

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.02.004

排水管网资产管理技术和工具研究进展

王浩正¹, 蔡 然², 骆春会¹, 刘智晓², 刘龙志¹, 许申来³

(1. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300381; 2. 北京首创股份有限公司, 北京 100044; 3. 长江生态环保集团有限公司, 湖北 武汉 430062)

摘 要: 城市排水管网系统是城市基础设施的重要组成部分, 不仅承担着收集污水、废水、雨水和防洪排涝的责任, 而且影响着城市景观、环境卫生及水环境安全。目前由于缺少有效的资产管理, 排水管网不断恶化, 因此从提高全生命周期价值的角度, 进行资产评估和信息化管理以便更经济高效地运营维护和改造升级管网系统变得愈发重要。对国内外排水管网资产管理相关的方法和工具研究进展进行了总结, 并对国内开展排水管网资产管理工作提出了展望。

关键词: 排水管网; 资产评估; 资产管理

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)02-0018-07

Research Progress on Asset Management Technology and Tools of Drainage Network

WANG Hao-zheng¹, CAI Ran², LUO Chun-hui¹, LIU Zhi-xiao², LIU Long-zhi¹, XU Shen-lai³

(1. North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300381, China; 2. Beijing Capital Co. Ltd., Beijing 100044, China; 3. Yangtze Ecology and Environment Co. Ltd., Wuhan 430062, China)

Abstract: Urban drainage network system is an important part of urban infrastructure, which not only takes the responsibility of collecting sewage, wastewater, rainwater and flood control and drainage, but also affects the urban landscape, environmental sanitation and water environmental safety. At present, the drainage network is deteriorating due to the lack of reliable asset management, so it becomes more and more important to carry out asset evaluation and information management from the perspective of improving the value of the life cycle in order to operate, maintain and upgrade the network system more economically and efficiently. This paper summarized the research progress of methods and tools for asset management of drainage network at home and abroad, and put forward the prospect of developing of asset management of drainage network in China.

Key words: drainage network; asset evaluation; asset management

排水管网是城市的重要基础设施, 然而排水管网规模不断扩大的同时, 其资产管理水平仍很低, 导致状态不断恶化。排水管网的结构和功能性故障导致的服务故障、公共卫生等问题日益突出, 亟需利用先进的技术, 对排水管网及相关数据进行信息化管

理, 并利用这些数据对管网的结构与功能状态进行评估和预测, 及时准确地掌握资产状况, 从而做出经济有效的维护、修复和更换决策。基于保障排水安全、提高预算分配效率等考虑, 国外学者对评估算法、预测模型、评估工具等在排水管网资产管理中的

应用进行了很多研究。随着城市内涝防治、黑臭水体治理和污水系统提质增效工作的深入,国内逐渐重视排水管网的问题,出台了一系列法规,但是排水管网埋藏于地下,状态难于准确评估和预测,如何在有效的资金下提高管网系统的最大效益,是当前污水系统提质增效工作面临的重要问题之一。由于经验不足、数据缺乏,我国尚未形成科学的管网资产管理辅助评估、预测和决策支持体系。

1 管网资产管理概要

美国环保局出台的污水收集系统资产管理说明书^[1]中表明,没有定期维护的管道资产通常比预期恶化得更快,从而导致更高的更换和应急成本。如果在较长的规划周期内定期进行科学的管养和升级,会大大降低管网资产整个生命周期中的成本。管网资产管理模型如图1所示。

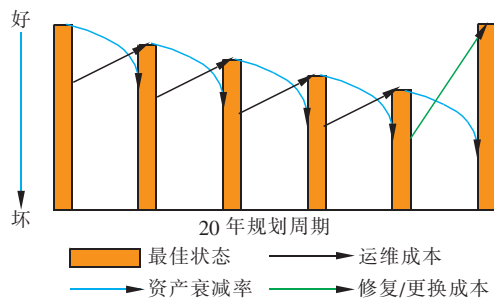


图1 管网资产管理模型

Fig. 1 Drainage network asset management model

为了减少管网恶化带来的损失,科学分配预算,提高管网全生命周期的价值,国外研究人员开发了一系列方法和工具,主要分为管网性能评估和预测方法、管网维护和修复成本分析方法以及管网资产管理决策支持方法和工具三类,具体如图2所示。

