

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.01.009

供水管网优化维护的理论与技术框架分析

褚俊英¹, 王 浩¹, 邵 煜², 俞亭超²

(1. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;
2. 浙江大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310058)

摘要:针对供水管网失效情况下,供水管网优化维护的问题,系统地总结了供水管网优化维护的3个阶段;提出了供水管网优化维护的3个基础理论:管道失效理论、管道可维护理论以及优化决策理论;建立了面向全生命周期的供水管网优化维护的一体化技术框架,包括数据融合、状态辨识、措施集合、优化决策以及方案实施5个方面。

关键词:供水管网;优化维护;基本理论;技术框架;优化决策

中图分类号:TV213 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)01-0067-06

Analysis on theory and technical framework of optimal maintenance of water supply network // CHU Junying¹, WANG Hao¹, SHAO Yu², YU Tingchao² (1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Aiming at the problem of optimal maintenance of water supply network in the case of failure of water supply network, three stages of optimal maintenance of water supply network are systematically summarized. Three basic theories of optimal maintenance of water supply network are put forward: pipeline failure theory, pipeline maintainability theory and optimal decision-making theory. An integrated technical framework for the optimization and maintenance of water supply network for the whole life cycle is established, including data fusion, state identification, measure collection, optimization decision-making and scheme implementation.

Key words: water supply network; optimized maintenance; basic theory; technical framework; optimization decision

供水管网作为城市基础设施的重要组成部分,直接关系到城镇供水安全与人类健康,具有极其重要的地位。供水管网漏损与爆管等失效事件不断发生,带来极其严重社会经济和生态环境影响。进行供水管网优化维护,确保管网流量、流速、压力和水质等指标满足要求且经济有效,已成为保障城镇供水安全的关键。长期以来,研究者在供水管道维护优化决策的优先权计算、单目标优化以及多目标优化的数值算法及其实践应用方面取得了多项进展。如 Shamir 等^[1]建立了经济优化模型,计算比较了爆管费用和换管费用的净现值,量化给出了供水管道的最优更换时间,并在加拿大卡尔加里市应用。基于层次分析法或资金分配指数的优先权方法,具有层次清楚、可操作性强等特点,得到广泛的应用^[2]。综合经济性、可靠性等目标,基于管道水力学计算、

遗传算法的供水管道维护多目标寻优技术也取得了一定进展,并在澳大利亚、加拿大等国家的多个城市得到应用^[3-4]。总体上,供水管网优化维护注重特定方法的研究及应用,但在优化维护的基础理论方面薄弱,尚缺乏统一的技术框架。本研究系统梳理了供水管网优化维护的发展历程,提出供水管网优化维护的3个基础理论,系统给出面向全生命周期的供水管网优化维护的技术路线,旨在为我国供水管网维护规划制定、决策优化与建设实施提供技术支持。

1 供水管网优化维护的发展历程

供水管网优化维护主要针对供水管网存在输水能力差、存在安全隐患等问题,综合考虑技术经济特点,识别维护管道对象,确定维护时机,进行维护优

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0400605)

作者简介:褚俊英(1976—),女,正高级工程师,博士,主要从事节水、水资源规划与管理等研究。E-mail: jehu@iwhr.com

化决策,并实施抢修、修复和更新改造的活动,以最大化减少供水管道漏损与爆管等失效事件带来的负面影响。随着城市化进程的不断推进以及供水管网检测、监测以及维护技术的变革,世界上供水管网维护逐渐从被动应急向主动优化转变,从传统技术向现代技术转变,从短期战术向中长期战略转变。如何更好地维护使供水管网处于良好状态,始终是供水管理决策者面临的重要挑战。本研究在文献分析的基础上,总结了供水管网优化维护发展的3个阶段。

