

农村供水管网漏损智能监测与精准定位技术应用研究

何旭斌¹, 彭枫¹, 毕力旺¹, 吴春晖¹, 庄晨岳²

1. 宁海县水利局, 浙江 宁波 315699

2. 杭州浙水科技发展有限公司, 浙江 杭州 310018

DOI:10.61369/WCEST.2025100002

摘 要 : 针对农村供水管网布局分散、地形地貌复杂和漏损隐蔽性高等特点, 以我国某山区县域的农村饮用水工程项目为依托, 基于改进型阈值法、RF 模型及声学 – GIS 定位技术, 开展漏损智能监测与精准定位技术的研究与应用, 构建包含感知层、传输层与平台层的三层监测架构, 形成长效监测管理运行机制, 提出适合于农村地区的漏损识别定位方案。经试验表明, 运用该技术可以将管网漏损率降低至8% ~ 12% ; 管网漏损故障点定位时间缩短至6h以内; 大大提高了供水保障能力和运维效率。该方法在当地农村供水工程中的推广应用, 进一步减少了人为巡检带来的噪声影响, 提高运行管理自动化水平。

关 键 词 : 供水管网; 精准定位技术; 智能监测; 水资源

Research on the Application of Intelligent Monitoring and Precise Positioning Technology for Leakage in Rural Water Supply Networks

He Xubin¹, Peng Feng¹, Bi Liwang¹, Wu Chunhui¹, Zhuang Chenyue²

1. Ninghai County Water Resources Bureau, Ningbo, Zhejiang 315699

2. Hangzhou Zheshui Technology Development Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310018

Abstract : In response to the characteristics of rural water supply networks, such as scattered layouts, complex topography, and high concealment of leakage, this study, based on a rural drinking water project in a mountainous county in China, explores the research and application of intelligent monitoring and precise positioning technology for leakage. The study employs an improved threshold method, RF model, and acoustic–GIS positioning technology to construct a three–tier monitoring architecture comprising a perception layer, transmission layer, and platform layer. This architecture facilitates the formation of a long–term monitoring and management operation mechanism and proposes a leakage identification and positioning scheme suitable for rural areas. Experimental results demonstrate that the application of this technology can reduce the leakage rate of the water supply network to 8%–12%, shorten the positioning time for leakage fault points to within 6 hours, and significantly enhance water supply security and operational efficiency. The widespread adoption of this method in local rural water supply projects has further minimized the noise impact caused by manual inspections and elevated the level of automation in operation and management.

Keywords : water supply network; precise positioning technology; intelligent monitoring; water resources

引言

农村供水管网是保障人们生活生产饮水安全的重要公共基础设施, 但因其泄漏导致的水资源损失极为严重。这些问题主要表现为监测滞后、人工巡检效率低下、漏点定位困难等, 这就使得漏水得不到及时发现, 造成了水资源的浪费和运维成本的增加。而现有很多方案都是针对城市密集型管网设计的, 对当前各地区非标准化、多样化的农村供水管网现状适应性不足。本文以此作为出发点, 选取我国一具有代表性的山区农村区域作为案例, 对其供水工程展开智能监测技术适配化, 系统构建化以及精准定位化的探索, 提供一种低成本且实用性强的漏损控制方案, 旨在为同类山区农村地区提供一种低成本且实用性强的漏损控制方案。

基金项目: 2021年度宁波市水利科技项目, 高海拔地区农饮水信息化全过程管控机制研究与效益评价 NSKB202126。

作者简介:

何旭斌 (1974–), 男, 汉族, 浙江衢州人, 本科, 高级工程师, 水利工程管理;

