

张俊斌, 张怡坤, 白志强, 等. 基于粒子群算法的寒区排水管网非开挖修复技术遴选方法[J]. 净水技术, 2026, 45(8): 173–184.

Zhang J B, Zhang Y K, Bai Z Q, et al. PSO-based selection method for trenchless rehabilitation technology of drainage pipelines network in cold region [J]. Water Purification Technology, 2026, 45(8): 173–184.

基于粒子群算法的寒区排水管网非开挖修复技术遴选方法

张俊斌¹, 张怡坤², 白志强^{2,*}, 郑 涛¹, 刘 宇¹, 柴祺蛟¹, 王雪飞²

(1. 中交<内蒙古>建设发展有限公司, 内蒙古呼和浩特 010000; 2. 内蒙古科技大学土木工程学院, 内蒙古包头 014010)

摘 要 【目的】针对寒区城市排水管网非开挖修复工程中修复技术类型多样、影响因素复杂且现有技术遴选过程依赖经验、缺乏定量决策依据的问题。本文提出一种兼顾经济性、结构与运行可靠性及环境影响的修复技术智能遴选方法, 为寒区排水管网修复方案的科学决策提供支撑。【方法】结合寒区低温环境及冻融循环条件下排水管网的服役特征, 构建多指标综合评价体系, 并建立相应的多目标优化模型。采用粒子群优化(PSO)算法对多种非开挖修复技术方案进行全局搜索, 获得帕累托最优解集; 在此基础上, 引入逼近理想解排序法(TOPSIS), 对多目标优化结果进行综合排序与优选。以呼和浩特市寒区排水管网非开挖修复工程为算例, 对多种常用修复技术的适用性进行验证分析。【结果】PSO能够在有限迭代次数内稳定收敛, 形成结构清晰的帕累托最优解集, 较好地揭示了修复成本、可靠性提升与环境影响之间的权衡关系。TOPSIS分析结果表明, 原位固化法(CIPP)为主、喷涂衬装为辅的组合方案在综合意义上表现最优, 该方案在控制总成本的同时显著提升了管网结构可靠性, 并有效降低施工环境影响, 结果与工程实际相符。【结论】本文所提出的 PSO-TOPSIS 组合方法能够实现寒区排水管网非开挖修复技术的定量化、系统化遴选, 具有计算稳定、结果直观和工程适用性强等优点, 可为寒区城市排水管网修复方案决策提供可靠参考。

关键词 排水管网; 非开挖修复; 多目标优化; 粒子群优化算法; 寒区工程

中图分类号: TU992 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-0177(2026)08-0173-12

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.08.018

PSO-Based Selection Method for Trenchless Rehabilitation Technology of Drainage Pipelines Network in Cold Region

Zhang Junbin¹, Zhang Yikun², Bai Zhiqiang^{2,*}, Zheng Tao¹, Liu Yu¹, Chai Qijiao¹, Wang Xuefei²

(1. China Communications <Inner Mongolia> Construction & Development Co., Ltd., Hohhot 010000, China;

2. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

Abstract [Objective] This paper addresses the problems of diversified trenchless rehabilitation technologies, complex influencing factors, and the lack of quantitative decision-making support in cold-region drainage pipeline rehabilitation projects, an intelligent selection method considering economic performance, structural and operational reliability, and environmental impact is proposed. [Methods] Considering the service characteristics of drainage networks under low-temperature environments and freeze-thaw cycles, multi-criteria evaluation system and corresponding multi-objective optimization model were developed. Particle swarm optimization (PSO) algorithm was employed to conduct a global search among alternative trenchless rehabilitation technologies and generate a Pareto-optimal solution set. Subsequently, the technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS) method was introduced to rank and select the comprehensive optimal scheme. A drainage pipeline network trenchless rehabilitation project in Hohhot, a typical cold-region city, was adopted as a case study to verify the proposed method. [Results] The PSO algorithm converged stably within a limited number of iterations and produced a well-structured Pareto-optimal solution set, clearly revealing the trade-offs among rehabilitation cost, reliability improvement, and environmental impact. The TOPSIS result indicated that a combined scheme dominated by cured-in-place pipe (CIPP) with supplementary spray lining achieved the highest comprehensive performance,

[收稿日期] 2025-12-27

[作者简介] 张俊斌(1982—), 男, 高级工程师, 主要从事寒区给排水管道非开挖修复关键技术等工作, E-mail: 546818987@qq.com。

[通信作者] 白志强(1993—), 男, 讲师, 研究方向为盾构/TBM与人工智能交叉学科, E-mail: baizhiqiang_cumtb@163.com。

effectively balancing cost control, reliability enhancement, and environmental impact reduction, which was consistent with engineering practice. [Conclusion] This paper proposes PSO-TOPSIS hybrid approach enables quantitative and systematic selection of trenchless rehabilitation technologies for cold-region drainage networks, demonstrating strong stability, clear decision support capability, and practical applicability, and can provide reliable guidance for rehabilitation scheme decision-making in cold-region cities.

Keywords drainage pipeline network; trenchless rehabilitation; multi-objective optimization; particle swarm optimization (PSO) algorithm; cold-region engineering

随着全球城市化进程的加速,作为城市生命线之一的排水管网系统正面临日益严峻的老化与性能退化问题^[1]。大量管网已达到或超过其设计寿命,导致泄漏、堵塞甚至道路塌陷等事件频发,直接威胁城市公共安全与公共卫生^[2-3]。因此,对现有排水管网进行科学、高效且经济的修复与更新,已成为城市基础设施可持续管理中的一项核心挑战。然而,在具体工程实践中,修复技术的选择往往涉及技术适应性、工程成本及社会环境影响等多个相互制约的目标因素^[4-6]。传统依赖专家经验或单一经济指标的决策方式难以系统反映多目标之间的权衡关系,容易导致方案主观性强、经济性不足或长期运行效益不佳的问题^[7-8]。

近年来,智能优化方法的发展为复杂工程决策问题提供了新的解决思路。粒子群优化(PSO)算法由 Kennedy 等^[9]于 1995 年提出,将每个潜地探索和开发解空间,逼近全局最优解^[10-12],具有高效数较少、实现容易、收敛速度快等优点,尤其在处理高维、非线性、多峰值的优化问题时展现出显著优势^[11,13-14]。在土木工程领域,PSO 的应用已相当广泛且深入,在结构优化、项目调度等方面均取得了成功^[15]。具体到管网系统,PSO 已被有效用于给水管网的最优设计、污水管网的布局与尺寸优化,以及排水系统实时控制策略的制定中^[16-18]。例如,应用 PSO 优化给水管网设计,取得了比遗传算法和模拟退火算法更高的效率^[16,19];构建基于 PSO 的污水管网维护计划优化模型,以在预算约束下最大化网络整体性能^[13]。这些成功案例充分证明了 PSO 处理管网系统固有复杂性的能力^[20-21]。

