

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.09.021

基于双目标函数的合流制排水系统截流倍数优化

王 武^{1,2,3}, 钟江丽⁴, 郜会彩^{1,2,3}

(1. 绍兴文理学院 土木工程学院, 浙江 绍兴 312000; 2. 浙江省岩石力学与地质灾害重点实验室, 浙江 绍兴 312000; 3. 浙江省山体地质灾害防治协同创新中心, 浙江 绍兴 312000; 4. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122)

摘 要: 合流制排水系统截流倍数的取值对水环境保护和截流改造工程的成本起着决定性作用。以不同截流倍数下的年溢流量和工程投资成本两个指标为目标函数,建立了环境-经济双目标优化的数学模型,利用加权理想点法将双目标问题转为单目标问题进行求解。理想点是多目标决策分析的方法,通过构造多目标问题的理想点和非理想点,利用靠近理想点的程度作为评价依据。通过对杭州市余杭区的案例分析得出,当截流倍数取2.63时,可以最大限度地逼近环境与经济相应的理想点,达到环境与经济的最优平衡。不同地区的工程应根据当地气候条件和工程成本,利用理想点法再次确定最优截流倍数。

关键词: 合流制排水系统; 截流倍数; 双目标优化; 理想点法

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)09-0133-06

Optimization of Interception Ratio for Combined Sewer System Based on Double Objective Function

WANG Wu^{1,2,3}, ZHONG Jiang-li⁴, GAO Hui-cai^{1,2,3}

(1. School of Civil Engineering, Shaoxing University, Shaoxing 312000, China; 2. Key Laboratory of Rock Mechanics and Geohazards of Zhejiang Province, Shaoxing 312000, China; 3. Zhejiang Collaborative Innovation Center for Prevention and Control of Mountain Geologic Hazards, Shaoxing 312000, China; 4. PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China)

Abstract: The value of interception ratio for combined sewer system plays a decisive role in water environment protection and interception reconstruction project cost. The annual overflow and project investment cost under different interception ratios were selected as the objective functions to establish a mathematical model for environment-economy dual objective optimization, and the dual objective problem was transformed into the single objective problem and solved by weighted ideal point method. The ideal point is a multi-objective decision analysis method. By constructing ideal point and non-ideal point of the multi-objective problem, the degree close to the ideal point is selected as the evaluation basis. The case analysis of Yuhang District in Hangzhou indicated that the optimal balance between environment and economy could be achieved when the interception ratio was 2.63. The optimal interception ratio can be

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41907167); 浙江省自然科学基金资助项目(LY18E090004)

通信作者: 郜会彩 E-mail: gaohuicai@sina.com

determined again by the ideal point method according to the local climate conditions and project cost in different regions.

Key words: combined sewer system; interception ratio; dual objective optimization; ideal point method

随着城市化进程的不断加快,许多城镇的排水管网都面临着改造的问题。新城区大多采用分流制排水系统,但对于大部分老城区,由于管位有限、施工困难等,往往采用截流制合流式的排水系统。截流倍数 n_0 的确定是合流制管网改造的重要设计参数,截流倍数取值偏大可减少溢流量,但相应截流干管的管径和污水处理设施的规模就要增大,将会增加截流工程的成本;截流倍数取值偏小会使溢流量增加,污染水环境,所以合理确定截流倍数的取值,对水环境保护和工程经济投资具有重要意义。

我国现行的《室外排水设计规范》(GB 50014—2006)建议截流倍数 n_0 宜采用2~5。孙勇^[1]以溢流量控制最优确定截流倍数,通过暴雨强度拟合法,将旱季污水量折算成基准降雨强度与真实的雨量记录相比,通过溢流次数、溢流时长的变化趋势选择合适的截流倍数。孙全民^[2]和黄维^[3]以经济投资最优确定截流倍数,通过溢流造成环境经济损失和工程建设费用之和的最小值确定最优截流倍数。张超等^[4-6]根据单位成本截流污染物的最大值选取截流倍数。王盼等^[7]研究了不同人口密度、汇流时间、降雨特征参数下载流倍数的取值范围。在上述截流倍数的优化研究中,由于不同目标函数对优化变量的影响程度不同,所以得到的优化方案有时会偏向某一目标函数的最优解,不能同时满足各项目标间的平衡。

