

汽轮机轴承振动异常排查与油系统精细化治理技术总结

黄 睿

陕西华电榆横煤电有限责任公司榆横发电厂 陕西 榆林 719000

摘 要：汽轮机轴承振动异常是影响机组安全稳定运行的常见故障，其成因复杂，排查周期长，治理难度大。本文从振动故障的机理与类型出发，系统分析了轴承振动与润滑油系统之间的内在关联，明确了油质劣化、油温波动及油压不稳定对轴承运行状态的直接影响路径。在此基础上，总结了从振动信号采集、频谱特征识别到油系统逐项排查的规范化排查流程，并提出了涵盖油质管控、油温油压精细化调节及轴承载荷分配优化的系统治理方案。实践表明，该技术路线可有效缩短振动故障排查周期，降低轴承故障率，提升机组运行可靠性，为同类型机组振动问题的快速诊断与长效治理提供了可借鉴的技术方案。

关键词：汽轮机；轴承振动；油系统；精细化治理；故障排查

引言：汽轮机轴承振动异常是火电机组运行中最常见的设备故障之一。轻微的振动超标会加速轴承磨损、降低机组经济性；严重的振动失稳则可能引发轴瓦烧毁、转子弯曲甚至断轴毁机等灾难性事故。据行业统计，约60%的汽轮机轴承振动故障与润滑油系统的状态劣化直接或间接相关——油质恶化导致油膜承载能力下降，油温波动破坏油膜稳定性，油压异常改变轴承载荷分配，最终以振动的形式表现出来。本文从轴承振动的机理出发，系统梳理油系统对轴承振动的影响路径，总结了一套以油系统精细化治理为核心的振动异常排查与治理技术方案。

1 汽轮机轴承振动异常的机理与类型

1.1 振动分类与故障机理

汽轮机轴承振动可按多个维度进行分类。按频率特征可分为同步振动（1X，与转子转速同频）、次同步振动（0.4~0.48X，常见于油膜振荡）和 multiples 频振动（2X、3X等，多见于不对中与松动故障）；按方向特征可分为径向振动与轴向振动；按振动稳定性可分为稳态振动、突发性振动和波动性振动。各类振动的物理机理存在本质区别：质量不平衡产生的激振力与转速平方成正比，表现为工频振动随负荷升高而增大；转子弯曲或热弯曲在热态下产生新的不平衡量，振动随运行时间延长呈上升趋势；轴承油膜振荡是半速涡动的进一步发展，当转速升至临界转速的两倍以上时，油膜力的非线性特性可能激发大幅低频振动，具有突发性强、幅值大的特点，对机组安全构成严重威胁^[1]。

1.2 轴瓦温度与润滑状态的关系

轴瓦温度是反映轴承润滑状态最直接的运行参数。润滑油膜的正常建立依赖于足够的润滑油流量和适当的

油温：油膜厚度不足时，轴颈与轴瓦乌金层直接接触，摩擦热量急剧增加，轴瓦温度异常升高。轴瓦温度每上升10℃，乌金层的疲劳强度约下降15%~20%。润滑状态恶化到一定程度时，首先表现为轴瓦温度的持续爬升，随后才出现振动的明显增大，温度变化通常比振动变化超前约5~15min，这一时间差为早期预警和干预提供了窗口。轴瓦温度与振动之间存在“温度爬升—振动增大—温度再爬升”的正反馈机制——振动增大后油膜受挤压变形、局部压力升高、油温进一步上升、黏度下降、油膜变薄，形成恶性循环，最终导致乌金烧毁或轴颈磨损等严重事故。

1.3 异常振动的典型频谱特征

不同故障类型具有各自独特的频谱特征，频谱分析是振动故障诊断的核心手段。质量不平衡的频谱特征为1X分量突出，幅值稳定，随转速平方增长，轴心轨迹呈圆形或椭圆形。转子不对中的频谱特征为2X分量明显，轴向振动较大，严重时可能出现高次谐波。动静碰磨的频谱特征为1X加高次谐波，波形存在削顶畸变，轴心轨迹不规则且方向不稳定。轴承座松动的频谱特征为 multiples 频分量丰富，方向性显著，振动幅值随负荷变化波动大。油膜振荡的频谱特征为0.4~0.48X低频分量突发性出现，幅值大（常超过1X分量），与负荷和油温密切相关，一旦发生难以通过运行调整快速消除。各类故障的频谱特征存在部分重叠，诊断时需结合时域波形、轴心轨迹和运行参数进行综合判断，单一频谱特征不足以确诊。

