

文章编号:0559-9350(2006)04-0480-06

自适应遗传算法在水库优化调度中的应用

王少波,解建仓,孔珂

(西安理工大学 水资源研究所,陕西 西安 710048)

摘要:本文提出了一种基于自适应遗传算法的水库优化调度问题的求解方法,并通过实例对自适应遗传算法和标准遗传算法的性能做了比较。结果表明,由于自适应遗传算法能够在进化过程中根据个体优劣和群体分散程度对遗传控制参数进行自动调整,可以较好地解决标准遗传算法在应用中遇到的收敛性差和容易早熟等问题。在进化相同代数条件下,自适应遗传算法能够在保持群体多样性的同时,加快收敛速度,其稳定性也优于标准遗传算法。

关键词:遗传算法;自适应遗传算法;水库;优化调度

中图分类号:TV697

文献标识码:A

遗传算法(Genetic Algorithms,GA)作为一种以随机理论模仿生物进化的优化搜索方法,在求解一些复杂优化问题中已显示出强大能力,在诸多领域得到广泛应用。目前,国内已有学者将其应用于水库优化调度领域^[1~4],但多局限于采用标准遗传算法(Simple Genetic Algorithms,SGA)^[5]的模式求解问题。由于SGA的遗传控制参数采用固定值,在求解复杂优化问题时存在早熟现象和收敛速度慢等缺点^[6,7],因此,GA的实现方式仍有待于进一步改进。本文将一种自适应遗传算法(Adaptive Genetic Algorithms,AGA)^[8]引入水库优化调度中,提出了基于AGA的水库优化调度问题的求解方法,并以青海省黑泉水库的优化调度为例,对AGA和SGA的性能进行了比较,结果表明,前者要明显优于后者。

1 自适应遗传算法原理

1.1 SGA原理及存在的问题 GA是美国的Holland吸取自然界中适者生存和基因遗传的思想而提出的一种全新的优化算法。它不依赖于问题的具体领域,以决策变量的编码作为运算对象,直接以目标函数值作为概率搜索的基本信息,可同时使用多个搜索点的信息,并且占用计算机内存少,适用于求解一些非线性、多目标和多参数的复杂系统的全局总体优化问题^[9]。因此,GA能够克服传统优化方法的不足,为求解复杂系统优化问题提供了通用框架。

SGA的基本原理是:以随机方式产生一个对应于优化问题可行解的初始群体(Population),其中的个体(Individual)在选择算子(Selection)、交叉算子(Crossover)和变异算子(Mutation)的作用下,向更高的适应度(Fitness)进化,通过在进化过程中对各代群体中的个体进行优胜劣汰来寻找问题的最优解。其中,选择算子是在适应度评估的基础上,对群体中的个体进行优胜劣汰的操作;交叉算子是通过基因重组产生新个体的主要手段,它决定了GA的全局搜索能力;变异算子是通过基因突变产生新个体的辅助手段,它决定GA的局部搜索能力。

遗传控制参数中的交叉概率 P_c 和变异概率 P_m 的选择是影响GA行为和性能的关键,直接影响算法的收敛性。 P_c 越大,旧个体的模式被破坏的可能性越大,新个体产生的速度就越快。但是, P_c 过高

收稿日期:2005-08-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50279041);国家“863”计划研究资助项目(2005AA113150)

作者简介:王少波(1978—),男,山东招远人,博士生,主要研究方向为水文学及水资源。E-mail:wshaobo@xaut.edu.cn

可能使优良的个体模式遭到破坏,过小又会延缓新个体的产生,导致算法早熟,停滞不前。对于 P_m ,若 P_m 过小,不易形成新的个体;若 P_m 过大,则 GA 就成了纯粹的随机搜索算法。由于 SGA 中的 P_c 和 P_m 是固定的,针对不同的优化问题必须通过反复试验调整 P_c 和 P_m ,这是极不方便的,且难以保证获得最佳的参数值。SGA 的这一缺陷,通常导致其处理优化问题时收敛速度较慢,而且算法稳定性较差,特别容易过早收敛于一个非全局最优解。

