

开放式遗传算法及其在水资源优化配置中的应用

董贵明¹, 束龙仓¹, 陈南祥²

(1. 河海大学水资源环境学院, 江苏 南京 210098; 2. 华北水利水电学院岩土工程系, 河南 郑州 450008)

摘要: 在分析遗传算法求解过程中对不可行个体处理方法的基础上, 提出开放式遗传算法, 即在传统遗传算法中加入一个必要的基本过程——修正, 用来处理交叉、变异产生的不可行个体。介绍了开放式遗传算法的基本流程, 并使用两个优化模型进行算法性能测试。采用开放式遗传算法对南水北调中线河南受水区郑州市水资源进行优化配置。结果表明, 该算法能够有效地处理不可行个体。

关键词: 开放式遗传算法; 水资源优化配置; 不可行个体; 修正; 南水北调中线

中图分类号: TV213.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-198X(2007)03-0241-04

水资源优化配置模型一般是多目标、多变量、多约束、多关联、非线性的, 寻找有效的模型求解方法是必要的。遗传算法在水资源优化配置模型求解中的应用具有广阔的前景^[1-4], 但这些研究多是探讨性的, 很多问题还需进一步研究。实际优化模型中, 只有独立约束的情况是很少见的, 大部分优化模型都存在关联约束, 在这种情况下, 采用遗传算法求解时, 两个重要的遗传操作交叉和变异之后都会出现相当比例的不可行个体, 对不可行个体直接进行交叉、变异、选择显然是不合适的, 不可行个体的处理方法既影响算法的求解效果, 又影响算法的求解效率。目前对不可行个体处理方法的研究较少, 寻找合适的处理不可行个体的方法是遗传算法求解优化模型研究的一个重点。对于不可行个体的处理方法主要有试探法、罚函数法^[5]、可行解搜索法^[6-7]。试探法效率低, 并且使遗传算法更加接近随机搜索算法。罚函数法具有对目标函数形态的歪曲、严重依赖问题本身等特点。可行解搜索法的思想为采用一定的策略修正非可行个体。本文采用开放式遗传算法求解优化配置模型, 不可行个体采用可行解搜索法处理, 使用搜索种群和参考种群协同进化, 在搜索种群中保留一定比例的不可行个体。

1 开放式遗传算法

1.1 计算步骤

a. 实数编码。

b. 种群生成。算法使用 2 个种群协同进化。参考种群完全由可行个体构成, 搜索种群中包含一定比例的不可行个体。利用不可行度和阈值来判断个体是否为不可行个体, 这 2 个量分别定义为^[8-9]

$$\phi(X_i) = \sum_{j=1}^n |g_j(X_i)| \quad (1)$$

$$\phi_{\text{crit}} = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^M \phi(X_i) \frac{1}{M} \quad (2)$$

式中: n ——所有不等式约束个数; $g_j(X_i)$ ——第 i 个解向量在第 j 个不等式约束中的取值; T ——控制系数, 其取值大小受计算速度和精度要求控制; M ——种群规模。

c. 选择。使用适应值比例选择和精英选择相结合的方法。先选择可行个体, 选择个数为种群规定的可行个体数, 可行度为零和不为零的个体应该分开排序。

d. 交叉。对每个染色体产生一个在区间 $[0, 1]$ 的随机浮点数 r , 如果 $r < p_c$ (交叉概率), 选择给定的染色体进行杂交。随机地对被选择染色体配对, 对每一对染色体, 产生 α (C 为变量的个数) 个在区间 $[0, 1]$ 的随机

浮点数 α 2 个染色体对应的基因按照下列方式进行交叉. 设 $v_k^{(1)}, v_k^{(2)}$ 是配对父代染色体中的 2 个基因, 通过杂交获得的 2 个后代基因^[10]为 $\alpha_k v_k^{(1)} + (1 - \alpha_k) v_k^{(2)}$ 和 $\alpha_k v_k^{(2)} + (1 - \alpha_k) v_k^{(1)}$.

