

Research on Diagnosis and Self-healing Control of Blast Furnace Abnormal Working Conditions Based on Digital Twin

Xing Fang Shuai Zhou Jinjin Zhang

Ningbo Iron and Steel Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang, 315800, China

Abstract

As the core equipment in steel production, the stable operation of blast furnaces is crucial for ensuring corporate production capacity and quality. However, the complex and variable internal conditions of blast furnaces are susceptible to multiple factors such as raw materials, operational procedures, and equipment status. Traditional diagnostic and control methods suffer from issues like delayed response and insufficient accuracy. Digital twin technology, by constructing high-fidelity virtual models of blast furnaces, enables real-time data interaction and dynamic simulation, providing a new approach for precise diagnosis and intelligent self-healing control under abnormal conditions. This paper systematically investigates digital twin-based diagnostic and self-healing control methods for blast furnaces. It first explains the concept of digital twin technology and its advantages in blast furnace applications, then analyzes the diagnostic process and self-healing control mechanisms, while exploring key technical challenges and development prospects. The study demonstrates that this technology can effectively enhance operational stability and safety of blast furnaces, driving the intelligent transformation of the steel industry.

Keywords

digital twin; blast furnace; abnormal condition diagnosis; self-healing control

基于数字孪生的高炉异常工况诊断与自愈控制研究

方星 周帅 张晋晋

宁波钢铁有限公司, 中国·浙江 宁波 315800

摘要

高炉作为钢铁生产核心设备,其稳定运行对保障企业产能与质量至关重要。然而,高炉内部工况复杂多变,易受原料、操作及设备状态等多因素影响,传统诊断与控制方法存在响应滞后、准确性不足等问题。数字孪生技术通过构建高炉的高保真虚拟模型,实现实时数据交互与动态仿真,为异常工况的精准诊断与智能自愈控制提供了新路径。本文系统研究了基于数字孪生的高炉异常诊断与自愈控制方法,首先阐述数字孪生技术概念及其在高炉应用中的优势,进而分析异常诊断流程与自愈控制机制,并探讨关键技术挑战与发展前景。研究表明,该技术可有效提升高炉运行的稳定性与安全性,推动钢铁行业智能化转型。

关键词

数字孪生; 高炉; 异常工况诊断; 自愈控制

1 引言

高炉是钢铁冶炼流程中实现铁矿石还原与铁水生成的关键设备,其运行状态直接决定了生铁的产量、质量及生产成本。在实际生产过程中,高炉工况受到原料成分波动、操作参数调整以及设备老化等多因素综合影响,极易出现炉温异常、炉压波动、煤气分布不均等各类异常工况。传统上主要依赖人工经验与相对简单的监测系统诊断,这种方法存在实时性较差、主观性强以及对复杂异常模式识别能力不

足等问题,难以满足现代钢铁企业对高炉稳定、高效运行的严格要求。

随着新一代信息技术的快速发展,数字孪生技术为高炉的运行管理带来了创新性的解决方案。数字孪生通过构建与物理高炉实时映射、深度交互的虚拟数字模型,能够集成多源数据并进行动态仿真,从而实现高炉工况的全方位感知、异常的早期预警以及自愈控制的智能决策支持。本文聚焦于基于数字孪生的高炉异常工况诊断与自愈控制展开系统研究,旨在为提升高炉运行的稳定性、安全性与经济性提供坚实的理论支撑与可行的技术参考。

【作者简介】方星(1991-),男,中国安徽桐城人,本科,工程师,从事高炉冶炼研究。

2 数字孪生技术概述及其在高炉领域的应用优势

2.1 数字孪生技术的核心内涵与特征

数字孪生是指利用数字化手段,对物理实体的几何结构、物理特性、行为逻辑及运行环境进行全生命周期建模与仿真,从而构建一个在形态、功能及动态特性上与物理实体高度一致的虚拟数字模型。该模型不仅能够实时映射物理实体的当前状态,还能通过持续的数据交互与动态计算,预测其未来行为趋势,并为物理实体的远程控制与优化决策提供支持。

数字孪生技术具备三个核心特征。首先是实时性,依托物联网技术实时采集物理实体的运行数据,并同步更新数字孪生模型的状态参数,确保虚拟模型与物理实体始终保持一致。其次是高保真性,基于多学科原理与高精度数据,构建能够细致刻画物理实体内部复杂过程的多层次模型,从而准确反映其在各种工况下的动态特性。最后是双向交互性,在物理实体与数字孪生模型之间形成闭环反馈链路,物理实体的运行数据驱动模型更新,而模型的分析结果,如异常预警和控制建议,则反向指导物理实体的操作调整^[1]。

