新信息技术、仿真与自动化

专著 科学出版物（期刊）**主编 Sergii Kotlyk**

Velychko V.、Voinova S.、Granyak V.、Gurskiy O. Zavertailo K.、Ivanova L.、Kotlyk D.、Kotlyk S.、Kudriashova A.、Kunup T.、Malakhov K.、Pikh I.、Punchenko N.、Senkivskyy V.、Sergeeva O. Sokolova O.、Fedosov S.、Khoshaba O.、Tsyra O.、Chaplinskyy Y.

爱荷华州立大学数字出版社 2022年

乌克兰教育与科学部 敖德萨国立技术大学

新信息技术、仿真与自动化

专著 科学出版物（期）

主编 Sergii Kotlyk

爱荷华州立大学数字出版社
2022

国际十进分类法
004.01/08 H73

经敖德萨国立技术大学学术委员会推荐（2022年4月5日第11号会议记录）

评审人：
Olexandr Romanyuk, 理学博士、教授、文尼察国立技术大学**Valery Plotnikov,** 理学博士、教授、敖德萨国立食品技术学院**Olexandr Shpinkovski,** 哲学博士、副教授、敖德萨理工国立大学

主编 Sergii Kotlyk
哲学博士、副教授、敖德萨国立技术大学

作者团队：
Velychko V.、Voinova S.、Granyak V.、Gurskiy O.、Zavertailo K.、Ivanova L.、Kotlyk D.、Kotlyk S.、Kudriashova A.、Kunup T.、Malakhov K.、Pikh I.、Punchenko N.、Senkivskyy V.、Sergeeva O.、Sokolova O.、Fedosov S.、Khoshaba O.、Tsyra O.、Chaplinskyy Y.

新信息技术、仿真与自动化：H73 专著 / Velychko V.、Voinova S.、Granyak V. 等；主编 Kotlyk S. 爱荷华州立大学数字出版社。

本专著总结并分析了计算机与数学仿真/建模、管理过程自动化、信息技术在教育中的应用、信息系统和软件系统的设计、计算机电信网络及技术的发展等领域的现状；这些领域大多由“工业4.0”这一术语涵盖。

这部专著不仅适用于从事信息技术和自动化领域工作的专家及企业员工，也适用于教育工作者、高等教育机构的硕士生、本科生和研究生，以及所有关注工业4.0相关议题的人士。

数字对象标识符 https://doi.org/10.31274/isudp.2022.121ISBN 978-617-7867-37-0（印刷版）
ISBN 978-1-958291-01-6（电子书）

© 2022年 Velychko V.、Voinova S.、Granyak V. 等

序言

第四次工业革命（工业4.0）设想了一种新的生产方式，其基础是将信息技术大规模引入工业领域、大规模实现业务流程自动化，以及人工智能的普及。第四次工业革命的优势显而易见：生产率提高、因减少在危险工作环境中的岗位而显著提升员工安全、竞争力增强、出现全新的产品，等等。然而，它也存在可能对社会发展产生负面影响的缺点。因此，研究工业4.0各个方向的发展演变，是现代科学得以实际应用的必要条件。

本专著总结并分析了计算机与数学仿真/建模、管理过程自动化、信息技术在教育中的应用、信息系统与软件系统的设计、计算机电信网络及技术的发展现状——这些领域大多可归入“工业4.0”这一术语。

本专著根据第十四届国际科学与实践会议“信息技术与自动化—2021年”的成果编纂而成。该会议于2021年10月在敖德萨国立技术大学（原敖德萨国立食品技术学院）举行。

本专著所呈现的问题范围极其广泛——信息技术在印后加工流程和新型食品设计中的应用，决策理论的发展，铁电聚合物和极化薄膜中的数学仿真/建模，逻辑控制算法的开发，大功率电机和船舶系泊系统维护的自动化，信息技术在教育和数字健康中的应用，以及计算综合系统之间的分配。

本专著对致力于了解工业4.0领域科学现状的专家、教育工作者、学生和研究生大有裨益。这些信息可用于解决相关章节中广泛的问题，这些问题既会出现在教育过程中，也会出现在研究和科研规划中。

乌克兰教育与科学部 敖德萨国立技术大学

新信息技术、建模与自动化

专著

在**С. В. Котлика**总编辑下

敖德萨
《生态学》
2022年

国际十进分类法
004.01/08 Н73

作者团队：

В. Ю. Величко、***С. О. Воінова***、***В. Ф. Граняк***、***О. О. Hurskyi***、***К. С. Завертайло***、***Л. В. Іванова***、***Д. О. Котлик***、***С. В. Котлик***、***А. В. Кудряшова***、***Т. В. Кунуп***、***К. С. Малахов***、***І. В. Піх***、***Н. О. Пунченко***、***В. М. Сеньківський***、***О. Є. Сергєєва***、***О. П. Соколова***、***С. Н. Федосов***、***О. М. Хошаба***、***О. В. Цира***、***Ю. П. Чаплінський***

审稿人：

О. Н. Романюк，工学博士、教授、文尼察国立技术大学软件教研室主任；

В. М. Плотніков，技术科学博士、教授、敖德萨国立食品技术学院信息技术与网络安全教研室主任；***О. А. Шпинковський***，技术科学副博士、敖德萨理工大学信息系统教研室副教授

经敖德萨国立食品技术学院学术委员会决议，批准付印（*2022*年*4*月*5*日第*11*号会议记录）

Н73 **新**信息技术、建模与自动化：专著 / 作者集：В. Ю. Величко、С. О. Воінова、В. Ф. Граняк [等] ；主编：С. В. Котлик。— 敖德萨：生态出版社，2022年。— 724页。

ISBN 978-617-7867-37-0（印刷版）

本专著总结并分析了计算机与数学建模、管理过程自动化、信息技术在教育中的应用、信息系统和软件系统设计、计算机电信网络及技术发展等方面的当前发展水平；这些领域大多归属于工业4.0这一术语。

本专著不仅适合从事信息技术和自动化领域工作的公司专业人员和员工，也适合高等教育机构的教师、硕士生、学生和研究生，以及所有关注工业4.0相关问题的人士。

国际十进分类法
004.01/08

ISBN 978-617-7867-37-0（印刷版）

© Величко В. Ю.、Воінова С. О.、Граняк В. Ф.等，2022年

目录

前言.5

第一章复杂过程的数学与计算机建模

面向问题的决策支持上下文-本体系统优化（***Чаплінський Ю. П.***）. 6 印后工艺设计质量预测评估信息技术的理论基础（***Сеньківський В. М., Піх І. В., Кудряшова А. В.***）.44 铁电聚合物中的热刺激过程与热释电性（***Sergeeva A. E.***）.139 极化处理的聚偏氟乙烯与 P(VDF-TFE)薄膜中的铁电极化分布（***Fedosov S. N.***）.179

第二章工艺过程自动化与控制

航运技术发展、未来航运的系泊系统（***Пунченко Н. О., Цира О. В.***）. . . . . 220 航运发展中 Petri 网的自动合成与逻辑控制算法（***Гурський О. О.***）.291 技术状态自动监控系统及大型旋转电机诊断（***Граняк В. Ф.***）.358

第三章
教育中的新信息技术

教师进修培训管理自动化信息系统（Іванова Л. В.、Котлик Д. О.） . . . . . 385 高等教育机构运用新信息技术组织教学过程的系统方法（Воінова С. О.）.453

第四章信息系统与软件 комплек设计

Ukrvectōrēs 与 vHealth：支持远程医疗康复服务的智能业务（***Величко В. Ю.***、***Малахов К. С.***）.494 分布式结构中的计算机回声定位基础（***Khoshaba O. M.***）.577 应用程序：运用数学模型和软件设计新型食品（***Котлик С. В.***、***Соколова О. П.***）.596

第五部分计算机电信网络与技术

计算系统间任务均匀分配方法 (***Завертайло К. С.***) . . . . . 658 NGN网络发展的重要性 (***Кунуп Т. В.***).689

作者名单.720

前言

第四次工业革命（工业4.0）意味着一种新的生产方法，其基础是在工业中大规模应用信息技术、大规模实现业务流程自动化，以及推广人工智能。

第四次工业革命的优势显而易见：提高生产率，通过减少在危险工作条件下的工作岗位来提升员工安全，提高竞争力，推出全新的产品，以及诸多其他优势。然而，它也存在可能对社会发展产生负面影响的缺点，因此，研究工业4.0各方向的发展，是现代科学得以实际应用的必要条件。

这部合著专著 ներկայաց了计算机与数学建模、管理过程自动化、信息技术在教育中的应用、信息系统和软件系统设计、计算机电信网络及技术发展等领域的实践与理论研究成果——这些大多是由工业4.0这一术语所涵盖的方向。

本专著根据第十四届国际科学实践会议“信息技术与自动化—2021年”的成果编撰而成。该会议于2021年10月在敖德萨国立技术大学（原敖德萨国立食品技术学院）举行。

本专著所涉及的问题范围极为广泛——信息技术在印后流程及新型食品设计中的应用、决策理论的发展、铁电聚合物和极化薄膜中的数学建模、逻辑控制算法的开发、强大电机及航运系泊系统维护的自动化、信息技术在教育中的应用，以及计算系统之间的分配。

本专著为专业人士、教师、学生和研究生提供了重要帮助，使他们能够了解工业4.0领域科学发展的现状。这些信息可用于解决上述章节中出现的广泛问题，这些问题既存在于教学过程中，也存在于研究和科学计划中。

第 I 章
复杂过程的数学与计算机建模

面向问题导向决策支持的上下文本体系统优化

Чаплінський Ю. П.

阐述了采用基于系统优化、本体和上下文的知识导向方法进行决策的必要性。介绍了一种用于求解管理任务的决策支持技术，该技术以系统优化方法论为基础。研究了在所提出技术框架下进行决策时的不同情境。基于系统优化的决策过程通过特定上下文模型来考察。定义了上下文本体及其组成部分，这些组成部分有助于识别、理解、表示并支持决策任务的求解。文中还介绍了层本体和方面本体。

阐明了采用基于系统优化、本体和情境的知识导向型决策方法的现实意义。介绍了基于系统优化方法论、用于解决管理问题的决策技术。研究了所提出技术中的各种决策情境。探讨了基于系统优化、通过某一情境模型进行决策的过程。确定了情境本体及其分量，这些分量可用于识别、理解和呈现决策问题，并为其求解提供支持。介绍了层本体和方面本体。

如今，综合性、系统化的决策支持已成为主导性的动态商业环境。这是由现代决策的典型特征所决定的：科学知识整合；跨学科问题数量增加；问题的复杂性，以及有必要从技术、经济、社会、心理、管理等方面的统一性出发对其进行研究；所分析的问题与对象日趋复杂；决策情形具有动态性；资源匮乏；标准

化与生产及管理流程中各元素自动化水平的提高；竞争、生产、协作、标准化等的全球化；人为因素在管理中的作用日益增强等。

此时，决策既通过水平交叉节点实现，也通过垂直交叉层级关系实现，从而有可能获取此前无法访问的信息，进而促进新知识和新理解的形成。在整个决策过程中，无法区分出任何单独的任务，因为它们共同构成一个整体任务。这意味着，无论是个人还是企业，其活动都日益依赖于已有的知识——这一最宝贵的资源之一，以及有效利用这些知识的能力。

如今，知识管理被视为企业的一项强大竞争优势，尤其是对于那些致力于持续变革业务流程的企业而言。知识表示是指对知识进行结构化，以便将特定问题领域中的任务解决过程形式化。

这种对决策的考察界定了从狭窄学科领域的决策向相互作用的多个学科领域的变迁，这些领域汇集了不同的考察视角：表示、内容、解释和使用；决策环境持续变化、新知识不断积累以及活性知识的使用。

还应指出，在这类复杂的学科领域中，知识变化或过时的速度很快，新的任务和新的求解方法不断涌现。因此，有必要考察与相应应用问题相关的多学科领域，以及它们之间的相互作用与集成。

决策任务的求解结果，是对来自不同学科领域的多项相互关联任务的求解知识、理解和思路进行结合与一体化的结果，每项任务都有各自特定的前置条件。这些任务具有多样性、多维性和多层次性的特点。我们将以决策支持系统方法论为基础，探讨如何实现有效决策。该方法论以跨学科／多学科／超学科、上下文和本体为基础，作为理解和表示学科领域与决策过程，以及一体化系统分析、过程分析和情境分析方法的工具。

在此类决策过程中，决策者需要考虑一系列同时确定并加以运用的属性。这要求考察进程、结构、资源、环境，以及决策过程参与者之间的交互。为此，只需采用对情境或问题最为重要的现实特征。与此同时，需要将注意力集中于通过观点（考察视角）确定的某些具体特征。这使我们能够运用考察视角或观点，对复杂且相互关联的情境进行表述、求解和管理。这些情境可能不仅基于某一学科领域的知识，也可能基于若干问题领域的集合。同时，还需要理解决策环境要素之间的关系。

因此，利用基于知识工程原则、针对若干特定问题领域开发的相应智能工具来求解问题情形，是一项迫切任务。在此过程中，必须运用并考虑认知知识（“知道是什么”）、应用知识（“知道如何做”）、系统理解（“知道为什么”）以及个人动机（“想知道为什么”）。为此，所有使用的知识都从两个方面加以考察：描述内容的知识和描述上下文的知识。

另一方面，管理系统中的决策由相互依赖的任务来描述。通常，由于这些任务既有的结构以及限制因素，它们彼此不相容；这些限制因素被称为“瓶颈”，包括系统运行要求、资金规模、是否拥有充足的人力资源、企业生产能力、产品生产生命周期的规范或实际小时阶段等。在这类任务中进行决策，需要考虑系统性、可替代性、不相容性（矛盾性）、多准则性，以及分析师和专家的意见。采用传统方法求解这类任务的经典问题表述，即在求解过程中模型保持不变的情况下寻找解决方案，需要将所有参数变化（新技术、额外资源）纳入初始问题表述，这会导致问题维数过大，进而使任务难以求解，无法在可接受的时间内获得精度可接受的解决方案。

由 B. M. 格卢什科夫提出的系统优化技术 [1]，符合这类决策任务的特点。其核心是有针对性地改变决策模型，以实现相容性，并从所提出的任务中选择最可接受的解决方案；这些任务被表述为多准则线性规划任务，并适用于参数的各种可能变化。

创建各种决策支持手段，是一个不断形成、完善需求并求解问题的过程。同时，需要考虑到，系统运行时面临信息异质性和实现异质性，以及系统信息资源的分布式特征与自主性。资源的信息异质性体现在其应用上下文的多样性上。信息源的实现异质性则表现为使用不同的计算机平台、数据库管理手段、数据与知识模型等。因此，需要支持系统及子系统不断发展为更复杂的集成系统，并以组成部分之间的互操作交互为基础。实现此类决策支持，需要支持完整的决策循环，以便从问题表述、确定相应的模型与求解算法，一直推进到使用求解器；而针对具体任务进行决策，则需要运用知识，并考虑用户的技能与经验。

本文旨在介绍一种由本体驱动的管理决策支持方法，该方法基于系统优化方法与算法，以及知识表示和处理的本体方法，同时考虑决策任务求解的上下文。

为考虑应用管理系统的这些特点和属性，以及各种管理系统在运行过程中产生的许多其他需求，需要构建统一的决策技术，以便形成最合适的解决方案。同时，选择某一解决方案不应破坏考察的系统性和决策过程的完整性。应当指出，现代任务求解需要使用来源各异的信息。

这决定了有必要理解问题复杂度，考虑周围世界的多样性，并对问-

题进行科学考察，将抽象知识与具体知识相结合，发展知识与活动，以实现结果。同时，需要考虑到，信息和知识的使用通常发生在决-策过程的复杂结构这一上下文中，而该过程往往由一系列因素共同形成。从决策的观点来看，这些系统包括：

- 存在一个复杂的内容对象（系统），与之相关联的是一个总体决策问题（任务）；
- 将该系统划分为相互关联的子系统，并相应地将总体任务分解为子任务；
- 在将函数分配给各子系统的同时，存在共同目标；
- 每个子系统在物理或虚拟上彼此隔离；能够相对独立地选择自身状态；
- 具备在子系统之间交换状态的手段，以及用于协调、克服矛盾和同步子任务求解过程的手段。

在[2] 中，提出将决策分为三个阶段：分析、开发和选择。分析（系统描述、理解系统行为、评估当前情境、目标制定）包括搜寻可用于触发决策的环境。开发（模型制定、备选方案生成）涉及创建、开发和分析可能的行动方案；而选择（评估备选方案的影响、评估并作出解决方案、解释：可视化与交流）则包括从现有方案中选择行动方向。决策支持的主要部分是收集、评估、组织并将这些信息转换为适合分析的形式。

为了成功开发和实施决策支持系统（决策支持系统），必须 [3；4]：让最终用户参与决策支持系统的开发；根据最终用户的需求，而非开发者所理解的需求来设计决策支持系统；确保系统具备灵活性、适应性和系统可更新性；界面简单，学习使用系统所需的时间有限；以可视化方式呈现结果；考虑与系统质量、信息质量和信息表示相关的因素。

决策领域将被视为一种多层结构，其中包括问题领域、模型领域、方法领域和实现领域。决策领域可以分解为

基本对象，每个对象均由一组属性描述。在这种考察框架下，需要确定相关概念和构造，据此可以界定决策形成与决策过程及其组成领域的本质、结构和表示，这些领域用于描述该过程。

本文将决策理解为一个交互式过程，包括知识的积累、处理、使用和传播，从而实现信息、知识与经验的交换，提升信息知晓程度，使人们能够获取并做出经过深思熟虑的备选方案选择，同时提升专业水平。此过程旨在解决问题：让知识易于获取且具有实用价值，使影响决策和问题理解的相关可靠信息与知识，能在适当的时间以适当的开本传达给适当的用户。因此，以某种决策系统形式实现的决策支持应符合 SMART 标准，即解决方案应具体、可衡量、达成一致、切实可行，并明确关联到特定的时间和空间。

我们将决策支持理解为一种智能计算机技术，它能够增强决策者在观察领域状态、诊断问题情形和行动目标、规划行动并生成其实现方式，以及利用专家知识和建模与优化方法形成合理决策方案方面的能力。其中，决策基于信息数据模型、逻辑模型、形式模型、典型决策或案例来实现。我们将决策的主要阶段视为：

- 监控并收集有关系统运行流程的可靠数据；
- 识别、预测发展，并评估系统活动中出现的常规和危机情形；
- 在企业子系统及整个系统所处的情形下设定目标，并搜寻实现目标的备选行动；
- 对可能行动方式进行适当评估，分析后果，并通过对备选方案的全部特性进行综合分析，选择其中最有效的方案；

• 组织决策执行，包括评估和选择实现决策的工作方向、具体措施和期限，以及分配实现决策所需的资源；

• 基于对活动状态和结果（将中间结果与预期最终结果进行比较）的评估与比较，控制决策执行；评估所作决策的质量，以及决策制定组织工作的正确性。

决策制定可以表示为一个多层系统，由一系列处于不同层级、承担特定函数或活动并与相应逻辑结构相关联的任务构成。在这种系统中，我们将决策制定视为既通过水平交叉节点（边界交叉），也通过垂直交叉的层级联系（层级交叉）进行；同时，可能获得先前无法访问的信息，从而为后续拓展新的知识与理解创造条件。每项对应特定活动方向的任务都可以包含子任务。任务及其子任务由相应的形式化任务来描述，而这些任务则通过相互关联的模型系统加以描述。形式化模型通过特定方法和算法实现。我们将这一过程视为一个系统，它由若干子系统（阶段）及其元素（过程、行动、操作）构成，这些部分彼此交互，其数量与组成可能随条件和所解决任务的不同而变化。同时，子系统范围内所作决策的整合，是通过在各项任务中作出协调一致的决策来实现的；整个系统的管理整合，则通过协调属于同一层级或不同层级的相关子系统之间的行动来实现。

我们指出，不同子系统、功能任务（子任务）和模型之间可能存在不同类型的相互作用。这种交互可以通过直接从属关系、信息交换关系、功能从属关系、功能协调关系及协同关系来实现。直接从属关系和功能从属关系是按照组织和功能特征描述控制系统构建的基础。在确定由各个子系统分别求解的功能任务的层级以及它们交互的优先级时，可以设定这些关系。信息交换关系是在描述单个子系统（任务）与整体系统中其他子系统（任务）的交互时确定的。

这可以通过为该子系统确定某些规范参考信息来设定，该子系统或任务在实现其功能的过程中会使用这些信息。功能协调关系和协同关系是在描述子系统的功能任务时确定的。这种关系由子系统功能任务的输入和标准输出参数以及子系统资源来设定。功能协调关系和协同关系是在求解控制系统内部产生的具体相互关联任务的过程中实现的。各个子系统之间的关系类型是在描述控制系统的组织功能结构过程中确定的。

在实现决策时，我们将区分三种决策策略：创建、一体化和适应。创建意味着面对一个“全新的问题”，或在没有现成基础的情况下提出问题求解方案；此时不存在可用作决策基材的相应模型、方法和/或求解算法。当决策过程中某些部分必须在没有现有方案支持的情况下进行设计时，这一点尤为重要。一体化是指一种问题求解方案，即通过收集现有组成部分来构建问题求解过程。构成决策过程的可重复使用组成部分越多，一体化过程就越容易。适应是指一种决策过程方案，即通过精简或修改现有内容的某些部分，或在现有内容的基础上扩展新的部分，来构建问题求解方案。

基于系统优化的任务求解可以表示为一系列人机交互过程，包括用领域术语构建初始任务模型、将构建好的模型转换到任务领域（例如数学规划领域），以及在多目标框架下求解数学规划任务。

在此过程中，任务解决方案包括：检查系统自身能力范围内是否能够满足系统运行质量需求（指令性要求）；如果无法满足，则找出“瓶颈”，制定旨在消除指令性要求无法实现问题的措施，并选择最

合适的解决方案。因此可见，系统优化使得能够将相当复杂的任务解决方案表示为一系列较简单任务的解决方案。

在实现系统优化时，需要考虑到，关于所作解决方案的信息交换发生在联系明确的任务（阶段）之间，并且任务（阶段）之间的决策存在优先级，这既体现在其交互规则上，也体现在其执行时间上。

1) 在待求解任务（阶段）现有能力范围内，分析从交互优先级或求解时间优先级较高的任务（阶段）获得的管理决策，或根据该任务（阶段）自身运行目标所作的管理决策。

如果任务（阶段）无法实现这些解决方案，则需要执行以下步骤：

• 提出关于期望且可行的已获得决策变更方案；

• i发起与相关任务（阶段）的交互过程 .

2) 在考虑任务（阶段）自身能力以及与其他任务（阶段）现有相互关系的基础上，搜寻管理决策。

3) 为实现已获得的决策，确定下一项任务（阶段）的任务。

在搜寻协调一致的决策过程中，交互结构，即相互关联的任务（阶段）以及相应决策者的集合，无法预先设定。该结构是在搜寻解决方案的过程中直接生成的。

据此，工具集应确保：

• 传达和接收管理决策，或针对所设任务生成自身的解决方向（此类解决方案称为指令性决策）；

• 对该任务（阶段）自身能力与利益、指令性决策以及与其他任务（阶段）之间的相互关系进行模型表示；

• 发起与相应决策者的交互过程；

• 形成任务搜寻协调一致的解决方案的模型表示，并考虑该任务（阶段）的能力；

• 用于求解已构建任务的方法和算法。

这种分析有助于提出一种实现子系统之间以及相应任务之间交互的方法（并在后续分析某些模型、形式化任务等时加以运用），该方法基于交互优先级关系这一概念。在相互关联的局部任务集合上，这种关系确定相应子系统和任务彼此之间的影响方式。这种关系可以视为非严格阶数关系R，其定义如下：若K是相互关联的任务集合，则iRj（$,ij K\in$）表示任务i在决策方面相对于任务j具有优先级，即任务i的解决方案对任务j具有强制性（指令性），并作为某些参数纳入其模型。这种关系定义了交互优先级关系。由于R是非严格阶数关系，因此它将相互关联的任务集合划分为等价类，后文将对此进行讨论。下面描述这些关系的实现。为此，我们引入以下符号（不考虑系统结构）：I表示系统的子系统集合，$_lI$表示第l个结构单元（子系统）的任务集合；

假设结构单元中的决策任务已结构化，而整个系统中的解决方案选择任务，应通过分布式子系统的集成，以及相应地通过集成各子系统中实现的任务来表述。

为形式化功能任务集成中的特定问题，引入以下符号：$\mathbf{x}^p$—向量，用于确定第 p 个功能任务中的动作选择；{ , } p p j p s s j J= ∈ —向量，用于确定描述集合 $,_p$pJ J I∈ 的其他功能任务对第 p 个功能任务的影响（功能协调关系与协调）；{ , } p p j p z z j Z= ∈ —向量，用于确定描述集合 $,_p$pZ Z I∈ 的其他功能任务与第 p 个功能任务之间的信息交换关系；{ , , } p p p ji l u u j J i I = ∈ ∈ —指令性影响向量（从属关系），通过交互优先级作用于第 p 个功能任务。它可以表示第 l 个子系统中其他功能任务的行动，也可以表示与该任务存在指令性联系的其他子系统中的功能任务的行动；这些任务确定集合 $,^p$ pJ J I∈。

在此定义向量：{, }^{j} *v p p p s s j J*= ∈ , { , }^{j} *z p p p z z j Z*= ∈ , { , , } *j p p pi u l u u j Ji I* = ∈ ∈ 它们描述了相应的向量和集合,

它们确定了该任务对其他任务的影响、信息交换和指令性影响。

在决策支持系统中，多层级系统的子系统集合与这些子系统中负责系统不同活动方向的相关任务集合之间的交互，是通过系统性原则实现的。

决策支持系统子系统运行中的独立性原则基于这样一点：每个子系统都可以根据自身的功能任务，按照自己的选择模型，选择自身的行动，该行动用向量x^p描述。这样的行动能够使子系统求解自主管理任务，以执行其功能活动。然而，整体性原则要求构建这样一种决策选择任务模型，其可行解区域应考虑子系统及功能任务的影响。

为此，我们引入决策支持系统中决策任务的以下几类可行区域：$_0(\ )^pDz$ — 该区域根据相应子系统在第p个功能任务中的自身能力，确定其选择可行解决方案（行动）的范围；在考虑向量$_px$时，选择自身的解决方案$_pz$；$_0(\ )^pDs$ — 第$_px$ p个功能任务的可行解区域，由向量$_ps$确定；$_0(\ )^pDu$ — $_px$的可行解区域，描述由向量$_pu$构成的指令区域。

众所周知，大多数决策任务在考虑某个特征集合$=1,\ J\ M$对解决方案$_{*p}x$的评价时，都是通过一组准则函数$_*\{\ (\ ),\}^p\ _jf\ fx\ i\ J$ $=\ \in$ 来确定其定量或定性尺度；其中，准则既可以具有定量性质，也可以具有定性性质。

首先假设$_0\ _0\ _0\ (\ )\ (\ )\ (\ )\ _p\ _p\ _p\ Dz\ Ds\ Du\cap\ \cap\ \neq\varnothing$。在这种情况下，我们将能够解决任务并找到$_{*p}x$，同时考虑准则函数的集合$f$以及允许域。

如果$_{000}()()()_{ppp}Dz\,Ds\,Du\cap\ \cap\ =\varnothing$且$_{00}()()_{pp}Dz\ Du\cap\ =\varnothing$，那么区域$_0()^pDu$在考虑其他任务影响的情况下，没有可行决策区域$_0()^pDz$，因此我们需要借助任务的能力来改变区域$_0(\ )^pDz$，以使其与区域$_0(\ )^pDu$相容；若无法实现相容，则对向量$_pu$施加约束，以告知优先级更高的任务该任务无法求解。

如果 $_{000}()()()_{ppp}DzDsDu\cap\quad\cap\quad=\varnothing$ 且 $_{00}()()_{pp}DzDu\cap\quad\neq\varnothing$，那么区域$_0(\quad)^pDs$ 在考虑指令性影响的情况下，没有可行决策区域 $_0(\quad)^pD\quad z$ ，因此我们需要为集合 $_ps$形成向量 $,_{p\ p}JJI\in$ ，以实现相互关联任务决策协调程序。

需要指出的是，任务模型、方法及任务求解算法不仅可以属于数学规划领域，也可以用信息模型和逻辑模型来描述。

在实施创建策略时，要对某个局部任务进行形式化描述，并将其表述为数学规划任务，由决策支持系统求解。由于任何决策任务的数学模型都包含若干最优性准则和约束系统，用于描述备选方案的可行解集合，因此，对该模型的所有影响都可以归结为对准则的影响和对约束的影响。下面讨论后者。在这种情况下，局部任务的约束集合包括描述与其他任务联系的约束，以及描述局部可行解区域的约束。

考虑多层组织系统中的局部决策任务模型，其一般形式如下：

$\{xi\ iM\ C=,0X,^{-1}()^iX\ u,()^iX\ u,()Ux,^{1}()^iU\ x^{+}\}$, 其中 i — 所研究任务的索引（$1,i\ I\ M\in\quad=$），$\{\overline{(),=}\quad\rightarrow\quad\in\quad=1,\quad\}\ xi\ \overline{xi\ i}\ jC\ C\ x\ extr\ j\ J\ N$ — 任务 iM 的解决方案选择评估集合；

$^0{}_iX$ — 由任务$_iM$的局部约束所确定的可能解域（区域$_0(\quad)^pD\quad z$ ；

$^{-1}\quad()^iX\ u$— 由称为指令性约束的约束所确定的期望解域（区域$_0(\quad)^pDu$ ）；

$()^iXu$ — 决策区域，根据与具有相同交互优先级的任务之间的妥协关系确定（区域 $_0(\quad)^pDs$ ）；

$()Ux$ — 变量区域 u，其取决于该任务的解决方案 $^*x$（向量 $_ps$）；

$^{+1}\quad()^iU\ x$— 变量区域，用于描述该任务对与其相关且交互优先级较低的任务的影响（向量 $_pu$）。

决策任务中存在局部目标和交互优先级，会导致相关任务之间出现不同的交互情境

。这些情境由各领域彼此之间的相对位置决定。

因此，决策过程可以由一系列阶段组成，每个阶段包括以下元素：

1. 根据前一阶段获得的结果，确定局部任务的决策；

2. 协调相关局部任务的决策。

第一阶段是分析局部任务模型。如果局部任务不存在可行决策，那么就有必要有针对性地改变区域$_{0i}X$，以满足由区域$^{l}(\,)^{i}Xu^{-}$所确定的指令性需求，其中$^{-1}\ _{i}u$是在求解优先级更高的任务时获得的。此类修正问题$^{0}{}_{i}X$被解释为系统优化任务[5]。

因此，局部任务的解决方案 = $^{i-1}$ $(\,,\,,\,)_{i}y\,x\,u\,u$（局部可行解）将直接求得，或通过求解系统优化任务获得，即$_{0}$ $^{i\ 1}(\,)X\,X\,u$ $\bigcap$ $^{-}$ $\neq\varnothing$。

由于解决方案 y 是在未考虑通信区域的情况下确定的$(\,)^{i}Xu$，因此参数 u 是在每个相互关联的任务中独立确定的，可能彼此不一致。此时，解决方案的协调就是寻找这样的局部可行（最优、折中）解决方案，使通信参数的值相等。文中介绍了按通信参数协调解决方案的算法实现方法[6]。

如果不存在此类一致的决策，则需要调整相关任务的模型，以确保其在参数空间中的兼容性u，这可以归结为系统优化任务。此时的主要问题是选择调整方向和幅度，以改变区域$_{0i}X$，$^{-1}(\,)^{i}X\,u$。所得解决方案y将确定参数$^{l}{}_{i}u^{+}$的值，该参数用于表征此任务对与其相关且优先级较低的任务的影响。

我们将局部任务表述为一个线性数学规划任务，该任务在决策支持系统中求解。在这种情况下，集合 $_{xt}C$ 语言由以下内容给出$_{n}$某个准则函数集 *, $_{i}\ _{ij}\ _{j}\ f\ c\ x\ extri\ I\ =\sum$ $\rightarrow$ $\in$；系统管理运行的指令性需求$_{1j=}$ 区域$_{g}D$由集合确定$_{*()\ 0}$ {: , = = =1, },
$_{g\ g\ j\ j}D\ x\ x\ x\ j\ n$ 或由区域

—

{: , = ≤ ≤ =1, }, g b u j j j P x x x x j n 或由区域 2 = ∑ ≤ 0 ∈{: *, };ng g ij j i D x a x u i Q 1j = 可行解区域由集合描述为0 = ∑ 0 ≤ 0 ∈ ≥ ={: *, , , 0, 1, }n ijj i j D x b x b i Qx j n 。 1j=

根据系统优化方法论，当指令性要求区域$_gD$与可行解决方案区域^0D不相容时，就需要解决系统优化任务。系统优化算法的主要目标是根据初始区域^0D以及参数,,,Δ Δ ∈ =1, $_{ij\,i}bbiQjn$所形成的附加受限变异区域,$_{ij\,i}bb$，构建新的可行解决方案区域。该区域是在解决过程中构建的，并考虑到指令性要求是否与该管理系统$_gD$的利益相协调；在该区域中，存在各项准则函数的值均大于或等于决策者（ЛПР）在指令性要求区域$_gD$中设定的准则值的解决方案。这些算法具有迭代性质。

系统优化框架内各过程的收敛通过迭代剔除不可行的解决方案来实现，同时保证不会剔除可行方案。最终，我们因此能够获得所提出任务的解决方案，或得出该任务无法求解的结论。

在领域内检查需求是否得到执行 $_gD$ ^0D，可通过直接代入 $_{*()g}x$ x = 到领域约束系统 ^0D 中，且$_{0g}$ $_gDD$= ；也可基于某种线性规划方法，对这些领域进行检查。若交集为空 $_gD$ 和 ^0D之间可能存在不同的位置关系，领域 $_gD$与领域 ^0D 相对于准则函数的一般情况可能如下：

1. 指令区域中的所有点$_gD$，在所有准则上的值均优于与其对应的偏好区域中的点所取得的值^0D，即完全协调。

2. 对于指令区域中的任意一点$_gD$，在可行决策区域中^0D都存在一点，其各项准则的值同时更优。这意味着，指令性要求与该系统由一组准则函数所定义的目标不一致。

3. 指令区域中只有一部分点$_{g}D$能够同时改善所有准则的值，这意味着需求仅与该系统的目标部分一致。

若执行第二种方案，决策者需要重新定义指令性要求区域 $_{g}D$ ，因为在区域 $_{g}D$ 中，关于准则函数值的要求将无法得到满足。

考虑其他位置方案以及指令区域的形态，可以找出妨碍 $_{g}D$ 与可行决策区域 ^{0}D 之间决策共性与一致性的区域约束，并将其称为实质性约束。实质性约束的索引集合记为 $_{0}Q$。

对于形如 $_{0g}D$ 的指令区域，实质性约束是指代入 $_{*g}xx=$ 时被违反的关系。

在确定实质性约束时，可以考虑纳入给定准则集合的情况，也可以考虑不纳入目标函数的情况。

考虑准则时，在确定已实现的协调方案后，将确定一个点集，称为捕获区域，它近似于区域 $_{g}D$，对应于第一种方案的实现；或者构造捕获区域 $_{g}{}_{g}XD\subseteq$ （该区域包含的点在所有准则上同时具有比区域 ^{0}D的解更好的值），对应于第三种方案的实现。

如果要解决的是不考虑准则函数集合的系统优化任务，那么实质性约束的确定取决于决策者所选择的捕获区域 $_{g}X$，$_{g}{}_{g}XD\subseteq$ 该区域可以用平行六面体、某个区域或点 $^{*}{}^{*}$来描述，$_{g}xxD\in$ 。此时，我们将针对某个点 $^{*}{}^{*}$求解系统优化任务，$^{g}{}_{g}{}_{g}xxX\in$ 该点是相应多边形的顶点。所得捕获区域 $_{g}X$将确定相应的点集以及实质性约束的索引集，并据此求解系统优化任务。

为判断给定捕获区域是否属于$_{g}X$模型变量，构建一个描述区域的约束系统P 。

为了确定改变任务模型参数以满足 ^{0}D 的需求、进而确定任务本身解决方案的可能性，系统—

无论是系统优化任务还是构建的局部任务，其标准输出都是构造区域 P（约束集合参数的变化范围）$_0Q$ 与区域 $_0P$（这些参数的允许变化范围）的交集。

如果 $_0P\,P\cap \neq\varnothing$，则模型参数的变化区域将受到约束，这将有助于解决构建新模型 $_1D$ 的问题，其中满足区域 ^0D 中的需求。

在这种情况下，决策者必须更改或重新定义自己的需求，或者修改 $_0P$ 的约束。

为修正可行变化区域 $_0P$，例如可以构造一个内接于区域 P 的平行六面体，决策者可据此设定或修正区域 $_0P$ 的约束，使得 $_0P\;P\cap \neq\varnothing$。

参数变化的选择任务 $,,,\Delta\quad\Delta\quad\in\quad=1,\quad_{ij}ibbiQjn\overline{在}$ 区域 P 与 $_0P$ 非空相交时，可归结为一个优化任务，其中选取与模型参数变化相关的成本作为准则 $()_,)CBb\Delta\quad\Delta$。

如果无法构建成本函数，则将选择任务表述为多准则问题，其中每个参数都作为一个独立准则，并根据其物理含义进行最大化或最小化。

因此，根据在新区 $_1D$ 中的构建条件，新的可行解域确保任务需求得以满足，并且存在准则值不劣于期望值的解。

系统优化任务的求解条件使算法能够收敛到相应的有效任务解决方案。这个过程是迭代式的。系统优化框架内的过程通过迭代剔除不可行方案来实现收敛，同时保证不会剔除可行方案。最终，这使我们能够获得所提出任务的解决方案，或者得出结论：无法选择投资项目方案，或无法实施该项目。

在实现适应与一体化策略时，可以使用案例库，帮助根据过去解决类似任务时已有的案例，确定当前情境的解决方案。一般而言，案例可包括以下组件：任务描述（问题情境）；任务解决方案（对问题情境的诊断以及给决策者的建议书），

解决方案的应用结果（或预测），以及使用所找到解决方案的结果。

案例技术的主要优势包括：能够直接利用系统积累的经验，而无需大量依赖相关领域的专家；还能够避免得出错误的解决方案。这种方法的主要缺点是：案例库中的案例数量较多时，系统的性能会下降；对于案例库（БП）中没有案例的任务，则无法得出解决方案。

在这种情况下，决策支持过程可形式化表示为：{,},,(),决策支持系统 *KB Rule Case M S M Dec* =< >，其中{,}*KB RuleCase*是知识库，包含规则集合*Rule* 以及*Case* 案例集合。( ) 1 2, ,..., ,*n Case x x x Sol* = ，其中1 2, ,..., *nx x x*是描述该案例的情境参数，*N*是描述案例所需的参数数量，而1 2, ,..., *nX X X* 是相应参数的允许值范围，*Sol*是解决方案（诊断、决策者建议）。

{ }i规则 R= ，其中 iR 为第 i 条规则，1,...,i I= 。规则 iR Rule∈ 定义如下：' 1 1 1 , , ,..., , ; ,..., ; , , , n n m b A a U a U P P b U S S < >，其中 ia A∈是问题情境（ПС）的前置条件；iU U∈ 是前置条件所需的置信度评估；VP P∈ 是谓词，1, 0V m≥ ≥；b B∈ 是带有置信度评估 bU 的结论 c；S 是初始问题情境（ПС）；'S 是由所采纳的解决方案所产生的问题情境。1{ ,..., }N M M M= 是实现决策过程函数的模型集合；( )S M 是实现为给定任务选择所需模型（或多个模型）的选择功能模块；Dec 是基于知识库形成决策的模块。这使得实现所谓的案例循环或基于案例的学习循环成为可能，该循环包括以下阶段：

- 从案例库（案例库）中提取最适用于当前问题情境的案例（多个案例）；
- 再版使用提取的案例，尝试求解当前问题；
- 根据当前问题审查并在必要时适应所获得的解决方案；
- 将新采纳的解决方案保存为新案例的一部分。

基于先例搜寻解决方案，就是确定当前情境与案例库中先例情境的相似度。此时会考虑专家为案例库中的情境设定的参数权重。相似度取决于当前情境与先例情境之间的接近程度，并通过最近邻搜寻算法，采用简单匹配的方式将当前情境与先例情境进行比较来确定（案例库中用于描述情境的每个参数都视为一个坐标）。由此可确定当前情境与先例情境之间的距离D以及根据先例情境的参数范围界限得出的最大距离$_{max}D$ 。随后计算相似度值$_{max}1$ $/sim$ D $D=$ $-$ 。为此可以使用最近邻法（K近邻）。

需要注意，基于案例的推理可能无法为已出现的问题情境导出所需的解决方案，例如案例库中不存在相似（类似）的情境时。可以通过在推理（结论推导）过程中直接补充案例库来解决这一问题。这可能包括：确定现有且已被接受和实施的实践；使用部分自动化策略，基于数学模型和专家系统协调来自多个信息源的零散信息；采用消除不确定性、信息不完整性并考虑来自多个信息源的主观专家信息这一战略目标。

如上所示，决策过程由若干阶段组成。每个阶段都要解决相应的任务。任务接收输入数据并产生一定的结果。任务的输入是各种情境，每种情境都由领域中一组彼此存在关系的对象构成。我们可以区分出问题情境类，即某些对象的属性值超出正常值范围，或非常接近其边界的情境。任务解决方案的结果可以是消息、情境或任务。消息是任务解决方案的最终结果，用户会知悉该消息。情境是可以进一步分析的结果。情境可以是已作决策的后果，也可以是为实现预期结果而必须采取的初始决策。如果求解得到多个情境——备选方案，

那么可以生成一个新任务，对所得备选方案进行评估，并从中选出最合适的方案。解决任务时会使用各种决策支持方法。其中一些方法可以通过计算机实现，也就是说，可以在某个软件模块中实现，而该模块又由某种求解器进行解释。其他方法可能没有软件支持。在这种情况下，会使用方法的文本描述（可能是形式化描述），而解释此类模块的求解器则由人担任——即决策过程参与者。参与者可以是决策者、问题所有人、各种积极群体、专家以及决策专业人员。

因此，必须描述借助系统优化技术求解任务的知识表示：

- 描述初始任务以及在系统优化技术实现过程中产生的模型；
- 求解所构建模型的方法和算法；
- 借助系统优化技术求解任务的过程。该过程通过若干阶段 [5] 实现。

因此，要实现系统优化，必须描述并使用以下方面的方法和工具：

- 综合考虑数据来形成决策。这里涉及详细数据区域，即使用数据库管理系统工具在单个数据库以及整体数据仓库中检索信息；还涉及聚合指标区域，即将相关信息收集到数据仓库中，并对其进行概括和聚合、超立方体表示以及多维分析（在线分析处理（OLAP））；还涉及规律领域，即在累积的信息中搜寻功能规律和逻辑规律，构建用于解释所发现异常和/或预测某些进程发展的模型和规则（数据挖掘（Data Mining））；

- 基于逻辑模型和规则进行决策形成（基于产生式模型、语义网络等进行决策）；

- 基于数学模型进行决策形成（通过使用解析公式进行优化、通过算法进行优化、多方案选择优化等）；

- 基于典型决策或先例形成决策（典型决策与模型、问题情境先例）。

在此过程中，需要考察决策的不同方面。例如，行为方面（描述决策情形，以及考察任务和执行相应行动的顺序）、组织方面（描述决策环境的结构、资源和工具，并确定任务求解正在或将要进行的组织结构，以及结构中各元素之间的关系）、信息方面（描述决策过程中使用的信息、信息的表示方式及其应用方式）。

在这种决策表示框架中，需要识别领域模型；根据交互优先级关系，确定任务与相应模型之间的交互；确定该任务（模型）对其他任务（模型）的所有影响类型；确定该任务（模型）的所有可能激活情形，既包括局部决策情形，也包括分布式决策情形；确定该任务（模型）在相应领域中的所有可能实现方案；确定实现该任务（模型）所依据的数据集，以及描述基于所选模型求解任务结果的数据集。

在此，我们将通过理解决策过程的三个维度（世界）来描述决策：世界1：现实世界（应用世界）；世界2：形式世界（形式模型、方法、算法等）；世界3：软件世界（软件工具、平台等）。

在基于模型实现决策时，会产生三元效应：通过感知和概念化构建应用领域模型（模型从描述的角度表示，包括对象、流程、关系、属性和特征；也从活动的角度表示，包括流程定义和概念模型构建）；再借助符号或语音，对关系（影响、调节、管理）进行形式化，并创建形式化模型，例如符号模型（模型从描述的角度表示为数学模型；也从活动的角度表示，包括定义模型结构、评估参数、可信属性和特征）。形式模型与软件模型（计算模型、软件模块及软件概念定义、软件模块协调）之间的联系决定了解决形式系统所需的方法和算法。

知识使用和借助系统优化实现决策过程的基础，以及构建相应集成决策环境、实现环境各组成部分之间的交互、描述学科领域并在此类环境中求解任务的基础，是本体。本体是对领域和决策过程进行明确理解与表示的手段。

本文将本体理解为一种系统[7]，用于描述某一问题领域或多个问题领域的结构，由一组概念班级、相互关联的关系、概念定义以及公理组成，这些公理规定了在给定问题领域或其集合中对这些概念进行解释时所应遵循的约束。

这种本体 [8] 基于相互关联的本体集合，构成多层级关联结构，其中包括元本体或顶层本体、基础本体、上下文本体、决策过程表示本体集合（包括问题领域层面的任务表示及其求解）、对该过程进行学科形式化表示和形式化表示及实现的本体、实现本体（包括用于决策支持的软件描述）、用户表示与交互本体，以及与所构建的本体模型相关联的推理机模型。本体的目标是提供一个集成的概念框架，使其能够定义、理解、构建并表示借助决策支持系统进行决策时所涉及的现象。元本体被视为整合决策支持过程实现的各个组成部分并对其进行最一般描述的手段。元本体的实体包括对象、属性、值、关系等概念，例如，可基于Zachman模型描述元信息。基础本体的目标是提供关键概念和构造，以定义、理解、构建并表示决策领域的基本原则，决策支持系统在该领域内运行。上下文本体实现了一个上下文系统，帮助通过上下文并在上下文范围内识别、理解和表示决策。决策过程表示本体集合被视为在具体问题领域中工作时知识库的一个组件，同时也是构建动态组件的模板；

知识库组件会随着从研究一个具体任务转向另一个任务而发生变化。实现本体包括用于决策支持的软件描述：功能、行为、组织和信息方面的描述。其中，描述基于功能需求（软件做什么）和非功能需求（使用约束）。用户表示与交互本体实现了对场景模型和对话组件的构建（自动或自动化完成）。

本体表示的实现首先基于对概念和术语的定义及其交互，以描述学科领域并解决相应学科领域中的特定任务。我们将决策问题领域视为由多个学科领域及其中待解决的任务构成的集合。这种本体表示由对特定问题领域的综合表示构成，通过这些表示，可以基于选定的观点（问题或问题领域的状态、问题或问题领域的行为以及问题求解）来表示和界定决策。

与问题领域相关的概念和术语包括：对象、任务（问题）、模型（问题表述）、方法论（场景、方法、算法）、用于描述它们的特性（属性）体系、值、关系。对象——由语义表示界定的术语或概念（实体），它具有相应的属性，与其他术语建立特定关系，并与引发该术语出现的任务和模型相关联。任务——该类的每个实例都定义了针对特定对象的任务，具有标识符，指明对象以及引发该任务的术语或属性及其值等。模型——该类的每个实例都描述某一对象，描述可采用特定语言，尤其是形式化语言，且其构建目的是研究该对象的属性。例如，可在此类描述中纳入影响模型选择的因素，如时间段、决策变量、评价准则、数值参数和关系（包括数学关系）。模型被归入模型类别。用于决策的模型有若干类别，而每一类别又可通过多种备选方法求解。每个模型类别都更适合表示某些类型的决策过程。属性——某种表征术语的特征，

它具有与术语类相似的属性。此外，它还指明在任务中定义该属性的值类实例。值——指用于语义表示中搜寻的数据，指明相关任务以及作为其解决方案的属性。关系——定义两个术语之间的联系，并指明相关术语或属性以及知识对象。其他术语则定义与特性体系（结构、约束、环境、上下文、概括层级等）、问题（问题主题、上层问题、下层问题、解决方法（场景）、问题复杂度、原子问题、复合问题、问题描述、问题主题、问题上下文、问题所有权、问题责任、问题评估、问题领域、对问题的影响、来自问题的影响、发起、时间、交互、参与者等）、模型（目标、约束、上下文、问题领域、问题、方法论、对象、输入参数、输出参数、其他参数、条件、触发器（触发的情形）、前置条件（开始时的情况）、后置条件（结束时的情况））以及问题领域相关知识（知识领域、功能知识、结构知识、处理知识等）相关的概念。决策概念，包括系统优化，通过分类、概括、聚合和分组关系以及关联关系彼此相连；这些关系通过问题领域和学科领域的表示来确定。

在这种方法中，决策基于对多层控制系统的表示，并通过一个或多个相互关联的上下文（特定上下文的模型）来考察：在这些上下文中，某人（参与者）出于某些原因（目标），为某人（对象），借助某个（对象），在某处（位置），于某个时间采取某种行动。上下文的表示由基于本体的内容构成，这些本体涵盖上下文模型的某一部分。

为了描述上下文，需要找到能够确定决策形成与决策过程及其相关领域组成部分的性质、结构和表示的概念与构造，这些组成部分描述了这一过程。上下文应以标准化的方式加以描述。决策过程的知识表示必须支持表示上下文及对其进行管理所需的操作。

我们将上下文视为一种概念性或智力构造，它由相应上下文领域范围内的概念构成，并帮助我们理解、分析和利用适当环境或情境中基本实体所体现的性质、值及其影响。上下文还表示一个整体，该整体由对于当前讨论而言重要的特定实体所界定。

这使得我们可以将上下文视为任何可用于描述某种情境的信息，即描述某物存在或发生的情境；这些信息还可以帮助解释该情境并确定其解决方向。这一情境依赖于知识、世界观、实践和环境，而这些因素可用于构建“无限且部分已知的假设集合” [8], , 这些假设决定问题的综合解决方案，并为知识的创建、维护和应用提供条件。

与此同时，第一， 上下文是交互案例不可分割的属性，而不是从外部刻画活动的稳定客观功能集。上下文对于理解、语境化以及误解活动和信息的形式仍然至关重要，但正是在上下文的本质中，人们必须不断协商并重新审视它。第二，这些上下文属性通过其与实践形式的关系获得其值或相关性，即围绕人工制品和信息展开行动，而这些人工制品和信息使其对人们具有意义并与其相关。因此，技术的意义不能脱离人们使用它的方式。

此类语境模型应能够解决具有语境依赖属性的问题：

- 异质性与移动性；• 关系与依赖关系；

- 及时性；
- 不完善性；
- 推理；• 符合决策形式化；• 有效的语境支持。

考察在问题领域中使用上下文，有助于发现所有语义关系，提供决策所需的全部信息和正确解释，因为在决策过程中使用信息通常

发生在决策过程复杂结构的上下文中，而这一过程往往由一系列因素共同形成。

如 [10], 所示，上下文系统有助于识别、理解并将相关决策要素表示为上下文以及上下文框架中的内容。上下文是指任何可用于或描述相关问题区域的信息。

上下文是决策过程中的重要因素，有助于确定支持决策所需的信息，并由一组相互关联的组件[11]表示。

在[12] 中，指出可以将上下文视为问题的表示，同时考虑以下上下文属性 [12；13]:

• 上下文是一种信息形式，也就是说，上下文被视为可被知晓、表示和编码的内容；

• 上下文是完备的，也就是说，可以认为能够预先确定特定用途的上下文；

• 上下文是稳定的，也就是说，尽管上下文可能因应用程序而异，但在与应用程序交互的不同实例之间不会发生变化；

• 上下文与活动是分离的，也就是说，上下文用于描述活动发生于其中的环境特征，但活动的元素不属于上下文本身，也不被视为上下文。

许多现有的基于上下文的系统的主要缺点，是无法实现上下文的动态描述。现有的上下文模型是“静态的”或受限的。

为了赋予上下文属性以动态性，我们将考察可概括为以下特征的上下文：因时空而产生；决策的因果过程；具有确定性，但不一定可预测；对参与者、任务或活动与其所处环境之间关系的语义解释；可用于模拟目标导向活动的约束标准。

上下文限制也降低了计算活动潜在解决方案的时间复杂度。我们采用以下限制准则：数据可用性或缺失；完整性；纳入／排除集合；时间边界；空间边界；活动区域。

上下文被视为参与者、有目标的任务与其所处环境之间的动态关系。这种看法允许上下文关联随着时间和空间的变化而产生、改变或消失，并涵盖时空动态的复杂性。我们采用这种上下文表示，因为它使我们能够对任务求解过程中产生的上下文动态进行建模，而不只是将其选定于问题表述和任务求解过程的阶段。上下文模型体现了对问题情境决策的主观观点。因此，我们从实践观点对上下文建模，并表示一种继承自传统上下文模型的上下文结构。

这种观点基于对上下文属性的理解。首先，它不将上下文视为信息，而是认为上下文性是一种关系属性，由对象、行动、任务、环境等之间的关系所决定。也就是说，某事物并非本身就是或不是上下文；相反，它可能与某项特定任务的求解有关，也可能无关。其次，可以认为，上下文功能的集合是动态确定的。第三，可以认为，上下文因问题、任务、活动、行动等具体情形而异。上下文是一种与特定设置、具体问题情形、任务、环境、行动以及参与决策过程的人员相关联的属性。第四，不应将上下文与内容视为两个彼此独立的对象，而可以认为上下文产生于活动。换言之，上下文不仅应被视为表示问题，也应被视为交互问题。

由于上下文被视为参与者、有目标的活动、资源、能力、时间、位置和环境之间动态关系的集合，这些要素均处于或被运用于其中。这使上下文关系能够随时间和空间的变化而产生、改变或消失，并涵盖时空动态的复杂性。我们采用这种上下文表示，因为它使我们能够对任务求解过程中产生的上下文动态进行建模，而不只是将其选定于问题表述和任务求解过程的阶段。

为了描述上下文，有必要厘清那些界定形成与决策过程及相关领域组成部分的性质、结构和表示的概念与构造，这些组成部分用于描述这一过程。上下文应以标准化方式加以描述。决策过程的知识表示应支持上下文表示及其管理所需的操作。

为了积累、解释、表示和管理上下文，本文提出一种通用的上下文管理模型。上下文本体由三个主要组成部分构成：上下文语义（本体）、上下文实例数据，以及与规则相关联的上下文。本体表示上下文范围内的语义、概念和关系。这种本体由描述抽象上下文、具体上下文和实现上下文的本体融合而成。规则是推理公理，上下文感知系统利用它们获取解决方案，并推理需要采取的行动。这些规则有两个来源：明确指定的规则，以及系统本身隐式推导出的规则。

决策实现的复杂性在于：需要综合利益相关方对问题的不同观点，管理与任务相关的大量信息，并理解促成对决策任务及决策过程本身进行这种考察的解决方案。此外，与问题相关的知识分散在作为问题所有人的不同利益相关方和决策者之间。

这决定了有必要基于多层控制系统的表示来考察决策过程，并通过特定上下文的模型在其中实现决策 [14]。

上下文本体 $_{cntxt}O$ 考虑到结果 [10] 包括以下组件本体：上下文本体、层本体和观点本体，有助于识别、理解并将相关现象表示为上下文及上下文中的内容。上下文本体的总体目标是定义概念和构造，帮助我们理解特定实体的性质、目标和值。因此，上下文本体并不将问题区域视为实体的基础结构，而是从特定角色或值的角度来界定实体在上下文中的考察方式。这种本体以如下形式表示：

相互关联的本体集合，构成如下形式的关联结构（图 1）：

$$O_{cntxt} = \left\langle O_{ctx}, O_{layer}, O_{aspect} \right\rangle,$$

其中 $_{ctx}O$ — 上下文本体；$_{layer}O$ — 层本体；$_{aspect}O$ — 方面（视角）本体。

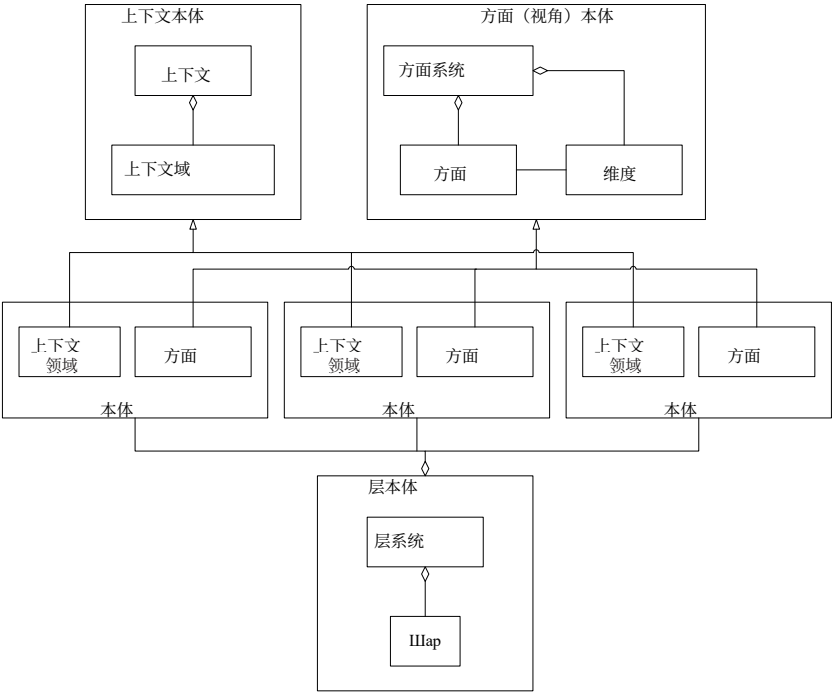


图1. 上下文本体的组成及其相互关系

本体$_{ctx}O$ 定义了以下上下文区域：目标/结果区域、参与者区域、过程/行动区域、对象区域、环境区域、能力区域、手段区域、表示区域、位置区域和时间区域。上下文被定义为一种结构，由十个上下文区域内的概念构成。每个上下文区域均由相应的概念和构造定义。上下文本体 $_{ctx}O$

包含对上下文区域及跨区域关系的详细概念和构造。

层本体 $_{层}O$ 支持决策结构，并描述决策组成要素在一般层面上的关系，以及它们在相应层级上的实现：问题、模型、方法和实现，分别处于结果系统、对象系统、使用系统和控制系统的框架内。层本体 $_{层}O$ 为理解和结构化决策提供概念与构造，尤其通过决策支持系统、对象系统和使用系统等概念；同时，它也为按照四个层次（实现、方法、模型和问题）对决策进行结构化提供了概念基础。

方面（视角）本体 $_{方面}O$ 源自层本体和上下文本体。本体 $_{方面}O$ 支持为决策支持系统中的决策过程的具体表示确定一系列审视方面，并对决策组成要素的感知进行结构化，具体包括系统、概念、功能、信息和实现等视角。

层级化组织、形式化特征、标准化、支持有效论证、支持不同抽象层次及相互作用，是上下文本体的主要特征。

其中，上下文分为抽象层、具体层和实现层 [14]。抽象上下文是多层系统的本体模型，该系统基于对应用问题领域知识的整合而构建，这些领域在系统运行时予以考量，且与具体任务相关。具体上下文是根据现有数据以及对决策过程的既定需求，为具体任务呈现某一抽象上下文。实现上下文则是在现有实现（尤其是软件）范围内，对每个具体上下文的呈现。

根据所发现的上下文属性以及使用上下文时出现的任务，提出了上下文管理需求。上下文应采用标准化方式进行描述，以确保表示方式不依赖于平台；知识表示模型应支持上下文表示及其管理所必需的操作。上下文应提供相关、真实且

可用于求解具体任务或理解当前情境的信息；纳入上下文的信息应包含直接获取的数据、这些数据的获取历史，以及交互对象当前已知的知识。

我们将上下文视为一种由相应上下文区域内的概念构成，并通过上下文本体以如下上下文区域结构加以描述的构造 [14]:

$$O_{ctx} = \left\langle \begin{matrix} O_{ctx}^{AR}, O_{ctx}^{A}, O_{ctx}^{PA}, O_{ctx}^{O}, O_{ctx}^{E}, \\ O_{ctx}^{F}, O_{ctx}^{Fclt}, O_{ctx}^{R}, O_{ctx}^{Plc}, O_{ctx}^{T} \end{matrix} \right\rangle.$$

在一般层面上 $_{ctx}O$ 由上下文区域描述:

$_{AR\ ctx}O$ — 目标/结果，$_{A\ ctx}O$ — 参与者，$_{PA\ ctx}O$ — 过程/动作，$_{O\ ctx}O$ — 对象，$_{E\ ctx}O$ — 环境，$_{F\ ctx}O$ — 能力，$_{Fclt\ ctx}O$ — 工具，$_{R\ ctx}O$ — 表示，$_{Plc\ \ ctx}O$ — 位置，$_{T\ ctx}O$ — 时间。

为了表示上下文区域，我们将使用对象类、关系和属性，这使得可以将其表示为语义方面，其中条件及其间关系的语义以显式方式定义（从而使每个方面成为形式化本体）。使用这些类别可以在描述逻辑（描述逻辑）（DL）中形式化这些方面。

上下文概念通过上下文关系相互关联，包括域内关系、域间关系和上下文间关系。也就是说，这些关系不仅包括同一领域组件之间的关系，还包括不同上下文之间的关系。这些概念和构造对于确定、理解、组织和表示作为上下文和/或位于上下文中的实体是必不可少的，从而有助于理解任务实体及决策过程相关的性质、目标和值。

要解决任何任务，都必须描述基于特定规范的上下文本体的决策过程。我们将通过层本体 $_{w\ \ layer}O$ 。

层本体有助于识别、理解并表示基于上下文的决策结构。层本体描述了总体层面上决策各组成部分之间的关系，以及它们在相应层级上的实现：问题、模型、方法及

在实现系统、对象系统、使用系统和管理系统中的实现。

我们定义层本体，它提供概念和构造，用于确定、理解、组织并表示决策过程表示中的静态和动态特征，涵盖四个层。

，=/ w \ /s layer layer layerO O O— 层本体。w layerO 包含与整个决策过程相关的概念和构造。s layerO 以结构化方式表示决策过程，并将其与已定义的层系统关联起来 w layerO 。

我们将区分，，，w w w\ w w layer layer layer layer / layer O Prblm Mdl MthRlztn =/ \ 作为由四个层构成的系统：问题、模型、方法和实现。我们来看看其中的一些。在任何涉及任务求解的上下文中，人们都会使用有助于确定、分析、设计并实现问题求解方案的构造。

概念与构造 w layerO 源自基础本体 [15], 上下文本体 [14], 层本体 s l ayerO 以及观点本体，并与主题形式表示本体和形式表示本体、实现本体（其中包括用于决策支持的软件描述）、用户表示本体及其交互本体进行交互。

层 , Pr, w prb layerPrblm Level View Rel= / \ 提供用于定义、理解、结构化和表示决策支持系统问题集合中问题实体的概念与构造，这些问题可在决策系统框架内得到解决。问题（任务）上下文与模型上下文相关联。概念与构造 w layerPrblm 源自基础本体 [15], 上下文本体 [14], 层本体 s layerO 以及观点本体，并与主题形式表示本体和形式表示本体进行交互。问题上下文与模型上下文相关联。

另一层是本体所描述的模型w 层Mdl:

，，w mdl layerMdl LevelViewP Rel = ，它提供了相关概念和结构，用于在系统模型范围内从模型的角度定义、理解、组织和呈现实体。我们将区分模型概念的以下主要观点：w layerMdl 从系统、概念和实现三个角度进行考察。模型的定义

必须始终突出这三个观点的相关方面。我们将模型视为一种实体，它用于帮助或促成对模型所指向的某个其他实体的理解、沟通、分析、开发和/或执行。模型将以三种形式之一呈现，即概念构造（描述）、以特定语言表达的表达式，或实现。模型的上下文与方法的上下文及问题的上下文相关。

下一层是通过本体描述的方法$_{w\ layer}Mth$。方法知识$_{w\ layer}Mth$由四个组成部分构成：方法执行过程知识、问题领域知识、实现技术知识以及用户行为知识。执行过程知识是指与方法执行相关的知识。问题领域知识是指与决策实现、其使用系统及对象系统相关的知识。每个问题领域都有自身的特点，这些特点是了解并执行方法所必需的。技术知识是指在特定任务中，为决策而搜寻、使用和设置硬件及软件的相关知识。用户行为知识是指关于人的问题特点及其行为的知识，也包括在方法开发和工作组织中必须考虑的社会和组织层面。方法以原则、过程等形式提供显性知识。方法可分为技术、场景、机制和算法。技术包括表示语言和过程。方法的上下文与模型上下文和实现上下文相关。方法的目标上下文包括已定义模型的那些上下文。

机制和算法由决策过程使用，并通过实现层进行描述$_{w\ layer}Rlztn$：，，$_{w\ rlztn\ layer}Rlztn\ Level\ ViewP\ Rel=$。它们可以是通用的，即适用于所有可用于决策的语言；也可以是特定的，即仅适用于特定语言；还可以是混合型的，即某些部分通用，另一些部分特定或可调整。实现上下文与方法的上下文相关。

为纳入信息和知识并以不同形式、在不同层次上加以利用，我们将区分与决策制定密切相关的四类系统：

1. 描述信息和知识的系统，
2. 与信息的积累、存储、处理和应用相关的那些，

3. 使用信息的那些，
4. 管理并可能根据决策结果及信息的使用而发生变化的那些。

因此，我们将考察系统 $_{s\,layer}O$，它集成了对象系统 $_{layer}So$、实现系统 $_{layer}Sr$、使用系统 $_{layer}Su$ 和管理系统 $_{layer}Sm$：

$$, , , _{s\ layer}\ _{layer}\ _{layer}\ _{layer}\ _{layer}\ O\ Sr\ So\ Su\ Sm =$$

与决策相关的情境知识：实现系统 $_{layer}Sr$、对象系统 $_{layer}So$、使用系统 $_{layer}Su$、管理系统 $_{layer}Sm$。

$_{layer}Sr$ 可定义为一种系统，它描述参与者、信息和数据、工具及位置，并收集、存储、处理和传播对象系统所呈现结果的信息，以实现和/或改进使用系统的行动。从结构上看，$_{layer}Sr$ 由参与者、行动、信息和数据、工具（包括软件）及位置构成，确定决策层级上的相应结果，以实现任务求解。$_{layer}Sr$ 旨在提供符合相关性、及时性等标准的信息，以满足用户对决策过程结果的需求。$_{layer}Sr$ 是一个功能单元，用于收集、存储、处理和传播对象系统 $_{layer}So$ 所呈现决策结果的信息，并实现和/或改进使用系统 $_{layer}Su$ 的行动。实现系统的用户 $_{layer}Sr$ 是希望借助实现系统提高对对象系统 $_{layer}So$ 知识水平的参与者。这也会改变用户执行与管理系统 $_{layer}Sm$ 相关任务的能力。.

$_{层}So$ 表示一个系统，它收集、存储、处理和传播信息，以服务于使用系统的利益并由此产生 $_{层}Su$。边界 $_{层}So$ 完全由使用系统的利益决定 $_{层}Su$。$_{层}So$ 是现实的一部分，被视为决策问题域。

$_{层}Su$可以表示为一个系统，它在决策过程中使用由实现系统提供的服务$_{层}Sr$，以便规划并实施变更（即通过管理系统改变状态（转换）$_{层}Sm$。使用系统中的参与者$_{层}Su$包括用户和实现系统的软件组件$_{层}Sr$。在$_{层}Su$中，我们可以区分两类用户：最终用户通过直接与决策支持系统交互来增加自身知识；间接作用用户则通过从决策支持系统用户处获取决策支持系统的结果来增加自身知识。$_{层}Su$ 可根据不同准则进行分类，例如，可从战略、战术或操作层面进行考察。结果$_{层}Su$ 可能涉及人类参与者或程序参与者。$_{层}Su$ 可定义为一个系统，它使用由实现系统提供的服务$_{层}Sr$ 来进行决策或采取其他行动，以便规划并实施管理系统$_{层}Sm$ 中的变更（即状态变更）。$_{层}Sm$ 是一个使用使用系统$_{层}Su$ 的系统。

实现系统$_{层}Sr$、对象系统$_{层}So$、使用系统$_{层}Su$和管理系统$_{层}Sm$之间存在某些关系。实现系统的信息对象代表对象系统的实体。使用系统的信息对象也代表对象系统的实体。对象系统与其他系统之间的关系取决于这些系统是否相交。我们可以根据对象系统有多少部分属于其他系统，确定四种不同的情况。第一种情况下，对象系统与其他系统完全不相交。这意味着，例如，所收集的信息来自与使用系统影响范围内的实体完全不同的实体。当然，这种情况非常罕见。第二种情况下，对象系统与管理系统重合。第三种情况下，对象系统与使用系统相交。在这种情况下，例如，实现系统可用于规划、监测或执行使用系统中的工作。最后，对象系统也可以与实现系统相交。

如上所示，上下文本体的第三个组成部分$_{ctx}O$ 是方面（视角）本体$_{aspect}O$ 。

方面或观点的概念没有明确的定义，因此我们将方面（观点）视为一种特定的考察或评估方式。使用某一方面会导致对现实中的某些实体及其属性形成有限的或确定的概念。为了获得并关联这些表示，需要定义某种结构。

方面（观点）本体

$$O_{aspect} = \left\langle \begin{matrix} VofP^{Sys}_{aspect}, VofP^{Cncpt}_{aspect}, VofP^{Man}_{aspect}, VofP^{Inf}_{aspect}, \\ VofP^{Rlz}_{aspect}, Dim_{aspect}, Rel_{aspect} \end{matrix} \right\rangle,$$

其中 系统方面观点 — 系统视角，反映问题领域中在进程内相互作用的对象构成，以及决策进程中的相互作用；

概念方面观点 — 概念观点，反映问题领域对象的内容及其在决策进程中的相互作用；

管理方面观点 — 管理观点，反映决策进程执行过程中发生、被使用并产生影响的事件和规则；

信息方面观点 — 信息视角，反映在决策进程中用于转换对象的函数（行动）之间的关系；

Rlz 方面$VofP$ — 一种实现视角，描述决策支持系统各元素及决策的实现工具；

方面Dim — 观点考察的维度；

方面Rel — 观点之间的关系。

在这种情况下，上下文既是多个本体中与任务求解相关部分的相关需求集成后的结果，也是集成过程本身的结果。这里所说的集成，是指对多个源本体的部分内容进行集成，其结果是一个统一本体或上下文，其中集成部分的知识以统一的方式呈现，并完整支持这些部分中所指定的逻辑推理；这些部分可从多个同质或异质来源中获取。

系统观点基于对象系统和使用系统，后者由相互关联的各层考察观点以及相关上下文区域组成。在此，例如，对于问题，需要确定其可能在什么条件下出现，可能存在哪些

对问题启动或使用的影响，如何使用，模型、方法和实现存在哪些或已经实现了哪些上下文等。对于方法层，需要确定应针对方法考虑哪些模型上下文、目标是什么、可能的参与者和方法使用限制是什么，同时还要考虑问题和模型的上下文以及实现的上下文等。

概念观点通过信息对象的语义内容来考察决策，这意味着该观点面向对象系统的上下文。该观点聚焦于相关对象的概念内容，同时考虑其结构和动态组成部分。

从管理观点来看，系统被视为一个具有相应事件和运行规则的管理系统。为此，需要确定参与者（人、软件系统）、他们如何交互、身处何处，以及如何在相应层等范围内制定相应的程序和算法。

从信息观点来看，所考察的系统基于对象系统，该系统被视为一种对目标、行动和对象进行信息处理的功能结构，不受任何表示、实现和使用方面特征的影响；也就是说，需要确定处理哪些信息及其原因，以及哪些行动、交换和处理规则等。

从实现视角来看，所讨论的系统基于实现系统，该系统与具体的组织、管理和技术上下文相关联；也就是说，需要确定在决策实现过程中执行行动的参与者、他们如何互动及位于何处、必要的数据存储在哪里以及如何存储、使用哪些工具及何时使用、采用何种硬件和软件，以及它们如何相互关联，等等

视角之间的关系可以依据多个准则构建。由于无法找到能够涵盖决策所需全部特征，并提供必要概念和构造的方案，因此，准则的选择决定了各个观点应支持对决策过程多方面特征的结构化考察。这些准则应能结合决策过程考察每个观点，从而确定哪些内容与该观点相关，哪些内容应予以忽略。

所呈现的方面（观点）系统从三个维度进行考察：分解维度、概念维度，以及实现的独立性——依赖维度。

采用系统、信息和管理等观点，可以沿分解维度推进，即从“黑箱”转变为由目标、行动和对象构成的系统。在这一过程中，主要应用了分解与专门化原则。

系统、管理和实现观点使人能够分析分解维度上的变化，以及实现独立性维度——依赖关系维度上的变化。

由此，可以得到某种观点体系的层级表示，它以实现依赖关系准则为基础，因为每一层都界定了更具体的概念，以及在较低抽象层级上展开的关系。因此，系统包含通过特定信息对象实现的对象、分为人类行动和软件系统操作的行动，以及临时的具体规范。在这一过程中，将确定目标、手段、行动分解结构和对象分解结构的层级结构。

在决策任务框架下对上下文进行这样的考察，无须直接影响决策过程，便能将其限制在仅包含对该上下文有意义的规则／程序之内。这使得我们能够：1）从现有上下文中逻辑推导出新上下文；2）通过应用更高抽象层次的上下文，并根据相应条件和任务对其进行一体化与具体化，重复利用上下文；3）从相应的已考察上下文中获得更高抽象层次的上下文；4）将上下文拆分为若干组成部分，即逻辑关联且内部一致的上下文。

通过方面（观点）体系实现决策的集成视角，可以使用包含在多个上下文中的信息，并确定可供应用程序使用的上下文，例如用于求解特定任务，从而提高上下文信息的可靠性。方面或观点使人们能够仅使用与待求解任务相关的数据、信息或知识。此外，它们还允许复制上下文片段，并将其重复用于其他目的等。

基于以本体和上下文形式使用知识的系统优化，为决策过程的组织引入了一系列重要属性。首先，它能够实现对情形的连续分析和行动规划；在不破坏技术完整性及关系的前提下，对决策过程进行修正；允许根据不同准则和模型制定多种决策方案；构建相互关联的决策准备与选择系统，既适用于当前问题，也适用于与其他问题和任务综合体的交互；并允许在决策时考虑其实现后果。在此类技术框架内，还能够考虑决策相互依赖性、实现带来的负面后果、行为约束、信息约束、时间和不断变化的环境、确定性、风险、不确定性等因素。

研究成果已用于科研项目“开发用于求解应用任务的典型本体驱动系统优化程序”。

参考文献

1. Глушков В. М.《关于系统优化》。《控制论》。1980年，第5期，第89–90页。2. Sharifi A., M. van Herwijnen M., van den Toorn W.《空间决策支持系统：理论与实践》。ITC讲义，2004年。3. Westmacott S.《为热带地区的综合海岸带管理开发决策支持系统：综合海岸带管理决策环境是否过于复杂，以致无法开发出实用且有用的决策支持系统？》。《环境管理杂志》。2001年，第62期，第55–74页。4. Bharati P., Chaudhury A.《基于网络的决策支持系统中的决策满意度实证研究》。《决策支持系统》。2004年，第37期，第187–197页。5. Чаплінський Ю. П.《针对参数不同允许变化的系统优化算法》。《信息化与管理问题》。2007年，第1期，第163–168页。6. Волкович В. Л., Коленов Г. В.《求解相互关联优化问题的分离方法》。《苏联科学院学报》。技术控制论系列。1990年，第6期，第28–43页。7. Чаплінський Ю. П.《决策过程的本体表示》。《信息化与管理问题》。2009年，第2期，第146–151页。

8. Чаплінський Ю. П. 《支持管理决策的本体组成部分》。《乌克兰国立食品技术大学学报》。2013年，第48期，第65–68页。9. Porzel R. 《情境计算：模型与应用》（认知技术）。Springer 出版社，2010年。10. Lepрдnen M. 《迈向信息系统开发本体——情境方法》。《数据库设计与信息系统开发中的当代议题》／K. Siau（编）。IGI Global。2007年，第1–36页。11. Hinton A. 《理解情境：环境、语言与信息架构》。加利福尼亚州塞巴斯托波尔：O'Reilly Media, Inc，2014年。12. Dourish P. 《谈论情境时我们在谈论什么》。《个人与泛在计算》。2004年，第8期，第19–30页。13. Bettini C., Brdiczka O., Henricksen K. 等。《情境建模与推理技术综述》。《普适与移动计算》。2010年，第6期，第161–180页。14. Чаплінський Ю. П., Субботіна О. В. 《应用决策问题求解中的本体与情境》。《人工智能》。2016年，第2期，第147—155页。15. Чаплінський Ю. П., Надточій В. І. 《决策中的基础本体》。《信息化与管理问题》。2016年，第2期，第45–51页。

印后工艺设计质量预测评估信息技术的理论基础

Сеньківський В. М., Піх І. В., Кудряшова А. В.

在初步阶段，开发图书出版物印后加工设计质量预测评估信息技术，需要描述领域，尤其是明确实现特点、印后工艺的顺序及其设计过程。基于理论论证和专家意见，提取了关键影响因素，并对确定的过程进行了功能建模。文中给出了上下文图，其中系统的主要功能是实现和设计印后工艺。文中还描述了各项功能的分解过程。为形式化所述知识，并获得确定主问题与次要问题最优解的能力，采用了所开发的印后工艺设计本体。

通过领域分析，综合出因素对设计质量的优先影响模型后续-

印刷流程设计质量的因素优先影响模型。具体描述了语义网络的构建特点，以及如何借助谓词逻辑描述因素之间的关系；并采用层次分析法和因素排序方法，确定了各因素对所研究流程的影响优先级。

下一阶段是优化各因素对印后工艺设计质量的优先影响模型，即改进输入数据；该过程采用层次分析法，通过求解一系列任务实现：构建成对比较矩阵；计算矩阵主特征向量的分量并对其值进行归一化；根据主特征向量最大值准则、一致性指数的规范值和一致性比率检验优化结果；综合优化模型。

为确定印后工艺设计实施的最优备选方案，选用了两种方法：基于准则线性聚合的多因素备选方案选择，以及基于模糊优先关系的选择。

采用模糊逻辑的方法和手段，实现了对所研究过程实现质量的具体定量指标的获取。

在所划分阶段的基础上，构建了信息技术的结构功能模型和 *IDEF0*模型。

印后加工图书出版物设计质量预测评估信息技术的开发，在初始阶段涉及对领域的描述，包括实现特征、印后工艺的顺序及其设计过程。基于理论论证和专家陈述，确定了关键影响因素，并对某些程序进行了功能建模。文中给出了情境图，其中系统的主要函数是印后工艺的实现与设计。文中描述了对每个函数进行分解的过程。为实现知识形式化并获得确定主要问题和次要问题最优解决方案的可能性，建议开发印后工艺设计本体。

通过对该领域的分析，构建了影响印后工艺设计质量的因素优先影响模型。具体而言，本文介绍了语义网络的构建特点，以及如何运用谓词逻辑描述因素之间的关系，并通过层次结构的数学建模和因素排序确定因素的优先级。

下一步是优化因素对印后工艺设计质量的优先影响模型，即改进输入数据。这一过程采用层次分析法，涉及解决若干问题：构建两两比较矩阵；计算分量并对主特征向量的值进行归一化；依据主特征向量最大值、一致性指标和一致性比率的规范值检验优化结果；

向量、一致性指标和一致性比率的规范值；优化模型的综合。

为了确定实施印后工艺设计的最佳方案，选用了两种方法：基于准则线性收敛的多因素方案筛选法，以及基于模糊效益比率的方法。

采用模糊逻辑的方法和手段，获得所研究过程实施质量的具体量化指标。

基于所选信息技术阶段，构建了结构功能模型和 *IDEF0*模型。

问题的提出。书籍产品生产技术的最后阶段包括装订工艺，常被错误地等同于一系列机械、周期性重复的动作，从而忽视了其中高度智能化的信息成分。这种方法会提高印数部分或全部报废的可能性。另一个典型错误是成品与其功能和使用特性不符合。例如，对于应使用数十年的出版物，却采用不适合满足既定需求的有机胶粘剂装订，并选用不合适的装饰材料[79]。

近年来，借助计算机设备和专用软件，开始对上述进程进行建模 [5; 59]。必须考虑到，装订和精装进程中各项操作所需的设备，以及不同产品所用的材料各不相同 [7; 9; 17; 19; 24; 35]。垂直设计原则得到广泛应用，其中区分分析和综合程序。综合的结果是创建对象描述，以反映其结构和参数 [11; 13]。技术和印后设备的选择依赖于印刷品的类型、用途、生产规模，以及印刷厂活动的经济和财务指标 [1; 23; 31; 37; 74; 75]。一项重要问题是遵守出版物制造标准，以及与印刷业质量相关的计量特性和业务流程建模 [40; 45; 77], , 这些都是印刷企业规划和高效运行的重要因素 [79]。

需要指出的是，利用计算机化技术进行自动化并未带来预期结果，因为所采用的程序并未因此结合成一个统一、不可分割的

系统。在这种情况下，逐工序信息支持既适宜又必要，其结果将是对未来产品质量进行预测评估。在存在不确定性的条件下，采用这种方法需要：识别影响印后工艺设计质量的关键因素，确定各因素的重要程度及其对所研究过程的影响优先级；基于准则线性聚合以及模糊优先关系，构建、计算并对印后工艺实现的备选方案进行多准则评估，并从中确定最优方案；计算印后工艺设计质量水平的综合指标；开发用于预测评估上述过程的信息技术，为获得符合要求的产品质量提供方法论基础 [79]。

本研究的主要任务是开发用于印后工艺设计质量预测评估的信息技术，这需要完成以下从属任务：

– 分析印后工艺的设计与实施阶段，研究主要操作与功能，并开发本体；

– 确定影响印后工艺设计质量的因素，并构建因素间关系的语义网络；

– 综合并优化影响印后工艺设计质量的因素优先影响模型；

– 根据基于准则线性聚合和模糊优先关系的多因素备选方案选择方法，确定最优实施备选方案；

– 构建语言变量的隶属函数，并使用模糊逻辑方程计算其值；

– 通过依据重心法对模糊集进行去模糊化，确定印后流程设计的综合质量指标；

– 开发印后流程设计质量预测评估信息技术的结构功能模型；

– 开发用于印后工艺设计质量预测评估的信息技术 IDEF0模型。

研究内容概述。尽管科学家和从业者为形成通用的过程质量先验评估方法、方式和手段付出了数百年的努力，但与各类产品生产相关的过程质量问题至今仍未得到彻底解决。我们尝试解释造成这一现状的原因。

通常，“质量”这一概念与产品联系在一起，这乍看之下合乎逻辑，因为消费者首先关心的是成品的优良程度 [12；47]。由此便产生了一个两难问题——什么才算质量，又该如何理解质量。毕竟，绝大多数用户并不熟悉标准，因此每个人都以自己的方式评价商品，更不用说他们并不关心其制造技术的细节了。在这种情况下，质量就成了主观范畴。另一方面，规范和质量标准的存在及其严格遵守，则构成了获得优质结果的客观前提；这些规范和标准用于评估产品，并据此制定对技术、机器、过程实施方式及各项具体操作的要求。

作为上述论述的总结，普遍范式认为，质量是一种后验类别，用于在静态模式下表征生产过程的产出。在这种情况下，质量是产品属性的总和，这些属性决定了产品能否按照其用途满足用户的需求 [47]。

本研究将重点关注图书出版物质量形成的动态过程，即借助现代信息技术，先验地确定效率准则预测指标的机制，并以此评价出版与印刷各阶段的质量。综上，可以断定，图书出版物生产的各技术过程层级之间存在有序的关系。对研究过程进行结构化，将明确行动顺序，同时证实信息概念应用于预测印刷品质量的有效性，并使其逻辑依据更加严谨。

鉴于上述情况，在电子信息手段兴起之初，人们可能以为印刷品将彻底衰落，近些年来也因此展开了严肃的讨论。然而，关于乌克兰印刷出版物（尤其是书籍）出版速度和篇幅的数据表明，传统（纸质——

钢笔）印刷业的怀疑者忽略了许多重要因素。例如，[4] 一文指出了表明乌克兰书业正在复兴的因素。

进入第三个千年之初，乌克兰已涌现出一批专业素养过硬、干劲十足的各类所有制出版商和印刷商，他们娴熟地传承着前辈在图书出版领域的优良传统。

尽管面临经济困境，乌克兰社会对优质乌克兰图书的需求仍然稳定而旺盛，包括文学、教材、学术、知识普及、参考工具书等。

仿效西欧国家，乌克兰日益感受到图书行业年度书展热潮的影响。各州府已成立私营出版社小组，它们在短短的运营时间内，便成功地在全国范围内崭露头角。

印刷品生产技术是信息技术的组成部分，因为印刷流程的及时性与完善程度，以及其对社会活动各领域的覆盖，决定着信息的传播规模与速度——而信息是人类生存与进步的基础。信息出版印刷技术属于现代技术的一种，与纸质和电子数据及知识载体的生产相关。作为社会信息技术的一种，它们源于社会对改进实体与电子信息载体生产过程的需求。这项技术的出现并非源于计算机设备本身的问世，而是源于社会认识到可以更有效地组织出版流程，及时融入人类共同的信息系统，并在现实的信息环境中成为其积极的信息源和消费者。这项技术正在出版流程中得到广泛应用，是生产书籍、成绩册、报纸及其他纸质和“电子”印刷品的高效、自动化程度最高的技术之一 [3; 36; 48; 65; 66]。

近年来，印刷企业创建并成功应用了一种全新的信息技术，用于组织和运行出版印刷综合体，称为“工作流”（Workflow）[8；14；39；49；71]。它确保与数据相关的具体操作按顺序实现，这些数据以 PDF、CIP3、CIP4 文件格式呈现，并涉及软—

件和硬件，以及硬件与软件之间的交互。其目标是从技术和组织层面整合工作流的数据流水线，并在客户、印刷厂和装订部门之间架起网桥。这些流水线用于处理印刷生产各阶段的数字信息；它们实现了 CtP（计算机直接制版）系统与数字化工作流程以及色彩打样系统的集成。其流程包括数据接收、生产、校对、色彩管理、分色、拼版及输出。

当前，印刷品印数呈现下降趋势。这促使按需印刷 PoD（按需印刷（PoD））应运而生。每种 PoD 系统都有其用途和能力。它们的共同点是，印刷通信通过数字印刷方式以及专为其设计的印后技术实现。

对当前印刷技术以及用于实现这些技术的系统与软件工具的现状进行分析后发现，目前缺少一种通用机制，能够在信息层面对出版印刷循环的各个环节、阶段或单项操作的实现情况进行先验效率评估，因此无法借助旨在提供所述问题的专家预测式解决方案的自动化系统，先验地达到预期质量。

构建用于印后工艺设计质量预测评估的信息技术结构功能模型，依据是提取并系统化信息技术的主要阶段 [10; 32; 46; 67]。

阶段 1. 领域分析

1.1. 书籍产品印后加工操作与技术的概述

印后工艺是指一系列连续操作，旨在将印刷纸张及其他结构元素加工为成品书 [35; 61]。

图书出版物的印后加工可分为两大类：平装工序和精装工序。平装工序包括：书帖制作、配帖和书芯粘合。也可以将书芯与封面连接

，并进行三面裁切。精装工序包括：书芯加工、书壳制作与装饰、将书芯与书壳连接，以及书籍最终加工 [6；35]。下面详细介绍上述操作。

书帖的制作包括撞齐、将纸张切分成若干部分、折页、压实以及粘贴附加元素。撞齐是为了提高修边和裁切纸张的精度。此操作是将纸张边缘沿纸垛的水平边和垂直边对齐。裁切是将印刷或装订纸张分成若干部分。折页是按照规定的顺序折叠纸张，并固定折缝，以获得所需开本和构造的书帖。折页可按以下特征分类：折缝数量（单折、双折、三折、四折、多折）、折缝的相互位置（平行、垂直、组合）、折缝在纸张上的位置（对称、偏移）、帖数（单帖、双帖、四帖）、纸张数量（一张、两张及以上、折缝超过四道）。压实和包装书帖是为了便于后续操作前的运输和存储。可附加环衬、插图、纸张部分等元素。

书芯配帖是指按照正确顺序将纸张或折好的书帖排列在书芯内的操作。配帖主要有两种方式：套帖（适用于篇幅不超过64–80页的出版物；将纸张一个套入另一个）和配帖（适用于篇幅超过80页的出版物；将折好的印张叠放在一起）。配好的书芯可采用铁丝订、锁线订或无线装订方式进行连接。如果封面用作覆面材料，则需将书芯与封面连接，并进行三面裁切 [6；9；35]。

如果覆面材料为精装，书芯后续加工可包括压书、粘贴书脊、书芯干燥、压紧书脊、三面裁切书芯、切口染色、改变书脊形状、裱贴、粘贴丝带书签、粘贴书头带、粘贴纸条、套筒等。精装书壳的制作通常包括三项主要操作：封面材料裁切、部件组装与

连接、书脊圆整。如有需要，还会对覆面材料进行装饰。书芯装入书壳有四种方式：普通装入法、套筒装入法、“盲装法”、插袋装入法。书芯装入书壳后，进行书籍压平、压痕，并为书籍包上护封。最后一道操作是图书产品包装[6；9；35；76]。

因此，制作封面式图书出版物只需执行装订流程，而制作精装图书出版物则需执行装订和包封流程。总体而言，装订生产具有丰富多样的操作，这与产品元素数量众多、半成品种类繁多、工艺链条较长以及材料多样有关。在使用经典处理方法的同时，印后工艺的自动化方向持续改进，并不断寻求对活动结果进行预测评估。所研究流程的设计是成功实现必要操作并确保图书出版物质量的关键阶段 [35; 76]。

1.2. 书籍产品印后加工的功能建模

鉴于印后工艺设计具有系统性特征，宜将其视为一个系统来考察和研究。研究系统时，会采用系统方法和系统分析。系统方法是将对象作为系统进行研究，发现并研究其中各种关系的集合。系统方法的主要原则包括相互联系原则、多角度原则、多维性原则、层次性原则、不同层级原则和动态性原则。系统分析是为解决问题而采用的一系列方法和算法。系统分析的核心思想是将复杂问题转化为一系列明确的知识步骤，其解决方案已为人所知，或可以采用已知的方法来解决。系统分析程序包括两个部分：分析与综合。分析是将主要问题分解为子问题，并采用最优方法加以解决。将各个子问题的解决方案合并为一个总体问题解决方案，称为综合。事实上，分析与综合是相互镜像的程序。在

采用系统分析之前，必须明确提出待解决的问题，并确定解决该问题的系统边界。

系统分析有两种方法。第一种方法在于应用数学方法，特别是优化理论和运筹学。同时，需要提出一个数学问题，其目的是找出最优系统设计和/或系统运行的最佳模式。第二种方法以系统分析逻辑为基础，适用于数学方法应用效果不佳的情况。

系统分析逻辑源于任务的具体特点以及所采用的方法。系统分析用于处理非结构化问题。在存在不确定性的系统分析中，其目标是影响行动方案的选择，其中包含问题与问题域、目标、实现目标的工具、备选方案、每个备选方案所需的资源、模型，以及最优备选方案的选择标准等元素。

问题表述阶段在于将其扩展为问题范畴，即找出与之相关的一系列问题；若不考虑这些问题，核心问题就无法得到求解。接下来重要的是目标识别阶段，在这一阶段确定为求解问题需要采取哪些措施。目标与问题相对立。在后续阶段，将确定应如何求解问题 [59]。

现代系统分析方法的使用有助于提高图书出版物印后加工的效率并使其更加完善。这些方法借助计算机设备和专用软件产品——CASE技术来实现。CASE工具支持对各种复杂系统进行分析和需求定义、信息系统的创建与维护等流程。CASE技术的一个方向是SADT技术，旨在创建、分析并进一步使用复杂系统模型 [59]。基于SADT方法论开发了IDEF0模型方法论，该方法论采用分解原则构建树形结构的上下文图。上下文图标记为A-0，第一级分解图标记为A0。输入类型的箭头（即被处理的内容）表示值的集合 $\{\ \}_1,\ldots,_n\ I\ I\ I=$ ，

控制类型的箭头（程序和管理策略）表示集合 $\{\}_1,...,_nCCC=$，输出类型的箭头（结果）表示集合 $\{\}_1,...,_nOOO=$，机制类型的箭头（必要资源）表示集合 $\{\}=\ _1,$ [40...,$_nMMM$; 77]。

主要功能是实现印后工艺。系统与周围环境之间的联系通过以下边界箭头表示：I_1 —印好的纸张，I_2 —封面材料，I_2 —其他材料，C_1 —规范性技术文件和工艺文件，C_2 —项目，C_3 —实施方案，O_1—印后加工工艺质量水平，O_2—成品出版物， M_1 —装订设备及其他劳动工具，M_2—工作人员、领域专家及相关人员。

下面分析印后工艺实现的 IDEF0 模型中各边界箭头集合组件的信息负载:

“输入”类型的边界箭头（Input）：

– $_1I$（印刷纸张）。 作者原稿经过印前处理和印刷印数后，形成印刷纸张，并送往印后加工工段。

– $_2I$（封面材料）。用于制作封面或书壳的封面材料纸张（具体取决于其特性）。

– $_3I$（其他材料）。用于装订、装饰加工等的材料。

“控制”类型的边界箭头（Control）：

– $_1C$（规范技术和工艺文件）。 规范技术和工艺文件包括技术要求和法律规章，尤其包括：法律、标准、技术条件、实践准则等。

– $_2C$ 语言（项目）。确定所有旨在实现印后工艺的工艺操作的进程。

– $_3C$ 语言（实施方案）。 通过对给定备选方案集上的模糊关系进行评估而确定的帕累托最优备选方案。

“输出”类型的边界箭头:

– $_1O$（印后加工工艺质量水平）。书籍出版物经过印后加工后获得的结果。

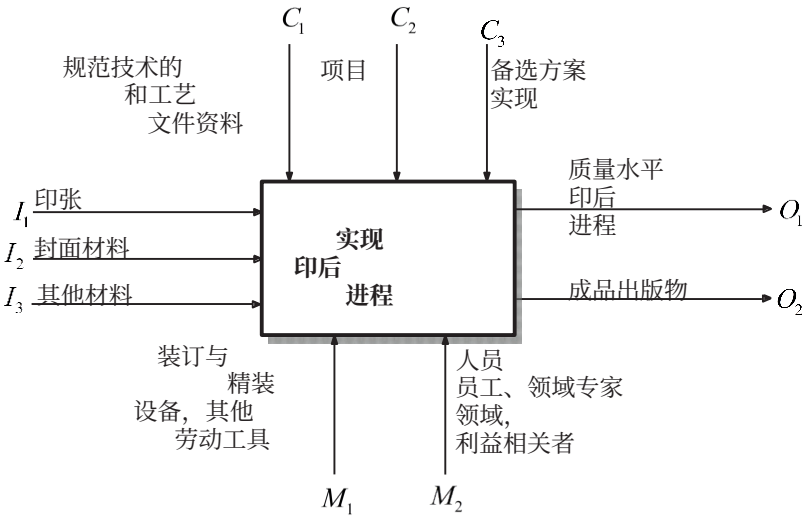


图1. 印后工艺实现的IDEF0模型A-0上下文图

– $_2O$（成品出版物）。采用软封面或精装的书籍出版物，可供发行。

“机制”（Mechanism）类型的边界箭头：

– $_1M$（装订设备及其他劳动工具）。实现印后工艺所需的设备。手动执行某些操作时，也可能使用专用劳动工具。

– $_2M$（工作人员、相关领域专家及利益相关者）。实现印后工艺需要装订车间的员工参与，员工人数及资质取决于生产的篇幅和自动化水平。也可能会邀请相关领域的专家，尤其是科学家及其他利益相关者。

图 1 所示上下文示意图的功能分解过程，是将其拆分为较低阶的函数，并确定边界箭头的方向，从而细化研究过程中的活动 [77]。

印后工艺实现的 IDEF0 模型 A0 第一层分解图包含以下功能模块：

– РБП（装订流程实施）。

– РПП（装订工艺实施）。IDEF0模型A1分解的第二层级图：– ВЗ（书帖制作）。– КБ（书芯配帖）。– СБ（书芯装订）。– ВО（封面制作）。– ПБО（书芯包封面）。– КОВО（封面书刊最终加工）。IDEF0模型A2分解的第二层级图：– ОБ（书芯加工）。– ВОП（书壳制作与装饰）。– ЗБП （书芯与书壳连接）。– КОК （书籍最终加工）。

为表示函数的层级依赖关系，宜使用节点树图。

1.3. 影响因素对印后工艺设计质量的分析。本体的开发

印后工艺设计是实现必要操作并确保图书出版物质量的关键阶段。

在研究印后工艺时，我们将技术特性或参数的存在视为一个重要因素，出版物在其制造的总体循环中的通过成效取决于这些特性或参数。对类似因素进行概括后，引入影响因素这一概念，它们将成为确定因素影响优先级模型以及对印后工艺质量进行预测评估模型的主要元素，用于分析其对实现过程进程的影响。确定所形成集合中组件的优先级，将有助于合理化印后工艺，并促进获得预期质量的成品。

印后工艺设计旨在有意识、有条理地执行计划中的工艺操作，将印刷纸张及其他结构元素转化为高质量的成品图书出版物。缺少设计阶段，就无法获得预期结果。

设 $\{\}_{1\,2\,3\,4\,5\,6\,7\,8}, , , , , , , , R\ R\ R\ R\ R\ R\ R\ R =$ — 印后工艺设计因素集合，其中 $_1R$ — 出版物指标；

$_2R$ — 结构特点； $_3R$ — 使用条件； $_4R$ — 生产类型； $_5R$ — 材料； $_6R$ — 设备类型； $_7R$ — 工艺及经济计算； $_8R$ — 工艺流程图。

下面我们将详细考察研究过程的每个因素。

出版物指标。图书出版物的主要指标包括：出版物的种类和类型、出版物开本及其篇幅。

出版物类型是指按照一种或多种类型特征归为一类的出版物集合。这些类型特征包括：信息的符号性质、制作方式、出版周期、物质结构、正文构成、语言特征、信息分析综合加工程度、用途、信息性质、结构、发行的重复性、篇幅、开本。按信息的符号性质，出版物分为文本类、乐谱类、地图类（地图集、地图、地图）、图像类（画册、图像卡片、图像海报、艺术复制品、版画、直观教具）、盲文出版物。按制作方式，分为印刷出版物和电子出版物。按出版周期，分为非定期出版物、丛书、期刊和连续出版物。按物质结构，分为块状出版物（册页式出版物）、图书出版物（双向翻转书、合订本）、期刊（双向翻转期刊、合订本）、单张出版物（海报、小册子、报纸出版物、卡片出版物）、成套出版物、组合出版物、玩具书。按正文构成，出版物分为以下类型：单一作品出版物、多作品出版物（汇编、年鉴、选集）、选集、全集（学术版）。按语言特征划分的出版物类型包括：原创、译作、单语、多语（平行文本出版物）、平行出版物。按信息分析综合加工程度，分为信息出版物（书目类、摘要类（快讯、信息简报）、综述类）、文摘。按用途，分为官方出版物、社会政治类、科学类、科普类、通俗类、生产实践类、教学类、文学艺术类、宗教类、参考类、广告类、休闲出版物。按信息性质，分为官方出版物（规范性法律出版物、规范性出版物（标准、技术条件）、规范与指令类（指令）；科学类（专著、学位论文摘要、预印本、报告摘要、发言摘要、会议资料、代表大会资料、研讨会资料、科学论文集）；生产实践类（实用指南、实用指南、方法建议、方法指导、方法手册、备忘录、护照（任选），教学类（教学大纲、教材、教学手册（教学方法手册、教学直观教具手册、选读文集、实践教材、练习册），参考类和广告类（百科全书（百科词典）、语言词典、语言学词典、手册、目录、指南、价目表、宣传册、海报）。

实践指南、实用指南、方法建议、方法指导、方法手册、备忘录、护照（任选），教学类（教学大纲、教材、教学手册（教学方法手册、教学直观教具手册、选读文集、实践教材、练习册），参考类和广告类（百科全书（百科词典）、语言词典、语言学词典、手册、目录、指南、价目表、宣传册、海报）。按结构分为：单卷本出版物、多卷本出版物、丛书（子丛书）、连续出版物、应用程序。按发行的重复性分为：第一版、再版（重版（未改版出版物、增补版、修订版、校正版）、翻印本（影印版、传真版）、新版。按篇幅，出版物分为以下类型：书籍、小册子、传单（单页印刷品）。按开本，出版物分为：袖珍型、小开本、便携本、大部头书。另将期刊和连续出版物的类型单独列出 [1；59]。

此外，图书出版物还可分为普通型、改良型和纪念品类—礼品类（广告型）。普通型出版物包括印数较大、没有插图或仅有少量单色或双色插图的出版物：选集、全集、单行本、大众丛书、大众广告信息出版物。改良型出版物适合长期使用，含有数量适中的三色或四色插图，包括：选集、全集、文集、单行本、教学出版物、改良型丛书。纪念品类—礼品类出版物的特点是印数较小、采用高质量材料、包含大量多色插图、采用非标准开本、留有大页边距、进行附加装饰并采用特殊包装，且价格较高。此类出版物包括：按个别订单制作的出版物、纪念品类出版物、礼品类出版物、周年纪念类出版物和仿真版出版物 [35；59]。

出版物的开本表示成品书芯的尺寸（单位为毫米），或印刷纸张的尺寸（单位为厘米）及其所占纸张的比例。开本由出版社与印刷厂协商后确定，主要取决于出版物的类型和种类。印制图书出版物时，开本通常以纸张的厘米尺寸及其所占比例（份数）表示，并标注在出版物版权页信息中 [2；51；59]。

平装出版物的毫米尺寸按书籍三面裁切后的尺寸确定。

精装出版物的毫米尺寸按三面裁切后的书芯尺寸确定。尺寸的最大偏差不得超过宽度1毫米、高度1毫米。

纸张开本及相应的图书出版物开本由 ДСТУ 4489:2005 规定。图书出版物的主要开本列于表1–3。其中，卷筒纸机器的纸张长度由纸张机器方向决定 [2]。

此外，根据开本和纸张所占比例，纸张可分为大型、中型、小型和微型。图书出版物通常采用22种开本。另有印刷幅面之分，它并不总是与出版物开本一致。

在理想条件下，出版物制作工艺过程及所需设备的后续选择依赖于所选开本 [51]。若不存在备选印刷厂可供选择，而所选印刷厂的能力有限，则这种依赖关系相反，因为开本的选择不仅要考虑出版物的主题式和使用要求，还要考虑现有设备的多种配置以及采用某种制作方案的经济合理性。

此外，还区分版心页面的开本（排版幅面），即页面不含边距的船宽和船长。以印刷单位计量。版心页面分为文本型、插图型和混合型。

表1

1/8纸张份数的图书出版物开本

纸张开本 纸张，мм	开本标记 开本 纸张*	图书出版物幅面		
		折叠后的纸张	出版物	
			最佳	最小
840 M×1080		270×420	265×410	262×408
700 M×1080		270×350	265×340	262×338
700 M×1000	B1	250×350	245×340	242×338
700 M×900		225×350	220×340	217×338
610 M×860	RA1	215×305	210×297	208×295
600 M×900		225×300	220×290	205×275
600 M×840	A1	210×300	205×290	202×288
500 M×700	B2	175×250	169×239	165×235
460 M×640	SRA2	160×225	148×210	145×208

*根据 ISO 216 和 ISO 217。M — 沿纸张机器方向的尺寸。

表2

1/16纸张份数的图书出版物开本

纸张开本，мм	标记开本纸张*	图书出版物幅面		
		折叠后的纸张	出版物	
			最佳	最小
890×1240 M		222×310	210×297	208×295
860×1220 M	RA0	215×305	210×297	208×295
840×1080 M		210×270	205×260	192×255
750×900 M		185×225	182×216	179×213
700×1000 M	B1	175×250	169×239	165×235
700×900 M		175×225	170×215	167×213
600×900 M		150×225	145×215	142×213
600×840 M	A1	150×210	145×200	142×198

*根据 ISO 216 和 ISO 217。M — 沿纸张机器方向的尺寸。

表3

1/32 纸张份数的图书出版物开本

纸张开本-纸张，мм	标记开本纸张*	图书出版物幅面		
		折缝-纸张的	出版物	
			最佳	最小
1000 M×1400	B0	175×250	169×239	165×235
890 M×1240		155×222	148×210	145×208
880 M×1120		140×220	136×210	133×208
860 M×1220	RA0	152×215	148×210	145×208
840 M×1080		135×210	130×200	127×188
750 M×900		112×187	107×177	104×175
700 M×1080		135×175	130×165	127×163
700 M×1000	B1	125×175	120×165	117×163
700 M×900		112×175	107×165	104×163
600 M×900		112×150	107×140	104×138
600 M×840		105×150	100×140	97×138

*根据 ISO 216 和 ISO 217。M — 沿纸张机器方向的尺寸。

页面边空是版心页面周围未填充的区域，其尺寸由页面尺寸与版心页面开本之间的差值决定。每页有四个字段：上边（书眉边）、下边（书脚边）、外侧（前口边）和内侧（书脊侧）。最佳页边距尺寸始终彼此成比例。

特定开本的版心页面和字段推荐尺寸，取决于出版物版式设计方案（第一种——最经济，页边距较小；第二种——普通，页边距中等；第三种——改进型，页边距较大）[2；59]。

表4

建议的页边距尺寸

纸张尺寸，厘米 及纸张比例	页面格式 折叠，开 .	裁切前的版心尺寸 (书脊侧、上边、外侧、 下边)，毫米
第一种版式		
60×84/32	.	9, 13, 15, 20
60×90/32	.	9, 13, 18, 20
70×90/32	.	9, 13, 18, 23
75×90/32	.	9, 13, 18, 21
70×100/32	.	9, 13, 21, 23
70×108/32	$^{36\,7\times}/_{4}$	9, 13, 18, 23
84×108/32	$^{36\,9\times}/_{4}$	9, 13, 18, 23
60×84/16	$6\,{}^{3}/_{4}\times 9\,{}^{3}/_{4}$	11, 16, 17, 19
60×90/16	$6\,{}^{3}/_{4}\times 10\,{}^{1}/_{2}$	11, 16, 17, 20
70×90/16	$^{18}/_{10\times 4}$	11、16、20、25
75×90/16	$8\,{}^{3}/_{4}\times 10\,{}^{1}/_{4}$	11、16、19、25
70×100/16	$^{18}/_{11\times 2}$	11, 16, 20, 27
70×108/16	$^{18}/_{12\times 2}$	11, 16, 20, 29
84×108/16	$9\,{}^{3}/_{4}\times 12\,{}^{1}/_{2}$	11, 16, 23, 29
60×84/8	$9\,{}^{3}/_{4}\times 14$	13, 18, 21, 30
60×90/8	$10\,{}^{1}/_{2}\times 14\,{}^{1}/_{4}$	13, 18, 23, 26
70×100/8	12×17	13, 18, 21, 26
70×108/8	13×17	13, 18, 23, 26
84×108/8	$^{313\,20\times}/_{4}$	13, 18, 23, 29
第二种排版方案		
60×84/32	$4\,{}^{1}/_{4}\times 6\,{}^{1}/_{4}$	11、16、18、22

表*4*（续）

纸张尺寸，厘米 та частка аркуша	页面格式 折叠，开　　.	裁切前的版心尺寸 （书脊侧、上边、外侧， 下边），毫米
60×90/32	$4\frac{1}{2}\times6\frac{1}{4}$	11、16、20、22
70×90/32	$4\frac{1}{2}\times7\frac{1}{2}$	11、16、20、24
75×90/32	$4\frac{1}{2}\times8\frac{1}{4}$	11, 16, 20, 22
70×100/32	$^{15\,7\times}\!/_{2}$	11, 16, 24, 24
70×108/32	$5\frac{3}{4}\times7\frac{1}{2}$	11, 16, 21, 24
84×108/32	$5\frac{3}{4}\times9\frac{1}{2}$	11, 16, 21, 23
60×84/16	$6\frac{1}{2}\times9\frac{1}{2}$	13, 18, 20, 21
60×90/16	$6\frac{1}{2}\times10\frac{1}{4}$	13, 18, 20, 23
70×90/16	$7\frac{3}{4}\times10$	13, 18, 22, 27
75×90/16	$8\frac{1}{2}\times10$	13, 18, 21, 27
70×100/16	$7\frac{3}{4}\times11\frac{1}{4}$	13, 18, 22, 30
70×108/16	$7\frac{3}{4}\times12\frac{1}{4}$	13, 18, 22, 31
84×108/16	$9\frac{1}{2}\times12\frac{1}{4}$	13, 18, 26, 31
60×84/8	$9\frac{1}{2}\times13\frac{3}{4}$	16, 20, 23, 33
60×90/8	$10\frac{1}{4}\times14$	16, 20, 24, 28
70×100/8	$11\frac{3}{4}\times16\frac{3}{4}$	16, 20, 23, 29
70×108/8	$12\frac{3}{4}\times16\frac{3}{4}$	16, 20, 25, 29
84×108/8	$12\frac{3}{4}\times20\frac{1}{2}$	16, 20, 25, 31
第三种版式		
60×84/32	4×6	13, 18, 20, 24
60×90/32	$4\frac{1}{4}\times6$	13, 18, 23, 24
70×90/32	$4\frac{1}{4}\times7\frac{1}{4}$	13, 18, 20, 27
75×90/32	$4\frac{1}{4}\times8$	13, 18, 20, 25

表4（续）

纸张尺寸，厘米 та частка аркуша	页面格式 折叠，开　　.	裁切前的版心尺寸 （书脊侧、上边、外侧， 下边），毫米
70×100/32	$4\frac{3}{4}\times7\frac{1}{4}$	13, 18, 26, 27
70×108/32	$5\frac{1}{2}\times7\frac{1}{4}$	13, 18, 23, 27
84×108/32	$5\frac{1}{2}\times9\frac{1}{4}$	13、18、23、26
60×84/16	$6\frac{1}{4}\times9\frac{1}{4}$	16、20、22、24
60×90/16	$6\frac{1}{4}\times10$	16、20、22、25
70×90/16	$7\frac{1}{2}\times9\frac{3}{4}$	16, 20, 24, 29
75×90/16	$8\frac{1}{4}\times9\frac{3}{4}$	16, 20, 23, 30
70×100/16	$7\frac{1}{2}\times11$	16, 20, 24, 32
70×108/16	$7\frac{1}{2}\times12$	16、20、24、24
84×108/16	$9\frac{1}{4}\times12$	16、20、27、24
60×84/8	$9\frac{1}{4}\times13\frac{1}{2}$	18、22、26、35
60×90/8	$10\frac{1}{4}\times13\frac{3}{4}$	18, 22, 27, 31
70×100/8	$11\frac{1}{2}\times16\frac{1}{2}$	18, 22, 25, 31
70×108/8	$12\frac{1}{2}\times16\frac{1}{2}$	18, 22, 27, 31
84×108/8	$12\frac{1}{2}\times20\frac{1}{4}$	18、22、27、34

篇幅是指出版物每个экземпля本中的页数或纸张数。纸张分为以下几种：纸张、物理印张、折合印张、作者印张、核算出版印张。纸张是核算印刷出版物所需纸张数量的计量单位。一张纸张等于两张物理印张。物理印张是出版物的物理篇幅，相当于指定开本（84×108 厘米、84×90 厘米、70×100 厘米等）的纸张面积，单面印刷。物理印张的数量是纸张数量的两倍。折合印张是出版物篇幅的计量单位，面积为60×90 厘米，用于

比较不同开本出版物的篇幅。物理印张与折合印张之间的换算，需借助换算系数进行：

$$K_{np} = \frac{S_{фа}}{S_{уа}}, \quad (1)$$

де $_{фа}S$ — 实际印张面积，$_{уа}S$ — 标准印张面积 .

因此，出版物的篇幅（以标准印张计）按以下公式计算：

$$O_{уа} = O_{фа} \cdot K_{np}, \quad (2)$$

其中$_{фа}O$ — 以实际印张计的篇幅。

作者印张是作品篇幅的核算单位。一个作者印张包含40,000个散文文本符号（包括空格、标点符号、数字等），或700行诗歌文本，或3,000平方厘米插图。

核算出版印张用于测量作者作品的篇幅，并计入出版方添加的材料。其计算方法与作者印张相同，但还包括非作者创作产生的对象（出版说明、内容、题名页要素、出版及发行信息、序言、封面、精装封套、护封上的数据、页码等）。

出版物以印张计的篇幅用于核算作业、统一化出版物、计算成本及进行工艺计算。条件印张数和核算出版印张数标注在书籍的出版信息中。出版物篇幅的另一项核算单位是页数，页数标注在书目描述中。出版物篇幅决定了封面材料的种类和类型、折页与配帖方式、书芯装订技术等。[35；51；59]。

结构特点。需要考虑配帖方式、书芯装订方式、封面材料的种类和类型，以及附加部件的有无和种类。

书芯的配帖有两种方式：套帖和配帖。套帖是将折叠纸张一个套入另一个，适用于篇幅较小的出版物。将折叠书帖或纸张一帖叠在另一帖上，称为出版物的配帖（适用于篇幅超过80页的出版物）[35]。

装订方式分为线装、无线胶订和组合装订。线装使用金属丝或线，无线胶订则使用胶粘剂或机械方式。此外，装订还分为锁线订和整块装订。采用锁线订时，书芯必须通过配帖组成。随后，每帖依次穿过折缝进行缝合并装订（线装）。采用整块装订时，书芯通过套帖或配帖组成，并在一个工作循环内完成装订（线装、无线胶订或组合装订）。整块装订方式更经济，尤其适用于篇幅较大的出版物。

铁丝订最常用于使用期限较短或中等的出版物，通常是小册子和软封面书籍。它具有高性能、高强度和低生产成本。铁丝订有四种方式：骑马订、平订、骑马订（分开式）和对向订书钉。

采用骑马订时，金属丝订书钉穿过书脊折缝，并向书籍内侧弯折。为防止腐蚀，使用涂层金属丝，有时也使用黄铜丝。骑马订适用于采用套帖方式配帖、并在上方加封面的书帖。

铁丝平订用于配帖组成的出版物。用铁丝订书钉在距书脊边缘4–5毫米处穿订。订书钉两端在最后一页的书脊区域弯折，与订书钉背部平行。为遮盖书脊和订书钉脚，将封面粘贴上去。

骑马订（分开式）铁丝装订用于精装出版物。订书钉弯折后覆盖书芯，并钉在书脊上。骑马订（分开式）可按书芯装订（适用于套帖组成的出版物），也可按书帖装订。

对钉铁丝装订用于厚度超过15毫米、经配帖组成的书芯。通常用于制作活页日历。订牢程度取决于订书钉脚之间的距离较小（不小于5毫米）。

书帖线装是最常见、最可靠的装订方式之一，可在单工序设备和流水线上加工书帖。线装有四种方式：平订、穿线平缝、锁线订和布背锁线订。

穿线平缝适用于篇幅较小、采用套帖方式配页的出版物。沿整个折缝用连续针脚缝合。

穿线锁缝适用于经配帖组成的书芯。沿整个书脊缝合，针迹距边缘4–5毫米。

逐帖缝订是依次缝合书脊折缝。它不仅将每张纸张缝合起来，也将各书帖彼此缝合。书芯可在书脊材料上缝合，例如缝在纱布上（用于精装书籍），也可不使用书脊材料（用于软封面和精装封面的书籍）。

非缝订装订借助胶黏薄膜或各种机械装置实现。

无线胶粘装订采用各种胶粘剂，并有多种实现方式，可分为完全切除、部分切除和不切除书帖书脊折缝三种。

采用聚醋酸乙烯酯分散体（冷胶订）进行无线胶粘装订并完全切除书帖书脊折缝时，通过胶粘剂中的水分蒸发及其部分被纸张吸收，形成胶粘剂膜。采用热熔胶（热胶订）进行无线胶粘装订并完全切除书脊折缝时，所用设备应配有胶槽加热器；采用聚醋酸乙烯酯分散体（冷胶订）时，则应配有加热台或干燥单元。总体而言，冷胶订与热胶订的大多数操作相同或相似，因此常使用可重新调试的通用设备。

部分破坏书脊折缝的无线胶粘装订，与前一种方法相比强度更高，因为保留了部分折缝。在此过程中，胶粘剂将书帖粘合在一起，并渗入切口，将纸张粘合起来。书芯通过配帖组成，书帖篇幅为8页或16页。可采用以下方法：在书脊切口处用绳或线装订书芯；在书脊横向切口或凹槽处装订书芯；“Flexstabil”，通过模切特定区域来装订书芯；装订书脊处经过打孔的书帖组成的书芯。

不破坏书脊折缝的无线胶粘装订分为以下几种方式：单折书帖装订，

在书脊折缝处用窄条液态冷胶粘剂装订二折和三折书帖；使用热熔胶粘剂沿书脊折缝装订书帖；预先在书脊字段中部涂布条状冷聚酰胺胶粘剂的无线胶粘装订。

机械式无线装订方法通过机械锁连接书帖块。书帖块由单张纸张组成。此类方法适用于制作儿童读物、广告宣传册、目录、相册等。

线胶装订（组合式）通过热熔线进行。书帖块必须通过配帖完成组配。缝订在折页时进行 [9；35；75]。

封面分为四种类型，书壳分为五种类型。

封面是与书芯连接且不使用环衬的外部封面材料。封面分为四种类型。

类型 1——用于包覆书芯的简易封面。适用于篇幅不超过 64 页的出版物。封面由一张纸张组成，包覆在书帖外，并用金属订书钉或线与书帖装订在一起。书芯通常采用套帖方式配帖。封面最常用纸张制作；为增强耐用性，可在纸张一面或两面覆上一层透明聚合物。

类型 2——用于普通包覆书芯的简易封面。通过在书脊处粘合与书芯连接。封面带有两道压痕。与类型 1 的封面不同，它只能在外侧覆上透明聚合物层（以便在书脊处粘合）。书芯采用配帖方式配帖。打开时，主要负载由压痕处承受，因此封面可能会从书芯上脱落。

类型3——用于包覆散帖书芯的简易封面。通过粘贴与书芯连接。胶粘剂不仅涂在书脊上，也涂在书芯侧边（第一页和最后一页的书脊边缘处，宽几毫米）。书芯通过配帖完成配套。此类封面最为常见，因为它比类型2更耐用。这与其设有四道压痕有关。

类型4——带包边书脊的拼合封面。侧面材料可以是纸张或装帧纸板，而包边则

使用装帧材料。与类型1、2和3的封面相比，其强度显著更高，制作也更复杂。通常用于大部头出版物。

也就是说，按封面结构划分，第1、2、3型由一个部件构成，而第4型封面由封面侧边和包边构成 [13；35]。

书壳是书籍坚固、具有保护作用的外部覆盖部件，通过环衬与书芯连接。书壳分为五种类型。

第5型——复合式。由纸板封面侧边、书脊和书脊衬条构成，表面覆以不同的封面材料。对于厚度不超过10毫米的出版物，可以不设书脊衬条。适用于儿童读物、文学作品、科学文献、初中教材以及篇幅较小的参考书。其特点是生产成本较低、强度足够且装饰方式多样。可进行印刷，随后上光或覆膜，以提高耐久性和耐磨性。

第6型——由一件材料制成的精装。由一整块材料构成。通常用于小开本手册类出版物及纸文具制品。

第7型——整面包覆式。由纸板封面侧边和书脊衬条组成，外覆整块封面材料。厚度不超过10毫米的出版物可不设书脊衬条。与第5、8和9型精装相比，其特点是生产成本较低、强度较高。凭借这些特性，该型精装应用广泛，尤其适用于高等教育机构和职业技术教育教材、订阅类出版物、科普出版物及科学出版物。

第8型——采用贴面侧边和贴面书脊的精装。由纸板封面侧边、书脊衬条、贴面侧边（四面均覆有封面材料）以及贴面书脊组成。其特点是强度较低、生产成本适中、外观美观。用于制作科学类、科学参考类和科普出版物。

第9型——带贴面侧边和包边书脊的精装。由纸板侧边、贴面侧边和包边材料组成。通常用于装订

小学和中学教科书、参考书及科普出版物 [35]。

出版物还可以包含附加要素：环衬（用于连接书芯与书壳以及进行出版物版式设计）、插图（用于出版物版式设计）。环衬可按以下特性分类：版式设计类型（简单未印刷的、由彩色纸制成且未印刷的、衬底式、装饰纹样式、主题式）、印刷面数量（单面、双面）、印色数（单色、双色、多色）、连接方式（粘接式、缝订式、缝线式）、结构（全纸式、包边式、包边式、套入式、折叠式）。附加插图要素根据其在书帖中的位置及与书帖的连接方式分类：粘页（简单式、复杂折页式、带包边、装入框内、装在轴杆上、装在衬纸上（装在轴杆上、带薄纸）、带折回折缝、带压痕）、插页（插入书帖接缝处、裁开书帖折缝后插入、简单式、复杂折页式）、套页、插入页、单独帖。附加要素还可以是纸张的一部分——页数不同于主体书帖的书帖。附加书帖的页数必须是四的倍数 [35]。

运营条件。这一因素包含两个主要组成部分：使用期限和图书出版物的使用强度。

使用寿命是指出版物运营的日历时间，或其耐久性，这取决于其构造特点、信息价值、使用地点以及读者的年龄类别 [35]。

按年龄类别，出版物分为面向成年读者的出版物和面向儿童的出版物。此外，儿童读者还可按阅读速度（有经验的读者和初学读者）以及年龄划分：学龄前儿童（含6岁以下）、小学低年级读者（7至10岁）、小学中年级读者（11至14岁）和小学高年级读者（15至17岁）。显然，面向小学低年级儿童的出版物通常不如面向年龄较大的儿童的出版物耐久 [70]。

出版物 [35] 的使用寿命分为短期（最多 2 年）、中期（最多 5–10 年）和长期（最多 20 年及以上）。

按使用时间长短，出版物也分为长期使用、一次性使用和长期一次性使用三类。长期使用的出版物可供一位或多位读者在较长时间内反复阅读。

例如，艺术出版物、文学经典和专业性较强的出版物。一次性使用的出版物只在较短时期内具有时效性，通常仅使用一次，之后便失去其功能。这类出版物包括节庆活动节目单、音乐会和会议等的节目单。长期一次性使用的出版物供一位用户在相对较长的时间内阅读一次，之后其他读者也可按同样的方式使用。此类出版物包括教学方法材料，尤其是方法指南、工作方案等 [70]。

使用强度由书籍部件的双重折叠次数决定。折叠次数越多，使用强度就越高。使用强度分为低和高两种。它与使用寿命无关，因为例如，使用寿命较短时，使用强度既可能较低，也可能较高 [35]。

生产类型。生产类型是一项涵盖多方面内容的特征，体现了生产的组织与技术水平，涉及生产量、产品品种、工作岗位的负荷特征、同类产品的产量、产品成本以及工人技能。换言之，它是工作岗位持续承担同类工作的程度。生产过程的组织类型分为单件式、批量生产、大批量式和混合式。

单件生产的特点是产品生产成本高、生产周期长、手工作业占比大，且各工作岗位没有固定的操作内容。当产品品种繁多、印数较小时，通常采用这种生产方式来按需印刷书籍（Book on Demand）。

批量生产的产品种类有限，也就是说，生产以特定批次进行。其特点是劳动机械化程度较高，劳动对象以平行—顺序方式迁移，将周期性重复的操作分配给指定的工作岗位，产品品种繁多，但少于单件生产。书籍产品的生产成本也低于单件生产。批量生产分为小批量、中批量和大批量生产。

大批量生产的特点是在高度专业化工作岗位上，以大印数生产书籍产品。其特点是机械化程度高，生产过程自动化程度高，产品成本显著降低。可使用流水线 [38]。

材料。设计印后工艺时需要考虑其特性的主要材料包括：印刷用纸的种类和参数、装帧材料、书芯装订材料、装饰材料等。

所有纸张种类的共同需求如下：
– 具有足够的机械强度；
– 无杂质；
– 同一批次内及每张纸内部的厚度、密度和结构均匀；

– 含水率为 6–8 %；
– 纸张具有清晰的矩形形状（方正度偏差不得超过 2 毫米）。

纸张的构造和结构由以下参数表征：厚度、平方米质量、密度和孔隙率。

厚度是影响纸张机械性能和光学性能的主要特性。厚度为 0.03 至 0.25 毫米的纸张用于印刷（通常为 0.07–0.1 毫米）。厚度较大但不超过 3 毫米的材料称为纸板。纸张厚度决定出版物的厚重感及其经济指标。例如，书籍书脊的厚度会影响装帧材料消耗。纸张越薄，书芯越紧凑。

纸张特性中的另一项重要指标是平方米质量，它与纸张的平均厚度成正比。印刷用纸的平方米质量为 30 至 250 克/平方米^2。平方米质量超过 250 克/平方米^2 的材料称为纸板。平方米质量相同的纸张品种，其厚度和密度可能不同。

纸张密度受填料含量、纤维打浆度、纸张压光等因素影响。印刷用纸的密度为 0.5 至 1.35 克/立方米^2。纸张密度与其孔隙率有关。

孔隙率是指纸张纤维间空间中空隙的存在程度。孔隙率越高，纸张的吸收能力越强，油墨吸收速度也相应越快。然而，孔隙率过高会降低印刷品对比度。

结构不均匀性与纸张制造的技术特点有关，表现为横向纤维与纵向纤维之间的差异。横向的特点是挺度较低，受潮时结构膨胀程度更大（而纵向受潮时结构伸长程度较小）。纸张方向可通过撕裂测试来确定：纸张沿横向垂直撕开时会出现不规则撕裂，而沿纵向撕开时则较为平滑。纸张正面与背面也有所不同。正面更光滑，因为制造过程中背面与网部接触。这些特点不仅对印刷很重要，对装订工艺也同样重要。例如，沿着抄纸方向折页效果更好。为避免书芯出现横向折痕和表面波浪状变形，书籍纸张的纤维方向应与书芯书脊平行。

纸张表面特征的一项重要指标是平滑度。平滑度越高，印刷图像的质量越好，因此，高质量插图出版物通常使用平滑的涂布纸。

纸张的机械属性包括强度和变形。强度是指纸张在机械力作用下抵抗破坏的能力。强度和变形属性取决于纸张的组成和结构，包括填料的含量、表面施胶、植物纤维半成品的打浆程度、压光以及纸张的湿度。研究纸张强度时，采用以下特性：抗张强度和伸长率、耐折度、耐撕裂度以及表面耐磨度。纸张在负载作用下会发生变形。变形分为可逆变形（压力消失时变形随之消失）和不可逆变形（负载停止后变形仍然存在）。两种变形各有用途，例如，封面压印时需要浮雕效果持久保留，而不是随时间消失；凸版印刷则恰恰相反。根据变形特性，可将其分为弹性变形、弹性恢复和塑性变形。弹性是指纸张在机械力作用下改变形状，并在外力停止后立即恢复原状的属性。弹性恢复使纸张在机械力停止作用后逐渐恢复原状。塑性变形是不可逆的，因为纸张在消除应力后无法恢复原状。

纸张的光学性能包括白度、光泽度、透明度和透光性。白度是指纸张均匀反射光线的能力，以反射系数表示（纸张表面反射的光量与照射到该表面的光量之比）。总体而言，纸张白度在 60% 至 98% 之间，适于阅读的最佳白度为 70% 至 80%。光泽度是光线在表面产生的部分镜面反射。根据这一指标，纸张可分为光面纸（光泽度最高可达 75%–80%）和哑光纸（最高可达 30%）。透明度是透光性的一种，指纸张允许光线穿过而不发生散射的能力。这通常是一种不利现象，会导致纸张背面印刷的内容透出。

印刷纸张根据某些特征分为若干组：

– 按用途：用于胶印、凸版印刷和凹版印刷；

– 按开本：平张纸、卷筒纸；

– 按印刷品类型：书刊用纸、新闻纸、地图用纸等；

– 按纤维组成；

– 按每平方米质量等。

各国的纸张分类有所不同 [19]。

纸板在印刷业中用于制作书壳（装帧纸板）、全纸板封面（彩色压制纸板）以及各种包装（涂布白纸板）。此外，也使用瓦楞纸板。装帧纸板的表面应光滑、平整、无翘曲，且无污渍和折痕。装帧纸板分为四个等级：A（用于手工和机械制作书壳，以及制作外侧粘贴覆面材料的书壳）；B（用于制作书籍护套、小开本出版物的书壳，以及外侧粘贴覆面材料的书壳）；C（用于制作无表面施胶的6型全纸板书壳）；D（用于制作外侧粘贴覆面材料的书壳）[19]。

扉页纸用于制作扉页。扉页纸的定量为900千克/米^3，，施胶度为1毫米。如果上述指标过高，则会导致折页困难、胶黏剂吸收性变差以及卷曲。此外，过高的孔隙率也不可取，因为这会导致胶粘时过度吸水。密度不均会造成变形、产生气泡和皱纹。

不足的强度会使印刷无法进行。涂胶时，变形和卷曲倾向应降至最低。总体而言，扉页纸应具有足够的抗弯曲和抗撕裂强度，因为它能确保出版物的耐久性。扉页纸分为两个等级：A（用于未印刷的扉页）和O（用于多色印刷的扉页）。

制作封面和裱糊书壳时，使用三种等级的封面纸：A（压光）、Б（哑光）、B（含有木浆纤维，强度低于A级和Б级）。这种纸张受潮后尺寸不得发生变化，并且应具有较高的抗张强度和耐折强度。

书脊衬纸的定量为210克/米^2。应具有弹性、紧密、挺括且不易折裂。

粘合书芯书脊时，使用强韧、未经施胶且未经压光的纸张，这种纸张应能很好地吸收胶粘剂。

覆面材料应符合以下需求：
– 具有较高的耐撕裂度、抗撕裂性和耐磨性；
– 具有足够的密度，以免过度吸收胶黏剂和油墨；

– 能够在较长时间内承受多次折缝；
– 具有耐水性和耐光性；
– 适用于印刷油墨和烫箔；
– 具有美观的外观 ляд тощо.

装帧材料的主要属性包括颜色、亮度以及艺术与技术元素，这些属性由出版物的用途和内容决定。按类型，装帧材料的覆面基材可以是织物、纸质或非织造材料 [19；35]。

通常，封面装帧材料的织物基底采用本色棉布——一种结实的平纹组织织物，可用于制作棉布装帧材料和漆布。也可使用杜克布（一种经过强烈上浆的厚棉织物，平纹组织较疏，用于制作高艺术价值出版物的整布封面）、粗纹棉布（一种结实粗糙、平纹组织较疏的棉织物，染成纤维的自然色，用于制作高艺术价值出版物的整布封面）以及雪纺（一种结实而轻薄的丝织物，用于粘贴环衬，也可作为粘贴用的芯条

）。棉布装帧材料是一种平纹棉织物，浸渍了淀粉胶粘剂、高岭土和染料的溶液。棉布装帧材料不用于需要长期使用的出版物，因为它容易弄脏，湿度过高时还可能发霉、腐烂。漆布是一种带硝化纤维素涂层的装帧材料，以本色棉布为基底，浸渍淀粉—高岭土溶液，并在正面涂覆硝化纤维素。它具有强度、耐水性、耐光性、耐热性和耐折性。外观类似皮革。它的硬挺度较高，因此需要使用黏性很强的胶粘剂。随着时间推移，这种学习材料会老化，导致硬挺度增加、变脆，折痕处发生破坏。

纸基封面材料包括：纸基漆布、纸基聚氯乙烯材料、特温材料等。纸基漆布是一种强度高的绝缘纸，由未漂白硫酸盐针叶木浆纤维制成，表面覆有一层硝化纤维素硫酸盐薄膜。其价格远低于布基漆布，通常用于制作小开本出版物的书壳。纸基聚氯乙烯材料是一种覆有聚氯乙烯涂层的材料，具有很高的耐水性、耐磨性和耐弯折性，但随着时间推移可能会出现裂纹。其外观类似皮革。特温材料是一种覆有乙烯基涂层的封面材料，颜色丰富，可承受超过2000次双向弯折。

非织物基材的覆面材料包括：网特科材料、西顿尼特、斯堪乙烯基材料、层合材料、马列尼特材料。网特科材料覆有淀粉—高岭土涂层，其非织物基材由相互粘合的涤纶和黏胶纤维组成。用于制作大众出版物的书壳。西顿尼特覆有硝化纤维素，外观与仿皮纸相似，用于制作大部头出版物的书壳。斯堪乙烯基材料覆有聚氯乙烯，性能类似纸基聚氯乙烯材料，用于装饰珍贵出版物的书壳。层合材料是一种复合书壳材料，由未粘合的非织物和纸张组成，用于制作艺术类和科学出版物的书壳。马列尼特材料的基材由低等级棉纱废料制成的非织物硝化纤维素幅材构成。

此外，还有无基材覆面材料——厚度为 0.2 至 0.45 毫米的塑料薄膜，用于制作纸张及文具类商品，而非图书出版物。

制作纪念册和礼品册的封面时，可以使用皮革。这种材料效果出众，但价格昂贵。最常用的是厚度为 0.4 至 1 毫米的光面山羊皮——萨菲安皮。除了普通萨菲安皮，还有黎凡特萨菲安皮，由山羊皮制成。正面带有压凸纹样的萨菲安皮称为沙格林皮。此外，还会使用厚实柔软的小牛皮（小牛皮）以及用麋鹿、鹿、绵羊和野山羊皮鞣制而成的油鞣皮（麂皮）[19]。

书芯装订使用金属丝、线、热熔线、纱布、书头带、书背包覆材料、胶黏剂等。

缝订采用印刷用金属丝或通用低碳钢丝，有时也使用黄铜丝。对于采用套帖方式装配、正文纸张克重不超过80克/米^2 的出版物，金属丝直径根据书芯厚度在0.4至0.7毫米之间变化。如果纸张克重大于80克/米^2, , 金属丝直径为0.45至0.7毫米。1000米金属丝的重量取决于金属丝直径，范围为5.9至39.45千克。采用金属丝装订时，可使用棉质印刷用纱布NIII以及数量为2至4枚的金属丝订书钉，具体数量取决于出版物高度。采用金属丝骑马订时，使用2至3枚订书钉（取决于出版物高度），金属丝厚度为0.4至0.85毫米（取决于书脊厚度）。对钉铁丝装订要求订书钉之间的距离不小于5毫米。

印刷业中使用的钢制金属丝应具有均匀的厚度、光滑有光泽的表面，并且柔软而有韧性。为防止腐蚀，金属丝可镀上一层薄薄的铜、锡、锌或光油。

书帖缝合还会使用棉线、合成线和热熔线。棉线由六股相互捻合、并经淀粉类物质浸渍的线组成。它们具有稳定的属性，几乎不会缠结或断裂，在缝合过程中不会割破纸张。合成线的强度是棉线的两倍，虽然明显更细且更经济，但价格更高，并且在缝合时可能割破纸张、缠结和拉伸。它们几乎不会断裂，也不会散丝。合成线由聚酰胺聚合物制成。棉线和合成线有时会结合使用。热熔线用于在书脊折缝处进行书芯粘合

。它们由涂覆聚丙烯的粘胶丝绸制成。使用热熔线可以实现装订过程的自动化 [19；35]。

印刷纱布是一种采用稀疏平纹组织的棉织物。分为НШ和БО两个等级。НШ纱布用于锁线机缝纫。它经过良好整理并浸渍胶黏剂，具有足够的硬挺度。БО纱布硬挺度较低，用于在书芯加工机组中粘贴书脊。尽管强度不高，但它能显著增强书脊。БО纱布的替代材料可以是微皱纸 [19]。

在书芯加工机组中将出版物粘贴到书脊上，以及无线胶订或热熔线装订时用于包边书脊，可以使用微皱纸。

在包脊布头机和用于粘贴书脊的机组中，使用定量为每平方米 60 至 80 克的硫酸盐浆纸张[2]。

篇幅超过 10 印张的出版物使用书头带，它是一种宽 13 至 15 厘米、带有 1.5–2 毫米加厚边缘的带子，由不同颜色的丝线、半丝线和棉线织成[19；35]。

印刷品的制作过程中也会使用胶黏剂，这些胶黏剂应易于均匀涂布，能够充分润湿材料，具有较快的粘合速度，颜色浅淡以免留下污渍，不与被粘合材料发生化学反应，不发霉、不老化等。所有装帧胶可分为以下几类：水分散体（乳胶型、聚醋酸乙烯乳液等）、水性胶液（骨胶、淀粉胶、糊精胶）、热塑性聚合物（热熔胶）、有机溶剂溶液以及热固性胶黏剂。植物源胶黏剂包括淀粉胶和糊精胶。动物源胶黏剂包括骨胶和酪蛋白胶。合成胶黏剂包括聚醋酸乙烯胶、环氧胶、以丁苯橡胶为基础的乳胶型胶、羧甲基纤维素胶、热熔胶，以及有机溶剂溶液型胶黏剂。总体而言，胶黏剂的选择依赖于印刷材料的特性和粘合条件。例如，粘合多孔纸时适宜使用黏度较高的胶，而粘贴弹性封面材料时则宜使用黏性更强的胶。

涂胶书脊时，可以使用具有良好弹性和高胶膜强度的装帧胶 [19]。

礼品书或艺术类出版物常使用丝带书签——一种宽度为 3 至 8 毫米的丝质书签，通常为红色。丝带书签也可以用厚纸或塑料制成，并饰有纹饰或饰章。

装饰封面材料时，会采用封面烫印箔压凸、上光和覆膜等工艺。

封面烫印箔用于通过压凸印制彩色或金属质感图像。烫印箔可以以纸张或涤纶为基材，是一种多层材料。它有彩色、青铜色、“纪念版”和全息烫印箔等类型。彩色烫印箔有多种颜色和色调，可用于实现印刷品丰富多样的装帧创意。其表面有哑光和亮光两种。烫印图案耐受外界因素的影响。青铜色烫印箔压凸后的视觉效果类似金色烫印，但会随着时间推移而失去光泽，因此很少使用。“纪念版”烫印箔光泽度好，且经久不暗；它能牢固附着在封面材料上。全息烫印箔通过反射光散射营造出图像的立体效果，其他性能则类似“纪念版”烫印箔。选择烫印箔时，应考虑其与其他烫印箔的相容性。以水溶液为基料制成的烫印箔，无法在以酒精溶液为基料制成的烫印箔上印制。影响烫印图案质量的因素包括：单位压力；烫印版温度；压凸速度和时间；覆面材料的种类、特性及含水率；烫印版上印刷元素的特性和面积；烫印箔的黏合层与承印材料表面的符合性；垫版材料的种类和厚度 [19；34；35]。

上光可用于进一步装饰印刷品，防止磨损，并增强强度和耐久性。按用途，清漆分为：底涂清漆（形成粘合层，以便后续涂布其他清漆或油墨）、哑光清漆、亮光清漆、耐磨性较高的清漆、用于借助超声波热封的清漆、用于借助微波设备热封的清漆、用于使被印刷包装材料更易或更难移动的清漆、用于压光的清漆，以及特殊用途清漆。清漆涂层既可涂布在干印张上，也可涂布在湿印张上，涂布设备可以是上光机或

上光机组。为此，可使用以下类型的清漆：印刷清漆（油基）、分散型清漆、紫外线固化清漆、挥发性溶剂型清漆。印刷清漆含有树脂、亚麻籽油、醇酸树脂、催干剂等，通过选择性吸收和不饱和化合物的氧化聚合而固化。分散型清漆的主要组件是苯乙烯-丙烯酸酯基聚合物。其固化通过水分吸收和蒸发实现；因此，个别聚合物颗粒彼此靠近，并随着毛细管压力增大，微粒相互结合形成均匀的薄膜。紫外线固化清漆分为自由基固化和阳离子固化两种（但不包括采用润版的胶印方式涂布的清漆——这类清漆通过自由基聚合固化）。挥发性溶剂型清漆通过酒精蒸发而固化。这类清漆的主要缺点是黏性过大，以及环境污染程度较高。

覆膜可提高学习材料的耐湿性、强度和耐久性，并赋予其光泽与美观的外观。装饰加工覆面材料时，采用合成聚合物薄膜。这些薄膜应具备强度高、无色、透明、弹性好等特点，不会导致印张卷曲和翘曲，在老化过程中变形尽可能小，且厚度均匀。覆膜有三种方法：用胶法、无胶法和转移法。用胶法是指在薄膜上涂布一层薄薄的胶粘剂，并在红外线照射下使其干燥。随后将薄膜与印张一起加热，再压合到印张上。该方法用于装饰第1、2、3、4型软封面出版物，以及第6、7、8、9型精装出版物和护封。所用材料包括醋酸纤维素薄膜、聚丙烯薄膜、聚对苯二甲酸乙二醇酯薄膜，以及胶黏剂（聚合物在挥发性有机溶剂中的溶液）和胶乳（聚合物水分散液）。胶粘剂的种类和成分根据薄膜和纸张而定。无胶覆膜是指将印刷品与热塑性聚合物或薄膜（聚对苯二甲酸乙二醇酯薄膜、聚酰胺薄膜、玻璃纸薄膜等）连接的过程，这些薄膜事先已涂有胶粘剂层。薄膜经加热软化后压合到学习材料表面。此方法用于装饰第5、7、8、9型精装出版物。采用转移法时，在印张上涂覆透明薄膜（聚对苯二甲酸乙二醇酯薄膜），

其基材随后会被剥离，并可重复使用。该方法用于装饰封面和护封 [19; 35]。

设备类型。 根据出版物的关键特性和工艺流程方案选择设备。

每项操作都可以选择专用设备。设备也可以是通用型的，并能够调整设置。

切开和修切纸张或装帧材料时，使用单刀切纸机。缺少专用设备时，也可用这些机器从三面裁切书芯。总体而言，单刀切纸机分为三类：小型（纸垛宽度不超过70厘米）、中型（不超过90厘米）和大型（超过90厘米）。切割方式也有两种：切垫式（刀具在行程末端切入位于纸垛下方的塑料部件，即切垫）和无切垫式（使用刀具和对刀进行切割）。单刀裁切机的参数包括：裁切长度、送料台平面至裁切线的最小和最大距离、前工作台宽度、压纸器压力、工作速度、送料台的最低和最高速度、主驱动的弹性、地面至工作台面的距离，以及机器重量。切纸机可配备以下辅助装置：“空气垫”（用于辅助手动移动或旋转纸垛的气动系统）、液压纸垛升降机、换刀装置、废料清除系统等。此外，还使用大量装置来机械化纸垛准备过程中的辅助操作。

纸张可手工折页，但通常采用机械方式完成这一操作。折页机分为四类：刀式、栅栏式、组合式和特殊作业型。栅栏式折页机通过带挡块的栅栏和转动滚轮进行折页。刀式折页分为四个步骤：预先对齐、侧向对齐、用刀形成纸环，以及用滚轮压紧折痕处。刀式折页装置通常用于组合式折页机。组合式折页机配有刀式和栅栏式折页装置：第一道折缝在栅栏式折页单元中形成，其余折缝则在刀式折页单元中形成。特殊作业型折页机用于折叠

由10–15张纸组成的纸叠，所有纸张一次冲压即可折叠。总体而言，折页机由自动输纸机、驱动装置、控制联锁系统和气动系统组成。

书帖的压紧和包装可使用包装压紧机进行。包装压紧机可分为以下几类：用于压紧并捆扎折好的纸张的包装压紧机、用于压紧书芯和书脊的书芯压紧机，以及用于压紧书籍的书籍压紧机。

为实现环衬、插图、帖的零散部分及其他附加部件的粘贴自动化，可使用粘贴自动机。为给粘贴了环衬的书帖包边，可使用包边机。自动机也可以采用组合式：先进行粘贴，再进行包边。

采用套帖方式进行书芯配页时，使用套帖锁线自动机或套帖锁线裁切自动机。采用配帖方式进行书芯配页时，使用配页机，这类机器应确保书帖顺序正确、配套齐全并能良好撞齐 [35；75]。

使用铁丝订书机进行书芯铁丝装订，包括单机式、套帖锁线式、配页锁线式，以及套帖锁线裁切联动机组中的铁丝订加工单元。

使用锁线机进行书芯线装订。锁线机可分为自动机（所有操作均无需操作人员参与）和半自动机（通常所有操作均已机械化，但书帖的供给和打开除外）；还可分为通用型（可使用不同针迹，在有或无书脊材料的情况下进行平装和精装订，适用于不同开本的出版物）和专用型（适用于采用简单平装针迹、不加纱布装订开本有限的出版物）。

根据工艺不同，无线胶订机器可包括以下主要组件和装置：将书芯送入输送机夹具的设备、整平装置、铣背工位、拉毛工位、用于在书芯背部涂布胶粘剂的涂胶装置、用于在书芯侧帖上涂布胶条的涂胶装置、干燥装置、冷却装置、封面输送与粘贴工位、包边工位、压紧装置、将书芯输出机器的设备、输送装置 [75]。

折叠和热熔线装订在折叠自动机上进行，该自动机可连接到刀式和组合式折页机。

书芯背部粘合可使用不同设备进行，例如连续式书芯粘合机 [35; 76]。建议在专用干燥装置中采用对流方式（使用室温空气或由风机送入的热空气）、辐射—对流方式（以空气以及红外和可见光波段的电磁波为热媒）或照射方式干燥书脊。干燥后，使用带液压压板驱动装置的压机压紧书脊 [35]。

书芯的三面裁切通常由专用切纸机完成，可分为以下类型：带旋转工作台的单刀切纸机、单工位三面切书机，以及用于逐本裁切书芯的切纸机。

书脊加工可在带有专用加工单元的流水线上进行，也可使用单机设备。书芯切口着色机通常由自动输纸机、切口润版单元、书口涂色单元、干燥装置和收纸输送机组成。切口烫金是通过在设备上压印特殊箔材来完成的；在该设备中，书芯切口经过打磨、抛光，必要时还要涂底漆，随后由耐热橡胶制成的加热辊将箔材压合到切口上。

书芯的书脊圆背可在圆背机、流水线书芯加工机组的加工单元以及圆背压槽自动机上进行。书脊圆背后，书芯被送去进行书脊压槽 [35; 76]。

在大型企业中，粘贴书签带通常由专用自动机完成，这些自动机可连接到用于加工精装改良型出版物的流水线。粘贴书头带、纸条和书脊材料可通过手工、半自动机、书芯加工机组或自动机完成 [35]。

总体而言，涂胶和干燥、书脊圆整、折缝压折、将加固元素粘贴到书脊等工序，可使用种类繁多的设备：仅用于执行一道操作的机器（涂胶机、书芯压紧机、圆整机

等）、用于两道操作的机器（涂胶—干燥机、圆整—覆合机等）、三道及以上工序设备、流水线[76]。

对于裁切印刷和未印刷的单张及卷筒产品、纸张、纸板、书壳及包边材料、纱布、聚合物薄膜，采用裁切准备设备：切纸机、切纸板机、纸板裁切机、卷筒分切机、织物裁切机。

书壳可采用手工、半机械化和机械化方式，在制书壳机上制作。现代制书壳机已实现全自动化，操作员只需监督过程、将机舱重新调试为生产新型号的书壳、供应坯料或更换书脊衬条卷筒，以及接收成品。大多数机器用于制作整面书壳。制书壳机按工艺过程的方向分类（工艺过程采用垂直、水平、组合式和旋转式运行），按书壳半成品的运动方式分类（间歇运动和连续运动），按速度分类（中速、高速、超高速）[35; 76]。

精装封面压凸机通常采用虎钳式结构：压力由两块压板产生，其中一块固定，另一块作往复运动。压机按结构（压凸平面为水平或垂直）、用途（加工大批量或小批量印件）、机械化程度（自动式、半自动式）、结构原理（虎钳式、平压式、轮转式）和工艺用途（轻型、重型）分类。所有压机通常由压凸机构、机架、箔材输送机构、模具加热装置、精装封面相对于模具的定位装置、压凸水深调节装置和驱动装置组成。

书芯插入书壳采用书芯自下而上垂直移动的原理。书芯插入机由以下机制和设备组成：书帖逐张供给装置、书芯中间打开并按厚度和开本定位的装置、带有用于运输书帖的书帖翼的垂直输送机、涂胶装置、配有书脊圆背装置的自动输纸机、插入前的书壳定位装置、书芯与书壳对齐装置

以及压紧装置、从书帖翼上取下书籍并将其送至收书装置的装置。这类机器按速度（低速、半自动和自动、高速）、组合程度（单机式和组合式）以及结构（带一个或多个书帖翼）分类 [76]。

将书帖插入书壳后，接下来进行书籍压书与干燥、压痕、包覆护封、整理书籍垛以及书籍产品包装。书籍压书由压壳机完成。压痕设备分为单项操作设备（供中小型企业使用）和组合式设备。应用较广的是连续式和周期式组合式压书压痕机，它们与插书机配套使用。书籍护封可手工包覆（使用封面覆膜机），也可由专用机器自动完成。书籍包装分为手工包装、机械化包装（使用配帖机、包装机和捆扎机）和自动化包装。

在装订生产中，还会采用流水线工艺线，这些生产线具有以下优点：设备按照操作顺序依次布置，工序同步，借助运输传送装置及时传递半成品，按出版周期将半成品投入流水线，在其上进行操作并将其输出。流水线根据产品的同质性（稳定流水线和可变流水线）、生产能力（同步流水线和非同步流水线）、半成品运动的连续性（连续流水线和间歇流水线）以及自动化和机械化程度（机械化、综合机械化、自动化流水线）进行分类。

上光可采用专用的全表面上光机器、用于全表面或局部上光的胶印机器润湿系统，或印刷机器的独立上光单元。将薄膜压合到单张纸学习材料上的设备称为覆膜机 [35；76]。

工艺与经济计算。根据相应公式确定所需材料数量、部件尺寸、使用寿命等。根据经济计算，选择出版物 [23, 35] 的最佳制作方案。

工艺过程方案展现了工艺操作之间相互关联的执行顺序。装订工艺方案取决于出版物的技术参数（篇幅、开本、构造特点、出版物用途）、印数、预期成本以及印刷企业的技术装备。工艺方案分为典型方案和个性化方案。也可以根据印刷品设计与制作的具体条件，对典型方案进行适应 [35; 56]。开发任何信息技术的主要目的，都是将某个具有社会意义的过程技术化，即使用计算机设备，有目的地影响其进程。此时的初始数据是某些系统化程度不足的信息。将进程高度划分为阶段，并确保系统完整性、规律性和明确性，有助于使其更加合理、完整、标准化和统一化，进而实现规划与预测。

为了将上述知识形式化，适合开发印后工艺设计本体。本体的结构直接影响确定主要任务或次要任务最佳解的能力。创建本体采用迭代方法，即分阶段对本体进行训练（填充）。可以持续添加新的班级及其间的关系。随着模型不断扩展，需要通过删除过时的班级来进行优化。

本体主要有以下几种类型：

– 元本体：用于描述不属于某一领域的一般概念；

– 领域本体：对领域术语库进行形式化描述和定义；

– 特定任务本体：确定所提出任务的术语库；

– 网络本体：用于描述领域对象或任务的行动结果。

构建本体的基本原则包括：

– Guarino 提出的“形式本体”，包含部分理论、整体性、相等性、依赖关系和泛化理论，并提出以下构建原则：需要理解整个领域，明确识别，进行结构分类，确立角色；

– Uschold 和 Grüninger 提出的手工构建本体的骨架式方法论，包括：确定目标和范围、构建本体、评估、编写文件，以及确定管理前述阶段的原则；

– 本体设计模式（ODPs）：用于确定结构、术语和语义。

总体而言，模型的构建由几个阶段组成：
– 积累有关主题区域的知识；
– 分解：将研究过程划分为独立的元素，这些元素将成为模型的基础；

– 识别元素；
– 分类：确定班级及其所属元素（班级层级结构）；

– 属性描述；– 赋予属性值；– 创建联系；–
扩展并具体化本体；– 审核；– 实施本体 [33]。

领域描述通过班级实现——它们是本体模型的基本结构单元，可以包含其他班级和/或实例。班级是一般概念、集合以及对象组。实例充当主体。实例与其所属班级之间的联系由谓词 rdf: type 指定。本体中的班级按分类体系（层次分类）组织。例如，封面和装帧是屋面材料种类班级的子类，而该班级又是结构特征的子类：屋面材料种类 SubClassOf 结构特征，结构特征 SubClassOf 印后进程设计。关系属性定义实例之间现有的联系。例如：篇幅较大决定了配帖组帖。数据属性定义特定班级实例的具体特征。例如，对于篇幅班级中的小篇幅实例，页数为 64。

术语表和叙词表对于描述同样重要。编制得当的本体词典有助于简化后续创建本体的过程 [73]。

要记录始终为真的陈述，可以使用公理。Protégé 5 编辑器支持使用以下公理：公理

类（SubClassOf、EquivalentClasses、DisjointClasses 等）、对象属性公理（SubObjectPropertyOf、EquivalentObjectProper- ties、InverseObjectProperties、FunctionalObjectProperty 等）、数据属性公理（SubObjectPropertyOf、EquivalentDataProperties、DisjointDataProperties 等）、个体公理（ClassAssertion、ObjectPropertyAssertion、DataPropertyAssertion、NegativeObjectPro- pertyAssertion 等）、注释公理（AnnotationAssertion、SubAn- notationPropertyOf、AnnotationPropertyDomain、AnnotationProper- tyRange）[78]。

1.4. 印后工艺设计的功能建模

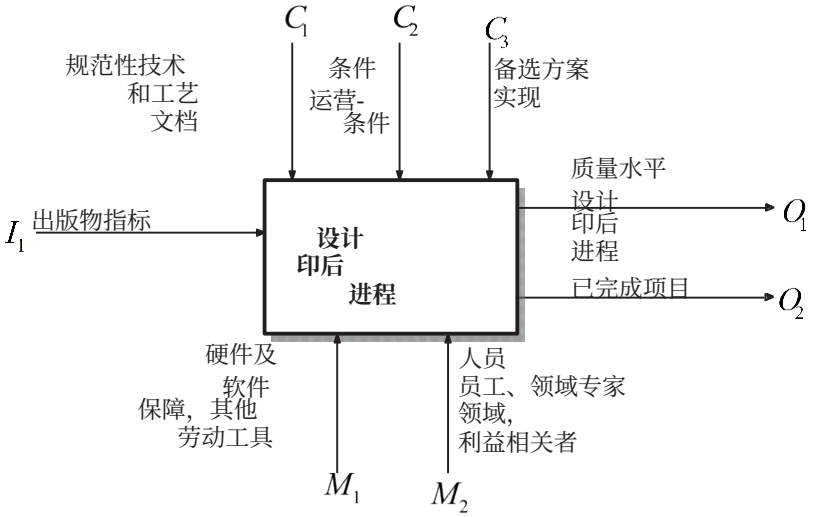


图2. IDEF0印后工艺设计模型的A-0上下文图

我们将采用 IDEF0 [40 方法进行印后工艺设计的功能建模。77] 上下文图如图 2 所示。其中，系统的主要功能是印后工艺设计，系统与周围环境之间的关系由边界箭头表示：I_1—出版物指标，C_1—规范技术和工艺文件，C_2—使用条件，C_3—实施方案，

O_1—印后工艺设计质量水平，O_2—已完成的项目， M_1—硬件和软件、其他劳动工具，M_2—工作人员、相关领域专家及利益相关者。

我们来分析 IDEF0 模型边界箭头集合各组成部分的信息负载:

“输入”类型的边界箭头（Input）:

– $_1I$（出版物指标）。 图书出版物的关键指标包括类型、类别、开本和篇幅。

“控制”类型的边界箭头（Control）:

– $_1C$（规范技术和工艺文件）。 规范技术和工艺文件包括：技术要求和法律条文，尤其是法律、标准、技术条件、实践准则等。

– $_2C$（使用条件）。使用条件包括成品出版物的术语和使用强度。

– $_3C$（实施方案）。 通过对备选方案集合上的模糊关系进行评估所确定的帕累托最优备选方案。

“输出”类型的边界箭头（结束）:

– $_1O$（印后工艺设计质量水平）。以创建项目为目标的活动，其结果是相应的质量水平。

– $_2O$（完成的项目）。确定所有旨在实现印后工艺的工艺操作的进程。

“机制”类型的边界箭头（机制）:

– $_1M$（硬件和软件、其他劳动工具）。设计过程要求使用现代技术和软件手段，包括专用的专业化软件。

– $_2M$（工作人员、领域专家、利益相关者）。印后工艺设计需要由熟悉相关流程实现细节的高素质员工参与，以便评估输出数据并预测结果。也可以邀请专家参与，包括科研人员和利益相关者（客户、营销人员等）。

IDEF0模型的A0第一层分解图包含以下书芯:

– 出版物结构确定（确定出版物构造）；

– 成品要求确定（确定成品出版物的需求）；
– 工艺操作顺序确定（确定工艺操作的顺序）；
– 加工模式确定（确定加工模式）。
IDEF0模型A1分解的第二层图：
– 装订方式选择（选择配帖方式）；
– 连接方式选择（选择装订方式）；
– ВПМ（封面材料选择）；
– ПДЕ（附加部件设计）。
IDEF0模型A2的第三层分解图：
– ВВКБ（书芯要求确定）；– ВВДЕ（附加元素要求确定）；– ВВПМ（封面材料要求确定）；– ВВО（装饰要求确定）；– ВВПБО（书芯封面覆盖要求确定）；– ВВВБП（书帖插入精装书壳要求确定）；– ВВП（包装要求确定）。

IDEF0模型A3第三层分解图：
– ВПОБП（装订工艺操作顺序确定）；

– ВПОПП（精装工艺操作顺序确定）。

IDEF0模型A4的第三层分解图：
– VROБП（装订加工过程处理模式的确定）；

– VROПП（精装加工过程处理模式的确定）。

阶段2。印后加工过程设计因素模型的综合

2.1. 印后加工过程设计因素之间关系的语义网络开发

基于专家判断，形成某个因素集合 $R=\{R_1, R_2, ..., R_n\}$，其中包含最重要的因素。为识别过程的特征因素，邀请学术界代表和实践专家参与。采用专家评估能够获得构成影响过程执行质量的因素值集合中各因素重要程度的定量评估。

构成后续领域描述基础所必需的已确定因素之间的联系，定量评估其权重

并据此确定其主导性，这些联系基于图论和语义网络来确定并可视化。语义网络的节点表示概念的语义，即因素；这些因素随后将以抽象语言变量的形式呈现。弧线表示它们之间的功能关系（语义关系）或联系。语言学（语言变量语义）与数学（作为图的一种形式的网络）相结合，一方面可以使用自然语言描述研究过程的知识库，另一方面则能够运用形式化方法和模糊逻辑进行研究，其最终目标是进行预测评估。语义网络的节点由集合*R*中的元素构成，弧线则表示具有特定语义负载的功能联系(R_i, R_j)。

语义网络模型为进一步构建领域描述奠定了基础，直观且易于理解，因为它与人们对人体记忆生理机制的现代认识相类似 [59]。

2.2. 借助谓词公式对因素间关系进行形式化

谓词逻辑是数理逻辑的一部分，其形式语言由项及其相互关系——谓词构成。作为构词元素，项包括谓词语言中的以下构造：常量（具体的现实对象）、变量（概括的可能对象，在此指因素）、函数（由圆括号限定的一系列常量或变量）、函子（置于函数前、作用于对象后返回特定值的操作符）。谓词是指一种逻辑函数：当其参数之间的关系有意义时，该函数取值为“真”；反之则取值为“假”。

因此，使用谓词逻辑在于推导因素之间的所有关系，同时考虑语义网络的结构 [59；61；72]。

我们来界定后道工序设计中各因素的影响：1 2–R R — 确定；1 3–R R — 确定；1 4–R R — 确定；1 5–R R — 决定；1 6–R R — 决定；1 7–R R — 形成；1 8–R R — 决定；2 5–R R — 确定；2 6–R R — 影响选择；2 7–R R — 形成；2 8–R R — 决定；3 5–R R — 影响选择；3 8–R R — 决定；4 6–R R — 确定；4 7–R R — 形成；

$_{56}$–RR — влияние выбора; $_{57}$–RR — формирование; $_{67}$–RR — формирование; $_{85}$–RR — определение; $_{86}$–RR — определение; $_{87}$–RR — формирование.

Для формализованного описания семантической сети различных элементов между собой, используется предикатная формула, которая включает следующие конструкции: ∧ — логическое «и»; ← — «если»; ∀ — квантор общности (для всех); ∃ — квантор существования (хотя бы один существует) [59].

(∀iR) [∃ (1R, издательская информация) ← определение (1 2,R R) ∧ определение (1 3,R R) ∧определение (1 4,R R) ∧определение (1 5,R R) ∧ определение (1 6,R R)∧конструкция (1 7,R R) ∧определение (1 8,R R)];

(∀iR) [∃ (2R, структурные особенности) ← определение (2 5,R R)∧влияние выбора (2 6,R R) ∧формирование (2 7,R R) ∧приводит (2 8,R R)^ по.....определение (2 1,R R) ∧ согласно.....выбор (2 3,R R)];

(∀$_i$$R$) [∃ ($_3$$R$, условие использования) ← влияние выбора ($_{32}$,RR)∧ влияние выбора ($_{35}$,RR) ∧ приводит ($_{38}$,RR)];

(∀$_i$$R$) [∃ ($_4$$R$, производственный тип) ← определение ($_{46}$,RR) ∧формирование ($_{47}$,RR) ∧ по..... определение ($_{41}$,RR)];

(∀iR) [∃ (5R, материал) ← влияние выбора (5 6,R R) ∧формирование (5 7,R R) ∧зависит от (5 1,R R) ∧ по.....определение (5 2,R R)∧ согласно.....выполнение выбора (5 3,R R)∧зависит от (5 8,R R)];

(∀iR) [∃ (6R, тип оборудования) ← формирование (6 7,R R) ∧зависит от (6 1,R R) ∧согласно.....выполнение выбора (6 2,R R) ∧по.....определение (6 4,R R) ∧ согласно.....выполнение выбора (6 5,R R) ∧ по.....определение (6 8,R R)];

(∀iR) [∃ (7R, технология и экономические расчеты) ← формирование (7 1,R R) ∧формирование (7 2,R R) ∧ формирование (7 4,R R) ∧ формирование (7 5,R R) ∧формирование (7 6,R R) ∧формирование (7 8,R R)];

(∀iR) [∃ (8R, технологическая схема) ← определение (8,R$_5$R) ∧определение (8 6,R R) ∧ формирование (8 7,R R) ∧ по.....определение (8,R 1R)∧ по.....определение (8 2,R R)∧ по.....определение (8 3,R R)] [61].

2.3. Использование иерархического анализа для построения модели влияния факторов на качество проектирования технологии

Помимо определения необходимых языковых переменных, современные производственные условия также требуют четкого понимания приоритетности этих переменных. Только при наличии полного представления о рассматриваемых факторах можно всесторонне отразить необходимые технологии и интеллектуальные составляющие.

