

# 遗传算法在管网优化设计中的应用<sup>\*</sup>

朱家松<sup>1</sup> 龚健雅<sup>1</sup> 郑 皓<sup>2</sup>

(1 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

(2 武汉大学城市建设学院, 武汉市东湖南路 8 号, 430072)

**摘 要:** 介绍了一种较新的工程优化算法——遗传算法, 将其引入管网优化设计计算, 增强了管网设计方案的经济合理性。

**关键词:** 最优化; 遗传算法; 管网 GIS

**中图法分类号:** P208

城市的给水管网是城市市政工程的重要组成部分, 给水管网的建设投资占整个供水系统投资的 70%~80%。由于管网设计的复杂性, 传统的设计方法主要依据经验, 缺乏合理性。给水管网的管径设计优化问题作为管网优化的一个重要方面, 一直是研究的热点。随着系统工程、最优化理论不断发展, 很多新的优化方法和算法不断被引入管网优化设计中。20 世纪 50 年代前苏联将拉格朗日条件极值理论应用到给水管网的技术经济计算中, 穷举法应用在小型管网搜索全局最优管径组合法以及基于非线性规划的广义简约梯度法中。这些方法的引入在某些程度上取得了一定的效果, 但也都有其局限性。遗传算法就是在近年来人工智能算法迅猛发展并广泛应用于各行业的背景之下被引入管网优化设计领域的。

## 1 遗传算法原理及用于管网优化计算的特点

遗传算法是一种模拟生物学中基因遗传和自然选择而提出的并行随机优化算法。在遗传算法中, 先建立工程优化问题的数学模型, 将问题的所有决策变量编码, 称为一个基因。多个基因形成一个有限长的编码串, 称为染色体。其对应的表现型即个体, 都对应于优化问题的一个可行解, 一组个体组成一代种群。优化问题的目标函数作为种群所处的环境, 可以得出每个个体对环境的适

应度, 由适应度决定该个体生存的概率。搜索时先随机产生一定数量的原始种群, 从这些种群开始, 模拟进化过程。按每个个体的适应度依概率进行优胜劣汰, 从而使适应度高的个体生存下来。再利用交换、变异等遗传手段, 使这些种群的优良特性得以遗传并保留到下一代。如此“选择—交换—变异—再选择”循环往复, 使各代的优良基因成分逐渐积累, 种群的平均适应度和最优个体适应度不断上升, 直到迭代过程趋于收敛, 从而求得一组最优种群。其用于管网优化计算的特点如下。

1) 遗传算法只需要适应度信息, 不需要导数等其他辅助信息, 对问题的依赖性较小, 能够得到一组直接以市场规模管径表示的满足要求的优化解, 更能适应管网计算要求。

2) 在搜索中用到的是随机的变换规则, 同时它在一定的约束条件下采用启发式搜索, 而不是盲目的穷举, 因而兼顾了搜索的广度和方向性, 搜索效率高。

3) 遗传算法从一组初始点开始搜索, 而且给出的是一组而不是一个优化解, 这一方面增加了全局寻优的能力, 另一方面也给设计者更大的选择余地。

4) 由于供水运行工况环境的变化而造成目标函数变化, 对大多数依赖目标函数的其他优化算法就可能完全不能适用了, 而遗传算法由于不依赖于目标函数, 所以具有很强的鲁棒性, 只需要作很小的修改就可以适应新的情况。

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2003-04-12。

## 2 遗传算法在管网优化设计中的应用

### 2.1 数学模型

现行的管网设计可分为定线、选取管径、水力平差、提交结果及评测四个基本步骤。其中管网定线是根据规划部门规划的道路走向和供水区位置联合确定的。管网设计单位按此定线结果,考

$$W(D_1, D_2, \dots, D_n) = \left[ \frac{F}{100} + \frac{i(1+i)^t}{(1+i)^t - 1} \right] \sum_{i=1}^n (a + bD_i^\alpha) l_i + 0.01 \times 8.76 \beta E \rho g \frac{QH_p}{\eta}$$

