

智慧水务背景下供水管网漏损监测的物联网技术集成与漏点定位精度提升

任静

河北省邯郸市供水有限责任公司冀安新区分公司, 河北 邯郸 056000

DOI:10.61369/ERA.2025110008

摘 要 : 本文聚焦智慧水务背景下的供水管网漏损监测问题, 针对漏损制约供水系统高效运行的现状, 研究了物联网技术集成与漏点定位精度提升策略。本研究为智慧水务背景下供水管网漏损的精准监测与高效管理提供了有力技术参考, 助力供水系统智能化升级与高效运行。

关 键 词 : 智慧水务; 供水管网; 漏损监测; 物联网技术

Integration of Internet of Things (IoT) Technologies and Enhancement of Leak Point Location Accuracy for Water Supply Network Leakage Monitoring Under the Background of Smart Water Management

Ren Jing

Ji'an New District Branch, Handan Water Supply Co., Ltd., Handan, Hebei 056000

Abstract : This paper focuses on the issue of leakage monitoring in water supply networks under the context of smart water management. Addressing the current situation where leakage restricts the efficient operation of water supply systems, it investigates strategies for the integration of Internet of Things (IoT) technologies and the enhancement of leak point location accuracy. This study provides a robust technical reference for the precise monitoring and efficient management of water supply network leakage under the smart water management framework, facilitating the intelligent upgrade and efficient operation of water supply systems.

Keywords : smart water management; water supply network; leakage monitoring; Internet of Things (IoT) technologies

引言

传统漏损监测方式依赖人工巡检与经验判断, 存在响应滞后、定位精度低、覆盖范围有限等问题, 已无法满足现代化供水管理的需求。因此如何通过物联网技术的集成应用构建全域感知、智能分析的漏损监测体系, 如何融合多源数据提升漏点定位精度, 成为当前智慧水务领域亟待解决的关键课题。本文聚焦智慧水务背景下供水管网漏损监测的技术突破, 系统梳理漏损机理与物联网技术体系, 设计多层级物联网集成架构, 并提出基于多源数据融合的定位精度提升策略, 旨在为实现供水管网漏损的“早发现、早定位、早修复”提供理论支撑与技术参考, 助力供水系统向高效化、智能化转型。

一、相关理论与技术基础

(一) 供水管网漏损机理与特征分析

部分城市的管网缺乏统一规划与标准化建设, 存在管道布置不合理、阀门老化、接头漏水等问题, 这些因素都加剧了漏损现象的发生^[1]。供水管网漏损是制约供水系统高效运行的关键问题, 其机理涉及多方面因素的综合作用。管道自身材料老化是重要内因, 金属管道易因电化学腐蚀形成锈洞并扩大漏水; 塑料管道可能因紫外线、温度变化产生应力疲劳开裂, 接口处更易因收缩不

一致渗漏。外部环境因素影响显著, 地质活动使管道受不均匀外力, 应力超限会导致断裂或接口松动; 施工不当会让回填土硬物持续磨损管道, 形成漏点。漏损呈现明显动态特征, 时间上, 用水高峰期水压高则漏损量增加, 夜间水压稳定则漏损平缓; 空间上, 老城区管网漏点密集, 新建城区施工区域周边可能因外力扰动集中漏损。漏损形式包括明漏和隐蔽暗漏, 后者长期耗水且难发现。

(二) 物联网核心技术体系

物联网技术为供水管网的智能化监测提供了重要支撑, 其核

心技术体系涵盖感知层、网络层和应用层三个层面^[2]。感知层通过压力传感器（监测漏水水压异常）、流量传感器（捕捉流量波动）及智能水表（识别异常用水模式）实时采集管网状态数据；网络层借助 LoRa（低功耗远距离）、NB-IoT（抗干扰性强）等无线技术及光纤（高速大容量）将数据高效稳定传输至处理中心；应用层通过云计算存储数据，利用大数据分析挖掘漏损特征，再以可视化界面呈现管网状态与预警信息，为漏损管理提供决策支持。

