

数字孪生技术在高炉冶金中的应用研究

刘志祥¹, 陈晨^{1,2*}, 李天宇¹, 杨宇¹

¹辽宁科技学院冶金与材料工程学院, 辽宁 本溪

²辽宁省本溪低品位非伴生铁矿优化应用重点实验室, 辽宁 本溪

收稿日期: 2025年9月10日; 录用日期: 2025年10月2日; 发布日期: 2025年10月10日

摘要

针对高炉冶金过程“黑箱特性显著、数据孤岛突出、操作依赖经验”等行业痛点, 系统阐述数字孪生技术在高炉冶金领域的应用框架与核心价值。为全面了解数字孪生技术在高炉冶炼方面的相关研究和应用热点, 从整个结构设计流程的角度总结当前数字孪生技术在数据采集储存、工业建模、数据驱动3个阶段的研究现状。通过梳理完整的技术路线, 详细分析几何建模、仿真建模、业务建模及数据科学建模的具体实现方式, 结合设备在线巡检、智能预警、工艺优化、模拟培训四大核心功能模块, 验证技术应用成效。本文基于鞍钢朝阳钢铁、太钢等企业的实践案例, 得出数字孪生系统可实现高炉生产实体与数字虚体的精准映射, 助力钢铁企业提高产能、实现降本增效。同时企业实现炉况诊断自动化、操作标准化, 为钢铁行业高炉工序数字化转型提供可复制的技术方案。

关键词

高炉冶金, 数字孪生, 工业建模, 智能预警, 工艺优化

Research on the Application of Digital Twin Technology in Blast Furnace Metallurgy

Zhixiang Liu¹, Chen Chen^{1,2*}, Tianyu Li¹, Yu Yang¹

¹School of Metallurgy and Materials Engineering, Liaoning Institute of Science and Technology, Benxi Liaoning

²Liaoning Key Laboratory of Optimization and Utilization of Non-Associated Low-Grade Iron Ore, Benxi Liaoning

Received: September 10, 2025; accepted: October 2, 2025; published: October 10, 2025

Abstract

Aimed at the industry pain points in the blast furnace metallurgical process, such as “significant black-box characteristics, prominent data silos, and experience-dependent operations”, this paper systemat-

*通讯作者。

文章引用: 刘志祥, 陈晨, 李天宇, 杨宇. 数字孪生技术在高炉冶金中的应用研究[J]. 机械工程与技术, 2025, 14(5): 593-598. DOI: 10.12677/met.2025.145060

ically expounded the application framework and core value of digital twin technology in the field of blast furnace metallurgy. To gain a comprehensive understanding of the relevant research and application hotspots of digital twin technology in blast furnace smelting, the current research status of digital twin technology in the three stages of data collection and storage, industrial modeling, and data-driven was summarized from the perspective of the entire structural design process. By sorting out the complete technical route, the specific implementation methods of geometric modeling, simulation modeling, business modeling, and data science modeling were analyzed in detail. Combined with the four core functional modules of equipment online inspection, intelligent early warning, process optimization, and simulation training, the effect of technology application was verified. Based on the practical cases of enterprises such as Angang Chaoyang Iron and Steel and TISCO (Taiyuan Iron and Steel Co., Ltd.), this paper concluded that the digital twin system could realize the accurate mapping between the physical entity of blast furnace production and the digital virtual entity, helping iron and steel enterprises increase production capacity and achieve cost reduction and efficiency improvement. At the same time, enterprises had realized the automation of furnace condition diagnosis and the standardization of operations, providing a replicable technical solution for the digital transformation of the blast furnace process in the iron and steel industry.

Keywords

Blast Furnace Metallurgy, Digital Twin, Industrial Modeling, Intelligent Early Warning, Process Optimization

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

高炉炼铁在钢铁工业中能源消耗量大、碳排放量高，过程中涉及高温、高压等复杂环境，包含多项物理化学反应，难以做到精准控制及预判。传统高炉冶炼过程信息孤岛特征明显，数据缺乏有效管理，炉况延续性较差，无法实现对异常工况的预判及预防[1]。过去粗放式、低质量高排放的大型高炉炼铁生产过程已经无法满足工业过程的快速发展和社会环境治理的要求，节能减排提质增效成为炼铁行业迫切的需求[2]。

随着智能制造技术的发展，“孪生模型 + 智能监测 + 大数据分析”驱动模型的建立实现了冶炼过程的可视化智能流转，将高炉“黑箱”生产实现全方位实时透明、智能监控，高效掌握高炉生产运行状态[3]。数字孪生技术凭借“虚实映射、实时仿真、动态优化”的核心能力，成为破解高炉冶金行业痛点的关键技术。