彭枫 (1989–), 男, 汉族, 浙江宁波人, 本科, 工程师, 农村供水管理。

一、农村供水管网漏损现状与智能监测技术适配性分析

结合在某山区县域实施的农村饮用水工程经验，该区域的农村供水管网主要有 PE 管使用多、平均输水距离约 1.5km、受地形限制呈山地丘陵地形的特点，导致管网分布较为分散，由于以前建设经费少、基层运维人员少、专业程度低等原因，造成目前仍有众多管网缺少实时流量、压力监测装置的问题，不能及时掌握管网运行动态；同时很多管网已运行多年，因管龄较长、老化而增加漏损概率，两类问题叠加，使得该区域农村供水管网漏损呈现出较强的隐蔽性与突发性。此次研究采用人工巡检与智能监测相结合的方式有效降低人工巡检带来的安全隐患问题，使设备可以处于更好的工作状态。结合农村特殊场景特征，智能监测系统需进行针对性适配，其中，所需的传感器包括：流量传感器，其应满足室外复杂工况下的使用需求；压力传感器，其应能承受管网 0.2~1.0MPa 的压力；声学监测传感器，其须具备一定的抗环境干扰能力。通信技术方面，由于偏远山区地势恶劣，在这种情况下，采用北斗 +4G 双通信保障；而在平原地势区域则可选用 4G 网络实现实时的数据传输；长距离主干管可以使用光纤传感提高精度，以上技术适配性分析为后续该类智能监测系统的构建奠定了良好基础。

二、农村供水管网漏损智能监测系统构建

（一）监测系统总体架构设计

研究基于一套城乡智慧供水一体化管控系统，建立了“感知—传输—平台”的三级漏损智能监测架构体系，重点针对农村管网的特性开展适配工作。在感知层上利用差异化的设备布置方法，结合农村管网直径 25mm ~ 200mm 的特点，将主干管（≥ 100mm）的流量—压力一体式传感器沿管线路由每 2km 一组进行布置，在分支管（≤ 80mm）的主要交汇节点以及末端水表节点上增加微型流量计，并补充原水浊度、出水余氯等其他相关监测指标，达到“核心节点全敷设、次要节点按需安排”的目标。所选传感器必须符合农村工况，其中流量传感器的精度需要满足 ± 1.0%FS，压力传感器需要满足防水防腐蚀和防震的需求；在传输层上基于农村各区域的通信状况采用“4G+北斗卫星+LoRa 局域网”的三级传输方案，在平原地带利用 4G 网络传送监测数据，在偏远山区利用北斗卫星进行信号补盲，村内管网采用 LoRa 组网实现近距离设备互联，达成物联网全面覆盖，在整体通信费方面也有显著降低；数据传输方面采用 MQTT 协议，精简数据包，数据每隔 5 分钟上传一次，保证了数据的及时性同时也节约了传输能量消耗。基于农村供水数据库平台，将管网 GIS 地理空间数据、历史漏损数据、维修保养台账等多方资源信息进行汇集，并通过建立标准化数据治理规则，分别以剔除异常值及环境干扰数据的方式进行数据清洗、以关联流量、压力、地形等参数进行数据融合，以分布式数据库保证海量数据存储安全等方式为漏损的识别定位提供优质的原始数据保障；同时平台从实现对平台用户使用

情景化要求出发，针对性搭建了实时监测看板、数据查询统计、设备状态管理等关键业务功能模块，以流程简化为核心，服务基层管理人员操作。

（二）漏损智能识别算法与模型构建

基于“风险识别管控子系统”预警逻辑，形成多维度漏损识别体系，提高漏损识别的精准性和可靠性，基础层运用改进型阈值法，在该地区农村管网不同季节（枯水期、丰水期）、不同时段（用水高峰、低谷）历史运行数据的基础上，将不同时间段划分为不同的正常区间，例如用水低谷期（0:00—6:00）主干管流量阈值 ≤ 5m³/h，压力波动幅度 ≤ 0.05MPa，当数据超出该区间时触发一级报警；若连续 10 组监测数据呈现流量持续上升、压力同步下降趋势，则触发二级报警。对于进阶层而言，则是构建机器学习混合模型，使用随机森林算法进行建模，挑选管网管径、管龄、地形坡度、流量衰减速率、压力突变幅度等 12 个特征参数，利用从该地区收集的近 3 年共计 120 起有效漏损案例作为样本来训练模型，并利用网格搜索法优化算法超参数，将决策树的数量设置为 100 棵，最大深度为 8，从而实现对漏损类型的精确分类（轻微渗漏、严重破损、接口渗漏），经测试，识别准确率高于 92%。为实现漏损程度的定量化评价，在此补充漏损量估算模型，参考皂溪流域水文预报模型的参数率定思路，运用达西定律结合现场漏损点管道管径、管网压力、埋深、土壤渗透系数等参量作为输入变量，得到漏损量和相关监测数据之间的量化表达式为： $Q=k \times d^2 \times \sqrt{P}$ ，其中 k 为地形修正系数，d 为漏损孔径，P 为管网压力。该公式可直接根据采集数据计算漏损量，并将测压管水量损失量化为管网漏损量，进而判断管网维修优先级。

