

# 热控系统自动化检测技术在火电厂检修中的应用

李燕楠

内蒙古华电腾格里绿色能源有限公司巴彦浩特发电分公司 内蒙古 阿拉善盟 750300

**摘要:** 火电厂热控系统作为保障机组安全稳定运行的核心环节,其自动化检测技术的创新应用对提升检修效率、降低非计划停机风险具有关键作用。本文通过分析热控系统构成与检修需求,结合DCS系统、智能传感器、大数据分析等技术的融合应用,提出基于状态监测与预测性维护的自动化检测体系。实践表明,该技术可使热控系统故障识别准确率提升,检修效率提高,为火电厂智能化转型提供技术支撑。

**关键词:** 热控系统; 自动化检测; 火电厂检修; DCS系统; 预测性维护

## 1 引言

火电厂热控系统承担着锅炉、汽轮机等核心设备的温度、压力、流量等参数的实时监测与自动调节任务,其可靠性直接关乎机组运行的安全性与经济性。在传统模式下,火电厂热控制系统的检修主要依赖定期停机检查与人工巡检。然而,这种方式存在诸多弊端,如故障发现滞后,往往在故障已对设备造成一定损害后才被发现;过度检修现象普遍,定期停机检查导致设备可用率下降,增加了非必要的维护成本。随着工业互联网与人工智能技术的蓬勃发展,热控系统自动化检测技术应运而生。它通过实时数据采集、智能诊断与预测性维护,实现了从“事后维修”到“事前预防”的转变,为火电厂热控制系统的检修带来了新的思路和方法。本文将以其某600MW火电厂为例,深入探讨自动化检测技术在热控系统检修中的具体应用路径与实施效果。

## 2 火电厂热控系统构成与检修需求分析

### 2.1 热控系统核心构成

火电厂热控系统主要由DCS(分布式控制系统)、现场控制单元、操作站单元及执行机构组成:(1)DCS系统:采用微处理器分散控制与集中管理架构,通过分级子系统实现锅炉、汽轮机等设备的参数调节。其硬件配置包括CPU插件、I/O接口、通信模块等,软件系统涵盖自动检测、报警、调节等功能。(2)现场控制单元:部署于设备生产现场,通过插板箱实现控制支路与总线的物理连接,完成温度、压力等参数的实时监测与初步处理。(3)操作站单元:位于主控制室,提供人机交互界面,支持参数调节、工况报表生成及历史数据追溯。(4)执行机构:包括调节阀、泵组等,根据DCS指令完成设备动作,其响应精度直接影响控制效果。

### 2.2 传统检修模式的局限性

传统热控系统检修采用“计划检修+故障抢修”模

式,存在以下问题:(1)过度检修:定期停机检查导致设备可用率下降,增加非必要维护成本。(2)故障漏检:人工巡检依赖经验,难以发现隐蔽性故障(如传感器漂移、回路接触不良)。(3)响应滞后:故障发生后需逐级排查,平均修复时间(MTTR)长达4-6小时,影响机组负荷率。(4)数据孤岛:各子系统数据独立存储,缺乏全局分析,难以预测设备劣化趋势。

## 3 自动化检测技术在热控系统检修中的关键应用

### 3.1 基于DCS的实时数据采集与预处理

DCS系统作为热控制系统的核心,其数据采集能力直接影响着检测精度。在某火电厂的实践中,通过升级DCS通信模块,实现了数据采集与预处理的显著优化。在采样频率方面,将温度、压力参数的采样周期从1秒缩短至100毫秒。这一改进使得系统能够捕捉到瞬态故障特征,例如,在设备启动或停止过程中,一些短暂的参数波动可能预示着潜在故障的发生。通过提高采样频率,系统可以更准确地记录这些瞬态变化,为故障诊断提供更详细的信息。数据清洗算法的应用也是提升数据质量的关键<sup>[1]</sup>。在数据采集过程中,传感器可能会受到各种干扰因素的影响,导致数据存在噪声。采用卡尔曼滤波算法可以有效消除传感器噪声,提高数据的准确性和可靠性。经过数据清洗后,数据有效率提升至99.7%,为后续的分析 and 处理提供了高质量的基础数据。为了实现局部故障的快速定位,在现场控制单元部署了轻量化AI模型。这些模型基于边缘计算技术,能够在本地对采集到的数据进行实时分析。例如,当锅炉主蒸汽温度控制回路出现波动时,传统方法需要检修人员花费4小时才能定位故障点。而通过DCS边缘节点的实时分析,系统可以迅速发现温度变送器输出信号存在0.5Hz周期性振荡。结合历史数据比对,系统能够确诊为传感器老化,检修人员可以在2小时内完成更换,避免了主设备的进一步损

