

基于数智融合孪生技术的智能制造应用探索

Application Exploration of Intelligent Manufacturing Based on Data Intelligence Fusion Twin Technology

刘岩,赵洋,张旅阳,路稳(中国科学院信息工程研究所,北京 100085)
Liu Yan,Zhao Yang,Zhang Lüyang,Lu Wen(Institute of Information Engineering,Chinese Academy of Sciences,Beijing 100085,China)

摘要:

数字经济的迅猛发展,带动了产业数字化和数字基础设施建设的快速推进,人工智能、数字孪生等先进创新融合技术,已成为产业数字化转型升级的关键驱动力。分析了数智融合孪生技术的产生背景,并围绕其赋能下一代智能制造工厂建设展开探讨。产业实验说明,数智融合孪生技术对提高生产效率、优化成本、提升竞争力及应对风险作用显著,作为智能制造核心支撑,正加速产业智能化,助推新质生产力发展。

关键词:

数字经济;人工智能;数智融合孪生;产业数字化;新质生产力

doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2025.05.001

文章编号:1007-3043(2025)05-0001-06

中图分类号:TN919.2

文献标识码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Abstract:

The rapid development of the digital economy has led to the rapid advancement of industrial digitalization and digital infrastructure construction, and the development of advanced innovative integration technologies based on artificial intelligence and digital twins has become a key driving force for industrial digital transformation and upgrading. It analyzes the generation background of digital-intelligence twin fusion technology and explores its empowerment for the construction of next-generation intelligent manufacturing factories. Industrial experiments show that the twin technology of digital intelligence integration plays a significant role in improving production efficiency, optimizing costs, enhancing competitiveness and coping with risks. As the core support of intelligent manufacturing, it is accelerating industrial intelligence and boosting the development of new quality productivity.

Keywords:

Digital economy; Artificial intelligence; Data intelligence fusion twin; Industrial digitization; New quality productivity

引用格式:刘岩,赵洋,张旅阳,等.基于数智融合孪生技术的智能制造应用探索[J].邮电设计技术,2025(5):1-6.

1 概述

当前,随着中国数字经济的飞速发展,产业数字化进程的加快,数字技术对工业、服务业的渗透率不断提高,对5G、工业互联网、大数据中心、人工智能等数字基础设施的需求日益增长。以DeepSeek、Sora等为代表的AI大模型的蓬勃发展,前沿技术的快速演进,在不断推动AI赋能万物数字化转型的同时,也对当前的产业数字化、数字产业化发展提出了新的挑

战。

随着全球经济以及中国经济陆续迈入一个全新历史时期,不确定性将成为这个新阶段的主旋律。我国作为全球工业生产制造的领头羊,必须推进工业生产制造转型升级,加速淘汰落后产能,基于数智融合先进技术的智能制造能力建设已成为产业数字化转型和推动产业高质量发展的必由之路。在全球数字化快速发展的当下,智能制造不仅关乎企业未来的生存,更成为推动我国经济发展的重要引擎。智能制造将带来更高效、更灵活和更智能的生产制造方式,同时也会促进企业技术创新和可持续发展,引领产业高

收稿日期:2025-04-16

质量蓬勃发展。

2 数智融合孪生技术的产生背景

低成本曾是我国工业相关企业的重要竞争优势,但如今,受社会需求、全球商贸环境以及全球政治局势的影响,我国相关制造业企业正在大力推动企业创新以及智能产品设计,加大研发投入。如表1所示,中国研发经费投入逐年增长,在GDP中的比重逐年增加。从2012年到2024年,我国研发经费总量翻了3倍,突破3.6万亿元,位居世界第2。我国已经不再满足于“加工式”的创新,致力于摆脱对海外核心技术的依赖,拥有世界首屈一指的创新力量。中国企业需要在充分利用自身优势的同时,积极拥抱数字化转型的趋势,将数字技术整合到业务各个领域,改变研发流程,从而实现研发数字化,大力提升技术研发水平,为企业持续发展提供动力。

