

• 计算机技术 •

改进遗传算法在城市给水管网改扩建工程中的应用

王 圃¹ 龙腾锐¹ 江志贤²

(1 重庆大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045; 2 中国建筑科学研究院深圳分院, 深圳 518028)

摘要 论述了遗传算法在城市给水管网优化应用中的原理和特点, 针对传统遗传算法存在的问题提出了改进意见, 同时还介绍了改进遗传算法在四川某市给水管网改扩建工程中的应用情况。该计算方法比传统的计算方法节省管道投资, 而且因城市给水管网得到优化, 水厂二泵站的电耗也得以降低。

关键词 改进遗传算法 城市给水管网优化 改扩建工程

The application of improved genetic algorithms in urban water networks upgrading and expansion engineering

Wang Pu¹, Long Teng-rui¹, Jiang Zhi-xian²

(1. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment of Chongqing University, Ministry of Education, Chongqing 400045, China;

2. China Academy of Building Research Shenzhen Branch, Shenzhen 518028, China)

Abstract: It is described the principles and characteristics of the application of genetic algorithms in the optimization of urban water networks. In view of the existing problems of the conventional genetic algorithm, it is presented suggestions for improvement and describes the performance of the improved genetic algorithm in the water networks upgrading and expansion engineering in a city. Compared with the conventional solution, the new method with optimization of the water networks that applies the improved genetic algorithm can save network cost. Power consumption is decreased in the secondary pumping station because of the optimization of the water networks.

Keywords: Improved genetic algorithm; Optimization of urban water networks; Water networks upgrading and expansion engineering

遗传算法(Genetic Algorithms, GA)是 John H. Holland 根据生物进化的模型提出的一种优化方法。该算法在计算机上模拟生物的进化过程和基因操作, 它不要求对象的搜索空间是连续可微的, 并具有全局寻优的能力。本文对遗传算法的基本原理和基本操作以及应用遗传算法进行城市给水管网改扩建工程优化设计的具体过程进行介绍和说明, 对传统遗传算法的性能进行改进, 最后介绍改进遗传算法在四川某市给水管网改扩建工程中的应用情况。

1 遗传算法在城市给水管网优化中的应用

建设部 2001 年科技项目(2001-45)。

遗传算法通常是用一串数据或数组作为优化问题解决方案的代码, 这一串数据或数组称为个体。遗传算法的求解过程首先随机产生一定数量的个体形成一个种群, 通过一个与目标函数相关的函数值(称为适配值)评价各个体的优劣性。再根据适配值的大小进行复制操作。个体被选择进行复制的概率与适配值成正比。复制后的个体进行交叉及变异操作, 以保持种群中个体基因的多样性, 防止陷入局部最优解。接着对新产生的种群再进行复制、交叉、变异操作, 如此迭代一定的次数后, 产生最优个体, 即最优方案^[1]。

1.1 管径编码及管网布置方案的表示

应用遗传算法解决管网优化问题需要把求解变量表示为一串数据和数组,这个过程称为编码。本文采用二进制数来表示优化问题的解。由于管网优化问题的求解变量一般为管径,因此必须对每一个优化过程中可能出现的标准管径分配一个二进制字符串。就以城市给水管网为例,考虑到室外消防用水和事故时传输流量的要求,城市给水主干管管径一般为 0.3 m, 0.4 m, ..., 1.0 m 这 8 种规格。因此可以根据这 8 种管径的编号进行二进制编码(见表 1)。管径编码后,给水管网的布置方案就可以表示为按照管段编号顺序排列的二进制字符串。

表 1 城市给水管网常用管径的编码

管径规格/m	十进制编号	二进制编码
0.3	0	000
0.4	1	001
0.5	2	010
0.6	3	011
0.7	4	100
0.8	5	101
0.9	6	110
1.0	7	111

1.2 初始种群的产生

优化算法中二进制字符串的长度取决于给水管网的管段数,就以表 1 中的管径编码,假如管网的管段数为 13,则所需的二进制字符串数为 $13 \times 3 = 39$ 。通过多次调用随机产生二进制数的算子,获得 39 位的字符串,产生初始的管网布置方案,即初始个体。多个初始个体形成初始种群。

1.3 适配值的计算

给水管网优化计算中的适配值 f 必须反映管网每年的建造和维护费用及年运行费用大小,同时应该做到费用越低则方案的适配值越大,这样才能达到管网优化的目的。按照这个要求,将适配值取为与费用评价函数 W' 的倒数成正比,即: $f = 1/W'$ 。

1.4 水力约束条件以及边界约束条件的满足

给水管网优化结果必须满足水力约束条件以及边界约束条件。算法中水力约束条件可以通过调用给水管网水力计算算子得到满足。而边界约束条件的满足是通过引入最优化算法中的惩罚因子来实现的。当水力参数不满足边界约束条件时,通过在管