式中,  $F$  为每年扣除的折旧和大修费;  $i$  为利率;  $t$  为投资回收年限;  $a$ 、 $b$ 、 $\alpha$  为管网造价系数;  $D_i$  为管径;  $l_i$  为管段长度;  $\beta$  为供水能量变化系数;  $E$  为电费;  $\rho$  为水的密度;  $g$  为重力加速度;  $Q$  为输入管网的总流量;  $H_p$  为二级泵站扬程;  $\eta$  为泵站效率。

可以看出, 式中除了  $a$ 、 $b$  等一系列常系数外,  $l_i$  定线时已经确定,  $H_p$  和  $\eta$  是根据提交管径后水力计算的结果确定的。因此, 管网优化实际是求一个拓扑结构已定(管网走向和各段管长已定)的网络结构各管段管径的最优组合, 使得目标函数值最小的最优化问题。考虑到市面上可用管径的规格化和管网水力计算本身的特点, 它又是

$$F(D_1, D_2, \dots, D_n) = \frac{1}{\left[ \frac{F}{100} + \frac{i(1+i)^t}{(1+i)^t - 1} \right] \sum_{i=1}^n (a + bD_i^\alpha) l_i + 0.01 \times 8.76 \beta E \rho g \frac{QH_p}{\eta} + P_f \sum_{i=1}^n \phi_i(P)}$$

### 2.2 遗传算法在管网优化设计中的实现

基于以上原理, 笔者编制了作为管网 GS 优

虑用水量要求和供水安全性要求, 利用经验选择管径, 再按照管网流量平衡和能量平衡的原则进行水力平差计算, 依据平差结果进行管网经济核算。

从以上过程可以看出, 管网定线早在设计初期就已经基本确定, 而后期的水力平差和经济核算部分又依赖于按照经验选取管径所得的结果。事实上, 整个管网设计在经济上合理与否, 主要取决于所选管径的组合方式。以下为目前主要使用的一个管网经济目标函数:

一个多元非线性离散型函数的组合求优问题。

除了能量平衡和流量平衡已通过水力计算部分纳入目标函数之外, 上述经济目标函数还应满足最小允许流速、最小服务水头等约束条件, 以罚函数形式纳入目标函数中:

$$W(D_1, D_2, \dots, D_n) + P_f \sum_{i=1}^n \phi_i(P)$$

其中,  $P$  为各个约束变量;  $P_f$  为惩罚因子, 其功能是根据情况放大或缩小惩罚函数的值, 以避免惩罚项与造价项的量级不匹配。考虑到在实际应用中方便计算适应度, 将上式取倒数得适应度的评价函数为:

化设计功能的流程图(图 1)和实现的子程序。

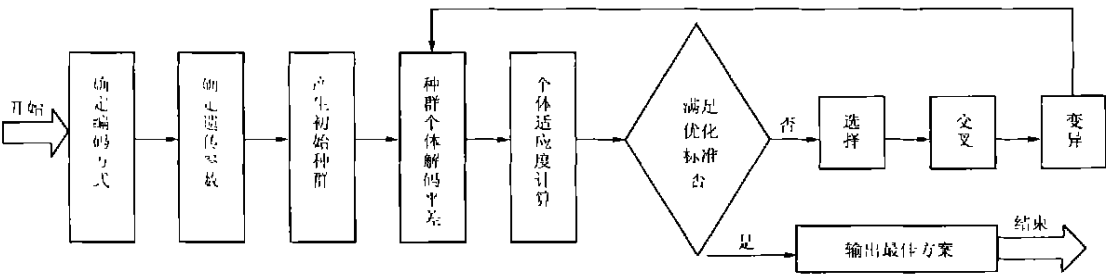


图 1 管网优化设计中的遗传算法实现流程

Fig. 1 GA's Application to Water Distribution Optimal Design

1)编码。考虑到计算机处理的方便性, 常用二进制编码与市面可用管径一一对应。如果市面可用管径有 8 种, 则用三位二进制码可以将其表示为一个基因型。每一组管网设计的管径组合对应着一组基因型的组合, 即一个染色体。多个带有染色体的个体就组成一个种群。

