

陈博, 郭冠呈, 苗大勇, 等. 基于流量数据分析的 DMA 漏损探测综合识别方法[J]. 净水技术, 2026, 45(8): 166–172.

Chen B, Guo G C, Miao D Y, et al. Comprehensive identification method for DMA leakage detection based on flow data analysis[J]. Water Purification Technology, 2026, 45(8): 166–172.

基于流量数据分析的 DMA 漏损探测综合识别方法

陈 博¹, 郭冠呈^{2, 3}, 苗大勇¹, 姚 伟¹, 吴亚鹏¹, 范晨露^{2, *}

(1. 河南力科管线探测技术有限公司, 河南郑州 450051; 2. 清华大学环境学院, 北京 100084; 3. 清华苏州环境创新研究院, 江苏苏州 215000)

摘 要 【目的】针对当前供水管网独立计量区(DMA)漏损识别中流量数据利用不充分、识别准则准确度偏低等问题, 本文旨在构建融合基准与漏损指标的 DMA 漏损流量数据综合识别模型。【方法】对 DMA 小区的流量基线自动识别, 以此划定阈值区间。构建多维流量特征空间, 引入马氏(Mahalanobis)距离模型进行置信域判定; 同时结合时序趋势分析进行辅助决策, 实现对新增漏损、存量漏损以及缓慢渗漏的综合判断, 有效提升了模型在复杂工况下的鲁棒性。【结果】该融合检测方法实现了多类型漏损的综合识别, 误报率显著降低, 召回率达到 100%。模型在不同 DMA 中均表现出良好的适用性与工程应用价值。【结论】本文提出的多维融合检测方法能够有效提升 DMA 漏损识别的准确性和可靠性, 为供水管网漏损控制与管理提供了有力的技术支撑。

关键词 供水管网; 流量基线; 多维特征; 流量趋势; 漏损识别

中图分类号: TU991 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2026)08-0166-07

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.08.017

Comprehensive Identification Method for DMA Leakage Detection Based on Flow Data Analysis

Chen Bo¹, Guo Guancheng^{2, 3}, Miao Dayong¹, Yao Wei¹, Wu Yapeng¹, Fan Chenlu^{2, *}

(1. Henan Leak Pipeline Detection Technology Co., Ltd., Zhengzhou 450051, China;

2. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. Research Institute for Environmental Innovation (Suzhou) Tsinghua, Suzhou 215000, China)

Abstract [Objective] Current water supply networks still face challenges in district metered area(DMA) leakage identification, including insufficient utilization of flow data and inaccurate identification criteria. This paper aims to build a comprehensive DMA leakage identification model that integrates flow baselines and leakage indices. [Methods] The flow baseline of each DMA was automatically identified, and set this as the threshold range. A multi-dimensional flow feature space was constructed, and a Mahalanobis-distance model was introduced for confidence-region determination. Meanwhile, time-series trend analysis was incorporated as an auxiliary decision-making tool, enabling integrated identification of new leakages, existing leakages, and slow seepage, thereby improving the model's robustness under complex operating conditions. [Results] The fusion detection method achieved comprehensive identification of multiple leakage types, with significantly reduced false alarm rates and a recall rate of 100%. The model demonstrated good applicability and engineering value across different DMAs. [Conclusion] The proposed multi-dimensional fusion detection method effectively improves the accuracy and reliability of DMA leakage identification, providing strong

[收稿日期] 2026-02-03

[基金项目] 高龄服役管线输配安全劣化机制及系统调控技术与装备(2023YFC3208100); 河南力科管线探测技术有限公司科研课题支持(LKYF202502)

[作者简介] 陈博(1985—), 男, 工程师, 主要从事漏损控制、GIS、测绘、管线探测等工作, E-mail: laohuang2046@126.com。

[通信作者] 范晨露(2000—), 女, 博士研究生, 研究方向为供水管道漏损识别检测、管道健康状态诊断, E-mail: fcl23@mails.tsinghua.edu.cn。

technical support for leakage control and management in water supply distribution networks.