为基于语义网络确定各因素的优先级层次，我们采用层次分析法。首先构建可达矩阵*A*，其二进制元素按以下规则确定：

$$R_{ij}=\begin{cases}1, \textit{якщо з вершини } i \textit{ можна попасти у вершину } j\\ 0, \textit{в іншому випадку}\end{cases}. \qquad (3)$$

相对于顶点 $R\ (i, , ..., n)$，顶点 R

$_j$ $=1$ 2 $_i$ $=1$ $(j, ,$ 2 $..., n)$ 的可达性由存在某种类型的通信（直接或间接）所决定。将可达顶点的子集记为 $K(R_i)$。其中，若从顶点 R_i 可以反向到达顶点 R_i，则后者是前者的前驱。前驱顶点的集合形成子集 $P(R_i)$。所形成子集 $H(R_i)=K(R_i)\cap P(R_i)$ 的顶点交集，在 $P(R_i)=H(R_i)$ 的条件下，确定与这些顶点相对应的因素作用的主导性，并通过分析所谓的迭代表加以确定。对语义网络的元素执行上述操作后，可获得一个多层模型，该模型反映因素作用对所分析工艺流程的主导性 [58]。

基于综合得到的语义网络，按照原则（3）构建可达矩阵。为便于映射，宜将矩阵置于表中，并添加因素标识。

为进一步根据可达矩阵确定因素优先级，构建迭代表，其中包含四列，*i* — 因素集合中的因素序号。其中，构建迭代表的$K(R_i)$列时，使用可达矩阵各行中的数据；构建$P(R_i)$列时，则使用该矩阵各列中的数据。在$K(R_i)\cap P(R_i)$列中，列出$K(R_i)$与$P(R_i)$共有的因素[58]。基于所得数据，综合构建因素对印后工艺设计质量的优先影响模型。

因此，最高优先级属于因素 R_1（出版物指标），从技术角度来看，这是合乎逻辑的，因为出版物的种类和类型、出版物开本及其篇幅，确实是制定印后工艺实施方案时的决定性因素。第二级因素为 R_3（使用条件）和 R_4（生产类型）。优先级第三的是因素 R_2（结构特点），第四的是 R_8（工艺流程图），

第五的是 R_5（材料），第六的是 R_6（设备类型）。优先级最低表明因素 R_7（技术与经济计算）具有从属性质。

2.4. 采用排序方法构建因素对印后工艺设计质量的优先影响模型

通过排序方法确定或验证印后工艺设计因素的优先级。该方法通过分析各个因素之间的关系，综合构建树状模型。需要指出的是，这些关系分为两类：影响和依赖关系，分别代表直接和间接作用。这种方法能够使可视化结果更贴近研究过程的实际运行状况。同时，为每种关系类型赋予相应的数值指标，以便后续进行数学评估。

本研究宜考虑以下定义和论述。

定义 1. 任何印刷生产工艺流程都包含一定数量的因素，这些因素对其实现质量产生决定性影响，进而影响印刷产品的质量。

鉴于印刷业中的每个进程都包含一定数量的影响其质量的因素，设 $D=\{d_1, d_2,\ldots,d_m\}$ 为任意工艺流程集合，而 $R_m=\{r_{m1}, r_{m2},\ldots, r_{mn}\}$ 为影响具体进程质量的因素集合，其中 n_m 为因素数量，m 是第 m 个工艺流程的因素数量。其中：

$$C(S_k)=\bigcup_{j=1}^{n}\omega(S_{jk}),\quad (k=1,2,\ldots,m), \tag{4}$$

其中 $C(S_k)$ — 第 m 个过程的质量函数值；$\omega(S_{jk})$ — 第 j 个因素为第 k 个工艺过程带来的附加质量权重指标。因此，定义如下：

$$(\exists p)(\forall r)C(r_k);\quad d\in D;\quad r\in R. \tag{5}$$

定义 2。因素的等级和优先级由权重系数确定。在任意因素集合中，至少可以找出一个优先因素。

也就是说，对于因素权重集合 $\{\}_{1\ 2,\ ,\ldots,\ m\ m\ mn}W\ w\ w\ w=$ ，若 $(\ )$ $\{\}_{1\ 2,\ ,\ldots,\ m\ m\ mn}\ P\ w\ max\ w\ w\ w\ =$ ，则有：

$$(\exists p)(\forall w)P(w);\ d\in D;\ w\in W. \tag{6}$$

命题1. 因素之间关系的存在，是将其以图的形式进行形式化映射的前提。

命题2. 对基于专家判断构建的初始图形模型中因素之间的影响和依赖关系进行考量与分析，可以确定因素初始等级。

命题3. 在初始图中对因素进行比较时，综合得到的多层模型仅显示它们之间的优先性。

命题4. 通过创建并处理成对比较矩阵，以及计算矩阵主特征向量的归一化分量，可以确定m阶印刷生产工艺流程中各因素的最终权重值，从而确定其等级和影响程度。

定义3。按归一化权重值递减顺序排列的因素集合中，不存在对工艺流程影响程度完全相同的因素。

如果 $(\ )=\ \ >\ \ _{+1\ j\ j}A\ w\ w\ w$ 则对于 $(\ )1,2,\ldots\ 1j\ n=\ \ \ \ \ -$ ，以下记录是正确的：

$$(\forall w)A(w);\ \ w\in W. \tag{7}$$

根据命题1–4，印刷生产第 m 个工艺流程的因素优先影响模型综合，是通过提取分析过程中的特征因素，创建、分析并处理输出图形模型来实现的；该模型依据专家判断确定了因素之间的联系。

排序方法以数值指标为基础，这些指标涉及因素之间的影响次数、依赖关系及其相应的权重系数。在此，我们区分直接作用，称之为一阶影响，以及间接作用，即二阶影响。我们也将区分依赖关系，并以类似方式为其设定一阶和二阶重要性等级。

为计算因素直接和间接影响的总权重值，以及它们对其他因素的综合依赖关系，引入相应的符号。设 $_{ij}k$ 表示影响或依赖关系的数量，适用于第 j 个因素 1,...,)j n；

iw 表示第 i 类的权重。索引的数值按如下方式定义： =1 i 表示一阶影响， =2 i 表示二阶影响， =3 i 表示一阶依赖关系， =4 i 表示二阶依赖关系。假设两类影响的权重均为正，即 $_1>0$w、2 1 / 2w w= ；相应地，依赖关系的权重为负，即： $_3<0$w、4 3 / 2w w= 。设 ijR 表示按所有类型关系的权重总和计算的因素综合权重值。那么，计算公式为:

$$R_{ij}=\sum_{i=1}^{4}\sum_{j=1}^{n}q_{ij}w_i, \tag{8}$$

其中 n — 研究过程中因素的编号。

根据初始条件 $_3 0w<$ 和 $_4<0w$，因此 $_{3j}$ $0R<$ 和 $_{4j}<0R$。为了将权重值“移至坐标原点”，也就是获得附加值，应按照以下关系将所有类型关系的积分图形映射直方图向上移动:

$$\Delta_j=max\left|R_{3j}\right|+max\left|R_{4j}\right|,\left(j=1,2,...,n\right). \tag{9}$$

根据给定条件，可得因素最终权重值的公式:

$$R_{Fj}=\sum_{i=1}^{4}\sum_{j=1}^{9}\left(k_{ij}w_i+\Delta_j\right), \tag{10}$$

其中 ( ) Δ = $_j$maxR maxR j n ;[3 + 58]。 4 , =1,2, [30..., j j

数值 $_{Fj}R$ 是权重排序的依据，即确定工艺过程实现质量因素的层级。根据排序结果，利用所得权重值综合图形模型，这些权重值反映了各因素对过程影响的优先级。

为实现该方法，针对印后加工过程设计的每个因素，基于构建的语义网络，建立其与其他因素之间的层次关系树，同时考虑直接影响和间接影响，以及直接依赖关系和间接依赖关系 [30; 58; 59]。

通过排序方法确定因素的权重值，并进一步明确其优先级。因此，原本处于同一层级的因素 R_3 (使用条件)和 R_4 (生产类型)分别获得了第二和第四优先级，

而R_2(结构特点)这一因素则在模型中移至第三位。其他因素的优先级仅得到进一步确认。

阶段 3. 后印刷流程设计质量影响因素优先级模型优化

3.1. 根据萨阿蒂相对重要性标度构建因素两两比较矩阵

因素权重值的优化及模型综合通过多准则优化和两两比较方法实现。基于排序法初步确定工艺流程因素的权重值，可获得较为粗略的结果，仍需专家进一步处理。基于萨阿蒂相对重要性标度构建的层次分析法，能够确定更精确（经优化）的权重值；该方法需要构建成对比较矩阵、计算其主特征向量的分量并进行归一化，还要依据关键准则检验结果。优化后，研究过程得以进一步细化，这有利于后续实施。

为此，构建一个方形互反矩阵——成对比较矩阵（МПП），其阶数由所分析的因素数量决定。其构建算法如下：将可达矩阵第一列中的各因素与矩阵顶行中的各因素分别进行比较，比较其影响程度。比较时还需考虑因素排序后得到的权重值。在МПП中每一行与各列的交点处，填入该因素的优先性数值，并采用对象相对重要性量表（表5）。例如，对于相互比较的两个因素（如r_i和r_j），根据它们的重要性及其对印后工艺设计的影响程度，可在表中查得成对比较矩阵相应元素在位置（r_i，r_j）处的建议值。显然，按照这一算法，МПП的对角元素均为1。

成对比较矩阵的下半部分填入倒数值。例如，在位置（$r_{i\ j}$ 1, 1 3, ,r）依次填入 / / / /。1 5, 1 7, 1 9

当准则权重之间的差异较小时，使用成对数值 2、4、6、8 及其倒数 [58；59；68]。

表5

对象相对重要性尺度

重要性 重要性	比较准则	说明关于 标准的选择
1	对象同等重要	不存在优先性 r_i 高于 r_j
3	一个对象略微 优先于另一个对象	有理由认为存在 弱优先性 r_i 高于 r_j
5	一个对象优于 另一个	存在显著优先性的依据 显著优先性 r_i 高于 r_j
7	一个对象显著 优先于另一个对象	存在明显优先性 优势 r_i 优于 r_j
9	一个对象绝对 占优 其他	绝对优势 r_i 优于 r_j 并非呼叫 拥有мніву
2, 4, 6, 8	折中中间 值	辅助比较评价

3.2. 成对比较矩阵主特征向量分量的定义

主特征向量 $(R_1, R_2, \ldots, R_n)$ МПП定义为矩阵每一行各分量的几何平均值:

$$R_i = \sqrt[n]{a_{i1} \cdot a_{i2} \cdot a_{in}} \quad i = \overline{1,n}, \tag{11}$$

其中 n — 所使用因素的数量。

为获得成对比较矩阵的主特征向量（即优先级向量），我们采用 Saaty 提出的方法 [55]。运用仿真建模理论的思想，借助程序《系统分析中的二元比较法仿真建模》 [57], 进行上述方法的计算。该程序由乌克兰印刷学院计算机科学与信息技术系开发。加载程序后，会显示一个对话框形式的界面。“请输入准则数量”选项用于确定因素数量，然后点击“设置”按钮。“请输入准则名称”——输入因素的数字编号，然后点击“应用”。在“准则偏好的专家评估”窗口中，用成对比较矩阵的元素填充表格，然后点击“应用”。处理结果显示在“中间结果输出”窗口中，其中的 *En* 列展示了归一化向量的组件

R，这些组件标识了所研究过程各因素计算得出的权重值。

3.3. 成对比较矩阵归一化向量各组件的确定

将主特征向量各组件的值$_nR$ МПП [58; 59; 68], 归一化，得到任务求解的初步结果：

$$R_{in} = \frac{\sqrt[n]{a_{i1} \cdot a_{i2} \cdot a_{in}} \quad i = \overline{1,n}}{\sum_{i=1}^{n} \sqrt[n]{a_{i1} \cdot a_{i2} \cdot a_{in}}}. \tag{12}$$

为便于表示因素的权重值，将向量$_nR$的优化组件乘以任意系数k。设500k =。

将成对比较矩阵右乘向量$_nR$，即可计算因素权重值的一致性。计算结果得到归一化向量$_{1n}R$。

成对比较矩阵的特征向量$_{2n}R$的各组件，可通过将向量$_{1n}R$的各组件分别除以向量$_nR$得到。

3.4. 根据成对比较矩阵主特征向量的最大值、一致性指数和一致性比率分析优化结果

正互反矩阵 $_{max}\lambda$ 的最大特征值 A 定义为向量各分量的算术平均值 $_{2n}R$。

所得解决方案的评估由一致性指数IU 确定，该指数按以下公式计算：

$$IU = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1}. \tag{13}$$

将获得的值与一致性指标的基准值——随机一致性指标RI 进行比较。若计算所得的一致性索引值IU不超过根据所分析因素数量选取的随机一致性指标RI 基准值的 10%，则结果可视为令人满意：

因此，为确认所设任务求解的适切性，必须满足以下不等式0,1*IU* *RI* < × 。

下表列出了不同阶数矩阵的随机一致性指标值，其中矩阵阶数对应分析对象（因素）的数量，并列于第一行；各阶数对应的一致性指标参考值列于第二行。

表格 я 6

不同阶数矩阵的随机一致性指标值

数量 对象	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
参考模型值 指数	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,54	1,56	1,57

此外，结果还通过一致性比率进行评估，其数值由以下公式得出：*RU IU RI*= 。如果0,1*RU* ≤ ，则可认为成对比较结果令人满意。这表明过程具有足够的收敛性，且专家对矩阵中所示因素的成对比较判断具有良好的一致性。

当一致性指数和一致性比率的值不令人满意时，应重新审视因素间关系的初始图， уточ核相应成对比较的数值，也就是说，需要解决某个逆问题，并依据上述准则检验其解的可靠性。

在此上下文中，以下推理可能颇有意义。如果成对比较矩阵的最大特征向量值和一致性比率均未超出允许范围，则可将其视为优化所得层次模型的准则，该模型描述了各因素对印后工艺设计效率的影响。根据这些值，可以确定层次模型与实际情境的适切性，以及其与专家对因素重要性的评估是否一致 [68]。

根据 最大值 λ =8 483, , =0,069*IU*。8阶矩阵的指标*RI* 的标准值为1,41，不超过一致性指标*IU* 的10%。因此，不等式0,1*IU RI*< ×成立，且

这证实了该任务解的适切性。$0{,}049RU =$ ，因此可以认为成对比较的结果是正确的。

3.5. 输出向量与归一化向量各分量关系的可视化。构建影响印后工艺设计质量的因素优先影响的优化模型

为根据所获得的模型得到因素的权重值，按照因素的主导程度，从最低等级开始，为其赋予条件数值标记等级。设最低等级的权重为20个条件单位，每个后续等级相对于前一个因素增加20个条件单位。所得因素数值以输出向量的分量形式表示 $_0R$，其排列顺序与矩阵中的排列顺序一致。

根据以向量表示的权重值 $_nR$ 和 $_0R$，构建直方图和对比图。

对比图形映射表明，尽管通过因素排序方法计算得到的向量组件与应用成对比较方法所得的向量组件在权重值上略有差异，但二者实质上反映了因素的先后顺序及其内在逻辑。这使得可以将归一化向量的权重组件用作综合优化模型的基础，以确定所选因素对印后加工过程设计质量的优先影响。

优化使所研究过程各因素的权重值更加明确，并细化了每个因素的影响程度。优化结果证实了研究的可靠性，且未改变因素优先级顺序[68]。

经过详细分析并比较原始向量与归一化向量后，综合得出一个优化模型，用于确定各因素对过程的优先影响。该模型为设计备选方案以及计算技术过程、其各阶段或各项操作的最优实现方案提供依据，其中各因素按重要性权重系数排序。

第 4 阶段：确定印后工艺设计实现的最优备选方案

4.1. 基于准则线性聚合的多因素方案选择

根据对问题的认知深度，问题可分为三类：结构化问题、非结构化问题和结构不良问题。在结构化问题中，现有依赖关系已得到充分明确，因此可以用符号和数字表示，并最终得出数值成绩。非结构化问题仅包含对资源、特性和特征的描述，而它们之间的定量依赖关系尚不明确。结构不良问题则同时包含定性和定量元素，其中问题的定性、不确定且鲜为人知的方面呈现主导趋势。

确定所提出问题的类别，有助于选择解决问题的方法。结构良好的问题可通过运用运筹学研究方法论来解决；非结构化问题可借助启发式方法解决；而结构不良的问题则通过系统分析来解决。

鉴于上述事实，可以得出结论：确定图书出版物印后加工设计最优备选方案的问题属于结构不良问题。因此，借助系统分析来确定解决该问题的备选方案。

生成备选方案集合，使得后续能够从中选择最优备选方案。所构建的备选方案集合反映了实现既定目标的可能方式。选择最优备选方案时，应考虑约束条件和最优性准则 [59]。

研究过程中，确定了所分析工艺流程中各因素的权重值，并构建了其优先影响模型。所得信息是规划印后工艺设计实施策略的基础，该策略在于选择最优备选方案。这将使我们了解所需的劳动强度以及各因素的重要程度。

所提出任务的求解通过多准则（在本例中，因素充当准则，因此是多因素）优化来实现。此时只需使用——

主导因素，这源于帕累托原理[22], ，其核心是使用彼此互不支配的因素，这些因素构成帕累托集( )P D ，其中nD R⊂ 是可行解集。权重值明显较低的因素则会直接被舍弃。

此前合成的语义网络是构建成对比较矩阵的基础。对该矩阵进行处理后，可得到条件权重值，用以确定因素数值优先级，即这些因素对工艺过程的重要程度。接下来，计算并确定印后工艺设计实施的最优（在备选方案中）方案。

多准则优化函数 ()()()()= 1 ,...,nrxrxrx在集合 B 上，需选出效用函数的最大值 () max,ixBrx→ ∈ 1,= .in因此，根据准则线性折叠方法，各个目标泛函1,...nr r 的合并按公式 [25； 59]:

$$R(w,x)=\sum_{i=1}^{n} w_i r_i(x)\to \max_{x\in D};\ w\notin W, \tag{14}$$

$$W=\left\{w=(w_1,...,w_n)^T;\ w_j>0;\ \sum_{i=1}^{n} w_i=1\right\},$$

其中 iw — 帕累托集合的因素权重。

对于效用和偏好相互独立的因素，存在如下效用函数 [25]:

$$U(x)=\sum_{i=1}^{n} w_i u_i(y_i), \tag{15}$$

其中 ( )U x — 某一备选方案 x 的多准则效用函数 ( )(0 1)U x ≤ ≤ ； iw — 第 i 个准则设定的权重值，其中 0< <1 ,iw ( ) ∑ i =1 ； i i i w u y — 第 i 个准则的效用函数 ( )(0≤ ≤1)i iu y；iy — 备选方案 x 在第 i 个准则下的值 [18]。

为实现所构建的任务，需要执行以下行动：

1. 仅考虑优先级最高的因素，形成帕累托集： 1R — 出版物指标（188 计量单位）； 3R — 使用条件（105 计量单位）； 2R — 结构特点

（74 计量单位）； $_4R$ — 生产类型（49.5 计量单位）。优先级明显较低的因素将被舍弃 [25; 54; 59]。

2. 设定所研究过程的三种备选实现方案，分别标记为$_{1\,2\,3}, , .AAA$根据每个选定因素的重要程度，编制备选方案评估表。对于给定的备选方案，每个分析因素的重要程度以百分比表示。可能的组合有很多（表7）。实际值取决于具体的生产任务。其中，同一因素的所有备选方案所占比例总和不得超过100%。

表7

因素值组合

因素值组合的百分比			
10–10–80	20–10–70	30–10–60	40–10–50
10–20–70	20–20–60	30–20–50	40–20–40
10–30–60	20–30–50	30–30–40	40–30–30
10–40–50	20–40–40	30–40–30	40–40–20
10–50–40	20–50–30	30–50–20	40–50–10
10–60–30	20–60–20	30–60–10	50–10–40
10–70–20	20–70–10	60–10–30	50–20–30
10–80–10	70–10–20	60–20–20	50–30–20
80–10–10	70–20–10	60–30–10	50–40–10

3. 创建成对比较矩阵，对根据 Saaty 对象相对重要性标度评估的因素权重值进行比较。

4. 使用《系统分析中的二元比较法仿真建模》程序 [57] 对成对比较矩阵的主特征向量进行规范化。规范化后获得优化的因素权重值。设定规范化准则。

通过检验以下不等式来验证问题解的正确性$< 0{,}1\times \quad IU\ RI$和 $0{,}1RU \le$，其中RI — 4 阶矩阵的随机一致性指标（表 6），$0{,}9$。$RI =$

4. 根据帕累托集合中的因素，确定每个已设计备选方案的效用函数。

5. 确定三个拟议备选方案的多准则效用评价。

将值代入公式 (15) R_2: $()=4;$ $=$ $_{i\,i\,ij}nuyu$—第 j 个备选方案的效用 $()j=1\,2\,3$ ，，按 i 个因素 $()i=1\ldots4,$ ，，得到如下结果:

$$U_j=\sum_{i=1}^{4}w_iu_{ij};\ j=1,2,3, \tag{16}$$

其中 $_jU$ — 第 j 个备选方案的多因素效用评价 .

根据公式（16）可建立如下关系:

$$U_1=w_1\times u_{11}+w_2\times u_{21}+w_3\times u_{31}+w_4\times u_{41};$$

$$U_2=w_1\times u_{12}+w_2\times u_{22}+w_3\times u_{32}+w_4\times u_{42};$$

$$U_3=w_1\times u_{13}+w_2\times u_{23}+w_3\times u_{33}+w_4\times u_{43}\ [25]. \tag{17}$$

其中 $_1=0,264$ $_2$ $0;U,=$ 322 $_3=0;U,414.U$印后工艺设计的最佳备选方案，根据 U_j 的最大值进行选择$(1,2,3)i=$。因此，备选方案 A_3 是该研究过程的最优方案，决定因素为“出版物指标” (R_1)。

4.2. 基于模糊优先关系的多因素方案选择

针对工艺流程备选方案作出管理决策时，可能会因缺乏其优先级信息以及无法对优先性进行定量评估而变得复杂。也可以在区间 [0;1] 上对备选方案进行两两比较，并以数值形式表示数据。评估基于多准则优化，其中工艺流程的因素作为准则。根据帕累托原理 [22], ，与基于准则线性聚合确定最优备选方案的方法一样，只需选择权重指标最高的主导因素，即可构成帕累托集。因此，在备选方案集上采用模糊优先关系进行决策时，将选择帕累托最优备选方案。

定义清晰的非严格偏好关系 $_iR$ 于备选方案集合 $\{\}_1,\ldots,_nXxx=$ 可以表达以下任一陈述，适用于任意一对备选方案 $(,)xy$: x 不劣于 y，也就

是 ( ), ,x y x y R≥ ∈；y 不劣于 x，记作 ( ), ,y x y x R≥ ∈，x 和 y 无法相互比较，( )( ), , , . x y R y x R≠ ∉ 这种方法使得理性选择的班级得以缩小。

如果存在严格偏好 ( ) , ,x y R∈，备选方案 x 优于 y，即 $x \succ y$。在效用函数明确的条件下 r 集合 X 备选方案 x，其评估值较高 ( ) $r x$ 在因素，j 下表现优于备选方案 y，其评估值为 ( ) $r y$。该陈述可用集合 R 上的明确优先关系 X 表示：

$$R_j = \{(x,y): r_j(x) \geq r_j(y), x,y \in X\}. \quad (18)$$

通过评估备选方案集合 { }1，2，3X x x x= 上的模糊优先关系 iR，确定印后工艺设计质量：1R（出版物指标）— 1 2 2 3,x x x x= <；2R（运营条件）— 1 3,x x< 2 > 3x x；3R（结构特点）— 1 2 2 3,x x x x> = ；4R（生产类型）— 1 2 2 3,x x x x> = 。

为确定帕累托最优备选方案，需要选择备选方案 x_0 $X\in$ ，其在所有因素集合上的效用评价最高：

$$r_j(x_0) \geq r_j(y), \forall j = 1,m; \ \forall y \in X. \quad (19)$$

将所形成的帕累托集合中的所有准则合并为一个标量，可采用交集方式 [22; 59; 79]。

m 记作 1 .= ⋂ j Q R 因此，备选方案集合 X =1j= { }1，..., nx x=及其优先性关系 1Q，与具有效用函数 ( ) r x 的备选方案集合相对应。基于模糊优先性关系 1Q 确定非支配备选方案，实质上是将若干关系 ( ) =1 ,R j m 替换为它们的交集。设 ( ) x yμ 是清晰优先性关系 jr 的隶属函数。所形成的条件如下：

$$\mu_j(x,y) = \begin{cases} 1, \text{якщо } r_j(x) \geq r_j(y), \text{тобто } (x,y) \in R_j \\ 0, \text{якщо } (x,y) \notin R \end{cases}. \quad (20)$$

因此，卷积的隶属函数 Q 可写为如下形式：

$$\mu_{Q_1}(x,y) = \min\{\mu_1(x,y), \mu_2(x,y), ..., \mu_n(x,y)\}. \quad (21)$$

考虑到技术过程因素的权重值v及相应的效用函数，准则聚合的形式为：

$$Q(x)=\min_j v_j r_j(x). \tag{22}$$

初始关系聚合 $_2Q$ 也由所分析因素的权重值 $_jv$ 及相应的效用函数构成：

$$Q_2=\sum_{j=1}^{m} v_j r_j(x),\ \partial e \sum_{j=1}^{m} v_j=1,\ v_j\geq 0. \tag{23}$$

与之对应的隶属函数为 [58]：

$$\mu_{Q_2}(x,y)=\sum_{j=1}^{m} v_j \mu_j(x,y). \tag{24}$$

计算结果如下：

$$\mu_{Q_2}^{и\partial}(x_i)=[0{,}4;\ 0{,}74;\ 1{,}26].$$

根据集合 $_{1и\partial}Q$ 与 $_{2и\partial}Q$ 的交集，隶属函数 $(\ )^{и\partial}\ _Q\ _ix\mu$ 的最大值对应于 $_3x$，因此第三种方案被认为是最优方案。

4.3. 结果验证

通过基于准则线性聚合的多因素最优备选方案选择，确定了多因素效用成绩：$_1=0{,}264$ $_2$ $0;U$,= 322 $_3=0;U$,414.U 效用成绩最高的是 $_3U$ ，因此第三个备选方案为最优方案。

基于模糊优先关系进行多因素备选方案选择，得到如下隶属函数值：$(\ )^{и\partial}\ _Q\ _ix\mu$: $_1$ 0,4;x = $_2$ 0,= 74 $_3=1;x$,26x . 因此，可以认为，方案 $_3x$ 是印后工艺设计的最优备选方案。

采用准则线性加权法和基于模糊优先关系的方法确定最优方案后，所得结果完全一致，这表明本研究具有可靠性 [79]。

第5阶段：印后工艺设计综合质量指标的定义

最终，基于模糊逻辑的印后工艺设计质量预测评估系统建模可归结为求解以下任务 [15；16；44；64]:

– 确定所选因素（语言变量）的值域及其对应语言项的论域；

– 构建多层逻辑推理模型，其结构再现因素和语言项的层级关系，这些因素和语言项会影响过程的实施质量。最高级分量以模糊集的形式确定研究过程的预测质量指标；

– 构建并处理语言项集合的两两比较矩阵，以此比较这些语言项与论域值间隔划分的量子，并为每个语言变量求得隶属函数；

– 将隶属函数值归一化，并将其与论域的划分量对应；

– 根据语言变量及其对应语言项的隶属函数归一化值，绘制叠加图形；

– 利用“如果 <条件>，那么 <结论（或行动）>”类型的模糊逻辑命题，构建模糊知识库（或知识矩阵），以反映印后工艺设计质量的形成算法如何取决于语言项的质量水平；

– 根据知识矩阵和隶属函数构建模糊逻辑方程，以确定输入数据与输出数据的隶属函数之间的关系；

– 构建解析表达式，以便将预测结果形式化识别为模糊集；该模糊集基于多层逻辑推理模型和模糊知识库获得；

– 对模糊集进行去模糊化，其核心是采用质心法或平面图形的重心法，计算预测质量数值指标；该平面图形由隶属函数图形和横轴围成。

对模糊集进行去模糊化时，使用语言变量的隶属函数值，其存在区域由论域确定。

5.1. 模糊集合的模糊化

印后工艺设计是确保成品书籍质量的必要组成部分，包括一系列旨在实现既定目标的连续操作。然而，对研究过程的实现产生直接影响的因素，并不总是包含定量成分。相反，某些语言特征的信息量会大得多。因此，需要用模糊集的概念取代清晰集的概念。正因如此，为确保建模精度，宜采用模糊逻辑的方法和工具。

模糊逻辑的一个重要元素和优势是能够进行模糊化，即用模糊集合中相应的概念替换清晰集合的组件。众所周知，其本质是将所分析因素的值的术语集与模糊形式变量的隶属函数相对应。也就是说，无法用定量值明确表示、适合用词或词组描述的变量，被视为语言变量，例如“出版物指标”“结构特点”等。此时，每个语言变量的值会构成一个特定集合——术语集，其组件称为项。例如，语言变量“出版物指标”的术语集由“简单”“复杂”“复杂”这些项组成。语言变量是指其值用日常语言的词或词组表示的变量。语言变量所有可能值的集合通常称为术语集，其中任意一个元素称为语言项。例如，对于语言变量“设备类型”，“手动”“机械”“自动化”这些语言成绩就是语言项，它们共同构成值的术语集。

模糊化确保模型与实际对象具有相当高的吻合度，并且如后文所示，是进一步对印后工艺设计进行预测评估建模的基础。

在模糊逻辑奠基人 Zadeh 的著作中，[20；21] 引入了论域的概念 D，该论域涵盖整个问题领域。于是，集合 M 的模糊子集 D 通过尺度 D 和隶属函数 $()_M d\mu$ [20], 定义如下

$$M = \{(\mu_M(d), d), d \in D\}, \quad (25)$$

де $(\ )\ (\ )\ 0 \le\ _M\ \ \le 1 d\mu$.

隶属函数确定模糊集中每个元素对论域的隶属程度，即 $M\ \ D\in$ 。当基准标度离散且有限（即划分为量子或区间）时，模糊集

$$M = (\mu_M(d_1)/d_1, \mu_M(d_2)/d_2, ..., \mu_M(d_n)/d_n) = \sum_{i=1}^{n} \mu_M(d_i)/d_i, \quad (26)$$

或简写为：$/_n\ _i\ \ _iM\ \ d=\ \ \mu\sum$ 。该记法表示将函数$_{1i=}$ 隶属度 $(\ )$ $_M\ _id\mu$ “附加”到元素 $_id$。

最终，隶属函数充当模糊开本中语言变量输入值的标识符，也就是说，变量 d 的值集合与隶属函数 $(\ )\mu\ d$相对应。

我们认为，给定工艺过程的实现可由某个函数 G 表示，其自变量为选出的因素 $_m\ \ _m1\ ,\ ^2\ ,\ ^{\prime}.....,\ _{mn}\ \ r\ \ r\ \ r$ ，则：

$$G = F(r_{1_m}, r_{2_m}, ..., r_{n_m}), \quad (27)$$

其中 $_mn$ — 工艺过程的因素数量 m。

因此，研究过程是一个包含初始变量集合的过程 $()=1\ \ \ ,\ _ir\ i\ n$以及最终变量 G。

变量具有定量值，这使得可以设定一个区间，并用这些变量的边界值表示[13; 14]: $,\ ,1,\ ;\ ,_{i\ i}r\tau_i n G G=$。鉴于所选因素属于定性变量，因此需要构建集合并确定值的取值边界：$()\ (\ )\ (\ )\ \{\}=\ \ ^1\ ,\ \ ^2\ ,\ \ \ _j\ \ \ ...D\ d\ d$其中 $(\ ),\ =1\ \ \ ,\ \ ^kd\ k\ j$——定量或定性条件单位的集合，其基数决定索引 j。那么，带有边界的结果变量 G 也可以用条件单位集合表示$()()()\ \{\}$ $^1\ ,\ \ ^2\ ,...=\ \ \ \

以评估所研究工艺过程的质量，需要形成部分质量指标；确定各语言变量的论域和值术语集；并直观呈现层级依赖关系。

我们将印后工艺设计过程视为函数$G = F(R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6, R_7, R_8)$，其参数如下：$R_1$ — 出版物指标；R_2 — 结构特点；R_3 — 运营条件；R_4 — 生产类型；R_5 — 材料；R_6 — 设备类型；R_7 — 技术与经济计算；R_8 — 工艺流程图[27； 30]。印后工艺设计的综合质量指标将按照过程结构的层次化原则确定。因此，出版物设计质量可通过各项局部指标的质量来表示：

$$G = F_G(M, O, P). \tag{28}$$

参数 M 决定出版物编制质量：

$$M = F_M(m_1, m_2, m_3), \tag{29}$$

其中 m_1 — 语言变量“出版物指标”， m_2 — 语言变量“结构特点”， m_3 — 语言变量 “ 使用条件 ”。

参数 O 决定生产组织质量：

$$O = F_O(o_1, o_2, o_3), \tag{30}$$

其中 o_1 — 语言变量“生产类型”； o_2 — 语言变量“材料”； o_3 — 语言变量“设备类型”。

参数 P 决定出版物加工质量：

$$P = F_P(p_1, p_2), \tag{31}$$

其中 p_1 — 语言变量“编辑”； p_2 — 语言变量“校对”。

我们将通过列出每个变量的语言学含义、值的论域以及相应的语言术语来编制表格。

使用条件的定义依据图书出版物的耐用性分组：第1组——使用寿命较短（不超过两年），使用强度较低；第2组——使用寿命较短（不超过两年），使用强度较高；第3组——中等使用期限

（2至10年），使用强度较低；第4组——中等使用期限（2至10年），使用强度较高；第5组和第6组——长期（10年及以上），使用强度较低或较高 [27；35；70]。

表8

语言变量值的术语集

变量-на	变量的语言学含义 变量	通用 符号集合 чень （*D* 集合）	语言术语 （*L* 集合）
m_1	出版物指标	（1–5）常规单位	简单出版物， 复杂出版物， 复杂 出版物
m_2	结构特点- 征	(1–5) 任意单位	简单结构， 复杂结构， 复杂结构 ія
m_3	运营条件（耐用性组的有用 置）	（1–5）类- 别	正常条件， 工作条件、极限 条件
o_1	生产类型	（1–5）任意单位	单件生产， 批量生产， 大规模生产
o_2	材料 （处理复杂度 ня)	（1–5）任意单位	低复杂度， 中等复杂度， 高复杂度
o_3	设备类型	(1–5) 个单位	手动、机械、自动化 自动化的
p_1	技术和经济 计算结果 （生产效率 产）	(10–90) %	低效率， 中等效率， 高效率
p_2	工艺流程图 过程	(1–5) 个相对单位	简单、复杂化， 复杂

为可视化印后工艺设计质量与所选因素语言项值之间的依赖关系，综合构建了多层模糊逻辑推理模型 [27；59]。采用多层模糊逻辑推理模型，有助于通过从最低层到最高层逐步积累知识，依次预测印后工艺设计实施的质量。该模型包括

从属模型：出版物形成质量模型、生产组织质量模型、规划质量模型。

研究过程的质量水平用语言术语 G 表示。其中，论域 D 被划分为若干部分（量子）。在划分点处，定义我们所指定的语言变量及等级 $()_{g\,i}$ $r\,d$，它们用于标识语言术语。因此，初始数据库为集合 $\{\}_{1}$，$_{2}$，$\ldots{}_{n}D\,d\,d$ $d=$ 以及等级 $()_{g\,i}r\,d$，用于确定各区间内语言项的优先级 $_{i}d$ $()$ $=1\ldots$ $,,.\,in$ 综上所述，语言术语“工艺过程的质量水平” G 表示为某个模糊集合，其元素由若干对构成 [15; 28; 41]:

$$G=\left\{\frac{\mu_g(d_1)}{d_1},\frac{\mu_g(d_2)}{d_2},\ldots,\frac{\mu_g(d_n)}{d_n}\right\}, \tag{32}$$

其中 $G\,D\subset$；$()_{g\,i}d\mu$ — 元素 $_{i}d\,D\in$ 对集合 G 的隶属度。

隶属度或隶属函数 $()_{g}$ $_{i}d\mu$ 是逻辑方程的基本组成部分，求解这些方程可得到语言术语 G 的隶属函数数值。隶属函数满足归一化条件：$_{1}$ $_{2}$ $\ldots$ $1.{}_{n}\mu$ $+\mu$ $+$ $+\mu$ $=$

其中，隶属度（函数）的分布满足以下条件:

$$\frac{\mu_1}{r_1}=\frac{\mu_2}{r_2}=\ldots=\frac{\mu_n}{r_n}, \tag{33}$$

其中 $()_{\,i\,g\,\,i}d\mu$ $=\mu$；$()_{\,g\,\,i}r\;r\;d=$ 对于所有 $1,\ldots,i\;\;n=$。

用于确定印后工艺设计因素等级的隶属函数数值由以下关系得出 [28; 41; 43]:

$$\left.\begin{aligned}
\mu_1&=\left(1+\frac{r_2}{r_1}+\frac{r_3}{r_1}+\ldots+\frac{r_n}{r_1}\right)^{-1}\\
\mu_2&=\left(\frac{r_1}{r_2}+1+\frac{r_3}{r_2}+\ldots+\frac{r_n}{r_2}\right)^{-1}\\
&\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\\
\mu_n&=\left(\frac{r_1}{r_n}+\frac{r_2}{r_n}+\frac{r_3}{r_n}+\ldots+1\right)^{-1}
\end{aligned}\right\}. \tag{34}$$

基于上述理论论证，形成以下关键任务：

$$\left.\begin{array}{l} G_F = F\left(m_a, o_b, p_c\right) \to \max,\ a = \overline{1,3};\ b = \overline{1,3};\ c = \overline{1,2} \\ m_a > 0,\ o_b > 0,\ p_c > 0 \\ \mu_g\left(y_i\right) \to \max,\ y_i \in Y,\ G_F \subset Y,\ i = \overline{1,3} \end{array}\right\}. \tag{35}$$

为了以图形方式表示语言项，语言变量的值域被划分为四个部分，由此得到五个点 $(\ )_{1\ 2\ 3\ 4\ 5}$, , , ,$d\ \ d\ \ d\ \ d\ \ d$ [52, 53]。

在已知或根据成对比较矩阵得到的等级已知时，会针对每个语言项计算隶属函数 $_i\mu$，其结果通过处理矩阵获得

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \frac{r_2}{r_1} & \frac{r_3}{r_1} & \frac{r_4}{r_1} & \frac{r_5}{r_1} \\ \frac{r_1}{r_2} & 1 & \frac{r_3}{r_2} & \frac{r_4}{r_2} & \frac{r_5}{r_2} \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ \frac{r_1}{r_5} & \frac{r_2}{r_5} & \frac{r_3}{r_5} & \frac{r_4}{r_5} & 1 \end{bmatrix}. \tag{36}$$

获得最终结果，就是在评估因素——语言变量的语言项隶属函数取最大值时，使表征过程质量水平的函数值达到最大。

通过为印后加工过程设计中所分析的语言变量的每个语言项构建两两比较矩阵，可以定量描述论域各点上等级之间的相互关系。也就是说，采用萨阿蒂相对重要性标度以及创建方阵和互反矩阵的方法论，大大有助于感知定性特征。然而，比较仅限于同一语言项内的等级，无法反映语言变量各语言项之间的关系。基于两两比较矩阵处理隶属函数，可将专家意见转化为定量指标 [28；29；63]。

我们为语言变量“出版物指标”构建两两比较矩阵，其术语值集为 $()$ $L\,m=$ =<简单、复杂、复杂>，其值的论域为 $()_1$ $[1\ 2\ 3\ 4\ 5]$;;;;D $m=$ 个单位，用于表征定量特征。

$$S_{просте}(m_1)=\begin{bmatrix} 1 & 7/9 & 5/9 & 3/9 & 1/9 \\ 9/7 & 1 & 5/7 & 3/7 & 1/7 \\ 9/5 & 7/5 & 1 & 3/5 & 1/5 \\ 9/3 & 7/3 & 5/3 & 1 & 1/3 \\ 9 & 7 & 5 & 3 & 1 \end{bmatrix};$$

$$S_{ускладнене}(m_1)=\begin{bmatrix} 1 & 5 & 8 & 3 & 1 \\ 1/5 & 1 & 8/5 & 3/5 & 1/5 \\ 1/8 & 5/8 & 1 & 3/8 & 1/8 \\ 1/3 & 5/3 & 8/3 & 1 & 1/3 \\ 1 & 5 & 8 & 3 & 1 \end{bmatrix};$$

$$S_{складне}(m_1)=\begin{bmatrix} 1 & 5 & 7 & 8 & 9 \\ 1/5 & 1 & 7/5 & 8/5 & 9/5 \\ 1/7 & 5/7 & 1 & 8/7 & 9/7 \\ 1/8 & 5/8 & 7/8 & 1 & 9/8 \\ 1/9 & 5/9 & 7/9 & 8/9 & 1 \end{bmatrix}.$$

计算矩阵后，语言变量ım “出版物指标”的“简单”“复杂”和“复杂”语言项的隶属函数值如下:

$$\mu_{просте}(y_1)=0,36;\ \mu_{просте}(y_2)=0,28;\ \mu_{просте}(y_3)=0,2;$$
$$\mu_{просте}(y_4)=0,12;\ \mu_{просте}(y_5)=0,04;$$
$$\mu_{ускладнене}(y_1)=0,055;\ \mu_{ускладнене}(y_2)=0,277;\ \mu_{ускладнене}(y_3)=0,444;$$
$$\mu_{ускладнене}(y_4)=0,166;\ \mu_{ускладнене}(y_5)=0,055;$$
$$\mu_{складне}(y_1)=0,033;\ \mu_{складне}(y_2)=0,166;\ \mu_{складне}(y_3)=0,233;$$
$$\mu_{складне}(y_4)=0,266;\ \mu_{складне}(y_5)=0,3.$$

相对于单位归一化后的隶属函数值（归一化系数 $\max_{1,2,3} \mu_{e_i}(y_k) = 1$；$\mu_{e_i}(y_k) / \max \mu_{e_i}(y_k)$）为：

$$\mu_{простe_n}(y_1)=1;\ \mu_{простe_n}(y_2)=0{,}778;\ \mu_{простe_n}(y_3)=0{,}556;$$

$$\mu_{простe_n}(y_4)=0{,}333;\ \mu_{простe_n}(y_5)=0{,}111;$$

$$\mu_{ускладненe_n}(y_1)=0{,}124;\ \mu_{ускладненe_n}(y_2)=0{,}624;\ \mu_{ускладненe_n}(y_3)=1;$$

$$\mu_{ускладненe_n}(y_4)=0{,}374;\ \mu_{ускладненe_n}(y_5)=0{,}124;$$

$$\mu_{складнe_n}(y_1)=0{,}11;\ \mu_{складнe_n}(y_2)=0{,}553;\ \mu_{складнe_n}(y_3)=0{,}777;$$

$$\mu_{складнe_n}(y_4)=0{,}887;\ \mu_{складнe_n}(y_5)=1.$$

根据公式（32）构造模糊集：

$$\textit{просте видання}=\left\{\frac{1}{1};\frac{0{,}778}{2};\frac{0{,}556}{3};\frac{0{,}333}{4};\frac{0{,}111}{5}\right\}\text{ у. о.;}$$

$$\textit{ускладнене видання}=\left\{\frac{0{,}124}{1};\frac{0{,}624}{2};\frac{1}{3};\frac{0{,}374}{4};\frac{0{,}124}{5}\right\}\text{ у. о.;}$$

$$\textit{складне видання}=\left\{\frac{0{,}11}{1};\frac{0{,}553}{2};\frac{0{,}777}{3};\frac{0{,}887}{4};\frac{1}{5}\right\}\text{ у. о.}$$

根据模糊集绘制语言变量“出版物指标”[29；69]的语言项“简单”“复杂化”“复杂”的隶属函数图。其中，横轴表示论域，纵轴表示语言项隶属函数的归一化值。

略去其余语言变量的类似推导，下面转入模糊逻辑的下一个组件。

模糊知识库可以表示为知识矩阵的形式，该矩阵将输入变量（第*m*个技术过程的因素）与输出变量（第*m*个技术过程实现的结果）关联起来。构建知识矩阵时，采用“如果—且—则”“如果—则—否则”“如果—或—则—否则”等命题。基于知识矩阵创建模糊逻辑方程组，该方程组可得出第*m*个技术过程的隶属函数数值和综合质量预测[26；42]。

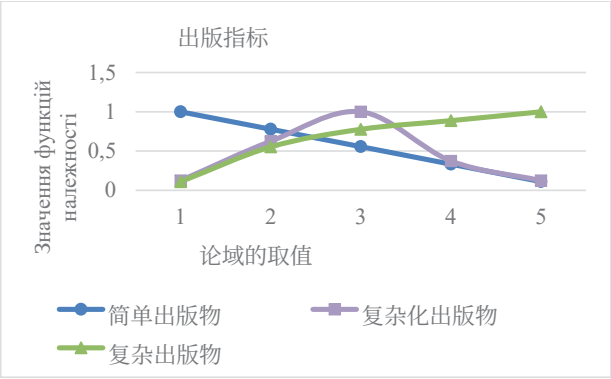


图3. 语言变量“出版物指标”的隶属函数可视化

下面列出隶属函数$_1\mu$和$_2\mu$取两个值时获得结果的组合：

$$\mu_1 \vee \mu_2 = \max(\mu_1, \mu_2) = \begin{cases} \mu_1, якщо \mu_1 \geq \mu_2, \\ \mu_2, якщо \mu_1 < \mu_2, \end{cases} \quad (37)$$

$$\mu_1 \wedge \mu_2 = \min(\mu_1, \mu_2) = \begin{cases} \mu_1, якщо \mu_1 \leq \mu_2, \\ \mu_2, якщо \mu_1 > \mu_2, \end{cases} \quad (38)$$

其中，模糊逻辑方程中的运算 $\vee$ 表示取最大值，而运算 $\wedge$ 表示取最小值。

设语言变量 M （出版物成形质量）、O （生产组织质量）和 P （出版物处理质量）的项为“低”“中”“高”。相应地，综合指标 G（印后加工进程设计质量）也将用相同的项 [27；60；64]。那么，关系 ()
= ，$_{\sigma}GFMOP$的模糊知识库将具有以下形式：

ЯКЩО (M = низька) І (M = середня) І (M = висока);
І (O = низька) І (O = середня) І (O = висока);
І (P = низька) І (P = середня) І (P = висока);
ТОДІ (G = низька) І (G = середня) І (G = висока).

已形成的条件显示在知识矩阵中。

表9

语言变量 G 的知识矩阵

初始质量数据 出版物 M	质量处理出版物 O	装帧质量出版物 P	质量设计印后进程 G
低	低	低	低
低	中	低	
中	低	中	中
高	中	中	
高	高	高	高
高	中	高	

综合指标G的“低”“中”“高”语言项对应的模糊逻辑方程形式如下:

$$\mu_{низька}(G)=\mu_{низька}(M)\wedge\mu_{низька}(O)\wedge\mu_{низька}(P)\vee$$
$$\vee\mu_{низька}(M)\wedge\mu_{середня}(O)\wedge\mu_{низька}(P);$$
$$\mu_{середня}(G)=\mu_{середня}(M)\wedge\mu_{низька}(O)\wedge\mu_{середня}(P)\vee$$
$$\vee\mu_{висока}(M)\wedge\mu_{середня}(O)\wedge\mu_{середня}(P);$$
$$\mu_{висока}(G)=\mu_{висока}(M)\wedge\mu_{висока}(O)\wedge\mu_{висока}(P)\vee$$
$$\vee\mu_{висока}(M)\wedge\mu_{середня}(O)\wedge\mu_{висока}(P).$$

鉴于出版物形成质量、生产组织和出版物处理的依赖关系也可以通过部分指标的质量表示 $()_{1\,2\,3},=$ $,,_{M}MFmmm()$，$_{2}$，$_{3}$，$_{O}OFooo=()_{1\,2},_{P}PFpp=$ 以及基于专家对集合的判断 $_{1\,2\,3}(,,),Lmmm$ $_{1\,2\,3}(,,),Looo$ $_{1\,2}(,)Lpp$，构建印后工艺设计语言变量的模糊知识库、知识矩阵和模糊逻辑方程 [59]。

关于以下语言变量的逻辑命题 x:
–「出版物编制质量」；–「生产组织质量」；–「出版物加工质量」。

如果（m_1）=（简单、复杂化、复杂），且（m_2）=（简单、复杂化、复杂）；且（m_3）=（正常、工作、极限）；那么（M）=（低、中、高）；

如果（o_1）=（单件式、批量生产、大批量式），且（o_2）=（低、中、高）；且（o_3）=（手动、机械、自动化）；那么（O）=（低、中、高）；如果（p_1）=（低、中、高），且（p_2）=（简单、复杂化、复杂）；那么（P）=（低、中、高）。

接下来，为经过分析的语言变量构建知识矩阵。为便于查看，矩阵以表格形式呈现 [50；60；64]。

表10语言变量 *M* 的知识矩阵（出版物编制质量）

指标 出版物 m_1	结构式氏族特征（复杂性构造）米 $_2$	条件运营 m_3	初始质量数据出版物 M
复杂	复杂	边界	低
复杂	复杂	工作	
复杂	复杂化	工作	中
复杂	复杂化	正常	
复杂	简单	正常	高
简单	简单	正常	

表11语言变量 *O*（生产组织质量）的知识矩阵

生产类型 o_1	材料（复杂度处理）的 $_2$	Тип 设备 的$_3$	组织质量生产 的
单件式	高	手动	低
批量生产	高	手动	
批量生产	中	机械	中
批量生产	中	自动化	
批量生产	低	自动化	高
大批量式	低	自动化	

表1语言变量 P（出版物加工质量）的知识矩阵 2

技术和经济计算结果（生产效率）p_1	技术流程图过程 p_2	处理出版物 P 处理
低	复杂	低
低	复杂化	
中	简单	中
中	复杂化	
高	简单	高
高	复杂化	

为已确定的语言项建立的模糊逻辑方程如下：– 对于语言变量“出版物编制质量”

$$\mu_{низька}(M)=\mu_{складне}(m_1)\wedge\mu_{складна}(m_2)\wedge\mu_{граничні}(m_3)\vee$$
$$\vee\mu_{складне}(m_1)\wedge\mu_{складна}(m_2)\wedge\mu_{робочі}(m_3),$$
$$\mu_{середня}(M)=\mu_{складне}(m_1)\wedge\mu_{ускладнена}(m_2)\wedge\mu_{робочі}(m_3)\vee$$
$$\vee\mu_{ускладнене}(m_1)\wedge\mu_{ускладнена}(m_2)\wedge\mu_{нормальні}(m_3),$$
$$\mu_{висока}(M)=\mu_{ускладнене}(m_1)\wedge\mu_{проста}(m_2)\wedge\mu_{нормальні}(m_3)\vee$$
$$\vee\mu_{просте}(m_1)\wedge\mu_{проста}(m_2)\wedge\mu_{нормальні}(m_3);$$

– 对于语言变量“生产组织质量”

$$\mu_{низька}(O)=\mu_{одиничне}(o_1)\wedge\mu_{висока}(o_2)\wedge\mu_{ручне}(o_3)\vee$$
$$\vee\mu_{серійне}(o_1)\wedge\mu_{висока}(o_2)\wedge\mu_{ручне}(o_3),$$
$$\mu_{середня}(O)=\mu_{серійне}(o_1)\wedge\mu_{середня}(o_2)\wedge\mu_{механічне}(o_3)\vee$$
$$\vee\mu_{серійне}(o_1)\wedge\mu_{середня}(o_2)\wedge\mu_{автоматизоване}(o_3),$$
$$\mu_{висока}(O)=\mu_{серійне}(o_1)\wedge\mu_{низька}(o_2)\wedge\mu_{автоматизоване}(o_3)\vee$$
$$\vee\mu_{масове}(o_1)\wedge\mu_{низька}(o_2)\wedge\mu_{автоматизоване}(o_3);$$

– 对于语言变量“出版物加工质量”

$$\mu_{низька}(P)=\mu_{низька}(p_1)\wedge\mu_{складна}(p_2)\vee\mu_{низька}(p_1)\wedge\mu_{ускладнена}(p_2),$$
$$\mu_{середня}(P)=\mu_{середня}(p_1)\wedge\mu_{проста}(p_2)\vee\mu_{середня}(p_1)\wedge\mu_{ускладнена}(p_2),$$
$$\mu_{висока}(P)=\mu_{висока}(p_1)\wedge\mu_{проста}(p_2)\vee\mu_{висока}(p_1)\wedge\mu_{ускладнена}(p_2).$$

5.2. 模糊集合去模糊化

为确定印后工艺设计的综合质量指标，需要进行去模糊化过程，同时考虑质量在各项指标之间的分布( )，$_{o}G\ F\ M\ OP=$ 。

应当指出，去模糊化是模糊逻辑的关键过程之一，其作用是将模糊集合的值转换为定量指标。去模糊化需要预先构建研究对象工艺过程的模糊知识库和模糊逻辑方程，以便后续根据语言项集合，生成由经归一化的隶属函数值构成的表格；这些值对应于所选语言变量的论域值的指定划分点，并用于代入模糊逻辑方程。为进行数值计算，本研究选用了重心法。根据该方法，初始变量的定量值等于由被分析变量 [22 的隶属函数曲线图形所围面积的重心横坐标；62；69；72]。

根据上述论述，针对每个语言变量，按照论域值的划分点及术语集，构建隶属函数值表（表6–13）[22；26；62；72]。

例如，给出术语集( )$D\ m$ “出版物指标”语言变量的值表：

Табли表13

术语集( )Dm （出版物指标）的隶属函数

$_{i}y$ ，条件单位	1	2	3	4	5
()$_{простe\ \ i}y\mu$	1	0,778	0,556	0,333	0,111
()复杂 $_{i}y\mu$	0,124	0,624	1	0,374	0,124
()$_{складне\ \ i}$ $y\mu$	0,11	0,553	0,777	0,887	1

给出最高级语言项“低”“中”“高”的模糊逻辑方程 G:

$$\mu_{низька}(G)=0,667\wedge 0,443\wedge 0,334\vee 0,667\wedge 1\wedge 0,334=0,334,$$
$$\mu_{середня}(G)=0,777\wedge 0,443\wedge 1\vee 0,333\wedge 1\wedge 1=0,443,$$
$$\mu_{висока}(G)=0,333\wedge 0,375\wedge 0,666\vee 0,333\wedge 1\wedge 0,666=0,333.$$

5.3. 综合质量指标数值的确定 ***i***

根据获得的数据，按照公式 [22；26；62；72] 对模糊集进行去模糊化：

$$G = \frac{\sum_{i=1}^{m}\left[\underline{G} + (i-1)\frac{\overline{G}-\underline{G}}{m-1}\right]\mu_i(G)}{\sum_{i=1}^{m}\mu_i(G)}, \qquad (39)$$

其中 $\underline{G}$ — 质量指标的最小值；G — 质量指标的最大值；$\overline{\ }$ m — 模糊语言项的数量 [22；26；62；72]。

变量 G 的取值范围设定如下：$1\%G =$，$=\underline{\ }100\%G$。$\overline{\ }$计算基于三个划分点进行：1%、50%、100%。计算结果为印后工艺设计质量综合指标的数值：

$$G_{прогноз.} = \frac{1\cdot 0{,}334 + 50\cdot 0{,}443 + 100\cdot 0{,}333}{0{,}334 + 0{,}443 + 0{,}333} = 50{,}256\,\%.$$

基于所构建的研究阶段序列，现给出印后工艺设计质量预测评估信息技术的综合结构功能模型（图4）。

因此，所开发的结构—功能模型由五个主要阶段组成，每个阶段又分为相应的子阶段，用于确定获取、建模、分析和综合信息的具体操作，以评估研究过程的质量。通过将所开发的信息技术应用于实际生产条件，这种细化使得人们能够审慎、前瞻地制定印后工艺实施方案，提高经济效益和操作合理性，并简化书籍产品的印后加工。

我们将采用 IDEF0方法论，对印后工艺设计信息技术进行功能建模。构建上下文图 A-0、第一层分解图 A0、第二层分解图 A1、A2、A3、A4、A5、第三层分解图 A23、A24、A41、A42、A51、A52 [40；77]。

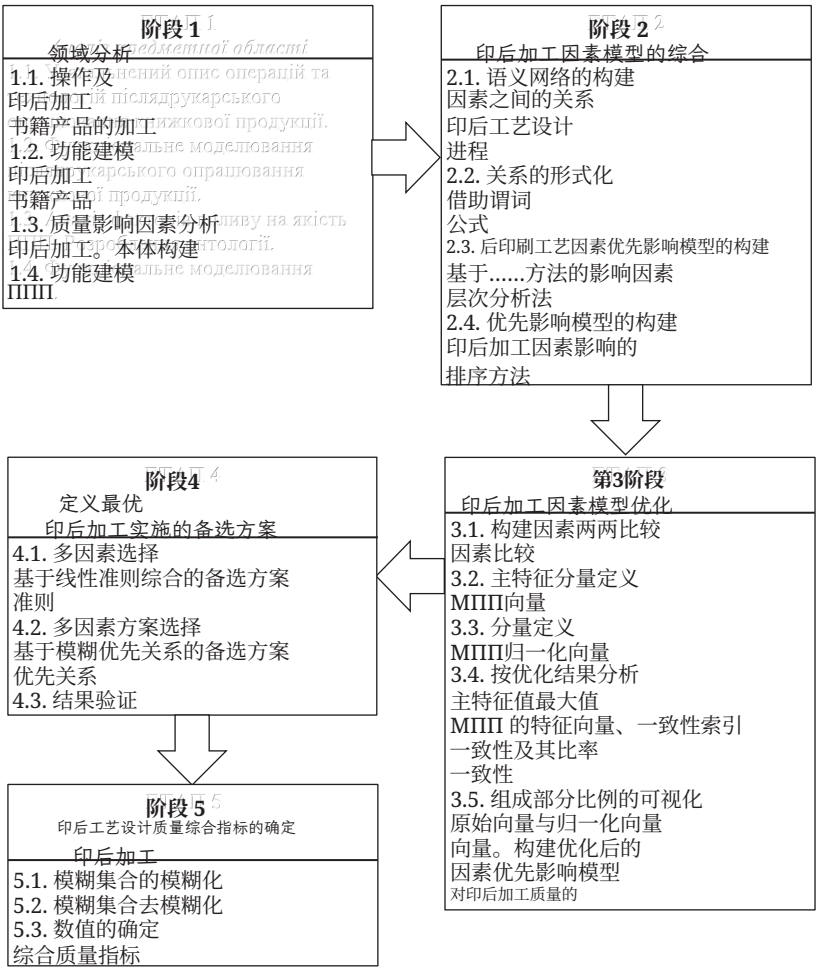


图4. 印后工艺设计质量预测评估信息技术的结构功能模型

上下文图如图 5 所示。其中，系统的主要功能是用于印后工艺设计质量预测评估的信息技术，而系统与周围环境之间的关系通过边界箭头表示：I_1—开发信息技术的需求，I_2—

半结构化问题，C 语言$_1$—规范性技术和工艺文件，C 语言$_2$—理论、方法、方法体系、原则，O_1—印后工艺设计实施的最优方案，O_2—印后工艺设计的综合质量指标，M_1—硬件和软件，M_2—研究人员、领域专家及其他利益相关者。

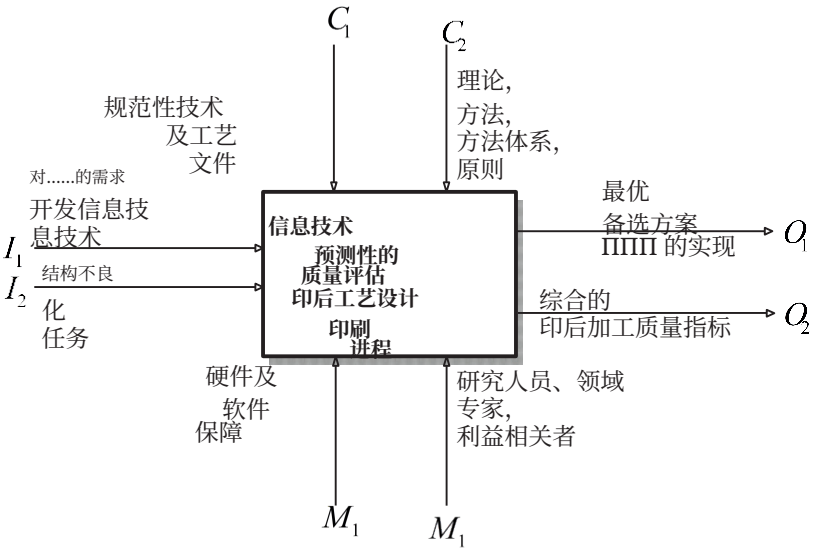


图5. 印后工艺设计质量预测评估信息技术的 IDEF0 模型 A-0上下文图

O根据类型划分，逐一描述每条边界箭头。

“输入”（Input）类型的边界箭头：

– $_1I$ (开发信息技术的需求)。 组织信息过程的需求，借助计算技术手段，加快数据处理和信息检索，并简化对信息的访问；

– $_2I$（半结构化问题）。根据认知深度，问题可分为三类：结构化问题、非结构化问题和半结构化问题。后者的特点是同时包含定性和定量指标，且问题中鲜为人知、研究不足的定性特性明显占优。半结构化问题

包括大规模问题，其特点是备选方案众多、依赖现代技术、执行时长不确定，以及所需资金资源和学习材料数量不确定，并且存在风险。印后流程的设计属于半结构化问题。

边界箭头类型“控制”（Control）：

– $_1C$（规范技术和工艺文件）。 规范技术文件包括技术要求和法律条款，具体有：法律、标准、技术条件、实践准则等；

– $_2C$（理论、方法、方法体系、原则）。每个信息进程均基于广为人知或最新的理论、方法、方法体系和原则执行。例如，出版后加工进程中设计因素之间关系的提取与形式化，采用系统分析和矩阵分析的方法、图论和语义网络理论以及谓词逻辑；因素优先影响模型的创建则依据分层多级系统理论等。[58；59]。

“输出”类型的边界箭头：

– $_1O$（实施印后工艺设计的最优方案）。 执行任何技术任务都需要有可行的备选方案。从现有备选方案中选择最佳实施方案是一个重要环节[25；79]；

– $_2O$（印后工艺设计的综合质量指标）。 执行任何过程的主要目的是获得优质结果。预测质量有助于实现这一目标。印后工艺设计质量的定量指标通过模糊逻辑方法和手段确定[26；42；62]。

“机制”（Mechanism）类型的边界箭头：

– $_1M$（硬件和软件）。信息的搜索、处理、存储和传输需要使用现代技术和软件手段；

– $_2M$（研究人员、领域专家、利益相关者）。实施印后工艺设计质量预测评估信息技术，需要开展一系列研究，邀请相关领域科研人员参与，形成专家结论，并进行测试验证以及与利益相关者咨询。

IDEF0模型的A0第一层分解图由上下文图分解而成，包含以下功能书帖块：

– 印后加工领域分析。用于界定研究过程的理论组成部分，并通过功能建模提取操作顺序。此处考察的不仅是项目的创建，也包括书籍产品的印后加工过程本身，因为了解设计对象的特性十分重要；

– 印后加工设计因素模型综合。其内容包括构建语义网络，运用谓词逻辑元素将因素之间的关系形式化，并确定因素的主导层级，进而建立优先影响模型。因素的优先级采用层次分析法确定，并通过排序方法加以 уточ明 [58, 59]；

– 印后工艺因素模型优化（印后工艺设计因素模型优化）。包括确定研究过程因素的优化权重值并构建优化模型。该阶段有助于细化因素的优先级，并在必要时避免将多个因素置于同一层级 [68]；

– 印后工艺最优备选方案选择（确定印后工艺设计实施的最优备选方案）。对所分析过程的可能实施备选方案进行设计与研究，并选出最优方案。此过程中采用两种方法进行处理，并对结果进行比较。所得结果的一致性表明任务解的适切性 [25；61]；

– 印后加工综合质量指标（设定印后工艺设计的综合质量指标）。基于模糊逻辑方法和手段，确定所研究过程的预测数值参数，并根据给定条件确定综合质量指标 [26；42；62]。

下一阶段是构建第二级分解示意图，即对第一级示意图进行分解。A1图由四个功能块组成：

– 图书产品印后加工操作与技术描述（书籍产品印后加工的操作与技术描述）。介绍印后加工可采用的操作与技术、选择条件及实施方

式。这种描述有助于后续建模与设计；

– 印后书刊产品加工功能建模（书籍产品印后加工的功能建模）。功能建模采用 IDEF0 方法论进行。其过程包括构建上下文示意图，其中系统的主要功能是书刊产品印后加工；对上下文示意图进行分解（创建第一层分解示意图）；再对第一层示意图进行分解（创建第二层分解示意图）。由此构建出书刊产品印后加工的树状层次模型，用以展示 IDEF0 [40 模型中父节点与子节点之间的关系；77];

– 印后工艺设计影响因素分析与本体开发（印后工艺设计影响因素分析与本体开发）。确定影响研究过程质量的影响因素的信息构成。对选出的因素进行详细描述：出版物指标、结构特点、使用条件、生产类型、材料、设备类型、技术与经济计算、工艺流程图 [30]。开发本体 [33];

– 印后工艺设计功能建模（印后工艺设计功能建模）。构建上下文图、第一级分解图和第二层分解图。系统的主要功能是印后工艺设计。此外，还构建树状层次模型，其顶层为上下文图 [40；77]。

A2图包含以下功能模块：

– 语义网络开发（语义网络的构建）。语义网络模型是后续研究的基础。从结构上看，它是一个有向图，其节点集合对应于因素集合，而弧则表示因素之间的关系 [61];

– 因素间关系形式化（因素之间关系的形式化）。因素之间关系的形式化描述通过使用谓词逻辑元素来实现 [59；61];

– 按层次数学建模法构建因素优先影响模型（采用层次分析法构建因素优先影响模型）。层次分析法是通过构建可达矩阵和迭代表来确定因素优先级层次的方法 [58];

– 按排序法构建因素优先影响模型（采用排序法构建因素优先影响模型）。排序法是通过构建层次树来展示因素之间的联系，并根据权重值确定因素优先级的方法 [30]。

对于 A2图的第三和第四个功能块，宜继续进行分解。A23图包含以下功能块：

– 可达矩阵创建（创建可达矩阵）。为便于映射数据，可达矩阵以表格形式构建。直接影响或间接影响用 1 表示，不存在影响则用 0 表示；

– 迭代表创建（创建迭代表）。迭代表包含四列：集合中因素的序号；受某一因素影响的因素序号；某一因素所依赖的因素序号；影响因素与依赖因素的共同序号。每次迭代都要划去迭代表中第三列和第四列数据相同的行。对应于第一条被划去行的因素具有最高优先级，而对应于最后一条被划去行的因素具有最低优先级；

– 因素优先级建模（因素优先级建模）。迭代所得数据用于构建因素优先影响模型 [58]。

A24图：

– 层级树创建（创建层级树）。为集合中的每个因素构建层级树，以展示该因素对其他因素的直接和间接影响，以及展示直接和间接依赖关系的层级树；

– 因素权重值确定（设定因素权重值）。依据层级树确定直接和间接影响及依赖关系的数量。设定假定的权重系数。根据各类关系的权重总和，计算因素的综合权重；

– 因素排序（确定因素等级）。根据综合权重值确定因素等级。其中，综合值最小的因素为最低等级——第一等级。多个因素可以被赋予相同等级；

– 因素优先级确定（确定因素优先级）。根据因素等级确定优先级。等级最高的因素具有最高优先级——第一优先级。多个因素的优先级可以相同；

– 因素优先级建模（因素优先级建模）。根据通过迭代过程得出的因素优先级，并经排序进一步 уточ定，综合构建因素优先影响层次模型。其中，模型的最高层对应优先级最高的因素，最低层则对应所选集合 [30；59] 中优先级最低的因素。

我们来看看示意图 A3 的功能模块：

– 因素成对比较矩阵构建（构建因素成对比较矩阵）。根据萨阿蒂相对重要性标度，构建因素成对比较矩阵。依据比较准则，选取 1 至 9 的效用评价值。如果对象同等重要，效用评价值为 1；如果一个对象绝对优于另一个对象，则为 9。其他评价值则用于描述指定标度范围内的中间关系 [25；68]；

– 主特征向量分量确定（主特征向量分量的确定）。主特征向量定义为成对比较矩阵每一行元素的几何平均数；

– 归一化向量分量确定（归一化向量分量的确定）。归一化向量分量用于确定因素数值优先级，并可进一步明确其权重值；

– 优化结果分析（优化结果分析）。根据一致性指数、一致性比率以及成对比较矩阵主特征向量的最大值，对所得结果进行审核；

– 向量分量比值可视化（向量分量比值的可视化）。绘制直方图和对比图，以展示原始向量与归一化向量各分量的权重值。原始向量根据因素优先影响模型及其赋予的权重值构建。为便于可视化，归一化向量的分量可按任意系数进行调整；

– 因素优先影响优化模型构建（构建因素优先影响的优化模型）。根据经过验证的优化结果，综合构建出影响印后工艺设计质量的因素优先影响优化模型。模型的最高层对应优先级最高的因素，

最低层则对应优先级最低的因素。所得模型是后续预测评估的基础 [68]。

A4 图包含以下书芯：

– 基于准则线性合成的多因素备选方案选择（基于准则线性合成的多因素备选方案选择）。采用准则线性合成方法确定印后工艺设计的最优实施方案，其要点是将各部分目标泛函线性组合为一个泛函，而多准则（多因素）优化任务则是求出效用函数 [25；59] 的最大值；

– 基于模糊偏好关系的多因素备选方案选择（基于模糊优先关系的多因素备选方案选择）。基于模糊优先关系的多因素备选方案选择，是确定印后工艺设计因素各备选方案之间的两两优先关系，并对其进行定量表示；

– 结果验证（结果审核）。比较通过上述两种方法确定的最优备选方案是否相同。结果一致表明任务 [59 的解是适切的；79]。

对于示意图 A4 的第一和第二个功能块，宜继续进行分解。示意图 A41 包含：

– 帕累托集构建（构建帕累托集）。帕累托集仅包含优先级显著较高的因素，优先级较低的因素予以剔除；

– 备选方案设计（备选方案设计）。设计印后加工进程设计实施所需数量的备选方案；

– 备选方案评估（备选方案评价）。对每个备选方案的帕累托集合因素影响程度进行百分比表示；

– 因素成对比较矩阵构建（创建因素成对比较矩阵）。根据帕累托集合因素的权重数据，并按照对象相对重要性标度，构建成对比较矩阵；

– 主特征向量归一化（主特征向量的规范化）。通过对帕累托集合因素成对比较矩阵的主特征向量进行规范化，确定后续计算所需的权重值；

– 效用与多准则效用评价（确定效用及多准则效用成绩）。针对帕累托集合中的每个因素，构建备选方案实现

方式的成对比较矩阵，据此确定备选方案效用。每个备选方案的多准则效用成绩通过各因素权重值与相应备选方案效用的乘积之和计算得出 [25];

– 最优备选方案选择（选择最优备选方案）。根据多准则效用评价值的最大值，选出印后工艺设计实施的最优备选方案 [59]。

A42图:

– 备选方案集上的模糊偏好关系评价（在备选方案集合上评价模糊优先关系）。针对帕累托集中的每个因素，构建备选方案之间的非严格偏好关系;

– 因素关系矩阵构建（构建因素的关系矩阵）。根据优先关系构建关系矩阵。其中，存在优先性用 1 表示，备选方案之间不可比则用 0 表示;

– 关系聚合构建（构建关系的卷积）。对帕累托集的所有因素的关系进行聚合；若所有因素下备选方案之间均存在优先性，则用 1 表示，若至少一个因素下备选方案不可比，则用 0 表示。另一种关系聚合方式则根据因素的权重值及相应的效用函数确定;

– VПНА（确定非支配备选方案子集）。根据关系的合成以及相应公式确定;

– VΦНСМ（确定公共集的隶属函数）。确定非支配备选方案的公共集及隶属函数;

– VOA（选择最优备选方案）。最优备选方案是隶属函数值最大的备选方案 [25；59]。

A5图包含三个功能模块，分别是:

– Ф（模糊化）。模糊化过程是将值集合与其隶属函数对应起来;

– Д（去模糊化）。去模糊化过程与模糊化过程相反。模糊集合去模糊化采用重心原理;

– 数值积分质量指标的确定（确定综合指标的数值）。该指标用于预测评估特定既定条件下印后工艺设计的质量，以百分比表示 [27–29；60；62]。

A5图的第一个和第二个功能书芯需要进一步分解。相应地，A51图包含以下书芯：

– 部分质量指标的形成（形成部分质量指标）。为确定印后工艺设计的综合质量指标，宜形成语言变量的部分质量指标，并按共同特征和用途进行分组；

– 取出通用值集和分析变量的术语集（提取论域和值集及分析变量的术语集）。针对每个语言变量，构建具有既定边界和计量单位的论域，以及以文字描述论域分级的术语集；

– 多层次模糊逻辑推理模型的构建（构建多层次模糊逻辑推理模型）。构建多层次模糊逻辑推理模型，以层次化表示印后工艺设计质量与所选因素的语言项值之间的依赖关系 [27]；

– 语言变量隶属函数的处理（语言变量隶属函数的处理）。根据语言项等级的相对评估，建立方形逆对称矩阵；通过计算这些矩阵，确定论域五个划分点上的隶属函数数值。得到的模糊集通过图形进行可视化 [28; 29]；

– 知识库的形成（知识库的形成）。针对综合质量指标和每个语言变量形成模糊知识库，并考虑多层模糊逻辑推理模型中给出的层级结构；

– 知识矩阵的形成（知识矩阵的形成）。根据已建立的知识数据库，为印后工艺设计质量及每个部分指标综合生成知识矩阵；

– 模糊逻辑方程的形成（模糊逻辑方程的形成）。根据已建立的知识矩阵，为各部分质量指标的每个语言项，以及语言变量“印后工艺设计质量”的语言项构建模糊逻辑方程 [50；60；64]。

图表 A52包括：

– 语言变量隶属函数值表构建（构建语言变量隶属函数值表）。根据隶属函数值已归一化的术语集，在论域的五个划分点处为每个语言变量创建值表；

– 模糊逻辑方程的形成（形成模糊逻辑方程）。将值表中的值代入每个语言变量的“低”“中”“高”语言项对应的模糊逻辑方程。相应地，计算隶属函数的最终值 [22；26；62；72]。

为映射函数的层次型依赖关系，我们将使用节点树图，其中顶层对应于上下文图（父元素），下层对应于线程分解（子元素）。其中，功能块之间的相互联系不予显示，仅呈现层次型顺序。这种方法能够对 IDEF0 [77] 模型的功能块层次结构进行整体分析。

结论。本研究提出了一项 актуального научно-прикладного завдання 的求解方案，即开发一种信息技术，基于对所选因素主导性的研究，并应用模糊逻辑获得综合质量指标，对印后工艺设计质量进行预测评估。研究确定了信息技术的主要阶段。

概述了图书出版物印后加工实现与设计的一般特征。识别并描述了影响印后工艺设计质量的因素。对研究过程的实现与设计功能进行了建模。创建了 IDEF0模型，由一组按层级排列且相互关联的示意图组成：上下文示意图、上下文示意图的分解（第一层分解示意图），以及第一层和第二层示意图中功能块的分解。介绍了本体创建的主要方法和本体的主要类型。

提出了一种构建语义网络的方法，用于呈现影响所分析过程质量的各因素之间的联系。借助谓词逻辑，对这些因素之间的联系进行了形式化表示。

阐述了因素优先影响模型的综合与优化特点，该模型用于评估各因素对印后工艺设计质量的影响。优化准则包括：矩阵特征值$\lambda_{\text{最大值}} = 8\,483$，一致性指标$IU = 0{,}069$，一致性比率$RU = 0{,}049$。优化准则均处于允许范围内。

确定了采用多因素方法实现印后工艺设计项目的最优备选方案，所用方法为多因素备选方案选择法——

基于准则线性聚合和模糊优先关系的备选方案选择法。其中，采用基于准则线性聚合的多因素备选方案选择法时，效用评价获得了最大值$_3$ $0,414U=$ 备选方案A_3。采用基于模糊优先关系的多因素备选方案选择法时，隶属函数取得最大值$()_3 =[0,4\ 0,74\ 1,26];;_{нQ}x\mu$，因此第三种方案被认为是最优方案。 比较了最优备选方案的搜寻结果，并确认各方案相同。

通过计算每个语言变量及其对应值术语集的两两比较矩阵，获得了所分析工艺过程的语言变量隶属函数值。语言变量的术语以模糊集表示。

介绍了通过采用重心法对模糊集进行去模糊化，获得印后流程设计质量评价值的方法。在所选条件下，综合质量指标为 。$=50,256$ $\%_{прогноз}$ G，最大值为 100%。

开发了印后流程设计质量预测评价信息技术的结构功能模型，该模型考虑了研究阶段，并可实现对印刷品质量的先验保障。构建了该信息技术的IDEF0模型：绘制了上下文图A-0、第一层分解图A0、第二层分解图A1、A2、A3、A4、A5、第三层分解图A23、A24、A41、A42、A51、A52，以及节点树图。

参考文献

1. ДСТУ 3017:2015. 出版物。主要类型。概念术语及定义。基辅，2016年。38页。2. ДСТУ 4489:2005. 图书和期刊出版物。开本要求。基辅，2006年。10页。3. Антонова С. Г. Редакторская подготовка зданий：教材。莫斯科：莫斯科国立印刷大学出版社，2002年。468页。4. Барановський І. В.、Яхимович Ю. П. 图像创作信息的印刷加工。基辅；利沃夫：ІЗМН，1998年。400页。5. Бартіш М. Я.、Дудзяний І. М. 运筹学。第3部分：决策与博弈论。利沃夫：伊万·弗兰科利沃夫国立大学出版中心，2009年。278页。

6. 装订工艺详解。Zen Designer创意团队艺术项目。网址：zen-designer.ru/scio/767- broshurovochno-perepletnij-protsess 7. Величко О. М.、Скиба В. М.、Шангін А. В. 出版印刷生产工艺设计：教学пособие。基辅：乌克兰国立技术大学“基辅理工学院”，2014年。235页。8. Волкова Л. А. 出版印刷技术与工艺。莫斯科：莫斯科国立印刷大学“图书世界”出版社，1999年。224页。9. Воробьев Д. В. 印后加工工艺：教材。莫斯科：莫斯科国立印刷大学，2000年。394页。10. Гавенко С. Ф.、Воржева О. В.、Конюхова І. І.、Мельников О. В. 印刷品质量评估实习指南 / Е. Т. Лазаренко 编。利沃夫：Афіша，2001年。64页。11. Гавенко С.、Лазаренко Е.、Мамут Б. 等。印刷品装饰：技术、设备、材料。基辅；利沃夫：“乌克兰”大学、乌克兰印刷学院，2003年。180页。12. Гавенко С.、Корнілов І.、Ничка В. 书籍产品质量的系统分析与管理方法。乌日霍罗德：喀尔巴阡，1996年。80页。13. Гавенко С.、Кулік Л.、Мартинюк М. 书籍结构。利沃夫：Фенікс，1999年。256页。14. Гавриш Б. М.、Тимченко О. В. 栅格转换处理器中数字数据流的处理方法。建模与信息技术。2014年。第71期。第142–147页。15. Голубник Т. С.、Піх І. В.、Сеньківський В. М. 运用模糊逻辑确保拼版质量的原则。科学札记。2014年。第1–2期。第77–83页。16. Голубник Т. С.、Сеньківський В. М.、Піх І. В.、Петрів Ю. І. 拼版质量因素隶属函数的构建。印刷工艺与技术。基辅：乌克兰国立技术大学“基辅理工学院”出版印刷研究所，2014年。第3期（45）。第20–29页。17. Либау Д.、Хайнце И. 工业装订生产。第1、2部分。莫斯科：莫斯科国立印刷大学，2007年。422页；470页。18. Дурняк Б. В.、Сеньківський В. М.、Піх І. В. 出版印刷流程预测与质量保障信息技术（问题解决方法论）。工艺综合体。2014年。第1期。第21–24页。19. Жидецький Ю. Ц.、Лазаренко О. В.、Лотошинська Н. Д. 等。印刷材料 / Е. Т. Лазаренко 总编。利沃夫：Афіша，2001年。328页。20. 扎德 Л. А. 语言变量的概念及其在近似决策中的应用。莫斯科：Мир，1976年。165页。21. 扎德。软计算与模糊逻辑在理解、构建和发展信息智能系统中的作用。人工智能新闻。莫斯科，2001年。第2–3期。第7–11页。

22. Ю. П. Зайчен科. 运筹学：教材。第七版，修订并增补。基辅：“斯洛沃”出版社，2006年。816页。23. B. C. 卡尔片科、B. Г. 西休克。印刷及装订生产：工艺过程设计与计算。利沃夫：乌克兰印刷学院，1999年。76页。24. Г. 基普汉。印刷媒体百科全书。技术与生产方法：德文译本。莫斯科：莫斯科国立印刷大学，2003年。1280页。25. A. B. 库德里亚绍娃。基于准则线性综合的印后工艺设计多因素备选方案选择。印刷与出版。2019年。第2期（78）。第45–50页。26. A. B. 库德里亚绍娃、H. M. 利托夫琴科。出版物结构化过程质量综合指标的形成。印刷与出版。2018年。第1期。第82–89页。27. A. B. 库德里亚绍娃。印后工艺设计质量模型。工艺综合体。卢茨克，2019年。第1期（16）。第44–48页。28. A. B. 库德里亚绍娃。印后工艺设计语言变量隶属函数的研究。第一部分：构建成对比较矩阵。科学札记。2020年。第1期（60）。第26–32页。29. A. B. 库德里亚绍娃、B. M. 森基夫斯基。印后工艺设计语言变量隶属函数的研究。第二部分：隶属函数值的可视化。印刷与出版。2020年。第1期（79）。第30–41页。30. A. B. 库德里亚绍娃。印后工艺设计因素优先影响模型的综合。科学札记。2019年。第1期（58）。第48–54页。31. Лазаренко O. B. 等。如何为小型印刷厂选择技术与设备？利沃夫：“梅塔”科研生产企业，1999年。226页。32. H. И. 利бер曼。印刷品质量统计控制方法：依据油墨套印偏差和折页精度指标。莫斯科：书籍出版社，1977年。119页。33. B. B. 利特温。知识管理技术：教学用书。利沃夫：利沃夫理工学院，2010年。260页。34. B. З. 马伊克。印刷品压凸工艺的理论基础。图书质量学。2008年。第2期。第43–62页。35. B. З. 马伊克。装订工艺技术：教材／Лазаренко E. T. 主编。利沃夫：乌克兰印刷学院，2011年。488页。36. E. B. 马雷什金、A. Э. 米利钦、A. A. 巴甫洛夫、A. E. 沙德林。出版者手册。莫斯科：AST；“КРПА 奥林匹克”代理公司，2004年。816页。37. Malcolm J. Keefe。印后技术／С. И. Купцов 英译；С. И. 斯捷法诺夫编。莫斯科：PRINT-MEDIA 中心，2005。280页。38. M. I. 涅巴ва、O. O. 阿德лер、O. Й. 列斯ко。企业经济与生产活动组织：教学用书。第2部分：生产组织。文尼察：文尼察国立技术大学，2011年。131页。

39. Новожилов А. 数字印刷——通往未来之路。印刷调色板。1996年。第3期。第43–45页。40. Овчинникова Е. В. 借助 AllFusion Process Modeler 进行业务流程建模：教学方法手册。叶卡捷琳堡：乌拉尔国立交通大学，2007年。102页。41. Осінчук О. І.、Козак Р. О. 模糊逻辑作为制定图书出版物规划质量的工具。印刷、多媒体与网络技术：第二届国际科学技术会议材料。利沃夫，2018年。第49–51页。42. Осінчук О. І.、Литовченко О. В.、Калиній І. В. 运用模糊集理论制定图书出版物规划及艺术技术设计质量综合指标。建模与信息技术。2018年。第85辑。第137–142页。43. Осінчук О. І.、Сеньківська Н. Є.、Сеньківський В. М. 构建并计算用于图书出版物规划及艺术技术设计过程的语言变量隶属函数。印刷与出版。2018年。第2期（76）。第57–63页。44. Павлов А. Н.、Соколов Б. В. 模糊信息条件下的决策：教学手册。圣彼得堡，2006年。72页。45. Пашуля П. Л. 印刷领域的标准化、计量学、符合性与质量：教材。利沃夫：乌克兰印刷学院，2011年。408页。46. Піх І. В. 图书出版物参数研究。教授与教师队伍、科研人员及研究生科学技术会议：报告摘要。利沃夫，2007年。第103页。47. Піх І. В.、Дурняк Б. В.、Сеньківський В. М.、Голубник Т. С. 图书出版物质量形成的信息技术：专著。利沃夫：乌克兰印刷科学院，2017年。308页。48. Піх І. В. 图书页参数的改进图形模型。图书质量学：第六届国际科学实践会议材料。利沃夫，2007年。第19–22页。49. Піх І. В.、Сеньківський В. М. 出版流程建模的信息技术：教学用书。利沃夫：乌克兰印刷科学院，2013年。224页。50. Піх І. В.、Сеньківський В. М.、Сеньківська Н. Є.、Калиній І. В. 出版印刷流程质量保障的理论基础。第四部分：运用模糊逻辑进行质量预测与保障。科学札记。2017年。第1期。第22–30页。51. Предко Л. С. 印前流程设计：教学用书。利沃夫：乌克兰印刷学院，2009年。352页。52. Репета В. Б.、Сеньківський В. М.、Гургаль Н. С. 基于模糊逻辑的标签紫外柔版印刷过程质量预测。科学札记。2014年。第1–2期。第84–89页。

53. Ротштейн А. П. 智能识别技术：模糊集合、神经网络、遗传算法。文尼察：УНІ-ВЕРСУМ-文尼察，1999年。320页。54. Ротштейн О. П.、Ларушкін Є. П.、Мітюшкін Ю. І. 生物技术中的软计算：多因素分析与诊断：专著。文尼察：УНІВЕРСУМ-文尼察，2008年。144页。55. 萨阿迪 Т. 决策（层次分析法）。莫斯科：Радио и связь，1993年。278页。56. 萨马林 Ю. Н. 自动化生产的工艺流程（印刷生产）：教材。莫斯科：莫斯科国立印刷大学，2015年。556页。57. 著作权登记证书 No 41832。乌克兰。通过二元比较法进行系统分析中的模拟建模。[计算机程序] /著作财产权归 И. В. Гілеті、В. М. Сеньківському、О. В. Мельникову 所有。登记日期：2012年1月17日。58. Сеньківський В. М.、Козак Р. О. 图书出版物的自动化设计：专著。利沃夫：乌克兰印刷学院，2008年。200页。59. Сеньківський В. М.、Кудряшова А. В.、Козак Р. О. 编辑出版流程质量形成的信息技术：专著。利沃夫：乌克兰印刷科学院，2019年。272页。60. Сеньківський В. М.、Кудряшова А. В. 运用模糊逻辑对出版物设计过程进行预测性评估。技术科学领域实用应用的现代方法、创新与经验国际研究与实践会议：会议论文集（波兰拉多姆：Izdevnieciba «Baltija Publishing»，2017年12月27日至28日）。拉多姆，2017年。第28–32页。61. Сеньківський В. М.、Кудряшова А. В. 印后工艺设计因素之间关系的形式化表示。印刷与出版。2019年。第1期（77）。第70–77页。62. Сеньківський В. М.、Кудряшова А. В. 出版物设计过程实现质量综合指标的构建。印刷与出版。2017年。第2期（74）。第11–18页。63. Сеньківський В. М.、Піх І. В.、Гілета І. В.、Петрів Ю. І. 平版胶印用纸张参数的隶属函数。技术综合体。2014年。第1期。第32–37页。64. Сеньківський В. М.、Піх І. В.、Голубник Т. С. 装版拼版过程中模糊知识库与模糊逻辑方程的应用。科学札记。利沃夫，2014年。第3期。第111–119页。65. Сеньківський В. М.、Піх І. В.、Голубник Т. С.、Калиній І. В. 用于装版拼版质量预测、设计与实现的信息技术结构—功能模型。科学札记。2015年。第2期（51）。第7–13页。

66. Сеньківський В. М.、Піх І. В.、Калиній І. В. 印前流程的信息技术模型。图书质量学。2006年。第9辑。第5–9页。67. Сеньківський В. М.、Сеньківська Н. Є.、Кудряшова А. В.、Калиній І. В. 图书出版技术质量保障过程建模。图书质量学。2015年。第1期。第26–31页。68. Сеньківський В. М.、Сеньківська Н. Є.、Кудряшова А. В. 印后工艺设计质量影响因素优先级模型的优化。科学札记。2019年。第2期（59）。第22–29页。69. Сеньківський В. М.、Сеньківська Н. Є.、Петрів Ю. І.、Калиній І. В. 隶属函数在保障印刷流程质量中的重要性。印刷与出版。2013年。第3–4期。第31–36页。70. Сокол О. Ф. 出版物的印刷设计准备。利沃夫：乌克兰印刷学院，2009年。12页。71. 特种印刷。工艺说明。莫斯科：图书室，1990年。350页。72. Сявавко М. С. “模糊专家”信息系统。利沃夫：伊万·弗兰科利沃夫国立大学出版中心，2007年。320页。73. Темникова Е. А.、Асламова В. С.、Берестнева О. Г. 补充职业教育机构学科领域的本体建模。设计本体。2015年。第5卷，第4期（18）。第

369 386 281–页。

8 29 2_ 0 2

网址：http://www.ontology-of-designing.ru/article/2015_4 % % / %D %A emnikova.pdf 74. Романо Ф. 印刷媒体商业 / М. Бредис、В. Вобленко、Н. Друзьева 英译；Б. А. Кузьмина 主编。莫斯科：PRINT-MEDIA 中心，2006年。456页。75. Хведчин Ю. Й. 装订设备。第1部分：装订设备：教材。利沃夫：ТеРус，1999年。336页。76. Хведчин Ю. Й. 装订设备。第2部分：精装设备：教材。利沃夫：乌克兰印刷学院，2007年。392页。77. Шаховська Н. Б.、В. В. 利特温 信息系统设计：教材。利沃夫：Магнолія-2006，2011年。380页。78. 本体度量。Protégé 5 文档。网址：http://protegeproject.github.io/protege/views/ontology-metrics/ 79. Senkivskyi V.、Kudriashova A.、Pikh I.、Hileta I.、Lytovchenko O. 印后流程设计模型。第一届数字内容与智能多媒体国际研讨会，DCSMart 2019，乌克兰利沃夫，2019年12月23日至25日。第259–270页。

铁电聚合物中的热刺激过程与热释电性

Sergeeva A. E.

本文对聚偏氟乙烯（*ПВДФ*）薄膜、其与四氟乙烯的共聚物 *П(ВДФ-ТФЄ)*，以及以聚偏氟乙烯和无机陶瓷材料钛酸钡 $BaTiO_3$、锆钛酸铅（*ЦТС*）为基础的复合材料进行了实验研究。所有这些材料均为铁电体。研究了它们在不同温度作用下的行为，特别是热刺激极化电流（*ТСП*）和热刺激去极化电流（*ТСД*），以及这些材料的热释电效应。研究发现，热作用对于铁电极化的形成及其稳定性的维持至关重要。

研究确定了体电荷对铁电聚合物残余极化大小及稳定性的重要影响，并提出了在聚合物薄膜中区分同号电荷与异号电荷的方法。

所得结果兼具科学意义与实际价值，因为铁电聚合物广泛用于制造各种传感器。

本文旨在对聚偏二氟乙烯（*PVDF*）薄膜、其与四氟乙烯的共聚物 *P(VDF-TFE)*，以及以 *PVDF* 和无机陶瓷材料钛酸钡 $Ba\text{-}TiO_3$ 和锆钛酸铅（*PZT*）为基础的复合材料进行实验研究。这些材料均为铁电体。研究考察了它们在不同温度作用下的行为，尤其是这些材料的热刺激极化（*TSP*）和热刺激去极化（*TSD*）电流，以及热释电效应。

研究发现，热作用会影响铁电体极化的形成及其稳定性。研究已证实，铁电聚合物中的空间电荷对极化的幅值和稳定性具有重要影响。研究提出了区分聚合物薄膜中同号电荷和异号电荷的方法。

所得结果兼具科学和实践意义，因为铁电聚合物广泛用于制造各种传感器和换能器。

1. 引言

要测量剩余极化的热弛豫，最合适的方法是测量热刺激去极化电流（TSD）。尽管已有大量实验研究，但对于聚偏二氟乙烯（PVDF）等经极化处理的铁电聚合物，目前仍缺乏热刺激去极化电流法的理论。因此，对

测量电流峰值的描述和解释通常停留在定性和假设层面。

为确定热刺激去极化电流峰的性质，必须考虑它们与极化和热释电性的联系，以及非晶相和晶相中发生的进程。有人尝试过这样做[1；2]通过分别考察热释电过程、非晶相中的极化、“电荷诱导的界面极化”（称为麦克斯韦-瓦格纳效应）以及晶相中的铁电极化对热刺激去极化电流的贡献。在对这些预期进程进行定性描述时，除补偿电荷外，还考虑了“注入的过剩电荷”，即空间电荷。人们往往认为，PVDF 中存在极化、补偿电荷和空间电荷是不言而喻的。尽管极化的存在毫无疑问，但除了补偿电荷之外是否还存在空间电荷则值得商榷，因为 PVDF 的电导率足够高，在室温下约为$g = 10^{-11}$ Sm/m [3；4] 而其介电常数为 ε = 10–20。

因此，任何多余电荷都会在约为.....的麦克斯韦弛豫时间内被中和

$$\tau = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{g} \approx 13s \,. \qquad (1)$$

这表明，在短路样品中，约 40 秒后，由电荷（铁电晶体的补偿电荷和极化电荷除外）引起的任何电场都会消失。

均匀极化的两相材料（如 PVDF）由分散在非晶基体中的铁电微晶组成。铁电微晶中的退极化场只能通过位于微晶两侧的电荷来补偿。无法像单晶或结晶度为 100%的材料那样，完全依靠电极电荷实现补偿。在 PVDF 和其他双相铁电聚合物中，由于介电常数不同，晶相与非晶相界面处的电荷积累程度较小，而这种积累最可能是由铁电极化所致。von Seggern 和 Fedosov 提出了一种层状结构模型，其中铁电层与非铁电层交替排列，用以描述初始极化处理[3, 4], 极化翻转[5], 短路以及 PVDF 中的反向切换[6] 。

TSD方法的理论[7] 仅针对具有偶极极化和/或空间电荷极化的驻极体而建立。其假设极化或

空间电荷最初处于热冻结状态，随后在线性升温过程中解冻。将TSD方法应用于铁电聚合物时，尚未建立相应的理论基础，因为PVDF中的极化并非热冻结，而是具有铁电性质，并且在极化处理过程中无需加热即可在高电场下产生。除了不可逆弛豫电流外，在铁电聚合物的热刺激去极化实验中还存在可逆热释电电流，而将这些分量分离并非易事。然而，由于TSD方法信息丰富且用途广泛，它也已被广泛用于研究聚合物铁电性。

许多研究人员在宽泛的温度、电场和时间范围内对经过极化处理的非铁电α-PVDF和铁电β-PVDF进行了研究，并观察到其在50–60 °C处的热刺激去极化电流峰。进行这些实验的所有PVDF样品唯一的共同特征是存在非晶相。因此，这一热刺激去极化电流峰很可能与PVDF非晶相中发生的进程有关。

在许多情况下，人们认为50–60 °C附近的热刺激去极化电流峰与所谓的α_c进程[8]有关。然而，关于α_c进程性质的数据仍存在争议。此外，还应确定结构转变与热刺激去极化电流之间的相互关系，因为热刺激去极化电流是电学进程的结果，但不一定是结构进程的结果。在对热刺激去极化电流峰的性质作出假设时，不仅要考虑结构转变，还必须考虑基本电学原理和定律。否则，不具备相应公式和方程的定性解释可能是错误的。通过TSD方法，除PVDF中通常的α和β进程外，还发现了两个高温峰。其中一个进程被归因于捕获在非极性晶体α相与非晶区之间边界上的电荷。另一个进程则被认为与极性β微晶上的电荷有关。作者认为，这两个峰都是由从阳极注入的正同号电荷引起的，尽管它们很可能与极化温度有关。

Eliasson [9], 在研究极化电场、温度和电极材料对热刺激去极化电流的影响时，认为体电荷的形成受到注入的影响，尽管她的结果与 Ieda 等人 [10]数据中峰的位置和幅值并不吻合。如果比较不同研究人员获得的热刺激去极化数据，情况就会更加复杂。TSD方法确定的弛豫过程种类繁多，这是因为缺乏明确的方法

来识别峰值（有时他们会把热刺激去极化电流曲线上的最小弯折处视为弛豫峰）。Neagu 等人 [11] 认为，电极材料以及未受控制的气氛成分，尤其是氧、氮和水蒸气的存在，对热刺激去极化电流有很大影响。

根据热刺激去极化电流理论 [12]，对于均匀极化的单分量偶极样品，测量电流等于位移电流 dP/dt，因此热刺激去极化电流的积分等于初始极化的值。von Seggern 和 Fedosov [5], 表明，对于两相体系，热刺激去极化电流的积分小于剩余极化。

热刺激研究方法的应用范围极广，因为大多数弛豫过程都是热激活的。与此同时，这些方法在铁电聚合物研究中的应用潜力尚未得到认识和利用。这涉及研究热驻极体极化（TEP）过程中的有效电导率动态、比较 TEP 电流与热刺激去极化电流、区分铁电聚合物中同号电荷和异号电荷对弛豫电流的贡献，以及利用分段热刺激去极化方法分离总电流中的热释电分量与弛豫分量。

本文旨在通过采用上述方法获得更多实验结果，以阐明聚偏氟乙烯薄膜中剩余极化形成所涉及的物理过程。聚偏氟乙烯薄膜是铁电聚合物的典型代表。研究的另一个方面是探讨这一类材料中热刺激去极化电流与热释电性之间的关系。我们还对 P(VDF-TFE)共聚物，以及聚偏氟乙烯与钛酸钡（$BaTiO_3$）和锆钛酸铅（PZT）等无机晶体组成的复合材料进行了一些实验，以使研究更具普遍性。

2. 热刺激去极化电流法的特点

在进行热驻极体极化（TEP）时，与等温极化不同，样品最初在室温下保持恒定电压一段时间，使吸收电流降低至约为 10^{-11} A 的数值；随后以恒定速率（0.5–4 °C/min）将温度线性升高至 150 °C，并连续测量极化电流。极化完成后，在不切断外加电压的情况下，迅速冷却样品。

由于许多弛豫过程具有热激活特性，因此采用 TSD方法 [12] 预测空间电荷和剩余极化稳定性，并研究其形成机制。样品电极通过静电计和电流记录装置相互连接，静电计的电流灵敏度为 10^{-14}–10^{-16} A。温度以恒定速率在 15–150 °C 范围内升高，并通过铬镍-铜镍热电偶进行测量。电流 TSD方法的原理如图 1 所示。

我们采用振动电极法（开尔文法）测量驻极体电势的热刺激下降。在 -100 °C 至 +180 °C 范围内的测量使用 Solomat-91000 弛豫谱仪进行。在 -170 至 + 40 °C 的低温范围内进行的研究，则使用 Kithley-6100静电计，对先前在液氮中冷却的样品进行测量。

3. 热刺激去极化电流测量过程中同号电荷和异号电荷的弛豫

铁电聚合物的许多属性可以在现代极性驻极体理论框架内得到解释 [13]；该理论考虑了自洽条件下同号电荷和异号电荷的弛豫，而不考虑晶相中的铁电性。我们结合电晕放电极化的 PVDF 薄膜的热刺激弛豫和等温弛豫实验数据，探讨同号电荷与异号电荷之间的相互关系。

采用四种去极化方式研究弛豫过程，即短路样品（S）的热刺激（T）和等温（I）去极化，以及开路模式（O）下的去极化。这些模式分别 обознач为 TS、TO、ISO 和 IO，其中第一个字母表示温度模式（热刺激或等温），第二个字母与电学状态（短路或开路）有关。在开路配置下保持 24 小时后，还对热刺激驻极体电位（TP）的动力学进行了 დამატებითი实验。在 TO 和 IO 模式下，采用厚度为 10 μm 的聚四氟乙烯（PTFE）薄膜作为介电间隙。所有热刺激实验均以 3 °C/min 的恒定升温速率进行。在等温实验中，快速加热达到所需温度值后，保持温度恒定。TP 方法中的驻极体电位采用开尔文法测量，并连续记录。

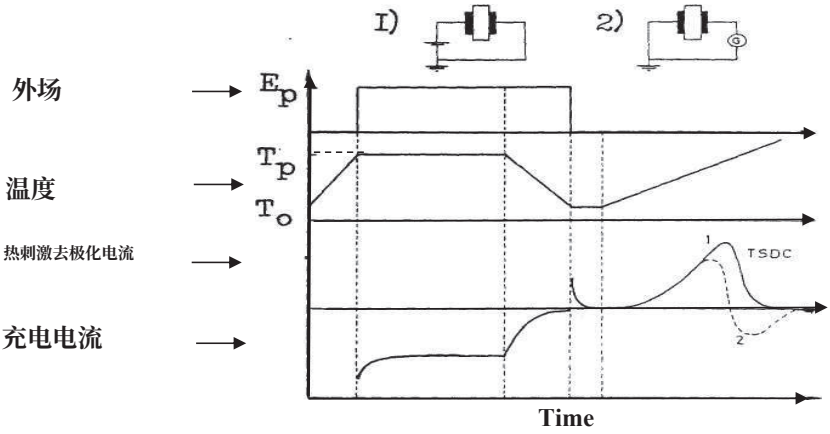


图 1。热驻极体极化（1）和去极化（2）方法的原理 s

在电晕放电极化过程中，过剩电荷局限于样品表面，形成均匀电荷 σ，该电荷在样品体积内产生均匀电场，并在其中形成以束缚电荷面密度 *P* 为特征的内部偶极极化（异号电荷）。在无间隙的样品短路情况下，只有异号电荷发生弛豫 [12], , 并且由于外电路中的电流再分布，等式 $\sigma = P$ 和内部电场为零（$E = 0$）得以保持。在存在介电间隙且处于开路模式时，同号电荷和异号电荷的弛豫电流沿相反方向流动。

为了分别找出开路模式下总去极化电流中对应于同号电荷 σ 和异号电荷 P 衰减的分量，我们将电流密度 i(t) 和表面电势 V(t) 表示为

$$i(t) = s\left[\frac{dP(t)}{dt} - \frac{d\sigma(t)}{dt}\right], \tag{2}$$

$$V(t) = \frac{sx_1}{\varepsilon_0\varepsilon_1}\left[\sigma(t) - P(t)\right], \tag{3}$$

$$i(t) = -\frac{\varepsilon_0\varepsilon_1}{x_1}\cdot\frac{dV(t)}{dt}, \tag{4}$$

其中，t 为时间，ε 和 x_o 分别为样品的介电常数和厚度；ε_1 和 x_1 为介电间隙的相似参数。对于电导电流密度，可以写为

$$i_C(t)=\frac{g}{x_0}V(t)=-\frac{d\sigma(t)}{dt}, \tag{5}$$

其中 $_0\exp(/)ggQkT=$ $-$ 为电导率，k 为玻尔兹曼常数，T 为温度，Q 为本征电导的活化能，g_o 为指前因子。对式（4）进行时间积分，并考虑线性升温 t 替换为 T 的关系 $=\ _0+\beta\cdot\ \ TTt$ 其中 β 为升温速率，T_o 为实验初始温度，由式（5）可得去极化电流和驻极体电势随温度变化的关系

$$i_1(T)=\frac{d\sigma}{dt}=-\frac{x_1g_0}{bT_0x_0\varepsilon_0\varepsilon_1}\exp\left(-\frac{Q}{kT}\right)\int_T^\infty i(T)dT', \tag{6}$$

$$i_2(T)=\frac{dP}{dt}=\frac{i(T)}{s}+\frac{d\sigma}{dt}, \tag{7}$$

$$V(T)=\frac{x_1}{bT_0\varepsilon_0\varepsilon_1}\int_T^\infty i(T)dT'. \tag{8}$$

方程（6–8）右侧的所有值均可通过实验获得。因此，这种方法可以利用实验得到的*i(T)*曲线，区分不同 TSD 模式下同号电荷和异号电荷的弛豫过程。

4. 聚偏氟乙烯薄膜热驻极体极化的应用

热驻极体极化法（TEP）比等温极化具有若干优势，因为它可以提供有关极化形成机制的额外信息。此外，还可以确定最佳极化温度，并找出欧姆电导变得显著时的温度。

从图2和表1可以看出以下特征：

1) TEP 曲线包含三个特征区域：a) 电流增长，不受电晕放电极性的影响；b) 电流降低（电导负温度系数）；c) 高温下电流增加。

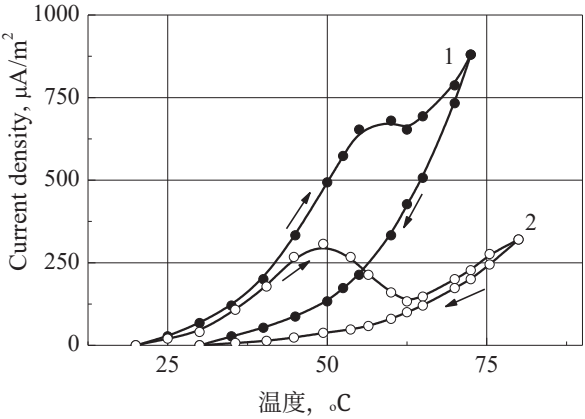


图2. 正电晕放电（1）和负电晕放电（2）下热刺激极化过程中电流随温度的变化。升温速率为 2 °C/min

Table 1

不同温度范围内热驻极体极化过程中的有效活化能（根据 ln*i*-1/*T* 曲线线性部分的斜率计算）[9]

电荷极性	加热			冷却	
	活化能，eV 温度范围，°C			活化能，eV 温度范围，°C	
+	0.87 20–40	0.82 40–50	0.82 50–65	0.92 60–45	1.06 45–25
–	0.87 20–35	1.1 35–45	1.12 65–80	1.19 70–55	0.83 55–35

2) 在负电晕放电极性下，第二区域比正极性下更明显，且电导率在较低温度下开始下降。TB 正极化与负极化样品的电流差异表明，其注入水平不同。在正电晕下，正电荷和负电荷（来自后电极）很可能都会被注入。在负电晕的情况下，金属电极中的正载流子不会被注入。

3) 对 PVDF 薄膜进行热驻极体极化处理时，有效电导率不可逆下降，这是因为冷却时的热电流值远小于加热时的电流。

在 PVDF 中，TEP 期间的电流峰值（图2）不能像线性极性聚合物那样被认为是由极化引起的，因为其

积分会得到不切实际的极化值。TEP 铁电聚合物中的电导电流可能远大于电流的极化分量，因此图2中的曲线反映了薄膜有效电导率的变化特征。

PVDF 中电导率的机理和本质尚不明确，但图2曲线中出现电导率负温度系数区段，这表明，除了迁移载流子数量随热激活而增加之外，还可能存在深陷阱俘获载流子的现象；当场强与温度的比值达到一定范围时，后一过程会占据主导。俘获电荷通过中和退极化场，并有助于保持剩余极化，发挥着重要作用。

极化薄膜中的高极化与电导率急剧下降（电流经过峰值）可能相互关联。微晶中的铁电极化为电荷在其界面处被俘获创造了条件。俘获电荷产生的电场会屏蔽极化，并有助于使其稳定。因此，极化形成过程与电荷俘获过程相互关联、相互依存。

在热驻极体极化过程中，从室温升至30–40 °C时，无论电晕极性如何，电流曲线上的*i(T)*关系均呈指数变化。这可能与体积内载流子的热生有关。此后电流曲线的变化趋势与所提出的极化形成和电荷俘获模型相符。第三个区段中电流再次增大，这可能是由于内部热电效应使此前被俘获的电荷脱陷，并导致已形成的极化部分消失。如果这一假设成立，那么实践中一个重要的结论是：在热驻极体极化过程中，不宜将 PVDF 加热到高于电流-温度曲线最低点所对应的温度。

TEP 曲线第二阶段电流和有效电导率的下降可能由以下原因造成：

1) 自有载流子因在外场中迁移并被俘获在电极附近（电极极化）而逐渐耗尽；

2) 电极处或其附近发生不可逆变化，导致电荷注入受限；

3) 体积中形成不导电区域，例如带有俘获电荷层的极化晶粒；

4) 由于极化晶粒和宏观极化区域界面处形成了新的陷阱，自由电荷与俘获电荷之间的平衡发生改变。

带正电和带负电样品的 TEP电流差异与导致电导率降低的迁移机制相悖。第二种解释也不太可能，因为离子杂质会使电极上的电场增强，而这与温度的作用共同会导致注入水平提高。第三种解释则更为可能，因为聚合物晶相中的有序化会降低局域态密度，从而降低电导率（带隙宽度约为 6–9 eV）。然而，外场中微晶内偶极子的优选取向有序化不会显著改变其电导率，因为它们已经具有自发极化这一更高程度的内部有序化。

聚偏氟乙烯的电导率很可能会降低，这是因为载流子在极化晶体界面和宏观极化区域的界面处被大量俘获，从而为电荷局域化创造了有利条件。我们发现，低温和高电场下的类似进程会导致伏安特性上出现负动态电阻区。

如果所提出的假设正确，那么温度与场强之间必定存在某种关系，使得高极化得以形成，并出现不可逆的电导率下降。在热驻极体极化模式下，不同恒定电压对应的有效电导率随温度的变化如图3所示；由图可见，随着极化电压升高，负温度电导率区段的起始点向较低温度移动。已知铁电体只有在高于矫顽场的电场中才会出现高极化。从图3的数据可知，矫顽场的值随温度升高而降低。从图3和表1可以看出，未极化样品和极化样品中产生有效电导率的活化能几乎相同。同时，极化薄膜的电导率（因而其中的自由载流子浓度）比未极化薄膜低近100倍。因此，在极化处理过程中，载流子会发生重新分布，并在新形成的陷阱中进一步被俘获。

下面分析 TEP电流曲线的形状，同时考虑到电导电流 IS 与自由电荷载流子浓度成正比

$$i_c = \mu \cdot n_c e \frac{U}{x_0}, \tag{9}$$

其中 μ 是迁移率；U 是外加电压；x_o 是样品的厚度。在禁带中存在局域态时，俘获电荷浓度由费米-狄拉克公式确定

$$n_t = N_t\{1+(1/g/\exp[-(F-E_t)/kT])\}^{-1}, \tag{10}$$

其中，N_t 为局域态密度；g 为其统计权重；E_t 为局域态能量；F 为基于自身载流子和注入载流子的准费米能级。我们假设载流子总浓度和费米能级保持不变。

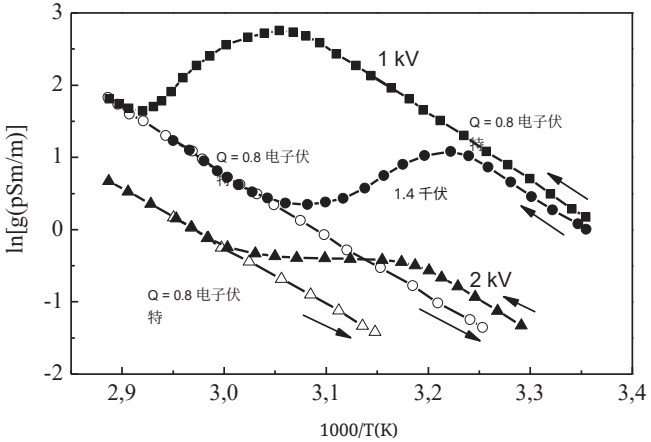


图3. 不同控制栅电压（驻极体电势）下，电晕放电热刺激极化处理过程中有效电导率的温度依赖性

随着极化程度的增加，局域态密度的增加可表示为线性函数，其中极化P是场强E.的函数。对于铁电体，函数$P(E)$可用三个直线段近似表示

$$P(E)=\begin{cases}0, E<E_c,\\ (E-E_c)P_s/(E_s-E_c), E_c<E<E_s,\\ P_s, E_s<E,\end{cases} \tag{11}$$

其中 E_c 为矫顽场；E_s 为极化达到饱和时的场强。考虑矫顽场随温度升高而降低的情况

$$E_c = E_0 - \gamma \cdot T \ . \qquad (12)$$

我们假设在$E_c < E < E_s$处的动态介电常数不随T变化，这等价于差值$\Delta E = E_s - E_c$. 保持恒定。根据式 (10)–(15)，并考虑上述假设，可得电导电流与温度之间的关系

$$i_c = (\mu \cdot e \cdot V / x_0)\left\langle n_0 - N_t\{1 + (1/g)\exp[-(F - E_t)/kT]\}^{-1}\right\rangle , \qquad (13)$$

其中

$$N_t = N_0; T < T_1 = (E_{c0} - V / x_0)/\gamma,$$
$$N_t = N_0 + \alpha P_s; T > T_2 = (\Delta E + E_{c0} - V / x_0)/\gamma,$$
$$N_t = N_0 + (\alpha P_s / \Delta E)[(V / x_0) - (E_{c0} - \gamma T)], T_2 > T > T_1 \ . \qquad (14)$$

由表达式 (13) 和 (14) 可知，在温度 $T < T_1$ 范围内，随着温度升高，电流 i_c 增大。若满足条件，N_t 便会在 $T > T_1$ 时开始增大

$$\alpha P_s \gamma / \Delta E > (Q / gkT^2)\exp(-Q / kT) \ , \qquad (15)$$

其中 $Q = F - E_t$。

尽管温度升高，电流 i_c 仍会减小。当极化达到饱和，或条件 (15) 不再满足时，电流会再次增大。

热驻极体极化过程中有效电导率降低，表明体电荷过程十分重要，因为滞留在极化区域边界上的电荷会补偿退极化场，并有助于长期保持剩余极化。在高电场下进行等温极化时也发现了类似的关系 [14]。

因此，温度和场强的升高对移动电荷的产生和注入有同等影响，而移动电荷的高浓度是高局部极化出现并发展的先决条件。随着极化形成，铁电聚合物的电导率会因注入的载流子被极化晶粒形成的深陷阱俘获而不可逆地降低。这些被俘获的载流子通过补偿局部退极化场，使剩余极化得以稳定。

5. 聚偏氟乙烯中的热刺激去极化电流

TSD 电流的测量是研究弛豫过程 [12] 的有力工具。尽管 TSD 电流理论仅针对热冻结的偶极极化而建立，但这种方法也被广泛用于研究

铁电聚合物。在 PVDF 中，有两个峰最为重要。其中一个峰与非晶相的玻璃化转变有关，始终出现在约 -45 °C 的温度下，且已得到充分研究。50–80 °C 范围内的第二个峰（图4）的本质尚未完全明了，不过可以确定，非晶相中偶极子的重新取向、铁电极化的弛豫、空间电荷的位移，以及相间过程和压电电极过程等多种过程，都可能导致这一峰的出现。研究已确认，约 60 °C 的温度是 PVDF 的特征温度，但其本质尚不完全清楚。许多研究人员将这一温度下的峰与所谓的 α_c 弛豫联系起来。Lacabane 等人 [15] 将该峰的出现归因于收缩，也就是为获得 PVDF 铁电 β 相而进行拉伸后发生的部分恢复。我们认为，该峰与非晶相中的极化有关。

铁电聚合物除了具有铁电性外，还具有普通极性驻极体的属性。因此，可以预期剩余极化由两个分量构成：一个与晶相中的铁电性有关，另一个与非晶相有关，尽管目前尚无直接实验证据证实这一现象。

von Seggern 和 Fedosov 在其研究中分析了聚偏氟乙烯中的热刺激去极化电流与热释电性之间的关系 [5]。他们发现，加热至 60 °C 后，剩余极化会降低，而热释电系数保持不变。他们据此得出结论：晶相中的铁电极化部分被局域电荷抵消，部分被非晶相中的极化抵消。因此，在铁电聚合物中形成热刺激去极化峰时，会有多种电流参与，这些电流由驻极体和铁电分量的剩余极化弛豫引起，并与空间电荷有关。

我们研究了接受热刺激去极化（TSD）的极化试样，测试采用短路模式，或采用开路模式，并以聚四氟乙烯薄膜作为样品自由表面与其中一个电极之间的介电间隙 [149–16]。从极化处理到进行 TSD 测量的时间间隔为一天或16个月。因此，样品分别命名为“新鲜”和“老化”。与其他论文报道的数据相似，我们在新鲜样品的短路模式下观察到一个宽峰（图4）。

该峰处的电流方向对应于剩余极化弛豫。由于聚偏氟乙烯的结晶度约为 50%，且结晶区中的大多数分子偶极子处于铁电

相 β-相，因此可以比较驻极体和铁电组分对新鲜样品中该峰形成的贡献。至于体电荷组分，已知它要么在短路模式下不对热刺激去极化电流产生贡献，要么其方向与去极化电流组分一致。

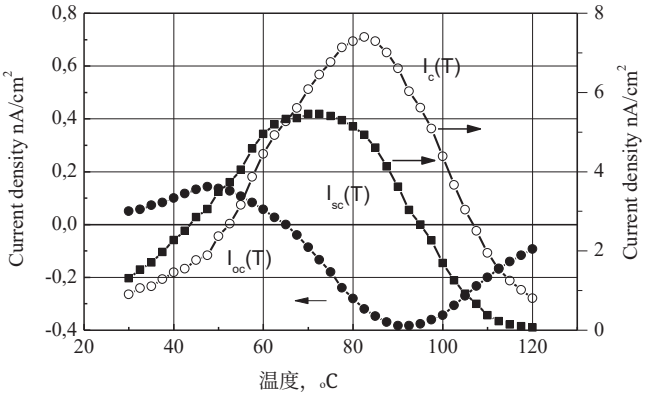


图4. 在短路和开路模式下测得的新鲜极化样品的热刺激去极化电流 $I_{sc}(T)$ 和 $I_{oc}(T)$。曲线 $I_c(T)$ 对应体电荷电流

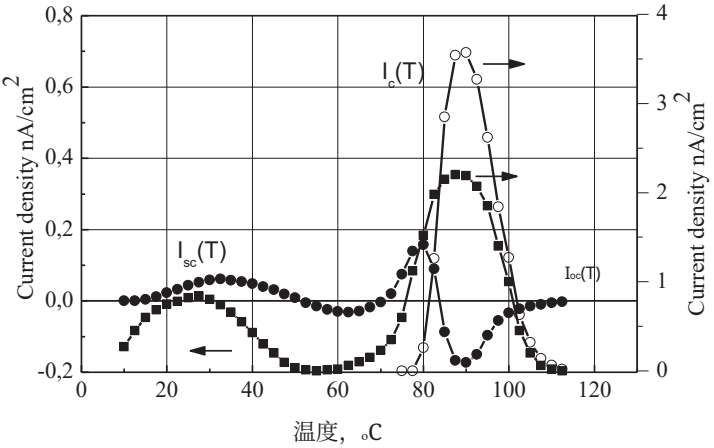


图5 在短路和开路模式下暴露16个月后测得的极化样品的热刺激去极化电流 $I_{sc}(T)$ 和 $I_{oc}(T)$。曲线 $I_c(T)$ 对应体电荷电流

比较新鲜极化样品和老化极化样品的热刺激去极化电流时，我们观察到一种新现象。短路模式下的一个宽热刺激去极化电流峰在老化过程中分裂成两个彼此完全分离的窄峰。同时，老化样品中出现了两对方向相反的峰，而不是新鲜样品中典型的一对峰（图5）。这一特征很可能适用于所有铁电聚合物，并且不取决于极化条件，因为我们还在以下样品中获得了相似结果：采用加速电压为20 kV的非聚焦电子束进行极化的样品，以及通过石灰玻璃、在7 kV电压下进行极化的 P(VDF-TFE) 和 PVDF薄膜。

开路模式下的去极化电流保持不变，而由电荷引起的热刺激去极化电流则改变方向，变为相反方向。因此，图4所示的两个峰可以解释为两个部分重叠且方向相反的电流所产生的结果，这些电流源于极化弛豫和空间电荷弛豫。

为了将去极化电流$I_P(T)$与空间电荷电流$I_c(T)$分离开来，可以合理地假设极化沿厚度方向是均匀的。由于俘获在表面附近的补偿电荷在短路模式下不会产生任何电流，因此$I_{sc}(T) = I_P(T)$，其中$I_{sc}(T)$是短路模式下实验测得的热刺激去极化电流。电流$I_c(T)$可以根据图4所示的实验曲线$I_{sc}(T)$和$I_{oc}(T)$计算得到

$$I_c(T) = 1_{0c}(T)\left[1+\frac{\varepsilon_1 x_2}{\varepsilon_2 x_1}\right] - I_{sc}(T)\,, \tag{16}$$

其中，ε_1，x_1，ε_2 以及x_2 分别是样品和介电间隙的介电常数与厚度。在我们的计算中，采用了 $\varepsilon_1 = 12$ ，。

$\varepsilon_2 =$ 2 1，$_1 = 20\ \mu$ $_2 = 25\ \mu$ $_c$

xm、xm。值得注意的是，峰值$I(T)$所处温度高于去极化峰值，这表明俘获电荷比剩余极化更加稳定。

考虑到热刺激去极化电流三个分量的性质各不相同，可以对所得结果作出定性解释。在新鲜样品中，电驻极体极化几乎占剩余极化的 50%，其衰减速度快于铁电分量。因此，新鲜样品中的两个峰彼此重叠，而在老化薄膜中则完全分离，仿佛在极化处理完成后，剩余极化仍在缓慢重新分布，并持续了很长时间。

由于目前尚无针对铁电聚合物的热刺激去极化电流理论，因此难以对观测到的峰和计算所得的峰进行定量分析。不过，

从峰形可以明显看出，所有三种弛豫过程都与理想的德拜情形显著不同，这表明弛豫偶极子之间不存在相互关系。考虑到极化随时间按照拉伸指数定律弛豫，这一特征便可以纳入考虑。

$$P(t) = P_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)^{\alpha} \quad 1 \geq \alpha \geq 0\,, \tag{17}$$

其中，τ 为时间常数，P_o 为初始极化。若以速率 $\beta = dT/dt$ 对样品进行线性加热，则

$$P(T) = P_0 \exp\left\{-\left[\left(\frac{1}{\beta}\right)\int_{T_0}^{T}\left(\frac{1}{\tau(T')}\right)dT'\right]^{\alpha}\right\}, \tag{18}$$

其中，T_o 为初始温度。假定温度对 τ 的依赖关系符合阿伦尼乌斯定律是合理的:

$$\tau(T) = \tau_0 \exp\left(\frac{A}{kT}\right), \tag{19}$$

其中，A为活化能，k为玻尔兹曼常数，τ_o 为特征时间。由方程（17）–（19）可推导出热刺激去极化电流密度的表达式

$$i(T) = -\left(\frac{\alpha P_0}{\tau_0}\right)\exp\left(-\frac{A}{kT}\right)\left[s(T)\right]^{\alpha-1}\exp\left\{-\left[s(T)\right]^{\alpha}\right\}, \tag{20}$$

其中

$$s(T) = \left(\frac{1}{\beta\tau_0}\right)\int_{T_0}^{T}\exp\left(-\frac{A}{kT}\right)dT'\,.$$

对实验观测到的以及根据方程（20）计算得到的热刺激去极化峰进行计算机拟合，结果证实了我们对弛豫过程性质及其热稳定性的假设。结果表明，在驻极体分量与铁电分量混合的新鲜样品中，去极化峰较宽（α = 0.24），这是因为形成该峰的两个弛豫过程差异很大。铁电极化相当稳定（A = 2.7 eV），其弛豫产生的热刺激去极化峰相对较窄（α = 0.52）。新鲜样品和老化样品中的空间电荷峰参数截然不同，仿佛存在两种类型的空间电荷：一种可能与铁电极化有关，另一种则与驻极体分量有关。它

也有可能，开路模式下出现在驻极体去极化峰附近的小峰（图5）仅由体电荷中的驻极体分量引起。由于 PVDF 的玻璃化转变温度为 -45 °C，非晶相中偶极子的有序排列不像普通极性驻极体那样被热冻结。在这些条件下，俘获电荷的电场可能维持偶极子的优势取向。

由此可见，在铁电聚合物的电晕极化薄膜中存在两个极化分量，且每个分量都伴有相应的空间电荷。只要在新鲜极化样品中观察到的宽热刺激去极化峰尚未分裂成两个完全分离的窄峰，驻极体型热力学不稳定分量就会持续弛豫。

将极化样品加热至特定温度（对于聚偏二氟乙烯，约为 60 °C），即可去除剩余极化中不稳定的驻极体分量。显然，无论偶极极化的性质如何，俘获电荷始终伴随其存在。

6.1. 铁电聚合物中的热释电效应及其性质

聚偏二氟乙烯薄膜中的热释电效应早在 40 多年前就已被发现。然而，尽管相关研究数量众多，聚偏二氟乙烯的热释电性本质仍不明确。已有一系列论文探讨铁电聚合物的热释电属性。在最流行的三种模型中，第一种认为热释电性源于电致伸缩、偶极涨落以及尺寸随温度变化的共同作用。第二种模型只考虑样品尺寸的变化和晶体，而第三种模型则认为热释电性归因于电致伸缩以及温度变化时尺寸的变化。

热释电效应是指温度变化时电位移矢量（感应）发生可逆变化的一系列现象。对于自由样品，热释电系数由以下表达式确定 [13]

$$p_i = \left(\frac{\partial D_i}{\partial T}\right)_{H,E} = \left(\frac{\partial D_i}{\partial T}\right)_{U,E} + \left(\frac{\partial D_i}{\partial U_{i,j}}\right)\left(\frac{\partial U_{i,j}}{\partial T}\right)_{H,E}, \qquad (21)$$

其中 $\left(\partial D_i / \partial \right)$ 是感应矢量的分量；$U_{i,j}$ 是形变张量；H 是机械应力；E 是场强，$_{ij}DU$ 是

压电模量；$_{,ijU}T\left(\frac{\partial}{\partial}\right)$ 是热膨胀系数。(21) 中的第一项对应于在受压样品上测得的初级或真正的热释电效应，第二项则表征次级热释电效应，它是热膨胀导致压电感应变化的结果。

由于热释电效应同时取决于内部极化和空间电荷，因此原则上，这两种量的温度依赖性都可能引起该效应。若忽略空间电荷的影响，则对于具有均匀极化 P 的扁平短路样品，我们得到

$$p_0 = \frac{\partial D}{\partial T} = \frac{\partial P}{\partial T} = \frac{\partial \sigma}{\partial T} = \frac{\partial (q/S)}{\partial T}, \tag{22}$$

其中，q 和 σ 分别是束缚表面电荷的幅值和密度；S 是表面积。

在实验条件下，电流 ( ) $dqIT\ \ dt=$ 在温度变化（dT/dt）发生时进行测量，并认为热释电系数具有以下值

$$p = \frac{1}{S}\frac{dq}{dT} = \frac{1}{S}\frac{I(T)}{dT/dt}. \tag{23}$$

由于 $p_o \neq p$ 存在差异，理论计算的热释电系数与实验测得的热释电系数也存在差别。研究已证明，在不考虑极化的情况下，热释电效应只能由空间电荷的非均匀分布引起。

Lines 和 Glass [17] 在研究 PVDF 中的热释电效应时得出结论：这是真正的热释电性，而不是许多极性驻极体中观察到的去极化效应，因为 PVDF 的晶相完全符合铁电体的定义，即在电场作用下具有可逆自发极化的热释电体。由此提出了一个迄今尚未解决的根本问题：热释电性是 PVDF 的平衡性质，还是非平衡极化的结果，也就是说，是否可以将其视为偶极子以某种方式被固定的取向?

在早期关于聚偏氟乙烯的研究中，人们认为体电荷对热释电效应的影响起决定性作用，但在证明聚偏氟乙烯微晶具有铁电性之后，热释电效应更多地被认为与自发极化有关。

因此，在 Broadhurst 和 Davies 的模型[18] 中，研究了分布在非晶相中的薄晶体薄片（片晶）内刚性偶极子的行为。在 Wada 和 Hayakawa 的模型 [19], 中，则假设非晶相中散布着球形铁电颗粒。这两种模型都预测了热膨胀（尺寸效应）对热释电效应的影响，以及介电常数和自发极化$P_{sc}(T)$对温度的依赖性。

与此同时，计算数据与实验数据之间并不存在令人满意的一致性。人们注意到，Broadhurst [18] 以及 Wada 和 Hayakawa [19] 的模型忽略了体电荷对热释电效应的贡献。试图将体电荷考虑在内，却导致了与所得数据相矛盾的结果 [13]。Lines和Glass [17] 的估算表明，即使 PVDF 中偶极子达到 100%的取向，理论热释电系数仍比实验测得的值低数倍。

我们认为，不仅晶相，非晶相也会对热释电性产生贡献。Elling 等人 [20] 发现，热释电系数值不仅受到剩余极化的影响，还受到超分子结构的影响，而 PVDF 的力学性能取决于该结构。

Fedosov 和 Sergeeva [21] 的研究表明，铁电聚合物热释电效应的分量之一是驻极体分量，即 PVDF 的热释电活性源于剩余极化的可逆温度变化，而这种变化与俘获电荷所处平衡状态下的变化密切相关。

Fedosov 和 von Seggern [3, 4, 6] 证明，在 PVDF 类型的双组分铁电聚合物中，局域于微晶表面的补偿电荷对于获得高而稳定的极化非常重要。随着温度周期性升高和降低，[21], 热释电系数会在远低于居里点的温度下不可逆地降低，这表明电荷可能产生影响。

人们普遍认为，PVDF 中的热释电系数与剩余极化值成正比。然而，这种关系更为复杂，因为热释电系数通常会随温度升高而非线性增加，而在这种情况下，极化并不会增加。

综上所述，可以得出结论：通常会将聚偏氟乙烯的热释电性与其他进程分开考察。然而，

为了理解这一现象的本质，有必要通过实验研究其形成与变化的动态过程，并同时考察其他等温和热模拟过程，例如测量伏安特性、进行热驻极体极化和去极化。

6.2. 测量极化PVDF薄膜的热释电系数

热释电效应通常采用准静态模式或动态模式进行研究。前者是在缓慢加热短路样品的过程中测量热释电电流，后者则是在温度快速变化时研究电流的变化分量。准静态法的主要难点在于，如何将TSD电流中热冲击的热释电（可逆）分量与弛豫（不可逆）分量分离。

我们采用 Collins [22] 提出并在其他多篇论文中使用的热脉冲法测量热释电动态系数。

使用 Metz 45 CT-3 闪光灯产生持续时间为 50 μs 的光脉冲，并将其作为可重复的热源，使热量穿透极化薄膜的表面。使用宽带示波器记录热释电信号。这是一种动态方法。

借助高灵敏度热释电传感器发现，光脉冲具有相当高的重现性。测量连续 200 个脉冲时，平均能源离散度为 2.4%。热释电系数的幅值根据电信号的最大值进行判断；因此，所得结果以相对单位表示。

采用准静态方法，通过对极化样品进行线性加热和冷却来测量热释电系数。热释电系数对温度的依赖关系按以下公式计算

$$p(T) = \frac{I_p(T)}{A\beta_c}, \tag{24}$$

其中，$I_P(T)$ 是冷却过程中测得的热释电电流，β_c 是冷却速率，即温度对时间的导数，A 是样品表面积。升温速率保持恒定，为 3 K/min，而冷却速率则取决于时间和温度。

6.3 聚偏氟乙烯薄膜的极化翻转与热释电活性

PVDF薄膜的热释电研究具有独立价值，因为PVDF广泛应用于热释电传感器。然而，研究热释电活性与剩余铁电极化

的结合颇有意义，因为这有助于阐明PVDF热释电性的本质，并确保其稳定性。

极化翻转后立即采用科林斯法测量热释电活性。图6显示，当极化从完全极化态完全翻转时，热释电信号如何变化。虽然热释电系数的值只能用相对单位来判断，但显然该方法的灵敏度相当高，而且完全翻转后信号完全对称。结果表明，只有当电压脉冲持续时间超过 100 s 时，才会发生完全翻转。根据图7的数据判断，电压脉冲持续时间较短时，极化只能部分翻转。

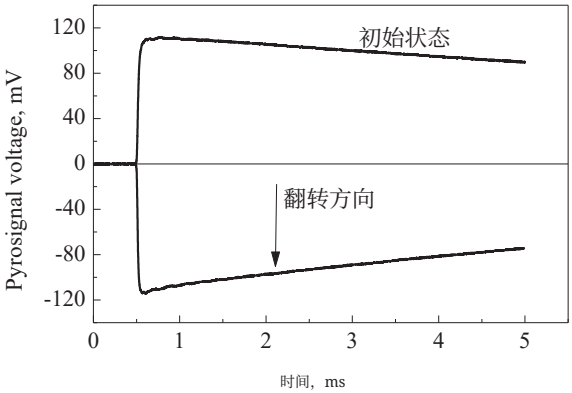


图6. 对聚偏氟乙烯薄膜施加 2 kV 电压 50 秒使其发生极化翻转后测得的热释电信号。关闭电压后 1.5 分钟测量热释电性

图7展示了四组实验的结果：各组实验中，极化翻转采用了不同的电压脉冲持续时间，但每组的幅值相同。在电压为 0.5 kV 时（图7），场强约为 40 MV/m，与矫顽场处于同一量级。即使脉冲持续时间达到 50 s，实际可翻转的极化也仅有 6.4%；而当脉冲持续时间短于 50 ms 时，实际上不会发生翻转。

施加 1 kV 电压 50 s 后，44.4 % 的剩余极化发生翻转，也就是说，样品几乎转变为平均极化为零的状态。在此电压下，即使电压施加时间仅为 50 μs，也有 2.2 % 的极化发生翻转。将电压提高至 1.5 kV

电压施加 50 s 后，79.4 % 的剩余极化发生翻转。施加 2 kV 电压 50 s 后，极化完全翻转。

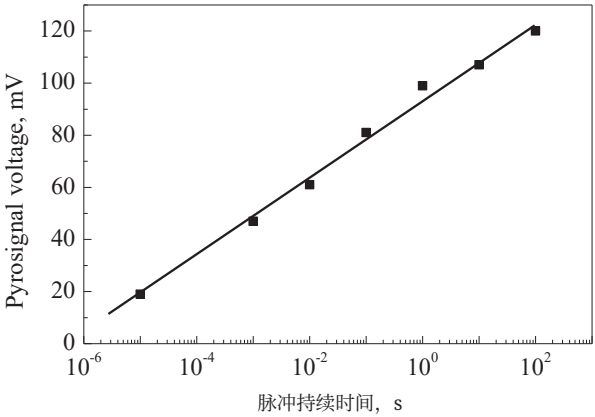
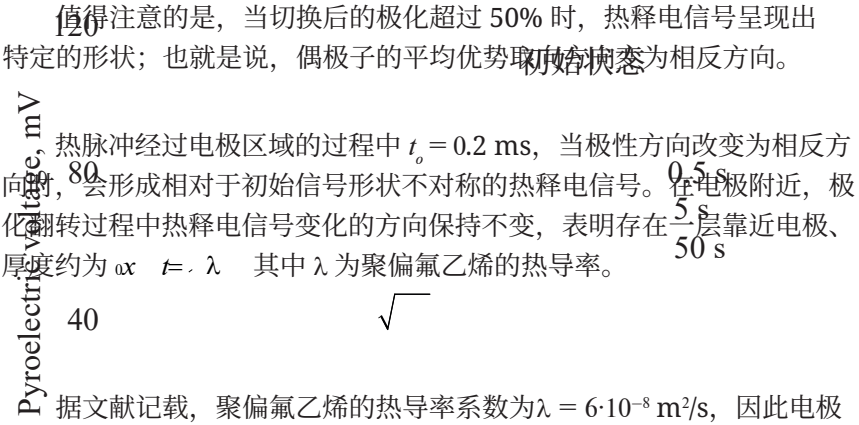


图7 聚偏氟乙烯薄膜在初始极化处理时，极化脉冲持续时间从10 μs至100 s范围内，热释电信号随脉冲持续时间的变化关系；施加电压为2.5 kV

值得注意的是，当切换后的极化超过 50% 时，热释电信号呈现出特定的形状；也就是说，偶极子的平均优势取向会改变为相反方向。



热脉冲经过电极区域的过程中 $t_o = 0.2$ ms，当极性方向改变为相反方向时，会形成相对于初始信号形状不对称的热释电信号。在电极附近，极化翻转过程中热释电信号变化的方向保持不变，表明存在一层靠近电极、厚度约为 $\omega x \quad t=, \lambda$ 其中 λ 为聚偏氟乙烯的热导率。

$\sqrt{\quad}$

据文献记载，聚偏氟乙烯的热导率系数为$\lambda = 6 \cdot 10^{-8}$ m²/s，因此电极层的厚度约为3 μm。我们认为，我们所发现的这一特征是由于该层中最初形成的极化即使在高电场下也不会发生翻转。

自然可以假设，电极附近的极化不会急剧增加，而是存在一个过渡层，其中的极化

从电极处的零值逐渐增大，直至达到薄膜体积内的最大均匀值。根据泊松方程，任何层中的非均匀极化只有在该层存在补偿电荷时才能稳定。显然，这些电荷被深陷阱俘获，并且在极化翻转过程中没有释放。所揭示的现象与我们已确认的一个特征相似：如果极化最初是在弱电场或中等电场中形成的，就不可能改善其极化均匀性。

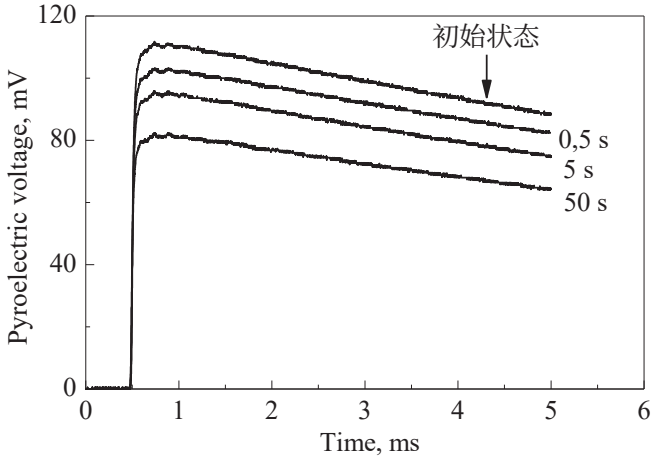


图8. 聚偏氟乙烯薄膜在连续极化翻转过程中，由持续时间为5 ms至50 s、电压为0.5 kV的电压脉冲产生的热释电信号。电压脉冲的持续时间标注在曲线旁

研究发现，在几个连续的短电压脉冲作用下发生翻转的极化，远小于单个脉冲作用下发生翻转的极化（该脉冲的持续时间等于几个短脉冲的总时间）。这表明开关时间存在一定的分布，即一些偶极子容易翻转，而另一些则需要更长时间才能翻转。短电压脉冲作用下，只有“快速”偶极子发生翻转；而持续施加电压时，“快速”和“缓慢”偶极子都会发生翻转，因此翻转的总极化显著增加。

总之，将不同时间和场强下的极化翻转与相同翻转条件下热释电信号的值进行比较（图9）。上述实验曲线的绝对相似性表明，剩余

铁电极化与热释电系数的值成正比。因此，可利用技术上简单的热释电系数测量来评估极化处理的聚偏氟乙烯薄膜的极化态，即估算剩余极化的幅值和方向。

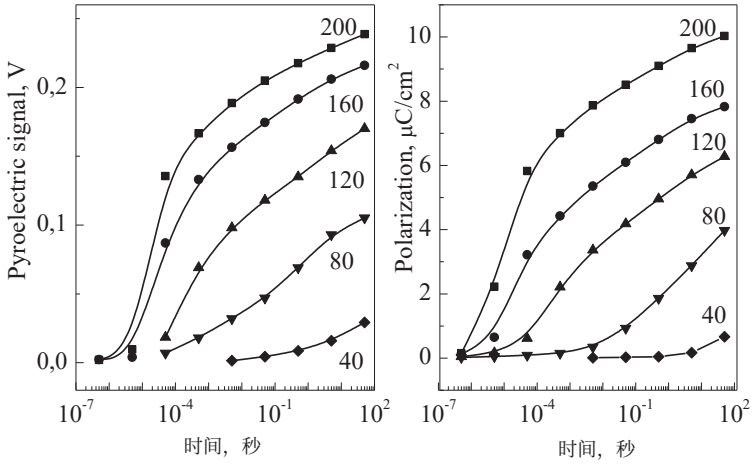


图9. 通过依次施加持续时间从 0.5 μ秒逐渐增加至 50 秒、且场强不同的开关电压脉冲，得到的热释电活性和极化的稳定铁电部分的演变

7. 聚偏二氟乙烯中热刺激去极化电流分量的分离

尽管聚偏氟乙烯被认为是一种铁电聚合物，但其某些电学属性可以用极性驻极体理论来解释。Gross-Swan-Gubkin 的唯象模型 [23] 表明，驻极体中存在两种类型的电荷，即同号电荷 $\sigma(t)$，其符号与极化处理期间电极的极性一致；以及异号电荷 $P(t)$（内部极化），它是电介质中的电荷在电场作用下发生微观和宏观位移的结果。对于聚偏氟乙烯，异号电荷是偶极极化，而同号电荷则由陷获在表面上或表面附近的电荷形成 [4]。

极性电介质中驻极体状态的稳定性取决于同号电荷与异号电荷的相互弛豫。

由于异号电荷（极化）通常在聚偏氟乙烯中最为重要，因此同号电荷的作用一直未受到足够关注，直到

目前为止，尽管空间电荷对剩余极化的稳定作用已在文献中讨论过 [4, 6]。

热刺激去极化（TSD）是一种用于识别聚合物驻极体中弛豫过程的方法。然而，要区分同号电荷和异号电荷对热刺激去极化电流的影响非常困难，尤其是在较宽的温度范围内相应峰彼此重叠时。

我们通过求解逆问题，开发了一种分离同号电荷电流和异号电荷电流的方法[24] 。此外，研究表明，将热刺激去极化方法的各种改进与等温去极化电流结合应用，可以确定弛豫过程的一些重要参数，例如活化能、特征频率和时间常数。

将单轴取向、厚度为25 μm且单面金属化的聚偏氟乙烯薄膜置于电晕三极管中，在室温下以3 kV的控制栅电压和恒定的90 μA/m^2 极化电流密度进行极化处理30 min，随后短路并在室温下放置24 h（测量驻极体电势动力学的试样除外）。

采用了四种TSD方法改型，即对短路（S）和开路（O）样品进行热刺激（T）和等温（I）去极化。因此，这些改型分别命名为TS、TO、IS和IO，其中第一个字母表示温度模式（热刺激或等温），第二个字母表示样品的电学状态（短路或开路）。

样品处于开路状态24小时后，进一步开展了热刺激驻极体电位（TP）动力学实验。在TO和IO改型中，使用厚度为10 μm的聚四氟乙烯薄膜作为介电层。

热刺激实验的升温速率为3 K/min。等温实验中，通过快速加热达到所需温度后，保持温度恒定。采用开尔文法测量TP改型中的驻极体电位，并连续记录。

图 10 和图 11 所示实验曲线的主要特征如下：

– TS改性中的去极化电流形成一个宽阔的“非经典”峰，最大值出现在 65 °C；

– 在 TO改性 中，TSD 电流发生反向，而在初始加热阶段，电流方向与 TS改性 中的电流方向一致；

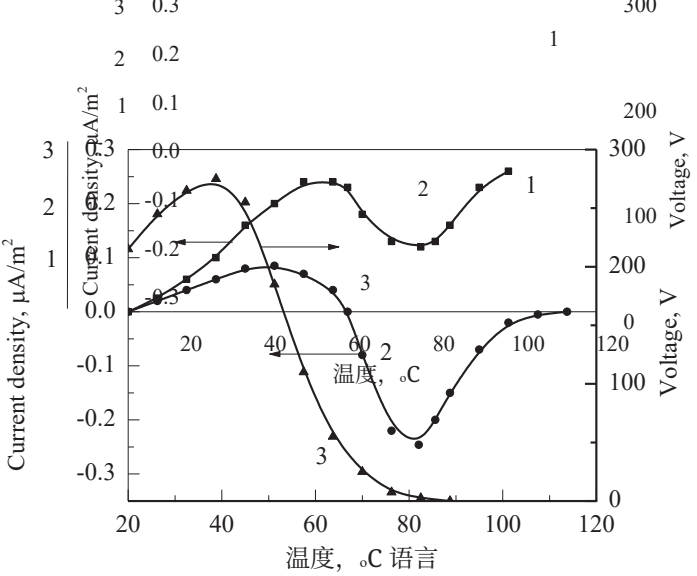


图 10. TS改性（1）和 TO改性（2）中的热刺激电流，以及 TP改性中的驻极体电势

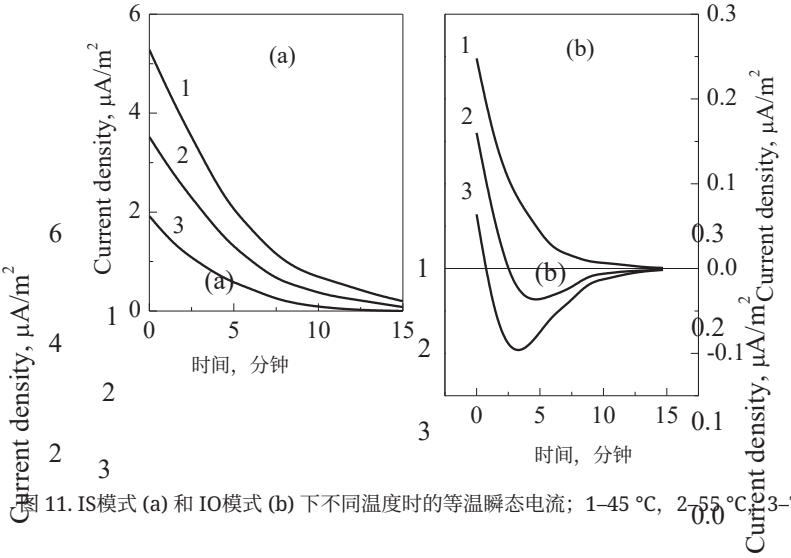


图 11. IS模式 (a) 和 IO模式 (b) 下不同温度时的等温瞬态电流；1–45 °C，2–55 °C，3–70 °C。

– TP改性中的驻极体电势在 40 °C 时达到最大值，

– 在所有温度下，IS改性中的电流都会随时间降低减小，而在高温下，IO模式中的等温电流会改变方向。

这些特征可以在该模型的框架内得到解释，该模型认为样品中存在同号电荷和异号电荷。首先，定性地考察极化处理和弛豫进程。可以合理地假设，电晕放电产生的带负电粒子（离子和/或电子）由于能量较低（热能），会吸附在样品表面并发生热化。近表层或表面的过量电荷形成同号电荷，其表面电荷密度为 σ，并在样品体积内产生均匀电场 *E*。氟原子的高电子亲和能有助于电荷被陷阱俘获并形成稳定的同号电荷。

均匀内部极化 *P*（异号电荷）是由偶极子 -CH_2-CF_2- 在同号电荷产生的电场中取向而形成的。极化的形成等效于束缚表面电荷 *P* 的形成，其符号与同号电荷 σ 的符号相反。在聚偏氟乙烯的所有极化进程中，-CH_2-CF_2- 偶极子的取向最为显著，因为其偶极矩较大，为 2.1 德拜 [13]。

如果极化 *P* 为零，那么电场由完整的表面电荷 σ 产生。当 *P* 开始增大时，会出现退极化场，并由部分表面电荷将其“中和”。因此，体积中的电场由表面电荷与极化之差（σ — *P*）产生。因此，表面电荷 σ 由两部分 $\sigma = \sigma_1 + \sigma_2$组成：第一部分是补偿退极化场的电荷（$\sigma_1 = P$），第二部分 $\sigma_2 = \sigma - P$ 则在样品体积内产生电场。

极化样品（处于 TS 和 IS 模式）短路后，“过量”电荷 σ_2 消失。

同号电荷与异号电荷之间的平衡（$\sigma = \sigma_1 = P$），以及零内部电场（$E = 0$），由外电路中的电流维持，因此测量电流对应于异号电荷的弛豫。

然而，在短路并形成平衡态$\sigma = \sigma 1 = P$之后，若在某个电极与样品表面之间插入不导电介质插片（在 TO 和 IO 模式下），就可以观察到弛豫电流：异号电荷和同号电荷分别朝相反方向流动。此时，体积内部的电场不再为零，因此表面电荷（同号电荷）会在自身电场作用下穿过样品的整个厚度漂移，或者被负责其自身电导率的载流子缓慢中和。

无论如何，异号电荷的弛豫都发生在非零电场中，这是由定向偶极子[12, 13]的热无序化引起的。

我们将说明，通过 TO 模式下$i(T)$的变化关系，可以求得去极化电流的两个分量（图 10，曲线 2）。已知[12, 13] 在样品表面与电极之间插入非导电插层的实验中，热刺激去极化电流$i(t)$和驻极体电势$V(t)$不仅取决于同号电荷与异号电荷之间的关系，也取决于它们的导数，因此

$$i(t) = s\left[\frac{dP(t)}{dt} - \frac{d\sigma(t)}{dt}\right], \tag{25}$$

$$V(t) = \frac{sx_1}{\varepsilon_0\varepsilon_1}[\sigma(t) - P(t)], \tag{26}$$

$$i(t) = -\frac{\varepsilon_0\varepsilon_1}{x_1}\cdot\frac{dV(t)}{dt}, \tag{27}$$

其中 $_{01101}/()sxxx=\quad\varepsilon\qquad\varepsilon+\quad\varepsilon$，$t$ 是时间，ε 以及 x_o 分别为电介质常数和样品厚度，ε_1 而 x_1 是介电间隙的相应参数，ε_o 是真空介电常数。

总分量$i_C(t)$可表示为

$$i_C(t) = \frac{g}{x_0}V(t) = -\frac{d\sigma(t)}{dt}, \tag{28}$$

其中 $_0\exp(/)ggQkT=\qquad-\qquad$ 为自身电导率，k 为玻尔兹曼常数，T 为温度，Q 为自身电导率的活化能，g_o 为指前因子。对（27）积分，并根据$_0(1)TTbt=\qquad+$，其中 b 为升温速率，T_o 为初始温度，将（25）–（28）中的时间 t替换为温度 T，可得到同号电荷电流 $i_1(T)$和异号电荷电流 $i_2(T)$的温度依赖关系表达式，以及样品上的电压（电势）$V(T)$

$$i_1(T) = \frac{d\sigma}{dt} = -\frac{x_1 g_0}{bT_0 x_0\varepsilon_0\varepsilon_1}\exp\left(-\frac{Q}{kT}\right)\int_T^\infty i(T')dT', \tag{29}$$

$$i_2(T) = \frac{dP}{dt} = \frac{i(T)}{s} + \frac{d\sigma}{dt}, \tag{30}$$

$$V(T) = \frac{x_1}{bT_0\varepsilon_0\varepsilon_1}\int_T^\infty i(T')dT'. \tag{31}$$

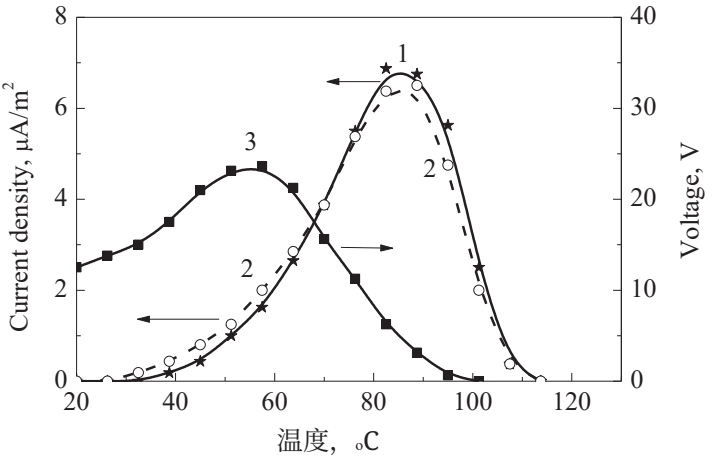


图 12. 根据模型计算的同号电荷 (1) 和异号电荷 (2) 弛豫电流的温度依赖性，以及样品上的电压 (3)

方程（29）–（31）右侧的所有量均已知，或可通过实验获得。根据图 10 的数据，按照方程（29）–（31）计算的结果如图 12 所示。根据等温极化电流和电压的恒定值，得到活化能Q = 0.76 eV 和因子g_o = 0.18 Sm/m。

如图 12 所示，同号电荷和异号电荷形成两个宽峰，峰值几乎相同。在低温区域，异号电荷的弛豫速度更快，而同号电荷相对稳定。这可能是热刺激电势初始上升的原因（见图 10 中的曲线 3 和图 12 中的曲线 3）。TO 和 IO 模式下的电流反转，是由高温下同号电荷与异号电荷比例的变化引起的（图 12 中的曲线 1 和 2）。

众所周知，热刺激去极化电流的反转可能由再极化引起，也就是说，这是同号电荷电场中出现额外异号电荷的结果；在这种情况下，电压应当降低 [12]。

然而，我们的情况并未观察到这一现象（图 10）。另一方面，加热过程中驻极体电势最初的上升不可能是由表面电荷密度的增加 σ 引起的，因为在这种情况下，电荷必须

逆着这些电荷产生的电场移动，这是不可能的。因此，热刺激去极化电流的第一个峰值以及驻极体电势的上升（图 10），是由于异号电荷（极化）的消散速度快于同号电荷所致。聚偏氟乙烯在加热初期可能并未完全消除极化，而只是消除了其中最不稳定的部分。

因此，只有存在由同号电荷产生的稳定电场时，聚偏二氟乙烯薄膜中的异号电荷才可能长期保存。我们认为，聚偏二氟乙烯的许多特殊属性与以下两者的有效结合有关：-CH_2-CF_2-具有较大的偶极矩（2.1 D），有助于形成异号电荷；氟原子具有较高的电子亲和能（3.37 eV），有助于产生稳定的同号电荷。尽管聚偏二氟乙烯中的驻极体状态并不稳定，但由于同号电荷的稳定作用，同号电荷与异号电荷之间的自平衡弛豫过程会减缓。

在驻极体理论[23], 中，假定同号电荷和异号电荷按照指数定律衰减，其时间常数取决于温度。因此，此类表达式应适用于 IO 和 IS 模式

$$i_1(t) = -\frac{s\sigma_0}{\tau_1}\exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right), \tag{32}$$

$$i_2(t) = -\frac{P_0}{\tau_2}\exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right), \tag{33}$$

$$\tau_1(T) = \frac{\varepsilon_0\varepsilon}{g_0}\exp\left(\frac{Q}{kT}\right), \tag{34}$$

$$\tau_2(T) = \tau_0\exp\left(\frac{W}{kT}\right), \tag{35}$$

其中W是异号电荷弛豫的活化能，τ_1和τ_2是相应的时间常数。

将方程 (32)–(35) 应用于图 11 中的实验曲线，我们计算得出同号电荷和异号电荷的以下弛豫参数：活化能（$Q = 0.76$ eV 和 $W = 0.54$ eV）、特征频率（$f_2 = 1/\tau_o = 7.4$ MHz 和 $f_1 = (g_0/\varepsilon_o\varepsilon) = 1.7$ GHz）、20 °C 时的时间常数（$\tau_1 = 31000$ s 和 $\tau_2 = 2800$ s）。结果表明，同号电荷比异号电荷更稳定。

因此，我们开发了一种方法，可从测得的热刺激去极化电流中分离同号电荷和异号电荷的去极化电流，并揭示了这两个分量的弛豫行为。

采用各种热刺激去极化改型，并辅以等温去极化电流，可以找出弛豫过程的最重要参数。

所开发的方法使我们不仅能够分析 PVDF 中同号电荷与异号电荷之间的关系，还能够分析其他极性电介质中的这种关系。引入极性基团并同时形成深陷阱，有助于提高极性聚合物电介质中剩余极化的稳定性。因此，如果具备形成同号电荷的适当条件，也能够使剩余极化在较长时间内保持较高水平。

8. 复合材料中的热刺激与等温过程

以掺有铁电陶瓷杂质的聚合物为基础的复合材料，与传统铁电陶瓷相比具有许多显著优势，但将复合材料用作压电和热释电换能器有源元件的潜力尚未得到充分发挥。

众所周知，铁电陶瓷中的大部分极化会在切断外加电压后立即翻转回原始状态；如果不采取特殊措施，仅有 25–30% 的电畴会保持取向。因此，必须设法固定电畴的主导取向。铁电聚合物中也存在类似问题，其中铁电微晶分布在非晶相中。复合材料与铁电聚合物之间的这种结构相似性，也可能决定这两类材料中电弛豫过程的相似性。

PVDF 数据用于验证已在铁电聚合物情况下证实的概念是否适用。此外，还获得了有关指定复合材料电弛豫参数的具体数据。

我们将 PVDF-$BaTiO_3$ 复合材料作为模型材料。所得结果与厚度为 300 μm、含有 0 %、40 %、50 % 和 70 % Ba- TiO_3 的 PVDF-$BaTiO_3$ 复合材料样品进行了比较。这些样品由聚偏氟乙烯粉末与平均粒径为 10 μm 的 $BaTiO_3$ 颗粒组成的混合物经热压制成。复合材料在 140 °C 下退火，并使用 Solomat 91000 光谱仪进行检测，以获得 -80 °C 至 +180 °C 范围内的热刺激去极化电流总谱（图13）。

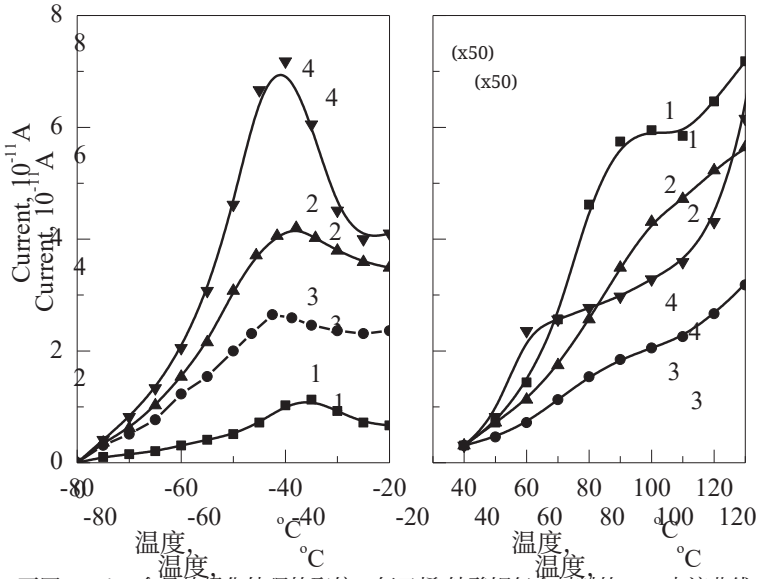


图13. 不同 $BaTiO_3$ 含量的极化处理的聚偏二氟乙烯-钛酸钡复合材料的 TSD电流曲线: 0 % (1)、40 % (2)、50 % (3) 和 70 % (4)

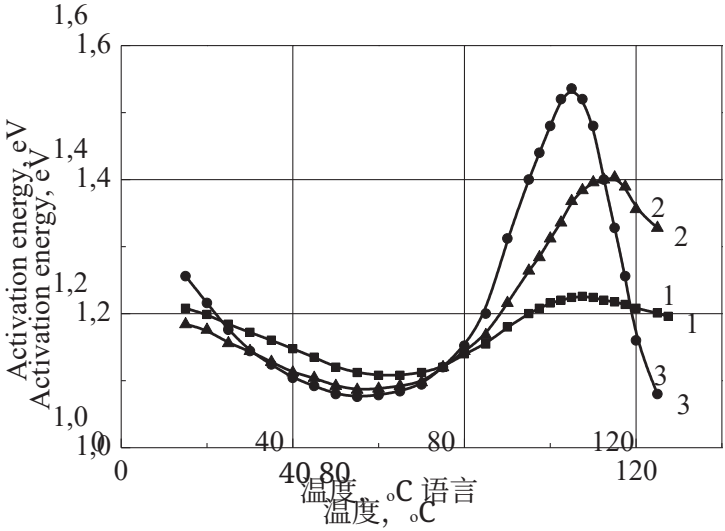


图 14. 含有 40 % (1)、50 % (2) 和 70 % (3) $BaTiO_3$ 的 PVDF-$BaTiO_3$ 复合材料中弛豫过程的活化能

样品在 1.25 MV/m 的电场中于 150 °C 下预先极化处理 15 min，随后在不切断电场的情况下冷却至 –100 °C。然后，以 7 °C/min 的速率在短路模式下加热，使样品去极化。

采用热窗法对弛豫过程进行分段分析。极化温度每次递增 5 °C，从 20 °C 升至 150 °C。实验的等效频率约为 $2 \cdot 10^{-4}$ Hz。根据这些实验，计算得出弛豫过程的活化能（图 14）。

研究发现，极化过程需要热活化，因为即使在约 20 MV/m 的强电场下，室温时也无法形成极化。试样在室温下经极化处理后未出现热刺激去极化电流，这一事实证实了上述结论。此外，20 °C 时的 VAC 呈表面特征，具有空间电荷限制电流的典型特征，但并非像聚偏氟乙烯（PVDF）那样呈 *N* 形。

在所有样品中，包括未添加陶瓷添加剂的 PVDF，在热刺激去极化曲线上都能看到约 −40 °C 附近明显的低温峰（图13）。该峰接近 PVDF 非晶相的玻璃化转变温度，通常归因于与非晶区分子链微布朗运动相关的 β 弛豫。该峰及其幅值均与复合材料中填料的含量无关，这表明该峰与聚合物的属性有关。80–120 °C 范围内的峰仅在 PVDF 中结构清晰，而在复合材料中则受到性质未知、呈指数增长的漏电流抑制。为消除寄生电流，我们会定期将电容器与样品串联。但即使如此，仍难以明确解释这些峰，因为复合材料中热刺激去极化电流的理论尚未建立。

假设在热窗法中，每个独立峰都对应一个单独的德拜弛豫过程。随后，通过峰值分析可得出随温度变化的弛豫时间 $\tau(T)$，该时间可用阿伦尼乌斯方程近似表示

$$\tau(T) = \tau_0 \cdot \exp(Q / kT) , \qquad (36)$$

其中，τ_o 为指前因子；Q为活化能；k为玻尔兹曼常数。

如图 14 所示，无论样品的组成如何，在 20–80 °C 范围内，活化能均从 1.17 eV 略微下降至 1.09 eV。随后活化能急剧上升，在

105–110 °C 时达到 1.23–1.55 eV 的最大值。活化能的大小与陶瓷填料的浓度相关：复合材料中 $BaTiO_3$ 含量为 40 %、50 % 和 70 % 时，活化能分别为 1.23 eV、1.4 eV 和 1.55 eV。此外，图5.10中的峰值温度非常接近 $BaTiO_3$ 的居里点，这证实了复合材料在该温度附近的弛豫行为由陶瓷决定。

研究发现，对于所有组分，无论样品的组成如何，热窗峰的最高温度都比极化温度高约 15 °C。

复合材料的介电常数随温度升高而增大，并与填料含量保持一定比例：复合材料中 $BaTiO_3$ 的含量分别为 40 %、50 % 和 70 % 时，介电常数分别为 20–250、30–400 和 40–1100。已知纯 PVDF 的介电常数约为 10–12，而 $BaTiO_3$ 的介电常数为 1500–7000。实验中施加于复合材料的极化电场（1.25 MV/m）高于纯 $BaTiO_3$ 的矫顽场（估计为 0.3 MV/m），但由于聚合物基体的电阻远高于陶瓷，因此尚不清楚是否会发生铁电极化。

由此确定，PVDF-$BaTiO_3$ 复合材料中的极化形成和电弛豫进程与铁电聚合物中的相似进程相似。这可为建立一种广义模型奠定基础；该模型不仅能够解释聚合物-陶瓷复合材料的电学行为，还能对其进行预测。

我们确定了聚合物基体电导率和极化制度对聚偏氟乙烯-锆钛酸铅复合材料有效电导率的影响。研究对象为聚偏氟乙烯-锆钛酸铅复合材料平板，其由聚偏氟乙烯粉末与锆钛酸铅陶瓷按 60:40 的体积比混合后经热压制成。为研究聚合物基体属性的影响，我们使用了两种聚偏氟乙烯粉末，它们的离子生成端基浓度不同，这些端基会促进杂质解离，因此其室温电阻率分别为 10^{10} Ω·m 和 10^{12} Ω·m。锆钛酸铅的电阻率数量级为 10^{10} Ω·m。

样品采用热驻极体法进行极化处理。样品在外电场中高温放置 50 min，随后在不撤去电场的情况下冷却。我们选取极化温度（70–130 °C）和聚合物分量的电导率作为变化参数。假设各层具有不同的电导率和介电常数。对于实际的铁电聚合物，应考虑渗流现象以及体积中的载流子注入

。根据渗流理论，对于三维双相体系，渗漏阈值取决于各相的结构特征，范围为 0.05–0.6。对于常规铁电聚合物，当填料或晶态铁电相的浓度约为 0.4–0.5 时，混合物很可能处于临界区域，或处于形成无限簇的区域。因此，适用于混合物广义电学特性的已知公式，如 Lichteneker、Landauer-Brugemann、Odelevsky 等人的公式，不适用于铁电聚合物和复合材料，因为这些公式假设各分量的属性彼此相近，且其中一个分量的体积分数较小。

显然，当微晶或陶瓷颗粒之间存在接触时，等效电路图不仅应考虑层的串联组合，也应考虑并联组合。基于泊松方程考虑注入效应，应会导致样品厚度方向上的电场不均匀。铁电聚合物和复合材料中的上述效应尚未得到研究，对这些现象也缺乏相应的理论。

如图 15 所示，极化温度的变化会影响电导率的温度依赖性。随着温度升高，低电导率和高电导率复合材料的活化能均增大，而电导率值则降低。这与所提出的假设相符：该假设认为，部分载流子被极化晶粒的界面俘获，从而导致电导率降低。事实上，随着温度升高，剩余极化增大，电导率则降低。

铁电陶瓷中剩余极化的程度及其稳定性，主要取决于注入空间电荷的幅值；当微晶中的偶极子取向时，这些空间电荷显然能够补偿由此产生的退极化场。铁电聚合物中也会发生类似的进程。然而，鉴于形态特征，铁电聚合物维持稳定极化的条件优于铁电复合材料；在铁电复合材料中，由于界面不足、机械应力以及自由体积受限，会出现极化不完全。因此，移除外场后，部分剩余极化会立即弛豫。在铁电聚合物中，铁电颗粒可以自由活动，这为电荷在其边缘被俘获创造了有利条件。尽管颗粒彼此接触，但它们不会形成刚性栅极，在极化处理过程中也能轻易发生体积变化。大规模

极化处理过程中的电势变化有助于电荷深陷阱形成，也会降低界面层中的分子迁移率。这就是铁电聚合物中聚合物的压电活性高于用作填料的陶瓷的原因。

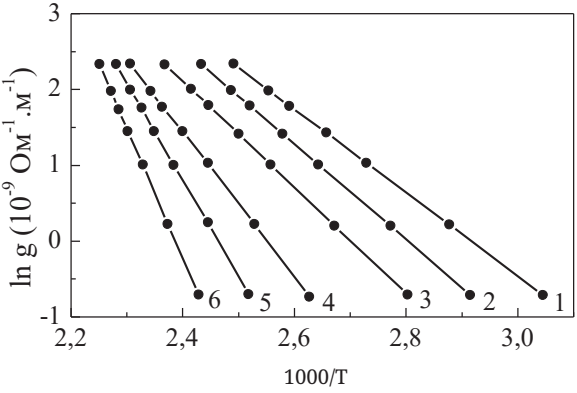


图 15. 在 70 °C（1.4）、100 °C（2.5）和 130 °C（3.6）下极化的聚偏二氟乙烯-锆钛酸铅样品的电导率随温度的变化。聚合物的电阻率为 10^{10} Ω·m（1、2、3）和 10^{12} Ω·m（4、5、6）

在“聚合物-铁电陶瓷”复合材料中，与铁电聚合物一样，不应否认空间电荷和极化在产生高热释电活性中的作用，而应将二者联系起来考虑。与聚偏二氟乙烯一样，这类复合材料中的不可逆弛豫过程与可逆（热释电）过程相互关联。

众所周知，热释电电流是可逆的，也就是说，从加热切换到冷却时，电流方向应当反转。然而，如图16所示，情况并非总是如此。

正向电流与反向电流不平衡，是由于弛豫分量的影响。加热停止后，该分量不会立即衰减至零，而是以数十至数百秒量级的时间常数逐渐弛豫。因此，热释电电流会出现延迟，如图16所示。

随着样品重复加热和冷却，弛豫过程经退火后，正向电流减小；同时，出于同样的原因，正向电流与反向电流呈现对称性（图17），表明热释电分量占主导地位，超过了弛豫分量。

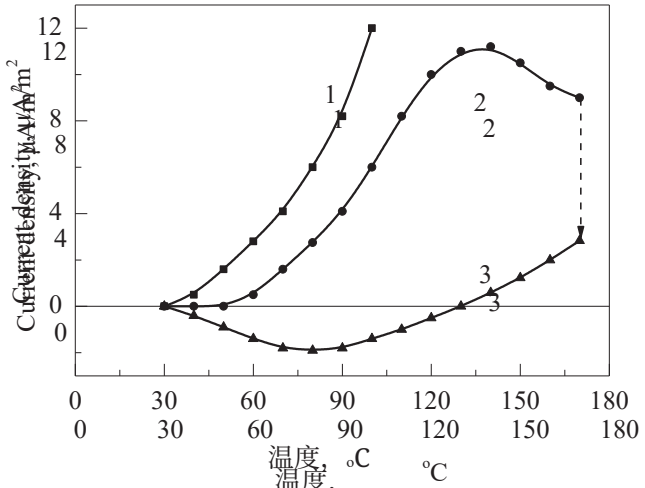


图16. 极化处理的聚偏氟乙烯-锆钛酸铅复合材料样品初次加热（1）和重复加热（2）时的热电流，以及再加热后的冷却过程（3）。加热速率为3.5 °C/min。样品厚度为280 μm。压电模量为8 pC/N

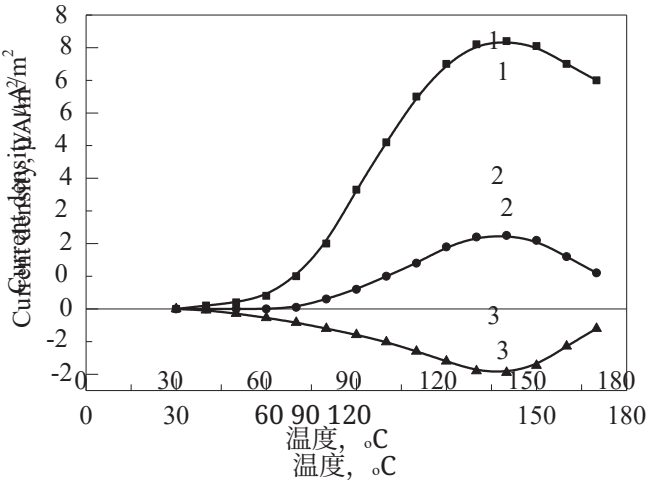


图17. 采用热驻极体法极化处理的PVDF-PZT样品首次（1）和第三次（2）加热时，以及第三次加热后冷却时（3）的热电流。升温速率为3.5 °C min。样品厚度为240 μm，极化温度为100 °C

值得注意的是，在聚合物-陶瓷复合材料中，与 PVDF 一样，热释电活性的最大值与热刺激去极化电流峰的位置重合，这表明这些过程之间存在相互关联，并且可能还具有共同的本质。

结论

在我们的大多数研究中，采用电晕三极管使极化过程得到完全控制，能够优化所得极化的幅值，并在极化完成后实现虚拟短路。基于多因素实验，确定了极化温度和时间，以及电晕电极和栅极电势等参数之间的最佳相关性。开发了一种用于研究铁电聚合物中同号电荷和异号电荷弛豫过程的新技术。该技术用于分离通过电压脉冲对 PVDF 薄膜进行极化时的全部电位移分量，以便识别和分析极化分量及其形成动力学。

通过实验验证了铁电聚合物与复合材料在电物理过程和极化过程中的共性与相似性，同时考虑到它们的两相结构，以及需要由相界面处的俘获电荷中和退极化场。

提出并计算了不同条件下极化态形成与弛豫过程的唯象模型，这些模型考虑并解释了极化非均匀性、极化对电场的非线性依赖，以及极化区域界面处的载流子俘获。

建立并分析了铁电聚合物在恒流极化处理下形成极化态的唯象模型。模型指出，电荷注入发挥着重要作用，它会形成空间电荷、电场强度和剩余极化的非均匀分布。该模型解释了铁电聚合物薄膜极化过程的三阶段特性。对驻极体电势实验动力学与计算动力学的比较表明，两者高度吻合，因此可以合理假设注入电荷被深度俘获，并以此为基础构建该模型。

建立了恒定外加电压模式下聚偏氟乙烯极化翻转的模型，并考虑了以下特征：

– 聚合物的两相结构，

– 本征电导率的存在以及来自电极的电荷注入，

– 极化晶粒界面处的电荷俘获及其随过程阶段而发生的释放，

– 释放出的电荷发生部分复合并再次被俘获，

– 极化翻转时间与场强的关系 ，
– 微晶中准稳态极化与场强之间的非线性依赖关系。

建立并求解了描述极化翻转过程的微分方程组，其中将以下参数作为交替变量：

– 非晶相和晶相中的场强，
– 微晶中的极化，
– 相间界面处的有效电导率和表面电荷密度。

通过比较实验所得的极化反转曲线与计算曲线，确定了有效迁移率、特征极化翻转时间和激活场等参数。基于该模型，解释了两相聚合物铁电体中初始极化形成与极化翻转之间的差异。

建立并分析了一种模型，用于解释在恒定电压模式下聚偏氟乙烯薄膜中的极化分布：该模式可产生接近矫顽场的中等电场，或显著高于矫顽场的高电场。该模型考虑了电荷从负电极单极注入、准静态铁电极化对场强的非线性依赖关系，以及描述电荷与场强梯度之间关系的泊松方程。研究计算了注入电荷前端的运动特性，以及正电极邻近区域内场强随时间的变化。研究解释了中等电场下非均匀极化的形成，以及极化区域边界处深陷阱电荷层的形成。即使极化发生反转，该电荷层仍保持稳定，从而导致极化均匀性分布曲线失真，也无法通过施加极高电场加以改善。研究还说明了为何在初始极化处理期间，施加高电场会形成均匀的剩余极化。

基于所开展的研究，提出了铁电聚合物与复合材料极化处理模式的实用建议，以获得较高且稳定的剩余极化。

参考文献

1. Rollik D., Bauer S., Gerhard-Multhaupt R., 应用物理学杂志 85, 3282 (1999年). 2. Rollik D., Kunstler W. 等 ., Proc. 第十届国际驻极体研讨会 , 51 (1999 年). 3. von Seggern H. and Fedosov S., IEEE《电介质与电气绝缘学报》11, 232 (2004年). 4. von Seggern H. Fedosov S. N. 《应用物理快报》 81, 2830 (2002 年). 5. von Seggern H. and Fedosov S. N., 《应用物理快报》, 91, 62914 (2007年). 6. Fedosov S. N. von Seggern H., 应用物理学杂志 96, 2173 (2004年). 7. Das-Gupta D. K. (编), 铁电聚合物与复合材料 — Trans. Publ. 332页 (2004年). 8. Teyssedre G., 等., Proc. 第八届国际驻极体研讨会. 650 (1994). 9. Eliasson S., 《物理学杂志D辑：应用物理》19, 1965 (1986). 10. Ieda M., Mizutani T., Nagata T., CEIDP年度报告. 399 (1994). 11. Neagu E. R. 等., 《物理学杂志D辑：应用物理》35, 1229 (2002年). 12. Turnhout van J., 聚合物驻极体的热刺激放电. 爱思唯尔, 327页 (1995). 13. Sessler G. M. (编), 驻极体 — 第1卷， 3rd 版，摩根希尔：437页 (1999年). 14. Sessler G. M., Das-Gupta D. K. 等 ., IEEE 《电气绝缘学报》 27, 872 (1992). 15. Teyssedre G. and Lacabanne C., 铁电学. 171, 125 (1995). 16. Sergeeva A. E., Fedosov S. N. 等., 薄膜物理与技术, 1, 382 (2005). 17. Lines M. E., Glass A. M., 铁电体原理与应用, 牛津, 680页 (2001年). 18. Broadhurst M. G., Davies G. T., 铁电体. 82, 177 (1987). 19. Wada Y., Hayakawa R., 铁电体. 32, 115 (1981). 20. Elling B., Danz R., Weigel P., 铁电体. 56, 179 (1984). 21. Fedosov S. N., Sergeeva A. E., 固体物理学. 31, 270 (1989). 22. Collins R. E., 应用物理学杂志 51, 2973 (1980). 23. Gross B., 《化学物理学杂志》**17,** 866 (1949). 24. Fedosov S. N., Sergeeva A. E. 等， arXiv:0704.3993 5页 (2007年).

极化处理的聚偏氟乙烯和 P(VDF-TFE) 薄膜中的铁电极化分布

Fedosov S. N.