2 油系统对轴承振动的影响机理

2.1 润滑油系统构成与功能

汽轮机润滑油系统是一个集供油、调节、净化和冷却于一体的复杂系统，由主油泵、交流辅助油泵、直流

事故油泵、冷油器、滤油器、顶轴油系统及排烟系统等组成。主油泵由汽轮机主轴驱动,正常运行时向各轴承提供压力油;交流辅助油泵在启停阶段和主油泵出力不足时投入运行;直流事故油泵作为最后一道安全屏障,在厂用电中断时保证轴承供油^[2]。冷油器通过冷却水调节润滑油温度,维持油温在40~45℃的设计范围;滤油器连续过滤油中的固体颗粒;顶轴油系统在盘车和启停阶段向轴承底部注入高压油,将转子顶起形成静压油膜,避免低速摩擦;排烟系统维持轴承箱微负压,防止油气外逸和水分侵入。各部件协同工作确保轴承在任何工况下均能获得充足的清洁润滑油。

2.2 油质劣化对轴承运行的影响

润滑油的关键质量指标包括黏度、水分、颗粒度、酸值和破乳化度,各项指标的劣化均会直接影响轴承运行状态。黏度是油膜承载能力的决定因素,黏度下降使油膜变薄、承载能力降低,轴颈与轴瓦的最小油膜厚度减小,在同等载荷下更容易发生边界摩擦;黏度升高则增加摩擦功耗,轴瓦温度上升。水分超标(>100mg/L)会破坏油膜的连续性和强度,加速油品氧化和添加剂消耗。颗粒度超标(>NAS 8级)时,固体颗粒随润滑油进入轴承间隙,对轴颈和轴瓦表面产生磨粒磨损,当颗粒尺寸接近油膜厚度时会造成瞬时油膜破裂。酸值升高反映油品老化程度,高酸值油品对轴瓦乌金产生腐蚀,降低轴承寿命。油质劣化的根源包括轴封漏汽侵入、油箱负压异常吸入湿气和粉尘、滤油系统失效等。

2.3 油温/油压波动与振动的关系

油温与油压的稳定性直接决定了轴承油膜的工作质量,其波动对振动的影响机制复杂。油温过高时润滑油黏度下降,油膜变薄,轴承的承载能力和抗振阻尼同步降低,转子在同样不平衡力下的振动响应显著增大;油温过低时黏度升高,油膜过厚,转子在油膜中的运动自由度增大,容易激发油膜涡动。冷油器调节品质不良或冷却水流量波动引起的油温周期性变化,会直接造成振动的同步波动。油压过低时轴承供油不足,轴颈在轴承中的偏心距增大,最小油膜厚度减小,严重时导致轴瓦干磨;油压波动则引起轴承载荷分配的不稳定,各轴承的支撑刚度不断变化,转子动力特性恶化。油压的稳定性依赖于油泵出口压力的恒定和系统管道阻力的稳定^[3]。

3 振动异常的排查方法

3.1 常规排查流程

振动异常排查应遵循“数据确认→频谱分析→参数关联→历史追溯→假说验证”的五步标准化流程。第一步确认振动数据的可靠性,排除传感器故障和信号干

扰导致的误报。第二步进行时域和频域分析,提取振动的特征频率及各频率分量的幅值,初步判断可能的故障类型。第三步开展运行参数关联分析,将振动变化与负荷、转速、油温、油压、轴瓦温度、真空度等参数进行趋势对比,识别与振动同频同相波动的关联参数。第四步追溯运行历史,调查振动异常首次出现的时间、当时的工况条件及近期是否有设备检修或操作变动。第五步建立故障假说并通过针对性验证确认,如通过现场动平衡验证不平衡故障、通过油质化验验证油质问题、通过间隙测量验证轴承磨损。五步之间形成迭代闭环,当验证结果不支持当前假说时返回修正,通过层层筛查逼近故障根因。

3.2 油系统排查重点

油系统排查应覆盖油质、冷油器、滤油器、排烟系统和顶轴油系统五个环节。油质排查包括现场快速检测和实验室全分析,现场检测侧重黏度、水分和颗粒度,实验室分析补充酸值和破乳化度,取样应涵盖油箱、各轴承回油管和滤油器进出口。冷油器排查包括检查进出口油温、冷却水流量及温控阀动作情况,确认冷油器无堵塞、无内漏。滤油器排查以进出口压差和滤芯状态为核心,压差超过0.15MPa时滤芯可能已失效需更换。排烟系统排查确认轴承箱负压维持在-0.5~-2.0kPa的正常范围,负压不足会导致油气积聚和水分侵入。顶轴油系统排查包括油泵出口压力、各轴承顶轴油压和管路是否泄漏。油系统排查的深度和广度往往决定了振动问题的最终诊断率^[4]。

