

汽轮机设备故障诊断与预防探讨

胡晓江¹, 苏阳¹, 潘杭², 金仲超³

1. 杭州汽轮动力集团股份有限公司, 浙江 杭州 310000

2. 浙江透平进出口贸易有限公司, 浙江 杭州 310000

3. 杭州汽轮新能源有限公司, 浙江 杭州 310000

DOI:10.61369/EPTSM.2025050005

摘 要： 汽轮机作为电力、化工等领域的核心动力设备，其运行稳定性直接影响生产系统的安全与效率。本文针对汽轮机常见的振动异常、油系统故障、叶片损伤等问题，系统分析故障产生的机理与诊断方法，从状态监测、数据解析、预防策略三个维度构建“诊断－预警－维护”一体化管理体系。通过融合振动分析、油液检测、红外热成像等技术手段，为提升汽轮机设备可靠性提供实践参考。

关 键 词： 汽轮机；故障诊断；状态监测；预防维护；设备可靠性

Discussion on Fault Diagnosis and Prevention of Steam Turbine Equipment

Hu Xiaojiang¹, Su Yang¹, Pan Hang², Jin Zhongchao³

1. Hangzhou Steam Turbine Power Group Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310000

2. Zhejiang Turbine Import and Export Trading Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310000

3. Hangzhou Steam Turbine New Energy Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310000

Abstract： As a core power equipment in the fields of electricity and chemical industry, the operational stability of steam turbines directly affects the safety and efficiency of production systems. This article systematically analyzes the mechanisms and diagnostic methods of common faults such as abnormal vibrations, oil system failures, and blade damage in steam turbines. It constructs an integrated "diagnosis-warning-maintenance" management system from three dimensions: condition monitoring, data analysis, and prevention strategies. By integrating technical means such as vibration analysis, oil detection, and infrared thermal imaging, it provides practical references for improving the reliability of steam turbine equipment.

Keywords： steam turbine; fault diagnosis; condition monitoring; preventive maintenance; equipment reliability

引言

汽轮机通过将蒸汽热能转化为机械功，驱动发电机或其他负载运转，广泛应用于火力发电、核能发电、工业驱动等场景。据行业统计，汽轮机故障导致的停机事故占电力系统非计划停运总量的35%以上，单次停机平均造成经济损失超百万元。随着机组向高参数、大容量发展，其结构复杂性与运行条件严苛性显著提升，传统的“事后维修”模式已无法满足现代工业对设备可靠性的要求。故障诊断与预防技术通过对设备运行状态的实时监测和数据分析，提前识别潜在故障并采取干预措施，可使汽轮机故障发生率降低40%以上，平均寿命延长15%~20%。本文基于汽轮机结构特性与运行规律，系统梳理典型故障类型及诊断方法，构建科学的预防体系，为设备安全稳定运行提供技术支撑。

一、汽轮机主要故障类型及成因分析

（一）振动异常故障

振动可作为汽轮机运行状态的关键表征，超80%的故障可经由振动信号得到反映，一般常见的振动异常有转子不平衡状况、

不对中问题、动静摩擦现象、油膜涡动及振荡等情况，转子不平衡常由转子材质不均匀，还有叶片结垢、磨损而引起质量分布失衡，其表现是振动幅值随转速的升高而递增，1倍频分量占据主导，其占比超过70%，某300MW机组鉴于末级叶片积盐现象，其不平衡量达到了500g·mm，振动数值超出标准至0.15mm，

作者简介：

1. 胡晓江（1981.03-），男，汉族，浙江永康人，本科，杭州汽轮动力集团股份有限公司，工程师，研究方向：汽轮机仪控；

2. 苏阳（1990.02-），男，汉族，浙江建德人，本科，杭州汽轮动力集团股份有限公司，工程师，研究方向：汽轮机、燃气机仪控；

3. 潘杭（1982.02-），男，汉族，浙江杭州人，本科，浙江透平进出口贸易有限公司，工程师，研究方向：汽轮发电机组、燃气轮机发电机组设备集成成套、燃气轮机热障涂层的过

