

数字孪生驱动的产线仿真优化方法研究

陈弘帆

成都天奥测控技术有限公司 四川 成都 611731

摘要：传统产线仿真优化多为静态离线模式，难以适配动态生产工况，存在优化滞后、精度不足、适配性差等缺陷，无法有效解决工序失衡、资源浪费与能耗过高等生产问题。本文基于数字孪生五维架构，结合数据融合、虚实映射建模技术，构建产线动态仿真模型，设计改进型多目标优化算法，形成闭环迭代优化体系。经多工况实验验证，该方法可实时适配生产波动，提升设备利用率与产能，降低生产能耗，为离散制造产线智能优化提供可靠技术支撑。

关键词：数字孪生；产线仿真；优化方法

引言：智能制造转型升级进程中，制造产线生产工况动态多变、工序耦合复杂，传统仿真优化方式依赖固定参数与预设场景，难以响应设备状态、订单、物料等生产要素的动态变化，导致产线调度不合理、生产效能偏低、资源消耗严重。为突破传统优化技术瓶颈，本文依托数字孪生虚实同步、数据驱动、迭代演化的技术优势，搭建全流程产线仿真优化体系，开展多目标智能优化研究，旨在实现产线高效、低碳、精细化、智能化生产管控。

1 数字孪生与产线仿真优化基础理论与关键技术

1.1 数字孪生核心理论体系

(1) 数字孪生是依托数字化手段构建物理实体镜像的技术体系，具备虚实同步、数据驱动、迭代演化、闭环优化四大核心特征。其通过物理与虚拟空间的实时数据交互，实现生产状态动态同步，以全域数据为核心驱动模型运行，持续迭代更新虚拟模型，并依托仿真反馈完成生产流程闭环优化。(2) 数字孪生采用五维模型架构，涵盖物理实体、虚拟模型、数据层、服务层、应用层。物理实体为生产现场真实设备与产线资源；虚拟模型实现物理场景的数字化复刻；数据层负责全域生产数据归集处理；服务层提供建模、仿真、优化等基础技术服务；应用层面向生产场景落地实操功能，五层架构协同支撑孪生系统运行。(3) 在产线应用场景中，数字孪生可适配不同制造模式。针对离散制造个性化、多批次生产特点，构建模块化孪生模型；针对流程制造连续化、一体化生产特性，搭建全域联动孪生体系，满足不同产线的数字化构建与仿真需求^[1]。

1.2 产线仿真优化基础理论

(1) 产线仿真可分为静态、动态及离散事件仿真。静态仿真侧重产线布局、设备配置的静态分析；动态仿真聚焦生产过程实时状态变化；离散事件仿真针对工序

启停、物料流转等离散节点事件分析，三类技术分别适配产线规划、动态监测与工序优化场景。(2) 产线仿真优化构建多维度评价指标体系，核心目标包含产能最大化、生产能耗最小化、工序等待时间最短、设备利用率最优，兼顾生产效率、成本控制与资源利用，实现产线综合效能提升。(3) 传统产线仿真优化以静态、离线仿真为主，仅能基于固定参数完成预设场景优化，无法适配生产工况波动、设备状态变化等动态场景，存在优化滞后、适配性差、精准度不足等局限性。

1.3 数字孪生驱动产线仿真优化关键技术

(1) 产线多源数据采集与融合技术，可实时采集设备运行、工艺参数、物料流转、车间环境等多维度数据，通过数据清洗、降噪、融合处理，消除数据冗余与偏差，为仿真建模优化提供精准数据支撑。(2) 产线虚实精准映射建模技术，整合几何、机理、行为建模方法，完整复刻产线设备外形、运行机理、动态行为特征，实现物理产线与虚拟模型的高精度、全维度精准映射。(3) 动态仿真迭代与智能优化技术，依托实时生产数据动态更新仿真模型，修正模型偏差，结合智能算法实现产线工艺、调度、参数的自适应迭代优化，适配动态生产场景。

2 数字孪生驱动的产线仿真模型构建

2.1 产线仿真模型整体构建思路

(1) 本文产线仿真模型构建严格遵循四大核心原则。精准性原则保障虚拟模型与物理产线结构、参数及运行逻辑高度一致；实时性原则支撑生产数据动态更新与状态同步；可拓展性原则适配产线设备迭代、工艺升级与产能扩容需求；兼容性原则实现多类型设备、多源数据与仿真系统的适配对接，全面满足动态生产与智能优化需求。(2) 模型构建采用全流程闭环建模方案，整体流程规范有序。首先开展物理产线实地调研，梳理设

