

廖文豪, 林丹贝, 郭小彬, 等. 城市智慧供水管网全生命周期管理平台研究进展[J]. 净水技术, 2025, 44(12): 31-38.

LIAO W H, LIN D B, GUO X B, et al. Research progress on full life cycle management platform for urban smart water supply networks[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(12): 31-38.

城市智慧供水管网全生命周期管理平台研究进展

廖文豪¹, 林丹贝¹, 郭小彬¹, 许俊鸽^{2,*}

(1. 龙岩水发自来水有限责任公司, 福建龙岩 364000; 2. 福州大学土木工程学院, 福建福州 350108)

摘 要 【目的】随着城市智慧化进程的推进,供水管网逐渐融合现代技术进行漏损治理,但由于现代技术间缺少交互平台,其产生的多源数据无法交联,从而产生“系统孤岛”问题,阻滞供水管网漏损治理步伐。鉴于智慧供水管网的当前困境,亟需建设统一管理平台,提高供水管网管理水平。【方法】本文围绕智慧供水管网进展,分析现代技术在供水管网运用中的特点与不足,针对管网管理水平瓶颈和技术间缺乏交互的问题,重点阐述城市供水管网全生命周期管理平台的建设方法,发掘海量数据的作用。【结果】通过综合对比分析,供水管网全生命周期管理平台建立的管道全生命周期数据标准和数据库,能够充分挖掘平台管理过程中产生的海量数据信息,运用分区计量和模糊数学等方法,化被动为主动,实现应急决策、大数据分析决策、管网状态实时监测和可视化管理等。基于地理信息系统(GIS)和建筑信息建模(BIM)等技术实现供水管网全周期信息交互,依托智慧平台,华东地区某市水务公司已节约水量超 2.85 亿 t,节约成本为 1.43 亿元。【结论】建设供水管网全生命周期管理平台,能够实现现代技术之间有机融合,对管网规划、设计、施工、运维和拆除的全过程进行统一管理,为智慧供水管网提供科学指导。

关键词 智慧供水管网 全生命周期 一体化平台 管网漏损 大数据

中图分类号: TU991 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)12-0031-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.12.004

Research Progress on Full Life Cycle Management Platform for Urban Smart Water Supply Networks

LIAO Wenhao¹, LIN Danbei¹, GUO Xiaobin¹, XU Junge^{2,*}

(1. Longyan Water Development Tap Water Co., Ltd., Longyan 364000, China;

2. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract [Objective] With the advancement of urban smart, water supply networks are gradually integrating modern technologies for leakage control. However, due to the lack of an interaction platform among modern technologies, the multi-source data they generate cannot be cross-linked, thus causing the "system island" problem and hindering the pace of leakage control in water supply networks. In view of the current predicament of the intelligent water supply network, it is urgent to build a unified management platform to improve the management level of the water supply network. [Methods] This paper focuses on the progress of intelligent water supply networks, analyzes the characteristics and shortcomings of modern technologies in the application of water supply networks, and addresses the bottlenecks in network management levels and the lack of interaction among technologies. It emphasizes the construction method of a full life cycle management platform for urban water supply networks and explores the role of massive data. [Result] Through comprehensive comparative analysis, the data standards and database for the entire life cycle of pipelines established by the water supply network's full life cycle management platform can fully tap into the massive data information generated during the platform's management process. By applying method such as district metering and fuzzy mathematics, it can turn the passive into the active, achieving emergency decision-making, big data analysis decision-making, real-time monitoring of pipeline network status, and visual management, etc. Based on technologies such as geographic information system (GIS) and building information modeling

[收稿日期] 2025-06-05

[作者简介] 廖文豪(1985—),研究方向为供水设施建设、运行与管理,E-mail:472086606@qq.com。

[通信作者] 许俊鸽(1977—),副教授,研究方向为供水安全保障理论与技术,E-mail:xujunge@163.com。

(BIM), the full-cycle information interaction of the water supply network is realized. Relying on the smart platform, a water enterprise in a certain city in east China had saved over 285 million tons of water and 143 million yuan in costs. [**Conclusion**] Constructing of a full life cycle management platform for water supply networks can organically integrate modern technologies, uniformly manage the entire process of network planning, design, construction, operation and maintenance, and dismantling, and provide scientific guidance for the intelligent water supply network.

