arXiv:2304.05147v1 [cs.AI] 11 Apr 2023

人工集体智能工程：概念与视角综述

ROBERTO CASADEI,博洛尼亚大学

集体性是许多系统的一项重要属性，无论是自然系统还是人工系统。通过利用大量个体，往往能够产生远超最聪明个体能力的效果，甚至能让并不那么聪明的个体展现出智能的集体行为。事实上，集体智能——即一个群体以看似智能的方式进行集体行动的能力——正日益成为工程化计算系统的设计目标，这一趋势受到物联网、群体机器人学和群智计算等近期科技发展动向的推动，仅举数例。多年来，在自然系统和人工系统中观察到的集体智能一直是工程理念、模型和机制的灵感来源。如今，人工集体智能和计算集体智能已成为公认的研究主题，涵盖多种技术、不同类型的目标系统以及各类应用领域。然而，计算机科学领域对这一主题的研究仍然相当分散；大多数研究群体和成果都具有很强的垂直性，因此难以提炼其核心思想和参照框架。挑战在于识别并以共同结构组织探讨智能集体的不同领域和方法，最终将它们联系起来。为弥补这一空缺，本文提出一系列广泛的范围问题，以绘制集体智能研究的全景图，主要立足于计算机科学家和工程师的视角。因此，本文涵盖初步概念、基本理念和主要研究视角，并指出人工与计算集体智能工程领域研究人员面临的机遇和挑战。

1 引言

如今，技术系统正变得越来越复杂：它们的规模日益庞大、异构且动态，给工程师和操作人员带来了诸多挑战。例如，信息与通信技术（信息与通信技术）的发展正在推动这样一个未来：计算将深度融入各种环境之中，包括我们的身体、家庭、建筑、城市、地球和宇宙。换言之，普适与泛在计算的愿景比以往任何时候都更加清晰，越来越多的异构设备几乎无处不在地大规模部署，以改进现有应用并创造新的应用。然而，在充分挖掘我们可支配的设备互联网络的全部潜力方面，我们似乎仍然相距甚远。

尽管如此，仍取得了一些进展。人们提出了新的范式和解决方案，往往借鉴自然这一强大的机制与解决方案宝库。事实上，我们正在见证一项长期研究努力，旨在将生命系统的强大特性和能力引入技术系统 [Stein 等人 2021]。智能、进化、新能力的涌现、韧性和社会整合 [Bellman 等人 2021年；Stein 等人 2021] 常见于自然的生命系统中，也被视为人工工程系统的重要特征。事实上，计算机科学家和工程师越来越关注的不只是让单个设备变得更智能，还包括让整个设备（及人员）生态系统具备更强的集体智能。然而，在人工系统中创造集体智能（CI）颇具挑战。事实上，计算机科学与工程中的多个领域，例如多智能体系统 [Wooldridge 2009] 和群体机器人学 [Brambilla 等人 2013],经常遇到与这一“集体智能挑战”相关的问题。此外，问题的普遍性以及跨领域迁移思想和技术的可能性，也推动了一个通用研究领域的兴起

作者地址：RobertoCasadei，roby.casadei@unibo.it，博洛尼亚大学，Via dell’Università 50，Cesena，意大利。

该研究领域专门致力于探讨如何在人工系统中构建集体智能，也常以诸如 人工集体智能（*ACI*） [Tumer 和 Wolpert（2004）；Zheng 等人2018] 以及计算集体智能（*CCI*） [Badica 等人 2014]。

已有一些关于集体智能/人工集体智能的综述，但它们往往采用特定视角，限制了研究的整体范围，例如社会计算系统的模型 [Suran 等人 2020], 交互模态 [He 等人 2019],或大规模协作多智能体系统 [Tumer 和 Wolpert2004]。本文的主要目标是综述人工集体智能工程所需的概念、模型和视角。可以说，本文主要将信息物理集体 视为目标系统，即由相互连接的计算设备组成的群体，它们可能处于物理环境中，也可能涉及“人在回路中” [Schirner 等人 2013], ；这些系统应被视为服务和应用的“可编程平台”，使其能够受益于活动中涌现的集体智能。本文旨在为计算机科学家和工程师提供一幅关于集体智能的研究地图，供广泛的科技学术界参考。

总而言之，我们作出以下贡献：

- 我们进行了一项 范围综述 [Petticrew 和 Roberts 2008], 在范围和重点上不同于现有综述，涵盖与集体智能、人工集体智能及其（软件）工程相关的概念、模型和观点，也可作为开展更多系统综述的基础；
- 我们通过将人工集体智能领域与相关领域联系起来，并提供用于构建人工集体智能研究框架的类别，为该领域绘制地图并建立分类体系；
- 我们概述了进一步研究的机遇与挑战，涉及目标领域以及现有方法的有趣发展。

换句话说，相对于 [He 等人（2019）；Malone 和 Bernstein（2015）；Suran等人（2020）；Tumer 和 Wolpert 2004]。

本文的组织结构如下。首先，提出一系列宽泛的范围问题，为论文及其讨论提供框架。随后，综述与集体智能（CI）相关的现有评述，并借此阐明本文的视角。然后，简要回顾“集体”和“（个体）智能”的初步概念。在此基础上，为了理解什么是集体智能，本文从文献中回顾一些参考定义、示例、模型和分类。接着，为讨论如何对集体智能进行工程化，本文考察若干视角，并在此基础上指出集体智能工程的主要方法。基于对这些方法的介绍，本文进一步探讨集体智能工程相关的机遇与挑战，为后续研究提供方向。最后，本文总结全文并提出一些结论性思考。

2 方法

我们的目标是对（人工）集体智能这一庞大且碎片化的领域进行范围界定，以识别其核心概念、相关视角、研究问题和空白——重点关注其工程和计算智能／人工智能（AI）方面。因此，我们开展了一项范围综述 [Petticrew 和Roberts 2008]。当具体研究问题难以确定或并不适用，或者目标是识别可用证据的类型、阐明与某一概念相关的概念和关键特征／因素时，这一工具可以优先于系统综述使用 [Munn等人 2018]。事实上，我们旨在绘制该领域的图谱，为未来更加聚焦且系统的综述提供支持。

我们采用基于问题的方法来指导本手稿参考文献的调查与筛选。具体而言，我们考虑以下范围问题（*SQs*）。

范围问题0) 什么是集体?

SQ1)什么是（个体）智能？ SQ2) 什么是集体智能？ SQ3) 哪些行为可以被称为“集体智能”？是否存在范式性示例？ SQ4) 集体智能的要求是什么？ SQ5) 个体智能与集体智能之间存在什么关系？SQ6)集体智能如何展开/涌现？SQ7)如何测量集体智能？SQ8)如何以人工/计算方式构建集体智能？ SQ9)（计算）集体智能的研究现状如何？ SQ10) 集体智能研究群体是如何构成的?

范围问题0–范围问题1 涵盖构成集体智能这一概念所依据的初步概念，为回答范围问题2–范围问题3 （即关于集体智能是什么的问题）以及范围问题4–范围问题7（即关于集体智能的因素、特征和机制的问题）。然后，范围问题8 涉及工程化集体智能的问题，而范围问题9–范围问题10 则是关于该领域研究的元问题。请注意，这些是宽泛的范围问题，主要旨在为搜索和识别纳入综述的研究工作提供方向。

3 三级研究

为了说明开展集体智能综述的必要性，我们进行了一项三级研究，对二级研究（例如调查、系统综述）和文集进行了综述。我们根据这些研究是否从一般层面考察集体智能（即抽象出其应用和领域）、聚焦其人工／计算形式（人工集体智能／计算集体智能）、类群体形式，或特定类型的集体或目标，对其进行分类。因此，本节也部分回答了SQ10。

总的来说，我们可以观察到，集体智能领域缺乏全面的综述和图谱。基于这一现状，我们为本文提出了一个动机：提供一份关于该主题的图谱，尤其面向计算机科学家和工程师，展示不同的视角，并介绍人工集体智能领域最新技术状态的一些亮点。

3.0.1 关于集体智能这一一般主题的综述。 迄今为止，有两项主要调查旨在将集体智能作为一个一般主题进行研究。 He 等人 (2019年) 基于一种区分隔离型、协作型和基于反馈的集体智能范式的分类体系，对不同领域中的集体智能进行了分析。 Suran 等人 (2020) 进行了一项系统性文献综述，以提炼集体智能及其属性的一般模型，重点关注社会计算。这两项研究考虑、整合并在一定程度上涵盖了此前较为有限或不够一般化的集体智能模型和综述 [Krause等人 2010年； Lykourentzou 等人 2009； Salminen 2012； Yu 等人 2018], 因此，后文将对它们进行更为详尽的讨论。然而，据我们所知，尚无全面的映射研究能够为计算机科学家提供该领域的广泛概览。

3.0.2 多学科文集。在 [Malone 和 Bernstein 2015],关于集体智能的论文汇集了来自不同领域的研究成果，包括经济学、生物学、人机交互（HCI）、人工智能、组织行为学和社会学。在 [Millhouse 等人 2021], 其中收录了来自一场汇聚不同领域科学家的研讨会的论文，旨在分享“关于智能如何从多个智能体之间的交互中涌现的见解——这些智能体可以是机器、动物或人类。”

3.0.3 关于人工集体智能/计算集体智能的综述。Tumer 和 Wolpert （2004）于 1999 年发表的论文，综述了以下类别中的计算集体智能系统：(i) 人工智能和机器学习（ML），包括多智能体系统（MASs）；(ii) 受社会科学启发的系统，例如经济学和博弈论中的系统；(iii) 进化博弈论方法；(iv) 受生物学启发的系统，例如

群体智能、人工生命和种群方法；(v) 基于物理学的系统；以及 (vi) 其他研究领域，包括网络理论和自组织。这是一篇内容十分丰富的综述，但涵盖的是 2000 年以前发表的研究，而且略微侧重于自动化和基于效用的方法。

Jung 的社论Jung(2017年) 回顾了关于计算集体智能与大数据融合的特刊论文，探讨了数据驱动的集体智能如何帮助：(i) 收集数据，(ii) 分析数据，以及 (iii) 利用数据，例如支持决策。

Rossi 等人的综述Rossi 等人 (2018年) 对集体行为多智能体算法进行了调查并提出分类体系，将其分为：共识、人工势函数、分布式反馈控制、几何算法、状态机与行为组合、生物启发算法、基于密度的控制以及优化算法。研究显示，低层级（例如生物启发的自组织）与高层级协调之间存在相当明显的区别。

3.0.4 群体智能综述。已有多篇关于群体智能的综述发表 [Brambilla 等人 2013年；Chakraborty 和 Kar 2017年；Dorigo 和 Stützle 2019年；Figueiredo 等人 2019年；Fister 等人 2013年；Kolling 等人 2016年；Mavrovouniotis 等人 2017年；Navarro 和 Matía 2013年；Nguyen 等人 2020；Rajasekhar 等人 2017；Schranz 等人 2021；Yang 和 He 2013；Zedadra 等人 2018年；Zhang 等人 2015]。群体智能领域的大部分研究致力于设计用于解决复杂优化问题的（元）启发式方法和算法。Mavrovouniotis 等人 (2017年) 关注用于动态优化的群体算法，即环境随时间变化的情形。

此外，在这一领域的综述往往会从自然系统的角度切入，探讨哪些自然系统启发了群体智能机制。例如，Rajasekhar 等人 (2017年对受蜜蜂启发的算法进行了综述，例如基于蜜蜂交配、觅食和群集行为的算法；类似的综述也涉及蝙蝠算法 [Yang 和 He 2013],萤火虫算法 [Fister 等人 2013],蚁群优化 [Dorigo 和 Stützle 2019]。

有些综述探讨了群体智能在特定问题中的应用，例如自组织模式形成 [Oh 等人 2017], 特征选择 [Nguyen 等人 2020],聚类 [Figueiredo 等人 2019], 绿色物流 [Zhang 等人 2015], 集体运动 [Navarro 和 Matía 2013]。其他综述则关注群体智能在特定情境中的应用，或关注特定类型系统所表现出的群体智能，例如物联网系统 [Zedadra 等人 2018],信息物理系统（CPS） [Schranz 等人 2021], 以及机器人群体 [Brambilla 等人 2013年；Kolling 等人 2016]。

3.0.5 针对特定系统和设置的集体智能综述。来自特定视角的综述包括关于人类集体智能的文集和调查 [Salminen 2012],深度学习 [Ha 和 Tang 2021], 企业信息系统 [Nguyen 等人 2019], 以及由 5G 通信支持的社会技术系统 [Narayanan 等人 2022]。

Salminen (2012年) 对人类情境中的集体智能进行了文献综述，将相关研究分为：（i）微观层面，强调促成因素；（ii）涌现（或中观）层面，强调全局模式如何由局部活动产生；以及（iii）宏观层面，强调系统输出的类型。 Yu 等人 (2018年) 从群体科学视角对人类集体智能进行了综述。 Krause 等人 (2010年) 对动物和人类的群体智能进行了综述和比较。

Ha 和 Tang (2021年)对将集体智能原则嵌入深度学习方法的最新发展进行了综述。他们讨论了例如集体智能如何帮助设计新颖的架构和训练算法，以及多智能体（强化）学习方面的最新研究。此类研究十分重要，因为它们促成并强化了跨学科关系，而对于集体智能这样复杂的跨学科领域而言，这些关系至关重要。

Narayanan 等人（2022年）综述了 5G 通信支持的人机社会技术系统中涌现的集体智能。文中讨论的应用包括道路交通控制、

无人机、智能电网管理和增强型民主。关键在于，要充分发挥这些去中心化社会技术系统的潜力，通常需要具备适当的连通性属性和能力，以支持并促进集体智能的涌现。例如，根据分析，作者预测，5G通信技术可通过提升与邻居节点的连通性、交互协议、知识交换，以及通过提高速度、降低延迟和提升可靠性来改善探索—利用权衡，从而促进集体智能。另一方面，在安全、隐私和无线电资源管理方面仍存在重大挑战，当前研究正在应对这些挑战，未来研究也有望继续推进。

4 初步概念

本节将介绍集体与个体智能的概念，从而探讨 范围问题0 和 范围问题1，并为下一节介绍和讨论集体智能提供初步概念。

4.1 集体

非正式地说，集体 是由大体上同质 的个体组成的（可能是动态的）群体，这些个体也称为集体的成员 。不同研究可能采用不同或更具体的集体定义。不同领域通常关注不同类型的集体，因此往往会带有隐含假设。

制定集体的通用且全面的特征描述仍是一个开放的研究问题，相关研究涉及 部分学，即对部分关系 的研究，以及 本体论，即对“存在何物”的研究。在文献中，一些形式理论试图深入刻画集体及集体现象 [Bottazzi等，2006； Brodaric和Neuhaus，2020； Galton和Wood，2016； Wood和Galton 2009]。

例如，在 [Wood 和 Galton 2009],中，作者依据以下分类标准提出了集体现象分类：成员关系（涉及集体成员的身份和基数）、位置（集体及其成员的位置）、连贯性（“集体性”的来源）、角色（成员是否按角色区分）、层级深度（涉及集体的层级）。尤其是，集体性可以有两个主要来源：内部或外部原因，以及共同目的或目标。关于层级深度，值得注意的是，与复合体中的组成部分关系不同，集体中的成员关系通常不具有传递性 [Brodaric 和 Neuhaus2020]。复合体可以定义为结构化复数整体，或由部分构成的群组，这些部分称为组成部分，并发挥特定功能 [Brodaric 和 Neuhaus 2020]。文献通常认为，复合体具有异质性，而集体具有同质性 [Brodaric 和 Neuhaus2020]。

此外，集体通常被认为是“具体个体”（即并非像数学集合那样的抽象体）和“延续体”（即在一段时间内存在且可能发生变化的个体） [Wood and Galton 2009]。定义集体的一般性、全面且精确的表征或分类体系并非易事 [Wood and Galton 2009]。例如，某些集体可能需要一定数量的成员，或需要填充某些角色，才能存在 [Wood 2016], ，或者其组成发生某些变化后，身份可能随之改变。有时，可以通过特定的集体属性或集体知识对集体进行抽象 [Nguyen 2008]。集体性也可以被视为一种程度，因而是现象和个体群体的一种可量化属性 [Daniels et al. 2016] 。

存在若干相关的类群概念，它们在视角、项目之间的关键关系或群体的基本属性等方面有所不同。表 1 汇总了其中一些类群概念，并提出了一种分类方式——参照 Brodaric 和 Neuhaus (2020)，不过也可能存在不同的部分学分类。集体是多元体或群体的一种特殊形式。

表 1. 计算机科学与工程中涉及的常见类群概念。

概念	**（典型）父类 cept**	**（典型）定义属性**
复数性；　　集合；群体；集合		集合包含关系
复合	多元性	组件性、异质性
集体	多数性	成员关系，同质性
群体	集体	自然（人类）
群体	集体	自然界（类似昆虫）
机器人群体	群体	自然界（简单机器人），结构（高数量)
兽群; 鸟群; 鱼群	集体	自然（动物）
组织	复合 / 集体	结构、角色
系统	复合体 / 集体	交互元素；边界
多智能体系统	系统	自然（能动性）

群体、蜂群、畜群、鸟群、鱼群通常都可以被视为特定类型的集体。组织和系统可能被建模为基于复合体的结构安排和异质性的构造，但也可以被描述为集体。

与意向性立场这一概念类似，[丹尼特 1989], 认为，采取一种集体立场或许是有道理的，例如在这种立场下，“人类物种 *[一个群体]* 被视为一个单一的有机体” [盖恩斯 1994],；不过，集体意向性这一观点存在问题，且是激烈哲学辩论的主题 [施韦卡德和施密德 2013]。事实上，我们认为，集体性的视角能够为理解和设计涉及个体群体的各种系统提供一种补充性的观点，与个体视角相辅相成。然而，在探讨涉及集体的主题（如集体智能 CI）时，明确所讨论的是何种集体十分重要，因为这有助于阐明特定研究贡献所依据的假设及其普适性。

