



城市供水管网信息化管理体系的构建及应用

盛东方 陈继平 周宇 亓万琦 李伟英

(同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要: 随着现代信息化技术的快速发展,物联网、大数据及通讯技术在供水系统管理领域得到越来越广泛的应用,实现了供水行业“监控、调度、资产、收费、客户关系”等多维度一体化管理模式。因此,构建供水系统信息化管理体系,有助于科学合理地整合有效资源,提高管理者决策科学性,实现优质低耗的供水理念,达到良好的经济效益和社会效益。分析了供水管网信息化管理系统的基本框架,阐述了应用于基础设施、数据采集、数据传输、数据处理、决策应用各层级的信息化管理技术。探讨了信息化管理体系在供水管网漏损监测、优化调度、水质保障中的应用,提出现阶段制约信息化管理应用推广的因素及未来发展趋势。

关键词: 智慧水务; 供水管网; 信息化管理体系

中图分类号: TU991

文献标识码: A

文章编号: 1002-8471(2021)01-0096-07

DOI: 10.13789/j.cnki.wwe1964.2021.01.019

引用本文: 盛东方,陈继平,周宇,等.城市供水管网信息化管理体系的构建及应用,给水排水,2021,47(1):96-102.SHENG D F, CHEN J P, ZHOU Y, et al. Building and application of urban water supply network information management system[J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(1): 96-102.

Building and application of urban water supply network information management system

SHENG Dongfang, CHEN Jiping, ZHOU Yu, QI Wanqi, LI Weiyong

(College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: With the rapid development of modern information technology, Internet of thing, big data and communication technology were widely applied in the field of water supply system management, which realized water supply system integration management including monitoring, scheduling, assets, fees and customer relationships. Therefore, building the informatization management system of water supply system could contribute to integrate resource scientifically, improve the rationality of decision, realize the concept of high quality and low consumption and gain good social benefits and commercial benefits. This paper analyzed the basic framework of water supply network information management system, summarizing the information technology applied in infrastructure, data collection, data transmission, data analysis and application layers, discussing the application of information management in water supply network leakage monitoring, operation optimization and water quality control, putting forward the factors restricted the information management promotion in the present and the development trend in the future.

Keywords: Smart water system; Water supply network; Information management system

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07110008)。



0 前言

由于气候变化与人口数量的增多,世界各国均面临着水量短缺和水质污染加剧的环境问题。与此同时,由于传统水处理工艺对有机污染物去除效果不理想、供水基础设施老化严重、供水系统管理水平落后等,传统的管理手段已无法科学处理和快速应对日益严峻的水质、水量、水压等供水问题^[1]。因此,自动化、信息化和智慧化的管理理念被应用于供水系统全流程的管理之中。

基于通讯技术、物联网以及人工智能的先进技术与理论被逐渐应用于供水系统管理体系的现状,有助于构建集成“监控管理、调度管理、资产管理、收费管理、客户关系管理”于一体的“智慧化水务管理系统”。对于供水系统而言,智慧水务就是基于信息化技术,通过对供水系统中压力、流量及水质等参数进行采集、传递与分析,服务于管理者对供水系统实时及未来状态的认知与预测,进而科学决策实现供水系统的工艺优化运行、漏损控制、节能调度、水质安全保障等过程^[2]。信息化技术应用于供水管网管理体系中,达到了降低供水系统能耗、提高故障处理效率、降低管网漏损、保障供水水质的目标,解决了传统管理手段带来的问题。

本文分析了供水管网信息化管理系统的理论构建框架,并对设施层、感知层、传输层、处理层及平台层等各层级应用的传感器网络、互联网通讯、大数据分析 and 模型预测等信息化新技术进行阐述,总结了该系统在供水管网日常运维中的应用以及能够解决的实际问题。旨在对现阶段供水信息化管理领域的新技术和新理念进行探讨,为供水管网的高效管理提供理论基础。

1 供水管网信息化管理系统构建

智慧水务系统(Smart water system, SWS)可以实现供水系统运行维护的信息化与自动化,该理念近年来在学术界、政府、企业以及国际组织间受到广泛关注,但其从概念、技术和实践的角度仍旧缺乏系统化的共识,因此需要对智慧水务系统提出一个统一的系统化的架构方案,以便更好地理解智慧水务系统的定义、特征及其在供水系统运维管理中的应用趋势。