Keywords water supply network; flow baseline; multidimensional feature; flow trend; leakage identification

随着我国城市供水系统规模持续扩大,管网老化、维护滞后及地下施工等外部扰动引发的结构性损伤不断累积,导致管网漏损问题日益凸显^[1]。《“十四五”节水型社会建设规划》明确提出:至2025年,城市公共供水管网漏损率需控制在9%以内,并将信息化建设纳入水务企业准许成本管理体系。然而在实际运行中,独立计量区(DMA)的漏损识别仍是供水管网的薄弱管理环节。

当前DMA漏损识别多采用水量平衡分析、最小夜间流量法等常规技术手段^[2-3]。该类方法操作简便、适用性广,但对流量数据的深层特征挖掘不足,存在误报率较高的问题;同时,监测数据质量与设备运维水平仍是制约DMA控漏效果的核心瓶颈。现阶段部分老旧DMA小区流量监测设备建设年代久远,普遍存在计量精度衰减、设备故障、数据缺失频发等问题,导致流量监测数据稳定性较差,大幅降低了基于最小夜间流量开展漏损分析的可靠性。此外,管网暗漏监测设备整体覆盖率偏低,现场漏损排查仍以传统人工听音检测方式为主,易受环境噪声干扰,存在主观性强、排查效率低等短板。尤其在老旧管网、敷设环境复杂、居民区背景噪声较大的场景中,暗漏隐患难以实现快速、精准识别^[4-8]。

此外,现阶段多数供水企业的漏损分析仍以单一夜间最小流量指标与经验判断为主,缺乏系统化、多指标的定量分析体系。传统识别方法难以同步刻画新增漏损、存量漏损与缓慢渗漏3类典型漏损模式,对数据波动和异常点的鲁棒性不足,容易同时出现误报、漏报现象。为此,亟须建立可深度挖掘流量数据价值的高精度漏损识别方法,进一步提升DMA主动控漏的精细化水平。基于此,本文以郑州市多个DMA小区为研究对象,构建包含流量基线识别、特征判定与趋势信号分析的多维判据体系,建立高精度DMA漏损识别模型,实现对新增漏损、存量漏损及缓慢渗漏的稳定辨识。

1 研究方法

1.1 流量基线识别——新增漏损检测

新增漏损通常表现为流量的突增,而流量基线对应DMA小区在稳定运行状态下的低波动区间。

基于这一特性,本文构建了基于流量基线的DMA新增漏损识别模型,以郑州市DMA的历史流量数据为对象,共收集13个存在已知漏损记录的小区数据,涵盖最小流量、最大瞬时流量与瞬时平均流量等指标。在数据预处理阶段,剔除序列前段的大量空值,将所有负值统一视为空值,并采用线性插值结合前向与后向填充方法对缺失点进行修复,从而确保时间序列的连续性与完整性。

为定义并识别各DMA的平台期,本文首先采用滑动窗口技术(窗口长度设为60d)计算三类流量指标的滚动标准差,以表征其短期波动性,再基于分位数法确定平台期阈值(将三类流量指标的滚动标准差分布的25%分位数作为低波动判定门槛,当3项指标的滚动标准差同时低于其分布的25%分位数时,即界定为低波动区间),最后从中选取持续时间最长的连续区间作为该DMA的平台期。所识别的平台期能反映DMA在正常运行条件下的稳态阶段,可用于刻画基准流量水平。

在平台期内,设流量样本序列为 $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$,则中位数绝对离差(MAD)定义如式(1)。

$$MAD = Median[|X_i - Median(X)|] \quad (1)$$

该指标用于刻画样本相对于其中位数的总体离散程度。基于MAD的阈值 T 计算公式如式(2)。

$$T = Median(X) + 1.2 \times 1.486 \times MAD \quad (2)$$

其中:1.2——阈值系数,作为灵敏度参数控制预警线;

1.486——尺度修正因子,使MAD在正态分布假设下与标准差 σ 具有可比性。

在单日判定阶段,若三项指标中任一指标超过阈值,则当日轻报警。在时序一致性约束下,若任意连续3d中有2d为可疑日,则正式判定该DMA小区存在新增漏损事件。这保证了一定的抗噪声性、及时性。

1.2 流量特征判定——存量漏损检测

存量漏损指DMA小区内长期存在、难以通过突变型信号捕捉的暗漏^[9]。漏损规模通常与小区

管网结构、管材老化程度及用户密度等因素相关,表现为持续性偏高的基线流量而非明显的日内波动变化。因此,平台期所刻画的“低波动性”特征更适用于新增漏损检测,而不足以识别存量漏损的存在。为了刻画存量漏损在稳定运行条件下的流量特征,本文选取了 26 个具有代表性的标准无

