已接受版本，将由 IOS Press 出版

SDPS会刊：《集成设计与过程科学杂志》
XXXX DOI
10.3233/JIDXXXXXXhttp://www.sdpsnet.org

可信人工智能驱动的数字工程转型迈向工业4.0：新兴范式转变

黄敬伟 老道明大学工程管理与系统工程系，美国弗吉尼亚州诺福克市，邮编 23529 j2huang@odu.edu

摘要 数字工程转型是第四次工业革命（第四次工业革命）中工程范式转变的关键过程，而人工智能（人工智能）是数字工程转型的一项关键使能技术。本文探讨以下研究问题：第四次工业革命带来了哪些根本性变化？更具体地说，工程领域发生了哪些根本性变化？什么是数字工程？其中的主要不确定性是什么？什么是可信人工智能？它为何在当今如此重要？第四次工业革命中有哪些新兴工程范式转变？数据密集型范式与数字工程转型之间有何关系？我们应如何推进数字化？通过考察工业革命的演进模式，本文指出，普适机器智能是第四次工业革命带来的决定性力量。数字化是发挥普适机器智能作用的前提。迈向工业4.0的数字工程转型包含三个基本构成：工程数字化、发挥普适机器智能的作用，以及构建数字信任与安全。广大的工程设计界正迎来绝佳机遇，可将普适机器智能和可信人工智能原则以及数字信任融入各种工程系统设计，以确保工业4.0中系统的可信性。

关键词 工业4.0、第四次工业革命、数字化、数字化转型、数字工程、数字工程转型、范式转变、数据科学、数字技术、不确定性、可信性、可信人工智能系统

1. 引言

人工智能（AI）、物联网（IoT）、云计算、高速无线通信和区块链等颠覆性数字技术的融合，推动世界进入新一轮技术革命，即“第四次工业革命”（4IR）（Schwab，2017）。由于数字化在第四次工业革命中发挥着核心作用，它也被称为“数字革命”。2011年，德国率先发起工业4.0倡议，旨在利用信息物理系统（CPS）建设智能工厂，并巩固其在制造领域的领先地位。美国于2014年启动了国家先进制造计划，并宣布制造业为国家优先发展事项。自2010年代以来，中国近期的五年规划积极推动面向第四次工业革命的关键技术。工业4.0（I4.0）常被用作第四次工业革命的同义词；不过，两者的侧重点略有不同。本文用第四次工业革命指代范式和工具的革命性变革，用工业4.0指代目标工业系统（以制造业为核心基础组成部分）。

在第四次工业革命中，简而言之，工业4.0是目标，而第四次工业革命则是朝着这一目标迈进的运动或过程。

第四次工业革命的一个显著特征是数字化。与这一特征相伴，全球人类社会几乎各个方面都正在经历普遍而深刻的数字化转型。数字工程是工程领域的数字化转型，而数字工程转型是第四次工业革命的核心。2018年，美国国防部发布了《数字工程战略》（美国国防部，2018年；Zimmerman、Gilbert 和 Salvatore，2019年）。该战略要求在工程生命周期和组织边界之间，通过可信的“权威事实来源”使用和共享形式化模型与数字数据。这一举措将影响美国国防工业，并扩展至其他行业领域，改变工程的实施方式。数字工程转型关乎第四次工业革命中的工程范式转变，而人工智能是数字工程转型的关键使能技术。

近年来，人工智能取得了显著进展。与此同时，人工智能系统（尤其是机器学习）应用的颠覆性影响及其快速增长，也引发了广泛关注：人工智能系统在可靠性、安全性、安全、隐私保护、公平性（或无偏性）、可解释性、可追溯性、透明度和问责性等方面的表现如何。围绕这些问题的研究一直在“可信人工智能”这一框架下持续开展（AAAI长期人工智能未来总统委员会，2009年；欧盟人工智能高级别专家组，2019年；H. Liu 等，2021年；美国国家科学基金会，2019年；Stone 等，2016年；Wing，2020年）。可信人工智能主要包含两个方面：社会影响（伦理）和技术性能（可信赖性）。人工智能伦理关注人工智能对人类及人类社会的长期影响。其核心原则是将人工智能用于善，或用于造福人类的目的。可信赖性关注人工智能系统在技术事务上的能力。鉴于人工智能在第四次工业革命中的关键作用，近期对可信人工智能的关注也延伸至工业4.0系统。数十年来，人工智能界一直致力于拓展机器智能的边界。工程界将把人工智能技术与伦理原则结合起来，为人类社会构建可信的信息物理社会智能系统。

本文将探讨以下研究问题：

(1) 第四次工业革命带来了哪些根本性变化？(2) 更具体地说，工程领域发生了哪些根本性变化？什么是数字工程？(3) 与第四次工业革命相关的主要不确定性有哪些？什么是可信人工智能？(4) 第四次工业革命中出现了哪些新兴工程范式转变?

本文内容安排如下。第2节通过考察四次工业革命的模式，重点关注正在发生的第四次工业革命，探讨第一个问题。第3节围绕第二个问题，继续讨论第四次工业革命中的数字工程转型。第4节讨论第四次工业革命中的不确定性和可信人工智能。第5节探讨一些尚待解决的问题，并重点关注新兴工程范式转变。最后，第6节总结全文。

2. 第四次工业革命

第四次工业革命带来了哪些根本性变化（包括范式转变及其深远影响）？让我们从技术触发因素、范式转变和深远影响这几个角度，依循逻辑考察历史上工业革命所呈现的模式。如图1所示，第一次工业革命（1IR）和第二次工业革命（2IR）的根本性变化，是为工业生产提供能源（物理力量）。第三次工业革命（3IR）和第四次工业革命（4IR）的根本性变化，则是提供机器智能（脑力），以探索并利用工业和人类社会中的信息力量。第一次工业革命和第三次工业革命都为发明具有革命性的新工具（蒸汽机和计算机）奠定了基础，分别用于提供物理力量和信息力量。第二次工业革命和第四次工业革命则分别扩大了第一次工业革命和第三次工业革命所开启的新力量（能源和信息力量）的供给规模。

第一次工业革命的特点是“机械化”。蒸汽机的发明引发了第一次工业革命。蒸汽机促使工业运营范式从人工作业转向在生产中广泛使用机器。一个典型例子常被称为第一台机械织机。

第一次工业革命的深远影响在于，使用蒸汽动力机器取代人类在生产活动中的双手，大幅提高了生产效率，并使人类摆脱繁重的体力劳动，从而投身于更具创造性的活动。

第二次工业革命的特点是“电气化”。电力的发明与应用，加上装配线的发明，推动了第二次工业革命。电力的使用使能源利用变得容易、灵活，不受空间限制，也便于扩大或缩小规模。没有电力，装配线的构想就无法实现。电力易于获取后，装配线的发明促成了基于技能专业化的大规模生产。这一变化标志着工业运营范式转变：从早期的手工业生产和单件生产，转向生产效率高得多的大规模生产及与之相伴的产品标准化。第二次工业革命的深远影响在于大规模生产，以及灵活、可扩展的能源获取方式。



图1. 工业革命的四次浪潮及其深远影响。每一波浪潮都由颠覆性技术引发，随后带来工业运营范式转变。

第三次工业革命可概括为“信息化”。可编程通用数字计算机的发明与发展触发了第三次工业革命。计算机是人类历史上最强大的信息处理工具。拥有这一关键工具，使人类能够探索并利用信息的力量，同时运用物质和能源。第三次工业革命带来的范式转变可从三个方面来看。首先，随着计算机广泛应用于控制领域，例如采用可编程逻辑控制器、分布式控制系统和监控与数据采集系统，许多由人操作的流程实现了自动化，或转变为计算机辅助流程。其次，信息媒介实现了数字化（或计算机化）。研究显示，2007年，94% 的信息媒介已实现数字化（Hilbert & López，2011年）。信息的数字形式使其能够通过计算机存储和读取。这种机器可读（以及后来机器可处理）的特性，使信息流在很大程度上实现了自动化，并显著加快了速度。在第三次工业革命时期，数字信息的优势使信息成为决定成败的关键因素，其重要性超越了其他因素。这一变化引出了范式转变的第三个方面——业务流程从以物质、能源和产品为中心转向以信息为中心。第三次工业革命的根本影响，在于开启了运用机器智能探索并利用信息力量的进程，由此带来新的能力，并显著提升了工业生产及其他人类活动的效率与效能。

因此，第三次工业革命也被称为“信息革命”，这一时期则被称为“信息时代”。自第三次工业革命开始以来，人工智能、工业机器人、便携式计算机及后来的移动计算机、互联网、无线网络、移动设备等众多数字技术相继发展，深刻改变了人类社会的工作与生活方式。这些数字技术预示着下一波技术革命即将到来。

第四次工业革命可被描述为“数字化”。物联网、高速无线通信、云计算、人工智能与机器学习、区块链等变革性和颠覆性数字技术的融合，催生了第四次工业革命。

从更广泛的角度来看，物联网也称为“万物互联”或“万物互联网”，由四大支柱构成：物联网、信息互联网、人际互联网和服务互联网（Kirkpatrick等人，2013年）。在未来互联网基础设施中，感兴趣的实体——例如各种机器、设备、建筑物、道路及其他结构，甚至自然界中值得关注的事物——抽象实体（数字世界中的事物，例如信息内容）、人员、组织以及各种值得关注的流程（例如服务流程、工程流程，甚至值得关注的社会或自然过程，如气候变化、环境变化、生物状态变化、大流行病监测、疾病感染追踪等），都通过未来互联网彼此互联，并在5G/6G无线通信网络、云计算和人工智能的支持下运行。在本文余下部分中，我们将以更广泛的“未来互联网”或“万物互联网”含义使用物联网一词。

物联网将物理世界与网络世界连接起来，形成一个一体化的信息物理智能环境。借助物联网中的传感器和执行器，物理世界中的智能物体可以通过互联网进行远程定位、监测，甚至控制。通过由5G/6G 无线网络支持的移动设备，人们将能够随时随地访问互联网、物理世界中的智能物体，以及处理这些智能物体所需的云服务。更重要的是，人们本身也成为互联网的节点。这个由物联网、5G/6G、云计算和人工智能与机器学习推动的互联世界，正催生出众多信息物理社会智能系统（CPS3）（Huang、Seck和Gheorghe，2016年），例如自动驾驶车辆、智能工厂、智能商店、智慧城市等。开发这些智能系统的一个必要条件，是将感兴趣的事物数字化，使其能够被唯一识别并为机器所理解；随后，我们便可利用人工智能与机器学习，挖掘数字化互联世界带来的前所未有的丰富信息。

伴随这些颠覆性数字技术的第四次工业革命，正“给经济、商业、社会乃至个人带来前所未有的范式转变”（Schwab，2017年）。第四次工业革命中涌现的范式转变，可从以下几个相互关联的视角来看待。

