第25卷第6期 水资源与水工程学报 Vol. 25 No. 6
2014年 12月 Journal of Water Resources & Water Engineering Dec., 2014

DOI:10.11705/j. issn. 1672 - 643X. 2014. 06. 048

树状给水管网布置形式优化设计

许文斌[1]，王 颖[2]

（1. 南昌市城市规划设计研究总院，南昌 330038；2. 重庆大学 城市建设与环境工程学院，重庆 400045）

摘 要：以管网年费用折算值作为管段的权值建立目标函数，以基于破圈法及 Mayeda-Seshu 算法的列队竞争算法作为求解方法，用于进行树状给水管网系统的优化，并将该方法用于实例研究。结果表明：该算法既可以完全避免以往各种优化算法在进化过程中产生不可行解的弊端，又继承了普通列队竞争算法寻优速度快的优点，使得算法的计算效率显著提高，计算结果的准确性也得以保证。该优化算法的提出对树状给水管网布置形式优化设计具有重要意义。

关键词：树状给水管网；优化设计；破圈法；Mayeda-Seshu 算法；列队竞争算法

中图分类号:TU991.31 **文献标识码**：A **文章编号**：1672-643X(2014)06-0226-05

Optimization design of layout form for tree water pipe network

XU Wenbin[1]，WANG Ying[2]

(1. *Nanchang Urban Planning and Design Institute*, *Nanchang* 330038, *China*;
2. *College of Urban Construction and Environment Engineering*, *Chongqing University*, *Chongqing* 400045, *China*)

Abstract: Taking network conversion value of annual cost as the weight of pipe segment to establish objective function, and using the method of line-up competition which based on breaking circle and Mayeda-Seshu algorithm as solving method, the paper used this new method to optimize tree water pipe network and applied it in a case study. The result showed that the algorithm can not only completely avoid the drawbacks of producing infeasible solution in the evolutionary process by conventional optimization algorithm, but also inherit the advantages of line-up competition algorithm. The method can improve the efficiency of the algorithm significantly and ensure the accuracy of calculation results. The optimization algorithm the paper proposed has great significance for the optimization design of layout form of tree water pipe network.

Key words: tree water pipe network; optimization design; method of breaking circle; Mayeda-Seshu algorithm; line-up competition algorithm;

管径组合的优化设计应当建立在最优管网定线的基础上。然而现有优化设计方法大部分都是在经验定线基础上进行的，这在一定程度上影响了整个给水管网最优化设计。基于此，众多国内学者对管网布置形式优化方法进行了研究：陈胜兵等[1]建立了排水管网的双向网络图模型，并利用改进的 Dijkstra 算法，找到了各点至给定节点的最优路线；王烜等[2]以树状燃气管网为研究对象，以管线总长度最短为优化目标建立了数学模型，并由此设计了基于遗传思想的燃气管网优化布局。但这些方法都只是简单的将管网投资看作是管道长度的线性函数，实质上求得的只是管网的最短路径，并没有考虑管段流量及水泵扬程等因素的影响。

为了克服上述问题，潘永昌等[3]以管网投资最小作为优化目标，利用蚁群算法进行了配水树状管网优化布置，该方法比最短路径法更具有优越性，但该算法的稳定性不能保证。付玉娟等[4]基于树状给水管网的特点，提出了用列队竞争算法对管网投资模型进行求解。结果表明，该方法有较高的搜索效率和稳定性。但由于该方法在运行过程中会产生不可行解，从而使得搜索效率降低。杨建军等[5]提出了用二进制编码遗传算法对模型进行求解。在遗传算法产生初始解、交叉和变异过程中，设计了基于圈的实现方法，减少了不可行解的产生，但该方法由

收稿日期:2014-10-13； **修回日期**:2014-11-30
作者简介:许文斌(1987-)，男，江西乐平人，硕士，工程师，主要从事给排水研究与设计工作。

于在每次交叉变异过程中都要对解的可行性进行判断,进而其计算效率在一定程度上也受到了影响。

本研究以管网年费用折算值作为管段的权值,通过基于破圈法和 Mayeda - Seshu 算法的列队竞争算法寻求最优解,既可以克服单纯的以管长作为权值的弊端,又可以完全避免初始群体和变异后的新群体中有不可行解的产生。

