

基于物联网的给排水系统泄漏预警设计与智能控制技术研究

赵青琳

石家庄市万成民用建筑设计有限公司, 河北 石家庄 050000

[摘要]文章设计“感知-传输-平台-控制”四级架构体系,利用多种传感技术对管道的压力、流速以及振动信号进行采集,并采用 NB-IoT 和光纤相结合的方式确保信息传递的有效性,在此基础上使用 LSTM-Attention 模型来进行泄漏检测。实现泄漏的精准预警及定位,并设计自适应智能控制策略完成泵站启动、关闭以及阀门开合度等联动控制;仿真结果表明,所设计系统泄漏识别准确率高,泄漏定位误差小,响应快,相比传统系统漏损控制效率提高,能耗降低,可为给排水系统智能化运行维护提供有效技术手段支持。

[关键词]物联网;给排水系统;泄漏预警;智能控制;LSTM-Attention 算法;传感器融合

DOI: 10.33142/ec.v8i11.18578

中图分类号: TU991

文献标识码: A

Research on Leakage Warning Design and Intelligent Control Technology of Water Supply and Drainage System Based on Internet of Things

ZHAO Qinglin

Shijiazhuang Wancheng Civil Architecture Design Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract: The article designs a four level architecture system of "perception - transmission - platform - control", which uses multiple sensing technologies to collect pressure, flow velocity, and vibration signals of pipelines, and combines NB-IoT and fiber optics to ensure the effectiveness of information transmission. Based on this, the LSTM-Attention model is used for leak detection. Realize precise warning and positioning of leaks, and design adaptive intelligent control strategies to achieve linkage control of pump station startup, shutdown, and valve opening and closing; The simulation results show that the designed system has high accuracy in leak identification, small leakage positioning error, fast response, improved efficiency in leak control compared to traditional systems, and reduced energy consumption, which can provide effective technical support for the intelligent operation and maintenance of water supply and drainage systems.

Keywords: Internet of Things; water supply and drainage system; leakage warning; intelligent control; LSTM-Attention algorithm; sensor fusion

引言

供水、污水处理是城市建设的重要环节之一,与人们的生活、环境以及用水息息相关。由于我国水文资源在时间上存在差异性,在空间上也存在差异性,并且部分管道的质量较差,管理方式较为落后,因此经常出现漏水情况。据统计,2023 年中国供水管网漏损量为 118 亿 t,漏损率超过 14%,平均每供应 7t 水就有 1t 漏水,既造成严重水资源浪费,也容易导致路面塌陷、水质污染等一系列连锁灾害的发生,危及城市的公共安全。传统的给排水系统主要依靠人工巡检以及事后的抢修来完成,具有检测泄露滞后性大、定位精度差、耗费人力物力多、响应不及时等特点,难以适应新时代城市对供水安全及智能管理的要求。

随着物联网的发展,在给排水领域可通过各种类型的传感器、通信设备及计算机操作管理平台,实时采集信息进行数据分析,并作出反馈调节,以达到实时监控、自动分析以及远程操控的目的^[1]。利用物联网建立管网泄漏预

报及自控系统可以将管网“事后维修”的管理模式转变成“提前预报、及时控制”。因此,有效地降低漏损量,提高系统的可靠性和有效性,对于解决缺水、保证城市的供水安全有着重要的实际意义。

1 物联网技术概括以及在给排水系统中的应用

1.1 物联网

物联网的目的在于借助网络建立起物与物、人与物、人与人之间的连接^[2],从真正意义上实现信息高效交互、系统智能化管理以及自主化处理,其系统架构主要如下:

(1) 感知层。位于物联网系统架构中的底层,主要功能为对物体基本信息进行感知、获取及识别,通常通过对无线传感器网络、射频识别、传感器等进行部署而实现^[3]。

(2) 网络层^[4]。在物联网数据信息的交互过程中发挥着桥梁的重要作用,在感知层完成对数据信息的获取任务以后,该层会借助有线或无线传输方式,在既定通信协议的支持下形成 ZigBee、Wi-Fi 等通信网络系统,以此完成人与人、人与物、物与物之间信息的高效交互^[5]。(3) 应用