鉴于此,笔者拟通过雨洪管理模型(SWMM)模拟不同截流倍数下的年溢流量,并建立截流倍数与年溢流量的函数,根据2010版《浙江省市政工程预算定额》和《给水排水设计手册:第10册 技术经济》建立工程成本与截流倍数的函数,利用理想点法^[8]将环境-经济的双目标优化问题转化为单目标优化问题,以克服量纲间的差异,进而确定截流倍数 n_0 ,使其最大限度地逼近环境-经济相应的理想最优值,并将该方法应用于某地排水管网的改造中。

1 多目标优化数学模型

1.1 优化问题的数学描述

截流倍数多目标优化数学描述为:

$$\begin{cases} \text{Min} P(x) \\ \text{Min} F(x) \end{cases} \quad (1)$$

s. t. $x=[1,5]$

式中: x 为截流倍数; $P(x)$ 为年溢流量优化函数; $F(x)$ 为工程成本优化函数。

基于截流倍数的设计理念,选择溢流量最少和成本最低为优化目标,因为国内外合流制改造做得好的城市 n_0 取值为1~5,所以本研究中的 n_0 取1~5。在 $n_0=1$ 时成本最低,在 $n_0=5$ 时溢流量最少,两个目标函数相互冲突,不能简单确定截流倍数同时满足MinP和MinF,因此需要对两个目标函数进行优化分析,求得对每一个目标都比较满意的方案。

1.2 多目标转为单目标

本研究希望取得溢流量控制与经济成本的平衡,使得选定的截流倍数更好地趋向各个目标的最优值,因此利用理想点法^[8]构建目标函数。理想点法先对单个目标进行优化,如下所示:

$$\min f_i(x) \quad i=1, \dots, p \quad (2)$$

求其最优解 f_i^* ,这些点构成的集合 $f^*=(f_1^*, \dots, f_p^*)^T$ 为多目标优化值域的理想点。该理想点或多目标优化中很难取得,所以建立某种度量,求得距离理想点 f^* 最近的 f 作为近似值,构建的评价函数^[9]如下:

$$\min \varphi[f(x)] = \sqrt{\sum_{i=1}^p [f_i(x) - f_i^*]^2} \quad (3)$$

通过求解式(3)的最小值得到最优解 x^* ,即为多目标优化的最优解。

在 $n_0=1$ 和 $n_0=5$ 时分别取得经济成本和溢流量控制的理想值,在 $n_0=5$ 和 $n_0=1$ 时分别为经济成本和溢流量控制的非理想值,由于各个目标量纲不一并且数量级差距很大,因此在构建目标函数时先进行归一化处理,换算公式如下:

$$M_{\text{value}} = \frac{M_{\text{raw}} - M_{\text{min}}}{M_{\text{max}} - M_{\text{min}}} \quad (4)$$

式中: M_{value} 为归一化值; M_{raw} 为实际优化目标; M_{min} 为实际目标理想值; M_{max} 为实际目标非理想值。换算后构建的单目标评价函数如下:

$$Z(x) = \sqrt{\mu_1 \left(\frac{P(x) - P_{\min}}{P_{\max} - P_{\min}} \right)^2 + \mu_2 \left(\frac{F(x) - F_{\min}}{F_{\max} - F_{\min}} \right)^2} \quad (5)$$

