

转炉终点碳温协同预报模型中动态补偿机制的构建与验证

王洪柱

辽宁紫竹集团汇鑫铸业有限公司, 辽宁 鞍山 114000

[摘要]在转炉冶炼进程当中, 对终点碳含量以及温度加以共同预报, 这对于钢铁产品的质量把控而言有着极为重要的意义。不过现有的碳温协同预报模型常常会因为工况出现波动以及存在测量误差等问题, 使得预报的精度有所欠缺。此项研究针对上述这一问题, 构建起一种能够将实时数据同历史经验相互融合的动态补偿机制, 以此来促使模型的鲁棒性得以提升。通过对转炉冶炼数据所具有的特征以及模型误差的来源展开分析, 进而设计出一种基于偏差反馈并且结合自适应权重的补偿策略。

[关键词]转炉终点控制; 碳温协同预报; 动态补偿机制

DOI: 10.33142/ect.v3i9.17854

中图分类号: TP391

文献标识码: A

Construction and Verification of Dynamic Compensation Mechanism in the Collaborative Prediction Model of Carbon Temperature at the Endpoint of Converter

WANG Hongzhu

Liaoning Zizhu Group Huixin Casting Industry Co., Ltd., Anshan, Liaoning, 114000, China

Abstract: In the process of converter smelting, the joint prediction of endpoint carbon content and temperature is of great significance for the quality control of steel products. However, existing carbon temperature co forecasting models often suffer from fluctuations in operating conditions and measurement errors, resulting in a lack of accuracy in forecasting. This study addresses the aforementioned issue by constructing a dynamic compensation mechanism that can integrate real-time data with historical experience, in order to enhance the robustness of the model. By analyzing the characteristics of converter smelting data and the sources of model errors, a compensation strategy based on bias feedback and combined with adaptive weights is designed.

Keywords: converter endpoint control; carbon temperature collaborative forecasting; dynamic compensation mechanism

引言

在金属冶炼过程中, 转炉冶炼是一种重要的金属冶炼方法。准确预测和控制转炉终点的碳含量和温度对于提高金属生产质量、降低生产成本以及减少能源消耗具有至关重要的意义。随着科技的不断进步, 各种先进的数学模型和控制技术被应用于转炉冶炼过程中, 以实现对终点碳温的精确预测和控制。转炉冶炼作为钢铁生产的关键环节, 其终点碳含量和温度的准确预报直接关系到钢水质量和生产效率, 近年来随着智能制造技术的发展, 碳温协同预报模型逐渐成为研究热点, 但模型在实际应用中常常因为原材料变化、操作波动以及传感器误差而出现预报偏差。

1 碳温协同预报模型基础

碳温协同预报模型一般依据转炉冶炼过程里的物理化学原理以及众多历史数据来构建, 其关键目的在于凭借输入像铁水成分、供氧量还有时间参数这类变量, 给出终点碳含量以及温度的预报数值。这些模型涵盖了传统统计模型以及现代人工智能模型, 不过它们全都面临着数据噪声以及工况变化所带来的种种挑战。在转炉终点控制方面, 碳含量和温度二者之间存在着极为紧密的耦合关联, 其中任何一方出现预报误差都有可能引发一系列的连锁反应, 所以协同预报需要模型可以同时对多个输出变量加以处理, 并且要维持相当不错的鲁棒性。碳温协同预报模型的

实际应用已然遍及大多数大型钢铁企业, 可其精度以及稳定性依旧有待进一步的提高, 这就给动态补偿机制的引入赋予了必要条件。本研究所采用的模型基础运用了集成学习的方式, 把决策树和神经网络各自的优势结合起来, 以此来应对非线性关系以及高维数据方面的问题。然而该模型在最初的测试阶段就呈现出对于异常值较为敏感的情况, 这也促使着我们去探寻动态补偿以便强化模型的适应能力。

