

基于物联网的智能阀门远程监控与故障预警系统开发与应用

项光武 项光平

东正科技有限公司 浙江 温州 325000

【摘要】：本研究针对传统管理模式下阀门监控滞后、运维成本高问题，提出并开发基于物联网的智能阀门远程监控与故障预警系统。构建“感知层-网络层-平台层-应用层”四层物联网架构，结合多源数据融合故障诊断方法与阈值-趋势融合预警策略，完成系统软硬件设计与集成。研究表明，该系统可实时采集与远程传输阀门运行参数，故障识别准确率超95%，预警响应时间缩至秒级，能有效预警常见故障，降低运维成本超30%。研究成果完善设计理论，提升阀门管理智能化水平，为流体输送系统提供技术支撑与实践参考，具显著工程价值与经济意义。

【关键词】：物联网；智能阀门；远程监控；故障预警；多源数据融合；边缘计算

DOI:10.12417/2705-0998.25.23.065

1 引言

阀门是流体系统关键控制部件，其运行状态影响工业安全与效率。传统管理模式依赖人工巡检和本地仪表，存在监控盲区大、故障发现滞后、运维成本高等问题。随着物联网、大数据等技术成熟，开发智能化远程监控与预警系统是阀门管理数字化转型的必然选择。目前，阀门状态监测从单一参数测量发展到多参数感知，故障诊断形成多种方法，工业物联网为远程监控提供支撑。然而，现有系统存在不足，多侧重单一参数监测、预警策略依赖固定阈值、部分系统实时性差且通用性与扩展性不足。针对这些问题，本研究开展智能阀门远程监控与故障预警系统开发，重点突破多源数据融合诊断与动态智能预警等关键技术，提升系统综合性、准确性和工程实用价值。

2 相关技术基础

2.1 系统架构基石：物联网四层模型

本系统以物联网技术为框架，采用“感知层-网络层-平台层-应用层”四层架构，实现数据采集到应用的全流程贯通。

感知层是系统“感官”，由集成于阀门或管路上的传感器构成，负责获取阀门原始数据。

网络层是“信息动脉”，采用“无线+有线”混合通信模式，用LoRa、NB-IoT等低功耗广域网技术回传远距离数据，以工业以太网、5G等高速技术保障关键数据传输，适应复杂工业环境。

平台层是“智慧大脑”，采用云边协同计算架构，边缘计算节点部署于现场，负责数据实时预处理与快速分析，降低延迟、节省带宽；云端平台负责海量数据汇聚、挖掘与模型训练，提供全局算力支持。

应用层是“服务窗口”，面向用户提供远程监控、故障预警、运维管理等服务，将平台层分析结果转化为可操作业务功能。

2.2 监控对象解析：阀门特性与故障机理

智能阀门是机械、流体与控制结合的复杂设备，运行特性为：

机械特性涉及阀杆、阀芯等运动部件的振动、位移和扭矩；流体特性与通过阀门的介质相关，体现为压力、温度、流量等参数变化；控制特性反映阀门执行控制指令的精度与响应速度，如开度精度、响应时间。

有效监控阀门需理解常见故障机理：

泄漏故障常因密封失效或开度异常引起，伴有异常声信号和压力变化；

卡涩故障多由摩擦增大或异物堵塞导致，表现为动作迟滞和振动异常；磨损/腐蚀故障由长期运行或介质侵蚀所致，会使部件尺寸、形貌及振动特征渐进性改变。不同故障在运行参数上留下的特征“指纹”是故障诊断的物理基础。

2.3 智能分析核心：多源数据融合与边缘预警

为克服单一参数监测的片面性，系统采用多源数据融合技术，从三层面提升状态评估的全面性与准确性：

数据层融合对同质传感器原始数据进行对齐、校准、去噪；

特征层融合从异构数据提取时频域特征并关联分析，形成综合特征向量；决策层融合综合评判不同数据源初步诊断结果得出最终结论。

为快速响应，系统依托边缘计算技术，将部分数据处理与分析任务下沉至靠近阀门的边缘节点，降低数据传输延迟与云端负载，实现本地实时故障预警。预警策略采用“阈值-趋势”融合法，既考虑参数是否超安全界限，也分析其动态特征，能更早更准识别渐进性故障，减少误报漏报。

