

基于物联网的冷水机组智慧运维与数据监测系统设计

黄耀华, 夏智扬, 徐伟, 童师阳

江苏省产品质量监督检验研究院, 江苏 南京 210007

DOI:10.61369/ME.2025090025

摘 要 : 面向大型公共建筑中冷水机组能耗高、人工巡检滞后与数据割裂等痛点, 本文提出一套“感知—边缘—云端—应用”四层协同的智慧运维系统架构。系统在边缘侧集成卡尔曼滤波与滑动窗口的预处理策略, 并嵌入结合 Z-score 与动态阈值的异常检测算法; 云端采用轻量化技术栈实现数据融合与交互可视化。工程部署结果显示, 系统实现了连续可靠的数据采集、低延时的异常告警与可观的能效改善 (COP 提升 4.5%), 验证了方案的可行性与推广价值。

关 键 词 : 冷水机组; 物联网; 智慧运维; 异常检测算法

Design of Smart Operation and Maintenance and Data Monitoring System for Chiller Units Based on Internet of Things

Huang Yaohua, Xia Zhiyang, Xu Wei, Tong Shiyang

Jiangsu Provincial Product Quality Supervision and Inspection Institute, Nanjing, Jiangsu 210007

Abstract : Addressing the pain points of high energy consumption, delayed manual inspections, and data fragmentation in large public buildings' chiller units, this paper proposes a four-layer collaborative intelligent operation and maintenance system architecture: "perception-edge-cloud-application." The system integrates Kalman filtering and sliding window preprocessing strategies at the edge, and embeds an anomaly detection algorithm combining Z-score and dynamic thresholds. At the cloud, a lightweight technology stack is used to achieve data fusion and interactive visualization. Engineering deployment results show that the system achieves continuous and reliable data acquisition, low-latency anomaly alarms, and significant energy efficiency improvements (COP improvement of 4.5%), validating the feasibility and promotional value of the solution. The paper concludes by discussing future directions such as group control optimization, predictive maintenance, and digital twins.

Keywords : chiller unit; Internet of Things; smart operation and maintenance; anomaly detection algorithms

冷水机组作为中央空调系统的核心设备, 被广泛应用于大型商业建筑、医院等公共设施, 其能耗可占整个空调系统的 40% - 60%。面对传统人工巡检模式存在的响应延迟、数据采集不连续及维护成本高昂等问题, 现代建筑对能效管理与实时监控提出了更为迫切的需求。在此背景下, 随着物联网、云计算与人工智能等技术的迅猛发展, 构建具备智能诊断与远程运维能力的冷水机组管理系统, 已成为提升设备运行效率、降低系统能耗并保障稳定运行的关键路径。目前, 以 Carrier、Trane 为代表的国际企业已推出集成远程监控与能效分析的系统平台, 普遍采用 BACnet、Modbus 等标准协议实现跨品牌互联; 而国内研究多集中于机房自动化控制与数据可视化层面, 在统一数据架构与智能诊断机制方面仍存在不足, 尤其在复杂运行环境中实现高精度数据采集、边缘智能与云端协同方面亟待突破^[1,2]。为此, 本研究旨在设计并实现一套适用于实际工程环境的冷水机组数据采集与远程监测系统, 重点针对数据孤岛、响应滞后与运维效率低下等现实问题, 融合边缘计算与云平台技术, 实现运行参数的实时采集、智能判断与可视化运维, 为建筑节能与设备精细化管理提供有效技术支撑。

一、系统总体设计

本章将深入阐述冷水机组智慧运维系统的整体设计。与传统楼宇自动化系统往往局限于数据采集与展示不同, 本设计强调边缘智能与云端协同的创新架构, 旨在从根本上解决数据孤岛与响

应滞后问题。下文将从需求、架构及数据流三个层面, 具体说明本系统相较于现有方案的优化与突破。

相较于仅关注“监”而弱于“控”的传统系统, 本系统以满足闭环智能运维为核心理念进行需求规划。其核心功能在传统的数据采集与可视化基础之上, 实现了两大关键拓展: 其一, 是引

入了边缘侧的数据处理与智能诊断，此举不仅缓解了云端压力，更将部分分析决策能力下沉，实现了从“感知”到“认知”的前移，显著提升了异常响应的实时性；其二，是强化了数据驱动的决策支持，系统不仅记录历史数据，更能基于能效模型进行深度分析，为维护策略优化提供直接依据，从而超越了传统系统主要用于状态监视的局限性。

（一）系统架构

为支撑上述高级需求，本系统并未采用常见的“传感-云”简单两层架构，而是创新性地构建了“感知层-边缘层-云端层-应用层”四层协同体系（见图1）。其核心创新在于边缘层的独立与强化：与许多将网关仅视为协议转换器的方案不同，本系统部署的工业级嵌入式网关被赋予了数据缓存、滤波、甚至轻量级智能诊断算法（如后文所述的动态阈值报警）的能力。这一设计使得系统在网络中断等极端工况下仍能维持本地智能与数据完整性，实现了从“边缘计算”到“边缘智能”的跨越，构成了本系统在架构上的主要创新。

