

工业互联网的概念、体系架构及关键技术

乔晋¹, 王微¹, 陈孟玺¹, 许斌¹, 董振江², 孙雁飞^{1,3}

(1. 南京邮电大学物联网学院, 江苏 南京 210003; 2. 南京邮电大学计算机学院, 江苏 南京 210023;
3. 南京邮电大学江苏省高性能计算与智能处理工程研究中心, 江苏 南京 210023)

摘要: 工业互联网作为实现传统工业数字化转型的关键路径之一, 已经引起学术界和产业界的广泛关注。工业互联网涵盖内容众多, 其体系架构及关键技术也在不断演化发展, 面临概念范畴不清晰、体系架构不健全、关键技术不明朗等问题。为了探讨以上问题, 通过梳理工业互联网与工业物联网、工业 4.0/5.0、智能制造的关系阐明工业互联网的基本概念, 分析工业互联网体系架构及涉及的关键技术, 总结工业互联网面临的挑战并展望工业互联网领域未来的研究方向。

关键词: 工业互联网; 体系架构; 智能制造; 工业智能

中图分类号: F424; TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2022.00272

Concept, architecture and key technologies of industrial internet

QI Jin¹, WANG Wei¹, CHEN Mengxi¹, XU Bin¹, DONG Zhenjiang², SUN Yanfei^{1,3}

1. School of Internet of Things, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China
2. School of Computer Science, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China
3. Jiangsu HPC and Intelligent Processing Engineer Research Center, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China

Abstract: As one of the key paths to realize the digital transformation of traditional industries, the industrial internet has attracted widespread attention in both the academia and the industry. As the content of the industrial internet is quite extensive, while its system architecture and key technologies are constantly evolving and developing, it also confronts problems such as unclear conceptual scope, unsound system architecture, and unclear key technologies. In order to further explore the above issues, the basic concepts of the industrial internet were clarified by sorting the relationship between the industrial internet and three other concepts of the industrial internet of things, industry 4.0/5.0, and intelligent manufacturing. Based on the analysis of the industrial internet system architecture and the key technologies involved, the challenges faced by the industrial internet were summarized and the future research directions in the industrial internet field were looked forward.

Key words: industrial internet, system architecture, intelligent manufacturing, industrial intelligent

0 引言

近年来, 数字经济浪潮席卷全球, 新一轮产业

变革蓬勃兴起, 以 5G、数字孪生 (DT, digital twins) 及人工智能 (AI, artificial intelligence) 等为代表的新一代信息技术与工业加速融合^[1-2], 在一定程度上

收稿日期: 2021-07-29; 修回日期: 2022-05-07

通信作者: 孙雁飞, sunyanfei@njupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.62172235); 中国博士后基金资助项目 (No.2019M651923); 江苏省自然科学基金资助项目 (No.BK20191381)

Foundation Items: The National Nature Science Foundation of China (No.62172235), The Postdoctoral Science Foundation of China (No.2019M651923), The Natural Science Foundation of Jiangsu Province (No.BK20191381)

颠覆了传统的生产、生活和商业模式^[3]。各工业大国正利用其在信息技术 (IT, information technology) 领域的领先优势, 加快实施诸如美国“工业互联网”、日本“工业 4.1J”、德国“工业 4.0”等一系列针对传统工业数字化转升级的“再工业化”战略, 谋求抢占新一轮竞争制高点^[4-5]。

在此背景下, 工业互联网作为传统工业数字化转型的关键路径之一, 已成为各国改造提升传统工业、塑造未来产业竞争力的战略选择^[4,6]。工业互联网通过新一代信息技术构建“人-机-物”的全面互联, 实现海量工业数据的实时采集、自由传输、精准分析和智能反馈, 推动传统产业加快转型升级、新兴产业加速发展壮大, 支撑传统工业体系变革^[7]。目前, 学术界及产业界对工业互联网的概念和范畴尚未形成统一认知, 美国通用电气公司 (GE) 将工业革命与互联网成果的融合称作工业互联网^[8]; 德国国家科学与工程院认为在工业互联网中除了“人-机-物”互联, 还包括业务活动的连接; 中国科学院尹浩院士认为工业互联网包含网络、平台、数据及安全四大体系^[9]。可以看出, 目前全球工业互联网的研究总体上仍处于起步探索阶段, 而中国正处于新旧动能转换的关键时期, 作为我国新型基础设施的工业互联网也面临着全新的挑战与机遇。

工业互联网正在推动传统工业形成全新的生产制造和服务体系, 但在理论和技术层面仍存在诸多问题需要解决。例如, 工业互联网的范畴是什么, 工业互联网还有哪些理论问题亟须解决, 工业互联网研究的核心技术有哪些, 工业互联网如何通过这些核心技术实现各层面、各平台间的互联互通。为了回答以上问题, 本文尝试阐明工业互联网的范畴, 梳理工业互联网的体系架构, 分析工业互联网技术体系中涉及的核心技术, 并总结当前工业互联网研究存在的挑战及需要解决的关键问题, 试图为未来工业互联网涉及领域的研究提供具有科学依据的理论支撑。

1 工业互联网的基本概念

1.1 工业互联网的定义

目前, 各国政府、企业、科研机构纷纷提出了各种战略理念和发展目标, 并从不同的角度对工业互联网进行了阐述。GE 认为工业互联网是互联网在全球工业系统中与高级计算、分析、传感等技术深度融合的产物, 强调机器与人的连接^[10]。清华大学刘云浩教授认为工业互联网是通过互联网与新兴技术在工业中的深度融合与创新应用, 强调了网络的重要性^[11]。《工业互联网体系架构 1.0》指出工业互联网不仅是深度融合基础下的产业和应用生态, 也是工业智能化发展的关键综合信息基础设施, 强调网络、数据和安全^[7]。在新一轮的产业变革背景下, 工业互联网的内涵和范畴在不断演化, 本文在前人的研究基础上给出了自己的理解: 工业互联网是互联网与 5G、云计算、大数据、物联网 (IoT, internet of things) 等新一代信息通信技术在工业经济中深度融合的全新工业生态、关键基础设施以及新型应用模式。工业互联网以“人-机-物”全面互联为基础, 以数据为核心, 以安全为保障来实现工业数字化、智能化发展。

在第四次工业革命蓬勃发展的大趋势下, 除了工业互联网, 还出现了工业物联网 (IIoT, industrial internet of things)、工业 4.0/5.0、智能制造等既紧密联系又有所区别的概念, 通过对它们之间关系进行梳理与对比可以帮助我们更透彻地理解工业互联网的概念。