1　目标函数的建立

管网年费用折算值为按年计的管网建造费用和管理费用之和[6],如式(1)所示:

$$W = \frac{c}{t} + M \tag{1}$$

式中:c 为初始建造费用,可按式(2)计算:

$$c = \sum (a + bD_{ij}^{\alpha}) l_{ij} \tag{2}$$

式中:a、b、α 为当地造价经验系数;D_{ij} 为第 $i-j$ 管段的直径,m;l_{ij} 为第 $i-j$ 管段的长度,m。

M 为年管理费用,包括折旧大修费用 M_1 和动力费用 M_2,分别按式(3)及式(4)计算:

$$M_1 = \frac{p}{100}(a + bD_{ij}^{\alpha}) l_{ij} \tag{3}$$

$$M_2 = 0.01 \times 8.76 \beta E \frac{\rho g Q(H_0 + \sum h_{ij})}{\eta} \tag{4}$$

式中:p 为年折旧大修费率,以管网造价的 % 计;β 为设计年限内供水能量变化系数;E 为电费,元/kWh;ρ 为水的密度(1000 kg/m^3);g 为重力加速度(取 9.8 m/s^2);Q 为进入管网总流量,L/s;H_0 为水泵静扬程,m;$\sum h_{ij}$ 为从管网起点至控制点任一条管段路径的水头损失之和,m;η 为泵站效率。

由上可知,β、E、ρ、g 和 η 在确定情况下均为常数,故 M_2 只是 Q、H_0 和 $\sum h_{ij}$ 的函数。

可令 $S = \dfrac{0.01 \times 8.76 \beta E \rho g}{\eta}$,则有:

$$M_2 = SQ(H_0 + \sum h_{ij}) \tag{5}$$

将式(2)、(3)、(4)、(5)带入(1)中,并整理得:

$$W = \left(\frac{p}{100} + \frac{1}{t}\right) \sum (a + bD_{ij}^{\alpha}) l_{ij} + SQH_0 + SQ\sum h_{ij} \tag{6}$$

根据海曾 - 威廉(A. Hazen,G. S. Williams)公式:

$$h_{ij} = \frac{10.67 \gamma q_{ij}^{1.852} l_{ij}}{C^{1.852} D_{ij}^{4.87}} \tag{7}$$

式中:l_{ij} 为第 ij 个管段长度,m;D_{ij} 为第 ij 个管段管径,m;q_{ij} 为第 ij 个管段流量,m^3/s;γ 为局部水头损失放大系数;C 为海曾 - 威廉系数,根据管材选取。

式(6)可变形为[7]:

$$W = \left(\frac{p}{100} + \frac{1}{t}\right) \sum (a + bD_{ij}^{\alpha}) l_{ij} + SQH_0 + SQ\sum \frac{10.67 \gamma q_{ij}^{1.852} l_{ij}}{C^{1.852} D_{ij}^{4.87}} \tag{8}$$

由式(8)可以看出,管网年费用折算值 W 仅仅是各管段直径 D_{ij} 的函数。由于不同的管网布置形式,其流量分配结果也不同,对应管径也会不同,为便于比较,需将 D_{ij} 表达成流量的函数,从而可以得到 W 关于流量的函数。可参考界限流量表[6],建立管径 D_{ij} 关于流量 q_{ij} 的分段函数形式:$D_{ij} = f(q_{ij})$,再将其代入式(8)得:

$$W = \left(\frac{p}{100} + \frac{1}{t}\right) \sum (a + b[f(q_{ij})]^{\alpha}) l_{ij} + SQH_0 + SQ\sum \frac{10.67 \gamma q_{ij}^{1.852} l_{ij}}{C^{1.852} [f(q_{ij})]^{4.87}} \tag{9}$$

