

基于人工智能的高炉炼铁过程参数智能调控与故障预警研究

马海兴 冯小勇

河南钢铁周口钢铁有限责任公司 河南周口 466300

摘 要: 钢铁工业加快智能化转型,传统高炉炼铁调控和故障预警方式满足不了生产需求。本文针对高炉炼铁过程复杂、非线性等特点,分析传统调控方法不足和智能调控需求。通过构建基于人工智能的参数智能调控模型,完成数据采集预处理、设计智能调控算法并训练验证模型;同时,基于故障类型和特征分析,研究故障预警算法并实现预警系统。文章还探讨技术挑战和应对办法,研究成果为高炉炼铁智能化生产提供理论和实践参考,有助于提升生产效率和稳定性,降低故障风险。

关键词: 人工智能;高炉炼铁;参数智能调控;故障预警

引言

高炉炼铁是钢铁工业关键环节,其生产过程高效、稳定运行决定钢铁企业经济效益和竞争力。在工业4.0和智能制造快速发展背景下,全球钢铁行业面临资源、能源和环境等挑战,需要通过技术创新实现转型升级。传统高炉炼铁过程主要靠人工经验和简单自动化系统调控参数、处理故障,这种方式存在调控精度低、响应慢、难应对复杂工况等问题。

人工智能技术,特别是机器学习、深度学习等算法,在工业过程控制、故障诊断等领域有很大应用潜力。把人工智能引入高炉炼铁过程,实现参数智能调控和故障精准预警,能克服传统方法不足,提高高炉炼铁自动化、智能化水平,降低成本,减少能源消耗和环境污染。所以,开展基于人工智能的高炉炼铁过程参数智能调控与故障预警研究有重要理论和实际应用价值。本文从分析高炉炼铁过程特性和调控需求出发,构建智能调控模型和故障预警系统,并探讨相关技术挑战和对策。

一、高炉炼铁过程特性与调控需求分析

(一) 高炉炼铁工艺概述

高炉炼铁是复杂的高温物理化学反应过程,基本原理是在高炉内,铁矿石、焦炭、熔剂等原料在高温下发生化学反应,还原铁矿石中的铁元素形成铁水。具体工艺是:原料用皮带运输机等设备送到高炉顶部,经布料装置均匀分布在炉喉;从高炉下部风口鼓入热风,使焦炭燃烧产生高温煤气,煤气自下而上运动,与自上而下的炉料充分接触,发生热交换和化学反应。这个过程中,

铁矿石逐步被还原,脉石成分与熔剂反应形成炉渣,铁水和炉渣在炉缸内积聚,定期从出铁口和出渣口排出。高炉炼铁过程涉及很多工艺参数,像炉顶压力、炉身温度、鼓风流量、透气性指数等,这些参数相互关联、影响,而且有高度非线性和时变性。任何一个参数异常波动都可能影响高炉稳定运行,甚至引发故障,所以需要精确调控这些参数^[1]。

(二) 传统调控方法的局限性

传统高炉炼铁调控方法主要有经验调控和基于经典控制理论的自动化调控。经验调控依赖操作人员长期积累的经验和主观判断,对操作人员技能水平和工作状态要求高,存在调控精度低、响应慢、难应对复杂工况等问题。高炉出现异常时,人工判断和操作可能滞后,导致问题恶化。

基于经典控制理论的自动化调控,比如PID控制,虽在一定程度上提高调控效率,但因为高炉炼铁过程复杂、非线性,经典控制算法难建立精确数学模型,控制效果不好。另外,传统调控方法不能有效利用大量历史数据,无法充分挖掘数据信息,难以适应高炉炼铁过程工况的动态变化。

(三) 智能调控与故障预警需求

钢铁行业对生产效率、产品质量和安全生产要求不断提高,对高炉炼铁过程智能调控和故障预警需求迫切。智能调控要能实时感知高炉运行状态,根据工况变化自动调整工艺参数,实现高炉炼铁过程优化控制,提高生产效率和产品质量,降低能源消耗。故障预警要及时发现高炉运行潜在故障,提前采取措施预防和处理,避免

故障扩大,保障高炉安全稳定运行。引入人工智能技术为满足这些需求提供新途径,通过深度分析和挖掘高炉炼铁过程数据,能建立更准确模型,实现参数智能调控和故障精准预警^[2]。

