

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.09.020

城市雨水深隧系统多目标优化设计及运行

李江云, 张选庆, 胡子欣

(武汉大学 土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 如何将城市雨水深隧系统和浅层雨水系统相结合,以充分发挥雨水深隧系统防洪排涝、削减初雨污染等作用,对于建设城市深隧系统意义重大。通过构建深隧系统与浅层管网耦合模型,以溢流总量、建设成本、抽排费用为目标函数,以闸门控制和深隧管径为优化变量,将罚函数与内涝风险相关联,建立基于NSGA-II算法的雨洪深隧系统多目标优化模型,研究在满足水文水力、内涝风险及经济运行各项指标下的雨洪深隧设计和运行方案。以武汉市某排水区为例,利用基于GIS的快速建模及率定方法,建立浅层与深隧排水系统的耦合模型,采用NSGA-II算法编程调用SWMM进行方案模拟及优化。结果表明,通过调整深隧直径、入流闸门调度,在满足经济性指标的前提下,可减少溢流节点、缩短内涝时间。

关键词: 雨水深隧系统; 雨水管网; 多目标优化; 数值模拟; 遗传算法

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)09-0129-08

Multi-objective Optimization Design and Operation of Urban Stormwater Deep Tunnel System

LI Jiang-yun, ZHANG Xuan-qing, HU Zi-xin

(School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: It is essential to combine the deep tunnel system with the upper storm sewer system in order to fully utilize deep tunnels in collecting stormwater, reducing flooding, and controlling initial rainwater pollution. By Constructing the coupled model of deep tunnel system and upper storm sewer network, a multi-objective optimization model for stormwater deep tunnel system was developed based on NSGA-II algorithm. With the total overflow volume, project investment and pumping cost as its objective functions, the gate controlling and tunnel diameter were served as the optimization variables. Additionally, the penalty function was correlated with the risk of waterlogging. The design and operation scheme of deep tunnel system was investigated under the conditions of meeting the hydrological and hydraulic, waterlogging risk and economic operation indexes. Taking a drainage area in Wuhan City as an example, a coupled model was established by using GIS-based fast modeling and parameter rating methods. The NSGA-II algorithm was then programmed to connect SWMM for scheme simulation and optimization. By adjusting the deep tunnel diameter and inlet gate scheduling, the number of overflow nodes could be reduced and the detention time could be shortened with good economic benefit.

Key words: deep tunnel drainage system; storm sewer network; multi-objective optimization;

基金项目: 湖北省水利重点科研项目

通信作者: 李江云 E-mail: lijy@whu.edu.cn

numerical simulation; genetic algorithm

低影响开发(LID)绿色基础设施在小重现期雨水径流及初雨拦截方面具有良好的控制效果^[1-2],但存在施工复杂及运维要求高、难以应对大暴雨等问题。灰色基础设施尤其是近些年发展起来的深隧排水系统,对极端降雨事件下雨水的安全排放起着越来越重要的作用。通常深隧管道在输送时因不受地面道路的影响可采用直线设计,通过合理布线可与浅层管网、调蓄池、泵站、污水处理厂以及周边河道顺利衔接,构建城市智慧水务体系。但从深隧排水系统在国内外城市的应用情况来看,其建设初期工程投资较大,需配建大容量的排水泵组,单次运行耗能较高^[3]。因此,合理设计规模和运行方式对促进深隧排水系统的发展至关重要。

笔者利用GIS快速建模方法,构建浅层与深隧耦合的SWMM排水系统雨洪模型,模拟分析管网溢流现象和过流能力,对比有、无深隧系统的雨洪模型模拟结果;将不同方案的溢流总量、建设成本、抽排费用的优化率作为判据进行方案评估和筛选,以期对深隧系统的优化设计和运行提供理论依据。