式中:$f(q_{ij})$ 为 q_{ij} 的分段函数,可通过将界限流量表输入计算机实现自动匹配。

这样,W 便转化成了关于各管段长度 l_{ij} 和流量 q_{ij} 的函数。目标在于如何求得既满足用水要求同时又使目标函数 W 为最小的定线方案。

2　基于破圈法和 Mayeda - Seshu 算法的列队竞争算法对模型的求解

列队竞争算法[8](英文简称 LCA)同粒子群算法和遗传算法一样,也是一种群体搜索算法,也有选择、变异、竞争和繁殖等算子,该算法和遗传算法的主要区别有两点:①LCA 在进化过程中始终保持着独立并行进化的家族,并通过无性繁殖产生后代,每个家族都仅保留一个个体。②在 LCA 中有两个竞争水平,一个是纵向竞争,指的是同一家族内部的竞争,保证该家族只有一个最优秀个体得以生存,这个最优秀的个体代表这个家族;另一个是横向竞争,指的是不同家族之间的竞争,将各个家族目标函数值按大小顺序成一个列队,最优秀的家族排在列队的首位,最差的排在队列末位。LCA 的基本思想是:通过横向和纵向两个水平的竞争,使列队中的首位家族不断地被其他家族更优秀的个体所取代,实现快速地向最优解逼近。为使每个家族有同等的机会到达列队的首位,文献[8]提出了一个相对竞争推动力的概念,即某时刻某家族在列队中的地位与首位家族的地位之差。不难理解,竞争推动力可作为促使个体变异的动力,是改变自身状况具有赶上或

超过它前面家族的一种潜在力量,对于组合优化问题,可以表达为变异次数或在搜索空间中迁移的距离。以下是求解组合优化问题算法的步骤:

(1)在搜索空间随机产生 m 个个体,分别代表 m 个家族,组成初始群体,并计算每个个体所对应的目标函数值;

(2)根据目标函数值的大小,对该 m 个个体进行排序(求最小值时,按由小到大的顺序排列,反之,则按由大到小的顺序排列);

(3)每个个体根据其在列队中的位置确定其变异次数,处于首位的个体变异次数最小,处于最末位的个体变异次数最大;

(4)每个个体在各自的搜索空间内通过无性繁殖产生 n 个均匀分散的子代个体,所有子代个体与其父代一起进行竞争,并将最优秀的个体保留下来,代表它的家族,参加下次横向竞争;

(5)转到步骤(2)。终止条件:直到搜索空间压缩到预先给定的值。

2.1 算法的设计及实现

以树状给水管网作为研究对象,将所有可能的连接路径汇集起来,就构成了管网初步连接图,可采用 $G=(U,V)$ 表达,其中:$U=\{u_1,u_2,u_3,\cdots,u_n\}$ 表示所有顶点的集合,$V=\{v_1,v_2,v_3,\cdots,v_m\}$,表示所有边的集合。该图为包含多个圈的连通图。

根据图论可知,单水源树状管网的管网布置形式的优化,实质上就是在管网初步连接图的基础上寻找一颗最优的生成树。在采用列队竞争算法对模型求解之前,先介绍一下割集的概念及两种构造生成树的方法:破圈法[9]和 Mayeda - Seshu 算法[10]。

(1)割集:设图 $G(U,V)$ 是连通图,$S\subseteq V$,若从图 G 中消去属于 S 所有边,则图不连通,但消去属于 S 的任何真子集的边,结果保持连通,则称 S 是 G 的一个割集。

(2)破圈法:是从 G(管网初步连接图)中任取一个圈,去掉该圈中的一条边,然后再取一个圈,再去掉这个圈中的一条边,去边过程中始终保持子图的连通。如此继续下去,最后得到的一个无圈子图就是 G 的一颗生成树。

(3)Mayeda - Seshu 算法的基本原理是:对于 G(管网初步连接图)的一棵树 t_1,t_1 的每根树枝 v,均对应一割集 $S_v(t_1)$;用 $S_v(t_1)$ 中的每一根余树枝取代 v_i 边,这样就可以得到一组互不相同的树,即:

$$T^v=\{t\mid t=t_1\oplus\{v,v_i\},v_i\in S_v(t_1),\ v_i\neq v\} \tag{10}$$

式中:T^v 指用 $S_v(t_0)$ 中的每一根余树枝取代 v 边所构成所有树的集合,符号 $\oplus$ 表示对称差运算,即 $0\oplus 0=1\oplus 1=1,1\oplus 0=0\oplus 1=1$。

2.1.1 *编码方式* 大量研究表明:对于树状管网优化布置问题,采用二进制编码方式较为合理。本研究采用二进制编码方式:以图 G 中的所有边为编码变量,赋值0或1当字符串中某位编码值为1时,表示它所对应的边处于连接状态;值为0则表示它所对应的边处于断开状态。

