

Industrial Process Modeling and Computer Parallel Simulation Optimization Based on Digital Twins

Tao Song Dingyuan Mo

College of Mathematical and Statistical Sciences, Baise University, Baise, Guangxi, 533099, China

Abstract

As a core technological carrier connecting physical entities and virtual models, digital twin technology provides powerful technical support for industrial process modeling with the characteristics of virtual-real mapping, real-time interaction, and dynamic iteration. Applying this technology to industrial process modeling not only eliminates the drawbacks of traditional modeling methods but also significantly enhances the accuracy of model construction, thereby providing a strong decision-making and reference basis for the deep optimization of industrial processes. Based on this, this paper will systematically elaborate on the key modeling technologies of integrating industrial multi-source data and data fusion governance, constructing simulation models based on virtual-real collaboration, and iterative optimization of the model throughout its lifecycle. It proposes specific implementation paths for building a technical system architecture, improving simulation linkage mechanisms, and deep optimization of industrial processes, aiming to provide theoretical references and insights for enhancing the quality and efficiency of industrial production processes and improving the level of intelligent manufacturing.

Keywords

digital twin; industrial process modeling; computer; parallel simulation; optimization strategy

基于数字孪生的工业过程建模与计算机并行仿真优化

宋涛 莫定源

百色学院数理科学与统计学院, 中国·广西 百色 533099

摘要

数字孪生技术作为连接物理实体与虚拟模型的核心技术载体,以虚实映射、实时交互、动态迭代的特点,为工业过程建模提供了强大的技术支撑。应用该技术进行工业过程建模,既可以摒弃传统建模方式的弊端,也能够大幅提升模型构建精准度,继而为工业流程的深度优化提供了有力的决策与参考依据。基于此,本文将基于数字孪生视角,系统阐述整合工业多源数据与数据融合治理、基于虚实协同构建仿真模型、模型全生命周期迭代优化的关键建模技术,提出技术体系架构搭建、仿真联动机制完善、工业流程深度优化的具体实施路径,旨在为工业生产流程的提质增效与智能制造水平的提升提供理论借鉴与参考。

关键词

数字孪生; 工业过程建模; 计算机; 并行仿真; 优化策略

1 引言

过去,传统工业过程建模方式多依赖于单一的数据源、静态参数设定与离线仿真模式,导致数据无法实时互通、模型适配性差、迭代更新滞后,无法精准反映工业生产过程的动态变化规律,也难以满足复杂工业流程多变量、实时性优化的实际需求。而数字孪生技术的介入则打破了这一壁垒,依托于该技术,通过构建与物理工业实体完全对应的虚拟数字化模型,实现了生产设备、工艺流程、物料流转、环境参数等全要素的动态可视化呈现,进而为工业生产的精

准管控奠定坚实基础。而计算机并行仿真优化技术则通过对复杂工业模型进行并行分解、分布式计算,有效解决传统串行仿真计算速度慢、效率低、无法适配大规模复杂模型的问题,二者协同作用对工业生产过程的精准优化与智能转型创造了有利条件。

2 数字孪生在工业过程建模中体现的优势

2.1 打破传统建模边界

传统的工业过程建模多围绕单一生产工序、独立设备单元或局部生产环节开展建模工作,不同工序、不同设备、不同部门之间的建模体系相互独立,无法实现全生产链条的一体化建模。这种建模模式,使得工业生产过程中的设备运行数据、工艺参数数据、物料流转数据、环境监测数据无法

【作者简介】宋涛(1971—),男,中国河北高阳县人,博士,高级工程师,从事数据科学研究。

互通融合,建模结果仅能反映局部生产状态,无法覆盖工业生产全流程的关联关系。而基于数字孪生技术采取的建模方式,能够打通工业生产中设备层、控制层、运营层、管理层的数据流通通道,消除不同生产环节、不同工艺单元、不同信息系统之间的建模隔阂,将原材料采购、生产加工、装配检测、仓储物流、能耗管控等全流程环节纳入统一建模体系,构建起覆盖工业生产全流程的一体化建模框架^[1]。

2.2 构建全流程动态映射

借助于数字孪生技术可以构建工业生产全流程的动态虚拟映射模型,通过在工业生产现场部署传感器、智能仪表、物联网终端等数据采集设备,实时采集设备运行转速、温度、压力、流量、能耗等全维度参数,依托5G、工业以太网等高速通信技术,将现场实时数据同步传输至虚拟空间,驱动虚拟模型按照物理实体的运行状态做出实时动态更新。这种全流程动态映射方式涵盖了工业生产几何特征、物理属性、工艺逻辑、运行规律的全要素,覆盖从原料投入、中间加工、成品输出到设备运维、能耗管控的全生产流程。无论是设备启停、工艺参数微调,还是物料流转速度变化、生产工况波动,虚拟模型都能做到毫秒级同步响应,完整还原生产过程的动态变化轨迹。