1.2 自适应遗传算法 针对 SGA 存在的问题,Srinivas 等^[8]提出 AGA。其思想是引入如式(1)、式(2)所示的自适应调整函数,使遗传控制参数 P_c 和 P_m 随个体适应度大小和群体的分散程度自动调整。具体为:当群体有陷入局部最优解的趋势时,就相应地提高 P_c 和 P_m ;当群体在解空间发散时,就相应地降低 P_c 和 P_m 。同时,当个体的适应度接近当代种群中的最大适应度时,认为该个体性能较好,则对其采用较低的 P_c 和 P_m ,以尽可能保留其优良模式;当个体的适应度低于当代种群的平均适应度时,认为该个体性能不佳,将对其采用较大的 P_c 和 P_m ,以加快个体的更新速度。这样,通过自适应调整 P_c 和 P_m ,AGA 在保持群体多样性的同时,保证了算法的收敛性,提高了算法的优化能力,其中 P_c, P_m 可表示为

$$P_c = \begin{cases} k_1 \frac{(f_{\max} - f')}{(f_{\max} - f_{\text{avg}})} & , f' \geq f_{\text{avg}}; \\ k_2 & , f' \leq f_{\text{avg}}. \end{cases} \quad (1)$$

$$P_m = \begin{cases} k_3 \frac{(f_{\max} - f)}{(f_{\max} - f_{\text{avg}})} & , f \geq f_{\text{avg}}; \\ k_4 & , f < f_{\text{avg}}. \end{cases} \quad (2)$$

式中: $f_{\max}$ 为群体中最大适应度值; f_{avg} 为每代群体平均适应度值; f' 为要交叉的两个体中较大适应度值; f 为要变异个体的适应度值; k_1, k_2, k_3, k_4 均为自适应控制参数,在(0,1)区间取固定值。

由式(1)、式(2)可以看出,适应度大于群体平均适应度的个体,其 P_c 和 P_m 的变化范围分别是 $[0, k_1)$ 和 $[0, k_3)$;而适应度低于群体平均适应度的个体,其 P_c 和 P_m 分别是 k_2 和 k_4 。同时还可以看出,对于每代种群中最大个体,其 P_c 和 P_m 均为零,保证了当前代中最优个体的模式可以成功进入下一代。这种调整方式对于进化后期是相当有利的,因为在进化后期,当前代中的最优个体已接近全局最优解,若再对其进行交叉、变异等操作,产生的新个体适应度不一定高。当然,这样做也有不利之处,那就是在进化初期容易减缓新的优良个体的产生。为此,可以做进一步改进^[9],使种群中最大适应度的个体 P_c 和 P_m 也不为零,这就相应地提高了最优的个体 P_c 和 P_m ,使它们不会处于一种近似停滞的状态。为了保证每一代的优秀个体不被破坏,只需要采用最优保存策略^[6],将它们直接复制到下一代即可。

2 水库优化调度的 AGA 算法设计

水库优化调度的遗传算法为在水库水位的允许变化范围内,随机选取 POP 组可行水位变化序列 $(Z_1^1, Z_2^1, \dots, Z_n^1), (Z_1^2, Z_2^2, \dots, Z_n^2), \dots, (Z_1^{\text{POP}}, Z_2^{\text{POP}}, \dots, Z_n^{\text{POP}})$,其中,POP 为群体规模, n 为时段数,再通过一定的编码将其表示为个体的数字串,在满足给定的约束条件下,按预定的适应度评价标准评价水位变化序列的优劣,通过一定的遗传操作(选择、交叉和变异),使适应度低的个体被淘汰,适应度高的个体遗传至下一代,如此反复,直至满足给定的终止规则。遗传算法的终止规则通常有三种,即:(1)是否到了预定的进化代数;(2)是否找到了某个优秀个体;(3)连续几代的最优目标值是否变化等。对于水库优化调度,第 1 种规则最为常用。

2.1 个体编码 本研究采用了实数编码。把水库在时段 t 允许的水位变化区间分为 m 等份,并按从小到大的次序用整数 $1, 2, 3, \dots, m, m+1$ 表示,个体的每一向量(基因)即为水库水位的真值。表示为

$$Z_t = Z_{t,\min} + N_{\text{rand}} \times \frac{Z_{t,\max} - Z_{t,\min}}{m} \quad (3)$$

