

# 汽轮机本体振动原因分析及控制策略研究

何家琛

国家能源菏泽发电有限公司 山东 菏泽 274000

**摘要:** 汽轮机本体振动是影响机组安全运行的关键因素。本文深入分析振动原因,涵盖机械因素如转子不平衡、轴系不对中、轴承缺陷,流体因素如气流激振,电磁因素如发电机磁拉力不平衡,及其他因素如基础松动、运行工况突变等。针对性提出控制策略,包括设计优化、制造安装精度控制、运行维护规范及故障应急处理,旨在降低振动水平,保障机组稳定运行。

**关键词:** 汽轮机; 本体振动; 原因分析; 控制策略

引言: 汽轮机作为电力、化工等行业的核心动力设备,其稳定运行至关重要。然而,汽轮机本体振动问题长期困扰着机组的安全性与可靠性,不仅会加速设备磨损、缩短使用寿命,严重时甚至引发重大安全事故。深入探究汽轮机本体振动的根源,准确识别各类振动诱因,并制定切实有效的控制策略,成为保障机组高效稳定运行的关键所在。本文聚焦于此展开研究,以期对汽轮机振动问题的解决提供理论支持与实践指导。

## 1 汽轮机本体振动理论基础

### 1.1 汽轮机结构与工作原理

(1) 转子系统、轴承系统、叶轮等关键部件: 转子系统是汽轮机核心转动部件,由主轴、叶轮、叶片等组成,承担能量转换与传递功能,其刚度、质量分布直接影响振动特性; 轴承系统为转子提供支撑并减小摩擦,分为滑动轴承、滚动轴承等类型,油膜稳定性是抑制振动的关键; 叶轮是叶片的安装载体,通过叶片捕获蒸汽动能,其制造精度与装配质量会影响转子动平衡状态,进而诱发振动。(2) 振动激励源: 气流激振是蒸汽流动过程中产生的不稳定激励,源于蒸汽压力脉动、叶栅气流分离等,易引发转子亚同步振动; 机械不平衡是最常见激励,由转子质量分布不均导致,振动频率与转子转速一致; 此外,转子不对中、轴承油膜振荡、动静部件摩擦等也会产生振动激励,影响机组运行稳定性。

### 1.2 振动基本特性与分类

(1) 自由振动与强迫振动: 自由振动是系统受初始激励后无外部载荷作用下的振动,因阻尼作用逐渐衰减,仅反映系统固有特性; 强迫振动是系统在持续外部激励下产生的振动,振幅与激励频率相关,当激励频率接近系统固有频率时,易发生共振,危害极大。(2) 低频振动与高频振动: 低频振动频率通常低于10Hz,多由基础沉降、转子不对中、油膜振荡等引起,振动幅值较

大但传播范围有限; 高频振动频率高于100Hz,常见于叶片振动、轴承滚动体磨损等,幅值较小但对部件疲劳损伤影响显著,需精准监测。(3) 轴向振动与径向振动: 轴向振动沿转子轴线方向,主要源于转子推力不平衡、轴向间隙不当等,易导致推力轴承损坏; 径向振动垂直于转子轴线,是最常见的振动形式,多由转子不平衡、轴承缺陷等引发,直接影响转子与静子的间隙安全性<sup>[1]</sup>。

### 1.3 振动监测与诊断技术

(1) 常用监测参数: 位移参数适用于低频振动监测,能直观反映转子与静子的间隙变化,常用电涡流传感器测量; 速度参数与振动动能相关,适合中高频振动监测,可通过磁电式传感器获取; 加速度参数对高频振动敏感,能有效捕捉早期故障信号,常用压电式传感器检测。(2) 频谱分析、时域分析、小波分析等方法: 频谱分析通过傅里叶变换将时域信号转换为频域信号,可识别振动频率成分,定位激励源,是振动诊断的核心方法; 时域分析直接分析振动信号的幅值、峰值、波形等特征,适用于故障初步判断; 小波分析具备多分辨率分析能力,能有效提取非平稳振动信号中的故障特征,尤其适用于早期微弱故障的识别。

## 2 汽轮机本体振动原因分析

### 2.1 机械因素导致的振动

(1) 转子质量不平衡: 转子制造过程中材质不均、加工精度偏差,会导致初始质量分布失衡; 长期运行中,蒸汽携带的杂质在叶轮、叶片表面结垢,或叶片、叶轮因汽蚀、摩擦出现磨损,会进一步破坏质量平衡。质量不平衡使转子旋转时产生离心力,该力作为周期性激励引发振动,振动频率与转子转速一致,是汽轮机最常见的振动诱因。(2) 轴系不对中: 安装阶段若测量或调整精度不足,会导致各转子中心轴线不同轴; 机组运行时,缸体、轴承座等部件因温度差异产生不均匀热膨

