



中国工程科学
Strategic Study of CAE
ISSN 1009-1742, CN 11-4421/G3

《中国工程科学》网络首发论文

题目：面向智能制造的自主可控工业互联网发展研究
作者：袁礼伟，王耀南，谭浩然，方遒，李哲
收稿日期：2024-12-22
网络首发日期：2025-04-23
引用格式：袁礼伟，王耀南，谭浩然，方遒，李哲. 面向智能制造的自主可控工业互联网发展研究[J/OL]. 中国工程科学.
<https://link.cnki.net/urlid/11.4421.G3.20250423.1135.002>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

面向智能制造的自主可控工业互联网发展研究

袁礼伟^{1,2}, 王耀南^{1,2}, 谭浩然^{1,2*}, 方遒^{1,2}, 李哲^{1,2}

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 长沙 410082; 2. 机器人视觉感知与控制技术国家工程研究中心, 长沙 410082)

摘要：在制造业与新一代信息技术深度融合发展并加速智能化变革的背景下，亟需突破工业软件研发、高端装备制造等“卡脖子”技术环节，构建自主可控工业互联网技术体系以支撑智能制造全流程优化。本文梳理了智能制造与工业互联网的发展现状，从工业互联网技术要素、基于工业互联网的智能制造技术要素、自主可控工业互联网软硬件系统3个方面呈现了面向智能制造的自主可控工业互联网技术体系全貌；系统总结了面向智能制造的自主可控工业互联网技术示范应用，涵盖自主可控的机器人化智能制造、基于自主可控工业互联网的工业检测与感知、面向智能制造的网络化多机协同控制、面向智能制造的多机协同调度规划；进一步研判了面向智能制造的自主可控工业互联网的当前挑战和技术方向。可积极应用第五代移动通信、自主可控工业软件、工业互联网“云边端”协同、搭载国产分布式操作系统的机器人、自主可控的多机协同制造技术，同时加快构建自主可控标准体系，驱动工业互联网与智能制造的融合发展，为我国制造业稳健升级和高质量发展开辟新途径。

关键词：工业互联网；智能制造；自主可控；机器人；软硬件系统；示范应用

中图分类号：TP18 **文献标识码：**A

Independent and Controllable Industrial Internet for Intelligent Manufacturing

Yuan Liwei^{1,2}, Wang Yaonan^{1,2}, Tan Haoran^{1,2*}, Fang Qiu^{1,2}, Li Zhe^{1,2}

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. National Engineering Research Center of RVC, Changsha 410082, China)

Abstract: As the manufacturing industry integrates deeply with the next-generation information technology and accelerates its transformation to intelligence, it is necessary to break the technical bottlenecks regarding industrial software development and high-end equipment manufacturing and establish an independent and controllable industrial Internet technology system to support the optimization of the entire process of intelligent manufacturing. This study analyzes the current status of intelligent manufacturing and industrial Internet, and presents an overall picture of the independent and controllable industrial Internet technology system for intelligent manufacturing from three aspects: industrial Internet technologies, intelligent manufacturing technologies based on industrial Internet, and independent and controllable software and hardware systems for industrial Internet. Moreover, this study summarizes the demonstrative applications of independent and controllable industrial Internet technologies for intelligent manufacturing, covering independent robotized intelligent manufacturing, industrial detection and perception based on independent and controllable industrial Internet, networked multi-robot collaboration for intelligent manufacturing, and multi-robot collaborative scheduling for intelligent manufacturing. The current challenges and technical directions of independent and controllable industrial

收稿日期：2024-12-22；修回日期：2025-03-25

通讯作者：*谭浩然，湖南大学电气与信息工程学院副教授，研究方向为智能制造、工业互联网、机器人控制技术；E-mail: tanhaoran@hnu.edu.cn

资助项目：中国工程院咨询项目“湖南省人工智能产业创新发展战略研究”(2023-DFZD-61)；国家自然科学基金项目(62293510)；湖南省科技重大专项(2021GK1010)

本刊网址：sscae.engineering.org.cn

Internet for intelligent manufacturing are also identified. Furthermore, it is proposed to actively apply technologies including the fifth-generation mobile communications, independent and controllable industrial software, cloud-edge-end collaboration of industrial Internet, robots equipped with domestic distributed operating systems, and independent and controllable multi-robot collaborative manufacturing. Meanwhile, it is necessary to accelerate the construction of an independent and controllable standards system to drive the integrated development of the industrial Internet and intelligent manufacturing, creating new paths for the upgrading and high-quality development of China's manufacturing industry.

Keywords: industrial Internet; intelligent manufacturing; independent and controllable; robotics; hardware and software system; demonstration application

一、前言

智能制造是高度柔性化及集成化、决策自动化的系统^[1-3],通过计算机模拟人类专家的智能活动,能够自适应复杂的工业制造环境。智能制造自20世纪80年代兴起,主要经历3个发展阶段:在数字化阶段,由计算-通信-控制技术驱动,实现基础信息化^[4,5];在网络化阶段,以万物互联技术为支撑,形成全流程协同能力^[6,7];目前进入智能化阶段,以人工智能(AI)+大数据+云计算深度融合的方式,逐步构建数据驱动的自主决策系统^[8,9]。智能制造的演进过程,反映了制造业从能量驱动向信息驱动的根本性转变——随着产品复杂度的提升,信息量呈指数级增长,制造系统对信息处理能力的需求超越传统技术极限,使智能制造成为新工业革命的核心驱动力。

制造企业集成工业互联网系统,可以实现远程运维、供应链实时响应、产品个性化定制等新型服务模式,在引入数据分析和优化算法后赋予生产线以自主调节生产参数的能力。在智能化的前沿研究方面,依托第五代移动通信(5G)^[10]、工业互联网^[11,12]、AI^[13,14]、云计算^[15,16]、集群机器人^[17]、数字孪生^[18]等技术,形成“数据采集-智能分析-自主执行”的闭环制造体系。然而,在全球产业竞争加剧、地缘冲突风险攀升的背景下,我国工业互联网发展面临严峻挑战:高端工业芯片、核心工业软件、实时操作系统等关键产品较多依赖进口,关键设备与协议“黑箱化”导致供应链安全风险,数据跨境流动、系统互操作方面标准话语权缺失。为此,构建自主可控的工业互联网技术体系,既是我国工业技术创新的必然要求,更是维护制造业发展安全、实现产业链高端化的战略选择。

有别于广义工业互联网的通用性概念,本文提出自主可控工业互联网,突出技术自主研发、供应链安全的双重属性,具有3个层级的内涵:①完全

自主知识产权层级,即工业操作系统、协议栈、智能算法等核心技术具有完整的自主研发能力,支持从架构设计到代码实现的全链条可控;②部分替代依赖层级,针对短期内难以突破的“卡脖子”环节(如高端传感器、精密控制器),通过异构冗余设计、多源供应商管理形成替代方案,降低单一技术路径的风险;③供应链安全可控层级,建立涵盖研发、生产、运维的全生命周期可信保障机制,确保核心组件的稳定供应和数据主权归属的明确性。这3个层级的内容具有递进关系,有助于稳健形成技术突破与风险缓释的立体化保障体系。

本文围绕更好发挥自主可控工业互联网技术对智能制造的关键赋能作用这一主旨,面向核心技术国产化替代的核心层级,探讨自主可控工业互联网与智能制造的协同发展路径,展望面向智能制造的自主可控工业互联网技术突破方向。相关内容有助于形成可复制推广的自主化技术方案,推动工业互联网技术从“可用”向“可信、可控、可替代”的更高维度演进,保障我国智能制造在全球竞争格局中占据优势。

二、智能制造与工业互联网发展现状

(一) 智能制造发展现状

智能制造是现代制造业转型的重要趋势,与前沿科技深度融合,引领制造业的数字化、智能化变革。在全球范围内,智能制造发展迅猛,衍生出一系列特色技术突破与应用范式。

我国智能制造正处于蓬勃发展期,相关国家政策推动制造业稳健转型智能化和高效化。在制造企业层面,以比亚迪为代表的诸多汽车品牌,建立智能化生产线和自动化装配流程,实现汽车从设计、制造到检测的全过程智能化管理;建成智能工厂,显著提高制造能力^[19]。尽管已有长足进步,但我国智能制造仍面临对国外高端装备技术依赖性强、面

向中小企业推广缓慢、标准化体系不完善等挑战，制约了全球产业链上的地位提升、自主技术的应用兼容性。

以德国、美国、日本为代表的制造业强国，也在大力推进智能制造发展，进而带动全球制造业的数字化转型。德国提出“工业4.0”，将物联网、大数据、云计算等技术与制造过程深度融合，提升了生产的自动化水平和灵活度^[20]。例如，西门子股份公司基于“数字化工厂”概念建立了高度自动化和互联的生产系统，产品的制造合格率达到99.998%，成为全球智能制造的标杆。美国工业界积极推广智能制造，如通用电气公司在工业互联网平台上融入大数据和AI技术，实现预测性维护与生产优化，兼顾简化维护与提升效率^[21]。日本丰田汽车公司采用“外部合作+自主研发”双轨策略，推动大数据、超高速通信及互联汽车技术应用，加速企业智能制造转型^[22]。