漏小区,采集其流量、用户规模及管道长度等基础数据,并从用水行为、管网规模效应和最小夜间流量结构 3 个维度构建标准化表征指标(表 1),分别为户均流量指标(PHFI)、管长比流量指标(PPFI)和夜流占比指标(RMFI),多指标联合衡量小区是否存在存量漏损。

表 1 存量漏损指标
Tab. 1 Existing Leakage indices

指标	定义公式	标准样本均值	意义
PHFI	最小夜间流量/用户数	0.002 186	单户流量强度,用以识别相同用户规模下是否存在异常偏高流量
PPFI	最小夜间流量/管道总长	0.002 129	单位管长流量强度,用以识别相同管网规模下是否存在异常偏高流量
RMFI	最小夜间流量/平均流量	0.169 834	最小夜间流量占比,用以识别夜间需求占比是否存在异常偏高的现象

为实现多维特征下的存量漏损识别,本文采用马哈拉诺比斯(Mahalanobis)距离方法构建联合判别模型。该方法能够同时考虑 3 个指标之间的相关性,并对不同维度的量纲差异进行自动归一化,是识别多指标综合偏离度的常用手段^[10]。首先,基于 26 个标准无漏小区计算三维指标的均值向量与协方差矩阵,刻画正常运行状态的统计分布。对于待测 DMA,小区每日的三维特征向量由前 60 d 的流量数据生成,并结合数据清洗和去噪策略进行稳健化处理(剔除新增漏损报警日 ± 5 d 的数据,以消除短期突增干扰,并采用加权滑动平均与分位数截尾方法抑制极端值影响,得到三维特征向量),如式(3)。

$$x = (PHFI, PPFI, RMFI) \quad (3)$$

随后,计算其相对于无漏分布的 Mahalanobis 距离平方(D^2),用于度量该 DMA 流量特征的标准化偏离程度,计算过程如式(4)。

$$D^2 = (x - \mu)^T \sum^{-1} (x - \mu) \quad (4)$$

其中: x ——DMA 三维特征向量;

μ ——无漏样本均值向量;

T ——转置符号;

$\sum$ ——无漏样本协方差矩阵。

在多元正态近似假设下, D^2 服从自由度为 3 的卡方分布,因此可基于置信域实现分级判定:当值落于 95% 置信域内时认为无异常;当值超出 95% 而未超过 99% 置信域时判为“可疑”;当值超过 99% 置信域时则判为“强可疑”。该方法能够有效综合评估

多维结构的特征,避免单一指标因用户规模、管网长度或业态差异带来的误报,提高存量漏损识别的稳健性。

1.3 趋势信号分析——缓慢渗漏检测

部分漏损属于缓慢发展的渗漏,其特征是最小夜间流量在较长时间尺度上呈现平缓、持续的上升趋势,但不伴随明显的波动增大或基线跃迁,因此容易被新增漏损检测与存量漏损判定共同忽略。为捕捉此类“非突变型”异常,本文通过构建趋势信号分析模块,对最小夜间流量的长期变化模式进行辅助性识别。

首先计算最小夜间流量序列的 7 日滚动线性回归斜率,量化其短期增长趋势;再对所得斜率序列开展 3 日平滑处理,削弱随机扰动;最后将平滑后斜率与平台期噪声水平对比,若斜率超出最小夜间流量标准差的 1%,则判定为趋势型上升信号。该阈值可有效规避短期流量波动引发的误判,实现夜间流量缓慢抬升的早期识别,可作为区分新增漏损与存量漏损的有效补充依据。

1.4 融合漏损检测

新增漏损检测、存量漏损判别与趋势信号分析可分别从突增型异常、长期偏高特征与缓慢上升趋势 3 个维度刻画 DMA 漏损状态。实际小区管网异常往往多重叠加,单一识别方法难以全面、准确反映管网运行工况。为此,本文构建多指标融合判定机制,实现不同类型漏损的综合识别。本文采用“多源异常并集逻辑结合等级评估”的融合策略(表 2),在保证各类漏损及时识别的同时,提升模型对短期随机波动的抗干扰能力,有效规避单一指标局限性

引发的误报与漏报问题。

表 2 判定条件说明
Tab. 2 Determination Criteria

条件	最终等级	说明
存量=强可疑,或新增漏损报警且存量 $\geq$ 可疑,或趋势报警	红色	强漏损风险:新增与存量并发或趋势显著
存量=可疑,或新增漏损报警	黄色	轻漏损:短期异常或存量偏高
其他情况	绿色	正常区段