程控制；

4. 金仲超（1985.10-），男，汉族，浙江绍兴人，本科，杭州汽轮新能源有限公司，工程师，研究方向：汽轮机、燃气机仪控。

造成停机保护开启。不对中源于联轴器安装偏差、机组热变形引发的轴心线偏移，分为2倍频较为突出的平行不对中，还有1倍频跟2倍频一起存在的角度不对中，数据呈现出，约30%的振动故障出自不对中，热态不对中所占比例超60%，动静摩擦与轴系挠度增大、气缸变形以及隔板松动的情况有关，引发转子跟静子部件发生接触摩擦，振动信号处出现类似1/2X、1/3X的分数谐波，与此同时温度异常上扬，情况严重时诱发转子热弯曲现象，陷入不良循环，油膜涡动与振荡乃是滑动轴承油膜不稳定所催生的自激振动，若转速达到并超过2倍临界转速，很容易出现，振动的频率大概为0.4 - 0.5倍频值，也许会导致轴瓦受损^[1]。

（二）油系统故障

汽轮机润滑油系统担当润滑、冷却、密封等功能角色，其故障对机组安全构成直接威胁，主要有油质变质、油压异常及调速系统卡壳情况，油质容易劣化，主要是水分（>0.1%）、杂质（NAS8级以上）超出正常范围，引起油膜强度降低，达到>0.2mgKOH/g，引发部件出现腐蚀问题，某机组因油箱呼吸器失去应有功效，油内水分占比为0.3%，造成轴瓦乌金出现磨损失效。因油泵出力不足、滤网堵塞或管路泄漏，造成油压异常现象，润滑油压力低于0.08MPa这一数值，危急遮断对应的油压低于1.0 MPa，说不定会引起轴瓦烧坏或停机故障，调速系统卡涩，源于伺服阀、错油门等部件被油中颗粒污染，也或是被油泥黏附，导致调门动作出现迟缓乃至失控情形，统计情况显示，大概25%的汽轮机非计划停机与此事关联。

（三）叶片与通流部分故障

汽轮机能量转换，核心部件非叶片莫属，面临高温、高压状态且承受交变载荷作用，常有的故障是叶片断开、隔板走形、结垢与被腐蚀，叶片断裂很多时候是由疲劳损伤，也就是应力集中处裂纹萌生，即湿蒸汽区被水滴冲蚀，以及振动共振，即叶片固有频率与激振频率耦合引起，某机组低压缸末级叶片共振时振幅达0.5mm，运行1.2万小时的过程结束后断裂。隔板变形是高温蒸汽发挥作用隔板刚度的欠缺，说不定安装间隙配置不当造成动静间隙消失无踪，引起摩擦磨损情况的出现，超临界机组鉴于蒸汽温度达到566℃以上，隔板出现变形的风险急剧增大，结垢与腐蚀是因为蒸汽质量不佳，引起盐分在叶片表面堆积，再不然含硫蒸汽诱发了晶间腐蚀，引起通流效率下降，增添转子失去平衡的风险，要是结垢厚度增加0.1mm，机组效率近似降低1%。

（四）汽阀与气缸故障

汽阀及气缸的故障主要有主汽阀/调门滞涩、气缸变形与漏汽现象、膨胀不顺畅，主汽阀/调门卡涩这一状况，是阀杆与阀套间隙被氧化皮或杂质卡住的结果，造成阀门无法完全开启或闭合，对机组负荷的调节产生干扰，于高温高压蒸汽构成的环境里，阀杆氧化速度可增至0.02mm/千小时。气缸变形及漏汽是由于启停阶段温度梯度过大，引起气缸热应力不均，结合面平整度突破标准界限，引起蒸汽泄露，若漏汽量有1%的增长，机组热耗率近乎上升0.5%，膨胀若不通畅，乃是滑销系统卡涩致使气缸自由膨胀受限，造成附加应力的形成，引起轴承座偏移或是动静间隙出现变动，某机组鉴于纵销存在卡涩现象，膨胀差超过既定标准到