表1 中国研发经费投入增长情况

年份	研发经费投入/亿元	增长率/%	投入强度(经费/GDP)/%
2012	10 298.4	18.55	1.83
2019	22 143.6	12.53	2.23
2020	24 393.1	10.16	2.40
2021	28 000.0	14.79	2.44
2022	30 870.0	10.25	2.50
2023	33 357.1	8.06	2.65
2024	36 130.0	8.31	2.68

2.1 数字孪生技术

数字孪生(Digital Twin)是指某一物理对象、系统或过程的数字化虚拟模型,它与物理实体同步交互,

用于模拟、集成、测试、监控和维护等目的。它由物理实体、数字映射模型以及两者之间的数据通信通道(即“数字线索”)构成。数字孪生能够虚拟构建产品数字化模型,并对该数字化模型进行仿真测试和验证;在生产制造过程中,它能模拟设备运转,实时模拟参数调整带来的变化,极大地降低物理原型制作的成本和时间,有效实现设计过程中的降本增效。该技术随着工业物联网和智能制造的兴起,在21世纪10年代迅速发展,被广泛应用于产品全生命周期管理和工业过程优化^[1]。

当前,中国已成为全球数字孪生研究与应用最活跃的地区之一。根据艾瑞咨询数据,2020年至2025年,中国数字孪生市场规模逐年增长,持续保持高增长率。2022年中国数字孪生市场规模突破百亿,预计到2025年将达到375亿元,年均复合增长率达54.3%(见图1)。从政策层面看,“十四五”期间国家先后发布多项鼓励数字孪生发展的战略性文件,覆盖工业制造、城市管理、水安全、碳中和等重点领域,这些文件提供了清晰的技术导向和落地场景。此外,伴随工业互联网与数字经济的深入推进,数字孪生被视为实现产业智能化与数字化升级的核心工具和底座平台。

2.2 人工智能技术

人工智能(AI)作为以机器学习和深度学习为代表的第4次工业革命的产物,具备从大量数据中学习规律,并执行感知识别、预测决策等智能行为的能力。在工业生产领域,AI技术具备广泛的应用基础。

