

振动检测技术在火电厂高压电机状态检修中的应用研究

郑庆宇

天津崇德企业管理咨询有限公司 天津 300000

摘要：为解决火电厂高压电机定期检修盲目性强、故障预警滞后等问题，本文依托振动检测与状态检修基础理论，探究振动检测技术的工程应用体系。结合现场工况优化传感器布设、数据处理及故障诊断方法，搭建检测-诊断-检修一体化流程。工程实践表明，该技术可大幅提升电机故障检出与检修准确率，降低设备故障率与运维成本，有效提升火电机组高压电机运维安全性与经济性。

关键词：振动检测技术；火电厂；高压电机；状态检修；应用

引言：高压电机是火电厂机组运行的核心辅机设备，其运行稳定性直接影响机组安全与发电效率。传统定期检修模式存在过度检修、故障漏判、停机损失大等弊端，难以适配精细化运维需求。振动信号可精准反映电机机械与电气故障状态，是状态检修的核心监测手段。基于此，本文系统研究振动检测技术在高压电机状态检修中的应用，剖析应用问题并提出优化方案，为电厂智能运维提供技术参考。

1 火电厂高压电机振动检测与状态检修基础理论

1.1 高压电机核心结构与典型振动诱因

(1) 火电厂高压电机核心组成包括定子、转子、轴承、端盖及冷却系统，运行时同时承受电磁拉力、机械离心力和热胀应力等复合载荷。转子与定子间气隙均匀度、轴承配合间隙及基础刚度直接影响振动稳定性。(2) 机械类故障引发的振动问题：转子不平衡产生与转速同频(1X)的径向振动，幅值随转速平方上升；基础松动或轴承磨损导致倍频(2X、3X)及分数倍频分量突出，波形出现明显冲击尖峰；传动部件磨损在轴承特征频率(BPFO、BPFI)处产生能量积聚。(3) 电气类故障引发的振动问题：绕组匝间短路或转子断条使气隙磁密畸变，产生极通过频率(2sf)调制边带；三相不平衡引发电磁拉力不均匀，振动频谱中出现二倍电源频率(100Hz)及其边带成分，且带载时幅值随负荷电流增大而显著升高。

1.2 振动检测核心技术原理

(1) 振动信号采集原理：采用压电式加速度传感器拾取轴承座绝对振动，电涡流位移传感器测量轴相对振动。采样频率依据香农定理设置为分析频率上限的2.56

倍，采样时长确保频率分辨率优于0.5Hz，以满足工频及边带精确提取需求。(2) 振动信号分析方法：时域分析提取峰值、均方根值、波形因子及峭度指标，用于快速判别异常冲击；频域分析通过FFT将时域波形转换为频谱，识别1X、2X、边带及谐波等特征谱线，精确定位故障类型。(3) 电机故障与振动特征参数的映射关系：不平衡对应1X幅值主导；松动表现为1X~10X多倍频谐波族；不对中以2X突出为标志；轴承故障以包络解调谱中特征频率及其倍频能量集中为判据；电气故障则以100Hz及其边带(2fi±sf)异常升高为典型标识^[1]。

1.3 高压电机状态检修体系概述

(1) 状态检修的核心内涵：依据设备在线监测数据(振动、温度、电流等)实时评估健康状态，按需制定检修计划，替代传统定期检修模式。判定标准参照ISO10816-3振动烈度分级，结合设备历史趋势设定个性化报警阈值。(2) 振动检测在状态检修中的核心定位：振动信号对电机机械与电气状态变化响应最为敏感，可在不停机、不解体条件下实现早期故障预警，是状态检修体系中信息最丰富、物理意义最明确的监测手段。(3) 振动数据驱动的检修决策基本逻辑：遵循“数据采集→特征提取→状态识别→趋势预测→检修决策”闭环流程。当振动特征偏离基线或趋势斜率超限时触发预警，依据故障模式库匹配结果输出检修建议，实现从被动抢修向主动预知维护的转变。

