

## 净水技术前沿与热点综述

袁秋红, 叱干勇, 李小雨, 等. 城市供水管网漏损的检测、定位和控制策略[J]. 净水技术, 2026, 45(2): 1-11, 59.

Yuan Q H, Chi G Y, Li X Y, et al. Leakage detection, location and control strategies for urban water supply networks [J]. Water Purification Technology, 2026, 45(2): 1-11, 59.

## 城市供水管网漏损的检测、定位和控制策略

袁秋红\*, 叱干勇, 李小雨, 李春龙, 袁源, 吴永捷

(重庆市清泽水质检测有限公司, 重庆 401331)

**摘要** 【目的】水在社会文明中扮演着重要的角色,城市供水管网作为城市生产生活的基础设施之一,是城市生态系统中的大动脉。但是供水管网因为管道自身属性、管道施工、管内工况突变和环境影响等原因易发生漏损,因此,针对城市供水管网漏损检测、定位及控制策略的研究显得尤为紧迫。【方法】本文通过梳理供水管网漏损检测、定位和控制的研究进展,结合国内供水管网漏损现状,提出了管网独立分区计量、软硬件联合检漏、压力管理控制漏损的综合策略,具体为分区计量,实现供水管网漏损监控;构建管网漏损定位模型,缩小漏损检测区域范围,提高硬件检测效率;构建管网泵阀联合调度模型,优化管网平均压力,降低漏损率和爆管率。【结果】以海南省某最高日供水量达到 4.6 万 m<sup>3</sup> 的县城供水管网为例,实施此综合策略实现漏损率由 22.00% 降低到约 10.22%,且减少了爆管事故,具有显著的经济和社会效益。【结论】供水管网漏损控制综合策略可实现管网漏损的系统性管理,有效降低漏损率并减少爆管事故,对于减少水资源浪费、提升供水系统安全性与可靠性具有重要意义。随着人工智能、物联网和云端平台技术的持续发展,未来应推进管网漏损的智能诊断、预测与精准控制,并推广绿色低碳技术,实现城市供水管网漏损管理的智慧化与低碳化。

**关键词** 供水管网 漏损控制 独立计量分区(DMA) 控制策略 智能诊断

中图分类号: TU991 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2026)02-0001-12

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.02.001

## Leakage Detection, Location and Control Strategies for Urban Water Supply Networks

Yuan QiuHong\*, Chi Ganyong, Li Xiaoyu, Li Chunlong, Yuan Yuan, Wu Yongjie

(Chongqing Qingze Water Quality Testing Co., Ltd., Chongqing 401331, China)

**Abstract** [Objective] Water plays a vital role in social civilization, and urban water supply pipelines—one of the key infrastructures for urban production and daily life—serve as major arteries in the urban ecosystem. However, water leakage often occurs in supply networks due to factors such as the inherent properties of pipes, pipes construction, sudden changes in pipe conditions, and environmental influences. Therefore, research on detection, location, and control strategies for urban water supply pipeline leakage is particularly urgent. [Methods] This paper reviews the progress of research on water supply network leakage detection, location, and control, and combines this with the current situation of domestic water supply network leakage. It proposes a comprehensive strategy that includes district metered areas, a combination of software and hardware for leak detection, and pressure management for leakage control. Specifically, this involves establishing district metered areas to monitor network leakage; building a network leakage location model to narrow down the detection area and improve the efficiency of hardware detection; and developing a joint pump and valve scheduling model to optimize average network pressure, thereby reducing both the leakage and pipe burst rates. [Results] Taking a country town water supply network in Hainan Province with a peak daily supply of 46 000 m<sup>3</sup> as an example, the implementation of this comprehensive strategy reduces the leakage rate from 22.00% to approximately 10.22% and decreases pipe burst

[收稿日期] 2025-03-12

[通信作者] 袁秋红(1983—),女,高级工程师,主要从事管网漏损控制等工作,E-mail:3180043877@qq.com。

incidents, demonstrating significant economic and social benefits. [ **Conclusion** ] A comprehensive control strategy for water supply network leakage can achieve systematic management of network leakage, effectively reducing leaks, conserving energy and resources, and minimizing pipe burst incidents. This holds significant importance for reducing water waste and enhancing the safety and reliability of water supply systems. With the continuous development of artificial intelligence, the internet of things, and cloud-based platforms, future efforts should focus on promoting intelligent diagnosis, prediction, and precise control of network leakage, as well as advancing green and low-carbon technologies to achieve intelligent and low-carbon urban water supply network leakage management.

**Keywords** water supply network leakage control district metered area (DMA) control solution intelligent diagnosis

在城市化进程不断加快的背景下,供水系统的完善与优化已成为保障社会经济可持续发展的重要议题。作为城市基础设施的重要组成部分,城市供水管网不仅是水资源分配的关键载体,更是维系居民生活质量和促进城市生态健康的重要支撑。然而,伴随着城市扩张和时间推移,供水管网系统面临着管道老化、施工缺陷、内部工况变化以及外部环境因素等多重挑战,导致严重的漏损问题。《2023 年城市建设统计年鉴》<sup>[1]</sup> 数据显示,重庆市 2023 年城市公共供水管网的漏损率高达 13.94%, 超出全国平均水平。这一现状不仅反映出水资源利用效率的低下,还对城市供水安全构成潜在威胁,同时增加了供水企业的运营成本。因此,开展针对城市供水管网漏损检测、定位及控制策略的研究具有重要意义。

本文通过总结国内外现有经验和方法,详细叙述了各类城市供水管网检测和控制的措施,不仅可以为国内范围内的供水系统优化提供有益借鉴,帮助供水企业减少经济损失、提高运营效益,还能确保为市民提供稳定且高质量的供水服务,从而提升城市居民的生活质量,为实现水资源的高效利用和环境保护贡献力量。

## 1 供水管网漏损检测、定位和控制策略现状

城市供水管网漏损检测、定位的相关研究技术在国外已经十分普及,以美国、英国、日本为代表的发达国家自 20 世纪中期便开始了系统性研究,依托美国水行业协会 (AWWA)、英国水研究中心 (WRC) 及日本水道协会 (JWWA) 等专业机构推动技术标准化与工程应用,使得其供水管网漏损率长期维持在较低水平。技术发展历程可划分为 3 个阶段:20 世纪 60 年代,美国、加拿大等国率先建立基于压力与流量监测的远程数据采集系统,通过控制室实时分析管网异常并触发预警;20 世纪 70 年代,英国、德国等国家开发了声信号检漏设备,但操作复杂性与定位精度不足导致其应用受限;20 世纪 80

年代,英国提出独立计量分区 (DMA) 管理模式,通过 DMA 与压力调控显著提升漏损检测效率,该模式随后被多国采纳<sup>[2]</sup>。进入 21 世纪后,随着全球水资源压力加剧,相关技术迭代加速,新型传感设备与多模态检测方法呈现多元化发展趋势<sup>[3]</sup>。

