

# 电厂锅炉故障监测及预警系统的研究

冯 强 宋家辰

北方联合电力有限责任公司包头第二热电厂 内蒙古自治区 包头 014030

**摘要:** 电厂锅炉是电力生产核心设备,其安全稳定运行直接决定电力供应可靠性,燃烧、汽水、风烟系统易因复杂工况引发故障,造成重大损失。本文分析锅炉核心系统特性与典型故障成因,结合数据采集、信号处理技术,设计“感知-处理-预警-交互”四层架构系统,构建K-means与CNN融合的优化预警模型,划分三级预警等级。研究表明,该系统可精准捕捉早期故障信号,提升预警及时性与准确性,为电厂锅炉运维提供可靠技术支撑,助力实现智能化运维转型。

**关键词:** 电厂锅炉;故障监测;预警系统

**引言:** 电力工业是国民经济支柱,燃煤发电仍是主力供电方式,电厂锅炉作为核心设备,长期处于高温、高压复杂工况,易出现燃烧不充分、汽包水位异常等故障,导致机组非计划停运,影响供电稳定并造成巨额损失。传统人工巡检效率低、故障发现滞后,难以满足智能化运维需求。因此,开展电厂锅炉故障监测及预警系统研究,构建高效精准的智能预警体系,对保障电力供应安全、降低运维成本意义重大。

## 1 电厂锅炉故障分析及监测预警相关理论

### 1.1 电厂锅炉核心系统及运行特性

(1) 锅炉核心系统组成: 燃烧系统由炉膛、燃烧器、煤粉制备装置构成,核心功能是将燃料化学能转化为热能;汽水系统包含汽包、过热器、省煤器等,负责水的加热、汽化及蒸汽升温;风烟系统由送风机、引风机、烟道及除尘器组成,保障燃烧供氧与烟气净化排放。各系统关键监测部位分别为燃烧器出口、汽包水位计、风机轴承及烟道压力测点。(2) 锅炉运行核心特性: 不同负荷下,锅炉温度、压力、流量等运行参数呈线性或非线性波动,低负荷时参数偏低且稳定性差,高负荷时参数接近设计阈值;高温、高压工况会加速金属部件疲劳、腐蚀,易引发密封件损坏、管道泄漏等故障,是故障防控的关键环节。

### 1.2 电厂锅炉典型故障类型及成因分析

(1) 燃烧系统故障: 燃料燃烧不充分源于煤质波动、配风比例失衡,燃烧器故障多由喷嘴磨损、点火电极老化导致,二者会降低锅炉热效率,还可能引发炉膛结焦、尾部烟道二次燃烧等隐患。(2) 汽水系统故障: 汽包水位异常由给水调节阀门卡涩、排污系统故障引发,过热器超温因受热面结垢、负荷突变导致,这类故障会损坏受热面管道,严重时引发锅炉停运,影响机组连续运行。(3) 风

烟系统故障: 风机振动加剧多为轴承磨损、转子不平衡所致,烟道积灰源于烟气流速过低、除尘设备效率下降,会增大通风阻力,降低燃烧稳定性,甚至导致风机过载跳闸<sup>[1]</sup>。

### 1.3 故障监测及预警核心技术理论

(1) 数据采集技术: 根据监测参数类型选型适配传感器,采用多通道数据采集原理,实现振动信号、温度、压力、流量等关键参数的实时采集,确保数据精准可靠,为故障分析提供基础支撑。(2) 信号处理技术: 通过滤波去噪消除环境干扰信号,利用傅里叶变换、小波分析等方法提取故障特征参数,过滤无效信息,为故障精准识别提供坚实的理论支撑。(3) 预警模型理论: 概述机器学习、深度学习及聚类分析等算法的基本原理,通过挖掘历史故障数据与运行参数的关联关系,明确算法在故障预警中的应用逻辑,实现故障提前预判。

### 1.4 故障预警指标体系构建原则

(1) 科学性原则: 指标选取基于锅炉运行机理和故障发展规律,确保能真实反映锅炉运行状态及故障发展趋势,避免指标冗余或无效。(2) 实用性原则: 结合电厂实际运行工况选取指标,兼顾数据采集的便捷性与后期预警系统的落地实现,降低系统建设与运维成本。(3) 敏感性原则: 指标需对早期微弱故障信号具有较高敏感性,能及时捕捉故障苗头,保障预警的及时性与有效性,为故障处置争取时间。

## 2 电厂锅炉故障监测及预警系统设计

### 2.1 系统总体架构设计

(1) 物理感知层: 结合锅炉核心系统分布,设计科学的传感器部署方案,针对燃烧系统的燃烧器、炉膛,汽水系统的汽包、过热器,风烟系统的风机、烟道等关键部位,合理布置振动、温度、压力等传感器监测点。每个关键