本文介绍了对铁电聚合物薄膜样品厚度方向极化分布均匀性进行实验研究的结果。研究对象选取了典型的铁电聚合物——聚偏氟乙烯（*PVDF*）及其与三氟乙烯的共聚物 *P(VDF-TFE)*。测量采用了现代灵敏的压电生成压力阶跃法。

研究发现，极化分布很大程度上取决于薄膜初次电极化过程中所施加电压的大小。在接近矫顽场的弱场和中等强度电场下，极化分布不均匀，最大值出现在正电极附近。此时，无法通过进一步施加极强电场来改善极化的均匀性。

如果在强电场中进行初次极化，则极化分布均匀。研究了在电晕放电中极化的共聚物的特性。建立了铁电体薄膜形成极化过程中所发生过程的现象学模型，并提出了实践建议。

本文介绍了对铁电聚合物薄膜中极化分布沿样品厚度方向的均匀性进行实验研究的结果。研究对象选取了典型的聚合物铁电体——聚偏二氟乙烯（聚偏氟乙烯，*PVDF*）及其与三氟乙烯的共聚物 *P(VDF-TFE)*。测量采用现代灵敏的压电压力阶跃法进行。

研究发现，薄膜初次极化时的外加电压值会显著影响极化分布。在接近矫顽场的弱电场和中等电场下，极化分布不均匀，最大值出现在正电极附近。然而，即使随后施加非常强的电场，也无法提高极化均匀性。

如果在强电场中进行初次极化，则极化分布是均匀的。研究了电晕放电条件下极化的共聚物的特性。建立了铁电体薄膜极化形成过程中各进程的唯象模型，并提出了实用建议。

1. 引言。问题现状

PVDF薄膜中极化的空间分布，无论从科学还是实际角度来看，都极为重要。早期研究中 [1; 2] 曾指出，PVDF薄膜的压电性和热释电活性

在正电极附近高于负电极附近，这一现象曾被错误地归因于空穴注入以及非均匀分布的正空间电荷的形成。后续研究 [3–5] 表明，在某些情况下，不仅空间电荷，而且极化也沿厚度方向呈非均匀分布。

Day 等人首次通过比较极化薄膜两侧附近热释电活性的不同值，检测到了 PVDF 中极化的异构性。Sassner 发现，在三层彼此紧密压合的薄膜中，只有紧邻正电极的薄膜高度极化。研究发现，在高场（$E > 150$ MV/m）下，极化几乎均匀；而在中等电场下，极化最大值可能位于取向薄膜的中心，也可能位于非取向薄膜的阳极附近。

Gerhard-Multhaupt 等人采用强激光产生压力脉冲的方法研究压电活性的分布，证实在中等电场下进行热驻极体极化时，极化最大值位于阳极附近，这与电晕放电极化的情况相同。

文献作者认为，由于 PVDF 的电导率较高，过剩电荷区域无法存在，因而会形成电荷补偿的极化区。同时，我们根据以下 PVDF 特性计算了德拜屏蔽长度 L_D：温度 T =300 K、介电常数 $\varepsilon = 10$、载流子迁移率 $\mu = 10^{-12}$ m²/(V·s)、电导率 $g = 10^{-12}$ Sm/m。

我们得到的 $L_D = 170$ μm 远大于薄膜的典型厚度（10–50 μm）。因此，空间电荷的屏蔽效应在聚偏氟乙烯中应较弱。

Mopsik 和 de Reggi [9] 发现，聚偏氟乙烯表面附近的矫顽场强有所增加；de Reggi 和 Brodhard [10] 发现，尽管极化朝阳极偏移，但在电极附近极化为零。Sessler 和 Berraissoul [11] 发现，电极附近的压电活性很小，因此极化也很小。

我们认为，电场减弱表明载流子注入；相反，阻挡电极附近的电场和极化则会增强。

在 [4], 中，据报道，PVDF经正电晕放电极化处理后，阳极附近的极化程度最高；然而，同一作者的另一项研究指出，在这种情况下，极化集中于中心区域 [6]。Bichler 等人 [3] 发现，最大极化的位置取决于

PVDF 的热处理和机械加工方式。该论文的作者 [3] 得出结论：含有 α 相的 PVDF 中，极化向阳极偏移；而存在 β 相时，极化分布均匀，尽管热处理和拉伸改变了薄膜的晶体结构及其他属性。在 [12], 中，据报道，电晕极化PVDF薄膜的阳极附近极化减弱。这些相互矛盾的数据可以用研究所选用的薄膜具有随机性来解释（厚度、极化处理制度、退火和机械预处理各不相同）。此外，在某些情况下，研究方法并不完善，因此测量结果的解读带有主观因素。只有采用压力阶跃法才能直接测量极化分布；其他方法均应视为间接方法。

只有少数研究探讨了聚偏氟乙烯中极化分布曲线的动态变化。因此，研究发现，在中等电场（60 MV/m）下，含有 70 % β相的双轴取向聚偏氟乙烯薄膜，其中心区域会发生极化[13] 。然而，改变电压极性时，阳极附近不会发生完全翻转，因而形成双晶片结构。

Fedosov 和 Sergeeva 研究了电晕放电下带电薄膜中的极化分布[5; 14–16], ，发现电晕放电为负极性时，最大极化出现在正电极附近。

这表明发生了负载流子注入，而正电极具有阻挡作用。采用正电晕充电时，会发生双重注入：正电荷来自电晕，负电荷来自电极。研究发现，受到电晕放电作用的薄膜自由表面可视为虚拟注入电极。

一些研究考察了聚偏氟乙烯和 P(VDF-TrFE) [10], 以及 P(VDF-TFE) [16] 中极化的热稳定性及其沿厚度方向的分布。采用电子束法极化的 PVDF 薄膜中的电荷和极化分布 [17] ，则通过激光诱导压力脉冲法进行了研究。

Fedosov 和 Sergeeva 发现，体积中的陷阱电子并未集中在某一深度的薄层中，而是在具有一定厚度的区域 [18] 内以不均匀的密度分布。

这些电子形成一个虚拟负电极，电荷由此注入非辐照区域，导致电子的假想穿透深度增加，并使非辐照区域内的极化变得不均匀。

Mitsutani 和 Ieda [19] 证明了注入过程的重要性，但并未证明体积内本征电荷分布的重要性。他们发现，如果使用电晕放电而非金属电极，极化电流会增加 200 倍。文献 [19；20] 中的实验结果已用载流子注入解释。与此同时，一些作者认为，电晕放电会与任何电介质形成理想的阻挡接触 [21]。因此，载流子注入及其在极化形成中的作用仍是一个悬而未决且存在争议的问题。

关于 PVDF 极化分布的文献数据零散且相互矛盾，其原因在于实验方法复杂，以及结果解读存在歧义。

本研究旨在通过补充实验并建立相应的唯象模型，阐明极化分布均匀性对聚合物铁电体的重要性。

2. 研究铁电聚合物极化分布的方法

采用以下三种方法之一研究聚合物薄膜中的极化分布和空间电荷：

1）压电产生的压力阶跃法（PPS）；
2）调制激光诱导的热波法（LIMM）；

3) 激光诱导脉冲压力（LIPP）方法。

对这些方法的效率、灵敏度和分辨率进行分析后发现，PPS方法中的测量电流与极化或空间电荷梯度成正比，而LIPP方法中的测量信号与电荷（如果存在）及极化梯度成正比。鉴于LIPP方法的特点，它只能检测到极化沿厚度方向发生变化的区域。因此，高度均匀的极化与完全没有极化会产生相同的信号。尽管LIPP方法的分辨率实际上与PPS方法的分辨率相同，但应当承认，压力阶跃（PPS）方法更加可靠且信息量更丰富。

在 LIMM 方法中，热波的穿透深度会随着调制频率的提高而减小，因此在高于 10 MHz 的极高调制频率下，可以研究厚度小于 1 μm、靠近电极的薄层。

然而，随着样品表面至深处距离的增加，LIMM 方法的分辨率会急剧降低，这是 LIMM 方法的一项重大缺点。

综合考虑分析结果，我们选择了PPS方法，该方法可实现约2–4 μm的较高分辨率，并能在示波器屏幕上实时观察极化分布。与LIMM方法不同，它无需进行复杂计算、作出假设或求解不适定逆问题。PPS方法的巨大优势在于能够在样品极化处理、极化翻转和短路过程中，直接“原位”研究极化分布的动态变化。

大多数用于测量电介质中极化和空间电荷分布的方法，都是针对已经极化的样品进行测量，只能提供最终状态的信息；而极化形成的过程及其分布曲线，仍无法通过直接实验进行研究。从这一角度看，压电产生压力阶跃（PPS）法提供了一种独特的可能性：其一种改进形式能够在施加极化电压或将试样短路时，直接“原位”测量。此类极化分布动态变化的测量，对于理解铁电聚合物在极化处理和极化翻转过程中发生的物理过程极为重要。

我们采用了 Eisenmenger 等人开发的 PPS方法[6] ，所有测量均在斯图加特大学物理系 W. Eisenmenger 教授的实验室完成。该方法的原理是：压电晶体产生的压力阶跃穿过样品时，会产生电信号（电流脉冲）。压电压力阶跃由一个前端极陡的电压阶跃产生。压力波的前端以 2250 m/s 的声速传播，并在短路样品中产生电流脉冲。研究已证明，电流脉冲的形状重现了薄膜厚度方向上的极化分布曲线。

采用 PPS方法的装置框图如图 1 所示。电压步长由一个恒压源（500 V）形成，该恒压源连接由串联的电阻器和电容器组成的负载。该电路以约 100 Hz 的频率接入一个阻值为 50 Ω 的电阻器，石英晶体与其并联。将样品压在压电晶体背面，并在该面连接接地的铜电极。

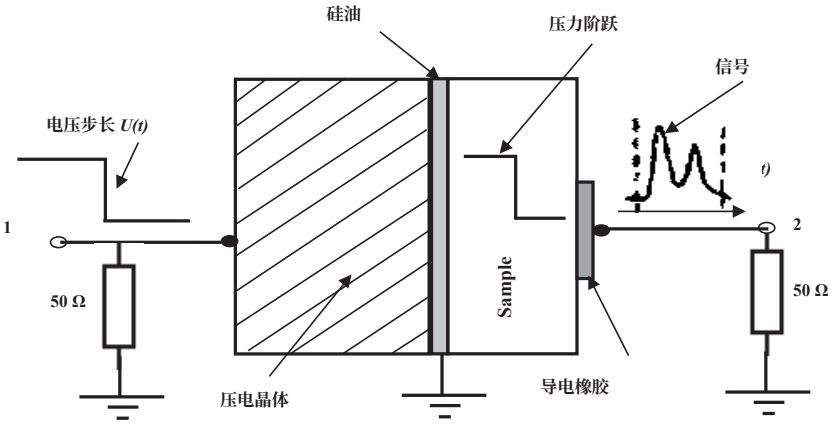


图 1. 压电诱导压力阶跃（PPS方法）测量极化分布的示意图

为使压力波更好地从石英传递至试样，在两者之间涂一层薄薄的硅油。借助夹持式导电橡胶电极，从样品背面取出电信号。负载为一个 50 Ω 电阻器，其信号被送入宽带放大器，然后再送至频谱分析仪或示波器。对于薄试样，使用厚度为 23-μm 的聚丙烯垫片以减小电容。

测量结果表明，压力阶跃前沿的陡峭度约为 0.4 ns，而室温下聚偏氟乙烯中的声速约为 2250 m/s。因此，压力波通过厚度为 20 μm 的样品所需时间约为 10 ns。单个电压脉冲的持续时间为 100 ns，即采用了逐步模式。

所有使用的设备（放大器、频谱分析仪和示波器）的带宽均超过 1 GHz。PPS方法的灵敏度约为 2 μm，受压力阶跃陡峭度的限制。频谱分析仪中的电信号被转换为数字代码，以便进行计算机处理。

为研究极化分布曲线，我们对 PVDF 薄膜进行了一系列实验。采用真空蒸发法，预先在样品两面镀上直径为 5 mm 的铝电极。在室温下，通过施加一定幅值和极性的恒定电压，进行初始极化和极化翻转。

在一系列极化和翻转实验中，电压幅值的选择使平均电场达到 60 MV/m；根据文献数据 [12]，该值略高于 PVDF 的矫顽场。这种模式被称为“中等电场”。

另一组实验中，极化场强为 160 MV/m，远高于矫顽值。这类条件被归为“高电场”。研究了中等电场和高电场下的完整极化循环。每个极化或翻转阶段结束后，样品均短路一段足以形成准稳态的时间（200 至 2000 s）。

极化分布曲线每秒测量约 100 次，并从示波器屏幕上记录下来。随后，将选定帧中的模拟信息转换为数字信息，并输入计算机进行进一步处理。所有结果均以极化随样品内部距其表面距离变化的曲线图形式呈现。

3. 薄聚偏氟乙烯薄膜中的极化分布

极化分布曲线和空间电荷为极化态形成过程中的相互关系及其稳定性的维持提供了重要信息。这使我们能够从假设和推测转向具体的实验事实；对这些事实的分析有助于更深入地理解铁电聚合物的特性。

因此，我们特别关注 PVDF 薄膜中极化分布的动态变化，不仅考察极化处理过程，还考察极化翻转和短路过程；研究范围既包括接近矫顽值（50–60 MV/m）的中等电场，也包括强度约为 160 MV/m 的高电场。

所得结果使我们能够构建模型，考虑注入与电荷分离之间的关系、深电荷陷阱区的存在及其与剩余极化的相互关系。我们发现，非均匀极化的铁电聚合物 [22] 无法实现完全翻转；这一发现对选择极化处理模式具有重要的实际意义，也表明铁电极化与表面电荷之间的关系十分紧密。

3.1. 接近矫顽值的极化电场

从图2可以看出，当平均场强接近矫顽值 $E_c = 50$ MV/m [23], 时，极化分布曲线的动态变化具有以下特征：在极化处理的初始阶段，

施加电压 8 秒后，极化分布均匀，但其值很低（0.5 μ库仑/厘米²）。随着时间推移，沿厚度方向的极化分布变得不均匀，最大值出现在正电极附近。PVDF 在平均电场下极化处理 2000年 s 后，剩余铁电极化呈现明显不均匀且不对称的分布；负电极附近有一层厚约 5 μm 的区域，其剩余极化为零。当断开电压并将样品短路时，极化分布的特征没有变化，仍然不均匀，但其幅值从 3.31 降至最大值区域的 1.71 μ库仑/厘米² 。

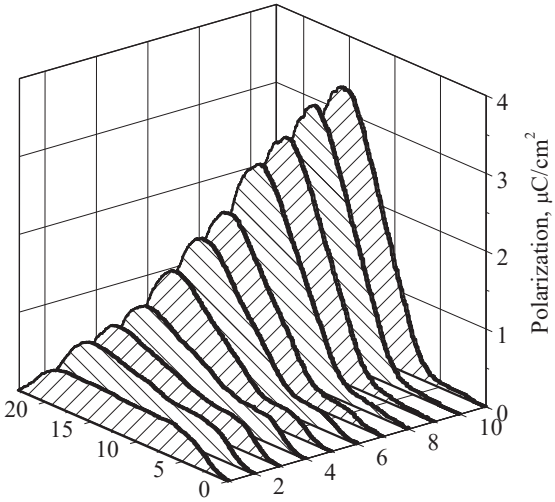


图2. P(VDF-TFE)薄膜在 60 MV/m 电场下进行极化处理时的极化分布。阶段编号对应极化处理开始后的不同时间：1–8 秒，2–70 秒，3–100 秒，4–150 秒，5–250 秒，6–350 秒，7–450 秒，8–750 秒，9–1000 秒，10–1510 秒，11–2000年

用于测量极化分布的方法的分辨率约为 2–3 μm，因此，在靠近电极的区域以及极化几乎发生突变的其他位置，极化分布会呈现平滑变化。例如，采用 LIMM方法测量电极附近的极化分布时，已证实极化会发生变化；该方法在电极附近的分辨率约为 0.1 μm [5]

在正电极附近，极化会在约 1 μm 的范围内从最大值急剧降至零。在不存在极化的负电极附近，不会因分辨率有限而导致分布曲线失真。

分辨率的影响可能也会影响第一区域与第二区域之间的边界；在该处，极化变化比图2曲线所显示的更加陡峭。

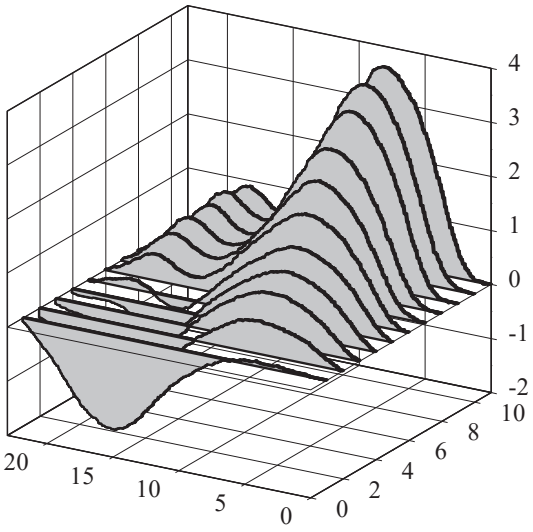


图3. 初始极化处理并短路后，P(VDF-TFE)薄膜在60 MV/m电场中翻转时的极化分布。各阶段对应于从翻转开始算起的不同时间：1–0 s，2–0.2 s，3–0.5 s，4–1 s，5–5 s，6–50 s，7–200 s，8–500 s，9–1000 s，10–1500 s，11–2000 s

改变电压极性后（图3），在深度约为16 μm处，原最大值所在位置形成一个最小值，因为该处的极化并未完全翻转，甚至没有降至零。与此同时，在该交点左右两侧形成方向相反的极化。

此时，只有在与薄膜另一侧相连的正电极附近再次形成高极化。值得注意的是，极化翻转比初始极化处理更快，而且峰值区域的剩余极化几乎是初始极化处理后的 1.5 倍。

对多次翻转后的极化分布曲线进行比较发现，经过偶数次翻转后，实际形成的分布曲线几乎完全相同。经过奇数次翻转后，分布曲线也相同，但首次充电后的分布曲线除外；此时负电极附近没有反向极化。

因此，分布曲线取决于翻转次数是偶数还是奇数。在这两种情况下，极化分布都呈现明显的不均匀性，且相对于样品中心不对称。无论相位的奇偶性如何，极化主峰始终位于上一轮实验中为正的电极附近；与偶数次翻转的情况相比，奇数次翻转时该峰的幅值几乎高出 1.5 倍。

准稳态形成所需的时间会随着电压翻转次数的增加而缩短：从初始极化处理时的 2000年 s，降至后续转换时的 250– 500 s。

在一些研究中，例如 [10, 24], , 关于表面附近的矫顽场大于体积内部矫顽场的说法，我们认为是不正确的，因为不完全翻转很可能是由电场不均匀所致。由于载流子注入，表面附近的电场小于体积内部的电场，因此该处的极化难以充分翻转。

3.2. 改善非均匀极化薄膜属性的尝试

从图2和图3可以看出，在中等电场（60 MV/m）下，无论电压极性如何，极化都是不均匀的，而且样品的任何部分都不会发生完全翻转。无论外部翻转电场的方向如何，形成的双晶片结构都能保持不变。同时，如下文所示，在高电场（160 MV/m）下会形成均匀极化；即使外加电压的幅值和符号发生变化，均匀极化仍会保持，直至完全去极化。因此，我们有必要研究最初在中等电场下极化的聚合物铁电薄膜在高电场下的行为。

如果初始极化不均匀是由于电场不够高，那么施加高电场后，极化区域应会扩展，从而提高极化均匀性。然而，我们发现，受到高电场作用时，极化并未变得均匀，极化区域也没有扩展。

实验按以下方式进行：将PVDF薄膜置于60 MV/m的电场中，并测量极化分布曲线。如

图2和图3所示，极化的空间分布极不均匀。此外，在不中断极化分布曲线测量的情况下，我们以200 V为步长将电压升至3.2 kV。3.2 kV时的场强是矫顽值的数倍。

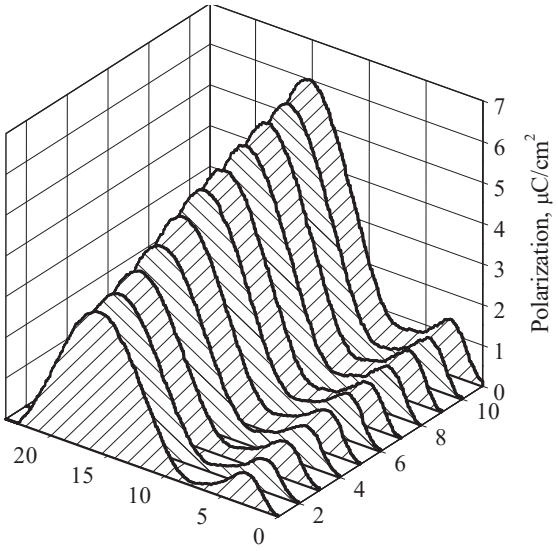


图4. P(VDF-TFE)薄膜在电压从 1.2 kV（初始极化）逐步升至 3.2 kV 过程中的极化分布。电压步长为 0.2 kV，每个电压下的作用时间为 50 s

然而，从图4中的曲线可以看出，场强的增加并未带来预期的极化均匀性改善。只有最大值的幅值增大了，而极化分布的不均匀特征仍未改变。

因此，要获得高且均匀的剩余极化，仅施加高场是不够的。还必须考虑样品首次进行极化处理时的条件。如果初始极化是在高场下进行的，那么无论施加何种正向极化或切换电压，剩余极化都将是均匀的。

如果初始极化是在中等或弱电场下进行的，那么施加高场无法校正或消除剩余极化的不均匀性

。在这种情况下，为了获得剩余极化的均匀分布，我们建议对样品进行彻底的热去极化，并在短路条件下于约 160 °C 退火数小时，以便将体积内的俘获电荷完全耗散。样品冷却后，必须重新进行极化处理，而且必须在高场下进行。

3.3. 高电场下的极化处理与极化翻转

在高电场（160 MV/m）下（图5），极化比在中等电场下均匀得多，而且即使经过初始极化处理，极化均匀性仍然显现。极化电压的极性改变时，会发生对称的极化翻转。施加相反极性的电压，并逐步小幅增加电压，可以使样品几乎完全去极化。发生这种情况时的场强对应于 60 MV/m。也就是说，该值可视为真实的矫顽场。

值得注意的是，随后施加任意极性的 60 MV/m 外场，都会产生均匀的剩余极化，而在该场强下进行初始极化处理后却无法获得这种状态。无论外场极性如何，高度极化的样品在场强为 60 MV/m 时都会完全去极化；这表明，如果初始极化处理是在高电场下进行的，磁滞回线便具有对称性。

因此，高电场下极化处理和翻转的主要特征如下：

1. 样品体积内的极化是均匀的，且相对于中央截面对称；

2. 在不同的极化电压下，分布曲线的形状和极化幅值没有差异；

3. 极化可在整个体积内轻易翻转，并且可以实现完全去极化；

极化均匀性不仅在高电场下得以保持，在中等电场下也同样如此。

在实践中，高电场下的“整形”或“调质”效应具有重要意义；经过这一处理后，在任何场强下（包括矫顽场）都能实现均匀极化。

如有必要，这样便可在从零到饱和的较大范围内改变剩余极化的幅值和符号，而不进行这种整形则无法实现这一点。

4. 恒定极化电场下极化分布形成的唯象模型

由图2可知，在施加产生60 MV/m平均场强的恒定电压后8秒的极化初始阶段，极化是均匀的，对应于约0.5 μ库仑/厘米^2。

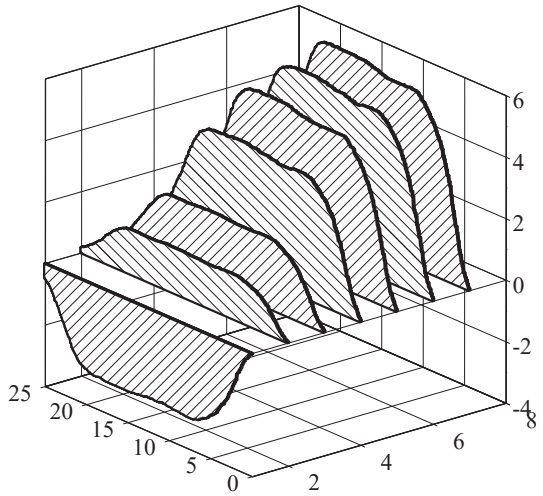


图5. P(VDF-TFE)薄膜在 3 kV 下进行初始极化处理后，施加不同值的反极性电压时的极化分布。阶段：1 — 初始状态，2 — 1.2 kV，3 — 1.6 kV，4 — 2.,0 kV，5 — 2.4 kV，6 — 2.8 kV，7 — 3.2 kV

这表明电场强度均匀分布，且不存在注入电荷 [25]。同时，考虑到极化稳态值与场强之间的非线性关系、矫顽值 E_c 的存在以及 50 % 的结晶度，可根据与初始极化处理相对应的公式计算极化稳态值 [26]

$$P_{st} = \frac{P_r}{2 \cdot (E_s - E_c)} (E - E_c) . \qquad (1)$$

将P_r = 13 μ库仑/厘米^2 [27], E_s = 200 兆伏/米 [23], E_c = 50 兆伏/米、E = 60 兆伏/米的值代入（1），得到P_{st} = 0.43 μ库仑/厘米^2。可逆极化分量P_{cap} 与场强和介电常数成正比

$$P_{cap} = \varepsilon_o(\varepsilon - 1)E. \qquad (2)$$

假设ε = 10 [21]，并考虑到ε_o = 8.85·10⁻¹² 法拉/米且E = 60 兆伏/米，可得P_{cap} = 0.3 μ库仑/厘米²。从极化分布曲线动态变化图可以看出，电压作用 8 秒后，极化值约为 0.5 μ库仑/厘米²。因此，所有极化均为可逆极化，也就是说，此时尚未形成铁电分量。

随着电场的进一步施加，极化变得不均匀（图2），表明场强分布出现非均匀性：负电极附近的场强减弱，而正电极附近的场强增强。根据泊松方程，只有存在过量负电荷，才能形成这种非均匀极化；这些负电荷位于电场不均匀处

$$\varepsilon_0\varepsilon\frac{\partial E(x,t)}{\partial x}=\rho(x,t)\,. \tag{3}$$

这些电荷可能从负电极注入，并存在于该电极附近，且随时间向样品深处延伸。若不考虑铁电极化的形成，可假设电荷分布接近矩形[13], , 电荷前沿运动速度由迁移率μ 以及边界处的场强E_1决定；该边界x_1 位于存在空间电荷的区域与没有过量体电荷的区域之间

$$v(t)=\mu E_1\left[x_1(t),t\right]. \tag{4}$$

由于外加电压保持恒定（U_o = 常数），归一化条件成立

$$\int_0^{x_0}E(x,t)dx=U_0\,. \tag{5}$$

假设注入电荷呈矩形分布时，表达式（5）可简化，因为在 0 到 x_1, 的区域内，根据泊松方程（3），电场随坐标线性变化，而在样品的其余部分则为常数，等于 E_1。因此，为求出 $x_1(t)$ 函数和场强 $E_1(t)$，可得到以下方程组

$$\frac{dx_1(t)}{dt}=\mu E_1(t)\,, \tag{6}$$

$$E_1(t)\left[x_0-\frac{1}{2}x_1(t)\right]=U_0\,. \tag{7}$$

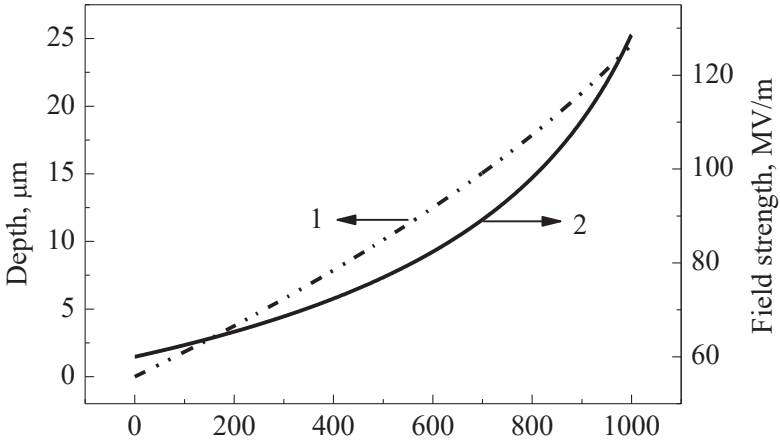


图6. 在对聚偏氟乙烯薄膜施加恒定电压后，注入电荷前沿运动的估算曲线，电荷迁移率为 $3\cdot10^{-16}$ $m^2/V\cdot s$ (1)；以及注入负电荷前沿到达处边界场强随时间的变化 (2)

方程（6）和（7）采用数值方法求解，x$x_l(t)$ 和 $E_l(t)$ 的曲线如图6所示，其中 $x_o = 23$ μm，$\mu = 3\cdot10^{-16}$ $m^2/V\cdot s$，$U = 1380$ V。。

从上述曲线可以看出，注入电荷前沿的运动速度随时间有所加快。同时，在注入电荷尚未到达的样品部分，场强随时间增加；经过 1000 s 的极化处理后，场强超过初始值的 2 倍。

极化翻转时间取决于电场。下面对此作进一步说明。假设聚偏氟乙烯中铁电极化的翻转时间在 $E = 200$ MV/m 时约为 5 μs，且翻转速率与场强的关系如下

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{E_A}{E}\right), \tag{8}$$

其中 τ_o 的量级为 20 ns，那么激活场 E_A 的值为:

$$E_A = E \ln\frac{\tau}{\tau_0} = 1.1 \text{ GV/m}. \tag{9}$$

根据公式 (8)，在 60 和 120 MV/m 电场下的极化翻转时间应分别为 $\tau_{60}\approx 2$ s、$\tau_{120}\approx 2\cdot 10^{-4}$ s。

因此，场强增大 2 倍会使翻转时间缩短 4 个数量级，但与实验的时间尺度相比，这两个数值都很小。这使我们可以假设，铁电极化的形成过程是准静态的。在这种情况下，我们可以忽略翻转时间对场强的依赖，而采用铁电极化对电场的依赖关系（1），并假设在任意给定时刻 $P_{fe} = P_{st}$。

已有研究[16] 表明，在 PVDF 中，除电容P_{cap} 和铁电P_{fe} 极化分量外，还存在一种可逆分量P_{rev}，其本质尚未明确；这一分量的存在与聚合物非晶相中的偶极极化有关。通过分析电压关闭且样品短路后极化分布的演变，可以确定各极化分量之间的关联。在极化处理过程中，即施加电压时，三种极化分量均存在

$$P_1 = P_{cap} + P_{fe} + P_{rev}, \tag{10}$$

在极化最大值处，$P_1 = 3.31$ μ库仑/厘米^2。在缩短的情况下，P_{cap} 和 P_{rev} 的分量消失，只剩下铁电分量，即 $P_2 = P_{fe}$，其中 $P_2 = 1.71$ μ库仑/厘米^2。由于极化形成过程相当缓慢，实验时间远大于麦克斯韦弛豫时间

$$\tau_M = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{g} \approx 3s\,. \tag{11}$$

当聚偏氟乙烯的自身电导率 $g = 3\cdot 10^{-11}$ Sm/m [16], 时，没有理由认为铁电极化会因退极化场补偿不足而发生部分反向切换。因此，P_{fe} 不会因短路而改变。根据公式 (1)，可以求出相应的极化最大值（$P_{st} = 1.71$ μ库仑/厘米^2）和场强 $E = 89.5$ MV/m。根据公式 (2)，极化的电容分量为 $P_{cap} = 0.79$ μ库仑/厘米^2。于是，极化的可逆分量等于 P

$$_{rev} = {}_{1} \quad {}_{cap} \quad {}_{fe} = 0\ 81\ P — P —$$

μ ^{2}

P。C/cm 。

由于可逆极化很可能是由非晶相的偶极结构引起的，因此可以通过引入

非晶相的有效介电常数来加以考虑，该介电常数包含所有可逆进程。

von Seggern 和 Fedosov 的研究中采用了同一数量级的数值（19.6）[15；28] 在计算 PVDF 中铁电极化两阶段形成过程时也采用了该数值。四个横截面上的极化动态（图7）表明，异构性程度有所增加，因为负电极附近、深度约为 5–6 μm 处约 0.5 μ库仑/厘米² 的极化并未像样品的另一部分那样随时间增加，而是逐渐减小至零（图7）。与此同时，正电极附近的极大值最初位于深度 17.5 μm 处，随后移至坐标 15.4 μm 处，并随时间增加。

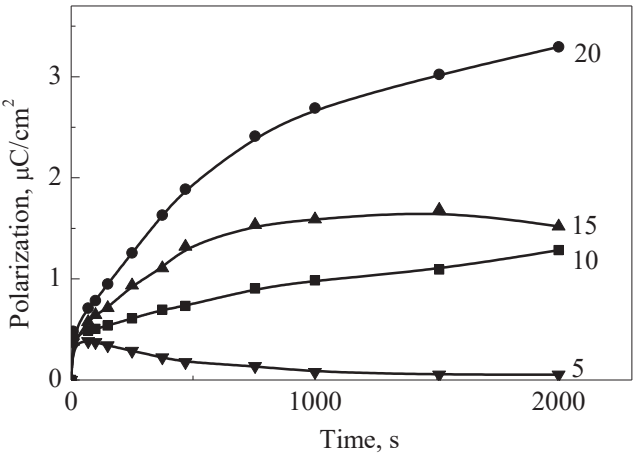


图7. 在 60 MV/м 电场中进行初始极化处理期间，P(VDF-TFE) 中极化随距薄膜表面不同距离（深度）变化的动态：5、10、15 和 20 μm。

这表明，铁电极化并非在负电极附近形成，而是电场和极化逐渐减小至零。根据注入电流理论 [25]，注入电极处的场强很小或为零；但在过量电荷所在的电极附近，电场不为零，并且在均匀电荷分布的情况下呈线性增加，这可由公式 (6) 得出。如果电荷密度沿深度方向减小，则 *E(x)* 关系曲线将呈凸形。也就是说，仅凭电荷注入无法解释为什么在厚度约为

- — — —

Polariz 1 10

5

0

0 时间，秒 1000 2000

5–6 μm 的区域内，电场和极化几乎为零。显然，还有另一种现象导致负电极附近的场强和极化减小。

$$\varepsilon_a = (P_{cap} + P_{rev}) / \varepsilon_0 E = 20.2 . \quad (12)$$

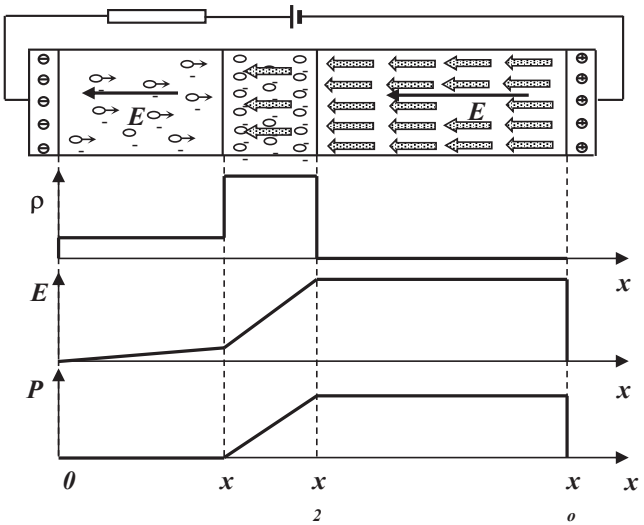


图8. 中等电场下对PVDF薄膜进行极化处理时发生并导致形成非均匀三层结构的过程示意图。还显示了注入电荷沿厚度方向的分布、电场强度和极化

已知，在聚偏氟乙烯 [17], 形成铁电极化的过程中，有效电导率会急剧下降，也就是说，可以认为样品中已极化部分的电导率远低于未极化部分。在这种情况下，外加总电压U_o在未极化部分和已极化部分之间的分配，如同在两个不同阻值的串联电阻器之间进行分配。未极化部分的电压因而场强较小，已极化部分则较大。这种电压分布会进一步加剧剩余极化的异构性。

因此，方程（6）和（7）未考虑有效电导率对铁电极化P_{fe}的依赖关系，只在P_{fe}形成开始之前有效。此后，均匀运动

注入电荷的运动停止，因为根据泊松方程（3），注入电荷会局域在极化区域与未极化区域的边界上。注入电荷仅部分进入极化区域，或完全无法进入，也就是说，极化区域的有效电导率降低。外加电压随之重新分配，使未极化部分的电压降低，而极化部分的电压升高。因此，注入电极邻近区域的场强和可逆极化减弱，而极化区域内的场强和可逆极化增强。极化分布演变的实验曲线（图2）恰好显示了这一现象。

这一现象导致形成三层结构，如图9所示。

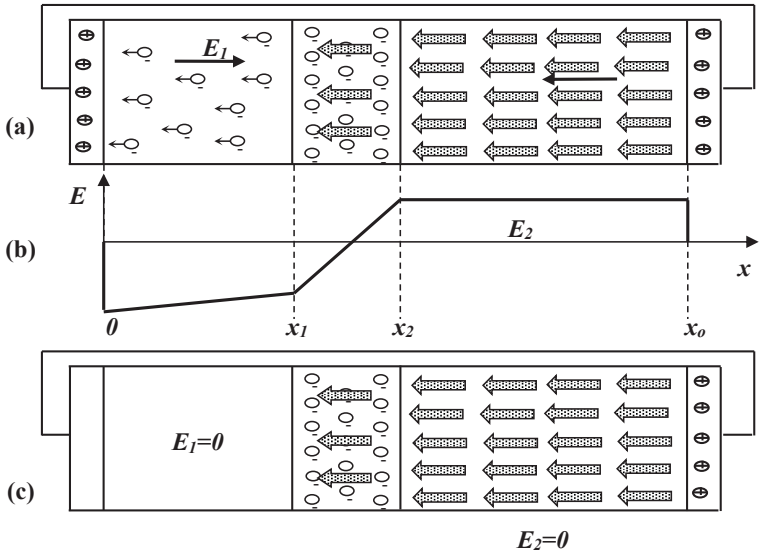


图9. 中等电场极化的 PVDF 在短路瞬间发生的进程示意图（a）、切断瞬间的场强分布（b），以及样品在短路条件下老化后的状态

在邻近负电极的区域，注入电荷浓度高，电导率高，场强低，可逆极化极低。在未极化区域与极化区域的边界处，会形成一层局域负电荷。在该层内，电场是不均匀的，极化从零急剧增加至

最大值。在第三区域，存在均匀电场和均匀极化。

极化处理完成后，样品短路时，平均场强变为零。同时，样品未极化部分的场强矢量方向E_1（图9）变得使得第一区域中过量的自由注入电荷经由极化处理期间带负电的电极被“吹出”。所有区域中的可逆极化分量均降至零，过量的非局域化电荷因自身电导率而消散，样品各点的场强以等于麦克斯韦弛豫时间（11）的时间常数变为零，如图9所示。

根据图2的实验数据，第一区域占据$x = 0$至$x_1 = 6\ \mu m$的范围，第二区域从$x_1 = 6\ \mu m$延伸至$x_2 = 14\ \mu m$，第三区域从$x_2 = 14\ \mu m$延伸至$x_o = 23\ \mu m$。根据实验极化分布曲线可知，各区域的界面不随时间变化。在第二区域中，过量负电荷几乎均匀分布。这一点可由该区域内极化分布曲线近乎线性的区段得到证实。

在恒定电压下，极化分布随时间变化至关重要。这表明，空间电荷的缓慢转移和重新分布过程参与了极化的形成及其翻转。一般而言，正如我们的数据所表明的，极化是电场、电介质体积内坐标和时间的复杂函数。

所得结果与该模型相符。该模型强调，体电荷在 PVDF 中极化区的形成以及电荷载流子从电极注入过程中发挥着重要作用。实验数据表明，从金属电极注入的负电荷量高于从正电极注入的负电荷量。注入的负电荷迁移率也可能远高于正电荷迁移率。在这种情况下，本征自由载流子的作用较小。

因此，在初始极化处理过程中，负电荷的注入会扰乱电场的均匀性。在靠近可注入电极的大部分样品区域内，电场减弱并低于矫顽场，因此该处不会形成铁电极化，剩余极化为零。同时，正电极附近的电场超过矫顽场值，因此该处会形成较高的剩余极化。极化非均匀性由俘获在极化梯度存在区域内的负电荷固定。另一侧的退极化场

则由位于电极处或近表层内的正电荷补偿。

极化处理并短路后，峰值区域的电场支持极化。移动电荷也会重新分布：在负电极附近，它们朝着与注入相反的方向移动，直到体积内所有位置的电场都变为零（图9）。只有极化峰的斜坡处仍留有未补偿的俘获电荷。

一旦出现高极化区域，注入电荷便立即开始在极化区域的边界大量俘获。这个带电层将体积分成两部分。在靠近负电极的第一部分中，没有高极化，且自由注入载流子的浓度相当高。因此，在极化处理过程中，该区域的表观电导率较高，电场相应减弱。与此同时，极化区域与注入电极之间被一层俘获电荷载流子隔开，其表观电导率也显著低于第一区域。这一现象可视为由非均匀极化引起的麦克斯韦-瓦格纳效应，它会导致极化区域内的电场增强。因此，随着时间推移，极化区域不会扩展，而极化值会增加。从现象学角度看，电荷俘获以及分区表现为恒定电压下充电电流的降低，也就是有效电导率的降低。

当外加电压的极性改变时，负电荷载流子的优先注入再次发生，但注入方向来自对侧电极。因此，在剩余极化为零的区域会出现高场。这使该区域沿新的方向形成高极化。在剩余极化较强的区域，由于负电荷的注入以及负体电荷的存在，电场会减弱。因此，此处不会发生极化翻转，但仍会保留一部分原方向的剩余极化。

在负空间电荷局域化区域（8–15 μm）内，极化梯度的方向和大小均未改变。这表明，初始极化处理期间俘获的负电荷仍留在原处，尽管其所在区域的极化方向已转为相反方向。这种异常现象完全符合零电场情况下的泊松方程。此前俘获的载流子也可能发生离域化

并重新俘获，而局域化的空间位置没有显著变化。

因此，翻转后会形成一种非对称双层结构，并在后续的翻转过程中保持不变。从 8–15 μm 区域的极化梯度来看，负电荷层在样品体积内的所有翻转过程中都保持不变，仿佛被固定在那里。该层的存在解释了为何翻转期间极化分布的形成速度快于初始极化处理：此时该层尚未形成。即使在外加电场较高的情况下，这一层也会阻碍均匀极化的形成。

对于最初在中等电场下进行极化处理的薄膜，提高外加电压却无法改善极化分布，这一现象可由注入电荷和俘获电荷的影响来解释。从图7可以看出，当开关外电压的极性改变时，样品体积内极化区域边界处的极化梯度并未改变符号。这表明体积内存在一层深度俘获的负电荷，它起到势垒的作用，阻止极化区域扩展。该层是稳定的，因为它能够补偿其两侧区域中的退极化场（外场极性不同时亦如此）。由于该层阻碍注入的负电荷自由移动，因此，该层与阴极之间区域的负电荷浓度远高于带电层与阳极之间区域的浓度。因此，这些区域的有效电导率不同，外加电压的分布也不均匀，导致相当一部分电压施加在已经极化的区域上。

因此，由于阻挡层的存在，提高电压无法扩大极化区域，也就是说，无法改善极化均匀性。因此，初始非均匀极化在任何幅值和极性的高电场中仍然是非均匀的。

我们发现的这一现象从科学、方法论和实践角度来看都具有根本重要性。首先，它进一步阐明了极化与俘获空间电荷之间的相互作用机制。看起来，强度为矫顽场 3 倍的高场应该能够提供均匀极化，而不受初始条件影响。然而，事实并非如此。

陷阱电荷的影响如此显著，以至于即使高电场也无法抑制它。其次，在研究铁电聚合物中的翻转和滞后现象时，人们似乎理所当然地认为应从弱电场开始通电，

然后逐渐增大外加电场。这就是所谓的“超低频”滞后测量方法。结合我们的数据可知，这种测量方法并不正确，因为极化的幅值，尤其是其分布曲线，不仅取决于场强，还取决于样品的前史。

通过研究高电场下的极化处理和翻转，发现此时极化是均匀的，并且在整个体积范围内很容易翻转。在高场下进行初始极化时，可能发生完全去极化，而且极化均匀性不仅在高电场下，在中等电场下也能保持。这些特征可以这样解释：在高电场作用下，极化区域会迅速扩展至几乎整个体积，从而阻碍电荷移动，并使电荷注入的作用显著减弱。在这种情况下，退极化场的补偿和中和进程发生在电极上或表面附近，因此整个主体积不含注入电荷和俘获电荷；这些电荷可能会破坏电场和极化的均匀性。极化翻转期间，电极附近极化梯度的变化表明，俘获的补偿电荷的符号也会发生变化。只有当这些电荷并未被俘获在过深的位置时，这才有可能；这样，在高电场作用下，它们便能从陷阱中被“震出”，随后局域化在同一区域。

5. 电晕极化 P(VDF-TFE) 共聚物中的极化均匀性 r

此前尚未研究过 P(VDF-TFE) 中的极化分布曲线，而对其他经电晕充电的铁电聚合物所获得的数据也相当零散。例如，研究发现，极化集中在带正电的聚偏氟乙烯 [29] 的中央区域。另一份处于相似条件下的聚偏氟乙烯样品，其极化峰值出现在正表面附近；而双轴拉伸聚偏氟乙烯则表现出或多或少均匀的极化 [30]。经负电晕极化的聚偏氟乙烯薄膜，其极化分布曲线呈钟形 [31], ；而经正电晕极化的双轴拉伸聚偏氟乙烯，其正侧附近的极化则显著降低 [32]。极化均匀性的失真通常被认为是注入电荷存在的结果 [29–32], , 但这一机制的具体细节仍未完全明了。

在[5], 中，我们报告了通过对薄膜应用压电产生压力阶跃（PPS）法获得的极化分布测量结果

这些 P(VDF-TFE) 薄膜是在不同条件下通过负电晕放电充电的。

样品为来自实验批次的 20 μm 厚 P(VDF-TFE) 薄膜，由 95 % 的 VDF 和 5 % 的 TFE 组成。薄膜由供应商（俄罗斯 Plastpolymer）从熔体中挤出并单向拉伸；根据红外光谱测量结果，其中约 90 % 的晶体为铁电 β 相。通过真空热蒸发，在样品的一侧表面沉积直径为 20 mm、厚度为 150 nm 的铝电极。有时也使用未金属化的薄膜。

极化处理在电晕三极管中进行，[33] 样品裸露的表面受到由尖端钨电极引发的负电晕放电。离子和电子穿过控制栅，控制栅相对于接地后电极保持恒定的负电势。极化电场由吸附在样品表面的电荷产生。控制栅被设置为振动，以便同时通过开尔文法测量表面电势和直流极化电流。

通过将场强维持在两个水平（50 MV/m 和 100 MV/m）、温度设为两个值（25 °C 和 85 °C），并采用两种电气模式（恒流和恒定电压），研究了由三个极化参数构成的六种组合。此外，我们还使用由相同薄膜构成的多层样品进行了实验，其中只有最下层薄膜金属化，并与正电极接触。极化处理完成后，立即将所有样品短路 15分钟。短路通过对裸露的样品表面进行非电极接地来实现。具体而言，将电晕极性从否定改为正，同时将控制栅接地。因此，样品被短路了，因为其上表面此时受到正电晕放电离子的轰击，获得了与后电极电位相等的栅极电位。短路持续时间足够长，能够确保样品主要部分处处为零电场。短路后，样品在开路条件下存放。

采用压电效应压力阶跃（PPS）法，在室温下测量极化分布曲线。该方法的完整描述见其他文献 [29], , 此处仅介绍其基本原理。压力阶跃由与样品相连的电控石英晶体产生。压力波以声速（~ 2000 m / s）沿厚度方向在样品中传播，产生

电信号，并由带宽为 1 GHz 的示波器测量，再进行数字化处理。已有研究表明 [30； 34] 短路电流对压力阶跃的响应可直接反映样品中压电性的空间分布。已知 [26] 铁电聚合物的压电系数与剩余极化水平成正比。因此，任一时刻的电流幅值与样品相应位置的剩余极化成正比。由此，测量信号直接按极化单位进行校准。在样品与测量电极之间插入一层 23 μm 厚的聚丙烯薄膜，以降低输入电容。为获得可靠数据，我们对每个样品的极化分布曲线均测量两次。

我们发现，在恒流条件下，P(VDF-TFE)薄膜中的剩余极化分布不均匀，且不受温度影响，如图 10 和图 11 所示。室温下极化的样品，其极化峰向正侧偏移，导致近一半厚度未被极化（图 10）。加热至 85 °C 的样品，其极化峰比室温样品的更高，且更靠近正表面（图 11）。如图 10 和图 11 所示，所有经恒流极化的样品中，在受到电晕放电离子轰击的表面附近还观察到另一个较小的峰。

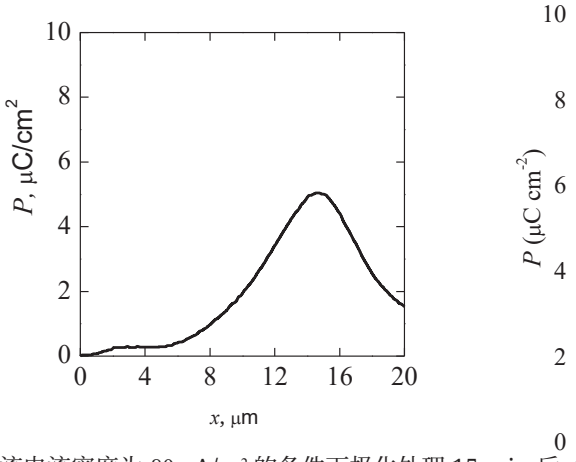
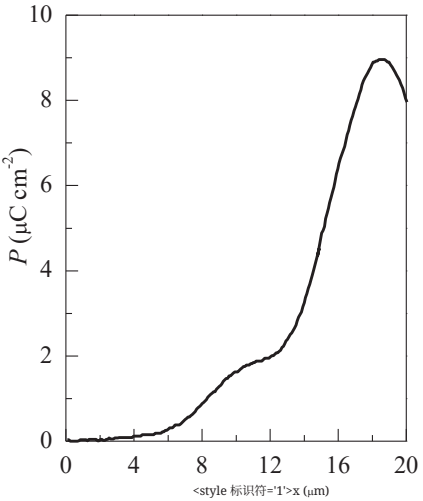


图 10. 在 25 °C、直流电流密度为 80 μA/m² 的条件下极化处理 15 min 后，P(VDF-TFE)薄膜中的极化分布。极化处理结束时的电场为 100 MV/m。坐标 $x = 0$ 对应于受到负电晕离子轰击的样品表面

10 10 10

(*a*) (*b*)



4 8 12 16 20

x, μm

图 11. P(VDF-TFE)薄膜在 85 °C 下经极化处理后，在 160 μA/m² 的直流电流密度下保持 15分钟，并在所施加的 100 MV/m 电场中冷却至 25 °C 后的极化分布。$x = 0$ 坐标对应样品的负侧

多层样品在恒定电压下进行极化处理。场强为中等（50 MV/m）或较高（100 MV/m）。第一个值接近聚偏氟乙烯的矫顽场。由样品构成的双层薄膜中，极化电场并不相同。在平均电场为 50 MV/m 时，只有与正后电极直接接触的薄膜具有剩余极化（图 12）。上层薄膜没有显示出任何剩余极化，这表明电压主要施加在下层薄膜上。

然而，在高场条件下，两层薄膜都会发生极化，如图13所示。下层（“正”）薄膜中的极化分布相当均匀（图 13 (b)），而上层薄膜中则有两个不对称峰，较高的峰位于受到电晕离子轰击的表面附近（图 13 (a)）。三层和四层试样在平均标称电场为 50 MV/m 的条件下进行了极化处理。图 14 和图 15 所示结果与双层样品的结果（图 12 和图13）显著不同。样品的三层薄膜中，受到离子作用的上层薄膜完全没有极化。极化分布

0
0 4 8 12 16 20
x, μm
2
0
0 4 8 12 16 20
x (μ米)

与恒流极化的情况（图 10 和图 11）相似，贴附在正电极上的薄膜极化不均匀；而中间薄膜中有两个对称峰，中间由一个鞍点隔开（图 14 (a)）。对于四层薄膜，只有样品正侧的两层薄膜发生了极化，但极化并不均匀（图 15）。两层薄膜中的极化峰均向正侧偏移，且与电极接触的薄膜中的极化幅值高得多（图 15 (a) 和 (b)）。

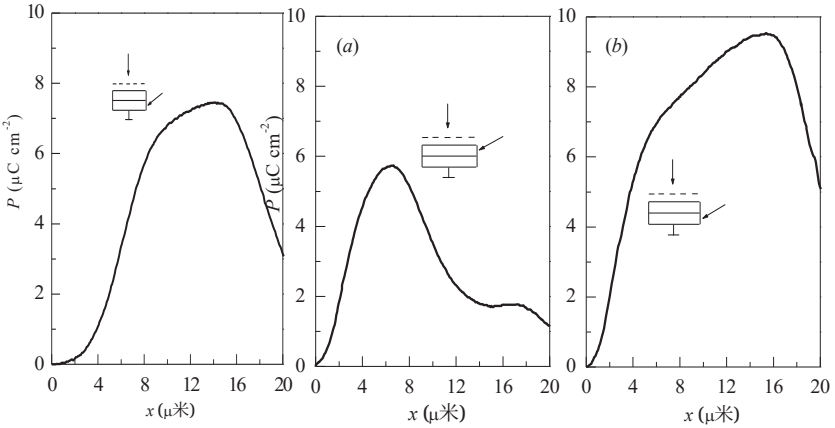


图 12. 双层样品在 85 °C 下以平均强度为 50 MV/m 的恒定电场极化 15分钟，并在外加电场中冷却至 25 °C 后，下层薄膜的极化分布。坐标 $x = 0$ 对应薄膜的负侧。受到电晕放电离子轰击的上层薄膜没有任何剩余极化

三层样品在 85 °C 下以平均电场 50 MV/m 进行极化，并在外加电场中冷却至 25 °C 后，中间层和最下层薄膜的极化分布呈现出相似的结果。坐标 $x = 0$ 对应每层薄膜的负侧。受到电晕放电离子轰击的上层薄膜没有任何剩余极化。

根据我们对多层样品进行的实验，也可以预期，在单层厚膜的情况下，正电极附近会出现极化峰，而负电极附近则有较大的极化耗尽区。在厚度为 120 μm [30] 的电晕极化PVDF薄膜中也观察到了类似现象。

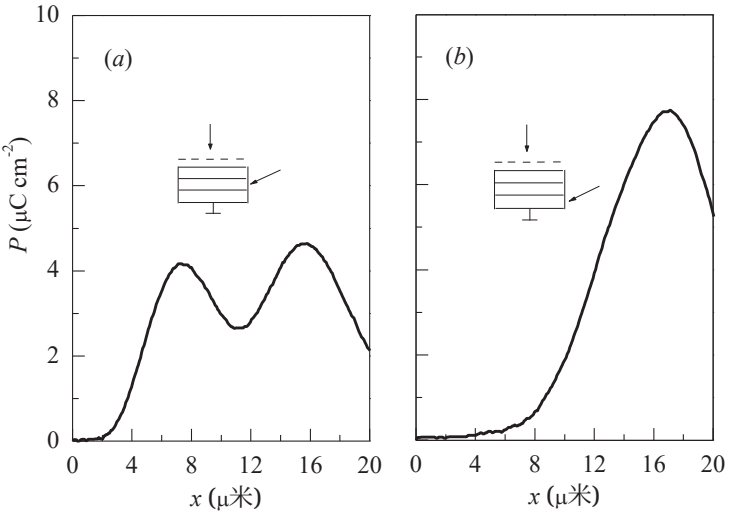


图13. 在外加电场中冷却至 25 °C 后，于 85 °C 下以 100 MV/m 的恒定平均电场极化处理 15分钟的双层样品中，(a) 上层薄膜和 (b) 下层薄膜的极化分布。坐标 $x = 0$ 对应每层薄膜的负极侧

极化与电荷注入

均质试样沿厚度方向的极化异构性，显然可能是外加电场分布不均匀所致。根据泊松方程，场强 *E(x,t)* 的不均匀性是由于存在未补偿的真实电荷 ρ*(x,t)*，或极化电荷 *dP(x,t)/dx:*

$$\varepsilon_0\varepsilon\left[\partial E(x,t)/\partial x\right] = \rho(x,t) - \partial P(x,t)/\partial x\ , \qquad (13)$$

其中，ε 为介电常数，ε_o 为真空介电常数，*P* 为铁电极化，*x* 为沿薄膜厚度方向的坐标，*t* 为时间。由于极化*P*本身取决于场强*E*，极化电场的初始异构性应仅归因于真实电荷的作用。

电介质中的空间电荷主要有两个来源。一种是原本存在的本征正、负载流子在空间上的分离；另一种是从外部向体积内注入电荷。为说明如何利用方程（13）区分注入载流子和内部载流子的影响，我们首先假设将外加电压 *V*

施加于厚度为 x_o 的样品上，此时注入电荷的密度远低于本征载流子的密度。

由方程 (13) 可知，样品两侧表面附近的电场增强，而中央区域的电场相应减弱。如果外加电场$E_p = V/x_o$ 等于或接近矫顽值E_c，那么电极区域前方将出现两个铁电极化峰，中间由非极化区隔开，如图16 (b) 所示。

现在假设将相同的电压V施加于另一个样品，其中发生负载流子单极注入，且其密度远高于本征电荷的密度。注入电荷不会影响平均E_p 电场，但会造成电场异构性，如图16 (a) 所示。注入电极处的电场几乎为零，但会按照方程 (13) 沿x方向增加，直至在某一深度达到E_c 值。显然，剩余极化峰将向正电极偏移。

因此，可以根据极化峰的位置确定起主导作用的现象。例如，图13 (a)和14 (a)中的分布曲线表明，这些样品中的注入程度较低。然而，在许多情况下，负电荷的注入比本征载流子的分离更为重要。例如，图10、11、14 (b)、15 (a)和16 (b)中均可见这一结果：这些情况下的极化峰都出现在正电极附近。

由于正电荷占主导的移动，样品内部的空间电中性将受到扰乱。极化处理期间注入的电荷在短路后不会留在那里。它们形成的空间电荷与剩余极化分布的斜率相对应，因为在短路条件下，$dP(x)/dx$

$= (x).\ E(x)$。

$= \rho \qquad = 0$

空间电荷对测量信号的贡献无法通过实验与剩余极化区分开来，但可以认为其影响微不足道，因为PPS方法所测的铁电聚合物压电性 [30; 34] 是由剩余极化引起的，而不是由空间电荷引起的。

我们对 P(VDF-TFE)薄膜所得的结果与其他在电晕放电中完成极化的铁电聚合物的极化分布数据一致。在 PVDF 和 P(VDF-TrFE) 中检测到了由于电荷注入导致的负侧附近极化耗减现象 [30–32]。此外，在采用热驻极体法进行极化的铁电聚合物中也观察到了类似现象 [29；30], 通过直接施加高场以及电子束极化也观察到了这一现象。

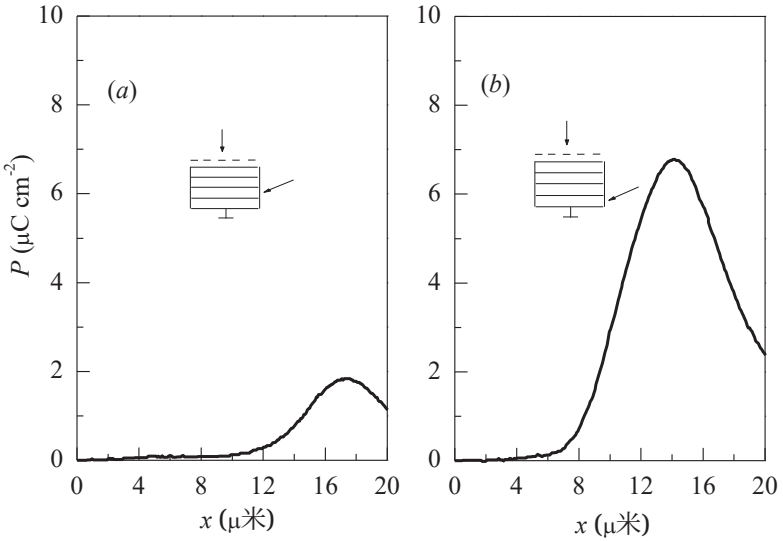


图 15. 在平均电场为 50 MV/m、85 °C 下极化 15分钟的四层样品中，(a) 倒数第二层最底部薄膜和 (b) 最后一层最底部薄膜的极化分布

电荷注入很可能源于在受到电子和离子轰击的表面上形成的虚拟电极。我们的结果表明，如果使用低场或中等电场，注入会更严重地破坏极化均匀性。例如，在恒定电压情况下，电场会从零逐渐增加到约 100 MV/m， resulting polarization distribution is highly heterogeneous（图 10 和图 11）。由于该区域的电场过低，无法形成铁电极化，因此样品厚度的近四分之一未被极化。在平均电场为 50 MV/m 下进行极化的双层样品中，电荷主要在电晕作用下被注入薄膜，从而导致薄膜电导率增加。我们假设该电导率符合以下方程

$$g = e\left[n(\mu_+ + \mu_-) + n_+ \mu'_+ + n_- \mu'_-\right], \qquad (14)$$

其中，e为元电荷，n为载流子密度，n_+ 和 n^- 为注入电荷密度，μ_+、μ^-、μ'_+ 和 μ'^- 为本征载流子和注入载流子的迁移率（二者可能不同）。该表达式表明，如果发生注入，电导率就会增加。因此，外加

电压会重新分配，使其主要部分施加在连接正电极的薄膜上。这种薄膜中的极化分布相当均匀（图 12），尽管负电荷注入的影响仍表现为样品负侧附近的一层薄的非极化层。顶部薄膜完全没有极化，因为电场非常弱。同样，在三层结构实验中有一层薄膜、在四层实验中有两层薄膜也未发生极化。

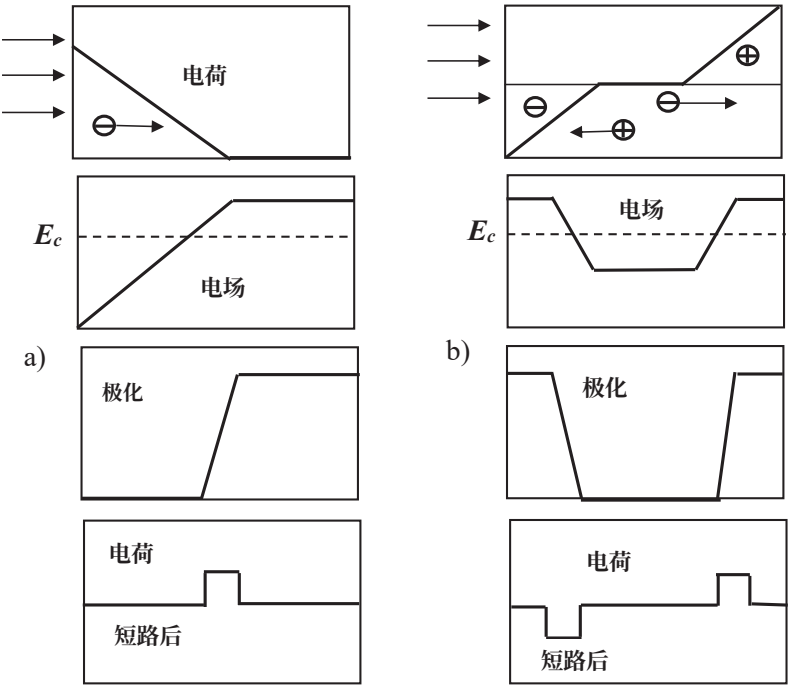


图16. 示意图显示了电晕极化过程中体电荷、场强和铁电极化的分布情况，其中（a）为负电荷的单极注入，（b）为内部正、负载流子的分离。平均场强等于矫顽场E_c。图中还显示了样品完成极化处理并短路后的局域电荷分布

我们对 P(VDF-TFE) 薄膜的测量结果与采用热驻极体法极化的 PVDF 薄膜多层实验所得结果一致[35], , 但对这一现象的解释

则有所不同。正电极附近热释电活性和压电活性的增强被归因于[35] 正电荷注入的作用。我们认为，根据注入电流理论[25]，，电场的异构性以及由此产生的极化是由负电荷注入造成的，而非如先前所认为的由正电荷注入造成[35]。

如果电荷是从实际金属电极注入，或从由电子和离子轰击样品表面后形成的虚拟电极注入，这被认为是正常现象。然而，我们的结果表明，虚拟注入电极也可以形成在既未金属化、也未受离子轰击的表面上。图 12、14 (b) 和 15 (b) 所示样品负极侧的极化耗尽，证明在所有这些情况下都有负电荷注入。

过渡区

值得分析极化处理完成后空间电荷的行为。短路后，样品中的平均电场立即变为零，但局部电场仍然存在。因此，可移动电荷在该电场作用下重新分布，直到样品中任意一点的电场都变为零。该过程的特征麦克斯韦弛豫时间为

$$\tau = \varepsilon_0 \varepsilon / g \,, \tag{15}$$

其中 g 为显式电导率。考虑到 PVDF 及其共聚物的典型值 $g = (10^{-11}$–10^{-12} Sm/m [12])，可得 $\tau \approx 10$–100 s。τ 的实际值甚至更低，因为极化处理期间引入了额外的载流子，表观电导率也相应增大，这一点可由方程 (14) 看出。

由方程（13）可知，在平衡条件下（$E(x) = 0$），空间电荷 $\rho(x)$ 只能局限于极化区的界面处，在那里导数 $dP/dx \neq 0$。

$$\rho(x) = dP(x) / dx \quad (t > \tau) \,. \tag{16}$$

由方程（16）可知，极化从最大值降至零的过渡区厚度取决于电荷密度；因此，电荷密度越高，过渡区越窄。

PPS方法的分辨率（2 μm）与过渡区的厚度相近，因此无法高精度测量过渡区的厚度。不过，可以通过比较测得的电信号上升时间与压力阶跃持续时间来估算这些数值。

在所有情况下，前者都长于后者，这表明过渡区的厚度超过 2 微米。例如，图 12 和图 13(b) 展示了最薄的过渡区（4–5 μm）。电信号的相应上升时间为 2–3 ns，而压力阶跃持续时间为 1 ns。

众所周知，任何极化非均匀性都会产生密度为$dP(x)/dx$的极化电荷。这种电荷会产生退极化场，在极化处理完成后，该电场倾向于使铁电极化恢复到原始状态。只有在退极化场得到补偿或中和时，剩余极化才能保持稳定。我们认为，对于铁电聚合物，补偿是由滞留在过渡区中的空间电荷 $\rho(x)$实现的；过渡区将样品中已极化部分与未极化部分隔开。由于极化电荷$dP(x)/dx$与真实电荷 $\rho(x)$相等（根据方程 (16)），退极化场便得到完全补偿，因此样品各处$E(x) = 0$。我们认为，过渡区的存在以及与之相伴的补偿性空间电荷，是经极化处理的 P(VDF-TFE) 的普遍特征，也可能是所有其他铁电聚合物的普遍特征。过渡区中存在空间电荷，是剩余极化具有高度稳定性的保证。

近表面区域

我们在 P(VDF-TFE) 的近表面区域观察到两种极化分布。在负表面附近，剩余极化在一定深度范围内为零，如图 10、11、14 (b)、15 (a) 和 15 (b) 所示。在其他情况下，$P_r = 0$ 10, 出现在 11, 12, 13 14 15 12, 13 正表面附近，如图 (b)、(b)、(b) 所示；或者出现在负表面附近，如图 (a)、13 (b) 所示。显然，第一种区域是极化处理过程中大量注入负电荷所致，因为注入表面附近的电场会减弱，铁电极化无法形成。未极化区域的厚度取决于注入载流子的穿透深度。在极化电场较弱时，这些区域尤其宽，如图 10、11、15 (a) 和 15 (b) 所示。另一方面，如果极化场强较高，且负电荷未深入注入体积内部，那么近表面区域就会非常狭窄（图 12、13 (a)、13 (b)、14 (a)）。

在某些情况下，本征载流子的分离作用超过外部注入。此时，在两个

样品表面处会出现两个极化峰。未极化的近表面区域要么非常狭窄，要么完全不存在（图13（a）和图14（a））。根据我们的结果可以得出，注入电荷需要一定时间才能深入散体内部。只有在预先极化的区域未被极化时，才能实现深层注入，例如在低场或中等电场的情况下。然而，如果表面附近已经形成铁电极化，例如在高场情况下，注入电荷便难以穿过极化区域。看来，极化区域的有效电导率远低于未极化区域。第二种近表面区域具有较高的极化，可见于极化处理期间与正电极相连的金属化表面附近。自发现 PVDF 中压电性和热释电性的非均匀分布以来，正电极在极化分布和累积中的作用便受到广泛讨论，人们也提出了许多相互矛盾的解释来说明这一现象。我们的测量显示，在所有金属化样品中，最大极化均出现在正电极附近。这意味着，无论是铁电极化的快速形成，还是其稳定化，条件都十分有利。正电荷要么不会注入，要么会在非常靠近表面处被深度俘获，从而为补偿退极化场创造良好条件。与此同时，俘获电荷会阻止高极化区域直接附着于电极。

分辨率约为2 μm的PPS方法无法提供更多关于近表面区域精细结构的信息，但使用LIMM方法[36]可以做到这一点。采用该方法测得的均匀电场下P(VDF-TFE)的极化分布曲线见图17。我们使用的试样与图13 (b)中展示PPS方法测量结果的试样相同。已知LIMM方法在受照电极[37]附近的分辨率约为0.1 μm。

如图17所示，极化区并未直接附着于正、负表面。过渡区由薄层构成，极化在其中从最大值降至零；此外，还有一层完全未极化层，其厚度约为0.5 μm。

对多层样品进行极化处理时，外加电压在各层之间的分布并不均匀。只有靠近正电极的薄膜表现出较高且相当均匀的极化，而上层薄膜仍未极化，这表明注入电荷已渗透

整个薄膜厚度。因此，若要在适中的电场下获得极化均匀的P(VDF-TFE)共聚物薄膜，建议在极化处理期间用另一层辅助薄膜覆盖主样品。在高极化电场下，剩余极化是均匀的，因为电荷注入受到抑制。但即使在这种情况下，已极化的体积部分与样品表面之间仍隔着过渡区，其中俘获了补偿电荷。在样品表面附近，总有一层厚度约为 0.5 μm 的薄层完全未发生极化。

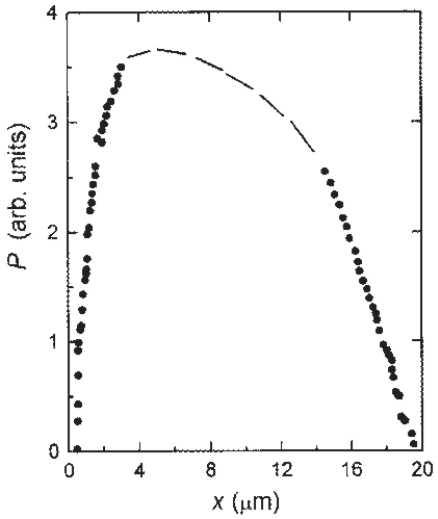


图17. 采用激光辐射调制强度法测得的名义上充分极化处理的 P(VDF-TFE)薄膜近表面区域的极化分布。极化处理条件与图5所示样品相同。坐标$x = 0$ 对应薄膜的负侧

6. 温度对铁电极化分布的影响

近期研究表明，聚偏氟乙烯和 P(VDF-TrFE) 中剩余极化的高稳定性，源于极化与被俘获在微晶或宏观极化区域界面的注入电荷之间的相互作用 [26]。

在这两种情况下，极化和空间电荷构成一个稳定且自洽的系统，其中后者起着决定性作用。假设弛豫符合德拜近似，并且存在连续分布

的电荷俘获活化能，Eisenmenger 等人得到了聚偏氟乙烯和 P(VDF-TrFE) 的这种分布 [38]。

我们的用途是 выяс清体电荷如何影响 P(VDF-TFE)共聚物中剩余极化的热稳定性。该共聚物同样属于铁电聚合物，但其研究程度远低于聚偏氟乙烯和 P(VDF-TrFE)共聚物。

为此，我们通过将温度从 20 °C 线性升高至微晶的熔点，测量了 P(VDF-TFE)样品的极化分布随温度的变化。利用我们的实验数据以及 [38] 中提出的理论模型，计算了活化能。所得结果与已知的聚偏氟乙烯和 P(VDF-TrFE)共聚物的结果进行了比较。

样品取自实验批次的 P(VDF-TFE) 20 μm 厚共聚物薄膜，其中晶相中铁电 β-相的含量超过 90 %。通过在真空中进行热蒸发，在样品两面沉积直径为 5 mm、厚度为 0.15 μm 的铝电极。极化处理采用以下两种方法之一：直接施加高电压（20 °C 下 3.2 kV，持续 2 min），或采用热驻极体法（85 °C 下施加 2.5 kV，持续 10 min，然后在外加电压下快速冷却至 20 °C）。

两种情况下的电场极化强度均为矫顽场的三至四倍，而 P(VDF-TFE) 的矫顽场为 35–40 MV/m。采用 PPS方法，以约 100 Hz 的重复频率测量沿样品厚度方向的剩余极化分布，同时将温度从 20 °C 以 3 K/min 的速率线性升高，直至微晶熔点，结果为 134 ± 2 °C。

研究发现，除靠近电极区域的部分外，沿厚度方向的极化分布相当均匀；在这些区域，极化会从最大值降至较低值（图 18）。所有温度下的极化分布曲线均略微不对称，最大值位于正电极附近，这与其他铁电聚合物中的观察结果相似。我们采用这些最大值来评估剩余极化的热稳定性。由图 19 所示数据可知，在整个研究温度范围内，P(VDF-TFE) 中的极化几乎随温度线性下降，从室温下的最大值降至熔点（134 °C）时的零值。这一行为与聚偏氟乙烯和 P(VDF-TrFE) 显著不同；后两者的极化仅在温度超过 90 °C 时才会下降。

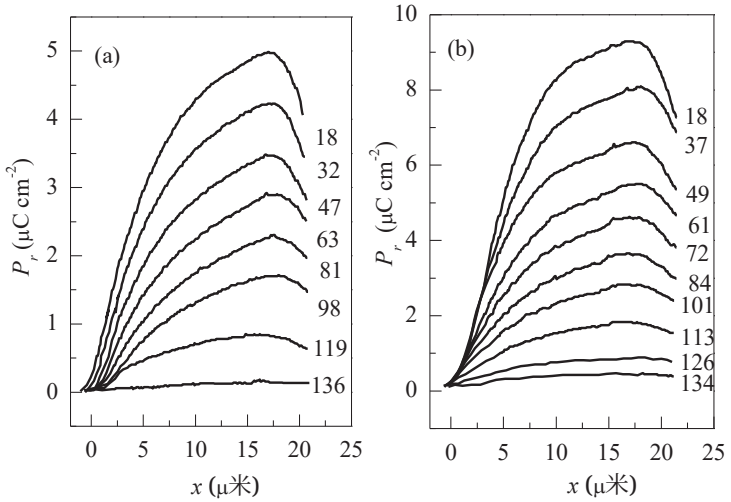


图18. 采用（a）直接施加高电场和（b）热驻极体法极化的 P(VDF-TFE)薄膜在不同温度下的极化空间分布。厚度轴上的零点对应于处理过程中样品的负极性表面

建议使用德拜近似描述极化弛豫，并令衰减常数的温度依赖性符合阿伦尼乌斯定律。在仅有一种活化能的情况下，去极化电流 $i_a(T)$ 为 [38]:

$$i_a(T) = -dP/dT =$$
$$= \left[h \cdot f_0 \exp(-a/T)\right] \cdot P_0 \exp\left[-h \cdot f_0 \int_{T_0}^{T} \exp(-a/T)dT\right], \qquad (17)$$

其中，h为升温速率，f_o 为本征频率，P_o 为T_o时的极化初始值，$a = A\,k$，其中A为活化能，k为玻尔兹曼常数。考虑到能量在被无序非晶相包围的极化晶粒表面连续分布，可以得出结论：陷阱能谱很可能是连续的，而非离散的。

因此，总去极化电流 $i(T)$ 是所有弛豫分量的叠加：

$$i(T) = \int_0^\infty g(a) i_a(T) da\,, \qquad (18)$$

其中，*g(a)* 是活化能的分布函数。研究表明，根据实验曲线 *P(T)* 计算得到的去极化电流 *i(T)* 是分布函数 *g(a):* 的映像。

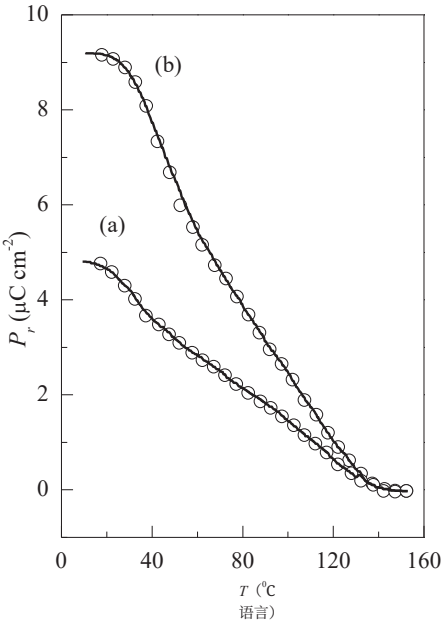


图 19. P(VDF-TFE) 中剩余极化值的实验结果（点）和理论结果（实线）与（a）高场极化处理和（b）b 热驻极体法的关系

基于图19实验数据的计算结果如图20所示。显然，P(VDF-TFE)共聚物的高温行为受两个弛豫过程调控，这两个过程具有显著拓宽的能级。热驻极体样品中的低温峰略微向较低能量方向偏移，而高温峰不受热处理影响。P(VDF-TFE)中两个峰的值之间的关系不同于聚偏氟乙烯 [38] ，后者的第二个峰比第一个峰更靠前。比较图20（a）和图20b中的曲线可以看出，在高场强下极化的样品与采用热驻极体法极化的样品，其活化能的值和分布没有显著差异。这表明，P(VDF-TFE)中的剩余极化并非像普通极性热驻极体那样被热冻结，而是

由俘获电荷的电场稳定。P(VDF-TFE)具有两个极化分量，即铁电分量和驻极体分量。前者集中在晶相中，后者则位于非晶相中。因此，图20所示的两个峰可能分别对应这两个极化分量的弛豫。在聚偏氟乙烯和P(VDF-TrFE)共聚物中也观察到了类似行为 [38]，这表明这一现象很可能普遍存在于整个铁电聚合物类别中。

$$i(T) \propto g(mT)\,, \tag{19}$$

其中 m 是一个常数值。

众所周知，只有在退极化电场以某种方式被中和或补偿时，铁电极化才能保持稳定。在铁电聚合物中，这种补偿由俘获电荷 [38] 实现。

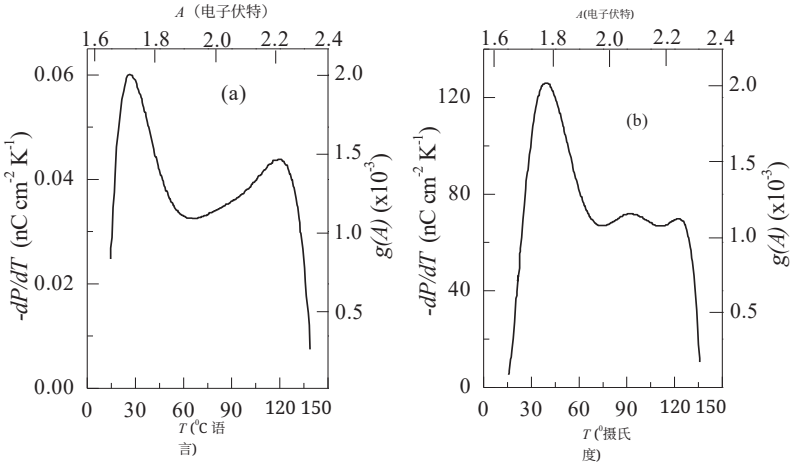


图20. P(VDF-TFE) 中去极化电流 i (T) = dP / dT 的温度依赖性，以及活化能分布函数，计算结果分别基于 (a) 高场极化处理和 (b)

由于电荷被深度俘获，且束缚能处于 1.65–2.35 eV 的范围内（如图20所示），空间电荷能够有效补偿晶体中的退极化场。这解释了材料在室温下具有较高的极化稳定性。根据我们基于图20数据所做的计算，预计约一年后，极化将降至初始值的 90 %。

我们利用图20所给的数据计算*P(T)*的依赖关系，从而验证了活化能连续分布模型。图19中的实线所示计算结果与实验数据吻合，表明P(VDF-TFE) 中剩余极化的热稳定性，以及其他铁电聚合物中剩余极化的热稳定性（可能也是如此），确实由俘获体电荷控制。

结论

本文介绍了对铁电聚合物薄膜样品厚度方向极化分布均匀性的实验研究结果。我们选取了典型的聚合物铁电体——聚偏二氟乙烯（PVDF）及其与三氟乙烯的共聚物 P(VDF-TFE)作为研究对象。测量采用了一种现代灵敏的压电压力阶跃法。

研究发现，极化均匀性在很大程度上取决于薄膜初始极化处理时外加电场的大小。当外加电场较弱或中等、接近矫顽值时，极化分布并不均匀，且在正电极附近达到最大值。

研究还发现了一个非常重要的特点：即使随后施加很强的电场，也无法改善极化均匀性。

然而，如果新样品的初始极化处理是在强电场中进行的，就会形成均匀的极化分布。此外，我们还研究了经电晕放电处理的 P(VDF-TFE) 共聚物的特性。为阐明导致极化分布形成的物理过程，我们建立了铁电聚合物薄膜中极化形成过程的唯象模型。

参考文献

1. Day G. W., Hamilton C. A., Peterson R. L., 《应用物理快报》24, 456 (1974). 2. Sussner H., Dransfeld K., 《聚合物科学杂志：聚合物物理》26, 529 (1988). 3. Bihler E., Neunann G., Eberle G. 等., CEIDP年度报告. 140 (1990). 4. Eisenmenger W., Schmidt H., 国际驻极体研讨会论文集, 635 (1999). 5. Fedosov S. N., Sergeeva A. E. 等., 《物理学杂志D辑：应用物理》29, 3122 (1996). 6. Eisenmenger W., Schmidt H., Dehlen B., 《巴西物理学杂志》, 29, 295 (1999). 7. Gerhard-Multhaupt R., Gross B., Sessler G. M., 载于《驻极体》, 383 (1988). 8. Fedosov S. N., von Seggern H. J., 《应用物理》103, 014105 (2008).

9. Mopsik F. J., De Reggi A. S., 《应用物理快报》44, 65 (1984). 10. De Reggi A. S., Broadhurst M. C., 铁电体. 194, 351 (1997). 11. Sessler G. M., Berraissoul A., 铁电体. 206, 489 (1997). 12. Sessler G. M. (编), 驻极体 — 第1卷, 3rd 版，摩根希尔: 437页 (1999). 13. Leal Ferreira G. F. 等., 《物理学杂志D辑：应用物理》29, 3117 (1996). 14. Fedosov S. N., Sergeeva A E., Marat-Mendes J. N., 铁电学. 294, 93 (2003). 15. von Seggern H. and Fedosov S. N., 《应用物理快报》, 91, 62914 (2007). 16. von Seggern H., Fedosov S. N., IEEE电介质与电气绝缘汇刊 7, 543 (2000). 17. Sessler G. M., Das-Gupta D. K. 等., IEEE《电气绝缘学报》27, 872 (1992). 18. Fedosov 20–57. Fedosov S. N., 固体物理与固态化学, Ser.A. 114, 435 (1989). 19. Pépin M. P., Wintle H. J., 应用物理学杂志 83, 5870 (1998). 20. Fedosov S. N., 固体物理与固态化学, Ser.A. 114, 435 (1989) 21. Sessler G. M., Das-Gupta D. K. 等., IEEE《电气绝缘学报》27, 872 (1992). 22. Fedosov S. N., Butenko A. F., 第九届国际薄膜物理与技术会议论文集, 伊万诺-弗兰科夫斯克. 45 (2007). 23. Furukawa T., 胶体与界面科学进展 71, 183 (1997). 24. Eberle G., Schmidt H., Eisenmenger W., 载于《驻极体》第3版 232 (1999). 25. Lampert M. A. and Mark P., 固体中的电流注入。学术出版社，纽约，354页 (1970). 26. Furukawa T., 相变 Part B. 18, 143 (1989). 27. Lines M. E., Glass A. M., 铁电体原理与应用，牛津大学出版社，(2001). 28. von Seggern H. Fedosov S. N. 《应用物理快报》81, 2830 (2002). 29. Eisenmenger W., Haardt M., Holdik K., IEEE电介质与电气绝缘现象年度报告 52 (1982). 30. Gerhard–Multhaupt R. 等., 应用物理学杂志 55, 2769 (1984). 31. Gerhard–Multhaupt R., IEEE电介质与电气绝缘现象年度报告. 68 (1983). 32. Giacometti J. A. and DeReggi A. S., 应用物理学杂志 74, 3357 (1993). 33. Fedosov S. N., 固体物理与固态化学 (a). 115, 293 (1989). 34. Leal Ferreira G. F. and Gerhard-Multhaupt R., 物理评论B辑 42, 7317 (1990). 35. Sussner H. and Dransfeld K., 聚合物科学与物理杂志 16, 529 (1978). 36. Lang S. B. and Das-Gupta D. K., 应用物理学杂志 59, 2151 (1986). 37. Ploss B., Bianzano O., 第八届国际驻极体研讨会论文集. 211 (1994). 38. Kussner B. 等., 第八届国际驻极体研讨会论文集, 594 (1994).

第 II 章
工艺过程自动化与控制

航运技术发展：未来航运的系泊系统

Пунченко Н. О., Цира О. В.

水路运输一直是世界经济体系的重要组成部分。海运和河运量持续增长，水路货运质量要求（及时性、安全性、可靠性）也不断提高。发展旨在使用自主系统，这也是海运业最重大的变革之一。本文综述了无人船舶（船只）的管理系统，在这些系统中，人为因素不会影响决策。文中介绍了智能系统的主要组成部分，并列举了自动化系泊系统的类型：激光式、真空式和磁力式。系泊系统通过减少系泊过程中人为因素的影响，降低船舶超速风险；同时减少对船舶与码头接近时当前情境评估的影响，选择相应模式，并直观呈现特定情境下的工作过程，从而提高整个系统的效率。

综述表明，近年来，全球没有任何一个经济领域未受到数字化转型的影响，而电信公司也已采取了足够措施来拓展服务范围。与此同时，全球海运业的数字化转型才刚刚起步。通信信道是实现这一转型的基础，没有通信信道，数据传输便无从谈起。在水上，这项任务最为复杂，因为光纤电缆无法铺设到船舶上。因此，在河流和海上，卫星通信必不可少；人们不仅需要利用它进行通信、在船上享受数字娱乐，还需要借此监控船舶及货物的状况，实现远程管理、监测船用燃料船舶，并保障安全性。由此可见，无人船队将使用集成自主控制系统，这些系统可以由岸上的操作员操控。

水上运输一直以来都是世界经济的关键组成部分，而且至今仍然如此。海运和河运持续增长，对

水上货运质量（及时性、安全性、可靠性）的要求也在不断提高。为实现这一目标，相关发展正朝着应用自主系统的方向推进，这是海事行业最重大的变化之一。本文概述了无人船舶（船只）的控制系统，在这些系统中，人为因素不会影响决策。文中介绍了智能系统的主要分量，并列举了自动系泊系统的类型：激光式、真空式和磁力式。系泊系统通过降低系泊过程中人为因素的影响，减少船舶超速的风险；减轻评估船舶驶近泊位时当前状况所带来的影响；根据当前状况选择模式，并直观呈现运行过程，从而提高系统效率。

综述表明，近年来，世界上没有哪个行业未受到数字化转型的影响，电信公司也已充分拓展了这类业务。与此同时，全球海洋产业的数字化转型才刚刚起步。这一转型以通信信道为基础，没有通信信道，数据传输原则上就无从实现。在水上，这项任务最为困难，因为光纤电缆无法接入船舶。因此，在河流和海上，卫星通信必不可少，其用途不仅包括船上通信和数字娱乐，还包括监控船舶及货物状况、远程控制、控制加油船以及保障安全。由此可见，无人船队将采用内置的自主控制系统，并由岸上操作员进行操作。

为制定提升海上航行总体安全水平的前瞻性发展方案，在海上航运日益繁忙的背景下，海上事故造成的死亡人数呈上升趋势 [2]。其中一个原因是人为因素。创新社会中的船舶驾驶这一领域，自诞生之初便将自身定位为创新领域。这一定位得到了印证：MariNet 团队由国家技术倡议框架内创建，成功汇聚了海洋高科技领域的大型公司和初创企业、科研中心、官方机构及高校 [3], ，并向社会展示了智能自主系统；这些系统为航运业带来了根本性变革。这类智能系统能够在没有外部干预的情况下作出决策。智能系统成为无人船舶驾驶这一方向的基础，该方向结合远程控制与自主控制，将人为因素对船舶驾驶安全的影响降至最低。

信息技术与航运系统领域理论和实践科学研究的基础，在以下科学家的著作中得到了十分详尽的阐述：А. Е. Сазонова（船舶自动化控制系统的数学与软件）、С. В. Смоленцева（智能控制建造系统基础）、С. В. Руда（技术及辅助船队船舶的监测与控制系统）、І. Г. Малюгіна、В. І. Комашинського（运输系统建造问题）、Д. А. Скорошодова（船舶综合控制系统）、А. А. Сикарева（稳定的无线电通信系统）、А. А. Диди（复杂系统），以及外国科学家，如 Ch. Liu（船舶自动化控制系统）、М. Хойхтяя（自主控制系统、卫星通信）、Е. Топп（系统远程控制）、Р. Польвара（机器视觉系统）等。作者们在其著作中奠定了理论与实践基础，有助于提升水上运输的运行效率并推动其发展。

人们认为，无人船将更加便宜、安全，并且对周围环境的污染更少。创建无人船的理念及其论证建立在以下几个基本 положения之上：

положения1——在没有船员的情况下，船舶维护成本可以降低30–40%；

положения2——在没有船员的情况下，船舶布局与架构将大幅简化，从而降低船舶的建造成本和维护成本；

положения3——船舶专业人员培训成本可以大幅降低；

положения4——科学与技术的发展表明，从技术角度来看，该任务不存在根本性限制；

命题 5——船舶保障系统的开发与实施属于科学与技术的一个新方向，它汇聚并推动了该领域科研、设计、教育及工业组织的创造性活动增长；

命题6——军舰实施与建造似乎是一个漫长的多阶段过程，包括逐步改变船队结构。船队由传统船舶组成，这些船舶由船员操作，也可以通过预设程序进行远程控制或完全自主运行。

航海是一种古老的职业，已有数百年历史。事实上，史前时期的人们就乘船前往其他海岸，逐渐在陆地上站稳脚跟。古代人工制品的运输实践已经存在，因为当时没有现代的理论基础、教材和地图。最早的导航者是腓尼基人，他们的知识源自15世纪。例如，引航员瓦斯科·达·伽马和伊本·马吉德积累了经验：任何想要驾驭海洋要素的人，都必须了解罗盘方位和月相、距离与方向。

地球上绝大部分区域都被水覆盖。因此，可以肯定地说，无论陆上和空中设备如何发展，海运都永远不会过时。要横渡海洋，需要经验丰富的船舶驾驶员，他们熟悉船舶上的设备，也了解水这一不稳定元素的特性。

目前，根据国际公约，无人船属于非法。为证实这一说法，我们将简要评估那些规定运输工具和船队状态及其运营要求的国际法律文件。

国际海事组织和国际劳工组织在这方面做出了最大努力。从20世纪40年代起，这些组织制定了一系列国际安全公约。在制定和实施上述公约时，管理职能取决于两项相关需求。首先，船舶的航行状况取决于船旗国。第二个协调机构应为专业组织——船级社。船舶所有人负责执行公约要求。然而，实践表明，国际组织为船舶制定的所有严格要求都未能得到执行。一方面，船旗国作为利益相关方，力求从经济角度为船东提供最有利的工作条件；另一方面，船旗国并非总能有效控制本国船舶的状况及其运营情况。基于上述原因，各国船级社开始实施监督。为此，制定了《国际安全管理规则》（ISM-Code）。其主要目标是确保海上安全。

负责监管航运安全的国际组织

第二次世界大战后，随着联合国的成立，国际社会认识到有必要建立一个权威的国际组织，以保障航运安全。1948年，国际海事协商组织应运而生。1973年，该组织更名为国际海事组织（国际海事组织）。它在联合国框架内运作，总部设在伦敦。

航运安全国际组织：ILO——国际劳工组织；ICF——国际航运商会；ISF——国际船东联合会；INSA——国际船东协会；MAK——国际船级社协会；IALA——国际航标协会；IPH——国际港口协会；MCE——国际电信联盟；CIRM——国际海上无线电委员会；IMPA——国际海洋引航员协会；IFSMA——国际海船船长协会联合会；ICFTU——国际自由工会联合会；WMO——世界气象组织；ISO——国际标准化组织；ICAO——国际民用航空组织；IMO——国际海事组织。

国际海事组织的最高机构是大会，每两年定期召开一次，组织的所有成员均参加。理事会在大会闭会期间运作。理事会履行大会的职能，并有权就航运安全性和防止污染向各国政府提出建议书。此外，组织理事会还具有以下职能：

1）协调组织的所有机构；

2）提交工作计划和预算，供大会批准；

3）通过并完善具有执行约束力的国际公约、守则、决议、协议、通函和建议书；

4）向大会提交秘书长人选；

5）邀请其他组织的代表参加大会，并安排相关会议。

根据以下规则任命国际海事组织理事会成员：

а) 对国际航行最感兴趣的十个国家；

б) 对国际海上贸易最感兴趣的十个国家；

в) 未列入 а) 和 б) 类别的二十个国家，以及对海上运输或航行感兴趣并代表世界地理区域各个区域的国家。

国际海事组织委员会。
以下委员会常设工作：
第1委员会——海上安全委员会（MSC — 海上安全委员会）是国际海事组织中最重要的委员会，成员包括该组织的所有成员。

第二届海洋环境保护委员会（MEPC — 海洋环境保护委员会）由组织的全体成员组成。该委员会最初以会议形式成立，并于1985年获得独立委员会的完整法律地位。

这两个委员会协助9个分委员会开展工作：
– 散装液体和气体运输分委员会 — 液体和气体运输；
– 危险品、普通货物和集装箱运输分委员会 — 危险品、普通货物及集装箱运输；
– 消防分委员会 — 防火；
– 无线电通信、搜救分委员会 — 无线电通信、搜寻与救助；
– 安全导航（Nav）——安全导航；
– 船舶现代化与装备；
– 稳定、货运品牌、渔船安全（SLF）——稳性、货物品牌、渔船安全；

– 培训标准与航行要求（STW）——学习标准与导航需求；
– 国家实施（FSI）——国家实施。
第三，法律委员会（Legal Committee）包括国际海事组织的所有成员国。

第4技术合作委员会（Technical Co-operation Committee）——包括国际海事组织的所有成员国。

第5便利化委员会（Facilitation Committee）——向国际海事组织的所有成员国开放。
于1972年作为国际航行手续简化理事会的下属机构成立。1991年发布了《

国际海事组织公约》附录，作为一个标准委员会。然而，该应用程序尚未生效。

国际海事组织秘书处由外派工作人员和伦敦总部的300名工作人员组成。

2. IACS 国际船级社协会。

国际船级社协会是根据1930年国际载重线公约的建议成立的。1968年，该协会获得了国际海事组织非政府组织咨询地位。

国际船级社协会成员：
ABS — 美国船级社；BV — 必维国际检验集团（法国）；CCS — 中国船级社；DNV — 挪威船级社（挪威）；GL — 德国劳氏船级社；KR — 韩国船级社；LR — 劳氏船级社（英格兰）；NK — 日本海事协会（日本）；RINA — 意大利船级社；RS — 俄罗斯海事船舶登记局。

准成员：
CRS — 克罗地亚船级社；
IRS — 印度船级社。
主要目标：
– 保障海上人命安全；
– 确保安全航行；
– 确保通过海上及内陆水道可靠地运输货物；

– 防止环境污染。

为实现这些目标，根据科学研究制定并完善规则、国际公约的需求及代码。

3. 国际电信联盟（ITU）。1844年5月24日，塞缪尔·莫尔斯通过华盛顿与巴尔的摩之间的电报线路发送了第一条消息。1865年5月17日，第一国际电报公约由20个国家在巴黎签署。根据该公约，国际电报联盟得以成立。由于联盟的成立，该公约经历了重大变更——在

1876年，电话问世；1896年，无线电探测问世。这些变更被纳入1903年公约。1906年，第一部无线电报公约在柏林举行的第一届无线电技术会议上签署。该公约的附录中通过了第一套无线电通信规则，后来经过更新，现在称为《无线电规则》。1920年，第一批无线电广播开始播出；1927年，国际无线电业务批准了在不同国家和无线电通信用户之间分配频率和规则。1932年，在马德里会议上，各项国际公约合并。合并后的公约被命名为国际电信公约。1934年1月1日起，该联盟也更名为国际电信联盟（国际电信联盟）。1947年，国际电信联盟（ITU）加入联合国体系，组织总部从伯尔尼迁至日内瓦。

1963年，第一颗卫星 Synk-1 发射升空，卫星通信时代由此开启。在日内瓦特别会议上，提出了空间通信公约，其中不仅规定了卫星通信的频率，还规定了通信卫星的轨道。1992年，鉴于数字通信的新特点以及非地球静止卫星的使用，该公约得到补充。在增补会议的全体会议上，ITU 进行了重组。由此形成了三个部门：— 电信标准化（ITU-T）；— 无线电通信（ITU-R）；— 电信发展（ITU-D）。在1994年的京都会议上，批准了联盟发展及全球通信的第一个战略计划。此外，本次会议还组织了全球电信政策论坛（WTPF），用于解决通信国家之间的政策问题。第一届 WTPF 于1996年在日内瓦举行，主题是全球移动卫星通信；第二届则于1998年举行，旨在提供电信维护服务。

4. ILO — 国际劳工组织。

国际劳工组织于1919年依据《凡尔赛条约》成立，旨在促进社会正义。该组织采用三方结构，由政府、雇主和劳动者（工会）代表组成。国际劳工组织的目标和任务载于《费城宣言》，该宣言由国际劳工组织大会于1944年通过。宣言包含以下原则：

– 工作不是商品;
– 思想自由和结社权是支持这一过程的重要元素;

– 任何地方的贫困都会危及整体繁荣;

– 所有人不论种族、信仰和性别，都有权在尊重自由与尊严、获得经济支持和机会平等的前提下，追求物质福祉和精神发展。

1946年，国际劳工组织成为首个与联合国开展合作的专门机构。1969年，国际劳工组织获颁诺贝尔和平奖。国际劳工组织第一次会议于1919年10月至11月在华盛顿举行。会议通过了六项建议和八项公约，其中包括第1号公约，即八小时工作日公约。

该组织最初包括42个国家，如今已增至175个。会议每年举行一次。每两年，会议都会通过一项为期两年的计划和预算。两次会议之间，行政理事会由28名政府代表、14名员工和雇主代表组成。秘书处和总部设在日内瓦。主要战略目标:
– 制定并实施规范、基本原则和劳动权利;

– 为女性和男性创造更多机会，确保体面的就业;

– 扩大社会保护的覆盖范围并提高其效率，使所有人受益;

– 加强三方结构，支持社会对话。

实现目标的方式:
– 开发国际措施和程序，以促进基本人权的实现，改进工作和生活，并扩大就业机会;

– 开发国际劳动标准（支持对其实施情况进行监测的独特系统），作为国家机构实施这些措施时的指导原则;

– 全面的国际技术合作程序，通过与创始方积极合作制定并实施，以帮助国家落实这些措施;

——准备、教育和出版活动，并促进所有这些努力的实现。

自1919年以来，国际劳工组织通过了184项公约和194项建议书。

航运安全主要国际公约。

制定国际协议的初步经验源于19世纪初出现的防止碰撞规则。后来，随着船队的发展和全球运输的扩大，这些规则多次经过修订。最新的MPPSS-72公约于1972年10月20日通过，但直到1977年7月15日才生效。

客轮“泰坦尼克号”发生惨剧后，1914年国际海上人命安全公约获得通过；随后，第二个海上人命安全公约于1929年通过，第三个于1948年通过，第四个于1960年6月17日通过，并于1965年5月26日生效。如今，现行的是SOLAS-74/78公约。

国际社会首次提出环境污染问题是在20世纪下半叶。1954年，应英国倡议召开了石油污染会议。会议通过了OILPOL-54公约，该公约于1958年7月26日生效。该公约涵盖世界航运的两个主要方向，仅涉及油及其组件造成的污染，并于1962年、1969年和1971年进行了修订。

1967年，“托里峡谷”号油轮在英吉利海峡发生灾难后，国际社会评估了损失（约有12万吨石油流入海中），并通过了一系列不同的国际公约：

安全和防止环境污染方面的主要国际公约：

SOLAS-74/88；
SOLAS-74/88。
1974年国际海上人命安全公约及其1988年议定书：

MARPOL 73/78国际防污公约；

MARPOL-73/78。
《1973年国际防止船舶造成污染公约》及其《1978年议定书》：

STCW-78/95；
STCW-95。

《海员培训、发证和值班标准国际公约》（1978年）及1995年规则：《1972 年国际海上避碰规则》；COLREG-72。《国际海上避碰规则》——1972年：《1979年国际海上搜寻救助公约》；SAR-79。《国际救助公约》——1979年：《1966年国际载重线公约》；LL-66/88。《国际载重线公约》——1966年及1988年修正案：FAL-65；FAL-65。《国际海上货物运输手续公约》——1965年：《制止危害海上航行安全非法行为公约》；SUA-88。《制止危害海上航行安全非法行为公约》——1988年：《1989年国际救助公约》；SALVAGE-89。《国际救助公约》——1989年：《1969年国际民事责任公约》；CLC-69。《国际民事责任公约》——1974年，关于油污造成损害的责任。

《1974年国际海上人命安全公约》（SOLAS-74/88）。

该公约于1974年11月1日在国际海上人命安全会议上通过，其议定书则于1988年11月10日在国际检验与证书协调制度会议上通过。此外，1988年11月11日还通过了对SOLAS-74的一系列修正案。

海上安全委员会一直致力于改进和完善SOLAS-74/78，并对其进行修订。

SOLAS公约及其1988年议定书以英语、西班牙语、中文、俄语和法语签署，所有文本具有同等效力。官方语言仍为——

英语，因此出现分歧时，以英语版本为准。

SOLAS公约最初有8个章节：
I — 一般规章
II-1 — 结构 — 舱室划分和稳性、机械和电气装置

II-2 — 结构 — 防火、探测和灭火。新版于2000年12月通过，并于2002年7月1日生效。

III — 救生设备和装置。1996年新版于1998年7月1日起生效。

IV — 无线电通信。新版于1988年获批。随着全球海上遇险与安全系统的实施，该章节于1992年2月1日至1999年2月1日期间生效。

V — 航行安全。新版于2000年12月获批，并于2002年7月1日生效（涉及AIS）。
VI — 货物运输。
VII — 危险货物运输。由国际海事组织于2002年批准，并于2004年1月1日生效（其内容后来纳入《海上危险货物运输规则》——UMDG规则）。

VIII — 核动力船舶——由国际海事组织大会于1981年批准。

以下章节是后来增补的：
IX — 船舶安全营运管理。于1994年5月获批，并于1998年7月1日生效。

X — 高速船安全措施。于1994年5月批准，1996年1月1日生效。

XI — 提高海上安全的特别措施。于1994年5月批准，1996年1月1日生效。

XII — 散货船附加安全措施。于1997年11月批准，1999年7月1日生效。

SOLAS公约的主要目标是统一并减少海船建造、设备和海船安全管理方面的标准。执行公约要求的主要责任由船舶所悬挂船旗国的政府承担。《国际海上人命安全公约》还要求各国监测航行港口的船舶（第XI章第4条）。

MARPOL-73 / +78。

由国际海事组织于1973年召集的海洋污染预防国际会议通过了防止船舶污染公约。1978年，该公约根据油轮安全与防止污染国际会议通过的议定书作了修订。此后，该公约称为《1973年国际防止船舶造成污染公约，经1978年议定书修订》，简称MARPOL 73/78国际防污公约。公约于1983年10月2日生效（附则I和II）。

涵盖各种船舶污染源的规则，载于MARPOL 73/78国际防污公约的六个附则中：

I 防止油类污染规则。自1983年10月2日起生效。

II 防止有害液体物质污染规则。于1987年4月6日随1985年修正案一并生效。

III 防止海上运输的包装、货运集装箱、可拆卸罐柜、公路和铁路罐车中的有害物质造成污染的规则。自1992年7月1日起生效。

IV 防止船舶污水污染规则。自2003年9月27日起生效。

V 防止船舶垃圾污染规则。自1988年12月31日起生效。

VI 船舶防止大气污染规则。该规则于1997年9月通过，但尚未生效。

MARPOL附则I（防止油类污染规则）中的一些重要规则和规章。

规则1中给出了以下定义：

– “油”是指任何形式的润滑油，包括原油、液体燃料、含沉积物的润滑油、油渣和精炼石油产品；

– “含油混合物”是指含有任何比例润滑油的混合物；

– “石油燃料”是指用作主发动机和船舶辅助机械燃料的任何润滑油；

– 油船“是指为在货舱内散装运输石油而建造或改装的船舶；

– «兼用货船»指用于散装运输石油或散装固体货物的船舶；

– «特殊区域»指由于其海洋学和生态条件方面公认的技术原因，且该区域的运输特点要求采用专门的强制性方法来防止海洋受到油类污染的海域。特殊区域是指本附则规则10所列的区域；

– “瞬时排放率”是指任何时刻的石油泄漏强度（升/小时）除以船舶航速（节）；

– “液舱”是指用于运输液体的封闭舱室；

– “舷侧液舱”是指任何与船舶舷侧外板相邻的舱柜；

– “中部液舱”是指船舶内部任何沿纵向设置的舱柜；

– “残油舱”是指专门用于收集液舱残留物、洗舱水及其他油类混合物的任何舱柜；

– “清洁压载水”是指液舱中所装的压载水，该液舱在上次装载后经过清洗，使得船舶静止时将该液舱的排出物排入晴朗天气下清澈平静的水域，不会在水面留下可见油迹；

– “隔离压载水”是指装入油舱内的压载水，该油舱与货物或燃油系统完全隔离；

– “舱室渗透率”是指舱室内可被水填充的体积与舱室总体积之比。

第9条规则规定了排放油类的约束：

1. 在遵守本附则第10条和第11条规则以及本条第2款规定的前提下，禁止本附则适用的船舶向海中排放油类或含油混合物，但以下情况除外：a) 油轮排放，但本款(b)项规定的情况除外：— 油轮位于特别区域之外；— 油轮距最近陆地超过 50 海里；— 油轮正在航行；— 瞬时排油率不超过每海里30升；b) 总吨位为400登记吨或以上的船舶（油轮除外），以及油轮的机器处所和货油泵舱排放，但

排放物中的油类含量未与润滑油和货油残余物混合时除外:

– 船舶位于特别区域之外;
– 船舶正在航行;
– 未经稀释的排放水中含油量不超过15百万分之一;

– 船上使用的滤油设备符合本附则第16条第17款的规定。

2. 对于总吨位小于400吨的船舶（油船除外），如果船舶位于特别区域内，主管机关应确保其在适宜且切实可行的情况下，配备能够在船上存储油类残余物并将其排放至接收设施或海中的装置，具体应符合本规则第I款（b）项的需求。

3. 在所有情况下，如果在船舶附近或其水面航迹上发现明显的油污迹象，公约缔约国政府都应立即调查这一情况。

6. 根据本规则第1和第2款不得排放入海的烃类残余物，应留在船上，并卸至接收设施。

附则I第10条列出了船舶在特殊区域航行时防止油类污染的方法:

1. 这些区域包括地中海、波罗的海、黑海、红海、海湾区域、南极区域和亚丁湾。

2. 在特殊区域内，禁止任何油船或船舶向海中排放石油或含油混合物。

MARPOL公约附则V（防止船舶垃圾污染规则）。

规则1中定义如下:
– “垃圾”是指船舶正常运行过程中产生、需要定期或不定期清除的各类食品废弃物、生活垃圾和操作性废弃物（鲜鱼及其残余物的清除除外），但本公约其他附则中已作定义或列入清单的物质除外。

– «最近海岸」。表达“距最近陆地”是指原始基线，根据国际法，相关领土的领海从该基线起算，但不包括北——

澳大利亚东北海岸，该处的基线载于公约。

– “特殊区域”是指这样一个海域：鉴于与其海洋学和生态条件有关的公认技术原因，该海域的航运特点要求采取特殊的强制性方法，以防止垃圾污染海洋。特殊区域是规则5所列出的区域。

《MARPOL公约》附则V规则3规定了在特殊区域以外进行垃圾处置的条件：

a）禁止将所有种类的塑料排放入海，包括但不限于合成纤维缆绳、合成纤维渔网和塑料垃圾袋；

b）任何以包装形式运输的有害物质，在任何情况下都不得排放到船外。

I. 对于漂浮材料和包装材料，距海岸 25 海里；

II. 对于食品废弃物及其他垃圾，包括纸制品、破布、玻璃、金属、瓶子、碎片及类似垃圾，距离为 12 海里；c) 若本规则 (b) (ii) 项所述垃圾经粉碎机处理，则可允许将其倾倒入海，但必须在距离最近陆地的界限之外进行；无论如何，若距最近陆地不足 3 海里，则禁止倾倒。此类粉碎后的垃圾必须通过孔径不超过 25 毫米的筛面。

根据规则4第1款，禁止使用任何适用于固定式或浮动式平台、海上矿产资源勘探及相关处理过程的材料，也禁止所有与此类平台有关或位于其500米范围内的其他船舶使用此类材料。

如果垃圾与其他废弃物混合，而这些废弃物的处置或排放受其他要求约束，则应适用更严格的要求。禁止在任何地方向海中排放塑料及塑料焚烧后的灰烬。

《MARPOL公约》附则V规则5列出了防止垃圾污染的特殊区域：
1. 就本应用程序而言，特殊区域包括地中海区域、波罗的海区域、黑海水域、红海区域和海湾区域、北海海域以及南极区域、加勒比海盆地

，包括墨西哥湾和加勒比海，其值定义如下：

a) 地中海海域是指地中海及其内的海湾和海域，南界为与黑海相接的北纬41°纬线，西界为穿过直布罗陀海峡的西经5°36′子午线；

b) 波罗的海海域是指波罗的海本身及博滕湾和芬兰湾，以及通往波罗的海的航道，边界为斯卡恩角（斯卡格拉克海峡）北纬57°44.8′纬线；

c) 黑海海域是指黑海本身，其与地中海的边界为北纬41°纬线；

d) 红海海域是指红海主体及苏伊士湾，南界为一条连接 Ras SI-ANS（北纬12°8.5′，东经43°19.6′）和胡斯内尔·穆拉德（北纬12°40.4′，东经43°30.2′）的直线；(E) 海湾海域是指位于连接拉斯哈德角（北纬22°30′，东经59°48′）和拉斯法斯特角（北纬25°04′，东经61°25′）的直线西北侧的海域。

e) 北海海域：北海范围为：(I) 北海以南至北纬62°线，东至西经4°子午线；(Ii) 斯卡格拉克海峡，其南部边界由斯卡恩角以东、平行于北纬57° 44.8′的纬线确定；以及 (W) 英吉利海峡及其通道，位于西经5°子午线以东、北纬48° 30′纬线以北；

g) 南极区域是指位于南纬60度以南的海域；

h) 加勒比海区域，如《加勒比海区域海洋环境保护与发展公约》第2条第I款所定义（卡塔赫纳-德印第亚斯，1998年），是指墨西哥湾和加勒比海，以及其中的海湾和海洋。

MARPOL-73/78 的审查、修订和补充功能由海洋环境保护委员会负责。

STCW-78/95。

STCW公约是首个涉及海员培训与发证以及值班基本规则的国际文件。该公约于1978年7月7日通过，并于1984年4月28日生效。

STCW-78公约第II条包含若干定义，其中主要定义如下：
– «缔约方»是指公约对其生效的国家；
– «主管机关»是指船舶有权悬挂其船旗航行的国家政府；

– «文凭»是指有效文件，无论其名称为何，由主管机关或其授权人员签发，或经主管机关认可，证明其持有人有权担任文件中注明或国家规则允许的职务；

– «证书持有人»是指依法持有文凭的人；

– «组织»是指国际海事组织；
– «海船»是指并非仅在受保护水域内陆水域、其附近水域或港口规则适用范围内航行的船舶；

– “渔船”是指用于捕捞鱼类、鲸类或其他海洋生物资源的船舶。

1978年公约附则第I/1条规则包含以下定义：“船长”“大副”“船长助理”“轮机员”“轮机长”“大管轮”“轮机员”“无线电操作员”“普通船员”。该规则应不适用于无人船。

谅解备忘录。
港口外国船舶监测机制旨在确保这些船舶遵守通常要求，该机制于20世纪80年代初以若干国家区域协议的形式出现（《巴黎港口国船舶监测谅解备忘录》）。

世界已签署并实施以下区域性港口管理协议：

– 巴黎备忘录 — 1982年7月1日于巴黎签署；
– 拉丁美洲协议 — 1992年11月5日于 Vina Del Mar（智利）（维尼亚德尔马）签署；
– 东京备忘录 — 1993年12月1日于东京签署；
– 加勒比备忘录 — 1996年2月9日于克赖斯特彻奇（巴巴多斯）签署；
– 地中海备忘录 — 1997年7月11日于瓦莱塔（马耳他）签署；
– 印度洋备忘录 — 05.07.98 于比勒陀利亚（南非）；

– 中部和西部非洲备忘录 — 1999年10月22日，在阿布贾（尼日利亚）；

– 黑海备忘录 — 2000年4月7日，在伊斯坦布尔。区域港口协定：– 在港口审核外国船舶；– 使用相同的管理手段；– 执行统一的监督程序；– 执行协议；– 相互交换信息。主要监测工具：– SOLAS 74/88；– MARPOL 73/78；– 《1978年海员培训、发证和值班标准国际公约》及其1995年修正案；– COLREG-72；– LL-66/88；– CLC-69；– 国际劳工组织公约。

特别关注以下船舶：
– 客船、散货船；
– 用于运输危险货物和污染物质的船舶；

– 首次到访港口，或间隔12个月及以上后再次到访；

– 从其他港口驶来且有港口国监督检查缺陷记录；
– 悬挂属于“黑名单”国家船旗的船舶。

“黑名单”是指这样一份国家名单：这些国家的船舶在接受港口国监督（PSC）检查后曾在港口被扣留，从而使港口当局无需对船舶进行过多检查。同时，这些船舶将受到严密监测，以防止可能发生的违规行为。

国际海事组织A.787(19)号决议《港口国船舶检查程序》于1995年11月23日通过，是规范港口船舶检查程序的主要文件。

第一章“定义”；第二章规定港口船舶检查；第三章规定更为详细的检查程序；第四章规定港口导航中的船舶扣留。

《国际海上搜寻救助公约》。SAR-79
国际搜寻救助系统。最初，遭海难的船舶会沦为沿岸居民的猎物，遭到无情掠夺。国际社会首次通过了一项国际

协议，规定在海上救助人员。1914年，泰坦尼克号灾难发生后，《国际海上人命安全公约》通过了这项协议。该公约将救助责任交给附近的船舶。因此，采用了500千赫频率和SOS信号。此外，规定每隔30分钟在广播中静默3分钟，并将世界海洋划分为13个区域，以便随时持续监听空中信号。到20世纪末，这一系统已过时，而且船舶和飞机上出现了新的无线电设备，全球海上遇险与安全系统由此生效。因此，国际海事组织于1977年11月17日通过的A.406（X）号决议建议召开会议，以通过搜救公约。会议于1979年4月9日至27日在汉堡举行，国际社会通过了《国际海上搜寻救助公约》（SAR-79）。根据海上安全委员会第69届会议于1998年5月作出的决定，关于《1979年国际海上搜寻救助公约》的新声明获得通过，并于2000年1月1日生效。根据SAR-79公约，沿岸服务机构——救援协调中心（RCC）在搜寻救助中发挥主要作用，各国都应设立此类中心。

SAR-79中使用的术语：搜寻、搜寻与救助区域、救助中心、救助分中心、救助设施和设备、遇险阶段、不确定阶段、警戒阶段、遇险阶段、现场协调员。

SAR-79公约附则第2章受搜寻与救助协调服务的国际标准规范。接到任何人在海上遇险或遭遇海难的信息后，当局必须立即采取措施，确保提供必要的援助。基于这一义务，当局必须自行或与其他国家共同组织搜寻与救助服务，这些服务应具备以下基本元素：

1. 法律框架；2. 主管机构的用途；3. 现有资金的组织；4. 通信手段；5. 协调和执行职能；6. 服务改进流程，包括规划、国家和国际层面的关系；

7. 人员培训。

在搜寻与救援区域内提供搜寻服务和救援作业，该区域的边界由相关缔约方协商确定。缔约方应向任何遭遇海上灾难的人提供援助。无论此人的国籍或身份如何，也无论其所处情形如何，均应提供援助。秘书长应发送有关救援服务的信息，并及时更新：

1. 负责海上搜寻与救援服务的国家主管机关信息；

2. CRS 或其他中心的位置，以确保搜索与救援行动的协调，以及与其进行沟通的手段；

3. 搜寻与救援区域的界限，以及灾难与安全情况下的沿海通信信息；

4. 采用基本的搜寻与救援方法。

为确保有效性，缔约方应与航空服务进行最充分的协调。在可以为导航和飞机目的设立 RCC 和 JSC 的地方，缔约方应确保在海上和空中搜寻及救援行动中采用统一的程序。

事故发生时在现场进行协调：指定一名搜寻与救援行动协调员（SMC），通常由其在RCC救援中心或负责协调的RSC中心开展工作。现场协调员（OSC）的职责：

– 协调现场所有搜寻与救援力量的行动；

– 如果未收到行动协调员（SMC）制定的计划，则制定搜寻与救援行动计划；

– 根据情境调整搜寻与救援行动计划，并通知SMC；

– 协调现场的关系；

– 监控其他力量执行行动的情况；

– 确保操作全面执行，特别关注空中和海上所有资源的分配；

– 按照标准的 SITREP 格式定期向 SMC 发送消息：

– 详细记录操作；

– 通知行动协调员（SMC）可能出现不再需要的成本；

– 向行动协调员（SMC）报告获救人数；
– 向行动协调员（SMC）提供获救人员的姓名及其目的地人员保全措施；
– 保存每个步骤的报告；
– 向（SMC）请求更多信息。现场行动协调员（OSC）的职责。现场行动协调员（OSC）应尽快从 SMC 获取行动计划。不过，OSC 可以制定自己的计划（视情况而定）。执行人员还应根据不断变化的环境条件调整搜索计划，尤其是在以下情况发生时：有更多援助力量抵达；收到更多信息；天气状况、能见度、照明条件等发生变化。抵达救援现场后，应立即开始搜寻行动。

如遇语言障碍，应使用国际海事组织的国际信号和标准短语进行海上通信。报告职责时，OSV 应定期向相关海岸无线电台（CRS）或空中交通管制服务（ATS）以及搜救协调员（SMC）通报，或在情境发生变化时通报。

国家搜索服务和救援服务。每一方都应制定相应程序，以全面组织、协调和改进搜索与救援服务。为确保搜索与救援行动有效开展，各方应：

1. 确保协调使用现有手段；
2. 在操作、规划、人员准备、学习和研究等领域建立组织间的密切合作。

国家间的合作。缔约方应协调各自协调中心的工作，并与邻国协调搜寻与救援行动。如有必要，缔约方应协调各自的国家法律，并承认邻国为搜寻和营救人员而使用其领海、领土及其上空空域。缔约方尤其是在各自的搜寻与救援区域相互重叠时，应缔结协议，允许救援部门进入其领土或空域。如果缔约方之间没有任何协议，则在必要时应提出请求

，负责的主管机构应尽快答复：

– 立即确认收到请求；
– 如有条件，应说明救援单位进入国家领土须遵守的条件。各方应授权其搜索程序：

– 向其他协调中心请求援助，包括可能需要的船舶、航空器、人员、补给等；
– 允许此类船舶、航空器、人员或建议进入其领土或领空；

– 与海关、移民、卫生及其他主管部门协调采取必要措施，以加快救援。各方保证，此类协调中心将立即向其他中心提供援助，包括提供航空器、人员、补给等方面的帮助。

船舶消息系统。缔约方应全天候快速、可靠地接收搜寻与救援区域内的遇险警报。任何国家或多个国家收到遇险消息后，均有义务：

– 立即将消息转发至相应的救援协调中心或救援分中心，然后在可能的情况下，协助确保搜寻与救援工作中的通信；

– 如有必要，确认收到警报。为便于开展搜寻与救援操作，缔约方可以建立船舶系统，最好依据国际海事组织的建议建立。该系统应向用户提供船舶动态信息：

– 航行计划；– 船舶位置；– 最终报告。发生灾难时：– 缩短船舶失去通信与开始搜寻和救援之间的时间，即使没有灾难信号；– 快速确定可参与救援的船舶；– 能够确定较小的搜寻区域；

– 协助提供紧急医疗救助或咨询。船舶消息系统应满足以下规章：– 提供有关位置和航行计划的信息；

– 允许发送船舶动态信息；
– 按特定间隔接收参与方发送的消息；

– 意图和操作关系应简单明了；
– 允许采用国际通行的标准格式和标准消息阶数。

国家联系地址列表。负责海上安全和防止船舶造成污染的国家中心联系地址，由国际海事组织公布并每年更新。新版地址通常在安全委员会和海洋环境保护委员会会议上获批，并以通函形式发布。该列表通常分为两部分：

1. 国家主管机关的简要清单（此前为 MSC/CHERC.630）、国家检查服务机构的地方部门、代表国家开展工作的官方服务机构，以及负责事故调查的机构（此前为 MSC/Цик542），还包括负责港口国监测的谅解备忘录秘书处。

2. 现有国家中心的联系地址清单，这些中心负责接收、传递和处理来自载有有害物质（包括润滑油）的船舶的紧急消息。

清单1应存放在每艘船舶上，并纳入公司安全管理体系（应急计划）文件。清单2应存放在每艘船舶的应急设备中，以防止润滑油污染。修订情况通过登记册进行监测，并每年进行检查。

船舶紧急计划中的事故事件报告格式：

船舶应急计划。
初始报告格式。
SS（坐标、纬度、经度）/ DD（距沿岸标志的距离）。

N 北纬 度 分钟 E W 度 分钟 / 度 海里。
EE 航向（度）/ FF（速度（节））1/10。
L L（预计航线）。
MM（监听电台）。
NN（下次报告的日期和时间，UTC）。日。小时。分钟。PP（船上货物/燃料的种类和数量）。

QQ（有关缺陷/损坏的简要信息）。
RR（污染情况简要信息，包括损失数量估算）。

SS（天气和海况简要信息）。
方向、风速（蒲福风级）/方向、波高（米）。

TT（与船东/运营商/代理人联系的数据）。
UU（船舶尺寸和类型）。
长度：（米）/宽度：（米）/吃水：（米）/类型。
X X（补充信息）。
事故简要信息。
是否需要外部援助。
已采取的行动。
船员人数及任何人身伤害的信息。
保险公司信息。
其他信息。

当可能因语言理解不畅而产生困难和约束时，应使用英语，并尽可能采用国际海事组织海上运输标准短语。为传递详细信息，可酌情使用英语，也可使用国际信号。使用国际信号时，必须在消息文本中紧接字母索引之后注明相应指示。

以下是填写专用表格所需的补充数据。
AA — 船名、呼号或船舶电台的识别数据，以及船旗。

BB——由6位数字组成的组，表示日期（前两位数字）、小时和分钟（后四位数字）。

CC由一组四位数字组成，表示以度和分为单位的纬度，以及N（北）或S（南）符号；另一组五位数字表示以度和分为单位的经度，以及E（东）或W（西）符号。

DD表示真方位（前三位数字）以及与明确标定的岸上标志之间的距离（以海里计）（注明岸上标志）。
EE——真航向。
FF——以节和十分之一节为单位的速度。
LL 是预计航线。描述航线时，必须给出每个转向点的纬度和经度，如同在直流中一样，并注明

这些点之间预计航线的类型，例如 RL（沿 Loccodromia 航行）、大圆航线（沿大圆弧航行），或沿海岸线航行（沿岸航行时），以及特征点的预计日期和时间，格式为六位数字组，与 VV 中相同。

MM — 完整列出监听电台的名称／频率。
NN — 日期和时间组，格式与BB相同。
PP — 船舶上货物（船用燃料）的名称和数量。
QQ — 故障／缺陷／损坏摘要。关于船舶状况和燃料储存能力的简短报告。

RR — 关于环境污染的简要信息。海上泄漏的润滑油或燃料名称；泄漏量评估；润滑油／燃料排放动态评估；如有可能，评估溢油区域的面积。位置按CC或DD的格式给出。

SS — 对主要天气和海况的简要描述。
TT — 船东及其代表（承租人、船舶所有人或经营人，或其代理人）的姓名、地址、电传号码和电话。
UU — 船舶船长、船宽、吃水和船舶类型的信息。
XX — 补充信息：
事故简要描述；
是否需要外部援助，以及是否已请求或由其他船舶提供援助；

已采取的排放和船舶动态措施；
船员人数以及任何人身伤害的相关信息；

保险公司信息：
其他信息。
按照表格要求发送初始报告后，应发送补充报告，其中包含对船舶安全和海洋环境保护至关重要的信息。

首次录入信息后，应尽快向船东或运营人提供以下补充信息：

– 船舶损坏及设备损坏的详细补充信息；
– 指明现有损失；
– 对火灾危险及已采取的预防措施进行评估；

– 货物在船上的配载位置及其编号；
– 事故数量；
– 对其他船舶造成的损坏和损失；

– 请求援助的时间（格林尼治标准时间），以及预计获得援助的时间；

– 救援人员的名及应急救援设备类型 ；
– 是否请求了额外援助；
– 对备件及其他材料的需求；
– 任何其他重要信息。
行动点通信。遇险信号：
– MAYDAY 用于表明船舶正处于迫在眉睫的危险之中，需要立即援助；

– 优先于所有其他消息。
紧急信号。
– 当移动手段的安全受到威胁时，使用 PAN-PAN；

– 当存在最终可能需要请求援助的危险情境时，应使用紧急信号 PAN-PAN；

– 优先于所有消息，但灾难信号除外。

安全信号。
– SECURITE 用于发送与航行安全相关的消息或传递重要气象预报。

在这些信号之后传送的任何消息，其优先级都高于普通消息。通常，该信号会在消息开头重复三次。飞机机长或指定船舶的船长必须通过 MAYDAY 信号宣布遇险状态。救援人员在无线电程序和搜寻中应使用并理解的基本词语：

AFFIRMATIVE 表示所传送的内容正确；
BREAK 用于分隔消息的一部分，或将一条消息与另一条消息分开；

数字在消息中的数字前直接读出；

我拼读用于逐字母拼读单词；
没有否定手段；
结束 表示传输结束，且不期待或不需要回复；

OVER 表示传输结束，且期待立即回复；
ROGER 表示收到的消息令人满意；
SILENCE 连说三遍，表示“立即停止所有程序”；

SILENCE FINI 表示解除静默，用于表示紧急情境结束并恢复正常无线电交换；

THIS IS 在电台名称或呼号前说出；
WAIT 表示“我需要暂停几秒钟，等待后续传输”。

更详细的过程用语清单见《国际海事组织海上通信标准短语》和 MCC。海上船舶发送灾难消息：

– 156,8 МГц（甚高频，第16频道）；– 156,525 МГц（甚高频数字选择性呼叫，第70频道）；– 2182 кГц（无线电话）；
– 中频/高频数字选择性呼叫（2187,55 кГц、8414,5 кГц，必须值守），以及以下频率之一：4207,5 кГц、6312 кГц、12577 кГц、16804,5 кГц；

– 国际海事卫星 1644.3–1644,5 МГц（应急无线电示位标）；
– 国际海事卫星 1626,5–1646,5 МГц — 应急无线电示位标 406–406,1 МГц。

如果对是否收到不符合项报告存有疑问，应将其发送至当地可用的任一频率，以便立即引起注意。为创建灾难信号，可以使用救生无线电。飞机发出遇险信号的方式如下：

– 通常由飞机通知空中交通管制中心（自动电话交换机），再由其通知 RCC；
– 121.5 MHz；
– 4125 kHz（无线电话）；
– 雷达应答器设置为 7700 MHz；
– 飞机遇到不确定的灾难时，可以使用手头的任何工具来引起注意、报告自己的位置并请求帮助。

根据 SOLAS-74/88 公约要求安装在船舶和航空器上的附加无线电技术设备，可用于发送不符合要求的消息：

– 应急无线电示位标（EPIRB），在启动或手动开启时，会向沿岸电台发送每个示位标独有的编码信号；

– 搜救雷达应答器（SART）手动开启后会自动运行，接收雷达发出的雷达脉冲。

它发出的脉冲会在雷达屏幕上显示为一组扩展的点，如同应答器信标的信号。通常，雷达屏幕上可在 6–8 海里范围内看到应答器——使用便携式甚高频无线电台 VHF。船舶遇险消息应包含以下重要组件：

– 船舶识别信息及船舶坐标；
– 自然灾害类型及所需援助类型；
– 附近天气状况、风向、波浪、能见度；

– 弃船时间及留在船上的船员人数；

– 救生设备的数量和类型；
– 用于放置在救生装置上或海中的应急工具；

– 重伤人员的数量。

初始消息中纳入了尽可能多的实用信息，但发送一系列简短消息比发送一条长消息更为合适。《1972年国际海上避碰规则》中列出了视觉遇险信号。救援完成后，或确认无需救援时，应立即取消遇险消息。任何误报都应予以撤销，以免浪费救援服务力量。

国际安全管理规则。全球标准。尽管船队的技术状况有所改善，导航设备和无线电设备也日趋现代化，但全球船队的紧急情况发生率仍处于原有水平。主要原因在于船舶船员不称职或缺乏训练。根据对海上紧急事件的调查结果，人们指出，近年来“人为因素”发挥着决定性作用。因此，人们决定对船上人员之间的关系进行规范和标准化。

船舶安全运营要求载于《安全与防污染管理规则》（ISM-代码）中，该规则由国际决议国际

海事组织A.741（18）于1993年11月4日通过。该规则包括以下条款：

1. 总则；
2. 安全与环境保护政策；
3. 公司的责任与权限；
4. 指定人员；
5. 船长的责任与权限；
6. 资源与人员；
7. 船上操作计划的制定；
8. 应急准备；
9. 不符合报告、事故、危险情况及其分析；

10. 船舶维护与修理；
11. 文件；
12. 公司进行的核查、审核与评估；
13. 检验、审核与控制。

SOLAS-74/78公约。

海上安全委员会于1994年通过了SOLAS-74/88公约的第IX项修正案。

规则1“定义”：

1. 国际安全管理规则——指《船舶安全营运和防止污染国际规则》，该规则由A.741（18）号决议通过，并可由本组织修正；

2. 公司指船舶所有人，或任何其他组织或个人，例如经理，其已从船舶所有人处承担船舶营运责任，并同意承担国际安全管理规则规定的全部职责和责任。

3. 设备——这是一种船舶，其结构包括一个船体、舷侧舭列板和货舱内的舷侧舱柜，主要用于运输散装货物或矿石，也可以是兼用船。

4. 海上移动式钻井装置——这是一种能够进行钻井作业，以勘探或开发资源的船舶，例如液态或气态烃、硫或盐。

5. 油轮是指主要为在货舱内散装运输石油而建造或改装的船舶，包括兼用货船以及任何

化学品船，只要其散装运输的石油属于货物或部分货物。

6. 高速船是指能够达到以米每秒为单位的最大速度，等于或大于：3,7 V0,1667，其中 V 7 为计算排水量，米^3。

7. Himovo油船是指建造或改装并用于散装运输《国际散装运输危险化学品船舶构造和设备规则》中规定的任何液态产品的货船。

8. 气体运输船是指建造或改装并用于散装运输《国际散装运输液化气体船舶构造和设备规则》中规定的任何液化气体或其他产品的货船。

9. 渔船是指用于捕捞鱼类、海洋动物和海产品以及从事渔业养殖的船舶。

10. DSC（可用文件）——指由公司、船旗国主管机关签发，用以证明船舶符合规则要求的文件。

11. SVUB（安全管理证书）——指公司主管机关在船舶管理机构建立后签发的文件，用以证明船舶安全管理机构符合《规则》第2条的要求。MCUB适用于所有船东及船舶，不论建造日期，具体时间如下：

– 1998年7月1日——高速船、油船、化学品船、液化气船、总吨位500吨及以上的散货船和高速货船；

– 2002年7月1日 — 其他货船及总吨位为500吨或以上的海上钻井平台。

本章不适用于以非商业目的运营的政府船舶。

国际海事组织A.787(19)号决议《港口国船舶监测程序》。船舶必须持有由船旗国港口主管机关签发且未过期的管理证书。如有理由进行更详细的检查，则记录了以下国际安全管理规则相关问题（引用国际安全管理规则的元素）。

国际安全管理规则。总则（国际安全管理规则）。根据国际海事组织的标准和规则，安全管理体系的核心环节是船舶所有人或运营商

（公司）。公司应在其活动中实施安全管理体系（SUB），以便高效、专业地处理船舶管理信息；该体系是生产型公司主要管理体系不可或缺的一部分。公司安全管理体系需求代码：

A）安全质量标准及防止污染：
– 遵守强制性规则和标准体系；
– 确保该体系采纳国际海事组织及海运业组织所推荐的守则、指导原则和标准；

B）公司总体目标：
– 确保所提供服务的质量；
– 确保船舶安全营运、工作条件安全及环境安全；

– 组织防范所有已识别风险；
– 持续提升安全管理和船舶管理技能，包括应急准备，以及采取预防措施防止污染相关危险和风险。

B）安全管理体系的功能要求：
– 安全与环境保护政策；
– 确保所提供服务质量、船舶安全运营及环境保护的说明和程序；

– 明确岸上与船舶人员之间的权限和联系，以及岸上内部沟通渠道和岸上与船舶之间的沟通渠道；
– 确保与无线电台和港口进行交互，以便可靠地记录公司的船舶日常记录；

– 发生事故及出现不符合规则要求的情况时所采取的程序；

– 应对紧急情况以及采取行动消除其后果的程序；

– 开展内部审计和管理评审的程序。17.国际安全管理规则。安全性与环境保护领域的方针（ISM规则第2条）。

每家公司都应制定安全性与环境保护方针，其内容包括：

– 实现规则规定的总体目标；
– 确保船舶安全营运达到国际和国家标准（规则和规范）；

– 在此基础上提高自身船舶在世界市场上的竞争力。

与此同时，公司宣示其承诺，并将确保安全和防止污染置于优先位置，这应成为政策的首要目标。

海上安全、防止人员死亡和受伤、环境（尤其是海洋环境）及财产遭受损害，以及遵守商业运营规则。这些目标通过以下方式实现：

– 遵守有关安全、防止航行事故和污染的国际和国家标准（规则和规范）；

– 船舶与岸上之间保持稳定可靠的双向通信；

– 船长报告船舶状况、船上问题及解决措施，并报告所需的岸上支持；

– 制定相互关联的紧急情况行动计划，并完善这些计划；

– 公司能够迅速、恰当地应对船舶上可能出现的危险；

– 禁止将酒精饮料和毒品带上船舶、存放或使用；

– 调查船舶上的事故和紧急情况，并采取措施加以预防。

基于上述内容，公司开展以下工作：
– 人事政策——招募合格人员；
– 技术政策——确保船舶的设计技术、工艺技术及环境安全；

– 社会政策——为人员创造有利条件，确保船舶安全运营。

政策由总经理签字批准。由总经理签署的公司政策副本，张贴在公司各部门指定的位置；在船舶上，则张贴在船员最常到达的位置以及船长室。公司全体员工都必须熟悉公司政策，以确保其得到执行。

公司政策由三级文件构成。
政策——目标与任务。
管理体系的总体结构：
– 描述管理体系策略及目标；

– 确定控制系统的范围；
– 组织结构描述；
– 明确控制系统关键员工的职责与权限；

– 使用所采用的标准，对手册各元素进行交叉引用。

程序——该做什么：
– 体系管理方法；
– 描述控制系统各项措施清单的程序；

说明书——如何完成：
– 文件化任务；
– 工作描述（作业指导书）；
– 安全管理体系中使用的报告表格和模板。

国际安全管理规则。公司的责任与权限（ISM规则第3条）。任何公司的安全管理体系标准结构都应包括：

– 高级管理层；– 股东／创始人大会；– 董事会；– 总经理；

– 董事，而包括所有自己的代表及股东大会确定的其他员工。沿海单位：

总经理

– 安全部门（СБМ）；– 技术运营部门（船舶或 MCC）；– 人事部（OK）或人力资源管理部门；– 开采；– 生产部门；– 商务部；– 法务部；– 通信部门；– 运营部；– 物流部（OMTC）。

根据行业标准建议，公司结构的最低需求如下：

小型：
– 总经理；

– 指定人员，若其在缺席期间由根据就业协议聘用的相关专业人员替代；

– 技术专家（机械师、电机师），但在其缺席期间，须由临时聘用的专业人员替代。注：为小型公司提供安全管理体系服务的合同，并不免除指定人员的义务。

中型：– 总经理；– 指定人
员；– 技术专家：

– 安全部门（每六艘船舶配备一名船长导师，包括指定人员；每12艘船舶配备一名通信与 SPI 专业人员）；

– 机械师和航运部门（每六艘船舶配备一名导师机械师，包括技术专家）。

大型：
– 总经理；– 指定人员；– 总工程师；– 安全部门（每6艘船舶配备1名导师）；– 机械师和航运部门（每6艘船舶配备1名导师）；– 无线电技术维护（可以是 СБМ 的一部分 —

1名导师负责12艘船）；
– 上述所有其他岸上单位。各部门的组成和员工数量由公司管理层确定。

国际安全管理规则。指定人员。（国际安全管理规则第4条）。船舶安全和服务质量必须始终受到公司管理层的监督。为此，公司负责人指定一名人员。根据其正式职务，任何公司的指定人员都可以全职任职，也可以担任海上安全负责人的副手。

指定人员不在时，其职责由副手履行。指定人员必须经以下人员批准：

– 在大型公司中——由国家委员会负责；
– 在中小型公司中——由注册港港务局负责。
任何公司的指定人员都可以是具备海事基础教育、文凭及所有证书的专业人员，包括

ISM规则，这些资质允许船长在公司的最大船舶上工作，且至少工作3年。

指定人员代表公司负责人，传达其关于航行安全和防止污染的指示，这些指示对公司的所有员工均具有约束力。

为将此项工作纳入安全管理体系，指定人员：

– 组织并协调安全管理体系的活动；

– 维护该体系，包括规范性文件；

– 与船舶保持持续沟通，监测其安全状况，并为其提供安全运营所需的岸上支持；

– 可直接访问公司的资源并参与公司管理；

– 确保控制安全标准（规则和规范）的遵守情况以及安全管理体系的有效性；

– 为船舶和划拨用于安全保障的岸基资源提供支持；

– 及时并立即响应有关不符合项、危险情况和事故的消息；

– 组织对安全管理体系进行系统性的内部和外部审核，纠正不符合项并执行纠正措施；

– 负责规范性法律文档的管理（分发、调试、公报等）；

– 开展安全状况系统性审查（分析）方面的学习，并制定有关政策调节系统和安全管理体系的主要建议。

国际安全管理规则。资源与人员（国际安全管理规则第6条）。安全作业所需资源包括：

– 规范性文件；– 物质资源；– 环境；– 资金；– 受过培训的人员。

安全管理体系的核心环节是人员，其应具备相应的资质、能力和专业培训水平。所有负责安全管理体系的岸上人员都应具有海上职称和工作经验

在指挥岗位上至少工作3年。人员要求由岗位描述规定，他们应在开始工作前熟悉相关内容（国际安全管理规则）。

应急准备（ISM规则第8条）。做好准备，确保公司和船舶始终处于应对紧急情况的准备状态。

公司设有经总经理批准、由指定人员领导的应急行动指挥部。公司应急总部的组成须经船舶登记港港务局批准。

ISM规则。不符合项、事故、事故、不安全情形及其分析（国际安全管理规则第9条）。公司的安全管理体系必须建立即时报告制度，报告所有直接或间接影响航行安全的事故——即不符合报告。不符合报告表见相关方文件。不符合报告由船厂团队填写，并由船长签字；在以下情形下，也可由岸基部门负责人签字：

– 发生了事故、意外事故；
– 造成了危险、高风险及意外情况；
– 渔业、监督机构及港口主管机关提出的索赔；

– 安全管理体系中的不符合项（不符合需求）；

– 关于照明要求的索赔和反馈；
– 没有任何关于现代化改造和完善的建议。确认：如果自行纠正了不符合项，且不需要公司提供协助，则无需编制不符合报告。不符合报告一式两份。第一份寄送给根据文档所示主体架构指定的人员，第二份留在编写报告的船舶／公司部门。收到不符合报告后，海事安全部门应指定一名负责人，由其：

– 登记报告，包括主体文件分类的数量；

– 组织报告研究与分析；
– 制定相关解决方案；
– 监控纠正措施的执行；

– 持续传递报告，并监测纠正措施的执行；

– 设定执行纠正行动的期限；
– 指定负责执行纠正和预防措施的人员。

纠正行动以针对不符合项报告的解决方案形式作出，一份副本发送至提交报告的设备／船舶，另一份发送给负责执行纠正行动的人员。CBM（指定人员）负责监测该解决方案的执行情况。纠正和预防措施应旨在确保航行安全和环境保护，绝不能降低安全性水平。纠正行动：

– 修订相关过程和说明；
– 开发新的过程和指示；
– 在船舶和岸上人员之间分享经验。

不符合项报告将在指定人员收到撰写该报告的部门负责人提供的信息，确认已按照文档中所列的表格消除不符合项后予以关闭。

国际安全管理规则。文件（《国际安全管理规则》第11条）。任何公司的安全管理体系均由大量文件规范。每家公司自行确定文件的组成及其编制顺序，但必须涵盖公司的所有领域以及船舶。每艘船舶都必须配备与其相关的完整文件。根据用途，文件分为：

1) 扩展版——由造船厂提供。Marigold 的最低安全配置包括：

– 船舶技术资料簿（船舶信息簿），包含主要技术性能数据（主要尺寸、用途、液舱容量、货物数量、重量等）。

– 稳性与计算方案信息（稳性与纵倾手册）——包含用于计算稳性的初始数据，以及不同装载工况下的静稳性和动稳性曲线图。

– 船舶结构、机械和系统图纸（图纸）对于确保船舶安全运营至关重要。

2）监管与法律文件是关键文件。这是一套确保船舶安全运营的强制性标准（规则和规范）。

19.0.国际安全管理规则（ISM-code）。规则第4—6条及第8条。ISM规则。指定人员（国际安全管理规则第4条）。船舶安全和服务质量必须始终受到公司负责人监督。为此，公司负责人通过命令任命指定人员。根据职务规章，任何公司的指定人员都可以是长期在公司工作的人员，即航行安全负责人副职。指定人员缺席期间，由其副手履行职责。指定人员必须经以下机构批准：

– 大型公司须经国家渔业委员会批准；
– 在中型和小型公司中，由船籍港总管理处负责。

任何公司的指定人员都可以是具备海事基础教育、文凭和所有相关证书（包括国际安全管理规则证书）的专业人员，这些资质允许其担任该公司最大船舶的船长；此外，还须拥有至少三年担任该公司最大船舶船长的工作经验。

指定人员代表公司负责人行事，其关于航行安全性和防止污染的指示对公司的所有员工均具有约束力。

为在安全管理体系框架内执行这一任务，指定人员：
– 组织并协调安全管理体系的活动；
– 负责维护该体系，包括规范性法律文件；

– 与船舶保持持续联系，监测其安全性，并为其提供确保安全运营所需的岸上支持；

– 可直接访问公司的资源和管理层。
– 确保监测安全性和安全管理体系有效性标准（规则和规范）的遵守情况；

– 为船舶和岸上部门提供用于确保安全性的资源；

– 及时、迅速地响应有关不符合项、危险情况和事故的报告；

– 组织开展安全管理体系的定期内部和外部审核检查，纠正不符合项并执行纠正措施；

– 管理规范性法律文件（分发、修订、发送等）；

– 开展公司安全状况的系统性审查（分析），并据此制定关于调整政策和安全管理体系的建议。

20.0. 船长的责任与权限（国际安全管理规则第5条）。根据国际安全管理规则、商船海运法典和船舶服务章程的需求，船长是公司在船舶上的最高职务人员和受托人。船长实行单一指挥制管理船舶，并向总经理和指定人员负责。任何人——无论是船舶委员会、船舶委员会、党组织、安全委员会，还是公司的任何员工，包括总经理和指定人员——均无权撤销船长就船舶生产和日常生活活动任何事项作出的解决方案。所有船员均须经船长同意后方可任命。船长发布船舶命令，并有权解除任何船员的职务或将其遣离船舶，并在命令中说明理由。船长对以下事项承担责任：

– 维护并提升公司的声望与权威；
– 在船舶上贯彻安全政策，并确保船舶人员理解该政策；

– 确保船舶安全管理体系有效运行；
– 在船舶团队中营造有利于提升船舶安全管理体系的道德和物质条件；

– 持有全部船舶证书和船员文件，并及时办理确认；

– 组织船舶上的值班工作，分配船员的职责、责任和权限，包括应对紧急情况；
– 船员岗位说明书的折叠与批准，并有权偏离企业章程要求；

– 与公司建立通信，以及船内通信；

– 向公司发送紧急措施报告，并报告未遵守规则条款的情况；

– 控制船舶人员遵守国际和国家标准（包括公司标准），以确保船舶安全运营；

– 组织课程、学习和训练，使船舶人员掌握紧急情况下的应对措施，包括环境污染事故；

– 维护船舶文件和船舶日志；

– 向公司提交关于船舶安全管理体系有效性的审查（分析）及改进建议。船长在决定如何确保船舶安全运营以及向公司寻求帮助方面拥有专属权限。在确保船舶及船员安全、防止环境污染、保护货物和财产方面，船长不受决策权限制，公司也会给予支持。

21.0.ISM规则。资源与人员（《国际安全管理规则》第6条）。确保作业安全所需的资源包括：

– 规范性文件；– 物质资源；–

环境；– 财务；– 受过培训

的人员。

安全管理体系的核心是人员，他们必须具备资格、胜任能力并接受专业培训。所有为公司安全管理体系提供支持的岸上人员，必须具有海事职衔，并拥有至少三年的管理职位工作经验。人员要求载于岗位指令中，他们须在入职时签字确认已阅读。船员配备须符合现行法律，并须与指定人员进行协调。船长有义务了解：

– 国家及国际法律以及规范性法律文件；

– 船舶的不沉性、强度、稳定性、耐久性参数及其特点；

– 关于航行安全的国际协定；
– 海事法、法律、规则及挂靠港惯例；
– 船级社规则；
– 公司关于船舶运营的规则、规范、建议书和说明书。

船舶人员必须：

– 具备海事基础教育，持有证明其资质的文凭、证书和证书；

– 了解船舶结构及其特点；
– 具备足够的工作经验（首次担任指挥岗位时，应完成相应实习）；

– 能够应对各种使用条件，包括事故情况；

– 了解船舶的使用条件及其业务领域；
– 了解工作制度、工作负荷和船上作息安排；– 遵守安全规程；

– 了解自己的岗位职责以及船舶安全管理系统。

岸上人员应：
– 具备符合任职要求的专业基础教育；
– 持有相应的文凭和证书，以证明其资格；

– 了解企业的活动领域及其安全管理体系；
– 具备充足的实践经验；
– 了解国际海事法、相关国际条约及国家海事立法；

– 了解有关航行安全性和海上环境保护的国际及国家规范性法律标准；

– 了解国际和国家财务操作规则；

– 了解船级社规则。

为使人员保持应有的资格水平，公司必须有计划地对其进行学习。根据《1978年海员培训、发证和值班标准国际公约》及其1995年修正案，船员学习的主要类型包括：

1. 在职培训（in-service training）——在船舶上进行船舶操作，但在被指派上船前于岸上开展，用于培养和检验知识、技能、资格、能力及专业素养。

2. 发证培训（training for certification）——由具备资质的教员按照相应的国际认可标准开展，用于培养和认证指挥人员。

3. 船上熟悉培训（shipboard familiarization）——面向被派往船舶工作的人员进行，使其熟悉自身职责、船舶及船舶舱室的布局、入口和出口（包括紧急出口），以及用于正常和紧急运行条件的船舶装置、系统和设备。

用于正常和紧急运行条件下的装置、系统及设备。

4. 其他培训（适用于所有船舶的其他培训要求）——针对所有船舶的正式及临时船舶人员开展，内容包括紧急情况下的生存方法和技能、危机情况下的弃船程序，以及个人保护方法（消防安全、安全技术、急救等）。

5. 专项培训（特定船型培训）——针对特定类型船舶（采掘船、加工船、接收船、危险货物运输船等）的船舶人员开展。

6. 通识培训——面向船舶人员及岸上人员开展。培训在岸上和船舶上进行，形式包括讲座、专业进修课程、模拟器训练、以副手身份实习等。岸上和船舶上的培训计划将根据事故案例、安全管理体系中发现的不符合项以及外部和内部审核检查的结果进行协调和调整。人事部负责核算每位员工的培训情况。在船舶上，培训情况记入船舶文件，并应监督机构要求出示。

26.0. 应急准备（《国际安全管理规则》第8条）。为做好准备并确保公司和船舶始终处于应对紧急情况的准备状态，应设立：公司应设立应急指挥中心，由总经理通过命令批准其组成，并由指定人员负责领导。公司应急指挥中心的成员须与船籍港总管理处协商确定。船舶应设立船舶安全委员会（最小成员包括船长、大副和轮机长）。应急指挥中心和船舶安全委员会的行动程序，载于相互衔接的岸基应急计划（shore based emergency plan）和船舶紧急情况行动计划中。公司必须针对可能发生的紧急情况开展行动准备。此类准备的目的是确保公司始终能够迅速、有效地应对船舶上可能发生的紧急情况。指定人员负责确保船舶及其船员做好应对紧急情况的准备。准备工作应包括：

– 识别并描述船舶上可能发生的事故情形；

– 制定海岸人员和船舶人员在潜在可能的紧急情况下的行动计划；

– 制定培训和演练计划，以训练海岸人员和船舶人员在紧急情况下采取行动、防止事故、控制事故并将后果降至最低（应在演练和学习规定中予以说明）。

– 在紧急情况下，船舶与海岸之间保持联系和通信的方法。建议采用国际海事组织的建议书（A.648(16)号决议《关于船舶报告系统的基本原则及其要求》）。紧急情况行动计划。岸上计划应说明：

– 指挥部主要人员的组成、职务、办公电话和家庭电话；

– 指挥部的集合程序和地点；
– 指挥部的职责及其与相关合作方的协作方式、请求援助的程序；

– 船舶与海岸之间双向发送消息的方法和程序；
– 用于识别紧急情况的检查清单，以及介绍船员在这些情境下应采取行动程序的小册子；
– 与港口民防作战指挥部交互；
– 公司船舶航行区域内应急救援组织及中心的参考信息；

– 决策的制定与执行程序，以及对其执行情况的控制。

船舶需求还应包括：
– 船舶安全委员会的组成、职务及电话；
– 与相关合作伙伴及所在区域内船舶的交互和联系。

根据 MARPOL 73/78国际防污公约，船舶上必须配备《船舶油污染应急计划（shipboard oil pollution emergency plan）》。其结构和编制方式与紧急情况行动计划相似。公司应按照上述计划定期组织船上和岸上人员进行演练和学习。培训计划应包括：

– 关于使用救生和消防设备的船员个人说明和培训；

– 针对船员开展有关船舶生存能力保障以及在潜在危险事故情况下采取行动的课程、训练和学习；

– 检查船舶事故应急财产及设备（包括无线电设备）的状态、可靠性和行动准备情况。

23.0. ISM规则。不符合项、事故、伤害事故、危险情况的报告及其分析。（《国际安全管理规则》第9条）。公司的安全管理体系应建立即时报告制度，针对所有直接或间接影响航行安全的事件——即不符合项报告。公司安全管理体系的文件中列有不符合项报告表。不符合项报告由船舶高级船员（必须由船长签字）或岸上部门负责人在以下情况下填写：

– 发生伤害事故、事故、险情时；
– 出现危险、存在风险及意外情境时；

– 渔业保护部门、监管机构及港口当局提出的投诉；
– 安全管理体系中的不符合项（未遵守需求）；

– 客户提出的投诉以及对分包商提出的反向投诉；

– 关于安全管理体系现代化改造和改进的建议，这些建议可能源于：如果不符合项已自行消除，且无需公司提供帮助，则不填写不符合项报告。不符合项报告一式两份。第一份按公司安全管理体系文件中所列流程，送交指定人员；第二份留在撰写报告的船舶／公司部门。海上安全部门收到不符合项报告后，如无该部门，则由指定人员负责：

– 登记报告，并按照公司安全管理体系文件分类为其编号；

– 组织学习并分析报告；
– 制定针对该报告的解决方案；
– проко控制员 实施纠 原版意大利千酪雷丝饼干 性行动；
– 持续跟进报告，并控制纠正行动的执行；

– 规定纠正行动的执行期限；
– 指定负责执行纠正和预防行动的人员。纠正行动以针对不符合项的报告所作解决方案的形式记录，一份发送至撰写报告的部门/船舶，另一份

交给负责执行纠正行动的人员。CBM（指定人员）监测该解决方案的执行情况。纠正和预防行动应旨在保障航行安全和环境保护，且绝不得降低安全水平。纠正行动通过以下方式实施：

– 修正相关过程和说明；
– 制定新的过程和说明；
– 在船上和岸上人员之间分享经验。不符合项报告在指定人员收到撰写报告的部门负责人发来的通知后关闭。按照公司安全管理体系文件所列格式提交消除不符合项的报告。

24.0 国际安全管理规则（ISM-code）。制定船舶操作计划。规则第7条。

制定船舶操作计划的主要责任由组织承担。公司管理层必须确定哪些船舶操作对其船舶的运行最为重要。公司的计划：

– 年度计划，包含对工业（航运）活动提案的审查（分析）；

– 准备计划，按照任务对船舶进行航次准备；

– 运营计划，按照航次任务开展捕捞／货物运输。生产活动的年度计划及其执行情况分析由企业岸上部门负责。准备计划由企业岸上部门与船上部门共同执行。公司审议并履行各类合同／协议（维修、船舶设备维护服务、通信、补给、港口手续等），这些合同／协议对于船舶在海上顺利运行必不可少。根据合同（协议）条款，船舶准备的主要类型包括：

– 航行准备——由安全部门负责，旨在保障捕捞作业安全（预测水文气象条件、提供海图、确保船舶配备事故应急及救援设备、制定紧急情况行动计划，并培训船员应对紧急情况）；

– 技术性——由轮机船舶（技术）部门负责执行（执行计划性维护、维修及

进坞，确保达到从事捕捞作业所需的技术和工艺准备就绪状态，审核船舶文件的有效期，进行定期检查，组织船舶加油，审核燃料质量，组织物资技术供应）；

– 人事管理——由人事部负责（配备船员，审核健康适任性，审核文凭和证书，组织船员轮换）；

– 运营（捕捞）管理——由航运服务部门和捕捞部门／商务部／运营部门负责（规划在捕捞区域的作业，指派代理人，为船舶提供货运和运营信息，按照捕捞作业规则提供文件，组织通信和调度报告，检查渔具，补给所需的捕捞物资）；

– 财务管理——由商务部和会计部门负责，并明确船长的权限（为船舶提供必要物资，支付运营服务费用，制定拨付资金的使用规则，控制财务操作，遵守企业商业机密，控制现金和财产的流动）；

– 保险 — 由法务部负责（提供各类保险，制定事故及可能引发风险的事故报告提交程序，并对索赔和诉讼赔付造成的损失进行统计核算）。

– 船舶操作 — 船舶运营期间，公司依据国际安全管理规则制定船舶操作计划，同时参考国际海事组织的建议书，并以许多国家的国家船舶服务组织体系为基础。根据可能造成的后果，船舶操作分为：

– 特殊作业 — 执行过程中出现错误会导致危险情形，或在事故发生后才被发现；

– 关键作业——执行中一旦出现错误便会立即引发事故，或对船员、船舶造成威胁，或导致污染的作业（例如：紧急投放和回收渔具、港口作业（引航员、系泊、锚泊等）、海上和港口的货物装卸作业、船舶加油作业、应急作业等）。关键船舶作业必须在严格监督下进行。同时，必须充分确信船员的资

格、能力和实践培训均符合要求。

船舶作业按照以下顺序纳入捕捞和/或货物运输流程：

1. 一般船舶作业：船上工作组织 — 船员岗位职责 — 船员按隶属关系提交报告 — 船舶与公司的联系 — 船长和指挥人员开展的检查与监督 — 船舶文件（组成、保管、登记） — 医疗服务 — 船员履行岗位职责的适任性及避免船员超负荷工作 — 酒精、药品、毒品（船舶政策、使用控制与检查）— 维护与维修组织 — 船舶设备操作与维护说明 — 职业健康与安全 — 防止环境污染 — 检查清单 — 捕捞课程表。

2. 船舶在港期间的作业：船舶值班服务（停泊值班）—与港口当局交互—检查、测试并做好启用消防设备的准备—装卸货—控制货物配载、强度和稳性—将含油污水和有害物质卸至海岸—安排交付食品废弃物、垃圾和污水—在港口进行维修工作—船用燃料中的液体货物意外溢漏—对污染事故承担责任—船舶在港口临时滞留时的行动—领取渔业及生产装备。

3. 船舶航次准备操作：审核和船舶登记 — 检查强度和稳定性 — 检查船体所有舱口和开口的封闭可靠性 — 检查渔业设备的固定是否牢靠 — 确定 / 预测水文气象条件 — 准备航海图并规划航次，直至准备文档 — 审核、校对海图和指南 — 船舶加油 — 接收物资、淡水和备件 — 完成维修并检查执行情况 — 检查并准备船舶主机和机械设备 — 检查并准备船舶管理系统 — 检查并准备安全保障系统和机制（导航设备、锚、航行灯等）— 检查并准备通信设备 — 检查并

准备ПЗМ设备和装置 — 检查并准备渔业及生产设备和装置。

4. 船舶在海上航行及从事捕捞作业时的操作：船舶航行值班——在复杂条件下航行的特殊需求——无线电通信——监测周围环境——监测船舶及主要设备的状态和运行模式——船舶操纵准备——布设捕捞工具——开展捕捞作业——渔业加工车间的生产活动及鱼类加工——系泊作业（加油、卸货）——做好应对意外/极端情形的准备。

5. 船舶进港前的准备操作：检查主机、舵机、导航和通信手段、锚设备——船舶引航（引航员引航）——船舶与港口之间的通信及信息——确定/预测水文气象状况——港口区域航行限制、季节性表格和海图、指南——船舶压载——控制强度、稳定性和水密性——检查并准备船舶系泊设备。船舶操作的文件记录以过程和指令的形式编制并оформляются。过程是由共同目标和行动（函数）构成的系统，以文件形式阐述，规定该系统的用途和任务、组成、内容和其中各项行动（函数）的执行顺序，以及其最终结果。

程序以船舶作业为基础。程序可以描述完整的船舶作业，也可以描述其组成部分。作业指导书是对程序的进一步发展和细化。它是一份规定如何执行程序所规定行动（函数）的文件。程序的主要内容载于公司安全管理体系文件中的程序规定。公司和船舶应遵守国际和国家规范性文件的需求，不必在较低层级的文件中重复这些内容。在安全管理体系文档中，只能对最高层级文件的需求作适当补充或细化，并结合本公司船舶工作的具体特点加以说明。在工作过程中，应根据对事故、不符合项、事故等的调查（分析），修订和补充安全管理体系文档。世界船队严重事故中，最大比例与人为因素有关，尤其涉及驾驶台和机舱的航行值班。为便于船舶驾

驶员和轮机员采取行动，船舶检查清单（检查清单）已得到广泛应用。这些检查清单列入各公司的安全管理体系文档，并建议在船舶日常生产活动中使用。根据国际海事组织的建议（A.864(20)号决议，1997年11月27日），进行高风险作业时（如高处和舷外作业、在封闭且通风不良的处所作业、动火作业等），船舶应使用相应的检查清单。值班期间使用检查清单时，船舶驾驶员／轮机员应考虑以下事项：

– 填写船舶操作检查清单，并不能免除承担航行值班的人员对错误行动所负的责任；

– 检查清单是一份法律文件，与船舶航海日志／轮机日志中的记录一并，可作为船舶驾驶员／轮机员在紧急情境下采取正确行动的证据；

– 必须在船舶航海日志／轮机日志中记录检查清单的填写情况；

– 检查清单只能用蓝色或黑色墨水笔填写，禁止使用铅笔；

– 检查清单中的所有项目都必须回答“是”；

– 如果检查清单中的任何一项未完成，则不得进行船舶操作，并且必须立即向相应的船长／轮机长报告该情境；

– 常用检查清单（交接班、拖网下放等）由每位船舶驾驶员/轮机员在每个航次中填写一次，之后只需在航海/轮机日志中标注其使用情况；

– 在复杂条件下航行时，必须立即填写检查清单；

– 每份已填写的检查清单都必须注明日期、签名以及填写者的姓；

– 所有已填写的检查清单都必须至少在船舶上保存两年。如果检查清单与船舶条件不符，必须向公司指定人员提交不符合项报告，并说明修订相应检查清单的理由。船舶作业期间使用的所有检查清单目录，必须张贴在网桥/机舱内醒目位置（海图桌上方、主机控制台上方）[4–10]。

根据对规范性文件的审查可知，只要无人船不遵守国际海事组织的规则，就会被视为不适航，因而不具备投保资格。但时代不断发展，如今已出现针对无人船法律关系的监管框架草案。对于完全自主的船舶，如果其自动化程度允许船舶在船上无船员的情况下航行，同时由船外人员持续监视船舶并管理其航行；或者无需船外人员持续监测和管理。

船舶文件。由于许多船舶文件与船舶船员及其职能有关，因此必须披露：按照现行解释，自主船舶所需的部分船舶文件应予以替换或维持。对于自主船舶，应确立其无需在船上携带船舶文件的权利；主管机关可通过船东以电子或其他方式进行检查监督。

船长、船舶船员。现行标准规定，船长的主要职能是从航行角度管理船舶。对于自主船舶，其航行管理职能已实现自动化，并由船舶技术系统全权执行，或在船东岸上人员的管理下执行。半自主船舶的管理职能（包括派遣）可由船舶自动装置或位于自主船舶之外的船东专家执行。

最低船员配额。此需求完全不适用于全自主船舶。半自主船舶的最低配员证书应考虑船舶的自动化（自主）程度。由于全自主船舶上没有船员，规定船员人数的文件毫无意义。

人员资格要求。自主船舶的操作，无论船上是否有船员，都应由自主船舶外的专业人员予以支持或执行。此外，还应为自主船舶船员及自主船舶操作专业人员制定并设立资格要求。对上述船员

及专业人员而言，最适合用于设定资格要求的法律工具是关于海船船员文凭的规章。

船舶管理。自主船舶安全管理的责任可以由船东承担，船东应配备具备自主船舶管理领域专业能力的专业人员。这些专业人员位于由其控制的自主船舶之外（在岸上或另一艘船舶或船上），但必须拥有管理船舶所需的一切技术和组织工具。船东还有义务为每艘自主船舶指定一名负责其管理的人员（岸上船长）。这名负责人可以同时管理多艘船舶。由于自主船舶管理是一项非常特殊的任务，需要集中运用专业技能，因此建议赋予船东权利，与具备自主船舶管理能力的专业组织签订自主船舶管理协议。同时，自主船舶安全运行的责任仍由船东承担。

这些用于引入新技术的修正性意见已纳入海事立法。2018年，DNV GL 编制了《自主船舶与遥控船舶》文件；2020年，俄罗斯海事船舶登记局发布了《海上自主及遥控船舶（MAHC）分类规定》。自主及遥控船舶系统的要求包括可靠性、安全性和自动化程度，且不得低于有人船舶的水平。自主船舶应尽可能减少设施，并具备船舶有效空间和休闲舱室。

自主船舶着重采用船舶局域网络和通信系统。局域网络应能在任何设备单元中运行；在排除故障期间，故障设备应从网络中隔离。

集成系统的选项之一是负责船舶管理的计算系统，该系统应按照多数表决原则进行设计：对于输出不正确值的计算机，在重启和检查期间应将其从整个系统中断开，之后再将其重新集成。

不能忽视这样一个方面，即实现能够参与救援行动的自主船舶；为此，需要为船舶配备以机器人手段形式存在的人工智能。

如果自主及远程操控船舶发生故障，无法继续运行，则应将其送至最近的港口，或在船上进行维修工作。同时，还必须解决以下任务：

运送至最近的港口；
组织接入船舶；
评估维修的可行性。

解决这一问题的方法是，在国际海事组织的主持下成立自主及远程操控船舶救援协会。

远程操控船舶上有人值守，因此需要由具备医学教育背景的专业心理学家开展工作，解决幻觉、抑郁症发展等心理问题，以及人体机能的其他障碍。

此外，也不能忽视海上活动中的一个方面——海盗行为，它以各种形式自航运诞生以来便一直存在。

如果远程控制中心遭到实体占领，就必须建立权限移交系统，将管理权限转交给位于其他中心的备用控制机构。船舶控制权可能会被转移至经过特别挑选的目标——船舶。此外，此类袭击还可能伪装成“海盗袭击”。传送错误数据可能会直接用于夺取船舶控制权，也可能间接导致船舶依据算法运行，并使远程控制台中心作出错误决策。

自主及远程操控船舶的设计与运营特点要求：

– 对运输作业关系的法律方面提出严格要求。

– 使用经认证的设备和软件。

– 实施设备模块化原则。
– 具备设备热插拔能力。
– 控制部件统一化 [11]。

然而，生产技术不断发展，许多外国公司并未等待无人船舶相关规范体系的制定和批准，而是迅速推进发展，并创建完整的自主船舶模型以及自主船舶本身。此类公司包括：

– 英国Rolls-Royce Convice与Finferries于2018年12月在图尔库附近，将一艘53.8米长的「Falco」型渡轮特别改装为自主模式。该项目名为SVAN（更安全的自主导航船舶）。测试取得成功，渡轮由位于实验地点50公里外的指挥中心进行监测。

– 挪威Yara公司与Kongsberg Gruppen于2017年10月完成了一款名为Yara Birkeland的全电动自主货船的研发。据《华尔街日报》报道，世界上首艘自主货船Yara Birkeland于2018年年底投入运营。下水后，开发者对自动驾驶系统进行了约一年半的测试。这个过程分为三个阶段。第一阶段由船上团队操控船舶。第二阶段由操作员远程监测在长达32.5英里的航线上进行的测试。下一阶段则由电动船使用自己的计算机进行操控，并利用GPS和多个传感器确定其他海上对象的位置，同时确保安全靠泊。上述有关无人船及其测试的内容表明，无人技术的发展并未停滞；然而，随着任何技术的发展，尤其是在海上运输领域，都需要认真制定相应的规章制度。但遗憾的是，现在谈完善相关工作还为时尚早。

无人船面临的主要问题是遵守航行安全要求、防止环境污染，以及作为使用无人船的一部分，厘清船舶所有人的责任。目前，MAS 无人海事研究是在“舒适”的条件下进行的：

– 无人船航行测试在距离海岸足够远的地方进行，并与无人船保持可靠、连续、不间断的通信链路；

– 在附近没有其他船舶的情况下；– 卫星覆盖区域良好时；

– 船舶雷达不存在任何盲区时；
– AIS、GPS、陀螺罗经、计程仪和回声测深仪均已确保持续运行，但传输的信息可能存在错误；
– 在具有足够地标、水深和导航标志系统的情况下，可以对空间中的船舶定位进行复核；
– 操纵速度较低时；
– 完全不存在复杂的水文气象因素（暴风风、高等级海况、强流、大量冰层、冰山，以及反射信号系数较低的外来漂浮物）。

值得关注的是，未来无人船舶将面临一系列问题：

1) 如何在发生任何类型的事故时（挤压、碰撞、火灾、进水控制等）保障无人船的生存能力；

2) 发生全船断电时，所有电源（包括备用电源）均失效；谁能进行维修，需要多长时间；

3) 无人机在海盗活动水域中的行动；
4) 紧急抛锚时，谁会跑到船首去抛锚；
5) 在冰区航行（船舶无法在冰中直线航行）。必须持续操纵并频繁倒车，以确保与前方航行的船舶、破冰船以及意外出现的障碍物保持安全距离。

6）遵守《1972年国际海上避碰规则》时出现不确定情境。不确定性是海上运输的显著特征。尽管对导航问题进行了全面细致的研究，不确定性因素依然存在，即使自动化程度进一步提高，也仍将存在。因此，海上运输领域的无人技术主要应着眼于解决在复杂条件下、在港口及船舶交汇过程中信息感知的不确定性问题，并修订防止碰撞的规则和发生事故时适用的法律框架。

基于以上所述，许多国家、组织和公司都在开发无人驾驶船舶技术并推动其应用，开展相关研究、技术项目和运输项目。机构和大学都在积极进行开发，包括麻省理工学院、哥伦比亚大学

、普利茅斯大学、乌乔安技术大学，以及跨国公司和船级社。技术项目的相互借鉴有助于未来全面转向建造无人船舶，也极大拓展了造船工业的发展潜力。对无人船航运领域项目的详细研究，将有助于为建造这类船舶编制技术经济论证，并确定实现这些项目所需的最终技术清单。电信技术、电子传感器与系统以及电子导航技术已开始应用于海洋工业领域。经济型船舶是技术上最复杂的交通工具之一，其中自动控制系统发挥着特殊作用。不久的将来，难以想象民用船队没有自主无人船舶。

本文首先探讨了监管和法律方面，但也不能忽视与描述和分析现有无人船舶项目相关的技术方面。无人船舶在测量技术手段和设备的配置程度上各不相同。无人船舶上没有驾驶网桥、上层建筑、居住舱室，也没有船员生命保障系统。

2018年5月，国际海事组织秘书处成立了海上自主水面船舶跨行业工作组。在第99届会议上，海上安全委员会开始讨论对自主运输领域进行持续监管，包括人为因素、安全系统、与港口的互动、引航、事故后果处置，以及针对不同自主性层级船舶的海洋环境保护。

还应指出，在统一的欧洲海事项目框架内，计划到2025年建立统一的自主配送物流“生态系统”。与此同时，该项目按照公私合作伙伴关系原则实施，参与者包括海事工业的领先企业：Wartsila、Rolls Royce、Abb、Meyer Turku、Finnferries、Ericsson、Cargotec等。[12]

决策时间不足，难以保障船舶安全，因此必须仅筛选出完成主要管理任务和决策所需的信息，并且

进行决策。由此产生了预筛选和分析信息的问题，这些信息是实现逻辑推理机制并提出实践建议所必需的 [13]。智能系统能够应对这一问题，它们旨在长期运行于存在一定不确定性的上下文中。据指出，要使系统具备智能自主性，就必须拥有以下一种或多种能力：学习；态势感知；推理；规划；人机界面；决策；驱动。美国船级社（ABS）2016年关于自主船舶的报告（Autonomous Vessels: ABS 'Classification Perspective）将“自主船舶”定义为“配备传感器、自动化导航、推进及辅助系统，并具有决策逻辑以按照任务计划航行、调整任务执行并在无需人工干预的情况下运行的海船” [14]。

根据美国船级社（ABS）2016年发布的《自主船舶：船级社视角》（Autonomous Vessels: ABS' Classification Perspective）报告，系统自动化分为以下等级 [14]：人工控制（human control）、部分函数自动化（some functions automated）、常规操作自动化且人员准备好接管（normal operations automated; human ready totake over）、关键安全函数自动化且人员在场（safety-critical functions automated; human present）、航次期间关键安全函数和环境监测完全自主（full autono my of safety-critical functions and environmental monitoring for duration of trip）、完全自主且没有供人员使用的控制界面（full autonomy with no human-available control interfaces）。

目前，无人系统仍处于概念设计阶段，重点在于集成传感技术和碰撞预警。所使用的智能系统的主要元素为无人船舶提供管理支持：自主导航系统、碰撞预警系统、发动机监测与管理系统以及自动化系泊系统。

船舶系泊作业（图1）属于航运中的危险过程。通过使用创新技术，可以提升船舶系泊安全。

许多码头已有使用这类技术的工作经验。但统计数据表明，这类系泊系统尚未完善到能够完全排除危险情况的程度。

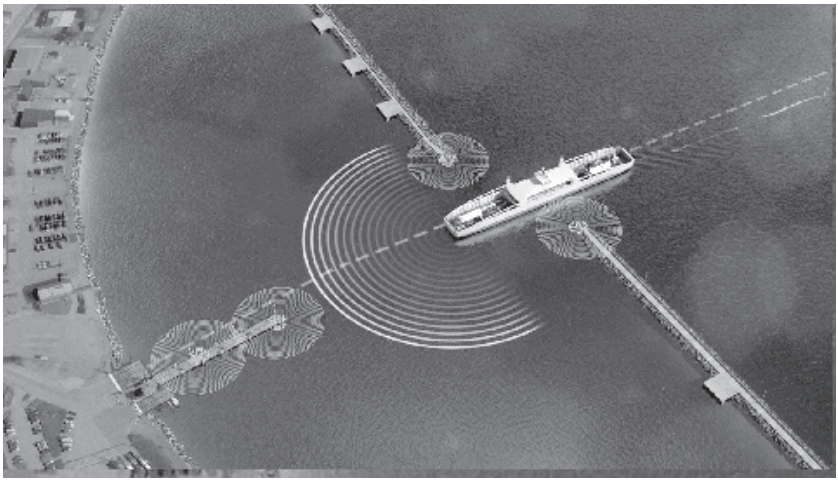


图1. 创新船舶系泊技术的应用

国际海事组织批准了船舶系泊安全性及设备设计需求 [10]。

新需求将包括对整条泊位线进行评估，包括新的维护制度和系泊设备。

据国际海事组织新闻稿报道，在国际海事组织海上安全委员会第102届会议上，会议通过了一揽子强制性需求，其中包括等效作业安全方面的要求。

在国际海事组织会议上，通过的一项需求与泊位有关，泊位必须确保职业安全和船舶安全加速，同时减少作业期间发生事故所造成的后果。这次会议的成果可能会对船舶设计产生重大影响，尤其是系泊绞车装置及相应甲板设备的设计。