式中: x 为截流倍数; $P(x)$ 为不同截流倍数的溢流量函数; P_{\min} 为 $n_0=5$ 时的溢流量; P_{\max} 为 $n_0=1$ 时的溢流量; $F(x)$ 为不同截流倍数的投资成本函数; F_{\min} 为 $n_0=1$ 时的工程成本; F_{\max} 为 $n_0=5$ 时的工程成本; μ_1 和 μ_2 分别为环境和成本的权重系数 ($\mu_1 + \mu_2 = 1$), 取值越大则在工程设计中占主要考虑因素, 若某地区在设计中认为成本重要, 则令 $\mu_2 > \mu_1$, 认为环境控制重要, 则令 $\mu_1 > \mu_2$, 根据研究区域当地的财政能力和环境要求, 本研究按等权分配 μ_1 和 μ_2 。

当 $Z(x)$ 达到最小时, 意味着各项目标函数分别已最大限度地逼近相应的理想值, 可以确定截流倍数 x , 使其同时达到环境、经济的最优平衡。

2 研究案例

2.1 工程概况

研究区域位于杭州市余杭区, 如图 1 所示的墨绿色区域。该区域排水管网承载能力有限, 雨季时经常发生污水溢流, 并且 90% 为合流制系统, 因此将其改造为截流式合流制系统, 研究其截流倍数的取值。研究区域总面积为 152 hm^2 , 通过拟建截流干管将雨污水截流到污水处理厂。

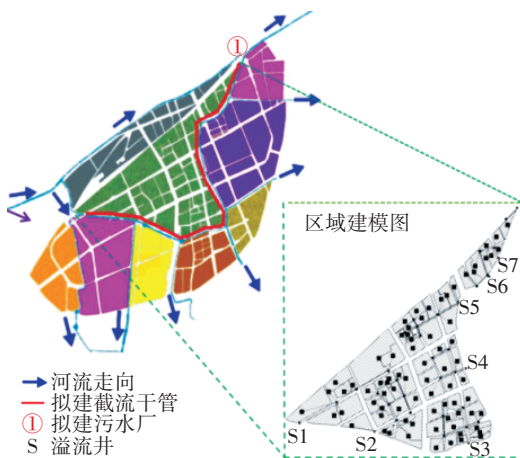


图 1 研究区域位置及建模

Fig.1 Location and modeling of research area

2.2 SWMM 模型建立

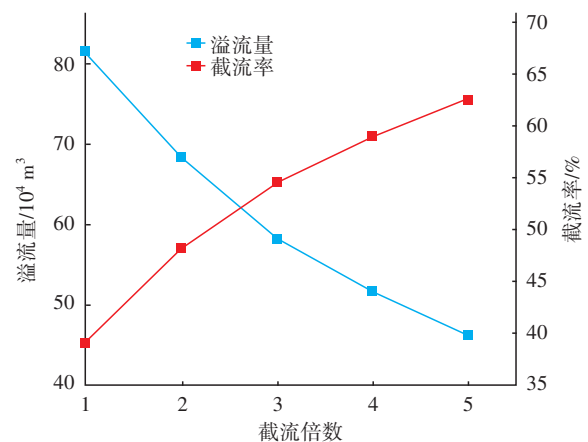
该地区以高密度的住宅区和商业区为主, 根据流域内卫星地图, 以城市道路为子流域的界限, 将研究区域概化为 77 个子汇水区 (面积范围为 $0.23 \sim 12.49 \text{ hm}^2$), 每个子汇水区的地表径流排入最近的检查井。根据该地区的排水管网图, 以管道材质、管径、坡度保持不变为前提, 将研究区域管道概化为 31 个节点、29 个管道 (管径范围为 $400 \sim 1500 \text{ mm}$)、7 个溢流口和 1 个出水口, 研究区域的 SWMM 模型如图 1 所示。