备布局、工艺流程与生产规则；其次完成全维度生产数据采集与预处理；随后搭建基础虚拟仿真模型；再通过虚实数据比对完成模型校准，最终通过多工况测试完成模型验证，保障建模流程标准化、系统化^[2]。（3）仿真模型具备四大核心功能，精准适配生产管控需求。生产状态可视化可直观呈现产线实时运行工况；生产过程仿真可模拟全工序流转状态；故障模拟可复现设备故障、工序卡顿等异常场景；参数迭代优化可依托仿真测算完成生产参数自适应调整，为产线优化提供支撑。

2.2 物理产线全要素数字化建模

（1）产线几何模型构建依托三维建模技术，对生产现场各类要素进行高精度数字化复刻。精准还原生产设备、作业工位、物料传输线、辅助设施的外观结构、空间位置与尺寸参数，复刻真实产线空间布局形态，为虚实映射搭建基础几何框架。（2）产线机理与行为模型构建聚焦生产动态逻辑，结合行业生产工艺机理、设备启停与运行规则、物料输送与流转逻辑，搭建动态行为仿真模型。打破静态建模局限，精准还原工序衔接、设备联动、物料流转的动态过程，贴合真实生产运行规律。

（3）多源数据驱动模型绑定是实现动态孪生的核心环节。将设备运行参数、工艺数据、物料数据、环境数据等多源实时数据与虚拟模型各单元深度关联绑定，建立数据联动机制，让虚拟模型可随物理产线状态实时同步更新，实现静态模型向动态孪生模型升级^[3]。

2.3 虚实同步映射与仿真运行机制

（1）虚实数据实时交互机制依托专用数据传输通道与数据传输协议，打通物理产线与虚拟模型的数据交互链路，实现生产数据的高速传输与实时同步，达到毫秒级数据更新效果，规避数据滞后导致的仿真失真问题。

（2）虚实状态精准映射机制针对产线核心生产要素建立一一对应的映射关系，覆盖设备运行状态、工序流转进度、生产节拍、物料库存等关键维度，保障物理产线的每一处状态变化都可在虚拟模型中精准体现。（3）动态仿真运行机制以实时生产数据为驱动，依托已构建的孪生模型复现物理产线实时生产过程，同时可基于历史数据与实时工况推演后续生产状态，实现生产过程复现、状态预测与动态仿真分析。

2.4 仿真模型验证与校准

（1）模型精度验证从三大核心维度建立标准化评价体系，分别为结构精度、状态同步精度与数据匹配精度，针对性校验模型空间结构还原度、工况同步及时性、数据拟合准确度，为模型精度评估提供量化依据。

（2）结合模型运行误差来源开展针对性分析，重点排查

建模参数偏差、模型简化缺陷、数据传输延迟等问题，通过参数修正、模型细节补全、传输链路优化等校准方法，有效降低仿真误差，提升模型真实性与仿真可靠性。（3）仿真模型稳定性测试通过模拟常规生产、负荷波动、设备异常等多种工况，全面检验模型的适配能力与连续运行稳定性，确保模型在复杂动态生产场景下可稳定运行，满足常态化仿真与优化应用需求。

3 数字孪生驱动的产线多目标仿真优化方法与验证

3.1 产线仿真优化问题与优化目标构建

（1）当前离散与流程制造产线在实际生产过程中普遍存在动态失衡问题，各类生产痛点制约产线综合效益提升。多数产线存在生产节拍匹配度低、工序衔接紊乱的问题，造成前后工序生产节奏脱节；同时存在设备闲置率偏高、有效作业时长不足的情况，设备资源浪费严重。此外，物料配送不及时、工位物料堆积拥堵问题频发，极易造成生产停滞，且传统生产模式下设备空载、过载运行现象频发，整体生产能耗偏高，难以实现高效、低碳、集约化生产。（2）针对产线多重生产痛点，构建多目标优化数学模型，统筹兼顾生产效益与生产成本。以产能最大化、生产能耗最小化、生产效率提升、设备利用率最优为四大核心优化目标，搭建多目标耦合优化函数。同时结合产线实际生产规则设置约束条件，涵盖设备运行阈值、工序时序约束、物料配送限额、生产工期限制等，规避优化结果脱离实际生产场景的问题，保障优化方案的可行性与实用性^[4]。（3）结合产线生产逻辑与优化目标，完成核心优化变量筛选。主要选取设备运行转速、加工参数、启停时序等设备运行变量，订单排程、物料调度、人员配比等生产调度变量，以及工序间隔等待时间、衔接缓冲时长等工序衔接变量。各类变量相互耦合，共同影响产线生产状态，是实现产线全局优化的核心调控要素。