Keywords smart water supply networks full life cycle integrated platform pipelines loss and leakage big data

城市供水管网是人们生产和生活基础设施之一,用来保障各用水单位对水质、水量和水压等需求。传统的城市供水管网管理方式是被动和消极地管理,加之供水管道老化、管道腐蚀堵塞、水压分布不均和检修效率低等因素加持,致使供水管网漏损率居高不下。2019年—2022年,我国每年漏失水量约为80亿 m^3 ,相当于2个太湖的蓄水量^[1-3]。北京、上海和厦门等各地水司寻求降低管网漏损率的有效途径,纷纷采用智能水表、独立分区计量(DMA)技术、物联网和云平台等智慧化技术,对城市供水管网的各环节进行更新、改进^[4]。经过多年改造治理,全国平均漏损率虽然呈下降趋势,但城市之间存在不平衡现象^[5],如2023年兰州市供水管网漏损率为3.56%,河沙市供水管网漏损率为4.28%,达到较好的控制水平;牡丹江市供水管网漏损率为35.25%,胡杨河市供水管网漏损率为44.24%,漏损治理工作压力大。面对供水管网漏损的行业顽疾,水务从业者亟需破解技术瓶颈,积极抓住数字化机遇,推动水务系统智能化升级。城市供水管网全生命周期是管网从规划设计、材料购买、施工建设、运行维护直至拆除的全过程记录与管控,打通原本隔断的上下游,连接成有机的整体,为降低漏损率提出行之有效的新思路、新方案^[6-7]。利用智能化技术将各环节连接时,产生了海量的数据资料,包括管道材质、管径、管长、埋深、水压、水质和检修记录等信息。此类信息并非单纯是平台中的字符,应将其整合分析,挖掘其中蕴含的价值,发挥智慧水务优势,全方位服务于供水管网漏损治理,实现供水管网的全生命周期管控。

1 智慧供水管网发展概况

1.1 智慧供水管网研究进展

智慧供水管网的发展大致划分起步、探索、高速发展和持续深化的4个阶段,如表1所示。20世纪80年代,城市供水管网致力于用水普及,兴建水厂和敷设供水管道,满足城市居民用水量的需求。此

时,部分地区开始采用自动化仪表监测水位和流量,标志着供水管网开始进入智慧化起步阶段^[8]。进入21世纪后,供水管网历经20多年建设,各地水司面临海量的水表数据和复杂的管道问题,纯人工的运行管理方式已捉襟见肘。而飞速发展的信息技术,为解决此类问题提供坚实的技术支持。美国部分城市利用数据采集与监视控制(SCADA)系统监测水源水水质;悉尼水务利用智慧水表进行计量,逐步解放人工抄表^[9];厦门市政水务从2004年着手实行信息化策略,引入SCADA和地理信息系统(GIS)对水表数据和管道位置信息等方面开始进行信息化探索^[10]。信息化方式用于供水管网建设、发展和运营中,但各环节相对独立、发展水平不一、存在信息壁垒。目前,城市供水管道的智慧化尚处于探索阶段。“大智移云”(大数据、智慧化、移动互联网和云平台)是4种现代化技术的简称,深圳^[11]、湖南^[12]和迪拜^[13]等地将“大智移云”与供水管网建设、运营、维护等有机融合。同时,DMA和综合管理平台的快速发展,加速城市供水管网智慧建设,标志着智慧城市供水管网的高速发展阶段。自2020年起,供水管网的智慧化进程保持迅速发展势头,物联网、数字孪生、人工智能和模型分析等为供水管网行业注入新活力^[14],推动主动、中长期的智慧管理,今后较长期的一段时间内将处于持续深化阶段。

表1 城市智慧供水管网发展历程

Tab. 1 Development Process of Urban Smart Water Supply Networks

阶段名称	时间	特征
起步阶段	20世纪80年代—90年代	引入流量、水位监测仪器
探索阶段	2000年—2010年	信息技术发展
高速发展阶段	2010年—2020年	“大智移云”技术运用
持续深化阶段	2020年至今	数字孪生、人工智能发展

1.2 智慧供水管网的特点及建设难点

智能技术推陈出新,为城市供水管网提供更多适配的技术支持,极大改善了劳动力大、操作复杂和被动检修等现状。王飞等^[15]融合传感器和大数据

分析技术,将传感器应用于上海市供水管网,实时监测用水数据,收集基础资料,进行智能化处理,指导管网治理工作。龚珑聪等^[16]为解决福州市世纪蓝景城小区高达 50% 的产销差问题,建立 DMA 进行漏损定位和设置漏损预警值,对供水管道水量、水压及加压泵运行情况进行实时监测,确保第一时间发现漏损点。蓝贵文等^[17]参考建筑信息模型(BIM)规范建立多个模型族,将输配水管网和调节构筑物等信息输入 BIM 加载至 SuperMap 软件中,不仅能提高供水管网的可视性,还能根据不同使用场景选择管网精细度,实现高效治理。然而,供水管网智慧化进程仍存在不少问题,其特点与难点如图 1 所示。首先,存在大量终端缺乏数据传输能力,需花费大量人力、物力建设;但现阶段采用互联网的连接方式,数据传输速度慢、准确性低;其次,供水管网在规划、设计、施工等过程会采用 BIM、GIS 等技术手段,其输出数据兼容性差、交互性低、转换难,建立的平台仅能分析本环节数据,上下游工程产生的数据无对应处理模块;最后,不同供水管网部门通常采用独立的管理系统,分工明确但缺乏协调性,加之各独立系统更新换代、智能化应用水平不高以及各平台建设交联阻塞等问题,导致各模块形成“系统孤岛”,阻碍智能技术在城市供水管网发挥作用^[18]。基于以上问题,如何让智慧技术在供水管网中发挥更大的作用,水务工作者亟需协同创新。此时,全生命周期管理平台引起水务工作者的热切关注,日益发挥其独特的优势。