5mm，诱发振动失稳。

二、汽轮机故障诊断技术与方法

（一）振动监测与分析技术

振动监测与分析的技术包含在线振动监测体系、频谱分析方法、相位分析手段以及模态分析途径，在线振动监测系统在诸如轴承座、转子这类关键部位安设磁电式或压电式传感器，即时采集振动相关的位移、速度、加速度信号，设置包含正常值、预警值、停机值的三级报警界限，振动信号24小时连续记录与趋势分析，是300MW以上机组要实现的。频谱分析采用傅里叶变换，让振动时域信号转成频域图谱，认定特征频率相关分量，若1倍频成为主导，就是不平衡现象，有2倍频突出情况说明是不对中，0.若检测到0.4 - 0.5倍频则是油膜振荡，分数次谐波揭示或许是摩擦或者松动造成。采用键相传感器，相位分析得以测量振动相位，分辨不平衡位置（相位角和转子高点相呼应）与故障类型，在出现不对中故障情形的时候，相位差受负荷变化影响显著，差值>30°，模态分析采用的激励手段为锤击法或激振器，测得转子-轴承系统固有频率及振型，判定共振隐患，临界转速周边，需将振动幅值控制到<0.05mm^[2]。

（二）油液分析技术

油液分析技术涉及到理化性能核验、油液铁谱探究还有光谱检测，定期实施的理化性能检测，检测润滑油黏度（40℃时应达ISOVG46标准）、水分、酸值、闪点等指标，测定油质的劣化级别，新油投入运行前，必须实施真空滤油处理，颗粒度需实现NAS6级达标。油液铁谱分析借助显微镜对油中磨粒的形态、大小与成分加以观察，判定磨损位置与类别，钢铁磨粒若尺寸超过5μm，往往暗示轴承或者齿轮发生了磨损，粒径2 - 5μm的铜粒或许源自轴瓦，纤维颗粒反映出密封件老化这一状况，光谱分析依靠原子吸收光谱，测定油里Fe、Cu、Cr等金属元素的浓度，搭建油内金属元素浓度走势曲线，若Fe元素浓度按月计算的增量>5ppm，必须排查轴承与叶片是否存在磨损。

（三）温度与压力监测技术

温度跟压力监测所采用的技术有红外热成像、蒸汽参数监测、膨胀监测，红外热成像对诸如气缸、阀门、管道这类部件实施红外扫描，查找温度分布是否存在异常，轴承温度宜小于90℃，定子线圈温度宜小于120℃，若温差跨越10℃界限，提示有故障迹象。在蒸汽参数监测过程里，实时采集主蒸汽/再热蒸汽的压力（偏差值±5%）、温度（偏差±10℃）及流量数据，鉴别通流部分是否结垢，利用线性位移传感器测量气缸与转子的膨胀量实施膨胀监测，让胀差符合设计范围要求一般是±3mm，启停阶段要把控温升率小于5℃/min，杜绝膨胀不顺。

（四）无损检测与离线诊断

超声波检测、渗透检测和内窥镜检查属于无损检测与离线诊断范畴，超声波检测针对叶片、转子等关键部件开展超声波探伤工作，找出内部裂纹，每2万小时应检测叶根、轴肩等应力集中的部位一次，借助渗透检测对叶片表面、螺栓等部件宏观缺陷展开检

查,就如疲劳裂缝、腐蚀的坑洼,检测启动前要把表面氧化皮除去,保障缺陷显现明晰,实施内窥镜检查,从孔洞或预留通道插入内窥镜,审视通流部分积垢问题、叶片破损、隔板变形等现象,高压缸检查周期为每3年一次,一年之中要对低压缸检查一次。

三、汽轮机故障预防策略与维护措施

(一) 基于状态的预测性维护

基于状态做预测性维护,得建立状态评估模型,还需制定有差异的维护周期,把控关键参数,创立状态评估模型应聚合振动、温度、油液等多维度数据,采用机器学习算法(就如BP神经网络)去构建设备健康度评估模型,实现7至30天的故障预警,某发电集团应用该技术之后的阶段,汽轮机未计划停机次数出现52%的下降。按照设备运行时间、工况条件和状态监测结果去制定差异化维护周期,动态调控维护间隔时长,像高负荷机组,油液分析周期定为15天,每日对振动监测数据开展分析;备用机组实施每月一次的静态检查,关键参数把控需严格把控蒸汽质量(钠含量 $<5\mu\text{g}/\text{kg}$,二氧化硅未达 $20\mu\text{g}/\text{kg}$,抑制叶片的结垢与腐蚀现象;实现润滑油过滤精度为NAS6级,使水分控制低于0.1%水平;轴承回油温度不得超出 65°C 。