然而,现有研究主要集中于管网系统的规划设计或运行控制阶段,而针对排水管网修复阶段的技术遴选问题,尤其是在多修复工法并存、约束条件复杂的情形下,尚缺乏系统、成熟的智能决策框架^[22-24]。同时,在极端气候频发和城市韧性需求不断提升的背景下,修复方案决策亟须兼顾长期性能、

风险控制与系统适应能力^[25-27]。

因此,本文以寒区排水管网非开挖修复工程为研究对象,构建一种基于 PSO 的修复技术智能遴选方法。通过建立统一的多目标优化决策框架,利用 PSO 的全局搜索能力和逼近理想解排序法(TOPSIS)决策优化分析能力,实现修复技术方案的高效筛选与优化推荐^[4,28]。为排水管网修复工程提供更加客观、科学的决策支持。

1 排水管网修复技术体系

1.1 排水管网修复技术总体分类

排水管网修复技术可按施工方式分为开挖修复技术与非开挖修复技术两大类。开挖修复技术通过破除路面并更换管道实现结构恢复^[29],具有适用范围广、修复效果直观等特点,但其施工周期长、对交通和环境影响显著,已难以满足建成区排水管网大规模更新改造需求。

非开挖修复技术依托检查井或工作井进行施工,在尽量不破坏地表条件的前提下完成管道结构或功能修复^[30],具有社会影响小、综合效益高等优势,已成为当前排水管网修复工程的主要技术路线。排水管网修复技术分类体系如图 1 所示。

1.2 常见非开挖排水管网修复技术特征分析

根据修复机理与结构形式差异,常用排水管网非开挖修复技术主要包括原位固化法(CIPP)、碎裂管法、微隧道法、喷涂法及局部修复技术等^[31-32]。为便于工程对比与后续指标量化,本文对典型非开挖修复技术的工程特征进行归纳,如表 1 所示。

不同非开挖修复技术在修复能力和适用条件方面差异显著,单一技术难以适用于所有排水管网修复工况,这也是技术遴选问题复杂性的主要来源。

1.3 技术遴选影响因素

排水管网修复技术的合理选择需综合考虑多方面因素。结合工程实践,修复技术遴选的关键影响因素如表 2 所示。

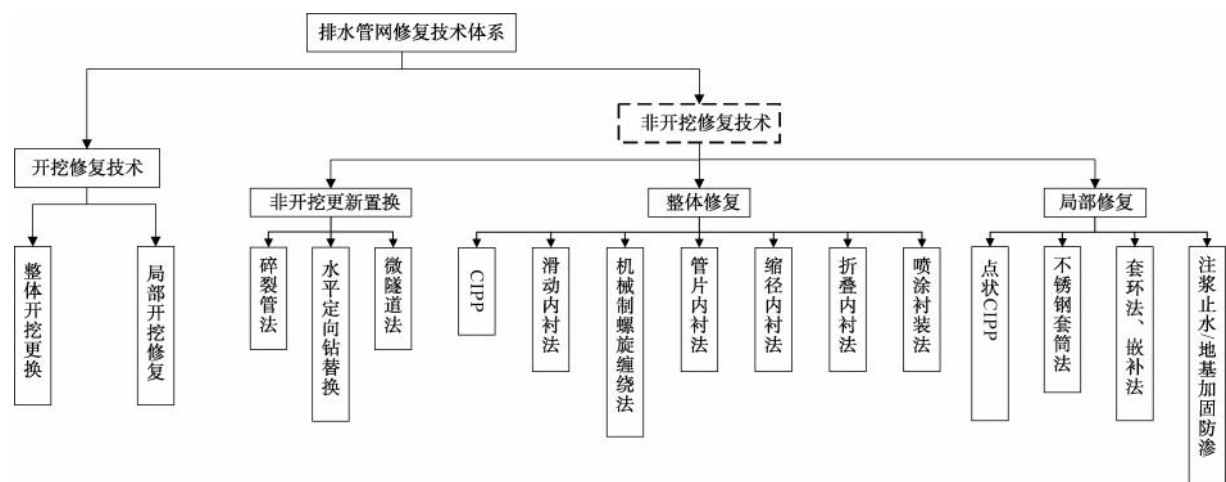


图 1 排水管网修复技术分类体系

Fig. 1 Classification System for Drainage Pipelines Network Rehabilitation Technology

表 1 常见排水管网非开挖修复技术特征比较

Tab. 1 Comparison of Characteristics of Common Trenchless Rehabilitation Technologies for Drainage Pipelines Network

修复技术	修复机理	结构补强能力	对过流断面影响	施工复杂度	典型适用场景
点状 CIPP	局部内衬贴壁固化成型	局部中等	很小	中等	局部裂缝、孔洞、接口渗漏等点状缺陷快速修复
不锈钢套筒法	套筒胀紧+密封止漏	较弱	很小	低	接口渗漏、轻度错口,需快速止漏且开挖受限
套环法/嵌补法	局部贴片/环形补强	较弱/中等	很小	低~中	局部裂缝、穿孔、局部腐蚀;适合短段补强与止漏
注浆止水/土体加固防渗	接口/裂隙注浆+周边土体加固	无	无	中等	渗漏伴随空洞、流砂、冻融松动等外部环境风险的辅助治理
CIPP	软管内衬翻转/拉入后固化成型	较强	中等	较高	裂缝、腐蚀、渗漏等需整体结构与功能同步提升的管段
滑动内衬法	预制内衬管插入成型	中等	较大	中等	防渗修复、轻度结构加固;对过流断面允许一定折减
机械制螺旋缠绕法	井内螺旋成型内衬并支撑固化	中等	较小~中等	中等~较高	中大管径长距离修复,检查井条件较好、交通敏感区
管片内衬法	分块内衬拼装形成新内衬环	强	中等	较高	大断面/异形断面(箱涵等)或需较高承载恢复的管段
折叠内衬法	折叠衬管复原成型(紧贴内衬)	较强	较小	较高	中大管径结构性修复,要求断面损失较小且整体成型
缩径内衬法	缩径成型后复原紧贴原管	较强	较小	较高	对断面损失敏感、需“紧贴式”结构修复的中大管径管段
喷涂衬装法	管内壁喷涂成膜	较弱	很小	低	防腐、防渗功能性修复
碎裂管法	原管破碎同步换管	强	无	较高	严重结构破坏管道更换
微隧道法	新建替代管道	很强	无	很高	主干管重度病害修复
水平定向钻替换法	沿既有管线走向定向钻进成孔,扩孔回拖新管完成更新替换	强	无	高	适用于交通敏感区或不具备开挖条件的长距离更新