(1) 从信息数字化转向将所有值得关注的事物数字化，包括人工制品（抽象和实体）、自然事物、组织和流程（例如生产和／或服务流程、受监测的自然过程等）。(2) 从集中式和分布式提供计算服务与机器智能，转向普遍性地提供计算服务与机器智能。(3) 从以信息为中心的流程（在第三次工业革命中发展而来）转向以大数据和机器智能为中心的流程。

关于第一个转变，与信息实现数字化的第三次工业革命不同，在第四次工业革命中，不仅信息（抽象人工制品），还有人们关注的物理人工制品和自然生物，以及人们关注的流程，都可以实现数字化。所有受关注的事物，甚至人类，都可以拥有自己的数字对应物（或称“数字存在”，据 Schwab（2017）的说法）。例如，一些设备或产品将拥有自己的数字孪生，一些人工制品将拥有数字增强（相关元数据，如来源信息）。除了人工制品，一些受关注的流程（无论是生产、服务，还是气候变化或区域生态系统变化等自然过程）也可以实现数字化。这种普遍性的数字化可以借助语义网技术（人工智能的一个分支）（Berners-Lee、Hall、Hendler、Shadbolt 和 Weitzner，2006；Berners-Lee、Hendler 和 Lassila，2001）、射频识别、物联网和区块链来实现。

通过比较第四次工业革命之前计算服务的交付方式，可以看出第二个转变。从许多人共用一台大型计算机，到每个人使用一台计算机，继而使用笔记本电脑，再到每台计算机都能通过墙上的插孔连接互联网，计算服务的交付方式经历了“集中式”“分散式”，再到“分布式”。在第四次工业革命中，我们可以随时随地使用计算机并与世界互动。

大约三十年前，Mark Weiser 和 Nicholas Negroponte 在麻省理工学院媒体实验室展开了一场辩论。Negroponte 预测，人工智能将引领下一波计算浪潮；而 Weiser 则认为，普适计算才是未来，其特点是“不可见”和“连接”（Weiser，1996）。Weiser 在论文《开放之家》（Weiser，1996）中以生动的图示呈现了这一愿景，它也是物联网最初的构想之一。有趣的是，物联网与人工智能共同成为第四次工业革命的主要驱动力。物联网将互联网的“神经”延伸至物理世界，而人工智能则是智能物体的“大脑”，使其能够与数字化的互联世界交互。除了物联网和人工智能，无线网络与云计算也是普遍提供计算和机器智能的关键推动因素。

首先，高速无线通信当然是重要的基础设施，能够促进沟通、计算、感知以及各类数字服务的交付，无需受物理空间限制，或大幅减少此类限制。其次，云计算支持随时随地按需访问共享的计算资源池，从而满足可扩展且弹性的计算需求（Armbrust 等，2009年；美国国家标准与技术研究院，2011年）。无论身处何处，云计算对于处理数字世界产生的大数据，以及满足人工智能应用所需的密集型计算都至关重要。

本文使用“普适机器智能”（uMI）一词，指物联网、5G/6G、人工智能与机器学习以及云计算融合所带来的综合能力。有趣的是，普适机器智能在满足计算和机器智能需求方面所发挥的作用，与电力在第二次工业革命中的作用非常相似：电力使装配线和大规模生产所需的电力输送具备了灵活性。在此，普适机器智能让计算服务和机器智能得以普遍使用，并为各种智能系统提供必不可少的技术。因此，普适机器智能被视为第四次工业革命带来的最根本变革。

第三次转变可以通过以下对比来理解。在工业3.0时代，信息流与物质流仍然彼此分离，因此信息存在严重延迟。而在第四次工业革命中，普遍的数字化和互联性使物质流和人员流与信息流相关联，因此可以利用有关物质流和人员流的实时信息进行决策。决策所关注的事物将拥有前所未有的丰富信息。因此，在第四次工业革命时代，决定成败的关键因素将是运用普适机器智能，在数字化、智能化和互联环境中收集和提取信息、从大数据中发现知识并作出智能决策的能力（Huang，2017年）。

最后，谈及第四次工业革命的深远影响，与第二次工业革命使电力（能源）得以轻松获取并推动大规模生产类似，第四次工业革命使信息力量（计算和机器智能）得以普遍获取，并催生了各种具有创新应用的CPS3。具体而言，在第四次工业革命中，普遍的数字化和普遍互联性使数据（信息的矿藏）以前所未有的规模得以获取，并使计算服务和机器智能（脑力或信息力量）能够随处获取并不断扩展。此外，它们还在催生并支持大量创新应用。这些颠覆性技术及其创新应用正在“从根本上改变我们的生活、工作以及彼此交往的方式”。它们促成了“整个系统的转型，涵盖（并发生于）各个国家、公司、行业以及整个社会”（Schwab，2017年）。

3. 数字工程转型

正如上一节所述，数字化是第四次工业革命的核心主题。因此，人类社会几乎方方面面的普遍数字化转型都在持续进行。鉴于工程在各行业中的关键作用，工程数字化是第四次工业革命的核心。数字工程是数字化的工程，也就是通过面向工业4.0的工程数字化而实现的工程目标数字形态。

美国国防部（国防部）在其《数字工程战略》中将“数字工程”定义为“一种集成式数字方法，以权威系统数据和模型作为贯穿各学科的连续整体，支持从概念阶段到报废阶段的生命周期活动”（美国国防部，2018年；Zimmerman 等人，2019年）。如图2所示，该战略着眼于五个目标：(1) 将模型的开发、集成和使用规范化，从而形成对目标系统连续、端到端的数字表示；(2) 提供持久的权威事实来源，以便在不同组织边界和工程生命周期各阶段之间共享和交换数字模型、数据及其他数字制品；(3) 融入技术创新以改进工程实践；(4) 建立支撑基础设施和环境；(5) 转变文化和劳动力，以采用并支持数字工程。论文（Zimmerman 等人，2019年）全面阐述了美国国防部推进数字工程转型所作的努力。这一战略的实施将显著改变美国国防部企业中的工程实践方式，并进一步推广到更广泛的行业。

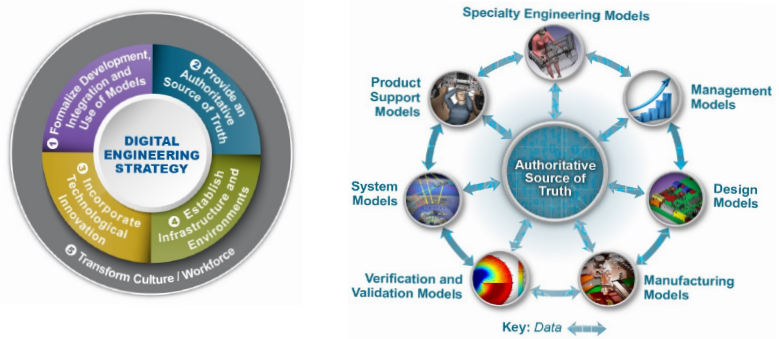


图2. 美国国防部数字工程战略。图片来源：（美国国防部，2018年）（图3和图4）

从工程流程的角度来看，图3展示了从传统工程向数字工程的转型。图中从总体上将工程流程描绘为一个流程模型，其中输入位于左侧、输出位于右侧、使能因素位于底部、控制位于顶部。工程制品、工程流程和工程企业的数字化是数字工程转型的基础。没有数字化的人工制品，新兴数字技术的应用将非常有限，可能只能以临时方式进行，或者需要由人或临时设备充当中介。因此，自动化和自主运行的水平将仅略高于工业3.0。另一方面，有了数字化的工程制品和流程，我们便可以广泛运用机器智能及其他数字技术，在数字化、智能化、互联的环境中开展工程活动；从而实现工程的新水平，使其更加有效、高效且值得信赖。数字工程的一些优势包括：在整个工程生命周期中共享知识和数据；提高工程流程和产品的可解释性与透明度；针对特定任务快速整合分布式工程资源；提高可追溯性和问责性；增强产品在供应链中的可追溯性；以及快速适应变化中的环境，等等。

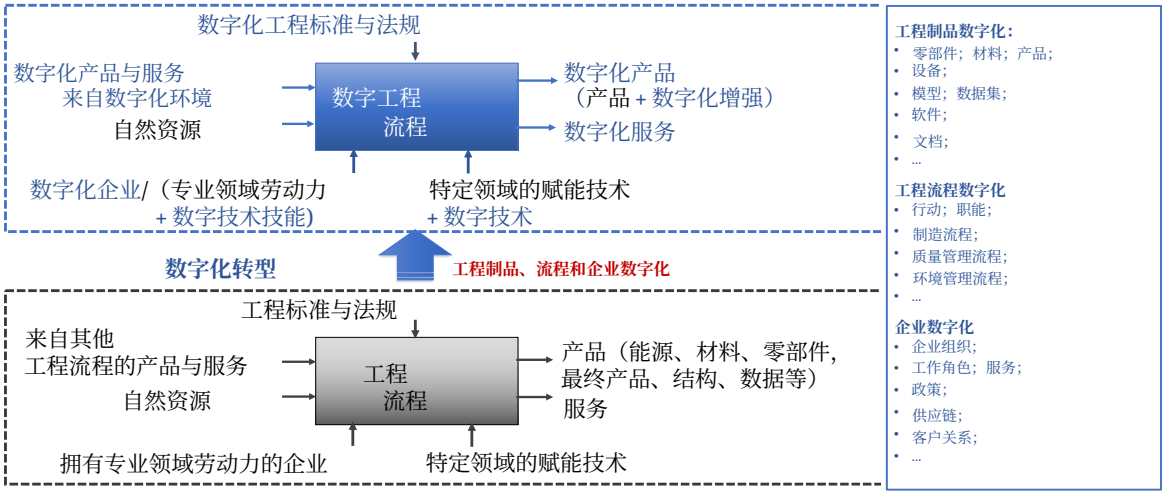


图3. 从流程视角看数字工程转型

	概念 阶段	开发 阶段	生产 阶段	使用/支持 阶段	退役 阶段
模型 创建。	输入: - 数字制品（数字资产） 在运行环境中; - 相关数据和 来自下游 阶段的 模型。	输入: - 来自 上游和 下游的数字制品; - 外部系统的 数字制品	输入: - 来自 上游和 下游的数字制品; - 以及来自生产 环境。	输入: - 来自 上游和 下游的数字制品; - 以及来自运行 环境。	输入: - 数字制品 来自上游; - 以及来自自然 环境。
模型学习	应用人工智能与机器学习，利用来自上游和下游工程阶段及环境的大数据构建模型。				
模型集成	交互 两者的数字模型 SysCon 和运行环境中的系统 运行环境。	交互 用于两者的数字模型 系统组件和 外部系统。	……之间的交互 用于两者的数字模型 系统及 生产环境中的系统 环境。	数字模型之间的交互 适用于系统和 运行环境中的外部系统 运行环境。	……之间的交互 用于……的数字模型 系统组件的数字模型与 自然环境中的数字资产 环境中的数字资 产。
模型整理	创建模型集合；维护模型的元数据；维护模型溯源；将模型更新并传播至下游。				
模型 共享与使用	贯穿生命周期活动；跨越学科与组织的边界				
模型 可信性	集中式标准化；去中心化标准化和映射；分布式演进式细粒度收敛; 模型可信性；模型可重复性；访问控制；数字制品知识产权保护，……				