1.2 工业互联网与工业物联网

工业物联网是指通过将工业资源进行互联互通实现制造流程各阶段的优化, 构建服务驱动型的新工业生态体系^[12]。工业互联网与工业物联网的联系与区别见表 1。

1.3 工业互联网与工业 4.0/5.0

德国政府于 2013 年正式提出工业 4.0: 利用网络物理生产系统 (CPPS, cyber-physical production

表 1 工业互联网与工业物联网的联系与区别

	工业互联网	工业物联网
联系	工业互联网涵盖了 IIoT 两者都强调工业的数字化、智能化发展	
区别	不仅包含工业领域, 而且延伸到企业的信息系统、业务流程和人员工业 实现“人-机-物”全面互联, 追求数字化	强调 IoT 在工业领域的应用 强调物与物的连接, 追求自动化和智能化

system) 将制造、物流及销售等信息数字化, 并集中使用全球可用的信息网络进行自动化信息交流以实现生产和业务流程的匹配, 最终完成高效、个性化的服务^[13]。在工业 4.0 概念的基础上, 欧盟委员会于 2021 年正式提出了工业 5.0 的概念, 除了数字化与智能化, 更加关注以人为本的需要^[14]。工业 5.0 不仅补充了工业互联网的标志性功能, 还强调将工业置于环境或社会等非经济或技术层面。工业互联网与工业 4.0/5.0 的联系与区别见表 2。

1.4 工业互联网与智能制造

智能制造是制造业一次大的变革, 作为一种新兴的生产形式, 以 IoT、云计算、新型通信、大数据分析等信息技术为一体构建面向智能计算、AI 和数据科学为先导的网络物理系统。工业互联网与智能制造的联系与区别见表 3。

1.5 小结

通过以上对工业互联网与 IIoT、工业 4.0/5.0、智能制造联系与区别的总结可以看出它们之间范畴的差异。工业互联网、工业 4.0/5.0 包含了“人-机-物”的全面互联, 都以智能制造为主导, 但工业互联网更关注产品本身的智能化而工业 4.0/5.0 的核心更注重互联, 工业物联网是物与物、机器与机器的连接。工业互联网涵盖了工业物联网, 工业互联网是工业 4.0/5.0 的技术支柱之一, 是实现智能制造的关键使能技术, 而智能制造又是工业互联网与工业 4.0/5.0 的核心动力源, 工业互联网、工业物联网、工业 4.0/5.0、智能制造范畴如图 1 所示。通过对工业互联网概念的深刻理解, 可以看出其对推动工业行业的发展有着举足轻重的作用, 在制造业、产业经济发展中蕴藏巨大潜力, 将工业互联网融入各行

业刻不容缓。然而从理论到应用还需要不断地探索, 尤其是构建完善的工业互联网体系架构对工业产业数字化、智能化转型升级有着重要的指导作用。

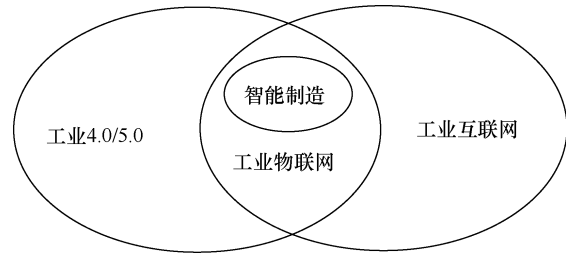


图 1 工业互联网、工业物联网、工业 4.0/5.0、智能制造范畴

2 工业互联网体系架构

工业互联网是工业制造与 IT 融合形成的新型应用架构, 其意义在于发展相关支撑技术以促进工业生产生态的重构。为了快速、广泛的部署并推广应用, 我国相继发布了《工业互联网体系架构 1.0》和《工业互联网体系架构 2.0》。

2.1 工业互联网体系架构 1.0

我国工业互联网产业联盟 (AII, Alliance of Industrial Internet) 于 2016 年发布《工业互联网体系架构 1.0》, 如图 2 所示。工业互联网体系架构 1.0 从工业智能化发展角度出发, 以基于全面互联而形成数据驱动的智能为核心, 网络、数据、安全为工业和互联网的共性基础和支撑 (其中, “网络” 支撑数据传输交换, “数据” 驱动智能化生产, “安全” 保障工业生产中数据与网络交互)^[18]。

工业互联网体系架构 1.0 涵盖了数据层面、网络层面和安全层面。数据层面主要用于生产数据的感知和产品反馈优化, 通过 IoT 技术将生产数据进

表 2 工业互联网与工业 4.0/5.0 的联系与区别

	工业互联网	工业 4.0/5.0
联系	具有相同的内核: 网络物理系统 CPS ^[15] 两者都将走向智能制 ^[16]	
区别	工业互联网关注的是数字化和 AI 技术驱动 提高生产效率和灵活性 追求生产制造的效率目标	更加突出了研究和创新的重要性, 以期工业为人类提供长期服务 注重以人为本、工业生产的可持续性和弹性

表 3 工业互联网与智能制造的联系与区别

	工业互联网	智能制造
联系	具有相同的内核: 网络物理系统 CPS ^[17] 工业互联网是实现智能制造的关键使能技术	
区别	工业互联网通过工业平台为工业企业提供定制服务, 为智能制造的发展模式奠定基础	智能制造是制造企业打造智能 自动化的愿景目标

行采集，通过数据建模与仿真，将数据进行分析得到优化决策，从而反馈到生产层面实现产品生产的优化；网络层面为适应智能制造发展，促使工厂内部网络呈现扁平化、IP 化、无线化及灵活组网的特点；安全层面构建工业互联网安全保障体系，满足体系架构下的网络安全应用，实现智能化生产环境下的设备安全、网络安全、控制安全、应用安全和数据安全^[19]。为了实现工业全流程智能化的目标，工业互联网体系架构 1.0 构建了三大优化闭环^[20]。

- 面向机器设备运行优化的闭环：实现生产设备的动态调整优化，构建智能生产线。
- 面向生产运营优化的闭环：动态调整生产运营管理，构建智能生产模式，实现复杂环境下的优化管理。
- 面向企业协同、用户交互与产品服务优化的闭环：满足资源和商业活动的创新优化，构建网络化协同、产品个性化定制及服务化升级的新模式。

工业互联网体系架构 1.0 从宏观主体层次的角度定义了工业互联网的整体体系，这种架构无法构建一个通用、完善的工业互联网体系架构。为了更好地适用于各个领域实际应用场景，特别是强化信息技术在解决方案与行业应用推广的实操指导性，以便更好地支撑我国工业互联网未来十年的发展。AII 考虑到架构 1.0 的不足，并

在此基础上于 2020 年正式提出了工业互联网体系架构 2.0^[20]。

2.2 工业互联网体系架构 2.0

工业互联网体系架构 2.0 是为了支撑工业企业获得更全面、更系统、更具体的指导性框架，进而实现规模化的推广应用而设计的。架构 2.0 继承了架构 1.0 的网络、数据、安全三大功能体系，并利用工业互联网平台代替了数据功能降低架构 1.0 的冗余，通过弱化数据传输以及数据安全等功能加强数据的集成、分析、优化功能。此外，架构 2.0 还定义了业务视图、实施框架以及技术体系，如图 3 所示。