近年来,我国也越来越重视漏损检测与定位问题,相继出台《水污染防治行动计划》等相关政策,对供水管网的漏损提出了明确要求。然而,由于我国在该领域的研究起步相对较晚,目前供水管网的泄漏检测与定位仍主要依赖传统的被动式人工巡检手段。尽管国内在硬件检测技术方面取得了一定进展,如音听仪器、探地雷达、红外测温仪等设备的应用,但这些技术在自动化水平、抗干扰能力及复杂工况适应性方面仍存在不足,与国外发达国家相比尚有一定差距<sup>[4]</sup>。

在控制策略上国内外均强调系统性治理。国外注重全生命周期管理,如英国通过长期管网更新与定期巡检降低漏损率;日本则依托高精度传感网络实现漏损实时监测。国内在《城镇供水管网漏损控制及评定标准》(CJJ 92—2016)等行业标准推动下,逐步形成“DMA+压力管理+智能检漏”的综合策略,但仍存在区域发展不均衡问题。当前研究趋势聚焦于多技术融合与智能化升级:硬件检测向低功耗远程监测[如窄带物联网 (NB-IoT) 传感器、无人机巡检]发展;软件模型则通过机器学习优化水力仿真精度;泵阀联合调度、数字孪生平台等集成化方案成为提升管网韧性的重要方向。

尽管国内在城市供水管网漏损检测、定位与控制领域已取得一定进展,但多数城市尚未形成系统化的策略体系,不同区域间的策略方案差异显著。因此,构建一种普遍适用大多数区域的综合策略方案显得尤为重要。

## 2 城市供水管网漏损检测、定位和控制综合策略

为有效解决城市供水管网漏损问题,提升水资

源利用效率,本文提出一套融合检测、定位与控制功能的漏损管理综合策略。策略主要由3个部分组成:首先,建立DMA系统,实现管网流量与压力的精细化监测,为漏损识别与区域判定奠定数据基础;在此基础上,结合水力模型与智能优化算法,缩小硬件检测范围,提升漏点辨识的精度与定位效率,构建软硬件协同的漏损定位机制;最终,通过实施主动压力管理,动态调控管网压力水平,在及时控制管网漏损的同时,从源头抑制漏损产生和爆管事故的发生,形成系统化的控制策略。

## 2.1 管网DMA

DMA是一种将供水管网划分为若干个独立的区域,每个区域安装一套流量计和压力表,并对该区域的流量和压力进行监测和控制的方法。通过DMA,可以对每个区域的供水量、水压、漏损等情况进行实时监测和调控,从而实现供水的精细化和智能化管理<sup>[5]</sup>。

### 2.1.1 管网信息化管理

在实施供水管网DMA前,需通过多系统协同获取管网基础数据以支撑水力建模<sup>[6]</sup>。应建立供水管网地理信息系统(GIS)、数据采集与监控(SCADA)系统及智慧表务系统,整合管网基础属性数据(管径、材质、埋深)与实时动态数据(压力、流量、水质),实现数据的标准化采集与规范化管理,推动管网信息化进程。动态更新GIS是掌握管网状态、识别漏损的关键。针对老旧管网及未移交小区导致的数据缺失、图纸不清等问题,需建立长效更新机制:制定GIS数据更新流程,确保数据时效性;引入高精度测绘仪器(如探地雷达、惯性定位仪)及数据处理技术,提升数据采集精度;通过技术培训强化专业人员能力。

具体实施中需分3步推进数据治理:

(1)现场校核图纸,通过实地勘察纠正管道位置、材质等信息的偏差,对疑似问题区域实施探坑作业,直接验证管道状态;

(2)全面勘察不明管线,逐条记录管道物理属性、地理坐标及维护历史,构建多属性数据库;

(3)利用GIS空间分析功能建立管网拓扑关系,实现可视化查询与管理,辅助分析管网布局与运行状态。GIS可直观展示管网分布、连接关系及压力、流量动态,为分区优化提供决策依据。通过上述措施,逐步完善数据覆盖范围与准确性,为后续漏损

控制与分区管理奠定基础。

### 2.1.2 GIS与SCADA系统协同设计

SCADA系统通过实时监控和采集供水管网的动态数据(如水厂运行参数、水质参数、管网压力及流量等),能够及时侦测管网中的异常事件,为生产调度和管理提供参考数据。其中,实时压力和流量数据可反映管网压力分布和区域用水情况,为查漏工作提供辅助决策支持。然而,SCADA系统在呈现空间数据方面存在不足,而GIS则具备处理复杂空间数据的能力,能够有效分析地理信息相关的空间位置和属性信息。通过GIS和SCADA系统的一体化设计,可实现功能互补与数据交换,消除信息壁垒,建立具备信息管理和调度监控功能的供水管网综合管理平台。基于GIS与SCADA技术的集成系统,通过对各类数据的挖掘与分析,能够为供水运营管理与决策提供更深层次的信息化应用。通过统一接口访问空间、历史和实时动态数据,实现供水信息的集成化管理,同时支持空间静态数据与实时动态数据的有机融合和高效处理,提升现场实时监测数据的可视化能力。不同类数据的统一管理和调用减少了数据传输误差,保证了数据可靠性<sup>[7-8]</sup>。

因此,通过一体化设计将GIS静态数据与SCADA动态数据融合,建立供水管网管理信息系统,实现管网信息与运行数据的集成,全面提升供水综合管理水平和工作效率,以适应供水量快速增长和管理要求不断提高的需求。

### 2.1.3 构建管网水力模型

水力模型通过数学算法模拟供水网络中的水流行为,包括流量、压力分布和水质变化等动态过程,建模依据GIS数据和管网参数,如管道长度、直径、材质、连接节点位置以及用户的用水模式等,确保了模型能够真实反映实际供水网络的运行状态,从而能够帮助管网识别潜在的漏损点。

供水管网水力建模的主要技术流程:基础数据收集、节点流量分配、模型简化、管网数据导入及模型校核。在供水管网建模软件的选择上,可根据数据处理方式、管网数据导入方式,以及是否具有外部接口与SCADA系统和GIS连接,是否具有开源代码支持二次开发以及是否免费等选择EPANET、WaterGEMS、Mike Urban、InfoWorks等水力建模软件<sup>[9]</sup>。

## 2.1.4 DMA

合理的 DMA 与诸多因素相关,近年来《城镇供水管网漏损控制及评定标准》(CJJ 92—2016)、《城镇供水管网运行、维护及安全技术规程》(CJJ 207—2013)、国际水协会(IWA)等国内外 DMA 的经验总结和分区指导手册对 DMA 的设计原则均有比较详细的叙述,建立 DMA 的主要影响因素包括漏损控制目标和经济漏损水平、DMA 规模、供水安全性、地理条件 4 类。

### (1)漏损控制目标和经济漏损水平

供水企业应结合实际制定合理的漏损控制目标,使漏损率处于经济漏损水平附近,以实现成本与效益的平衡。过度追求低漏损率可能导致检测和维修成本过高,反而降低整体经济效益<sup>[10]</sup>。

