

基于 SWMM 的雨水管网韧性优化设计研究

李 锐¹, 贾思迪²

(1. 西安建筑科技大学, 陕西 西安 710055; 2. 中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司, 陕西 西安 710075)

摘 要: 以提升雨水管网经济性和管网韧性为目标, 实际工程规范为约束, 管径和检查井井底高程为决策变量建立雨水管网多目标优化模型, 并基于 PlatEMO 多目标优化平台, 利用 MATLAB 将 SWMM 嵌入寻优过程, 选择 NSGA-II、NSGA-III、AGE-MOEA 3 种优化算法求解, 对比解集质量和求解速度。以西安市某区域为研究案例, 进行模型验证。研究结果表明: (1) 优化模型所得的排水方案可以满足不同工程需求; (2) AGE-MOEA 算法解集质量最高, NSGA-III 求解速度相对较快; (3) 优化方案可以同时满足管网经济性和韧性的要求。

关键词: SWMM; 雨水管网; 韧性; 多目标优化

中图分类号: TU992

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)12-0132-07

0 引 言

近年来, 随着城市化进程不断加快, 造成城市下垫面不断硬化以及可透水地面的逐渐缩减, 导致地面径流增加, 城市雨水系统纳水负担不断加重, 城市内涝问题频繁发生。为应对各种不确定性灾害, 国际社会普遍倡导建设韧性城市, 将建设韧性城市作为可持续发展的新兴战略。《中共中央关于制定国民经济和社会发展的第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议》中首次提出建设“韧性城市”, 并提出“增强城市防洪排涝能力, 建设海绵城市、韧性城市”。党的二十大报告提出“提高城市规划、建设、治理水平, 实施城市更新行动, 加强城市基础设施建设, 打造宜居、韧性、智慧城市”的目标任务^[1]。韧性已成为我国新时代城市的新理念, 提升城市地下基础设施韧性水平对韧性城市建设具有重要意义^[2]。雨水管网作为城市防洪排涝最主要的基础设施, 其设计是否合理直接决定了城市防洪排涝能力的强弱。因此, 构建具有“韧性”的“雨水管网”成为城市基础设施建设的热点。

目前, 国内外学者主要从评估排水管网韧性入手, 分析排水管网的韧性建设水平。Mugume 等^[3]提出

了一种排水管网韧性评价指标, 该指标采用计算每根管线失效时溢流量上下限和平均溢流时间作为韧性评价指标。Guptha 等^[3]通过模拟 3 种可持续排水系统的条件(即仅入渗沟、仅截留池和两者同时使用), 评估了可持续排水系统在增强城市排水系统韧性方面的作用。Zhang 等^[4]构建了城市地面塌陷防治视角下的污水管网弹性评价框架, 采用加权法对管网韧性指数进行评价。Kamali 等^[5]开发了一个开源工具箱, 提出基于轮盘赌的场景选择方法来执行全局韧性分析。柯庆等^[6]提出考虑管材、经济水平、蓄水能力、水质和蓄水池等因素的韧性雨水管网评估公式, 并且提出集中式和分布式改造两种增加排水系统韧性的措施。方咸根^[7]从降雨的不均匀性出发, 建立基于可靠度、溢流总时间鲁棒性和溢流总量鲁棒性的雨水管网韧性评价指标体系。以上学者均是评估雨水管网韧性大小, 并未考虑如何优化设计韧性雨水管网。雨水管网优化设计主要包括两大方向: 一种是确定雨水管网的平面布局^[8-9]; 另一种是在管网平面布局确定的基础上, 优化管网参数^[10-14]。以上学者主要考虑了雨水管网经济成本、可靠性和脆弱性等, 忽略了雨水管网的韧性性能, 而可靠性和脆弱性仅是韧性的一部分, 韧性在评价雨水管网系统的性能时具有更加全面的优势。

针对现有的雨水管网优化研究以及考虑到建设韧性雨水管网的紧迫性, 本文以降低管网造价和提升管网韧性为目标建立雨水管网韧性优化模型, 并基于

收稿日期: 2023-11-30

基金项目: 陕西省自然科学基金(2021JM-354); 西安建筑科技大学 2022 年度新型城镇化专项研究基金(2022SCHZ14)

