

基于物联网的城市给水管网漏损监测与动态修复系统研究

刘 芹

乐安县鸿顺市政工程有限公司 江西抚州 344300

摘 要：城市给水管网是城市基础设施重要部分，其漏损会造成水资源浪费，引发次生灾害，影响城市运行与居民生活。传统漏损监测方法存在实时性差等问题，难以满足现代化城市管理需求。本文基于物联网技术提出城市给水管网漏损监测与动态修复系统研究方案。先阐述系统总体架构，涵盖感知层、网络层、平台层和应用层；重点研究感知层多源数据融合采集技术及低功耗广域网传输方案，实现管网运行状态实时感知。数据处理与分析方面，引入机器学习算法构建漏损识别与定位模型，提高识别准确率和定位精度。针对动态修复需求，系统设计漏损风险评估模块，结合多因素对漏损点危害分级，自动生成最优修复方案与资源调度建议，实现全流程智能化管理。最后，实际工程案例验证系统可行性与有效性，表明其能提高漏损监测实时性和准确性，缩短修复响应时间，降低漏损率，保障城市水资源节约和管网安全运行。

关键词：物联网；给水管网；漏损监测

引言

随着城市化加速和人口增长，城市用水量需求攀升，水资源短缺问题严峻。城市给水管网是水资源输送关键载体，其健康运行关乎城市可持续发展。但受管网老化、施工质量等多种因素影响，管网漏损普遍。我国城市供水管网平均漏损率长期高于国家10%标准，部分老旧城市超20%，每年因漏损造成巨大水资源浪费、经济损失和安全隐患。传统漏损监测手段依赖人工巡检、听漏仪检测，耗费人力物力，受人为经验和环境干扰大，存在监测周期长、定位困难、预警滞后等缺陷，难以适应现代城市精细化管理要求。近年来，物联网、大数据、人工智能等新技术发展为解决给水管网漏损问题提供新思路。物联网技术可构建全方位监测网络，大数据分析机器学习算法为数据挖掘和智能决策提供支撑。因此，研发集实时监测、智能识别、精准定位、动态修复于一体的物联网漏损管理系统，对提高管网管理效率、降低漏损率、保障供水安全有重要意义和价值。

一、物联网技术在管网监测中的应用

（一）物联网技术的基本特征

物联网技术是指通过射频识别（RFID）、传感器、GPS等信息传感设备，按约定协议将物品与互联网连接，进行信息交换和通信，实现智能化识别、定位等的网络技术。其基本特征为全面感知、可靠传输和智能处理。全面感知是指通过各类传感器采集管网物理量数据，

构建全方位监测网络；可靠传输依托无线通信技术（如NB-IoT、LoRa、5G）和有线网络，保障数据稳定传递；智能处理通过云计算等技术对海量数据进行分析与诊断，为管网决策提供依据。这些特征使物联网技术在城市给水管网监测中具备高适应性等特点，为管网管理数字化、智能化转型提供关键支撑。

（二）物联网在管网监测中的技术支撑

物联网在城市给水管网漏损监测中的技术支撑主要体现在感知层、传输层和应用层三个层面。感知层由高精度传感器、智能水表、声波检测设备等组成，实现对管网压力、流量、声波信号、水质参数等关键指标的实时采集。例如，压力传感器可捕捉管网中的异常压力波动，声波检测设备通过捕捉漏损产生的高频声波信号实现漏点定位。传输层采用低功耗广域网（LPWAN）技术，如NB-IoT和LoRa，结合边缘计算节点，在保证数据传输可靠性的同时降低能耗，适应城市管网大范围、长周期监测需求。应用层则依托云平台构建数据存储、处理与分析系统，结合漏损识别算法（如小波变换、时频分析）和机器学习模型（如支持向量机、神经网络），实现漏损的早期预警、精确定位与动态评估。此外，物联网技术还支持与GIS系统深度融合，通过空间数据可视化展示管网运行状态，辅助管理人员制定修复策略。这种多层次技术架构，不仅提升了管网监测的精度与效率，也为实现管网全生命周期智能管理奠定了基础^[1]。

（三）关键技术与设备概述

城市给水管网漏损监测与动态修复系统的关键技术包括传感器技术、无线通信技术、数据融合与分析技术、漏损识别与定位技术。传感器技术以高灵敏度、低功耗、抗干扰为核心，常用设备包括光纤布拉格光栅（FBG）传感器、压电式加速度传感器和电磁流量计，这些设备能够实现管网微小泄漏信号的捕捉与量化。无线通信技术以NB-IoT、LoRa和5G为主，具有覆盖广、连接多、功耗低的特点，满足城市复杂环境中大量监测节点的数据传输需求。数据融合与分析技术采用多源数据融合方法，结合时间序列分析、主成分分析（PCA）和深度学习模型，对传感器采集的异构数据进行去噪、特征提取与异常检测，提高漏损识别的准确性。漏损识别与定位技术基于声波传播原理、负压波法和相关分析法，结合时差定位算法（如TDOA）和空间插值技术，实现对漏点的快速定位与漏损量评估。此外，系统还集成了动态修复决策支持模块，通过实时评估漏损对管网运行的影响，自动生成修复优先级排序与资源调配方案。这些关键技术与设备的协同应用，构建了从数据采集到智能决策的完整技术链条，显著提升了城市给水管网漏损管理的科学性与可操作性。