近年来，数字孪生技术已应用于工业的多个领域，钢铁企业也在数字孪生技术服务于冶金行业开展了诸多实践。王玉刚等[4]聚焦高炉安全管理难题，提出基于数字孪生驱动的高炉本体区域网格风险管控方法，推动企业安全风险管控数字化与智能化升级。周继红[5]提出“云-边-端”一体化架构，为数字化高炉提供技术范式。陈树文[6]介绍了专家系统在太钢高炉中的应用，阐述了专家系统的构成、核心模型应用情况，分析影响运行的因素并给出开发建议，为高炉高效稳定运行提供技术参考。

但是，冶金过程涉及多种复杂的物理化学反应，建立精确反映复杂物理化学过程的数字孪生模型难度大，现有模型难以准确描述反应动力学、传热传质等复杂现象。在钢铁行业数字孪生的研究中，多数模型对冶金反应机理的刻画不够精细，导致模型预测精度不高，无法满足实际生产需求。

本文基于上述研究成果与企业实践,从技术路线、功能模块、应用效益三方面,全面剖析数字孪生技术在高炉冶金中的应用,为行业技术推广提供支撑。

2. 高炉数字孪生系统构建技术路线

高炉数字孪生系统的构建需以现有硬件监测与信息系统为基础,遵循“数据为基、建模为核、驱动为要”的原则,通过数据采集存储、工业建模、数据驱动三大环节,实现物理高炉与数字虚体的实时同步。依靠数字孪生技术,钢铁企业开发并建立起相关系统或平台,构建出工业孪生模型,实现物理层和虚拟层之间的数据交互,数字孪生系统架构如图 1 所示。

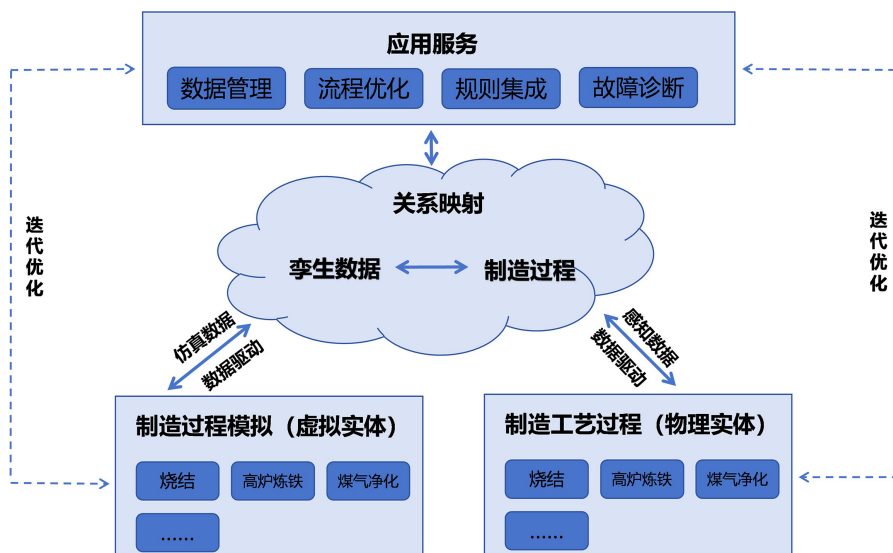


Figure 1. Architecture of the digital twin system

图 1. 数字孪生系统架构

2.1. 数据采集与存储

数据采集是数字孪生系统的基础,需覆盖高炉全流程多源异构数据,解决“数据孤岛”问题,存储架构需适配不同数据特性,保障数据调用效率。数据采集范围包括:实时传感数据、业务过程数据及非结构化数据。

(1) 实时传感数据:通过 PLC、DCS 系统采集炉缸热电偶温度、冷却壁水温差、炉身静压、风口成像等参数,根据工艺参数设定采样频率,利用工业摄像头采集高炉区域视频数据,实现设备动作与人员行为监测。

(2) 业务过程数据:通过 DbLink 技术同步 L2 系统(高炉过程控制)、MES 系统(生产执行)中的原燃料质量数据、渣铁成分数据(硅含量、硫含量等)、铁水称重数据等。