1.1 被动应急维护阶段:经验性优化

20世纪80年代之前,供水企业缺乏可靠的地下水供水管道检测技术,难以对供水管网的基本状态进行判断,供水管网以建设为主而忽视管道维护,当时我国出台了GB 50268—97《给水排水管道工程施工及验收规范》,2008年进行了修订。供水管道维护主要采取被动性的应急方式,即“不漏不修,漏了再修”,实行经验性优化策略。该阶段供水企业基本建立了完善的应急维修系统,供水管道出现失效后,通过经验方式进行管道维修与更换的比选决策。随着供水管网的不断老化,供水管网漏损与爆管频率不断增大,导致企业、居民、商店、学校、仓储受淹以及道路交通中断等,给世界各国城市社会经济发展带来灾害性的影响。供水企业采取基于经验性优化的被动应急维护策略,带来供水管网维护投资大、潜在健康威胁突出以及社会影响严重等问题^[5]。该阶段,美国环保署调查提出未来20年美国需要772亿美元来维护现有的供水管道系统^[6],加拿大预计未来15年升级城市供水管网系统的费用约115亿加元^[7]。

1.2 主动预防维护阶段:多目标优化

20世纪80年代至今,供水管网检测、监测、修复以及维护方面技术不断进步,非开挖修复技术取得突破性进展,技术的规范性程度不断提高。如我国出台了CJJ 159—2011《城镇供水管网漏水探测技术规程》、CJJT 226—2014《城镇供水管网抢修技术规程》以及CJJT 244—2016《城镇给水管道非开挖修复更新工程技术规程》等。该阶段着眼于中长期尺度的积极主动性维护策略,成为供水企业的选择,可有效阻止供水管道漏损与爆管等失效发生,提高供水管网的绩效水平,在世界上得到广泛应用^[8]。该阶段供水企业开始对供水管网维护费用进行详细核算,除了考虑直接费用外,还将管道失效所带来间接社会影响(如用水者服务的中断、公共健康的威胁)进行经济量化^[9],并充分融合供水管网的可靠性、弹性等多种目标,进行多目标的优化维护决策。该

阶段,美国水行业协会1987年出台了《供水管网更新维护手册M28》(2014年更新到第3版),我国出台了CJJ 207—2013《城市供水管网运行、维护及安全技术规程》,从而对供水企业管网维护目标与策略提出了规范化要求。供水企业采取更为主动的方式,进行管道状态检测、管道状态评估,建立了基于状态的主动性维护策略。一些供水企业更进一步地考虑管道失效可能性以及失效影响,评估供水管道失效风险,建立了面向风险的优化维护策略^[10]。总体上,该阶段供水企业优化维护更具综合性,既包括管道失效前日常态的优化维护,也包括管道失效后应急态的优化维护,尤为侧重中长期的供水管道失效动态风险管控,实现多目标优化供水维护专家系统(或决策支持系统)不断建立和应用^[11]。

1.3 智慧精准维护阶段:自适应优化

未来,随着大数据、物联网、人工智能以及数据挖掘等信息技术迅猛发展,供水管网维护将进入智慧精准维护阶段,根据管道自身以及周边环境特点进行自适应优化维护决策将成为供水企业的选择。如智能管道传感技术(smart pipe sensor technology)能够嵌入管道,持续监控管道的完整性并及时报告供水管道状态;基于Android的供水管网移动端巡检系统,可实现信息采集、巡检系统导航定位、管网事故抢险维修和系统信息管理等多种功能^[12]。该阶段,供水企业着力构建集管道资产全面感知、远程实时控制、智能预测预警、自适应优化决策一体化的智慧管网维护GIS平台系统,实现管网维护的精细化、标准化和智能化,为供水管网漏损识别控制、维护方案优化以及智能调度控制等提供现代化决策支持^[13]。

2 供水管网优化维护的基本理论

针对供水管网优化维护的基本理论缺失问题,本研究在文献分析基础上提出了供水管网维护的3个基本理论:管道失效理论、管道可维护理论以及决策优化理论。

2.1 管道失效理论

研究者通常针对管道失效的极端情况如爆管、漏损等开展研究,实际上供水管道失效包括更为广泛的内容,不仅包括管道漏损、爆管等结构性失效,还包括了输水能力降低、压力不足、水质不满足要求等功能性失效。从失效程度看,供水管道失效可分为软失效和硬失效两种类型。其中,软失效主要由于供水管道老化、腐蚀等,导致管道存在部分漏损、输水能力降低、压力不足以及水质较差等退化性问题,但危害程度相对较小,依然可以带病运行实现连