图4。 模型视角：数字工程生命周期中的运营（Huang 等，2020 ）

如图3所示，数字工程中的输入、输出、使能因素和控制均不同于传统工程；相应地，数字工程运营也将与传统工程运营显著不同。在数字工程转型过程中，随着数字技术快速发展，“计算思维”（Wing，2006，2012）对新的工程范式至关重要。应用计算及相关数字技术方面的知识与技能，已成为面向数字工程的劳动力发展中的必要组成部分。图4从模型的角度简要描述了数字工程生命周期中的运营。有关数字工程的进一步讨论，参见（Huang 等，2020）。

最后，人工智能是推动数字工程发展的关键赋能技术（Huang、Beling、Freeman 和 Zeng，2021）。除了机器学习在工程建模与预测方面的广泛应用外，人工智能的另一分支——知识表示与推理，尤其是语义技术，也是支持数字化的一项基础技术。例如，本体被用于基于模型的系统工程（Madni 和 Sievers，2018）。人工智能在构建和运行数字信任与安全系统的逻辑形式化过程中也发挥着关键作用（Huang，2018）。我们将在第5.3小节进一步讨论。

4. 驾驭第四次工业革命中的不确定性——关键：可信人工智能系统

第四次工业革命中的颠覆性数字技术不仅带来了变革性机遇，也带来了不确定性，并引发了人们对系统可信性的广泛关注和研究。人们关注可信性的重点不断转变和扩展，以涵盖每一代工程系统所采用的新技术中涌现的新问题。本节探讨工业4.0系统的可信性问题，先考察工程系统可信性的发展演变，再重点讨论可信人工智能系统——工业4.0系统的关键组成部分。

在讨论这些主题之前，让我们先探讨信任的基本概念。在日常生活和工作中，我们会有意或无意地使用信任，甚至可能没有意识到自己正在使用它。然而，信任究竟是什么？关于信任有许多定义（Walterbusch, Gräuler, & Teuteberg, 2014）。本文采用的信任工作定义如下（Huang & Fox, 2006）——信任是一种心理状态，包括：（*1*）预期：信任者预期受信者会有特定行为，例如提供真实信息或有效开展合作行动；（*2*）信念：信任者基于受信者的能力、善意和完整性的证据，相信预期行为会发生；（*3*）承担风险的意愿：信任者愿意基于这一信念承担风险（或使自己处于易受伤害的境地）。简而言之，

信任 = 期望 + 对该期望的信念 + 愿意为该信念承担风险。

信任可以被视为“信任者”（信任的一方）与“受信者”（被信任的一方）之间的一种关系，涉及受信者所提供、提出或实施的某事物的属性。例如，乘客（信任者）信任自动驾驶汽车（受信者），相信其在街道上行驶时的安全性。信任者无法控制被信任的对象。关于信任的研究表明，促成信任的因素包括受信者的能力、对信任者的善意（有些研究者称之为善意），以及完整性（体现在指导行为的原则和价值观中）（Mayer, Davis, & Schoorman, 1995）。能力和善意在信任概念中的作用显而易见。完整性对于信任判断而言十分重要，因为它关乎受信者在信任者无法观察的情况下是否会表现出可预见的行为。

根据 Simon（Simon，1997年）的观点，现实世界中的决策流程受到“有限理性”的限制，即“考虑到决策者认知局限性的理性选择——包括知识和计算能力方面的局限”。在现实世界中，由于我们掌握的信息/知识有限，计算能力有限，可用于决策的时间也有限，因此，决策必须部分基于有限理性计算，部分基于信任。正如 Luhmann（Luhmann，1979年）所指出的，信任作为“社会生活的基本事实”，发挥着“降低复杂性”的作用。没有信任，社会互动（包括工程和商业领域中的技术应用）将变得极其困难。正因为有了信任，我们在进行决策或采取行动之前，无需核实一切。信任机制（Huang & Nicol，2013年）在驾驭颠覆性数字技术、推动其可信应用方面发挥着关键作用。

4.1. 系统可信性

在（Schneider, 1999）中，系统可信性的定义是：“保证系统值得信任——即使遭遇环境扰动、人为和操作员失误、恶意攻击以及设计和实现错误，系统仍会按预期运行。”简而言之（Avizienis, Laprie, Randell, & Landwehr, 2004），系统可信性就是“保证系统将按预期运行”。可信性是一个相对概念，取决于人们的预期。可信性通常被描述为一组系统值得信任所应具备的预期属性，如图5所示。这种“保证”可以通过在工程系统和社会系统中实施的各种信任机制来实现，例如审计、认证、法规和执法。

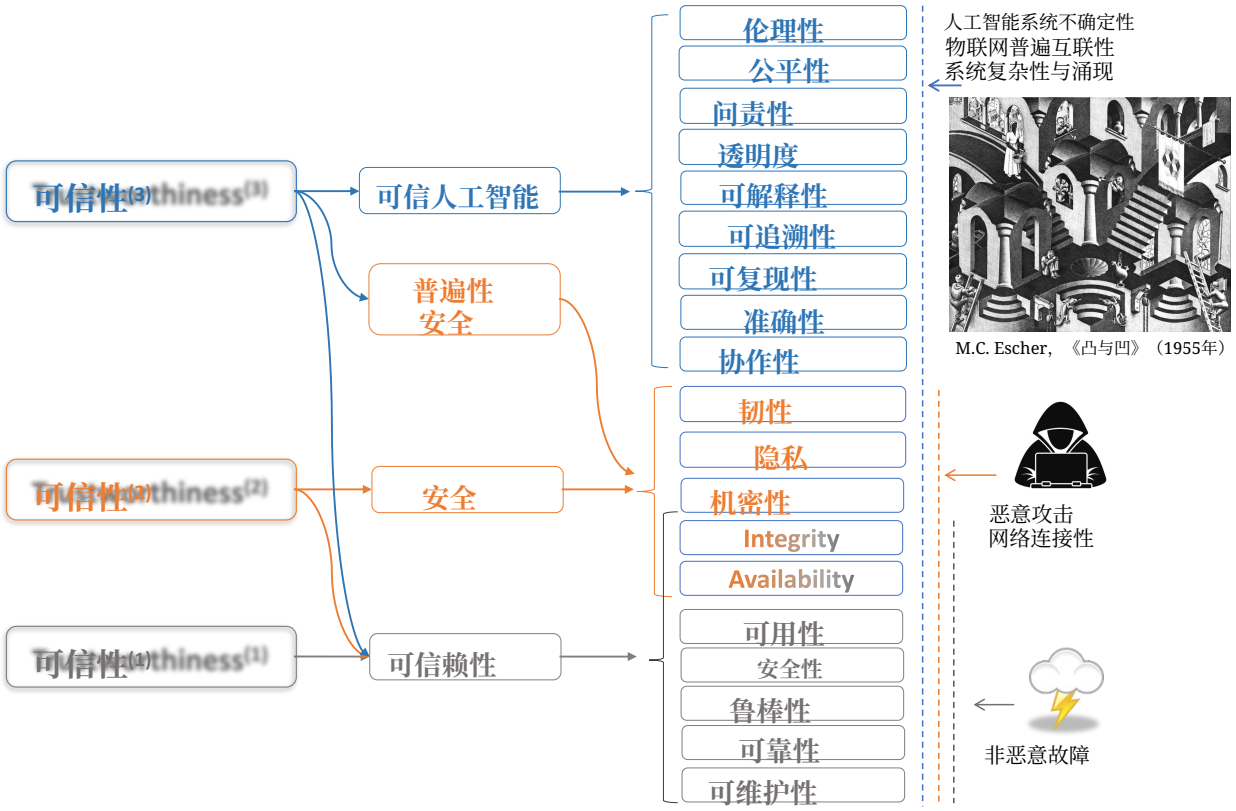


图5. 随着系统与技术的发展而演变的可信性属性及其关注源

下面我们将讨论不同代际工程系统的可信性预期属性，以及引发对可信性担忧或构成可信性威胁的来源。传统系统通常是独立系统（物理系统、计算机系统，或嵌入计算机系统的系统），或者仅在组织内部进行逻辑连接，而不连接互联网。如图5下半部分所示，与这些传统系统相关的可信性属性主要包括可靠性、可维护性、可用性、完整性、鲁棒性、安全性和可用性。这些属性合称为可信赖性。引发担忧或威胁可信性属性的来源，主要是非恶意故障，包括：（1）系统设计与开发中引入的错误；（2）制造与维护中引入的错误；（3）系统运行中发生的错误；（4）环境扰动，包括自然灾害、环境污染，以及与气候变化相关的渐进但不可逆的环境变化。

在图5的中间部分，在互联网和无线移动通信的推动下，联网工业系统演变为信息物理系统（CPS）（Lee，2008年；美国国家科学基金会，2008年；Rajkumar、Lee、Sha 和 Stankovic，2010年）。这类系统利用联网计算组件来监测、协调、控制并整合物理系统与流程。系统的互联性自然带来了安全和隐私方面的重大挑战，因此安全和隐私相应成为系统可信性的核心主题（Avizienis 等人，2004年；Schneider，1999年）。安全和隐私面临的威胁显然来自各种恶意攻击以及不称职的安全防御。

如图5上半部分所示，第四次工业革命系统的可信性涉及可信人工智能、普遍安全和技术可信赖性等问题。人工智能系统中的问题可能引发安全问题和系统可信赖性问题；当然，安全问题也可能引发系统可信赖性问题。导致系统可信性问题的根源主要有三个方面：

（1）物联网所促成的普遍互联性引发的普遍安全问题：物联网促成的普遍互联性，使安全和隐私方面的担忧广泛延伸至人类工作和生活的世界各个角落。若缺乏有保障的技术和社会机制，物联网可能会变成“风险之物联网”（S. Smith，2017），甚至是“危险之物联网”。第四次工业革命中的安全与隐私威胁包括一如既往的恶意攻击和不力的安全防御，但攻击／暴露面要大得多。此外，威胁还包括某些相关的社会机制。例如，正如Smith所指出的（S. Smith，2017），某些智能设备的使用寿命会超过其制造商和供应商，那么谁来持续更新这些系统或其嵌入式计算组件？如果没有更新，数字系统在复杂的数字运行环境中就会很容易受到攻击。（2）人工智能系统带来的不确定性：人工智能系统以及嵌入各类系统中的人工智能组件快速发展并得到广泛应用，由此引发了两方面的担忧：技术能力（如可靠性和安全）以及伦理关切（如透明度、对特定群体的偏见、人机关系等）。下一小节将讨论这一方面。（3）系统复杂性与涌现——上述两个主要因素共同给第四次工业革命中的系统带来了高度的不确定性和复杂性。复杂系统通常会表现出显著的涌现现象（设计和开发阶段未曾预料到的意外涌现式系统行为和属性，例如2003年美加东北大停电）（Adcock、Jackson、Fairley、Singer和Hybertson，2021）。