后续，智能制造将更显多元化、融合化、智能化，与数据驱动^[23]、深度学习^[24]等技术结合，推动制造业更加智能、高效、快捷发展；也将实现高度的自动化生产、个性化定制、产业链协同，促进制造业从“制造”向“智造”转型升级。也要注意，国际智能制造领域依然面临与现有系统兼容、网络安全风险、标准统一等方面的挑战，需要更多关注安全性^[25]、互用性^[26]。

（二）工业互联网发展现状

工业互联网是推动制造业向网络化、智能化、服务化转型升级的重要支撑。美国、德国、日本等制造业强国同样在工业互联网领域表现突出。例如，通用电气公司率先推出工业互联网平台，通过大数据分析、物联网技术提升工业设备的运营效率^[27]；西门子股份公司在工业互联网平台上集成数据采集与分析功能，支持制造企业优化生产流程、提高设备使用率^[28]；日本推动相关企业建立并深入应用物联网平台，促进跨企业、跨行业生产合作。然而，数据隐私安全风险、标准化不足等因素仍然在制约跨国生产的合作水平^[29]。

我国的工业互联网发展与美国、德国、日本等制造业强国基本同步，形成了特色路径和比较优势。2022年，我国工业互联网产业增加值超过4万亿元，支撑制造业高质量转型并成为新的经济增长

点。例如，海尔集团公司推出了基于工业互联网的大规模产品定制平台，提升了生产效率和客户满意度。华为技术有限公司建立“5G+云+AI”的工业互联网架构，支持应用企业在云端进行数据实时分析和决策，显著缩短产品研发周期。比亚迪股份有限公司建设了基于工业互联网的智能生产线，大幅提高汽车零部件的生产精度及效率。工业互联网应用进展良好，后续需着力解决混合关键性隔离、容错设计、可扩展性、网络安全防护等方面的不足^[30]。

我国是全球制造业大国，需要加快建立自主可控的工业互联网产业体系和行业标准，确保相关核心技术、关键环节不再受制于人。目前，中低端工业互联网产业链基本实现自主可控，但以微控制器、数字信号处理芯片为代表的高端工业芯片，工业操作系统，控制软件等软硬件的自主可控率存在不足，仍需依赖国际市场供给。后续，5G、大数据、AI等技术进一步融入，工业互联网的应用将不断深化^[31]。此过程中伴生着设备兼容性、网络安全风险、数据隐私保护等问题^[32]，需要积极应对以确保工业互联网的稳健发展与全面应用。

三、面向智能制造的自主可控工业互联网技术体系

（一）工业互联网技术要素

工业互联网是基于互联网、物联网技术的先进制造模式，核心在于全面连接、感知、分析、优化生产过程的各个环节，支持设备、工序、人员之间实时开展信息交互和协同工作，提升制造业的智能化、高效化、灵活化水平^[33]。美国通用电气公司在2012年首次提出工业互联网概念^[34]，旨在实现人、机、物、系统的连接，分析工业大数据产生更高价值的信息^[35]。德国定义“工业4.0”，目的是利用信息与通信技术实现机器和工业过程的智能互联^[36]。在我国，工业互联网被普遍视为新一代信息技术与制造业深度融合的产物，以数字化、网络化、智能化为主要特征，属于新工业革命的关键基础设施。近年来，工业互联网引入5G、AI大模型、数字孪生等前沿技术，赋予生产过程以智能化的监控、预测、优化能力，在进一步提高生产效率的同时，更好保障智能制造的安全和可靠性。

5G是先进的无线通信技术标准，在网络速度、容量、延迟等方面相较前代移动通信技术实现大幅提升，能够支撑各类新技术的创新应用。5G融合边缘计算，在靠近数据源头的网络边缘侧就近提供智能服务，满足敏捷联接、实时业务、应用智能、安全与隐私保护等行业数字化的关键需求^[37,38]。5G网络中引入网络切片技术，提供定制化的网络服务以高效满足差异化网络服务需求，实现一网多用^[39]。

大模型技术加速自然语言开发创新，革新开发交互模式^[40]。工业互联网与大模型技术结合，有望引发智能制造领域内的深刻变革^[41]。就目前的进展看，虽然基础大模型很难直接应用到工业制造环节，但基础大模型提供方与制造企业可以合作开发具有针对性的行业大模型。近期，我国已有一些深度融合AI的工业互联网平台，支持端到端并行训练优化、场景模型迁移、大模型应用集成等任务。

工业数字孪生集成多种数字化技术，推动智能制造的创新性应用^[42]。在数字空间中应用建模工具构建精确的物理对象模型，经由实时物联网数据驱动模型的运行；数字孪生技术与现实数据、虚拟模型融合，支持综合决策能力提升，优化工业生产全流程^[43]。

（二）基于工业互联网的智能制造技术要素

针对传统制造依赖集中式控制、多为标准化流水线作业，缺乏灵活性，难以适应产品个性化、快速响应生产、高效资源配置等需求的不足，柔性制造系统、可重构制造系统成为有潜力的改进方案^[44]：前者可在同一系统上生产具有可变组合的多种产品，但吞吐量较小；后者力求综合柔性制造系统、专业生产线的优点，但涉及对生产配置、零件制造进行复杂的分析及规划。立足当前的研究与应用进展，基于工业互联网的智能制造关键技术主要分为3个方面。

1. 分布式模块化技术

分布式模块化的核心理念是开展模块化设计和分布式控制，支持动态配置与扩展，适用于批量生产、高度定制化和柔性生产。生产流程包含加工、物流、质检等功能模块，各模块均配置独立控制单元，用于增强制造系统的鲁棒性，由此形成分布式智能制造系统。分布式智能制造系统强调具有自主

决策能力^[45]，其中的模块可视作独立智能体，根据局部实时信息自主进行决策；各模块之间通过工业互联网实时交换信息，协调工作进度和资源调度。例如，生产过程中一个加工单元完成任务后立即通知物流单元进行运输，减少等待时间并避免资源浪费。良好的适应性与学习能力是分布式智能制造系统另一个显著特征。引入AI、深度强化学习等技术^[46]，相关系统可基于历史生产数据进行不断学习，进而优化自身的决策流程。训练后的智能体可以根据环境变化调整生产计划，通过强化学习逐步提升决策能力，增强分布式系统在面对复杂生产环境时的应变能力。

模块化设计指将产品划分为独立模块并实现功能优化，模块内部的物理结构、功能结构具有高度的一致性，模块之间存在弱的相互依赖性^[47]。相比传统制造，模块化制造不仅降低设计复杂性和全生命周期成本，而且提高产品质量和制造灵活性；支持零部件的标准化与重复使用，显著缩短新产品开发周期。引入数字孪生技术为模块化生产提供虚实融合的管控能力，构建的高保真生产系统模型支持模块化节点的动态重组和快速调整。此外，模块化生产将复杂的生产流程分解为可独立设计和执行的模块，激励单一企业专注自身优势领域，形成高效的分工协作模式，促进产业链的深度协作。这种垂直分工模式可显著提升制造企业的生产效率和响应速度，为构建智能制造生态体系筑牢能力基础。

2. 大模型与机器人制造技术

在智能制造领域，大模型、机器人制造技术获得广泛关注。工业机器人包括机械臂、自动导引车（AGV）、各类带有复杂传感器的机器人，具有操作精度高、作业灵活的特点，在诸多工业生产场景中得到应用。近年来，大模型技术发展迅速，在多模态信息处理、大规模数据集处理、人机协作方面具有显著优势，赋予制造技术创新发展新动能。例如，工业预训练大模型使用工业数据集进行预训练、面向特定业务场景进行微调、集合领域专业知识开展增量学习，形成解决制造业细分场景中任务的能力^[48]；据此构建的智能制造系统，能够自主识别和理解关键信息，在复杂制造过程中作出决策，在执行过程中进行自我优化和持续学习。

机器人制造是智能制造的核心技术之一。在早期，机器人只能按照存储器中的程序执行简单、机

械的工业任务（如抓取、搬运、包装等动作），一旦生产环境发生变化就需重新设计程序。随着传感器、控制技术的进步，机器人通过视觉、听觉、触觉等传感器获取并处理工业环境和作业目标的变化信息，动态调整自身行为，进而提高机器人制造的精确度和灵活性。AI技术则推动机器人制造的智能化、自主化、高效化发展。

机器人制造与大模型的深度结合，推动机器人在语言交互、多模态感知、智能决策、个性化交互、自主学习等方面不断提升能力以及朝着具身智能方向发展，以工业机器人的自主设计、决策、任务执行为关注重点。大模型与工业机器人的结合框架（见图1）主要包含3个步骤^[49]。①任务与过程参数匹配，细分为指令解析、命令执行两个阶段：对于前者，大模型通过少样本学习提取特定的制造任务，如增材制造打印、夹紧等；对于后者，大模型设置场景布局，根据前面阶段的任务提取，为工业机器人选择匹配的末端执行器。②自主执行任务，以末端执行器的路径规划为例，机器人与末端执行器耦合后，大模型进行连续决策来构造末端执行器的路径，引入应用程序编程接口（API）、错误模块、反射机制等，纠正执行任务的动作。③大模型与工业机器人集成，经大模型训练后的智能体与任务设计、执行能力紧密结合，支持具身智能机器人在实际工业场景下的高效运作。

3. “云边端”协同技术

接入工业互联网的智能设备数量不断增加，产生了高维、异构的实时工业数据^[50]。处理与分析实

时工业数据，有助于提高生产效率和产品质量。“云边端”协同技术用于增强智能制造系统的数据处理和分析能力，支持实时监控制造过程、及时作出调整和新的安排，保障生产制造的高效化和智能化。“云边端”协同技术广泛应用于工业制造场景，如加工过程中的设备故障诊断、预测性维护、生产质量监控等^[51]，增强了制造过程的灵活度和效率，实现了智能化管理。

