

燃气轮机启动过程中的振动异常分析与处理

郑 亮 闫煜鑫

大唐惠州热电有限责任公司 广东 惠州 516123

【摘 要】：燃气轮机启动阶段工况变化快，转速跨越临界区间，振动信号易受转子不平衡、对中偏差、支承松动、轴承油膜不稳、燃烧波动等因素影响。异常振动会造成启动曲线波动、保护停机和部件附加载荷增加，降低机组可靠性。通过采集启动全过程振动数据，结合转速、温度、压力、轴承温升等参数识别异常特征，按转子动平衡、联轴器对中、支承紧固、轴承润滑、燃烧调整等环节制定处理措施，可降低振动峰值，缩短故障定位时间，减少重复启停风险，提升启动安全性和运行连续性。

【关键词】：燃气轮机；启动过程；振动异常；故障诊断；处理措施

DOI:10.12417/2705-0998.26.10.068

引言

一次启动异常往往不是单一振动峰值的偶然出现，而是转速爬升、热态膨胀、油膜形成、燃烧稳定性和控制逻辑共同变化后的集中反映。燃气轮机启动时间短、参数变化密集，轻微装配偏差或支承状态劣化都可能在临界转速附近被放大，进而触发报警、降负荷甚至停机。准确读取启动曲线中的振动特征，厘清机械、热工和控制因素之间的联系，才能把处理措施落实到动平衡、对中、润滑、支承和燃烧调整等具体环节，为后续正文的异常判定和处置路径奠定基础。

1 燃气轮机启动振动特征识别

1.1 启动升速阶段振动变化规律

启动升速阶段是燃气轮机由静止状态向额定运行状态过渡的重要环节，转子转速持续提升，气体负荷、热膨胀状态和轴承支撑条件同步变化，振动响应呈现明显的阶段性特征。低速阶段主要受转子初始不平衡、轴系装配精度和轴承间隙影响，振动幅值通常保持较低水平；进入高速升速区域后，转子动力特性发生变化，轴系柔性变形、油膜刚度变化以及结构共振因素会导致振动幅值快速波动。通过建立启动全过程振动趋势曲线，结合转速变化率、轴振幅值、相位角变化等参数，可准确判断异常振动出现的具体阶段，为后续故障定位提供数据依据。

1.2 临界转速区间峰值特征

临界转速区域是燃气轮机启动过程中振动变化最明显的阶段，转子运行频率接近系统固有频率时，容易产生共振放大现象，使振动幅值短时间内快速增加。该阶段振动特征主要表现为幅值突升、相位快速变化以及频谱中工频成分增强，反映出转子动力响应受到不平衡质量、轴系刚度和阻尼特性的综合影响^[1]。针对临界转速区间，需要重点分析振动峰值持续时间、通过速度以及恢复趋势，结合转子动力学参数判断是否属于正常共振响应。利用智能监测系统对关键转速节点进行实时记录，可提高异常振动识别精度，避免因误判造成不必要停机。

1.3 报警停机信号判别要点

燃气轮机启动过程中报警停机信号是保护系统判断设备状态的重要依据，其准确性直接影响机组启动安全。振动报警信号判别需要综合考虑振动幅值、变化速率、持续时间以及不同测点之间的关联关系，避免单一参数异常导致错误判断。轴承座振动、轴振动和转子位移等监测信号存在一定差异，需要结合测点分布和振动频谱特征进行综合分析。当振动值超过设定阈值并伴随频率成分异常、相位变化明显或多测点同步升高时，通常表明设备存在较高风险。通过优化报警逻辑、完善分级保护策略和提升数据分析能力，可提高启动异常响应速度，减少非计划停机情况发生。

2 启动振动异常成因判定

2.1 转子不平衡诱发机理

转子不平衡是燃气轮机启动振动异常的重要机械因素，主要由转子质量分布偏差导致离心力变化引起。启动升速过程中，转子旋转速度不断提高，不平衡质量产生的离心力会随转速平方关系增加，使轴系产生周期性振动响应。叶片积碳、装配误差、材料热变形以及长期运行磨损均可能改变转子质量分布，造成原始平衡状态破坏。异常振动通常表现为工频振动幅值升高、相位稳定变化以及径向振动增强。通过开展转子动平衡检测、振动频谱分析和运行状态评估，可明确不平衡量位置及影响程度，为精准调整提供依据。

2.2 联轴器对中偏差影响

联轴器对中状态直接影响燃气轮机轴系传动稳定性，轴线偏移会改变转子受力分布，使联轴器产生附加弯矩和周期性交变载荷。启动过程中，设备温度逐渐升高，转子与支撑结构发生热膨胀，初始对中偏差可能进一步扩大，导致振动水平异常增加^[2]。对中偏差主要包括径向偏差和角向偏差，不同类型偏差会引起轴承载荷变化、轴颈运动轨迹异常以及振动频率特征改变。采用高精度激光对中检测、热态对中补偿和轴系状态监测技术，可降低联轴器连接误差对启动振动的影响，提高轴系运行稳定性。