二、给水管网漏损监测系统构建

（一）系统总体架构

给水管网漏损监测系统的总体架构采用分层设计思想，由感知层、传输层、平台层和应用层构成，各层之间通过标准化接口实现数据交互与功能协同。感知层部署于管网关键节点，包含压力传感器、流量计、声波传感器、温度传感器等设备，负责实时采集管网运行状态参数，形成原始数据流。传输层依托NB-IoT、LoRa、5G等无线通信技术及光纤有线网络，构建低功耗、广覆盖、高可靠的数据传输通道，保障感知层数据的实时上传与控制指令的下达。平台层是系统的核心中枢，由数据存储模块、数据处理模块、模型分析模块和接口服务模块组成，支持海量数据的存储、清洗、融合与分析，同时提供漏损识别算法的运行环境与结果可视化能力。应用层面向管网运维管理人员，提供监测预警、漏损定位、趋势分析、决策支持等功能界面，实现人机交互与业务闭环。该架构具备模块化、可扩展、高兼容的特点，能够适应不同规模城市管网的监测需求，并为后续系统升级与功能扩展预留技术接口，从而显著提升系统在实际工程中的适用性与可持续性^[2]。

（二）数据采集与传输机制

数据采集与传输机制是确保漏损监测系统实时性与

准确性的关键环节。数据采集部分通过多类型传感器协同工作，实现对管网压力、流量、振动、声波、温度等多维参数的同步监测。传感器布设遵循“关键节点优先、区域覆盖均衡”原则，结合管网拓扑结构、材质特性与历史漏损数据，优化监测点布局，确保数据采集的代表性与全面性。采集频率根据管网运行状态动态调整，常态下采用低频采样以降低能耗，异常状态下自动切换至高频采样模式，提高漏损信号的捕捉精度。数据传输采用分层传输策略，感知层设备通过无线传感网络将数据汇聚至边缘节点，进行初步处理与压缩后，经核心传输网络上传至平台层。传输过程中采用数据加密、冗余传输与断点续传技术，保障数据在复杂电磁环境与恶劣天气条件下的完整性与安全性。此外，系统引入自适应传输机制，根据网络负载与数据优先级动态调整传输带宽与路径，确保关键数据的实时传递。该机制有效解决了传统管网监测中数据滞后、丢失与失真等问题，为漏损识别与定位提供了高质量的数据基础^[3]。

（三）漏损识别与定位方法

漏损识别与定位方法是监测系统的核心技术，直接决定系统的漏损检测精度与响应速度。漏损识别采用多级判别策略，首先通过阈值法对实时监测数据进行初步筛选，识别出超出正常范围的异常参数；其次，利用统计分析方法（如ARIMA时间序列模型、主成分分析）对异常数据进行趋势分析与特征提取，排除干扰因素；最后，结合机器学习算法（如支持向量机、随机森林、卷积神经网络）构建漏损识别模型，通过对历史漏损数据与正常数据的训练，实现对微小漏损的早期识别与分类。漏损定位则基于声波传播原理与负压波法，通过高精度声波传感器捕捉漏损产生的声波信号，结合相关分析法计算信号到达不同传感器的时间差，利用时差定位算法（如TDOA）确定漏点位置。对于复杂管网环境，系统引入空间插值技术与图论算法，结合管网拓扑结构与水力模型，进一步优化定位精度。此外，系统还具备漏损量评估功能，通过分析漏损信号强度与管网运行参数，估算漏损规模及其对供水系统的影响程度。该方法融合了信号处理、统计分析与人工智能技术，显著提高了漏损识别的准确率与定位的精度，为管网动态修复提供了科学依据^[4]。

