

基于数字孪生的智能制造系统实时优化与自主决策研究

张文宇

中国恩菲工程技术有限公司 北京

【摘要】 基于数字孪生的智能制造系统已成为推动制造业向智能化与自主化升级的重要路径。本文围绕实时优化与自主决策展开研究，重点探讨数字孪生如何通过虚实映射实现生产过程的动态感知、预测与反馈调节。研究提出以多源数据融合、虚拟模型驱动和自适应算法优化为核心的系统框架，能够在生产中实现资源配置的实时调整与工艺流程的智能优化。通过自主决策机制的引入，系统可在复杂环境下快速响应，提升制造系统的鲁棒性与柔性。本文的研究结果表明，基于数字孪生的智能制造系统不仅在提升生产效率与产品质量方面具有显著优势，还为未来智能工厂的构建提供了可行的路径选择。

【关键词】 数字孪生；智能制造；实时优化；自主决策

【收稿日期】 2025 年 7 月 14 日

【出刊日期】 2025 年 8 月 12 日

【DOI】 10.12208/j.jer.20250360

Research on real-time optimization and autonomous decision-making of smart manufacturing systems based on digital twin

Wenyu Zhang

China ENFI Engineering Technology Co., Ltd., Beijing

【Abstract】 Smart manufacturing systems based on digital twin have become a crucial path to drive the upgrading of the manufacturing industry towards intelligence and autonomy. This paper focuses on the research of real-time optimization and autonomous decision-making, with emphasis on exploring how digital twin achieves dynamic perception, prediction, and feedback adjustment of the production process through virtual-real mapping. The study proposes a system framework centered on multi-source data fusion, virtual model-driven, and adaptive algorithm optimization, which enables real-time adjustment of resource allocation and intelligent optimization of process flows in production. By introducing an autonomous decision-making mechanism, the system can respond quickly in complex environments and improve the robustness and flexibility of the manufacturing system. The research results of this paper show that the smart manufacturing system based on digital twin not only has significant advantages in improving production efficiency and product quality but also provides a feasible path option for the construction of future smart factories.

【Keywords】 Digital twin; Smart manufacturing; Real-time optimization; Autonomous decision-making

引言

智能制造的快速发展正在重塑传统制造业的生产模式，数字孪生作为虚拟与现实深度融合的关键技术，为制造系统的实时感知、预测和优化提供了新的可能。与传统制造系统相比，数字孪生能够在虚拟环境中提前模拟复杂工况，并通过数据驱动实现动态调整，从而显著提升系统的灵活性与自主性。这一技术的引入，使得制造过程不仅能够更加精准地把控生产节奏，还能实现实时的决策支持，为应对不确定环境提供保障。本文聚焦于基于数字孪生的智能制造系统，探讨其在实时优化与自主决策方面的核心机制与实践价值，旨在

为未来智能工厂的建设和制造业的转型升级提供新的思路与理论依据。

1 数字孪生驱动下智能制造系统的构建原理

数字孪生驱动下的智能制造系统，其构建原理在于通过虚拟空间与物理实体之间的实时映射，建立高度一致的数字化模型，实现制造过程的全生命周期管理。数字孪生技术依托多源异构数据采集与融合，包括传感器信息、工业物联网平台以及历史生产数据，以动态建模的方式形成虚拟工厂^[1]。这种虚拟工厂不仅可以准确反映生产设备和工艺流程的运行状态，还能通过参数调节和模型迭代来预测潜在问题。与传统信息化

系统相比,数字孪生在精准度与实时性方面更具优势,使得制造系统能够实现信息流、物料流和价值流的同步优化。在此过程中,物理工厂与虚拟模型之间建立持续的双向反馈机制,确保信息传递不再单一依赖人工决策,而是依靠数据驱动形成闭环控制结构。

在智能制造系统的构建过程中,数据的处理与建模方法成为关键环节。数字孪生技术通过高性能计算与人工智能算法的引入,实现对复杂制造场景的多维度模拟与优化。在加工环节中,虚拟模型能够根据机床运行状态和环境参数,对刀具磨损、热效应及工艺精度进行预测,从而提前调整工艺参数,避免生产故障。基于云计算和边缘计算的协同架构,为大规模数据的实时处理与传输提供了保障,使得系统能够在毫秒级响应周期内完成虚拟与现实的交互。构建原理的另一核心在于跨学科融合,既包含机械工程、自动化控制,又涉及人工智能与大数据分析,从而实现数字孪生驱动的制造系统具备可扩展性与自适应性。