### (2)DMA 规模

DMA 规模应综合考虑人口密度、地理条件和管网特性,一般以 500~5 000 户为宜,人口不宜超过 2 个。DMA 规模:小型(<1 000 户),适用于高密度城区;中型(1 000~3 000 户),平衡管控灵敏度与经济性;大型(3 000~5 000 户),适用于管网稳定的区域。分区时应结合水力模型验证极端工况下的压力稳定性,优化阀门布局以减少死水区,并配套实施管道冲洗与水质监测。

### (3)供水安全性

DMA 需统筹保障水量、水压和水质。水量应建立分级管网架构,实现优化分配;水压需经消防及事故工况校核,确保压力可靠;水质应重点关注水龄控制,通过优化边界阀门、模拟水质衰减、定期冲洗及加强在线监测,保障全流程水质安全<sup>[11-12]</sup>。

### (4)地理条件

地形高程直接影响管网压力均衡与安全。DMA 划分应尽量保证区内高程相对一致,避免因高差过大引起压力异常或工程复杂度过高。为优化管网水力稳定性,DMA 划分需优先保障分区内部节点高程的相对均质化,通过 GIS 高程分析筛选地形特征相近的管网单元,从而降低地形突变导致的压力失衡风险,同时减少管道纵向应力集中现象,为压力分区管理及漏损控制提供地形适配性支撑。

科学合理的 DMA 规划应遵循系统化的实施流程:首先通过多源数据融合构建管网基础数据库,整合几何参数与运营数据,经清洗后形成时空数据集。基于 GIS 平台和 EPANET 水力-水质耦合模型进行

仿真模拟,校准模型与实际工况的一致性。分区设计需结合经验与优化算法,在满足规模(500~5 000 户)和人口数量( $\leq 2$ 个)约束的前提下,优先考虑地形连续性以控制区内高差,并优化边界阀门与流量计布设。方案需经水力模拟验证极端工况下的压力稳定性,评估封闭区水质衰减风险,制定死水区冲洗预案。实施前需评估施工可行性,必要时调整分区或增设连接。设备安装分阶段进行,先进行阀门密封性和压力测试,再选型安装流量计。试运行阶段建立动态水量平衡监测,利用夜间最小流量分析追踪漏损,完善压力调控与水质预警,形成全生命周期管理体系。

DMA 建成后的管理至关重要,直接关系到漏损控制效果。DMA 管理分为初期管理和常规管理 2 个阶段。初期管理重点在于建立管理基础,包括制定规划记录、组建专业团队,结合装备与经验开展巡检,及时修复漏损和处理死水。需评估修复经济性,必要时暂缓高成本修复。系统排查漏失需校对仪表、核实数据、估算漏失量、检查边界、测试压力、排查偷水等,通过多轮操作确认漏失情况;常规管理则需建立持续运行机制,包括每日巡检、定期校表、更新用户数据与边界条件、维护阀表数据库、及时修复漏损,长远规划分区扩展与调整,对不合理分区重新设计。通过初期与常规管理的有机结合,实现系统化、常态化管控,有效控制漏损,保障供水系统稳定运行<sup>[13-14]</sup>。

## 2.1.5 表务管理

为了有效研究产销差水量,并对系统计量的完整性和准确性进行客观评价,对于特定区域内的自来水公司而言,了解当前计量工作的状况及其设备中存在的问题并提升表务管理水平具有重要意义。

### (1)水表普查

确定管网中水表的位置及其运行状态是供水企业完善重要基础资料的基本工作,也是产销差水量管理的重要组成部分。供水企业应选择合适的时间段对所有供水用户进行全面普查,特别是针对大用户群体,详细统计水表信息,包括但不限于水表位置、营收系统对应关系及计费情况、安装与计量情况、量程匹配性、防护措施、旁通管与非法用水行为等。

### (2)大表监控管理

建议设立专门的大水表管理中心,负责管理在

册及即将安装的大水表,从采购、安装、使用直至报废的全生命周期过程。该中心应维护水表档案,执行水表的拆换、复购检验等操作,并管理水表库存。此外,还应对因故障或周期强制检定而更换的水表进行分析和统计,提供灵活查询在线状态的功能<sup>[15]</sup>。

### (3) 水表更换计划

严格执行国家规定的水表周期检定和到期轮换要求,加强对水表更换或校验的管理。按照国家强制标准,自来水水表的使用年限为6年,到达期限后需强制更换;对于存在疑问的水表,则应不定期进行校验,以确保其计量准确性<sup>[16]</sup>。

### (4) 提高抄表准确率

实施抄表轮换和抽检复制制度,强化供水企业内部管理。建立和完善供水企业内部的用水和售水制度,构建科学的监管体系,杜绝“人情水”的发生,提高水费收取的精度,减少漏户和人为因素引起的数据偏差<sup>[17]</sup>。

### (5) 使用智能抄表系统

针对当前水表抄表中存在的产销差管理缺位、抄表数据易丢失、预存及罚没水量记录不规范等问题,建议设立专职岗位统一负责产销差管理,推进抄

收一体化,完善营收系统与数据表单,建立相关技术标准和管理制度。推荐推广手机抄表等移动互联方式,实现数据实时上传和集中管理,在降低成本的同时提升数据质量与水费回收率<sup>[18]</sup>。

### 2.1.6 工单管理

工单管理系统是水务企业用于整合设备维护、故障处理、巡检任务及客户服务等核心业务流程的数字化管理平台。通过整合水务大数据中心与热线工单系统、供水管网GIS及工单管理系统,实现系统间的数据互联互通。客服人员在接收到故障信息后,可依据报修地址进行空间定位,快速识别故障发生点,并将相关信息同步上传至工单系统。系统根据工单类型自动完成任务分类与派发,维修完成后及时开展用户回访,从而构建一个高效、智能、闭环的水务故障处理流程<sup>[19-22]</sup>。

## 2.2 漏损定位检测

### 2.2.1 基于硬件的漏损定位

传统的硬件检漏技术,如音听法、探地雷达、红外测温仪、智能球等,通过使用便携式检漏仪器或者将检漏硬件设备安装在管道上,可在管道发生泄漏时,精确检测泄漏情况并确定泄漏位置,目前常用的管网硬件检漏技术如表1<sup>[23-28]</sup>所示。

表1 常用的管网硬件检漏技术<sup>[23-28]</sup>

Tab. 1 Commonly Used Pipe Network Hardware for Leakage Detection Technology<sup>[23-28]</sup>

名称	优点	缺点	适用条件
音听法	设备相对便宜,操作简单; 能够快速提供初步判断结果; 可以应用于各种类型的管道材料	对操作人员的经验和技术水平要求较高; 逐点侦听工作量大,耗时长; 背景噪声如工地施工、交通噪声等会影响检测准确性; 通常只能在深夜安静时段进行有效检测	适用于小型社区或居民区的供水管网,特别是在夜间环境较为安静的情况下
探地雷达	无需破坏地面即可获取地下信息; 尤其适合复杂地形区域; 能提供详细的地下结构图,有助于精确定位	需要有经验的操作员和数据分析专家; 深埋管线或高导电性土壤会降低探测效果; 设备购置和维护费用不菲	适用于需要详细调查地下结构的城市主干道或难以开挖的区域
红外测温仪	易于上手,快速获取结果; 可以在较大范围内迅速扫描,提高工作效率	设备成本较高; 温度波动和土壤特性可能影响检测精度; 需要一定的培训才能正确解读数据	适用于表面温度差异明显的管道段落,尤其是在白天温度较高的环境中
小型摄像机	提供最直观的管道状况信息; 能够准确指出具体漏损部位; 除检漏外还可以评估管道整体健康状况	只适用于一定尺寸以上的管道; 可能需要清理管道以确保图像清晰; 设备采购和维护成本较高	适用于直径较大的市政供水管道或工业管道,特别是那些容易进入但难以从外部检测的区域
智能球	不受管道材质限制,适用于多种类型管道; 特别适合大口径、长距离供水管道; 减少了人工干预,提高了检测效率	成本较高,且每次使用后需回收处理; 存在污染水源的可能性; 需要适当的部署投放点和回收点	适用于大型供水网络中的主干管道,尤其是那些难以定期检查的长距离输送线