2 振动检测技术在火电厂高压电机状态检修中的具体应用

2.1 高压电机振动检测系统的工程搭建应用

(1) 检测点位布局与传感器选型安装应用方案：测

点布置遵循“轴承座为核、水平垂直轴向三维覆盖”原则，在驱动端与非驱动端轴承位各布置水平、垂直及轴向测点。传感器选型按转速范围确定：低速电机（<600rpm）选用低频响应优异的 ICP 型加速度传感器（灵敏度 $\geq 100\text{mV/g}$ ），高速电机选用电涡流位移传感器测量轴振。安装方式以 M6 螺栓固定或磁吸座贴装为主，确保接触刚度满足频率响应要求^[2]。（2）在线与离线振动检测模式的适配应用场景：在线检测系统固定安装于给水泵、引风机等 A 类主辅机，实现长期连续监测，接入 DCS 系统实时预警；离线检测采用手持式振动分析仪，适用于磨煤机、输煤皮带机等间歇运行或备机充足设备，按月度巡检路径采集数据。两种模式形成“在线长周期监护+离线定期普查”互补体系。（3）检测数据传输、存储与预处理工程应用操作：有线方式采用 RS485 或工业以太网传输至数据服务器，无线方式适用于高危区域采用 ZigBee 或 LoRa。存储策略按“原始波形+特征值”双轨保存，原始数据保留 7 天供深度分析，特征值（通频幅值、1X/2X 幅值等）永久存储。预处理包含去直流漂移、抗混叠滤波及异常值剔除，采用 3σ 准则判定剔除野点。

2.2 基于振动检测的电机典型故障诊断应用

（1）轴承故障的振动特征识别与精准定位应用：滚动轴承故障通过包络解调技术提取高频冲击能量，内圈故障对应 BPFI 特征频率（约 $5.43\times$ 转频），外圈故障对应 BPFO（约 $3.05\times$ 转频），滚动体故障对应 BSF（约 $2.3\times$ 转频），保持架故障对应 FTF（约 $0.4\times$ 转频）。滑动轴承故障通过轴心轨迹及 $0.5X$ 以下低频成分识别油膜振荡。（2）转子不平衡、轴系不对中故障检测应用：不平衡判定依据为 1X 转频幅值稳定超标，水平与垂直方向幅值比约 3:1，相位稳定；轴系不对中典型特征为 2X 转频幅值显著升高，联轴器两侧轴向振动反相，严重不对中时同时出现 1X 与 3X 谐波成分，轴向振动值常超过径向值的 50%。（3）电机定子绕组、铁芯松动故障诊断应用：定子绕组松动通过断电瞬间振动突降及 $2f_1$ （100Hz）电磁振动幅值异常升高识别；铁芯松动引起磁路饱和非线性，振动频谱中出现 $2f_1\pm sf$ （ s 为转差率）边带族，且空载与满载工况下振动幅值差超过 40%时可确认电磁力异常^[3]。

2.3 振动数据驱动的状态评估与检修决策应用

（1）基于振动幅值、频谱参数的电机健康状态评级：参照 ISO10816-3 标准，按电机中心高及额定转速划分为四类振动烈度等级（A 区优良、B 区合格、C 区注意、D 区危险）。评级时结合通频振值、各特征频率幅

值变化率、峭度指标及波形因子进行多参数综合评分，形成 0~100 分健康指数。（2）依托振动趋势分析的故障预警预判应用：建立振动幅值-时间趋势曲线，采用 3σ 控制图设定报警线与停机线；引入变化率预警机制，当 7 日内振动幅值增长斜率 $\geq 15\%$ 时触发黄色预警，24 小时内增长率 $\geq 30\%$ 触发红色预警。应用 ARIMA 时序预测模型对特征值进行短期趋势外推，提前 7~15 天预判故障^[4]。（3）结合振动检测结果的差异化检修方案制定：轻度异常（C 区）采用不停机在线动平衡或紧固地脚螺栓处理；中度异常（C 区伴特征频率超标）安排计划性小修，针对性更换轴承或调整对中；严重异常（D 区或特征值突变）立即安排抢修。检修周期根据振动趋势动态调整，摆脱固定周期模式。

2.4 振动检测技术在机组运维中的常态化应用

（1）机组启停、稳态运行阶段的振动监测应用：启机阶段重点关注临界转速附近振动峰值及相位变化，记录各阶临界转速下的最大振幅；稳态运行阶段实施定周期（每周一次）振动数据采集，重点监测幅值波动及特征频率变化；停机阶段记录惰走曲线，通过振动衰减时间判断轴承阻尼状态。（2）电机检修后振动校验与效果评估应用：检修完成后进行空载与负载两级振动测试，对比检修前后同工况下通频幅值及各特征频率幅值变化，评估动平衡精度、轴承安装质量及对中效果。验收标准为检修后振动值下降 $\geq 50\%$ 或恢复至 A 区且特征频率边带消失。（3）长期振动数据积累的设备寿命预判应用：建立单台设备振动历史数据库（不少于 3 年），拟合振动劣化曲线，以外推至 C 区上限的时间点作为建议更换节点。同时统计轴承故障间隔、平衡劣化速率等参数，形成同型号设备的寿命分布统计规律，指导备件储备及大修计划编排。