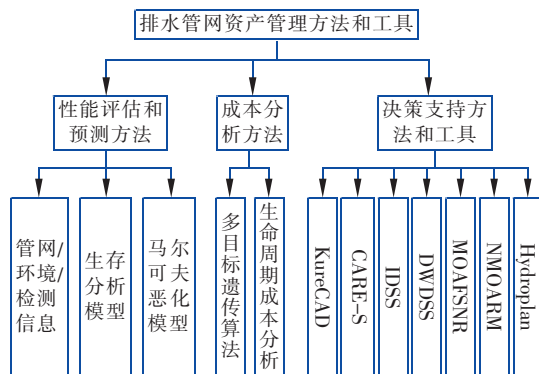


图2 排水管网资产管理方法和工具

Fig. 2 Methods and tools for asset management of drainage network

这些方法的侧重点各不相同,但考虑的基本参数类似。图3为排水管网资产管理决策支持流程以及常见方法/工具中主要考虑的参数,主要包括管道的基本属性、外部环境属性、内部缺陷属性和性能属性等。

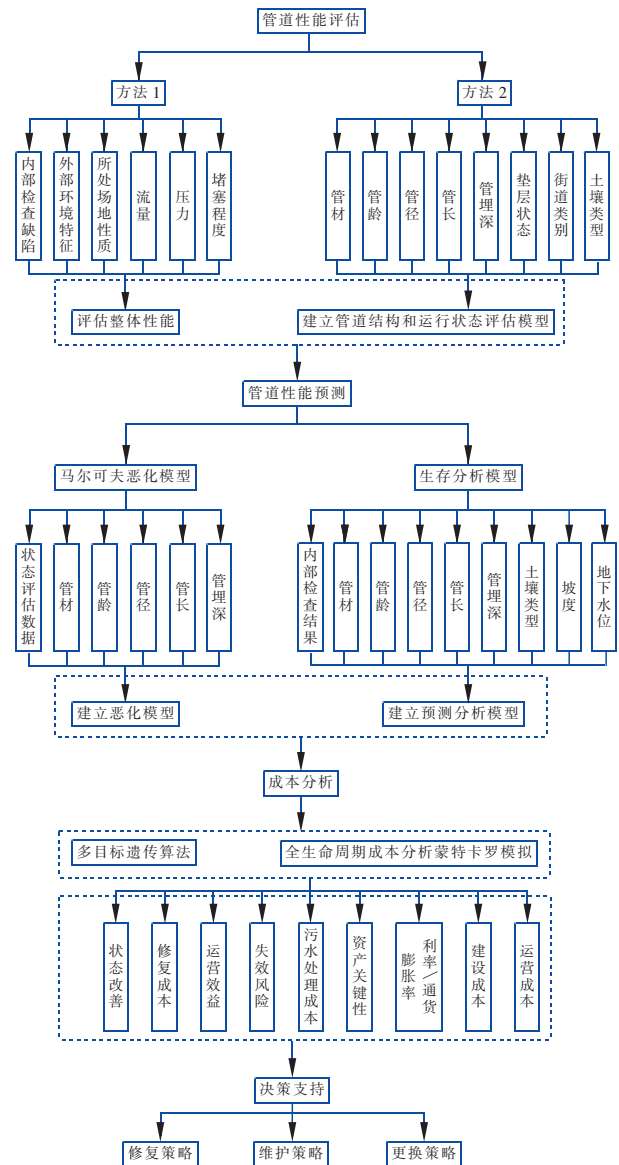


图3 排水管网资产管理流程

Fig. 3 Asset management process of drainage network

2 性能评估和预测方法

对管网的性能进行准确可靠的评估和预测是考虑未来管道维护、修复或更换优先级的第一步,也是成功实施管网资产管理计划的关键之一。国外学者对管网性能评估和预测方法的研究结果汇总如表1所示。

