

城市防汛泵站的多级排队选址模型及优化算法

胡文发¹, 何新华²

(1. 同济大学 经济与管理学院, 上海 200092; 2. 上海海事大学 经济管理学院, 上海 201306)

摘要: 考虑城市暴雨的空间与时间分布特点, 选用合适的地表径流系数计算雨水口汇集的待排水量. 将暴雨在雨水口汇集、管道传输和泵站排出的过程看作为一个多级串联的排队系统, 同时根据城区不同重要等级确定其排水等待时间约束, 通过计算防汛泵站及管网的建设与运营费用, 构建以总成本和最长排水等待时间为双目标的城市防汛泵站选址模型. 通过嵌入禁忌搜索算法改进遗传算法, 求解复杂的防汛泵站非线性选址问题. 实际案例分析表明多级排水理论可以较好地模拟城市排水系统, 也指出排水泵站数量、泵站地址及暴雨重现期等对城市排水系统有重要影响.

关键词: 排水系统布局; 排队模型; 多级串联; 排水泵站; 优化算法

中图分类号: N949

文献标志码: A

Cascaded Connection Queuing Model of Urban Drainage System Layout and Its Optimization Algorithm

HU Wenfa¹, HE Xinhua²

(1. School of Economics and Management, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. School of Economics and Management, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Considering spatial and temporal features of urban storms, a proper surface runoff coefficient is selected to measure the quantity of flowing water, which will be collected by inlets. The sequence of drainage consists of rainfall collecting, conveying and discharge through inlets, pipes and pumps respectively, referred to a cascade connection queuing system. According to their importance, an urban district is divided into several areas whose rainfall should be drained out within a restricted time determined by their importance. The time, as well as the cost of building and the operation of the urban drainage system (UDS), is set as constraints of a bi-objective optimization model for the pump location problem. Then we develop an optimization algorithm, genetic algorithm integrated with Tabu algorithm, to solve this complex nonlinear allocation problem. A practical case study reveals

that multiple cascaded connection queuing method can simulate the UDS well, and the quantity and location of pump stations, as well as storm recurrence period, plays an important role in designing an UDS.

Key words: drainage system layout; queuing model; cascaded connection; drainage pumps; optimization algorithm

上海市城市排水系统建设长期不足, 频繁的暴雨内涝严重扰乱城市居民生活秩序^[1]. 城市内涝灾害产生的原因众多, 由于城市区域规划的不均衡性, 致使城市水文特性和成灾机制发生显著变化, 暴雨对不同区域的灾害影响存在较大差异^[2]. 上海市普遍采用截流式合流制改造原有排水系统、优化排水管网及泵站选址. 本文城市排水系统指截流式合流制排水系统, 在暴雨条件下, 其主要作用是处理雨水, 包括雨水汇集、输送、排出等环节, 由雨水管网和防汛泵站组成, 不讨论污水处理及其排水问题.

城市排水系统可以看作一个串联排队系统, 排队论可以用于解决系统布局与选址问题. 例如 Hajipour 等^[3]使用 M/M/m 排队构建一个多目标非线性混合整数规划的选址模型, Singer 等^[4]构建救护车排队服务的模型, 胡丹丹等^[5]将竞争环境下的最大截流选址问题转化为排队论模型. 本文基于多级串联排队系统仿真城市排水系统, 考虑降水特征、区域排水时间需求、排水管网承载能力, 构建排水系统年度运行费用和排水时间为双目标的排水系统再选址模型, 通过改进遗传算法求解该模型, 达到优化城市排水设施布局的目的.

1 城市暴雨与排水系统

1.1 城市暴雨强度特征与地表径流

气象资料表明城市暴雨是一个变化过程, 降雨

收稿日期: 2016-12-19

基金项目: 国家自然科学基金(71371145; 71473162; 71102043); 上海市科技创新行动计划软科学研究重点项目(17692103900)

第一作者: 胡文发(1968—), 男, 工学博士, 副教授, 主要研究方向为管理科学与工程、建设工程管理. E-mail: wenfahu@tongji.edu.cn

强度在暴雨期间变化大,常用总降雨量、降雨历时和降雨频率描述城市暴雨特征.降雨历时一般用 5 min 至 2 h,重现期为高强度暴雨出现一次的平均间隔时间,一般取 0.5 年至 5 年不等.考虑到总降雨量、降雨历时和降雨频率之间存在明显的相关性,暴雨强度公式为

$$f(t,R) = \frac{a(1+dlgR)}{(t+b)^c}$$

式中: $f(t,R)$ 为暴雨强度, $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$; t 为降雨历时, min; R 为暴雨重现期,年; a, b, c, d 为待定参数,由当地暴雨长期观测数据确定.