1 浅层与深隧系统建模

基于GIS预处理的SWMM模型构建是目前常用的建模方法,主要包括以下步骤:通过将管道数据文件在GIS建立拓扑规则等方式完成排水管网图层的建立;利用研究区域的DEM数据建立地理高程模型,进行流域水文、管道流向及排出口分析后,划分研究区域;以第二步提取的数据作为新河网,划分一级流域,再以一级流域为边界,以其上的雨水检查井为节点创建泰森多边形,完成二级子汇水区划分;利用DEM数据、土地栅格数据和遥感影像卫星图,为每个二级子汇水区精确计算要素面积、特征宽度等属性。基于GIS预处理的模型构建完成后,按照SWMM文件格式,将节点、管道、子汇水区图层文件转换为SWMM的输入文件^[4-6]。

2 基于NSGA-II的模型优化算法

2.1 NSGA-II简介

NSGA-II是一种基于Pareto最优概念的遗传算法,是NSGA(非支配排序遗传算法)的改进算法,被广泛用于市政基础领域,比如灰绿基础设施的优化设计、灰绿耦合设施的布设规模占比、泵闸的调度

研究等^[7-8],其主要优势是比改进前的算法具有更强的搜索能力和扩展性,通过引入精英策略,能够有效保持优良个体进入下一代,迅速提高种群水平,具备快速高效的求解能力^[9]。

2.2 多目标优化模型

以24 h内节点总溢流量最小、深隧管段建设成本最小、深隧抽排泵站单次运行费用最小为3个优化目标,以入流闸门开关闸时对应的上游检查井的水位、深隧管段的管径为优化变量,以深隧管段的最大经济管径约束管径变化,以闸门上游检查井的最高水位约束开闸水位变化。

2.3 多目标优化函数

目标函数主要包括经济性指标、水文水力性能指标和内涝风险等级指标。其中,经济性指标主要包括深隧管道造价及抽排泵站单次运行成本;水文水力性能选择节点总溢流量作为负荷指标和区域水量控制指标,因为节点溢流时,管网已经超负荷运行,因此节点溢流量一定程度上可以反映管网的负荷状态;采用情景分析法进行内涝风险评估,将内涝风险等级作为惩罚系数纳入优化模型。

① 深隧管道建设费用

本研究仅对深隧主体系统费用进行优化,竖井、末端调蓄池、泵站等建设费用不在优化范围内。故将深隧的建设费用以深隧管段的建设成本替代,参考武汉市污水深隧盾构管段的经济指标书,确定不同管径的单位长度单价,采用公式法估算成本。

$$F_1 = \sum_{i=1}^{N_L} (3\,552.3X_i^2 + 6\,632.8X_i + 45.626) \times L_i \quad (1)$$

式中: F_1 为深隧管道建设总费用,元; X_i 为研究区域的第*i*段深隧管道的管径,m; L_i 为第*i*段管道的管长,m; N_L 为研究区域深隧管段的总数量。

② 抽排泵站的运行费用

运行费用以水泵的电费表示,单次降雨的水泵抽排水量等于深隧总入流量,采用单位抽排体积法估算抽排泵站的运行费用。计算公式如下:

$$F_2 = \sum_{i=1}^{N_R} \sum_{j=1}^{N_L} 0.196 \times Q_j \times t \quad (2)$$

$$T = N_R \times t \quad (3)$$

3.2 浅层雨水与深隧系统的模型构建

利用GIS工具构建研究区域的SWMM模型,模型中共有检查井1 215个、排口44个、蓄水池1个、水泵连接1条、管道1 231条,如图3所示。



图3 研究区域的SWMM模型

Fig.3 SWMM model of research region

首先,在2年一遇2 h降雨条件下,用SWMM模拟浅层雨水系统,溢流时间超过15 min视为积水时溢流点,模拟结果如图4所示,将其与2020年区域内严重积水点分布图[见图2(b)]进行对比,模拟结果与实测积水点资料基本相吻合。

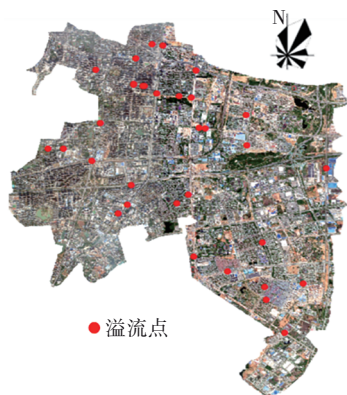


图4 模拟溢流点

Fig.4 Research region simulate points

其次,分析代表性节点的流量过程,分别选取建筑稀疏区靠近上游的检查井J398、建筑密集区靠近上游的检查井J69、排水管线较长的排放口PK22、排水管线较短的排放口PK25(见图5),发现建筑较稀疏处的节点峰值流量滞后时间偏长,原因在于该类区域透水下垫面比例较高,地表曼宁系数较大,汇流速度较慢;反之,建筑密集区由于不透水面积