目前，SOLAS（II-2 / 3–8）说明书被视为甲板设备规则，适用于系泊

操作，并为每件设备和装置规定最大允许载荷。

这些指令旨在防止工作区域的访问受到限制，并尽量减少对比例区域能见度的限制，以避免参与靠泊的人员受到系泊动态载荷的影响。

II-2 / 3–8规则对设计需求增添了新的内容。专项信息应纳入所谓的拖带与靠泊计划，该计划在国际海事组织1/1620《系泊设备设计及安全靠泊适用系泊设备和装置选择指南》这一新的设计指令中有所描述。同时，无需获得悬挂船旗国港口管理部门对该计划的批准。

关于检验和维护，委员会为所有船舶通过了新的规章，无论船舶的大小和建造日期如何，均要求检查码头设备，包括缆绳和绳索。对 Shridge 的检查现在包括数量、强度、尺寸、船长、特性和约束。进一步的标准载于新手册 MSC.1 / CHERC.1621《湿式设备检验和维护指南，包括系泊设备》。

系泊装置要求对船舶设计师和造船商尤为重要，应与船东客户讨论。维护检查以及更换损坏设备的要求，主要关系到船东和运营商。

修正案自2024年1月1日起生效。
系泊过程可分为以下几个步骤：
1) 将船舶驶近至距码头所需距离，并向正确方向转向；

2) 借助拖船将船舶驶至相对于码头的指定位置，并在系泊期间保持该位置；

3) 使用专用设备 [15] 将船舶拖至码头。靠泊过程的每个阶段都各不相同。

船舶驶入目的港，从导航复杂程度、无线电电子监控和信息监控负载的角度来看，

可划分为若干阶段，称为船舶阶段。这样的划分有助于更清晰地提出船舶在港口内定位精度的需求，也有助于评估船舶建造的安全性，以及在航运的每个阶段减少对可能发生的紧急情况造成影响的措施。1983年，国际海事组织通过A.529 (13)决议确立了这种划分，但该决议仅涉及航运的一个狭窄方面：定位精度 [15]。与此同时，船舶进港安全取决于大量因素。根据上述船舶航行水域实践，可以单独分析船舶进港的四个阶段。

船舶进港的第一阶段。

根据 A.529 (13) 号决议《补偿标准》，船舶航程可分为进入港湾、进港航道、水域（包括受操纵限制的水域）以及其他水域。按照这种划分，船舶进港第一阶段的大部分距离都归入“其他水域”阶段。在这一段航程中，导航精度不得低于与危险物距离的 4%，但不得超过 4 海里 [15]。在这一航次阶段，所说的危险物距离以数十海里计，因此所需的准确度约为几分之一海里至数海里。

正如统计数据所示，船舶进港的这一阶段发生事故和灾难的概率相对较低，这也解释了为何对船舶坐标确定精度的请求较低。

需要指出的是，所列系统参数是在理想条件下观测到的。但在实际应用中，存在一些限制这些系统能力的因素，例如岸基雷达的探测距离受到限制（± 75 米）、存在盲区和“无线电阴影”，以及大型船舶对周围小型船舶造成的遮蔽。

对上述信息以及船舶导航工具参数的分析得出以下结论：在船舶进港的第一信息阶段，所列导航设备在理想运行条件下能够令人满意地确保对驶入港口船舶位置进行测定所需的精度。

船舶进港第二阶段。

船舶进港第二信息阶段属于「评估标准」中定义的航程阶段，即「进入港湾以及

通往港湾的航道，以及操纵自由度受限的水域」。根据[15]，「位置允许误差的代价依赖当地条件，其确定由相关管理部门负责」。

显然，在有限机动条件下接近航道灯标门时，需要比第一阶段更高的位置精度。这一说法是有现实意义的，因为航道灯标门处会周期性地发生船舶碰撞。

因此，从信息模块的观点来看，在船舶进港第三阶段确定导航精度时，与第二阶段一样，现有系统能够令人满意地执行其功能，但在船舶上这些系统发生异常运行的关键情境下，必须配备备用系统，以便以至少10–15 l的精度自主确定空间。

船舶进港第四阶段。

这一阶段描述船舶的靠泊系泊过程。船舶载体这一阶段的特点在于，船舶通常在系泊船舶发动机关闭的情况下驶向码头，这会导致船舶几乎完全处于不受控制的状态。因此，安全系泊任务在很大程度上取决于负责监测系泊技术的操作员 [16; 17]。

码头发生的大多数紧急情况，都是由于缺少客观监控船舶驶向码头的技术设备所致。通过分析船舶与码头及其对象发生碰撞的情况，可以断定，人们不仅能够准确掌握船舶相对于码头的位置，还能核算任何工艺过程中最复杂组件的影响。

船舶进港各阶段对航行安全日益提高的需求，不仅要求改进船舶技术设备，更重要的是加强对操作员行动的技术监控 [18；19]。因此，国际海事组织和世界各地海港管理机构近年来积极开展了以下工作：[20]

– 在交通繁忙的区域分隔航道；

– 船舶彼此接近或通过时，必须或自愿进行广播通信的区域；

– 改进港口及其入口的船舶航行管理系统（СУРС），逐步提高对海域航运质量及运输的自动化监控水平；

– 利用格洛纳斯和 GPS 型全球导航卫星系统（DGNS）的监测与校正差分台站，为近岸水域的船舶提供高精度定位手段；

– 在海域沿岸地带实现全球海上遇险与安全通信系统（GMDSS）的连续无线电频率覆盖（消除盲区），并提供全天候可靠的甚高频通信；

– 国际海事卫星组织海上通信系统，能够与位于世界任何区域的船舶进行全球、高效的通信。

作为国际海事组织开展的审查《海上人命安全公约》（SOLAS）第5章“航行安全”工作的一部分，预计近期将在海上船队中引入一种全新的自动信息（识别）系统（AIS）。全球投入使用的第一版 AIS 具备三项主要功能：

– 船舶在海上需要相互避让时，自动交换航行数据；

– 船舶在管制区域航行时，将船舶及其货物数据传输给沿岸服务机构，并发送强制性消息；

– 将航行数据从船舶传送至沿岸船舶交通管理系统（СУДС），从而在系统作用范围内实现更加准确、可靠的引航。

因此，自动识别系统是一种海上导航系统，其中船舶之间以及船舶与岸基服务机构之间进行的双向自动化信息广播，用于传递每艘船舶的呼号和名称（以便识别船舶）、坐标、参数（尺寸、负载、吃水等）、航次目的及运动参数（航向、速度等），以解决船舶碰撞预防问题、监测航行制度的遵守情况，并全面监控受控海域的安全状态。

在发展AIC网络的最重要组成部分中，应考虑引入全球导航卫星系统（ДГНСС）差分子系统服务，

例如美国GPS系统；由差分子系统添加这些服务，可解决以水下精度（d5 M）高精度确定船舶位置的问题。

因此，尽管高精度导航系统（GNSS、格洛纳斯、GPS）以及船舶自动识别手段（AIS）已得到广泛应用，确保系泊安全的问题仍存在于船舶进港的最后阶段 [16]。系泊的第四阶段最为复杂且责任重大，需要对船舶接近码头的过程进行不间断的无线电电子监控，并且必须将船舶与码头之间的距离测量精确到不足一米。

文献分析表明，改进的主要备用系统是改进不同类型的智能系泊信息系统。需要考虑到，每项系泊工作都因船舶的天气、气候和结构特点而各有不同 [21], , 无论处于何种情境、紧急情况还是装卸作业：

– 靠泊漂航船舶；– 靠泊航行中的船舶；– 靠泊
锚泊船舶；– 在港口船尾靠泊码头。

自动化系泊系统可优化码头运营，并确保港口作业效益最大化。自动模式下的系泊可确保船舶可靠系固，并在技术安全和环境安全方面具有优先性。这类系统的信号功能以实时模式运行。

为深入了解自动化系泊和对接过程，可将主要自动化系泊和对接装置分为磁力式、激光式和真空式。

分析靠泊作业可知，尽管已采取的措施降低了事故率，但安全问题仍然突出，原因有很多，其中包括向驾驶员提供的当前系泊参数信息不足。为了改进管理并作出适当的解决方案，驾驶员需要特殊作业靠泊技术设备，这些设备利用测量数据获取靠泊船舶位置的实际参数，并通过系统进行处理；该系统接收并处理当前

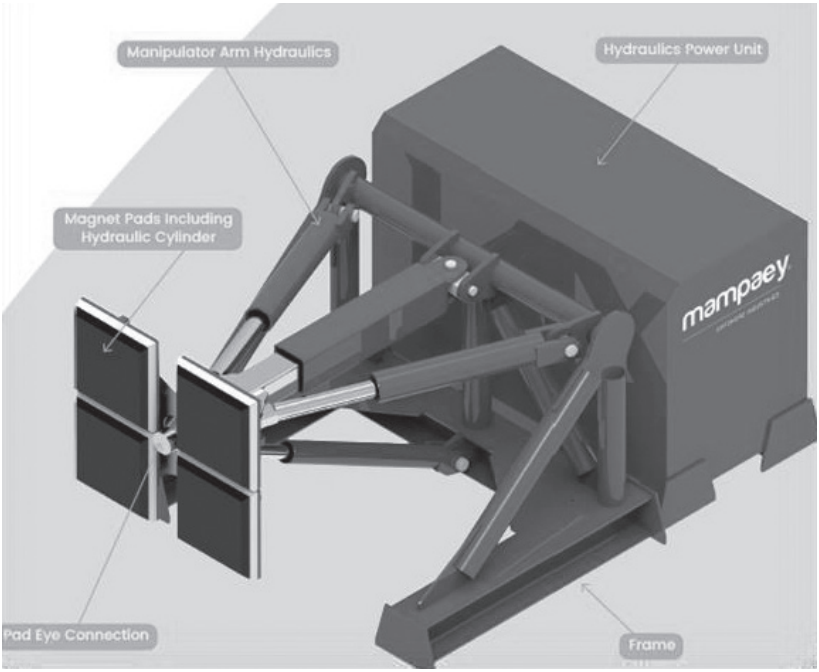
关于这些参数变化的信息，并以视觉形式向驾驶员呈现危险情况，同时通过声音信号和彩色信号发出警示。这种解决方案的一种技术实现方式可以是系泊分析系统，用于监测船舶驶近码头的过程并预警当前环境——例如安全指示器。它是一种技术工具，能够接收、处理和存储系泊所需的信息。根据所开发的预测性数学模型和软件，该设备应在指示器屏幕上显示数据处理结果，既以概率图景的形式呈现船舶驶近码头的过程，也以剩余时间和预测距离的形式向驾驶员提供建议书。这些需求在更高的技术层面上适用于无人船航运。

下面来看看无人船航运所采用的系泊系统特性：

磁性自动系泊系统（图2）根据各种动态作用监测这一过程。该系统由成对布置在船首和船尾的固定锚组成，锚上配有磁性垫，可牢固地吸附在任何船体上，无论船体是平直还是弯曲、涂有油漆还是已遭腐蚀。

磁性垫可沿船体移动，并适应高度变化。磁性系统有严格的限制：运营成本高（能耗、专业维护），且会给船体增加额外负载（风力可能导致船舷变形）——磁性垫必须安装在肋骨区域，这意味着需要针对具体船体进行调整。其可靠性也令人存疑，因为断裂的缆绳可以更换，而故障的磁性垫却无法替换。该系统适用于船舶快速作出决策的场景——渡船。油轮禁止使用自动装载系统。这项禁令源于：当船体在波浪作用或附近船舶经过时沿码头纵向“拖曳”，系统会改变倒缆和纵缆的负载，并通过缆绳张力控制系统进行调节。这种作用会导致船体变形。

许多公司都在开展系泊作业中真空技术的应用及其研发，致力于研发系统化的系泊技术。



P图 2.「智能码头锁定系统」的系泊系统结构

真空自动系泊系统（图3）使用真空垫而非缆绳将船舶固定在码头旁。每个真空垫都有经过监测的工作载荷，可确保船舶与码头之间可靠的物理连接。真空垫在国际船级社挪威船级社（DNV）的监督下进行测试和分级；测试结果结合现代三维硬件设备，显示出自动系统的行程范围和弹性，其水平与缆绳系泊相当。承载保持力信息来自对真空度以及船首和船尾系缆桩横向力的测量。由于真空系统能比交叉缆绳更靠近码头岸壁固定船舶，因此具有良好的码头作业性能。通过实时获取所有系泊条件的信息，操作员可以全面控制船舶的系泊状态。

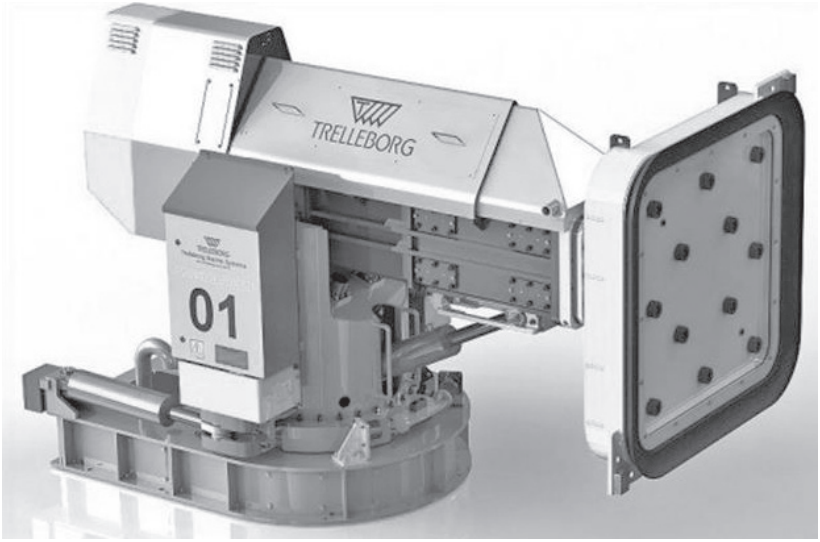


图3. 真空系泊系统“Auto Moor”

这类系统效率很高。数千年来，人们一直使用缆绳为船舶系泊，但多年来，这一过程并未变得更安全。

自动真空系泊系统只需按下一次按钮即可解决问题，而且不到1/4分钟就能完成操作。这类系统能让各种尺寸的船舶在有涟漪和长波的港口中稳稳停泊在同一位置。

激光系泊系统（图4）属于仪器系统，利用每台测距仪持续计算与船舶之间的距离。系统根据所得数据描绘船舶可视位置，并计算其相对于码头的角度。除了距离和角度，系统还会计算船首和船尾靠近或远离码头的速度。如果船舶靠近至较近距离，且速度超过设置中规定的速度，系统会立即通过界面指示以及码头上的警报器发出警报。

在评估系泊系统的特性时，无人船开发者倾向于使用激光系统。系泊第二阶段的主要特点是船舶向码头靠近。系泊过程中，船舶以非零速度与泊位接触往往不可避免，这种情况称为碰撞。

碰撞分为有意碰撞和意外碰撞，后者发生于船舶与泊位、其他固定对象或停泊在一定距离处的另一艘船接触时 [15]。由于船舶尺寸固定，避免船舶撞上码头的唯一方法，就是仔细测量船舶接近时的速度以及与码头的距离。通常由拖船将船舶移至码头 [15; 16]。从接近阶段开始，拖船便使船舶右舷与码头平行。拖船的任务包括将船舶引至靠近码头的位置，并保持其处于该位置，直到系泊缆被带上并收紧。船舶靠泊是一项危险的技术操作，要求船舶驾驶员具备专业技能并及时采取行动，同时操控船舶驾驶、运输和拖船设备，使船舶靠近码头 [15; 16]。

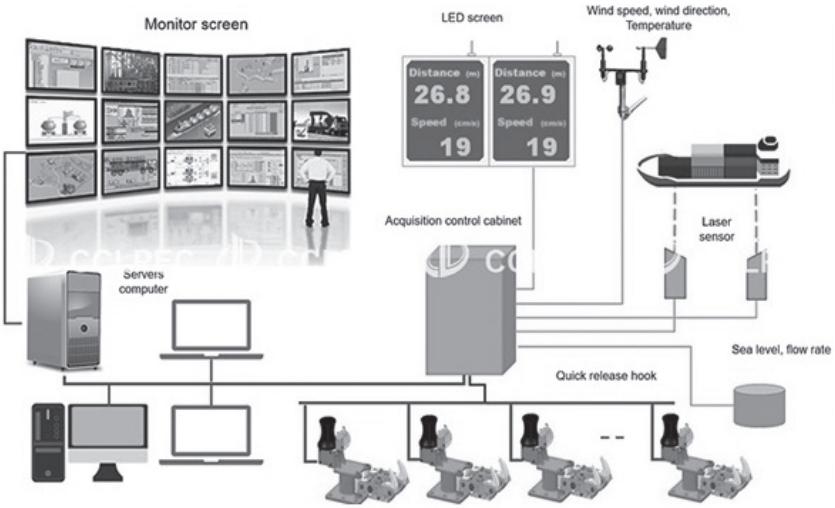


图4. 激光系泊系统概念

激光系统的显著特征是：在垂直平面内扫描激光束，并获取距离轮廓，随后进行处理，确定与码头或其他对象之间的距离。如果分析激光测距的特点，就会发现，在码头使用测距设备已显示出其可靠性、易操作性以及最低限度的维护需求。然而，测距系统在码头的运营中也暴露出其局限性：

它无法解决港口管理部门在系泊过程中最常制定的所有违规问题。因此，有必要更深入地研究对靠泊过程提供信息支持的可能性。分析表明，为确保系泊安全，这些系统的信息潜力尚未得到充分利用。事实证明，由激光系统软件构成的激光系泊系统能够扩展对系泊过程的信息支持。该系统基于两个传感器测得的距离，计算相对于该对象的速度和加速度，并且还可以确定船舶的旋转中心。通过在设备中应用倾角传感器，在计算过程中可以补偿船舶摇摆以及船舶和码头的各种尺寸参数。这些系统能够实时进行精确测量，获取船舶的距离和速度数据。由大型船舶激光靠泊系统（ЛСШКС）测得的船舶接近码头参数数据流，通过用于连接这些技术设备的模块接口传输至遥测设备。当前信息经由发射天线传入安装在船舶上的无线电设备。经过转换以便进一步处理的信息通过接口传入计算单元，在其中计算船舶整个系泊过程中的参数。指示器提供以下可视化模式：

1. 显示计算得出的船舶与码头接触时超速概率。

2. 船舶接近码头的时间线。

3. 结合显示船舶实际速度以及船舶与码头接触时的超速概率的模式。

4. 自动模式下启动对当前情境的分析，并对船舶驶近码头进行预测评估。信息量最大的是自动模式下启动对当前情境的分析，并对船舶驶近码头进行预期评估，这样可以提醒驾驶员，船舶首次接触码头时可能出现何种情境。

“Trelleborg”、“Strainstall”、“A. & Marine (Thai) Co., Ltd.”和“MARIMATECH”是全球自动化

系泊系统的主要开发商。由“Trelleborg”开发的“Smart Dock”系统由两个激光传感器、一个控制器和一台中央个人计算机构成。有关靠泊过程的数据，以及达到风险临界限值时发出的警报信号，会通过多种方式呈现，其中包括码头上的大型屏幕。控制中心的个人计算机会记录数据，并以图形方式显示整个过程 [22]。

“MARIMATECH”系泊系统使用安装在码头上的两台激光器，测量船舶靠近一侧的距离，随后计算船舶的速度和倾斜角。“MARIMATECH”系统的概念基于远程数据传输。数据会显示在安装于码头的数字大屏幕、无线设备（如便携式寻呼机或袖珍个人计算机）以及调度室的计算机显示器上。

“Strainstall”的“Dock Aler”激光系泊系统使用安装在码头端部两侧的眼安全激光器模块，测量船首至船尾相对于码头的距离，并提供船舶相对于码头的速度和倾斜角数据。这些激光器采集的数据会传送至中央管理系统，可在调度室显示，并传送至便携式寻呼机、袖珍个人计算机和／或显示屏 [23]。

结论：全球大型企业集团和研究公司正努力将无人船舶驾驶的概念变为现实。为此，必须将船舶安全运营与船旗国法律以及国际管辖范围内港口主管机关的解决方案结合起来。无人船舶驾驶中采用的创新技术，引发了航运发展领域期刊、会议和研讨会上的讨论。在航运业，一项根本性变革就是实现无人船舶驾驶概念项目。这一方向的优势之一，是通过使用创新技术提高航行安全。

本文综述了航运自主系统的管理层级，重点讨论系泊系统，并介绍了真空、激光和磁性系统的特征。无人船舶驾驶倾向于使用激光系

泊系统，以扩展系泊信息支持能力。该系统提供剩余时间和预测距离等形式的建议书，从而降低出错概率。总之，系泊安全性得到提高。

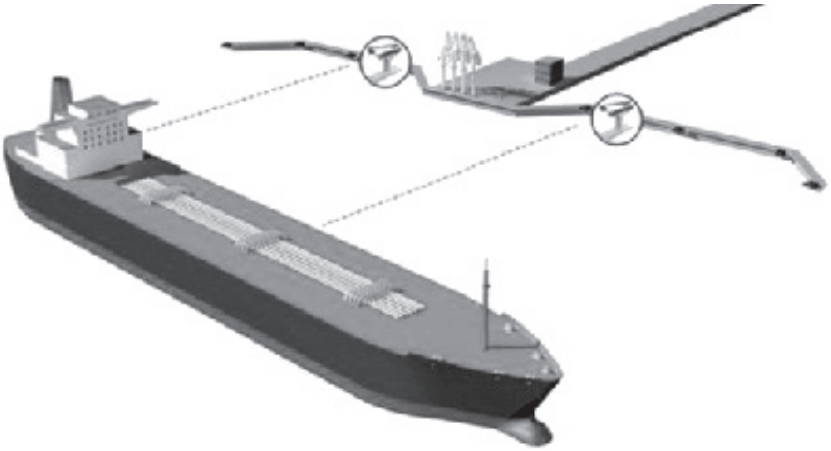


图5.「Dock Aler」对接系统 [23]

参考文献

1. Pipitsoulis C. 欧盟 eMaritime 倡议——单一窗口：展望不久的将来。*Logious* 会议。鹿特丹，2010年。 2. Пунченко Н. О. 水上运输无人装备的实践学， автоном系统风险。信息技术与计算机建模 *ITKM-2021*：国际科学实践会议。2021年7月5日至10日，伊万诺-弗兰科夫斯克。伊万诺-弗兰科夫斯克，2020年。第35–36页。 3. Strelbitskyi V., Punchenko N., Tsyra O. 塑造海洋产业的未来，作为适应创新社会的条件。智能系统与信息技术 ISIT-2021。2021年9月13日至19日，敖德萨。敖德萨，2021年。第116–120页。ISBN 978–617–7711–43–7。 4. 国际海上人命安全公约，SOLAS 74/88。圣彼得堡中央海事研究设计院股份公司，1996年。720页。 5. 国际海员培训、发证和值班标准公约。1978年公约及1995年规则。封闭式股份公司中央海洋渔业研究设计院，1996年。552页。

6. 国际防止污染公约 MARPOL 73/78。封闭式股份公司中央海洋渔业研究设计院，1999年。720页。 7. 国际搜寻与救助公约 SAR-79。封闭式股份公司中央海洋渔业研究设计院，1998年。64页。 8. 国际航空和海上搜寻与救助手册。封闭式股份公司中央海洋渔业研究设计院，2001年。448页。 9. 港口国监督程序（国际海事组织第A.787(19)号决议）。封闭式股份公司中央海洋渔业研究设计院，2000年。237页。 10. 1972年国际海上避碰规则，伦敦，国际海事组织，1990年。56页。 11. 无人船舶——现实与前景：由俄罗斯交通大学法学院（莫斯科国立交通大学）海商法系与国际海商法协会联合举办的“圆桌会议”成果论文集，В. Н. Гуцуляк 编。莫斯科：俄罗斯交通大学法学院（莫斯科国立交通大学），2020年。41页。 12. Титов А. В., Баракат Л. 海洋智能技术。无人船舶的技术发展与应用前景。2018年。第94–104页。 13. Пунченко Н. О. 迈向工业4.0：信息技术、建模、人工智能、自动化。神经网络对船舶漂移预测可靠性的影响：船舶驾驶安全的一个方向：С. В. Котлик 主编的集体专著。敖德萨：Астропринт，2021年。544页。ISBN 978–966–927–702–2。 14. Jorgensen J. 自主船舶：美国船级社的船级社视角。海洋委员会技术、安全与安保讨论议题，2016年。 15. Лицкевич А. П., N. Yu. Rostorgueva. 具有时间备用的船舶运动控制系统可靠性。《高等院校学报：北高加索地区》。技术科学。水上运输问题。第1部分。顿河畔罗斯托夫：俄罗斯国立大学，2004年。第118–120页。 16. N. Yu. Rostorgueva, L. N. Yusupov, V. V. Demyanov. 用于评估人为因素对船舶靠泊影响的统计数据库。亚速海—黑海盆地运输与物流系统发展战略：与第六届区域科学技术会议“海上航行安全问题、海上运输的技术与商业运营”分会会议联合举办的国际科学技术会议论文集。新罗西斯克：以Ф. Ф. 乌沙科夫海军上将命名的国立海事大学，2007年。第175–177页。 17. N. Yu. Rostorgueva, L. N. Yusupov, V. V. Demyanov. 通过对趋势进行多项式逼近，合成船舶靠泊速度扰动向量。科学论文集。新罗西斯克：以Ф. Ф. 乌沙科夫海军上将命名的国立海事大学，2007年。第12辑。第97–100页。 18. N. Yu. Rostorgueva. 激光测距系统靠泊参数统计数据库分析与定量评估。论文集

学术论文集。新罗西斯克：以Ф. Ф. 乌沙科夫海军上将命名的国立海事大学，2007年。第12辑。第100–104页。19. N. Yu. Rostorgueva. 概率模型中“人—机器”系统发生故障时船舶靠泊速度调节循环时间基准分布的统计研究。学术论文集。新罗西斯克：以Ф. Ф. 乌沙科夫海军上将命名的国立海事大学，2007年。第12辑。第94–97页。20. N. Yu. Rostorgueva、L. N. Yusupov、V. V. Demyanov. 在扰乱稳定性的干扰条件下船舶靠泊过程中事故情境的计算机模拟。学术论文集。新罗西斯克：以Ф. Ф. 乌沙科夫海军上将命名的国立海事大学，2007年。第12辑。第92–94页。21. M. V. Burkhanov、G. G. Ermolaev 等。《远洋船长手册》。莫斯科：运输出版社，1988年。248页。22. SmartDock®激光靠泊辅助系统 [电子资源]。URL：http://www.trelleborg.com/en/marinesystems/products--solutions--and--services/docking--and--mooring/docking--aid--system/smart--dock--laser.（访问日期：19.07.2021）。23. 码头监测与管理系统 [电子资源]。URL:http://www.strainstall.com/files/9214/9693/6079/43917_James_Fisher_Jetty_Monitoring_V1_WEB. pdf（访问日期：25.07.2021）。

逻辑控制算法开发中的佩特里网自动综合

Гурський О. О.

本文探讨了一项与佩特里网自动综合方法开发相关的重要任务。开发这些方法的重要性源于智能系统的发展，这些系统能够实现劳动密集型过程的自动化。

提出了一种基于人工神经网络运行的佩特里网及特定逻辑控制算法自动综合原理。文中给出了在佩特里网综合过程中改变网络神经元间连接权重的方法的数学描述。

在 *Matlab/Simulink 2012a* 编程环境中，进行了与人工神经网络和 *Petri*网协同运行相关的实验。借助 *Statflow*图，在 *Matlab/Simulink* 环境中展示了 *Petri*网的运行。实验得出了用于实现 *Petri*网组合的人工神经网络的时间特性。根据时间特性，

确定了采用人工神经网络实现 *Petri*网自动组合的基本可行性。

最终，解决了一个与开发神经网络和*Petri*网协同运行系统有关的任务，用于生成算法和顺序计算。由此，进一步发展了*Petri*网自动综合方法，以及基于神经网络运行的特定算法开发方法。

在相关科研工作中，解决了开发佩特里网自动综合方法这一重要任务。开发这些方法的重要性源于智能系统的发展。这些系统能够实现劳动密集型进程的自动化。

提出了佩特里网自动综合原理，以及基于人工神经网络运行、用于整定复杂控制系统的特定算法的实现方法。介绍了在佩特里网综合过程中改变网络神经连接系数的方法的数学描述。

实验在 *Matlab\Simulink 2012a* 环境中进行。这些实验围绕人工神经网络与佩特里网的协同运行展开。佩特里网的运行通过 *Statflow* 图在 *Matlab | Simulink* 环境中呈现。

通过实验，我们获得了用于实现佩特里网组合的人工神经网络运行时间特性。基于对时间特性的分析，确定了使用人工神经网络实现佩特里网自动组合的基本可行性。

本研究解决了构建神经网络与佩特里网协同运行系统的问题，该系统用于生成算法和执行顺序计算。因此，佩特里网自动综合方法以及基于神经网络运行来开发特定算法的方法得到了进一步发展。

佩特里网作为一种应用数学工具，在离散动态系统或逻辑动态系统的建模与分析领域颇为知名。此外，佩特里网也被视为表示并行算法和计算的一种形式 [1]。

佩特里网自动综合原理的开发，其重要性体现在逻辑控制算法开发过程的自动化领域。例如，值得一提的是所谓的“智能蚂蚁”问题，相关研究见 [2；3]。蚂蚁通过试错和突变构建自己的行为自动机。但毫无疑问，算法综合过程具有智能性——

质，在这种情况下，可以采用与人工神经网络及其学习算法相关的相应智能技术 [4]。

因此，我们解决了一个任务：基于某种智能技术，研究算法及相应Petri网组合的合成原理。

本文介绍了某种智能系统发展到应用人工神经网络的阶段，以及与Petri网自动综合相关的人工神经网络训练算法。

众所周知，James Peterson在其著作[5]中就指出了自动综合的可能性以及自动构建Petri网的方法的存在。此后，出现了一系列关于Petri网自动生成与组合的学术论文，其中阐述了基于特定方法构建Petri网的特点 [6–9]。类似地，文献 [10]，也提出了一种方法，其中Petri网自动综合是基于离散-连续网络的可达性验证方法实现的[11; 12]。如果在变量空间中验证某一状态可达性的方法，是将离散-连续网络（离散-连续网）转换为一个变迁（Petri网的元素），那么Petri网自动综合的过程则恰好相反：由一个变迁转换得到一个Petri网，该网表示混合系统（具有可控结构的系统——СКС）某一状态的可达性[13; 14]。

若存在相应的逻辑控制算法，就可以确保达到СКС的状态。该算法可实现СКС的运行*k*-过程 $\sum_{I+1.}$ 在这种情况下，必须存在一系列变迁发射序列，代表系统模型。因此，ДБ网工具可基于网约简规则研究系统可达性，而网约简规则和可达性验证方法在开发合成Petri网的成形自动机时发挥着重要作用。

接下来，我们将探讨如何基于ДБ网可达性验证方法生成算法。

基于离散-连续网络可达性验证方法的算法构建。通过约简ДБ网的连续部分与离散部分来验证系统的可达性，其过程是

按照特定规则将网络“折叠”为宏变迁。因此，在构建算法时，也可以展开离散 Petri 网——以与折叠为宏变迁类似的方式构建。

为构建表示逻辑控制算法的佩特里网，制定了以下关联矩阵*W*的生成规则：

– 行必须以*0*或*+1* 开头，且各行中的值必须交替出现——*0, +1, 0, -1, 0*，依此类推；

– 某列中至少出现一个*+1* 时，同一列中也必须至少出现一个*-1*；

– 一行中不能连续出现两个或更多*+1* 或*-1*，即使中间隔着 零也不行；

– 为避免生成过于复杂的算法，每行中，*-1.+1*这样的数值对不得超过两组。

根据上述规则生成关联矩阵的算法片段，以 Stateflow 状态图的形式展示于图 1。由图 1 可见，该自动机由并行状态 StateC4、StateC5、StateC6 ... StateC*N*构成，其中*N*为所生成关联矩阵的行数。从子状态 State19 或 State24 转换到子状态 State20 或 State25，即出现*–1,* 时，同时会从子状态 State22 或 State26 转换到子状态 State23 或 State27（同一列中出现*+1*）。

需要指出的是，从 State19 或 State24 变迁至 State20 或 State25，可能根据条件 data01> *-10*，伴随延时时间，也可能不带条件。在这种情况下，将形成一个Petri网，其中存在具有以下触发条件的变迁：

$$\forall p_i \in I(t_j) : \mu(p_i) = 1 \,\&\, J_{0j} < g \,\&\, t < t_k ,$$

$$\forall p_i \in I(t_j) : \mu(p_i) = 1 \,\&\, t < t_k ,$$

其中，$\mu(p_i)$ — 变迁 t_j输入库所的标识；g — 某个系统运行质量准则 J_{0j} 的极限值；t_k — 变迁触发时的延时时间。

具有不同触发条件的变迁，会根据算法生成信号 data14 或 data15 等的值来选择。算法生成信号 *V1* .... *Vn*在确定用于生成佩特里网关联矩阵的自动机状态动态方面发挥着重要作用——

佩特里网关联矩阵。 *+1* 中某个单元的出现取决于信号*V1* .... *Vn*的值。例如，从状态 State22 到 State23 的变迁可以在条件 [data24>0.5& data15>2.5]，下发生，其中 data24 是 Stateflow 图中的局部变量，而 data15 是信号 *V1*的值。

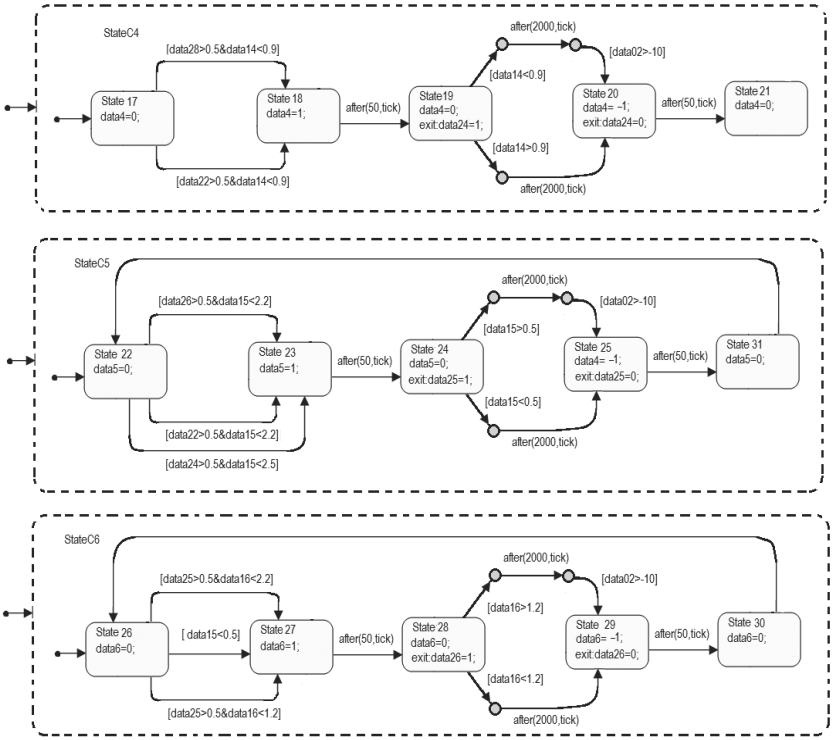


图1. Stateflow图，表示用于构建关联矩阵（佩特里网元素之间的关系）的自动机

因此，该 Stateflow图能够表示大量各种各样的算法，甚至包括专家可能无法预料的算法。算法的创建取决于信号 *V1* .... *Vn*，如果算法不令人满意，还可以调整这些信号。

如图2所示，根据设定的信号 *V1* .... *Vn* 以及指标值——J_{01}, J_{02}, J_{03}，关联矩阵生成自动机

生成数值序列，由此构成佩特里网关联矩阵。

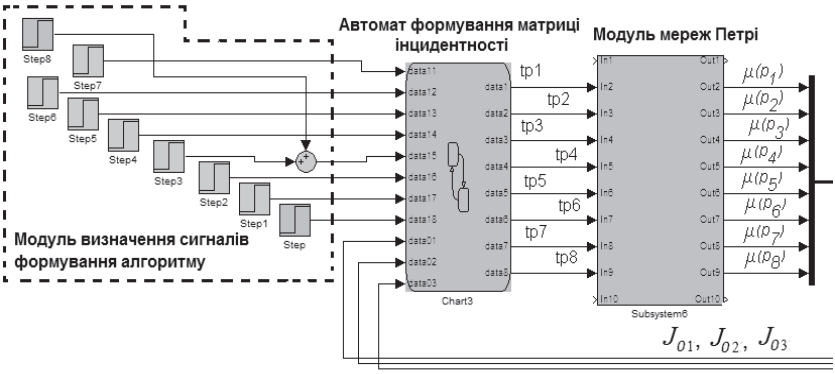


Рис. 2. 展示Petri网生成模型的结构图

然而，在构建佩特里网和确定某种控制算法时排除专家，会导致合成的佩特里网缺乏实用性。因此，文献[15] 提出了一种基于神经网络运行的佩特里网自动组合方法，该方法体现了一种用于确定某种逻辑控制算法的智能技术。

之后，信号确定模块*V1* .... *Vn*将由神经网络表示，而图1所示的Stateflow图可以用相应的同步运行的Petri网表示。

基于人工神经网络运行生成算法。因此，基于人工神经网络运行的Petri网综合，构成了Petri网生成与自动综合的一个领域 [5; 8]。如图3所示，在这种情况下，神经网络按照反馈原理与同步运行的Petri网进行交互。通过这些同步运行的Petri网，可以形成一种组合，用以表示人工神经网络所实现的特定动作算法。神经网络输出层的神经元间连接系数矩阵，与Petri网的关联矩阵存在一定的相似性。因此，神经网络会生成

与综合所得Petri网的关联矩阵相似的输出信号。

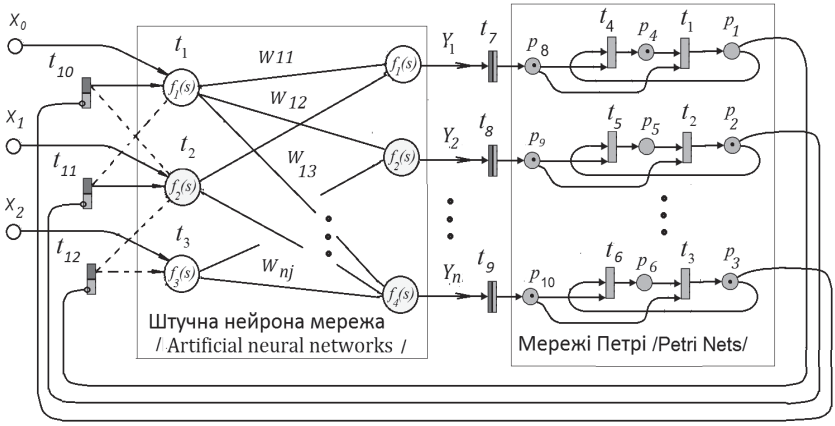


图3. 人工神经网络与Petri网的综合 схем，用于在系统中构建相应的逻辑控制算法，w_{11}... w_{nj}—神经元间连接系数；t_7...t_{12}—实现人工神经网络与Petri网之间关系的离散-连续变迁

Petri网的运行可用方程描述：

$$M_k = M_{k-1} + |A| \cdot U_{k-1},$$

其中| $_0$(),.... ()|^T $_k$$_n$$Mpp$=μ μ — Petri网在第 k 步的标识向量；$_{-1}$ $_k$$M$—Petri 网在第 k–1 步的标识向量；| |A — 关联矩阵，用于确定网络中库所与变迁之间的关系；$_{-1}$ $_k$$U$—控制向量。

在这种情况下，如果( ) $_i$ =lpμ，其中i=l...n，则相应参数的值会发生变化，例如在调节系统时。根据图3所示的方案，神经网络表示表达式的一部分| | $_1$ $_k$$A$ U · $_-$，并生成| |A 合成的Petri网的关联矩阵。

如果某个系统运行时所采用的动作算法不令人满意，则应指出在佩特里网的哪个变迁处发现了系统错误。这对于重新调节神经网络是必要的。

这种Petri网自动综合原理已在科研工作 [15–17], 中多次得到探讨，其中展示了各种实验，以验证这种方法在原理上适用于构建特定算法。

，以验证这种方法在原理上适用于构建特定算法。

Petri网合成可以基于Petri网的组合与分解，因为任何Petri网都可以由同类型的功能子网[18]组成。如图4所示，对Petri网N_1进行分解时，可以提取出执行不同逻辑运算（或、与、条件转移操作）的功能子网。

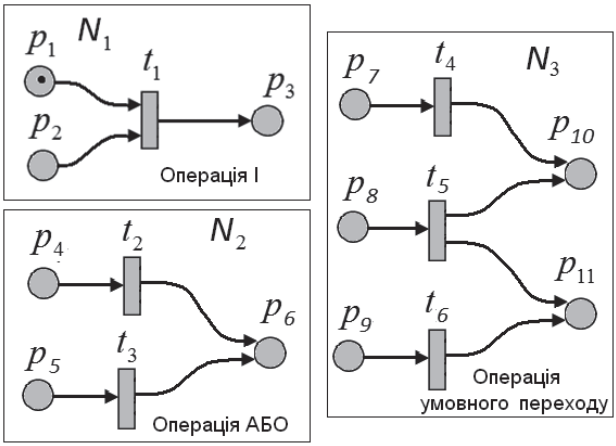


图4 。将Petri网N分解为功能子网N_1, N_2, N_3

实现功能子网之间的关系时，会形成一个Petri网，用以表示特定的逻辑控制算法。在已有研究中，Petri网合成通过对特定功能子网进行组合与分解来实现[18；19]。

然而，这类功能子网可以与人工神经网络协同运行。总体而言，与功能子网交互的人工神经网络可以将不同Petri网的运行表示为各个子网运行的组合。

因此，根据图3所示的结构，ДБ网包含由离散-连续变迁连接的离散子网t_i^3、t_i^4，其中$i=1...N$ [13]。每个这样的子网都是一个佩特里网，可以独立于整个ДБ网进行考察。

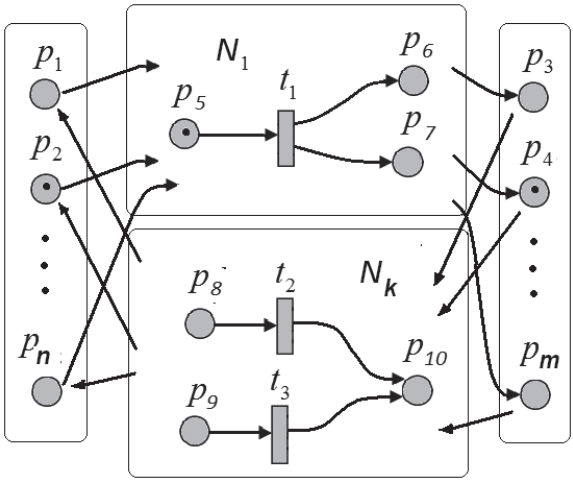


图5。 功能子网相互关联时佩特里网的构建

神经网络生成信号 $Vs=|V1 .... V5|^T$，并据此控制佩特里网中标记的移动。标记的移动具有协调一致的特性。例如，标记从位置P_2 移出时，位置P_3.会出现一个标记。

佩特里网中标识变化的协调特性，使得可以将这些网络组合成一个统一的佩特里网。如图6 a所示，要组合佩特里网，需要合并在特定时刻同时发生的变迁。图6 a中，变迁t_1, t_3, t_7, t_8, t_9 通过虚线曲线相连。例如，变迁t_3, t_7 合并为一个变迁$t_{3,7}$，，在特定情况下，它会于t_2时发生。通过这种合并，可以将不同的网络转换为一个统一的佩特里网。

根据 Petri网中标记的航行，生成 Petri网关联矩阵的值；同样，Stateflow 图中的子状态也会依次激活，其片段如图 1 所示。如图 6 б 所示，随着每一步的推进，都会根据关联矩阵的生成过程构建 Petri网。需要指出的是，在某些情况下，转换 t_1的出现是错误的，因为例如标识的变化导致了系统运行质量准则发生不期望的变化。在这种情况下，某个自动调整模块应

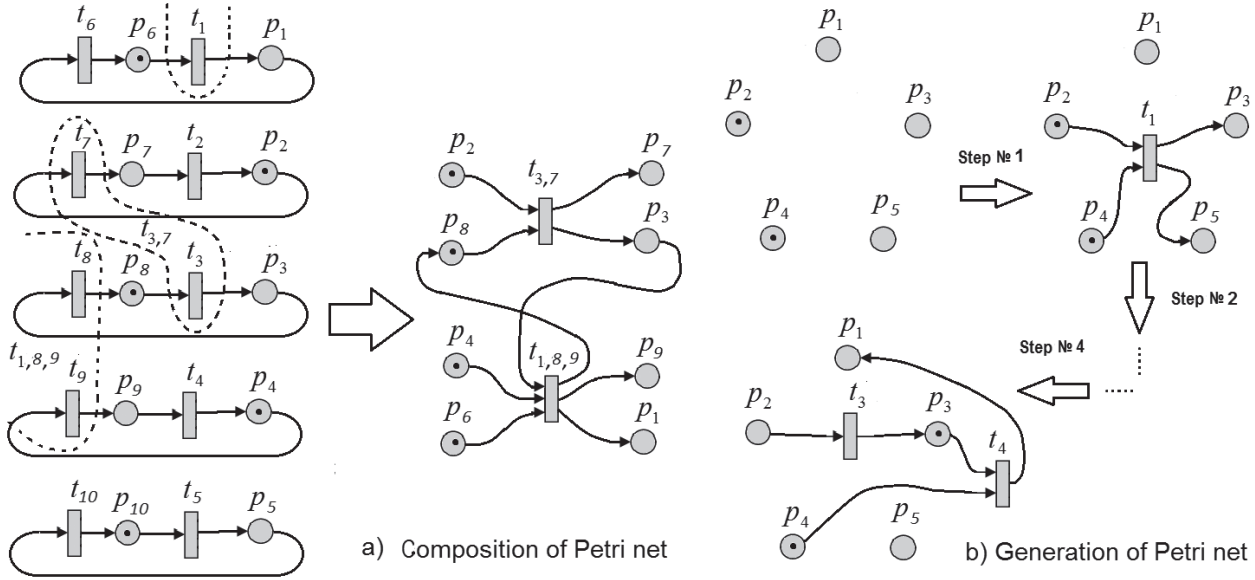


Рис. 6. Візуалізація автоматичного формування мережі Петрі

随机改变相应的神经元间连接系数，之后通过这些改变即可形成所需的标识动态特性，使其与佩特里网相对应，例如该网在第 4 步构建完成。

具有同步运行的佩特里子网的神经网络，其算法的形成通过改变神经元间连接系数来实现。神经元间连接系数的改变会导致相应算法的调整。

在这种情况下，某个算法存在于某个局部人工神经网络中。

应当注意，在综合逻辑控制系统时可能会有若干标准输出算法，因此可以划分出若干局部人工神经网络，如图 7 所示。

在算法分类过程中，会启动相应的局部神经网络，该网络将直接参与特定算法的构建。

在这种情况下，Petri网自动综合可以分为两个阶段。第一阶段，从可能的方案中选择特定算法及相应的Petri网；第二阶段，对选定的算法和Petri网进行调整。该算法的构建顺序可用图8表示，其中展示了Petri网合成的相应阶段，该网络用于表示所构建的算法。

图8所示的这两个阶段可以通过人工神经网络及其训练来实现。在这种情况下，需要构建一个智能系统，用于在Petri网自动综合与组合过程中形成逻辑控制算法。接下来，需要给出该智能系统的结构图，并确定Petri网自动综合中人工神经网络的训练方法。

自动综合Petri网时人工神经网络的调节算法。

人工神经网络作为一种包含大量计算单元——神经元的计算电路，在采用特定方法改变神经元间连接权重时，可以表示某种智能系统。神经网络学习过程中发生的这种神经元间连接权重变化，能够在智能的表现中发挥重要作用

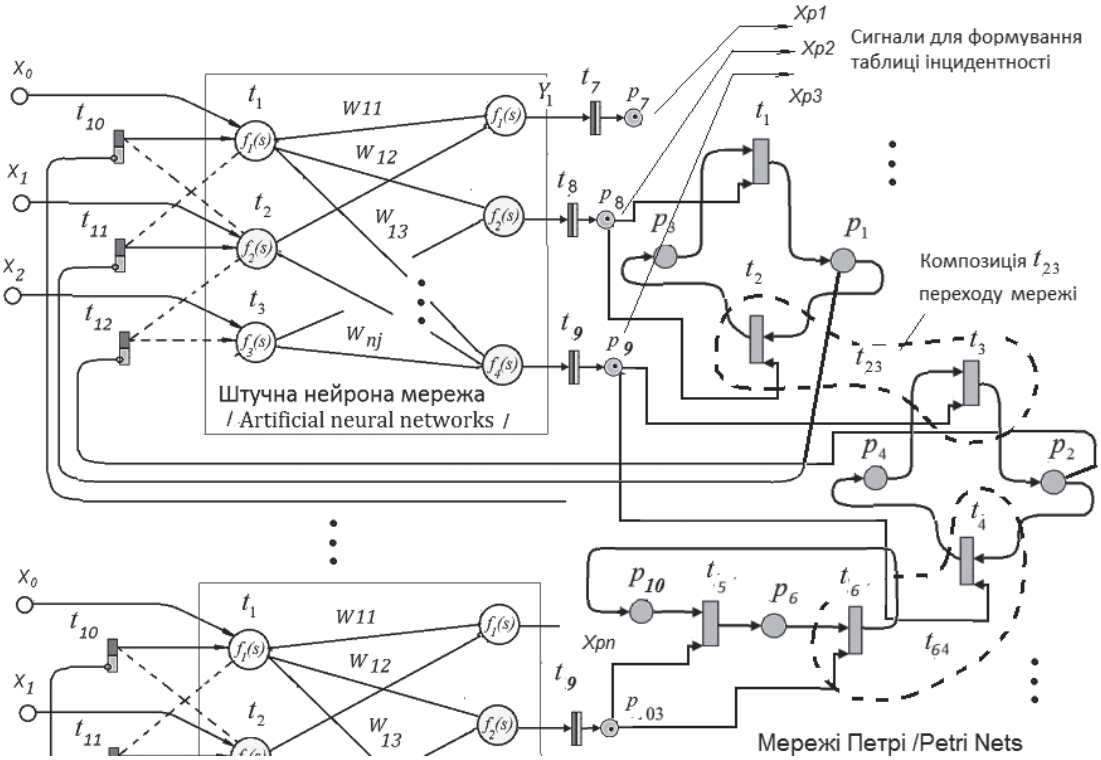


Рис. 7. Фрагмент схеми, що представляє візуалізацію автоматичного формування мережі Петрі на основі функціонування

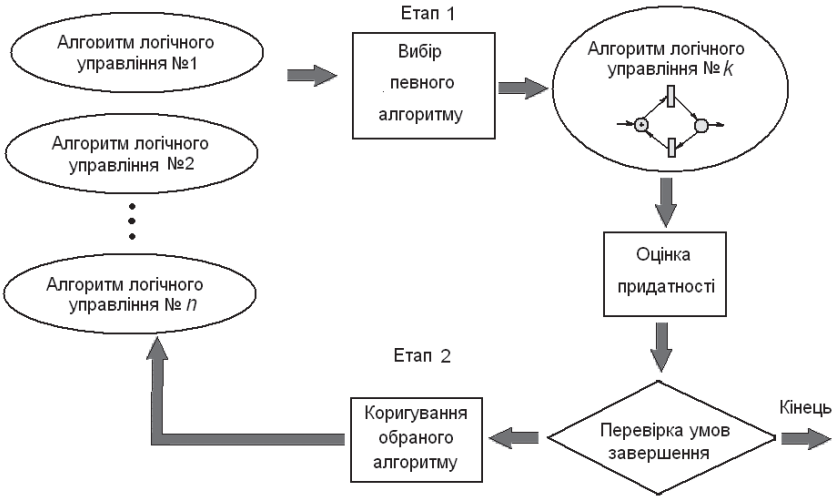


图8. 逻辑控制算法的生成及相应 Petri网综合示意图

神经网络在解决特定任务时的特点。在某些情况下，这些任务可能与Petri网的自动综合以及某些对象逻辑控制算法的综合有关 [3; 6]。

Petri网的自动综合与组合需要使用相应的特定方法。然而，要使所构建的Petri网适用于解决特定任务，就必须采用能够取代专家、用于构建特定算法的智能技术。例如，在构建各种多级自动控制系统的调节算法时取代专家 [20]。

佩特里网自动生成过程中神经网络的运行特点。首先确定，佩特里网自动生成应在神经网络运行过程中进行，该网络决定了为某个对象构建控制算法的智能技术。

这种神经网络是多层前馈式网络。神经网络的每一层都承担特定的功能。神经网络的第一层负责分类

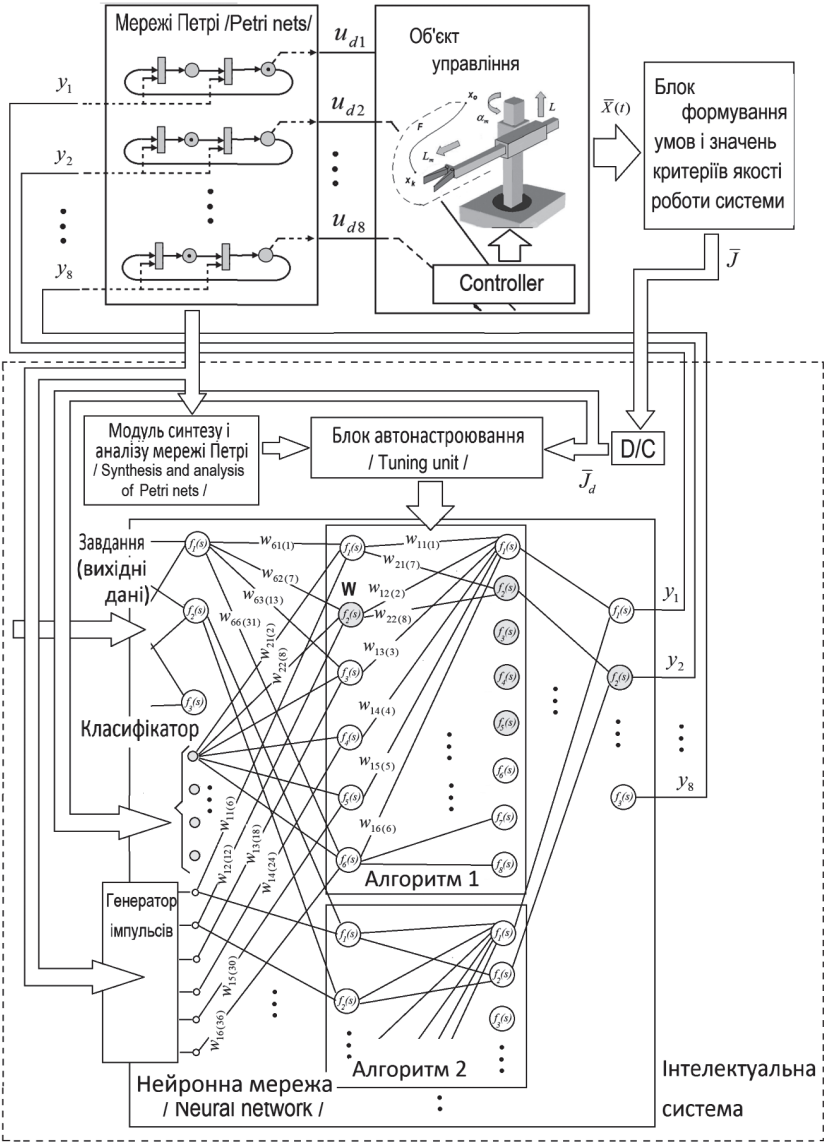


图 9. 基于人工神经网络运行的、在佩特里网自动组合过程中生成逻辑控制算法的系统简化结构图

可能的算法。内部层确定管理算法。输出层负责生成特定的Petri网关联矩阵，该矩阵表示对象的逻辑控制算法。如图9所示，可将神经网络划分为若干扇区，每个扇区代表一个特定的管理算法及相应的Petri网关联矩阵。由于算法的生成表现为逐步、分阶段的过程，因此算法生成的每一步都伴随着某个神经元的激活，该神经元称为初始神经元。最先激活的初始神经元可称为指令神经元，因为在其激活后，局部神经网络便开始运行。在算法分类阶段选择并激活指令神经元。此类分类过程也可借助人工神经网络实现。需要指出的是，每个相应的局部神经网络扇区中都存在起始神经元W。重新调节与初始神经元相关的神经元间连接权重系数，会对相应算法进行修正，前提是该算法不满足特定需求。

神经网络作为计算电路，通过神经元间连接系数集合定义佩特里网关联矩阵(w_{ijk})，这些系数与初始神经元相关。图9所示网络的关联矩阵如下：

$$
|W| = \begin{array}{c|cccccc}
 & t_1 & t_2 & t_3 & t_4 & t_5 & t_6 \\
p_0 & w_{11(1)} & w_{12(2)} & w_{13(\#)} & w_{14(4)} & w_{15(5)} & w_{16(6)} \\
p_1 & w_{21(7)} & w_{22(8)} & w_{23(9)} & w_{24(10)} & w_{25(11)} & w_{26(12)} \\
p_2 & w_{31(13)} & w_{32(14)} & w_{33(15)} & w_{34(16)} & w_{35(17)} & w_{36(18)} \\
p_3 & w_{41(19)} & w_{42(20)} & w_{43(21)} & w_{44(22)} & w_{45(23)} & w_{46(24)} \\
p_4 & w_{51(25)} & w_{52(26)} & w_{53(27)} & w_{54(28)} & w_{55(29)} & w_{56(30)} \\
p_5 & w_{61(31)} & w_{62(32)} & w_{63(33)} & w_{64(34)} & w_{65(35)} & w_{66(36)} \\
p_6 & w_{71(37)} & w_{72(38)} & w_{73(39)} & w_{74(40)} & w_{75(41)} & w_{76(42)} \\
p_7 & w_{81(43)} & w_{82(44)} & w_{83(45)} & w_{84(46)} & w_{85(47)} & w_{86(48)}
\end{array}.
$$

关联矩阵的列数W 由初始神经元的数量决定，而行数由神经网络第n（输出）层的输出神经元数量决定。

佩特里网中相应变迁的触发条件由初始神经元输入连接的权重系数决定。初始神经元输入连接的权重系数集合也可以表示为矩阵：

$$
\begin{array}{c|cccccc}
 & t_1 & t_2 & t_3 & t_4 & t_5 & t_6 \\
N_1 & w_{11(6)} & w_{12(12)} & w_{13(18)} & w_{14(24)} & w_{15(30)} & w_{16(36)} \\
N_2 & w_{21(2)} & w_{22(8)} & w_{23(14)} & w_{24(20)} & w_{25(26)} & w_{26(32)} \\
N_3 & w_{31(3)} & w_{32(9)} & w_{33(15)} & w_{34(21)} & w_{35(27)} & w_{36(33)} \\
N_4 & w_{41(4)} & w_{42(10)} & w_{43(16)} & w_{44(22)} & w_{45(28)} & w_{46(34)} \\
N_5 & w_{51(5)} & w_{52(11)} & w_{53(17)} & w_{54(23)} & w_{55(29)} & w_{56(35)} \\
N_6 & w_{61(1)} & w_{62(7)} & w_{63(13)} & w_{64(19)} & w_{65(25)} & w_{66(31)}
\end{array}
\quad |N| = \quad .
$$

在此矩阵中，$|N|$行数$N_1 \ldots N_6$对应于变迁触发的不同条件，而列数对应于算法生成步骤的数量。

根据图3，Petri网关联矩阵元素的生成过程基于神经网络的输出信号$y_1 \ldots y_8$，这些信号确保相应Petri网并行、同步运行。这使得可以表示由相应Petri网构成的某种组合，该组合反映了针对特定对象 [15] 的逻辑控制算法。

如果对象的逻辑控制算法不符合既定需求，而这些需求决定了系统运行质量指标值的相应变化，那么自动整定模块（Tuning unit）应根据合成的Petri网的关联矩阵，调整神经元间连接系数。

用于综合佩特里网并生成逻辑控制算法的神经网络架构特点。根据图9所示的上述方案，可以确定一种特定的神经网络架构，该架构可用于生成由相应佩特里网表示的控制算法。图10所示的这种神经网络架构为带有反馈连接和信号延迟元件的双层架构。

这种神经网络运行的特点在于，在任意时间点，输入层的n 个可能神经元中只能有一个处于激活状态。同时，仅激活输入层中的一个神经元就可能引发激活——

输入层中仅一个神经元的激活可能引发输出层中*N*个神经元的激活。

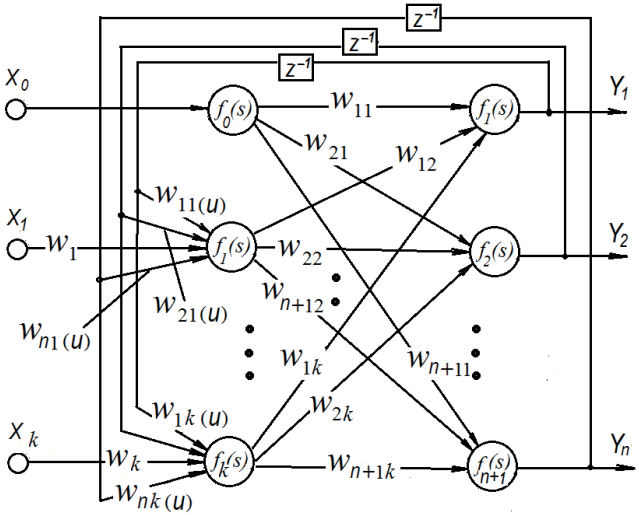


图10. 用于构建佩特里网关联矩阵的神经网络架构

输出神经元突触系数的计算基于网络初始神经元输入连接的突触系数，公式如下：

$$w_{nk(u)} = w_{nk} \cdot \left(\left| b_{k(u)} \right| - \sum_{n=1}^{m} w_{nk} \right) + w_{nk} - 1 ,$$

其中 w_{nku} — 输入层第 n 个输入连接的突触系数 k 个神经元；w_{nk} — 输出层第 k 个输入连接的突触系数，第 n 个神经元；b_{ku} — 输入层第 k 个神经元的偏移量。

该神经元间连接系数计算公式基于以下条件推导得出：在任意时刻，只有一个输入神经元被激活，且该神经元是n 个可能神经元中的一个。网络的输入神经元数量应足够多，以确保输出信号值组合$Y_1 \ldots Yn.$不会重复。

为验证所讨论的神经网络架构在原理上是否可行，我们在MATLAB/Simulink 编程环境中实现了相应的方案，如图11所示。

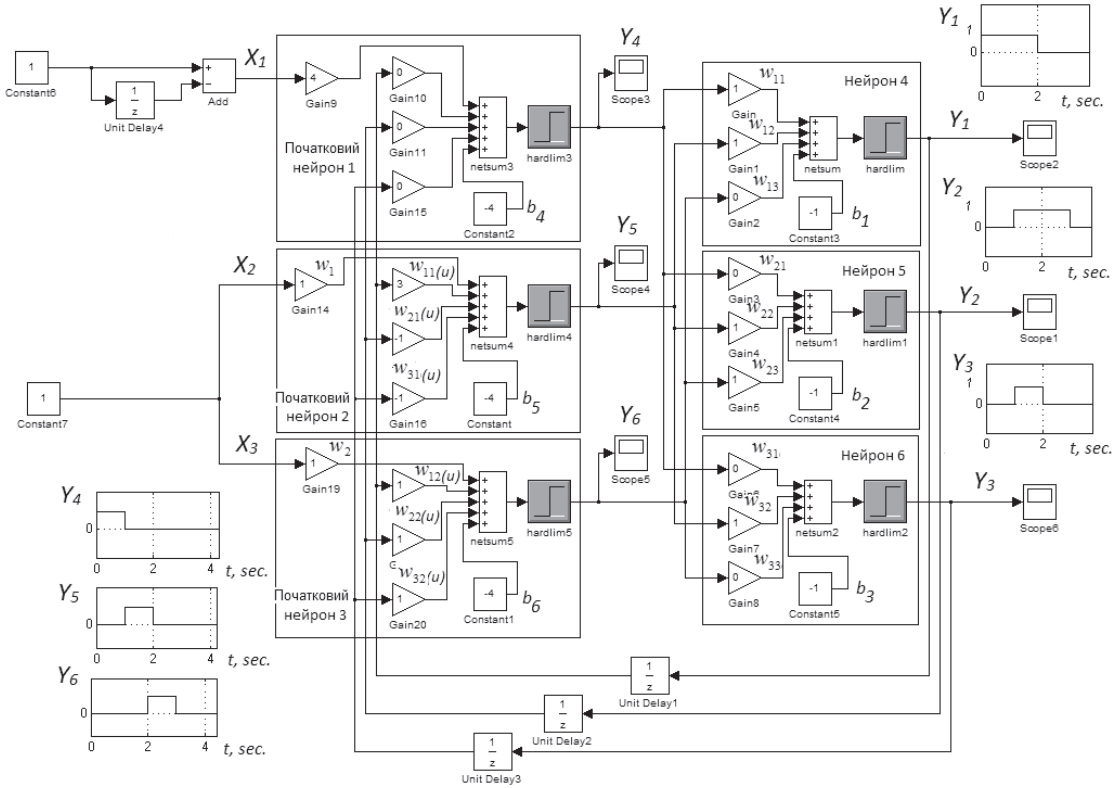


Рис. 11. Структурна схема нейронної мережі з початковими нейронами

如图11所示，所给出的神经网络方案由3个输入神经元和3个输出神经元组成，并具有带信号延迟元件的反馈关系。

根据上述公式，列出相应神经网络部分神经元间连接系数的计算结果：

$$w_{32(u)} = w_{32} \cdot \left(\left| b_{2(u)} \right| - \sum_{n=1}^{3} w_{n2} \right) + w_{32} - 1 = 1 \cdot (|-4| - (1+1+1)) + 1 - 1 = 1;$$

$$w_{31(u)} = w_{31} \cdot \left(\left| b_{1(u)} \right| - \sum_{n=1}^{3} w_{n1} \right) + w_{31} - 1 = 1 \cdot (|-4| - (1+0+0)) + 1 - 1 = 3 \cdot$$

从图11所示的相应神经元激活时间图可以看出，在任意时刻，3个初始神经元中只有一个处于激活状态，而激活的输出神经元数量则不同。由于输入层在每个时刻只有一个神经元处于激活状态，因此神经元间连接系数的计算结果是正确的。

基于允许组合的神经网络调节算法。所讨论的神经网络调节算法符合序贯知识强化学习算法。在这种算法中，不向网络提供期望的输出信号值，而是对网络进行评估，判断其输出信号是好是坏 [21]。

假设在某一时刻，神经网络中只有一个神经元处于激活状态，该神经元称为初始神经元；层中共有n 个可能的神经元。由此，神经网络调节的本质可以表示如下：如果初始神经元的活动导致了不期望的情境，那么与该神经元相连的关系 $\boldsymbol{W}$ 就必须发生变化（图 12）。同时，与初始神经元相连的关系必须以不违反佩特里网构建规则的方式进行改变。

在记录佩特里网的形成规则时，与输出神经元相关的神经元间连接系数应根据所形成的关联矩阵以特定方式进行调整。因此，如果某些神经元激活后导致某个系统产生了不期望的反应，则应按以下方式调整这些神经元连接的权重系数w_{ij}：

$$w_{ij(0)} = \eta \cdot \left(\sum_{j=1}^{n} w_{ij} \cdot S_{im} + \left(1 - \sum_{j=1}^{n} w_{ij} \right) \cdot f_{ik} \right) \cdot F_i ,$$

$$F_i = \begin{cases} 1 \quad npu \quad \left(\sum \overline{w}_{ij}^T \cdot \overline{S}_{im} \right) \cdot \left(1 - \sum \overline{w}_{ij}^T \right) \cdot \overline{f}_{ik} > 0 \\ 0 \quad npu \quad \left(\sum \overline{w}_{ij}^T \cdot \overline{S}_{im} \right) \cdot \left(1 - \sum \overline{w}_{ij}^T \right) \cdot \overline{f}_{ik} = 0 \end{cases},$$

$$w_{ij(i)} = \eta \cdot n_{ih} ,$$

де $|W| = \begin{array}{cccccc} & t_1 & t_2 & \dots & t_j & \sum \overline{w} \\ p_0 & w_{11} & w_{12} & \dots & w_{1j} & \sum w_{ij} \\ p_1 & \dots & w_{22} & \dots & w_{2j} & \Rightarrow \sum w_{2j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{i-1} & w_{i1} & w_{i2} & \dots & w_{ij} & \sum w_{ij} \end{array}$ — матриця інцидентностей

$\sum \overline{w} = \left| \sum w_j \quad \dots \quad \sum w_{ij} \right|^T$ $\sum w = \sum w_{1j} \quad \dots w_{ij} \sum ; \; {}_{ij} w \sum$ 所形成的佩特里网及所形成的向量1 第 i 个 矩阵行的所有值之和 W ; $|\ |$

$\overline{\ }$, $_{im}\overline{\ }$ $_{ik}S$ f — 不违反佩特里网构建规则的神经元间连接权重允许组合向量;

$$|S_1| = \begin{array}{c|cccc} & \overline{S}_{i1} & \overline{S}_{i2} & \overline{S}_{i3} \\ s_{1m} & 1 & 0 & 1 \\ s_{2m} & 1 & 1 & 0 \\ s_{3m} & 1 & 1 & 0 \\ s_{4m} & 1 & 0 & 1 \\ s_{5m} & 1 & 0 & 1 \\ s_{6m} & 1 & 1 & 0 \\ s_{7m} & 1 & 1 & 0 \\ s_{8m} & 1 & 0 & 1 \end{array} , \quad |f_1| = \begin{array}{c|cccccccc} & \overline{f}_{i1} & \overline{f}_{i2} & \overline{f}_{i3} & \overline{f}_{i4} & \overline{f}_{i5} & \overline{f}_{i6} & \overline{f}_{i7} & \overline{f}_{i8} \\ f_{1k} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ f_{2k} & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ f_{3k} & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ f_{4k} & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ f_{5k} & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ f_{6k} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ f_{7k} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ f_{8k} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} ;$$

$$S_2 = \begin{array}{c|cccc} & S_i S S_{i2} & & i3 \\ s_{1m} & 1 & 0 & 1 \\ s_{2m} & 1 & 1 & 0 \\ s_{3m} & 1 & 1 & 0 \\ s_{4m} & 1 & 0 & 1 \\ s_{5m} & 1 & 0 & 1 \\ s_{6m} & 1 & 1 & 0 \\ s_{7m} & 1 & 1 & 0 \\ s_{8m} & 1 & 0 & 1 \end{array} , \quad f_2 = \begin{array}{c|cccccccc} & f_{i9} & f_{i10} & f_{i11} & f_{i12} & f_{i13} & f_{i14} & f_{i15} & f_{i16} \\ f_{1k} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ f_{2k} & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ f_{3k} & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ f_{4k} & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ f_{5k} & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ f_{6k} & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ f_{7k} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ f_{8k} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} ;$$

s_{6m} 1 1 0 f_{6k} 0 0 0 0 0 0 1 0

s_{7m} 1 1 0 f_{7k} 0 0 0 0 0 0 1 0

s_{8m} 1 0 1 f_{8k} 0 0 0 0 0 0 0 1

$$|S_2| = \begin{array}{c|ccc} & \overline{S}_{i1} & \overline{S}_{i2} & \overline{S}_{i3} \\ s_{1m} & 1 & 0 & 1 \\ s_{2m} & 1 & 1 & 0 \\ s_{3m} & 1 & 1 & 0 \\ s_{4m} & 1 & 0 & 1 \\ s_{5m} & 1 & 0 & 1 \\ s_{6m} & 1 & 1 & 0 \\ s_{7m} & 1 & 1 & 0 \\ s_{8m} & 1 & 0 & 1 \end{array}, \quad |f_2| = \begin{array}{c|cccccccc} & \overline{f}_{i9} & \overline{f}_{i10} & \overline{f}_{i11} & \overline{f}_{i12} & \overline{f}_{i13} & \overline{f}_{i14} & \overline{f}_{i15} & \overline{f}_{i16} \\ f_{1k} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ f_{2k} & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ f_{3k} & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ f_{4k} & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ f_{5k} & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ f_{6k} & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ f_{7k} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ f_{8k} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array};$$

$\overline{n}_{ih}$ — 输出神经元输入连接权重系数组合向量;

$$|N_1| = \begin{array}{c|cccc} & \overline{n}_{i1} & \overline{n}_{i2} & \overline{n}_{i3} & \overline{n}_{i4} \\ n_{1h} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ n_{2h} & 0 & 1 & 0 & 0 \\ n_{3h} & 0 & 0 & 1 & 0 \\ n_{4h} & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array}.$$

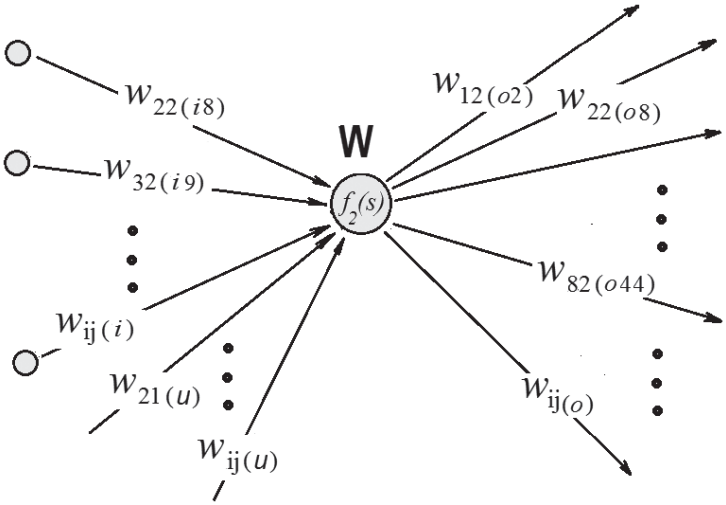


图12. 示意图展示了初始神经元的联系，并标出了神经元间连接权重

上述神经元连接突触系数的可能组合向量，使神经网络在运行过程中只能组合特定的佩特里网，因为并非所有可能的神经元间连接权重组合都已列出。显然，这些佩特里网只能表示特定的对象控制算法，或者在某些情况下，表示特定控制系统的整定算法。然而需要指出的是，用于自动综合佩特里网的神经网络架构具有一项特殊性质，这对形成各种控制算法是必不可少的。

我们提出的用于调节特定输出神经元神经网络的算法，为智能系统的开发迈出了重要一步。该系统在自动综合和组合Petri网时，可生成对象逻辑控制算法。自动综合的Petri网能够呈现对象控制算法的生成结果，从而使专业人员在必要时对算法进行相应修正。

需要指出的是，在这个与Petri网自动综合相关的智能系统中，尝试采用了强化学习原理，体现了正在积极发展的人工智能、神经网络建模与控制领域。因此，所开发的智能系统与Petri网综合，以及例如为特殊类别的控制系统生成调节算法有关，在很大程度上符合当代智能技术的发展趋势，这些技术在当今尤为重要。

接下来，我们将讨论另一种神经网络调节算法，该算法不允许神经网络神经元间连接权重出现允许的组合。

通过遍历可能方案来调节神经网络的算法。通过遍历可能方案来调节神经网络的原理与上述算法类似，区别在于其形式化方式。在这种情况下，如果某个动作算法不令人满意，则必须指出在网络的哪个变迁中发现了系统错误。这是为了重新调节人工神经网络。如果某个系统的运行质量指标值增加，则应相应地删除变迁 t_i 与库所 p_i 之间的关系。但与此同时，

还必须在变迁 t_i 与相邻库所 p_{i+1}之间添加新的关系。因此，例如，图 13 a 所示的 Petri 网会变为图 13 b 所示的 Petri 网。相应地，人工神经网络的神经元间关系系数也应发生变化。

在数学上，可以形式化为以下形式：

$$w_{i,j}(t_{k+1}) = w_{i,j}(t_k)\cdot(1-|w_{i,j}(t_k)\cdot w_{i,j+1}(t_k)|\cdot\delta_1) + w_{i+1,j}(t_k)\times \\ \times|w_{i+1,j}(t_k)\cdot w_{i+1,j+1}(t_k)|\cdot\delta_1 \quad (1)$$

при i=2,4,6...

$$w_{i,j+1}(t_{k+1}) = w_{i,j+1}(t_k)\cdot(1-|w_{i,j}(t_k)\cdot w_{i,j+1}(t_k)|\cdot\delta_1) + w_{i+1,j+1}(t_k)\times \\ \times|w_{i+1,j}(t_k)\cdot w_{i+1,j+1}(t_k)|\cdot\delta_1 \quad (2)$$

при i=2,4,6...

$$w_{i,j}(t_{k+1}) = w_{i,j}(t_k)\cdot(1-|w_{i,j}(t_k)\cdot w_{i,j+1}(t_k)|\cdot\delta_1) + w_{i-1,j}(t_k)\times \\ \times|w_{i-1,j}(t_k)\cdot w_{i-1,j+1}(t_k)|\cdot\delta_1 \quad (3)$$

при i=1,3,5...

$$w_{i,j+1}(t_{k+1}) = w_{i,j+1}(t_k)\cdot(1-|w_{i,j}(t_k)\cdot w_{i,j+1}(t_k)|\cdot\delta_1) + w_{i-1,j+1}(t_k)\times \\ \times|w_{i-1,j}(t_k)\cdot w_{i-1,j+1}(t_k)|\cdot\delta_1 \quad (4)$$

при i=1,3,5...

其中，$w_{i,j}(t_k)$ — 神经元间连接系数，它确定在步骤 t_k；$w_{i,j+1}(t_{k+1})$，在步骤 t_{k+1}对应的神经元间连接系数。

神经元间连接系数矩阵 N 与佩特里网的关联矩阵具有一定的类比关系。例如，对于图 13 a 所示佩特里网的关联矩阵 W_1。当转换 t_1 发生错误时，关联矩阵 W_1 相应地变为矩阵 W_2，具体如下：

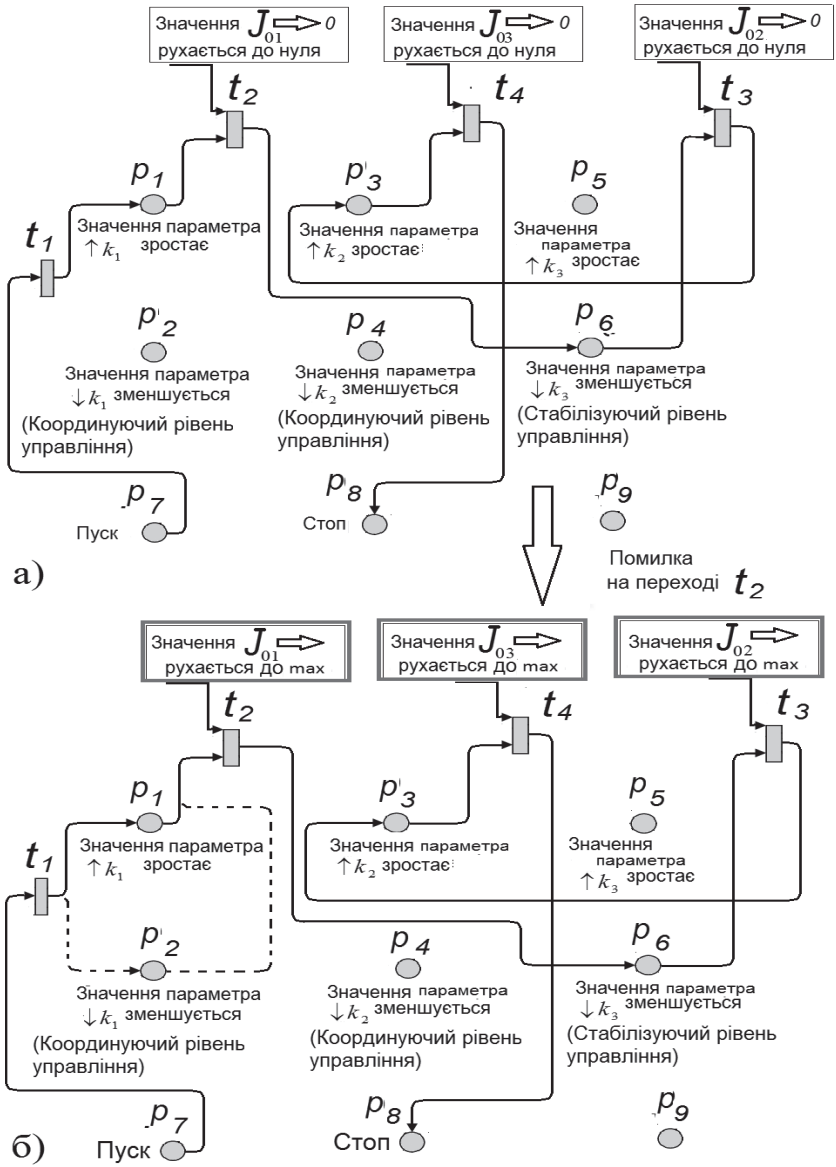


图13. 以佩特里网表示的逻辑控制算法，反映了多层系统的分阶段调节过程

$$W_1=\begin{array}{c|cccc} & t_1 & t_2 & t_3 & t_4 \\ p_1 & +1 & -1 & 0 & 0 \\ p_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_3 & 0 & 0 & +1 & -1 \\ p_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_6 & 0 & +1 & -1 & 0 \\ p_7 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ p_8 & 0 & 0 & 0 & +1 \\ p_9 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \Rightarrow W_2=\begin{array}{c|cccc} & t_1 & t_2 & t_3 & t_4 \\ p_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_2 & +1 & -1 & 0 & 0 \\ p_3 & 0 & 0 & +1 & -1 \\ p_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_6 & 0 & +1 & -1 & 0 \\ p_7 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ p_8 & 0 & 0 & 0 & +1 \\ p_9 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array}.$$

矩阵 W_1 的行 r_1 和 r_2 按照表达式 (3) 进行了修改。因此，如果在变迁 t_i 处检测到错误，则 $\delta_1=1$。在这种情况下，如果变迁 t_j 与库所 p_i 之间存在关系，则 $w(t_j,p_{i+1})=-1$。因此，根据表达式 $w(p_{i+1},t_j)\times\delta_1=0$，神经元间关系的系数在步骤 kt_{j+1} 也将变为零 $w(t_j,p_{i+1})=0$。这样，所构建的佩特里网中相应的关系就会消失。

在另一种情况下，如果变迁 t_i 与库所 p_i 之间不存在通信，则 $w(p_{i+1},t_j)=0$，$w(t_j,p_{i+1})=0$。此时，如果变迁 t_j 与库所 p_{i+1} 之间存在相邻关系，则 $w(p_{i+1},t_j)\cdot\delta_1=1$，因此，神经元间通信系数将增加 $w(t_j,p_{i+1})=w(t_j,p_{i+1})+1$。由此，所构建的佩特里网中将出现相应的关系。

如果在转换 t_i 上未检测到错误，则 $\delta_1=0$，$w(p_{i+1},t_j)\times\delta_1=1$，因此，$w(t_j,p_{i+1})=w(t_j,p_{i+1})$。

实验。在 MATLAB/Simulink 2012 编程环境中，进行了有关神经网络与佩特里网协同工作的实验。在 MATLAB/Simulink 编程环境中，借助 Statflow 图实现了佩特里网的运行。图 14 展示了用于表示佩特里网运行的 Stateflow 图片段。State1、State2、State3 和 State4 是同一个佩特里网中的状态。神经网络与三个此类佩特里网同时协同工作。图 15 展示了这一点。

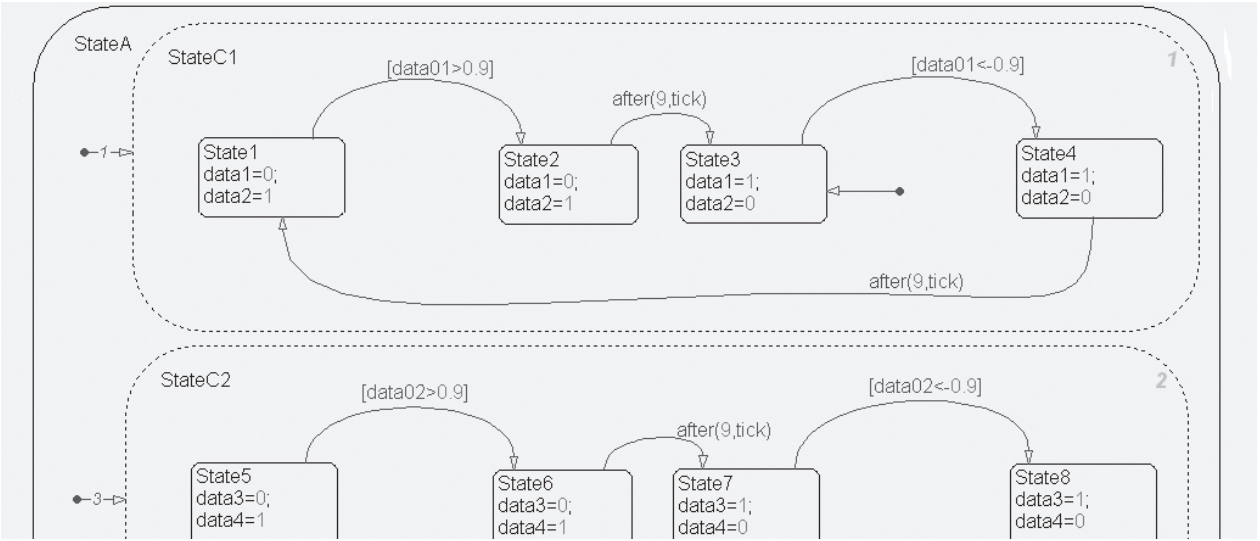


Рис. 14. Stateflow-діаграми, що представляють роботу мереж Петрі

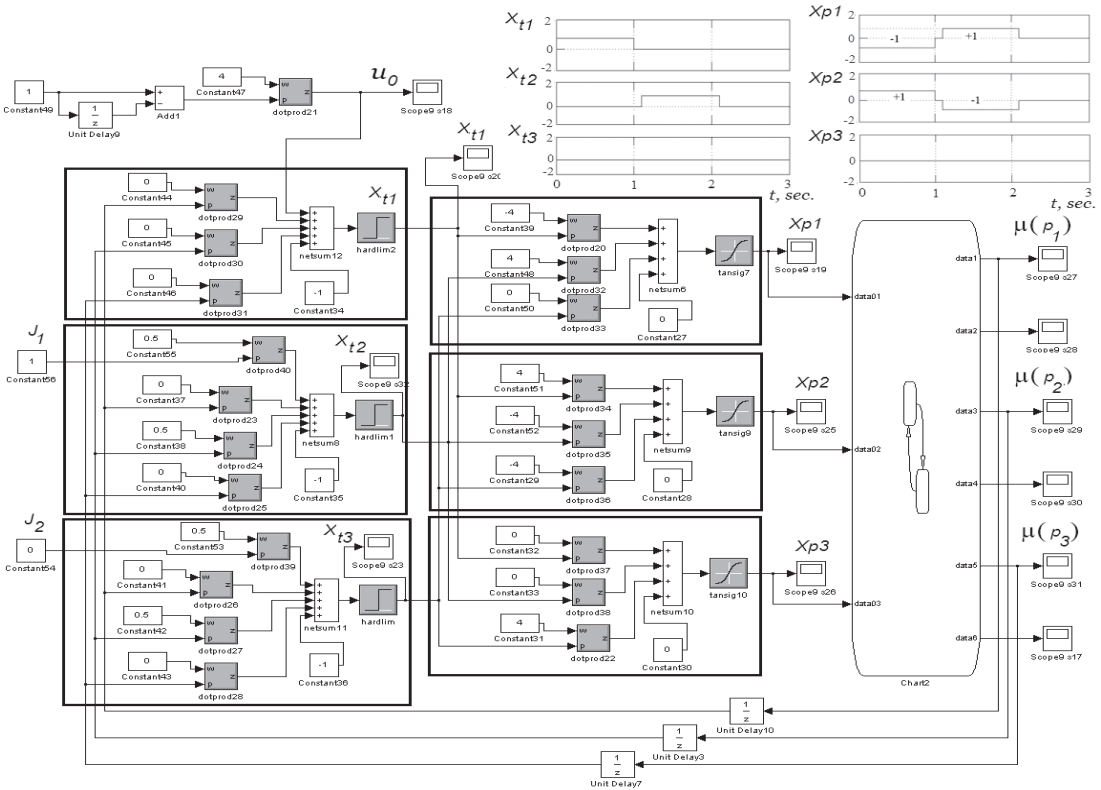


Рис. 15. Структурна схема нейронної мережі, що синтезує мережу Петрі

图15还展示了通过 MATLAB/ Simulink 环境实现的双层人工神经网络，该网络由六个神经元组成，其输出信号为*Xp1*、*Xp2*、*Xp3*、并与 Petri网相关联。

该神经网络与 Petri网的结构图类似于图3所示的简化方案。图14和图15给出了系统运行所需的全部参数，该系统展示了神经网络与 Petri网的协同运行，用于自动生成 Petri网及相应算法。

其结构图如图4所示的系统能够展示不同 Petri网的运行。

方程（2）描述了佩特里网与人工神经网络的协同运行。

如果佩特里网的关联矩阵*A*与神经网络输出层神经元间连接系数矩阵具有一定的类似性，那么人工神经网络将生成输出信号$_{1k}V\ A\ U=\ \cdot\ -$，其对应于所形成的佩特里网关联矩阵的值。

图15和图16展示了由三个库所和三个变迁组成的佩特里网的时序图。此类佩特里网的运行表示人工神经网络与Stateflow 图的协同工作系统。人工神经网络的输出信号 *Xp1*、*Xp2*、*Xp3* 对应于所形成的佩特里网关联矩阵。而输出信号 $\mu(p_1)\ \mu(p_2)\ \mu(p_3)$表示佩特里网标识随时间的变化。作为单独案例，介绍了图16所示佩特里网的运行。

从时序图可以看出，如果输入J_1 ($J_{01}>0$), 上存在信号，则变迁t_2触发。如果输入J_2 ($J_{01}>0$), 上出现信号，则变迁t_3.触发。变迁t_2 和t_3 同时触发，对应于Petri网运行中的冲突情境。

分析图15和图16所示的时间特性，可以得出结论：所研究的系统原则上适用于表示不同Petri网的运行。该系统的一个重要组成部分是人工神经网络，其训练与Petri网的自动综合相关。因此，网络训练过程中神经元间连接权重的变化，与合成的Petri网的变化相关。

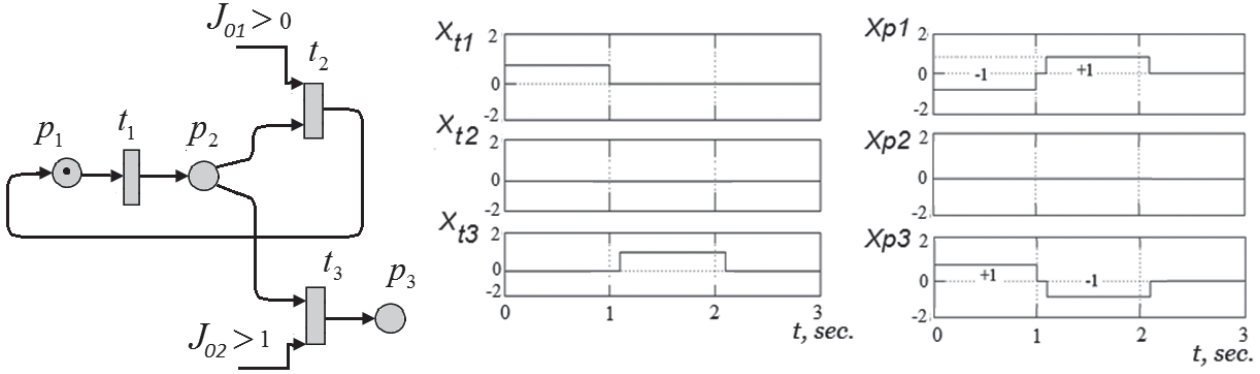


Рис. 16. Процес функціонування синтезованої мережі Петрі

将网络训练过程中神经元间连接系数的变化进行数学描述，可视为在 Petri网中穷举网络可能连接方式的一种尝试。在这种情况下，构建的 Petri网是人工神经网络神经元间连接系数集合的可视化映射。

结论。我们解决了一个与开发神经网络和佩特里网协同运行系统相关的任务，以形成算法并进行顺序计算。由此，进一步发展了佩特里网自动综合方法，以及基于神经网络运行来开发特定算法的方法体系。文中给出了佩特里网综合过程中网络神经元间连接权重变化的数学描述。

所开发的Petri网综合方法有助于解决一项实际任务，即对复杂类别的多级自动控制系统进行自动调节。此时，合成Petri网可以表示相应控制系统的调节过程和算法。

Petri网综合过程中的自动控制系统自动调节。所讨论的Petri网自动综合方法可应用于特定类别多级自动控制系统调节过程的自动化领域 [22; 23]。

根据已有科学著作可以得出结论：最初进行综合时，应将协调自动控制系统视为单层系统，即应从底层开始进行系统综合，然后再转向上层的综合 [22–25]。但在某些情况下，也可能采用其他方案。例如，机器人操纵器驱动装置的协调自动控制系统（自动控制系统）宜从上层调节回路开始综合，随后调节底层，再修正上层的调节参数。研究发现，协调系统的综合算法可能有多种，而每种算法都可能得出不同结果。因此，需要构建并搜寻一种算法，以实现协调系统运行质量指标的理想值。在这种情

况下，会出现一个类似于混合（离散—连续）状态空间中系统可达性任务的问题，该问题曾在文献 [14；26] 中进行过讨论。

在此情况下，开发了一种基于离散-连续网络（ДБ-мереж）的数学工具的自动控制系统参数综合系统，该系统通过对网络的连续部分与离散部分进行约简，能够研究系统的可达性属性 [12]。首次尝试开发此类系统是在文献 [27], 中提出的，其中利用佩特里网表示某些神经模糊控制系统参数的自整定算法。在此情况下，建议在所开发的系统中，基于离散-连续网络可达性验证方法，实现参数综合算法的构建。在 MATLAB/Simulink 环境中开发的自动机生成离散-连续网络离散事件部分的佩特里网关联矩阵，进而生成表示坐标自动控制系统参数综合算法的佩特里网。

本工作的目标是减少开发复杂多级自动控制系统所需的计算资源和时间资源。

为实现既定目标，需要开发一个系统，使其能够生成所需的参数综合算法，并按照生成的算法执行必要的操作顺序。

机器人操纵器驱动装置的协调自动控制系统表示为两级系统 [28; 29]。该系统模型的结构图由 MATLAB/Simulink 环境实现，如图 17 所示。系统的上层控制负责消除抓手位置调节误差 L_m 以及机械臂转角误差 α_m，下层则负责消除代表抓手在柱坐标系中运动轨迹的变量关系偏差。该控制系统的两级控制律可表示如下：

$$\overline{u} = \overline{u}_q + \overline{u}_p = \left[u_{1Lm} \quad u_{2\alpha m}\right]^T;$$

其中 $\underline{\quad} = \begin{bmatrix} \quad_1 \\ \quad_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \quad_2 \cdot 1 + \quad_{21} \cdot \\ \quad_3 \cdot 1 + \quad_{31} \cdot \end{bmatrix} \cdot \psi$ () ( ) () $_{q\,q\,q}$*u k k p u t u k k p*—底层控制律；

$\overline{u}_p = \begin{bmatrix} u_{p1} \\ u_{p2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (L_{mz}(t) - L_m(t)) \cdot k_1 \cdot (1 + k_{11} \cdot p) \\ (\alpha_{mz}(t) - \alpha_m(t)) \cdot k_4 \cdot (1 + k_{41} \cdot p) \end{bmatrix}$ — закон управління上层；

( ) ( ) ( ) ( ) $_{m\ m\ m}\ t f L\ L\ t k\ t b\ \psi$ = · + ·α − — 在时间 *t* 时，参数关系的偏差（未匹配量）；

()$_m L\ t$, ( )$_m\ t\alpha$ — 可调变化；

f(Lm) — 非线性关系，在系统中以 NU 环节的形式表示*NU*（图17），用于描述夹爪在坐标$L_m - \alpha_m$中的运动轨迹；

k_1, k_{11}, k_2, k_{21} k_3, k_{31}, k_4, k_{41}— 考虑到运动分离效应，需要确定的系统调节参数；

$\alpha_{m.Z}(t)$, $L_{m.Z}(t)$ — 根据转角和机械手在平面 *F;*中的位置给定的作用；

p — 微分算子。

在本文中，坐标控制系统的对象由以下传递函数描述：

$$W_1(p) = \frac{X_1(p)}{u_1(p)} = \frac{k_L}{p \cdot Q_L(p)},$$

$$W_2(p) = \frac{X_2(p)}{u_2(p)} = \frac{k_\alpha}{p \cdot Q_\alpha(p)},$$

其中 k_L、k_α —传递系数，$Q_L(p)$、$Q_\alpha(p)$ —某些多项式，满足 $Q_L(0)=1$、$Q_\alpha(0)=1$。

机器人的运动学方程确立了不同坐标之间的关系。方程 $X_i = F(q_1, q_2)$，其中 q_1, q_2 —L_m, α_m 重构系统的坐标，确定了机器人机械部分的数学模型。

为对该协调控制自动控制系统进行参数整定，已实现数值生成模块，用于生成以下系统运行的积分性能指标的值：

$$J_1 = \int_{t_0}^{t_1} (\beta_1 \cdot (L_{mz}(t) - L_m(t)^2) + u_{2L_m}(t))dt = \int_{t_0}^{t_1} (fL_m(t))dt;$$

$$J_{01} = \left[\int_{t_0}^{t_1} f_{L_m}(t)dt - \int_{t_2}^{t_3} f_{L_m}(t)dt \right] - \left[\int_{t_1}^{t_4} f_{L_m}(t)dt - \int_{t_2}^{t_3} f_{L_m}(t)dt \right];$$

$$J_2 = \int_{t_0}^{t_1} (\beta_2 \cdot (\alpha_{m.z}(t) - \alpha_m(t)^2) + u_{2\alpha_m}(t))dt = \int_{t_0}^{t_1} (f\alpha_m(t))dt;$$

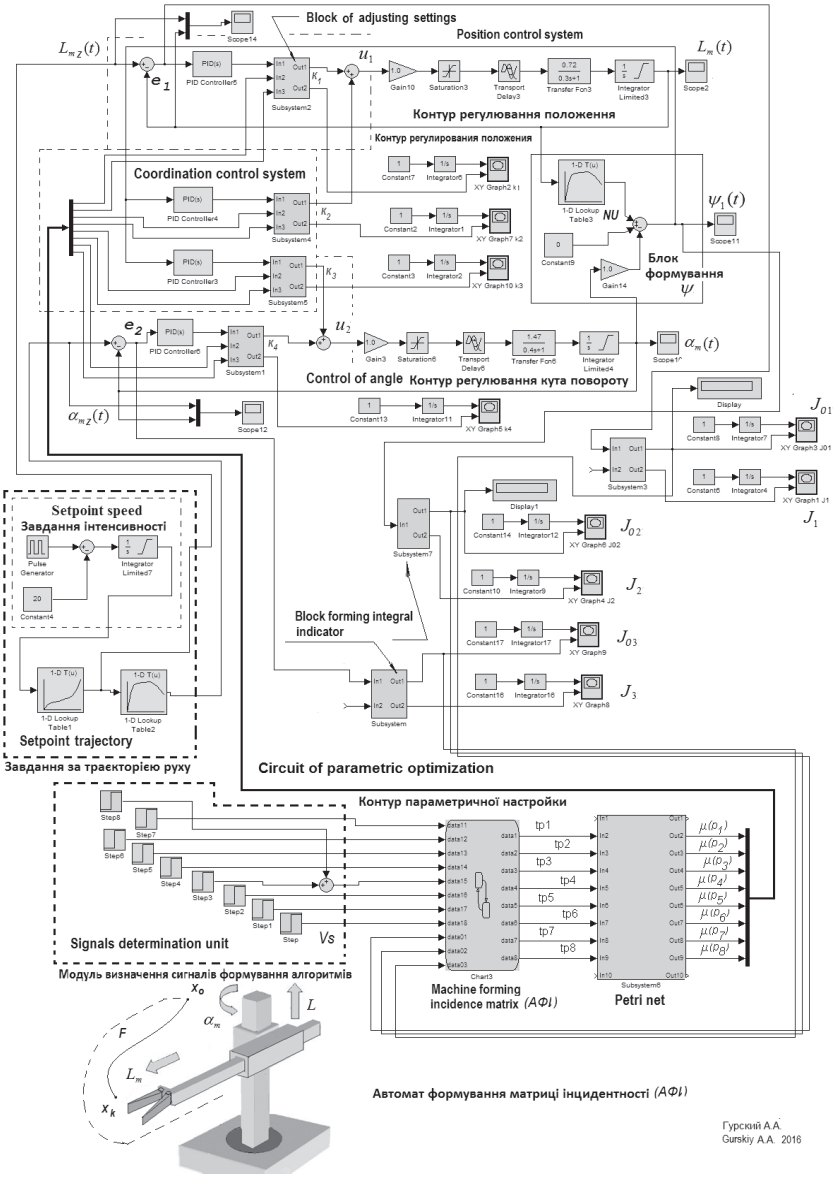


图17. 带参数整定回路的自动协调控制系统模型结构方案

$$J_{02}=\left[\int_{t_0}^{t_1} f_{\alpha_m}(t)dt-\int_{t_2}^{t_3} f_{\alpha_m}(t)dt\right]-\left[\int_{t_1}^{t_4} f_{\alpha_m}(t)dt-\int_{t_2}^{t_3} f_{\alpha_m}(t)dt\right];$$

$$J_3=\int_{t_0}^{t_1}\psi^2(t)dt;\ J_{03}=\left[\int_{t_0}^{t_1}\psi^2(t)dt-\int_{t_2}^{t_3}\psi^2(t)dt\right]-\left[\int_{t_1}^{t_4}\psi^2(t)dt-\int_{t_2}^{t_3}\psi^2(t)dt\right],$$

其中 $(t_1-t_0)=(t_3-t_2)=(t_4-t_1)=(t_5-t_3)$, $t_0<t_2<t_1<t_3<t_4<t_5$.

根据指标J_{01}, J_{02}, J_{03}，评估自动控制系统 [13] 调节参数变化方向的正确性。当参数k_1, k_2, k_3, k_4未发生变化时，指标J_{01}, J_{02}, J_{03}的值将为零。

自动控制系统的参数综合（确定参数k_1, k_2, k_3, k_4）按照特定算法执行。在所开发的系统中，算法的构建任务由生成自动机（ΦA）承担，该自动机由算法生成信号确定模块（MBC）和关联矩阵生成自动机（AΦI）组成。MBC确定所需的综合算法，而AΦI生成表示系统中该算法的佩特里网关联矩阵。佩特里网的标记决定了参数校正书芯中自动控制系统某些调节参数的变化。

若将自动控制协调系统与参数调节回路结合起来，并以参数调节值搜寻算法为基础，则该系统表现为逻辑—动态系统。在这个逻辑—动态系统以及具有可控结构的系统中，[13] 既有离散信号，也有连续信号，并呈现多模式运行特性（底层整定模式，以及底层已整定时的上层整定模式）等。

众所周知，基于离散—连续网络[13]工具的数学工具，为综合逻辑—动态模型以及研究具有离散—连续运行特性的复杂系统提供了强有力的支持。这些工具可依据网约简规则研究系统可达性，而网约简规则和可达性验证方法在成形自动机的开发中发挥着重要作用。

在我们的研究中，带有调节系统的自动控制系统模型是基于离散-连续网络的数学工具开发的。

ДБ网络可以分为两部分：连续事件部分（НПЧ）和离散事件部分（DPC）。

在我们的情况下，НПЧ表示协调控制系统，而ДПЧ表示自动控制系统的参数综合和调节算法。

ДБ网的离散事件部分由状态方程描述：

$$X_L^d(t_k) = X_L^d(t_{k-1}) + |W| \cdot v_L^d(t_k) + u_L^d(t_k),$$

其中，|W——ДПЧ库所与变迁的关联矩阵，在此处用于确定系统调节算法；( )^d L kv t——控制向量，其根据代表ДПЧ的佩特里网变迁的触发条件形成，并相应地取决于指标J_{01}, J_{02}, J_{03}的值；( )^d L ku t——输入作用；$_{-1}$ ( ), ( ) d d L k L kX t X t——ДБЧ在时刻t_k、t_{k-1}的离散状态；在本例中，$=\begin{bmatrix} {}^{2}_{1} & {}^{2}_{2} & \dots & {}^{2}_{8} \end{bmatrix}$ ( ) ( ), ( ), , ( )^T d L kX t p p p μ μ μ；其中，若库所p_1带有标记——1( ) 1pμ = ，则增大协调控制系统的调节参数k_1的值。因此，库所p_1中存在标记，表示参数k_1的值不断增大，直至自动控制系统运行质量指标J达到极值，即1 1 ( ) =1⇒↑ p kμ；由此，2 1 ( ) =1⇒↓ p kμ，3 2 ( ) =1⇒↑ p kμ，$_{4}$ =1⇒↓ $_{2}$ ( ) p kμ，$_{5}$ =1⇒↑ $_{3}$ ( ) p kμ，$_{6}$ =1⇒↓ $_{3}$ ( ) p kμ，7 4 ( ) =1⇒↑ p kμ，$_{8}$ =1⇒↓ $_{4}$ ( ) p kμ。

基于已生成算法的协调系统参数综合过程分析。根据设定的算法生成信号以及综合过程指标的值 J_{01}, J_{02}, J_{03} ，关联矩阵生成自动机生成了一个数值序列，由此构成佩特里网关联矩阵。该数值序列在自动控制系统参数调节时间段内的变化如图18所示。基于图18所示的过程，可以构建关联矩阵，并据此生成能够表示自动控制系统参数调节算法的佩特里网。

生成的佩特里网关联矩阵表示协调系统的参数综合算法，共有8行，对应AFI自动机的输出数量；有10列，对应佩特里网生成的步骤数量。在这种情况下，关联矩阵如下所示：

$$
\begin{array}{c|cccccccccc}
 & t_1 & t_2 & t_3 & t_4 & t_5 & t_6 & t_7 & t_8 & t_9 & t_{10} \\
tp_1 & +1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
tp_2 & 0 & +1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
tp_3 & 0 & 0 & 0 & +1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\left|A_{L1}\right| = tp_4 & 0 & 0 & +1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
tp_5 & 0 & 0 & +1 & -1 & 0 & +1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\
tp_6 & 0 & 0 & 0 & +1 & 0 & -1 & +1 & -1 & 0 & 0 \\
tp_7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & +1 & -1 & 0 \\
tp_8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & +1 & -1
\end{array}.
$$

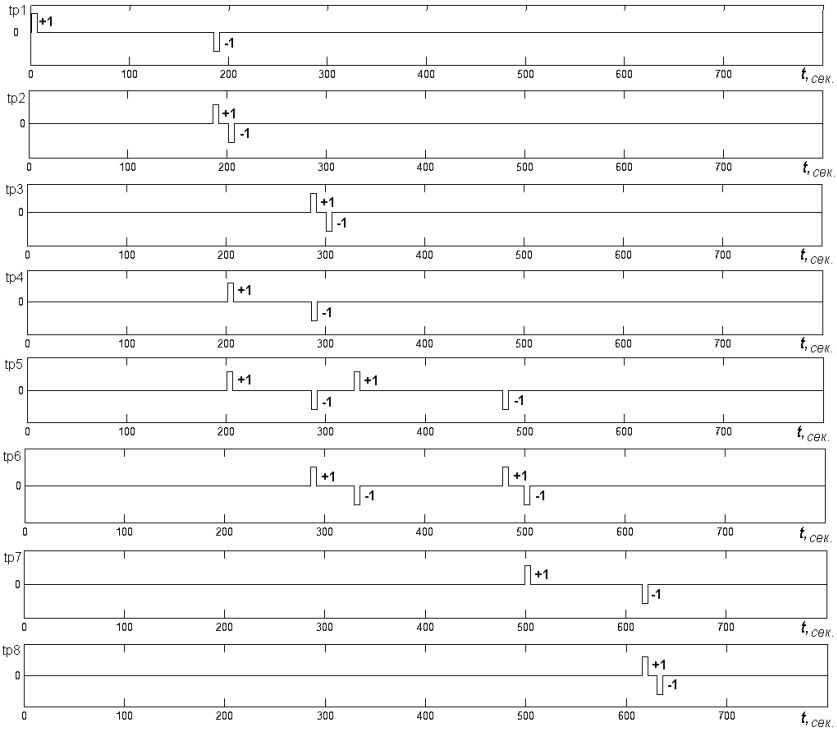


图18. 表示自动控制协调系统参数调节算法的佩特里网关联矩阵生成过程

因此，关联矩阵生成自动机每一步都会生成关联矩阵的一列，从而逐步构建 Petri网，如图19所示。

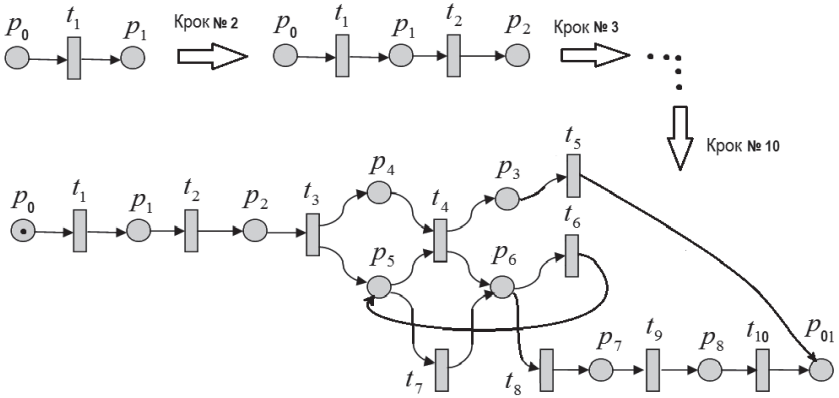


图19. 表示自动控制协调系统参数整定算法的 Petri网生成过程可视化

从图19可以看出，生成的 Petri网是“活”的，但其中存在两种冲突情况。因此，在参数综合过程的第200秒，变迁 t_4 和 t_7 的触发条件同时满足；在第300秒和第500秒，变迁 t_6 和 t_8 的触发条件同时满足。根据图20所示的参数整定算法，以及图21所示的标识动态（该动态是Petri网运行的结果，而该网络表示自动控制系统的参数综合算法），可以得出结论：最初，变迁 t_4 和 t_6 具有较高的触发优先级。

需要指出的是，所提出的关联矩阵构建规则不足以生成无冲突情境下的 Petri 网，尽管自动机综合正是基于这些规则来生成关联矩阵的。但在本例中，这并不妨碍对自动控制系统进行参数综合。因此，根据标识动态变化（图21），自动控制系统的整定参数依次变化，如图22所示。当A点的指标 J_{01} 达到零值时，设置系统的参数 k_1 停止增大，如图23所示。参数 k_2 和 k_3 在B点停止变化，而在C点，参数增大的停止

则是参数 k_3。最终，当J_{03}的指标值达到零值区域时，参数 k_4 在D点停止增大。

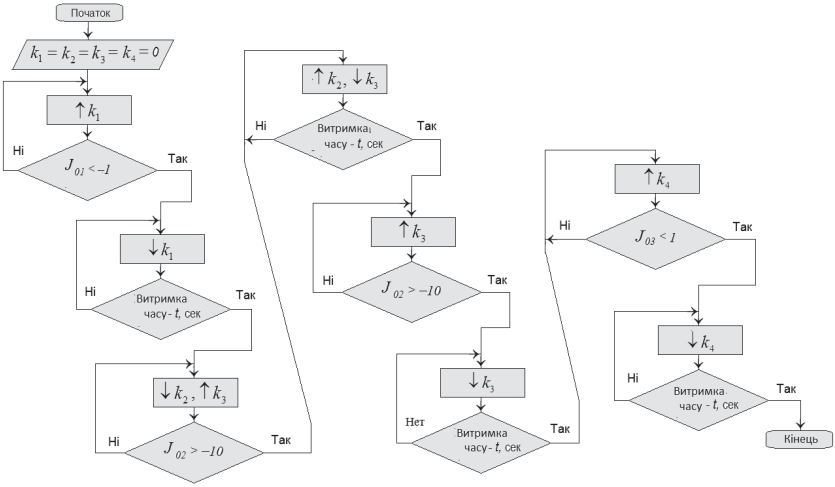


图20。自动控制协调系统的参数整定算法：$_ik\uparrow$ —参数 k_i 值的增加；$_ik\downarrow$ —参数 k_i 值的减少，其中 $i = 1...8$

为检验成形自动机的基本适用性，对算法生成信号进行了修改，从而设定了一个与图20所示算法显著不同的算法。自动机生成了关联矩阵（图24和图25），并据此生成了图26所示的Petri网，该网络反映了自动控制系统的参数整定算法。

根据参数整定算法，Petri网的标识发生变化，并据此依次修正自动控制协调系统的调节参数k_4, k_2 和 k_3，具体取决于指标 J_{02}值的变化。

从图26可以看出，在这种情况下，给定算法生成信号后，生成的Petri网是“活”的，且不存在冲突情形。

需要指出的是，如果算法生成信号不是确定性的，而是随机的，那么Petri网也会以随机方式生成。因此，可以得到许多不同的Petri网，并将算法搜索扩展到参数综合领域之外。

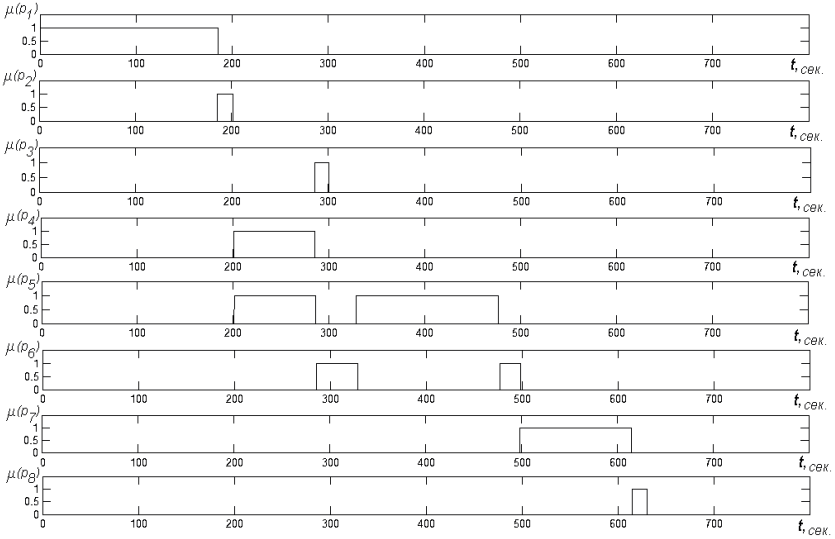


图21. 表示自动控制协调系统参数整定算法的佩特里网运行所得的标识动态

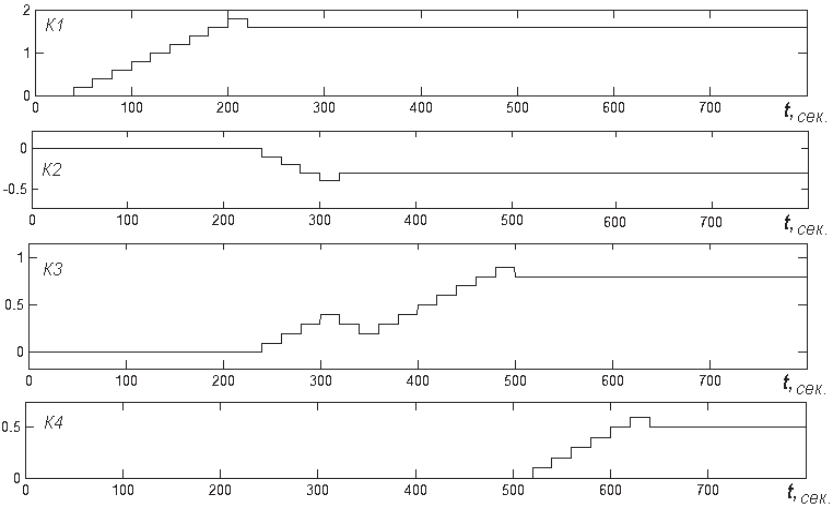


图22. 根据综合佩特里网所表示的算法进行协调控制系统参数综合时的整定参数修改过程

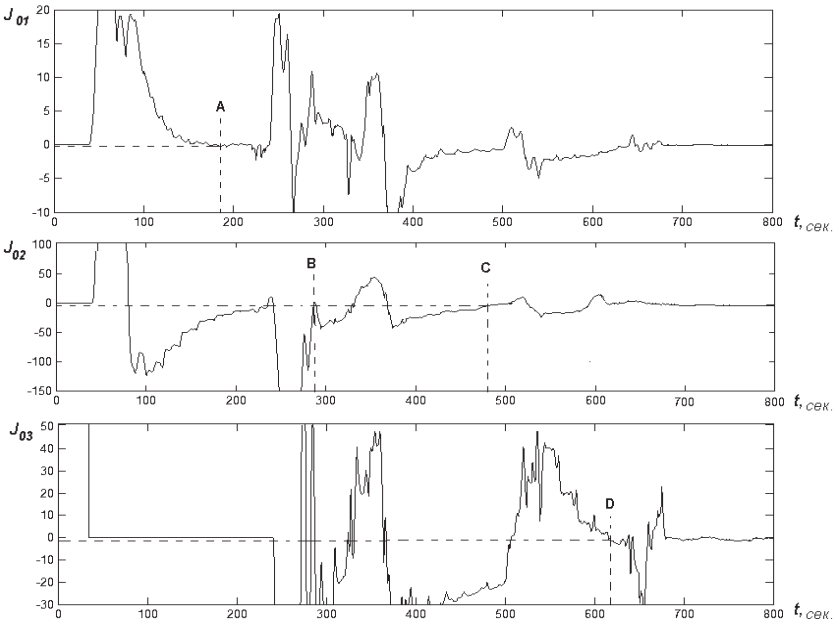
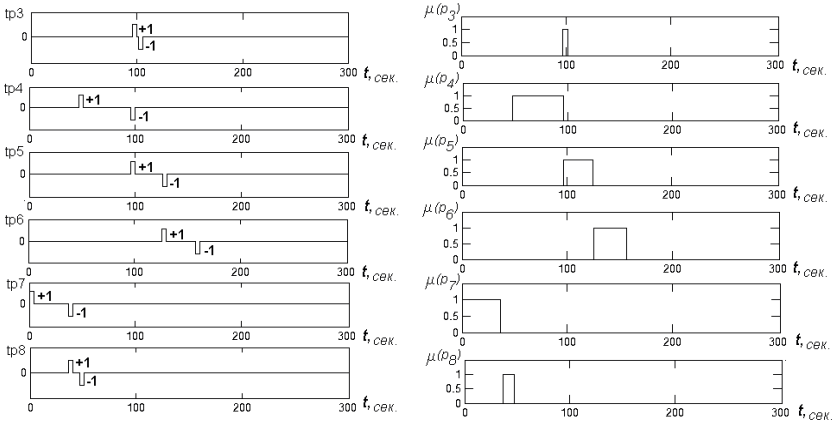


图23. 系统运行质量指标随时间的变化



а) б)

图24. 关联矩阵的生成过程（a）以及表示自动协调控制系统参数调节算法的佩特里网标识动态变化（b）

а) $|A_{L2}|$

	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7
tp_1	0	0	0	0	0	0	0
tp_2	0	0	0	0	0	0	0
tp_3	0	0	0	+1	−1	0	0
tp_4	0	0	+1	−1	0	0	0
tp_5	0	0	0	+1	0	−1	0
tp_6	0	0	0	0	0	+1	−1
tp_7	+1	−1	0	0	0	0	0
tp_8	0	+1	−1	0	0	0	0

б)

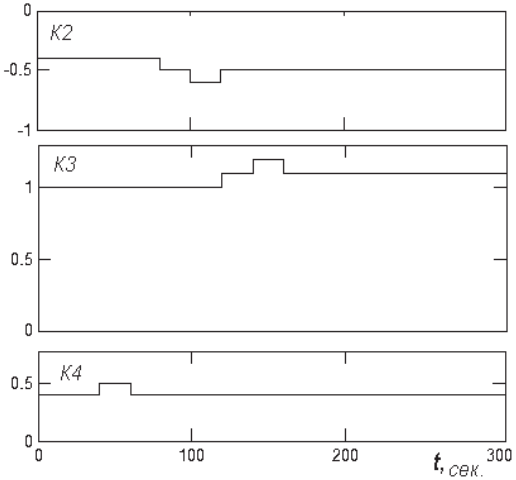


图25. 生成的Petri网关联矩阵（а），表示自动控制系统参数整定算法，以及依据该算法进行的参数调节修改（б）

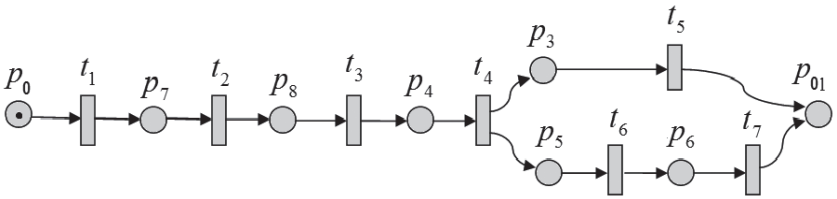


图26. 合成的Petri网，表示自动控制协调系统参数整定算法

基于所构建算法的参数综合结果，与使用 MATLAB/Simulink 环境中的 Response Optimization 模块对自动控制协调系统进行参数优化所得结果的比较分析。为评估基于形成自动机的自动控制系统参数整定算法，宜将综合结果与使用 MATLAB/Simulink 环境中的 Response Optimization 模块对协调控制系统进行参数优化所得结果进行比较。Simulink响应优化模块适用于线性和非线性、离散和连续模型。该软件包通过循环迭代比较所得结果与瞬态过程约束范围，对模型进行优化。这些特性足以用于优化机器人操纵器驱动器的自动控制系统。

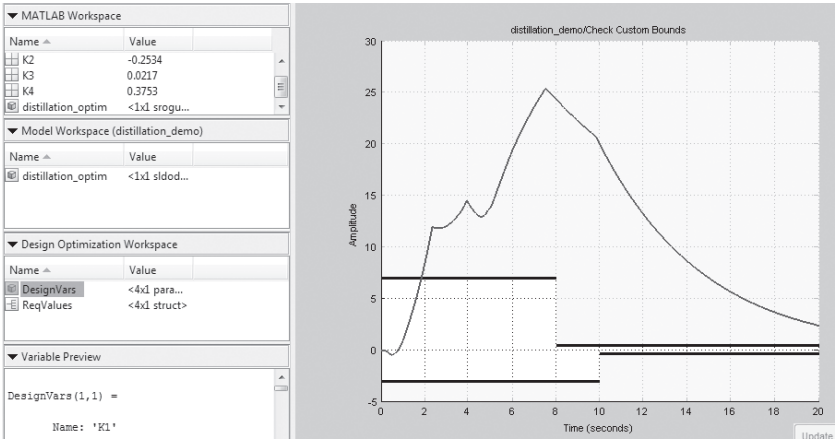
显然，使用梯度下降方法时，模块会执行一系列不必要的计算，而这些计算并未包含在基于生成自动机所构建的调节算法中。然而，如果将参数初始值设为（k_1=0,3；k_2=0；k_3=0；k_4=0,2），使其产生稳定的过渡过程，但又大幅超出规定的约束范围，如图27所示，那么优化过程便能得到理想结果。图28展示了这些参数优化结果。将其与基于生成自动机的自动控制系统参数综合结果进行比较，可以得出结论：响应优化模块能够相当出色地完成既定任务。

然而，如果在模块 Response Optimization 的相同调节设置下，为自动控制系统的调节参数（k_1=k_2=k_3=k_4=0）设定不会产生稳定过程的初始值，那么优化结果将如图 30 所示，不尽如人意。在这种情况下，系统将显示消息 Optimization failed to converge——优化未能收敛。

根据上述结果，可以得出结论：应在应用综合算法之后使用自动系统优化模块，该算法能够确保达到系统运行质量指标的相应期望值。

通过对基于成形自动机的参数综合过程进行分析，得出以下结论：

– 为了获得正面结果，在参数初始值不同时，KCAУ参数整定算法必须规定必要的层级调节顺序；



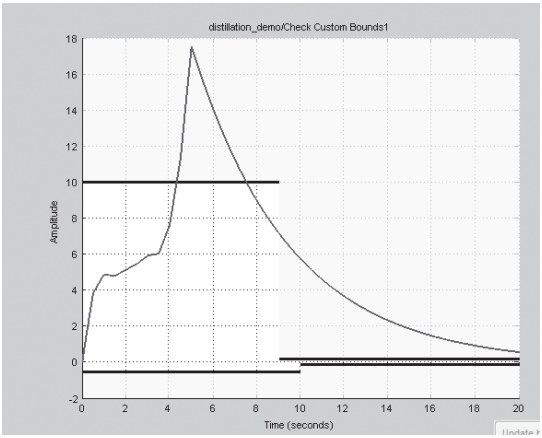


图27. 初始参数值为 k_1=0,3；k_2=0；k_3=0；k_4=0,2 时约束走廊的过渡过程

– 由生成自动机构建的KCAY参数整定算法排除了不必要的计算；与传统随机搜索方法相比，这样可降低系统综合过程的计算开销；

– 关联矩阵的构建规则并不排除创建存在冲突情形的 Petri 网，但在为变迁触发设定优先级后，调节算法能够取得良好结果。

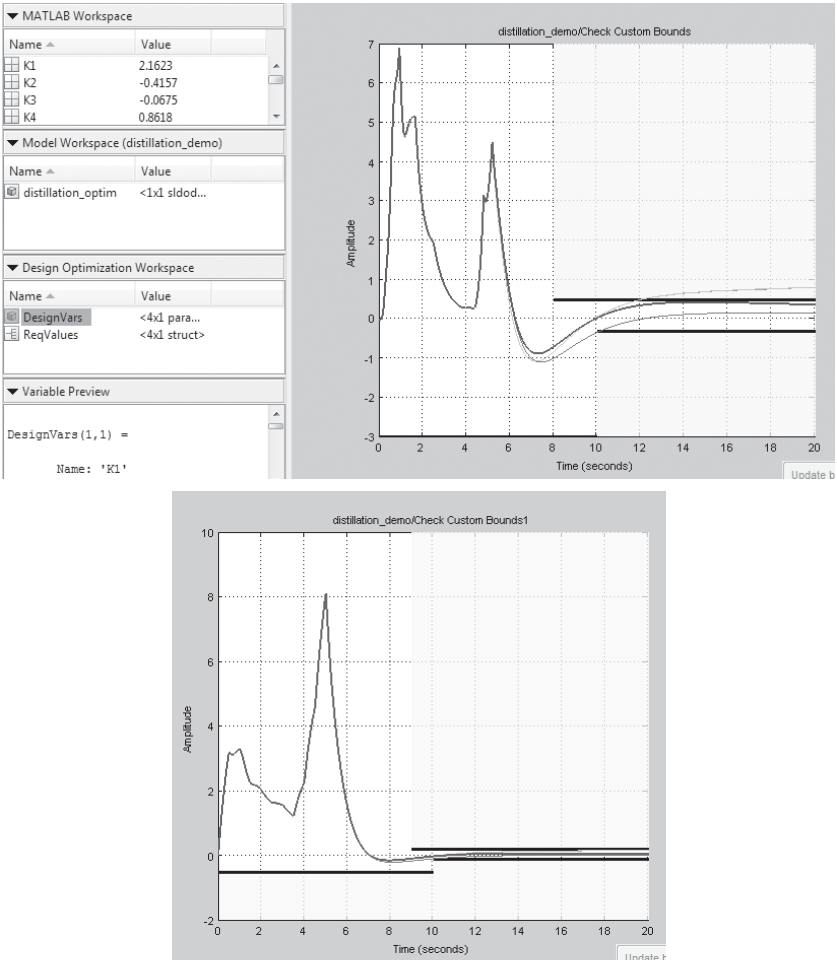
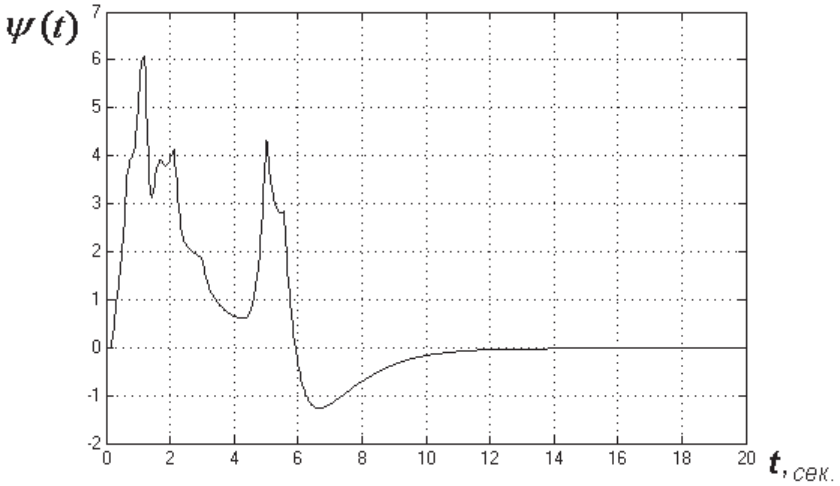
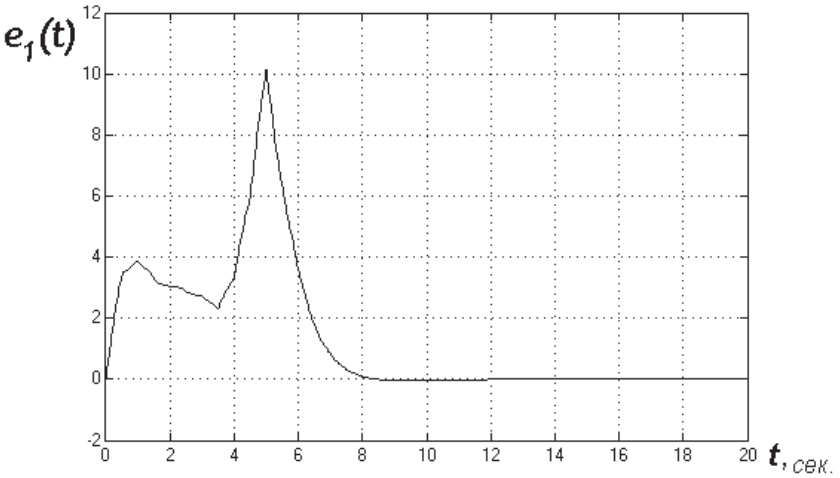


图28. 使用 MATLAB/Simulink 环境中的响应优化模块进行参数优化的结果，初始值为 k_1=0,3；k_2=0；k_3=0；k_4=0,2

进一步开展与算法构建相关的研究，将有助于基于专家积累的知识，创建一种智能调节系统，用于调节复杂的多层系统，并以控制任务和技术对象的特性为基础。



а)



б)

图29. 通过成形自动机进行参数综合的结果：相对于给定运动轨迹的偏差所对应的过渡过程（a），以及夹持器位置调节回路中的偏差信号所对应的过渡过程（б）

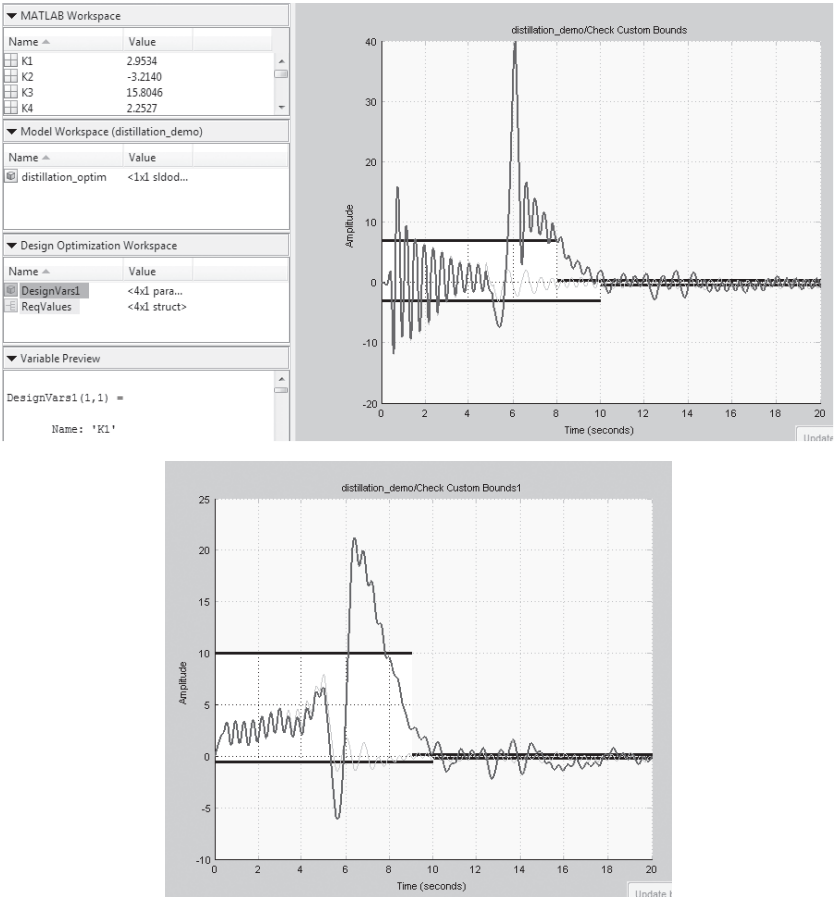
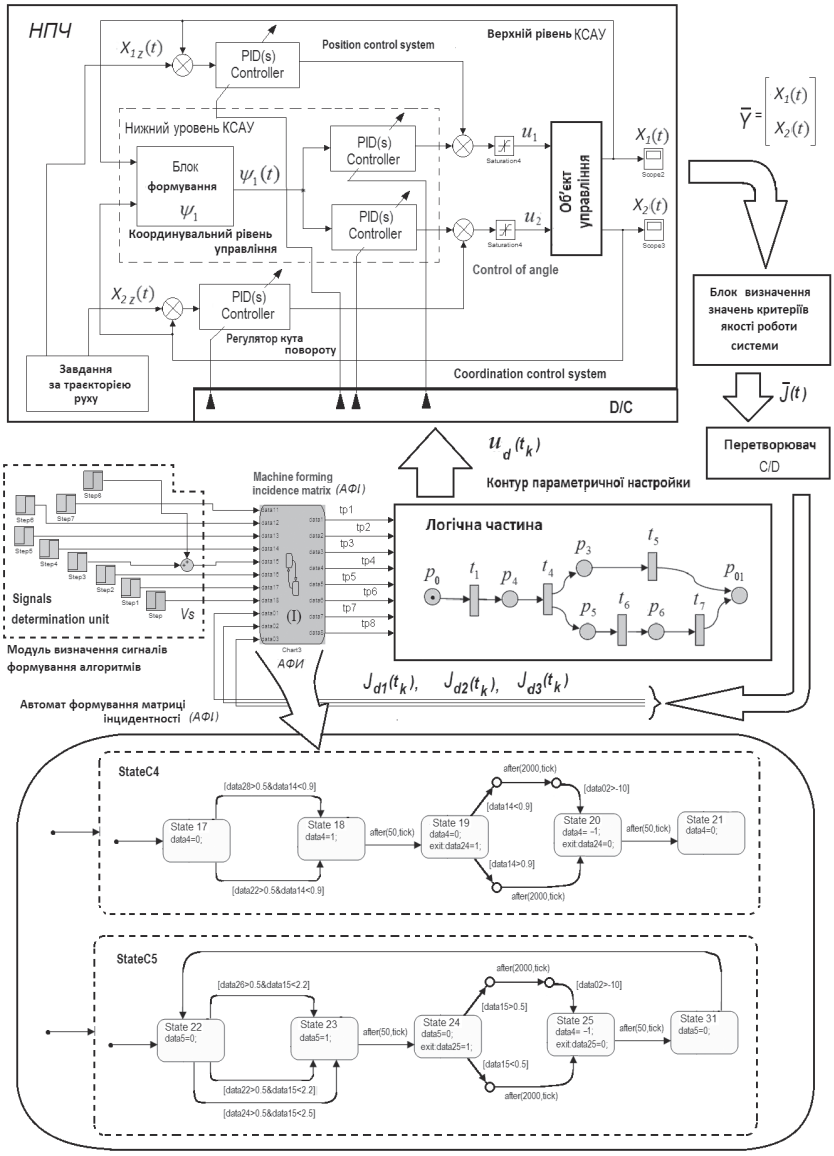


图30. 使用 MATLAB/Simulink 环境中的 Response Optimization 模块进行参数优化的结果，初始值为 $k_1=k_2=k_3=k_4=0$

所开发的调节系统的特点，考虑到采用离散-连续网手段的相关性。后续工作将对图31所示的系统进行转换，并考虑添加一个人工神经网络，用于生成确定算法的信号。

与前一种情况一样，本文研究了所开发的、带有参数调谐算法的协调系统模型



Фрагмент Stateflow діаграми формування матриці інцидентності мережі Петрі

图31. 机器人驱动装置协调控制系统及自动调节系统的简化结构图

调节器，其简化结构图如图 31 [14] 所示。从图中可以看出，系统由两部分组成——连续事件部分和离散事件部分。

НПЧ表示机器人的驱动装置协调控制系统，而DPC表示综合协调控制系统时的动作排序算法，其中还包括自动调节系统。

自动控制协调系统分为两级。上层调节器处理不一致信号 $e_1(t)=X_{1Z}(t)-X_1(t)$ 和 $e_2(t)=X_{2Z}(t)-X_2(t)$，其中 $X_{1Z}(t)$、$X_{2Z}(t)$、$X_1(t)$、$X_2(t)$ 为受控变量的给定值和实际值。底层调节器处理变量关系 $\psi=f(X_1)\cdot X_1+k\cdot X_2-b$ 的偏差，其中 X_1, X_2 为受控变量；$f(X_1)$ 是非线性关系，在系统中以非线性环节的形式表示，用于描述机器人作为受控对象在坐标 X_1—X_2 中的运动轨迹；k、b 分别为系数和常数项。

控制律可以表示为：

$$\overline{u}=\begin{bmatrix} k_2\cdot(1+k_{21}\cdot p)\cdot\psi(p)+k_1\cdot(1+k_{11}\cdot p)\cdot e_1(p) \\ k_4\cdot(1+k_{41}\cdot p)\cdot\psi(p)+k_3\cdot(1+k_{31}\cdot p)\cdot e_2(p) \end{bmatrix}=\overline{u}_q+\overline{u}_p=\begin{bmatrix} u_1 & u_2 \end{bmatrix}^T,$$

其中 k_2, k_{21}, k_4, k_{41}—自动控制系统底层的整定参数；k_1, k_{11}, k_3, k_{31}—自动控制系统顶层的整定参数；$p=d/dt$—微分算子；，u_q u_p—底层和顶层的控制向量；u_1 和 u_2–控制影响。

自动控制系统的整定参数 k_1, k_2, k_3, k_4 自动控制系统 应由自动调节系统确定，并考虑调节过程在时间上的从属关系。

如图31所示，基于信号确定算法*Vs*的佩特里网关联矩阵元素生成过程，是通过 MATLAB/Simulink 环境中的 Stateflow 图 [14]描述的。然而，根据对 Stateflow 图中关联矩阵生成过程描述的分析，之后已将其替换为 DC-net 环境中的离散-连续网。

需要指出的是，Stateflow图对于逻辑模块的开发而言信息量较少，例如，它无法直观呈现并行状态 State31 — State35 之间的关系，这给某些算法的开发带来了困难。在这种情况下，DB网络在算法及逻辑模块（I）运行过程的可视化方面具有一定优势，而该模块会生成关联矩阵的元素；此外，DB——

网络还可以利用 Petri 网分析方法来分析算法，因而具有优势。

因此，对于所讨论的控制系统进行建模与综合，宜使用具备离散-连续网工具的 DC-net 软件环境。

DC-net 软件环境专用于分析和综合具有逻辑-动态运行特性的复杂技术系统。在我们的例子中，与前一个例子一样，所讨论的管理与综合系统，其简化结构图如图31所示，其运行原则与逻辑-动态系统类似。系统中既存在离散 $()_d\ _k J\ \ t$ ， $()_d\ _k u\ \ t$ 信号，也存在连续信号 $X_1(t), X_2(t)$,并呈现出多模式运行特性。因此，接下来有必要确定基于 DC-net 工具构建算法的原则。

基于离散-连续网手段，通过生成佩特里网来形成算法的原理。根据图31，系统在参数综合时的操作顺序依赖于算法任务信号 Vs 。这些信号 Vs 可以由经过适配、用于执行特定系统自动调节的神经网络产生；在一个具体情形中，该系统为坐标控制系统。

最终，基于具备自调节能力的神经网络构建的此类系统，其简化结构图如图32所示。在该系统中，管理层的参数整定算法由神经网络确定，神经元间连接系数则在运行过程中由自动调节书芯进行调整。

自动调节模块以随机方式选择性地改变神经元间连接的系数。此时，根据系统运行质量指标的值，以及对所生成的、表示系统参数整定算法的佩特里网络的分析，选择要改变的神经元间连接系数。

在前一个系统中，其简化结构图如图31所示，Petri网关联矩阵由一个模块生成，该模块的运行过程已通过 Stateflow 图表示。在所研究的系统中，神经网络取代了 Stateflow 图，采用 Petri 网实现。

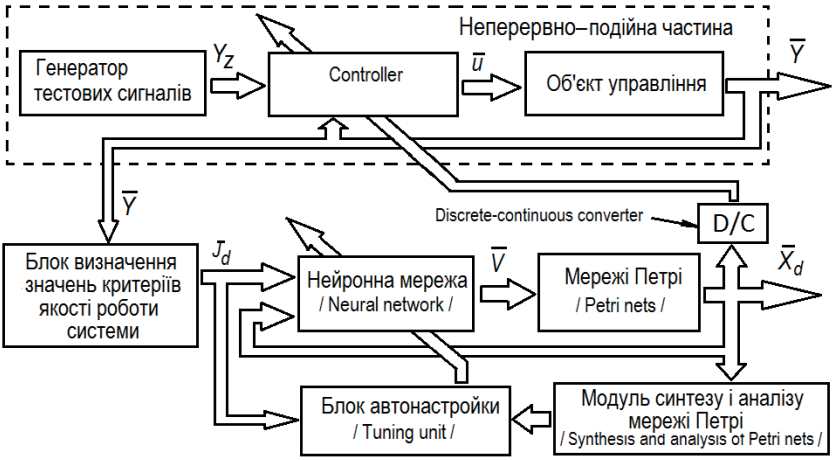


图 32. 系统的简化结构图，其中对协调层控制的调节器进行参数调节

神经网络实现 Petri 网的组合过程（图33）。该过程的结果是生成 Petri 网关联矩阵，该矩阵反映了协调系统参数设置时的动作排序算法。

在 DC-net 编程环境中实现了这样一种系统，其中协调层控制基于 Petri网和神经网络的运行进行综合。图 33 展示了使用 DC-net 环境绘制的该系统方案。

如图 33 所示，神经网络为双层网络。第 2 层神经元间连接的系数直接决定所生成 Petri网的关联矩阵。而第 1 层的权重系数则决定与指标相关的 Petri网某些变迁触发所需附加条件的顺序，

系统运行质量的 ψ，J，其中$J = \int_{t_0}^{t} \psi dt - \int_{t_0}^{t} \psi dt$，$(t_1 - t_0) = (t_3 - t_2)$，$t_0 < t_2 < t_1 < t_3$。

请注意该系统的特点，具体而言，是构建表示系统调节算法的佩特里网关联矩阵的方式。前一种情况下，关联矩阵的每一行都是在激活 Stateflow 图的不同状态时形成的，例如，依次激活 State17–State21（图 31）；而在所讨论的系统中，情

况则相反，关联矩阵的一行是在标记沿离散位置移动的过程中形成的，例如，在位置 P_1, P_6 （图 33）。

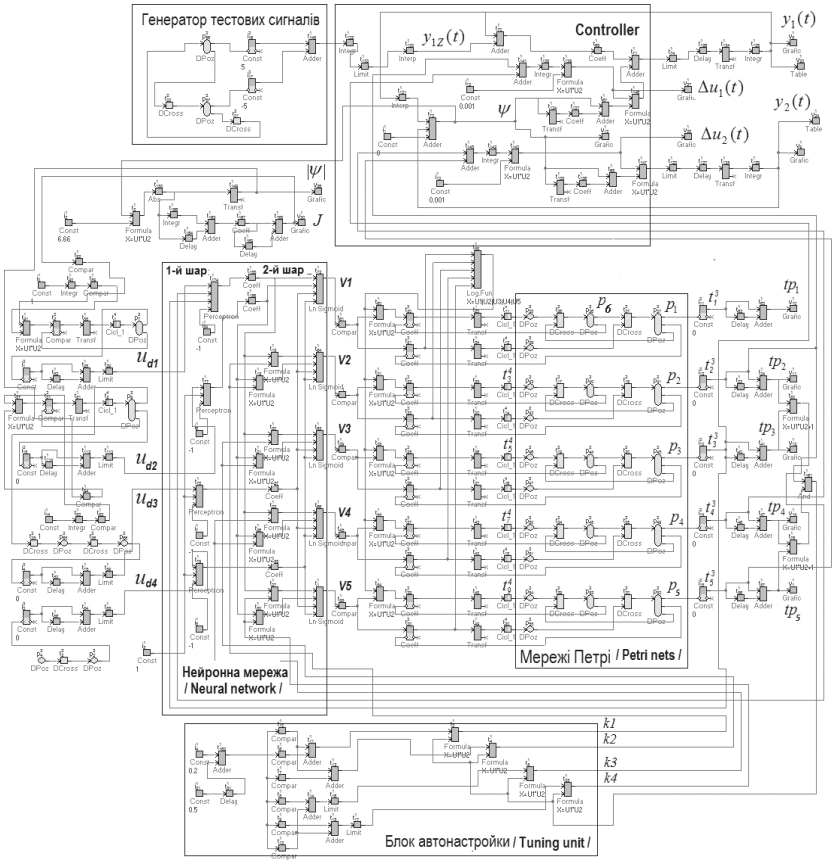


图33. 表示管理系统和基于神经网络的调节系统的离散-连续网络，该神经网络生成佩特里网

根据神经网络生成的算法设定信号 *V1...V5*, , 基于ДБ网手段实现的 DPC 会生成数值序列，并据此构建佩特里网关联矩阵。作为 ДБ 网运行结果的该数值序列如图34所示。

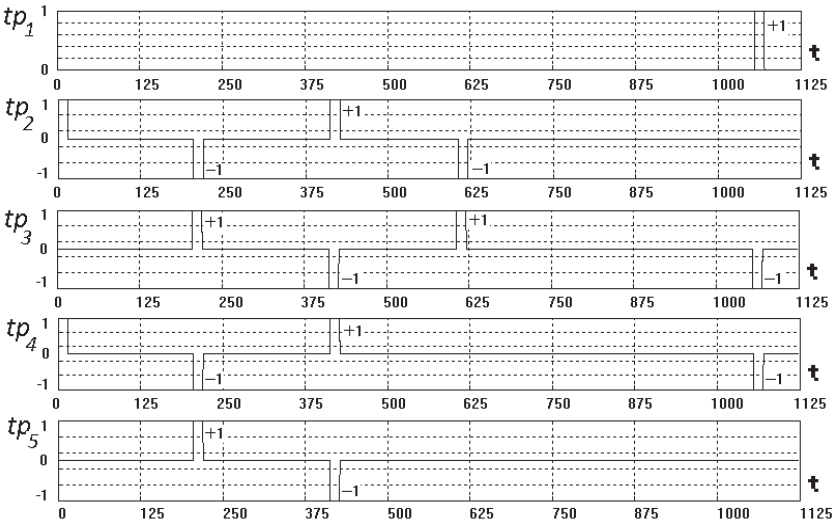


图34. 佩特里网关联矩阵的形成过程

根据图34所示的进程，可以编制关联矩阵，并据此构建佩特里网。生成的佩特里网关联矩阵有5行，对应模块的输出数量 *X1....X5*；有4列，对应佩特里网构建的步骤数量。在这种情况下，关联矩阵如下所示：

$$\left|A_L\right| = \begin{array}{c} \\ tp_1 \\ tp_2 \\ tp_3 \\ tp_4 \\ tp_5 \end{array} \begin{array}{cccc} t_1 & t_2 & t_3 & t_4 \\ 0 & 0 & 0 & +1 \\ -1 & +1 & -1 & 0 \\ +1 & -1 & +1 & -1 \\ -1 & +1 & 0 & -1 \\ +1 & -1 & 0 & 0 \end{array}. \qquad (5)$$

在给定实验中，系统综合过程将分阶段进行。图35展示了合成的Petri网的标识变化过程，其关联矩阵形式如式（5）所示。根据初始标识，协调层的整定参数k_2, k_3增加至 ψ =500，之后在时间 t_1, 时，标识发生变化，使系统恢复

至标准输出状态（图36）。在时间t_2，，当达到准则J=14的值时，标识也会发生变化，相应地，系统调节参数也开始变化。

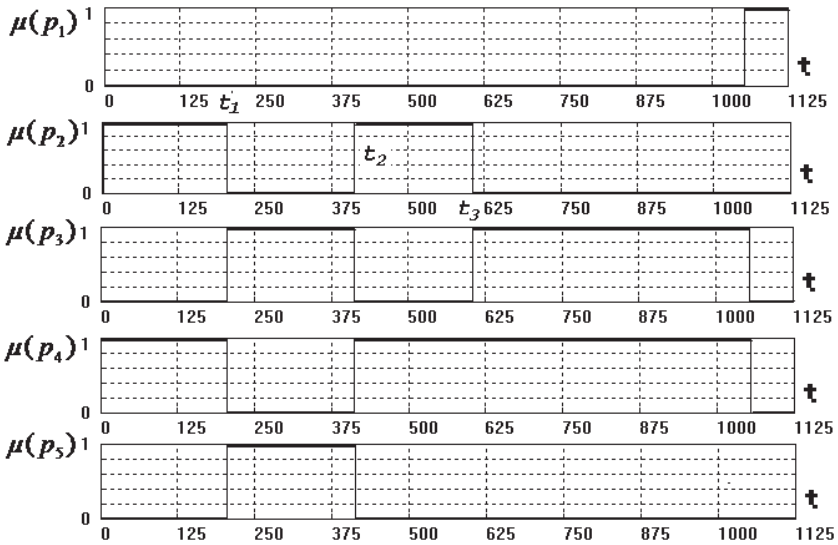


图35. 合成的Petri网标识变化过程

此时，在时间t_2，自动整定模块会在系统综合过程中搜寻正确步骤，并调整第2层神经元间连接的系数。从时间t_3起，系统运行质量指标逐渐降低，这表明系统调节过程正确。

通过确定关联矩阵来形成自动控制系统各层调节算法的过程，取决于已实现的离散-连续网的运行特点。

根据图33所示的示意图，离散-连续网包含若干离散子网，它们由离散-连续变迁t_i^3、t_i^4连接，其中i=1...N. 每个这样的子网都是一个佩特里网，可以独立于整个离散-连续网进行考察。

神经网络生成信号 Vs=|$V1$ .... $V5$|^T，这些信号决定了标记在佩特里网中的移动。同时，标记的移动是协调进行的。例如，标记从位置P_2 移出时，位置P_3.会出现一个标记。

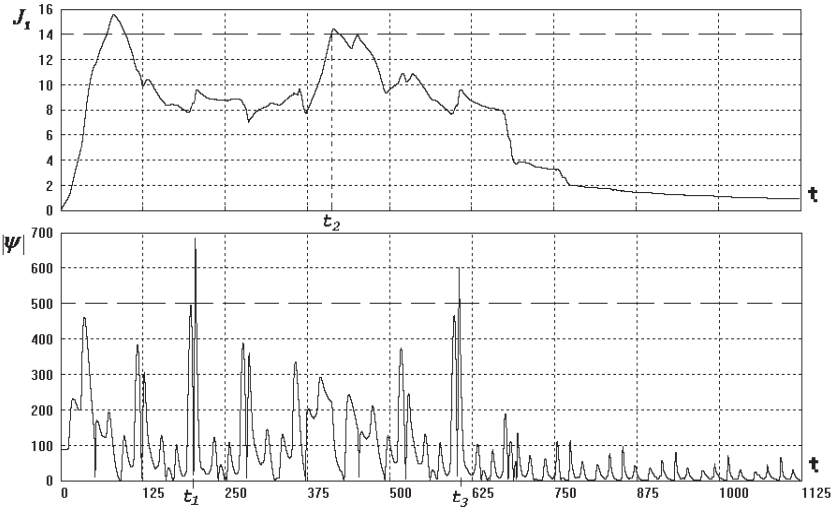


图36. 系统运行质量指标随时间变化的曲线

佩特里网中标识的协调变化，使得可以将这些网络组合成一个整体的佩特里网。如图36所示。

研究结果表明，所开发的系统具有基本可行性，该系统基于人工神经网络的运行来构建佩特里网的组合。确定了自整定系统运行过程中神经网络各个书芯的重新配置方案。然而需要指出的是，应将该系统视为一种近似方案，接近某种最优方案；在该最优方案中，应包含与控制系统综合任务相关的神经网络调节算法。

所研究的系统体现了所形成的智能技术的主要特点，该技术旨在取代专家来综合某一特定班级的控制系统。这种替代能够显著缩短控制系统的开发时间；此外，所形成的技术还将使协调控制系统能够综合出高效的自整定算法。

下一阶段的工作应直接与智能系统的发展相关，该系统用于复杂类别的多层控制系统的自动化调试。

该智能系统应在人工神经网络运行期间，基于佩特里网自动综合实现系统调节。

基于人工神经网络构建、用于合成Petri网的系统具有以下主要特点。基于 MATLAB/Simulink 编程环境开发了协调控制系统自动调节系统。自动控制系统自动调节系统的结构框图如图 37 和图 38 所示。

从图 37 可以看出，调节器 No 1 和 No 2 对偏差进行调节φ ，使受控变量X_1 和X_2, 之间达到给定的值比，其中$_{T}AXb\varphi=\quad\cdot\quad+$；$_{1\,2T}Aaa=\quad$—决定受控变量$X_1$ 和X_2之间给定关系的系数矩阵；$\quad_{1\quad 2T}X\;X\quad X=_$；$b$— 常数项。

3号调节器对受控量$e(t)=X_{Z3}-X_3(t)$ 相对于设定值$X_3(t)$ 的偏差进行调节 X_{Z3}。

在线性模型框架下，管理对象可以用以下方程组描述:

$$X_1=W_{11}(p)\cdot u_1+W_{12}(p)\cdot u_2+X_{01},$$

$$X_2=W_{21}(p)\cdot u_1+W_{22}(p)\cdot u_2+X_{02}, \qquad (6)$$

$$X_3=W_3(p)\cdot(W_{31}(p)\cdot X_1+W_{32}(p)\cdot X_2+X_{03})+X_{04},$$

其中，X_1, X_2, X_3 —受控变量；u_1, u_2 —控制影响；X_{01}, X_{02}, X_{03}, X_{04} — $u_1=u_2=0$时受控变量的初始值；$W_{ij}(p)$ —相应通道的传递函数，其中$i=1...3, j=0...2$.