e. 修正. 搜索群体记为 P_s , 参考群体记为 P_r , P_r 中的点满足所有约束, 搜索群体 P_s 中个体是否可行仍采用不可行度和阈值进行判断. 设 $s \in P_s$, 若 s 可行, 则不进行修正; 否则, 则从参考群体中任选取一点, 例如选取 $r \in P_r$, 再通过生成一系列在区间 $[0, 1]$ 的随机浮点数 α , 按 $z = \alpha s + (1 - \alpha)r$ 产生位于连接 s 和 r 线段上的一系列点 z , 直至 z 的不可行度小于或等于阈值, 并用 z 替换掉 s . 另外, 若 z 对应的适应值较 r 对应的适应值好, 则以 z 替换掉 r , 成为 P_r 中的一个新参考点.

f. 变异. 对修正后染色体中的每个基因: 产生一个在区间 $[0, 1]$ 的随机浮点数 r , 如果 $r < p_m$ (变异概率) 则变异此位. 下列操作共进行 m 次 (m 为群体中个体个数) 进行变异的染色体的原基因 v_k , 设其取值范围为 $[v_{kmin}, v_{kmax}]$, 产生一个在区间 $[0, 1]$ 的随机浮点数 α , 按照式 (10) 进行变异^[10]:

$$v'_k = v_{kmin} + \alpha(v_{kmax} - v_{kmin})$$

(3)

g. 修正. 同步骤 e.
h. 执行步骤 c ~ g, 直到满足迭代次数或其他终止准则为止. 算法结束.

从步骤 a ~ h 可以看出, 开放式遗传算法使用了 5 个基本遗传操作. 把修正作为一个基本的、主动的遗传操作, 改变了过去对不可行个体处理的认识, 不可行个体本身也有一定的进化作用. 使用参考种群对部分不可行个体进行修正时, 参考种群可以看做是系统之外的环境, 对搜索种群中不可行个体的环境改良, 体现了外部环境对种群进化的影响. 将修正得到的更好的个体用来替换掉参考种群中的个体, 也实现了参考种群和搜索种群的共同进化, 体现了系统对环境的作用.

1.2 性能测试

已有的测试模型都是独立约束的, 大部分改进遗传算法性能的测试也都是针对独立约束模型的. 验证开放式遗传算法要使用存在关联约束的模型, 选择如下 2 个模型.

模型一：

$$\begin{cases} \max f = 3.2x_1 + 2x_2 + 4.8x_3 \\ 4.8x_1 + 2.2x_2 + 3.4x_3 \leq 54 \\ 6.2x_1 + 3.4x_2 + 1.4x_3 \leq 42 \\ 1.2x_1 + 4x_2 + x_3 \leq 18 \\ x_1, x_2, x_3 \in [1.5, 20] \end{cases}$$

(4)

模型二：

$$\begin{cases} \max f = 2x_1 + x_2 \\ x_1^2 - 6x_1 + x_2 \leq 0 \\ x_1^2 + x_2^2 - 80 \leq 0 \\ x_1 \geq 3, x_2 \geq 0 \end{cases}$$

(5)

模型一的极值点为(1.50, 1.50, 10.20), 最优值为 56.76; 模型二的极值点为(4.00, 8.00), 最优值为 16.00. 对这 2 个模型分别使用传统遗传算法和开放式遗传算法进行寻优, 传统遗传算法可行个体的生成采用不断试探的方式. 使用 2 种方法分别对上述 2 个模型求解 50 次, 表 1 是开放式遗传算法的优化参数设置, 传统遗传算法的相关参数取值与开放式遗传算法相同. 2 种算法均采用精英保留的选择方式. 一般, 非独立约束越多修正的难度越大. 模型二的非独立约束少于模型一, 所以模型二参考种群个数少于模型一, 不可行个体比例小于模型一, 控制系数取值大于模型一.

表 2 为 2 种算法的优化结果比较, 当进化种群中最优个体的函数值与实际最优值的差值小于 0.3 时认为计算成功. 对于存在非独立约束的优化模型使用试探的方式处理不可行个体效果不好, 即使使用大量的进化代数仍很难得到近似最优解. 使用开放式遗传算法可以有效地处理不可行个体问题, 在种群中保持一定数量的不可行个体, 一方面降低了把不可行个体变为可行个体的计算压力, 另一方面增加了种群向最优点方向

表 1 开放式遗传算法的优化参数设置

Table 1 Optimal parameter setting of open genetic algorithm

模型	种群规模/个		交叉 概率	变异 概率	不可行 个体比例	控制 系数	进化 代数/代
	搜索种群	参考种群					
模型一	50	50	0.7	0.10	0.3	10	1000
模型二	50	30	0.6	0.15	0.2	15	1000

进化的概率. 2 个优化模型的计算表明 , 开放式遗传算法处理非独立约束模型收敛速度快、精度高.

