

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.03.001

智能制造前沿技术概述

郭宇, 龙智新

(南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 智能制造作为现代制造业的演进范式, 通过新一代信息技术与制造系统的深度融合, 推动全球制造业强国重新定义其产业竞争策略框架。其核心目标在于构建具备制造全流程数据贯通、全要素协同联动及全周期动态优化能力的智能生产系统, 实现产品全生命周期维度内的智能决策、协同优化、过程可视化与可持续运营, 进一步推动制造业向智能化、数字化、网络化方向迈进。对智能制造的相关定义及其标准进行解析, 系统性地概述了智能制造前沿技术的相关特点、发展趋势以及未来挑战, 为新一代智能制造系统的理论创新与实施策略提供方法论支撑。

关键词: 智能制造; 制造业发展; 新一代信息技术; 智能生产系统

中图分类号: TP29 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2025)03-0001-12

Overview of Frontier Technologies for Intelligent Manufacturing

GUO Yu, LONG Zhixin

(College of Mechanical and Electrical, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: As the evolution paradigm of modern manufacturing industry, intelligent manufacturing promotes the global manufacturing power to redefine its industrial competition strategy framework through the deep integration of new generation information technology and advanced manufacturing technology. Its core goal is to build an intelligent production system with the capabilities of data penetration in the whole manufacturing process, collaborative linkage of all factors and dynamic optimization in the whole cycle, so as to realize intelligent decision-making, collaborative optimization, process visualization, and sustainable operation in the dimension of the whole product life cycle, further promoting the manufacturing industry onwards to intelligentization, digitalization and cybrization. This paper analyzes the relevant definitions and standards of intelligent manufacturing, systematically summarizes the relevant characteristics, development trends and future challenges of intelligent manufacturing frontier technology, and contributes the methodological support for the theoretical innovation and implementation strategy of the new generation of intelligent manufacturing system.

Keywords: intelligent manufacturing; manufacturing development; new - generation information technology; intelligent production system

0 引言

随着全球产业结构的快速重构, 制造业正经历以智能化、高端化与绿色化为核心的深刻发展变革。传统制造模式面临诸如人力成本上升、企业创新能力不足、生产管理效率低下以及环境污

染加剧等严峻挑战^[1]。在此背景下, 数字孪生、云制造、工业大数据、工业具身智能以及生成式人工智能等新一代信息技术的深度融合, 为破解制造业转型困境提供了系统性的技术方案。

因此, 发达国家通过战略布局, 将技术优势转化为产业竞争优势。德国“工业 4.0”战略以信息

基金项目: 江苏省前沿引领技术基础研究专项 (BK20202007)

第一作者简介: 郭宇 (1971—), 江苏南京人, 教授, 博士生导师, 南京航空航天大学国家卓越工程师学院副院长, 江苏省教学名师、“青蓝工程”优秀青年骨干教师、青蓝工程优秀教学团队负责人、江苏省“333 工程”高层次人才。中国机械工业教育协会第一届智能制造工程专业教学委员会副主任委员、江苏省智能工厂建设标准化技术委员会副秘书长、江苏省智能制造服务联盟副理事长、江苏省企业技术改造协会智能制造工作委员会副主任委员、江苏省工程师协会智能制造工作委员会副主任委员、中国机械工程学会工业大数据与智能系统分会委员、中国图学会数字化设计与制造专委会委员、中国图学会数字孪生专委会委员等。承担国家重大科技专项、国家 863 项目、国防基础科研重大/重点项目等国家级、省部级项目 20 余项, 获得国家级、省部级等奖励 10 余项, 编写专著 3 部, 发表学术论文 150 余篇。获软件著作权和发明专利 30 余项, 研究方向为数字化设计与制造、智能制造系统等。bx2405513@nuaa.edu.cn。

物理融合系统(cyber-physical systems, CPS)为基石,通过3C(Computation、Communication、Control)技术的有机融合与深度协作^[2],实现制造系统的实时感知、动态控制和信息服务;美国“先进制造伙伴计划(advanced manufacturing partnership, AMP)”则聚焦工业大数据分析 with 生成式人工智能技术,依托国家制造创新网络加速5G工厂、数字孪生等技术的产业化落地,以巩固美国先进制造业的全球领导地位^[3]。

为实现制造业高质量发展,我国制定了“制造强国三步走”战略目标^[4],通过构建“工业互联网平台+数字化转型服务商+智能示范工厂”三元协同赋能体系,驱动生产要素的数字化解构与重组,推进价值链条的智能化升级^[5]。基于国家顶层设计指引,通过技术创新驱动全产业链智能化升级,构建自主可控的产业生态体系,有效适应市场需求个性化与多样化的演变趋势^[6]。

智能制造的发展有助于实现定制化生产(多品种、小批量、快速响应)的生产模式,降低人工干预、提高生产效率,并在确保高效生产的同时实现低碳、绿色目标。因此,本文旨在系统梳理智能制造的定义及前沿技术体系,构建其技术架构,并展望技术发展的前景与挑战。重点探讨各关键技术

在制造业数字化转型与智能化管控中的关键作用。通过本文,期望为智能制造理论框架与实践路径的构建提供参考,并为制造业的可持续发展提供新动力。

1 智能制造定义

智能制造作为现代制造业高级演进形态,虽在学术界尚未形成普遍共识的学理界定,但可基于技术发展轨迹与产业实证基础构建其理论框架。智能制造可定义为:利用新一代信息技术(制造物联网、云制造平台、工业大数据、数字孪生技术及生成式人工智能等)与制造业深度融合,构建具有具备自适应决策能力、分布式协同模式、智能化设计方法、可视化管控手段以及低碳化运营策略的新型制造模式,旨在通过数据驱动和自动化技术,优化资源配置、提升生产效率并降低运营成本^[7]。其理论技术体系如图1所示,以生成式人工智能、数字孪生、工业大数据等关键技术为底层根基,通过感知—分析—决策—执行的闭环流程实现产品全生命周期的智能化运作,并借助各环节的数据链贯通,实现跨领域协同与资源整合,形成数据驱动、虚实融合的智能生态体系。