4.2 智能

智能是一个颇具争议且难以捉摸的概念，长期以来一直是哲学争论的主题 [Legg 等人2007],认为，最好将其理解为一组构念构成的法则网络 [Reeve 等人 2011]。从词源上看，智能一词源自拉丁语“intelligere”，意为“理解”。它可以定义为“个体有目的地行动、理性思考并有效应对环境的整体能力” [Wechsler 1946], ，也可以定义为这样一种特性：“衡量智能体在各种环境中实现目标的能力” [Legg 等人 2007]。总的来说，对智能有两种不同的解释：将其视为一系列特定任务技能，或视为一种通用学习能力 [Chollet 2019],这分别反映了晶体与流体能力之间的区别。

关于智能的问题包括：智能的定义与建模，例如设计智能的结构 [Reeve 等人 2011]；智能与行动的关系；智能的测量与评估；智能的分析；以及智能的构建与发展。

关于智能理论，主要有两种传统 [Reeve 等人 2011]：心理测量学传统，以基本认知能力的数量和性质或因素为基础；另一种是发展论或整体论视角，以后天获得的智力为基础。

智能的衡量智能 [Chollet 2019年；Hernández-Orallo 2017]当然与所考虑的智能表征或模型有关，并且由于需要区分因果关系与相关性、选择具有代表性的环境集合而变得复杂

用于评估等。卡罗尔将能力（即一个智能因素）定义为某一类任务的表现差异来源 [卡罗尔 1993]。智能的测量基于因素分析，即通过运行特定测试（可观测变量）并使用因素（不可观测变量）作为对可观测变量之间相关性及其变异性的可能解释。人们预期，所考虑的实体的性质将推动并要求定义适当的因素模型。

随着时间的推移，人们提出了各种智能分类法。常见的一种区分是自然 [vanGerven 2017] 和人工智能 [Russell and Norvig 2020]。两者都可以归入抽象智能 [Wang 2009]。

5 理解集体智能

基于上一节介绍的初步概念，本节聚焦于 什么是 文献中的集体智能，讨论集体智能的定义、示例、模型以及我们所关注的集体智能主要分类（即人工集体智能和计算集体智能），从而回应 SQ2 至 SQ7。在转向下一节的计算集体智能工程问题之前，了解集体智能的目标、特征和主要参考框架非常重要。

5.1 集体智能的定义与特征描述

集体智能是可以归属于一个集体的智能——其中，集体是多个实体的集合（通常具有上一节所述的特征）。事实上，通过将集体抽象为一个整体，也就是将其视为一个高阶个体 （由其他个体组成，而这些个体是其成员），应该可以将个体智能的特征描述迁移到集体上。

表格 2 汇总了文献中关于集体智能的一些定义。从中可以看出，集体智能的特征描述既有反复出现的方面，也有独特的方面。

5.1.1 重用（个体）智能定义。一些定义并未尝试重新定义“智能”，而只是将对智能的既有描述、常识性理解，或其作为概念法则网络的一般含义 [Reeve 等人 2011] 拓展到集体领域。这种做法具有简单、普遍和开放等优点，或可促进多学科、跨学科和超学科研究。

5.1.2 通用型与任务特定型。如果我们沿用现有的智能概念，就意味着可以考察不同定义如何分别适用于集体实体。例如，与个体智能类似，集体智能（CI）可以被视为一种通用的问题解决能力，也可以被视为一组特定技能。关于人类群体中存在通用集体智能统计因子的证据 *c* 由 Woolley 等人(2010年提供；研究表明，该因子与平均社会敏感性和多样性的相关性，高于与成员平均或最高个体智能的相关性。

5.1.3 不同性质的集体。 有些定义基本不考虑集体的性质（参见“集合”或“个体群体”、“人工和/或自然”）；有些则假定个体具备一组最低限度的特征（参见能动性、交互能力等）；还有一些要求个体以某种方式相互联结（参见交互或社会结构的存在）。

5.1.4 集体性的不同来源与集体智能的机制。交互、协作、竞争和社会结构等术语，可用于进一步将集体智能的范围限定在特定类型的集体，或限定在可能用于支持集体智能的不同机制。

5.1.5 与涌现的联系。各种定义都建立在涌现这一概念之上，它指的是系统中由微观层面的活动产生全新且连贯的宏观层面模式 [Wolf 和 Holvoet 2004]。

5.1.6 现象学方法。与涌现类似，涌现通常以现象学方式进行研究 [Minati 2018年；Rainey and Jamshidi 2018], 一些集体智能定义采用现象学立场，其关注点并不在于集体智能实际上是什么，而在于可能与之相关的现象。

5.1.7 正面集体智能与负面集体智能。 将集体智能视为一种 可量化的 属性，尤其是视为一种 带符号的 量，即正值或负值，是很常见的。事实上，许多作者都谈到了负面的 集体智能 [Laan 等人 2017年； Szuba 2001] ，以描述集体表现得比其中某个个体成员更差的情况。在此类情况下，社会约束实际上阻碍了个体能力，却没有带来任何益处。

5.2 示例

下面简要介绍集体智能的典型示例。

示例 1 （市场）。市场是由大量理性且利己的智能体、买方和卖方组成的经济系统，这些智能体会就资产进行交易。资产价格会发生变化，以反映供求关系以及更广泛的背景，并且可以被视为整个市场集体智能的具体体现 [Lo 2015]。因此，市场可以被视为一种分享信息并以集体智能的方式决定如何分配资源的机制 [Malone 和 Bernstein 2015]。相应地，计算机科学中一直在研究基于市场的抽象，以促进全球高效的系统 [Mainland 等2004]。

示例 2 （群体智慧）。 群体——由人组成的群体——可以有不同类型（参见身体群体与心理群体），也可以表现出不同程度的集体智能。群体可能表现出智能行为 [Surowiecki 2005] ，也可能表现出不智能的行为 [Laan 等人 2017]。 Surowiecki （2005年）推广了“群体智慧”这一术语，指出在某些条件下，群体能够取得良好表现，给出汇总结果，将参与者的集体知识纳入其中并加以利用。关于群体智慧形成所需的条件，Surowiecki（2005年）指出了多样性（个体之间的多样性）、独立性（个体意见的独立性）以及去中心化（个体获取知识的去中心化）；后续研究，例如Woolley 等人 （2010年），也证实了这些条件的重要性。

示例 3 （群体智能）。 群体智能是由简单智能体组成的群体中涌现出的集体智能 [Bonabeau 等人 1999]。群体智能最初是在自然系统中观察到的，例如昆虫社会（如蚁群、蜂巢）；这些现象启发了用于提升人工系统灵活性、鲁棒性和效率的机制与策略。在集体智能这一广泛领域中，群体智能可视为一个子领域，研究由大量个体组成、且个体依照简单规则行动的群体。由于规模和简单性这两项标准都是程度性的，该领域的边界也较为模糊。

示例 4 （学习型多智能体系统）。 集体智能的另一个著名示例是多智能体系统 [Wooldridge 2009]。与群体不同，多智能体系统通常由理性智能体组成，这些智能体可能被组织成各种组织形式，并可能表现出强智能体的属性 [Wooldridge 2009],，即智能体自身可能具备个体智能。智能体以及多智能体系统可能能够学习 环境、它们自身或应遵循的行为，以最大化某种局部或全局效用函数 [TumerandWolpert 2004]。

表2。文献中的一些集体智能定义。

Ref.	定义	备注
Malone and Bernstein (2015)	个体群体以 看似智能的方式集体行动	• ""重新运用"智- 能这一概念 • 集体行动
Nguyen 等人 (2009)	由众多个体的协作与竞争所涌现的智能形式 由众多个体的协作与竞争 （人工和/或自然）	• 涌现 • 机制（协作， 竞争) •不同国籍的成员- ture
He et al. (2019年)	集体智能（*CI*）指的是智- 在集体宏观层面涌现的智能- 性，并超越了个体的水平。	• 涌现（超越） • 层级（宏观、微观）
图默尔 and Wolpert （2004）	*[*集体智能（*COIN*）*]* 任意一对 大型、分布式的交互计算过程集合中的 各个过程之间几乎没有 或完全没有集中式通信或控制 ，*to-* 再加上一个"全局效用"函数，用于评估 该集合可能出现的动态历史。	• 要求（交互， 去中心化) • 嵌入度量
舒巴 (2001)	我们可以说，*CI* 这一现象已经 在相互作用的智能体构成的社会结构中涌现 或个体，在某一特定时期内，当且仅当加权后的 他们作为某种社会结构共同解决的问题总和 在整个时期内都更高 而非以相同方式加权的、 智能体或个体在彼此不互动时能够解决的问题 总和。	• 要求（社会结构， 交互） • 嵌入度量 • 动态性质 • 负向和正向集体智能
Lykourentzou 等人（2009）	集体智能（*CI*）是一个新兴的研 究领域，旨在结合人类与 机器智能，以改进通常由大型群体执行的社 区流程。	• 混合式或人机 CI

示例 5 （人机集体智能）。 集体智能的一个强大示例是所谓的人机集体智能（*HMCI*） [Smirnovand Ponomarev 2019] 或 混合集体智能 [Moradi 等人 2019年； Peeters 等人 2021], , 它适用于同时涉及机器和人类的异构系统。其理念是促进人工智能／机器智能与人类智能之间的协同，这两者通常被视为互补的智能形式。HMCI 的一个典型示例是维基百科，这是一个相互连接的集体知识超媒体系统，由人类通过网络技术的中介创建和修订。维基百科数据还可以由智能体自主处理，以构建其他利用其集体知识的应用。

5.3 模型

这里，我们简要回顾文献中的两种主要通用集体智能模型，它们全面总结并整合了以往的模型。

5.3.1 隔离、协作与反馈式集体智能范式 *[He 等人 2019]*。He 等人（2019年）根据交互和反馈机制的缺失或存在，将集体智能划分为三个能力逐渐增强的范式，并提出了相应的分类体系。在他们看来，集体智能通常可视为个体行为结果的聚合。具体而言：

(1) 隔离范式。个体彼此隔离并独立行动，以某种方式聚合所产生的结果。聚合结果不会影响个体行为。隔离研究会使用统计和挖掘工具。(2) 协作范式。个体之间存在直接或间接的交互。间接交互可以通过环境这一概念来建模。聚合基于个体行为结果和环境状态进行。聚合结果既不会影响个体行为，也不会影响环境。(3) 反馈范式。这一范式在交互范式的基础上，增加了聚合结果对个体行为和／或环境的“向下因果作用”。

5.3.2 Suran 等人的集体智能框架*Suran 等人（2020）*。Suran 等人（2020）分析了 12 项关于集体智能的研究，并设计出一个通用模型，该模型基于 24 项集体智能属性，并将其分为 3 个集体智能组成部分：个体、协调／协作活动以及沟通方式。该通用模型基于：

- 描述集体智能系统中参与者的身份，包括：被动参与者（用户）；主动参与者（集体智能贡献者），他们可能构成群体或层级组织；参与者在多样性、独立性和临界规模方面的属性；以及交互。
- 描述集体智能参与者的动机：内在或外在动机。
- 描述集体智能目标：个体目标和社区目标。
- 描述集体智能过程：从活动类型（决策、竞争和自愿参与）以及交互类型（依赖或独立）方面进行说明。

此外，集体智能系统可视为复杂适应系统，通常需要满足一些要求才能正常运行，例如对状态、数据、聚合、去中心化、任务分配和鲁棒性的要求。

5.4 集体智能因子的量化

理解和构建集体智能都离不开一些关键科学问题，其中包括哪些因素会促进或抑制集体智能，尤其是个体智能与集体智能之间有何关系。我们已经提到Woolley等人(2010年的开创性研究，该研究支持存在一般集体智能因子的观点 *c*，并表明它与社会性水平的相关性高于与个体智能水平的相关性。我们还指出，群体智能是集体智能的一种形式，它涌现于大量个体智能有限的简单智能体。在这个例子中，显然，正是交互——与其他智能体和／或环境的交互——促进了有效行为模式的形成。

人们已经开展了研究来调查这些关系。例如，在一项后续研究中，Woolley 等人(2015) 重点关注：(i) 群体构成，例如群体成员的技能和多样性；以及 (ii) 群体互动，例如约束和规范交互的结构与规范。他们发现，对集体智能贡献最大的个体技能，是能够带来充分多样性并提升协作成效的技能，而满意度和凝聚力等群体层面的心理要素则没有影响。考虑到不同类型的交互式认知系统，Chmait 等人(2016年研究了以下因素的影响

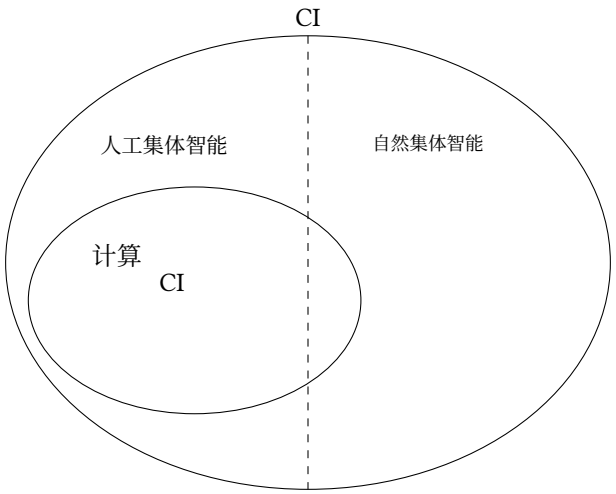


图 1. 集体智能（CI）、人工集体智能（ACI）与计算集体智能（CCI）之间的关系。虚线表示人工集体智能与自然集体智能之间的错误二分法。

因素：(i)关于个体：个体智能、个体推理/学习速度；(ii) 关于合作：集体基数、交互所需时间、通信协议；以及 (iii) 关于智能体—环境交互：搜索空间复杂度（通过不确定性体现），以及环境的算法复杂度。他们将一组智能体的集体智能量化为一组测试环境中的平均累积奖励，从而扩展了 Anytime通用智能测试 [Hernández-Orallo 和Dowe 2010]至集体。观察结果表明，这些因素——无论是独立考察，还是与其他因素以联合配置的方式考察——确实会以非平凡的方式塑造群体的集体智能。这些因素也与集体智能模型的组成部分相关—— [Suran 等人 2020]提供了一个很好的概览。

5.5 集体智能的主要类型

一种典型的集体智能分类方式，是依据所涉及实体的性质进行划分。

5.5.1 自然集体智能。 自然集体智能是指自然界中的集体所表现出的集体智能，例如昆虫群、兽群、畜群或动物群、人群、鸟群、鱼群等。在所有这些系统中，都存在值得深入研究的复杂集体现象和社会层面。昆虫社会的研究，例如见于 [Bonabeau 等人 1999]的开创性著作。关于集体动物行为，主要参考文献之一是 Sumpter（2010年）的著作，该书将集体现象描述为 “许多个体之间反复交互，产生尺度大于个体自身的模式”。关于人类集体智能，一些历史文献包括 [Le Bon 2002； Surowiecki 2005]；此外，还有针对特定人类情境的研究，例如行人群体 [Sieben 等人 2017]，以及诸如语言与集体行动之间关系等问题 [Smith 2010]。

自然集体智能的研究十分重要，因为它是集体智能机制应用于人工系统的重要灵感来源 [Bonabeau 等人 1999]。

5.5.2 人工集体智能（*ACI*）与计算集体智能（*CCI*）。人工集体智能是人造机器所展现的集体智能。需要注意的是，严格来说，自然集体智能与人工集体智能构成了一种错误

二分法，因为两者之间的界线划分本身具有主观性，而且也可以将其视为一个渐变连续体。在文献中，人工集体智能与计算集体智能大多被视为同义词。不过，一些作者将计算集体智能视为一种特定类型的人工集体智能，即“一个人工智能子领域，涉及运用软计算方法，使分布式环境中自主运行的单元能够进行群体决策或处理知识” [Badica 等人 2014]。软计算方法有助于通过克服近似性和不确定性来解决复杂问题，所用技术包括模糊逻辑、专家系统、机器学习、遗传算法和人工神经网络 [Ibrahim 2016]。换言之，人工集体智能与计算集体智能之间的区别，可能遵循区分人工智能与计算智能的常见方式 [Engelbrecht 2007],：前者倾向于采用硬式、符号化方法，而后者倾向于采用软计算和仿生计算技术。集体智能、人工集体智能与计算集体智能之间的关系如图 1 所示。计算集体智能也可能被视为自然集体智能的一部分，以体现生物计算的概念 [Mitchell 2011], ，即将生物系统视为计算设备 [van Gerven 2017]。不过，并非所有人工集体智能都必然涉及计算，因为机械机器也可能展现智能 [Stradner 等人 2013年; Wang 2009]——参见 Braitenberg车辆 [Dvoretskii 等人 2022], ，其中一些是纯机械车辆，传感器与执行器之间通过硬连线连接。人工集体智能的常见子领域包括语义网、社交网络和多智能体系统等 [Nguyen 等人 2009]。人工集体智能与计算集体智能通常都包括由机器和人类共同构成的系统。下一节将介绍人工集体智能的可能分类法。

