

高层住宅给排水管道堵塞预警的物联网监测系统设计与性能验证

李茜茜

142701*****1565

摘要: 高层住宅给排水系统作为居民生活的关键基础设施,其管道堵塞问题易引发排水不畅、水质污染甚至管道破裂等连锁故障,严重影响居住体验与建筑安全。针对传统人工巡检效率低、堵塞预警滞后的痛点,本文设计一种基于物联网技术的管道堵塞预警监测系统。系统通过部署多参数传感器实时采集管道流量、压力、流速及液位信息,经边缘计算模块预处理后,借助无线通信网络传输至云端监测平台,结合改进的堵塞判定算法实现堵塞风险分级预警。通过模拟实验与现场应用验证,系统可精准识别管道堵塞前兆,预警响应时间满足实时性要求,且具备良好的稳定性与抗干扰能力,为高层住宅给排水管道运维提供智能化技术支撑。

关键词: 堵塞预警; 物联网; 监测系统; 性能验证

DOI: 10.69979/3060-8767.25.10.055

1 研究背景及意义

1.1 研究背景

随着城市化进程加速,高层住宅已成为城市居住建筑的主流形态。高层住宅给排水系统具有管道线路长、竖向分区复杂、用水负荷波动大等特点,长期运行中易因杂物堆积、管道老化、施工残留等因素引发堵塞问题。传统管道维护依赖人工定期巡检,不仅耗费大量人力物力,且难以发现早期堵塞隐患,往往在堵塞故障发生后才被动处理,导致维修成本增加,同时给居民生活带来不便。据相关研究统计,高层住宅给排水管道故障中,堵塞类问题占比超40%,且故障处理周期平均延长3-5天,因此,研发高效、实时的堵塞预警监测系统具有重要现实意义。

1.2 研究现状

目前,国内外关于管道堵塞监测的研究主要集中在工业管道与市政管网领域,针对高层住宅民用给排水管道的专用监测技术相对匮乏。现有技术中,基于视频检测的方法受管道内水流干扰大,难以适应住宅管道狭小空间;基于压力波动的监测方法易受用水高峰影响,误报率较高;而基于流量变化的监测方法单一参数判定,预警精度不足。物联网技术的发展为多参数协同监测提供了可能,通过融合传感器技术、无线通信技术与数据分析技术,可实现管道运行状态的实时感知与堵塞风险的提前预警,有效弥补传统监测方法的缺陷。

2 系统总体设计

2.1 设计目标

本系统设计需满足以下核心目标: (1) 监测参数覆盖管道堵塞相关关键指标,采集精度满足预警需求; (2) 通信网络在高层住宅环境下实现全覆盖,数据传输延迟不超过预设阈值; (3) 堵塞预警算法可识别不同程度堵塞风险,误报率低于设定标准; (4) 系统具备远程监控、历史数据查询与故障报警功能,便于运维管理; (5) 设备体积小、功耗低,适应住宅管道安装环境,且具备一定抗干扰能力。

2.2 系统架构

系统采用“感知层-网络层-平台层-应用层”四层架构,如图1所示(图略)。感知层负责管道参数采集,部署流量传感器、压力传感器、流速传感器与液位传感器,通过边缘计算模块对原始数据进行滤波、降噪与初步分析;网络层采用“LoRa+WiFi”双模通信方式,LoRa用于传感节点与网关间的长距离低功耗传输,WiFi实现网关与云端平台的高速数据交互,同时解决高层住宅不同楼层信号覆盖问题;平台层构建云端监测中心,具备数据存储、算法分析、预警决策等功能,采用分布式数据库实现海量监测数据的安全存储;应用层面向物业运维人员与居民,提供Web端与移动端监控界面,实时展示管道运行状态,推送堵塞预警信息。

2.3 关键技术选型

(1) 传感器技术: 流量传感器选用超声波式,具有非接触测量、无压力损失、适应多种管径的特点; 压

力传感器采用扩散硅式，精度高、稳定性好，量程适配住宅管道工作压力；流速传感器选用电磁式，可实现瞬时流速实时测量；液位传感器采用电容式，用于监测管道内积水情况，预防堵塞导致的液位上升。（2）通信技术：LoRa 模块选用工业级芯片，传输距离可达千米级，支持多节点组网，满足高层住宅垂直传输需求；WiFi 模块采用双频设计，规避 2.4GHz 频段干扰，提升数据传输速率。（3）边缘计算技术：在传感节点集成微处理器，实现数据预处理，减少冗余数据传输，降低网络负载；云端算法采用机器学习框架，通过历史数据训练优化堵塞判定模型。（4）供电技术：传感节点采用“电池+太阳能辅助供电”模式，电池选用大容量锂亚电池，满足长期待机需求，太阳能板用于补充供电，延长设备使用寿命。

