

汽轮机组振动异常的原因分析及处理措施探讨

刘东阳

中能吴忠热电有限责任公司 宁夏回族自治区 吴忠 751100

摘要: 汽轮机作为火力发电、核能发电以及大型工业驱动系统中的核心动力设备,其运行稳定性直接关系到整个能源系统的安全与效率。振动是衡量汽轮机组健康状态的关键指标之一,异常振动不仅会加速设备磨损、降低运行效率,严重时甚至可能引发灾难性事故。本文系统梳理了汽轮机组振动异常的主要成因,从机械、热力、电气及控制系统等多个维度进行深入剖析,并结合典型故障案例,详细阐述了相应的诊断方法与处理措施。旨在为电厂运行维护人员提供理论参考与实践指导,提升汽轮机组的安全性、可靠性与经济性。

关键词: 汽轮机; 振动异常; 故障诊断; 不平衡; 不对中; 处理措施

引言

随着我国能源结构的持续优化和“双碳”目标的深入推进,高效、清洁、可靠的能源转换技术成为电力工业发展的核心方向。汽轮机作为将热能转化为机械能的关键设备,在现代能源体系中占据着不可替代的地位。然而,由于其结构复杂、运行工况严苛(高温、高压、高转速),在长期服役过程中极易出现各类故障,其中以振动异常最为常见且危害最大。汽轮机组的设计通常要求其在额定转速下运行时的振动值控制在极小的范围内(通常在20-50微米以内)。一旦振动幅值超出允许限值,轻则导致轴承、密封件等部件加速磨损,重则可能引发轴系断裂、动静部件碰磨乃至整机毁坏的重大事故。历史上,国内外曾多次发生因振动失控而导致的汽轮机严重损毁事件,造成了巨大的经济损失和安全风险。因此,深入研究汽轮机组振动异常的根源,建立科学有效的诊断与处理体系,对于保障机组安全稳定运行、延长设备寿命、提高发电效率具有极其重要的现实意义。

1 汽轮机组振动的基本原理与评价标准

1.1 振动产生的物理机制

汽轮机转子在高速旋转过程中,若其质量中心与几何中心或旋转轴线存在偏移,便会因离心力作用而激发强迫振动。这种偏移可能源于制造误差、运行磨损或热变形等多种因素。与此同时,整个轴系并非孤立存在,其振动响应还受到轴承支撑刚度、基础结构动态特性以及联轴器连接状态等外部条件的显著影响。因此,实际观测到的振动信号本质上是“转子—轴承—基础”这一复杂机电耦合系统在内外激励共同作用下的综合动态响应,既包含机械缺陷的直接体现,也融合了系统固有模态与运行工况的交互效应。

1.2 振动评价标准

国际上对大型汽轮发电机组的振动状态普遍依据

ISO7919系列标准进行评估,其中ISO7919-2专门适用于陆地安装的机组。该标准根据机组功率、转速及支撑形式等因素,将振动烈度划分为四个区域:A区代表新交付或大修后处于优良状态;B区表示可长期稳定运行,属于正常范围;C区虽允许短期运行,但需密切监控并安排检修计划;D区则表明振动已达到危险水平,必须立即停机检查。我国电力行业也制定了相应规范,如DL/T586《电力设备监造技术导则》和DL/T550《汽轮机运行导则》,对振动限值、报警阈值及处理原则作出了具体规定,为现场运维提供了明确的技术依据。

2 汽轮机组振动异常的主要原因分析

汽轮机组振动异常的原因错综复杂,可归纳为以下四大类:

2.1 机械因素

2.1.1 转子质量不平衡

转子质量不平衡是汽轮机组振动异常中最常见的故障类型,占比超过50%。其成因可分为两类:一是原始不平衡,源于制造或装配过程中叶轮、叶片、联轴器等部件的质量分布不均;二是运行中不平衡,由叶片结垢、腐蚀、断裂或脱落,通流部分积盐,以及轴封漏汽引发的水蚀等因素导致转子质量分布发生改变。此类振动具有鲜明特征:其频率与转子转频(1X)完全一致,振幅随转速的平方近似成正比增长^[1]。在启停机过程中记录的波特图(BodePlot)上,通常能清晰观察到一阶临界转速处的共振峰值,为诊断提供直观依据。

2.1.2 轴系不对中

轴系不对中是指相邻转子在联轴器连接处的轴线未能保持共线,可分为平行不对中与角度不对中两种形式。其产生原因多与安装误差、热膨胀不均、基础不均匀沉降或管道附加应力有关。不对中引起的振动在频谱上表

现为1X与2X频率成分共存，且2X分量的幅值相对较高；在空间相位上，联轴器两侧轴承的振动相位往往存在明显差异。此外，轴向振动通常较为显著，这也是区别于其他故障的重要判据之一。