为了及时汇集暴雨径流,一般在交叉路口、道路低洼处、沿道路每隔一定距离设置雨水口.假设每个雨水口对应一个汇水区,每个汇水区内的降雨特征相同,暴雨径流就近流入雨水口.每个雨水口汇集的暴雨径流的流量强度 Q_i 与汇水区流域面积 A_i 有关:

$$Q_i = k_i f(t,R) A_i, \forall i \in I$$

式中: Q_i 为雨水口单位时间汇集的流量强度, $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$; k_i 为量纲一径流系数,为径流强度与相应降雨强度的比值,一般小于 1,与汇水区块的地表特征有关,例如居住区 $k_i = 0.6 \sim 0.7$,城市商业区 $k_i = 0.7 \sim 0.9$,屋面和沥青路面 $k_i = 0.7 \sim 0.9$; A_i 为汇水区块的面积; I 为汇水区即雨水口的总数量.

1.2 城市排水系统的组成与排水过程

城市排水管网是一个由不同雨水管道组成的网状系统,雨水管道由众多管段组成,一般沿道路一侧或两侧使用暗埋方式敷设,在管网终点设置雨水提升泵站.

假设排水管网由一系列管段 $i_1 - i_2$ 组成,连接雨水口 i_1 和 i_2 , $\forall i_1, i_2 \in I$. 雨水在管段内沿重力方向流动, $i_1 \rightarrow i_2$, $\forall i_1 < i_2$. 每个管段的排水服务容量与其直径有关:

$$u_{i_1, i_2} = \frac{\pi}{4} d_{i_1, i_2}^2 v_{i_1, i_2}$$

式中: u_{i_1, i_2} 为管段 $i_1 - i_2$ 的服务容量, $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$; d_{i_1, i_2} 为管段 $i_1 - i_2$ 的直径, mm; v_{i_1, i_2} 为管段 $i_1 - i_2$ 排水平均流速, $\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$.

雨水口 i 的服务容量 u_i 为: $u_i = g_i v_i$, 其中 g_i 为雨水口的截面积, m^2 , v_i 为雨水口的水流平均速度, $\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$.

稳定服务条件下管段 $i_1 - i_2$ 的排水量 Q_{i_1, i_2} 为该管段前端的雨水口 i_1 汇集的降雨量与所有流经此处的管段流量之和,且管段 $i_1 - i_2$ 的排水量不大于其服务容量.

$$Q_{i_1, i_2} = Q_{i_1} + \sum Q_{h, i_1} \leq u_{i_1, i_2}, \forall h < i_1, \\ Q_{i_1, i_2} \leq u_{i_1, i_2}$$

式中: Q_{i_1, i_2} 为管段 $i_1 - i_2$ 的排水量; Q_{h, i_1} 为与管段 $i_1 - i_2$ 连接的所有上游管段.

1.3 多级串联排水特征

1.3.1 多顾客源多级排队过程

城市排水系统通过雨水口汇集降水、由多级管段组成的管网传输雨水、最后由防汛泵站提升雨水直到排到水体,该过程可以看作是一个多顾客源、多级排队系统,记为 $M/M/c/k/k/$. 雨水口 i 、管段 $i_1 - i_2$ 、泵站可看作是服务容量有限的多级服务台,见图 1. 以管段 $i_1 - i_2$ 为例,其服务容量为 u_{i_1, i_2} ,顾客来源是雨水口汇集的地表径流 Q_i 和所有上游管段的汇流 $Q_{h, i}$, $\forall h < i$.