2 应用实例

采用开放式遗传算法对南水北调中线工程河南受水区 内郑州市 2010 年的水资源进行优化分配. 供水水源有南水北调中线水、水库水、引黄水、地下水、中水 ,用水户为城市生活、一般工业、电力工业、环境.

2.1 模型的建立

a. 经济目标. 城市不同行业用水产生的经济效益最大.

$$\max f_1(x) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J b_{ij} x_{ij}$$

(6)

式中 : I ——城市水源个数 ; J ——用水户个数 ; b_{ij} ——水源 i 向 j 用水户供水的效益系数 ,元/ m^3 ; x_{ij} ——水源 i 向 j 用水户的供水量 ,万 m^3 .

b. 环境目标. 城市 BOD 排放量之和最小.

$$\min f_2(x) = \sum_{j=1}^J d_j m_j \sum_{i=1}^I x_{ij}$$

(7)

式中 : d_j ——城市 j 用水户单位废水排放量中重要污染因子含量 , mg/L ; m_j ——城市 j 用水户污水排放系数.

c. 缺水目标. 各水平年各城市缺水总量最小.

$$\min f_3(x) = \sum_{j=1}^J (D_j - \sum_{i=1}^I x_{ij})$$

(8)

式中 D_j 为 j 用水户的总需水量 ,万 m^3 .

2.2 约束条件的确定

a. 供水约束. 供水约束是保证不同供水水源分配到城市不同用水户上的水量总和不能超过该水源所能提供的水量.

$$\sum_{j=1}^J x_{ij} \leq W_i$$

(9)

式中 W_i 为南水北调中线水、水库水、引黄水、地下水、中水总可供水量.

b. 需水约束. 需水约束是每个用水户所有供水水源的总供水量不能超过该用水户的需水量.

$$\sum_{i=1}^I x_{ij} \leq D_j$$

(10)

式中 D_j 为 j 用水户的需水量 ,用水户包括城市生活、一般工业、电力工业、环境等.

c. 水库蓄水约束. 限制了水库某个月份的蓄水量范围.

$$V_{\min} \leq V_t \leq V_{\max}$$

(11)

式中 : V_t ——第 t 月的水库蓄水量 ; $V_{\min}$, $V_{\max}$ ——水库第 t 月的最小、最大蓄水量.

d. 非负约束.

$$x_{ij} \geq 0$$

(12)

2.3 优化策略及结果分析

优化配置模型是多水源、多用户的 ,模型以月为计算时段 ,考虑地下水和水库蓄水的月间调节 ,计算多年平均情况 ,生活供水要求 100% 的保证率. 模型中决策变量个数是 240 个 ,需水约束 48 个 ,供水约束 60 个 ,非负约束个数与变量个数相同. 在优化模型求解过程中 ,交叉、变异之后将会产生大量的不可行个体 ,不可行个体在进化中的处理显得非常重要 ,求解时先把 3 个目标的多目标问题转化为单目标问题 ,然后使用开放式遗传算法进行求解.

搜索种群个体数为 100 ,参考种群个体数为 50 ,交叉概率 0.5 ,变异概率 0.05 ,搜索种群中不可行个体比例为 30% ,进化代数 为 500. T 的取值区间为 12 ~ 18. 遗传算法修正过程中 ,从参考种群中每选出 1 个个体 ,该个体最多和被修正的个体作用 100 次.

