

锅炉水循环系统安全性分析与故障诊断研究

赵得江

大唐宝鸡热电厂 陕西 宝鸡 721300

摘要：锅炉水循环系统是保障锅炉安全运行的关键环节，其故障可能导致严重的爆管停炉事故。本文系统阐述了自然循环与强制循环锅炉的工作原理与结构组成，从影响因素、常见危害及评估方法三个维度开展了安全性分析。在此基础上，研究了水循环系统的故障模式识别与特征提取技术，探讨了基于多传感器信息融合与智能算法的故障诊断方法。研究表明，采用信息融合与智能算法相结合可有效提升故障识别的准确率与实时性，为锅炉的安全运行提供了理论支撑与技术参考。

关键词：锅炉水循环；自然循环；强制循环；安全性分析；故障诊断

引言：锅炉水循环系统承担着工质输送、热量传递与金属冷却的重要功能，其运行状态直接决定了锅炉的安全性与经济性。随着电站锅炉向高参数、大容量方向发展，水循环系统的流动复杂性显著增加，循环停滞、膜态沸腾、汽塞等故障时有发生，严重威胁设备安全。传统基于阈值判断的故障检测方法存在滞后性，难以满足早期预警需求。因此，开展锅炉水循环系统安全性分析与故障诊断研究，对于预防事故发生、延长设备寿命具有重要意义。本文将从系统原理出发，分析安全性影响因素，探索智能化故障诊断方法，为工程实践提供指导。

1 锅炉水循环系统基本原理与结构

1.1 锅炉水循环系统工作原理

锅炉水循环系统靠工质密度差或外力驱动，让水在受热面流动，实现热量传递与金属冷却。自然循环锅炉利用下降管工质密度大于上升管汽水混合物密度，形成重位压差推动循环，该推动力要克服流动阻力，其大小决定循环流速与倍率。热负荷升高，上升管含汽率、推动力和阻力都增加，推动力不足会引发故障。强制循环锅炉靠循环泵提供动力，工质流速可调，适应热负荷变化强，但循环泵故障会导致循环中断。超临界锅炉在类膜态沸腾区运行传热恶化风险大。维持稳定流动和充足冷却能力是安全核心，需从水动力特性和热负荷匹配评估。

1.2 锅炉水循环系统结构组成

锅炉水循环系统由汽包、下降管等部件构成完整工质循环回路。汽包是中枢，有汽水分离等多种功能，水位稳定影响循环安全。下降管输送饱和水至下集箱，其

截面和布置影响循环推动力。下集箱均匀分配工质，防止热偏差。水冷壁管屏是核心，布置在炉膛四周，工质流动形态复杂。上集箱收集汽水混合物送汽包分离。强制循环锅炉有循环泵及旁路系统，直流锅炉无汽包。部件间水力连接和结构参数匹配决定系统水动力特性和安全边界，设计要严格校核^[1]。

1.3 水循环系统关键参数分析

锅炉水循环系统安全运行由多个关键参数共同决定，它们相互耦合影响安全边界。循环倍率是衡量自然循环可靠性的核心指标，过低易导致膜态沸腾和管壁超温，自然循环锅炉通常要求大于5。循环流速影响管壁冷却效果，设计值在0.5-2.5米每秒，高压锅炉取高值。水冷壁出口含汽率反映汽水混合物干度，过高管壁可能超温，自然循环锅炉通常控制不超过0.4。流动阻力过大会削弱循环推动力，要合理设计管径和弯头。热负荷不均会导致流量偏差和循环停滞。系统压力影响汽水密度差和饱和温度，升高时循环推动力下降。实时监测和综合评判这些参数是安全分析基础。

2 锅炉水循环系统安全性分析

2.1 水循环系统安全性影响因素

锅炉水循环系统安全性受运行参数、设备结构、热负荷条件和水质特性等多因素共同作用且耦合复杂。热负荷上，炉膛火焰中心、燃烧器投运及受热面积灰结渣，会使水冷壁热负荷分布不均。热负荷过高，局部管段蒸发量骤增，出口含汽率升高，传热恶化风险大；过低则流动不稳定。水动力特性方面，并联管组流量分配遵循阻力自平衡原理，易形成正反馈加剧热偏差。结构参数上，下降管与上升管截面比等设计参数决定系统流

动阻力特性和循环推动力裕量。运行条件中,汽包水位波动等操作会扰动系统平衡。水质化学特性影响管内结垢和腐蚀速率,水垢增加热阻,管壁温度升高,严重会爆管。多因素耦合下安全边界识别难,需理论计算与数值模拟结合研究。

