# 汽轮机转子振动故障机理分析及振动异常处理技术研究

郑 东
中电建湖北电力建设有限公司 湖北 武汉 430000

**摘 要：**汽轮机转子振动异常是影响机组安全稳定运行的核心故障。本文依托转子结构特性与振动基础理论，系统剖析质量不平衡、转子不对中、油膜振荡等典型振动故障产生机理，梳理各类故障的信号特征与判别依据。结合现场工程实际，探究故障精准诊断、针对性治理及预防性控制技术，辅以实际机组案例验证技术有效性，为汽轮机转子振动故障排查、治理及长效防控提供可靠技术参考。

**关键词：**汽轮机转子；振动故障机理；振动异常；处理技术

引言：汽轮机作为火电、热电联产机组的核心设备，转子的稳定运行直接决定机组安全性与发电效率。在长期高速、高温、变负荷工况下，转子易受装配偏差、介质冲刷、热变形及支承系统异常影响，产生各类振动故障，轻则降低设备运行寿命，重则引发停机事故。为有效解决转子振动难题，本文系统研究振动故障机理，优化故障诊断与处理技术，旨在提升机组运行稳定性，降低设备故障发生率与运维成本。

## 1 汽轮机转子结构特性与振动基础理论

### 1.1 汽轮机转子核心结构与运行特性

（1）汽轮机转子由本体、叶轮、轴封及轴承等核心部件构成。本体采用整锻或焊接结构，叶轮经红套或铣制固定于主轴，轴封为梳齿或蜂窝结构，轴承多为可倾瓦或椭圆瓦滑动轴承。装配注重红套过盈量、同心度调整及动平衡精度，确保高速旋转配合可靠性。（2）高速工况下，转子承受离心径向拉伸应力、叶片及叶轮离心载荷、蒸汽作用力与扭转力矩。受力分布呈中心孔应力集中、轮缘应力梯度变化特征。运行约束包括轴振与瓦振限值、轴温控制、临界转速避让及润滑油膜稳定性要求。（3）转子-轴承-汽缸-基础构成多自由度耦合振动系统。轴承油膜刚度和阻尼影响支承特性，汽缸热膨胀及基础沉降改变对中状态，耦合作用决定变工况下的振动响应与稳定性边界[1]。

### 1.2 转子振动基础理论

（1）机械振动基本机制中，自由振动由系统初始扰动激发，频率为固有频率；受迫振动由周期性外力驱动，频率与激励力一致；当激励频率接近固有频率时发生共振，振幅急剧增大。共振是汽轮机运行中需严格规避的危险工况。（2）转子动力学核心理论包括临界转速分析——转子在升至某一转速时激振力频率与固有频率重合即发生共振；陀螺效应使正进动与反进动固有频率产生分离，影响转子稳定性；轴承油膜阻尼和结构阻尼耗散振动能量，对抑制振幅具有关键作用。（3）振动评价标准主要依据ISO7919（轴振）和ISO10816（瓦振），常用阈值指标为：轴振相对位移报警值约120μm、跳机值约200μm（因机组容量及厂家而异），瓦振速度有效值报警约4.5mm/s、跳机约7.0mm/s，各制造厂另有针对特定转子的专门限值。

### 1.3 转子振动信号特征与检测方法

（1）振动信号核心参数包括：幅值表征振动能量大小；频率揭示振动来源（工频、倍频、分频分别对应质量不平衡、对中不良、油膜振荡等故障）；相位反映转子键相基准与振动高点之间的角度关系，对动平衡诊断至关重要。（2）在线监测系统采用电涡流位移传感器测量轴振相对位移（非接触式），速度传感器及加速度传感器测量瓦振绝对振动；离线检测常用便携式测振仪配合频谱分析仪进行定期巡检，同时辅以模态锤击法获取转子固有频率及振型参数。（3）信号预处理方法包括：数字滤波（低通/高通/带通）去除噪声干扰；时域平均法增强周期性信号；FFT频谱分析提取故障特征频率；小波变换用于非平稳信号的时频分解，为后续振动诊断与动平衡提供可靠数据基础。

## 2 汽轮机转子典型振动故障机理分析

### 2.1 转子质量不平衡故障机理

（1）质量不平衡产生原因：制造加工中叶轮及转子本体质心偏心；长期运行后叶片受冲蚀、磨损导致质量损失；高温结垢引起周向不均匀沉积；叶片断裂或脱落造成突发质量突变；检修装配时叶片安装偏差或平衡块调整不当。（2）力学机制：偏心质量m在转速ω下产生离心力$F = m \cdot e \cdot \omega^2$（e为偏心距），以工频（1X）持续激励转子，引发同步正进动响应。信号特征：频谱中工频分量占主导（通常超通频幅值60%~80%），幅值随转