工业互联网体系架构 2.0 通过自上而下的方式对业务视图、功能架构、实施框架和技术体系进行融合贯通，明确了功能架构设计以及实施部署方式。

- 业务视图分别从宏观和微观视角对企业数字化转型进行了把握，指导企业正确理解工业互联网的定位、价值，明确其在转型过程中的业务需求、以及如何转型的技术支撑，从而指导后续功能架构的设计。
- 功能架构在业务视图的指引下，建立了以平台为核心、以网络为基础、以安全为保障的三大体系，并对这三大体系的运作进行抽象，形成工业数字化应用的优化闭环。

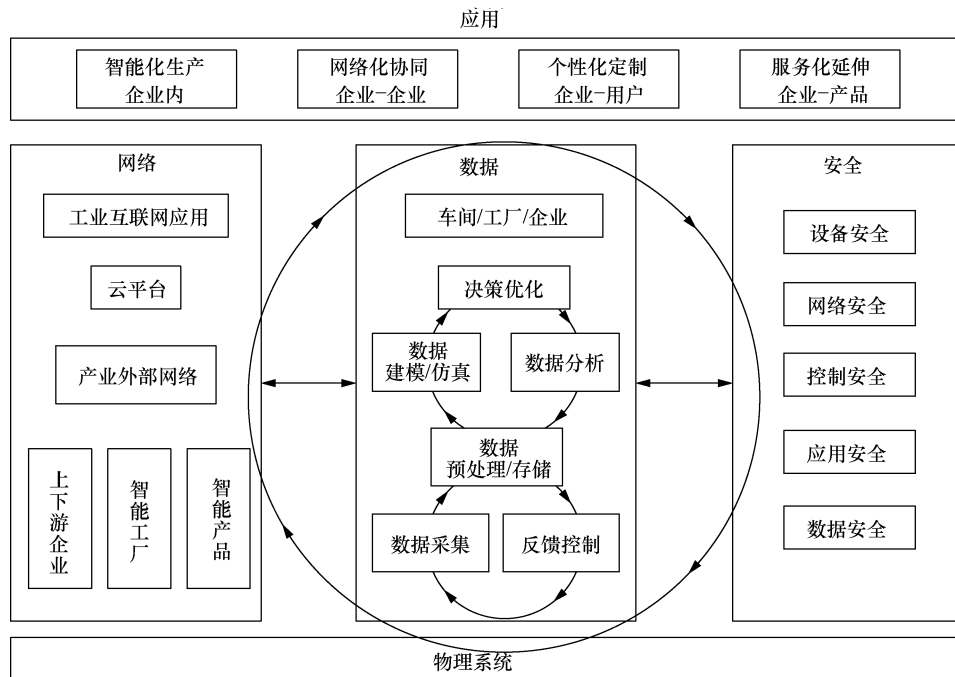


图 2 工业互联网体系架构 1.0

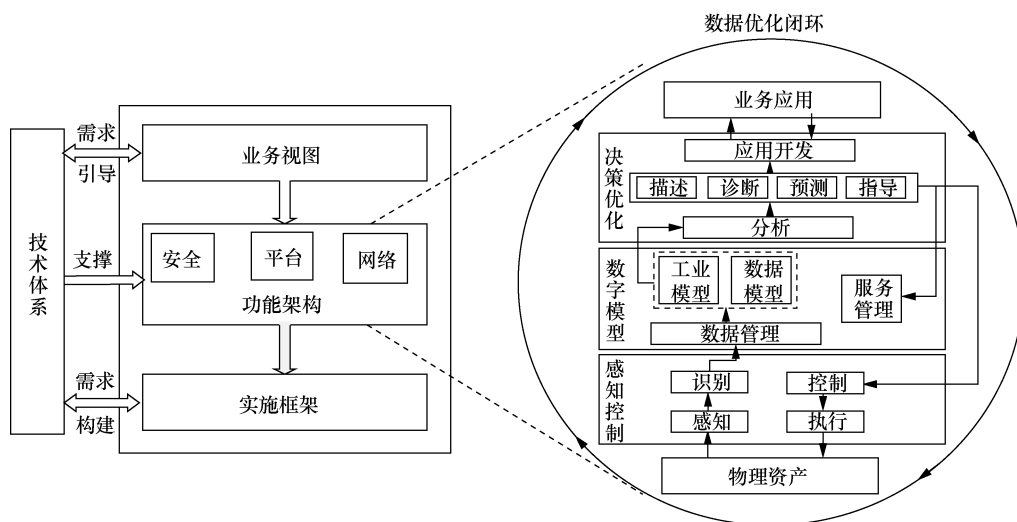


图3 工业互联网体系架构 2.0

- 实施框架是对功能架构在企业中如何部署做出的规划，即“在哪做”“做什么”“怎么做”的问题。实施框架划分出了设备层、边缘层、企业层、产业层等实施层级，并明确以上层级中网络、标识、平台、安全4个实施系统的部署，能够更好地与现有的制造体系相结合。
- 技术体系是保证整个工业互联网赋能工业转型升级的基础，是用于支撑功能架构实现，构建实施框架的整体技术体系。

2.3 工业互联网技术体系

由架构 2.0 可以看出，工业互联网的应用离不开技术体系的支撑。为了能够适应各种业务场景数字化转型的需求，工业互联网技术体系需要在满足支撑工业互联网体系架构的基础上，从宏观视角概括工业互联网的应用，工业互联网技术体系如图 4 所示。