2.3 支承松动轴承油膜失稳

支承结构和轴承运行状态决定燃气轮机转子的稳定支撑能力, 支承松动或轴承油膜失稳会削弱轴系阻尼效果, 引发启动阶段振动异常。支承紧固力不足、基础刚度变化、轴承间隙偏离设计范围等因素, 会造成转子运动约束降低, 使振动能量难以及时衰减。轴承油膜形成过程受润滑油温度、压力、黏度和转速影响, 当油膜承载能力不足时, 容易出现油膜振荡、半速涡动等非稳定运动状态。通过优化润滑系统控制参数、加强轴承间隙检测和提升支承结构可靠性, 可改善转子支撑条件, 降低启动过程中的异常振动风险。

3 异常数据采集诊断路径

3.1 振动转速同步监测

振动转速同步监测是燃气轮机启动异常诊断的重要数据采集方式, 通过建立振动信号与转子转速变化之间的对应关系, 实现对不同运行阶段振动特征的精准识别。启动过程中, 转速由低到高连续变化, 振动幅值、相位角和频率成分也会随转速产生动态响应, 需要利用高采样率传感器持续获取轴振、瓦振等关键参数, 并同步记录转速、升速速率和临界转速通过状态。监测系统通过时间轴匹配技术, 将振动波形与转速曲线进行关联分析, 可准确判断振动异常发生的转速区间, 区分转子不平衡、共振响应和结构松动等不同故障类型。结合数字化采集平台和智能算法, 可进一步实现振动趋势预测、异常阈值动态调整以及故障特征自动提取, 提高启动过程诊断效率和准确程度。

3.2 温度压力参数联合校验

温度压力参数联合校验能够从热力运行状态角度辅助判断燃气轮机启动振动异常原因, 避免单纯依靠机械振动信号造成诊断偏差。启动阶段燃烧室温度、排气温度、润滑油温度、轴承供油压力以及密封系统压力均会影响转子受力状态和轴承运行性能。温度变化异常可能引起转子热弯曲、膨胀不均和间隙变化, 压力波动则可能导致润滑条件下降、油膜承载能力降低, 从而诱发振动增加。通过建立振动数据与热工参数的联合分析模型, 可判断振动异常是否与燃烧波动、润滑状态变化或热态变形有关^[3]。采用多参数融合诊断方式, 可以提高故障识别的全面性, 使机械状态和热力状态形成协同判断体系, 为后续处理措施制定提供更加准确的数据支撑。

3.3 频谱趋势故障定位

频谱趋势分析是燃气轮机启动振动故障定位的重要技术手段, 通过对振动信号进行频域转换, 可提取不同故障对应的特征频率, 实现异常来源的精准判断。启动过程中采集的振动信号包含转频、倍频、低频扰动以及高频冲击等多种成分, 不同频率变化规律能够反映转子系统、轴承结构和连接部件的运行状态。通过连续跟踪频谱峰值、能量分布和频率变化趋势,

可判断故障发展过程, 识别突发异常和渐进性劣化问题。结合人工智能算法和历史运行数据, 可建立振动特征数据库, 实现故障模式自动匹配和趋势预警。该方法能够突破传统人工经验判断限制, 提高复杂启动工况下故障定位速度, 为燃气轮机状态维护提供可靠依据。

4 启动振动处理措施设计

4.1 转子动平衡校正方法

转子动平衡校正是降低燃气轮机启动振动的重要处理措施, 主要针对转子质量分布不均导致的周期性离心振动问题。处理过程中需要结合振动幅值、相位角变化以及频谱特征确定不平衡类型, 通过现场动平衡检测获取转子异常响应规律, 再根据计算结果调整配重位置和质量, 使转子旋转惯量重新达到稳定状态。校正过程不仅需要关注单一转速下的振动水平, 还应分析低速、临界转速和额定转速区域的综合表现, 避免局部优化导致其他工况振动升高。现代动平衡技术可结合高精度传感器、数字化分析软件和在线监测系统, 实现配重方案快速计算与效果验证, 提高调整精度。合理实施转子动平衡校正, 能够降低启动阶段工频振动, 提高转子通过临界转速区域的稳定性, 减少 4.2 联轴器对中调整方法

联轴器对中调整是改善燃气轮机轴系受力状态的重要措施, 主要解决轴线偏移造成的附加弯矩和周期性振动问题。调整过程中需要对联轴器径向偏差、角向偏差以及热态运行补偿量进行综合测量, 根据轴系安装状态和运行温度变化确定合理调整参数。传统冷态对中容易受到启动后热膨胀影响, 因此需要结合机组实际运行条件, 采用热态对中修正方式, 提高轴系长期稳定性。调整过程中应重点检查联轴器连接间隙、螺栓紧固状态和轴端位置变化, 避免因局部误差造成整体轴系振动异常^[4]。利用激光对中仪、三维测量技术和数据分析平台, 可提升轴线检测精度, 实现调整过程的量化控制。合理优化联轴器对中状态, 有助于降低轴承载荷波动, 减少启动阶段振动放大现象, 增强传动系统可靠性。

