

电站汽轮机阀门压力位移数据监测分析系统

李鹏¹ 王旭亮² 易毕成²

1 华电电力科学研究院有限公司

2 湖北华电江陵发电有限公司

DOI:10.32629/pe.v4i3.21070

[摘要] 为提升电站汽轮机阀门状态监测水平,实现预测性维护,设计并实现了一套集成压力与位移多源数据监测分析的智能系统。系统构建“边缘感知-平台分析-应用交互”的分层架构,通过高精度传感器网络实现数据采集,并采用小波降噪、特征提取及SVM与LSTM混合智能模型,实现对阀门卡涩、松动等典型故障的快速分类与性能退化早期预警。在某660MW超临界机组长达6个月的试运行中,该系统成功识别出阀杆结垢卡涩、LVDT松动等多起异常,验证了其诊断准确性与预警及时性。这为电站实现从定期维修向预测性维护转变提供了可靠的技术解决方案。

[关键词] 电站汽轮机阀门; 压力位移监测; 预测性维护

中图分类号: TP274 **文献标识码:** A

System for monitoring and analyzing the pressure displacement data of steam turbine valves in power plants.

Peng Li¹ Xuliang Wang² Bicheng Yi²

1 Huadian Electric Power Research Institute Co., Ltd.

2 Huadian Jianling Power Generation Co., Ltd., Hubei Province

[Abstract] In order to enhance the level of turbine valve condition monitoring in power plants, enabling predictive maintenance, a smart system integrating pressure and displacement multi-source data monitoring and analysis was designed and implemented. The system employs a layered architecture of “edge perception-platform analysis-application interaction,” utilizing high-precision sensor networks for data collection. It employs wavelet denoising, feature extraction, and a hybrid intelligent model combining SVM and LSTM to quickly classify typical faults such as valve sticking and loosening, and provide early warnings of performance degradation. During a 6-month trial operation of a 660 MW supercritical unit, the system successfully identified multiple anomalies, including valve rod fouling and sticking, and LVDT loosening. This validated its diagnostic accuracy and the timeliness of its warnings. This provides a reliable technical solution for power plants to transition from periodic maintenance to predictive maintenance.

[Key words] power plant steam turbine valves; pressure displacement monitoring; predictive maintenance

引言

电站汽轮机作为现代火力发电厂的核心动力设备,其运行状态稳定性、调节精确性、维护经济性直接关系到整个电力生产系统的安全、高效与环保^[1]。在能量转换系统中,汽轮机阀门扮演着控制蒸汽流量与分配、精确匹配机组负荷需求的关键角色。一旦阀门因机械卡涩、伺服机构故障、位置反馈失真、内部泄漏等出现性能劣化,这不仅会导致机组调节响应迟滞,热耗率上升,同时也将引发负荷大幅度波动、轴系振动异常等严重后果^[2]。传统维护模式主要依赖于定期解体检查和离线试验,存在

工作量大、无法反映实时状态、难以捕捉间歇性故障等缺陷。伴随着工业互联网、大数据、人工智能等新一代信息技术和电力行业的深度融合,电站的数字化转型与智能化升级成为了不可逆转的趋势^[3]。基于此,开发一套全方位的电站汽轮机阀门压力位移数据监测分析系统,为阀门健康管理提供从“状态感知”到“智能决策”的完整解决方案。

1 系统整体设计

1.1 系统总体架构

为应对现场环境恶劣、数据异构、实时性要求高等挑战,

总体设计遵循“边缘感知、汇聚处理、平台赋能、应用驱动”的原则。系统总体架构如图1所示。



图1 系统总体架构

现场感知层直接部署在汽轮机阀门本体及邻近的蒸汽管道上,负责将关键的物理量(压力、位移)和控制系统指令转化为高质量的数字信号。由于现场感知层服役于高温、高压、高振动的恶劣环境中,因此设计要考虑极端工况下的长期稳定性与测量精度。压力监测单元安装在每个被监测的高压调节阀和再热主汽调节阀的阀前和阀后关键位置,所安装的压力变送器应该具备高稳定性和高精度特性。所有模拟信号在进入数据网络前均经过信号调理模块进行隔离、滤波和抗干扰处理,并接入工业级分布式远程I/O站。

数据汇聚层扮演边缘计算节点的角色,其由部署在电子设备间的高性能工业控制器构成。数据上传前网关进行轻量级预处理,涉及基于工程单位的标度变换、基于规则的初步数据有效性检查、降采样、滑动平均滤波。处理后的数据被打上精确时间戳和设备标签,临时存储于网关本地的时序数据库或缓存中。当网络中断时,网关能持续缓存数据。网络恢复后,自动将历史数据补传到平台层,保证数据完整性。支持双网口冗余配置,提高通信可靠性。