此时，管理对象模型的结构图可能有不同形式。例如，当$W_{12}(p)=W_{21}(p)=W_{31}(p)=0$，$W_{32}(p)=W_3(p)=1$，$X_2=X_3, X_{03}=X_{04}=0$。

自动控制系统自动调节系统的控制部分与神经处理器相连，该处理器在图38中以 Subsystem 31 neuroprocessor 书芯表示。该处理器由若干局部神经网络组成，每个网络分别对应一种自动控制系统分阶段调节算法。图38在处理器结构图片段 Subsystem 31 中，以 Subsystem 1 和 Subsystem 2 书芯表示局部神经网络。

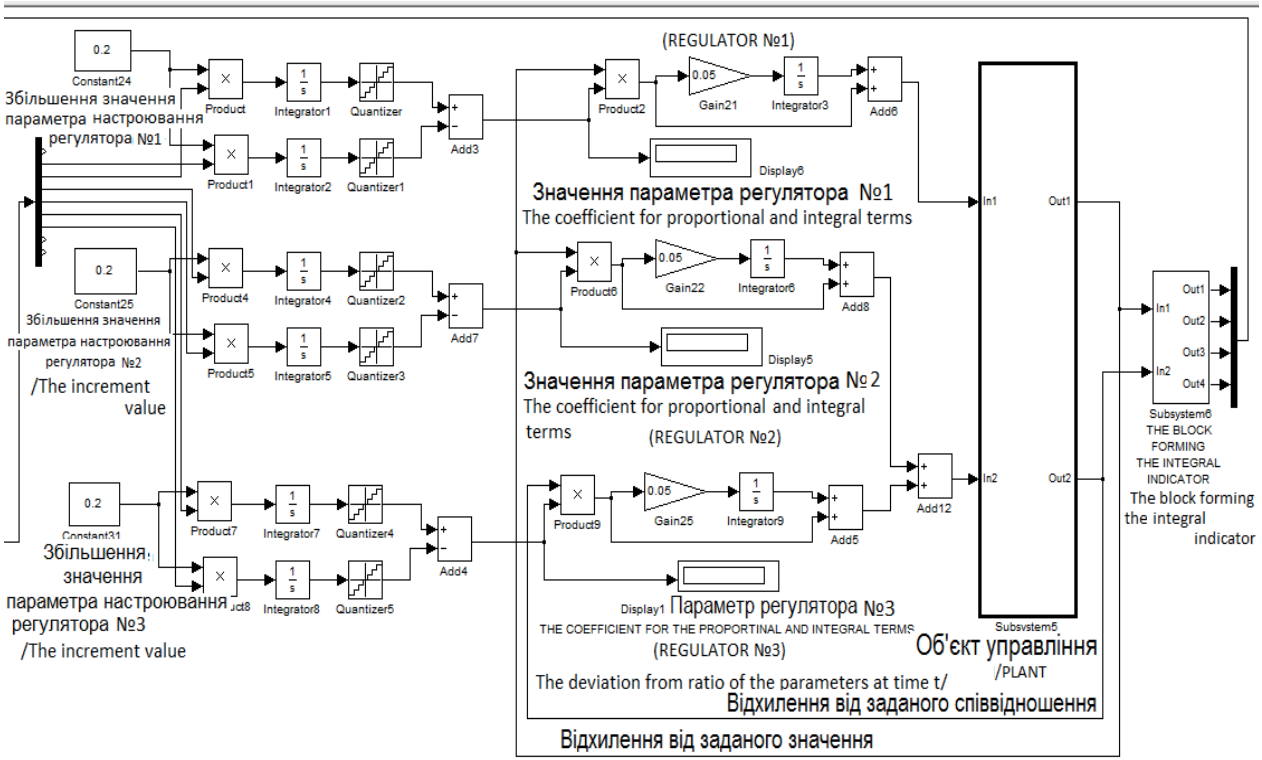


Рис. 37. Структурна схема системи автоматизованого настроювання регуляторів різних рівнів координувальної системи автоматичного управління

调节某一自动控制系统时，必须设定调节器参数 No 1、No 2、No 3 的增量，分别对应 Constant 24、Constant 25、Constant 31模块。然后，根据控制对象的惯性，确定时间间隔 t_1，以评估自动控制系统运行质量指标的增量 ΔJ_{00}, ΔJ_{01}, ΔJ_{02}, ΔJ_{03}。因此，系统调节与以下指标的最小化有关：

$$\Delta J_{00} = \left[\int_{t_0}^{t_1} |e(t)|dt - \int_{t_1}^{t_2} |e(t)|dt \right] \to \min ,$$

$$\Delta J_{01} = \left[\int_{t_0}^{t_1} |\varphi(t)|dt - \int_{t_1}^{t_2} |\varphi(t)|dt \right] \to \min ,$$

$$\Delta J_{02} = \left[\int_{t_0}^{t_1} \left(|e(t)| + 3 \cdot |\varphi(t)| \right) dt - \int_{t_1}^{t_2} \left(|e(t)| + 3 \cdot |\varphi(t)| \right) dt \right] \to \min ,$$

$$\Delta J_{03} = \left[\int_{t_0}^{t_1} \left(|\varphi(t)| + |e(t)| \right) dt - \int_{t_1}^{t_2} \left(|\varphi(t)| + |e(t)| \right) dt \right] \to \min ,$$

其中，*e(t)* — 被控变量相对于设定值的偏差；φ*(t)* — 随时间变化的被控变量之间的设定值关系偏差。

时间间隔 $t_1$10、15、16、12、40 在图示的 Transport Delay 模块中标记。最终，需要为处理器设定任务，以启动特定的局部神经网络。该网络将生成自动控制系统分步调节的操作序列，并以合成的Petri网的形式显示调节结果。

如前所述，所讨论的Petri网自动综合过程的本质在于依次执行以下两个阶段：

1）从众多算法中选择所需算法；

2）修正所选算法及其对应的Petri网。

这两个阶段可以通过人工神经网络（ШHM）及其训练来实现。我们将这种人工神经网络表示为书芯 Subsystem 31 (PROCESSOR)。

处理器的上层或人工神经网络的输入层执行算法分类功能，并选择要启动运行的局部神经网络。

局部神经网络按照反馈原理与同步运行的Petri网进行交互，由此可以实现所构建Petri网的组合。这一过程如图39所示。

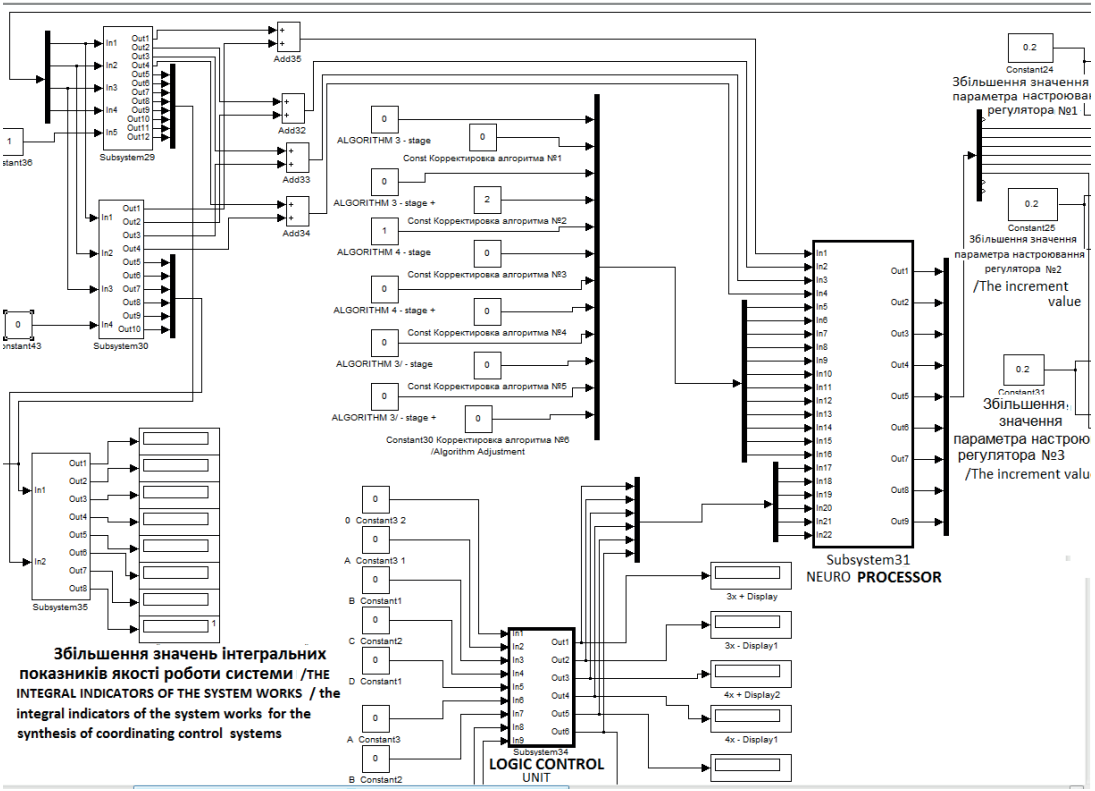


Рис. 38. Структурна схема управляючої частини системи автоматизованого настроювання КСАУ

如图所示，综合得到的佩特里网的关联矩阵与神经网络第 2 层的神经元间连接系数矩阵相对应。因此，如果综合得到的网络呈现出不合理的算法，那么人工神经网络中的神经元间连接系数也应相应改变。

神经网络通过结构控制变迁 t_{17}, t_{18}, t_{19}, t_{20}, 与佩特里网交互，其输出信号依赖于库所标识 p_0, p_2, p_4, p_5, ，具体如下:

$$X_{out,t_{17}} = \begin{cases} 1 & npu \quad \mu(p_0) = 1 \\ 0 & npu \quad \mu(p_0) = 0 \end{cases}.$$

变迁 t_{13}, t_{14}, t_{15}, t_{16} 在存在来自人工神经网络的输出信号且谓词函数 $\Pi_i \to t_{ij}$ 为真时触发。变迁 t_{13}, t_{14}, t_{15}, t_{16} 触发时，标记出现在输出库所 p_{11}, p_{12}, p_{13}, p_{14}。

因此，在运行过程中，局部神经网络将生成与合成的Petri网相应关联矩阵对应的输出信号序列。通过Petri网的同步运行，可以组合Petri网；在特定情况下，该组合将表示自动控制协调系统的调节算法。

从图41可以看出，Petri网组合是在变迁同时触发时实现的。例如，变迁 t_9 和 t_6 同时触发时合并为变迁 t_1, ；变迁 t_7 和 t_{12} 同样合并为变迁 t_3, ，依此类推，即可完成相应Petri网的组合。

与控制协调系统调节相关的实验。在 MATLAB/Simulink 2012 编程环境中，基于所开发的自动生成佩特里网的系统，实现了对多个不同协调自动控制系统的自动化调节。

与Petri网综合过程相关的实验结果曾多次发表于科学著作中 [3; 8; 12]。为验证所开发系统在原理上的可行性，图42展示了用于冷却产品的隧道式冷却室中自动控制协调系统的调节过程。

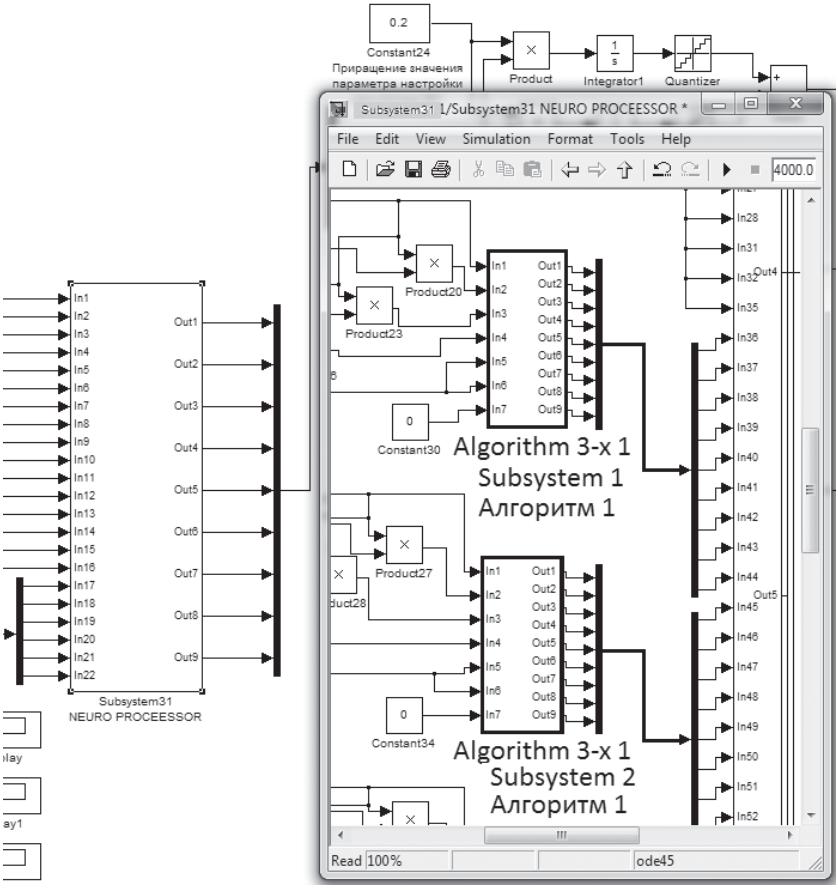


图39. Subsystem 31 Neuro processor 书芯结构图片段

带隧道室的制冷装置模型作为管理对象，可用方程（6）描述 [30]，其中$_{11}$ 0,02 exp(1) ( ) ($\overline{=}$ 15 +1 · 15 +1) ()$PWpppp$—按控制影响通道的传递函数 u_1 对应电机转速 隧道室内风机的转速——隧道室入口处的空气温度X_1, ℃; $_{12}$0,02 exp(1) ( ) ($\overline{=}$ 90 +1 · 90 +1) ()$PWppp$—按控制影响通道的传递函数 影响 u_2 对应隧道内输送机的运行速度

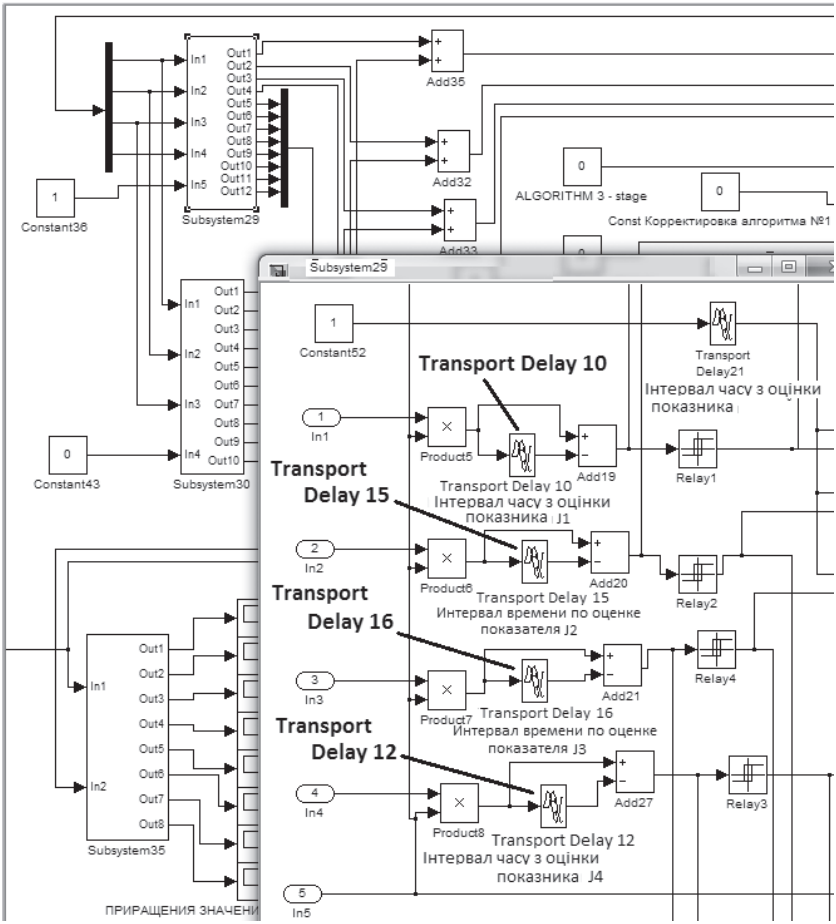
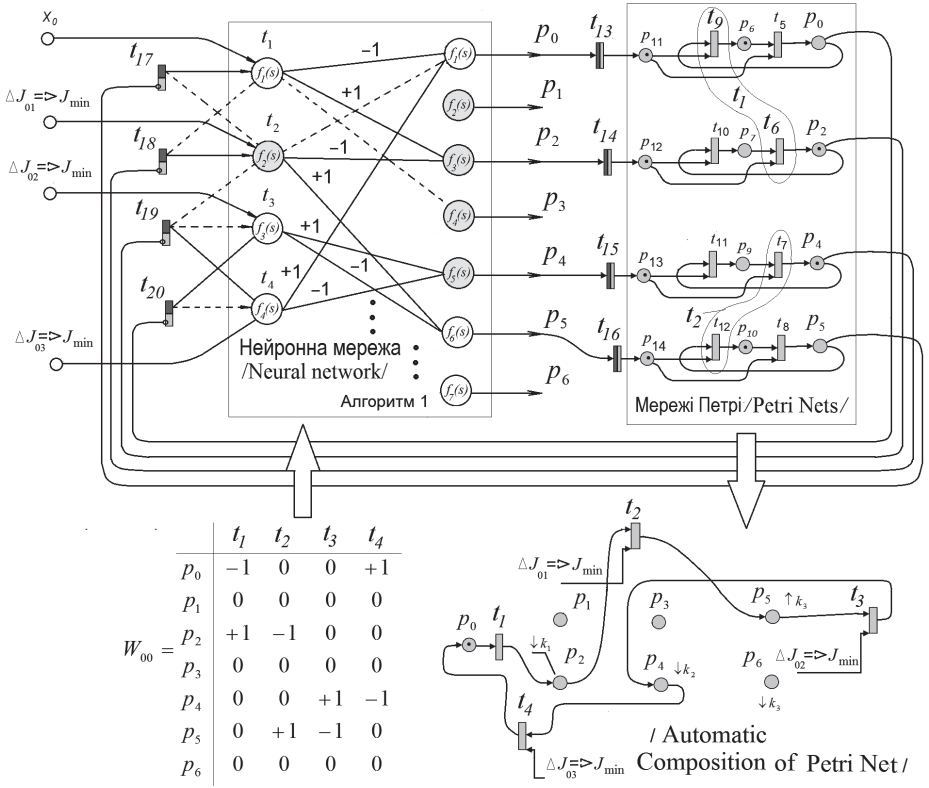


图40. 控制系统工作质量综合指标增量形成 схем的片段

腔室——隧道腔入口处的空气温度 X_1，℃；$_{21}0{,}04\exp(1)()($ $=$ $10\ \ +1\ \cdot 110\ \ +1\ \ )()PWppp$—控制作用通道的传递函数 u_1 对于隧道腔内增压风机电机的转速——隧道腔出口处的空气温度 X_2，℃；$_{22}0{,}04\exp(1)()($ $=$ $90\ \ +1\ \cdot 90\ \ +1\ \ )()PWppp$—通道的传递函数



$$W_{00} = \begin{array}{c|cccc} & t_1 & t_2 & t_3 & t_4 \\ p_0 & -1 & 0 & 0 & +1 \\ p_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_2 & +1 & -1 & 0 & 0 \\ p_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_4 & 0 & 0 & +1 & -1 \\ p_5 & 0 & +1 & -1 & 0 \\ p_6 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array}$$

Рис. 41. Схема формування композиції мережі Петрі при функціонуванні штучної нейронної мережі

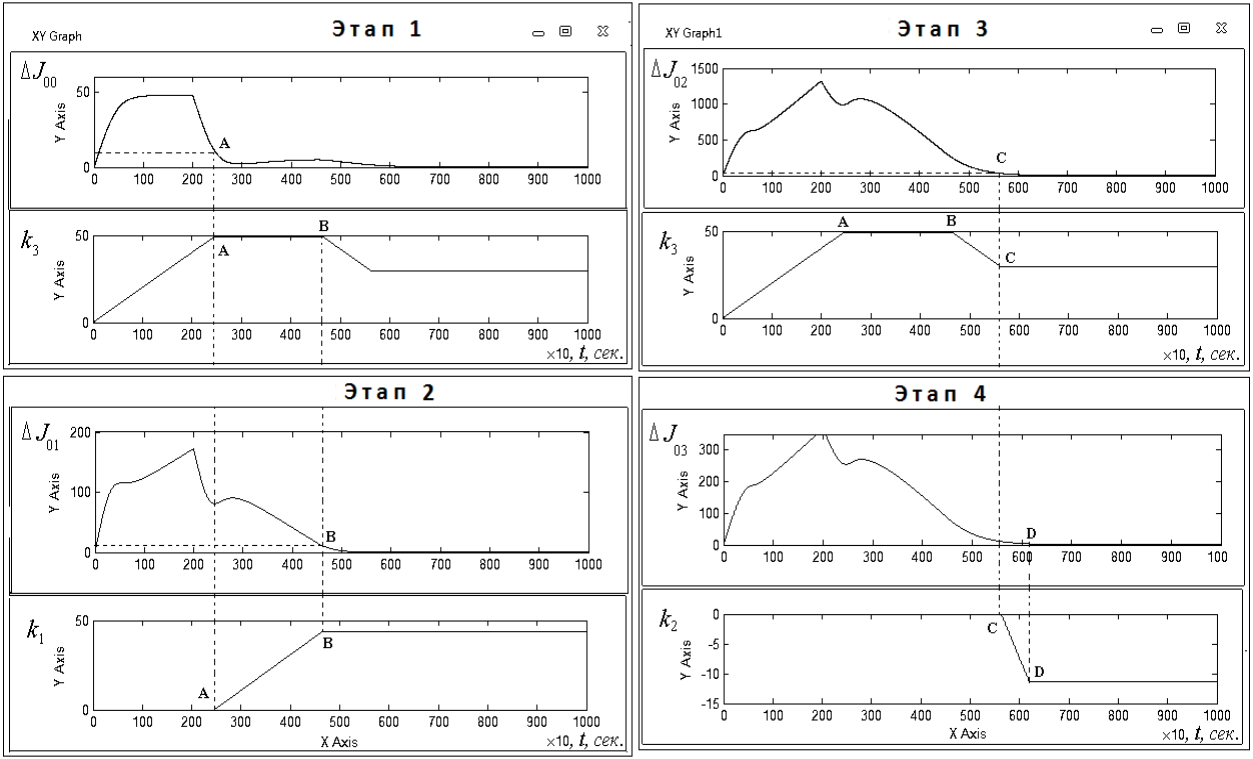


Рис. 42. Часові характеристики процесу настроювання координувальної системи автоматичного управління процесом охолодження продуктів у тунельній камері

输送机在隧道室内的运行速度控制输入 u_2 ——隧道室出口处的空气温度 X_2, °C； 01 10X = – °C； 02 4X = – °C； $W_{31}(p) = 0$, $W_{32}(p) = W_3(p) = 1$, $X_2 = X_3$, $X_{03} = X_{04} = 0$。

所研究系统的控制律:

$$\bar{u} = \begin{bmatrix} u_1 & u_2 \end{bmatrix}^T;$$

де $u_1 = k_1 \cdot \left(1 + \frac{0{,}05}{p}\right) \cdot \varphi$; $u_1 = k_2 \cdot \left(1 + \frac{0{,}05}{p}\right) \cdot \varphi + k_3 \cdot \left(1 + \frac{0{,}05}{p}\right) \cdot e$;

( )φ =[–1 3]· + tXb — 受控变量值与给定关系的偏差； 0b = ;

[1 2 ( ) ( )]^T X X t X t= — 受控变量向量； $e(t) = X_{2Z} - X_2(t)$; X_{2Z}— 制冷隧道室出口处空气温度的给定值， ℃。

从图 42 可以看出，在每个调节阶段，随着某个调节参数k_j, $j=1...3$ 的变化，相应系统运行质量准则（2）的增量 ΔJ_{0i}, $i=0...3$ 都会降至最小值。在 0 至 A 点的时间间隔内，调节上层管理的调节器 No 3；在 A 至 B 段，调节协调层管理的调节器 No 1。随后在 B–C 段，校正调节器 No 3 的调节参数 调节 k_3，最终在第 4 阶段调节协调层的调节器 No 2。

因此，系统获得自动控制系统的最终调节参数值k_1, k_2, k_3，这些参数能够确保相应的调节质量，同时保证运动分离模式 [19]。

调节过程的每个阶段，如图42所示，均按照生成的Petri网实现，该网络反映了自动控制系统的调节过程。

人工神经网络逐步实现Petri网的构建和运行。每一步均呈现相应的Petri网，编号为1、2等，如图43所示。

例如，根据图 43，如果变迁 t_1 导致不期望的情境——系统综合质量指标的值超出允许边界，则会标记变迁 t_1 上的错误，并调整神经元间连接系数，从而综合出编号为 3 的 Petri网。因此，如果变迁 t_1 和 t_2, 上出现错误，就会形成编号为 4 的 Petri网，依此类推，按照图 43 所示的操作进行。

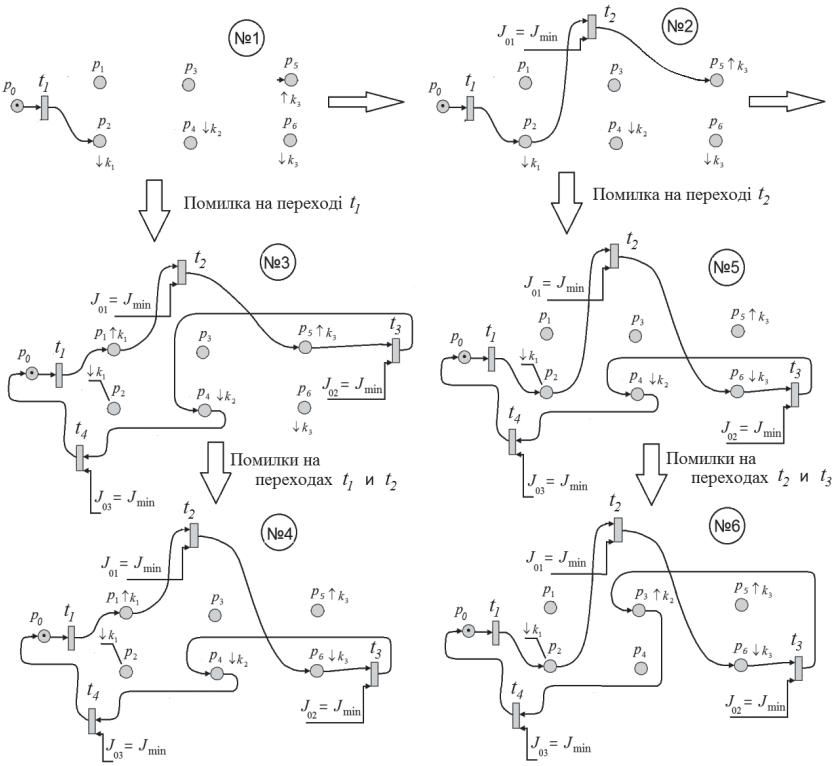


图43. 综合不同Petri网的进程可视化，这些网络反映了自动控制协调系统调节的阶段

从图 42 所示的时间特性可以看出，系统调节过程是在系统稳定运行的条件下进行的。系统运行质量指标各项增量的值都趋近于零，这不仅表明综合控制系统运行稳定，也表明调节取得了积极结果。图 41 所示的 Petri网体现了相应的系统调节算法，但用户或专家对该 Petri网进行修正，会导致人工神经网络重新调节过程中的操作。因此，对于导致 Petri网按图 43 发生变化的这类操作，其协调过程应作为一种单独的有教师人工神经网络训练方法加以探讨。

结论。我们解决了提出的问题，即开发多层协调自动控制系统的自动整定系统。在完成该任务的过程中，证实了基于人工神经网络运行、自动综合佩特里网的系统具有原则上的适用性。

本研究是在敖德萨国立食品技术学院工艺流程自动化与机器人系统教研室的科学研究框架内，于2013—2020年开展的。

参考文献

1. Kotov, V. E. 佩特里网。莫斯科：科学出版社，1984年。160页。2. Tsarev F. N., Shalyto A. A. 将遗传编程应用于“智能蚂蚁”问题中的自动机生成。莫斯科：Fizmatlit出版社，2007年。第2卷。第590–597页。3. Aleksandrov A. V. 等。用于控制无人机模型的有限自动机生成。信息技术、力学与光学科学技术通报。2011年。第2期（72）。4. Gurskiy A. A. 佩特里网自动综合中的神经网络整定。工艺与业务流程自动化。敖德萨，2018年。第10卷，第1期。第22–32页。5. Peterson J. 佩特里网理论与系统建模。莫斯科：Мир，1984年。264页。6. He D. W. 等。用于制造系统控制与调度的佩特里网自动生成中的分解。国际生产研究杂志。2000年，第38卷，第6期，第1437–1457页。数字对象标识符：10.1080/002075400188942。7. Ndiaye M. A. A. 等。利用有色Petri网自动模型生成，在售前不确定情境下评估工业控制系统的性能。*2016*年控制、决策与信息技术国际会议 (CoDIT)。IEEE，2016年。第671–676页。数字对象标识符：10.1109/CoDIT.2016.7593643。Durmuş M. S., Yıldırım U., Söylemez M. T. 用于铁路联锁设计的佩特里网监督器自动生成。*2012*年第二届澳大利亚控制会议。IEEE，2012年。第180–185页。9. Kharitonov D. I. 等。以佩特里网术语生成程序模型示例的方法。信息系统建模与分析。2015年。第4期，第563–577页。数字对象标识符：10.18255/1818-1015-2015-4-563。Gurskiy A. A. 等。通过自动生成佩特里网构建协调控制系统的综合算法。工艺与业务流程自动化。2016年。第8卷，第3期。第13–23页。11. Nesteryuk O. H. 离散连续自动化控制系统建模与分析的信息技术：论文摘要……

技术科学副博士：专业 05.13.06“信息技术”。敖德萨，2016年。23页。12. Denisenko V. A., Nesteryuk A. G. 离散连续网可达性检查模块。敖德萨国立食品技术大学学报。敖德萨：2004年。第27辑。第130–137页。13. Zgurovsky M. Z., Denisenko V. A. 具有可控结构的离散连续系统。基辅：科学思想出版社，1998年。350页。14. Drighiciu M. A. 混合佩特里网：混合系统建模框架。*2017*年国际机电与电力系统会议（SIELMEN）。IEEE，2017年。第020–025页。数字对象标识符：10.1109/SIELMEN.2017.8123285。15. Gurskiy A. A., Goncharenko A. E., Denisenko A. V. 在构建协调控制系统自动整定算法时，基于离散连续网工具生成佩特里网。电气与计算机系统。敖德萨，2017年。第26(102)期。第78–87页。16. Gurskiy A. A., Goncharenko A. E., Dubna S. M. 协调自动控制系统整定中的佩特里网自动综合。电气与计算机系统。敖德萨，2020年。第32(108)期。第34–44页。17. Gurskiy A. A., Denisenko A. V., Dubna S. M. 基于人工神经网络运行的佩特里网自动综合。无线电电子学、计算机科学与控制。2021年。第2期。第84–92页。数字对象标识符：https://doi.org/10.15588/1607–3274–2021–2–9。18. Zaitsev D. A. 佩特里网分解。控制论与系统分析。2004年。第5期。第131–140页。19. Zaitsev D. A. 佩特里网组合分析。控制论与系统分析。2006年。第1期。第143–154页。20. Gurskiy A. A., Goncharenko A. E., Dubna S. M. 协调自动控制系统的整定算法。无线电电子学、计算机科学与控制。2020年。第1期。第190–199页。数字对象标识符：https://doi.org/10.15588/1607–3274–2020–1–19。21. Sutton R. S., Barto A. G. 强化学习。莫斯科：Binom出版社，2011年。380页。22. Boychuk L. M. 协调自动控制系统综合。莫斯科：Energoatomizdat出版社，1991年。160页。23. Gurskiy A. A., Denisenko V. A., Goncharenko A. E. 制冷离心压缩机性能的自动调节系统。制冷技术与工艺。2013年。第5期。第72–76页。24. Filimonov A. B., Filimonov N. B. 关于协调自动控制系统综合的问题。南方联邦大学学报。技术科学。2012年。第128卷，第3期。第172–180页。25. Efanov V. N., Mukhamedshin E. R. 具有层级结构的机载信息控制系统中的协调控制综合

结构。乌法国立航空技术大学学报。控制、VTиИ。乌法：乌法国立航空技术大学，2007年。第9卷，第2期，24–26，20–16（）。C. – 。Denisenko V. A.、Nesteryuk A. G. 混合系统的可达性。制冷技术与工艺。2005。第3期。第87–93页。27. Gurskiy A. A.、Denisenko V. A.、Goncharenko A. E. 配备离心式压缩机的制冷装置神经模糊控制系统自整定回路。工艺与业务流程自动化。2014年。第6期。第92–101页。28. Gurskiy A. A.、Goncharenko A. E.、Dubna S. M. 机器人机械臂驱动装置的自动控制协调系统。工艺与业务流程自动化。2016年。第4期。第11–21页。数字对象标识符：https://doi.org/10 578 29 15673 8 4 . /atbp.v i . . Цыбулькин G. A. 具有运动学冗余的机械臂机器人的双层协调控制。控制与信息学问题。1995。第3期。第143–150页。30. Dubna S. M. 等。隧道式冷却室中产品冷却过程控制算法的开发。制冷技术与工艺。敖德萨，2018年。第5期。第67–71页。国际标准连续出版物号 0453–8307。

大型旋转电机技术状态自动监测与诊断系统

Граняк В. Ф.

本文提出了一种用于大功率旋转电机的自动监测与诊断系统的前瞻性软硬件实现方案。建议基于一种非标准人工类神经网络实现该自动化系统，该网络作为形成逻辑结论的关键元素，是极端复杂系统的典型代表。文中指出，所提出的解决方案可视为一个独特的个案，具有重要的实用价值，因为它能够适配于解决广泛类别的任务。

研究表明，在构建此类系统时，振动信号是最具前景的输入信号之一。尤其是，该参数信息量较高，可在电机运行的实时模式下直接测量，无需对其结构进行重大干预。

为提高自动监控与诊断系统的工作效率，本文确定并从理论上论证了振动信号时间实现的持续时长，该时长适用于获取所研究节点处振动信号的互相关系数。此外，本文提出了综合性高信息量数值准则，用于评估转子不平衡、主电磁场强度对称性增加、定子回路电流不对称以及轴承缺陷对小波变换系数的影响。该准则以研究时间区间内信息频带小波系数的均方根值表示，且该时间区间远大于电机转子旋转周期。研究表明，所述准则对电机运行过程中可能出现的无信息单次扰动影响的敏感度较低。

本文提出了一种用于大型旋转电机自动化监控系统与诊断的硬件和软件实现方案，具有良好的应用前景。该自动化系统拟基于一种非标准人工神经网络构建，该网络作为形成逻辑结论的关键要素，是复杂度极高的系统的典型代表。研究表明，所提出的方案可视为一个独特的个例，具有重要的实用价值，因为它能够适配于解决广泛类别的问题。

研究表明，在构建此类系统时，可采用的最有前景的输入信号之一是振动信号。尤其是，该参数信息量充足，能够在无需大幅改动电机设计的情况下，直接对电机进行实时测量。

为提高自动控制与诊断系统的效率，本文确定并从理论上论证了振动信号时间实现的持续时长，该时长应用于获取所研究节点中振动信号的相关系数。此外，本文提出了综合性、高信息量的数值判据，用于评估转子不平衡、主电磁场强度对称性增加、定子电路电流不对称性以及轴承缺陷对小波变换系数的影响，并以均方根值的形式表示。该时长超过电机转子的旋转周期。研究表明，这些判据对电机运行期间可能发生的无信息量单次扰动具有较低的灵敏度。

如今，自动化旋转电机监测与诊断系统的发展已成为一种明显趋势。这既是由于达到保修期限的相关设备数量不断增加，也是由于现代计算机技术和测量信息处理方法不断发展所致 [1]。然而，迄今尚无一套通用的

此类系统构建理论，这大大增加了其实践应用的难度。

在分析旋转电机运行过程中出现缺陷的概率时，研究表明，对于任何电机，在评估其运行可靠性时，采用薄弱环节法是可取的。该方法能够筛选出最典型的缺陷，这些缺陷在运行此类设备时具有较高的发生概率 [2]。对电机最可能出现的缺陷进行统计分析后发现，这些缺陷包括：转子不平衡、轴承损坏、转子绕组绝缘损坏（击穿）、定子绕组绝缘损坏（击穿）、导杆固定件损坏或定子变形，以及固定件机械刚度的降低 [3]。

因此，基于上述内容可以得出结论：开发一种基于完善的设备构建理论概念的大型旋转电机自动监控与诊断系统，是一项具有现实意义的科学应用任务。

水轮发电机组自动监控技术状态与诊断系统通用硬件结构的开发。大型旋转电机自动监控与诊断系统的实现，应具备灵活性和在较大范围内进行现代化改造的能力，以适应运营条件和特点，以及所需的效率 [4; 5]。因此，这类系统构建的一般原则应包括采用模块化方法增加测量通道数量，并能够通过连接附加设备和更改系统运行的软件算法相对轻松地进行现代化改造。

此外，显然有必要采用双级硬件处理系统来处理输入信息（测量结果）。具体而言，宜将第一级设计为离散数字转换器（微控制器），用于将测量信息整理成适合后续处理的测量信息包。根据测量通道的数量、测量算法的复杂程度以及可用的硬件处理能力，第一级可为每台机组配置一个或多个数字转换器 [4; 5]。

第二级硬件层宜基于人工类神经网络实现，可设计为高性能服务器，用于预处理输入数据包，并据此计算能够表征电机技术状态的高信息量准则。为提高算法的运行速度，并考虑到从预处理书芯传输至人工类神经网络（人工神经网络）的信息量较大，宜在同一硬件层内执行上述算法操作 [6]。

在最简单的情况下，构建旋转电机技术状态自动化监测与诊断系统时，该系统的结构可类似于 [7； 8]。图 1 展示了一种最简单的电机自动化监测与诊断系统的结构示意图。

该装置的工作方式如下：n 个振动传感器 11–1n 将电机 n 个关键节点处的振动加速度转换为直流电压，其值在 n 个比例放大器 61–6n 中放大至适合系统工作的值；n 个带通滤波器 81–8n 对输入信号中振动监测过程中不予研究的高次谐波进行滤除，仅将用于监测振动状态的谐波分量传送至标准输出。来自 n 个带通滤波器 81–8n 标准输出的信号，分别传送至 n 个模拟内存元素 91–9n 的输入端；当整形器 7 的标准输出端送来一个单位信号时，这些元素便将信号值存储下来。该单位信号对应于电机转子转过确定角度 α 的时刻。整形器 7 标准输出端的同一逻辑高电平信号还被送至微控制器 13 第一端口的第一输入端，作为振动加速度测量转换操作的启动信号。随后，微控制器 13 第一端口的第二标准输出端生成地址信号，该信号对应于模拟多路复用器 11 的第一个信息输入端，从而使其第一个输入端的信号出现在标准输出端。此时，微控制器 13 第一端口的第一个标准输出端生成模数转换启动信号，并将其送至数模转换器 12 的第二输入端；数模转换器 12 的第一输入端接收来自模拟多路复用器 11 标准输出端的信号，数模转换结果则从数模转换器的标准输出端读取

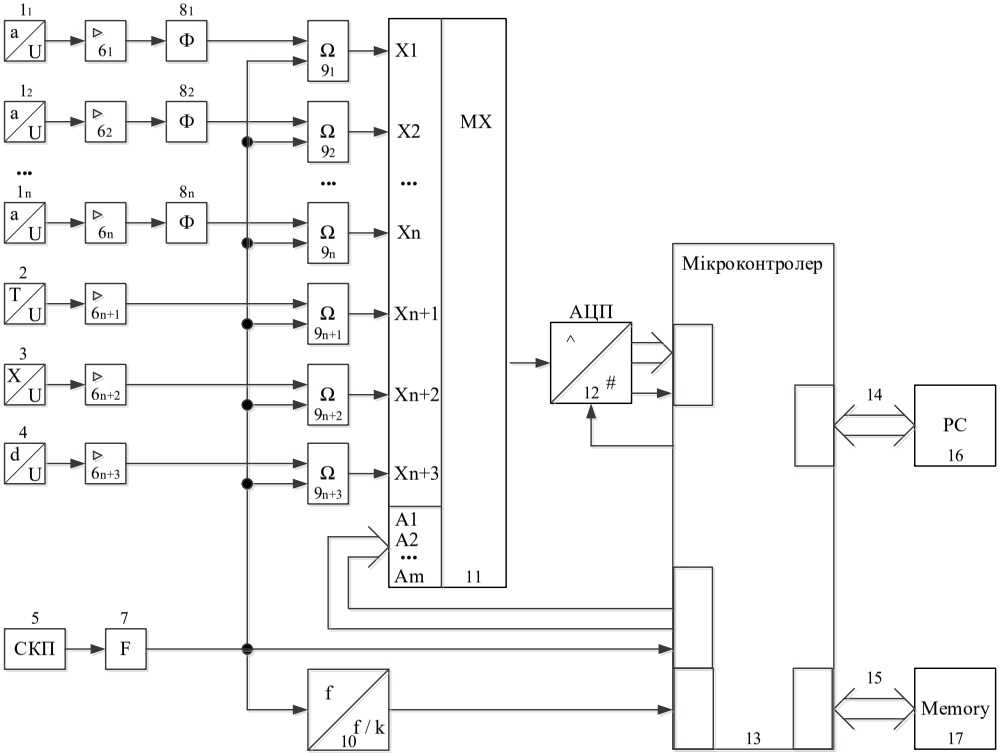


Рис. 1. Структурна схема однієї з найпростіших систем автоматизованого контролю та діагностування обертової електричної машини

转换器 12 通过微控制器 13 第二端口的第一个输入端接收信号；当微控制器 13 第二端口的输入端收到测量转换结束信号时，即完成转换。随后，在微控制器 13 第一端口的第二个输出端生成模拟多路复用器 11 下一个信息输入端的地址。其余操作循环重复，直至获得模拟多路复用器 11 所有输入端的信号数字值，这些输入端分别对应于机组所有关键点的振动加速度值、当前极绕组的温度值、转子当前轴向位移值，以及转子与定子之间气隙的大小。完成这些操作后，测量系统转入等待整形器 7 输出下一个单脉冲的模式；收到该脉冲后，操作循环重复。

当电机转子转过指定角度 α 时，角位置传感器 5 的输出端产生信号，并将其送至整形器 7 的输入端。在整形器 7 中，该信号被转换为逻辑 1 信号，并送至模拟内存元素 81–8n+3 的第二输入端以及微控制器 13 第一个港口的第一输入端；此外，还送至分频器 10 的输入端。当与分频系数相对应的第 k 个脉冲到达分频器输入端时，其输出端产生逻辑 1 信号，并将其送至微控制器 13 的定时器输入端，作为记录微控制器 13 定时器所计数当前数值的信号。当电机转子转过 360 度（完整旋转）时，角位置传感器 5 的输出端产生一个持续时间较长的信号，该信号经整形器转换为一个延长的逻辑 1 信号，作为转子新一周开始的标记，供微控制器 13 用于检查分频器 10 的工作是否正确。

在非接触式温度传感器 2 的输出端，形成与转子当前极绕组温度成比例的恒定电压信号。该信号从非接触式温度传感器 2 的输出端传送至第 n+1 个比例放大器 6 的输入端，在此被放大至适合后续数字处理的电平。从第 n+1 个比例放大器 6 的输出端，放大后的信号传送至第 n+1 个模拟存储元件 9 的第一输入端；当整形器 7 的输出端向其第二输入端输入控制信号时，该信号即被存储。

在转子轴向位移非接触传感器 3 的输出端，形成与转子当前轴向位移成比例的恒定电压信号。该信号从转子轴向位移非接触传感器 3 的输出端传送至第 n+2 个比例放大器 6 的输入端，在此被放大至适合后续数字处理的电平。从第 n+2 个比例放大器 6 的输出端，放大后的信号传送至第 n+2 个模拟存储元件 9 的第一输入端；当整形器 7 的输出端向其第二输入端输入控制信号时，该信号即被存储。

在转子与定子之间气隙传感器4的输出端，形成与转子当前转子轴向位移成正比的恒定电压信号。该信号从转子与定子之间气隙传感器4的输出端传送至第n+3个比例放大器6的输入端，在此被放大到适合后续数字处理的电平。从第n+3个比例放大器6的输出端输出的放大信号，传送至第n+3个模拟存储元件9的第一输入端；当整形器7的输出端向其第二输入端输入控制信号时，该信号被存储。

测得电机各关键点的振动加速度值、转子当前磁极绕组的温度、转子当前轴向位移、转子与定子之间的气隙，以及计时器在电机转子旋转角度 kα 所用时间内计得的数值代码，通过第一个 14 和第二个 16 接口转换装置及通信线路传输至服务器 17。此外，服务器 17 还接收来自标准电流和压力传感器的测量信息。服务器 17 对原始测量信息进行预处理，判定是否存在缺陷，并显示监测与诊断操作的结果。

外部存储器 15 用于暂存与测量值成比例的数值，并在需要时存储微控制器 13 的运行程序代码。

神经网络构建概念的开发与理论论证，该网络作为自动化监测与诊断系统决策的关键元素。当今科学发展的主要趋势之一，是可归入极高复杂度系统这一班级的系统所占比重不断增加 [9; 10]。这类系统的主要特点是存在大量关系和（或）影响因素，对它们进行经典数学描述是不可能的，

或者由于模型复杂性显著增加而不切实际，以致模型不适用于实际使用 [10; 11]。

鉴于社会对可用于解决此类任务的科学方法存在广泛需求，超越经典数学建模范畴的各种理念得到积极发展，完全合乎逻辑。尽管迄今为止，解决此类任务最常用的方法仍是专家评估法 [12], 但显而易见，科学与技术的现代发展水平需要其他更快速的自动化方法，因此也需要劳动强度更低的方法，这些方法可用于构建快速响应技术系统。相对较新的模糊逻辑和类神经建模方向 [13]便属于此类方法。然而，它们的一个显著缺点是缺乏明确的算法来构建语言项，或选择输入参数及类神经网络的结构类型。因此，每个单独构建的系统都是独特的技术解决方案，具有重要的科学与实践价值。

具有重要实际意义、且涉及在属于极端复杂系统的系统中进行分析并形成逻辑结论的一项任务，是旋转电机的诊断 [14]。

电机技术状态监测与诊断最有前景的方法之一是振动诊断 [14；15], 因为在紧急情况下，振动信号几乎能即时响应技术状态的变化，这一特性不可或缺；此时，诊断速度和作出解决方案的速度是决定性因素。此外，振动声学信号具有很高的信息量，在受控点数量充足时，不仅能以较高的可信度确定是否存在某种缺陷，还可能发现缺陷的具体位置，并预测其发展所需的时间 [16]。

电机振动声学参数的形成过程极其复杂，这与激励作用的动态性有关，而激励作用源于电机机械部分相当复杂的结构，该结构包含大量空间分布的、通过弹性和黏性连接相连的元素 [17]。此外，正如已经指出的，仅分析振动信号无法确保足够高的监测可靠性，因此也无法达到诊断系统可接受的效率。因此，现

代此类系统的构建概念不仅要求分析振动声学信号，还要求分析其他附加参数，这必然会增加研究对象的复杂性 [6]。

由于实际上不可能建立旋转电机机械连接的精确数学模型，因此宜将其视为“黑箱”。也就是说，建模的不是它的结构，而是其外侧运行 [14]。因此，宜采用人工类神经网络（人工神经网络）来解决所提出的任务。

由于诊断不可避免地需要进行逻辑推理，因此显而易见，该对象是一个典型案例：借助类神经网络，在极其复杂的系统中形成逻辑推理。因此，这一任务的解决算法以及所提出的类神经网络结构，可以视为一个独立且独特的案例，具有重要的实践价值，因为它能够适用于解决类似类型的任务。

构建人工神经网络时，首先需要确定哪些信息可以输入其输入端，以及需要获得人工神经网络运行的何种结果。

根据前述分析，建议基于振动声学信号测量通道和温度测量通道构建所述诊断系统；温度测量通道依次测量转子各极绕组端部的温度。

系统还设有其他通道，用于实时测量机器运行时的负载功率、转子转速以及其他必要的技术参数。

这些数据传送至实时监测子系统，经过预处理后，再传送至诊断子系统。信号预处理包括对每个获得的振动声学信号进行离散小波变换（离散小波变换），使用不同的母小波，并基于所得离散小波变换系数，进一步计算对振动信息因素高度敏感且信息量丰富的准则。基于振动加速度或振动速度的时域实现（电机运行时通常测量这些量）[18], , 还会通过解析计算得出振动位移，

其方法在文献 [19] 中有详细描述。此外，实时监测子系统还会根据转子转速的瞬时值计算其角加速度，并计算电机的其他附加参数，这些参数可用作人工神经网络的输入值。

因此，输入人工神经网络的数据应包括：

- 各振动传感器在某一时间间隔内所有超过允许限值的振动位移值，并记录这些值，持续时间为 $\Delta\tau$；
- 根据振动声学信号计算得出的高信息量准则值；
- 每个极绕组的温度；对于转子绕组，按每转记录一次；
- 定子各相电流；
- кутове прискорення 转子；
- 支撑结构关键节点处的机械应力值；
- 机器技术状态的其他附加参数，可用于提高诊断系统的工作效率。

根据所进行的分析结果，提出了用于实现诊断任务的人工神经网络结构，如图2所示。

如图2所示，拟构建一个四层非均匀非标准人工神经网络。

零层输入神经元的数量（图2中以圆圈表示）与输入人工神经网络的附加参数数量相对应。输入神经元负责接收数值数据并对其进行排序。

人工神经网络的第一层（其神经元以带数字 1 的方框标记）包含 $N{\cdot}M{+}K$ 个神经元。前 $N{\cdot}M$ 个神经元各自接收高信息量准则的值，该准则对振动信息因素具有最高灵敏度。该层中一组特殊的神经元由最后 K 个神经元构成，其输入端接收相应极绕组的温度。此外，第一层的每个神经元还接收由零层神经元基于对来自附加测量通道（角加速度、负载功率等）的测量信息进行内部分析而生成的积分信息（积分准则）。

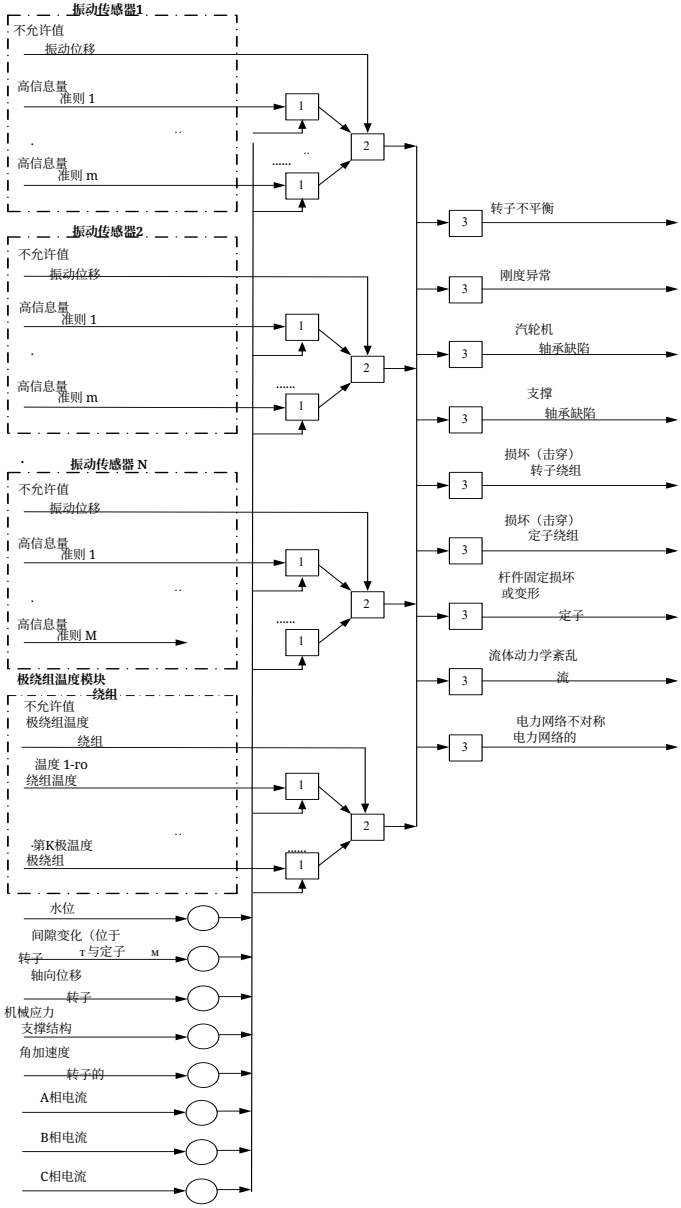


图2。人工类神经网络的结构

所提出的人工神经网络中每个神经元的传递函数，都是通过运行前学习，根据所研究类别电机运行特点的统计信息形成的。第一层神经元用于修正高信息量准则以及极绕组温度指标，并考虑来自附加测量通道的信息。鉴于电机是具有复杂机械连接的系统，这种方法是合理的。因此，当出现由非信息性因素引起的局部扰动，且其合成作用特性与某些信息性参数类型所造成的影响相似时，在绝大多数情况下，受到显著干扰的只是位于机器特定区域的单个传感器或传感器组输出的测量信息。

人工神经网络的第二层神经元（以数字 2 标记）包含 $N+1$ 个神经元，其中 N 个神经元从每个振动加速度传感器接收综合准则信息，并对其进行积分处理。在此阶段，完成对信息参数是否存在的初步概率分析任务，并消除测量冗余，同时考虑到输入人工神经网络的数值准则不可避免地依赖于一个以上信息参数。第二层的最后一个神经元用于对电机极绕组温度梯度进行积分处理。该层神经元的转换函数在运行前学习阶段形成，此外还会接收振动位移超限或极绕组过热程度超出允许范围的信息。

只有当至少一个振动信号中包含过度振动位移，或发生绕组严重过热时，人工神经网络才会被触发。在这种情况下，第二层神经元的激活函数 N 可表示为：

$$\phi(a_i) = sign(a_i - a_0, \Delta\tau) \cdot \sum_{j=1}^{M} \psi(p_j), \qquad (1)$$

其中 $\Delta\tau$ —关断时间延迟；a_i — 输入相应神经元的当前振动位移值；a_0 — 振动位移阈值；p_i —经校正的j-个信息判据；$\psi(p_i)$ — 经校正的j-个信息判据的影响函数，

信息判据；sing($a_i - a_0, \Delta\tau$) — 带关断延迟的继电函数。

第$N+1$-个神经元的转换函数以类似方式构成，区别在于：当任一极绕组的热油温度超过某个稳定值时，其继电函数便会动作。

人工神经网络的第三层（标记为数字 3）包含 9 个神经元，每个神经元对应一个被研究的因素，这些因素是引起振动或绕组过热的可能原因。在这一层中，会基于对第二层神经元结论的综合分析，对中间结论进行平均处理。

需要指出的是，由第三层神经元形成的此类系统的逻辑推理具有概率性质。对于导致过度振动位移或绕组过热、且属于缺陷的原因，若其概率超过某个设定值，便会得出这些缺陷存在的逻辑推理结论。

开发能够高信息量地诊断旋转电机中最常见缺陷的特征。在现有且已有充分描述和研究、适用于分析运行真实电机时采集的振动信号时域实现的方法中，可以列出傅里叶变换和离散小波变换（离散小波变换）。不过值得指出的是，傅里叶变换在数学上比离散小波变换更复杂，因此在保证相同运行速度的情况下，需要更多硬件资源，而且完全不具备研究局部扰动的能力 [20]。这些特点使其不适合用于现代电机振动信号分析系统。离散小波变换则首先适用于检测局部峰值扰动，但并未提供用于分离周期和非周期分量的现成工具。由此可得出结论：有必要开发基于离散小波变换的新方法，以检测振动信号中的周期分量；这些分量可能由旋转电机的典型缺陷引起。

根据对异步电动机（这是最常见的旋转电机类型）故障原因进行统计研究的结果，发现有 79% 的故障是由以下情况之一引起的：

上述电动机发生故障时，技术参数出现三种异常偏差之一，即：转子机械不平衡、轴承损坏或定子电路中的电流不对称 [3]。此时，在缺陷发展早期，合成振动信号通常表现为大量同等程度的干扰因素相互叠加，其中一部分具有非周期性特征 [14；21]。

由上述类型缺陷引起的振动信号具有准周期性特征 [14; 21]。因此，在进行标准小波分析时，早期阶段出现的缺陷不会导致个别离散小波变换系数的振幅局部增大，因而在分析变换结果时不易察觉。

在信号不同分解层级上进行小波表示的一个主要思想，是将信号的逼近函数分为两组：一组用于逼近信号，变化的时间动态较慢；另一组用于细化，在平缓变化的背景下呈现局部且快速的变化，随后在信号分解的其他层级进一步细分和细化。无论是在信号的时域还是频域表示中，都可以实现这一点。在这种情况下，基小波函数能够将注意力集中于所分析进程的某些局部特征。实质上，连续小波变换（НВП）的细化不过是确定母小波函数与待研究信号之间的互相关函数，这一点可由该变换的数学模型推得 [20; 22]:

$$W(a,\tau)=\int_{-\infty}^{+\infty} f(t)\cdot\psi^{*}_{a,\tau}(t)dt\ , \qquad (2)$$

其中 *W(a,τ)* — 细节函数（小波变换结果）；*a* — 尺度参数；τ — 平移参数；*f(t)* — 待分析函数；$*, ()\psi_{a\,\tau}$ *t*— 复共轭小波函数。

鉴于小波变换中的计算是通过改变分析“窗口”的尺度、使其沿时间轴移动、与信号相乘并沿整个时间轴积分来实现的 [22; 23], 因此，这种变换的几何意义可描述为：在时间域和频率域中搜寻待分析函数的片段，这些片段的形状与母小波函数相关。

离散小波变换也保留了类似的物理意义；在该变换中，细节系数可按如下方式计算 [20; 23]:

$$d_k^j = \sum_{n \in Z} g_{n-2k} \cdot c_n^{j+1}, \tag{3}$$

其中 $_j{}_k d$ — 第k个细节系数，属于第j个频带；g — 母小波函数的系数；c^{j+1} — 前一频带的近似系数，计算如下：

$$c_k^j = \sum_{n \in Z} h_{n-2k} \cdot c_n^{j+1}, \tag{4}$$

其中 h — 尺度函数的系数。

对于最高频带，待研究信号的时域实现用作近似系数。

在这种情况下，所述缺陷的检测任务可分为两个子任务：选择与由缺陷引起的振动信号分量尽可能接近的母小波，以及开发一种判据，以便定量评估由缺陷引起的振动对各频带小波变换系数的影响，并且该判据对这种振动具有很高的选择性。

对文献中关于转子不平衡所引起的振动信号的描述进行分析后发现，该缺陷会导致产生包含谐波分量的振动，该分量集中在转子旋转频率及其二次、三次谐波处。而振动幅值在转至第二和第三谐波分量时会急剧减小 [14；21]。这一事实表明，在搜寻该缺陷时，宜分析包含转子旋转频率的频段，并在较小程度上分析对应于转子频率二倍和三倍的频段。选择母小波时，宜依据单一谐波振动的特征进行。对文献资料的研究表明，在典型母小波函数中，与单一谐波振动最相近的可认为是哈尔小波和4阶Daubechies小波。不过，值得指出的是，两者在结构上各有显著差异 [23]。

此外，考虑到由转子不平衡引起的振动信号具有周期性，而且研究中每个谐波振荡都被视为一个独立的突发，

可以预期，在包含转子频率及其二次、三次谐波的频带内，小波系数的值会随时间周期性变化。这种周期性变化的幅值与缺陷的发展程度直接相关。因此，不等式 [24] 成立：

$$t_{cn} >> T_p, \tag{5}$$

其中t_{cn} —待研究信号时域实现的持续时间；T_p —电机转子的旋转周期。

适宜采用积分方法分析小波变换系数。因此，可将待研究频带内小波系数在某一时间区间内的均方值作为判断上述缺陷是否存在的数值判据，该时间区间的持续时间远大于转子旋转周期。这种方法既能考虑待研究时间区间内小波系数的正、负峰值，又能降低对非信息性扰动的灵敏度；这类扰动由非周期性激励力引起，可能在电机运营过程中出现。综上所述，不平衡对上述频带小波变换系数的影响评估数值判据可用数学形式表示如下[24]:

$$k_{\partial e\delta} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} d_i^2 \ \textit{при умові}\ t_{cn} >> T_p, \tag{6}$$

其中，n — 所研究频带的小波变换系数数量；d_i — 所研究频带的第i个小波变换系数。

为验证上述理论推理，开展了实验研究：使用一台处于空载运行状态的电机，其转动惯量为0.002千克·米^2, ，空载运行转速为720转/分（12赫兹），并附加了0.002千克·米的不平衡量。压电加速度计安装在电机机壳上，使测量轴严格垂直于电机转子。信号采样频率为232赫兹，待研究信号的时间记录长度为2^{14} 个值。

将获得的振动加速度信号通过哈尔小波进行变换，并进一步计算有无使用不平衡量时各频带对应的所提出数值判据，所得结果如图3和图4所示。

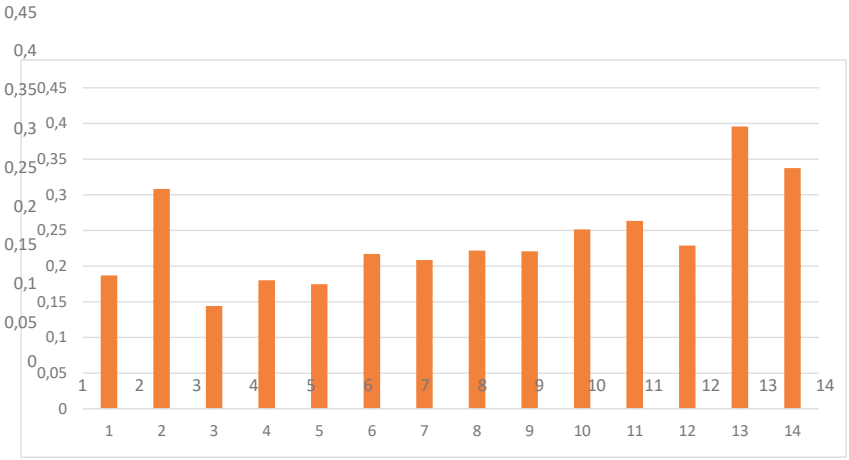


图3. 无不平衡时振动信号各频带的平均平方哈尔小波系数变化关系

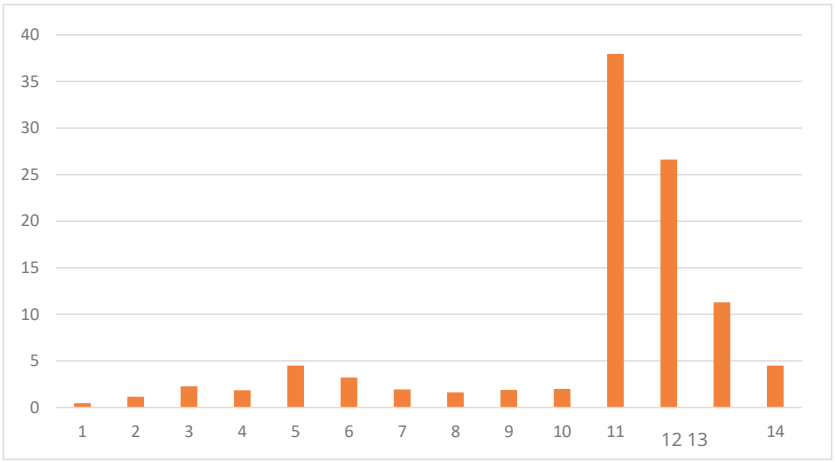


图4. 存在不平衡时振动信号各频带的平均平方哈尔小波系数变化关系

此外，还借助小波和四阶 Daubechies进行了类似的变换。计算结果如图5和图6所示。

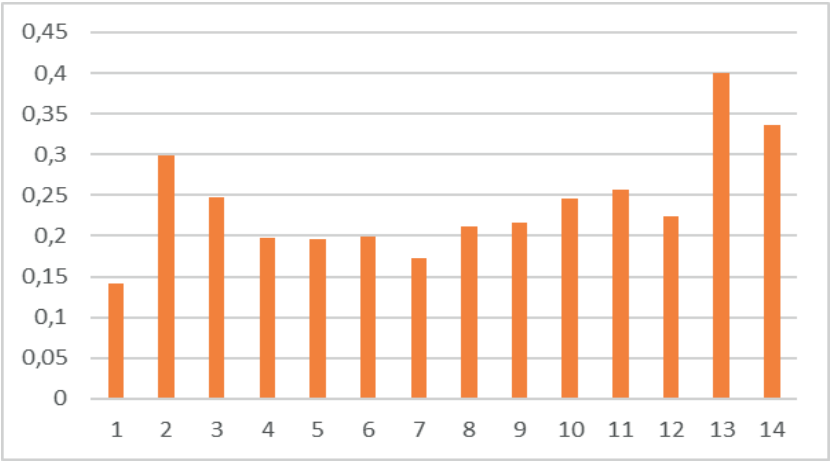


图5. 未使用不平衡时，振动信号各频带的4阶 Daubechies 小波系数均方值变化关系

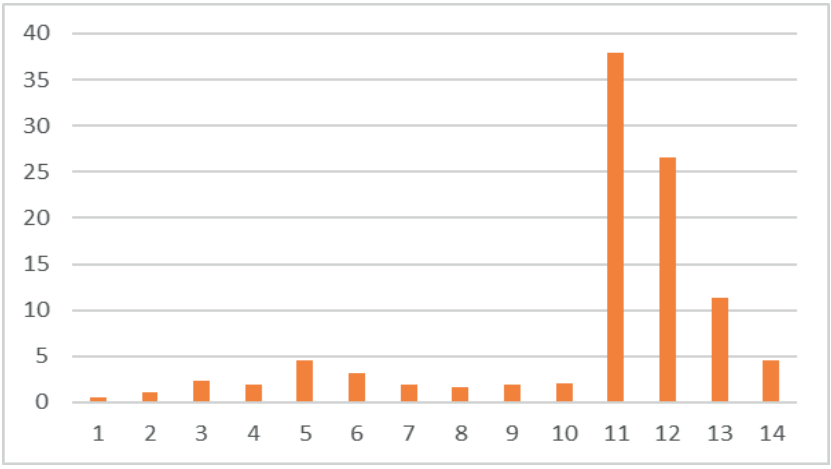


图6. 存在不平衡时，振动信号各频带的4阶 Daubechies 小波系数均方值变化关系

根据图3–6所示的相关性分析结果可以看出，正如预期，转子不平衡检测中信息量最大的是与电机转子转频及其二次和三次谐波相对应的频带（分别为11、12、13及频带）。而对基于Haar小波和4阶Daubechies小波的信号分解结果进行比较表明，两种小波对所研究缺陷的存在均表现出大致相同且足够高的灵敏度。因此，鉴于基于哈尔母小波函数的变换在数学上更加简单（所需数学操作更少）[20；22；23], 可以得出结论，使用后者对于检测上述缺陷更为有效。

通过分析文献中对旋转电机轴承损坏所引起的振动信号的描述，我们发现，这类缺陷会产生形态相当复杂的准周期振动响应，其频率与电机的转子频率相对应 [14；21]。考虑到轴承损坏所引起的振动响应在一个周期内具有多个峰值，显然，采用高阶母小波函数来检测此类损坏是适宜的。这是因为，随着母小波函数阶数的提高，其振荡次数通常也会增加。因此，对于 N 阶小波函数，下式成立 [20；22；23]:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} t^k \psi(t) dt = 0, \quad k = 0,1,...,N-1. \tag{7}$$

由于计算大多数离散小波函数的系数相当繁琐 [20; 22; 23], 而轴承损坏时的振动响应形式具有相当复杂的结构，无法明确地与任何已知小波对应，因此建议使用Daubechies小波作为基小波函数。该小波函数族的主要优点是，能够相对简单地解析计算任意阶函数的系数 [25]。在这种情况下，在使用上述母小波函数的条件下，评估轴承缺陷对频带小波变换系数影响的数学数值判据，将与转子不平衡存在性判据（6）相同，

在使用上述母小波函数的条件下，转子不平衡的性质（6）。

为验证上述理论推理，采用异步电机 АИМ90La6У2.5进行了实验研究。该电机额定功率为0.75 kW，同步转速为1000 rpm（16.67 Hz），实验时处于空载运行状态。通过使用无油膜的轴承来模拟轴承缺陷。实验的其他参数与上述转子不平衡影响研究完全相同。

将采集到的振动加速度信号采用四阶 Daubechies小波进行变换，并进一步计算各频带小波系数的均方根值。在电机空载运行时，所得结果如图7和图8所示。

采用6阶 Daubechies小波对所得振动信号进行了类似变换。计算结果见图9和图10。

从图7–10所示的依赖关系分析可知，对于检测轴承故障，最具信息量的是

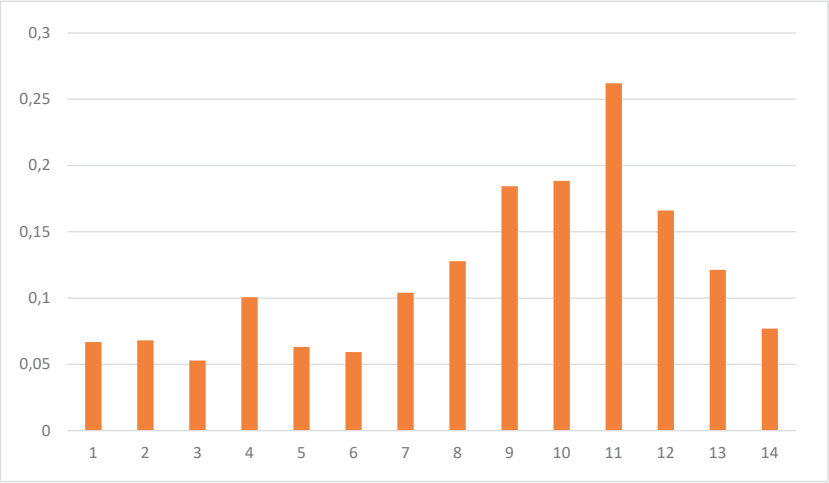


图7. 轴承中有 润滑油时，振动信号各频带对应的4阶 Daubechies 小波系数均方值



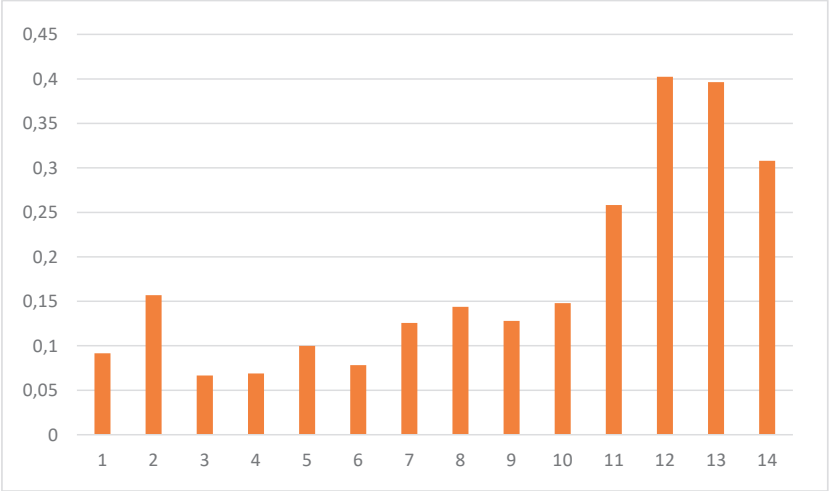


图8. 轴承缺少 润滑油时，振动信号各频带的4阶 Daubechies 小波系数均方值变化

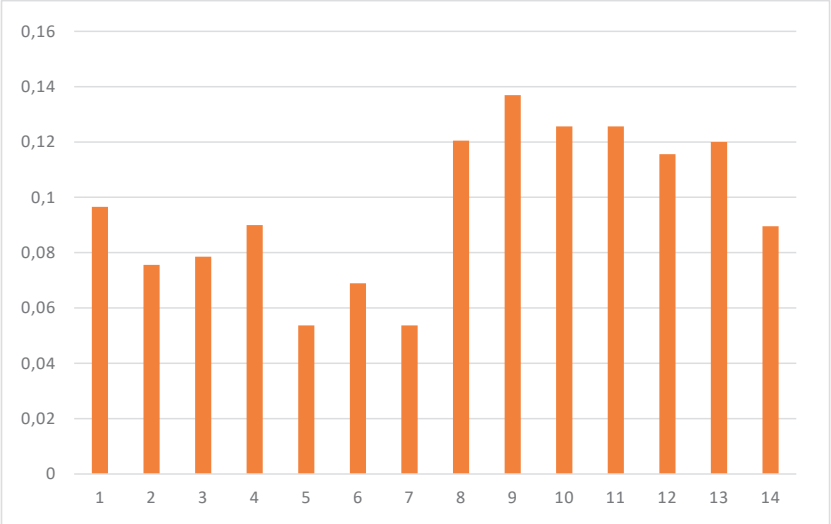


图 9. 轴承存在 润滑油时，振动信号各频带的6阶 Daubechies 小波系数均方值变化



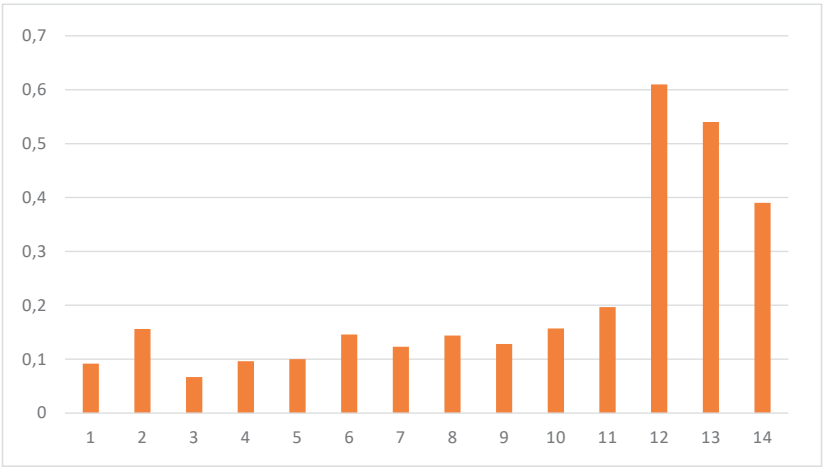


图10. 轴承中缺少润滑油时，振动信号各频带的6阶多贝西小波均方小波系数的相关性

正如预期，存在一个对应于转子转频的频带（第12频带），以及其二次（第13频带）和三次（第14频带）谐波。对基于4阶和6阶多贝西小波分解信号所得结果进行比较后，证明了此前关于使用高阶小波检测上述缺陷的合理性假设。

另一方面，对于由定子电路电流不对称引起的振动信号，其特点是振动信号中存在一个位于电网供电电压频率处的谐波分量 [14；21]。这一事实说明，分析包含供电电压频率在内的频率范围，并根据上述考虑使用 Haar小波和四阶 Daubechies 是合理的。在这种情况下，评估定子电路电磁不对称性对上述频带小波变换系数影响的数值判据可表示如下 [26]:

$$k_{деб} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} d_i^2 \ \textit{при умові}\ t_{сп} >> T_{ж}, \tag{8}$$

其中 $T_{ж}$ —定子回路的供电电压周期。

为验证上述理论推理，开展了使用……的实验研究。

了前一项实验中所述的异步电机。实验的其他参数与上文所述转子不平衡影响的研究完全相同。

利用 Haar 小波对获得的振动加速度信号进行变换，随后计算各频带小波系数的均方根值。电机在正常运行模式和 A 相断路情况下运行时，所得结果如图 11 和图 12 所示。

此外，还利用四阶 Daubechies 小波对获得的振动信号进行了类似变换。计算结果如图 13 和图 14 所示。

从图 11–14 所示的依赖关系分析可知，正如预期，用于检测供电不对称最有信息量的是与电网供电电压频率 50赫兹相对应的频带（第13频带）。比较基于 Haar 小波和四阶 Daubechies 小波分解信号所得的结果发现，两种小波对所研究缺陷的存在都具有大致相同且相当高的灵敏度。因此，根据以上分析，可以得出结论：使用 Haar 小波来解决所提出的任务是合理的。

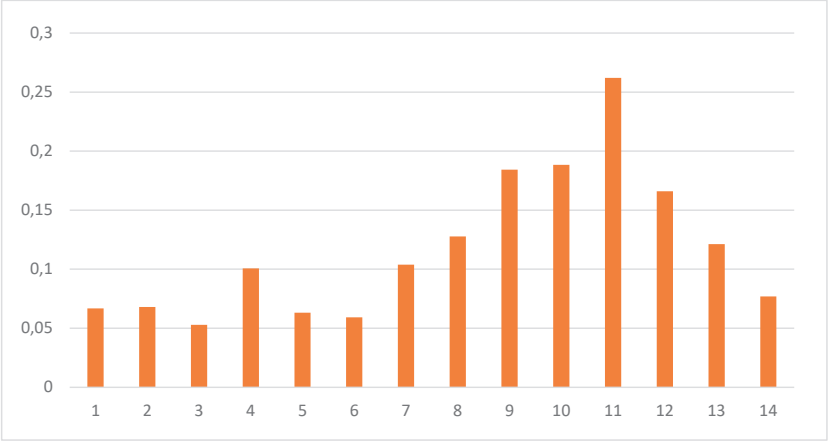


图 11. 电动机正常运行时，振动信号各频带的平均平方哈尔小波系数变化关系

0,45
0,4
0,35
0,3

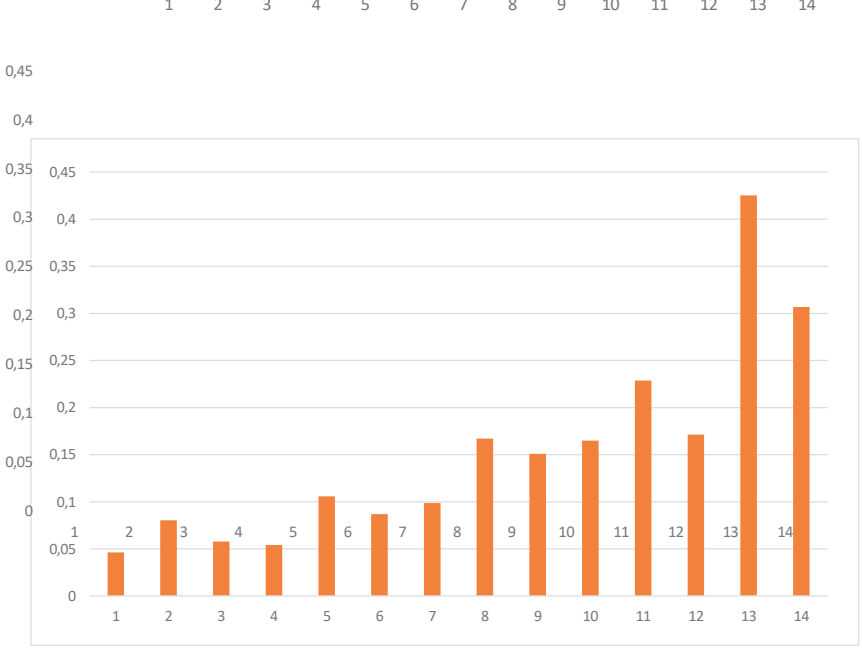


图12. A相断路时振动信号各频带的平均平方哈尔小波系数变化

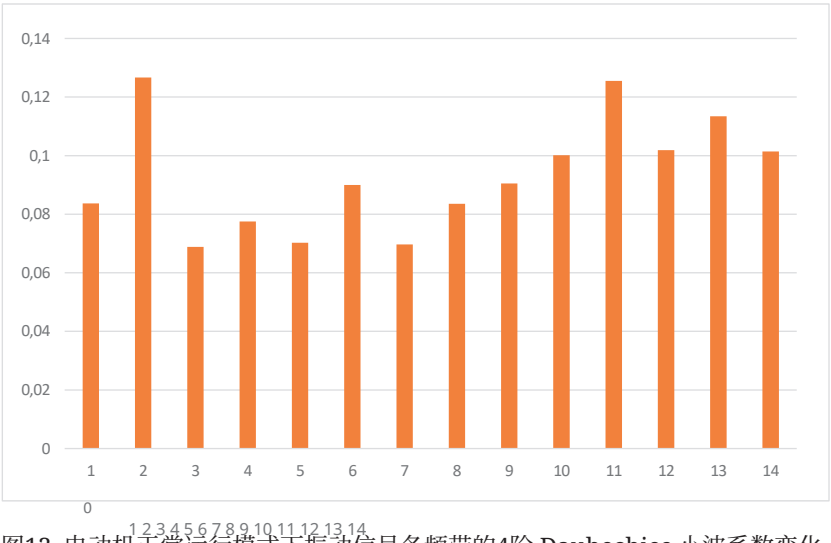


图13. 电动机正常运行模式下振动信号各频带的4阶 Daubechies 小波系数变化

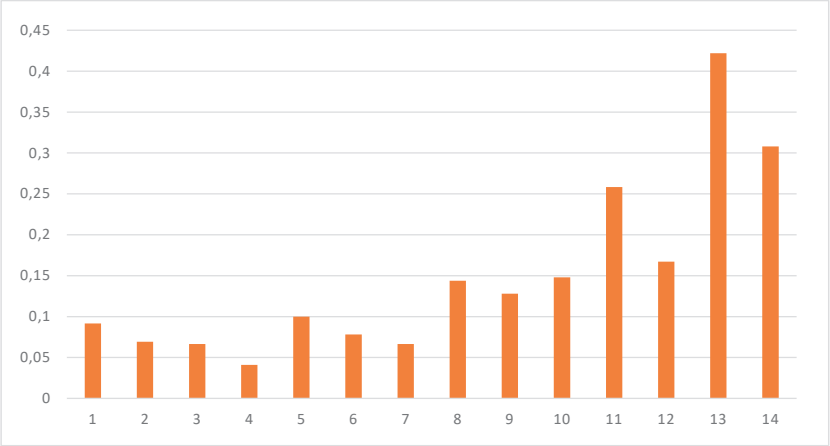


图14. 振动信号各频带的4阶 Daubechies 小波系数均方值与A相断路之间的关系

结论。 1. 提出了使用人工神经网络并设计了其结构，将其作为水力机组诊断系统中形成逻辑结论的关键元素，该系统是极端复杂系统的典型代表。研究表明，所提出的解决方案可视为一个独立且独特的案例，具有重要的实用价值，因为它可以经过调整，用于解决广泛类别的任务。

2. 通过对局部区域的信息进行独立积分处理，并随后在高层神经网络层中对其进行综合分析，分布参数“黑箱”类系统的分析算法得到了进一步发展。研究表明，所述方法能够消除非信息因素的影响；这些因素在作用结构上与信息影响相似，但具有局部特征。

3. 确定并从理论上论证了振动信号时间实现的持续时长，这一时长适用于获取所研究节点中振动信号的互相关系数。研究发现，这类实现的持续时长应为电机转子旋转周期频率的整数倍。

4. 提出了一种积分式高信息量数值准则，用于评估转子不平衡、主电磁场强度对称性增强、

定子回路电流不对称以及轴承缺陷对小波变换系数的影响，具体采用研究时间区间内信息频带的小波系数均方根值表示，其中该时间区间远长于电机转子的旋转周期。结果表明，这些准则对电机运行过程中可能出现的无信息单次扰动影响不敏感。

参考文献

1. Левицький А. С., Федоренко Г. М., Грубой О. П. 借助电容式测量仪监测大型水轮发电机和汽轮发电机的状态及机械缺陷参数：专著。基辅：乌克兰国家科学院电动力学研究所，2011年。242页。2. Бигус Г. А., Даниев Ю. Ф., Быстрова Н. А., Галкин Д. И. 技术装置诊断。莫斯科：鲍曼莫斯科国立技术大学出版社，2014年。615页。3. ИТГ Энергомаш. 异步电动机故障的确定。顿涅茨克，2021年。URL: http://energo.ucoz.ua/publ/5–1–0–10。4. Граняк В. Ф., Кацив С. Ш., Кухарчук В. В. 水力机组诊断系统中人工神经网络权重系数计算的理论与实验方法。测量技术与计量学。2019年。第1期。第5–10页。5. Граняк В. Ф. 大型旋转电机技术状态自动监测与诊断系统。信息技术与自动化：第十四届国际科学与实践会议论文集（敖德萨，10月21–22日）。敖德萨，2021年。第91–94页。6. Kukharchuk V. V., Katsyv S. Sh., Hraniak V. F., Kucheruk V. Y. 等。水力机组故障发展振动预测。卡拉干达大学学报。《物理学》系列。2018年。第4期。第67–76页。7. Граняк В. Ф., Кухарчук В. В. 电机技术状态参数测量与监测系统：乌克兰专利129338：国际专利分类$_8$ G 01 M 7/00，编号u 2018 05009，申请日期：2018年5月7日；公布日期：2018年10月25日，公报第20期。7页。8. Граняк В. Ф., Кухарчук В. В. 电机技术状态参数测量与监测系统：乌克兰专利139681：国际专利分类$_8$ G 01 M 7/00，编号u 2019 07559，申请日期：2019年7月5日；公布日期：2020年1月10日，公报第1期。7页。9. Варенко В. М., Братусь І. В., Дорошенко В. С., Смольніков Ю. Б. 等。信息过程系统分析：教学用书。基辅：“乌克兰”大学，2013年。203页。10. Прокопенко Т. О. 系统理论与系统分析：教学用书。切尔卡瑟：切尔卡瑟国立工艺大学，2019年。139页。11. Кухарчук В. В., Кацив С. Ш., Мадьяров В. Г., Усов В. В. 等。水力机组振动状态监测、诊断与预测：专著。文尼察：文尼察国立技术大学，2014年。168页

12. Гаджиев Н. Г., Ахмедова Х. Г. 信息技术应用条件下的专家经济学研究。URL: https://
cyberleninka.ru/article/n/ekspertno-ekonomicheskie-issledovaniya-v-usloviyah-vnedreniya-informatsionnyh-tehnologiy 13. Клебанова Т. С., Чаговець Л. О., Панасенко О. В. 企业管理中的模糊逻辑与神经网络：专著。哈尔科夫：VD «ІНЖЕК»，2011年。240页 14. Кухарчук В. В., Кацив С. Ш., Граняк В. Ф., Биковський С. О. 水力机组诊断中的离散小波变换：专著。文尼察：文尼察国立技术大学，2018年。118页。15. Граняк В. Ф. 用于绝对位移的覆层式参数涡流初级测量转换器的数学模型。《技术与工艺中的振动》。2020年。第2期（97）。第123–128页。16. Rao S. S. 连续系统振动。美国纽约：Jon Wiley & Sons，2007年。720页。17. Кухарчук В. В., Граняк В. Ф., Кацив С. Ш., Мадьяров В. Г. 水力机组技术状态监测与诊断系统的构建特点：专著。文尼察：文尼察国立技术大学，2019年。91页。18. Колесников А. Е. 声学测量。列宁格勒：Судостроение，1983年。256页。19. Vedmitskyi Y. G., Kukharchuk V. V., Hraniak V. F., Wojcik W. 等。用于水电设施瞬态过程振动监测的新型非系统物理量——积分振动加速度。*Przegląd electrotechnicz- ny*。2017 17 20 3 69 72 10 15199 48 2017 03 。第。页–。数字对象标识符：。/。..。。Воробъёв В. И., Грибунин В. Г. 小波变换理论与实践。圣彼得堡：ВСУ，1999年。204页。21. Ширман А. Р., Соловьев А. Б. 机械设备状态的实用振动诊断与监测。莫斯科：机械制造。1996年。276页。22. Broughton S. A., Bryan K. 离散傅里叶分析与小波：信号与图像处理应用。新泽西州：John Wiley & Sons, Inc.，2008年。— 355页。23. Polikar R. 小波教程。罗马：罗文大学工程学院 Web 服务器，2001年。79页。24. Граняк В. Ф., Кацив С. Ш., Кухарчук В. В. 运用离散小波分析振动声学信号，检测旋转电机转子不平衡。《顿涅茨克国立技术大学学报》。系列：信息学、控制论与计算机技术。2021年。第1期（32）。第32–40页。25. Добеши И. 小波十讲。伊热夫斯克：“规则与混沌动力学”科学研究中心，2001年。464页。26. Граняк В. Ф., Гайдамак О. Л. 运用离散小波分析振动声学信号，检测交流旋转电机的供电不对称。《技术与工艺中的振动》2021年。第2期（101）。第62–70页

第 III 章
教育中的新信息技术

教师进修情况记录自动化信息系统

Іванова Л. В.、Котлик Д. О.

本文阐述了教育机构信息化的现状，以及教育机构负责人管理活动的信息保障。文章对商业综合性教学过程自动化管理系统与高等教育机构自主开发的自动化管理系统进行了比较分析，并介绍了它们在教学过程管理中的功能及特点。

本文介绍了有关教育机构教师专业进修管理自动化信息系统设计的材料。研究发现，实现该系统是客观需要，这是由教育机构活动改革以及自动化评估教育机构教师专业进修质量的必要性所决定的，以便快速作出有关其资格认证和教育活动的管理决策。

本文介绍了一种教育机构教师专业进修管理自动化信息系统，该系统能够存储、处理和监测教师专业进修及资格认证的结果。研究表明，采用综合方法存储教师专业进修及资格认证结果，可实现：实时监控教师专业进修信息，以便参加定期资格认证；便捷地填写和保存信息；方法办公室员工能够监测教师的专业进修情况。

确定了信息流方案、数据存储与输出方式，探讨了能够分析数据并创建数据可视化的现代技术，以实现记录、监测和监控流程。设计了教育机构教师专业进修与资格认证记录信息系统的数据库和用户界面。

所创建的教育机构教师专业进修管理自动化信息系统正在个人账户的工作流程中进行试运行-

程，用于记录教师专业进修的结果以及敖德萨国立食品技术学院独立结构部门“敖德萨国立食品技术学院敖德萨技术专业学院”教师资格认证的通过情况。

本文揭示了教育机构信息化的当前状况，以及教育机构负责人管理活动的信息支持情况。对商业综合电子教育过程管理系统与高等教育机构自行开发的电子管理系统进行了比较分析，并介绍了它们在教育过程管理中的功能及其特点。

本文介绍了教育机构教师专业发展登记自动化信息系统的设计相关材料。研究确定，该系统的实施是客观需要，这是由教育机构改革以及通过教师评价实现教师质量评估自动化的可行性所决定的，从而能够迅速就教师的认证和教学工作作出管理决策。

本文介绍了一种用于登记教育机构教师在职培训的自动化信息系统，该系统能够存储、处理和控制教师在职培训及认证结果。研究表明，采用综合方法存储教师在职培训及认证结果，可实现：*оператив мониторинг* 教师在职培训信息，以便参加下一次认证；便捷地填写和保存信息；由教研办公室工作人员对教师进修情况进行控制。

确定了信息流方案、数据存储和输出方法，并分析了现代技术，这些技术能够对数据进行分析和可视化呈现，以实现记账、监测和控制进程。设计了教育机构教师进修与认证信息系统的数据库和用户界面。

所创建的教育机构教师进修自动化信息系统正在学院教研室的工作流程中进行试用，用于记录进修成果以及「敖德萨国立食品技术学院敖德萨技术应用学院」独立结构部门教师的认证情况。

教育对于社会经济发展和社会文化丰富具有极其重要的意义，它赋予人们相应的知识和能力，以提升技能，增强在全球化持续发展背景下从事生产性劳动的能力，而知识经济正是这一发展的主导力量。对于乌克兰而言，当务之急是有效保障和组织.....

转型中的教育体系内学生／教育接受者的学习，形成所有利益相关方新的信息思维。解决这一任务需要持续监测和评估教育体系的状况，其基础是收集、处理信息并分析教育数据，从而为作出有依据的管理决策提供必要保障 [1]。

现代教育发展的主要方向之一是教育信息化。实现这一方向能够使教育更加高效、灵活、现代化，并符合国际标准。

《国家信息化计划概念》指出，信息化的本质在于一系列相互关联的组织、法律、政治、社会经济、科学技术和生产过程，其目标是通过创建、发展和使用基于现代计算与通信技术构建的信息系统、网络、资源及信息技术，为满足信息需求、实现公民和社会的权利创造条件 [2; 3]。

乌克兰社会现代化的一项显著特征是全面信息化，这推动了信息与通信技术（信息与通信技术）在教育过程中的大规模应用，使教育工作者能够以更高的质量水平完成教学方法方面的任务。这一问题的基本概念性规章载于《乌克兰国家信息化计划法》、《国家信息化计划构想》、乌克兰总统于2005年10月20日颁布的第1497号《关于实施最新信息技术的优先任务》总统令、《2006年—2010年教育与科学信息和通信技术国家计划》以及其他规范性文件中。

教育信息化依赖于信息社会发展的客观条件和当前趋势，其中包括：

– 确保用户在信息空间中开展信息与通信活动的迁移率（Mobility），进一步发展面向移动的工具以及访问电子数据的信息通信技术；

– 云计算技术与虚拟化、企业级、公开和混合信息通信技术基础设施的发展，以及

采用云计算技术（云计算与虚拟化、私有云、公有云和混合云、信息通信技术基础设施、雾计算）；

– 积累并处理大量数字数据，构建和使用电子信息数据库与系统（Big Data、Data Mining、Data Bases），尤其是电子图书馆（Electronic Libraries、Repositories）和科学计量数据库（Scientometric Data Bases）；

– 提升互联网用户特性（Internet of People — IoP），部署高速宽带电子通信信道拓扑（Broadband Communication Channels），构建信息与通信技术空间系统，使用户能够通过无线方式访问电子数据（Cordless Access to Digital Data、WiFi、Bluetooth、Cellular Networks）；

– 构建物联网（Internet of Things — IoT），发展其软硬件手段，尤其是微处理器及集成平台，以便借助现代电信技术设置、管理和监控电子设备；

– 机器人技术（Robotics）和机器人系统的发展，尤其是 3D 打印机和 3 D 扫描仪；

– 信息系统中数据保护系统的发展以及打击网络犯罪（Data Security a nd Counteraction of Cybercriminality）；

– 软件生产产业（Software Development Industry）的发展，尤其是出版电子教育资源；

– 确保基于不同软硬件平台构建的信息与通信技术手段和应用的兼容性（Compatibility）；

– 发展信息与通信技术服务提供商网络（信息与通信技术外包市场），尤其是云服务（Cloud Services），以及数据处理中心网络（Computing Center Network）[24]。

亟待解决的是本国教育中信息与通信技术的发展与应用问题，其中的关键问题已在2016年《乌克兰教育现状与发展前景国家报告》中列出[23]。

首要问题是构建并广泛应用乌克兰统一的教育信息空间，并为这些进程提供适当的科学支持。

第二个问题是区域信息和电信-网络所需基础设施要素的部署与改进，

这些网络彼此之间以及与全球互联网相互连接，从而有助于消除乌克兰不同地区，尤其是农村地区的“数字鸿沟”。

第三个问题是，民众的信息与通信技术能力及信息素养水平偏低，在学习中沿用过时的方法，且学习过程参与者使用先进信息与通信技术的积极性不高。值得指出的是，信息与通信技术手段在全球教育系统中的大规模应用，催生了新的学习方法和形式（电子学习、移动学习、教育中云技术的应用、大规模开放在线课程等），但这些新方法和形式在乌克兰现代国家教育体系中的推广速度较慢。

第四个问题是，国家层面尚未形成完整的信息与通信技术教育应用政策，法律规范框架不完善，无法保障信息社会建设，进而阻碍了乌克兰的教育信息化。教育信息化任务未能在现行乌克兰教育相关法律及当代项目中得到适当、系统的映射。当前教育政策的一项重大缺陷，是低估了鼓励各类主体提出的信息与通信技术应用倡议的重要性；这些倡议由教育机构、科研机构、教育工作者、社会组织及私营企业发起。

近年来，信息已成为最重要的生产因素之一，也是任何组织（包括教育机构）的主要管理杠杆之一。

教育信息化是指改变教育内容、方法和组织形式的过程，旨在通过应用信息技术实现教育质量的新提升。它应有助于解决学校的两项主要任务：让所有人都能接受教育，并让每个人都享有新的教育质量。

教育机构管理信息化与基于自动化处理社会经济、心理教育学及其他信息，作出更有依据的管理决策有关。如今，教育管理信息化分为多个层级，具体如下：

– 单个层面——信息化涵盖对单个教育机构的管理；

– 总体层面——总体上涵盖同一区或地区的多个教育机构，教育机构之间以及教育管理机构之间进行部分信息交换；

– 系统性——分阶段覆盖该区域内的所有教育机构，并依据统一的信息标准组织全面的信息交换，从而形成统一的教育信息空间。

教育机构信息化的有效性在很大程度上取决于对这一过程的科学论证。综合科研人员对教育机构信息化的不同观点可以发现，他们大多关注其支持管理决策这一函数。科学著作分析结果和自身经验证实，信息技术能够提高管理决策制定与实现过程中各个环节的效率：获取必要信息、制定管理决策、向执行人员传达管理决策，以及监督管理决策的执行。

当代社会教育情境的特点之一，是教育机构的自主性。一方面，这激发了教育团队的创造力，促进了教育机构创新进程的发展。另一方面，教育机构的管理过程显著复杂化，亟须进行高质量的转变。教育机构管理过程的高质量转变，反过来也要求专业人才的素质不断提升，因为他们负责实施这一过程。

信息技术的诸多应用可能性曾由 О. Андріянова、З. Пожидаєва、Н. Сомилкіна、Л. Заброд-ська、Л. Жиліна、Е. Палат、М. Бухаркіна、М. Моїсеєва、А. Петров [4]进行探讨。Л. Даниленко认为，在管理活动中使用计算机，能够确保及时向决策者提供适当的实时信息；及时提供分析信息；提供适量的信息；提供决策选择建议，并缩短决策制定过程的时间 [5]。认同科研人员的研究成果，我们指出，在瞬息万变的环境中，加快教育机构信息流的使用已成为当务之急。在学术研究中，这一问题仅有零星论述，而关于系统

性地在教育机构中应用信息流的问题则完全未见阐述。

科学著作分析和自身经验的结果证实，信息技术能够提升管理决策制定与实施过程各个环节的效率：获取必要信息、制定管理决策、将管理决策传达给执行者，以及监督管理决策的执行。

根据“教育管理去官僚化”项目第一阶段成果的介绍，该项目由乌克兰教育和科学部在DOCCU公共组织和瑞士-乌克兰DECIDE项目的支持下，与BRDO高效监管办公室的专家合作实施。项目对乌克兰普通中等教育管理系统开展了研究，并拟定了对11项现行规范性法律文件的修订草案，以及制定两项新规范性法律文件的方案，以实现学校文书工作的数字化；这一领域亟需进行实质性现代化改造。

项目的主要任务是提供专家支持，帮助理解需要采取哪些措施，以简化报告和文书工作程序，并完善普通中等教育领域的数据交换流程。

项目期间成立了由教育工作者组成的焦点小组，并分析了学校活动中涉及的文件。这有助于发现阻碍国内教育领域有效运行的主要问题和众多官僚主义障碍。

以下几项数据足以说明该领域的流程和程序存在过度官僚化现象：学校必须编制并保存48种纸质文件；乌克兰学校每月要耗用70,000包纸张来处理这些文件；如此庞大的纸张用量每年给国家造成62,400,000格里夫纳的开支。

综上所述，我们可以得出以下结论。

报告主要以数字版和纸质版两种形式重复编制，供不同接收方使用。它们之间的信息交换尚未建立，需要加以规范。

报告信息以手动方式录入。这使得现代教育服务无法部署，也无法充分整合必要的教育信息资源，并确保与关键国家登记册交换数据。

此外，还利用升级后的信息与通信系统“教育管理自动化信息综合系统”（AIKOM）对电子记录、入学、退学、学生和儿童转学等新流程进行了建模。新的技术解决方案将有助于引入新的数字化方法，促进去官僚化和教育管理放松管制。

显然，乌克兰教育体系的信息化不仅需要在普通教育领域进行重大现代化改造，也需要在其他教育层级进行。

教育机构管理信息化问题的紧迫性在于，基于信息系统、网络、资源和技术，创建、实施并发展计算机导向的教育环境。其主要目标是培养能够适应信息社会条件的专业人才，包括教育机构负责人；全面重构教学过程，提高其质量和效率。教育机构信息化有助于解决这一问题。

用于管理教育机构的计算机与通信技术手段，应共同构成一个系统。该系统以运用现代方法管理教育体系中的对象、在决策过程中应用数学模型和方法，并基于计算机设备与通信手段建立必要的信息库为基础，从而确保提升专业预科教育和高等教育体系的效率，实现质量的新飞跃。在信息社会条件下，教育机构负责人应特别关注处理信息材料的现代方法（信息的收集、处理、积累、存储、搜寻和发行），并为教师团队做好准备，使其在构建教育机构的文件流转时落实“无纸化信息学”原则。

由上述内容可以得出一些结论：教育机构的管理涉及广泛的问题，包括教育、行政、社会教育、经济、法律和财务等方面。整个社会的信息化，尤其是教育信息化，使这些系统符合现代信息社会的需求和能力。信息技术是改进管理的重要因素，它带来了许多新的可能性，具体而言：能够积累和更新大量信息，是优化时间和

资金的工具，可节省解决单项管理任务所需的开支；还能提供有关受管理对象状况的及时、可靠信息，从而提高管理决策的质量。

本主题的 актуу性由以下因素决定：

— 有关教育过程进展和结果的信息篇幅不断增加，超出了人们充分理解这些信息的能力；

– 缺乏特定标准算法的机械处理无法提供及时数据，因而无法依据活动结果作出最优管理决策；

– 教育机构以创新模式开展工作，需要对教育活动进行多方面分析，及时追踪变化动态并适时作出调整；

– 复杂的信息模型（教育机构自动化管理系统）通常在财务角度上并不划算，因此有必要且适宜在管理算法足够简单、技术上可行且成本相对较低的领域引入计算机技术。

我们的目标是介绍一套自动化的综合系统，用于记录教育机构教学人员及科研教学人员的专业进修情况。该系统能够存储、处理和监测教育机构教学人员及科研教学人员专业进修和资格认证的结果。

教育活动监测自动化系统及教育机构管理系统的现状分析。教育管理信息系统不仅是一套形式化、集成化的运营流程、过程及组织法律措施，也是一种完整的机构文化，能够为社会提供有关教育发展状况的最新、可靠数据。

已知的教育过程管理系统旨在支持学习的基本函数（尤其是远程教育形式），但并不总是涵盖规划、执行、学习、分析、报告和监测等沟通过程。此外，在已知的学习管理系统中，通常会区分远程学习系统和质量监测系统。我们认为，只有综合电子系统才能成为面向系统所有类别用户的有效信息支持——从受教育者到教育机构负责人。正因如此，研究主题的选择及其现实意义才得以确立。

然而，教育机构信息化的其他所有函数都以信息的获取、记录、存储和转换函数为基础。该函数涵盖范围广，因为信息不仅是做出管理决策所必需的。正是这一函数为实现教育机构信息化的另一项重要函数创造了条件，即满足学生、员工、潜在教育服务消费者、其他教育机构员工以及教育管理结构的信息需求。

教育信息化的重要组成部分之一是软件开发。教育机构使用的程序分为以下几类软件工具：教学类（根据学生现有的知识和个人能力引导学习，并促进其掌握新信息）；诊断类（测试类——用于诊断、检查和评估学生的知识、技能与能力）；训练类（用于重复和巩固已学过的教学材料）；数据库（存储各知识领域信息的资料库，可通过在不同知识领域中发起搜寻请求来查找所需信息）；仿真类（通过参数呈现现实的某一方面，以研究其主要结构或功能特性）；建模类（呈现主要元素和函数类型，对某种现实进行建模）；工具类（支持执行具体操作，即文本处理、制表和编辑图形信息）[6]。

目前，乌克兰教育和科学部正积极参与关键领域的数字化转型项目。数字化转型部的项目管理系统目前已涵盖乌克兰不同方向的94个数字化对象。数字化已经在乌克兰教育和科学领域发挥了重要作用。其目标是让所有教育服务更加便捷并受到有效控制。这些项目的实施包括在教育和科学领域引入数字服务，实现教育及管理进程的自动化

其中，所展示的项目包括：

学前、普通中等及校外教育数字化（电子学校）。在电子学校项目框架内，现代化在线资源“全乌克兰在线学校”已投入运行，为5至11年级学生提供混合式学习和远程教育，所用材料符合国家课程计划。近期计划包括创建

教师工作台，教师可在其中跟踪学习进度，并创建和修改课程。

高等、专业预高等及职业教育数字化（电子大学）。在电子大学项目框架内，计划：

– 招生工作自动化；

– 外国公民及无国籍人士招录与学习（实习）进程自动化；

– 推行电子许可；

– 现代化改造教育统一国家电子数据库；

– 创建并现代化改造毕业生就业情况统一电子监测系统。

项目“电子科研”的目标包括：升级文件提交系统，以及开展科研机构和高等教育机构科研活动方面的国家资格认证；发展学术文本知识库并接入本地知识库；创建电子访问系统，以便使用现有的科研用途数字服务。

科研领域资金与服务数字化（电子科研）

需要指出的是，目前已有用于监测教育机构活动的智能业务。在乌克兰市场上，知名的高等教育机构教学过程管理系统包括：

– 面向所有认证层级高等教育机构的教学过程管理自动化系统 АСК «Вищий навчальний заклад»（高等教育机构），由应用信息技术科学研究所（НДІ）开发，是信息与生产系统“教育”的一部分 [7];

– 面向高等教育机构的教学过程管理系统“指令”，由有限责任公司“计算机信息技术”开发 [8];

– 软件包“院长办公室”，由私营企业“Політек-СОФТ”开发，其中包括模块“ПС 学生” [9]。

与此同时，许多大型高等教育机构也运行着自行开发的类似系统。其中包括：

– 文尼察国立农业大学的高等教育机构管理电子系统“苏格拉底”[10];

–赫尔松国立大学“大学”高等教育机构信息分析管理系统；

–在利沃夫理工大学和伊万·弗兰科利沃夫国立大学运行的教育机构管理自动化工具；

– 在赫梅利尼茨基国立大学创建的“电子大学”自动化信息系统 [11]，。

我们将分析两种用于高校教学过程管理自动化的信息系统，分别是：由应用信息技术研究所为商业用途开发的“高校”自动化管理系统，以及由文尼察国立农艺大学自主开发并投入使用的“苏格拉底”自动化管理系统。首先，需要说明这两种系统的通用工作原则。

“高校”自动化管理系统的信息系统采用 Web 应用程序的形式构建，因此其运行需要连接到全球互联网。所有数据均存储在服务器上并由其处理，该服务器实际位于基辅，而非系统的实际使用地点（即大学在利沃夫、哈尔科夫和切尔卡瑟等城市的部门）。使用该系统无需安装专用软件。

“高校”自动化控制系统的结构采用模块化设计，每个模块均可独立使用（图1）。“高校”自动化控制系统可实现大量自动化管理功能，包括 [7]:

– 在统一信息系统中，为各结构部门及整个机构分别进行电子登记、数据处理和文档流转；

– 教学活动的规划、控制与分析；
– 及时访问与教学过程相关的信息；

– 建立统一的报告系统，既包括内部报告，也包括按照乌克兰教育和科学部（MOH）的要求编制的报告；
– 根据法律需求建立数据安全系统 ；
– 能够与信息生产系统“教育”和“Education”直接交换数据。

此外，系统还包括自动化系统“报表生成器”，可整理信息并以最便捷的形式提供给用户。



图1。“高校”自动化控制系统模块

自动化管理系统“苏格拉底”— 作为大学教育活动质量管理系统，它以开放式信息系统的方式运行，并根据大学教师、学生和管理部门的需求进行调整 [10]。

相比之下，文尼察国立农艺大学自主开发的“苏格拉底”自动化管理系统完全独立运行，系统服务器位于教育机构内，并可根据需要接入全球互联网。使用该系统也无需安装专用软件，用户使用任何方便的浏览器即可（Microsoft Internet Explorer、Mozilla Firefox、Google Chrome、Safari、Opera）。该系统可随时访问互联网中的几乎所有信息，并支持远程学习。由于不断推出新功能，且其结构和整个大学都在不断扩展，因此该系统需要进行系统管理。

我们来详细了解“苏格拉底”自动化管理系统的组成部分。

教师个人 кабин是教师工作的一部分，借助它可以开展远程学习、填写电子日志，并与系统中的其他用户交换信息。

学生个人 кабинет是学生学习的一部分，借助它可以开展远程学习。

“院系办公室”自动化管理系统可用于：生成并保存学生个人数据；生成学业成绩、模块、学分考试和考试相关数据；监测知识质量；监控教学过程。

会计是一款基于 Web 技术开发的客户端—服务器多用户程序，是“1C：会计”程序的备选方案。

图书馆系统“索菲亚”可以存储和使用各种类型、各种内容的电子文档，并以便于最终用户的方式呈现这些文档。

教学方法办公室负责管理教师教学方法研究成果的创建与实施过程。

健康中心可通过电子方式记录学生疾病的医疗数据、开具医疗证明，并自动向院系办公室提供信息。

教师人事处负责管理教师个人档案。

学生人事处负责管理学生个人档案。

文书管理处负责所有文件、信件，并将其分发给相关部门。

远程学习可以进行测试，并查看互联网上的信息。

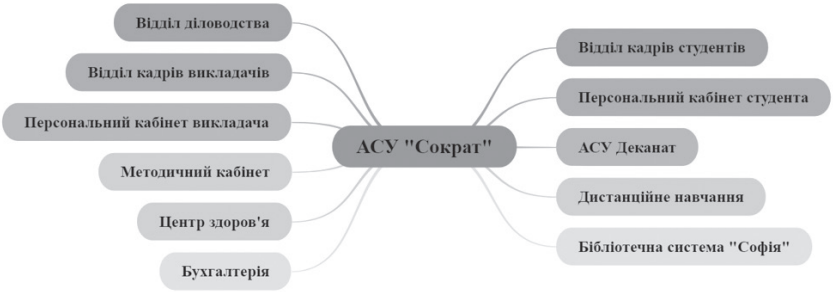


图2. “苏格拉底”电子自动化管理系统及其组成部分

“苏格拉底”自动化管理系统的主要特点是使用学生、教师和员工个人账户，并以此为中心构建信息空间（图3）。

教师个人 кабин包括:
– 填写电子日志（学生可以查看）；

– 在线查看教务部门的课程表和教学计划;

– 在手机上查看课程表;
– 为学生创建测试;



图3.电子系统“苏格拉底”的组成部分：教师个人账户

– 访问自动化图书馆系统“索非亚”； – 可发布个人教学材料，供其用于课程学习卡片； – 可在电子知识库中自行发布个人科研材料； – 访问系统内的 Web 聊天、博客和论坛。学生个人 кабинет提供以下功能（图 4）： – 查看自己的学习卡片； – 搜寻并查看图书馆的信息资源； – 参加测试； – 访问 Web 聊天室、微博客和学生论坛。

电子系统“苏格拉底”与移动技术和社交网络相连接。因此，教师可以在手机上查看自己的课程表。在“苏格拉底”系统中，可以根据课程教学卡中的学习材料、视频讲座和网络研讨会来创建远程课程。

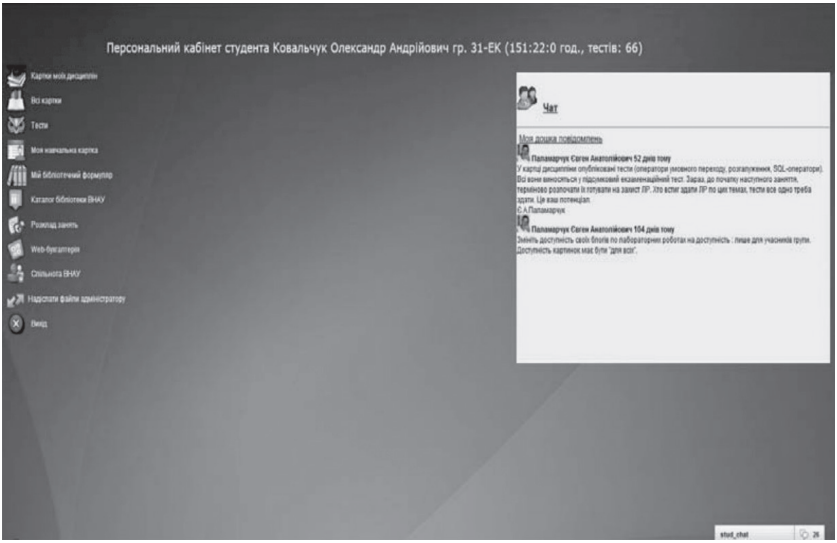


图4. 电子系统“苏格拉底”的组成部分：受教育者个人账户

“高校”自动化控制系统的一项显著优势，是设有“招生委员会”书芯，并与部级“入学”计划相连接。“学生宿舍区”书芯支持学生宿舍的报告工作。总体而言，“高校”自动化控制系统侧重于生成报告，并实现“院系办公室”自动化管理系统、“招生委员会”和“学生宿舍区”的功能，但不支持远程学习、建立教学资料库或连接图书馆资源。

电子系统“苏格拉底”的优势在于以学生、教师、教学方法专家和机构管理部门为导向，满足他们在教学信息支持与监测方面的请求。其缺点是需要创建新的模块，并与国家级软件产品实现一体化。

教育活动中常用的自动化与监测系统包括：

1. 信息生产系统“教育”，由应用信息技术研究所（НДІ）开发 [12];

2. “Vstup.OSVITA.UA”信息系统 [13];

3. 由国立大学机构“教育分析研究所”开发的“教育管理自动化信息系统”软硬件系统 [14];

3.1. 电子日志;

4. “课程：教育”软件系统，由“新知识”有限责任公司开发 [15];

4.1. “课程：学校”;

4.2. “乌克兰：教育管理信息系统”;

4.3. «NZ.UA»门户;

4.4. “课程：学前教育”;

5. 由“阿克蒂夫媒体”有限责任公司开发的普通中等教育机构教育工作者专业进修自动化系统 [16]。

我们将分析教育活动中的自动化与监测系统。

全国教育信息生产系统为乌克兰教育领域提供统一、完整的信息环境，由行政、法律、软件和硬件手段构成。

个人身份自动识别系统已成为文明国家行政运作中不可或缺的要素。任何身份识别系统中关于个人的基本信息都是个人信息：姓、名、父称、出生日期和地点、照片。

在乌克兰统一信息空间的形成阶段，有必要实施统一的综合性文件支持系统，以信息系统记录数据与文件制作系统的不可分割结合为基础。根据《教育法》，所有公民都必须接受基础教育，因此，预期将公民个人数据及其数字照片录入数据库的系统，应在与国家税务管理局协商后，成为分配个人纳税人识别号码的基础。

这一多功能信息生产系统用于收集和记录自然人数据，并为其提供文件支持，由乌克兰国家科学院网络安全中心的网络安全研究所和“应用信息技术研究所”股份公司与乌克兰教育和科学部共同开发。

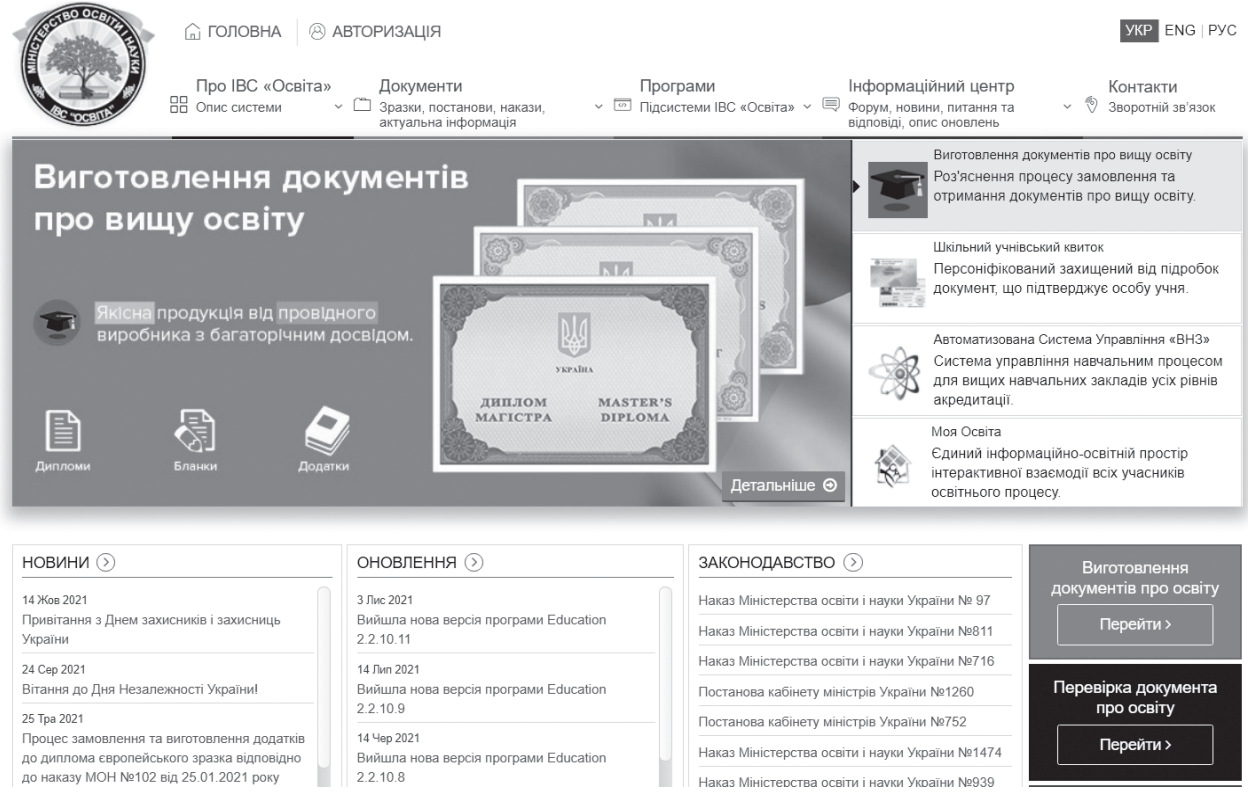


Рис. 5. Головна сторінка інформаційно-виробничої системи «Освіта»

目前，已经建成并成功运行一套基础设施，可收集初始数据，覆盖乌克兰全境，直至区级。

创建 IBC «OCBITA» 的主要目标：

– 分析国家的人力资源潜力，并预测职业构成结构变化的趋势；

– 分析国家劳动力资源的数量指标；

– 创建用于有效管理教育机构的标准化信息与软件工具；

– 监控教育机构的活动；
– 国家标准教育证书的真伪验证；
– 规范向中小学生和大学生提供优惠。

根据其用途，信息系统“教育”的主要任务包括：

– 创建高效的自动化系统，以制定乌克兰教育领域的管理决策；

– 创建高效的自动化系统，用于管理典型自动化系统“高等教育机构”中的高等教育机构；

– 创建并维护乌克兰教育机构统一数据库；

– 在乌克兰创建并维护中小学生与大学生统一数据库；

– 推行高等、职业技术及普通中等教育机构名录；

– 获取并分析有关乌克兰教育机构活动的信息；

– 支持维护教育与科学部的信息库，其中包含教育领域文件、其持有人以及用于分析人口专业构成的方法库；

– 按照现行法律规范学生优惠的提供过程；

– 自动化收集和保存与教育领域文件相关的信息；

– 在 IBC «OCBITA» 中，于数据收集和处理的不同阶段进行信息认证；

– 提高教育领域文件的防伪保护水平；

– 集中化并改进教育领域文件的制作流程，以及在塑料卡遗失或损坏时补办其副本的流程；

– 确保已制作的教育领域文件相关信息的整体性、准确性和及时更新；

– 对由IBC «OCBITA»制作的教育领域文件进行识别；

– 获取统计数据，并向国家机关和企业提供所需的统计信息；

– 根据现行法律的需求，确保信息免遭未经授权的访问。

信息生产系统IBC «OCBITA»包括通过互联网收集自然人数据（包括数字照片）的系统、中央数据库，以及用于制作和记录文件的生产系统。该系统的信息安全通过使用现代软件和加密手段来实现，从而彻底杜绝未经授权访问信息的可能性。

IBC «OCBITA»已在乌克兰教育和科学部部署，用于为教学过程提供信息和文件支持。该系统涵盖从中学到高等教育机构的所有学习阶段，负责收集个人数据，并集中制作电子学生证、电子大学生证和教育文件。2000年，该系统运行的成果是在乌克兰制作并登记了超过180万份教育文件。目前，中央数据库中包含超过3900万份文件及其所有人的信息。

由于IBC «OCBITA»中包含的个人数据会在个人今后于国家中的生活活动中使用，因此该系统必须与教育领域的活动紧密相关，也必须与乌克兰其他部门和行政机构的职责领域紧密相关，包括内务部、乌克兰国家税务管理局、国防部、卫生部、交通部以及州和市国家行政机构。目前，相关各方已就交互原则达成一致，并正与交通部和乌克兰国家税务管理局开展联合工作。此次交互的成果是优惠登记与发放系统。

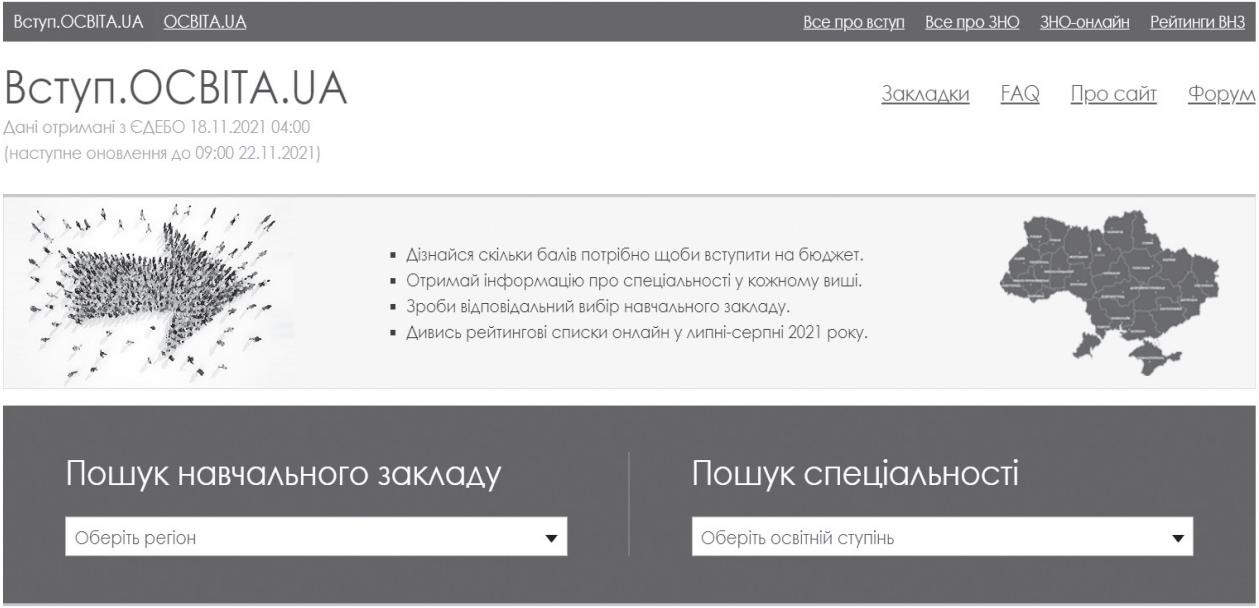


Рис. 6. Головна сторінка «Вступ.ОСВІТА.UA»

*“Vstup.OSVITA.UA”*信息系统。“Vstup.OSVITA.UA”信息系统网站上发布的信息，源自教育事务统一国家数据库（ЄДЕБО），依据与作为ЄДЕБО管理机构的国有企业“信息资源”签订的合同获得。

“Vstup.OSVITA.UA”信息系统向公众广泛提供有关招生工作期间提交入学申请、获得录取建议书以及被高等教育机构录取进展的信息，旨在确保高等教育机构招生工作的开放性和透明度。

该网站还旨在向申请者、他们的父母、教育专家及其他相关人士介绍乌克兰高等教育机构的入学条件，并提供往年高等教育机构入学结果的统计信息。

网站刊载乌克兰所有现行高等教育机构的信息，这些机构招收申请者入学，以攻读初级专科文凭、学士或硕士学位。

网站提供各高等教育机构的联系信息，以及有关专业和教育项目的信息，这些机构依据相关专业和项目培养初级专科、学士和硕士。信息包括考试科目、许可招生名额、国家计划招生名额等数据。

“教育管理自动化信息综合系统”软硬件综合体（ПАК «AIKOM»）是一种电子教育管理系统，是现代化的国家教育信息系统（ДІСО），旨在统一集成环境中处理教育领域的国家电子信息资源和个人数据。

主要目标是推动实现电子文档流转（报告、沟通、通知、调查、投票、及时收集数据），优化学前教育、普通中等教育、校外教育和职业教育（职业技术教育）领域以及地方和州级教育管理部门的相关数据业务流程（在 ПАК «AIKOM» 中创建相应模块），从而大幅提高教育统计信息和行政信息的可靠性，并以此提升管理决策的质量，尤其是关于分配教育补贴和其他用于教育经费的预算资金的决策，

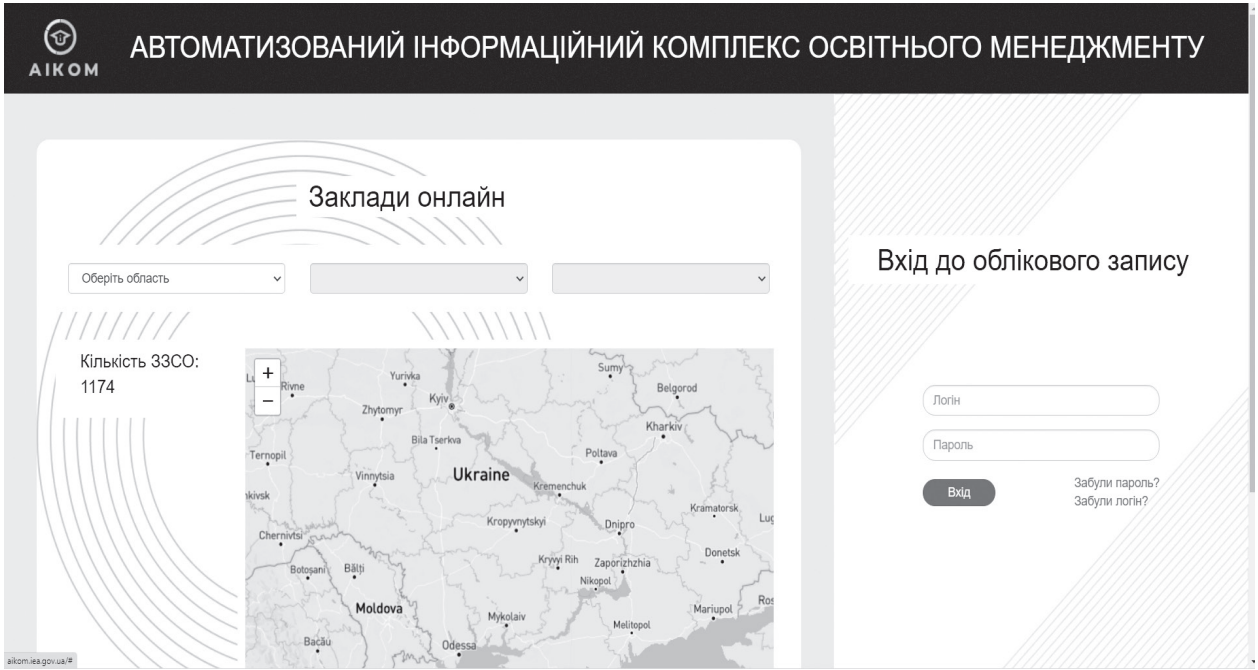


Рис. 7. Головна сторінка ПАК «AIKOM»

这将为全面去官僚化进程中停止使用纸质文件创造前置条件。

预期的现代化改造包括为学前、普通中等、校外及职业（职业技术）教育的受教育者和教育工作者创建电子个人账户，使他们能够访问所有国家教育信息服务，并更便捷地获取汇总后的去标识化数据，以自动生成乌克兰国家统计局所需的报告。

现代化改造的其他目标还包括发展免费的国家电子日志和成绩册，部署面向国家教育服务的统一身份验证系统，以及通过使用 API ПАК « AIKOM»，将教育信息服务市场上的备选软件解决方案连接至中央数据库等。

确保普通中等教育系统实现基础数字化的热门数字工具之一是电子日志系统。这类数字工具为保障过程四类参与者——学校管理人员、教师、学生和家长——之间持续交互与高效合作创造了新的能力。

自2020年12月起，普通中等教育机构可部署和使用基于软硬件综合系统《自动化教育管理信息综合系统》（EJournal）的免费国家电子日志服务。该服务由乌克兰教育与科学部和国家科研机构《教育分析研究所》团队开发，并根据乌克兰教育与科学部2020年12月22日第1545号命令投入试运行。普通中等教育机构可自愿决定是否使用该服务。

为教育过程参与者的不同群体引入电子日志的优势：

面向学校管理人员：
– 可快速编制教育报告，生成各班级和学科的成绩图表；

– 分析教师工作成效；
– 出勤记录；
– 可跟踪学生、班级和学校的学业成绩变化；



Рис. 8. Можливості системи E-Journal

– 提升教育机构的排名。
对教师而言：
– 减少繁琐的纸质工作；
– 可通过智能手机或计算机轻松访问最新课程表；
– 可下载学习资料，以便了解并协助完成家庭作业；
– 节省备课时间；
– 无需纸质日志，即可便捷地将班级划分为小组；
– 学期或学年结束时，可简单地自动生成复杂报告；
– 与学生和家长高效沟通。
面向学生：
– 便捷访问学习材料和家庭作业；
– 参加由学校组织的线上网络研讨会和会议；
– 可在方便的时间查看课程材料（包括缺勤期间）；
– 可与教师进行远程交互；
– 可自主监测学习成绩。
面向家长：
– 可及时获取有关儿童学业成绩和出勤情况的信息；
– 有效监测知识掌握情况及家庭作业的完成情况；
– 直接与教师沟通；
– 有机会参与教育服务质量评估。

«КУРС:Освіта» — 这是一个软件套件，由以下关键组成部分构成：

面向普通教育机构的计算机程序 «КУРС:ШКОЛА»，以及其组成部分——面向地方教育管理机构（区级和市级政府机构的部门、管理机构和教育部门）的 «КУРС:ШКОЛА +»，还有用于自动化向上级 WEB门户传输数据的 «КУРС:САЙТ»。

可实现教学过程的自动化和高效管理。可生成乌克兰教育、科学、青年和体育部2012年7月2日第766号令批准的3НЗ-1和83-РВК必填报告表，以及国家统计委员会2010年8月6日第317号令批准的77-РВК统计报告表，并根据隶属关系发送其电子版。可帮助安排教师工作量。可编制

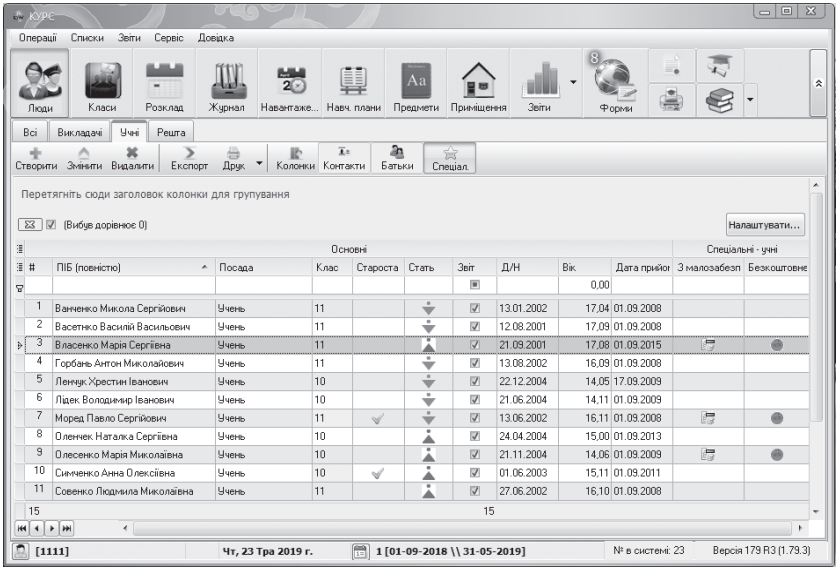


图 9. «КУРС:ШКОЛА»程序界面

手动或自动编排课程表。设有电子班级日志模块。«КУРС:ШКОЛА»程序可在两种模式下运行：访问互联网和不访问互联网。

教育管理信息系统（*ІСУО*）门户。该系统接收并汇总普通中等教育机构的数据，生成由现行法律批准的必填报告表格 ЗНЗ-1、76-РВК、77-РВК、83-РВК、Д-4、Д-5、Д-6、Д-7、Д-8，并根据隶属关系发送这些表格的电子版。支持信息检索，便于筛选所需数据和编制用户报告。系统采用可靠的算法，保护信息免遭未经授权的使用。乌克兰的每个地区都有自己的域名，因此也拥有本地区的教育管理系统。系统的组成和功能可根据任务和需求进行补充和扩展。

NZ.UA»门户是面向教育过程所有参与者的公开网站：学生、家长、教师及其他教育员工。

教师可以在班级日志和学生日记中录入成绩并记录出勤。教育过程的所有参与者都可以便捷地进行交流和分享信息。

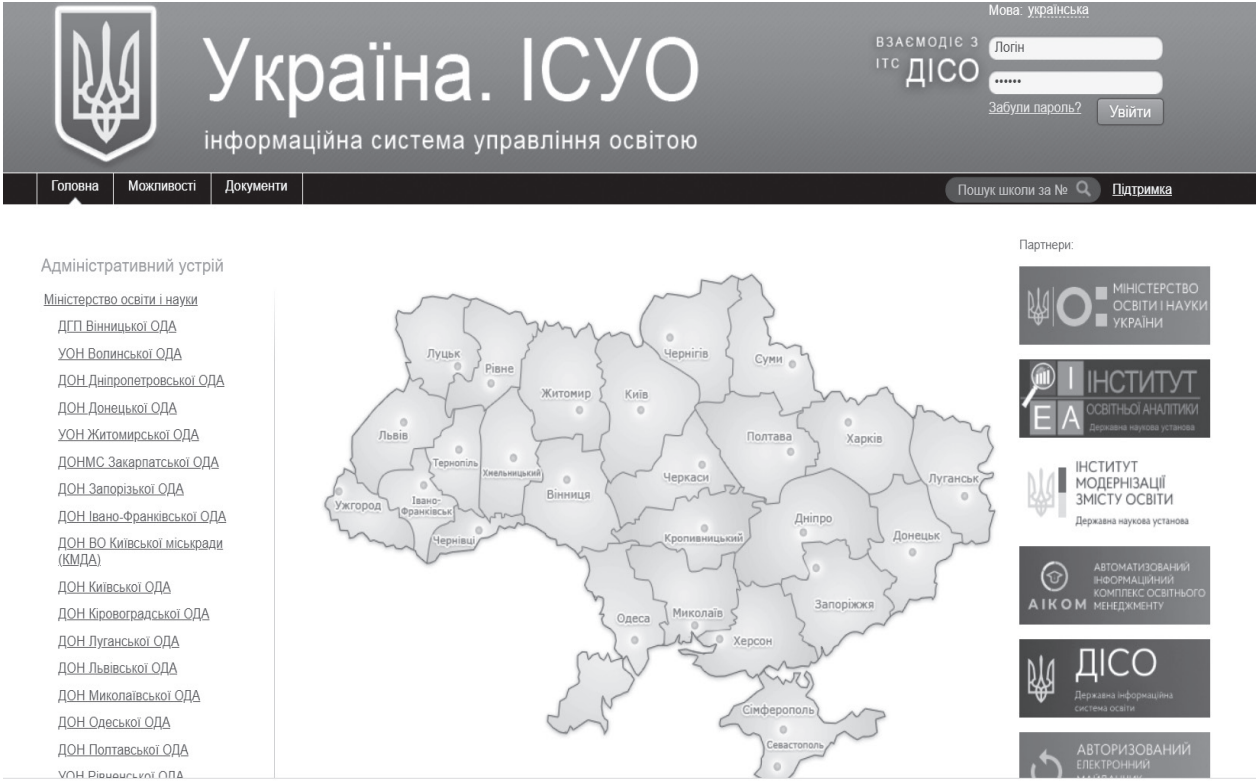


Рис. 10. Головна сторінка «Україна.ІСУО»

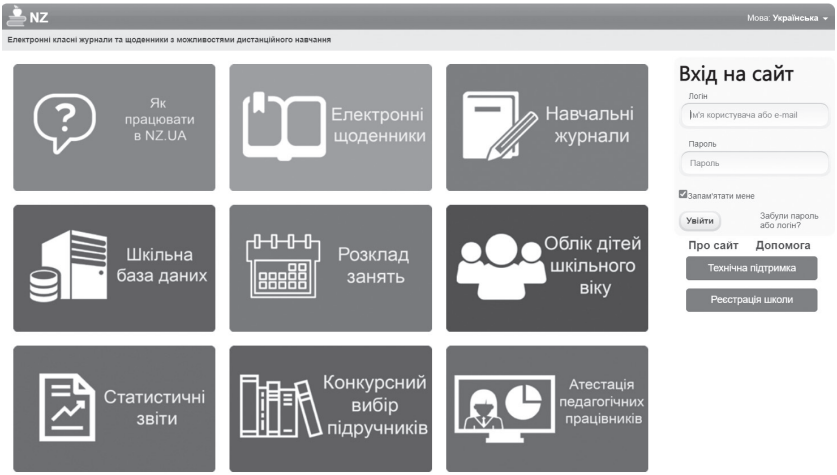


图 11.「NZ.UA」门户主页

可以向全班发布家庭作业，也可以单独发布给每位学生。即使家长非常忙碌，或住在远离孩子的地方并在那里工作，也能随时了解学校里发生的事情。教师和家长都可以归档数据，分析出勤率和学业成绩。该门户支持得出结论并进行各种统计抽样。「NZ.UA」门户会与「КУРС:ШКОЛА」程序自动同步，大大减轻用户的工作负担。

计算机程序《КУРС:ДОШКІЛЛЯ》。该程序用于管理学前儿童教育机构的统一数据库、管理各项流程、记录学龄前儿童信息，并自动（按一下按钮）编制85-к表规定的统计报告。《КУРС:ДОШКІЛЛЯ》程序记录教职员工、学员及其父母或监护人的信息，帮助控制并映射各班级及整个机构一周、一个月或一年的出勤情况，提高学前儿童教育机构的工作效率，为人员创造更舒适的工作条件。程序支持两种语音（乌克兰语和俄语），并区分数据访问权限和级别。程序支持单用户和网络模式，并可个性化设置界面。程序采用最新的智能数据表示方法。

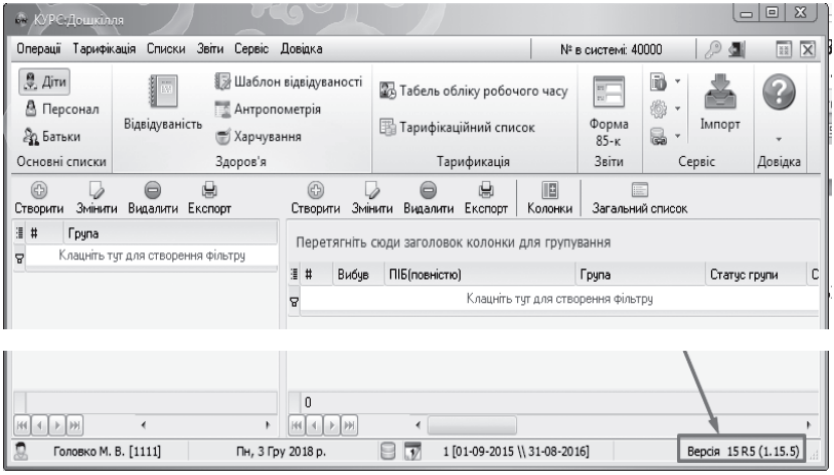


图12.「КУРС:ДОШКІЛЛЯ」程序界面

普通中等教育机构教学人员职业资格提升自动化系统（*АПК*）旨在支持普通中等教育机构教学人员参加职业资格提升课程的学习过程。

在新平台上，用户可以查看专业进修课程和项目，提交学习报名申请，创建个人账户以存储学习进度和结果信息，进行付款，并获取规定格式的专业进修证书等。

服务按照乌克兰内阁第800/1133号决议（2019年8月21日和12月27日）中有关教学人员和教学科研人员专业进修阶数的要求提供。服务依据协议提供，注册用户在为所选课程提交报名申请的过程中即可查看协议。用户根据发票支付服务费用，可选择以下方式之一：银行卡、在线支付或银行转账。上传特定课程要求的所有文件并完成付款后，用户将在个人账户中收到规定格式的证书以及服务提供证明。

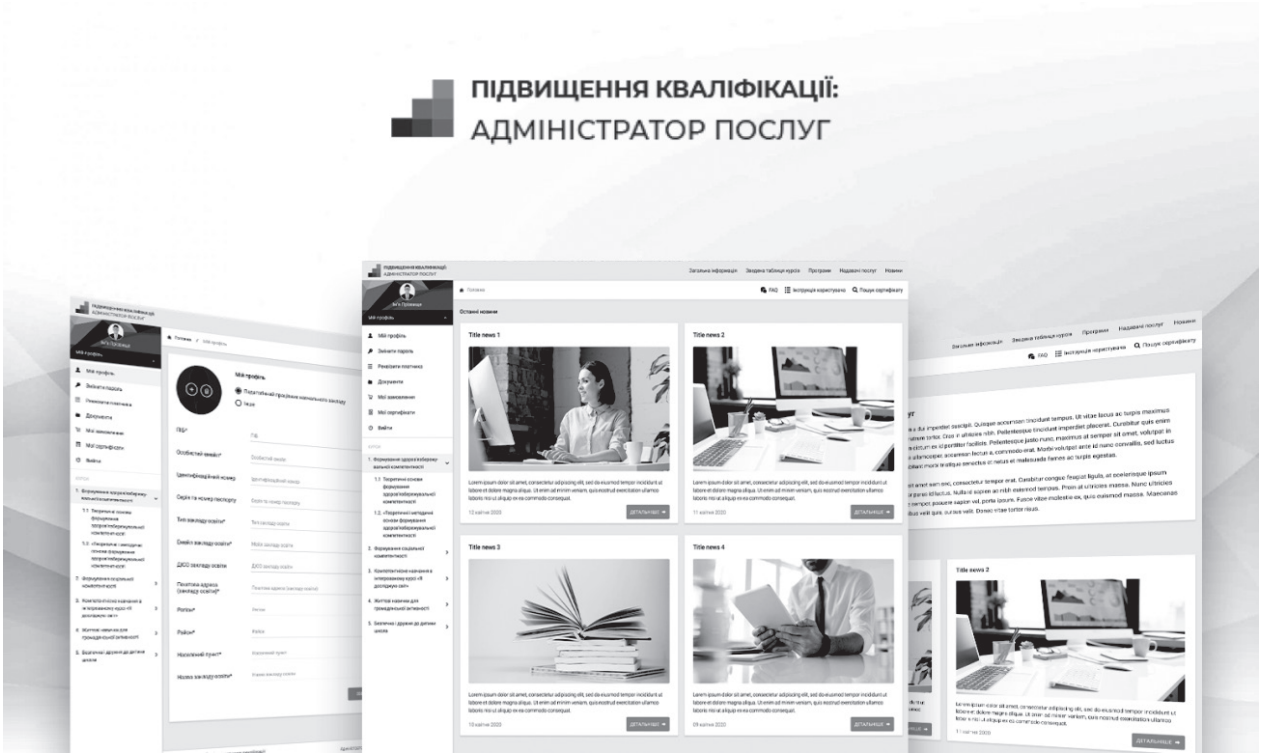


Рис. 13. Автоматизована система підвищення кваліфікації педагогічних працівників закладів загальної середньої освіти

用于颁发进修证书的依据文件包括：

对于远程教育形式：完成相应在线课程的电子文件；

对于双元学习形式：
1）完成相应在线课程的电子文件；

2）由教育机构管理层签字的工作地点实习证明。

通过分析教育活动中的学习过程管理信息系统以及自动化与监测系统，可以得出结论：通用系统的优势在于初始设置更加简单，只需具备互联网连接即可，无需用户管理数据库。此类系统中的技术流程依据教育和科学部的需求及规范性文件构建。然而，为了实现广泛适用性和通用性，系统牺牲了某些特定函数的周全性以及用户使用的便利性。相比之下，专业电子管理系统需要进行专门的系统管理，但这使其能够更加灵活地适应教育机构的各种需求。该系统的一项重要优势是，所有模块均使用统一的数据库，其中既包含教师数据，也包含学习者数据。此外，系统还促使人员提高执行纪律，因为它不允许随意更改标准输出信息，同时也使使用现代学习与通信工具（企业邮箱、聊天工具、科学教育社群等）成为必要。

研究结果可以形成以下建议：

1. 创建教育过程电子管理系统时，应考虑用户群体（学生、教师、员工、机构管理部门）的目标与任务；

2. 只有在获得技术、软件和组织支持的条件下，综合电子教育机构管理系统的实施才能真正发挥成效。

教师专业进修核算自动化信息系统。乌克兰教育新改革与研究生师范教育（ППО）系统

要求对教育机构员工的专业进修过程进行监测。这将有助于观察和分析教育机构实施相关专业发展过程的情况，以便发现阶段性和最终结果。总体而言，这将有助于作出相应的管理决策，以调节和调整教学过程，确保其质量。同时，监测的有效性以及必要变更的及时性，取决于对现有教育机构活动数据处理的自动化程度。这决定了使用相应软件的可能性，尤其是专业信息系统（智能业务）。

根据以上考察的应用程序，可以得出结论：教育过程自动化系统有许多不同的形式。每种系统都有各自的优点和缺点；还应指出，大多数考察的决策均以在线开本运行。分析这些系统后，可以归纳出待开发系统应具备的主要功能，具体如下：

界面清晰易懂；运行速度快；设置和启动简单；具备不同的访问类型；能够创建独立的用户组；可集成到不同环境中；能够实现额外模块；安全性高；功能丰富。

所有信息系统，无论其架构和使用领域如何，均由两部分组成：功能架构部分，包含决定系统功能、用途和管理函数的元素；以及保障部分（图14）。

功能部分由子系统、任务系统和自动化工作站组成。功能子系统是系统中能够执行特定管理函数和任务的独立部分，其特点是具有相应的目标用途、特定的经济指标计算方法、隶属关系以及运行技术特性。具体信息系统的函数列表

取决于其应用领域和控制对象。根据划分出的功能子系统和管理阶段，确定任务系统，并结合管理的主要阶段实施：规划、核算、监测、分析和调节。选择并论证功能任务系统，是创建信息系统 [22] 最重要的元素之一。

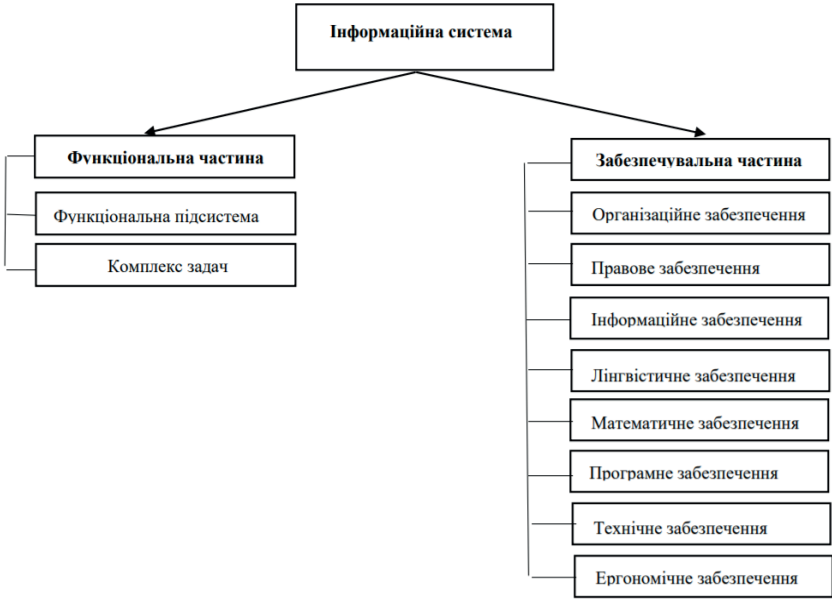


图14. 信息系统结构图

信息系统的保障部分由各个子系统组成，这些子系统是实现功能部分的工具。它们包括组织保障、法律保障、信息保障、语言保障、数学保障、软件保障、技术保障和人机工程保障。

组织方法保障子系统由规则、文件、说明书和条例组成，用于确保系统的创建及其组成部分在运行过程中的相互协作。组织保障实现以下函数：

– 分析组织现有的管理系统（信息系统将在其中使用），并确定需要自动化的任务；

– 准备交由计算机处理的任务，包括信息系统设计技术任务书及其效益的技术经济论证；

– 制定管理决策，构建解决任务的方法论，以提高管理系统的效率。

文件规定了信息系统的运行技术，以及用户选择和应用技术手段以在信息系统运行过程中取得具体结果的方法。

法律保障子系统是与信息系统运行相关的立法文件、法律规范和规范的总和。规范性文件规定了获取、转换和使用信息的程序。法律保障以法律方法处理系统开发中的组织和功能方面问题。具体而言，法律领域中的管理函数通过规范性法律文件、计划、方法以及对所有国家标准均有约束力的规定来实现。规范性法律文件分为立法文件、部委规范性文件、地方管理机构文件和地方规范性文件。

信息保障是指信息 размещ置和组织方法与手段的总和，包括统一的消息分类与编码系统、信息流图，以及数据库构建方法论。信息保障包括指标、参考数据、分类器和信息编码表的集合，以及存储在相应载体上的信息数组；它是信息系统运行的主要环节之一，其中包含资源，而系统的开发正是为了使用这些资源。通过信息保障手段，可以实现不同信息系统之间数据的信息兼容性。为组织它们之间的交互，数据必须采用统一的方式进行描述。

用于创建和维护数据库的软件系统称为数据库管理系统（СКБД）。该系统支持创建数据库逻辑结构、录入和编辑数据库、搜寻和存储数据，以及访问单条记录、字段等。

信息保障的形成是创建信息系统中最重要的环节之一。正在进

行信息库整理、制定统一的信息分类与编码系统、确定信息输入、存储、积累和恢复方法等工作。

数学支持——数学方法、模型和信息处理算法的集合。它包括支持工具、求解与优化方法、数学规划、数理统计以及技术文档。此类支持的技术文档包括任务描述、算法设计任务、任务的经济数学模型及用于实现信息系统运行的程序，以及应用软件包的描述。数学支持专家负责任务设定，并使用数学解析与数值方法。

软件包括一个协调一致的程序系统，使集成环境的所有组成部分能够本地运行并协同运行，还包括一组用于确保技术设备综合体稳定运行的程序。软件由系统软件与应用软件以及指导性教学材料构成。系统软件包括保障计算机操作系统运行的程序。这些程序旨在组织计算过程并解决信息处理中的标准任务，具体包括操作系统、防病毒软件、命令文件处理器等。应用软件工具是创建特定功能系统时开发的一组程序，其中包括用于收集和处理数据、以解决功能任务的应用软件包。这类工具包括以下系统：

– 编制文件（文本、表格、图形）；– 处理财务经济信息；– 管理数据库；– 决策支持和专家系统等。

技术支持是指供信息系统运行使用的技术设备，以及有关这些设备和工艺流程的文件。构建集成信息环境与信息基础设施的建设密切相关，其组成部分包括：

– 硬件（整个技术设备系统的基础，用于处理和转换各种类型的信息）；

– 软件；
– 数据存储设备；
– 用于确保系统内部信息传输及与外部环境交换数据的通信设备；

– 计算机网络。

人机工程保障涵盖在系统开发和运行的不同阶段所采用的一系列方法和手段，旨在为人员和客户创造最佳且安全的条件，确保高效、无差错地工作。

引入信息系统旨在提高信息处理效率，这不仅得益于对日常信息的处理与存储以及报告自动化，也得益于采用基于决策时行动建模的全新管理方法。

为营造人事条件提供信息支持，需要获取、记录并使用以下信息：员工人员编制表及岗位职责；每位员工的个人资料；员工专业进修计划、员工考核计划；书目及摘要文献清单；教学经验档案；教师个人工作计划、自学计划。

值得指出的是，目前尚无专门用于教育机构层面专业进修过程记录与监测的信息系统。为减少教师专业进修及资格认证过程中需要跟踪和处理的文件数量，建议创建一套自动化信息系统，用于记录教育机构科研教学人员及教学人员的专业进修与资格认证情况。

创建信息系统的目的如下：

– 通过为该过程的预测与组织规划任务提供信息支持，确保教育机构教学及科研教学人员专业进修与资格认证过程的有效性；

– 便捷地对教育机构教学及科研教学人员的专业进修过程进行自动化监控；

– 监督教育机构教学及科研教学人员在统计期间内专业进修学时数量规范的执行情况;

– 统计指标的表示（每位教师的专业进修学时数、少于150小时的专业进修学时等）;

– 编制关于教育机构教学及科研教学人员专业进修和资格认证结果的报告;

– 按专业进修和资格认证方向，对教育机构教学及科研教学人员的结果进行分析。

数据库作用范围及应用边界的定义:
– 教育机构教学方法办公室。
用户组成及应用领域的定义:
– 教育机构教学方法部门的员工 .
定义数据库支持的用户视图:

– 存储和处理有关学院教师专业进修规划及成果的信息。

用户需求:
– 自动化教育机构教学及科研教学人员专业进修与资格认证过程的登记与控制;

– 自动化规划、记录和监测教育机构教学及科研教学人员的专业进修;

– 自动化生成教育机构教学及科研教学人员专业进修和资格认证指标。

信息系统要求:
系统应支持执行以下函数:

– 系统初始化（输入教育机构教学及科研教学人员的信息、专业进修基地清单等）;

– 输入和更正教育机构教学及科研教学人员的信息，以及他们专业进修的结果;

– 获取教育机构教学及科研教学人员专业进修和资格认证的相关信息。

系统应支持执行以下查询:

执行数据筛选并返回教育机构中某一类别的教学及科研教学人员名单的查询（通过“按类别搜索”表单进行选择）。

执行数据筛选并返回教育机构中某一教研组/教研室的教学及科研教学人员名单的查询。

返回教育机构中具有“教师-方法专家”教育职称的教学及科研教学人员名单的查询。

返回教育机构中具有“科学博士”学位/学术职称的教学及科研教学人员名单的查询。

统计教育机构教学及科研教学人员专业进修总学时的查询。

返回教育机构中具有“科学副博士”学术头衔的教学及科研教学人员名单的查询。

按专业进修日期筛选数据并返回相关信息的查询。

该查询用于筛选数据，并返回有关教育机构某位教学及科研教学人员专业进修结果的信息。

按资格认证年份筛选数据的查询。

查询在过去5年内专业进修时数不足150小时的教师数据的查询语句。

输出数据包括:

– 教育机构教育工作者及教育科研工作者的个人信息卡;

– 教育机构教育工作者及教育科研工作者的考核卡;

– 教育机构教育工作者及教育科研工作者的职业资格提升计划;

– 教育机构教学及科研教学人员职业资格提升最新信息;

– 专业进修成果;
– 各类报告及其他 лани.
可靠性需求，即确保程序可靠运行的需求:

– 应进行信息输入控制;
– 应防止用户在操作系统时执行不正确的操作;

– 确保已存信息的完整性。
智能业务的设计过程是从领域信息结构的非正式语言描述到用某种模型的术语对领域对象进行形式化描述的一系列变迁。智能业务的设计包括以下阶段:

– 领域系统分析; – 概念设计; – 逻辑设计; – 物理设计。

系统分析包括对领域中的真实对象进行语言描述，确定对象之间的关系，并研究对象及其关系的特性。研究结果用于数据库的概念设计。

为确定领域的组成和结构，可采用功能方法或面向领域的方法。功能方法采用“从任务出发”的思路，适用于事先已知数据库未来用户的函数，且已知为满足其信息需求而创建数据库的所有任务的情况。在这种情况下，可以根据生产文件和对客户的调查，明确确定领域的最小对象集合及其相互关系。

领域方法适用于未来用户的信息需求尚未明确确定的情况。在这种情况下，无法明确确定领域的最小对象集合。领域描述中包含对该领域最具代表性且最为重要的对象及联系。数据库称为领域数据库，可用于求解预先未确定的任务。

在实际活动中采用综合方法：一方面，它能够解决具体的信息任务和功能任务；另一方面，也考虑到添加新应用的可能性。

一般而言，数据库设计有两种方法：自顶向下设计和自底向上设计。

自顶向下设计从确定数据集开始，然后确定每个数据集的数据元素。这个过程包括识别不同类型的实体，并确定每个实体的属性。自顶向下设计包括分解操作，即用另一关系集替换数据库模式中的原始关系集，而后者是原始关系的投影。

当实体、关系和事务的数量、种类及复杂程度较大时，建议采用这种方法进行设计。最常用的设计模型是“实体—关系”模型（ER模型，Entity-Relationship model）。

自底向上的设计从识别数据元素开始，随后将其分组成数据集。首先确定属性，再将属性合并为实体。自底向上的设计包括综合操作，即根据数据库模式中源关系的主题领域对象之间给定的函数依赖集执行组合。

如果开发的是规模较小、对象、属性和事务数量较少的数据库，建议采用这种方法。

概念设计是创建概念模型的过程，该模型由概念数据库模式表示。在这一阶段，需要确定对象、对象之间的关系、属性和键属性。

逻辑设计是基于选定的数据模型创建逻辑模型。在这一阶段，必须明确系统将采用哪种数据库管理系统（层次型、网状型、关系型或面向对象型）。为检验逻辑模型的正确性，需要进行规范化。此外，还要检查逻辑模型是否满足所有用户事务的要求。

物理设计是对数据库逻辑项目物理实现方式的描述。物理模型确定数据在存储环境中的存放方式，以及在物理层支持的访问这些数据的方式。

领域分析。根据法律规定，教育工作者和科研与教学人员有义务不断提升专业

水平、综合文化水平和教育技能。但这项义务与教学人员自由选择教育计划、学习形式、教育机构、机构和组织以及其他开展教育活动并提供专业进修的主体的权利相平衡。教育工作者可以通过任何方式搜寻专业进修信息——直接访问提供专业进修的主体网站，浏览各类信息或专业资源、主题群组，或直接向专业进修主体请求所需信息等。

教育机构应促进其教学人员和科研教学人员的专业发展与专业进修。基于此，乌克兰教育与科学部要求所有教育机构的管理层履行控制职责，并积极尽可能地促进教学人员和科研教学人员的专业发展与专业进修，遵循法律规定的原则以及《教学人员和科研教学人员专业进修程序》所规定的程序。该程序由乌克兰内阁于2019年8月21日通过第800号决议《有关教学人员和科研教学人员专业进修的若干问题》批准。机构管理部门积极支持教学人员——解释新的专业进修程序，并在需要时帮助他们确定最需要改进的能力等——是推动教育机构形成伙伴关系教育理念、实现可持续发展、维护团队健康微环境、改善教育机构活动和整体教育质量的保障。

对于高等教育和专业预科教育机构而言，专业进修是教育质量保障系统的必备组成部分。通常，专业进修按照专业进修程序开展，包括参加研讨会、实践教材、培训、网络研讨会、大师班等。科研教学人员的某些活动（参与学术流动项目、科研进修、自学、取得学位、接受高等教育）可被认定为专业进修。科研教学人员某些活

动及其结果和专业进修篇幅的认定程序，由相关教育机构的学术（教学）委员会确定。科研教学人员可自主选择专业进修的形式、类型、方向及实施主体。

法律对在不同教育层级开展专业活动的科研教学人员的专业进修频率和篇幅提出了不同要求。例如，专业预科教育机构的科研教学人员必须每年参加专业进修；五年内用于专业进修的学时总数不得少于120学时，其中一定数量的学时必须用于改进面向有特殊教育需求的学生和成年学生开展工作的知识、能力与实践技能。此外，专业预科教育机构科研教学人员每年的专业进修篇幅由创办者（或其授权机构）确定。

科研与教学人员专业进修的篇幅（时长）以欧洲学分转换与累积系统学分计算（一个欧洲学分转换与累积系统学分为30小时），采用累积制。高等教育和研究生教育机构的科研与教学人员在五年内的专业进修不得少于六个欧洲学分转换与累积系统学分。累积制允许将科研与教学人员在考核间隔期内任何时间参加的、被认定为专业进修的专业进修或其他专业能力提升活动的篇幅计入其中。首次受聘担任以下职务的教育机构科研与教学人员：高等教育、研究生教育机构负责人或副负责人，院系、研究所或其他结构部门负责人或副负责人，教研室负责人，以及高等教育机构研究生院、博士生院主任，必须在任职后的前两年内根据所任职务参加专业进修。此类专业进修的篇幅由相应教育机构的学术（教学）委员会确定。

专业进修结果在以下过程中予以考虑：高等教育机构及研究生教育机构教学人员的资格认证；

通过竞聘选任岗位，或与科研教学人员签订劳动合同。

教师资格认证是指一套措施，旨在全面、综合地评估教学人员的教育活动，并据此确定教育工作者是否符合所任职位要求、其资格水平，以及授予相应的资格类别和教师职称。考核分为定期考核和额外考核。定期考核每五年进行一次。教学人员参加定期考核的条件是，至少每五年一次，在自由选择学习形式、课程和教育机构的基础上完成进修。为组织和开展教育机构及其他机构、教育管理部门中教学人员的考核，每年9月20日前设立第一级、第二级和第三级资格认证委员会[18]。

在考察教育机构及其他机构管理人员的专业活动过程中，资格认证委员会将查明:

– 教育机构发展计划的执行情况及创新活动的结果;

– 教学与育人工作的组织状况，以及对国家教育标准需求的遵守情况;

– 教育机构国家评估的结果;

– 国家教育机构监察局、地方教育管理部门及其他国家监督（监测）机构开展的检查结果;

– 是否遵守为学生提供安全、无害学习条件的需求;

– 对教育机构教师团队及其他工作人员开展工作的监测结果;

– 与社会组织及学校自我管理机构的交互效率;

– 遵守教育职业道德和职业操守;

– 负责人在教育机构集体大会（会议）上所作的工作报告;

– 对公民诉求处理情况的分析。

自动化教师专业进修管理信息系统的信息流图定义。

信息流以纸质文件或电子文档流为基础。根据具体情况，可以用数量来衡量，

即已处理和传递的纸质文件数量，或这些文件中的行总数。

教师进修核算自动化信息系统从信息来源获取数据。这些数据被发送至系统进行存储或处理，然后发送给消费者（图14）。

消费者可以是人、设备或其他信息系统。消费者与信息系统本身之间可以建立反馈关系（从消费者到信息接收者）。

在本例中，信息来源是教育机构的教育工作者和科研教育工作者，而信息消费者则是管理结构。

教师进修核算自动化信息系统包括输入信息（教师数据、证书、文凭）和输出信息（报告、计划、计算结果），并在信息环境中运行。借助信息处理手段，输入信息转化为输出信息，随后教研室主任可以对其进行处理（图15）。

信息来源
（教育机构教学及科研教学人员的计划、报告，教育机构教学及科研教学人员专业进修证书、进修培训证明，工

委员会命令)↓信息获取（教研组委员会、教研室）↓信息存储与处理（教学与教研部门、教研室）↓信息输出（教学与教研部门、教研室）↓
信息使用者（结构部门负责人、上级考核委员会）

图15. 信息流转链



图16. 信息系统结构图

方法办公室工作人员通过与信息系统界面交互来访问数据库，并可以编辑任何数据、创建报告，或提供信息，以供教学方法办公室负责人进一步审查、处理和修正。

概念建模。为创建信息系统数据库的概念模型和逻辑模型，选择了关系模型。该模型由 E. F. Codd 于1970年提出，旨在使数据库管理系统尽可能摆脱对特定应用程序的依赖。这是一种以谓词逻辑和集合论定义的数学模型，采用该模型的系统应用于大型主机、个人计算机和微型计算机系统中。通常所称的关系数据库产品，实际上实现的模型只是对 Codd 所定义的数学模型的一种近似。关系数据库模型中广泛使用三个关键术语：关系、属性和域。关系是一张由列和行组成的表。关系中命名的列称为属性，而域则是一组属性可以取值的集合。

关系模型的基本数据结构是表，其中有关特定对象（例如员工）的信息以行（也称为元组）和列的形式呈现。因此，“关系数据库”中的“关系”指的是数据库中的不同表。一个关系由一组元组构成。列列出了对象的各种属性（例如员工的名、

地址或电话号码），而一行则是由该关系表示的对象（某位特定员工）的实际实例。因此，Employee 表中的每个元组都表示一名员工的不同属性。关系数据库中的所有关系（因此也包括表）都必须遵循一些可归纳为关系的基本规则。首先，表中列的顺序并不重要。其次，表中不能有相同的元组或行。第三，每个元组的每个属性都只能包含一个值。

关系数据库包含多个表，每个表都类似于“平面”数据库模型中的表。关系模型的一大优势在于，原则上，出现在两个不同记录中的任何值（这些记录可以属于同一张表，也可以属于不同的表）都意味着这两条记录之间存在联系。不过，为了确保明确的完整性约束，也可以通过识别父子关系，并为其指定基数（1:1、(0)1:M、M:M），来明确规定表中记录之间的关系。表还可以指定一个唯一属性或一组属性，作为“键”，用于唯一识别表中的每个元组。能够唯一识别表中一行的键称为主键。键通常用于联接两个或多个表中的数据。例如，Employee 表可能包含一个名为 Location 的列，其中的值对应于 Location 表中的键。键在创建索引时也很重要，因为索引有助于从大型表中快速搜寻数据。任何列都可以作为键，也可以将多列组合成一个复合键。无需预先定义所有键。即使某列最初并非为此目的而指定，也可以将其用作键。具有外部实际含义的键（例如某人的姓名、书籍的 ISBN 或汽车的序列号）有时称为“自然键”。如果没有合适的自然键（想想许多名叫伊万的人），可以指定一个任意键或代理键（例如，使用员工识别号码）。在实践中，大多数数据库同时具有生成的键和自然键，因为生成的键可以在内部使用，以建立

不会断裂的行间联系，而自然键则可以较不可靠地用于搜寻以及与其他数据库集成（例如，可以通过社会保险号码匹配两个独立开发的数据库中的记录，但社会保险号码错误、缺失或已更改的情况除外）。

概念设计是创建数据库概念模式的起点，其基础是数据概念模型。概念模型展现了对数据的总体视角。概念设计中的数据建模主要有两种方法：语义模型；对象模型。

语义模型主要关注数据结构。最常见的语义模型是“实体—联系”模型（实体—联系模型，ER模型）。ER模型由实体、关系、属性、属性域和键组成。数据建模呈现数据的逻辑结构，正如算法流程图呈现程序的逻辑结构一样。

对象模型主要关注数据对象的行为以及数据操作手段。这类模型的核心概念是对象，即具有状态和行为的实体。对象的状态由其属性集合决定，而对象的行为则由为其规定的操作集合决定。

这些模型的融合体现在扩展 ER 建模（扩展实体—联系模型，EER模型）中。

ER建模是一种自顶向下的数据库设计方法，始于确定最重要的数据，这些数据称为实体（entities），以及数据之间需要在模型中表示的关系（relationships）。随后，将实体和关系的属性信息（attributes）以及适用于实体、关系和属性的所有约束录入模型。ER模型以图形方式表示数据库结构中的逻辑对象及其关系。实体用于对一类同类型对象进行建模。实体在所建模系统的范围内具有唯一名称。由于实体对应于某一类同类型对象，因此假定系统中存在该实体的多个实例。实体所对应的对象具有一组描述其属性的属性。这组属性必须能够区分各个具体的实体实例。

对于教师继续教育管理自动化信息系统，根据领域确定了以下实体：“教师”、“专业进修”、“考核”、“进修方向”、“专业进修基地”、“进修结果”。

“教师”实体（属性：工号、照片、姓名、循环委员会/教研室、电话号码、电子邮件、资格类别、教师职称、学位/学术职称、文凭所列专业）。

“考核”实体（属性：序号、姓名、资格类别、上次考核年份、计划考核、类别、类别状态、教师职称、教师职称状态）。

“计划中的进修”实体（属性：进修编号、工号、姓名、课程代码、进修地点、进修形式、进修类型、最近一次进修日期、开始日期、结束日期、完成标记）。

实体“专业进修信息库”（属性：航向代码、徽标、名称、地址、电话、电子邮件、网站）。

实体“专业进修方向与形式”（属性：方向代码、专业进修方向名称）。

实体“进修结果”（属性：文件代码、文件类型、受颁发者、颁发者、方向、进修主题、颁发日期、小时数、学分数、其他（未计划）。

所设计的概念设计经过了冗余性和用户事务符合性检查。

冗余性检查包括检查 ER模型，以发现冗余数据并将其删除（如果发现冗余数据）。冗余关系表现为两个实体之间存在多条路径，且这些路径彼此重复（代表不同关联的关系不在此列）。

根据以下方法审核模型是否符合用户事务：

– 检查模型是否包含每项事务所需的全部信息（实体、属性、联系）；

– 根据 ER 图检查每项事务的路径。

通过审核模型的冗余情况及其是否符合用户事务，可以得出结论：概念设计满足所有必要需求。

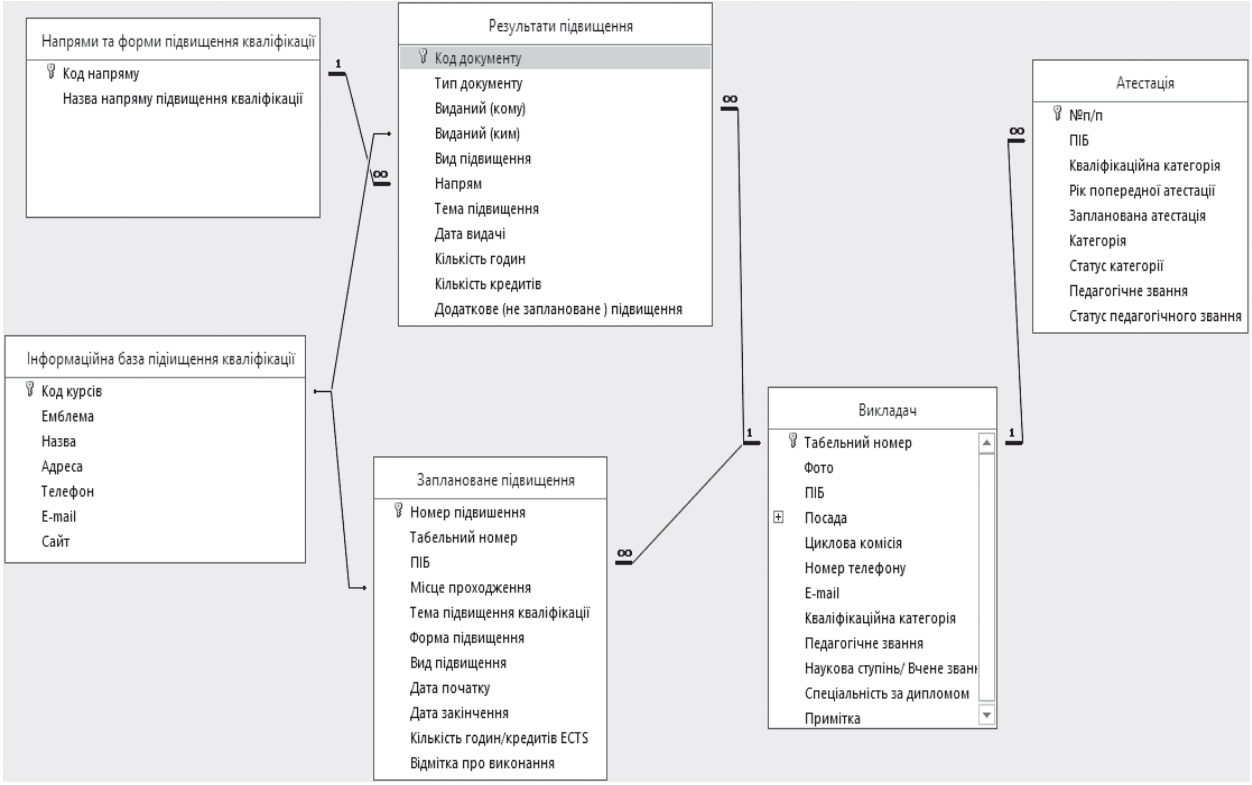


Рис. 17. Концептуальна модель (ER-модель)

需要注意的是，所开发的概念项目并不是唯一符合既定任务的项目。还可以采用实体之间的其他联系，或采用扩展的ER模型来开发系统。

应用程序ER示意图能够简单、直观地展示数据库的主要逻辑对象，以及这些对象之间存在的联系。ER示意图的优点还在于，它们与关系模型具有良好的集成性。

实体之间建立联系，用于说明实体之间以何种方式相互关联或相互作用。联系可分为以下几种:

– 两个实体之间（二元联系）；– 三个实体之间（三元联系）；– N 个实体之间（N元联系）；– 单个实体之间（递归联系）。

最常见的是二元联系。关系用于说明实体实例之间以何种方式相互关联。二元联系分为:

– 1:1（一对一）；– 1:M（一对多）；– N:M（多对多）。

“专业进修信息库”与“已计划的进修”两个实体通过“课程代码”字段的外键，以“一对多”关系相连，因为一个专业进修数据库可以由不同教师多次计划。

“教师”和“计划中的进修”实体通过“工号”和“姓名”字段的外键建立“一对多”关系（即“教师”表为主表，“计划中的进修”表为从表），因为一位教师可以安排多项进修。“计划中的进修”表中设有人工键“资格提升编号”。

“教师”和“进修结果”实体通过“工号”和“颁发对象”字段的外键建立“一对多”关系（即“教师”表为主表，“进修结果”表为从表），因为一位教师可以拥有多份进修文件（结果）。“进修结果”表中设有人工键“文件代码”。

“进修方向与形式”和“进修结果”这两个实体通过“方向代码”和“方向”字段以

外键关联，形成“一对多”关系（“进修方向与形式”表为主表，“进修结果”表为从表），因为教师会多次选择同一个方向。

实体“进修方向与形式”和“进修结果”通过“方向代码”和“方向”字段的外键关联（表“进修方向与形式”为主表，表“进修结果”为从表），形成“一对多”关系，因为教师会多次选择同一个方向。

实体“教师”和“评估”通过“工号”和“姓名”字段的外键关联（表“教师”为主表，表“评估”为从表），形成“一对多”关系，因为同一位教师会多次接受评估（每 5 年一次）。建议在“评估”表中添加一个名为“序号”的计数器字段，作为人工键。

逻辑设计。逻辑设计针对特定的数据模型进行。对于关系数据模型，逻辑设计包括创建关系模式、确定表的数量和结构（表 1–6）、构建数据库请求（图 17）、确定报告文件的类型（图 18）、开发信息处理算法（图 20）、创建用于在数据库中输入和编辑数据的表单（图 19），以及解决其他一系列任务。概念模型按照一定规则转换为逻辑数据模型。逻辑模型的正确性通过规范化规则进行检查，以确保所采用的数据模型在结构上协调一致、逻辑上完整且冗余最少。还要对模型进行检查，以确定其是否能够执行用户将要指定的事务。

在前面各设计阶段创建的数据库逻辑模型关系集合，必须检查每个关系中属性组合的正确性。检查通过对每个关系应用逐步规范化程序来完成。规范化可确保所得模型不会产生矛盾，并具有最小的冗余。规范化后，属性将按照它们之间现有的逻辑联系进行分组。为确保逻辑模型的正确性，如果发现存在不符合规范化需求的关系，就必须返回前面的设计阶段，重建错误创建的模型元素。

Таблиця 1

Таблиця містить особисту інформацію про викладача і має наступні поля

Назва поля бази даних	*Тип даних*	*Розмірність*	*Призначення*
Табельний номер	Числовий	Довге ціле	Ключове поле таблиці
Фото	Поле об'єкта OLE	–	Фото викладача
ПІБ	Короткий текст	60	Призвіще, ім'я, по баткові викладача
Посада	Короткий текст	20	Для відображення посади викладача
Циклова комісія	Короткий текст	255	Циклова комісія, на якій працює викладач
Номер телефону	Короткий текст	20	Номер телефону
E-mail	Короткий текст	60	Електронна адреса викладача
Кваліфікаційна категорія	Короткий текст	20	Кваліфікаційна категорія, яку має викладач
Педагогічне звання	Короткий текст	20	Педагогічне звання викладача
Науковий ступінь / вчене звання	Короткий текст	20	Науковий ступінь / вчене звання викладача
Спеціальність за дипломом	Короткий текст	255	Спеціальність викладача за дипломом
Примітка	Короткий текст	255	Для додаткові інформації

Таблиця 2

Атестація містить дані про атестацію викладача і має наступні поля

Назва поля бази даних	*Тип даних*	*Розмірність*	*Призначення*
№ п/п	Лічильник	Довге ціле	Ключове поле таблиці
ПІБ	Текст (числовий)	60	ПІБ викладача (дані беруться з таблиці «Викладач»)
Кваліфікаційна категорія	Короткий текст	30	Дані про кваліфікаційну категорію, яку на даний момент має викладач
Рік попередньої атестації	Дата та час	Короткий формат дати	Дата проходження попередньої атестації
Запланована атестація	Дата та час	Короткий формат дати	Дата проходження запланованої атестації
Категорія	Короткий текст	60	Обрана категорія
Статус категорії	Короткий текст	60	Отримання, підтвердження або підвищення категорії
Педагогічне звання	Короткий текст	60	Обране педагогічне звання
Статус педагогічного звання	Короткий текст	60	Отримання або підтвердження

Таблиця 3

Заплановане підвищення містить інформацію про плани підвищення кваліфікації викладачів і має наступні поля

Назва поля бази даних	*Тип даних*	*Розмірність*	*Призначення*
Номер підвищення	Лічильник	Довге ціле	Ключове поле таблиці
Табельний номер	Числовий (дані беруться з другої таблиці)	Довге ціле	Id викладача, з яким пов'заний запис
ПІБ	Числовий (дані беруться з другої таблиці)	Довге ціле	ПІБ викладача
Місце проходження	Числовий (дані беруться з другої таблиці)	Довге ціле	Інформація про місце проходження
Форма підвищення	Короткий текст	20	Форми підвищення
Вид підвищення	Короткий текст	255	Види підвищення
Дата початку	Дата та час	Короткий формат дати	Запланована дата початку підвищення
Дата закінчення	Дата та час	Короткий формат дати	Запланована дата закінчення підвищення
Кількість годин/кредитів ЄКТС	Короткий текст	15	Запланованя кількість годин
Відмітка про виконання	Логічний	Так / ні	Пройдене підвищення чи ні

表4

专业进修信息库包含有关专业进修数据库的信息，并具有以下字段

字段名称 数据库	数据类型	维度	用途
课程代码	数值型	长整型	表的关键字段
徽标	OLE 对象字段	-	基地徽标
名称	短文本	255	进修基地名称
地址	短文本	80	基地位置
电话	短文本	50	电话信息
电子邮件	短文本	150	电子邮箱地址
Сайт	超链接	-	网站链接

表5

提升方向和形式包含以下字段

数据库字段名称	数据类型	维度	用途
方向代码	数值型	长整型	表的关键字段
方向名称提升 提升资质	短 文本	长整型	方向名称

完整性约束可防止数据库中出现相互矛盾的数据。在设计阶段解决这一问题的方法如下:

– 为属性设置必填和非必填数据值（NULL、NOT NULL）；

– 对属性域设置约束（定义值域或取值范围）；

– 实体完整性（每个关系中都必须有主键）；

– 参照完整性（通过外键关联表）；

– 域约束（业务规则），既可通过数据库实现，也可在应用层实现。

创建逻辑数据模型后，需要分析关系模式中属性合并的正确性。通过对每个关系依次进行规范化来检验其正确性。检验的目的是确保数据库架构至少符合第三范式或博伊斯-科德范式。如果不满足这一条件，则需要返回前几个阶段

Таблиця 6

Результати підвищення мають наступні поля

Назва поля бази даних	*Тип даних*	*Розмірність*	*Призначення*
Код документу	Короткий текст	Довге ціле	Ключове поле таблиці
Тип документу	Короткий текст	Довге ціле	Назва типу документу
Виданий (кому)	Числовий	Довге ціле	Назва бази підвищення
Виданий (ким)	Числовий	Довге ціле	ПІБ викладача
Напрям	Числовий	Довге ціле	Назва напряму підвищення
Тема підвищення	Короткий текст	255	Тема підвищення
Дата видачі	Дата та час	Короткий формат дати	Дата видачі документу
Кількість годин	Числовий	10	Отримана кількість годин за підвищення
Кількість кредитів	Числовий	10	Отримана кількість кредитів за підвищення
Додаткове (не заплановане)	Короткий текст	255	Інформація про додаткове підвищення

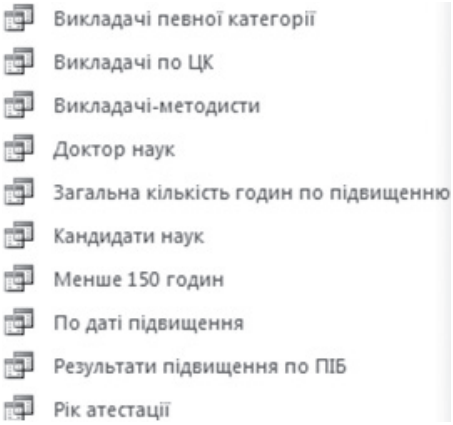


图18。数据库查询

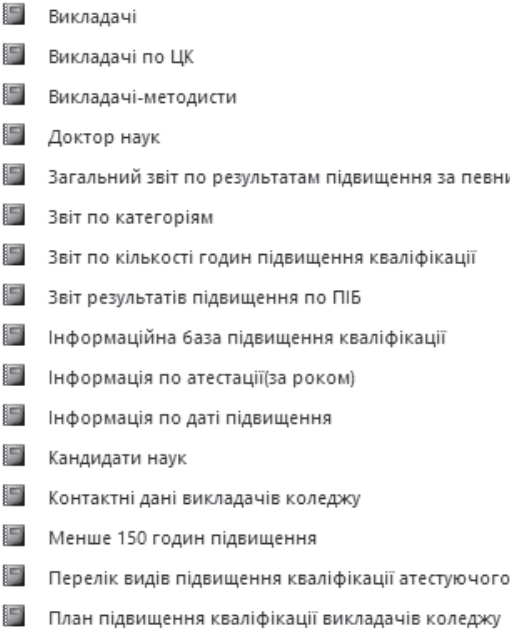


图19。报告文档

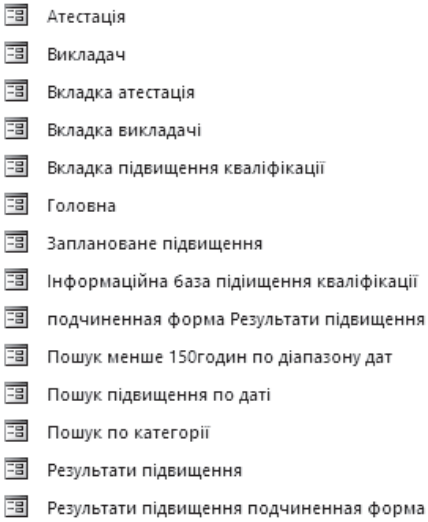


图 20. 用于输入和编辑数据的表单

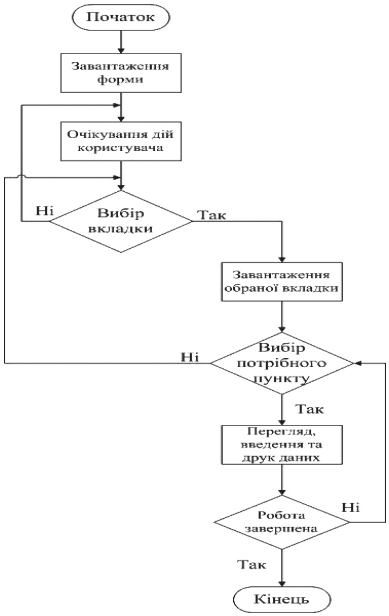


图 21. 信息系统运行算法

设计并重建错误创建的模型片段。对数据库逻辑模型的检查表明，关系模式处于第四范式，无需调整模型。

使用规范化规则检查逻辑模型后，将分析系统是否能够执行用户事务，这些事务在设计初期阶段确定。如果无法执行某些事务，则需要调整数据库模型。

应用程序开发。应用程序是为解决特定领域中的一组任务而设计的程序或软件系统，也可以是适用于不同领域的通用工具集。

在此阶段要解决以下任务：
– 事务设计；
– 用户界面设计。

事务可以由多个数据库操作组成，这些操作将数据库从一种完整状态转换为另一种状态。事务分为从数据库获取特定信息的事务，以及更改数据库中数据的事务（更新、删除、添加）。事务也可以是混合型的。

用户界面是由一组功能组件构成的，用于实现用户与系统之间的交互。

为了方便使用教育机构教师专业进修管理自动化信息系统，开发了尽可能方便且直观易懂的界面。

在“教师”选项卡中，用户可以查看、添加或修改教师信息卡，也可以查看、打印并保存有关教师学位/学术职称及各类报告信息的报告。

此选项卡包含三个部分：
– 主要信息；– 有关教师学位和学术职称的信息；– 报告信息。

“主要信息”部分包含教师信息卡和教师的联系信息。教师信息卡用于创建、编辑、存储和搜寻教师的主要信息。

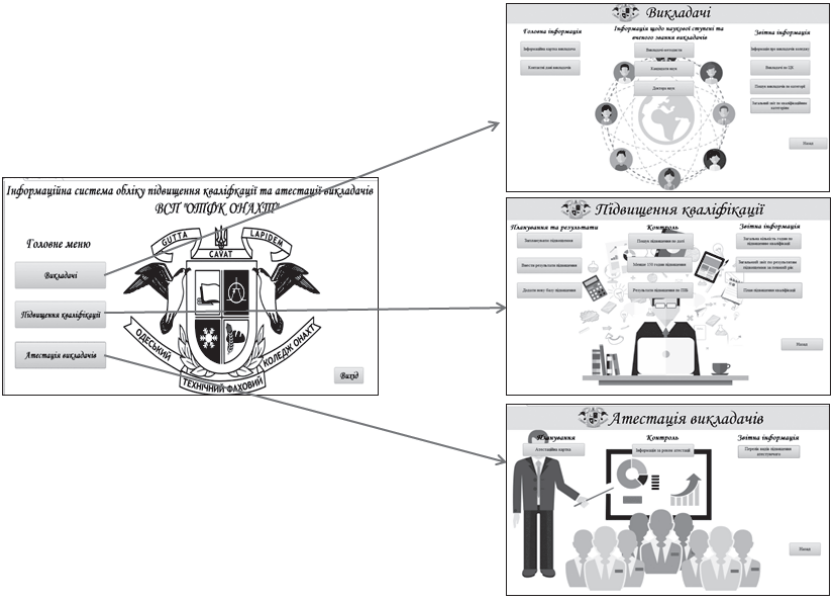


图 22. 信息系统选项卡



图 23. “教师”选项卡

在“教师学位及学术职称信息”部分中有三个按钮：“教师-方法学家”“科学副博士”和“博士”，用于选择特定信息。

在“报告信息”部分中，有关于学院教师的报告：“按教研室分类的教师”“按类别搜索教师”“学院教师信息”或“按资格类别汇总的报告”。

在“专业进修”选项卡中，用户可以制定进修计划、录入进修结果、监测特定教师的进修情况，还可以查看、打印和保存各类有关专业进修的报告信息。

此选项卡包含以下部分：
– 计划与结果；– 控制；– 报
告信息。

“计划与结果”部分包含三个用于录入信息的表单。

第一个按钮打开“安排进修”表单，用于规划教师专业进修。

第二个按钮打开“录入进修结果”表单，用于录入和存储教师专业进修结果的数据。

第三个按钮打开“添加新的进修基地”表单，用于创建可能的专业进修基地记录，并存储其联系信息。

“控制”部分包含三个用于搜索信息的请求 ï.
点击“按日期搜索计划进修”按钮后，将打开一个新表单，用于输入日期范围，之后系统会生成报告。

第二个按钮会打开“进修少于150小时”表单——该表单用于筛选最近5年内专业进修学时少于150小时的教师信息。

点击第三个按钮“按姓名查询晋升结果”后，将打开请求窗口，需要在其中输入我们感兴趣的教师姓名，然后点击“确定”按钮以获取结果。

“专业进修”部分即为“报告信息”。该部分包含三份报告。

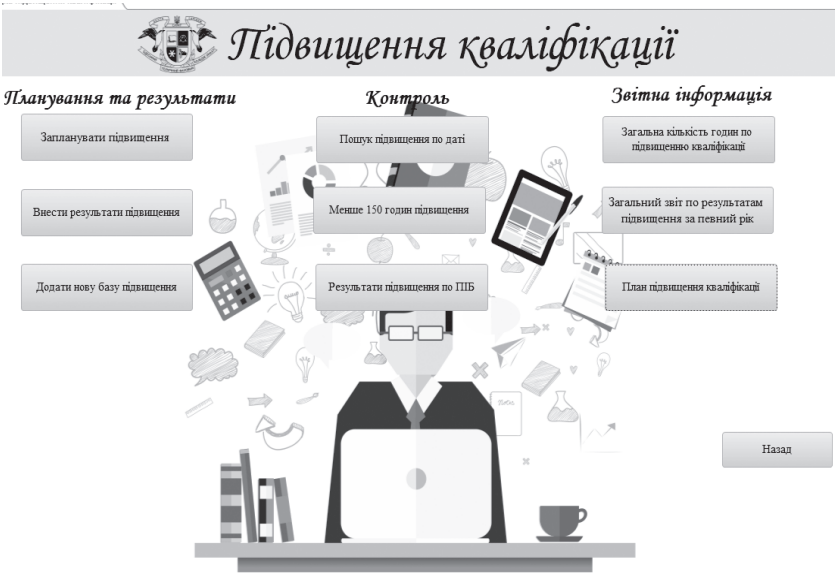


图24。“提升资质”选项卡



图25。“教师考核”选项卡

在第一份报告《专业进修总小时数》中，我们可以看到教师姓名、进修日期、获得的小时数、学分及其总和。

第二份报告《某年度进修结果总报告》通过选择查询生成。

第三个按钮“职业进修计划”会打开已生成的职业进修计划，其数据取自“计划中的进修”表单，并按指定年份筛选——通过选择查询实现。

在“教师考核”选项卡中，用户可以创建或修改教师考核卡片，按年份监测考核信息，并查看、打印和保存有关专业进修的各类报告信息。

此选项卡包含三个部分：
– 规划；– 控制；–
报告信息。

“规划”部分有一个“考核卡”按钮，用于规划教师资格认证。

“控制”部分有一个“按考核年份查询的信息”按钮。点击该按钮后，会看到一个用于输入考核年份的请求窗口。

“报告信息”部分有一个“受考核人员进修类型清单”按钮，可打开已生成的有关各类进修项目清单的文档。

关于在教育机构中实施教师专业进修管理自动化信息系统的结论与展望。

目前，教师继续教育管理自动化信息系统已在OHAXT奥德萨技术与金融专业学院的教学方法办公室完成测试和试用，以检验系统已实现的函数是否符合既定任务，具体包括：借助信息支持，为预测和计划该过程的组织工作提供支持，从而提高教育机构教学及科研教学人员专业进修和资格认证过程的效率；便于自动监测教育机构教学及科研教学人员的专业进修过程；监测教育机构教学人员专业进修学时数规范的执行情况

以及教育机构科研教学人员在统计期间的专业进修学时数规范执行情况；呈现统计指标（每位教师的进修学时数、进修学时不足150小时等）；编制教育机构教学及科研教学人员专业进修和资格认证结果报告；分析教育机构教学及科研教学人员专业进修和资格认证各方向的结果。教育机构教师继续教育管理自动化信息系统界面便于快速搜寻所需信息，可立即着手准备专业文件，提高效率和运行质量，并缩短执行时间。

基于所提出的教师继续教育管理自动化信息系统模型，可通过实现以下请求和报告，对专业进修过程进行监测：

– 统计在该机构及某一指定学年内参加专业进修的学员总人数；

– 按专业进修教育服务的支付来源对学员进行分类；

– 统计参加专业进修的劳动者所属教育机构的数量和类型；

– 按专业方向、教育程度、工作年限和资格类别对学员进行分类，并统计总体情况及某一指定学年的情况；

– 确定某位学员在相应时间段内（如一个学年、数年、五年期限等）的专业进修学时数；

– 按资格类别比较学员的学习活动成果：专业人员、二级、一级、高级类别；

– 根据学习形式比较学习活动成果：全日制、非全日制、全日制远程学习；

– 按专业进修课程比较学习活动成果；

– 确定不同学习项目可能的组合方式，以确保教师有效开展资格提升，促进其专业能力的协调发展，并遵守乌克兰内阁第800号决议的要求 [17]；

– 根据对数年来学员按所列准则进行分配情况的分析，确定当前的学习形式（面授、面授与远程相结合、函授）及日历周期；

– 跟踪机构教师队伍的专业方向、学位和学术职称类别及职位，这将间接决定专业进修的成果质量；

– 监控教师专业进修计划的制定及其计划执行情况；

– 跟踪某位教师在所需时间段内专业进修主题及方向的变化；

– 禁止教师在同一考核期内登记参加同一专业进修方向；

– 有效规划未来教师的专业进修过程。

总体而言，所述教师专业进修管理自动化信息系统模型应确保：

– 通过根据现有需求规划教师继续教育课程，并分析学员的学习活动成果，实现这一过程质量的提升；

– 通过一次性录入相应数据并反复使用，减少教育机构员工编制内部报告文件（教学程序、专业进修课程记录日志、日历图表等）所花费的时间；

– 减少机构管理部门监控内部报告文档所花费的时间；

– 通过运用数理统计方法等，对科研教学人员和教学人员的学习活动成果开展多方面分析，提升机构与 ППО、区级教研室以及地区联合领土社区相关代表共同规划活动的质量，以促进教育工作者的专业发展。

未来，信息系统将存储在远程服务器上，以提高数据库的安全性并支持远程办公。自动化教师资格提升记录信息系统可推荐给高等教育及专业预科教育机构中负责教学方法工作的结构部门使用

，用于监测和记录教学及科研教学人员的资格提升及资格认证。

参考文献

1. 教育管理信息系统的发展：实现国家教育政策的工具：专著 / С. Л. Лондар 主编；国立大学“教育分析研究所”。— 基辅，2020年。— 258页。 2. Гуменюк В. В. 普通教育机构管理的信息保障：教育学副博士学位论文：13.00.01 / 乌克兰教育科学院中央研究生师范教育学院。— 基辅，2001年。— 220页。 3. 关于国家信息化计划构想：乌克兰法律，截至2006年2月9日 // 最高拉达公报。— 官方版。— 基辅，2006年。— 第22期。 4. Забродська Л. М. 普通教育机构教育过程管理的信息化：教育学副博士学位论文：13.00.01 / 乌克兰教育科学院教育学研究所。— 基辅，2002年。— 210页。 5. Хриков Є. М. 教育机构管理：教学参考书。— 基辅：Знання，2006年。— 365页。 6. Фіцула М. М. 高等学校педагогика：教学参考书。— 基辅：Академвидав，2006年。— 352页。 7. 应用信息技术研究所“高校”自动化控制系统 [电子资源]。— 访问方式：http://ndipit.com.ua/ ua/#tab2。— 屏幕显示名称。 8. 乌克兰国家教育发展战略（2012—2021年）[电子资源]。— 访问方式：http://www.kmu.gov.ua。— 屏幕显示名称。 9. “电子大学”信息系统 [电子资源]。— 访问方式：http://isu1.tup.km.ua/。— 屏幕显示名称。 10. “苏格拉底”教育机构电子管理系统 // 文尼察国立农艺大学科学著作集。经济科学系列。— 2013年。— 第4期（81）[电子资源]。— 访问方式：http://www.vsau.vin.ua。— 屏幕显示名称。 11. 乌克兰高等教育机构软件“ПолітекСОФТ” [电子资源]。— 访问方式：http://www.politek-soft.kiev.ua。— 屏幕显示名称。 12. 为公众提供教育相关数据的信息生产系统 IBC «OCBITA» [电子资源]。— 访问方式：https://osvita.net/ua/。— 屏幕显示名称。 13. Вступ.OCBITA.UA [电子资源]。— 访问方式：https://vstup. osvita.ua/。— 屏幕显示名称。

14. 教育管理自动化信息综合系统 [电子资源]。— 访问方式：https://aikom.iea.gov.ua/。— 屏幕显示名称。 15. “КУРС：教育”项目 [电子资源]。— 访问方式：http:// ekyrs.org/ua/project/。— 屏幕显示名称。 16. 普通中等教育机构教学人员职业资格提升自动化系统 [电子资源]。— 访问方式：
h
t
t
p://
a
c
t
i
v
e
m
e
d
i
a.
u
a/
n
e
ws/pochala-pratsiuvaty-avtomatyzovana-systema-pidvyshchennia-kvalifikatsii-pedahohichnykh-pratsivnykiv-zakladiv-zahalnoi-serednoi-osvity/。— 屏幕显示名称。 17. 关于教学及科研教学人员专业进修的若干问题：乌克兰内阁 2019 年 8 月 21 日第 800 [号决议] 电子资源]。— 访问方式：https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/800–2019- %D0 %BF#Text 18. 教师资格认证示范条例：乌克兰教育和科学部2010年10月6日第 930 [号命令]电子资源]。— 访问方式：https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1255– 10#Text 19. Львов М. С. 、 О. В. Співаковський 、 Д. Є. Щедролосьєв. 高等教育机构管理信息系统：实现学术过程管理的平台 // 《学校与家庭中的计算机》。— 2007年。— 第2期。— 第3–6页。 20. П. П. Грабовський. 教师专业进修过程监测信息系统设计 //《信息技术与教学工具》。— 2019年。— 第73卷，第5期。— 第206–218页。 21. П. П. Грабовський. 教师专业进修过程监测信息系统的数据库信息逻辑模型 //《技术工程》。— 2020年。— 第1期（85）。— 第115–120页。 22. В. П. Страхарчук. 银行信息系统与技术：教学参考书。 [电子资源]。— 访问方式：https://pidruchniki. com/1584072022211/bankivska_sprava/informatsiyni_sistemi_i_tehnologiyi_v_bankah。 23. 乌克兰教育现状与发展前景国家报告 / 乌克兰国家教育科学院。— 基辅：Педагогічна думка，2016年。— 448页。 24. В. Ю. Биков. 教育信息化的当代任务 [电子资源] // 《信息技术与教学工具》。— 2010年。— 第1期（15）。— 访问方式：http://journal.iitta.gov.ua/index.php/itlt。 25. С. П. Кулицький. 管理领域信息活动组织基础：教学参考书。— 基辅：МАУП，2002年。— 224页。 26. В. С. Пономаренко、І. В. Журавльова、І. Л. Латишева. 人员管理中的信息系统 / В. С. Пономаренко。— 哈尔科夫：ХНЕУ，2008年

27. 奥利伊尼克·V. V. 社会转型条件下研究生教育发展的趋势 //《社会系统管理理论与实践》。— 2013年。— 第1期。— 第56–66页。28. 阿夫拉缅科·V. S.、阿夫拉缅科·A. S.《信息系统设计：教学用书》。— 切尔卡瑟：博赫丹·赫梅利尼茨基切尔卡瑟国立大学，2017年。— 434页。29. 用于创建、实施和维护自动化系统及信息系统的乌克兰国家标准目录 [电子资源] /乌克兰伊·V. 韦尔纳茨基国家图书馆。— 访问地址：http://nbuv.gov.ua/node/1469。

应用新信息技术组织高等教育机构教学过程的系统方法

Воінова С. О.