式中: $Z_{t,\max}, Z_{t,\min}$ 分别为时段 t 水库水位的最大值和最小值; m 为控制精度的整数; N_{rand} 为小于 m 的随

机数。

2.2 适应度函数 由于水库的优化调度为约束极大值优化问题,因此,本文采用保守估计界限构造法来构造适应度函数。适应度函数表达式为

$$\text{Fit}(f(Z)) = \frac{1}{1 + c - f(Z)} \quad (4)$$

式中: $f(Z)$ 为目标函数值; c 为目标函数界值的保守估计,并且 $c \geq 0, c - f(Z) \geq 0$ 。

水库优化调度中约束优化问题的处理,通常采用惩罚函数法。惩罚函数法又分为定量惩罚法、变量惩罚法。在定量惩罚法中,解的质量严重地依赖惩罚系数的值。当惩罚系数太小时,算法可能收敛于不可行解;另一方面,惩罚系数太大时,会使算法较早地收敛于某个局部最优解。因此,本文采用变量惩罚函数法,公式为

$$f(Z) = F(Z) - M \sum_{i=1}^p W_i \quad (5)$$

式中: $F(Z)$ 为原优化问题的目标函数值; M 为与进化代数有关的惩罚因子; W_i 为与第 i 个约束有关的违约值; p 为违约数目。

2.3 遗传操作

(1)选择算子。本文采用 GA 中最常用的轮盘赌法(又称适应度比例法)对个体进行选择。设群体大小为 POP ,个体 i 的适应度为 f_i ,则个体被选中的概率 $P_i = f_i / \sum_{i=1}^{POP} f_i$,因此,个体的适应度越大,被选中的概率越高。

(2)交叉运算。交叉是把两个父代个体的部分结构加以替换重组而生成新个体的操作,目的是寻找父代双亲已有的但未能合理利用的基因信息。本文采用中间交叉策略,设 x 和 y 是两父代个体,则交叉产生的后代为 $x' = ax + (1-a)y$ 和 $y' = ay + (1-a)x$, a 为 $[0,1]$ 内均匀分布的一个随机数。

(3)变异运算。通过变异可引入新的基因以保持种群的多样性,它在一定程度上可以防止成熟前收敛的发生。具体方法为:个体 Z 的每一个分量 $Z_i (i=0,1,\dots,n)$,以概率 $1/n$ 被选择进行变异。设对变量 Z_k 进行变异,其定义区间为 $(Z_{k,\min}, Z_{k,\max})$,变异后

$$Z'_k = \begin{cases} Z_k + \text{Rand}(Z_{k,\max} - Z_k), & \text{if } \text{rand}(2) = 1 \\ Z_k - \text{Rand}(Z_k - Z_{k,\min}), & \text{if } \text{rand}(2) = 2 \end{cases} \quad (6)$$

式中: Rand 为 $0 \sim 1$ 之间的随机数, $\text{rand}(u)$ 函数表示产生最大值为 u 的正整数。

2.4 参数的自适应调整 如前所述,遗传控制参数中 P_c 和 P_m 的选择是影响 GA 行为和性能的关键所在。构造自适应调整函数的方法很多,但原理是一致的。本文采用文献[9]提出的方法,按照式(7)、式(8)对遗传控制参数 P_c 和 P_m 进行自适应调整。另外,为了保证每一代的优良个体不被破坏,采用最优保存策略,使它们直接复制到下一代。

$$P_c = \begin{cases} P_{c1} - \frac{(P_{c1} - P_{c2})(f' - f_{\text{avg}})}{(f_{\text{max}} - f_{\text{avg}})}, & f' \geq f_{\text{avg}}; \\ P_{c1}, & f' < f_{\text{avg}}. \end{cases} \quad (7)$$

$$P_m = \begin{cases} P_{m1} - \frac{(P_{m1} - P_{m2})(f_{\text{max}} - f)}{(f_{\text{max}} - f_{\text{avg}})}, & f \geq f_{\text{avg}}; \\ P_{m1}, & f < f_{\text{avg}}. \end{cases} \quad (8)$$