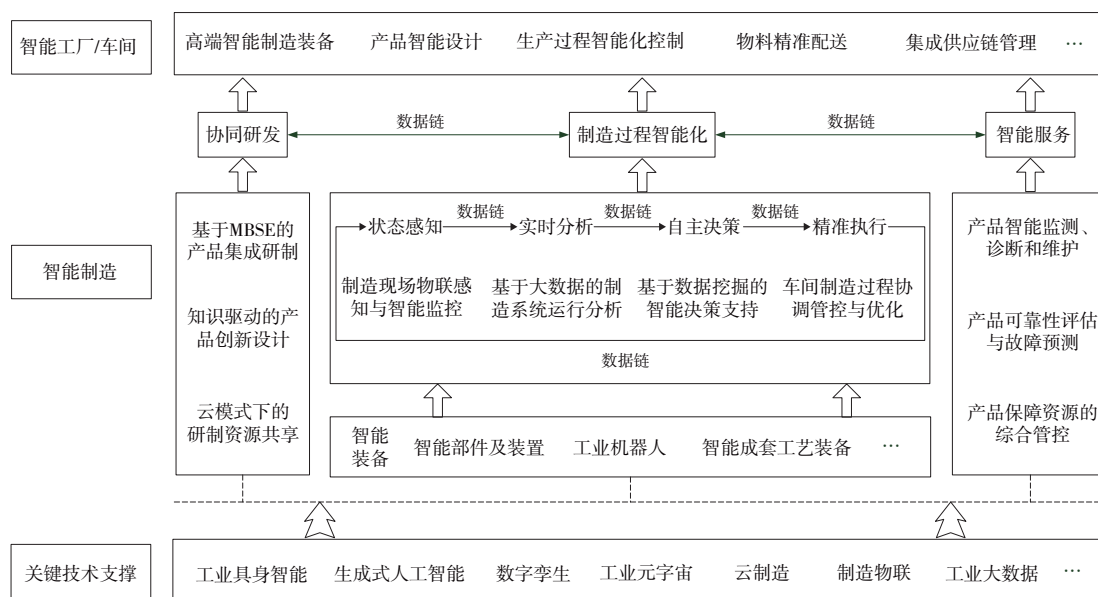


图1 智能制造技术体系架构

2 智能制造前沿技术

智能制造前沿技术涵盖工业具身智能、生成式人工智能、数字孪生技术、工业元宇宙、云制造、

制造物联以及工业大数据等新一代信息技术。各前沿技术协同作用,以实现生产过程的自主优化、精准匹配与智能服务,进一步提升制造系统的柔性化、智能化和自动化。

2.1 工业具身智能

工业具身智能(industrial embodied intelligence, IEI)是具身智能在工业场景中的具体实现,其核心在于利用具身智能体(如工业机器人、物料搬运机器人(AGV)、人机协作机器人等)与工业环境进行动态交互,形成“感知—理解—推理—决策—执行”闭环,以增强制造系统的自主性、适应性和智能化水平^[8],具体如图2所示。工业具身智能与传统的工业自动化系统不同,后者更多依赖于预设的程序和规则,而具身智能系统具备自我学习和调整能力,能够应对动态、复杂的工业环境。该技术主要的研究领域如表1所示,包含多模态感知与理解、自主学习与任务规划以及人机协作与多机协同等。

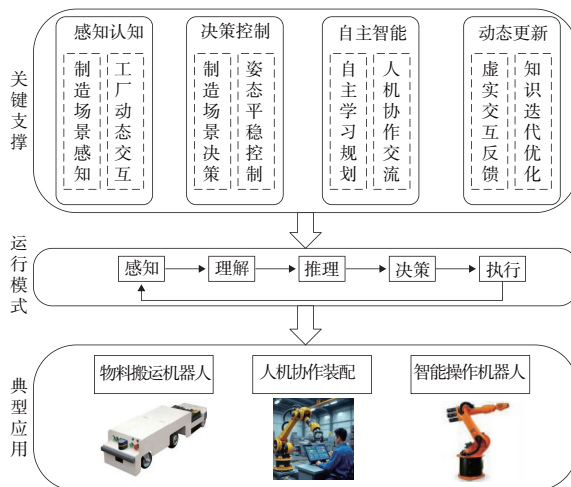


图2 工业具身智能研究架构

表1 工业具身智能技术研究概述

研究方向	研究内容	文献来源
多模态感知与理解	构建多模态交互策略与智能任务分配框架,以实现“人—机—环境”共融协作	DUAN 等 ^[9]
	提出跨模态不一致感知的双视角交互融合模型	卜韵阳等 ^[10]
	提出多模态双感知融合框架,通过跨模态对比学习,提高了多模态情感分析的性能	LU 等 ^[11]
自主学习与规划	提出深度进化强化学习框架,模拟复杂环境驱动机器人形态智能的协同进化	GUPTA 等 ^[12]
	基于 GPT-4-1106-preview 提出一个能够根据推断的任务上下文调整机器人运动参数的框架	GUPTA 等 ^[13]
人机协作与多机协同	构建 LLM 驱动的工业机器人三阶段自主框架	FAN 等 ^[14]
	综述多智能体强化学习在人机协作中的技术路径	黄炜焯等 ^[15]
	从形态—动作—感知—学习的协同视角系统综述具身智能研究	LIU 等 ^[16]
	结合跨领域技术融合案例,论证了人机协作通过互补性分工可突破制造业自动化瓶颈	CHU 等 ^[17]

多模态感知与理解是通过多传感器协同提升工业场景下的环境感知精度与鲁棒性,解决动态、非结构化环境中的感知难题。DUAN 等构建多模态交互策略与智能任务分配框架,以实现更安全、高效的“人—机—环境”共融协作。自主学习与决策优化是在动态、不确定环境中实现实时任务分解并通过与环境的互动自主优化其动作策略,提高任务完成的效率和准确度。GUPTA 等针对机器人的任务和运动规划问题,基于 GPT-4-1106-preview 提出了一个能够根据推断的任务上下文调整机器人运动参数的框架。人机协作与多机协同通过高效的通信和协调机制,不同机器人能够在同一环境中高效协作,实现复杂的任务分配与执行。黄炜焯等系统综述多智能体强化学习在人机协作中的技术路径与应用挑战,提出基于训练范式优化与人类数据融合的自适应协作框架,为动态人机共生系统的泛化能力提升与产业

化落地提供理论支撑。未来,利用大模型的语义理解、知识推理和生成能力,增强工业机器人的任务理解、决策效率与人机协作能力,推动工业自动化从“程序驱动”迈向“认知驱动”。

2.2 生成式人工智能

生成式人工智能 (artificial intelligence generated content, AIGC) 是利用人工智能技术来生成内容。基于生成对抗网络、大型预训练模型等人工智能的技术方法,通过已有数据的学习和识别,以适当的泛化能力生成相关内容的技术^[18]。大模型是 AIGC 的基础,指具有大规模参数和复杂计算结构的机器学习模型,通常由深度神经网络构建而成,拥有数十亿甚至数千亿个参数。AIGC 在工业领域已取得重要进展,如图3所示,工业大模型通过多模态数据(文本、图像、视频)的语义理解与跨模态对齐能力,实现工业场景下的自动化内容创作与知识表达。依赖生成式模

