

# 雨水管网多目标优化设计研究

徐得潜, 李 星

(合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘 要:** 基于雨水管网年费用、脆弱度和溢流量,建立雨水管网多目标优化模型,并应用遗传算法求解,进行雨水管网系统优化设计。其中,管网年费用表示其经济性,脆弱度表示其水力性能,溢流量表示城市内涝情况。案例分析表明,设计方案在经济性、可靠性和安全性方面均能够得到保障,充分说明此多目标优化模型在雨水管网设计中是实用和有效的。

**关键词:** 雨水管网; 多目标优化; 遗传算法

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)07-0133-06

## Multi-objective Optimization Design of Rainwater Pipe Network

XU De-qian, LI Xing

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** Based on annual cost, vulnerability and overflow volume of rainwater pipe networks, a multi-objective optimization model of rainwater pipe network was established to achieve the optimal design by applying the genetic algorithm. The annual cost of a rainwater pipe network represented its economy, vulnerability indicated its hydraulic performance, and the overflow volume showed the urban waterlogging situation. Case analysis showed that the design scheme could be guaranteed in terms of economy, reliability and safety, which fully illustrated that the multi-objective optimization model was practical and effective in the design of rainwater pipe network.

**Key words:** rainwater pipe network; multi-objective optimization; genetic algorithm

雨水管网是城市的重要基础设施。目前,国内外针对雨水管网的优化设计存在两种主导理念:经济性优化和水力性能优化<sup>[1]</sup>。经济性优化是以最优优化理论为基础,以雨水管网造价最小为目标函数,寻求满足水力条件约束下的设计方案。目前,国内外对此项研究已较为成熟,常用的方法包括线性规划法、非线性规划法、动态规划法和遗传方法等<sup>[2,3]</sup>。水力性能优化一般使用 SWMM 和 InfoWorks 等软件进行水文及水动力学模拟,通过合理选择管径和管道坡度等方式来实现<sup>[4,5]</sup>。但目前将水力模型与优化算法结合起来,同时考虑管网经济

性、抵抗风险和排洪防涝的可靠性,寻求最优的雨水管网设计方案的研究还较为少见。因此,笔者针对这一问题,提出了基于管网经济性、可靠性的多目标优化模型,并进行实例计算分析。

### 1 多目标优化设计数学模型

雨水管道多目标优化设计的目标是在保证雨水管网系统具有抵抗风险以及排涝能力的同时,尽量减少其年折算费用值。通过分析,以管网总年折算费用最小和可靠性指标作为目标函数,水力要素作为约束条件,在此基础上建立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

雨水管网经济性目标函数可以通过年折算费用来表示,通常包括管道年折算费用及泵站的基建、运行费用。管道年折算费用可用下式计算<sup>[6]</sup>:

$$F_1 = \sum_{i=1}^M \left[ \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} + e_1 \right] C_{1,i} L_i + \sum_{j=1}^N \left[ \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} + e_2 \right] C_{2,j} \quad (1)$$

式中, $M$ 为雨水管段数; $N$ 为检查井数; $r$ 为利率; $n$ 为计算期,年; $e_1$ 为管网年维修费率; $e_2$ 为检查井年维修费率; $L_i$ 为第 $i$ 段管段的长度; $C_{1,i}$ 为第 $i$ 管段单位长度的投资费用,元/m; $C_{2,j}$ 为第 $j$ 个检查井的投资费用,元/个。

雨水系统中,雨水泵站的投资较大,运行时间短,利用率低。应充分利用地形,采取合理的管径和坡度,使雨水自流进入水体,尽量少设置泵站。必须设置雨水泵站时,应尽可能减少雨水泵站的设计流量,以节省泵站投资。当设置雨水泵站时,需考虑雨水泵站的投资和年运行费用,其年折算费用为:

$$F_2 = \sum_{k=1}^R \left\{ \left[ \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} + e_3 \right] C_{3,k} + Y_k \right\} \quad (2)$$

式中, $R$ 为泵站数; $e_3$ 为泵站年维修费率; $Y_k$ 为第 $k$ 个泵站的年运行费用,元; $C_{3,k}$ 为第 $k$ 个泵站的投資费用,元。