比例较大,汇流速度较快,峰值滞后时间较短,峰值出现时间相对关系合理,流量过程线总体趋势与降雨趋势一致,认为模型水文水力参数设置合理。

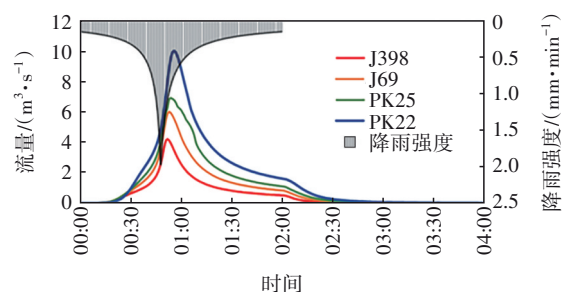


图5 降雨强度和代表性节点径流过程

Fig.5 Rainfall intensity and representative node runoff hydrograph

研究区域现状内涝风险成因主要是硬化面积大、排水管网标准偏低。采用不同降雨重现期下的3 h短历时降雨,经计算发现,研究区域只有50%的管网排水能力重现期>5年,41%的管网排水能力重现期<3年,导致多处主干道排涝能力不足,遭遇极端暴雨时存在较大积水风险。此外,部分区域地势低洼、河道水位顶托、排水管道衔接不足、逆坡排水也是产生积水的重要原因。为此,鉴于研究区域的实际情况及工程条件,根据经验提出如图6所示深隧方案(初始方案)。



图6 深隧系统布置示意

Fig.6 Layout of deep tunnel system

3.3 深隧系统的排涝效能分析

通过浅层与深隧系统联合运行,模拟分析溢流量、超载管道数量的相对变化量,进行深隧系统的排涝效能分析,结果如图7所示。设置深隧后,在

1 年一遇的降雨情况下溢流控制率达到 94%, 基本不发生溢流, 而随着降雨重现期的增大, 溢流控制率逐渐减小至 51%, 深隧的设置相当于给流域的雨水增加了一个出水口, 分流管网中部分雨水, 减小下游水位的顶托作用, 从而起到减少溢流的作用。因此, 深隧的设置使得溢流水量、溢流点数、超载管段占比均呈下降趋势。对于部分深隧管道出现满管情况, 需要优化其管径, 使其工程造价发挥最大效益。另外, 浅层满管占比减少率远小于溢流量减少率, 说明浅层管网从满管到发生溢流之间, 有较大的调蓄空间。因此, 有必要在深隧入流点设置闸门控制, 充分利用浅层管网满管后的调蓄能力, 降低深隧的运行和维护成本。

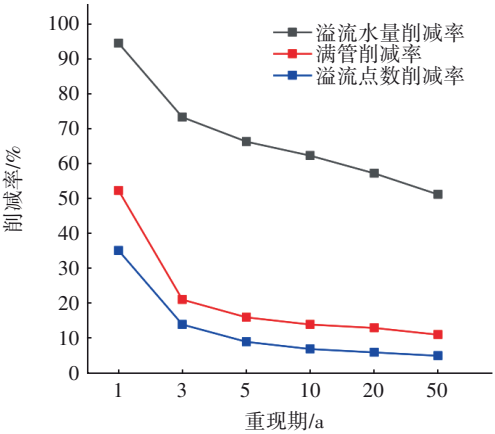


图7 深隧系统的排涝效能分析

Fig.7 Analysis of drainage efficiency of deep tunnel system

3.4 浅层排水与深隧耦合系统的优化设计与运行

在满足防洪排涝要求的情况下, 可以减少深隧启用次数和入流量, 降低深隧的运行维护成本。为此, 建立基于 NSGA- II 的雨水深隧系统优化模型, 在关键节点与深隧排水系统之间连接的管道上, 利用控制条件(control rule)编写控制语句, 以此对深隧排水系统在入流闸门调控下进行模拟。