（三）精准定位技术融合应用

针对农村管网分散、地形复杂的问题，利用声学定位与 GIS 空间技术相结合的办法提高漏损点定位的精度。声学定位技术采取“分布式部署+集中式分析”的方式，在主干管的关键节点上安装高灵敏度声学传感器（频率响应范围 20—5000Hz），并用便携式声学探测器监测分支管，采集漏损所产生的声波信号，并根据声音波在 PE 管内约为 2200m/s 的传播速度，测得漏损点与声波传感器之间的距离差值，实现初步定位，定位误差控制在 10m 以内。对于弱渗漏（< 1m³/h），引入声波信号降噪算法，滤除土壤震动、水流撞击等来源的干扰噪声，并提高了漏水声波的分辨率程度。利用“城乡供水一张图”GIS 空间定位优化技术，补充管网埋深、土壤类别、周边构筑物等相关要素至 GIS 图层中，搭建定位误差修正模型；针对地形起伏（坡度 >15°）情况下的声波传播路径偏移问题，结合该处海拔高度差调整了声波传播距离；对于管网转弯及管网分支等结构节点，引入转角修正系数缩小误差。定位完成后，系统自动关联管网维修保养档案，推送周边管网材质、安装年份、历史维修记录等内容，在此基础上形成针对性维修方案建议（含开挖范围、需用设备及材料）；通过移动端 APP 推送至维修人员手中，直至实现“定位—派单—维修—反

馈”闭环式管理，大大缩减了维修响应时间。

三、技术应用效果与推广价值分析

（一）技术应用效益量化评估

根据该地区200吨以下供水工程的测算数据，在直接经济效益、维修保养效益、间接效益三个方面建立智能监测技术应用的量化评估模型。从直接经济效益看，与人工巡检相比，传统人工巡检模式下，年人均巡检面积为 5km^2 ，年人工成本约为8万元，管网漏损率为25%~30%；而采用智能监测模式后，其年度运维成本为5万元（包括设备校准和通信费用），管网漏损率为8%~12%。按农村供水3元/吨计算，单个工程年节水量约1.2万吨，则单个工程的年直接经济收益为3.6万元，投资回收期约3年。从维修保养效益来看，精准定位能将以往48小时的漏损抢修时间降到6小时内，减少了大量的管网停运损失，按照日供水量50吨、缺水影响系数为0.8来计算，单次维修可减少损失约1200元。同时因为精准定位还能避免无效开挖，从而降低了维修过程中所消耗的材料费以及维修的人力费，每年可节约维修费用约2万元。在间接效益方面，通过“水费收缴管理子系统”的精准计量，水费收缴率由原来的85%提高到现在的98%，有效保障了农村供水工程的正常运行。