平台层部署在电厂信息中心的标准服务器中,提供海量数据管理、高性能计算和智能算法服务。关系型数据库采用MySQL,用于存储系统元数据、结构化事件记录以及从时序数据中提取的特征向量和模型诊断结果。

Web监控平台基于B/S架构,采用Vue.js、React等前端框架开发,主要功能模块包括实时监控看板、历史数据分析、报警与事件管理、设备健康中心以及报告自动生成。移动App为管理人员提供移动端的实时报警推送、关键状态查看和简要报告浏览功能,实现随时随地掌握设备健康状态。

1.2 硬件与数据流设计

硬件选型以满足功能、精度、环境适应性和生命周期成本为目标。压力变送器选择具有单晶硅压阻式技术的产品,测量范围覆盖阀门工作压力,精度0.075级,过程连接为法兰式,膜片材质为哈氏合金C-276以抗腐蚀,防护等级IP67,环境温度范围-40~85℃。LVDT位移传感器选择核心级耐温(>150℃)产品,量程匹配阀杆全程,独立线性度±0.25%,内置温度补偿,输出为直流电压(0~10V),机械连接采用高刚性、防松脱的万向球铰连杆。

边缘计算网关选择工业无风扇设计、宽温工作(-20~70℃)、带多个以太网口和串口的高性能ARM工控机,具备看门狗功能,预装轻量级Linux系统及数据采集中间件。

系统数据流遵循从底向上、分层处理的原则,压力变送器、LVDT每10ms产生一个测量值,阀门指令信号以100ms的周期从DCS更新,这些信号被分布式I/O模块同步采集并数字化。边缘网关以固定周期轮询或订阅接收所有I/O站的数据。边缘网关通过高速工业以太网,采用MQTT写入方式,将数据包实时推送至平台层的消息队列。流计算引擎订阅这些数据流,进行实时计算,实时绘制并更新当前阀门特性曲线。另外,与基准曲线进行动态偏差计算。若超出阈值,那么立即生成报警事件。应用层Web服务器通过调用平台层的API,从关系库和时序库中获取实时数据、历史曲线、特征分析结果和报警事件,渲染成图形化界面呈现给用户。

2 关键数据分析技术实现

2.1 数据特征提取

由于原始数据中常常包含噪声,且存在时间基准不统一的问题,需要对数据进行预处理。采用 3σ 准则和滑动窗口内的中值滤波对原始数据中的异常值检测,提出信号中的异常值。对信号中的噪声,通过小波阈值法进行降噪处理。不妨设原始含噪信号为 $f(t)$,经离散小波变换后得到的小波系数为 $\omega_{j,k}$,采用软阈值函数进行降噪处理,其数学表达式为

$$\hat{\omega}_{j,k} = \begin{cases} \text{sgn}(\omega_{j,k}) \cdot (|\omega_{j,k}| - \lambda) & |\omega_{j,k}| \geq \lambda \\ 0 & |\omega_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (1)$$

式中: λ 为阈值, $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号函数。

由于不同传感器的采样频率存在差异导致时间坐标不统一,采用线性插值重采样技术实现压力、位移、控制指令的时序严格对齐。对预处理后的信号,提取时域特征、频域特征、关联特征。时域特征包括单次动作过程中的压力峰值与谷值、位移超调幅度、响应滞后时长、稳态阶段跟踪偏差以及压力-位移迟滞回线所包络的区域面积。频域特征为对阀杆位移在稳态或微弱波动阶段进行快速傅里叶变换,计算特定频带内能量的分布比例。关联特征为刻画阀门间的协同运行状态及其与历史工况的偏离程度,包括同一时刻多阀门指令-位移响应的同步时差、阀后压力耦合系数等,用以实现性能衰退进程的定量评估。

2.2 智能诊断模型

为实现突发故障的快速诊断与性能渐进衰退的早期预警,构建基于支持向量机(SVM)与长短期记忆网络(LSTM)的混合分析架构^[4-5]。SVM分类器针对低维空间线性不可分的故障样本,利用径向基核函数完成高维映射以构建最优分离超平面。SVM分类器的决策函数为

$$f(x) = \text{sgn} \left(\sum_{i=1}^n \alpha_i y_i K(x_i, x) + b \right) \quad (2)$$