作者简介: 李锐(1975—), 女, 博士, 副教授, 从事总图运输优化研究工作。

PlatEMO 多目标优化平台,选择多种常用优化算法进行对比。

1 雨水管网多目标优化模型

1.1 目标函数

1.1.1 经济性指标

由于建设雨水管道费用较高且服务年限较长,故费用目标是雨水管网优化最基础的目标函数之一。费用目标通常根据管道、检查井以及相关附属设施的材料费、机械施工费、土方工程费、日常维护费等的费用,通过多种形式回归分析的方法,得出由管径和埋深两个变量组成的管道费用模型^[15]。

$$C = k_1 + k_2 H + k_3 H^2 + k_4 D H + k_5 D + k_6 D^2 + k_7 D^3 \quad (1)$$

式中: C 为单位管道长度费用,元/m; D 为管道直径,m; H 为指管道埋深,m; $k_1 \cdots k_7$ 为地方系数。

1.1.2 韧性指标

雨水管网韧性表示管网抵抗城市内涝发生的能力,最关键的是内涝发生后的恢复能力。因此,本研究将雨水管网韧性从工程视角考虑,将雨水管网韧性定义为面对暴雨天气时抵抗城市内涝的发生、从城市内涝中快速恢复并维持基本功能的能力,见图 1。城市基础设施韧性可以用实际性能曲线对时间的积分值比上目标性能曲线对时间的积分值来计算^[16]。对于城市雨水管网系统来说,雨水经过地表流入雨水口的流量为 Q_1 ;其中部分雨水在管道内流动,经管道输送作用流入水体,该部分流量为 Q_2 ;由于管道输水能力有限,超过管道设计流量的雨水从检查井溢流至地面,该部分流量为 Q_3 ;为衡量雨水管网的韧性,将目标性能曲线 P_0 设为 1,实际性能曲线 $P(t)$ 等于管道内流量与流入雨水口流量的比值,即 $P(t) = Q_2/Q_1$ 。当发生溢流时,管网性能小于 1,其余任何状态下管网性能都等于 1。

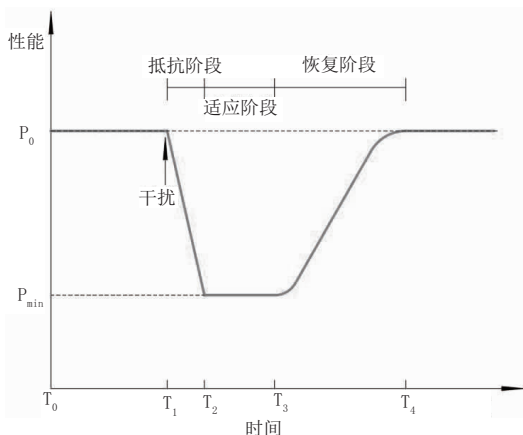


图 1 雨水管网系统面对扰动下性能变化示意图

雨水管网韧性公式^[17]如下:

$$R = 1 - \alpha \frac{t_s}{T} \frac{V_{Ts}}{V_{Ti}} \quad (2)$$

式中: t_s 为地面积水时间,h; T 为降雨历时,h; V_{Ts} 为降雨历时内的地面溢流总量, m^3 ; V_{Ti} 为降雨历时内管网的总入流量, m^3 ; α 为修正系数。

1.2 约束条件

(1)管径:规范规定雨水管的最小管径是 300 mm 且管径的取值并非是连续的,应按照市场现有管径规格取值。

$$d_i = D \in \Omega_D \text{ 且 } d_{i+1} \geq d_i \quad (3)$$

(2)坡度:规范规定塑料管的最小设计坡度为 0.2%,其他管的最小设计坡度为 0.3%。

$$S_i \geq S_{\min} \quad (4)$$

(3)流速:金属管道的最大设计流速宜为 10.0 m/s;非金属管道的最大设计流速宜为 5.0 m/s,经试验验证可适当提高。管道的最小设计流速应为 0.75 m/s。

$$v_{\min} \leq v \leq v_{\max} \quad (5)$$

(4)覆土厚度:人行道下最小覆土厚度宜为 0.6 m,车行道下最小覆土厚度宜为 0.7 m。雨水管道最大埋设深度应满足地区的地质条件,在干旱地区不应大于 7~8 m,地质条件较差地区不超过 4~5 m。

$$H_{\min} \leq H_i \leq H_{\max} \quad (6)$$

(5)雨水管道连接方式:规范规定不同直径的管道的连接方式应采用管顶平接或管底平接。

1.3 多目标优化数学模型

综上所述,雨水管网的多目标优化模型可以表示为:

$$\begin{cases} C_{\min} = \sum_{i=1}^n C_i L_i \\ R_{\max} = 1 - \alpha \frac{t_s}{T} \frac{V_{Ts}}{V_{Ti}} \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} d_i = D \in \Omega_D \text{ 且 } d_{i+1} \geq d_i \\ v_{\min} \leq v \leq v_{\max} \\ H_{\min} \leq H_i \leq H_{\max} \\ S_i \geq S_{\min} \end{cases} \quad (8)$$