请注意，诸如群体智能或多智能体智能之类的术语，可能指自然系统、人工系统，或同时涵盖二者的一般模型。

下文将介绍其他类型的集体智能，因为它们与特殊的集体智能工程方法和技术密切相关。

6 P人工集体智能工程的视角 G

在前文讨论了集体智能的含义及其主要模型的基础上，本节将重点讨论如何对集体智能进行工程化，根据相关文献，进而回答SQ8 至SQ10。在此过程中，我们将描绘集体智能工程领域的现状图谱，为下一节讨论研究机遇与挑战奠定基础。

根据需要实现的集体智能类型（参见上一节），可以设计出多种视角和集体智能工程方法，每种方法都会利用并提供独特的集体智能机制。

6.1 知识导向型与行为导向型集体智能

从工业角度来看，集体智能的工程化通常围绕着信息与通信技术平台和算法展开，用于从人类活动中收集数据，并从所收集的数据中提取知识 [Alag 2008年; Segaran 2007]。人们使用网络应用时，可以通过多种交互方式提供数据：例如，他们搜索什么内容、遵循什么路径、提供什么反馈、添加什么内容等。随后，可以使用数据挖掘、文本挖掘和机器学习等技术对信息进行分类、聚类、预测趋势、推荐内容、过滤信息、汇总信息等。我们可以将此称为知识导向型集体智能，因为集体智能蕴藏于集体所产生和处理的数据中，而信息与通信技术则发挥着支持此类信息创造的作用，最终促进潜在的集体知识涌现。这本质上就是Surowiecki(2005年)所称的认知问题。

这种系统可能看起来并不像集体智能的形式。事实上，人们可能会倾向于完全抽象掉提供数据的智能体集体，而仅仅考虑一个在概念上单一的

数据来源，以及数据如何由一个概念上单一的过程进行处理和汇总。然而，一旦从更宏观的社会技术视角考察整个过程，这一切的集体智能本质便开始显现。从这一视角来看，多个智能体通过自身的活动和推理生成信息，并可能与其他智能体及支持性工具进行交互（例如，用于共享信息的网络、用于理解他人贡献的工具等）——参见隔离、协作和基于反馈的范式。

相反，我们可以将行为导向型集体智能称为驱动系统整体行为的集体智能。这包括Surowiecki（2005年）所说的协调和合作问题。此类智能的例子包括驱动机器人群体移动方式的智能 [Navarro 和 Matía 2013], 自组织形成活动与通信结构的计算生态系统 [Pianini 等人 2021],以及能够自我调节的市场 [Lo 2015]。然而，正如最后一个例子所示，由于集体行动与集体决策相关，而集体决策又与集体知识相关，因此知识导向型集体智能与行为导向型集体智能之间的界限并不清晰，所以不应将这两类集体智能视为机制的容器，而应视为典型集体智能目标的容器。

“普通”系统与系统之系统（SOS）之间的区别 [Nielsen 等人 2015],例如，依据自主性、归属性、连通性、多样性和涌现等属性 [Boardman 和 Sauser 2006], 在此讨论中也具有相关性 [Peeters 等人。知识导向型集体智能领域的研究通常涉及社会技术系统，似乎大多与系统之系统框架相关。相比之下，行为导向型集体智能领域的研究似乎更均匀地分布在系统视角（参见群体智能和聚合计算——Bonabeau 等人；Viroli 等人（1999；2019年））和系统之系统视角（参见人机混合系统——Peeters 等人；Scekic 等人（2021年；2020））。

6.2 手动与自动的人工集体智能开发

关于人工集体智能，可以区分两种主要方法：基于手动设计 的方法和基于自动设计的方法。

6.2.1 人工集体智能的手动设计。 在手动方法中，设计者通过直接提供行为规则 （或策略），来指定构成集体的计算代理的行为。

这里的关键问题是，确定何种个体行为在复制或与其他行为或现象结合后，能够产生所需的涌现行为。文献中通常将被认为能够以某种方式实现这一目标的编程方法称为宏编程 [Casadei 2023], ；这一术语尤其在21世纪初的无线传感器网络（WSN）领域反复出现 [Newton 等人 2005]。宏编程的一项奠基性贡献来自Reina 等人 (2015)，他们提出了一种方法，通过设计模式将宏观描述转化为微观实现，从而在微观和宏观动态之间建立定量对应关系。此后，研究人员开发了不同的宏编程框架，例如用于表达机器人群体行为的框架 [Pinciroli 和 Beltrame 2016] ，以及用于分布式物联网系统的框架 [Mizzi 等人，2018年；Noor 等人 2019]——不过，其中大多数都缺乏形式化基础。

一种近期受到密集研究的著名宏编程方法是聚合计算（*AC*） [Viroli 等人 2019]。聚合计算由一种函数式宏编程语言构成，该语言通过对称为计算场 [Mamei 等人，2004 年的分布式数据结构Viroli 等人 2019]来表达集体行为。该语言的基本构造支持以下操作：（i）将标准值提升为场值；（ii）通过函数抽象场计算；（iii）场的有状态演化；以及（iv）处理双向

通过所谓的邻域场。借助此类构造以及库函数（例如，通过梯度处理信息流或支持更高层次模式的函数），程序员可以编写聚合程序，以表达由智能体组成的、可能动态变化的网络的全局行为。智能体通过反复异步地执行感知、计算和交互轮次来评估程序，并按照程序的指示与邻居交换数据，从而能够引导自组织行为，期望实现程序的意图。Casadei 等人(2021年) 认为，多个并发且动态的聚合计算或可为集体智能工程开辟道路。

虽然 AC 采用类似群体的自组织模型，但人工集体智能的另一类方法是 多智能体编程，例如 JaCaMo 平台所支持的方法 [Boissier 等，2020b], ，该平台包含 *Jason* ，用于编程认知型自主智能体；*CArtAgO* ，用于编程多智能体系统的基于分布式人工制品的环境；以及 *MOise* ，用于编程智能体组织。不过，值得注意的是，多智能体系统研究与集体智能研究之间的关系常常受到不同术语和彼此分离的研究群体的阻碍。一个原因可能是，多智能体系统研究的很大一部分实际上关注的是复合体，而非集体；也就是说，关注的是异质智能体组成的结构良好的组织，而不是由大体同质且认知能力简单的智能体构成的自组织群体。

6.2.2 人工集体智能的自动设计。 由于手动编写计算智能体的控制和行为规则可能很困难，尤其是在非静态环境中处理复杂任务时，因此另一种方法是设计能够自动设计行为的策略。其思路是提供有关预期行为或其应达到结果的提示（例如，通过规格说明 或 数据），并利用机制生成或寻找满足规格说明的行为。这可以通过自动编程 [O'Neill 和 Spector 2020]，（机器）学习 [Behjat 等人 2021], 以及搜索 [Russell 和 Norvig 2020]来实现。对于集体智能系统，这些基本上是一些知名方法所采用的途径，例如多智能体强化学习（多智能体强化学习） [Busoniu 等人 2008] 和进化群体机器人学 [Trianni 2008]。

早期模型之一，也是一个著名的例子，是集体智能，即*COIN* [Wolpert 2003]。本质上，COIN 将集体视为由利己智能体组成的系统，它们试图最大化自身的私人效用函数，同时共享一个相关的世界效用，以衡量整个系统的集体智能。多智能体强化学习显然是构建集体智能的一种强大技术，目前也是一个热门研究领域，已有多篇综述相继发表 [Canese 等人，2021年；Gronauer 和 Diepold，2022年；Zhang 等人，2019年b]。集体行为的学习可能与集体学习有关，但不应将两者混为一谈。集体学习是由多个智能体共同进行的学习，但不一定会产生集体行为模型。

在进化机器人学中 [Trianni 2008], 其理念是使用进化算法（即使用受生物进化启发的机制来使解群体不断进化的算法），根据期望的行为目标，优化机器人控制器的模型（例如，将传感器的输入映射为执行器的输出）。文献中已提出各种技术来改进传统的进化方法，例如新颖性搜索 [Gomes等 2013]。一种有趣的群体控制逻辑自动设计方法由 *AutoMoDe* [Francesca等 2014] 提出。AutoMoDe通过选择、组合和配置行为模块（偏置），以概率有限状态机的形式生成模块化控制软件。其理念是利用这种偏置，使自动设计方法能够适应仿真与现实之间的差异，从而提高鲁棒性。进化机器人学的另一种重要方法是所谓的 具身进化方法 [Bredèche等 2018年；Watson等 2002], 该方法基于分布式 于处在某一环境中的机器人群体内的进化过程，以支持在线和长期的适应性。具身进化是研究具身等方面的一个有趣环境，

智能、协同进化、环境生态位的作用、优化与选择压力之间的关系、交互局部性等。学习与进化的结合也是一个非常有趣的研究方向 [Gupta 等人 2021]。

自动设计的另一种可能途径来自程序合成 [Gulwani 等人 2017]，这是一个研究如何自动编写程序（采用给定的编程语言），使其满足特定意图的领域。尤其值得关注的是近期将程序合成与强化学习相结合的尝试——参见Aguzzi 等人；Bastani 等人（2022年；2020）。然而，在集体智能的背景下，这一方向尚未得到研究，为未来研究提供了机遇（参见后续章节）。

最后需要强调的是，手动设计和自动设计可以视为一个连续谱的两端，也可以采用混合方法——参见交互式程序合成 [Zhang 等人 2020]。

6.3 人机集体智能中的人机关系

在人机集体智能中，可以区分出多个研究方向。第一种分类可基于前文提到的知识导向型集体智能与行为导向型集体智能之间的区别。还可以根据何种实体扮演控制器和执行器的角色进行分类：

(1) 人群任务分配 [Ganti 等，2011年；Guo 等，2014年；Sari 等，2019年；Zhen 等2021]——参见众包 [Zhen 等 2021] 和众感知 [Guo 等 2014]；(2) 利用人类引导机器运行，例如通过交互方式 [Yu 等 2021]；

或考虑由哪个实体扮演输入和输出的角色

(1) 利用人工智能从人类贡献中提取或挖掘智能 [Alag，2008年；Segaran 2007]；(2) 利用人类（或人类计算）从机器贡献中提取价值，尤其是在机器（目前）通常无法胜任的任务中，例如视觉识别和语言理解 [Quinn 和 Bederson 2011]。

或者，最后，将人类和机器视为平等伙伴，因此形成所谓的人机网络 [Tsvetkova 等 2017] 或社会机器 [Berners-Lee，1999年；Burégio 等 2013]。

关于社会机器的工程，一个值得注意的宏编程方法由 *SmartSociety* 平台 [Scekic 等人 2020]，提出，该方法基于持久团队和人类/机器同伴临时团队，以及基于集体的任务等抽象概念。该方法可用于人类编排和人类任务分配等活动，例如众包和混合集体中的相关活动。

关于社会机器中人工集体智能的一般设计，Peeters 等人（2021年）提出了三项原则：(i) 应同时考虑集体、技术和人类视角下的目标；(ii)开发工作应持续贯穿产品的整个生命周期；(iii)应在所有抽象层级（人工智能、团队和社会）考虑可观测性、可预测性、可解释性和可引导性的要求。

6.4 集体任务

集体智能工程研究的另一种主要分类方式，是按照所处理的集体任务类型进行分类。集体任务可以定义为一种需要多于一个个体来完成的任务。需要注意的是，集体智能可以被视为解决集体任务的一种要求或机制（参见一般CI解释）；反过来，集体智能也可以根据其在各种环境中解决一组集体任务的能力来定义（并进行测量）。

文献中已经提出了多种集体任务分类法。例如，Brambilla等人（2013年）将（群体机器人系统的）集体行为分为：（i）空间组织行为；（ii）导航行为；（iii）集体决策；以及（iv）其他行为。关于群体机器人任务的其他综述包括 [Bayindir 2016；Nedjah和Junior 2019]。此外，集体任务还可以根据 [He等人 2019]所讨论并在前文各节中综述的三种范式进行分类：隔离、协作和反馈。

下文将回顾两种一般且主要的集体任务，即集体决策和集体学习，并指出其他类型任务的相关参考文献。

6.4.1 集体决策。 集体决策所要解决的问题是：群体如何在没有任何集中式领导的情况下达成决策 [Bose 等人 2017年； Prasetyo 等人 2019]。这也称为群体决策 [Tang 和 Liao 2021年； Zhang 等人 2019年a]。

决策及其集体形式可以根据待做决策的性质进行分类。达成共识和多智能体任务分配是两种常见的集体决策行为，在群体机器人学中十分典型 [Brambilla 等人 2013]。 Guttmann(2009) 根据四个维度对 MAS 决策进行分类：*(i)* 使用关于自身的模型与使用关于他者的模型； *(ii)* 个体输入与群体输入； *(iii)* 学习与非学习，取决于决策过程是跨越多轮还是仅进行一轮；以及*(iv)* 协作与竞争。Surowiecki (2005年) 区分了分布式决策中的三类问题或任务：*(i)* 认知、*(ii)* 合作和 *(iii)* 协调。

集体决策通常由基于例如集体感知的自组织机制提供支持 [Schmickl 等人 2006], 投票模型 [Valentini 等人 2014], 意见形成模型 [de Oca 等人 2011], 以及自稳定领导者选举 [Pianini 等人， 2022a]。

近期关于集体决策的综述包括以下内容。Valentini 等人(2017年) 聚焦于离散共识的达成，并提出了最佳选择n 问题（从 n 可用选项中选择最佳方案）；随后，他们依据问题的不同类别建立了分类体系，并据此对离散共识达成方面的文献进行了分类。 Zhang 等人(2019a) 回顾了集体决策中的共识模型，并依据多项衡量共识效率的标准对这些模型进行了比较。他们还指出，两个值得关注的研究方向包括：(i)大规模集体决策，以及 (ii) 处理社会关系和意见进化。Tang 和 Liao(2021年) 回顾了大数据背景下大规模集体决策面临的五项挑战：降维、决策信息的加权与聚合、行为管理、成本管理，以及知识的分配与增长。Rizk 等人(2018年) 综述了多智能体系统中的决策。该综述重点讨论了五种合作决策模型：马尔可夫决策过程（及其变体）、控制理论、博弈论、图论和群体智能。讨论从异质性、可扩展性和通信带宽等维度展开，而这些也是至关重要的研究挑战。在动态环境中进行决策也尤其具有挑战性 [Prasetyo 等人， 2019年；Rizk 等人 2018]。其他挑战还包括安全、隐私和信任；应对这些挑战的方法包括例如区块链共识 [Pournaras， 2020b]。

6.4.2 集体学习。 学习与智能密切相关 [Jensen 1989]。集体学习是由集体过程支持的学习，涉及个体与人工制品之间的协调和信息交换 [Fadul 2009]。作为一个多学科主题，它既在社会学和组织理论等领域受到研究 [Fadul2009； Garavan 和 Carbery 2012], 也在人工智能研究中受到研究 [Bock 1993]。集体学习涵盖集体智能的知识导向和行为导向视角，是人工集体智能自动设计的主要技术。集体学习的目标包括支持个体学习 [Fenwick 2008],产生集体5: Keep tag structure etc. Need translate "collective" glossary collective -> 集体; truncated " producing collective" translate "产生集体" yes. But ids style human text. "Learningis" typo spacing, translated. "organisational theory" target 组织理论, used. "artifacts" 人工制品. ACI人工集体智能. Good. Maybe citations names unchanged. Output only.*6.4.2* 集体学习。 学习与智能密切相关 [Jensen 1989]。集体学习是由集体过程支持的学习，涉及个体与人工制品之间的协调和信息交换 [Fadul 2009]。作为一个多学科主题，它既在社会学和组织理论等领域受到研究 [Fadul2009； Garavan 和 Carbery 2012], 也在人工智能研究中受到研究 [Bock 1993]。集体学习涵盖集体智能的知识导向和行为导向视角，是人工集体智能自动设计的主要技术。集体学习的目标包括支持个体学习 [Fenwick 2008],产生集体

知识，以及促进集体决策 [Garavan 和Carbery 2012]。作为一个宽泛的概念，集体学习可以从多个角度进行解读 [Garavan 和 Carbery2012]：例如，将其视为个体学习的独立聚合，或将其视为一种协作活动。因此，集体学习与合作学习和协作学习相关，但不一定相同 [Fadul 2009]。这些不同的观点也可以在人工智能和人工集体智能研究中找到。

人工集体学习包括分布式机器学习 [Verbraeken 等人 2020]：例如集中式、联邦式和去中心化机器学习系统。在集中式学习中，系统中的不同个体将数据提供给一个中央实体，由其执行实际的学习过程。因此，在这种情况下，核心学习过程并非集体性的，不过若从更广阔的视角来看，将数据生成也纳入考虑，该过程便具有集体性。在联邦学习 [Kairouz 等人 2021], 提出的思路是，由彼此独立的个体工作者在本地数据集上执行机器学习任务，生成的模型随后由主节点聚合为全局模型，而无需共享数据样本。这种方法有助于解决数据隐私问题。多个模型的组合也称为集成学习 [Dong 等人 2020]。 Hegedüs 等人(2021年) 提出了基于 *gossip* 的学习，作为联邦学习的一种去中心化替代方案。在这种方法中，不使用中央实体，模型通过 gossip 在系统各节点间传播并合并。集体学习可以是有监督的，也可以是无监督的。Pournaras 等人提出了一种无监督去中心化集体学习方法，示例如下：Pournaras 等人(2018年)。

