

上汽上锅汽轮机轴系振动特性分析及运行调整策略

张智涵

福建华电可门发电有限公司，福建省福州市，350000；

摘要：本文以上汽上锅汽轮机轴系振动为重点进行了系统性的研究工作。分析轴系振动产生的主要原因，并对振动源识别和信号采集与处理中存在的技术难题和解决方法进行阐述；介绍振动监测系统，故障诊断预警机制和控制技术等方面的应用现状和成效；制定运行调整策略，包括优化运行参数，强化设备维护管理，引进先进的监测诊断技术。指出了研究中振动源精准溯源和复杂工况下振动特性剖析等方面存在的缺陷，提出了今后的研究趋势，最后对上汽上锅汽轮机的运行和维护提出了具体的建议，目的是促进机组运行安全和稳定。

关键词：上汽上锅；汽轮机轴系；振动特性；振动监测

DOI：10.69979/3041-0673.25.11.040

引言

汽轮机是电力工业的核心设备之一，汽轮机的安全与稳定运行对电网供电质量与可靠性有着直接影响。轴系振动是汽轮机运行中一项重要的监测指标，对于机组安全性与稳定性有着显著影响。上汽上锅汽轮机是我国的主流机型，深入分析轴系振动特性对促进机组运行至关重要。国内外学者对于汽轮机轴系的振动分析已经取得了很多的研究成果，但是仍然存在着对于具体机型的振动特性的研究不充分，振动故障诊断的精度还有待提高的问题。

1 上汽上锅汽轮机轴系的基本技术概述

1.1 汽轮机轴系的定义与特点

汽轮机轴系作为汽轮机内连接各个转子部件和传递扭矩的关键系统主要包括转子，轴承和联轴器三大部分^[1]。转子在轴系中起着核心作用，它担负着把蒸汽中热能转化为机械能的任务；轴承的主要功能是为转子提供支撑并降低摩擦；联轴器的主要功能是连接各种转子，确保它们能够同步进行旋转^[2]。上汽上锅汽轮机轴系因设计独特，制造工艺高超而著称，结构紧凑，运行稳定，承载能力大。它在技术参数上对转子长度，直径，重量及轴承类型，润滑方式都进行了精心设计与优化，从而达到了高效，安全，平稳运行的要求。



图1 上汽上锅汽轮机轴系的基本技术概述图

1.2 轴系振动的应用现状

轴系振动对汽轮机的运行监测起着决定性作用，是评价机组健康状态和防止潜在故障发生的一个重要标志^[3]。对轴系振动进行实时监测与分析，可及时发现转子不平衡，轴承磨损，联轴器松脱等异常状况，以便采取适当的措施，避免事故的扩大。上汽上锅汽轮机轴系振动监测技术已经得到了广泛的应用，利用先进的振动传感器及数据分析系统可以实时准确的得到轴系振动数据并借助专业软件平台对其进行深度分析及预警。

1.3 轴系振动技术的发展趋势

在科学技术不断进步的今天，轴系振动监测技术也在向智能化和网络化发展^[4]。轴系振动监测系统会更重视数据实时采集，处理与分析的能力，并通过大数据，人工智能等先进技术的引入来实现轴系振动状态准确预测与智能诊断。随着物联网的推广，轴系振动监测系统必将实现远程监控、集中管理、提升运维效率^[5]。这些新技术的开发会给上汽上锅汽轮机轴系振动监测工

作带来深远的影响,既增强了监测工作的准确性与及时性,也促进了机组运维模式创新与升级,为汽轮机安全、稳定地运行提供了更扎实的保证。

2 上汽上锅汽轮机轴系振动的主要技术难点

2.1 振动源识别与定位

上汽上锅汽轮机轴系产生振动的原因有很多,主要有转子未平衡,未对中,轴承失效和联轴器存在缺陷。转子不平衡可由于制造误差,物料不均,也可由于工作时磨损造成;不正确的情况往往是由于安装调节不当或者热膨胀的不同而造成的;轴承故障可与润滑不良,磨损或者疲劳损伤有关;联轴器的缺陷可能是由于连接部分的松动或者损坏造成的。识别和定位振动源的技术难题是振动信号中通常含有多个频率成分,不同故障类型会产生类似振动特征。为了有效地解决这个问题,我们需要使用尖端的信号处理方法,例如小波变换和经验模态分解,这样可以提取出故障的特征频率,并与机器学习算法相结合,实现对振动源的精确定位。

2.2 振动信号的采集与处理

振动信号采集系统包括振动传感器,数据采集卡,上位机软件。振动传感器承担着把机械振动变成电信号的任务,而数据采集卡把这些电信号数字化后传送到上位机软件中做进一步的分析。振动信号的处理过程中存在着噪声干扰与信号衰减两大难题。噪声的干扰可能是由电磁干扰或机械振动的背景噪声等因素引起的,这会对振动信号的精确度产生不良影响;信号的衰减可能是由于传感器的不恰当安装位置或传输线路的损耗等因素引起的。为了解决这些难题,需要利用滤波技术去噪、优化传感器布置来降低信号衰减、利用信号增强技术来改善信号质量。