网优化目标函数的基础上引入惩罚因子,使得不能满足边界约束条件方案的费用值变得极大(即适配值极小),失去了与其他满足边界约束条件方案进行竞争的能力而被淘汰。费用评价函数可表示为:

$$W' = W + P_1 \times |H - H_{\min}| + P_2 \times |H_{\max} - \bar{H}| + P_3 \times |v_{\max} - \bar{v}| \quad (1)$$

式中 W' ——费用评价函数,元;

W ——给水管网优化目标值,元;

\bar{H}, H ——允许自由水头的上、下限, m;

\bar{v} ——允许的水流速度上限, m/s;

P_1, P_2, P_3 为惩罚因子。

1.5 复制

复制操作可以以多种算法的形式实现。较为简单的方法是使用与轮盘赌的转盘相似的一种算法。转盘上的比例对应于适配值的大小。适配值大的位串占用的比例大,在每次转动转盘时,它被选择的几率就比较大。这样位串的适配值越高,在其下一代中产生的后代就越多。随着种群的进化,其总体性能得到不断的优化。

1.6 交叉

传统的交叉操作分为两步实现。在由等待配对的位串构成的匹配池中,第一步是将新复制产生位串个体随机两两配对;第二步是按照一定的交叉概率,随机地选择交叉点,对匹配的位串进行交叉繁殖,产生一对新的位串。具体过程如下:

设位串的字符长度为 l ,在 $[1, l-1]$ 的范围内,随机地选取一个整数 k 作为交叉点。将两个配对位串从位置 k 后的所有字符进行交换,从而生成两个新的位串。例如两个初始配对个体位串为 A_1 和 A_2 其中 $A_1 = 0110|11, A_2 = 1100|01$ 。

位串的长度 $l = 6$,假定在 1 和 5 之间随机选取一个 $k(k = 4, \text{如分隔符“|”所示})$,经交叉操作后产生了两个新的字符串,即: $A'_1 = 011001, A'_2 = 110011$ 。

1.7 变异

变异是个体中某个字符发生变化。变异过程需从个体中随机选出一个个体,同时产生一个 0~1 范围内的小数,若该小数小于变异概率则进行变异操作。变异是沿着字符串空间随机移动的。当它有

节制地和交叉一起使用时,就是一种防止过度成熟而丢失重要概念的保险策略(见表2)。

表2 某一初始种群

编号	1	2	3	4
位串	011011	110010	001010	101001

在表2所示的种群中,无论怎样交叉,在位置4上都不可能得到有1的位串。若优化结果该位置是1,显然仅靠交叉是不够的,还需要有变异,即特定位置上的0和1之间的转变。

可见,变异在遗传算法中必不可少。变异操作可以起到恢复位串字符多样性的作用,并能适当地提高遗传算法的搜索效率。

2 传统遗传算法的改进

2.1 对传统遗传算法的改进

传统遗传算法复制算子、交叉算子的寻优功能随着进化迭代次数的增加而逐渐减弱,在应用中常出现早熟收敛;传统遗传算法的计算量大,全局优化速度慢;同时,传统遗传算法优化结果的精度受编码长度控制。特别是当实际问题的变量变化空间很大时,上述问题就更加突出^[2]。

为了改进遗传算法以上的不足之处,有必要对其进行改进。具体的改进措施在于以下几个方面:

(1)对适配值的改进。为了增加评价函数对适配值的影响力度,将适配值的计算改为 $f_i = 1/W^2$ 。这样各个体间适配值的差异变大了,算法中的择优操作变得更加简单,种群优化速度变快。

(2)保护最优个体。根据传统遗传算法的原理,通过复制、交叉和变异所产生的新一代群体,其平均适配值应该比上一代要高。可是由于计算中的随机性,就个体而言,新一代中的个体并不都比上一代的最优个体好。因此,改进后的做法是把新一代中的最差个体替换成上代中的最优个体。这样一代一代地重复下去,不但各代的平均适配值逐步提高,其最优个体的适配值也保持攀升的状态,加速了收敛过程。

(3)两点交叉与两点变异。交叉和变异有利于增强种群的多样性。传统遗传算法采用的是单点交叉与变异,虽然对于增强种群多样性有一定的作用,但其作用强度不大,新个体产生速度较慢。目前普遍认为两点交叉方式优于单点交叉方式,同时两点变异与单点变异相比更有利于种群的多样性。两点

交叉与两点变异的操作可以表示为:

$$\begin{array}{l} \text{两点交叉:} \\ A_1 = 01|10|11 \\ A_2 = 11|00|01 \end{array} \Rightarrow \begin{array}{l} A'_1 = 11|10|01 \\ A'_2 = 01|00|11 \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \text{两点变异:} \\ A = 011011 \\ A = 010001 \end{array}$$

