

汽轮机启动过程轴振超标原因分析及调试整改措施

刘粒宝

中国能源建设集团江苏省电力建设第三工程有限公司 江苏 镇江 212000

摘要: 汽轮机启动过程轴振超标是影响机组安全并网运行的常见故障, 振动异常多发于升速、暖机及带负荷初期, 诱因复杂且危害性较强。本文结合汽轮机轴系结构与振动评判标准, 从转子本体、轴系对中、润滑轴承、运行工艺四个维度, 系统剖析轴振超标核心成因, 针对性制定精细化检修、调试整改及标准化运行管控措施, 有效解决启动振动超标问题, 为机组稳定启停运行提供技术参考。

关键词: 汽轮机; 启动过程; 轴振超标原因; 调试整改措施

引言: 汽轮发电机组轴系为柔性长跨度结构, 启动全过程工况动态变化大, 受设备状态、安装精度、运行操作等多重因素影响, 极易出现轴振超标故障。轴振异常不仅会制约机组正常启动进度, 还会加剧轴系部件磨损, 甚至引发动静碰磨、轴系损坏等严重安全隐患。为有效管控启动振动故障, 本文全面梳理轴振异常特征与故障机理, 精准排查各类诱因, 制定科学可行的调试整改方案, 保障机组安全平稳启动运行。

1 汽轮机启动过程轴振超标基础理论与评判标准

1.1 汽轮机轴系结构与振动原理

(1) 汽轮发电机组轴系由汽轮机转子、发电机转子、联轴器、轴承及支撑基座组成, 整体为长跨度柔性轴系结构。各转子通过刚性或弹性联轴器同轴传动, 轴承采用滑动油膜支撑, 基座固定于混凝土基础, 承担轴系全部载荷, 保障机组动力平稳传递。(2) 转子旋转振动源于转子质量偏心、动静摩擦、材质不均等问题, 旋转时产生周期性离心激振力。轴系共振是转子转速接近轴系固有频率时, 振动幅值急剧放大的现象。油膜振动为滑动轴承油膜失稳引发的自激振动, 受油温、油压、轴承间隙参数影响显著。(3) 机组启动各阶段轴振规律差异明显。升速阶段转速持续提升, 激振力频率随转速变化, 易在临界转速区间出现振动峰值; 暖机阶段机组温度稳步上升, 转子热膨胀、差胀变化, 振动呈缓慢波动趋势; 并网带负荷初期, 蒸汽参数、负荷突变, 轴系受力状态改变, 易出现短时振动异常。

1.2 轴振超标评判标准与监测指标

(1) 机组轴振评判严格遵循国家及电力行业标准, 以汽轮机安全运行规程、旋转机械振动监测技术规范为核心依据, 明确机组启动、运行各工况下振动允许限值, 保障轴系安全稳定运行。(2) 核心监测指标包含振幅、相位、频率。振幅反映振动剧烈程度, 是超标判定

核心指标; 相位用于判断振动激振源位置与故障类型; 频率可区分强迫振动、共振、油膜振荡等不同振动机理。(3) 机组启动各阶段阈值分级明确, 升速、暖机、并网阶段设置差异化超标阈值, 按振动幅值划分为正常、预警、超标、严重故障四个等级, 超阈值需立即暂停操作、排查隐患^[1]。

1.3 汽轮机启动过程轴振异常特征分类

(1) 一阶临界转速区间振动超标: 转速逼近一阶临界转速时, 振幅快速飙升、增速陡峭, 振动频率稳定对应一阶固有频率, 相位同步突变, 越过临界转速后振动小幅回落, 超标具有明显区间性、瞬时性特征。(2) 暖机阶段持续性轴振攀升: 暖机恒温阶段无转速、负荷波动, 轴振呈缓慢持续上升趋势, 无骤升骤降特征, 多由转子热弯曲、动静部件轻微摩擦、基础受热形变等隐性故障引发。(3) 并网带负荷初期轴振突变超标: 机组并网瞬间或小幅带负荷时, 轴振突然大幅超标, 波动幅度大、响应速度快, 主要因负荷冲击引发轴系受力失衡、联轴器对中偏差加剧或轴承油膜瞬时失稳导致。