“云边端”协同是集成云计算、边缘计算、终端设备的分布式计算架构^[52]，通过各种计算层的紧密协作，建立高效、智能、低延时的数据处理与业务执行能力（见图2）。在该架构中，云、边、端承担独立任务，再经功能互补构成完整的智能系统。终端是整个系统的感知层和执行层，包含传感器、摄像头、工业机器人等智能化设备，主要负责工业数据的实时采集、具体操作的有效执行。边缘端是部署在靠近数据源的边缘服务器、网关等设备，对终端采集的数据进行实时分析和处理，执行异常检测、实时监控等任务。相较云端，边缘计算更靠近数据产生的场所，能有效完成时间敏感型任务，降低数据传输的时延。云端是具有强大计算能力和存储容量的远程服务器及计算中心，在整个架构中处于核心层次，承担大规模的数据处理、复杂的大模型训练、高容量的数据存储等任务。云端生成的策略、训练好的模型下发至边缘端和终端，支持智能制造系统开展更加高效和智能的生产控制与决策执行。

“云边端”协同涉及多项关键技术，以高效稳

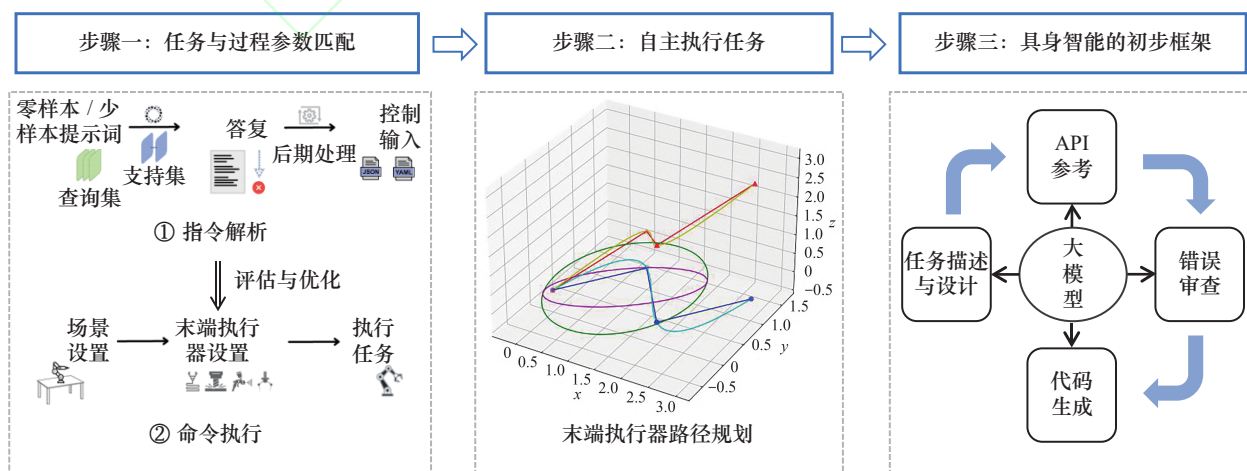


图1 大模型与工业机器人的结合框架
注：x，y，z表示三维坐标。

定的数据传输和通信协议为基础。常用的工业物联网协议有消息队列遥测传输、OPC UA、Modbus 等，用于大规模设备和传感器的数据传输、管理、监控、控制。5G 能够突破传统网络的传输瓶颈，为工业现场的多设备互联和实时协作提供通信支持。高效的任务分配和资源调度技术^[53]是实现“云边端”协同的重要基础，将不同类型的任务合理分配到计算节点，高效调度计算资源、存储资源、网络带宽，追求最优的系统性能。常用的调度技术包含负载均衡、优先级调度、基于优化算法的调度、基于机器学习的智能调度等。边缘智能也是“云边端”协同的重要组成部分，将 AI 融入边缘计算，赋予边缘设备以数据处理、分析与决策的能力。在边缘设备部署智能算法，将减少数据传输延迟和云端计算压力，提升系统的实时性与可靠性，为构建高效、智能、可靠的分布式系统提供基础。

（三）自主可控工业互联网软硬件系统

自主可控工业互联网软硬件系统是当前工业数字化转型的重要组成部分，强调核心技术、关键硬件设备、各类软件实现国产化和自主化，尽快摆脱对外部技术的依赖。工业互联网平台体系架构主要包括：行业设备，负责数据的生成和具体操作的执行；边缘层，负责数据采集、向顶层传输数据，分解云端的计算压力；基础设施即服务（IaaS）层，提供平台运行所需的计算、存储、网络服务能力，确保平台的可扩展和灵活性；平台即服务（PaaS）层，提供开发工具、运行环境和 API，用于构建、部署、管理工业应用，增强平台的整体能力；工业软件包含各工业领域的专用软件和行业通用工具（见图3）。

1. 工业互联网硬件系统

硬件系统是工业互联网的基础构成，包含智能

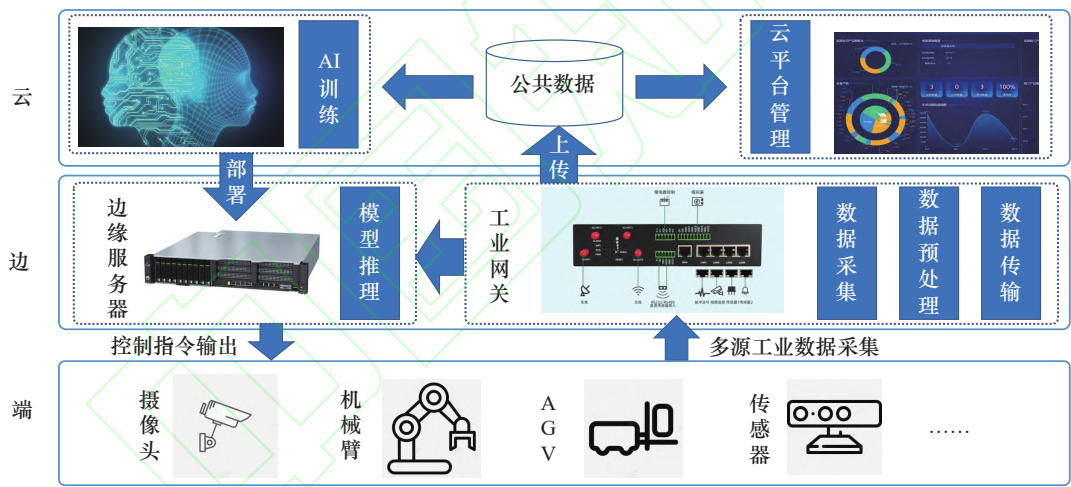


图2 “云边端”协同架构

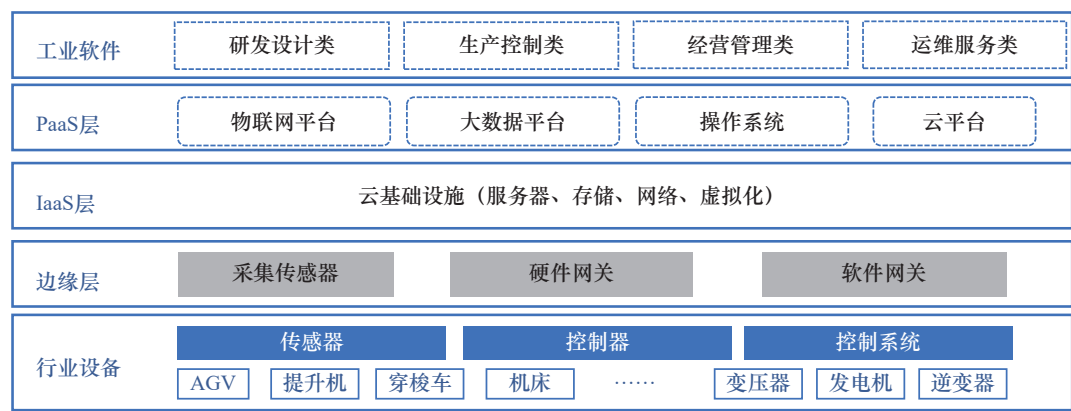


图3 工业互联网平台体系架构

传感器、工业网关、嵌入式设备、边缘计算节点、工业控制器、云端服务器等^[54]。智能传感器采集工业数据、设备状态、加工信息,将相关实时数据传输至上层进行处理。工业网关是连接现场工业设备、上层管理系统的“桥梁”,支持多种通信协议与接口,聚合各类终端采集的数据并上传到边缘计算节点、云端服务器。边缘计算节点、云端服务器对下层设备传输的数据进行处理、分析,支持控制决策。工业控制器、嵌入式设备根据上层系统下发的指令,执行具体的控制和操作。

在硬件系统中,通信协议是确保各类设备高效可靠交换数据的基础。Modbus、CANopen 等现场总线协议,专为自动化控制系统设计,支持跨设备实时传输数据。在特定的工业场景中,移动热点、蓝牙等无线通信技术也获得广泛应用:前者凭借高带宽的优势,适合大数据传输场景;后者具有低功耗特性,常用于短距离设备的通信。以太网/网际互连协议、以太网控制自动化等协议适合高效实时传输数据的工业场景。多样化的通信协议协同工作,为工业互联网硬件系统提供了可靠的数据传输保障。