1.5 数据采集与模型构建

本文结合郑州市 DMA 小区的用户规模、管网材质结构、数据连续性等因素,从中遴选出具有典型意义且数据完整的 DMA 试验小区。所选小区覆盖老旧城区、新建居住区及不同规模等级区域,管材涉及球墨铸铁、灰口铸铁、钢塑复合、PE 管等多种类型,能够全面反映郑州市供水管网的复杂性。

预处理历史数据是构建可靠 DMA 漏损识别模型的基础环节,具体流程如下。

(1)缺失值处理:针对传感器故障、通信中断等原因造成的数据缺失,采用线性插值法进行填补,确保数据序列的连续性;

(2)异常值识别与剔除:基于 3σ 准则和 MAD 方法,自动识别并标记流量数据中的尖峰异常值,对因仪表故障或施工操作导致的明显异常数据进行剔除,避免其对基线构建产生干扰;

(3)时间对齐与统一:由于各 DMA 监测点数据采集频率可能不一致,将所有数据统一重采样至日级序列,采用最近邻插值方法进行时间对齐,保证多维特征计算的时间基准一致。

构建 DMA 基础数据库是本文的重要数据基础,具体包括以下内容。

(1)空间结构数据:从 GIS 系统中提取各 DMA 的管网拓扑结构,包括管段长度、管径、管材(球墨铸铁管、PE 管等)、节点连接关系等,用于计算 PHFI 和 PPFI 等结构特征参数;

(2)用户属性数据:整合各 DMA 的注册用户数及其实时计量数据,用于评估各 DMA 的合理用水量和识别大用户异常用水;

(3)运行监测数据:采集 DMA 进口流量计的实时数据,包括瞬时流量平均值、最小流量等,作为漏损识别的输入数据源;

(4)历史维护数据:收集各 DMA 的历史漏损事件记录、维修记录和检漏报告,用于模型训练、验证和基线期的筛选。

上述数据通过统一的数据编码和关联规则整合至 DMA 基础数据库,实现了从空间结构、用户属性到运行维护的全维度数据管理,为后续的漏损识别模型训练和多维特征分析提供了标准数据支撑。

在此基础上,本文构建涵盖结构数据、属性数据与运行监测数据的 DMA 基础数据库,实现“模型输入基础层”的标准化与可复用性,为后续流量特征判别与趋势信号检测奠定数据支撑。在基准建立之后,进一步从户均尺度、管长尺度及夜间流量占比 3 个维度,构建 PHFI、PPFI、RMFI 3 项核心特征指标,用以量化表征不同 DMA 小区的固有结构特征和规模因素。基于郑州市 26 个无漏小区收集的数据,利用这些指标构建了一个三维特征空间,并以 Mahalanobis 距离判定理论建立多元置信域模型。当小区流量特征长期偏离正常特征分布时,即可判定为存在存量漏损。这一方法相较于传统的基于阈值的判定方式更具鲁棒性,能够在不同管网规模和用户结构下保持判定的一致性。

为解决传统方法难以识别的缓慢渗漏情况,本文加入了趋势检测模块,通过计算最小夜间流量的短期滚动斜率并结合标准差比例阈值,识别出稳定、小幅但持续的上升趋势。趋势检测强化了模型对非突变型漏损的识别能力,使整个体系能够覆盖从突发漏损、结构性漏损到持续性渗漏的全类型异常。

上述 3 个模块在融合层面通过并行判定与互补权重的方式实现统一输出,构建了一套全面、稳定、具备工程适用性的漏损识别体系。

2 结果与讨论

为验证所构建融合漏损识别模型的有效性,本文选取人工标注的漏损记录作为基准,基于日尺度的漏损报警事件,对模型输出结果进行系统评估。评价指标包括真报、误报和漏报,分别对应算法正确报警、错误报警及漏检情况。其中,漏报判定允许 3 d 缓冲期,以消除人工标注时间的不确定性。

对全部待测 DMA 小区的历史漏损事件进行统计后,模型获得 7 081 起真报事件,4 526 起误报事件,未出现任何漏报事件。相应地,模型精确率(P)达到 61.01%,召回率(R)达到 100%, $F1$ 分数(P 和

