

石灰石矿热工设备状态监测与故障诊断方法

鲁鑫宇¹ 张文博² 孙厚健¹ 孟庆学¹

1 本溪钢铁(集团)矿业有限责任公司石灰石矿, 辽宁本溪, 117000;

2 本溪钢铁(集团)矿业有限责任公司安全生产监督部, 辽宁本溪, 117000;

摘要: 本文针对石灰石矿回转窑、竖窑和套筒窑三种热工设备, 提出了一套完整的状态监测与故障诊断优化方案。研究首先分析了不同炉窑的结构特点和运行机理, 建立了科学的监测参数体系与测点布局, 构建了高可靠的同步采集系统, 并执行系统化的数据预处理流程。在此基础上, 根据各炉窑动态特性差异选择合适的诊断模型与算法, 优化输入空间, 严格执行模型训练与性能验证流程, 并建立在线更新与漂移检测机制。最后, 实现诊断系统与企业平台的无缝对接, 建立全链条系统监控与维护机制, 形成诊断与运维的闭环管理体系。通过多个实际案例验证, 该方案能够有效提高监测精度、降低误报率、提前预警故障, 为矿山热工设备的安全稳定运行提供了有力支持。

关键词: 石灰石矿热工设备; 状态监测; 故障诊断

DOI: 10.64216/3080-1508.25.12.055

1 石灰石矿热工设备状态监测

1.1 回转窑状态监测

回转窑作为动态倾斜回转设备, 需要建立完整的多参数监测体系, 其中温度监测应覆盖窑体表面与内部关键区域, 采用红外热像仪获取整体温度分布, 并配合热电偶网络捕捉局部热点; 窑尾烟气的温度、压力及成分需连续采集, 以反映燃烧与换热状态; 传动系统监测重点包括托轮与挡轮的振动、温度及窑体轴向窜动, 确保机械运行稳定。同时, 针对回转窑的长滞后、非线性特性, 需建立温度场与窑速、喂料量、燃烧量的关联模型, 实现热工状态的动态评估, 并对关键参数设置多级报警阈值, 结合历史趋势分析识别异常模式。数据采集应采用抗高温、抗粉尘的传感器, 确保在恶劣环境下稳定运行。

1.2 竖窑状态监测

竖窑监测的核心是掌握炉内温度梯度与气流分布, 沿炉高布置多点温度传感器, 实时监测不同料层的温度变化, 并结合炉顶压力与烟气成分分析判断炉内反应状态。出料温度与熟料质量密切相关, 需重点监控并与入炉原料特性进行关联分析; 气流分布监测通过设置差压测点实现, 并结合风量测量数据评估炉内通风均匀性; 对布料装置与出料系统的运行状态进行监测, 包括电机电流、振动与转速等参数。针对竖窑相对稳定但易受原料波动影响的特点, 建立自适应报警机制, 根据原料特性变化调整监测参数。

1.3 套筒窑状态监测

套筒窑的监测需同时关注内筒与外筒的热工状态及环形空间的气流分布, 沿内外筒布置温度测点, 捕捉径向与轴向温度梯度, 并配合烟气分析数据评估燃烧效率。环形通道的压力分布监测可反映气流均匀性, 及时发现通道堵塞或磨损问题; 燃烧系统监测包括燃料流量、助燃风比例及火焰稳定性参数。对回转部件的振动、温度与密封状态进行连续监测, 防止因机械问题引发热工波动。由于套筒窑结构紧凑、热工耦合度高, 应建立多变量关联模型, 实现对复杂故障模式的早期识别与诊断。

2 石灰石矿热工设备状态监测难点

2.1 恶劣环境下的测量可靠性

石灰石矿热工设备运行环境恶劣, 高温、粉尘、振动等因素严重影响传感器性能和数据质量。传统传感器在高温环境下易漂移, 粉尘积累导致测量偏差, 振动冲击缩短设备寿命。此外, 回转窑等设备的旋转特性使布线困难, 信号传输易受干扰, 进一步降低数据可靠性。解决这一难点需要采用耐高温、抗粉尘、防振动的专用传感器, 配合合理的防护措施和信号处理技术^[1]。

2.2 多参数耦合与动态特性复杂

热工设备的运行状态受多种参数相互影响, 如温度、压力、流量等参数间存在强耦合关系。回转窑的长滞后特性、竖窑的温度梯度变化、套筒窑的复杂流场, 使得建立精确的数学模型困难。传统监测方法难以有效分离各参数的影响, 导致故障预警准确性低。需要引入多变量分析和数据融合技术, 结合机理建模与数据驱动方法, 才能更好地理解和预测设备状态变化。

2.3 实时性与经济性的平衡

状态监测需要实时采集和分析大量数据,对硬件和软件系统提出了高要求。然而,矿山企业通常面临成本压力,过度追求高精度监测可能导致投资过大。同时,复杂的数据分析算法需要强大的计算能力,可能影响系统响应速度。如何在保证监测精度和实时性的前提下,控制设备投资和运行成本,是石灰石矿热工设备状态监测面临的重要挑战。

