

电站汽轮机阀门卡涩故障模型系统平台

李鹏¹ 王旭亮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.v4i3.21074

[摘要] 为提升电站汽轮机阀门卡涩故障监测的及时性与准确性,克服传统方法依赖定期试验、诊断滞后的局限,构建了集成化、智能化的阀门卡涩故障模型系统平台。通过融合基于工况分类、摩擦力动态观测及弹簧偏心距计算的多维度故障诊断模型,设计了由数据采集、模型计算、预警决策与应用展示层构成的四层分布式系统架构。该平台在某电厂600MW机组为期五个月的试运行中,预警准确率达到82.4%,显著减轻运行人员工作压力,提升故障处理效率。结果表明,所开发的系统平台能够实现对阀门卡涩状态的早期预警与智能诊断,为电站关键设备的状态监测与主动安全防护提供有效的技术解决方案,具有一定的应用价值。

[关键词] 电站汽轮机; 阀门卡涩; 故障诊断模型

中图分类号: TS737+.3 **文献标识码:** A

Model system platform for the valve sticking fault in power plant steam turbines.

Peng Li¹ Xuliang Wang²

1 Huadian Electric Power Research Institute Co., Ltd.

2 Huadian Jianling Power Generation Co., Ltd.

[Abstract] In order to enhance the timeliness and accuracy of monitoring for valve sticking faults in power plant steam turbines, and to overcome the limitations of traditional methods, which rely on periodic testing and delayed diagnosis, an integrated and intelligent valve sticking fault model system platform has been developed. By integrating multi-dimensional fault diagnosis models based on operating condition classification, dynamic observation of friction forces, and calculation of spring eccentricity, a four-layer distributed system architecture consisting of data acquisition, model calculation, early warning decision-making, and application display layers has been designed. During a five-month trial operation of a 600 MW unit at a power plant, the early warning accuracy rate of the platform reached 82.4%. This significantly reduced the workload of operators and improved the efficiency of fault handling. The results demonstrate that the developed system platform can provide early warning and intelligent diagnosis for valve sticking conditions, offering an effective technical solution for the state monitoring and proactive safety protection of key equipment in power plants. The platform has certain practical value.

[Key words] power plant steam turbine; valve sticking; fault diagnosis model

引言

汽轮机是火力发电机组中能量转换的核心设备,其运行可靠性直接关系到整个电站的安全性和经济性^[1]。汽轮机通过高压主汽调节阀、中压联合汽阀等近汽轮机精确控制进入汽轮机的蒸汽流量,阀门的灵活启闭是机组安全稳定运行的基本保障^[2]。在高温、高压、振动频繁的恶劣环境下,受到杂质侵入、润滑失效、材料磨损等因素的影响,阀门机构易出现卡涩故障。在紧急情况下,阀门无法及时关闭将导致汽轮机超速、飞车等恶

性事故,进而造成巨大的经济损失,甚至导致人员伤亡^[3]。有关统计数据表明,在所有故障中卡涩类故障占比超过35%^[4]。传统阀门卡涩监测主要依赖于定期停机检查和阀门试验,其诊断具有严重的滞后性,同时也影响电厂的经济运行^[5]。基于此,构建一个集成化、智能化的电站汽轮机阀门卡涩故障模型系统平台,有效提高监测的准确性。

1 电站汽轮机阀门卡涩故障机理

1.1 阀门卡涩故障成因

汽轮机阀门卡涩的本质是运动副之间的摩擦阻力过大,结合故障发生的部位可以将故障分为不同的类型,具体如表1所示。

表1 阀门卡涩故障类型及特征

故障类型	发生部位	成因	典型特征	危害等级
阀杆卡涩	阀杆与填料函之间	填料老化硬化、杂质侵入、润滑不良	阀位指令与反馈偏差增大,动作滞后	高
弹簧偏心卡涩	操纵机构弹簧	弹簧安装偏心、疲劳变形、温度不均	阀门非线性特性增强,出现死区	中高
伺服阀堵塞	DEH系统伺服阀	油液污染、颗粒物积聚、阀芯磨损	油压响应异常,流量特性改变	高
导向套磨损	阀杆导向套	长期磨损、间隙增大、对中不良	阀门晃动增大,密封性能下降	中

阀门卡涩故障并非突发性事件,而是经历潜伏期、发展期、爆发期的渐进过程。通过对阀门卡涩故障案例的分析,提取三个关键特征量,分别为动作时间特征、摩擦力特征、工况相关性特征。对正常阀门而言,其从全开到全关或从全关到全开的时间相对稳定,卡涩初期该时间会缓慢延长,且延长的幅度与卡涩的程度之间呈正相关。从摩擦力特征角度而言,正常运行时摩擦系数在0.08~0.12范围内波动。当连续多个周期超过0.15时,那么可以判定为早期卡涩。