2.1.2 *随机产生初始群体* 由图论可知,可采用破圈法生成初始二进制编码串。首先对管网初步连接图的所有边均赋值1;然后在没有处理过的圈中随机选择一个圈。如果该圈中没有断开的管线,则随机将该圈中的任意一个管段所对应的二进制编码变为0,如此继续下去,所产生的二进制编码均为能够保证所有节点都能供水的树状管网。按相同的方法,可以随机产生多个编码串,这样就构成了初始群体。

2.1.3 *选择与变异* 变异算子对 LCA 的收敛性影响很大,所以制定出合理的变异策略至关重要。同遗传算法相比,LCA 的变异操作是强制性的,即对排序相对靠后的家族迫使其变异,以赶超排序相对靠前的家族。首先,对父代个体依照目标函数值大小进行排序,根据它们在列队中所处的位置决定每个个体的变异次数。本文假设某个个体变异 i 次。可按如下方法实现变异操作:首先,采用深度优先遍历法(Depth - First Traversal)生成所选个体的所有管段对应的割集,然后随机断开个体中的某一个管段,依据如前所述的 Mayeda - Seshu 算法用被断开管段所对应割集中的任意一根管段取代这个管段(即被断开管段取值由1变为0,取代管段取值由0变为1),这样便重新获得了一个有效的个体(即可以保证任意节点均能有效供水的连通树状管网)。按照同样的方法操作 i 次,便可完成该个体的 i 次变异。不难理解,根据 Mayeda - Seshu 算法原理所产生的所有新个体均为可行解。

2.1.4 *算法的终止* 当最优目标函数值与次优目标函数值相对差值或绝对差值达到预先设定的值,或进化代数达到预先规定值时,算法终止。

2.2 算法逻辑图

算法逻辑图如图1。

3 应用实例

图2为某一假定的管网初步连接图,共有9个节点,除节点1为水源节点外,其它均为用水节点;

共 19 个管段,各管段长度见表 1。各节点用水量为 5 L/s,为便于计算,假设各节点地面标高一致。表 2 给出了管径值分别为 100、125、150 、200、250 mm 的 5 种管径规格的单位长度造价 [5],表中 d 为管径,c 为单位长度造价,节点最小服务水头取 10 m。

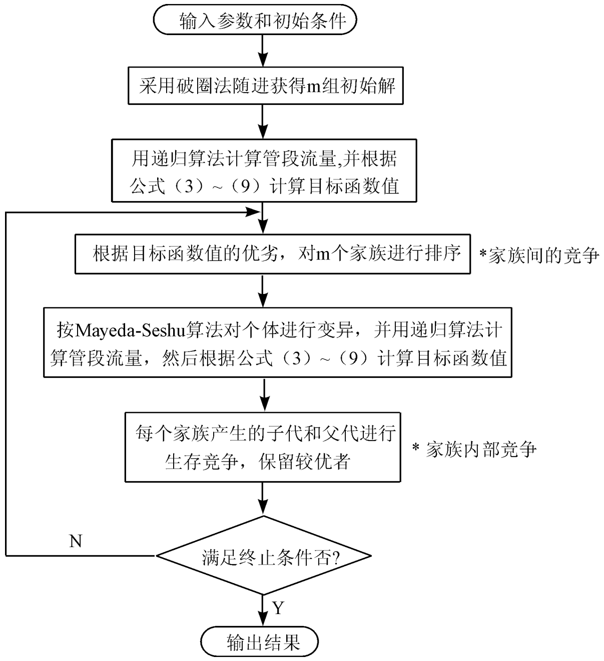

图 1　列队竞争算法逻辑图

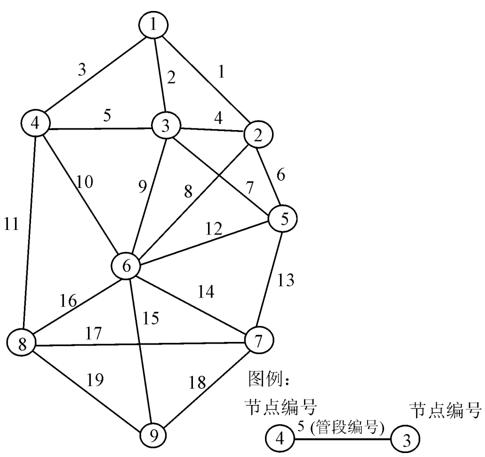

图 2　管网初步连接图

表 1　各管线长度

管段编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
l / m	1440	800	1280	1120	1440	480	1440	1600	1120	1760
管段编号	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
l/m	2080	1600	960	1280	1760	960	1760	1760	1600	