2.2 数字孪生技术在高炉领域的独特优势

高炉作为典型的复杂工业系统,其内部涉及多相流、非线性化学反应及强耦合物理过程,传统监测手段难以全面捕捉运行细节,而数字孪生技术通过构建全维度的数字化映射,集成炉体结构参数、工艺逻辑与实时数据,形成涵盖几何、物理和行为的完整虚拟模型,为异常工况精准定位奠定基础;该技术还支持工况的动态预测与早期预警,依托实时数据驱动模型仿真,可提前模拟不同操作条件下的高炉响应趋势,识别潜在异常风险,显著早于传统事后诊断模式发现问题;此外,数字孪生模型为自愈控制提供智能决策支持,通过在虚拟环境中模拟评估不同控制策略效果,快速筛选最优方案并反馈至物理系统,推动高炉控制从依赖人工经验向数据驱动智能决策的根本转变。

3 基于数字孪生的高炉异常工况诊断方法

3.1 高炉异常工况的典型类型与诊断需求

高炉异常工况根据其影响范围和严重程度,大致可分为三类。一是局部异常,例如单个风口堵塞或局部炉墙结厚,通常表现为特定区域的温度或压力异常,若处理不及时可能扩散为全局性问题。二是参数失衡异常,涉及多个操作参数的协同失调,如煤气分布不均或热制度波动,可能导致炉况顺行度下降。三是系统性故障,例如冷却系统失效或送风设备停机,直接威胁高炉的连续生产,需要紧急干预。

针对这些异常,诊断需求主要集中在三个方面。一是实时性,要求能够在异常萌芽阶段,如出现微小温度偏差或压力波动时快速识别。二是准确性,需要有效区分正常的工况波动与真实的异常状态,避免误报或漏报。三是可解释性,

必须明确异常产生的根本原因,为后续的控制操作提供清晰依据^[2]。

3.2 基于数字孪生的异常工况诊断流程与技术实现

基于数字孪生的高炉异常工况诊断流程可系统划分为四个关键步骤。首先,通过部署在高炉本体及附属设备上的传感器网络实时采集温度、压力、流量、成分等多源数据,并整合工艺操作数据及设备状态信息,再经过数据清洗、插值补全和特征提取等预处理手段确保数据质量。其次,构建涵盖几何结构、物理过程和行为逻辑三个层次的高保真数字孪生模型,其中几何层精确还原炉体尺寸和内衬分布,物理层基于冶金学原理模拟核心的物理化学过程,行为层描述高炉对外部操作的动态响应特性,模型通过实时接收传感器数据更新内部状态参数,确保与物理实体同步。

在模型构建基础上,数字孪生系统通过对比虚拟状态与物理实体的实时数据,结合历史数据构建的正常工况基线模型和机器学习算法,智能识别参数偏离正常范围的异常特征,区分偶发波动与持续性异常,并追溯关联参数以准确定位异常区域。最后,基于识别出的异常特征,系统调用内嵌的冶金工艺知识库与专家规则进行因果推理,通过模拟不同假设条件下的工况响应验证各潜在原因的合理性,最终输出最可能的根因列表及置信度评估,为控制决策提供明确方向。

4 基于数字孪生的高炉自愈控制策略与实现机制

4.1 自愈控制的核心目标与策略框架

高炉自愈控制的本质是通过自动化的调节手段,使高炉从异常工况恢复至稳定运行状态,同时最大限度减少对生产效率和产品质量的负面影响。其核心目标包括短期快速抑制异常恶化、中期恢复关键参数至最优区间以及长期避免同类异常重复发生。

自愈控制策略主要分为三类。一是参数微调策略,针对轻微异常,通过小幅调整操作参数实现自我修正。二是设备干预策略,针对局部故障,自动切换备用设备或启动保护机制。三是流程重构策略,针对系统性异常,重新规划操作制度以重建系统平衡^[3]。

4.2 数字孪生驱动自愈控制实现机制

数字孪生模型作为自愈控制系统的智能中枢,其实现过程包含方案模拟、效果评估和决策优化三个关键环节,形成一个完整的智能决策闭环。当高炉异常工况被准确诊断后,系统首先基于当前物理实体的实时状态参数和深入的根因分析结果,自动生成多个具有针对性的候选控制方案。这些方案不仅涵盖常规的操作参数调整,如风量、风温的精细调控,还包括设备运行模式的切换及工艺制度的优化等多个维度,确保应对策略的全面性和多样性^[4]。

在方案生成的基础上,数字孪生模型利用其高保真特

性,在虚拟空间中对各个候选方案进行多轮次、高精度的动态仿真。这一过程不仅预测关键参数(如炉缸温度、煤气流分布、压力梯度等)的恢复轨迹和所需时间,还会深入评估方案实施可能引发的连锁反应和潜在副作用,例如对炉体热负荷、能耗指标、设备寿命及后续工艺环节的影响。通过建立多指标评价体系,系统能够客观量化地对比不同方案在恢复效率、运行成本、长期可靠性等方面的综合表现。

在完成效果评估后,系统依托多目标优化算法,统筹考虑生产稳定性、经济性、安全性等多重目标,从众多候选方案中自主筛选出最优控制策略。该策略将转化为具体的设备控制指令,通过工业网络实时下发至现场的可编程逻辑控制器、分布式控制系统等底层自动化系统执行,从而实现从异常感知、智能诊断到自主控制的完整闭环自动化,显著提升响应速度和控制精度。

