

基于物联网与大数据的空调系统故障诊断与预测性维护技术研究

安国圣 赵凯 马杰 王晓锋 胡绍雄

湖北中烟工业有限责任公司襄阳卷烟厂 湖北襄阳 441000

摘要: 针对传统空调维护效率低下且能耗较高的突出问题展开相关研究, 此研究基于物联网及大数据的故障诊断与预测性维护技术, 凭借部署传感器网络采集多维度运行数据, 借助结合 Flink 流计算与 TensorFlow 算法构建智能模型, 在一机械制造企业的实际应用中, 实现故障诊断准确率达 97%、能耗降低 18% 的显著成果, 非计划停机时间减少 70%, 年维护成本降低约 280 万元。研究成果验证数据驱动维护模式的有效性, 为空调系统智能化运维提供技术支持与实践范例。

关键词: 物联网; 大数据分析; 空调系统; 故障诊断; 预测性维护; 智能运维

引言

在建筑能耗占比持续攀升当下, 空调系统作为建筑能耗“主力军”, 其稳定运行与节能优化意义至关重要, 而传统基于人工巡检和定期维护模式存在故障响应滞后、运维成本高昂等一系列问题, 物联网与大数据技术凭实时感知和海量数据分析能力为空调系统故障诊断与预测性维护开辟创新路径, 在烟厂生产过程中, 温湿度、洁净度等环境指标对烟草品质影响重大, 空调系统的稳定运行尤为关键。本研究以构建智能化运维体系为目标, 致力于提升空调系统可靠性与能效水平, 助力建筑领域朝绿色低碳方向发展。

一、物联网与大数据技术基础

1. 物联网技术概述

作为新一代信息技术的重要部分, 物联网可以通过射频识别、传感器网络等各种硬件实现物与物与人的互联互通, 它有着典型的三层架构, 其中感知层实现对各种信息的数据采集。例如一烟厂空调系统部署的温湿度传感器, 可实时监测烟叶储存车间的温湿度, 确保烟叶品质不受环境影响粉尘传感器则能监测空气中的粉尘含量, 保障生产环境洁净度。网络层实现了数据的传输, 采用 5G 网络将这些数据快速传至云端。

2. 大数据技术概述

大数据有着体量大、速度快、多样性及价值密度低等显著特征, 其处理流程涵盖数据采集、存储、分析及可视化, 以某烟厂空调系统为例, 通过部署物联网设备

每日可产生数万条运行数据, 包括车间温湿度变化、空调设备运行参数、能耗数据等。利用 Hadoop 等大数据处理平台对这些数据实施分布式存储与并行计算, 采用机器学习算法挖掘隐藏在数据中的故障特征及运行规律, 通过建立数据模型能精准分析空调系统能耗情况、设备性能变化趋势, 为故障诊断与预测性维护提供有力数据支撑。

二、空调系统故障诊断技术

1. 空调系统常见故障类型及原因分析

空调运行状态下的故障种类多种多样, 比如制冷系统的故障, 主要有压缩机卡缸和制冷剂泄漏现象等, 压缩机卡缸主要由于长期处于超负荷工作状态下造成的机械磨损所致, 而制冷剂泄漏, 则有可能是因为管道老化或者焊接点处的密封出现故障等造成的; 电气系统的故障主要有线路短路、控制板元件损毁等故障问题, 与环境湿度过大、电流负荷过大的状况有关。控制系统故障有传感器失效或者程序逻辑错误等问题, 使空调无法正常控制温度的调节, 导致温度不能准确的进行控制, 例如某烟厂曾因空调系统传感器失效, 导致烟叶储存车间温度失控, 部分烟叶出现受潮变质, 造成较大经济损失。

2. 基于物联网与大数据的故障诊断技术原理与方法

基于物联网和大数据的故障诊断技术是基于物联网系统上部署温度、湿度、压力、振动等类型的传感器实时获取空调系统运行状态的相关数据信息, 然后依靠边缘计算、云计算等技术, 将采集的数据高效传输到云端, 在云端利用支持向量机、随机森林等机器学习方法对大

量历史数据进行特征提取及模型训练来建立故障诊断模型，在一烟厂空调系统应用中，该技术将因管道堵塞导致的制冷效率下降故障诊断准确率提升至92%，相比传统诊断方式大大降低了漏诊率，保障了烟厂生产环境的稳定。