表1 不同学者提出的管网性能评估和预测方法的汇总

Tab.1 Summary of performance evaluation and prediction methods by different scholars

作者	目标	方法特点
Tagherouit W B 等 ^[2]	管道性能评估	根据管道内部缺陷、所处环境特征评估结构性能,根据数学模拟评估水力性能,最后结合所有因素评估管道整体性能
Saegrov S 等 ^[3]	管道性能评估	根据调查的性能指标,利用相关模型评估管网的水力、环境和结构状态
Chughtai F 等 ^[4]	管道性能评估	通过考虑各种物理、环境和运行影响因素,采用多元回归技术建立管道结构和运行状况评估模型来评估管道的现状
Ruwanpura J 等 ^[5]	管道性能预测	根据管龄、管材和管长预测管道当前的状态等级,再利用马尔可夫链模型预测管道未来的状态,最后利用成本预测模型预测管道当前和未来的改造成本
Van Herzele F 等 ^[6]	管道性能预测	利用检测结果和老化模型预测管道结构状态,使用水力模型评估管道水力状态,最终计算管道发生故障的概率
Duchesne S 等 ^[7]	管道性能预测	利用检测数据,基于生存分析原理建立指数和威布尔模型预测管网结构恶化风险
Jin Y L 等 ^[8]	管道性能预测	利用马尔可夫链模型进行基础设施状态的预测
Ward B 等 ^[9]	管道性能预测	利用半马尔可夫恶化矩阵预测管道未来状态等级,根据管道的总长度、状态等级、各等级的管道长度等计算管道未来的坍塌率

① 管道性能评估方法

管道性能评估方法一般是利用管道内部检测的缺陷、外部环境特征、所处场地性质来评估管道的结构性能,根据流量、压力等指标评估管道的水力性能,最后结合以上因素评估管道的整体性能(见图1)。将管道划分成不同等级,以便确定管道维护或修复的优先次序^[2-3]。也有研究通过分析影响管道状态的物理、环境等因素,如管材、管龄、管径、管长、管埋深、土壤类型、街道类别等,建立管道结构和运行状况评估模型(见图1)^[4-5],帮助管理者确定关键管道、确定管道检测的优先顺序和修复需求。

② 管道性能预测常见的方法

a. 生存分析模型^[6-7]:通过建立管网状态过渡函数或管网老化模型,并结合管道内部检测结果来预测管道的老化速度,即管网从一个状态等级转变成下一个较差状态等级所需的年数,从而协助管理者规划管道检测、修复和改造频率。但是该方法建

立的模型比较复杂,而且只能预测管道的结构性能,不能预测管道的水力性能。

b. 马尔可夫恶化模型^[8]:该模型假设排水管网未来的状态只与当前状态有关,先通过内部检测和水力模型评估管网当前的结构状态和水力状态,再利用马尔可夫恶化模型根据当前状态评估的结果和管龄、管材、管长等信息预测管网状态转移概率。该方法考虑了更多因素,但是该方法需要的数据量大、对分析人员要求较高。

近几年还有研究人员提出了预测污水管道性能的恶化和坍塌模型^[9],除了利用半马尔可夫恶化矩阵预测管道未来状态等级外,还根据管道的总长度、状态等级、各等级的管道长度等信息来计算管道未来的坍塌率,从而更全面地预测管网未来情况,指导管理者优先修复具有高故障风险的管道,节约调查时间和成本。