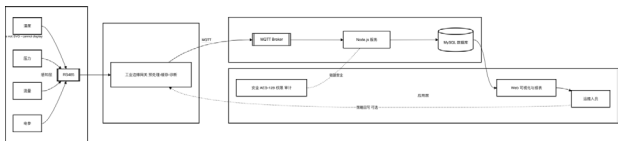


图1 系统总体架构图

（二）通信协议与数据流

在通信设计上，系统针对不同层级的需求与约束，采用了差异化的协议策略，以优化性能与可靠性。底层传感网络沿用稳定成熟的RS485总线，确保现场级的抗干扰与长距离传输。而在边缘至云端的数据传输关键路径上，系统摒弃了传统楼宇自控中常见的HTTP轮询或WebServices等重载协议，转而采用为物联网场景量身定制的MQTT协议。该协议基于发布/订阅模式，具备低带宽占用、低功耗和高效双向通信的优势，尤其适合高并发、弱网络的环境。针对网络不稳定的工业现场，本系统另一创新设计是引入了具备断点续传能力的本地缓存机制。当网络中断时，数据可在边缘网关暂存；网络恢复后，系统能从中断点自动续传，确保数据零丢失。这一机制对比传统方案中常见的数据丢弃或整体重传，在数据可靠性上实现了显著提升。最终，系统形成了一条高度协同的数据流：传感器→（边缘智能网关：预处理/缓存/诊断）→云端数据库→Web前端可视化→运维人员决策响应，构建了一个高效、鲁棒的闭环运维链路，见图2。

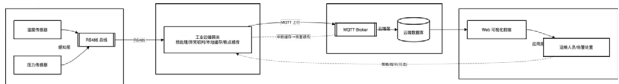


图2 通信协议与数据流闭环示意图

二、关键技术设计

本章将深入剖析支撑本系统实现智慧运维的核心技术模块。与仅实现基本数据汇集功能的传统系统不同，本设计在数据采集、边缘处理、云端平台及安全架构上均进行了针对性创新，旨

在构建一个全链路智能、高效且安全的闭环运维体系。

（一）高可靠数据采集与预处理模块

在数据采集层面，本系统突破了传统模拟信号采集易受干扰的局限，设计了基于多通道采集卡的数字式采集方案。具体而言，温度监测采用线性度优异的NTC精密传感器，压力监测则选用量程为0-2MPa的高稳定性压阻式传感器，并将采样周期优化至5秒，在数据精度与系统开销之间取得了良好平衡。其核心创新在于边缘节点集成的卡尔曼滤波算法与滑动窗口平滑机制。与常规的均值滤波或简单阈值去噪相比，该联合算法能有效区分信号中的真实动态与随机高频噪声，并对突变数据进行平滑修正，从而在源头确保了上传数据的稳定性和可靠性，为后续的精准分析奠定了坚实基础。

（二）基于动态阈值的边缘智能告警算法

传统系统的报警机制多依赖于预设的固定阈值，难以适应设备工况的动态变化，易产生误报或漏报^[3-5]。对此，本系统在边缘侧创新性地嵌入了一种轻量级异常检测机制，它结合了Z-score统计方法与动态阈值调整策略。该算法并非使用固定值，而是基于设备运行历史数据动态计算报警阈值（设定为历史均值 $\pm 3\sigma$ 范围）。这种方法能够自适应机组在不同负荷、不同季节下的正常运行区间，从而显著提升了报警的准确性。经样本测试验证，该算法的误报率被控制在3%以下，同时将平均响应延迟缩短至3秒以内，实现了从“事后报警”到“事前预警”的智能化转变。

（三）轻量级云端监测与可视化平台

为克服传统重型工业监控平台部署繁琐、响应迟缓的缺点，本系统云端平台采用了一系列轻量化与高效能技术选型。数据存储层选用开源且性能稳定的MySQL数据库，构建了实时与历史数据一体化存储体系。后台服务基于Node.js异步非阻塞框架构建，天然支持高并发数据接入与处理，相较于传统的多线程模型，在I/O密集型任务中表现出更优的响应效率。前端展示则借助ECharts组件库，实现了能耗曲线、参数趋势图与报警记录等多维度数据的动态、交互式可视化。用户可便捷地按日、周、月生成统计报表，这使得系统不仅在功能上满足监控需求，更在决策支持的数据洞察力上超越了传统平台。

（四）纵深防御的数据安全与访问控制架构

针对物联网系统普遍面临的安全挑战，本系统摒弃了单一防护思路，构建了覆盖数据链路与访问行为的纵深防御体系。在通信层面，系统全程采用AES-128加密技术对传输数据进行加密，有效防止数据在传输过程中被窃取或篡改。在应用层面，系统实施了严格的用户分级权限管理，确保不同角色的用户只能访问其授权范围内的功能与数据。此外，系统的创新点还在于集成了全操作日志审计模块，能够完整记录从设备操作到用户登录在内的所有关键行为，为系统安全事件的事后溯源与责任界定提供了不可抵赖的证据链，极大地增强了系统的整体安全性。