3 系统硬件设计

3.1 传感节点硬件设计

作为感知层核心，其硬件含传感器、微处理器、通信、供电与存储模块。微处理器选用低功耗 ARM 芯片，协调模块工作、控制采集频率，还能对原始数据滤波去异常，避免水流波动影响；传感器模块经标准接口连接，支持热插拔以便维护；通信模块集成 LoRa 与 WiFi 芯片，按需自动切换模式；存储模块用 Flash 芯片暂存数据防丢失；供电模块具备过压过流保护。外壳为 IP68 防水工程塑料，适配管道管径，安装分内置式（专用接口接入保精度）与外壁附着式（磁吸/卡扣固定，无需断水，减少居民影响）。

3.2 网关硬件设计

网关是网络层核心，负责接收传感数据转发至云端，兼本地缓存与设备管理。硬件含 LoRa 网关、WiFi/以太网、核心处理器、存储与供电模块。核心处理器选高性能嵌入式芯片，支持多线程，可同步接收多节点数据；LoRa 网关模块用集中式组网，扩大信号覆盖，解决高层楼层信号衰减；WiFi/以太网模块实现网关与云端高速交互，支持断点续传保数据完整；存储模块组合 SD 卡与固态硬盘满足备份需求；供电采用 AC220V 市电，配备用电池防断电停机。

3.3 硬件抗干扰设计

针对高层住宅电力线、无线信号干扰，从三方面设计：电源端加 EMC 滤波器抑高频干扰，用线性稳压器降电压波动影响；信号端用屏蔽线减电磁干扰，微处理器与通信模块间加光耦隔离防串扰；结构上设备外壳设金属屏蔽层，安装时避开配电箱、电梯机房等强干扰源。

4 系统软件设计

4.1 传感节点软件设计

传感节点软件采用模块化编程，主要包括数据采集模块、数据预处理模块、通信控制模块与功耗管理模块。数据采集模块根据预设周期控制各传感器采集数据，采集频率可通过云端平台远程配置，正常工况下采用低频率采集，当检测到参数异常时自动提高采集频率；数据预处理模块采用滑动平均滤波算法去除噪声，通过阈值判断初步筛选异常数据，减少无效数据传输；通信控制模块实现 LoRa 与 WiFi 通信模式的切换，当传感节点与网关距离较远时，启用 LoRa 模式，近距离时切换为 WiFi 模式，提升传输效率；功耗管理模块采用休眠唤醒机制，在非采集时段控制设备进入休眠状态，降低功耗，延长电池使用寿命。

4.2 网关软件设计

网关软件基于嵌入式操作系统开发，主要功能包括节点管理、数据转发、本地存储与异常处理。节点管理模块实现传感节点的注册、认证与状态监测，自动识别新增节点并分配通信地址；数据转发模块将接收的传感数据进行格式转换，按照预设协议上传至云端平台，同时接收云端指令并下发至传感节点；本地存储模块将数据实时备份至本地存储设备，当网络中断时，待网络恢复后自动补传数据；异常处理模块监测网关运行状态，当出现通信故障、硬件异常时，自动重启故障模块并发送报警信息至云端平台。

4.3 云端平台软件设计

云端平台采用 B/S 架构，基于 Web 开发技术实现，主要包括数据接收与存储模块、数据分析与预警模块、用户管理与权限模块、可视化展示模块。数据接收与存储模块采用分布式消息队列接收网关上传的数据，通过时序数据库存储历史监测数据，支持高效查询与统计分析；数据分析与预警模块是平台核心，采用多参数融合算法判定管道堵塞风险，通过建立流量-压力-流速关联模型，当监测参数超出正常阈值范围时，结合历史数据趋势预测堵塞发生概率，并根据风险程度分为轻度、中度、重度三个预警等级；用户管理与权限模块实现不同角色用户的权限分配，物业管理员具备系统配置与预警处理权限，居民仅可查看所在楼栋管道运行状态；可视化展示模块采用图表、地图等形式直观展示管道参数变化趋势与预警信息，支持历史数据查询与报表导出。