(续表1)

名称	优点	缺点	适用条件
传感光纤	能够捕捉微小的变化, 提供精确的数据; 具有良好的耐热性和抗腐蚀性, 适合恶劣环境; 可以覆盖整个管道长度, 无盲区	布设和维护成本较高; 需要专业的安装和数据分析支持; 某些情况下(如极深埋设)可能不适合	适用于新建或改造项目中的关键供水线路, 特别是需要长期稳定监测的重要设施
示踪探头	能够准确定位非常细微的泄漏点; 可用于新铺设管道的压力测试以及老旧管道的常规检查; 使用的示踪气体通常是惰性或无害的, 对环境影响小	需要精心设计注射点和探查路线; 检测耗时较长; 检测设备成本较高	适用于承压测试不合格的新管道, 或者那些难以用其他方法检测的小型漏水点, 尤其是在郊区或长距离管道系统中
超声波流量计	能够检测微小流量变化, 适用于精细管理; 可以监测正向和反向流动; 适用于不同大小和形状的管道	需要确保传感器正确安装以获得准确读数; 设备成本较高; 需定期校准和清洁以保持性能	适用于需要精确流量监测的关键节点, 如泵站进出口、重要分支点等, 特别适合自动化管理系统集成

传统的人工检测方式难以满足现代供水系统对高效、精准漏损检测的需求。因此, 基于硬件的供水管道漏损定位技术得到了广泛的研究与应用。近年来, 随着物联网、人工智能、大数据、5G 通信等技术的发展, 漏损检测技术逐步向智能化、自动化、远程化的方向演进。如王鹏渊等<sup>[29]</sup>基于恒压供水原理, 利用供水变频器的频率、电压、电流、转速等运行参数的动态变化, 通过融合支持向量机(SVM)、灰狼优化算法(GWO)等, 构建了一种结合合成少数类过采样技术(SMOTE)与编辑最近邻规则(ENN)的SMOTE-ENN-GWO-SVM漏损预警模型, 其预测准确率高达98.16%; 石越等<sup>[30]</sup>则通过融合压缩波与流体波理论, 并结合变分模态分解(VMD)与Teager能量算子(一种用于估计信号瞬时能量的非线性算子), 实现了对管道泄漏初始时刻的高精度辨识; 单单等<sup>[31]</sup>设计了一种融合双电荷放大器与差分放大器的复合式信号调理电路, 并通过引入线性反馈网络有效拓展了电荷放大器的低频响应特性, 降低了其下限截止频率, 从而实现了供水管道低频泄漏信号的高灵敏度采集。

### 2.2.2 基于软件的漏损定位

基于软件的漏损定位技术主要包括3类方法: 信号处理法通过分析压力、流量等监测数据的波动来识别和定位异常, 其优点在于响应速度快、定位较为直观, 但对传感器布点密度与信号质量要求较高, 在复杂管网中易受用水噪声干扰; 数学模型法利用仿真模拟, 寻找最符合当前管网实际状态的运行工况, 该方法机理明确, 可分析不同工况下的系统行

为, 但依赖准确的管网参数与水力模型, 计算复杂度高且维护成本较大; 人工智能法则通过挖掘历史数据, 建立监测数据与运行状态之间的关联模型, 辅助实现异常事件的诊断与定位, 其具备良好的自适应与模式识别能力, 但对历史数据质量与数量依赖较强, 模型可解释性较差且更新维护需持续投入<sup>[32-34]</sup>。

构建漏损定位模型遵循多目标优化框架, 其流程: 首先, 定义决策变量, 包括离散变量(如阀门开闭状态)和连续变量(如水泵转速); 其次, 建立涵盖经济性、服务质量和可靠性等多维指标的目标函数; 最后, 设定约束条件, 包括物理规律、设备性能边界及安全运行要求<sup>[35-37]</sup>。在模型求解阶段, 需根据问题特点选用合适的优化算法。针对大规模非凸非线性问题, 可采用遗传算法等群体智能优化方法搜索全局近似最优解, 其优势在于全局搜索能力强、对函数性质无严格要求, 但存在计算成本高、收敛速度慢且参数调优复杂的缺点<sup>[38]</sup>; 高维动态问题可结合混合蛙跳算法提高收敛效率, 该算法具有并行搜索和高效探索的优点, 然而其局部开发能力较弱且易受分组策略影响<sup>[39]</sup>; 处理时变不确定性时, 则可引入神经网络构建数据驱动优化策略, 神经网络擅长捕捉复杂非线性关系且适应性强, 但需要大量训练数据且存在黑箱特性可解释性差的问题<sup>[40]</sup>。这些智能算法通过并行计算与自适应迭代, 能够在复杂系统中有效平衡求解质量与计算效率, 但均需根据具体问题特点权衡各自的优缺点进行选择。

### 2.2.3 软硬件联合漏损定位

在当前的供水管网漏损检测实践中,无论是声学听漏、相关仪检测还是示踪气体等硬件检测技术,均需投入大量人力进行现场巡查与设备操作,物力成本较高,且检测周期长、覆盖范围有限,难以实现持续和系统性的监控,因而缺乏实时性与全局性<sup>[41]</sup>。另外,单纯依靠软件定位模型(如基于水力模型、数据驱动或人工智能)的漏损识别方法,其定位精度易受数据质量、模型适应性、边界条件设定等多种因素影响,在复杂多变的实际管网环境中可能出现误报或定位偏差,难以独立实现精准定位。

因此,为克服上述两类方法的局限性,在实际工程应用中亟需将硬件检测与软件模型有机结合,构建“软件初步定位+硬件精细确认”的机制。具体而言,可首先依托软件手段(如DMA流量与压力监测数据、实时水力模型或机器学习算法)进行大范围筛查与实时分析,识别异常区域并初步判定漏损可能发生的区段;在此基础上,再有针对性地部署硬件检测设备进入疑似区域开展小范围、精细化的现场探查与验证,最终实现漏损点的精准定位。

软硬件联合漏损定位可有效推动漏损管理从传统的“事后补救、被动响应”向“事前预警、主动防控”转变,可提高检测效率,降低人工与物资成本,为供水企业实现高效、节能、可持续的漏损控制提供了系统性的解决方案。