（二）社会效益与生态效益分析

智能监测技术的社会效益主要是提升了供水保障能力和基层管理水平。一是供水保障方面，能够提前发现、修复供水管道渗漏，使农村地区停水次数大幅减少，全年村民饮水停水次数由原来的月均2~3次下降到目前的0.5次以内，有利于保障村民饮水和大棚种植、田间灌溉等农业生产需要，根据在该地区开展的试点调研统计，当地居民用水满意度从72%提升至95%以上。二是基层管理方面，通过运行实时监测看板实现了管网运行状态可见化，自动化预警代替了大量的人工排查工作，大大降低了基层管理人员的工作量（由每天4小时缩短到每天仅需1小时），节约了成本；并通过开放数据共享接口连接水利局、环保局、乡镇政府等相关部门，将漏损数据与水源地取水量、区域用水量、户均用水量等数据相结合，助力取水、漏损分析，并推进各部门的跨部门协同治理。生态效益更加明显，实现了水资源节约与生态保护的双重目标，例如通过在该山区的应用每年实现节水约180万吨，减少了水源开采压力，降低了地下水过度开采引发的地质沉降风险；由于减少了漏损，避免了管网老化产生的锈蚀水随漏损水渗入土壤或回流管网造成的二次污染，使得区域内水资源生态

得到了良好的保护。

（三）技术推广适配性与优化建议

结合各地农村实际情况，制定差异化推广方案。对于山地农村，需因地制宜优化设备布设密度，主干管沿线传感器安装间距控制在1.5km，强化北斗卫星通信模块应用，扩大信号覆盖范围。对于管网密度相对较高的平原地区，可探索采用LoRa与4G混合传输模式以降低成本，并增加分支管线的监测点密度，以扩大监测覆盖率。对一些欠发达地区采取“分步推进”的方式，先在主干管部署重点监测设备，实现主要区域漏损监测，待当地资金条件改善后，逐步向全管网拓展。全面建立完善的配套设施支撑技术推广，搭建“人员培训—资金保障—制度建设”三位一体的配套支撑，一方面人员培训通过“理论+实践”方式培养专业人员，培训内容应涵盖传感器校准、平台操作、设备故障排查与问题反馈等技能，安排3~4期基层管理人员轮训工作；另一方面在资金上确保支持，建立以政府补助和工程收益相结合的筹资模式，由国家财政承担设备采购资金的50%；剩余部分从供水工程水费收入中列支；最后一项就是加强制度建设，制定并完善《农村供水管网智能监测设备运行维护规范》，明确相关要求：做好相关设备每半年1次的校准，定期开展巡检，规范数据质量合格准则，严格要求维修响应时间。技术优化方向主要是3个方面：第一是通信稳定性优化，研发低功耗卫星通信模块，应用于偏远地区低功耗、低成本的设备通信；第二是算法优化，采用CNN-LSTM混合深度学习算法，提升小流量漏损识别的精度；第三是功能拓展，为移动端APP增加AR实景导航功能，借助GIS定位，将泄漏点转化为坐标点，生成点位导航指引到漏损点，极大提升抢修作业的便利性与精准度；同时建立技术推广案例库，收集不同地区应用数据，形成可复制、可推广的技术方案范式。

四、结语

结合农村供水管网漏损治理需求，构建了适配农村应用场景的智能监测与精准定位技术体系，通过多技术融合与试验验证，技术体系可实现农村供水管网漏损识别、定位、治理全过程优化；在本研究案例区域的应用结果显示，在降低漏损率、节约用水、提高运维效率方面效果明显，对促进经济社会与生态环境的协调发展具有积极意义，但要使此项技术真正走向实用化、产品化还需从完善通信模块、优化算法模型、多场景适应等方面不断改进，建立良好推广的配套制度，在更多的农村推广应用，为农村供水保障体系升级发展提供强有力的技术保障。

参考文献

- [1] 张童洲. 农村供水工程管网漏损成因及解决方法 [J]. 农村实用技术, 2024, (08): 103-105.
- [2] 郑嘉龙, 杨明, 杨鸽. 独立计量区供水管网漏损定位的研究 [J]. 给水排水, 2023, 59(S1): 827-834.
- [3] 佟伟维, 尹宁, 郭晨, 等. 基于长波段雷达卫星的供水管网探漏技术及实践 [J]. 给水排水, 2023, 59(02): 131-137.
- [4] 李涛. 农村供水工程管网漏损成因及应对措施 [J]. 农业科技与信息, 2022, (06): 123-125.
- [5] 夏志博. 农村供水管网漏损控制对策研究 [J]. 黑龙江水利科技, 2022, 50(01): 88-91.