速平方增长，相位稳定且相对键相基准固定[2]。（3）危害程度随转速升高加剧：轻者轴承动载荷增大、瓦温升高、油膜失稳风险增加；重者可诱发临界转速共振，导致轴封磨损、叶片疲劳断裂乃至断轴；不平衡力经轴承传递至基础，降低整机可靠性与寿命。

2.2 转子不对中故障机理

（1）不对中故障主要来源包括：联轴器安装偏差（端面平行度及同轴度超差）；运行后基础不均匀沉降使各轴承标高改变；机组热态工况下汽缸膨胀不均导致冷热态对中状态差异；轴承座因长期运行发生蠕变或定位销松动引发的位置漂移。（2）平行不对中（两轴中心线平行偏移）产生交变弯矩，每转两周期使联轴器承受拉压交变应力；角度不对中（两轴中心线存在夹角）使联轴器每转产生轴向交变力及附加弯曲力矩。两者均使转子承受非线性激振力，激发多倍频振动成分。（3）不对中故障的振动频率特征以2X分量显著增高为典型标志，严重时出现3X、4X等高次谐波；时域波形呈现M形或尖顶形畸变，偏离标准正弦形态。随运行时间延长，轴承磨损加剧使不对中程度渐进发展，振动幅值呈缓慢上升趋势，并伴随轴向振动明显增大。

2.3 转子摩擦与松动故障机理

（1）动静摩擦故障诱因包括：轴承间隙或轴封间隙调整过小；转子热膨胀量超过设计间隙裕度；不平衡或不对中使转子挠曲增大导致轴封、隔板处发生碰摩。碰摩时产生切向摩擦力，其方向与旋转方向相反或相同，形成周期性的冲击和反向激励力。（2）轴承座松动（如台板接触不良、地脚螺栓预紧力不足）及紧固件松动使转子支承刚度下降并出现非线性弹性特性。松动工况下，转子在自身重力及离心力作用下产生“跳动”或“漂移”，支承刚度随载荷变化呈分段线性或非线性特征，诱发复杂的振动响应。（3）摩擦与松动均为典型非线性故障，频谱中出现丰富的倍频及次谐波成分，1/2X、3/2X等分数谐波时有出现，严重摩擦时频谱连续谱抬高。时域波形出现削顶、截断及冲击尖峰。故障恶化过程通常表现为：轻微碰摩（间歇性）→持续碰摩（轴温升高）→轴颈磨损或局部热弯曲→振动急剧发散，危及机组安全[3]。

2.4 油膜涡动与油膜振荡故障机理

（1）滑动轴承油膜压力由楔形效应产生，其周向压力分布呈非对称形状，合力方向与载荷方向相反。当转速升高、载荷降低或润滑油黏度变化时，油膜力与转子离心力之间的动态平衡被破坏，当失稳转速（约2倍第一阶临界转速）以上时，油膜回复力不足以维持稳定运转，即诱发油膜失稳。（2）油膜涡动表现为转子中心在轴承间隙内绕静平衡位置做次同步进动，涡动频率约为（0.4~0.48）倍工作转速（即约半频），其方向为正向进动。当涡动频率恰好等于转子第一阶固有频率时，涡动演变为油膜振荡，振荡频率“锁定”于该阶固有频率，不再随转速升高而改变，振幅急剧增大直至发生碰摩或跳机。（3）油膜振荡是滑动轴承支承转子系统最危险的失稳形式之一，其一旦发生，即使继续升速也无法越过振荡区，振动能量在系统内持续积累并传递至整机，导致轴承合金疲劳开裂、轴颈磨损加剧、密封损坏及轴瓦烧毁，严重制约转子高速运行的稳定性与安全裕度。

## 3 汽轮机转子振动异常处理技术及工程应用

3.1 振动故障精准诊断技术

（1）基于振动信号特征的故障定性、定量识别方法包括：频谱分析提取工频、倍频、分频幅值及相位信息；幅值-转速曲线判别共振区与临界特征；轴心轨迹识别进动方向与形状（椭圆、香蕉形、内“8”字形分别对应不同故障）；瀑布图与级联图分析变工况下频率成分的演变规律，实现故障类型的初步判断和严重程度的量化评估。（2）多维度故障匹配诊断体系综合振动幅值、频率构成、相位变化、轴心轨迹、时域波形及工况关联性等多参数信息，建立典型故障模式库。判别标准涵盖：不平衡以1X幅值主导且相位稳定为特征；不对中以2X显著增高并伴随轴向振动大；摩擦松动呈现非线性谐波与分数谐波；油膜振荡锁定于转子一阶固有频率且转速越过二倍临界后突现[4]。（3）故障溯源分析方法从振动表象逆向推理至根本原因，包括：传递路径分析确定振动源与响应点之间的传递函数关系；启停机Bode图与波特图解析转子动力学特性变化；结合运行参数（负荷、蒸汽参数、轴承温度）关联性分析，定位不平衡质量分布不均、对中状态偏移、支承刚度变化或油膜失稳等核心诱因。