该技术体系对工业互联网赋能企业过程中涉及的核心技术进行梳理、归类形成的，主要包括制造技术、信息技术以及融合技术。

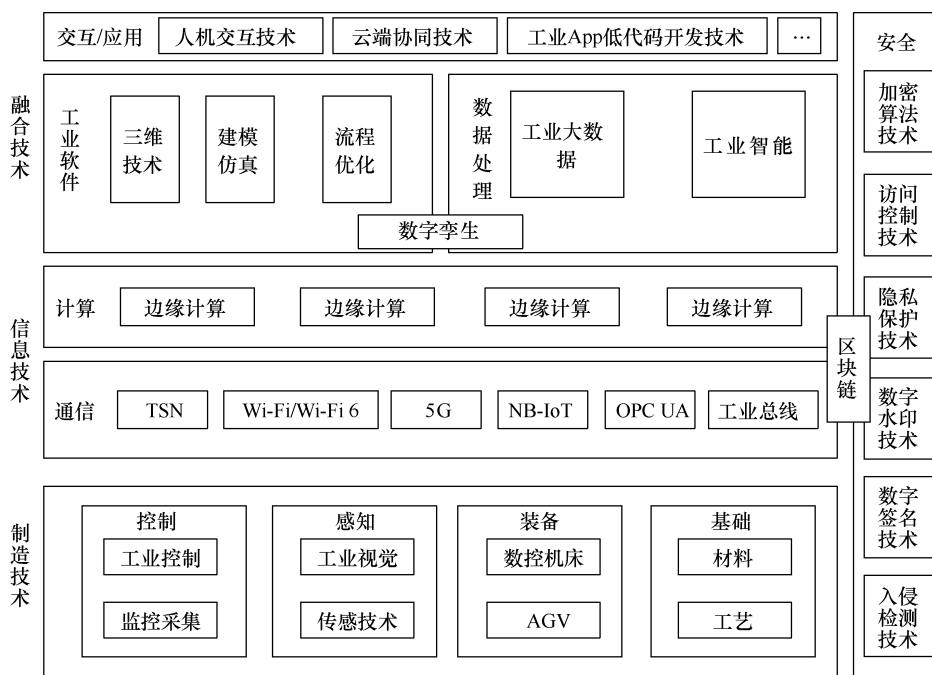


图4 工业互联网技术体系

- 制造技术以及信息技术作为工业互联网发展的基础设施，其融合发展能够强化工业互联网在企业中的应用。制造技术涵盖的感知和控制技术分别作为起点和终点实现数字化优化闭环，并对制造物理系统的数据进行采集以及对智能装备进行控制。
- 信息技术是构建工业互联网数字空间和实现数字优化闭环的基础，负责将工业数据传输至工业互联网平台。主要包括 5G、窄带物联网（NB-IoT, narrow band internet of things）、边缘计算（EC, edge computing）等技术。
- 融合技术是连接数字优化闭环数据流、信息流与决策流的关键，在制造技术和 IT 的基础上对工业数据进行分析处理并反馈到物理资产，主要包括工业软件、工业大数据、工业智能技术以及 DT 技术。

由图 4 可以看出，支撑整个工业互联网技术体系核心的关键技术包括 5G、EC、工业智能、DT、区块链等新一代信息技术。

3 工业互联网关键技术

由工业互联网技术体系可知，以 5G、EC、工业智能、区块链、DT 技术为代表的对支撑工业互联网体系架构中功能架构的网络、平台和安全的建设以及实现数据优化闭环有着极其重要的作用，而功能架构又是赋予企业智能化落地实施的能力架构，因此，必须深度集成和融合这五大关键技术。本节重点介绍了关键技术如何解决企业在升级改造中面临的问题，总结了当前的典型应用场景以及应用挑战。

3.1 5G 技术

工业领域中业务场景复杂多样，需要具有海量连接、低时延的网络连接技术来实现人机物之间的互联互通。5G 作为最新一代蜂窝移动技术，具有海量连接、高可靠、低时延等特点^[21-22]，是工业互联网实现全面连接的基础，能够应用于增强型移动宽带（eMBB, enhanced mobile broadband）、大连接物联网（mMTC, massive machine type communication）、超可靠低时延通信（URLLC, ultra reliable low latency communication）三大场景。利用 5G 无线技术、网络切片技术，以及其他与网络技术融合的 5G+时间敏感网络（TSN, time sensitive

network）、5G+云等技术，可有效解决不同工业场景的多样性需求。

当前，5G 赋能工业互联网已经得到了一定的研究和应用。在生产制造场景下，5G 能够支持自动导引运输车（AGV, automated guided vehicle）的部署。Siriwardhanad 等将当地 5G 运营商与移动网络运营商（MNO, mobile network operator）架构相结合，将 AGV 与制导控制器进行连接，实现低时延并且能够确保数据的安全性^[23]。文献[24]将 5G 应用于机械手控制，与长期演进（LTE, long term evolution）技术相比有显著优势，能够满足该场景超低时延以及超高可靠的需求。但以上研究主要偏重理论设计，缺乏落地应用。文献[25]在虚拟化技术基础上，利用 5G 切片技术灵活部署工业园区中不同业务的需求实现逻辑资源上的隔离。文献[26]也提到利用网络切片技术来解决具有子网络以及多个运营商的复杂园区场景。由此可见，5G 技术能够解决工业企业在生产制造以及业务方面遇到的困难。

尽管 5G 技术能够满足部分场景的需求，但主要集中在大型的企业中，对大多数的中小制造企业来说，它们的基础设施并不具备智能化、数字化的能力，面临着部署成本高，无法实现大规模部署的问题。当前，5G 与工业互联网的融合还处于探索阶段，对于工业中硬实时控制的需求还有所欠缺，缺乏针对工业领域的解决方案。相信随着《工业互联网创新发展行动计划（2021—2023）》的实施以及工业互联网 2.0 体系的推广，将加速推动 5G+工业互联网创新模式的发展，并最终为工业数字化转型提供技术支撑和智力保障^[27]。

3.2 边缘计算技术

工业领域的部分控制场景对计算能力的高效性有严格要求，将数据传输到云端进行计算可能会造成巨大的损失，并且，在工业现场中存在大量异构的总线连接，设备之间的通信标准不统一，因此需要将计算资源部署在工业现场附近以满足业务高效实时的需求。边缘计算作为靠近数据源头或者物的网络边缘侧，融合网络、应用核心能力、计算存储的开放平台^[28-29]，有低时延、高效、近端服务、低负载等优点，能够就近提供边缘智能服务，是工业互联网不可或缺的关键性环节。

当前，边缘计算赋能工业互联网已经得到了一定的研究和应用。通过利用边缘计算技术将工业场景中的计算以及存储分散到工业互联网边缘来降低

云端计算和存储的压力,解决云计算模式存在的实时性差、运维成本高、数据安全存在风险等问题^[30]。文献[31]将边缘计算技术应用到工业生产中,以实现生产自动化,使“机器取代人力”成为现实。李庆等^[32]提出了适用于工业网络的通用边缘计算模型,提高了动态环境的服务质量。利用 EC 技术也可以对工业设备进行实时检测,使得预测性维护成为可能。在实际部署过程中,边缘计算与云计算以及 5G 网络技术的融合也得到了应用。GSMA 联合全球运营商合作构建了电信边缘云平台。中国联通推出了 CUC-MEC 平台,并设计了 EdgePOD 一体化边缘解决方案。中国电信也开展了 5G+MEC 的应用合作创新。由此可见,边缘计算技术能够满足工业领域中信息化与工业化深度融合的产能升级和高性能网络化的需求。

综上,EC 技术已经广泛应用于工业互联网中,但其仍面临设备接口标准不统一、测试标准不统一的问题,并且在应用过程中还存在许多安全问题。在边缘计算的架构中位于不同层次的边缘服务器拥有不同的计算能力,所以未来需要继续提升 EC 的性能以在运行的过程中完成成本分析以及负载的分发。此外,在行业应用中对于网络传输、可靠性要求普遍较高,因此 EC 需要与行业应用、运营商网络进行高效协同,其系统隔离、数据安全能力仍有待进一步提高。未来,边缘计算的发展将为工业、制造业以及其他新兴产业提供更加强大的驱动力。