集体学习的另一个重要例子是 MARL [Busoniu 等人 2008], ，它研究由强化学习智能体组成的群体进行学习。MARL 算法通常根据其所处理的问题是完全合作、完全竞争，还是混合合作/竞争问题进行分类。在完全合作问题中，智能体会获得一个共同的奖励信号，用于评估 MAS 的集体行动。相反，在完全竞争问题中，智能体的目标彼此相反。混合博弈介于完全合作问题和完全竞争问题之间。MARL 中常见的三种信息结构是 [Zhang 等人，2019b]：（i）集中式结构，即由中央控制器汇总来自智能体的信息；（ii）去中心化结构，不存在中央实体，智能体之间进行邻域交互；以及（iii）完全去中心化结构，即独立学习，智能体之间不交换信息。为解决 MARL 问题，人们提出了各种形式化框架，包括 COIN [Wolpert 2003] 和去中心化马尔可夫决策过程（Dec-MDP） [Oliehoek 和 Amato 2016]。有兴趣了解 MARL 算法和框架的读者，可以参阅该主题的多篇综合性综述 [Busoniu 等人，2008年；Hernandez-Leal 等人，2019年；Zhang 等人，2019b]。

已有关于集体学习的综述。D'Angelo 等人（2019年）对基于学习的集体自适应系统开展了系统性文献综述。他们的分析提取出此类系统的主要特征，包括涉及具备学习能力的智能体群体的应用领域、智能体的自主性水平、知识获取水平（即它们明确共享学习信息的方式），以及所涉及的行为类型（例如自私型与协作型）。据此，作者提出了一个集体自适应系统学习框架，该框架基于三个维度：自主性、知识获取和行为。学习目标根据目标涌现行为进行分析；通过分析，研究成果呈现出两个集群：一类是涌现行为与预期学习任务相关联的研究，另一类则并非如此。在学习技术方面，他们指出，大多数研究工作采用强化学习，而博弈论、监督学习、概率方法及其他方法在这些场景中的研究较少。韧性和安全被推断为该研究领域面临的主要开放性挑战。

Pournaras (2020a) 提供了在经济规划与优化选择（*EPOS*）项目背景下，关于社会技术系统中以人为中心的集体学习在协调多目标决策方面为期十年的研究综述。集体学习的动机是

一种解决长期存在的公地悲剧问题的方法，并被认为是人工智能的一种有前景的范式。作为研究机遇与挑战，作者指出：可解释性与信任、应对计划违规和对手的韧性、有机计算系统中的集体学习、人类与机器学习的协同进化，以及数字民主。

学习也与进化密切相关 [Bredèche等 2018]。学习和进化通常被视为在不同时间和空间尺度上发挥作用的不同适应机制 [Anderson 等，2013年； Mataric 2007]。然而，这些技术也可以结合起来 [Nolfi 和 Floreano 1999]：学习可以引导进化 [Hinton 和 Nowlan 1987]，而进化可以改进学习（参见进化学习——Telikani 等 (2022年)），其中可以采用不同的结合架构 [Sigaud 2022]。

6.4.3 其他集体任务。集体行动 [Oliver 1993] 通常指这样一种情形：多个具有相互冲突目标以及共同目标的个体将从协调行动中受益。显然，以有效方式进行集体行动的能力可以被视为集体智能的一种体现。该问题主要在社会学中进行研究，但计算机科学也提供了用于研究该问题和探索解决方案的工具（例如仿真、模型等），如 *SOSIEL*（自组织社会与归纳进化学习）仿真平台 [Sotnik 2018]，，用于研究人类社会以及社会技术系统和人工系统中的这一问题并探索解决方案。集体行动可能得到集体决策和自组织决策过程的支持，也可以借助 电子制度 和 社会资本 [Petruzzi 等人 2015]。

集体移动 [Navarro 和 Matía 2013] 指的是让一组智能体（例如机器人、无人机、车辆）协调一致地朝共同方向移动的问题。需要注意的是，这不仅关乎移动本身，还包括协同移动或为了支持其他任务而移动，例如分布式感知、探索和救援任务。可以确定两个主要的子问题 [Navarro 和 Matía 2013]：(i) 编队控制 [Yang 等人 2021]，，此时群体的形状和／或个体的位置至关重要；以及 (ii)群集 [Beaver 和 Malikopoulos2021]，，此时这些方面不那么重要。

分布式优化 [Yang 等人 2019] 指的是以分布式方式最小化全局目标函数的问题，该函数是集体中各成员的局部目标函数之和。分布式优化可作为集体决策的一种技术。

集体知识构建是指集体创造新的、分布式且共享的知识 [Hecker 2012]。这一主题通常从协作 [Hmelo-Silver 2003],社会技术基础设施 [Gruber 2008],知识转移 [Huangand Chin 2018], 个体知识与集体知识之间的相互作用 [Kimmerle et al. 2010]信息扩散动态模型 [Maleszka 2019],和终身学习 [Rostami et al.2018]。

6.5 集体智能相关领域概览

集体智能是一门多学科领域，集体智能和人工集体智能的工程研究可以从众多领域的理念和研究成果中受益。绘制一幅全面的研究领域图谱，展示对集体智能有所贡献的领域，将会很有帮助。

虽然我们将全面绘制集体智能工程研究地图留待未来开展，但我们从2的视角提供了一份研究地图（见图集体自适应系统（*CAS*）研究 [Bucchiarone 等人，2020；Casadei，2020；Ferscha，2015；Nicola 等人 2020]。其理念是，应通过跨学科研究和系统科学视角来支持集体智能工程 [Mobus 等人 2015]，，同时对集体智能过程能够维持的系统层级属性进行严谨的研究。这包括借鉴对抽象

以及一些基本类型的系统，例如 CPS，即结合离散和连续动态的系统 [Alur 2015]。随后，一系列相互关联的领域可以推动对集体智能现象的研究，例如涌现、自组织、集群形成等。这些领域包括但不限于协调领域 [Malone 和 Crowston 1994],多智能体系统 [Wooldridge 2009], 自主/自*计算 [Kephart 和 Chess 2003],集体自适应系统 [Bucchiarone 等，2020；Casadei, 2020；Ferscha，2015；Nicola 等 2020],泛在/普适计算 [Weiser 1991], 群体智能 [Bonabeau 等 1999], 以及集体计算 [Abowd 2016]。下文将简要概述其中一些领域。

我们在前文多次指出，交互是集体智能的关键要素。协调是对交互进行研究的跨学科领域 [Malone 和 Crowston 1994]。在计算机科学中，交互很早就被认识为一个与计算相关但又明确区分开来的问题 [Gelernter 和 Carriero 1992],，因此可以通过所谓的协调语言进行独立建模。协调的一般元模型 [Ciancarini 1996] 由以下部分组成：协调实体（进行交互的实体）、协调媒介（支持并约束交互的抽象），以及协调法则（描述协调媒介的行为）。语言、抽象和模式可用于定义计算组成部分如何在控制、信息、空间和时间等方面进行协调。这促成了众多研究共同体的诞生，并形成了长期延续的研究方向 [Ciancarini 和 Hankin，1996；ter Beek 和 Sirjani2022]。

集体自适应系统（CASs）是由智能体组成的集体，能够在没有中央控制器的情况下适应不断变化的环境。其工程设计面临诸多挑战，相关研究社区正致力于应对这些挑战 [Bucchiarone et al. 2020; Nicola et al. 2020]。集体自适应系统有时被认为具有异质性 [Andrikopoulos et al. 2013; Loreti and Hillston 2016], ，与之相对的是更同质的智能群体，不过我们倾向于不同意这一观点。在我们看来，集体自适应系统是智能群体的超集，智能群体的特征包括：（i）数量众多的（ii）相对简单（或不太智能）的个体 [Beni 2004]。集体通常具有相当程度的同质性，至少在某一抽象层次上如此 [Pianini et al. 2022b], ，不过也有研究致力于解决异质集体自适应系统 [Scekic et al. 2020] 以及异质群体 [Dorigo et al. 2013; Kengyel et al. 2015], 的问题，例如涉及人类与机器人协作的系统 [Hasbach and Bennewitz 2022], ，或由形态或行为各不相同的机器人组成的群体。群体机器人学是群体智能与机器人学的结合 [Beni 2004; Brambilla et al.2013]。

协调、集体自适应系统和群体机器人学也可视为多智能体系统这一更大领域的子领域 [Faliszewski 等，2022年；Wooldridge 2009], 而多智能体系统本身源自分布式人工智能领域 [Ferber 1999]。在多智能体系统工程中，通常考虑两个主要层次及其对应问题：智能体设计的微观层面，以及智能体社会设计的宏观层面。自主性（控制的封装）和能动性（采取行动的能力）通常被视为智能体的两项基本属性 [Franklin 和 Graesser，1996；van der Hoek 和 Wooldridge2003], ，其他属性，如主动性、交互性和社会性，均由此衍生。从软件编程与工程的角度来看，智能体可被视为一种抽象，其发展脉络承接了主动对象和 actor [Odell 2002] ；与人工制品 [Omicini 等 2008], 、环境 [Weyns 和 Michel 2014],以及组织 [Horling 和 Lesser 2004], 等其他一等抽象概念一起，为所谓的（多）智能体导向编程范式提供了支持 [Boissier 等，2020a；Shoham 1993]。多智能体系统领域／视角显然与集体智能密切相关。

与多智能体系统一样，自主性这一关键属性处于自主计算 [Kephart 和 Chess 2003], 的核心；自主计算是致力于构建能够在有限或无需人工干预的情况下管理/适应自身的计算系统的领域。秉持这一愿景，

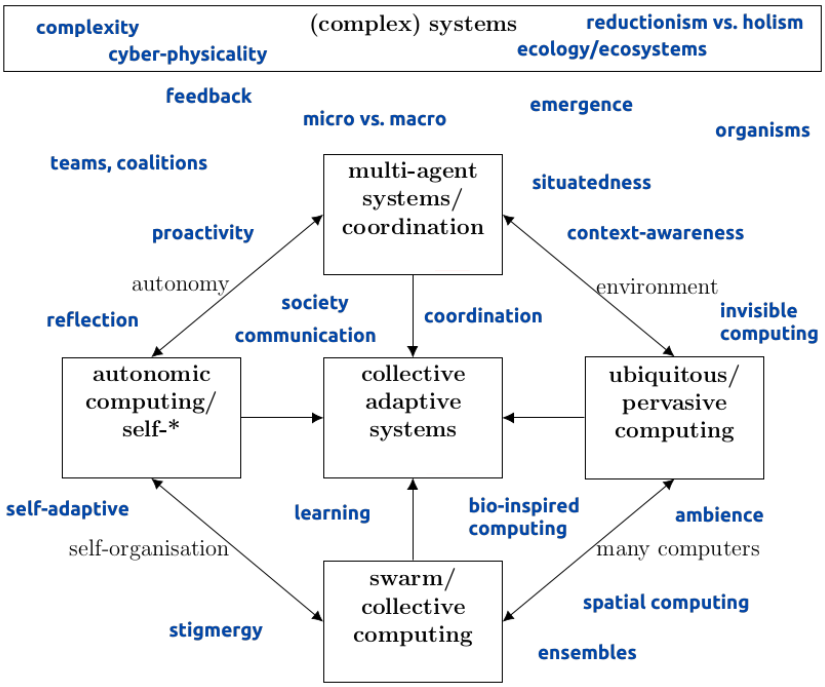


图 2. 对集体智能工程（研究）有所贡献的领域与概念研究图 .

研究人员一直在探索各种方法和技术，以赋予人工系统不同的自我-* 属性：自适应 [de Lemos 等，2010年；Salehie 和 Tahvildari 2009],自我修复/修复 [Psaier 和 Dustdar 2011], 自我改进/优化 [Bellman 等 2018],自组织 [Heylighen 2013], 等等。为了构建自治系统，相关方法通常会区分被管理系统与管理系统，并将后者划分为监控、适应、规划、执行和知识（MAPE-K）组成部分 [Kephart 和 Chess 2003]。在所谓的基于架构的自适应中 [Garlan 等 2004], , 被管理系统的架构模型会在运行时得到利用，以组织自管理逻辑。管理系统也可以是分布式和去中心化的 [Weyns 等 2010]。如果被管理系统是一个集体，那么其自我-* 属性便可以与其集体智能联系起来。以自组织这一属性为例，它表现为自主且弹性地增加/维持秩序或结构的过程 [Wolf 和 Holvoet 2004]；它通常源于多个实体之间的交互。自组织可被视为集体智能的关键推动因素或组成要素 [Rodríguez 等2007]。

最后，我们强调，上述领域具有高度的跨学科和超学科特性。例如，可以从经济学、社会学、组织学和计算视角研究多智能体系统 [Wooldridge 2009]。协调也是如此 [Malone 和 Crowston 1994]。此外，自然（如物理和生物）系统提供了丰富的灵感来源，许多仿自然协调 [Zambonelli 等人 2015] 和自然启发计算 [Siddique 和 Adeli 2015] 方面的研究成果都体现了这一点。

7 研究机遇与挑战

了解集体智能的本质及其工程视角后，接下来我们将讨论若干相关研究方向。这些方向为集体智能工程领域的研究人员带来了有趣的机遇和挑战。

7.1 涌现编程和宏编程

对涌现和自组织行为进行编程，是一项尚待解决的研究挑战 [Gershenson 等，2020；Varenne 等，2015] 与集体智能工程密切相关。术语宏编程于21世纪初出现，用以指称旨在定义无线传感器网络全局行为的编程方法 [Newton 等，2005]；如今，它通常指旨在支持对系统级或宏观层面属性与行为进行编程的范式。Casadei（2023）最近的一项综述指出，除了无线传感器网络领域的第一波研究之外，受物联网、机器人群体以及一般集体自适应系统等场景推动，我们正见证着人们对宏编程重燃兴趣。这也与空间计算密切相关 [Beal 等，2013], 因为空间往往是系统中的一种约束、一种手段或一个目标。

这里的关键挑战是确定个体的哪些局部行为规则能够促成期望的集体行为。具体来说，我们可以区分两个问题 [Tumer 和 Wolpert 2004]。给定一组个体及相应的局部行为规则，局部到全局映射问题 (或 正向问题)是确定将产生何种全局结果的问题。相反，全局到局部映射问题 (或 逆向问题)是确定哪些局部行为产生了观察到的全局结果的问题。在宏编程中，后一个问题转化为如何将全局意图的描述（宏程序）映射为局部行为规则（微程序） [Casadei 2023]。

已有研究表明，诸如聚合计算之类的方法 [Viroli 等人 2019] 能够通过宏程序支持自组织和集体智能的形式，而这些宏程序可以编码为可复用集体行为的函数组合 [Audrito 等人 2022]。这是很有前景的，但迄今为止，针对一般或特定场景下宏编程的原则、概念和机制的研究、系统化和形式化工作仍然很少 [Casadei 2023]。

7.2 手动与自动集体智能工程方法的整合

在前文中，我们讨论了如何通过手动方式（例如，使用宏编程语言，或运用传统技术从人类活动中提取知识并建立关联）或自动方式（例如，采用多智能体强化学习技术或程序合成）对集体智能进行编程。可以说，结合这两种方法或许能够克服各自的局限。这仍是一个尚未探索的研究方向，但已有一些早期研究和构想涌现。

一个初步设想是使用程序合成 [Gulwanietal. 2017] 来合成以宏编程语言编写的宏程序 [Casadei 2023]。这可以结合仿真，以验证执行合成程序的系统在各种环境中的运行情况。一方面，由于仿真也可能需要大量计算资源，因此或许有必要将仿真限制在少数几个程序候选项上。另一方面，生成宏程序的问题可能很棘手，尤其是在可能程序的空间非常庞大时。因此，采用原语或组合子较少的宏编程语言或许更适合这一任务。

此外，近期也有一些尝试将程序合成与强化学习相结合的研究 [Bastani 等，2020；Qiu 和 Zhu，2022；Verma 等，2018]。例如，Bastani 等（2022年）讨论了基于学习程序化策略的强化学习方法（即，

以程序形式表示的策略），这可以在可解释性、形式化验证和鲁棒性方面带来益处。因此，考虑将多智能体强化学习应用于策略以面向多智能体的语言或宏编程语言表达的场景，将会很有趣。例如，已有一项早期尝试在 [Aguzzi 等人 2022],开展，其中多智能体强化学习被用于填补一个草拟的聚合计算程序中的空缺（参见草拟程序合成中的技术 [Solar-Lezama 2009]），从而产生了优于简单手动编码的集体行为的集体自适应行为。

7.3 自下而上与自上而下过程的整合

另一个有趣的研究挑战和机遇在于，如何提升我们对集体智能工程的理解，即实现对自底向上过程和自顶向下过程如何整合的更深入认识——换言之，如何将涌现与向下因果作用/反馈结合加以利用，从而同时为集体行为提供灵活性和鲁棒性。事实上，我们正在考虑反馈集体智能范式 [He 等人 2019], 其中，个体和环境所贡献内容的聚合反过来会影响个体和环境。这也正是 Lykourentzou 等人 (2009) 所称的主动式 集体智能系统，其中集体行为受到系统层级的支持；与之相对的是被动式 集体智能系统，其中不存在集体意识或意向性。

整合自顶向下与自底向上过程的问题确实与涌现控制的问题相关，这一问题已在自主计算等研究领域中得到探讨， [Kephart 和 Chess 2003], 提出了具有*MAPE-K*（监控–分析–规划–执行与知识）循环的自主计算，以及有机计算 [Müller-Schloer 和 Tomforde 2017], 提出了具有观察者-控制器架构的有机计算。一个问题在于，涌现本身是一个存在争议的概念，受到哲学和科学研究的探讨，而且通常所给出的定义很难适用于系统工程 [Müller-Schloer 和 Sick 2006]。基于层次化系统模型和本体论方法来定义涌现的尝试 [Gignoux 等人 2017] 可能会有所帮助。用于系统工程中推理的涌现初步工作分类可以例如基于以下标准：它是否被预期，以及未被预期；以及它是否理想或不理想 [Iivari 2016]。