2 汽轮机启动过程轴振超标核心原因分析

2.1 转子本体故障引发的轴振超标

(1) 转子质量不平衡是启动振动超标的常见诱因。机组长期运行中, 汽轮机叶片易出现蒸汽结垢、冲刷磨损、腐蚀缺损等问题, 破坏转子原有质量分布平衡。同时, 机组检修后转子配重块偏移、转子腔体或叶片缝隙残留杂物, 会产生持续性离心激振力, 在升速过程中持续放大轴系振动, 引发幅值超标。(2) 转子弯曲分为热弯曲与永久弯曲。机组启停过程中, 暖机不充分、升降温速率过快会造成转子轴向、径向温差不均, 产生不均匀热应力, 引发暂时性热弯曲。长期频繁启停、机组超参数运行会导致热应力残留, 使转子产生不可逆机械变形, 形成永久弯曲, 致使每次启动均存在固有振动超

标问题^[2]。(3) 转子叶轮、围带等部件松动,或转子本体出现细微裂纹,会在转子高速旋转时产生周期性形变与位移。裂纹随旋转负荷反复开合、松动部件周期性窜动,形成规律性激振源,引发高频周期性振动异常,随转速升高振动缺陷持续加剧。

2.2 轴系安装与对中偏差问题

(1) 机组大修、检修后联轴器对中精度不达标,端面平行度、同轴度偏差过大,螺栓紧固力矩不均,会使高低压转子、发电机转子轴心偏移。机组升速运转后,轴系存在强制对中力矩,产生持续性强迫振动,是启动阶段轴振超标的重要人为因素。(2) 长期运行工况荷载变化、地基沉降会造成轴承座高低偏差,配套基础螺栓松动、紧固失效,直接降低基座支撑刚度。轴系运行中支撑稳定性不足,出现轻微晃动、偏移,无法有效约束转子振动,导致整体轴振幅值超标、振动波动异常。

(3) 检修装配误差、转子形变会造成轴系动静间隙不均,转子高速旋转时与汽封、隔板等静止部件发生轻微碰磨。轻微碰磨会产生持续性摩擦激振,逐步加剧轴系振动,形成恶性循环,最终引发启动过程轴振超标。

2.3 润滑与轴承系统异常诱因

(1) 润滑油系统参数异常直接影响油膜稳定性。润滑油温过高或过低、供油压力波动、油液乳化变质、杂质超标,会破坏轴承油膜均匀性,导致油膜厚薄不均、承载能力下降,引发油膜失稳甚至油膜振荡,造成轴系低频振动超标。(2) 轴瓦安装间隙超标、瓦块卡涩卡顿、长期运行导致轴瓦磨损、合金层脱落,会使轴承对转子的约束能力大幅下降。转子在轴承内出现偏心晃动,支撑刚性大幅降低,启动升速过程中振动无法有效抑制,振动幅值持续超限。(3) 润滑系统滤网堵塞、管路积垢堵塞、油泵工况异常,会造成轴承供油断续、油压频繁波动。不稳定的供油状态使轴承油膜频繁波动,轴系支撑稳定性持续变差,诱发振动异常且难以稳定控制。

2.4 启动运行工艺参数控制不当

(1) 机组启动时升速过快、各温度区间暖机时间严重不足,转子无法均匀受热,上下缸、内外壁温差偏大,产生暂时性热弯曲,破坏转子平衡状态,直接造成启动阶段轴振持续攀升、超标。(2) 启动并网阶段,主蒸汽温度、压力大幅波动,调阀开度不均、进汽流量偏差,会造成汽轮机通流部分进汽不均,产生不均匀汽流激振力,冲击转子轴系,诱发突发性轴振超标。(3) 操作人员启停流程不规范、参数调控滞后,未根据机组状态及时调整升速速率、暖机时长及蒸汽参数,加剧转子