(3) 非结构化数据:收集高炉设备设计图纸(二维 CAD、三维模型文件)、操作记录文档、专家经验手册,形成知识库支撑建模与决策。

数据存储策略采用多数据库协同存储架构,适配不同类型数据需求,如表 1 所示。

何天庆等[1]在鞍钢朝阳钢铁实践中,通过数字孪生架构实现 1036 个单体设备数据的统一管理,基于新型工业互联网平台底层架构搭建高性能数据采集、高速率数据传输、高效率数据管理的孪生数据平台。周继红[5]进一步引入数据清洗与标签化处理,通过高炉数据平台对相关的数据进行抽取,按照工艺模型和应用平台的需求,进行提取、过滤、汇集,以便于高炉炉况的分析。

Table 1. Data storage strategies and adaptation types
表 1. 数据储存策略及适配类型

数据类型	存储方式	典型工具	应用场景
结构化业务数据	关系型数据库	MySQL、Oracle	原燃料成分、生产报表存储
高实时性传感数据	时序数据库	InfluxDB	炉温、压力等实时数据存储
强交互性数据	内存数据库	Redis	在线巡检、实时预警计算
非结构化数据	文档数据库/文件系统	MongoDB、MinIO	图纸、视频、文档存储

2.2. 工业建模

工业建模是数字孪生系统的核心之一，决定数字虚体对物理实体的映射精度，需融合几何、仿真、业务、数据科学四大维度，构建多尺度、多物理场的高炉数字模型。

(1) 几何建模

采用多种三维软件及专业工具，按 1:1 比例还原高炉生产区域物理结构，涵盖矿槽、主皮带、炉顶、本体、风口、热风炉等模块。建模流程包括：白模型构建、材质贴图、动态属性绑定等。

(2) 仿真建模

基于冶金机理与多物理场理论，构建高炉内部“黑箱”解析模型，实现物理过程动态仿真包含：炉顶布料仿真、炉缸仿真、气流分布仿真等。

(3) 业务建模

基于物料平衡、热量平衡机理，模拟高炉实际生产业务流程，实现操作标准化，包括配料控制模型、喷煤控制模型、顺行评价模型等。

(4) 数据预测建模

利用机器学习与大数据算法，挖掘历史数据价值，实现高炉状态预测与诊断，包含铁水温度预测、异常工况预警、炉缸侵蚀预测等。具体的数据预测模型核心算法及应用如表 2 所示。

Table 2. Core algorithms and applications of data prediction models
表 2. 数据预测模型核心算法与应用

模型类别	具体算法/模型	模型机制	模型结构	应用场景	作用及效果
铁水含量预测模型	GRU 模型[2]	基于环境感知增强的特征-时间注意力机制	输入层→特征注意力层→GRU 层(隐藏神经元)→因果卷积时间注意力层→输出层	高炉铁水硅含量预测	2 小时提前预测，RMSE = 0.0498，HR = 94.7%
参数优化预测模型	RBF 神经网络模型[7]	径向基函数神经网络	输入层(关键操作参数误差量)→RBF 隐含层(径向基函数)→输出层(优化后参数预测值)	高炉燃料比优化	该模型预测准确度达到 99.1%；焦炭成本降低 (69 万元/周期)

数据预测模型在高炉冶炼过程中起着非常重要的作用。王振阳等[8]基于 SVR 算法构建的模型对铁水温度实现了较好的预测效果，误差波动方面表现较好，对铁水温度 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 范围内的预测命中率为 94%。

2.3. 数据驱动

数据驱动是实现虚实交互的关键，通过实时数据与数字模型绑定，驱动数字孪生体与物理高炉同步

运行，形成“监测 - 分析 - 决策 - 执行”闭环，包含数据绑定与同步及多源数据融合。对于多源数据融合，融合炼铁集控中心、质量检测数据，构建“监测数据 + 模型数据 + 业务数据”驱动体系。

3. 数字孪生系统核心功能与应用场景

基于上述技术路线构建的数字孪生系统，已在高炉设备管理、安全预警、工艺优化、人员培训等场景落地应用。

3.1. 设备在线巡检

传统人工巡检效率低、高危区域作业风险高，数字孪生系统通过虚实映射实现“可视化 + 智能化”巡检。在工作流程方面，数字场景中制定定制化巡检路径，标注冷却壁、热风阀等关键点位，结合历史与实时数据评估设备健康状态，如通过水温差突变识别冷却壁破损，自动记录缺陷并生成维修工单。通过数字孪生系统的在线巡检功能，有效降低巡检时间，提前预测故障的发生。

