

供水管网漏损检测与定位的智能化技术集成及应用

谢文强

江西洛宣建设工程有限公司 江西赣州 341000

摘要: 供水管网漏损是城市供水系统面临的重大挑战, 不仅造成宝贵水资源的巨大浪费, 还可能导致地面塌陷、水质污染等次生灾害。传统漏损检测方法在效率、精度和成本方面已难以满足现代化城市精细化管理的要求。本文系统研究了智能化技术在供水管网漏损检测与定位领域的集成应用。首先, 阐述了漏损检测的技术基础, 剖析了传统方法的局限性, 明确了智能化技术的核心优势。其次, 深入探讨了基于声波振动传感、流量压力分析等多种智能化检测技术的原理, 并提出了多源数据融合与信息协同的集成方法, 设计了系统化的技术架构。最后, 分析了智能化技术在构建实时监测预警系统、实现漏损点精准定位、支持科学决策以及优化管网维护管理等方面的具体应用与实践价值。

关键词: 供水管网; 漏损检测; 精准定位; 智能化技术

引言

随着我国城镇化加速、城市规模扩大, 供水管网作为城市生命线, 其安全稳定运行关系社会经济与居民生活。但因管材老化、地质变化等因素, 供水管网漏损问题普遍且突出。统计显示, 部分城市供水管网漏损率高, 水资源损失大, 既加重供水企业经济负担, 又加剧城市水资源供需矛盾。此外, 长期隐蔽漏损可能引发安全事故、威胁饮用水安全。所以, 发展高效精准的漏损检测与定位技术, 实时掌控和主动干预管网健康状态, 是保障城市供水安全、提升水资源利用效率的迫切需求。在此背景下, 物联网、大数据、人工智能等新一代信息技术为供水管网漏损管理带来机遇, 推动其从被动响应向主动预防、从粗放管理向精细调控转变。

一、供水管网漏损检测与定位的技术基础

(一) 漏损检测基本原理与分类

供水管网漏损检测核心是识别管道破损致水体异常流动或物理现象, 泄漏会产生可感知物理信号。依物理原理不同, 检测技术分声学检测法、压力/流量分析法、示踪剂法、地质雷达法和红外热成像法等。声学检测法捕捉漏损水流声波或振动信号; 压力/流量分析法基于管网水力模型监测压力波动和流量变化; 示踪剂法投入特定物质检测浓度变化; 地质雷达法和红外热成像法探测土壤介电常数或温度场异常。这些方法构成漏损检测基础体系^[1]。

(二) 传统漏损检测方法局限性

传统漏损检测方法虽曾发挥作用, 但面对现代城市

供水管网时局限性凸显。一是依赖人工操作, 检测效率低, 难普查大规模管网; 二是检测精度受环境和人员经验影响大, 背景噪声复杂时误报和漏报率高; 三是多为被动检测, 难早期预警和主动防控; 四是只能判断大致区域, 定位精度低, 维修成本高、影响大; 五是数据记录不系统, 难评估管网健康状况、提供科学数据支撑。

(三) 智能化检测技术特点与优势

智能化检测技术是传统与现代信息技术融合产物, 具自动化、数据化、精准化和智能化特点。自动化通过在线监测设备实现管网状态自动采集; 数据化将物理量转化为结构化数据; 精准化靠先进传感技术和算法模型提高检测灵敏度和定位准确性; 智能化用人工智能算法挖掘数据、识别漏损模式、预测趋势和辅助决策。与传统方法相比, 其优势是可全天候、全覆盖监控, 降低误报漏报, 提供高精度定位, 积累大数据支撑管理和规划。

(四) 智能化技术在漏损定位中应用潜力

智能化技术在漏损定位有巨大潜力, 实现从“发现漏损”到“精确定位”跨越。传统相关仪技术操作复杂、要求高, 智能化技术集成多数据源, 提升定位精度和效率。如分布式光纤传感技术可实现长距离、连续监测定位; 阵列式传感技术结合算法可缩小定位误差。且智能化技术融合多源信息, 剔除干扰, 为无人化修复提供可能^[2]。

二、智能化漏损检测与定位技术的集成方法

(一) 基于声波与振动传感的检测技术

基于声波与振动传感的检测技术是智能化漏损检测

体系中最为成熟和广泛应用的一类。其技术核心在于利用高灵敏度的加速度传感器或水听器,捕捉漏损点产生的振动信号。这些信号以应力波的形式沿管道和周围介质传播。智能化体现在两个方面:一是传感器的智能化,现代传感器集成了信号调理、模数转换和初步处理功能,能够输出高质量的数字信号,并具备低功耗、无线通信能力,便于在管网中大规模、灵活部署。二是信号处理的智能化,采集到的原始信号包含大量环境噪声和管道自身运行产生的干扰。智能化系统采用数字滤波、小波变换、经验模态分解等先进的信号处理技术,对原始信号进行降噪和特征提取。随后,利用模式识别算法,如支持向量机、卷积神经网络等,对提取的特征进行分类,自动判断是否存在漏损。该技术的优势在于对微小漏损的灵敏度高,且能够通过布置多个传感器形成传感器阵列,利用信号到达不同传感器的时间差,精确计算出漏损点的位置,实现检测与定位的一体化。