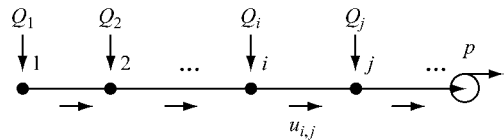


图 1 排水系统的多顾客源多级串联排队过程

Fig.1 Multi customers and multi cascade queue process in a drainage system

1.3.2 排队假设

该排队模型采用以下假设:

- (1)地表水按 Poisson 流到达雨水口 i , 均值为 λ_i , $\lambda_i = Q_i$, 以第一级进入系统, 当雨水流量大于雨水口服务容量 u_i 时, 地表径流排队等待, $\lambda_i \leq u_i$.
- (2)所有雨水口 i 均为第一级服务台, 所有管段 $i_1 - i_2$ 为第二级及以后各级的服务台.
- (3)待排水在排水管网流动过程中形成相互独立的排队队列, 遵从先到先服务的规则.
- (4)所有管段 $i_1 - i_2$ 的服务时间相互独立, 服务时间的分布假定服从负指数分布, 均值为 λ_{i_1, i_2} , $\lambda_{i_1, i_2} = 1/u_{i_1, i_2}$.
- (5)管网末端为一个防汛泵站, 防汛泵站的服务时间分布服从负指数分布, 均值为 λ_p , $\lambda_p = 1/u_p$, 其中 u_p 为防汛泵站的服务能力, $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.

1.3.3 多顾客源多级排队的主要参数

设 $L_k(t)$ 、 $\theta_k(t)$ 分别表示 t 时刻系统中第 k 级服务台的待排水队长和服务相位, $L_0(t)$ 、 $\theta_0(t)$ 表示 t 时刻雨水口的地表径流所处的队长和相位, $k \in \{1, I\}$, 则排水系统构成的随机过程

$$\{(L_k(t), \theta_k(t), L_{k-1}(t), \theta_{k-1}(t), \dots, L_0(t), \theta_0(t))\}$$

是一个 $2k+2$ 维 Markov 随机过程, 其状态空间为 $E_k = \{(L_k, \theta_k, L_{k-1}, \theta_{k-1}, \dots, L_k, \theta_k, L_0, \theta_0), k\}$. 共有

$\Pi_{k=i}^j(u_k(m_k+1)+1)$ 个状态,按字典顺序排列.上述 k 级串联排队的雨水在排水系统中的排队长度 $L_k(t)$ 为 $(N_{n-k}-1)n_0$ 阶 PH(相位型分布)分布,表示为 $L_{n-k}(t) = (\eta_{n-k}, T_{n-k})$, $\eta_{n-k} = (\alpha_1 \otimes \alpha_0, O_{1 \times (N_{n-k}-1-N_1)n_0})$. 雨水等待服务的时间 t_i 为 $(N_{n-k}-1)$ 阶 PH 分布 $t_{i1,i2} = (\gamma_{n-k}, \omega_{n-k})$, 其中 $\gamma_{n-k} = (y_2, y_3, \dots, y_{(n-k)I})$, 满足 $(y_1, \gamma_1) = (y_1, y_2, \dots, y_{(n-k)I}) = X(I_{(n-k)I} \otimes e_{(n-k)0})$, $e_{(n-k)0}$ 为单位矩阵.

汇集的暴雨被雨水口 i 服务前等待时间可表示为: $t_i = t_{lea}(i) - t_{arr}(i)$, 式中 $t_{lea}(i)$ 为降水在汇集区 i 的离开时间, $t_{arr}(i)$ 为降水到达雨水口的时间.

暴雨在防汛泵站 p 及其管网的总等待时间 t_p 为经各雨水口直到排出的平均等待时间的最大值: $t_p = \max\{t_i\}, \forall i \in I$. 整个城区的雨水总等待时间最大值为: $T = \max\{t_p\}, \forall p \in P$. 其中, P 为泵站总数.

1.3.4 城区排水逗留时间限制

由于城市不同区域的人口密度、交通条件、经济水平不同,暴雨内涝灾害对其影响不同.为了减少城市重要区域(例如商业集中地、人口密集的社区、交通流量大的道路、政治文化集聚区等)潜在的内涝损失,可以通过设置不同区域排水的优先权或者排水等待时间值,以调整排水系统的排水服务水平.

