烧结终点温度AI智能控制技术研究与应用

徐志海
江苏昆仑互联新能源集团有限公司　江苏 盐城　224005

摘　要　烧结终点（burn through point，BTP）温度是烧结核心控制指标，直接影响烧结矿产质量、能耗和设备运行状态。国内多数钢铁企业烧结终点依靠人工经验调整台车速度、料层厚度，温度波动大，控制精度差。行业现有烧结终点温度预测专家系统大多只输出预测结果和操作建议，无法完成实时闭环控制。针对上述问题，本文提出一套边云协同的烧结终点温度AI智能控制技术，集成多源数据预处理、前馈反馈预测控制、大纯滞后补偿、异常工况约束等算法，将料层透气性软测量、主抽风机频率协同调节纳入控制逻辑，实现台车速度、料层、风箱负压、风机转速多变量协同优化。工业现场应用证明，该系统能够把终点温度波动控制在±25 ℃以内，实现增产、降低返矿率与工序能耗。

关键词　烧结终点；温度闭环控制；AI算法；边云协同；料层透气性；模型预测控制

Research and Application of AI Intelligent Control Technology for Sintering Burn Through Point Temperature

Xu Zhihai
Jiangsu Kunlun Internet Energy Group Co., Ltd., Yancheng 224005, Jiangsu Province, China

Abstract　The burn through point (BTP) temperature is a core control indicator in sintering, directly affecting the quality and output of sinter, energy consumption, and equipment operation status. In most domestic steel enterprises, the sintering BTP is adjusted manually based on experience through changes in pallet speed and bed thickness, resulting in large temperature fluctuations and poor control accuracy. Most existing expert systems for BTP temperature prediction in the industry only output prediction results and operational suggestions, and cannot achieve real-time closed-loop control. To address these problems, this paper proposes an edge-cloud collaborative AI intelligent control technology for sintering BTP temperature, which integrates algorithms such as multi-source data preprocessing, feedforward-feedback predictive control, large dead-time compensation, and abnormal condition constraints. It incorporates soft measurement of bed permeability and coordinated adjustment of the main exhaust fan frequency into the control logic, achieving multivariable collaborative optimization of pallet speed, bed thickness, windbox negative pressure, and fan speed. Industrial field applications prove that the system can control BTP temperature fluctuations within ±25 °C, achieving increased output and reduced return fines rate and process energy consumption.

Key words　Sintering Burn Through Point; Temperature Closed-Loop Control; AI Algorithm; Edge-Cloud Collaboration; Bed Permeability; Model Predictive Control

铁矿石烧结是高炉炉料制备的关键环节，烧结矿质量直接影响高炉生产与炼铁成本。烧结终点（BTP）指烧结料层中燃烧带下移到达台车篦条的位置，对应风箱温度曲线拐点温度，是判断烧结过程是否完全、热制度是否合理的核心标志。工程上通常将关键风箱温度组合判定为终点温度，目标控制区间一般为330～400 ℃。温度偏低会导致烧结不完全、强度不足、返矿率上升；温度偏高则引发过烧、能耗升高、台车与篦条使用寿命缩短。为此，本文面向工业落地需求，提出一套基于AI算法的烧结终点温度全闭环智能控制技术，突破传统预测型系统局限，实现从“人工操作”到“自动闭环控制”的跨越，为烧结高质量稳定生产提供技术支撑[1]。

1　烧结终点控制现状与行业技术瓶颈

1.1 烧结过程控制难点

①大纯滞后特性：台车速度调整后，温度响应至烧结终点滞后约40 min，指令与反馈严重滞后；②强扰动特性：原料成分、水分、粒度、料层厚度、透气性频繁波动，干扰源多且不可控；③多变量强耦合：台车速度、料层厚度、透气性、风箱负压、风量、主抽风机转速、终点温度相互影响、相互制约；④非线性时变：不同工况下过程增益、滞后时间、动态特性均会发生明显变化。因此，传统人工操作和常规比例—积分—微

分（proportional-integral-derivative，PID）控制难以实现高精度、高稳定性控制[2]。

1.2 现场生产突出问题

人工调节为主，温度波动大。烧结机机速、料层厚度以人工操作为主，存在响应滞后、一致性差的问题，终点温度实际波动达到 ± 60 ℃以上，烧结质量不稳定。在线检测缺失，过程难以精准控制。操作人员无法实时获取透气性指标，甚至部分烧结机还未配置高精度的料层厚度检测仪，难以根据料层厚度、料层透气性匹配烧结机速与抽风能力，导致烧结终点温度和位置偏移较大。系统缺少异常工况防护，可靠性不足。对风箱温度突变、台车篦条掉落等异常工况，缺少智能识别与处理机制，易造成控制失稳与设备安全隐患[3]。