型,实现多域数据的动态融合与推理优化,解决工业知识图谱补全与语义消歧问题,推动了智能制造系统从确定性规则执行向生成式认知跃迁的范式升级。

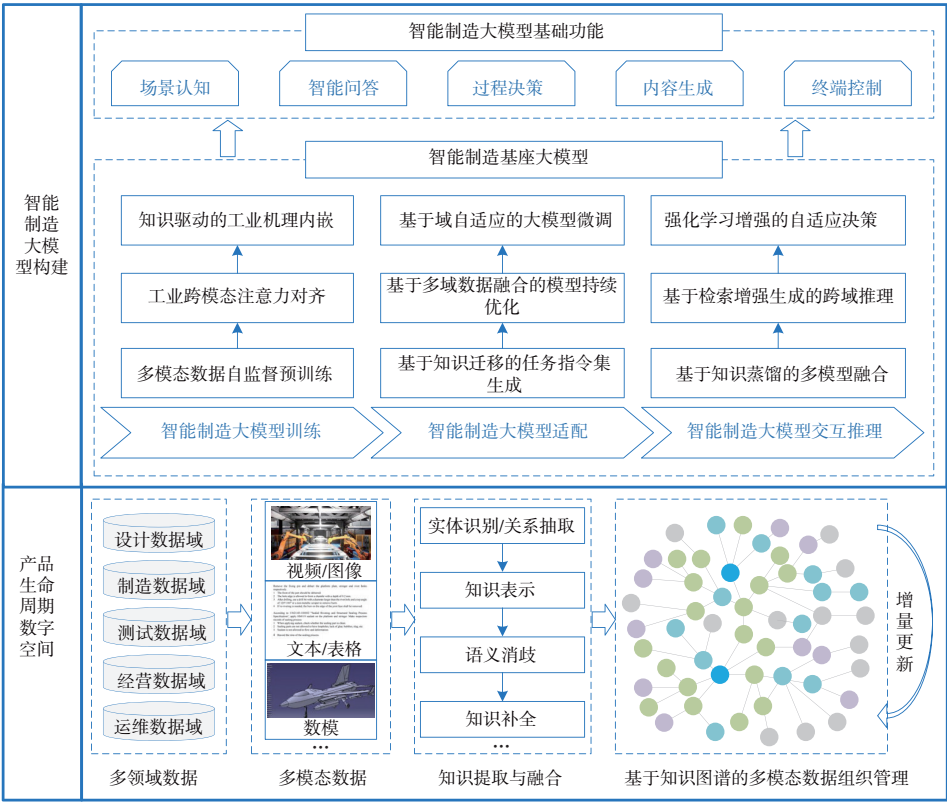


图 3 工业大模型研究架构

如表 2 所示,工业大模型的研究方向包含智能工艺设计、工业视觉与检测、可持续制造以及预防性维护等多个方向。JIANG 等将大模型技术与知识图谱融合,构建了面向直升机部件装配指令生成的智能工艺设计框架。通过异构知识融合、指令复用优化与工艺因子动态修正三重技术突破,实现装配工艺设计效率的显著提升。黄亚如等通过微调视觉大模型 SAM,实现工业材料表面缺陷的高精度、通用化检测,显著提升微小缺陷识别能力与跨场景适应性,为工业质检提供低标注依赖、高泛化性的智能解决方案。LOWIN 提出融合时间关联规则与 LLM 语义分析的无监督算法,

从设施管理文本中自动提取可解释维护规则,为工业大数据驱动的预测性维护提供跨语言、低标注依赖的决策支持新范式。WU 等介绍了一个由 LLM 赋能的自主代理框架,并实施了一种两阶段置信度估计方法,以细化决策辅助的精度,从而提高由 LLM 支持的工业生产中高碳排放状态下的决策准确性。尽管生成式人工智能以及大模型的生成能力非常强大,但其训练需要极其庞大的计算资源和时间,而且生成内容无法保证其真实性。因此,如何优化模型训练过程,降低计算开销,提高生成内容的真实性,防止其被恶意用于欺诈或误导,是未来发展的一个重要方向。

表 2 生成式人工智能技术研究概述

研究方向	研究内容	文献来源
智能工艺设计与优化	融合知识图谱与实现工艺知识的多模态表达及可解释推理	JIANG 等 ^[19]
	构建知识图谱在智能制造中的技术框架与应用路径	WAN 等 ^[20]
工业视觉与检测 预测性维护	通过工业视觉大模型的应用,实现高精度的产品质量监测、缺陷识别	黄亚如等 ^[21]
	通过工业大模型的微调,以生成故障规则,扩充数据集	LOWIN ^[22]
可持续制造	通过增强云边协同与智能决策,为可持续的工业系统提供创新技术范式	CHEN 等 ^[23]
	通过语义交互增强与两阶段置信度估计,突破工业事件日志处理的固有瓶颈	WU 等 ^[24]

2.3 数字孪生技术

数字孪生(digital twin, DT)技术作为新一代智能制造的核心使能技术,通过构建物理实体与虚拟模型的双向动态映射与实时交互机制,实现智能制造系统全生命周期的精准映射、动态仿真与闭环优化^[25]。如图4所示,以数据为驱动,集成多学科技术,融合物理现实与虚拟模型,最终实现“虚实映射,以虚控实”的迭代优化机制。该技术自提出以来,因其在制造领域的多维度映射与实时交互能力,迅速成为学术界与工业界的研究热点。如表3所示,国内外学者围绕其理论框架构建、模型构建、关键技术突破及工程化应用展开了系统性研究。

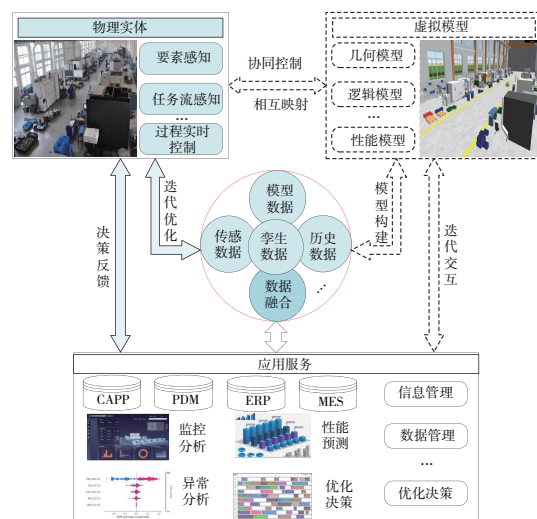


图4 数字孪生技术示意图

表3 数字孪生技术研究概述

研究方向	研究内容	文献来源
理论框架	提出DT技术的系统性理论框架,并进一步提出六项应用标准,为跨行业应用提供规范化指南	陶飞等 ^[26]
	提出分布式架构与多层级防御策略,并规划“大数据—区块链—边缘智能”融合的技术路径	WANG等 ^[27]
模型构建	基于机器学习与流程挖掘的数据驱动框架,实现数字孪生仿真模型的自动化生成与持续优化	FRIEDERICH等 ^[28]
	针对离散制造场景,提出“模型迁移—验证—同步演化”三步法	QIAN等 ^[29]
关键技术突破	提出基于数字孪生的跨单元联动决策信息架构,采用目标级联法实现多单元协同优化	周达坚等 ^[30]
	融合仿真优化与多准则决策技术,赋能中小企业定制高效生产布局	LEE等 ^[31]
工程化应用	针对航天装备制造,构建全生命周期数字孪生体系、驱动航天产业智能化升级	宋海龙等 ^[32]