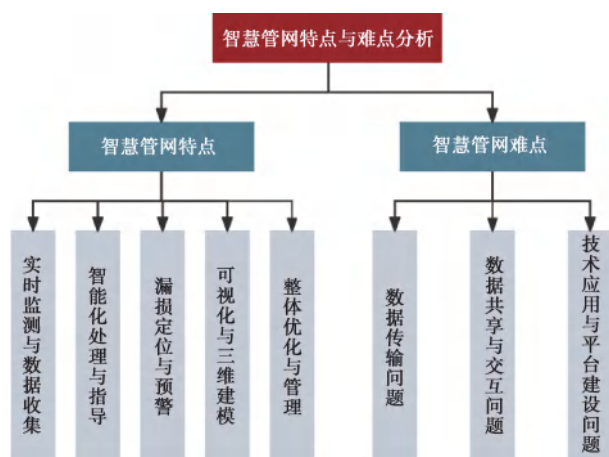


图 1 智慧管网特点与难点分析

Fig. 1 Analysis of Characteristics and Difficulties of Smart Pipeline Networks

2 智能管网解决方案

城市供水管网全生命周期管理是在智能化技术支持下,对供水管道从规划设计、建设施工、运行维护直至报废拆除的全过程管理监测^[19],实现合理有效地管理城市供水管网。大数据、监测系统和模型分析等智慧手段用于管网的全生命周期管理,为平台记录从规划至拆除的各类数据,从而构建一个有机整体(图 2),实现降低管网漏损率、提升管道使用寿命和节约全过程资金投入^[20]。城市供水管网全生命周期管理并非一蹴而就,需要在实践中不断完善。



图 2 城市供水管网全生命周期管理

Fig. 2 Full Life Cycle Management of Urban Water Supply Networks

2.1 建立管道全生命周期数据融合通道

城市供水管网的基础数据在全生命周期管理中至关重要,以往常忽视管道信息的记录与更新,导致检修时困难重重,甚至无法确定管道的具体位置。采用智能水表或监测传感器记录的数据与管道维修的信息难以深入交联分析,大数据因互相独立存在而造成缺乏信息间的对比协助。因此,为克服信息间的阻隔,则需形成统一的管道全生命周期数据管理平台,建立数据融合通道。利用 SCADA 系统、智能远传水表和传感器等数据采集和传输技术,收集管道从规划至报废全过程的“管内-管道-管外”数据,并对全周期数据综合分析和运用^[14]。张鑫等^[21]发现,供水管网数据种类繁多,如 txt、dwg、xls 和 shp 等格式,加之部分管网位置信息的数据采用

不同的坐标系和高程基准,难以形成统一数据进行分析;则以石家庄供水数据为研究对象,通过数据转换软件开发,将管道数据转换为统一 mdb 格式,并进行数据一致性检查,实现供水管网多源数据融合。

2.2 构建管道全生命周期数据库

海量数据是实现供水管道全生命周期管理的基础条件,数据的存储关乎其能否发挥作用。Adedeji 等^[22]认为,在城市供水系统领域的工业革命 4.0 (Water 4.0)需要融入新兴技术,在不同阶段中利用传感器得到的海量管网数据需要充分挖掘,形成全生命周期的数据库,以便将数据导入 BIM 等软件中构建水力建模,满足复杂供水系统的多元化需求。

除 BIM 技术外,供水管道全生命周期的数据库还可依托 SCADA 技术、GIS 技术和智慧水务云平台等,实现海量数据的存储,进行实时更新替换,便于按需调用,消除各数据间无法交联的问题^[23]。