胀,也会破坏轴系对中精度。轴系不对中会使转子承受附加弯矩,旋转过程中产生周期性的径向力和轴向力,引发振动,振动频率多为转速的1倍或2倍。(3)轴承缺陷:润滑油黏度异常、供油不足或油温过高,会导致轴承油膜破裂或振荡,无法有效缓冲减振;轴承安装时间隙调整过大,会使转子支撑不稳定,间隙过小则易产生干摩擦;轴瓦磨损、剥落或巴氏合金熔化,会直接破坏支撑结构。这些缺陷会导致振动幅值显著增大,且振动信号中常伴随不规则频率成分<sup>[2]</sup>。(4)联轴器故障:联轴器连接螺栓松动会导致转子传动不同步,产生冲击性振动;弹性联轴器的橡胶垫、弹簧等弹性元件老化、变形或损坏,会丧失缓冲补偿作用,使轴系振动相互传递放大。此类故障引发的振动多具有间歇性,振动频率与转速相关,且常伴随联轴器部位温度升高。

## 2.2 流体因素导致的振动

(1)气流激振:叶顶间隙加工或装配不均,会导致蒸汽在叶片通道内流动时产生压力差,形成周期性的气流激励;低负荷工况下的部分进汽效应,会使蒸汽对叶片的作用力不平衡,引发气流激振。气流激振多为亚同步振动,振动频率低于转子转速,易导致转子失稳,严重时损坏叶片。(2)流体诱导振动:进排汽管道布置不合理或支吊架失效,会使管道振动与机组本体振动共振,将振动传递至汽轮机本体;汽封间隙过大或不均匀,会导致蒸汽泄漏产生涡流,涡流激励汽封片和转子产生振动。此类振动频率多与流体流动频率相关,振动幅值随蒸汽流量变化而波动。

## 2.3 电磁因素导致的振动

(1)发电机转子磁拉力不平衡:发电机转子绕组匝间短路、铁芯局部损坏或气隙不均,会导致转子磁场分布不均,产生不平衡的磁拉力。磁拉力随转子旋转周期性变化,引发振动,振动频率为转速的2倍,且振动幅值与发电机负荷呈正相关。(2)电气系统谐波干扰:电网电压谐波、变频器输出谐波等电气干扰,会通过发电机定子绕组产生交变电磁力,该力传递至转子和机组本体,引发附加振动。谐波干扰导致的振动频率为电网频率的整数倍,易在机组低负荷运行时显现<sup>[3]</sup>。

## 2.4 其他因素

(1)基础松动或共振:汽轮机基础混凝土开裂、地脚螺栓松动,会降低基础支撑刚度,使机组振动放大;基础固有频率与机组运行频率接近时,会发生基础共振,导致振动急剧增大。此类振动多为低频振动,且振动信号在基础各部位均有明显响应。(2)运行工况突变:负荷骤升骤降会使蒸汽压力、流量急剧变化,对叶

片和转子产生瞬时冲击,引发冲击性振动;启停机过程中,转子经过临界转速区时,若升速率控制不当,易发生共振;此外,冷热态启动方式不当导致的温差应力,也会诱发振动。

## 3 汽轮机本体振动控制策略

### 3.1 设计阶段优化

(1)转子动力学设计:在转子设计阶段,通过动力学仿真计算精确定各阶临界转速,确保其与机组正常运行转速区间保持足够安全裕度,一般要求避开额定转速 $\pm 10\%$ 的范围,防止运行中发生共振。同时,科学配置阻尼结构,如在转子关键部位加装阻尼环、在轴承系统优化油膜阻尼设计等,提升转子系统的减振能力,降低外部激励对振动的放大效应。此外,还需优化转子的质量分布与刚度设计,减少质量不平衡隐患,增强转子抗振稳定性。(2)轴承选型与油膜稳定性优化:结合机组参数与运行工况,合理选型轴承类型,高速机组优先选用稳定性更佳的椭圆轴承、可倾瓦轴承等,替代传统圆筒形轴承,提升油膜承载能力与稳定性。通过仿真分析优化润滑油黏度等级、供油压力与油膜厚度参数,避免油膜振荡等不稳定现象的发生。同时,设计合理的轴承供油回路与冷却系统,确保油膜温度稳定,防止因油温过高导致油膜破裂,从源头提升轴承系统的抗振性能<sup>[4]</sup>。

(3)结构刚度与抗振性提升:强化汽轮机本体框架、缸体等关键结构的刚度设计,通过增加筋板、优化结构截面形状等方式,提升结构固有频率,避开常见激励频率范围。对进排汽管道、阀门等附属结构进行抗振设计,合理设置支吊架,减少管道振动向本体的传递。在易产生振动的部件连接处采用刚性连接或弹性减振接头,平衡结构刚度与减振需求,全面提升机组整体抗振性能。

### 3.2 制造与安装阶段控制

(1)转子动平衡校正:严格把控转子制造精度,在加工过程中对转子进行多次静平衡校正,消除初始质量不平衡。出厂前必须完成高速动平衡试验,采用精密动平衡设备检测转子不平衡量,通过磨削、钻孔等方式进行精准校正,确保转子不平衡量控制在设计允许范围内。对于大型轴系,还需进行轴系整体动平衡试验,保障轴系整体运行的平衡性,从根本上减少机械不平衡引发的振动。(2)轴系对中精度控制:在安装过程中,采用激光对中技术替代传统机械对中方法,提升轴系对中精度。激光对中技术具有测量精度高、操作便捷等优势,可实时监测轴系的平行偏差与角度偏差,确保各转子中心轴线保持同轴。同时,充分考虑机组运行中的热膨胀影响,进行热态对中补偿设计,在冷态安装时预留