陶飞等总结了数字孪生在企业中的应用和理论研究进展,提出了DT的五维结构模型和DT驱动的6项应用标准,探索了DT驱动的14种应用概念和实施过程中需要突破的关键问题和技术,为未来DT的进一步应用提供了理论和方法。QIAN等构建离散制造车间数字孪生模型的系统性方法,介绍了模型迁移—模型验证—模型同步演化三项关键技术。周达坚等提出了基于数字孪生的跨单元联动决策信息架构,并采用目标级联法实现了大型多单元生产系统的在线联动决策。宋海龙等系统剖析了数字孪生技术在航天领域的应用瓶颈与技术挑战,强调虚实交互强化、高保真建模与AI融合的重要性。然而,随着实时数据处理和高精度建模需求的不断增加,如何确保数据

的准确性和系统的高效运行以及广泛应用成为数字孪生技术发展的关键难题。进一步突破模型轻量化、动态耦合与安全协同等技术瓶颈,推动数字孪生从“描述性映射”向“自主性决策”跨越对该技术的发展具有重要的意义。

2.4 工业元宇宙

工业元宇宙(Industrial Metaverse)是元宇宙在工业领域的深度拓展与创新应用,如图5所示,其技术框架依托虚拟现实、增强现实、物联网技术、大数据分析、人工智能算法及区块链协议等前沿信息通信技术的集成,构筑具有高仿真建模能力与实时交互特征的工业数字空间,实现工业全生命周期协同管理、虚实空间双向映射以及智能主体跨域协作三大核心功能^[33]。

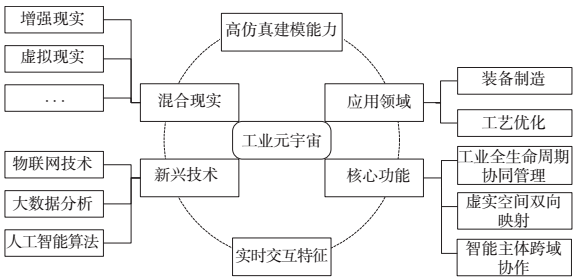


图5 元宇宙技术体系

如表4所示,工业元宇宙的研究已初步形成理论体系、技术架构及部分应用场景。孙柏林分析了工业元宇宙在智能制造中的应用以及具体的工业元宇宙应用实例。杨阳等阐明了数字孪生与

工业元宇宙的区别,并提出了从数字孪生向工业元宇宙过渡的可行路径。LI等通过分析人机协作的需求和工业元宇宙的发展,提出了6种工业元宇宙在主动人机协作中的体现。然而,高精度数字孪生仿真、AR/VR渲染及AI推理计算均需大量计算资源,而工业环境对低时延、高实时性的要求较高,如何在有限计算资源下提升工业元宇宙系统的运行效率是亟待解决的问题。伴随虚拟现实设备的沉浸式体验突破、增强现实界面的空间计算能力提升以及工业大数据分析技术的迭代升级,工业元宇宙将进一步推动制造业向智能化、网络化和自主化方向演进,构建高效协同、动态优化的智能制造体系。

表4 工业元宇宙技术研究概述

研究方向	研究内容	文献来源
理论体系	工业元宇宙在智能制造中的应用	孙柏林 ^[34]
	通过系统工程原则与AI技术融合,明确数字孪生对工业元宇宙的支撑逻辑	ZHANG等 ^[35]
技术架构	阐明了数字孪生与工业元宇宙的区别	杨阳等 ^[36]
	系统解析元宇宙六大关键技术的协同机制与工业应用瓶颈	王文通等 ^[37]
应用场景	提出工业元宇宙模型与架构,推动智能制造向虚实共生范式升级	REN等 ^[38]
	提出6种工业元宇宙在主动人机协作中的体现	LI等 ^[39]

2.5 云制造

云制造 (cloud manufacturing, CM) 是基于分布式网络化制造范式的新型生产模式,如图6所示,通过虚拟化、服务化与协同化技术将制造资源抽象为可全局调度的云服务,构建“制造即服务” (manufacturing as a service, MaaS) 的开放式生态

系统。其技术架构以制造资源虚拟化封装、服务组合动态优化及跨域协同控制为核心,依托工业互联网 (IIoT)、边缘计算与区块链技术实现资源的高效配置与全生命周期管理^[40]。如表5所示,云制造技术通过服务化封装、智能优化与协同控制,正在重塑制造业的资源配置与运营模式。

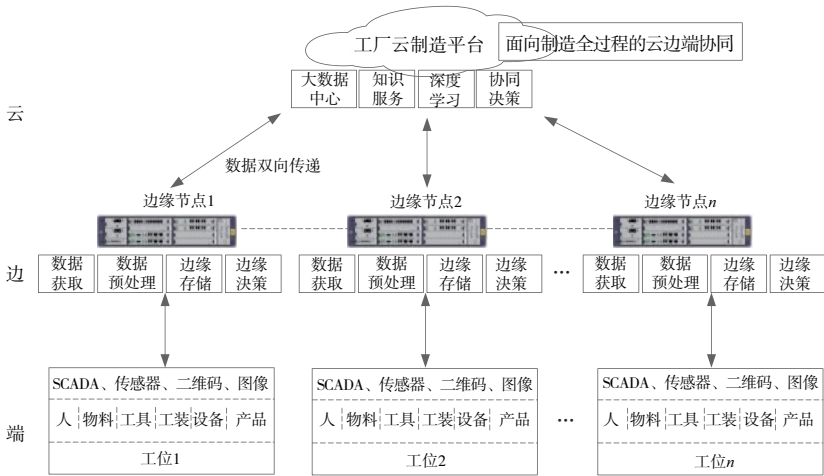


图6 云制造技术体系架构

表 5 云制造技术研究概述

研究方向	研究内容	文献来源
服务化封装	通过虚拟化技术将物理资源抽象为可度量的云服务	JI 等 ^[41]
	通过潜在关系图建模与改进的最大生成树求解,实现云制造服务目录的智能构建	BAI 等 ^[42]
智能优化	提出基于云边协同的制造服务组合优化框架,结合智能进化算法实现全局优化	SONG 等 ^[43]
	构建动态优化引擎,支持从工艺参数调整到供应链重构的自主决策	姚娟等 ^[44]
协同控制	本研究提出云—边—设备协同的闭环性能优化框架,实现制造系统全局动态优化	ZHANG 等 ^[45]
	提出云边协同制造 5 层架构,实现跨企业、跨地域的制造资源协同调度	GUO 等 ^[46]