SWS 系统的构架是由多个执行各种功能的层

协同运作组成,即通过构建系统化的 SWS 体系实现对基础设施的感知控制、数据采集传输、数据管理、数据分析决策以及用户服务等功能。因此通常将 SWS 系统自下而上地划分为设施层、感知层、传输层、处理层及应用层 5 个层级,各层级的组成架构如图 1 所示。

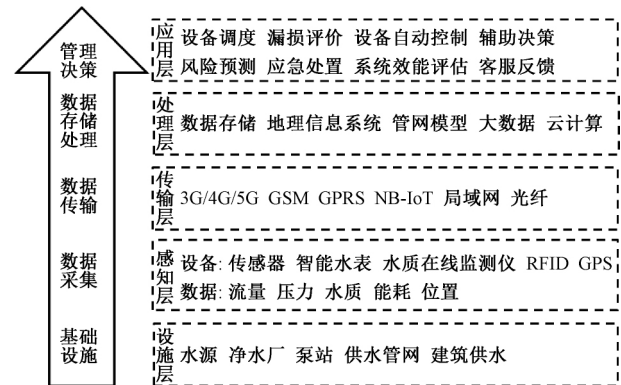


图 1 智慧水务系统层级架构

Fig.1 Layer framework of smart water system

1.1 基础设施

设施层由供水管道网络以及水泵、阀门等基础设施组成,基础设施是产生所需数据和信息的要素,这些数据和信息将被互联网相关的软件、硬件及设备进行收集、传输及处理分析,网络仪器也可以通过分析产生新数据来预测系统运行状况,指导物理设施的运行和维护^[3]。

为方便管理和信息统计分析,近年来供水管网分区的技术理念应运而生。区域计量分区(District metered area, DMA)是一种应用于供水管网监测和控制的管理概念,通过 DMA 可提高供水管网的管理效率。一个 DMA 分区指的是整个供水管网中,具有明显永久性边界的一个子系统^[4]。通过安装、开闭阀门以及安装流量计,可以将复杂的供水管网划分成几个独立计量的区域,从而实现各个区域内流量独立监控,分析各个子区域内流量变化历史数据可实现管网漏损状况的评估,当发现某区域存在漏损时及时反馈,再使用相应的漏损监测技术确定漏损点。DMA 理念的应用使得传统的被动检漏模式转变为主动管理模式^[5]。同时 DMA 也有助于供水管网的压力管理以及水质监控管理^[6]。随着供水管网管理目标不断提高,提出将 DMA 分区不断细化成若干个子系统形成二级分区,管网分区级别



越多则管理越精细。

确定分区边界是 DMA 的基础,这对于一些规模较大、拓扑关系复杂的环状管网而言是一项困难的任务,因此在初期 DMA 划分通常是一个手动的经验过程。近年来,随着研究的发展,提出了一些新型的 DMA 自动分区方法。早期的 DMA 自动分区是根据社区的模块化指数,通过一些优化算法进行;新型的 DMA 划分则建立在以拓扑学为基础的分区方法上,例如 Random Walk、Metis 和图形理论等^[7]。

1.2 数据采集

传感器网络(Wireless sensor networks, WSN)是一系列用于采集供水管网数据的传感器,以及包括射频识别(Radio frequency identification, RFID)、相机、M2M 终端以及其他能从环境中采集数据的设备。RFID 被广泛应用于 WSN 节点,可以通过射频信号自动识别目标对象并获取相关数据,通常用于供水管网地下管线的快速定位。传感器是一种检测装置,能将检测到的信息转化为电信号等其他形式的信号传输,通常应用于采集供水管网的压力、流量、噪声等数据^[8]。

水质实时监测是供水管网安全保障的重要环节,水质在线监测系统集成了采样、分析、记录等过程,可对供水管网监测点水质信息进行实时采集。常规的在线监测水质指标有温度、pH、溶解氧、电导率和浊度,除此之外余氯、金属离子等指标也被纳入在线监测的范围。根据监测原理不同,在线检测仪采用的分析方法包括化学法、分光光度法及生物法等^[9]。在线仪表采集管网水质数据,并通过安装在仪表上的无线传输模块将信息传递到控制中心,实现了供水管网水质数据的可视化。表 1 总结了水质数据在线采集方法。