2.3 搭建基于 GIS 的全生命周期智能管网平台

城市供水管网全生命周期管理需依托一个功能齐全、运行通畅和专业性高的平台,全新的智慧水务平台构建难度大,需要长时间探索和重构才能符合全生命周期管理要求。因此,基于技术成熟的 GIS 技术构建管理平台,能够减少技术难度和经济成本。汤宁^[24]将传感器、大数据和物联网等技术融入 GIS 中,建成一个“全面感知、设备联网、数字集成、智能预报”的供水管网全生命周期智能管网平台。该平台具备以下优点:(1)能够利用基础信息和 GIS 功能,辅助完成用水量预测和管网设计;(2)将大量管道资料和资产信息数据化,减少纸质材料,实现供水管网和资产的数字化管理;(3)以管道数据为基础,结合夜间最小流量数值对管网进行实时监测,快速发现漏损点,及时治理漏损点,减少水资源浪费。

2.4 管道全生命周期施工管理

传统的管道施工过程中涉及的管道埋设深度、坡度和管径等数据仅停留在文档之中,甚至有时发生文档丢失的情况。因此,为直观了解施工进度、有效保留施工资料,可采用城市供水管网全生命周期管理平台,促进施工组织的高效管理。在平台中引入 BIM 或 GIS 技术,将施工现场从纸质二维模型构建出空间三维模型,加入施工组织设计后,扩展为四维模型,能及时发现施工顺序中不合理的地方,缩短施工时间。同时,施工过程的各种数据能够实时嵌入平台之中,实现数据有效录入,便于后续管网平台

的数字化移交。不仅如此,还可在各个节点设置监控视频,随时调取所需现场实况,达到实时监测施工建设进程的效用^[25-26]。Wang 等^[27]开发一套基于无线传输网络和物联网技术的施工监测与预警系统,该系统能够实时监控埋地供水管网的运行状态、服务环境及结构完整性,分析回填土条件、日常运营和第三方施工活动对供水管道结构行为和应力状态的影响机制,有效保障施工过程中的安全性,大量施工数据可用作后续管网模型的建立。

2.5 管道运维管理

管道建设完毕后,进入长期的运维管理,常出现偷水、管道破损和水质问题等。如何利用智能化技术,在供水管网全生命周期管理平台的帮助下稳定、持续地运作,是技术人员需要不断探索的方向之一。周华等^[28]通过管径、管材和管长等多项评价指标,结合管道基础资料和极限梯度提升算法(XGBoost),建立城市供水管网管道结构稳定性风险评估模型,该算法通过迭代集成决策树弱学习器,有效捕捉多特征间复杂的非线性关联,具有运算速度快、结果泛用性好、对缺失数据不敏感等优点,需要注意的是模型效果依赖于特征完备性。研究以 H 市为风险评估对象进行模型验证,结果表明:健康监测模型的准确率可达 86.0%,模型能够筛选出重点管段,及时发现可能存在的事故,提高安全性。刘翔翔^[29]以天津某市供水管网的余氯数据为参考,结合粒子群算法,构建管网余氯模型,在线实时监测供水管网中的余氯量和综合评估安全性,帮助企业及时做出合理决策。在供水管网全生命周期管理平台中引入适宜的现代技术,不断提高管网运维的科学性和可靠性,从而创造更智慧的供水管网平台。

2.6 典型案例介绍

华东地区某市水务供水管网依托 GIS 综合服务平台、大数据中心和水力模型等现代技术,实现对 9 座水厂和若干个节点进行信息数据分钟级采集,曾入选住房和城乡建设部智慧水务案例。该平台将管网数据从各类表格、图纸中提取并转化,形成统一数据库,不断更新迭代;利用感知层采集的实时数据进行分析,及时发现管网中的异常用水,同时根据仿真模拟功能,科学用水调度,从多维度对供水管网问题进行治理。经过多年运营维护,管网漏损率降低了约 15%,节约水量超过 2.85 亿 t,节约成本为 1.43 亿元,降低供水能耗与管网维护近 3 000 万元。智慧

平台不仅带来显著的经济效益,还提高居民的用水品质,如管网浑浊度均值下降约为 23%,出厂水合格率、水质综合合格率均远高于国家标准。

3 管道数据挖掘与决策支持

全生命周期管理平台的不断完善过程中会产生海量数据,这些数据不仅是管道的基础信息,而且能与模型和算法相结合,可在应急决策、漏损治理和运行维护等方面发挥更大作用。

3.1 应急决策支持

城市供水与居民生活息息相关,当供水系统发生紧急事件时,若利用智慧平台的相关功能,能及时做出应对措施。Kowalski 等^[30]以智慧平台为主体,利用传感器集成监控指挥大屏,实时显示片区供水管网水量和水压数据,当爆管等造成管道数值急剧变化时,能够快速定位到问题点,帮助管理人员及时做出决策。刘军等^[31]在水源水、自来水厂、管网和二次加压泵站加装水质传感器,当水质发生严重问题时,能够快速筛选出问题区域,及时关闭区域内阀门,避免发生危害,提高应急决策的科学性和合理性。