本节讨论的一些工程技术，例如宏编程和多智能体强化学习，有助于设计“受控涌现”；另一方面，深入理解涌现及其与反馈的关系，也能为机制或此类技术的实现提供启示。事实上，宏程序可以被视为涌现过程的一种自上而下的结构。此外，在这方面也值得关注的还有例如针对自稳定聚合计算 [Pianini 等人，2022a], 开展的形式化研究，该研究保证稳定输入最终会产生稳定输出。

7.4 融合人类与技术：社会机器

集体智能的一个重要分支领域仍处于起步阶段，即人机集体智能 [Smirnovand Ponomarev 2019],, 也称为混合集体智能 [Moradi 等人 2019年；Peeters 等人 2021], 或混合复杂自适应系统 [Scekic 等人 2020]。在本文讨论的系统中，我们可以识别出两个主要领域 [Beal 等人 2013]: （i）时空领域，对应于物理环境及其进化；（ii）信息领域，它通过计算而演化。当然，这两个领域会相互作用，例如，通过测量时空来获取相关信息，并通过执行动作利用信息操控时空。要实现人类与机器的集成，关键在于认识到这两类个体都能够在这两个领域中充分运作。也就是说，人类可以被视为计算机器（参见人类计算 [Quinn 和 Bederson 2011]的概念），而（计算）机器能够在物理世界中运作（参见信息物理系统 [Alur 2015]）。

事实上，为了指称人类、计算和物理系统实现此类集成的系统，各种术语或流行说法不断涌现——例如，人类 CPS [Liu 和 Wang 2020],人在回路 CPS [Schirner 等人 2013], 以及群智计算 [Murray 等人 2010]。从计算的角度来看，值得注意的是，基于异构人机集体的集体计算被 Abowd （2016年确定为计算发展的第四代。此前，Weiser 将计算的演进描述为从大型机计算到个人计算，再到普适计算 [Weiser 1991]。

为了应对系统的复杂性并释放人类与技术的潜力，将技术层面与人类、社会及组织层面结合起来考量，正变得愈发重要 [Bucchiarone et al. 2020]。换言之，设计社会机器 [Berners-Lee 1999; Burégio et al. 2013], 混合社会 [Hamann et al. 2016], 以及社会技术系统 [Baxter and Sommerville 2011]，既是关键挑战，也是重要机遇。社会机器可以描述为“一种融合了计算过程与社会过程的计算实体”，它处于社会软件、作为计算单元的人以及作为社交实体的软件三者的交汇处 [Berners-Lee 1999; Burégio et al. 2013]。在这方面，有助于推动将集体智能工程融入社会机器的形式化要素及其应用，可能包括宏观层面和集体层面的抽象 [Scekic et al. 2020],社会概念 [Bellman et al. 2017],以及协调模型 [Malone and Crowston 1994]。然而，仍然存在若干挑战，包括如何恰当地建模人类计算、如何实现人与机器之间有效的通信与协调，以及如何实现具备自我改进能力的系统集成 [Bellman et al. 2021]。

7.5 未来集体智能工程研究建议总结

本节讨论了多个问题和方向，为大量研究机会与挑战提供了空间。总而言之，我们建议进一步研究以下主题：

- 基于语言的集体智能编程解决方案，正如近期关于宏编程的研究所推动的那样 [Casadei, 2023； Sene Júnior 等人 2022], 可能也可作为可解释性的基础 [Krajna 等人 2022];
- 用于控制或引导涌现和自组织的方法与机制 [Ger- shenson 等， 2020； Varenne 等 2015], 以及为加深对这些概念本身的理解所作的努力（参见 Gignoux 等(2017年)）;
- 集体智能在现代计算系统的各个层级（例如，应用层、中间件层和物理系统层）中的作用 [Sene Júnior 等人 2022],处理功能性和非功能性方面，包括例如安全、韧性和资源效率；
- 用于整合集体智能工程中人工与自动化方法的设计，例如基于带规范的多智能体强化学习 [Ritz 等人 2021] 或程序合成 [Aguzzi 等人 2022 年； Bastani 等人 2020] 的宏程序；
- 将人类智能与机器智能结合，构建混合型集体智能系统 [Peeters 等人 2021年； S mirnov and Ponomarev 2019], 例如，利用可穿戴计算 [Ferscha 等人 2014], 结合人类团队合作方法与人工智能的方法，以及兼顾人类和人工智能体的自组织协议 [Scekic 等人 2020年; Smirnov andPonomarev 2019]。

最后但同样重要的是，我们坚信，集体视角尚未在软件工程实践中找到自己的位置。关于集体自适应系统的形式化模型和语言的近期研究 [Nicola 等， 2020 年; Scekic 等， 2020 年; Viroli 等 2019] 或许能为这一方向指明道路。

8 结论

集体智能（CI）是一个内涵丰富的主题，建立在多学科、跨学科及超学科集体协作的基础之上。然而，相关研究大多分散于若干具体研究问题（参见集体任务的类型）、研究方法（参见手动与自动集体智能设计），甚至整个计算机科学研究领域（参见混合系统、集体自适应系统、多智能体系统等）。目前仍缺乏全面的映射研究，因此不同背景的人们难以了解这一领域的全貌，甚至难以把握自己所属细分领域中与集体智能相关的研究。这项范围综述旨在为计算机科学家和工程师全面呈现集体智能，重点关注其概念与视角，并介绍一些他们最感兴趣的集体智能形式的研究亮点，即人工集体智能（ACI）、计算集体智能（CCI）和人机集体智能（HMCI）。最后一部分回顾了计算机科学与工程领域研究人员面临的一些有趣机遇与挑战。这些机遇与挑战指向若干尚待发展的方向，尽管已有前瞻性和初步研究：集体智能编程、集体智能工程中手动与自动技术的整合、集体性与涌现的整合，以及人机混合系统。

参考文献

Gregory D. Abowd. 2016. 超越 Weiser：从普适计算到集体计算。《Computer》49, 1（2016），17–23。https://doi.org/10.1109/MC.2016.22 Gianluca Aguzzi, Roberto Casadei 和 Mirko Viroli. 2022. 探索基于强化学习的聚合计算。载于《协调模型与语言——第24届 IFIP WG 6.1 国际会议 COORDINATION 2022》，作为第17届分布式计算技术国际联合会议 DisCoTec 的一部分举行，意大利卢卡，2022年6月——论文集（《计算机科学讲义》），Maurice H. ter Beek 和 Marjan Sirjani（编），第 卷。Springer，72–91。https://doi.org/10.1007/978-3-031-08143-9_5 Satnam Alag. 2008.《集体智能实践》。Simon and Schuster。Rajeev Alur. 2015.《信息物理系统原理》。麻省理工学院出版社。Stuart Anderson、Nicolas Bredeche、AE Eiben、George Kampis 和 MR van Steen. 2013.《自适应集体系统：牧羊群中的黑羊》。Bookprints。Vasilios Andrikopoulos、Antonio Bucchiarone、Santiago Gomez Saez、Dimka Karastoyanova 和 Claudio Antares Mezzina. 2013. 探索集体自适应系统的建模与执行。载于《面向服务的计算——ICSOC 2013 研讨会——CCSA、CSB、PASCEB、SWESE、WESOA 及博士生研讨会》，德国柏林，2013年12月2日至5日。修订精选论文（《计算机科学讲义》），Alessio Lomuscio、Surya Nepal、Fabio Patrizi、Boualem Benatallah 和 Ivona Brandic（编），第8377卷。Springer，69–81。https://doi.org/10.1007/978-3-319-06859-6_7 Giorgio Audrito、Roberto Casadei、Ferruccio Damiani、Guido Salvaneschi 和 Mirko Viroli. 2022. 用 XC 为分布式系统编写函数式程序。载于第36届欧洲面向对象编程会议 ECOOP，2022年6月，德国柏林（LIPIcs），Karim Ali 和 Jan Vitek（编），第 卷。Schloss Dagstuhl - Leibniz-Zentrum für Informatik，20:1–20:28。https://doi.org/10.4230/LIPIcs.ECOOP.2022.20 Amelia Badica、Bogdan Trawinski 和 Ngoc Thanh Nguyen（编）. 2014.《计算集体智能最新进展》。《计算智能研究》，第513卷。Springer。https://doi.org/10.1007/978-3-319-01787-7 Osbert Bastani、Jeevana Priya Inala 和 Armando Solar-Lezama. 2020. 通过程序合成实现可解释、可验证且鲁棒的强化学习。载于《xxAI——超越可解释人工智能国际研讨会》，与 ICML 2020 联合举办，2020年7月18日，奥地利维也纳。修订扩展论文（《计算机科学讲义》），Andreas Holzinger、Randy Goebel、Ruth Fong、Taesup Moon、Klaus-Robert Müller 和 Wojciech Samek（编），第13200卷。Springer，207–228。https://doi.org/10.1007/978-3-031-04083-2_11 Gordon D. Baxter 和 Ian Sommerville. 2011. 社会技术系统：从设计方法到系统工程。《Interact. Comput.》23, 1（2011），4–17。https://doi.org/10.1016/j.intcom.2010.07.003 Levent Bayindir. 2016. 群体机器人学任务综述。《神经计算》172（2016），292–321。https://doi.org/10.1016/j. neucom.2015.05.116 Jacob Beal、Stefan Dulman、Kyle Usbeck、Mirko Viroli 和 Nikolaus Correll. 2013. 组织聚合体：空间计算语言。载于《领域特定语言的形式化与实践方面：最新进展》。IGI Global，436–501。Logan E. Beaver 和 Andreas A. Malikopoulos. 2021. 最优集群概述。《Annu. Rev. Control.》51（2021），88–99。https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2021.03.004

Amir Behjat、Hemanth Manjunatha、Prajit Krisshna Kumar、Apurv Jani、Leighton Collins、Payam Ghassemi、Joseph P. Distefano、David S. Doermann、Karthik Dantu、Ehsan Tarkesh Esfahani 和 Souma Chowdhury. 2021. 在复杂对抗环境中学习机器人集群战术。载于《多机器人与多智能体系统国际研讨会》，MRS 2021，英国剑桥，2021年11月4日至5日。IEEE，83–91。https://doi.org/10.1109/MRS50823. 2021.9620707 Kirstie L. Bellman、Jean Botev、Ada Diaconescu、Lukas Esterle、Christian Gruhl、Christopher Landauer、Peter R. Lewis、Phyllis R. Nelson、Evangelos Pournaras、Anthony Stein 和 Sven Tomforde. 2021. 自我改进的系统集成：掌握持续变化。《Future Gener. Comput. Syst.》117（2021），29–46。https://doi.org/10.1016/j.future.2020.11.019 Kirstie L. Bellman、Jean Botev、Ada Diaconescu、Lukas Esterle、Christian Gruhl、Christopher Landauer、Peter R. Lewis、Anthony Stein、Sven Tomforde 和 Rolf P. Würtz. 2018. 自我改进的系统集成——SISSY 五年后的现状与挑战。载于《2018 IEEE 第三届自*系统基础与应用国际研讨会（FAS*W）》，意大利特伦托，2018年9月3日至7日。IEEE，160–167。https://doi.org/10.1109/FAS-W.2018.00042 Kirstie L. Bellman、Jean Botev、Hanno Hildmann、Peter R. Lewis、Stephen Marsh、Jeremy Pitt、Ingo Scholtes 和 Sven Tomforde. 2017. 社会敏感型系统设计：探索社会潜力。《IEEE Technol. Soc. Mag.》36, 3（2017），72–80。https://doi.org/10.1109/MTS.2017.2728727 Gerardo Beni. 2004. 从群体智能到群体机器人学。载于《群体机器人学》，SAB 2004 国际研讨会，美国加利福尼亚州圣莫尼卡，2004年7月17日。修订精选论文（《计算机科学讲义》），Erol Sahin 和 William M. Spears（编），第3342卷。Springer，1–9。https://doi.org/10.1007/978-3-540-30552-1_1 Tim Berners-Lee. 1999. 《编织万维网：万维网发明者对其原始设计与最终命运的阐述》。Harper San Francisco。John T. Boardman 和 Brian J. Sauser. 2006. 系统之系统——“of”的含义。载于《第一届 IEEE/SMC 系统之系统工程国际会议》，SoSE 2006，美国加利福尼亚州洛杉矶，2006年4月24日至26日。IEEE Computer Society，1–6。https://doi.org/10.1109/SYSOSE.2006.1652284 P. Bock. 1993. 《人工认知的涌现：集体学习导论》。World Scientific。https: //books.google.it/books?id=gKQSXszyf-YC O. Boissier、R.H. Bordini、J. Hubner 和 A. Ricci. 2020a. 《面向多智能体的编程：使用 JaCaMo 编写多智能体系统》。麻省理工学院出版社。https://books.google.it/books?id=kHpUzQEACAAJ Olivier Boissier、Rafael H Bordini、Jomi Hubner 和 Alessandro Ricci. 2020b. 《面向多智能体的编程：使用 JaCaMo 编写多智能体系统》。麻省理工学院出版社。Eric Bonabeau、Directeur de Recherches Du Fnrs Marco、Marco Dorigo、Guy Théraulaz、Guy Theraulaz 等. 1999. 《群体智能：从自然系统到人工系统》。Oxford university press。Thomas Bose、Andreagiovanni Reina 和 James AR Marshall. 2017. 集体决策。《Current Opinion in Behavioral Sciences》16（2017年8月），30–34。https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2017.03.004 Emanuele Bottazzi、Carola Catenacci、Aldo Gangemi 和 Jos Lehmann. 2006. 从集体意向性到意向性集体：本体论视角。《Cognitive Systems Research》7, 2-3（2006），192–208。Manuele Brambilla、Eliseo Ferrante、Mauro Birattari 和 Marco Dorigo. 2013. 群体机器人学：从群体工程视角出发的综述。《Swarm Intell.》7, 1（2013），1–41。https://doi.org/10.1007/s11721-012-0075-2 Nicolas Bredèche、Evert Haasdijk 和 Abraham Prieto. 2018. 集体机器人学中的具身进化：综述。《Frontiers Robotics AI》5（2018），12。https://doi.org/10.3389/frobt.2018.00012 B Brodaric 和 F Neuhaus. 2020. 复数、集体与复合体。载于《信息系统形式本体论：第11届国际会议论文集（FOIS 2020）》，第330卷。IOS Press，186。Antonio Bucchiarone、Mirko D’Angelo、Danilo Pianini、Giacomo Cabri、Martina De Sanctis、Mirko Viroli、Roberto Casadei 和 Simon Dobson. 2020. 集体自适应系统的社会影响。《IEEE Technol. Soc. Mag.》39, 3（2020），36–46。https://doi.org/10.1109/MTS.2020.3012324 Vanilson Arruda Burégio、Silvio Romero de Lemos Meira 和 Nelson Souto Rosa. 2013. 社会机器：描述面向社会网络系统的统一范式。载于《第22届国际万维网大会》，WWW ’13，巴西里约热内卢，2013年5月13日至17日，配套卷。ACM，885–890。https://doi.org/10.1145/2487788.2488074 Lucian Busoniu、Robert Babuska 和 Bart De Schutter. 2008. 多智能体强化学习综合综述。《IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Part C》38, 2（2008），156–172。https://doi.org/10.1109/TSMCC.2007.913919 Lorenzo Canese、Gian Carlo Cardarilli、Luca Di Nunzio、Rocco Fazzolari、Daniele Giardino、Marco Re 和 Sergio Spanò. 2021. 多智能体强化学习：挑战与应用综述。《Applied Sciences》11, 11（2021），4948。John B Carroll. 1993. 《人类认知能力：因素分析研究综述》。剑桥大学出版社。https: //doi.org/10.1017/cbo9780511571312 Roberto Casadei. 2020. 面向信息物理生态系统的自适应集体过程工程。博士论文。博洛尼亚大学。http://amsdottorato.unibo.it/9380/ Roberto Casadei. 2023. 宏观编程：宏观行为建模的概念、现状与机遇。《Comput. Surveys》（2023年1月）。https://doi.org/10.1145/3579353