表 2 遴选影响因素分析
Tab. 2 Analysis of Influencing Factors for Technological Selection

类别	影响因素	具体内涵
经济因素	直接工程成本	材料、设备及施工组织费用
	社会成本	交通延误、商业损失等间接成本
技术与可靠性因素	结构安全性	修复后管道结构承载能力及整体稳定性
	排水功能恢复程度	管道过水能力、运行效率及水力性能改善情况
	使用寿命提升效果	修复后管道服役年限及耐久性改善程度
环境与社会影响因素	施工周期	修复作业持续时间及对城市运行的影响
	交通扰动	施工对道路通行和交通组织的影响
	环境影响程度	施工的噪声、碳排放及环境干扰水平
综合约束	施工适应性与可实施性	修复材料与工艺在低温条件下的施工性能与实施难度

上述因素之间往往相互制约,单一指标难以全面反映修复技术优劣,因此有必要构建多指标综合评价体系进行系统分析。

2 多目标优化模型构建

2.1 经济性评价指标

本文从工程实施角度出发,构建经济性评价指标目标函数 f_1 ,如式(1)。

$$f_1 = \sum_{i=1}^n x_i [(C_i^m + C_i^l)L_i + f_i^s] \quad (1)$$

其中: x_i ——决策变量,为第 i 段管道是否实施修复措施, $x_i = 0$ 表示该管段不进行修复, $x_i = 1$ 表示该管段采取修复处理;
 C_i^m ——第 i 段管道实施修复时,单位管段长度所对应的材料费用,元/m;
 C_i^l ——第 i 段管道实施修复时,单位管段长度所对应的施工费用,元/m;
 L_i ——第 i 段管道对应的实际管段长度,m;
 f_i^s ——社会成本,元。

社会成本测算在参考美国土木工程师协会(ASCE)相关方法的基础上,结合国内排水管网工程实际情况进行适当修正,具体计算模型如式(2)~式(6)。

$$f_i^s = \lambda_1 C_i^c + \lambda_2 C_i^t + \lambda_3 C_i^b + \lambda_4 C_i^h \quad (2)$$

其中: λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 λ_4 ——相应指标的权重参数,其取值依据层次分析法(AHP)计算确定;
 C_i^c ——清洁处置费用,元;
 C_i^t ——交通延误损失,元;
 C_i^b ——商业活动受影响的经济损失,元;

C_i^h ——公共健康与医疗支出,元。

$$C_i^c = \sum_{i=1}^n (Q_i^w \times P_c) \quad (3)$$

其中: Q_i^w ——对第 i 段管道实施修复过程中所产生的固体废弃物总量,t;
 P_c ——单位质量垃圾的清运与处置费用,元/t。

$$C_i^t = T_i^t \times V_i \times (P_t + P_f) \times D_i \quad (4)$$

其中: T_i^t ——施工活动对通行车辆造成的平均延误时长,h;
 V_i ——受施工影响路段在统计周期内的日均交通流量,辆/d;
 P_t ——单位车辆时间价值参数,元/(h·辆);
 P_f ——单位车辆在延误过程中产生的燃油消耗费用,元/(h·辆);
 D_i ——工程施工持续时间,d。

$$C_i^b = A \times R \quad (5)$$

其中: A ——施工活动影响的商业经营面积规模,m²;
 D ——施工影响时间,d;
 R ——单位面积在施工期间产生的日均营业收入损失水平,元/(m²·d)。

$$C_i^h = P \times I \times C_h \quad (6)$$

其中: P ——受施工活动影响区域内涉及的人口规模,人;
 I ——施工扰动条件下相关疾病发生的

发生频率,例/人;

C_h ——单位病例对应的医疗治疗费用参数,元/例。

2.2 可靠性评价指标

综合考虑管道承载能力与变形控制要求,构建可靠性评价指标目标函数 f_2 ,如式(7)。

$$f_2 = \omega_h \times R_i^h + \omega_s \times R_i^s \quad (7)$$

其中: ω_h 、 ω_s ——各评价指标对应的权重参数,其数值依据 AHP 计算获得;

R_i^h 、 R_i^s ——排水功能可靠性指标与结构安全可靠性指标,其计算结果限定在 $[0, 1]$ 内,当计算值 >1 时取1,计算值 <0 时取0。

排水功能可靠性指标的计算如式(8)。

$$R_i^h = \left(\omega_Q \times \frac{Q'_i}{Q_i} \right) + \left(\omega_H \times \left(1 - \frac{\Delta H'_i}{\Delta H} \right) \right) + \left(\omega_K \times \frac{\Delta K'_i}{\Delta K} \right) \quad (8)$$

其中: ω_Q 、 ω_H 、 ω_K ——各评价指标所对应的权重参数,其取值依据 AHP 进行计算确定;

$\frac{Q'_i}{Q_i}$ ——第 i 段管道修复后,实际过水能力相对于设计工况流量的比例关系;

$\frac{\Delta H'_i}{\Delta H}$ ——第 i 段管道修复后,新增水头损失与该管段允许的最大水头损失增量之间的比值;

$\frac{\Delta K'_i}{\Delta K}$ ——第 i 段管道修复前后漏损水平变化程度,其数值为漏损率差值与理论最大可降低漏损幅度之比。

结构可靠性指标的计算如式(9)。

$$R_i^s = \left(\omega_\sigma \times \frac{\sigma'_i}{\sigma_i} \right) + \left(\omega_N \times \frac{N'_i}{N_i} \right) + \left(\omega_F \times \frac{F'_i}{F_i} \right) \quad (9)$$

其中: ω_σ 、 ω_N 、 ω_F ——各结构性能评价指标对应的权重参数,其数值依据 AHP 确定;

$\frac{\sigma'_i}{\sigma_i}$ ——管道修复材料实际抗拉性能相对

于设计规范中规定的最小抗拉强度要求的比例关系;

