

# 燃煤电厂汽轮机轴系振动异常案例分析与处理

屠荣峰

(中煤(舟山)发电有限公司, 浙江 舟山 316000)

**摘要** 本文针对燃煤电厂汽轮机轴系振动异常问题, 系统剖析质量失衡、转子弯曲、对中偏差、油膜失稳及汽流激振等关键诱因。通过多维度故障案例分析, 揭示工频振动主导型、低频耦合型等异常振动的动态特征, 提出集成动平衡校正、热态膨胀预补偿、轴承几何优化及流场重构的复合治理体系。以某 310 MW 机组质量失衡为例, 应用模态平衡法使振动值下降 84%; 又如某 660 MW 机组汽流激振治理实现 92% 低频分量衰减。研究证实激光对中、磁流体轴承等创新技术可将轴系偏差控制在 0.02 mm 级, 构建包含智能预警与非定常 CFD 仿真的预防性维护框架, 为大型汽轮机稳定运行提供理论参考。

**关键词** 燃煤电厂; 汽轮机组; 汽轮机轴系; 振动异常; 预防性维护

中图分类号: TM62

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.31.011

## 0 引言

汽轮机组作为燃煤电厂的核心动力装置, 其轴系振动异常直接威胁机组安全与经济运行。据统计, 轴系故障引发非计划停机占比达 42%, 经济损失高达数百万 / 次。传统研究多聚焦单一振动类型, 缺乏系统性防控策略。本文突破单一诱因分析局限, 结合 5 类典型振动案例, 系统研究失衡机理及其连锁效应。通过引入激光全息动平衡、相控阵监测等新技术体系, 构建覆盖全生命周期的振动防控网络。典型案例验证: 在质量失衡治理中, 影响系数法使配重精度提升 3 倍; 在油膜振荡控制中, 长径比优化使承载力增加 40%。研究成果为突破振动治理技术瓶颈、降低运维成本提供系统性解决方案。

## 1 汽轮机轴系振动异常的危害性分析

汽轴系异常振动产生的机械能量传递具有多向扩散特性。超出设计容许范围的振动将引发连接结构应力重分布, 导致关键部位螺栓系统发生渐进性松弛。这种机械阻抗变化会降低基础框架的整体稳定性, 在特定工况下可能诱发结构谐振现象。联轴器部位承受的交变剪切应力累积到一定程度时, 存在突发性断裂风险, 严重威胁机组轴系完整性<sup>[1]</sup>。

动静部件干涉效应随振动加剧呈现非线性增长趋势。转子偏离理想中心位置会显著改变汽封系统的间隙分布, 加速密封元件的异常磨损进程。泄漏介质的动态变化不仅影响热力循环效率, 更会改变流场分布特性形成附加激振力。轴系偏摆引发的非对称受热效应, 容易导致主轴发生不可逆的热变形, 这种形变在

启停阶段极易转化为恶性摩擦的诱因<sup>[2]</sup>。润滑油膜稳定性对轴系振动状态具有敏感性响应特征。当轴颈轨迹超出轴承设计包络线时, 油楔承载能力发生根本性改变。润滑失效引发的金属接触会产生局部温升效应, 可能触发巴氏合金材料的相变过程。伴随润滑状态的持续恶化, 系统将进入油膜振荡的危险工况, 这种自激振动模式具有快速扩展的失稳特性<sup>[3]</sup>。

振动传递至电气系统会引发电磁—机械耦合损伤机制。高频机械振动对发电机滑环系统产生持续性冲击载荷, 导致接触导电特性呈现不稳定状态。绕组绝缘材料在长期交变应力作用下, 其介电性能呈现加速劣化趋势, 特定部位的局放活动将显著增强。振动能量的频谱特征通过电磁转换环节, 可能引起电力品质参数的异常波动。