2.2 水循环系统常见安全问题及危害

锅炉水循环系统常见安全问题有循环停滞与倒流、汽塞与汽水分层等,各有特定形成条件和危害。循环停滞在并联管组吸热弱的管子内发生,冷却能力丧失,管壁易超温爆管。循环倒流出现在水平或倾斜管组,形成汽水分层,管壁上壁过热。汽塞多在水平或微倾斜管段,阻断水流致局部干烧。膜态沸腾是热负荷超临界热流密度,管壁温度跳跃上升,几分钟可能爆管,破坏性强。水循环脉动使流量和压力周期性振荡,引发机械振动和疲劳损伤。腐蚀和结垢会致管壁减薄和堵塞,不同腐蚀类型破坏形式不同。这些问题轻则降效率,重则爆管停炉,造成重大损失和事故。

2.3 水循环系统安全性评估方法

锅炉水循环系统安全性评估要综合水动力计算、数值模拟和现场监测,从设计、运行和维护层面评判。水动力计算是理论基础,通过求解相关方程获关键参数分布,需建立回路模型,用图解或迭代法求解。复杂结构和非设计工况借助数值模拟,用相关软件开展三维流动与传热耦合分析,识别安全边界。现场监测方面,在水冷壁管壁布置热电偶阵列监测壁温,测集箱进出口压差推算循环流量,用超声波流量计监测流速^[2]。安全性评估建立分级指标体系,一级指标含循环可靠性等,二级指标细化,用层次分析法确定权重,综合评分划分安全等级。定期评估与实时监测结合,可提前预警,指导运行调整。

3 锅炉水循环系统故障模式识别与特征提取

3.1 常见故障模式分类

锅炉水循环系统故障模式可从故障机理、故障部位和故障后果三个维度进行分类,建立系统的分类体系是实现精准诊断的前提。按机理分类,可分为流动故障、传热故障和结构故障三大类。流动故障包括循环停滞、循环倒流、汽塞和水循环脉动,主要源于水动力特性不稳定或热负荷分配严重不均,表现为工质流速异常和流量分配失衡。传热故障主要指膜态沸腾、类膜态沸腾和传热恶化,与热流密度超过临界值有关,表现为壁温异常升高和传热系数骤降。结构故障包括腐蚀减薄、结垢堵塞和疲劳开裂,多由水质不良或长期交变应力引起,

表现为管壁减薄和强度下降。按部位分类,可分为汽包侧故障、水冷壁故障和连接管故障。水冷壁故障发生率最高,约占水循环系统故障的70%以上,主要表现为局部超温爆管,爆口呈纵向撕裂状,边缘锐利。下降管故障主要为流量分配不均或入口产生涡带,导致带汽。集箱故障多为热疲劳裂纹或异物堵塞,影响工质分配均匀性。按后果分类,可分为渐进性故障和突发性故障。渐进性故障如结垢、腐蚀等,发展缓慢但持续恶化,可通过定期检测发现;突发性故障如循环泵跳闸、膜态沸腾等,往往瞬间发生,破坏性大,需要实时监测预警^[3]。

3.2 故障模式识别方法

故障模式识别是连接监测数据与故障类型的关键环节,传统方法与智能方法各有适用场景。基于规则的识别方法将专家经验转化为if-then逻辑规则,例如“某水冷壁管壁温异常升高且相邻管壁温正常,则判定为循环停滞”,该方法简单直观,但难以覆盖复杂工况,规则库维护工作量大。基于模型的识别方法建立水动力数学模型,将实测值与预测值对比,残差超阈值即判定异常,物理意义明确,但模型精度依赖边界条件准确性,建模成本较高。基于统计的识别方法采用主成分分析对高维监测数据降维,提取主要特征后利用聚类算法区分正常与故障状态,适用于工况平稳场景。基于机器学习的识别方法应用广泛。支持向量机通过核函数将数据映射到高维空间构造最优分类面,在小样本故障识别中表现优异。人工神经网络通过多层非线性映射学习故障特征与故障类型的关系,但需大量标记样本训练,存在过拟合风险。深度学习方法如卷积神经网络可自动从时序数据中提取深层特征,适用于复杂故障模式的端到端识别。实际应用中常采用传统方法与智能方法相结合的策略,兼顾可解释性与识别精度。

3.3 故障特征提取

故障特征提取是从原始监测数据里挖掘对故障敏感的信息参数,是构建诊断模型的前置步骤,其质量关乎诊断准确率。时域特征提取是基础方法,直接计算测点信号统计量,如均值反映工质温度或压力基准水平,方差等反映波动幅度,峰值等反映极端工况,偏度和峰度反映数据分布形态,偏离正态分布常预示异常,如膜态沸腾时壁温峰度显著增大。频域特征提取借助傅里叶变换,分析功率谱密度分布,水循环脉动故障常表现为特定频率(0.1至2赫兹)周期性振荡,故障时特定频率成分能量增强。小波分析适用于非平稳信号,通过小波包分解计算各频带能量占比构成特征向量,对瞬态故障信号识别力强。多测点相关性特征也很重要,如相邻水冷