探讨了乌克兰高等教育面临的时代挑战，以及解决由此产生的任务的可能途径。指出了采用基于现代信息技术的教学新方法的现实意义。探讨了在教育过程中使用信息技术的哲学与方法论方面。

阐述了在高等教育机构中应用现代信息技术开展教学过程的系统方法的本质。探讨了信息技术的发展阶段。分析了高等教育系统当前发展阶段的特点。指出了在教育系统中使用远程教育的外部和内部因素。

探讨了远程教育技术和电子学习，将其作为远程教育的基础。阐述了远程学习课程的概念和结构，将其视为远程学习系统的重要元素。指出了远程面授学习和函授学习相较于传统学习的优点与缺点。特别关注模块化教学技术。探讨了高等教育信息化的目标、方向和原则，将其作为高等学校改革的优先方向。

阐述了系统方法在组织教学过程中的作用，以及在高等教育机构中综合应用新信息技术的价值。这有助于认识教育系统各组成部分之间的关系，并有效实现其主要功能。

探讨了乌克兰高等教育面临的时代挑战，以及解决这些挑战所提出任务的可能途径。指出了采用基于现代信息技术的新教学方法的现实意义，并探讨了在教育过程中运用信息技术的哲学和方法论层面。

阐述了在高等教育机构中运用现代信息技术开展教育过程的系统方法的本质。探讨了信息技术的发展阶段，分析了教育体系当前发展阶段的特点，并指出了在教育体系中运用远程学习的外部和内部因素。

介绍了远程学习教育技术以及作为远程学习基础的电子学习，阐述了远程课程这一远程学习体系重要组成部分的概念与结构。指出了远程面授教学和非全日制教育相较于传统学习的优缺点，并特别关注模块化学习技术。探讨了高等教育信息化的目标、方向和原则；高等教育信息化是高等教育改革的优先方向。

阐述了通过运用新信息技术整合高等教育机构教育过程组织工作的系统方法所具备的资源。正如文中强调的，这种资源有助于理解教育体系各分量之间的关系，并有效发挥其主要函数。

乌克兰的高等教育具有大众化特征。根据乌克兰教育与科学部的分析资料，处于传统官方学习年龄的人口接受高等教育的比例较高，达到82.7%。在这一指标上，乌克兰在《2020年全球创新指数》中位列131 个国家中的第 14 位。德国（70.2%，第 28 位）、波兰（67.8%，第 34 位）和英国（60%，第 46 位）的覆盖率较低 [1]。

乌克兰高等教育机构教师的学历构成质量较高。2019/1920 学年初，大学、研究所和学院教师总数中，47.3% 为哲学博士／科学副博士，11.7% 为科学博士，31.1% 为副教授，9.3% 为教授。

乌克兰的大学网络密度位居前列：每百万人口拥有 6.7 所大学。过去五年，大学、研究所和学院的数量增长了 1.4%。

乌克兰高等教育基础设施发展呈现出一个关键趋势：大学、学院和

研究所数量不断增加，其学习内容旨在提供更扎实的培训。这一趋势首先是国家经济结构变化以及向大众化高等教育转型的结果。乌克兰高等教育机构网络的发达程度和区域分布广泛，使该国相当一部分人口能够接受高等教育，并进一步推动终身教育和再培训。

教育目前在一定程度上落后于整体数字化进程，因此需要投入更多努力，利用新信息技术的工具和优势，同时解决潜在滥用问题，例如网络入侵和保密性问题。

教育领域立法发展的任务由《国家教育发展纲要》勾勒，该纲要确定了概念性思想体系，以及对截至2025年教育发展战略和主要方向的看法。[2；3]。

在编制《地平线2020》报告期间，EDUCAUSE协会邀请了来自世界各地的专家，他们勾勒出整体格局，并确定了影响高等教育、教学与学习的最重要趋势 [4]。关键趋势归纳为五个类别：社会、技术、经济、高等教育和政治。具体而言，“技术”类别包括人工智能的发展、下一代数字学习环境的构建、数据分析问题以及保密性问题。“高等教育”类别包括通往教育的备选途径和在线教育。

根据《乌克兰高等教育发展战略（2021—2031年）》，乌克兰高等教育概念模型的基础应当是必要多样性控制论原则 [1]。

高等教育机构应创建自己的在线平台，或使用现有在线平台，在专业社群中传播知识、开展职业指导等。

如今，推行虚拟大学是一个重要议题。这类大学可以开设多种或某些专业的培训，也可以作为独立的在线平台存在，或成为传统高等教育机构的虚拟对应体。虚拟大学旨在扩大不同人群接受高等教育的机会，让非传统群体（成年高等教育学习者、.....）参与教育过程，包括

终身学习者），提供专业进修，帮助掌握额外技能、更新知识与技能，并推广优质教学实践。教育项目应具备最大程度的灵活性，并涵盖微证书和纳米证书课程。虚拟大学将成为校外教育、非正规教育和非正式教育的主要提供者。此处采用远程学习形式 [5]。

建议将引入创新信息技术和远程教育作为最重要的运营目标。为实现这一目标，提出了以下具体任务：创建符合世界科技水平的创新信息技术及学习手段产业；推动高等教育体系中所有进程的数字化；将远程教育规范为获得高等教育的一种形式[1]。

教育领域改革是对社会需求的回应，因为教育正是保障人力资本质量的关键，而人力资本是国家经济发展的基础。2020/2021学年，乌克兰教育与科学部继续推进改革教育各领域的战略方向。同时，鉴于新冠疫情（COVID-19）以及出台的隔离限制，2019/2020学年教育体系面临新的挑战，包括确保教育过程连续开展，使各层级教育机构能够在隔离限制下保障教育质量和稳定性，以及发展远程教育形式的必要性。

这一切促使人们加强教育领域改革中与教育环境数字化相关的组成部分，尤其是确保高等教育机构能够高速访问互联网，并为高等教育学习者和教育工作者配备数字设备和电子教育资源 [6]。

疫情促使全球学术界转向新的教学方法，包括远程教学和在线教学。对高校实践的分析表明，在远程工作期间，形成了几种教育活动组织模式：异步或函授模式（高等教育学生按照授课教师规定的期限，在方便自己的时间学习学习材料）；同步模式（同时参与课堂，例如，

以网络研讨会的形式）；混合模式（根据教学任务的性质，结合同步与异步交互）。

过去两年的经验表明，远程工作形式和技术在解决大学的传统任务与新任务方面具有广泛的应用能力。

除此之外，近几十年来，教育体系的发展出现了一个新问题。知识每3–5年就会过时，而技术知识每2–3年就会过时。再过一段时间，这一周期将缩短至1.5–2年；教育机构毕业生所需的知识篇幅每3–4年就会翻一番。如果不改变教育技术，专业人才的培养质量客观上将落后于劳动力市场的需求。根据最低估算，高等教育学习者借助信息与通信技术掌握知识的速度或单位时间内获取的知识量，比采用常规技术快40–60%（在相同时间内可以传授更多知识）。

在高等职业教育组织中，推行远程教育是创新方式之一。

如今，高等教育机构中就读的是迄今为止唯一的一代新人，他们从出生之日起便接触信息技术和微处理器设备，尤其是计算机。对他们而言，数字设备就像电视机或冰箱之于老一辈一样寻常。对于高等教育机构的团队来说，没有比了解这一代新人所期待的文化、心理、价值观及其变化更为迫切的任务了。网络一代必将改变生产方式本身，并创造新的劳动文化。新一代的成员希望在学习中积极使用移动设备（智能手机、平板电脑、笔记本电脑）和互联网服务，因此，高等教育机构必须做好技术准备，为新一代高等教育学习者提供这些能力[7]。

在高等教育机构中使用信息技术既有可能，也有必要，这一点毋庸置疑。应用多媒体程序以及将所进行的计算可视化，能够使学习更加直观，在很大程度上有助于克服许多大学课程教学中一贯过于形式化和抽象的问题。与此同时，对于许多学科而言，使用计算机工具必须与计算机建模相结合。

互联网上积累了大量关于基础科学许多分支的有用信息，需要借助搜索引擎进行搜寻和系统整理，并在教学过程中加以利用。

有效使用这些技术，需要教师、管理人员和高等教育学习者具备特殊能力，也需要高效便捷的技术解决方案以及特殊的教学过程组织方式。缺少这些条件，就无法谈论远程形式下的完整教育。高等教育机构肩负着使命，并应在不久的将来成为培养年轻人新型互联网导向意识的摇篮。高等教育机构还必须为这一过程提供物质保障。教师在活动中既要以传统教学方法为基础，也要采用非传统方法。关键在于培养高等教育学习者的互联网导向思维方式，教会他们使用信息进行自我教育、提高资格水平，并解决可能遇到的生产问题和任务。

高等学校教育过程中使用信息技术的实践表明，存在以下矛盾：

– 传统的教学方法保障形式与实践中采用创新形式应用信息技术的需求之间的矛盾，尤其是在高等教育机构的教学过程中；

– 教育信息化进程与现代教育机构中缺乏统一方法、无法在高等教育学习者教学中使用信息技术之间的矛盾；

– 教学过程组织所需信息的搜寻与发现，与数字化信息之间的矛盾；数字化信息能够支持采用更主动、现代的搜索、感知、处理、使用和存储信息的方式；

– 过分强调面向高等教育学习者的教学方法学习材料的结构及其构建形式，与实践对具有扩展功能和信息能力的创新结构的需求之间存在矛盾。

上述矛盾促使人们基于系统方法，寻求在高等教育学习者教学中应用信息技术的途径。

在教育领域，信息技术负责收集、处理、提供和发布与学习相关的数据，并

帮助教师更好地为教学过程提供必要的材料，发现知识漏洞，并针对具体小组调整内容和教学方法。

信息技术对于高等教育机构学习活动发展的价值在于：

– 通过更充分地利用可获得的信息、提高高等教育学习者的学习动机以及教师的创造性活动，提升教学质量；

– 引入新的教育技术——发展性学习与项目式学习、商业游戏、可视化、模拟建模、远程学习；

– 集成不同类型的活动（学习活动、学习与研究活动、科研活动）；

– 降低高等教育学习者对教师的依赖；
– 基于计算机测试，改进学习成果评估。

信息技术改变了教师的角色：教师从唯一的知识传授者转变为教学管理者和导师，引导并监测高等教育学习者掌握特定程序的努力——通过个性化任务、确定相应的学习资源、创造共同学习的机会，以及在面对面教学过程中和学习环境及虚拟互动中，分享自己对学习材料的理解并提供咨询支持。教师无疑仍是关键人物，但终究只是教育过程的参与者之一，可能手持投影仪遥控器，也可能坐在信息环境中的计算机前。新方法的成功取决于人为因素，也取决于教师是否愿意进入虚拟课堂和环境。教师将更多地承担导师的角色，引导学习者学习和思考、开展研究、解决问题；而高等教育机构则负责培养高等教育学习者，使其为真正的职业生涯做好准备。

为妥善应对出现的问题，高等教育机构应关注质量、相关性和及时性。

教育活动和高等教育学习者的培养是一个复杂的概念，因此要有效实现，必须采用系统方法 [8]。

「教育质量」这一概念在职业培训系统中的内容，会随着培训内容的变化而改变。这些变化是由

以下原因引起的：第一，生产技术发生科学技术和信息方面的变化；第二，对非熟练劳动的需求下降；第三，生产过程管理自动化系统的普及，即职业内容发生变化，这要求相应调整职业培训内容，提高其质量，创建机制，使其能够持续调节以适应不断变化的劳动力市场需求，并在组织职业培训时使用系统方法。

在科学文献中，系统方法是一种方法论方向，其任务是制定研究系统对象的原则、方法和手段。

系统方法作为辩证方法整体的一个元素，不仅是对关于现象普遍联系的辩证唯物主义学习的具体化，也是关于发展的辩证唯物主义学习的一个方面。系统性原则要求从相互联系、相互交互的角度考察一切现象。因此，系统研究的基础是系统性原则与发展原则辩证统一的规章。

采用系统方法时，会识别并研究任何管理对象的元素（子系统）之间的联系和关系。将各子系统的局部任务置于总体最终目标之下，是一个重要环节。此时，必须明确表述统一的目标和任务，随后确定最有效的求解途径，既适用于整个系统，也适用于其各个元素。

系统是由若干组件构成的集合，这些组件处于一定的关系之中并彼此联系；它们的交互会产生一种各组件单独存在时所不具备的新质量。系统中存在元素（任何对象），以及作为复杂整体各元素之间相对稳定的联系形式的特定结构。

教育系统是指一系列相互关联的手段、方法和进程，这些要素对于形成具有特定品质的个体，进而产生有组织、有目的且专业化的教育影响而言不可或缺 [9]。

从系统方法的角度来看，在上述定义中可以区分出教育系统的以下内部方面：系统—组成部分、系统—结构、系统—功能以及系统—整合。

结构的存在是系统内部积累量变的条件，而量变是系统进一步发展和转变的必要前提。

任何社会秩序系统都是主动且能动的，这体现在它的函数中。反过来，系统的函数是构成该系统的各组成部分所采取的某些行动的综合结果。对于系统而言，这些行动具有目的性，否则组成部分就会脱离系统，成为系统的异物。组成部分的性质及其交互特征发生变化，会引起组成部分自身及整个系统函数的相应变化。因此，系统方法不仅是认知主体对系统对象的界定，也是对其进行系统性掌握的程序。实现这一目标最有效的途径，是根据高等教育的需求和目标构建教学结构。

所讨论方法在高等教育中的主要任务，是构建一种优化模型，将理论知识的掌握与运用这些知识解决实际问题结合起来，从而有助于培养未来专业人员的职业能力。

探讨高等教育学习者职业培训这一问题时，应将其视为一个系统，其中包含若干子系统，这些子系统遵循与系统相同的原则：整体性、结构化和多样性。职业培训的子系统之一是教学过程，它本身也是一个具备系统所有特性的系统。教学过程具有一定的整体性，因此可以同时将系统视为一个整体，以及更高层级的子系统。结构化使人们能够分析系统的元素及其在特定组织结构范围内的相互联系。多样性使人们能够运用多种形式、手段和方法来实现各个元素及整个系统。与此同时，教学过程具有协同效应（源自希腊语，意为“共同作用”），这说明所有系统组成元素运行所产生的总效果，大于各元素行动效果之和。

在教育实践中应用系统方法进行学习，意味着教学过程的各个组成部分之间存在关系；每个部分都可以依托该系统的内部联系，以最高效率运行。所学习的材料内容是教学过程的结构组件之一，其掌握与所选的方法、形式和教学手段有关。在此过程中，教师负责管理该系统，

教师本质上也是该系统的组成部分。该系统的运行效率取决于教师所采用的技术。

如今，信息技术得到广泛使用，并融入教学过程的所有组成部分；新的技术也在不断开发和应用。

系统方法要求考察在教育过程中使用信息技术的哲学与方法论方面。这种分析旨在为研究信息技术在教育领域的各种应用可能性，奠定一般性的世界观基础 [10]。

如今，融入计算机技术的信息技术已深入人类活动的各种结构，改变了劳动与学习的内容和性质，以新的方式提出了人类智力与个性发展的相关问题，深刻影响着人们的世界观和意识形态概念，并催生了科学研究组织方式的新方法与新形式。因此，作为信息技术发展的结果，计算机技术发展的社会哲学与哲学方法论方面值得密切关注 [11]。

这一需求适用于各个科学知识领域，包括教育科学，它反映了其研究领域——教育活动的本质特征。

教育学与其他社会科学、自然科学和技术科学的融合，是改进科学教育知识体系的主要趋势。这一趋势在研究教育领域人与计算机交互的问题时也有所体现。尽管这一问题本身具有独立性和重要性，但实质上只是更广泛的社会哲学问题“人机关系”的一部分，而后者是现代科学技术革命的核心问题。在此，“机器”这一类别具有集合性，泛指一切用作提高人类活动效率和合理性的技术设备。

在社会经济和科学技术进步加速、日益重视与阐释人为因素在社会生产集约化中的作用和地位相关的一系列问题的背景下，教育因素与纯技术因素之间直接而密切的关系问题日益凸显。这种关系体现在

人类与微处理器和计算机技术的交互过程中——这是社会有益的人类活动技术化的最高表现。社会科学、自然科学与技术科学之间交互的加强，凸显了哲学知识体系的重要性；这些知识构成了综合性、跨学科认知形式的核心，并对理解自然科学与社会科学的融合过程如何推动技术发展具有决定性意义。

人类科学与技术科学相互作用的直接方法论指引，是普遍联系与相互依存的哲学原理，即客观现实中事物与现象普遍联系、相互依存的原理，系统方法正是以此为基础。从辩证唯物主义的观点来看，事物、对象、现象和过程尽管性质往往迥异，却能够发生多种相互作用，这体现了世界物质统一原理；该原理确认，存在适用于性质各异对象的规律。同时，辩证逻辑要求，在指出人的劳动活动与各类机器运行之间存在根本差异的同时，也要揭示伴随人的劳动活动而产生的智力和物理过程，与机器中发生的过程之间客观存在的类比关系。不仅如此，现实生活还要求创建这样的理论，使人和机舱能够从统一的立场加以考察；这绝不意味着抹杀人与机器人之间的一切性质差异。“严格来说，没有任何机器——即便是最完善的机器——在工作，也不可能工作。它只是劳动工具，人借助它影响性质，并按照预先设定的目标改变性质。无论技术取得多么辉煌的成就，无论创造出多么奇妙的自动机，劳动始终是并将继续是人的有意识活动，而人则是劳动的主体。”[12]

信息技术可以概括为三种基本的信息转换方式：存储、处理和传输[13]。

信息技术的方法包括信息处理和传输方法。

信息技术工具包括技术、软件、信息及其他工具，借助这些工具可以实现信息技术。

信息技术旨在合理使用信息资源，并为组织结构的所有元素提供这些资源。

在描述信息技术时落实系统方法，意味着运用整体性原则；根据这一原则，采用系统方法时会区分以下方面或方法。

本质方法在于揭示系统的本质、质的特征以及其固有的系统属性。揭示系统的本质，是认知信息技术关键特征中最复杂的阶段，这些特征使其有别于其他对象和系统。

对“技术”和“信息技术”概念的上述定义进行分析，可以提炼出若干关键特征：

– 信息技术的过程性体现在：技术的本质一方面与属性、形式、内容及其他信息的转换有关，另一方面与信息技术的组织过程有关；

– 信息技术的形式化特征体现在多种形式化形式中，如项目、算法和程序、各种数学模型等；

– 面向实践——在实践需求的推动下，信息流程开始以技术的形式实现；

– 集中体现科学知识以及实现信息流程的经验；

– 提高效率、达成最终结果，是信息技术不可或缺的特征。信息技术社会效益的主要标准是人的空闲时间。信息技术能够节省劳动、能量和资源；

– 确保达到用户指定的信息流程实现质量水平。

要素层面涉及描述系统的组成、对各部分及组成部分进行定量和定性分析、协调其关系与层级，并确定系统中具有优先地位（起主导作用）的部分。

信息技术的保障工具包括方法、技术工具（PC硬件、办公设备等）、算法和软件、信息与方法保障、计算机网络与电信、人员等。

功能方法要求回答以下问题：信息技术作为一个系统，具有哪些内部和外部功能？这些功能如何帮助实现系统目标？系统的活动和运行状态如何？

确定系统的功能，需要明确其目标。信息技术是一个有目标的系统。信息技术的主要目标是形成优质的信息资源（新信息、知识），以提高其所运行系统的效率。将总体目标分解后，可以构建目标树，反映信息技术实现的所有方向。

为实现信息技术的目标，需要执行某些函数。主要函数包括构建信息技术的概念模型、对数据、信息和知识进行转换（收集、处理、存储、传输、发行等），以及确保信息技术运行的函数。外部函数旨在满足国家、政治环境、社会和生产领域、科学、经济、技术等各类元素对优质、高效信息系统的需求。

结构方法有助于确定系统的内部组织、元素之间的连接方式、系统中的组件及其结构。所确定的函数由结构承载，而结构是系统中元素交互的方式。

技术信息过程的功能结构由信息转换过程的实现逻辑和技术原理决定。具体的信息技术必须适应相应的信息系统管理组织结构和技术系统。

交互方法通过确定物质、能量和信息关系，揭示系统与外部环境交互的问题。系统的这一属性称为开放性 [14]。

信息系统的开放性属性体现为与外部环境交互，并持续与其交换能量、物质和信息。这里信息方面最为重要，尽管物质和能量交换在技术的运行与发展中也发挥着不可忽视的作用。

信息技术作为开放系统具有以下特征属性。

第一，具有活动性。它表现为为了满足自身需求而与外部环境进行有目的的交互。信息技术的活动性与其中是否存在有目的的组成部分有关，

这些组成部分的核心元素是人员。

信息技术主动作用的增强，与外部环境发展性质的变化以及与消费者交互日益复杂有关。信息技术（主体）对对象产生的影响，应使对象达到最有助于实现其目标的状态，也就是说，应具有主动性。信息技术的主动性首先意味着，在其运行和发展过程中，扩大其行动和函数的范围。因此，信息技术的主动性应具有一定的稳性。

在实际实现既定目标的过程中，信息技术需要根据外部环境的变化管理自身活动。因此，信息技术的主动性首先应着眼于认知外部环境的发展规律，以便进一步主动影响外部环境。

使用信息技术时，重要的是考虑稳态属性。这一属性能确保系统在外部环境状态不断变化的情况下保持整体性。这里需要指出，在环境处于不同状态时，系统的重要变量仍保持稳定，或在规定范围内变化，从而确保系统与外部环境保持平衡。这种状态体现了系统的整体性，不能归因于系统的任何组成部分（子系统）。

在实践中，信息技术的开放性属性通过制定开放信息系统概念得以实现。其要旨可简要概括如下：每个开放信息系统都旨在解决两项任务（数据处理和数据传输），并由两部分组成——应用进程，用于处理数据，尤其是满足用户需求；以及交互区域，用于在分布于不同系统中的应用进程之间传输数据。国际标准化组织（International Organization for Standardization，ISO）在开放系统的开发中发挥着主要作用。该组织制定开放系统互连标准（Open Systems Interconnection，OSI）。

整合方法揭示系统构成因素、确保系统统一性及其整体性的机制。

在研究整体性问题时，许多科学家对这一概念持有不同观点。关于整体性问题的第一种方法，与系统具有其组成元素所不具备的新属性（非加和性、涌现性、整体性等）这一点相关。

第二种方法强调系统的自主性、整体性以及与外部环境的对立。

第三种方法将系统整体性准则界定为：系统元素有一定程度的有序性和组织性，存在关系与相互作用，且关系具有一定的紧密程度；元素（子系统）、属性及系统关系的组合能够最大程度地符合系统运行和发展的目标。由此可见，整体性属性与系统的组织性密切相关。第四种方法结合了第一种和第三种方法[15]。

近年来，随着科学认识中功能方法的发展，人们从这一角度逐渐形成了对整体性问题的看法。在系统认识中提出功能整体性，是研究这一复杂问题的又一步进展，有助于考虑开放性这一属性。在探讨系统整体性的来源时，必须考虑系统与外部环境之间的联系。

信息技术确实具有新的属性，这些属性在其运行和发展过程中显现出来。尤其值得关注的是，新属性中出现了系统任何一个元素都不具备的属性，即整体属性（涌现属性等）。

许多专业人才认为，系统整体属性产生的原因在于系统内部以及系统与外部环境之间存在各种稳定联系。正是这些联系构成了一个新的隐含加项，使整体区别于部分之和。

信息技术的新属性可以多种多样。对于目的性系统（信息技术正是如此）而言，与其目标用途相关的新属性的产生具有重要意义，也就是说，这些属性决定了它的质的特征。

信息技术作为一个完整系统，在其运行和发展过程中所能发挥的作用，超过其任何一个独立

元素或子系统。在组织理论中，系统的这种新属性被称为协同效应。

因此，信息系统的整体性属性可以具体化，并通过元素之间以及元素与外部环境之间的联系体系来表达；另一方面，则可通过整合性来表达。系统论指出，联系的存在并非系统独有的特征。要确保信息技术的整体性，元素之间的联系必须具有稳定性，其中还应包含系统构成关系。系统构成关系包括管理联系、组织联系、功能联系、反馈联系、技术联系等。

历史方法用于确定系统的产生、形成、运行过程，以及其发展趋势和前景。

与我们的任务最相关的是电子计算机发展相关的信息技术发展阶段。

第一阶段（19世纪下半叶之前）——“手工”技术：钢笔、墨水瓶、书籍、简单的手动计算工具。通信通过马车邮政投递信件、包裹和急件来实现；欧洲国家还使用机械电报。技术的主要目的是以所需形式呈现和传递信息。

第二阶段（19世纪末至20世纪40年代）——“机械”技术：打字机、计算器、电报、电话、录音机，以及配备更完善投递工具的邮政。技术的主要目的是以所需形式呈现信息，使用更便捷的工具，并减少弥补损失和纠正失真的开支。

第三阶段（20世纪40年代至60年代）——“电气”技术：第一批电子管计算机及相应的软件、电动打字机、电传打字机（电传）、复印机、便携式录音机。组织在指定时间传递信息。信息技术的重点开始从信息的呈现形式转向其内容的构建。

第四阶段（20世纪70年代—20世纪80年代中期）——“电子”技术，主要工具是大型电子计算机，以及以其为基础构建的自动化管理系统（АСУ）和信息检索系统，这些系统配备了广泛的基础及专用软件комплек。技术重心

转向为各个社会生活领域的管理环境构建信息的内容组成，尤其重视分析工作组织。

第五阶段（自20世纪80年代中期起）——“计算机”（“新型”）技术，配备种类繁多的通用标准软件产品和定制软件产品的个人计算机。创建用于不同管理层级的决策支持系统。这些系统内置分析和人工智能元素，在个人计算机上运行，并利用网络技术和电信技术进行联网工作。

第六阶段（自20世纪90年代中期起）——“Internet/Intranet”（“最新”）技术。分布式系统以及全球、区域和本地计算机网络广泛应用于科学、技术和商业的各个领域。电子商务不断发展。信息量的增加促成了数据挖掘技术的诞生（英文：数据开采）——一种基于海量信息分析的数据自动搜寻技术。其目标是识别常规分析无法发现的趋势和模式。数据分段和后续事件发生概率的评估采用了复杂的数学算法 [16]。

人类文明开始向一种新的质态转变，这一论断毋庸置疑——后工业文化或信息文化正在取代工业文化，而工业文化又在中世纪取代了农业文化。社会发展的每个阶段，都有与之相应的形式和内容，用于新一代的学习过程，以及向他们传授积累下来的知识、技能和传统。

农业文明从原始社会和奴隶社会延续至15世纪中叶，孕育了以口头交流为基础的导师式学校，随后又发展出通过编写和使用手写讲义及科学实验记录进行教学的形式。这种教育模式的特点是师生之间精神上的亲近程度极高，但数据安全性较低，信息损失极为严重。然而，在导师式学校存在的时期，人类积累了足以推动社会迈入工业社会的力量，而工业社会又催生了新的教育过程形式——手工业学校。这场改革以印刷术为基础，扩大了用户群体，提高了信息安全性，并首次使远程教育得以普及。手工业学校以及城市大学体系首先满足了日益发展的工业需求。

教授的课堂教学负担按每名学生计算有所下降，教师的世界观影响力也随之减弱。直到20世纪末，新的信息技术、通信技术，尤其是计算机技术，才彻底改变了人们对信息交换能力的认识。这得益于手工业学校体系中长达五个世纪的知识传递。

教育体系发展的新阶段，是教学过程走出具体教育机构边界的阶段。最优秀的世界学科教学范例、现成课程和程序变得普遍可及。信息复制与保存系统的可靠性达到绝对水平，人们也能够远程访问世界图书馆馆藏、信息数据库以及全球领先实验室和研究所的科研成果等取之不尽的资源。学习材料的呈现形式也发生了根本变化：人们逐渐认识到，广播、电影和电视的出现，并非意味着独立传播媒介的诞生，而只是借助音频和视频信息远程影响人脑的合成方式的先导。人际关系领域也发生了变化：学习小组的集体性和凝聚力有所减弱，大规模教学中的精神交流和教育元素也逐渐淡化。

在信息社会中，这类教育发展的主要特征可以概括如下。

1. 全球信息网络——以电子邮件取代书面交流，以聊天工具取代集体口头讨论，以电子版本取代教材的印刷形式。教师的角色、地位及职能职责发生了变化。教师不仅应掌握所有这些技术，能够筛选、评估并应用最有价值的教育资源，还应帮助高等教育学生不至于在信息海洋中迷失。

2. 知识、能力与技能的新型呈现方式：交互式动态文本、超文本、视听手段、计算机化实践课程——模拟器、虚拟实验室。在此，教师至少应能够在设计此类教学材料时向设计师、程序员和动画师提出任务，并在自己的教学领域中运用专业人员已经制作的交互式、多媒体或虚拟指南。

3. 时间延展性。提供优质教育服务的技术能力，与人们希望教师与学生能够长时间面对面交流的愿望相矛盾。大众传媒和互联网的信息压力，彻底改变了新一代感知外部刺激的性质、深度和速度。基于直接医学指征，课堂负荷正在降低。随着信息基础设施的发展，简化版的普通高等教育也在同步普及。

在这种情况下，应利用年轻人对互联网的热情，引导他们进行文明、礼貌且有意义的网络交流。必须着手培养能够运用最新信息化教学技术的教育工作者，同时保留他们所传承的宝贵经验、知识和教学方法，并将其传授给新一代。还必须发展电信教育基础设施，以更快的步伐开发适用于各种面授课程的教学方法与软硬件，并为其提供本地和远程两种版本。

应特别重视教育服务器、网站及其他互联网资源的开发，使其能够覆盖尽可能广泛的受众，创建并维护统一教育空间，保障国家标准的落实。还应逐步调整高等教育机构的教学计划，减少教师的课堂负载，将重心转向不受严格课程表限制的远程教学形式，并在教师提供咨询与方法指导支持的情况下，促进学生自主学习。

展望未来，应努力基于统一的教育标准，最大限度地整合领先的高等教育机构，为教学过程的所有形式提供通用网络服务，并建立统一的教学质量评级系统。这显然要求全社会创建一个广泛的信息快速交换基础设施，该基础设施以相互补充的新型信息与电信技术为基础 [17]。

新型信息技术包括：人工智能、神经计算机技术、神经网络、视频技术、多媒体技术、面向对象技术、互联网技术、虚拟现实等。新型信息技术是一些方法，能够在另一个、

更新的层面上解决教育和育人任务；进行信息预测与分析；帮助做出正确且有效的解决方案。

借助这些技术，可以搜寻、收集信息，对信息进行处理和存储，并以高等教育学习者易于获取的形式呈现，同时更新信息。这与科学技术进步、技术设备和技术的更新以及知识密集型产业的发展有关。大规模使用的数字教学方法材料（包括多媒体形式的材料）、无线技术、演示设备以及用于访问资源的网络技术，都会影响信息技术基础设施和高等教育机构信息系统的服务 [18]。

只有在以下条件下，信息技术在高等教育中的应用才能取得最大成效：在高等教育机构的教育空间中创建内容丰富的多元环境，调动多种信息接收通道——文本、视觉和音频信息，从而强化教学过程，使高等教育学习者为未来的职业领域工作做好准备，并考虑到近来信息感知的感官通道融合趋势日益增强这一已知现象。

在教育领域，与其他领域一样，现代信息技术的使用与转向在网络中处理、存储和交换信息密切相关。互联网作为全球性信息通信网络，连接着不同国家的信息系统和电信网络，并借助全球地址空间提供实现多种通信形式的可能，因此成为21世纪这一信息技术时代的基础。

信息技术使学习过程更加轻松简便，也更加便利、易于获取，同时发挥着三个彼此关联的功能：诊断、教学和育人。

借助管理方法和前文提到的系统方法，可以利用信息技术实现现代高等教育质量提升过程。

管理方法的核心是使用数字技术作出管理决策。

系统方法基于借助数字化教学工具，将教师与学生的交互组织为一个极其复杂的统一系统中的元素。

数字技术的优势使得某一高等教育机构能够邀请身处城市乃至国家边界之外的实践教师、讲师和科学家参与教育过程。

近几十年来，远程教育技术在世界范围内迅速发展。教育过程的信息化时代已经到来。当前的发展阶段可称为电信阶段。这是交流的阶段，也是信息与知识传递的阶段。如今，学习与工作已成为同义词：专业知识老化得非常快，因此需要不断改进——这就是开放教育 [19]。

高等教育体系中使用远程教育的因素分为两类：外部因素和内部因素。

外部因素。在信息社会中，成员的高教育水平成为优先事项。只有受过高等教育的人才能有效地将信息用作生产性资源。“信息爆炸”效应要求每位社会成员不断更新知识。对个人而言，仅有“终身教育”还不够，还需要“贯穿一生的教育”。学习客观上正变得连续不断，学习过程的性质也发生了重大变化。这些问题在全球范围内都十分重要。联合国教科文组织作为联合国负责教育事务的主要机构，与专门机构国际教育规划研究所合作，为各国在教育政策规划与分析方面提供技术支持。联合国教科文组织终身学习研究所（终身学习教育）在支持成员国制定这一领域的政策方面发挥着关键作用。

“终身教育”这一术语具有多重含义。第一，终身教育意味着持续不断地改进人的知识、能力与技能，这是为了适应现代环境（职业环境和社会环境）的需要。第二，这一术语指的是对整个教育过程的一套观点。这一系统将学习活动视为任何年龄阶段生活方式中不可分割且主要的组成部分；认为有必要为教育阶梯增建新的阶梯，以适应人的所有

生命阶段。第三，终身教育意味着不断丰富个人的创造潜能，发展人成为具有创造力的人。终身教育是一个完整的过程，由依次衔接的各个阶段以及专门组织的学习活动构成，为人的生活创造有利条件 [20]。

此外，还必须指出在全球层面推广信息技术的重要性：

第一，信息技术为教育创造了新的能力，使教育能够覆盖更广泛的人群，并满足个人追求知识、提升所选领域的资格以及从事专业活动的需求；

第二，消除与获取所需信息相关的障碍，并降低信息交换的成本；

第三，促进吸引投资进入本国，并推动先进技术在生产、管理和教育领域的应用；

第四，信息技术提高经济效率，并显著加快全球化进程等。

这一切都使进一步使用信息技术成为一个非常 акту 的问题，也是成功应用远程学习技术的必要条件。

内部因素。经济和社会改革、隔离限制以及日益频繁的自然灾害所带来的现代需求，导致教学过程的资源消耗显著增加。在提供教育服务以及组织专业进修和人才再培训系统时，若不考虑现代需求和已经变化的条件，就会严重限制学习群体规模的增长，降低教育服务的可及性和效能，进而缩小其潜在可能性的范围。

为了降低教学过程的资源消耗，提高高等教育机构中学习的可及性，教学技术必须尽可能高效，即在保证较高教学质量的同时，提升教学过程的经济性。必须广泛应用能够强化教学过程的创新教学方法。通过在教学和教育过程中广泛采用现代教育技术和最新信息技术，便可实现这一目标。

根据上述内容，可以归纳出在教育系统中创建并推广远程学习技术的几个主要原因：

– 扩大专业进修和人员再培训系统；

– 提高对教育质量的需求；

– 有必要向能力受限者（残障人士）广泛提供教育服务，并促进其社会适应；

– 有必要满足学习与教学舒适度方面的需求，使高等教育学习者和教师都能在方便自己的时间、地点和节奏开展学习过程。课程学习时间不受限制，使高等教育学习者能够比严格限定时间的传统课程用更短或更长的时间完成课程。教师的课堂教学工作量也会相应减少；

——在传统教育与远程教育之间营造竞争环境，这必将推动教育质量的提高。

因此，世界教育体系发展的新信息阶段是客观且不可逆的。使用符合世界水平的信息技术开展学习，是发展本国教育体系的主要而有效的途径[21]。

远程教育的发展历史悠久，随着时间推移经历了重大变化：从通过通信方式开展学习，到逐步使用音频和视频学习材料，最终转向在学习过程中积极应用计算机技术和互联网。传统上，人们认为远程教育起源于20世纪60年代英国开放大学的创立。

远程学习是一种普遍的人文主义学习形式，基于电子学习和远程教育技术的应用，为高等教育学习者提供选择主修及辅修教育课程、与教师进行对话交流的条件，同时学习过程不受学习者所处空间位置和时间的限制。

远程教育技术——指通过信息技术和电信技术，在学生与教学人员间接（远距离）交互的情况下实现的教育技术

。电子学习——指运用数据库中包含的信息来组织教育活动，这些信息用于实现教育计划；同时运用能够对其进行处理的信息技术和技术手段，以及能够通过通信线路传输上述信息、实现高等教育学习者与教学人员交互的信息与电信网络。

电子学习作为一种独立的教学形式，或远程教育的组成部分，可以视为一种借助电子技术开展学习与教学的过程。它为专家、同事以及教育服务和各类服务提供灵活访问学习资源的途径，并充分发挥计算机技术的潜力，使学习能够随时随地进行。直到不久前，全球学术界才对电子环境中学习的本质与特点形成了统一认识。然而，专业人员仍在继续围绕这一主题展开讨论。

一些研究人员认为，无论是在学习阶段本身，还是在学习后获得知识的阶段，电子环境中的学习与传统学习形式之间都没有显著差异。但目前占多数的另一些人则认为，电子环境中的学习是一种全新的教育范式，它以一种独特的学习文化为基础形成。因此，电子环境中学习的重要元素是其组织方式与方法论，而这与传统的开本和教学方法大不相同。

现代电子学习包括在线学习（通过互联网进行的学习）、离线学习（通过电子存储介质进行的学习，例如多媒体光盘）、移动学习（通过手机、智能手机、平板电脑、笔记本电脑等设备进行的移动学习，也可借此使用互联网）。

创建完整虚拟教育环境的可能性，取决于对以下原则的考虑：

1）强调认知（以及知识获取）对社会上下文的依赖关系；

2) 学习（“成熟”）与发展之间存在密切联系，因此有必要根据发展水平、需求等来关联（或选择）

某种学习形式，以适应高等教育学习者的发展水平、需求等；

3) 有必要将高等教育学习者视为学习系统的核心人物和元素；

4) 学习共同体成效显著，其中社会临场感、教学临场感和认知临场感为个人发展以及教师与学习者双方生活前景的转变提供了良好环境。

因此，电子学习是一种相对新颖的学习形式，也是科学研究领域之一。电子学习是借助电子技术开展学习与教学的过程，可灵活访问学习资源、专家、同事、学习服务和各类服务，并充分发挥计算机技术的潜力，使学习者能够随时随地学习。如今，乌克兰正积极发展电子学习，这一点从新门户网站的开设以及相关国家计划中可见一斑。

然而，作为在乌克兰推广电子学习的结果，不仅需要考察其推广效果的定量指标，还要分析电子学习的心理构成要素。若未考虑心理层面，未为电子学习创造相应的心理条件，包括确保教育过程参与者之间理解的真实性的心理条件，那么任何电子学习项目都不会有效。

乌克兰已为未来的远程学习体系奠定了坚实基础。远程学习是一种借助计算机和电信技术的学习形式，可确保教师与高等教育学习者在学习的不同阶段进行互动，并支持其独立使用信息网络中的材料开展学习[22]。

如今，在我国乃至全世界，生活中的许多方面都已转移到网络上，这加快了信息社会的发展步伐。在教育领域，学生函授学习形式已经存在了相当长的时间，可追溯到苏联时期，但其可能性十分有限。新信息技术和互联网使函授学习能够变得完善而全面，并与面授学习一道，通过数字化手段提供高等教育学习者所需的教学材料；

通过数字化手段监测高等教育学习者的学业成绩；通过数字化手段，由程序—教师为高等教育学习者提供咨询；通过数字化手段实现教师与高等教育学习者之间的互动协作；还能够迅速为航向补充新信息、修正程序错误等。

在当今经济关系和劳动力市场激烈竞争的条件下，知识、技能和经验具有特别重要的值。21世纪的专业人士，是能够熟练掌握现代信息技术，并不断提升和完善自身专业水平的人。在信息社会时代，获取新的知识和技能——这些知识和技能在工作中具有实际用途并能够得到应用——能够显著拓展自我实现的能力，并促进职业发展。然而，希望继续学习的人所面临的主要障碍之一（考虑到其中大多数人已经参加工作）是时间不足。大多数人无法每天前往教育机构参加课程。另一个重要障碍是距离。如果教育机构位于另一座城市，经常前往参加课程同样既不方便又昂贵。

“传统”函授教育形式往往无法达到其预期目的。学生获得的知识往往流于表面，课程本身也缺乏成效。此外，教学过程持续的时间相当长。

远程函授教育相较于传统形式具有以下优先性：

– 灵活性——能够根据学生的准备程度和能力讲授航向学习材料。这可通过创建备选网站来实现，以便获取关于难以理解的主题的更详细或补充信息，以及一系列提示性问题等；

– 时效性——能够引入最新的教育学、心理学和教学方法研究成果；

– 便利性——能够在方便的时间、特定的地点学习，在不脱离主要工作的情况下接受教育，并且掌握学习材料的时间不受限制；

– 模块化——将学习材料划分为若干功能完整的独立主题，随着学习者逐步掌握而进行学习，并符合单个学生或整个小组的能力；

– 经济效益——这种教学方法比传统方法更便宜，这得益于对教学场所的高效利用、

电子教学材料易于修订，且可供多人访问；

– 可供任意数量的学生同时使用大量学习信息；

– 交互性——高等教育学习者与教师之间积极交流，显著增强学习动机，改善对知识内容的掌握；

– 教学质量监控的能力更强，包括开展讨论、使用聊天室、进行自我监控，以及消除心理障碍；

– 获取教育不受地理界限限制。可以在世界各地不同的教育机构学习不同课程。

在西方，这种形式早已出现，并因其经济指标和教学成效而深受学生欢迎。正如前文所述，那里将远程教育形式称为“终身教育”，因为大多数学习者都是成年人。他们中许多人已经接受过高等教育，但由于需要专业进修或拓展业务领域，许多人需要快速、有效地掌握新知识并获得工作技能。这时，远程学习便可能成为一种理想形式。

远程教育系统中划分出四种主体类型：

1. 高等教育学习者——接受学习的人。
2. 导师（教师）——教授知识的人。
3. 组织者——负责规划学习活动、制定教学计划、将学生分组并为导师分配教学工作量，以及处理各种组织事务的人。

4. 管理员——负责确保系统稳定运行、处理技术问题并跟踪系统运行统计的人。

远程教育的重要元素是远程课程。在学习开始之前，辅导教师会根据各自的学科开发远程课程。在学习过程中，课程可以修改和补充。每位教师都可以自行决定远程课程的形式，以及其中采用哪些多媒体元素。准备远程课程时使用计算机技术的程度和方式，会显著影响学习者对课程内容的掌握效果。世界经验表明，

使用动态对象创建过程的直观模型，以及对高等教育学习者进行自适应建模，在许多情况下都能显著提升学习效果。

航向分为若干章节，学习者需在规定时间内完成。导师根据章节学习材料创建并布置测试和任务，这些也需要按时完成。导师可以针对航向的相应章节布置专门的考核（限时）测试。导师还可以为高等教育学习者小组布置任务，由小组成员共同完成。

远程学习系统中的主体通过个人留言簿系统、论坛、聊天室和电子邮件进行互动。

要有效组织远程教育教学过程，高等教育学习者和导师几乎每天都需要持续使用各自的页面，贯穿整个学习期限。

在信息社会中，面对教育领域巨大的信息负载，可通过模块化学习技术来实现教学过程的系统方法；这种技术与现代信息通信技术完全兼容 [23]。

模块化学习是一种组织教学过程的工具形式：高等教育学生在主动自学模式下，沿着可变或个性化学习路径，与由学习模块构成的学习环境进行互动。模块化学习技术是个性化学习的一个方向，有助于组织自我发展和自主学习过程，并调节学习进度以及学习材料的内容。

模块化学习中的信息化教学材料应以清晰的层级结构进行组织，并以所有可能的代码形式提供给高等教育学习者：图形、数值、符号和文字形式。在此基础上，形成对教学信息的完整系统性感知。在模块化课程中，应构建工具型学习环境，其中包括一系列信息与方法材料以及交互式学习模型，用于组织自主学习行动。

与此同时，信息化学习超空间是教师与高等教育学习者之间的中介。这种学习环境对教育工作者的活动进行建模，并确保能够以自主学习、自我发展和自我组织的模式组织教学过程。在交互式学习环境中进行自我教育以及利用不同信息来源开展自主学习的技能，是发展学习能力的基础。这种学习建立在自我激励之上，具有发展性，并培养高等教育学习者进行学习活动自我管理的技能。因此，通用学习行动在模块化教育环境中能够以最高的效率和速度在高等教育学习者中形成。

在模块化学习循环中，高等教育学生根据既定的个人目标组织学习活动，并使用所需的信息与方法支持材料以及推荐的学习行动算法。学习完一个模块后得到的输出结果，将在转入下一轮学习活动循环时作为输入。与此同时，还会调整个人学习目标。

反馈的概念是控制论中的基础概念。教学过程管理的效率取决于反馈的质量。在每个学习模块中，反馈通道可以构建于“高等教育学习者—知识”和“教师—高等教育学生”这两种控制论系统中。反馈功能可以嵌入评级电子表格。与此同时，按照模块化课程学习的高等教育学生，在学习过程中能够自行衡量学习行动的篇幅，并在感知、信息处理阶段以及训练模式下完成练习的过程中，考虑自我监控的结果。根据这些记录，可以对学习进程的结构进行系统分析。与此同时，高等教育学生学会使用反馈通道，培养管理学习过程的自我管理技能；这些管理技能会自动迁移到生活的其他领域（管理自身健康、情绪状态、时间、资金流、资源、他人等）。

排名表中还应设置数据录入功能，以录入控制任务完成结果，

用于确定高等教育学习者对知识和技能的掌握程度。这也是教师的反馈渠道。

如果教师与高等教育学习者之间的反馈不足，整个学期内便会产生相互误解，教学质量也会下降。教师应倾听高等教育学习者在理解教学信息时遇到困难或不接受教学方法体系的情况。直接联系和反馈可以对应于高等教育机构教学过程参与者之间的纵向和横向通信 [24]。

在高等教育机构的教学过程中，“教师—高等教育学习者”系统中的信息传递遵循纵向原则。随着互联网技术和社交网络的发展，横向传递成为可能。

学生的反馈可以通过使用专门的资源来实现，高等教育学生可在这些平台上根据特定准则为教师打分并撰写响应。这有助于提高教师与学生之间关系的透明度，并防止教师滥用职权。

当正向和反向信息流不均衡时，教师会在整个学期内向高等教育学习者授课，之后再组织阶段性考核。在考试中，通常通过教学材料的内容与高等教育学习者对其复述内容之间的符合性，来确定信息掌握程度。因此，考核往往确定的是记忆程度，而非高等教育学习者对课程内容的理解程度。解决这一问题的办法，可以是改变阶段性考核和期末考核的方式，将考题设计成促使高等教育学习者生成新知识的形式。

学习活动的系统分析基于自主学习活动的自我监测数据，以及根据完成考核任务的结果对学习成果进行测量。通过系统分析，学生可以获得以下信息：

– 关于自主学习活动的结构与数量的实际数据；

– 学习时间分配结构数据；

– 因果关系（教学活动 — 学习成果）；

– 将系统分析数据以图表形式进行图形化呈现。

这种教学过程组织方法以高等教育学习者的自主学习活动为基础，能够促进他们形成和发展通用学习活动体系。

与模块化和远程学习相适应的电子教育资源，其发展与改进方向可以包括以下几个方面。

模块化课程应构建系统化的工具型学习环境，其中包括信息与方法材料，以及用于组织自主学习活动的交互式学习模型。这样的信息化学习空间是教师与高等教育学习者之间的媒介，可模拟教育工作者的活动，从而支持以自主学习、自我发展和自我组织的方式开展教学过程。

系统性原则的实现意味着，学习课程中的学习模块应包含不同开本的数字教育资源以及交互式控制工具，从而能够组织完整的学习循环，实现取得学习成果所必需的所有自主学习活动。

该学习循环必须包括以下内容：

– 感知和处理信息；
– 以形成学习能力为目的的训练；
– 学习成果评估；
– 自我分析并自我管理学习活动的可能性。

工具型学习环境中应嵌入交互式或纸质表格，用于监测和系统分析教学过程。

互动式学习环境应具有开放的模块化结构，并能够更改接口、修改系统的所有组成部分、扩展功能、设计不同的教育路径方案等。

工具环境的结构和界面具有开放性，使教师与高等教育学习者能够开展集体创作。这是在高等教育机构的教学过程中实施项目方法的一种创新方法。

按照系统性和模块化原则实施完整的教学循环，可创建完善的交互式教学方法产品，作为一种教学工具；基于该产品的应用，可将模块化学习的要素引入教育过程。

按照上述原则组织的计算机教学工具，可帮助高等教育学习者系统地理解教学课程的内容，并促进其系统性思维的发展，而这是学习循环中的一项重要目标。借助此类交互式程序，可以构建以主动自学、自我发展和自我管理为模式的教学过程。

如果计算机教学程序直接与高等教育学习者交互，并发挥交互式训练器的功能，就能构建更高效的教学过程。

模块化方法有助于构建教学环境，使高等教育学习者能够开展集体创作活动，并借助他们逐步向教学模块结构中填充教育资源。在模块化教学过程中，项目方法也能自动应用于教学过程。绘制出层次化图——即教学模块的结构——后，教师便可据此编写大量开发小型项目的技术任务，并将其设计为不同难度级别的学习任务。

发展中的教育技术之项目法建立在高等教育学习者积极参与教育活动的基础上，而不是被动地接收信息。教育资源的设计旨在促进对教学信息的感知和自主处理，因此，项目法有助于在高等教育学习者中形成通用学习行动体系，因为只有在这种教育技术中，才能确保以创造性的系统方法组织自主学习行动。

采用教育的系统方法，意味着要改进各级学习进程。

高等教育机构缺乏系统方法时，专业人员的培养便会自发进行，未来专业人员往往缺乏自我认同。因此，在学习期间（开展讲座和实践课程时）仍需继续进行职业指导，否则学习便会失去目标。

在高等教育学习者低年级阶段的学习过程中，重要的是为他们指明正确的方向——“学会学习”。必须区分两个概念：“教学”与“学习”。

教学是一个更具体、研究得更充分的活动领域，由教师面向高等教育学习者开展。它包括教学方法体系以及组织教学过程的方法。

学习方法体系是一个形式化程度较低的领域，可以将其归入艺术范畴。

一种解决办法是与教师共同开展活动，制定学习方法体系。在为不掌握学习方法体系的高等教育学习者制定教学方法体系时，应考虑以下几点：任务必须尽可能具体、详尽且有针对性；也就是说，应为每位高等教育学习者明确一项需要在特定期限内完成的任务。

通过高等教育机构的高效运作、教师与高等教育学习者的协同工作，以及高等教育学习者在学习过程中彼此交互，人类会形成四种智力：身体智力（或身体的智力）、心智智力、情绪智力和精神智力。教育技术应致力于发展所有类型的智力。

必须承认，如今的毕业生虽然掌握了大量信息，却不知道如何将其应用于实践。

要在教育系统中取得优异成果，高等教育机构各学习阶段之间必须实现完整的系统性关联。

优秀专业人才的培养应以教师为核心，由其整合整个学习过程（毕业生所属系、系主任或教育项目负责人）——从录取进入高等教育机构，到毕业生就业及后续跟进（例如，在职业发展过程中进行专业进修）。

值得指出的是，不可能存在通用的教育数字化水平评估工具，教育过程质量仍然

保持不变，即便是在形成以能力本位方法培养专业人员的过程中。

借助新的信息技术，可以采用互动式教学方法，并开展个性化、差异化和分层教学。教学过程中采用的教学工具也多种多样，包括交互式白板、计算机、投影仪、软件产品和应用程序。在职业培训中，信息技术不仅应用于理论教学领域，也应用于实践领域，以及高等教育学习者知识与技能的评估。

高等教育机构中的信息技术能够最有效地组织人员活动（教学过程），并实现对数字数据的访问。据此，在任何高等教育机构中，都可以区分出信息技术决策的三个主要组件，它们之间存在密切关系——人员、流程和数据。从管理角度来看，流程解决和组织得有多好、人员与数据之间的关系建立得有多完善，在很大程度上决定了高等教育机构活动的成功与否 [7]。

现代信息技术趋势对新信息技术的引入产生了重大影响，主要趋势如下：

– 虚拟化和云技术；
– 扩大面向服务的架构的使用；
– 在企业层面引入移动设备和决策方案，以访问资源并执行企业应用程序；
– 用户偏好的差异化日益显著；
– 可视化、网络研讨会和视频会议通信 [25]。

在高等教育机构将新的信息技术引入教学过程时，确保教育系统有效运行的重要途径之一，是创建和使用电子教学方法综合体。该信息化计算机产品中的所有文件均为多媒体文件，其中始终包含交互性元素，也可以网页集合的形式呈现。电子教学综合体可用于讲座教学（展示视频录像、交互式模型和动画）、开展虚拟实验、资格认证以及高等教育学习者的自主学习。因此，电子

教学方法综合体是一种用于教学的多媒体软件产品，能够保证学习过程教学循环的连续性和完整性，并包含依据系统方法、交互性、信息开放性以及知识成绩评估过程远程化原则构建的组织性、系统化理论、实践和监测材料。

在高等教育机构中组织教学过程时采用新信息技术的系统方法，可通过信息技术手段实施一系列措施，改善该机构作为一个系统的活动，从而推动该高等教育机构的信息化[26]。

为了提高高等教育机构的工作效率，需要从整体上对系统进行综合影响——包括战略、网络基础设施、组织结构、管理系统、工作激励机制和企业文化。为完成高等教育机构信息化这一任务，必须建立统一的电子系统，以便管理知识，进而推动创新发展、提高劳动生产率：通过缩短搜寻管理所需解决方案的时间、减少已完成工作的篇幅，并提升人员能力。由此，用户将能够访问高质量信息；信息技术领域的解决方案也将如此深入地融入高等教育机构的核心业务流程，以至于人员和高等教育学生将无法离开信息环境所提供的服务。与此同时，人员履行岗位职责的效率得以提高，高等教育学生的教学质量也得到提升，从而使对信息技术的投资在经济上具有合理性[7]。

高等教育机构的 IT使命应作为制定 IT战略以及在高等教育机构信息技术标准体系内创建系统的基础。IT战略是指一套形式化的原则体系，据此制定信息化概念、信息技术的基本需求及其在高等教育机构中的发展计划。该策略确保采用系统方法推进信息化，并使其与高等教育机构整体的发展优先级相协调。

信息化的主要战略目标：

– 确保高等教育机构在信息技术领域的地位优于其他机构；

– 创新服务形式，提高教育服务质量；

— 通过协调业务策略与信息化策略，并优化投资、组织和技术解决方案，提高信息技术在高等教育机构管理和教学过程中的应用效益；

– 通过提升资源管理能力，降低信息技术资源的总拥有成本；

– 基于高等教育机构统一信息系统模型，提高高等教育机构的管理效率，提升信息服务质量，并增强用户对这些服务的可访问性；

– 通过实施计算机测试系统、电子文档流转、管理决策执行监测以及对管理和教学信息的规范化访问，减少教学人员对高等教育学习者以及行政管理人员对教师和员工进行滥用的机会；

– 提高信息技术在高等教育机构 [27] 中应用的经济效益。

信息化的主要方向包括：

– IT基础设施：设备、数据传输线路和信道、计算机网络、系统软件、对资源的无线访问；

– IT解决方案：基于信息技术的综合项目、信息系统与服务、信息环境、地理信息技术；

– 信息技术应用方法论：高等教育机构的业务流程信息模型、统一信息系统模型、信息技术应用效能评估方法、信息技术应用的主要指标（与高等教育机构活动的关键绩效指标相协调）、关于在高等教育机构开发、实施和应用信息技术的程序的企业标准、规章制度；

– IT部门：组织结构、管理以及与其他部门的关系 [28]。

信息化的基本原则包括：

– 将高等教育机构的信息技术基础设施发展为独立的云，实现服务器和客户端的虚拟化；

– 基于资源整合和业务流程自动化的概念，发展信息环境；

– 持续改进 IT部门实施的各项流程；– 根据对信息技术在高等教育机构中应用成效的评估，持续改进信息技术的使用；

– 信息技术经费由高等教育机构发展的既定战略任务决定；

– 信息环境的安全策略基于合理必要原则制定；

– p企业数据质量保障过程的发展 [7]。

为实现 IT战略而制定的所有措施，都可以整合为一个创建统一电子系统的项目，其核心是建立高等教育机构统一的信息系统。建立高等教育机构统一信息系统的过程，包括一系列措施，旨在将信息技术引入高等教育机构的所有活动领域。信息技术是计算机软硬件工具的集合，以及在执行信息收集、存储、处理、传输和使用等功能时应用这些工具的技巧、方式和方法。

可以列出以下主要任务，其执行旨在构建高等教育机构统一的信息系统：

– 构建信息化组织结构；
– 创建高等教育机构的信息基础设施，并实现其管理自动化；

– 推进高等教育机构管理流程的信息化，尤其是财务管理；

– 推进教学过程的信息化；
– 推进科学研究和项目的信息化；
– 提高人员在信息技术领域的能力水平 [29]。

在创建高等教育机构统一信息系统时，应确保在教学和管理活动中合理运用创新。创建和组织高等教育机构统一信息系统是一项复杂的组织和技术任务，因此宜分阶段开发该系统：在每个阶段求解获取完整产品的任务，并逐步对其进行修改和扩充。上述子系统之间的相互协调以及

数据集成基于组织、功能、技术、软件以及信息语言兼容性实现。只有以此为基础，才能确保高等教育统一信息系统稳定运行。

乌克兰高等教育的信息化是高等学校改革的优先方向之一。在教学过程信息化的道路上，基于新的信息技术、系统、网络和资源创建、引入并发展计算机导向的教育环境至关重要。

这是一个转型系统，涉及以信息产品和基于微处理器技术的信息工具充实教育系统，并采用新的信息技术，同时全面利用系统方法这一方法论基础的优势。

系统方法的资源，加上在职业培训过程中综合应用新的信息技术，使教学过程的组织者和参与者能够清晰认识教育系统各组成部分之间的关系，并更有效地实现其主要功能：组织、领导和控制。

参考文献

1. 乌克兰教育和科学部（2020年12月2日）《乌克兰高等教育2021—2031年发展战略》[电子资源]。访问地址：https://mon.gov.ua/storage/app/media/rizne/2020/09/25/rozvitku- vishchoi-osviti-v-ukraini-02–10–2020.pdf。访问日期：2021年12月6日。2. 乌克兰总统（2002年4月17日）第347/2002号总统令《关于教育发展的国家纲要》[电子资源]。访问地址：https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/347/2002#Text。访问日期：2021年12月6日。3. 乌克兰总统（2013年6月25日）第344/2013号总统令《关于乌克兰教育发展至2021年的国家战略》[电子资源]。访问地址：访问日期：2021年12月6日。4. EDUCAUSE地平线报告。教学与学习版。路易斯维尔：EDUCAUSE，2020年，58页。[电子资源]。访问地址：https://library.educause.edu/-/media/files/library/2020/3/2020 _horizon_report_pdf。pdf?la=en&hash=08A92C17998E8113BCB15DCA7BA1F467F303BA80/。访问日期：2021年12月6日。5. Козяр М. М.、Зачко О. Б.《虚拟大学》。利沃夫：利沃夫国立生命安全大学，2009年。[电子资源]。访问地址：https://nmetau.edu.ua/file/133.pdf。访问日期：2021年12月6日。

6.《乌克兰教育：挑战与前景：信息分析汇编》。基辅：乌克兰教育和科学部，2020 [电子资源]。访问地址：https://mon.gov.ua/storage/app/media/zagalna %20serednya/ serpneva-konferencia/2020/metod-zbirka-osvita-ta-covid-2020.pdf。访问日期：2021年12月6日。7. Крюков В. В.、Шахгельдян К. И.《大学中的信息技术：战略、趋势与经验》。符拉迪沃斯托克：ВГУЭС，2012 [电子资源]。— 访问地址：https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/26115/1/ unup-2012–04–16.pdf [1]。访问日期：2021年12月6日。8. Кудряшов К. В.《教育中的系统方法：方法论基础》。师范教育。2021年。第1期。第13–14页。9. Беспалько В. П.《教学技术的构成要素》。莫斯科：Педагогика，1989年。10. Путивцева Н. П.《在能力本位教育模式下，以自动化方式识别知识的系统方法应用过程开发》。计算机科学与社会信息化。2008年。第11期。第193–196页。11. Смолян Г. Л.、Солнцева Г. Н.《信息环境与信息活动——概念的方法论分析》。系统研究。方法论问题：2015—2018年年鉴。莫斯科，2018年。第38卷。第32–44页。12. Ломов Б. Ф.《人与技术：工程心理学论集》。莫斯科：Книга по Требованию，2021 [电子资源]。访问地址：https://www.bookvoed.ru/files/3515/10/ 76/83.pdf。访问日期：2021年12月6日。13. Громов Ю. Ю.、Дидрих И. В.《信息技术》。坦波夫：ТГТУ， 2015 [电子资源]。访问地址：https://www.tstu.ru/ book/elib/pdf/2015/gromov-t.pdf。访问日期：2021年12月6日。访问日期：2021年12月6日。14. Сараев А. Д.、Щербина О. А.《系统方法、系统分析与最新信息技术》。建筑与技术安全。2015年。第12期。第156–163 [电子资源]。访问地址：https://docplayer.com/34938719-Saraeva-d-shcherbinao-a-sistemnyy-podhod-sistemnyy-analiz-i-noveyshie-informacionnye-tehnologii.html。访问日期：2021年12月6日。15. Глухих В. Р.、Левкин Г. Г.《运用远程教学方法的综合性校际知识获取系统》。远程与虚拟学习。2009年。第8期。第28–31页。16. Москалева О. Г.、Корецкая Т. В.《经济学中的信息技术》。奥伦堡：ОГУ，2018 [电子资源]。访问地址：https://cde.osu.ru/demoversion/course157/ text/1.3.html。访问日期：2021年12月6日。17. Васильев В. Н.、Стафеев С. К.《计算机信息技术——21世纪教育的基材》。教育中的计算机工具。2012年。第1期。

18. Слободянюк І.、Мисліцька Н. 远程教育环境下云导向技术的应用。《物理与数学教育》。2020年。第2辑。第1期（23）。第78–82 [电子资源]。访问方式：https:// fmo-journal.fizmatsspu.sumy.ua/journals/2020-v1–23–2/2020_1–23–2_Slobodianiuk_FMO. pdf。访问日期：2021年12月6日。19. Левкин Г. Г. 高校教育过程创新模式。第一届国际科学实践会议《高校教育过程创新模式》，基辅。2011年。第178–180页。20. Пережовская А. Н. 终身教育：目标、任务、内容、功能与发展前景。第六届国际科学会议《教育发展的难题与前景》。彼尔姆，2015 38 41 。第–电[ ]子资源。访问方式：https://evansys.com/ articles/pedagogika-i-psikhologiya-nauchnye-prioritety-uchyenykh-sbornik-nauchnykh-trudov-po-itoga m-mezhdunar/sektsiya-6-teoriya-i-metodika-professionalnogo-obrazovaniya/obrazovanie-na-protya zhenii-vsey-zhizni-ili-pogovorim-o-nepreryvnom-professionalnom-obrazovanii/。访问日期：2021年12月6日。21. Лабуз Л. С.、Мазаева Л. Н. 高等职业教育中的信息技术：问题与前景。《概念》。2016年。第37卷。第90–95 [电子资源]。访问方式：http://e-koncept. ru/2016/56791.htm。访问日期：2021年12月6日。22. Гладуш В. А.、Лисенко Г. І. 高等学校 педагогика：理论、实践与历史。第聂伯罗：Акцент，2014 [电子资源]。访问方式：https://studbooks.net/70164/pedagogika/ informatsionnye_tehnologii_obucheniya。访问日期：2021年12月6日。23. Вараксин Г. С. 教学过程组织的系统方法。教育中的信息与通信技术。彼尔姆，2021 [电子资源]。访问方式：https://www.ikt-school.com/。访问日期：2021年12月6日。24. Левкин Г. Г.、Колычев Н. М. 高校教师活动组织中的系统方法。《当代世界的职业教育》。2015年。第1期（16）。第77–89 [电子资源]。访问方式：htt ps://www.sibran.ru/upload/iblock/eb7/eb7f96c451a03cdf252aee81223cd61f.pdf。访问日期：2021年12月6日。25. Хонин Г. А.、Семченко В. В. 信息技术在高校教学过程中的应用。《当代世界的职业教育》。2014年。第3期（14）。第148–156 [电子资源]。访问方式：https://www.sibran.ru/upload/iblock/156/15684701862f643bc7dee584f03a92b3.pdf。访问日期：2021年12月6日。26. Левкин Г. Г.、Левкин Е. А. 高校教育过程创新模式。基辅：科学与启蒙，2011年。27. Симак Р. С.、Левкин Г. Г. 借助信息技术组织高校教学。《社会技术》。2012年。第4期。第373–377 [电子资源]。访问方式：http://files.informio.ru/files/

main/documents/2016/06/Simak_R_S.-omgups.pdf。访问日期：2021年12月6日。28. H. 萨恰纽к-Кавецька、O. 普罗佐尔 借助自动化测试系统组织学生学习成果评估。《物理与数学教育》。2020年。第1辑。第3期（25）。第87–93 [电子资源]。访问方式：https://fmo-journal.fizmatsspu.sumy.ua/journals/2020-v3–25–1/2020_3–25-sachanuk-kavets-ka_fmo.pdf。访问日期：2021年12月6日。29. K. B. 波尔贡 基于 MOODLE 平台创建高等教育机构电子教育环境的组织原则。《物理与数学教育》。2020年。第1辑。第3期（25）。第68–73 [电子资源]。访问方式：https://fmo-journal.fizmatsspu.sumy.ua/journals/2020-v3– 25–1/2020_3–25-Polhun_FMO. pdf。访问日期：2021年12月6日。

第 IV 章

信息系统与软件-комплекс设计

UKRVECTŌRĒS 与 vHealth：支持远程医疗康复服务的智能服务

Величко В. Ю.，***Малахов К. С.***

在大流行病期间实施康复措施的方法论具有一系列显著特点，这些特点与问题出现的不可预测性及其复杂程度高、问题产生速度快、康复治疗师与患者之间交流受限、需要迅速作出决策并确保决策恰当、过程规模庞大以及因此需要使用可扩展的操作工具等因素有关。提供医疗康复服务的一种有效方案是远程、以患者为中心的康复，它需要使用在线工具进行远程诊断、遥测和干预，并根据患者的能力进行调整；还需要发达的互联网交互、智能信息技术与服务、在“康复治疗师—患者—多学科团队”系统中有效的认知支持方法，以及对海量信息进行统计处理等。因此，在传统康复手段之外，面向大流行病期间康复进程的跨学科智能信息分析支持系统 *TISP* 中，还增设了用于远程医疗支持康复措施的智能系统。结合智能远程生物反馈工具，以及高效的微型远程诊断、遥测和康复设备，此类系统前景广阔，世界范围内的经验也印证了这一点。本研究旨在开发一种形式化模型、软件实现及方法学基础，用于应用远程、以患者为中心的智能系统服务，为大流行病期间的患者提供医疗康复服务，尤其是针对新型冠状病毒病 *COVID-19*。当前国际通行的“远程康复”或“电子康复”概念定义为：通过电信计算机技术，主要在门诊治疗阶段远程向患者提供的一系列康复训练和教育计划。远程康复在全球迅速发展，并使这一医学领域与多个不同学科领域建立起跨学科联系，

这些领域超出了当代电子健康范式的范畴，由此催生了最新的康复形式——混合式电子康复。这种电子康复由一系列基础方法、途径和技术构成：电信技术、遥测、嵌入式系统和微型智能可穿戴设备、生物反馈、虚拟个人助理，以及基于人工智能、用于处理大型数据库的方法、技术和软件应用。研究开发了形式化模型、软件实现及方法学基础，用于应用远程、以患者为中心的智能系统服务（*UkrVectōrēs* 和 *vHealth*），为大流行病期间的患者提供医疗康复服务，尤其是针对新型冠状病毒病 *COVID-19*。

大流行病期间康复措施的方法具有若干重要特点，这些特点与高度复杂问题出现的不可预测性和高发率、治疗师与患者之间沟通受限、需要快速作出决策并确保决策得到遵循、流程规模，以及因此需要使用可扩展的操作工具等有关。医疗康复援助中最有效的解决方案之一，是远程患者/个人中心康复。它需要在线远程诊断工具、遥测和以患者能力为重点的干预措施、完善的互联网交互、智能信息技术和业务。患者/个人中心康复还需要在“物理治疗师 — 患者 — 多学科团队”系统中采用有效方法，对大量数据进行统计处理等。因此，除传统康复手段外，作为“大流行病期间支持康复进程的跨学科智能信息分析系统（*TISP*）”的一部分，远程支持康复活动和业务的智能系统应运而生。这类系统结合智能远程生物反馈设备以及高效的微型远程诊断、遥测和康复设备，前景十分广阔，世界各地的实践经验也证明了这一点。本研究旨在构建一种形式化模型，实现相应软件，并奠定方法学基础，以便使用远程患者/个人中心智能系统的业务，为大流行病期间的患者提供医疗康复援助，尤其是针对新型冠状病毒病 *COVID-19*。国际上现代且普遍接受的远程康复或电子康复定义是：通过远程通信计算机技术远程向患者提供的一系列康复练习和训练计划，主要用于治疗的门诊阶段。远程康复在全球迅速发展，该医学领域也与各种超出现代电子健康范式的领域建立了跨学科联系，由此产生了最现代的康复类型——混合式电子康复。这种电子康复类型由以下若干基础方法、途径和技术构成：远程通信技术、遥测、嵌入式系统

以及微型智能可穿戴设备、生物反馈、虚拟个人助理，以及用于大数据处理的人工智能应用的方法、技术和软件。

已开发出一种用于在大流行病期间为患者提供医疗康复援助的远程患者／个人中心智能系统（*Smart-system*）的正式模型、软件实现及服务（*UkrVectōrēs*、*vHealth*）使用方法论基础，尤其适用于新型冠状病毒疾病*COVID-19*。

缩略语列表

应用程序编程接口 — 应用程序编程接口
CBOW — 连续词袋　DWIM — 按我意
图执行　PMI — 点互信息　SPA — 单页
应用　SVD — 奇异值分解

TISP — 用于大流行病期间支持康复进程的跨学科智能信息分析系统

生物反馈 — 生物反馈
БК — 欧洲物理医学与康复医学白皮书
ЗПМ — 增长金字塔网络
MIC — 医疗信息系统
МКФ — 国际功能、残疾和健康分类

НФДУ — 乌克兰国家研究基金
ПЗ — 软件
ФРМ — 物理医学与康复医学
人工智能 — 人工智能

1. 数学语言学中语言（分布语义）建模方法的理论基础。 人工智能（AI）发展的现阶段被称为机遇与技术及人工智能工具应用前景的爆发期。预计基于这些技术的应用，整个工业领域都将发生转型 [1]。

这类复杂过程不能仅仅依赖于理解和使用人工智能工具，将其作为促进创新或确保利润增长的手段。还需要了解各种约束，不仅是技术方面的，也包括组织方面的。人工智能技术及其开发的工具基于特定模型、算法及其软件实现。如果这类工具的工作结果是某种预测、建议或解决方案，

并且会对社会产生影响，那么就需要更多信息，以便安全地使用这些工具。用户必须理解算法是基于什么，或者更确切地说，为什么会得出这样的结果，以及哪些因素如何影响了结果。信任正是由此建立起来的，但我们需要深入了解“黑箱”[2]。

自然语言一直是人工智能的研究对象。在过去几年中，人们相当成功地开发出能够处理、自动理解和生成文本的技术[1]。对这些技术在工业领域实际应用情况的分析表明，它们主要用于文本分析（81%）、社交网络分析（46%），以及创建用于与客户交互的聊天机器人（英文 聊天机器人）（40%）、智能助手（23%）和文档分类（30%）。使用自然语言处理技术时，需要解决分类体系构建以及机器学习训练执行等问题，而这些对于实现大多数现代算法都不可或缺。基于机器学习构建系统所面临的问题，在于必须确保训练所需的数据篇幅和质量，尤其是在监督学习的情况下。构建分类体系需要确定信息单元之间的层级关系。根据分类体系所应用的领域，关系可能会有所不同。

在输入数据和语言模型中表示词语的方式，仍然是大多数自然语言处理任务中的重要问题。直到最近，自然语言处理系统仍将词语编码为由任意字符组成的字符串，而词语之间相似与差异的有用信息并未得到充分利用。

向量模型早已为人所知，自20世纪50年代起便应用于自然语言处理。过去几年开发的构建向量表示的算法、方法和工具，从科学角度看，是分布语义学的进一步发展；从实际应用角度看，则是用于解决命名实体抽取、语义角色标注、自动摘要、建立词语之间关系等任务的工具，

以及问答系统中的相关任务。向量模型已成为表示语音单位和计算这些单位之间语义相似度的通用方法 [3]。向量表示广泛用于解决自然语言处理任务，因此有必要了解这些工具及其能力和局限。研究自然语言向量建模理论与实践基础的领域是分布语义学，它是数学（或计算）语言学的一个分支，旨在根据语言数据大型样本中的分布属性，对语义相似度进行量化评估，并对语言学元素进行分类。

1.1. 向量表示的概念——词嵌入。向量表示，或称为表示/套帖（英文 词嵌入 / 分布式词表示），是一种将词视为向量的技术，向量间的相对相似度与语义相似度相关。它是无监督学习（英文 无监督学习）最成功的应用案例之一。向量表示是一种自然语言处理技术，是传统方法的替代方案。它可以将词典中的实体（词、词组、术语）映射到一个相对于词典规模较小的实数向量空间中，而向量之间的相似度与实体之间的语义相似度相关 [1]。

在相似上下文中出现（使用）的实体，其值往往也相似。这一内容以如下表述形式呈现（即所谓的分布假说）：这一假说由 Zellig Sabbettai Harris（1954年）和 John Rupert Firth（1957年）于上世纪50年代提出，当时分布式方法得到了发展。在这些方法中，实体的值（此处的实体是指词）根据其周围实体的分布计算得出。在这种情况下，实体表示为一个向量（数值数组），并通过特定方式计算得出 [3]。

采用这种方法时，词汇表不是由带有相应索引的字符字符串表示的词集合，而是向量空间中的向量集合。在这样的词汇表中添加新词，并非只是添加一行，而是一个更复杂的过程；由此产生了术语 词嵌入，即将实体（词）嵌入（套帖）到向量空间中。单个词会经历一个映射过程，从其上下文构成的多维空间映射到一个维度较低的向量空间。

在最简单的情况下，可以根据某个词与其他词共同出现的频率，构建其分布式语义模型，或称词向量。表示这类信息的一种便捷方式是矩阵（英文：共现矩阵）。这种矩阵的行数和列数相同。矩阵的单元格中存放数值，用于表示矩阵行所对应的词与矩阵列所对应的词在文本语料库中共同出现的次数。这些数值根据对文本语料库的处理计算得出。可以统计词语在文件或文本中共同出现的次数，也可以统计它们在文本的某一部分（段落、自然段）中共同出现的次数，不过通常使用特定大小的上下文窗口。例如，表 1 展示了文本语料库片段中五个词的上下文窗口，该片段涉及奥列斯·冈察尔创作作品的诗学问题。这个上下文窗口包含 11 个词（中心词及其前后各五个词）。

表1

实体（词语）上下文窗口

我总不能忘了	**同志**	工作上的伙伴，在很大程度上也是我的老师
别以为幽默和	**同伴**	按志向
担任职务	**编辑**	青年小组墙报 记者
和我同组的**Столяренко**		还记得吗，去年那个共产主义者的老婆 来过
过了很久	**часу**	自从我给你寄了叶子

表2展示了矩阵的相应片段，该矩阵表示奥列斯·冈察尔创作遗产诗学问题语料库中词语的共现情况。

表2

表示文本语料库中实体（词语）共同出现情况的矩阵片段

	…	同伴	…	职位	记者	Столяренко	…
同志		3		1	2	3	
同伴		0		1	1	2	
编辑		1		3	3	2	
Столяренко		2		2	0	0	
часу		1		0	0	1	

该矩阵片段显示，“同伴”和“同志”这两个词具有一定的相似度，因为“Столяренко”一词出现在这两个词的上下文窗口中。需要特别注意的是，此片段中的大多数值为零，而且整个矩阵都呈现这一趋势。因此，每个词的向量长度都等于文本语料库词典的大小，并且这些向量的大多数元素都为零。在奥列斯·冈察尔创作遗产诗学问题语料库的这一片段中，词典包含 15 000 个实体（即词）；而对于国家文本语料库，这一数值会增加到数千万。实际上，这类向量不仅因稀疏性而难以使用，词频的绝对值也不是衡量词语共现情况的特别有效指标[3]。实际应用中通常采用基于点互信息（英文 点互信息，*PMI*）或正 PPMI（英文 正点互信息）的度量及其变体，从而可以在矩阵单元格中记录相应的值，表明两个词共同出现的频率相较于它们彼此独立出现的频率有多高。构建的词向量表示可以通过比较词语的向量来评估它们的相似度。向量相似度可以用向量之间夹角的余弦来衡量，这种度量称为余弦相似度（英文 Cosine similarity）。图1展示了“记者”和“同伴”的向量，并标出了它们之间的夹角。向量之间的夹角越小，其余弦值就越大，与这些向量对应的词语也就被认为越相似。余弦相似度的取值范围为 –1 至 1：若值为 –1，则向量方向相反；若为 1，则向量重合（上下文完全相同）；若为 0，则向量正交（不存在相似的上下文）。此外，还有其他已知并在使用的相似度度量方法，但基于向量夹角余弦的度量应用最为广泛。

向量的维度较大且具有稀疏性，限制了它们在实践中的使用。为了降低向量的维度并减少其中的零元素数量，也就是压缩向量，人们开发了若干类方法。用于降低向量维度的一种经典方法是矩阵奇异值分解（英文 奇异值分解，*SVD*）。使用这种方法可以将向量维度降至 500 到 5000，但该方法需要执行大量额外计算，

对于某些任务，计算量甚至与使用完整的 PPMI 矩阵相当 [3]。



图1. 二维空间中的词向量表示

以这种方式获得的词向量表示了语义信息和句法信息，但仍存在许多问题，具体包括：矩阵规模庞大（$>10^6 \times 10^6$）且稀疏；难以进行修改（添加新词会导致矩阵规模增大，并需要重新计算矩阵元素）；执行奇异值分解的计算成本高。

使用词（总体而言，即词向量模型）的主要局限之一是，具有多个含义的词会被合并为同一种表示（语义空间中的同一个向量）。换言之，多义性和同形异义未得到妥善处理。例如，在句子“我昨天试过的俱乐部很棒！”中，不清楚“俱乐部”一词指的是什么：“多层三明治”、“棒球俱乐部”、“祈祷室”、“高尔夫球杆”，还是“俱乐部”可能具有的其他含义。需要将一个词的多种含义分别置于不同向量中（多义词嵌入，英文 多义词嵌入），这促使人们将单义嵌入拆分为多义嵌入。

1.2. Word2vec 语言建模的方法与工具。 近年来迅速发展的另一种方法，是使用神经网络进行自然语言建模。基于神经网络的语言模型无需计算和存储海量数据，而是可以预测实体——给定词的上下文词，并在预测过程中获取密集的词向量。Word2vec 是最知名

且广受欢迎的技术（一组方法和算法），托马斯·米科洛夫于2013年基于这种方法构建了该技术，并在 [4；5] 中介绍了理论与实践部分。图2展示了 Word2vec 的基本思想。给定一个篇幅较大的文本语料库，其中词典里的每个词都表示为一个向量。遍历语料库中的所有文本时，对于句子中每个词所在的位置，都会考察中心词（当前位置）及上下文词。根据中心词向量与上下文词向量之间的相似度，计算给定中心词对应的上下文词的概率。同样，也可以根据给定的上下文词计算中心词的概率。主要任务是为词选择合适的向量表示，以最大化这些概率。

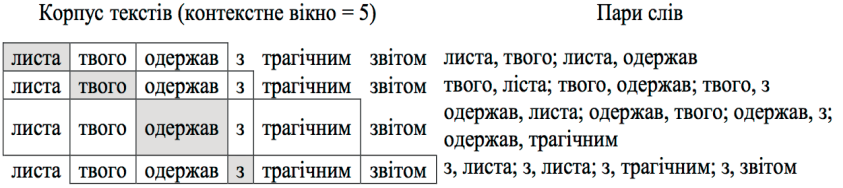


图2. 使用 Word2vec 处理文本语料库的示意图

需要指出的是，这里采用了以下假设：语料库中的文本彼此独立；每个词只依赖于其上下文中的词；上下文词彼此独立。最后一个假设被认为是 Word2vec 技术的缺点，因为该方法没有考虑词出现在中心词之前和之后时，其概率存在的差异。

预测通过使用神经网络实现。训练一个具有单个隐藏层的简单前馈神经网络（英文：前馈神经网络），但实际上使用该网络的目的另有不同。训练的目的是获得隐藏层的权重系数，这些系数就是词向量。

在 Word2vec 中，通过 CBOW 模型（英文 连续词袋，*CBOW*）和 Skip-gram [4；6] 实现了上述方法。

Skip-gram 模型可以为每个词获得两个独立的向量：一个是该词作为上下文窗口中心词时的向量，另一个是该词作为上下文词时的向量。这些向量构成两个矩阵：词矩阵和上下文矩阵，用于

求解预测任务。词矩阵的每一行都是文本语料库词典中某个词的向量，而在上下文词矩阵中，该词对应的向量则是相应的列。按顺序查看语料库中的词时，对于每个词，skip-gram 模型都可以预测其所在上下文窗口中的所有词，其中当前词是中心词。每个这样的预测都可以看作确定这两个词共同使用的概率。该概率的计算在于寻找两个向量的点积：中心词向量和上下文词向量。向量之间的点积值越大，它们彼此就越相似。由于向量之间的归一化点积就是向量之间夹角的角度余弦，因此使用它作为相似度度量。为了从向量的点积获得概率，使用归一化指数 softmax 函数。因此，skip-gram 模型可以通过计算两个词的向量之间的点积，并借助归一化指数函数 [7] 将其转换为概率，从而计算两个词同时出现的概率。上述方法存在一个很大的缺点：softmax 函数需要计算词典中每个词的向量与词典中所有其他词向量的点积。对于规模适当的语料库，直接完成这一计算实际上是不可能的。CBOW 模型不同于 skip-gram，它可以根据围绕当前中心词的上下文词来预测上下文窗口中的当前中心词。

词和上下文的向量通过无监督学习构建，其方法是最大化当前词的向量与其邻近词向量之间的相似度，同时最小化它与其他词向量之间的相似度。为求解上述预测任务，词的概率计算方法是：将词向量与上下文词向量的点积除以所有词向量点积之和。在 Skip-gram 中，为避免计算分母时求取数量庞大的点积，会采用带负采样的 Skip-gram 变体（英文 负采样），近似计算分母 [8]。

在训练阶段遍历语料库中的词时，会为每个词选取上下文中的词作为正例，并为每个正例选取一定数量的噪声样本或负例——即不是当前词邻居的词。具体而言，假设负例数量为

两个，那么对于每一对“词—上下文词”，都会为每个上下文词选取两个噪声词。例如，在遍历表3中的下一个例句时，对于当前词“вклали”，如果上下文窗口还包含该词左侧两个词和右侧两个词，则会选取六个负例。

训练过程从随机生成值的矩阵开始。遍历语料库时，这些矩阵中的值不断变化，以获得中心词的向量，使其与每个上下文词的向量的点积尽可能大。此外，还需要使噪声词的向量与当前词向量的点积较小。这样便生成了向量。训练结束后得到的向量表示词语的语义信息和句法信息。

表3

负采样词的构建

语料库	我收到你的信，读完后仔细思索 整整一个晚上；我想起了这样一件事
词典	收到，我，叶子，你的，读完，想了，整整， 晚上，我，想起了，事实
词语配对 — 词-文本	收到（信，你的，我）——收到，信；收到， 你的；收到，我的信（你的，收到，我，读过——了）——你的，收到；读过，信；收到，我；我，读过
负采样	收到，傍晚；收到，想起；你的，我.....

word2vec 技术的优势在于计算效率高。其程序代码可自由访问，模型训练快速高效，并且已有多种语言的词向量表示可供使用。

已知以下用于构建向量表示的方法和算法实现：

– Word2vec 原始实现；实现语言为 C 语言；可通过链接 [5] 下载；

– Medallia/Word2VecJava，实现语言为 Java；可通过链接 [9] 下载；

– Spark MLLib Word2Vec；实现语言为 Java，可通过引用 [10] 下载；

– Gensim Word2vec、FastText 库，实现语言为 Python，可通过引用 [11] 下载；

– 谷歌的 TensorFlow Word2vec；实现语言为 Python；可通过链接 [12] 下载；

– FastText 库；实现语言为 C 语言++，可通过链接 [13] 下载。

1.3. fastText 语言建模方法与工具。由 Facebook 人工智能研究实验室（英文 *Facebook*人工智能研究实验室，*FAIR*）创建的 fastText 库，是自然语言分布语义学模型发展过程中的又一重要进展（用于训练词嵌入和文本分类）。托马斯·米科洛夫也参与了它的开发，他正是我们在 Word2vec 中已经认识的人。fastText 算法基于 [14, 15] 的研究成果。词向量化同时使用 Skip-gram 算法、负采样算法和连续词袋 CBOW 算法。

在 Word2Vec 基础模型中加入了所谓的字符 n元语法模型。每个词都表示为若干个特定长度的字符序列的组合。例如，词 they 根据超参数的不同，可以由 th、he、ey、the、hey 组成。本质上，词向量就是其所有 n元语法的总和。

为了获取词 w_i 在此文件集合中的词向量，引入成绩函数 $s(w, w_i)$。该函数计算字符 n元语法的总和，并将其乘以周围的词 $w_{i-2}, w_{i-1}, w_{i+1}, w_{i+2}, \ldots \in c$ 词 w_i。上下文词的数量 w_i 由 Skip-gram 输出窗口的长度决定。Skip-gram 版 fastText 计算条件概率 [14] $p(w_c \mid w_t)$

$$p(w_c \mid w_t) = \frac{e^{s(w_t, w_c)}}{\sum_{i=1}^{N} e^{s(w_t, w_i)}},$$

将 $u_{w_t}^T v_{w_c}$ 的标量乘积结果替换为 $s(w, w_c)$。令 G 为 n 元语法词典，$G_{w_i} \subset 1 \ldots G$ 是词 w_i 的字符 n 元语法数组。那么，结果 [14] $s(w_t, w_c) = \sum z_g$ 对每个.....定义 $g \in G_{w_c}$ 上下文词的 w_c。fastText 不使用单词的独热编码向量，而是用字符 n 元语法集合来预测上下文词。所有向量 z_g 其中 $g \in G_{w_i}$ 都是词 w_i 的字符 n 元语法嵌入。它们的集合构成词 w_i 的表示/嵌入。由于大型语料库中 n 元语法的总集合非常庞大，因此使用字符 n 元语法的哈希版本作为输入信息。

fastText 在自然语言处理任务（如语义分析或标签分类）中的准确率，在最先进的方法中名列前茅。

1.4. fastText 与 Word2vec 模型的区别。 fastText 模型是 Word2vec 技术的进一步发展，也能构建向量表示。fastText 基于 Skip-gram 模型，该模型在 Word2vec 中实现。fastText 模型与 Word2vec 的主要区别在于：Word2vec 将语料库中的每个词单独视为一个原子对象，并为其构建向量；而 fastText 模型将每个词视为由该词的字符 n-gram 组成的集合。因此，词向量由构成该词的各个 n-gram 的向量之和构成。例如，当 n-gram 的最小长度为 3、最大长度为 5 时，词语“то-вариш”的向量由以下 n-gram 的向量之和构成：“^то”、“тов”、“ова”、“вар”、“ари”、“иш^”、“^тов”、“това”、“овар”、“вари”、“риш^”、“^това”、“товар”、“овари”、“ариш^”。

fastText 模型与 Word2vec 模型相比，可以：

• 为不常用的词生成更好的词向量。即使某个词在语料库中很少出现，构成它的 n 元语法也可能更频繁地作为其他词的一部分出现，因此可以生成更好的向量。如果使用 Word2vec 构建向量，那么不常用的词（例如，在语料库中出现 5 次）相比更常见的词，拥有的邻近词更少。后者的上下文窗口中包含更多词，因此能够为该词构建更好的向量。

• 为语料库中未出现的词构建向量。这类词的向量由字符 n-gram 组成，而这些字符 n-gram 是语料库中已有其他词的一部分。

• 为形态丰富的语言构建词向量。使用 n 元语法能够为词的整个形态范式生成更精确的向量。

使用 fastText 模型时，参数的选择非常重要，尤其是 n 元语法的最小和最大长度，因为这会影响语料库的大小。由于词向量是通过在 n 元语法层面进行训练来构建的，因此与 Word2vec 相比，所需时间成本会增加。

1.5. 分布语义学预测模型的应用程序。 现代向量模型能够计算词、句子或文件之间的语义相似度，而这些能力正是其用于求解自然语言处理任务的基础。

这些能力使其得以用于求解自然语言处理任务。分布语义学预测模型直接用于解决与自然语言文本语义建模相关的广泛任务，包括：

– 识别词、词组和文本之间的语义相似度；

– 命名实体识别；
– 词的形态分析；
– 根据词、词组和文本的语义相似程度进行自动分类/集群化；

– 自动生成 ерація т词库 以及双语 сло者；
– 解决 ле词义的 ео歧义；
– 借助关联关系扩展请求；
– 确定文本主题；
– 用于信息搜寻的文本文件分类/集群化；

– 从非结构化来源（文本文件）中获取知识；

– 自动构建任意学科领域的语义图谱；

– 确定文本和陈述的情感倾向；
– 对词语筛选约束进行建模。

此外，利用向量表示还可以解决文本生成、机器翻译、释义识别和文本建模等任务。

在近期已知的向量表示应用中，值得一提的是 [16; 17], 这些工作利用向量模型解决机器翻译任务。研究展示了如何在不使用平行文本语料库的情况下构建翻译用（英文 双语词典）双语词典。此类词典通过无监督学习实现向量空间对齐来构建。研究为十二种语言对开发了质量相当高的词典，其中部分语言对的准确性超过 60 %。研究还指出，人工生成的词典能够成功处理语言对中的词语多义性。向量空间通过搜寻两个语言各自独立的向量模型之间的映射来对齐。作者以图 3 所示的方式，对这一过程进行了示意说明。

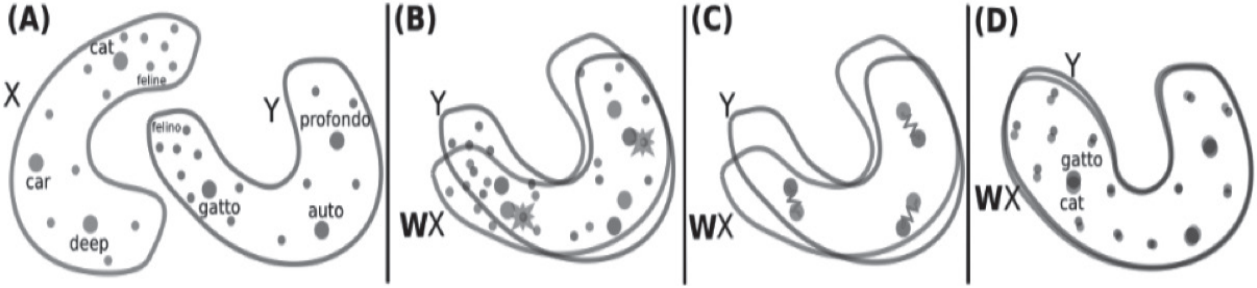


Рис. 3. Схема вирівнювання векторних просторів

对齐是在两个基于 fastText 模型构建的向量空间之间进行的，该模型使用维基百科作为训练语料库（A）。构建翻译词典时，只使用频率最高的 200000 个词向量。图 3 中，每个词都以一个点表示，点的大小表示该词在语料库中的频率。接下来，搜寻旋转矩阵 W，以预先对齐两个空间（B）。再搜寻一种依赖关系，使语料库中使用频率较高的词彼此“靠近”，从而改善对齐效果（C）。找到的映射和额外的度量使词语翻译成为可能（D）。

在通过向量表示构建的翻译词典中，也有乌克兰语—英语词典和英语—乌克兰语词典。这两部词典分别收录了 40722 和 47912 个词对。由于此前尚未以这种方式编纂过翻译词典，因此需要开展进一步研究来评估其质量。初步分析通过检查这些词典中的词是否收录于 VECУM 项目词典——乌克兰语大型电子词典 [18]——完成。结果发现，乌克兰语—英语词典中有 30.7%（12512）个词未收录于 BECУM 词典，而英语—乌克兰语词典中这一比例上升至 48%（19633）。这些结果在一定程度上可以用乌克兰语—英语词典和英语—乌克兰语词典中有大量以小写字母书写的专有名称来解释。

2. 开发用于使用自然语言实体向量表示分布语义模型的网络工具（Web 服务）——UkrVectōrēs。网络工具 UkrVectōrēs 根据所选的实体向量表示分布语义模型，计算乌克兰语实体之间的语义关系。UkrVectōrēs 是一种自然语言分布分析工具，也就是一种自然语言研究方法，通过研究文本中各个实体的环境（分布），而不使用有关这些实体完整词汇或语法意义的信息。一般而言，分布分析以自然语言实体（如词或词组）为研究对象，并以其为基础。

在这种方法中，对自然语言文本应用一组有序的通用程序，从而提取语言的基本单位（音位、语素、词、词组

搭配），对其进行分类，并确定它们之间的语义相似关系。

2.1. UkrVectōrēs 的用途和网络工具功能。网络工具 UkrVectōrēs（以带有应用程序编程接口（英文 应用程序编程接口，应用程序编程接口）的网络服务形式提供）是一种工具，可借助用于自然语言处理和数学建模的开源软件库 gensim [11; 19–21]，研究分布语义预测模型中的词语语义关系（该库包含用于处理 Word2vec、fastText 等算法的应用程序编程接口）。

可以形象地将网络工具 UkrVectōrēs 称为“语义计算器”。用户可以选择一个或多个精心准备的分布语义预测模型（也可以使用自己的乌克兰语词语向量表示模型），这些模型是在不同的文本船体上训练的，尤其包括以下数据集（英文 数据集）：

– 奥列斯·冈察尔创作遗产的诗学问题；
– 文学作品；
– 瓦西里·苏霍姆林斯基的《我把心交给孩子们》。

UkrVectōrēs 网络工具涵盖分布语义分析的以下元素：

• 根据所选的分布语义预测模型，计算词语对之间的语义相似度/接近度；

• 在所选的分布语义预测模型中，查找与给定词语最接近的词（可按字母顺序和余弦相似度/接近度系数筛选），即计算语义关联词。词语的余弦接近度系数取值范围为 [–1...1]。如果实体——词语的余弦相似度/接近度系数取值范围为 [–1...0,5], ，则表明数据集中缺少相似的上下文，词语的语义接近度最低。如果实体——词语的余弦相似度/接近度系数取值范围为 [0,5...1], ，则表明数据集中存在相似的上下文，词语的语义接近度较高。余弦相似度/接近度系数越接近 1，词语的语义接近度越高，数据集中相似的上下文也越多；

• 对词向量执行代数运算（加法、减法、搜寻词汇集群的中心以及到

该中心的距离），在所选分布语义预测模型的框架内；

• 生成词语间关系的语义图（使用开源软件工具 TensorFlow [12], , 具体来说是 TensorBoard [22]），以发现语义簇或在此类集群上检验假设；

• 获取向量（以数字数组的形式），并将所选分布语义预测模型中指定词语的向量可视化；

• 从列表中选择并下载分布语义预测模型，以供后续使用；

• 通过设置配置文件，使用其他可自由分发的分布语义预测模型。

2.2. UkrVectōrēs 网络工具的软件依赖关系。

– Python 3.8.6 [23] —解释器和标准库；

– gensim [11；19–21] —用于自然语言高级处理和数学建模的开源软件库；

– Flask [24] —用于 Web 应用程序的微框架；

– Flask-CORS [25] —用于处理跨源资源共享的 Flask 扩展（英文 *Cross-Origin Resource Sharing，CORS*）；

– uWSGI [26] —Web 服务器和 Web 应用服务器，最初用于通过 WSGI 协议（及其二进制变体 uwsgi）运行 Python 应用程序；

– Pandas [27] — 一款为 Python 编程语言编写的软件库，用于操作和分析数据。它特别提供用于操作数值表格和时间序列的数据结构及操作；

– nginx [28] — 一款自由 Web 服务器和代理服务器；

– Angular [29] —一种使用 TypeScript 编写的开源前端框架，用于开发单页应用（英文 *Single-page application, SPA*）。在软件工程中，术语“前端”和“后端”分别根据表示层与数据访问层之间的职责分离原则加以区分。前端是用户与后端之间进行交互的界面。前端和后端可以分布在一个或多个系统之间。在软件架构中，硬件与最终用户之间可能存在多个层。这些层中的每一层都可以同时具有前端和后端。前端是用于

硬件与最终用户之间的抽象层，通过提供便捷的界面，使用户能够与SPA 进行交互。

2.3. UkrVectōrēs 网络工具的架构组织

2.3.1. UkrVectōrēs 网络工具的网络服务应用程序接口描述（back- end API）。开发者可通过 API 端点（英文 *API endpoints*）访问服务，端点列于表4。

表4

UkrVectōrēs 网络工具的 API 端点

	API 端点	服务	HTTP 请求方法
S1	主机 [:端口] /api/word2vec/ 相似度	语义计算 相似度/接近度之间 在所选分布式 语义模型的词语 语义模型	POST
S2	主机 [:port] /api/word2vec/similar	语义计算 给定词的联想词 在所选 分布式语义 模型中	POST
S3	主机 [:port] /api/word2vec/center	计算词汇 集群中心 在所选分布 语义模型框架内	POST
S4	主机 [:port] /api/models	可访问列表的定义 供使用的分布式- 分布语义的 模型	GET
S5	主机 [: 端口]/	图形界面 用户单页 应用程序 UkrVectōrēs	GET

S1 — 在所选分布语义模型框架内计算词对之间的语义相似度/接近度的服务。

输入数据说明。

输入数据应为包含文本字段 词_*1*、词_*2* 以及数值字段 模型 的 JSON 结构。所选分布语义模型下用于计算词对之间语义相似度/接近度的服务的完整输入数据 JSON 模式见图4。

使用 HTTP 请求的 POST 方法。使用 Fetch API 以 JavaScript 编程语言向 S1 服务端点发送 POST 请求的示例[30] 见图5。

输出数据描述。

输出数据为一种专用 JSON 结构，其中包含数值字段 相似度，对应于余弦相似度/接近度系数。所选分布语义模型下词对之间语义相似度/接近度计算服务的完整输出数据 JSON 模式如图 6 所示。

S2 是在所选分布语义模型下，为给定词计算语义关联词的服务。

输入数据描述。

输入数据应为一种 JSON 结构，其中包含文本字段 词 和数值字段 模型。所选分布语义模型下为给定词计算语义关联词的服务的完整输入数据 JSON 模式如图 7 所示。使用 POST HTTP 请求方法。使用 JavaScript 编程语言和 Fetch API 向 S2 服务端点发送 POST 请求的示例 [30] 如图 8 所示。

输出数据描述。

输出数据是一种专用 JSON 结构，其中包含 *similar* 字段，该字段是一个数组的数组（数组元素包含文本字段和数值字段），用于表示所选分布语义模型中给定词的语义关联词及其余弦相似度/接近度系数。所选分布语义模型中给定词的语义联想词计算服务的完整输出数据 JSON 模式见图9。

S3 — 所选分布语义模型中的词语词汇簇中心计算服务。

输入数据说明。

输入数据应为 JSON 结构，其中包含 *words* 字段（表示文本元素数组）和数值字段 *model*。在所选分布式语义模型范围内，用于计算词汇簇中心的服务输入数据完整 JSON 模式如图10所示。使用 HTTP 请求方法 POST。图11展示了使用 JavaScript 编程语言和 Fetch API [30] 向 S3 服务端点发送 POST 请求的示例。

```
{
   "$schema": "http://json-schema.org/draft-07/schema",
   "$id": "http://example.com/example.json",
   "type": "object",
   "title": "根模式"          ,
   "description": “用于计算词对之间语义相似度/接近度的服务输入数据模式
слів
在所选分布语义模型的框架内。",
   "默认值": {},
   "示例": [
      {
         "word_1": "Гончар",
         "word_2": "письменик",
         "模型": 0
      }
   ],
   "必需": [
      "word_1" ,
      "word_2" ,
      "模型"
   ],
   "属性": {
      "word_1": {
         "$id": "#/属性/word_1",
         "type": "字符串",
         "title": "word_1 架构"     ,
         "description": “用于在所选分布语义模型中进行比较的词元。”,
         "default": "" ,
         "examples": [
            "Γончар  "
         ]
      },
      "word_2": {
         "$id": "#/属性/word_2",
         "type": "字符串",
         "title": "word_2 模式"     ,
         "description": "用于在所选分布语义模型中进行比较的词元。",
         "默认值": "" ,
         "示例": [
            "письменик"
         ]
      },
      "模型": {
         "$id": "#/properties/model",
         "类型": "整数",
         "标题": "模型模式"          ,
         "描述": “所选分布语义模型的索引。模型索引包含在
配置文件 config.models.simple.json”中,
         "默认值": 0  ,
         "示例": [
            0
         ]
      }
   },
   "additionalProperties": true
}
```

图4 – 用于计算词对之间语义相似度/接近度的服务输入数据 JSON 模式

图4. 词对之间语义相似度/接近度计算服务的输入数据 JSON 模式

```
var myHeaders = new Headers();
myHeaders.append("内容类型", "JSON应用类型");

var raw = JSON.stringify({"word_1": "Гончар", "word_2": "письменик", "模型": 0});
var myHeaders = new Headers();
myHeaders.append("内容类型", "JSON应用类型");
var requestOptions = {
var raw = JSON.stringify({"word_1": "Гончар", "word_2": "письменик", "模型": 0});
  headers: myHeaders,
var requestOptions = {
  body: raw,
  method: 'POST',
  redirect: 'follow'
};
  headers: myHeaders,
  body: raw,
  redirect: 'follow'
fetch("host[:port]/api/word2vec/相似度", requestOptions)
};.then(response => response.text())
  .then(result => console.log(result))
fetch("host[:port]/api/word2vec/相似度", requestOptions)
  .catch(error => console.log('error', error));
  .then(response => response.text())
var formData = new FormData();
  .then(result => console.log(result))
var fileField = document.querySelector("input[type="file"]");
  .catch(error => console.log('error', error));
var formD     ata =
变量文件字段 d = document.querySelector("input[类型=文件]");
```

图5. 向 S1 服务端点发送 POST 请求的示例

图5. 向 S1 服务端点发送 POST 请求的示例

图5. 向 S1 服务端点发送 POST 请求的示例

```
{
    "$schema": "http://json-schema.org/draft-07/schema
```

```
{ "$schema": "http://json-schema.org/draft-07/schema", "$id": "
http://example.com/example.json", "type": "object", "title": "根模式", "description": "用于所选分布语义模型中词对之间语义相似度/接近度计算服务的输出数据模式。", "default": {}, "examples":
                [ { "similarity": 0939421488228 . }    ], "required":                [ "similarity"    ], "

properties": { "similarity": { "$id": "#/properties/similarity", "type": "number", "title": "相似度模式", "description": “词对之间的余弦相似度/接近度系数

在所选分布语义模型的框架内。”,
    , "examples": [

        0.939421488228
      ]
    }
  },
  "additionalProperties": true
}
```

图6. 计算词对之间语义相似度/接近度的服务的输出数据 JSON 模式

图6. 计算词对之间语义相似度/接近度的服务的输出数据 JSON 模式

```
{
    "$schema": "http://json-schema.org/draft-07/schema",
    "$id": "http://example.com/example.json",
    "type": "object",
    "title": "根模式"              ,
    "description": “给定词语的语义联想词计算服务输入模式
在所选分布语义模型的框架内。",
    "default": {},
    "examples": [
        {
            "word": "Гончар",
            "model": 0
        }
    ],
    "required": [
        "词"    ,
        "模型"
    ],
    "属性": {
        "词": {
            "$id": "#/properties/word",
            "类型": "字符串",
            "标题": "单词模式"           ,
            "描述": "用于搜寻语义关联词的词元
在所选分布语义模型范围内。",
            "默认值": "",
            "示例": [
                "Гончар  "
            ]
        },
        "模型": {
            "$id": "#/properties/model",
            "type": "integer",
            "title": "模型模式"             ,
            "description": "所选分布语义模型的索引。模型索引位于
配置文件 config.models.simple.json 中。",
            "default": 0   ,
            "examples": [
                0
            ]
        }
    },
    "additionalProperties": true
}
```


图 7 – 给定词语的语义联想词计算服务输入数据 JSON 模式

图7. 用于指定词的语义联想词计算服务输入数据的 JSON 模式

输出数据说明。

输出数据是一种专用 JSON 结构，其中包含 *center* 字段，该字段是一个数组的数组（数组元素包含文本字段和数值字段），用于表示所选分布语义模型下词语词元集群中心的语义关联词，以及与该中心的余弦相似度/接近度系数。所选分布语义模型下用于计算词语词元集群中心的服务，其完整输出数据 JSON 模式如图 12 所示。

```
var myHeaders = new Headers();
myHeaders.append("内容类型", "JSON应用类型");

var raw = JSON.stringify({"词": "Тончар", "模型": 0});

var requestOptions = {
  method: 'POST'   ,
  请求头:  myHeaders,
  请求体:  raw,
  重定向:  'follow'
};

fetch("host[:port]/api/word2vec/similar", requestOptions)
  .then(response => response.text())
  .then(result => console.log(result))
  .catch(error => console.log('错误', error));
var formData = new FormData();
var fileField = document.querySelector('input[type="file"]');
```

图 8 – 向 S2 服务端点发送 POST 请求的示例
图8. 向 S2 服务端点发送 POST 请求的示例

S4 — 用于确定可使用的分布语义模型列表的服务。

输入数据说明。

输入数据应为普通的空 HTTP GET 请求。图13展示了使用 Fetch API [30] 通过 JavaScript 编程语言向 S4 服务端点发送 GET 请求的示例。

输出数据说明。

输出数据为专用 JSON 结构。用于确定可供使用的分布式语义模型列表的服务，其完整输出数据 JSON 方案见附录 d1。

S5 — UkrVectōrēs 单页应用的图形用户界面服务。默认情况下，UkrVectōrēs 网络工具的图形用户界面服务可通过相应主机地址上的相应端口，使用 HTTP GET 请求方法访问。UkrVectōrēs 单页应用的图形用户界面单独开发，并根据领域和要解决的任务，通过 API 端点调用已开发的服务。

2.3.2. UkrVectōrēs 单页应用的图形用户界面ōrēs。下面将介绍用户使用 UkrVectōrēs 单页应用图形界面的方法，尤其是如何使用自然语言文本分布式语义分析的各项函数（元素）。

```
{
  "$schema": "http://json-schema.org/draft-07/schema", "$id": "http://example.com/example.json", "类型":
"object", "标题": "根模式", "描述": “所选分布语义模型下，给定词的语义联想词计算服务输出数据的模式
在所选分布语义模型中为给定词生成联想词。”,
  "示例": [
    {
      "相似": [              [
          "乌克兰语", 0.9999048709869385
        ]        ]     }
  ],
  "required": [
    "相似"
  ],
  "属性": {
    "相似": {
      "$id": "#/properties/similar", "type": "数组", "title": "相似模式", "description": “数组的数组
(数组元素包含文本字段和数值字段)语义关联词及余弦相似度
度/邻近度系数，用于所选分布语义模型中的给定词。",
      "示例": [
        [              [
          "乌克兰语", 0.9999048709869385
        ]              ]          ],
      "项": {
        "$id": "#/properties/相似/项",
        "anyOf": [
          {
            "$id": "#/properties/相似/items/任一/0",
            "type": "array",
            "title": "第一个任一模式",
            "examples": [
              [
                "乌克兰语", 0.9999048709869385
              ]
            ],
            "项": {
              "$id": "#/属性/相似/项/任一/0/项",
              "任一": [
                {
                  "$id": "#/属性/相似/项/任一/0/项/任一/0",
                  "类型": "字符串", "标题": "第一个任一模式",
                  "description": “所选范围内给定词的语义关联词元】【。
分布语义模型中的给定词的语义关联词元。”,
                  "examples": [
                    "українс斯基"
                  ]
                },
                {
                  "$id": "#/属性/相似/项/任一/0/项/任一/1",
                  "type": "number", "title": "第二个任一模式", "description": "系数
语义关联词在所选分布式.....框架内与给定词的余弦相似度/接近度
语义模型。",
                  "examples": [
                    0.9999048709869385
                  ]     } ]      } } ]       } } },
}
```


图 9 – 给定词的语义联想词计算服务输出数据 JSON 模式

图 9. 用于计算给定词语义关联词的服务的输出数据 JSON 模式

```
{
   "$schema": "http://json-schema.org/draft-07/schema",
   "$id": "http://example.com/example.json",
   "type": "object",
   "title": "根模式"          ,
   "description": “所选范围内词语词元词汇集群中心计算的输入数据模式
分布语义模型",
   "默认值": {},
   "示例": [
      {
         "词": [
            "奥列斯" ,
            "Гончар  ",
            "作家"
         ],
         "模型": 0
      }
   ],
   "必需": [
      "词"     ,
      "模型"
   ],
   "属性": {
      "words": {
         "$id": "#/properties/words",
         "type": "数组",
         "title": "词语模式标题"    ,
         "description": “用于计算所选分布语义模型中词汇集群中心的文本元素（词语词元）数组
在所选分布语义模型的框架内。”,
         "默认值": [],
         "示例": [
            [
               "奥列斯" ,
               "Гончар  "
            ]
         ],
         "模型": {
         "$id": "#/属性/model",
         "类型": "整数",
         "标题": "模型模式"          ,
         "描述": "所选分布语义模型的索引。模型索引位于
配置文件 config.models.simple.json 中。",
         "默认值": 0  ,
         "示例": [
            0
         ]      } }
}
```

图10 – 词语词元词汇集群中心计算的输入数据 JSON 模式

图10. 计算词汇集群中心的输入数据 JSON 模式

在所选分布语义模型框架内计算给定词的语义关联词。使用此函数需要：

使用最新版 Google Chrome、Mozilla Firefox 或 Microsoft Edge 网页浏览器启动 UkrVectōrēs 单页应用的图形界面。为此，在网页浏览器的地址

栏中输入引用：https:// ukrvectores.ai-service.ml/（引用可能有所不同，具体取决于 UkrVectōrēs 网络工具的部署特点），然后在主菜单中选择工作制度“语义关联”（图14）；

```
var myHeaders = new Headers();
myHeaders.append("内容类型", "JSON应用类型");
var myHeaders = new Headers();
var raw = JSON.stringify({"words": "奥列斯", "Гончар", "作家", "模型": 0});
myHeaders.appeпd("内容类型", "JSON应用类型");

var requestOptions = {
var raw = JSON.stringify({"词": "奥列斯", "Гончар", "作家", "模型": 0});
  method: 'POST',
  headers: myHeaders,
var requestOptions = {
  方法: 'POST'
    redirect:
myHeaders, 正文:
'follow',
};
raw, 重定向: '跟随'

fetch("host[:port]/应用程序编程接口/word2vec/center", requestOptions)
};
  .then(response => response.text())
  .then(result => console.log(result))
fetch("host[:port]/应用程序编程接口/word2vec/center", requestOptions)
  .catch(error = console.log('error', error));
  .then(result = console.log(result))
var fo
  .catch(error => console.log('错误', error));
var formData = new FormData();
var fileFie  ld = document.querySelector('input[类型="file"]')
变量 requestOptions =
method: 'GET'
```

图11 – 向 S3 服务端点发送 POST 请求的示例

图 11. 向 S3 服务端点发送 POST 请求的示例

图11 – 向 S3 服务端点发送 POST 请求的示例

```
var requestOptions = {
  method: 'GET',
  redirect:
'follow'
};

fetch("host[:port]/api/word2vec/models", requestOptions)
  .then(response => response.text())
  .then(result => console.log(result))
  .catch(error => console.log('error', error));
```

图13 – 向 S4 服务端点发送 GET 请求的示例

图13. 向 S4 服务端点发送 GET 请求的示例

通过名为“模型”的组件下拉列表 *select*（图 15）选择所需的分布语义模型，以计算语义关联词（通常情况下，默认使用“奥列斯·冈察尔”神经词向量表示模型（使用数据集——奥列斯·冈察尔创作遗产的诗学问题），维度为 500d 的 word2vec 词嵌入算法。实体为词，经过词形还原并转换为小写。word2vec 参数：-size 500 -negative 5 -window 5 -threads 24 -min_count 10 -iter 20）；

```
{
    "$schema": "http://json-schema.org/draft-07/schema",
    "$id": "http://example.com/example.json",
    "type": "object",
    "title": "根模式"          ,
    "description": “词汇簇中心计算服务输出数据模式，在
所选分布语义模型。”,
    "默认值": {},
    "示例": [
        {
            "center": [
                [
                    "український" ,
                    0.8037014603614807
                ]
            ]
        }
    ],
    "required": [
        "中心"
    ],
    "属性": {
        "中心": {
            "$id": "#/properties/center",
            "类型": "数组",
            "标题": "中心模式"          ,
            "description": "数组的数组（数组元素包含文本字段和数值字段）语义
联想词：词语的词汇集群中心，以及与该中心的余弦相似度/邻近度系数
在所选分布语义模型中，词语的词汇集群。",
            "default": [],
            "examples": [
                [
                    [
                        "українс斯基",
                        0.8037014603614807
                    ]
                ]
            ],
                        ]
                    }
                }
            ]
        }
    }
}
```


图12 – 词汇簇中心计算服务输出数据 JSON 模式

图12. 词汇簇中心计算服务输出数据 JSON 模式

在名为“输入词元”的组件 *intput* 输入框中，填写要计算其语义关联词的词元（例如图 14 所示的 Гончар），然后按键盘上的“Enter”键或点击“计算”按钮；

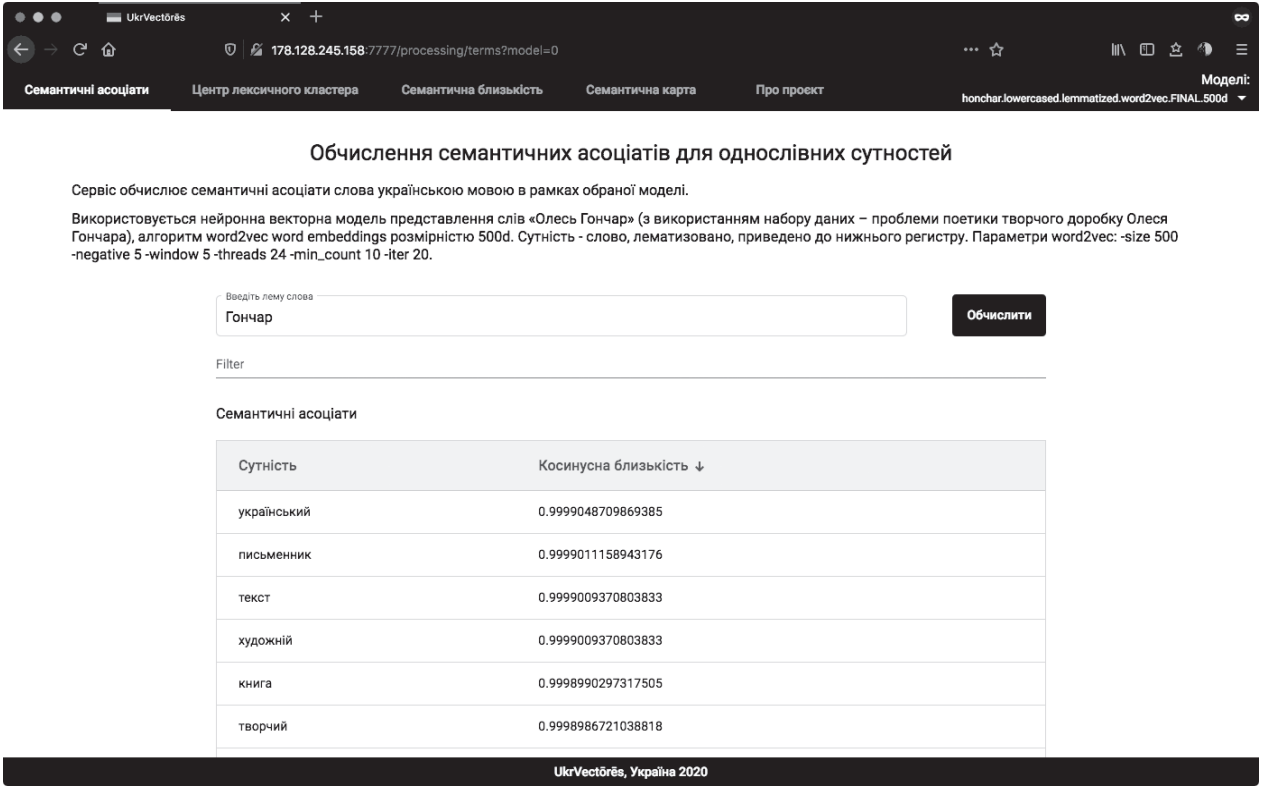


Рис. 14. Графічний інтерфейс односторінкового застосунку UkrVectōrēs (режим роботи «Семантичні асоціати»)

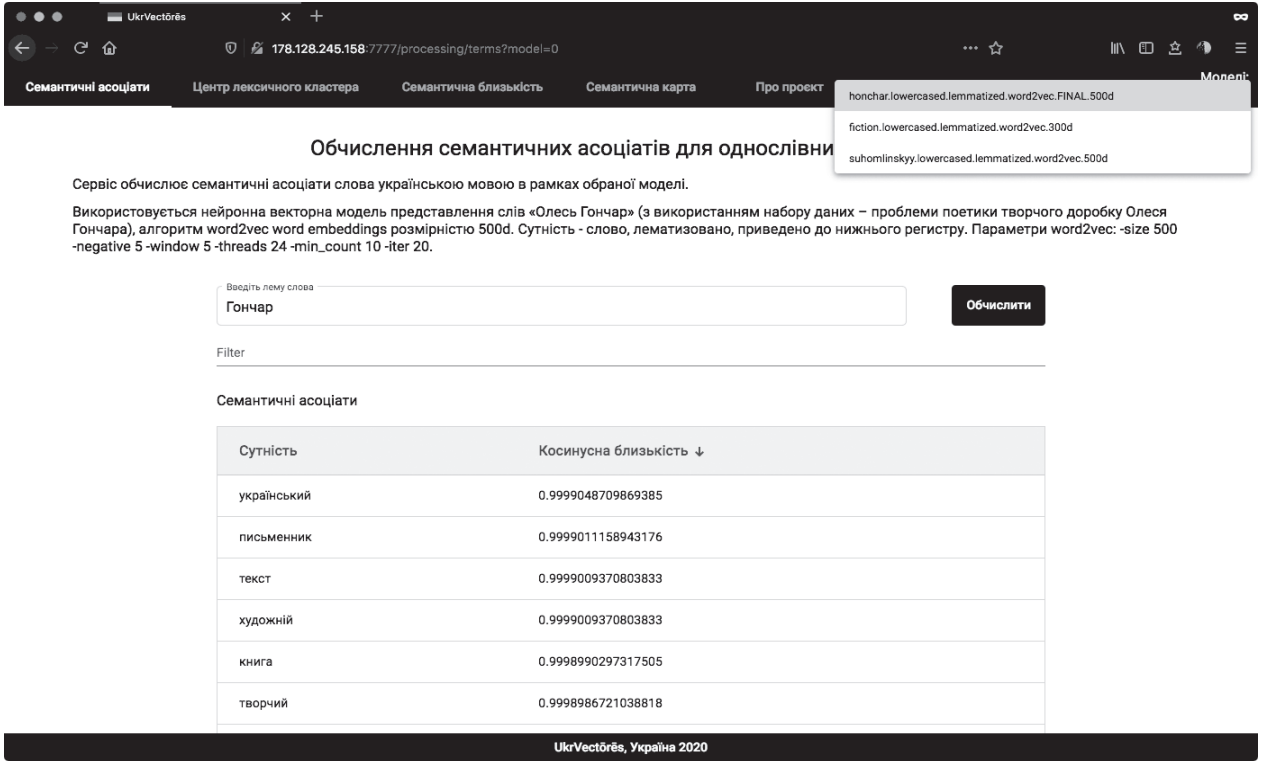


Рис. 15. Графічний інтерфейс односторінкового застосунку UkrVectōrēs (режим роботи «Семантичні асоціати», компонент *select* під назвою «Моделі»)

1. 屏幕上将显示所选分布语义模型“奥列斯·冈察尔”中给定词元「Гончар」的语义关联词（默认按余弦相似度/接近度系数降序显示前100个关联词）（图14）；

2. 使用“实体”元素，用户可以选择按字母顺序显示语义关联词（图16）；

3. 使用“余弦相似度”元素，用户可以选择按余弦相似度/接近度系数（升序或降序）显示语义关联词（图17）。

计算所选分布语义模型中词对之间的语义相似度/接近度。要使用此函数，需执行以下操作：

1. 使用最新版本的 Google Chrome、Mozilla Firefox 或 Microsoft Edge 网页浏览器，启动 UkrVectōrēs 单页应用的图形界面。为此，请在网页浏览器的地址栏中输入链接：https://ukrvectores.ai-service.ml/（链接可能有所不同，具体取决于 UkrVectōrēs 网络工具的部署方式），并在主菜单中选择“语义邻近度”工作模式（图18）；

2. 使用“模型”标题下的 *select* 组件下拉列表（图19），选择所需的分布语义模型，以计算词对之间的语义相似度/接近度 ——即余弦相似度/接近度系数（通常情况下，默认使用“奥列斯·冈察尔”神经词向量表示模型（使用的数据集为奥列斯·冈察尔创作作品的诗学问题），维度为 500d 的 word2vec 词嵌入算法。实体为词，已进行词形还原并转换为小写。word2vec 参数：-size 500 -negative 5 -window 5 -threads 24 -min_count 10 -iter 20）；

3. 在标题为“输入要比较的词语词元”的组成部分 *intput* 字段中，输入需要计算语义相似度/接近度（即余弦相似度/接近度系数）的词语词元（例如 Гончар 和作家，如图18所示），然后按“Enter”键或点击“计算”按钮；

4. 屏幕上（图18）将显示所选分布语义模型“奥列斯·冈察尔”中指定词语词元“Гончар”和“作家”的余弦相似度/接近度系数；

计算所选分布语义模型中词语词元集群的中心。要使用此函数，需：

1. 使用最新版 Google Chrome、Mozilla Firefox 或 Microsoft Edge 网页浏览器，启动 UkrVectōrēs 单页应用的图形界面。为此，需在网页浏览器的地址栏中输入链接：https://ukrvectores.ai-service.ml/（链接可能有所不同，具体取决于 UkrVectōrēs 网络工具的部署方式），然后在主菜单中选择“词汇聚类中心”工作模式（图20）；

2. 使用“模型”标题下的 *select* 组件下拉列表（图21），选择所需的分布语义模型，以便据此计算词汇集群中心（通常情况下，默认使用“奥列斯·冈察尔”神经词向量表示模型（使用的数据集为奥列斯·冈察尔创作作品的诗学问题），模型为 500d 的 word2vec 词嵌入算法。实体为词，已进行词形还原并转换为小写。word2vec 参数：-size 500 -negative 5 -window 5 -threads 24 -min_count 10 -iter 20）；

3. 在名为“用空格输入词元”的组件 *intput* 字段中，用空格输入所需的词语词元，以计算其词汇簇中心（例如“冈察尔 作家 英雄”，如图20所示），然后按“Enter”键或点击“计算”按钮；

4. 屏幕上（图20）将显示构成所输入词语词元词汇簇中心的词元（默认按余弦相似度/与词汇簇中心的接近程度系数从高到低显示前100个联想词），这些词元对应于所选分布语义模型“奥列斯·洪恰尔”中的词元“冈察尔”；

5. 使用“实体”元素，用户可以选择按字母顺序映射构成给定词语词元词汇簇中心的语义关联词（图22）；

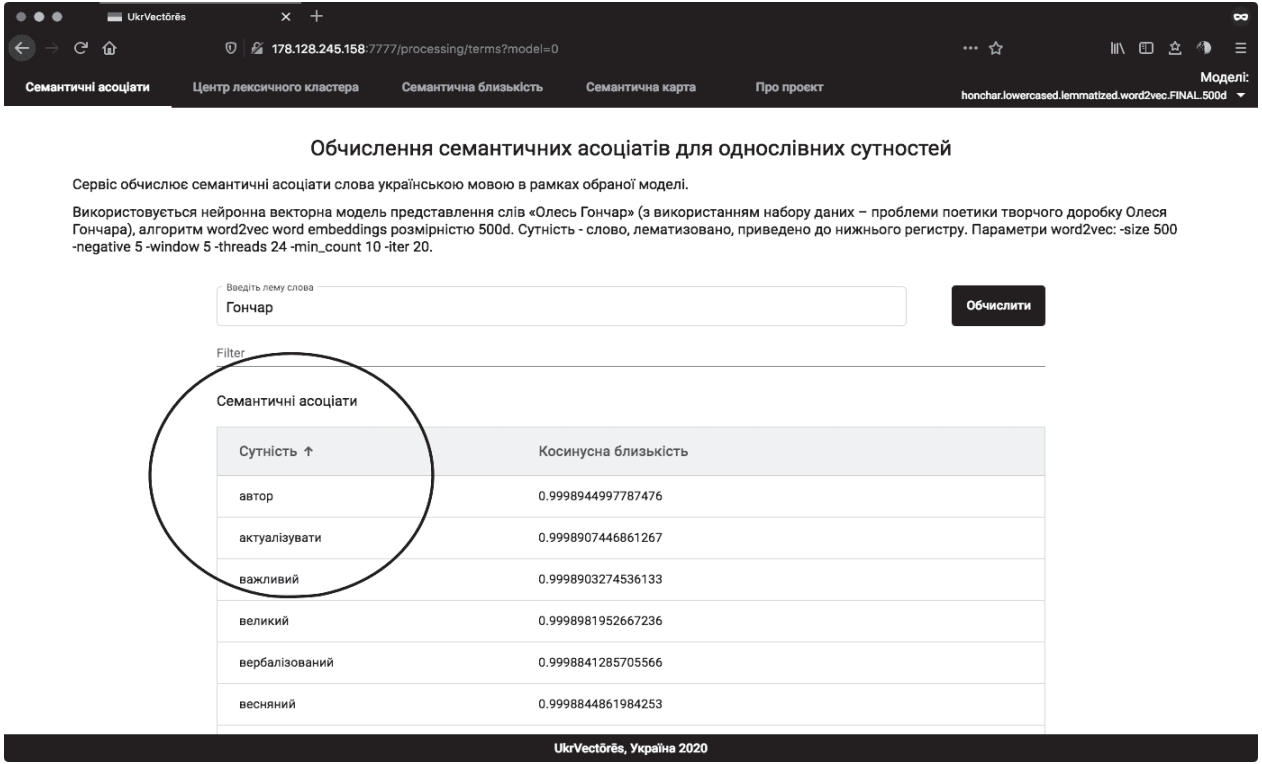


Рис. 16. Графічний інтерфейс односторінкового застосунку UkrVectōrēs (режим роботи «Семантичні асоціати», елемент «Сутність»)

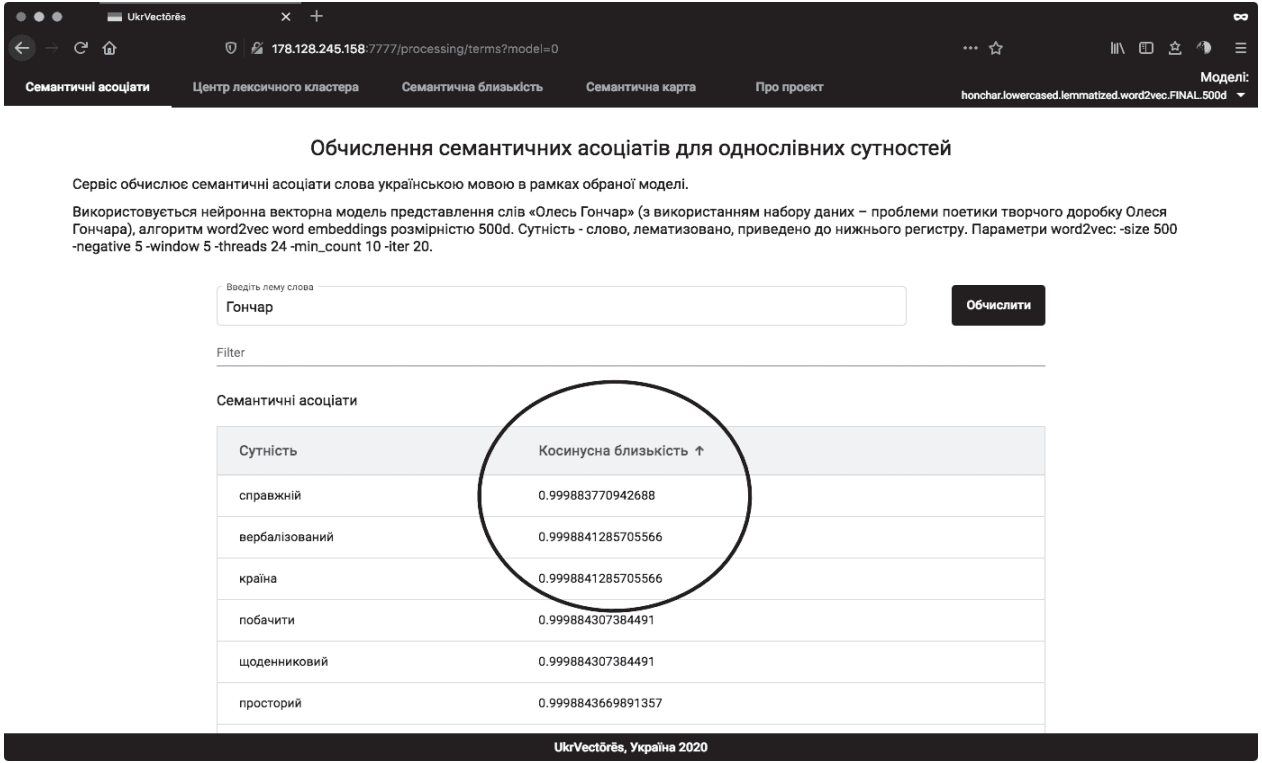


Рис. 17. Графічний інтерфейс односторінкового застосунку UkrVectōrēs (режим роботи «Семантичні асоціати», елемент «Косинусна близькість»)

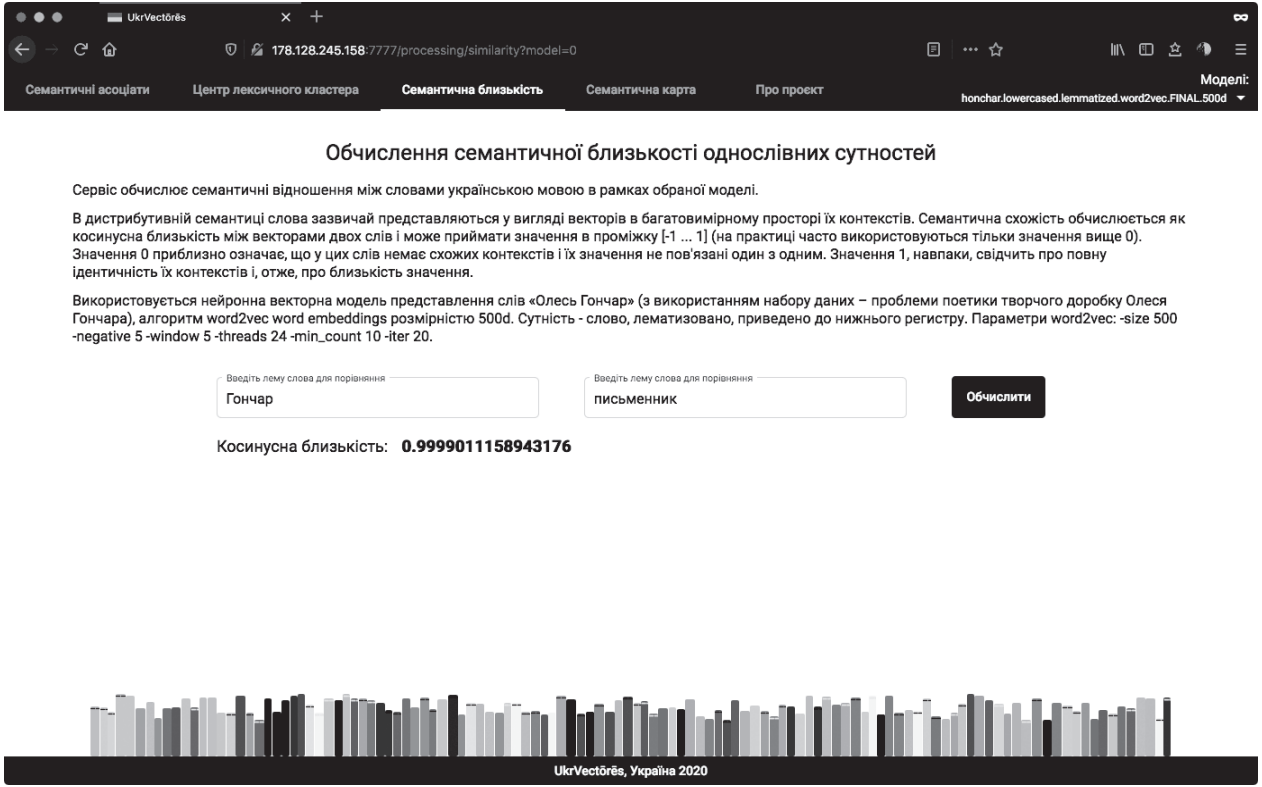


Рис. 18. Графічний інтерфейс односторінкового застосунку UkrVectōrēs (режим роботи «Семантична близькість»)

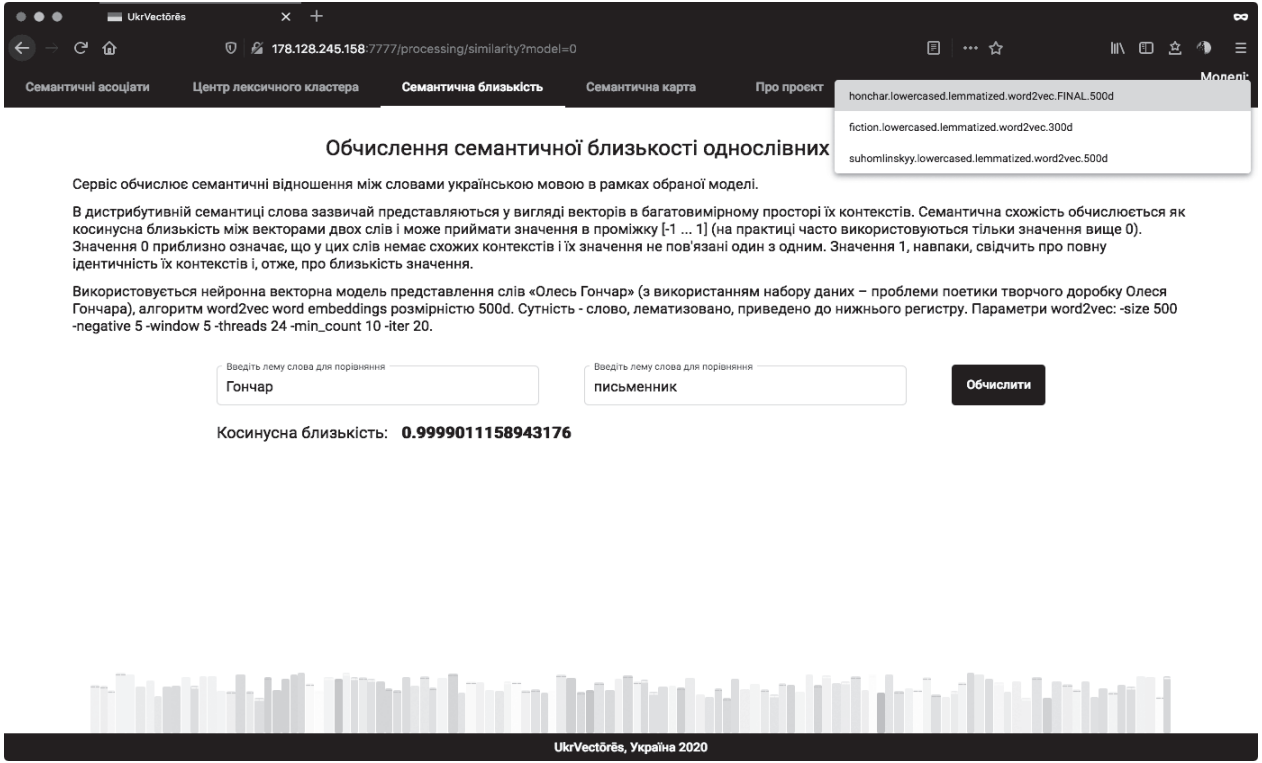


Рис. 19. Графічний інтерфейс односторінкового застосунку UkrVectōrēs (режим роботи «Семантична близькість», компонент *select* під назвою «Моделі»)

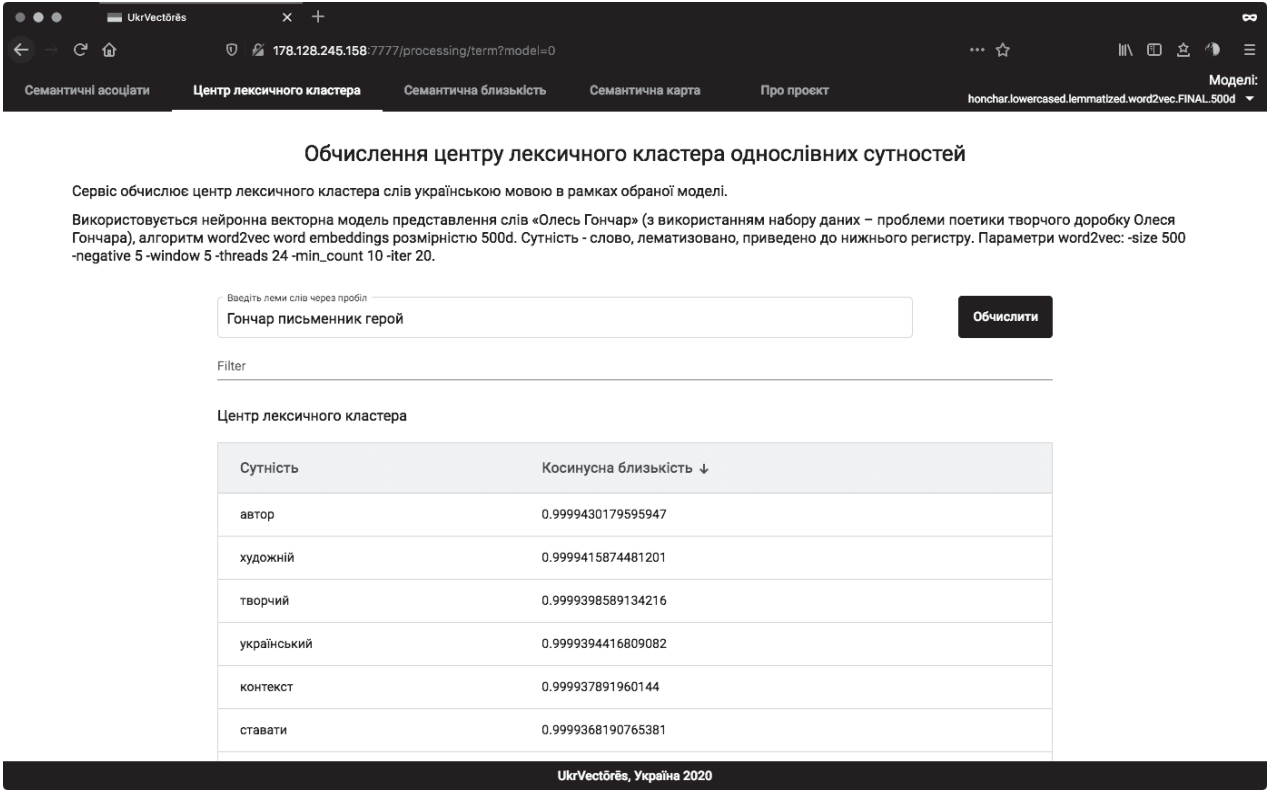


Рис. 20. Графічний інтерфейс односторінкового застосунку UkrVectōrēs (режим роботи «Центр лексичного кластера»)

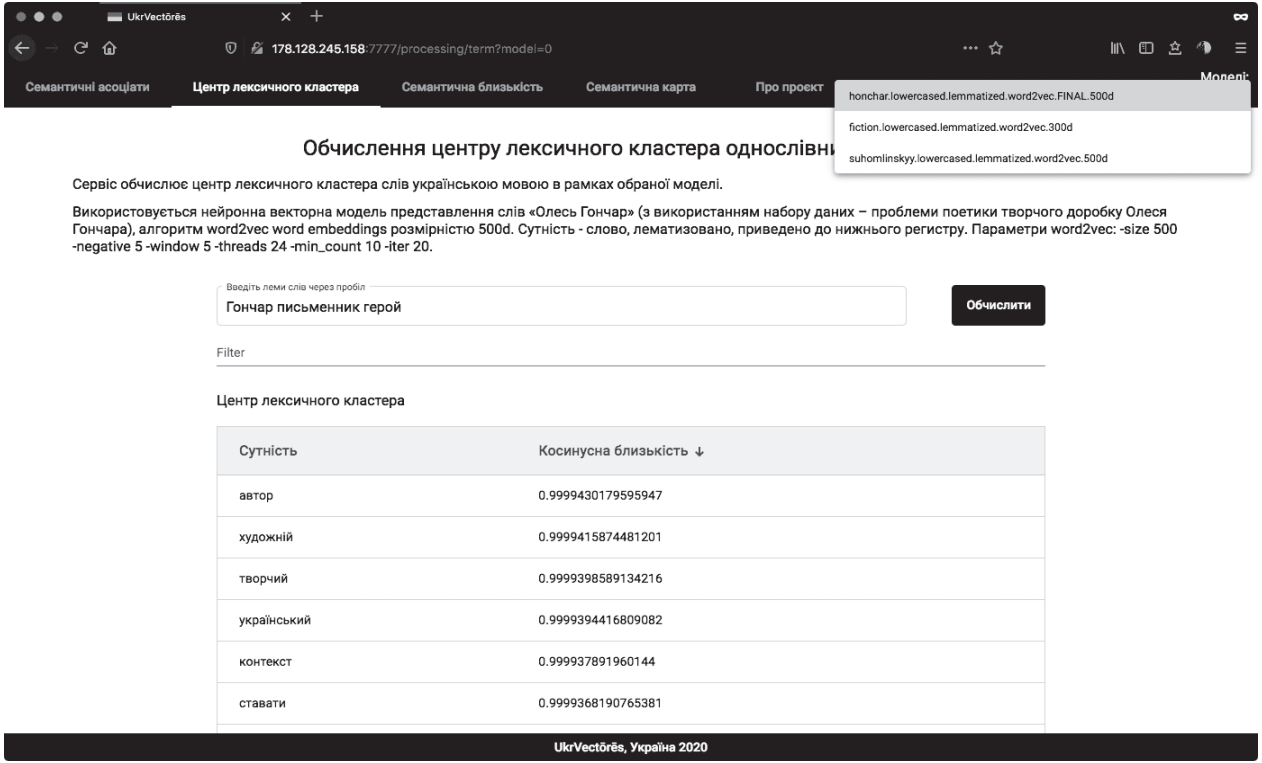


Рис. 21. Графічний інтерфейс односторінкового застосунку UkrVectōrēs (режим роботи «Центр лексичного кластера», компонент *select* під назвою «Моделі»)

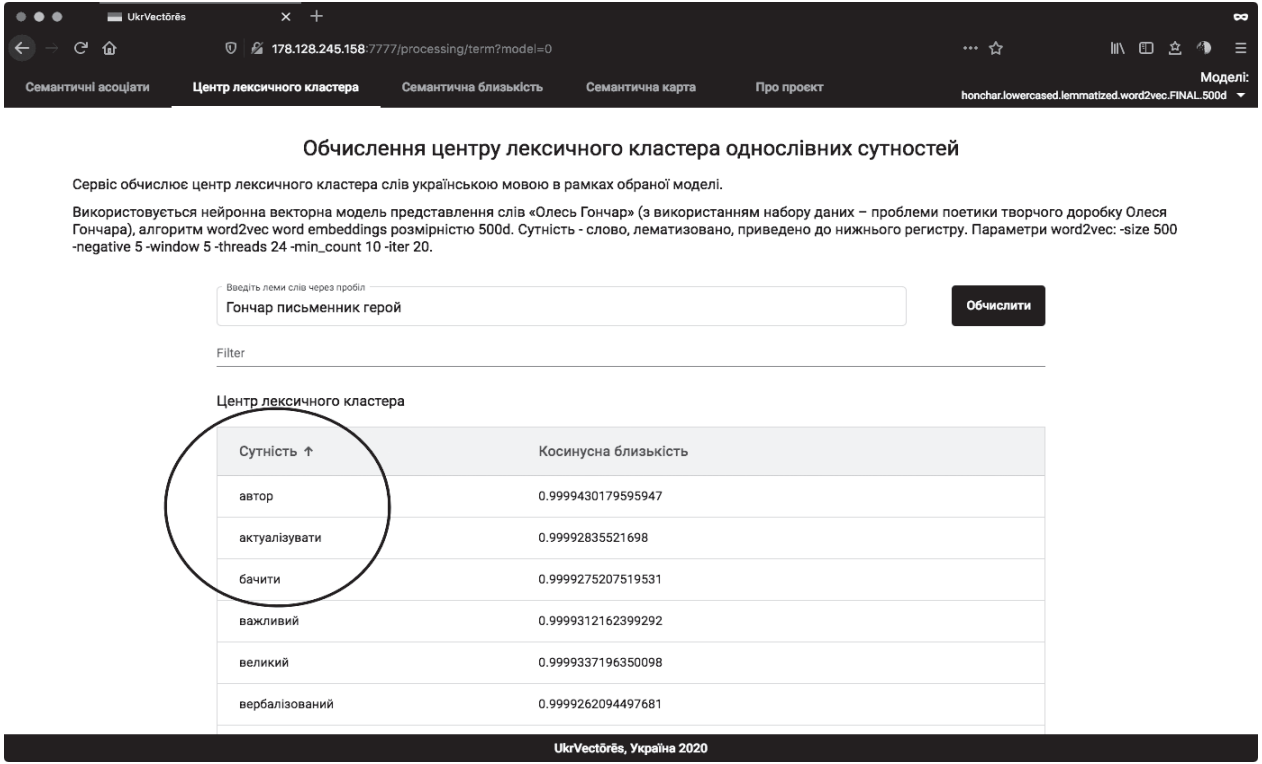


Рис. 22. Графічний інтерфейс односторінкового застосунку UkrVectōrēs (режим роботи «Центр лексичного кластера» елемент «Сутність»)

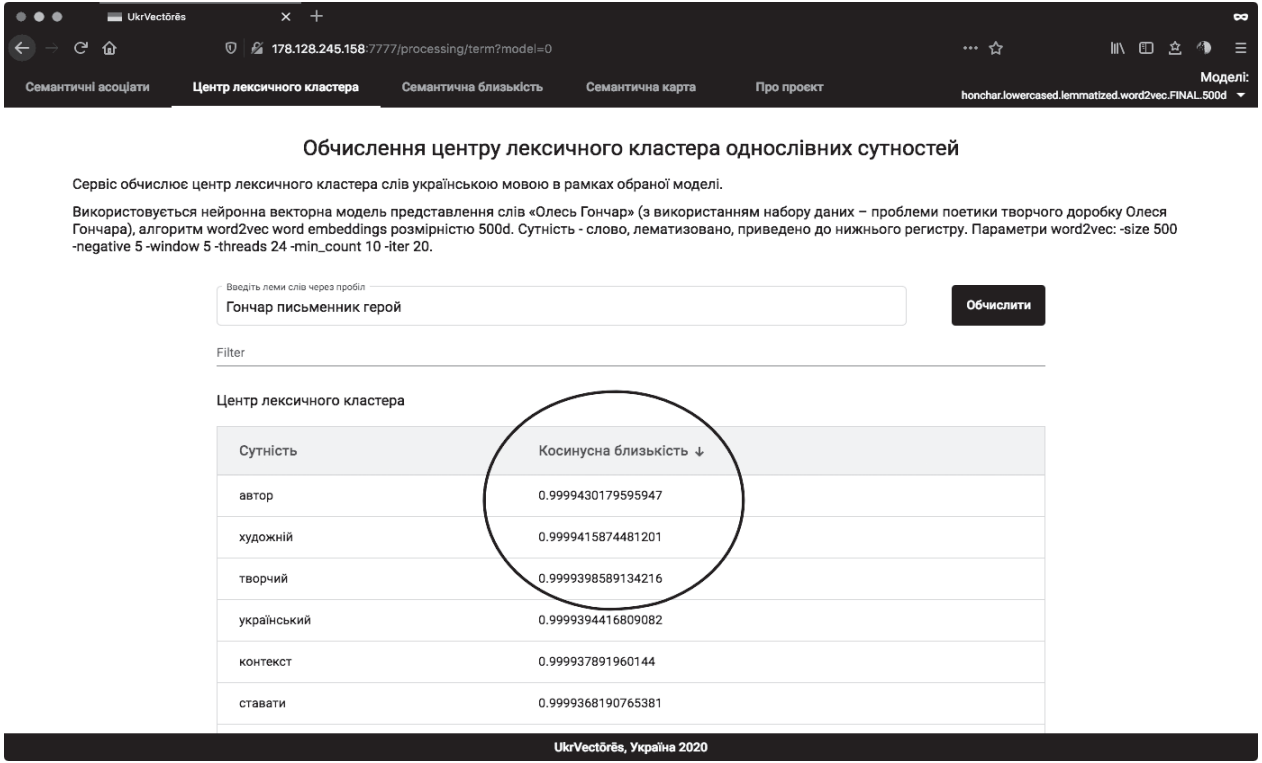


Рис. 23. Графічний інтерфейс односторінкового застосунку UkrVectōrēs (режим роботи «Центр лексичного кластера», елемент «Косинусна близькість»)

6. 使用“余弦邻近度”元素，用户可以选择按余弦相似度/接近程度系数升序或降序显示语义关联词，这些关联词构成了指定词语词元的词汇簇中心（图23）。

使用开源软件工具 *TensorFlow [12],*（即 *TensorBoard [22]*）生成所选分布语义模型中的词语间关系语义图。要使用此函数，需：

1. 使用最新版 Google Chrome、Mozilla Firefox 或 Microsoft Edge 网页浏览器，启动 UkrVectōrēs 单页应用的图形界面。为此，需在网页浏览器的地址栏中输入链接：
https://ukrvectores.ai-service.ml/（该链接可能有所不同，具体取决于 UkrVectōrēs 网络工具的部署特点），然后在主菜单中选择 “ 语义图 ” 工作模式（图24）；

2. 通过名为“模型”的组件 *select* 下拉列表（图24）选择所需的分布语义模型，在该模型框架内计算词汇集群的中心（通常情况下，默认使用“奥列斯·冈察尔”神经词向量表示模型（使用数据集——奥列斯·冈察尔创作作品的诗学问题），采用维度为500d的word2vec 词嵌入算法。实体——词，已进行词形还原并转换为小写。word2vec 参数：-size 500 -negative 5 -window 5 -threads 24 -min_count 10 -iter 20）；

3. TensorBoard 可视化工具的用户使用文件可通过此引用访问：[22]。图25展示了词元“Гончар”的语义关联词可视化示例。

2.4. 分布语义模型的训练方法：实体向量表示（使用数据集——奥列斯·冈察尔创作遗产的诗学问题）。实体（词）向量表示的分布式语义模型训练通用方法，以处理包含自然语言文本的各类数据集（电子文本文件）的流水线结构（英文：Pipeline）形式给出（图26），由以下阶段和组成部分构成：

1. 电子文本语料库构建技术；

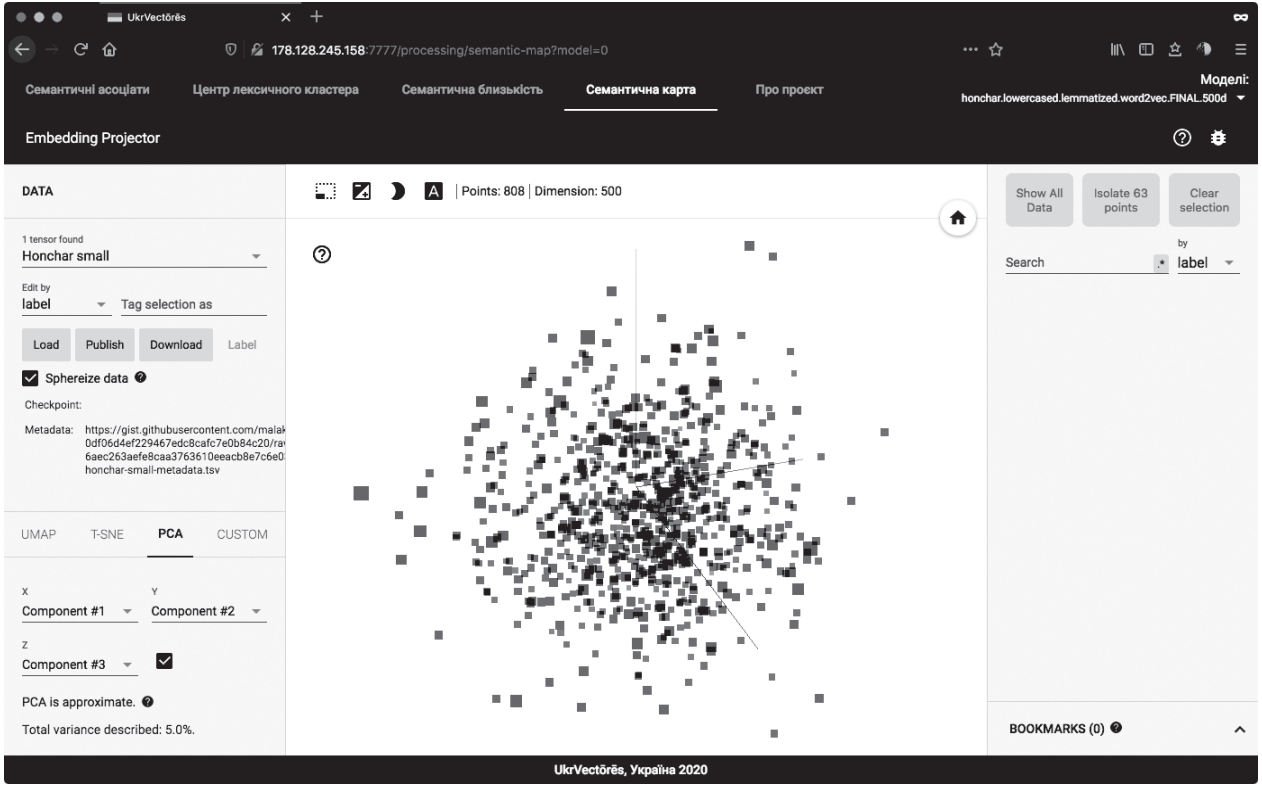


Рис. 24. Графічний інтерфейс односторінкового застосунку UkrVectōrēs (режим роботи «Семантична карта»)

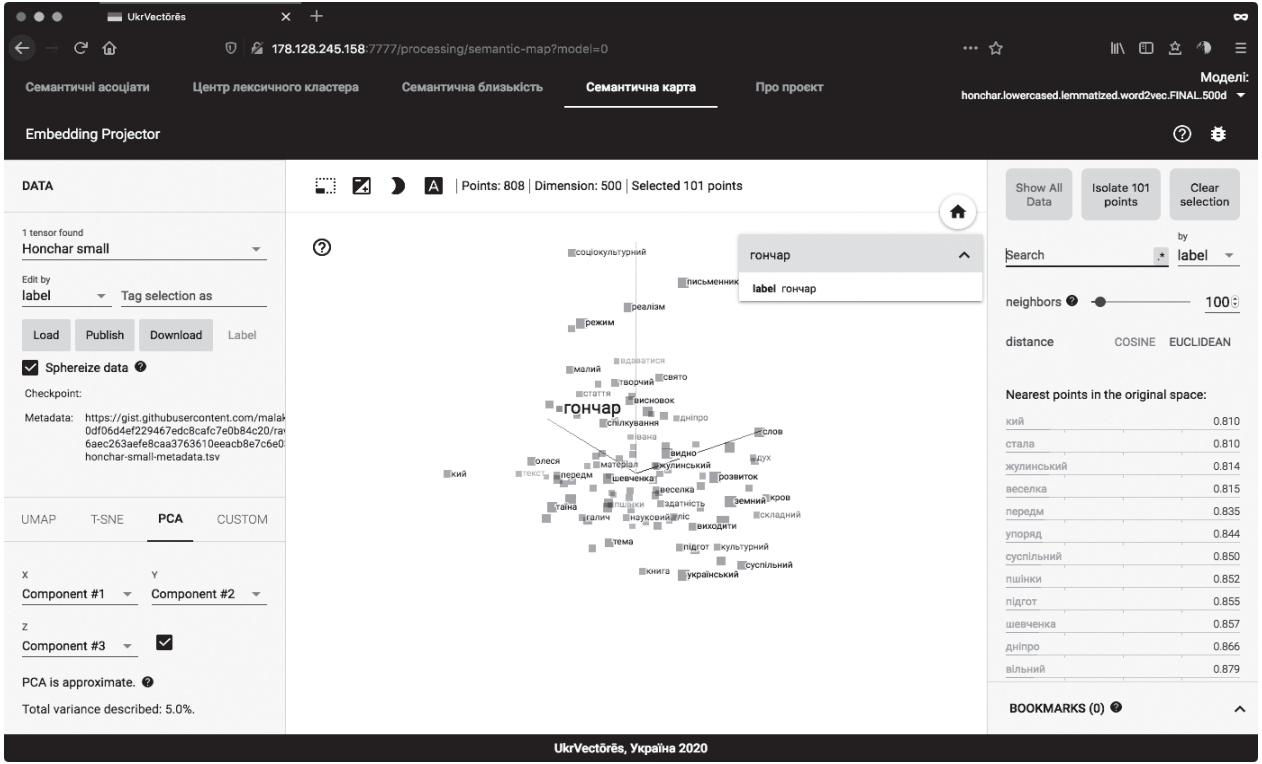


Рис. 25. Графічний інтерфейс односторінкового застосунку UkrVectōrēs (режим роботи «Семантична карта», візуалізація семантичних асоціатів леми слова «Гончар»)

2. 电子文本语料库预处理技术；

3. 分布语义预测模型的训练/学习技术；

4. 分布语义预测模型处理技术；

5. 文本文件和文本语料库的来源（模拟文本、互联网、维基百科文本语料库、TD电子馆藏、数据库等）；

6. 电子文本语料库；
7. 带标注的文本语料库——语言学文本语料库；
8. 分布语义预测模型——实体（词语）的向量表示模型。

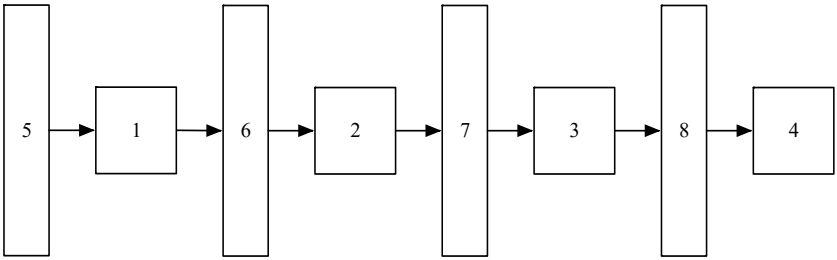


图26. 分布语义预测模型教学方法体系的通用流程结构

电子文本语料库构建技术（图26，元素1）。通常，电子文本语料库一般基于（图26，元素5）公开且规模足够大的维基百科文章文本语料库构建（维基百科文本语料库的最新版本可在维基媒体服务器上获取，该服务器保存着 Wikipedia foundation 各项目的完整压缩包——转储文件 [31]），并使用 gensim 程序库 [21] ——一种用于向量建模和主题建模的开源软件，具体使用其 gensim.corpora.wikicorpus 模块（可根据维基百科数据库转储文件或其他 MediaWiki 资源构建电子文本语料库）。应用电子文本语料库构建技术后，得到的结果是以文本格式呈现的电子文本语料库（图26，元素6）。

电子文本语料库预处理技术（图26，元素2）。电子文本语料库预处理流水线由以下组件构成：

– 词法分析（词法分析的元素）——分词（英文 分词）——一般而言，这是将字符序列转换为词元序列的过程：将文本分解为句子序列，再将句子分解为词元序列（预先定义的类别），包括词（类别：词、词组、术语）、标点符号、空格等。

– 语法分析（语法分析的元素）——为文本标注词性（英文 词性标注、词性标注）——一般而言，这是为每个词元赋予句法类别的过程。

– 形态分析（形态分析元素）——通常是词形还原过程，即将词转换为词典原形。词形还原可以大幅缩减词典，并在构建词向量表示时增强文本之间的关联性。

– 句法分析（句法分析元素）——解析与组块分析（英文浅层句法分析，英文. 组块分析）——通常是分析句子的过程，首先确定句子的组成部分（名词、动词、形容词等），然后将它们与更高阶的单位关联起来，这些单位具有离散的语法意义（名词短语或短语、动词短语等）。

电子文本语料库（尤其是乌克兰语语料库）预处理语言学处理流水线的所有阶段，均借助自然语言处理的免费软件工具——LanguageTool API NLP UK [32] 以及文本计算机处理领域专业人员（程序员、语言学家、研究人员）开放社群的项目——lang-uk [33]来执行。

应用电子文本语料库预处理语言学处理技术的结果，是带注释的文本语料库——语言学文本语料库（图26，元素7），以文本格式呈现。

分布语义学预测模型的训练/学习技术。用于训练分布语义学预测模

型（词向量表示）最常见的软件工具/技术是 *word2vec*。gensim 库提供了丰富的手段，可有效使用和研究词向量表示，其中也包括 *word2vec*。

模型训练的结果决定了向量表示的质量，并取决于用户可以设置的训练参数。主要参数包括：文本语料库；训练算法 *Skip-gram* 或 *CBOW*；向量大小；上下文窗口的最大大小；纳入考量的词的最低词频；用于减小高频词影响的参数；训练模型——层次 Softmax（英文 层次 *Softmax*）或负采样（英文 负采样）；负例数量；学习迭代次数（英文 训练轮次）；用于学习的线程数。

应用分布语义学预测模型训练/学习技术的结果是实体的分布语义表示模型（图26，元素8）。

为网络工具 UkrVectōrēs 开发（训练）了若干分布语义预测模型，其中包括“奥列斯·冈察尔”模型，该模型使用了篇幅较小（有限）的数据集——《奥列斯·冈察尔创作成果的诗学问题》。用于训练分布语义预测模型的软件工具（gensim 程序库、word2vec 算法）的源代码，尤其是“奥列斯·冈察尔”模型的源代码，见附录 d2。在篇幅较小的文本数据集上训练分布语义模型的显著特点是采用专用参数集，通过应用这些参数可以获得高质量的实体向量表示。下文列出了训练“奥列斯·冈察尔”模型所用的参数集：

▪ 训练算法 — Skip-gram；▪ 向量维度 — 500；▪ 上下文窗口最大尺寸 — 5；▪ 纳入统计的词的最低词频 — 10；▪ 训练模型 — 负采样（英文 负采样）；▪ 学习迭代次数（英文 训练轮次）— 20；▪ 分配用于学习的线程数 — 最大值；▪ 降低高频词影响的参数 — 1e-5；▪ 其他参数 — 默认值。

向量表示评估。对向量表示的研究有助于通过词语之间显现出的相似性，理解结果的特征；然而，从向量表示的质量及其解决实际任务的能力这一角度进行评估，不仅仍是一个现实问题，也引发了激烈的讨论。一般而言，词语向量表示的评估方法分为两种：基于内部评估的方法和基于外部评估的方法。外部评估是指根据向量表示应用于解决实际任务所取得的结果来评估其质量。例如，如果构建向量表示时对参数的恰当选择提高了文本情感分析的精度，那么就认为该向量表示的质量更高。内部评估则基于使用专门的测试集（类比测试——形式为“A之于B，如同C之于D”的表达式）以及人工标注的数据。

分布语义预测模型处理技术。通常，开发分布分析软件工具（或用于处理分布语义预测模型的软件工具）时，会使用 gensim 库的应用程序编程接口，并实现以下功能：根据计算余弦相似度（英文 余弦相似度），在给定词的向量与模型中所有其他词的向量之间进行比较，从而查找与该词向量相似的词向量；根据一组正面词和负面词查找相似的词向量，这些词会对词向量相似性的判断产生相应影响；基于一组正面词和负面词找到的相似词向量，可能会展示模型中保留的偏见和刻板印象；基于一组正面词和负面词找到的相似词向量，可能会呈现词语之间的关联关系；基于一组正面词和负面词找到的相似词向量，也可能展示语法关系；计算词向量与另一词向量之间的余弦距离（英文 余弦距离）；查找一个未与给定列表中的其他词同时出现的词；在列表中查找与给定词最相似的词；查找模型中所有比另一个给定词更接近指定词的词；计算两份文件中词语之间的距离（英文 词移距离）。

3. UkrVectōrēs 网络工具部署模型的开发

3.1. 用于管理隔离式 Linux Docker 容器的工具

Docker [34] — 是一款开源工具，可自动在支持容器化的环境中部署应用程序。Docker 帮助更快地发布代码、更快地测试、更快地发布应用程序，并缩短从编写代码到运行代码之间的时间。Docker 借助轻量级容器虚拟化平台实现这一点，该平台使用有助于管理和发布程序的流程与实用工具。在核心层面，Docker 几乎可以运行任何应用程序，并将其安全地隔离在容器中。安全隔离使同一台主机能够同时运行多个容器。

Docker 的优势：
- 加快开发过程；
- 方便地封装应用程序；
  - 在本地机器以及开发、预发布和生产服务器上表现一致；

- 监控简单明了；
- 便于扩展。

Docker 工具术语：

- 容器（Container）——封装了所需软件的运行实例。容器始终由镜像创建，并可提供端口和磁盘空间，以便与其他容器和/或外部软件交互。容器可以轻松销毁/删除，然后重新创建。容器不会保存状态。

- 镜像（Image）——每个容器的基础元素。创建镜像时，每个步骤都会被缓存，并可重复使用（写时复制）。构建所需时间依赖于镜像本身。另一方面，可以直接从镜像启动容器。

- 端口（Port）——通常意义上的 TCP/UDP 端口。为简化说明，假设端口可以向外部软件开放（可从主机操作系统访问），也可以连接到其他容器（即仅这些容器可以访问，且对其他软件不可见）。

- Volume 可以视为共享文件夹。Volume 在创建容器时初始化，用于存储数据，不受容器生命周期的影响。

▪ Registry（存储库）是用于存储 Docker 镜像的服务器。我们可以将它与 GitHub 相比较：从存储库拉取镜像，以便在本地部署，然后将本地构建的镜像推送到远程存储库。

▪ Docker Hub [35] — Docker Inc. 提供的带有网页界面的存储库。它存储了许多包含不同软件的 Docker 镜像。Docker Hub 是 Docker“官方”镜像的来源，这些镜像由其团队创建，或与其他公司合作创建（但不一定是由软件官方制造商提供的镜像）。如果您已注册，就可以查看这些镜像可能存在的漏洞列表。提供付费和免费账户。免费账户可创建一个私有镜像和任意数量的公开镜像。

▪ Docker Store [36] —与 Docker Hub 非常相似的服务。这是一个带有评分、响应等功能的市场。

Docker 架构。

Docker 由两个主要组成部分构成：

▪ Docker：开源虚拟化平台；

▪ Docker Hub：用于分发和管理 Docker 容器的平台即服务。

Docker 采用客户端—服务器架构。Docker 客户端与 Docker 守护进程通信，由后者负责创建、启动和分发容器。客户端和服务器可以运行在同一系统上，也可以将客户端连接到远程 Docker 守护进程。客户端和服务器通过套接字或 RESTful API 进行通信。

用户不会直接与服务器交互，而是通过客户端进行操作。Docker 客户端是 Docker 系统的主要界面。它接收用户的命令，并与 Docker 守护进程交互。

要了解 Docker 的组成，需要了解它的三个组件：

▪ 镜像（images）；▪ 仓库（registries）；▪ 容器。

Docker 镜像是一种只读模板。例如，镜像可以包含 Ubuntu 操作系统、Apache 和运行在其上的应用程序。镜像用于创建容器。Docker 可以轻松创建新镜像、更新现有镜像，也可以下载其他人创建的镜像。镜像是 Docker 构建组件。Docker 注册表用于存储镜像。注册表分为公共和私有两种，可以从中下载或上传镜像。公共

Docker 注册表就是 Docker Hub。那里存储着海量镜像。镜像可以由您创建，也可以使用其他用户创建的镜像。注册表是分发组件。

容器类似于目录。容器中包含程序运行所需的一切。每个容器都由镜像创建。容器可以创建、启动、停止、迁移或删除。每个容器都是隔离的，是应用程序的安全平台。容器是运行过程中的组成部分。基于 Docker 的这三个组成部分，可以：

▪ 创建包含应用程序的镜像；▪ 根据镜像创建容器，以运行应用程序；▪ 通过 Docker Hub 或其他镜像仓库进行分发。

Docker 的工作原理。

因此，镜像是只读模板，容器由此创建。每个镜像由一组层组成。Docker 使用联合文件系统将这些层合并为一个镜像。联合文件系统允许来自不同文件系统（不同分支）的文件和目录透明地叠加，从而创建一个连贯的文件系统。

Docker 轻量化的原因之一是使用了这样的层。当镜像发生变化时，例如应用更新时，就会创建一个新层。因此，无需替换整个镜像或重新构建镜像（这可能是使用虚拟机时必须做的），只需添加或更新相应层即可。您也不需要分发整个新镜像，只需发布更新，这样就能更轻松、更快速地分发镜像。

每个镜像都以一个基础镜像为基础。例如，Ubuntu 的基础镜像 ubuntu，或 Fedora 发行版的基础镜像 Fedora。同样，也可以使用现成的镜像作为基础来创建新镜像。例如，可以将 Apache 镜像用作 Web 应用程序的基础镜像。Docker 通常从 Docker Hub 镜像仓库获取镜像。

Docker 镜像可以基于这些基础镜像创建，用于创建这些镜像的描述步骤称为指令。每条指令都会创建一个新的镜像或层。指令包括以下行动：

▪ 运行命令；▪ 添加文件或目录；▪ 创建环境变量；▪ 指定此镜像的容器启动时要运行的内容。

这些说明保存在 Dockerfile 文件中。构建镜像时，Docker 会读取此 Dockerfile，执行这些说明并返回最终镜像。

镜像仓库是 Docker 镜像的存储库。创建镜像后，您可以将其发布到公共镜像仓库 Docker Hub，也可以发布到自己的私有镜像仓库。借助 Docker 客户端，您可以搜索已发布的镜像，并将其下载到安装了 Docker 的机器上，以创建容器。

Docker Hub 提供公共和私有镜像仓库。所有人都可以搜索和下载公共仓库中的镜像。私有仓库的内容不会出现在搜寻结果中。只有您和您的用户才能获取这些镜像，并用它们创建容器。

容器的工作原理。

容器由操作系统、用户文件和元数据组成。众所周知，每个容器都是根据镜像创建的。这个镜像会告诉 Docker 容器中包含什么、启动容器时要运行哪个过程，以及其他配置数据。Docker 镜像是只读的。Docker 启动容器时，会在镜像上方创建一个读写层（使用联合文件系统，如前所述），应用程序可以在其中运行。

无论是通过 Docker 程序，还是通过 RESTful API，Docker 客户端都会告知 Docker 守护进程启动一个容器。

```
$ sudo docker run -i -t ubuntu /bin/bash
```

我们来分析一下这条命令。客户端通过 Docker 命令启动，并使用 run 选项，该选项表示将启动一个新容器。启动容器的最低需求包括以下属性：

- 用于创建容器的镜像。在我们的例子中是 ubuntu；
- 容器启动后要运行的命令。在我们的例子中是 /bin/bash。

运行这条命令后，Docker 会依次执行以下操作：

- 下载 ubuntu 镜像：Docker 会检查本地机器上是否存在 ubuntu 镜像，如果不存在，就从 Docker Hub 下载。如果镜像已存在，则使用它创建容器；
- 创建容器：获取镜像后，Docker 使用它来创建容器；

▪ 初始化文件系统并挂载只读层：容器在文件系统中创建，镜像中的只读层也已添加；
▪ 初始化网络/网桥：创建一个网络接口，使 Docker 能够与主机机器通信；

▪ 设置 IP 地址：查找并设置地址；
▪ 启动指定的进程：运行程序；
▪ 处理并输出应用程序的输出：连接并记录应用程序的标准输入、标准输出和错误流，以便跟踪程序的运行情况。

现在您已经有了一个可运行的容器。您可以管理自己的容器，与应用程序交互。决定停止应用程序时，请删除容器。

Docker 中使用的技术。
Docker 使用 Go 语言编写，并利用 Linux 内核的某些能力来实现上述功能。

Docker 使用命名空间技术来组织隔离的工作空间，这些工作空间称为容器。启动容器时，Docker 会为该容器创建一组命名空间。这样便形成了一个隔离层：每个容器都在自己的命名空间中运行，无法访问外部系统。

Docker 使用的部分命名空间列表：
▪ PID：用于隔离进程；
▪ 网络：用于管理网络接口；
▪ IPC：用于管理 IPC 资源（ICP：进程间通信）；

▪ mnt：用于管理挂载点；
▪ utc：用于隔离内核并控制版本生成（UTC：Unix 分时系统）。

控制组（控制组）。Docker 也使用 cgroups 技术，即控制组。让应用程序在隔离环境中运行的关键，是只向应用程序提供其所需的资源。这可以确保容器能够良好共存。控制组可以划分可用的硬件资源，并在必要时设定界限和约束。例如，限制容器可使用的内存量。

联合文件系统或 UnionFS 是一种通过创建层来运行的文件系统，因此十分轻量且快速。Docker 使用 UnionFS 创建构成容器的书芯。

Docker 可以使用多种 UnionFS 变体，包括：AUFS、btrfs、vfs 和设备映射器。

Docker 将这些组件封装在一起，形成我们所说的容器开本。默认使用的开本称为 libcontainer。同样，Docker 也通过 LXC 支持 Linux 中传统的容器开本。未来，Docker 可能还会支持其他容器开本，例如与 BSD Jails 或 Solaris Zones 集成。

3.2. 在 UNIX 类操作系统 Linux 环境中编译、构建和部署网络工具 UkrVectōrēs（来自 GitHub 代码库）

系统需求：

▪ 最低硬件资源：兼容 x86–64 的处理器，时钟频率为 1 GHz；运行内存：4 GB；硬盘空间：20 GB；

类 UNIX 操作系统 Linux（在测试、编译、构建和部署网络工具 UkrVectōrēs 时，使用了 Ubuntu Server 18.04 LTS x86–64 和 Alpine Linux 3.9.4 x86–64 发行版）；

Git 分布式文件版本控制与协作系统；

Docker CE 用于管理隔离的 Linux/Windows 容器的工具集；

高速连接互联网。

在类 UNIX 操作系统 Linux 环境中，编译、构建和部署网络工具 UkrVectōrēs 包括以下步骤：

从 GitHub 服务的 git 仓库 https://github.com/malakhovks/docsim 克隆 UkrVectōrēs 程序的源代码， [37] 。此步骤可以使用以下命令完成：

$ Git 克隆 https://github.com/malakhovks/docsim.git.