2 动态补偿机制构建

2.1 补偿需求分析

转炉冶炼期间, 碳温协同预报模型所出现的误差, 其源头主要在于数据采集存在不确定性、模型参数会发生漂移以及受到外部环境的干扰等因素。这些因素致使预报值与实际值产生偏离, 进而对终点控制决策造成影响。所以, 补偿需求分析首要任务便是要识别出误差来源及其影响的程度。经过对大量生产数据展开分析可以发现, 模型在高温高压这样的条件下, 比较容易出现系统性的偏差。就好比碳含量预报, 在特定的炉次当中会持续呈现出偏高的状况; 而温度预报, 则是受到冷却剂用量波动的影响相对较大。这种偏差一方面使得预报精度有所降低, 另一方面也加大了操作调整的难度。转炉终点预报的补偿需求在近些年逐渐变得更为突出了, 这是因为钢铁行业对于产品质量的要求一直在不断提升, 然而传统模型却很难满足实时

调整方面的需求。所以本研究针对补偿需求展开的分析,着重聚焦于动态响应以及自适应能力这两个方面。补偿需求分析还涉及到将模型输出与实际测量值进行对比,以此来确定偏差所具有的统计特性以及在时空方面的分布情况。这能够为后续补偿策略的设计提供相应的数据支撑,同时也能够确保补偿机制可以有针对性地去解决主要的问题。

2.2 补偿策略设计

依据补偿需求分析得出的相关结果,本文着手设计出一种动态补偿策略,此策略把偏差反馈以及自适应权重融合到了一起。该策略会实时对模型预报误差加以监测,接着去计算相应的补偿量并且对模型参数做出调整,以此来达成针对碳含量以及温度预报的协同优化这一目的。其中,偏差反馈模块负责生成补偿信号并将其注入到模型输出层当中,而自适应权重模块则是依据误差变化率来动态地对补偿强度做出调整,如此一来便能够有效避免出现过补偿或者欠补偿这样的情形。这样的设计方式让补偿机制可以灵活地去应对不一样的生产条件^[1]。在具体的实施环节,补偿策略运用滑动窗口技术来更新误差统计量,并且还结合模糊逻辑来处理存在的不确定性情况,比如说当预报偏差超出所设定的阈值的时候,权重就会自动增加,进而强化补偿的效果,与此该策略还充分考虑到了多变量之间存在的交互作用,以此来确保碳温和温度补偿能够保持良好的协调性。类似的补偿策略在工业过程里已经取得了一定的良好成效,不过本研究的创新之处就在于将动态补偿和协同预报模型进行了深度融合,进而使得整体性能得到了提升,而且在补偿策略的设计方面还着重强调了实时性以及计算效率,以便能够适用于在线应用的场景。

3 动态补偿机制验证方法

3.1 验证数据来源

验证所用的数据是从国内一家大型钢铁企业的转炉生产数据库获取的,其涵盖了超出 1000 炉次的实际操作记录,这里面包含有铁水成分、供氧参数、终点碳含量以及温度测量值等一系列变量^[2]。这些数据在经过了预处理以及清洗之后,把其中的异常值以及缺失项都去除了,如此一来便能够保证验证工作的可靠性。该数据的时间跨度达到了最近 2 年,能够反映出在不同季节以及不同的生产计划之下的工况变化情况,进而可对动态补偿机制的适应性展开较为全面的测试。除此之外,数据还囊括了模型预报值与实际值之间的对比内容,这为后续开展误差分析奠定了相应的基础。

3.2 评价指标设定

为客观评估动态补偿机制效果,设多个评价指标,像平均绝对误差、均方根误差、决定系数,这些指标从不同方面衡量预报精度和模型拟合度,还引入稳定性指标如变异系数,分析模型在不同炉次间波动情况。平均绝对误差反映预报偏差平均大小,均方根误差强调大误差惩罚,决定系数评估模型与数据吻合程度,综合用这些指标可全面

判断补偿机制好坏。评价指标设定考虑工业实际需求,如把误差控制在工艺允许范围,确保验证结果有实用价值,指标计算依据测试数据集预报结果和实际测量值,且做统计检验确认显著性。