### 2.3 漏损控制策略

根据IWA的分类,进入供水系统的水量可分为授权用水量和漏失水量,其中漏失部分又可进一步划分为计量误差和未授权用水导致的账面漏损,以及管道、储水设施泄漏或破裂引起的物理漏损。在实际工程中,漏损控制主要针对物理漏损。考虑到漏损的隐蔽性、检测难度及成本限制,采取系统性的预防与控制策略尤为重要。目前主要措施包括管理性措施和技术性措施两大类。

管理性措施侧重于长期规划与系统性维护,包括合理规划管网布局、定期开展管道巡检与更换、预防极端天气影响、科学设定管道埋深以及完善管网档案管理等。这些措施致力于从源头上降低漏损发生概率,具备长效性和基础性作用。技术性措施则更多依托现代监测与控制手段,主要包括针对背景漏损的压力管理方法及区域管理方法(如DMA)。

综合来看,管理性措施为漏损控制提供制度保障和长远支撑,而技术性措施赋予系统实时响应与精准调控的能力,二者协同作用,共同构建高效、可持续的漏损防控体系。

#### 2.3.1 管网压力管理

随着城市供水管网规模的不断扩大和运行环境的日益复杂,单一的管理性措施成效周期长、成本投入高,已难以满足现代漏损控制的精准化和高效化需求,技术性措施成为不可或缺的补充与提升手段,其中主动压力调控技术能有效控制隐蔽性漏损和潜在风险,弥补传统方法主要针对显性漏损检测的不足。相关研究<sup>[42]</sup>表明:管网压力与漏损强度呈正相关,降低压力可显著减少漏损流量并延缓漏点发展。由于供水系统常按峰值需求设计,非高峰时段普遍存在压力冗余,这使得压力管理尤为必要。精细化压力管理具有多重价值:通过分区调控降低漏失水量并抑制漏损恶化;根据实际需求设定压力阈值,在保障供水的同时优化能耗;稳定压力还能减少水锤发生概率,延长管道寿命。该技术通过多目标优化,同步实现了漏损防控、节能降耗和爆管事故的减少。

#### 2.3.2 管网压力优化调度方案

压力管理作为漏损控制的有效手段之一,其直接或间接方法包括:减压阀安装和调节、管网更新(替换修缮问题构件、改变不合理的管网结构、增加中途加压泵站)、水泵优化调度、根据压力进行压力分区等。其中加装减压阀和调度水泵是较为普适而科学的方法,适用于大多数管网。

##### (1) 阀门调度

减压阀通过预设压力阈值或实时反馈机制,在关键节点维持压力稳定。例如,在管网拓扑结构突变或用水负荷剧烈波动的区域,减压阀能够通过先导式压力调节功能,快速补偿因流量变化引发的压力振荡,从而避免瞬态高压对管壁造成的应力冲击。其快速响应特性可有效抑制压力波动,减缓既有漏损发展,并降低爆管风险<sup>[43-45]</sup>。

##### (2) 水泵调度

通过用水预测与水力模型融合,动态调整水泵运行曲线,使管网压力与用水模式匹配。例如,在用水低谷期降低泵组输出功率以减小管网整体压力,在高峰期则通过压力分区策略维持关键区域的最低服务水头。该方法可减少系统背景漏损和降低能耗,但难以解决局部高压问题<sup>[46-48]</sup>。

### (3) 泵阀联合调度

采用分层控制架构:水泵调度设定系统压力基准,减压阀进行局部精细化调节。这种协同机制既提升了系统应对负荷变化的鲁棒性,又通过压力分级控制降低了水力振荡风险。实践表明:该方式能同步实现漏损控制、能耗优化和管网寿命延长<sup>[49-51]</sup>。

泵阀联合优化的核心是构建多目标决策模型,需综合考虑水力可靠性约束(节点水头、流速范围等)、经济性目标(电耗最小化、漏损抑制等),并通过协调离散变量(泵组启停)与连续变量(转速、开度)来寻求帕累托最优解。通过动态调控泵阀状态,系统可实现压力场精细控制,从源头预防和过程抑制 2 个维度有效管理漏损风险。

## 3 城市供水管网漏损检测、定位和控制策略应用

海南省某县城供水系统服务人口为 20.95 万,供水主管网长度约为 200 km,最高日供水量约为 4.6 万 m<sup>3</sup>,水厂出水压力为 5.0~5.5 MPa。早期供水管网建设因缺乏系统规划,布置不合理,叠加部分年限较长,管道锈蚀漏水,2019 年前管网平均漏损

率约为 22.00%。供水管网缺乏流量和压力监测,管网压力数据和水量漏失率难以统计分析,导致漏损无法溯源,因而不能对供水管网进行科学有效的管理。为解决上述问题,开展了供水管网漏损控制技术改造工程,具体措施如下。

(1) 管线探测与数据库建设:开展供水管线探测及检漏工作,依照相关管线测绘规范,建立供水管网空间数据库及地下管线信息数据库。

(2) DMA:结合管网现状进行三级分区计量,其中一级分区 1 个,为整个城区,二级分区 3 个,三级分区 6 个(图 1),实现对管网流量、压力数据全面实时监控,通过对供水管网的流量、压力数据分析,减少和控制管网漏损,科学有效地管理供水管网。

(3) 软硬件联合应用:DMA 平台还集成了管网调度/漏损定位模型及事故工单系统,从而实现漏损实时监控、漏点及时定位、漏管迅速修复的管网漏损全流程管理。

(4) SCADA 系统:建设 SCADA 系统大幅提高管网的动态监管与控制能力,根据需求实时调整送水泵站水泵机组的开停,控制管网水量和水压,控制漏损。

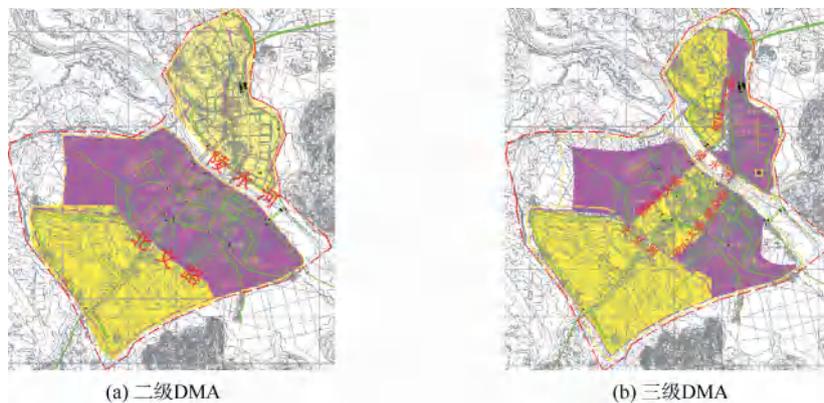


图 1 独立计量分区(DMA)

Fig. 1 District Metered Area(DMA)

改造工程实施后,通过最小夜间流量分析及漏失排序分析,找到了 5 处关键漏点,日供水量下降 500~800 m<sup>3</sup>,改造区域内管网漏损率下降至 10.22%,目前已实现了年均降低漏水量约 153.14 万 t,每年挽回直接经济损失约 300 万元。同时,管网漏损控制技术改造后,通过实时记录每段管网的压力流量(图 2、图 3),管网调度模型智能调控管网压力及流量,爆管事故对道路