4.2. 可信人工智能

过去十年，人工智能取得了显著进展。举几个例子：阿尔法围棋（Silver 等，2016年，2018年）利用基于深度神经网络的强化学习，战胜了世界排名第一的围棋选手；围棋被认为是计算机最难取胜的棋类游戏。阿尔法围棋的成就标志着机器智能在特定任务上迈向超人类智能的新里程碑。尽管 Waymo One 仍处于试点阶段，尚未得到更广泛的应用，但这项商业出租车服务已在一座城市的街道上提供服务，使用的是符合 4 级自动驾驶标准的车辆（Waymo One，2020年）。这项服务标志着人工智能系统在一类复杂任务上的综合智能能力达到新水平，而这类任务此前只有人类能够完成。另一项显著进展是生成对抗网络（GANs）（Creswell 等，2018年；Goodfellow 等，2014年，2020年）。生成对抗网络由一对深度神经网络组成，即生成器和判别器；二者协同工作，可以按要求生成逼真的图像及其他内容（示例见 https://thispersondoesnotexist.com/）。生成对抗网络带来了许多潜在应用，但也为深度伪造打开了大门。

数十年来，人工智能界一直致力于拓展机器智能的能力。尽管如今人工智能的发展仍然局限于特定领域（即狭义人工智能），而非通用人工智能，但人工智能系统取得的卓越成就、带来的颠覆性影响以及应用的快速增长，引发了人们对可信人工智能系统的关注和相关研究。这些关注主要来自两个方面：（1）伦理人工智能，关注社会影响，主要是伦理层面的考量；从本质上说，是关注人工智能系统对人类、人类群体和人类社会产生的深远影响，并倡导将利用人工智能造福人类作为核心原则。（2）可靠人工智能，关注技术性能或可信赖性，涉及人工智能系统在技术事务上的能力。人工智能系统的可信性包含广泛的预期属性。

伦理人工智能是一个新兴的跨学科研究领域，汇集了来自众多领域的研究人员，包括计算机科学、哲学、社会学、人类学、公共政策、法律等。一些思想领袖和研究人员在这一领域开展了开创性工作。人工智能促进协会（AAAI）组织了一场由人工智能领域领军研究人员参加的专题讨论会，并于2008年开展了“阿西洛马会议长期人工智能未来研究”。该研究探讨了人工智能社会影响及其研究指导方面的广泛议题（AAAI长期人工智能未来总统委员会，2009年）。研究评估了人们对超人类智能可能带来颠覆性后果的担忧与看法，探讨了与自主系统相关的伦理和法律问题，并指出了近期人工智能研究

面临的挑战和机遇，包括加强对人们隐私的保护、促进人机协作与互动、让机器学习和推理过程对人们更加透明，以及防止将人工智能用于恶意目的。为继续推动人工智能研究造福人类，AI100 2016年报告（Stone等，2016年）指出，人工智能研究“正从单纯构建智能系统，转向构建能够理解人类且值得信赖的智能系统”。该报告汇集了专家小组对人工智能在典型北美城市2030年生活中八个选定应用领域的机遇与挑战所作的观点和展望，并提出了政策建议。他们指出了如何构建安全可靠的系统、如何在安全性、安保和隐私方面赢得公众信任、如何使人工智能系统遵守伦理并克服偏见，以及如何让人工智能系统与人类顺畅互动等挑战。从长远来看，伦理人工智能关乎人工智能系统与人类之间的根本关系。人们担忧“技术奇点”或“智能爆炸”，这在一定程度上反映于虚构作品所描绘的反乌托邦景象。人工智能领域的专家认为，这些激进的后果仍属虚构，并非迫在眉睫的威胁；不过，一些思想领袖建议“不要对未来人工智能能力的上限作出过于强烈的假设”（生命未来研究所，2017年）。鉴于人工智能对人类社会影响深远，有必要审视人工智能系统的目的、用途和影响，并制定指导人工智能研究与开发的原则和法规，以避免伤害人类及人类社会。阿西洛马会议的23项原则（生命未来研究所，2017年）和欧盟人工智能高级别专家组伦理人工智能指南（欧盟人工智能高级别专家组，2019年）体现了对人工智能系统伦理问题的广泛关注。欧盟人工智能高级别专家组将可信人工智能定义为由三个部分组成：合法人工智能、伦理人工智能和稳健人工智能。该指南提出了四项伦理原则：（1）尊重人类自主性；（2）防止伤害；（3）公平性；（4）可说明性，涵盖透明度、可审计性、可追溯性和可解释性。基于这四项原则，指南进一步提出了七项要求：（1）人类能动性与监督；（2）技术稳健性与安全，包括安全性、准确性、可靠性和可复现性；（3）隐私与数据治理；（4）透明度，包括可追溯性、可解释性和沟通；（5）多样性、非歧视与公平性；（6）社会与环境福祉；（7）问责性。欧盟指南还讨论了落实这些要求的技术和非技术方法，并提出了一系列用于评估人工智能系统可信性的相关问题。

人工智能伦理研究的是关于人工智能目的和用途的对错，这基于人工智能系统对人类和人类社会产生的深远影响。伦理人工智能的核心原则是利用人工智能造福人类和人类社会。在图5的上半部分，伦理性指人工智能系统遵循这一原则的程度。

正如AI100 2021报告（Littman等人，2021年）所指出的：“人工智能系统和人类具有互补优势；”因此，“二者结合起来能够完成超越任何一方单独行动的任务。”从技术层面来看，如何有效地将人类与人工智能系统协作起来，仍然是一项挑战。对于可信人工智能的基本伦理原则（欧盟人工智能高级别专家组，2019年）而言，毫无疑问，人类与人工智能协作是正确的发展方向，这不仅是为了最大化能力和性能，也是出于伦理方面的考虑。协作性指人工智能系统为人机协作解决复杂问题提供便利和支持的程度，包括增强人类与机器之间互动和协作的渠道或方法。协作性涵盖可控性；后者指人工智能系统允许人类对该系统进行监控和控制的能力。

公平性是指人工智能系统能否公平对待不同群体的人，包括不同种族、性别、年龄、文化背景等群体。近年来，随着人工智能系统开始应用于招聘决策、金融信用评估和司法决策等可能改变人生的场景，公平性受到了广泛关注（Mehrabi 等，2021年）。由于涉及复杂的人类社会因素，公平性是一个极具挑战性的话题。从技术角度看，公平性可以视为无偏。生成对抗网络所体现的近期深度学习进展，可用于生成逼真的样本，为机器学习提供平衡数据。

问责性是指相关人工智能系统中执行某项操作的实体身份的可用性和完整性。简单来说，就是谁（人工智能系统中的人类操作人员或自主组件）在何时做了什么，以及由此承担的责任。在发生安全事件、事故、错误或系统故障时，问责性有助于确定原因、明确责任并避免今后重蹈覆辙。

透明度指的是人工智能系统的运行方式对各类利益相关者（如操作人员、业务合作伙伴、审计人员和用户）有多透明。透明度是确保伦理性、公平性和隐私，并促进可控性与协作性的基础。

可解释性是指向人类解释人工智能系统的结果和流程的能力。主要挑战在于，机器学习中的神经网络采用低层级编码来表示特征，而这种表示本质上难以用高层知识加以解释。深度神经网络的参数数量庞大、结构复杂，使可解释性问题更加棘手。

可追溯性是指收集并记录所用和生成的数据、所用和训练的模型，以及人工智能系统运行过程的来源信息的能力。可追溯性是透明度的基础，并为可解释性提供支持。

可复现性是指能否使用相同的人工智能算法和数据重建某个模型实例，以及能否复现使用人工智能模型运行的实验，或更广义地说，能否复现相关流程。可复现性对科学和工程至关重要。

在第四次工业革命中，随着越来越多的人工智能系统被应用于大型工程系统或嵌入其中，可靠人工智能反映了人们对系统技术性能的关注。自然，这种关注使人们的注意力部分回归到工程系统较为经典的可信性属性，但重点在于人工智能系统或人工智能组件及其对更大系统的影响。本文使用“可信赖性”一词，涵盖技术性能方面所有预期的（可信性）属性。此处的可信赖性概念比（Avizienis 等人，2004）中所定义的范围更广。可靠性是指系统在给定时间段内无故障运行的概率。可维护性是指维护系统健康、可更新和可升级的难易程度。韧性是指系统在自然灾害事件或网络攻击等情况下遭受损坏后恢复到可运行状态的能力。安全性是指系统对人类而言有多安全。在工程系统中广泛使用人工智能组件，使安全性成为一项重要关切。准确性用于衡量模型或系统产生的错误；在机器学习中，对于模型训练所用数据之外的新数据，取得高准确性至关重要。在系统工程中，鲁棒性被定义为“系统或组件在存在无效输入或严苛环境条件时正确运行的程度”（ISO/IEC/IEEE，2010）。在机器学习中，鲁棒性 是指输入受到扰动时结果仍保持稳定，可通过敏感度进行衡量。在深度学习中，缺乏鲁棒性是生成对抗网络可能产生深度伪造的一个关键原因。鲁棒性的一般含义与韧性相似。鲁棒性所应对的扰动规模较小。可用性是指系统易于使用的程度，且其含义不限于人机交互。可用性不佳可能导致现代系统的许多其他属性出现故障，包括安全和安全性。

安全被定义为众所周知的 CIA 三元组：机密性（防止未经授权访问受保护资源或披露受保护信息）、完整性（不存在未经授权的更改）和可用性（为授权用户提供正确服务的就绪状态）。在 CIA 三元组之上，还可以定义其他一些有意义的安全属性。例如，真实性是信息内容及其来源信息（起源）的完整性。显然，在数字化互联环境中，安全故障会产生广泛影响，并可能损害其他可信性属性。隐私是人工智能领域的另一大关注点。由于数据是人工智能系统的燃料，因此人们关注数据收集、持有、处理、使用、共享和治理是否尊重个人隐私。

如图5所示，当人工智能系统演变为工业4.0系统时，人工智能系统的可信性成为一组新的关注点。有趣的是，另一方面，第四次工业革命中的工程制品、流程和企业的数字化，可能有助于实现人工智能系统所期望的可信性属性。

在数字工程转型过程中，这是一个绝佳的机会，让广大工程设计界在各类面向人类社会的工程系统设计中，将人工智能的新能力与可信人工智能原则结合起来，从而发挥人工智能的力量，同时避免或尽量减少其潜在的负面影响。

5. 尚待解决的问题与讨论

在前几节中，我们讨论了第四次工业革命的特征及其根本影响、数字工程转型——第四次工业革命在工程领域的体现，以及可信人工智能——工业4.0数字化转型中的引领性技术。本节将继续讨论第四次工业革命方向上的一些开放性问题。

5.1. 范式转变的模式是什么?