上述模型主要公式见表2。

表2 性能预测公式总结

Tab.2 Summary of performance prediction formula

模型名称	公式	说明
生存分析模型	$S_i(t) = Pr(T > t) = \exp[-(\lambda_i t)^{\beta_i}]$	$S_i(t)$ 表示管道在状态 <i>i</i> 下停留时间长于 <i>t</i> 的概率; λ_i 为尺度参数; β_i 为形状参数
马尔可夫恶化模型	$P_2 = P_1 P, P_3 = P_2 P, \dots, P_N = P_{N-1} P$	P 为状态转移矩阵; P_1 为当前状态矩阵; P_N 为第 <i>N</i> 年状态矩阵
性能恶化和坍塌模型	$P_2 = P_1 P, P_3 = P_2 P, \dots, P_N = P_{N-1} P$ $\lambda = [L \times \sum_{i=3}^5 (C_i \cdot P_i)] + C_c$	P 为状态转移矩阵; P_1 为当前状态矩阵; P_N 为第 <i>N</i> 年状态矩阵; λ 为下水道倒塌率; L 为按组别划分的污水渠总长度; C_i 为状态等级系数; P_i 为各自状态等级下的管道长度比例; C_c 为考虑第三方事件的常数系数

国内在排水管网性能评估和预测方面研究较晚,且仅局限在采用单一数据进行的现状性能评估,

如基于内部检测的评估方法^[10-11]、基于监测的评估方法^[12-13]和基于模型的评估方法^[14]等。

3 成本分析方法

日益增长的管道维护和修复需求与有限的预算之间的矛盾一直是很多国家排水管理部门所困扰的

问题。如何在有限的资金下解决尽可能多的排水问题是完成管网性能评估和预测后的另一项重要工作。也有研究通过成本分析方法为第一步管网状态评估工作制定最佳预算分配方案。表3为国外对管网维护和修复成本分析方法的研究结果汇总。

表3 不同学者提出的成本分析方法的汇总

Tab.3 Summary of cost analysis methods by different scholars

作者	目标	方法特点
Ward B 等 ^[15]	改进管网建设/运行/维护决策	利用多目标遗传算法制定最佳管道修复方案,最大化改善结构状态、最小化修复成本、最小化关键资产故障风险
Ward B 等 ^[16]	改进管网建设/运行/维护决策	利用多目标遗传算法找出最佳管道修复方案,使其可以最大化资产寿命、最小化修复成本、最大化运营效益
Atef A 等 ^[17]	为管网状态评估制定最佳预算分配方案	利用单目标和多目标遗传算法找出最佳状态评估技术使其能全面、准确地评估管网,并且成本最小化
Ryu J 等 ^[18]	改进管网建设/运行/维护决策	利用快速混沌遗传算法规划管道修复策略,使排水处理费用和管道修复费用最小化
Farran M 等 ^[19]	改进管网建设/运行/维护决策	利用马尔可夫链预测基础设施的恶化,利用遗传算法寻找最佳的基础设施修复方法,使生命周期成本最低
Jin Y L ^[20]	改进管网建设/运行/维护决策	利用马尔可夫链模型预测管道状态,并在管道制造、施工和维护阶段利用生命周期成本分析选择最佳策略
Marlow D 等 ^[21]	改进管网建设/运行/维护决策	对可用技术的实用性和经济进行评估,计算技术上可行的修复方案的最低使用寿命,同时考虑修复方案的生命周期成本
Azeez K 等 ^[22]	改进管网建设/运行/维护决策	利用模糊和模拟方法来开发生命周期成本模型,以处理模糊、不精确或不完整的数据
Marzouk M 等 ^[23]	改进管网建设/运行/维护决策	利用多目标遗传算法和全生命周期成本分析选择最适当的运维方案
Altarabsheh A 等 ^[24]	改进管网建设/运行/维护决策	将多目标遗传算法与蒙特卡罗模拟相结合,在最大限度提高管网状态的同时,最小化整个规划期内管网故障风险和成本

管网资产管理成本分析中常见的方法是多目标遗传算法(MOGA)和全生命周期成本分析法(LCCA),利用这两种方法可以评估管道修复方案的技术和经济风险,计算修复方案的最低成本及全生命周期建设和维护成本,从而帮助管理者制定最佳资产管理方案。