3.2 大数据决策支持

供水管网建设和运行维护均需根据实际情况作出判断和选择,个人无法充分地综合考虑众多因素,导致最终决策难以达到最优。利用平台自身智能技术获取的信息,结合大数据处理方法,利于工作人员进行决策。袁伟等^[32]利用 GIS 技术将城市水源信息映射到平台中,获取该地区的河流位置、走向资料,根据应急水源的要求,采用层次分析法和模糊数学模型确定出 3 个备选方案,辅助完成应急水源的选择。陈炯禧等^[33]为克服人工识别管道漏损效率低的问题,利用噪声记录仪和水音传感器收集漏损特征信号声,进行数据处理与分析,如图 3 所示。首先,采用梅尔频率倒谱系数(MFCC)进行特征提取,MFCC 模拟人耳听觉特性,能够有效捕捉管道漏损声在中低频段的关键谱特征;接着应用卷积神经网络(CNN)模型,该模型擅长学习图像和类图像信号中的空间模式;研究中 CNN 输入由 MFCC 及其一阶、二阶差分构成的特征图谱,学习声学信号与漏损状态之间的复杂非线性关系,利用华南某探漏实操基地供水管网漏损声信号,实现通过信号特征分析及时发现城市供水管网的漏损点的目的。虽然该模

型准确性高度依赖训练数据质量,但其相比传统人工检巡方法,漏损检测效率和覆盖范围得到显著提升。王兴等^[34]以北方城市 CY 区的管网现状数据为基础,将大量管网数据导入灰狼优化算法中,对管网泵阀进行辅助决策,优化后管网漏失率降低 7.39%、平均压力下降 0.121 MPa。

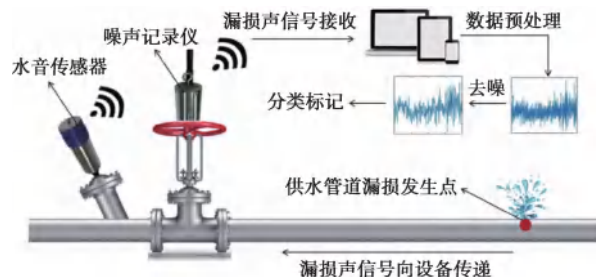


图 3 漏损特征信号收集与处理^[33]

Fig. 3 Characteristic Leakage Signal Collection and Processing^[33]

3.3 管道泄漏和爆管实时监测

智能水表传输的大量用水数据能够反映出该区域供水管网的漏失水平,通过长期数据积累可确定一个警戒数值,实现管道漏损和爆管实时监测。陈彬等^[35]为解决暗漏被动治理现状,在治理示范区设立 DMA,采用低功耗广域网络(LPWAN)网络收集供水管网的水流和水压数据,并建立云平台为“大脑”,如图 4 所示。利用统计学方法剔除不合理的数据,得到夜间最小流量和水压界限值,快速确定可能漏损区域。彭森等^[36]基于全连接稠密网络和深度学习算法,在华北某园区根据管网的基础数据,结合该地区爆管的相关特征,建立供水管网爆管监测模型,结果表明,在预测可能爆管的第一、二区域发生爆管。

3.4 供水管网可视化管理

城市供水管网位于地面之下,给管网运维带来巨大的挑战。若能清晰地展示管道实际情况,有助于实现管道全生命周期管理。徐立仁^[37]以上海临港大道的供水项目为研究对象,采集规划设计与施工过程中的管道数据,采用传感器与数字交互技术,将管道与周围环境形成一张清晰、可靠的位置与状态图,实现供水管网的可视化管理。

3.5 网络模块与移动应用开发

基于智能化技术的城市供水管网全生命周期管理平台的海量数据,随着科技发展,平台功能同样需要向外延展,这样便于使用。李裕等^[38]在智慧平台

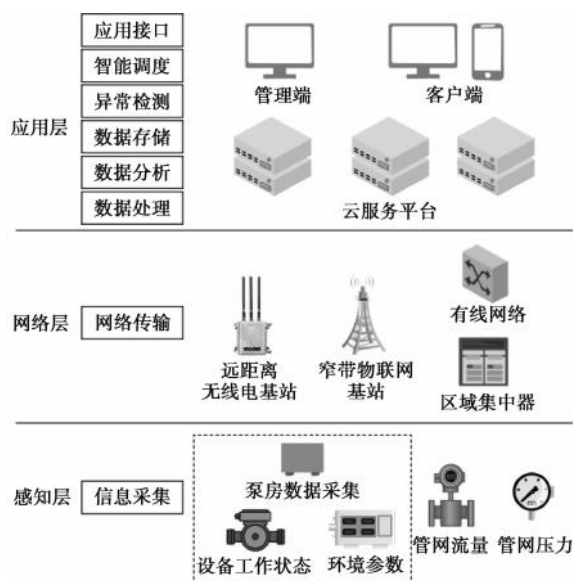


图4 供水管网物联网体系架构^[35]