本研究在 20 年一遇 24 h 长历时设计暴雨(情景 1)和 50 年一遇 24 h 长历时设计暴雨(情景 2)条件下, 计算深隧建设成本和节点溢流总量随深隧设计规模的变化规律。

3.4.1 深隧优化算法分析

两种降雨情景下溢流总量和建设成本随管径的变化如图 8 所示。以 20 年一遇长历时降雨为例, 深隧管径处于 1~1.2 m 和 3.2~3.9 m 之间时, 系统溢流量基本不变。分别在这两个阶段之后, 随着管

径继续增加, 溢流量迅速减小, 边际效益递减, 管径增大到 5.6 m 之后, 溢流量基本稳定, 管径对系统溢流没有影响。50 年一遇长历时降雨情况类似, 在 5.7 m 之后溢流量基本不变。不同降雨情形下深隧管径的经济效益参数见表 2。

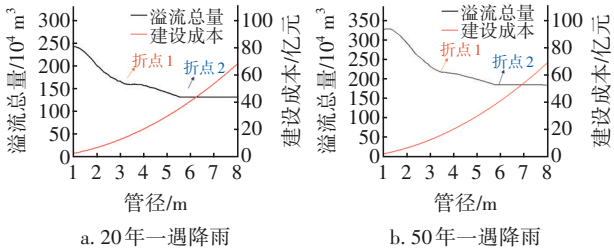


图8 不同降雨情形下深隧的经济效益

Fig.8 Economic benefits of deep tunnel under different rainfall conditions

表 2 不同重现期下深隧管径的经济效益参数

Tab.2 Key economic parameters of deep tunnel diameter under different rainfall scenarios

项 目		情景 1(P=20 a, 24 h)	情景 2(P=50 a, 24 h)
溢流总量/ 10^4 m^3	最小值	132.0	186.3
	最大值	243.5	327.8
	折点 1	159.5	217.7
	折点 2	132.0	186.3
管径/m	折点 1	3.2~3.9	3.4~4
	折点 2	5.6	5.7
建设成本/亿元	折点 1	14.22	19.72
	折点 2	36.7	37.8
溢流量削减率/%	折点 1	34.5	33.6
	折点 2	45.8	43.2

仍以降雨情景 1(P=20 a, 24 h)为例, 分析优化算法的运行过程。遗传代数设为 100 代, 种群数量设为 60 个, 每一代各目标函数种群的均值随遗传代数的变化规律见图 9。在前 10 次迭代中, 溢流总量大幅下降, 同时抽排费用大幅上涨, 建设费用基本不变, 说明在这一阶段的优化中, 在入流闸门的控制下深隧起到分流作用, 深隧入流量增加, 从而抽排费用增加, 溢流总量减少。在 10~60 代之间, 建设费用逐渐减小, 抽排费用曲线波动下降, 溢流总量虽然不断波动但并未大于初代值, 说明这一阶段的优化充分发挥了浅层管网的过流和负压能力, 利用闸门控制深隧入流, 在没有增加溢流量的前提下, 使得深隧入流量减小, 深隧管径也得到了充分优化。溢流总量和抽排费用在迭代 60 次后只在小幅

度内上下波动,建设费用在60代后基本不变,说明60代时建设成本已经收敛。

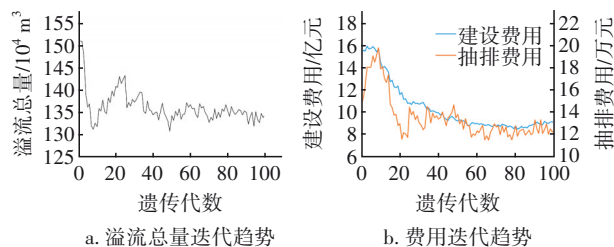


图9 目标函数种群的均值随遗传代数的变化规律

Fig.9 Variation of the mean of the target function population with genetic generation