2.3 提升模型构建精准度

利用数字孪生技术能够整合多源异构数据融合治理技术,对生产现场的结构化数据、非结构化数据、实时流数据进行标准化清洗、降噪处理,剔除无效数据、冗余数据与误差数据,保障建模数据源的真实性、完整性与时效性。依托于机器学习、深度学习等人工智能算法,对海量生产数据进行深度挖掘与分析,精准提取工业生产过程中的运行规律,以此替代传统经验式建模,使模型可以清晰地反映真实的生产数据。与此同时,数字孪生模型能够自适应生产工况变化,有效应对设备老化、工艺升级、环境扰动等因素对模型精准度的影响,长期保持模型与实际生产过程的高度契合,进而为工业生产的精准仿真、故障诊断、能耗优化、质量管控提供高精度的模型支撑。

3 基于数字孪生的工业过程建模技术

3.1 整合工业多源数据,实施数据融合治理

工业生产过程将产生海量数据,这些数据主要来自于设备运行、物料流转、环境监测、质量检测等多个环节,来源不同,数据的存储格式、采集频率、传输协议也存在明显差异,以至于出现一些冗余数据,如果不及时予以处理,将直接影响数字孪生模型的构建质量与运行效果。而基于数字孪生技术的工业过程建模方式,通过建立统一的数据标准与治理规范,对零散、杂乱的原始工业数据进行规范化处理,这就为后续模型构建提供真实、完整、高质量的数据支撑。比如某煤化工企业生产现场涉及合成塔、压缩机、换热设备等数百台套装置,数据来源涵盖DCS控制系统、PLC现场

终端、智能传感器、质检化验系统、能源管理系统等,数据类型包含实时时序数据、离线报表数据、图像监测数据等十余种。企业通过部署数字孪生数据治理平台,统一数据采集接口与传输协议,对全流程生产数据进行集中归集,彻底解决了不同系统数据无法互通、格式不统一的难题^[2]。因此,在数据融合治理阶段,企业应当运用大数据处理技术完成数据清洗、降噪、融合、标注全流程操作,先通过异常值检测、缺失值填补算法剔除无效数据与误差数据,再依托数据映射与关联技术,建立不同数据源之间的对应关系,实现跨设备、跨工序数据的有机融合,以此来提升工业过程建模精度。

3.2 基于虚实协同原理,精准构建仿真模型

工业过程建模需要全面采集物理实体的三维几何尺寸、材料特性、运行参数、约束条件等信息,并结合工业机理模型与数据驱动模型,搭建与物理实体完全对应的虚拟仿真模型,以达到虚实同频的效果。比如某高端装备制造企业,建模时,首先通过三维激光扫描技术,采集加工设备、工装夹具、零部件的几何结构数据,再结合航空零部件加工的工艺机理,将切削参数、转速、进给量、温度等物理参数嵌入虚拟模型,构建出与物理加工现场完全一致的虚拟仿真场景。该模型可实时同步物理加工设备的运行状态,精准还原零部件从毛坯加工到成品检测的全流程,实现加工过程的虚拟可视化仿真。建模过程中,为了确保工业机理的严谨性与数据驱动的灵活性,一方面需要融合机械动力学、材料力学、化工反应原理等专业机理,保障模型符合工业生产客观规律。另一方面应当依托人工智能算法,挖掘生产数据中的潜在关联,弥补纯机理建模的局限性。并对接后续计算机并行仿真系统,支持多场景、多工况的仿真运算,为工业生产过程的模拟推演、风险预判、工艺优化提供高精度载体。

3.3 针对模型全生命周期,持续实施迭代优化

基于数字孪生技术衔接的工业过程模型,涉及模型构建、部署运行、监测校验、优化升级、退役更新等多个阶段。随着工业生产设备老化、工艺升级、工况调整、生产需求变化,初始构建的模型会逐渐与物理实体产生偏差,如果不及时优化,模型精准度与实用性会持续下降,为此,需要针对模型全生命周期采取迭代优化策略。以某汽车整车制造企业的焊装车间数字孪生模型为例,该模型初始搭建时适配传统燃油车车身焊装工艺,随着企业新能源汽车产能提升,焊装工艺、设备参数、生产节拍均发生大幅调整。企业通过建立模型实时监测机制,持续对比虚拟模型与物理焊装生产线的运行偏差,定期采集新工艺数据、设备运行新参数,对模型的工艺逻辑、仿真算法、运行参数进行针对性迭代更新,使模型始终贴合新能源车焊装生产实际。这种持续实施迭代优化的方法,能够确保数字孪生模型始终保持高精度、高适配性,并长期适配工业生产动态变化需求,这就给企业的长期高质量发展注入了源源不断的驱动力^[3]。