3.2 融合数字孪生的智能仿真优化算法设计

（1）传统智能优化算法在动态产线优化中存在明显局限性，适配性不足。遗传算法全局寻优能力较强，但迭代收敛速度慢，实时性较差，难以适配动态生产工况；粒子群算法迭代效率高，但易陷入局部最优解，多目标耦合优化精度不足。两类传统算法均依赖离线固定数据迭代优化，无法响应产线实时状态波动，难以适配复杂动态的工业生产场景。（2）依托数字孪生实时数据反馈优势，设计改进型多目标优化算法。基于孪生模型实时采集的生产动态数据，优化算法迭代更新逻辑，摒弃传统离线批量迭代模式。通过动态调整算法寻优权重，平衡产能、能耗、效率等多目标的优化优先级，有效解决传统算法寻优片

面、收敛滞后、适配性差等问题,提升动态场景下的寻优精度与时效性。(3)搭建算法与仿真模型双向融合迭代机制,形成闭环优化体系。以数字孪生仿真模型实时输出的生产状态数据、工况参数为算法寻优输入,驱动算法完成多目标最优参数求解;同时将算法输出的优化调度方案、设备参数反向导入仿真模型,驱动虚拟产线迭代更新运行状态,通过反复迭代修正,实现仿真模型与优化算法的动态协同适配^[5]。

3.3 产线仿真优化实验与结果分析

(1)搭建贴合实际生产的仿真实验环境,制定标准化实验方案。选取典型离散制造产线为实验对象,依托专业仿真平台搭建孪生仿真实验场景,复刻真实产线设备参数、工艺流程、调度规则。统一设定实验初始参数、运行时长、评价标准,明确模型初始化、工况加载、算法优化、数据统计、结果分析的完整实验流程,保障实验规范性与数据可靠性。(2)开展常规单一工况仿真优化实验,模拟产线标准生产状态。在稳定生产、订单恒定、设备正常运行的常规工况下,运行改进型优化算法,记录优化前后产线产能、设备利用率、生产能耗、工序等待时长等核心指标。通过数据对比可见,优化后产线节拍更加均衡,资源浪费问题显著改善,基础生产效能得到有效提升。(3)设置复杂动态工况仿真实验,验证算法自适应能力。模拟工业生产中常见的订单临时增减、设备轻微故障、物料配送延迟等突发场景,测试优化算法的动态响应与自适应寻优能力。实验结果表明,改进算法可快速感知工况变化,实时调整生产参数与调度方案,有效适配复杂动态生产场景,具备极强的工况适配性。

3.4 优化方法有效性与工程实用性验证

(1)对仿真优化结果进行多维度量化分析,精准评估优化成效。从生产效率维度,工序等待时间大幅缩短,产线整体通行效率显著提升;从能耗成本维度,设备空载运行时长减少,生产单位能耗明显下降;从产能效益维度,设备有效利用率提升,产线产能输出更加稳定,整体生产综合效益实现全方位提升。(2)与传统离

线仿真优化方法进行对比分析,凸显技术优势。传统优化方法仅能针对固定工况完成静态优化,无法适配生产动态变化,优化结果滞后、适配范围有限。而数字孪生驱动优化方法依托虚实实时交互优势,可实现动态工况实时感知、参数自适应优化,具备精准性高、实时性强、适配范围广的突出优势。(3)开展工程应用可行性分析,明确落地应用价值。该优化方法依托数字化孪生模型实现无实体试错优化,无需改动产线硬件设备,落地流程简单、成本较低。可广泛应用于机械加工、装备制造等各类离散制造产线,能够有效解决产线动态失衡问题,为工业产线智能化、精细化优化升级提供可靠的技术支撑,具备极高的工程推广价值。

结束语

本文完成了数字孪生驱动的产线仿真建模与多目标智能优化方法研究,构建了虚实联动的闭环优化体系,并通过常规与动态工况实验完成有效性验证。研究有效解决了传统仿真优化动态适配性弱的短板,显著优化了产线产能、能耗、设备利用等核心指标。该优化方法落地成本低、适配场景广,可为机械加工等离散制造产线的智能化升级与精益化生产优化提供重要的工程参考与技术借鉴。

参考文献

- [1]刘松.基于数字孪生的智能生产线动态优化系统研究[J].工程技术研究,2025,10(8):45-47.
- [2]刘达新,王科,刘振宇,等.基于数据融合与知识推理的机器人装配单元数字孪生建模方法研究[J].机械工程学报,2024,60(5):136-140.
- [3]李伯虎,柴旭东,张霖,等.数字孪生技术在智能制造中的应用研究[J].中国机械工程,2022,33(15):181-186.
- [4]王书亭,陈新度,胡成亮,等.基于数字孪生的装配生产线优化方法及应用[J].计算机集成制造系统,2023,29(11):331-335.
- [5]杜洋洋,罗勇,彭云波,等.工业机器人生产线数字孪生三维可视化仿真监控系统[J].计算机集成制造系统,2023,29(6):213-218.