

数字孪生技术在钢铁生产流程中的建模与仿真研究

于灵军

酒泉钢铁(集团)有限责任公司 甘肃 嘉峪关 735100

摘要: 在钢铁产业智能化转型背景下,传统生产模式面临能耗高、流程复杂、决策滞后等挑战。本文围绕数字孪生技术在钢铁生产流程中的建模与仿真展开研究。分析其在优化生产流程、提升产品质量、降低能耗与成本方面的应用意义,阐述钢铁生产流程数字孪生建模中物理实体映射、数据采集集成、多维度模型构建等核心要素,探讨生产过程模拟、工艺参数优化、故障预警诊断等仿真关键环节。同时剖析技术应用中存在的数据库、模型、安全等问题,并针对性提出解决策略,旨在为钢铁行业数字化转型提供理论与实践参考。

关键词: 数字孪生技术;钢铁生产流程;建模;仿真研究

引言: 随着钢铁行业竞争加剧与智能化转型需求迫切,传统生产模式已难以满足高效、绿色、精准的发展要求。数字孪生技术凭借虚实映射与动态仿真能力,成为钢铁生产流程革新的重要突破口。通过构建钢铁生产流程的数字孪生模型,可实现生产过程实时监控、工艺参数精准调控及潜在风险提前预判。但在实际应用中,数字孪生技术面临诸多挑战,亟需系统性研究。

1 数字孪生技术在钢铁生产流程中的应用意义

1.1 优化生产流程

钢铁生产流程涵盖原料处理、炼铁、炼钢、轧钢等多个环节,工序复杂且关联性强,传统生产模式易出现流程衔接不畅、调度效率低等问题。数字孪生技术通过对整个生产流程进行数字化建模,将物理实体转化为虚拟模型,并实时采集设备运行、物料传输等数据,使生产过程透明化。借助仿真分析,可提前预测各环节的生产瓶颈,优化生产计划与调度策略。例如,通过模拟不同订单优先级下的生产路径,合理安排设备启停与物流配送,减少等待时间,提高生产效率;还能动态调整生产节奏,灵活应对市场需求变化,实现生产流程的高效协同,提升整体生产效能^[1]。

1.2 提升产品质量

产品质量是钢铁企业的核心竞争力,但生产过程中温度、压力、化学成分等参数波动,易导致产品质量不稳定。数字孪生技术可构建产品质量与工艺参数的关联模型,对生产过程进行全流程质量追溯与监控。在炼钢环节,实时采集钢水成分、温度数据,通过数字孪生模型分析参数变化对成品性能的影响,及时调整冶炼工艺,确保成分达标;在轧钢阶段,模拟轧制过程中金属变形规律,优化轧制速度、辊缝等参数,减少表面缺陷与尺寸偏差。此外,数字孪生还能基于历史质量数据进

行机器学习,建立质量预测模型,提前发现潜在质量问题,从源头把控产品质量,增强企业市场竞争力。

1.3 降低能耗与成本

钢铁行业是高能耗产业,生产过程中的能源浪费与成本居高不下制约企业发展。数字孪生技术通过对能源消耗设备与生产工艺的建模与仿真,深入分析能耗分布与成本构成。在高炉炼铁过程中,借助数字孪生模型模拟不同鼓风温度、喷煤量等参数下的能源利用效率,找到最优操作区间,降低燃料消耗;在轧钢工序,通过仿真分析加热炉的温度曲线与轧制负荷,合理调整加热时间与轧制节奏,减少电能与燃料浪费。同时,数字孪生可实现设备的预测性维护,避免因突发故障导致的停机损失与维修成本增加,从能源管理与设备维护等多方面降低生产成本,推动钢铁企业绿色可持续发展^[1]。

2 钢铁生产流程数字孪生建模的核心要素

2.1 物理实体精准映射

在钢铁生产流程数字孪生建模中,物理实体精准映射是基础与关键。钢铁生产涉及众多复杂设备与庞大系统,从高炉、转炉等大型冶炼设备,到连铸机、轧机等加工装置,每个物理实体都需在虚拟空间中进行精确复刻。通过激光扫描、三维建模等技术,可获取设备的几何结构、尺寸参数等静态信息;利用传感器实时采集设备运行状态、温度、压力等动态数据,确保虚拟模型与物理实体在外观、性能、行为上的高度一致。以高炉为例,精准映射不仅要还原其外形结构,更要将内部炉料分布、煤气流动等物理过程进行数字化表达,使操作人员能通过虚拟模型直观了解高炉运行状态,为后续的生产决策、故障诊断提供可靠依据,真正实现物理世界与虚拟世界的无缝对接。