如第 2 节所述，第四次工业革命中的数字化正在推动我们社会几乎各个方面发生范式转变。新兴的工程范式是什么？工程运用科学原理来设计、建造和运行工程系统，以解决现实世界的问题或满足特定领域人类的需求，因此本质上与科学研究共享相同的范式。科学范式转变的一般模式可通过下图 6 加以说明。

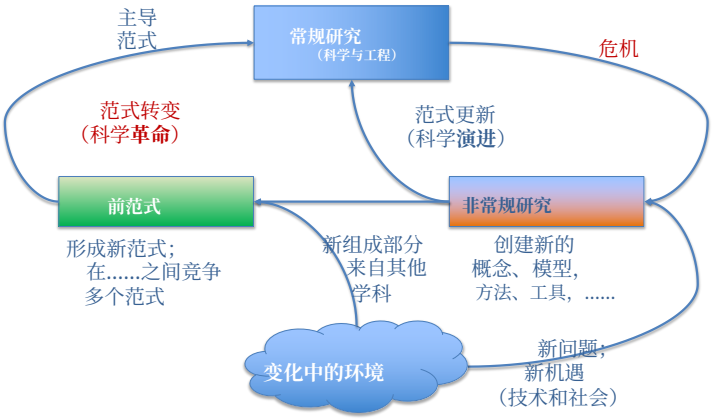


图 6. 基于库恩《科学革命的结构》（Kuhn，1962）对范式转变的阐释。

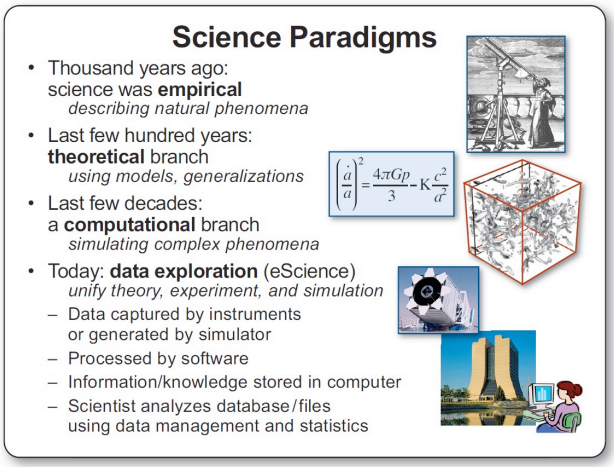
根据库恩《科学革命的结构》（Kuhn，1962），在“常规研究”或“常规科学”时期，科学共同体运用主导范式开展研究，并产出该领域的主要知识体系。随后，面对变化中的环境带来的新观察和/或新问题，主导范式可能因自身的缺陷或局限而陷入危机。为了应对危机并满足新的需求，该学科进入“非常规研究”时期（库恩对这一时期的命名）。在此期间，将创造出新的概念、模型、工具、方法等。如果新的学科组成部分是渐进式的，且能够融入当前范式，那么范式就会得到更新，从而实现科学演化。否则，在“非常规研究”中形成的新组成部分，可能连同其他学科的组成部分一起，推动新范式在“前范式”时期（同样是 Kohn 的命名）发展起来。在“前范式”时期，将形成一个或多个范式，并展开竞争。最终，最受认可的范式将成为该学科新的主导范式。这种“范式转变”（Kohn）就是一场科学革命。转型之后，该学科再次进入“常规研究”时期，并开启新的生命周期。

上述讨论的模式体现在科学研究的语境中。它似乎具有普遍性，因为我们将科学范式视为一种在环境中演化的知识系统。

5.2. 什么是科学研究的第四范式?

Jim Gray 曾提出这样一种愿景：科学研究继经验范式、理论范式和计算范式之后，正转向第四范式（数据密集型范式）（Gray，2007年；Hey、Tansley 和 Tolle，2009年），如图 7 所示。经验范式的特点是根据对现实世界现象的观察发现并描述模式，而理论范式的特点是构建

基于数学模型的理论。计算范式则借助计算机模拟，解决理论模型过于复杂、难以推导和证明命题的问题。



Fig图7. 科学研究的四种范式，摘自（Gray，2007年；Hey 等，2009年）)

第四范式反映了在新的研究环境下开展的科学研究：仪器和仿真产生了大数据，人们对利用计算从大数据中发现知识提出了更高要求，同时数据发布和研究工作的可复现性需求也日益显现。在第四范式下，科学研究重点关注从大数据中发现知识、构建可复现模型以及共享数据集。

必须指出，新范式并不意味着彻底取代现有范式。相反，新范式是在现有范式的基础上建立起来的。新范式体现了研究重点的转移，以及在新环境中解决新问题的新方法。理论模型建立在观察的基础上，计算仿真则以理论模型为基础。第四范式在前所未有的大数据环境和利用大数据发现知识的新技术基础上，强化并统一了经验范式、理论范式和计算范式。

受 Jim Gray 第四范式的启发，随着过去十年大数据的快速增长，数据科学已成为一门新兴学科。美国国家标准与技术研究院的一份出版物（NIST大数据公共工作组，2019年）指出：“数据科学是科学的第四范式。”然而，数据科学一直高度聚焦于从数据中发现知识。从图书馆与信息科学的角度来看，数据策展和知识策展是数据科学的研究主题之一。不过，第四范式催生的需求远不止传统的策展，还进一步涉及知识与数据共享，并要求具备可追溯性、可解释性、问责性、可复现性和互操作性。

随着第四范式的到来，各个科学/工程学科中将涌现出数据密集型科学/工程。（数据密集型工程是数据科学在工程领域的体现。）在这一范式转变中，数据科学是共同的核心，为许多特定领域的科学/工程学科所共有；这些学科需要从大数据中发现知识并共享知识。将数据科学（第四范式）与各个特定学科相结合，将形成许多特定领域的数据密集型科学/工程学科。

5.3. 新兴的工程范式是什么?

“科学是对现象的系统描述”（Richards，1928年）。科学致力于发现自然规律的本质。工程是“将科学应用于自然资源的最优转化，以满足人类的需求”（R. J. Smith，2022年）。一方面，科学与工程存在交集，因为工程包含科学研究，旨在发现可应用于工程目的的

知识。从这一视角来看，数据密集型工程是在第四次工业革命的数字化、互联运行环境中，科学的数据密集型范式的体现。

另一方面，工程活动不仅仅是发现新知识，更着重于为人类社会设计、制造（或建造）、运行和支持有用的系统，因此与运行环境中的其他系统（包括人类利益相关者）存在更加复杂的互动和关系。鉴于工程的复杂性、颠覆性数字技术，以及第四次工业革命中与之相关的数字化、互联和智能环境，我们应如何开展工程？第四次工业革命中有哪些新的工程范式？

毫无疑问，科学研究的数据密集型范式至关重要。它涵盖从数据中发现知识以及知识共享（包括数据共享）这两个方面。当前以“数据科学”为核心的主题更侧重于从数据中发现知识。而美国国防部愿景中的“数字工程”，则更多着眼于基于模型的工程，以及模型和数据的共享。有趣的是，基于模型的工程是一项类似于科学中发展理论和计算范式的工作，旨在将模型引入工程工作流，包括需求引出、需求表示、系统概念建模、系统设计等传统上非正式的活动。当然，建模应尽可能以科学知识为基础。此外，工程环境中数据的可用性和丰富性，以及机器学习的快速发展，使得利用数据构建模型成为一种强有力的方法，进而推动数据密集型工程的发展。

然而，鉴于工程、人类社会与运行环境之间复杂的交互和关系，仅依靠数据密集型范式（侧重科学发现）不足以应对工程的复杂性。第四次工业革命中的工程范式转变，是由工程环境、颠覆性数字技术、与之相关且更高的社会经济需求，以及新的挑战性问题所推动的，例如人工智能系统的信任问题（如第4节所述）。在第四次工业革命的背景下，数字工程转型需要新的概念、模型、工具、方法、理论、方法论、技术和标准。

如第2节所述，第四次工业革命包含三个方面的范式转变：将所有关注对象数字化、提供普适机器智能，以及大数据和以机器智能为中心的业务流程。另一方面，数字化和普适机器智能也引发了广泛的担忧，以及对可信性可能存在的问题的关注，如第4节所述。将以上讨论的内容结合起来，我们可以较为清晰地把握工业4.0的发展方向，如图8所示。为实现工程和产业的数字化转型，我们需要三个相互依存的关键构成部分：(1) 工程数字化；(2) 运用普适机器智能；(3) 构建数字信任与安全。

数字化是实现普适机器智能的基础，并且需要支持数字信任。基于这一考虑，要将感兴趣的事物（可以是对象或流程）进行数字化，我们需要以下四个基本组成部分：

（1）以标准形式对感兴趣的事物进行数字表示，并具有定义明确的语义，使不同平台上的不同类型机器都能普遍访问。（2）感兴趣事物的唯一标识符，这是实现可追溯性、可验证性、问责性和可解释性的必要组成部分。（3）相关元数据（例如来源信息），以标准形式呈现并具有定义明确的语义，从而能够利用数字技术自动操纵和操作该事物。（4）将唯一标识符、数字表示和元数据与感兴趣的事物建立可验证的关联。该关联确保数字制品的真实性和完整性。

工程数字化基本上需要：（i）将工程制品、工程流程和企业数字化；（ii）在整个工程生命周期中实现数字化制品的共享与互操作性；（iii）发展数字化基于模型的工程。虚拟化是从使用数字化制品和流程的角度来看待问题的一种视角。