我国正在推进自主可控的工业互联网硬件系统建设。例如,面向制造产线复杂计算场景,研发基于国产芯片的边缘计算 AI 一体机,以 AI 与边缘计算相结合的方式提升边缘侧的算力及数据处理能力;研发集成开源操作系统的工业控制器,支持自主可控工业互联网硬件系统的可靠应用。

2. 工业互联网软件系统

软件系统是工业互联网的“大脑”,包含操作系统、工业软件、云平台、大数据平台。操作系统是整个工业互联网软件系统的核心,以高性能、高可靠性、高安全性支撑工业生产的复杂需求。国产化工业互联网操作系统主要是以国际开源操作系统(如 Linux、Ubuntu)为底层进行二次开发而形成的。国内企业也研制了面向数字基础设施的开源操作系统,支持服务器、云计算、边缘计算、嵌入式等应用场景^[55]。工业软件是工业技术和相关流程的程序化封装及复用,主要分为研发设计类、生产控制类、经营管理类、运维服务类^[56]。

面向离散制造的典型工业软件有计算机辅助设计(CAD)/计算机辅助工程(CAE)软件、工艺自主规划软件、机器人产线数字孪生软件、机器人

智能制造产线一体化控制软件等。① 对于 CAD/CAE 软件,主要通过建模语言映射、基于文件等方式实现集成。CAD 模型结构复杂、几何计算鲁棒性差,集成过程仍在模型修复及简化、网格生成等方面存在技术难题。工业界采用的方案高度依赖专家经验,需要大量的人工交互,整体效率偏低^[57]。学术界提出了几何分析、无网格方法以试图解决相关问题,但产生了曲面重参数化等问题。CAD/CAE 一体化工业软件仍待攻关突破。② 对于工艺自主规划软件,国际工业软件龙头企业实现全流程数据集成及模型管理,但产品设计、工艺规划依赖人工进行迭代优化^[58]。一些机构开展的研究项目,支持制造过程中的产品设计,构建产品设计和制造工艺一体化建模环境,但多处于演示验证阶段,软件工具尚不成熟。③ 对于机器人产线数字孪生软件,离散工业制造提出了柔性化制造的高要求,数字孪生技术的重要性开始显现^[59]。现有针对离散制造机器人产线的数字孪生软件较少,接口不统一、“信息孤岛”等问题未能完全解决。复杂系统建模则对软件的算法、数据处理能力提出新要求。④ 对于机器人智能制造产线一体化控制软件,工业视觉检测、加工制造流程成为关键的细分方向。当前的工业视觉检测软件依赖传统机器学习算法,不适应随机性强、特征复杂的工作任务。深度学习技术具有应用潜力,但面临缺陷样本匮乏、数据收集及标注成本高昂等问题。机器人高效协同的加工控制技术需要以装配、焊接、磨抛等加工控制一体化软件为基础,但相关软件开发仍存在诸多挑战。

面向流程制造的典型工业软件有驱动集中式企业资源计划(ERP)、制造执行系统(MES)、驱动过程控制系统(PCS)等。当前,流程工业中较多使用 PCS/MES/ERP 三层结构,存在各层系统相对独立、集成度不高的问题,不利于上下游生产单元之间的高效协同及整体优化。后续,基于工业互联网的流程工业智能制造新模式需重点提升制造流程全局优化能力^[60],驱动 PCS/MES/ERP 三层结构转向智能自主控制系统、人机互动及协作的管理与决策智能化系统两层结构,构建面向产品全生命周期的跨企业流程工业智能优化制造模式。

未来,工业软件开发可依托工业互联网平台,以提升软件开发效率和行业利用率为目标,追求云化、智能化、平台化发展^[61],为实施自主可控的智

能制造战略提供坚实保障。

四、面向智能制造的自主可控工业互联网技术示范应用

（一）自主可控的机器人化智能制造

工业互联网、机器人技术作为智能制造的核心驱动力，承担着自动化生产的关键任务^[62]。自主可控机器人事关制造业转型升级、国家经济安全发展、国际竞争力提升^[63]。在工业互联网体系下发展自主可控机器人，需要在技术研发、制造、应用全过程中完全掌握核心技术和生产工艺，降低甚至消除对外部供应链的依赖，主要表现在：自主研发核心零部件，包括高精度减速器、高性能伺服电机、工业级传感器；独立创制关键算法，如机器人运动规划、视觉导航、人机交互等智能算法；全面掌控系统集成和应用生态，尤其是机器人整机设计、软硬件协同开发。此外，自主可控工业互联网监控并保护数据流通、设备连接，为机器人系统的信息安全提供保障；在涉及敏感操作或高价值生产过程时，保障机器人稳定运行并增强自主可控性更显必要。

1. 协作机器人

协作机器人可与人类联合工作，其设计注重安全性、灵活性、易操作性；与传统工业机器人相比，在人机共享的工作环境中可更加安全地与人类协作。协作机器人配置先进的传感器和力控技术，实时感知与人类的接触，在发生碰撞时自动停止或减速以抑制安全隐患；具有高的灵活性，可执行重复性、严格精度要求的任务，如装配、焊接、包装、测试等，极大地提高生产效率^[64]；结合具体工作场景进行简单的编程，或者通过示教器进行快速培训，支持非专业人员准确操作。

我国在自主可控协作机器人方向进展显著，基本实现从技术引进到自主研发的转型，在核心零件、控制技术等关键环节上实现自主可控。市场上出现了许多协作机器人制造企业，如沈阳新松机器人自动化股份有限公司、上海节卡机器人科技有限公司、遨博（北京）智能科技有限公司等，推出了高性能、全面国产化的协作机器人产品，促进了汽车装配、医疗辅助、教育培训等领域的智能化发展。

2. 复合机器人

复合机器人集成多个机器人系统或多类技术，

以移动机器人、机械臂结合到统一平台上为常见形式，具有同时执行多种任务的能力；整合感知环境、规划路径、执行操作等功能，针对复杂任务进行自主或半自主操作。复合机器人克服传统机器人功能单一的局限性，在灵活性、自动化程度、任务复杂度方面具有明显优势，多用于仓储、物流、柔性制造等任务。

例如，遨博（北京）智能科技有限公司联合国内多家供应商、高校，研发了自主可控复合机器人^[65]，攻克了高性能零部件自主可控、多设备融合、系统级安全等关键技术，推动复合机器人在新能源汽车、医药、食品、航空航天等领域的规模化应用。常见的复合机器人主体由机械臂、自主移动机器人融合而成，机身装有激光、视觉、力控等传感模块，具有多模态信息获取能力；采用同一套控制系统对各个部件进行统一控制，实现模块之间的互联互通。

3. 特种机器人

特种机器人用于特定场景或者为特定任务定制，通常执行人类难以完成或不安全的任务；具有特殊的环境适应能力和功能设计，可在极端温度、高辐射、爆炸危险、复杂地形、其他恶劣条件下工作，契合国防装备、应急救援、核工业、海洋探测等方面的特殊应用需求。

例如，中煤科工集团沈阳研究院有限公司研发了搭载国产操作系统的矿用变电所 / 水泵房巡检机器人、矿用危险气体巡检机器人、矿用仿生四足巡检机器人，部分产品正式装配至神东煤炭大柳塔煤矿大柳塔井投入使用^[66]。这是国产操作系统在工业机器人领域的首次应用，为提升矿山智能化水平、推动能源行业高质量发展提供了科技支撑，在减少对国外操作系统的依赖、防范基础软件“卡脖子”风险方面具有重要意义。

4. 人形机器人

人形机器人具有接近人类的外观和动作，能够模拟人类行走、抓取、交流等基本动作；既可执行动作任务，也能采用语音识别、视觉处理等 AI 技术与人类进行交互，在服务业、教育、医疗、工业生产等领域具有良好的应用前景。

例如，华为技术有限公司、乐聚（深圳）机器人技术有限公司联合研发了基于开源操作系统的人形机器人^[67]。该机器人搭载了具身智能大模型，具

有较强的智能化、泛化能力。国产操作系统提供了更有保障的应用安全性,具有与外部传感设备数据互联、超级终端多设备连接的特性,支持人形机器人更加智能和高效地工作。相关机器人已进入新能源汽车工厂进行验证性应用,也在科研、交通劝导、展厅导览、家庭服务等场景中获得应用^[68]。

(二) 基于自主可控工业互联网的工业检测与感知

数据采集与监视控制(SCADA)系统是智能制造工业检测与感知的核心工具^[69],在工业互联网的支持下开展实时数据采集和环境感知,精准监控产品质量和设备状态,参与产品的全生命周期管理,提高供应链的可追溯性^[70]。自动化立体仓库是SCADA系统的典型应用,引入大数据分析、智能调度算法,提升存储效率、物料管理精准度,推动生产和物流的高度集成与优化^[71]。鉴于立体仓库环境与工况的复杂性,穿梭车需要精准、快速地到达指定位置并完成操作^[72],但传统的视觉方法在工况频繁变化的环境下无法实现精准定位、实时健康状

