

基于数字孪生的智能生产线动态优化系统研究

刘 松

深圳永恒光智慧科技集团有限公司 广东深圳

【摘要】基于数字孪生的智能生产线动态优化系统旨在通过构建虚拟生产环境与真实生产线的高度映射，实现生产过程的实时监控、预测与优化。系统利用多源数据融合技术和先进的建模算法，对生产线运行状态进行精准仿真，并通过动态优化策略及时调整工艺参数与资源配置，从而提升生产效率、降低能耗并保证产品质量。研究重点在于数字孪生驱动的闭环优化机制、智能决策模型及其在复杂制造场景中的应用验证，推动制造业向高柔性、高智能化方向发展。

【关键词】数字孪生；智能生产线；动态优化；实时仿真；智能决策

【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.20250368

Research on dynamic optimization system of intelligent production line based on digital twin

Song Liu

Shenzhen eternal light Intelligent Technology Group Co., Ltd. Shenzhen, Guangdong

【Abstract】The intelligent production line dynamic optimization system based on digital twin aims to realize the real-time monitoring, prediction and optimization of the production process by constructing a high mapping between the virtual production environment and the real production line. The system uses multi-source data fusion technology and advanced modeling algorithm to accurately simulate the operation state of the production line, and timely adjust the process parameters and resource allocation through dynamic optimization strategy, so as to improve production efficiency, reduce energy consumption and ensure product quality. The research focuses on the digital twin driven closed-loop optimization mechanism, intelligent decision-making model and its application verification in complex manufacturing scenarios, so as to promote the development of manufacturing industry in the direction of high flexibility and high intelligence.

【Keywords】Digital twins; Intelligent production line; Dynamic optimization; Real time simulation; Intelligent decision making

引言

随着制造业向智能化与柔性化转型，生产线的实时优化需求愈加迫切。数字孪生技术通过构建与物理生产线高度一致的虚拟模型，实现生产全过程的动态映射与同步交互，为生产调度与工艺优化提供了新思路。借助数据驱动的建模方法与智能算法，可以在虚拟环境中提前预测潜在风险、验证优化方案，并迅速反馈至实际生产环节。通过这种动态闭环机制，生产线能够在多变的市场需求和复杂工艺条件下保持高效稳定运行。

1 数字孪生驱动下智能生产线优化需求分析

基于数字孪生的智能生产线动态优化系统研究，核心在于解决现代制造业生产过程中效率、质量与柔性之间的多重矛盾。随着制造模式向多品种、小批量和

定制化发展，传统生产线在应对复杂工艺路径、多变订单需求和设备高负载运行时逐渐显现出瓶颈。数字孪生技术通过构建与真实生产环境高度一致的虚拟生产线，实现对物理生产全过程的精准映射，为智能优化提供了数据驱动的基础^[1]。通过对设备状态、工艺参数、能耗信息和产品质量等多维度数据的实时采集与分析，能够在虚拟空间中重现实际运行状态，从而揭示瓶颈工序、资源冲突与生产风险。这种高保真建模方式为生产线的性能评价和优化决策提供了新的技术路径，有效突破了传统方法依赖经验和静态模型的局限性。

在复杂制造场景下，生产线面临的优化问题不仅涉及生产效率，还包括资源配置、能源消耗和产品一致性等多目标约束。数字孪生技术的引入打破了传统优化策略仅基于历史数据或局部信息的模式，借助动态

仿真与预测分析实现生产全过程的全局优化。通过多源数据融合,系统能够实现对生产线设备运行状态的实时监控,基于机器学习与强化学习等智能算法预测潜在故障和产能波动,从而实现工艺参数与调度策略的动态调整。这种闭环优化能力使生产线能够适应高频率订单变化、复杂工艺路径切换以及多工位并行协作的需求,实现对生产节拍与资源利用率的平衡控制。相比传统生产模式,这一方法在提高生产效率和质量稳定性的同时显著降低了能源浪费与设备磨损,体现了制造业向智能化、精益化发展的趋势。