2)产生初始群体。随机产生  $N$  个个体形成初始种群, 由这多个初始点开始进行进化计算, 种群个数  $N$  取得过小, 采样点不够, 则遗传算法可能退化为随机搜索; 如果  $N$  取得过大, 则会加大计算量, 而且对计算效果意义不大。现有办法是通过试验寻求最佳  $N$  值。

3) 计算适应度及评价。将种群中的每个个体进行解码, 还原出相应管网的管径信息, 调用水力计算模块进行管网平差计算, 将结果带入适应度的评价函数求出每个个体的适应度  $F_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 。  $F_i$  越大说明对应个体的适应度越大, 在目标函数所定义的环境中生存的几率越大。

4) 选择。计算完适应度后, 按一定比例  $P_s$  (常取 70% ~ 80%) 从群体中选出部分个体生存并作为双亲繁殖后代。现常用的选择方法有轮盘赌法、截断选择法、随机遍历抽样法、锦标赛选择法等。本程序采用锦标赛选择法, 随机在种群中选择 3 个个体, 将适应度最好的个体选作父个体。

5) 交叉。按交叉概率  $P_c$  选中  $P_c N/2$  对个体作为双亲, 随机选择染色体的某一位置, 将双亲的基因编码再次进行交换, 产生新的个体。例如,

双亲:        010110100100111 | 011011  
100111110101101 | 110001  
后代:        010110100100111 | 110001  
100111110101101 | 011011

考虑到市面可用管径的规格, 此处断点的位置选择时应为编码位数的整数倍。通过交叉操作, 遗传算法的搜索能力迅速提高, 交叉操作是遗传算法获取新优良个体最重要的手段。

6) 变异。即按一定小比例  $P_m$  从群体中随机选取  $P_m N$  个个体, 再随机对个体中的一位进行取反运算, 从而产生新的个体。例如,

个体变异前:    010110100100111011011  
个体变异后:    010110100100101011011  
变异本身是一种随机搜索, 与选择/交叉算子结合在一起, 保证了遗传算法的有效性, 防止出现非成熟收敛, 从而维持了群体的多样性, 增强了遗传算法的全局求优能力。

3 算例分析及结论

某城市新建小区由新区泵站供水, 地面相对标高均按 0.00 计算。设计日用水量  $47\ 091\text{m}^3/\text{d}$ , 最高时用水量按最高日用水量的 6% 计, 即  $784.96\text{L/s}$ 。本文仅选取主干管网的单水源供水情况计算说明, 其中小区管网布置及各节点流量如图 2, 要求最小服务水头为 20m。

传统经验方法得出供水方案一如图 3 所示。图中 [25]、[26] 号管段由于流量分配已定, 为减少计算量, 不参加遗传运算, 按经济流速选取管径为 DN 600。在确定费用目标函数各参数后, 可进一步选取如下遗传参数: 种群个数  $N = 200$ , 遗传代数  $G = 100$ , 交换概率  $P_c = 55\%$ , 变异概率  $P_m = 0.1\%$ 。经过 100 次迭代求出最优个体: 0111011100100100101110100111010010101011010010101000001001010000000001。相应的管段分配和水力情况如图 4。

