

基于状态监测的汽轮机振动故障诊断与运维管理探讨

王朝华

华能平凉发电有限责任公司 甘肃 平凉 744000

【摘要】：汽轮机振动问题已成为制约电力设备稳定运行的重要隐患。依托状态监测技术进行振动故障的早期识别和精准诊断，是提升运维效率和保障机组安全运行的关键路径。通过构建多维数据采集系统、融合振动信号特征识别算法，并优化运维响应机制，可实现汽轮机故障的智能预测与科学管理。将状态监测技术与运维管理深度融合，有助于推动汽轮机运行模式由传统“事后维修”向“主动预防”转变，提升全生命周期管理水平。

【关键词】：汽轮机振动；状态监测；故障诊断；智能运维；数据驱动

DOI:10.12417/2811-0528.25.21.067

引言

振动是汽轮机运行中最直观且敏感的健康指标之一，轻则影响设备效率，重则诱发重大事故。随着电力系统向高可靠性与智能化方向演进，传统依赖经验判断和周期性维护的管理模式，已难以满足对故障快速响应与预防性干预的需求。状态监测技术的兴起为实现动态感知和实时分析提供了技术基础，其在汽轮机振动故障诊断中的应用，正逐步推动运维理念从“发现问题”向“预测问题”转变。如何构建高效的状态监测体系，挖掘关键振动特征并实现精准判断，成为当前设备管理领域的重要课题，也为运维管理的升级提供了新契机。

1 汽轮机振动故障的常见类型及其运行风险识别机制

1.1 汽轮机振动问题的主要表现及危害特性分析

汽轮机在运行过程中出现振动现象，通常表现为轴承箱剧烈抖动、轴心轨迹异常、频谱图出现高幅频率分量等物理信号反常状态。其危害并不仅限于机械结构的疲劳损伤，还可能诱发附属系统的不稳定运行，例如密封失效、润滑系统压力波动、联轴器磨损加剧等。振动对汽轮机结构和性能造成的影响具有累积性和隐蔽性，若未能在初期及时识别并干预，极易演变为轴系脱位、转子断裂或叶片脱落等严重事故，造成长时间停机和高额维修成本。尤其在大型火电和核电装置中，振动问题的破坏性将波及整条发电链条，严重威胁系统稳定性与人员安全。识别振动异常的主要表现，解析其背后的力学特征与影响路径，是实施有效管理的基础。

1.2 典型振动故障类型及其成因分类梳理

汽轮机振动故障可根据信号特征与设备部位分为多种类型，主要包括不平衡、不对中、松动、轴承损伤及擦碰等。其中，不平衡通常由转子质量分布不均或叶片积垢引起，表现为特定转速下的单频振动；不对中涉及联轴器安装偏差，易导致

轴系周期性冲击；松动故障常出现在地脚螺栓或部件连接处，诱发振动幅值非线性波动；而轴承损伤则表现为高频成分增强和冲击脉冲增加，伴有润滑油温升异常。擦碰类故障则多因热胀冷缩控制不当或安装间隙过小引发，通常伴随金属摩擦声及强烈局部震动。针对上述类型进行系统分类，有助于在振动信号采集与后续诊断中实现目标聚焦，提升识别效率与准确率。

1.3 振动故障对设备寿命与系统安全的综合影响

持续振动对汽轮机关键部件造成的损害具有长期性和渐进性，常导致轴颈与轴瓦间间隙扩大、材料疲劳寿命下降，进而引起轴系动态特性退化。振动能量不断施加在固定结构和旋转部件之间，使设备承载力发生变化，容易诱发裂纹扩展、零件变形及材料微观组织破坏。振动引起的热效应和接触磨损，会加速润滑系统退化和轴承烧毁，影响机组启停灵活性。系统层面上，若振动未被有效抑制，可能通过耦合传递影响发电系统中的电气控制模块，导致保护系统误动作或信号失真，对整个电厂运行构成潜在风险。将振动故障作为汽轮机全生命周期管理中的关键风险点进行监控与评估，具有重要现实意义。

2 状态监测技术在振动识别中的关键应用路径研究

2.1 多源信号采集与数据融合在状态监测中的作用体现

实现对汽轮机振动状态的全面掌握，需要构建由多种传感器组成的多源信号采集系统。通常采用加速度传感器、速度探头、位移传感器、温度传感器与压力传感器协同工作，从振动、热力、流体与结构响应等多个维度获取原始数据。这些数据通过边缘设备或嵌入式控制单元实时传输至数据中心，经同步化处理后进入融合分析阶段。融合处理可采用小波变换、经验模态分解（EMD）、主成分分析（PCA）等技术，对高维冗余信息进行降噪与特征提取，提高诊断信息的准确度和时效性。基于数据融合的状态监测体系不仅增强了对局部异常的敏感性，也为后续智能诊断提供更具代表性的输入数据，为实现对振动