基础设施的损毁显著减少,具有显著的间接效益。

## 4 结论及展望

### 4.1 结论

本文提出的融合检测、定位与控制功能的供水管网漏损控制综合策略,依靠 DMA、软硬件协同和主动压力管理,可系统控制管网漏损,减少爆管事故,节能降耗,具有显著的经济和社会效益。

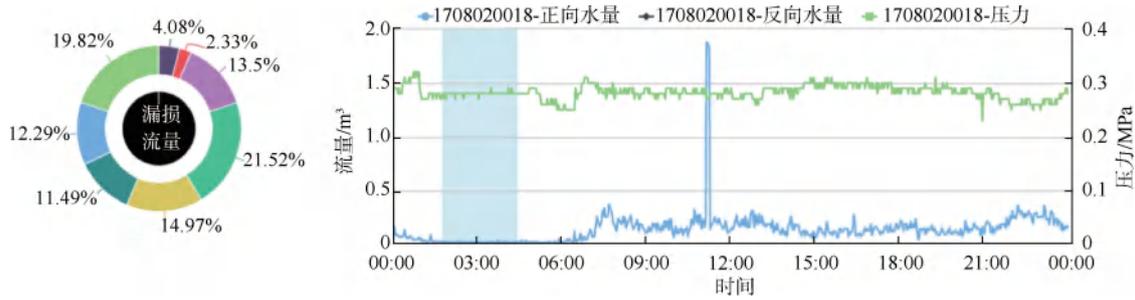


图2 流量压力监控管理记录

Fig. 2 Flow Pressure Monitoring and Management Records

设备编码	最大压力	最小压力	流量	漏损量	用量	漏损率
1708020018	0.32 MPa	0.23 MPa	0 m³	0 m³	0 m³	0%
1708020018	0.33 MPa	0.25 MPa	0 m³	0 m³	0 m³	0%

当前第 1 页 共 1 页 共 2 笔数据

跳转  按钮：首页 上一页 下一页 最后一页

图3 设备监控管理记录

Fig. 3 Equipment Monitoring and Management Records

#### 4.2 展望

近年来漏损控制管理过程中仍存在诸多挑战与瓶颈,例如预期管理不足、多源系统数据难以融合、老旧管网基础数据缺失等。面向未来,漏损管理可朝以下几个方向持续深化发展。

(1)智能诊断与精准控制:通过测绘、水力、声学、振动等多源数据的融合分析,构建管网全要素映射的数字孪生系统,解决基础数据缺失问题,在此基础上结合人工智能方法建立泄漏早期识别与精准定位模型,实现漏损的预期管理。突破复杂工况下多模态感知信息的协同处理机制,通过实时诊断、智能预测和自适应压力调控策略,形成“感知-预测-诊断-调控”的漏损预期管理。

(2)系统化协同管理:建立跨平台的漏损控制集成系统,推动监测设备、水力模型与调度决策的深度融合。发展基于“云-边”协同的分级管控机制,实现中心平台的大数据分析与边缘节点的快速响应相结合。构建基于风险评价的管网维护决策模型,优化漏损防控的资源分配与应急预案。

(3)长效运行机制建设:探索将漏损控制纳入城市公共基础设施韧性管理体系的实施路径,建立与城市安全、节能减排目标协同的政策保障机制。研究基于绩效的漏损管理考核办法与水价激励机

制,推动水务企业采用全生命周期成本核算方法,促进新技术应用与管网更新改造的良性发展。

(4)绿色低碳技术应用:研发基于可再生能源的监测与控制设备,推广微水力发电等能源回收技术在管网系统中的集成应用。发展环境友好型管道修复材料与技术,建立漏损控制措施的碳减排核算体系,实现节水效益与低碳发展的协同增效。

#### 参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2023年城乡建设统计年鉴 [EB/OL]. <https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgknr/sjfb/tjxx/tjgb/index.html>. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Statistical yearbook of urban-rural construction 2023 [EB/OL]. <https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgknr/sjfb/tjxx/tjgb/index.html>.
- [2] Kowalska B, Suchorab P, Kowalski D. Division of district metered areas (DMAs) in a part of water supply network using WaterGEMS (Bentley) software: A case study [J]. Applied Water Science, 2022, 12: 166. DOI: 10.1007/s13201-022-01688-2.
- [3] 申恒峰, 杨昌明. 管道漏损检测技术与智慧供水融合发展探讨研究 [J]. 黑龙江水利科技, 2025, 53(4): 18-22. Shen H F, Yang C M. Discussion and research on integrated development of pipe leakage detection technology and smart water supply [J]. Heilongjiang Hydraulic Science and Technology,