Fig. 4 Internet of Things Architecture of Water Supply Network^[35]

中嵌入计费缴费模块,居民可以通过营业厅或微信公众号进行水费缴纳,还能查看历史用水数据。朱夫静等^[39]基于GIS系统开发能够从水源水质监测到管网运行维护的移动应用服务,可通过移动应用完成一系列数据采集和信息记录,打破固定工作地点操作的局限。

4 总结与展望

(1)现代技术自20世纪80年代起用于城市供水管网,如SCADA、GIS、BIM、传感器、大数据和云平台等,共同推动管网的智能化、数字化和自动化发展。但各技术标准不统一、“信息孤岛”和“系统孤岛”问题,阻碍了智慧管网化进程。因此,为进一步提升管网漏损控制和管理水平,需建立统一管理的智慧平台,贯穿管网从规划设计到报废全过程。

(2)城市供水管网全生命周期管理平台能够融合智慧技术与治理方案,实现统一运维管理。平台以GIS和BIM等技术为基础,建立从管网规划设计到拆除的统一运行管理平台,将各阶段数据录入储存,建立数据标准和数据库,解决数据交联问题,实现全生命周期管理。挖掘管道海量数据信息,运用模糊数学、DMA和可视化管理等理念,建立管网数据模型,科学指导管网治理,保障供水安全。

(3)平台建设能有效提升供水管网全生命周期的管理水平:信息收集端减轻工人劳动力,收集海量

基础信息;数据融通将不同格式信息转化为统一识别数据,克服不同系统间的交互阻碍,提高管网治理效率;实时监测端时效性高,及时发现问题,避免持续性影响;基于海量数据建立分析模型,预测可能发生的漏损或灾害,减少经济损失和保障供水安全。

(4)当前,城市供水管网全生命周期管理仍处于发展阶段,现有管理机制不完善,制约着平台进一步建设和优化,未来需科技应用和工程实践中积极探索创新,如融合人工智能与大数据预测管网漏损,借助物联网与神经网络实时监测管网安全,通过能耗优化算法实现助力智慧供水碳中和目标。现代智慧技术为供水管网管理注入新动能,必须建立与管网建设相匹配的技术和管理机制,从而系统提升城市供水管网的全生命周期管理水平,全面增强供水系统的安全性与智能化程度。

参考文献

- [1] CAI B M, WANG F, ZHANG W, et al. Potential water and energy savings for reducing urban water supply loss in China[J]. ACS ES&T Water, 2022, 2(4): 539-546.
- [2] XI F, LIU L Y, SHAN L Y, et al. Pipeline leak identification and prediction of urban water supply network system with deep learning artificial neural network[J]. Water, 2024, 16(20): 1-12.
- [3] 张剑惠, 车通, 朱杰, 等. 漏损检测技术在智慧供水系统中的应用[J]. 净水技术, 2023, 42(12): 35-43.
ZHANG J H, CHE T, ZHU J, et al. Application of leakage detection technology in smart water supply system[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(12): 35-43.
- [4] 施亮. 上海重大原水单线管渠安全保障技术[J]. 净水技术, 2024, 43(s1): 89-96.
SHI L. Safety guarantee technology for Shanghai's major raw water single line canal[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(s1): 89-96.
- [5] 宋文轲, 王杉月, 陶涛. 一种基于虚拟压力分区的供水管网漏损区域识别方法[J]. 环境工程, 2023, 41(7): 184-191.
SONG W K, WANG S Y, TAO T. A leakage zone identification method for water distribution networks based on virtual pressure partition[J]. Environmental Engineering, 2023, 41(7): 184-191.
- [6] CHU J, ZHOU Z, DING X, et al. A life cycle oriented multi-objective optimal maintenance of water distribution: Model and application[J]. Water Resources Management, 2022, 36(11): 4161-4182.
- [7] 郑镔, 陈锐, 孙恕, 等. 全生命周期成本在长距离输水管材比选中的应用[J]. 给水排水, 2024, 50(s1): 788-795, 801.