态检测,需要集成多个协同作业传感设备才能支撑运转^[73]。应用自主可控工业互联网技术,获取立体仓库控制系统的设定、运行状态等工业数据,经由信号处理与自适应深度学习相结合的方法分析感知数据,实现立体仓库状态的全面监测。机器人视觉感知与控制技术国家工程研究中心团队开展了基于自主可控工业互联网技术的工业检测和感知研究,取得了一系列成果。例如,采用多源信号融合与特征提取方法,解决了多传感器融合感知分析难题,构建复杂立体仓库系统的状态感知与健康监测能力。

电机作为立体仓库堆垛机、穿梭车的重要组成部分,多因绝缘老化、长时间超负荷运行等出现故障,需要开展电机设备的实时健康管理,提高立体仓库运行的可靠性和安全性。应用自主可控工业互联网技术、多传感器信号融合的健康监测框架(见图4),构建智能立体仓库,采集并传输电机运行的多源信号,在边缘端进行数据处理与计算。本研究团队提出了修正点阵图的信号转图像新方法,将立体仓库电机的多源振动信号转换为可视化图像,充

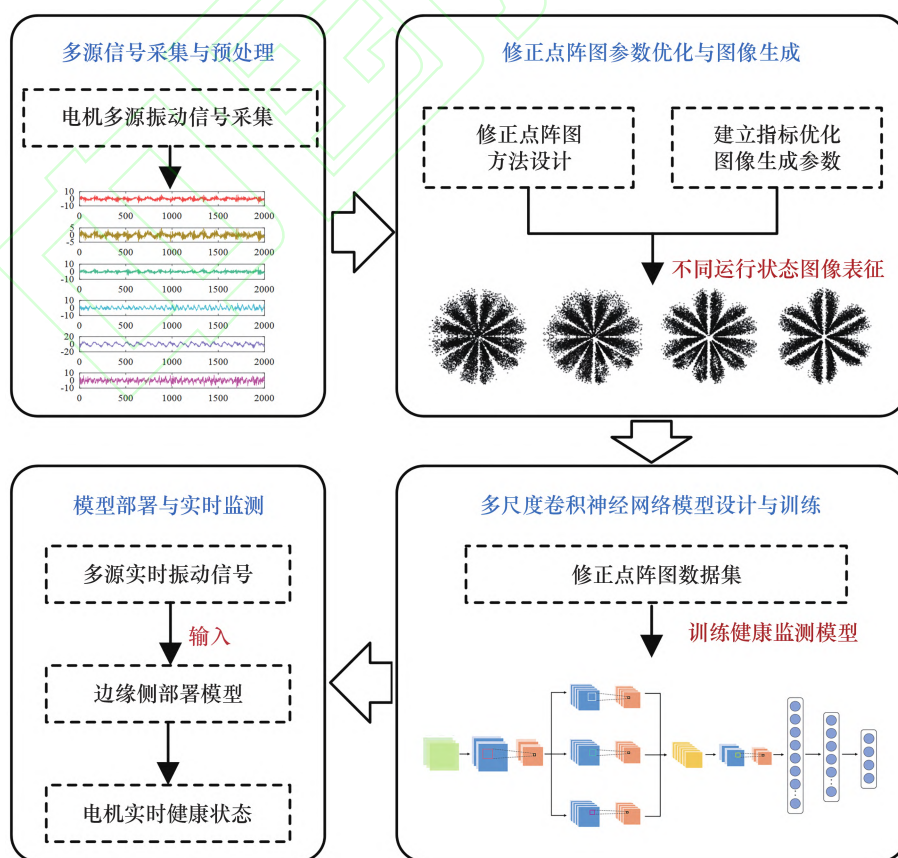


图4 多传感器信号融合健康监测框架

分利用多源信号开展电机健康管理；设计多尺度卷积神经网络，判断电机健康状况，实现电机状态感知。

（三）面向智能制造的网络化多机协同控制

从制造工艺角度看，工业现场作业可分为非接触式作业（如喷涂、焊接）和接触式作业（如打磨、装配）^[74]。多机协同加工制造整合多种自动化设备（如AGV、机械臂），联合完成复杂制造任务（见图5），较单机作业具有更高的灵活性和综合效率；将复杂作业任务分解为多个步骤、开展并行处理，多台机器能分别执行不同任务，显著缩短生产周期。多机协同加工制造可提升生产线的柔性、降低单一设备的负载，使系统在个性化定制或小批量生产时表现更佳，但也面临通信时延与丢包、设备

对恶劣环境的适应性、协同作业过程的柔顺性及安全性等方面的难题^[17]。

在多机协同控制系统中，AGV、机械臂是常见的设备。AGV多通过轮式驱动进行移动，相应运动学模型包含位置、行进方向、速度等信息，用于描述AGV在平面上的移动方式，为协同作业时的轨迹规划提供基础数据。机械臂的动力学模型由牛顿-欧拉方程或拉格朗日方程描述，用于表征关节之间的相互作用力、外部作用力对机械臂运动的影响；精确控制机械臂的加速度和力，可确保多机协作时各设备动作的协调及稳定。

多机协同控制策略分为集中式、分布式控制。集中式控制由中央控制器收集所有设备的状态信息，再作出统一决策；虽然能够支持全局协调和优化，但中心节点决策需要的网络带宽、计算资源与问题变量规模呈指数上升关系^[17]，在设备规模较大时易出现通信和计算瓶颈。分布式控制中的每个设备根据自身状态、邻近设备状态独立作出决策，减少与中心节点通信，具有良好的系统扩展性和鲁棒性。然而，分布式控制涉及网络节点之间的点对点通信，对工业互联网平台提出更高的安全与自主可控需求。

在多机协同加工制造中，基于自主可控工业互联网的分布式控制（见图6）相较于集中式控制具有优势^[75]。分布式控制可减少全局通信需求，降低网络带宽占用，利于大规模、多设备系统部

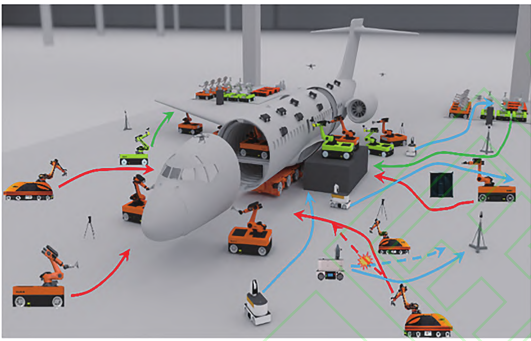


图5 典型多机协同加工制造场景

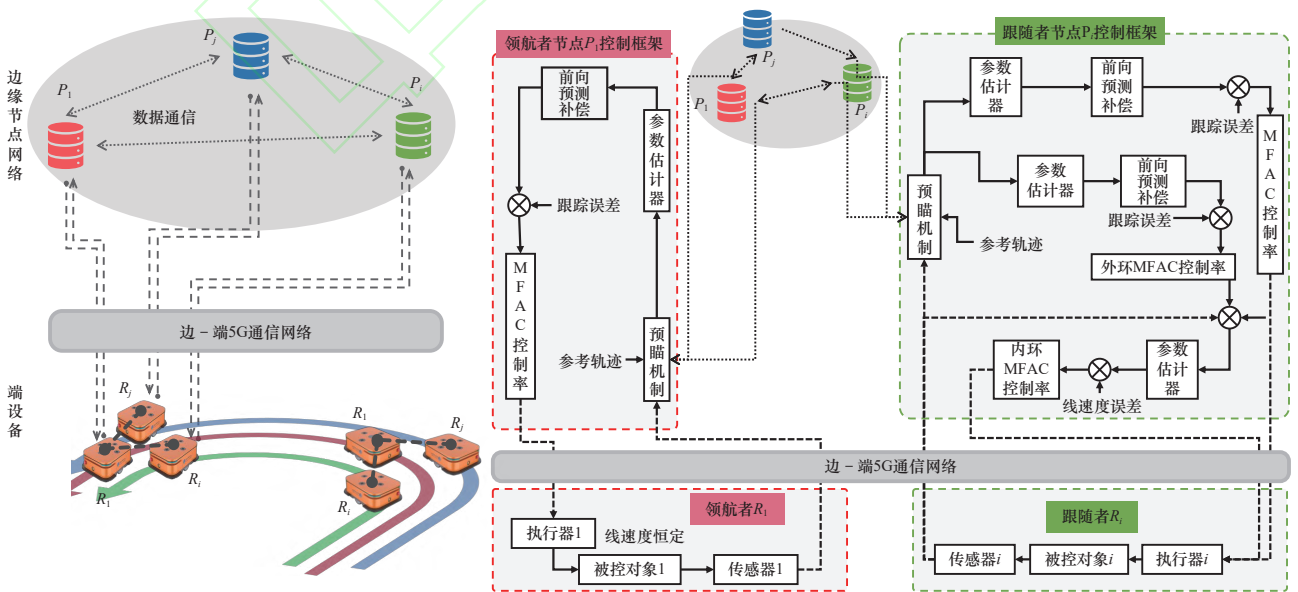


图6 边端网络场景下的多机协同控制方法
注：MFAC表示无模型自适应控制。

署；具有更强抗故障能力，即使部分设备发生故障，其他设备仍能基于局部信息继续执行任务，确保系统工作的连续性；具有更好的扩展性，在系统中设备数量增加后，仅需进行局部控制更新，无需重新配置整个系统。整体上，分布式控制适用于大型制造系统，灵活应对多变的生产需求，确保系统高效稳定运行。

