

基于整数编码粒子群算法的树状供水管网优化

孙明月¹, 许文斌¹, 邹彬², 何英³

(1. 重庆大学 城市建设与环境工程学院, 重庆 400045; 2. 深圳市水务(集团)有限公司, 广东 深圳 518031;

3. 长安大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 以管网年费用折算值为目标函数, 以管网布置形式及管径为优化参数, 建立了树状供水管网的优化设计模型。利用基于整数编码的粒子群算法对这一模型进行了求解, 该方法以某一管网连接状态及各管段管径作为粒子群个体, 采用整数编码, 通过不断地更新粒子的位置来搜索最优的管网结构及管径值, 实现了对管网布置形式及管径的同时优化。优化过程中, 对进化过程中产生的不可行解进行处理, 提高了优化效率。实例表明, 将粒子群算法应用于树状管网优化设计中可以获得更好的优化结果和效率。

关键词: 树状供水管网; 管网布置; 管径; 整数编码; 粒子群算法

中图分类号: O152; TU991.33

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2012)06-0168-04

Optimal design of tree-type pipe network based on integer coding particle swarm algorithm

SUN Mingyue¹, XU Wenbin¹, ZOU Bin², HE Ying³

(1. College of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University,

Chongqing 400045, China; 2. Shenzhen Water Group, Shenzhen 518031, China;

3. College of Environmental Science and Engineering, Changan University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Taking network's annual reduced value as optimization object, pipe layout and pipe diameter as parameter, a tree-type pipe network optimization model was established. Particle swarm algorithm based on integer coding was adopted for solving the math model, which take a pipe network connection status with the pipe diameter as the particle swarm individuals and updates the particle's location to search the optimal network structure. Through the integer coding design, the optimizations of pipe layout and pipe diameter were achieved simultaneously. During the optimization process, the infeasible solutions during evolutionary process were disposed to improve the optimization efficiency. A instance showed that applying the particle swarm optimization algorithm to optimal design of tree-type pipe network could get a better results and efficiency.

Key words: tree-type pipe network; pipe layout; pipe diameter; integer coding; particle swarm algorithm

根据图论, 树状管网是管网初步连接图的一棵生成树, 对其进行完整的优化设计应包括管网布置形式及管径优化两部分^[1]。国内外学者们单独对二者进行优化的研究较多: 文献[2]和文献[3]仅针对管网布置形式进行了优化, 然后通过经济流速求得管径。文献[4-7]在管网布置形式确定的情况下, 以投资最省为目标函数, 对管径进行了优化。杨建军^[1]等人则在此基础上进行了对二者同时优化的研究。研究表明, 同时对二者进行优化可进一步降低管网投资, 改善系统运行状况。上述研究成果

多数采用线性规划、非线性规划、遗传算法等优化模型。粒子群算法^[8-9]以其实现容易、精度高、收敛快等优点引起了学术界的重视, 并且在解决实际问题中展示了其优越性。文献[10]研究了基于粒子群算法的环状供水管网抗震优化设计, 成功将粒子群算法用于环状管网优化设计中, 但未能解决进化过程中不可行解的处理问题。本文在前人研究的基础上, 以管网年费用折算值为目标函数, 建立了树状供水管网的优化设计模型, 并应用基于整数编码的粒子群算法对这一模型进行了求解。

收稿日期: 2012-08-02; 修回日期: 2012-09-12

作者简介: 孙明月(1987-), 男, 山东德州人, 硕士研究生, 主要从事管渠工程理论与技术研究。

通讯作者: 许文斌(1987-), 男, 江西乐平人, 硕士研究生, 主要从事管渠工程理论与技术研究。

1 树状供水管网优化模型

1.1 目标函数

管网年费用折算值是按年计的管网建造费用和管理费用,其中管理费用包括动力费用和折旧大修理费,可用下式表示^[2]:

$$\min C_a = \left(\frac{p}{100} + \frac{1}{t} \right) \sum_{i=1}^n \gamma_i c_i \cdot l + H_p Q_p P \quad (1)$$

式中: p 为每年折扣的折旧和大修费用,以管网造价的%计; t 为管网投资偿还期(年); n 为管网初步连接图中所有管线的数量; γ_i 为第 i 条管线的连接状态(连接时取1,断开时取零); l_i 为第 i 条管段管长,m; P 为单位运行电费系数,表示 $Q_p = 1 \text{ L/s}$, $H_p = 1 \text{ m}$ 时的每年电费(分); Q_p 、 H_p 分别为泵的流量,L/s,扬程,m。

