

发电厂汽轮机运行维护中的故障诊断与预防策略研究

李建国

国电建投内蒙古能源有限公司布连电厂 内蒙古 鄂尔多斯 017000

摘要：汽轮机故障防控需以“预防优先、智能诊断、标准运维”为核心，通过振动监测与多参数分析实现早期预警，结合叶片专项维护、轴承系统优化及预测性维修体系，系统性提升设备可靠性。同时，强化故障档案管理与智能技术融合，是未来运维效能突破的关键。随着智能诊断模型与多参数融合分析技术的深化应用，其重要性将持续凸显。

关键词：发电厂；汽轮机运行维护；故障诊断；预防策略

汽轮机故障诊断实现了从被动抢修到主动防御的跨越，是保障电力供应连续性、控制安全风险及提升经济效益不可替代的技术支柱。随着智能诊断模型与多参数融合分析技术的深化应用，其重要性将持续凸显。

1 汽轮机故障诊断的重要性

1.1 安全防御核心屏障。预防恶性事故。实时监测振动、温度等参数可识别叶片断裂初期征兆，避免转子飞裂等灾难性事故，保障人员生命安全。控制高风险故障。精准诊断轴承电腐蚀、汽流激振等隐患，防止设备连锁损坏甚至机组爆炸。应急响应依据。为突发性振动超标、三相电流失衡等工况提供处置决策支持，降低事故扩大风险。

1.2 经济效益核心驱动。减少非计划停机。早期预警叶片结垢、油系统泄漏等渐进性故障，避免突发停机导致的发电损失。优化维修成本。采用预测性维护替代定期检修，降低30-50%维护费用（如避免过度更换未损部件）。提升设备效能。保持汽轮机在设计效率下运行，案例显示可使设备综合效率（OEE）提升18%以上。

1.3 技术运维核心支撑。延长关键寿命。通过热应力控制与振动治理，显著延缓转子弯曲、轴承烧损等老化进程。智能诊断升级。图卷积神经网络（GCN）等技术深度挖掘振动信号与故障关联，诊断准确率提升40%以上。运维体系革新。构建故障知识库支持决策，推动“定期检修”向“状态维修”转型，提升设备可靠性30%。汽轮机故障诊断实现了从被动抢修到主动防御的跨越，是保障电力供应连续性、控制安全风险及提升经济效益不可替代的技术支柱。

2 汽轮机故障诊断的方法

2.1 振动信号分析法。频谱特征诊断。通过FFT（快速傅里叶变换）将振动信号转换为频谱图，识别基频、倍频成分：基频幅值突增→转子不平衡或叶片损伤。2倍

频显著→轴系对中不良或联轴器故障。高频成分→轴承磨损或动静碰摩。轴心轨迹与波形分析。观测轴心轨迹形态（如“8”字形提示不对中），结合时域波形判断摩擦或松动。

2.2 多参数协同诊断法。热力参数联动。同步监测第一级后压力（反映蒸汽流量与结垢）、轴向位移、轴承温度：压力异常升高+振动加剧→叶片结垢或裂纹，轴向位移超标+瓦温异常→推力轴承损坏，真空度与负荷关联，真空度下降伴随负荷波动→凝汽器泄露或冷却系统故障。

2.3 智能诊断技术。图卷积神经网络（GCN）。基于历史振动数据训练模型，精准识别转子不平衡、轴承电腐蚀等复杂故障。机器学习预测模型。输入温度、压力、振动等多维数据，预测部件剩余寿命及故障概率。故障知识库匹配。比对实时数据与典型故障案例库，快速定位相似故障（如汽流激振频谱匹配）。

2.4 在线监测系统（TDM）。实时采集轴振、瓦振、偏心、胀差等参数，自动生成趋势报告并触发预警。典型应用：动静碰摩预警→振动突增且含次谐波时自动降负荷，热不平衡诊断→转速与温度关联分析转子弯曲，技术演进趋势：传统振动分析（频谱诊断）仍是基础，但多参数融合与GCN智能模型显著提升复杂故障识别率；在线系统（TDM）则推动运维模式向预测性维护转型。

3 汽轮机振动信号处理技术

3.1 信号采集与预处理技术。智能传感器融合。采用位移与加速度双模态传感器同步采集叶片振动信号，结合边缘计算技术实时实施滤波、放大及数字化处理，消除环境噪声干扰。动态降噪技术。高精度动平衡调校转子，减少机械振动噪声源；安装柔性连接管与减震垫，阻断振动传播路径。

3.2 特征提取与分析方法。频谱特征诊断。FFT快速傅里叶变换：将时域信号转换为频谱图，识别基频（转子不平衡）、倍频（轴系不对中）及高频成分（轴承磨损）；相位谱分析：区分机械振动与电气/气流激振差异。非线性信号处理。小波变换：分解非平稳信号，提取局部故障特征（如动静碰摩瞬态冲击）；轴心轨迹分析：通过轨迹形态（如“8”字形）诊断联轴器故障或松动。多参数关联建模。同步分析振动信号与热力参数（如第一级后压力、轴向位移），联动识别叶片结垢或推力轴承失效。