Roberto Casadei、Mirko Viroli、Giorgio Audrito、DaniloPianini 和Ferruccio Damiani。2021年。使用聚合过程在边缘工程化集体智能。《工程应用人工智能》97（2021年），104081。https://doi.org/10.1016/j.engappai.2020.104081 Amrita Chakraborty和ArpanKumar Kar。2017年。群体智能：算法综述。载于《自然启发计算与优化：理论与应用》，Srikanta Patnaik、Xin-She Yang 和 Kazumi Nakamatsu（编）。Springer International Publishing，Cham，475–494。https://doi.org/10.1007/978-3-319-50920-4_19 Nader Chmait、David L. Dowe、Yuan-Fang Li、David G.Green 和 JavierInsa-Cabrera。2016年。集体智能的因素：智能体集体有多聪明？载于 ECAI 2016——第22届欧洲人工智能会议（人工智能前沿与应用），第285卷。IOS Press，542–550。https://doi.org/10.3233/978-1-61499-672-9-542 François Chollet。2019年。论智能的度量。arXiv预印本arXiv:1911.01547（2019年）。Paolo Ciancarini。1996年。作为软件集成器的协调模型与语言。《ACM计算调查》28，2（1996年），300–302。https://doi.org/10.1145/234528.234732Paolo Ciancarini和 ChrisHankin（编）。1996年。协调语言与模型：第一届国际会议，CO-ORDINATION '96，意大利切塞纳，1996年4月15–17日，会议论文集。计算机科学讲义，第1061卷。Springer。https://doi.org/10.1007/3-540-61052-9Mirko D'Angelo、Simos Gerasimou、Sona Ghahremani、Johannes Grohmann、Ingrid Nunes、EvangelosPournaras 和S venTomforde。2019年。集体自适应系统中的学习：实践现状与三维框架。载于《第14届软件工程自适应与自管理系统国际研讨会论文集》，SEAMS@ICSE 2019，加拿大魁北克省蒙特利尔，2019年5月25–31日，Marin Litoiu、SiobhánClarke 和 Kenji Tei（编）。ACM，13–24。https: //doi.org/10.1109/SEAMS.2019.00012 BryanC Daniels、Christopher J Ellison、David CKrakauer和Jessica CFlack。2016年。量化集体性。《神经生物学当前观点》37（2016年4月），106–113。https://doi.org/10.1016/j.conb.2016.01.012 Rogério de Lemos、HolgerGiese、Hausi A. Müller、Mary Shaw、Jesper Andersson、Marin Litoiu、Bradley R. Schmerl、Gabriel Tamura、Norha M. Villegas、ThomasVogel、Danny Weyns、Luciano Baresi、BasilBecker、Nelly Bencomo、Yuriy Brun、Bojan Cukic、Ronald J. Desmarais、SchahramDustdar、Gregor Engels、Kurt Geihs、Karl M. Göschka、Alessandra Gorla、Vincenzo Grassi、Paola Inverardi、Gabor Karsai、JeffKramer、Antónia Lopes、JeffMagee、Sam Malek、Serge Mankovski、Raffaela Mirandola、John Mylopoulos、Oscar Nierstrasz、Mauro Pezzè、Christian Prehofer、Wilhelm Schäfer、Richard D. Schlichting、Dennis B. Smith、João Pedro Sousa、Ladan Tahvildari、Kenny Wong和 JochenWuttke。2010年。自适应系统软件工程：第二份研究路线图。载于《自适应系统软件工程II——国际研讨会》，德国达格斯图尔城堡，2010年10月24–29日修订、精选及受邀论文（《计算机科学讲义》），Rogério de Lemos、Holger Giese、HausiA. Müller和 Mary Shaw（编），第7475卷。Springer，1–32。https://doi.org/10.1007/978-3-642-35813-5_1 Marco Antonio Montes de Oca、Eliseo Ferrante、Alexander Scheidler、Carlo Pinciroli、Mauro Birattari 和 MarcoDorigo。2011年。具有差分延迟的多数规则意见动态：一种自组织集体决策机制。《群体智能》5，3-4（2011年），305–327。https://doi.org/10.1007/s11721-011-0062-zDaniel Clement Dennett。1989年。意向立场。麻省理工学院出版社。Xibin Dong、Zhiwen Yu、WenmingCao、Yifan Shi和Qianli Ma。2020年。集成学习综述。《计算机科学前沿》14，2（2020年），241–258。https://doi.org/10.1007/s11704-019-8208-z Marco Dorigo、DarioFloreano、Luca Maria Gambardella、Francesco Mondada、Stefano Nolfi、Tarek Baaboura、Mauro Birattari、Michael Bonani、Manuele Brambilla、Arne Brutschy、Daniel Burnier、Alexandre Campo、Anders Lyhne Christensen、Antal Decugniere、Gianni Di Caro、Frederick Ducatelle、Eliseo Ferrante、Alexander Förster、Javier Martinez Gonzales、Jerome Guzzi、Valentin Longchamp、Stéphane Magnenat、Nithin Mathews、Marco Antonio Montes de Oca、Rehan O'Grady、Carlo Pinciroli、Giovanni Pini、Philippe Rétornaz、James F. Roberts、Valerio Sperati、Timothy S. Stirling、Alessandro Stranieri、Thomas Stützle、Vito Trianni、Elio Tuci、Ali EmreTurgut 和 FlorianVaussard。2013年。Swarmanoid：异构机器人群体研究的新概念。《IEEE机器人学与自动化杂志》20，4（2013年），60–71。https://doi.org/10.1109/MRA.2013.2252996 MarcoDorigo 和 ThomasStützle。2019年。蚁群优化：概述与最新进展。《元启发式算法手册》（2019年），311–351。Stefan Dvoretskii、Ziyi Gong、Ankit Gupta、Jesse Parent 和 BradlyAlicea。2022年。Braitenberg车辆作为发育神经仿真。《人工生命》28，3（2022年），369–395。https://doi.org/10.1162/artl_a_00384 Andries P Engelbrecht。2007年。计算智能：导论。JohnWiley&Sons。Jose A. Fadul。2009年。集体学习：将分布式认知应用于集体智能。《学习国际期刊：年度评论》16，4（2009年），211–220。https://doi.org/10.18848/1447-9494/cgp/v16i04/46223 Piotr Faliszewski、Viviana Mascardi、Catherine Pelachaud 和 Matthew E. Taylor（编）。2022年。第21届自主智能体与多智能体系统国际会议，AAMAS2022，新西兰奥克兰，2022年5月9–13日。自主智能体与多智能体系统国际基金会（IFAAMAS）。https://doi.org/10.5555/3535850

Tara Fenwick。2008年。《工作中的个体—集体学习关系理解：研究综述》。Management Learning 39，3（2008年7月），227–243。https://doi.org/10.1177/1350507608090875Jacques Ferber。1999。《多智能体系统——分布式人工智能导论》。Addison-Wesley-Longman。Alois Ferscha。2015。《集体自适应系统》。载于《2015年ACM普适与泛在计算国际联合会议论文集》及《2015年ACM可穿戴计算机国际研讨会论文集》，UbiComp/ISWC 2015 附属会议，日本大阪，2015年9月7日至11日，Kenji Mase、Marc Langheinrich、Daniel Gatica-Perez、Hans Gellersen、Tanzeem Choudhury 和 Koji Yatani（编）。ACM，893–895。https://doi.org/10.1145/2800835.2809508 Alois Ferscha、Paul Lukowicz和FrancoZambonelli。2014。《大规模集体可穿戴设备的超有机体》。载于《2014年ACM普适计算会议》，UbiComp '14附属会议，美国华盛顿州西雅图——2014年9月13日至17日，A. J. Brush、Adrian Friday、Julie A. Kientz、JamesScott和 Junehwa Song（编）。ACM，1077–1084。https://doi.org/10.1145/ 2638728.2659396 ElliackinM. N. Figueiredo、Mariana Macedo、Hugo ValadaresSiqueira、Clodomir J. Santana Jr.、Anu Gokhale 和 CarmeloJ. A. BastosFilho。2019。《用于聚类的群体智能——关于数据挖掘的新视角系统综述》。Eng. Appl.Artif. Intell. 82（2019），313–329。https://doi.org/10.1016/j.engappai.2019.04.007 Iztok Fister、Iztok Fister Jr.、Xin-She Yang 和 Janez Brest。2013。《萤火虫算法综合综述》。Swarm Evol. Comput. 13（2013），34–46。https://doi.org/10.1016/j.swevo.2013.06.001 Gianpiero Francesca、Manuele Brambilla、Arne Brutschy、Vito Trianni 和 Mauro Birattari。2014。《AutoMoDe：机器人群体控制软件自动设计的新方法》。Swarm Intell. 8，2（2014），89–112。https: //doi.org/10.1007/s11721-014-0092-4 Stan Franklin和 ArthurC. Graesser。1996。《它是智能体，还是仅仅是程序？：自主智能体分类法》。载于《Intelligent Agents III，智能体理论、架构与语言》，ECAI '96研讨会（ATAL），匈牙利布达佩斯，1996年8月12日至13日，论文集（计算机科学讲义），Jörg P. Müller、Michael J. Wooldridge和 Nicholas R. Jennings（编），第1193卷。Springer，21–35。https://doi.org/10.1007/BFb0013570BrianR Gaines。1994。《个人与组织专业知识建模中的集体立场》。International Journal of Expert Systems 7，1（1994），19–49。AntonyGalton和 Zena Wood。2016。《外延与内涵集体以及指物与指称区别》。Applied Ontology 11，3（2016），205–226。Raghu K.Ganti、Fan Ye 和 Hui Lei。2011。《移动群智感知：当前状态与未来挑战》。IEEE Commun. Mag. 49，11（2011），32–39。https://doi.org/10.1109/MCOM.2011.6069707 Thomas N.Garavan 和 Ronan Carbery。2012。《集体学习》。载于《学习科学百科全书》。Springer US，646–649。https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1428-6_136 David Garlan、Shang-Wen Cheng、An-Cheng Huang、Bradley R. Schmerl 和Peter Steenkiste。2004。《Rainbow：基于可复用基础设施的架构自适应》。Computer 37，10（2004），46–54。https://doi.org/10.1109/MC.2004.175 David Gelernter和 Nicholas Carriero。1992。《协调语言及其重要性》。Commun. ACM 35，2（1992），96–107。https://doi.org/10.1145/129630.376083 Carlos Gershenson、Vito Trianni、Justin Werfel 和 Hiroki Sayama。2020 26, 。《自组织与人工生命》。Artif. Life（ ），–。https://doi.org/ 。 /artl a Jacques Gignoux、Guillaume Chérel、Ian D Davies、ShayneR Flint 和Eric Lateltin。2017。《涌现与复杂系统：动态图论的贡献》。Ecological Complexity 31（2017），34–49。https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020. 12.1497 Jorge C. Gomes、Paulo Urbano 和 Anders Lyhne Christensen。2013。《通过新颖性搜索实现群体机器人系统的进化》。Swarm Intell. 7，2-3（2013），115–144。https://doi.org/10.1007/s11721-013-0081-z Sven Gronauer 和Klaus Diepold。2022年。《多智能体深度强化学习：综述》。Artif.Intell. Rev. 55，2（2022），895–943。https://doi.org/10.1007/s10462-021-09996-wTomGruber。2008年。《集体知识系统：社会网络与语义网的交汇之处》。J. Web Semant. 6，1（2008），4–13。https://doi.org/10.1016/j.websem.2007.11.011 Sumit Gulwani、Oleksandr Polozov 和 Rishabh Singh。2017年。《程序合成》。Found.Trends Program. Lang. 4，1-2（2017），1–119。https://doi.org/10.1561/2500000010 Bin Guo、Zhiwen Yu、XingsheZhou和Daqing Zhang。2014年。《从参与式感知到移动群智感知》。载于《2014年IEEE普适计算与通信国际会议研讨会》，PerCom2014 研讨会，匈牙利布达佩斯，2014年3月24日至28日。IEEE ComputerSociety，593–598。https://doi.org/10.1109/PerComW.2014.6815273 Agrim Gupta、SilvioSavarese、Surya Ganguli 和 Li Fei-Fei。2021年。《通过学习与进化实现具身智能》。Nature Communications 12，1（2021年10月）。https://doi.org/10.1038/s41467-021-25874-z Christian Guttmann。2009。《多智能体系统中的决策问题分类体系》。载于《多智能体系统技术，第七届德国会议，MATES2009》，德国汉堡，2009年9月9日至11日。论文集（计算机科学讲义），Lars Braubach、Wiebe van der Hoek、Paolo Petta 和 Alexander Pokahr（编），第5774卷。Springer，195–201。https://doi.org/10.1007/978-3-642-04143-3_19

DavidHa和 Yujin Tang。2021年。《用于深度学习的集体智能：近期发展的综述》。CoRRabs/2111.14377（2021年）。arXiv:2111.14377 https://arxiv.org/abs/2111.14377 Heiko Hamann、Yara Khaluf、Jean Botev、MohammadDivband Soorati、Eliseo Ferrante、Oliver Kosak、Jean-Marc Montanier、Sanaz Mostaghim、Richard Redpath、Jon Timmis、Frank Veenstra、MostafaWahby和AlesZamuda。2016年。《混合社会：自组织系统中集体行为设计的挑战与展望》。Frontiers Robotics AI 3（2016年），14。https://doi.org/10.3389/frobt.2016.00014 Jonas D. Hasbach和 Maren Bennewitz。2022年。《自组织人类—群体智能的设计》。Adapt. Behav. 30, 4（2022年），361–386。https://doi.org/10.1177/10597123211017550 Feijuan He、Yudai Pan、Qika Lin、XianglinMiao和Zhouguo Chen。2019年。《集体智能：分类体系与综述》。IEEE Access 7（2019年），170213–170225。https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2955677 AchimHecker。2012年。《超越个体的知识？理解组织理论中的集体知识概念》。Organization Studies 33, 3（2012年3月），423–445。https://doi.org/10.1177/0170840611433995 István Hegedüs、Gábor Danner和MárkJelasity。2021年。《去中心化学习有效：八卦学习与联邦学习的实证比较》。J. Parallel Distributed Comput. 148（2021年），109–124。https://doi.org/10.1016/j.jpdc.2020. 10.006 Pablo Hernandez-Leal、BilalKartal和 MatthewE. Taylor。2019年。《多智能体深度强化学习的综述与批评》。Auton. Agents Multi Agent Syst. 33, 6（2019年），750–797。https://doi.org/10.1007/s10458-019-09421-1 JoséHernández-Orallo。2017年。《人工智能中的评估：从面向任务到面向能力的测量》。Artificial Intelligence Review 48, 3（2017年），397–447。José Hernández-Orallo和David L. Dowe。2010年。《测量通用智能：迈向任意时刻智能测试》。Artificial Intelligence 174, 18（2010年12月），1508–1539。https://doi.org/10.1016/j.artint.2010.09.006 Francis Heylighen。2013年。《从人类计算到全球大脑：分布式智能的自组织》。载于《人类计算手册》，Pietro Michelucci（编）。Springer，897–909。https://doi.org/10.1007/978-1-4614- 8806-4 73_Geoffrey E. Hinton和Steven J. Nowlan。1987年。《学习如何引导进化》。Complex Syst. 1, 3（1987年）。http: //www.complex-systems.com/abstracts/v01_i03_a06.htmlCindyE. Hmelo-Silver。2003年。《分析协作式知识建构：促进综合理解的多种方法》。Comput. Educ. 41, 4（2003年），397–420。https://doi.org/10.1016/j.compedu.2003.07.001 BryanHorling 和Victor R.Lesser。2004年。《多智能体组织范式综述》。Knowl. Eng. Rev. 19, 4（2004年），281–316。https://doi.org/10.1017/S0269888905000317 Yen-ChihHuang和 Yang-Chieh Chin。2018年。《将集体知识转化为团队智能：集体教学的作用》。Journal ofKnowledge Management 22, 6（2018年5月），1243–1263。https://doi.org/10.1108/jkm-03-2017-0106 Dogan Ibrahim。2016年。《软计算概述》。Procedia Computer Science 102（2016年），34–38。https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.09.366 Juhani Iivari。2016年。《内生涌现的信息系统》。载于《信息系统开发：信息系统开发中的复杂性——第25届国际信息系统开发会议 ISD 2016 论文集》，波兰卡托维兹，2016年8月24–26日，Jerzy Goluchowski、Malgorzata Pankowska、Chris Barry、Michael Lang、Henry Linger 和 Christoph Schneider（编）。卡托维兹经济大学 / 信息系统协会。http://aisel.aisnet.org/isd2014/proceedings2016/ISDMethodologies/5Arthur R. Jensen。1989年。《学习与智能之间的关系》。LearningandIndividualDifferences 1, 1（1989年1月），37–62。https://doi.org/10.1016/1041-6080(89)90009-5JasonJ. Jung。2017年。《大数据环境下的计算集体智能：挑战与机遇》。Future Gener. Comput. Syst.66（2017年），87–88。https://doi.org/10.1016/j.future.2016.08.021 Peter Kairouz、H. Brendan McMahan、Brendan Avent、Aurélien Bellet、Mehdi Bennis、Arjun Nitin Bhagoji、Kallista A. Bonawitz、Zachary Charles、Graham Cormode、Rachel Cummings、RafaelG. L. D'Oliveira、Hubert Eichner、Salim El Rouayheb、David Evans、Josh Gardner、Zachary Garrett、Adrià Gascón、Badih Ghazi、Phillip B. Gibbons、Marco Gruteser、Zaïd Harchaoui、Chaoyang He、Lie He、Zhouyuan Huo、Ben Hutchinson、Justin Hsu、Martin Jaggi、Tara Javidi、Gauri Joshi、Mikhail Khodak、Jakub Konečný、Aleksandra Korolova、Farinaz Koushanfar、Sanmi Koyejo、TancrèdeLepoint、Yang Liu、Prateek Mittal、MehryarMohri、Richard Nock、Ayfer Özgür、Rasmus Pagh、Hang Qi、Daniel Ramage、Ramesh Raskar、Mariana Raykova、Dawn Song、Weikang Song、Sebastian U. Stich、Ziteng Sun、Ananda Theertha Suresh、Florian Tramèr、PraneethVepakomma、Jianyu Wang、Li Xiong、Zheng Xu、Qiang Yang、FelixX. Yu、Han Yu 和 SenZhao。2021年。《联邦学习的进展与开放问题》。Found.Trends Mach. Learn. 14, 1-2（2021年），1–210。https: //doi.org/10.1561/2200000083 Daniela Kengyel、Heiko Hamann、Payam Zahadat、Gerald Radspieler、FranzWotawa和Thomas Schmickl。2015。《集体行为中的异质性潜力：异质群体案例研究》。载于PRIMA2015：多智能体系统的原理与实践——第18届国际会议，意大利贝尔蒂诺罗，2015年10月26–30日，论文集（《计算机科学讲义》），Qingliang Chen、Paolo Torroni、Serena Villata、Jane Yung-jen Hsu 和 Andrea Omicini（编），