二、基于人工智能的参数智能调控模型

(一) 数据采集与预处理

构建基于人工智能的参数智能调控模型前,要先全面采集数据。数据主要来自高炉现场各类传感器,如温度传感器、压力传感器、流量传感器等,这些传感器实时采集炉顶压力、炉身温度、鼓风流量、原料成分等大量数据。还可以收集操作人员调控记录、设备运行状态等数据,丰富数据维度。采集到的数据常有噪声、缺失值、异常值等问题,需要预处理。对于噪声数据,可用中值滤波、卡尔曼滤波等滤波算法去噪;对于缺失值,可根据数据特点用均值填充、插值法或基于机器学习的预测方法填补;对于异常值,通过统计分析和数据可视化手段识别,再根据实际情况修正或删除。预处理后的数据能更准确反映高炉炼铁过程真实状态,为后续模型训练提供可靠数据基础。

(二) 智能调控算法设计

智能调控算法是实现高炉炼铁过程参数智能调控的核心。考虑到高炉炼铁过程复杂、非线性,本文用深度学习算法中的长短期记忆网络(LSTM)结合强化学习算法设计智能调控算法。LSTM网络能有效处理时间序列数据,通过记忆单元和门控机制,捕捉数据长期依赖关系,适合对有时变性的高炉炼铁过程参数建模。把预处理后的数据按时间序列输入LSTM网络,网络学习数据特征和规律,预测未来一段时间参数变化趋势。

强化学习算法以高炉炼铁过程优化目标(如提高铁水产量、降低焦比等)为导向,通过智能体与环境(即高炉炼铁过程)不断交互,根据环境反馈的奖励信号调整调控策略。智能体根据LSTM网络预测结果,采取不同调控动作(如调整鼓风流量、改变布料模式等),环境根据动作执行后的实际效果给予奖励或惩罚,智能体不断学习,逐步找到最优调控策略。

(三) 模型训练与验证

完成智能调控算法设计后,要训练和验证模型。把预处理后的数据分成训练集和测试集,训练集用于模型参数学习和优化,测试集用于评估模型性能。训练时,用训练集数据训练LSTM网络和强化学习智能体。对于LSTM网络,用反向传播算法结合随机梯度下降法优化

网络参数,使网络预测误差最小;对于强化学习智能体,通过不断与模拟的高炉炼铁环境交互,根据奖励信号更新策略网络参数,逐步提高调控策略性能。训练完成后,用测试集数据验证模型。通过计算模型预测值与实际值的均方误差(MSE)、平均绝对误差(MAE)等指标,评估模型预测精度和调控效果。同时,在实际生产环境小规模部署和测试模型,进一步验证模型有效性和实用性,根据实际运行结果调整和优化模型^[3]。

三、高炉炼铁故障预警系统构建

(一) 故障类型与特征分析

高炉炼铁过程常见故障有炉温异常、悬料、管道行程、炉墙结厚等。炉温异常指炉内温度偏离正常范围,炉温过高或过低都会影响铁水质量和高炉顺行;悬料指炉料在炉内停止下降,导致高炉透气性变差,影响煤气分布和炉况稳定;管道行程指煤气在炉内局部区域流速过快形成管道,造成炉料下降不均;炉墙结厚是因为炉内操作不当或原料性质变化,炉墙附着大量炉料,影响高炉容积和传热效率。每种故障都有独特特征,可通过工艺参数变化反映出来。比如炉温异常时,炉身温度、铁水温度等参数会明显波动;悬料发生时,炉顶压力、透气性指数等参数会急剧变化。通过分析和挖掘历史故障数据,提取故障发生时各工艺参数变化规律和特征,为设计故障预警算法提供依据。

(二) 故障预警算法研究

为实现高炉炼铁故障精准预警,本文用集成学习算法中的随机森林算法结合支持向量机(SVM)研究故障预警算法。随机森林算法通过构建多个决策树,集成它们的预测结果,有较强泛化能力和抗噪声能力。把提取的故障特征数据作为随机森林算法输入,训练多个决策树模型,通过投票机制确定最终故障预测结果。支持向量机是基于统计学习理论的分类算法,能在高维空间找到最优分类超平面。对于故障预警,把故障数据和正常数据作为训练样本,通过SVM算法学习样本分类边界,新数据到来时,根据其在分类超平面位置判断是否有故障风险。为提高故障预警准确性和及时性,融合随机森林算法和SVM算法。先用随机森林算法初步分类数据,再把随机森林分类结果和原始特征数据作为SVM算法输入,进行二次分类,发挥两种算法优势,提高故障预警性能^[4]。