多目标遗传算法借鉴自然选择和遗传学机理,在选择管道修复方案时,考虑多个目标函数,如最小化修复成本[见式(1)]、最大化改善管道结构状况[见式(2)]、最小化关键资产故障风险[见式(3)]、最大化运营效益[见式(4)]、最小化入流/入渗导致的污水处理成本[见式(5)]等^[15-18],然后利用该方法将所有备选的修复技术进行选择、交叉和变异,最终选出能同时满足多个目标的最优修复技术,为管道修复工作确定优先次序并估计最佳预算。

$$C = \beta \cdot (C_r \times \alpha) + C_m \quad (1)$$

式中: C 为总成本; C_r 为原始单价; β 为成本因

子; α 为修复因子; C_m 为启动成本。

$$\Delta S = S^0 - S^1 = \sum_{x=1}^L S_d^0(x) - \sum_{x=1}^L S_d^1(x) \quad (2)$$

式中: ΔS 为提高的结构评分; S^0 为初始结构评分; S^1 为修复后结构评分; S_d^0 为结构缺陷修复前观察评分; S_d^1 为修复后结构缺陷观察评分; L 为管段长度。

$$R_c = \sum_{x=1}^L \text{Max}[S_d^1(x)] \cdot C_w \quad (3)$$

式中: R_c 为失效风险; C_w 为关键性加权。

$$\text{OB} = \text{yr} \cdot \sum_{x=1}^5 f_x \left(\frac{\sum \text{PR}_x}{T2_x - T1_x} \right) + \sum_{\text{Ref}=A}^J [P_{\text{Ref}} \cdot (\text{PR}_{\text{Ref}} + S/E_{\text{Ref}})] \quad (4)$$

式中:OB为运营效益;yr为年数; f 为事故解决概率; $T1$ 为事故发生时间; $T2$ 为事故结束时间;PR为每次事件产生的私人成本; x 分别代表五类事件,1表示堵塞纸/布,2表示堵塞树根,3表示坍塌,4表示部分坍塌,5表示有可能坍塌;Ref表示管道坍塌

后导致的事件,如交通中断、洪涝、污染等; P_{Ref} 为每次坍塌导致相应事件发生的概率; S/E_{Ref} 为每次事件产生的社会/环境成本。

$$C_{\text{总}} = TC_i(\vec{j}, \vec{t}^R) + \sum_{i=1}^{n_s} [RC_i(j_i, \vec{t}^R) + MC_i(j_i, \vec{t}^R)] \quad (5)$$

式中: $C_{\text{总}}$ 为污水处理及修复维护总成本; TC_i 为污水处理成本在 t 时刻的现值; RC_i 为对管道 i 维修费用的现值; MC_i 为对管道 i 的维护费用现值; n_s 为污水管总数量; \vec{t}^R 为管道维修时间; \vec{j} 为管道所有的缺陷类型; j_i 为管道 i 的缺陷类型,分为功能性缺陷和结构缺陷。

在选择管道修复方法的过程中,除了要考虑修复技术的成本,还要考虑修复后管道的使用寿命即后期成本效益,因此使用全生命周期成本分析法选择管网维护和修复方案是很多地区研究和使用的方[19-21]。由于一些成本相关参数(如利率、通货膨胀率)的不确定性导致难以估计未来的支出和收益,采用此方法进行管网修复成本分析存在一定的

不确定性,因此有研究人员利用模糊和模拟方法开发管道修复的全生命周期成本模型来处理模糊、不精确或不完整的数据[22],或使用蒙特卡罗模拟方法计算未来可能的成本[23-24],从而帮助工作人员规划合适的管道安装或修复工作及计算相关成本。

国内目前还没有形成科学的成本分析方法来选择排水管道维护或修复策略,大部分研究是基于个别非开挖修复技术的环境效益分析、社会成本计算或经济性评价[25-26]的分析。