第 9387 卷。Springer，201–217。https://doi.org/10.1007/978-3-319-25524-8_13 JeffreyO. Kephart 和 DavidM.Chess。2003年。自主计算的愿景。Computer 36，1（2003年），41–50。https://doi.org/10.1109/MC.2003.1160055 Joachim Kimmerle、Ulrike Cress 和 Christoph Held。2010年。个体知识与集体知识之间的相互作用：组织学习与知识构建技术。知识管理研究与实践 8，1（2010年3月），33–44。https://doi.org/10.1057/kmrp.2009.36 Andreas Kolling、PhillipM. Walker、Nilanjan Chakraborty、KatiaP.Sycara和Michael Lewis。2016年。人类与机器人群体的交互：综述。IEEE 人机系统学报 46，1（2016年），9–26。https://doi.org/10.1109/THMS.2015.2480801 Agneza Krajna、Mario Brcic、Tomislav Lipic 和 JurajDoncevic。2022年。强化学习中的可解释性：观点与立场。CoRR abs/2203.11547（2022年）。https://doi.org/10.48550/arXiv.2203.11547 arXiv:2203.11547 Jens Krause、GraemeD.Ruxton 和 StefanKrause。2010年。动物与人类中的群体智能。《生态学与进化趋势》25，1（2010年），28–34。https://doi.org/10.1016/j.tree.2009.06.016 Andres Laan、Gabriel Madirolas 和GonzaloG.de Polavieja。2017年。当群体平均意见错误时挽救集体智慧。《机器人学与人工智能前沿》4（2017年），56。https://doi.org/10.3389/frobt.2017.00056 Gustave Le Bon。2002年。群体：大众心理研究。Courier Corporation。（原著出版于1895年）。ShaneLegg、Marcus Hutter 等。2007年。智能定义汇编。《人工智能前沿与应用》157（2007年），17。ZhimingLiu和 Ji Wang。2020年。人类—信息物理系统：概念、挑战与研究机遇。《信息技术与电子工程前沿》21，11（2020年），1535–1553。https://doi.org/10.1631/FITEE.2000537Andrew WLo。2015。群体的智慧与暴民的疯狂。载于《集体智能手册》。麻省理工学院出版社。Michele Loreti和 JaneHillston。2016年。使用CARMA及其工具对集体自适应系统进行建模与分析。载于《集体自适应系统定量评估的形式化方法——计算机、通信与软件系统设计形式化方法第16届国际学校，SFM2016，24，2016年，20Bertinoro，意大利，6月——高级讲座》（《计算机科学讲义》），Marco Bernardo、Rocco DeNicola 和 Jane Hillston（编），第9700卷。Springer，83–119。https://doi.org/10.1007/978-3-319-34096-8_4 Ioanna Lykourentzou、Dimitrios J.Vergados和Vassilis Loumos。2009。集体智能系统工程。载于 MEDES '09：国际 ACM 涌现数字生态系统管理会议，法国里昂，2009年10月27日至30日，Richard Chbeir、Youakim Badr、EpaminondasKapetanios 和 Agma J. M. Traina（编）。ACM，134–140。https://doi.org/10.1145/1643823.1643848 Geoffrey Mainland、Laura Kang、Sébastien Lahaie、DavidC.Parkes 和MattWelsh。2004。使用虚拟市场编程传感器网络中的全局行为。载于第11届ACM SIGOPS 欧洲研讨会论文集，比利时鲁汶，2004年9月19日至22日，YolandeBerbers 和 MiguelCastro（编）。ACM，1。https://doi.org/10.1145/1133572.1133587Marcin Maleszka。2019 13，7 820191120 1142 10 108017517575 2018 1526325 。社会网络环境中的集体知识扩散应用。企业信息系统 -（），–。https://doi.org/ 。/ 。Thomas W Malone和Michael SBernstein。2015。集体智能手册。麻省理工学院出版社。ThomasW.Malone 和 KevinCrowston。1994。协调的跨学科研究。ACM 计算调查 26，1（1994年），87–119。https://doi.org/10.1145/174666.174668 Marco Mamei、Franco Zambonelli 和LetiziaLeonardi。2004。Co-Fields：一种受物理启发的运动协调方法。IEEE 普适计算 3，2（2004年），52–61。https://doi.org/10.1109/MPRV.2004.1316820Maja J. Mataric。2007年。机器人学入门。麻省理工学院出版社。http://mitpress.mit.edu/catalog/item/default.asp?ttype=2&tid=11229 Michalis Mavrovouniotis、Changhe Li和ShengxiangYang。2017年。动态优化中的群体智能综述：算法与应用。群体演化计算 33（2017年），1–17。https://doi.org/10.1016/j.swevo.2016.12.005 Tyler Millhouse、MelanieMoses和Melanie Mitchell。2021年。集体智能前沿：研讨会报告。CoRRabs/2112.06864（2021年）。arXiv:2112.06864 https://arxiv.org/abs/2112.06864 GianfrancoMinati。2018年。涌现的现象学结构动力学：涌现如何涌现的概述。载于《人文与自然科学中的系统转向》。Springer InternationalPublishing，1–39。https://doi.org/10.1007/978- 3-030-00725-6 1_Melanie Mitchell。2011年。Ubiquity专题讨论：生物计算。Ubiquity 2011年，2月（2011年），3。https://doi.org/10.1145/1940721.1944826 Adrian Mizzi、Joshua Ellul 和GordonJ.Pace。2018年。D'Artagnan：一种用于分布式嵌入式系统的嵌入式DSL框架。载于现实世界领域专用语言研讨会论文集，RWDSL@CGO2018，奥地利维也纳，2018年2月24日至24日。ACM，2:1–2:9。https://doi.org/10.1145/3183895.3183899 GeorgeE Mobus、MichaelC Kalton 等。2015。系统科学原理。Springer。Morteza Moradi、Mohammad Moradi、FarhadBayat 和AdelNadjaran Toosi。2019。集体混合智能：迈向概念框架。《国际群体科学杂志》（2019年）。Christian Müller-Schloer和 Bernhard Sick。2006。有机计算系统中的涌现：对一个有争议概念的讨论。载于《自主与可信计算》，第三届国际会议，ATC 2006，中国武汉，2006年9月3日至6日，

2006年，论文集（《计算机科学讲义》），Laurence Tianruo Yang、Hai Jin、Jianhua Ma 和 Theo Ungerer（编），第4158卷。Springer，1–16。https://doi.org/10.1007/11839569_1 Christian Müller-Schloer 和 Sven Tomforde。2017年。《有机计算——真实世界生存的技术系统》。Birkhäuser。https://doi.org/10.1007/978-3-319-68477-2 Zachary Munn、Micah D. J. Peters、Cindy Stern、Catalin Tufanaru、Alexa McArthur 和 Edoardo Aromataris。2018年。系统综述还是范围综述？作者在选择系统综述或范围综述方法时的指南。《BMC医学研究方法》18卷1期（2018年11月）。https://doi.org/10.1186/s12874-018-0611-x Derek G Murray、Eiko Yoneki、Jon Crowcroft 和 Steven Hand。2010年。群智计算的理由。载于第二届 ACM SIGCOMM 移动手持设备网络、系统与应用研讨会论文集。39–44。Arun Narayanan、Mohamed Selim Korium、Dick Carrillo Melgarejo、Hafiz Majid Hussain、Arthur Sousa de Sena、Pedro E. Gória Silva、Daniel Gutierrez-Rojas、Mehar Ullah、Ali Esmaeel Nezhad、Mehdi Rasti、Evangelos Pournaras 和 Pedro H. J. Nardelli。2022年。利用5G实现集体智能：社会技术环境中的概念、应用与挑战。《IEEE Access》10卷（2022年），70394–70417。https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3184035 Iñaki Navarro 和 Fernando Matía。2013年。移动机器人的集体运动综述。《国际先进机器人系统期刊》10卷1期（2013年），73。https://doi.org/10.5772/54600 arXiv:https://doi.org/10.5772/54600 Nadia Nedjah 和 Luneque Silva Junior。2019年。群体机器人学方法与任务综述：迈向标准化。《群体与进化计算》50卷（2019年）。https://doi.org/10.1016/j.swevo.2019.100565 Ryan Newton、Arvind 和 Matt Welsh。2005年。逐步构建宏编程：一种用于传感器网络的中间语言。载于第四届国际传感器网络信息处理研讨会论文集（IPSN 2005），2005年4月25日至27日，美国加利福尼亚州洛杉矶，加州大学洛杉矶分校。IEEE，37–44。https://doi.org/10.1109/IPSN.2005.1440891 Bach Hoai Nguyen、Bing Xue 和 Mengjie Zhang。2020年。数据挖掘中特征选择的群体智能方法综述。《群体与进化计算》54卷（2020年），100663。https://doi.org/10.1016/j.swevo.2020.100663 Ngoc Thanh Nguyen。2008年。知识的不一致性与集体智能。《控制论与系统》39卷6期（2008年），542–562。https://doi.org/10.1080/01969720802188268 Ngoc Thanh Nguyen、Dosam Hwang 和 Edward Szczerbicki。2019年。面向企业信息系统的计算集体智能。《企业信息系统》13卷7-8期（2019年），933–934。https://doi.org/10.1080/17517575.2019.1640394 Ngoc Thanh Nguyen、Ryszard Kowalczyk 和 Shyi-Ming Chen（编）。2009年。《计算集体智能：语义网、社交网络与多智能体系统》，第一届国际会议 ICCCI 2009，2009年10月5日至7日，波兰弗罗茨瓦夫。论文集。《计算机科学讲义》，第5796卷。Springer。https://doi.org/10.1007/978-3-642-04441-0 Rocco De Nicola、Stefan Jähnichen 和 Martin Wirsing。2020年。集体自适应系统的严谨工程：特刊。《国际软件工具与技术转移期刊》22卷4期（2020年），389–397。https://doi.org/10.1007/s10009-020-00565-0 Claus Ballegaard Nielsen、Peter Gorm Larsen、John S. Fitzgerald、Jim Woodcock 和 Jan Peleska。2015年。系统之系统工程：基本概念、基于模型的技术与研究方向。《ACM计算综述》48卷2期（2015年），18:1–18:41。https://doi.org/10.1145/2794381 Stefano Nolfi 和 Dario Floreano。1999年。学习与进化。《自主机器人》7卷1期（1999年），89–113。https://doi.org/10.1023/A: 1008973931182 Joseph Noor、Hsiao-Yun Tseng、Luis Garcia 和 Mani B. Srivastava。2019年。DDFlow：面向异构物联网网络的可视化声明式编程。载于国际物联网设计与实现会议论文集（IoTDI 2019），2019年4月15日至18日，加拿大魁北克省蒙特利尔，Olaf Landsiedel 和 Klara Nahrstedt（编）。ACM，172–177。https: //doi.org/10.1145/3302505.3310079 James Odell。2002年。对象与智能体的比较。《对象技术期刊》1卷1期（2002年），41–53。https://doi.org/10.5381/jot.2002.1.1.c4 Hyondong Oh、Ataollah Ramezan Shirazi、Chaoli Sun 和 Yaochu Jin。2017年。受生物启发的自组织多机器人模式形成：综述。《机器人与自主系统》91卷（2017年），83–100。https://doi.org/10.1016/j.robot.2016.12.006 Frans A. Oliehoek 和 Christopher Amato。2016年。《去中心化POMDP简明导论》（第1版）。Springer Publishing Company, Incorporated。Pamela E. Oliver。1993年。集体行动的形式模型。《社会学年度评论》19卷1期（1993年8月），271–300。https://doi.org/10.1146/annurev.so.19.080193.001415 Andrea Omicini、Alessandro Ricci 和 Mirko Viroli。2008年。多智能体系统A&A元模型中的人工制品。《自主智能体与多智能体系统》17卷3期（2008年），432–456。https://doi.org/10.1007/s10458-008-9053-x Michael O'Neill 和 Lee Spector。2020年。自动编程：尚未解决的问题？《遗传编程与可进化机器》21卷1-2期（2020年），251–262。https://doi.org/10.1007/s10710-019-09364-2 Marieke M. M. Peeters、Jurriaan van Diggelen、Karel van den Bosch、Adelbert W. Bronkhorst、Mark A. Neerincx、Jan Maarten Schraagen 和 Stephan Raaijmakers。2021年。人类—人工智能社会中的混合集体智能。《人工智能与社会》36卷1期（2021年），217–238。https://doi.org/10.1007/s00146-020-01005-y Patricio E. Petruzzi、Dídac Busquets 和 Jeremy V. Pitt。2015年。用于优化自组织集体行动的通用社会资本框架。载于2015年IEEE第9届自适应与自组织系统国际会议，2015年9月21日至25日，美国马萨诸塞州剑桥。IEEE计算机学会，21–30。https://doi.org/10.1109/SASO.2015.10

Mark Petticrew 和 Helen Roberts。2008年。《社会科学中的系统综述：实用指南》。John Wiley & Sons。Danilo Pianini、Roberto Casadei 和 Mirko Viroli。2022a。自稳定的基于优先级的多领导者选举与网络分区。载于2022年IEEE自主计算与自组织系统国际会议（ACSOS）。IEEE。https://doi.org/10.1109/acsos55765.2022.00026 Danilo Pianini、Roberto Casadei、Mirko Viroli 和 Antonio Natali。2021年。通过自组织协调区域模式实现分区集成与协调。《未来一代计算机系统》114卷（2021年），44–68。https://doi.org/10.1016/j. future.2020.07.032 Danilo Pianini、Federico Pettinari、Roberto Casadei 和 Lukas Esterle。2022b。多机器人系统中去中心化k-覆盖的集体自适应方法。《ACM自主与自适应系统汇刊》17卷（2022年），4:1–4:39。https: //doi.org/10.1145/3547145 Carlo Pinciroli 和 Giovanni Beltrame。2016年。Buzz：一种面向机器人群体的编程语言。《IEEE软件》33卷4期（2016年），97–100。https://doi.org/10.1109/MS.2016.95 Evangelos Pournaras。2020a。集体学习：以人为中心的分布式智能的十年探索。载于IEEE自主计算与自组织系统国际会议（ACSOS 2020），2020年8月17日至21日，美国华盛顿特区。IEEE，205–214。https://doi.org/10.1109/ACSOS49614.2020.00043 Evangelos Pournaras。2020b。见证者在场证明：智能城市中用于增强型民主的区块链共识。《并行与分布式计算期刊》145卷（2020年），160–175。https://doi.org/10.1016/j.jpdc.2020.06.015 Evangelos Pournaras、Peter Pilgerstorfer 和 Thomas Asikis。2018年。面向自主管理共享经济的去中心化集体学习。《ACM自主与自适应系统汇刊》13卷2期（2018年），10:1–10:33。https://doi.org/10.1145/3277668 Judhi Prasetyo、Giulia De Masi 和 Eliseo Ferrante。2019年。动态环境中的集体决策。《群体智能》13卷3-4期（2019年），217–243。https://doi.org/10.1007/s11721-019-00169-8 Harald Psaier 和 Schahram Dustdar。2011年。自愈系统综述：方法与系统。《计算》91卷1期（2011年），43–73。https://doi.org/10.1007/s00607-010-0107-y Wenjie Qiu 和 He Zhu。2022年。无需预言机的程序化强化学习。载于国际学习表征会议。https://openreview.net/forum?id=6Tk2noBdvxt Alexander J. Quinn 和 Benjamin B. Bederson。2011年。人类计算：一个不断发展的领域的综述与分类体系。载于国际计算系统中的人为因素会议论文集（CHI 2011），2011年5月7日至12日，加拿大不列颠哥伦比亚省温哥华，Desney S. Tan、Saleema Amershi、Bo Begole、Wendy A. Kellogg 和 Manas Tungare（编）。ACM，1403–1412。https://doi.org/10.1145/1978942.1979148 Larry B. Rainey 和 Mo Jamshidi（编）。2018年。《涌现工程》。CRC Press。https://doi.org/10.1201/9781138046412 Anguluri Rajasekhar、Nandar Lynn、Swagatam Das 和 Ponnuthurai N. Suganthan。2017年。利用蜜蜂的集体智能进行计算——综述。《群体与进化计算》32卷（2017年），25–48。https://doi.org/10.1016/j.swevo.2016.06.001 Charlie L Reeve、Silvia Bonaccio、T Chamorro-Premuzic、A Furnham 和 S von Stumm。2011年。“智能”的本质与结构。《Wiley-Blackwell个体差异手册》（2011年），187–216。Andreagiovanni Reina、Roman Miletitch、Marco Dorigo 和 Vito Trianni。2015年。集体决策的定量微观—宏观联系：最短路径发现／选择示例。《群体智能》9卷2-3期（2015年），75–102。https://doi.org/10.1007/s11721-015-0105-y Fabian Ritz、Thomy Phan、Robert Müller、Thomas Gabor、Andreas Sedlmeier、Marc Zeller、Jan Wieghardt、Reiner N. Schmid、Horst Sauer、Cornel Klein 和 Claudia Linnhoff-Popien。2021年。规格感知型多智能体强化学习。载于《智能体与人工智能——第13届国际会议，ICAART 2021，线上活动，2021年2月4日至6日，修订精选论文集》（《计算机科学讲义》），Ana Paula Rocha、Luc Steels 和 H. Jaap van den Herik（编），第13251卷。Springer，3–21。https://doi.org/10.1007/978-3-031-10161-8_1 Yara Rizk、Mariette Awad 和 Edward W. Tunstel。2018年。多智能体系统中的决策：综述。《IEEE认知与发展系统汇刊》10卷3期（2018年），514–529。https://doi.org/10.1109/TCDS.2018.2840971 Alejandro Rodríguez、Alexander Grushin 和 James A. Reggia。2007年。利用引导式自组织进行集体问题求解的群体智能系统。《复杂系统进展》10卷增刊01（2007年），5–34。https://doi.org/10.1142/ S0219525907001069 Federico Rossi、Saptarshi Bandyopadhyay、Michael T. Wolf 和 Marco Pavone。2018年。集体行为的多智能体算法综述：结构分类体系。《CoRR》abs/1803.05464（2018年）。arXiv:1803.05464 http://arxiv.org/abs/1803. 05464 Mohammad Rostami、Soheil Kolouri、Kyungnam Kim 和 Eric Eaton。2018年。用于集体知识获取的多智能体分布式终身学习。载于第17届国际自主智能体与多智能体系统会议论文集（AAMAS 2018），2018年7月10日至15日，瑞典斯德哥尔摩，Elisabeth André、Sven Koenig、Mehdi Dastani 和 Gita Sukthankar（编）。国际自主智能体与多智能体系统基金会，美国南卡罗来纳州里奇兰／ACM，712–720。http://dl.acm.org/citation.cfm?id=3237489 Stuart Russell 和 Peter Norvig。2020年。《人工智能：一种现代方法》（第4版）。Pearson。http://aima.cs. berkeley.edu/