（四）面向智能制造的多机协同调度规划

多机调度规划是多机协同加工制造的关键技术，现有方法通常忽视对任务自身复杂内在结构的深入挖掘，未能准确刻画真实环境中资源受限、存在多个耦合优化指标的复杂情况^[75]。这就导致单机性能与任务负荷的适配性不足，难以提高多机协同的整体性能。多机调度规划需联合开展任务分配与路径设计^[76]，以确保资源共享情况下任务分配的合理性，进而有效规避协同时的死锁、碰撞等问题，最大化资源利用并提升协作效率（见图7）。

多机路径规划以任务分配为基础，而任务分配受路径规划结果的直接影响，因而联合优化的目标是为所有机器人合理分配任务，规划出无冲突且高效的路径。任务分配和路径规划问题常转化为多商品网络流问题^[77]。先设置决策变量和相应的约束条件，后引入任务分配和路径规划：前者通过任务量、任务-机器人分配约束、任务开始/完成约束来实现，后者通过任务量、任务-边约束、流量-边约束、节点死锁避免约束、相向冲突避免约束来实现。然后，设计和优化目标函数，使用分支定界方法^[78]求解整个联合优化模型。最终，计算出最小化任务的最大完工时间、在给定时间内的最大化任

务完成量，获得复杂多机调度问题的可用解。有研究表明，结合分支定界法的联合优化算法使最优解中出现路径冲突的概率下降至仅约3%^[76]。

五、面向智能制造的自主可控工业互联网发展研判

（一）面向智能制造的自主可控工业互联网发展挑战

当前，我国工业互联网产业自主可控能力不强，如关键信息基础设施对外依存度偏高、国产化率较低。与发达国家相比，我国工业互联网在核心技术、产业规模、推广应用等方面尚存差距，导致高端关键基础装备、控制系统、软件及平台市场仍被进口产品主导^[79]。例如，日本、欧洲企业主导了伺服电机、减速器、控制系统等机器人核心产品供应，国内企业在高端机器人领域仍存在不小的技术差距。此外，我国工业门类齐全，面临着多样化的工业场景需求，不同的行业和企业对工业互联网技术的具体应用要求存在差异，如工业自动化侧重低延迟（而非高带宽），视频监控及检测则关注高带宽（而非低延迟），导致工业互联网通用技术标准建立难度较大。

工业互联网赋能的智能制造技术是推动制造业转型升级的重要动力。然而，面向智能制造的自主可控工业互联网技术面临多重挑战，突出表现在高端芯片制造、高端工业软件国产化、工业互联网自有标准体系等方面。① 高端芯片是工业互联网的核心部件，制造过程复杂且成本高。国内企业在高端芯片制造领域与国际先进水平差距明显，特别是集成设备制造商模式投资量大、技术门槛高，对设备、工艺、材料要求苛刻；在高端芯片的设计、制造、封装测试全链条上仍待突破众多关键技术，以摆脱对外依赖、实现自主可控。② 高端工业软件如数字孪生软件、电子设计自动化（EDA）软件等，是支持智能制造数字化转型的关键基础。国内企业的研发工作起步较晚，整体技术水平仍处于追赶状态。数字孪生软件需要具有大量复杂数据处理、高性能渲染等能力，国产技术研发和平台设计仍有不足。EDA软件是芯片设计的核心工具，国产化过程中缺乏模型库、数据库等基础资源以及软件集成、数据交换等标准。③ 工业互联网标准的国际竞争格局失衡，我国工业互联网生态受制于技术壁垒较

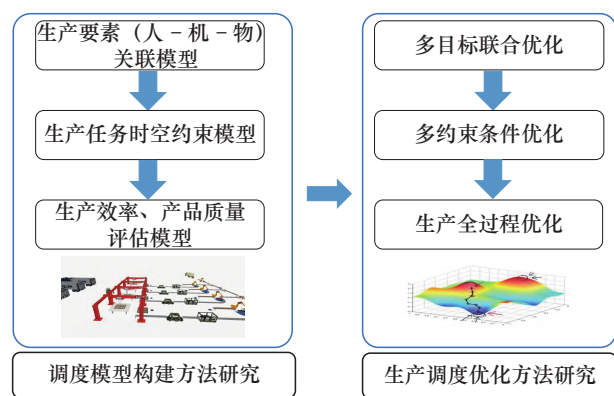


图7 面向智能制造的多机协同调度规划机制

高、规则主导权旁落而显自主性不强。美国、德国、日本的技术组织主导着国际工业互联网协议与标准发展^[80]，推行提出的技术路径，通过专利池、认证机制构建排他性生态，使后发国家陷入“技术适配性锁定”困境。国内企业若遵循既有国际标准接入全球供应链，既需向国外技术组织支付知识产权费用，也面临关键数据跨境流动的监管风险。

（二）面向智能制造的自主可控工业互联网技术发展方向

后续，可采取部署专项发展规划、加大科技研发投入、引导社会资本参与、推动“产学研用”协同创新等方式，加快突破关键技术瓶颈，构建自主可控的工业互联网技术生态体系，保障工业互联网软硬件、高端工业软件的自主研发和产业化发展需求。在这一发展过程中，应充分依托国内技术优势与前沿进展，如5G、自主可控工业软件、工业互联网“云边端”协同、搭载国产分布式操作系统的机器人、自主可控的多机协同制造技术，同时加快构建自主可控的标准体系，驱动工业互联网与智能制造融合发展。

发挥5G的深度赋能作用。5G是广泛部署的新一代信息通信技术，速度快、时延低、连接广，支持深刻改变智能制造的生产方式和管理模式。在5G规模化建设的基础上，智能制造企业可以利用5G网络优势，推进生产现场的全面数字化和智能化。在工业互联网中，5G支持大规模设备接入、实时数据传输，促成远程监控、预测性维护、智能调度等新型应用。5G与AI、大数据等技术的融合运用，进一步推动工业互联网与智能制造向更高级别发展。

工业软件是智能制造的“大脑”“中枢神经”。在中高端工业软件方向，国内企业正在摆脱对国外市场和技术的依赖，着力推进自主可控工业软件的研发和应用。自主研发的工业软件顾及行业和企业个性化需求，涵盖设计、仿真、制造、管理等产品全生命周期的主要环节，兼有良好的灵活性、可定制性。以此为基础，智能制造企业将拓展应用本领域核心技术，全面提升自主创新能力。

工业互联网“云边端”协同是智能制造主攻发展方向之一。紧密结合云计算、边缘计算、终端设备，开展数据的实时处理和分析，提升智能制造的

响应速度与管理决策能力。依托技术进步迅速的国产大模型，强化数据建模与智能算法能力，重点突破基于时间序列分析的预测性维护、基于强化学习的动态调度等关键技术，实现面向智能制造的自主可控工业互联网智能化控制与决策。

机器人制造是智能制造生产的重要环节。搭载国产分布式操作系统的机器人，具有数据处理和交互能力，可与智能设备连接并协同工作，适用于智能制造相关的自动化生产线、智能仓储、智能物流等场景，显著提升生产效率和灵活性；其模块化设计架构兼具横向扩展与垂直定制能力，可快速响应柔性生产需求，适应产品定制化开发及制造，为智能制造提供全场景协同解决方案。

发展自主可控的多机协同制造技术，精准应对复杂多变的生产环境和市场需求，构建智能化、柔性化、个性化生产模式，支持智能制造的高效协同生产。单个机器人集成传感器、控制器、执行器与通信设备，参与多个机器人的精准配合与高效协作。拓展集群机器人协同制造模式，提升超大型部件（如飞机机身、高铁车身、船舶螺旋桨等）的制造效率和产品质量。

构建自主可控工业互联网标准体系，重点在设备互联协议、数据安全治理、系统互操作性等方面建立差异化的标准，加快从“标准遵循者”向“规则共塑者”转变。依托5G领域的技术先发优势，推动我国主导的工业物联网通信标准成为国际标准。在国家数据安全立法框架下，设计包括数据分级分类、跨境流动审计在内的本土化标准，提高智能制造领域的数字治理能力。将国内企业在智能工厂、工业云平台的最佳实践提炼为行业标准，与国家标准、国际标准协调，面向全球市场开展案例推介。

六、结语

智能制造是增强我国制造业在全球竞争格局中比较优势的关键举措，自主可控工业互联网技术能够兼顾技术自主研发、供应链安全的现实发展需要。本文围绕面向智能制造的自主可控工业互联网，梳理了工业互联网、智能制造协同发展的过程与现状，分析了技术体系构成及主要技术要素，总结了我国在此领域内的示范应用情况，进一步识别

了发展挑战并阐明了技术发展方向。自主可控工业互联网技术与智能制造紧密融合并协同发展, 将为我国制造业稳健升级、高质量发展开辟新途径。

着眼未来全球科技竞争加剧的发展背景, 需发挥自主可控工业软件、“云边端”协同决策与控制、自主可控机器人、多机协同制造等方面的技术驱动力, 加快我国工业互联网与智能制造的技术突破及融合应用。自主可控工业互联网技术也将重构智能制造体系, 支撑工业设备的大规模互联与实时管理决策, 再与 AI、大数据结合以形成智能生产的充分闭环。国产工业软件、工业互联网平台将覆盖制造全生命周期的主要环节, 推动制造业自主创新能力的质变。后续, 我国智能制造领域将形成更加高效、智能、可持续的发展模式, 为全球智能制造产业贡献中国智慧和方案。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: December 22, 2024; **Revised date:** March 25, 2025