或者使用以下命令，从 GitHub 服务 [37] 的 git 仓库克隆 UkrVectōrēs 程序源代码的指定分支/标签：

$ git clone --depth=1 --branch=<tag_name> <repo_url>，其中 tag_name 是分支 / 标签的名称；

repo_url — 私有仓库的 HTTPS 地址，包含授权参数。

示例：
$ Git 克隆 --深度=1 --分支=develop https://Velychko-Vitalii:ae9c2fa2d73fbbb0bd0a5ffa746f1df59036815c@github.com/malakhovks/docsim.git。

或者从开发者处获取压缩包形式的发布版本（UkrVectōrēs 程序源代码），将其解压，然后进入下一阶段。

1. 进入 docsim 目录：

$ cd docsim.

2. 使用 git checkout 命令切换到用于编译/构建的分支：

$ git checkout <分支_名称>,

其中 branch_name 是分支的名；

docsim 程序的 Git 仓库有两个主要分支：develop 和 master。

Γmaster 分支包含 docsim 程序的稳定的程序源代码 .

develop 分支包含 docsim 程序的开发中的程序源代码。

示例：

$ git checkout master.

从 Dockerfile 文件创建隔离的 Docker 应用程序（即所谓的 Docker 镜像）：

$ docker build. — t <image name>,

其中：image name — 隔离的 Docker 镜像应用程序的名称。

示例：

$ docker build. — t docsim_image.

创建隔离的 docsim_image 应用程序可能需要较长时间，具体取决于硬件性能。Docker 命令的完整文档可通过引用 [38] 访问。

3. 在 docsim 容器中启动已创建的隔离应用程序 docsim_image：

$ docker run --restart always --name docsim -d -p 80:80 docsim_image.

带有 --restart always 参数的 Docker run 命令可在操作系统重启时自动重启，从而确保服务持续运行。

Docker 容器的主要管理命令：

- docker attach docsim — 查看 docsim 容器的标准输出；
- docker stop docsim — 停止 docsim 容器；
- docker start docsim — 恢复运行（启动）docsim 容器；

▪ docker rm docsim — 删除 docsim 容器（删除容器前需要先将其停止）；

启动 Docker 容器的一些实用参数：

▪ --name — 为容器指定一个名称，可在 docker ps 命令的输出中找到；

▪ -p 80:80 — 发布 80 端口。冒号后的第二个 80 指定 nginx 服务器在容器内部监听的端口；

–d — 在与终端分离的状态下启动容器。之后可以使用 Docker 日志命令 docker logs 查看日志；

–t — 用于查看 Docker 容器的控制台输出；

—restart on-failure — 自动重启运行失败的容器。如果容器因错误而故障退出（表现为非零退出代码），则重启容器；

—restart always — 始终重新启动容器（如果容器停止运行）。如果容器是手动停止的，则只有在 Docker 服务重新启动或手动重新启动容器时，它才会重新启动。

3.3. 在 VirtualBox 操作系统虚拟化程序环境中编译、构建并部署网络工具 UkrVectōrēs（来自 GitHub 仓库）。

系统需求：

最低硬件资源：x86–64 兼容处理器，时钟频率为 2 GHz；运行内存：4 GB；硬盘空间：20 GB；

x86–64 兼容的类 UNIX 操作系统 Linux；x86–64 兼容的操作系统 Microsoft Windows 7 Service Pack 1 或更新版本；

VirtualBox [39] 虚拟化程序，适用于 VirtualBox 6.0.8 或更高版本的操作系统；

一台运行类 UNIX 操作系统 Linux 的虚拟机（在测试、编译、构建和部署网络工具 UkrVectōrēs 时，使用了 Ubuntu Server 18.04 LTS x86–64 和 Alpine Linux 3.9.4 x86–64 发行版），其中安装了以下软件：Git——用于文件版本控制和协作的分布式系统；Docker CE——用于管理隔离的 Linux/Windows 容器的工具集；

高速连接到互联网；

虚拟机是通过虚拟化计算资源（处理器、运行内存、存储设备以及信息输入和输出设备）创建的计算机模型。与特定设备的模拟程序不同，虚拟机能够完整模拟物理机或程序的执行环境。

VirtualBox — 一款用于创建虚拟机器的程序，隶属于甲骨文公司。该程序可免费访问，并受主流操作系统 *Linux*、*FreeBSD*、*Mac OS X*、*OS/2 Warp*、*Microsoft Windows* 支持；这些操作系统也支持运行 FreeBSD、Linux、OpenBSD、OS/2 Warp、Windows 和 Solaris 等客户机操作系统。

主要功能。

- 跨平台性；
- модул性；
- 实时迁移ранія；
- 支持 USB 2.0，主机机器上的设备可供客户机操作系统访问（仅限专有版本）；
- 支持 64 位客户机系统（从 2.0 版开始），即使运行在 32 位主机系统上（从 2.1 版开始；此功能需要支持处理器虚拟化技术）；
- 支持客户机系统中的对称多处理（从 3.0 版开始；此功能需要支持处理器虚拟化技术）；
- 内置 RDP 服务器，并支持通过 RDP 协议连接客户端 USB 设备（仅限专有版本）；
- 实验性支持硬件 3D 加速（OpenGL、DirectX 8/9（使用 Wine 代码）（仅限 32 位 Windows XP 和 Vista）；对于 DOS/Windows 3.x/95/98/ME 客户机，不支持硬件 3D 加速；
- 支持 VMDK (VMware) 和 VHD (Microsoft Virtual PC) 硬盘映像，包括快照（从 2.1 版本开始）；
- 支持 iSCSI（仅限专有版本）；
- 支持音频设备虚拟化（可选择 AC97 仿真或 SoundBlaster 16）；
- 支持多种网络交互模式（网络地址转换、桥接主机网络、内部网络）；
- 支持虚拟机保存状态链（快照），可从客户机系统的任意状态返回到这些快照；

▪ 支持共享文件夹，方便在主机系统和客户机系统之间轻松共享文件（适用于 Windows 2000 及更高版本、Linux 和 Solaris 客户机系统）；

▪ 支持主机与客户机操作系统桌面集成（无缝模式）；

▪ 可以选择界面语言（也支持乌克兰语界面）。

在 VirtualBox 操作系统虚拟化程序环境中（从 Git 仓库 [37]）编译、构建和部署网络工具 UkrVectōrēs，包括以下步骤。

根据 VirtualBox 官方网站 [39] nf 上提供的用户指南，借助视频教程创建一台安装 Alpine Linux 3.9.4 x86–64 或更高版本的虚拟机。根据 UkrVectōrēs 服务的预计负载，为虚拟机配置硬件资源。

按照 wiki.alpinelinux.org 官方 wiki 文档网站上提供的用户指南，在运行 Alpine Linux 3.9.4 x86–64 操作系统的虚拟机环境中安装 Git 和 Docker CE。

从 GitHub 服务的 Git 仓库 [37] 克隆 UkrVectōrēs 程序源代码，地址为 https://github.com/malakhovks/docsim。此步骤可以使用以下命令完成：

$ Git 克隆 https://github.com/malakhovks/docsim.git.

或者，使用以下命令从 GitHub 服务的 Git 仓库 [37] 克隆指定分支/标签中的 UkrVectōrēs 程序源代码：

$ git clone --depth=1 --branch=<tag_name> <repo_url>，其中 tag_name 是分支 / 标签的名；

repo_url 是带授权参数的私有仓库 HTTPS 地址。

示例：

$ Git 克隆 --深度=1 --branch=develop https://Velychko-Vitalii:ae9c2fa2d73fbbb0bd0a5ffa746f1df59036815c@github.com/malakhovks/docsim.git.

或者从开发者处获取压缩包形式的发布版本（UkrVectōrēs 程序源代码），解压后进入下一阶段。

1. 进入 docsim 目录：

$ cd docsim.

2. 使用 git checkout 命令切换到需要用于编译/构建的分支：

$ git checkout <branch_name>,

其中 branch_name 是分支的名；

UkrVectōrēs 程序的 Git 仓库有两个主要分支：develop 和 master。

master 分支包含 UkrVectōrēs 程序的稳定的程序源代码。

develop 分支包含 UkrVectōrēs 程序的开发中的程序源代码。

示例：

$ git checkout master.

根据 Dockerfile 创建隔离的 Docker 应用程序，即所谓的 Docker 镜像：

$ docker build. — t <镜像名称>,

其中，镜像名称是隔离的 Docker 镜像应用程序的名称。

示例：

$ docker build. — t docsim_image.

创建隔离的 docsim_image 应用程序可能需要较长时间，具体取决于硬件性能。Docker 命令的完整文档可通过此引用 [38] 查阅。

3. 在 docsim 容器中运行已创建的隔离应用程序 docsim_image：

$ docker run --restart always --name docsim -d -p 80:80 docsim_image .

docker run 命令配合 --restart always 参数，可在操作系统重启时自动重新启动，从而确保服务持续运行。

4. TISP远程康复子系统的媒体文件电子图书馆——vHealth 服务。

UkrVectōrēs 应用程序所包含算法与技术的实际实现和部署已集成到 vHealth 网络服务中，具体而言，vHealth 智能信息检索子系统完全采用 UkrVectōrēs 的分布式语义分析算法与技术运行。

乌克兰的医疗康复系统面临着紧迫挑战。首要任务之一是对 COVID-19 康复患者进行康复治疗。社会各界以及乌克兰卫生部管理层都充分认识到这一点，该部门目前正为此问题组建一个特别工作组。

乌克兰设有医疗预防机构，为军人提供心理和身体康复服务，并采用现代康复技术。然而，并非所有人都能在这些中心获得长期康复服务。因此，将远程康复技术用于创伤后应激障碍及类似疾病患者，并结合功能状态客观监测手段，至关重要。

相关工作围绕乌克兰国家研究基金会的项目展开，项目名称分别为《大流行病期间支持康复进程的跨学科智能信息分析系统（TISP）》（2020—2020年）和《基于数学建模的肿瘤患者以患者为中心的远程康复云平台开发》（2022—2023年）。这些系统的特点是基于知识导向技术、本体工程和跨学科范式。系统的认知服务可实现信息的结构化与分类，基于语义分析综合所需文件，识别信息进程的典型属性，并在其生命周期的所有阶段提供决策支持。

疫情期间的康复措施方法论具有诸多显著特点，这些特点与问题出现的不可预测性和速度快（相较于常规情境）、问题复杂度高、康复治疗师与患者之间交流受限、决策必须迅速且恰当、过程规模庞大，以及因此需要使用可扩展的操作工具等因素有关。提供医疗康复服务的一种有效方案是远程以患者为中心的康复，这需要采用在线远程诊断、遥测和干预工具，并以患者能力为导向，同时还需要完善的互联网交互、智能信息技术与服务、“康复治疗师—患者—多学科团队”系统中的有效认知支持方法，以及对大量信息（特别是问卷调查数据和遥测数据）进行统计处理并从中提取可靠知识等。因此，在该项目实施过程中，除传统康复手段外，还开发了“疫情期间康复过程支持跨学科智能信息分析系统

(TISP)» [40], 该项目在“面向人类与社会安全的科学”竞赛中胜出，并获得乌克兰国家研究基金（乌克兰国家研究基金）的资助[41]；在 TISP 系统中，由此诞生了康复措施远程医疗支持智能系统 [42]。结合智能远程生物反馈工具[43] 和高效的微型设备（英文：嵌入式系统、可穿戴设备）进行远程诊断[40；44], 用于遥测和康复的这类系统前景广阔，全球经验也证明了这一点。

用于远程支持康复措施的智能系统，是一个综合、集成、以患者为中心的 TISP 医疗服务信息子系统，用于解决康复医学领域的各类临床组织问题和科研任务（咨询；远程监测和支持康复过程及措施；识别、分类、预测和学习知识；研究并审视新的专业领域），并使用远程通信手段及人工智能技术元素，尤其是本体工程 [45 – 48] 和机器学习 [49]。

TISP远程康复子系统的媒体文件电子图书馆——vHealth 服务——是一个分布式信息系统，可用于存储、使用和传播（共享功能）各类学科领域的异构电子文档集合（视频和音频内容），以便远程指导患者及其亲属学习康复训练动作与相关措施。

COVID-19 康复者的康复无疑是一项极其重要的社会问题。国际医学界已经充分认识到这一点。与此同时，各国康复措施的普及程度差异很大。在保险医疗发达的国家，许多人都能在相应的专业中心接受康复服务。遗憾的是，乌克兰的情况有所不同：患者对门诊康复服务的需求远远超过现有资源，因此必须寻求替代决策，并引入现代先进技术来支持患者。因此，迫切需要采用康复医学中一个新兴的现代方向——远程康复。

现代世界通用的远程康- 复或电子康复（英语：*E-rehabilitation*）[44] ——是一个系统

由康复练习和教学程序组成，这些内容借助电信计算机技术，主要在治疗的门诊阶段远程提供给患者。这一现代方向的意义在于，患者通常可在家中独立执行康复治疗程序，在医生专业人员的远程控制和管理下完成门诊阶段的康复。远程康复应配备相应的软件，使在住院部观察患者的康复专业人员能够快速制定个性化练习方案，以视频格式供患者自主练习。该方案应根据康复动态进行调整。这样，患者便能够继续执行在住院阶段制定的结构化家庭康复程序。患者可从已经熟悉的专业人员那里获得反馈，记录过去一段时间所取得的结果，针对患者当前的实际情况提出新的任务，并对相关函数进行客观控制。所有这些无疑都能改善并维持患者的积极性，并显著提高康复门诊阶段的效果。

远程康复体现了多个现代技术趋势。首先，远程康复离不开电信技术。其次，它需要使用专用于康复的医疗信息系统。这些系统既用于患者管理，也用于（最重要的是）根据康复周期的结构创建一系列康复文件，例如个体康复计划、类别用户档案、康复预测等。第三，远程康复技术的重要组成部分是在家中对患者的状况进行功能评估，使用微型设备和现代数据评估算法，顺应一种英语称为 即时检测 的趋势。意译而言，这指的是在患者所在地、医生诊室之外直接进行的医学检测。最后，远程康复离不开患者积极参与有关自身诊断和治疗的决策过程。这是现代医学的主要趋势之一，也得到了包括乌克兰卫生系统立法倡议在内的支持。

远程康复在世界范围内迅速发展，并与众多学科领域建立了跨学科联系，超出了现代电子健康（英语：电子健康）范式的范畴，由此催生了最前沿的康复形式——**混合式电子康复**（英语：混合式电子康复）[50]。

混合式电子康复由一系列基础方法、途径和技术组成：

– 电信技术 — 通过电信网络和互联网提供康复服务。此外，这使患者能够远程与服务提供商交互，既可用于评估患者，也可用于开展治疗。

– 富互联网应用（英文 富互联网应用）。首先，这包括医疗信息系统（MIC）。医疗信息系统是一种全面、集成的信息系统，旨在管理医疗机构（包括门诊诊所、医院或康复中心）运营的各个方面，例如医疗、行政、财务和法律事务，并对数据进行相应的处理和交换（包括与乌克兰电子医疗系统中央数据库登记簿的数据交换 [51]）。

– 遥测 — 一系列方法、途径和技术，可用于远程测量、收集、传输和处理患者身体活动指标（生理参数）的信息（尤其是在实时进行康复训练和采取相关措施时）。

– 嵌入式系统（英文 嵌入式系统）以及微型“智能”可穿戴设备（英文 可穿戴设备、可穿戴设备）。此类可穿戴设备可供一般用途，在这种情况下，它们只是移动计算机的一种特殊形式。作为备选方案，它们也可用于特殊作业，例如健身追踪器或医疗设备。它们可配备特殊的传感器，例如加速度计、心率监测器，或更先进的设备，如心电图仪、血氧监测器和动脉压力监测传感器；

– 生物反馈 (生物反馈，英文 生物反馈)。 生物反馈技术 [43] 包括一系列研究性、非医疗性、生理性、预防性和治疗性程序。在这些程序中，通过主要借助微处理器或计算机设备构建的外部反馈回路，向人们呈现其自身某些生理过程的状态及变化信息，

这些反馈回路主要借助微处理器或计算机设备构建。生物反馈程序是在指定的值域内，持续实时监测特定生理指标，并通过多媒体、游戏及其他方法有意识地对其进行控制。因此，在一系列生物反馈训练期间，可以增强或减弱相应的生理指标，进而提高或降低该指标所反映的调节系统的紧张性激活水平。

– 智能/虚拟个人助理（英文 智能/虚拟个人助理）。这类软件代理能够提供个人信息，并为个人执行任务和提供服务。现代智能/虚拟个人助理类软件代理可以相互交互，以完成某一类任务。人们通常通过语音或文本与这类助理交互。有时，人们会将具有文本界面的虚拟助理称为“聊天机器人”。例如，在 TISP 项目及系统框架内，开发了通用对话子系统 [52]（在“物理医学与康复医学”（ΦPM）领域中实现），形式包括网络应用程序和 Telegram 服务中的虚拟对话者。开发的 TISP 对话子系统运用了本体工程的元素，特别是《欧洲物理医学与康复医学白皮书》的本体表示（白皮书，英文 欧洲物理医学与康复医学白皮书）[53] 以及《国际功能、残疾和健康分类》（国际功能、残疾和健康分类，英文 国际功能、残疾和健康分类，*ICF*）[54]。

– 基于人工智能的用于大数据处理（英文 *Big data*）的方法、技术和软件应用，旨在获取知识并解决分析任务 [55]。为了发现并获取知识，以及解决分类、诊断或预测等主要分析任务，我们使用一种名为“增长金字塔网络”的方法 [55]（ЗΠМ，英文 *Growing pyramidal networks, GPN*）。学习的结果是以逻辑函数（逻辑代数函数）的形式呈现的规律。ЗΠМ 属于统计方法类别。智能信息搜索也基于分布语义学预测模型的使用 [49]。

4.1. vHealth 网络工具的用途和功能。

vHealth 服务的主要任务和用途之一，是整合信息资源并实现对这些资源的有效导航。信息资源整合是指将这些资源 объедин合起来，以便使用不同的信息，同时保留其属性、表示特点和处理能力。资源可以通过物理方式或虚拟方式进行整合。但这种整合必须确保用户能够将所需信息视为一个统一的信息空间：电子图书馆必须支持对数据库的操作，并实现高效的信息搜索。电子图书馆中的有效导航，是指用户能够以最少的精力，在整个可用信息空间中尽可能全面、准确地找到感兴趣的信息。为了解决这一任务，vHealth 服务采用基于分布语义学预测模型的智能搜索。

“vHealth 电子图书馆”服务具有以下功能：

• 全面控制媒体内容和用户数据；

• 支持多种内容发布工作流（访问模式）：公开内容（public）、私人内容（private）、不属于任何列表且只能通过引用访问的内容（unlisted）；

• 支持多种数据媒体格式（媒体类型）：音频内容、视频内容，未来计划支持文本文件 PDF、DOCX；

• 能够为内容对象及其不同集合编目（类别和标签）；

• 通过共享访问单个媒体资源、播放列表（播放列表）、类别和标签来交换媒体内容。自动生成用于将媒体内容嵌入外部 Web资源的代码；

• 基于分布语义预测模型的实时智能信息检索（词汇、符号和属性搜索）；

• 媒体内容播放列表创建功能，并可设置内容发布工作流（访问模式）；

• 采用现代化图形用户界面设计，支持浅色和深色主题；

• 通过服务单独的管理面板实现高级用户管理功能；

• 社交网络功能：可添加评论、点赞（点赞和点踩），以及将媒体内容下载到本地磁盘；

• 具备媒体内容编码配置：支持多种分辨率（240p、360p、480p、720p、1080p）和多种编码配置（H.264、H.265、VP9）；

• 媒体内容自适应流传输功能：可使用 HLS 协议；

• 支持视频内容的多语言字幕文件；
• 媒体内容分块加载功能（即分块文件上传）；

• 记录用户与系统的交互会话，并可切换到系统先前存在的任意状态；

• 编辑媒体内容对象的描述结构；
• 支持超文本和超媒体关系，使用户能够快速从某个对象或其某个元素跳转到与之相关的另一个对象或元素。

4.2. vHealth 网络工具的程序依赖关系。
– Python 3.8.6 — 解释器和标准库；
– gensim —用于自然语言高级处理和数学建模的开源软件库；

– Django 3.1.6 —用于开发 Web 系统的高级开源 Python 框架（软件框架）；

– PostgreSQL 12 —对象关系型数据库管理系统；

– React 16.13.1 —用于创建图形用户界面（尤其是 Web 应用程序）的开源 JavaScript 库；
– Video.js —开源 JavaScript 库、Web 视频播放器；
– uWSGI —Web 服务器和 Web 应用服务器，最初实现用于通过 WSGI 协议（及其二进制变体 uwsgi）运行 Python 应用程序；

– Celery 5.0.2 — 一种基于分布式消息传递的开源异步队列或任务队列；

– Redis 6.2.1 — 一种将键值对存储在内存中的分布式键值存储，并可根据用户需要提供持久化存储；

– nginx — 一款自由的 Web 服务器和代理服务器；

– Fine Uploader — 一个用于上传文件的开源 JavaScript 库。

4.3. vHealth 网络工具的图形用户界面

构建 vHealth 网络工具图形用户界面时，采用了热门媒体平台 YouTube 的界面，该界面是媒体内容发行系统的典范。在开发 vHealth 网络工具的图形用户界面时，遵循了现代软件系统图形用户界面的重要需求之一——“按我所想去做”理念，或称 DWIM（英文 按我意图执行）。因此，系统的运行具有可预测性，用户能够提前直观地理解程序在收到其命令后将执行什么行动。这大大简化了用户与系统之间的交互，也无需为用户额外开发与软件系统图形用户界面交互的方法和指南。

我们来看看 vHealth 网络工具图形用户界面的主要元素（图27）：

– 界面中央部分包含根据用户档案向用户提供的所有媒体内容。媒体内容（默认情况下）按类别划分：

– 界面左侧包含 vHealth 网络工具的主菜单项，具体包括：“上传”（上传新媒体内容的函数）；“我的文件”（查看用户档案中已上传媒体内容的函数）；“我的播放列表”（创建媒体内容播放列表，并设置内容发布工作流）；“历史记录”（查看已浏览媒体内容列表的函数）；“人员”（查看 vHealth 服务所有用户的函数）；“类别”和“标签”（对媒体内容对象及其不同集合进行编目的函数）；

– 用户档案（账户）的图形界面如图28所示。用户可以访问个人媒体内容，并能够编辑其用户档案的图形界面以及每个媒体内容对象。此外，用户还可以访问播放列表页面（图29）。

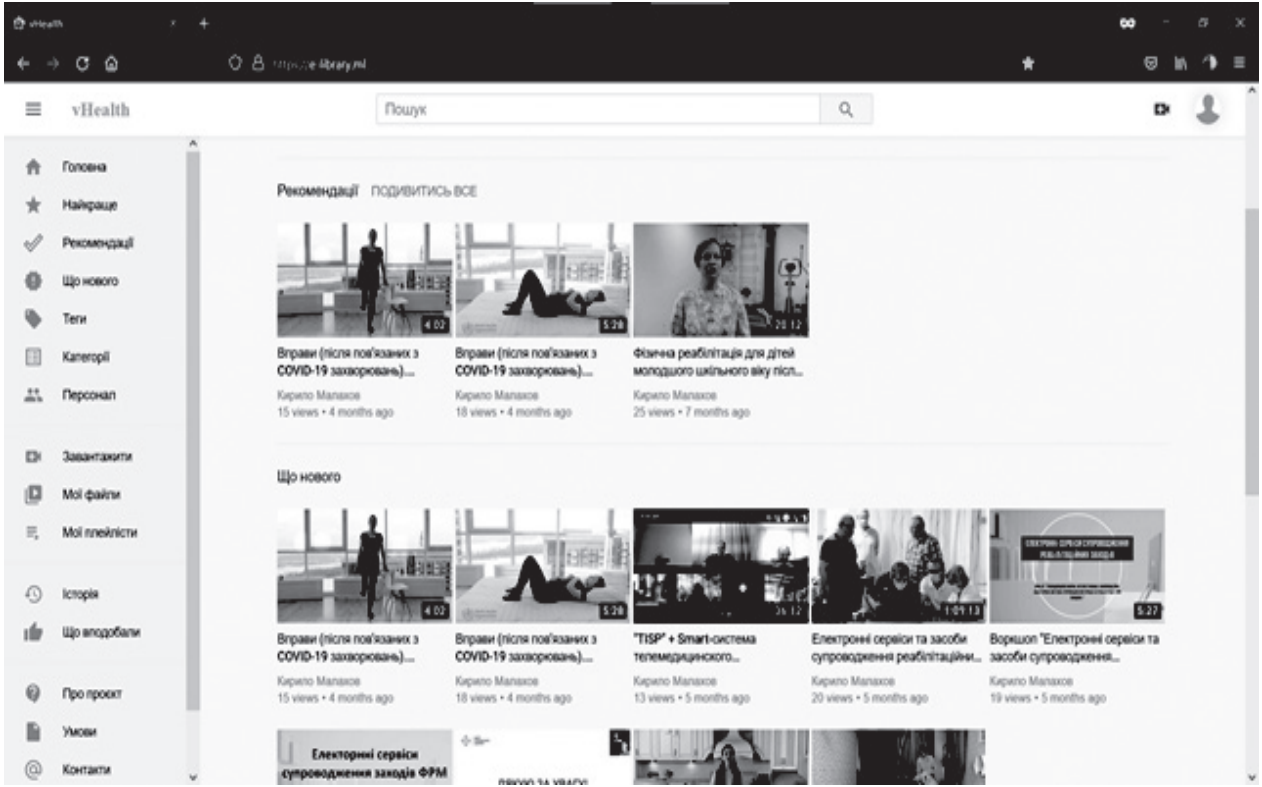


Рис. 27. Графічний інтерфейс користувача мережевого засобу vHealth (головна сторінка)

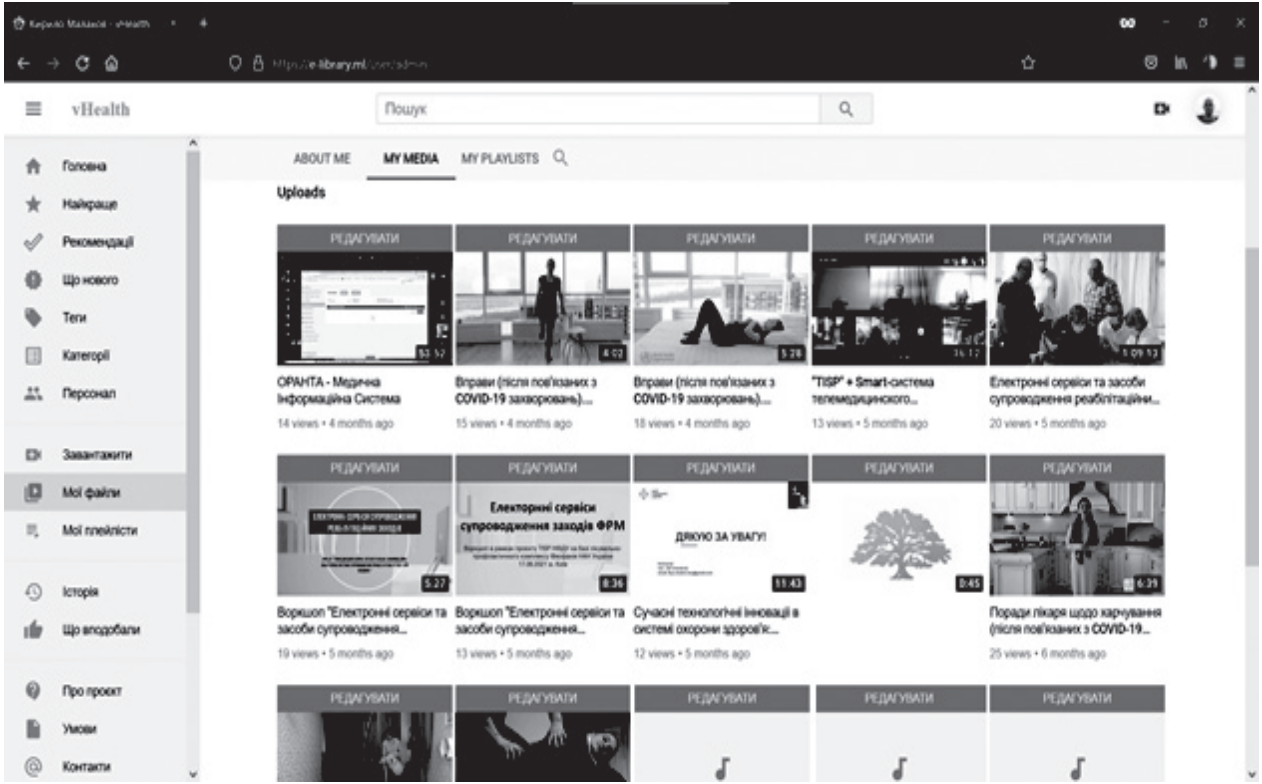


Рис. 28. Графічний інтерфейс користувача мережевого засобу vHealth (сторінка профілю користувача)

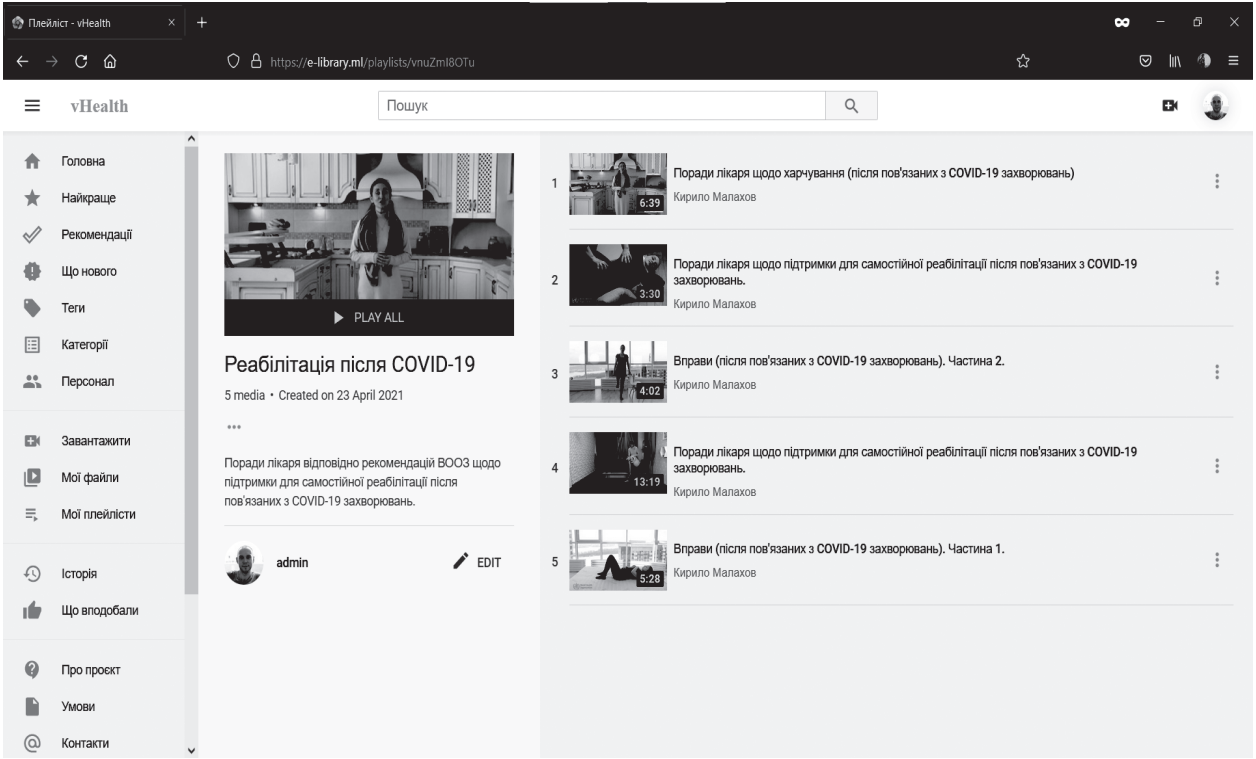


Рис. 29. Графічний інтерфейс користувача мережевого засобу vHealth (сторінка профілю користувача зі списками відтворення (плейлистами)

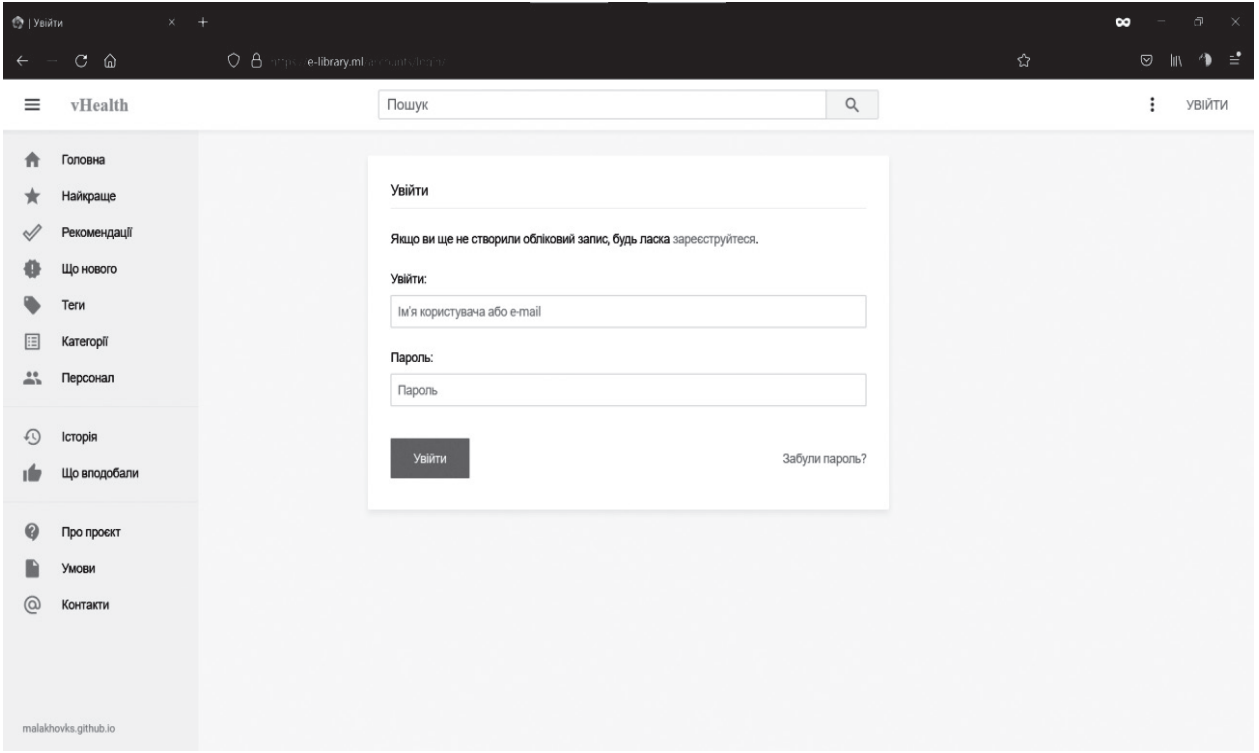


Рис. 30. Графічний інтерфейс користувача мережевого засобу vHealth (сторінка авторизації облікового запису користувача)

网络工具 vHealth 的编译、构建和部署技术，以及其源代码的详细描述，还有用户使用 vHealth 应用程序图形界面的方法，将在项目《大流行病期间康复过程支持的跨学科智能信息分析系统（TISP）》的最终报告中介绍。

vHealth 服务的当前版本可通过以下链接访问：https://vhealth.ai-service.ml/

要开始使用 vHealth 服务，用户必须先完成身份验证（登录），因此我们创建了一个用于演示服务操作的账户。可以使用演示用户档案账户的登录名和密码进行身份验证（图 30）：

用户名（登录名）：demouser
密码：JyMyuC6nMdD494T
链接：https://vhealth.ai-service.ml/accounts/login/

结果和结论

1. 系统整理了数学语言学中语言（分布语义）建模方法的理论基础。

2. 开发了分布语义模型实体向量表示的训练方法。

3. 开发了用于远程医疗陪护康复措施的智能系统服务的软件实现，具体包括 TISP远程康复子系统的媒体文件电子库——vHealth 服务，以及用于研究、建模和学习任意学科领域的电子工具——UkrVectōrēs 服务。

4. 开发了 UkrVectōrēs 和 vHealth 网络工具的部署模型。

5. 编写了 UkrVectōrēs 网络工具的 Web 服务应用程序接口（后端 API）描述。

6. 确定了混合式电子康复的概念及其基本原理。

后续研究展望。

后续工作计划将把计算机程序应用于实践，以优化多学科团队专业人员在康复肿瘤患者（尤其是乳腺癌患者）时应用国际功能、残疾和健康分类所耗费的时间。同时，还计划进一步研究有效的大规模数据数学分析方法的确定与应用，以及建模

并构建预测和优化整个康复过程系统及其路由的场景，使用团队中已验证的系统手段、技术以及开发康复系统的经验。

致谢

本研究在乌克兰国家研究基金资助下完成，依托于乌克兰国家科学院 B. M. Глушков 控制论研究所（乌克兰基辅），并结合以下项目开展：「面向大流行病期间康复进程的跨学科智能信息分析支持系统（TISP）」（2020—2020年）以及「基于数学建模的肿瘤患者患者中心型远程康复云平台开发」（2022—2023年）。

作者特别感谢乌克兰国家科学院 B. M. Глушков 控制论研究所第205微处理器技术部初级研究员、前端 Web 开发专家奥列克桑德尔·谢尔希约维奇·舒罗夫，感谢他为 UkrVectōrēs 和 vHealth 网络工具的开发，尤其是应用程序前端部分，作出了重要贡献。

作者特别感谢其学术导师奥列克桑德尔·瓦西里约维奇·帕拉金。他是乌克兰国家科学院院士、技术科学博士、教授、乌克兰功勋发明家，任乌克兰国家科学院 B. M. Глушков 网络研究所科研副所长及第205号微处理器技术部主任。

作者的科研与实践贡献

维塔利·尤里约维奇·韦利奇科。 章节：数学语言学中语言（分布语义）建模方法的理论基础；UkrVectōrēs 网络工具部署模型的开发。

马拉霍夫·基里洛·谢尔希约维奇。 章节：开发用于使用自然语言实体向量表示分布式语义模型的网络工具（网络服务）——UkrVectōrēs；TISP远程康复子系统的媒体文件电子库——vHealth服务。

本书献给我的儿子马克·基里洛维奇·马拉霍夫。

参考文献

1.《人工智能新知》。O'Reilly Media网站。网址：https://www.oreilly.com/library/view/artificial-intelligence-now/9781492049210/。（访问日期：04.01.2021）。2.《人工智能目前能为你的企业做什么、不能做什么》。全球管理咨询网站。网址：https://www.mckinsey.com/business-functions。（访问日期：04.01.2021）。3.《语音与语言处理》。斯坦福大学网站。网址：https://web.stanford.edu/~jurafsky/slp3/。（访问日期：04.01.2021）。4. Mikolov T., Chen K., Corrado G., Dean J. 在向量空间中高效估计词表示。arXiv预印本 arXiv:1301.3781。网址：https://arxiv. org/abs/1301.3781。（访问日期：04.01.2021）。5. 用于计算词连续分布式表示的Word2vec工具。谷歌代码门户。网址：https://code.google.com/archive/p/word2vec/。（访问日期：04.01.2021）。6. Mikolov T. 等。词和短语的分布式表示及其组合性。arXiv预印本 arXiv: 1310.4546。网址：https://arxiv.org/ abs/1310.4546。（访问日期：04.01.2021）。7. Word2Vec教程——跳元模型。Chris McCormick机器学习教程与见解网站。网址：http://mccormickml.com/2016/04/19/word2vec-tutorial-the-skip-gram-model/。（访问日期：04.01.2021）。8. Word2Vec教程第2部分——负采样。Chris McCormick机器学习教程与见解网站。网址：http://mccormick-ml.com/2017/01/11/word2vec-tutorial-part-2-negative-sampling/。（访问日期：04.01.2021）。9. Word2vecJava。GitHub网站。网址：https://github.com/medallia/Word2Vec- Java。（访问日期：04.01.2021）。10. Apache Spark。Apache Spark™——大数据统一分析引擎网站。网址：https://spark.apache.org/downloads.html。（访问日期：04.01.2021）。11. 面向人类的主题建模。Radimrehurek网站。网址：https://rad-imrehurek.com/gensim/。（访问日期：04.01.2021）。12. TensorFlow。TensorFlow网站。网址：https://www.tensorflow.org/tutorials/ t ext/word2vec。（访问日期：04.01.2021）。13. 用于高效文本分类和表示学习的fastText库。fastText网站。网址：https://fasttext.cc/。（访问日期：04.01.2021）。14. Bojanowski P., Grave E., Joulin A., Mikolov T. 利用子词信息丰富词向量。arXiv预印本 arXiv:1607.04606。网址：https://arxiv.org/ abs/1607.04606。（访问日期：04.01.2021）。15. Joulin A., Grave E., Bojanowski P., Mikolov T. 高效文本分类技巧集。arXiv预印本 arXiv: 1607.01759。网址：https://arxiv.org/abs/1607.01759。（访问日期：04.01.2021）。

16. Conneau A. 等. 无平行数据的词语翻译. arXiv 预印本 arXiv: 1710.04087. (2017年). 网址：https://arxiv.org/abs/1710.04087. (访问日期：04.01.2021). 17. Kutuzov A., Kopotev M., Sviridenko T., Ivanova L. 俄语和乌克兰语学术文本可比语料的聚类：词嵌入与语义指纹. arXiv 预印本 arXiv: 1604.05372. 网址：https://arxiv.org/ abs/1604.05372. (访问日期：04.01.2021). 18. 乌克兰语词性标注词典生成项目. GitHub 网站. 网址：https://github.com/brown-uk/dict_uk. (访问日期：04.01.2021). 19. models.keyedvectors — 存储和查询词向量. Radimrehurek 网站. 网址：https://radimrehurek.com/gensim/models/keyedvectors.html. (访问日期：04.01.2021). 20. models.word2vec — Word2vec嵌入. Radimrehurek 网站. 网址：https://radimrehurek.com/gensim/models/word2vec.html. (访问日期：04.01.2021). 21. gensim. GitHub 网站. 网址：https://github.com/RaRe-Technologies/gen- sim. (访问日期：04.01.2021). 22. TensorBoard. TensorFlow 网站. 网址：https://www.tensorflow.org/tensor- board. (访问日期：04.01.2021). 23. Python 下载. Python 网站. 网址：https://www.python.org/down- loads/. (访问日期：04.01.2021). 24. Flask 文档网站. 网址：https://palletsprojects.com/p/flask/. (访问日期：04.01.2021). 25. Flask-CORS. GitHub 网站. 网址：https://github.com/corydolphin/flask-cors. (访问日期：04.01.2021). 26. uWSGI. GitHub 网站. 网址：https://github.com/unbit/uwsgi. (访问日期：04.01.2021). 27. Pandas. GitHub 网站. 网址：https://github.com/pandas-dev/pandas/. (访问日期：04.01.2021). 28. nginx 网站. 网址：https://nginx.org/en/. (访问日期：04.01.2021). 29. Angular 是一个应用程序设计框架和开发平台. 网址：https://angular.io/. (访问日期：04.01.2021). 30. Fetch API. Mozilla MDN 网站. 网址：https://developer.mozilla.org/en-US/ docs/Web/API/Fetch_API. (访问日期：04.01.2021). 31. 维基媒体下载. 维基媒体网站. 网址：https://dumps.wikimedia. org/. (访问日期：04.01.2021). 32. LanguageTool API NLP UK. GitHub 网站. 网址：https://github.com/ brown-uk/nlp_uk. (访问日期：04.01.2021). 33. lang-uk 项目. Lang-uk 网站. 网址：https://lang.org.ua/. (访问日期：04.01.2021). 34. Docker 社区版. Docker 网站. 来源：https://www.dock- er.com/docker-community. (访问日期：04.01.2021).

35. Docker Hub 探索. (2020年). Docker Hub 网站. 网址：https://hub.docker. com/. 36. Docker Store 网站. 网址：https://hub.docker.com/search/?q=&type=im- age. (访问日期：04.01.2021). 37. docsim / UkrVectōrēs — 一款由自然语言理解驱动的知识发现工具. GitHub 网站. 网址：https://github.com/malakhovks/docsim. (访问日期：04.01.2021). 38. Docker 文档. Docker 网站. 网址：https://docs.docker.com/. (访问日期：04.01.2021). 39. Oracle VirtualBox. 网址：https://www.virtualbox.org/. (访问日期：04.01.2021). 40. 大流行病期间康复过程支持的跨学科智能信息分析系统 TISP：专著 / O. V. Palagin 编. 基辅：Просвіта；索非亚：ITHEA. 2021年. DOI: https://doi. org/10.54521/ibs34. 41. 乌克兰国家研究基金. 网址：https://nrfu.org.ua/. (访问日期：24.10.2021). 42. Velychko V., Malakhov K., Palagin O. 等. O. 用于远程支持康复措施的智能系统：形式模型、软件实现与应用方法. 《乌克兰物理与康复医学杂志》. 2021年. 第*9*(3–4)期. 第85–94页. 网址：https://doi. org/10.54601/2523–479X. 2021.9.3–4.11. 43. Kurgaev AF, Palagin OV. 基于生物反馈的康复. 第十一届 *IEEE* 智能数据采集与高级计算系统国际会议：技术与应用. (IDAA-CS) 2021年9月22–25日. 克拉科夫，2021年. 第2卷. 第1170–1175页. 44. O. V. Palagin、T. V. Semikopna、I. A. Chaikovskyi、O. V. Syvak. 远程康复：信息技术支持与使用经验. 《临床信息学与远程医疗》. 2020年. 第15卷，第16期. 第35–44页. DOI: https://doi.org/10.31071/kit2020.16.15. 45. Palagin A. V., Petrenko N. G., Velychko V. YU., Malakhov K. S. “本体工程工具综合体”软件系统的形式模型、算法、程序、工程与运行的开发. 第九届乌克兰编程国际会议论文集. *CEUR* 研讨会论文集 *1843*. 基辅，乌克兰，2014年5月20–22日. 网址：http://ceur-ws.org/Vol-1843/221–232.pdf. 46. Palagin O. V., Velychko V. YU., Malakhov K. S., Shchurov O. S. 研发工作站环境：新一类当前研究信息系统. *2018* 年第十一届乌克兰编程国际会议论文集24, 2018*2139*22 2139 255 269. *CEUR* 研讨会论文集 . 基辅，乌克兰，5月–. 网址：http://ceur-ws.org/Vol- / – . pdf. DOI: https://doi. org/10.15407/pp2018.02.255.

47. Палагин А. В., Петренко Н. Г., Малахов К. С. 领域本体设计方法。计算机工具、网络与系统。2011年。第10期。第5–12页。URL: http://www.dasd.com.ua/kzms/2011/2011_st1.pdf。48. Величко В. Ю., Малахов К. С., Семенков В. В., Стрижак А. Е. 本体工程综合工具。信息模型与分析。2014年。第3卷，第4期。第336–361页。URL: http://www.foibg.com/ ijima/vol03/ijima03–04.pdf#page=36。49. Palagin O. V., Velychko V. YU., Malakhov K. S., Shchurov O. S. 分布式语义建模：采用本体相关方法训练术语/词语向量空间模型的改进技术。第*12*届乌克兰编程国际会议 *UkrPROG 2020* 论文集。*CEUR*研讨会论文集*2866*。基辅，乌克兰，2020年9月15日至16日。URL: http://ceur-ws.org/Vol-2866/ ceur_342–352palagin34.pdf。数字对象标识符: https://doi.org/10.15407/pp2020.02–03.341。50. Palagin O., Velychko V., Malakhov K. 用于混合式电子康复决策的基于人工智能的方法。口头报告。*2021*年 *IEEE* 第*11*届智能数据采集与高级计算系统：技术与应用国际会议。克拉科夫理工大学。波兰克拉科夫，2021年9月22日至25日。数字对象标识符: https://doi.org/10.5281/zenodo.5635645。51. 乌克兰电子医疗保健系统。URL: https://ehealth.gov.ua/。52. Litvin A. A., VelychkoV. Y., Kaverynskyi V. V. 将自然语言短语转换为形式化查询的基于树的语义分析方法。无线电电子学、计算机科学与控制。2021年。第2卷。第105–113页。数字对象标识符: https://doi. org/10.15588/1607–3274–2021–2–11。53. 欧洲物理医学与康复医学白皮书。URL: http://www.whitebookprm.eu/。54. 国际功能、残疾和健康分类（ICF）。URL: https://www.who.int/classifications/international-classification-of-functioning-disability-and-health。55. Gladun V., Velychko V., Ivaskiv Y. 自结构化系统。信息理论与应用。2008年。第1期。第5—13页。

用于确定可使用的分布式语义模型列表的服务输出数据 JSON 模式

{ «$schema»: «http://json-schema.org/draft-07/schema», «$id»: «http://example.com/example.json», «type»: «object», «title»: «根模式», “ description”: «用于确定可供使用的分布式语义模型列表的服务输出数据模式。», «default»: {}, «examples»: [{ «models»: { «word

2 [vec»: { «description»: «使用神经元向量

-

针对“奥列斯·冈察尔”词表示模型（使用数据集——奥列斯·冈察尔创作遗产的诗学问题），维度为 500d 的 word2vec 词嵌入算法。实体为词，已进行词形还原并转换为小写。word2vec 参数：-size 500 -negative 5 -window 5 -threads 24 -min_count 10 -iter 20。”,

«name»: «honchar.lowercased.lemmatized.word2vec. FINAL. 500d», «link»: «», «language»: «ua», «index»: 0 }] } }], [ ], «required»: «models» «properties»: { «models»:

{ «$id»: «#/properties/models», «type»: «object», «title»: «模型模式», «description»: «关于此实例用途的说明。», «default»: {},

[

«examples»: { «word

2 [vec»: { «description»: «使用神经元向

量-

《奥列斯·冈察尔》词语表示向量模型（使用数据集——奥列斯·冈察尔创作遗产的诗学问题），维度为 500d 的 word2vec 词嵌入算法。实体为词，经过词形还原并转换为小写。word2vec 参数：-size 500 -negative 5 -window 5 -threads 24 -min

−count 10 -iter 20.》，

«名称»: «honchar.lowercased.lemmatized.word2vec. FINAL. 500d», «链接»: «», «语言»: «ua», «index»: 0 }] }

[

], «required»: 2 «wordvec»

],

«属性»: { «word2vec»: { «$id»: «#/

properties/models/properties/word2vec», «类型»: «数组», «标题»: «word2vec 模式», «描述»: «关于此用途的说明

i stance.», «默认值»: [[]], «示例»:

[

{ «描述»: «使用神经

词向量表示模型“奥列斯·冈察尔”（使用数据集——奥列斯·冈察尔创作遗产的诗学问题），采用维度为 500d 的 word2vec 词嵌入算法。实体为词，经过词元化并转换为小写。word2vec 参数：-size 500 -negative 5 -window 5 -threads 24 -min_count 10 -iter 20.»,

«名称»: «honchar.lowercased.lemmatized. word2vec.FINAL. 500d», «链接»: «», «语言»: «ua»,

«index»: 0 }] «additionalItems»: true, «项»: { «$
],

id»: «#/properties/models/properties/word2vec/items», «任一»:
[{ «$id»: «#/

properties/models/properties/word2vec/

items/anyOf/0», «type»: «对象», «title»: «第一个任一模式», «description»: «关于此实例用途的说明。», «default»: [{}, «examples»:
{ «description»: «使用非-

约纳的词向量词语表示模型“奥列斯·洪恰尔”（使用数据集——奥列斯·冈察尔创作遗产的诗学问题），维度为 500d 的 word2vec 词嵌入算法。实体——词，已进行词形还原并转换为小写。word2vec 参数：-size 500 -negative 5 -window 5 -threads 24 -min_count 10 -iter 20.」，

«name»: «honchar.lowercased.lemmatized. word2vec.FINAL.500d», «link»: «», «language»: «ua», «index»: 0 }
], «required»:
[
«description», «name»,
],

«link», «language», «index»

«properties»: { «description»: { «$id»: «#/
properties/models/properties/

word2vec/项/任一/0/属性/描述»,
«type»: «string»,

«标题»: «描述模式»,
«描述»: «关于
此实例的用途»,
«默认值»: «» ,
«示例»: [
«使用于 я нейро中世纪-
用于表示“奥列斯·冈察尔”词语的分布式模型（使用数据集——奥列斯·冈察尔创作遗产的诗学问题），维度为 500d 的 word2vec 词嵌入算法。实体为词，经过词形还原并转换为小写。word2vec 参数：-size 500 -negative 5 -window 5 -threads 24 -min count 10 -iter 20。”_
]
},
«名称»: {
«$id»: «#/属性/模型/属性/
word2vec/项/任一/0/属性/名称»,
«类型»: «字符串», «标题»: «名称模式», «描述»: «关于此

实例用途的说明。»,
«默认值»: «» ,
«示例»: [
«honchar.lowercased.lemmatized .
word2vec.FINAL. 500d»
]
},
«链接»: {
«$id»: «#/属性/模型/属性/
word2vec/项/任一/0/属性/链接»,
«类型»: «字符串»,
«标题»: «链接模式» ,
«描述»: «关于此
实例用途的说明。»,
«默认值»: «» ,
«示例»: [
«»
]
},
«语言»: {
«$标识符»: «# /properties/models/属性/
word2vec/项/任一/0/属性/语言»,
«类型»: «字符串»,
«标题»: «语言模式»,

«描述»: «对该实例用途的说明。», «默认值»: «», «示例»:

[

«ua»

]

}, «索引»: { «$id»: «#/属性/模型/属性/word2vec/ 项 / 任一 /0/ 属性 / 索引 », « 类型 »: « 整数 », « 标题 »: « 索引模式 », «描述»: «对该实例用途的说明。», «默认值»: 0, «示例»:

[

0

]

} }, «附加属性»: true }

] } } }, «附加属性»: true } }, «附加属性»: true }

分布语义预测模型学习软件工具源代码（gensim 软件库，word2vec算法）

```
from __future__ import unicode_literals

import multiprocessing, time from gensim.models
import Word2Vec from gensim.models import
Word2Vec as WV_model from
gensim.models.word2vec import LineSentence from
gensim import utils

class MyCorpus(object): """一个用于生成句子（字符串
列表）的迭代器。"""

    def __迭代__(self): corpus_path = './dataset/honchar/extracted_
lemmatized.txt' for line in open(corpus_path): # 假设每行对应一篇文档，
词元以空格分隔 yield utils.simple_preprocess(line)


# 输入 = "extracted.txt"

句子 = MyCorpus()

结束_模型 = "../models/honchar.lowercased.lemmatized.word2vec.500d"

大小 = 500 # 大小是特征向量的维度。

窗口 = 5 # 窗口是当前词与预测词之间的最大距离

句子中的词。

sg = 1 # 默认值为 (sg=0) 时使用 CBOW；否则 (sg=1) 使用 Skip-gram        .

# cbow_mean = 1 # cbow_mean = 如果为 0，则使用上下文词向量之和。如果
为 1（默认值），则使用平均值。仅在使用 CBOW 时适用。

样品 = le-5 # 配置随机下采样哪些高频词的阈值；默认值为 1e-3，有效范围为 (0,
1e-5)。
```

负采样 = *5 # 否定 = 若为 > 0*，则将使用负采样；负采样参数指定应抽取多少个“噪声词”（通常为 *5–20*）。默认值为 *5*。如果设为 *0*，则不使用负采样。

层次 Softmax = 0 *# hs = if 1*，则模型训练将使用层次 *Softmax*。如果设为 *0*（默认值），且否定不为零，则将使用负采样。

迭代 = 20

最小词频 = 10_

工作线程 = multiprocessing.cpu_count()

开始 = time.time()

 # 模型 = Word2Vec(LineSentence(inp), sg = sg, size = size, window = window, workers = workers, negative = negativeSampling, iter = iter, min_count = min_count, hs = hs, sample = sample)

模型 = Word2Vec(句子 = 句子, sg = sg, size = size, window = window, workers = workers, negative = negativeSampling, iter = **迭代**, min_count = min_count, hs = hs, 样品 = sample)

 # trim unneeded model memory = 使用（大幅）更少的随机存取存储器 model.init_sims(replace=True)

print(时间.time()-start)

相似 = 模型.wv.相似度(’陶工’, ’叶子’) **print**(sim) s = 模型.wv.most_相似(’陶工’) **print**(s) m = 模型.wv.most_相似(’英雄’) **print**(m) lc = 模型.wv.most_相似(positive= [’陶工’, ’英雄’]) **print**(lc)

模型.save(结束_模型)

分布式结构中的计算机回声定位基础

Khoshaba O. M.

本文提出了分布式结构中计算机回声定位的基础，其方法是生成并分析不同频率反射信号的延迟，以检测结构和功能异常。

展示了基于确定性和概率性研究方法的负载影响模型及数据处理模型分类。介绍了计算机回声定位在分布式结构中的应用示例，并阐述了借助计算机回声定位研究分布式结构的各个阶段。

本文提出了分布式结构中计算机回声定位的基础，其方法是生成并分析不同频率反射信号的延迟，以检测结构和功能异常。

展示了基于确定性和概率性研究方法的加载冲击模型及数据处理模型分类。介绍了计算机回声定位在分布式结构中的应用示例。阐述了使用计算机回声定位研究分布式结构的各个阶段。

1. 基本概念和定义。计算机回声定位是一种生成并分析不同频率的反射信号延迟的方法，用于检测计算机系统或分布式结构中的结构和功能异常。

利用计算机回声定位，可以在获取分布式系统结构和功能特征信息以及诊断其异常方面迈上更高的质量台阶。这些异常可能出现在企业软硬件系统运行的早期阶段，也可能出现在后期阶段。

计算机回声定位可通过评估因计算机回声定位对研究对象施加加载效应而获得的信号振幅和频谱，诊断分布式系统中的结构和功能异常。

随着组织基础设施日益完善，回声定位研究的重要性也随之提高，因为组织基础设施可能由异构的软硬件综合体和设备构成，并且可以确定其运行中的异常区域。

计算机回声定位基于对研究对象发出的信号和反射信号的使用。

计算机回声定位的使用基于重复进行一系列阶段，旨在研究加载效应过程并处理数据、选择研究对象负载效应参考（所需）轨迹的参数，以及形成、清理（消除噪声和失真）和分析信号。

利用计算机回声定位研究分布式结构的主要研究阶段包括以下内容。

1. 建立负载作用轨迹的参考模型。
2. 确定负载作用轨迹的主要参数。

3. 为信号成形做准备，确定采样方式。
4. 开展信号生成、信号发送、接收以及反射信号成形工作。

回声定位工作的各个阶段与研究主体和研究对象的运用密切相关。

如表1所示，计算机回声定位研究对象包含多种操作。针对加载作用轨迹的顶层操作缩写为 CRUD，含义如下。

C（创建）——按照特定参数，以模拟信号或离散信号的形式创建轨迹的操作。

R（读取）——读取轨迹参数的操作，可通过显示所需参数来完成。此外，此类操作还可输出多种类型的轨迹。

表1回声定位研究对象各层级的比较特征

规格	顶层	较低层级
研究对象	载荷轨迹	信号
层级特征	抽象	物理
使用的性质 方法	确定性研究 方法	概率研究 方法
研究操作 对象	CRUD 操作	采样操作

U（更新）——将一条轨迹添加到载荷作用场景中的操作，因为可以组合多条轨迹。

D（删除）——从载荷作用场景中删除已添加轨迹的操作。可以根据输入的轨迹参数，或根据已创建或添加轨迹的识别编号来执行此操作。

在载荷作用任务形式化阶段或使用数据库处理载荷作用参数时，执行上述操作会很方便。

2. 载荷作用过程与数据处理模型的模型分类。载荷影响与数据处理模型描述分布式结构中发生的进程。可使用确定性模型（图1）和概率模型（图2）来描述这些进程。确定性模型和概率模型这两类模型又分别划分为若干类别，各类别在其用途的性质和特点上有所不同。下面分别讨论各类模型及其类别。

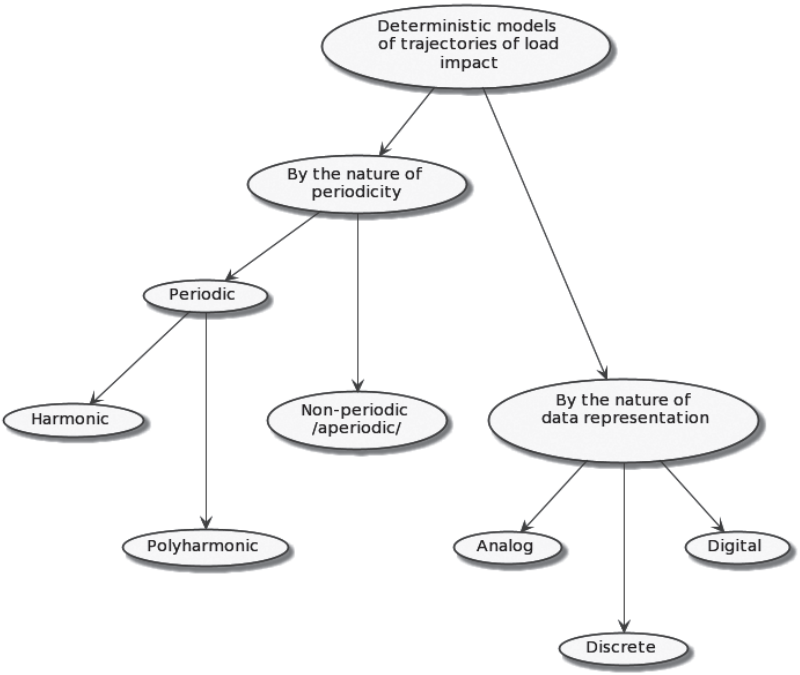


图1. 载荷作用与数据处理过程中的载荷作用轨迹确定性模型分类

2.1. 负载效应确定性模型的特点。确定性模型直接描述载荷作用本身的进程。当可以准确描述其在任意时间周期内的预测（行为）时，载荷作用过程的模型就是确定性的（或非随机的）。

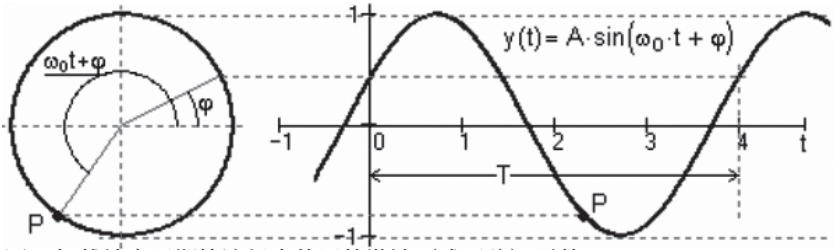


图2. 加载效应周期轨迹组中使用的谐波（或正弦）函数

载荷作用和数据处理（M_{LI}）进程的确定性模型由以下关系式表示：

$$M_{LI} = F(t,z,\omega,...,A,B,C,...),$$

其中 *t, z, w,...* 为独立自变量（时间、空间坐标、频率等）；

A, B, C... — 轨迹参数。

采用确定性模型时，负载作用轨迹的值是先验已知的，因为在数轴上的任意时刻或空间中的任意点，都可以相当准确地确定（计算）这些值。

负载作用轨迹的物理意义在于，它是一个参考函数，其中包含了在特定时间点向研究对象发出的请求数量的信息。

2.2. 负载作用轨迹中周期性本质的模型类别。在周期性本质模型类别中，可以将负载作用轨迹分为两组，分别对应周期函数和非周期函数（图1）。

在加载效应组的周期轨迹中，我们纳入谐波函数和多谐波函数。对于周期函数，满足一般条件，此时载荷冲击轨迹（Tr_{LI}，载荷冲击轨迹）具有以下形式：

$$Tr_{LI}(t) = Tr_{LI}(t + kT),$$

其中 k = 1、2、3.....为任意整数；

T — 周期，即一段有限的时间长度。

2.2.1. 载荷作用谐波路径。考虑载荷作用的谐波轨迹。我们将载荷作用轨迹的参数定义为振幅、频率和相移，这些参数将

决定加载作用和数据处理过程的总体特征。

接下来，我们将载荷作用作为信号时的以下信息参数表示如下：

A — 信号幅值（以测量单位计）；f_o — 循环频率（赫兹）；$\omega_o = 2\pi fo$ — 角频率（弧度）；φ 和 ϕ 为初始相位角（弧度）。在这种情况下，一个振荡周期为：

$$T = 1/f_o = 2\pi/\omega_o.$$

这一关系也体现了循环频率与角频率之间的关系。

如果将加载作用轨迹的一组谐波（或正弦）函数视为信号，则可描述如下关系（图2）：

$$Tr_{LI}(t) = A \cdot sin\,(2\pi f_o\, t+\phi) = A \cdot sin\,(\omega_o\, t+\phi),$$

or

$$Tr_{LI}(t) = A \cdot cos\,(\omega_o\, t+\varphi),$$

其中，A、f_o、ω_o、ϕ、φ 为常数，可作为信号的信息参数。

还应注意，对于 $\varphi = \phi - \pi/2$，正弦函数和余弦函数将描述同一信号。信号的频谱可用频率 fo 的振幅和初始相位值表示（图3）（在 t = 0 时）。

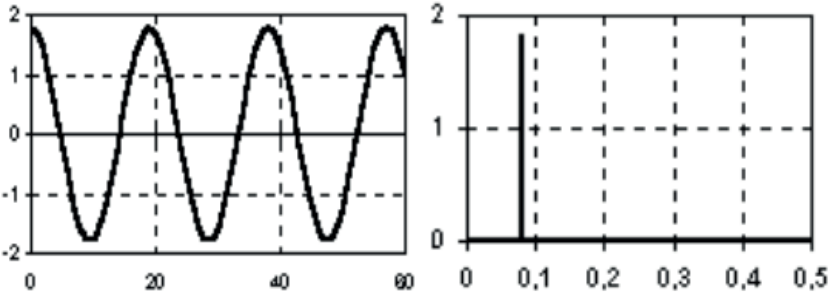


图3。以谐波信号形式表示的负载效应轨迹及其振幅频谱

2.2.2. 载荷作用的多谐波路径。 载荷作用的多谐波轨迹是一组轨迹，描述如下：

$$Tr_{LI}(t)=\sum_{n=0}^{N-1}A_n sin\left(2\pi f_n t+\varphi_n\right),$$

或直接通过函数

$$Tr_{LI}(t)=y(t\pm kT_p),$$

其中 k = 1,2,3,...,

Tr 是函数 $y(t)$ 完成一次完整信号振荡的周期，设定为一个周期。

值 $fp = 1 / T_p$ 定义为基波振荡频率。

同时，加载作用的多谐波轨迹由信号表示，这些信号由某个恒定分量（$f_o = 0$）与任意数量（极限情况下为无限多个）、具有任意振幅值 An 和相位 ϕ_n 的谐波分量之和组成，其周期是基频 f_p 周期的整数倍。

因此，在等于谐波最低频率或其整数倍的基频 fp 周期内，可以容纳所有谐波的多个周期。这就形成了信号的重复频率。

多谐波信号的频谱是离散的。对此，信号还有另一种数学表示形式，即以频谱（或傅里叶级数）的形式表示。

例如，考虑一个周期函数（图4）的表示形式，它由恒定分量（恒定分量的频率为 0）与三个频率值和振荡初相位各不相同的谐波振荡相加而成。

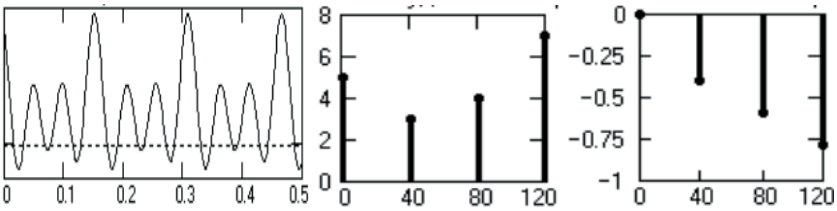


图4. 载荷作用轨迹模型

该公式给出了信号的数学描述：

$$r_{LI}(t)=\sum_{n=0}^{3}A_n cos\left(2\pi f_n t+\phi_n\right),$$

其中 A_k = {5, 3, 4, 7} — 谐波的振幅;
f_k = {0, 40, 80, 120} — 频率，单位为赫兹;
φ_k = {0, -0.4, -0.6, -0.8} 是谐波的初相角，单位为弧度;

k = 0,1,2,3 是周期数。
信号的基频为 40 赫兹。

负载作用轨迹的频域表示（以信号频谱的形式）如图4(b)所示。此外，周期信号 $Tr_{LI}(t)$ 的频域表示也已确定，其范围受频谱谐波数量的限制。

应注意，任意形状的周期信号都可以表示为频率为基频整数倍的谐波振荡之和:

$$f_p = 1/Tr.$$

为此，只需将信号的一个周期展开为正弦和余弦三角函数的傅里叶级数，其频率步长等于振荡的基频 $\Delta f = f_P$:

$$Tr(t) = \sum_{k=0}^{K} \left(a_k cos 2\pi k\Delta ft + b_k sin 2\pi k\Delta ft\right),$$

$$a_0 = (1/T)\int_0^T Tr(t)dt, a_k = (2/T)\int_0^T Tr(t)cos 2\pi k\Delta ftdt,$$

$$b_k = (2/T)\int_0^T Tr(t)sin 2\pi k\Delta ftdt.$$

傅里叶级数的项数 K = kmax 通常受信号中谐波分量的最高频率 fmax 限制，使得 $f_{max} < K \cdot f_P$。

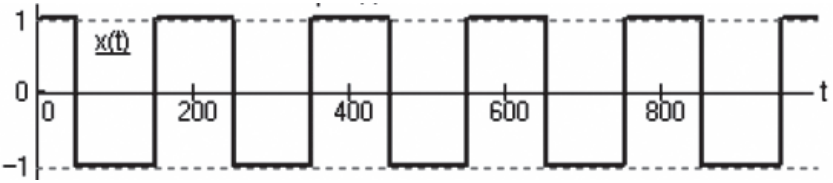
然而，对于存在不连续点和跳变的信号，$f_{max} \to \infty$ 是存在的。在这种情况下，级数项数受函数 $Tr_{LI}(t)$ 允许的逼近误差限制。

单频余弦和正弦谐波可以合并并以更紧凑的形式分解如下:

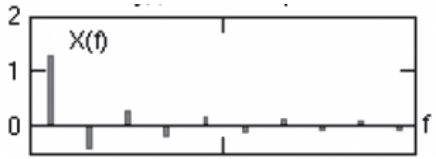
$$Tr(t) = \sum_{k=0}^{K} Tr_k cos\left(2\pi k\Delta ft - \varphi_k\right), ,$$

$$Tr_k = \sqrt{\ }, \ \varphi_k = arctg\left(b_k / a_k\right).$$

在频域中，矩形周期信号（方波）也可以用幅值傅里叶级数表示。例如，在图5中，载荷作用的轨迹呈矩形周期信号形式，该信号关于$t=0$对称，不含正弦谐波，并且此信号模型的所有φ_k值均为零。



a) 时间模型



b) 幅度谱

图5. 以矩形周期信号形式作用的载荷轨迹模型

加载作用的多谐波轨迹的输入参数可以是：

– 波形的特征（从最小值到最大值的变化幅度、偏离平均值的异常程度等）；

– 信号谐波的一些参数。

例如，对于矩形脉冲，输入参数可以是脉冲重复周期、脉冲持续时间、脉冲占空比（即周期与持续时间之比）。

分析复杂周期信号时，输入参数还可以是：

– 特定时间的电流平均值（A_C），例如，某段时间内的电流平均值：

$$A_C = 1/T \int_{t}^{t+T} Tr(t)dt ,$$

– 一个周期的恒定分量（C_C）：

$$C_C = 1/T \int_{0}^{T} Tr(t)dt ,$$

– 平均整流值（A_R）：

$$A_R = 1/T\int_0^T \left|Tr(t)\right|dt\ .$$

2.3. 载荷作用轨迹数据表示类别的模型。 数据表示类别的模型描述基于轨迹的进程，适用于能够将载荷作用的值表示为函数或信号的情况：

– 模拟型，不进行量化；– 离散型，仅在时间尺度上进行量化；– 数字信息型，在所有尺度上进行量化。

在这种情况下，信号可以理解为包含信息的物理或抽象进程。

载荷作用轨迹的模拟表示属于连续线，其在相对于时间轴的每一时刻都有一组确定的值（图6）。

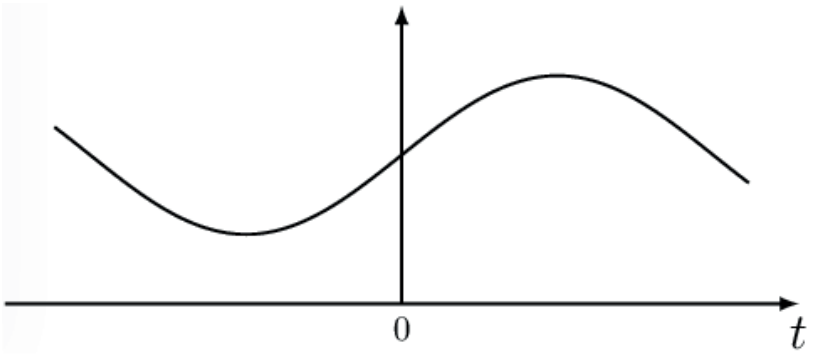


图6. 载荷作用轨迹的模拟表示

载荷作用模拟轨迹的值（图6）在每一时刻都是任意的。因此，这种轨迹可以表示为连续函数（取决于时间或某个变量），也可以表示为时间的分段连续函数。

载荷作用轨迹的模拟值在一定范围内可以有无限多个值。它们是连续的，且其值不能发生突变。

负载作用轨迹的模拟形式写作 *x(t)*，其中 t 表示某个特定时刻。

这种虚线属于负载作用轨迹的离散表示，其值仅在特定时刻的许多点上存在（图7）。

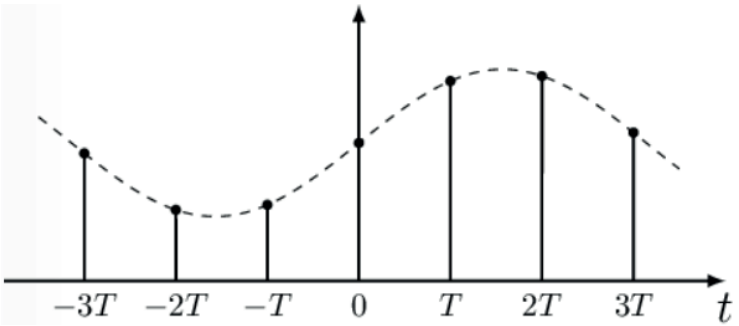


图7. 负载作用轨迹的离散表示

因此，负载作用轨迹的离散表示仅在特定采样时刻取特定值。也就是说，与负载作用轨迹的模拟表示不同，虚线并不连续。因此，图7展示了负载作用轨迹以采样间隔（或步长）*T*形成离散表示的示例。

使用负载作用轨迹的离散表示时，需要注意以下几点：

– 对于这种表示类型，只在时间尺度上的采样间隔处进行量化，而不对负载作用轨迹本身的值进行量化；

– 对于这种表示方式，可以使用时间轴上均匀或不均匀的间隔。

负载作用轨迹的数字表示只取固定值（图8），这些值在时间轴上按一定间隔（步长）分布。

图8展示了一个基于模拟表示形成负载轨迹数字表示的示例。在这种情况下，需要注意的是，数字表示的值不能取中间值。

因此，负载作用轨迹的数字表示是一种离散表示，其中不仅在时间尺度上进行量化，而且在数值级别上也进行量化。

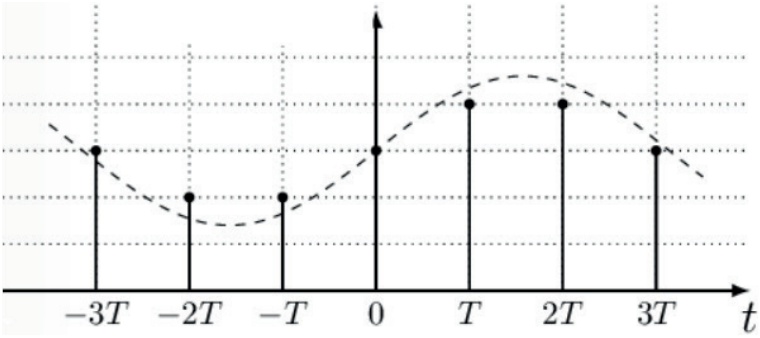


图8. 载荷作用轨迹的数字表示

在解决若干问题时，可以广泛采用这种负载作用轨迹的表示形式。当使用控制器或其他计算设备，基于布尔代数解决若干建模问题时，这种负载影响轨迹的表示形式尤其受到需求。

3. P加载效应过程的概率模型与数据处理

3.1. 使用概率模型的特点。 随机（概率）模型描述了研究对象受加载效应影响而产生的数据处理过程。数据处理模型通过指定概率分布、相关函数、谱密度等各种规律，描述随机过程的统计特征。

4. 基于八度音符频率的负载效应轨迹应用示例。 有一张八度音符频率表。有时可以利用这张表来设计负载路径。

例如，第一八度的 A 音（A）的频率为 440.00 赫兹，第二八度的 C# 音频率为 554.37 赫兹，而第二八度的 E 音（E）为 659.26 赫兹。我们将所选音符的数值取整，得到以下数值：

$$A = 440 \text{ Hz};$$

$$C\# = 550 \text{ Hz};$$

$$E = 660 \text{ Hz}.$$

让我们编写 Matlab 程序代码：循环频率为：

$$fc = 440;$$

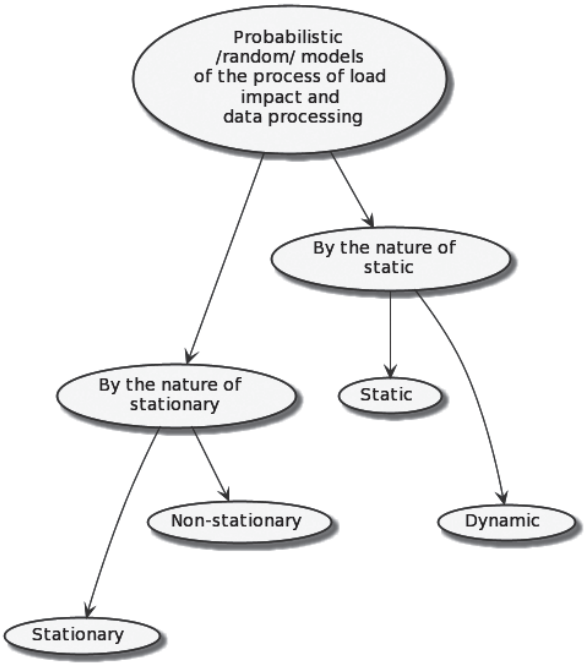


图9. 加载冲击和数据处理过程概率模型的分类

采样率为：

$$fs = 8000;$$

周期内的时间间隔为：

$$dt = 1/fs;$$

恒定分量（A_k）将等于：

$$Ak = 2.5.$$

接下来，我们创建时间向量 t，其值从 0 到 0.1 秒，步长为 1.25 * 10–4：

$$t = 0: dt: 0.1.$$

接下来，我们按如下方式创建一个余弦波：

$$Tr = Ak + \cos (2 * pi * fc * t).$$

请看负载作用轨迹图（图 10）：

plot (t, Tr)

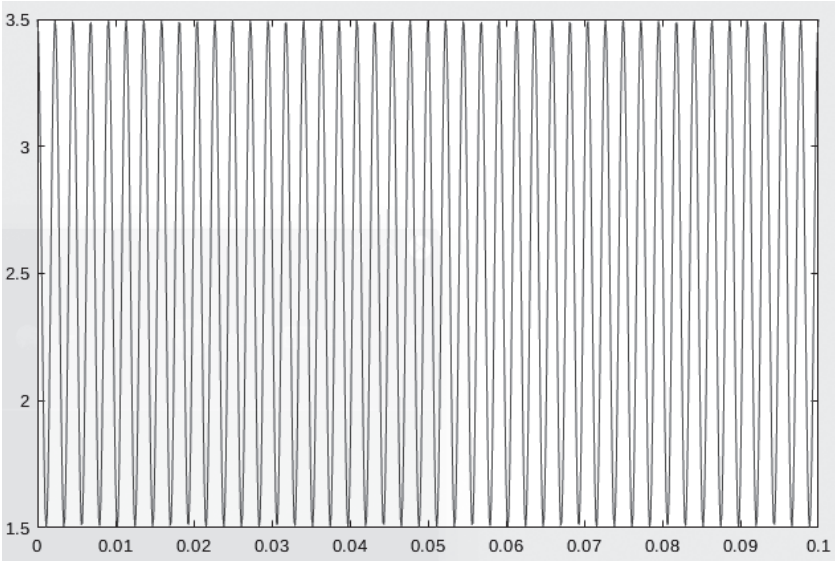


图 10. 第一八度 A 音信号的负载效应轨迹图

5. 使用计算机回声定位研究分布式系统的结构。 使用计算机回声定位研究分布式结构包含几个功能组件（图 12）：负载生成器（或基准测试）、负载均衡器、监控系统、模块和节点。

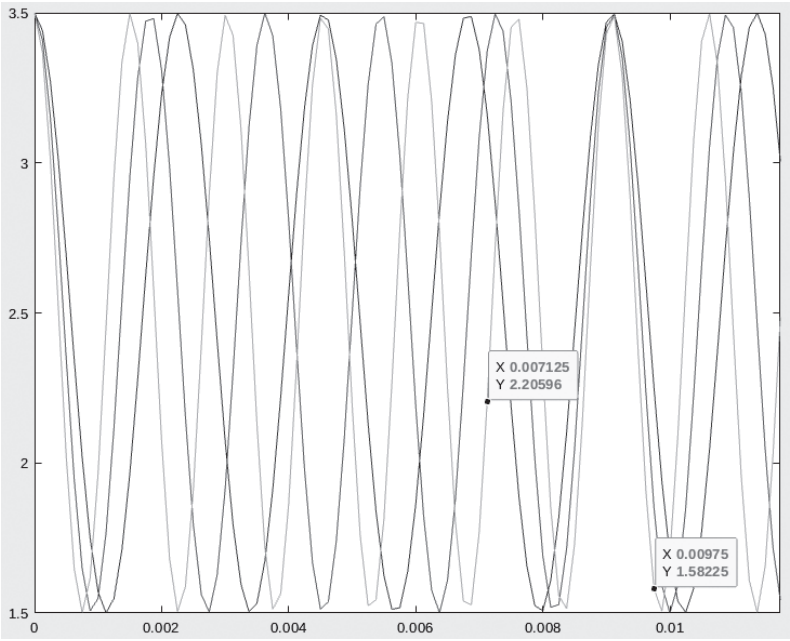
我们来看看分布式结构的主要分量。基准测试是负载均衡器研究结构中的一个结构分量，用于生成按特定轨迹执行的请求流。

模块是负载均衡器研究结构中的一个结构分量。其主要函数包括：

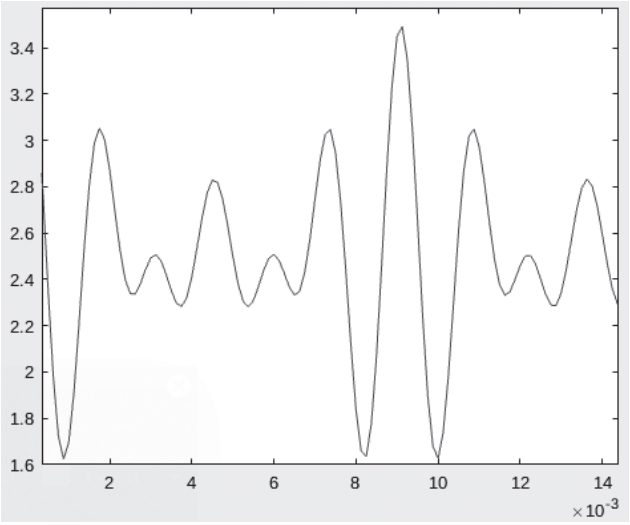
– 处理和交换同步请求流；
– 池与负载均衡器之间的请求同步。

池是负载均衡器研究结构的一个结构组件，其作用是：

– 请求流存储；



a)



b)

图 11. 三个音符信号的负载效应轨迹图：a) 单个信号的表示；b) 三个信号总和的表示

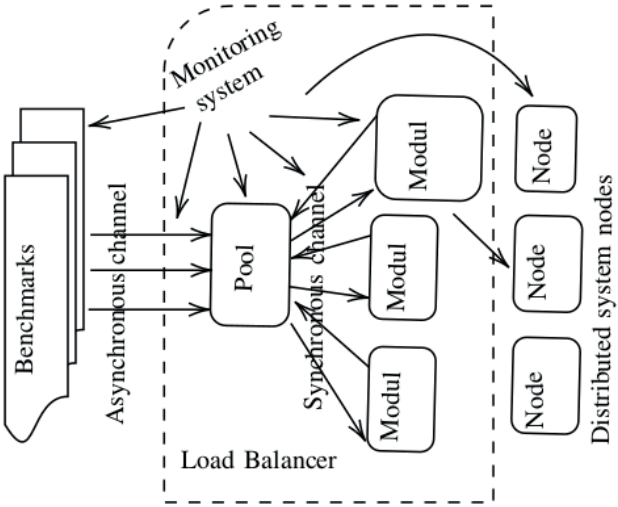


图 12. 分布式系统的研究结构。

– 基准测试与负载均衡器模块之间请求流的同步。

I在这个负载均衡器研究系统中，池是一个动态瓶颈 .

分布式系统节点是负载均衡器的一个结构组件。其主要功能是在特定场景中执行基准测试所创建的请求流。请求流通过模块传输至分布式系统节点。

研究系统的监控系统是负载均衡器的一个结构组件，用于测量基准测试、负载均衡器的池、模块以及通信信道的性能。

在此负载均衡器研究结构中，瓶颈变化动态的测量基于观测点。该结构可以为研究结构的监控系统设定观测点，以监测特定时间间隔内的过程或某个事件的发生。

此外，通信信道在负载均衡器研究结构的运行中发挥着重要作用。通信信道是结构性构成，用于将请求传送至负载均衡器的主要分量。

通信信道可以在通信信道中传输同步和异步请求流。

6. 分布式系统运行评估的比较特征。对分布式系统运行情况进行评估的比较特征，基于这样的假设：在此类结构中执行的进程具有静态和动态特性。为了解决确定节点运行评估值的问题，文献中提出了并行和分布式结构模型，这些模型基于用于解决问题的参考算法 [1–4]。

在这方面，基于并行系统模型确定节点工作量的估计值时，应用程序使用基准串行算法在时间 T 内解决某个问题 A [2, 4]。此时使用加速比估计，其定义如下：

$$S = T_0 / T ,$$

其中，T_0 是应用程序在一个设备（节点）上使用最快的串行算法解决基准问题 A 所需的时间。

加速比 S 表示通过使用并行结构 [3]，节点能够将应用程序解决问题所需的时间缩短多少倍。

对并行结构中节点上的应用程序工作情况进行的下一项评估是效率，通常定义 [1, 3] 如下：

$$E = S / nT_0 / nT .$$

所描述的应用程序在并行结构上的运行模型便于计算评分。然而，在该模型中，只有在问题解决后、总时间 T 已知时，才能确定其估计值。此外，该模型还要求知道在并行结构的一个节点上，使用串行算法集合中最佳算法解决问题所需的时间 T0。

由于以下两个方面，在工作评估中使用相似模型的另一种方法采用了分布式结构。首先，由于分布式结构具有异构性，其中的节点可能具有不同的值，用于评估应用程序的性能，因为这些节点拥有不同的计算资源。其次，在整个问题的求解过程中，分布式结构中的节点可能会在某些时段不可用。

考虑一种用于分布式结构应用程序的模型，该模型的特征是存在调度，其定义如下：

$$h_i(t): \Re \rightarrow \{0,1\} .$$

此外，如果节点上的应用程序在时间 t 可用于解决问题 A，则 hi (t) = 1 。否则，如果 hi (t) = 0，则节点上的应用程序在时间 t 不可用。

对分布式结构上的应用程序进行性能估计时，需假设不同的关系。因此，对于具有分布式结构调度的模型，效率评估形式为 [5]:

$$E_t = \frac{\underline{T}(A)}{T(A)},$$

其中，*T(A)* 是求解问题 *A* 的参考时间。

参考时间 *T(A)* 表示在节点上由第 *i* 个应用程序使用最快的串行算法求解问题 *A* 所需的时间，其中 T(A)> 0。

此外，对于分布式结构上的应用程序，还引入了以下额外估计 [5,6]: 参考系统的性能和任务复杂度。计算参考系统性能 *(A, t)* [5–7] 是计算 *T(A)* 的必要步骤。

结构的参考性能 *i(A, t)* 称为 [7] 分布式系统中第 *i* 个节点求解问题 *A* 时的性能:

$$\pi_i(A) = \frac{L(A)}{\underline{T_i}(A)},$$

其中，*L(A)* 是一个函数，表示应用程序在分布式结构上执行任务的任务复杂度。

任务执行的函数复杂度 *L(A)* 是针对特定任务集合定义的，表示对其复杂度的先验认知:

$$L(A): \Lambda \to \Re^+.$$

例如，使用复杂性理论 [8–10], 计算得出的基本操作数量估值，可称为分布式结构上的应用程序执行任务的复杂度函数 L (A)。

为解决确定并行和分布式结构中节点运行估算值的问题，引入了带调度的模型，该模型将结构的参考性能描述为各节点参考性能之和 [7]:

$$\pi(A,t) = \sum_{i=1}^{n} \pi_i(A) h_i(t) = (\vec{\pi}(A), \vec{h}(t)),$$

当节点上的应用程序完全可用时$()_i$　　$1ht\equiv$　在求解问题的过程中，且参考性能相同时，其中$()_{0\,i}A\pi$　　$=\pi$，分布式结构的参考性能将与并行结构的参考性能一致，因为条件$_0n\cdot\pi$　将得到满足。

同时，用于求解一组问题的带调度模型称为集合：

$$\Re =<\vec{\pi}(A),\vec{h}(t)>.$$

对于带调度的模型，求解问题 A 的参考时间称为值 $(\ )T\ A$ [5–7]，其由以下关系确定：

$$\underline{T}(A)=mint:\int_{t=0}^{t}\pi(A,\tau)d\tau\,.$$

一般而言，并行结构的加速率定义为应用程序在单个节点上解决问题所需时间与在整个系统上解决问题所需时间之比。在带调度的分布式结构中，各节点的资源可能不同。因此，不能以同样的方式将加速这一概念引入分布式结构中的应用程序，因为无法确定应以哪个节点来计算加速参数本身。基于此，我们引入一个更一般的概念——相对加速，其定义如下：

$$S(R_1,R_2)=\frac{T_1}{T_2}.$$

该关系表示带调度模型 $S\,R_1$ 相对于另一系统 R_2 的加速估计值，即它们在分布式结构中的应用程序上解决问题 A所需时间之比。

此外，对于带调度的模型，通常按如下方式估算分布式结构中每个节点的加速比 S：

$$S(R_1,R_2)=\frac{T_1}{T_2}.$$

该关系将节点上第i个应用的加速比 Si 估算为求解问题 A 的参考时间与基于带调度的模型在分布式结构中求解同一问题所需时间之比。

结论。本文提出了分布式结构中计算机回声定位的基本原理：通过生成并分析不同频率反射信号的延迟，检测结构和功能异常。

本文展示了基于确定性和概率性研究方法的负载模型与数据处理模型分类，并介绍了计算机回声定位在分布式结构中的应用示例。

对回声定位研究对象各层次的比较特征进行了描述。

介绍了借助计算机回声定位研究分布式结构的研究阶段。

参考文献

1. Афанасьев А. П., Посыпкин М. А., Хританков А. С. 分布式系统性能评估的分析模型 //《程序产品与系统》。— 2009年。— 第 4 期。— 第 60–64 页。 2. Хританков А. С. 分布式计算系统性能特征的数学模型 // 莫斯科物理技术学院第 50 届科学会议论文集。— 2007年。— 第 86–88 页。 3. Хританков А. С. 关于分布式系统性能特征 // 莫斯科物理技术学院第 51 届科学会议论文集。— 2008年。 4. Хританков А. С. 负载分配模型与算法。基于排队网络的算法 //《信息技术与计算系统》。— 2009年。— 第 3 期。— 第 33–48 页。 5. Посыпкин М. А., Хританков А. С. 关于分布式系统中的加速与效率概念 // 全俄科学会议《互联网科学服务：大型问题求解》论文集。— 2008年。— 第 149–155 页。 6. Хританков А. С. 求解可变规模任务时分布式系统的效率评估 // 圣彼得堡国立信息技术、机械学与光学大学科学技术学报。— 2010年。— 第 2(66) 期。— 第 66–71 页。 7. Посыпкин М. А., Хританков А. С. 关于分布式计算系统中的性能概念 // 俄罗斯科学院系统分析研究所论文集。— 2008年。— 第 32 卷。— 第 26–32 页。 8. J. L. Balc´azar、J. D´ıaz 和 J. Gabarr´o。《结构复杂性 II》。第 22 卷。EATCS 理论计算机科学专著。施普林格，1990年。[电子资源] / 电子数据 — 访问方式：http://dx.doi. org/10.1007/978–3–642–75357–2。 9. J. L. Balc´azar、J. Dıaz 和 J. Gabarr´o。《结构复杂性 I》，第二版。理论计算机科学丛书，EATCS 丛书。施普林格，1995年。[电子资源] / 电子数据 — 访问方式：http://dx.doi. org/10.1007/978–3–642–79235–9。 10. O. Goldreich。《P、NP 与 NP 完全性：复杂性理论基础》。剑桥大学出版社，2010年。

数学模型和软件在新型食品设计中的应用

Котлик С. В.，Соколова О. П.

本文说明了人们食用发酵乳制品（奶酪）的必要性，并阐述了这些产品的优点及其益处。奶酪中含有多种动物脂肪，但现代技术使以植物脂肪替代动物脂肪成为可能。与此同时，需要按一定比例使用植物油，使混合脂肪中的饱和脂肪酸、单不饱和脂肪酸和多不饱和脂肪酸的含量接近合理营养理论推荐的比例。为此进行了相应的实验，并采用回归相关分析方法处理实验结果，获得了适用的数学模型。为此还编制了计算机程序，该程序使用自有数据库和随机搜索法来优化函数。程序通过一组实验数据进行了验证，结果与实际数值吻合良好。此外，还建立了使用葵花籽油和橄榄油调和油生产酸凝乳干酪时乳液均质化的数学模型。为确定最佳均质工艺参数，建立了乳液稳定性和脂肪相分层与温度、压力之间依赖关系的数学模型。为应用这些模型，还开发了应用程序并进行了验证，同时提供了使用建议。总体而言，所开发的程序为工艺师用户提供了一种工具，可用于计算添加植物油的新型发酵乳制品配方；用户无需进行物理实验，即可根据所建立的数学模型，在计算机上研究产品性质。

本文阐明了人们食用发酵乳制品（奶酪）的必要性，并介绍了这些产品的优点及其带来的益处。奶酪配方中含有多种动物脂肪，但现代技术使动物脂肪可以由植物脂肪替代。在这种情况下，必须以适当比例使用植物油，使脂肪混合物中 *SFA*、*MUFA*、*PUFA* 的含量接近合理营养理论所推荐的比例。为此，研究人员进行了相应的实验，采用回归相关分析处理实验数据，并获得了适当的数学模型。为此，他们开发了一个计算机应用程序，该程序使用自有数据库和随机搜索方法对函数进行优化。该程序使用一组实验数据样品进行了测试，所得结果

与实际数值吻合良好。研究人员还针对奶酪生产中使用葵花籽油和橄榄油混合物的情况，建立了乳状液均质化的数学模型。为确定最佳均质化条件，他们建立了乳状液稳定性及脂肪相沉降与温度、压力之间关系的数学模型。此外，他们还开发并测试了供实际应用的软件，并提出了使用建议。总体而言，所开发的程序为用户（工艺技术人员）提供了一种工具，使其无需进行物理实验，即可依据所开发的数学模型，在计算机上考察产品属性，计算添加植物油的新型发酵乳制品配方。

问题的提出。改善居民膳食结构的重要任务之一，是增加具有较高营养价值和生物价值的大众消费食品。现代膳食不仅应满足人体对营养物质和能量的生理需求，还应发挥预防和治疗功能，当然也必须绝对安全。

通过对食品配方进行数学建模，可以开发具有指定质量特性的食品。建模任务在于有依据地定量选择主要原料和营养强化添加剂，使其共同确保成品形成所需的感官和理化属性，并达到指定的消费价值和能量价值水平。通过计算机建模，可以在既定标准（或标准体系）下优化所开发产品的特定属性，而无需进行昂贵的实验研究。这种方法论能够开发具有特定蛋白质、脂肪、碳水化合物、维生素、膳食纤维、氨基酸、矿物质及其他物质含量的食品 [8; 9; 16; 21; 47]。

如今，“产品设计”这一概念包括开发能够表示数学依赖关系的模型，这些模型反映一个或多个关键参数的所有变化。同时，必须优化标准输出组成部分的选择及其比例，以获得一种配方，使其在数量含量和质量组成方面最大限度地符合既定的平衡膳食公式，满足既定需求，并具有较高的消费特性 [22；40；46]。

在科学和技术（首先是计算机和软件）现代发展的条件下，开发和生产具有规定质量与组成的新产品，需要采用相应的数学工具和高性能计算机设备。

寻找并开发高效数值方法、数学模型和算法，并将最新信息技术实现为面向问题的程序系统，以解决优化问题并开展计算实验，这对生产活动的各个领域都具有现实意义，包括新食品的开发。

目前，这类高效配方的创建基于开展必要的实地实验、运用回归相关分析方法处理结果、构建适当的数学模型、开发相应的软件并进行综合计算。这种方法能够节省物质资源，并提供一种工具，用于计算具有指定特性的新产品配方 [21]。

综上所述，拓展优化软件工具的功能，将有助于在开发具有特定化学成分、消费特性和工艺特性的新型食品方面迈上一个全新的台阶。采用数学建模方法设计组成最优的食品，可降低食品开发的资金和时间成本，其中包括各种发酵乳制品，如奶酪；还可及时应对技术社会中人体需求的变化，并大幅丰富功能性、治疗预防性及治疗性产品的品类，以满足特定人群的营养需求[23]。

医生推荐的几乎所有治疗膳食菜单中，乳制品和发酵乳制品都名列前茅，尤其是奶酪。不过，奶酪对任何年龄段的健康人也有益。奶酪是乳蛋白以及牛奶中某些其他成分的浓缩物。蛋白质对我们生活的重要性众所周知：它是构成机体细胞、酶以及免疫体的材料，免疫体使机体获得抵御疾病的能力。人体通过食物摄取蛋白质，

再将其分解为氨基酸，并以这些特殊的“砖块”构建仅适合我们机体的新蛋白质分子。为此，人体需要由20种氨基酸组成的集合，而奶酪正是这些氨基酸的主要来源。除了蛋白质，矿物质对机体正常活动也必不可少，其中最重要的是钙和磷的化合物。它们正是骨组织和牙齿的主要构成成分。顺便一提，这也解释了为什么在机体形成和生长期间，儿童和青少年需要额外补充钙。还应补充一点，由于乳制品富含钙，它们对于结核病、骨折、造血设备疾病和佝偻病患者不可或缺。

奶酪制品是指用纯种乳酸菌发酵牛奶或奶油制成的产品。有些奶酪制品仅通过乳酸发酵制得；在此过程中会形成相当致密、均匀且具有明显酸奶风味的凝乳。奶酪制品因其治疗和膳食特性、可口的味道以及易于消化吸收等优点，在人类饮食中具有重要价值 [42]。

奶酪含有 14–17 % 的蛋白质、至多 18 % 的脂肪和 2.4–2.8 % 的乳糖。它富含钙、磷、铁、镁等物质，这些都是年轻机体生长和正常发育所必需的。奶酪及其制品营养价值很高，因为含有大量蛋白质和脂肪。奶酪中的蛋白质有一部分与磷盐和钙盐结合，这有助于它们在胃和肠道中更好地消化。因此，奶酪很容易被人体吸收。

食用奶酪和奶酪制品有助于促进体内物质的正常代谢，并维持渗透压处于一定水平。矿物质参与骨形成，为神经系统提供营养，并有助于提高血液中的血红蛋白水平。奶酪含有多种A、B、C、D族维生素及其他许多维生素。奶酪中还含有各种动物脂肪，不过现代技术可以用植物脂肪替代动物脂肪 [38；42–44]。

这能延长产品保质期、降低成本、提升消费品质，并避免有害胆固醇。但只有使用优质脂肪组分，而非廉价替代品，才能生产出这样的产品。

以植物脂肪替代动物脂肪的做法最常见于乳品工业。现代脂肪体系将乳脂的替代比例控制在30–50%，以植物脂肪替代乳脂，即可生产混合油、酸奶油、奶酪、冰淇淋、开菲尔和奶酪制品；这些产品在风味和质地上与传统的100%乳脂产品几乎没有区别。

根据平衡膳食概念，为维持人体正常生命活动，必须摄入适量的能量和主要营养物质，同时严格遵循多种营养因素之间的特定比例关系——蛋白质、脂肪、碳水化合物及其他组件 [9；10；38]。

设计原料种类复杂的发酵乳制品配方时，应考虑到，使用生物价值较高的植物性原料，可以获得维生素、矿物质、碳水化合物和氨基酸组成得到改善的复合物，与单独使用各组件相比，且能够更精细地控制产品形成过程。

生产符合合理膳食需求的乳基产品时，必要环节包括论证乳脂基料并筛选有助于调整其组成的配料，以及论证所选生理性添加剂的脂肪酸组成 [22; 43]。

本研究致力于开发软件，通过对不同组分及其比例进行数学建模，使用植物油调和油来设计和优化奶酪制品配方。

类似计算机程序开发的分析。所提出的配方优化模型大多归结为线性规划任务，其中目标函数通常体现为：混合物成本最低、某一组成部分的产出最大、要求各组成部分不低于某一数值，以及将多个具有不同权重系数的准则 объединяет 的某种加性准则。在大多数出版物中，研究在构建数学模型并解释其应用预期结果的阶段即告结束。可以列举出少数尝试，即借助计算机程序在实践中实现所提出的食品配方开发方案，尽管这种方法在逻辑上是合理且有效的

；[8；16；25；26；34–37]。

用于计算新产品配方的计算机程序开发研究，主要是在实现基于实验结果建立的数学模型这一背景下开展的。

目前存在多种用于配方自动计算的软件产品。MS Excel 是最常用的配方计算程序之一。使用该软件产品时，计算所需的数据以及计算公式都要输入电子表格中相应的单元格。使用 MS Excel 的缺点是缺乏自动输入输入数据和计算关系的能力 [6; 9; 25]。

现有用于食品配方设计的专用软件包分为两类：一类是自动化生产管理系统中的程序，另一类是用于针对特定种类食品产品进行一次性计算的专用程序。作为自动化生产管理系统数学软件一部分运行的专用软件包，通常价格过高；其部署对食品企业人员的计算机技能水平提出了更高需求。专用配方设计程序的缺点包括：有关备选原料成分的信息有限；依赖通用办公软件及特定种类的食品产品；以及知识产权保护水平不足。现有用于配方设计的软件产品普遍存在的缺点，是缺少依据食品、biological and energy value criteria 的综合准则优化配方的子系统（模块）[9; 16; 22; 25]。

专用软件套件 «Etalon» [37] 用于设计通用产品的多组分配方，以及专用产品的配方，使其组成符合人体的生理需求，并考虑年龄、病理状况、身体状况和负荷、周围环境等因素；这些产品适用于儿童、膳食、功能性食品、孕妇和哺乳期妇女以及特殊人群。该程序在很大程度上有助于确保数据处理井然有序，

并开发具有指定属性的产品。软件套件由以下部分组成：1）信息数据库，其中存储食品原料的营养素组成信息，以及不同社会群体的生理性膳食标准；2）专用数据库，用于提高食品配方建模算法的运行效率；3）信息数据库管理系统。信息数据库基于“客户端／服务器”模型，在 Microsoft SQL Server 2000 环境中开发，包含若干相互关联的表。专用数据库在 Microsoft Access 2002 编程环境中构建。该程序用于计算和优化肉制品配方。该软件产品的缺陷包括：工作计算机必须安装 Microsoft SQL Server 和 Microsoft Access。

《植物原料配方组合开发》程序 [36] 可依据创建健康食品的现代原则，开发以果蔬为基础、具有较高生物价值的食品浓缩物配方。设定基准产品所需参数，即可获得宏量元素比例均衡的配方，并尽可能全面地满足人体每日对维生素和矿物质的需求。

Generic 2.0 是库班国立技术大学开发的程序，用于自动化设计和计算多组分功能食品配方。该软件用于计算和优化肉类、植物类和乳制品配方 [34]。

上述软件产品未考虑糖果制品多相配方计算的特殊性。在网站 http://ttk.telenet.ru/index.htm 上介绍了《餐饮计算系统》软件套件，其中包括糖果制品工业配方的开发。该系统的缺点是软件缺乏自主性，因此对用户知识产权的保护不足。

网站 http://www.es-nsk.ru/programmi.html 展示了“Expert Soft”公司为食品工业及餐饮企业的工艺人员开发的计算机程序，

其中最受关注的程序有：“烹饪工艺师”“糕点工艺师”和“烘焙工艺师”。“烹饪工艺师”程序旨在帮助食品行业企业引入质量与安全体系的相关要素。该程序具备的功能可在烹饪产品生产的各个主要阶段，全面实现工艺文档编制的自动化：原料质量检验、烹饪产品生产，以及烹饪产品的储存与销售。

上述软件系统的主要缺点是缺乏针对不同质量的特定模型，无法用于配方计算。公开渠道中，用于计算奶酪制品生产工艺参数的程序非常少。

乳液脂肪酸组成研究实验部分的描述。生产符合合理膳食需求的乳基产品时，必要的一步是论证乳脂基料并挑选有助于调整其组成的配料，同时论证所选生理性添加剂的脂肪酸组成 [23；41；42；46；47]。

根据合理膳食需求，蛋白质、脂肪和碳水化合物的比例应为1.0：1.2：4.6，而饱和脂肪酸：单不饱和脂肪酸：多不饱和脂肪酸的比例具有一定特点，应为0.3：0.6：0.1。所有天然脂肪，包括乳脂，都无法满足上述全部需求，因此，开发新型乳制品的一项任务是正确评估原料脂肪酸组成（从均衡角度出发），以便随后对其进行调整，确保成品具有最佳的脂肪酸组成。为此，需要增加植物脂肪相对于动物脂肪的含量，以达到所需的脂肪酸比例 [22；23]。

因此，需要选择以植物油形式存在的脂肪添加剂。为此，研究了乳品工业传统使用的油类的脂肪酸组成，包括葵花籽油、大豆油和橄榄油。上述油类的脂肪酸组成见表1。

为了使生产产品所用基料的组成符合合理膳食的需求，必须大幅

提高多不饱和脂肪酸和单不饱和脂肪酸的含量。饱和脂肪酸的含量应基本保持不变。如表1所列数据所示，为调整脂肪酸之间的比例，宜使用作为单不饱和脂肪酸主要来源的橄榄油，以及作为多不饱和脂肪酸来源的葵花籽油。

表1

植物油脂肪酸组成

指标	葵花籽油 олія	豆油	橄榄油
脂质总含量，%	99,9	99,9	99,8
甘油三酯	99,2	99,2	99,0
磷脂	0	0	0
β-谷甾醇	0,57	0,30	0,30
胆固醇	0	0	0
脂肪酸，%	94,9	94,4	94,7
饱和： 棕榈酸 硬脂酸 花生四烯酸	13,3 11,10 2,20 0	13,9 10,3 3,5 0	15,75 12,9 2,5 0,35
单不饱和脂肪酸： 油酸 棕榈油酸 二十碳烯酸	24,0 24,0 – –	19,8 19,8 – –	66,9 64,7 1,55 0,50
多不饱和脂肪酸： 亚油酸 亚麻酸	57,6 57,0 0,6	61,2 50,60 10,30	12,10 12,0 0
饱和脂肪酸:单不饱和脂肪酸:多不饱和脂肪酸	1,0:1,8:4,3	1,0:1,4:4,4	1,3:5,5:1,0

在产品中加入植物油，不仅能使其富含有价值的单不饱和脂肪酸和多不饱和脂肪酸，还能补充重要的抗氧化维生素，尤其是脂溶性维生素E和生育酚。这些存在于油中的生物抗氧化剂在人体内具有抗癌作用，能刺激心肌功能，并可作为生物膜的稳定剂。

从营养价值、生物价值以及抗氧化状态的观点来看，使用橄榄油和葵花籽油的混合物，按照脂肪的质量分数对乳品混合物进行规范化是合理的。

研究任务是选择混合物中橄榄油与葵花籽油的合适比例，使饱和脂肪酸的脂肪酸组成：

单不饱和脂肪酸*：*多不饱和脂肪酸尽可能接近合理营养理论所确定的 ***0,3 : 0,6 : 0,1*** 关系。

为建立发酵乳制品的数学模型（乳脂基质脂肪酸模块），在敖德萨国立技术大学 ХХтаЕ系，在副教授 Шарахматова Т. Є. 的指导下进行了相应实验。实验中，橄榄油和葵花籽油的含量占混合物总脂肪质量分数（1.6%）的比例从5%变化至95%（间隔为5%）。乳脂基质脂肪酸模块的建模结果见表2。

根据表2所列实验结果得出结论：当葵花籽油与橄榄油的比例为0,4:0,6 时，饱和脂肪酸：单不饱和脂肪酸：多不饱和脂肪酸的比例最接近理想值。此外，橄榄油完全不含胆固醇，这对食品而言非常重要，因为食品中的胆固醇过量是不可接受的。因此，部分以植物油混合物替代乳脂，可以改善乳脂混合物脂肪酸组成的平衡性。

然而，创建由葵花籽油和橄榄油组成的乳液数学模型、相应的软件，并结合函数优化程序进行计算，可以改善这些结果。

为了更详细地计算此类混合物的效果，有必要建立饱和脂肪酸:单不饱和脂肪酸:多不饱和脂肪酸关系与橄榄油和葵花籽油含量之间依赖关系的数学模型，以帮助使所得关系接近0.3 : 0.6 : 0.1。

不同化学组成乳液均质化工艺模式研究的实验部分说明。为了在工业中应用乳液，必须借助专用设备——广泛应用于乳品工业的阀式均质机，对其进行进一步有效分散，从而获得细分散稳定型水包油脂肪乳液。目前，在乳品工业中，均质化是形成稳定乳液的唯一方法，其中也包括使用植物油制备的乳液。因此，有必要 уточнить определённого химического состава乳液的均质化过程工艺模式 [30；38]。

Таблиця 2

Жирнокислотний склад емульсії з соняшниковою та оливковою оліями

Соняшникова олія	Оливкова олія	Вміст жирних кислот в 100 г олії			Сумарний вміст жирних кислот	Вміст жирних кислот в 100 г продукту		
		НЖК	МНЖК	ПНЖК		НЖК	МНЖК	ПНЖК
0,05	0,95	18,95195	68,66605	12,44605	100,0641	1,52272809	5,517095785	0,27600175
0,1	0,9	21,2729	66,6881	12,1151	100,0761	1,75589966	5,504543916	0,31899094
0,15	0,85	23,59385	64,71015	11,78415	100,0882	2,00216817	5,491287025	0,36460818
0,20	0,8	25,9148	62,7322	11,4532	100,1002	2,26266895	5,477263996	0,41310204
0,25	0,75	28,23575	60,75425	11,12225	100,1123	2,53867248	5,462406438	0,46475349
0,3	0,7	30,5567	58,7763	10,7913	100,1243	2,83160509	5,446637569	0,51988131
0,35	0,65	32,87765	56,79835	10,46035	100,1364	3,14307361	5,429870893	0,57884868
0,4	0,6	35,1986	54,8204	10,1294	100,1484	3,47489486	5,412008609	0,6420712
0,45	0,55	37,51955	52,84245	9,79845	100,1605	3,82913114	5,3929397	0,71002669
0,5	0,5	39,8405	50,8645	9,4675	100,1725	4,208133	5,3725376	0,78326731
0,55	0,45	42,16145	48,88655	9,13655	100,1846	4,61459194	5,350657524	0,86243456
0,6	0,4	44,4824	46,9086	8,8056	100,1966	5,05160353	5,327132734	0,94827814
0,65	0,35	46,80335	44,93065	8,47465	100,2087	5,52274725	5,301770575	1,04167979
0,7	0,3	49,1243	42,9527	8,1437	100,2207	6,03218439	5,274347041	1,14368363
0,75	0,25	51,44525	40,97475	7,81275	100,2328	6,58478129	5,244600173	1,25553542
0,8	0,2	53,7662	38,9968	7,4818	100,2448	7,18626534	5,212221658	1,37873364
0,85	0,15	56,08715	37,01885	7,15085	100,2569	7,84342421	5,176846109	1,51509704
0,9	0,1	58,4081	35,0409	6,8199	100,2689	8,56436311	5,138037215	1,66685502
0,95	0,05	60,72905	33,06295	6,48895	100,281	9,3588408	5,095269651	1,83677046

为确定不同化学组成乳液的机械处理条件，在7至15 MPa的压力和55至70 °C的温度下对其进行均质化，这些是乳品工业普遍采用的条件。根据乳液稳定性（Y，%）和脂肪相析出量（v，%）确定最佳均质化条件。其中，乳液稳定性应达到最大值（100%），脂肪相析出量应尽可能小。

实验研究结果见表3。分析所列数据可知，随着均质化程度提高，脂肪相析出量减少。这是因为在12–15 MPa压力下均质化的混合物中，脂肪球半径小于0.5 μm的脂肪球占绝大多数，其静电斥力超过范德华吸引力，因此不会聚集。这正是高均质化压力下脂肪相析出量较少的原因。例如，压力为15 MPa时，析出量占脂肪总量的0.6%–4.2%；压力为12 MPa时，占0.9%–5.2%；压力为7 MPa时，占3.5%–9.2%。因此，通过经验方法计算得出的最佳压力为12–15 MPa。

表3

均质乳状液的物理特性

Тиск, МПа	温度，°C							
	55		60		65		70	
	Y, %	v, %	Y, %	v, %	Y, %	v, %	Y, %	v, %
葵花籽油								
7	98,5	8,3	98,8	7,6	99,1	4,9	99,3	3,4
10	100,0	6,1	100,0	5,2	100,0	3,8	100,0	2,0
12		4,4		3,1		1,5		0,9
15		3,8		2,6		1,0		0,6
橄榄油								
7	98,6	8,6	98,7	7,8	99,2	4,9	99,6	3,6
10	100,0	6,4	100,0	5,5	100,0	3,7	100,0	2,4
12		4,8		3,4		1,6		0,9
15		3,7		2,8		0,9		0,8
混合油（葵花籽油+橄榄油）								
7	98,1	9,2	98,4	7,7	99,0	5,0	99,3	3,5
10	98,3	6,9	100,0	5,3	100,0	3,6	100,0	2,1
12	98,6	5,2		3,2		1,5		0,9
15	98,8	4,2		2,8		1,0		0,6

通过经验确定沉降的最大允许系数，超过该值时，产品质量便不可接受。

脂肪质量分数为 1.6% 的混合物的分层系数计算结果见表4。

Та6表4

脂肪质量分数为 1.6% 的混合物分层系数

均质压力，MPa	分层系数
7	0,224
10	0,194
12	0,176
15	0,170

分析表中数据可以发现，随着混合物中植物脂肪含量的增加，分层系数也随之增大。混合物的最佳均质压力为12 MPa和15 MPa。在这两种压力下，脂肪相的分层系数最小，分别为：12 MPa时为0.176，15 MPa时为0.170。

因此，根据实验结果，分别对葵花籽油和橄榄油进行均质化时，适宜的均质化条件为温度 55 °C、压力 15 MPa。对调和油（葵花籽油 + 橄榄油）进行均质化时，推荐的均质化条件为温度 60 °C、压力 12 MPa。在此条件下，乳液稳定性最高，达到 100%，脂肪相析出为 2.8%，足以用于生产凝乳奶酪产品。进一步提高压力和温度并不可取，因为这会增加生产能耗，从而显著提高产品成本。

比较乳液稳定性变化及脂肪相分层的数据后可以得出结论：压力为 12 МПа 和 15 МПа 时的实验数据几乎没有显著差异。乳液稳定性为 100%，脂肪相析出量为 2,8–3,2%。因此，根据实验结果，使用植物油调和油生产酸凝乳干酪的最佳压力为 12 ± 0,5 МПа。

研究的任务是构建数学模型并开发计算机程序，用于计算生产酸凝乳干酪时不同化学组成乳液的均质工艺参数，所用原料为

植物油调和油（葵花籽油 + 橄榄油），即寻找压力和温度的最佳值。

数学模型构建方法。为了开发新配方，需要采用现代数学工具，构建过程数学模型，对其进行优化并获得最佳参数。数学模型应基于实地实验，采用回归相关分析方法构建 [22; 33; 40; 44; 46]。

如今，提高研究效率和质量的重要因素之一，是应用概率统计方法和计算机来创建各种过程和对象的数学模型。应用这些方法，可以从简单的计算和评估迈向新的工作阶段——对复杂的实际过程和对象进行详细的数学建模与研究。利用计算机进行实验规划和处理的统计方法，能够显著提高研究人员的工作效率，缩短实际物理实验所需的时间并降低成本，提高实验结果结论的可靠性和质量。采用这些方法的目的是获得研究过程的数学模型，该模型应能充分描述这一过程。获得这样的模型后，便可以用对其数学模型的分析，取代对实际过程的后续实验研究，从而显著减少时间和材料投入。这有助于确定工艺过程的最佳运行模式及其他特征，以及机器或设备的结构参数 [15; 22; 23]。

一般而言，模型是反映现实世界的一种形式。下文所说的模型，是指一种形式化系统，它能够反映并再现研究对象，并在计算中替代该对象。

模型与对象的符合性标准可以各不相同。最常见的标准是过程质量指标（输出特性、工作介质能耗、消耗量等）的偏差程度，即直接在对象上测得的指标与通过计算所得到的数学模型 z 的指标之间的偏差。

有时，在建立研究过程的数学模型时，其某些参数可能是已知的；但一般来说，研究对象被视为一个“黑箱”（控制论术语），其内部结构未知；在其输入端

机器或设备 [15, 22, 23]。

一般而言，模型是对现实的一种映射形式。

此后，我们将模型理解为这样一种形式化系统，它能够通过反映和再现研究对象，并在计算中替代它。

模型与对象的符合标准可以各不相同。最常见的标准是过程质量指标（输出特性、工作能耗аген等，成本等）在对象上直接测得的值与通过计算得出的值之间的偏差程度

根据已知

定的数学模型 z。有时，在建立研究过程的数学模型时，其某些参数可能

作用着输入影响 x_i，$i = 1, 2, \ldots, k$（即所谓的“因素”，k 为因素数量），而输 уть

бути 事先已知，但通常情况下，研究对象被表示为 ляді

«чор·出影响 y（“响应”）可由记录仪器测量（图 1）。如果对象有多个响应，它们可

黑箱（控制论术语），其描述构成如下，即输入 。

输入

此外，我们将考察单输出系统，也可以通过权重系数纳入计算公式，因此下文将讨论单输出

影响 x_i，$i = 1, 2, \ldots, k$（所谓的“因素”，k 为因素数量），而输出影响 ків,

啊系），可以用记录仪器测量（图 1）。如果对象有多个响应 у з

我们可以彼此独立地考察，也可以纳入计算公式

权重系 фіщі数，因此下文 б我们将考察单输出系统 .

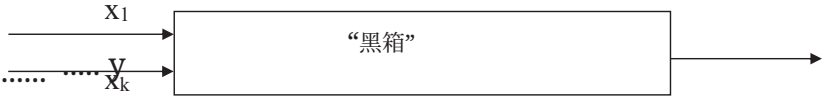


图1. 将研究对象表示为“黑箱”

图1 - 将研究对象表示为“黑箱”

为了求得数学模型，通常会开展实验研究，以确定影响过程进展的 які

вста确定影响过程进展的输入因素与输出参数之间的关系。前者是自变量，可以 ими

пара过程参数之间的关系，这些参数表征其属性。前者是自变量，且可能

取任意值；后者是因变量 [21; 22]。

ами

розу指在未规划试验条件的情况下，随机获取任何数据 міні

вхід因素。被动方法虽然易于应用，但不够精确，而且 кож

відр其特点是对所获数据采用复杂的处理方法。主动实验则是预先规划的

实验，实验采用被动和主动方法。被动实验是指在输入因素随机变化的情 іни

вхід输入因素至所需范围时才会进行，此时，输入因素变化方法应 нна

пер考虑到实验次数最小化，并采用简单且最省力的方法 одів

обр如此所得到的数据的处理方法也较为复杂。若研究对象允许在必要范围

内改变输入因素，则会进行预先规划的主动实验。在这种情况下，输入 що

зв'я因素变化方法应尽量减少实验次数，并采用简单且耗时最少的方法处理

所得结果。创建有效实验计划的原则由数学的一个专门分支——“实验设 (1)

计”[12]研究。

图1所示研究对象的数学模型，是指将响应与因素联系起来的方程。

$$y = f(x_1, x_2, \ldots, x_k). \qquad (1)$$

需要用解析式（即公式）表示 x 与 y 值之间的关系，从而用另一个逼近函数 $z = \varphi(x_1, x_2, \ldots, x_k)$ 替代函数 $y = f(x_1, x_2, \ldots, x_k)$，该函数对原函数进行近似描述。根据对逼近函数的需求，

可区分两种逼近类型 [6；12]。

第一类逼近。假设表中记录的实验结果是近似值，存在一定误差。这种情况在实际实验中很常见，因为测量所用仪器并不完善。任务是从某个函数类中选取一个逼近函数，使其与实验结果之间的偏差最小。

第二类逼近。假设表中记录的实验结果是精确的。需要从给定的函数类中选取函数 $\varphi(x_1, x_2, ..., x_k)$，使其在网格节点 $x_1, x_2, ..., x_n$ 处满足严格等式 $\varphi(x_1, x_2, ..., x_k) = y(x_1, x_2, ..., x_k)$。这种逼近称为插值。解决此类任务时，常使用拉格朗日插值多项式和牛顿多项式。然而，这种近似的准确性仅在较小的间隔内有保证；对于其他区间，需要重新计算插值公式系数。

下文将讨论第一类逼近任务，因为它在工程问题中最为常见；有时，这类任务也称为求解经验关系的任务。

根据实验数据结果建立数学模型，需要完成以下任务：选择解析公式的形式；确定其最佳参数；证明所得模型与研究对象相符。

目前尚无关于如何选择经验关系形式的一般理论。研究者会根据预测能力、任务的具体特点，以及坐标平面上与实验数据相对应各点的位置来选择函数。在某些情况下，可以依据有关研究依赖关系特征或测量量变化的理论认识，选择经验公式的形式。在其他情况下，则需要将根据观测数据绘制的图形与参考文献中列出的典型依赖关系图形进行比较，从而选取公式。[12]中给出了一些关于如何选择经验公式形式的建议书。

实践中，为了确定经验关系的参数（在提出关于其形式的假设之后），通常采用选点法、平均值法和最小二乘法。对于

回归公式系数的数值计算，我们将采用随机搜索法。

为了找到近似符合原始信息的曲线，需要制定一个准则。将实验点的偏差定义为实验纵坐标 y_i 与根据理论求得的函数依赖关系 $z_i=\varphi(x_i)$ 计算出的纵坐标之差（图 2 中，依赖关系 $z_i=\varphi(x_i)$ 的计算图及偏差以实线表示）。

作为确定总偏差的综合准则，可以采用偏差平方和公式：

$$\sum_{i=1}^{n}(y_i - z_i)^2 .$$

以所示公式作为质量准则的逼近方法，称为最小二乘法 [5；12；16；31]。回归分析的主要目标是确定通信的解析形式，其中结果特征的变化由一个或多个因素特征的影响所决定。

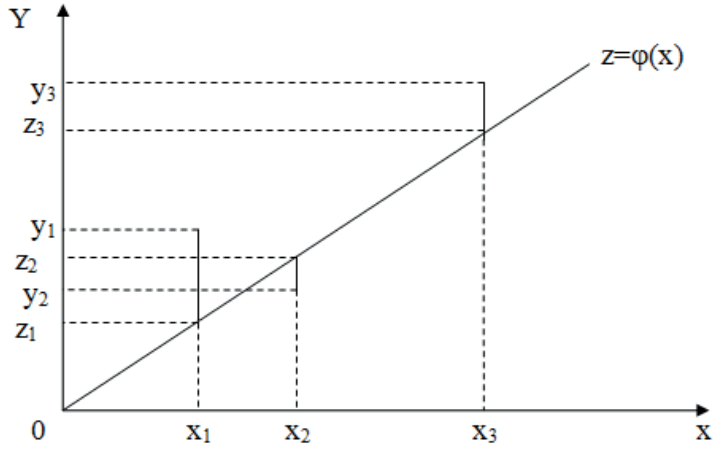


图2. y_i 与 $z_i=\phi(x_i)$之间偏差的示意图

图 2 - 插图 ія ві нь між y_i і $z_i=\varphi(x_i)$

回归分析的任务 [12; 44]：

回归任务 分析 [12, 44]：

а）确定 依赖形式。根据现象间依赖关系的性质和形式，可分为正 现象之

分正 正向线性和非线性，以及负向线性和非线性回归 相关。

б）将回归函数定义为某种类型的数学方程，并 61)

输入变量对因变量的影响 зміну.

в) 因变量未知值的估计。借助回归函数，可以重现

值间隔内因变量的值（即解决插值任务）

计给定间隔以外的过程变化（即解决外推任务）。

量对因变量值的估计

б）将回归函数表示为某种类型的数学方程，并确定输入变量对因变量的影响；

в）因变量未知值的评估。借助回归函数，可以还原给定值间隔内的因变量值（即解决插值问题），也可以评估给定间隔之外的过程变化（即解决外推问题）。所得结果是对因变量值的评估。

设 x 与 y 之间的函数关系如下：

$$z=\varphi\ (x, a, b, c,...),$$

其中 a、b、c、.....是经验关系公式中的未知参数，需要确定这些参数（如果函数 zi = φ (xi) 的形式为多项式，则所求的对象数学模型有时称为回归方程）。表达式

$$S\ (a, b, c,...) = \sum_{i=1}^{n}\ [y_i - \varphi(x_i, a, b, c,...)]^2 \qquad (2)$$

称为经验公式与实验数据之间的平方偏差。

在最小二乘法中，选择参数 a、b、c.....，使函数 (2) 最小化，即求出计算数据与实验数据之间的最小总偏差。为此，按照经典数学规则，可以令函数 S (2) 对未知参数 a、b、c、**.....** 的各个偏导数等于零：

$$\frac{\partial S}{\partial a}=0;\ \frac{\partial S}{\partial b}=0;\ \frac{\partial S}{\partial c}=0;\ \ldots\ldots\ldots \qquad (3)$$

系统 (3) 展开后可写为：

$$\ldots\ldots\ldots \sum_{i=1}^{n}\ 2\ [y_i\text{-}\varphi(x_i,a,b,c,...)]\cdot(-(\partial\varphi(x_i,a,b,c,...))/\partial a)=0,$$

$$\sum_{i=1}^{n}\ 2\ [y_i\text{-}\varphi(x_i,a,b,c,...)]\cdot(-(\partial\varphi(x_i,a,b,c,...))/\partial b)=0, \qquad (4)$$

所得系统中的方程数量等于未知参数的数量。用任何已知方法求解该系统，即可得到

参数 a、b、c、.....的值。然而，不能忘记实现最小二乘法时可能遇到的困难，这些困难可能由以下原因引起 [2; 19; 31]:

1. 系统（4）可能不相容。2

3. 系统（4）可能会变得极其难以求解。

3. 系统（4）可能有无穷多个解，在这种情况下，需要进一步 выяс明其中哪些解对应于函数（2）的最小值。

一般情况下，利用最小二乘法可以找到计算任何经验公式参数的公式，但是系统（4）的解以及与其求解相关的计算可能会相当复杂。

为了评价所得逼近的精度，可以采用均方误差（该值越小，所得逼近越精确）

$$\delta^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - z_i)^2}{n-k-1}. \qquad (5)$$

该值表示实际值相对于根据经验公式获得的计算值的离散程度。错误 Δ 越小，所得数学模型对现有的响应与因素之间的关系描述得越好。通过改变函数（1）的形式，并利用均方误差（5）评价结果，可以从所考察的经验公式中选出最佳公式。若干经验公式的使用及计算（5）的示例见于 [5；12；31]。然而，还应检验所得回归方程是否具有显著性；在没有平行试验的情况下，这可通过计算Fisher准则进行

$$F_r = \frac{\delta_y^2}{\delta^2},$$

其中 $\delta^2 = \sum_{i=1}^{n} (y_i - y_s)^2 / (n-1)$ —— y 相对于平均值 $\bar{y}$ 的方差；

$\bar{y}_s$ ——根据实验数据得出的 y 的平均值。

如果满足以下条件，则认为计算出的回归方程可靠且与实验数据相符

$$F_r < F_t(\alpha, \nu_1, \nu_2),$$

其中 $\nu_1 = n - 1$，$\nu_2 = n - k - 1$ 为自由度；

α — 显著性水平（在技术计算中，最常用的显著性水平为 $\alpha = 00.05$）；

$F_t(\alpha, \nu_1, \nu_2)$ — Fisher检验表值。

如果发现条件 $F_r < F_t$ 不成立，则说明经验关系（1）的形式选择有误，必须从头重新进行所有计算。

优化方法的应用。在开发中的应用程序里，为应用最小二乘法方法论并优化所得的数学模型，实现了随机搜索法。

随机搜索法基于随机数序列的应用，借助这些序列，在自变量变化范围内进行随机点抽样或确定随机方向。这种方法是对著名的试错法的直接发展：解决方案通过随机方式搜寻，若成功则予以接受，若失败则予以舍弃，并立即再次求助于随机性，将其视为能力的来源。这种随机行为合理地基于这样一种确信：随机性包含所有可能性，其中也包括在所有情况下所寻求的解决方案 [4; 20; 31]。

在最优设计中，随机搜寻法只需耗费相对较少的机器时间，就能确定含有大量变量的函数的极值。该方法的优点是，除要求区域内存在唯一的局部极值外，它对用于搜寻最优值的参数集合形式，以及将所选参数与优化准则和约束联系起来的依赖关系形式，都没有严格要求。它能够找出具有复杂地形的 10–20 个变量函数的所有局部最小值。对于研究只有一个最小值的函数，该方法也很有用。

这种方法有两项优先性。第一，它适用于任何目标函数，无论其是否为单峰函数。第二，尝试成功的概率依赖于分析空间的维数。尽管这种方法不能直接找到最优解，但它为后续应用其他搜索方法创造了相应的前置条件。因此，人们常将其与一种或多种其他类型的方法结合使用。

这种方法的缺点在于，必须预先指定随机点的选取区域。如果我们设定的区域过大，就难以对其进行细致研究；而如果选择

的区域过小，许多局部最小值可能会落在区域之外。

存在几种随机搜索方法，它们彼此相似，仅在几个步骤或条件上有所不同。

随机搜索方法最一般的迭代公式形式如下

$$X_{k+1} = X_k + \xi_k ,$$

其中，ε_(k) 是一个 n 维随机变量。该随机变量的概率分布及其在方法不同步骤中的变化，决定了搜寻方法。通常对随机变量 ε_(k) 会提出特定要求。

该向量量的范数必须有界，以使点 X_(k+1) 保持在点 X_k 附近。

分布规律取决于后续试验的结果（随机搜索自适应）。

最简单的算法包括以下几种:

双探测算法。在随机方向上，于初始状态 X_k 的两侧分别试探移动 X_(k)± Lk，其中 L 为试探步长。计算这些点处目标函数的值。沿目标函数值较小的方向迈出实际步。该算法的显著特点是很容易“徘徊”。

失败步回退算法。沿随机方向迈出一步。如果新点处目标函数的值大于初始点处的值，即这一步未能成功，则返回初始点。之后重复随机步进。

最佳试探算法。从起始点出发，随机迈出 m 步，并记下使目标函数值最小的那一步。工作步就沿着这个方向进行。

由于数学模型中的变量数量较少，软件采用成对试探方法来求解回归方程的系数并最小化所得函数，因为这种方法是最通用、最简单的优化方法。

选择编程语言的依据。 为了实现所选算法，实际操作中需要在计算机上编写程序，而这里的核心问题是选择合适的编程语言。编程语言是一种形式化符号系统，旨在

记录计算机程序。编程语言定义了一组词法、句法和语义规则，用于规定程序的外观以及计算机在其控制下将执行的行动 [14；32]。

高级编程语言是为提高程序员使用效率和便利性而开发的编程语言。高级语言的主要特征是抽象，即引入能够简要描述数据结构及其操作的语义结构，而用机器码（或其他低级编程语言）描述这些内容则十分冗长，难以理解。

因此，高级语言不仅力求简化复杂编程任务的解决，也致力于简化软件的移植。借助各种编译器和解释器，可以使使用高级语言编写的程序与不同的操作系统和设备建立联系，同时其源代码理想情况下保持不变。

一般来说，如果一种语言中的程序能够被编译器接受为构造正确，那么这些程序在运行时就永远不会超出允许行为的范围，这种语言便称为安全语言。这并不意味着这类程序完全不含错误。术语“程序良好行为”（英文 well behavior）指的是，即使程序含有某种程序错误（尤其是逻辑错误），它也不会因此破坏数据完整性或崩溃。虽然这些术语并非正式定义，但某些语言（例如 Standard ML）的安全性已得到数学证明。另一些语言（例如 Ada）的安全性则是以临时方式实现的，缺乏概念上的整体性；如果在关键任务中依赖这些语言，可能会导致灾难。

C语言及其后代 C++ 都不安全。在使用它们编写的程序中，类型系统弱化（类型转换）及其违反（类型双关）的情况十分常见，因此内存访问错误在这类程序中在统计意义上属于常态（但程序并不会立即崩溃，这使得搜寻代码中的错误位置更加困难）。最强大的静态分析系统也只能检测出略多于 70–80% 的错误，而使用它们的成本非常高。若不借助形式化验证，就无法可靠地保证这些语言编写的程序不会出错；而形式化验证的成本更高，还需要专门的知识 [14]。

C 也有安全的后代，例如 Cyclone、C# 或 Rust。Forth 并不自诩为“安全”语言，但实际上，能够破坏数据的程序几乎不存在，因为包含潜在危险错误的程序会在首次测试运行时立即崩溃，从而促使人们修正源代码。Erlang 社区采用“让它崩溃”的方法，同样旨在尽早发现错误。

用编译型语言编写的程序，经专用编译器程序转换（编译）为适用于特定类型处理器的一组指令（机器码），随后写入一个模块，该模块可用于启动单个程序的执行。换句话说，编译器将程序的源代码从高级编程语言转换为处理器的二进制指令代码。

如果程序是用解释型语言编写的，那么解释器会直接执行（解释）源代码，而无需预先翻译。此时，程序仍然是源语言编写的，可以在没有解释器的情况下启动。可以说，计算机的处理器就是机器码的解释器。

简而言之，编译器会立即将程序源代码完整地翻译成机器语言，同时生成一个独立的可执行程序；而解释器则在程序执行过程中直接执行源代码 [14; 28; 45]。

将语音划分为编译型和解释型多少有些人为。例如，对于任何传统上采用编译方式的语音，比如 Pascal，都可以编写解释器。此外，大多数现代的“纯”解释器并不直接执行语音构造，而是将它们编译成某种高级中间表示（例如，对变量进行解引用并展开宏）。

任何解释型语言都可以创建编译器——例如，Lisp 语言最初是解释执行的，也可以不受任何限制地编译。程序执行期间生成的代码可以动态编译。

通常，编译程序执行速度更快，且不需要执行其他附加程序，因为它们已经被翻译成机器语言。不过，每次修改程序文本后，都需要对其进行重新编译，这给开发带来了困难。此外，编译程序只能在与编译器所针对的相同类型的

计算机上运行，并且通常只能在相同的操作系统下运行。若要为其他类型的机器创建文件，则需要重新编译。

解释型语言具有一些特定的附加功能，此外，对其进行修改后即可立即运行相关程序，从而简化开发工作。解释执行的程序通常可以在不同类型的机器和操作系统上运行，而无需额外操作。

然而，解释执行的程序运行速度明显慢于编译型程序，此外，它们无法在没有额外解释器程序的情况下运行。编译型语言的示例：汇编语言、C 语言、Pascal。解释型语言的示例：PHP、JavaScript、Python。有些语言，例如 Java 和 C#，介于编译型语言和解释型语言之间；[28；32]。

分析所使用的算法语言及其使用特点后，决定使用 C# 语言对应用程序进行编程，因为它普及广泛、通用性强且相对简单。

C# 语言由 Microsoft 公司开发（于 2000年 问世），是当今最受欢迎的编程语言之一。它在多个国家的开发市场都备受青睐；C# 可用于开发个人电脑程序、创建复杂的网络服务或移动应用。这门语言经历了大量更新与革新。

C# 是一种极其灵活、强大且通用的算法语言。如今的 C# 功能十分强大。它如今在热门语言榜单中名列前茅并非偶然，因为基于它几乎可以构建任何项目。

此外，随着 Unity 游戏引擎的出现，这门语言在市场上获得了额外的优势。如今，借助它并结合广受欢迎的 Unity 引擎，可以轻松快速地创作任何类型、任何复杂程度的游戏。

C# 是一种面向对象编程语言。这意味着每个文件都代表一个特定的班级。

C# 语言几乎用途广泛。它可用于创建任何类型的软件：先进的商务应用、电子游戏、功能丰富的 Web 应用程序、Windows 和 macOS 程序，以及适用于 iOS 和 Android 的移动应用 [18；27；28]。

C# 工具集可以解决范围广泛的任务，这门语言确实非常强大且用途广泛。人们使用这门语言开发：

- Web 程序。
- 各种游戏程序。
- Android 或 iOS 平台程序。
- Windows 程序。

几乎所有类型的程序都可以用它编写，从小型 Web 应用程序到强大的软件系统，这些系统将 Web 结构、桌面应用和移动设备应用整合在一起。这一切都得益于便捷的类 C 语法、严谨的结构，以及大量的框架和库（多达数百种）。

得益于种类最齐全的工具和手段，开发可能性几乎不受限制。当然，所有这些都可以借助其他语言实现，但其中一些语言用途狭窄，另一些则需要使用第三方开发者提供的额外工具。使用 C# 解决各种任务的速度更快、过程更简单，而且耗费的时间和资源更少。

面向对象编程和互联网的发展促成了新型编程技术的出现——.NET 技术，该技术允许在统一平台上使用不同的编程语言开发程序组件，并确保这些组件共同执行。在 .NET 技术框架下，提出了新的编程语言 C#，它以 C 语言++为基础，并借鉴了 Java 语言中确保创建安全程序的特性。结合 .NET 技术，C 语言++ 扩展了新的功能，并更名为 C++/CLI；此外还出现了 J# 语言——面向 .NET 技术的 Java 语言[45]。

C# 语言是在 Java 语言之后开发的。它不仅继承了 Java 语言的精华，还对其进行了改进，使诸如委托和事件等构造更加简洁、易于使用。不过，由于 Java 语言开放且可通过 Sun Microsystems 公司的网站在互联网上轻松获取，它或许已成为世界上最流行的编程语言。Sun Microsystems 公司的网站面向全世界的程序员开放。网站的可访问性汇聚了关心 Java 语言命运的专业程序员，推动了使用该语言进行的面向组件编程。Microsoft 公司提出的 J# 语言是 Java 语言的一个变体，

面向 .NET 平台，可以使用（导入——import）.NET Framework 库以及 Java 库。

提到 C# 时，人们通常指的是 .NET 平台技术（Windows Forms、WPF、ASP.NET、Xamarin）。反之，提到 .NET 时，人们也常常指的是 C#。不过，尽管这些概念彼此相关，却不应将它们混为一谈。C# 语言是专为使用 .NET 框架而创建的，但 .NET 这一概念的范围要广一些。

.NET 框架是一个用于创建应用程序的强大平台。它具有以下主要特点 [45]:

- 支持多种语言。该平台以通用语言运行时 Common Language Runtime (CLR) 为基础，因此 .NET 支持多种语言：除 C# 外，还有 VB.NET、C 语言++、F#，以及其他与 .NET 绑定的各种语言方言，例如 Delphi.NET。编译时，这些语言中的代码都会被编译成通用语言 CIL (Common Intermediate Language) 的程序集——这是一种 .NET 平台的汇编语言。因此，在某些情况下，我们可以用不同的语言编写同一程序中的不同模块。

- 跨平台性。.NET 是一个可移植的平台（但存在一些限制）。例如，目前的最新版本 .NET 6 支持大多数现代操作系统：Windows、macOS 和 Linux。使用 .NET 平台上的各种技术，可以用 C# 语言为不同平台开发程序：Windows、macOS、Linux、Android、iOS 和 Tizen。

- 强大的类库。.NET 提供了一个支持所有语言的统一类库。无论我们打算用 C# 编写什么程序——文本编辑器、聊天工具或复杂的网站——总会以某种方式用到 .NET 类库。

- 技术的多样性。通用语言运行时 CLR 和基础班级库是整个技术栈的基础，开发者可以在构建各种应用程序时使用这些技术。例如，在该技术栈中，用于处理数据库的技术是 ADO.NET 和 Entity Framework Core。用于构建具有丰富、复杂界面的图形程序的技术是 WPF 和 WinUI；用于创建较为简单的图形程序的是 Windows Forms；用于开发跨平台移动和桌面程序的是 Xamarin/MAUI；用于创建网站和 Web 应用程序的是 ASP.NET，等等。此外，还应提到活跃的 Blazor——这是一个正在发展并日益流行的框架，它运行于 .NET 之上，能够创建既运行在服务器端、也运行在客户端的 Web 应用程序。

未来还将支持创建移动应用，并且可能支持创建桌面应用程序。

• 性能。根据一系列测试，在多个类别中，基于 .NET 6 构建的 Web 应用程序大幅领先于采用其他技术构建的 Web 应用程序。.NET 6 程序总体而言具有很高的性能。

还应指出，C# 语言和 .NET 框架的一项特点是自动垃圾回收。这意味着与 C++ 不同，我们大多数情况下无需操心内存释放。上述公共语言运行时 CLR 会自行调用垃圾回收器并清理内存。

值得指出的是，.NET 长期以来主要作为 Windows 平台发展，名称为 .NET Framework。2019年，该平台的最后一个版本 .NET Framework 4.8 发布。此后它不再继续发展。

自2014年起，Microsoft 开始发展备选方案 .NET Core，该平台面向多种平台，旨在整合过时的 .NET Framework 的所有能力，并添加新功能。随后，Microsoft 陆续发布了该平台的一系列版本：.NET Core 1、.NET Core 2、.NET Core 3、.NET 5。目前的版本是 .NET 6 平台。因此，应区分主要面向 Windows 的 .NET Framework，以及跨平台 .NET 6（我们将结合 C# 来讨论）。

人们常把用 C# 编写的程序称为托管代码（managed code）。这意味着该程序基于 .NET 平台创建，因此由通用语言运行时 CLR 管理；CLR 会加载程序，并在必要时清理内存。但也有一些程序，例如用 C 语言++编写的程序，其编译结果不是像 C#、VB.NET 或 F# 那样的通用中间语言 CIL，而是普通的机器代码。在这种情况下，.NET 不会管理该程序。同时，.NET 平台提供了与非托管代码交互的能力 [27；45]。

C# 源代码会编译成采用 CIL 的程序或独立程序集，扩展名为 DLL、EXE。运行已编译好的程序时，会进行即时编译（JIT-компіляція）——这是 Just-In-Time（即时）的缩写。最终生成机器码，并将其交付执行。

要运行 C# 程序，必须安装并配置 .NET Framework。它完全免费提供，

应用范围非常广，因此通常不会出现设备兼容性问题。该平台内置于 Windows 安装包中，如有需要，也可以单独下载并安装。另有适用于 Linux 和 MAC 的版本。

在该平台中，处理待执行代码时会连接 CLR 环境——这是由 Microsoft 开发的、统一整合的库和类的集合，也是全球通用语言基础设施（CLI）标准的实现。

编译器工作完成后，程序文本会被翻译为中间语言 IL，即 CLI 能够“理解”的语言。IL 和所有必要资源（包括字符串和 BMP 开本的图像）都会以 DLL 或 EXE 文件的形式保存到硬盘上。这些包含中间代码的文件构成程序程序集，其中包含完整描述，列出有关 [14；18] 运行的所有重要参数。

程序执行时，CLR 会直接访问程序集，并根据获得的信息执行相应行动。如果代码编写正确且通过系统安全性检查，就会将 IL 编译为机器指令。CLR 环境还会同时执行许多其他辅助函数：

- 清除“程序”垃圾；
- 异常处理；
- 资源分配；
- 类型检查；
- 版本管理；
- 类型化。

因此，C# 代码被视为托管代码，也就是说，它会根据已安装系统的特性，在本地设备上编译为二进制形式。

C# 因其“简单性”而广受欢迎。这种简单性面向当代程序员和大型开发团队，使他们能够在短时间内创建功能丰富且高效的程序。这得益于该语言非同寻常的构造和独特的语法，有助于以最自然的方式实现预定函数。

除了所有这些优势之外，C# 语言还通过几种创新的语言构造，简化了程序组成部分的开发：

- 封装的方法签名（称为委托）包含类型安全通知。

• 属性充当变量的私有成员的访问器。• 特性在运行时提供有关类型的声明性元数据。

• XML 行文档注释。• 集成查询语言（LINQ）提供了跨数据源的内置查询能力。

语言的流行度是另一项重要优势。许多 C# 爱好者推动着它的发展。这也对与使用 Microsoft 语言进行开发相关的职位数量增长产生了积极影响。尽管熟悉 C# 的程序员人数不断增加，他们在业界仍然供不应求。

程序的一项重要优点是能够只编译当前所需的部分。如果程序没有调用某段代码，就不会编译该部分。在调用时，会立即将 CIL 编译为机器码 [32]。

C# 长期以来一直稳居开发市场上最佳、最受欢迎的语言排行榜前列。起初，只有为 Windows 编写程序的开发者对它感兴趣。但随着 C# 的发展，它“学会了”在 Mac、Linux、iOS 和 Android 上运行。此后，平台代码向所有人开放，几乎解除了 C# 应用方面的所有限制。因此，这门语言得以蓬勃发展，应用范围也越来越广。推荐将其作为任何类型开发者都应学习的基础语言之一。

Microsoft 高度重视对开发语言的支持，因此定期推出更新和补充功能，修复编译器中发现的程序错误，并扩充库。开发者希望推广这一工具，并为此付出了许多努力。

脂肪酸组成乳液数学模型的系数计算方法。如上所述，为使奶酪制品的组成更接近符合合理膳食需求的产品，需要添加橄榄油和葵花籽油的混合物。同时，还需使饱和脂肪酸 : 单不饱和脂肪酸 : 多不饱和脂肪酸的比例尽可能接近 0.3 : 0.6 : 0.1。为建立脂肪酸比例与油的混合物之间的依赖关系，我们将使用表1中的实验数据，并将其转换为表5的形式，剔除中间数据。

表5

酸比例模型的输入数据

葵花籽油 олія	橄榄油 олія	每100克产品中的脂肪酸含量		
		НЖК	МНЖК	ПНЖК
0,05	0,95	1,5227	5,5171	0,2760
0,1	0,9	1,7559	5,5045	0,3190
0,15	0,85	2,0022	5,4913	0,3646
0,2	0,8	2,2627	5,4773	0,4131
0,25	0,75	2,5387	5,4624	0,4648
0,3	0,7	2,8316	5,4466	0,5199
0,35	0,65	3,1431	5,4299	0,5788
0,4	0,6	3,4749	5,4120	0,6421
0,45	0,55	3,8291	5,3929	0,7100
0,5	0,5	4,2081	5,3725	0,7833
0,55	0,45	4,6146	5,3507	0,8624
0,6	0,4	5,0516	5,3271	0,9483
0,65	0,35	5,5227	5,3018	1,0417
0,7	0,3	6,0322	5,2743	1,1437
0,75	0,25	6,5848	5,2446	1,2555
0,8	0,2	7,1863	5,2122	1,3787
0,85	0,15	7,8434	5,1768	1,5151
0,9	0,1	8,5644	5,1380	1,6669
0,95	0,05	9,3588	5,0953	1,8368

为构建和优化数学模型，宜选择能够表征所得结果的单一准则。通常会选择加性准则，其中各组成项是其他数学表达式，并赋予一定的权重系数。然而，在本例中不能采用这种方法，因为我们需要得到一个准则，用以表示脂肪酸比例接近合理营养理论所确定的目标比例 0.3 : 0.6 : 0.1 的程度。为建立单一准则，建议确定数值 0.3 、 0.6 、 0.1 之间的 “ 标准比例”，并将所得比例与该“标准”进行比较。

将标准比例（构建模型时将逐步逼近的比例）记为:

$$\begin{aligned} Y_1 &= 0,3 : 0,6 = 0,5; \\ Y_2 &= 0,6 : 0,1 = 6; \\ Y_3 &= 0,3 : 0,1 = 3. \end{aligned} \qquad (6)$$

Таблиця 6

Розрахункові дані для моделі співвідношення кислот

Соняшникова олія, l_i	Оливкова олія, m_i	Вміст жирних кислот в 100 г продукту			НЖК/МНЖК, $T1_i$	МНЖК/ПНЖК, $T2_i$	НЖК/ПНЖК $T3_i$	Сумарне відхилення, F_i
		НЖК, c_i	МНЖК, d_i	ПНЖК, e_i				
0,05	0,95	1,5227	5,5171	0,2760	0,2760	19,9894	5,5171	16,7304
0,1	0,9	1,7559	5,5045	0,3190	0,3190	17,2561	5,5045	13,9417
0,15	0,85	2,0022	5,4913	0,3646	0,3646	15,0608	5,4913	11,6875
0,2	0,8	2,2627	5,4773	0,4131	0,4131	13,2589	5,4773	9,8230
0,25	0,75	2,5387	5,4624	0,4648	0,4648	11,7533	5,4624	8,2510
0,3	0,7	2,8316	5,4466	0,5199	0,5199	10,4767	5,4466	6,9432
0,35	0,65	3,1431	5,4299	0,5788	0,5788	9,3805	5,4299	5,8892
0,4	0,6	3,4749	5,4120	0,6421	0,6421	8,4290	5,4120	4,9831
0,45	0,55	3,8291	5,3929	0,7100	0,7100	7,5954	5,3929	4,1984
0,5	0,5	4,2081	5,3725	0,7833	0,7833	6,8591	5,3725	3,5149
0,55	0,45	4,6146	5,3507	0,8624	0,8624	6,2041	5,3507	2,9172
0,6	0,4	5,0516	5,3271	0,9483	0,9483	5,6177	5,3271	3,1577
0,65	0,35	5,5227	5,3018	1,0417	1,0417	5,0896	5,3018	3,7538
0,7	0,3	6,0322	5,2743	1,1437	1,1437	4,6117	5,2743	4,3063
0,75	0,25	6,5848	5,2446	1,2555	1,2555	4,1772	5,2446	4,8230
0,8	0,2	7,1863	5,2122	1,3787	1,3787	3,7804	5,2122	5,3105
0,85	0,15	7,8434	5,1768	1,5151	1,5151	3,4168	5,1768	5,7751
0,9	0,1	8,5644	5,1380	1,6669	1,6669	3,0825	5,1380	6,2224
0,95	0,05	9,3588	5,0953	1,8368	1,8368	2,7740	5,0953	6,6580

П我们还定义 (табл. 6)

: l_i —第 i 次实验中葵花籽油的含量；m_i —第 i 次实验中橄榄油的含量；c_i —第 i 次实验中饱和脂肪酸的含量；d_i —第 i 次实验中单不饱和脂肪酸的含量；e_i —第 i 次实验中多不饱和脂肪酸的含量。

我们还将第 i 次实验中实验数据的脂肪酸比例（饱和脂肪酸/单不饱和脂肪酸、单不饱和脂肪酸/多不饱和脂肪酸、饱和脂肪酸/多不饱和脂肪酸）分别定义为 $T1_i$、$T2_i$、$T3_i$:

$$T1_i = \frac{c_i}{d_i};$$

$$T2_i = \frac{d_i}{e_i}; \qquad (7)$$

$$T3_i = \frac{c_i}{e_i}.$$

计算实验数据中的 $T1_i$、$T2_i$、$T3_i$，并将其填入表6。我们将使用表4最后一列给出的计算值作为脂肪酸比例的最优性准则:

$$F_i = |T1_i - Y_1| + |T2_i - Y_2| + |T3_i - Y_3|. \qquad (8)$$

显然，F 值越小，脂肪酸的饱和脂肪酸 : 单不饱和脂肪酸 : 多不饱和脂肪酸关系就越接近最合理的关系 0.3 : 0.6 : 0.1（理论上，F 可以等于 0，此时各项比例相等）。

为了进行建模，需要建立 F 对 l 和 m 的依赖关系的数学模型。我们将采用多项式的形式，因为它是最通用的函数。我们将最高次数限制为 4，并采用以下模型形式:

$$G(l, m) = a_1l^2 + a_2m^2 + a_3l + a_4m + a_5lm + a_6 + a_7l^3 + a_8m^3 + a_9l^4 + a_{10}m^4. \qquad (9)$$

在开发的程序中，使用随机搜索法，通过最小二乘法计算未知系数 a_i，得到如下模型:

$$G = 1{,}552162 + 0{,}589001l + 0{,}955900m + \\ + 5{,}549843l^3 + 17{,}483025m^4. \qquad (10)$$

因此，计算得出的回归模型系数如下：

a_1=	0,000000
a_2=	0,000000
a_3=	0,589001
a_4=	0,955900
a_5=	0,000000
a_6=	1,552162
a_7=	5,549843
a_8=	0,000000
a_9=	0,000000
a_{10}=	17,483025

将所得函数最小化后，得到以下值：

$$l = 0,579062;$$

$$m = 0,420938.$$

此时，最优性准则的值为 F = 2,8949，与表2中的实验数据具有良好的相关性。

数学模型系数的计算方法 使用葵花籽油和橄榄油调和油生产酸凝乳干酪时乳液的均质化。

如上所述，要确定均质化的最佳条件，需要建立乳液稳定性和脂肪相分层与温度、压力之间依赖关系的数学模型。下面分别考察乳液稳定性与温度、压力之间的依赖关系，以及脂肪相与温度、压力之间的依赖关系。为便于处理输入数据，在创建乳液稳定性数学模型时，我们将表3中的中间数据删除后进行转换：

为确定乳液稳定性对压力和温度的依赖关系，采用以下符号：

D_i —第 i 次实验中乳液稳定性的值；x_i —第 i 次实验中的压力值；y_i —第 i 次实验中的温度值。

我们将寻找多项式函数形式的数学关系

$$S = a_1*x + a_2*y + a_3*x^2 + a_4*y^2 + a_5xy + a_6 + a_7*x^3 + a_8*y^3 + a_9*x^4 + a_{10}*y^4. \quad (11)$$

Табл页 7

用于乳液稳定性建模的实验数据

压力，兆帕	温度，℃	乳液稳定性 Y，%
7	55	98,1
10	55	98,3
12	55	98,6
15	55	98,8
7	60	98,4
10	60	100
12	60	100
15	60	100
7	65	99
10	65	100
12	65	100
15	65	100
7	70	99,3
10	70	100
12	70	100
15	70	100

我们通过最小二乘法计算未知系数 a_i： 寻找函数的最小值

$$\sum_{i=1}^{n}\left(S(x_i, y_i) - D(x_i, y_i)\right)^2 \to \min . \qquad (12)$$

表8

基于数学模型计算乳液稳定性

压力，x_i	温度，y_i	稳定性乳液 D_i	计算 S	偏差
7	55	98,1	91,357	6,743
10	55	98,3	101,393	3,093
12	55	98,6	103,777	5,177
15	55	98,8	94,798	4,002
7	60	98,4	93,491	4,909
10	60	100	103,526	3,526
12	60	100	101,910	1,910
15	60	100	96,931	3,069
7	65	99	93,971	5,029
10	65	100	104,006	4,006
12	65	100	106,390	6,390