JI 等通过 OPC UA 协议设计分层架构,打通云制造与 CPS 的实时数据链路,解决了制造系统跨层互操作性问题。姚娟等系统地综述了云制造服务组合问题的研究进展,从组合流程、优化目标及多角度分析方法总结了现有成果与不足。GUO 等提出云边协同制造 5 层架构,整合人—机—物资源与边缘计算、数字孪生技术,通过 12 类协同特征与 5 大关键技术体系推动制造系统向实时化、精准按需服务演进。云制造技术核心特点体现为弹性供给、全局协同、自适应决策与可信架构。但在应用过程中的瓶颈集中于异构资源语义互操作及服务组合可靠性等问题。未来,通过多层次云架构与边缘协同计算进一步推动云制造从“资源集成”向“认知自治”的范式演进,为全球制

造业提供弹性、敏捷、可持续的云化服务能力。

2.6 制造物联

制造物联技术(industrial internet of things, IIoT)作为智能制造的核心赋能技术,通过多源传感网络、边缘计算架构与工业通信协议的深度融合,实现了制造全要素的实时感知、数据互操作与闭环控制^[47]。如图 7 所示,其技术架构以异构设备互联、高并发低时延通信以及数据-知识双驱动决策为核心特征,有效解决传统制造中信息孤岛、状态不可见与响应滞后等瓶颈问题,为智能化生产管控、制造流程优化及效率提升提供了重要的技术支持。如表 6 所示,制造物联在智能生产调度、数字化供应链及能源管理等领域有着广泛的研究。

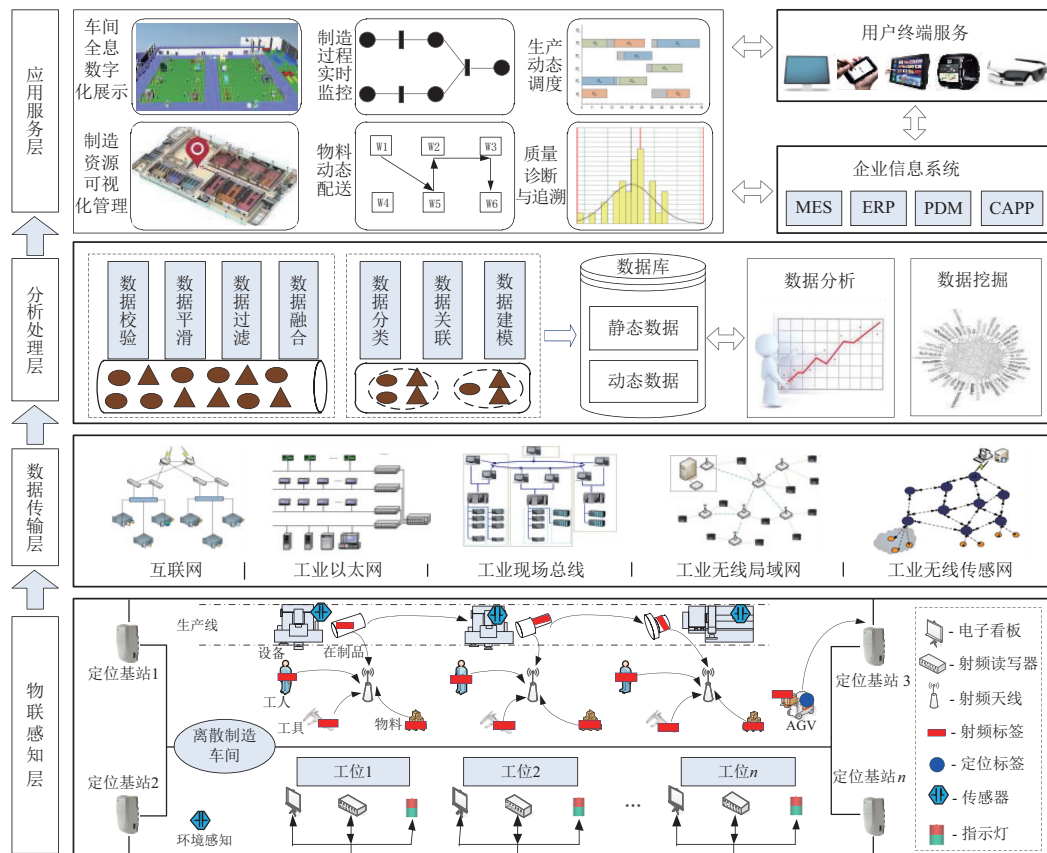


图 7 制造物联技术体系架构

表 6 制造物联技术研究概述

研究方向	研究内容	文献来源
智能生产调度	构建工艺参数动态优化与资源协同调度体系,通过数字线程技术贯通端到端数据链路	张党等 ^[48]
	系统构建工业物联网智能化 5 层架构与技术体系,结合灯塔工厂实践验证其全价值链赋能价值	HU 等 ^[49]
数字化供应链	基于区块链技术构建分布式可信计算框架,实现工业数据隐私保护与操作可追溯性	HAJLAOUI 等 ^[50]
	构建基于 RFID 与改进蚁群算法的动态路径优化框架,实现制造车间物料配送效率提升与计划协同	李亚杰等 ^[51]
能源管理	以 IIoT 实时数据流驱动强化学习算法,动态优化设备运行参数,实现能耗与碳排放的协同控制	RAVI 等 ^[52]
通信技术	聚焦 6G 新型 IoT 应用场景,为工业物联网应对高传输、低时延、低功耗挑战提供理论与技术支持	张爽等 ^[53]
	基于 5G 边缘计算的智能制造分层应用框架,实现多场景集成	史彦军等 ^[54]

张爽等系统性地综述了基于 6G 技术的智能物联网通信关键技术研究。张党等构建数据—知识混合驱动的离散制造智能控制体系,通过动态交互配置与混合算法模式创新,突破制造资源协同与决策优化瓶颈,推动离散制造向智能化深度转型。HAJLAOUI 等提出区块链赋能的 SmarterChain 框架,实现 AI 模型在 IoT/IIoT 中的安全部署与高效威胁检测,以链上可信计算与低开销优势,为工业大数据驱动的网络安防提供抗攻击、可追溯的智能决策支持。RAVI 等以 IIoT 实时数据流与边缘智能为核心,通过动态容错与能碳协同优化,实现工业控制系统的“零差错”与可持续升级,为制造业数字化转型提供兼具效率与绿色的解决方案。然而,制造物联技术仍面临