在产品阶段,引入数字孪生技术构建产品和生产流程的虚拟仿真模型,并通过AI技术模拟不同

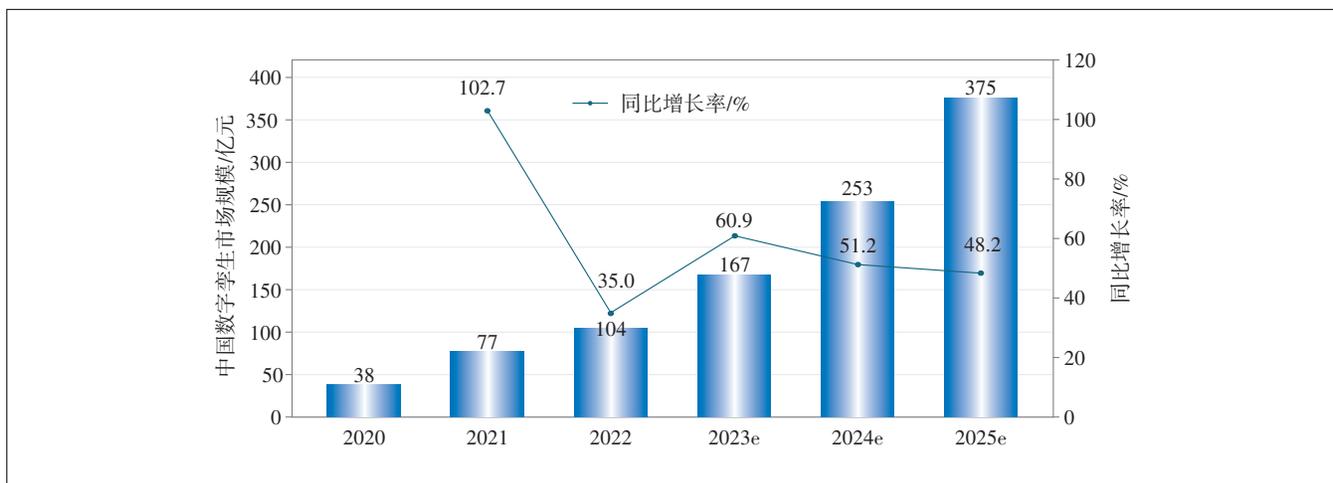


图1 2020—2025年中国数字孪生市场规模

设计方案在真实环境中的性能和生命周期^[2];对于庞杂的企业内部知识,可将AI大模型用于构建企业技术知识库,通过检索增强生成(RAG)等方案,将企业积累的技术规范、专利文档、设计图纸等接入大模型,进而实现对研发资料的智能检索和问答^[3]。此外,可利用云端计算资源创建虚拟原型并进行仿真测试,以评估设计方案的可行性和性能,降低物理原型制作的成本和时间投入,有效实现设计过程中降本增效的目标^[4]。

2.3 融合人工智能的数字孪生技术

随着科技的进步,早期侧重于利用模拟模型和简单规则进行离线分析的融合技术已不能满足工业制造的智能化需求,实时数据驱动的智能闭环控制已成为智能制造发展的标准架构^[5]。数据是AI算法的核心要素,优质的数据是推动人工智能在工业界应用的必要条件,而数字孪生与人工智能的创新交叉融合已成为推动产业数字化、智能化的重要路径。在产业数字化发展进程中,需实现数据驱动的智能应用创新。

数智融合孪生技术面向真实业务场景,提供先行先试的实验环境。该技术基于“实物孪生-数字孪生-机理孪生-孪生推演”的逻辑路径,遵循“孪生-拟生-派生-演生-新生”的路径层级,基于作业流程实现数字技术与智能技术的融合应用,构建基于真实业务场景下的数智融合孪生环境^[6]。

2.4 数智融合孪生技术特点

数智融合孪生技术具有如下特点。

a) 虚实融合(实时映射)。通过高精度模型和高速通信,实现物理世界和数字世界的实时同步映射与交互,打通数据链路,形成“镜像”关系。这使企业能够在数字空间中直观监视和操控物理资产,真正做到对生产现场的全局可视、可控、可测^[7]。

b) 智能决策。利用AI实时监控复杂系统的运行状态,提前识别潜在风险,辅助或自动完成决策。充分挖掘物理运行过程产生的数据,并结合AI的模式识别和推理能力,实现对运行状况的智慧解析,为优化决策提供支持。利用智能化决策牵引优化作业流程,显著提高业务运行的安全性和可靠性^[8]。

c) 预测性管理。通过对历史数据和实时数据进行机器学习,数字孪生模型可以提前预测未来趋势和潜在问题,实现预测性维护和主动干预。例如某企业在数字化质量系统中引入AI forecasting预测技术,对

质量数据进行实时分析判断,一旦发现某工序的参数或检测值出现偏离正常趋势的情况,系统会提前预警,指导调整工艺以消除隐患^[9]。

d) 仿真优化。数字孪生允许对各种方案进行模拟测试和优化,从而以较低成本进行研发与测试。企业可以在虚拟模型上尝试不同的参数配置或流程调整,观察其对产出、质量以及能耗等数据的影响,从而选择最佳方案。例如,某企业通过部署制造执行系统(MES)来实时监控与调度生产,并引入数字孪生等技术对产线进行仿真优化,不断提升产能和产品良率^[10]。

数智融合孪生技术作为第4次工业革命的创新产物,通过数字技术与智能技术的融合,赋予了工业系统前所未有的洞察力和灵活性,能够有效推动生产效率提升、实现降本增效,已成为产业转型与升级的重要驱动力,为产业数字化转型提供了核心支撑。