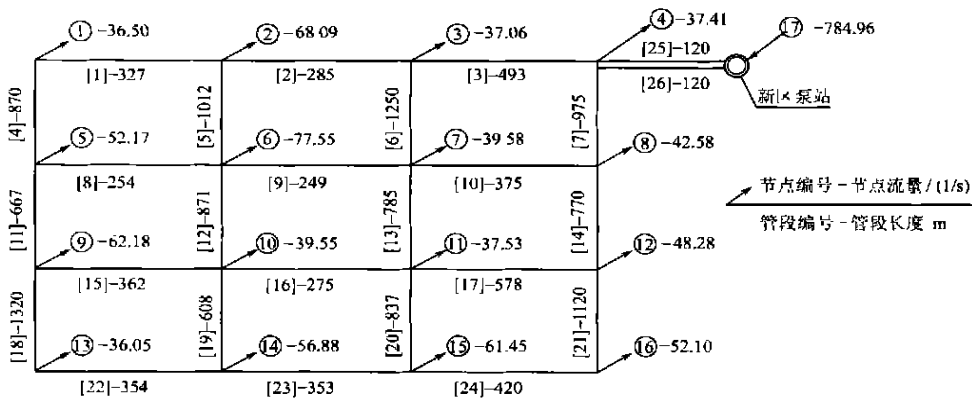


图 2 小区管网布置及各节点流量分配

Fig. 2 Water Supply Demand of a Residence Region

评价以上两种供水方案, 方案一的管网总费用年折算值为 952 344. 74 元, 方案二的管网总费用年折算值为 830 243. 70 元, 比方案一少了 12. 82%, 充分体现了遗传算法的寻优能力。通过合理的管径方案, 本文方案在没有过多增加水源节点所需扬程的同时, 有效降低了管网的建设费

用, 从而使管网的总费用得以优化。在实际工程中单一采用遗传算法作为优化手段是不够的, 笔者通过对较复杂管网进行算例分析后发现, 这样优化得到的管网方案主要流向形成了供水管网的枝状优化树, 其他位置往往都是由满足约束条件的临界管径联接成环。管网优化设计的目标

