

基于神经网络与深度学习的转炉智慧 炼钢系统开发与应用

张胤^{1,4,5}, 陆斌^{1,4,5}, 崔弘³, 王立军², 刁望才^{1,5}, 高博³, 王强³

- (1. 内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心, 内蒙古包头 014010;
2. 内蒙古包钢钢联股份有限公司制造部, 内蒙古包头 014010;
3. 内蒙古包钢钢联股份有限公司炼钢厂, 内蒙古包头 014010;
4. 北京包钢钢铁技术有限公司, 北京 100083;
5. 内蒙古自治区稀土钢产品研发重点实验室, 内蒙古包头 014010)

摘要:针对传统转炉炼钢依赖人工经验、智能化程度低、生产效率与钢水质量稳定性不足等问题,以包钢1号转炉为研究对象,开发了一套融合神经网络与人工智能深度学习技术的转炉智慧炼钢系统。系统通过整合炉口火焰视觉、烟气分析、音频检测等多源异构数据,构建“机理-数据”双驱动模型,结合CNN、Bi-LSTM、强化学习等算法,实现吹炼状态实时判识、终点碳和温度精准预测及供氧-枪位智能协同调控。工业试验表明,该系统使转炉终点碳和温度双命中率提升至90%以上,转炉冶炼周期缩短2 min,吨钢降本1~2元,有效推动了转炉炼钢操作从“经验驱动”向“数据驱动”的转型。

关键词:转炉炼钢;神经网络;深度学习;智慧炼钢;多源数据融合;终点预测

中图分类号:TF345

文献标识码:B

文章编号:1009-5438(2026)02-0010-05

Development and Applications of Intelligent Steelmaking System for Converter Based on Neural Network and Deep Learning

Zhang Yin^{1,4,5}, Lu Bin^{1,4,5}, Cui Hong³, Wang Lijun²,
Diao Wangcai^{1,5}, Gao Bo³, Wang Qiang³

- (1. Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China;
2. Manufacturing Dept. of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China;
3. Steel-making Plant of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China;
4. Beijing Baotou Steel Technology Co., Ltd., Beijing 100083, China;
5. Inner Mongolia Key Laboratory of Rare Earth Steel Products Research & Development, Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China)

Abstract: The intelligent steelmaking system for converter integrating neural network and artificial intelligence deep learning technology is developed by taking the 1[#] converter of Baotou Steel as research object aiming at such problems as dependence of manual experiences, low intelligence as well as insufficient stability of production efficiency and quality of liquid steel for traditional converter steelmaking. The real-time judgment of converting state, accurate prediction of end point carbon and temperature as well as intelligent collaborative regulation and control of oxygen supply-oxygen lance position are realized by integrating such multi-source heterogeneous data as vision of flame at converter mouth, flue gas analysis and audio testing as well as establishing the dual-drive model of “mechanism-data” combining with such algorithms as the CNN, Bi-LSTM and reinforcement learning. The industrial tests showed that the dual hit rates of end point carbon and temperature for converter were increased to over 90%, smelting cycle of converter was shortened by 2 min as well as cost per ton of steel was reduced by CNY 1~2 Yuan with the system so that the transformation of converter operations from “experience driven” to “data driven” is effectively promoted.

Key words: converter steelmaking; neural network; deep learning; intelligent steelmaking; multi-source data fusion; endpoint prediction

转炉炼钢是钢铁生产的核心工序,其冶炼过程具有高温、多相、非线性等特点,传统生产模式高度依赖操作人员的现场经验,存在操作标准不统一、工艺参数波动大、终点命中率低等问题,严重制约了生产效率提升、产品质量稳定及绿色低碳发展^[1]。随着工业4.0与智能制造技术的发展,人工智能、大数据、机器视觉等技术与冶金工艺的深度融合成为转炉炼钢技术升级的重要方向^[2]。