邀请有经验的专家,确定城市重要区域的排水等待时间限制值 e_i . 如果城区的重要性程度越高,则可要求地表雨水的逗留值 e_i 越小,即 $t_i \leq e_i$.

2 城市排水系统的的目标选址模型

在城市排水系统中,一个泵站组成的局部系统是一个多级串联的 Markov 过程,多个泵站及其排水系统之间相互独立.系统模型使用两个决策变量 m_j 和 $n_{i1,i2}$:

$$m_j = \begin{cases} 1, & \text{选址点 } j \text{ 建设防汛泵站} \\ 0, & \text{选址点 } j \text{ 没设防汛泵站} \end{cases},$$

$$j \in I, \text{ 且 } \sum m_j = P$$

$$n_{i1,i2} = \begin{cases} 1, & \text{雨水点 } i_1 - i_2 \text{ 之间铺设管道} \\ 0, & \text{雨水点 } i_1 - i_2 \text{ 之间没铺管道} \end{cases}, i_1, i_2 \in I$$

在一个局部区域,划分为一系列的降雨汇集区,每个雨水汇集区设置一个雨水口,各雨水口通过不同直径的排水管连接,该区所有排水管最后与一个泵站相连,雨水经提升后直接排到临近水体.雨水最长等待时间 T 表示雨水径流接受各雨水口处理前等待时间的最大值: $T = \max\{t_p\}, \forall p \in P$.

排水系统总成本 C 包括防汛泵站的设备费用、

泵站的土建费用、排水管网的建安费用、排水系统年运行费用,按年度折旧费计算:

$$C = d_a \sum_{p \in P} a_p u_p + d_b \sum_{p \in P, j \in I} b_p m_j + d_n \sum_{i_1, i_2 \in I} h_{i_1, i_2} l_{i_1, i_2} + \sum_{i_1, i_2 \in I} c_{i_1, i_2} Q_{i_1, i_2}$$

式中: d_a, d_b, d_n 分别为泵站设备费用、泵站土建费用、管网 $i_1 - i_2$ 建安费用的年折旧率; l_{i_1, i_2} 为排水管 $i_1 - i_2$ 长度; a_p 为拟建防汛泵站的设备费用(按单位服务能力计); b_p 为拟建防汛泵站的土建费用(按座数计); h_{i_1, i_2} 为排水管段 $i_1 - i_2$ 的单位长度的建安费用; c_{i_1, i_2} 为排水管段 $i_1 - i_2$ 的单位排水量的损耗费用.

城市排水系统选址的双目标排队优化模型为

$$\min T = \max\{\max\{t_i\}\}, \forall i \in I, p \in P \quad (1)$$

$$\min C = d_a \sum_{p \in P} a_p u_p + d_b \sum_{p \in P, j \in I} b_p m_j + d_n \sum_{i_1, i_2 \in I} h_{i_1, i_2} l_{i_1, i_2} + \sum_{i_1, i_2 \in I} c_{i_1, i_2} Q_{i_1, i_2} \quad (2)$$

s. t.

$$Q_i = k_i f(t, R) A_i, \forall i \in I \quad (3)$$

$$f(t, R) = \frac{a(1 + \text{clg}R)}{(t + b)^c} \quad (4)$$

$$Q_{i1,i2} = Q_{i1} + \sum Q_{h,i1}, \forall h < i_1; \forall i, i_1, i_2 \in I \quad (5)$$

