

文章编号:1671-6833(2003)04-0059-04

基于遗传算法的雨水管道系统优化设计

周荣敏, 雷延锋

(郑州大学环境与水利学院,河南 郑州 450002)

摘 要: 建立了一个雨水管道系统优化设计模型,并应用遗传算法求解管网投资最小的最优设计方案.该方法以管段设计流速为决策变量,采用浮点数编码方式将优化问题的解表达为染色体,设计了相应的适应度函数、交叉算子和变异算子.与传统设计方法相比,遗传算法所得到的最优设计方案可比原设计方案节约投资 19.38%.研究表明,应用 GA 进行城市雨水管道系统优化设计是一种可行且非常有效的新方法,不仅可以找到最优设计方案,而且可以为决策者提供多种优化设计方案,为进行方案评价和决策提供可靠依据.

关键词: 遗传算法;雨水管道系统;优化设计;浮点数编码;适应度函数

中图分类号: TU 992.22 **文献标识码:** A

0 引言

随着城市化进程的加快,城市排水系统的规模和工程投资日益庞大,重视和加强城市排水系统的优化设计研究,寻找技术先进、经济合理的工程设计方案,对节约工程投资,降低施工难度,减少运行管理费用,保护和改善城市环境等均具有重要的理论和现实意义.目前,对于城市排水管道系统的优化设计问题,已开发了一些水力计算程序和优化算法如直接优化法、动态规划法、遗传算法(Genetic Algorithm,GA)等^[1,2],并在设计过程中得到一定应用,能显著提高设计水平和设计效率,节省工程投资.本文的主要目的是根据雨水管道系统设计计算的特点,研究应用遗传算法进行雨水管道优化设计的性能,为雨水管道系统的优化设计寻找一种简单易用的新方法.

1 雨水管道优化设计模型

目前,国内的城市雨水管道系统设计主要采用推理公式法(即极限强度法)和均匀流基本公式进行设计计算^[3].

$$Q=\left[\frac{167A_1(1+dgP)}{t_1+m\sum\frac{L}{60V}+b}\right]^n\phi\cdot F \tag{1}$$

$$V=\frac{1}{n}\left(\frac{D}{4}\right)^{\frac{2}{3}}I^{\frac{1}{2}} \tag{2}$$

$$Q=\frac{\pi D^2}{4}V \tag{3}$$

式中各符号的意义参见文献[3].

对于具体的雨水管道工程来说,式中 P,t_1,ϕ,A_1,b,c,n,n 均为已知值,管段设计流量 Q 可根据上游累计管内流时间来计算,只有 D,V,I 待定,只要确定其中一个量,便可以由式(2)和(3)计算出另外两个,然后根据控制点的埋深要求和管道在检查井的衔接方式进行管道埋深计算.

雨水管道系统优化设计的目标是在满足《室外排水设计规范》中对流速、管径、埋深等约束条件下,使整个雨水管道系统的工程总投资最小.以雨水管道的总投资最小为优化目标,可建立如下的目标函数:

$$\min W=\sum_{i=1}^{n_p}C_i(D_i,H_i)L_i \tag{4}$$

流速约束:

$$V_{\min}\leq V\leq V_{\max} \tag{5}$$

埋深约束:

$$H_{\min}\leq H_{i,1},H_{i,2}\leq H_{\max} \tag{6}$$

标准管径集合:

$$D\in\{D_1,D_2,\cdots,D_N\} \tag{7}$$

式(4)~(7)中: W 为雨水管道总费用,元; L_i 为

收稿日期:2003-09-03;修订日期:2003-10-15

基金项目:郑州大学青年骨干教师基金资助项目

作者简介:周荣敏(1971-),女,河南省新野县人,郑州大学副教授,博士,主要从事智能优化算法理论及其应研究.

第 i 管段管道长度, m ; C_i 为雨水管道的费用函数, 其形式因各地施工经验和条件而不同, 元/ m ; D_i 为第 i 管段的标准管径, m ; $H_{i,1}$, $H_{i,2}$, H_i 分别为第 i 管段的起点埋深、终点埋深和平均埋深, $H_i = (H_{i,1} + H_{i,2}) / 2, m$; H_{min} , H_{max} 分别为雨水管段的最小和最大允许埋深, m ; V_{min} , V_{max} 分别为雨水管段的最小和最大允许流速, m/s .

