

基于智能算法的老旧城区供水管网漏损控制技术集成应用

毛润勇

江西丰悦建设工程有限公司

DOI:10.32629/jpm.v7i6.8956

[摘要] 老旧城区的市政供水管在长时间的使用下，普遍存在老化、腐蚀、破损等现象，造成漏损率始终处于较高的水平，对水资源形成较大浪费。传统模式巡检技术，定位精确度低、效率差，且受到老城区空间限制等影响下，需要加快对供水管网漏损率的控制，在当前智能技术发展的背景下，以智能算法为基础，采用高效的供水管网漏损率控制技术，可确保居民的用水安全，并降低运营成本，实现水资源的节约。本文基于智能算法，采用创新的市政供水管网漏损控制技术，并通过典型的案例，验证老旧城区管网漏控技术集成应用的效果，

[关键词] 老旧城区；市政供水管网；漏损控制技术；效益

[中图分类号] TU991

Integrated Application of Intelligent Algorithm-Based Leakage Control Technology for Water Supply Networks in Aging Urban Areas

Mao Runyong

Jiangxi Fengyue Construction Engineering Co., Ltd.

[Abstract] Municipal water supply pipelines in aging urban areas commonly suffer from aging, corrosion, and damage due to prolonged use, resulting in persistently high leakage rates that lead to significant water resource waste. Traditional inspection methods exhibit low positioning accuracy, poor efficiency, and are constrained by spatial limitations in older urban environments. There is a pressing need to accelerate the control of leakage rates in water supply networks. In the context of advancing intelligent technologies, adopting efficient leakage control solutions based on smart algorithms can ensure water safety for residents, reduce operational costs, and promote water conservation. This paper proposes an innovative leakage control technology for municipal water supply networks leveraging intelligent algorithms and demonstrates its effectiveness through case studies in aging urban areas.

[Key words] aging urban areas; municipal water supply networks; leakage control technology; benefits

前言

城市化进程的加快，城区内的基础设施建设出现破旧、老化现象，其中供水管网使用年限超限较为突出。通常，供水管网的使用时间在30年到50年，老旧城区的市政供水管网往往超过这个时间，并且因早期建设中的使用材料、工艺的局限性，铸铁管、镀锌钢管等传统型材料，出现老化、腐蚀、接口密封失效等现象，使得管网漏损率居高不下^[1]。老旧城区管网漏损率普遍偏高，形成了较大的资源浪费，对人们的生活用水形成较大的威胁，管内压力波动造成高层用户出现间歇性的缺水，管道渗漏点吸入了污染物，使得水质浊度、菌落总数超过标准^[2]。同时，传统检测方式，以人工为主，采用听音杆联合区域流量的方式，此方式的短板显著，如：巡检的效率低、

定位误差大、响应滞后性时间长等，不能有效满足老城区高密度建筑群下快速精准的控漏需求^[3]。基于民生和资源浪费的巨大压力下，老旧城区供水管网漏损控制技术需要进一步创新和转型，借助于大数据、智能化技术等，向智能化、精细化及预见性发展。

1 老旧城区供水管网系统特性与漏损成因深析

1.1 老旧城区管网结构与运行环境特殊性

老旧城区的市政管网属于城市基础民生项目，其布设结构复杂，主要表现为四个特性：

第一，结构复杂性。旧城区的市政管网始建时间比较早，管网面临老化、破损现象也比较显著，经历了不同时期的修复和扩展，形成了环状、枝状混合的复杂拓扑结构^[4]。同时在修

复的扩展的时候采用的管材也呈现多样化，比较常见的是灰口铸铁管、镀锌钢管、水泥管，受到管道材质差异的影响，管道的使用时间和被腐蚀的程度存在较大差异。

第二，空间的隐蔽性。老旧城区的地下管线十分复杂，包括：给水管、排水管道、电力管线交错叠加，采用机械设备进行挖掘，比较容易造成安全事故，如：施工中不小心挖到电缆，造成此区域大面积停电。

第三，运行动态性。老旧城区的人口多，且具有较强的流动性，那么存在显著的用水时空分布差异，使得管网压力变化比较大^[5]。在夜间处于低负荷运行的时候，出现较高的压力，那么原本比较小的管道漏点会增加，并出现新的漏电，出现压力驱动型的漏损现象。

第四，环境侵蚀性。老旧城区的地下环境比较复杂，在土壤酸碱度、杂散电流、微生物等因素的共同作用下，地下形成了强腐蚀性的环境。管道在地下掩埋的深度不一，也需要长时间承受地面交通荷载的冲击，管道接口的位置比较容易出现松动和疲劳断裂的现象。

1.2 多因素耦合作用下的漏损机理

基于物理、化学和水力因素的共同作用下，老旧管网会出现漏损现象。其漏损机理为：

第一，接口失效。受到温度变化、地基不均匀的影响，管道刚性接口会出现错位或者松动，密封性失效。管道橡胶圈柔性接口，因材料的老化和长时间的承受较大压力，形成变形，进而弹性密封性大大的降低。