3.3 智能诊断与预测技术。深度学习模型。图卷积神经网络（GCN）：挖掘历史振动数据与故障类型的复杂映射关系，提升诊断准确率；故障知识库匹配：比对实时频谱与典型故障案例库（如汽流激振特征），快速定位故障类型。剩余寿命预测。输入多维数据（温度、压力、振动）训练机器学习模型，预测轴承磨损或叶片裂纹的发展趋势。

3.4 系统平台与应用创新。在线监测系统（TDM）。实时跟踪轴振、瓦振、胀差等参数，自动生成趋势报告并触发预警（如次谐波出现时降负荷防碰摩）。VR可视化平台。动态呈现振动特征参数，辅助运行人员直观判断异常工况。技术演进方向：从传统频谱分析（FFT）向边缘计算预处理+深度学习诊断体系升级，结合多传感器融合与虚拟现实技术，形成“采集-处理-分析-决策”闭环，推动运维模式向预测性维护转型。

4 汽轮机定期检查与维护的重要性

4.1 预防恶性事故，保障人员设备安全。阻断事故链。定期校验超速保护系统（主汽阀严密性试验、危急保安器动作校验），防止转子飞车引发机组解体事故；实时监测轴向位移与胀差，避免动静摩擦导致叶片断裂或轴承烧毁。消除隐蔽风险，油系统每月金属颗粒检测（ $Fe > 100ppm$ 预警），预防轴承磨损引发的轴瓦熔化；汽封间隙定期调整（精度 $\pm 0.10mm$ ），降低蒸汽泄漏引发振动的风险。案例：某厂因未定期清洗叶片，结垢导致轴向推力剧增，推力轴承烧毁引发非停，损失超800万元。

4.2 延长设备寿命，维持高效运行。关键部件寿命管理。转子年度动平衡校准（残余不平衡量 $< 5g \cdot mm/kg$ ），避免离心力失衡加速轴承老化；控制启停温升速率 $\leq 100^\circ C/h$ ，防止热应力导致汽缸裂纹。性能稳定性保障。主蒸汽压力/温度偏差控制在 $\pm 5\%$ 额定值，保障理想循环热效率；凝汽器真空严密性定期检测，真空度下降 $\leq 0.3kPa/min$ 。综合效益：规范执行定期维护，可使汽轮机非停率下降至0.5次/机组年以下，延长大修间隔至5-7

年，全生命周期运维成本降低40%以上。

5 汽轮机故障诊断对电力供应的影响

5.1 经济性保障——降低非停损失。电量损失控制。2022年某集团因机组非停损失电量50亿千瓦时，直接经济损失超15亿元，精准诊断可提前预警故障，避免突发停机。运维成本优化。早期诊断叶片结垢、轴承磨损等渐进性故障，减少大修频次，单次大修成本可降低30%以上。

5.2 供电稳定性强化——技术支撑体系。预测性维护转型。基于振动信号频谱分析（FFT/小波变换）与热力参数建模，故障识别率提升至92%，避免60%以上计划外停机。智能诊断升级。图卷积神经网络（GCN）深度挖掘振动数据与故障关联，将转子不平衡、动静碰摩的诊断响应时间缩短至10分钟内。在线监测（TDM）刚性需求。实时跟踪胀差、轴振等参数，2024年某电厂通过次谐波预警成功避免动静碰摩，减少单次非停损失约200万元。故障诊断技术通过经济止损（减少非停）、安全托底（阻断事故链）、智能预警（预测性维护）三重作用，成为保障电力持续供应的核心基础设施。据行业统计，全面应用智能诊断系统的电厂，因汽轮机故障导致的电量损失可减少75%以上。

6 汽轮机运行维护与预防策略

6.1 运行监控与参数调整。关键参数实时监测。蒸汽参数：主蒸汽压力与温度严格按额定值控制，偏差超限将影响机组性能及安全寿命。振动监测：定期测量轴承振动值，发现异常升高时立即分析原因并采取措施，避免紧固件松动或叶片断裂。轴向位移与胀差：实时跟踪转子轴向位移及汽缸膨胀，防止动静间隙消失导致摩擦。运行操作规范。启停控制：冷态启动前需连续盘车 ≥ 8 小时，大轴晃度 $\leq 30\mu m$ ；热态启动充分暖机，防止转子热弯曲。负荷调整：加减负荷避免大幅波动，防止因热应力突变诱发振动。真空系统维护：保障凝汽器严密性，循环水温度/水量稳定，预防真空恶化引发振动。