需要说明的是本文中变异操作与传统遗传算法不同,它针对的不是随机个体中的每个字符,而是以变异概率随机选择变异个体,再随机选出两点进行变异。这样使变异集中到一部分个体上,促进了新个体的出现,有利于最优个体的产生。

2.2 程序框图

笔者根据改进遗传算法的原理,结合给水管网改扩建情况,编制了专业软件,编制程序框图见图1。

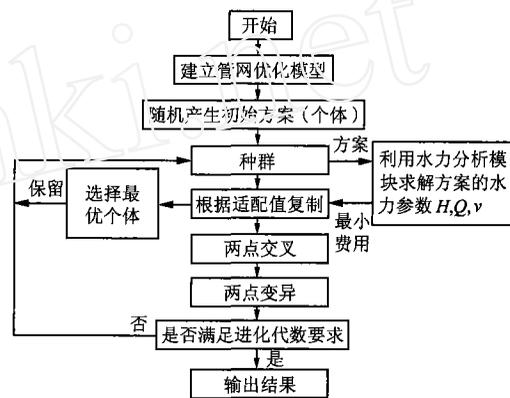


图1 程序流程图示意

3 工程应用实例

3.1 四川某市给水管网改扩建工程概况

四川某市给水管网改扩建工程设计见图2。供水服务面积 19.1 km²,服务人口 30 万人,供水由一、二水厂完成。其中一水厂 5 万 m³/d,采用重力流供水;二水厂 6 万 m³/d,采用水泵加压供水。由于两水厂向同一管网供水,管网以前未经优化计算,而且现有二水厂水泵扬程配置不合理等因素,导致管网部分地区压力偏高,部分地区压力不足,电机效率较低,能耗较大,管网漏损严重,甚至出现了二水厂的水倒压至一水厂清水池的现象,造成一水厂现有 5 万 m³/d 的供水能力无法正常发挥作用,运行成本高。笔者受供水企业的委托,并结合建设部的科研课题“山地城镇给水系统节能技术研究”(2001-45),对该城市给水管网和二泵站扬程进行优化,以

降低运行成本,提高企业效益,确保城市给水管网适应城市发展的需要。

针对该城市给水管网存在的这些问题,并考虑到该城区布局呈狭长带状,经过对现有城市用水量,管网中的水压等基础资料的分析研究得出:该市采用分片区供水方式是比较经济合理的,即一水厂向南部的城南工业园区、旧城部分地区以及仁里镇部分地区供水;二水厂主要向中部的旧城部分地区以及通过拟建涪江三桥上的过江管道向江东部分地区供水。在对管网系统分片区的同时,考虑到城市供水的可靠性,一水厂供水片区与二水厂供水片区之间用闸阀相连(见图2)。平常闸阀关闭,当某一个水厂发生事故时打开闸阀,由另一个水厂进行联合供水。

3.2 应用结果

本文仅以二水厂供水片区管网改扩建为例(一)

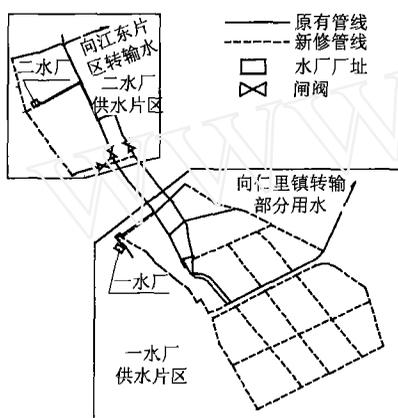
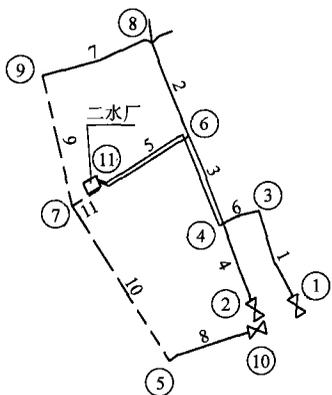


图2 四川某市给水管网改扩建示意



1~8为旧管线,9~11为新管线
图3 二水厂供水片区管网布置

水厂供水片区管网改扩建与二水厂类似,由于篇幅的限制,本文未列其计算结果)。二水厂供水片区管网布置见图3,管道造价见表3,节点流量及节点地形标高见表4,管径、管长见表5。本例中改进遗传算法参数分别为:种群规模为200;交叉概率为1.0,变异概率为0.4,根据遗传算法的基本原理,通过编制的软件,计算出城市最高日最高用水时,城市给水管管径、水压、管段流量等,详见表6和表7。

