

汽轮机振动故障诊断与处理措施探讨

高鑫

广东大唐国际雷州发电有限责任公司 广东湛江 524200

【摘要】汽轮机作为电厂及工业驱动的核心旋转机械，其运行稳定性直接影响生产安全与经济效益，振动异常是汽轮机最常见的故障表象，通常由转子质量不平衡、动静碰摩、油膜振荡、热变形及基础松动等因素引发。本文深入分析了上述典型振动故障的机理与特征频谱，结合现场案例，系统总结了基于频谱分析、轴心轨迹监测及相位检测的综合诊断方法，并针对不同故障类型提出了精准的动平衡校正、轴系对中调整及运行参数优化等处理措施，旨在提升汽轮机运行可靠性与延长设备寿命。

【关键词】汽轮机；振动故障；处理措施

Discussion on Diagnosis and Mitigation Measures for Steam Turbine Vibration Faults

Gao Xin

Guangdong Datang International Leizhou Power Generation Co., Ltd., Zhanjiang, Guangdong 524200

【Abstract】As the core rotating machinery in power plants and industrial drives, steam turbines' operational stability directly impacts production safety and economic efficiency. Vibration anomalies represent the most common fault manifestation, typically caused by rotor mass imbalance, dynamic-static friction, oil film oscillations, thermal deformation, and foundation loosening. This paper conducts an in-depth analysis of the mechanisms and characteristic spectra of these typical vibration faults. Based on field case studies, it systematically proposes a comprehensive diagnostic approach integrating spectral analysis, shaft trajectory monitoring, and phase detection. Tailored mitigation measures—including precise dynamic balance correction, shaft alignment adjustments, and operational parameter optimization—are recommended for different fault types, aiming to enhance steam turbine reliability and extend equipment service life.

【Key words】 steam turbine; vibration fault; mitigation measures

引言：

随着现代工业向大型化、高速化发展，汽轮机组的运行工况日趋复杂，振动问题已成为威胁设备安全运行的首要因素，据统计，约70%的汽轮机非计划停机均由异常振动引发，不仅加剧零部件磨损，严重时甚至导致断轴、毁瓦等恶性事故。因此，深入探讨汽轮机振动故障的内在机理，总结高效、准确的诊断策略，并制定切实可行的处理措施，对于保障机组组长周期安全稳定运行具有重要的工程实践意义。

1. 案例分析

某火电厂一台1000MW汽轮机组采用高、中、低压三缸结构，额定转速为3000r/min，在一次振动故障中，1号轴承的轴振值突然上升至 $192\mu\text{m}$ （超过跳机保护设定值 $250\mu\text{m}$ ，触发紧急停机），在降负荷过程中，振动值短暂回落至 $130\mu\text{m}$ 后再次攀升，机组被迫紧急停机。停机后检修发现，轴承表面存在明显碰摩痕迹，轴承间隙偏小，转子弯曲度达到 0.22mm ，远超正常允许值，轴承回油温度升高至 75°C 。

技术人员在经过系统诊断后发现，该故障主要是由于动静碰摩、转子热变形和油膜振荡共同作用造成的，动静碰摩使局部过热引起转子热弯曲，油膜振荡破坏了油膜稳定性，

这三个因素互相叠加、互为因果，使得振动持续攀升且难以随负荷降低而有效恢复，所以应当采取相应的解决办法。另外，汽轮机油泥积碳和轴承刚性下降也加速了机组老化，成为振动故障的次要因素。

2 汽轮机振动故障的原因分析

2.1 动静碰摩故障分析

动静碰摩属于汽轮机运行中常出现的振动故障，主要指高速旋转的转子同其周边的封、轴封和隔板等静止部件发生接触或摩擦，该故障会使振动幅值快速增大，在严重情况下还会造成转子弯曲、部件损坏乃至整机毁坏等恶性事故。其产生机理主要源于转子出现热变形、发生不对称、汽缸进水或者保温效果不好，这些原因使得汽缸产生变形。当转子和静子之间的间隙消失时，会发生局部碰摩，并产生巨大的切向摩擦力^[1]。