3 数智融合孪生技术在制造场景中的深度应用

随着新一轮科技革命和产业变革的深入推进,数据作为关键生产要素的价值日益凸显,获取和处理海量数据的需求愈发迫切,这也极大地促进了数智融合先进技术的快速发展和产业深度应用。在底层数智融合技术的支持下,业务数据的流动性、可用性逐步提升,以数智慧融合技术驱动的数据处理和分析能够为产业发展提供指引,突破了产业传统的生产协作模式,帮助企业寻求新的盈利增长点^[11]。另一方面,数据的不断积累和应用,为人工智能大模型的训练和应用提供了丰富的数据资源,进一步推动了数智融合技术在实际产业中的深度应用。基于数智融合孪生技术在灯塔工厂建设中的数字化用例如图2所示,本文将针对图2所示用例,详细阐述数智融合孪生技术在制造场景中的应用及价值。

3.1 基于数智融合孪生技术的预生产试验环境系统

排产、调度以及维护是生产制造环节中的3个重要环节,对工厂的产出效率起着决定性作用。智能生产制造环节已成为先进制造业的必要组成部分^[12]。当前,生产制造产业数字化程度普遍比较低,生产数据流转分析时效性差,生产效率提升面临瓶颈,难以满足业务快速发展和产业升级的需求。

为了解决当前产业发展面临的问题,基于数智融合孪生技术制定的预生产试验环境产品解决方案,通过100%复刻真实产线构建预生产试验环境。在该试

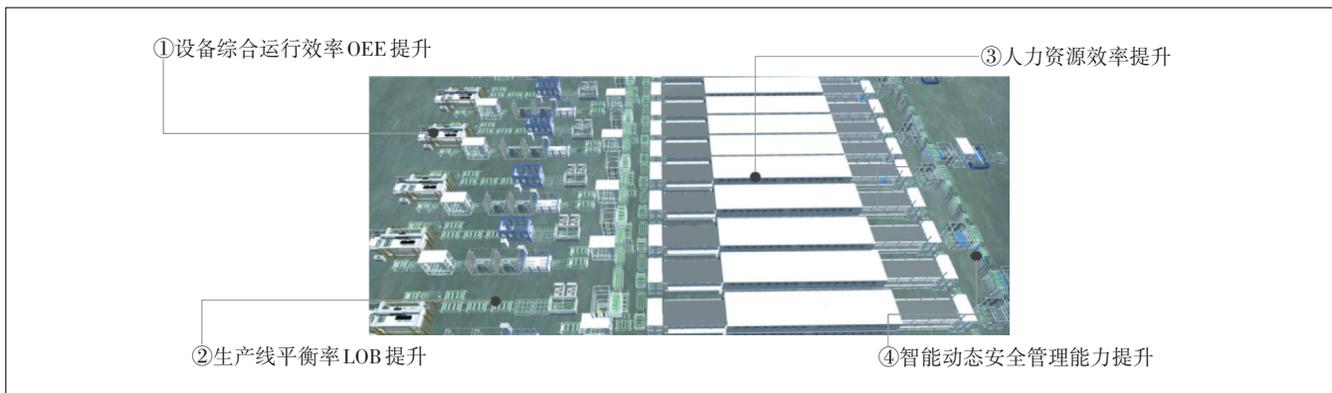


图2 数智融合孪生技术在智能制造中的应用场景示例

验环境中,构建了单向数据交互机制,产线所有生产数据和设备运行数据会按照设计原则流入预生产试验环境,进而实现整体运行状态的自动获取。通过数据处理和异常识别技术,对产线运行情况进行实时监控和告警;另一方面,单向数据交互机制可确保不会让影响产线稳定运行的干扰数据流入产线,从而实现整体设备的稳定运行和生产效率的提升,兼顾了生产效率提升与安全保障。预生产试验环境产品方案的数据作业流程如图3所示。通常使用设备综合效率