异构协议互操作性不足和安全攻击面扩大等挑战。随着关键技术的不断突破,将进一步推动制造物联技术从“连接赋能”向“认知自治”跃迁,为智能工厂提供高可靠、高弹性、高安全的数字化基座。

2.7 工业大数据

工业大数据(industrial big data)是以制造全要素多源异构数据(仓储库存、质检数据、工艺参数、机床状态数据等)为核心对象。通过数据建模、关联分析、机器学习以及强化学习等技术对海量数据进行深度挖掘与精准分析,实现生产过程的实时监测与优化,有效提升生产效率、降低运营成本,并在质量控制、设备维护、供应链管理方面提供数据支持^[55],其技术架构如图 8 所示。

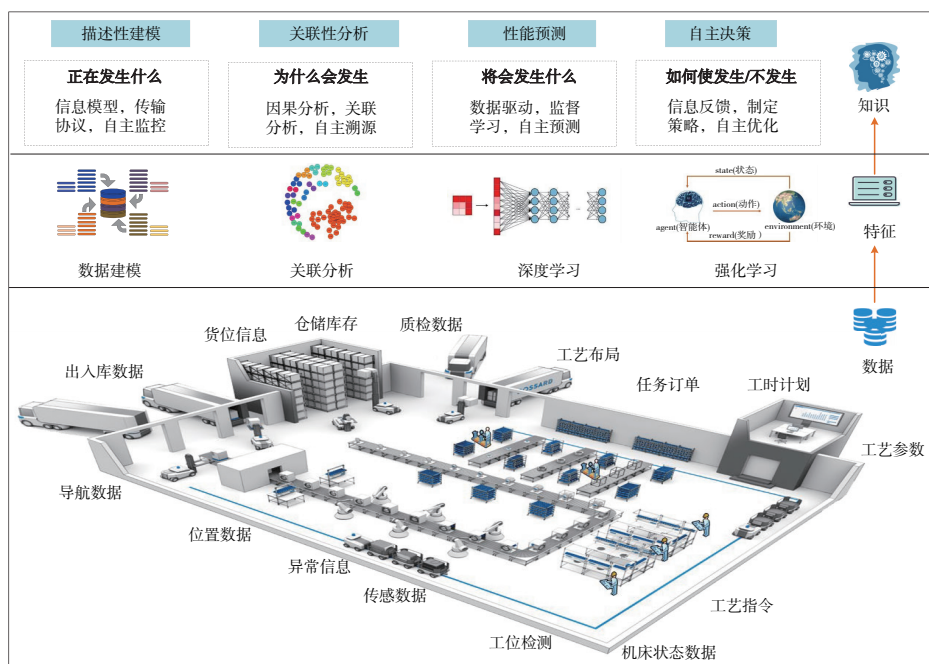


图 8 工业大数据技术架构

如表 7 所示,工业大数据研究方向包含理论架构、数据融合、质量控制以及故障预测等应用领域研究。WANG 等设计并验证了一种支持多源异构数据分层处理的分布式工业大数据平台架构,通过“实时—离线”混合存储与计算模式,突破智能工厂数据集成与实时分析瓶颈。陈洪军等针对工业大数据多模态特征与全生命周期管理需求,提出“离线—实时—检索—融合”四维技术框架,实现跨场景数据的高效采集、动态聚合与精准分析。张帅等融合最小协方差行列式稳健统计与变量选择算法,提出面向工业大

数据高维过程的稳健变量选择控制图监控模型,突破传统统计质量控制在数据噪声与离群点下的性能瓶颈。金晓航等通过剖析工业大数据驱动的故障预测与健康管理工作发展现状,结合风电与硬盘装备案例揭示技术瓶颈,并规划多源数据融合与自适应算法优化的未来路径。工业大数据的有效应用仍面临数据价值密度低下、数据存储瓶颈大以及实时—历史数据割裂等问题。随着数据挖掘与分析技术的不断发展,工业大数据将为智能制造系统构建高可信、高敏捷、高弹性的数据价值转化体系。

表 7 工业大数据技术研究概述

研究方向	研究内容	文献来源
理论框架	设计“实时—离线”混合存储与计算模式的分布式平台,支持分层处理多源数据	LI 等 ^[56]
	综述大数据分析(BDA)在智能制造中的技术框架、关键方法与典型应用	WANG 等 ^[57]
数据融合	采用四维技术框架,支持跨系统数据的动态采集、聚合与精准分析	陈洪军等 ^[58]
	通过多源数据整合与混合检测模型,显著提升工业控制系统的识别精度与响应速度	ABID 等 ^[59]
质量控制	融合最小协方差行列式(MCD)与变量选择算法,实现噪声过滤与关键变量识别	张帅等 ^[60]
故障预测	提出多源数据融合与自适应算法优化技术,为复杂装备的全生命周期维护提供了理论支持	金晓航等 ^[61]
	提出基于周期性冲击识别与水平响应分析的预知性维修策略,对 3 套轴承包运行状态进行多维度智能评估与故障精准诊断	王德芬等 ^[62]

3 挑战与未来发展

3.1 面临的挑战

智能制造前沿技术的演进呈现多维度复杂性。在系统集成层面,物理实体与数字空间的深度融合受制于异构系统架构,亟需基于制造物联构建全要素互联体系;在数据治理层面,垂直领域间存在的数据壁垒亟待通过数字孪生与工业大数据平台实现多源异构数据融合;在智能算法层面,工业数据价值密度偏低与算法泛化能力不足形成双重约束,生成式人工智能与工业具身智能技术亟待突破模型与算法的增量结合,提升其推理能力,突破场景泛化能力瓶颈;在人才培养层面,亟待构建融合工业工程、数据科学及控制理论的跨学科体系,依托云制造平台打造虚实融合的协同实训范式;在安全防护层面,制造系统泛在互联导致攻击向量激增,需构建基于零信任架构的动态防御机制。

3.2 未来发展趋势

未来,智能制造前沿技术将沿着深度融合、智能优化、数据互通、跨学科协同与安全防护等方向持续演进,以应对当前面临的多重挑战。基于制造物联的全域互联架构将突破异构系统壁垒,构建柔性化、自适应的智能制造网络拓扑;依托数字孪生与工业大数据平台的多模态融合技术,将驱动跨域数据语义对齐与知识化建模,形成高置信度工业数据基座;生成式人工智能与工业具身智能将成为关键突破口。未来研究将侧重于优化模型训练机制,提升自适应推理能力,以满足复杂制造环境下的智能感知、决策和自主优化需求;通过构建虚实共生的云制造实训平台,培养具备系统思维和智能制造实践能力的复合型人才;通过构建动态防御机制,结合人工智能安全监测与区块链可信计算,实现制造数据流通与系统运行的全链路安全保障。整体而言,通过架构革新、数据赋能、算法升级、人才储备与安全防护的立体化协同,