子汇水区的面积、特征宽度、地表坡度、不透水性取值等参数通过卫星地图和地形图确定; 地表产流模型采用 Horton 模型, 入渗率、曼宁系数、洼蓄量等参数采用推荐值^[10]; 设置人均污水量为 $200 \text{ L}/(\text{人} \cdot \text{d})$, 人口密度为 $300 \text{ 人}/\text{hm}^2$, 不考虑污水实时变化; 不同截流倍数下的截流量通过 SWMM 中分流器的 overflow 功能实现, 首先计算出不同截流倍数下各段截流干管的最大流量, 分流器将超过截流管段最大设计流量的雨污水分流至溢流管中, 溢流管出口设置排放口, 溢流量即为排放口的蓄水总容积; 以余杭区雨量站记录的 2004 年—2011 年的分钟降雨量为模型降雨数据, 以 5 min 为时间步长, 选择累积深度达 2 mm 以上的降雨进行模拟; 截流干管按钢筋混凝土管满流设计。

3 结果与分析

3.1 溢流量归一化的计算

运用 SWMM 软件模拟 2004 年—2011 年总计 627 场降雨, 以年为统计单位计算出各个年份的年溢流量和截流率, 选取 2010 年和 2011 年为典型年份, 结果如图 2 所示。



a. 2010 年 103 场降雨的模拟结果

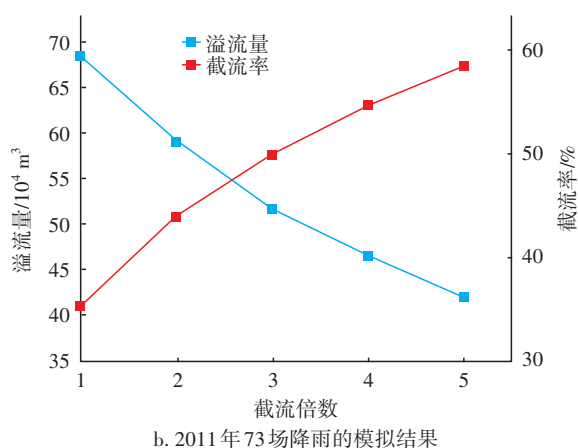


图2 2010年和2011年的溢流量和雨水截流率

Fig.2 Overflow and rainwater interception rates in 2010 and 2011

由图2可知,2010年和2011年的溢流量变化趋势大致相同,当截流倍数 n_0 从1增加到3时,溢流量降低幅度较大,当截流倍数 n_0 从3增加到5时,溢流量降低幅度相对较小,主要原因是截流干管设计流量增幅的比例大于管径增幅的比例。另外,当 n_0 取值为1时每年可以截流35%~50%的雨水,当 n_0 增加到5时仅截流60%~80%的雨水,可见一味地提高截流倍数,雨水截流效果的提高幅度会逐渐降低。

为了消除目标函数量纲之间的差异,各个年份在不同截流倍数下的溢流量按式(4)进行归一化处理并用多项式拟合。结果显示,当截流倍数 n_0 分别为1、2、3、4、5时,2004年的溢流量归一化值分别为1、0.606 4、0.321 5、0.140 9、0,拟合函数为: $P'(x)=1.458 3-0.507 8x+0.043 6x^2$, $R^2=0.988 9$;2005年溢流量归一化值分别为1、0.624 8、0.337 6、0.150 2、0,拟合函数为: $P'(x)=1.439 8-0.483 0x+0.039 3x^2$, $R^2=0.998 6$;2006年的溢流量归一化值分别为1、0.611 2、0.323 6、0.142 3、0,拟合函数为: $P'(x)=1.455 7-0.503 7x+0.042 8x^2$, $R^2=0.998 3$;2007年溢流量归一化值分别为1、0.642 0、0.355 3、0.163 4、0,拟合函数为: $P'(x)=1.417 7-0.455 3x+0.034 6x^2$, $R^2=0.999 1$;2008年的溢流量归一化值分别为1、0.626 0、0.342 3、0.158 8、0,拟合函数为: $P'(x)=1.430 9-0.474 2x+0.037 9x^2$, $R^2=0.998 3$;2009年溢流量归一化值分别为1、0.613 3、0.327 1、0.144 7、0,拟合函数为: $P'(x)=1.451 5-0.498 7x+0.042 0x^2$, $R^2=0.998 5$;2010年的溢流量归一化值分别为1、0.629 1、0.338 7、0.150 9、0,拟合函数为: $P'(x)=$