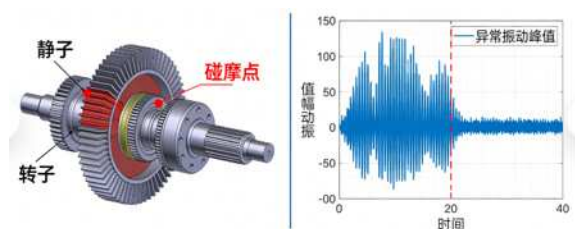


图1 动静碰摩故障

动静碰摩产生的振动特征表现为工频振动幅值的不稳定波动,通常会伴随高次谐波分量,频谱图中除了基频分量外,也会出现2倍频、3倍频甚至更高倍频的成分,如图1所示。如果碰摩发展成整周摩擦,振动可能会突然剧烈增加,且很难进行控制,这类故障通常具备较大的随机性、非线性特征,振动相位会发生不规则的变化,轴心轨迹呈现出不规则的形状,有时甚至出现反进动现象。

2.2 转子热变形故障分析

转子热变形会引起汽轮机振动异常,主要因为转子受到热不均匀或温度场分布改变的影响而出现不对称的热膨胀,使转子发生弯曲或挠曲变形,该变形破坏了转子原有的动平衡状态,使机组在运行中产生随负荷或时间改变的振动。转子材质分布不均、内部残留应力较大、汽缸内进入冷气或冷水、轴封部件出现故障、动静摩擦造成局部温度过高是造成热变形的主要原因,如图2所示。

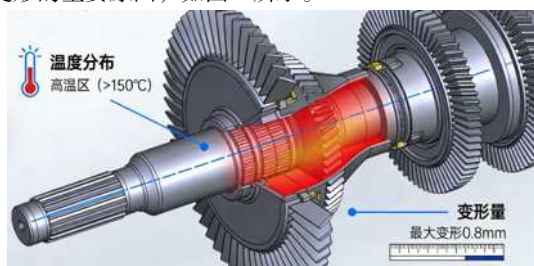


图2 转子热变形故障

热变形的振动特征表现为时间和负荷相关的明显特性,一般在机组带负荷运行一段时间之后,振动开始逐渐增大,并随着负荷的增加而加剧,但当负荷降低或停机冷却后,振动经常会恢复到比较低的水平;频谱分析显示,热变形产生的振动主要表现为基频分量,高次谐波分量一般不太明显。此外,振动的变化趋势和转子的温度场变化有紧密联系,并且具有可逆性;而轴心轨迹呈现椭圆形且比较稳定,相位变化速度较慢但是具有规律性,一般会在负荷或者转速发生改变时出现单向漂移^[2]。

2.3 油膜振荡故障分析

油膜振荡属于滑动轴承支撑的汽轮机在运行中特有的一种自激振动现象,其本质是因为轴承油膜动力特性不稳定,在特定条件下引起了转子的失稳振动。转子工作转速如果超过一阶临界转速的两倍,油膜力和转子振动之间会产生负阻尼效应,并形成一种剧烈、持续的自激振动。油膜振荡一旦发生,振动幅值通常会较大,且不会受到转速持续升高的影响,它具有突发性和破坏性,主要的诱发原因包括轴承设计参数不合理、润滑油温或油压异常、轴承磨损或载荷分配不均等。

油膜振荡的振动特征非常典型,其发生具有明显的“门槛转速”,通常在转子转速升至两倍一阶临界转速时突然爆发,振荡频率主要接近转子的一阶临界转速频率,而不是工作转速频率,也就是通常所说的“半速涡动”特征,实际频率略低于工作转速的一半。振荡出现后,转速虽然一直上升,但是振动频率基本维持在第一临界频率附近,且振动幅值也始终保持在较高位置且不发生衰减,这种情况就被称为惯性效应。频谱图表明低频分量在主要位置,工频幅值比较小,轴心轨迹表现为大环套小环的杂乱形态,并且还出现发散趋势,如图3所示。

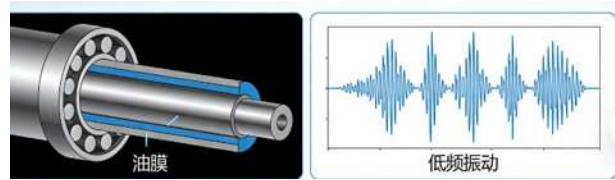


图3 油膜振荡故障

2.4 油泥积碳故障分析

油泥积碳主要发生在高温区域的轴承和密封部位,润滑油在高温下氧化、劣化,逐渐形成胶质油泥乃至硬质积碳,这些沉积物会附着在轴颈、轴瓦或挡油环上,一方面破坏转子动平衡,引发质量不平衡振动。另一方面会堵塞油路、改变轴承间隙与接触条件,导致局部过热和摩擦,诱发自激振动或不稳定涡动,使振动幅值随运行时间显著上升。