Corresponding author: Tan Haoran is an associate professor from the College of Electrical and Information Engineering, Hunan University. His major research fields include intelligent manufacturing, industrial Internet, robot control technology. E-mail: tanhaoran@hnu.edu.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Research on the Innovation and Development Strategy of Artificial Intelligence Industry in Hunan Province” (2023-DFZD-61); National Natural Science Found Project (62293510); Hunan Province Science and Technology Major Project (2021GK1010)

参考文献

- [1] 杨叔子, 丁洪. 智能制造技术与智能制造系统的发展与研究 [J]. 中国机械工程, 1992, 3(2): 15–18.
Yang S Z, Ding H. Development and research of intelligent manufacturing technology and intelligent manufacturing system [J]. China Mechanical Engineering, 1992, 3(2): 15–18.
- [2] Rzevski G. A framework for designing intelligent manufacturing systems [J]. Computers in Industry, 1997, 34(2): 211–219.
- [3] Shen W M, Maturana F, Norrie D H. MetaMorph II: An agent-based architecture for distributed intelligent design and manufacturing [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2000, 11(3): 237–251.
- [4] Kim H. The role of information technology in production control in a job shop environment considering customers and suppliers [D]. Ohio: The Ohio State University (Doctoral dissertation), 1996.
- [5] Chen M, Linkens D A. An on-line information processing method for intelligent control systems [R]. New Orleans: 34th IEEE Conference on Decision and Control, 1995.
- [6] Lau H. The new role of intranet/Internet technology for manufacturing [J]. Engineering with Computers, 1998, 14(2): 150–155.
- [7] Zhou J, Li P G, Zhou Y H, et al. Toward new-generation intelligent manufacturing [J]. Engineering, 2018, 4(1): 11–20.
- [8] Wang F Y, Yang J, Wang X X, et al. Chat with ChatGPT on industry 5.0: Learning and decision-making for intelligent industries [J]. CAA Journal of Automatica Sinica, 2023, 10(4): 831–834.
- [9] Mattera G, Nele L, Paoletta D. Monitoring and control the wire arc additive manufacturing process using artificial intelligence techniques: A review [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2024, 35(2): 467–497.
- [10] Mu N, Gong S L, Sun W Q, et al. The 5G MEC applications in smart manufacturing [R]. Beijing: 2020 IEEE International Conference on Edge Computing (EDGE), 2020.
- [11] 付宇涵, 马冬妍, 唐旖浓, 等. 工业互联网平台赋能流程制造业转型升级场景分析 [J]. 科技导报, 2022, 40(10): 129–136.
Fu Y H, Ma D Y, Tang Y N, et al. Scenario analysis of transformation and upgrading of process manufacturing industry based on industrial Internet platform [J]. Science & Technology Review, 2022, 40(10): 129–136.
- [12] Hu Y J, Jia Q M, Yao Y, et al. Industrial Internet of things intelligence empowering smart manufacturing: A literature review [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024, 11(11): 19143–19167.
- [13] Li B H, Chai X D, Hou B C, et al. New generation artificial intelligence-driven intelligent manufacturing (NGAIIM) [R]. Guangzhou: 2018 IEEE Smart World, Ubiquitous Intelligence & Computing, Advanced & Trusted Computing, Scalable Computing & Communications, Cloud & Big Data Computing, Internet of People and Smart City Innovation, 2018.
- [14] Lu Y Q, Wang L H, Bao J S, et al. Semantic artificial intelligence for smart manufacturing automation [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2022, 77: 102333.
- [15] Song C H, Zheng H Y, Han G J, et al. Cloud edge collaborative service composition optimization for intelligent manufacturing [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2023, 19(5): 6849–6858.
- [16] Wan J F, Tang S L, Li D, et al. A manufacturing big data solution for active preventive maintenance [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(4): 2039–2047.
- [17] 张振国, 毛建旭, 谭浩然, 等. 重大装备制造多机器人任务分配与运动规划技术研究综述 [J]. 自动化学报, 2024, 50(1): 21–41.
Zhang Z G, Mao J X, Tan H R, et al. A review of task allocation and motion planning for multi-robot in major equipment manufacturing [J]. Acta Automatica Sinica, 2024, 50(1): 21–41.
- [18] Zhu Q Z, Huang S H, Wang G X, et al. Dynamic reconfiguration optimization of intelligent manufacturing system with human-robot collaboration based on digital twin [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2022, 65: 330–338.
- [19] 孙一元. 上汽集团: 打造“智能制造”新商业模式 [J]. 上海国资, 2021 (7): 50–52.
Sun Y Y. SAIC: Building a new business model of “intelligent manufacturing” [J]. Capital Shanghai, 2021 (7): 50–52.
- [20] Zhong R Y, Xu X, Klotz E, et al. Intelligent manufacturing in the context of industry 4.0: A review [J]. Engineering, 2017, 3(5): 616–630.
- [21] Yang T, Yi X L, Lu S W, et al. Intelligent manufacturing for the

- process industry driven by industrial artificial intelligence [J]. *Engineering*, 2021, 7(9): 1224–1230.
- [22] 杨林, 陆亮亮. “互联网+”背景下制造企业智能化战略转型路径: 多案例比较研究 [J]. *科技进步与对策*, 2022, 39(12): 92–101.
Yang L, Lu L L. Exploring the intelligent strategic transformation path of manufacturing enterprises under the background of “Internet+”: A multi-case comparative study [J]. *Science & Technology Progress and Policy*, 2022, 39(12): 92–101.
- [23] Tao F, Qi Q L, Liu A, et al. Data-driven smart manufacturing [J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2018, 48: 157–169.
- [24] Wang J J, Ma Y L, Zhang L B, et al. Deep learning for smart manufacturing: Methods and applications [J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2018, 48: 144–156.
- [25] Tuptuk N, Hailes S. Security of smart manufacturing systems [J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2018, 47: 93–106.
- [26] Sahoo S, Lo C Y. Smart manufacturing powered by recent technological advancements: A review [J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2022, 64: 236–250.
- [27] Chen Y B. Integrated and intelligent manufacturing: Perspectives and enablers [J]. *Engineering*, 2017, 3(5): 588–595.
- [28] Annanth V K, Abinash M, Rao L B. Intelligent manufacturing in the context of industry 4.0: A case study of Siemens industry [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1969(1): 012019.
- [29] Lee J, Bagheri B, Kao H G. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems [J]. *Manufacturing Letters*, 2015, 3: 18–23.
- [30] Li J Q, Yu F R, Deng G Q, et al. Industrial Internet: A survey on the enabling technologies, applications, and challenges [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, 19(3): 1504–1526.
- [31] Rehman M H, Yaqoob I, Salah K, et al. The role of big data analytics in industrial Internet of things [J]. *Future Generation Computer Systems*, 2019, 99: 247–259.
- [32] Younan M, Houssein E H, Elhoseny M, et al. Challenges and recommended technologies for the industrial Internet of things: A comprehensive review [J]. *Measurement*, 2020, 151: 107198.
- [33] 陈培全. 数字化制造与工业互联网融合的智能制造模式探究 [J]. *中国机械*, 2023 (29): 43–46.
Chen P Q. Research on intelligent manufacturing mode of digital manufacturing and industrial Internet integration [J]. *Machine China*, 2023 (29): 43–46.
- [34] Evans P C, Annunziata M. Industrial Internet: Pushing the boundaries of minds and machines [R]. Boston: General Electric Reports, 2012.
- [35] Morrish J, Figueredo K, Haldeman S, et al. The industrial Internet of things, volume b01: Business strategy and innovation framework [R]. Boston: Industrial Internet Consortium, 2016.
- [36] Joshi S J, Mamaniya S, Shah R. Integration of intelligent manufacturing in smart factories as part of industry 4.0—A review [R]. Mumbai: 2022 Sardar Patel International Conference on Industry 4.0—Nascent Technologies and Sustainability for “Make in India” Initiative, 2022.
- [37] Li Y J, Wang D, Sun T, et al. Solutions for variant manufacturing factory scenarios based on 5G edge features [R]. Beijing: 2020 IEEE International Conference on Edge Computing (EDGE), 2020.
- [38] Ding P, Liu D, Shen Y, et al. Industrial intelligent edge computing system based on 5G [R]. Harbin: 2021 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC), 2021.
- [39] 韩冬, 张晶. 5G端到端网络切片标准化演进研究 [J]. *现代传输*, 2024 (4): 60–63.
Han D, Zhang J. Research on standardization evolution of 5G end-to-end network slice [J]. *Modern Transmission*, 2024 (4): 60–63.
- [40] Xiong Z W, Li Q K, Feng Z L. Research on model based on big data technology for process control [R]. Hangzhou: 2023 International Conference on Intelligent Computing and Next Generation Networks (ICNGN), 2023.
- [41] Sun Q, Li Y H, Zhou C J, et al. Root cause analysis for industrial process anomalies through the integration of knowledge graph and large language model [R]. Kunming: 2024 43rd Chinese Control Conference (CCC), 2024.
- [42] Mikhailov A, Tretyakov S, Andreev Y. A new approach to build industrial Internet of things (IIoT) systems based on digital twin’s technologies [R]. Sochi: 2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2022.
- [43] Rayhana R, Bai L, Xiao G Z, et al. Digital twin models: Functions, challenges, and industry applications [J]. *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*, 2024, 8: 282–321.
- [44] Pansare R, Yadav G, Nagare M R. Reconfigurable manufacturing system: A systematic review, meta-analysis and future research directions [J]. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 2023, 21(1): 228–265.
- [45] Wan J F, Li X M, Dai H N, et al. Artificial-intelligence-driven customized manufacturing factory: Key technologies, applications, and challenges [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2021, 109(4): 377–398.
- [46] Kim Y G, Lee S, Son J, et al. Multi-agent system and reinforcement learning approach for distributed intelligence in a flexible smart manufacturing system [J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2020, 57: 440–450.
- [47] Shaik A M, Rao V V S K, Rao C S. Development of modular manufacturing systems—A review [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 76(5): 789–802.
- [48] Wang H, Liu M, Shen W M. Industrial-generative pre-trained transformer for intelligent manufacturing systems [J]. *IET Collaborative Intelligent Manufacturing*, 2023, 5(2): e12078.
- [49] Fan H L, Liu X, Fuh J Y H, et al. Embodied intelligence in manufacturing: Leveraging large language models for autonomous industrial robotics [J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2025, 36(2): 1141–1157.
- [50] Sun Z J, Yang H, Li C, et al. Cloud-edge collaboration in industrial Internet of things: A joint offloading scheme based on resource prediction [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(18): 17014–17025.
- [51] Zhang Q, Zhang Y F, Luo Q, et al. Cloud-edge-end-based aircraft assembly production quality monitoring system framework and applications [J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2024, 75: 116–131.
- [52] Liao H J, Jia Z H, Zhou Z Y, et al. Cloud-edge-end collaboration in air-ground integrated power IoT: A semidistributed learning approach [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2022,