推动智能制造系统向自感知、自决策、自优化的体系架构持续进化,以支撑新一代工业变革和全球制造体系的深度升级。

4 结语

智能制造作为当前工业革命的重要组成部分,已经在全球范围内得到广泛应用。本文系统地概述了智能制造前沿技术的特点及应用,指出了工业具身智能、生成式人工智能、数字孪生技术、工业元宇宙、云制造、制造物联以及工业大数据等新一代信息技术在推动制造业转型升级中的关键作用。然而,智能制造的实施仍面临着自主技术、标准化、数据共享等方面的挑战。未来,随着技术的持续进步和产业协同发展,智能制造前沿技术的应用将进一步提升制造业的生产效率、优化资源配置,并推动全球制造业向智能化、数字化和网络化的方向迈进。

参考文献:

- [1] 原磊,王山. 数字经济助力现代化产业体系建设[J]. 当代经济研究,2023(12):5-13.
- [2] EROL S, SCHUMACHER A, SIHN W. Strategic guidance towards Industry 4.0 - a three - stage process model [C]//International conference on competitive manufacturing. 2016, 9(1): 495-501.
- [3] HEMPHILL T A. The U. S. advanced manufacturing initiative;will it be implemented as an innovation - or industrial - policy [J]. Innovation: Management, Policy & Practice,2013;2854-2859.
- [4] 张莹婷.《中国制造 2025》解读之:制造强国“三步走”战略[J]. 工业炉,2021,43(1):23.
- [5] GAO T Y, WANG L, SONG W Y, et al. Ten industrial software towards smart manufacturing [J]. Journal of Manufacturing Systems,2025,79:255-285.
- [6] 张宏博,吴璇,马冬妍.新型工业化背景下我国智能制造发展模式研究[J].制造业自动化,2024,46(11):1-8.
- [7] 陶飞,戚庆林.面向服务的智能制造[J]. 机械工程学报,2018,54(16):11-23.
- [8] REN L, DONG J B, LIU S, et al. Embodied intelligence toward future smart manufacturing in the era of AI foundation model [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics,2024(99):1-11.
- [9] DUAN J G, ZHUANG L W, ZHANG Q L, et al. Multimodal perception - fusion - control and human - robot collaboration in manufacturing: a review [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2024,132(3):1071-1093.
- [10] 卜韵阳,齐彬廷,卜凡亮. 模态不一致感知下双视角交互融合的多模态情感分析 [J/OL]. 计算机科学, (2025-02-27) [2025-04-02]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=lcwslclaudjY4Jy8Kmgnf4dPoUf7INONYLN2XxFqrOQ2_c2_HCvGn_Hbplp6czxqFQO4g6GmaTMfmk4faOLA_-kb99a1387kXZ1DFSVoDPJYSguQDq_WXfVgBQjHVLh_-uF1WKQMC7z7nVZfa7t3Tro8YA8n9ixvUblX_aUJdXE52Rfm5fYR_dgd32zJHKo4LjjPL&uniplatform=NZKPT&language=CHS
- [11] LU Q, SUN X, LONG Y F, et al. Multimodal dual perception fusion framework for multimodal affective analysis [J]. Information Fusion,2025,115:102747.
- [12] GUPTA A, SAVARESE S, GANGULI S, et al. Embodied intelligence via learning and evolution [J]. Nature Communications,2021,12(1):5721.
- [13] GUPTA S, YAO K P, NIEDERHAUSER L, et al. Action contextualization: adaptive task planning and action tuning using large language models [J]. IEEE Robotics and Automation Letters,2024,9(11):9407-9414.
- [14] 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.
- [15] 黄炜烨,陈希亮,赖俊. 面向人机协作的智能体训练方法研究综述 [J/OL]. 计算机科学, (2025-02-27) [2025-04-02]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=lcwslclaudhepdeyJP7_XxWo59ojEGdSSWG7aNAaxWGosWUCClAigivkDzN427k6gwtW7d7a8jKGcycIEfr78gw5cYprQ7zOw9Uq0I4zG0s5sMWm3Ep15omg6FlAoQa40AdSqrQiebiB_-T9KRB0gLnXZn0Mw0rtBHRyR2qnhy01nxRiq84jCgZ1qJOKso7r&uniplatform=NZKPT&language=CHS
- [16] LIU H P, GUO D, CANGELOSI A. Embodied intelligence: a synergy of morphology, action, perception and learning [J]. ACM Computing Surveys, 2025, 57(7):1-36.
- [17] CHU C H, ZHANG Y, ZHENG P, et al. Special issue: human - robot collaboration in industry 5.0 [J]. Journal of Computing and Information Science in Engineering,2025,25(5):050301.
- [18] KUSIAK A. Generative artificial intelligence in smart manufacturing [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2025,36(1):1-3.
- [19] JIANG M J, GUO Y, HUANG S H, et al. Generating the assembly instructions of helicopter subassemblies using the hierarchical pruning strategy and large language model [J]. Journal of Industrial Information Integration, 2024,42:100723.