3.2 典型振动故障针对性处理技术

（1）转子质量不平衡校正技术中，动平衡校正采用影响系数法在平衡机上确定不平衡量的大小与方位，通过去重（磨削或钻孔）或加重（配重块焊接）实现平衡改善；现场配重优化方法借助在线振动监测数据，采用双平面或多平面影响系数法，在叶轮或联轴器端部加装平衡块，经多次试重迭代获得最优配重方案，使残余不平衡量满足ISO1940标准要求。（2）转子不对中校准技术涵盖冷态激光对中仪精密找正工艺，使联轴器端面平行度与同轴度偏差控制在0.02mm~0.05mm以内；热态对中优化方案结合机组冷热态标高变化规律，设置预偏量

补偿热膨胀影响，确保运行状态下联轴器受力均匀，轴向预拉量根据制造厂推荐值及现场实测热伸长量综合确定。（3）动静摩擦与部件松动整改措施包括：调整轴封间隙至设计上限并采用蜂窝密封减少碰摩风险；紧固地脚螺栓、更换变形定位销恢复轴承座刚性连接；轴承油膜稳定性优化技术通过调整轴承间隙（减小顶隙或侧隙）、提高润滑油黏度或温度控制、更换抗振型可倾瓦轴承等途径增大失稳裕度，有效抑制油膜振荡发生。

3.3 振动异常预防性控制技术

（1）机组启停与变工况运行的振动防控调控策略包括：升速过程中设置暖机转速平台，确保转子均匀膨胀；快速通过临界转速区（升速率不低于300rpm/min），缩短共振停留时间；变负荷时控制负荷变化率不超过额定值的3%~5%/min，避免蒸汽参数突变引发热变形和胀差超限；停机过程安排惰走监拍，异常惰走及时分析原因。（2）定期检测、状态监测与预警技术体系构建了从传感器（电涡流、速度、加速度、键相）→数据采集单元→在线监测平台→故障诊断服务器的完整链路，设置多级报警阈值（预警、报警、跳机），配合趋势预测模型（如神经网络或支持向量机）实现振动异常超前识别，防患于未然[5]。（3）设备运维优化方案从源头降低振动故障发生率，包括：大修期间执行转子高精度动平衡复测与校正；严格控制轴承间隙、轴封间隙及联轴器对中安装精度；制定润滑油品质定期化验与更换制度；建立转子振动历史数据库，开展同类机组故障统计与根因分析，形成标准化检修作业指导书。

3.4 工程案例应用与效果分析

（1）以某超临界600MW汽轮机高中压转子为案例，运行中轴振3X方向振动由85μm持续爬升至165μm（报警值125μm），频谱显示工频分量占92%，轴心轨迹呈椭圆且长轴方向稳定，初步诊断为质量不平衡加剧。进一步Bode图分析确认不平衡量等效偏心距约18μm，溯源排查发现末级叶片存在不均匀积盐。（2）现场处理采用双平面动平衡配重法，在转子两端平衡槽加装配重块各125g和95g（相位分别为215°和320°）。实施过程分为动平衡试重方案制定→配重块精确加工与称重→在线监测下逐步加装→振动响应验证→配重微调优化的标准化流程，全过程机组维持3000rpm空负荷状态。（3）治理后轴振3X降至78μm，通频幅值由185μm降至95μm，1X分量占比由92%回落至68%；相邻轴承瓦振速度有效值由5.2mm/s降至2.8mm/s，各指标均优于报警阈值。连续跟踪三个月运行数据，振动幅值波动范围控制在±5μm以内，机组带满负荷运行稳定，验证了本文处理技术的有效性和工程适用性。

**结束语**

本文系统阐释了汽轮机转子典型振动故障的内在机理，总结了精准诊断、专项治理及预防性运维的全套振动处理技术，通过工程案例证实了技术方案的实用性。研究明确了不同振动故障的特征差异与治理重点，可为现场故障快速排查、精准整改提供实操指导。后续可结合智能监测算法，优化故障预判模型，进一步提升汽轮机转子振动故障的智能化防控水平。

**参考文献**

[1]张学延,张卫军,何国安.汽轮机转子裂纹故障振动机理与诊断技术研究[J].热力发电,2025,54(02):89-95.

[2]张卫军,张恒,胡启龙.大型汽轮发电机组典型振动故障机理及现场处理对策[J].热力发电,2022,51(12):172-178.

[3]陈二云,杨爱玲,赵鑫.汽流激振下汽轮机转子振动失稳机理与抑制技术[J].上海理工大学学报,2023,45(04):391-397.

[4]王坤,李勇,刘继磊.汽轮机转子不平衡振动故障演化机理及动平衡优化方法[J].动力工程学报,2024,44(05):389-395.

[5]刘云亮,张增平,訾雄峰.火电厂汽轮机转子振动故障诊断及处理技术应用[J].应用能源技术,2025,16(11):40-42.