

基于数字孪生与人机协同模式下 AI 深度融合智能 制造行业的研究综述

刘杨, 刘勇, 胡洋, 蒋世应*

宜宾职业技术学院智能制造学院, 四川 宜宾 644100

DOI: 10.61369/SDME.2026050029

摘 要 : 随着新一轮科技革命和产业变革的深入推进, 涵盖智能设计、智能生产、智能运维、智能供应链、数字孪生、人机协同、边缘智能与安全可信等人工智能 (AI) 技术已经与智能制造的深度融合发展, 成为推动制造业高质量发展的核心驱动力。AI 技术通过数字赋能制造全过程, 正在重塑传统制造模式, 实现生产效率、产品质量、资源利用率和柔性响应能力的全面提升。本文系统梳理了当前 AI 融入智能制造领域的研究热点等多个方向, 分析各方向的技术特征、应用现状与未来发展趋势, 并探讨当前面临的挑战与应对策略, 以期为高职院校科研人员和产业界提供理论参考与实践指导。

关 键 词 : 人工智能; 智能制造工业 4.0; 深度学习; 数字孪生; 人机协同

A Review of Research on the Deep Integration of AI in Intelligent Manufacturing Based on Digital Twin and Human-Machine Collaboration

Liu Yang, Liu Yong, Hu Yang, Jiang Shiyong*

School of Intelligent Manufacturing, YiBin Vocational And Technical College, Yibin, Sichuan 644100

Abstract : With the in-depth advancement of the new round of scientific and technological revolution and industrial transformation, artificial intelligence (AI) technologies including intelligent design, intelligent production, intelligent operation and maintenance, intelligent supply chain, digital twin, human-machine collaboration, edge intelligence, security and trustworthiness have been deeply integrated with intelligent manufacturing, becoming the core driving force for the high-quality development of the manufacturing industry. By digitally empowering the entire manufacturing process, AI technologies are reshaping traditional manufacturing models and achieving comprehensive improvements in production efficiency, product quality, resource utilization and flexible response capability. This paper systematically sorts out the current research hotspots and other directions in the integration of AI into intelligent manufacturing, analyzes the technical characteristics, application status and future development trends of each direction, and discusses the existing challenges and corresponding strategies, aiming to provide theoretical reference and practical guidance for researchers in higher vocational colleges and the industrial community.

Keywords : artificial intelligence; intelligent manufacturing Industry 4.0; deep learning; digital twin; human-machine collaboration

引言

随着 2025 年全球制造业向智能化、绿色化、服务化转型的背景下, 智能制造产业升级发展, 已成为各国抢占未来科技竞争制高点的战略方向。德国提出“工业 4.0”战略, 美国推动“先进制造伙伴计划”, 中国实施“中国制造 2025”战略, 均将智能制造作为国家战略核心发展方向。在这一进程中, 人工智能凭借其强大的数据处理、模式识别、自主决策与自适应学习能力, 成为推动智能制造升级的关键使能技术。数字孪生与人机协同模式下 AI 深度与智能制造的融合, 不仅体现在生产线的自动化控制, 更深入到产品全生命周期的各个环节, 包括研发设计、工艺优化、生产调度、质量检测、设备维护、供应链管理 & 客户服务等。^[1]近年来, 随着深度学习、强化学习、机器视觉、自然语言处理、边缘计算等 AI 技术的突破, 人工智能在制造业场景中的应用不断深化, 催生出大量新的研究热点。高校作为基础研究与技术创新的重要阵地, 亟需把握这些前沿方向, 开展系统性、前瞻性研究。本文旨在系统归纳当前 AI 融入智能制造的主要研究热点, 分析其技术内涵、应用场景、研究进展与未来挑战, 为高校教师开展相关科研工作提供综述性参考。

基金项目: 宜宾职业技术学院校级质量与教学改革工程项目 (项目编号: JG2025ZD-009); 中国教育技术协会课题 (课题编号: KYKFYB250031)

作者简介:

刘杨, 讲师, 硕士研究生, 研究方向: 产业经济;

刘勇, 副教授, 模具教育室主任, 研究方向: 模具制造;