1.2 约束条件

(1) 节点压力约束:

$$P_j \geq P_{j \min}, j = 1, 2, 3, \dots, m \quad (2)$$

式中: P_j 、 $P_{j \min}$ 分别为节点 j 的压力和最低允许压力(P_j 由管网水头损失求得); m 为用水节点总数。

(2) 流速约束:

$$v_{k \min} \leq v_{ki} \leq v_{k \max}, k = 1, 2, \dots, n_c \quad (3)$$

式中: $v_{k \min}$ 、 $v_{k \max}$ 、 v_{ki} 分别为管线 k_i 的最大、最小允许流速和实际流速; n_c 为连接状态管线数量。

(3) 欧拉方程约束:

根据图论中树的性质,管网中处于连接状态的管线数量应等于节点数量减去1即:

$$\sum_{i=1}^{n_a} \gamma_i = m - 1 \quad (4)$$

2 粒子群算法的基本原理^[8-9]

粒子群优化算法(PSO算法)是一种进化计算技术,1995年由Eberhart博士和Kennedy博士提出,源于对鸟群捕食的行为研究。设想这样一个场景:一群鸟在随机搜索食物。在这个区域里只有一块食物。所有的鸟都不知道食物在哪里。但是它们知道当前的位置离食物还有多远。那么找到食物的最优策略是什么呢。最简单有效的就是搜寻目前离食物最近的鸟的周围区域。PSO从该行为模型中得到启示并用于解决优化问题。PSO中,每个优化问题的解都是搜索空间中的一只鸟,称之为“粒子”。所有的粒子都有一个由被优化的函数决定的适应值,每个粒子还有一个速度决定它们飞翔的方向和距离。然后粒子们就追随当前的最优粒子在解空间中搜

索。PSO初始化为一群随机粒子(随机解),然后通过迭代找到最优解。在每一次迭代中,粒子通过跟踪两个“极值”来更新自己。第一个就是粒子本身所找到的最优解(pBest);另一个极值是整个种群目前找到的最优解(gBest)。

在找到这两个最优值时,粒子根据如下的公式来更新自己的速度和新的位置:

$$v^{i+1}[] = wv^i[] + c_1 \cdot r_1 \cdot (pbest^i[] - present^i[]) + c_2 \cdot r_2 \cdot (gbest^i[] - present^i[]) \quad (5)$$

$$present^{i+1}[] = present^i[] + v^{i+1}[] \quad (6)$$

式中: $v^i[]$ 是粒子的速度; w 是惯性权重; $present[]$ 是当前粒子的位置; $pbest[]$ 和 $gbest[]$ 分别是个体极值和全局极值; r_1 、 r_2 是介于(0,1)之间的随机数; c_1 、 c_2 是学习因子。

3 粒子群算法在树状供水管网优化设计中的应用

3.1 约束条件的处理

对于式(2)、(3),采用外罚函数进行处理,将原目标函数转化为无约束优化问题,避免粒子在进化过程中因为碰壁而改变飞行方向,适应度函数变为:

$$f = C_a + M \left[\sum_{j=1}^m \max \left(0, 1 - \frac{P_j}{P_{j \min}} \right) + \sum_{k=1}^{n_c} \max \left(0, 1 - \frac{v_k}{v_{k \min}}, \frac{v_k}{v_{k \max}} - 1 \right) \right] \quad (7)$$

式中: M 取较大的正数。

3.2 编码方式

为了将优化参数连通系数 γ_i 和管径 d_i 合二为一,实现供水管网的布置形式和管径的统一,本研究采用整数编码方式:以每一粒子所处的位置表示一种管网布置形式及管径值,在粒子位置矢量中,每一维对应一条管线,当粒子位置矢量的某一维取零时,表示其对应的管线断开,取不为零的整数时表示其铺设不同管径的管线。对于离散的标准管径,在操作过程中,定义一个包含 n_s 个元素的一维数组,其值分别与标准管径一一对应;进化过程中,对 $[1, n_s]$ 范围内的整数进行处理,计算目标函数时则用其对应的数组值。例如:假定一根管线管径可取100、150、200、250、300、350 mm,对应的管径编码可取1、2、3、4、5、6,而取值为零时,表示这根管线断开。

在进化过程中,会出现连续值,因此,需对变量进行离散化处理:当位置矢量中的某一维的值小于零时,则取为零;当其值大于最大的管径编码值时,则取最大的管径编码值;处于两者间时,则选择与其

最接近的管径编码值。

3.3 初始解的产生

为了使任意管段处于连接和断开的概率相等,可建立一个由 0 和 $[1, n_s]$ 范围内的整数组成的数组,其中 0 的个数等于 n_s ,在产生初始种群时,将该数组的元素作为编码的来源,令粒子的每一维取值等于该数组内的一个随机整数。再按 3.1 中的原理译码后即可得到各管线的连接关系和相应的管径。