第二，管体腐蚀及破损。基于电化学和化学腐蚀作用下，灰口铸铁管、钢管管壁的厚度逐渐降低，继而出现空洞状漏点。基于外部荷载的冲击下，灰口铸铁、水泥管此类脆性材料，很容易出现脆性断裂，进而引发爆管。

第三，压力波动及水锤效应。压力波动使得供水管网泄漏风险进一步深化，目前老旧城区以枝状布局管网，高区用户水压的波动幅度范围在 0.15MPa-0.3MPa 之间，已经超过球墨铸

铁管的疲劳强度阈值，可诱发微裂纹扩展成为爆管。

1.3 漏损评估指标与影响模型

解决管道漏损需要从微观角度出发，形成微观精准建立模型。核心指标包括：物理漏损量（m³）、漏损率（漏水量/供水总量×100%）、单位管长漏损量（m³/km/h）及压力指数（PI）。

漏损影响模型，以“精准定位和预测”为目标，从此物理模型、数据驱动模型、水力模型。第一，物理模型。选取的数据参数包括：管道材质、年限、土壤性质、压力数据，以此为依据，建立管道破损风险预测模型，采用分段的模式对风险进行评级。第二，数据驱动模型。收集数据包括：海量流量、压力监测数据，以机器学习算法，对水模式外的流量异常进行有效识别，对漏损位置尽快定位，且实现早期预警。第三，水力模型。耦合管网地理信息（GIS）、监测数据（SCADA），家里微观的水力模型，经模拟仿真，发生爆管或泄漏的情况下，可以从反方向推演出泄漏点的位置，精确指导维修。

2 智能算法驱动的供水管网漏损控制创新技术体系

2.1 高性能管材与结构修复技术

市政供水管网漏损核心原则在于物理性损害，也就是管道材料的抗腐蚀性。老旧城区采用的灰口铸铁管和镀锌钢管，在长时间的使用下泄漏风险很高。在进行改造上，需要选取抗腐蚀性较高材料，如：球墨铸铁管，具有很好的防腐性能，有硅酸盐水泥衬里和锌铝合金镀层，抗拉强度达到了 420MPa，耐土壤应力的腐蚀性提高三倍，延长了使用寿命。内衬不锈钢复合管，利用氩弧焊把 304 不锈钢板结合到原本的管道内壁，其摩擦系数降低到 0.008，降低水头损失 15%，避免发生铁离子析出造成“红水”的情况。针对于钢制桥管锈蚀造成的浊度超过标准的问题，以不锈钢管替代，其表面的钝化膜，可以使得腐蚀电流的密度下降 2 个数量级，可改善水质浊度，并且不需要使用周期性大量水冲击。采用新材料创新技术的效益比较，如表 1 所示：

表 1 新材料创新技术的效益比较

技术类型	关键参数	漏损下降率
球墨铸铁管	寿命增加超 50 年以上，耐压 1.6MPa	背景漏损下降 40%
不锈钢内衬复合管	摩擦系数 0.008，没有重金属析出	接口泄漏下降 70%
不锈钢桥管	浊度≤0.45NTU，免冲洗	一年节水 1200 吨/座

2.2 基于机器学习的渗漏预警与异常诊断技术

机器学习（ML）技术通过对海量管网运行数据进行深度挖掘与模式识别，为实现主动预警、精准诊断与智慧决策提供了革命性的工具，是当前漏损控制领域的前沿与核心。机器学习

模型的有效性高度依赖于数据质量与维度，包括：SCADA 系统数据、客户用水数据、管网资产数据、外部环境数据。

漏损控制不同环节，机器学习算法侧重点不同。如表 2 所示：

表 2 核心算法与应用场景

环节	应用场景	典型算法	技术实现
无监督学习用于异常检测与早期预警	在无标签数据或漏损历史数据稀少的情况下，从正常用水模式中学习规律，自动识别偏差。	孤立森林、自编码器	模型对 DMA（独立计量区域）或关键节点的夜间最小流量（MNF）进行持续监控，一旦检测到流量模式偏离正常基线（如夜间流量持续异常偏高），立即发出预警信号

有监督学习用于漏损定位与风险评估	利用历史漏损事件记录数据（标签）进行训练，预测未来某段管道发生漏损的概率或直接分类其状态。	梯度提升树、卷积神经网络	将管网划分为若干段，提取每段管道的静态属性和动态运行数据作为特征，输入训练好的模型，输出其未来一段时间内的“爆管风险分数”，生成高风险管段清单。
------------------	---	--------------	--