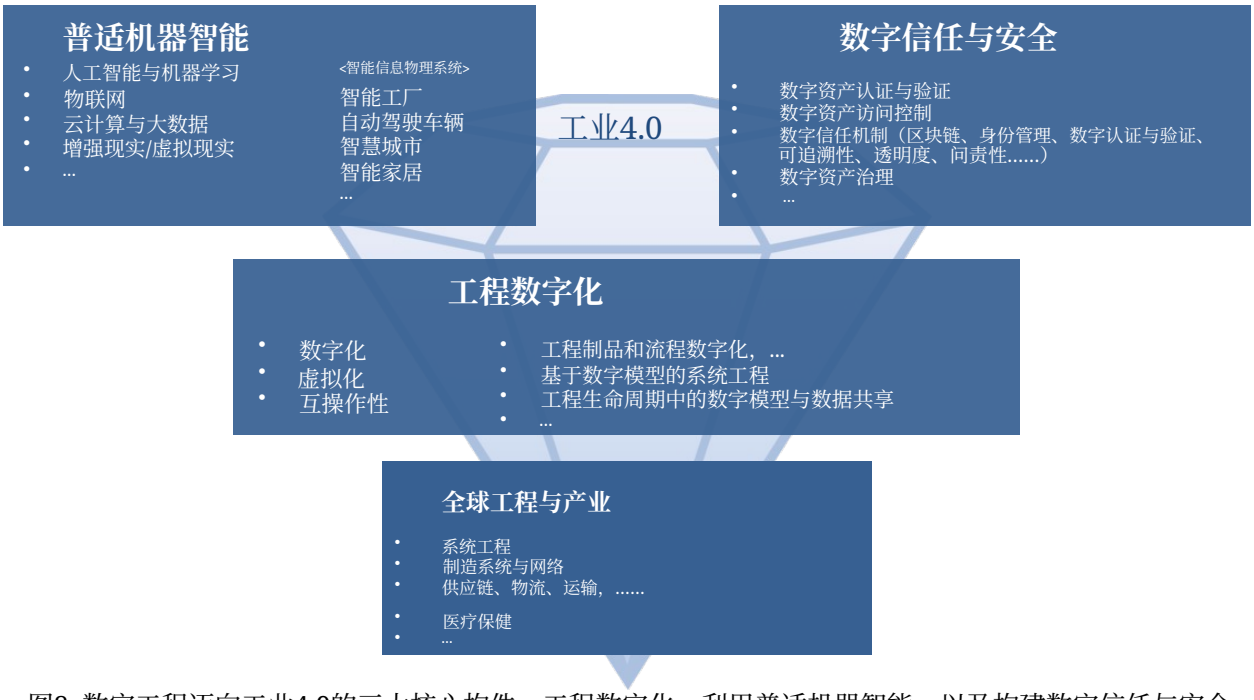


图8. 数字工程迈向工业4.0的三大核心构件：工程数字化、利用普适机器智能，以及构建数字信任与安全。

数字化需要在设计中建立数字信任，并由数字技术中的普适机器智能提供支持。自然，在这一方向上，有哪些技术能够赋能工程制品、流程和企业的数字化建模？语义网技术（人工智能的一个分支）（Berners-Lee 等，2006、2001）、射频识别、物联网和区块链至关重要。此外，与此直接相关的企业建模和企业集成研究自20世纪90年代以来一直在深入开展，可用于支持跨边界的模型共享（Chen、Doumeingts 和 Vernadat，2008；Fox 和 Gruninger，1998；Fox 和 Huang，2005；Goranson，2002；Vernadat，2020）。企业建模与数字身份管理相结合，可以为工程制品的数字化奠定基础。本体在工程数字化中发挥着重要作用，涉及工程制品、实体、组织以及各种工程活动和流程等方面（Ahmed、Kim 和 Wallace，2006；Demoly、Kim 和 Horváth，2019；Dimassi 等，2021；Fox、Barbuceanu、Gruninger 和 Lin，1998；Gruninger 和 Fox，1995；H. M. Kim、Fox 和 Grüninger，1999；K.-Y. Kim、Manley 和 Yang，2006；Sirin、Coatanéa、Yannou 和 Landel，2013）。

普适机器智能的实现是第四次工业革命范式转变的第二个方面，也是数字化的基础。借助数字化的工程制品和流程，我们可以在工程领域应用普适机器智能，以设计、制造和支持智能产品，提供智能服务，构建可信供应链，并以智能化方式开展工程工作。以下是一些例子。机器学习已广泛应用于增材制造（Z. Jin、Zhang、Demir 和 Gu，2020年；Meng 等，2020年；Wang、Tan、Tor 和 Lim，2020年）。在数字化、智能化和互联环境中，前所未有的大数据为在工程运营中应用人工智能提供了丰富信息。基于状态的维护或预测性维护是应用人工智能与机器学习的典型场景（Black、Richmond 和 Kolios，2021年；Carvalho 等，2019年）。工程涉及许多序贯决策；借助有关工程系统状态的丰富信息，可以利用强化学习从仿真、实验、日常运营以及一般经验中学习，以实现优化，例如网格生成（Pan、Huang、Cheng 和 Zeng，2022年）、制造（Su、Huang、Adams、Chang 和 Beling，2022年）以及工程设计（Dworschak、Dietze、Wittmann、Schleich 和 Wartzack，2022年）中的优化。机器

学习也可应用于传统上劳动密集且耗时的需求引出流程（Cheligeer 等，2022年；Mokammel 等，2018年）。从本质上说，工程系统设计始于环境（Zeng，2004年、2015年、2020年）。在第四次工业革命的新工程环境中，许多工程系统成为信息物理社会智能系统，如何设计这类系统是一个颇具挑战的问题（Horváth，2022年；Tavčar 和 Horvath，2018年）。

数字化不仅为我们带来优势，也带来了新的问题，其中最突出的是数字制品及相关数字技术中的信任与安全问题。这些问题包括：如何确保数字制品的真实性和完整性；关于谁能在何时、何地访问哪些内容，有哪些政策；以及如何确保可追溯性、透明度、问责性和可复现性等。我们必须开发适当的数字机制来应对这些问题。我们如何才能在数字工程中实现安全的信息共享？例如，融合基于角色的访问控制和基于属性的访问控制（包括基于安全分类的强制访问控制）的安全策略（Huang, Nicol, Bobba, & Huh, 2012； X. Jin, Sandhu, & Krishnan, 2012； Servos & Osborn, 2017 ）可以发挥作用。数字身份管理和数字信任机制（Huang & Nicol, 2013），尤其是区块链（Y. Liu et al., 2020；Zheng et al., 2020），能够支持数字制品的信任管理。数字档案对于确保数据完整性和存在性证明至关重要（ Vigil, Cabarcas, Buchmann, & Huang, 2013），而区块链则为分布式数字档案提供了一种新方法。科学计算完整性（Huang，2018；Peisert, Cybenko, & Jajodia, 2015）可以进一步发展，以支持可信工程工作流。

数字工程是数字革命中一种新兴的工程形式，其中有许多问题和疑问亟待研究。举几个例子：在数字化过程中，数字表示和增强的标准形式应由集中式标准化（例如制定国际标准）支持，还是由分布式演进式标准化（例如让许多本体在细粒度层面竞争成为标准，并逐渐自然演进）支持？我们如何在第四次工业革命中实现可信人工智能系统？数字工程的数字信任机制是什么？云服务中使用的许多信任机制（Huang & Nicol，2013年）适用于数字化产品、系统和服务，但仍应引入哪些新机制？数字工程模型和数据应以集中式还是分布式方式共享？当我们在截然不同的新数字化环境中开展工程工作时，前方还有许多问题和挑战（Coatanéa、Nagarajan、Panicker 和 Mokhtarian，2022年；Horváth，2022年；Huang 等，2020年）。

5.4. 接下来是什么?

在第2节中，我们曾讨论过人类历史上四次工业革命的发展历程。接下来可能会是什么？鉴于数字工程转型对人类社会产生的广泛而深刻的影响，更为长远的愿景将有助于我们发展持久的工程范式，并更好地设计和开发数字工程系统。

图9展示了工业革命的发展历程：从被动遵循自然，到主动利用自然，并可能最终实现人类社会与自然之间的和谐。让我们从计算的物理极限开始讨论。计算能力是普适机器智能的核心，也是我们从第四次工业革命中获得的决定性力量。然而，随着摩尔定律达到极限，中央处理器的芯片在尺寸和性能方面，尤其是在功耗方面，已经触及天花板。高性能计算（HPC）领域一直在努力实现功耗不超过20MW的百亿亿次级计算系统（Lucas等，2014）。在2022年6月发布的最新TOP500榜单中，目前速度最快的超级计算机*frontier*是第一台百亿亿次级机器，以21MW的功耗达到1.1百亿亿次浮点运算/秒。我们希望用来突破摩尔定律的，是正在地平线上涌现的新型计算技术，例如新型半导体材料、量子计算和DNA计算。

数据中心是当今计算能力最重要的来源，同时也消耗大量能源，并造成显著的环境足迹。例如，2014年美国数据中心消耗了1.8%的电力，并在2018年造成了0.5%的温室气体排放（Siddik、Shehabi 和 Marston，2021年）。如何……已变得愈发重要

提高数据中心的可持续性。微软的纳蒂克项目开展了为期两年的实验，发现海底数据中心切实可行、可靠、能效更高且环保（微软研究院，2020年）。

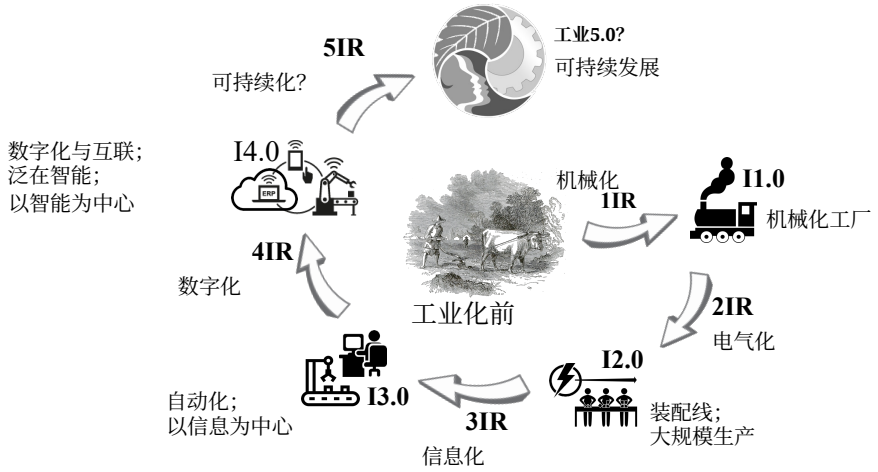


图9. 人类社会历经工业革命的发展历程

从全球视角来看，自第一次工业革命以来，经济增长一直伴随着高昂的环境成本，包括环境[2]污染、自然资源过度开发、生态系统退化、生物多样性丧失以及全球气候变化。由于存在环境外部性，在市场经济机制下，各个实体缺乏采取环保行为的动力，因此这一问题颇具挑战性。“可持续发展是既满足当代人的需求，又不损害后代人满足其自身需求能力的发展。”（联合国世界环境与发展委员会，1987年）这已成为国际社会的共识（政府间气候变化专门委员会，2022年；联合国，1992年）。根据政府间气候变化专门委员会第六次评估报告（政府间气候变化专门委员会，2022年），全球变暖正在加速——2011–2020年的全球地表温度比1850–1900年高出1.09 [0.95至1.20] °C，而2003–2012年增幅为0.19 [0.16至0.22] °C。即使在温室气体排放极低的情景下，近期增幅也将达到或超过1.5°C。气候变化已对地球造成一些不可逆转的影响，并正逼近临界点。这一跨世纪的挑战已迫在眉睫，必须趁为时未晚，由全世界立即采取集体行动。这场全球行动似乎旨在推动下一次工业革命，以利用可再生自然资源，尤其是可再生能源、可重复使用材料和生态环境友好型经济，实现人类活动与自然和谐共处。

在这一方向上，科学（例如生物与环境科学、能源科学、材料科学等学科）将成为揭示事实、提供可持续性相关知识的科学基础。工程将通过开发技术和设计创新的可持续发展解决方案，把科学知识带入现实世界。可持续性是一个高度复杂的问题，因为它涉及不同学科领域、行业领域、区域经济、文化、人群、世代，以及人类社会与自然系统。可持续性解决方案需要协调一致、全面且系统。系统科学与工程将在运用系统思维、设计系统化机制和解决方案以应对可持续性这一复杂问题方面发挥独特作用。