3.4 对不可行解的处理

根据图论中树的的性质,管网中处于连接状态的管线数量应等于节点数量减去 1 即:

$$\sum_{i=1}^{n_a} \gamma_i = m - 1 \tag{8}$$

在进化过程中会出现两种不可行解:不满足式(8)的管网,或者满足式(8)但非连通的管网,故在进化过程中应对不合理方案先进行修补,若仍不合理,则将其抛弃。具体操作为:当管网中处于连接状态的管线数量小于节点数量减去 1 时,此时随机选择编码为 0 的管段将其赋值 1(即对应较小管径),直到满足式(8)的约束;当管网中处于连接状态的管线数量大于节点数量减去 1 时,此时选择编码最小(即对应管径最小)的管段赋值 0(即断开),直到满足式(8)的约束。这样,便满足了树状管网的必要条件,然后通过调用深度优先搜索程序,判断管网是否连通,再将不连通的管网舍去,重新生成一个管网。

3.5 粒子群算法的实施

树状管网优化粒子群算法的步骤如下:

- (1) 根据上述规则产生初始粒子群个体的位置和并随机产生对应的初始速度,输入初始数据;
- (2) 计算每个粒子的适应值;
- (3) 将每个粒子的适应值与个体极值($pbest$)进行比较,若较好,则将其作为当前的最优解;
- (4) 将每个粒子目前所搜索到的最优解与全局极值($gbest$)进行比较,若较好,则将其作为当前的群体最优解;
- (5) 分别对每个粒子的各维速度和位置进行进化,并对不可行解进行处理;当进化达到足够好的适应值或达到最大进化代数时,结束,否则,返回步骤(2)。

为了使粒子在优化初始阶段有较大的搜索范围、在优化后期有较高的搜索精度,本文对惯性权重 w 和学习因子 c_1 、 c_2 采用线性减小的方式来取值,即在优化初始阶段取较大值,随着进化代数线性减小。

4 实例分析

图 1 为某一管网的初步连接图,共有 8 个用水节点(编号 2~9)和一个水源节点(节点 1);共 19 条管线,各管线长度见表 1,表中 l 为管长,各节点用水量为 2.8 L/s,各节点地面标高均相同,投资偿还期为 5 年,计算时,管线最低流速取 0.6 m/s,节点最低水压取 10 m,每年折旧和大修费率取 2.8%,单位运行电费系数取 24.55 元,水头损失采用海曾-威廉公式计算。根据该工程规模,选定管网中管线的管径种类和管径值分别为 65、80、100、125、150、200 mm 6 种,各管径单位长度造价见表 2,表中 d 为管径, c 为单位长度价格。

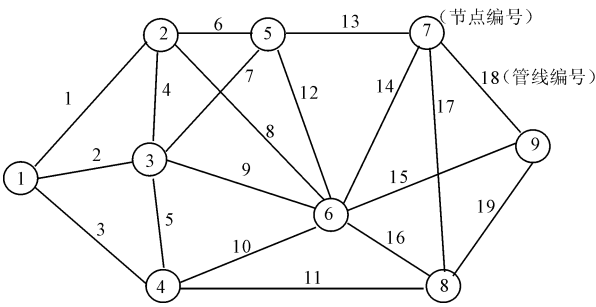


图 1 管网初步连接图

采用骆力明^[3]等人的二进制编码的单亲遗传算法仅对管网连接关系进行优化,然后采用经济流速求得管径后,管网年折算值中的建造及管理费用为 9 899 元,动力费用 5 138 元,年折算费用 15 037 元;当采用杨建军^[2]等人的双重编码遗传算法对管网布置形式及管径同时优化,建造及管理费用为 8 918 元,动力费用 5 943 元,年折算费用 14 861 元。

表 1 各管线长度 m

管段编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
l	720	400	640	560	720	240	720	800	560	880
管段编号	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
l	1040	800	480	640	880	480	880	880	800	

表 2 管线造价表 mm, 元/m

d	c	d	c
65	4.40	125	12.60
80	5.90	150	16.96
100	8.74	200	24.37

采用本研究的基于整数编码的粒子群算法,对管网布置形式及管径同时优化,对应的管径编码按

由小到大分别取为 1、2、3、4、5、6,最大进化代数取 200 代,最大及最小惯性系数分别取 1.2 和 0.4,最大及最小加速度常数分别取 2.0 及 0.2,种群规模为 50,优化后,,建造及管理费用为 9 258 元,动力费用 5 072 元,年折算费用 14 330 元。