胡洋, 讲师, 博士研究生, 研究方向: 智能制造模具方向。

通讯作者: 蒋世应, 通讯作者, 副教授, 硕士研究生, 研究方向: 电气自动化。

一、数字孪生与人机协同模式下 AI 融入智能制造的研究热点

（一）智能设计与产品创新

1. 基于数字孪生技术下 AI 驱动的智能设计

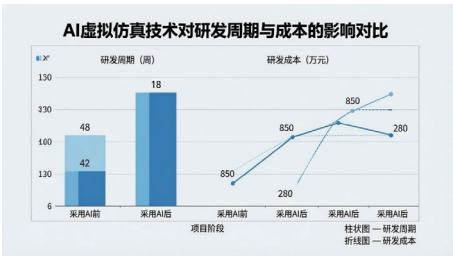
智能设计是智能制造的起点，AI 技术正在改变传统“试错式”设计模式。通过引入数字孪生生成式设计（AIGC Design）技术，AI 采用拓扑优化、多目标优化算法，可根据产品性能约束、材料特性、制造工艺等条件，自动生成多种设计方案。例如，在产品研发阶段，基于深度学习的生成对抗网络（GAN），可用于逆向设计思路生成具有特定功能特征的产品结构设计方案，特别对创新类产品设计中，可以采用生成对抗网络（GAN）强化学习可用于优化复杂系统的参数配置。

2. AI 知识图谱与设计知识管理

传统制造企业在产品设计阶段，需要积累大量设计图纸、工艺文件、专家经验等非结构化数据，这样产生的误差较大与设计冗余时间较长，不利于新产品的市场推广。^[4]工业 AI 设计软件利用自然语言处理（NLP）和知识图谱技术，可构建“设计知识库”，实现设计经验的结构化沉淀与智能检索。例如，通过构建“零件-材料-工艺-性能”知识图谱，支持设计人员快速获取相似案例与推荐方案，提升设计效率与创新性。

3. 数字孪生技术仿真与 AI 融合的虚拟验证

传统 CAE 仿真耗时长、计算资源密集。AI 驱动的虚拟仿真技术在产品研发过程中具有重要作用，能够有效降低研发成本并缩短研发周期。AI 大数据模型可通过学习历史仿真数据，构建“代理模型”（Surrogate Model Agent），实现快速产品开发性能预测，找准产品开发设计中的问题，显著缩短新产品设计迭代周期。^[6]例如，基于神经网络的代理模型可在秒级内预测材料结构应力分布，辅助设计优化。具体而言，基于 AI 深度学习的虚拟仿真系统，对产品在实际使用环境中的性能表现进行高精度的预测与评估，从而帮助研发人员在物理样机制造之前发现潜在问题并进行优化。例如，某汽车制造企业在开发新款电动车型时，利用 AI 虚拟仿真技术对电池热管理系统进行了多轮仿真测试，成功识别了散热设计中的薄弱环节，并实施改进，最终使电池组的寿命延长了约 10%。此外，AI 大模型还能够通过实时数据反馈，对仿真模型进行在线校正，从而提高制造产品的仿真准确性。例如，某航空航天企业在研发新型发动机时，利用 AI 自适应仿真技术，对发动机在不同工况下的运行特性进行了模拟，并将仿真结果与实验数据进行了对比校正，最终使仿真误差降低了约 5%。图一展示了该企业采用 AI 虚拟仿真技术前后研发周期与成本的对比情况，直观反映了该技术在实际应用中的显著优势。^[10]



图一：某航空制造企业采用 AI 虚拟仿真技术前后研发周期与成本的对比

（二）智能生产与工艺优化

1. 数字孪生技术背景下生产过程的智能控制与调度

现代智能制造系统具有高度动态性与不确定性，传统生产制造的调度算法难以应对复杂多变的生产环境与技术迭代需求。AI 大数据模型中将数字孪生技术融入强化学习、多智能体系统（MAS），用于智能制造的动态排产、资源调度与路径优化，使一般生产更趋于柔性生产方式。例如，基于深度 Q 网络（DQN）的调度算法可实时响应设备故障、订单变更等扰动，实现自适应调度。

2. 数字孪生技术的工艺参数智能优化

工艺参数（如切削速度、进给量、温度、压力等）直接影响产品质量与能耗。AI 可通过分析历史生产数据，根据产品生产需求，利用数字孪生技术建立“工艺-质量”映射模型，实现参数自动更迭推荐与优化。例如，基于支持向量机（SVM）或随机森林的预测模型可预测产品加工误差，结合数字孪生技术的遗传算法寻优最佳参数组合。

