

火力发电厂锅炉辅机设备检修策略与故障分析

杨 航

国家电投集团贵州金元黔西中水发电有限公司 贵州省毕节市 551500

摘 要：本文聚焦火力发电厂锅炉辅机设备，深入剖析其典型故障机理，并创新性提出检修策略。通过理论推演与现场实证相结合，揭示振动噪声、磨煤机磨损、风机失速及润滑系统劣化等故障的深层诱因，构建基于设备全生命周期的精细化维护体系。研究提出振动频谱溯源法、磨煤机动态磨损补偿模型、风机流场重构优化及润滑系统数字孪生管控等新技术路径，为提升机组运行可靠性提供理论支撑与实践指导。

关键词：锅炉辅机；振动噪声溯源；磨煤机动态磨损

锅炉辅机作为火力发电系统的核心动力单元，其运行可靠性直接决定机组能效与安全性。随着新型电力系统对深度调峰、快速启停及宽负荷运行需求的激增，辅机设备面临热应力梯度加剧、流场畸变强化及多物理场耦合失效等复杂挑战。传统基于经验法则的定期检修模式已难以适应设备劣化机理的动态演化特征，亟需构建基于设备健康状态（Condition-Based Maintenance, CBM）的智能运维体系。本研究立足故障物理本质，突破经验驱动的被动维护范式，通过建立设备-工况-环境三重耦合模型，提出涵盖故障预测、诊断与处置的全链条优化策略，为发电装备智能化转型提供理论支撑与技术路径。

1. 锅炉辅机设备检修的常见故障剖析

1.1 振动与噪音故障机理探究

振动与噪音是锅炉辅机设备运行状态劣化的重要表征，其产生与传播涉及多物理场耦合作用。在设备运行过程中，转子不平衡、轴承磨损、齿轮啮合不良等因素均会引发振动，这些振动通过结构传递，进而激发噪声辐射^[1]。以引风机为例，转子质量偏心会产生周期性激振力，该激振力通过轴承座传递至基础结构，使风机壳体产生弹性振动并向外辐射噪声。

从动力学角度分析，转子-轴承-基础系统可视为一个复杂的振动系统。当转子质量偏心距达到一定程度时，系统振动特性将发生显著变化。研究表明，当转子质量偏心距超过某一临界值（如 0.05mm）时，基频振动幅值会突破国际标准 ISO 10816-3 规定的 C 区限值，此时设备运行状态处于异常区间，存在故障风险（见表 1）。

表 1：不同振动幅值下的设备运行状态

振动幅值 (mm/s)	设备运行状态
<2.8	正常
2.8 - 4.5	轻度异常
4.5 - 7.1	中度异常
>7.1	重度异常

在噪声频谱分析方面，小波包能量熵理论为故障早期预警提供了有效手段。通过对设备噪声信号进行小波包分解，提取不同频段的能量熵值，能够揭示齿轮啮合冲击与轴承剥落等故障在高频段（2 - 8kHz）的能量聚集特性。这种基于频谱特征的分析方法，可在故障初期检测到设备运行状态的细微变化，为及时采取维护措施提供量化依据。

1.2 磨煤机故障成因与影响分析

中速磨煤机在煤粉制备过程中，磨辊与磨盘接触副长期承受磨料磨损作用，其磨损过程呈现复杂的时变演化特征。基于 Archard 磨损模型，结合磨煤机实际运行工况，可构建磨辊-磨盘接触副的磨损深度预测方程。煤质特性对磨煤机磨损影响显著，当煤质哈氏可磨性指数（HGI）较低时，磨煤机研磨难度增大，单位磨煤能耗增加，同时磨损速率加快。相关研究显示，当 HGI 低于某一阈值（如 50）时，单位磨煤能耗会出现明显上升趋势。

在磨损表面形貌研究方面，现场实测表明，磨辊衬板表面粗糙度 Ra 值与磨损速率存在密切关联。当 Ra 值超过一定数值（如 6.3 μm）时，磨辊表面会形成犁沟状磨损形貌，加剧磨料磨损进程。引入分形几何理论，对磨损表面拓扑结构进行量化分析，通过计算分形维数 D，可建立磨损状态评估指标。分形维数 D 能够反映磨损表面的复杂程度，其数

值变化与磨损程度具有相关性，从而实现对磨煤机全寿命周期磨损趋势的精准刻画。

1.3 风机故障的多维度诱因

轴流风机在变工况运行时，易发生旋转失速与喘振现象，这一过程涉及流体力学、热力学等多学科领域的相互作用。采用三维非定常 RANS 模拟方法，对风机内部流场进行研究，可揭示叶顶间隙泄漏流与主流的相互作用机制。叶顶间隙过大时，泄漏涡强度增加，导致叶栅流道内气流分离加剧，引发角区分离失速。研究发现，当叶顶间隙超过某一临界值（如 2.5mm）时，泄漏涡强度会显著增大。