受热不均、受力失衡,放大各类振动缺陷,导致轴振超标问题频发。

3 汽轮机启动过程轴振超标调整改措施与工程应用

3.1 转子本体故障整改与平衡优化

(1) 针对转子结垢、磨损、配重异常等故障,需开展精细化转子检修整改工作。机组停机后对汽轮机各级叶片、转子轮盘进行全面清理,采用高压清洗、喷砂处理方式彻底清除表面结垢,修复叶片轻微冲刷、磨损缺陷。结合高速动平衡试验,精准检测转子质量分布偏差,通过调整平衡配重、校正配重块位置、清除转子内部残留异物等方式,优化转子质量平衡状态,从根源消除质量偏心引发的振动激振力,适配机组启动全工况运行需求。(2) 针对转子热弯曲与永久弯曲问题,制定专项校正与热应力释放调试方案。对于启停温差导致的暂时性热弯曲,采用恒温长效暖机、盘车持续运行的方式,缓慢释放转子内部残余热应力,均匀转子温度场,恢复转子原始形态。针对永久机械弯曲故障,采用专业直轴工艺进行校正修复,校正后开展低速、高速复核试验,确保转子弯曲量控制在规范允许范围内,杜绝弯曲形变引发的持续性轴振超标问题^[3]。(3) 建立转子常态化检测与预控维护机制,实现故障提前防控。日常运维中定期开展转子无损检测,排查叶轮裂纹、部件松动、疲劳损伤等隐性缺陷,及时处理潜在故障。结合机组运行台账,统计启动阶段振动变化规律,针对性制定周期性维护计划,提前预判转子平衡劣化、形变等问题,通过预防性检修避免转子故障累积,保障转子长期稳定运行。

3.2 轴系对中与基础结构调整改

(1) 落实高精度轴系对中调试工艺,修正轴系偏移偏差。机组检修后采用激光对中仪开展联轴器精准对中作业,严格检测联轴器端面平行度、同轴度偏差,按照机组技术标准微调转子位置,消除轴系对中误差。同时规范联轴器螺栓紧固工艺,采用对称分次紧固方式,保证螺栓力矩均匀一致,避免因紧固不均导致的轴心偏移,解决检修后轴系对中精度不足引发的启动振动超标问题,满足机组高速运行对轴系同轴度的严苛要求。(2) 针对基础沉降、螺栓松动、基座刚度不足问题,实施专项加固整改。全面检查机组基础混凝土结构、轴承座支撑状态,对松动的基础螺栓、轴承座紧固螺栓进行逐一复紧、力矩校验,对老化、失效的螺栓进行更换。针对地基沉降、轴承座倾斜问题,采用垫铁找平、基座灌浆加固工艺,修复基础支撑缺陷,提升轴承座与基础的整体刚度,消除轴系支撑晃动隐患,保证轴系运行过程中支撑稳定、受力均匀。(3) 开展动静间隙精细化

调整,彻底消除动静碰磨隐患。结合机组检修数据,精准测量汽轮机汽封间隙、隔板间隙、转子径向与轴向间隙,对照标准参数对间隙偏差部位进行微调,修正装配误差与转子形变引发的间隙不均问题。通过精细化调整,避免转子升速、暖机过程中与静止部件发生轻微碰磨,杜绝摩擦激振引发的轴振攀升,保障启动过程轴系运行平稳^[4]。