表3 管道造价

管径/mm	费用/元/m	管径/mm	费用/元/m
300	358	600	1 059
400	600	700	1 258
500	800	800	1 398

表4 节点资料

节点编号	节点流量 /L/s	地形标高 /m	节点编号	节点流量 /L/s	地形标高 /m
1	19.34	279.5	7	52.96	284.38
2	19.34	281.5	8	385.53	282.28
3	26.75	279.5	9	44.66	285.98
4	43.22	281.5	10	10.52	281.5
5	44.50	287.5	11		282.5
6	33.74	281			

注:节点11为二水厂。

表5 管段资料

管段编号	起点	终点	管径/mm	管长/m
1	1	3	600	658
2	8	6	600	588
3	6	4	800	560
4	4	2	600	658
5	6	11	800	672
6	4	3	600	252
7	9	8	300	728
8	5	10	300	560
9	7	9	待定	791
10	7	5	待定	1 120
11	11	7	待定	217

表6 水压计算结果

节点编号	节点水压标高/m	自由水头 /m	节点编号	节点水压标高/m	自由水头 /m
1	324.15	44.65	7	324.18	39.8
2	324.17	42.67	8	321.76	39.48
3	324.16	44.36	9	321.78	35.8
4	324.18	42.68	10	319.41	37.91
5	320.06	32.46	11	325.50	43
6	324.24	43.24			

注:节点11自由水头为水泵扬程。

微观模型配水系统的优化调度

俞国平¹ 刘 静^{1,2}

(1 同济大学国家污染控制与资源重点实验室, 上海 200092; 2 杭州市城乡建设设计院, 杭州 310003)

摘要 研究了包括多水源和多水库的城市配水系统的优化调度。在给出24 h用水量预报, 水库初始和最终水位, 电费价格和供水管网的水力学约束条件后, 追求能源费用最小的优化调度成为一个带非线性约束的非线性规划问题。由于该优化调度问题非线性约束很多, 维数很高, 求解时, 用一些传统的优化方法, 在计算时间和精度上达到统一的难度较大。采用广义简约梯度法对此求解, 从计算结果和计算(时间)过程来看, 都能够达到令人满意的程度。

关键词 优化调度 广义简约梯度 配水系统

城市配水系统优化调度的目标是在保证安全供水的条件下, 最大限度地降低运行电耗。由于用水量变化的周期性, 配水系统的调度一般以 24 h 为周期, 用水量和电费价格随时间变化, 因此调度是一个动态的优化问题。

配水系统优化调度的困难主要表现在两个方面: ①由于管道水流阻力公式的非线性, 管网中的水

力计算需要求解一组非线性节点(回路)方程。方程数等于管网的节点数或回路数, 一般中小城市管网的节点数或回路数在 50~500 个, 一些省会大城市管网的节点数或回路数可能高达上千个, 同时优化调度的目标函数也是非线性的。数目庞大的非线性约束方程决定了优化调度的计算相当困难。②如果配水系统内没有水库, 调度周期可以划分成 24 个时

定的值较接近, 因此节能效果明显。
 (4)改进遗传算法无论是在收敛速度, 还是在计算结果方面都要优于传统算法, 采用改进遗传算法计算管径比传统计算方法节省管道总投资, 而且在实际运行中, 由于对城市管网及二泵站的扬程、运行方案进行了优化, 一年多的生产运行表明, 在满足城市用水量和水压的前提下, 二泵站的电耗比改造前降低了 20% 左右。

表 7 流量计算结果

管段编号	管径/mm	管段流量 /L/s	管段编号	管径/mm	管段流量 /L/s
1	保留原有给水管	19.34	7	保留原有给水管	6.68
2	保留原有给水管	378.85	8	保留原有给水管	10.52
3	保留原有给水管	108.65	9	300(新建)	51.3
4	保留原有给水管	19.34	10	300(新建)	56.87
5	保留原有给水管	521.26	11	400(新建)	159.32
6	保留原有给水管	46.09			

4 结论

应用改进遗传算法进行城市给水管网优化设计具有以下几个优点:

(1)从许多点开始进行操作, 而非局限于一点, 因而可以有效地防止搜索过程收敛于局部最优解。

(2)易于处理离散变量函数的优化问题, 在管网优化应用中避免了管径调整。

(3)无需对给水管网进行流量初分配及管径的初设计, 计算结果不仅包括管段流量, 还包括各个节点的水压标高及自由水头, 计算出的结果与规范规

参考文献

- 1 Savic D A, Walter G A. Genetic algorithms for least-cost design of water distribution networks. *Water Resour Plng and Mgmt.* ASCE, 1997, 123(2): 69~76
- 2 Halhal D, Walter G A, Ouazar D, Savic D A. Water networks rehabilitation with structure messy genetic algorithm. *Water Resour Plng and Mgmt.* ASCE, 1997, 123(3): 137~145

□电话:(023)65121560

E-mail:wpu2120@sina.com

收稿日期:2004-1-18