式中: $P_{c1}=0.9, P_{c2}=0.6, P_{m1}=0.1, P_{m2}=0.001$ 。

综上所述,算法的步骤为:①初始化,设置控制参数,产生初始群体;②计算各个体的目标函数,并进行适应度变换;③按轮盘赌选择法对母体进行选择;④按照式(7)、式(8)计算的 P_c 和 P_m 对群体进行交叉、变异和精英选择策略操作,得到新一代群体;⑤检验是否达到进化代数,若达到,输出最优解,否则转向步骤②。

3 实例分析

下面以青海省黑泉水库的优化调度为例,对 AGA 和 SGA 的性能进行对比分析。黑泉水库是兼有城市供水、灌溉和发电等综合利用任务的水利工程。水库的死水位为 2840.00m,正常蓄水位等于汛限水位为 2887.75m,电站出力系数为 7.4,装机容量为 $1.2 \times 10^4 \text{kW}$,保证出力为 5149kW。黑泉水库兴利调度的任务是在满足城市供水(自下游河道取水)和灌溉补水(自库区引水)的前提下,尽可能多发电。因此,水库优化调度的目标为:在保证灌溉补水和城市供水的条件下,水电站的发电量最大。优化调度模型描述如下。

目标函数:

$$F = \max \sum_{t=1}^n N_t T_t \quad (9)$$

式中: N_t 为时段的平均出力; T_t 为时段秒数; n 为计算时段总数。

主要约束条件包括:

水位约束:

$$Z_s \leq Z_t \leq Z_{\max} \quad (10)$$

水轮机最大过机流量约束:

$$Q_{d,t} \leq Q_{\max} \quad (11)$$

电站出力约束:

$$N_{\min} \leq N_t \leq N_{\max} \quad (12)$$

下泄流量约束:

$$Q_{s,t} \geq q_{c,t} \quad (13)$$

灌溉供水约束:

$$Q_{g,t} = q_{g,t} \quad (14)$$

水量平衡约束:

$$V_{t+1} \geq V_t + (Q_{r,t} - Q_{s,t} - Q_{g,t}) T_t \quad (15)$$

式中: Z_s 、 Z_t 、 $Z_{\max}$ 分别为水库死水位、时段水库水位和水库正常蓄水位; $Q_{d,t}$ 、 $Q_{\max}$ 分别为时段水轮机组过机流量和水轮机组允许最大过机流量; $N_{\min}$ 、 N_t 、 $N_{\max}$ 分别为水电站保证出力、时段水电站出力和水电站装机容量; $Q_{s,t}$ 、 $q'_{c,t}$ 分别为时段下泄流量和时段城市供水的引水流量; $Q_{g,t}$ 、 $q_{g,t}$ 时段灌溉供水流量和时段灌溉需水流量; V_t 、 V_{t+1} 分别为时段初、末蓄水量; $Q_{r,t}$ 为时段入库流量。

针对上述模型,分别采用本文提出的基于 AGA 的求解方法和传统的基于 SGA 的求解方法,对该水库设计中水年优化调度进行模拟。计算中取种群数为 100,根据文献[4]进行水库优化调度的经验,对 SGA 取 $P_c=0.7$ 、 $P_m=0.08$,其它操作与 AGA 相同。在已知入库径流过程、下游城市用水需求和上游灌溉引水需求的基础上,以月为计算单位,以进化 100 代作为遗传终止条件,用 AGA 和 SGA 分别求解黑泉水库的优化调度模型。由于 GA 是一种以随机理论模仿生物进化的搜索方法,进化相同代数,其每次计算的结果并不一定相同,因此,本文用两种方法各进行了 5 次调度模拟,AGA 最好的一次调度过程如表 1 所示,SGA 最好的一次调度过程如表 2 所示。