表 1 水质数据在线采集传感器

Tab.1 Water quality data online collection sensor

传感器	水质参数
Spectro: :lyser	浊度、水温、色度、金属离子、UV ₂₅₄
Smart Coast	pH、溶解氧、电导率、水温、浊度、磷酸盐
Kapta 3000 AC4	氯浓度、水温、电导率
Smart Water	pH、溶解氧、电导率、氧化还原电位
Lab-on-chip	生物化学指标
I: :scan	色度、浊度、UV ₂₅₄

全球卫星定位系统(Global positioning system, GPS)是一种结合卫星及通讯的技术,根据 GPS 提供的坐标、坐标演变精度及方式的不同可以分为毫米级、厘米级、静态、实时动态、实时差分等几种设备分类和测量方式^[8]。利用 GPS 可准确测量供水管网中的管线、阀门、流量计及水表等设施的坐标数据,该技术可为管网地理信息系统的搭建提供精准的位置信息^[10]。

1.3 数据传输

将采集的数据传送到应用云平台需要利用通讯技术。根据传输范围的差异可将常用通讯技术分为两类,蜂窝技术如 2G、3G、4G、5G 以及全球移动通信技术(Global system of mobile communication, GSM)和 GPRS 技术(General packet radio service, GPRS)都可应用于长距离的数据传输。在供水管网的运维管理中 GSM 常被应用于在线监控系统的报警,而 GPRS 常用于监控设备采集数据的传输^[8],但 GSM 和 GPRS 技术所需的能耗较高,因此不能灵活地运用于传感器网络。NB-IoT 技术是一种基于 LTE 蜂窝移动网络的窄带物联网技术,它具有传输距离长、海量连接、功耗和成本较低的优势,适用于环境监测数据和抄表数据信息传输等低速互联网应用领域^[11]。

一些小范围的数据传输通讯技术,如 Zigbee、LoRa 等也被应用于供水管网信息传输中,其优点是传输过程能耗低、速度快且安全性高^[12],当数据传输网络连接就位,从传感器捕获的数据会发送至云平台^[13]。

1.4 数据处理

数据云平台是用来存储、运算和管理来自不同设备的数据信息,其应实现的功能包括数据对用户的可视化、管理员在线操控以及大数据分析功能。该平台既能完成对长期采集的数据的存储,也能实现基于长期监测数据利用机器学习等手段对数据变化趋势进行分析,从而判断供水管网健康状况并对异常情况及时预警。

1.4.1 地理信息系统

地理信息系统(Geographic information system, GIS)可用于供水管网信息的管理,其可实现空间的可视化以及相关数据信息的检索、查询、输



出、编辑等基本功能。GIS 的 3 种体系包括 C/S、B/S 和 M/S, 分别用于数据采集与编辑、数据读取分析以及移动端 GIS^[14]。GIS 系统可以记录供水管线的地图位置以及管径、埋深、管材等信息, 记录阀门、水表、消火栓等设备的规格、型号、读数等。GIS 的应用使得供水管网图形和属性数据相结合, 可以实现对供水管网数据的编辑、实时信息查询、设备查询测量以及调度管理等^[15], 方便各管理体系间共享和利用最新的信息数据, 从而提高对供水管网实时运行信息的利用率和管理效率。

1.4.2 管网模型

供水管网水力模型是基于管网拓扑结构及管网组件的水力计算, 以直观的方式展示管网中管段、节点、水泵、阀门的水力要素和水力状态的分析方法^[16], 常见的用于供水管网水力模型计算的有 EPANET 以及需要经过二次开发的 WaterGEMS、InfoWorks 等软件, EPANET 具有管网平差、运行模拟等多种功能, 但其不具备对水力模型进行在线运行和管理的功能, 因此有研究将 EPANET 与 ArcObjects 通用开发平台进行结合, 可实现水力模型的在线发布。管网漏损模型可根据应用目的分为漏损预测模型、漏损定位模型以及压力控制模型三种^[17]。供水管网漏损预测模型可基于管网漏损数据分析出漏损规律, 并根据漏损规律合理预测供水管网漏损趋势; 漏损定位模型可根据实测的压力流量数据, 通过质量守恒、能量守恒方程进行数据处理判断漏损点; 供水管网漏损量可以作为与管网压力相关的数据进行模拟, 从而提出基于漏损压力调控的漏损控制策略。