（三）漏点定位核心算法理论

漏点定位算法是实现供水管网漏损精准定位的关键，目前主要有基于模型的算法和基于数据驱动的算法两类。基于模型的算法以管网水力模型为基础，依据流体力学原理建立水压、流量与管道参数的关系，通过对比实际与模拟的水力参数偏差反推漏点，定位精度高，但对管网模型准确性要求严、计算复杂，适用于结构清晰、参数已知的管网^[3]。基于数据驱动的算法依赖大量监测数据，经机器学习（如支持向量机、神经网络）、深度学习（如卷积神经网络、循环神经网络）训练模型实现定位，对管网结构依赖性低，但需大量标注数据，数据质量影响定位精度。此外，混合算法融合两者优点，如用水力模型缩小范围后用数据驱动算法精准定位，提升准确性与鲁棒性。

二、漏损监测的物联网技术集成架构设计

（一）总体架构设计

漏损监测的物联网技术集成总体架构以“全域感知、高效传输、智能处理、精准定位”为核心目标，采用分层递进设计，构建“感知层-网络层-平台层”三层协同架构，各层功能独立且通过标准化接口实现数据与指令双向交互^[4]。其设计遵循“数据驱动决策”原则，感知层捕捉管网漏损特征信号形成原始数据池；网络层经混合组网汇聚数据至平台层，同时下发控制指令；平台层融合处理多源数据、运算算法并可视化展示，输出漏损预警与漏点定位结果。该架构优势在于分布式部署可灵活扩展感知节点，适应不同城市管网场景；集中式管理平台统一调度数据与算法，避免多系统冗余冲突。技术适配性上需满足关键数据传输时延 ≤ 10 秒以快速响应漏损；网络层有断线重连与数据补发机制，感知节点平均无故障运行时间 ≥ 8000 小时；采用低功耗硬件与窄带通信，单节点年均能耗 ≤ 5 度电以控成本。三层架构融合实现漏损监测从“被动响应”向“主动预警”转型。

（二）多维度感知层设计

感知层设计质量直接决定原始数据的完整性与准确性，多维度感知层以“全参数覆盖、高密度部署、自适应感知”为设计原则。在监测参数与传感器选型上，建立对应的感知矩阵，压力特征选用扩散硅压力传感器，测量范围 0-1.6MPa，分辨率 0.1kPa，适应 -20℃-80℃环境；流量特征在 DMA 区域入口与主干管安装电磁流量计，管径适配 DN80 到 DN1200，流速测量 0.1-10m/s，通过 RS485 接口输出数据；声学特征采用压电式振动传感器，灵敏度 10mV/g，频率响应 20Hz-5kHz，可过滤环境

噪声；辅助感知部署土壤墒情传感器（0-100% 体积含水量）与管体应力传感器（0-200MPa）。传感器部署结合管网拓扑与漏损风险等级，高风险区域“网格状密集部署”，间距 50-80 米；中低风险区域“线性稀疏部署”，每隔 300-500 米设监测节点。感知节点采用 IP68 防护等级外壳，地埋式安装，内置锂电池与太阳能辅助供电，连续阴雨天气续航不低于 15 天，实现漏损信号“早发现、早捕捉、早传输”。

（三）混合组网的网络层设计

网络层作采用混合组网思路构建“近距离自组网+远距离广域网+骨干网传输”三级传输链路，平衡传输距离、数据量与能耗矛盾。近距离组网用 ZigBee 技术构建 WSN，感知节点通过星型拓扑与区域协调器通信，每个协调器接入 64 个终端节点，通信半径 50-100 米，传输速率 250kbps，适用于密集区域数据本地汇聚，采用 CSMA/CA 机制避免冲突，支持路由自动修复。远距离传输以 NB-IoT 与 LoRa 为核心，区域协调器经 NB-IoT 接入运营商基站，广域覆盖（半径 1-3 公里），窄带特性降干扰，适合小数据量周期性上报；偏远区域用 LoRa 构建私有网络，通信距离 3-5 公里，扩频技术抗干扰，满足低速率、低功耗需求。骨干传输结合光纤与 5G，区域监测中心经光纤专线连云端（速率 1Gbps）传输海量数据与视频流；应急场景启用 5G 切片，时延 ≤ 50 ms，保障实时数据回传。网络层还嵌入数据预处理模块，完成格式转换、异常值剔除与压缩（压缩率 $\geq 30\%$ ），降低云端压力，实现分层传输目标。