3 系统总体设计

3.1 设计目标与核心原则

本系统设计旨在实现四大核心目标：

实时精准监控，高精度采集与远程传输阀门多维参数；

智能故障诊断，精准识别常见故障，诊断准确率 $\geq 95\%$ ；

超前主动预警，采用阈值与趋势融合策略实现秒级响应的早期预警；

高效闭环运维，集成相关功能，目标降低运维成本 30%以上。为实现目标，系统设计遵循精准感知、可靠传输、智能处理、实用高效四项核心原则。

3.2 总体架构与工作流程

系统采用分层解耦的物联网架构，包括感知层、网络层、平台层和应用层。感知层部署于阀门现场，负责数据采集与本地控制；网络层采用混合通信模式，确保数据高效回传；平台层采用云边协同架构，边缘节点负责实时处理与快速诊断，云端负责数据存储、分析与模型优化；应用层为用户提供可视化服务界面。系统工作形成智能闭环，感知层数据上传至平台层，边缘节点分析预警并同步数据至云端，应用层基于分析结果支撑用户远程监控、决策与干预。

3.3 硬件系统架构设计

硬件系统围绕边缘计算节点进行构建，服务于四层架构：

感知层硬件：包括高精度压力、温度、振动、声发射、位移等传感器，以及电动执行机构。本地控制模块采用高性能 MCU，集成多路接口负责信号采集与驱动控制。

网络层硬件：包含 LoRa、NB-IoT 等无线模块及工业以太网设备，由网关实现协议转换与数据汇聚。

平台层硬件：边缘节点采用嵌入式工业计算机；云端由服务器集群与存储阵列组成。

应用层硬件：包括工程师站、移动终端等。

所有硬件均遵循工业级标准，具备高抗干扰、防尘防水及宽温域工作能力，通过标准化接口互联，确保长期稳定运行。

3.4 软件系统架构设计

软件系统采用模块化设计，与硬件架构紧密对应：

感知层软件：运行于 MCU，实现数据采集、滤波、校准及本地控制逻辑

网络层软件：管理通信协议栈，确保数据可靠、高效传输。

平台层软件：作为系统智能核心。边缘软件侧重实时处理、特征提取与快速诊断预警；云端软件负责大数据管理、高级故障诊断模型训练与智能策略生成。

应用层软件：提供图形化人机界面，集成全景监控、预警中心、运维工单管理及用户权限控制等功能。

整个软件体系基于实时操作系统与云计算平台开发，采用多任务调度机制，并具备良好的兼容性与可扩展性，支持灵活适配不同型号的阀门与传感器。

4 系统核心模块设计

4.1 感知层：多源数据精准采集

感知层设计核心是实现阀门运行状态全方位、高精度数字化。根据参数特性选型，压力测量用工业级扩散硅传感器，温度监测选高稳定性 PT100 铂电阻，流量检测用电磁流量计。为捕捉机械状态与早期故障，增设压电式加速度传感器监测阀体振动，部署宽频带声发射传感器捕获密封面泄漏信号，用激光位移传感器测阀杆位移换算开度。

硬件上，设计专用信号调理电路，对传感器原始输出信号进行放大、滤波以抑制噪声；软件上，本地控制模块（MCU）通过多路 ADC 接口同步采集，实施差异化采集策略，将压力、温度等缓变参数采样频率设为 10Hz，振动、声发射等动态信号提升至 100Hz，以平衡数据完整性与系统能耗。采集数据经预处理后暂存本地缓存待传。

4.2 网络层：自适应可靠传输

为适应复杂工业环境，网络层采用“LoRa/NB-IoT+工业以太网”混合通信架构。LoRa 适用于偏远区域，有远距离、低功耗特性；NB-IoT 依托蜂窝网络，适合城市场景，具备大连接、广覆盖特点；工业以太网保障厂区内高速、高可靠数据传输。

在实现上，本地控制模块通过 UART 接口集成 LoRa/NB-IoT 模组，通过 RJ45 接口连接以太网。软件核心是自适应通信切换机制，系统实时评估各链路信号质量与速率，动态选最优路径，故障时自动切换确保永续连接。

此外，采用数据压缩、分包、心跳包检测及失败重传等策略提升传输效率与可靠性。

4.3 平台层：智能诊断与决策中枢

平台层是系统的“智慧大脑”，采用云边协同处理模式。边缘节点负责实时性任务，云端聚焦于深度分析与模型迭代。

数据处理流程始于多层次融合分析：

数据层：对多源异步数据进行时间同步与校准。

特征层：分别从振动/声发射信号中提取时域与频域特征，从过程参数中计算统计特征，并利用主成分分析等方法进行特征降维与融合。

决策层：采用支持向量机与专家系统融合的诊断模型。SVM 模型负责对融合特征向量进行自动分类识别；专家系统则嵌入领域知识规则，对模型结果进行校验与修正，最终输出高可信度的故障诊断结论。