供水管网水质模型包括余氯衰减模型、微生物模型、消毒副产物模型以及金属离子释放模型等。氯衰减模型的研究主要包括主体水氯衰减动力学及管壁氯衰减动力学, 该模型可以用来评价现有供水系统中的消毒剂作用效果, 或用来作为规划水池、泵站及二次加氯点等基础设施的参考依据^[18]。供水管网管道中腐蚀产物的释放会影响饮用水的感官性状, 利用金属离子释放模型可以用来预测腐蚀产物的释放以及微粒在管道中的迁移情况, Statistical Red Water 释放模型以及 Iron Release Flux 模型(铁释放流量模型)可以根据管网水质参

数、管材和水力条件分析预测管道中腐蚀产物中的铁释放^[19]。

1.5 应用平台

应用层的功能是向管理者提供决策支持, 以及向用户提供实时的用水信息。基于真实管网数据以及大数据分析的应用平台有助于管理者了解供水管网的实时运行状况, 从而提供诸如管道更换、仪表安装的决策建议。除此之外, 通过对水务数据的访问以及采取先进的算法来对供水系统进行分析, 可对供水系统运行情况进行预测识别, 判断水务数据的走向, 制定出科学完善的城市供水系统应急方案^[20]。应用平台的建立有助于提升供水系统管理的决策能力从而实现延长资产的生命周期, 提升能源的持续性, 优化供水管网压力与水质, 减少水资源消耗等目的^[3]。

2 供水管网信息化管理系统应用

2.1 漏损监测

2.1.1 基于 DMA 分区与漏损监测仪的漏损监测

监控各 DMA 分区最小夜间流量 (Minimum night flow, MNF) 的变化可用来分析区域内的流量异常。MNF 是指在一定时间间隔内 (如 15 min) 最小的流量, 其一般发生在 2:00—5:00, 此时用户用水量最小, MNF 中漏失水量占主要比例。因此, 通过分析 MNF 变化可间接判断漏失情况。MNF 通常在一定范围内波动, 当其发生突然上升并持续数日超出制定的阈值时, 则可能出现新增漏损点。传统的 MNF 警戒阈值通过经验法估算夜间合法用水量或通过夜间最小流量与日用水量的比值进行漏损估算, 但传统方法设立的警戒阈值误差较大, 可用数据模型对流量数据进行处理来消除数据的随机波动带来的误判^[21]。移动平均隔差法可降低数据的波动性使数据趋于平滑; 灰色预测模型可实现少量原始数据的处理, 减弱原始数据的波动性, 并通过对新生成序列进行深入研究, 挖掘原始数据进行预测^[22]。通过上述对采集的原始数据进行预处理可提高管网漏损预测的精度。

基于 DMA 流量监测无法直接定位漏水点, 因此可通过 DMA 分区监测判断新增漏损发生, 并逐步缩小检测区域, 再通过漏失监测仪直接定位漏水点。漏失监测仪根据原理不同可分为声学探测法及



非声学探测法,声学探测仪器有听音棒、漏损噪音记录器等。非声学探测法被广泛应用于漏损定位,主要有气测法、探地雷达、热红外线成像等^[23]。表 2 总结了常用漏损检测仪及参数。

表 2 常用漏损监测仪及参数

Tab.2 Leakage monitoring instrument and parameter

方法	检测范围	检测限	探测精度	应用管材
听音棒	200~500 m	0.003 L/s	30~75 m	金属
漏损噪音记录器	与精度相关	>10 dB	2.5 m	金属
气测法	1 m	—	<1 m	不限
探地雷达	1 m	0.33 L/s	0.001 m	不限
热红外线成像	与温度差相关	温度差 0.05~0.1 ℃	0.1 mrad	不限

2.1.2 基于数学模型的漏损监测

通过实时监控的压力和流量数据建立数学模型,可以快速地诊断漏损发生点位。检测供水管道内水压及变化量,进而推导出管网运行中流量变化与压力变化的方程,用来分析漏水点位置、漏水量之间的关系,从而达到定位漏损管段的目的。基于管网瞬态分析,认为管段发生破坏就会出现瞬时压力波动,压力波动会传递至最近的几个压力检测点,可根据传播路径产生的时间差来诊断漏损点位,但由于管网节点数远大于测压点数,路径难以确定,因此该方法的应用在复杂的实际管网中缺少应用。可借助动态水力模型模拟计算的数值与在线测压点观测值进行优化计算,寻找理论漏损点,但该方法受限于水力模型的误差、传感器的数量和配置及传感遥测数据的精确性和可靠性^[24]。