- 2025, 53(4): 18-22.
- [ 4 ] 梁红霞. 给水排水管网漏损控制与优化管理策略研究[J]. 水上安全, 2025(3): 176-178.  
Liang H X. Study on leakage control and optimization management strategy of water supply and drainage network[J]. Maritime Safety, 2025(3): 176-178.
- [ 5 ] 郭天鸣. DMA技术在管网漏损中的应用研究[J]. 建筑与预算, 2024(6): 10-12.  
Guo T M. Research on the application of DMA technology in pipe network leakage [J]. Construction and Budget, 2024(6): 10-12.
- [ 6 ] 史文韬. 优化供水管网DMA分区及协同压力管理调压控漏的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2023.  
Shi W T. Research on optimization of DMA partition and cooperative pressure management for pressure regulation and leakage control in water distribution networks [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2023.
- [ 7 ] 郑龙. 温岭供水管网信息系统的集成与优化[J]. 净水技术, 2015, 34(s1): 162-164.  
Zheng L. Integration and optimization of water supply network information system in Wenling [J]. Water Purification Technology, 2015, 34(s1): 162-164.
- [ 8 ] 赵媛媛. 移动GIS在供水管理中的应用[J]. 城镇供水, 2019(3): 64-66.  
Zhao Y Y. Application of mobile GIS in water supply management [J]. City and Town Water Supply, 2019(3): 64-66.
- [ 9 ] Novak P, Guinot V, Jeffrey A, et al. Hydraulic modelling: An introduction: Principles, methods and applications [M]. London: CRC Press, 2018.
- [ 10 ] 曹茂康, 王伟静, 葛欣. 分区计量在供水漏损控制中的应用[J]. 中国建筑金属结构, 2023, 22(s2): 88-91.  
Cao M K, Wang W J, Ge X. Application of partition metering in water supply leakage control [J]. China Construction Metal Structure, 2023, 22(s2): 88-91.
- [ 11 ] 胡凯, 刘凯伦, 吴国平. DMA分区技术在供水管网漏损率控制中的应用[J]. 云南水力发电, 2020, 36(8): 266-268.  
Hu K, Liu K L, Wu G P. Application of DMA zoning technology in leakage rate control of water supply network [J]. Yunnan Water Power, 2020, 36(8): 266-268.
- [ 12 ] 李雪梅. 供水分区计量建设与运用[J]. 城镇供水, 2025(4): 15-20.  
Li X M. Development and application of DMA for water supply system[J]. City and Town Water Supply, 2025(4): 15-20.
- [ 13 ] 张炜, 钱晓明, 笄跃武, 等. 无锡水务分区计量管理体系[J]. 国企管理, 2022(10): 56-63.  
Zhang W, Qian X M, Da Y W, et al. Wuxi water district measurement management system [J]. China State-Owned Enterprise Management, 2022(10): 56-63.
- [ 14 ] 廖光伟, 许荔娜, 张清, 等. DMA分区在城市供水产销差信息化管理中的应用[J]. 市政技术, 2023, 41(11): 158-164.  
Liao G W, Xu L N, Zhang Q, et al. Application of DMA partition in information management of difference ratio in urban water supply [J]. Journal of Municipal Technology, 2023, 41(11): 158-164.
- [ 15 ] 白金超. 智能水表全寿命期应用管理关键问题研究[J]. 给水排水, 2024, 50(4): 35-38.  
Bai J C. Research on key issues of life-cycle application management of intelligent water meter [J]. Water & Wastewater Engineering, 2024, 50(4): 35-38.
- [ 16 ] 乔磊, 罗勇. 新时期水务管理的四大要素[J]. 城镇供水, 2021(5): 82-84, 55.  
Qiao L, Luo Y. Four elements of water-meter management in the new era[J]. City and Town Water Supply, 2021(5): 82-84, 55.
- [ 17 ] 任慧举, 常成, 孙彬. 浅析基于供水GIS的水表普查和维护[J]. 城镇供水, 2023(5): 23-28.  
Ren H J, Chang C, Sun B. Analysis on survey and maintenance of water meter based on water supply GIS [J]. City and Town Water Supply, 2023(5): 23-28.
- [ 18 ] 何文杰. 基于智能水表多参数数据的智慧管理平台的应用和展望[J]. 智能建筑与智慧城市, 2025(2): 21-23.  
He W J. Application and prospect of intelligent management platform based on multi-parameter data of intelligent water meter [J]. Intelligent Building & Smart City, 2025(2): 21-23.
- [ 19 ] 李美玲. 智慧水务建设效益浅析[J]. 城镇供水, 2022(2): 6-14.  
Li M L. Benefit analysis of smart water utilities[J]. City and Town Water Supply, 2022(2): 6-14.
- [ 20 ] 郭军, 刁黎雅, 沈建鑫. 城市供水智慧管网运维管理平台[J]. 建设科技, 2019(23): 77-79, 83.  
Guo J, Diao L Y, Shen J X. Operation and maintenance management platform of smart urban water supply network[J]. Construction Science and Technology, 2019(23): 77-79, 83.
- [ 21 ] 王俊, 倪宽, 李宁. 基于大数据的城市供水设备预防维护与精细化管理研究[J]. 中国设备工程, 2025(4): 81-83.  
Wang J, Ni K, Li N. Research on preventive maintenance and refined management of urban water supply equipment based on big data [J]. China Plant Engineering, 2025(4): 81-83.
- [ 22 ] 彭秀华, 黄懿华, 陈志伟, 等. 供水企业降低产销差率的精细化管理措施实践[J]. 城镇供水, 2025(1): 40-45, 91.  
Peng X H, Huang Y H, Chen Z W, et al. Practice of fine management measures for reducing non-revenue water ratio in water supply enterprises [J]. City and Town Water Supply, 2025(1): 40-45, 91.
- [ 23 ] 孙怀楠. 给水管网漏损检测及控制技术综述[J]. 供水技术, 2025, 19(3): 16-19.

- Sun H N. Summary of leakage detection and control technology for water supply network [J]. *Water Technology*, 2025, 19(3): 16-19.
- [24] Tafuri A N. Locating leaks with acoustic technology [J]. *American Water Works Association*, 2000, 92(7): 57-66.
- [25] Kumar D, Tu D Z, Zhu N F, et al. The free-swimming device leakage detection in plastic water-filled pipes through tuning the wavelet transform to the underwater acoustic signals[J]. *Water*, 2017, 9(10): 731.
- [26] Charlton M, Mulligan M. Efficient detection of mains water leaks using ground-penetrating radar (GPR) [C]. *San Diego: 3rd International Conference on Subsurface and Surface Sensing Technologies and Applications*, 2001, 4491: 375-386.
- [27] Fahmy M, Moselhi O. Automated detection and location of leaks in water mains using infrared photography [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2010, 24(3): 242-248.
- [28] 王若谱. 浅析给排水管网漏损控制[J]. *清洗世界*, 2024, 40(3): 193-195.  
Wang R P. Analysis of leakage control in water supply and drainage pipeline networks [J]. *Cleaning World*, 2024, 40(3): 193-195.
- [29] 王鹏渊, 刘治学, 郭广丰, 等. 基于 SMOTE-ENN-GWO-SVM 模型的低成本直饮水管道漏损预警[J/OL]. *水利水电技术*, 2025. <https://link.cnki.net/urlid/10.1746.TV.20250605.1249.002>.  
Wang P Y, Liu Z X, Guo G F, et al. Low-cost direct drinking water pipeline leakage warning based on SMOTE-ENN-GWO-SVM model [J/OL]. *Water Conservancy and Hydropower Technology*, 2025. <https://link.cnki.net/urlid/10.1746.TV.20250605.1249.002>.
- [30] 石越, 江竹. 基于改进变分模态分解的供水管道单测点泄漏检测定位方法[J]. *西华大学学报(自然科学版)*, 2024, 43(5): 96-102.  
Shi Y, Jiang Z. Leakage detection and location method of single measuring point of water supply pipeline based on improved variational mode decomposition [J]. *Journal of Xihua University (Natural Science Edition)*, 2024, 43(5): 96-102.
- [31] 单单, 黄明柱, 陈伟, 等. 基于压电传感器的漏损监测系统及特性研究[J]. *仪表技术与传感器*, 2024(10): 57-63.  
Shan D, Huang M Z, Chen W, et al. Research on leakage monitoring system and characteristics based on piezoelectric sensor [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2024(10): 57-63.
- [32] Nimri W, Wang Y, Zhang Z A, et al. Data-driven approaches and model-based methods for detecting and locating leaks in water distribution systems: A literature review[J]. *Neural Computing and Applications*, 2023, 35(16): 11611-11623.
- [33] 吴哈希. 基于时空数据分析的供水管网漏损预警与定位研究[D]. 广州: 广东财经大学, 2024.  
Wu H X. Research on early warning and location of leakage in water supply network based on spatiotemporal data analysis [D]. *Guangzhou: Guangdong University of Finance & Economics*, 2024.
- [34] 周飞. 基于阀门扰动的供水管网漏损检测研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2024.  
Zhou F. Research on leakage detection of water supply network based on valve disturbance [D]. *Wuhan: Wuhan University*, 2024.
- [35] 苏彦博, 吕谋, 褚洋洋. 基于 NSGA-II 的供水管网漏损定位多目标优化模型[J]. *水电能源科学*, 2023, 41(7): 132-136.  
Su Y B, Lü M, Chu Y Y. Multi-objective optimization model for leakage location of water supply network based on NSGA-II [J]. *Water Resources and Power*, 2023, 41(7): 132-136.
- [36] 彭燕莉, 刘俊红, 陶修斌, 等. 基于 PSO-GA 模型的供水管网漏损预测研究[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2025, 41(1): 121-129.  
Peng Y L, Liu J H, Tao X B, et al. Study on leak location prediction in water supply networks using PSO-GA model [J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science Edition)*, 2025, 41(1): 121-129.
- [37] 张颖博. 基于卷积神经网络的供水管网漏损检测与定位研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2024.  
Zhang Y B. Research on leakage detection and location of urban water supply network based on convolutional neural network [D]. *Hohhot: Inner Mongolia University*, 2024.
- [38] 杨彦斌, 郑德仁, 王贺龙, 等. 基于 GA-SVR 的管网异常漏损检测[J]. *水电能源科学*, 2024, 42(3): 133-136, 53.  
Yang H B, Zheng D R, Wang H L, et al. Abnormal leakage detection of pipe network based on GA-SVR [J]. *Water Resources and Power*, 2024, 42(3): 133-136, 53.
- [39] 吴玮, 林广阳, 冉雨晴, 等. 基于混合蛙跳算法的供水管网减压阀优化控制模型研究[J]. *给水排水*, 2023, 49(6): 141-149.  
Wu W, Lin G Y, Ran Y Q, et al. Research on the optimal control model of pressure reducing valve in water supply network based on shuffled frog leaping algorithm [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2023, 49(6): 141-149.
- [40] 汪淋. 基于图神经网络供水管网系统漏损定位方法的研究[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2025.  
Wang L. Research on leak localization method of water supply networks system based on graph neural network [D]. *Hefei: Anhui Jianzhu University*, 2025.
- [41] 曾乙芮. 市政供水管网的漏损检测与定位方法研究[D]. 成都: 西华大学, 2024.  
Zeng Y R. Research on leakage detection and localization methods for municipal water supply pipeline networks [D]. *Chengdu: Xihua University*, 2024.