3.3 工业智能技术

工业互联网的核心功能是数据驱动的智能分析与决策优化^[20]。工业智能技术具备自感知、自学习、自执行、自决策、自适应等特点,利用知识图谱、机器学习、深度学习、自然语言处理等技术,可以解决工业化联网数据量巨大、数据维度多、实时分析难、难以定量等问题,为更好地实现精准决策和动态优化提供帮助,是工业互联网形成数据优化闭环的关键。同时,工业智能技术可以在全面感知、泛在连接、深度集成和高效处理的基础上,更好地适应复杂多变地工业环境,帮助工业企业提高设备管理与维护效率^[33]。

目前,工业智能技术赋能工业互联网已经得到了一定的研究和应用。面向设备级应用时,工业智能技术能够预测设备剩余寿命,从而做到设备预测性维护,减少成本与故障率。Zhang^[34]建立了基于

BP 神经网络的刀具寿命预测模型,提高了预测精度,保证了制造系统的工作效率。面向企业级应用时,工业智能技术能够综合考虑设备运行状况、原料状况、制造流程等数据,找出最优参数,进而大幅提升运行效率与制造品质。肖畅等^[35]提出了一套钢铁生产全流程多源异构数据分析框架,应用全栈式机器学习平台搜集数据,并应用平台中的算法库进行模型建立,实现了质量溯源与产线监控,解决了线材生产中椭圆度超差的质量问题。面向产业链级应用时,工业智能技术能够基于全新的知识组织方式以实现更全面可靠的管理与决策。华为通过汇集多种信息资源,构建了华为供应链知识图谱,通过企业语义网实现供应链风险管理,辅助公司决策。

由此可见,工业智能技术可以挖掘数据潜藏的意义,最大化地利用工业数据的隐含价值,成为工业互联网发挥作用的重要支撑。虽然工业智能在实施部署方面取得了一定的成果,但在对实时性需求较高的特定场景,缺乏高能效低成本的架构芯片,同时要想在工业领域中普及应用,仍然面临数据标准不统一、算法模型不够可靠、可解释性不强、算力平台维护成本高且难以集成的问题。

未来,工业智能技术的发展将会释放工业互联网更多的价值并推动工业互联网的进一步发展。

3.4 数字孪生技术

在工业互联网中,通过生产设备之间的广泛连接获取生产数据,并对其进行整合、分析和决策,以达到生产过程的全流程优化。在此过程中,需要实现物理实体和虚拟模型间的虚实交互以及保证工业生产安全。数字孪生技术通过算法模型对数据进行分析、认知,以达到对生产过程的优化,具有数据驱动、模型支撑、软件定义、精准映射及智能决策等优点。

目前,数字孪生技术虽然在一些场景已经得到应用,但整体还处于发展阶段初期,其赋能作用主要体现在高价值设备或相关产品的健康管理方面。在生产设计阶段,文献[36]通过 DT 技术为设计人员在装备设计上提供辅助指导,进而提高试验效率和实现装备的敏捷实验和运用,有效降低装备试验费用、缩短试验周期,并提高设备的使用寿命;在生产制造阶段,文献[37]提出了一种压力驱动的筛板塔模型,该模型使用设计相关性来计算压降以及液体和蒸气的滞留量,提高生产工艺水平;在产品维护阶段,文献[38]通过高精度物理模型、历史数

据、传感器数据的数字实体模型实现对航空发动机的维护,预测安全事件及时发现问题并激活自修复机制,从而减轻损伤和退化。数字孪生能够实现虚拟与现实的双向耦合,为物理现实的生产提高扩展能力,在一定程度上解决企业分工困难,从而进一步提高生产力。

工业数字孪生以数据与模型的集成融合为核心的新模式,通过在数字空间构建物理对象的精准数字化映射,基于分析预测形成最佳综合决策,实现工业全业务流程的闭环优化。但是,数字孪生目前仍是一个新兴的技术,在很多方面仍处于探索阶段,如建模工作量大、周期长,针对不同场景需要设计不同数据分析模型等。未来,随着工业互联网架构 2.0 的推广及应用将极大促进 DT 技术的发展,DT 技术的应用也反过来推动工业互联网的发展,以此驱动工业互联网生产方式和制造模式的全新变革。

3.5 区块链技术

工业互联网平台在部署过程中工业数据需要上云,企业对自身隐私数据泄露存在担忧而不愿参与其中,阻碍了工业互联网平台的推广。因此需要一项技术解决工业互联网中博弈多放的互信协作问题,以及各企业对自身数据的控制权问题。区块链是由多种技术集成创新形成的分布式网络数据管理技术^[39],通过区块链的加密算法、访问控制、隐私保护、入侵检测等技术,可以实现工业企业内部各个环节的数据共享、网络加密及访问权限控制等功能,并且可以利用区块链分布式的特点促进产业链的协同和产融协同。

目前,区块链赋能工业互联网已经得到了一定的研究和应用。针对 IIoT 中传感器设备生成的图像泄露问题,文献[40]提出了一种基于私有链的面向 IIoT 网络计算系统的图像加密方案,加强了图像数据的私密保护以及安全性保护;针对工业互联网标识解析系统存在的数据完整性、真实性问题,文献[41]基于混合共识、一致性哈希等技术设计一种高性能的轻量级混合区块链模型 LHB,以异步的方式实现可信验证和冗余备份,通过对全网区块存证,防止篡改和伪造数据;针对工业服务层平台安全保护问题,文献[42]基于 oneM2M 物联网标准和区块链混合应用开发了一种面向工业领域的物联网服务层平台。由此看出,区块链影响着工业互联网中物理设备安全、网络加密保护、平台隐私保护以及数据互联共享等多方面的发展与演化。

工业互联网平台下两种技术在兼容与调和过程中并不是简单的技术嵌入,而是需要在更多模式上进行升级。对于区块链如何同工业互联网平台进行业务上的集成与融合、各项标准制定也是未来需要研究的重点。随着“区块链+工业互联网”融合研究以及各项标准制度的发展与完善,再加上对区块链核心技术的不断研究和更多模式上的升级和探索,区块链技术将在工业互联网中网络安全保障、资源高效分配、制造数据追溯、智能协同制造等方面发挥更大的推动作用。

3.6 小结

本节总结了关键技术对工业互联网的支撑作用,列举了目前关键技术在工业领域中的典型应用场景,并分析其应用过程中面临的挑战,关键技术对工业互联网的支撑及应用挑战见表 4。

关键技术是工业互联网发展不可或缺的组成部分,但关键技术与工业互联网的融合还处于初级阶段,除了分析其应用方面面临的挑战,还需要从总体深入分析工业互联网发展面临的挑战及未来研究方向。

