

火电厂集控运行中蒸汽轮机振动异常 智能诊断与抑制策略研究

江宗浩

(马鞍山当涂发电有限公司)

【摘要】火电厂集控运行模式下,蒸汽轮机振动异常问题对系统安全与运行稳定性构成严重挑战。文章围绕蒸汽轮机振动异常的实际运行特征,研究了典型工况下振动波动与结构偏差的成因,深入剖析了异常振动对调控系统的影响机制。在此基础上,设计数据驱动的智能诊断流程,完成振动信号采集与时频特征提取,构建基于卷积神经网络的异常识别模型,实现对多类型振动模式的精准分类。进一步制定控制策略联动机制,提升诊断结果的工程响应能力,并结合实测工况数据进行策略有效性验证,量化抑制效果。研究旨在为火电厂蒸汽轮机振动风险的智能预警与快速干预提供可靠技术路径与工程实现依据。

【关键词】火电厂;集控运行;蒸汽轮机;振动异常

中图分类号: TM621

DOI: 10.13655/j.cnki.ibci.2025.S2.179

Research on Intelligent Diagnosis and Suppression Strategies for Steam Turbine Vibration Abnormalities in Centralized and Controlled Operation of Thermal Power Plants

JIANG Zong-hao

(Ma'anshan Dangtu Power Generation Co., Ltd.)

【Abstract】In the centralized operation mode of thermal power plants, the abnormal vibration of steam turbines poses a serious challenge to system safety and operation stability. Focusing on the actual operation characteristics of abnormal vibration of steam turbines, the article studies the causes of vibration fluctuations and structural deviations under typical working conditions, and deeply analyzes the influence mechanism of abnormal vibration on the regulatory system. On this basis, it designs a data-driven intelligent diagnostic process to complete vibration signal collection and time-frequency feature extraction, build an abnormal recognition model based on convolutional neural network, and realize the accurate classification of multi-type vibration modes. It further formulates the control strategy linkage mechanism to improve the engineering response ability of diagnostic results, and verify the effectiveness of the strategy in combination with the actual working condition data, and quantify the inhibition effect. The research aims to provide a reliable technical path and engineering implementation basis for intelligent early warning and rapid intervention of steam turbine vibration risk in thermal power plants.

【Keywords】thermal power plant; centralized control operation; steam turbine; abnormal vibration

1 引言

火电厂在我国能源结构中占据重要比重,集控运行模式作为提升运行效率与安全水平的关键手段,已在各类大型机组中广泛应用。蒸汽轮机作为火电厂动力系统的核心设备,其运行状态直接影响整套发电系统的稳定性与经济性。在集控环境下,蒸汽轮机运行特征更加复杂,涉及高速旋转部件、多源扰动耦合以及动态负荷变化等因素,振动表现呈现出时变性与非线性特征。振动信号中蕴含大量与结构状态和运行工况密切相关的信息,对其进行精细感知与智能识别,是保障设备稳定运行与精准调

控的基础环节。深入理解振动行为演化规律,有助于提升蒸汽轮机系统的异常感知能力与工程响应效率,为集控系统下的运行安全构建技术支撑。

2 振动异常问题分析

2.1 高负荷运行引起的振动波动

火电厂集控运行模式下,蒸汽轮机常处于变负荷或深调峰运行状态。高负荷工况下,主蒸汽压力与温度显著升高,热应力快速作用于转子系统,导致轴向膨胀不均。转子在非均匀热载荷作用下产生微小形变,引发不规则轴振动。同时,调门开启度的快

速变化引发蒸汽流场扰动,进一步激发非稳定气动力,对转子系统形成交变激励。高负荷段,汽封间隙变化与轴承油膜刚度下降现象更为明显,导致系统阻尼能力降低,振动响应增强^[1]。调节系统响应滞后时,频繁切换的负荷工况形成动态激励,加剧整个轴系的振动幅度波动。该波动在时间域表现为脉冲性冲击,频率域存在能量短时集中现象,对诊断模型的识别精度提出了更高要求。