(二) 基于流量与压力分析的监测技术

基于流量与压力分析的监测技术是从宏观水力行为入手判断漏损的重要方法。该技术通过在供水管网的特定关键节点,如区域边界、泵站出口、主干管分支处等,安装高精度的电磁流量计和压力变送器,实时采集流量和压力数据。其智能化应用的核心是建立能够反映管网真实运行状态的数字水力模型,并将实时监测数据与模型预测数据进行比对。当管网中发生漏损时,会打破原有的水力平衡,导致特定区域的流量出现异常增加(夜间最小流量分析法是典型代表),或压力出现异常下降和波动。智能化系统通过持续分析这些监测数据与模型基线之间的偏差,并结合管网拓扑结构,能够快速识别出发生异常水力特征的区域,从而锁定漏损嫌疑区^[1]。

(三) 多源数据融合与信息协同机制

单一检测技术往往存在其固有的适用范围和局限性,难以应对所有复杂的管网工况。因此,多源数据融合与信息协同成为提升智能化漏损检测系统可靠性和准确性的关键。该机制的核心思想是,将来自声波振动传感器、流量压力计、甚至水质传感器、环境传感器等多种异构数据源的信息,在一个统一的平台上进行汇聚、关联和综合分析。信息协同的实现依赖于几个层面:在数据层面,需要进行时空对齐,确保不同来源的数据在时间戳和空间位置上具有可比性。在特征层面,需要从各类数据中提取能够表征漏损的有效特征,如声信号的能量、频率,流量数据的偏差率,压力数据的梯度变化等。在决策层面,则采用数据融合算法,如D-S证据理

论、贝叶斯网络或深度学习模型,对来自不同证据的漏损判断进行加权或投票,形成一个综合置信度更高的决策结果。

(四) 智能化技术集成系统的架构设计

为了实现上述多种技术的有效集成与协同,必须设计一个科学、合理的智能化技术集成系统架构。一个典型的系统架构通常分为感知层、传输层、平台层和应用层。感知层是系统的“五官”,由部署在管网上的各类智能传感器、执行器组成,负责原始数据的采集。传输层是系统的“神经网络”,利用物联网技术,如NB-IoT、LoRa、5G等无线通信方式,或工业以太网、光纤等有线方式,将感知层采集的数据安全、可靠地传输到数据中心。平台层是系统的“大脑”,是整个架构的核心。它包括数据存储与管理模块(如时序数据库、关系型数据库),负责海量监测数据的存储;数据处理与分析引擎,负责数据清洗、特征提取、模型运算和漏损诊断;以及模型管理模块,负责水力模型、算法模型的训练、更新和部署。应用层是系统的“交互界面”,面向不同用户(如调度员、维修工程师、管理人员)提供可视化的操作界面,包括GIS地图上的漏损报警显示、定位结果推送、历史数据查询、统计分析报表以及维修工单生成等功能^[4]。

三、智能化技术在供水管网漏损管理中的应用

(一) 实时监测与预警系统的构建

智能化技术的首要应用是构建供水管网的实时监测与预警系统。该系统通过在管网关键位置部署的智能传感器,实现对压力、流量、振动、水质等关键指标的7×24小时不间断监控。所有监测数据实时传输至中央平台,并与预设的安全阈值或正常波动范围进行比对。一旦某项指标出现异常且超出阈值,系统将自动触发预警机制。预警并非简单的报警,而是分级的。例如,对于轻微的、孤立的异常,系统可能仅记录并标记为“关注”;对于持续存在的、多项指标关联的异常,则升级为“预警”,并向相关管理人员推送通知;对于可能引发重大事故的剧烈变化,则触发“警报”,并启动应急响应流程。这种实时监测与预警系统,将漏损管理的关口前移,使管理人员能够在漏损发展的初期阶段就介入处理,有效避免了小漏变大漏、突发性爆管等严重后果,极大地提升了管网运行的安全性和可控性。