3.2. 全方位智能预警

基于历史数据与实时仿真，构建多维度预警机制，覆盖安全、质量、设备三类风险，安全预警类别及指标如表 3 所示。

Table 3. Safety warning categories and related indicators
表 3. 安全预警类别及相关指标

预警类别	监测指标	预警逻辑	响应方式
安全风险	煤气浓度、炉缸温度梯度	浓度超 50 ppm 或温度梯度 > 5℃/cm 时预警	声光报警 + 手机 APP 推送
质量风险	铁水硅含量、硫含量	预测值超目标范围±0.1%时预警	工艺调整建议推送
设备风险	冷却壁水温差、风机振动	水温差超 3℃或振动值超 8 mm/s 时预警	维修工单自动生成

3.3. 工艺制度优化

数字孪生系统提供“虚拟试验场”，模拟操作参数对生产指标的影响，降低物理试错成本。在优化场景方面，模拟溜槽角度、料批重量对料面的影响，优化布料制度以改善气流分布，试算风口直径、鼓风动能对炉缸活跃性的影响，调整送风参数确保均匀性等。

3.4. 数字孪生模拟培训

构建沉浸式培训环境，解决传统培训“难实操、高风险”痛点。通过数字孪生模拟培训可有效缩短员工对设备及操作流程的学习时间、提升操作标准化，并可以检验学习成效。场景设计包括：

- (1) 模拟上料、布料等常规操作；
- (2) 展示参数与炉况关联；
- (3) 模拟炉凉、崩料等故障，训练应急处理能力；
- (4) 自动对比操作效果与标准流程，生成技能评估报告。

4. 应用案例

鞍钢朝阳钢铁 2600 m³ 高炉引入数字孪生系统后，通过数据采集存储、工业建模、数据驱动等技术手段，实现了生产实体与数字虚体的精准映射，关键工艺参数与经济效益得到显著优化，具体提升情况如表 4 所示：

Table 4. Comparison of key parameters before and after the application of blast furnace digital twin technology at Angang Chaoyang Steel [1]

表 4. 鞍钢朝阳钢铁高炉数字孪生技术应用前后关键参数对比[1]

关键指标类型	具体指标	应用前水平	应用后水平	提升/优化效果
生产效率 指标	日产生铁量	6107 t	稳定在 6333 t 以上， 最高达 6564 t	单日产量提升至少 226 t，最高提升 457 t， 生产规模显著扩大
	高炉利用系数	-	2.52 t/(m ³ ·d)	达到高效冶炼水平，单位容积 高炉每日产出能力大幅提升
能耗成本 指标	燃料比	536 kg/tFe	530 kg/tFe	每吨铁水燃料消耗降低 6 kg， 有效减少能源消耗与生产成本
	高炉综合焦比	-	降低 4 kg/tFe	每吨铁水焦炭消耗减少 4 kg， 进一步降低冶炼核心原料成本
经济效益 指标	年创效	-	2970 万元	通过效率提升与能耗降低， 实现显著的年度经济收益增长

5. 结论

数字孪生技术通过“数据采集 - 工业建模 - 数据驱动”技术路线，实现高炉物理实体与数字虚体的精准映射。多家钢铁企业实践表明，该技术可显著提升生产效率、降低能耗、保障安全。未来需突破多物理场耦合、跨工序协同瓶颈，推动技术向全流程、自进化方向发展，为钢铁行业绿色低碳转型提供支撑。

基金项目

2025 年辽宁科技学院大学生创新创业训练计划项目(202511430089)。

参考文献

[1] 何天庆, 宁武, 王晓雪, 等. 鞍钢朝阳钢铁高炉数字孪生系统构建及应用[J]. 鞍钢技术, 2022, 438(6): 66-71.

[2] 李俊方. 高炉炼铁过程数据驱动建模及智能优化[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2022.

[3] 魏文举, 吕金秋, 王晓雪. 钢铁行业高炉数字孪生系统研究与应用[J]. 数码精品世界(工程科学), 2020, 2(2): 469-472.

[4] 王玉刚, 张永钢, 何腾, 等. 基于数字孪生的高炉本体区域网格风险管控研究[J]. 工业安全与环保, 2023, 49(S2): 58-61.

[5] 周继红, 陈仁. 钢铁冶金数字化高炉研究[J]. 山西冶金, 2022, 45(2): 91-95.

[6] 陈树文. 高炉专家系统在太钢高炉的应用[J]. 山西冶金, 2019, 42(6): 117-119, 144.

[7] 田毅, 王刚, 苏家庆, 等. 基于大数据挖掘的高炉参数优化调控模型研究[J]. 冶金自动化, 2022, 46(5): 65-75.

[8] 王振阳, 江德文, 王新东, 等. 基于支持向量回归与极限学习机的高炉铁水温度预测[J]. 工程科学学报, 2021, 43(4): 569-576.