R 的调和平均数) 为 75.78%。结果表明,在确保零漏报的前提下,模型能够显著抑制误报数量,实现漏损事件的稳定识别。

为进一步评估模型在工程场景中的优势,本文以郑州市现行漏损识别方法作为对照基线。郑州市现行方法基于夜流占比及户均最小夜间流量的固定阈值,一旦任意指标触发即判为异常。以裕华美霖小区为例,图 1 和图 2 分别展示了现行方法和本方法下报警结果和实际漏水区间对比,可

见在本方法下误报区间明显减少。本方法融合 3 类漏损报警结果,形成多源异常并集逻辑判定机制,因此可以减少大量由于单方法误报的可能性。二者在所有小区相同数据集下得到的指标对比如表 3 所示。与之相比,该方法显著降低了误报数量,误报率降低了 40.59%,同时完全避免了漏报现象, P 和 $F1$ 分数均明显提升,表明融合模型在识别的准确性与稳定性方面具有显著优势,监测结果更加可靠与稳健。

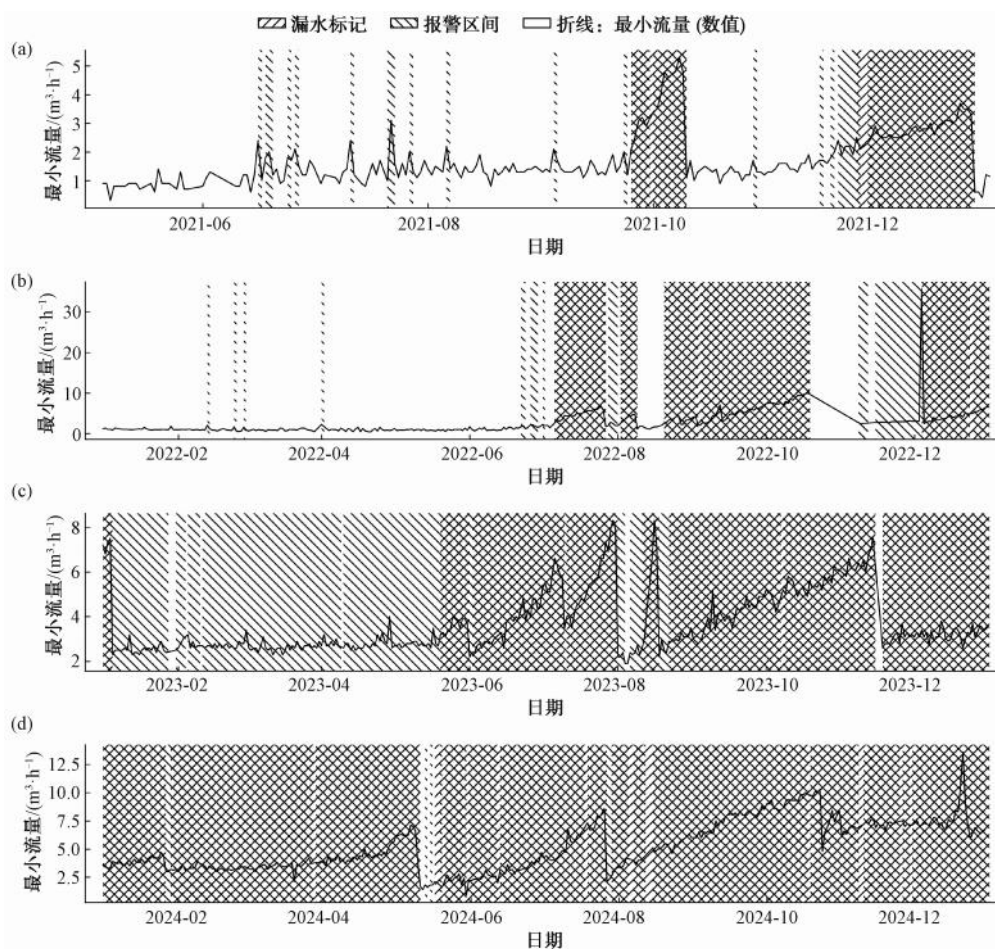
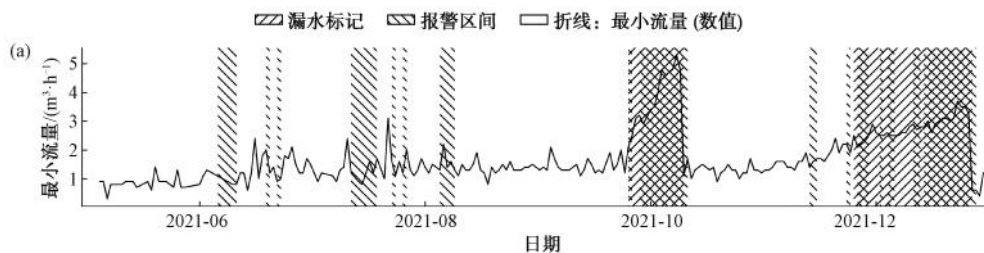