对60代之后每一代种群的非支配解取均值,发现各目标函数非支配解之间有如下关系:深隧入流量(抽排)越大,系统溢流量越小;而建设费用和溢流总量相关性不强,60代后由深隧管径决定的建设成本已经收敛于8.4~9.2亿元,影响溢流总量的关键因素是抽排费用。对60代之后所有个体的目标函数中取非支配解集作为优化方案集,得到Pareto最优前沿如图10所示。在Pareto最优前沿中,用户最感兴趣和关注的最优解为每个目标函数上具有最优值的极端解(本研究中两个目标函数对应两个极端解),以及目标函数变化最快的拐点,这三者被称为兴趣最优解。

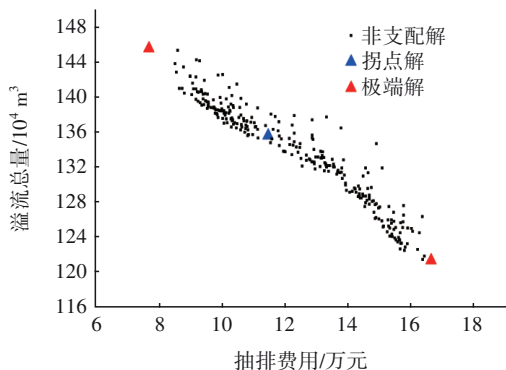


图10 Pareto最优前沿

Fig.10 Pareto optimal frontier

由于60代后建设成本基本不变,溢流总量主要由泵闸控制的抽排费用决定,因此不考虑管径目标的极端点,而溢流总量与抽排费用近似呈反比关系,互为对方的极端解,故共得到3套备选方案:备选方案一和方案二为极端解、方案三为拐点解,各方案目标值和优化率如表3所示。方案一的抽排费用优化率为49.7%,是Pareto最优前沿中抽排费用

和建设成本最小的方案,但对溢流量的优化率仅为3.7%;方案二的溢流量优化率为19.7%,是Pareto最优解集中溢流量最小的方案,但抽排费用较初代增加了9.2%,没有起到优化抽排费用的作用;方案三对3个目标函数均有优化效果,其中对建设成本的优化效果最大。因此,方案三可视为该情景下的最优方案。

表3 备选方案及目标函数优化率

Tab.3 Alternative solutions and optimization rate of the target function

项 目	溢流量		建设成本		抽排费用	
	数值/ 10^4 m^3	优化 率/%	数值/ 亿元	优化 率/%	数值/ 万元	优化 率/%
初始方案	151.1		15.6		15.3	
备选一	145.5	3.7	8.4	46.2	7.7	49.7
备选二	121.3	19.7	9.2	41.0	16.7	-9.2
备选三	135.6	10.3	8.5	45.5	11.5	24.8

进一步分析遗传过程中各目标函数的取值,结果如图11和表4所示。

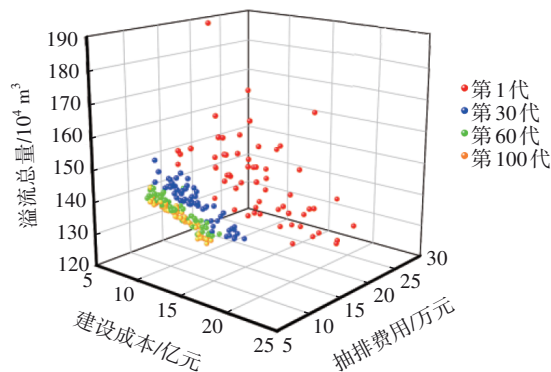


图11 典型代种群分布

Fig.11 Distribution of typical generation population

表4 典型代种群目标函数分布范围

Tab.4 Target function distribution range of typical generation population

项 目	溢流总量/ 10^4 m^3	建设成本/ 亿元	抽排费用/ 万元
第1代	124.7~192.7	9.4~22.1	7.5~27.0
第30代	124.0~153.2	8.4~13.4	9.1~18.9
第60代	124.5~143.9	7.4~10.8	9.0~17.6
第100代	121.3~144.1	7.9~10.2	8.8~16.8