- ZHENG B, CHEN R, SUN S, et al. The application of life cycle cost for the optimization of pipe materials of water supply system [J]. 给水排水, 2024, 50(s1): 788-795, 801.
- [8] 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.
- [9] MARAR R W, MARAR H W. A reliable algorithm for efficient water delivery and smart metering in water-scarce regions[J]. Asian Journal of Water Environment and Pollution, 2024, 21(1): 1-9.
- [10] KAMAL N, ALI M S. Improving the operational efficiency of water desalination systems through the integration of GIS-SCADA [J]. Urban Water Journal, 2024, 21(1): 131-142.
- [11] 林峰, 李旭, 曾翰, 等. 某大型城市智能供水调度优化算法研究与模拟实践[J]. 中国给水排水, 2023, 39(9): 109-115.
- LIN F, LI X, ZENG H, et al. Optimized algorithm of intelligent water supply scheduling and its simulation practice in a large city [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(9): 109-115.
- [12] 袁卓昇, 李勇刚. 基于集成 LSTM 的泵站供水流量智能预测方法[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2023, 38(1): 68-75.
- YUAN Z Y, LI Y G. Intelligent prediction method of water supply flow in pump station based on integrated LSTM [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2023, 38(1): 68-75.
- [13] SIMION I M, PENNELLINI S, AWERE E, et al. Enhancing sustainability in italian water supply pipes through life cycle analysis[J]. Sustainability, 2024, 16(7): 2685-2699.
- [14] 褚俊英, 王浩, 邵煜, 等. 供水管网优化维护的理论与技术框架分析[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 67-72.
- CHU J Y, WANG H, SHAO Y, et al. Analysis on theory and technical framework of optimal maintenance of water supply network[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 67-72.
- [15] 王飞, 胡智翔, 胡群芳, 等. 城市供水管网运行安全监测技术及应用[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2023, 51(2): 197-205.
- WANG F, HU Z X, HU Q F, et al. Operation safety monitoring technology and its application in urban water supply network[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2023, 51(2): 197-205.
- [16] 龚珑聪, 卓雄, 许俊鸽. 基于 NB-IoT 和 DMA 技术相结合的小区漏损控制分析[J]. 中国给水排水, 2021, 37(13): 40-46.
- GONG L C, ZHUO X, XU J G. Analysis of leakage management in community based on combination of NB-IoT and DMA technology[J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(13): 40-46.
- [17] 蓝贵文, 莫栩琪, 郭亚峰, 等. 基于 BIM LOD 规范的给排水管网室内外一体化建模[J]. 桂林理工大学学报, 2025, 45(1): 75-81.
- LAN G W, MO X Q, GUO Y F, et al. Integrated modeling of indoor and outdoor water supply and drainage pipeline network based on BIM LOD specification[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2025, 45(1): 75-81.
- [18] 蒲政衡, 赵平伟, 冯偲懋, 等. 基于深度学习的供水管网实时智能调度研究[J]. 给水排水, 2022, 48(11): 166-172.
- PU Z H, ZHAO P W, FENG S M, et al. Intelligent real-time scheduling of water distribution system based on deep learning [J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(11): 166-172.
- [19] EVANGELISTA L A, MEIRELLES G, BRENTAN B. Computational model of water distribution network life cycle deterioration[J]. Sustainability, 2023, 15(19): 98-112.
- [20] 褚俊英, 周祖昊, 田子阳, 等. 供水管网维护技术的体系架构与递进式选择模式分析[J]. 给水排水, 2021, 47(8): 138-144.
- CHU J Y, ZHOU Z H, TIAN Z Y, et al. Analysis of system framework and progressive selection mode of water supply network maintenance technology[J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(8): 138-144.
- [21] 张鑫, 陈勇, 胡本刚, 等. 供水管网多源数据融合探讨[J]. 测绘与空间地理信息, 2022, 45(3): 101-104.
- ZHANG X, CHEN Y, HU B G, et al. Discussion on the multiple data fusion of water supply pipeline network [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2022, 45(3): 101-104.
- [22] ADEDEJI K B, PONNLE A A, ABU-MAHFOUZ A M, et al. Towards digitalization of water supply systems for sustainable smart city development-water 4.0 [J]. Applied Sciences-Basel, 2022, 12(18): 1-25.
- [23] THABANE H S, HAMAM Y, JACO A J, et al. Model-based approach for leak detection and localization in water distribution networks; A literature survey [J]. International Journal of Engineering Research in Africa, 2023, 67: 159-188. DOI: 10.4028/p-r2lbNg.
- [24] 汤宇. 供水管网漏损检测系统研究[D]. 廊坊: 北华航天工业学院, 2023.
- TANG Y. Research on leakage detection system of water supply pipe network[D]. Langfang: North China Institute of Aerospace Engineering, 2023.
- [25] 倪世海, 饶金刚, 许志, 等. 城市供水时空数据的异常模式可视分析方法研究[J]. 给水排水, 2024, 50(3): 25-31.
- NI S H, RAO J G, XU Z, et al. Research on visual analysis method for anomaly patterns of urban water supply temporal-