2 优化模型求解

2.1 多目标优化平台

现阶段优化算法以仿生算法为主,该类算法一般包括基因编码、初始化种群、交叉变异算子、精英保留机制等操作。随着进化算法应用越发广泛,众多研究机构对现有顶级优化算法进行集群,出现了一大批进化算法工具箱,如 MATLAB 遗传算法工具

箱、Python 的进化算法工具箱 Geatpy 和多目标优化平台 PlatEMO^[18,19]。PlatEMO 是田野等开发的多目标优化工具箱,是一个用于求解优化问题的开源平台,它的输入是一个优化问题,输出是在该优化问题上得到的最优解。PlatEMO4.0 包括了除了常见的遗传算法、粒子群算法等传统进化算法,还提供了多种新兴的进化算法,如差分进化算法、蚁群算法、人工免疫算法等。这些算法不仅能够应用于单目标优化问题,还可以有效地解决复杂的多目标优化问题,且由于其开源、免费和易于操作的特点,受到广泛应用。本研究优化模型共选取 3 种优化算法,分别是第二代非支配排序遗传算法(NSGA-II)、第三代非支配排序遗传算法(NSGA-III)、基于自适应几何估计优化算法(AGE-MOEA)。

2.2 优化算法

(1)NSGA-II

NSGA-II 是由 Deb 等^[20]于 2000 年通过改进 NSGA 算法而产生的,因其在处理一系列水资源优化问题方面具有可靠和令人满意的性能而被广泛认可为行业标准算法。该算法采用的非支配分层方法进行排序,然后根据帕累托优势和拥挤距离选择下一代的种群成员,提高了好的个体遗传到下一代的可能性。算法的核心步骤是快速非支配排序算子设计、个体拥挤度计算以及精英策略选择算子设计。

(2)NSGA-III

NSGA-III 算法是由 Deb 等^[21-22]在 NSGA-II 算法基础上,基于参考点提出的第三代带有精英保留策略的快速非支配多目标优化算法。该算法主要针对三维及以上维度目标,采用参考点的选择操作代替 NSGA-II 算法中拥挤距离的选择操作来保持非支配解的多样性,从而解决了高维优化问题中非支配解个体数量呈指数增长和个体间优劣难区分的问题。

(3)AGE-MOEA

2019 年,Annibale Panichella^[23]提出了 AGE-MOEA 算法,AGE-MOEA 算法继承了 NSGA-II 的整体框架,但它用一个结合了非优势前沿的多样性和邻近性的生存分数取代了拥挤距离。首先,AGE-MOEA 使用 $O(M \times N)$ 计算复杂度的快速启发式来估计每一代中的正面几何形状。然后,将接近度计算为每个种群成员与理想点之间的距离,而利用种群成员的近度和多样性的距离对应于与估计几何相关的 L_p 范数。

3 工程实例

以西安市北部偏东地区某规划片区为研究对象,项目总用地面积为 12 hm²,地表高程为东北高西南低,采用雨污管网分流的排水体制。雨水管网的三个排出口连接其北侧市政道路。该规划区南侧主要有大面积绿化,管线较少,故不在研究范围内。研究范围内部根据雨水管的布置可分为东西两个片区,两片区均是独立的雨水管网系统,中间由市政道路隔开,故划分雨水研究范围见图 2。



图 2 研究区域现状图

区域下垫面类型主要分为 3 类:建筑及办公区域、道路和绿化区域,见图 3。根据该研究区域施工图以及经济技术指标表可知其面积与占比见表 1,东区建筑及办公、道路、绿化面积分别为 36 030, 20 450, 7 979 m²,面积占东区比例分别为 57.2%, 32.5%, 10.3%;西区建筑及办公、道路、绿化面积分别为 31 350, 20 500, 8 640 m²,面积占西区比例分别为 51.8%, 33.9%, 14.3%;考虑全部区域硬化面积为 108 330 m²,占全部区域面积的 87.8%,透水面积为 15 119 m²,占全部面积的 12.2%。

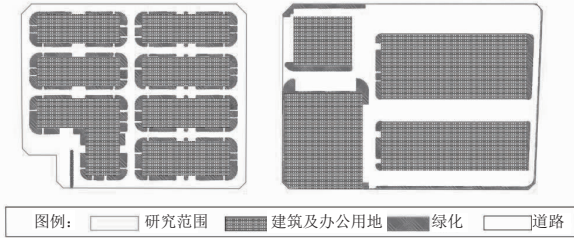


图 3 区域土地利用图

表 1 不同类型土地利用及占比

土地类型	硬化地面		透水地面
	建筑及办公 /m ²	道路 /m ²	绿化 /m ²
东区	36 030(57.2%)	20 450(32.5%)	6 479(10.3%)
西区	31 350(51.8%)	20 500(33.9%)	8 640(14.3%)
总计	67 380(54.1%)	40 950(32.9%)	16 119(12.9%)