3 石灰石矿热工设备故障诊断方法

3.1 数据采集与预处理优化

3.1.1 建立科学的监测参数体系与测点布局

在回转窑、竖窑和套筒窑的故障诊断中,首先需要依据三种炉窑的结构特点、热工机理和运行特性,系统梳理并确定监测参数体系,明确各参数的物理意义、测量范围、精度要求与采样频率。通过计算流体力学与传热学分析进行流场与热场仿真,确定高温区、压力梯度变化区、气流扰动区等关键位置,优化传感器布置位置与安装方式,确保测点既能反映设备整体运行状态,又能精准捕捉局部异常变化。在安装过程中,需考虑传感器的防护措施,如耐高温套管、防尘罩、防振支架等,同时避免测点处于死区或强干扰区域,确保数据采集的可靠性和代表性。

以套筒窑为例,项目组首先梳理了内筒温度、外筒温度、环形通道压力、烟气成分、燃料流量、助燃风比例等核心参数,明确各参数的物理意义、测量范围、精度要求与采样频率。通过计算流体力学与传热学分析进行流场与热场仿真,确定高温区主要集中在内筒中部和外筒出口位置,压力梯度变化区位于环形通道入口处,气流扰动区分布在燃料喷射附近。据此优化传感器布置,在内筒中部和外筒出口各布置2个K型热电偶,在环形通道入口布置3个压力变送器,在燃料喷射附近增加1个气流扰动测点。所有传感器均采用耐高温陶瓷套管、防尘罩和防振支架进行防护,安装位置避开死区和强电磁干扰源,确保数据采集的可靠性和代表性。

3.1.2 构建高可靠的同步采集系统

数据采集系统需采用高可靠的工业级传感器与采集模块,确保在高温、粉尘、振动等恶劣环境下稳定工作。通过分布式采集与集中管理相结合的方式,配合高精度时间同步协议,实现多通道数据的同步采集与时间戳对齐,为后续的多变量关联分析、时空特征提取提供一致的数据基础,避免因时间偏差导致分析结果失真。采集系统应具备断线检测、数据缓存和断点续传功能,防止数据丢失,同时设置数据采集优先级机制,确保关键参数优先传输和处理^[2]。

3.1.3 执行系统化的数据预处理流程

预处理阶段需对原始数据进行清洗、滤波与特征提取,采用滑动平均、卡尔曼滤波、小波变换等方法去除高频噪声和干扰信号。通过统计检验识别并剔除异常值,利用基于物理模型的插值或预测填补缺失数据,避免数据缺口影响诊断精度。结合热工机理分析构建派生特征,如热效率系数、烟气再循环率、温度梯度等,然后进行标准化或归一化处理,消除量纲与量级差异,确保数据质量满足诊断模型的输入要求,提升模型训练与推理的稳定性。

3.2 诊断模型与算法优化

3.2.1 选择合适的建模方法并优化输入空间

根据三种炉窑的动态特性差异,选择合适的建模方法,回转窑可采用深度学习模型捕捉复杂时空关联,竖窑可结合机理模型与随机森林、梯度提升树等数据驱动模型,套筒窑可采用多输出神经网络同时预测多个耦合参数的异常。通过特征选择与降维技术优化输入空间,剔除冗余与噪声特征,提高模型计算效率与泛化能力,避免过拟合与维度灾难。保留模型的可解释性模块,如加入物理约束层或规则推理机制,确保诊断结果符合热工机理。

3.2.2 严格执行模型训练与性能验证流程

模型训练过程需严格遵循数据分层与交叉验证原则,按工况类型和时间序列特性合理划分训练集、验证集与测试集,确保数据分布一致性。采用网格搜索、贝叶斯优化等系统化方法进行超参数优化,提高模型性能。建立多指标评估体系,从准确率、召回率、F1值、均方误差等多角度综合验证模型性能。结合热工机理分析检查输出结果的物理合理性,如温度场分布是否符合传热规律、压力变化是否与气流动力学一致,确保诊断结果可靠。

以回转窑为例,项目组按不同负荷工况分层划分训练集、验证集与测试集,确保数据分布一致。采用贝叶斯优化对学习率、批大小、隐藏层节点数等超参数进行寻优,目标函数综合考虑准确率、召回率与均方误差。在测试集上模型整体准确率达到92%,F1值为0.89,均方误差较优化前降低35%。通过热工机理校验,验证模型输出的温度场分布符合辐射与对流换热规律,压力变化与气流动力学一致。

3.2.3 建立模型的在线更新与漂移检测机制

建立模型的在线更新机制,通过滑动时间窗与增量学习不断吸收新数据,动态调整模型参数,适应设备运行状态的变化。首先,引入概念漂移检测算法,实时监控模型性能变化,当检测到显著漂移时及时触发重训练