图 1 裕华美霖小区现行方法报警结果与漏水标记区间对比

Fig. 1 Comparison of Alarm Results between the Conventional Method and Leak Marked Periods in Yuhua Meilin Community



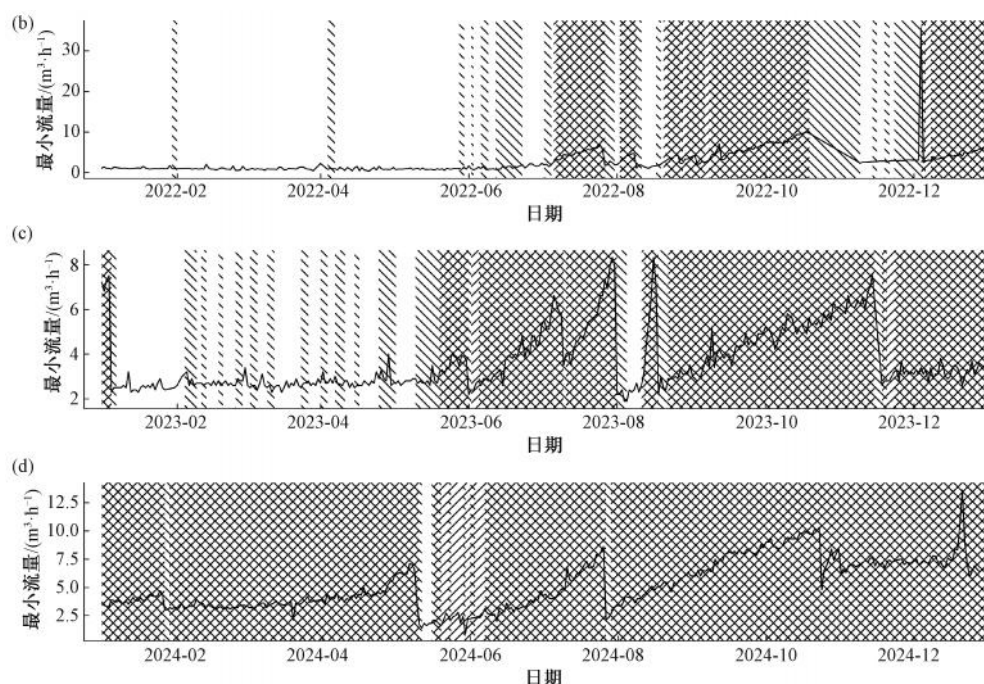


图 2 裕华美霖小区融合检测方法报警结果与漏水标记区间对比

Fig. 2 Comparison of Alarm Results between the Fusion Detection Method and Leak Marked Periods in Yuhua Meilin Community

表 3 指标对比表

Tab. 3 Comparison of Indices

指标	现行方法	本方法
命中数/起	8 780	7 081
误报数/起	7 618	4 526
漏报数/起	8	0
P	53.54%	61.01%
R	99.91%	100.00%
$F1$ 分数	69.72%	75.78%

综上所述,本文提出的融合漏损识别模型能够在不同类型 DMA 中保持高召回、高可靠性和较低误报水平,体现了良好的泛化能力与工程适用性,可为后续的漏损探测与排查工作提供更为可信的识别基础。

3 结论

本文以郑州市多个 DMA 为对象,开发了基于流量基线识别、特征判定与趋势信号分析的 DMA 漏损综合识别方法,实现对新增漏损、存量漏损及缓慢渗漏的稳定判断,结论如下:

(1)形成了“基线识别+多维特征+趋势分析”的融合判别机制,提升复杂工况适应性。通过构建基于“流量基线+动态阈值”的 DMA 平台期识别判定模型,构建多维流量特征空间,并采用

Mahalanobis 距离进行置信域判定,结合时序趋势分析辅助决策,实现了对新增漏损、存量漏损与缓慢渗漏 3 类典型漏损模式的综合识别,增强了模型对数据波动、异常点及运行扰动的鲁棒性。