由图11和表4可知,第30代、第60代和第100代种群相较于初代种群个体更为集中且各目标函数的范围均缩小,溢流总量、建设成本及抽排费用等3个末代目标函数的分布范围较初代缩小率分别

为 66.5%、81.9%、59.0%,说明经过调整深隧管径和闸门控制规则,深隧建设成本的优化效果最好,其次是溢流总量,对抽排费用也有良好的优化效果,优化模型具有合理性。同理,研究 50 年一遇 24 h 的降雨情景,观察演化种群各目标值随遗传代数的优化趋势,也有类似的规律。

3.4.2 最终优化方案评估

对比不同重现期下优化前后的深隧管径及入流闸门调度方案,结果见表 5 和表 6(篇幅所限,只列出部分结果)。可以看出,在 $P=20$ a 降雨情景下,大部分深隧管径尤其是上游管径都进行了不同程度的缩小,运行调度方面提高了入流闸门的开启水位,说明优化方案通过充分利用浅层雨水系统的空管调蓄能力,减少了深隧抽排费用;在 $P=50$ a 降雨情景下对管径进行了类似调整,而在运行调度方面,普遍调低了闸门的开启水位,说明优化程序在更大的重现期暴雨情景下,可通过增加抽排量来避免更多的溢流发生。

表 5 不同重现期下优化前后的深隧管径对比

Tab.5 Comparison of deep tunnel pipe diameter before and after optimization under different rainfall return periods

深隧管段编号	管径			
	降雨情景 1		降雨情景 2	
	初代方案	优化方案	初代方案	优化方案
Spipe1	4.1	1.6	3.6	2.2
Spipe2	4.0	2.5	3.2	3.3
Spipe3	3.6	4.3	3.2	4.4
...
Spipe32	3.7	3.7	4.3	3.8

表 6 不同重现期下优化前后的闸门控制方案对比

Tab.6 Comparison of gate control scheme before and after optimization under different rainfall return periods

闸门编号	溢流水位	开闸水位~关闸水位			
		降雨情景 1		降雨情景 2	
		初代方案	优化方案	初代方案	优化方案
K1	4.1	2.26~1.08	2.65~1.40	1.99~1.06	1.47~1.06
K2	2.1	0.99~0.48	1.99~0.31	0.88~0.44	1.24~0.21
K3	2.5	1.32~0.66	2.09~0.78	1.26~0.58	1.12~1.03
...
K16	3.6	1.67~0.88	2.86~1.06	1.83~0.87	2.27~1.20

相应的目标函数值与初始方案的对比情况见表 7,优化方案相较于初始方案,对建设成本的优化

效果最好,对溢流总量和抽排费用也有一定优化。

表 7 优化前后目标函数对比

Tab.7 Comparison of target function before and after optimization

项 目		溢流总量/ 10^4 m^3	建设成本/亿元	抽排费用/万元
降雨情景 1	初始方案	151.10	15.6	15.3
	优化方案	135.60	8.5	11.5
降雨情景 2	初始方案	222.60	20.8	20.0
	优化方案	193.30	11.3	17.4

4 结 论

① 以武汉市东湖高新区浅层雨水系统为例,讨论了通过加设深隧排水系统缓解该区内涝问题的方案。首先,通过构建 SWMM 浅层空间雨洪模型,对现状浅层排水系统进行了溢流点和管网过流能力的分析,得出管网过流能力不足、泵站抽排能力不足和下游河道水位顶托为该区内涝的主要成因。通过建立深隧与浅层管网耦合模型,对比设置深隧前后系统溢流量的变化,评估雨水深隧方案的必要性。其次,基于 NSGA-II 算法建立了城市雨水深隧优化模型,以节点总溢流量最小、深隧管段建设成本最小、深隧抽排泵站单次运行费用最小为优化目标,以入流闸门启闭时对应的上游检查井的水位、深隧管段的管径为优化变量进行优化。优化结果表明,深隧系统的经济性指标可以和内涝控制要求同时满足,分别得到降雨情景 1($P=20$ a, 24 h)和降雨情景 2($P=50$ a, 24 h)下的最优方案。通过对比初、末代种群各目标函数的取值范围,发现所建优化模型对建设成本的优化效果最佳,而当暴雨重现期较大时,模型对抽排费用的优化更明显,暴雨重现期较小时,对溢流总量控制的优化效果更明显,说明优化模型很好地满足了工程多目标优化中的权重匹配问题。