通过对原始管线进行概化,共有 60 个节点和 57 个管段。其中,57 个节点是检查井,3 个节点是排放

口,概化结果见图 4。

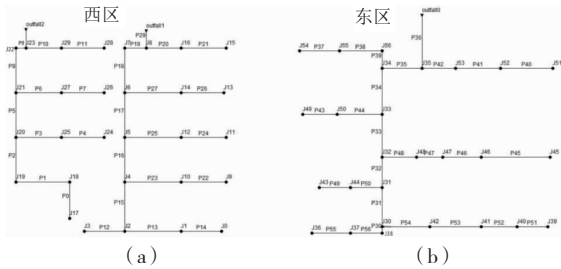


图 4 研究范围内雨水管网概化图

3.1 SWMM 模型参数设置

通过 SWMM 模型对雨水管网进行水力模拟,设计降雨条件取重现期为 50 a、降雨历时为 2 h 的芝加哥雨型作为降雨输入,根据《西安城区暴雨强度公式编制研究》^[24] 的研究,西安市暴雨强度公式如式所示:

i=21.960×(1+1.32×lgP)/(t+20.829)^0.971 (9)

式中:i 指西安市暴雨强度,mm/min;P 指降雨重现期,年;t 指降雨历时,min。

SWMM 模型的其他相关参数见表 2。

表 2 SWMM 模型相关参数取值

	参数名称	数值
子汇水区	平均坡度	0.005
	不透水地面粗糙系数 N 值	0.013
	透水地面粗糙系数 N 值	0.17
	不透水地面初始积注雨量/mm	1.5
	透水地面初始积注雨量/mm	5
	最大下渗速率/(mm·h ⁻¹)	75
	最小下渗速率/(mm·h ⁻¹)	3.03
	Horton 下渗曲线的衰减速率常数/h ⁻¹	4
	土壤排干时间/d	7
	管段(混凝土管)粗糙系数	0.013

3.2 优化模型相关参数

目标函数(1)中:通过收集西安市城市雨水管网建设费用,利用 SPSS 软件进行回归分析,得到西安市混凝土雨水管网综合造价公式。系数分别为 k₁ 为 472.077、k₂ 为 -264.948、k₃ 为 28.264、k₄ 为 0.401、k₅ 为 1.333、k₆ 为 0、k₇ 为 0。

目标函数(2)中:本次研究以西安市某区域为研究对象,降雨重现期为 50 a,设计降雨历时设为 2 h,该情况下 α 值为 15。

3.3 不同算法对比分析

利用 3 种优化算法对上述建立模型进行求解,设置种群为 200,迭代次数为 150 次。

3.3.1 结果质量分析

将最后一次迭代满足约束条件的种群进行统计,3 种算法优化结果中的管网造价与韧性关系见图 5。分析可知,经过算法 200 次迭代后,3 种算法的解集质量非常接近,但 AGE-MOEA 优化算法所得的前沿解集质量相对较高。

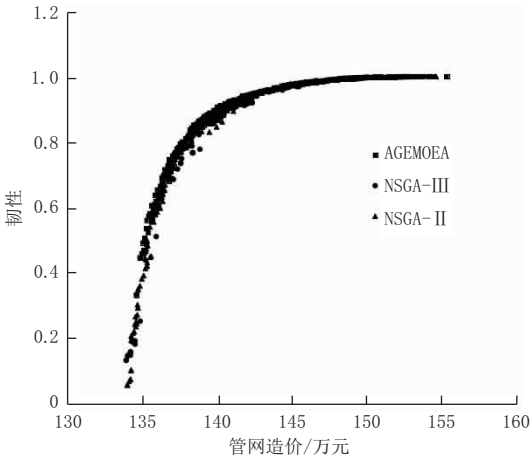


图 5 优化结果-管网造价与韧性关系图

将 3 种优化算法的 Pareto 解集范围进行统计,见表 3。

表 3 3 种优化算法 Pareto 解集范围统计表

优化算法	目标函数最大值		目标函数最小值	
	管网造价	韧性	管网造价	韧性
NSGA-III	1 519 622.97	1	1 330 463.621	0.075 401 574
NSGA-II	1 531 440.127	1	1 331 525.815	0.109 680 772
AGE-MOEA	1 513 836.103	1	1 341 480.043	0.430 265 686

