

# 火电厂汽轮机状态检修技术探析

简冬

国能江苏电力工程技术有限公司 江苏 镇江 212000

**摘要:** 本文聚焦火电厂汽轮机状态检修技术。阐述了其理论基础,包括汽轮机结构故障模式与状态检修技术体系框架。分析状态监测关键技术,如振动、油液等监测及新兴技术。探讨了故障诊断与寿命预测方法,涵盖物理模型、数据驱动方法及寿命预测技术。最后展望未来,指出边缘计算与5G、AI自主诊断决策系统、全生命周期数字孪生平台是发展方向,旨在提升汽轮机检修的科学性与高效性。

**关键词:** 火电厂; 汽轮机; 状态检修

引言: 在火电厂运行中,汽轮机作为关键设备,其稳定运行至关重要。传统检修方式存在过度检修或检修不足等问题,影响机组可靠性与经济性。状态检修技术凭借实时监测、精准诊断等优势,成为保障汽轮机安全运行的重要手段。深入研究汽轮机状态检修技术,有助于提升检修水平,降低运维成本,增强火电厂的市场竞争力,对电力行业的稳定发展意义重大。

## 1 汽轮机状态检修技术理论基础

### 1.1 汽轮机结构与故障模式分析

汽轮机作为复杂的旋转机械,主要由转子、定子、轴承、隔板、叶片等核心部件构成,各部件通过精密配合实现热能向机械能的转化。其结构特性决定了故障模式具有多样性与关联性,常见故障包括转子不平衡、不对中、叶片磨损与断裂、轴承油膜振荡、隔板变形、密封失效等<sup>[1]</sup>。转子系统作为核心旋转部件,易因材料疲劳、制造缺陷或运行工况波动引发不平衡故障,表现为振动幅值异常升高;叶片则面临气蚀、冲蚀、腐蚀等多重损伤,长期运行后可能出现裂纹扩展甚至断裂,严重威胁机组安全;轴承系统故障多与油液品质、润滑条件相关,易引发温度升高、振动异常等问题。通过深入分析各部件结构特点与故障演化规律,可为状态检修提供重要理论支撑。

### 1.2 状态检修技术体系框架

汽轮机状态检修技术体系是一个涵盖数据采集、状态监测、故障诊断、寿命预测、检修决策与执行反馈的闭环系统。该框架以设备全生命周期管理为核心,分为基础层、监测层、分析层与决策层四个核心模块:基础层包含设备结构参数、历史运行数据、检修记录等基础信息,为后续分析提供数据支撑;监测层通过各类传感器实现振动、温度、压力、油液等关键参数的实时采集与传输;分析层运用物理模型、数据驱动算法等技术手

段,对监测数据进行深度挖掘,实现故障识别、定位与严重程度评估;决策层基于分析结果,结合设备运行需求、检修资源配置等因素,制定最优检修方案,并通过执行反馈持续优化体系参数。

## 2 汽轮机状态监测关键技术

汽轮机状态监测关键技术是状态检修体系的核心支撑,通过对机组运行过程中各类物理、化学参数的精准感知与实时追踪,实现设备状态的动态掌控。该技术以传感器技术、数据传输技术、信号处理技术为核心,涵盖振动、油液、温度、压力等传统监测手段与红外热成像、超声波检测等新兴技术,形成多维度、全方位的监测网络。

### 2.1 振动监测与分析

振动监测与分析是汽轮机状态监测中最核心、最常用的技术手段,其原理基于设备故障会导致振动信号特征发生规律性变化的特性。该技术通过在转子、轴承、机座等关键部位安装加速度传感器、速度传感器,采集径向、轴向振动信号,经信号调理、数据采集卡转换为数字信号后,运用时域分析、频域分析、时域-频域联合分析等方法进行处理<sup>[2]</sup>。时域分析通过峰值、有效值、峭度、偏度等参数识别信号幅值变化;频域分析通过傅里叶变换将时域信号转换为频谱图,依据特征频率定位故障类型,如转子不平衡对应1倍频幅值升高、不对中对应2倍频异常、轴承故障对应特征频率峰值等;小波分析等联合分析方法则适用于非平稳信号处理,可有效识别早期微弱故障。通过振动监测与分析,能够快速判断转子不平衡、不对中、轴承磨损、叶片裂纹等常见故障,是保障机组安全运行的“哨兵”。

### 2.2 油液监测技术

油液监测技术通过分析汽轮机润滑油、液压油的物理化学性质与颗粒污染物特征,评估设备磨损状态与润

滑系统性能,是一种非破坏性监测手段。该技术主要包括油液理化指标检测、污染度分析、磨损颗粒分析三大核心内容:理化指标检测通过测定粘度、酸值、水分、闪点等参数,判断油液老化、变质程度,评估润滑性能;污染度分析采用颗粒计数器等设备,依据ISO4406标准确定油液中杂质颗粒的数量与尺寸分布,判断密封失效、部件磨损等问题;磨损颗粒分析通过光谱分析、铁谱分析等技术,识别磨损颗粒的元素组成、形貌特征与浓度变化,进而判断磨损部位、磨损类型与严重程度。