2.3 振动特性与运行工况的关系

上汽上锅汽轮机运行工况对轴系振动特性影响显著。不同负荷,转速及温度下轴系振动呈现不同规律。负荷变化会引起转子的热弯曲从而影响其振动特性;当转速发生变化时,转子的临界转速可能会受到影响,从而触发共振效应;轴承的润滑特性和材料的热膨胀系数可能会因温度的波动而受到影响,这进一步可能导致振动的出现。深入剖析运行工况对轴系振动特性产生影响的机理,有利于有针对性地制定运行调整策略例如优化负荷分配和控制转速改变幅度等、调节润滑油温度等来

减小轴系振动及提高机组运行稳定性与安全性。

3 上汽上锅汽轮机轴系振动的技术应用分析

3.1 振动监测系统的应用

上汽上锅汽轮机轴系振动监测系统一般配置高精度振动传感器,数据采集单元和中央分析处理平台等。传感器分布于轴系关键部位,对振动信号进行实时采集,数据采集单元负责将其转换成数字信息传送到中央平台。系统具有实时监测,数据分析,历史数据查询和报警等功能,能综合反映轴系振动状况。振动监测系统在实践中有效地辅助运维人员发现轴系异常并防止可能发生的故障,从而提高机组运行可靠性与安全性。通过长时间监测数据积累也可以对轴系维修与优化工作提供强有力的支撑。

3.2 振动故障诊断与预警

根据振动数据进行故障诊断的方法有时域分析,频域分析和时频联合分析。对振动信号进行特征提取及模式识别可精确地判断轴系有无不平衡,不对中及轴承故障。预警机制再依据诊断结果并结合预设阈值及规则及时报警以提醒运维人员做出相应处理。故障诊断与预警系统的准确度和稳定性是由诊断算法的准确度、传感器数据的可靠性以及系统设计的合理性共同决定的。需要在实践中不断对诊断算法进行优化,提升传感器的准确性,同时加强对系统进行日常维护与标定,从而保证系统能够长时间稳定地工作。

3.3 振动控制技术的应用

常见振动控制技术有动平衡,轴承优化和结构改造。动平衡技术是利用调节转子质量分布来消除不平衡力以减小振动。轴承的优化措施涵盖了对轴承设计的改进、提升轴承制造的精确度、以及润滑方法的优化,旨在增强轴承的支撑能力并降低摩擦和振动。针对轴系中的结构瑕疵或设计不当,结构改造旨在增强轴系的总体刚性和动态表现。这些振动控制技术被广泛地应用于上汽上锅汽轮机轴系的振动控制,效果十分显著。

4 上汽上锅汽轮机轴系振动的运行调整策略

4.1 优化运行参数

运行参数如负荷、转速和温度对上汽上锅汽轮机的轴系振动有显著影响。负荷变化主要通过改变汽轮机本体气缸的“力负荷”分配影响轴系振动,而非机组电功率

负荷分配。实际运行中，汽缸受力状态的改变会导致轴系支撑刚度变化，进而影响转子振动特性。蒸汽参数偏离额定值（如压力、温度突变）会加剧汽缸热变形，诱发轴系振动异常。转速方面，汽轮机正常运行时定速 3000rpm，不存在频繁加减转速过程，但在启动、停机过程中，转子临界转速附近的振动响应需重点关注。温度变化不仅影响轴系构件热膨胀，还与蒸汽进汽温度变化密切相关，温度突变会导致转子与汽缸膨胀不均，形成热弯曲或动静碰磨，是诱发振动的重要因素。

为减小轴系振动，需结合机组实际运行状况及轴系振动特性，对运行参数进行针对性优化：

额定蒸汽参数管控：避免长期偏离额定蒸汽参数运行，通过调整汽缸垫片厚度或蒸汽支吊架弹簧高度，优化汽缸“力负荷”分配，确保轴系支撑刚度均匀。运行中加强主蒸汽温度、压力监控，设置温度变化率限制（如

$\leq 5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ），防止温度骤变引发热应力集中。

临界转速区控制：明确转子临界转速范围（如 1800~2200rpm），在启动过程中采用恒定升速率（如 600rpm/min）快速通过临界转速区，避免在临界转速附近停留。通过 DEH 控制系统设置转速变化保护，禁止非必要的转速波动。

温度场均衡调节：除监控润滑油温度外，重点监测蒸汽进汽温度、汽缸上下温差及轴瓦温度。通过优化蒸汽温度调节系统（如调整调门开度均衡性），确保进汽温度稳定；加强轴系各部件热膨胀位移监测，通过冷却系统优化（如调整轴封供汽温度）减小温差应力。

采用先进振动监测系统实时追踪轴系振动状态，结合蒸汽参数、汽缸受力数据进行多维度分析，形成“监测-分析-调整”闭环控制，持续优化轴系振动水平。具体可实施方案如下表所示：