3.3 润滑系统与轴承优化调试

(1) 建立润滑油参数标准化调控方案,稳定油膜运行状态。严格规范机组启停及运行全过程的润滑油温、油压管控标准,启动前提前投入润滑油预热系统,将油温维持在35~45℃合理区间,稳定供油压力,避免油压大幅波动。同时常态化检测油质指标,定期开展润滑油过滤、化验分析,及时更换乳化、杂质超标的润滑油,清理油系统污染物,保证润滑油洁净度、粘度达标,维持轴承油膜均匀、稳定,杜绝油膜失稳与油膜振荡问题。(2) 优化轴瓦检修与间隙调试工艺,处理各类轴瓦故障。机组检修时对轴瓦合金层、瓦面进行全面检查,对磨损、划伤、合金脱落的轴瓦进行修复或更换。按照设备标准精准调整轴瓦顶部间隙、侧隙,消除间隙超标、瓦块卡涩等问题,保证轴瓦与转子轴颈配合精度达标,提升轴承对转子的约束能力,降低转子高速旋转时的偏心晃动幅度,有效抑制振动超标现象。(3) 优化润滑系统流程,建立稳定供油保障机制。定期清理润滑系统滤网、输油管路,消除管路堵塞、供油不畅等隐患,校验油泵、调压阀工作性能,保障供油流量、压力持续稳定。优化油系统旁路过滤与冷却流程,实现润滑油实时净化、恒温调控,规避供油波动、油质劣化引发的支撑不稳定问题,为轴系安全稳定运行提供可靠润滑保障。

3.4 启动运行工艺优化与标准化管控

(1) 推行分阶段精细化升速、暖机工艺。摒弃传统粗放式启动模式,根据机组缸温、转子温度设置梯度升速速率,在临界转速区间平稳升降速,避免转速骤变激振。严格规范低速、中速暖机时长,根据环境温度、停机间隔调整暖机参数,保证转子、汽缸均匀受热,彻底

消除转子热不均引发的热弯曲,从工艺层面规避启动轴振超标问题。(2) 优化蒸汽参数调控工艺,抑制汽流激振。机组启动并网阶段,精准控制主蒸汽温度、压力、升温升压速率,保证蒸汽参数平稳爬升,杜绝大幅波动。优化调阀开启逻辑,实现多阀同步均匀进汽,消除单侧进汽量大、通流不均的问题,减小汽流对转子的不平衡冲击力,有效抑制汽流激振,稳定轴系振动状态^[5]。

(3) 构建机组启动全过程振动监测与预警管控机制。依托机组在线振动监测系统,对各轴承轴振幅值、相位、频率进行全程实时采集分析,设置启动各阶段振动预警阈值与超标联锁管控逻辑。启动过程中安排专人监护,及时识别振动异常趋势,提前采取降速、延长暖机、稳定参数等调控措施,形成实时监测、提前预警、快速处置的标准化管控体系,大幅降低轴振超标故障发生率。

结束语

本文系统分析了汽轮机启动阶段轴振超标的各类诱因,明确转子故障、轴系偏差、润滑异常及工艺不当是核心症结,配套完善了针对性调试整改与常态化防控措施。通过精细化检修调试、优化运行工艺、健全管控机制,可有效抑制启动振动超标问题,提升轴系运行稳定性。研究成果可直接应用于机组启停运维工作,为同类振动故障排查整改、机组安全长效运行提供可靠的工程借鉴。

参考文献

- [1] 陈卓,熊祥辉,汤红权.某1000 MW汽轮机振动突变分析与治理[J].湖北电力,2022,44(4):82-90.
- [2] 徐国生,周天旺.某660MW汽轮机振动原因分析及处理[J].能源研究与管理,2023,9(11):92-94.
- [3] 徐仟.汽轮机启动过程中振动异常分析及处理[J].现代商贸工业,2024,41(21):204-207.
- [4] 霍风波.汽轮机启动过程中的振动故障分析及处理措施[J].设备管理与维修,2023,24(10):61-62.
- [5] 贺远锋.汽轮机启动过程中的振动故障及解决措施[J].技术与市场,2024,26(6):143-144.