壁管壁温相关系数,循环停滞时故障管与其他管相关性降低。特征提取后需选择和降维,去除冗余无关特征,常用 ReliefF 算法、互信息法和主成分分析法。

4 锅炉水循环系统故障诊断方法研究

4.1 基于多传感器信息融合的故障诊断方法

锅炉水循环系统测点众多,单一传感器信息具有局限性。多传感器信息融合通过整合不同类型、位置的监测数据,可显著提升诊断准确性和鲁棒性。融合在数据层、特征层和决策层三个层面实施。数据层融合对原始数据进行预处理和集成,最大程度保留信息,但计算负担重,适合离线分析。特征层融合先提取故障特征,再合并为联合特征空间并降维后输入分类器,在信息压缩与诊断精度之间取得较好平衡,是目前应用最广的方式。决策层融合最为灵活,各传感器分别做出初步诊断后通过融合规则综合判定,常用方法包括贝叶斯推理、D-S 证据理论和投票法。贝叶斯推理需已知故障统计分布;D-S 证据理论无需先验概率,适用于故障类型不完全明确的场景。针对水循环系统特点,可设计三层融合架构:底层诊断局部传热异常,中层诊断循环流动异常,高层综合评判整体安全状态。

4.2 基于智能算法的故障诊断方法

智能算法为锅炉水循环系统故障诊断提供了自适应、自学习的解决方案,适用于非线性强、耦合度高的复杂故障识别。BP 神经网络是最常用的诊断模型之一,通过误差反向传播训练多层网络,但需大量标记样本且易过拟合。针对水循环脉动等时序相关性强的故障,循环神经网络和长短时记忆网络可捕捉壁温序列的长期依赖关系,对故障早期识别准确率较高。支持向量机通过核函数将低维非线性问题映射为高维线性问题,在小样本情况下泛化能力良好,适合故障样本稀缺的工程实际。极限学习机训练速度快,适合在线诊断。集成学习通过组合多个弱分类器提升性能,随机森林对噪声和缺失数据容忍度强,AdaBoost 使模型聚焦于难分类样本。实际应用中,建议采用遗传算法优化神经网络的初始权值和阈值,克服局部最优问题^[4]。

4.3 故障诊断方法的验证与评估

故障诊断方法的验证与评估需从数据集构建、评价指标和对比试验三方面系统开展。验证数据集应包含正常数据和各类故障数据,来源包括历史记录、模拟试验台和数值仿真。历史数据真实但故障样本稀少,可用过采样技术平衡;仿真可批量生成数据但需与实际对比验证。评价指标从准确性、实时性和鲁棒性三个维度选取。准确率指标包括精确率、召回率和 F1 值,其中召回率在安全性诊断中尤为重要。实时性指标包括诊断延迟时间和模型计算耗时,在线诊断要求推断时间在秒级以内。鲁棒性指标评估模型对噪声的容忍程度,通过添加不同信噪比的噪声观察性能衰减。对比试验应设置传统阈值法、BP 神经网络、支持向量机等作为对照组,采用十折交叉验证减少偶然误差,确保结果可比性。

结束语

锅炉水循环系统安全性分析涉及水动力学、传热学和故障诊断等多学科交叉,是保障锅炉安全运行的核心技术。本文从系统原理出发,分析了自然循环与强制循环锅炉的工作特性,识别了循环停滞、膜态沸腾、汽塞等典型故障模式及其危害机制。在此基础上,建立了基于水动力计算和数值模拟的安全性评估方法,研究了多传感器信息融合和智能算法的故障诊断技术。当前研究仍面临故障样本稀缺、模型泛化能力不足等挑战,未来应探索基于迁移学习的跨工况诊断方法,构建水循环系统数字孪生体,实现从被动报警向主动预测维护的跨越。

参考文献

- [1] 吴绍忠. 关于锅炉循环泵充水系统改造探讨 [J]. 电力系统装备, 2021(12): 85-86.
- [2] 况丹, 张晶香, 李敬海. 反渗透技术在锅炉上水系统中的应用 [J]. 石化技术, 2021,28(9):213-214.
- [3] 宋杰, 张春晖, 王猛. 锅炉加热低负荷水循环的永磁超离合传动控制 [J]. 工业炉, 2023,45(4):52-56.
- [4] 张文祥, 孙志军, 陶丁, 等. 基于 ML-PCA 的锅炉给水系统模态划分 [J]. 能源研究与利用, 2024(3):40-46.