综上,雨水管网年折算费用的目标函数为:

$$\min F = F_1 + F_2 \quad (3)$$

### 1.1.2 可靠性指标

雨水系统的脆弱性是指雨水系统由于外界条件改变表现出来的易受扰动的程度及缺乏应对能力,导致雨水不能及时排出的一种性质。因此脆弱性的高低也就代表了城市雨水系统排涝能力的强弱。根据雨水系统对城市突降暴雨的反应,将影响雨水系统脆弱性的因素分为物理脆弱性因素、社会脆弱性因素和管网工况影响因素。物理脆弱性因素指标包括雨水算子的泄水能力、雨水口相对高程、雨水管道管径、管道坡度及管道材料;社会脆弱性因素指标包括雨水系统管理水平和城市绿化率;管网工况影响因素包括节点超载时间和管道超载时间<sup>[7]</sup>。

考虑到不同指标在雨水系统中承担的重要程度不同,通过层次分析法比较各个指标的重要程度,获取各个指标的权重值,构成权重向量:

$$W = [w_1, w_2, \dots, w_9] \quad (4)$$

式中, $w_i$  ( $i=1, 2, \dots, 9$ ) 依次为雨水口相对高程、管道坡度、管道管径、算子泄水能力、管道材料、雨水系统管理水平、城市绿化率、节点超载时间和管道超载时间的权重系数。

城市雨水系统的组成部件具有重复性,例如雨水管网由多条管段组成,且每条管段的管径不尽相同。因此,雨水系统脆弱性的各指标因素是一个综合性指标,表现了该系统中同类部件的综合性能。

通过实地调查和软件模拟的方式,获取每个指标各部分的基础数据后,通过指标标准化处理来消除不同量纲带来的影响。不同指标对雨水系统脆弱性的影响存在正、负两面,将指标分为正向指标和逆向指标。正向指标表示指标值越高,雨水系统的脆弱性就越大;反之,则表示脆弱性越小。正向指标值和逆向指标值分别按下式计算<sup>[8]</sup>:

正向指标:

$$y_i' = y_i / \max(y_i) \quad (5)$$

逆向指标:

$$y_i' = \min(y_i) / y_i \quad (6)$$

式中, $y_i'$ 表示原始数据标准化后的指标值; $y_i$ 表示指标的原始值。

将指标分为定量指标和定性指标,通过表征值来表示其同类型所有部件的综合性能。对于定量指标,采用加权综合法来计算各指标因素的表征值;对于定性指标,则通过模糊综合评价法来确定各指标的表征值<sup>[9]</sup>。

定量指标表征值的处理方式:

$$Y = \sum_{i=1}^n y_i' a_i \quad (7)$$

定性指标表征值的处理方式:

$$X = \sum_{i=1}^5 x_i b_i \quad (8)$$

式中, $Y$ 为定量指标的表征值; $a_i$ 为各部分所占百分比; $X$ 为定性指标表征值; $b_i$ 为通过模糊综合评价法得到的最终评价集; $(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = (0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0) = (\text{很好}, \text{好}, \text{一般}, \text{差}, \text{很差})$ 。

通过指标求和的方法计算整体脆弱性:

$$V = w_1 h + w_2 s + w_3 d + w_4 u + w_5 m + w_6 G + w_7 A + w_8 T_1 + w_9 T_2 \quad (9)$$

式中, $h$ 为雨水口相对高程; $s$ 为管道坡度; $d$ 为管道管径; $u$ 为算子泄水能力; $m$ 为管道材料; $G$ 为雨水系统管理水平; $A$ 为城市绿化率; $T_1$ 为节点超载

时间; $T_2$ 为管道超载时间。

因此,雨水系统脆弱性的目标函数为:

$$\min V = w_1 h + w_2 s + w_3 d + w_4 u + w_5 m + w_6 G + w_7 A + w_8 T_1 + w_9 T_2 \quad (10)$$

利用 SWMM 模型进行风险性分析。在进行雨水管网多目标优化设计时,若通过 SWMM 平台及用户操作窗口对雨水管网系统进行模拟,则将寻求经济性优化和水力优化分成了前后两个过程,并没有满足同时寻优的要求。因此,本研究提出通过调用 SWMM 源代码,在程序寻优的过程中自动调用 SWMM 模型对各种不同管道方案的溢流总量、各节点超载时间和各管道超载时间等参数进行模拟,并将模拟结果继续应用到寻优算法迭代中,从而寻找最优解,实现多目标优化。