2 雨水管道遗传优化设计的实现

GA 是一种模拟自然界生物进化过程的全局随机优化算法, 由 Holland 教授于 1975 年提出. 应用 GA 求解优化问题的关键是采用某种编码方式将待优化问题的解表示成染色体(个体), 组成染色体的每个字节决定相应解的特征. GA 从一组随机产生的初始群体(初始解)出发, 以群体中个体的适应度为依据, 对个体执行选择、交叉和变异等基本遗传算子, 使群体中的个体(即问题的解)不断进化并逐渐逼近问题的最优解或准最优解, 从而实现了对优化问题的求解.

2.1 浮点数编码

由于 GA 不直接作用于最优化问题的参数上, 而是对问题参数的某种编码进行优化, 因此, 应用 GA 求解优化问题时, 首先需要采用适当的编码方法把待优化问题的解表示成染色体. 本研究以雨水管网中各个设计管段的设计流速 V 为决策变量, 采用连续编码方案, 即用浮点数作为字节来表示各设计管段的设计流速, 并指定其取值的上限 V_{max} 和下限 V_{min} , 则用一个由设计流速组成的实数字符串就可以表达相应的一种可能的雨水管道设计方案. 以流速 V 为决策变量, 可在群体初始化和进化过程中直接控制其在最大允许流速 V_{max} 和最小允许流速 V_{min} 范围内变化, 既可以自动满足流速约束条件, 又可以根据问题特点选取适当的经济流速范围, 有助于提高寻优效率, 实现方案的精细调优.

2.2 适应度函数设计

应用 GA 进行雨水管网优化设计时, 遗传群体中的每一个个体都代表一种可能的设计方案. 对于每一种设计方案, 必须先进行水力计算以验证其是否满足有关约束条件. 不满足约束条件的方案, 采取增加惩罚项修正其目标函数, 使其在竞争中的生存概率较低, 逐渐被淘汰.

由于采用流速 V 作为决策变量, 对于流速约束条件式(5), 可在计算过程中通过修正使其自动满足, 管径 D 的确定可根据式(3)计算所得的非

标准管径从可用标准管径集合式(6)中选取最接近的标准管径, 因而, 在水力计算过程中需要重点考虑的是埋深约束式(7). 当计算管段的终点埋深小于最小允许埋深 H_{min} 时, 通过在该设计管段起端设置跌水井来降低管位, 满足设计要求; 当管段的终点埋深超过最大允许埋深 H_{max} 时, 通过设置中途雨水提升泵站, 提高下游管位至 H_{min} , 满足设计要求. 若需要增设雨水泵站, 则在目标函数中增加惩罚项. 增加了惩罚项修正后的目标函数称为广义目标函数:

$$\min W' = \sum_{i=1}^{N_p} [C_i(D_i, H_i)L_i + S_i K Q_i H P_i] \quad (5)$$

式中: S_i 为 $0 \sim 1$ 变量, 当计算管段 i 的终点埋深 $H_{i,2}$ 大于 H_{max} 时, S_i 取 1, 否则取 0; K 为惩罚因子, K 的选取应足够大, 以保证设有雨水提升泵站的管网费用要比不设泵站的管网费用大; Q_i 为计算管段 i 的设计流量, m^3/s ; $H P_i$ 为提升水头, m .

广义目标函数 W' 的大小直接反映了相应设计方案的最优化程度, 即投资越低, 方案越优. 在 GA 的寻优过程中, 工程投资低的方案将被赋予较高的适应度, 在进化过程中有较大的生存和繁殖机会; 工程投资高的方案将被赋予较低的适应度, 使其在进化过程中的生存繁殖机会较低, 并逐渐被淘汰. 因此, 定义遗传进化过程中每个个体的适应度函数为

$$f_i = f_{max} - W'_i \quad (6)$$

式中 f_i 为群体中第 i 个体的适应度; f_{max} 为可以是一个较大输入值, 也可以采用迄今为止进化过程中的最大 W' , 但必须要能保证所计算出的 f_i 满足非负要求.

2.3 遗传算子设计

GA 中的遗传操作如选择、交叉和变异都是模拟生物基因遗传的操作, 其主要任务就是对群体中的个体按照它们对环境的适应程度施加一定的操作, 从而实现优胜劣汰的进化过程. 从优化的角度而言, 遗传操作可使问题的解一代又一代地优化并逼近最优解.

2.3.1 选择算子

选择算子采用最常用的适应度比例法来实现. 在适应度比例法中, 每个个体的选择概率和其适应度值成比例. 设群体规模为 n , 其中每个个体 i 的适应度值为 f_i , 则个体 i 被选择的概率为

$$P_{si} = \frac{f_i}{\sum_{j=1}^n f_j} \quad (7)$$

式中, 概率 P_{si} 反映个体 i 的适应度在整个个体适

应度总和中所占的比例.