2 智能生产线动态优化系统的总体架构设计

智能生产线动态优化系统的总体架构设计以数字孪生为核心,旨在实现虚拟空间与物理生产线的深度融合。通过多源信息采集层将设备传感器、生产执行系统和工业物联网平台的数据实时接入,形成完整的多维度数据流。该层包括对生产节拍、设备负载、能耗指标、质量检测结果等关键参数的采集,保证数字孪生模型能够得到实时更新和高精度输入^[3]。在此基础上,构建高保真度的虚拟生产线模型,使物理过程与数字模型保持动态一致,从而实现生产全流程的透明化与可追溯性。这种虚拟与现实的双向映射关系为后续的动态优化和智能决策提供了可靠的数据支撑和验证平台。

在总体架构的中间层,系统通过建模与仿真引擎实现对生产过程的实时计算与动态分析。该部分包含高性能计算模块、预测性分析模块和动态调度模块,能够在虚拟环境中对生产工序进行全局模拟。通过引入机器学习、深度强化学习以及优化算法,系统具备对工艺参数的自动寻优与对生产路径的智能调整能力。仿真结果与优化策略可通过闭环控制机制快速传递至物理生产线,形成即时反馈与执行。这种架构设计确保生产线在面临复杂工艺、多样化产品需求与随机扰动时,仍能保持稳定性和灵活性,从而实现动态优化的目标。

在系统的上层,决策支持与可视化平台承担着人机交互与智能辅助决策的重要功能。通过大数据分析,管理者能够实时掌握生产状态,直观地观察到生产瓶颈、能耗分布及质量偏差。该平台不仅提供基于规则的决策建议,还结合知识图谱与人工智能推理机制,为复杂场景下的多目标权衡提供支持。通过将生产数据、仿真结果和优化策略进行可视化呈现,管理者能够快速理解系统的运行逻辑并进行干预^[4]。这种设计思路使智能生产线动态优化系统形成从数据采集、仿真优化到决策执行的完整闭环架构,实现数字孪生驱动下的高效、智能与柔性化生产模式。

3 基于数字孪生的实时仿真与动态优化方法

基于数字孪生的实时仿真与动态优化方法以虚拟模型与物理生产线的高精度映射为基础,通过多维数据驱动实现生产过程的全局监控与预测分析。利用设备传感器、工业物联网和生产执行系统获取实时数据,结合高保真建模技术构建动态更新的数字孪生体,使虚拟生产线能够与物理系统保持高度一致。该方法通过对生产节拍、设备状态、工艺参数和能耗数据的实时采集与融合,为后续的仿真计算提供精确输入^[5]。在这一过程中,系统能够对生产工序进行动态重现,识别潜在瓶颈工序与工艺冲突点,为动态优化策略提供可靠依据,确保在复杂制造场景中实现精准预测与实时控制。

在实时仿真过程中,系统依托高性能计算与机器学习算法对生产工艺进行多维度建模,形成虚拟环境下的过程模拟平台。通过引入深度强化学习、进化算法和多目标优化策略,能够在不同生产任务与工艺方案之间进行大规模并行计算与智能筛选,得到最优的工艺参数与调度方案。仿真引擎在虚拟空间中快速验证不同的优化路径,基于生产效率、能耗水平和质量控制等多目标权衡,生成动态优化策略。通过闭环控制机制,仿真结果能够实时传递至物理生产线,驱动设备调整与资源重新配置,从而实现生产过程的动态适应与即时优化。这种方法显著提升了系统在高频率订单变化、复杂工序切换及多工位协作中的响应能力。

在动态优化执行阶段,系统通过实时决策引擎和反馈控制机制,实现虚拟与现实之间的高效交互。通过数字孪生平台对优化策略的可视化呈现,生产管理者能够直观了解设备运行状态、资源分布及生产瓶颈,并在必要时进行人工干预。结合预测性维护与自适应调度技术,系统能够在设备异常、产能波动或工艺偏差出现之前进行预警并调整生产计划,使生产线保持高效、稳定运行^[6]。该方法通过多源数据融合、实时仿真验证和动态优化决策的深度结合,实现了从状态感知到智能优化的全链路闭环控制,显著提升了生产柔性和资源利用率,为智能制造体系的构建提供了可行方案和技术支撑。