比较表 1 和表 2 可知,在进化 100 代的条件下,采用 AGA 计算的最大年发电量为 $6119.57 \times 10^4 \text{kW} \cdot \text{h}$,大于 SGA 计算的最大年发电量 $6101.34 \times 10^4 \text{kW} \cdot \text{h}$,从调度过程也可以看出,AGA 的计算结果相对较好。为了进一步对比 AGA 和 SGA 的性能,再以进化 200 代和进化 300 代作为遗传终止条件,分别进行了 5 次演算,历次结果汇总见表 3。

由表 3 可以看出,随着进化代数的增加,AGA 的计算结果有明显的增加趋势($GEN=200$ 的第 3 次例外),并且其同代结果之间的差距也逐渐缩小,说明 AGA 能够以较快速度收敛,向最优解逼近的稳定

性也较高。而 **SGA** 虽然随进化代数的增加,也有可能得到一个较优解,但其同代结果之间的差距较大,说明 **SGA** 极有可能产生早熟现象,向最优解逼近的稳定性也较差。可见,在引入遗传控制参数自适应调整机制后,**AGA** 法比较好的克服了传统 **SGA** 法由于采用固定 P_c 和 P_m 所导致的容易早熟和收敛速度慢等缺点,在寻优过程中显示出较好的自适应周围环境的性能。

表 1 AGA 优化调度过程

月份	入库流量 ?(m ³ /s)	城市需水 ?(m ³ /s)	灌溉需水 ?(m ³ /s)	城市供水 ?(m ³ /s)	灌溉供水 ?(m ³ /s)	发电流量 ?(m ³ /s)	发电水头 ?m	出力 ?kW	弃水 ?(m ³ /s)	月末水位 ?m
6	18.70	4.44	2.55	4.44	2.55	9.56	72.85	5153.40	0	2851.84
7	46.60	4.39	0.00	4.39	0.00	16.79	91.59	11376.84	0	2879.78
8	28.70	4.43	0.00	4.43	0.00	14.76	109.85	12000.00	0	2887.71
9	12.70	4.23	0.00	4.23	0.00	14.31	113.43	12000.00	0	2886.79
10	7.03	4.27	2.92	4.27	2.92	6.20	113.33	5191.66	0	2885.70
11	3.57	4.09	0.00	4.09	0.00	6.29	111.99	5211.68	0	2884.12
12	2.00	4.08	0.00	4.08	0.00	6.38	109.86	5190.82	0	2881.45
1	1.59	4.42	0.00	4.42	0.00	8.44	106.36	6645.30	0	2877.25
2	4.20	4.08	11.03	4.08	11.03	7.07	98.76	5163.55	0	2866.17
3	11.50	4.27	9.92	4.27	9.92	7.74	90.15	5161.09	0	2860.05
4	16.80	4.23	15.06	4.23	15.06	8.42	82.65	5152.42	0	2851.22
5	13.40	4.48	9.61	4.48	9.61	10.37	72.47	5562.87	0	2840.00

注: $POP=100$, $GEN=100$, 年发电量 $6119.57 \times 10^4 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 。

表 2 SGA 优化调度过程

月份	入库流量 ?(m ³ /s)	城市需水 ?(m ³ /s)	灌溉需水 ?(m ³ /s)	城市供水 ?(m ³ /s)	灌溉供水 ?(m ³ /s)	发电流量 ?(m ³ /s)	发电水头 ?m	出力 ?kW	弃水 ?(m ³ /s)	月末水位 ?m
6	18.70	4.44	2.55	4.44	2.55	9.60	72.82	5174.72	0	2851.78
7	46.60	4.39	0.00	4.39	0.00	16.48	91.70	11185.33	0	2879.95
8	28.70	4.43	0.00	4.43	0.00	14.75	109.93	12000.00	0.19	2887.75
9	12.70	4.23	0.00	4.23	0.00	14.29	113.44	12000.00	0	2886.80
10	7.03	4.27	2.92	4.27	2.92	6.22	113.32	5216.54	0	2885.68
11	3.57	4.09	0.00	4.09	0.00	6.31	111.97	5229.61	0	2884.09
12	2.00	4.08	0.00	4.08	0.00	6.44	109.82	5230.90	0	2881.38
1	1.59	4.42	0.00	4.42	0.00	8.58	106.24	6746.40	0	2877.09
2	4.20	4.08	11.03	4.08	11.03	7.08	98.57	5162.63	0	2865.94
3	11.50	4.27	9.92	4.27	9.92	7.75	89.88	5157.24	0	2859.74
4	16.80	4.23	15.06	4.23	15.06	8.55	82.21	5200.89	0	2850.66
5	13.40	4.48	9.61	4.48	9.61	9.96	72.23	5323.04	0	2840.00