除此之外,基于管网现存的漏失数据,建立漏损预测模型可以分析供水管网的漏损规律,利用得到的规律可合理预测供水管网漏损趋势,进而分析管网的健康状况,对漏损发生进行预判。常见的用于漏损预测的数学模型有多元线性回归预测模型、指数平滑模型、灰色预测模型以及差分自回归移动平均模型等。

2.1.3 基于神经网络的漏损定位

随着计算机技术的发展,近年来提出了基于神经网络的漏损定位方法。人工神经网络的故障诊断就是将发生故障时症状空间的数据向量映射到故障空间上,人工神经网络通过大量输入、输出数据集的学习,推测故障数据空间与故障空间的映射关

系^[25],应用在供水管网漏损管理中即是一种通过将各种代表性故障工况与该状况下的实时压力信息建立映射,并与实时压力数据对比分析判断漏损点位的方法。当漏损发生时,管网中水流状态变化,压力检测点感知变化,通过神经网络深度学习在“管网压力变化”和“漏损点位”之间建立映射关系,将采集到的供水管网压力值与建立的映射网络进行对比分析,从而实现漏损点位定位的目的。但由于真实管网的漏损情况复杂多样,很难全部作为样本进行训练,且人工神经网络在样本多的情况下容易出现局部收敛,因此该法在复杂管网中的应用具有局限性^[26-27]。随后诞生了基于贝叶斯理论的神经网络检测漏失定位方法,该方法首先利用小波去噪对管网采集数据进行处理,筛选出平稳真实的管网数据信息,随后将其与人工神经网络预测数据比对,并依据贝叶斯理论公式进行误差计算,如果误差值超出合理范围则进行漏损定位,但该法对数据要求高,实施难度大。

人工神经网络在供水管网漏损中的应用能协助管理人员迅速对漏损区域进行定位,缩减了故障诊断维修时间,但该技术现阶段发展并不成熟,缺少在实际复杂管网中的应用实例。

2.2 优化调度

供水优化调度的目的是通过优化净水厂出水压力和流量,对水资源进行合理分配,从而降低供水过程运行能耗。科学的优化调度方式可以在保证城市供水需求的情况下,通过合理设置增压及减压点或水泵的优化调度方案达到绿色低碳减少漏损的目标。供水优化调度模型的建立由决策变量、目标函数及约束条件组成。决策变量指输入的变量数据,目标函数指优化目标如泵站用电成本、总功率、制水总成本等,约束条件是指运行时需要满足的条件。供水优化调度模型可通过遗传算法等计算机算法进行求解。优化调度模型分为直接优化调度模型和二级优化调度模型,对于以水泵能耗为目标函数的优化模型,直接优化调度模型的决策变量为水泵的开停状态,只对水泵开停的型号、台数和开停时间进行优化;二级优化调度模型以水泵出口压力及流量、清水池水位为中间变量,该模型优化精度高速度快,优化结果准确。



除以制水成本为目标的供水优化调度模型外,有学者提出基于水力模型和水质模型的余氯优化调度模型,可实现各水厂加氯量的优化组合,使得管网中较为均匀,从而保证余氯浓度在满足抑制微生物再生长余氯浓度的同时控制消毒副产物的生成。在王艳等^[28]的研究中,建立了基于余氯衰减模型和消毒副产物生成模型的余氯优化调度模型,实现了实时监测数据与模型计算数据的同步展示,从而优化净水厂及中途加氯点的投加量。

2.3 水质保障

保障饮用水水质安全是供水管网运维管理的重点,水质在线监测、水质模型模拟等技术可服务于供水管网水质安全保障。水质在线监测系统既实现了水质数据实时检测记录,亦可基于数据分析对水质变化进行预测。水质实时采样检测以及水质污染预警被广泛应用于水源水质保护与净水厂出水水质保障,通过合理布设监测点,基于水质在线监测仪也可实现供水管网水质实时监测以及水质问题预警。近年来基于在线监测开发出的水质污染预警系统有 Canary, OptiEDS, Bulebox 和 Ana:::tool 等, Canary 和 OptiEDS 系统都可以实现水质实时监测及水质污染预警; Bulebox 是一种能根据水质参数变化判断异常情况的系统,即便缺少一些参数该系统也可以稳定地输出事件信息; Ana:::tool 是一种具有用户操作界面的 EDA 系统,在 moni:::tool 系统的支持下该系统能可视化地反应实时水质数据^[29]。这些系统的应用实现了水质状况可视以及水质问题及时预警,达到了水质保障的目的。