2.5 轴承刚性下降分析

当油膜破坏或支撑结构失效后,油泥积碳可能侵入轴承间隙,干扰油膜建立,使油膜刚度降低、阻尼减弱,转子在微小扰动下易发生低频振动。同时,长期运行后轴承合金疲劳、瓦块磨损或支撑螺栓松动,会直接削弱轴承的支撑刚度,当刚度降至临界值以下时,系统临界转速发生变化,运行时可能出现突发性振动跳变或共振放大现象。

3 汽轮机振动故障的解决措施

3.1 动静碰摩故障处理

针对该火电厂汽轮发电机组出现的动静碰摩故障,运行维护人员采取多维度综合处理措施来降低这种故障的发生概率,具体而言,在控制碰撞摩擦的过程中,对轴承间隙进行优化属于一种基础方法,结合多台300兆瓦机组的实测数据和检修实践发现,上轴瓦间隙应该精确控制在0.18~0.22mm范围内,下轴瓦间隙可以保持在0.22~0.26mm之间。该经验验证的参数区间可以在保证润滑油膜形成的同时,防止因间隙过小而使轴颈和轴瓦直接接触,并通过结构设计来减少碰摩隐患^[3]。

提高转子动平衡精度是减小旋转离心力和抑制振动幅值的另一个关键技术,技术藤原运用N-R多面法动平衡技术,将转子不平衡量从原来的8.5g·mm/kg降到3.2g·mm/kg,1号轴承振动值从156 μ m减少到42 μ m,下降幅度超过70%。对振动水平进行控制,大幅降低了轴系在运行过程中出现异常碰摩的风险。

在设备装配和检修期间,加强部件固定和紧固管理也同样重要,技术人员对主要连接部位进行了明确规定:M24螺栓的紧固扭矩应保持在800~850N·m范围内,M30螺栓需要达到1200~1300N·m,并且需要全部安装双螺母或制动垫片等防松装置,以防止螺栓长期松动造成部件出现位移、产生动态碰摩^[4]。

另外,运用在线监测系统早期预警,是提高故障主动防御能力的主要方式,该厂在机组上安装了16通道振动监测系统,能够实时获取碰摩发生前的特征信号,累计成功预警和处理了5起潜在碰摩故障,避免了非计划停机事件,提高了机组运行的安全性和经济性。综合来看,将间隙优化、动平衡校正、紧固控制和在线监测这四种措施协同应用,可以形成一个整体性较强的动静碰摩故障防控体系。

3.2 转子热变形控制

对转子热变形进行控制,可以从以下几个关键环节采取系统性措施,形成覆盖启停机全过程、加热系统优化及预热工艺精细化的综合管控体系,具体而言,在对启停机流程进行优化的过程中,需要严格执行温度变化速率控制的原则,在进行冷态启动时,温升速率需要被精确控制在 1.5~2° C/min 的范围内,这样做可以保证转子受到的热量分布比较均匀,防止因为局部温差过大使热应力集中。同时,热态启动时机组已处在较高温度状态,温升速率可以适当提高到 2~2.5° C/min,但仍然需要对各部位的温度分布进行密切监控,以防止出现急剧的温升;当设备停止运行时,温度下降速度要保持在每分钟 1~1.5°C 以内,这样不但可以减缓冷却过程中产生的不均匀收缩,也降低了残余热应力对转子直线度造成的影响。

另外,在加热系统配置上,使用分区式蒸汽加热技术,将转子周向划分成 8 个独立控制区域,以实现精细化热管理的目的,各个区域可以按照实时温度反馈来单独调节加热强度,能够解决传统整体加热方法无法消除周向温差的问题。在转子上和下部各安装 4 组轴向分布的加热带,形成立体化加热网络,使沿轴向方向的温度梯度可以得到控制。该系统利用共同作用,将转子上下部的温差严格限制在 15° C 以内,减少了由径向温差产生的弯曲变形风险^[5]。

汽轮机在启动前的预热阶段,利用分阶段的逐级加热工艺来实施加热,将低压蒸汽作为加热介质,以每升温 30°C 为一个阶梯的方式进行控制,每达到设定温度之后保持恒温 2 小时,使热量在转子内部进行充分传导和均布,防止因为升温过快而导致表层和芯部的温差过大。该逐级加热方式配