异常的早期识别和精准定位奠定了基础。

2.2 常用振动诊断算法在汽轮机状态分析中的适应性探讨

在状态监测系统中，振动数据的分析需依赖有效的算法模型。目前常见的包括时域分析、频域分析和时频联合分析三种方式。时域方法以统计量计算为主，如均方根值、峭度、峰度等，适用于故障早期趋势监测；频域分析利用傅里叶变换提取频谱特征，能有效识别周期性故障模式，如不平衡与不对中；时频分析如小波包分解、希尔伯特-黄变换等技术则适用于非平稳信号处理，具备更高的灵敏度与抗干扰性。不同算法在不同场景下的表现存在差异，因此应结合汽轮机运行特点和数据特性选择最适合的诊断方法，并持续对模型精度与执行效率进行优化，以提升实际应用中的响应速度与容错能力。

2.3 基于状态监测的早期预警机制构建与评估策略

构建完善的早期预警机制需在识别出关键故障特征之后，依据其趋势变化设计多级响应阈值模型。通常设置预警、告警和停机三个等级，每一级别对应不同的风险等级与干预策略。预警机制的核心在于准确判断故障演化趋势，其实现依赖于对历史数据的拟合分析与实时数据的动态对比，结合贝叶斯估计或卡尔曼滤波等算法，可有效预测振动参数的未来变化方向。一旦指标达到设定阈值，系统将自动触发信息推送或控制逻辑执行，如调整转速、自动润滑或远程检修调度。评估策略需定期校验预警机制的准确率与误报率，以确保系统灵敏度与稳定性的双重保障。合理设计并动态调整预警机制，是提升运维管理前瞻性的关键措施。

3 汽轮机振动故障诊断的智能化建模与识别技术演进

3.1 数据驱动模型在振动特征提取与识别中的实践进展

数据驱动模型在振动诊断中可实现从大量监测数据中提取关键特征参数，通过特征映射揭示故障潜在模式。近年来，主流实践路径集中于基于支持向量机、随机森林和神经网络等算法的特征学习与分类建模。利用历史运行数据构建故障标签样本库，再经由模型训练形成可自适应识别系统，可对复杂非线性振动问题进行有效分类与定位。该类方法不依赖物理机制建模，更适合应对结构复杂、工况多变的汽轮机系统，特别适用于早期微弱异常的提取场景，提升了故障识别的时效性和准确性。

3.2 机器学习与人工智能算法在故障诊断精度提升中的应用价值

人工智能技术的应用极大丰富了振动故障诊断的技术手段，使诊断系统具备更强的学习能力与适应能力。以卷积神经

网络（CNN）为代表的深度学习算法，能够直接对原始振动信号或频谱图像进行端到端学习与分类，省去传统算法中繁琐的人工特征提取过程，尤其适合处理高维复杂数据。无监督学习中的聚类算法可在缺乏标签的情况下挖掘数据中的潜在分布规律，实现对未知故障模式的自动识别与动态追踪。同时，迁移学习和集成学习技术的引入，进一步增强了模型在小样本条件下的泛化能力，提升模型在实际工况变化中的适应性。将AI模型嵌入状态监测系统中，可实现振动数据的智能识别、异常预警、诊断推理等一体化流程，从而推动汽轮机运维向自动化与智能化方向不断演进。

3.3 诊断模型训练样本质量对识别结果可靠性的影响机制

训练样本的质量是构建高性能诊断模型的基础，直接影响识别精度与模型的实际应用能力。在汽轮机振动故障识别中，样本必须覆盖多种典型故障模式及不同负载、转速等运行工况，以保证数据的全面性与代表性。若样本量不足或类别分布严重不均，将导致模型训练阶段产生偏差，影响其泛化效果。为弥补现实中故障样本稀缺的问题，可通过数据增强技术构建虚拟样本，提升数据维度与复杂度。增强方式包括加性噪声、时域扭曲、频谱变换等，可有效提升模型对弱故障信号的识别能力，从而增强其稳定性与鲁棒性。

4 智能运维管理体系在汽轮机振动控制中的集成优化方案

4.1 基于诊断结果的分级响应与维修策略优化模型

基于状态监测的诊断结果可构建多层级的维修响应机制，实现维修行为从计划性向条件导向转变。根据振动异常的严重程度与发展趋势，设置巡检加密、检修排期、停机整改等不同响应级别。利用诊断系统自动输出的故障类型与部位信息，可对维修任务进行定向部署，缩短故障定位时间。维修策略由传统“统一预设”转向“故障分级”，结合风险评估与成本控制原则，提升资源配置效率。此类模型兼顾运行安全与经济性，适应现代电力设备精细化管理需求。