表 2 2 种算法优化结果比较

Table 2 Comparison of optimal results of two algorithms

算法	精度		成功次数/次		进化代数/代	
	模型一	模型二	模型一	模型二	模型一	模型二
传统遗传算法	0.42	0.51	35	29	699.61	783.19
开放式遗传算法	0.12×10^{-4}	0.91×10^{-5}	50	50	45.58	71.44

目标满意度和总体协调度采用文献[11]中的定义。经计算,经济目标满意度为0.82,环境目标满意度为0.76,缺水目标满意度为0.95,总体协调度为0.89。各个水源分给不同用水户的水量如表3所示。由

Table 3 Optimal result of water resources for Zhengzhou City in 2010 万 m ³								
水源用户	水库水分水量	中线水分水量	引黄水分水量	中水分水量	地下水分水量	总供水量	需水量	缺水量
一般工业	1695	12959	1831	257	225	16967	18859	1892
电力工业	260	480	163	231	213	1347	1592	245
生活	1948	16436	17526	366	0	36276	36276	0
城市生态	1413	32	3480	654	325	5904	6870	966

表3可知,郑州市在南水北调中线实施后,2010年缺水比率不到5%,基本上解决了郑州市的水资源供需矛盾。多次计算显示,在每一次进化中,修正过程计算时间所占比例较小,不可行个体不能被修正的概率很小,不可行个体修正时间较快,计算结果较稳定。

3 结 语

水资源优化配置模型通常是庞大、复杂的,研究模型的求解方法有很高的应用价值。本文在分析遗传算法的求解过程中,在不可行个体处理方法的基础上提出了开放式遗传算法。开放式遗传算法体现了种群在进化过程中和环境之间的相互作用,使传统遗传算法的封闭进化变成了开放式进化。应用实例表明,该方法能达到了较好的进化效果。开放式遗传算法的遗传策略是探讨性的,还有一些问题有待进一步研究,如选择和修正过程、参考种群是否也要进行交叉和变异、阈值的确定等。

参考文献:

[1] 贺北方,周丽,马细霞,等.基于遗传算法的区域水资源优化配置模型[J].水电能源科学,2002,20(3):10-12.
[2] 游进军,纪昌明,付湘.基于遗传算法的多目标问题求解方法[J].水利学报,2003,34(7):64-69.
[3] 陈南祥,李跃鹏,徐晨光.基于多目标遗传算法的水资源优化配置[J].水利学报,2006,37(3):308-313.
[4] 柳长顺,陈献,刘昌明,等.国外流域水资源配置模型研究进展[J].河海大学学报:自然科学版,2005,33(5):522-524.
[5] 王跃宣,刘连臣,牟盛静,等.处理约束的多目标优化进化算法[J].清华大学学报:自然科学版,2005,45(1):103-106.
[6] 范丽,张育林.基于稳态遗传算法的间歇式覆盖天基雷达星座优化设计[J].国防科技大学学报,2006,28(2):17-21.
[7] 刘晓平,秦晋,安竹林.基于可行解搜索法和遗传算法的堆芯参数优化[J].系统仿真实报,2004,16(12):2713-2714.
[8] 王跃宣,吴澄,胡昔祥,等.求解约束优化问题的退火遗传算法[J].高技术通讯,2004(7):10-14.
[9] 李小玲,袁继敏.一种新的遗传算法求解约束优化问题[J].湖北工学院学报,2004,19(4):69-71.
[10] 周明,孙树栋.遗传算法原理及应用[M].北京:国防工业出版社,1999:42-63.
[11] 王顺久,侯玉,丁晶,等.交互式多目标决策新方法及其在水资源系统规划中的应用[J].水科学进展,2003,14(4):476-479.

Open genetic algorithm and its application to optimal allocation of water resources

DONG Gui-ming¹, SHU Long-cang¹, CHEN Nan-xiang²

(1. College of Water Resources and Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Department of Geotechnical Engineering, North China University of Water Conservancy and Electric Power, Zhengzhou 450008, China)

Abstract A new algorithm, called open genetic algorithm (OGA), was proposed based on genetic algorithm (GA) for treatment of infeasible individuals. A basic process—amending was added into GA for treatment of infeasible individuals induced by cross and variation process. In this paper, the flow of OGA was introduced, and the algorithm was tested by use of two optimal models. The application of OGA to water resources optimal allocation for Zhengzhou City in water-receiving area in Henan Province on the middle route of the South-to-North Water Transfer Project shows that the algorithm is effective for treatment of infeasible individuals.

Key words open genetic algorithm; optimal allocation of water resources; infeasible individual; amending; middle route of South-to-North Water Transfer Project