4 决策支持方法和工具

完善的管网资产管理除了管理管网基本信息、评估/预测管网性能、分析维护和维修成本外,还需要基于有限的预算制定优化的管网修复和维护策略,国外研究人员在此方面也开发了比较完整的管网资产管理决策支持方法和工具,具体见表4。国内相关研究主要通过对管网资产信息的管理或根据管网运行状态评估制定维护计划,但对相关预测模型、成本分析方法的研究和使用较少,尚不具备完整的资产管理理念和功能。

表4 不同学者提出的决策支持方法和工具的汇总

Tab. 4 Summary of decision support methods and tools by different scholars

作者	目标	方法特点
Saegrov S 等 ^[3]	指导管网修复和维护	可以存储管网及与管网性能有关的一系列指标和修复技术等信息,根据性能指标评估管网的结构状态和水力性能,可评估不同修复技术的实用性、经济性和可靠性,为需要优先修复的管网选择最佳技术,并根据预测的管网状态制定长期维护和修复策略
Van Herzele F 等 ^[6]	指导管网修复和维护	建立资产数据库,评估管道结构和水力状态,利用蒙特卡罗模拟计算全生命周期成本,生成管网短期修复计划和长期运维策略
Kleidorfer M 等 ^[27]	指导管道修复	开发了一种修复策略规划工具,讨论了污水管道状态、未来性能发展和脆弱性评估等方法
Debères P 等 ^[28]	指导管道修复	根据管道检测报告和其他指标(如经济、社会或环境指标)制定修复计划,使用多准则分析确定要修复的管段
Bouamrane A 等 ^[29]	指导管网维护	开发了一个决策支持工具,帮助管理者根据技术、经济、社会和环境标准为污水管网管理/维护提供解决方案
Halfawy M R 等 ^[30]	指导管网系统更新	采用恶化模型预测管网的状态等级,确定管网更新的优先顺序,利用基于遗传算法的多目标优化技术确定和选择能有效改善管网状态、最小化风险和成本、最大化预期效益的最合适的管网更新技术
Park T 等 ^[31]	长效决策支持工具	使用数据仓库技术管理管道的安装信息、检测信息和更新信息等,决策支持模块为每条管道分配适当的检测和更新方法,并估算相关技术成本,可以生成详细的管理报告
Marzouk M 等 ^[23]	指导管网维护	利用马尔可夫恶化模型预测管网未来的情况,利用蒙特卡罗模拟,根据利率和通货膨胀率计算运维策略成本的累计净现值,利用多目标遗传算法选择运维方案,以最小化全生命周期成本和管网故障风险、最大化运营效益和最大化改善管网状态
Altarabsheh A 等 ^[24]	指导管网维护	利用马尔可夫恶化模型预测管网未来的情况,利用蒙特卡罗模拟计算运维成本、建设成本,利用多目标遗传算法,根据污水管网在其整个生命周期内的建设成本、运营成本和预期效益来选择最适当的运维方案

5 总结和展望

国外资产管理研究主要集中在三个方面:①对管网性能的评估和预测是进行管网资产管理的基

础,通常利用内部检测数据评估管网当前的状态,利用马尔可夫恶化模型预测管网未来的状态。②管网维护和修复策略的成本是资产管理者最关心的问

题,多目标遗传算法和生命周期成本分析法是进行成本分析并选择最佳维护和修复策略的最常用方法。③通过开发资产管理决策支持工具,管理管网基本信息、评估和预测管网性能以及分析管网维护和修复成本,最终生成管网运维和修复计划,可以指导工作人员高效地开展管网资产管理工作。

我国在排水管网资产管理体系方面与国外存在一定差距,目前仅实现了管网性能的评估,还无法根据收集的数据进行综合决策分析,辅助管网规划改造、运营维护等。但是国内研究提出了很多适合国内现状的方法,推动了行业进步。国外的资产管理工具虽然发展较为成熟,但是由于管网状态、管理体制等各不相同,能否适用我国排水管网现状尚需检验。因此,需要结合我国排水管网的特性来开发可操作、可落地的管网资产管理技术体系和工具,从而更科学、更经济地开展污水管网的提质增效工作。

参考文献:

- [1] United States Environmental Protection Agency. SSO Fact Sheet - Asset Management for Sewer Collection Systems [M]. America: Office of Wastewater Management, 2002.
- [2] TAGHEROUI W B, BENNIS S, BENGASSEM J. A fuzzy expert system for prioritizing rehabilitation of sewer networks [J]. Computer-aided Civil & Infrastructure Engineering, 2011, 26(2): 146 - 152.
- [3] SAEGROV S, SCHILLING W. CARE - S: Computer Aided Rehabilitation of Sewer and Storm Water Networks [M]. London: IWA Publishing, 2006.
- [4] CHUGHTAI F, ZAYED T. Infrastructure condition prediction models for sustainable sewer pipelines [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2008, 22(5): 333 - 341.
- [5] RUWANPURA J, ARIARATNAM S T, EI-ASSALY A. Prediction models for sewer infrastructure utilizing rule-based simulation [J]. Civil Engineering and Environmental Systems, 2004, 21(3): 169 - 185.
- [6] VAN HERZEELE F, BOONEN I, VAN ASSEL J, et al. Hydroplan - EU knowledge management framework for urban water asset management [C] // IAHR, IAHS, IWA. Proceedings of 7th International Conference on Hydroinformatics 2006. France: International Association of Hydraulic Engineering and Research (IAHR), International Association of Hydrological Sciences (IAHS) and International Water Association (IWA), 2006: 48 - 56.
- [7] DUCHESNE S, BEARDSSELL G, VILLENEUVE J P, et al. A survival analysis model for sewer pipe structural deterioration [J]. Computer-aided Civil & Infrastructure Engineering, 2013, 28(2): 146 - 160.
- [8] JIN Y L, MUKHERJEE A. Markov chain applications in modeling facility condition deterioration [J]. International Journal of Critical Infrastructures, 2014, 10(2): 93 - 112.
- [9] WARD B, SELBY A, GEE S, et al. Assessing impacts of the private sewer transfer on UK utilities [J]. Infrastructure Asset Management, 2014, 1(2): 23 - 33.
- [10] 王和平. 排水管道健康状况评估方法的研究 [J]. 给水排水, 2011, 37(8): 112 - 116.
WANG Heping. Study on evaluation of the drainage pipe condition [J]. Water & Wastewater Engineering, 2011, 37(8): 112 - 116 (in Chinese).
- [11] 方门福, 潘文俊, 韩葵. 排水管网健康状况检测及评估技术方法 [J]. 城市勘测, 2018(增刊): 82 - 86.
FANG Menfu, PAN Wenjun, HAN Kui. Study on the method of health condition detection and evaluation of drainage network [J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2018(S1): 82 - 86 (in Chinese).
- [12] 盛政, 刘旭军, 王浩正, 等. 城市污水管道入流渗入监测技术研究与应用进展 [J]. 环境工程, 2013, 31(2): 17 - 21.
SHENG Zheng, LIU Xujun, WANG Haozheng, et al. Study on field monitoring technology for urban drainage network system management [J]. Environmental Engineering, 2013, 31(2): 17 - 21 (in Chinese).
- [13] 金利姣. 基于 GIS 与物联网的智慧排水综合管理系统建设 [J]. 能源与环保, 2018, 40(12): 154 - 156, 161.
JIN Lijiao. Construction of intelligent drainage integrated management system based on GIS and Internet of Things [J]. China Energy and Environmental Protection, 2018, 40(12): 154 - 156, 161 (in Chinese).
- [14] 盛政, 曹尚兵, 赵冬泉. 数字排水平台的设计与开发 [C] // 中国地理信息系统协会. 2009 第八届 ESRI 中国用户大会论文集. 北京: 测绘出版社, 2009: 462 - 466.
SHENG Zheng, CAO Shangbing, ZHAO Dongquan. Design and development of Digital Water DS [C] // China Association for Geographic Information Service. Proceedings of the 8th ESRI China User Conference.