$$\lambda_i \leq u_i, \forall i \in I \quad (6)$$

$$Q_{i1,i2} \leq u_{i1,i2}, \forall i_1, i_2 \in I \quad (7)$$

$$t_i = \sum_{i_1, i_2 \in I} n_{i1,i2} t_{i1,i2}, \forall i \in I \quad (8)$$

$$t_1 \leq e_i, \forall i \in I \quad (9)$$

$$u_{i1,i2} = \frac{\pi}{4} d_{i1,i2}^2 v_{i1,i2} \quad (10)$$

$$u_i = g_i v_i \quad (11)$$

$$m_j, n_{i1,i2} \in \{0, 1\}, \forall i_1, i_2, j \in I \quad (12)$$

式(1)、(2)为模型目标函数,为雨水最长等待时间最小、排水系统总成本最小.式(3)表示每个汇水区的暴雨量与暴雨强度、汇水区面积有关;式(4)表示暴雨强度的通用公式与暴雨重现期有关;式(5)表示排水管段 $i_1 - i_2$ 在稳定服务条件下排水量为该管段前端的雨水口 i_1 汇集的降雨量与所有前置管段的排水量之和;式(6)表示地表降水按 Poisson 流到达雨水口 i 的均值 λ_i 不大于其服务容量 u_i , 否则地表径流排队等待;式(7)表示排水管段 $i_1 - i_2$ 在稳定服务条件下的排水量应不大于其服务容量;式(8)地表降水从雨水口进入排水系统直到离开排水系统的平均等待时间;式(9)表示区域排水等待时间的主观限制条件,式(10)和(11)分别表示排水管段 $i_1 - i_2$ 和雨水

口的服务容量计算;式(12)为防汛泵站和管道铺设这两个决策变量的赋值属性。

3 改进遗传算法

双目标多级排队系统模型具有复杂的非线性关系,难以直接采用确定性数学规划方法求解。为了简化计算,主要聚焦于求解平稳的多级排水随机过程问题,平稳的 Markov 随机过程统计特性不随时间而变化。对于平稳状态的排队系统,随机过程的统计特征 $E(t_i)$ 、 $E(L_k(t))$ 等不变,用各雨水口降水的等待时间期望值代替其等待时间平均值,则随机排队问题可转化为确定性问题,采用改进遗传算法以双目标函数求解该确定性问题,得到多级排队问题下的城市排水系统的等待时间、总成本的最小期望值。

改进遗传算法的具体步骤如下:

(1)编码:针对决策变量 m_j 和 $n_{i1,i2}$,采用浮点数与二进制混合编码方式进行编码,编码长度为 $I+P \times I$ 。

(2)算法初始化:初始化染色体 V_k 时,在决策向量的可行域中随机产生点,运用随机模拟方法检验其可行性,若可行,则作为一个染色体,否则重新生成随机点,直到得到可行解。

(3)设置适应度函数:采用基于序的 $\text{eval}(V_k)$ 评价函数对每个染色体 V_k 设定一个概率,通过轮盘赌的方式,使每个染色体被选择的可能性大小与种群中其它染色体的适应性成比例。

(4)选择操作:计算每个染色体 V_k 累计概率。

(5)交叉操作:设 p_c 为交叉操作的概率,在 $[0, 1]$ 中产生一个随机数 p' ,若 $p' < p_c$,则选择染色体 V_k 为一个参加交叉操作的父代,对每个父代中的前 J 位进行交叉操作,产生前位的两个子代。采用随机模拟方法检验子代的可行性。

(6)变异操作:设 p_m 为变异操作的概率,在 $[0, 1]$ 中产生一个随机数 p'' ,若 $p'' < p_m$,则选择染色体 V_k 为一个参加变异操作的父代。对每个父代中的前 J 位进行变异操作产生前 I 位的子代。采用随机模拟方法检验子代的可行性。

(7)精英保留策略与禁忌搜索:将每次迭代的局部最优解作为禁忌对象放入禁忌表,用当前最好解替代新种群中的最差解,提高遗传算法的求解效率和收敛性。

(8)重复选择、交叉、变异操作,直至满足停止准则,求解结束,输出决策变量、等待时间、成本的最

优解。

4 算例与讨论

通过实际算例说明城市防汛泵站选址的多级排队理论的适用性,讨论与验证改进遗传算法的有效性。

4.1 算例选择与参数确定

算例为上海市杨浦区定海路街道的防汛排水系统的更新改造。定海路街道紧邻黄浦江,占地面积 4.5 km^2 ,常住人口 10 万人。定海路街道弄堂多而狭窄,老式居民区地势低洼,排水管道老化,排水能力较弱,每逢暴雨就会出现大范围的积水和内涝。现有防汛排水系统只有一个泵站,位于第 85 点,该泵站防汛服务能力为 $4.2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。主要雨水口共计 92 个,雨水管道共计 119 段,各管段长度及直径如图 2 所示。