三、系统实现与性能分析

为验证本系统设计的可行性与优越性，我们将其部署于真实

工业场景中进行测试，并从数据传输、异常识别及能效优化等多个维度，与传统运维模式进行了对比分析。

（一）实验环境搭建

测试平台部署于某大型写字楼的中央空调系统，监测对象为两台额定功率为450kW的离心式冷水机组。为实现全面状态感知，我们在机组的关键节点上共设置了28个传感监测点，覆盖了冷媒循环、水系统及电力系统。测试为期7天，完整涵盖了工作日、周末及昼夜交替等典型负荷变化工况，确保了测试数据的代表性与全面性。

（二）数据采集与传输性能分析

实验数据表明，本系统在数据传输可靠性方面表现卓越。在7×24小时连续运行中，系统数据丢包率仅为0.08%，平均传输延迟为1.6秒。这一性能相较于依赖周期性轮询、平均延迟约4秒的传统楼宇自动化系统，响应速度提升了约60%。尤为关键的是，系统设计的边缘缓存与断点续传机制在实际测试中成功得到验证：在模拟网络中断的极端情况下，边缘节点可完整缓存超过24小时的运行数据，并在网络恢复后实现数据零丢失续传，彻底解决了传统系统在此类场景下的数据缺失痛点。

（三）异常识别准确性与可视化效果

在功能有效性层面，系统成功通过了实战检验。测试期间，系统基于3.2节所述的动态阈值告警算法，准确识别出3次由电压暂降引起的电流短时波动与1次由过滤器堵塞导致的水流量突降事件。所有告警均在3秒内通过平台与短信双通道推送至运维人员，并触发现场声光提示，实现了从“被动响应”到“主动预警”的运维模式转变。可视化平台能够以趋势图、雷达图等多种形式清晰展示参数动态、能耗对比与报警日志，其交互性与多维度数据分析能力，为运维决策提供了远超传统单机HMI界面的信息支持。

（四）能效分析与节能效果验证

本系统的核心价值最终体现在能效提升上。通过对比系统投

运前后的运行数据，两台冷水机组的平均能效比（COP）提升了4.5%。这主要得益于系统对运行参数的实时优化与在夜间低负荷工况下执行的自动调节策略，该策略在此特定时段实现了约6%的额外节能效果。这一数据有力地证明了，本系统不仅是一个监控工具，更是一个能够带来直接经济效益的能效优化平台。

四、结论与展望

这项研究设计并实现了一套基于物联网的冷水机组智慧运维与数据监测系统，其主要创新与成果体现在三个方面：在架构创新上，构建了“感知-边缘-云端-应用”四层全链路协同架构，特别是强化了边缘层的智能处理能力，从而有效解决了数据孤岛和响应滞后问题；在技术突破上，创新性地将卡尔曼滤波与滑动窗口法相结合用于数据预处理，并设计了基于Z-score与动态阈值的边缘智能告警算法，显著提升了数据质量、异常识别的准确性和及时性；在工程价值上，通过实际部署验证，系统在数据传输可靠性（丢包率<0.1%）、异常响应速度（<3秒）以及能效提升（COP提升4.5%）等方面表现优异，具有显著的工程推广价值和节能效益。尽管当前系统已达到预期目标，但智慧运维的演进永无止境，基于该研究的基础，后续工作将聚焦于三个方向进行深化：一方面，智能诊断深化，通过引入机器学习与深度学习算法，构建基于大数据的设备健康状态预测与故障诊断模型，实现从“预警”向“预测”的跨越；另一方面，系统优化升级，探索多台冷水机组联动的群控节能策略与优化调度算法，从单机优化迈向系统级能效最大化；此外，技术融合应用，结合数字孪生技术，构建与物理机组同步映射的虚拟模型，用于运行策略仿真、故障模拟与自适应维护，最终实现全生命周期的智慧运维。

参考文献

- [1] 郭鲁,魏颖,何金.基于物联网云平台的空调智能控制系统设计[J].计算机测量与控制,2022,30(3):114-119,138. DOI:10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2022.03.019.
- [2] 谢浩田.基于云平台的办公建筑中央空调监控系统设计与应用[D].山东:山东建筑大学,2023.
- [3] 梁博阳,郭景景,王占伟,王林,谈莹莹,李修真,周赛.基于参数残差驱动贝叶斯网络的冷水机组故障诊断[J].过程工程学报,2023,23(4):627-636.
- [4] 孙雨,丁强,夏宇栋,李聪.基于多块和自注意TCN结合的冷水机组故障诊断[J].过程工程学报,2024,24(2):162-171.
- [5] 石书彪,陈焕新,李冠男,胡云鹏,黎浩荣,胡文举.基于小波去噪和神经网络的冷水机组故障诊断[J].制冷学报,2016(37)1:12-17.