城市雨水管网排水能力不足通常表现在节点、管道过流超载,从而形成积水。因此,本研究选取节点溢流总量最小作为评价内涝的目标函数。各个节点的溢流量大小通过  $Q_i$  来表示:

$$\min Q = \sum Q_i \quad (11)$$

式中, $Q_i$  值通过 SWMM 模拟一定降雨条件下的管网节点溢流量获得。 $Q$  值越小则溢流量越小,管网过水能力越强,暴雨所造成的内涝影响越小。

$$\begin{cases} \min F = \sum_{i=1}^M \left[ \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} + e_1 \right] C_{1,i} L_i + \sum_{j=1}^N \left[ \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} + e_2 \right] C_{2,j} + \sum_{k=1}^R \left\{ \left[ \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} + e_3 \right] C_{3,k} + Y_k \right\} \\ \min V = w_1 h + w_2 s + w_3 d + w_4 u + w_5 m + w_6 G + w_7 A + w_8 T_1 + w_9 T_2 \\ \min Q = \sum Q_i \\ \text{s. t. } d \in \Omega_D, v_{\min} \leq v \leq v_{\max}, h/d = 1, s \geq s_{\min} \end{cases} \quad (12)$$

## 2 优化设计模型求解

遗传算法具有全局最优性、不依赖问题的特性、可并行性及高效性等优点,因此,采用遗传算法对优化模型进行求解。通过对脆弱度和溢流量进行约束,将雨水管网多目标优化数学模型转换为单目标优化数学模型进行求解,主要步骤如下:

① 输入管长、地面标高、汇水面积和 SWMM 模型的 .inp 文件等数据。

② 通过整数编码方式对 16 种不同管径的雨水管道进行编码。管径分别为 300、400、500、600、700、800、900、1 000、1 200、1 350、1 500、1 650、1 800、2 000、2 200、2 400 mm,编码分别为 1、2、3、4、5、6、7、8、9、10、11、12、13、14、15、16。

③ 确定算法的循环代数、编码长度、种群大小等参数,并在约束范围内产生初始种群。

## 1.2 约束条件

① 管径。雨水管网的管径大小应在标准规格管径集合中,即  $d \in \Omega_D$ 。

② 流速。雨水管和合流管管道在满流条件下,最小流速为 0.75 m/s;不同材质的雨水管道分别对应不同的最大设计流速,如金属管为 10 m/s、非金属管为 5 m/s。即  $v_{\min} \leq v \leq v_{\max}$ 。

③ 设计充满度。雨水管网的设计应该按满流进行设计,即设计充满度为 1。

④ 坡度。不同管径的设计坡度应大于或等于其对应的最小坡度,即  $s \geq s_{\min}$ 。

⑤ 埋深。埋深约束分为以下 3 个方面:管道起点的最小埋深,根据地面荷载、土壤冰冻深度和支管衔接要求确定;管道最大埋深,根据管道通过地区的地质条件设定,当管道的计算埋深达到或超过该值时,应设置中途泵站;提升后的管道埋深仍按最小埋深考虑,当低于最小埋深时,应设跌水井。

⑥ 雨水管渠的连接方式。不同直径的管道在检查井内采用管顶平接。

## 1.3 多目标优化数学模型

综上所述,雨水管网多目标优化设计的数学模型可以表达为:

④ 对个体干管和支管依次进行水力计算,当干管的交叉点处埋深小于支管在此处设计的埋深时,则需要添加跌水井。根据计算结果对 SWMM 运行的输入文件 .inp 文件中的管径、节点标高和最大埋深等参数进行修改,调用动态链接库运行 swmm\_run 函数,读取运行结果 .rpt 文件并求取节点溢流量、管道和节点超载时间等数据,并基于此计算溢流总量和雨水系统脆弱度。

⑤ 设计适应度函数,构建如下所示的惩罚函数,将原问题转化为无约束问题:

$$\begin{aligned} f(D) = & F(D) + \alpha_1 \max[0, V(D) - \varepsilon_1] + \\ & \alpha_2 \max[0, Q(D) - \varepsilon_2] + \\ & \alpha_3 \max\{\max[0, (v - v_{\max})]\} + \\ & \alpha_4 \max\{\max[0, (v_{\min} - v)]\} \end{aligned} \quad (13)$$

式中, $D$  为设计管径组合; $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$  分别为溢流量