（四）一体化平台层设计

平台层整合数据存储、智能分析与应用服务功能，实现从原始数据到决策信息的转化，采用“云边协同”架构，边缘节点处理部分实时任务，云端部署核心计算与管理功能，形成分层协同的技术体系。数据接入层兼容多协议，接收感知层数据并对接管网 GIS 系统，建立“监测数据-管网实体”映射。数据存储层采用混合数据库，时序数据库存储实时监测数据，关系型数据库存储结构化数据，文件数据库存储非结构化数据^[5]。智能分析层集成三大引擎，漏损识别引擎对比数据与历史基线识别异常；定位引擎融合多种方法输出漏点坐标（平面精度 ≤ 5 米）；健康评估引擎计算管道剩余寿命并生成风险热力图。可视化层构建三维数字孪生场景，叠加展示各类信息，支持多维度查询与分析。应用服务层为运维人员提供工单管理与路径规划，为管理人员提供统计分析决策建议，通过 API 接口与智慧水务平台对接，实现全流程智能化。

三、基于多源数据融合的漏点定位精度提升策略

（一）数据预处理与特征工程

多源监测数据在采集与传输中存在噪声干扰、数据缺失与格式异构等问题，需经预处理与特征工程转化为高质量特征^[6]。数据预处理针对不同数据特性采用差异化方法，时序数据用小波变换过滤噪声，保留有效频段；声学信号通过短时傅里叶变换转换为频谱图，过滤非漏点噪声。数据缺失时，短时缺失用滑动窗口

均值法填补,空间上用 K 近邻算法基于相邻传感器数据估算。数据标准化采用 Z-score 归一化,消除量纲差异^[7]。特征工程从时域、频域、空间域提取漏损特征,时域提取统计量捕捉数值波动规律,频域从声学信号频谱图提取特征,空间域结合管网 GIS 数据构建空间关系矩阵。再通过特征选择算法筛选出强相关特征子集,减少冗余信息,提升定位效率。

(二) 传统定位算法的优化与改进

传统定位算法受管网复杂性与环境干扰影响,定位精度不足,结合多源数据优化可发挥其优势。水力模型法通过多源数据动态校正参数,用实时压力数据反演管道糙率并建立动态关系模型,结合流量数据修正节点用水量;引入漏点数量自适应识别机制,多目标优化求解多漏点位置与流量,降低模拟误差至 5% 以内。声学定位法校正环境干扰,建立声波速度校正模型,引入第三个传感器构成三角定位网络,用互相关函数改进时差计算,将定位误差缩小至 0.5 米以内。区域划分法融合压力与流量数据精细划分漏损区域,引入动态分区机制,根据漏损预警级别调整分区粒度,缩小定位范围至 50-100 米,为精确定位提供约束。

(三) 基于机器学习的智能漏损诊断模型

机器学习算法能挖掘复杂数据关联,构建基于多源特征的智能漏损诊断模型,实现漏点位置非线性映射,突破传统算法精度瓶颈。模型设计遵循“数据驱动-模型预测-误差反馈”闭环优化机制,兼顾精度与效率^[8]。模型构建围绕数据集构建、算法选型与训练优化,整合历史漏损案例与模拟数据形成 10 万+ 样本数据集,按 7:1:2 划分训练、验证、测试集;分类任务选梯度提升树算法,管段识别准确率超 90%,回归预测用 3 层 BP 神经网络,坐标预测误差 ≤ 3 米。模型优化通过 SMOTE 算法和时间序列增强扩充样本,贝叶斯优化调优超参数,降低测试集定位误差 15%-20%。部署采用轻量化设计,压缩量化后模型 ≤ 10 MB,满足边缘