$\frac{N'_i}{N_i}$ ——修复完成后管道的预测服役年限与设计使用年限之间的比值关系,其中设计寿命一般取 50 a;

$\frac{F'_i}{F_i}$ ——修复材料抗腐蚀性能水平相对于最高抗腐蚀等级的比例值。

其中材料抗腐蚀等级参照标准[*Paints and varnishes—Corrosion protection of steel structures by protective paint systems* (ISO 12944—5:2019)]进行划分,等级范围为 C1~C5,对应模型评分区间为 1~5,本研究中 F_i 取值为 5。

2.3 环境影响指标

定义环境友好度目标函数为 f_3 ,如式(10)。

$$f_3 = \varepsilon_c \times f(c) + \varepsilon_n \times f(n) \quad (10)$$

其中: ε_c 、 ε_n ——各评价指标的权重参数,其取值依据 AHP 计算确定;

$f(c)$ ——管道修复作业涉及范围内产生的碳排放总量,t,通过参考国家温室气体排放因子数据库中的碳排放计算工具及《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南 2019 修订版》^[33],采用生命周期评价(LCA)进行量化;

$f(n)$ ——施工活动产生的噪声影响区域面积 n , km^2 ,其具体表达式如式(11)。

$$n = \pi \times D_m^2 \quad (11)$$

其中: D_m ——施工现场噪声级最高设备的直线传播距离参数。

2.4 模型与约束条件

基于上述 3 个单目标优化模型的目标函数并结合排水管网修复需求,提出多目标优化模型目标函数如式(12)。

$$\begin{aligned} F(x) &= [f_1(x), f_2(x), f_3(x)]^T \\ &\begin{cases} \text{Min}(f_1, f_3) \\ \text{Max}(f_2) \end{cases} \end{aligned} \quad (12)$$

约束条件如式(13)。

$$\begin{cases} f_1 \leq B_{\max} \\ T \leq T_{\max} \\ x_i \in [0, 1] \end{cases} \quad (13)$$

其中: $B_{\max}$ ——项目可支配的最高资金限额, 元;
 $T_{\max}$ ——工程施工所允许的最长持续时间, d。

2.5 AHP 的权重确定方法

鉴于不同工程项目在修复技术选择过程中对评价指标侧重点存在差异,为提高多目标优化模型对实际工程需求的适配性和应用灵活性,本文引入 AHP 对模型中各目标函数的权重进行量化。通过构建由目标层与指标层组成的层次结构模型,并建立相应的判断矩阵,结合项目组内部专家的评分结果,对各评价指标的相对重要程度进行系统比较与赋权。在权重计算过程中,采用 1~9 标度法对指标之间的相对重要性进行判别,其中标度值越大表示前一指标相对于后一指标的重要性越高,1 表示两指标具有相同重要程度,9 表示前者相对于后者具有极端重要性。

3 PSO 与 TOPSIS 决策方法框架

基于多指标综合评价模型,采用 PSO 与 TOPSIS 决策结合的方法对寒区排水管网修复技术遴选问题进行求解。该算法具体流程如图 2 所示。

3.1 PSO 设计

1) 问题编码与粒子表示

设某一待修复管段共有 N 种备选非开挖修复技术,则每一种修复技术均可视为一个潜在解。在 PSO 中,每一个粒子代表一个候选修复技术方案,其在搜索空间中的位置用于表征该技术方案编号或决策状态。对于单一管段的技术遴选问题,粒子的位置向量如式(14)。

$$\mathbf{X}_i = (x_i) \quad (14)$$

其中, $x_i \in \{1, 2, \dots, N\}$ ——粒子 i 当前对应的修复技术类型。

粒子的速度 $\mathbf{V}_i$ 用于描述粒子在搜索空间中的变化趋势,反映修复技术方案在相邻迭代过程中的调整方向与幅度。

2) PSO 参数初始化

根据工程规模与计算复杂度要求,初始化以下

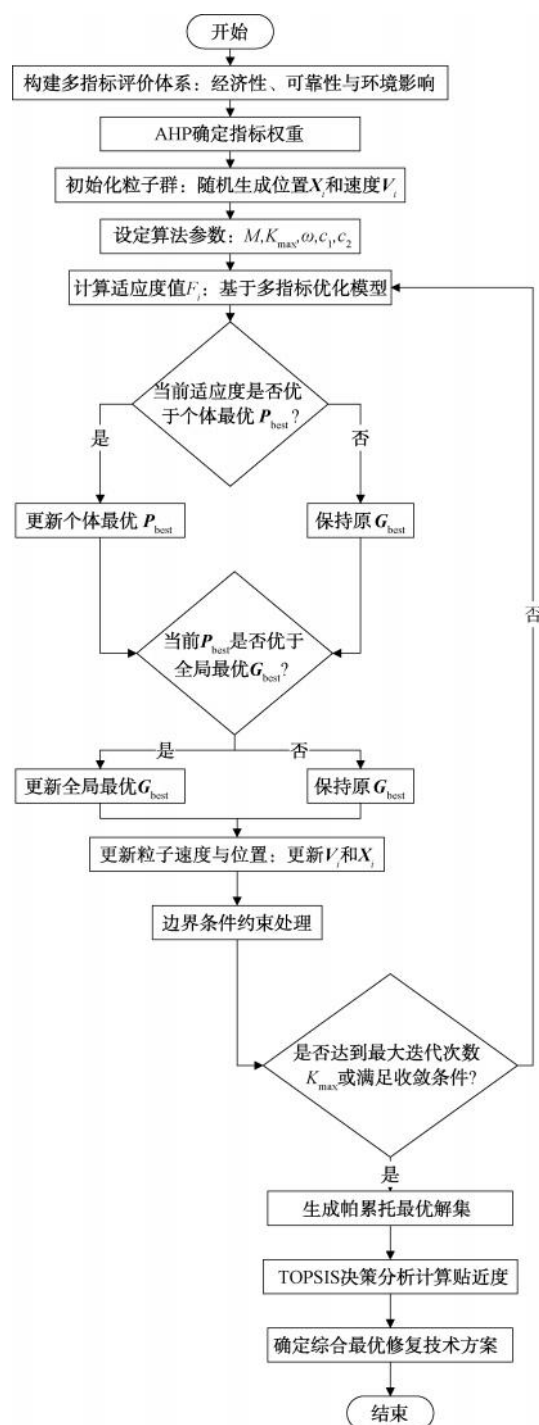


图 2 基于 PSO 的技术遴选流程

Fig. 2 Flow of Technical Selection based on PSO

参数: 粒子群规模 M 、最大迭代次数 $K_{\max}$ 、惯性权重 ω 、个体学习因子 c_1 及群体学习因子 c_2 。其中, 惯性权重用于调节粒子对当前搜索方向的保持能力, 个体学习因子反映粒子对自身历史最优解的依赖程度, 群体学习因子则体现粒子向群体全局最优解靠