(二) 安装与调试阶段的质量控制

安装调试阶段的质量把控,具体有精密找正、转子平衡和间隙的调整内容,借助激光对中仪完成联轴器的精密找正,实现平行偏差 $<0.05\text{mm}/\text{m}$ 的精准控制,角度偏差须小于 $0.05\text{mm}/\text{m}$ 的数值,热态找正应考量机组运行后的温度变形补偿量。就转子平衡而言,动平衡精度要达到ISO G2.5级,余留的失衡量值:转速为 $3000\text{r}/\text{min}$ 的机组,残余不平衡量得小于 $500\text{g}\cdot\text{mm}$,若机组转速为 $1500\text{r}/\text{min}$,残余不平衡量得小于 $1000\text{g}\cdot\text{mm}$,首次启动前需开展 $500-800\text{r}/\text{min}$ 低速动平衡的相关操作,严格按照设计要求对间隙进行调整,设定动静间隙,如轴封的间隙大小为 $0.3-0.5\text{mm}$,隔板径向的间隙在 $1.5-2.5$ 毫米范围,达成既避免摩擦发生,又降低漏汽的损失^[3]。

(三) 运行过程中的优化操作

运行时段的优化操作有启停曲线的优化、负荷波动的管理以

及异常工况的处置,优化启停曲线需制订恰当的升速、升负荷曲线,防止转速急速跨越临界转速,当振动幅值达到 0.1mm 以上要降速,维持高压缸内外壁温差低于 50°C ,需保证法兰与螺栓的温差 $<30^{\circ}\text{C}$ 。负荷波动的控制要杜绝机组频繁改变负荷,避免叶片承受的交变应力超出合理范围,需定时针对调峰机组开展低周疲劳寿命评估,开始处理异常工况的时候,要是出现振动快速激增($>0.03\text{mm}/\text{min}$)、轴承温度瞬间陡升($>5^{\circ}\text{C}/\text{min}$)等现象时,即刻下调负荷开展检查;要是遇到水冲击情形,赶紧停机且启动疏水阀功能,禁止采用强行启动方式。

(四) 检修与改造措施

检修跟改造手段有定期的大修活动、技术方面的改造以及备品备件管理事项,按照“逢修必改”的原则实施定期大修,开展对运行 $8000-12000$ 小时机组的全面检修,着重替换老化的密封部件、磨损的轴瓦,应对叶片损伤难题,对调速系统进行校准。技术改造实施对有设计瑕疵部件的升级,就像把传统轴瓦换成可倾瓦,此时稳定性提升30%,对叶片喷涂耐磨涂层,以此延长寿命两倍,于油系统增添在线滤油装置,油质达标率提升到95%,备品备件管理提出,关键备件(诸如叶片、主轴、伺服阀)需选用原厂件,存储环境得维持干燥清爽,相对湿度 $<60\%$ 为宜,定时开展防锈处置与性能核验。

四、结语

对汽轮机故障进行诊断与预防是个系统性项目,应整合设备构造特性、运转规律及监测的相关数据,创建“监测-诊断-维护”闭合管理体系,采用像振动分析、油液检测这样的技术手段,可有力识别逾90%潜在故障;实施预测性的运维方针,可让设备可用率提高至95%及以上,极大降低运维花销。伴随物联网跟人工智能技术相融入,汽轮机故障诊断要往“全息感知、智能预警、自主决策”方向实现转变:采用布置无线传感器网络达成全状态的监测工作,采用数字孪生技术模拟故障发展进程,依靠大数据分析改良维护方针,最终实现汽轮机设备达成“零故障”运行状态的目标,为工业生产安全高效运转筑牢根基。

参考文献

- [1] 王勇.大型汽轮机振动故障诊断与处理技术[M].北京:中国电力出版社,2020.
[2] 张伟,李明.汽轮机油系统故障分析及预防措施[J].热力发电,2021,50(3):120-125.
[3] 刘军,赵刚.300MW汽轮机叶片故障诊断与寿命评估[J].动力工程学报,2020,40(5):356-361.