3. 故障诊断模型的构建与验证

以某品牌组合式空调系统为研究对象，收集该设备运行3年产生的温度、压力、电流等相关数据，筛选出2000组故障样本及5000组正常运行样本，采用主成分分析（PCA）进行数据降维操作，再结合卷积神经网络（CNN）构建故障诊断模型，经交叉验证，该模型对风机故障、滤网堵塞、加湿器故障等6类常见故障的平均识别准确率达95.3%，在实际应用中，该模型提前72小时对某烟厂组合式空调的风机轴承异常磨损发出预警，避免了因设备突发停机导致车间温湿度失衡，保障了烟叶生产加工的连续性从而验证模型可靠性与实用性。

三、空调系统预测性维护技术

1. 预测性维护的概念与优势

凭借对设备运行数据进行实时监测及深度分析这一关键依托的预测性维护，成功突破传统预防性维护周期限制以实现“状态驱动”精准维护且能预判潜在故障风险，相比事后维修的被动应对及定期维护造成资源浪费情形，可显著降低非计划停机时间并优化维护成本结构，例如一烟厂卷烟车间空调系统采用传统定期维护方式时年均维护成本达80万元，且因突发故障导致车间温湿度异常影响卷烟生产质量，造成产品合格率下降。引入预测性维护后通过提前干预故障隐患维护成本降低35%，设备可靠性提升40%有效保障了卷烟生产的稳定性和产品质量。

2. 基于物联网与大数据的预测性维护技术原理与流程

利用物联网设备构建涵盖压缩机转速、冷凝器温度、能耗等多维度运行参数的空调系统数据感知网络的此技术，数据经边缘节点初步处理后传输至云端大数据平台，进而利用时序数据分析、关联规则挖掘等技术建立设备健康状态评估模型，从流程上先是通过历史故障数据训练预测算法，然后实时监测设备运行数据，数据偏离正常阈值范围时触发预警机制，紧接着结合故障概率及影响程度制定维护策略，一烟厂制丝车间空调系统采用此技术，实现了对风机轴承磨损、管道堵塞等故障的提前预警，故障响应时间缩短至2小时以内，确保了制丝过程中温湿度等环境指标的的稳定保障了烟丝品质。

四、基于物联网与大数据的空调系统故障诊断与预测性维护系统设计

1. 系统总体架构设计

采用分层式架构的系统涵盖感知层、网络层、数据层以及应用层，感知层部署诸如温湿度传感器、压力变送器、振动传感器等设备对空调系统运行参数予以实时采集，在烟厂应用场景中，还需额外部署粉尘传感器、空气质量传感器等，以满足生产环境监测需求。网络层采用5G与NB-IoT混合组网，经实地测试，在制丝车间5G信号穿透损耗达25dB，丢包率约8%，NB-IoT信号穿透损耗18dB丢包率5%。为此设计有线备份链路，无线信号不佳时自动切换，确保数据可靠传输数据层依托Hadoop与Spark框架，实现海量数据存储与分析。将振动、压力等关键参数采样率提升至100Hz，常规参数每秒采集10次。针对数据缺失问题，建立完善处理机制，对于因传感器故障导致的少量数据缺失采用拉格朗日插值算法，基于相邻时间点的参数关联性快速估算缺失值。

2. 硬件选型与配置

硬件选型依空调系统规模以及监测需求定制，传感器选用测量精度达 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 与 $\pm 2\%$ RH的霍尼韦尔高精度温湿度传感器，压力传感器采用满足 -0.1MPa 至 3MPa 宽量程需求的麦克传感器公司的MPS3115，通信模块选适配复杂建筑环境信号传输的移远BC95-B5型NB-IoT模组，边缘计算设备搭载用以实现数据预处理与协议转换的树莓派4B，一现代化烟厂空调系统部署了2500余个传感器节点，包括针对车间环境和空调设备的各类传感器，通过优化硬件配置，将数据传输延迟控制在500ms以内，有效支持系统对烟厂复杂环境下空调设备的实时诊断需求。

3. 软件功能模块设计

该软件系统的整体架构是基于微服务模式并由数据采集、存储管理、智能分析、故障诊断以及预测性维护等五部分组成的体系结构。其采集端分别采用Modbus协议及MQTT协议进行多源异构数据接入。在存储管理端则是使用到了InfluxDB的时序数据库来进行设备运行的数据的存储，并可以实现针对万亿级数据的快速检索。在智能分析端则是集成了机器学习算法库进行相关联的数据的特征抽取以及模型的训练工作，故障诊断端运用了基于随机森林的故障类型和故障原因的快速判定。预测性维护端则利用LSTM神经网络来对设备的剩余使用寿命进行预测。在一烟厂空调系统应用中，该软件成功