式中： α_i 为拉格朗日乘子， b 为偏置项， $K(x_i, x)$ 为径向基核函数，其表达式为

$$K(x_i, x) = \exp(-\gamma \|x_i - x\|^2) \quad (3)$$

通过网格搜索结合交叉验证对惩罚因子 C 与核参数 γ 进行优化，实现对阀杆卡涩、位移跳变及LVDT传感器失效等典型故障模式的高精度辨识。

LSTM趋势预警模块以时序对齐的多维序列为输入，通过遗忘门、输入门、输出门的协同作用来有效捕获序列中长期依赖关系。经离线训练，模型能够学习并固化阀门在健康状态下的动态行为模式，以连续标量形式输出健康指数。当阀门发生性能缓慢漂移时，LSTM可敏锐识别当前动态特征与基准模式的偏差，并在健康指数持续低于自适应阈值后触发渐进式预警。在线运行阶段，系统采用双轨并行的处理逻辑。阀门典型故障模式与诊断特征映射如表1所示。

表1 阀门典型故障模式与诊断特征映射

故障类型	压力域	位移域	时频域	SVM模型	LSTM模型
阀杆结垢卡涩	压力响应滞后	位移响应畸变	低频摩擦振荡能量增大	轻微卡涩	健康指数连续下降
LVDT连接松动	压力无显著异常	位移信号周期性波动	特征频率位置能量高	位移传感器连接松动	健康指数波动加剧
伺服阀零偏漂移	阀前后压差异常	稳态位移指令偏差增大	频域特征不明显	零偏漂移	健康指数突破阈值预警
阀杆弯曲、卡涩严重	压力跃变响应延迟明显	位移行程受限、回程误差超标	高次谐波成分增多	机械卡涩	健康指数骤降且无法恢复

3 实际应用

为评价系统的性能，将系统接入某660MW超临界机组内试运行6个月。该机组配置了4个高压调节阀(编号依次为GV1、GV2、GV3、GV4)和2个中间调节阀(编号依次为IV1、IV2)。为确保样本数据具有广泛的代表性，试运行时间为2025年5月到11月。在接入系统的6月内，监测出多起潜在的故障和性能退化现象。表2为两起典型的事件。

经过6个月的现场工程应用验证，该系统的结构设计具有良好的合理性，运行状态稳定可靠，所采用的数据预处理方法及智能诊断模型能够有效支撑电站汽轮机阀门组的状态监测与预测

性维护任务，展现出良好的工程适用性及推广潜力。

表2 系统试运行期间阀门事件诊断与处理记录

阀门编号	时间	异常特征	模型诊断	现场确认
IV2	2025.08.15	开启指令下达后,位移响应延迟增加。压力-位移特性曲线出现畸变,局部斜率减小	健康指数持续下降至预警阈值以下,输出“轻微卡涩可能性高”	阀门阀杆存在少量致密结垢沉积
GV3	2025.10.22	机组稳态负荷运行时,阀杆位移反馈信号出现周期性低频波动	触发即时故障报警	传感器固定支架存在螺丝松动

4 结论

设计并实现了面向电站汽轮机阀门压力位移信号的集成化监测分析系统，该系统包含采集、数据传输、处理分析与决策支持功能。基于“边缘计算-平台服务-应用呈现”3层架构，支撑多源异构数据的高频同步获取、可靠链路传输与统一汇聚管理。提出一种融合小波阈值去噪、多域特征提取、SVM-LSTM混合模型的智能诊断预警策略，其兼顾突发性故障的快速辨识与性能缓慢衰退的早期预警。系统应用于某660MW超临界机组，试运行六个月。结果表明，系统能够准确检出阀杆卡涩、LVDT松动等典型异常状态，显著提升了阀门执行机构的控制品质与机组整体运行的经济性。

【参考文献】

- [1]史海燕.电站汽轮机中压调节汽阀阀杆断裂原因分析[J].金属世界,2025,(1):52-56.
- [2]张磊,王程乘,郭德军,等.汽轮机阀门执行机构智能监测及控制研究[J].汽轮机技术,2025,67(6):421-425+476.
- [3]高健,任易凡.汽轮机阀门流量特性在线诊断及优化方法[J].安徽电气工程职业技术学院学报,2025,30(4):59-63.
- [4]王志杰,朱晓星,王锡辉,等.基于LSSVM的汽轮机阀门流量特性辨识及应用[J].中国电力,2020,53(9):189-194.
- [5]段彩丽,呼浩,郭前鑫,等.基于长短期记忆网络汽轮机振动幅值预测[J].工业仪表与自动化装置,2024,(2):118-123+142.

作者简介：

李鹏(1986—),男,汉族,浙江杭州人,学士学位,高级工程师,研究方向：电站设备状态监测与故障诊断、智能巡检技术研究。