$1.438 5-0.480 3x+0.038 8x^2$, $R^2=0.999 0$;2011年溢流量归一化值分别为1、0.652 2、0.369 3、0.173 4、0,拟合函数为: $P'(x)=1.400 9-0.434 6x+0.031 1x^2$, $R^2=0.999 1$ 。

3.2 工程成本归一化的计算

查阅2010版《浙江省市政工程预算定额》得到,管径为300、400、500、600、700、800 mm的排水管道的综合单价分别为848、1 012、1 336、1 679、1 959、2 303 元/m。截流干管采用钢筋混凝土管,不同截流倍数下载流干管的工程量见表1。当截流倍数 n_0 分别为1、2、3、4、5时,截流干管的设计流量分别为 $2h_t$ 、 $3h_t$ 、 $4h_t$ 、 $5h_t$ 、 $6h_t$ (h_t 为旱季污水流量),计算得到建设费用分别为549、659、726、804、873 万元,与 n_0 为1时相比,当 n_0 为2、3、4、5时,建设费用分别增加19.93%、32.17%、46.49%、59.02%。

表1 不同截流倍数下载流干管的工程量

Tab.1 Engineering quantity of main intercepting sewer at different interception ratios

项目	管径=300 mm	管径=400 mm	管径=500 mm	管径=600 mm	管径=700 mm	管径=800 mm	总量
$n_0=1$	772	1 030	2 837				4 639
$n_0=2$		772	2 016	1 851			4 639
$n_0=3$		772	1 030	1 642	1 195		4 639
$n_0=4$			772	2 016	1 851		4 639
$n_0=5$			772	1 030	1 642	1 195	4 639

在截流干管的末端出水口设置有提升泵站,用于提升截流污水送入污水处理厂。根据《给水排水设计手册:第10册 技术经济》,计算出不同截流倍数时提升泵站的造价。根据污水泵站指标基价可知,当设计流量为100~300 L/s时,综合造价指标为17 624.32~22 357.13 元/(L·s⁻¹);当设计流量为300~600 L/s时,综合造价指标为12 720.3~17 624.32 元/(L·s⁻¹);当设计流量为600~1 000 L/s时,综合造价指标为10 223.35~12 720.3 元/(L·s⁻¹)。随着设计流量的增大,造价指标在减小,两者呈负相关。由此建立设计流量和造价指标的关系,当设计流量为100~300 L/s时, $Y=24 723.54-23.66X$ (X 为设计流量, Y 为提升泵站的综合造价指标,下同);当设计流量为300~600 L/s时, $Y=22 528.34-16.35X$;当设计流量为600~1 000 L/s时, $Y=16 465.72-6.24X$ 。不同截流倍数下提升泵站的建

设费用见表2。

表2 不同截流倍数下提升泵站的建设费用
Tab.2 Construction cost of sewage pump station
under different interception ratios

n_0	设计流量/ ($\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$)	综合造价指标/ ($\text{元}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{s}$)	费用/万 元	较 $n_0=1$ 的费 用增加率/%
1	201	19 967	401	—
2	302	17 591	531	31.37
3	403	15 940	642	60.07
4	504	14 289	720	79.45
5	605	12 689	767	91.28

合流制混合污水经截流干管收集,通过提升泵站进入污水厂。依据《给水排水设计手册:第10册技术经济》中一级污水厂的指标基价,当设计进水量为 $(1\sim2)\times10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 时,综合造价指标为1 121.76~1 381.74 元/ $(\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1})$;当设计进水量为 $(2\sim5)\times10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 时,综合造价指标为1 066.51~1 121.76 元/ $(\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1})$;当设计进水量为 $(5\sim10)\times10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 时,综合造价指标为916.21~1 066.51 元/ $(\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1})$,设计进水量和综合造价指标也呈负相关。建立设计进水量和综合造价指标的关系,当设计进水量为 $(1\sim2)\times10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 时, $Y=2\,489.65-265.58X$ (X 为设计进水量, Y 为污水厂综合造价指标,下同);当设计进水量为 $(2\sim5)\times10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 时, $Y=2\,195.56-118.53X$;当设计进水量为 $(5\sim10)\times10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 时, $Y=1\,816.34-42.69X$ 。不同截流倍数下污水厂的建设费用见表3。根据余杭区的实际情况,溢流井与河流的距离较短,因此溢流雨污水通过溢流管就近排放至河流中,没有考虑溢流污水工程量的成本。