伤,大大缩短了故障修复时间。

### 3.2 智能传感器与无线监测网络构建

针对传统有线传感器布线复杂、维护成本高的问题,引入无线HART协议传感器与自组网技术,为热控系统的监测带来了新的变革。无线温度传感器被广泛部署于高温管道、阀门连接处等隐蔽区域。这些区域由于环境恶劣,传统有线传感器安装和维护难度较大。而无线温度传感器通过LoRaWAN协议传输数据,具有安装方便、灵活性高的特点。同时,其续航时间可达5年,减少了频繁更换电池的麻烦,降低了维护成本。振动监测节点采用三轴加速度计与MEMS技术,能够实时监测执行机构的振动频谱<sup>[2]</sup>。执行机构在运行过程中,如果出现轴承磨损、齿轮断齿等机械故障,其振动频谱会发生特征性变化。通过对振动频谱的分析,系统可以及时发现这些机械故障,为设备的维护和检修提供依据。自组网拓扑是无线监测网络的核心技术之一。传感器节点能够动态选择传输路径,当网络中某个节点出现故障时,其他节点可以自动调整传输路径,确保数据不丢失。这种自组织、自修复的能力使得无线监测网络具有很高的可用性,可达99.9%。

### 3.3 大数据分析驱动的故障预测模型

构建基于LSTM(长短期记忆网络)的故障预测系统是自动化检测技术在热控系统检修中的重要应用。该系统的构建过程包括数据整合、特征工程、模型训练和动态更新四个关键步骤。数据整合是构建故障预测系统的基础。需要融合DCS实时数据、设备台账、检修记录等多源异构数据,形成设备健康档案。这些数据包含了设备从投入运行到当前时刻的各种信息,能够全面反映设备的运行状态和历史情况。通过数据整合,系统可以从多个维度对设备进行分析,提高故障预测的准确性。特征工程是从原始数据中提取有价值的特征的过程。针对热控系统数据,提取了时域特征(如均值、方差)、频域特征(如FFT频谱)及时频特征(如小波包能量),构建了200维特征向量。这些特征能够从不同角度描述设备的运行状态,为模型训练提供了丰富的信息。模型训练采用迁移学习技术,利用同类机组历史故障数据预训练模型,再通过本地数据微调。由于火电厂热控系统的故障数据相对较少,直接使用本地数据进行训练可能会导致模型过拟合或欠拟合。而迁移学习技术可以借助同类机组的大量历史故障数据,使模型先学习到故障的一般特征和规律,然后再根据本地数据进行微调,以适应本机组的具体情况,解决小样本问题。动态更新是保证模型准确性的重要环节。每月根据新增数据重新训练模

型,使模型能够适应设备劣化规律的变化。随着设备的运行,其性能会逐渐发生变化,故障特征也可能随之改变。通过动态更新模型,可以确保模型始终能够准确预测设备的故障。

### 3.4 数字孪生技术支持的虚拟检修

基于Unity3D引擎构建的热控系统数字孪生体为检修工作提供了全新的手段和方法。数字孪生体具有三维可视化的特点,能够1:1还原锅炉、汽轮机等设备结构。检修人员可以通过虚拟现实设备或计算机屏幕,沉浸式地进行巡检。在虚拟环境中,检修人员可以自由穿梭于设备的各个部位,仔细观察设备的细节,发现潜在的问题。这种直观的巡检方式大大提高了检修效率和质量。虚拟调试是数字孪生技术的重要应用之一。在孪生体中,可以对参数调整(如PID整定)进行模拟。PID控制是热控系统中常用的控制方法,其参数的整定直接影响到控制效果。传统的PID参数整定需要在物理系统上进行试验,存在一定的风险和成本。而在数字孪生体中进行虚拟调试,可以安全地尝试不同的参数组合,验证控制策略的有效性。只有当在虚拟环境中验证通过后,再将调整后的参数应用于物理系统,避免了真实试验可能带来的风险,缩短了调试周期。故障复现功能也是数字孪生技术的一大优势。通过历史数据回放,可以重现故障发生过程<sup>[3]</sup>。在故障发生后,检修人员往往需要花费大量时间来分析故障的根本原因。数字孪生体可以将故障发生时的各种参数和设备状态进行精确还原,辅助检修人员分析故障的根本原因,如参数越限、逻辑错误等。