3 结论

信息化智慧管理系统能实现供水管网数据信息的采集、传输、存储、分析以及管理决策辅助,其应用提高了供水管网运行维护效率及管理决策的科学性,实现了绿色低碳的管理目标。但国内关于信息化管理技术的应用尚未广泛开展,一方面相关的互联网技术在水务、环保行业的应用未完全开发,例如数据库构建基础不完善导致数据不精准不及时、各模块之间数据没有形成连通等,致使系统在运行时存在数据不完善以及数据孤岛问题存在。另一方面,一些先进的信息化管理技术诸如数学模型、计算机算法的应用缺少在实际复杂管网中的应用实例,

以及一些软件的应用使用与维护成本较高。因此,开展信息化系统在实际管网中的应用研究,建立标准化的信息化管理体系,规范管理人员工作章程是供水行业未来发展方向。

参考文献

- [1] NGUYEN K A, STEWART R A, ZHANG H, et al. Re-engineering traditional urban water management practices with smart metering and informatics [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2018 (10): 256-267.
- [2] 信昆仑, 陶涛, 李树平, 等. 人工智能技术在供水行业中的应用与展望 [J]. *给水排水*, 2019, 45(12): 1-3.
- [3] LI J, YANG X, SITZENFREI R. Rethinking the framework of smart water system: a review [J]. *Water*, 2020, 12 (2): 412.
- [4] DIAO K, ZHOU Y, RAUCH W. Automated creation of district metered area boundaries in water distribution systems [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2013, 139(2): 184-190.
- [5] 朱乃富. 基于数据驱动的供水管网独立计量分区漏损检测和定位方法研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [6] TAVERA M, PÉREZ-GARCÍA R, ILAYA-AYZA A, et al. A flexible methodology to sectorize water supply networks based on social network theory concepts and multi-objective optimization [J]. *Journal of Hydroinformatics*, 2016, 18(1): 62-76.
- [7] LIU H, ZHAO M, ZHANG C, et al. Comparing topological partitioning methods for district metered areas in the water distribution network [J]. *Water*, 2018, 10(4): 368.
- [8] 陈佑民, 毋焱, 邓勇, 等. 互联网技术在地下管线管理中的应用 [J]. *办公自动化*, 2014(S1): 301-306.
- [9] 李震, 宛如意. 智慧水务背景下的水质在线监测系统 [J]. *电子测试*, 2018(9): 97, 99.
- [10] 陆文菁. 探析 GPS 在供水管网管理地理信息系统中的应用 [J]. *通讯世界*, 2017(12): 261-262.
- [11] 王圆圆, 马玉银, 刘萍. 基于 NB-IoT 的城市水生态数据实时采集系统 [J]. *扬州职业大学学报*, 2018, 22(2): 44-46.
- [12] RADHAKRISHNAN V, WU W. IoT technology for smart water system [C]//The 16th IEEE international conference on Smart City(Smart City 2018). IEEE, 2018.
- [13] ALSHATTNAWI S. Smart water distribution management system architecture based on internet of things and cloud computing [J]. 2017, 289-294.
- [14] 王晴. GIS 在供水管网中的应用 [J]. *城镇供水*, 2016(6): 50-53, 65.
- [15] 王馨懿. GIS 地理信息系统在供水管线管理中的应用探讨