表3 不同截流倍数下污水厂的建设费用
Tab.3 Construction cost of sewage treatment plant
under different interception ratios

n_0	设计进水量/ $(10^4\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1})$	综合造价指 标/ $(\text{元}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d})$	费用/ 万元	较 $n_0=1$ 的费 用增加率/%
1	1.74	2 027	3 527	—
2	2.61	1 886	4 922	39.54
3	3.48	1 783	6 205	75.89
4	4.36	1 678	7 319	107.46
5	5.23	1 593	8 331	136.17

综上,当截流倍数 n_0 分别为1、2、3、4、5时,总成本分别为4 477、6 112、7 573、8 843、9 971 万元,与 n_0 为1时相比,当 n_0 为2、3、4、5时,总成本分别增加36.50%、69.12%、97.47%、122.69%。可以看出,随

着截流倍数的增大,投资总额的增长速率放缓,主要原因是提升泵站和污水厂的设计流量与造价指标呈负相关。

不同截流倍数下的总建造成本按式(4)进行归一化处理,当截流倍数 n_0 分别为1、2、3、4、5时,成本归一化值分别为0、0.297 5、0.563 3、0.794 5、1,拟合函数为: $F'(x)=-0.327\,3+0.343\,4x-0.015\,6x^2$, $R^2=0.999\,98$ 。

3.3 理想点法优选最佳截流倍数

将归一化后的溢流量 $P'(x)$ 和投资成本 $F'(x)$ 按式(5)进行计算得到新的评价函数,选取2010年和2011年为典型年, $[P'(x)]^2+[F'(x)]^2$ 的函数图像见图3。当截流倍数 x 取最小值 x_{\min} 时,意味着各项目标函数已经最大限度地逼近相应的理想最优值,达到环境-成本的最优平衡;当 x 取值在 x_{\min} 的左边时,意味着在截流倍数设计中以工程成本为主要考虑因素;当 x 取值在 x_{\min} 的右边时,则以环境保护为主要考虑因素。各年份的最优截流倍数在2.61~2.66之间,取其均值2.63为最终优选截流倍数。