显然,在遗传进化过程中,个体适应度越大,其被选择的概率就越高,有更多的机会将优良特性遗传给子代个体;适应度低的个体逐渐被淘汰,失去生存机会.

2.3.2 交叉算子

交叉算子采用两点交叉方式.例如,有随机选择的个体 A 和 B ,可通过如下的两点交叉,产生两个新的子代个体 A' 和 B' .

$$\begin{array}{l} 0.756 : \underline{0.824 \ 0.956 \ 1.213} : 1.516 \rightarrow 0.756 \\ \underline{0.847 \ 0.925 \ 1.014 \ 1.516} \ A' \\ 0.812 : \underline{0.847 \ 0.925 \ 1.014} : 1.356 \rightarrow 0.812 \ \underline{0.824} \\ \underline{0.956 \ 1.213 \ 1.356} \ B' \end{array}$$

交叉算子一方面使原来群体中优良个体的特性能够在一定程度上的遗传和继承,另一方面使算法能够搜索新的基因空间,从而使新群体中的个体具有多样性.

2.3.3 变异算子

变异算子采用均匀变异算子.均匀变异算子的具体操作是:从群体中随机选择一个个体,从个体中随机选择一个分量,在其定义区间内均匀随机取一个数值代替原来的分量,得到一个新个体.

对于流速的变异区间,采用两种方式确定:(1)对随机选择的一个分量 V_j 在 $[V_j - 0.2, V_j + 0.2]$ 之间随机变异;(2)对所选择的一个分量 V_j 在 $[V_{\min}, V_{\max}]$ 范围内进行变异.

例如,随机选择一个个体 A ,假定流速区间为 $[0.750, 2.000]$.随机选定个体 A 中的第 3 个基因位实施变异.若采用第(1)种变异区间,则在 $[0.903, 0.943]$ 之间产生一个随机数如 0.918 代替原来的 0.923.

$$\begin{array}{l} 0.752 \quad 0.843 \quad \underline{0.923} \quad 1.014 \quad 1.518 \\ \text{变异区间 } [0.903 \sim 0.943] \rightarrow 0.752 \quad 0.843 \quad \underline{0.918} \quad 1.104 \\ 1.518 \ A' \end{array}$$

若采用第(2)种变异区间,则可在 $[0.750, 2.000]$ 之间产生一个随机数如 1.357 代替原来的分量 0.923:

$$\begin{array}{l} A \quad 0.752 \quad 0.843 \quad \underline{0.923} \quad 1.014 \quad 1.518 \\ \text{变异区间 } [0.750, 2.000] \rightarrow 0.752 \quad 0.843 \quad \underline{1.357} \quad 1.104 \\ 1.518 \ A' \end{array}$$

在进化过程中以随机方式确定所采用的变异区间,两种变异区间混合使用,既可加强变异算子的局部寻优能力,亦可重新恢复群体多样性.

3 应用举例

以文献[3]中第 92 页的雨水主干管设计为例,应用 GA 进行优化设计.费用函数采用如下形式[4]:

$$C_i = (52.07 + 76.491 \ 2D_i^{2.3489}) + (0.335 \ 8 + 36.87D_i) \ H_i^{3.0157} \quad (8)$$

式中各符号意义同前.

雨水管道设计参数的选取范围如下:经济流速范围取 $[0.760, 1.50]$,最小和最大允许埋深范围取 $[1.30, 5.00]$,标准管径集合取 $\{300, 350, 400, 450, 500, 600, 700, 800, 900, 1\ 000, 1\ 200, 1\ 400\}$.遗传算法的参数配置[3]如下:最大遗传代数 Maxgen = 1 000;群体规模 Popsiz e = 20;交叉率 $P_c = 0.8$;变异率 $P_i = 0.6$.

应用 GA 得到的最优设计方案见表 1,其中仅列出部分计算数据.作为对比,采用了相同的费用函数计算了原设计方案的管道造价和总费用,计算结果见表 2.