表 2　管线造价表[5]

d / mm	100	125	150	200	250
c/(元・m^{-1})	8.74	12.6	16.96	24.37	34.73

为便于下文计算,式(9)的计算参数确定如下:

$p = 2.8$, $t = 5\ a$, $\gamma = 1.1$, $S = 24.6$ 元, $H_0 = 10$ m, $C = 140$

由界限流量表可知,经济管径是管段流量的分段函数,故与经济管径对应的单位管长造价也是管段流量的函数。即:

$$c_{ij} = (a + bD_{ij}^{\alpha})l_{ij} = (a + b[f(q_{ij})]^{\alpha})l_{ij} = F(q_{ij})l_{ij} \tag{11}$$

则式(9) 变为:

$$W = \left(\frac{p}{100} + \frac{1}{t}\right)\sum[a + b(f(q_{ij}))^{\alpha}]l_{ij} + SQH_0 + SQ\sum\frac{10.67\gamma q_{ij}^{1.852}l_{ij}}{C^{1.852}[f(q_{ij})]^{4.87}} = \left(\frac{p}{100} + \frac{1}{t}\right)\sum f(q_{ij})l_{ij} + SQH_0 + SQ\sum\frac{10.67\gamma q_{ij}^{1.852}l_{ij}}{C^{1.852}[f(q_{ij})]^{4.87}} \tag{12}$$

将各参数值带入上式得:

$$W = 0.228\sum f(q_{ij})l_{ij} + 2.61\sum\frac{q_{ij}^{1.852}l_{ij}}{[f(q_{ij})]^{4.87}} + 9840 \tag{13}$$

以式(13)作为管道的权值进行计算。

为便于比较,分别采用 Dijkstra 算法、单亲遗传算法、文献[4]所述的 LCA 和本文所研究的方法对模型进行了求解。各方法计算结果见表 3 和图 3。

比较各种方法可以看出,虽然方法一的管网总长最短,但方法二、三、四年费用总和均比方法一节省很多,这说明单纯以管长作为权值,求解最优的管网布置形式是不合理的。比较方法二和方法三可以看出,两者年费用折算值相差不大,但后者进化代数和计算个体的个数远比前者低,提高了计算效率,说明 LCA 比单亲遗传算法具有更快的寻优速度。比较方法三和方法四可以看出,两者最后获得相同的布置形式,但方法三共搜索和评价了 7 000 多个个体,却只计算了 2 520 个个体,而方法四搜索、评价和计算的个体数均为 2 850(即计算个体数占搜索个体数 100%),其计算效率更高,搜索时间更短。这是因为,方法三所用的算法每次变异都有可能产生不连通的管网图形,也就是说会产生无效的子代个体,这就需要父代重新变异获得新的子代个体,直到管网连通。很显然,这会导致之前所产生的所有子代个体被浪费。而方法四采用改进的 LCA 则可以保证每次变异产生的子代个体均为可行解。

表 3 各方法计算结果

优化算法	群体规模	进化代数	搜索和评价的个体总数	计算(有效)个体总数	管网总长/m	年折算费用总和/元
Dijkstra 算法					8800	70592
单亲遗传算法[11]	30	300	9000	6000	9120	67203
文献[4]所述的列队竞争算法	30	184	7000	2520	9760	67649
基于破圈法和 Mayeda – Seshu 算法的列队竞争算法	30	95	2850	2850	9760	67649