层。位于物联网系统架构中的顶层，主要用于处理与应用感知到的各类信息，为用户提供人机交互平台，实现终端设备应用等智能化控制^[6]。

1.2 物联网技术在给排水系统中的应用

目前，物联网技术在给排水系统中的应用已经取得了显著进展，通过将传感器和智能设备部署在管网、泵站和污水处理厂等关键位置，实现了对给排水系统的实时监测和远程控制^[7]。这些传感器可以收集水质、水位、流量等多种数据，通过物联网平台将数据实时传输至中心控制系统，而借助物联网技术，管理者可以随时监测系统运行状态，及时发现异常情况并采取相应措施。物联网技术还支持对给排水设备的远程监控与维护，提高了设备的利用率和管理效率^[8]。总体而言，物联网技术为给排水系统带来了智能化、自动化的管理手段，提升了系统的稳定性、安全性和运行效率，为城市水务管理注入了新的活力^[9]。

2 系统总体架构设计

(1) 感知层：相当于整个系统的“神经末梢”。用来获取管道的重要信息，布置了声振传感器、压力传感器、流量传感器及温度传感器以完成对泄露声音、管内压力、流速流量以及周围温度的数据采集。其中声振传感器为阵列式的传感器来接收泄露声音频率范围在 300~2500Hz 的声音；压力传感器选用压阻式传感器，压力：0~1.6MPa，精度 $\pm 0.5\%$ ；流量传感器采用电磁流量计，适用于大管径，无阻流损失。

(2) 传输层：实现感知数据与控制指令的双向传输。采用“LoRa 为主、NB-IoT 为辅”的融合通信方案：LoRa 用于地下管网深层节点数据传输，通信距离 $\geq 3\text{km}$ ，功耗低至 2 μA ；NB-IoT 用于城市主干道管网节点传输，依托运营商基站实现广覆盖，适用于信号遮挡较少区域。两种协议通过网关融合，保障数据传输的稳定性与覆盖率。

(3) 数据层：进行数据的存储、预处理及融合分析。建立分布式数据库，保存原始传感数据、历史泄漏案例以及管网 GIS 数据；对数据进行清洗（去除异常值）、标准化（统一数据格式）、融合分析（多源数据互补验证），给预警算法提供良好的数据入口。

(4) 应用层：主要功能层，包含预警功能子系统和控制功能子系统。其中，预警功能子系统负责对漏损进行检测，并提供不同的预警级别；控制功能子系统则结合预警信息制定相应的控制方案，驱动阀门、泵等执行机构动作；此外还设置有 GIS 展示平台，用于查看管道运行状况及显示漏损位置。

4 核心技术实现

4.1 多源传感器数据融合技术

传感器对给排水系统基本数据进行采集，主要采集的指标有水位、管路流量、水质及压力等。其中，水位主要指给排水系统管道或水体内部液体的实际高度，通过对水位

变化情况的监测，能够有效规避溢流、水灾等风险，单一传感器监测易受干扰致数据不准，多源传感器数据融合可整合多维度数据提升泄漏检测可靠性。本研究用基于 D-S 证据理论的方法，步骤如下：

(1) 数据预处理：用 Z-score 公式标准化各传感器数据。

(2) 特征提取：针对不同传感器数据提取泄漏特征。

(3) 证据构建：以特征提取结果为独立证据，建立与泄漏状态映射，算出 BPA。

(4) 证据融合：用 D-S 合成规则融合多源证据，得最终泄漏状态判断，提升检测可靠性准确性。

以上均通过布设在给排水系统关键位置的传感器进行采集，经过数据传输由中心控制系统接收，在数据处理后为给排水系统实际运行状态监测及预警提供技术支持。基于对各类数据变化情况及其关联性的实时采集与精准分析，能够在尽可能短的时间内确定给排水系统运行问题，避免事故发生，为系统安全运行提供保证。