需要特别指出的是,这种自愈控制机制并非旨在完全取代人工干预,而是构建一种高效的人机协同智能决策模式。系统具备完善的置信度评估机制,当识别到控制对象涉及重大生产安全、模型仿真结果置信度不足或处于复杂工况边界等特殊状况时,会自动将异常预警、诊断结论、推荐的控制方案及其详细的仿真评估报告推送给操作人员,由经验丰富的工程师结合专业知识进行最终决策。这种设计既充分发挥了数字孪生模型在快速计算、多方案寻优方面的优势,又确保了人类专家在关键决策中的核心作用,最终实现控制过程安全性、有效性和灵活性的统一^[5]。

5 应用挑战与发展前景

5.1 关键技术挑战

尽管数字孪生技术在高炉异常工况管理中展现出巨大潜力,但其实际应用仍面临若干挑战。首先是高保真模型的构建难度大,高炉内部多尺度耦合过程复杂,完全依赖机理模型描述困难,而数据驱动模型又面临工业现场数据标注成本高、样本不平衡的问题。其次是实时性保障要求高,海量数据的秒级甚至毫秒级更新与处理对计算算力和通信网络提出了极高要求。最后是系统集成复杂性高,数字孪生平台需要与现有的制造执行系统、分布式控制系统等无缝对接,涉及多协议兼容和数据标准统一,增加了工程实施的难度。

5.2 发展前景与价值展望

随着人工智能、边缘计算和工业互联网技术的持续进步,数字孪生在高炉中的应用将不断深化。未来发展方向包括模型轻量化与边缘部署以提升响应速度、实现高炉与上下游工序的数字孪生体联动进行跨工序协同优化、以及增强模型的自适应学习能力以提升对复杂工况的适应性。

6 结语

本文系统研究了基于数字孪生的高炉异常工况诊断与自愈控制方法,构建了完整的理论框架和技术体系。研究深

入阐明了数字孪生技术的核心内涵及其在高炉精细化管理中的独特优势,详细剖析了基于数字孪生的异常诊断流程和自愈控制机制,为高炉智能化管控提供了创新性的解决方案。研究表明,数字孪生技术通过构建高炉的高保真虚拟映射,建立了物理空间与信息空间的双向交互通道,能够实现异常工况的精准感知、智能诊断与自动控制。在感知层面,数字孪生系统通过部署在炉体各部位的传感器网络,实时采集温度、压力、流量等多维数据,构建了高炉运行的“数字镜像”;在诊断层面,基于机理模型与数据驱动模型的深度融合,实现了对异常工况的早期识别和根因分析;在控制层面,通过在虚拟空间中对控制策略进行仿真验证,形成了“监测-诊断-决策-执行”的闭环自愈机制。这一技术体系有效克服了传统方法在实时性、准确性和可靠性方面的局限,显著提升了高炉运行的智能化水平^[6]。当前,该技术在工程化应用过程中仍面临多重挑战。在模型精度方面,高炉内部多相流传输、化学反应等过程的精确建模仍需进一步深入研究;在实时计算方面,海量数据的处理与模型的高频更新对计算资源提出了更高要求;在系统集成方面,需要解决新旧系统兼容、数据接口标准化等问题。这些技术难题的突破需要冶金工艺、信息科学、控制工程等多学科的交叉融合与协同创新。尽管存在上述挑战,但随着物联网、人工智能、边缘计算等支撑技术的快速发展,数字孪生在高炉中的应用深度和广度将持续拓展。可以预见,基于数字孪生的智能管理方案将通过不断优化迭代,逐步完善其感知精度、诊断能力和控制效果,最终成为保障高炉稳定、安全、高效运行的核心技术支撑。这一技术的成熟与推广,不仅将推动单个高炉的智能化升级,还将促进钢铁制造全流程的数字化转型,为行业高质量发展注入新的动能。未来,随着数字孪生技术与高炉工艺的深度融合,其应用场景将从异常工况处理向优化运行、预测性维护、能效管理等更多维度延伸,形成覆盖高炉全生命周期的智能管控体系。这一发展路径将显著提升钢铁生产的精细化水平,推动行业向绿色化、智能化方向转型升级,为实现制造强国战略提供有力支撑。

参考文献

- [1] 周继红,陈仁.钢铁冶金数字化高炉研究[J].山西冶金,2022,45(02):91-95.
- [2] 侯健,方觉,冯艳平.高炉异常炉况诊断研究[J].南方金属,2009,(04):29-31.
- [3] 储满生,王国栋,唐珏,等.数字化高炉炼铁技术研发与应用研究进展[J].东北大学学报(自然科学版),2025,46(07):113-130.
- [4] 刘小杰,李天顺,李欣,等.高炉炼铁智能化发展的探讨与展望[J].中国冶金,2025,35(01):1-14+31.
- [5] 鄂殿玉,炼铁高炉数字孪生体构建及时空调控机制研究.江西省,江西理工大学,2023-03-31.
- [6] 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,(06):66-71.