

转炉炼钢终点控制技术优化研究

徐海军 史磊 张鹏 李广华

河南安阳钢铁股份有限公司第一炼轧厂, 河南 安阳 455004

[摘要] 转炉炼钢终点控制是决定钢水质量、生产效率和生产成本的关键环节, 其实质就是对熔池碳含量和钢水温度进行准确地控制。文中对转炉炼钢终点控制技术的发展脉络和技术体系进行了系统的梳理, 按照人工经验控制、静态模型控制、动态检测控制、智能化控制这四个阶段递进展开。在分析传统控制技术的优势和不足之后, 主要研究了用机器学习做终点预测模型、多模态感知数据融合技术、静态和动态协同优化策略等主要的优化途径。

[关键词] 转炉炼钢; 终点控制; 静态模型; 动态控制; 智能优化

DOI: 10.33142/ec.v9i6.19820

中图分类号: TF713

文献标识码: A

Research on Optimization of Terminal Control Technology for Converter Steelmaking

XU Haijun, SHI Lei, ZHANG Peng, LI Guanghua

First Refining and Rolling Plant, Anyang Iron & Steel Co., Ltd., Anyang, He'nan, 455004, China

Abstract: The endpoint control of converter steelmaking is a key link in determining the quality, production efficiency, and production cost of molten steel. Its essence is to accurately control the carbon content of the molten pool and the temperature of the molten steel. The article systematically outlines the development trajectory and technical system of end-point control technology for converter steelmaking, progressing through four stages: manual experience control, static model control, dynamic detection control, and intelligent control. After analyzing the advantages and disadvantages of traditional control techniques, the main optimization approaches were studied, including using machine learning for endpoint prediction models, multimodal perception data fusion technology, and static and dynamic collaborative optimization strategies.

Keywords: converter steelmaking; terminal control; static model; dynamic control; intelligent optimization

引言

转炉炼钢是现代钢铁生产过程中不可缺少的环节, 转炉炼钢冶炼终点控制影响着钢水质量、金属收得率、冶炼周期。终点控制就是指在氧气转炉吹炼终点, 使钢水碳含量和温度同时达到出钢要求的控制技术。但是转炉炼钢过程具有高温、多相、非线性、强耦合等特点, 入炉原料波动大、炉内反应无法直接观测, 传统的手工经验控制命中率低、难以标准化。因此, 由静态模型变动态控制, 由经验为主变数据为主, 由单点改善变全流程协调就构成了终点控制技术改进的基本逻辑。探究融合先进的检测技术和智能算法的优化途径, 对提高转炉炼钢的智能化水平有着十分重要的意义。

1 转炉炼钢终点控制技术概述

终点控制技术的发展过程是人工经验控制、静态模型控制、动态分析、自动化控制这四个时期。早期依靠人工经验判断炉口火焰的亮度、火花的形状和炉声的变化, 操

作方便但是存在主观性强、命中率低、劳动强度大等固有的缺点^[1]。随着计算机技术进入工业控制领域, 基于物料平衡和热平衡的静态数学模型随之产生, 可以预先计算出供氧量、副原料加入量等参数, 但是开环结构的本质使它很难适应吹炼过程中动态扰动的影响, 终点命中率一般不会超过 80%。

为了解决复杂的工况下系统调节性能的问题, 动态控制技术被应用起来。副枪检测技术就是在熔池中放入探头, 对碳含量、温度进行测量, 然后用动态模型来计算结果, 再与静态模型进行比较修正, 以提高终点命中率的一种方法。与此同时炉气分析技术用烟气成分的连续检测来推算熔池脱碳速率, 从而达到对钢水碳含量的连续预测和动态调整的目的。动态控制技术把转炉炼钢由原来的“开环设定”变为现在的“闭环调控”。

近些年来, 由于大数据, 机器学习以及多模态感知技术的发展, 终点控制朝着智能化的方向不断前进。用历史

生产数据构建的智能预测模型,其预测精度远远高于传统机理模型。

2 传统终点控制技术分析

2.1 人工经验控制

人工经验控制是最早出现并且还在一定范围内使用的控制方式。拉碳补吹法和直吹增碳法是其主要的操作方法,拉碳补吹法适合于中高碳钢的生产,操作简便、原料消耗少,但是终点命中率最高只有约 70%,而直吹增碳法则以“一吹到底”为特点,补吹时间短、效率高,适合于低碳钢的生产,命中率可达 80%以上^[2]。但是人工控制的主观性以及非标准化的特点,使得它不能满足现代钢铁生产对于质量一致性、稳定性的要求,也无法进一步缩短冶炼周期。