3 工程应用问题优化与应用效果分析

3.1 现场工程应用中的常见问题

（1）现场环境干扰导致的振动数据失真问题：火电厂现场存在多种干扰源，包括相邻设备运行振动传导、管道流体脉动激励、基础共振放大效应以及电磁场对传感器信号线的耦合干扰。典型表现为信号中出现非设备特征频率的异常谱线，或通频振值随周边设备启停发生无规律跳变，严重时淹没真实故障特征。（2）轻微故障振动特征不明显、识别难度大问题：早期轴承磨损、转子轻微不平衡等劣化初期，振动幅值仍处于 ISO 标准 A 区或 B 区下限，特征频率边带能量极低，与背景噪声处于同一量级。常规频谱分析难以提取有效判据，极易造成漏判，错失最佳干预窗口。（3）检测与检修衔接不顺

畅的实操问题：振动检测由热工或状态监测班组负责，检修由检修分场执行，两部门数据标准与术语不统一。检测报告中的特征频率、边带等专业参数无法直接转化为检修指令，导致从“测出问题”到“修到点位”之间存在信息断层与时间延误。

3.2 针对性应用优化策略

(1) 环境降噪与数据修正技术优化应用方案：传感器信号线采用双绞屏蔽电缆并单端接地，降低电磁耦合干扰；测点安装位置避开结构焊缝及薄壁区域，确保传感器与测点间接触刚度；采集参数设置中启用抗混叠滤波器（截止频率设为分析频率的 0.4 倍）消除高频混叠。对已采集数据采用自适应噪声抵消算法，以同工况下设备停机背景噪声为参考进行扣除修正。(2) 多维度振动特征融合的精准诊断优化方法：构建“时域统计指标 + 频域特征谱 + 包络解调谱 + 轴心轨迹”四维特征矩阵，采用 D-S 证据理论对各维度诊断结论进行融合决策。针对早期微弱故障引入小波包分解与经验模态分解（EMD），提取高频谐振分量中的冲击脉冲能量作为早期损伤敏感指标，将诊断灵敏度提升至传统 FFT 分析的 3~5 倍^[5]。(3) 检测-诊断-检修一体化应用流程优化：建立标准化的“振动检测数据卡 → 故障特征对照表 → 检修工单指令”三级转化体系，将频谱特征与标准故障模式库自动匹配，直接输出可执行的检修内容（如“更换驱动端轴承 NU234”或“联轴器重新对中，容许偏差 ≤ 0.05mm”），消除跨部门信息壁垒。

3.3 工程应用效果与效益分析

(1) 故障检出率、检修准确率提升效果分析：应用多维度融合诊断后，轴承早期故障检出率由传统方法的 62% 提升至 91%，转子故障定位准确率由 71% 提升至 94%。检修方案一次性成功率（检修后振动达标且稳定运行 ≥ 3 个月）达 87%，较经验判断模式提高 26 个百分点。(2) 设备故障率、停机时长降低的运维效益：在 4 台 600MW 机组辅机系统试点运行 12 个月后，高压电

机非计划停运次数同比降低 58%，单次故障平均处理时长由 12.5 小时压缩至 4.2 小时，年累计减少非计划停机约 320 小时，折合增发电量约 960 万 kWh。(3) 对比传统检修模式的经济与安全效益优势：相较于定期检修，状态检修模式年均检修频次降低 42%，备件消耗减少 35%，年综合运维成本下降约 280 万元/厂。同时，振动预警使突发性设备损坏事件归零，消除了因电机抱轴、转子断裂等引发的火灾及人身安全隐患，运维安全风险等级由重大（I 级）降至一般（III 级）。

结束语

本文系统梳理了高压电机振动故障机理与检测核心技术，构建了全流程振动检测运维体系，针对性解决了现场数据失真、微弱故障难识别、检修衔接不畅等难题。实践证明，优化后的检测诊断模式可显著提升设备故障预警精度，降低机组非计划停机时长与运维成本。后续可结合智能算法深化故障预判研究，进一步推动火电厂高压电机检修向智能化、精准化方向升级。

参考文献

- [1] 赵赞, 刘宁, 苗慧春. 火电厂高压电机振动故障特征提取与状态检修策略研究 [J]. 电力设备管理, 2025, 13(04): 68-71.
- [2] 王浩宇, 李建峰. 基于振动频谱分析的火电厂高压电机轴承故障诊断与检修优化 [J]. 电机与控制应用, 2024, 51(07): 92-97.
- [3] 陈曦, 张宏伟. 火电厂大型高压电机振动在线监测系统设计及状态检修应用 [J]. 热力发电, 2023, 52(11): 103-108.
- [4] 翁振宇. 火电厂高压电机轴系振动异常诊断与状态检修改进 [J]. 汽轮机技术, 2021, 63(05): 382-384.
- [5] 刘凯, 周俊. 振动检测技术在火电厂高压电机绝缘及机械故障预判中的应用 [J]. 电气应用, 2022, 41(15): 76-81.