Mazeiar Salehie 和 Ladan Tahvildari。2009。自适应软件：概况与研究挑战。ACM Trans. Auton. Adapt. Syst. 4, 2（2009），14:1–14:42。https://doi.org/10.1145/1516533.1516538 Juho Salminen。2012。人类的集体智能：文献综述。CoRR abs/1204.3401（2012）。arXiv:1204.3401 http://arxiv.org/abs/1204.3401 Asli Sari、Ayse Tosun 和 Gülfem Isiklar Alptekin。2019。软件工程中众包的系统性文献综述。J. Syst. Softw. 153（2019），200–219。https://doi.org/10.1016/j.jss.2019.04.027 Ognjen Scekic、Tommaso Schiavinotto、Svetoslav Videnov、Michael Rovatsos、Hong Linh Truong、Daniele Miorandi 和 Schahram Dustdar。2020。混合协作自适应系统的编程模型。IEEE Trans. Emerg. Top. Comput. 8, 1（2020），6–19。https://doi.org/10.1109/TETC.2017.2702578 Gunar Schirner、Deniz Erdogmus、Kaushik R. Chowdhury 和 Taskin Padir。2013。人在环信息物理系统的未来。Computer 46, 1（2013），36–45。https://doi.org/10.1109/MC.2013.31 Thomas Schmickl、Christoph Möslinger 和 Karl Crailsheim。2006。机器人群体中的集体感知。载于《群体机器人学》，第二届国际研讨会，SAB 2006，意大利罗马，2006年9月30日至10月1日，修订精选论文（计算机科学讲义），Erol Sahin、William M. Spears 和 Alan F. T. Winfield（编），第4433卷。Springer，144–157。https://doi.org/10.1007/978-3-540-71541-2_10 Melanie Schranz、Gianni A. Di Caro、Thomas Schmickl、Wilfried Elmenreich、Farshad Arvin、Y. Ahmet Sekercioglu 和 Micha Sende。2021。群体智能与信息物理系统：概念、挑战与未来趋势。Swarm Evol. Comput. 60（2021），100762。https://doi.org/10.1016/j.swevo.2020.100762 David P. Schweikard 和 Hans Bernhard Schmid。2013。集体意向性。载于《斯坦福哲学百科全书》（2021年秋季版），Edward N. Zalta（编）。斯坦福大学形而上学研究实验室。Toby Segaran。2007。集体智能编程：构建智能 Web 2.0 应用。O'Reilly。Iwens Gervásio Sene Júnior、Thalia S. Santana、Renato F. Bulcão-Neto 和 Barry Porter。2022。物联网宏编程的最新进展：更新。J. Internet Serv. Appl. 13, 1（2022），54–65。https://doi.org/10.5753/jisa.2022.2372 Yoav Shoham。1993。面向智能体的编程。Artif. Intell. 60, 1（1993），51–92。https://doi.org/10.1016/0004-3702(93) 90034-9 Nazmul H. Siddique 和 Hojjat Adeli。2015。自然启发计算：概述及未来方向。Cogn. Comput. 7, 6（2015），706–714。https://doi.org/10.1007/s12559-015-9370-8 Anna Sieben、Jette Schumann 和 Armin Seyfried。2017。群体中的集体现象——行人动态研究何以需要社会心理学。PLOS ONE 12, 6（2017年6月），1–19。https://doi.org/10.1371/journal.pone.0177328 Olivier Sigaud。2022。结合进化与深度强化学习进行策略搜索：综述。ACM Transactions on Evolutionary Learning and Optimization（2022年10月）。https://doi.org/10.1145/3569096 Alexander Smirnov 和 Andrew Ponomarev。2019。基于人机集体智能的决策支持：主要挑战。载于《物联网、智能空间与下一代网络和系统》。Springer International Publishing，瑞士查姆，113–124。Eric Alden Smith。2010。交流与集体行动：语言与人类合作的进化。Evolution and human behavior 31, 4（2010），231–245。Armando Solar-Lezama。2009。程序合成的草图方法。载于《编程语言与系统》，第七届亚洲研讨会，APLAS 2009，韩国首尔，2009年12月14日至16日，论文集（计算机科学讲义），Zhenjiang Hu（编），第5904卷。Springer，4–13。https://doi.org/10.1007/978-3-642-10672-9_3 Garry Sotnik。2018。SOSIEL 平台：基于知识、认知与多智能体。Biologically Inspired Cognitive Architectures 26（2018年10月），103–117。https://doi.org/10.1016/j.bica.2018.09.001 Anthony Stein、Sven Tomforde、Jean Botev 和 Peter R Lewis。2021。仿生计算系统。载于《仿生计算系统研讨会论文集》（LIFELIKE）。Jürgen Stradner、Ronald Thenius、Payam Zahadat、Heiko Hamann、Karl Crailsheim 和 Thomas Schmickl。2013。不同耦合集体系统中群体智能的算法要求。Chaos, Solitons & Fractals 50（2013年5月），100–114。https://doi.org/10.1016/j.chaos.2013.01.011 David JT Sumpter。2010。动物集体行为。普林斯顿大学出版社。Shweta Suran、Vishwajeet Pattanaik 和 Dirk Draheim。2020。集体智能框架：系统性文献综述。ACM Comput. Surv. 53, 1，文章14（2020年2月），36页。https://doi.org/10.1145/3368986 James Surowiecki。2005。群体的智慧。Anchor。Tadeusz M Szuba。2001。计算集体智能。John Wiley & Sons, Inc. Ming Tang 和 Huchang Liao。2021。从传统群体决策到大规模群体决策：大数据时代有哪些挑战，如何应对？最新研究综述。Omega 100（2021年4月），102141。https://doi.org/10.1016/j.omega.2019.102141 Akbar Telikani、Amirhessam Tahmassebi、Wolfgang Banzhaf 和 Amir H. Gandomi。2022。进化机器学习：综述。ACM Comput. Surv. 54, 8（2022），161:1–161:35。https://doi.org/10.1145/3467477

Maurice H. ter Beek和 Marjan Sirjani（编）。2022年。《协调模型与语言——第24届 IFIP WG 6.1国际会议 COORDINATION 2022》，作为第17届分布式计算技术国际联合会议DisCoTec2022 的一部分于意大利卢卡举行，2022年6月13日至17日，会议论文集。《计算机科学讲义》，第13271卷。Springer。https://doi.org/10.1007/978-3-031-08143-9 VitoTrianni。2008年。《进化群体机器人学——自主机器人群体中的自组织行为进化》。《计算智能研究》，第108卷。Springer。https://doi.org/10.1007/978-3-540-77612-3 Milena Tsvetkova、Taha Yasseri、Eric T. Meyer、J. Brian Pickering、Vegard Engen、Paul Walland、Marika Lüders、Asbjørn Følstad和George Bravos。2017年。《理解人机网络：跨学科综述》。ACM Comput. Surv. 50，1（2017），12:1–12:35。https://doi.org/10.1145/3039868 KaganTumer和David H Wolpert。2004年。《集体综述》。载于《集体与复杂系统设计》，Kagan Tumer 和 David H Wolpert（编）。Springer Science & Business Media，第1章。Gabriele Valentini、Eliseo Ferrante 和 MarcoDorigo。2017年。《机器人群体中的最佳选择问题：形式化、研究现状与新视角》。Frontiers RoboticsAI 4（2017），9。https://doi.org/10.3389/frobt.2017.00009 Gabriele Valentini、Heiko Hamann和MarcoDorigo。2014年。《自组织集体决策：加权投票者模型》。载于《自主智能体与多智能体系统国际会议》，AAMAS '14，法国巴黎，2014年5月5日至9日，Ana L. C. Bazzan、Michael N. Huhns、Alessio Lomuscio和 Paul Scerri（编）。IFAAMAS/ACM，45–52。http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2615742 Wiebe van der Hoek和Michael J. Wooldridge。2003年。《迈向理性智能体逻辑》。Log. J. IGPL 11，2（2003），135–159。https://doi.org/10.1093/jigpal/11.2.135 Marcel van Gerven。2017年。《自然智能的计算基础》。Frontiers Comput. Neurosci.11（2017），112。https://doi.org/10.3389/fncom.2017.00112Franck Varenne、Pierre Chaigneau、JeanPetitot 和René Doursat。2015年。《在形态发生架构复杂系统中编程涌现》。Acta biotheoretica 63，3（2015），295–308。https://doi.org/10.1007/s10441-015-9262-z Joost Verbraeken、Matthijs Wolting、Jonathan Katzy、Jeroen Kloppenburg、Tim Verbelen 和 Jan S. Rellermeyer。2020年。《分布式机器学习综述》。ACM Comput. Surv. 53，2（2020），30:1–30:33。https://doi.org/10.1145/3377454 Abhinav Verma、Vijayaraghavan Murali、Rishabh Singh、Pushmeet Kohli 和 SwaratChaudhuri。2018年。《程序可解释强化学习》。载于《第35届国际机器学习会议论文集》，ICML2018，斯德哥尔摩国际展览中心，瑞典斯德哥尔摩，2018年7月10日至15日（《机器学习研究论文集》），JenniferG.Dy 和Andreas Krause（编），第80卷。PMLR，5052–5061。http://proceedings.mlr.press/v80/verma18a.html Mirko Viroli、Jacob Beal、Ferruccio Damiani、Giorgio Audrito、Roberto Casadei和Danilo Pianini。2019年。《从分布式协调到场演算和聚合计算》。J.Log. Algebraic Methods Program. 109（2019）。https://doi.org/ 10.1016/j.jlamp.2019.100486Yingxu Wang。2009年。《论抽象智能：迈向自然智能、人工智能、可机器处理智能和计算智能的统一理论》。Int.J.Softw.Sci. Comput. Intell. 1，1（2009），1–17。https://doi.org/10.4018/jssci.2009010101 Richard A. Watson、Sevan G.Ficici和 JordanB. Pollack。2002年。《具身进化：在机器人群体中分布进化算法》。Robotics Auton. Syst.39，1（2002），1–18。https://doi.org/10.1016/S0921-8890(02)00170-7David Wechsler。1946年。《成人智力的测量》（第3版）。Williams& Wilkins Co。https://doi.org/10.1037/11329- 000 Mark Weiser。1991年。《21世纪的计算机》。Scientific american 265，3（1991），94–105。Danny Weyns 和 Fabien Michel。2014年。《多智能体系统的智能体环境——研究路线图》。载于《多智能体系统的智能体环境IV——4 6，2014，42014年第10届国际研讨会，E MAS——多年后，法国巴黎，5月，修订后的精选与特邀论文》（《计算机科学讲义》），DannyWeyns 和 Fabien Michel（编），第9068卷。Springer，3–21。https://doi.org/10.1007/978-3-319-23850-0_1 Danny Weyns、Bradley R. Schmerl、Vincenzo Grassi、Sam Malek、Raffaela Mirandola、Christian Prehofer、Jochen Wuttke、JesperAndersson、HolgerGiese 和 Karl M. Göschka。2010年。《自适应系统中的去中心化控制模式》。载于《自适应系统软件工程 II——国际研讨会，德国达格斯图尔城堡，2010年10月24日至29日，修订后的精选与特邀论文》（《计算机科学讲义》），Rogério de Lemos、Holger Giese、HausiA. Müller 和Mary Shaw（编），第7475卷。Springer，76–107。https://doi.org/10.1007/978-3-642-35813-5_4 TomDe Wolf和 Tom Holvoet。2004年。《涌现与自组织：不同的概念，但结合起来前景广阔》。载于《自组织系统工程、方法论与应用》（《计算机科学讲义》），第3464卷。Springer，1–15。https://doi.org/10.1007/11494676_1 David H.Wolpert。2003年。《集体智能》。Wiley，第17章，245–。https://books.google.it/books?id=IR9__G9tRk8C Zena Wood。2016年。《考察集体：角色、成员与目标》。载于 FOIS。359–372。ZenaWood 和 Antony Galton。2009年。《集体现象分类》。Applied Ontology 4，3-4（2009），267–292。Michael J.Wooldridge。2009年。《多智能体系统导论》，第二版。Wiley。Anita Williams Woolley、IshaniAggarwal和Thomas W Malone。2015年。《集体智能与群体绩效》。Current Directions in Psychological Science 24，6（2015），420–424。https://doi.org/10.1177/0963721415599543

Anita Williams Woolley、Christopher F. Chabris、AlexPentland、NadaHashmi和 Thomas W. Malone。2010年。人类群体绩效中存在集体智能因子的证据。《科学》330，6004（2010年10月），686–688。https://doi.org/10.1126/science.1193147 Tao Yang、Xinlei Yi、Junfeng Wu、Ye Yuan、Di Wu、Ziyang Meng、Yiguang Hong、Hong Wang、ZongliLin和 Karl HenrikJohansson。2019年。分布式优化综述。《控制年度评论》47（2019年），278–305。https://doi.org/10.1016/j. arcontrol.2019.05.006Xin-SheYang 和XingshiHe。2013年。蝙蝠算法：文献综述与应用。《生物启发计算国际期刊》5，3（2013年），141–149。https://doi.org/10.1504/IJBIC.2013.055093YueYang、YangXiao 和Tieshan Li。2021年。自主水下航行器编队综述：性能、编队控制与通信能力。《IEEE通信调查与教程》23，2（2021年），815–841。https: //doi.org/10.1109/COMST.2021.3059998 ChaoYu、Yueting Chai 和Yi Liu。2018年。集体智能文献综述：群体科学视角。《群体科学国际期刊》（2018年）。Zhiwen Yu、Qingyang Li、FanYang和BinGuo。2021年。人机计算。《CCF普适计算与交互汇刊》3，1（2021年），1–12。https://doi.org/10.1007/s42486-020-00051-1 Franco Zambonelli、Andrea Omicini、Bernhard Anzengruber、Gabriella Castelli、Francesco L. De Angelis、Giovanna DiMarzo Serugendo、Simon A. Dobson、Jose LuisFernandez-Marquez、Alois Ferscha、Marco Mamei、Stefano Mariani、Ambra Molesini、Sara Montagna、Jussi Nieminen、Danilo Pianini、Matteo Risoldi、Alberto Rosi、Graeme Stevenson、MirkoViroli 和 Juan Ye。2015。利用仿自然协调开发普适多智能体系统。《普适与移动计算》17（2015），236–252。https://doi.org/10.1016/j.pmcj.2014.12.002 Ouarda Zedadra、Antonio Guerrieri、NicolasJouandeau、Giandomenico Spezzano、HamidSeridi 和GiancarloFortino。2018年。物联网系统中的基于群体智能的算法：综述。《并行与分布式计算杂志》122（2018年），173–187。https://doi.org/10.1016/j.jpdc.2018.08.007 Hengjie Zhang、Yucheng Dong、FranciscoChiclana 和 Shui Yu。2019a。群体决策中的共识效率：全面的比较研究及其最优设计。《欧洲运筹学杂志》275，2（2019年），580–598。https://doi.org/10. 1016/j.ejor.2018.11.052 Kaiqing Zhang、Zhuoran Yang和 TamerBasar。2019b。多智能体强化学习：理论与算法的选择性综述。CoRRabs/1911.10635（2019年）。arXiv:1911.10635 http://arxiv.org/abs/1911.10635 Shuzhu Zhang、Carman K. M. Lee、Hing Kai Chan、King Lun Choy和 Zhang Wu。2015。应用于绿色物流的群体智能：文献综述。《工程应用中的人工智能》37（2015），154–169。https://doi.org/10.1016/j.engappai.2014.09.007Tianyi Zhang、London Lowmanstone、Xinyu Wang和ElenaL.Glassman。2020年。通过增强示例进行交互式程序合成。载于UIST '20：第33届ACM用户界面软件与技术研讨会论文集，线上活动，美国，2020年10月20日至23日，Shamsi T. Iqbal、Karon E. MacLean、Fanny Chevalier和Stefanie Mueller（编）。ACM，627–648。https://doi.org/10.1145/3379337.3415900 Ying Zhen、Abdullah Khan、Shah Nazir、Huiqi Zhao、AbdullahAlharbi 和SulaimanKhan。2021年。众包使用、任务分配方法与众包平台：系统性文献综述。《软件演化与过程杂志》33，8（2021年）。https://doi.org/10.1002/smr.2368 Lianmin Zheng、Jiacheng Yang、Han Cai、Ming Zhou、Weinan Zhang、Jun Wang和 Yong Yu。2018年。MAgent：面向人工集体智能的多智能体强化学习平台。载于《第三十二届AAAI人工智能大会论文集》（AAAI-18）、第30届人工智能创新应用会议（IAAI-18）和第八届AAAI人工智能教育进展研讨会（EAAI-18），美国路易斯安那州新奥尔良，2018年2月2日至7日，Sheila A. McIlraith 和Kilian Q.Weinberger（编）。AAAI出版社，8222–8223。https://doi.org/10.1609/aaai.v32i1.11371