3. 智能质量检测与缺陷识别

传统制造业人工质检效率低、主观性强。AI 结合机器视觉和数字孪生技术，实现产品自动化、高精度的质量检测。AI 大数据模型下卷积神经网络（CNN）、YOLO 系列目标检测算法广泛应用于表面缺陷识别（如裂纹、划痕、气孔等）。例如，在汽车焊点检测、电子元器件外观检测中，AI 系统可达到 99% 以上的识别准确率。

（三）智能运维与预测性维护

1. 设备健康状态监测与故障预测

基于数字孪生技术的传感器采集的振动、温度、电流等时序数据，AI 大模型可构建智能制造设备健康评估模型。长短期记忆网络（LSTM）、门控循环单元（GRU）等时序模型能有效捕捉设备退化趋势，实现早期设备故障预警。例如，在数控机床、风力发电机等关键设备中，AI 系统可提前数小时至数天预测故障发生。

2. 预测性维护（Predictive Maintenance）

传统定期维护存在“过度维护”或“维护不足”问题。AI 通过构建“设备退化模型”与“剩余使用寿命（RUL）预测模型”，实现按需维护。这不仅降低维护成本，还减少非计划停机时间。研究热点包括：多源数据融合、小样本学习、迁移学习在 RUL 预测中的应用。

3. 数字孪生技术背景的远程诊断与自助运维

结合 AI 数字孪生与增强现实（AR）技术，可实现远程专家系统辅助运维。例如，运维人员通过 AR 眼镜查看设备运行状态，AI 系统自动推送故障诊断建议与维修指导，提升响应速度与维修质量。

（四）智能供应链与物流管理

1. 需求预测与库存优化

制造业面临市场需求波动大、订单碎片化等挑战。AI 通过分析历史销售数据、市场趋势、天气、社交媒体等多源信息，构建高精度需求预测模型。基于预测结果，结合强化学习或优化算法，实现动态库存策略调整，降低库存成本与缺货风险。

2. 智能物流与仓储调度

在智能工厂中，AGV（自动导引车）、AMR（自主移动机器人）广泛应用于物料搬运。AI 算法（如 A*、Dijkstra、强化学习）用于路径规划与避障；多机器人协同调度算法优化任务分配与交通管制，提升物流效率。

3. 供应链风险预警与韧性管理

全球供应链面临地缘政治、自然灾害、疫情等多重风险。AI大模型可通过构建供应链网络图谱，识别关键节点与脆弱路径，结合自然语言处理分析新闻、舆情，实现风险早期预警。智能制造供应链端研究热点包括：基于神经网络（GNN）的供应链风险传播建模、韧性评估指标体系构建。

（五）数字孪生与虚实融合

1. 数字孪生系统构建

数字孪生是物理系统在虚拟空间的动态映射，是实现智能制造闭环控制的核心技术。AI大模型在其中发挥关键作用：通过机器学习构建高仿真模型；利用实时数据驱动模型更新产品设计迭代；基于AI算法实现“仿真－优化－控制”一体化。例如，在航空发动机制造中，数字孪生系统可实时模拟运行状态，优化维护策略。

2. 虚实交互与自主决策

数字孪生系统结合AI决策模型，可实现“智能设备虚拟调试”“产品虚拟试产”“供应链自主优化”等功能。例如，在新产线建设前，通过数字孪生平台进行全流程仿真，提前发现智能生产过程中的瓶颈并优化布局，降低试错成本。

（六）人机协同与智能工厂组织变革

1. 协作机器人（Cobot）与人机交互

传统工业机器人多为生产场景隔离式运行，每个机器人只负责其中一个场景的生产任务，缺乏跨区域和生产背景的协同能力。而协作机器人可与人类共事。AI赋予机器人环境感知、意图识别、安全避障等能力。例如，基于计算机视觉与行为识别算法，机器人可预判操作员动作并主动配合，提升协作效率。

2. 智能工厂的组织模式变革

AI大模型的引入正在改变工厂的组织结构与管理模式。智能生产的研究热点包括：AI如何影响岗位设置与人才结构；如何重构绩效考核与激励机制；如何构建“人-AI”协同决策机制。高职院校可结合AI融入智能制造行业进行组织行为学、管理信息系统等多学科视角研究。

二、数字孪生与人机模式下 AI 深度融合智能制造面临的挑战

（一）数字孪生背景下数据安全与隐私问题

在智能制造领域，数据作为核心生产要素，其重要性不言而喻。智能制造系统通过数字孪生和人机交互模式下，需要实时采集、传输和处理大量生产数据，通过AI大模型实现设备互联、工艺优化以及决策优化等功能。然而，在人工智能技术深度融合智能制造的过程中，数据的安全性依然面临严峻挑战。