(OEE)、生产线平衡率(LOB)、时间稼动率和性能稼动率来评价产线总体运行效率。

a) 设备综合运行效率(OEE):OEE是一种衡量生产设备实际效率的指标。它通过3个核心维度(可用性、性能和质量)来评估设备在运行中的损失。

b) 生产线平衡率(LOB):作为评估生产线平衡状况的关键指标,LOB旨在确保各生产工序所需时间的均衡性,从而减少工序间的等待时间浪费,提高生产效率。



图3 预生产试验环境系统数据作业流程

c) 时间稼动率:时间稼动率是指设备在计划运行时间内实际处于运行状态的时间所占的比例。它主要关注的是设备的可用性和利用率,即设备是否处于运行状态以及运行了多长时间。

时间稼动率 = 实际运行时间 / 计划运行时间 × 100%

d) 性能稼动率。性能稼动率是指设备在实际运行过程中,其性能达到或接近设计标准(或预期水平)的时间所占的比例。它用于衡量设备运行时的效率和质量,即设备是否是高效且稳定地工作。

性能稼动率 = (总生产量 / 理论最大生产量) × 100%(或在特定时间段内,设备实际输出与理论最大输出的比值)

3.2 预生产试验环境系统对生产效率提升的影响评估

经过真实产线验证,配备预生产试验环境的产线设备运行效率较未配备预生产试验环境的产线设备运行效率提升了1.85%。按照单一车间10条产线的规模计算,应用预生产试验环境后,该车间总体收益为535万元。应用预生产试验环境系统前后产线基于OEE提升收益数据对比如表2所示。

此外,通过接入预生产试验环境,还可以自动获

表2 应用预生产试验环境系统单一车间产线OEE收益对比 (测试周期为12个月)

指标	应用前	应用后	改善幅度
设备综合运营效率提升/%	91.15	93	1.85
单线人力下降/人	50	49.8	0.2
单线日产能提升/个	5 735	6 508.33	773.33
10条线单车间年度收益/万元	535		

取并计算生产节拍,减少人工操作介入点,实现生产节拍的实时统计以及问题的自动改善与纠偏,从而保障产线运行的稳定性,有效提升产能。叠加LOB与OEE数字化用例后,产线各项指标均有明显提升。应用预生产试验环境系统前后产线OEE叠加LOB提升收益数据对比情况如表3所示。

3.3 预生产试验环境系统对人力资源效率提升的影响评估

传统劳动密集型的生产制造模式,在数智技术快速发展的当下,面临巨大的挑战,存在根本性重构的迫切需求。新型技术赋能的业务系统和工业自动化机器人的出现,正在改写依靠人力堆积实现快速发展的业务逻辑。为了逐步提升产线自动化水平和人力资源效率,解决人力需求与实际需求脱节、人岗不配备等核心问题,将人力资源投入到重要的生产环节,亟待建立一套人力透明度评价体系,实现自动化产线排班,并与生产计划更新实时联动,从而精准进行资

表3 应用预生产试验环境系统单一车间产线OEE叠加LOB收益对比(测试周期为12个月)

指标	应用前	应用后	改善幅度
设备综合运营效率提升	74.5%	85.7%	11.2%
时间稼动率	91.3%	95%	3.7%
性能稼动率	87.3%	94.7%	7.4%
产品合格率	90%	95%	5%
换算产能提升	5 735	6 508.33	13.5%
10条线单车间年度收益/万元	2 010		