1.3 烧结控制技术共性短板

现有烧结主流智能系统是预测型专家系统，仅输出建议，不能自动执行，没有闭环控制；大多只调节台车速度，缺少多变量协同优化；没有专门针对大滞后的补偿算法，容易出现调节超调、系统振荡；缺少异常数据清洗、故障安全约束，模型在复杂工况下适应性差。烧结行业迫切需要从开环辅助升级为全流程闭环智能控制，依靠人工智能（artificial intelligence，AI）完成感知、决策、执行、校验全链路动态优化。

2 AI闭环智能控制总体架构

系统采用边云协同技术架构，构建集“边缘实时感知与控制、云端全局优化与分析、智能人机交互与决策支持”于一体的AI能效优化系统。

系统采用边云协同架构，分为边缘控制层、云端优化层与人机交互层，兼顾实时控制、模型迭代和现场操作安全，遵循实时性、鲁棒性、安全性、协同性、持续迭代的设计原则。边缘控制层：实时采集风箱温度、料层厚度、台车速度、风箱负压、主抽风机转速/风门等现场数据，完成信号滤波、异常数据处理、透气性软测量，输出闭环控制指令下发执行。云端优化层：负责模型训练、参数自优化、能耗分析、历史数据追溯、报表生成与控制策略迭代升级。人机交互层：提供可视化监控界面、权限管理、人工干预接口，异常工况可无缝切入手动模式，不中断模型运行[4]。

3 核心AI算法与控制模型设计

3.1 多源数据预处理与异常值处理

1.滑动平均滤波。对风箱温度序列进行窗口平滑处理，抑制随机噪声：

$$\bar{T}(i)=\frac{1}{n}\sum_{k=i-n+1}^{i}T(k) \tag{1}$$

式中，$\bar{T}(i)$—滤波后温度；$T(k)$—原始温度；n—滑动窗口长度。

2.基于3 σ 准则识别异常值。

$$|T(i)-\bar{T}|>3\sigma \tag{2}$$

满足条件判定为异常数据，采用线性插值或邻域均值替换，避免异常值干扰模型计算。

3.2 料层透气性在线软测量模型

基于风箱风量、风箱负压、料层厚度、台车速度建立透气性在线软测量模型：

$$P=\frac{Q}{A}\cdot\left(\frac{H}{\Delta P}\right)^{n} \tag{3}$$

式中，P—料层透气性指数；A—抽风面积（m^2），即风箱对应的有效抽风面积；Q—通过料层的风量（m^3/min）；ΔP—料层前后的压力降；H—料层厚度；n—系数，取决于气体流态。透气性指数实时输出，作为台车速度与主抽风机转速协同调节依据。

3.3 烧结终点预测控制算法

采用模型预测控制，结合前馈抗扰与反馈校正，适配大纯滞后对象。

1.前馈控制律。

$$u_{ff}(k)=K_{ff1}\cdot\Delta T+K_{ff2}\cdot\Delta H+K_{ff3}\cdot\Delta K \tag{4}$$

2.反馈控制律。

$$u_{fb}(k)=K_p\cdot e(k)+K_i\sum e(k)+K_d\cdot\frac{\mathrm{d}e}{\mathrm{d}t} \tag{5}$$

3.预测控制最优输出。

$$u(k)=u_{ff}(k)+u_{fb}(k)+\Delta u_{mpc}(k) \tag{6}$$

3.4 大纯滞后时延补偿与延后判断算法

针对约40 min的大滞后特性，系统引入指令时间戳机制。在控制指令下发时，记录下发时刻并预估终点温度；结合动态计算的实测滞后时间，将预测值与实际终点温度进行时间戳对齐比对，进而计算控制误差指标。基于该误差实施延时评估，并自动校正模型参数，从而有效抑制系统超调与反复振荡。

3.5 安全约束与人工干预机制

为保障生产安全，设置多重约束：①台车速度设置上下限硬约束$v_{\min}\leqslant v(k)\leqslant v_{\max}$，输出超限自动限幅。②设置终点温度报警保护。③人工手动干预时模型后台继续运行，不会复位退出。④发生通信中断、信号故障时自动切手动，保障设备安全。