4 挑战与未来研究方向

通过以上对工业互联网体系结构的分析以及关键支撑技术的阐述可以看出,目前工业互联网在我国垂直行业数字化转型中起到了较好的支撑作用,但仍然面临政策、经济、技术等多方面的挑战。基于上述挑战,本文也给出了未来可能的研究方向。

4.1 挑战

4.1.1 工业互联网相关政策不完善

我国工业互联网在各行业中已经得到了一定的推广应用,但相关的政策制度尚不完善。首先,设备全面互联互通是工业互联网应用于各产业领域的基础,然而目前存在工业设备生产厂商多,接口标准不统一的突出问题,再加上行业内也缺乏标准的协议,导致设备与系统互操作性弱,也使得对这些多源异构数据分析处理遇到很大的困难^[43]。其次,工业互联网的发展带来的不仅是信息量的爆发增长,还有“人-机-物”多维度、跨层次的交互控制,这些都会带来系统和设备安全的问题。目前我国缺乏工业互联网网络安全产品以及相关信息安全的保障能力,对于敏感和隐私信息泄露以及工业数据交易存在权属不明确、责任不清晰的问题,同时也缺乏强力的法律政策进行约束。

表 4 关键技术对工业互联网的支撑及应用挑战

关键技术	支撑作用	应用场景	应用挑战
5G	工业互联网网络互联的基础设施 <ul style="list-style-type: none"> • 保证海量工业数据实时回传 • 有效满足不同工业场景连接需求 	<ul style="list-style-type: none"> • 5G+超高清视频 • 5G+AR/VR • 5G+无人机 • 5G+云端机器人 • 5G+远程控制 • 5G+机器视觉 • 5G+云化 AGV 	<ul style="list-style-type: none"> • 工业领域需要提高基础设施数字化能力 • 加强对工业领域解决方案的研发
边缘计算	工业互联网的计算基础设施 <ul style="list-style-type: none"> • 降低工业现场复杂性 • 提高工业数据计算的实时性和可靠性 	<ul style="list-style-type: none"> • 设备优化 • 工艺过程优化 • 工厂全价值链优化 	<ul style="list-style-type: none"> • 工业领域存在设备接口标准不统一、测试标准不统一的问题 • 提升边缘计算的互操作性、安全性以及智能边缘操作管理服务
工业智能	工业互联网形成数据优化闭环的关键 <ul style="list-style-type: none"> • 为用户提供指导 	<ul style="list-style-type: none"> • 调度与生产管理场景 • 故障诊断与参数优化场景 • 异常预测与过程控制场景 • 设备/系统预测性维护场景 • 复杂质量（缺陷）监测场景 • 不规则物体分拣场景 • 设备/制造工艺优化场景 • 供应链风险场景 • 产品研发场景 • 企业决策管理场景 • 工艺流程虚拟规划 	<ul style="list-style-type: none"> • 实时性 • 可靠性 • 可解释性
数字孪生	工业互联网平台的重要场景 <ul style="list-style-type: none"> • 对高价值设备或产品进行健康管理 	<ul style="list-style-type: none"> • 设备自动化虚拟调试 • 产品数字化研发 • 工厂三维可视联动 • 设备身份管理 • 设备访问控制 • 设备生产流程管理 • 供应链可视化 	<ul style="list-style-type: none"> • 建模工作量大、周期长 • 不同场景需要设计不同数据分析模型
区块链	工业互联网平台的保障 <ul style="list-style-type: none"> • 解决高价值制造数据的追溯问题； • 辅助制造业不同主体间高效协同 	<ul style="list-style-type: none"> • 工业物流管理 • 工业品回收 • 分布式生产 • 供应链金融 • 租赁 • 二手交易 	<ul style="list-style-type: none"> • 与工业互联网的集成融合 • 标准制定

4.1.2 工业互联网应用与关键技术融合不充分

工业互联网的实施部署对新兴技术和新型基础设施有迫切的需求，需要将技术融入工业互联网网络、平台、安全三大体系。但在融合过程中面临融合不充分的问题，主要体现在如下方面。

- 支持智能物体、平台和人全面互联互通的基础设施不够完善，传统工业控制网络在各层级间协议存在差异，当前网络体系还存在一些缺陷，导致 5G、Wi-Fi 6 在工业互联网应用融合受限^[44-45]。
- 工业生产各个环节（涵盖生产链、产业链和价值链）的泛在感知数据量随着工业互联网的发展呈现爆炸性增长，传统的数据处理能力已经无法满足爆炸性的数据量增加，同时工业现场存在设备接口标准不统一、测试标

准不统一的问题，EC 技术在应用过程中仍面临着数据安全的问题。

- 在工业数据分析方面，信息系统数据、制造执行系统数据还存在海量数据以及缺失数据的问题，客观上导致工业智能挖掘有效数据效率低，同时技术本身也存在可解释性弱的问题。
- 由于工业互联网应用场景复杂多样，导致 DT 建模工作量大、周期长，加上数据分析应用维度较广，需要针对不同场景设计不同数据分析模型，使其建模分析过程非常困难。
- 区块链在融合过程中也面临标准制定不完善的问题。

4.1.3 工业互联网市场应用及管理发展缓慢

工业互联网在我国发展空间巨大，有着丰富的

应用场景以及大规模的市场空间。随着国家的大力扶持与政策的积极推动，各行业积极开展实施并涌现出大量的工业互联网应用案例及管理平台，但这些工业互联网平台在降本增效、提质减存方面的绩效仅仅在内部得到认可，并未在市场得到检验。工业互联网在企业数字化转型方面能够促进其生产组织方式、制造方式等正向变革。同时，工业互联网还需要对“人-机-物”全面连接，“云-边-端”产业架构战略定位、IT网络与运营技术（OT, operational technology）网络融合、“生产-制造-市场”融合，企业上下游高度协同等方面做出管理^[20]。

4.2 未来发展方向

上述工业互联网所面临的挑战大致可以归纳为网络安全、数据管理以及应用3个方面。针对以上挑战，工业互联网需要解决的核心问题在于推动核心技术率先嵌入工业互联网体系中，进而带动技术体系的赋能作用。

一是加强工业互联网网络基础设施的建设，加快对企业内部和外部网络的建设，推进IT网络与OT网络的融合。针对具有高实时性要求的工业场景，一方面需要升级企业内外网络，支持企业升级、建设新型低时延、广覆盖、可定制的网络，实施提速降费政策，降低中小型企业升级成本；另一方面需要推进工业互联网标识解析体系建设，制定并完善工业互联网的体系架构、网络协议及相关标准，融合边缘计算、工业智能等技术实现跨功能域的信息交互^[46]。同时，需要加快推进无线技术与有线技术的协同，特别是加强以5G、Wi-Fi 6等无线技术的融合，实现工业互联网全流程的全面感知与高效传输。工业互联网与新基建的其他六大领域可以实现跨领域跨行业的融合发展，实现不同领域相互促进，为社会经济发展提供新动力。