注: $POP=100$, $GEN=100$, 年发电量 $6101.34 \times 10^4 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 。

表 3 AGA 和 SGA 在不同进化代数的计算结果

进化代数	AGA 计算发电量 $\times 10^4$ (kW·h)					SGA 计算发电量 $\times 10^4$ (kW·h)				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
100	6113.43	6108.10	6119.57	6116.74	6114.83	6091.33	6101.34	6088.83	6079.54	6062.40
200	6123.56	6119.62	6118.35	6124.19	6125.98	6075.14	6077.56	6114.55	6120.25	6093.17
300	6128.15	6126.73	6128.74	6127.08	6127.21	6126.77	6085.22	6116.92	6101.63	6074.69

4 结论

作为一种基于自然选择和群体遗传机理的全局优化搜索方法,遗传算法提供了一条处理复杂优化问题的有效途径。标准遗传算法由于在进化过程中采用恒定的交叉概率和变异概率,使得算法收敛性差并且容易出现早熟现象,因此,能否提高算法的收敛速度并且避免早熟是遗传算法在应用中遇到的最

大困难。本文将自适应遗传算法引入水库优化调度领域,提出了基于自适应遗传算法的水库优化调度问题的求解方法,并通过青海省黑泉水库的典型年调度实例,对该方法进行了性能分析。结果表明,与标准遗传算法相比,自适应遗传算法能够有效地根据个体适应度大小和群体的分散程度自动调整遗传控制参数,从而能够在保持群体多样性的同时,加快收敛速度,提高算法全局收敛的稳定性。

参 考 文 献:

- [1] 方红远,邓云梅,董增川.多目标水资源系统运行决策优化的遗传算法[J].水利学报,2001,(9):22—27.
- [2] 畅建霞,黄强,王义民.水电站水库优化调度几种方法的探讨[J].水电能源科学,2000,18(3):19—22.
- [3] 马光文,王黎.遗传算法在水电站优化调度中的应用[J].水科学进展,1997,8(3):275—280.
- [4] 王大刚,程春田,李敏.基于遗传算法的水电站优化调度研究[J].华北水利水电学院学报,2001,22(1): 5—10.
- [5] Goldberg D E. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning[M]. MA, Addison-Wesley, 1989.
- [6] 罗志军.遗传算法的全局收敛性的齐次有限马尔柯夫链分析[J].系统工程与电子技术,2000,22(1):73—76.
- [7] Rudolph G. Convergence Properties of Canonical Genetic Algorithms[J]. IEEE Trans. Neural Networks, 1994, 5(1): 96—101
- [8] Srinivas M, Patnaik L M. Adaptive Probabilities of Crossover and Mutation in Genetic Algorithms[J]. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, 1994, 24(4): 656—667.
- [9] 王小平,曹立明.遗传算法——理论、应用与软件实现[M].西安:西安交通大学出版社,2002.

Application of adaptive genetic algorithm in optimization of reservoir operation

WANG Shaoqibo, XIE Jianqiang, KONG Ke

(Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: A new method for optimizing reservoir operation based on Adaptive Genetic Algorithm (AGA) is proposed and the calculation procedure and result for an example are compared with that of Simple Genetic Algorithm (SGA). It shows that because of the AGA can adjust the parameters adaptively according to the value of individual fitness and dispersion degree of population, the problems of convergence and prematurity occurred in SGA are solved. The proposed algorithm has better performance of convergence speed and better stability in the global optimum result with the same generations.

Key words: genetic algorithm; adaptive genetic algorithm; reservoir; optimal operation

(责任编辑:王成丽)