4 基于数字孪生的工业过程建模与计算机并行仿真优化路径

4.1 技术体系架构思路

基于数字孪生的工业过程建模与计算机并行仿真优化,首先应当严格遵循“虚实同源、分层协同、算力支撑、数据驱动”的原则,构建一个涵盖物理层、数据层、模型层、仿真层、应用层的一体化架构体系。物理层主要是依托工业物联网传感器、智能设备、数控装备等硬件设施,全面采集工业生产过程中的设备运行参数、工艺指标、环境数据、物料状态等全维度信息,为数字孪生模型提供原始数据支撑。数据层负责对多源异构数据进行清洗、融合、标准化处理,搭建实时数据传输通道与分布式数据存储平台,解决工业数据体量庞大、类型繁杂、时效性要求高的问题。模型层聚焦工业过程精准建模,整合机理建模、数据建模、混合建模三种方式,构建与物理实体完全映射的数字孪生体。仿真层依托计算机并行算力,实现多场景、多参数的并行仿真运算。而应用层则将仿真结果转化为实际生产的优化指令,实现闭环管控。这种架构思路,可以根据企业生产规模扩大、工艺升级、新增设备等需求,灵活增加模型模块、仿真节点与数据采集端口,适配工业生产的动态变化,实现技术体系架构从基础搭建向智能化、高效化的转型升级。

4.2 健全仿真联动机制

建立和完善仿真联动机制的目的是保障物理实体实时映射、数字仿真动态反馈、优化指令即时执行的多方联动,首先,依托5G、工业以太网等高速通信技术,确保物理工业现场的生产数据能够毫秒级传输至数字孪生模型,让数字孪生体始终保持与物理实体的同步状态,避免因数据延迟导致仿真模型失真。其次,构建仿真结果与生产现场的指令联动机制,将计算机并行仿真得出的优化方案、风险预警、参数调整建议等结果,自动转化为可执行的工业设备控制指令,通过控制系统直接下发至生产终端,实现仿真优化与生产执行的无缝衔接。并通过反馈修正联动机制的进一步完善,收集物理现场执行优化指令后的实际生产数据,反向输入数字孪生模型与仿真系统,对模型参数、仿真算法予以动态修正。

4.3 深度优化工业流程

企业需要通过对工业生产全流程进行数字化复刻、多场景仿真验证、全维度指标分析,实现生产工艺、设备运维、资源配置、能耗管控等环节的精细化、智能化优化,以提升工业生产的效率、质量与效益。依托于数字孪生建模能够还原工业生产的全流程逻辑,结合计算机并行仿真的高速运算能力,可以同时生产流程中的多个环节、多种变量进行并行仿真,模拟不同优化方案下的生产效果,快速筛选出最优方案。而针对工业流程采取深度优化策略时,应当始终以降本增效、节能减排、提升质量为核心目标,对工业生产的设计、生产、运维、管理全生命周期进行全方位优化。针对企业的技术人员与数字化运维人员,需要进一步提升数字孪生与并行仿真技术的实际应用能力,让优化方案能够精准落地执行,推动工业流程深度优化从技术层面转化为实际的生产效益,进而为企业的高效长远发展奠定坚实而稳固的基础。

5 结语

综上,为加快推进工业生产管控由经验驱动向数据驱动的转型进程,企业应当充分发挥数字孪生技术及计算机仿真技术的应用优势,打造一条数字孪生与计算机并行仿真融合赋能工业智能化升级的有效路径,实现物理世界与数字空间的深度映射与闭环交互,并借助于计算机并行仿真技术,为高速决策与多方案比选提供强大的算力支撑。随着物联网、人工智能、大数据等数字技术的持续迭代,企业需要始终秉持“与时俱进”的态度,持续深化虚实融合、健全动态反馈、夯实数据底座,以实现工业生产全要素、全流程效率与质量的同步提升。

参考文献

- [1] 陈超,聂文雪,李旭,等.数字孪生中的建模与仿真研究应用现状[J].计算机与数字工程,2025,53(11):3270-3275.
- [2] 张拓.数字孪生技术在工业自动化生产线中的应用研究[J].造纸装备及材料,2025,54(09):70-72.
- [3] 李红曼,吴祥蔚,艾晶.数字孪生技术研究及行业应用综述:新型工业化时代的核心使能技术[J].科技与金融,2025,(04):3-19.