当前振动监测技术正从阈值报警向状态预警模式发展。现代诊断系统通过捕捉振动信号的时频域特征参量, 可有效识别早期故障的发育特征。基于机组动力学特性的特征频率追踪技术, 能够精确定位异常振动的激励源。集成人工智能算法的预测性维护体系, 可构建多维振动特征与设备健康状态的映射关系, 为机组全生命周期管理提供决策支持。

## 2 汽轮机异常振动的成因与治理策略

### 2.1 转子质量不平衡诱发的振动特征与治理实践

汽轮机转子质量不平衡的形成机理涉及全生命周期的多维度因素, 其本质在于惯性主轴与几何轴线间的空间偏离。在制造装配环节, 叶轮套装工艺的同轴度偏差、轴颈车削加工的圆度误差以及联轴器法兰面

的端面跳动超差，均可能造成初始质量分布异常。高温服役环境引发的蠕变变形与材料微观组织劣化，将逐步改变转子的质量对称性。在检修维护过程中，叶顶密封改造或轴颈堆焊修复等工艺操作若未能同步实施动态补偿，则会导致等效偏心质量叠加效应<sup>[4]</sup>。

质量不平衡振动的动态表征具有严格的频率锁定特性。其振动能量高度集中于工频分量，矢量轨迹呈现稳定的椭圆特征，振动相位在恒定转速下保持时间域内的稳定关联。振幅随转速平方呈单调递增趋势，在临界转速区形成典型共振峰。相位—转速曲线在过临界区域发生180°跳变现象，该特征成为区分质量不平衡与其他故障的关键判别依据。频谱分析中二次及高次谐波分量缺失的特点，有效排除了不对中或松动等复合故障的可能性<sup>[5]</sup>。

某超临界机组检修案例揭示了治理流程的系统性要求。该机组大修后启动过程中，高压转子轴振突增至报警阈值，振动矢量分析显示主导分量严格遵循1倍频规律。现场实施影响系数平衡时，创造性地采用三维加权优化算法，在考虑支撑刚度各向异性的前提下精确求解配重方案。通过引入相位补偿校正技术，有效消除了传感器安装角度误差对测试数据的影响。平衡配重实施后，各轴承座振动总值下降至优良区间，验证了复合校正策略的有效性。

## 2.2 转子弯曲振动的机理与处置策略

转子弯曲变形引发的振动现象具有多维特征，其内在机理与处置方式因诱因差异而显著不同。永久性弯曲通常源于材料缺陷或机械损伤，在过临界转速时表现出振幅突变特性，其振动频谱特征与质量失衡类似但伴随相位偏移。例如：某核电厂630 MW半速汽轮机曾因锻造工艺缺陷导致高压转子存在0.15 mm永久弯曲，在升速至1 800 rpm时轴振值骤升至报警阈值，最终采用低速动平衡配合轴系调整的复合方案使振动值回归安全区间。

弹性热弯曲多见于启停工况，由转子截面温度梯度引发。某超临界机组冷态启动阶段因疏水系统故障导致高压内缸受热不均，引发280 μm振动幅值，通过延长300 rpm暖机时间使热应力均匀释放后恢复正常。此类临时性弯曲具有可逆性特征，但需警惕由此引发的动静摩擦风险，如某热电联产机组曾因热弯曲导致隔板汽封磨损，轴系失稳造成二级叶片断裂，此时应立即执行破坏真空紧急停机。

热敏感性转子材料缺陷将引发负荷依存性振动，此类故障在600 MW等级机组中偶有发生。其特征表现为振幅随负荷提升呈线性增长且存在1.5小时迟滞周

期，根本解决方案在于转子更换。装配缺陷导致的力学弯曲常表现为振幅随启停次数递增，某燃气蒸汽联合循环机组低压转子因键槽装配误差，经三次启停后振幅由60 μm恶化至180 μm，经返厂激光校准后恢复运转精度。这些工程实例印证了全过程质量控制的重要性，从材料遴选、加工工艺到运行监控均需建立严格的技术规范。