- spatial data [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2024, 50 (3): 25-31.
- [26] WEN X B, WANG Z H. Engineering application of BIM in saving water and energy conservation[J]. *3C EMPRESA*, 2023, 12(1): 133-163.
- [27] WANG F, NIE S, HU Q F, et al. Monitoring and early warning system for buried water supply networks and its applications[J]. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 2025, 36(2): 152-163.
- [28] 周华, 姜石磊, 周琮辉, 等. 针对大型城市供水管网健康评估及修复指数模型的探索[J]. *给水排水*, 2021, 47(s2): 491-494.
- ZHOU H, JIANG S L, ZHOU C H, et al. Exploration of health assessment and model restoration for urban water supply network [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2021, 47(s2): 491-494.
- [29] 刘翔翔. 基于粒子群算法的供水管网余氯衰减模拟研究[J]. *河北水利电力学院学报*, 2024, 34(4): 23-30.
- LIU X X. Simulation of residual chlorine decay in water supply network based on hydraulic model [J]. *Journal of Hebei University of Water Resources and Electric Engineering*, 2024, 34(4): 23-30.
- [30] KOWALSKI D, KOWALSKA B. Novel solution of water disinfection for a branched water supply network [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2023, 288(9): 37-44.
- [31] 刘军, 王国英, 朱宇峰. 生态智慧导向下水务系统顶层设计与关键技术[J]. *城市道桥与防洪*, 2024, 30(5): 18-22.
- LIU J, WANG G Y, ZHU Y F. Top-level design and key technologies of water system under the guidance of ecological wisdom[J]. *Urban Roads Bridges & Flood Control*, 2024, 30(5): 18-22.
- [32] 袁伟, 张芳, 云智汉, 等. 基于 AHP 及模糊数学评价的特大城市应急地下水源地选址研究[J]. *四川环境*, 2024, 43(6): 100-111.
- YUAN W, ZHANG F, YUN Z H, et al. Research on site selection of emergency water source in mega cities based on AHP and fuzzy mathematics evaluation [J]. *Sichuan Environment*, 2024, 43(6): 100-111.
- [33] 陈炯禧, 王琦, 詹凡, 等. 基于 CNN 和 MFCC 的供水管网漏损声信号识别方法[J]. *中国给水排水*, 2024, 40(23): 13-19.
- CHEN J X, WANG Q, ZHAN F, et al. A method for identifying leakage acoustic signals in water supply network based on CNN with MFCC[J]. *China Water & Wastewater*, 2024, 40(23): 13-19.
- [34] 王兴, 吕谋, 王西平, 等. 基于改进灰狼优化算法的供水管网压力漏失调控优化研究[J]. *给水排水*, 2023, 49(11): 144-152.
- WANG X, LÜ M, WANG X P, et al. Optimization research on pressure leakage regulation and control of water distribution network based on improved gray wolf optimization algorithm[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2023, 49(11): 144-152.
- [35] 陈彬, 朱臻涛, 张翔. 基于物联网的供水管网智慧运维系统设计[J]. *现代信息科技*, 2020, 4(10): 171-175.
- CHEN B, ZHU Z T, ZHANG X. Design of intelligent operation and maintenance system for water supply distribution network based on internet of things[J]. *Modern Information Technology*, 2020, 4(10): 171-175.
- [36] 彭森, 程蕊, 程景, 等. 基于贝叶斯优化 FCN-DenseNet 算法的供水管网爆管智能识别[J]. *安全与环境学报*, 2022, 22(1): 306-315.
- PENG S, CHENG R, CHENG J, et al. Research on burst intelligent identification in water distribution network based on Bayesian optimized FCN-DenseNet algorithm [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2022, 22(1): 306-315.
- [37] 徐立仁. 基于自动化监测技术在城市供水管网运行管理的应用分析与探讨[J]. *城镇供水*, 2023(4): 68-73.
- XU L R. Based on the automatic monitoring technology in the operation and management of urban water supply network [J]. *City and Town Water Supply*, 2023(4): 68-73.
- [38] 李裕, 杜世杨, 曹飞, 等. 三维可视化技术在智慧水务中的应用[J]. *城市建筑空间*, 2023, 30(s1): 248-249.
- LI Y, DU S Y, CAO F, et al. Application of three-dimensional visualization technology in intelligent water affairs [J]. *Urban Architecture Space*, 2023, 30(s1): 248-249.
- [39] 朱夫静, 齐轶昆, 包晓玄, 等. 移动 GIS 在供水管网管理中的应用[J]. *给水排水*, 2022, 48(s2): 470-474.
- ZHU F J, QI Y K, BAO X X, et al. Application of mobile GIS in water-supply network management [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2022, 48(s2): 470-474.