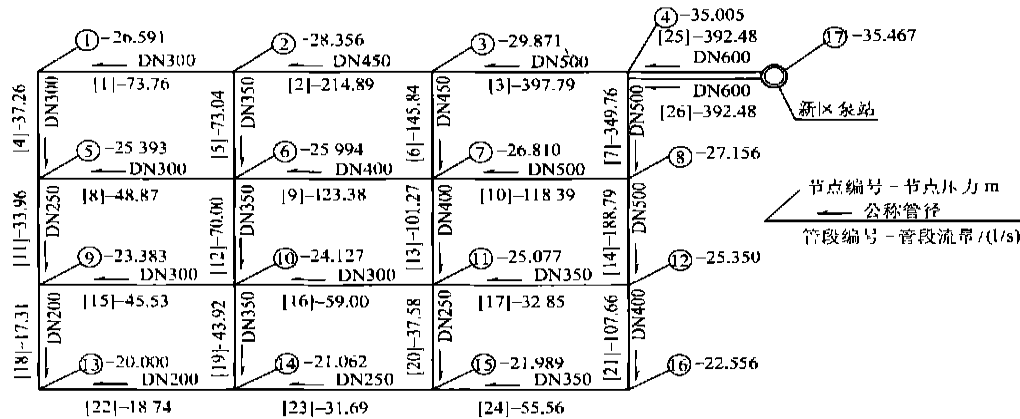


图3 传统经验方法得出小区供水方案

Fig. 3 Traditional Water Supply Scheme

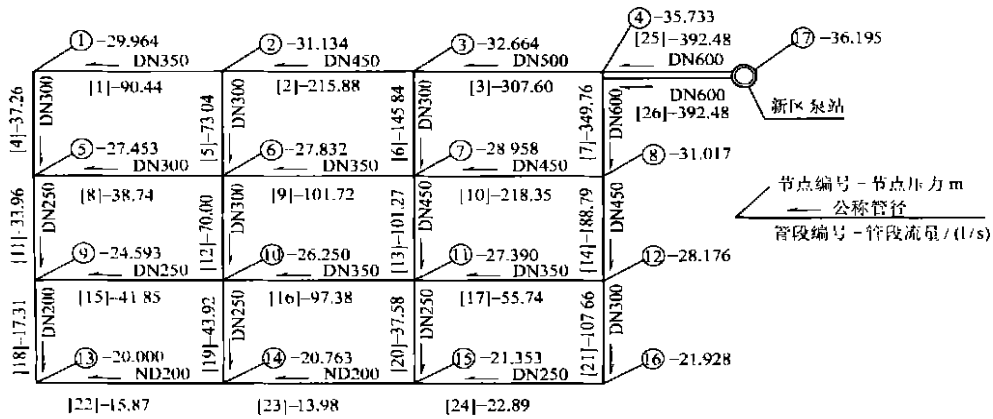


图4 通过遗传算法优化设计的小区供水方案

Fig. 4 Water Supply Scheme Obtained by GA

应当是经济性、可靠性和供水水质安全性的全面优化。但是由于水质安全性不易量化, 管网运行正常时和故障时用水量会发生变化, 以及管网拓扑结构的复杂性, 使得至今还没有成熟的理论来分析管网的安全性, 因而也无法将可靠性因素很好地量化以纳入适应度函数中。现在常用的方法是以经济性为目标函数, 而将其他因素作为约束条件, 据此建立适应度函数, 来评价个体的适应度, 这样处理的结果使得最终方案在供水安全性上不够完善。事实上, 现有很多研究成果表明, 对环状管网来说, 流量优化分配是个凹规划问题, 即它的最优解往往出现在约束区域的边界上。如果没有与供水水质和供水安全性相关的下限约束条件, 则优化的结果会使某些管段的流量为零, 成为树状网。应当依据工程实际情况对遗传算法获取的优化结果加以修正。例如在实际管网的运行维护中, 管线故障概率是与敷设所在地的道路等级及当地用水情况等密切相关的, 如能结合 GIS 的

地物属性关系, 合理确定相应干管的事故转输流量, 让道路等级高的干管承载较高的供水输送任务, 对道路等级较低或将来可能改造地区采用安全性较高的设计方案, 在经济和安全上寻求一个最佳的平衡点, 才能真正达到优化设计的目的。

综上所述, 遗传算法用于管网优化设计是可行的, 可应用于城市供水管网设计, 但同时也还存在一些问题亟待研究, 如如何加快收敛的速度和效果, 如何利用管网水力计算本身的特点来确定约束条件和对成果的修正等。本文充分利用 GIS 的图文数据拓扑分析、模拟与预测的强大功能, 结合给排水专业理论及方法, 进行深度开发, 为管网设计、施工、运行优化调度以及事故抢修等提供有效决策支持, 是管网 GIS 未来进一步发展和研究的方向。

参 考 文 献

1 Quindry G E, Brill E D, Liebman J C. Optimization of

Looped Water Distribution Systems. ASCE, 1981, 107 (4): 665 ~ 679

2 Simpson R A, Dandy G C, Laurence J M. Genetic Algorithms Compared to Other Techniques for Pipe Optimization. ASCE, 1994, 120 (4): 423 ~ 443

3 Templenan A B. Discussion of Optimization of Looped Water Distribution Systems. ASCE, 1982, 108(3): 599 ~ 602

4 俞国平. 给水管网最优化设计的一个方法: [ 硕士论文]. 上海: 同济大学, 1980

5 严熙世, 赵洪滨. 给水管网理论和计算. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986

第一作者简介: 朱家松, 硕士生。现从事 GIS 在城市规划管理方面的应用研究。

E-mail: zhujiasong@hotmail.com

# Application of Genetic Algorithm to Water Distribution System Design Optimization

ZHU Jiasong<sup>1</sup> GONG Jianya<sup>1</sup> ZHENG Hao<sup>2</sup>

(1 State Key Laboratory for Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan, China, 430079)  
(2 School of Urban Studies, Wuhan University, 8 South Donghu Road, Wuhan, China, 430072)

**Abstracts:** The optimal design of water distribution network is an optimization problem of functions that depend on a series of nonlinear discrete multi-variables. Many traditional methods are not satisfactory when applied in this field. This paper introduce a relatively novel algorithm, genetic algorithm (GA), which has special advantages in tackling this problem based on its inherent characteristics. This paper gives an overall introduction of basic principles of GA and analyzes the characteristics of water distribution system optimization design. A mathematical model is put forward. Some problems on the software solutions of several key GA operators and the hydraulic computation constraint factors are discussed. Lastly this paper chooses a case study to demonstrate the feasibility of GA in this field. It makes a comparison between two water supply schemes for a residence region.

**Keywords:** optimization ; genetic algorithm (GA); pipeline network GIS

About the first author: ZHU Jiasong, postgraduate. He majors in GIS in urban planning and management.  
E-mail: zhujiasong@hotmail.com

(责任编辑: 涓涓)