(二) 漏损点的精准定位与快速响应

在系统发出漏损预警后,智能化技术的核心价值体现在对漏损点的精准定位上。一旦确认某个区域存在漏

损,系统会自动调用该区域内所有相关的传感器数据,启动高精度定位算法。对于声学信号,系统会计算不同传感器接收到漏损信号的时间差,并结合管网的地理信息和管材声速,利用三角定位或相关定位算法,在GIS地图上精确标示出漏损点的坐标。对于水力分析,系统会结合水力模型,通过反演计算,缩小漏损嫌疑区的范围,并与声学定位结果进行交叉验证。定位结果不仅是一个坐标点,通常还会附带一个置信度区间,帮助维修人员判断开挖的优先级和范围。定位信息一旦确定,系统可自动或半自动地生成维修工单,通过移动应用推送给维修班组,工单中包含漏损点的详细位置、周边管线图、建议的维修方案等信息^[5]。

(三) 漏损数据的分析与决策支持

智能化系统积累的海量漏损数据是供水企业的宝贵资产。通过对这些历史数据进行深度分析,可以为管网管理提供强大的决策支持。数据分析主要体现在几个方面:一是漏损成因分析,通过关联漏损事件的时间、地点、管材、管龄、周边地质、施工记录等信息,利用数据挖掘技术,找出导致漏损的主要风险因素,如特定管材的腐蚀高发期、地质沉降活跃区域等。二是管网健康评估,基于漏损发生的频率和严重程度,对管网的各个管段或区域进行健康度评分,生成管网健康“热力图”,直观展示管网的整体状况和薄弱环节。三是预测性维护,利用机器学习算法,如时间序列预测、生存分析等,预测不同管段在未来一段时间内发生漏损的概率,从而指导企业制定前瞻性的管网更新改造计划,将有限的维护资金投入到的最需要的地方,实现从“坏了再修”到“坏前预警”的转变。这些数据驱动的决策支持,使得管网管理更加科学、精准和高效。

(四) 智能化技术在管网维护管理中的实践价值

智能化技术在管网维护管理中的实践价值是全方位的,最终体现在经济效益、管理效益和社会效益三个层面。在经济效益上,通过精准定位和快速修复,直接减少了漏损造成的水量损失,降低了产销差;通过预测性维护,优化了维修和更新资金的投入,避免了盲目开挖和无效投资,整体降低了管网的运维成本。在管理效益上,智能化系统实现了对管网状态的透明化、精细化管理,改变了过去依赖经验、粗放式的管理模式,提升了管理效率和水平;标准化的数据采集和分析流程,也为

企业内部的绩效考核和责任追溯提供了客观依据。在社会效益上,有效控制漏损,节约了宝贵的水资源,符合国家绿色发展的战略方向;减少了因漏损引发的路面塌陷、停水等公共安全事件,保障了城市运行的稳定和居民生活的安宁,提升了公共服务的质量和满意度。综上所述,智能化技术的集成应用,不仅是一项技术升级,更是推动供水行业向现代化、智慧化转型的重要驱动力。

结语

供水管网漏损检测与定位的智能化技术集成,是应对当前城市供水挑战、构建智慧水务体系的必然选择。本文通过对技术基础、集成方法和应用实践的系统性阐述,证明了智能化技术在提升漏损管理效能方面具有不可替代的作用。它通过实现对管网状态的实时感知、漏损事件的智能诊断、漏损位置的精准锁定以及维护决策的科学支持,构建了一个主动、高效、经济的闭环管理体系。展望未来,随着传感器技术、人工智能算法和通信技术的不断进步,智能化漏损管理将向着更高水平的自主化、预测化和协同化发展。未来的研究应进一步探索低成本、高可靠性的新型传感技术,开发更强大的自适应学习算法以应对复杂多变的管网环境,并推动漏损管理系统与智慧城市其他系统的深度融合,最终形成一个全面感知、智能响应、协同联动的城市基础设施生命线保障体系,为城市的可持续发展和居民的美好生活提供更加坚实的水务保障。

参考文献

- [1] 陆旭峰.城市水务管理中智能水表系统的应用与效益分析[J].2022(31):145-147.
- [2] 贾玲,汪宇,汪林,等.城市供水安全与节水全程监控管理系统研究与应用[J].水利发展研究,2021,21(8):6.DOI:10.13928/j.cnki.wrdr.2021.08.001.
- [3] 沈永鑫.供水管道泄漏声信号的统计特征分析与智能识别技术研究[D].浙江大学,2022.
- [4] 刘辛悦,沈玉琼,杨坤,等.管网消毒,清洗,非开挖修复诊断与评估技术[J].净水技术,2021.DOI:10.15890/j.cnki.jsjs.2021.04.004.
- [5] 邓静.供水管网稳态与瞬态水力模拟研究[D].重庆大学,2019.