- 18(11): 8047–8057.
- [53] Qu X F, Wang H Q. Emergency task offloading strategy based on cloud-edge-end collaboration for smart factories [J]. *Computer Networks*, 2023, 234: 109915.
- [54] Chi H R, Wu C K, Huang N-F, et al. A survey of network automation for industrial Internet-of-things toward industry 5.0 [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2023, 19(2): 2065–2077.
- [55] 姜红德. 欧拉迎来四大升级, 国产开源操作系统进一步增强 [J]. *中国信息化*, 2024 (6): 10.
- Jiang H D. Euler ushered in four major upgrades and the domestic open source operating system was further enhanced [J]. *China Informatization*, 2024 (6): 10.
- [56] 孙晓霞. 工业软件: 纾困突围, 助推工业互联网高质量发展 [J]. *新材料产业*, 2022 (3): 48–52.
- Sun X X. Industrial software: Breaking through the difficulties and promoting the high-quality development of industrial Internet [J]. *Advanced Materials Industry*, 2022 (3): 48–52.
- [57] 刘文广. CAD 技术发展新趋势 [J]. *新技术新工艺*, 2024 (1): 1–9.
- Liu W G. New development trends of CAD technology [J]. *New Technology & New Process*, 2024 (1): 1–9.
- [58] 叶瑛歆. 基于云知识库的数控机床智能控制器加工工艺规划方法研究 [D]. 济南: 山东大学(博士学位论文), 2019.
- Ye Y X. Research on machining process planning method of CNC machine tool intelligent controller based on cloud knowledge base [D]. Jinan: Shandong University (Doctoral dissertation), 2019.
- [59] 陈燕, 王禹封, 谯木, 等. 数字孪生在制造业中实现的关键技术及典型应用综述 [J]. *航空制造技术*, 2024, 67(11): 24–45.
- Chen Y, Wang Y F, Qiao M, et al. Review on key technologies and typical applications of digital twin in manufacturing industry [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2024, 67(11): 24–45.
- [60] 柴天佑, 刘强, 丁进良, 等. 工业互联网驱动的流程工业智能优化制造新模式研究展望 [J]. *中国科学: 技术科学*, 2022, 52(1): 14–25.
- Chai T Y, Liu Q, Ding J L, et al. Perspectives on industrial-Internet-driven intelligent optimized manufacturing mode for process industries [J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2022, 52(1): 14–25.
- [61] 王雷, 卢珊珊, 张松岚. 依托生态位战略的国产工业软件发展 [J]. *软件导刊*, 2024, 23(2): 208–214.
- Wang L, Lu S S, Zhang S L. Relying on niche strategy to promote the development of domestic industrial software [J]. *Software Guide*, 2024, 23(2): 208–214.
- [62] 莫洋, 王耀南, 刘杰, 等. 我国智能机器人核心芯片技术发展战略研究 [J]. *中国工程科学*, 2022, 24(4): 62–73.
- Mo Y, Wang Y N, Liu J, et al. Development strategy for the core chip technology of intelligent robot in China [J]. *Strategic Study of CAE*, 2022, 24(4): 62–73.
- [63] 加快建设科技强国实现高水平科技自立自强 [EB/OL]. (2022-04-30)[2025-02-15]. https://www.gov.cn/xinwen/2022-04/30/content_5688265.htm.
- Accelerate the construction of a strong country in science and technology and achieve high-level scientific and technological self-reliance and self-improvement [EB/OL]. (2022-04-30)[2025-02-15]. https://www.gov.cn/xinwen/2022-04/30/content_5688265.htm.
- [64] 范致彬, 刘嘉, 马伟佳. 协作机器人技术与产业分析 [J]. *科技和产业*, 2024, 24(11): 282–288.
- Fan M S, Liu J, Ma W J. Collaborative robotics technology and industry analysis [J]. *Science Technology and Industry*, 2024, 24(11): 282–288.
- [65] 新一代国产自主可控复合机器人“遨游 300”重磅发布 [J]. *物流技术与应用*, 2024, 29(1): 64.
- A new generation of domestic autonomous controllable composite robot “Roaming 300” was released [J]. *Logistics & Material Handling*, 2024, 29(1): 64.
- [66] 任文清. 国内首台鸿蒙系统矿用巡检机器人在神东投用 [J]. *能源科技*, 2021, 19(5): 94.
- Ren W Q. The first domestic HarmonyOS mine-used inspection robot has been put into use in Shendong Coal [J]. *Energy Science and Technology*, 2021, 19(5): 94.
- [67] 杨光. 首款搭载鸿蒙操作系统的人形机器人夸父进厂做工 [N]. *中国信息化周报*, 2024-07-15(19).
- Yang G. The first humanoid robot Kuafu equipped with Harmony OS enters the factory for production [N]. *China Information Weekly*, 2024-07-15(19).
- [68] 邓勇, 何茂松. “未来”已来人工智能产业无限精彩 [N]. *绵阳日报*, 2024-07-25(03).
- Deng Y, He M S. “The future” has arrived and the artificial intelligence industry is full of excitement [N]. *Mianyang Daily*, 2024-07-25(03).
- [69] Jin X H, Xu Z W, Qiao W. Condition monitoring of wind turbine generators using SCADA data analysis [J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2021, 12(1): 202–210.
- [70] Costa T P, Costa D M B, Murphy F. A systematic review of real-time data monitoring and its potential application to support dynamic life cycle inventories [J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2024, 105: 107416.
- [71] Gagliardi J P, Renaud J, Ruiz A. On sequencing policies for unit-load automated storage and retrieval systems [J]. *International Journal of Production Research*, 2014, 52(4): 1090–1099.
- [72] Zhang B Z, Chen X W, Li Z H, et al. CoNi-MPC: Cooperative non-inertial frame based model predictive control [J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2023, 8(12): 8082–8089.
- [73] Zhang G Y, He X D, Mu Y, et al. Serial distributed detection in multihop multirelay wireless sensor networks with end-edge-cloud orchestration under graph-powered computing [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2025, 12(4): 3720–3733.
- [74] 孙立宁, 许辉, 王振华, 等. 工业机器人智能化应用关键共性技术综述 [J]. *振动、测试与诊断*, 2021, 41(2): 211–219.
- Sun L N, Xu H, Wang Z H, et al. Review on key common technologies for intelligent applications of industrial robots [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2021, 41(2): 211–219.
- [75] 薛建儒, 房建武, 吴俊, 等. 多机协同智能发展战略研究 [J]. *中国工程科学*, 2024, 26(1): 101–116.
- Xue J R, Fang J W, Wu J, et al. Collaborative multiple autonomous systems [J]. *Strategic Study of CAE*, 2024, 26(1): 101–116.
- [76] Brown K, Peltzer O, Sehr M A, et al. Optimal sequential task assignment and path finding for multi-agent robotic assembly planning [R]. Paris: 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2020.

- [77] Yu J J, LaValle S M. Optimal multirobot path planning on graphs: Complete algorithms and effective heuristics [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2016, 32(5): 1163–1177.
- [78] Basu A, Conforti M, Di Summa M, et al. Complexity of branch-and-bound and cutting planes in mixed-integer optimization [J]. Mathematical Programming, 2023, 198(1): 787–810.
- [79] 王秋华, 吴国华, 魏东晓, 等. 工业互联网安全产业发展态势及路径研究 [J]. 中国工程科学, 2021, 23(2): 46–55.
- Wang Q H, Wu G H, Wei D X, et al. Research on the development trend and path of industrial Internet security industry [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(2): 46–55.
- [80] 王鹤子, 张中献, 杨学. 国内外经典工业互联网体系架构发展研究 [J]. 数据与计算发展前沿, 2025, 7(1): 119–134.
- Wang H Z, Zhang Z X, Yang X. Research on global classic industrial Internet architecture development [J]. Frontiers of Data & Computing, 2025, 7(1): 119–134.