续供水的服务功能;硬失效则是供水管道发生较大漏损、爆管或水质超标严重等突发性问题,带来较大社会经济危害,导致部分节点供水强行中断,无法实现供水的服务功能。

管道失效主要有两种表达形式:①确定性表达,如管道失效次数(单位为次/(a·km)),或管道失效时间(或管道下次失效时间、两次管道失效的时间间隔、管道剩余服务期等,单位为a);②不确定性表达,如管道失效概率或第n次失效的管龄概率分布等^[14]。

供水管道失效影响因素众多,通常可以分为以下几类^[15]:物理因素(如管龄、管材、管壁厚度、管径、接口类型、管道内衬、安装特征等)、环境因素(如土壤类型、气候、地下水、道路特征以及地震活动特点等)、操作因素(如管道水质、水压、流速、水锤等)。供水管道失效的机理尤为复杂,属于多因素作用于供水管道上的非线性累积效应,具有很大的随机性和不确定性,每个管道都有其特殊的失效机制。硬失效往往不具有明显的退化过程,失效前通常难以检测;软失效则主要受到退化性因素的影响,如管道裂纹、管道腐蚀导致的管壁变化等,管道失效前可根据特征做出预判。

大量研究数据的统计规律分析表明,供水管道的失效过程(即故障模式)与时间的推移有直接关

系,通常符合“浴缸曲线”。供水管道全生命周期的动态演变过程中,可以分3个主要时期(图1):①幼年磨合期,供水管网建设运行早期,管道失效主要来源于建设与安装质量不好、地面不均匀沉降导致管道位移等方面。随着不断磨合,供水管道失效率缓慢下降。该时期进行供水管道建设与施工的质量控制、全面检验可有效降低管道失效率。②成熟随机期,供水管道运行相对稳定,管道失效率较低。该时期供水管道失效主要受到随机因素影响,如承重负荷、第三方扰动等。通过增大供水管网系统冗余、实行压力控制、进行管道清洗等,可提高安全系数和可靠性,降低管道失效率。③老化磨损期,随着时间推移,管道不断老化和劣化,供水管道失效率将迅速增加,导致系统可靠性迅速下降、维护费用显著增大。进行主动性、预防性的管道维修与修复,可降低供水管道失效率,延长管道的服务期。当然,并非所有的供水管道都经历3个完整时期,每个时期的长度对于所处各种环境条件的不同管道也有明显差异。对供水管道失效规律的认知,在很大程度上受到数据可靠性与可得性的限制。其中,老化磨损期是供水管道失效研究的重点,也是管道优化维护的关键期,该时期开展供水管道失效规律观测与量化分析,是提高供水管网可靠性、降低维护成本、延长管道生命周期的重要基础。