2.2 多源数据采集与集成

钢铁生产过程产生的数据具有多源性、异构性特点,涵盖设备运行数据、工艺参数数据、质量检测数据、能源消耗数据等。多源数据采集与集成是构建有效数字孪生模型的核心支撑。通过部署各类传感器,如温度传感器、压力传感器、流量计等,实现对生产全流程数据的实时采集;同时,整合来自企业资源计划(ERP)、制造执行系统(MES)等信息系统的数据,获取订单、生产计划、物料供应等管理数据。然而,不同来源的数据在格式、协议、更新频率上存在差异,需要运用数据清洗、转换、标准化等技术,消除数据孤岛,将分散的数据集成到统一的数据平台。例如,将设备振动数据与工艺参数数据集成分析,能更准确地判断设备运行状态,预测潜在故障,为数字孪生模型提供丰富、准确、实时的数据基础,提升模型的分析与决策能力。

2.3 多维度模型构建

钢铁生产流程数字孪生建模需构建多维度模型,以全面反映生产过程的复杂性。多维度模型包括几何模型、物理模型、行为模型和规则模型等。几何模型呈现设备与生产线的空间结构,为可视化监控提供基础;物理模型基于冶金学、热力学等原理,模拟物质转化与能量传递过程,如钢水凝固、金属轧制变形等;行为模型通过分析设备运行规律与人员操作习惯,预测生产过程的动态变化;规则模型则融入生产工艺标准、质量规范等约束条件,确保模型输出符合实际生产要求。这些模型相互关联、协同工作,例如在模拟轧钢过程时,几何模型确定轧辊与钢材的形状尺寸,物理模型计算轧制力与温度变化,行为模型预测设备响应,规则模型保障产品质量达标。

3 钢铁生产流程数字孪生仿真的关键环节

3.1 生产过程动态模拟

在钢铁生产流程中,生产过程动态模拟是数字孪生仿真的核心环节之一。钢铁生产工序繁多且连续性强,从原料预处理、高炉炼铁、转炉炼钢,到连铸连轧等,每个环节都相互关联、动态变化。通过数字孪生技术,将采集的实时数据注入虚拟模型,可实现生产过程的动态可视化呈现。例如,在高炉炼铁过程中,动态模拟能直观展示炉内炉料下降、煤气上升及化学反应进程;在连铸环节,可模拟钢水从结晶器到铸坯成型的凝固过程。操作人员通过观察虚拟模型的动态变化,能实时掌握生产进度,及时发现生产节奏异常、物料堵塞等问题,快速调整生产策略,保障生产流程稳定高效运行,同时也为生产调度和计划制定提供可靠的参考依据^[2]。

3.2 工艺参数优化仿真

工艺参数的精准调控是提升钢铁产品质量与生产效率的关键,而工艺参数优化仿真赋予了数字孪生技术重要价值。钢铁生产中,温度、压力、时间、物料配比等工艺参数对产品性能影响显著。数字孪生模型可基于历史生产数据与物理化学原理,构建参数与产品质量、生产效率之间的关联关系。通过仿真试验,在虚拟环境中模拟不同工艺参数组合下的生产过程,评估其对产品质量、能耗、产量的影响。例如,在轧钢工艺中,仿真分析不同轧制温度、速度和压下率对钢材强度、表面质量的影响,找到最优参数组合;在炼钢环节,模拟不同吹氧量、造渣剂添加量对钢水成分的影响,优化冶炼工艺。这种方式无需在实际生产中反复试错,能大幅降低试验成本,快速实现工艺参数的优化,提升钢铁生产的智能化水平。

3.3 故障预警与诊断仿真

故障预警与诊断仿真在钢铁生产中意义重大,能有效降低设备故障带来的损失。钢铁生产设备长期处于高温、高压、重载等恶劣工况,设备故障风险高且故障影响范围广。数字孪生技术通过实时采集设备振动、温度、电流等运行数据,结合设备历史故障数据与故障机理模型,在虚拟模型中构建故障预警规则。一旦监测数据出现异常,系统可提前预测设备故障发生的可能性及时间,发出预警信息。当故障发生时,数字孪生模型可基于实时数据和仿真分析,快速定位故障部位,模拟故障发展过程,分析故障原因,为维修人员提供详细的诊断报告和维修建议。

4 数字孪生技术应用中的问题与解决策略

4.1 存在的主要问题

4.1.1 数据质量与融合问题

在钢铁生产数字孪生应用中,数据质量与融合面临多重难题。一方面,生产现场传感器种类繁多,数据采集频率、精度参差不齐,存在数据缺失、噪声干扰等问题,部分老旧设备甚至难以实现关键参数的实时采集,影响模型的准确性与可靠性。另一方面,数据来源广泛,涵盖生产设备、管理系统等多个领域,数据格式、协议差异大,如生产数据与企业ERP系统数据在结构和标准上不统一,导致数据融合困难,难以形成完整、有效的数据集,无法充分发挥数字孪生技术的价值。