2.2 轴系不对中导致的周期振动

蒸汽轮机轴系由多级转子、轴承及联轴器构成,对对准精度要求严苛。经长周期运行或热工调整后,易出现热变形残留、基础下沉、联轴器偏差等情况,引发轴系不对中问题。此类结构性偏差使转子旋转过程中产生附加载荷,表现为稳定且幅度较高的周期性振动。振动呈现明显的一次频或两倍频特征,且在稳态运行中维持恒定水平。联轴器不对中引发弯矩不平衡,作用于两端轴承产生交替剪切力,导致轴承油膜非对称扰动^[2]。高转速工况下,微小的不对中偏差会在运行中被放大,形成准共振状态,在低阻尼支撑结构中尤为显著。集控系统中,运行人员主要依赖远程监测信号判断设备状态,不对中振动信号易被误判为普通运行波动,影响定位准确性。

2.3 振动异常对安全控制的影响

蒸汽轮机振动信号具有高度非线性特征,其波动性与不确定性直接干扰集控系统对设备健康状态的判断。振动异常发展过程中,轴向位移、轴承温度、油膜压力等系统监控变量会产生协同变化,导致自动控制策略频繁调整。调门开度、调速器响应曲线出现异常扰动,破坏调速系统稳定性^[3]。严重情况下,自动控制系统执行保护逻辑,频繁触发减载、跳闸等操作,对电网调度造成冲击。集控运行模式下,多机组共用一体化控制平台,振动异常产生的负面反馈可能通过电气系统耦合至其他设备,扩大干扰范围。部分早期故障信号微弱、特征不显著,若未能及时识别,会使振动进一步演变为机械破坏或结构疲劳失效。缺乏对振动信号的精细分析机制,会削弱控制系统的响应精度,降低故障处置时效与准确。

3 智能诊断与抑制策略设计

3.1 振动数据采集

蒸汽轮机振动的异常演化具有短时突变和强非

线性特征,对监测系统响应速度与采样精度提出更高要求。数据采集依托火电厂集控系统现有传感器布设基础,选取高灵敏度压电加速度计布设在轴承座、联轴节邻近区域及中压段转子下方,通过差动方式消除背景噪声干扰。信号采样频率设定为20kHz,满足高速旋转设备振动信号的Nyquist要求,采集通道采用同步采集模式,避免因通道时差影响振动源定位^[4]。

采集模块接入边缘计算装置,在本地完成初步滤波,采用带通滤波器抑制工频干扰与高频噪声。信号预处理阶段引入滑动窗口切片机,将连续振动信号按时间窗分割,便于后续特征提取模块进行多尺度分析。每个样本窗长度设定为0.2s,对应4000个采样点,振动数据按运行工况分类存储,包括满负荷、调峰、启停及跳闸过程四类典型状态。

3.2 特征参数提取

蒸汽轮机振动信号复杂多变,直接输入原始时域数据将导致诊断模型学习困难。为增强诊断模型的输入表达能力,从时域、频域及时频域三个维度构建特征矩阵。在时域特征中,选取峰值、均方根、峭度、偏度等8类常用统计参数表征信号幅值分布与偏移趋势;在频域特征中,采用快速傅里叶变换对信号进行谱分析,提取主频分量、频率中心、频率能量密度等参数,用于识别周期性异常及共振特征^[5]。

为处理非平稳信号,进一步引入小波包分解方法,对振动信号进行4层小波包分解,提取各分解层的能量比值作为时频特征。设第 j 层第 k 个频带的小波包能量为 $E_{j,k}$,则总能量为:

$$E_{total} = \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^{2^j} E_{j,k} \quad (1)$$

特征向量中各能量比值定义为:

$$f_{j,k} = \frac{E_{j,k}}{E_{total}} \quad (2)$$

特征提取后形成维度为 $[N,D]$ 的样本矩阵,其中 N 为样本数量, D 为提取的多尺度特征维度。所有特征在输入模型前进行Z-score标准化处理,增强模型对不同物理量的适应能力。