在设计新方案时,通常考虑韧性为 1,对比三种优化算法在韧性为 1 时的管网造价,亦可知 AGE-MOEA 算法的造价最小。

3.3.2 寻优速率分析

以迭代次数为自变量,分别以管网造价和韧性为因变量对比三种优化算法寻优速率。

分析不同算法寻优速率对比由图 6 可得以下结论。

NSGA-III 优化算法在迭代次数为 33 次时便搜索到 133.3 万元的方案,在迭代次数 100 次时搜索到管网最小造价 133.0 万元的方案;NSGA-II 优化算法在迭代次数为 34 次时搜索到 133.3 万元的方案,在迭代次数为 60 次时搜索到最小造价 133.1 万元的方案,而对于 AGE-MOEA 算法,仅搜索到 134.1 万元的方案;可知,从造价方面分析,NSGA-I-I、NSGA-III 优化算法寻优速率较高。

NSGA-III 优化算法在迭代次数为 96 次时搜索到韧性最大值,NSGA-II 优化算法在迭代次数为

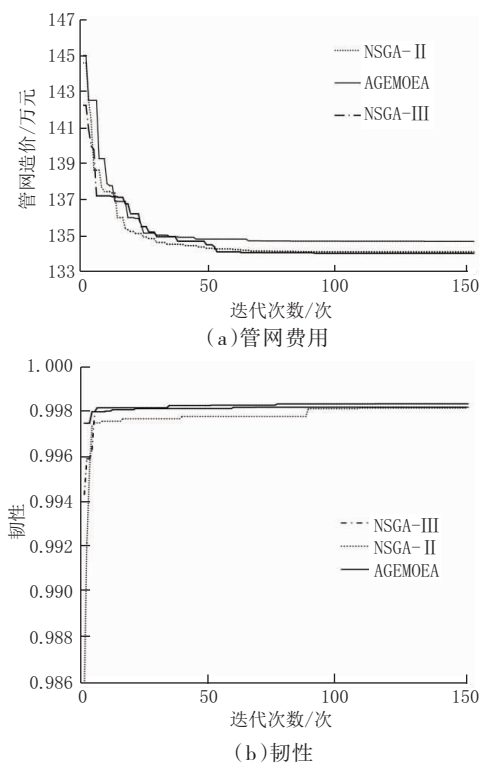


图6 不同算法寻优速率对比图

108次时才搜索到韧性最大值,AGE-MOEA 优化算法在迭代次数为 116 次时搜索到韧性最大值。但 NSGA-III、AGE-MOE 优化算法在迭代次数为 10 次时便接近韧性最大值,而 NSGA-II 优化算法在迭代次数为 90 次时才接近韧性最大值。因此,从韧性方面分析,NSGA-III、AGE-MOE 优化算法寻优速率较高。