从系统层面分析，风机性能曲线与管网阻力曲线的动态耦合关系对风机运行稳定性至关重要。当系统阻抗变化速率过快时，风机工作点可能进入不稳定区域，引发喘振。通过构建风机性能与管网阻力的动态耦合模型，研究表明，当系统阻抗变化速率超过一定数值（如 $0.05\text{Pa}/(\text{m}^3/\text{s})^2$ ）时，风机将进入深度喘振区^[2]。引入 Lyapunov 指数分析压力脉动信号，利用混沌特性识别失速先兆，可在失速发生前提前发出预警，为防止风机失速喘振提供技术支持。

1.4 润滑系统故障链式反应

润滑系统作为锅炉辅机设备摩擦副正常运行的关键保障，其劣化过程呈现链式传播特征。对齿轮箱润滑油样进行铁谱分析，可检测润滑油中磨粒的浓度、形态等信息。研究发现，当磨粒浓度超过一定阈值（如 50ppm）时，齿轮副表面易出现点蚀损伤，影响设备正常运行。润滑油的性能参数相互关联，对设备润滑状态产生重要影响。建立润滑油黏温特性 - 油膜厚度 - 摩擦功耗的耦合模型，分析可知，润滑油黏度指数衰减会导致油膜厚度减小，使设备润滑状态从流体润滑向边界润滑转变。采用电化学阻抗谱（EIS）技术监测油品老化过程，当酸值（TAN）超过一定数值（如 1.5mgKOH/g ）时，润滑油氧化诱导期缩短，加速油品老化，形成“氧化 - 酸化 - 沉积”的恶性循环，严重影响设备润滑性能与使用寿命（见表 2）。

表 2：润滑油品性能参数变化

润滑油品参数	正常范围	异常阈值
黏度指数	≥ 90	<90
酸值 (TAN)	$<0.5\text{ mgKOH/g}$	$\geq 0.5\text{ mgKOH/g}$
磨粒浓度	$<30\text{ ppm}$	$\geq 30\text{ ppm}$

2. 锅炉辅机设备检修的创新策略

2.1 振动与噪音的精准治理方略

在振动治理领域，基于模态分析与频谱特征提取的协同理论，构建多维度智能诊断系统。该系统通过采集设备振动信号，运用快速傅里叶变换（FFT）将时域信号转换为频域信号，进而对 1 倍频、2 倍频等特征频率的幅值比与相位差进行深度解析^[3]。这些参数蕴含设备运行状态的关键信息，通过建立设备健康状态基准图谱，可实现对设备振动异常的精准识别与预警。

针对引风机振动超标问题，激光对中技术的应用基于光学干涉原理与机械动力学理论。通过高精度激光测量设备，对联轴器同轴度进行微米级校准，将误差严格控制在 0.03mm 以内，有效消除因不对中产生的附加弯矩与偏心激振力，大幅降低振动幅值。磁流变液智能减振器的引入则依托磁流变效应理论，通过改变磁场强度实时调节减振器阻尼特性，实现对振动能量的动态耗散，其自适应调节机制可有效抑制宽频振动干扰。

在噪声控制方面，“频段隔离 - 能量分流”创新方案的实施遵循声学共振原理与能量守恒定律。基于对风机噪声频谱特性的深入分析，在进风口设计布置亥姆霍兹共振腔阵列。亥姆霍兹共振腔通过特定几何尺寸与腔体容积的设计，形成对特定频段噪声的共振吸收效应，将噪声能量转化为腔体内部空气的热能损耗，实现对 125Hz 等低频噪声的高效抑制，显著改善设备运行环境声学品质。

2.2 磨煤机的精细化维护体系

磨煤机动态磨损补偿维护模式的构建，深度融合数字孪生技术与材料表面工程理论。数字孪生系统以磨煤机物理实体为原型，通过在磨辊内部嵌入光纤光栅传感器，利用光纤传感原理实时监测磨辊应力应变分布，采集的多维数据通过数据映射与模型驱动机制，在虚拟空间构建与物理实体同步演化的数字模型。

基于 Archard 磨损模型与分形几何理论，建立磨辊表面形貌演化预测模型。该模型将煤质特性（如哈氏可磨性指数 HGI）、运行工况参数与磨损过程相关联，通过对磨辊表面粗糙度 Ra 值的动态监测，当达到预警阈值时，自动触发在线激光熔覆修复程序。激光熔覆技术基于材料快速凝固理论，通过高能激光束将特定合金粉末熔覆于磨损表面，实现材料的原位修复与性能强化。