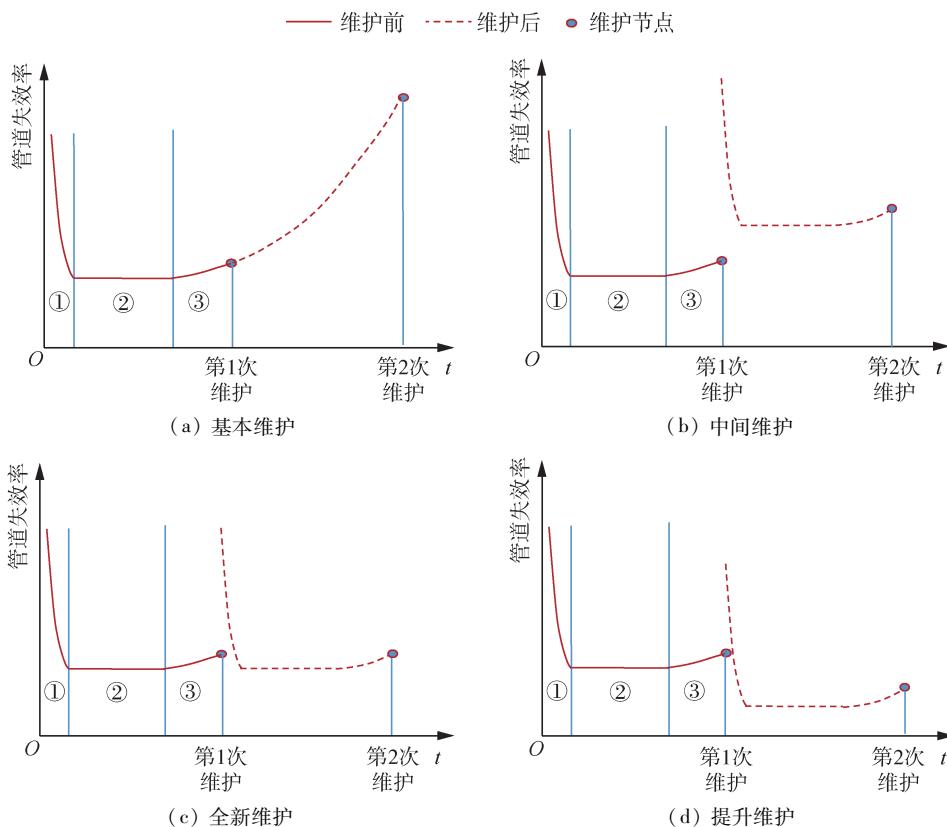


图1 生命周期的供水管道失效动态演变与维护效果

Fig. 1 Dynamic evolution and maintenance effect on failure of water supply pipe in whole life cycle

2.2 管道可修复理论

管道可修复理论描述了供水管道维护与管道状态之间的动态关系。早期的研究侧重通过经济性识别哪些管道进行维护,假定管道失效概率服从随机分布,忽视维护措施与管道状态之间的量化关系。21世纪以来,供水管道维护措施维护效果逐渐得到关注,研究者通常将管道状态表达为管龄函数,管道更换后修改管龄重新计算管道状态。随着管道维护措施呈现多样化,研究者探索不同类的维护措施并与管道状态指数进行经验性的量化关联,从而对实施维护后管道状态进行动态修正^[16]。本研究在文献整理基础上,借鉴相关研究进展,丰富了管道可修复理论,提出管道维护措施与管道状态4个主要类型(图1):①基本维护,维护后管道失效率仍然保持失效前一时刻的状态,即“修复如旧”,管道失效率保持现有规律不变;②中间维护,经过维修以后,管道失效率有所降低,但不能使管道状态完全恢复到全新,管道状态介于“修复如旧”和“修复如新”之间;③全新维护,管道维护后能够恢复到全新状态,供水管道失效率与全新管道失效规律一致;④提升维护,随着科学技术进步,管道维护材料、安装与施工等质量明显提升,管道维护后相对全新状态进一步提升,管道失效率相对全新管道失效率明显降低。总体上,通过管道更新(采用原有管材或新材料)进行供水管道维护可考虑为全新或提升维护,采用穿插法、原位固化法等进行管道修复可考虑为中间维护,而采用不锈钢发泡筒法等方式进行管道局部维修则考虑为基本维护。

2.3 优化决策理论

供水管网维护的优化决策理论描述了不确定条件下,决策者综合权衡经济性、可靠性以及水质等多目标,通过优化算法识别供水管道的维护对象、维护时机并进行维护措施决策的理论。根据企业特点如何设定多目标和决策变量、如何通过高效优化算法辅助决策已成为该理论研究的热点。本研究按照决策者的决策特点,将供水管道维护的决策优化过程分为3类:①完全理性决策,即决策者具有完全理性,能通盘考虑供水管网维护的成本及其所带来的影响和收益,根据自身价值判断标准,通过量化计算分析做出最优化决策;②非理性决策,即决策者具有非理性特征,其供水管网维护决策很大程度上受到认知、判断等主观因素的影响,主要通过定性分析做出经验化决策;③有限理性决策,即决策者具有有限理性,在信息不对称、数据不完善条件下,按照自身价值判断,通过定性与定量分析相结合做出满意化决策。

3 面向全生命周期的供水管网优化维护一体化技术框架

确定具有大量决策变量的大型供水系统的最优更新维护计划是一项具有挑战性的任务。供水管网优化维护应坚持问题导向、因地制宜和创新引领的基本原则,以供水管网存在的问题为导向,注重技术和经济优化分析,积极采用新技术、新设备和新材料,提高供水管网维护措施的针对性、实用性和高效性。面向全生命周期的供水管网优化维护一体化技术框架(图2)主要包括数据融合、状态辨识、措施集合、优化决策以及方案实施5个层面。其中,数据融合是基础,状态辨识是根本,措施集合是抓手,优化决策是核心,方案实施是重点。