(下转第 59 页)

- [24] Ejbouh A, Ech-Chebab A, Hassi S, et al. Durability assessment of LC3-based reinforced concrete under combined chloride-sulfate environment via the EIS technique [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 366: 130194. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.130194.
- [25] Guo H, Wang R, Jiang M H, et al. Cement-mortar lining failure and metal release caused by electrochemical corrosion of ductile iron pipes in drinking water distribution systems[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2025, 152: 488–502. DOI: 10.1016/j.jes.2024.06.003.
- [26] 贾子晔. 过一硫酸盐作用下管道腐蚀产物中铜离子的释放规律及机制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.  
Jia Z Y. Study on the release characteristics and mechanism of copper ions from pipe corrosion products in presence of persulfate [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2023.
- [27] Sun M Q, Yang J, Wang Z B, et al. Effect of coexistence of sulfate reducing bacteria and nitrate reducing bacteria on the under-deposit corrosion of carbon steel[J]. *Corrosion Science*, 2024, 231: 111958. DOI: 10.1016/j.corsci.2024.111958.
- [28] Zhang H Y, Liu D B, Zhao L T, et al. Review on corrosion and corrosion scale formation upon unlined cast iron pipes in drinking water distribution systems [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2022, 117: 173–189. DOI: 10.1016/j.jes.2022.04.024.
- [29] Liu Q Z, Zhuang Y, Zhang Y, et al. Stability of cement mortar lining in drinking water supply pipelines under different hardness and alkalinity conditions[J]. *ACS ES&T Water*, 2022, 2(12): 2519–2527.
- [30] 胡艳华, 酆和生.  $\text{Ca}^{2+}$  浓度和碱度对循环水结垢和腐蚀的影响[J]. *石化技术*, 2012, 19(2): 9–11.  
Hu Y H, Li H S. The scaling and corrosion in circulated water influenced from alkalinity and concentration of  $\text{Ca}^{2+}$  [J]. *Petrochemical Technology*, 2012, 19(2): 9–11.
- [31] Bui H T, Maekawa K, Tan K H. Electrochemical corrosion kinetics of steel bars in pseudo-transparent concrete under different alkaline properties and chloride contamination levels [J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 421: 135636. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.135636.
- [32] Yang S M, Li M, Liu T D, et al. Protective mechanism of carbon dioxide in pipelines for water containing typical corrosive anions[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2024, 188: 654–663. DOI: 10.1016/j.psep.2024.05.121.

(上接第 11 页)

- [42] 文思齐. 基于数据驱动的供水管网独立计量分区快速漏失识别方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.  
Wen S Q. Research on rapid leakage identification method for independent metering zoning of water supply network based on data-driven [D]. Chongqing: Chongqing University, 2022.
- [43] Creaco E, Pezzinga G. Embedding linear programming in multi objective genetical algorithms for reducing the size of the search space with application to leakage minimization in water distribution networks[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2015, 69, 308–318. DOI: 10.1016/j.envsoft.2014.10.013.
- [44] De Paola F, Galdiero E, Giugni M. A jazz-based approach for optimal setting of pressure reducing valves in water distribution networks[J]. *Engineering Optimization*, 2016, 48(5): 727–739.
- [45] Gupta A D, Bokde N, Marathe D, et al. Optimization techniques for leakage management in urban water distribution networks[J]. *Water Supply*, 2017, 17(6): 1638–1652.
- [46] 贺兴伟, 刘涛. 水泵供水机组的精准节能变频调度方法[J]. *城镇供水*, 2023(6): 34–38, 33.  
He X W, Liu T. Precise energy-saving frequency scheduling method for pumping unit water supply[J]. *City and Town Water Supply*, 2023(6): 34–38, 33.
- [47] 胡诗苑, 高金良, 钟丹, 等. 供水管网实时优化调度深度自注意力强化学习框架[J]. *给水排水*, 2023, 49(7): 135–139.  
Hu S Y, Gao J L, Zhong D, et al. Deep self-attention reinforcement learning framework for real-time optimal scheduling of water distribution network [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2023, 49(7): 135–139.
- [48] 路梦瑶, 刘小莲, 田雨, 等. 水泵加压与有压重力混合输水系统泵阀联合优化调度研究[J]. *中国农村水利水电*, 2022(9): 1–5.  
Lu M Y, Liu X L, Tian Y, et al. Research on the joint optimal operation of the pump valve in pump pressurized and pressurized gravity mixed water conveyance system [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2022(9): 1–5.
- [49] Shafiee M E, Berglund A, Berglund E Z, et al. Parallel evolutionary algorithm for designing water distribution networks to minimize background leakage [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2016, 142(5): 7.
- [50] Gupta A D, Kulat K. Leakage reduction in water distribution system using efficient pressure management techniques. Case study: Nagpur, India[J]. *Water Supply*, 2018, 18(6): 2015–2027.
- [51] Monsef H, Naghashzadegan M, Farmani R, et al. Pressure management in water distribution systems in order to reduce energy consumption and background leakage [J]. *Journal of Water Supply: Research and Technology*, 2018, 67(4): 397–403.