二是加快升级工业互联网平台体系，包括大数据中心以及其服务体系的建设，深度融合EC、工业智能等信息技术，强化生产过程中的智能分析决策能力。当前，工业互联网在我国的建设和推广初显成效，但仍然有一些企业受资金、技术、人才等因素制约，无法实现规模化数据处理^[27]。因此，加快布局大数据中心建设显得尤为重要。建设国家级工业大数据中心，为工业互联网数据的汇聚、存储、处理、分析提供智能化平台，促使工业软件与平台融合，促进数据要素的流通共用，降低企业升级数据处理能力成本，提升数据驱动政府治理水平和

数据赋能实体经济的能力^[2]。

三是推进工业互联网安全分类分级管理体系的建设，明确不同级别网络安全管理的要求，有针对性地提升安全保障，针对设备芯片与操作系统实现设备层的安全加固、优化，深度融合区块链等安全技术。通过强化区域内产业链协同，加速区域工业互联网平台建设，融合区块链、网络建设等技术提升区域内的安全保障，发挥平台建设优势^[47]。未来对工业互联网的安全防护将由传统的被动式防护转变为持续响应的智能新模式，旨在实现一种全面预测、基础防护、主动反应、自主恢复的能力，以此应对不断变化的高级威胁。

四是加快工业互联网在各行业中应用模式的创新发展，以满足不同企业的业务需求。当前，我国互联网正处于由消费转向产业的过渡期，工业互联网在工业智能生产应用方面缺乏相关专业的技术指导以及服务能力。通过工业互联网与新一代信息技术的深度融合，在不同行业中实现应用模式创新发展，才能够满足各行业在各环节的需求，促进融合应用的发展，为工业互联网自主创新提供了新的可行方向。

5 结束语

工业互联网是第四次工业革命变革的核心，其体系架构对各行业有着指导作用，将新一代信息技术融入工业体系中，对经济发展、社会管理等有着积极的影响。本文基于工业互联网的相关发展背景和赋能应用实例分析了其体系架构以及技术体系，总结了工业互联网与新一代信息技术融合的现状以及面临的挑战。工业互联网与信息技术的融合还处于探索阶段，亟须加快推进网络、数据等新型基础设施的建设并赋能多行业领域，相信随着国家政策以及技术研究的发展，工业互联网将会迈向一个新的台阶。

参考文献：

- [1] 陶永, 蒋昕昊, 刘默, 等. 智能制造和工业互联网融合发展初探[J]. 中国工程科学, 2020, 22(4): 24-33.
TAO Y, JIANG X H, LIU M, et al. A preliminary study on the integration of intelligent manufacturing and industrial Internet[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(4): 24-33.
- [2] 工业互联网产业联盟. 工业互联网平台白皮书(2017)[EB]. 2017. Industrial Internet Consortium. White paper on industrial internet platform (2017)[EB]. 2017.

- [3] 中国信息通信研究院. 工业互联网产业经济发展报告(2020年)[EB]. 2020.
China Academy of Information and Communications Technology. Industrial internet industry economic development report(2020)[EB]. 2020.
- [4] 陈肇雄. 深入实施工业互联网创新发展战略[J]. 行政管理改革, 2018(6): 17-20.
CHEN Z X. Deeply implementing the innovation development strategy of industrial internet[J]. Administration Reform, 2018(6): 17-20.
- [5] 祝毓. 国外工业互联网主要进展[J]. 竞争情报, 2018, 14(6): 59-65.
ZHU Y. Development of industrial internet in foreign countries[J]. Competitive Intelligence, 2018, 14(6): 59-65.
- [6] 王建伟. 发展工业互联网平台体系 推动两化融合迈上新台阶[J]. 中国信息化, 2018(4): 9-11.
WANG J W. Develop the industrial internet platform system and promote the integration of the two industrializations to a new level[J]. Zhongguo Xinxihua, 2018(4): 9-11.
- [7] 工业互联网产业联盟. 工业互联网体系架构(版本 1.0)[EB]. 2016.
Industrial Internet Consortium. Industrial internet architecture (Version 1.0)[EB]. 2016.
- [8] 通用电气公司(GE). 工业互联网: 打破智慧与机器的边界[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
General Electric(GE) and Accenture. Industrial internet: pushing the boundaries of minds and machines[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2015.
- [9] Organized by the editorial department of this newspaper. Three major challenges in building an industrial Internet network system[N]. China Information Weekly, 2021-05-10.
- [10] Industrial Internet Consortium. The industrial internet reference architecture technical document[EB]. 2015.
- [11] LIU Y. Internet of everything for new industrial revolution[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2016: 96-98.
- [12] 中国电子技术标准化研究院. 工业物联网白皮书(2017版)[EB]. 2017.
China Electronics Standardization Institute. White paper on industrial internet of things (2017 Edition)[EB]. 2017.
- [13] VAIDYA S, AMBAD P, BHOSLE S. Industry 4.0 - A glimpse[J]. Procedia Manufacturing, 2018, 20: 233-238.
- [14] BREQUE M, DE NUL L, PETRIDIS A. Industry 5.0: towards a sustainable, human-centric and resilient European industry[J]. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2021.
- [15] 杨帅. 工业 4.0 与工业互联网: 比较、启示与应对策略[J]. 当代财经, 2015(8): 99-107.
YANG S. Industry 4.0 and industrial internet: comparison, insights and response strategies[J]. Contemporary Finance & Economics, 2015(8): 99-107.
- [16] BREQUE M, DE NUL L, PETRIDIS A. Industry 5.0. towards a sustainable, humancentric and resilient European industry[J]. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2021.
- [17] MITTAL S, KHAN M A, ROMERO D, et al. Smart manufacturing: characteristics, technologies and enabling factors[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2019, 233(5): 1342-1361.
- [18] 向涛. 基于 5G 网络的工业互联网应用研究[J]. 中国新通信, 2019, 21(22): 31-32.
XIANG T. Research on industrial internet applications based on 5G networks[J]. China New Telecommunications, 2019, 21(22): 31-32.
- [19] 杨智超, 许强, 刘佳昌. 在“新基建”背景下基于视联网技术建设工业互联网的战略考量[J]. 信息安全与通信保密, 2020, 18(6): 101-107.
YANG Z C, XU Q, LIU J C. Strategic considerations of building industrial Internet based on 'V2V' communication protocol in the context of new infrastructure construction[J]. Information Security and Communications Privacy, 2020, 18(6): 101-107.
- [20] 工业互联网产业联盟. 工业互联网体系架构 2.0[EB]. 2020.
Industrial Internet Consortium. Industrial internet architecture 2.0[EB]. 2016.
- [21] SERIES M. IMT vision—framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond[J]. Recommendation ITU, 2015, 2083.
- [22] 工业和信息化部. 智能制造发展指数报告(2020)[EB]. 2021.
Ministry of Industry and Information Technology. Smart manufacturing development index report (2020)[EB]. 2021.
- [23] SIRIWARDHANA Y, PORAMBAGE P, YLIANTTILA M, et al. Performance analysis of local 5G operator architectures for industrial Internet[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(12): 11559-11575.
- [24] ALEKSY M, DAI F, ENAYATI N, et al. Utilizing 5G in industrial robotic applications[C]//Proceedings of 2019 7th International Conference on Future Internet of Things and Cloud (FiCloud). Piscataway: IEEE Press, 2019: 278-284.
- [25] 工业互联网产业联盟. 工业互联网园区网络白皮书[EB]. 2020.
Alliance of Industrial Internet. Industrial internet park network white paper[EB]. 2020.
- [26] GUNDALL M, SCHNEIDER J, SCHOTTEN H D, et al. 5G as enabler for industrie 4.0 use cases: challenges and concepts[C]//Proceedings of 2018 IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1401-1408.
- [27] 工业和信息化部. 工业互联网创新发展行动计划(2021-2023)[EB]. 2021.
Ministry of Industry and Information Technology. Action plan for industrial internet innovation and development (2021-2023)[EB]. 2021.
- [28] 边缘计算产业联盟. 边缘计算产业联盟白皮书[EB]. 2016.
Edge Computing Consortium. White paper of edge computing consortium[EB]. 2016.
- [29] 张健, 王震, 石鑫磊, 等. 边缘计算在储能领域的应用[J]. 中国科技投资, 2019(35): 296.
ZHANG J, WANG Z, SHI X L, et al. Application of edge computing in the field of energy storage[J]. China Venture Capital, 2019(35): 296.
- [30] LI Z, ZHOU X, QIN Y F. A survey of mobile edge computing in the industrial Internet[C]//Proceedings of 2019 7th International Conference on Information, Communication and Networks (ICIN). Piscataway: IEEE Press, 2019: 94-98.
- [31] SHI W S, CAO J, ZHANG Q, et al. Edge computing: vision and challenges[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2016, 3(5): 637-646.
- [32] 李庆, 刘金娣, 李栋. 面向边缘计算的工业互联网工厂内网络架构及关键技术[J]. 电信科学, 2019, 35(S2): 160-168.