扰的趋势。在参数确定后,在允许的解空间范围内随机生成各粒子的初始位置与初始速度,并对速度和位置设置上下限约束,以避免粒子搜索过程出现无效或发散情况。

3) 适应度函数计算与评价指标映射

将排水管网修复技术综合评价函数作为粒子的适应度函数。对于每一个粒子,根据其当前位置所对应的修复技术方案,提取该技术在经济性、可靠性及环境影响等各评价指标下的原始数据。随后,依据指标属性对各评价指标进行归一化处理,消除量纲与数量级差异。在指标归一化的基础上,引入权重系数,对各指标的重要性进行加权求和,得到粒子 i 的综合适应度值如式(15)。

$$F_i = \sum_{j=1}^m w_j z_{ij} \quad (15)$$

其中, m ——评价指标数量;

w_j ——第 j 个评价指标的权重;

z_{ij} ——粒子 i 在第 j 个指标下的归一化评价值。

适应度值越大,说明该修复技术在多指标综合评价下的整体性能越优。

4) 个体最优位置与群体全局最优位置更新

在完成粒子适应度评估后,对其个体最优状态进行判定与更新。通过比较粒子当前适应度与其已记录的历史最优适应度,当前状态表现更优时,将粒子当前所处位置记为新的个体最优位置 P_{best_i} 。与此同时,在整个粒子群中对所有粒子的适应度值进行比较,选取适应度最大的粒子,其对应的位置作为当前迭代下的群体全局最优位置 G_{best} 。

5) 粒子速度与位置迭代更新

在确定个体最优与全局最优位置后,依据粒子群算法的基本更新规则,对粒子的速度和位置进行迭代更新。速度更新公式如式(16)。

$$V_i^{k+1} = \omega V_i^k + c_1 r_1 (P_{best_i} - X_i^k) + c_2 r_2 (G_{best} - X_i^k) \quad (16)$$

其中, r_1 与 r_2 —— $[0,1]$ 区间内的随机数,用于增强搜索过程的随机性与全局探索能力。位置更新公式如式(17)。

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1} \quad (17)$$

通过上述更新机制,粒子在保留自身历史经验的同时,不断向群体最优解方向移动。在更新过程中,若粒子速度或位置超出预设边界,则采用边界截断法进行修正,以确保搜索过程始终处于可行解空间内。

6) 收敛判据与终止条件判断

在完成一次粒子群迭代更新后,对算法的收敛状态进行判断。本文采用最大迭代次数作为主要终止条件,同时结合适应度变化趋势进行辅助判断。当算法运行达到预先设定的最大迭代次数,或群体全局最优适应度在连续多次迭代过程中变化幅度小于设定阈值时,可判定算法已趋于收敛,并终止后续搜索过程。若不满足终止条件,则返回适应度计算步骤,继续进行下一轮迭代。

7) 最优修复技术方案输出

当粒子群算法满足收敛判据或达到最大迭代次数后,终止迭代计算。在算法终止阶段,对最终粒子群中所有可行解进行帕累托非支配性判别,筛选得到帕累托最优解集。

3.2 TOPSIS 决策

PSO 得到的帕累托最优解集包含了多种在经济性、可靠性与环境影响之间相互权衡的修复方案,难以直接确定最终决策。为此,引入 TOPSIS 对帕累托解集进行综合评价^[34]。通过对评价指标进行无量纲化处理,并结合 AHP 确定权重,构建加权归一化决策矩阵,计算各方案与正、负理想解之间的距离,从而求得相对贴近度。以贴近度最大的方案作为排水管网修复技术的优选结果,实现多目标优化结果向工程决策的有效转化。

4 工程算例分析与结果验证

4.1 工程概况

为验证本文提出的 PSO 算法的适用性与有效性,选取呼和浩特市某老城区排水管网非开挖修复工程作为算例进行分析。

算例研究的地理位置为呼和浩特市回民区与新城区交界范围,排水管网服役年限普遍超过 30 a。受寒区长期冻融循环作用影响,部分管段出现接口渗漏、结构裂缝及局部沉降等病害,冬季运行风险突出。研究区域内排水管道以混凝土管和球墨铸铁管为主,管径为 DN300~DN800,埋深为 2.0~3.5 m。

结合现场检测资料与运维记录,选取其中 12 段需重点修复的排水管段作为研究对象。各管段长度

介于 60~180 m,总修复长度约为 1.45 km。待修复管段的基本信息如表 3 所示。

表 3 待修复排水管段基本信息

Tab. 3 Basic Information of the Drainage Pipelines Section to be Repaired

管段编号	长度/m	管径/mm	管材	主要病害	病害程度(轻/中/重)	紧迫性等级(1~5)
D01	120	400	钢筋混凝土	接口渗漏	中	4
D02	85	300	钢筋混凝土	纵向裂缝	中	3
D03	160	600	球墨铸铁	冻融剥蚀+渗漏	重	5
D04	70	400	钢筋混凝土	局部变形	轻	2
D05	95	500	钢筋混凝土	接口错台	中	3
D06	140	600	球墨铸铁	环向裂缝	重	4
D07	60	300	钢筋混凝土	局部渗漏	轻	2
D08	110	500	钢筋混凝土	裂缝+渗漏	中	4
D09	75	400	钢筋混凝土	接口老化	中	3
D10	130	600	球墨铸铁	冻胀引起错位	重	4
D11	105	500	钢筋混凝土	内壁剥蚀	中	3
D12	180	800	球墨铸铁	结构裂缝	重	5

紧迫性等级由运维专家综合考虑病害程度、对周边道路与建筑物的影响及冬季运行安全风险等因素评定,其中紧迫性等级“5”表示急需修复。各管段病害程度按“轻/中/重”进行分级,其中“重”表示存在显著结构性损伤或冻胀变形风险,“中”表示结构或功能缺陷对运行安全已有影响,“轻”表示以功能性缺陷为主且结构风险相对可控。