2.2 静态模型控制

静态控制就是根据原材料情况和炼钢目的,在吹炼开始之前计算出铁水、废钢、铁合金等加入量及供氧量,吹炼结束后启动吹炼。静态模型主要有机理模型、增量模型、统计模型和人工神经网络模型等。机理模型是通过求解物料平衡和热平衡方程得到装料参数,但是由于转炉冶炼过程的复杂性,一般需要采用简化假设,实际应用中多为半机理的经验模型,参数繁杂、调控困难。人工神经网络模型由于具有非线性映射的能力,在终点控制建模上具有一定的优势,但是由于工业数据质量、规模的限制,模型的泛化能力还有待提高。

2.3 动态检测控制

动态控制冲破了静态模型的开环限制,依靠在线获得的熔池状态信息来对控制参数实施实时修正。副枪动态控制是最成熟的方式,在临近吹炼终点的时候,副枪探头插入熔池测得碳含量和温度,从而修正静态计算模型并调整供氧量和副原料加入策略。副枪检测单点数据的本质决定了它不能对整个吹炼过程进行连续的监测。炉气分析动态控制就是通过实时采集烟气中 CO、CO₂等气体成分变化趋势来推断脱碳速率和熔池碳含量,从而实现碳含量和温度的连续预测,在终点碳含量较低的时候更加明显。

从表 1 可知,各种传统的控制方法在控制依据、命中率、实时性以及局限性上存在很大差别。从人工经验到静态模型,控制由定性向定量发展,但是开环结构仍然是精度的瓶颈。副枪和炉气分析将检测引入到过程之中,完成了由“设定”到“校正”的转变,但是前者是单点测量,后者在非低碳区段存在精度不足的问题。这些特点一起指向一个方向,就是依靠连续感知、数据驱动建模和自适应决策来实现智能化控制,这是克服传统方法缺陷的必然选择。

3 基于数据驱动的终点控制优化

3.1 基于机器学习的终点预测模型

传统的机理模型虽然可以反映冶炼过程的基本规律,但是对于原料波动大、工况变化频繁的复杂生产环境来说,预测精度很难达到要求。近几年来,用机器学习的终点预测模型在提高碳温命中率上取得明显的效果。CatBoost 等 Boosting 算法模型在终点碳含量、温度预测中都比机理模型要更准确,与机理模型相比碳含量命中率可以提高约 17%,温度命中率可以提高约 23.5%。自适应数据增强技术同随机森林模型的融合使用,使得碳含量预测的命中率由原来的 86.5%提高到现在的 88.9%,温度预测的命中率由原来的 87.5%提高到现在的 92.3%。这些研究证明了数据驱动的方法在转炉终点预测方面有工程上的实用性。

3.2 多模态感知与数据融合技术

终点控制精度主要依靠对炉内状态的感知能力来保证。传统的单个信息源检测方式有各自的不足之处,多模态感知和数据融合是新的发展方向。烟气分析技术通过对烟道内气体成分的检测来判断碳氧反应的过程和脱碳的速度,音频检测技术用吹炼噪声强度的变化来反映化渣的情况,火焰监测技术通过分析炉口火焰图像来评价熔池的脱碳状况。三种检测技术从嗅觉、听觉、视觉三个角度给出互相补充的信息,用数据融合算法综合判断,大大提高了冶炼状态判断的准确性、可靠性。另外,以光谱特征提取和深度学习算法为基础的碳温预测方法也给终点控制开拓了新的途径。

表 1 传统终点控制方法的主要特征对比

控制方法	控制依据	命中率范围	实时性	主要局限性
人工经验控制	火焰、炉声等感官信号	70%~80%	连续	主观性强,难以标准化,对操作者依赖高
静态模型控制	物料平衡与热平衡计算	≤80%	开环设定	无反馈校正,抗扰能力弱
副枪动态控制	副枪探头插入实测	85%~92%	终点前单点	非连续监测,无法覆盖全过程
炉气分析动态控制	烟气成分连续检测	80%~88%	连续	低碳段精度较高,高碳段偏差大