着眼于可持续性，在当今推动数字工程转型的工作中，我们应将数字工程系统设计与开发对可持续性的需求纳入考量。例如，产品溯源有助于产品退役后实现再利用和回收。尤其重要的是，要考虑新兴数字技术的可持续性（Colorado、Velásquez 和 Monteiro，2020年；Kellens 等，2017年；Paris、Mokhtarian、Coatanéa、Museau 和 Ituarte，2016年）。在数字化过程中考量可持续性，将使新兴数字工程范式具有长远视野，并能更好地满足未来需求。

6. 结论

本文探讨了数字工程转型中的机遇与不确定性，并讨论了新兴工程范式转变所涉及的未决问题。

• 通过考察工业革命中呈现的模式，本文揭示，普适机器智能是第四次工业革命带来的决定性力量。数字化通常被认为是第四次工业革命的主旋律，也是实现普适机器智能的基础和必要条件。• 数字工程，即工程数字化，是第四次工业革命的核心。随着普适机器智能得到广泛应用，许多创新的物理-社会智能系统将会涌现，传统工程系统也正在转变为数字化、智能化和互联的系统。这些前景广阔的机遇也伴随着不确定性，其中包括对可信性的担忧。鉴于人工智能是第四次工业革命的一项关键赋能技术，可信人工智能是确保工业4.0中系统可信性的关键领域。• 在数字化、智能化和互联环境中，数字工程需要新的概念、模型、工具、方法、理论、方法论、技术和标准。新兴工程范式转变包括但不限于数据密集型范式（或数据密集型工程，即数据科学的对应领域）。迈向工业4.0的数字工程转型包含三个基本组成部分：(1) 数字化，(2) 利用普适机器智能，以及(3) 建立数字信任与安全。• 数字化远不止数字化处理。数字化处理旨在使人工制品可被机器读取；数字化旨在使关注对象可被机器理解并可在虚拟环境中操作。对关注对象进行数字化应包括：(1) 数字表示，(2) 唯一标识符，(3) 包含来源信息的元数据，以及(4) 对象与上述三个组成部分之间可验证的关联。• 数字化互联环境中，现实世界人工智能应用取得的显著进展、产生的颠覆性影响及其快速增长，引发了人们对人工智能系统可信性的担忧和相关研究。广大工程设计界正迎来绝佳机遇，可以在各种工程系统设计中融合普适机器智能的新能力、可信人工智能原则以及数字信任，从而确保工业4.0中系统的可信性。

数字工程转型是第四次工业革命中实现工程范式转变的关键流程。数字工程是第四次工业革命的核心，是一个令人振奋且广阔的探索领域，并将进一步推动“跨越（及内部）国家、公司、行业乃至整个社会的系统转型”（Schwab，2017年）。

参考文献

AAAI长期人工智能未来总统委员会。（2009）。阿西洛马长期人工智能特征研究。检索自 https://www.aaai.org/Organization/asilomar-study.pdf Adcock, R., Jackson, S., Fairley, D., Singer, J., & Hybertson, D.（2021）。涌现。载于系统工程知识体系（*SEBoK*）。检索自 https://www.sebokwiki.org/wiki/Emergence Ahmed, S., Kim, S., & Wallace, K. M.（2006）。工程设计本体创建方法。《工程计算与信息科学期刊》，*7*（2），132–140。 https://doi.org/10.1115/1.2720879 Armbrust, M., Fox, A., Griffith, R., Joseph, A. D., Katz, R. H., Konwinski, A., ... Zaharia, M.（2009）。云端之上：伯克利视角下的云计算。Avizienis, A., Laprie, J.-C., Randell, B., & Landwehr, C.（2004）。可靠与安全计算的基本概念和分类。《可靠与安全计算，IEEE会刊》，*1*（1），11–33。https://doi.org/10.1109/TDSC.2004.2 Berners-Lee, T., Hall, W., Hendler, J. A., Shadbolt, K. O. and N., & Weitzner, D. J.（2006）。万维网框架

科学。《网络科学基础与趋势》，1（1），1–130。Berners-Lee, T., Hendler, J. A., & Lassila, O.（2001）。语义网。《科学美国人》，284（5），35–43。Black, I. M., Richmond, M., & Kolios, A.（2021）。状态监测系统：改善海上风力涡轮机运行管理的机器学习方法系统性文献综述。《国际可持续能源杂志》，40（10），923–946。Carvalho, T. P., Soares, F. A., Vita, R., Francisco, R. da P., Basto, J. P., & Alcalá, S. G. S.（2019）。应用于预测性维护的机器学习方法系统性文献综述。《工业中的计算机与工程》，137，106024。Cheligeer, C., Huang, J., Wu, G., Bhuiyan, N., Xu, Y., & Zeng, Y.（2022）。需求获取中的机器学习：文献综述。《工程设计、分析与制造中的人工智能》，36（e32），1–23。https://doi.org/10.1017/S0890060422000166 Chen, D., Doumeingts, G., & Vernadat, F.（2008）。企业集成与互操作性的架构：过去、现在与未来。《工业中的计算机》，59（7），647–659。Coatanéa, E., Nagarajan, H., Panicker, S., & Mokhtarian, H.（2022）。基于关键影响趋势对工程设计学科演变进行前瞻性分析。《集成设计与过程科学杂志》，26（3）。Colorado, H. A., Velásquez, E. I. G., & Monteiro, S. N.（2020）。增材制造的可持续性：材料循环经济与环境视角。《材料研究与技术杂志》，9（4），8221–8234。https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.04.062 Creswell, A., White, T., Dumoulin, V., Arulkumaran, K., Sengupta, B., & Bharath, A. A.（2018）。生成对抗网络：概述。《IEEE信号处理杂志》，35（1），53–65。Demoly, F., Kim, K.-Y., & Horváth, I.（2019）。用于支持设计中语义推理的本体工程：基于本体推导模型以支持工程设计。《工程设计杂志》，第30卷，405–416页。Taylor \& Francis。Dimassi, S., Demoly, F., Cruz, C., Qi, H. J., Kim, K.-Y., André, J.-C., & Gomes, S.（2021）。用于形式化和表征设计中4D打印知识的基于本体的框架。《工业中的计算机》，126，103374。Dworschak, F., Dietze, S., Wittmann, M., Schleich, B., & Wartzack, S.（2022）。用于工程设计自动化的强化学习。《高级工程信息学》，52，101612。欧盟人工智能高级别专家组。（2019）。可信人工智能伦理准则。检索自 https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/d3988569-0434-11ea-8c1f-01aa75ed71a1 Fox, M. S., Barbuceanu, M., Gruninger, M., & Lin, J.（1998）。用于企业建模的组织本体。载于 M. Prietula, K. Carley, & L. Gasser（编），《组织仿真：机构与群体的计算模型》（第131–152页）。AAAI/MIT出版社。Fox, M. S., & Gruninger, M.（1998）。企业建模。《人工智能杂志》，19（3），109。Fox, M. S., & Huang, J.（2005）。企业信息中的知识溯源。《国际生产研究杂志》，43（20），4471–4492。生命未来研究所。（2017）。阿西洛马会议人工智能原则。检索于2021年12月2日，网址：https://futureoflife.org/ai-principles/ Goodfellow, I., Pouget-Abadie, J., Mirza, M., Xu, B., Warde-Farley, D., Ozair, S., ... Bengio, Y.（2014）。生成对抗网络。《神经信息处理系统进展》，27。Goodfellow, I., Pouget-Abadie, J., Mirza, M., Xu, B., Warde-Farley, D., Ozair, S., ... Bengio, Y.（2020）。生成对抗网络。《美国计算机协会通讯》，63（11），139–144。Goranson, H. T.（2002）。ICEIMT：历史与挑战。载于 K. Kosanke, R. Jochem, G. Neil, James, & A. O. Bas（编），《企业间与企业内部集成——IFIP TC5/WG5.12企业集成与建模技术国际会议》（第7–14页）。克鲁维尔学术出版社。Gray, J.（2007）。电子科学——转型中的科学方法。检索自 http://research.microsoft.com/en-us/um/people/gray/talks/NRC-CSTB_eScience.ppt。Gruninger, M., & Fox, M. S.（1995）。本体设计与评估方法。知识共享基本本体问题研讨会，国际人工智能联合会议-1995。Hey, T., Tansley, S., & Tolle, K. M.（2009）。第四范式：数据密集型科学发现。微软研究院。Hilbert, M., & López, P.（2011）。世界存储、沟通和计算信息的技术能力。《科学》，332（6025），60–65。Horváth, I.（2022）。设计下一代信息物理系统：为何这是一个问题？《集成设计与过程科学杂志》，（预印本），1–33。Huang, J.（2017）。数字化转型中的构建智能。《SDPS会刊：集成设计杂志