表8续

压力，x_i	温度，y_i	稳定性乳液 D_i	计算 S	偏差
15	65	100	97,411	2,589
7	70	99,3	92,862	6,438
10	70	100	102,897	2,897
12	70	100	105,280	5,280
15	70	100	96,301	3,699

在开发的程序中使用随机搜索法，可得到如下模型：

$$S = -0{,}004666x - 0{,}026530y + 0{,}577439x^2 + 0{,}076405y^2 - 0{,}000010xy + + 1{,}550705 - 0{,}021941x^3 - 0{,}001249y^3 - 0{,}000656x^4\ 0{,}000005y^4. \quad (13)$$

因此，计算得到的回归模型系数如下：

$a_1=$	-0,004666
$a_2=$	-0,026530
$a_3=$	0,577439
$a_4=$	0,076405
$a_5=$	-0,000010
$a_6=$	1,550705
$a_7=$	-0,021941
$a_8=$	-0,001249
$a_9=$	-0,000656
$a_{10}=$	0,000005

对于实验数据，采用该数学模型进行计算可得到以下结果（表8）。最后一列显示了实验数据与根据所构建数学模型得出的计算值之间的偏差。

显然，偏差较小，因此可以使用所构建的模型计算奶酪制品乳液稳定性的实际值。

此外，为了确定最佳均质工艺参数，需要建立脂肪相分层对温度和压力的依赖关系数学模型。为此，我们将表3转换为如下形式，舍弃中间数据：

表9

用于脂肪相沉降建模的精选实验数据

压力，MPa	温度，°C	脂肪相沉降 v，%
7	55	9,2
10	55	6,9
12	55	5,2
15	55	4,2
7	60	7,7
10	60	5,3
12	60	3,4
15	60	2,6
7	65	5
10	65	3,6
12	65	1,5
15	65	1
7	70	3,5
10	70	2,1
12	70	0,9
15	70	0,6

按照前面的计算方法，引入脂肪相分层的记号 V_i（该值依赖实验数据 x_i ——第 i 次实验中的压力值，y_i ——第 i 次实验中的温度值），并将数学模型表示为函数

$$G = a_1*x + a_2*y + a_3*x^2 + a_4*y^2 + a_5xy + a_6 + a_7*x^3 + a_8*y^3 + a_9*x^4 + a_{10}*y^4. \quad (14)$$

如上所述，采用最小二乘法进行计算，可得以下模型：

$$G = -0{,}004837x - 0{,}027562y + 0{,}005950x^2 + 0{,}034753y^2 - 0{,}000011xy + 1{,}599765 - 0{,}008708x^3 - 0{,}000901y^3 + 0{,}000438x^4 + 0{,}000006y^4. \quad (15)$$

计算得出的回归模型系数如下：

a_1=	-0,004837
a_2=	-0,027562
a_3=	0,005950
a_4=	0,034753
a_5=	-0,000011
a_6=	1,599765
a_7=	-0,008708

a_8=	-0,000901
a_9=	0,000438
a_{10}=	0,000006

使用该脂肪相分层数学模型对实验数据进行计算，得到以下结果（表10）。最后一列显示实验数据与根据所建立数学模型得出的计算值之间的偏差。

实验数据与计算值（表10最后一列）的偏差很小，因此，所得数学模型可供研究人员使用。

利用这两个不同化学组成乳液均质化的数学模型，可以按以下方式确定均质化过程的最优参数：乳液稳定性应达到最大值（100%），脂肪相析出应最小。根据这些准则计算得出的结果如下：压力为12 MPa，温度为60°C，此时乳液稳定性为100%，脂肪相析出为3.167%。这些数据与通过另一种实验方法获得的数据吻合良好。

表10

基于数学模型的脂肪相分层计算

压力，x_i	温度，y_i	脂肪相分层相 v_i	计算 G_i	偏差
7	55	9,2	8,915	0,285
10	55	6,9	6,809	0,091
12	55	5,2	5,424	0,224
15	55	4,2	4,639	0,439
7	60	7,7	7,058	0,642
10	60	5,3	4,953	0,347
12	60	3,4	3,167	0,233
15	60	2,6	2,782	0,182
7	65	5	5,360	0,360
10	65	3,6	3,254	0,346
12	65	1,5	1,868	0,368
15	65	1	1,084	0,084
7	70	3,5	4,277	0,777
10	70	2,1	2,171	0,071
12	70	0,9	0,785	0,115
15	70	0,6	0,000	0,600

研究的软件支持。为了计算奶酪制品的最佳配方，进行了实地实验，并根据所得数据构建数学模型。所有数据都需要进行结构化存储，以便于访问，因此使用数据库是必要的。示例采用通用算法语言 C# 编写 [18; 27; 28]。

由于数据量较小，且访问完全局限于本地，因此使用 PostgreSQL 或 Oracle Database 这类大型而强大的数据库管理系统并不合理。综上所述，SQLite 是最优选择。它是一款轻量级嵌入式数据库管理系统，完全满足既定条件，而且免费，因此无需为使用它投入额外资金。

SQLite 是一款紧凑的嵌入式数据库管理系统。该库的源代码已开放供公众使用。“嵌入式”（embedded）一词表示 SQLite 不采用客户端—服务器范式，也就是说，SQLite 引擎并非一个独立运行、供程序与之交互的过程，而是一个与程序编译在一起的库，引擎也因此成为程序的一部分。因此，SQLite 库的函数调用（应用程序编程接口）被用作交换协议。这种方法减少了开销和响应时间，并简化了程序。SQLite 将整个数据库（包括定义、表、索引和数据）存储在程序运行所在计算机上的一个标准文件中。其实现之所以简单，是因为在执行写事务之前，存储数据库的整个文件都会被锁定；此外，通过创建日志文件 [14，也实现了 ACID 特性；17]。

多个进程或线程可以同时无任何问题地从同一个数据库读取数据。只有在当前没有处理任何其他请求的情况下，才能向数据库写入记录；否则，写入尝试将以失败告终，并向程序返回错误代码。另一种发展方向是在指定的时间间隔内自动重复写入尝试。

SQLite 是一个嵌入式库，用于实现自主、无服务器、零配置的 SQL 数据库事务引擎。它是一个无需配置的数据库。这意味着您无需在系统中对其进行配置。

SQLite 不像其他数据库那样作为独立过程运行，您可以根据您的需求，将其静态或动态链接到您的应用程序中。SQLite 直接访问其存储文件 [8]。

SQLite 的特点：

- SQLite 无需单独的服务器进程或系统即可运行（无服务器）。
- SQLite 采用零配置，这意味着无需进行设置或管理。
- 完整的 SQLite 数据库存储在一个跨平台磁盘文件中。
- SQLite 非常小巧轻便，完整配置后不到 400KiB，使用附加功能时不到 250KiB。
- SQLite 是独立运行的，这意味着它没有外部依赖。
- SQLite 事务完全符合 ACID，确保多个进程或线程能够安全访问。
- SQLite 支持 SQL92（SQL2）标准中定义的大多数查询语言功能。
- SQLite 使用 ANSI-C 编写，并提供易于使用的应用程序编程接口。
- SQLite 可用于 UNIX（Linux、Mac OS-X、Android、iOS）和 Windows（Win32、WinCE、WinRT）。

SQLite 数据库管理系统在很多方面都支持标准 SQL。SQLite 使用的 SQL 方言在语法上与 PostgreSQL 所使用的方言相似。不过，SQLite 对 SQL 施加了一些特定限制。

应区分 SQLite 库（其中包含数据库管理系统）与数据库本身。借助 SQLite 创建的数据库是一个跨平台文本文件。与 SQLite 不同，数据库文件不会嵌入应用程序中，也不会成为其一部分，而是独立存在。这样，可以使用命令行工具 sqlite3 创建数据库，之后通过编程语言的 SQLite 库在程序中使用它。数据库文件则存储在本地机器上。

包含 SQLite 的程序通过简单的函数调用来使用其功能。由于这些函数调用发生在程序运行的同一进程中，因此速度比进程间通信快得多。

摒弃客户端-服务器模型并不意味着 SQLite 是一种教学用或精简版数据库管理系统。这仅仅体现了它作为嵌入式组件的应用特点。有许多类型的应用程序，从“记事本”到浏览器和操作系统，都需要小型本地数据库。

由于 SQLite 在另一个程序的框架内运行，写入时数据库文件会被锁定。因此，只能按顺序写入数据。与此同时，多个进程可以同时读取数据库。如果预计会频繁向数据库写入，SQLite 并非最佳选择。SQLite 数据库管理系统的这些特点，使其被用于开发该应用程序。

图3展示了用于应用程序运行的 SQLite 数据库架构。

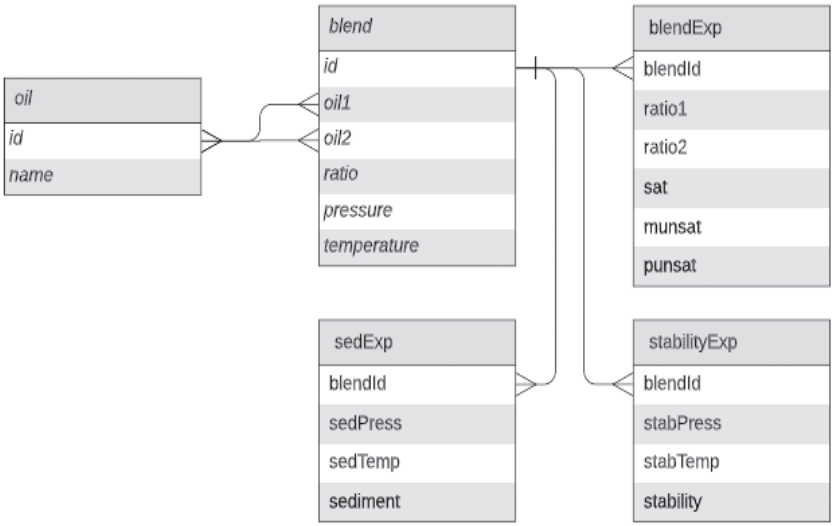


图3. 应用程序数据库架构

此外，下面还列出了数据库表描述的片段：油类表：

```
CREATE TABLE "oil" (
    "id"    INTEGER NOT NULL UNIQUE,
    "name"  TEXT NOT NULL,
    PRIMARY KEY("id" AUTOINCREMENT)
```

混合物表：

```
CREATE TABLE "blend" (
    "id"    INTEGER NOT NULL UNIQUE,
    "oil1"  INTEGER,
    "oil2"  INTEGER,
    "ratio" INTEGER,
    "pressure"  INTEGER,
    "temperature"   INTEGER,
    FOREIGN KEY("oil1") REFERENCES "oil"("id"),
    FOREIGN KEY("oil2") REFERENCES "oil"("id"),
    PRIMARY KEY("id")
```

混合物脂肪酸组成实验表：

```
CREATE TABLE "blendExp" (
    "blendId"   INTEGER NOT NULL,
    "ratio1"    INTEGER NOT NULL,
    "ratio2"    INTEGER NOT NULL,
    "sat"   REAL NOT NULL,
    "munsat"    REAL NOT NULL,
    "punsat"    REAL NOT NULL,
    FOREIGN KEY("blendId") REFERENCES "blend"("id")
```

混合物稳定性实验表：

```
CREATE TABLE "stabilityExp" (
    "blendId"   INTEGER NOT NULL,
    "stabPress" INTEGER NOT NULL,
    "stabTemp"  INTEGER NOT NULL,
    "stability" REAL,
    FOREIGN KEY("blendId") REFERENCES "blend"("id")
```

脂肪相沉降实验表：

```
CREATE TABLE "sedimentExp" (
    "blendId"   INTEGER NOT NULL,
    "sedPress"  INTEGER NOT NULL,
    "sedTemp"   INTEGER NOT NULL,
    "sediment"  REAL,
    FOREIGN KEY("blendId") REFERENCES "blend"("id")
```

主要过程和函数说明。启动应用程序时，首先检查数据库文件路径是否有效。

var db = Properties.Settings.Default.pathToDB; if (!File.Exists(db)) MessageBox.Show («数据库文件不存在，请指定新版文件的位置»);

using (OpenFileDialog dialog = new OpenFileDialog() {Filter = «数据库文件 (*.db)|*.db”}») dialog.ShowDialog(); if (string.IsNullOrEmpty(dialog.FileName) ‖ !File.Exists(dialog.File-Name)) return; db = dialog.FileName; Properties.Settings.Default.Save(); else if(Path.GetExtension(db) != “.db”) MessageBox.Show («该文件不是数据库。请选择扩展名为 .db 的文件»); using (OpenFileDialog dialog = new OpenFileDialog() {Filter = «数据库文件 (*.db)|*.db}») dialog.ShowDialog(); if (string.IsNullOrEmpty(dialog.FileName) ‖ ! File.Exists(dialog.File- Name)) return; db = dialog.FileName; Properties.Settings.Default.Save();

如果因某些原因无法访问文件，将打开系统文件管理器对话框，以便指定新文件的路径；该文件可以位于任何位置。

公开 static DataTable select(字符串 columns, 字符串 from) CheckConnection(); using (SQLite数据适配器 adapter = new SQLite数据适配器(String.For- mat(«select {0} from {1}», columns, from), connection)) using (var dataSet = new DataSet()) adapter.Fill(dataSet); return dataSet.Tables [0];

从表中请求数据的程序接收一个包含所需列名称的字符串和表名称；此外，还有一个同名程序，带有用于指定数据筛选参数的附加参数。

公开 static void update(字符串 table, 字符串 upd, 字符串 where)

CheckConnection();
使用（var cmd = new SQLite 命令(String.Format(«update {0} set {1} where {2}», table, upd, where), connection)）
cmd.ExecuteNonQuery();

现有记录更新过程。

```
public static void delete(string from, string where)
    CheckConnection();
```

使用（var cmd = new SQLite 命令(String.Format(«delete from {0} where {1}», from, where), connection)) cmd.ExecuteNonQuery();

删除过程。窗口应用程序使用 DataGridView 元素来显示和处理数据库中的数据。下面介绍相关的操作程序。

私人 void loadBlendExp() if (blendExp.行.Count != 0) blendExp.行.Clear(); var rows = select(“rowid, ratio1,ratio2,sat,munsat,punsat”, “ blendExp”, $”blendId={selectedBlend.ItemArray [0]}”).Rows; if (rows.Count != 0) foreach (DataRow row in rows) blendExp.行.Add(row.ItemArray);

从混合物组成实验表中填充数据。

```
私人 void DataGridUserDeletingRow(object sender, DataGridViewRowCan-
celEventArgs e)
    var dg = (sender as DataGridView);
    字符串 标识符 = dg.Columns [0].Name.Contains(«row») ? «标识符» : «rowid»;
    delete(dg.Name, $»{id}={dg.Rows [e.Row.Index].Cells [0].Value}»);
```

删除过程，因为所有表都引用共同的过程，所以首先要确定请求指向哪个表，然后再处理指定的请求

```
私人 字符串 cellValue;
私人 void DataGridCellBeginEdit(object sender, DataGridViewCellCancelEv-
entArgs e)
    var dg = (sender as DataGridView);
    单元格值 = dg.行 [e.行索引].单元格 [e.列索引].值.ToString(); 私人 void
DataGridCellEndEdit(object sender, DataGridViewCellEventArgs e)
    var dg = (sender as DataGridView);
    字符串 标识符 = dg.列 [0].名称.Contains(«row») ? «标识符» : «rowid»;
    if (dg.行 [e.行索引].单元格 [e.列索引].值.ToString() != cellValue)
```

update(dg.名称, $»{dg.列 [e.列索引].名称}=’{dg.行 [e.行索引]. 单元格 [e.列索引].值}’», $»{标识符}={dg.行 [e.行索引].单元格 [0].值}»); if (dg.名称 == «油») FillCalcBlendCombo();

编辑过程分为两个阶段：首先保存正在编辑的单元格中的当前值，然后检查该值是否与新记录重复。这样做是为了避免在意外调用编辑操作时覆盖原有内容。

选择混合物时，需通过两个下拉列表分别选择第一和第二个组件，选择顺序并不重要；添加新混合物记录后，所选顺序会保留。下拉列表位于应用程序的三个页面上，并且彼此同步，因此无需在每个页面上都选择组件。

pri$^{\text{vate vo}}$ id FillC alcBlendCombo()

var CB = blendCB1.组合框; var selected = CB.选定索引 == -1 ? CB.项.Count : CB.选定索引; var 数据源 = 获取 ID 名称对(«油»); CB.数据源 = 数据源; CB.值成员 = «标识符»; CB.显示成员 = «名称»; CB.选定索引 = selected; CB = blendCB2.组合框; selected = CB.选定索引 == -1 ? CB.项.Count : CB.选定索引; CB.绑定上下文 = new BindingContext(); CB.数据源 = 数据源; CB.值成员 = «标识符»; CB.显示成员 = «名称»; CB.选定索引 = selected;

填充下拉列表的过程。

私人 void 同步组合框(组合框 CB1, 组合框 CB2) CB1.数据源 = blendCB1.组合框.数据源; CB1.值成员 = «id»; CB1.显示成员 = «name»; CB2.绑定上下文 = blendCB2.组合框.绑定上下文; CB2.数据源 = blendCB2.组合框.数据源;

CB2.值成员 = «id»; CB2.显示成员 = «name»; 私人 void 绑定组合框() 同步组合框(sedimentCB1.组合框, sedimentCB2.组合框); 同步组合框(stabilityCB1.组合框, stabilityCB2.组合框); (blend.列 [1] as 数据网格视图组合框列).数据源 = blendCB1.组合框.数据源; (blend.列 [1] as 数据网格视图组合框列).值成员 = «id»; (blend.列 [1] as 数据网格视图组合框列).显示成员 = «name»; (blend.列 [2] as 数据网格视图组合框列).数据源 = blendCB2.组合框.数据源; (blend.列 [2] as 数据网格视图组合框列).值成员 = «id»; (blend.列 [2] as 数据网格视图组合框列).显示成员 = «name»;

下拉列表同步程序。

private void selectBlend() var CB1 = blendCB1.组合框; var CB2 = blendCB2.组合框; var s = select(«*», «blend», $»oil1={CB1.选定值} and oil2={CB2. 选定值} or oil1={CB2.选定值} and oil2={CB1.选定值}»); if (s.行.Count == 0) using (var cmd = new SQLite 命令($»insert into blend (oil1, oil2) values ('{CB1.选定值}', '{CB2.选定值}'); SELECT last_insert_row- id()», connection)) selectedBlend = select(«*», «blend», $»id={cmd.ExecuteScalar()}»). 行 [0]; loadExp(); else selectedBlend = s.行 [0]; loadExp(); if (selectedBlend != null) blendExp.列 [1].HeaderText = selectedBlend.ItemArray [1]. ToString() == CB1.选定值.ToString() ? StringExtensions.FirstCharToUp- per(CB1.Text) : StringExtensions.FirstCharToUpper(CB2.Text); blendExp.列 [2]. HeaderText = selectedBlend.ItemArray [2]. ToString() == CB2.选定值. ToString() ? StringExtensions.FirstCharToUp- per(CB2.Text) : StringExtensions.FirstCharToUpper(CB1.Text);

混合物选择程序。由于列表已同步，该程序始终引用位于第一页的列表。读取组分代码，并检查是否存在具有该组合的混合物；如果没有该记录，则会创建一条新记录并获取其引用。

```
StringBuilder newValues = new StringBuilder(); var CB1 =
blendCB1.ComboBox; var CB2 = blendCB2.ComboBox; if
(CB1.SelectedValue == NULL) if (CB1.Text != «») newValues.Append($»(’
{CB1.Text}’),»); if (CB2.SelectedValue == NULL) if (CB2.Text != «»)
newValues.Append($»(’{CB2.Text}’),»); if (newValues.Length != 0) i
nsert(«油», «名称», newValues.Remove(newValues.Length — 1,
1).ToString()); FillCalcBlendCombo(); selectBlend();
```

列表支持直接输入新的组成部分，无需切换到所有记录的窗口。如果找不到组分标识符，应用程序会自动保存这些组成部分及以它们为基础的混合物。

每个页面都设有相应字段和确认按钮，可用于添加新的实验记录。

```
if (selectedBlend != null) var error = false; for (int i = 0; i < TS. 项.
Count — 1; i += 2) if (TS. 项 [i].Text == «») TS. 项 [i].BackColor =
Color.Red; error = true; if (!error) StringBuilder newValues =
new StringBuilder(); newValues.Append($»
({selectedBlend.ItemArray [0]},»); for (int i = 0; i < TS. 项.Count —
1; i += 2) newValues.Append($»’{TS. 项 [i].Text.Replace(’,’, ’.’)}’,»);
TS. 项 [i].Text = «»; newValues [newValues.Length — 1] = ’)’;
return (newValues.ToString()); else return null; else return
null;
```

var newValues = addExp((sender as ToolStripButton).Owner);
如果（newValues != null）
插入（«blendExp», «blendid, ratio1,ratio2,sat,munsat,punsat», newValues. ToString()); 加载blendExp();

所有窗口共用实验结果添加过程。首先获取包含输入元素的面板引用，然后检查是否已选择混合物，之后读取现有字段，检查其是否已填写，并添加新记录。

应用程序描述。该软件是一个包含五个主要页面并内置数据库管理系统的窗口应用程序。所开发的程序不仅可用于创建和优化发酵乳制品生产中的混合物数学模型，也可用于任何需要根据实验数据求解回归方程系数的任务。该应用程序的特点是能够确定所得到的三个数值与给定的三个基准数值之间的接近程度。

程序主窗口包含多个插入页，用户在创建数学模型并对其进行优化的过程中，可以在这些插入页之间切换，分别是“混合物计算”“乳液稳定性”“相分离沉淀”“混合物”和“油类”（图4）。最后两个插入页用于辅助操作，可在其中录入并选择输出数据——油类名称以及将用于混合物并供后续计算使用的油类。虽然目前该应用程序用于优化由葵花籽油和橄榄油组成的混合物，但原则上它具有通用性，也可用于其他配料。

图4展示了程序界面，其中打开的插入页用于录入和编辑任务中使用的配料——油类。

图5展示了应用程序的工作片段：选择两种参与后续计算的油。在此窗口中还可以输入混合物的一些输入特性。开始操作前，必须从下拉列表中选择混合物的第一和第二种组分，并按下按钮确认选择。

选择油类时可以参考表1，但实际计算中将使用葵花籽油和橄榄油。表1列出了各种植物油的脂肪酸组成，

不过，以下推理可以从全部列表中选出两种油——葵花籽油和橄榄油。

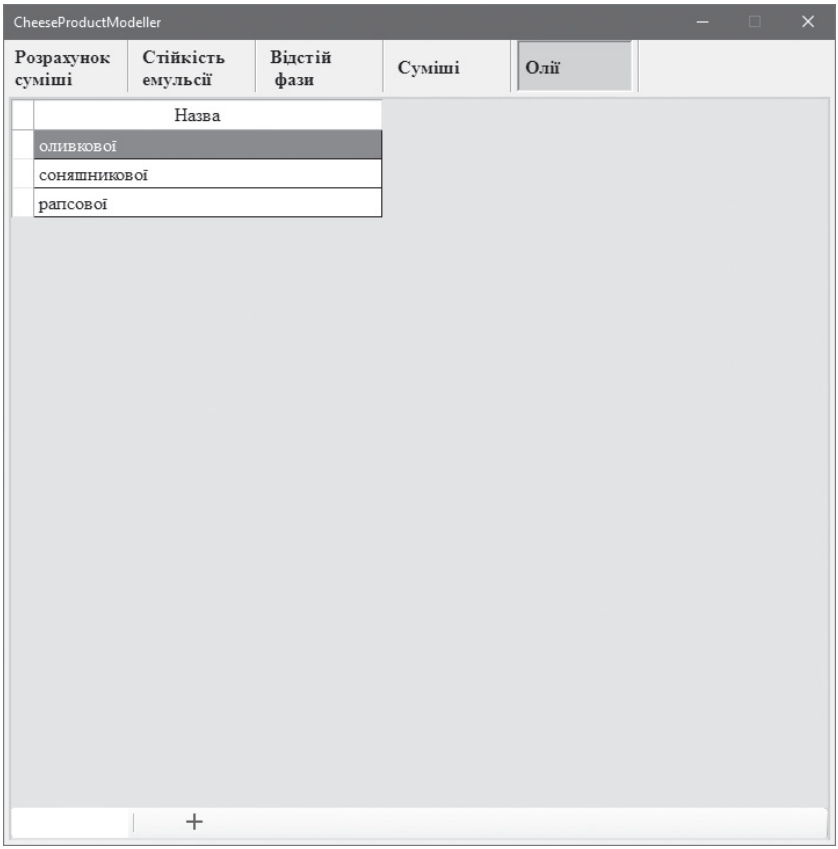


图4. 工作界面中的“油类”选项卡

为使基料的组成更符合合理膳食要求，必须大幅提高多不饱和脂肪酸和单不饱和脂肪酸的含量。饱和脂肪酸的含量应基本保持不变。从表1所列数据可以看出，为调整脂肪酸之间的比例，宜使用橄榄油（单不饱和脂肪酸的主要来源）和葵花籽油（多不饱和脂肪酸的来源）。

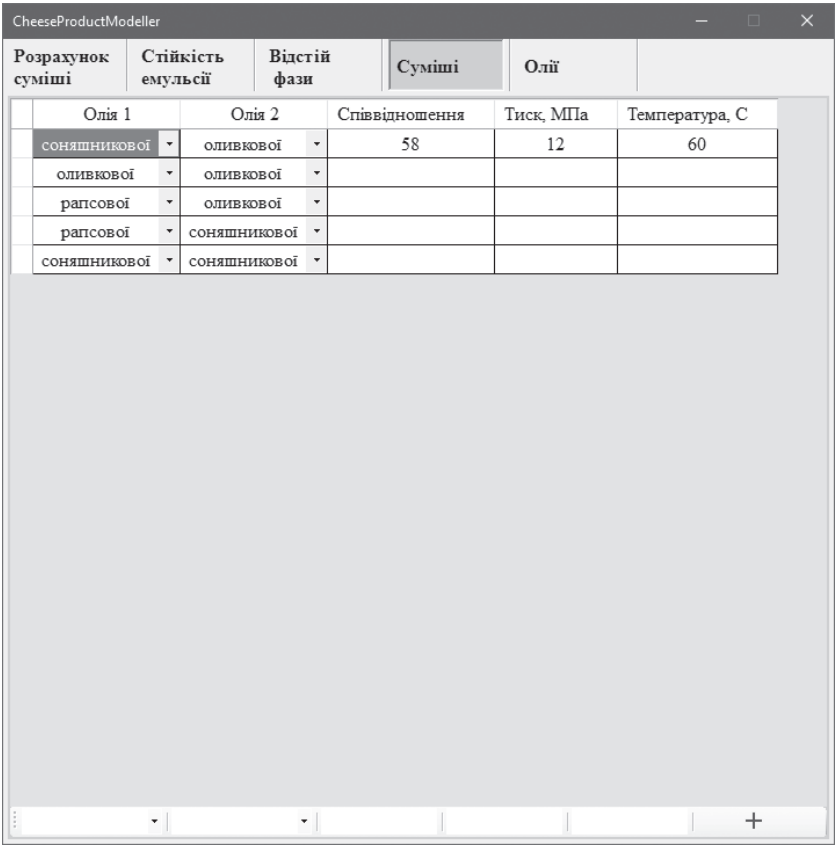


图5. 混合物选项卡的工作界面

图6展示了录入实验输入数据的过程，这些数据用于创建由葵花籽油和橄榄油组成的乳液数学模型。在此阶段，需要输入各油类（葵花籽油和橄榄油）在混合物中的占比，以及每100克酸奶制品中饱和脂肪酸、单不饱和脂肪酸和多不饱和脂肪酸的含量值（即录入表5中的数据）。实验数据录入“混合物计算”的结果如图7所示。录入的数据与表5完全一致。“混合物计算”选项卡用于查看、添加、删除和编辑实验数据记录，并基于这些数据进行计算

混合物中油脂的最佳比例，以使其脂肪酸组成最大程度地接近标准组成。

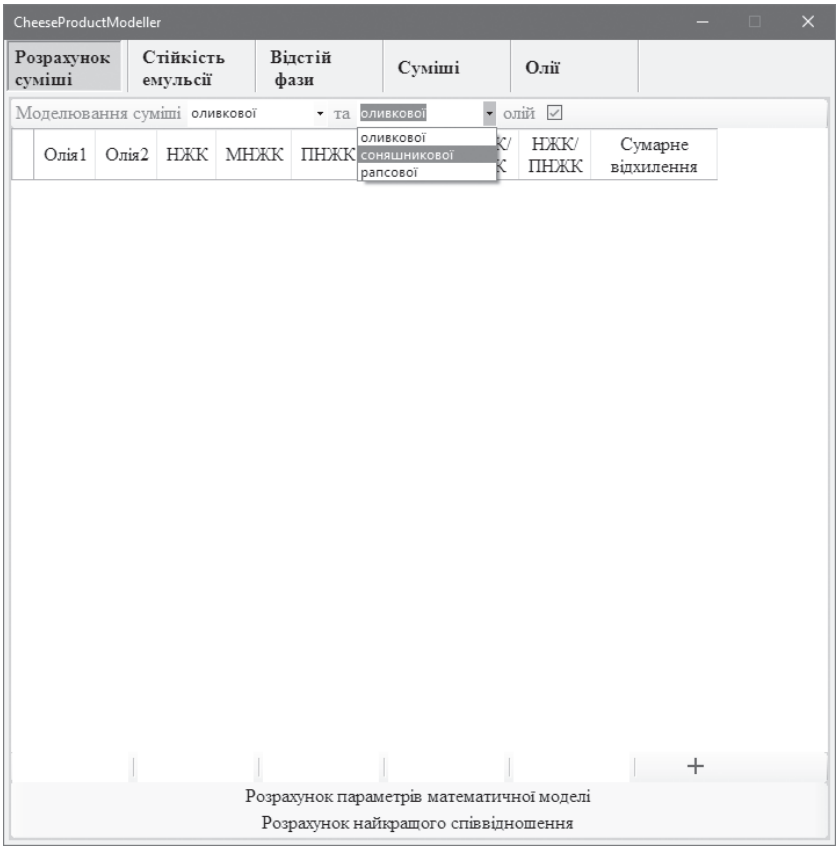
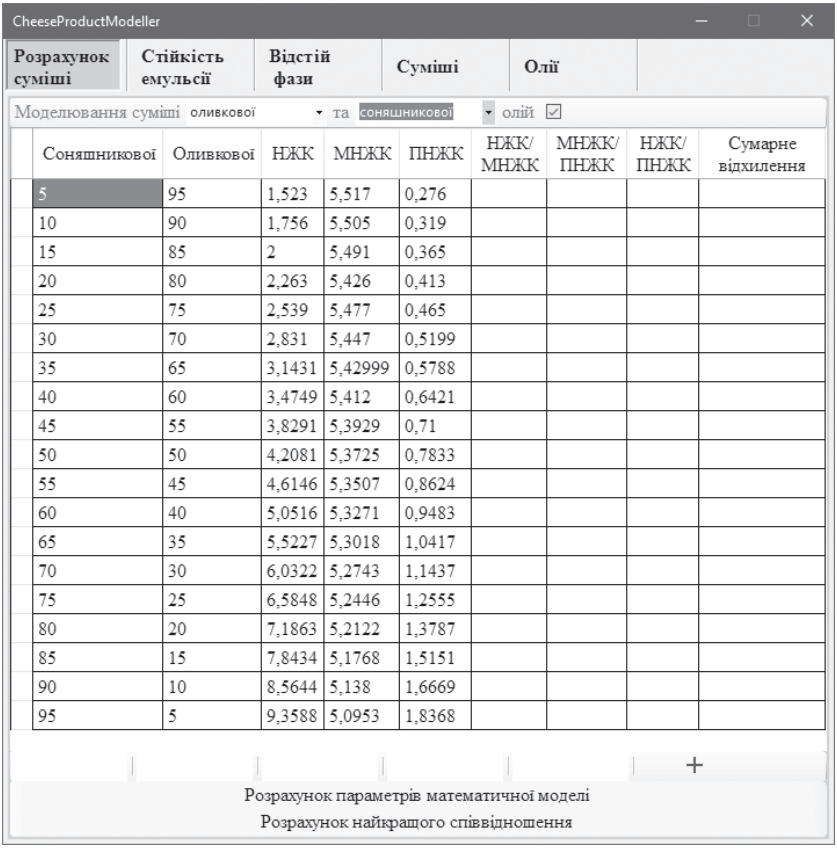


图6. 演示将数据录入“混合物计算”选项卡的屏幕

此时，程序会根据公式（7）自动计算饱和脂肪酸/单不饱和脂肪酸、单不饱和脂肪酸/多不饱和脂肪酸、饱和脂肪酸/多不饱和脂肪酸的比值，以及相对于给定比值 0,3:0,6:0,1 的综合偏差指标，计算公式见公式（8）——图8。此类计算的结果见表6。若要添加新记录，应填写屏幕下方的字段并确认添加，随后表格将自动更新并显示新数据。

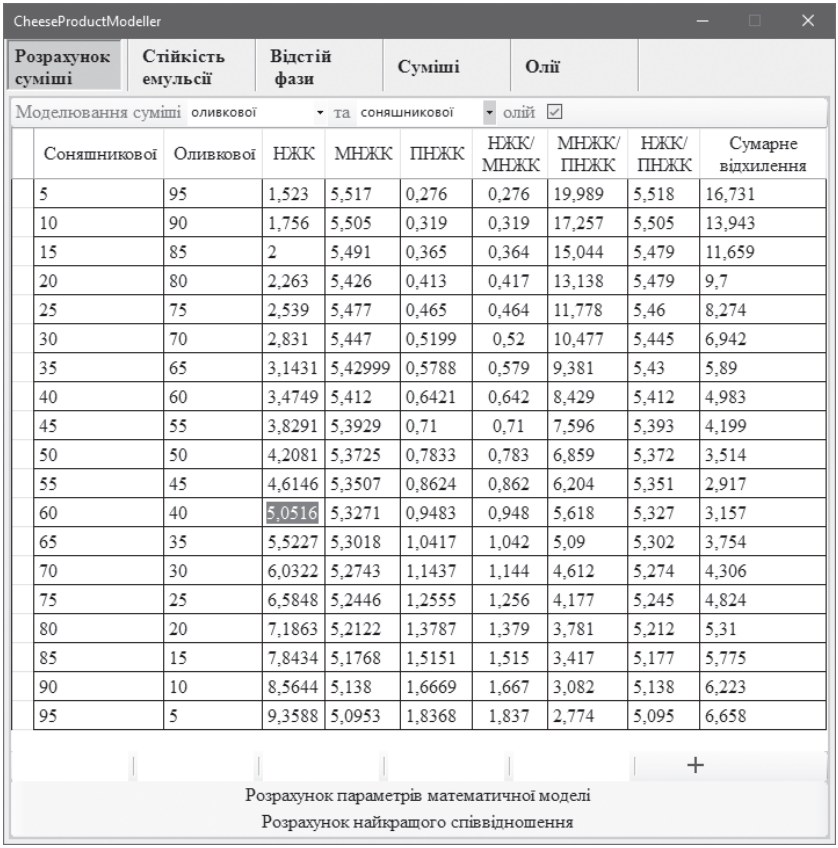


Соняшникової	Оливкової	НЖК	МНЖК	ПНЖК	НЖК/МНЖК	МНЖК/ПНЖК	НЖК/ПНЖК	Сумарне відхилення
5	95	1,523	5,517	0,276				
10	90	1,756	5,505	0,319				
15	85	2	5,491	0,365				
20	80	2,263	5,426	0,413				
25	75	2,539	5,477	0,465				
30	70	2,831	5,447	0,5199				
35	65	3,1431	5,42999	0,5788				
40	60	3,4749	5,412	0,6421				
45	55	3,8291	5,3929	0,71				
50	50	4,2081	5,3725	0,7833				
55	45	4,6146	5,3507	0,8624				
60	40	5,0516	5,3271	0,9483				
65	35	5,5227	5,3018	1,0417				
70	30	6,0322	5,2743	1,1437				
75	25	6,5848	5,2446	1,2555				
80	20	7,1863	5,2122	1,3787				
85	15	7,8434	5,1768	1,5151				
90	10	8,5644	5,138	1,6669				
95	5	9,3588	5,0953	1,8368				

图7. 将实验数据录入“混合物计算”选项卡的结果

要计算数学模型参数，需点击相应按钮，随后计算值将显示在表格中，同时会弹出一个窗口，显示已保存的数学模型及其系数。计算采用上述随机搜寻算法（蒙特卡洛）。与此同时，通过最小二乘法求解任务

$$\sum_{i=1}^{n}\left(G(l_i, m_i) - F(l_i, m_i)\right)^2 \to \min, \tag{16}$$



Соняшникової	Оливкової	НЖК	МНЖК	ПНЖК	НЖК/МНЖК	МНЖК/ПНЖК	НЖК/ПНЖК	Сумарне відхилення
5	95	1,523	5,517	0,276	0,276	19,989	5,518	16,731
10	90	1,756	5,505	0,319	0,319	17,257	5,505	13,943
15	85	2	5,491	0,365	0,364	15,044	5,479	11,659
20	80	2,263	5,426	0,413	0,417	13,138	5,479	9,7
25	75	2,539	5,477	0,465	0,464	11,778	5,46	8,274
30	70	2,831	5,447	0,5199	0,52	10,477	5,445	6,942
35	65	3,1431	5,42999	0,5788	0,579	9,381	5,43	5,89
40	60	3,4749	5,412	0,6421	0,642	8,429	5,412	4,983
45	55	3,8291	5,3929	0,71	0,71	7,596	5,393	4,199
50	50	4,2081	5,3725	0,7833	0,783	6,859	5,372	3,514
55	45	4,6146	5,3507	0,8624	0,862	6,204	5,351	2,917
60	40	5,0516	5,3271	0,9483	0,948	5,618	5,327	3,157
65	35	5,5227	5,3018	1,0417	1,042	5,09	5,302	3,754
70	30	6,0322	5,2743	1,1437	1,144	4,612	5,274	4,306
75	25	6,5848	5,2446	1,2555	1,256	4,177	5,245	4,824
80	20	7,1863	5,2122	1,3787	1,379	3,781	5,212	5,31
85	15	7,8434	5,1768	1,5151	1,515	3,417	5,177	5,775
90	10	8,5644	5,138	1,6669	1,667	3,082	5,138	6,223
95	5	9,3588	5,0953	1,8368	1,837	2,774	5,095	6,658

图8。总偏差综合指标的自动计算

其中，G 和 F 的值由公式 (8) 和 (9) 确定。回归方程采用多项式函数，因为它是最通用的函数（为减少系数数量，我们将阶数限制为 4 阶）。使用开发的程序计算数学模型 (9) 系数所得的结果见图 9 和模型 (10)。程序中的随机搜索算法（蒙特卡洛）使用内置的伪随机数函数，其重复周期极长（对于我们的任务，可以将其视为一列无限的随机归一化

数，范围为 [0, 1] ）。算法每一步最多进行 1 万次未成功的尝试；如果找不到函数值更小的点，则步长减半。算法停止运行时的最小步长值为 0.0001。

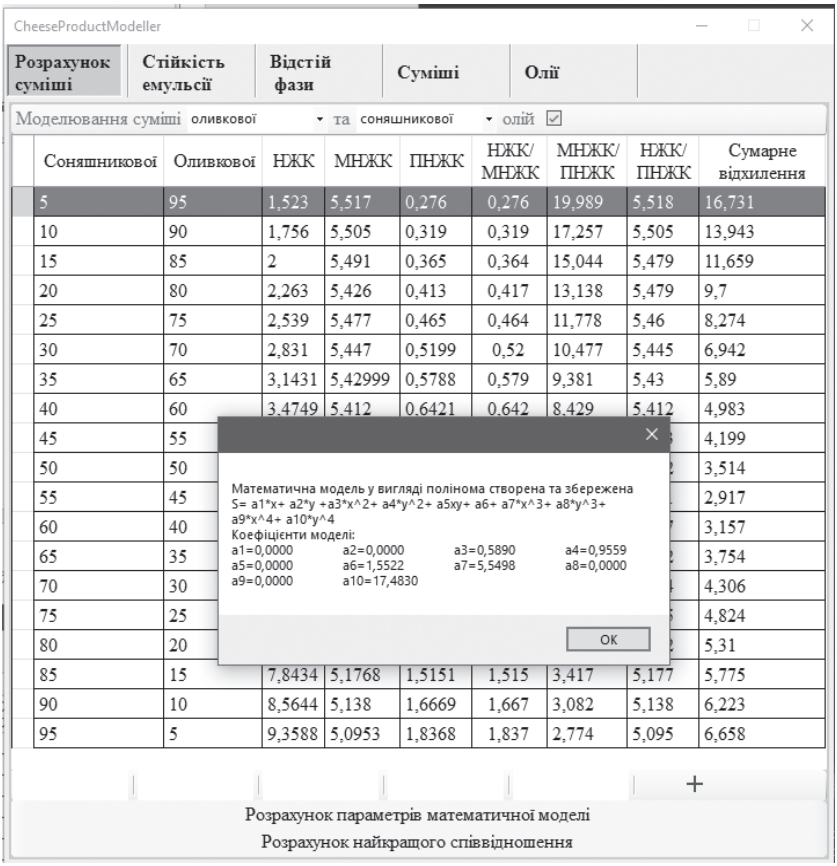
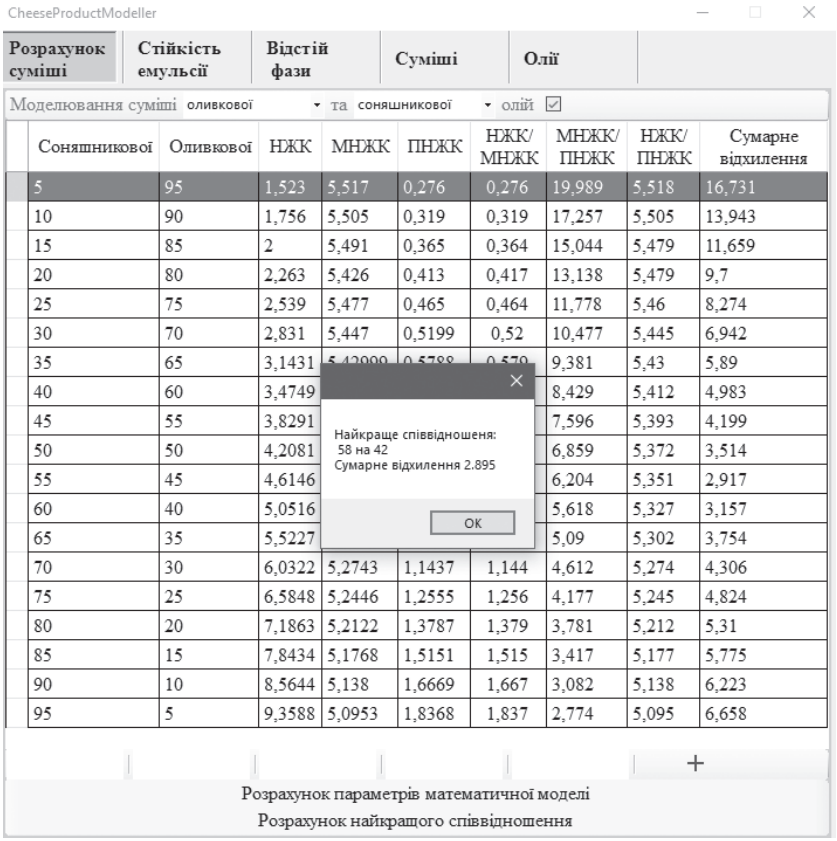


图 9 。油混合物数学模型系数的计算结果

为了计算最佳比例，使用所得到的数学模型，需要点击相应按钮，随后包含该模型的窗口将显示在屏幕上，并且还会针对所选混合物保存该模型。这是通过利用所述随机搜索算法对两个变量的函数（10）进行最小化来实现的。

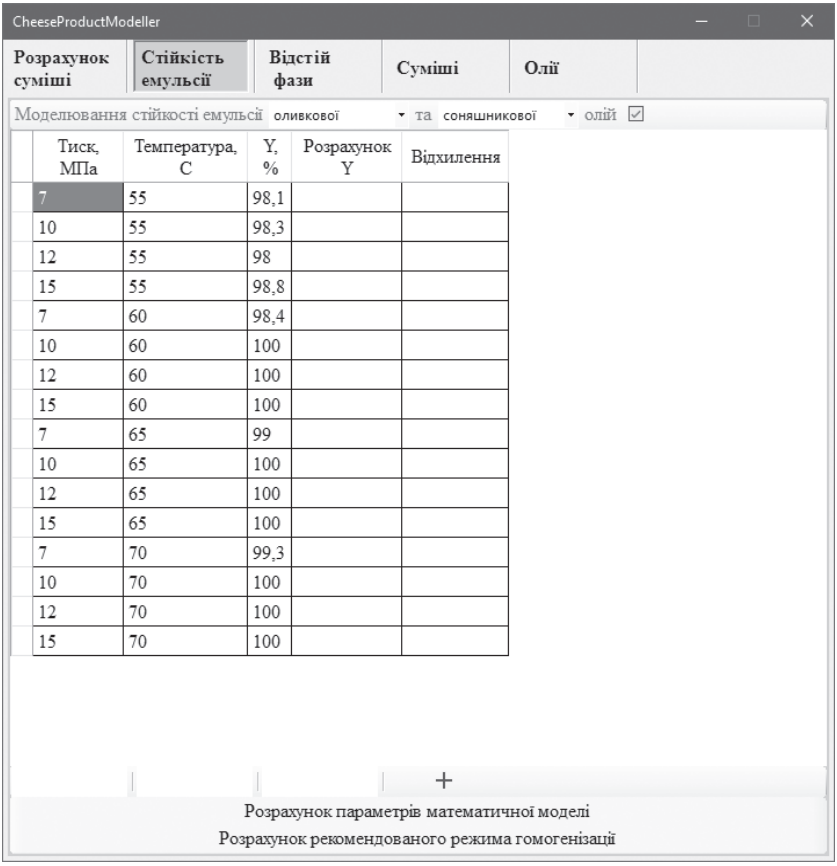
结果如图10所示，其中变量分别为 l = 0,579062、m = 0,420938，而函数的最小值为 F = 2,8949。这些结果与表6中的实验数据具有良好的一致性，其中通过选择最佳实验所得到的最小值位于 l = 0,55、m = 0,45 处，函数值为 F = 2,9172。分析表明，使用数学模型对混合物中橄榄油与葵花籽油比例进行优化，可得到更优、更精确的积分函数值，从而能够在实际计算发酵乳混合物参数时使用所开发的模型和程序。



Соняшникової	Оливкової	НЖК	МНЖК	ПНЖК	НЖК/МНЖК	МНЖК/ПНЖК	НЖК/ПНЖК	Сумарне відхилення
5	95	1,523	5,517	0,276	0,276	19,989	5,518	16,731
10	90	1,756	5,505	0,319	0,319	17,257	5,505	13,943
15	85	2	5,491	0,365	0,364	15,044	5,479	11,659
20	80	2,263	5,426	0,413	0,417	13,138	5,479	9,7
25	75	2,539	5,477	0,465	0,464	11,778	5,46	8,274
30	70	2,831	5,447	0,5199	0,52	10,477	5,445	6,942
35	65	3,1431	5,42999	0,5788	0,579	9,381	5,43	5,89
40	60	3,4749				8,429	5,412	4,983
45	55	3,8291				7,596	5,393	4,199
50	50	4,2081				6,859	5,372	3,514
55	45	4,6146				6,204	5,351	2,917
60	40	5,0516				5,618	5,327	3,157
65	35	5,5227				5,09	5,302	3,754
70	30	6,0322	5,2743	1,1437	1,144	4,612	5,274	4,306
75	25	6,5848	5,2446	1,2555	1,256	4,177	5,245	4,824
80	20	7,1863	5,2122	1,3787	1,379	3,781	5,212	5,31
85	15	7,8434	5,1768	1,5151	1,515	3,417	5,177	5,775
90	10	8,5644	5,138	1,6669	1,667	3,082	5,138	6,223
95	5	9,3588	5,0953	1,8368	1,837	2,774	5,095	6,658

图10。混合物中油的最佳比例计算结果

同一程序也可用于计算不同化学组成乳液的最佳均质化参数。首先，考察乳液稳定性与温度和压力之间的关系模型。实验数据见表7，程序中“乳液稳定性”选项卡对应的窗口见图11。



Ри图11. 在“乳液稳定性”选项卡中输入实验数据 ї»

“乳液稳定性”选项卡用于查看、添加、删除和编辑实验数据记录，并根据这些数据计算使所得混合物的乳液稳定性达到最大值的最佳均质化工艺。

为将均质化过程描述为乳液稳定性对温度和压力的依赖关系，我们将使用双变量函数 (11) S(x,y)，并将其表示为四次多项式，其中 x 为压力值，y 为温度值，S 为乳液稳定性值。为通过最小二乘法求得数学模型系数，我们将利用前文所述的随机搜寻方法，寻找函数 (12) 的最小值：

$$\sum_{i=1}^{n}\left(S\left(x_i, y_i\right)- D\left(x_i, y_i\right)\right)^2 \rightarrow \min.$$

系数形式的计算结果见图12和公式（13）。

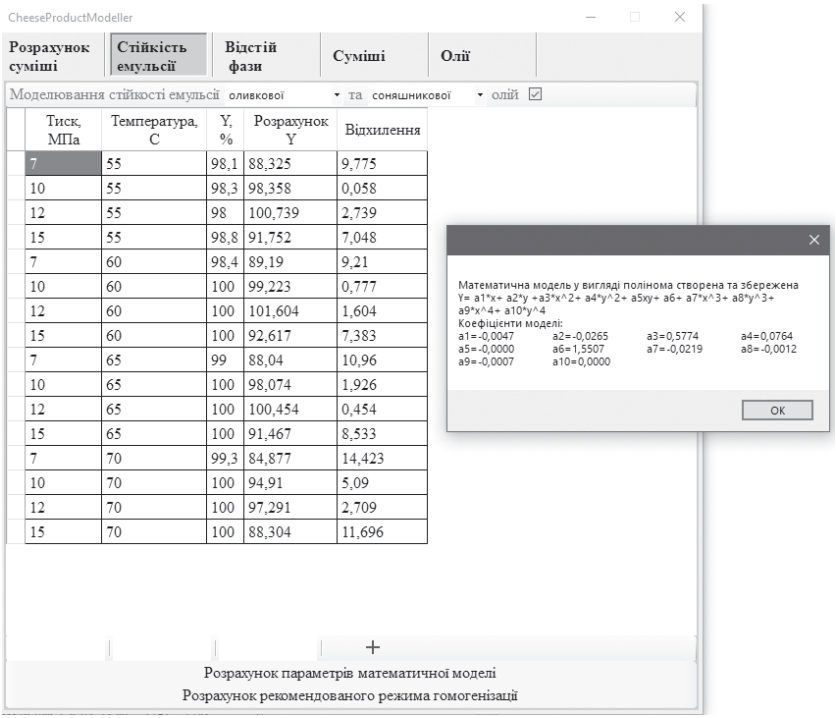


图12. 混合物乳液稳定性数学模型系数的计算结果

因此，得到的数学模型形式为

$$S(x, y) = -0{,}004666x - 0{,}026530y + 0{,}577439x^2 + 0{,}076405y^2 -$$

$$-0{,}00\ \ 0010xy + 1{,}550705 - 0{,}021941x^3 - 0{,}001249y^3 - 0{,}000656x^4 + 0{,}000005y^4 \quad .$$

该模型可用于计算生产酸凝乳干酪时，不同化学组成乳液的均质化工艺参数，以确定稳定性值与温度和压力之间的关系。

我们再来考察脂肪相分层与温度和压力之间的依赖关系。输入的实验数据见表9和图13。“脂肪相分层”选项卡使用与前文所述过程相同的数据填充方法，因此图12仅展示模型系数的计算结果。求出待求函数（14）的系数后，数学模型可表示为

$$G(x,y) = -0{,}004837x - 0{,}027562y + 0{,}005950x^2 + 0{,}034753y^2 -$$

$$-0{,}000011xy + 1{,}599765 - 0{,}008708x^3 - 0{,}000901y^3 + 0{,}000438x^4 + 0{,}000006y^4.$$

该模型可用于计算和优化脂肪相分层与温度及压力之间的依赖关系。

不过，更常见的做法是将所得的两个模型结合起来，用于计算均质工艺参数，因为迄今为止，在乳品工业中，均质化是形成稳定乳液的唯一方法，其中也包括使用植物油形成的乳液。在此过程中，乳液稳定性应达到最大，脂肪相析出应尽可能少。若使用最后得到的两个数学模型来优化均质化过程，可得到图12所示的解决方案。模型给出的最优均质化过程参数如下：压力为12兆帕，温度为60°C，此时乳液稳定性为100%，脂肪相析出为3.167%。这些数据与表3、表4中通过另一种实验方法获得的数据吻合良好。

结论。本文介绍了一种构建发酵乳制品数学模型的方法，以改进含植物油混合物相关参数的计算。

研究过程中完成了以下任务：分析实物物理实验的结果，并选定数学模型类别；处理实验数据

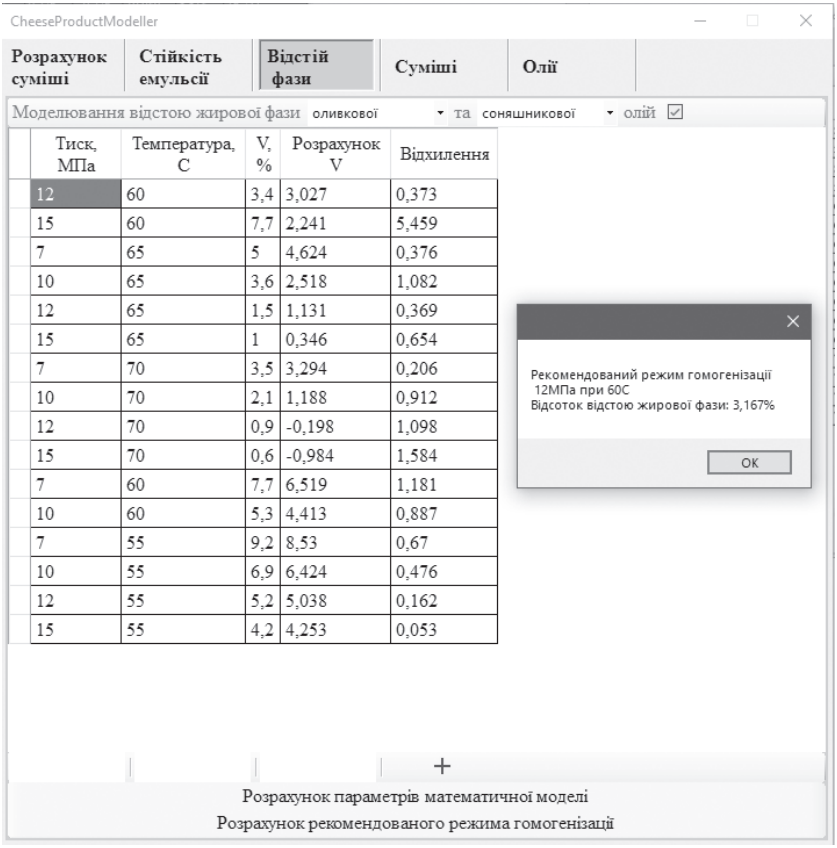


图13。均质化过程及其最佳参数的计算结果

在所开发的程序中，采用回归相关分析方法求得数学模型的数值系数；分析所得系数，以检验模型对输入数据的适切性；分析所用算法语言的优缺点，并选择 C# 语言进行编程；构建计算机程序，用于计算获得指定属性的发酵乳制品所需的初始配料比例；提出将蒙特卡洛随机搜索法的改进版本作为优化算法，该算法虽然需要

需要大量时间和计算机资源，但具有较强的通用性，且对输入数据具有较好的稳健性；算法以数值生成失败的次数作为控制参数，因此通过程序的多次实验运行，找到了失败尝试次数的最优值；并为用户提供了使用该程序开发新型发酵乳制品配方的实践建议。

研究的实践成果在于，所开发的程序为工艺师用户提供了一种工具，可用于计算添加植物油的新型发酵乳制品配方，无需进行物理实验，即可依据所建立的数学模型，在计算机上研究产品性质。

参考文献

1. Design Expert 中的 102 个问题及答案 [电子资源]。访问方式：https://www.researchgate.net/topic/Design-Expert 2. Design-Expert 版本 12 [电子资源]。访问方式：https://www.statease.com/software/Design-Expert/ 3. 低乳糖生物活性乳冰淇淋配方的论证与开发 / A. Trubnikova、O. Chabanova、T. Sharahmatova 等。*Path of Science*：国际电子科学期刊。Traektoriä Nauki。2018年。第4卷，第9期。第3001–3021页。数字对象标识符：10.22178/pos.38–7 [电子资源]。资源访问方式：http://pathofscience.org/index.php/ps/article/view/544 4. 阿尼西莫娃 H. П.、瓦尼娜 E. A. 线性规划：教学方法指南 / 国立高等经济学院圣彼得堡分院。圣彼得堡：国立高等经济学院，2012年。70页。5. 最小二乘法函数逼近 [电子资源]。访问方式：https://лови5.рф/upload/uf/4b8/mnk.pdf 6. 巴拉兹 B. P. 使用 Excel 分析商业活动指标之间关系的相关回归分析：教学指南。叶卡捷琳堡：乌拉尔国立技术大学—乌拉尔理工学院，2005。102页。7. 巴尔特科夫斯基 I. I.、Поліщук Г. Є.、沙拉赫马托娃 T. Є. 等。冰淇淋工艺。基辅，2010年。第25–27页。8. Борисенко A. A. 使用递归循环和关系数据库对多组分混合物进行建模的算法。信息技术。莫斯科，2006年。第7期。第69–71页。9. Борисенко A. A.、Дроздова B. И. 均衡多组分食品配方开发的算法与软件支持。北高加索国立技术大学学报。斯塔夫罗波尔：北高加索国立技术大学，2006年。第3期（7）。第42–45页。

10. Борисенко Л. А.、Борисенко А. А.、Борисенко А. А. 新一代营养素均衡食品、菜肴和膳食方案的理论与实验论证。*Наука-Парк*。2013年。第6–2期（18）。第27–31页。11. 戈卢别娃 Л. В.、多尔马托娃 О. И.、斯特列米洛娃 О. Б. 非乳脂肪对新型含乳产品质量的影响。农产品储藏与加工。2012年。第4期。第49–50页。12. 格拉乔夫 Ю. П. 实验设计的数学方法。莫斯科：食品工业，1979年。200页。13. 祖霍维茨кий С. И.、阿夫杰耶娃 Л. И. 线性与凸规划。莫斯科：科学出版社，1967年。460页。14. 克里根 Б.、里奇 Д. С 语言编程：英文译本。[电子资源]。资源访问方式：http://khpi-iip.mipk.kharkiv.edu/library/pgm/kr/ 15. Колодязная В. С.、Е. И. Кипрушкина、Д. А. Бараненко等。食品生物技术科学研究方法论：教学指南。圣彼得堡：ИТМО大学，2019年。143页。16. Котлик С. В.、马尔达尔 М. Р.、乌利亚ницкий А. В. 在生态环境恶化条件下对膳食方案的最优配方进行软件建模。克列缅чу格，2008年。第56–62页。17. Котлик С. В.、马尔达尔 М. Р.、瓦列夫ская Л. А. 用于多组分谷物产品计算机建模的信息数据库开发。食品生产、餐饮业和贸易企业发展的战略方向：国际科学实践会议论文集。哈尔科夫，2008年。第87–90页。18. C# 语言简要概述 [电子资源]。访问方式：https://docs.microsoft.com/ru-ru/dotnet/csharp/tour-of-csharp/ 19. 线性近似 [电子资源]。访问方式：https:// prog-cpp.ru/mnk 20. 线性规划：使用 Python 求解优化问题的实践 [电子资源]。访问方式：https://proglib.io/p/lineynoe-progra
mmirovanie-praktika-resheniya-zadach-optimizacii-na- python-2020 26 21 11– –. 利帕托夫 Н. Н.、罗戈夫 И. А. 具有所需营养价值指标系统的食品设计方法论。高校学报：食品技术。1987年。第2期。第9–15页。22. 利辛 П. А. 多组分乳制品的计算机建模。食品工业，2006年。第11期。第60–61页。23. 利辛 П. А. 乳制品配方计算中的计算机技术。莫斯科：ДеЛи принт，2007 年。102页。24. Маруняк В. С.、Котлик С. В.、Соколова О. П. 用于优化冰淇淋配料的数学模型开发。信息系统与技术的现状、成就和前景：第二十届全乌克兰科学……会议材料

青年科学家、研究生和学生技术会议。第一部分。敖德萨，2020年4月21日至22日。敖德萨，ОНАХТ出版社，2020年。第128–132页。25. Колесникова Н. В., Лескова С. Ю., Миронов К. М.. 多组分产品配方的计算机建模：教学实践指南。乌兰乌德：ВСГТУ，2008年。26. Николаева С. В., Головин И. М. 多组分配方混合物优化程序。《农产品原料的储存与加工》。2006年。第12期。27. C、C++、C#的应用领域？[电子资源]。访问方式：https://qna.habr.com/q/255092 28. C++/CLI、C#和Java面向对象编程的特点：第2版，修订增补。喀山：РИЦ《Школа》，2010年。444页。29. Остроумов Л. А., Бобылин В. В., Остроумова Т. А.等。利用植物原料生产复合乳蛋白产品。《农产品原料的储存与加工》。1998年。第8期。第28–30页。30. Полищук Г., Симахина Г., Устименко И. 用于规范化蛋白质-脂肪产品的乳液组成的科学依据。《食品化学与技术》。2016年。第1期。第45–55页。31. 使用MathCAD软件包解决工程问题：教材 / Ю. Е. Воскобойников [等]; Ю. Е. Воскобойникова 编；新西伯利亚国立建筑与土木工程大学（西伯利亚建筑学院）。新西伯利亚：НГАСУ（西伯利亚建筑学院），2013年。120页。32. C#指南 [电子资源]。访问方式：https://professorweb.ru/my/csharp/charp_theory/level1/1_1.php 33. 将逼近任务归结为线性规划任务。访问方式：https://scask.ru/e_book_apf.php?id=29 。34 2005611720 计算机程序证书 No 。用于食品多组分配方的自动化设计、计算和质量评估程序（Generic-2.0）» / А. А. Запорожский, В. А. Запорожский。35. 计算机程序证书 No 2005612711。学校膳食配餐计算电子资源（ШкоОптиПит）/ Н. Г. Колесникова, А. С. Бородихин, Н. Т. Шамкова, Г. М. Зайко, А. С. Григорьев。36. 计算机程序证书 No 2007610187。植物原料组合配方开发（РКРС）/ И. А. Бугаец, Ф. В. Москаленко, М. Ю. Тамова, Н. А. Бугаец。37. 计算机程序«Etalon»官方注册证书 No 2005610751，颁发于2005年3月30日。/ Борисенко А. А. 38. Снегова В. 植物脂肪（包括乳脂替代品）在奶酪产品生产中的应用。《乳品工业》。2008年。第4期。第31–32页。39. Страуструп Б. C 语言的设计与演进。莫斯科：ДМК Пресс；圣彼得堡：Питер，2006年。448页。

40. Судакова Н. В.等。基于计算机设计开发多组分肉类-植物原料罐头技术。《高加索科学思想》。顿河畔罗斯托夫，2006年。第4期。第133–137页。41. Ткаченко Н. А., Українцева Ю. С. 婴幼儿食品蛋白质酱料技术中蛋白质团发酵参数的论证。《食品科学与技术》。2015年。第2期（31）。第38–47页。数字对象标识符：10.15587/1729–4061.2014.23388 42. Устименко І. М., Поліщук Г. Є. 新型复合成分发酵乳制品的开发。《食品工业》。2016年。第20期。第93–99页。43. Устименко І. М., Бреус Н. М., Поліщук Г. Є. 用于规范化含乳产品的乳液组成的科学依据。《国立食品技术大学学术论文集》。2016年。第23卷（5）。第183–188页。44. Худенко Н. П., Трубнікова А. А., Чабанова О. Б.等。低乳糖冰淇淋配方成分的相关-回归分析。《以弗拉基米尔·伊万诺维奇·韦尔纳茨基命名的塔夫里达国立大学学术笔记》。系列：技术科学。第30卷（69）。第2部分，第3期。2019年。第127–136页。45. 什么是.NET，.NET开发者的工作是什么？[电子资源]。访问方式：https://training.epam.ua/#!/News/301?lang=ru 46. Эрл М., Эрл Р. 食品开发案例。案例分析。莫斯科：Профессия，2010年。400页。47. Ясаков А. В. 复杂原料组成食品的计算机设计 [电子资源]。访问方式：http://conf.omgtu.ru/node/128

第 V 章
计算机电信网络与技术

计算集群间任务均衡分配方法

Завертайло 基辅 ***С.***

本文探讨了负载均衡问题以及计算系统间的任务均匀分配。本文从总体角度研究这一问题，以使所提出的方法能够作为开发软件工具的基础，应用于信息学中所有存在负载不均和任务分配问题的领域。文中介绍了导致负载不均的主要原因，并得出结论，提出了解决这一问题的方法。

本文探讨计算机系统之间负载均衡与任务均匀分配的问题。本文从一般角度考察这一问题，因为所提出的方法可作为开发计算机科学各领域软件的基础，这些领域都存在工作负载不均衡和任务分配的问题。文章将阐述负载不均衡的主要原因，并得出结论，提出消除这一问题的方法。

凡是使用计算机系统的场合，都可能出现任务分配不均的问题。当计算元素的工作性能不同时，它们之间出现负载不均的风险就会增加。由于计算元素的能力各异，规划任务分配和负载分配也会困难得多。系统整体负载过高也可能导致平衡失当，因为在这种情况下，不仅要计算各组件当前的负载，还要考虑其性能。在任务到达系统进行处理的强度不断增加这一复杂情境下，负载失衡的风险也会随之增加。

导致负载不均衡的原因还包括输入计算系统的任务篇幅各不相同。

显然，在这种情境下，仅通过简单的数量方式在计算元素之间分配任务，很难实现均匀分配。

复杂系统中负载均衡不当造成的主要负面后果是，整个系统未能充分发挥某些计算单元的能力。因此，可以说，这些元素往往处于部分空闲状态。此外，在负载均衡不均匀的情况下，几乎总会有一些元素比其他元素承担过多任务。这会严重影响整个系统的性能，尤其是在任务到达强度显著增加时，影响更为明显。

从前述负载不均衡造成的负面后果中，还可以得出另一项后果：系统中某些元素承受的负载过重，会增加计算单元发生故障的风险。还可以补充一点，过重的负载会降低计算组件硬件的耐磨性。

显然，负载均衡不当会对网络吞吐能力和响应时间产生负面影响。当请求未能均匀分配到各服务器时，大量请求只能闲置等待排队，从而降低整个服务器系统的工作效率。

从上述负面后果可以得出结论：在采用计算系统的各个信息领域中，负载均衡都是一个非常重要的元素。尤其是在计算元素的性能各不相同（这在实践中相当常见）时，采用高效的负载均衡器就更为重要。

理论知识。 负载规划问题需要在任何项目发展的早期阶段加以解决。系统故障可能造成严重后果，包括精神方面和物质方面的后果。起初，对于因负载增长而导致的系统性能不足问题，可以通过扩容或优化所用算法、程序代码等方式来解决。但迟早会出现这些措施不足以应对的时刻 [1; 7]。

不得不采用集群化，例如将多台服务器组合成一个集群；它们之间的负载通过

一系列称为负载均衡的专门方法来分配。除了应对高负载问题，集群化还有助于实现服务器相互冗余。集群化的效率直接依赖于集群元素之间的负载分配方式。负载均衡器的总体工作方案如图 1 所示。

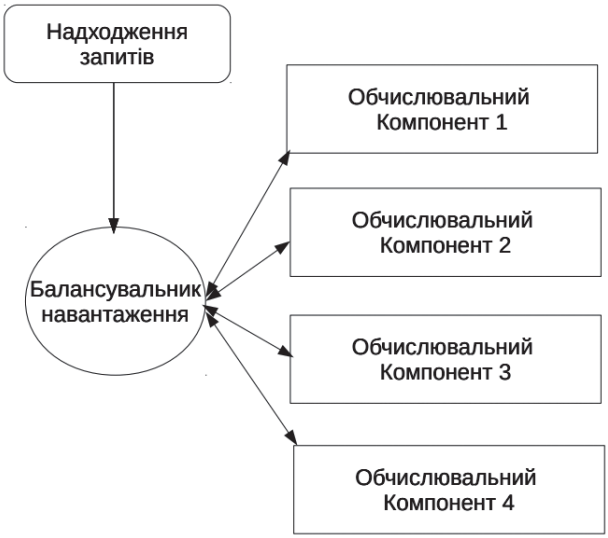


图1. 负载均衡器工作示意图

下面将简要概述计算机科学领域两个重要方向的负载均衡理论：

– 多处理器计算机的负载均衡；

– 网络负载均衡。

多处理器系统中的负载均衡。多核处理器之间或多核处理器组中其他集群之间的通信链路性能差异，会导致通信负载不平衡。另一方面，通信交换不平衡也可能与并行应用程序有关，并由问题求解算法决定。一个重要的例子

对于负载均衡而言，是采用分布式内存的异构计算系统。在这类系统中，只有在程序运行期间才能确定必要资源，因此必须动态进行负载均衡，也可能需要跨不同操作系统进行 [2；12]。

需要划分若干层级，并说明实现这些层级的算法特性，以实现单个并行应用中处理器的负载均衡。

仅在操作系统层面进行负载均衡，机制包括集群化、负载划分以及执行阶段的进程迁移；在中间件层面进行负载均衡，机制包括会话或请求上下文中的高层负载均衡，以及编译阶段的指令分配；在用户应用程序层面进行负载均衡，通过应用并行程序实现负载均衡机制。现有操作系统依赖用户进行明确的静态任务分配，这可能导致处理器负载严重失衡。集群化有助于克服由此产生的困难。集群化技术有两项主要优点：提高可扩展性和计算能力。大多数集群解决方案都能实现负载均衡，并在发生过载或故障时自动从一个节点切换到另一个节点。MOSIX 系统就是 Linux 的此类集群解决方案之一。

OpenMOSIX 是一种适用于 Linux 等内核的系统软件，由自适应资源分配算法组成。OpenMOSIX 的资源分配算法根据实时模式下各节点的资源使用情况进行设计。

所有这些算法都是通过进程迁移机制实现的。每个进程都关联一个唯一主节点的标识符，该进程从该主节点启动。为进行迁移，进程被拆分为两部分：用户上下文和系统上下文。用户部分由程序代码、数据、堆栈、内存映射和进程寄存器组成。系统部分包括属于该进程的资源描述，并确定依赖机器的部分；这一部分始终保留在进程唯一的主节点上。迁移中的进程会尽可能使用新节点的资源，但仍通过主节点与操作系统交互。

迁移基于由某种资源划分算法提供的信息。任务分配策略基于

同样也基于经济原则和竞争分析。这一策略能够以接近最优的方式管理异构资源。

应用软件和消息传递接口会将进程固定分配到集群的各个节点，而 OpenMOSIX 则根据可用资源配置动态执行这一操作。应用软件和消息传递接口运行在用户级，也就是普通程序运行的级别。OpenMOSIX 解决方案作为操作系统内核模块运行，对应用完全透明。无需为 OpenMOSIX 修改程序，也无需将程序与库链接。OpenMOSIX 操作系统一方面是消息传递接口技术的备选方案，另一方面也是这项技术的发展。需要指出的是，OpenMOSIX 和消息传递接口可以在同一个集群上同时运行。

用户和程序可以通过 API接口直接与 openMOSIX 交互，该接口提供有关本地处理器和进程状态的信息。openMOSIX 的一个明显缺点是在执行系统调用时开销很大。网络访问操作也会产生额外开销。例如，所有套接字都在主节点的标识符中创建；如果进程从主节点迁移，这将导致巨大的通信开销。

这种负载均衡的主要缺点是缺乏灵活性和适应性。前者源于应用程序无法在运行时决定如何进行负载均衡；后者则是因为缺少与副本的反馈。这些对象在负载均衡服务器一侧运行，并在其控制下共同构成可进行负载均衡的进程。另一个缺点是，标准中间件对操作系统这些能力的利用有限，而且这些能力在不同操作系统中的实现方式各不相同。

用于在并行系统中分配流程的基本中间件，需要一个运行时环境，并要求应用经过适配且用户了解相关情况。它包含用于初始化流程与节点绑定的实用工具，但会忽略可用资源，例如可用内存和输入输出进程。这类应用软件会启动——

在用户级运行，如同普通程序，因此无法应对负载波动，也无法自适应地重新分配计算负载。

在中间层进行负载均衡优于在网络或操作系统等较低层进行负载均衡，因为后者缺乏灵活性和适应性。中间件可以提供丰富的负载均衡指标，包括依赖于应用的用户自定义指标（灵活性）；而网络或操作系统负载均衡器只能使用固定的负载描述。中间件既可与标准网络、操作系统和负载均衡系统配合使用，也可与专用网络、操作系统和负载均衡系统配合使用；而低层负载均衡器则与其所面向的硬件和软件环境紧密关联 [3; 10]。

负载均衡机制可以在应用软件中实现，例如 MIST、Dynamite、mpC。在消息传递系统中，包含整个应用程序代码的进程会根据给定的配置在不同的计算节点上启动。运行过程中出现负载失衡时，必须中断这些进程，将其在节点之间迁移，并在原有上下文中重新启动。在消息传递系统中，负载均衡是通过在计算节点之间有效地重新分配负载来实现的，其中进程迁移是负载均衡的主要机制。

此外，还可以通过资源调度来实现负载均衡机制。分布式系统最初由各个独立模块构成，这些模块相互作用，导致系统负载失衡。因此，需要在分布式系统运行期间有效地关联各模块，以平衡负载。在分布式系统中，负载均衡可以通过数据结构（或面向对象的接口）来描述，这些结构允许建立资源提供者与消费者之间的对应关系。

并行和分布式多处理器计算系统的动态负载均衡中间件，应通过在多处理器系统的计算节点之间迁移此类进程，在资源动态变化的情况下实现并行应用的最优分配。

动态负载均衡中间件包括以下组件：负载监视器、执行过程调度、任务迁移等。负载均衡管理器计算负载均衡情况。如果系统失衡，迁移管理器便开始工作，确定处理器执行和迁移的新位置。独立服务会创建过程副本，其中包含有关已建立通信连接和已打开文件的信息。为将过程迁移到新的节点或处理器，数据会传递给任务迁移器。过程借助任务重启系统在新节点上恢复其初始状态，并行程序继续执行。

消息交换应用软件由服务和一个包含在应用程序代码中的库组成。通过扩展，也就是修改源代码，可以实现进程迁移的附加功能。

基本思路如下：

– 迁移进程停止运行。接收服务确定与该进程对应的可执行文件；

– 迁移进程的状态、已加载到内存中的代码和数据、栈、打开的通道（文件、网络连接等）被传输到接收端；

– 前两个步骤中累积的、发往迁移进程的所有消息也会被传输到接收端；

– 迁移进程的原始实例会完全停止，新实例则从原始实例暂停时所在的位置（状态）启动。

实现进程迁移需要操作系统具备相应的功能（API——应用程序编程接口），以便扩展的软件能够在这些系统上运行。API 应包含暂停进程、确定进程地址空间、在上下文中启动进程等函数。进程迁移可在同构计算网络中实现，因为迁移过程涉及进程地址空间等参数（在内存容量不同的节点之间迁移进程很难实现）。

是否迁移任务取决于一系列参数，这些参数必须由迁移控制程序（UNIX 守护进程）进行评估。对于在集群上运行的并行任务，

管理程序会考虑：每个节点的负载；MVS 平均负载、网络性能；创建检查点、迁移和重新启动任务所需的时间；处理器后续负载的预测值。

网络负载均衡。对于任何云微服务架构而言，可扩展性都是一项主要特性。在当今世界，任何面向大量消费者提供服务的服务，都必须具备良好的可扩展性和响应速度。潜在用户绝不会愿意忍受持续出现的错误、请求丢失、服务中断以及其他与服务性能不足有关的问题。他们会直接转向竞争对手，即便对方的方案不那么划算，但运行稳定。

最显而易见的解决方案可能是提升基数。中央服务器的性能越强、资源越多，服务发生故障或无法提供服务的可能性就越低。是的，这种方法在一定时间内会有效，直到服务器需要维护 [4; 11]。

第二种解决方案是部署多台服务器，以维持服务提供服务的正常运行。但与此同时，马上就会出现几个问题：

– 客户端程序如何确定当前为客户提供服务的服务器；

– 如何准确判断服务器是否可用，以及整个服务是否可用；

– 如果一台服务器已经承受着大量请求的负载，无法再接收额外负载，那么应如何确定要向哪台可用服务器发送请求，才能避免另一台服务器也变得不堪重负。

解决这一问题的方法是负载均衡。它是一系列在网络中的设备之间分配任务的方法，旨在优化硬件、计算和网络资源的使用，缩短请求的维护时间，并提高系统能够处理的最大任务篇幅。

为解决计算机网络中的这一任务，需要开发额外的软件，使其承担负载均衡器的函数。负载均衡器不一定必须是软件工具，也可以是独立的网络设备。

在系统中引入另一个元素，有助于避免客户端一侧的系统错误，并使其运行更加轻松、高效。客户端可以通过预先确定的机制，依据嵌入负载均衡器中的算法和策略，直接向负载均衡器发出请求。

负载均衡器能够在后台监控服务器的可用性及其路由，以便在客户端发出请求时，绕过网络中的过载元素，通过最短路径对请求进行路由。

负载均衡器最重要的功能是消除网络中的不一致性，因为在许多情况下，仅在一个区域或地域创建大型服务是不够的；此时，负载均衡器需要解决这类细小的系统不匹配问题，而对于标准的客户端-服务器模型而言，这些问题会使任务变得更加复杂。

负载均衡过程借助一组与 OSI 模型各层相对应的算法和方法来实现：网络层、传输层和应用层。

网络层负载均衡旨在解决以下任务：使一个特定的服务器 IP 地址对应多台不同的物理机器。这种负载均衡可以通过多种不同的方式实现：

– DNS负载均衡。为一个域名分配多个 IP 地址。通常通过 Round Robin 算法确定将客户端请求转发到哪台服务器。

– 构建 NLB 班级。使用这种方法时，服务器会组成一个集群，由入口节点和计算节点构成。

– 通过专门的算法进行负载划分。该方法用于 Microsoft 公司的解决方案中。

– 通过额外的路由器进行 IP 负载均衡。

– 按地域进行负载均衡，即在互联网不同地区部署地址相同的相同服务。

传输层负载均衡。这种负载均衡方式最简单：客户端向负载均衡器发送请求，负载均衡器随后将请求转发到一台服务器，由其进行处理。请求处理服务器的选择可以通过各种算法实现：

例如采用简单的循环调度，或从池中选择负载最低的服务器。有时，传输层负载均衡很难与网络层负载均衡区分开来 [5; 9]。

不同层级的负载均衡可以这样解释：网络层的解决方案不会在自身终止用户会话。它们只转发流量，不以代理模式运行。

在网络层，负载均衡器只负责决定将数据包转发到哪台服务器。与客户端建立会话的是服务器。

在传输层，与客户端的通信由负载均衡器终止，负载均衡器以代理服务器的方式运行。它以自身名义与服务器交互，并在附加数据和标头中传递客户端信息。例如，流行的软件负载均衡器 HAProxy 就是以这种方式工作的。

在应用层进行负载均衡时，负载均衡器以“智能代理”模式运行。它会分析客户端请求，并根据所请求内容的类型将请求转发到不同的服务器。

例如，Nginx Web 服务器通过在前端和后端之间分配请求来实现这一功能。Nginx 的负载均衡由 Upstream 模块负责。

应用层负载均衡工具的另一个例子是 pgpool——位于客户端与 PostgreSQL 数据库管理系统服务器之间的中间层。借助它，可以根据请求内容将请求分配到各个数据库服务器。例如，读请求会被发送到一台服务器，而写请求则会被发送到另一台服务器。

负载均衡策略分类。为了开发负载均衡方法，需要考察该领域中现有的方法、算法和策略。本文将介绍负载均衡策略的主要类别。之所以要考察负载均衡方法的分类，是因为这些分类及其特征能够直观地展现任务均匀分配方法的理论基础和对这些方法本身的理解 [6]。

第一类负载均衡，是根据负载均衡原则将其分为静态、半动态和动态。采用静态负载均衡策略时

计算机系统之间的任务分配计划预先已知，因为负载分配是提前进行的。静态策略实现起来较为简单，但效率低于动态或半动态策略。

采用半动态负载分配策略时，计划在初始化阶段、主要计算开始之前确定。也就是说，会预先评估所有可用资源。与统计策略相比，半动态策略的运行效率更高，因为在系统运行初期评估情境，有助于之后更好地在计算元素之间平衡负载。统计负载均衡策略的实现则更简单。

动态负载分配策略的运行效率最高。它会在整个计算系统运行期间不断变化，并受到某些因素的影响，定期评估其运行环境的状态。通常，动态策略会按照预先设定的时间间隔评估环境状态。不过，也可以不固定这一间隔，而是在每次评估环境后，根据环境所处的状态来确定下一次评估的时间。此外，动态策略也可能在间隔期间发生变化。在复杂系统中，如果负载均衡失常的风险较高，动态系统可能随时接收负载急剧变化的信号。这些信号可能表明，需要在设定的间隔结束之前进行某些调整。上述策略实现起来最为复杂，但在实践中也最为有效。需要指出的是，只有在复杂计算系统中，使用动态策略才是合理的。对于复杂度不高的计算系统，半动态策略就能胜任负载均衡任务；而对于非常简单的系统，静态策略也足够。因此，理解采用动态负载均衡策略是否合理非常重要。

策略划分的下一类别是按依赖型分配和独立分配原则进行划分。计算元素之间的依赖型任务分配，是指根据整个复杂系统运行过程中发生的特定事件，改变节点间任务分配原则的分配方式。

具体而言，规划中发生这些变化的条件会预先确定，并且具体取决于调度器所服务的系统。通常，这些参数包括整个系统或某个特定计算元素的负载增加或减少。此外，某个计算元素在运行期间性能下降，也可视为此类参数。鉴于调度策略会随特定因素而变化，依赖型规划分配与动态规划策略相对应。

讨论独立负载均衡原则时，指的是没有任何因素影响负载均衡器的工作，或将这些影响降至最低。通常，独立方式可与静态或半动态方法相比较，因为负载均衡器的工作是在系统本身运行之前预先规划的。因此，独立任务分配通常适用于简单系统中的计算元素。

此外，还需要指出一种分类方式，它将负载均衡方法分为专用和通用两类。从名称本身便可看出，专用策略是指针对特定网络环境拓扑或特定分布式系统架构开发算法。显然，与通用方法相比，采用专用方法开发的负载均衡器效率更高。其缺陷包括开发此类负载均衡器的成本较高，而且适用范围狭窄，无法用于许多需要进行负载均衡的领域。

关于通用方法，可以说，顾名思义，它们具有多方向性。事实上，这正是它们相较于专用方法的主要优势。通常，通用方法是算法的基础，而专用方法则是针对特定架构开发的具体算法。

下一种分类在于考虑和不考虑系统中负载平衡变化的原因。在开发方法和算法时，需要确定是否有必要考虑负载均衡变化的原因。考察那些不考虑系统中任务分配平衡变化原因的算法，可以指出

，其优点在于能够简化负载均衡器的开发。这种方法的缺点显而易见，即使是不考虑负载变化原因的高效负载均衡算法，也将不如那些考虑负载变化原则以及未来应如何相对于计算系统调整工作策略的算法。

与上述方法不同，考虑系统未来运行中负载变化原因的方法，能够更准确地确定如何在计算元素之间重新分配任务。与这种方法的优先性相对应的，也有其反向缺点。其缺点在于，开发计算元素之间负载均衡的方法更加复杂且成本更高。正是这种相互对应的优缺点，引出了一个核心问题：究竟应当采用哪种方法。

考虑系统组件之间负载失衡原因的系统，适用于复杂系统；在这类系统中，要实现节点间任务的均匀分配，效率和准确性至关重要。不考虑系统中负载变化原因的方法，则适用于结构简单的系统。

需要指出的是，考虑负载平衡变化原因的负载均衡器可分为两个子类。第一类是从外部影响系统负载平衡的因素；第二类是从系统内部影响负载平衡的因素。例如，高峰时段对服务器系统的请求增加，属于外部因素；而由于某个计算元素耐磨性差而导致性能下降，则是从系统内部产生影响的因素。

负载均衡策略还可分为预测型和非预测型：前者模拟系统中计算组件未来的负载，后者则无法预测计算系统后续运行时的负载行为。显然，预测方法更加有效，因为通过准确预测并分配系统后续运行中的负载，可以显著提升其性能。借助预测方法，提升的并非某些因素的表现，而是所有因素的整体表现。

这既能提高吞吐能力，也能加快计算元素处理所分配任务的速度。在负载均衡方法中考虑预测能力的缺点，是需要投入大量成本来开发能够预测系统未来运行情况的方法。正因如此，只有在以下情况下才会采用这种方法：所开发的负载均衡算法将应用于规模庞大、对节点间任务分配的判定精度要求很高，且需要高效完成所分配任务的系统。

在考察那些无法预测计算集群中负载后续变化的负载均衡系统时，应当立即指出，这类系统的效率远逊于预测型系统。不过，仍需再次说明，有些计算机系统虽然篇幅可能很大，但其本质并不复杂，对计算单元之间任务分配精度的要求也不高。对于这类系统，采用非预测型负载均衡策略往往比采用预测型策略更为合适。

最重要的分类方式之一，是将负载均衡方法分为集中式和分布式。按这种方式划分负载均衡策略，在开发负载均衡方法时非常重要，因此有必要对此进行详细探讨。首先来看开发负载均衡方法的集中式方法。这种方法为系统中的所有计算单元设置一个统一的负载均衡器。负载均衡器负责评估待处理任务的到达率，评估计算单元在特定时刻的能力和负载程度，分析整个系统的状况，并进行任务分配。这种方法的优势显而易见：统一的负载均衡器能够更好地协调计算单元之间的工作，更快地评估整个系统的状态，并在系统后续运行过程中对其施加影响；必要时，还能针对系统的临界状态发出信号。当然，这种方法也有缺陷。其中一个缺陷是，一旦负载均衡器发生故障或开始异常运行，

整个系统的负载均衡就会开始出现异常，并很快造成严重的负面后果。还应指出，集中式负载均衡器通常比分布式负载均衡器对可扩展性产生更大的负面影响。

在讨论分布式方案时，需要指出，每个计算组件都配有自己的负载均衡器，其任务是评估所在组件的负载，确定任务或请求到达该组件的强度，并进行计算，以确定其负责的计算单元后续的运行性能。所有负载均衡器彼此交换各自计算节点的负载信息。总之，每个负载均衡器都会确定其元素的负载程度，并判断其计算单元是否负载过重，或是否未得到充分利用。在整个系统中，所有负载均衡器彼此保持联系并交换信息。通过数据交换，所有负载均衡器都掌握系统中每个负载均衡器的负载信息。因此，在有需要时，负载较轻的负载均衡器可以从负载较重的负载均衡器的队列中接收部分请求。分布式负载均衡相较于集中式负载均衡的优势，源于集中式方法的缺陷。这一优势在于，当发生故障或开始进行不恰当的计划时，整个系统中只有一个负载均衡器会失效；而在集中式算法中，这会立即对整个系统的负载平衡产生负面影响，因为其中只有一个负载均衡器。分布式负载均衡方法的缺点是，与集中式方法不同，这种均衡策略无法整体评估整个系统的情境，因为每个计算组件都有自己的负载均衡器。因此，在影响系统的关键情境下，如果需要作出应对整个计算集群产生全局影响的决策，集中式负载均衡方式显然优于分布式方式。图2展示了由五个计算组件组成、彼此交换数据的示意图。

之所以特别关注将负载均衡策略划分为集中式和分布式，是因为选择其中一种方法往往会改变建模的整体思路，以及计算单元之间任务分配方法的创建原则。考虑到所开发的方法的具体用途，应在初始阶段选择其中一种策略：集中式或分布式。

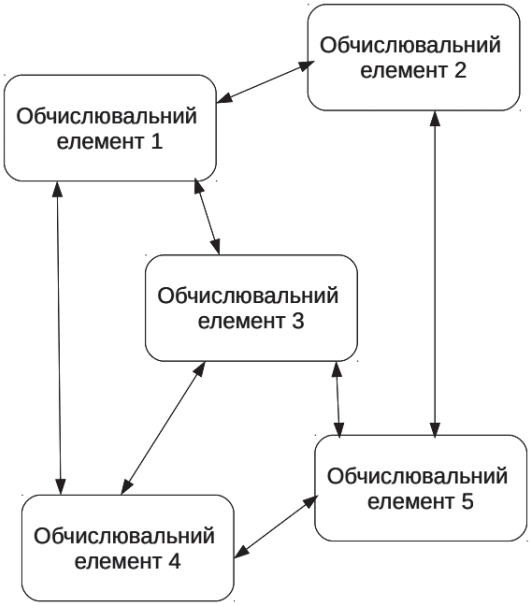


图2。分布式负载均衡

策略类别的最后一种划分，是将负载均衡方法分为自适应和非自适应两类。自适应负载均衡策略能够适应系统中的重大变化。例如，向系统中添加新的计算节点，或移除现有节点。当然，能够适应重大变化这一点，使这种策略比非自适应方法更具优势。不过，这种方法的缺点是，开发时需要额外投入工作，并且必须考虑是否确实需要实现它。

毕竟，如果系统根本不打算添加或移除新的计算元素，分布式系统的资源配置及其他重要方面也不会发生变化，那么采用这种方法就毫无意义。自适应负载均衡策略与动态策略非常相似，甚至可以将其视为动态策略，只不过这里的定义范围更窄。图3展示了一个集中式自适应负载均衡器，并在其中添加了两个计算元素，以虚线标出。图4展示了一个分布式自适应负载均衡器：在三个彼此交互的元素基础上，又添加了两个同样以虚线标出的元素。

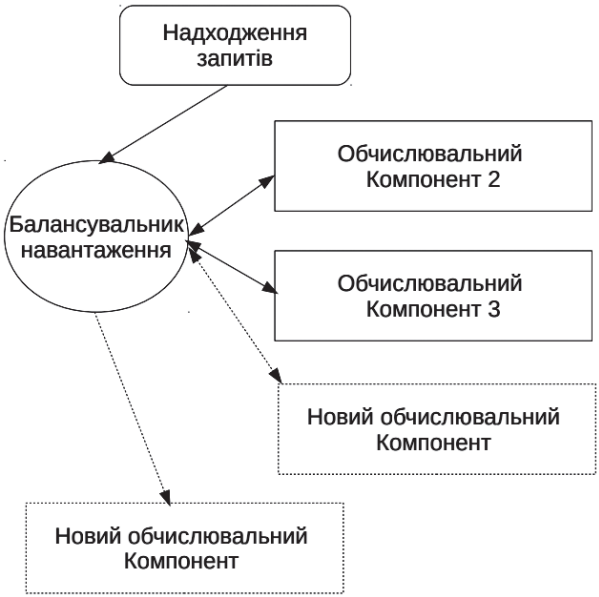


图3. 集中式自适应负载均衡器

非自适应负载均衡策略不会考虑或预见工作中的重大变化。这是它相较于自适应策略的缺点。不过，对于不预期工作中出现重大变化的系统，这种任务分配方法非常适用。

负载均衡方法的描述。已 对可用于分类负载均衡策略的指标进行了综述，以便将这些策略应用于我们提出的负载均衡方法。之所以通过分类来描述该方法的理论基础，是因为这种特性能够清晰地展现其能力和属性。

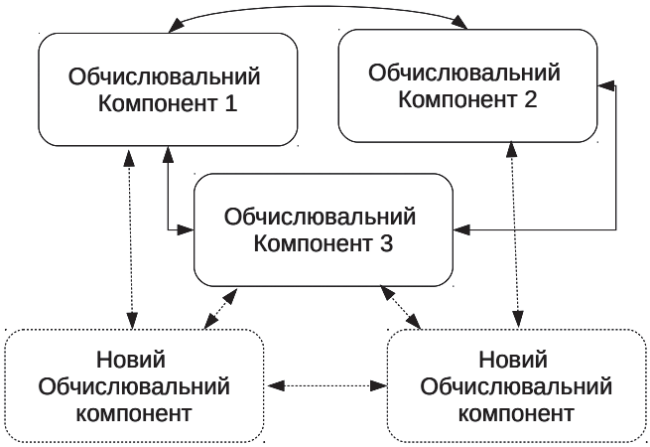


图4. 分布式自适应负载均衡器

简要概述负载均衡方法时，首先应指出，其运行应立即划分为两个部分。第一部分的功能包括对整个系统进行全局评估，跟踪进入系统进行计算的任务到达强度，根据计算元素的处理能力在各计算元素之间均匀分配任务，并根据进入计算系统的请求到达强度，确定未来在计算节点之间分配任务的方式。

向计算元素重新分配请求将每隔设定的时间段进行一次。具体设定多长的时间段取决于具体系统。此外，还允许在计算系统运行期间，根据系统自身的运行情况调整这一时间间隔。

在节点之间分配任务时，负载均衡器将根据任务到达量进行操作，并将其与系统中每个计算组件的性能能力进行比较。因此，为实现负载均衡，需要借助每个计算节点的基本特性来评估其性能。预计每个元素的工作性能特征仅在系统启动时供负载均衡器使用。之后，将通过评估每个计算元素的工作效率，即在实际运行中确定其性能。

系统任务到达强度的评估是负载均衡器第一部分的关键组成部分。借助概率论中的一个基本公式，以及对前几次迭代中请求到达强度的评估，可以预测后续迭代中的工作情况；这些迭代会按设定的时间间隔进行。该预测的意义在于，每次在系统的计算组件之间重新分配任务时，都对预测准确度进行比较。比较时，将已到达的任务数量与预测数量进行对照，并评估误差。如果预测结果与实际收到的任务非常接近，就不进行重新分配，而是继续按照上一次迭代中确定的方式运行。这种方法的优点在于，简单地比较数据耗时极少，所需计算资源也很少，实际上不会影响系统或负载均衡器的运行。反之，如果每次都重新分配，则需要付出一定代价。因此，即使预测多次与实际收到的数据不符，也仍需调整负载划分策略，而这本来就是必须执行的操作。当预测与收到的数据一致时，就无需重新分配，也就能明确后续应如何分配负载。这既能节省负载均衡器的时间和计算资源，也能为整个系统节省时间和计算资源。

此外，负载均衡器第一部分的功能还包括监控负载以及整个系统的运行情况。例如，当整个系统的负载显著增加时，

这种负载均衡器能够迅速发现这一情况并及时应对这一问题，也能发现某个计算元素运行中的问题。这是集中式负载均衡策略的主要优势。

总结负载均衡器的第一部分时，需要根据上述分类确定其主要特征。毫无疑问，这种方法是集中式的，因此能够更好地监测系统中的负载分配。此外，任务负载均衡方法的第一部分预计将具有自适应性，即能够适应系统的运行情境，例如某个计算组件发生故障或新增组件。当然，考虑到每隔一个设定的时间段就会重新分配负载，任务分配方法的第一部分可以称为动态策略。它具有依赖型分配的特征，因为负载均衡必然会根据系统的变化以及请求到达强度，考虑上述因素。当然，这一策略也是预测型的，因为预测未来将如何分配负载正是其核心。

在计算元素之间分配任务的方法的第二部分中，假设负载均衡器将直接与系统元素协同工作，并分别评估每个元素的工作能力。此外，工作将按照设定的时间间隔循环进行，各次迭代将在第一部分完成其工作后执行。

可以得出结论，负载均衡器的第二个组成部分呈现出去中心化的特征，因为负载均衡器在与每个计算组件协同工作时，会评估其能力，判断它具体能够承受多大的负载。同时还需考虑，负载不会降低组件的工作性能。当然，如果整个系统的负载随着新任务更加密集地到来而增加，那么由于工作量增大，整个计算系统将需要更多时间来处理收到的全部信息。不过，即使总体工作量增加，负载均衡器仍有义务将其均匀分配给各个计算节点。

因此，预计当负载均衡器的第二部分开始重新分配负载时，所有计算单元都会彼此交换信息。有关计算节点状态的具体信息包括：在负载均衡器第二个组成部分执行系统负载重新计算所限定的时间间隔内，请求的处理速度。系统运行期间，会评估其中每个计算单元的工作性能。此外，在评估每个节点的工作情况时，将采用实践方法，也就是说，会评估系统运行期间各组件处理请求的速度，包括新任务到达强度上升和下降时的处理速度。

第二部分将用于比较计算元素的工作性能和负载程度。此外，还将创建一个方案，在每次重新计算负载后动态变化。在该方案中，将评估计算元素之间的影响。这里所说的影响，是指某个负载过重的特定元素可以将多少任务转移给另一个负载较轻的元素。该方案是负载均衡器第二部分的基础。因为这样便能构建一套完整的算法，使计算元素能够动态地交换各自队列中的请求。在动态评估每个元素的负载程度时，将考虑其负载相较于最近一次和倒数第二次迭代的变化、系统中新任务到达强度增加或降低时负载的变化趋势，以及系统开始运行以来组件的性能。这样，通过计算这三个组成部分，就能评估系统中每个计算组件在特定时刻的性能和负载。

需要指出的是，确定系统中每个计算节点的工作效率十分重要，因为这有助于在重新分配负载时作出可靠评估。如果执行计算功能的系统组件负载并不太大，但在整个系统运行期间，其性能却明显逊于其他元素，那么应最后才将部分工作从负载较高的系统组件转移出去——

—。也就是说，首先应将负载重新分配给负载较低且整体性能良好的计算单元，之后才将一部分任务分配给那些性能逊于前述计算单元、负载较低的元素。

考察负载均衡器的第二个组成部分可以看出，它与第一个组成部分的区别在于其具有去中心化特性。尽管这两个组成部分的函数不同，但基于这些方法开发的算法在本质上也会存在显著差异。此外，组成部分之间存在差异的原因还在于：第一部分负责预测后续负载及其进一步分配，而第二部分则负责评估每个计算元素上的负载并对其进行重新分配。

需要注意的是，从计算系统开始运行之初，就必须评估系统 [8] 的性能能力。由于在最开始时不会有实际数据，因此需要评估负责计算提交给它们的任务的组成部分的计算性能。为此，需要考察一种简化的计算机模型，该模型由指令集合 I 和可用内存 M 组成。需要指出的是，指令 x ∈ I 不仅指该指令的名称，还包括其所有操作数的值。因此，当存在两条名称相同但操作数值不同的指令时，它们将被视为不同的指令，并且都会被纳入集合 I。

将处理器面前的任务记作符号 A，并将其视为某个指令序列 x (P) = x 1, x 2,..., x i ∈ I。此时，如果任务 A（例如）包含一个重复执行若干次的循环，那么序列 x(A) 就会包含按指定次数重复的该循环体。显然，并非所有指令序列都是允许的。例如，可能存在一对指令，按顺序执行时会导致处理器运行出错。因此，需要确定仅由允许执行的指令构成的序列。

假设指令 x 的执行时间为 τ(x)。为简单起见，我们认为所有指令的执行时间都是

整数，且所有 τ (x)（x ∈ I）的最大公约数为 1（这一补充对大多数处理器都成立，因为执行时间总可以用处理器周期数来表示），因此总存在一条最简单的指令，其执行时间为 1，即 τ (x) = 1）。本文在描述计算能力时采用这一假设，便可以使用 lim 代替 lim sup。于是，指令序列 y = x 1 x 2 x 3...、x t 的执行时间 τ (y) 可由以下公式表示：

$$\tau(y)=\sum_{i=1}^{t<\tau}(x_i). \tag{1}$$

公式（1）简单且基础，可用于计算评估处理器和计算系统的性能。它给出了任务执行所需的时间，而任务又会进一步分解为若干独立的子任务。由于目前我们只关心计算元素执行所分配任务所需的时间，因此在简单情况下，这一公式便足以为后续计算中的负载均衡方法奠定基础，依据是已接收请求的处理速度。如果这类简单公式仍然不够，则需要采用更复杂的公式和方法，并参考有关计算机性能的研究成果。

总结理论综述时需要指出，在将负载均衡工作划分为两个阶段的情况下，其主要优势在于所谓的额外检查和重新分配。显然，这由负载均衡器的第二部分完成。在执行预测性计算、为下一次负载重新分配做准备后，负载均衡器第一部分的算法会根据各计算组件的负载评估结果及其处理能力，在组件之间分配负载。第二部分完成工作后，经过设定的时间间隔，会再次调用第二部分执行工作；它会评估计算组件的负载，并在需要时进行新一轮负载重新分配。这提高了负载均衡器工作的准确性。而在预测准确时，第一部分的预测能力可以节省时间。

还需要指出的是，这两个部分将以不同的方式在计算

组件之间重新分配负载，但彼此不会发生冲突，尽管它们采用的负载均衡策略不同。不会发生冲突的原因在于，这两个部分依赖相同的数据——计算元素的任务计算速度指标以及请求到达率。负载均衡器的总体工作方案如图5所示。

对所提出的方法进行更详细的考察时，首先需要关注负载均衡器的第一部分。首先，将进行预测计算，这些计算基于概率理论中的基本公式，即全概率公式：

$$P(A)=\sum_{i=1}^{n}P(B_i)P(B_i \vee A). \quad (2)$$

公式（2）用于计算预测值，即下一次迭代中将向计算系统分配多少任务。为此，需要使用前一次迭代的数据。这些数据是前一时间段内发送的请求数量。反映前一次迭代请求数量的数据被视为已经发生的事件，即 P(B)，因为这些请求已经分配到所有计算节点，并且计算系统按照分配给它的负载运行。反映当前迭代期间收到的请求数量的数据被视为事件 P(A)，该事件取决于前一次迭代的数据。参数 i 和 n 表示将参与这些计算的最近迭代次数。通过计算连续两次迭代期间发送的任务数量信息，可以得到被视为预测性数据、且接近下一次迭代数据的数据。

当然，人们可以质疑这种预测的精度，因为到达计算系统的任务到达率并不稳定。不过，如前所述，为了保证预测的工作效率，负载上升或下降的强度必须均匀。若强度不均匀，则每次都会重新计算下一次迭代的预测。但采用这种方法的意义在于所述公式简单，且易于通过程序实现。由于公式并不复杂，计算速度会很快，而且这不会

影响负载均衡器的工作效率。更重要的是，如果任务到达率逐渐上升或下降，那么只需进行简单比较即可；若误差很小，例如在 10–20% 之间，就没有必要重新计算所有元素的负载状态，而可以按照上一次迭代所采用的策略，在这些元素之间分配负载。还应注意，如果误差确实会明显影响工作性能以及各个计算组件的负载，那么负载均衡器的第二部分会评估每个组件的工作情况，并更合理地在它们之间重新分配负载。

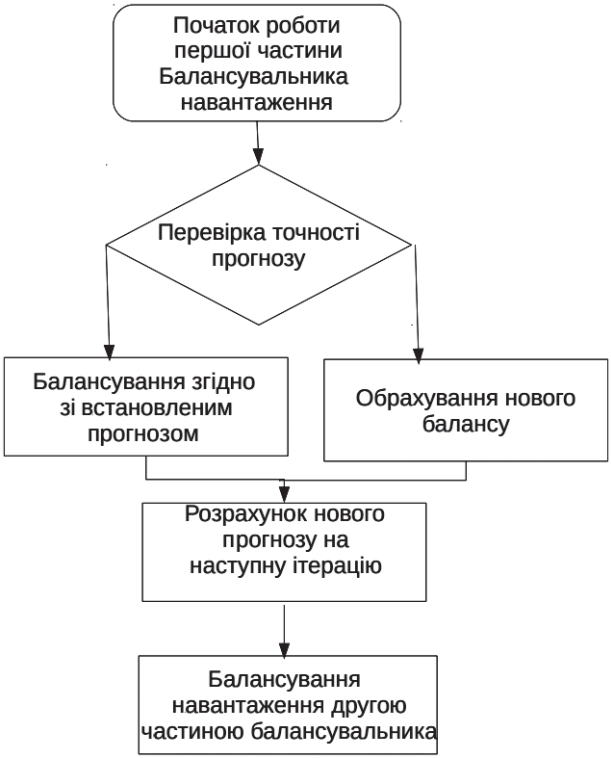


图5。负载均衡器的总体工作示意图

因此，可以对负载均衡器的预测部分作出如下总结：当向计算系统发送请求的到达率均匀且逐步变化时，才会进行预测。在请求到达之间，其篇幅差异较大的情况下，预测部分将无法有效用于负载均衡。考虑到前文所述的实现简便性，采用预测部分不会对整个系统的工作效率产生任何影响，因为其计算不需要耗费大量时间和资源。

负载均衡本身将通过以下关系式进行计算：

$$\frac{k_{i(n-1)}}{k_{i(n)}}. \tag{3}$$

在所示公式（3）中，各值表示当前迭代与前一次迭代所提交请求数量之间的比率。符号*i*表示应用该比率的计算组件，k表示在指定迭代期间收到的任务数量，n表示迭代的序号。首先均匀分配请求，然后比较所得系数；如果发现某些计算单元的值存在显著差异，则将部分请求从负载较高的单元转移到负载较低的单元。如此反复排序，直到各比率彼此趋于均匀。随后计算每个计算单元的性能，即比较其在前一个时间间隔内的运行速度与刚刚结束的时间间隔内的运行速度，从而评估其性能。接着计算各单元上均匀分配的请求与各单元性能之间的关系。这样做是为了识别性能更高的计算节点，并将更多负载分配给它们。由此，系统中负责计算的各组件之间的负载不仅会根据所发送请求的篇幅均匀分配，也会根据每个组件的运行性能均匀分配。

无法准确确定迭代间隔，因为这具体取决于将采用该均匀任务分配方

法的系统。毕竟，在实现时存在差异，例如，处理已到达请求的服务器集群与多处理器计算机之间就有所不同。因此，具体实现可能各异。不过可以确定，迭代之间的间隔不能太长。这是因为所提出的公式在软件实现方面并不复杂。同样，也很难确定预测所允许的准确误差，因为这取决于负载均衡器所实现的系统。值得注意的是，要求预测完全准确并排除误差的可能性并不合理，因为请求到达率无法准确预测。同样，也不应过分放宽误差容限，否则会导致负载均衡器第一部分运行不正确。如前所述，最好关注15%以内的误差范围，不过首先仍需考虑该负载均衡方法所应用的具体环境。

负载均衡器的第二部分通过评估并比较各计算元素之间的负载和性能来运行。它紧接着负载均衡器第一部分的工作之后执行。第二部分评估第一部分所建立的分配有多大程度的不平衡，并进行重新分配。但这一过程并不是对整体情况进行评估，而是对所有计算元素的负载数据进行排序并相互比较。计算结果依据公式（3），但仅适用于两个元素。因此，负载均衡器的第二部分工作被称为第一部分的校正。它使计算节点之间的负载趋于均衡，而这一负载是由第一部分建立的。

第一部分结束运行与第二部分开始运行之间需要设定的时间间隔也很难确定，这具体取决于所描述的负载均衡方法将应用于何种环境。需要注意的是，负载均衡器第一部分的一次迭代结束与第二部分的一次迭代开始之间的时间间隔，不应大于负载均衡器第二部分的一次迭代结束与第一部分下一次迭代开始之间的时间间隔。如果第二部分开始运行得太晚，那么第一部分所实现的负载均衡便失去了意义。

尽管针对特定系统确定预测误差会更有效，但建议使用以下公式：

$$k = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{i_{n-1}}{i_n}}{n}. \quad (4)$$

公式（4）用于计算系统整个运行期间的算术平均误差。参数 *i* 和 *n* 分别表示请求数量和迭代次数。建议引入可缩短或延长迭代间隔的常量。例如，可以设定间隔常量与平均误差成正比。比如，在误差达到 50% 的情况下，迭代间隔缩短一半。不过，在应用上述公式并确定进行调整的常量时，建议考虑该算法将用于计算机科学的哪些具体领域，因为该算法将基于所提出的方法。这样便可以根据两个组成因素计算间隔变化动态：预测误差，以及重新计算的负载量之比，即当前迭代的请求数量与上一迭代的请求数量之比。重要的是，重新计算后的比值关系应依据负载均衡器第二部分的数据来确定，因为正是第二部分在第一部分运行后调整负载。同样，也可以将公式应用于上述两个因素，计算平均值并将其与设定的常量进行比较。这正是判断负载分配调度方法工作效率的依据。如果误差值和负载校正值较大，则表明任务到达强度并不均匀。显然，缩短迭代之间的时间区间，会减少该区间内任务到达强度的明显波动。迭代间隔可以相对较短，因为如前所述，该方法的软件实现和执行并不复杂。

总结负载均衡器的工作后，我们建议引入系统中所有计算元素的示意图。在整个运行期间

动态确定系统中每个计算组件的运行速度，以此反映各自的性能。该示意图旨在标明系统运行期间哪些组件效率较高，哪些效率较低。这些数据有助于预先确定应从哪些元素中转移部分任务，并将其分配给其他性能较低的元素。图 6 展示了性能最低的计算元素将部分任务转发给其他计算元素的示意图。图 7 展示了将两个性能最低的元素所承担的部分任务转发给系统中性能最高元素的示意图。

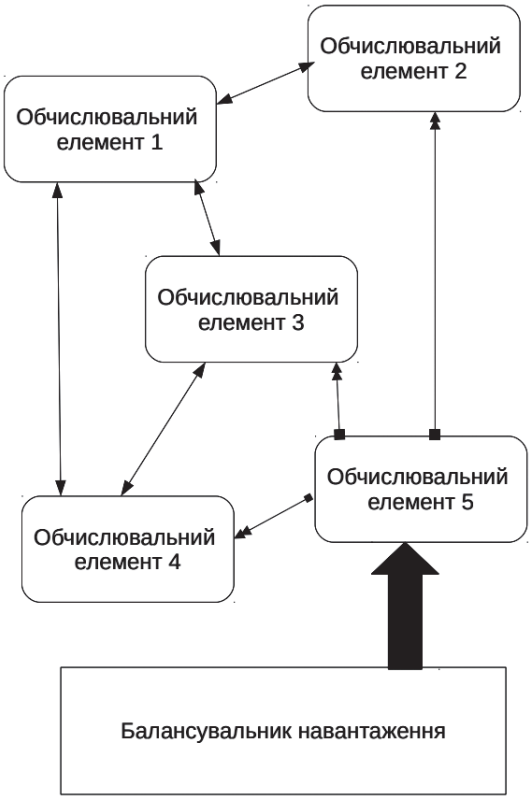


图6. 将任务重定向至性能最高的计算组成部分

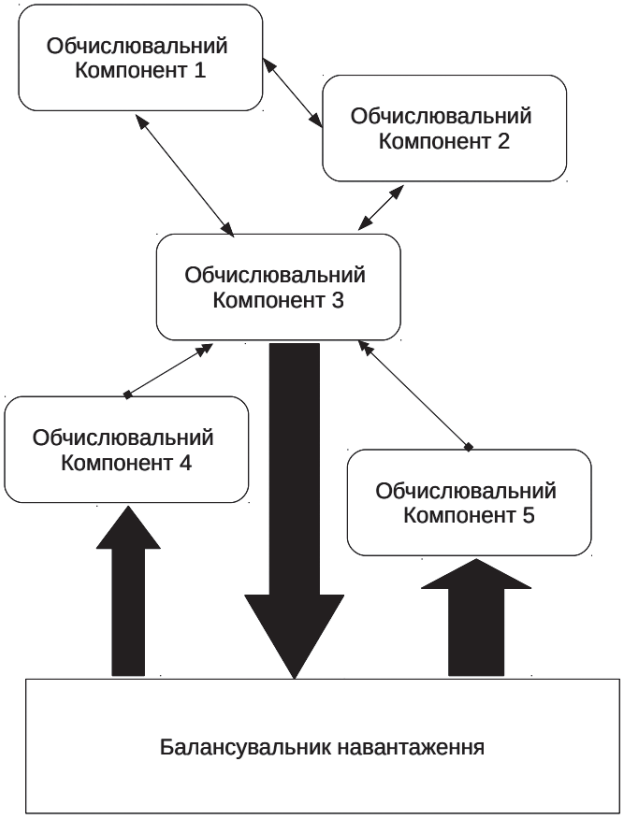


Рис. 7. 将任务从生产力最低的组件重新分配 a

结论。 基于所述均衡策略，我们提出了一种新的负载均衡理论。我们考虑到，所提出的方法具有通用性，可作为开发各种需要负载均衡的信息系统算法的基础。此外，所述方法还可在任务到达强度均匀时，预测系统后续运行过程中的负载分配。所述负载均衡方法是动态的，会按设定的时间间隔改变系统计算组件之间的负载分配。该方法不仅依据对任务到达强度的评估，还依据计算组件的工作性

能。性能通过评估各组件在整个系统运行期间的工作速度来确定。

参考文献

1. Классен Р. К., Хисамиев Л. Р. 全球信息系统中负载均衡过程的建模 // 第二十一届图波列夫讲座（青年科学家学校）：国际青年科学会议，喀山，2013年11月19日至21日：会议论文集。— 喀山，2013年。— 第1卷。— 第323–324页。 2. 负载均衡：主要算法与方法 [电子资源] / Selectel 公司博客。— URL: http://habrahabr.ru/company/ selectel/blog/250201/（访问日期：2015年12月24日）。 3. Бершадский А. М., Курилов Л. С. 分布式数据处理系统中负载均衡策略的研究 // 高校学报。伏尔加地区。技术科学。— 2009年。— 第4期。— 第 38–48 页。 4. Райхлин В. А., Классен Р. К. 使用 RUNNet 网络资源的分布式数据库管理系统中负载均衡过程的建模 // НГТУ科学学报。— 2015年。— 第61卷，第4期。— 第90–100页。 5. Корнилина М. А., Якобовский М. В. 燃烧问题建模中的处理器负载动态均衡 // 高性能计算及其应用：全俄科学会议论文集。切尔诺戈洛夫卡-2000。— 莫斯科：莫斯科国立大学，2000年。— 第34–38页。 6. 网络负载均衡 [电子资源] / АСПЕКТ СПб：网站。— URL: http://www.aspectspb.ru/solutions/it/highavailability/nlb.html（访问日期：2015年12月24日）。 7. Чжоу Т. Web服务器负载均衡系统 [电子资源] / Windows IT Pro/RE。— 2000年。— 第3期。— URL: http://www.osp.ru/win2000/2000/03/174228/（访问日期：2015年12月24日）。 8. Ракитский А. А., Рябко Б. Я., Фионов А. Н. 比较和评估计算机及计算系统性能的分析方法 // 计算技术。— 2014年。— 第19卷，第4期。— 第84–98页。 9. Punetha S., G., Gnanambigai N., Dinadayalan P. 云计算中的容错负载均衡算法综述 // 第二届电子与通信系统国际会议（ICECS）。— 2015年。— 第1715–1720页。 10. Asghar S. A., Bremner E. D. 基于动态可塑作业调度的并行SAT求解器 // 2013年第42届并行处理国际会议。— 2013年。— 第110–119页。 11. Bolch G. 等。《排队网络与马尔可夫链：结合计算机科学应用的建模与性能评估》。— Wiley，1998年。— 第126页。

12. Chang K. C. 等。排队研究软件包建模环境（RESQME）[文本] // Evans G. W., Mollaghasemi M., Russell E. C., Biles W. E，编。冬季仿真会议。— ACM出版社，1993年。— 第294–302页。

下一代网络（NGN）发展的紧迫性

Кунуп Т. В.

人类发展的现阶段，其特点是社会技术和经济基础的重构，信息技术、通信、能源和交通成为其基础。合理构建信息通信系统和网络，以保障信息及物质价值的流动，能够显著降低社会维持正常运行的成本。本文探讨了电信网络的发展阶段、现代网络发展的紧迫性，以及对使用此类通信系统和下一代网络（*NGN*）的需求增长。*NGN*的主要方面之一，是确保所提供服务的质量符合要求，这与系统运行效率及网络中服务的提供有关。

人类发展的现阶段以社会技术和经济基础的重构为特征，计算机科学、通信、能源和交通运输成为其基础。信息通信系统和网络的优化建设能够确保信息和物质财富的流动，从而显著降低社会正常运行的成本。本文探讨了电信网络的发展阶段、现代网络发展的相关性，以及对使用此类通信系统和下一代网络网络日益增长的需求。下一代网络的主要方面之一是确保所提供业务的服务质量符合要求。这与系统的效率以及网络中的服务提供有关。

在网络和通信服务的发展过程中，可以划分出以下阶段：PSTN（公用交换电话网）、IDN（综合数字网）、ISDN（综合业务数字网）、IN（智能网）、NGN（下一代网络）、FN（未来网络）。

第一阶段——建设公共交换电话网（PSTN）。电话通信被等同于一项单一服务——语音信息传输。此后，借助调制解调器，电话网络也开始传输数据。

第二阶段——电话网络数字化：建立了综合数字网（IDN），其主要提供基于数字交换和传输系统的电话通信服务。

第三阶段——服务集成：出现了综合业务数字网（ISDN）的概念。在通信网络的发展过程中，人们开始特别关注智能服务。因此，业务集成开始被智能网（IN）的概念所取代。

第四阶段——智能网（IN）。智能网是一种具有以下原则的架构 [14；15]:

– 广泛使用现代信息维护手段；

– 高效使用网络资源；
– 网络函数模块化，并可重复使用；

– 借助模块化、可重复使用的网络函数，同时创建并部署服务；

– 在不同物理对象中放置网络功能的手段具有不变性；

– 网络功能通过独立于服务的标准化接口进行交互；

– 用户和用户可对服务的某些属性进行管理；

– 对服务逻辑进行标准化管理。
智能网的功能架构可表示为以下公式：智能网 = 交换机 + 计算机 [22]。

该网络旨在快速、高效且经济地向广大用户提供智能业务。智能网与以往网络的根本区别在于服务提供的灵活性和经济性 [14]。

智能网 = 交换机 + 计算机 [22], 多年来，交换设备制造商和计算机设备制造商都在追求这一公式。前者因此能够灵活、迅速地创建并推出新的通信服务，而无需对交换设备进行重大改动；后者则得以进入新信息技术市场中最大的细分市场之一。

现代通信网络得益于“智能网”（IN，智能

网络）概念的发展，获得了大量新功能。智能网的核心思想是让交换机（移动交换中心）专注于交换工作，而各种业务则由外部平台提供。这些平台通过信令网络与交换机“通信”，指示交换机如何处理呼叫。在这种架构下，所有逻辑都在独立的控制节点（业务控制点）上实现，而交换机中只需描述在何种条件下将请求转发至相应的业务控制点。由于所有逻辑变更都在交换机之外进行——理论上集中在一个节点上——因此可以缩短业务部署时间，并使业务具有很高的灵活性。智能网架构最初是为公共交换电话网开发的。之后，智能网应用部分协议也扩展到了移动通信领域。不过，智能网应用部分存在一个重大缺陷：架构封闭，导致不同厂商的解决方案彼此不兼容。因此，智能网应用部分业务只能在归属网络内提供。用户漫游时便无法使用这些业务。为解决这一问题，开发了 CAMEL（CAMEL应用部分）协议。CAMEL 是一种用于应用程序（业务）与交换设备协同工作的协议。它是经过扩展的智能网应用部分协议，增加了有关用户位置的信息。该协议由欧洲电信标准协会开发（TS GSM 02.78，1996年7月）[25]。除在功能上有别于智能网应用部分外，其关键特点还在于高度符合标准，并且不同厂商对其基础交换设备的实现具有较高的统一性。该协议自2002年末起在乌克兰及其他国家陆续部署，并于2003年年中起全面推广。

CAMEL，或称 CAMEL应用部分，可为用户提供完整的智能增值服务套餐（尤其是漫游服务），包括预付费用户；用户不仅能在归属网络中使用这些服务，也能在支持 CAMEL 标准的网络中漫游时使用。这得益于用户可在归属网络中实时监测账户并计费。与 USSD 等方式不同，CAMEL 可将连接时间缩至最短。由于其开放性，不同制造商生产的设备可以顺畅互通。也就是说，即使在漫游时，用户也能在其他运营人的网络中使用自己的“智能”服务。

智能业务提供系统是一种基于 CAMEL 协议运行的平台，可用于解决电信增值业务领域中各种各样的任务 [25]。与 CAMEL 协议相关的漫游组织方式有一个特点：

与 USSD 不同，它只能在同样支持 CAMEL 的运营人网络中提供。漫游分为入境漫游、网内漫游和出境漫游。该协议有以下版本：CAP2、CAP3（CAMEL应用协议第 2 阶段／第 3 阶段）[25]。

基于该系统的服务示例：

1. 预付费业务系统。任何通信业务（主叫电话、短信、互联网流量、内容提供）都可以实时计费——在服务开始前或服务提供过程中计费。

2. 虚拟电话号码。为企业用户提供统一的访问点。可设置各种来话路由规则，并集成语音信箱或自动信息服务等。

3. 彩铃（RBT）。拨打您电话的人听到的将不是回铃音，而是您喜爱的旋律，也可以是企业歌曲，甚至是广告——这就不再只是娱乐服务了。

4. 回拨（“请给我回电话！”）。如果您突然无法拨打电话（个人账户余额不足或漫游条件不允许），这项服务可以向您的联系人发送短信或 USSD消息，请求对方给您回电话。

5. 黑名单／白名单。想摆脱不想接听的来电或短信？或者想设置一个只有特定联系人才能拨通的号码？这项服务会在交换机层面拦截不想接听的来电，这些来电将不再打扰您，也不会占用您的通信线路。

关于智能通信业务和计算机电话集成（Computer — Telephony Integration，CTI）的能力——它将两个异质的信息空间结合起来——已有不少相关出版物。相比之下，关注其实现手段的文献则少得多：即普通电话网络中的智能交换与路由系统。这些系统负责形成语音和传真流量，并为提供非传统（智能）通信业务创造技术条件。与非传统呼叫处理过程、连接建立或计费相关的电信业务正日益普及。这类服务包括免费电话（由被叫方付费的呼叫）、付费电话业务（按额外费用计费的呼叫，例如访问信息资源或参与电话抽奖、投票等），

预付费呼叫（用户通过密码访问的预付费呼叫）、最低成本路由（选择最经济路线进行路由）以及其他多种业务。

下面来看看这些业务是如何实现的。例如，某个运营人打算为某一类用户提供一项新增的附加服务。为此，需要确保有专门的呼叫处理和连接建立流程（例如，Prepaid Calling 业务需要能够在通话过程中从用户账户动态扣款）。然而，运营人的电话网络交换机并不支持这种流程。解决这一情境的“传统”方法，是投入“非常、非常多的钱”来升级网络设备，或者干脆放弃向用户提供智能业务的想法。

还有一种办法（对运营人来说同样令人沮丧），就是求助于“电话接线员”。难道就毫无希望了吗？当然不是，只要使用基于 CTI 技术的 Call Routing 计算机电话系统即可。

采用专用软件和硬件的想法相当直观，尽管对通信领域的从业者来说并不常见。如果自动电话交换机无法实现智能业务，就让它处理传统任务，而缺少的智能则由呼叫路由系统补足。此类系统通过模拟或数字信道（双线用户线路、T1/E1/ISDN）接入自动电话交换机，并使用它最后一种能够理解的语言与之“交流”（也就是说，支持几乎所有信令协议——环路启动、随路信令、共路信令，甚至七号信令系统）。自动电话交换机唯一需要做的，就是照常处理标准呼叫，并将需要特殊连接建立程序的呼叫转接至呼叫路由系统。

俗话说，感受一下其中的差别：更换网络基础设备，或在不进行任何现代化改造的情况下安装呼叫路由。通信运营商只需对自己的自动电话交换机进行编程，将特定类型的呼叫交换至计算机电话系统，并分配足够数量的端口供其连接。另一方面，呼叫路由则根据具体的服务组合进行配置和编程。接下来谈谈这个问题的经济方面。

基于呼叫路由的解决方案成本要低得多，不像专用自动电话交换机的安装费用那样高，后者包含软件和硬件模

块，用于提供智能业务。原因在于，所有与智能业务相关的程序（例如，以用户选择的多种语言与用户进行语音交流、审核密码、根据用户要求建立连接、动态从用户账户中扣款），都是计算机电话集成的“原生”功能，通常甚至最简单的呼叫路由系统也会通过软件支持这些功能。更精密的软件可提供个性化计费和路由、IP电话元素、回拨功能（Call Back）以及许多其他功能 [24]。

呼叫路由系统的主要优势清单相当可观：

1. 支持多种通信线路类型。系统可通过任何类型的信道连接到自动电话交换机（模拟、数字——T1 / E1 / 综合业务数字网）；

2. 灵活性。支持与基础网络交换节点进行交互的任何协议（环路启动、随路信令、共路信令）；

3. 可扩展性。系统既可以通过增加所服务信道的数量来提升容量（从小型运营商的几十条用户线路到大型服务提供商所服务的数十条数字流），也可以扩展功能集；

4. 部署简便。无需对现有网络进行现代化改造，只需在通信运营商的自动电话交换机上划分出连接系统所需数量的模拟或数字端口；

5. 经济高效。为推出新的通信业务或提高老旧通信网络的使用效率，往往需要巨额资本投资（例如，建设新的通信信道、更换交换设备等）。

呼叫路由可在老旧的模拟信道和步进制交换机上，实现现代数字网络所特有的智能业务。

直到 20 世纪 80 年代中期，通信系统设计的首要任务是以合理的价格确保较高的传输能力。随着光纤系统的部署以及 SDH、宽带综合业务数字网、异步传输模式等技术的应用，这一目标已部分实现，电信市场上另一个因素开始变得重要——能够快速发展综合电信业务，以满足用户日益增长的需求。从电信

网络与服务的历史发展来看，大致可分为以下几个主要阶段（见图 1）：

1. 构建公用电话网（Public Switched Telephone Network，PSTN）。在这一阶段，开始建设面向语音信息传输的全国模拟电话网。此后，公用电话网还开始借助调制解调器进行数据传输。

2. 电话网数字化。为提高通信业务质量、提升管理自动化水平和设备的工艺性，在这一阶段开始建设综合数字网（Integrated Digital Network，IDN），其主要基于数字交换系统和信息传输系统提供电话通信业务。

3. 业务集成。在这一阶段，向网络用户提供的业务范围不断扩大，并出现了综合业务数字网（Integrated Service Digital Network，ISDN）的概念。然而，由于设备成本高昂，这一概念并未得到广泛应用。

4. 智能网（Intelligent Network，IN）的创建。IN 概念旨在更快速地推出新服务，同时尽可能高效地利用现有电信网基础设施 [20；22]。

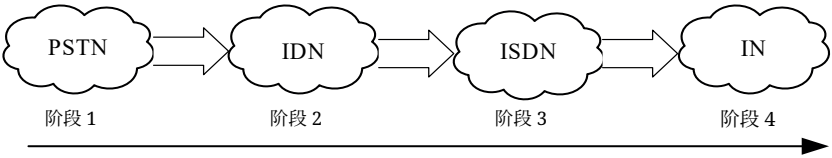


图1. 电信业务和网络的发展阶段

随后，通信网络进一步发展，出现了下一代通信网络。

到20世纪50年代，电信网络仅限于传输模拟电话信号。这一时期，网络开发者的主要任务是以高可靠性和最低成本，将语音高质量地传输到远距离。

到20世纪中叶，发达国家的运营商发现，提供传统服务所带来的收入增长速度大幅下降。对这类服务的需求已完全得到满足——

随着人类各领域不断发展，通信市场上开始出现要求提供传统双点语音连接以外新型服务的用户。两个用户之间普通的语音连接已无法满足商业领域客户的需求。自20世纪60年代下半叶起，通信网络运营商开始提供一系列服务以吸引新用户：为普通用户量身定制的服务，以及面向商业用户的 Centrex 服务。

按需提供的服务清单取决于交换站的能力，例如，用户可以要求在某个时间通过电话叫醒自己等。

Centrex 最初是指一种服务提供方式，即通过共用的部门交换站，向多家公司的用户提供通信服务。随着程控交换站的出现，“Centrex”这一术语开始指向公用电话网的商务用户提供类似于部门自动电话交换机服务的增值服务。为此，自动电话交换机配备了专用书芯，许多公司用户因此节省了采购、安装和维护自有部门自动电话交换机的费用，因为他们可以借助 Centrex，利用公用电话网的资源建立自己的企业网络。Centrex 支持使用缩位拨号、三方会议通话、呼叫转移、将连接转接至其他号码、呼叫等待，以及在当前占线的用户空闲后与其建立连接等功能。

Centrex 是由两个词组成的复合词：Central Exchange，指一种电话通信方式。Centrex 是自动电话交换机／用户交换机集中式服务的名称，由电话服务提供商提供，通常由办公室专用分支交换机（Private Branch Exchange，PBX）提供。Centrex 服务套餐让组织或公司无需自行购买和维护办公室 PBX，因为固定通信运营商的中央电话节点会提供所有必要设备。移动通信运营商也可以提供类似的服务套餐。在移动网络中，这通常称为 FMC（固定移动融合，Fixed Mobile Convergence）。Centrex 所需的最基本业务集包括：使用 2 位或 3 位内部号码拨打办公室内电话；将呼入的市话转接；将呼出的电话转接至市话（经典示例：“娜塔莉娅·彼得罗夫娜！请帮我拨一下米科拉的号码！”）；

将来自网桥的来电转接；将呼出电话转接至网桥（经典示例：“娜塔莉娅·彼得罗芙娜！请帮我接一下米科拉！”）；截获电话 [4]。

在 Centrex 中，提供新服务需要运营商与客户协调一系列具体需求，这些需求必须由自动电话交换机的工作人员执行。因此，Centrex 几乎没有标准化，而能够使用其服务的用户中，实际使用这些服务的人数相当少。

随着信息革命又一个迅猛发展阶段的到来，人们需要以高速传输海量数据，其中也包括通过交换信道传输。与此同时，模拟电话的交换速度已无法令人满意。到 20 世纪 60 年代末，在西方国家继续发展传输语音质量相当高的模拟网络已不再合算。20 世纪 70 年代，基于实现 64 kbit/s 速率连接的能力，以及数字中继线路（例如脉冲编码调制）的发展，数字电话的概念应运而生。从 20 世纪 80 年代中期起，随着光纤系统的部署以及同步数字体系和异步传输模式等技术的应用，以可接受的成本实现高带宽这一主要目标已部分达成。

网络数字化不仅提高了服务质量，也促进了服务数量的增长。因此，制定了创建综合业务数字网（ISDN）的基本原则。 或 ISDN用户可获得两条速率为64 kb/s的信息信道，以及一条速率为16 kb/s、用于管理连接的信令信道（2b+d）。信道的总传输能力为144 kb/s，足以实时传输一个视频频道。

这些新型网络由综合业务数字网交换机组成，用于交换数字流，其中包含各种信息：语音、数据、压缩视频等。模拟信号的转换直接在用户终端中进行。此外，与模拟交换机不同，综合业务数字网中的所有交换机都可以像一台大型交换机那样运行，从而实现呼叫的自动路由、负载的均衡分配、统一的编号计划、虚拟网络的创建，并提供其他一系列增值服务。在其发展过程中，综合业务数字网概念历经起伏，这与市场需求的变化以及计算机用户

的普及程度有关。如今，发达国家网络中的几乎所有交换机都具备综合业务数字网功能。

然而，综合业务数字网（ISDN）以及其他向用户提供附加业务的方法也存在一些问题，例如标准化不足，导致全球存在多种彼此不兼容的标准。此外，要引入新业务，必须更换每个 ISDN 交换局的软件，这需要大量资本投入，也要求网络运营商具备极强的洞察力，因为在这种情况下，「走错一步」的代价会更高。交换设备的使用寿命长达数十年，因此每次为了提供新业务而更换设备并不现实（但也不能不更换，因为网络需要支持的功能数量正迅速增加）。此外，以这种方式引入新业务还会使网络结构以及管理和运营流程变得更加复杂。

在扩展网络所提供的服务种类时，网络中所有自动电话交换机的设备和软件都需要现代化改造，这是上述所有技术的薄弱环节。要解决网络运营人希望向客户提供哪些服务的问题，就必须与设备制造商协商未来服务的特性及其实现能力。推出每项新业务，都需要修改所有交换站的硬件。由于运营人的网络通常由多个不同制造商的设备组成，这一过程更加复杂，有时同一运营人的服务区域内提供的服务甚至并不完全相同。此外，服务投入使用后，要根据新客户群体的需求对其进行修改也非常困难。通常，为此不得不与设备供应商协商，进行额外的硬件改动。因此，运营人往往需要数年时间，才能在自己的网络中规划并实现一项新业务。采用程序控制交换站是迈出的重要一步，它使业务提供逻辑能够通过编程实现，从而大大简化了业务提供过程的实现。然而，业务提供的概念并非模块化。随着单项业务的复杂程度不断提高，以及业务间依赖关系日益增多，在现有业务基础上添加新业务变得越来越困难。运营人无法将支持一项业务的逻辑直接用于支持另一项业务。

通信网络中新增函数的数量、复杂程度和频率不断增加，因此需要一种全新的方法，从根本上改变业务的创建、提供及其运营管理的各个方面。人们需要摒弃沿用多年的保守做法——仅提供少量业务，转而创建一种新平台，使其能够引入种类繁多的非传统业务，并支持根据客户的个性化需求对业务进行“定制”。这种新方法就是智能网络概念。

其后续发展是下一代通信网络的出现。NGN网络的基础是多协议网络——通信传送网，它属于多业务网络，可使用不同的传输协议传送各种类型的信息。NGN是一个统一的传送平台，各种服务在此平台上融合。

NGN网络的主要特点包括：

– 使用分组交换模式传输数据；

– 将管理函数划分为与传送管理、呼叫/会话管理以及应用/业务管理相关的函数；

– 将服务提供过程与传送过程分离，并使用开放接口；

– 支持大量基于构建模块的服务、应用和机制，包括流媒体业务、实时和非实时服务、多媒体服务；

– 支持宽带技术，并端到端（end-to-end）保障服务质量；

– 通过开放接口与现有网络互通 ；

– 广义上的移动性（generalized mobility）；

– 用户可不受限制地访问不同的业务提供商；

– 多种用户身份识别方案；

– 对于用户看来相同的服务，具有相同的特性；

– 移动和固定网络服务融合；

– 面向服务的函数独立于传输技术；

– 支持多种技术，以实现接入网络等。

如今可以说是后 NGN 时代，更准确地说，是采用 IMS 方法。

下面我们将更详细地探讨多业务网络发展的主要阶段。

如今已有下一代网络的概念，其核心是“业务”这一概念——NGS（新一代业务）。

智能网是迈向网络模块化架构的第一步，使交换层与业务提供层得以分离。得益于智能网的成功以及分组技术的发展，在当前阶段，创建下一代网络（NGN，Next Generation Network）已成为可能。向下一代网络的过渡可视为电信系统的一次彻底现代化。改变的不仅是传输和交换的技术原则，信息通信业务市场、技术运维系统等方面也将发生重大变化。

许多当代科学家的研究都涉及 NGN 架构。B. Goldstein、O. Goldstein 等人的著作阐述了向下一代网络过渡的问题，分析了 NGN 的两种竞争性概念——IPCC 和 TISPAN，以及 NGN 的补充技术——MPLS、软交换、呼叫中心和 SIP 协议。该方向的主要规章见 [10]。

NGN网络具有若干显著特点，使其成为一类新型电信系统 [9]:

- 采用分组交换进行传输；
- 将管理函数分离，分别用于承载信道容量、呼叫/会话以及应用/业务；
- 实现服务提供与运输的分离，并提供开放接口；
- 基于统一服务模块支持广泛的服务、应用和机制（包括实时业务、流媒体模式、离线模式和多媒体业务）；
- 通过端到端服务质量（QoS）功能实现宽带传输能力；
- 通过开放接口与现有网络互通；
- 通用移动性；

• 用户可无限制访问不同的业务提供商；

• 标识方案的多样性；
• 从用户的观点来看，同一种服务具有统一的服务特性；

• 固定和移动通信服务的融合；
• 与维护相关的函数独立于所采用的传输技术；

• 支持各种“最后一公里”技术；
• 满足所有监管要求，例如紧急通信、信息保护、保密性、合法拦截等方面的要求。

了解下一代网络的特点后，应对这一术语作出定义。

下一代通信网络（NGN）是一种通信网络构建概念，旨在提供种类不受限制的业务，并具备灵活的管理、个性化和创建新业务的能力；这一概念通过网络解决方案统一化，实现具有分布式交换功能的通用传送网络，将业务提供功能下沉至边缘网络节点，并与传统通信网络集成[14]。

在文献[13] 中，Б. С. Гольдштейн提出了对NGN术语略有不同的解释，其依据是网络能够提供三网合一业务的能力（Triple-Play services——语音、视频、数据）：NGN是一种能够通过使用基于分组技术的传输和交换设备，提供三网融合服务的网络。

谈到下一代网络（NGN），指的是一种基于分组的多业务网络，其服务提供函数与交换函数相分离。

NGN网络架构如图 2 [13] 所示。
NGN借鉴了IN将交换函数与服务提供函数分离的原则。IN的函数分布在软交换和服务器之间。IN与NGN的对应关系如图3所示。

在这种情况下，软交换负责智能服务的交换函数，而业务管理函数则由应用服务器执行。

引入一种新的网络元素：软件交换机 Soft-switch，负责呼叫与会话控制

CSCF（呼叫会话控制功能）一方面管理连接，另一方面通过 SIP 协议（会话初始协议）与服务提供服务器进行交互 [11]。

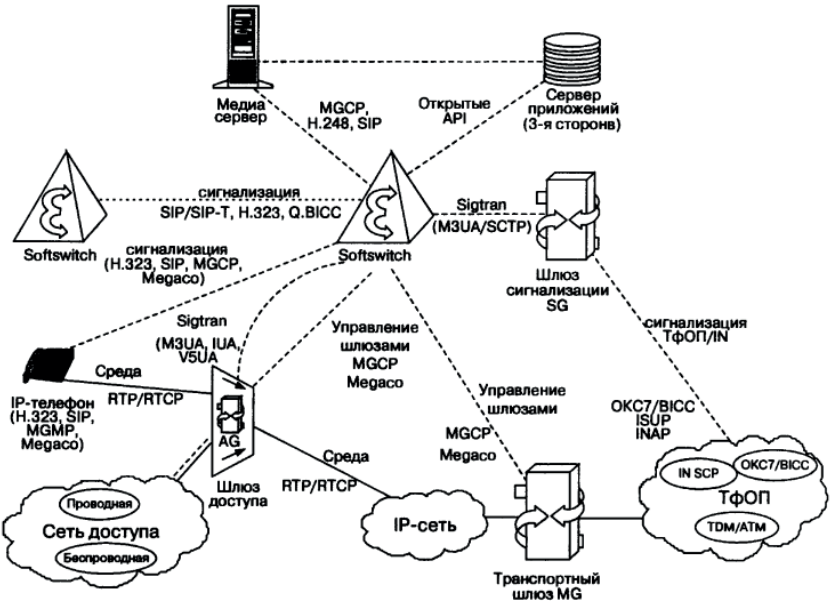


图2. NGN网络架构

在 NGN 术语中，智能业务提供平台称为 SDP（服务交付平台）。NGN 理念的基础是 3GPP联盟（第三代合作伙伴计划）的开放标准。

NGN 的建设理念使多业务网络能够为用户提供三网合一业务（语音、数据和视频传输）。

如今讨论的是按照 IMS 概念实现蜂窝通信和固定通信的融合。

IMS采用分层架构，将用于传输流量的传输层与用于管理会话的IMS信令网络分开（图4）[11]。因此，3GPP在开发IMS时，实际上将软交换的核心理念引入了移动网络。尽管某些函数并不总是容易归属于某一层，

但这种方法确保了各层之间的依赖性降至最低。在IMS中，可以区分出[11]:

– 用户平面——用户层，或数据传输层；– 控制平面——控制层级；– 应用平面——应用层。



图3. 智能网与下一代网络的对应关系

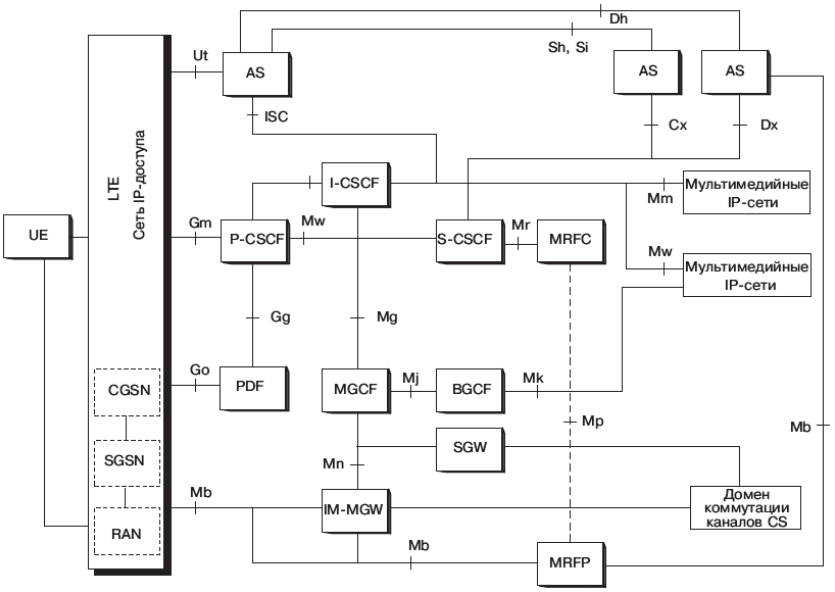


图4. IMS架构

3GPP仿照IN，随后又仿照IPCC中的软交换，规定的不是网络节点，而是函数。这意味着，IMS架构与IN或软交换一样，也是一组通过标准接口连接的函数。

开发人员有权在一个物理实体中组合多个功能，或者反过来，将一个功能分布式实现；不过，通常会使物理架构与功能架构相对应，并在独立节点中实现各项功能。

因此，在 IMS 中，智能叠加层实际上已转变为应用层，其中包括三类应用服务器：

– SIP AS（SIP应用服务器）；
– OSA-SCS（开放业务接入-业务能力服务器——提供服务界面的服务服务器，该界面支持基于开放式服务访问的服务）；

– IM-SSF（IP多媒体业务交换功能——用于在智能网中提供业务的平台）。

在 IMS 中，“智能业务”这一概念已被“新业务”这一概念所取代。

下一代网络的后继者被认为是未来网络（Future Network — 未来网络）。

根据国际电信联盟-T Y.3001建议书，未来网络是指能够提供使用现有网络技术难以提供的服务、能力和工具的网络 [9]。

未来网络可以是：
– 新的组件网络或现有组件网络的改进版本；

– 新组件网络构成的异构组，或由新的和现有的组件网络组成、作为统一网络运行的组。

建议未来网络提供其函数经过专门设计、能够满足应用和用户需求的服务。预计未来服务的数量和选择将迅速增长。建议未来网络能够支持部署这些服务，而无需进行大规模的额外部署，也无需增加运营成本。

图5展示了四个目标设定与未来网络的十二项设计目标之间的相互联系 [9]。



图5。未来网络的四项目标和12项设计任务

与设计任务直接相关:

– 服务多样性 — 未来网络必须支持多样化的服务，以适应传输具有广泛特性和属性的流量;

– 功能灵活性 — 未来网络必须具备功能灵活性，以支持并确保新服务的稳定性，从而满足用户需求;

– 网络管理 — 未来网络需要高效地运行、维护并提供越来越多的服务和应用;

– 优化 — 未来网络将根据服务需求和用户需求，通过优化网络设备的能力来确保足够的运行质量;

– 可靠性和安全 — 必须以确保可靠性和恢复能力的方式设计、运营和发展未来网络，同时考虑复杂环境。

预计到2020年，未来网络——FN 应该已经出现。

由 IPCC 制定的下一代网络架构分为以下几层 [15；16]。

架构的底层是传输层（Transport Layer），负责在网络中传输信令消息和多媒体信息。此外，它还确保与公共交换电话网（PSTN）及其他分组网络之间进行信令和媒体信息的交互与交换。

传输层又分为三个子层：IP传输、网络间交互以及非IP（NON-IP）访问。

IP传输子层提供用于在网络电话网络中传输数据包的骨干传输网络和交换/路由结构。该层包括路由器和交换机，以及负责确保服务质量（Quality of Service，QoS）和数据传输策略的设备。

网络互通子层负责将从外部网络接收的信令和多媒体信息转换为适合在网络电话网络内部传输的形式，反之亦然。该子层中运行着信令网关（Signaling Gateways）、媒体网关（Media Gateways）和互通网关（Interworking Gateways）等设备。

非IP接入子层将不兼容的终端和可访问网络电话网络的无线广播网络连接起来。该子层包括用于不兼容终端或电话的接入网关或驻地网关、ISDN终端、用于混合光纤同轴网络（Hybrid/Fiber Coaxial）的电缆调制解调器或多媒体终端适配器（MTA），以及GSM/3G网络和无线接入网络的媒体网关。

下一个层级是呼叫控制与信令（Call Control & Signaling）。该层管理位于传输层的网络电话网络的主要元素。该层的设备和函数根据从传输层获取的信令信息管理呼叫，具体包括在网络电话网络中建立和断开媒体通信，并向网络组件传递命令。呼叫控制与信令层包含媒体网关控制器（MGC、呼叫代理、呼叫控制器）、LDAP服务器等设备。

第三层——服务与应用层（服务与应用）——负责管理、逻辑处理以及执行一定数量的服务或应用。属于这一层的设备管理流

程呼叫，并依据预先编写的服务执行逻辑，通过与呼叫管理和信令层设备交互来实现。服务与应用层包括应用服务器和服务服务器等设备。

最后一层——管理（Management）负责执行用户支持功能、支持操作并提供服务，同时处理计费及其他网络管理任务。管理层可以使用标准协议或企业内部协议和 API（应用程序接口），与上述三个层级中的任意一个交互。

现在我们来看 ETSI TISPAN 的概念。在这个项目中，与 IPCC 的概念不同，网络架构并非以节点集合的形式描述，而是由一组功能模块构成，这些模块可以部署在不同的物理元素中。模块之间通过标准化接口进行交互。交互通常通过 SIP-I 信令协议进行，有时也使用 H.248 等协议。

ETSI TISPAN 提出的网络架构如图 6 [15 所示；16]。

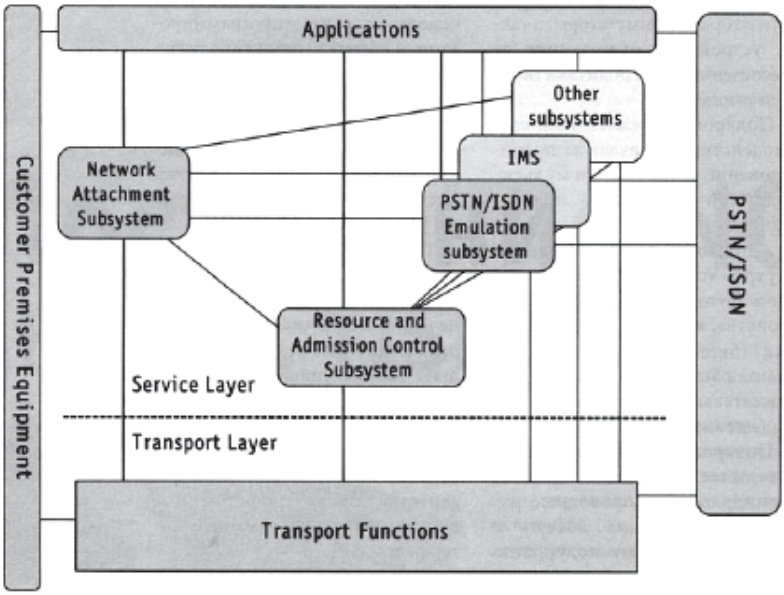


图6. TISPAN子系统

TISPAN 最重要的子系统之一是 IMS 呼叫与服务管理系统。

IMS 的重要原则之一是，它基于开放的互联网标准，因此无需额外适配即可使用互联网网络的所有服务和应用程序；不过，IMS 内部规定使用 IPv6 协议。

IMS 架构的第二个特点是采用创新的方法提供服务，使操作员能够创建各种服务并将它们相互集成，从而为服务个性化和增加服务数量提供了广阔的空间。

IMS 方法采用水平架构（图 6）[15；16], 这使操作员能够以简单、经济的方式部署可个性化的新服务，而且用户可以在同一通信会话中访问各种服务。

新的服务提供架构改变了人们对其创建和标准化的传统看法。引入 IMS 所带来的能力无疑为 TISPAN 解决方案增添了优势。

国际电信联盟成立了一个未来网络论坛，目前该论坛仍在积极运作。下一代网络能够提供最广泛的服务。我们来定义“服务”这一术语，并尝试对现有服务进行分类。 在国际电信联盟 I.112 建议书中，服务被定义为：“为满足消费者的某种通信需求而提供的内容”。同一建议书将通信服务定义为：“一种业务类型，它根据为相应通信类型制定的协议，充分实现用户之间通信的能力（包括终端设备的功能）”。用户服务指提供给用户、出租给用户或由用户付费的内容。

如今，运营商通常依据某一项准则对服务进行分类。这会带来一些困难，例如在计算资费时。因此，有时采用分类器系统对服务进行分类更为合适。

最常见的分类方式如下：

1. 根据所传输的信息类型（内容）对服务进行分类。

2. 根据向客户提供服务访问的方式对服务进行分类。

3. 按客户端类型划分的服务分类。

4. 按信息交换类型划分的服务分类。

每种业务类型都可以按以下特征进行分类：

1. 按实施优先级和重要性划分——基本（主要）业务和补充业务。

2. 按营销功能划分——主要以获取收入为目的的业务，以及旨在吸引新客户的业务。

业务划分为基本业务 *(basic services)* 和补充业务 *(supplementary services).*尤其值得关注。

基本业务由设备的功能用途决定。电话业务中，两个用户建立连接时的语音传输就是提供基本业务的一个例子。

补充业务（增值服务）可以是长期的，也可以是一次性的。长期补充业务可在一定时间段内为设备所有人提供额外能力，而这些能力并非该类型设备的必备功能。一次性补充业务则根据客户的请求提供。

目前最常见的补充服务包括：

1. **无条件呼叫转移** *(CFU)* — 可将所有呼入呼叫转接至其他号码。

2. **用户忙时呼叫转移** *(CFB)* — 用户终端设备忙时，可将所有呼入呼叫转接至其他号码。

3. **用户无应答呼叫转移** *(CFNR)* — 对于在特定时间段内未得到应答的所有呼入呼叫，可将其转接至其他号码。

4. **电话会议**-关系 *(CONF)* — 支持多个用户同时参与通信并进行管理。

5. **呼叫保持** *(HOLD)* — 允许用户中断并恢复现有连接上的关系。

6. 其他。

根据国际电信联盟电信标准化部门 Y.1540 建议，服务质量通过三个指标 [9] 进行评估：

– 速度是最重要的指标之一，用于描述大多数智能业务的服务质量。速度指标由控制时限确定。控制时限是指必须提供服务的最长时间；

– 准确性和可靠性 ——这是服务消费属性的特征，也就是说，它有多适合使用。

– 可靠性——通信设备提供优质服务的属性。

近期关于这一方向的研究指出，服务的提供依赖以下网络指标：IPTD（携带管理信息的IP分组传送时延）、IPDV（IP分组时延变化）、IPLR（丢失的IP分组百分比）和IPER（IP分组差错百分比）。

根据国际电信联盟电信标准化部门的建议I.380/Y.1540, 2007 [9]，下一代网络运行质量的评估应基于以下指标：

- 分组传送时延；
- 分组时延变化（抖动）；
- 分组丢失率；
- 分组差错率。

根据国际电信联盟电信标准化部门的建议[7–9]，服务质量（QoS）定义为电信业务的一组特性，这些特性关系到该业务满足服务用户既定及预期需求的能力。

此外还存在感知质量（QoSE）这一概念，即用户声称自己感受到的质量水平。

网络性能指标（NP），特别是智能层的运行质量指标，描述了智能层或其部分提供与向用户提供智能业务以及管理该服务相关的函数的能力。

随着服务日益复杂，新的设备应运而生。除标准交换函数外，这些设备还可执行服务管理函数。在这种情况下，会使用所谓的网络智能。

网络智能是一种软件，旨在管理终端设备连接过程，并向用户提供信息通信服务 [19]。网络智能的使用以及业务逻辑与交换逻辑的分离，意味着创建所谓的智能层。

通过智能层提供的附加服务称为智能服务。智能服务也包括个性化业务，这些业务基于持续更新的用户位置、用户在日程管理器中的记录、个人偏好等信息，为用户提示最合适的行动方

向，提醒用户为生日购买礼物，安排旅行、预订票务、获取指定地点的天气信息，提供银行信息、办理金融业务等。

国际电信联盟关于智能业务的建议中规定了四种智能业务集：CS-1、CS-2、CS-3、CS-4 [5–9]。CS-1 业务集（能力集1）包括25项业务和38项属性（基本属性和辅助属性），它们具有国际电信联盟标准化的两项共同特征：

– 业务由单个用户订购（单端）；
– 业务的执行由单个业务监测点控制（单点控制）。

如今，智能业务的种类已大幅增加。最受欢迎的业务包括免费电话（由被叫方付费的呼叫）、付费电话业务（收取额外费用的呼叫，例如参与抽奖、投票等）、增值业务（增值业务）等。

CS-1 服务属于 A 类（单端）服务，采用集中式管理逻辑。CS-1 包含 25 种服务，由公共交换电话网、综合业务数字网支持。

近年来，电信运营商不仅致力于提升通信传统服务的质量并扩大其覆盖范围，还积极推出新服务。在激烈的市场竞争中，这些服务正成为企业营业额增长最重要的推动力。与此同时，实现各种服务需要相应发展通信网络，尤其是其传输基础设施。全球电信界已认识到有必要创建下一代网络，即所谓的下一代网络（Next Generation Networks）。下一代网络的大部分特性与现代互联网相似。然而，下一代网络必须支持更多由不同设备制造商提供的协议，涵盖“旧式”设备和前瞻性设备。

如今，“下一代网络：时尚还是必需？”这一问题显然已不合时宜——现在根本谈不上什么时尚。领先的电信运营商不仅成功部署了下一代网络的部分网络，还完全按照下一代网络的原则构建自己的基础设施。许多公司如今表示，其长途和国际通信网络均基于下一代网络构建。

过去几年，人们最终全面认识了下一代网络这一概念，面向 IP网络的设备研发也取得了显著进展。人们明确了构建下一代网络基础设施的能力与优势，相关项目也开始具备商业属性。行业从热衷于畅想新技术，转向将其商业化部署。与此同时，下一代网络正成为部署三网合一服务的先进基础，即通过一条用户线路提供语音、数据传输和视频服务。

国际电信联盟（ITU）建议书对下一代网络（NGN）的定义如下：NGN 是一种分组交换网络，能够通过支持服务质量（QoS）的宽带传输技术提供电信服务，其业务功能独立于所采用的传输技术 [1；7]。

ITU-T 部门提出的 NGN 模型的显著特点，是将其功能划分为业务层和传输层 [1]。后者负责执行在任意两个地理位置分散的点之间交换任意类型离散信息的功能 [8]。

第一层实现与所需服务相关的应用功能，例如，单独或组合实现语音和视频图像的传输。根据 ITU-T 的建议，NGN 应在个人、群组和广播模式下实现数据、语音、视频、音频及视觉数据传输服务的融合 [1]。

NGN 网络应能够提供种类不受限制的服务，并灵活支持对服务的管理、个性化定制以及通过统一网络决策创建新服务。

NGN 的特性：

1. 多业务性——提供服务的技术独立于传输技术；

2. 宽带性——能够根据用户当前需求，在较宽范围内灵活、动态地改变信息传输速率；

3. 多媒体性——网络传输多组件信息（语言、数据、视频、音频）的能力，可在实时传输中对这些组成部分进行必要的同步，并使用复杂的连接配置；

4. 智能性——用户或服务提供商管理服务、呼叫和连接的能力；

5. 接入无关性（或可能性）——无论所使用的技术如何，都能够组织对业务的访问；

6. 多运营商性——多个运营商参与业务提供过程，并根据其活动领域 [2] 划分各自的责任。

基于对当前现有概念性文件的分析和专家评估，可以得出结论：下一代网络是一种通用的多用途网络，旨在利用分组交换技术传输语音、图像和数据。

其基础是多协议、多业务传输通信网络，可通过不同的数据传输协议承载异构流量。

下一代网络（NGN）的概念旨在支持种类不受限制的服务，并提供灵活的管理方式；实现采用分布式交换的通用传输多协议网络；与传统通信网络集成。NGN 的基本原则是将承载与交换功能、呼叫管理与业务管理分离。

传统网络采用信道范式，在这种范式下，用户之间按照“点对点”的原则建立连接；而 NGN 则转向虚拟专用网络（VPN）的理念，通过 IP 协议向最终用户交付服务。

下一代网络技术为在通用传输环境之上构建叠加服务提供了大量可能性——从分组电话（网络电话）到交互式电视和 Web 服务。其特点是，无论客户所在的位置以及所使用的界面（以太网、xDSL、Wi-Fi 等）如何，服务都始终可用。因此，在下一代网络的任何节点创建的任何服务，都可供每位消费者使用 [3]。

基础设施异构性、竞争加剧以及基础服务销售额下降，西方专家认为，如今可能被视为电信行业面临的主要威胁。网络运营商希望重新思考自己的商业模式，并将其基础设施转变为完全基于 IP 的平台。向下一代网络转型的首要目标和主要动因，是降低成本并创造新的收入来源。

近年来，市场形成了有利于推动下一代网络发展的局面。通信市场出现了以下条件：

– 运营商之间的开放竞争，这是通信企业私有化和国家对市场监管力度减弱的结果；

– 电信网络与信息计算网络的融合，以及信息通信网络的发展；

– 数字流量迅猛增长，主要得益于互联网使用范围的扩大；

– 对移动通信和新型多媒体业务的需求旺盛；

— 运营商、网络、终端及电信业务融合。

上述因素为运营商推出种类丰富的新服务创造了前置条件。据运营商统计，新型电信业务的单用户收入比传统电话业务的用户收入高出数倍。

还应指出，部署下一代网络的固定网络运营商，旨在通过创建统一的多业务传输环境来传送异构流量，从而降低资本支出和运营支出。

下一代网络传输网络的构建方法，对公共通信网络运营商（固定和移动运营商）以及专用通信网络运营商（部门和企业）的运营商而言，同样具有重要意义。尽管专用通信网络通常具有特定的专业取向和专业化特点，但在其发展过程中也会考虑下一代网络理念。

下一代网络（NGN）的发展与企业视频通信相互有利、相互促进。NGN 网络能够高质量地传输视频流量，让消费者自行管理带宽及网络的其他参数，从而最有效地利用可用带宽。

纵观视频通信的发展历程，下一代网络（NGN）的出现恰逢其时。一方面，现代视频设备采用了用于会话管理（SIP）、数据压缩（H.264）、动态带宽管理、穿越防火墙等方面的最新技术。这一切都“提升”了质量，

提高了可管理性，这在逐步过渡到高清电视（HD）的过程中尤为重要。

最近，全球范围内对视频通信的需求迅速增长，尤其是在COVID-19 大流行病期间。随着公司治理的发展和改进，例如减少差旅费用、减轻对周围环境的负担、发展远程医疗，以及更迅速地应对紧急情况，视频会议通信已成为企业用户及其他用户极具吸引力的选择。

运营商提供访问的任何现代服务，都可以表示为数据、语音和视频流量的集合。近年来的研究表明，全球范围内语音流量的发展趋势仍保持稳定。与之相反，数据流量逐年呈指数增长。如今，经由通信网络传输的大多数信息流都属于数据流量。现有电信网络的设计理念形成于十多年前，主要面向语音流量传输；它们很快将无法满足用户不断增长的所有需求。

下一代网络（NGN）概念是数字通信发展阶段出现的技术解决方案，此时数据流量的重要性已超过语音流量。NGN网络是一种多业务通信系统，其核心是IP承载网，支持数据、语音和视频传输业务的集成，并实现技术融合原则。

在NGN网络中，我们可能需要保护以下资源 :
– 通信和计算机操作领域的服务；
– 信息和数据，包括软件，以及与安全保障服务相关的数据；

– 设备和工具。
在NGN网络中，必须确保信息免受以下威胁。

DoS（拒绝服务——拒绝服务）是一种针对计算机系统的攻击，旨在使计算机资源无法供原本应使用该计算机系统的用户访问。

一种常见的攻击方法是向受攻击的计算机或网络设备发送大量外部请求（通常毫无意义或格式错误），使得受攻——

击的设备无法响应用户，或响应速度极慢，以至于实际上无法访问。一般来说，拒绝服务通过以下方式实施：

1) 迫使受攻击的设备停止运行软件或设备，或者耗尽现有资源，导致设备无法继续工作；

2) 占用用户与受攻击设备之间的通信信道，导致连接质量不再符合需求。

窃听——一种保密性威胁，因通过通信信道截获发送方与信息接收方之间的消息而产生。

未授权访问——对网络对象的访问应受到限制，并符合安全策略。如果攻击者获得了访问权限，系统将无法防范其他未授权行为，例如DoS攻击、窃听、伪装等 [3]。

信息篡改——攻击者破坏数据，从而阻止授权用户访问资源。

拒绝服务——攻击者阻止电信连接中的活跃参与者访问资源。可能的攻击方法包括拒绝传输、接收以及在通话过程中修改数据。

由于所有 NGN 网关都将连接到互联网，因此这些网络将面临其他IP网络所遭遇的所有威胁。例如，欺诈者可能发动 IP 地址欺骗攻击。

传统电信网络通常使用专有算法和协议。这使攻击者难以实现其目标，因为这需要掌握某些内部信息。与此情境不同，IP网络的协议广为人知且有完善的文档记录。

公用电话网采用集中式架构，网络的“智能”集中在自动电话交换机中，而电话机的功能并不强大。与之相反，IP网络从本质上说是分布式的，用户终端实际上是计算机，诈骗者可以利用它们制造诸多威胁

用户终端与各元素位于同一 IP 地址空间。攻击者可以同时利用多种不同的访问方式来

发动攻击：铜缆、光纤、无线电信道。为了检测欺诈，需要 NGN 的所有元素之间持续进行信息交换，这相当困难。

下一代网络的计费模型将不同于目前采用的模型，其中考虑的不仅是流量量或连接时间，还包括流量类型、所选服务质量等。因此，可以预见新的欺诈类型将会出现。

人们认为，下一代网络的发展将推动移动商务的普及。因此，欺诈者的注意力主要会转向这一方向：内容的价值将远高于连接本身的价值。攻击者将从利用公用电话交换网 / GSM 非法拨打电话，转向内容欺诈：

1）消费未付费流量；
2) 非法转售服务；
3) 服务费用虚高 [2；3]。

分析现代信息安全标准时可以发现一个主要趋势：放弃僵化、通用的安全等级量表，转而采用灵活的安全性评估方法。

结论。下一代网络（NGN）是一种多业务通信系统，其核心是支持数据、语音和视频传输业务集成的 IP 承载网，并实现技术融合原则。近年来，尤其是在全球 COVID-19 疫情期间，视频通信需求迅速增长。当个人接触不再受欢迎时，视频连接几乎成为开展业务的唯一可行方式。此外，随着公司治理的发展与改进，例如削减差旅开支、减轻环境负担、发展远程医疗以及及时应对紧急情况，视频会议通信对企业及其他用户而言变得极具吸引力。

参考文献

1. 国际电信联盟（ITU）官方网站。— 访问模式：https://www.itu.int/en/ITU-T/publications/ Pages/default.aspx（访问日期：2021年10月15日）。2. Бакланов И. Г. NGN. 构建原理与组织。— 莫斯科：Эко-Трендо，2008年。— 40页。

3. https://www.itweek.ru ’ infrastructure ’ article ’ detai（访问日期：2021年10月15日）。4. https://ru.wikipedia.org/wiki/Centrex（访问日期：2021年12月13日）。5. ITU-R 建议书 E.800——电信服务质量：概念、模型、目标与可信性规划——与服务质量及网络性能（包括可信性）相关的术语和定义。— 2008年批准。— 30页。6. ITU-T 建议书 Q.1215。— 智能网 CS-1 的物理平面。— 赫尔辛基，1993 年。7. ITU-T 建议书 Q.1220。— 智能网能力集 -2 系列。— 赫尔辛基，1993年。8. ITU-T 建议书 Q.1230。— 智能网能力集-3 系列。— 赫尔辛基，1993年。9. ITU-T 建议书 Y.1540——互联网协议数据通信业务——IP分组传送与可用性性能参数。— 2007年批准。— 46页。10. http://www.rusnauka.com/36_PWMN_2010/Informatica/75853.doc.htm。11. 全球信息基础设施、互联网协议与后续世代网络的相关方面。— ITU-T建议书 Y.3001（05/2011），ITU-T研究组。Y系列，2011年批准。— 26页。12. Гольдштейн А. Б.、Гольдштейн Б. С. 软交换。— 圣彼得堡：БХВ，2006年。— 368 页。13. Гольдштейн Б. С. 、 Кучерявый А. Е. 后 NGN 通信网络。— 圣彼得堡：БХВ：圣彼得堡，2014年。— 160页。14. Гольдштейн Б. С. 等. 智能网。— 莫斯科：Радио и связь，2000年。— 504页。
15 [2] .
16

Гольдштейн А. Б. 名为NGN的冰山水下部分。第 . Гольдштейн А. Б.、Соколов Н. А. // 通信技术与设备。— 2006年。— 第3期。— 第22–29页。17. Гольдштейн А. Б.、Атцик А. NGN构建：IPCC 与 TISPAN // 通信世界。— 2006年。— 第4期。— 第90–95页。18. Додонов А. Г.、Ландэ Д. В. 信息系统生存能力。— 基辅：Наук. думка，2011年。— 256页。19. Князева Н. А.、Кальченко А. С. 从消费者满意度角度评估通信业务质量 // Science and Education a New Dimension: Natural and Technical Science。— 布达佩斯，2013年。— 第8卷。— 第156–161页。20. Стеклов В. К.、Беркман Л. Н. 智能网管理系统设计的特点 //《利沃夫理工大学学报》。— 2000年。— 第387期。— 第 19–22 页。21. 电信网络设计：高等院校 “ 电信 ” 专业学生教材 / Стеклов В. К.、Беркман Л. Н.；В. К. Стеклов 编。— 基辅：Техніка，2002年。— 792页。

22. Стекольников Ю. И. 系统生存能力。— 圣彼得堡：理工出版社，2002年。— 155 页。23. 下一代网络 —— 架构结构与功能模型：国际电信联盟电信标准化部门。— Y. 2001。— [生效日期为2004–17–12]。— 日内瓦，2005。— 12页。— [国际电信标准]。24. http//kunegin.com 2021 年 12 月 8 日（可访问）。25. http://pro-gprs.info/tag/camel 2021年12月13日（可访问）。

维塔利·韦利奇科，物理与数学博士、副教授、高级研究员，B. M. Глушков控制论研究所，乌克兰国家科学院（基辅）**斯维特拉娜·沃伊诺娃**（**Svitlana Voinova**），技术科学副博士、副教授，敖德萨国立技术大学（敖德萨）**瓦列里·格良亚克**，技术科学副博士、副教授，文尼察国立农业大学（文尼察）**亚历山大·古尔斯基**，技术科学副博士、副教授，敖德萨国立技术大学（敖德萨）**科斯佳·扎韦尔泰洛**（**Kostiantyn Zavertailo**），研究生，数学机器与系统问题研究所（基辅）**莉莉娅·伊万诺娃**（**Liliia Ivanova**），技术科学副博士、主任，敖德萨国立技术大学分校“敖德萨技术专业学院”（敖德萨）**迪安娜·科特利克**，教师，敖德萨国立技术大学分校“敖德萨技术专业学院”（敖德萨）**谢尔希·科特利克**（**Sergii Kotlyk**），技术科学副博士、副教授，敖德萨国立技术大学（敖德萨）**阿廖娜·库德里亚绍娃**（**Alona Kudriashova**），技术科学副博士、高级教师，乌克兰印刷科学院（利沃夫）**特季娅娜·库努普**，技术科学副博士、教师，敖德萨国立技术大学分校“敖德萨技术专业学院”（敖德萨）**基里洛·马拉霍夫**，硕士（信息技术）、研究员，B. M. Глушков控制论研究所，乌克兰国家科学院（基辅）**伊琳娜·皮赫**（**Iryna Pikh**），技术科学博士、教授，乌克兰印刷科学院（利沃夫）**娜塔莉娅·普恩琴科**（**Nataliia Punchenko**），技术科学副博士、副教授，敖德萨国立生态大学（敖德萨）**弗谢沃洛德·先基夫斯基**（**Vsevolod Senkivskyy**），技术科学博士、教授，乌克兰印刷科学院（利沃夫）**奥列克桑德拉·谢尔盖耶娃**（**Olexandra Sergeeva**），物理与数学博士、教授，敖德萨国立技术大学（敖德萨）

索科洛娃·奥克萨娜·彼得里芙娜（Oksana Sokolova），高级讲师，敖德萨国立技术大学（敖德萨）**费多索夫·谢尔希·尼基福罗维奇（Sergiy Fedosov）**，物理与数学博士、教授，敖德萨国立技术大学（敖德萨）**霍沙巴·奥列克桑德尔·米罗斯拉沃维奇（Oleksandr Khoshaba）**，技术科学副博士、副教授，文尼察国立技术大学（文尼察）**奥列克桑德拉·齐拉**，哲学博士、副教授，国立智能技术与通信大学（敖德萨）**恰普林斯基·尤里·彼得罗维奇（Yuri Chaplinskyy）**，技术科学副博士、高级研究员，以В. М. Глушков命名的乌克兰国家科学院控制论研究所（基辅）

科学出版物

Величко Віталій Юрійович Воїнова Світлана Олександрівна Граняк Валерій Федорович等

新信息技术、建模与自动化

专著

按作者原稿印制

编辑部主任 *Т. М. Забанова* 技术编辑 *М. М. Бушин* 封面设计师 *В. І. Костецький* 校对*І. В. Шепельська*

科学出版物（期）由作者自行出版

主编 Sergii Kotlyk

Vitalii Velychko	https://orcid.org/0000-0002-7155-9202
Svitlana Voinova	https://orcid.org/0000-0003-0203-0599
Valery Granyak	https://orcid.org/0000-0001-6604-6157
Liliia Ivanova	https://orcid.org/0000-0003-1738-7697
Sergii Kotlyk	https://orcid.org/0000-0001-5365-1200
Alona Kudriashova	https://orcid.org/0000-0002-0496-1381
Tetiana Kunup	https://orcid.org/0000-0003-0246-0951
Kyrylo Malakhov	https://orcid.org/0000-0003-3223-9844
Iryna Pikh	https://orcid.org/0000-0002-9909-8444
Nataliia Punchenko	https://orcid.org/0000-0003-1382-4490
Vsevolod Senkivskyy	https://orcid.org/0000-0002-4510-540X
Olexandra Sergeeva	https://orcid.org/0000-0002-5534-9563
Oksana Sokolova	https://orcid.org/0000-0001-9224-6734
Sergiy Fedosov	https://orcid.org/0000-0002-5775-1468
Oleksandr Khoshaba	https://orcid.org/0000-0001-5375-6280
Olexandra Tsyra	https://orcid.org/0000-0003-3552-2039
Yuri Chaplinskyy	https://orcid.org/0000-0001-7697-3958
Olexander Gurskiy	
Kostiantyn Zavertailo	
Diana Kotlyk	

新信息技术、仿真与自动化

专著

爱荷华州立大学数字出版社
2022