识别并预警20次潜在故障，预测准确率达93%。为解决智能诊断系统与现有OA、MES、集控系统的联动问题，设计了标准化数据接口与集成方案。通过API接口与OA系统的工单管理模块对接，当故障诊断或预测性维护模块发出预警时，自动生成维护工单并推送至对应责任人。与MES系统建立数据交互通道，将空调运行数据与生产计划关联，根据生产任务动态调整诊断策略。在集控系统中嵌入可视化监控面板，实时同步故障预警信息便于运维人员统一调度资源，实现预警、派单、维护的全流程闭环管理，确保烟厂生产环境稳定可控，避免因空调系统故障造成生产损失。

五、案例分析

1. 某工业企业空调系统故障诊断与预测性维护案例

以某大型机械制造企业为例，该厂原有300多套工业专用空调机组、20套大型制冷设备，采用人工巡检和定期保养方式，存在故障响应慢、能耗高的问题，且车间温湿度波动影响烟叶储存和生产质量。后续项目组为其引入物联网、大数据技术的智能化维护系统，在感知层增加1000多个各类传感器采集设备运行数据，包括针对精密加工车间、生产车间的温湿度、粉尘、空气质量传感器，以及组合式空调设备的压力、振动、电流传感器等，并通过5G和LoRa混搭方式进行组网的数据稳定传输，再利用Flink框架完成流数据实时处理并通过TensorFlow搭建故障诊断及预测模型。实际运行中系统通过振动传感器捕捉到一台大型制冷机组压缩机的异常振动信号。结合历史数据与频谱分析推断其轴承存在磨损风险，并提前72小时发出预警。运维人员在预警后第三天完成轴承更换，避免了风机突发性停机。经数据分析，优化空调运行工况后，烟厂每月节约空调运行成本约18%，同时车间温湿度稳定性显著提升，为精密零部件加工和产品质量管控提供了可靠的环境保障，有效提高了生产效率。

2. 案例结果分析与经验总结

对该机械制造企业运行数据的分析表明，实施智能化维护系统后，空调系统故障诊断准确率由原来的65%

提升到现在的97%，非计划停机时间减少了70%，每年的维护成本降低了约280万元。通过机器学习算法对数据进行关联挖掘，发现企业生产高峰期设备密集运行、车间人员活动频繁等因素，会使工业空调负荷产生剧烈波动。基于此后期可通过优化设备启停逻辑，实现更高效的节能降耗。对于上述内容的经验教训是本项目成功的关键点在于采集了多源的数据信息，并对其进行深度融合。

结语

针对该文提出的基于物联网和大数据的空调系统故障诊断和预测性维修，针对烟厂生产对环境要求高的特点进行应用和优化，实现多源数据采集，利用智能算法模型提高故障诊断有效减少设备的非计划停机时间和维修费用，大大降低了运行成本，最终印证了以数据为驱动运维的可行性和有效性。但是在解决设备状态感知过程中还存在问题，因此以后还会对如何改进和加深深度学习算法的应用范围以及完善多模态融合技术等技术，并研究边云协同模式下的边缘计算，将空调系统的智能运维向更进一步的发展方向推进。

参考文献

- [1] 彭家浩, 邱爱兵, 缪杰, 等. 基于递推PCA的变工况中央空调系统故障诊断[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(01): 134-144. DOI: 10.13382/j.jemi.B2306845.
- [2] 孙哲, 金华强, 李康, 等. 基于知识数据化表达的制冷空调系统故障诊断方法[J]. 化工学报, 2022, 73(07): 3131-3144. DOI: 10.11949/0438-1157.20211830.
- [3] 庞小雪. 新能源汽车空调系统故障诊断与维修效率提升[J]. 汽车维修技师, 2025, (10): 45-46.
- [4] 李化文. 汽车空调系统故障诊断与维修技术的研究[J]. 内燃机与配件, 2025, (08): 81-83.
- [5] 彭家浩, 邱爱兵, 缪杰, 等. 基于递推PCA的变工况中央空调系统故障诊断[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(01): 134-144. DOI: 10.13382/j.jemi.B2306845.