4.1.2 模型精度与鲁棒性问题

当前钢铁生产数字孪生模型在精度和鲁棒性上存在明显不足。由于钢铁生产过程涉及复杂的物理化学反应和动态变化,现有模型难以精确描述和模拟这些过程,例如高炉内的气固两相流、钢水成分的微观变化等,导

致模型预测结果与实际生产存在偏差。此外,钢铁生产工况多变,设备老化、原料波动等因素频繁发生,而模型对复杂工况的适应性差,鲁棒性不足,当生产条件发生微小改变时,模型性能大幅下降,无法持续稳定地为生产决策提供有效支持。

4.1.3 安全与隐私问题

钢铁生产数字孪生技术应用中的安全与隐私风险日益凸显。生产数据包含大量敏感信息,如核心工艺参数、企业运营数据等,一旦泄露将直接威胁企业竞争力。而数字孪生系统高度依赖网络通信和数据交互,在数据传输与存储过程中,易受到黑客攻击、恶意软件入侵等网络安全威胁。同时,不同部门、企业间数据共享时,缺乏完善的隐私保护机制,可能导致数据滥用或非法获取,引发隐私泄露问题,严重阻碍数字孪生技术在钢铁行业的广泛应用与深度发展。

4.2 解决策略

4.2.1 优化数据管理

为解决数据质量与融合问题,需构建完善的数据管理体系。首先,对生产现场传感器进行升级改造,统一数据采集标准,确保关键参数采集的及时性与准确性,并引入数据清洗算法,去除噪声数据、修复缺失值。其次,搭建数据集成平台,采用标准化的数据接口和协议,打破不同数据源间的壁垒,实现生产数据、管理数据的无缝对接与融合。例如,利用ETL(抽取、转换、加载)技术对异构数据进行格式转换与统一处理,建立数据仓库,为数字孪生模型提供高质量、完整的数据集,夯实数据基础。

4.2.2 提升模型性能

针对模型精度与鲁棒性不足,需结合多学科知识优化模型构建。一方面,深入研究钢铁生产过程的物理化学机理,引入先进的计算流体力学(CFD)、分子动力学等仿真技术,细化对高炉气固两相流、钢水成分变化等复杂过程的建模,提高模型的描述精度。另一方面,采用机器学习与深度学习算法,利用海量历史数据对模型进行训练与优化,增强模型对复杂工况的适应性。例如,通过强化学习算法让模型在模拟的多变工况中自主学习最优策略,提升模型鲁棒性,确保其在不同生产条件下稳定输出可靠结果。

4.2.3 强化安全防护

为应对安全与隐私风险,需构建多层次的安全防护体系。在数据传输环节,采用加密技术对敏感数据进行加密处理,如使用SSL/TLS协议保障数据在网络传输过程中的安全性;在存储层面,部署访问控制机制,严格限制数据访问权限,结合区块链技术实现数据操作的可追溯。同时,建立数据隐私保护机制,对共享数据进行脱敏处理,制定数据使用规范,明确数据共享范围与使用权限,防止数据泄露与滥用,为数字孪生系统筑牢安全防线。

4.2.4 规范标准与控制成本

为推动数字孪生技术在钢铁行业的可持续应用,需制定统一的技术标准与成本控制策略。行业协会应牵头制定数字孪生建模、数据交互、系统集成等方面的标准规范,确保不同企业、系统间的兼容性与互操作性。在成本控制上,企业可采用模块化、轻量化设计理念,避免过度开发,优先选取性价比高的软硬件设备。同时,通过云计算、边缘计算等技术实现资源按需分配,降低硬件与运维成本,促进数字孪生技术在钢铁行业的规模化推广应用^[3]。

结束语

数字孪生技术为钢铁生产流程的智能化革新提供了强劲动力。通过构建精准的虚拟模型并开展深度仿真,该技术在优化生产工艺、提升设备运维效率、降低能耗等方面展现出显著优势。随着物联网、大数据等技术的持续进步,数字孪生与钢铁生产的融合将更为深入,推动生产模式向更智能、更高效、更绿色的方向发展。未来,需进一步强化跨学科技术整合,深化全流程数据协同,让数字孪生技术在钢铁产业数字化转型中发挥更大作用,助力行业实现高质量发展目标。

参考文献

- [1]王志鹏,兰峰,赵勇,等.数字孪生技术在钢铁生产流程中的建模与仿真研究[J].电气应用,2021,40(6):111-115.
- [2]黄文德,张晓飞,庞湘萍,等.数字孪生技术在钢铁生产流程中的建模与仿真研究[J].电子测量技术,2021,44(21):131-135.
- [3]邓啸巍.数字孪生技术在钢铁生产流程中的建模与仿真研究[J].科技风,2022(09):210-212..