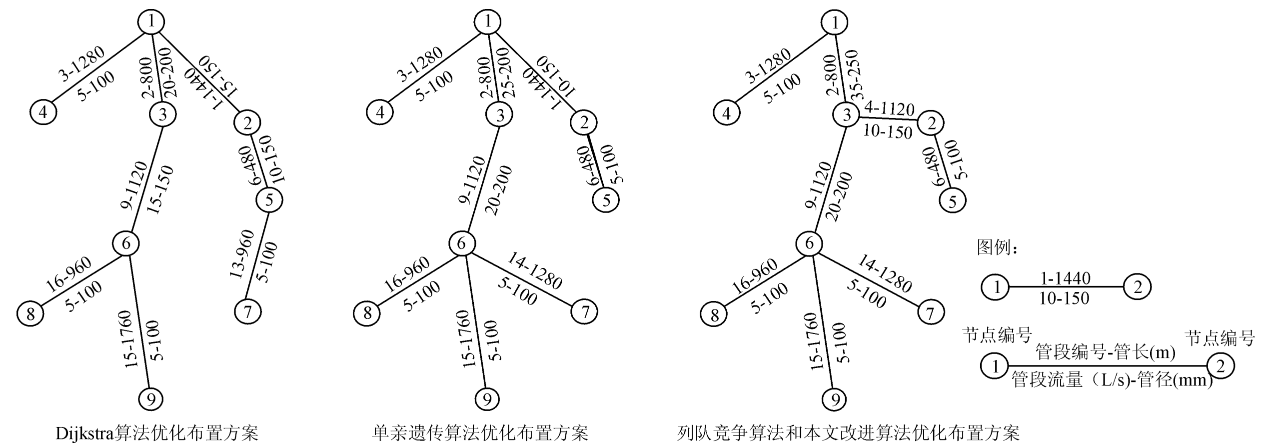

图 3 管网优化布置结果图

4 结 语

文章以管网年费用折算值作为管段的权值建立目标函数,以基于破圈法及 Mayeda – Seshu 算法的列队竞争算法作为求解方法,对树状给水管网系统的优化设计进行了研究,并得到以下结论:

(1)树状给水管网布置形式的优化不能单纯的以管长作为权值建立目标函数,而应以经济性指标作为管段权值,这样才更为合理;

(2)由于列队竞争算法的强迫变异机制,该算法的寻优速度与遗传算法相比较快;更加适用于管网布置形式的优化;

(3)采用破圈法获得初始群体,采用 Mayeda – Seshu 算法来实现变异操作,一方面可以保证初始解均为可行解,另一方面可以避免在变异过程中产生不可行解,克服了以往各种算法产生无效解的问题。

文章提出的以管网年费用折算值作为管段的权值建立目标函数,以基于破圈法及 Mayeda – Seshu 算法的列队竞争算法作为求解方法,对树状给水管网系统进行优化设计研究,为树状给水管网系统优化设计提供了一种新的有效的方法和途径,也为其它管网系统优化设计提供了一定参考,对降低整个管网的工程投资,节约资源具有重大意义。

参考文献:

[1] 陈胜兵,娄金生. 排水管网平面布置的优化[J]. 工业用水与废水,2005,36(6):47 – 49.
[2] 王烜,段常贵,于碧涌. 基于遗传算法的枝状燃气管网布局优化[J]. 煤气与热力,2005,25(4):1 – 4.
[3] 潘永昌,王 军. 基于蚁群算法的配水树状管网优化布置[J]. 安徽建筑工业学院学报(自然科学版),2007,15(6):28 – 31.
[4] 付玉娟,蔡焕杰,张旭东,等. 基于列队竞争算法的变权值树状管网优化布置[J]. 水利学报,2008,39(12):1321 – 1326 + 1333.
[5] 杨建军,丁玉成. 基于生成树和遗传算法的树状管网布置优化[J]. 节水灌溉,2010(1):51 – 53.
[6] 严煦世,刘遂庆. 给水排水管网系统[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2008.
[7] 张世泽,袁一星,李玉华. 城市供水管网优化设计两步法[J]. 哈尔滨工业大学学报,2009,41(4):111 – 117.
[8] Yang Liexiang, Ma Dexian. Global optimization of non-convex nonlinear programs using line-up competition algorithm [J]. Computers and Chemical Engineering, 2001, 25:1601 – 1610.
[9] 王朝瑞. 图论[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2001.
[10] 卢开澄,卢华明. 图论及其应用[M]. 北京:清华大学出版社,1995.
[11] 周荣敏,林性粹. 应用单亲遗传算法进行树状管网优化布置[J]. 水利学报, 2001,32(6):14 – 18.