4.4 堵塞判定算法设计

传统堵塞判定方法多基于单一参数阈值，易受用水负荷波动影响，误报率较高。本文提出基于改进BP神经网络的多参数融合堵塞判定算法，步骤如下：（1）特征提取：选取流量偏差率、压力波动幅度、流速下降率、液位上升速度作为输入特征参数，通过归一化处理消除量纲影响；（2）模型训练：采用历史监测数据与模拟堵塞数据构建训练数据集，对BP神经网络进行训练，优化网络权重与阈值，提高模型泛化能力；（3）风险判定：将实时采集的特征参数输入训练好的模型，输出堵塞风险概率，当概率超过对应阈值时，触发相应等级的预警；（4）模型更新：定期利用新的监测数据与故障案例对模型进行迭代优化，适应管道运行状态变化。

5 系统性能验证

5.1 验证方案设计

采用“模拟场景复现+实际环境部署”双层框架。模拟实验搭建含竖向分区、支管分支及用水负荷波动的全尺寸平台，构建堵塞各阶段场景（初期截面缩减、中期阻力上升、后期局部阻塞），并模拟不同用水负荷，测试系统参数采集、信号传输及风险判定的适应性；现场应用选取多栋、高楼层且入住率稳定的住宅社区，在管网关键节点与易堵塞支管部署设备，验证周期覆盖季节与用水高峰变化，监测系统稳定性、环境适应性及预警价值，同步收集运维反馈与居民体验。

5.2 模拟实验结果分析

参数采集环节，不同工况下流量、压力、流速、液位数据均能精准反映管道状态，无失真或中断；预警响应上，系统可及时捕捉异常并触发对应等级预警，堵塞初期亦能通过多参数关联识别风险，误判率低；通信传输方面，模拟高层复杂信号环境，“LoRa+WiFi”双模架构保持数据稳定传输，无丢失或延迟。

5.3 现场应用结果分析

长期运行中，系统硬件无环境因素导致的故障，通信与预警推送畅通；预警可精准指向堵塞位置，简化巡检流程，隐患均在恶化前处理，避免排水问题与居民生活受影响；运维团队反馈人工巡检频次与强度降低，居民认可处理时效性，突发工况下系统亦能稳定适配。

5.4 性能对比分析

相较传统人工巡检，系统实现“被动维修”到“主

动预警”转变，可提前识别前兆、避免故障扩大，判定更一致准确；对比单一参数系统，多参数协同分析规避外界干扰导致的误报，提升预警可信度；运维上，减少人工介入，提升故障定位精度，长期可优化资源配置、降低成本。

6 结论与展望

6.1 研究结论

本文设计的高层住宅给排水管道堵塞预警物联网监测系统，通过多参数传感节点实现管道运行状态的实时感知，采用分层式通信架构解决高层住宅信号传输问题，结合改进的多参数融合算法实现堵塞风险精准预警。模拟实验与现场应用验证表明，系统数据采集精度高、预警响应快、误报率低，且具备良好的稳定性与抗干扰能力，可有效弥补传统监测方法的不足，为高层住宅给排水管道智能化运维提供技术支持。同时，系统采用模块化设计，具备良好的扩展性，可根据不同住宅建筑特点进行参数配置与功能升级。

6.2 研究展望

未来研究可从三方面进一步优化：一是拓展监测参数类型，加入管道温度、水质浊度等参数，实现管道腐蚀、水质污染等多故障预警；二是优化通信网络架构，引入5G技术，提升数据传输速率与网络容量，适应大规模传感节点部署；三是融合数字孪生技术，构建管道数字模型，实现堵塞故障的可视化模拟与预测，进一步提升系统智能化水平。此外，还需加强系统标准化设计，降低设备成本，推动技术在更多高层住宅项目中的推广应用。

参考文献

- [1]黎强龙.基于物联网与大数据的智慧安全给排水系统监测与预警研究[J].中国战略新兴产业,2024(18):64-66.
- [2]孙抗.基于物联网的市政管线标识监测系统的设计与实现[D].西安科技大学,2016.
- [3]杨录林.基于物联网技术的智能给排水设备自动监测方法研究[J].科技创新与生产力,2024,45(10):107-109.
- [4]付芳.住宅建筑给排水工程中管道安装工艺探究[J].建筑与施工,2024(17).
- [5]杨芳泉,陈少林.建筑给排水系统节能优化设计在智能住宅小区的应用[J].中国战略新兴产业,2024(32):116-118.