设备至少布置1-2个监测点,重点部位加密部署,确保数据采集的全面性和准确性,为后续处理提供可靠原始数据。(2)数据处理层:设计多模块协同的数据处理流程,包含数据清洗、时空对齐、特征提取三大核心模块。数据清洗模块过滤异常、缺失、冗余数据,采用插值法补充缺失值;时空对齐模块统一各传感器数据的时间戳和空间坐标,消除数据错位问题;特征提取模块结合信号处理技术,提取与故障相关的关键特征参数,实现原始监测数据的预处理和有效信息提取。(3)预警决策层:构建三级协同模块,即故障识别、风险评估、预警发布模块。故障识别模块依托预警模型,对处理后的特征数据进行分析,精准识别故障类型;风险评估模块根据故障严重程度划分风险等级,明确处置优先级;预警发布模块通过多渠道发出预警信号,实现故障的精准识别和分级预警,为运维人员提供决策支撑<sup>[2]</sup>。(4)交互展示层:设计简洁直观的系统操作界面,采用模块化布局,实现三大核心功能:运行参数实时展示,直观呈现各监测点的温度、压力、振动等数据及变化趋势;故障预警提示,通过声光报警、弹窗提醒等方式,及时告知运维人员故障位置、类型及风险等级;历史数据查询,支持按时间、参数类型、故障类型检索历史数据,为故障复盘和系统优化提供依据。

## 2.2 硬件系统设计与选型

(1)传感器选型:根据监测参数类型和锅炉运行工况,选择适配的高精度传感器。振动传感器选用压电式加速度传感器,测量范围0-50g,精度 $\pm 1\%$ ,适配高温环境;温度传感器选用铠装热电偶,测温范围0-1200 $^{\circ}\text{C}$ ,抗腐蚀、抗干扰;压力传感器选用扩散硅式压力传感器,测量范围0-25MPa,精度 $\pm 0.5\%$ ,选型依据贴合电厂高温、高压、强干扰的运行环境,确保监测数据精准。(2)数据采集模块设计:选用16位高精度AD转换器,采样频率可达100Hz,实现多通道数据的高速采集,确保数据采集的实时性;搭配工业级边缘计算网关,具备本地数据预处理功能,可对原始数据进行初步过滤和压缩,减少数据传输压力,实现多通道数据的高效采集和本地预处理<sup>[3]</sup>。(3)传输与存储设备选型:传输设备选用工业级5G/以太网双模传输模块,支持高速数据传输,确保数据传输的实时性和可靠性;存储设备选用工业级固态硬盘,容量不低于1TB,支持断点续传功能,可应对突发断网情况,避免数据丢失,同时满足历史数据长期存储需求。

## 2.3 软件系统设计

(1)数据采集软件:采用C语言开发数据采集程序,适配多类型传感器和采集模块,实现传感器数据的实时

采集、校准和传输,支持多设备协同工作,可根据实际需求设置采集频率和数据传输间隔,具备数据异常报警功能,确保采集数据的可靠性。(2)数据处理软件:开发专用数据处理程序,集成数据清洗、特征提取算法,采用滤波去噪、小波分析等方法过滤噪声数据,精准提取故障特征参数,支持算法参数自定义调整,可根据锅炉运行工况优化处理效果,实现对监测数据的高效处理。(3)预警与交互软件:基于Python开发预警模型运行程序,集成机器学习、深度学习算法,实现故障的自动识别和风险评估;设计可视化用户交互界面,支持故障预警、参数设置、数据查询、报表导出等功能,操作便捷,适配电厂运维人员的使用需求<sup>[4]</sup>。

## 2.4 系统接口设计

(1)硬件接口:设计标准化硬件接口,传感器与数据采集模块采用RS485接口,支持多设备并联接入,确保数据传输的兼容性;采集模块与传输设备采用以太网接口,实现高速数据传输,接口设计符合工业设备接口标准,便于安装和维护。(2)软件接口:采用API接口设计,实现数据处理层与预警决策层、交互展示层的无缝衔接,定义统一的数据交互格式,确保各模块之间的数据实时交互和协同工作,支持模块的独立升级和扩展,提升系统灵活性。(3)外部接口:设计与电厂现有DCS系统的兼容接口,采用ModbusTCP通信协议,实现系统与DCS系统的数据共享和协同控制,可将监测数据同步至DCS系统,同时接收DCS系统的锅炉运行参数,实现一体化运维管理。