### 2.3 温度与压力监测

温度与压力作为汽轮机运行过程中的核心热力学参数,其监测数据直接反映机组热力循环效率与设备健康状况。温度监测主要针对轴承温度、定子绕组温度、蒸汽温度、排汽温度等关键部位,采用热电偶、热电阻等传感器实现实时采集,通过监测温度变化可识别润滑不良、冷却系统故障、蒸汽参数异常等问题,如轴承温度持续升高可能预示油膜振荡、润滑油不足等故障;压力监测聚焦于主蒸汽压力、再热蒸汽压力、排汽压力、油压等参数,采用压力变送器、压力表等设备采集数据,压力波动异常可能反映阀门卡涩、管道泄漏、汽轮机通流部分结垢等问题。温度与压力监测需保证传感器安装位置精准、测量范围匹配,数据采集频率满足实时分析需求,通过与振动、油液等监测数据的融合分析,可全面提升设备状态评估的准确性,为故障诊断提供多维度数据支撑。

### 2.4 新兴监测技术

随着传感器技术、人工智能、物联网等技术的快速发展,汽轮机状态监测领域涌现出一批新兴技术,显著拓展了监测维度与诊断能力。红外热成像技术通过检测设备表面温度场分布,可非接触式识别轴承过热、管道泄漏、绝缘老化等故障,尤其适用于难以接近部位的监测;超声波检测技术利用超声波在材料中的传播特性,可检测叶片、转子等部件的内部裂纹、腐蚀缺陷,实现早期损伤识别;声发射监测技术通过捕捉设备运行过程中因裂纹扩展、摩擦碰撞等产生的弹性波信号,实时监测故障演化过程,为紧急故障预警提供支持;无线传感器网络技术则解决了传统有线监测系统布线复杂、维护困难的问题,通过无线传输实现多测点同步监测,提升监测系统的灵活性与扩展性。

## 3 汽轮机故障诊断与寿命预测方法

### 3.1 基于物理模型的方法

基于物理模型的故障诊断与寿命预测方法以汽轮机结构原理、力学特性、热力学规律为基础,通过建设

备运行的数学模型,模拟故障演化过程与寿命损耗机制。该方法首先根据设备设计参数、材料属性、运行工况等信息,建立转子动力学模型、热力学循环模型、疲劳损伤模型等核心模型,通过数值计算分析设备在正常与故障状态下的参数变化规律,进而制定故障判定准则与寿命评估公式。例如,在转子故障诊断中,通过建立Jeffcott转子模型,分析不平衡、不对中故障下的振动响应特征,实现故障类型识别;在寿命预测中,基于Miner线性累积损伤理论、Paris裂纹扩展模型等,结合应力分析结果,计算部件疲劳寿命与剩余使用寿命。该方法的优势在于物理意义明确、解释性强,适用于故障机理清晰、模型可准确建立的场景,但对参数准确性与建模技术要求较高,难以应对复杂多故障耦合场景<sup>[3]</sup>。

### 3.2 基于数据驱动的方法

基于数据驱动的方法依托大数据技术与人工智能算法,通过挖掘海量监测数据中的隐藏规律,实现故障诊断与寿命预测,无需依赖精确的物理模型,适用于复杂设备与多故障耦合场景。该方法的核心流程包括数据预处理、特征提取、模型训练与推理应用四个步骤:数据预处理通过降噪、补全、归一化等操作提升数据质量;特征提取采用主成分分析、小波包变换等方法,从原始数据中提取故障敏感特征;模型训练利用支持向量机、人工神经网络、随机森林、深度学习等算法,建立监测数据与故障状态、剩余寿命的映射关系;推理应用阶段通过输入实时监测数据,实现故障诊断与寿命预测。该方法具有自适应能力强、诊断精度高、适用于复杂系统等优势,随着监测数据量的积累与算法的优化,其应用范围不断扩大,已成为汽轮机故障诊断与寿命预测的主流方法之一。

### 3.3 寿命预测技术

汽轮机寿命预测技术聚焦于核心部件的剩余使用寿命评估,为检修计划制定与设备更新决策提供科学依据,主要包括疲劳寿命预测、蠕变寿命预测、腐蚀磨损寿命预测等方向。疲劳寿命预测以材料疲劳特性为基础,结合机组启停次数、负荷波动等运行数据,通过Miner线性累积损伤理论、非线性累积损伤模型等计算部件疲劳损伤累积量,进而预测剩余疲劳寿命;蠕变寿命预测针对高温高压工况下的部件,基于材料蠕变试验数据,采用Larson-Miller参数法、Arrhenius方程等建立蠕变损伤模型,评估部件在长期高温应力作用下的剩余寿命;腐蚀磨损寿命预测则结合运行环境、介质特性、油液监测数据等,分析部件腐蚀、磨损速率,建立寿命损耗模型。现代寿命预测技术正朝着多因素耦合、多模型融合的方向发展,