4.2 参数设定与帕累托解集生成

PSO 的主要参数配置如下:粒子数量设定为

100,算法最大迭代次数取 400,惯性权重 ω 采用线性递减方式进行调整,个体学习因子 c_1 与群体学习因子 c_2 分别取 1.5 与 1.5。修复技术候选集包括滑动内衬法、折叠内衬法等共 6 种寒区适用性较好的非开挖修复技术,具体如表 4 所示,其中 K_s 为“修复后结构承载/整体性恢复水平”的归一化评价量,用于多指标遴选建模,其锚点来自行业标准对修复方法“结构性/半结构/非结构”的分类^[35],并非结构可靠度理论中的 β 或失效概率。

表 4 寒区排水管网非开挖修复技术参数

Tab. 4 Technical Parameters for Trenchless Rehabilitation of Drainage Pipelines Network in Cold Regions

技术编号	修复技术名称	材料成本/ (万元·km ⁻¹)	施工成本/ (万元·km ⁻¹)	适用管径/mm	预期 寿命/a	结构性修复能力 系数 K_s (0~1)	碳排放量/ (t CO ₂ ·km ⁻¹)	噪声 值/dB
T1	滑动内衬法	28	18	300~800	30	0.70	8.5	65
T2	折叠内衬法	35	22	300~600	35	0.78	7.2	68
T3	CIPP	42	25	300~1 000	50	0.90	5.6	60
T4	碎裂管法	30	20	400~800	25	0.82	11.5	75
T5	喷涂衬装法	22	15	300~1 200	20	0.60	9.0	58
T6	微隧道法	55	35	≥600	50	0.95	14.8	85

通过 PSO 迭代搜索,在满足预算约束与施工条件约束的前提下,最终获得 18 个帕累托最优解,具体如表 5 所示。

结果表明,总体修复费用分布在 268 万~430 万元,综合可靠性指数为 0.78~0.95,环境影响指标为 0.21~0.46。随着修复投入水平的变化,管网系统

可靠性提升程度与环境影响削减幅度呈现出明显差异,不同方案在成本、可靠性与环境影响之间形成了由“低投入-低可靠性-高环境影响”向“高可靠性-低环境影响”逐步过渡的折中解。为更加直观地刻画多目标之间的权衡关系,将帕累托最优解集投影至“总修复成本-综合可靠性”坐标空间,其散点分

表 5 帕累托解的目标函数值及对应的技术组合方案
Tab. 5 Objective Function Values of Pareto Solution and Corresponding Technical Combination Schemes

解编号	总成本/ 万元	可靠性 指数	环境影 响指数	修复技术组合特征
1	268	0.78	0.46	喷涂衬装+滑动内衬
2	276	0.79	0.44	喷涂衬装+局部滑动内衬
3	285	0.80	0.43	滑动内衬为主
4	295	0.82	0.41	滑动内衬+折叠内衬
5	305	0.83	0.39	折叠内衬为主
6	312	0.85	0.37	折叠内衬+局部 CIPP
7	320	0.86	0.35	折叠内衬+CIPP
8	330	0.87	0.34	CIPP 为主
9	335	0.88	0.33	CIPP+喷涂衬装
10	340	0.88	0.32	CIPP 为主,次要管段喷 涂衬装
11	350	0.89	0.30	CIPP+局部碎裂管
12	360	0.90	0.29	CIPP+碎裂管
13	372	0.91	0.28	碎裂管为主
14	385	0.92	0.26	碎裂管+折叠内衬
15	398	0.93	0.25	碎裂管+CIPP
16	410	0.94	0.23	CIPP+局部微隧道
17	420	0.94	0.22	微隧道+CIPP
18	430	0.95	0.21	微隧道为主的高等级结 构性修复

布特征如图 3 所示。由图 3 可知,随着总修复成本的增加,方案对应的可靠性指数整体呈上升趋势,而环境影响指标则逐步降低,该变化规律与排水管网非开挖修复工程的实际经验一致,即通过增加投入、采用结构性更强的修复技术,可有效提升

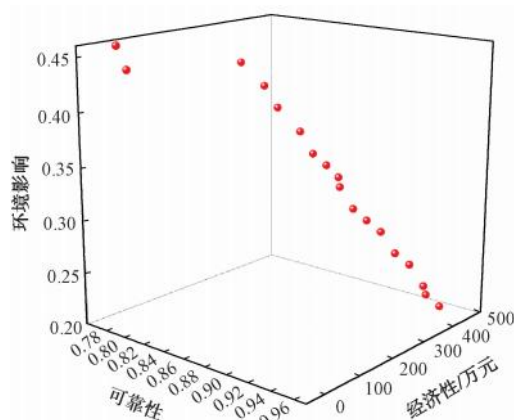


图 3 帕累托解集三维视图

Fig. 3 3D View of Pareto Solution Set

管网运行安全性并降低施工扰动带来的环境影响。

然而,各目标之间并不存在简单的线性关系。当修复成本处于较低区间(≤ 320 万元)时,每增加一定投入,可靠性提升幅度较为明显;当成本进一步增加至中高区间后,可靠性和环境影响的改善幅度逐渐趋缓,表现出明显的“边际效益递减”特征。例如,当总成本由约 385 万元增至 430 万元时,可靠性指数仅由 0.92 提升至 0.95,环境影响指标由 0.26 降至 0.21,整体改善程度有限。相较之下,在中低成本区间内,适度增加投入能够显著改善系统性能。多方案比较雷达图如图 4 所示。

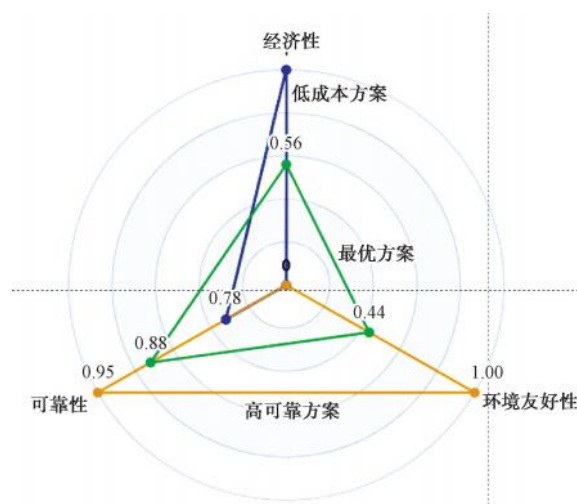


图 4 多方案比较雷达图

Fig. 4 Radar Chart of Multiple Schemes Comparison

4.3 基于 TOPSIS 的最优方案确定

PSO 生成的帕累托最优解集反映了寒区排水管网非开挖修复在经济性、可靠性及环境影响三目标之间的权衡关系,但仍需进一步筛选综合最优方案。为此,采用 TOPSIS 对帕累托解集进行决策分析,结果如表 6 所示。