3.1 数据融合:从传统记录向大数据转变

全面、可靠的供水管网基础数据是开展管网优化维护的重要基础。随着互联网、大数据、云平台与人工智能的发展,除了传统人工记录、统计资料外,借助各种途径(如SCADA监控系统、GIS空间分析、遥感分析以及物探等),精确到每个管段尺度,实现海量、多源异构、类型多样的供水管网大数据融合和数据转换是重要发展趋势。从发展趋势看,对供水管道的内部运行数据(如压力、流量、流速、水质等)、管道资产特征及维护情况(如管龄、管材、失效时间、失效影响、维护措施等)、管道外部环境(如温度、土壤、地下水、交通、覆土等)等多元数据进行有效集成,形成“管内-管道-管外”一体化的动态数据库,提高决策者对供水管网系统的认知程度,从而为供水管网状态评估、优化决策提供基础支撑。

3.2 状态辨识:从状态评价向风险辨识转变

在数据融合基础上,供水企业可根据供水管网特点与维护要求,采用经验判断法、统计回归法、优先权排序法、检测探测法等方法进行管网状态识别,为供水管网的优化维护决策提供依据。其中,经验判断法具有主观性较强、操作简单的特点;检测探测法具有客观性强,但耗时长、费用相对较高的特点;统计回归法对历史观测数据的依赖性强,主要分为物理模型和统计模型,前者注重分析管道失效的物理机制,通常考虑的影响因子包括土壤特性(如pH值、电阻率、通气条件等)、温度等^[17],而后者注重分析管道失效的统计学规律,考虑的影响因子包括管材、管龄、管壁厚度、土地利用等^[18];优先权排序法通常根据经验确定优先权指标,设定规则进行优先权排序,可操作性强,如丁相毅等^[19]提出了基于因子分析的供水管网健康状态评价方法。从未来发展趋势看,综合考虑供水管道失效的可能性及其所带