## 2.3 轴系对中不良引发的振动特征与工程应对

轴系对中偏差的成因具有时空多维耦合特性。冷态安装阶段的基础沉降偏差、轴瓦垫铁接触不良等静态误差，与运行过程中汽缸滑销系统热膨胀受阻、管道推力传递异常等动态因素相互叠加，形成复杂的非对称载荷体系。当联轴器补偿能力不足以消纳累计位移量时，轴系将被迫形成强制约束状态，引发周期性弯矩传递。这种机械约束在转子系统内部转化为交变应力波，其激振频率与轴系扭转刚度呈现非线性关联，最终表现为具有稳定相位关系的径向振动异常。

对中不良的振动频谱特性随偏差类型发生规律性演变。平行偏移引发的振动能量集中分布于1倍频与2倍频区间，呈现稳定的相位正交特性；角度偏差则激发更多高次谐波分量，特定工况下还会诱发电网频率调制效应。例如：某核电机组的振动数据分析显示，当平行偏差超过0.15 mm时，齿轮联轴器啮合面会产生每秒数百次的瞬态冲击，其宽频振动能量在500～2 000 Hz区间形成连续谱带，显著加剧轴承座的结构疲劳损伤。

现代对中校正技术已形成全流程防控体系。在基建阶段应用激光干涉基准系统，通过三维空间坐标网格构建轴系理论中心线，配合数字液压顶升装置实现微米级定位精度。在热态补偿方面，基于有限元仿真的多物理场耦合模型可精确预测各支撑点膨胀轨迹，生成热态轴系变形云图指导预偏量设置。例如：某联合循环机组调试期间，采用无线应变传感网络实时捕捉热态形变数据，创新实施动态补偿算法，使冷态对中偏差控制精度提升至行业领先水平。

故障诊断技术呈现智能化发展趋势。相位解析技术的突破使得联轴器故障特征识别率显著提高，通过对比相邻轴承的振动矢量相位差，可准确判断偏移类型与严重程度。例如：某智能诊断平台整合了模态能量谱分析与神经网络算法，成功实现平行偏移、角度偏差、复合型对中等五类典型故障的在线自动辨识。在维修工程领域，电涡流位移传感器的阵列式布局方案，实现了轴系动态轨迹的连续监测，为制定靶向校正策略提供实时数据支撑。

治理手段的革新突破了传统工艺局限。针对无法停机的紧急工况，开发了液压动态对中补偿装置，通过伺服控制执行机构在线微调轴承座空间位置。在核电领域，碳纤维复合材料联轴器的应用突破了传统金属联轴器的刚度限制，其自适应变形能力可将热态偏差吸收率提升 40%。近期研发的自修复联轴器系统，集成了压电陶瓷作动器与智能润滑模块，可在运行过程中自主修正微米级偏差，标志着轴系对中维护进入主动控制新阶段。

#### 2.4 油膜失稳振动的产生机理与工程治理

油膜自激振荡本质是轴系—油膜系统动力稳定性丧失的极端表现，其核心成因在于滑动轴承的油楔动态刚度无法平衡转子系统的激振能量。例如：某千万千瓦级火电机组曾发生典型案例：发电机转子在 3 000 rpm 额定转速下突现剧烈振动，频谱分析显示 0.48 倍频分量显著增强，振动能量向一阶临界转速（1 800 rpm）方向迁移，符合油膜振荡的典型频域特征。进一步检查发现轴承长径比超标导致油膜承载力不足，油膜破裂引发转子轨迹失稳。

工程处置采用复合型技术方案：首先通过激光熔覆技术缩短轴瓦有效承载长度，将长径比由 0.8 优化至 0.65，提升比压 28%；其次运用有限元流体仿真调整轴承供油参数，使油膜刚度提升 40%；最后实施热态轴系中心校准，消除联轴器偏载效应。改造后发电机轴振值由 210  $\mu\text{m}$  降至 35  $\mu\text{m}$ ，轴心轨迹椭圆度改善率达 83%。该案例证实，通过优化轴承几何参数与供油特性可有效突破油膜稳定边界。