4 智能决策模型在复杂制造场景中的应用验证

智能决策模型在复杂制造场景中的应用验证依托数字孪生平台,通过对生产线实时数据与历史数据的深度融合,实现对多工序、多设备协同生产的精确控制。制造企业在多品种、小批量与高柔性生产环境下,常常面临工艺切换频繁、资源分配复杂及生产节拍不稳定

等问题。智能决策模型基于高维数据建模和知识图谱推理技术,对设备状态、工艺参数、能耗指标和产品质量等多维数据进行综合分析,识别生产过程中的瓶颈环节与潜在冲突^[7]。通过在数字孪生环境中模拟不同决策方案,系统能够对工序路径、设备调度与物料分配进行最优评估,并快速生成可执行的优化策略,实现对生产过程的全局管控与高效协调。

在应用验证过程中,系统依托强化学习与深度神经网络等智能算法,针对复杂制造场景中不确定性高、动态性强的问题进行建模与优化。通过不断从实际生产数据中学习,智能决策模型能够根据实时状态调整生产调度策略,实现对生产能力、能源利用率与工艺稳定性的动态平衡。借助数字孪生平台的高保真仿真能力,系统在虚拟空间中对多种生产策略进行快速迭代和验证,将优化结果与实际生产参数进行同步更新。该方法显著提高了应对突发事件和随机扰动的能力,使生产线能够在工艺切换、订单变动或设备故障等情况下保持高效运转,体现了模型在应对复杂制造场景时的鲁棒性与适应性。

通过在实际生产环境中的应用验证,智能决策模型表现出在多目标约束下的显著优化能力。系统能够在保证产品质量稳定的同时最大化生产效率,并实现能源消耗与资源配置的最优平衡。在不同制造企业的验证案例中,该模型不仅优化了工序路径和生产节拍,还在设备利用率与生产柔性方面取得了显著提升。通过与数字孪生驱动的动态优化系统深度结合,智能决策模型能够实现从数据分析到策略执行的闭环管理,为复杂制造场景中的生产组织提供科学决策支持^[8]。这种应用验证证明了在高柔性、高复杂度制造模式下,智能决策技术为实现精益化、智能化生产提供了可靠途径和技术保障。

5 结语

基于数字孪生的智能生产线动态优化系统研究,充分展现了虚拟模型与物理生产过程深度融合的优势。实时仿真、数据驱动与动态优化的协同应用,使生产系

统在复杂制造环境中具备高柔性、高效率与高稳定性。系统通过对工艺参数、设备状态和资源配置的精准控制,实现了生产过程的精细化管理与智能化决策,为制造企业提升竞争力提供了坚实技术支撑。该研究为智能制造体系的构建提供了可行的路径与方法,具有重要的工程应用价值。

参考文献

- [1] 黄书经,何建华.基于数字孪生技术智能生产线的虚拟调试[J].模具制造,2025,25(04):17-19.
- [2] 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.
- [3] 王垠撞.基于数字孪生的智能生产线建设技术探析[J].数字技术与应用,2025,43(01):126-128.
- [4] 王煜龙,吕冲冲,吴金文.基于数字孪生技术的农用车皮带轮智能制造生产线设计与研究[J].粮油与饲料科技,2024,(11):155-157.
- [5] 牛虎利,杨硕,闫海鹏,等.基于数字孪生的套筒智能检测生产线虚拟调试技术[J].实验室研究与探索,2024,43(10):88-93.
- [6] 刘娟,雷翔霄,袁佳俊,等.基于数字孪生的智能分拣装配生产线设计[J].电子制作,2024,32(19):64-67.
- [7] 宋海鹰,叶锐锋,岑健,等.智能化生产线的数字孪生设计[J].制造业自动化,2024,46(02):38-41.
- [8] 曹建华,蒋国璋,夏绪辉,等.基于数字孪生的智能制造实验教学平台设计[J].中国现代教育装备,2023,(15):13-16.

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/>