首先对 18 个帕累托解的评价指标进行无量纲化处理,其中总修复成本和环境影响为成本型指标,可靠性指数为效益型指标。结合寒区排水管网运行安全要求,采用 AHP 法确定经济性、可靠性和环境影响的权重分别为 0.35、0.40 和 0.25^[36],在此基础上构建加权归一化决策矩阵,并分别确定正理想解与负理想解;随后通过计算各备选方案与理想解之间的距离,求得对应的相对贴近度,并据此对方案进行排序。

表 6 TOPSIS 贴近度及排序结果
Tab. 6 TOPSIS Closeness and Ranking Results

排序名次	解编号	相对贴近度	总成本/万元	可靠性指数	环境影响指数	修复技术组合特征
1	10	0.892	340	0.88	0.32	CIPP 为主,次要管段喷涂衬装
2	3	0.865	285	0.80	0.43	滑动内衬为主
3	14	0.841	385	0.92	0.26	碎裂管+折叠内衬
4	7	0.829	320	0.86	0.35	折叠内衬+CIPP
5	12	0.806	360	0.90	0.29	CIPP+碎裂管
6	5	0.798	305	0.83	0.39	折叠内衬为主
7	18	0.771	430	0.95	0.21	微隧道为主的高等级结构性修复
8	9	0.754	335	0.88	0.33	CIPP+喷涂衬装
9	1	0.739	268	0.78	0.46	喷涂衬装+滑动内衬
10	16	0.721	410	0.94	0.23	CIPP+局部微隧道
11	6	0.707	312	0.85	0.37	折叠内衬+局部 CIPP
12	11	0.681	350	0.89	0.30	CIPP+局部碎裂管
13	4	0.662	295	0.82	0.41	滑动内衬+折叠内衬
14	15	0.648	398	0.93	0.25	碎裂管+CIPP
15	8	0.631	330	0.87	0.34	CIPP 为主
16	2	0.597	276	0.79	0.44	喷涂衬装+局部滑动内衬
17	17	0.563	420	0.94	0.22	微隧道+CIPP
18	13	0.529	372	0.91	0.28	碎裂管为主

解编号“10”的贴近度最大(0.892),被确定为综合意义下的最优修复方案。该方案在重度或紧迫性较高且以裂缝/冻胀错位/剥蚀渗漏等结构性风险为主的管段 D01、D02、D03、D06、D08、D10、D12 采用 T3 CIPP 作为主修复技术;而对病害程度较轻或以功能性缺陷为主、紧迫性较低的管段 D04、D05、D07、D09、D11 采用 T5 喷涂衬装法作为修复技术,以在满足寒区运行安全的前提下兼顾成本与环境影响。该方案总修复成本约为 340 万元,可靠性指数为 0.88,环境影响指标为 0.32,在多目标约束下实现了较为均衡的优化效果。PSO-TOPSIS 组合方法能够有效支撑寒区排水管网非开挖修复技术的工程决策。

5 结论

针对寒区城市排水管网非开挖修复技术遴选问题,本文构建了融合多目标优化与决策分析的综合方法框架,通过建立经济性、可靠性与环境影响多目标模型,引入 PSO 进行求解,并结合 TOPSIS 决策完成修复方案优选。以呼和浩特寒区排水管网为算例进行验证,主要结论如下。

(1)所构建的多目标优化框架能够实现修复方案在多维目标下的综合权衡,PSO 在有限迭代内形成清晰的帕累托解集,并借助 TOPSIS 高效确定综合最优方案,较传统经验型或单指标决策方式更具系统性与科学性。

(2)算例结果表明,在总修复成本保持合理的前提下,优化方案显著提升了管网结构可靠性并降低了环境影响水平,体现了多目标优化方法在寒区排水管网修复中的工程优势。

(3)模型优化结果能够根据不同管段病害程度和风险等级实施差异化修复策略,实现有限资金条件下的合理配置,符合排水管网分级修复与重点治理的工程原则。

同时,本文方法仍存在一定局限性:最优解可能涉及多种修复技术组合,增加施工组织复杂性;可靠性评价主要基于单管段层面,尚未充分考虑系统级风险;未耦合水力模型对不同工况下的运行性能进行动态验证。后续研究可结合情景分析与鲁棒优化方法,并引入 SWMM 等水力模型,对修复方案在复杂工况下的系统性能进行进一步评估。