根据建立的雨水管网优化模型,通过 matlab 遗传算法编写程序,设置初始种群为 20,迭代次数为 1 000,常规设计方案和不同约束条件下的雨水管网优化模型的计算结果如表 1 所示。可知,当脆弱度的约束值取 0.40 时,由于算子泄水能力、雨水口相对高程、管道材料、雨水系统管理水平、城市绿化率等指标因素的影响,无论管径取多少,均不存在满足所有约束条件的设计方案。综合比较优化设计方案和常规设计方案可以看出,雨水管网总费用与溢流量和脆弱度之间呈负相关关系,随着设计方案总费用的减少,其溢流量和脆弱度随之增大。

表 1 优化计算结果

Tab. 1 Calculation results of optimal design

项 目	溢流量约束值/ $\text{m}^3$	脆弱度约束值	溢流量/ $\text{m}^3$	脆弱度	总费用/万元
方案一	3 712	0.40	无解	无解	无解
方案二	3 712	0.45	32	0.441	94.52
方案三	3 712	0.50	360	0.493	91.37
方案四	3 712	0.55	841	0.542	89.41
方案五	3 712	0.60	1 812	0.589	88.62
常规方案	—	—	32	0.439	99.74

4 种约束条件下设计方案和常规方案的计算结果如表 2 所示。

表 2 计算结果比较

Tab. 2 Comparison of calculation results

管段编号	管段长度/ $\text{m}$	方案二		方案三		方案四		方案五		常规方案	
		管径/ $\text{mm}$	流速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	管径/ $\text{mm}$	流速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	管径/ $\text{mm}$	流速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	管径/ $\text{mm}$	流速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	管径/ $\text{mm}$	流速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
1-2	237	600	0.86	600	0.86	600	0.86	600	0.86	600	0.86
5-2	257	600	0.92	600	0.92	600	0.92	600	0.92	600	0.92
2-3	204	1 000	1.09	1 000	1.09	1 000	1.09	1 000	1.09	1 000	1.09
6-3	264	600	0.97	600	0.97	600	0.97	600	0.97	600	0.97
3-4	209	1 350	0.90	1 200	1.14	1 200	1.14	1 200	1.14	1 200	1.14
7-4	258	600	1.05	600	1.05	600	1.05	600	1.05	600	1.05
4-11	354	1 500	1.03	1 500	1.06	1 350	1.30	1 350	1.30	1 500	1.06
8-9	267	600	0.98	600	0.98	600	0.98	600	0.98	600	0.98
12-9	287	600	1.00	600	1.00	600	1.00	600	1.00	600	1.00
9-10	274	1 200	0.92	1 000	1.33	900	1.64	900	1.64	1 200	0.92
13-10	274	600	0.87	600	0.87	600	0.87	600	0.87	600	0.87
10-11	206	1 350	1.12	1 350	1.18	1 200	1.53	1 000	2.21	1 350	1.12
11-17	293	1 800	1.24	1 500	1.84	1 500	1.90	1 350	2.34	2 000	1.03
14-16	232	600	0.80	600	0.80	600	0.80	600	0.80	600	0.80
15-16	259	600	0.86	600	0.86	600	0.86	600	0.86	600	0.86
16-17	368	1 000	1.04	1 000	1.04	1 000	1.04	900	2.28	1 000	1.04
17-18	162	2 000	1.27	1 800	1.66	1 500	2.47	1 500	2.50	2 200	1.05

综合比较表 1 和表 2,通过比较不同约束条件下的设计方案与常规方案之间的关系,可以看出,常规设计方案中,在给定的降雨条件下,雨水管网的溢流量为  $32 \text{ m}^3$ ,但其总费用达到了 99.74 万元,付出了较大的经济代价。与常规设计方案相比,方案二的溢流量与常规设计方案相同,脆弱度增加了 0.002,总费用减少了 5.2%;方案三的溢流量和脆弱度分别增加了  $328 \text{ m}^3$ 、0.054,总费用减少了 8.4%;方案四的溢流量和脆弱度分别增加了  $809 \text{ m}^3$ 、0.103,总费用减少了 10.3%;方案五的溢流量和脆弱度分别增加了  $1 780 \text{ m}^3$ 、0.150,总费用减少

了 11.1%。因此,可以将方案二作为最终的设计方案,此时溢流量为  $32 \text{ m}^3$ ,其安全性可以得到保障;脆弱度为 0.441,根据脆弱度评价,当发生 10 年一遇的降雨时,地面仅形成轻微积水。其可靠性能得到保证;总费用相较于常规设计方案减少了 5.2%,其经济性也得到了满足。