数字孪生的价值不仅体现在单一设备层面,更体现在整个制造生态的协同优化。通过构建覆盖设备、车间、生产线乃至供应链的多层次孪生模型,系统能够在宏观层面对资源进行合理调度,实现生产计划的动态优化与供应链协同。在这一过程中,虚拟模型成为企业决策的重要依据,其预测与反馈能力不仅提升了系统的鲁棒性,还使企业在面对市场需求波动和复杂外部环境时具备更强的应对能力。数字孪生驱动下的智能制造系统构建原理,核心在于建立虚实融合的动态平台,通过数据驱动、模型仿真和智能优化实现制造业的自主化升级。

2 实时优化机制在制造过程中的应用研究

实时优化机制在智能制造中的应用,重点在于解决传统制造过程中生产调度滞后与资源利用效率低下的问题。通过引入数字孪生模型,制造过程能够实现全流程的动态感知与反馈调节。实时优化依托多源数据的融合分析,包括设备运行数据、能耗指标和产品质量参数,使得系统能够快速识别瓶颈环节,并在毫秒级响应周期内提出优化方案^[2-6]。在这一过程中,算法的选择与实现尤为关键,例如基于强化学习的优化方法能够通过不断试错与反馈,逐渐形成最优生产路径。与传统静态调度模式不同,实时优化机制可在生产过程中持续调整,从而实现产能的最大化利用与成本的最小化控制。

在具体应用中,实时优化机制展现出显著的实际价值。以智能生产线为例,数字孪生系统通过虚拟模型

监控设备状态,能够在出现工艺偏差时迅速调整参数,避免批量性质量问题的发生。实时优化还能在能源管理中发挥作用,通过动态平衡设备能耗与生产效率,降低整体能耗水平。对于多品种、小批量的柔性制造模式,实时优化能够根据订单需求的变化快速调整生产计划,从而缩短交付周期。这种高度动态化的管理方式,使得制造企业能够在不确定性环境中保持稳定的竞争优势,并实现绿色制造和高效运营的目标。

在应用研究的深化过程中,实时优化机制面临的挑战主要集中在算法效率与系统鲁棒性上。制造场景中存在大量不确定因素,如设备故障、原材料延迟和市场需求波动,这些变量可能导致优化模型难以快速收敛。研究者提出多层次协同优化的解决方案,即在设备层、车间层与企业层之间建立分布式优化架构,通过边缘计算与云计算协同,提升系统响应速度与适应性。未来的发展趋势表明,实时优化不仅是提高制造效率的技术手段,更是智能制造系统实现自主化与智能化决策的重要支撑。

3 自主决策模式对制造系统灵活性的提升作用

自主决策模式在智能制造系统中的应用,体现出数字孪生对生产灵活性的深度赋能。传统制造系统往往依赖人工经验和预设流程进行决策,这种模式在复杂多变的环境中显得滞后且缺乏适应性。而在数字孪生驱动下,制造系统能够基于实时数据和预测模型,自动完成工艺调整与生产调度,减少人为干预。自主决策的实现依赖于深度学习、模糊逻辑与多智能体系统等技术,它们在处理不确定性问题与复杂决策任务中具有优势。通过这些方法,系统能够在面对突发事件时自主选择最优策略,从而提高生产过程的灵活性和鲁棒性。

在实际应用中,自主决策模式显著提升了制造系统的适应能力。当生产过程中某一关键设备出现性能下降时,数字孪生系统可以在虚拟空间中进行快速仿真,预测不同调度策略下的产出效果,并自主选择影响最小的解决方案。这种模式不仅保证了生产的连续性,还在很大程度上降低了停机损失^[7]。另一个典型应用是供应链管理,自主决策系统能够根据市场需求变化与库存情况,自动调整采购与生产计划,提升供应链的响应速度。随着自主决策能力的不断增强,制造系统逐渐从被动响应转向主动优化,具备了动态调节与智能演化的特征。