三种方法的优化结果参照图 2、图 3、图 4 及表 3,其中, L 为总管长, C_1 为建造及管理费, H_p 为泵的

扬程, C_2 为动力费用, C_a 为总年费用折算值, n 为迭代次数。由结果可知,采用本研究的方法,与二进制编码的单亲遗传算法相比,管网年折算值降低 707 元;与双重编码遗传算法相比,管网年折算值降低了 531 元。而且,采用双重编码遗传算法需进化 152 代达到最优,本研究算法只需要进化 80 代便达到最优,进化效率几乎提高了一倍。

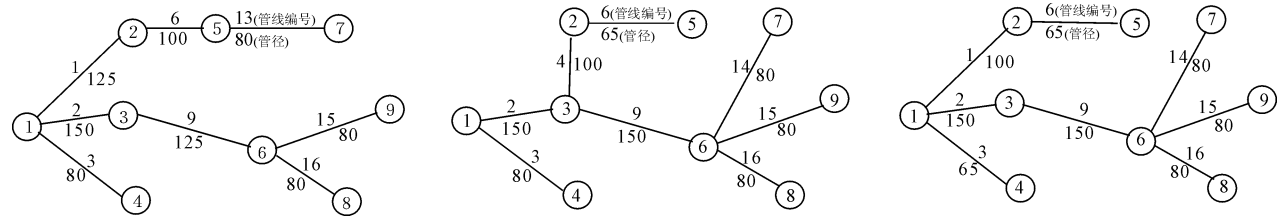


图 2 二进制编码单亲遗传算法优化结果 图 3 双重编码遗传算法优化结果 图 4 整数编码的粒子群算法优化结果

表 3 优化结果对照表			m, 元, 次			
优化方法	L	C_1	H_p	C_2	C_a	n
单亲遗传算法	5500	9899	9.344	5138	15037	-
双重编码遗传算法	5500	8918	10.808	5943	14861	152
整数编码粒子群算法	5700	9258	9.224	5072	14330	80

5 结 语

(1) 尝试将粒子群算法运用于树状供水管网优化设计中。实例表明,将基于整数编码的粒子群算法应用于该优化中,通过整数编码,以 0 表示管线断开,以其它自然数表示处于连接状态的管径值,可以将管线连接关系和管径有机结合起来,和双重编码相比,不仅节省了计算机内存,也同样实现了对管网布置形式及管径的同步优化,从而进一步减小了管网年折算费用。

(2) 和遗传算法相比,粒子群算法省去了“交叉”和“变异”等操作,更容易实现,且它比遗传算法更快的收敛于最优解,实例表明,其进化效率和遗传算法相比几乎提高了一倍。

(3) 在进化过程中对不可行解进行了修补处理使其满足树状管网的必要条件,提高了优化效率。

参考文献:

[1] 杨建军,战红,丁玉成. 基于圈的单水源树状管网优化改进遗传算法[J]. 排灌机械工程学报, 2010,28(2): 164-168.

[2] 王烜,段常贵. 改进遗传算法在燃气管网布局优化中的

应用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006,38(1):46-48.

[3] 骆力明,王华,王炎. 基于单亲遗传算法的管网优化[J]. 计算机应用与软件, 2008,25(6):68-70.

[4] KaduM S, GuptaR, Bhav P R. Optimal design of water networks using a modified genetic algorithm with reduction in search space[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2008,134(2):147-160.

[5] Andrea Bolognesi, Cristiana Bragalli, Angela Marchi et al. Genetic heritage evolution by stochastic transmission in the optimal design of water distribution networks[J]. Advances in Engineering Software, 2010,41:792-801.

[6] Lina Perelman, Ariel Krapivka, Avi Ostfeld. Single and multi-objective optimal design of water distribution systems: application to the case study of the Hanoi system[J]. Water Science & Technology: Water Supply - WSTWS, 2009,9(4):395-404.

[7] Chien-Wei Chu, Min-Der Lin, Gee-Fon Liu et al. Application of immune algorithms on solving minimum cost problem of water distribution network[J]. Athemtical and Computer Modelling, 2008,48:1888-1900.

[8] Eberhart R C, Shi Y. Comparing inertia weights and constriction factors in particle swarm optimization[C] // Proceedings of the 2000 Congress on Evolutionary Computation. Piscataway NJ: IEEE Service Center, 2000:84-88.

[9] 高尚,杨静宇. 群智能算法及其应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2006.

[10] 徐良,刘威,李杰. 基于微粒群算法的供水管网抗震优化设计[J]. 防灾减灾工程学报,2010,30(3):269-273.