与过程科学, *21*(4), 1–4. Huang, J. (2018). 从大数据到知识：来源信息、信任与科学计算完整性问题。*2018 IEEE*国际大数据会议（*Big Data*）, 2197–2205. Huang, J., Beling, P., Freeman, L., & Zeng, Y. (2021). 面向数字工程转型的可信人工智能。*SDPS Transactions:* 集成设计与过程科学杂志, *25*(1), 1--7. Huang, J., & Fox, M. S. (2006). 信任本体——形式语义与传递性。第八届国际电子商务会议论文集, 259–270. ACM. Huang, J., Gheorghe, A., Handley, H., Pazos, P., Pinto, A., Kovacic, S., ... Daniels, C. (2020). 迈向数字工程：数字系统工程的兴起。国际系统之系统工程杂志, *10*(3), 234–261. https://doi.org/10.1504/IJSSE.2020.109737 Huang, J., & Nicol, D. M. (2013). 云计算的信任机制。云计算杂志, *2*(1). 获取自 http://www.journalofcloudcomputing.com/content/2/1/9 Huang, J., Nicol, D. M., Bobba, R., & Huh, J. H. (2012). 将基于属性的策略整合到基于角色的访问控制中的框架。第*17*届*ACM*访问控制模型与技术研讨会论文集, 187–196. Huang, J., Seck, M. D., & Gheorghe, A. (2016). 物联网时代迈向可信智能信息物理社会系统。第*11*届*IEEE*系统之系统工程会议（*SoSE*）论文集. 政府间气候变化专门委员会. (2022). 气候变化2022：影响、适应与脆弱性。载于 H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, H. Adams, C. Adler, P. Aldunce, E. Ali, ... Others (编), 政府间气候变化专门委员会第六次评估报告. https://doi.org/10.1017/9781009325844 ISO/IEC/IEEE. (2010). ISO/IEC/IEEE国际标准——系统与软件工程——词汇。*ISO/IEC/IEEE 24765:2010(E)*, 第1–418页. https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2010.5733835 Jin, X., Sandhu, R., & Krishnan, R. (2012). RABAC：以角色为中心的基于属性的访问控制。计算机网络安全的数学方法、模型与架构国际会议, 84–96. Jin, Z., Zhang, Z., Demir, K., & Gu, G. X. (2020). 面向先进增材制造的机器学习。物质, *3*(5), 1541–1556. Kellens, K., Baumers, M., Gutowski, T. G., Flanagan, W., Lifset, R., & Duflou, J. R. (2017). 增材制造的环境维度：应用领域及其环境影响图谱。工业生态学杂志, *21*(S1), S49–S68. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/jiec.12629 Kim, H. M., Fox, M. S., & Grüninger, M. (1999). 面向质量管理的本体——助力质量问题识别与追踪。*BT*技术杂志, *17*(4), 131–140. Kim, K.-Y., Manley, D. G., & Yang, H. (2006). 面向协同产品开发的基于本体的装配设计与信息共享。计算机辅助设计, *38*(12), 1233–1250. Kirkpatrick, S., Boniface, M., Bouckaert, S., Grace, P., Jimenez, J., Lahnalampi, T., ... Sallstrom, A. (2013). 未来互联网研究与实验：*2020*年愿景与情景. 获取自 https://eprints.soton.ac.uk/370585/1/370585.pdf 库恩, T. (1962). 科学革命的结构（第2版）。芝加哥大学出版社。Lee, E. A. (2008). 信息物理系统：设计挑战。*2008*年第*11*届*IEEE*面向对象与构件的实时分布式计算国际研讨会（*ISORC*）, 363–369. Littman, M. L., Ajunwa, I., Berger, G., Boutilier, C., Currie, M., Doshi-Velez, F., ... others. (2021). 汇聚力量，风暴渐起：人工智能百年研究（*AI100*）*2021*年研究小组报告. 获取自 https://ai100.stanford.edu/sites/g/files/sbiybj18871/files/media/file/AI100Report_MT_10.pdf Liu, H., Wang, Y., Fan, W., Liu, X., Li, Y., Jain, S., ... Tang, J. (2021). 可信人工智能：计算视角。*arXiv*预印本 *arXiv:2107.06641*. 获取自 https://arxiv.org/pdf/2107.06641 Liu, Y., He, D., Obaidat, M. S., Kumar, N., Khan, M. K., & Choo, K.-K. R. (2020). 基于区块链的身份管理系统：综述。网络与计算机应用杂志, *166*, 102731. Lucas, R., Ang, J., Bergman, K., Borkar, S., Carlson, W., Carrington, L., ... others. (2014). 百亿亿次级研究十大挑战. 获取自 https://www.osti.gov/servlets/purl/1222713 Luhmann, N. (1979). 信任与权力. John Wiley & Sons Ltd. Madni, A. M., & Sievers, M. (2018). 基于模型的系统工程：动因、现状与研究机遇。系统工程, *21*(3), 172–190. Mayer, R. C., Davis, J. H., & Schoorman, F. D. (1995). 组织信任的综合模型：过去、现在与未来。管理学评论学报, *20*(3), 709–734. Mehrabi, N., Morstatter, F., Saxena, N., Lerman, K., & Galstyan, A. (2021). 关于机器学习中的偏见与公平性的综述

机器学习。ACM计算调查（CSUR）, 54(6), 1–35. Meng, L., McWilliams, B., Jarosinski, W., Park, H.-Y., Jung, Y.-G., Lee, J., & Zhang, J. (2020). 增材制造中的机器学习：综述。Jom, 72(6), 2363–2377. 微软研究院. (2020). 纳蒂克项目。获取于2022年10月28日，网址：https://natick.research.microsoft.com/ Mokammel, F., Coatanéa, E., Coatanéa, J., Nenchev, V., Blanco, E., & Pietola, M. (2018). 使用源自计算语言学的方法自动提取、分析需求并进行图表示。系统工程, 21(6), 555–575. 美国国家标准与技术研究院. (2011). NIST云计算标准路线图，NIST CCSRWG-092, 第一版。美国国家标准与技术研究院。NIST大数据公共工作组. (2019). NIST大数据互操作性框架：第1卷, 定义，第3版。载于NIST特别出版物1500-1r2。获取自 https://doi.org/10.6028/NIST.SP.1500-1r2 美国国家科学基金会. (2008). NSF 08-538：计算机系统研究（CSR）。获取自美国国家科学基金会网站：https://www.nsf.gov/pubs/2008/nsf08538/nsf08538.pdf 美国国家科学基金会. (2019). 国家人工智能（AI）研究院：加速研究、改变社会并壮大美国劳动力（项目征集公告，NSF 20-503）。获取于2020年1月1日，网址为美国国家科学基金会网站：https://www.nsf.gov/pubs/2020/nsf20503/nsf20503.htm Pan, J., Huang, J., Cheng, G., & Zeng, Y. (2022). 用于自动四边形网格生成的强化学习：一种软演员-评论家方法。神经网络, 157, 288–304. 获取自 https://arxiv.org/abs/2203.11203 Paris, H., Mokhtarian, H., Coatanéa, E., Museau, M., & Ituarte, I. F. (2016). 增材制造与减材制造技术的环境影响比较。CIRP年刊, 65(1), 29–32. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.04.036 Peisert, S., Cybenko, G., & Jajodia, S. (2015). ASCR科学计算完整性网络安全，美国能源部研讨会报告，2015年1月7日至9日，马里兰州罗克维尔。获取自 https://crd.lbl.gov/assets/Uploads/Final- ASCR-Cybersecurity-ReportR7.pdf Rajkumar, R., Lee, I., Sha, L., & Stankovic, J. (2010). 信息物理系统：下一场计算革命。设计自动化会议, 731–736. Richards, W. T. (1928年). 科学的定义。化学教育杂志, 5(7), 874. https://doi.org/10.1021/ed005p874 Schneider, F. B. (1999). 网络空间中的信任。美国国家科学院出版社。Schwab, K. (2017). 第四次工业革命。获取自 https://www.google.com/books/edition/The_Fourth_Industrial_Revolution/ST_FDAAAQBAJ?gbpv=1 Servos, D., & Osborn, S. L. (2017). 基于属性的访问控制：当前研究与未解决问题。ACM计算调查（CSUR）, 49(4), 65. Siddik, M. A. B., Shehabi, A., & Marston, L. (2021). 美国数据中心的环境足迹。环境研究快报, 16(6), 64017. https://doi.org/10.1088/1748-9326/abfba1 Silver, D., Huang, A., Maddison, C. J., Guez, A., Sifre, L., Van Den Driessche, G., ... others. (2016). 利用深度神经网络和树搜索掌握围棋。《自然》, 529(7587), 484–489. Silver, D., Hubert, T., Schrittwieser, J., Antonoglou, I., Lai, M., Guez, A., ... others. (2018). 通过自我对弈掌握国际象棋、将棋和围棋的通用强化学习算法。《科学》, 362(6419), 1140–1144. Simon, H. A. (1997). 有限理性模型（第3卷）。麻省理工学院出版社。Sirin, G., Coatanéa, E., Yannou, B., & Landel, E. (2013). 创建领域本体，以支持复杂系统设计中供应商与用户之间的数值模型交换。第2B卷：https://doi.org/10.1115/DETC2013-12266 Smith, R. J. (2022). 工程。获取于2022年10月21日，网址为大英百科全书网站：https://www.britannica.com/technology/engineering Smith, S. (2017). 风险之物联网：信任我们周围的设备。O'Reilly Media, Inc. Stone, P., Brooks, R., Brynjolfsson, E., Calo, R., Etzioni, O., Hager, G., ... others. (2016). 2030年的人工智能与生活：人工智能百年研究。获取自 https://ai100.stanford.edu/sites/g/files/sbiybj18871/files/media/file/ai100report10032016fnl_singles.pdf Su, J., Huang, J., Adams, S., Chang, Q., & Beling, P. A. (2022). 用于制造系统多层级预防性维护的深度多智能体强化学习。《专家系统与应用》, 192, 116323. Tavčar, J., & Horvath, I. (2018). 面向运行时自适应的智能信息物理系统设计原则综述：经验教训与待解决问题。IEEE系统、人类与控制论汇刊：系统, 49(1), 145–158. 联合国世界环境与发展委员会. (1987). 《我们共同的未来》——世界环境与发展委员会报告（G. H.

布伦特兰，编者）。检索自 https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common- future.pdf 联合国。（1992年）。《*21*世纪议程》。美国国防部。（2018年6月）。数字工程战略。检索自 https://fas.org/man/eprint/digeng-2018.pdf Vernadat, F.（2020年）。企业建模：研究综述与展望。《工业中的计算机》，*122*，103265。Vigil, M., Cabarcas, D., Buchmann, J., & Huang, J.（2013年）。评估文档长期保护中的信任。*2013*年 *IEEE*计算机与通信研讨会（*ISCC*），185–191。Walterbusch, M., Gräuler, M., & Teuteberg, F.（2014年）。信任的定义方式：科学文献的定性与定量分析。Wang, C., Tan, X. P., Tor, S. B., & Lim, C. S.（2020年）。增材制造中的机器学习：现状与展望。增材制造，*36*，101538。Waymo One。（2020年）。Waymo 在菲尼克斯向公众开放其完全无人驾驶服务。检索于2022年1月1日，网站 blog.waymo.com：https://blog.waymo.com/2020/10/waymo-is-opening-its- fully-driverless.html Weiser, M.（1996年）。开放之家。《*ITP*评论》，纽约大学。检索自 https://web.archive.org/web/20160310200237/http://www.ubiq.com/hypertext/weiser/wholehouse.doc Wing, J. M.（2006年）。计算思维。《美国计算机协会通讯》，*49*(3)，33–35。Wing, J. M.（2012年）。计算思维。微软亚洲研究院学术峰会 *2012*。检索自 https://www.microsoft.com/en-us/research/wp-content/uploads/2012/08/Jeannette¯Wing.pdf Wing, J. M.（2020年）。可信人工智能。*arXiv:2002.06276*。检索自 http://arxiv.org/abs/2002.06276 Zeng, Y.（2004年）。基于环境的设计问题表述。《集成设计与过程科学杂志》，*8*(4)，45–63。Zeng, Y.（2015年）。基于环境的设计（EBD）：一种跨学科设计方法+。《集成设计与过程科学杂志》，*19*(1)，5–24。Zeng, Y.（2020年）。环境：概念设计中首先要关注的事物。《集成设计与过程科学杂志》，*24*(1)，45–66。Zheng, Z., Xie, S., Dai, H.-N., Chen, W., Chen, X., Weng, J., & Imran, M.（2020年）。智能合约概述：挑战、进展与平台。《未来一代计算机系统》，*105*，475–491。https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.future.2019.12.019 Zimmerman, P., Gilbert, T., & Salvatore, F.（2019年）。国防部的数字工程转型。《国防建模与仿真期刊》，*16*(4)，325–338。