自主决策模式的推广,也为智能制造的未来发展奠定了基础。通过多源数据与人工智能算法的深度融

合,制造系统不仅能够实现即时的自主决策,还能通过持续学习优化自身的决策逻辑,形成自进化特征。系统在长期运行中不断积累经验,逐渐形成知识图谱,为后续的生产提供更高层次的支持。然而,这一过程中仍存在安全性与透明度的挑战,自主决策模型的可解释性问题需要进一步解决,以避免“黑箱”决策带来的风险。总体而言,自主决策模式对制造系统灵活性的提升,不仅优化了生产效率与资源利用,还推动了制造业向智能化、自主化与可持续发展的方向迈进。

4 基于数字孪生的智能制造系统实践成效与问题探讨

基于数字孪生的智能制造系统在实践中已经展现出显著成效,特别是在生产效率、产品质量与资源利用率方面。通过虚实结合的方式,制造企业能够在生产前对工艺流程进行仿真预测,避免潜在缺陷带来的损失。在航空航天和汽车制造领域,数字孪生被广泛应用于零部件加工与装配环节,通过模拟不同工况下的运行状态,提前发现可能出现的结构问题,提升产品的可靠性。实践结果表明,这种方法不仅降低了试错成本,还使得产品研发周期大幅缩短,为企业创造了更高的经济效益。

在系统推广过程中也暴露出一系列问题。数据孤岛与系统兼容性成为制约数字孪生应用的重要因素,不同厂商和平台之间的数据格式差异,导致信息共享和模型融合存在障碍。实时优化与自主决策的实现依赖高质量数据,若数据采集不完整或存在噪声,将直接影响系统的准确性与可靠性。在实践中,一些中小型制造企业由于技术和资金限制,难以承担高昂的系统建设与维护成本,这使得数字孪生在行业中的普及存在不均衡性。数据安全与隐私保护问题也逐渐凸显,如何在确保系统开放与共享的同时保障核心数据的安全,成为亟需解决的挑战。

针对上述问题,未来的研究方向应聚焦于构建标准化的数据接口、提升模型自适应能力和强化系统安全机制。通过建立行业通用的数字孪生标准,可以促进跨平台数据的共享与协同应用。强化人工智能与大数据分析在孪生模型中的作用,使系统能够在复杂环境下保持较高的鲁棒性和稳定性^[8]。在实践成效方面,随

着 5G、边缘计算和区块链等新兴技术的应用,数字孪生驱动的智能制造系统将在更多领域展现潜力,为制造业的转型升级提供更加坚实的技术支撑。可以预见,这一技术将在未来制造体系中发挥不可替代的作用,推动产业链向更高水平的智能化发展。

5 结语

基于数字孪生的智能制造系统在实时优化与自主决策方面展现出巨大潜力,其虚实融合、数据驱动与智能算法的结合为制造业转型升级提供了全新路径。实践结果证明,该技术能够提升生产效率、改善资源配置并增强系统柔性,同时也暴露出数据标准、系统兼容与安全隐患等挑战。未来的研究需在跨平台协同、模型自适应与安全治理方面不断深化,以推动数字孪生驱动的智能制造实现更高水平的自主化与智能化发展。

参考文献

- [1] 王好柱.数字孪生技术在智能机械制造中的应用[J].模具制造,2025,25(07):31-33.
- [2] 高瑞娟,陈雪.数字孪生技术在制造系统仿真中的应用[J].中国信息化,2025,(06):66-67.
- [3] 吴羽.基于智能制造技术的智能机械制造工艺分析[J].造纸装备及材料,2025,54(04):80-82.
- [4] 裴学杰,姚飞鸣.基于智能制造的新能源汽车生产管理系统优化[J].农机使用与维修,2022,(10):109-111.
- [5] 都行.智能制造技术在汽车制造中的应用与机械工艺优化[J].汽车画刊,2024,(07):25-27.
- [6] 李钰龙,张红梅,陈普银,等.数字孪生技术在智能制造实训中的应用研究[J].南方农机,2025,56(07):156-159+171.
- [7] 杨明,董倩男,董梦莹.数字孪生技术在智能制造中的建模、仿真与优化分析[J].上海轻工业,2025,(01):132-134.
- [8] 齐天泓,黄海峰,曹乐,等.智能制造数字孪生概念模型与关键技术研究[J].信息技术与标准化,2024,(11):45-50+60.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