2.3 数字孪生赋能的管网动态仿真与智能决策

将数字孪生技术引入到智慧管控平台，融合 BOM 技术欸和 GIS 技术，构建全要素可视化模型。BIM 层，构建出管道、阀门、泵站的三维实体模型，将材料属性和服役的年限进行有效集成。GIS 层，需要增加空间数据，包括：叠加土壤腐蚀性、地下水位、交通载荷等，形成管网脆弱性热力图。智能管控平台需要 AI 决策，包括：第一，漏损定位。在图卷积神经网络（GCN）的基础上，对压力和传感器拓扑关系进行分析，形成压力梯度热力图，可实现精确的定位。例如：当泵站压力骤降到 0.15MPa 的时候，系统在 5min 锁定 1.2 公里外的爆管点，传统的方法锁定实践则需要 2h 左右；第二，压力优化，利用深度学习，对泵站出口压力进行动态化的调节，降低分区压力数值，使漏损率大大的降低，实现水资源的节约。

2.4 基于水力模型与算法优化的实时调度控制

第一，深度学习用水量的预测。构建 LSTM 神经网络模型，输入相关的特征，包括：历史用水量、温度、湿度、日期类型、人口流动等相关数据，形成时序预测模型，预测 MAPE 降低。根据预测的结果，对水泵组合及频率进行动态化的调整，可减少泵站启动、停止的次数，由此节约电力能源。

第二，压力优化管理市政供水管网划分为独立剂量区域，以压力传感器，将其数据进行实时性反馈，联合 EPANET 水力模型计算最优压力设定值。从技术上分析，采用深度强化学习算法，将漏损量最小化作为奖励函数，对减压阀开度进行动态化的调节，可实现节水并降低爆管次数。

第三，末端压力动态补偿。采用分腔式设计，以恒压腔维

持基础压力，通过高压腔储能水能瞬时补偿，响应的时间在 0.1S 以内。出口压力偏差<0.02MPa，可将高层用水“脉冲式水流”彻底消除。

3 老旧城区管网漏控技术集成应用案例分析

3.1 案例简介

某老旧城区，面积 24 平方公里，供水管网长度为 310 公里，超过 60%以上为灰口铸铁管和镀锌钢管，平均管道使用时间超过 30 年。技术集成应用前，漏损率超过 33%，年漏水量大约 1000 万立方米，夜间的小流量异常偏高，常常发生爆管事件。

3.2 技术集成方案

采用“分区分管控、动态监测、智能诊断、精准施策”的集成技术方案。分为给四个层面：

（1）基础层。老城区划分为 8 个一级 DMA 和 42 个二级 DMA，安装高精度电磁流量计、压力传感器，形成“宏观-微观”两级监测体系，使其成为漏损定位和量化提供结构性基础。

（2）感知层。一、二级 DMA 进出口及管网关键节点布设检测仪共计 200 各，可达分钟级的数据采集和回传。

（3）大脑层。基于云计算的漏损管控平台，包括三个模块，分别是基于机器学习（ML）的漏损预警模块、基于数字孪生（DT）的仿真决策模块、水力模型优化模块。

（4）执行层。结合平台的指令，利用有关的设备精确定位预警区域，选取最佳的修复技术进行快速修复工作。

3.3 关键技术应用效果

关键技术应用效果，如表 3 所示：

表 3 关键技术应用效果

技术模块	应用效果
基于机器学习（ML）的漏损预警模块	系统累计发出有效报警 57 次，其中 52 次经现场核查确认为漏点，且超过 70%的漏点位于管径小于 100mm 的支管上
基于数字孪生（DT）的仿真决策模块	模拟关阀方案，迅速确定了需关闭的 5 个关键阀门（而非经验判断的 11 个），将影响范围缩小了 40%，停水用户从预估的 5000 户减少至 3000 户，决策时间从小时级缩短至分钟级。
水力模型优化模块	智能压力调控实施后，3 个重点 DMA 的平均夜间压力下降了 15%，其背景漏损量随之下降了约 25%

4 结束语

老旧城区管网漏损率普遍偏高，因而需要采取有效的技术和施工方法，维护和更换老旧管网，采用“分区分管控、动态监测、智能诊断、精准施策”的集成技术方案，效解决高漏损率和改造约束的难题，有助于长期改善民生，推进城市的可持续发展。

[参考文献]

[1]张士乔,邵煜.城镇供水管网漏损监测与控制技术及应用[J].中国环境管理,2017,9(2):109-110.
[2]马金锋,陈求稳,徐强,等.供水管网独立计量分区漏损控

制系统开源架构研究[J].中国给水排水,2018,34(17):1-8.

[3]刘士阳.浅谈城市供水管网漏损的有效控制[J].建筑工程技术与设计,2017,(013):3119-3119.

[4]付恒阳.城市供水管网水漏损管理技术研究现状综述[J].陕西理工学院学报：自然科学版,2017,33(1):64-70.

[5]曹徐齐,阮辰旼.国内外城镇供水管网漏损检测最新技术及漏损管理策略汇编[J].净水技术,2017,36(2):5-6.

作者简介：毛润勇（1989—），男，汉族，江西上饶，中职称，本科，交通土建。