表 1 最优设计方案
Tab.1 Opti ml design solution

管段 编号	设计流量 $Q/(L\ s^{-1})$	管径 $D/$ mm	坡度 $I/$ %	流速 $V/$ ($m\ s^{-1}$)	管道输水能力 $Q'/(L\ s^{-1})$	起点埋深/ m	终点埋深/ m	造价/ 元
1	94.586	400	2.11	0.76	95.609	1.30	1.65	16 420.35
2	164.038	500	1.89	0.84	164.038	1.75	1.94	18 524.11
3	233.656	600	1.65	0.88	249.590	2.04	2.18	28 780.16
4	336.552	800	0.84	0.76	382.308	2.38	2.06	59 813.76
5	494.784	900	0.75	0.78	494.784	2.16	2.23	47 041.74
6	500.541	900	0.76	0.79	500.541	2.23	2.31	50 897.09
7	530.116	900	0.86	0.83	530.116	2.31	2.41	66 983.52
8	639.234	900	1.25	1.01	639.234	2.41	2.58	95 957.54
9	639.234	900	1.25	1.01	639.234	2.58	2.72	89 250.33
10	742.810	900	1.68	1.17	742.810	2.72	2.97	134 350.90
11	799.740	900	1.95	1.26	799.740	2.97	3.24	170 239.29
总造价								778 258.78

表 2 原始设计方案
Tab.2 Original design solution

管段 编号	设计流量 $Q/(L\ s^{-1})$	管径 $D/$ mm	坡度 $I/$ ‰	流速 $V/$ ($m\ s^{-1}$)	管道输水能力 $Q'/(L\ s^{-1})$	起点埋深/ m	终点埋深/ m	造价/ 元
1	94.58	400	2.1	0.76	96.00	1.30	1.65	16 449.1
2	163.98	500	1.9	0.84	165.00	1.75	1.94	18 611.26
3	233.78	600	1.5	0.84	240.00	2.04	2.27	29 581.64
4	335.00	700	1.4	0.90	350.00	2.37	2.02	51 113.3
5	503.42	800	1.5	1.02	520.00	2.12	2.27	41 676.4
6	518.38	800	1.6	1.05	530.00	2.27	2.43	48 973.94
7	557.21	800	1.8	1.12	560.00	2.43	2.65	71 210.43
8	681.32	900	1.5	1.10	700.00	2.75	2.94	115 612.00
9	682.32	900	1.5	1.11	700.00	2.96	3.11	126 705.4
10	791.40	900	2.0	1.29	810.00	3.11	3.41	194 224.5
11	853.41	900	2.3	1.37	870.00	3.41	3.74	251 134.6
总造价								965 292.5

根据GA 的优化结果可以看出,在限定经济流速范围为[0.76, 1.50] 情况下,GA 所获得最优设计方案的工程造价要比原设计方案减少 18.7 万元,可节约工程投资 19.38%。

在应用GA 进行雨水管道优化的过程中,由GA 控制进化过程的进行,不断搜索和逼近最优方案,对群体中的每一个体通过水力计算确定对应设计方案的可行性和优劣性,通过保留进化过程中的最优个体(即最优方案),可以为进行方案评价和决策提供可靠依据。另外,根据遗传优化的结果,还可以结合工程实际需要和其他因素进行方案修正,使设计方案更切合实际条件,进一步提高设计水平和设计效率。

4 结束语

GA 是一种适应性和可扩展性能极强的全局随机优化方法,对许多优化问题都能较容易地给出满意的设计结果。研究表明,应用GA 进行城市

雨水管道系统优化设计是一种可行且非常有效的新方法,不仅可以找到最优或准最优设计方案,而且可以为决策者提供多种优化设计方案,为进行方案评价和决策提供可靠依据。

参考文献:

[1] 李树平,刘遂庆.城市排水管道系统设计计算的进展[J].给水排水,1999,25(10) :9~12.
[2] 周荣敏,雷延峰.管网最优化理论与技术——遗传算法与人工神经网络[M].郑州:黄河水利出版社,2002.
[3] 孙慧修.排水工程(上册)[M].第四版.北京:中国建筑工业出版社,1999.
[4] 周玉文,赵洪宾.排水管网理论与计算[M].北京:中国建筑工业出版社,2000.
[5] 周荣敏,雷延峰.基于遗传算法的最小生成树的参数优化研究[J].郑州大学学报(工学版),2002,23(2) :9~12.

Optimal Design of storm Sewer Systems Using Genetic Algorithms

ZHOU Rong -min , LEI Yan -feng

(College of Environmental & Hydraulic Engineering ,Zhengzhou University , Zhengzhou 450002,China)

Abstract : This paper sets up an optimal design model of storm sewer systems and uses genetic algorithms (GA) to find the least cost optimal solution .The GA takes velocities of the pipes as the decision variables and uses a floating - point coding scheme to represent the chromosome .The corresponding fitness function ,crossover operator and mutation operator are designed .In comparison with the traditional design method the optimal solution by GA is much better and can save money of 19.38% .The study shows that Genetic Algorithms are best suited for optimal design of storm sewer systems and can provide a lot of optimal solutions for decision - makers to choose and evaluate .

Key words : Genetic Algorithms ; storm sewer systems ; optimal design ; floating point coding ; fitness function