充分结合管网费用和韧性两个目标进行分析, NSGA-III 优化算法寻优速率较高。

3.4 优化方案设计与分析

3.4.1 优化方案设计

根据上述三种算法的对比分析以及结合实际应用,仅选择 AGE-MOE 优化算法进行分析。根据模型运算结果,经过多次迭代后得到一组 Pareto 最优解集见图 7。

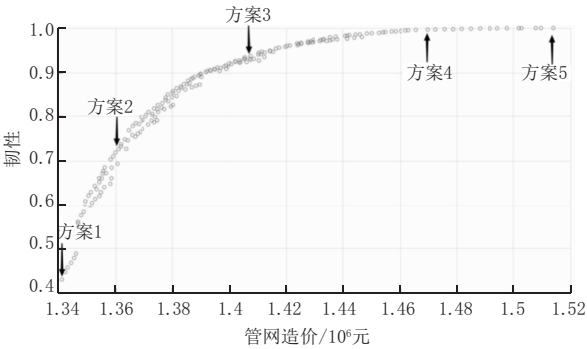


图7 AGE-MOE Pareto 前沿图

由于本次优化种群数量过大,因此根据管网造价选择 5 种方案。各方案的平面见图 8,各方案目标函数值见表 4。

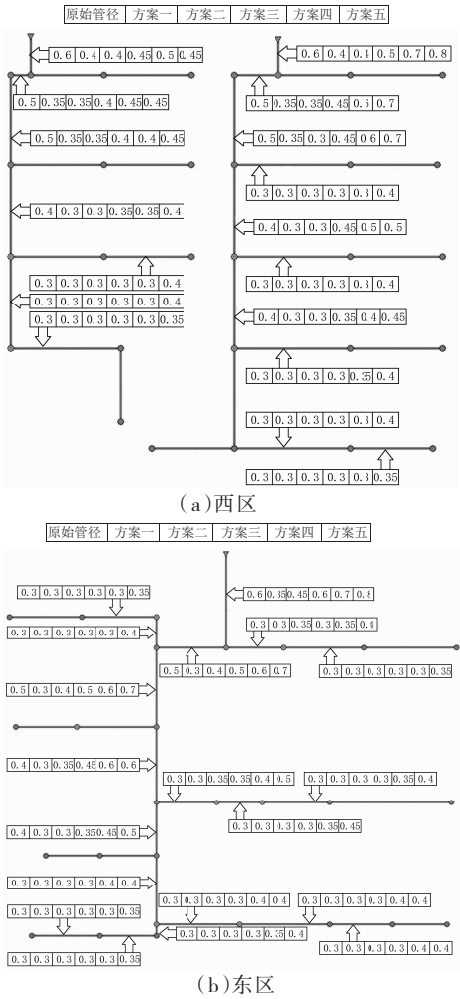


图8 各方案管道直径示意图

表4 优化方案与原始方案对比表

方案	管网造价 / 元	韧性
1	1 341 480.043	0.430 265 686
2	1 359 773.453	0.729 137 476
3	1 414 451.104	0.958 477 929
4	1 469 923.755	0.996 751 246
5	1 513 836.103	1
原始	1 413 562.452	0.911 672 9

由图 8 中各个方案的管径与检查井井底高程变化趋势可明显看出,优化方案管径的变化趋势与实际雨水管网一致,越靠近下游的管线管径值越大,且检查井井底高程越小,说明根据优化模型所得的排水方案满足实际工程需要。

为了分析不同降雨重现期下不同管网结构对排水能力的影响,选择 6 种降雨重现期,利用 SWMM 软件模拟 5 种典型优化方案和原始方案在不同降雨

重现期下检查井溢流情况,模拟结果见图 9。

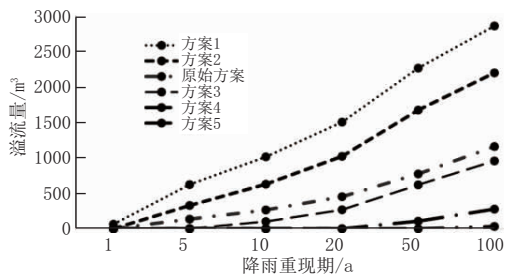


图 9 不同降雨重现期下各优化方案溢流量

通过模拟 6 种方案在不同重现期下溢流数据可知。随着降雨重现期的增大,优化方案和原始方案的溢流量均增加且变化趋势一致。在同一重现期下,费用越小的方案溢流量越大,两者成负相关关系。

根据优化结果与原始方案对比图 10 可知,原始方案并不满足优化算法的 Pareto 最优解,利用 AGE-MOEA 算法所优化的结果均优于原始方案。方案 1、方案 2 需要的预算较小,管网韧性也是相对较差的,在资金极度紧缺时可以考虑将方案 1 和方案 2 作为建设方案;若考虑造价的限制,可选择方案 3,此时管网造价虽比原始方案增加了 888.652 元,但韧性增加了 0.468;方案 4 是 Pareto 曲线变缓的拐点,此拐点后,管网造价增加时,韧性增加速率减弱。因此,可以考虑将方案 4 作为建设方案,此时管网造价为 1 469 923.755 元、韧性为 0.996 7、溢流量是 106.4 m³;若预算充裕时,可以将方案五作为建设方案,此时管网造价为 1 513 836.103 元、韧性为 1、溢流量是 0 m³。

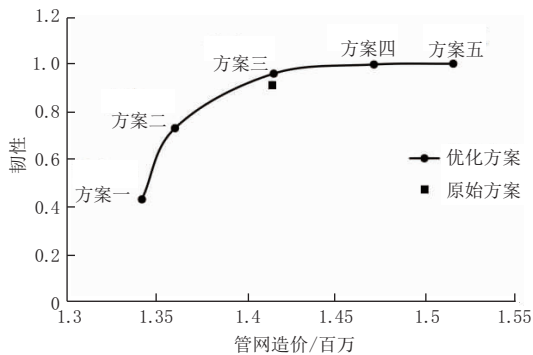


图 10 优化方案与原始方案对比图

3.4.2 优化方案分析

(1)管径对比分析

根据以上分析,选取优化方案 4 与原始方案进行详细对比分析。

优化前后管径对比见表 5。对比发现,共有 24 根管段发生变化,其中 P5、P8、P9、P28 等 4 根管段管径减小,增加经济效能;其中 P5、P9 管段管径减小 0.05 m,P8、P28 管段管径减小 0.1 m;20 根管段管径