- LI Q, LIU J D, LI D. Network architecture and key technologies in industrial Internet factory oriented to edge computing[J]. Telecommunications Science, 2019, 35(S2): 160-168.
- [33] 工业互联网产业联盟. 工业智能白皮书[EB]. 2020. Industrial Internet Consortium. Industrial intelligence white paper[EB]. 2020.
- [34] ZHANG Z, LI L, ZHAO W. Tool life prediction model based on GA-BP neural network[J]. Materials Science Forum, 2016, 836/837: 256-262.
- [35] 肖畅, 吕立华. 全栈式机器学习在钢铁流程智能制造中的应用[J]. 宝钢技术, 2021(2): 24-31. XIAO C, LYU L H. Application of full stack machine learning in intelligent manufacturing of steel process[J]. Baosteel Technology, 2021(2): 24-31.
- [36] 左毅, 樊志强, 曹江, 等. 基于数智孪生的装备全周期敏捷试验技术[J]. 装备环境工程, 2021, 18(4): 57-63. ZUO Y, FAN Z Q, CAO J, et al. Digital-intelligence twins based full-cycle agile test technology of equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(4): 57-63.
- [37] KENDER R, KAUFMANN F, RÖBLER F, et al. Development of a digital twin for a flexible air separation unit using a pressure-driven simulation approach[J]. Computers & Chemical Engineering, 2021, 151: 107349.
- [38] 刘魁, 王潘, 刘婷. 数字孪生在航空发动机运行维护中的应用[J]. 航空动力, 2019(4): 70-74. LIU K, WANG P, LIU T. The application of digital twin in aero engine operation and maintenance[J]. Aerospace Power, 2019(4): 70-74.
- [39] 工业互联网产业联盟. 工业区块链应用白皮书(1.0版)[EB]. 2019. Industrial Internet Consortium. White paper on industrial blockchain applications (Version 1.0)[EB]. 2019.
- [40] KHAN P W, BYUN Y. A blockchain-based secure image encryption scheme for the industrial internet of things[J]. Entropy, 2020, 22(2): 175.
- [41] 赵浩然, 张继栋, 谢人超, 等. LHB: 用于工业互联网标志解析的轻量级混合区块链模型[J]. 计算机应用研究, 2021, 38(9): 2594-2599. ZHAO H R, ZHANG J D, XIE R C, et al. LHB: lightweight hybrid blockchain model for industrial Internet identification and resolution[J]. Application Research of Computers, 2021, 38(9): 2594-2599.
- [42] LEE C, SUNG N, NKENYEREYE L, et al. Blockchain enabled Internet-of-things service platform for industrial domain[C]//Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Industrial Internet. Piscataway: IEEE Press, 2018: 177-178.
- [43] 唐飞泉, 杨律铭. 工业互联网发展难题破解[J]. 开放导报, 2019(2): 98-102. TANG F Q, YANG L M. The countermeasures of the development of industrial internet[J]. China Opening Journal, 2019(2): 98-102.
- [44] 工业互联网产业联盟. 5G边缘计算安全白皮书[EB]. 2021. Industrial Internet Consortium. 5G edge computing security white paper[EB]. 2021.
- [45] 工业互联网产业联盟. 工业互联网时间敏感网络产业白皮书[EB]. 2020. Industrial Internet Consortium. Industrial internet time-sensitive networks industry white paper[EB]. 2020.
- [46] 工业互联网产业联盟. 工业互联网标识解析标准化白皮书[EB]. 2021. Industrial Internet Consortium. White paper on standardization of industrial internet identity resolution[EB]. 2021.
- [47] 工业互联网产业联盟. 工业互联网平台白皮书(2019)[EB]. 2019.

Industrial Internet Consortium. Industrial internet platform white paper(2019)[EB]. 2019.

[作者简介]



亓晋 (1983-), 男, 博士, 南京邮电大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为工业互联网、信息物理系统和能源互联网等。



王微 (1997-), 女, 南京邮电大学硕士生, 主要研究方向为工业互联网、能源优化管理等。



陈孟玺 (1997-), 男, 南京邮电大学硕士生, 主要研究方向为工业互联网、容器调度等。



许斌 (1981-), 男, 博士, 南京邮电大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为进化计算、面向服务的制造业、物联网。



董振江 (1970-), 男, 博士, 南京邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为计算机视觉、车联网、人工智能和信息安全。



孙雁飞 (1976-), 男, 博士, 南京邮电大学研究员、博士生导师, 主要研究方向为工业互联网、能源互联网、大数据管理与分析、智能优化与控制等。