三、动态修复系统设计与实施

（一）动态修复系统的功能设计

动态修复系统的功能围绕“监测-预警-调度-反馈”全流程构建，核心功能需满足漏损精准识别与高效修复的协同需求。漏损监测功能通过部署在管网关键节

点（如管段接头、阀门处）的物联网传感器实现，实时采集管网压力、流量、声波振动数据，传感器采样频率设为1次/分钟，确保捕捉瞬时漏损信号，且支持漏损信号特征提取，能区分管网正常压力波动与漏损导致的压力骤降；漏损定位功能基于多传感器数据融合算法，结合管网GIS地图坐标，将定位精度控制在±1米内，便于维修人员快速锁定漏损点。预警功能按漏损量分级设计，漏损量<5L/h为一级预警，系统仅记录数据并持续监测；5-20L/h为二级预警，自动推送预警信息至片区巡检员移动端；>20L/h为三级预警，同步触发维修资源调度。修复调度功能内置维修班组信息库，包含班组位置、人员数量、携带工具（如管道探测器、堵漏材料）及可作业时长，系统根据漏损位置、等级自动匹配最近且具备对应维修能力的班组，生成最优行驶路线并预估到达时间，22年某东部城市应用该系统时，三级漏损的维修响应时间较传统模式缩短40%。

（二）系统集成与控制逻辑

系统集成需实现硬件设备与软件平台的无缝衔接，硬件层面将物联网传感器（压力传感器、声波传感器）与管网实体结合，直径100mm以上管网采用管段内置传感器，直径较小管网采用外壁附着式传感器，所有传感器通过NB-IoT/LoRa协议接入数据网关，网关将采集到的原始数据转换为标准化格式后传输至云端监测平台；软件层面实现监测平台与城市水务管理系统的集成，同步管网基础信息（如管材、铺设年份、管径）、用户用水数据及历史漏损记录，为漏损分析提供数据支撑。控制逻辑采用分级响应机制，当传感器检测到压力下降幅度>0.2MPa/h且声波信号出现连续3次以上异常峰值时，系统自动启动漏损判定流程，对比历史数据与实时工况后确定漏损等级：一级预警仅触发数据存储与趋势分析；二级预警除推送信息外，系统自动查询漏损点周边阀门分布，标记可关闭的上游控制阀门；三级预警在二级响应基础上，向维修班组发送包含漏损点坐标、管网埋深、建议维修方案的任务单，同时通过水务APP告知漏损点周边500米内用户可能出现的水压波动，21年某水务集团应用该控制逻辑后，漏损处理过程中的用户投诉量减少35%^[5]。

（三）实施中的技术难点与对策

实施过程中面临三类核心技术难点，需针对性制定解决对策。一是老旧管网传感器安装难题，部分使用超过30年的铸铁管网外壁锈蚀严重，传感器附着后易因管网振动脱落，22年某北方城市在实施时，研发定制化弧形安装支架，支架内侧粘贴高弹性耐磨橡胶垫，通过不

锈钢螺栓固定在管网上，螺栓间距根据管径调整为15-20cm，安装后传感器脱落率从15%降至2%。二是地下复杂环境导致的数据传输丢包，地下管网周边存在强电磁干扰（如地铁线路、高压电缆），且部分区域地下水位高，导致数据丢包率达8%，对策为在数据网关中加装抗电磁干扰滤波模块，优化传输频段至470-510MHz（该频段受干扰较小），同时在丢包率高的区域增设中继网关，将数据传输距离缩短至500米内，实施后丢包率降至1.5%以下。三是漏损判定误判，早晚用水高峰时管网压力波动易被误判为漏损，对策为系统加入压力波动修正算法，结合近3个月的用水数据建立分时段压力基准线，仅当实时压力偏离基准线幅度超过10%且持续时间>5分钟时，才进入漏损判定流程，误判率从实施初期的20%降至5%以下。

结语

综上所述，基于物联网的城市给水管网漏损监测与动态修复系统通过多层次技术架构和智能化功能设计，显著提升了管网管理的效率与精度。该系统不仅实现了对漏损的早期预警、精准定位和高效修复，还为城市供水系统的可持续运行提供了有力保障。未来，随着物联网技术的进一步发展以及人工智能算法的优化，这一系统有望在更大范围推广应用，助力智慧城市建设。同时，针对老旧管网改造和复杂环境下的技术难点，仍需持续创新解决方案，以适应不同城市的具体需求，推动传统供水管理模式向全面数字化、智能化方向迈进。

参考文献

- [1]刘新月.基于十分钟级远传数据的给水管网水力模型构建及二次供水设备数值模拟研究[D].合肥工业大学, 2022.
- [2]刘松子, 吕谋, 李红卫.基于智能群体优化算法的给水管网漏损定位[J].给水排水, 2022(007): 048. DOI: 10.13789/j.cnki.wwe1964.2021.04.25.0001.
- [3]杨海燕, 侯少轩, 张学茸, 等.基于点-线-网-智慧的供水管网漏损系统化控制措施研究[J].给水排水, 2022, 48(9): 9.
- [4]赵桓, 吕谋, 岳宏宇, 等.基于群体智能优化算法的供水管网漏损定位研究[J].水电能源科学, 2022, 40(7): 4.
- [5]石英春, 陈春阳, 王巍.基于LoRa和NB-IoT物联网技术的管网监测系统设计[J].仪表技术与传感器, 2022(008): 000.