随着黄浦江两岸开发的深入,定海路街道分别划入复兴岛开发区域和东外滩开发区域。拟建排水系统仍然采用雨污水合流制,服务面积约 4.25 km^2 ,充分利用现有管道系统,沿黄浦江和运河选址建设防汛泵站,即泵站候选点为 16、17、26、88、45、57、58、67、75、78、79、80、81、82、83、84、85、88 等 18 个点。

现有排水系统的原设计暴雨重现期为 0.5 年,更新改造后设计暴雨重现期取 1 年,考虑现代化城区规划发展,扩建或新建 1~3 个泵站,同时相应地调整排水管网直径和排水流向,基本消除城市积水和内涝,满足待排水等待时间和总费用的控制目标。

暴雨强度公式系数取值为: $a = 17.812$, $b = 10.472$, $c = 0.796$, $d = 0.823$ 。每个雨水口的汇流面积按占地面积计算,原设计综合径流系数为 0.50。改造后每个汇水区径流系数由城市规划重新调整,综合径流系数为 0.65。

定海路街道所辖主要社区功能发生较大变化,将城区划分为 5 个不同的排水等待时间限制值,见表 1。

4.2 算例结果

遗传算法的种群规模 (popsize) 为 200,交叉概率 p_c 为 0.7,变异概率 p_m 为 0.04,基于序的评价函数中 α 为 0.05,最大迭代次数 (Maxgen) 为 1 000 次。计算结果如下:

(1)原防汛泵站选址点和泵站服务能力不变,原管道直径和管道系统组成不变,如果暴雨重现期取 1 年、综合径流系数取 0.65,则暴雨等待服务的时间

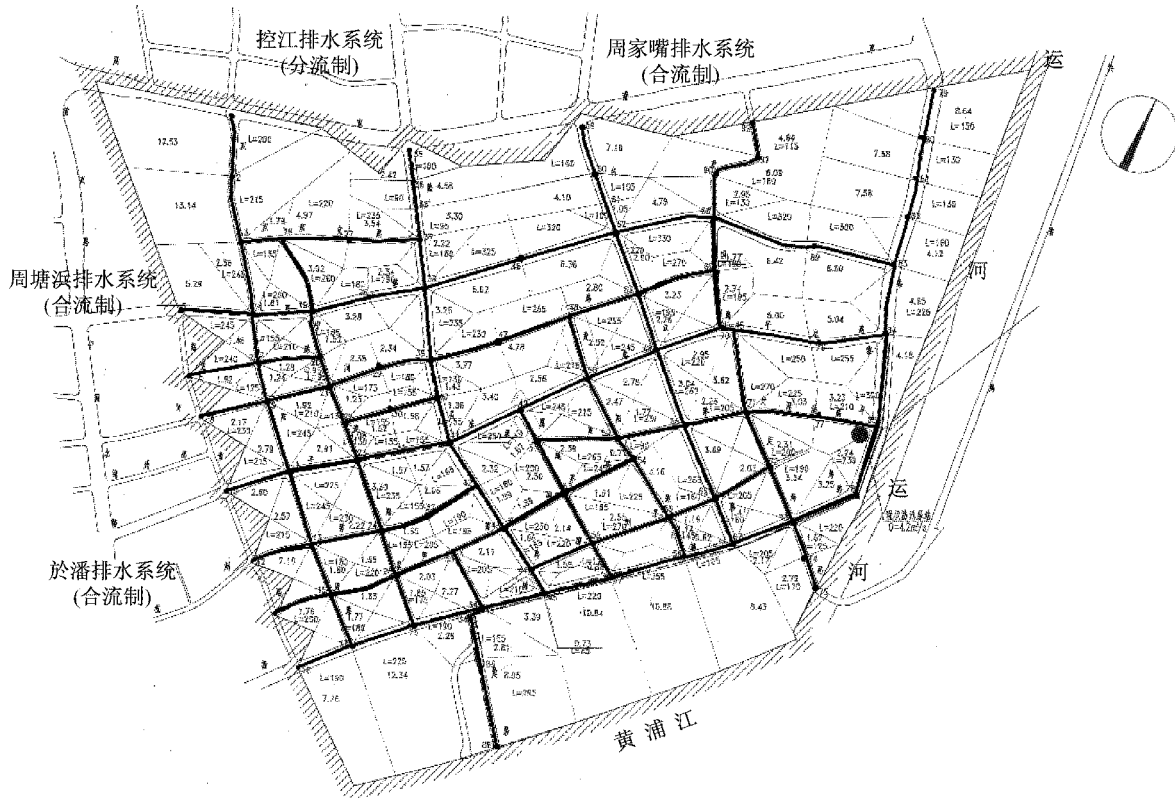


图 2 定海路街道排水管网系统现状

Fig.2 Current layout of the drainage system in Ding Hai Lu residential district

表 1 重要区域的排水等待时间限制值
Tab.1 Limit values of draining sojourn time in important areas

重要区域等级	等待时间限制值/min	城区主要规划功能	雨水口编号
一级	≤70	东外滩开发区	16、17、26、34、45、57、58、67、73、74、75、86、88
二级	≤80	重点商圈、医院、中小学	4、19、38、46、52、54、56、62、66、68、72、80、81、82、83、85
三级	≤90	中高档住宅区、主干道沿线	5、6、7、8、10、11、23、65、71、72、79、89、92、
四级	≤100	新建普通住宅区	24、25、32、33、35、42、47、59、64、70、76、77、78
五级	无限制	其他区域	其他雨水口

最小值为 132.4 min(雨水口 i_{56}), 等待时间最大值为 247.5 min(雨水口 i_2), 该辖区暴雨平均等待服务时间为 165.6 min. 等待服务时间均远大于需求, 即现有排水系统不能满足排水时间要求, 当暴雨气候出现时, 该街道容易出现积水和内涝.

(2)暴雨重现期取 1 年、综合径流系数取 0.65, 重要区域雨水口的暴雨等待时间要求满足限制条件, 排水系统费用按 20 年折旧. 当设置一座泵站时, 所有雨水管段与该泵站相连, 最优选址点为 i_{57} , 泵站服务能力为 $u_p = 26 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 排水系统总成本 $C = 1\,372 \text{ 万元} \cdot \text{年}^{-1}$, 雨水最长等待时间 $T = 112.5$

min. 设置两座泵站时, 雨水管段分为独立的两个系统分别与两个泵站相连, 最优选址点为 i_{88} 和 i_{75} , 泵站服务能力分别为 $u_p = 15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $14 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 排水系统总成本 $C = 2\,396 \text{ 万元} \cdot \text{年}^{-1}$, 雨水最长等待时间 $T = 104.6 \text{ min}$. 设置三座泵站时, 雨水管段分为独立的三个系统分别与三个泵站相连, 最优选址点为 i_{88} 、 i_{75} 、 i_{83} , 泵站服务能力分别为 $u_p = 12$ 、 11 、 $9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 排水系统总成本 $C = 3\,332 \text{ 万元} \cdot \text{年}^{-1}$, 雨水最长等待时间 $T = 98.7 \text{ min}$.

4.3 敏感性分析

(1) 泵站数量的影响

拟建泵站数 P 与雨水最长等待时间及总成本的关系见图 3. 当 $p=1$ 时, 排水系统的总成本最低, 各降雨区的等待时间均能满足限制值要求. 随着排水泵站个数增加, 每个泵站的平均服务能力可适当调整降低, 各降雨区的等待时间明显减小, 总成本的最优值会明显增大. 新建一座防汛泵站每年需综合增加投资约 600~1 000 万元, 但排水等待时间随泵站数量增加并不明显降低, 说明增加防汛泵站数量并不是降低城市积水的最优办法.

(2) 暴雨重现期的影响

当在最优选址点 i_{57} 设置一座泵站, 且径流系数及其他主要参数不变时, 暴雨重现期 R 对该排水系

统的最优总成本和雨水最大等待时间的影响见图 4.