流程。同时,保存模型版本历史,支持回滚操作,确保在新数据导致模型性能下降时能够快速恢复到稳定版本。

以竖窑为例,部署滑动时间窗机制,以最近10,000条样本作为增量训练数据,每新增2,000条数据触发一次模型更新。引入Page-Hinkley算法进行概念漂移检测,设定累积误差阈值,当检测到显著漂移时自动启动重训练流程。建立模型版本管理系统,保存每次更新的参数与评估指标,支持一键回滚至历史最优版本。在实际运行中,系统成功在异常早期识别出环形通道局部堵塞,较传统方法提前多个采样周期发出预警。

3.3 系统集成与运维优化

3.3.1 实现诊断系统与企业平台的无缝对接

将数据采集、预处理、诊断模型与企业现有管理平台无缝对接,采用标准化通信协议与接口,实现数据的高效传输与共享。通过分布式计算与边缘计算相结合的架构,将实时诊断任务部署在靠近数据源的计算节点,降低数据传输延迟,满足实时诊断的响应要求。开发专用的可视化界面,针对三种炉窑分别设计监测画面,突出关键参数与故障诊断结果,支持运维人员快速定位问题。

3.3.2 建立全链条的系统监控与维护机制

建立覆盖传感器、数据链路、计算节点与诊断模型的全链条监控与维护机制。首先,制定传感器定期标定与检修计划,如每季度进行一次现场标定,每年进行一次全面校验;对数据链路进行冗余设计,如双网卡、双交换机配置,防止单点故障导致数据中断。此外,对计算与存储资源进行动态分配,根据诊断任务负载自动调整CPU、内存和磁盘资源,建立系统日志与审计机制,记录传感器故障、通信中断、模型异常等事件,便于追溯和分析^[3]。

3.3.3 形成诊断与运维的闭环管理体系

将诊断结果与设备维护、生产调度流程紧密结合,形成闭环管理;诊断系统输出的故障信息直接推送至设备管理模块,生成维护工单并分配给责任人。同时需要定期对诊断系统的性能进行审计与评估,分析误报与漏报原因,并反馈至数据采集与模型优化环节,持续改进系统功能。此外组织运维人员培训,使其熟悉诊断系统的工作原理、操作流程和故障处理方法,确保优化措施能够持续落地并产生实际效益。

以竖窑为例,诊断系统将异常信息封装为标准化事件,通过消息队列推送至设备管理模块,自动生成维护工单。工单包含故障位置、影响范围、建议措施与优先级,运维人员可直接在移动端接收与反馈处理进度。定

期进行系统性能审计,统计各参数的误报率与漏报率,分析原因并调整报警阈值与特征权重。将审计结果反馈至数据采集与模型优化环节,形成闭环改进机制。组织分层次培训,包括系统架构、参数含义、报警逻辑与应急处理流程。通过模拟故障演练,提升运维人员在真实工况下的处置能力,确保优化措施持续落地。

4 总结

本文提出的石灰石矿热工设备状态监测与故障诊断优化方案,通过科学的参数体系设计、高可靠的数据采集、先进的算法模型和完善的运维机制,实现了对回转窑、竖窑和套筒窑运行状态的精准感知与智能诊断。研究表明,该方案不仅能够有效解决恶劣环境下的测量可靠性问题,还能处理多参数强耦合的复杂特性,在保证监测精度的同时兼顾系统的实时性和经济性。

参考文献

- [1] 王砚军,俞美,程鸿机,等.设备状态监测与故障诊断技术的基本原理与方法——声发射技术[J].山东建材,2000,(04):18-19.
- [2] 俞美,王砚军,程鸿机.设备状态监测与故障诊断技术的基本原理与方法——红外测温技术(连载三)[J].山东建材,2000,(03):29-30.
- [3] 程鸿机,俞美,王砚军.设备状态监测与故障诊断技术的基本原理与方法[J].山东建材,2000,(01):17-19.

作者简介:鲁鑫宇(1991.09.04—),男,汉族,籍贯:辽宁省本溪市,大学本科,中级工程师职称,职务:本钢矿业石灰石矿设备工程室主任工程师,研究方向:设备运行,单位:本溪钢铁(集团)矿业有限责任公司石灰石矿。

张文博(1991.07.12—),男,回族,籍贯:浙江龙游县,大学本科,中级工程师职称,职务:本钢矿业公司安全生产监督部(环境保护部)环保管理经理,研究方向:设备工程,单位:本溪钢铁(集团)矿业有限责任公司安全生产监督部(环境保护部)。

孙厚健(1989.11.14—),男,汉族,籍贯:辽宁省普兰店市,大学本科,中级工程师职称,职务:本钢矿业石灰石矿设备工程室主任工程师,研究方向:设备运行,单位:本溪钢铁(集团)矿业有限责任公司石灰石矿。

孟庆学(1988.12.10—),男,汉族,籍贯:辽宁省朝阳市,大学本科,中级工程师职称,职务:本钢矿业石灰石矿生产技术室主任工程师,研究方向:石灰工艺技术,机械工程,单位:本溪钢铁(集团)矿业有限责任公司石灰石矿。