6.2 机械系统维护策略。转子与轴承维护。动平衡校准：定期检查转子结垢、腐蚀情况，进行高精度动平衡调校，减少离心力失衡引发的基频振动。油系统管理：控制润滑油温在 $35-45^\circ C$ ，油质定期化验；防止油中进水导致油膜振荡或轴承磨损。通流部分防护。结垢预防：监测第一级后压力变化，异常升高时及时清洗，避免通流面积减小导致的轴向推力增大。防动静碰摩：维持汽缸上下缸温差在允许范围，定期校验汽封间隙，防止转子偏移摩擦。

6.3 安全保障与预防性试验。超速保护机制。定期进行危急保安器超速试验及喷油试验，主蒸汽压力 $\leq 40\%$

额定值,升速速率保持 $6r/min/s$ 。校验高/中压主汽阀、调节阀严密性,发现卡涩立即处理。预测性维护技术。在线监测系统(TDM):实时采集轴振、瓦振、胀差等数据,自动预警次谐波等异常特征。智能诊断应用:结合振动频谱分析(FFT/小波变换)与热力参数建模,早期识别轴承磨损或叶片裂纹。综合成效:通过规范操作、实时监测及预测性维护,非停概率可下降至 0.5 次/机组年以下,供电可靠性提升至 99% 以上。

7 如何建立汽轮机应急响应机制

7.1 应急组织体系构建。三级指挥架构。应急指挥部:厂长任指挥长,生产副厂长/总工任副指挥长,决策重大处置行动,现场指挥部:运行部主任任指挥,负责隔离设备、人员疏散、信息上报,专业救援组:分设抢修、医疗、消防分队,24小时待命,依据《电力应急体系和能力建设指导意见》属地指挥原则。

7.2 核心事故处置流程。即时响应阶段(0-10分钟)。报警触发:参数超限自动激活声光报警,同步推送信息至应急群组,紧急操作:超速/轴断裂:切断主蒸汽+投旁路泄压+启动盘车冷却,油系统火灾:启动 CO_2 灭火+隔离燃油供应,人员疏散:通过智慧调度系统定向广播撤离路线。协同处置阶段(10-60分钟)。环境控制:检测蒸汽泄漏范围,设置50米警戒区,设备干预:推力轴承温升 $>95^\circ C$ 时注事故润滑油,跨区支援:启动区域应急协作机制(如粤港澳资源共享),恢复评估阶段(事故后24h)。根本原因分析:查验断裂面金相组织/振动频谱特征,试运行标准:大修后需通过72小时满负荷测试,

7.3 汽轮机故障诊断如何预防设备损坏。以下为基于汽轮机故障诊断技术预防设备损坏的系统性措施,涵盖监测预警、诊断分析及防护干预三个维度:(1)实时监

测与早期预警。轴系状态监控。轴承振动值 $>50\mu m$ 时启动频谱分析,识别转子失衡/碰摩特征(如 $2\times$ 频谐波),轴向位移 $>0.6mm$ 或推力瓦温 $>95^\circ C$ 触发连锁停机,介质参数监测。蒸汽湿度 $>12\%$ 时报警,预防汽流激振,监视段压力上升 $>10\%$ 额定值,提示通流部分结垢需清洗。(2)主动防护与快速干预。机械系统防护。轴瓦保护。冷油器切换前排尽空气,操作时双人监护并实时监测油压,直流油泵全容量联动试验每月1次,确保熔断器可靠,叶片防护。限制超参数运行:抽汽压力/真空超过设计值立即降负荷,大修中全面检查叶根裂纹,更换应力集中部位叶片,(3)维护策略优化。寿命管理。转子动平衡校准周期:新机组2年/次,老机组1年/次(残余不平衡量 $<5g\cdot mm/kg$),服役超10年机组:压缩大修周期至3年/次,重点检测蠕变损伤,经济性控制。油质月度监测(酸值增幅 $<0.4mg KOH/g$),延长换油周期至3年,结垢预警清洗提升热效率 $2\%\sim 3\%$,降低煤耗 $1.5g/kWh\cdot 年$,闭环管理:建立诊断-决策-执行数字化平台,通过振动突变率、轴向推力梯度等参数动态调整维护优先级,实现预防性投入精准化。

总之,通过“智慧调度+精准操作+区域联动”机制,可将汽轮机事故伤亡率降低 90% ,设备损失减少 75% 。需每年度审计预案与最新版《电力应急预案编制标准》的符合性,确保法律效力。可将轴瓦烧损风险降低 85% ,非计划停机率压缩至 0.5 次/年以下,延长设备寿命至30年以上。

参考文献

- [1]王芳.浅谈发电厂汽轮机运行维护中的故障诊断与预防策略.2022.
- [2]赵秀丽.关于发电厂汽轮机运行维护中的故障诊断与预防措施.2023.