1.2 卡涩故障危害机制

阀门卡涩引发的危害具有显著的系统性、连锁性、放大性特征,其影响远超阀门单体本身,对汽轮机组,乃至整个电厂的安全、稳定与经济运行都将构成严重威胁。阀门卡涩会导致阀门核心功能丧失,使得阀门无法精确、平滑地响应数字电液控制系统的指令。阀门位置指令和实际开度间的偏差增大,动态响应时间会显著延长且出现非线性特征。从保护层面来讲,卡涩直接瓦解了汽轮机的最后安全防线。当机组因甩负荷、电网故障等原因出现转速飞升时,要求阀门在数百毫秒内快速关闭,切断近汽。卡涩故障,尤其是发生在关闭方向的卡涩,这将使得阀门动作延缓甚至完全拒动,从而导致超速保护失效。另外,阀门卡涩过程本身是一种剧烈的设备损伤行为。当驱动装置的力克服静摩擦力使卡涩的阀杆产生“突跳”式运动时会对机械结构造成冲击,导致阀杆与填料函密封面拉伤划痕,加剧泄漏。这些损伤不仅增加了维修的成本,同时也会形成“损伤-卡涩加剧-更严重损伤”的恶性循环。

2 阀门卡涩故障模型构建

2.1 基于工况的识别模型

工况分类是提高故障诊断准确性的关键,结合汽轮机的运行状态,将工况划分为不同的种类,每个工况类别对应不同的特征库和诊断阈值。在启动工况下,由于油温较低、粘度较大,阀门的正常动作时间会相对较长,系统会自动放宽时间阈值。在稳态工况下,要求相对比较严格。特征提取环节是从阀门运行数据中挖掘出反映卡涩状态的关键信息,包括动作时间序列、位置偏差序列、压力波动特征以及温度相关特征。对提取的特征进行

归一化处理,输入到识别模型中,实现对卡涩故障的诊断。识别模型采用支持向量机和随机森林集成算法,其中支持向量机擅长处理高维特征空间中的分类问题,对小样本情况下的早期卡涩识别具有显著的优势,随机森林通过多决策树投票机制,提高模型的鲁棒性和泛化能力。支持向量机和随机森林的输出通过加权融合形成最终的诊断结果,权重结合工况类型进行动态调整。

2.2 基于摩擦力的识别模型

摩擦力是阀门卡涩最直接的表征参数,通过摩擦力来识别阀门卡涩故障。传统摩擦力测量需要在阀门上安装额外的力传感器,其不仅成本高,而且在实际电站环境中安装维护困难。基于模型的观测器技术,通过阀位、油压信号来间接估计摩擦力的大小。对典型的电液伺服阀控油动机系统而言,其动力学方程为

$$A_p P_L = m\ddot{x} + B\dot{x} + Kx + F_f + F_{ext} \quad (1)$$

式中: A_p 为活塞有效面积, P_L 为负载压力, m 为等效质量, B 为粘性阻尼系数, K 为弹簧刚度, F_f 为待估计的摩擦力, F_{ext} 为外部干扰力。

设计滑模观测器对摩擦力进行估计,即

$$\hat{F}_f = \rho \cdot \text{sign}(s), s = \dot{x} - \hat{\dot{x}} \quad (2)$$

基于李雅普诺夫稳定性理论设计观测器增益,确保估计误差在有限时间内收敛。为区分正常摩擦和异常卡涩,系统引入摩擦特征指数,其数学表达式为

$$FCI = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t \left| \frac{\hat{F}_f(t)}{\hat{F}_{f,normal}} - 1 \right| dt \quad (3)$$

式中: $\hat{F}_{f,normal}$ 为当前工况下正常摩擦力的参考值。

当FCI超过阈值1.2倍且持续10 min以上,那么触发注意级预警。当FCI超过阈值1.5倍且持续5 min以上,那么触发预警级。当FCI超过阈值2倍,那么立即触发紧急级预警。

2.3 基于弹簧偏心距的识别模型

弹簧偏心是阀门操纵机构特有的卡涩形式,当弹簧安装存在偏心或因长期运行产生塑性变形,那么会在阀杆上产生附加的侧向力,导致阀门在特定位置出现运动死区。弹簧偏心距的数学表达式为:

$$\delta = \frac{F_{侧向}}{k_{弹簧}} = \frac{\mu \cdot F_{预紧} \cdot \sin \theta}{k_{弹簧}} \quad (4)$$

式中: μ 为摩擦系数, $F_{预紧}$ 为弹簧预紧力, θ 为偏心角度, $k_{弹簧}$ 为弹簧刚度。

基于弹簧偏心距,开发了三种阀门卡涩故障识别方法,分别为死区检测法、力平衡残差法、频率响应分析法。所谓死区检测法就是在阀门缓慢动作的过程中,监测阀位变化率接近零的

区域。对正常阀门而言,在任何位置都应该保持连续运动。当存在弹簧偏心时,其会在偏心方向对应的位置出现明显的停滞区。所谓力平衡残差法就是比较理论驱动力和实际驱动力的差值,在死区内,理论驱动力应大于实际驱动力,该差值反映了偏心引起的附加阻力。