3.3 静态模型与动态控制的协同优化

静态模型与动态控制并非彼此替代,而是互为补充。优化策略就是创建起“静态设定-动态校正-智能决策”三层协同架构。吹炼开始之前,根据入炉原料条件和目标钢种的要求,用静态模型来确定初始工艺参数;吹炼过程中,依靠副枪或者炉气分析的动态信息来持续监测实际状态,当检测值和目标值出现偏差的时候,动态校正模型就会实时改变供氧量和加料方案,直到达到终点为止。该协同机制把静态模型的开环可靠性同动态控制的闭环适应性结合起来,从而在提高命中率的时候保持过程的稳定性。

4 终点控制技术优化策略

4.1 模型精度提升与数据质量保障

高质量的生产数据才是建立准确预测模型的前提。转炉炼钢过程数据具有高维度、强噪声、非线性等特点,容易造成模型命中率低、过拟合等现象。数据预处理方面可以采用数据滤波法剔除异常值和噪声,用数据增强法来增加有效的训练样本。模型构建方面集成学习模型用多个基学习器的预测结果降低单个模型的偏差和方差,深度学习方法用它强大的特征提取能力自动生成复杂的联系。从以上研究结果可以看出,将神经网络特征提取法和树模型回归法结合起来所得到的终点预测方法,其命中率可以达到91.80%左右。为了进一步提高模型的准确性,可以采用贝叶斯优化法来对模型的超参数进行自适应寻优,从而达到不依赖于人为调参的目的,也可以大大提高效率。建立模型性能的在线评估和触发重训机制,当预测误差一直大于设定的阈值的时候,系统就会自动执行增量学习或者重新训练的过程,从而使模型永远和当前的工作情况相适应。

4.2 全流程协同控制

终点控制不能只停留在某一位置上,应该从全过程的角度出发来协调各个工序之间的联系和影响。从铁水预处理、转炉吹炼到精炼调质,各个工序对钢水成分和温度的影响是相互耦合的。全流程协同控制的关键之处在于打破工序之间的数据壁垒,创建起统一的工艺参数数据库,让后道工序的状态信息可以回传给前道工序进行设定和调整。物料流、能量流和信息流三者之间协同优化可以达到由单点智能向系统智能转变的目的。在实际协同机制设计的时候,应该以终点碳温目标为基准,逆向分解出各个工序的关键控制指标,形成层层递进的约束条件。在铁水预处理阶段就根据转炉吹炼和精炼的要求,预先调节脱硫、脱硅的深度和温度窗口,防止后道工序因为前期的偏差而被迫进行补救性的操作^[3]。同时建立工序间动态协调机制,当转炉吹炼出现异常造成终点偏移的时候,信息要及时传

送给精炼工序,精炼根据偏离程度来调节合金加入量 and 处理时间,以尽量减小偏离给最终产品质量带来的影响。全流程协同控制要建立跨工序的工业互联网平台,开发以多目标优化为基础的调度算法,在钢水质量、能耗、节奏等各方面之间取得平衡。

4.3 复杂工况自适应控制

实际生产环境中的入炉铁水成分波动、废钢种类变化、炉龄状态不同等都会造成工况条件变得复杂多变。传统固定参数的模型在该类场景中很容易产生预测偏差。应对措施分为两方面,一是对模型参数实施实时数据的在线自适应修正,以此来应对工况的变化,二是创建多工况模型库并采用智能切换的方式来决定选用何种预测以及控制方法。另外,采用迁移学习的方法,把从历史数据中得到的通用知识迁移到新的工况上,也是降低模型对某一工况的依赖性的一种方式。自适应修正可以采用递推最小二乘或者卡尔曼滤波等递推估计算法,用新增炉次的实测数据不断更新模型参数,使模型表达越来越接近真实的工艺关系。多工况模型库的建立要先对历史生产数据做工况聚类分析,找出有明显统计差异的典型工况类别,然后为每个工况类别分别训练专属模型,再建立工况特征快速识别器。新炉次开始吹炼的时候,系统按照入炉原料即时检测结果来选择最接近的工况模型,从而达到“因工况施控”的目的。对频繁出现的新型或者过渡工况,使用迁移学习的方法,把已有的相近工况模型的知识参数迁移到新的模型上,用小样本数据进行微调适配,大大缩短了模型的冷启动时间。