(2)工程测试验证了方法的有效性与稳定性,整体性能优于传统方法。在实际管网测试中,模型漏报率为 0%,误报率降低 40.59%, R 提升至 100%。该方法在保持高检出率的同时显著降低误报率,具有较高工程应用价值,可为 DMA 主动控漏与巡检决策提供可靠依据。

从工程适用性来看,本研究模型输入仅需流量数据,可兼容现有 DMA 监测系统而无需额外增设传感设备;计算流程支持增量更新,满足漏损识别的时效性需求;模型可封装为标准化模块,便于与供水管网 SCADA 系统或智慧水务平台集成。通过对不同类型 DMA(老旧小区、新建小区、商业区等)的测试验证,模型能够自适应调整基线与阈值参数,表现出一定的泛化能力。

然而,将该方法由小区级 DMA 推广至市政管网层级仍面临若干挑战:市政尺度的用水结构更为复杂,人均夜间合理流量值需按区域功能类型分别确定;工业园区、大型商业综合体等大用户的夜间用水模式与居民区差异显著,基线构建时应将其大表

计量数据予以合理剔除;市政管网流量受季节变化和节假日效应的影响也更为明显,基线模型需引入动态修正机制。受限于数据获取条件,上述拓展分析目前尚处于理论探讨阶段,后续有待在取得市政管网流量监测及大用户计量数据后继续开展实证检验。

后续将主要在以下 2 方面开展深入研究:一是融合流量、压力、泵阀工况、分区边界调整及用户用水行为等多源信息,构建“漏损-扰动-需求变化”的可解释性判别模型,以降低工况切换和突发用水引起的误报;二是在多城市、多场景 DMA 中开展泛化验证,研究流量基线与阈值参数的迁移策略及自适应整定机制,提升模型的工程可复制性。

参考文献

- [1] 杨浩. 基于供水管网离线流量数据处理定位漏失研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2017.
Yang H. Study on leakages localization of water distribution network processing off-line flow data [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [2] 王瑞彬, 陈峰, 张蕊, 等. DMA 管理在济南市供水漏损控制中的应用[J]. 净水技术, 2019, 38(2): 1-6, 46.
Wang R B, Chen F, Zhang R, et al. Application of DMA management in leakage loss control in Jinan water supply[J]. Water Purification Technology, 2019, 38(2): 1-6, 46.
- [3] 李旭, 林峰, 李允琛, 等. 基于组合流量法的城市供水系统小区漏损诊断和预警[J]. 净水技术, 2024, 43(2): 135-142, 183.
Li X, Lin F, Li Y C, et al. Diagnosis and early warning for water leakage loss of residential community in urban water supply system based on combined flow method[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(2): 135-142, 183.
- [4] 唐中亚, 吴军, 杨丹. 城镇供水管网漏损现状分析及漏损控制技术的研究进展[J]. 环境保护前沿, 2022, 12(2): 224-232.
Tang Z Y, Wu J, Yang D. Analysis of leakage status of urban water supply network and research progress of leakage control technology[J]. Advances in Environmental Protection, 2022, 12(2): 224-232.
- [5] Gupta A, Kulat K D. A selective literature review on leak management techniques for water distribution system[J]. Water Resources Management, 2018, 32(10): 3247-3269.
- [6] Puust R, Kapelan Z, Savic D A, et al. A review of methods for leakage management in pipe networks[J]. Urban Water Journal, 2010, 7(1): 25-45.
- [7] Farah E, Shahrour I. Water leak detection: A comprehensive review of methods, challenges, and future directions[J]. Water, 2024, 16(20): 2975. DOI:10.3390/w16202975.
- [8] Romero-Ben L, Alves D, Blesa J, et al. Leak detection and localization in water distribution networks: Review and perspective[J]. Annual Reviews in Control, 2023, 55: 392-419.
- [9] 高云, 王兴双, 周柯, 等. MNF 法在 DMA 小区漏损管理中的综合分析运用[J]. 供水技术, 2022, 16(6): 36-38.
Gao Y, Wang X S, Zhou K, et al. Comprehensive analysis and application of MNF method in DMA community leakage management[J]. Water Technology, 2022, 16(6): 36-38.
- [10] Dejus S, Nescerecka A, Kurcalts G, et al. Detection of drinking water contamination event with Mahalanobis distance method, using on-line monitoring sensors and manual measurement data[J]. Water Supply, 2018, 18(6): 2133-2141.