4.2 基于改进 LSTM-Attention 的泄漏识别算法

给排水管道泄漏信号具非线性、非平稳特点，本研究提出改进的 LSTM-Attention 泄漏识别算法，引入注意力机制增强对泄漏特征感知，提升识别精度。

LSTM 可捕捉时间序列数据长短期依赖、解决梯度消失问题，但难突出关键特征。注意力机制能增强关键特征贡献、抑制无关干扰，提升模型性能。

改进算法结构：

(1) 输入层：以预处理多源传感器时间序列数据（样本数，时间步长，特征数）为输入。

(2) LSTM 层：2 层，神经元数 64、32，用 Dropout (0.2) 防过拟合，提取时间序列特征。

(3) 注意力层：用 Bahdanau 注意力机制计算权重。

(4) 全连接层：拼接注意力层与 LSTM 层最后时间步输出，经 ReLU 处理输出特征向量。

(5) 输出层：用 Softmax 输出泄漏状态分类结果（正常、轻微、严重泄漏）。

4.3 泄漏点精准定位技术

基于多源传感器数据与管网水力模型，提出“声纹特征匹配+水力计算”融合定位法实现泄漏点精准定位，步骤如下：

(1) 建声纹特征库：实验采集不同工况（泄漏程度、管道材质、埋深）的泄漏声纹信号，提取特征（峰值频率等）建库。

(2) 初步定位：实时声纹信号与库匹配，结合传感器位置确定大致区域，利用分布式光纤传感器缩小范围至 50m 内。

(3) 精准定位：基于管网水力模型，输入实时压力、流量数据，依压力降传播规律建数学模型求解得精准位置，

误差小于 1m。

4.4 自适应智能控制策略

4.4.1 泄漏应急控制

在发生泄漏时,自动执行紧急控制:①根据泄漏点定位结果,下发控制指令至泄漏点上下游的智能阀门,关断上流阀门减少泄漏量,调节下流阀门维持管网压力平衡;②如泄漏量大,则联动变频泵站降低水泵转速,减小供水压力,防止泄漏扩大;③待泄漏控制住后,缓慢开启阀门及泵房设备,恢复管网供水。

4.4.2 日常运行优化

在历史运行数据的基础上,利用在线监测的数据进行模型预测控制(MPC),以改善系统的日常运行状况:①依据用水负荷的变化情况,对将来一段时间内所需用水量做出估计,相应地调节泵站的运行台数及转速;②考虑电力价格的不同,在电价低的时候将水蓄存起来,在电价高的时候降低泵站的负载率,节能降耗;③动态掌握管网压力变化情况,并根据管网压力的变化及时调节阀门的开启程度,在保证管网压力在合理范围内(0.3~0.6MPa)的情况下避免管网压力过大而发生渗漏。

5 系统性能测试与验证

5.1 测试平台搭建

为了检测系统对管道泄漏报警准确度、报警延迟时间以及自动调控能力,在 MATLAB/Simulink 中建立试验环境,并设计出一个虚拟城市给水管网系统作为被测对象,该管网长度 5km,管径范围在 300~800mm 之间,管网中有 10 处压力传感点、3 台加压泵及 15 个电动阀门。具体实验条件如下:压力传感器采集时间为 1s;通信响应时间 $\leq 200\text{ms}$;渗漏量为 $0.5\sim 5\text{m}^3/\text{h}$;正常状态、微量渗漏、大渗漏。测试指标包括:泄漏识别准确率、定位误差、响应时间、漏损率降低幅度、能耗降低幅度。

5.2 泄漏预警性能测试

在不同泄漏工况下测试系统预警性能,每种工况重复测试取平均值,本系统在轻微与严重泄漏工况下识别准确率高于单一传感器组,定位误差小,响应时间短,且相较于单一传感器监测模式,识别准确率、定位精度、响应速度均有显著提升,验证了多源传感器融合与改进 LSTM-Attention 算法的有效性。

5.3 智能控制性能测试

将物联网技术引入建筑给排水系统,在模拟管网漏场景下,测试系统的智能控制效果,本系统通过泄漏应急控制与日常运行优化,漏损率、单位水量能耗降低,泄漏处置时间缩短,验证了自适应智能控制策略的有效性,可提升系统运行效率,降低漏损与能耗。