(三) 预警系统实现

基于上述故障预警算法,构建高炉炼铁故障预警系统。该系统主要包括数据采集模块、数据处理与分析模

块、故障预警模块和人机交互模块。数据采集模块实时获取高炉现场各类工艺参数数据，并传输到数据处理与分析模块；数据处理与分析模块对采集数据预处理和特征提取，再把处理后数据输入故障预警模块；故障预警模块根据故障预警算法分析判断数据，检测到故障风险时及时发出预警信号；人机交互模块以直观界面展示高炉运行状态、故障预警信息等，方便操作人员了解高炉情况并采取处理措施。系统实现过程中，用Python语言结合相关机器学习库（如Scikit-learn、TensorFlow等）开发软件，利用数据库技术（如MySQL）存储和管理采集到的数据，确保系统稳定可靠。

四、挑战与对策

（一）技术挑战

虽然人工智能在高炉炼铁过程参数智能调控与故障预警方面潜力大，但实际应用面临很多技术挑战。第一，高炉炼铁过程数据来源多、复杂、不确定，数据质量不一，如何提高数据采集准确性和完整性，更好处理复杂数据，是提高模型性能的关键。第二，人工智能模型可解释性问题限制其在工业领域广泛应用。高炉炼铁对安全性和可靠性要求极高，操作人员需要了解模型决策依据，以便异常时做出合理判断和决策。但深度学习等复杂模型像“黑箱”，内部工作机制难理解，增加操作人员对模型的信任难度。第三，高炉炼铁生产环境复杂多变，模型实际应用中需要不断适应新工况和数据分布变化。如何提高模型适应性和鲁棒性，使其在不同工况下都保持良好性能，也是急需解决的问题。

（二）应对措施

针对上述技术挑战，可采取以下措施。在数据处理方面，加强传感器网络建设，提高数据采集精度和可靠性；用数据清洗、特征工程等技术优化数据质量。同时，探索多源数据融合技术，融合分析工艺数据、设备数据、环境数据等，挖掘更有价值信息。为解决模型可解释性问题，可研究可解释人工智能（XAI）技术，如开发基于规则提取、可视化等方法的解释工具，把复杂模型决策过程转化为操作人员容易理解的形式。还可以结合专家知识和经验，建立混合模型，让模型既有强大计算能

力，又有一定可解释性。对于模型适应性问题，可采用在线学习、迁移学习等技术，让模型根据新数据不断更新和优化参数，适应工况变化。同时，建立模型性能监测和评估机制，及时发现模型性能下降情况，并采取调整措施，确保模型在实际生产中持续稳定运行^[5]。

结语

本文围绕基于人工智能的高炉炼铁过程参数智能调控与故障预警展开研究，分析了高炉炼铁过程特性与调控需求，构建了基于人工智能的参数智能调控模型和故障预警系统，并探讨了相关技术挑战与对策。研究结果表明，将人工智能技术应用于高炉炼铁过程，能够有效提高参数调控精度和故障预警准确性，为高炉炼铁的智能化生产提供了新的解决方案。

未来，随着人工智能技术的不断发展和完善，以及与钢铁工业的深度融合，高炉炼铁过程的智能化水平将进一步提高。后续研究可进一步优化智能调控模型和故障预警算法，提高模型的性能和实用性；加强实际生产应用研究，验证模型在不同工况下的有效性；同时，探索人工智能技术在高炉炼铁其他环节的应用，推动钢铁工业的智能化转型升级。

参考文献

- [1] 安剑奇, 郭云鹏, 张新民, 等. 高炉炼铁过程智能感知、诊断与控制方法的研究现状与展望[J]. 冶金自动化, 2024, 48(02): 2-23.
- [2] 刘小杰, 张玉洁, 刘然, 等. 高炉炼铁智能化发展的研究现状与展望[J]. 钢铁研究学报, 2024, 36(05): 545-559.
- [3] 张智峰, 刘小杰, 李欣, 等. 大数据与工业4.0时代下高炉炼铁流程智能化发展现状与展望[J]. 冶金自动化, 2021, 45(06): 8-16.
- [4] 李启会. 高炉冶炼过程的模糊辨识、预测及控制[D]. 浙江大学, 2005.
- [5] 刘文慧. 基于多源信息融合的高炉煤气流分布识别和建模研究[D]. 内蒙古科技大学, 2021.