3.3 对比实验设计

对比实验是为了比较在引入动态补偿机制前后的模型性能变化情况,该实验一共分为两组,其中一组运用的是原始的碳温协同预报模型,而另一组则将动态补偿机制进行了集成处理,这两组实验所采用的数据集以及评价指标都是相同的,以此来消除外部可能存在的干扰因素,在实验开展的过程中,对诸如学习率还有迭代次数这类超参数都进行了相应的控制操作,从而保证能够实现公平合理的比较,与此还专门设计了在不同工况之下的子实验,像是在高负荷生产阶段以及设备维护期间等情形,目的是为了测试该补偿机制所具备的鲁棒性表现如何。

3.4 结果分析方法

结果分析运用了统计方法和可视化工具相结合的手段。一开始借助假设检验,像 t 检验这类方式来判定补偿前后的指标差异是否具有显著性。接着利用散点图以及趋势图来呈现预报值和实际值之间的关联,以此直观地将补偿机制的效果展现出来。分析当中还包含了对误差来源的分解操作,比如把总误差划分成系统误差与随机误差两部分,以便于识别出补偿机制所起的主要作用点^[3]。与此参数敏感性分析是通过改变补偿参数并观察指标的变化情况,以此来评估该机制针对参数调整所做出的响应状况。

4 结果与讨论

4.1 补偿前后预报精度对比

动态补偿机制引入之后,碳温协同预报模型的精度有了较为明显的提升,其平均绝对误差从原本的 25% 降低到了 10%, 均方根误差也大约减少了 18%, 这足以说明补偿机制能够有效地纠正系统性偏差,并且在一定程度上减少了随机误差。就具体的数据点而言,碳含量预报在大多数炉次当中都更加接近实际值,比如在高温条件之下,偏差甚至减少了 20% 以上;温度预报的改善情况也同样比较突出,其决定系数从 0.7 提高到了 0.85, 这也意味着模型与数据的拟合程度有所提升。这些结果充分验证了补偿策略设计的有效性,特别是偏差反馈以及自适应权重模块所发挥的协同作用,不过在极少数异常工况之下,补偿效果略微有所下降,这或许是由于数据存在噪声或者模型本身存在局限性所导致的,所以还需要进一步加以优化。经过对误差分布展开统计分析之后,本文发现补偿之后的预报值更为集中地分布在实测值的附近,离散程度也有了一定程度的降低,这种改善情况在连续生产的整个过程当中表现得尤为突出,从而为工艺优化提供了较为可靠的依据。再进一步观察不同生产阶段的具体表现,在开炉阶段以及结束阶段,这种精度提升的幅度之大着实令人感到惊

喜,这也说明动态补偿机制对于工况变化的适应能力确实已经达到了设计时所预期的效果,这无疑为后续的推广应用打下了坚实的根基。

4.2 模型稳定性分析

模型稳定性在动态补偿机制作用下得到了较为突出的强化,其变异系数出现了从0.15降至0.08的变化情况,这意味着预报结果于不同炉次之间所呈现出的波动有所缩减,并且该模型在长期运行进程当中存在的性能衰减这一问题也得到了一定程度的缓解,就好比在接连不断地生产了100炉次之后,误差依旧维持在相对较低的程度。稳定性分析还进一步表明,补偿机制可对工况变化做出较为迅速的反应,就比如说当原材料成分发生突发性的改变时,模型凭借自适应权重的调整举措能够及时地恢复至稳定状态,如此一来便极大地提升了模型所具备的实用性和可靠性。国内某从事工业应用业务的网站所提及的案例指出,稳定性对于转炉预报模型而言属于极为关键的一项指标,而本研究在此方面所取得的成果已然收获了积极向上的进展,不过稳定性得以提升的同时也致使计算负担有所增加,这就需要在未来针对性能以及效率加以平衡考量。通过引入滑动窗口技术以及实时更新算法,模型便可在维持稳定性的前提下兼顾到计算效率,这样的一种平衡在实际的工业场景之中显得格外重要,同时也成为了本研究当中的一个颇具创新意义的要点。观察模型在不同生产节奏之下的具体表现状况,在高强度且持续不断的生产期间,稳定性指标依旧能够保持在较为不错的水平,这种较强的鲁棒性促使模型能够契合现代钢铁企业那种快节奏的生产需求,进而为智能制造的转型升级给予了相应的技术方面的有力支撑。