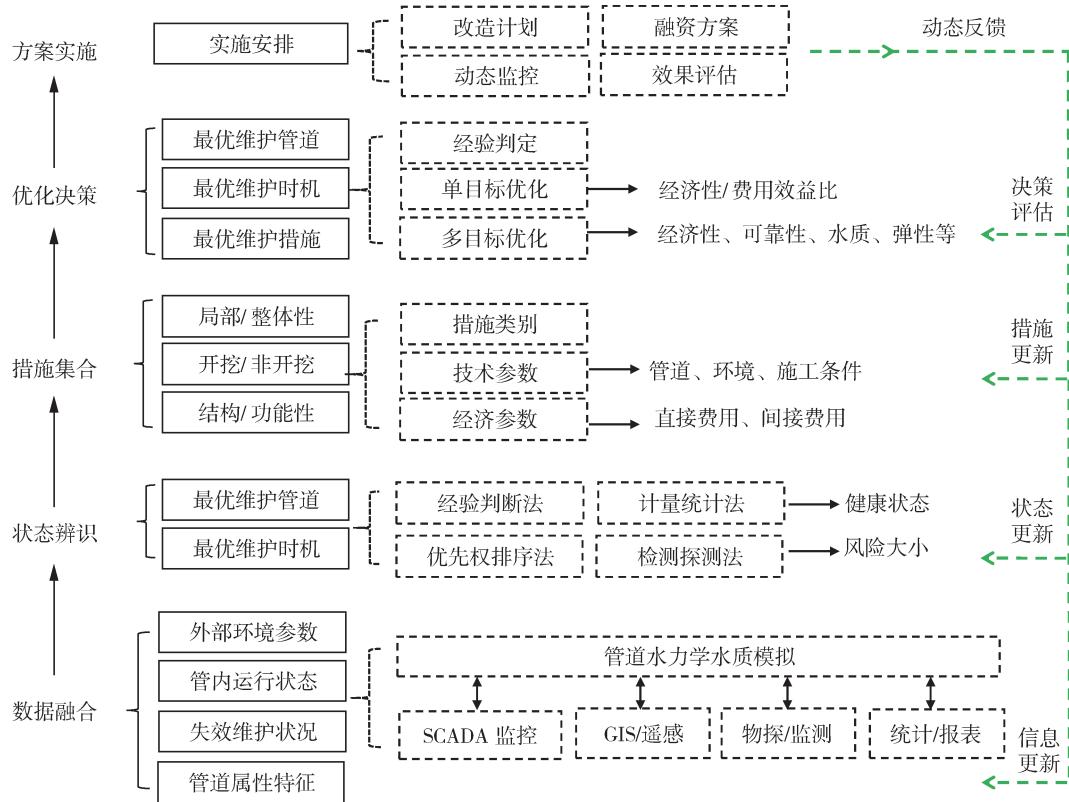


图 2 面向全生命周期的供水管网优化维护一体化技术框架

Fig. 2 Integrated general technical framework for optimal maintenance of water supply network on perspective of whole life cycle

来的影响的风险辨识日益得到关注。其中,管道失效所带来的影响程度不仅包括节点用水中断的直接影响,也包括管网中用水节点的流量损失、修复过程中交通扰动和健康威胁等间接影响。

3.3 措施集合:从传统技术向革新转变

传统的供水管网维护措施主要以维修和更换管道措施为主。随着科学技术进步,新技术、新产品、新工艺不断得到研发和市场应用,供水管道维护从传统技术向革新技术转变。这些革新技术包括新型管材、新型管道维护与修复技术等,导致供水管道韧性强、生命周期长,能够减少腐蚀所带来供水水质下降,降低温度应力对管道结构的影响以减少漏损事件的发生。例如,供水管网非开挖技术取得突破性进展,将极大减少新管道安装费用并降低现有管道修复的成本。再比如,低成本、高精度的供水管道探地雷达技术得到开发利用^[20],为供水企业实行精准化和经济性的管道维护提供了可能。应尽快建立供水管网优化维护的措施集合,并对各项措施的技术适用性、经济可行性以及社会可接受性进行具体分析,为供水管网优化决策提供详细的备选方案库。

3.4 优化决策:从单目标决策向多目标优化转变

在供水管网维护资金有限的条件下,为保障供水的水量、水质以及压力满足要求,供水企业传统的

单目标决策向多目标优化转变,通过优化算法寻优,动态识别管网中不同时间的维护对象、维护措施和维护效果。传统的经济性目标始终是决策者关注的热点,随着对供水管网观测和认识水平的不断提高,近年来研究者对于经济成本的考虑更为综合,包括了管道失效所带来的用户直接、间接影响以及社会影响等费用。此外,实现提高供水管网水力可靠性、水质安全性以及弹性等多元目标,也逐渐成为决策者的价值取向。通过多目标的权衡分析和寻优,供水企业愈加采取更为主动地预防性维护措施,以减少用户投诉,提高供水系统的绩效水平。

3.5 方案实施:从短期计划向全生命周期管理转变

基于优化决策结果,供水企业进一步制定供水管网维护的实施计划,从短期计划逐渐向生命周期管理转变,从中长期的视角开展动态化、高效化地维护。供水企业将根据供水管网维护方案年度的实施情况进行动态跟踪评估,不断滚动修正后续的年度计划,以生命周期为基础实现供水管道失效与维护在动态中均衡,最大化地降低不确定性。

4 结语

针对供水管网存在输水能力差、存在安全隐患等问题,供水管网优化维护旨在综合考虑技术经济

特点,识别维护管道对象和时机,进行维护优化决策,并实施抢修、修复和更新改造的活动,以最大化减少供水管道失效所带来的负面影响。本研究充分融合已有研究成果,分析了供水管网优化维护发展的3个阶段,提出了供水管网维护的3个基本理论,并探索建立了面向全生命周期的一体化技术框架。研究旨在推动供水企业采取更积极主动和优化维护策略,实现从传统记录向大数据融合转变、从状态评价向风险辨识转变,从传统技术向革新技术转变、从单目标决策向多目标优化转变以及从短期计划向全生命周期管理转变,建立更为现代、高效的供水管道维护模式。从未来发展趋势看,随着技术不断进步,供水管网维护的智能化、精准化程度将明显提升。

参考文献:

- [1] SHAMIR U, HOWARD C D D. An analytic approach to scheduling pipe replacement [J]. American Water Works Association, 1979, 71(5) :248-258.
- [2] MOHAMED E, ZAYED T. Modeling fund allocation to water main rehabilitation projects [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2013, 27 (5) : 646-655.
- [3] DANDY G C, ENGELHARDT M O. Multi-objective trade-offs between cost and reliability in the replacement of water mains [J]. Journal Water Resources Planning Management, 2006, 132(2):79-88.
- [4] ROSHANI E, FILION Y R. Water distribution system rehabilitation under climate change mitigation scenarios in Canada [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2015, 141(4) :04014066.
- [5] SELVAKUMAR A, TAFURI A N. Rehabilitation of aging water infrastructure systems:key challenges and issues[J]. Journal of Infrastructure Systems, 2012, 18(3) :202-209.
- [6] U. S. Environmental Protection Agency. Drinking water infrastructure needs survey [S]. Washington D. C. : First Report to Congress, 1997.
- [7] HONG H P, ALLOUCHE E N, TRIVEDI M. Optimal scheduling of replacement and rehabilitation of water distribution systems[J]. Journal of Infrastructure Systems, 2006, 12(3) :184-191.
- [8] SCHOLTEN L, SCHEIDECKER A, REICHERT P, et al. Strategic rehabilitation planning of piped water networks using multi-criteria decision analysis[J]. Water Research, 2014, 49:124-143.
- [9] SELVAKUMAR A, STERLING R, WANG L, et al. Rehabilitation of wastewater collection and water distribution systems:state of technology review report[R]. Washington D. C. : Environmental Protection Agency, 2009.
- [10] KABIR G, TESFAMARIAM S, FRANCISQUE A, et al. Evaluating risk of water mains failure using a Bayesian belief network model[J]. European Journal of Operational Research, 2015, 240:220-234.
- [11] FARES H, ZAYED T. Hierarchical fuzzy expert system for risk of failure of water mains [J]. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 2010, 1(1) :53-62.
- [12] 班福忱,郭芷彤,张晶. 基于Android供水管网移动端巡检系统设计[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020, 36 (5) : 904-909. (BAN Fuchen, GUO Zhitong, ZHANG Jing. Design of mobile inspection system for water supply pipeline network based on android [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2020, 36 (5) :904-909. (in Chinese))
- [13] 徐强,张佳欣,王莹,等. 智慧水务背景下的供水管网漏损控制研究进展 [J]. 环境科学学报, 2020, 40 (12) : 4234-4239. (XU Qiang, ZHANG Jiaxin, WANG Ying, et al. Research progress on water loss control of distribution networks under smart water supply conditions [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40 (12) :4234-4239. (in Chinese))
- [14] GAT Y L. Extending the Yule process to model recurrent pipe failures in water supply networks [J]. Urban Water Journal, 2014, 11(8) :617-630.
- [15] LIU Z, KLEINER Y, RAJANI B, et al. Condition assessment technologies for water transmission and distribution systems [S]. Washington D. C. : Environmental Protection Agency, 2012.
- [16] HALFWAY M R, BAKER S. GIS-based decision support system for evaluating costs and benefits of sewer renewal technologies [C]//International No-Dig Show Conference Proceedings, Toronto: North American Society for Trenchless Technology Chicago IL, 2009.
- [17] RAJANI B, KLEINER Y. Comprehensive review of structural deterioration of water mains: physically based models[J]. Urban Water Journal, 2001, 3(3) :151-164.
- [18] KLEINER Y, RAJANI B. Comprehensive review of structural deterioration of water mains: statistical models [J]. Urban Water Journal, 2001, 3(3) :131-150.
- [19] 丁相毅,石小林,凌敏华,等. 基于因子分析的供水管网健康状态评价指标遴选 [J]. 水资源保护, 2021, 37 (6) :67-73. (DING Xiangyi, SHI Xiaolin, LING Minhua, et al. Selection of evaluation indicators for water supply network health status based on factor analysis [J]. Water Resources Protection, 2021, 37 (6) :67-73. (in Chinese))
- [20] 王俊岭,徐怡,韩伟,等. 城市供水产销差率与漏损控制研究进展 [J]. 水资源保护, 2017, 33 (5) : 48-52. (WANG Junling, XU Yi, HAN Wei, et al. Research progress of non-revenue water and leakage control of urban water supply system [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(5) :48-52. (in Chinese))