通过整合疲劳、蠕变、腐蚀等多维度损伤机制,结合数据驱动与物理模型的优势,显著提升预测精度,为设备全生命周期管理提供可靠支撑。

#### 4 未来发展方向

随着新一代信息技术与高端装备制造技术的深度融合,汽轮机状态检修技术正朝着智能化、网络化、一体化方向快速发展,未来将围绕实时监测升级、自主决策优化、全生命周期管理三大核心目标,突破关键技术瓶颈,构建更高效、更可靠、更智能的检修体系。

##### 4.1 边缘计算与5G在实时监测中的应用

边缘计算与5G技术的融合应用将彻底革新汽轮机实时监测系统的架构与性能,解决传统监测中数据传输延迟、带宽受限、云端计算压力大等痛点。5G技术凭借其高带宽、低时延、广连接的特性,可实现海量监测数据的高速、实时传输,保障振动、温度、压力等关键参数的同步采集与远程监控,尤其适用于大型电站多机组集群监测场景;边缘计算则将数据处理、分析算法部署在靠近传感器的边缘节点,实现监测数据的本地实时分析与故障预警,大幅降低数据传输量与云端计算负荷,避免因网络中断导致的监测失效。二者结合可构建“边缘感知-本地分析-云端协同”的三级监测架构,边缘节点负责数据采集与实时预警,云端平台承担数据存储、模型训练与全局优化,实现从数据采集到故障预警的端到端延迟控制在毫秒级。

##### 4.2 基于AI的自主诊断与决策系统

基于人工智能的自主诊断与决策系统将成为汽轮机状态检修的核心发展方向,通过深度融合机器学习、深度学习、强化学习等先进算法,实现从故障识别到检修决策的全流程自主化。该系统将具备三大核心能力:一是高精度故障诊断能力,通过构建深度学习模型(如卷积神经网络、循环神经网络),自动提取监测数据中的深层故障特征,实现多故障、早期微弱故障的精准识别与定位,诊断准确率将突破95%;二是智能寿命预测能力,基于强化学习与迁移学习算法,整合多源数据与多损伤机制,实现剩余寿命的动态自适应预测,预测偏差率控制在10%以内;三是自主决策优化能力,结合设备运行需求、检修资源约束、经济性目标等多因素,通过多目标优化算法制定最优检修方案,自动生成检修计划、资源

调配建议,并具备自我学习与持续优化能力。该系统将显著降低对人工经验的依赖,实现检修决策的科学化、自动化与智能化,大幅提升检修效率与经济性。

##### 4.3 全生命周期数字孪生平台构建

全生命周期数字孪生平台将打通汽轮机设计、制造、运行、检修、报废的全流程数据壁垒,构建物理设备与虚拟模型的实时映射与协同联动,成为状态检修的终极形态。该平台以数字孪生模型为核心,整合设备设计图纸、材料参数、制造工艺数据、运行监测数据、检修记录、故障案例等全生命周期信息,通过三维建模、仿真模拟、数据融合等技术,实现设备运行状态的实时可视化、故障演化的虚拟仿真、检修过程的模拟优化<sup>[4]</sup>。在状态检修中,该平台可通过虚拟模型与物理设备的实时数据交互,提前模拟故障发展趋势,优化监测点布局;通过虚拟检修仿真,制定最优检修流程,减少实际检修时间与成本;通过全生命周期数据追溯,分析故障根源,为设备设计改进提供依据。未来,随着数字孪生技术与物联网、大数据、人工智能的深度融合,该平台将实现从“状态监测”到“全生命周期智能管理”的跨越,为汽轮机设备的安全、高效、经济运行提供全方位支撑。

#### 结束语

火电厂汽轮机状态检修技术对保障机组安全、高效运行意义深远。当前,在理论基础、监测技术、诊断预测等方面已取得一定成果,但仍面临挑战。未来,随着边缘计算、5G、AI及数字孪生等技术的发展,汽轮机状态检修将迈向智能化、网络化、一体化新阶段。持续创新与完善该技术,能进一步提升检修质量,为火电厂的可持续发展提供坚实支撑,推动电力行业迈向更高水平。

#### 参考文献

- [1]石聪,白汉宽.火电厂汽轮机状态检修技术研究关键点[J].中国战略新兴产业,2020(42):33-34.
- [2]许瑞.火电厂汽轮机状态检修技术探析[J].电力设备管理,2025(16):85-87.
- [3]刘镇荣.火电厂汽轮机状态检修技术探析[J].电力设备管理,2025(16):76-78.
- [4]周志峰.分析火电厂汽轮机辅机检修管理的现状及对策[J].甘肃冶金,2020,42(06):70-72.