2.1.3 动静部件碰磨

当转子因热弯曲、轴承磨损或剧烈振动而与汽封、隔板、喷嘴等静止部件发生接触摩擦时，会引发复杂的非线性振动现象。此类碰磨不仅导致机械损伤，还会在振动信号中激发出丰富的频率成分，除基频1X外，常伴随高次谐波（如3X、4X等）甚至分数谐波（如1/2X、1/3X）。同时，碰磨过程通常伴有明显的金属摩擦噪声、局部温升以及振动相位的不稳定性，这些综合特征有助于与其他故障类型进行区分。

2.1.4 轴承故障

轴承故障主要表现为间隙异常（过大或过小）、乌金脱胎、瓦块磨损或润滑不良等问题。这些问题会破坏滑动轴承油膜的形成与稳定性，进而削弱其承载能力，导致轴承系统的刚度与阻尼特性发生劣化。由此引发的振动往往缺乏典型频率特征，但常伴随瓦温升高、油压波动等辅助参数异常，需结合多源信息进行综合判断。

2.2 流体与热力因素

2.2.1 蒸汽激振（又称“部分进汽激振”）

蒸汽激振通常发生在高压缸或调节级区域，当蒸汽流量分配不均或调门开启顺序不合理时，作用于转子上的切向力会出现周期性波动，从而激发低频振动。该类振动多出现在高负荷工况下，且对负荷变化极为敏感——负荷微调即可引起振动幅值显著波动^[2]。由于其激励来自流体动力，故在排除机械故障后，应重点检查配汽方式与阀门特性。

2.2.2 热弯曲

热弯曲多源于汽轮机启停过程中暖机不充分或疏水不畅，导致转子上下缸壁温差过大，进而产生暂时性弯曲变形。带有热弯曲的转子在旋转时等效于一个不平衡质量，因而引发以1X为主的振动。其显著特点是振动幅值随时间逐渐增大，且在盘车状态下即可测得较大的晃度值。与永久性不平衡不同，热弯曲引起的振动通常可在充分盘车或均匀冷却后自行消除。

2.3 油膜动力学因素

2.3.1 油膜涡动与油膜振荡

油膜涡动与油膜振荡是滑动轴承特有的自激振动现象。

当转子转速升高至接近两倍一阶临界转速时，油膜动压效应可能失稳，形成与转子同向旋转的涡动。若该涡动频率与转子的一阶临界转速重合，则会触发剧烈的油膜振荡，此时振幅急剧上升且难以通过常规降速手段抑制。其典型特征是振动频率略低于0.5倍转频（约0.42~0.48X），且一旦发生，即使转速略有下降，只要仍高于失稳阈值，振动仍将维持在高位，表现出明显的“频率锁定”特性。

2.4 电气与控制系统因素

2.4.1 发电机磁拉力不平衡

发电机内部若存在转子绕组匝间短路、定转子空气间隙不均或磁极不对称等问题，会导致电磁力分布不平衡，从而产生与电网频率（50Hz）或其倍频（100Hz）相关的周期性扰动力。此类振动通常表现为稳定的低频成分，且与电气负荷密切相关，在排除机械原因后应重点排查发电机本体的电磁状态。

2.4.2 控制系统故障

DEH（数字电液调节系统）或TSI（汽轮机监视仪表系统）中的传感器失效、信号干扰、接线松动或逻辑程序错误，可能导致振动监测数据失真，给出虚假报警；更严重的是，若控制系统因故障导致阀门误动作或转速调节失灵，可能间接诱发机械振动。因此，在诊断振动异常时，必须首先确认监测系统的可靠性，排除仪表或控制回路本身的干扰因素。

3 振动异常的诊断方法与流程

准确的故障诊断是有效处理的前提。现代汽轮机组普遍配备TSI系统，可实时采集轴振、瓦振、偏心、胀差、转速等关键参数。结合离线精密诊断技术，可构建一套完整的诊断体系。

3.1 数据采集与初步判断

现代汽轮机组普遍配备TSI系统，可实时采集轴振、瓦振、偏心、胀差及转速等关键参数。在初步诊断阶段，需综合运用多种分析手段：时域分析用于观察振动波形是否规则、是否存在冲击成分；频域分析（FFT）则是识别主导频率及其幅值的核心方法；轴心轨迹分析通过两个正交方向的电涡流传感器合成轨迹图形，不同故障对应特定形态（如椭圆、香蕉形或内“8”字）；趋势分析则关注振动值随时间、负荷或转速的变化规律，有助于判断故障的发展趋势与工况依赖性。

3.2 典型故障的诊断特征总结

表1：典型故障的诊断特征总结

故障类型	主要频率成分	相位特征	其他特征
质量不平衡	1 X	各轴承相位基本一致	振幅与转速平方成正比
不对中	1X,2X	联轴器两侧相位差明显	轴向振动较大

续表:

故障类型	主要频率成分	相位特征	其他特征
油膜振荡	~0.5X	频率锁定, 不随转速变化	振幅突增, 难以消除
动静碰磨	多频 (1X, 2X, 3X...)	相位不稳定	伴有噪声、温升
热弯曲	1X	与不平衡相似, 但可随时间变化	盘车晃度大

3.3 综合诊断流程

完整的振动诊断应遵循系统化流程: 首先全面收集机组历史运行数据、近期操作记录及检修履历; 其次对采集的数据进行筛查, 确认传感器功能正常, 排除仪表误报; 随后利用时频分析、轨迹图、趋势图等工具提取故障特征; 在此基础上, 结合当前运行工况 (如负荷、温度、启停状态) 提出最可能的故障假设; 最后通过交叉验证 (如变负荷测试、停机检查) 确认诊断结论, 并据此制定科学、可行的处理方案。

4 振动异常的处理措施

针对不同的故障原因, 应采取差异化的处理策略。

4.1 针对不平衡的处理

针对转子不平衡问题, 最直接有效的手段是实施现场动平衡。通过在转子上试加重块, 结合影响系数法或模态平衡法, 可精确计算出所需配重的质量与位置, 将残余不平衡量控制在允许范围内。对于由积盐、结垢或异物附着引起的运行中不平衡, 应在停机后彻底清理流通部分; 若因叶片断裂导致质量缺失, 则需更换整圈叶片以恢复整体动平衡, 避免局部修复引发新的不平衡。

4.2 针对不对中的处理

解决轴系不对中问题, 首要措施是重新进行精密找正, 通常采用激光对中仪等高精度工具, 严格依照制造厂技术规范执行。同时, 需全面检查与汽轮机相连的管道、阀门及其支撑结构, 消除因热膨胀受限或安装应力造成的附加弯矩^[1]。对于存在基础沉降风险的机组, 应建立定期监测机制, 必要时采取地基加固措施, 从源头上防止不对中复发。

4.3 针对油膜振荡的处理

抑制油膜振荡可从润滑系统与轴承结构两方面入手。一方面, 可通过适当提高润滑油温度以降低粘度, 或调整供油压力, 改善油膜稳定性; 另一方面, 将原有的圆筒瓦轴承改造为可倾瓦轴承 (Tilting Pad Bearing), 因其具有更高的动态稳定性, 能有效提升失稳转速阈值。此外, 在轴承座外部加装阻尼器也可增强系统耗能能力, 抑制自激振动的发展。

4.4 针对热弯曲的处理

预防和消除热弯曲的关键在于规范启停操作。启动

前及停机后必须按规定时间连续盘车, 使转子均匀受热或冷却, 避免上下缸温差过大。同时, 应优化启动曲线, 严格控制升速率与暖机时间, 确保温差始终处于安全限值内^[4]。此外, 加强疏水管理, 保证所有疏水点畅通无阻, 防止冷凝水在缸内积聚造成局部冷却, 也是防止热弯曲的重要措施。

4.5 针对动静碰磨的处理

处理动静碰磨问题需从间隙控制、部件修复与运行优化三方面协同推进。在大修期间, 应精确测量并合理调整汽封、隔板等关键部位的动静间隙, 避免过小导致摩擦; 对已发生磨损的部件, 可采用补焊、热喷涂或整体更换等方式恢复其几何形状与表面质量; 在日常运行中, 应尽量避免在易发生碰磨的负荷区间 (如低负荷或变负荷过渡区) 长时间停留, 必要时通过调整运行策略规避风险工况。

5 结语

汽轮机组振动异常是一个涉及多学科、多因素的复杂系统工程问题。本文通过对机械、热力、流体、电气等各类振动源的系统分析, 阐明了其内在机理与外在表现, 并结合现代诊断技术, 提出了一套从精准识别到有效处理的完整解决方案。实践证明, 只有将传统的经验判断与先进的状态监测、智能诊断技术相结合, 建立起以预防为主、防治结合的现代化运维体系, 才能从根本上保障汽轮机组的安全、稳定、高效运行, 为国家能源安全和电力系统的可靠供应提供坚实的技术支撑。未来, 随着物联网、大数据和人工智能技术的深度融合, 汽轮机振动故障的诊断将更加智能化、自动化和精准化, 这将是推动电力装备智能化升级的重要方向。

参考文献

- [1] 吕然明. 火力发电厂汽轮机轴承振动大的原因分析及处理措施[J]. 消费导刊, 2020(24):83.
- [2] 康凯. 600MW机组汽轮机异常振动的原因和处理探讨[J]. 百科论坛电子杂志, 2020(16):1776-1777.
- [3] 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.
- [4] 刘振刚, 王志勇, 王建, 等. 某350MW汽轮机组振动故障诊断及治理[J]. 发电设备, 2025, 39(5):322-325.