- Beijing: Surveying and Mapping Press, 2009: 462 – 466 (in Chinese).
- [15] WARD B, SAVIC D A. A multi-objective optimisation model for sewer rehabilitation considering critical risk of failure [J]. *Water Science & Technology*, 2012, 66 (11): 2410 – 2417.
- [16] WARD B, KAWALEC M, SAVIC D. An optimised total expenditure approach to sewerage management [J]. *Municipal Engineer*, 2014, 167(2): 191 – 199.
- [17] ATEF A, OSMAN H, MOSELHI O. Multiobjective genetic algorithm to allocate budgetary resources for condition assessment of water and sewer networks [J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2012, 39 (9): 978 – 992.
- [18] RYU J, PARK K H. Planning rehabilitation strategy of sewer asset using fast messy genetic algorithm [C] // WCEAM. 9th WCEAM Research Papers: Volume 1 Proceedings of 2014 World Congress on Engineering Asset Management. Switzerland: Springer International Press, 2015: 61 – 71.
- [19] FARRAN M, ZAYED T. New life-cycle costing approach for infrastructure rehabilitation [J]. *Engineering Construction and Architectural Management*, 2012, 19 (1): 40 – 60.
- [20] JIN Y L. Integration of stochastic approaches in the life cycle cost analysis of sewer pipe applications [J]. *International Journal of Production Economics*, 2016, 179: 35 – 43.
- [21] MARLOW D, GOULD S, LANE B. An expert system for assessing the technical and economic risk of pipe rehabilitation options [J]. *Expert Systems with Applications*, 2015, 42 (22): 8658 – 8668.
- [22] AZEEZ K, ZAYED T, AMMAR M. Fuzzy-versus simulation-based life-cycle cost for sewer rehabilitation alternatives [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2013, 27(5): 656 – 665.
- [23] MARZOUK M, OMAR M. Multiobjective optimisation algorithm for sewer network rehabilitation [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2013, 9 (11): 1094 – 1102.
- [24] ALTARABSHEH A, KANDIL A, VENTRESCA M. New multiobjective optimization approach to rehabilitate and maintain sewer networks based on whole lifecycle behavior [J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2018, 32(1): 04017069.
- [25] 孙长申, 孙平贺. 非开挖技术的社会成本计算与应用 [J]. *非开挖技术*, 2015(2): 11 – 15.
- SUN Changshen, SUN Pinghe. Study on social cost of trenchless technology [J]. *China Trenchless Technology*, 2015(2): 11 – 15 (in Chinese).
- [26] 熊露. 排水管道非开挖修复技术经济评价指标体系的研究 [D]. 广州: 广东工业大学, 2015.
- XIONG Lu. Study on Trenchless Repair Economic Evaluation Index System of Drainage Pipes [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2015 (in Chinese).
- [27] KLEIDORFER M, MODERL M, TSCHIEKNER-GRATL F, et al. Integrated planning of rehabilitation strategies for sewers [J]. *Water Science & Technology*, 2013, 68 (1): 176 – 183.
- [28] DEBÈRES P, AHMADI M, MASSIAC J C D, et al. Deploying a sewer asset management strategy using the indigau decision support system [J]. *Optics Express*, 2012, 16(9): 5997 – 6007.
- [29] BOUAMRANE A, BOUZIANE M T, BOUTEBBA K. Decision support system for the management and maintenance of sewer networks [J]. *Larhyss Journal*, 2014(20): 297 – 315.
- [30] HALFAWY M R, DRIDI L, BAKER S. Integrated decision support system for optimal renewal planning of sewer networks [J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2008, 22(6): 360 – 372.
- [31] PARK T, KIM H. A data warehouse-based decision support system for sewer infrastructure management [J]. *Automation in Construction*, 2013, 30: 37 – 49.
-
- 作者简介: 王浩正 (1980 –), 男, 河北涿州人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为城市排水系统智慧化管理技术。
- E-mail: 26802514@qq.com
- 收稿日期: 2019 – 11 – 01
- 修回日期: 2019 – 12 – 22

(编辑: 丁彩娟)