3.6 风箱温度与负压突变监测算法

基于风箱温度与负压变化识别异常工况：

$$\frac{dT}{dt} > \alpha, \quad \frac{d\Delta P}{dt} > \beta \tag{7}$$

满足条件判定为数据异常或设备故障，立即触发报警提醒处理。

4 料层透气性与主抽风机频率协同控制

4.1 协同控制目标

在稳定终点温度的前提下，实现产量最大化、电耗最小化、返矿率最低化。

4.2 协同控制逻辑

传统控制仅调节台车速度，在透气性波动较大时控制效果有限。本系统建立透气性—主抽风机转速—台车速度多变量协同优化规则：①透气性偏高，适度降低主抽风机频率或加快台车速度，提升产量与利用系数。②透气性偏低，降低台车速度延长烧结时间，配合微调主抽风机转速，保证烧结充分。③料层厚度变化：料层加厚则降低台车速度；料层变薄则提高台车速度，同步联动主抽风机，维持合理风箱负压[5]。

构建多目标优化函数，同时兼顾温度偏差与风机能耗：

$$\min J=\omega_1 \cdot \Delta T^2+\omega_2 \cdot P_{fan} \tag{8}$$

式中，ω_1、ω_2—权重；P_{fan}—主抽风机功率。

通过协同控制，在稳定终点温度的同时实现节能增效，提升系统鲁棒性与经济性。

5 与传统预测型专家系统的对比

随着烧结终点温度控制要求不断提高，传统预测型专家系统仅能提供开环预测与操作建议，难以实现实时闭环调节。为验证本文所提AI智能控制技术的实际效果，现从控制模式、闭环能力、控制变量、滞后处理、异常适应能力、控制目标、人工干预及投运率等方面，将其与传统预测型专家系统进行系统对比，具体结果见表1。

表1 本系统与传统预测型专家系统对比

对比项	传统预测型专家系统	本文 AI 闭环控制系统
控制模式	开环预测 + 人工执行	预测—前馈—反馈—时延补偿—自动执行
闭环能力	无	全闭环自动控制
控制变量	仅调节台车速度	台车速度 + 料层 + 透气性 + 主抽转速多变量协同
滞后处理	无时延补偿	大纯滞后时延补偿与延后判断算法
异常适应能力	弱	异常监测、异常清洗、安全约束
控制目标	追求预测准确	终点温度稳定、提质、增产、降耗
人工干预	干预即退出	无缝干预、模型不退出
投运率	低	高，7×24 h 自动运行

6 工业应用实例与效果分析

系统在江西某钢厂265 m²烧结机上投运，改造前依靠人工操作，终点温度波动大，返矿率和能耗都有优化空间。实施内容包含现场工艺信号标准化采集、部署边缘计算网关、部署AI算法与协同控制模块、改造主抽风机控制接口、开发监控报警报表功能，完成现场调试与模型迭代。

该技术稳定运行后，对实施前后的关键指标进行对比，具体数据如表2所示。

表2 优化前后指标对比

项目	优化前	优化后	优化率（%）
烧结产量（t/d）	10 206	10 430	2.1
高返矿率（%）	12.26	11.19	− 1.07
终点温度波动（℃）	256 ~ 450	目标区间 ± 25	显著优化

7 结束语

本文提出的AI闭环智能控制技术，构建“感知—决策—执行—校验—迭代”全流程体系，有效突破烧结过程大滞后、强扰动、多变量耦合等控制难题。系统集成数据预处理、透气性软测量、预测控制、大滞后补偿、安全约束、主抽风机协同优化，解决终点温度波动大、人工依赖度高等行业痛点。工业应用证明，该系统能够将烧结终点温度控制在目标区间 ± 25 ℃，实现增产降返矿，具备良好的现场适应性，技术可复制推广，为烧结工序智能化低碳升级提供示范案例[6]。

参考文献

[1]邓小龙,陈虎,杨雄文,等.智能化烧结控制系统开发与应用[J].冶金自动化,2021,45(3):67-78.

[2]严锋,刘哲,葛铭,等.烧结过程关键参数智能预测与控制研究现状与展望[J].冶金自动化,2024,48(5):1-11.

[3]杜胜.烧结过程多时间尺度工况识别与热状态参数智能控制[D].武汉:中国地质大学,2021.

[4]邱海雨.梅钢5号烧结机自动控制模型的研究及应用[J].冶金自动化,2021,45(3):79-84.

[5]韩振,张金鑫,朱秋平,等.180m²烧结机烧结质量提升实践[J].山西冶金,2025,48(6):151-153.

[6]申旭桓.烧结机部件缺陷视觉检测技术研究与应用[D].西安:西安建筑科技大学,2025.

（本文编辑 曹 阳）