- [20] WAN Y W, LIU Y, CHEN Z Y, et al. Making knowledge graphs work for smart manufacturing: research topics, applications and prospects[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2024, 76: 103-132.
- [21] 黄亚如, 钟剑斌, 成颖怡. 基于 SAM 视觉大模型的工业材料表面缺陷检测[J]. *智能制造*, 2024(6): 129-134.
- [22] LOWIN M. A text-based predictive maintenance approach for facility management requests utilizing association rule mining and large language models[J]. *Machine Learning and Knowledge Extraction*, 2024, 6(1): 233-258.
- [23] CHEN C, ZHAO K H, LENG J W, et al. Integrating large language model and digital twins in the context of industry 5.0: framework, challenges and opportunities[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2025, 94: 102982.
- [24] WU T, LI J, BAO J S, et al. Process carbon agent: a large language models-empowered autonomous agent for decision-making in manufacturing carbon emission management[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2024, 76: 429-442.
- [25] ZHANG L T, GUO Y, QIAN W W, et al. Modelling and online training method for digital twin workshop[J]. *International Journal of Production Research*, 2023, 61(12): 3943-3962.
- [26] 陶飞, 程颖, 程江峰, 等. 数字孪生车间信息物理融合理论与技术[J]. *计算机集成制造系统*, 2017, 23(8): 1603-1611.
- [27] WANG Y T, SU Z, GUO S L, et al. A survey on digital twins: architecture, enabling technologies, security and privacy, and future prospects[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2023, 10(17): 14965-14987.
- [28] FRIEDERICH J, FRANCIS D P, LAZAROVA-MOLNAR S, et al. A framework for data-driven digital twins of smart manufacturing systems[J]. *Computers in Industry*, 2022, 136: 103586.
- [29] QIAN W W, GUO Y, ZHANG L T, et al. Towards discrete manufacturing workshop-oriented digital twin model: modeling, verification and evolution[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2023, 71: 188-205.
- [30] 周达坚, 屈挺, 张凯, 等. 数字孪生驱动的工业园区“产—运—存”联动决策架构、模型与方法[J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(6): 1576-1590.
- [31] LEE J, CHUA P C, LIU B F, et al. A hybrid data-driven optimization and decision-making approach for a digital twin environment: towards customizing production platforms[J]. *International Journal of Production Economics*, 2025, 279: 109447.
- [32] 宋海龙, 潘建立, 姜震, 等. 数字孪生技术及其在宇航领域中的应用综述[J/OL]. *电子测量与仪器学报*, (2025-03-03)[2025-04-02]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=lcwslclaudjroIwvwRNlrVly5dkwO9rN_UNomfs6dKQaYX6OVlw4kb9RCPo8NiOLcKDrwAC1UsvmHYShq7nTP2iJ_eL6ErgPalgM4-OKdaw7O0VcW-VFjFEGWKSy4BBwcQn28BBGGMBR_pr4NOJrpCSjsOWtlf8ZA-FczLOyXQ9vD_8gcnFmh3MZSieu83m&uniplatform=NZKPT&language=CHS
- [33] GUO J L, LENG J W, ZHAO J L, et al. Industrial metaverse towards industry 5.0: connotation, architecture, enablers, and challenges[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2024, 76: 25-42.
- [34] 孙柏林. 工业元宇宙: 现实世界与虚拟世界互通的桥梁[J]. *计算机仿真*, 2022, 39(7): 1-7.
- [35] ZHANG H, LI Y L, ZHANG S, et al. Artificial intelligence-enhanced digital twin systems engineering towards the industrial metaverse in the era of industry 5.0[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2025, 38(1): 40.
- [36] 杨阳, 钟振宇, 王翔, 等. 工业元宇宙实践与思考[J]. *新型工业化*, 2024, 14(1): 20-28.
- [37] 王文通, 张智军, 张铭洋. 元宇宙关键技术、研究进展与应用综述[J]. *计算机科学*, 2024, 51(12): 2-11.
- [38] REN L, DONG J B, ZHANG L, et al. Industrial metaverse for smart manufacturing: model, architecture, and applications[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2024, 54(5): 2683-2695.
- [39] LI S F, XIE H L, ZHENG P, et al. Industrial Metaverse: a proactive human-robot collaboration perspective[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2024, 76: 314-319.
- [40] LANDOLFI G, BARNI A, IZZO G, et al. A MaaS platform architecture supporting data sovereignty in sustainability assessment of manufacturing systems[J]. *Procedia Manufacturing*, 2019, 38: 548-555.
- [41] JI T, XU X. Exploring the Integration of cloud manufacturing and cyber-physical systems in the era of industry 4.0: an OPC UA approach[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2025, 93: 102927.
- [42] BAI J, FANG S L, XU X, et al. LMPF: a novel method for bill of standard manufacturing services construction in cloud manufacturing[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2022, 62: 402-416.
- [43] 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.
- [44] 姚娟, 邢槟, 曾骏, 等. 云制造服务组合研究综述[J].

- 计算机科学,2021,48(7):245-255.
- [45] ZHANG C,WANG Y L,ZHAO Z Y,et al. Performance-driven closed-loop optimization and control for smart manufacturing processes in the cloud-edge-device collaborative architecture:a review and new perspectives [J]. Computers in Industry,2024,162:104131.
- [46] GUO L, HE Y L, WAN C C, et al. From cloud manufacturing to cloud-edge collaborative manufacturing[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing,2024,90:102790.
- [47] 黄少华,郭宇,查珊珊,等. 离散车间制造物联网及其关键技术研究与应用综述[J]. 计算机集成制造系统,2019,25(2):284-302.
- [48] 张党,赵永宣,王振军,等. 数据-知识混合驱动的离散制造系统智能控制体系构架研究[J]. 机械工程学报,2024,60(6):1-10,20.
- [49] 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.
- [50] HAJLAOUI R, MOULAH T, ZIDI S, et al. Towards smarter cyberthreats detection model for industrial Internet of Things (IIoT) 4.0[J]. Journal of Industrial Information Integration,2024,39:100595.
- [51] 李亚杰,赵帅,杨晓英. 面向制造物联的物料配送路径优化技术研究[J]. 现代制造工程,2021(11):35-42.
- [52] RAVI K C, VAISHNAVI T, PRINCY B A, et al. Revolutioning IIoT: a smart appliance of an Internet of Things over industrial manufacturing unit to make error-free circumstances[C]//2024 International Conference on Cybernation and Computation (CYBERCOM). Dehradun, India: IEEE,2024:314-319.
- [53] 张爽,张晨,彭淑敏,等.面向6G的智能物联网通信关键技术综述[J]. 无线电工程,2025,55(4):699-713.
- [54] 史彦军,韩俏梅,沈卫明,等. 智能制造场景的5G应用展望[J]. 中国机械工程,2020,31(2):227-236.
- [55] 方伟光,郭宇,黄少华,等. 大数据驱动的离散制造车间生产过程智能管控方法研究[J]. 机械工程学报,2021,57(20):277-291.
- [56] LI T, SONG W N, ZHOU J H. Research on artificial intelligence industrial big data platform for industrial Internet applications[C]//2021 IEEE 4th International Conference on Electronics Technology (ICET). Chengdu, China: IEEE,2021:955-959.
- [57] WANG J L, XU C Q, ZHANG J, et al. Big data analytics for intelligent manufacturing systems: a review [J]. Journal of Manufacturing Systems,2022,62:738-752.
- [58] 陈洪军,叶丽珠,陈其龙,等. 产品全生命周期工业大数据采集与管理范式探究[J]. 机电工程技术,2024,53(3):72-77.
- [59] ABID A, JEMILI F, KORBAA O. Real-time data fusion for intrusion detection in industrial control systems based on cloud computing and big data techniques[J]. Cluster Computing,2024,27(2):2217-2238.
- [60] 张帅,杨剑锋,闫莉.工业大数据驱动的高维过程质量稳健监控模型的构建与优化[J]. 机床与液压,2024,52(18):48-53.
- [61] 金晓航,王宇,ZHANG Bin. 工业大数据驱动的故障预测与健康管理[J]. 计算机集成制造系统,2022,28(5):1314-1336.
- [62] 王德芬,杨贺绪,张春兰.基于工业大数据的轴承包状态评估与故障预报[J]. 机械设计与研究,2024,40(3):229-233,244.

收稿日期:2025-04-01