国外钢铁强国如日本、德国已实现转炉“一键炼钢”与数字孪生系统应用,日本新日铁开发的智能转炉系统通过副枪检测与动态模型耦合,实现终点命中率稳定在92%以上^[3]。我国宝武、鞍钢等大型钢企虽已开展炼钢智能化改造,但多数系统仍存在模型适应性差、多源信息融合不足、全流程自主决策能力弱等问题,未能从根本上摆脱对人工经验的依赖^[4]。

包钢炼钢厂1号转炉作为传统炼钢工艺代表,智能化水平低成为制约其高质量发展的关键瓶颈。为此,包钢开发了基于神经网络与深度学习技术的转炉智慧炼钢系统,通过深度融合AI算法与转炉冶金工艺机理,构建全流程智能调控体系,打破传统生产模式的局限性,实现转炉冶炼的透明化、精细化与智能化管控,为包钢钢铁产业绿色发展提供技术支撑。

1 系统整体架构设计

1.1 设计思路

本系统以“数据驱动→智能决策→精准控制”为核心设计思路,围绕转炉吹炼全流程,构建“感知层→传输层→数据层→算法层→应用层”五层架构,深度融合冶金工艺机理与人工智能技术。通过采集多源异构数据实现全面感知熔池状态,依托工

业大数据池完成数据整合与分析,基于神经网络与深度学习算法构建智能模型,最终通过应用层实现工艺参数优化与全流程闭环控制,实现吹炼状态实时判识、终点碳和温度的精准预测、供氧-枪位智能调控的核心目标。

1.2 整体架构

转炉智慧炼钢系统整体架构如图1所示,各层级功能如下所述。

“感知层”部署耐高温工业视觉相机、烟气分析传感器、音频检测装置、投弹检测系统、温度/压力传感器等设备,实时采集炉口火焰图像、烟气成分、炉体振动、熔池状态、供氧强度等多维度数据,为系统提供基础感知数据。

“传输层”基于5G+工业以太网构建高速、稳定的工业通信网络,采用OPC UA协议实现设备间数据互联互通,确保感知层数据无延迟、无丢失,实时传输至数据层,同时将应用层调控指令下发至现场执行设备。

“数据层”搭建工业大数据池,整合时序数据(工艺参数)、关系数据(设备状态)、视图数据(火焰图像)等多类型数据,通过数据清洗、归一化、特征工程等预处理,形成高质量数据集,为算法层模型训练与推理提供数据支撑。

“算法层”是系统核心层,融合CNN、Bi-LSTM、强化学习、集成学习等深度学习算法,构建吹炼状态判识模型、终点碳和温度协同预测模型、供氧-枪位智能调控模型及异常炉况预警模型,实现数据应用到智能决策的转化。

“应用层”指开发转炉智慧炼钢控制平台,包含数据可视化、炉况实时监控、智能决策输出、远程集

控等功能模块,与一级 PLC 系统集成,实现调控指令的精准执行,同时为操作人员提供人机交互界面。

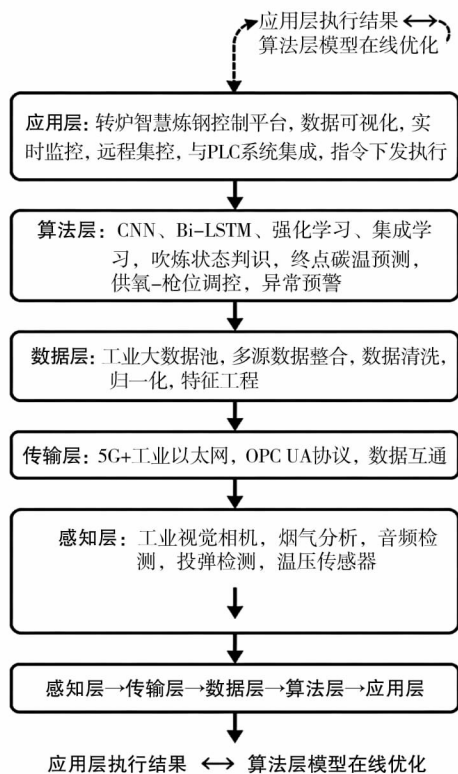


图 1 转炉智慧炼钢系统整体架构图

2 系统开发关键技术

2.1 多源异构数据融合技术

转炉吹炼过程中,不同类型数据具有不同的特征与维度,如火焰图像为非结构化视图数据,工艺参数为结构化时序数据,烟气分析为标量数据,数据格式与特征差异大,难以直接用于模型训练。本系统采用“特征级融合”策略,实现多源异构数据的深度融合。