3 系统平台架构设计与实现

3.1 整体架构设计

考虑电厂数据量大、实时性要求高、可靠性要求严的特点,电站汽轮机阀门卡涩故障模型系统平台采用四层分布式架构系统最底层是数据采集层,负责从各类信号源抓取原始数据。采集对象包括DEH系统的阀位指令和反馈信号(分辨率0.1%,100Hz采样)、油压传感器(0~20MPa,精度0.5%)、LVDT阀位传感器(线性度0.2%)、PT100温度传感器(精度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$),以及DCS传送过来的负荷、主蒸汽参数等工艺数据。所有信号通过工业以太网统一汇总到实时数据总线,时间同步误差控制在1ms以内,确保不同来源信号在时序上对齐。

模型计算层是整个系统的核心,运行在专用的边缘计算服务器上。为平衡计算负载和响应速度,这里采用微服务架构,每个故障模型都独立封装成一个服务,彼此通过消息队列通信。数据进入后先由工况分类模块做预处理、识别当前工况,再分发给对应的模型。摩擦力观测和弹簧偏心两个模块并行计算,特征提取模块则负责从原始信号里挖掘深层特征。

预警决策层负责融合多个模型的结果进行综合判断。不同模型的输出如果有冲突,就通过D-S证据理论来处理:先把各模型的诊断结果转成基本概率分配(BPA),再用Dempster组合规则融合,最终输出一个综合信任度。预警规则库里存了200多条现场积累下来的经验规则,比如“摩擦力指数大于1.5,且动作时间延长超过20%,并持续5分钟”——满足这类条件就触发预警。故障严重度评估模块会综合考虑卡涩程度、故障发展速度以及当前工况的重要性,算出一个风险分值,给运维人员提供量化参考。

最上层是应用展示,提供多种交互界面。Web监控采用B/S架构,通过浏览器就能实时查看阀门状态、模型输出、预警信息等。移动端APP同时支持Android和iOS,预警信息会直接推送到手机上。报表系统每天、每周、每月自动生成报告,分析故障趋势、模型性能等。此外,系统还预留了与电厂SIS、MIS的接口,在数据层面实现了无缝对接。

3.2 技术实现

高频数据要实时处理,系统专门搭建了一套数据处理流水线。Kafka用来缓冲数据,Flink做流式计算,采集、处理、存储三个环节串起来跑通。100Hz的阀位信号进来,10毫秒之内就能完成特征提取和模型计算,预警基本是实时的。

数据质量这块集成了几种检测手段:异常值用 3σ 准则或者箱线图来筛;缺数据了先用线性插值补,再不行就用模型预测补全;信号杂波多的话,小波阈值去噪加卡尔曼滤波走一遍。进模

型的数据得干净,诊断结果才靠得住。

模型更新有两种方式。一种是离线批量更新,每个月用历史数据整体训练一遍,特征权重、分类边界这些参数重新调一调。另一种是在线增量学习,现场运维人员要是标记某次预警是误报,系统就把当时工况的特征记下来,下次再碰到类似情况,预警概率自动调低。

一旦判断出严重卡涩风险,系统不光发预警,还会给DEH发控制建议。早期卡涩,就建议改一下阀门动作方式——动作慢一点、中间多停几秒,别让卡涩继续加重。检测到弹簧偏心,在死区附近加点控制增益,把非线性部分补回来。如果确认阀门已经卡死、动不了了,就自动切备用阀门,或者触发机组降负荷,防止事态扩大。

3.3 实际应用

为验证系统的实用性,在某电厂 $2\times 600\text{MW}$ 机组上进行5个月的试运行。统计下来,一共发了17次预警,其中真正出故障的有3次,轻微异常7次,剩下的7次算是误报——分析下来,大多是因为工况波动太剧烈,模型没适应过来。预警准确率82.4%,该报的全报了,漏报是零。运行人员那边也做了个满意度调查,95%的人反馈系统确实能减轻工作负担,处理故障也比以前快多了。

4 结论

针对电站汽轮机阀门卡涩故障的早期预警需求,基于工况分类、摩擦力动态观测及弹簧偏心距计算等多维度诊断模型,建立阀门卡涩故障模型系统平台。平台采用数据采集、模型计算、预警决策与应用展示四层分布式架构,实现从信号接入、特征提取、故障辨识到人机交互的全流程闭环处理。通过在某电厂600MW机组开展为期五个月的工程验证,系统共触发预警17次,其中真实故障3次、轻微异常7次,误报7次,预警准确率为82.4%,漏报率为0。运行人员满意度调查显示,95%的操作人员认为该系统显著降低了日常监控负担,提升了故障响应效率。这为同类机组阀门卡涩故障的智能化预警提供了可推广的技术路径。

[参考文献]

- [1]刘刚.火力发电厂汽轮机常见故障分析与检修研究[J].中国设备工程,2022,(2):43-44.
- [2]黄坤.超超临界中压阀门卡涩案例分析[J].机电信息,2022,(4):66-68.
- [3]刘剑.728MW汽轮机调门卡涩原因分析与处理措施[J].科技视界,2021,(15):52-54.
- [4]陈洪炼.汽轮机阀门卡涩常见故障分析与预防[J].技术与市场,2016,23(8):22-24+26.
- [5]乐汉字.热电厂机械故障常见故障及维护[J].今日制造与升级,2023,(6):90-93.

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。