② 深隧技术作为一项兼具缓解内涝和防控污染功能的先进技术,在排水效率及极端降雨事件下的排水能力安全保障等方面具有巨大的应用前景,适用于高度开发、地表用地和空间紧张的城市,但也存在着建设初期工程需要投资费用较大、大容量的排水泵组单次运行的抽排费用高等问题。为避免盲目跟风地建造深隧,需建立研究区域浅层雨洪模型,分析内涝成因;结合城市排水特征,科学设计隧道入流点和路线及其与现有雨水管网的衔接

关系,建立浅层与深隧雨水系统协同运行水力模型。本研究的模型中仅采用闸门运行方式作为优化变量,目标函数中的抽排费用依据深隧入流量采用单位抽排体积法计算得出。在后续的深隧调度优化研究中,可增加泵站或末端调蓄池、初雨处理厂的运行方式为优化变量,以泵站实际的抽排流量计算抽排费用,增加初雨污染控制率为目标函数,实现深隧、浅层管网、调蓄池、泵站、污水处理厂的智能调度。

参考文献:

- [1] DELLEUR J W. The evolution of urban hydrology: past, present, and future [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003, 129(8): 563-573.
- [2] JACOBSON C R. Identification and quantification of the hydrological impacts of imperviousness in urban catchments: a review [J]. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92(6): 1438-1448.
- [3] 黄明利, 张志恩, 谭忠盛. 我国城市防洪排涝地下深隧规划设计与施工方法 [J]. *隧道建设*, 2017, 37(8): 946-951.
- HUANG Mingli, ZHANG Zhi'en, TAN Zhongsheng. Planning, design and construction of deep underground tunnel for flood control and drainage in urban areas in China [J]. *Tunnel Construction*, 2017, 37(8): 946-951 (in Chinese).
- [4] 徐慧珺. 基于SWMM模型的城市雨洪模拟建模方法研究 [J]. *水利规划与设计*, 2021(9): 44-49, 97.
- XU Huijun. Research on urban rain and flood simulation modeling method based on SWMM [J]. *Water Resources Planning and Design*, 2021(9): 44-49, 97 (in Chinese).
- [5] 赵冬泉, 陈吉宁, 佟庆远, 等. 基于GIS构建SWMM城市排水管网模型 [J]. *中国给水排水*, 2008, 24(7): 88-91.
- ZHAO Dongquan, CHEN Jining, TONG Qingyuan, et al. Construction of SWMM urban drainage network model based on GIS [J]. *China Water & Wastewater*, 2008, 24(7): 88-91 (in Chinese).
- [6] 赵冬泉, 陈吉宁, 佟庆远, 等. 基于GIS的城市排水管网模型拓扑规则检查和处理 [J]. *给水排水*, 2008, 34(5): 106-109.
- ZHAO Dongquan, CHEN Jining, TONG Qingyuan, et al. Inspection and modification of GIS based topological relationships in urban drainage modeling [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2008, 34(5): 106-109 (in Chinese).
- [7] GUO Y, WALTERS G A, KHU S T, et al. A novel cellular automata based approach to storm sewer design [J]. *Engineering Optimization*, 2007, 39(3): 345-364.
- [8] VAIRAVAMOORTHY K, ALI M. Optimal design of water distribution systems using genetic algorithms [J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2002, 15(5): 374-382.
- [9] AFSHAR M H, AFSHAR A, MARIÑO M A. Hydrograph-based storm sewer design optimization by genetic algorithm [J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2006, 33(3): 319-325.

作者简介:李江云(1967-),女,湖北武汉人,博士,教授,主要研究方向为市政工程给排水管网、泵及泵站过渡过程和水锤防护等。

E-mail:lijy@whu.edu.cn

收稿日期:2023-03-22

修回日期:2023-07-31

(编辑:刘贵春)

科学防御水旱灾害,有效促进人水和谐