“数据预处理”对采集的原始数据进行清洗,剔除异常值、缺失值;对时序数据进行归一化处理,消除量纲影响;对火焰图像进行去噪、增强、裁剪等预处理,提升图像质量。

“特征提取”采用 CNN 算法提取火焰图像的亮度、形态、纹理等空间特征,通过 Bi-LSTM 算法提取工艺参数的时序特征,结合烟气分析、音频检测数据的统计特征,形成多维度特征向量。

“特征融合”利用改进的自编码器对不同类型

特征向量进行融合,通过注意力机制分配不同特征的权重,突出与熔池状态、终点碳和温度强相关的特征,形成融合特征集,为后续模型训练提供高质量输入特征。

2.2 基于 CNN - Bi - LSTM 的吹炼状态实时判识模型

吹炼状态的准确判识是实现转炉智能控制的基础,传统方法通过人工观察火焰状态判断熔池反应情况,主观性强、误差大。本系统构建基于 CNN - Bi - LSTM 的吹炼状态实时判识模型,实现熔池脱碳、渣态演变、喷溅返干风险等状态的精准判识。

模型结构由 CNN 模块与 Bi - LSTM 模块串联组成,CNN 模块采用 3 层卷积层 + 2 层池化层,提取火焰图像的空间特征;Bi - LSTM 模块采用 2 层双向长短期记忆网络,提取火焰特征与工艺参数融合后的时序特征,最后通过连接层输出吹炼状态判识结果。

模型训练以包钢 1 号转炉近半年的生产数据为训练集,包含 2 000 炉次的火焰图像与对应工艺参数,将吹炼状态分为初期、中期、末期、喷溅预警、返干预警 5 类,采用反应熵损失函数与 Adam 优化器对模型进行训练,通过参数调优,模型识别准确率达到 90% 以上。

模型应用将实时采集的火焰图像与工艺参数输入训练完成的模型,模型可在 100 ms 内输出吹炼状态判识结果,为后续工艺参数优化提供实时依据。

2.3 基于机理 - 数据双驱动的终点碳和温度协同预测模型

转炉终点碳含量与温度的精准预测是避免过吹/欠吹的关键,传统纯机理模型适配性差,纯数据模型泛化能力弱。本系统构建“机理 - 数据”双驱动的终点碳和温度协同预测模型,兼顾模型的物理可解释性与自学习能力。

机理模型构建基于冶金物理化学原理,结合物料平衡、热平衡规律,建立熔池碳氧反应动力学方程与热力学方程,确定铁水成分、供氧强度、冷却剂加入量等参数对终点碳和温度的定量影响关系,引入原料成分波动修正项,提升机理模型的适配性。

数据模型构建以 CNN - Bi - LSTM 为基础,输入多源融合特征集,构建数据驱动预测模型,挖掘数据间的非线性关系,实现终点碳和温度的初步预测。

双模型融合采用改进的自编码器将机理模型的定量特征与数据模型的融合特征进行深度融合,引

入动态注意力机制,根据吹炼阶段动态调整机理特征与数据特征的权重——吹炼初期侧重机理模型,吹炼中后期侧重数据模型,最终实现终点碳和温度的协同精准预测。

2.4 基于强化学习的供氧-枪位智能协同调控模型

供氧强度与氧枪枪位是转炉吹炼的核心工艺参数,传统调控依赖人工经验,易引发喷溅、返干等问题。本系统构建基于深度强化学习的供氧-枪位智能协同调控模型,实现工艺参数的动态优化。