3.3 典型排查案例

某600MW机组#3轴承振动在运行中突发性增大,通频振动由60μm升至130μm,频谱显示0.43X低频分量占主导。经五步流程排查,排除了质量不平衡和轴承松动可能;油系统排查发现润滑油含水量达280mg/L(标准<100mg/L),颗粒度NAS 11级(标准≤8级),冷油器出口油温在35~52℃范围内周期性大幅波动。进一步追溯发现轴封供汽压力偏高导致轴封漏汽量增大、水分侵入油系统,同时冷油器温控阀卡涩。更换滤芯、干燥脱水、修复温控阀后,油质恢复标准,油温稳定在40~43℃,#3轴承通频振动降至58μm,低频分量消失。该案例表明,油系统状态是振动故障排查中不可忽视的关键环节。

4 油系统精细化治理方案

4.1 油质管控精细化

油质精细化管理的核心是从“定期化验”升级为“在线监控+趋势预警+精准干预”的主动管理模式。建立定期取样化验制度,关键指标(黏度、水分、颗粒

度)每月1次,全分析每季度1次,各指标设定明确的预警值和报警值,当指标达到预警值时启动原因排查,避免其持续劣化至报警值。优化在线滤油装置运行策略,主机滤油机采取连续运行方式,不设固定停运周期;增设一台移动式高精度滤油机作为应急补充,当颗粒度快速升高时投运强化过滤。针对轴封漏汽这一水分侵入的主要途径,将轴封供汽压力由原28~30kPa优化整定至22~25kPa,同步调整轴封抽气器运行参数,使轴承箱负压稳定在-1.0~-1.5kPa,既防止水分侵入又不致使油气外逸超标。

4.2 油温/油压精细化调节

油温精细化调节的核心是消除冷油器的调节死区和响应滞后。根据机组负荷和季节变化制定油温分段目标值:夏季40~43℃、冬季38~41℃,控制偏差不超过 $\pm 2^\circ\text{C}$,将温控阀的PID参数重新整定,比例增益由原1.2提高至2.0,积分时间由60s缩短至30s,提高冷油器对负荷变化的响应速度。建立冷油器定期切换清洗制度,每台冷油器连续运行不超过3个月即切换备用组并安排清洗^[5]。油压稳定化的关键措施包括:将主油泵出口溢流阀整定压力由原1.8MPa调整为2.0MPa,提高系统油压储备,确保各轴承进油压力不低于0.12MPa;对于系统管道阻力局部增大的管段,查明原因进行清理或更换,使润滑油在轴承前的压力稳定在设定值的 $\pm 5\%$ 以内。

4.3 轴承载荷分配与顶轴油系统优化

轴承载荷分配优化的目标是消除各轴承间的载荷不均。通过测量各轴承的瓦温分布和油膜压力分布,结合转子-轴承系统动力学计算,评估各轴承的实际承载比例,对载荷偏差超过 $\pm 20\%$ 的轴承进行标高调整。轴承标高的调整量通过现场顶丝精密调节实现,每次调整量控制在0.05~0.10mm,调整后运行4~8小时待热膨胀稳定后再测量复核。顶轴油系统优化从油泵出口压力、各支

路流量分配和控制逻辑三个方面入手:将顶轴油泵出口压力由原12MPa整定为14MPa,提高顶轴油系统的出力裕度;根据各轴承转子的静载重量调整各支路节流阀开度,使各轴承实际顶起高度均匀一致;启机过程中顶轴油泵与盘车实现联锁,盘车停止时顶轴油自动投入,盘车运行正常后延迟10min再停顶轴油泵,全程保证转子与轴瓦不出现干摩擦接触。

结束语

汽轮机轴承振动异常排查是一项涉及转子动力学、润滑理论和故障诊断技术的综合性工作。本文从振动机理出发,分析了油系统对轴承振动的多维影响路径,建立了“机理认知→路径分析→系统排查→精细治理”的闭环技术体系。研究表明,润滑状态劣化是振动故障的深层原因之一,将排查重心从转子本身适度前移至油系统,可显著缩短诊断周期、提高治理成效。随着机组深度调峰常态化,轴承振动面临的运行环境更加复杂,建议后续将振动监测数据与油系统运行参数纳入统一的数据分析平台,建立基于大数据关联分析的振动预警模型,实现从“故障后诊断”向“风险前预警”的跨越。

参考文献

- [1]赵冀平.火电厂汽轮机异常振动故障排查技术应用[J].电力设备管理,2026(4):122-124.
- [2]陈建勋.深度调峰下的火电机组变负荷过程蒸汽参数反馈特性研究[J].电器工业,2023(10):45-47,70.
- [3]胡明,许天瑶,刘忠轩,等.超临界W火焰锅炉深度调峰运行试验研究[J].锅炉技术,2024,55(5):21-25,78.
- [4]杨林,兰云霞,罗国民,等.汽轮机轴承异常振动分析处理[J].东方汽轮机,2022(2):75-78.
- [5]鲁鹏飞,薛宁.超临界锅炉超低负荷调峰运行稳燃改造方案研究[J].热力发电,2022,51(1):87-92.