表 1 优化运行参数可实施方案表

序号	实施步骤	具体措施	执行部门/人员	完成时间
1	汽缸力负荷优化	1.分析机组历史运行数据，结合额定蒸汽参数与轴系振动特性，制定汽缸支撑调整方案（如垫片厚度、支吊架弹簧预紧力）2.检修期间按方案调整汽缸垫片及支吊架，运行中监控蒸汽参数偏差（额定值 $\pm 5\%$ 以内）	检修部门/技术人员运行部门/操作人员	方案制定：2 周内执行：检修周期内完成
2	临界转速区控制	1.实测转子临界转速范围，在 DEH 系统中设置临界转速区快速通过策略（升速率 $\geq 300\text{rpm}/\text{min}$ ）2.操作人员严格执行启停程序，禁止在临界转速区人为停留或调整负荷	热控部门/工程师运行部门/操作人员	策略设置：1 周内执行：持续进行
3	温度场监控与调整	1.加装汽缸上下温差传感器、进汽温度变化率监测模块，实时监控轴系关键温度参数 2.根据温度数据，优化调门开度分配以均衡进汽温度，调整轴封供汽温度至设计范围（如 $320^{\circ}\text{C}\sim 350^{\circ}\text{C}$ ）	维护部门/技术人员运行部门/操作人员	传感器安装：2 周内执行：持续进行

4.2 加强设备维护与管理

定期维护与检验是维持轴系完好的关键。轴系部件（如转子、轴承、联轴器）长期运行后，可能因磨损、疲劳导致性能退化，若不及时处理，将显著改变轴系振动特性。需建立全生命周期维护管理体系，确保各构件处于良好运行状态：

精准制定维护计划：以设备运行小时数、振动历史数据为依据，制定差异化维修周期（如轴承每 5000 小时检查，联轴器每 10000 小时对中校验）。维护内容涵盖转子动平衡校验、轴承间隙测量、轴系对中调整等关键项目，明确各项检修标准（如轴承合金磨损量 $\leq 0.1\text{mm}$ ，联轴器对中偏差 $\leq 0.05\text{mm}$ ）。

强化运维人员能力：开展专项培训，使运维人员掌握轴系结构原理、振动信号特征（如 1X、2X 频率成分异常识别）及故障诊断方法（如频谱分析、趋势分析）。

通过模拟仿真系统进行实操训练，提升异常振动状态下的判断与处理能力（如快速识别碰磨、失稳振动特征）。

完善维修档案管理：建立数字化设备档案，记录历次维修时间、更换部件型号、振动数据变化（如维修前后 1X 幅值下降 30%以上）等信息，利用大数据分析预测部件老化趋势，提前制定更换策略。

4.3 引入先进监测与诊断技术

针对传统监测手段的滞后性与诊断模糊性，需构建智能化监测诊断体系：

升级在线监测系统：采用高精度电涡流传感器（分辨率 $\leq 1\mu\text{m}$ ）实时采集轴振、瓦振信号，搭配高速数据采集卡（采样频率 $\geq 10\text{kHz}$ ）确保信号完整性。集成智能分析软件，实现振动幅值、相位、频谱的实时显示与异常预警（如幅值超过报警值 $120\mu\text{m}$ 时触发声光报警）。

搭建数据共享平台：通过工业互联网将振动数据、

蒸汽参数、设备状态上传至云端服务器,支持移动端实时访问。利用大数据分析技术建立轴系振动模型,自动识别典型故障特征(如不平衡的1X幅值主导、不对中的2X频率显著),提供故障定位建议(如某轴承座刚度不足)。

开发智能诊断算法:引入机器学习技术(如随机森林、LSTM神经网络)训练故障诊断模型,基于历史振动数据、检修记录实现早期故障预警(如预测轴承磨损剩余寿命)。结合数字孪生技术构建轴系虚拟模型,模拟不同工况下的振动响应,辅助制定调整策略。

5 结论

本文针对上汽上锅汽轮机轴系振动问题,从运行参数优化、设备维护管理、先进技术应用三方面提出调整策略。通过聚焦额定蒸汽参数管控、临界转速快速通过、汽缸力负荷优化等工程实际措施,结合智能化监测诊断技术,形成系统性解决方案。后续研究可进一步探索高精度振动传感器阵列布局、多源数据融合诊断算法优化,

以及基于振动特性的主动控制策略(如电液伺服系统动态补偿),为机组长周期安全运行提供更精准的技术支撑。

参考文献

- [1] 宋亚军,张泽,李春辉,等. 300MWNCB 汽轮机轴系摩擦振动分析与处理[J]. 节能,2023,42(01):79-81.
- [2] 李玮,赵凯,刘文彦,等. 一起 1000MW 机组汽轮机轴系振动异常的诊断及处理[J]. 电站系统工程,2021,37(06):58-60.
- [3] 薛胜峰,郑祥东,谭旭东,等. 核电厂汽轮机轴系振动测量系统抗雷击干扰性能提升研究[J]. 中国核电,2020,13(04):505-511.
- [4] 李珍兴,谷军生,姚坤,等. 防止汽轮机轴系振动失稳的高调阀组进汽模式切换组合方法研究[J]. 节能技术,2020,38(04):312-316.
- [5] 陈云. 某电厂汽轮机轴系振动突增的临时运行控制措施探讨[J]. 机电信息,2019,(23):68-69.