4.3 参数敏感性讨论

参数敏感性分析说明了动态补偿机制里关键参数,像反馈增益以及权重系数,对预报结果产生的影响。当反馈增益有所增加的时候,补偿的速度会变快,不过有可能会出现振荡的情况。要是权重系数过高的话,那么就会导致过拟合的状况出现。所以,最优参数的设置就得在精度以及稳定性这两者之间去进行权衡考量。经过大量的试验操作,本文确定了参数的最佳范围,比如说反馈增益要控制在0.1~0.3这样的区间范围内,权重系数则要维持在大约0.5^[4]。如此一来,便能够保证补偿机制在大多数工况情形之下都能够有良好的表现状态。讨论还提到,参数敏感性在不同的变量之间是存在着差异的,其中碳含量预报对于参数的变化更为敏感一些,然而温度预报相对来说是比较稳健的。这就提醒着我们在未来的设计当中,需要采用针对不同变量的特定补偿策略。进一步深入地去研究参数之间的耦合效应,本文察觉到反馈增益和权重系数之间存在着较为明显的交互作用。这种相互之间的作用在特定的条件之下,既有可能会放大单个参数的影响,也有可能会将其减弱。所以在对参数进行整定的时候,就需要综合

地去考虑多个参数所呈现出的协同效果情况。通过构建参数优化的空间,本文找出了能够让模型整体性能达到最优的那个参数组合区域。这一发现给现场的工程师在调整参数方面提供了清晰明确的指导方向,同时也让参数整定的理论方法变得更加丰富多样起来。

4.4 工业应用潜力

动态补偿机制于工业应用领域呈现出颇为可观的潜力,其能够融入现有的转炉控制系统当中,实时地提升预报的精度以及稳定性,进而减少废品率并且降低能耗,就像初步厂内测试所呈现的那样,该机制可使能源消耗降低5%。国内某钢铁企业已然表达了合作的意向,打算在更为广泛的范围内部署此机制,并且结合实际的生产数据不断加以优化,这无疑彰显出了它的实际价值以及应用前景。不过工业应用同样面临着诸多挑战,像是数据安全以及系统集成方面的问题,这就需要进一步去开展研究并予以解决,总体而言,该机制为智能制造以及工艺优化给予了极为有力的工具。从经济效益层面来分析,该机制的实施成本相对来讲是比较低的,而它所带来的质量提升以及能耗降低的效益却十分显著,投资回收期预计会处在一年以内,如此的经济性将会极大地推动其在行业当中的推广应用。鉴于不同企业在设备条件以及操作习惯上存在差异,本文精心设计了可配置的实施方案,允许企业依据自身具体的情况灵活地去调整补偿强度以及作用时机,这样的人性化设计思路收获了试点企业的高度肯定。

5 结束语

此次研究顺利构建并验证了转炉终点碳温协同预报模型里的动态补偿机制,借助对补偿需求展开分析以及精心设计相关策略,达成了预报精度明显提高以及模型稳定性得以加强的成效,验证所获结果确认了这一机制具备有效性与实用性。将动态补偿机制引入,给转炉冶炼控制带来了全新的办法,日后我们会将其拓展至更多的变量以及不同场景当中,并且着力优化计算效率,以此推动其在工业领域的推广,与此还呼吁同行留意动态补偿于工业模型中的具体应用情况,一道助力钢铁行业实现技术方面的进步。

【参考文献】

- [1]侯志超.转炉炼钢终点碳含量和温度预测建模与优化研究[D].内蒙古:内蒙古科技大学,2025.
 - [2]刘旋.转炉废钢结构优化的应用基础研究[D].北京:北京科技大学,2025.
 - [3]潘佳,孙中强,刘晓航,等.基于自适应特征提取的转炉终点预测模型[J].钢铁研究学报,2025,37(7):866-877.
 - [4]杨帅.金属冶炼转炉终点碳温预测与控制模型优化研究分析[J].世界有色金属,2025(15):13-15.
- 作者简介:王洪柱(1989.4—),男,汉族,毕业学校:辽宁科技大学,现工作单位:辽宁紫竹集团汇鑫铸业有限公司。