3.3 异常模式识别

异常诊断模块采用深度卷积神经网络(CNN)结构,利用其对局部模式敏感、可自动提取高层特征的能力,识别不同类型振动异常。输入层接收二维特

征矩阵,第一层卷积核大小为3×3,通道数为32,激活函数采用ReLU。池化层使用最大池化方式降低维度,提升鲁棒性。网络结构设计为两层卷积+池化叠加,后接一层全连接层与Softmax分类器,输出层维度与异常模式数量相同,包括轴系不对中、高负荷扰动、油膜失稳、轴瓦磨损与正常状态共五类。模型损失函数采用交叉熵函数:

$$L = - \sum_{i=1}^m y_i \log(\hat{y}_i) \tag{3}$$

式(3)中: y_i 为真实标签, $\hat{y}_i$ 为预测概率。训练阶段引入Dropout机制防止过拟合,优化算法选用Adam,自适应学习率设为0.001,迭代轮数为100轮。模型训练完成后,在火电厂控制系统中部署轻量化版本,接入在线采集数据流,在边缘节点实时进行振动状态分类。识别结果通过中控系统可视化接口反馈至运行值班员,并触发预设抑制策略。

控制策略部分根据识别结果进行分级响应:针对高负荷扰动引发的振动,引导调门开度缓调,降低蒸汽激励冲击;对轴系不对中识别结果,发出转速限制命令,避免共振区段;对油膜失稳状态,发送润滑系统检查指令。各策略绑定中控系统逻辑层变量,形成闭环反馈路径。

4 策略效果验证分析

4.1 实测数据验证

测试平台选取国内某600MW火电机组,运行周期28天,覆盖满负荷、深调峰、启停及局部故障扰动等状态。采集阶段启用同步双通道机制,记录转子中压段与低压段加速度响应数据。每段采集窗口长度2048点,采样频率20kHz,每3s更新一次数据特征向量。

振动诊断模型以容器化服务部署,由工业计算节点调度。输入数据标准化与样本预处理由数据总线自动执行,保障模型接收结构统一的特征向量。振动异常识别结果包括“高负荷扰动”“轴系不对中”“油膜失稳”“轴瓦磨损”“正常状态”,每次预测时长约37ms,满足实时响应需求。

验证过程中设置与人工巡检结果的比对机制,选取有明确故障记录的数据段作为验证集,分析模型识别结果与人工标注的一致性。验证集含412组已知异常数据片段及1200组正常片段,诊断模型依托自动化推理引擎连续运行,无需人工干预,输出结果直接反馈至DCS控制台。

4.2 抑制效果评估

振动抑制策略嵌入集控系统闭环调控逻辑,诊断结果经消息中间件同步传输至策略执行模块。每类识别结果对应一套控制策略,由PLC控制器解析执行,动作参数来自策略控制表,表项含状态标签、执行指令、参数边界、动作持续时间等信息。系统根据CNN模型输出类别直接匹配控制策略条目,控制逻辑以闭环形式反馈调节后的振动幅值与执行状态,形成完整自动化干预链。表1为策略调节前后关键控制动作响应时延对比,反映策略执行链路效率。抑制策略集成后,系统可根据振动异常类别自动执行对应调节命令,控制指令经工业以太网与DCS系统对接,通信延时低于80ms,满足电厂实时控制要求。执行动作完成后,反馈控制量进入控制平台变量监测列表,记录策略作用过程中的响应路径与参数变化。

表1 蒸汽轮机典型振动异常的控制策略响应时间对比表

状态类型	控制变量	执行前响应时间/ms	执行后响应时间/ms
高负荷扰动	主汽门开度	980	430
轴系不对中	负荷调节速率	1200	540
油膜失稳	润滑油压力阈值	1020	470

5 结语

蒸汽轮机在集控运行模式下易受到负荷扰动与结构偏差影响,针对振动信号的非线性特征,构建包含加速度采集、小波包分解、卷积神经网络识别与控制策略联动的智能诊断与抑制系统,完成对多类振动异常的自动识别与响应调节。模型结构具备端到端运行能力,策略执行集成于自动化调控链条,具备高频响应与闭环控制特性。研究结果可为大型火电机组运行稳定性与智能感知水平提升提供技术支撑与部署示范。

参考文献

[1] 李阳.火电厂集控运行节能降耗技术研究[J].电力设备管理, 2025 (13): 236-238.
[2] 阎晓君.火电厂汽轮机振动故障与诊断技术措施探析[J].电力设备管理, 2025 (6): 74-76.
[3] 王杰.火电厂汽轮机振动故障和诊断技术研究[J].现代制造技术与装备, 2024, 60 (1): 17-19.
[4] 葛红健.600MW火电厂汽轮机振动大原因及对策分析[J].电力设备管理, 2021 (1): 80-81.