4.4 智能化控制体系构建

智能化控制体系的建立属于终点控制技术改良的顶层设计目标,它的架构应该由感知层、模型层、决策层和执行层这四个部分组成。感知层完成多源数据的采集与融合,模型层实现碳温预测、状态识别等功能模块,决策层利用模型输出和工艺知识库进行决策,给出控制方案,执行层通过自动化控制系统将控制指令下发给供氧、加料等设备。四个层次之间就形成了一个“感知、决策、执行、反馈”不断更新的闭环系统,保证控制系统可以对工况的变化作出持续的适应和改善。工业实践证明,建立完整的智能化控制体系可以明显提高终点碳温双命中率,使转炉炼钢向着标准化、精细化的方向发展。

感知层要集成烟气分析仪、副枪、炉口火焰成像、声频检测等多种传感器,经过边缘计算节点的数据清洗和初步融合之后再上传到平台层^[4]。模型层用微服务架构来部署各种预测模型和辨识算法,可以独立更新和管理模型。

决策层用规则引擎和优化求解器把工艺专家的经验知识编码成决策规则,调用模型层的预测结果,用多目标优化算法得到最佳的氧量、加料量等控制量。执行层把决策指令变成 PLC 可以执行的控温、控氧参数,然后实时反馈执行状态。整个体系还要配备运维监控模块,对模型精度、数据质量、执行偏差进行持续跟踪,当系统判定出现明显退化或者异常的时候,会自动发出预警并启动备用控制策略,保证生产安全和质量稳定。

5 结束语

转炉炼钢终点控制技术的发展过程是人工经验向模型计算,开环设定向闭环控制,单点优化向系统协同的发展过程。在目前的智能化转型大背景之下,以数据为驱动,将多模态感知信息和控制策略结合起来,形成协同优化的技术路线,具有冲破传统方法束缚的强大潜能。但是终点控制技术的进一步优化还存在着一些重要的问题。工业数据质量、数据完整性不足属于数据驱动方法的基本限制,复杂工业环境下的数据改善是数据驱动法得以应用的前提条件。机器学习模型对于非线性高维数据的泛化能力、可解释性还要做进一步的研究。另外全过程动态优化决策机制、绿色低碳约束下终点控制策略等都会成为以后研究的重点。可以预见到,以智能制造为载体、以数据智能为

引擎,转炉炼钢终点控制技术会向着更高的精度、更强的适应性和更好的协同性方向不断前进。

[参考文献]

- [1]刘辉,邵彬,杨路,等.转炉炼钢吹炼终点判定方法研究综述与展望[J].冶金自动化,2023,47(2):1-15.
 - [2]戴雨翔,杨利彬,赵进宣,等.转炉终点预测模型技术与展望[J].工业加热,2024,53(8):7-15.
 - [3]李星彤,龚伟,李帝阅.基于 Boosting 算法的转炉终点预测模型[J].材料与冶金学报,2025,24(6):589-596.
 - [4]李擎,杨思琪,陈松路,等.基于自适应数据增强的转炉炼钢终点碳温预测方法[J].冶金自动化,2025,49(2):64-74.
- 作者简介:徐海军(1979—),男,河南林州人,技师,郑州大学行政管理专业毕业,现就职于河南安阳钢铁股份有限公司第一炼轧厂,从事炉外精炼工作;史磊(1979—),男,河南安阳人,技师,安钢工程大学冶金专业毕业,现就职于河南安阳钢铁股份有限公司第一炼轧厂,从事炉外精炼工作;张鹏(1980—),男,河南安阳县人,技师,现就职于河南安阳钢铁股份有限公司第一炼轧厂,从事转炉冶金工作;李广华(1978—),男,河南林州人,现就职于河南安阳钢铁股份有限公司第一炼轧厂,从事转炉冶金工作。