以“脱碳效率最大化、喷溅返干风险最小化、氧耗最优化”为核心优化目标,构建多目标函数,引入吹炼阶段权重系数,适配不同阶段的冶炼工艺需求。

模型训练将熔池实时状态、火焰特征参数作为状态输入,供氧强度、氧枪枪位调节量作为动作输出,以转炉生产数据为训练环境,通过强化学习算法自主学习最优调控策略,在训练过程中不断优化模型,最终收敛至最优解。

将吹炼状态判识结果、终点碳和温度预测结果输入调控模型,模型实时输出最优供氧强度与氧枪枪位参数,下发至 PLC 系统执行,同时根据投弹检测的实时数据进行在线修正,实现供氧-枪位的自适应协同调控。

2.5 能量流-物料流协同优化与闭环控制机制

从系统工程视角出发,将绿色冶炼理念融入智能控制全流程,构建能量流-物料流协同优化模型,结合全流程闭环控制机制,实现资源高效利用与绿色低碳冶炼。

建立转炉吹炼全流程物料流与能量流网络,量化各环节物料转化效率与能量传递效率,以钢水质量达标、物料消耗最小、能量利用率最高、碳排放最低为目标,构建多目标优化函数,采用改进的优化算法求解最优造渣制度、冷却剂加入策略、副产物回收工艺。

构建“感知→分析→决策→执行→反馈”全流程闭环控制系统,通过感知层实时采集生产数据,算法层进行智能分析与决策,应用层下发调控指令,同时将执行结果作为反馈信号动态修正模型参数,实现工艺参数的持续优化,提升系统的适应性。

3 系统实施与工业试验

3.1 工作基础

包钢1号转炉已完成前期智能化改造,为系统

实施奠定了坚实基础:部署了耐高温工业视觉系统,可实时采集炉口火焰视频与图像,结合投弹检测系统建立了高质量标注数据集;搭建了工业大数据池,实现多类型数据的整合与实时分析;构建了专家经验库,采用 CNN、Bi-LSTM 等算法完成了智能模型的初步训练;实现了与一级 PLC 系统的集成,具备远程集控与自适应控制能力。

3.2 实施步骤

实施分为数据准备、模型开发、系统集成、工业试验、优化验收5个阶段,具体实施步骤如表1所示。

表1 转炉智慧炼钢系统实施步骤

实施阶段	核心工作内容
数据准备	完成现场数据接口对接,收集历史生产数据;数据清洗与特征工程,构建基础数据库
模型开发	建立终点静态预测模型,开发动态预报模型;构建火焰特征提取与吹炼状态判识模型;开发异常炉况识别与预警模型
系统集成	完成能量流-物料流协同优化模型开发;集成各功能模块,搭建闭环控制原型系统;在线测试与模型参数优化
工业试验	引入在线学习机制,优化模型;小批量工业试验与多钢种验证;连续多炉次稳定性测试
优化验收	对比分析新旧工艺指标;完成技术总结与标准化文件编制;内部预验收与项目结题验收

3.3 工业试验方案与数据采集

以包钢1号100t转炉为试验对象,选取普碳钢、低合金钢等典型钢种开展工业试验,试验周期为6个月,分为对照组与试验组。

对照组采用传统人工经验操作模式,记录终点命中率、冶炼周期、物料消耗、能耗等指标。

试验组采用智慧炼钢系统进行智能控制,保持原料成分、钢种要求与对照组一致,同步采集相关生产指标,用于效果对比分析。

试验过程中,实时采集炉口火焰图像、工艺参数、设备状态等数据,每炉次记录终点碳含量、温度、冶炼周期、钢铁料消耗、氧耗等核心指标,共采集有效试验数据1000炉次。

4 系统应用效果

4.1 核心指标

工业试验结果表明,基于神经网络与深度学习

的转炉智慧炼钢系统有效提升了转炉生产的智能化水平与综合效益,核心指标对比结果如表 2 所示。由表 2 可知,与传统人工操作相比,转炉智慧炼钢系统应用后,转炉终点碳和温度双命中率由 70% 提升