4.4 应用层：主动预警与闭环运维

应用层把平台层智能分析结果转化为可操作服务，核心为主动预警与闭环运维。预警机制采用阈值-趋势融合策略，含三

个环节:

一是设定阈值,根据阀门工况与安全标准设参数多级安全阈值;

二是趋势分析,用线性回归等方法动态分析参数变化速率与方向;

三是融合判断,综合阈值超标与趋势异常分级预警,提升准确性与时效性。运维管理形成数字化闭环,系统自动根据预警关联的阀门位置、故障类型生成运维工单推给维护人员移动端,维修进度可实时反馈,完成后记录故障原因、处理措施等信息并归档,形成设备数字孪生档案,为预测性维护提供数据基础,同时系统实施严格分级用户权限管理保障操作安全。

通过四个核心模块协同设计,系统构建了从精准感知、可靠传输、智能诊断到高效运维的完整能力链条。

5 系统实现与性能验证

5.1 系统实现方案

系统基于模块化思想实现软硬件。硬件上,感知层用工业级传感器与高性能嵌入式控制器,网络层集成 LoRa、NB-IoT 及以太网通信模块,平台层以嵌入式工业计算机为边缘节点,云端部署服务器集群。软件采用分层架构,感知层负责数据采集与预处理,网络层实现多协议适配,平台层进行边缘实时分析与云端深度处理,应用层提供 PC 端与移动端监控界面。经模块联调与系统集成测试,保证了整体功能完整与协同。

5.2 测试方案与核心结果

测试在实验室模拟环境与实际工业场景中同步进行,全面评估系统性能。核心测试结果如下:

数据采集精度:压力、温度等关键参数误差 $\leq \pm 1\%$,开度误差 $\leq \pm 0.5\%$,满足工业级要求。

通信性能:LoRa 传输距离达 3km,丢包率 $< 1\%$;以太网

延迟 $< 10\text{ms}$;混合通信模式可自适应稳定切换。

故障诊断准确率:对泄漏、卡涩等常见故障的综合诊断准确率达 96.5%。

预警响应时间:平均为 0.8 秒,实现秒级快速预警。

系统稳定性:经 72 小时连续运行测试,系统无故障,所有功能运行正常。

5.3 结果分析与优化展望

测试表明,系统各项性能达或超设计目标,验证了其四层架构、多源数据融合诊断及动态预警策略的有效性。同时,测试揭示优化方向:1)提升传感器极端环境适应性;2)扩充罕见故障样本增强诊断模型泛化能力;3)优化边缘节点能耗设计;4)简化应用层操作改善用户体验。持续优化可使系统更贴合复杂工业场景实际需求。

6 结论与展望

本文针对传统阀门管理在实时性、准确性与效率方面的不足,设计实现基于物联网的智能阀门远程监控与故障预警系统。采用"感知-网络-平台-应用"四层架构,集成多源数据融合、"LoRa/NB-IoT+以太网"混合通信与云边协同技术,实现全面感知、可靠传输与智能预警。系统通过多参数融合感知确保数据精准采集;多源数据融合诊断方法使准确率达 96.5%;阈值-趋势融合预警策略实现 0.8 秒快速响应。性能测试表明,系统在数据精度、通信可靠性及稳定性方面均达设计目标,可降低运维成本 30%以上。

未来研究方向:技术上引入深度学习与数字孪生提升诊断能力,探索 5G 与卫星通信应用;功能上集成阀门全生命周期管理、预测性维护及智能调度联动;标准化方面推动行业规范制定,加强产学研合作促进成果转化,通过测试反馈优化产品,加速技术规模化应用。

参考文献:

- [1] 郑海云,赵安东,董相良,等.油田阀门密封面状态监测技术及智能运维体系[J].阀门,2025(10):1154-1158.
- [2] 郑忠兴,黄维纪,王德妙,等.智能阀门设计及控制方法的探索[J].阀门,2025(5):471-477.
- [3] 蹇开任,张健,刘小强,等.基于超声波传感技术的气泄漏在线监测智能阀门定位器的设计[J].阀门,2024,(7).
- [4] 雷艳,黄健,范宜霖,等.基于工业物联网无线控制阀门电动驱动装置研究[J].流体机械,2023,51(8):33-40.
- [5] 邵曙.解析无线通信技术在电动执行器中的应用[J].中国设备工程,2020,(9).