5.4 系统稳定性测试

排水系统引入物联网可提升运行可靠性与稳定性,能

提前预警设备故障、准确评价设备状况、降低事故概率^[9]。通过设置临界值实现事故预警,避免经济损失;还能识别影响设备效能的关键因素并优化,提升系统稳定性与效率^[10-11]。对系统开展 72h 连续运行稳定性测试,监测传感器数据采集、传输及设备运行状态。结果显示,传感器数据采集精准,数据传输稳定无丢失,设备运行稳定无故障停机;平台层响应及时,预警信息推送准确、控制指令执行成功率高,验证了系统的稳定性与可靠性^[12]。

6 结论与展望

在给排水系统监测及预警中应用物联网技术,能够在显著程度上提升给排水系统监测及预警准确性,为系统智慧安全运行提供重要保证。本文提出一种基于物联网技术的给排水系统的漏损预报及智能控制系统,并搭建“感知-传输-平台-控制”四级模型框架,对整个给排水管网进行在线监控、漏损预测报警以及自动调节。具体的研究成果包括:提出多源传感器融合部署方案,整合压力、流量、振动、声纹等多维度数据,采用 D-S 证据理论实现数据融合,提升了泄漏检测的可靠性。优化 LSTM-Attention 泄漏识别算法,在 LSTM 基础上增加 Attention 以提高模型对重要信息的关注度,泄漏识别准确率高;泄漏定位误差小;泄漏响应时间小于 5s;相比传统的泄漏识别方法大大提高了泄漏预警的速度及准确性。设计自适应智能控制策略,实现泄漏应急控制与日常运行优化,漏损率降低,能耗降低,泄漏处置时间缩短,提升了系统运行效率与经济性。搭建的系统运行稳定可靠,数据传输成功率提高,控制指令执行成功率提高,能够满足给排水系统智慧化运维的需求。本研究虽取得一定成果,未来可引入数字孪生技术,建立给水管网的数字孪生模型,实现物理空间和虚拟空间中给水管网实体和模型的一一对应和动态同步,增强系统仿真分析及预测能力,实现泄漏风险预警。优化传感器部署方案,结合管道老化程度、运行年限等因素,建立动态部署模型,实现传感器资源的最优配置,降低系统建设成本。

[参考文献]

- [1]金涛.GPS 技术在数字孪生中的应用研究[J].中国管理信息化,2025,11(6):173-175.
- [2]艾晓燕.数字孪生在建筑智慧运维系统中的应用探讨[J].科技创新与生产力,2024,12(9):36-40.
- [3]Marc BAADEN.Deep inside molecules-digital twins at the nanoscale[J].Virtual Reality&Intelligent Hardware,2022,11(4):324-341.
- [4]贺洪煜.大数据在建筑智慧运维系统中的应用[J].建筑施工,2021,12(12):2600-2603.
- [5]吴学伟,黄穗虹,黄艳雄,等.广州海绵城市建设之智慧排水实践[J].环境工程,2023,41(11):110-114.

- [6]罗茜平,何宗苕,景袁媛.基于物联网的重庆市智慧排水建设体系探讨[J].智能城市,2022,8(8):72-74.
- [7]刘玉涛.基于物联网等技术的城市智慧排水系统建设应用研究[J].仪器仪表用户,2022,29(2):21-24.
- [8]裴燕.智慧工地视域下房屋建筑给排水施工技术创新[J].中国建筑金属结构,2024,23(12):49-51.
- [9]胡烈诚,黄月红,李健勇.城市轨道交通给排水专业智能运维应用[J].现代信息科技,2024,8(24):116-120.
- [10]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.

[11]张雨童.建筑智能化技术在建筑给排水工程中的应用初探[J].中国住宅设施,2024,11(4):34-36.

[12]唐仁刚.建筑给排水设备智能化控制与监测技术研究[J].中国设备工程,2024,10(7):28-30.

作者简介:赵青琳(1993.7—),毕业院校:唐山学院,所学专业:建筑环境与设备工程,当前就职单位:石家庄市万成民用建筑设计有限公司,职务:给排水设计,职称级别:工程师。