#### 4 结论

① 利用遗传算法,将 matlab 和 SWMM 充分结合起来,使得水力模拟和算法寻优同时进行,并通过遗传算法的选择、交叉和变异操作,保留优秀个体。

② 多目标优化模型不单考虑到管网的经济

性,还考虑了雨水系统脆弱性和实况条件下的溢流量,从寻优结果来看,最终设计方案在经济性、安全性和可靠性等方面均有保障。

③ 可以将雨水管网系统优化设计与可持续发展 and 低影响开发的措施结合,通过建设绿色屋顶、透水路面和蓄水设施等,将雨水资源利用和雨水系统排洪措施相结合,从而获取更加合理安全的雨水管网设计方案。

### 参考文献:

- [1] 王赫婧. 城市雨水管网多目标优化设计研究[D]. 天津:天津大学,2011.  
Wang Hejing. Study on Multi-object Optimization Design of City Stormwater Pipe Networks[D]. Tianjin: Tianjin University, 2011 (in Chinese).
- [2] 曹相生,刘杰,刘婷,等. 基于枚举算法的雨水管网优化设计[J]. 中国给水排水,2010,26(7):37-39.  
Cao Xiangsheng, Liu Jie, Liu Ting, et al. Optimal design of stormwater drainage system based on enumeration algorithm[J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(7): 37-39 (in Chinese).
- [3] 李树平. 采用遗传算法优化设计排水管道系统[J]. 中国给水排水,2002,18(12):59-62.  
Li Shuping. Use of genetic algorithms for optimization design of sewerage system [J]. China Water & Wastewater, 2002, 18(12): 59-62 (in Chinese).
- [4] 毛剑东,顾素恩,陈梅君,等. 基于 SWMM 的城市雨水管网优化模拟[J]. 水利水电技术,2015,46(1):114-117.  
Mao Jiandong, Gu Suen, Chen Meijun, et al. SWMM based-simulation on optimization of urban drainage network[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2015, 46(1): 114-117 (in Chinese).
- [5] Koudelak P, West S. Sewerage network modelling in Latvia use of InfoWorks CS and Storm Water Management Model 5 in Liepaja city[J]. Water Environ J, 2008, 22(2):81-87.
- [6] 钱坤. 基于可靠性的雨水管网优化设计[D]. 合肥:合肥工业大学,2008.  
Qian Kun. The Optimal Design of Urban Rainwater Pipe Networks Based on Reliability[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2008 (in Chinese).
- [7] 侯强. 雨水管网脆弱性分析与应急对策研究[D]. 青岛:青岛理工大学,2014.  
Hou Qiang. Study on Vulnerability Assessment and E-

mergency Measures of Storm Sewer System[D]. Qingdao: Qingdao Technological University, 2014 (in Chinese).

- [8] 张丽佳. 上海市地下轨道交通暴雨内涝脆弱性研究[D]. 上海:华东师范大学,2010.  
Zhang Lijia. Waterlogging Vulnerability Study of Underground Metro in Shanghai Urban Areas[D]. Shanghai: East China Normal University, 2010 (in Chinese).
- [9] 邹和礼,赵暑生,张龙祥. 基于定量与定性指标综合分析的工程项目评标方法[J]. 铁道学报,2000,22(6):112-115.  
Zou Heli, Zhao Shusheng, Zhang Longxiang. Evaluation method for engineering tenders based on synthetic analysis of quantitative and qualitative indexes[J]. Journal of the China Railway Society, 2000, 22(6): 112-115 (in Chinese).
- [10] 李彦伟,尤学一,季民,等. 基于 SWMM 模型的雨水管网优化[J]. 中国给水排水,2010,26(23):40-43.  
Li Yanwei, You Xueyi, Ji Min, et al. Optimization of rainwater drainage system based on SWMM model[J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(23): 40-43 (in Chinese).
- [11] 刘伟. 城市暴雨地面积水量分析研究[D]. 西安:长安大学,2006.  
Liu Wei. Study on the Analysis of Urban Rainstorm Terrene Accumulated Water Quantity[D]. Xi'an: Chang'an University, 2006 (in Chinese).



**作者简介:**徐得潜(1960-),男,安徽青阳人,博士,教授,住建部绿色建筑评价标识专家,注册公用设备工程师(给水排水),研究方向为水资源利用与水环境保护、建筑给水排水工程、给水排水工程优化规划与经济运行。

**E-mail:** xudeqian60@163.com

**收稿日期:** 2017-09-02