至 92%,吹炼状态判识准确率达到 90%,有效减少了过吹/欠吹现象;转炉冶炼周期缩短 2 min,生产效率显著提升;钢铁料消耗降低 1.2 kg/t,氧耗降低 3.5 m³/t,吨钢综合降本 1~2 元,经济效益显著。

表 2 系统应用前后核心生产指标对比

指标名称	传统人工操作	系统智能控制	提升/改善效果
终点碳和温度双命中率/%	70	92	+22
吹炼状态判识准确率/%	-	90	达到设计目标
冶炼周期/min	38	36	-2
钢铁料消耗/(kg·t ⁻¹)	1 120	1 118.8	-1.2
氧耗/(m ³ ·t ⁻¹)	58.5	55.0	-3.5

4.2 钢水质量与生产稳定性

转炉智慧炼钢系统应用后,转炉工艺参数的波动范围显著减小,钢水成分均匀性大幅提升。以普碳钢 Q235B 为例,在系统应用前,钢水碳含量波动标准差为 ±0.021%,温度波动标准差为 ±15℃;在系统应用后,碳含量波动标准差降至 ±0.012%,温度波动标准差降至 ±8℃,产品质量稳定性提升显著。同时,由于供氧-枪位智能协同调控,熔池喷溅、返干等异常工况发生率从 8% 降至 1.5%,冶炼过程的平稳性大幅提升,金属收得率提升 0.8%。

4.3 绿色低碳与社会效益

系统通过能量流-物料流协同优化,实现了资源高效利用与能耗下降,吨钢综合能耗下降 18 kgce,吨钢 CO₂ 排放减少 20 kg,助力包钢实现绿色低碳发展。同时,系统实现了转炉冶炼的远程集控,将操作人员从高温、高强度的现场环境中解放出来,降低了人工劳动强度,消除了人为误操作带来的安全隐患,为包钢实现“无人化”炼钢奠定了技术基础。此外,系统的成功应用为钢铁企业智能化改造提供了示范,并带动了周边配套产业的协同发展,具有显著的行业引领作用与社会价值。

5 结论

本研究以包钢 1 号转炉为研究对象,开发了基于神经网络与深度学习技术的转炉智慧炼钢系统,通过多源异构数据融合、机理-数据双驱动建模、强化学习智能调控等关键技术,实现了转炉吹炼状态实时判识、终点碳和温度精准预测、供氧-枪位智能协同调控与全流程闭环控制。工业试验结果表明:

(1)系统核心指标达到设计要求,终点碳和温度双命中率提升至 92%,吹炼状态判识准确率达到 90%,有效解决了传统炼钢终点命中率低的问题。

(2)系统显著提升了生产效率与经济效益,转炉冶炼周期缩短 2 min,钢铁料消耗降低 1.2 kg/t,吨钢综合降本 1~2 元。

(3)系统提升了钢水质量稳定性与生产过程平稳性,钢水成分与温度波动大幅减小,熔池喷溅、返干等异常工况发生率降至 1.5%。

(4)系统实现了绿色低碳冶炼,吨钢能耗与碳排放显著降低,同时降低了操作人员劳动强度,具有显著的经济、社会与环境效益。

(5)系统的成功开发与应用,打破了传统转炉炼钢对人工经验的依赖,推动了包钢转炉炼钢操作从“经验驱动”向“数据驱动”的转型,为钢铁企业转炉智能化改造提供了可复制、可推广的技术方案。

参 考 文 献

- [1] 王利国,刘浏,张建良. 转炉炼钢智能控制技术发展现状与趋势[J]. 钢铁,2022,57(8):1-12.
- [2] 李建新,张立峰,王新华. 人工智能在钢铁冶金中的应用研究进展[J]. 金属学报,2023,59(5):681-700.
- [3] 佐藤健,山本裕司. 新日铁转炉智能炼钢技术的开发与应用[J]. 铁と钢,2021,107(6):385-392.
- [4] 马春生,李红涛,王强. 国内转炉智能炼钢技术应用现状与存在问题[J]. 炼钢,2022,38(4):1-8.