增大,增加管网整体的韧性。其中管径最小增加 0.05 m,最大增加 0.2 m;P33 增加 0.2 m;P17、P18、P19、P29、P31、P34、P35、P36、P48、P52、P53、P54 增加 0.1 m;P23、P30、P32、P42、P46、P47、P51 增加 0.05 m。

表 5 优化方案 4 与原始方案管径对比 单位:m

原始方案		优化方案 4		原始方案		优化方案 4	
管段	管径	管段	管径	管段	管径	管段	管径
P0	0.3	P0	0.3	P33	0.4	P33	0.6
P5	0.4	P5	0.35	P34	0.5	P34	0.6
P8	0.5	P8	0.4	P35	0.5	P35	0.6
P9	0.5	P9	0.45	P36	0.6	P36	0.7
P17	0.4	P17	0.5	P42	0.3	P42	0.35
P18	0.5	P18	0.6	P46	0.3	P46	0.35
P19	0.5	P19	0.6	P47	0.3	P47	0.35
P23	0.3	P23	0.35	P48	0.3	P48	0.4
P28	0.6	P28	0.5	P51	0.3	P51	0.35
P29	0.6	P29	0.7	P52	0.3	P52	0.4
P30	0.3	P30	0.35	P53	0.3	P53	0.4
P31	0.3	P31	0.4	P54	0.3	P54	0.4
P32	0.4	P32	0.45				

(2)检查井高程对比分析

优化前后检查井内底高程详细对比见表 6。通过对比所有检查井井底高程可知,所有检查井井底高程均有所增加,增加范围在 0.05 m 至 1m 之间。其中 J6、J7、J8、J22、J23 增加埋深在 0.8 m 以上。检查井井底高程即对应管道底部高程,井底高程的变化,将增大管道坡度及流速,因此可进一步提高管网韧性。

4 结 论

本文基于 SWMM 建立雨水管网韧性优化模型,所得结论如下。

(1)从优化解集质量和寻优速率两个方面对比 NSGA-II、NSGA-III、AGE-MOEA 优化算法可知,AGE-MOEA 算法解集质量最高,NSGA-III 优化算法寻优速率较高。

(2)根据分析优化算法所得的 Pareto 解集可知,韧性优化模型能够根据实际工程建设中对经济性及管网韧性的不同需求满足不同工程的建设目标。算法所得出的方案解集以拐点为界,拐点之前随着造价增加,管网韧性提升速率显著;拐点之后造价提升,韧性提升速率减弱。

(3)通过对管道管径及埋深进行约束,进而影响坡度、流速及连接方式,建立起的雨水管网韧性优化模型可以有效优化管道直径和检查井井底高程,提

表6 优化方案4与原始方案检查井内底高程对比 单位:m

原始方案		优化方案4		原始方案		优化方案4	
检查井	内底高程	检查井	内底高程	检查井	内底高程	检查井	内底高程
J0	373.90	J0	373.800 1	J29	373.65	J29	373.534 4
J1	373.76	J1	373.658 9	J30	373.22	J30	372.917 9
J2	373.56	J2	373.101 8	J31	372.98	J31	372.732 1
J3	373.80	J3	373.600 0	J32	372.87	J32	372.152 1
J4	373.29	J4	372.701 8	J33	372.60	J33	372.002 1
J5	373.13	J5	372.445 7	J34	372.35	J34	371.852 1
J6	372.67	J6	371.845 7	J35	372.20	J35	371.612 4
J7	372.52	J7	371.691 4	J36	374.00	J36	373.817 5
J8	372.34	J8	371.515 1	J37	373.87	J37	373.517 5
J9	373.90	J9	373.660 6	J38	373.76	J38	373.317 5
J10	373.54	J10	373.452 8	J39	373.80	J39	373.576 7
J11	373.70	J11	373.603 8	J40	373.67	J40	373.419 9
J12	373.54	J12	373.446 0	J41	373.57	J41	373.293 9
J13	373.70	J13	373.634 2	J42	373.39	J42	373.113 9
J14	373.55	J14	373.485 5	J43	373.60	J43	373.420 2
J15	373.80	J15	373.605 1	J44	373.89	J44	373.312 0
J16	373.64	J16	373.447 4	J45	373.80	J45	373.504 4
J17	373.80	J17	373.101 8	J46	373.56	J46	373.213 1
J18	373.67	J18	372.975 6	J47	373.42	J47	373.078 1
J19	373.48	J19	372.788 7	J48	373.33	J48	372.938 1
J20	373.20	J20	372.438 7	J49	373.60	J49	373.416 6
J21	372.94	J21	372.188 7	J50	373.48	J50	373.296 4
J22	372.79	J22	371.938 7	J51	373.70	J51	373.500 0
J23	372.66	J23	371.854 5	J52	373.52	J52	373.316 4
J24	373.80	J24	373.392 8	J53	373.36	J53	373.108 6
J25	373.65	J25	373.243 1	J54	373.70	J54	373.465 0
J26	373.70	J26	373.600 0	J55	373.56	J55	373.324 2
J27	373.55	J27	373.450 3	J56	373.41	J56	373.174 5
J28	373.80	J28	373.684 0				