（二）数字孪生与人机交互模式下技术标准不统一

由于AI技术的井喷式爆发，人工智能与智能制造融合过程中缺乏统一的技术标准，这一问题已成为制约行业发展的重要因素之一。智能制造技术标准的缺失直接导致了设备兼容性和系统集成方面的障碍。在设备层面，不同厂商生产的智能装备往往采用各自的技术协议和通信标准，这使得设备之间的数据交互和协同工作变得异常困难^[2]。例如，某些企业的生产设备支持OPCUA协议，而其他企业则使用Modbus协议，这种异构性显著增加了

系统集成的成本和复杂性。在智能制造系统设计层面，技术标准的碎片化进一步加剧了信息孤岛现象。智能制造系统通常由多个子系统组成，包括生产执行系统（MES）、企业资源计划系统（ERP）以及产品生命周期管理系统（PLM）等。然而，由于缺乏统一的数据格式和接口标准，这些子系统之间难以实现高效的数据共享和业务协同^[8]。不同企业开发的AI模型可能基于不同的数据格式和算法框架，这导致模型的可移植性和互操作性较差，从而限制了其规模化应用。

（三）数字孪生与人机交互模式下技术融合发展高端人才短缺

人工智能与智能制造深度融合的过程中，复合型人才之匮乏已成为行业发展的突出瓶颈。智能制造领域需要的是既懂人工智能技术，又熟悉制造业生产流程的跨学科人才，而这类人才的培养面临诸多困难。首先，当前教育体系中，人工智能与制造业相关专业的课程设置相对独立，缺乏交叉融合的教学内容。例如，高校计算机专业通常侧重于算法和编程技能的培养，而对制造业的实际需求关注较少；相反，机械工程专业课程则更多聚焦于传统制造工艺，对新兴技术的引入不足^[4]。

其次，实践训练资源的匮乏进一步制约了人才培养的成效。智能制造领域的人才培养需要结合真实的工业场景进行实践操作，然而，由于智能制造设备和系统的复杂性及高昂成本，许多高校和培训机构难以提供相应的实验环境^[5]。

三、结语

AI与智能制造的深度融合正深刻改变我国制造业的发展模式。从智能设计到智能运维，从数字孪生到人机协同，研究热点广泛覆盖制造全链条。高职院校应立足国家战略需求，结合自身学科优势，聚焦关键技术瓶颈，开展具有前沿性的实践与应用性研究。同时，应加强与智能制造企业合作，推动产学研协同创新，助力我国从“制造大国”向“制造强国”迈进。未来，随着AI技术的持续演进与制造场景的不断深化，智能制造将迈向更高阶的“自主化、服务化、生态化”发展阶段。高职院校的科研工作者应主动把握这一历史机遇，为构建智能化、韧性化、可持续发展的现代制造体系贡献智慧与力量。

参考文献

- [1] 李培根. 智能制造中的关键问题[J]. 机械工程学报, 2020, 56(1): 1-10.
- [2] Zhou, M., et al. Artificial Intelligence in Manufacturing: A Review. Engineering, 2022, 8: 120-135.
- [3] Kagermann, H., et al. Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0. German National Academy of Science and Engineering, 2013.
- [4] Lee, J., et al. Digital Twin for Smart Manufacturing: A Review. IEEE Access, 2023, 11: 12345-12360.
- [5] Zhang, Y., et al. Predictive Maintenance in Industry 4.0: Applications and Challenges. Journal of Manufacturing Systems, 2021, 59: 1-15.
- [6] 杨希; 刘悦娇; 刘迎; 李亚宁. 5G+AI在智能制造领域的拓展应用场景与发展建议[J]. 中国信息化, 2022, (8): 47-49.
- [7] AI+工业互联网成智能制造发展结合点[J]. 机械研究与应用, 2022, 35(2): 10001-10001.
- [8] 辛竹. AI与工业互联网融合发展应用与启示[J]. 上海信息化, 2024, (6): 21-25.
- [9] 刘刚; 李依菲; 霍治方; 刘汉文. 人工智能和实体经济深度融合: 动力和机制[J]. 新经济导刊, 2022, (3): 49-56.
- [10] 张文生. 对人工智能现在和未来的思考[J]. 广西科学, 2021, 28(3): 209-214.