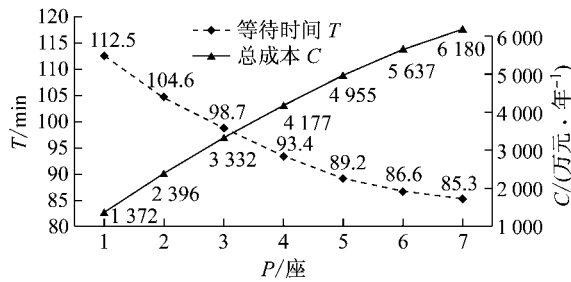


图 3 拟建泵站数量对目标值的影响

Fig. 3 Impacts of various pump stations on the objective values

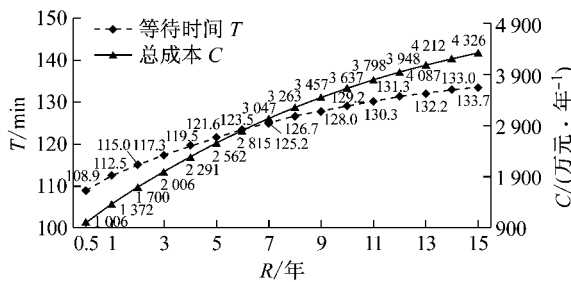


图 4 暴雨重现期对目标值的影响

Fig. 4 Impacts of various storm recurrence periods on the objective values

当暴雨重现期从 0.5 年增加到 15 年时,排水系统的总成本和雨水最大等待时间均不断增加.暴雨重现期延长,意味着暴雨强度设计值提高一倍以上,但是随泵站服务能力需要大幅增加,雨水最大等待时间 T 变化较小,而排水系统总成本 C 增加近 5 倍.说明在设计排水系统时,选择一个经济合理的暴雨重现期具有非常重要的现实意义.同时也说明,当某地区频繁出现大暴雨或特大暴雨,且对该地区的排水时间要求紧迫,则应增加资金投入改善排水系统,提高防汛能力.

5 结论

城市排水系统可以看作作为一个复杂的多级串联排队系统,如果地表径流来不及处理,就会形成城区

积水和内涝.防汛泵站作为城市排水系统的核心组成之一,其选址位置和服务能力直接影响到排水效果.通过考虑暴雨强度在城市空间分布特点以及城市排水系统的组成与运行特点,以雨水口、排水管段、泵站等组成多级服务台的排队模型.为了确保重要城区无积水,对不同区域设置不同的排水等待时间.以各雨水口的最长排水等待时间及排水系统运营总成本为目标函数,以城市排水系统为基础,建立防汛泵站的最优选址模型.

提出禁忌算法改进随机遗传算法,将复杂的随机非线性排队问题转化为确定性问题求解,能稳定搜索出复杂条件下选址问题的最优解,通过测试函数验证该算法的有效性.结合上海市定海路排水系统的更新改造工程,求解城市发展背景下的防汛泵站数量设置和最优选址问题,重点讨论暴雨重现期对排水系统的总成本和雨水等待时间的影响,讨论泵站数量对排水时间及总成本的影响等,提出合理确定暴雨重现期和防汛泵站数量的重要意义.

参考文献:

- [1] DU S, GU H, WEN J, *et al.* Detecting flood variations in Shanghai over 1949—2009 with Mann-Kendall tests and a newspaper-based database[J]. *Water*, 2015, 7(5): 1808.
- [2] CHANDIO A S, LEE T S, MIRJAT M S. Simulation of horizontal and vertical drainage systems to combat waterlogging problems along the Rohri Canal in Khairpur District, Pakistan [J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2013, 139(9):710.
- [3] HAJIPOUR V, KHODAKARAMI V, TAVANA M. The redundancy queuing-location-allocation problem: a novel approach[J]. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 2014, 61(3):534.
- [4] SINGER M, DONOSO P. Assessing an ambulance service with queuing theory[J]. *Computers & Operations Research*, 2008, 35(8):2549.
- [5] 胡丹丹, 杨超. 在竞争环境中的拥塞设施截流选址问题[J]. *系统工程理论与实践*, 2010, 30(1):68.
HU Dandan, YANG Chao. Flow interception location problem of congestion facilities in competitive system [J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2010, 30(1):68.