合理的对中偏差,避免运行中因热膨胀不均导致轴系不对中,减少振动隐患。(3) 轴承间隙与紧力标准化安装:制定严格的轴承安装标准流程,精准控制轴承间隙与紧力参数。安装前对轴瓦、轴颈进行精密测量,根据设计要求选配轴承,确保径向间隙、轴向间隙符合规范;通过增减垫片等方式调整轴承紧力,避免紧力过大导致轴瓦变形,或紧力过小引发轴承松动。安装过程中全程监测,采用塞尺、百分表等工具进行精准检测,保障轴承安装质量,提升支撑稳定性。

### 3.3 运行维护策略

(1) 在线监测与预警系统:搭建完善的振动在线监测系统,在转子、轴承、缸体等关键部位布置位移、速度、加速度传感器,实时采集振动信号。科学设定振动预警阈值与跳闸阈值,结合机组运行工况动态调整,当振动信号接近预警阈值时及时发出警报。同时,对振动数据进行趋势分析,通过对比历史数据、分析变化规律,提前预判潜在振动故障,为运维决策提供数据支撑,实现振动故障的早发现、早干预。(2) 定期检修与状态评估:制定常态化定期检修计划,定期对机组进行全面检查与状态评估。开展油液分析,检测润滑油的黏度、水分、杂质含量及金属磨粒浓度,判断轴承磨损、转子腐蚀等情况,及时更换变质润滑油、清理油路;持续跟踪振动频谱数据,通过频谱分析识别振动频率成分,定位潜在故障源,如转子不平衡、轴系不对中等,并针对性开展检修校正。此外,定期检查地脚螺栓、联轴器螺栓紧固情况,及时处理松动问题<sup>[5]</sup>。(3) 操作规范优化:优化机组运行操作规范,严格控制负荷调整速率,避免负荷骤升骤降,减少蒸汽流量与压力突变对机组的冲击,降低瞬时振动风险。规范启停机操作流程,在启停机过程中严格控制升速率与降温速率,当转子经过临界转速区时,适当提高升速率快速通过,避免长时间停留引发共振。同时,加强运行人员培训,提升操作熟练度与故障判断能力,确保机组运行参数稳定,减少人为操作不当导致的振动问题。

### 3.4 故障应急处理

(1) 振动超标时的紧急停机准则:明确振动超标

紧急停机的判定标准,当振动幅值达到跳闸阈值,或振动突然急剧增大并伴随异响、温度骤升等异常情况时,立即启动紧急停机流程。制定标准化停机操作步骤,确保运行人员快速、准确完成停机操作,避免因停机不及时导致动静摩擦、轴承烧毁等严重故障扩大。停机后,严禁盲目重启机组,需全面排查振动超标原因,彻底解决故障后经检验合格方可重新启动。(2) 临时减振措施:在振动未达到紧急停机阈值但需临时控制振动的情况下,可采取针对性临时减振措施。通过调整润滑油温度,优化油膜性能,如适当降低油温可增加油膜黏度,提升油膜稳定性,缓解油膜振荡引发的振动;对于多机组联合运行场景,可通过改变负荷分配,调整机组运行转速或负荷,避开共振区域,降低振动幅值。临时措施实施过程中,需实时监测振动变化,确保措施有效,同时为后续故障根治争取时间。

### 结束语

汽轮机本体振动问题一直是影响机组安全稳定运行的难题。本文深入探究其成因,发现机械失衡、流体振荡、电磁干扰等因素相互交织。基于此,从优化设计、提升制造安装精度、强化运行监测与维护等多维度提出了控制策略。但汽轮机运行工况复杂多变,未来还需借助智能监测、大数据分析等前沿技术,持续完善控制策略,实现振动的精准预测与有效治理,保障汽轮机长周期安全高效运行。

### 参考文献

- [1] 李晓波, 俎海东, 焦晓峰, 等. 基于本体的汽轮机组振动故障知识语义性表达[J]. 热力发电, 2021, 50(10): 78-86.
- [2] 孟辉. 汽轮机本体常见故障分析及处理对策探讨[J]. 山东工业技术, 2020, (01): 178-179.
- [3] 赵晓晨, 梁春阳, 奕龙. 延迟焦化装置汽轮机进汽室阀梁磨损原因分析及解决措施[J]. 河南化工, 2024, 41(12): 44-47.
- [4] 胡剑, 卢勇振, 马思聪, 等. 1000MW汽轮机中压阀门异常振动分析及治理[J]. 汽轮机技术, 2024, 66(04): 289-291.
- [5] 王雄, 李志恒, 梅富琨, 等. 电厂燃汽轮机振动原因与改进建议[J]. 电气技术与经济, 2024, (04): 183-186.