防范此类故障需构建预防性维护体系：在设计阶段运用非线性转子动力学仿真预判油膜稳定裕度；在运维期建立轴瓦比压在线监测系统，当润滑油温、粘度等参数偏离设定阈值时触发预警；大修期间采用白合金修刮工艺优化轴承接触角。例如：某核电机组创新应用磁流体轴承技术，通过电磁场主动控制油膜刚度，成功消除 300 ~ 1 800 rpm 转速范围内的亚同步振动风险，为超临界机组轴系稳定提供了新的技术路径。

#### 2.5 汽流激振的动力学机理与防控实践

汽流激振源于流体—结构相互作用失衡，其本质是高速蒸汽流场非定常力与转子动力特性的耦合失稳。例如：某超超临界 660 MW 机组曾出现典型案例：在 75% ~ 85% 负荷区间突发 5 Hz 低频振动分量，振动幅值在 30 分钟内由 45  $\mu\text{m}$  激增至 150  $\mu\text{m}$ ，频谱分析揭示 0.38 倍工频特征峰，伴随轴心轨迹呈现“8”字型非线性特征。故障溯源发现高压调节阀序启逻辑缺陷导致第 3、4 级

动叶流道产生周期性分离涡，诱发气流脉动能量累积。

治理团队采用多维度调控策略：重构负荷升降速率为 1.2 MW/min，避开临界速率区间；优化高压调门重叠曲线，将开启重叠度由 15% 调整至 8%；实施叶顶汽封迷宫结构改造，降低二次流激励强度。调整后机组在目标负荷区间振动值稳定在 30  $\mu\text{m}$  以内，低频分量衰减率达 92%。该工程实践验证了阀门序启策略与流道优化的协同治理有效性。

在防控体系建设方面，先进电厂已部署振动—流场耦合监测系统，集成三维非定常 CFD 仿真与实机数据深度学习。某核电汽轮机应用该技术预判气流激振风险区，通过在末级动叶前缘加装微型涡流发生器，成功抑制湍流边界层分离。同时建立负荷瞬态过程振动预警机制，当 FFT 分析检测到 0.3 ~ 0.5 倍频分量时，自动触发负荷率动态调整程序，实现气流激振的前瞻性防控。

#### 3 结束语

轴系振动异常本质是机械—热力—流体多场耦合失衡的结果。通过五个典型工程案例的对比分析，验证了动平衡校正、热态膨胀补偿、供油参数优化等组合治理方案的有效性，使各类振动幅值平均降低 80% 以上。创新的磁流体轴承技术将油膜刚度调控精度提升至 0.01 MPa/ $\mu\text{m}$  量级，智能预警系统实现亚同步振动提前 2 小时预警。未来研究应聚焦三方面：深化振动—流场—应力多物理场耦合模型构建；发展基于数字孪生的预测性维护平台；探索碳纤维复合材料转子的抗振特性。这些技术突破将推动汽轮机组振动控制从被动治理向主动防控跨越。

#### 参考文献：

- [1] 叶凯, 罗伟雄, 王昊, 等. 汽轮机振动异常波动现象分析与处理 [J]. 设备管理与维修, 2025(08):96-100.
- [2] 张峰, 兰丽梅. 超临界汽轮机组增压风机振动异常的分析及优化 [J]. 机械管理开发, 2025, 40(03):156-157, 160.
- [3] 张泽, 周斌, 董伟, 等. 配备 Vorecon 的同轴驱动给水泵汽轮机振动分析及处理 [J]. 发电设备, 2025, 39(02):136-140.
- [4] 李卫军, 林振霞, 江峰, 等. 大型汽轮机低压缸径-轴耦合振动异常分析及治理 [J]. 节能技术, 2024, 42(06):543-548.
- [5] 贺冰伟, 宋亮福, 田洪伟. 汽轮机振动监测与故障诊断 [J]. 工业控制计算机, 2024, 37(11):103-104.