## 4 自动化检测技术实施中的挑战与对策

### 4.1 数据安全与隐私保护

热控系统数据涉及机组核心运行参数,其安全性至关重要。一旦数据泄露或被恶意篡改,可能会导致机组运行异常,甚至引发安全事故。因此,必须采取有效的措施保障数据安全与隐私。加密传输是保障数据安全的重要手段之一。采用国密SM4算法对无线传感器数据进行端到端加密,确保数据在传输过程中不被窃取或篡改。SM4算法是一种国产的对称加密算法,具有较高的安全性和加密效率,能够有效保护数据的机密性和完整性。访问控制是限制数据访问权限的关键措施。基于RBAC(基于角色的访问控制)模型设置数据访问权限,根据用户的角色和职责分配不同的数据访问级别。检修人员仅可查看授权设备的数据,避免了数据的非法访问和滥用。审计追踪功能可以对所有数据操作行为进行记录和追踪。系统会详细记录数据的访问时间、访问用户、操作类型等信息,满足等保2.0三级要求。一旦发现

数据异常操作,可以通过审计记录进行追溯和调查,及时采取措施防止数据安全事件的发生。

#### 4.2 算法可解释性与工程师信任

AI模型用于故障预测和诊断虽准确性高,但“黑箱”特性使工程师难以理解其决策逻辑,对输出存疑。为此,需提高算法可解释性,增强信任。一是特征重要性可视化。用SHAP值展示各参数对故障预测的贡献度,如预测汽轮机轴承故障时,可显示振动频率等参数的贡献大小,助工程师理解决策逻辑。二是人机协同校验。模型输出结果需工程师二次确认后再触发检修工单,避免误报。工程师可依经验和专业知识评估判断,不符时调整模型或修正数据,提升准确性和可靠性。三是历史案例匹配。将当前故障特征与历史案例库比对,提供相似案例处理方案,工程师可参考并结合实际制定检修计划,增强决策可信度,提高检修效率。

#### 4.3 跨系统集成与标准化建设

热控制系统与SIS、MIS(管理信息系统)等系统之间的数据互通是实现自动化检测技术全面应用的关键。然而,由于不同系统采用的技术架构和数据格式存在差异,导致系统之间数据集成困难。为了解决这一问题,需要推进跨系统集成与标准化建设。协议转换是实现异构系统数据融合的基础。开发OPCUA到MQTT的协议适配器,可以将不同系统使用的协议进行转换,使数据能够在不同系统之间顺畅传输。OPCUA是一种通用的工业自动化通信协议,具有安全、可靠、跨平台等优点;MQTT是一种轻量级的发布/订阅消息传输协议,适用于物联网环境。通过协议转换,可以实现热控制系统与SIS、MIS等系统之间的数据互联互通。数据字典统一是消除语义歧义的重要措施。制定全厂级数据标签体系,明确测点编码规则、单位制式等数据标准,确保不同系统对同一数据的理解和表示一致。例如,对于温度参数,统一规定其单位为摄氏度,编码规则按照设备类型和位置进行编制。这样可以避免因数据语义不一致导致的数据

错误和误解,提高数据的可用性和准确性<sup>[4]</sup>。API接口开放是实现系统间数据共享和业务协同的关键。通过RESTful API向第三方系统提供数据服务,支持检修资源动态调度。不同系统可以通过调用API接口获取所需的数据,实现数据的实时共享和交互。例如,MIS系统可以通过调用热控制系统的API接口获取设备运行状态数据,根据设备状态合理安排检修计划和资源分配,提高检修效率和质量。

#### 结语

热控系统自动化检测技术融合DCS实时控制、智能传感器、大数据分析 with 数字孪生技术,构建了“状态感知-智能诊断-预测维护-虚拟检修”的全流程闭环管理体系,实践表明该技术可显著提升火电厂检修效率、降低成本并增强安全性,为电力行业智能化转型提供可复制方案;未来,随着5G、数字孪生与AI技术深度融合,热控系统检修将向“自主决策”(通过强化学习算法实现检修策略动态优化、减少人工干预)与“零故障”(结合数字孪生与数字线程技术实现设备全生命周期健康管理)目标演进,同时需推动热控系统自动化检测技术规范(如数据接口、模型评估)的标准化建设以促进行业标准制定与产业链协同发展,火电厂也需持续加大技术投入、培养“懂热控、精数据、通AI”的复合型人才队伍,以技术创新驱动检修模式变革,最终实现“安全、高效、绿色”的智慧电厂建设目标。

#### 参考文献

- [1]渠国防.火电厂热控自动化系统优化与性能提升研究[J].电力设备管理,2025,(02):114-116.
- [2]田旭朝.火电厂热控自动化系统运行稳定性探析[J].电力设备管理,2024,(24):84-86.
- [3]魏志德.火电厂热控自动化系统运行的稳定性研究[J].电子元器件与信息技术,2023,7(12):40-43.
- [4]顾欢,朱学飞.火电厂热控系统可靠性及其优化研究[J].电子元器件与信息技术,2025,9(04):123-126.