高管网经济性和管网韧性,改善解决传统雨水管网排水能力不足的问题。

参考文献:

[1] 王润梅. 提高市政基础设施科学化管理水平 打造宜居韧性智慧城市[J].中国勘察设计,2023(3):51.

[2] 廖英泽,王国盛,李喆,等.城市地下基础设施韧性发展现状及策略[J].防灾减灾工程学报,2022,42(6):1183-1190.

[3] Mugume S N,Gomez D E,Fu G,*et al*.A global analysis approach for investigating structural resilience in urban drainage systems[J].Water research,2015(81):15-26.

[4] Guptha G C,Swain S,Al-Ansari N,*et al*.Assessing the role of SuDS in resilience enhancement of urban drainage system: A case study of Gurugram City, India[J].Urban Climate,2022(41):101075.

[5] Zhang C,Oh J,Park K.Evaluation of sewer network resilience index under the perspective of ground collapse prevention[J].Water Science

and Technology,2022,85(1):188-205.

[6] Kamali B,Ziaei A N,Beheshti A,*et al*.An open-source toolbox for investigating functional resilience in sewer networks based on global resilience analysis[J].Reliability Engineering & System Safety,2022,218:108201.

[7] 柯庆,王林森,陶涛.城市雨水排水系统恢复力评估[J].中国给水排水,2016,32(21):6-11.

[8] 方威根.城市雨水管网多目标优化设计及韧性评估研究[D].杭州:浙江大学,2019.

[9] 陈森发,朱德炯,顾兴富,等.城市排水管网系统布局的优化设计[J].运筹与管理,1997(2):37-42.

[10] Hassan W H,Attea Z H,Mohammed S S.Optimum layout design of sewer networks by hybrid genetic algorithm[J].Journal of Applied Water Engineering and Research,2020,8(2):108-124.

[11] Pan T C,Kao J J.GA-QP model to optimize sewer system design[J].Journal of Environmental Engineering,2009,135(1):17-24.

[12] 郑恺原,向小华.基于SWMM和PSO-GA的多目标雨水管网优化模型[J].水利水电技术,2020,51(9):24-33.

[13] 付积皓.城市雨洪排水系统多目标优化设计研究[D].大连:大连理工大学,2019.

[14] 徐得潜,李星.雨水管网多目标优化设计研究[J].中国给水排水,2018,34(7):133-138.

[15] 刘军,高徐军,焦永宝,等.基于SWMM与NSGA-III的城市排水系统多目标优化[J].中国农村水利水电,2022(9):90-94.

[16] 金学易.排水管道工程造价的数学模式[J].中国给水排水,1990(2):59-61.

[17] Ouyang M,Duenas-Osorio L.Time-dependent resilience assessment and improvement of urban infrastructure systems[J].Chaos:An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science,2012,22(3):033122.

[18] 汪维,王林森,肖涛,等.基于雨水管网恢复力评估的LID设施优化布局[J].中国给水排水,2019,35(13):112-116.

[19] 唐杰,邓琪伟,沈阳武.基于PlatEMO的新能源高渗透率电网惯量辨识方法[J].电工技术,2022(5):15-18,21.

[20] Tian Y,Cheng R,Zhang X,*et al*.PlatEMO: A MATLAB platform for evolutionary multi-objective optimization [educational forum][J].IEEE Computational Intelligence Magazine,2017,12(4):73-87.

[21] Deb K,Agrawal S,Pratap A,*et al*.A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization:NAGA-II [A]//Proc of the Parallel Problem Solving from Native VI Conf[C]//Paris.2000:849-858.

[22] Deb K,JAIN H.An Evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point-based nondominated sorting approach, Part I: solving problems with box constraints[J].Evolution-ary Computation,IEEE Transactions on,2014,18(4):577-601.

[23] Panichella A.An adaptive evolutionary algorithm based on non-euclidean geometry for many-objective optimization[C]//Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference,2019:595-603.

[24] 毕旭,党超琪,程龙,等.西安城区暴雨强度公式编制研究[J].安徽农业科学,2015,43(26):223-225,228.