参考文献

- [1] 智国铮, 戴勇华, 马艳. 排水管网检测技术与分析方法研究进展[J]. 净水技术, 2021, 40(5): 8-15.
Zhi G Z, Dai Y H, Ma Y. Research progress on detection technology and analysis method of drainage pipelines network [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(5): 8-15.
- [2] Almeida M, Covas D, Beceiro P. Rehabilitation of sewers and manholes: technologies and operational practices [R/OL]. [2025-12-27]. <https://riunet.upv.es/handle/10251/54141>.
- [3] 程丽琼. 论给排水管网非开挖方式的维护与修复[J]. 住宅与房地产, 2019(24): 202.
Cheng L Q. Maintenance and repair of trenchless water supply and drainage pipe network[J]. Housing and Real Estate, 2019 (24): 202.
- [4] Assad A, Moselhi O, Zayed T. Resilience-driven multiobjective restoration planning for water distribution networks[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2020, 34 (4): 04020072.
- [5] Covas D, Almeida M, Carriço N, et al. Rehabilitation of water mains and storage tanks: technologies and decision support tools [R/OL]. [2025-12-27]. <https://riunet.upv.es/handle/10251/54107>.
- [6] Kulczkowski A. Trendy w zakresie bezwykopowej odnowy przewodów wodociągowych i kanalizacyjnych [J]. Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne, 2016(2): 51-55.
- [7] Madala P. The role of sludge dewatering technologies in modern wastewater management [J]. Journal of Mechanical, Civil and Industrial Engineering, 2025, 6(1): 11-18.
- [8] Kitaev S V, Baykov I R, Smorodova O V, et al. Application of decision support method in pipeline repair [J]. Problems of Gathering Treatment and Transportation of Oil and Oil Products, 2025(4): 125-136.
- [9] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization [C]// Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks. Perth, WA, Australia. IEEE, 1995: 1942-1948.
- [10] 薛英文, 文倩倩. 基于粒子群算法的污水管网优化设计[J]. 中国农村水利水电, 2010(8): 40-42.
Xue Y W, Wen Q Q. Optimal design of sewage pipe network based on particle swarm optimization[J]. China Rural Water and Hydropower, 2010(8): 40-42.
- [11] Wang D S, Tan D P, Liu L. Particle swarm optimization algorithm; An overview [J]. Soft Computing, 2018, 22 (2): 387-408.
- [12] Liu H C, Sung W P, Yao W L. Computer, intelligent computing and education technology [M]. Boca Raton: CRC Press, 2014.
- [13] Kaddoura K. Performance modeling for sewer networks [D]. Montreal: Concordia University, 2018.
- [14] Gad A G. Particle swarm optimization algorithm and its applications: A systematic review [J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2022, 29(5): 2531-2561.
- [15] Gandomi A H, Alavi A H. Expression programming techniques for formulation of structural engineering systems [M]// Metaheuristic applications in structures and infrastructures. Amsterdam: Elsevier, 2013: 437-454.
- [16] Abdel-Kader M Y, Ebid A M, Onyelowe K C, et al. (AI) in infrastructure projects—Gap study [J]. Infrastructures, 2022, 7 (10): 137.
- [17] Surco D F, Vecchi T P B, Ravagnani M A S S. Optimization of water distribution networks using a modified particle swarm optimization algorithm [J]. Water Supply, 2018, 18(2): 660-678.
- [18] 龚艳冰, 陈森发. 基于微粒群算法的污水管网优化设计[J]. 中国给水排水, 2006, 22(24): 48-50.
Gong Y B, Chen S F. Optimization design of sewage network by using particle swarm optimization [J]. China Water & Wastewater, 2006, 22(24): 48-50.
- [19] Suribabu C R. Particle swarm optimization compared to other heuristic search techniques for pipe sizing [J]. Journal of Environmental Informatics, 2006, 8(1): 1-9.
- [20] Navin P K, Mathur Y P. Design optimization of sewer system using particle swarm optimization [M]// Proceedings of fifth international conference on soft computing for problem solving. Singapore: Springer, 2016: 173-182.
- [21] Nafisi M, Ahmadi A. Sewer networks optimization by particle swarm optimization with abilities of fly-back mechanism and harmony memory [J]. Journal of Water and Wastewater, 2014, 25(4): 76-87.
- [22] Mora Meliá D. Diseño de redes de distribución de agua mediante algoritmos evolutivos; Análisis de eficiencia [D]. Valencia: Universitat Politècnica de València, 2012.
- [23] Assad A, Moselhi O, Zayed T. Resilience-driven sustainability-based rehabilitation planning for water distribution networks [J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2021, 147 (8): 04021079.
- [24] Sitzenfrie R, Minaei A, Hajibabaei M, et al. Hydraulic and co-located pipe criticalities in the rehabilitation of water distribution mains [C]. España: Proceedings - 2nd International Joint Conference on Water Distribution System Analysis (WDSA) & Computing and Control in the Water Industry (CCWI), 2022.
- [25] Galarza-Molina S, Torres-Lozada P, Galvis-Castaño A. Incorporating urban drainage system resilience in public policies for a city in a developing country—Colombia [J]. Frontiers in Water, 2022, 4: 774154. DOI: 10.3389/frwa.2022.774154.
- [26] Casal-Campos A, Sadr S M K, Fu G T, et al. Reliable, resilient and sustainable urban drainage systems: An analysis of robustness under deep uncertainty [J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52(16): 9008-9021.

- [27] McClymont K, Fernandes Cunha D G, Maidment C, et al. Towards urban resilience through sustainable drainage systems: A multi-objective optimisation problem [J]. Journal of Environmental Management, 2020, 275: 111173. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.111173.
- [28] Cheung P B. Análise de reabilitação de redes de distribuição de água para abastecimento via algoritmos genéticos multiobjetivo [D]. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2004.
- [29] 周云川. 树脂点状修复技术在地下管网修复中的应用[J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(s2): 432-436.
Zhou Y C. Application of resin point repair technology in underground pipe network repair [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022, 53(s2): 432-436.
- [30] 吴坚慧. 排水管道检测评估与非开挖修复设计方案[J]. 净水技术, 2012, 31(4): 152-156.
Wu J H. Inspection and assessment of drainage pipelines and design scheme of trenchless rehabilitation technology[J]. Water Purification Technology, 2012, 31(4): 152-156.
- [31] 郁片红, 孙跃平. 排水管道原位固化法修复常见问题与质量控制方法[J]. 净水技术, 2020, 39(s1): 252-255, 259.
Yu P H, Sun Y P. Common problems and quality control measures of CIPP method for drainage pipes [J]. Water Purification Technology, 2020, 39(s1): 252-255, 259.
- [32] 郁片红, 庄敏捷, 曹依雯, 等. 上海市《城镇排水管道非开挖修复技术标准》解读[J]. 净水技术, 2021, 40(11): 1-5, 34.
Yu P H, Zhuang M J, Cao Y W, et al. Interpretation of Technical Standard for Trenchless Rehabilitation of Urban Drainage Pipelines of Shanghai City [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(11): 1-5, 34.
- [33] IPCC. 2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [R/OL]. Geneva: IPCC, 2019. <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>.
- [34] 熊柳, 王琦, 王志红, 等. 基于高维多目标优化的给水管网设计方法——以意大利 Fossolo 小镇管网为例[J]. 给水排水, 2018, 44(5): 114-120.
Xiong L, Wang Q, Wang Z H, et al. Many-objective optimization based design of water distribution systems: A case study of the Fossolo Town network in Italy [J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44(5): 114-120.
- [35] DG/TJ 08—2354—2021 城镇排水管道非开挖修复技术标准[S].
DG/TJ 08—2354—2021 Technical standard for trenchless rehabilitation of urban drainage pipelines[S].
- [36] 张倩, 陈亮, 李蕊, 等. 基于 AHP-TOPSIS 法的分布式光伏并网安全性评估[J]. 浙江工业大学学报, 2025, 53(6): 617-622.
Zhang Q, Chen L, Li R, et al. Safety assessment of distributed photovoltaic grid connection based on the AHP-TOPSIS method [J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2025, 53(6): 617-622.