表 1 汽轮机振动故障治理效果对比

轴承位置	故障类型	治理措施	处理前振幅 (μm)	处理后振幅 (μm)	轴承间隙 (mm)	油温 ($^{\circ}\text{C}$)	弯曲度 (mm)
1号轴承	动静摩擦	间隙调整、动平衡	186	42	0.16→0.21	68→51	0.17→0.04
2号轴承	热变形	热矫正、加热带改造	205	38	0.23→0.24	72→53	0.24→0.03
3号轴承	油膜振荡	定向供油、油品更换	178	35	0.27→0.22	76→47	0.14→0.05
4号轴承	复合故障	综合治理	196	44	0.15→0.20	74→49	0.21→0.04

3.4 油品管理与监测

技术人员应尽量使用高性能抗氧、抗磨润滑油,并增设旁路在线净化装置,有效滤除微小颗粒和胶质物,抑制油泥生成;严格控制轴承进油温度在 38~43°C 的合理区间,避免油温过高加速氧化。对于已产生的积碳,需在检修期间解体轴承箱,对轴颈、轴瓦及挡油环进行机械清理或超声波清洗,彻底去除硬质沉积物,恢复转子平衡状态和油路通畅。

3.5 轴承修复与加固

技术人员需要定期检查并修复磨损的轴瓦合金层,重新调整轴承间隙至设计值,并确保润滑油清洁无杂质,以建立

合分区加热系统进行精细调节,可以将转子弯曲变形量控制在 0.05mm 以下,比常规工艺有更好的控制效果,为机组安全启动和平稳运行提供可靠保障。

3.3 油膜振荡抑制

火电厂为解决油膜振荡的自激振动问题,在结构优化和运行控制上进行了整体治理工作,具体而言,在轴承结构参数优化上,将轴承长径比从原来的 0.43 改成 0.62,将间隙比从 1.6‰ 降到 1.0‰,将椭圆度定为 1.8。改进上述参数后,轴承油膜刚度和阻尼特性得到提高,油膜稳定性的临界转速增加 580r/min,从根本上控制了油膜振荡的诱发条件。

该厂在运行控制方面使用振动监测系统,确定油膜振荡的特征频率是 22.5Hz,在启停机过程中容易产生振荡的转速区间上,采取快速通过的方式,将该区间的通过时间从原本的 25 分钟减少到 8 分钟,大幅度减少了自激振荡持续存在的时段,防止振荡发生充分的发展和扩散,保证了机组在瞬态工况下能够安全运行。

综合来看,该厂通过对结构进行优化和对运行策略进行改进,使振动故障的治理取得明显成效,振动故障率由治理前每年 6.2 次下降到 0.8 次,下降幅度达到 87%,机组启停机成功率、运行可靠性也有了明显提高。治理完成后,由于振动异常引发的非计划停机次数出现大幅度减少,设备维护成本和发电损失也出现大幅度降低,产生了明显的经济效益,具体数据如表 1 所示。该案例表明,针对油膜振荡这种自激振动问题,通过将结构参数优化和运行工况精细管控结合起来进行整体治理,能够提高机组的安全性和经济性,具有较大的工程推广价值。

稳定且刚度足够的油膜。同时,全面紧固轴承座地脚螺栓、台板连接螺栓及压盖螺栓,对松动的支撑部件进行定力矩复紧;若发现基础台板变形或二次灌浆层开裂,需进行灌浆修复或采用环氧树脂等高强度材料加固。

结语

综上所述,本文结合具体案例,对汽轮机振动故障的类型及原因进行分析,并提出相应的解决措施,以保障机组长期安全稳定运行。

参考文献

[1]薛朝辉.火电厂汽轮机振动故障的诊断技术分析[J].能源新观察,2026,(02):118-120.
 [2]李勃.150MW 汽轮机振动故障诊断及处理[J].电力设备管理,2026,(02):110-112.
 [3]朱全.火电厂汽轮机振动故障原因分析及解决措施[J].能源新观察,2026,(01):116-117.
 [4]何文凯.基于特征捕捉的汽轮机异常振动故障诊断研究[J].自动化仪表,2025,46(12):25-30.
 [5]王新,李凌坤,朱亚鹏,等.某汽轮机振动突增故障的诊断和处理[J].热力透平,2025,54(04):313-317.