源计划调度,防止人力与实际生产脱节,最大化提升资源利用率和产出效率^[13]。基于预生产试验环境系统打造的人力资源透明度管理数字化用例作业流程如图4所示。

从图4可以看到,通过系统的应用和作业流程优化,可以有效实现生产计划和人力资源的有效匹配,通过对岗位和人员技能的精准记录,可以建立一套先

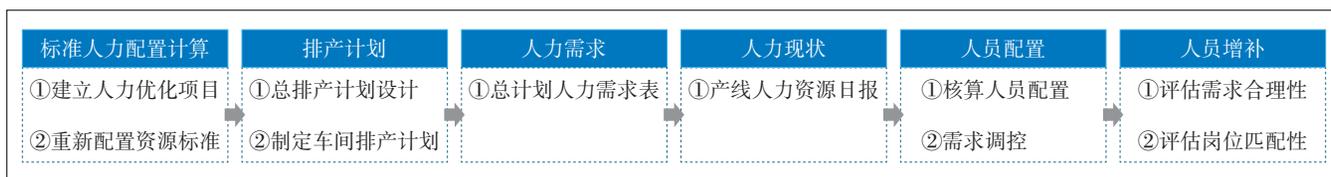


图4 智能化人力资源透明度管理用例作业流程

进的人岗匹配逻辑,动态适应产线调整,最大化提升人工管理效率,降低人工成本。智能化人力资源透明度管理用例实验预估收益对比如表4所示。

表4 智能化人力资源透明度管理用例实验预估收益对比(测试周期为12个月)

指标	应用前	应用后	预估收益
在岗人力效率损失率	32%	15%	1 200万元
人力调度资源池损失率	16%	12%	300万元
工厂派工效率(含沟通时间)	185 h/天	150 h/天	35万元
10条线单车间年度收益/万元	1 535		

3.4 预生产试验环境系统对产线安全能力提升影响评估

在生产制造场景下,设备资产和安全管理混乱、资产台账不清晰,且缺乏行之有效的统一安全能力以及支持安全与生产稳定性、生产效率相平衡的产品,这导致生产制造场景中安全漏洞难以被精准定位,安全风险时间无法被有效收敛,运维工单无法及时确认

和修复,长时间处于安全管理真空状态,给产线稳定运行带来巨大隐患。同时,在全球范围内,针对生产制造场景的勒索攻击事件频发,风险覆盖面广,影响业务领域众多,对我国制造产业的发展造成巨大影响^[14]。

基于预生产试验环境系统打造的“数智孪生数字安全管理实验平台”,为产业数字化应用和安全防御提供了先行先试实验环境。该平台旨在从信息系统、制造工艺、IT网络、业务流程、制造设备的早期设计阶段入手,进行威胁仿真分析,可以提早实现安全威胁预警、业务流程优化、生产质量改善等目标,整体降低业务安全风险。其次,该平台基于攻防对抗模拟,自动生成和优化主动防御策略,融合对抗性机器学习,自动化构建动态安全策略生成模型,实现对复杂网络威胁的预测和主动防御,并通过虚拟业务孪生环境对安全策略的有效性进行智能验证,将生产制造安全防御从被动响应转变为主动预防,极大提升了产线安全漏洞告警的及时性和准确性。再次,该平台采用数智

融合先进技术,采集日常生产数据和安全攻击数据,对影响生产稳定运行的因素和潜在安全攻击行为进行推演模拟,为业务和安全人员提供实验基础环境,形成快速、高可用、低开销、自动推演的场景复刻能力,提升生产制造安全防御水平,保障安全稳定生产。测试期内应用“数智孪生数字安全管理实验平台”前后安全风险数据对比如表5所示。

表5 “数智孪生数字安全管理实验平台”安全风险处置数据对比(测试周期为4个月)

安全风险类型	应用前	应用前风险漏过率	应用后	测试期内风险漏过率
病毒风险累计处理	业务主动上报	无法识别风险	983例	0
系统风险累计处理	业务主动上报	无法识别风险	83例	0
网络风险累计处理	业务主动上报	无法识别风险	2 168例	0
受影响终端数量	业务主动上报	无法识别风险	62台	0