- [J]. 信息系统工程, 2019(1): 83.
- [16] 刘彦辉. 供水管网水力模型应用及未来发展的思考及探讨; 第十二届中国城镇水务发展国际研讨会与新技术设备博览会, 中国海南海口, F, 2017 [C].
- [17] 储子慧. 基于水力模型的供水管网漏损定位研究 [D]; 合肥: 安徽建筑大学, 2019.
- [18] FISHER I, KASTL G, SATHASIVAN A, et al. Suitability of chlorine bulk decay models for planning and management of water distribution systems [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2011, 41 (20): 1843-1882.
- [19] BENSON A S, DIETRICH A M, GALLAGHER D L. Evaluation of iron release models for water distribution systems [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2012, 42(1): 44-97.
- [20] 梅文迪. 浅析“云平台”在智慧水务中的应用 [J]. *中国设备工程*, 2020(2): 169-171.
- [21] 杨帆, 陈佑民, 毋焱, 等. 持续控制漏损的关键技术《供水管网 DMA 分区定量漏损监控管理系统》——“十二五”水专项技术 [J]. *办公自动化*, 2014(S1): 316-318.
- [22] 刘燕芳, 陈天伟, 陈凯华, 等. 基于灰色与线性回归组合模型在变形预测中的研究 [J]. *城市勘测*, 2011(4): 151-154.
- [23] TAO T, XIN K, HUANG H, et al. A review of methods for burst leakage detection and location in water distribution systems [J]. *Water Supply*, 2015, 15(3): 429-441.
- [24] 李霞. 城市供水管网漏损定位及控制研究 [D]. 天津: 天津大学, 2006.
- [25] 王珞桦. 基于 BP 神经网络的供水管网漏损故障诊断研究 [D]. 青岛: 青岛理工大学, 2018.
- [26] 王珞桦, 李红卫, 吕谋, 等. 基于 BP 神经网络深度学习的供水管网漏损智能定位方法 [J]. *水电能源科学*, 2019, 37(5): 61-64.
- [27] 朱东海, 张士乔, 毛根海. 城市供水管网爆管点动态定位的神经网络模型研究 [J]. *水利学报*, 2000(5): 1-5.
- [28] 王艳, 王玉敏, 李乔, 等. 城乡统筹供水管网水质控制优化调度研究 [J]. *给水排水*, 2020, 46(2): 116-120.
- [29] Qamar A M, Mumtaz S, Anwar H, et al. Water quality monitoring: from conventional to emerging technologies [J]. *Water Supply*, 2020, 20(1): 28-45.



△ 通信作者: 李伟英, 女, 1968 年出生, 安徽宿州人, 博士。同济大学环境科学与工程学院教授, 硕士/博士研究生导师。主要研究方向为饮用水安全保障理论与技术、供水系统水质生物安全评价与控制技术研究、建筑给排水理论与技术研究。
收稿日期: 2020-08-21

(上接第 95 页)

- [5] 张松, 郭怀成, 盛虎, 等. 河流流域生态安全综合评估方法 [J]. *环境科学研究*, 2012, 25(7): 826-832.
- [6] 张晓岚, 刘昌明, 门宝辉, 等. 漳卫南运河流域水生态安全指标体系构建及评价 [J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2013, 49(6): 626-630.
- [7] 张远, 高欣, 林桂宁, 等. 流域水生态安全评估方法 [J]. *环境科学研究*, 2016, 29(10): 1393-1399.
- [8] 解雪峰, 吴涛, 肖翠, 等. 基于 PSR 模型的东辽河流域生态安全评价 [J]. *资源科学*, 2014, 36(8): 1702-1711.
- [9] 陈广. 基于 DPSIR 模型的三峡库区水生态安全评价 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2015.
- [10] 林佳宁, 高欣, 贾晓波, 等. 基于 PSFR 评估框架的太子河流域水生态安全评估 [J]. *环境科学研究*, 2016, 29(10): 1440-1450.
- [11] 张满满, 于鲁冀, 张慧, 等. 基于 PSR 模型的河南省水生态安全综合评价研究 [J]. *生态科学*, 2017, 36(5): 49-54.
- [12] 杨晴, 赵伟, 张建永, 等. 水生态空间管控指标体系构建 [J]. *中国水利*, 2017(9): 1-5.
- [13] 何俊仕, 王林威, 刘洋, 等. 沈阳市水生态环境安全评价指标体系研究 [J]. *水电能源科学*, 2011, 29(9): 31-34.
- [14] 魏冉. 辽宁省辽河流域水生态功能三级区水生态安全评价 [D]. 沈阳: 辽宁大学, 2013.



△ 通信作者: 司马文卉, 女, 1981 年出生, 北京人, 高级工程师。主要研究方向为城镇生态环境及水系统的保护、修护、治理等。
E-mail: smwh720@sina.com
收稿日期: 2020-09-20
修回日期: 2020-11-21