4.3 支承紧固润滑燃烧优化

支承结构、润滑条件和燃烧状态共同影响燃气轮机启动过程中的振动水平, 需要通过综合优化改善转子运行环境。支承系统调整重点在于检查基础连接、轴承座紧固状态以及支撑刚度变化, 防止结构松动造成振动能量放大。润滑系统优化需要根据启动转速变化调整供油压力、油温和流量参数, 保证轴承内部形成稳定油膜, 降低油膜失稳引起的非同步振动。燃烧系统优化则需要关注点火过程、燃料分配和燃烧稳定性, 通过控制燃烧波动减少气动力不均对转子的影响。现代控制技术可结合实时监测数据, 对润滑参数和燃烧参数进行动态调整, 实现机械状态与热工状态协同优化。通过支承强化、润滑改善和燃烧调节的综合处理, 可有效降低启动异常振动, 提高机组启动

过程的安全性和运行稳定性。

5 处理效果验证闭环控制

5.1 启动曲线对比评价

启动曲线对比评价是验证燃气轮机振动处理效果的重要方法,通过比较处理前后转速、振动幅值、升速时间以及关键节点变化情况,判断异常振动是否得到有效控制。评价过程中需要重点分析低速升速区、临界转速区和额定转速稳定区的曲线变化规律,观察振动峰值是否降低、波动范围是否收窄以及转速过渡是否更加平稳。结合历史运行数据和标准启动曲线,可建立量化评价指标,对处理措施的有效性进行持续验证。数字化监测平台能够自动采集启动过程中的多维参数,并生成趋势对比结果,提高评价过程的准确性和实时性。通过曲线变化分析,可进一步明确设备状态改善程度,为后续维护调整提供数据依据。

5.2 振动峰值控制标准

振动峰值控制标准是衡量燃气轮机启动状态是否稳定的重要依据,需要结合设备结构特点、运行工况和监测规范建立分级管理体系。控制过程中应重点关注启动升速阶段振动最大值、持续时间以及恢复速度,避免短时间异常升高对转子系统造成累积损伤^[5]。不同位置测点的振动响应存在差异,需要综合分析轴振、瓦振和转子位移等参数,形成多指标联合判断方

式。通过优化报警阈值、完善异常分级机制和引入动态评价模型,可提高振动控制精度,减少误报警和漏报警情况。合理的峰值控制标准能够实现设备状态实时评估,使启动过程保持在安全运行范围内,提升故障预防能力。

5.3 运行稳定性提升路径

运行稳定性提升需要建立从启动监测、故障诊断到维护调整的全过程控制体系,通过持续优化设备状态降低振动异常发生概率。稳定性提升路径重点包括完善在线监测系统、强化关键部件状态管理以及优化运行参数匹配。通过长期积累振动、温度、压力和转速等运行数据,可形成设备健康状态数据库,为异常趋势预测提供支持。结合智能算法开展数据分析,能够提前识别潜在振动风险,并指导维护措施精准实施。同时,加强启动控制程序优化和设备检修质量管理,可减少机械偏差、热态变化和控制波动对机组运行的影响。系统化稳定控制方式能够提升燃气轮机启动成功率,延长关键部件使用周期,保证机组持续可靠运行。

6 结语

燃气轮机启动过程中的振动异常受转子状态、轴系连接、支承条件以及运行参数等多因素影响,需要结合数据监测、故障诊断和精准处理实现稳定控制。完善振动识别方法与闭环调节机制,可有效降低启动阶段异常波动,提高设备运行可靠性,为燃气轮机长期安全运行提供技术保障。

参考文献:

- [1] 许正武,俞哲锋,冷永南.AE94.3A 型燃气轮机启动阶段燃料控制及启动异常处理[J].燃气轮机技术,2025,38(4):50-54.
- [2] 田彪,田宝元,王焕杰,等.船舶燃气轮机启动转速自适应模糊滑模控制方法[J].舰船科学技术,2024,46(24):67-71.
- [3] 殷悦,孙钢虎,兀鹏越,等.超级电容储能辅助燃气轮机黑启动系统调频技术应用研究[J].热力发电,2024,53(11):31-37.
- [4] 王涛,韩平,张瀚,等.某型燃气轮机启动故障原因分析与处理[J].石油和化工设备,2024,27(6):62-66+61.
- [5] 陈延柏.M701F4 燃气轮机轴承振动异常分析及处理[J].现代制造技术与装备,2024,60(2):121-124.