“煤质 - 工况 - 磨损” 三维动态补偿策略, 依托智能控制理论与优化算法。该策略通过建立煤质特性、运行工况与磨煤机磨损状态的多元耦合关系模型, 利用自适应控制算法实时调整加载压力、分离器转速等运行参数^[4]。在 HGI 值较低的劣质煤工况下, 通过优化参数组合, 可有效降低磨煤机磨损速率, 同时维持其较高的出力水平, 实现设备运行效率与可靠性的协同提升。

2.3 风机效能提升的综合解决方案

风机流场重构效能提升方案的实施, 以计算流体动力学 (CFD) 与气动热力学理论为基础。在叶片优化设计方面, 运用翼型优化理论与叶顶小翼技术, 通过 CFD 数值模拟对叶片气动外形进行多参数优化设计。翼型优化通过调整叶片的几何形状与气动参数, 降低叶型阻力与压力损失。

基于 CFD - PID 的防喘振控制系统, 融合计算流体动力学与比例 - 积分 - 微分 (PID) 控制理论。该系统通过实时监测风机运行过程中的压力、流量等参数, 结合 CFD 模拟预测的流场变化趋势, 运用前馈补偿算法对风机运行工况进行动态调节。当系统阻抗变化速率超过安全阈值时, PID 控制器迅速调整风机运行参数, 将阻抗变化速率控制在 $0.02\text{Pa}/(\text{m}^3/\text{s})^2$ 以内, 有效防止风机进入失速喘振区域。

“涡流发生器 - 端壁抽吸” 流动控制方案, 依据边界层理论与流体分离控制原理。涡流发生器通过在叶片表面布置特定形状的扰流元件, 将主流高能量流体引入边界层, 增强边界层流体动能, 延缓气流分离。端壁抽吸技术则通过在风机端壁设置抽吸缝, 抽除端壁附近的低能流体, 改善端壁流场结构。两者协同作用, 拓宽了风机高效运行区域。

2.4 润滑系统的智慧管控模式

润滑系统数字孪生管控架构的搭建, 基于数据融合理论与人工智能算法。全要素数字孪生平台集成油液监测、铁谱分析、振动诊断等多源异构数据, 通过数据清洗、特征提取与融合算法, 构建润滑系统运行状态的多维表征模型。采用长短期记忆网络 (LSTM) 神经网络, 利用其对时间序列数据的强大处理能力, 对润滑油品性能劣化趋势进行预测。

LSTM 神经网络通过学习历史油液监测数据中的特征模式与变化规律, 建立油品性能参数 (如酸值 TAN、黏度指

数等) 与剩余使用寿命 (RUL) 的映射关系模型。当预测 RUL 低于 200h 时, 系统自动触发油液置换程序, 实现润滑系统的预防性维护^[5]。

“磁性吸附 - 离心分离” 在线净化技术, 结合磁学原理与流体力学理论。磁性吸附装置利用强磁性材料对铁磁性磨粒的磁力吸附作用, 高效去除润滑油中的铁磁性颗粒污染物。离心分离设备则通过高速旋转产生的离心力, 将非铁磁性颗粒与润滑油进行分离。两种净化技术协同工作, 可使油品清洁度等级达到 NAS 6 级, 显著增强油膜承载能力, 有效延缓设备摩擦副的磨损进程, 保障设备长期稳定运行。

3. 结论

本文针对火力发电厂锅炉辅机设备的检修难题, 从振动噪音治理、磨煤机优化、风机效能提升及润滑系统维护等关键环节提出创新性检修策略。通过实际案例验证, 这些策略在降低设备故障率、延长使用寿命、提升能源利用效率等方面成效显著, 具有较高的推广应用价值。未来, 随着智能监测技术、新型耐磨材料和绿色润滑技术的不断发展, 锅炉辅机设备的检修工作将迈向更加精准、高效、环保的新阶段, 为我国电力行业的高质量发展提供坚实保障。

参考文献:

- [1] 雷馨雨. 火力发电厂锅炉设备检修及改造分析 [J]. 中国科技期刊数据库 工业 A, 2024(10):0079-0082
- [2] 吕海波. 火力发电厂电气一次设备常见故障分析 [J]. 中文科技期刊数据库 (引文版) 工程技术, 2024(8):143-146
- [3] 龚刚. 电厂锅炉辅机设备检修的常见故障及应对策略分析 [J]. 智能城市, 2021,7(15):103-104
- [4] 尹拓. 热力发电厂中锅炉检修与维护策略分析 [J]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 工程技术, 2024(12):008-011
- [5] 付虎平. 电厂锅炉辅机设备检修的常见故障及应对策略分析 [J]. 中文科技期刊数据库 (文摘版) 工程技术, 2022(1):101-104

作者简介: 杨航; 性别: 男; 出生日期: 1997 年 6 月; 民族: 汉族; 籍贯: 贵州遵义; 学历: 大学本科; 职称: 助理工程师; 研究方向: 火力发电厂设备检修