智能制造是采用智能化、系统化的方法实现从产品制造到生产管理的全程数字化,并且通过数智化技术和产品对端到端业务流程体系进行重构,从而支撑产线规模扩展、生产效率提升和供应链优化。随着数智融合技术数字化能力的不断应用与发展,我国先进生产制造领域的端到端业务流程得以重构^[15]。通过智能制造的全面落地,总体生产交付周期可缩短84%,仓储、物流效率大幅提升,实现了交付计划、物流协同、库存管理三维一体的智能化升级,以及传统制造向智能制造的巨大跃迁。

4 结束语

当前,中国正处于数字经济蓬勃发展和产业数字化转型的重要阶段。以数智融合孪生技术为代表的人工智能先进技术,是引领新一轮科技革命和产业变革的战略性技术。目前,该技术已具备在各行各业深入、大面积应用的基础,能够赋能应用场景和产品服务创新,对产业数字化转型升级具有关键意义。基于数智融合技术的产业研发创新、供应链优化、产线智能化、营销精准化等各环节的深度数字化改造,使得产业能够有效降低运营成本、提高生产效率、增强市场竞争力。这不仅大幅提升了产业运营效率和产品质量,也为产业数字化提供了有力的支撑与广阔的发

展空间,是助推我国新质生产力发展的重要引擎,也是我国经济持续高质量发展的核心保障。

参考文献:

- [1] 刘大同,郭凯,王本宽,等. 数字孪生技术综述与展望[J]. 仪器仪表学报,2018,39(11):1-10.
- [2] BALTA E C, PEASE M, MOYNE J, et al. Digital twin-based cyber-attack detection framework for cyber-physical manufacturing systems [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2023,21(2):1695-1712.
- [3] 刘浩东. 大语言模型在企业信息化中的应用探讨[J]. E-Commerce Letters, 2025,14(2):235-240.
- [4] 张星洲,鲁思迪,施巍松. 边缘智能中的协同计算技术研究[J]. 人工智能,2019,5(7):55-67.
- [5] TONG X, LIU Q, PI S, et al. Real-time machining data application and service based on IMT digital twin[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2019,31(2):1-20.
- [6] 李嘉琪,张骁,翟立东. 数智融合孪生与安全实验床赋能能源产业数字化路径探索: 2024中国石油化工企业信息技术交流大会[C]. 北京:中国石化出版社,2024.
- [7] 江海凡,丁国富,张剑. 数字孪生车间演化机理及运行机制[J]. China Mechanical Engineering, 2020,31(7).
- [8] 陶飞,马昕,戚庆林,等. 数字孪生连接交互理论与关键技术[J]. 计算机集成制造系统,2023,29(1):1.
- [9] 刘虎沉,王鹤鸣,施华. 智能质量管理:理论模型、关键技术与研究展望[J]. 中国管理科学,2024,32(3):287-298.
- [10] 卢荣胜,吴昂,张腾达,等. 自动光学(视觉)检测技术及其在缺陷检测中的应用综述[J]. Acta Optica Sinica, 2018,38(8):0815002.
- [11] 爽李. 5G与AI大数据的合作发展与应用研究[J]. 大数据与人工智能,2025,6(1).
- [12] 张曙. 工业4.0和智能制造[J]. 机械设计与制造工程,2014,43(8):1-5.
- [13] 臧冀原,王柏村,孟柳,等. 智能制造的3个基本范式:从数字化制造,“互联网+”制造到新一代智能制造[J]. 中国工程科学,2018,20(4):13-18.
- [14] 葛琪. 生产制造企业的资产管理新探索[J]. 经济管理文摘,2020(4):2.
- [15] 周济. 智能制造——“中国制造2025”的主攻方向[J]. 中国机械工程,2015,26(17):2273-2284.

作者简介:

刘岩,中国科学院大学博士在读,主要从事网络安全技术、新型数字技术产业应用研究工作;赵洋,中国科学院大学博士在读,主要从事数据安全、产业安全测评领域研究工作;张旅阳,中国科学院大学博士在读,主要从事网络空间安全战略方向研究工作;路稳,中国科学院大学博士在读,主要从事数字安全、网络安全领域研究工作。