## 3 电厂锅炉故障预警模型构建与优化

### 3.1 故障特征提取与优化

(1)多源数据融合处理:整合锅炉振动、温度、压力等多维度监测数据,采用加权融合技术,对不同来源、不同精度的数据进行归一化处理,消除数据量纲差异,弥补单一参数监测的局限性,提升故障特征的完整性和可靠性,为后续特征提取奠定坚实基础。(2)特征提取方法实现:基于傅里叶变换、小波分析等核心信号处理技术,分别提取数据的时域、频域及时频域特征。时域特征重点提取峰值、均值等参数,频域特征通过傅里叶变换获取频率分布规律,时频域特征借助小波分析捕捉信号瞬时变化,全面提取故障相关特征后,初步筛选出与故障关联性较强的关键特征参数。(3)特征优化:采用随机森林算法对初步提取的特征进行筛选,通过计算各特征的重要性得分,剔除冗余、无效特征,保留对故障识别贡献度高的核心特征,有效降低模型输入维度,减少计算量,提升预警模型的运行效率和识别精度。

### 3.2 预警模型构建

(1) 模型选型: 结合电厂锅炉故障类型多样、故障信号复杂且具有时序性的特点, 选择K-means聚类与CNN结合的混合算法构建故障预警模型。K-means聚类用于对故障数据进行初步分类, 减少数据冗余; CNN擅长提取数据深层特征, 二者结合可兼顾故障分类的准确性和特征提取的深度, 适配锅炉故障预警需求。(2) 模型训练: 收集电厂锅炉历史正常运行数据和典型故障数据, 构建标准化数据集并按7:3比例划分训练集与测试集。利用训练集数据对模型进行迭代训练, 通过梯度下降法调整模型参数, 反复优化损失函数, 确定K-means聚类数、CNN卷积层数等关键参数, 确保模型贴合锅炉实际故障规律。(3) 模型验证: 采用测试数据集对训练完成的模型进行验证, 统计模型的故障识别准确率、召回率等指标, 分析模型对不同故障类型的识别精度和泛化能力, 针对验证中出现的识别偏差, 初步调整模型参数, 确保模型能稳定适配实际运行场景<sup>[5]</sup>。

### 3.3 预警模型优化

(1) 参数优化: 以模型预警精度和实时性为目标, 通过控制变量法调整模型关键参数, 优化K-means聚类数、CNN卷积核大小及步长, 平衡模型计算速度与识别精度, 解决模型预警滞后、识别误差较大的问题, 提升模型整体性能。(2) 算法融合优化: 结合LSTM算法的时序数据处理优势, 将其与原有混合模型融合, 优化模型对锅炉运行时序数据的捕捉能力, 增强模型对早期微弱故障信号的识别能力, 有效提升早期故障预警效果, 为故障处置争取充足时间。(3) 预警阈值优化: 根据锅炉不同故障类型的危害程度、处置难度, 设置分级预警阈值, 明确各故障类型对应阈值范围, 避免预警过于灵敏或滞后, 确保预警信号的合理性和实用性, 适配电厂运维实际需求。

### 3.4 预警等级划分与响应机制

(1) 预警等级划分: 结合故障危害程度、发展速度, 将预警分为一般预警、较重预警、严重预警三个等级。一般预警对应轻微异常, 不影响正常运行; 较重预警对应明显故障苗头, 需加强监测; 严重预警对应重大故障隐患, 需立即处置, 明确各等级的判定阈值和特征标准。(2) 预警响应机制: 针对不同预警等级设计差异化响应流程, 一般预警仅发出声光提示, 运维人员定期巡检; 较重预警启动故障定位功能, 推送故障疑似位置及初步排查建议; 严重预警立即触发紧急提示, 同步推送应急处理方案, 确保故障得到及时、精准处置, 降低故障损失。

### 结束语

本文围绕电厂锅炉故障监测及预警系统展开全面研究, 完成系统硬件、软件及接口设计, 构建并优化故障预警模型, 实现对锅炉各类典型故障的精准监测与分级预警。研究有效解决了传统监测方式滞后、精度不足的问题, 验证了系统的实用性与可靠性。但系统在极端工况下的适应性仍需完善, 未来将结合数字孪生、5G等技术优化模型, 拓展功能, 为锅炉安全高效运行提供更全面保障。

### 参考文献

- [1]张栋栋. 火电厂设备状态在线监测与预警诊断系统研发[J]. 设备管理与维修, 2022, 19(10): 150-152.
- [2]胡忠旭, 任少君. 火电机组状态监测与诊断系统设计与实现[J]. 工业控制计算机, 2020, 33(08): 49-50.
- [3]李德, 石林, 孟兆博. 电站设备远程故障预警系统设计[J]. 电站系统工程, 2020, 36(01): 69-70.
- [4]江明良. 电厂锅炉故障监测及预警系统的研究[J]. 建筑技术科学, 2024, 26(03): 59-62.
- [5]梁家瑞. 电厂锅炉故障监测及预警系统的研究[J]. 电力系统及自动化, 2024, 41(07): 97-99.