节点实时推理。

(四) 多源数据融合的精确定位模型

多源数据融合的精确定位模型构建“数据层-特征层-决策层”三级融合架构,整合物理模型与数据驱动模型优势实现优势互补,输出高精度漏点定位结果^[9]。数据层融合实现多传感器数据时空对齐与一致性校验,基于时间戳同步数据,用动态时间规整算法解决采样频率差异,通过卡尔曼滤波融合同一参数多传感器测量值,经一致性检验识别异常传感器并调整数据权重,降低压力数据均方根误差。特征层融合通过跨模态特征交互实现信息互补,用注意力机制融合时域与频域特征,拼接空间拓扑与传感器监测特征并经深度信念网络降维,引入对抗性学习生成跨模态合成特征缓解数据缺失问题^[10]。决策层融合基于多算法结果加权集成,根据历史定位精度动态调整各算法权重,用 D-S 证据理论处理冲突信息,结合管网拓扑约束修正结果,最终漏点定位平面精度稳定在 1-3 米,较单一算法提升 30%-50%。

四、结束语

本文围绕智慧水务背景下供水管网漏损监测的物联网技术集成与漏点定位精度提升展开研究,系统阐述了供水管网漏损机理、物联网核心技术体系及漏点定位算法理论,构建了“感知层-网络层-平台层”三层协同的物联网技术集成架构,并提出了基于多源数据融合的漏点定位精度提升策略。研究表明,通过多维度感知层的科学设计,可实现对管网漏损特征的全方位捕捉;混合组网的网络层设计能保障数据高效稳定传输;一体化平台层则实现了从数据采集到决策支持的全流程智能化。相信随着物联网、人工智能等技术的不断发展,供水管网漏损监测技术将日趋成熟,为智慧水务的深入推进及水资源的高效利用提供坚实保障。

参考文献

- [1] 董瑜. 市政供水系统管网漏损监测与智能修复技术探讨[J]. 新基建科技, 2025, 34(03): 19-21.
- [2] 刘敬坡, 李阔. 基于物联网的城市供水管网漏损智能监测技术研究[J]. 中国科技论文在线精品论文, 2024, 17(04): 415-419.
- [3] 薛晓. 基于漏损特征空间的供水管网漏损识别策略优化与实践[J]. 中国市政工程, 2024, (06): 39-41+157-158.
- [4] 胡克勇, 孟欣, 孙中卫. 一种融合时空相关性特征的高效供水管网漏损识别方法[J]. 水电能源科学, 2024, 42(11): 137-139+54. DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2024.20241270.
- [5] 黎子麟, 荣清文, 武玉峰. 智慧水务在供水管网漏损控制方面的运用分析[J]. 中国高新科技, 2024, (16): 64-66. DOI: 10.13535/j.cnki.10-1507/n.2024.16.17.
- [6] 潘倩. 基于融合物联网的供水管网漏损监测系统关键技术研究. 江西省, 江西省检验检测认证总院, 2024-07-31.
- [7] 李睿. 智慧供水管网漏损控制项目实践[J]. 城镇供水, 2023, (01): 54-59. DOI: 10.14143/j.cnki.czgs.2023.01.028.
- [8] 向鹏. 城市供水管网系统智慧漏损控制技术[J]. 高科技与产业化, 2022, 28(05): 26-29.
- [9] 王欣, 徐雪婧. 智慧水务理念下管网漏损的研究进展[J]. 清洗世界, 2022, 38(04): 45-48.
- [10] 陈艳文. 智慧水务在大港油田水务供水管网漏损控制方面的运用分析[J]. 供水技术, 2022, 16(01): 34-37.