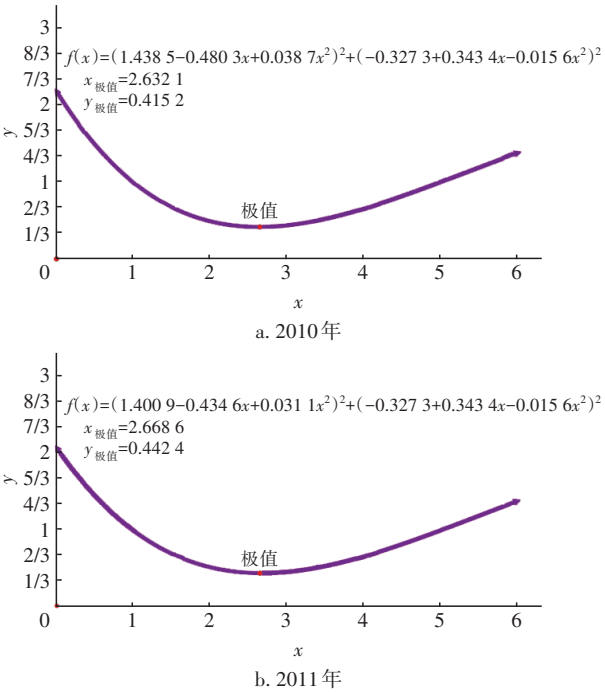


图3 理想点法的优化结果

Fig.3 Optimization results of ideal point method

4 结论

利用SWMM构建了杭州市余杭区某区域的地表径流模型,计算出2004年—2011年各年份的溢流量,得出年溢流量随截流倍数的增大而降低的幅度

逐渐减小;并根据工程设计计算出不同截流倍数下的工程成本,得出工程成本随着截流倍数的增大而增长的趋势放缓。最后通过理想点法优化得出在截流倍数取2.63时,可以达到环境-经济的最优平衡。不同地区应根据当地气候条件和工程投资成本,利用理想点法再次确定最优截流倍数。

参考文献:

- [1] 孙勇. 强度拟合法分析计算合流制排水管道截流倍数[J]. 城市道桥与防洪, 2012(2): 54-56.
SUN Yong. Analysis and calculation of interception multiple of combined drainage pipe by strength fitting method [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2012(2): 54-56 (in Chinese).
- [2] 孙全民. 柳州市合流制排水管网截流倍数确定及优化研究[D]. 南宁:广西大学, 2010.
SUN Quanmin. Research on the Determination and Optimization of the Interception Ratio of Combined Drainage System of Liuzhou City [D]. Nanning: Guangxi University, 2010 (in Chinese).
- [3] 黄维. 重庆地区小城镇合流制排水系统截流倍数研究[D]. 重庆:重庆大学, 2014.
HUANG Wei. Research on the Interception Ratio of Combined Sewer Systems in Small Towns of Chongqing Area [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014 (in Chinese).
- [4] 张超, 姜应和. 合流制排水系统截流倍数优选[J]. 环境工程学报, 2015, 9(6): 2771-2776.
ZHANG Chao, JIANG Yinghe. Optimization of interception ratio in combined sewer [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(6): 2771-2776 (in Chinese).
- [5] 黄瑜琪. 合流制排水系统最优截流关系分析与研究[D]. 苏州:苏州科技大学, 2017.
HUANG Yuqi. Analysis and Research of Optimal Intercept Relationship between Drainage System of Confluence System [D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2017 (in Chinese).
- [6] JIN X, JIANG Y, JIN J. Interception ratio optimal selection aided by micro-scope hydraulic and quality simulation [J]. Advanced Materials Research, 2010, 113/116: 119-125.
- [7] 王盼, 柯杭, 陈嫣. 基于InfoWorks CS模型的合流制排水系统截流规模[J]. 净水技术, 2019, 38(4): 54-58.
WANG Pan, KE Hang, CHEN Yan. Interception ratio scale of combined overflow system (COS) based on InfoWorks CS model [J]. Water Purification Technology, 2019, 38(4): 54-58 (in Chinese).
- [8] 孟祥飞, 王瑛, 姚岷, 等. 基于PEV准则的D-UMOP求解方法及应用研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(9): 52-58.
MENG Xiangfei, WANG Ying, YAO Di, et al. Solution method for D-UMOP based on PEV principle and its application [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2018, 46(9): 52-58 (in Chinese).
- [9] 田聪, 谢新连, 赵瑞嘉, 等. 功能浮力舱的双目标优化设计[J]. 大连海事大学学报, 2019, 45(4): 14-19, 34.
TIAN Cong, XIE Xinlian, ZHAO Ruijia, et al. Dual-objective optimization design of multi-functional buoyancy tanks [J]. Journal of Dalian Maritime University, 2019, 45(4): 14-19, 34 (in Chinese).
- [10] LOWE S A. Sanitary sewer design using EPA storm water management model (SWMM) [J]. Computer Applications in Engineering Education, 2010, 18(2): 203-212.

作者简介:王武(1995-),男,江苏南京人,硕士研究生,研究方向为海绵城市建设技术。

E-mail:731669857@qq.com

收稿日期:2020-07-04

修回日期:2020-08-11

(编辑:刘贵春)