4.2 运维资源调度与管理信息系统的协同控制机制研究

状态监测平台与运维管理信息系统实现联动，可构建覆盖设备、人员、任务的全流程运维管理架构。监测系统输出异常信号后，管理平台根据既定策略自动生成维修工单、调配人员并记录操作过程，形成闭环控制流程。通过信息集成，运维各环节实现数据共享与动态更新，提升协同响应效率。调度机制依据历史维修数据和风险等级划分任务优先级，避免资源重复投入。系统可通过可视化界面实时展示振动状态及处理进度，提高决策透明度和执行力。

4.3 远程监控平台与专家系统在智能运维中的融合实践

远程监控平台可实现对汽轮机运行状态的24小时在线跟踪,并将监测数据同步至专家系统进行实时分析与判断。专家系统内嵌知识规则库与历史案例数据库,具备自动推理和辅助诊断功能。当识别出异常模式后,系统自动给出可能故障原因及处置建议,提高应急处理效率。在网络通讯与数据传输技术支持下,实现异地集中监控与多站点统一运维,有效缓解专业技术人员不足的问题。远程专家系统的推广应用提升了运维智能化水平,降低了人力成本与突发故障风险。

5 提升状态监测实效性的综合保障与关键实施路径分析

5.1 传感器布设与数据传输可靠性在系统设计中的优化要求

状态监测系统对传感器选型与布设方案要求极高,需兼顾安装位置合理性、响应灵敏度与环境适应性。在汽轮机系统中,轴承座、转子中段、联轴器等部位为重点布设区域,宜采用抗干扰能力强、温漂系数低的高性能传感器。应保障采集频率与采样精度满足高频振动信号的监测需求。数据传输方面,可采用有线与无线混合通信方式,部署冗余通道与实时备份策略,防止数据丢失或延迟。传输协议需支持高速率和稳定性,保障远程诊断平台数据接入的连续性与准确性。

5.2 运维人员技能提升与组织机制建设的配套协同策略

推进状态监测系统高效运行,需同步构建具备数据理解与分析能力的运维队伍。组织应建立系统培训机制,覆盖信号判读、故障模式识别、系统操作等关键知识模块,并设置多级技

术支持体系,便于现场技术与后端专家协同响应。岗位设置需优化人员职责分工,形成数据采集、诊断分析、维修执行的闭环流转机制。还应建立考核与激励机制,将振动控制指标与绩效评价挂钩,激发技术人员主动参与监测与维护的积极性,强化管理执行力。

5.3 基于典型案例的状态监测闭环管理实践成效评估

某300MW等级汽轮发电机组在实际运行中引入状态监测系统后,依托实时振动信号分析,有效识别出轴承部位出现的中段不平衡趋势。系统在异常参数达到设定阈值时及时发出预警,运维团队依据诊断结果迅速采取针对性处理措施,避免了隐患进一步恶化所引发的设备损坏或紧急停机。该机组通过连续监测和故障识别,实现了由事后维护向预防性维护的转变,极大提升了整体运维效率与可靠性。此次实践充分展现出状态监测技术在识别初期异常、引导精准维修方面的应用价值,也为后续完善智能诊断机制与响应流程积累了有益经验,推动管理模式向智能化和精细化不断迈进。

6 结语

本文围绕基于状态监测的汽轮机振动故障诊断与运维管理展开系统探讨,聚焦振动故障特征识别、智能建模分析、远程监控联动及预警响应机制的实际应用路径。通过构建多维数据采集系统与智能化诊断模型,有效提升了设备运行安全性与管理效率。结合典型案例实践,进一步验证了状态监测技术在推动汽轮机运维模式转型中的关键价值,为电力设备运维管理的数字化、智能化升级提供了重要支撑与借鉴。

参考文献:

- [1] 林辰宇,高志敏.基于状态监测的旋转机械振动故障诊断方法研究[J].热能动力工程,2022,37(2):98-104.
- [2] 周建华,许恒辉.智能化运维在汽轮机故障预测中的应用探索[J].电力系统装备,2023,24(5):53-57.
- [3] 陈卓然,谭海波.汽轮发电机组状态监测与振动数据分析技术研究[J].能源装备,2021,25(6):45-49.
- [4] 贺思远,孙泽宇.振动信号处理技术在大型汽轮机故障预警中的应用[J].电力设备管理,2020,38(4):60-64.
- [5] 杜晓琳,阎文涛.基于人工智能的电力设备运行状态智能监控系统研究[J].电力系统自动化,2023,47(1):112-118.