

文章编号: 1006-4710(2011)02-0139-06

基于协同进化遗传算法的水库群供水优化调度研究

万芳¹, 黄强¹, 原文林², 邱林³

(1. 西安理工大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. 郑州大学 水利与环境学院, 河南 郑州 450002; 3. 华北水利水电学院 环境与市政工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 针对水库群供水优化调度问题, 介绍了一种改进的协同进化遗传算法。该算法针对求解高维、复杂的水库群优化调度时多约束条件难以处理、计算机时长、易陷入局部最优解等缺陷, 建立了相应的罚因子的评价机制, 生成了两类进化子种群, 运用改进遗传算法同时对不同种群进行操作, 并将其应用在滦河下游六水库联合供水优化调度中。实例计算结果表明, 用该算法求解水库群供水优化调度问题, 结果可靠、合理, 计算效率高。

关键词: 水库群供水优化调度; 遗传算法; 协同进化; 罚函数

中图分类号: S11

文献标志码: A

Research on Co-Evolutionary Genetic Algorithm for Reservoir Optimization Water Supply Dispatching

WAN Fang¹, HUANG Qiang¹, YUAN Wenlin², QIU Lin³

(1. Key Lab of Northwest Water Resources and Environment Ecology of MOE, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. School of Water Conservancy and Environment Engineering,

Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China; 3. Inst. of Environmental and Municipal Eng,

North China Inst. of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Aiming at the problems of reservoir optimization water supply dispatching, an improved co-evolutionary genetic algorithm is described. For high-dimensional and complex cascade reservoirs, the traditional optimization algorithms are difficult to deal with multi-constraint condition, a long computing time, falling into local optimal solution easily and other defects, a corresponding penalty factor of the evaluation mechanism is established. Two evolution subpopulations are formed, and at the meantime, the improved genetic algorithm is applied to operate the various subpopulations. It is applied to six reservoirs to optimize water supply dispatching in the lower reaches of the Luan-he river. The results from the real example calculation indicate that when this algorithm is used to solve the problem of the optimization dispatching of reservoir water supply, the results are reliable and rational with high calculation efficiency.

Key words: reservoir optimization water supply dispatching; genetic algorithm; co-evolutionary; penalty function

如何通过水库群联合供水并优化调度以更好地调配有限水资源一直以来都是研究的一个热点问题, 同时使受水区供水均匀以减低缺水的破坏深度, 从而提高全系统效益是目前亟待解决的问题。但水库群供水优化调度是一个具有各类约束条件的大型、动态的复杂非线性系统的优化问题^[1-2], 很难用常规方法处理。

遗传算法是 Holland 吸取自然界中适者生存和

基因遗传思想而提出的优化算法, 具有并行性、鲁棒性强等优点, 在水库优化调度中, 已有很多应用, 如陈立华^[3]等应用遗传算法求解多阶段最优化问题的数学模型, 赵文举^[4]等引入动态罚函数来处理约束条件, 提出了基于模拟退火遗传算法的模型求解方法。但遗传算法往往存在收敛速度慢等缺陷, 且常采用固定惩罚因子的常规罚函数法来处理约束条件, 易存在量纲难以统一、搜索精度不高和过早收敛

收稿日期: 2010-11-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50779053); 中国博士后科学基金资助项目(20100471007)。

作者简介: 万芳(1982-), 女, 河南信阳人, 博士生, 研究方向为水资源系统工程。E-mail: ywl2009@zzu.edu.cn。

黄强(1958-), 男, 四川梓潼人, 教授, 博导, 研究方向为水资源系统工程。E-mail: sy-sj@xaut.edu.cn。

到局部最优解的问题。本文应用协同进化思想,通过表征决策解和罚因子的两类种群之间的协同竞争来改善遗传算法的全局收敛性,提出基于协同进化遗传算法 (Co-Evolutionary Genetic Algorithm, 简称 CGA) 的水库群供水优化调度研究。

1 水库群供水优化调度模型

一般水库供水优化调度可选缺水率最小为优化目标。模型目标函数及约束条件如下。

1) 目标函数

$$\min f = \sum_{i=1}^D \sum_{t=1}^{T_0} \sum_{w=1}^W [(Q_{it}^w - G_{it}^w - G_{0,it}^w)/Q_{it}^w] \quad (1)$$

式中, Q_{it}^w 为 i 水库所辖 w 供水区 t 时段的需求水量; G_{it}^w 为 i 水库 t 时段给 w 供水区的供水量; $G_{0,it}^w$ 为 i 水库所辖 w 供水区 t 时段的当地供水量; $i = 1, 2, \dots, D, t = 1, 2, \dots, T_0, w = 1, 2, \dots, W, D$ 为水库群中水库的数量, T_0 为供水时段数, W 为供水区个数。

2) 约束条件

a. 水量平衡约束

$$V_{it} = V_{i,t-1} + I_{it} + q_{it} - G_{it} - R_{it} \quad (2)$$

b. 水库库容约束

$$V_{it,\min} \leq V_{it} \leq V_{it,\max} \quad (3)$$

c. 可供水量约束

$$G_{it,\min} \leq G_{it} \leq G_{it,\max} \quad (4)$$

d. 需水量约束

$$0 \leq G_{it}^w \leq Q_{it}^w - G_{0,it}^w \quad (5)$$

e. 变量非负约束: 所有变量均为非负量。

式中, $V_{i,t-1}$ 、 V_{it} 分别为 i 库 t 时段初、末的库容; q_{it} 为 i 库 t 时段的天然入流; I_{it} 为 $i-1$ 库向 i 库 t 时段的调水量; R_{it} 为 i 库 t 时段的损失水量; $V_{it,\min}$ 、 $V_{it,\max}$ 分别为 i 库 t 时段允许的最小、最大库容, $V_{it,\min}$ 一般为死库容, $V_{it,\max}$ 为允许的最大库容, 非汛期一般为正常蓄水位下的库容, 汛期为防洪限制水位下的库容; $G_{it,\min}$ 、 $G_{it,\max}$ 分别为 i 库 t 时段最小、最大可供水能力; G_{it} 为 i 水库 t 时段的供水量; 其他各参数含义同上。

2 协同进化遗传算法

2.1 算法的基本原理

遗传算法^[5-6]模拟自然遗传过程中的繁殖、杂交和突变现象,将问题的每一个可能解都编码成一个“染色体”(个体),每个个体都被评价优劣并得到其适应值。

协同进化遗传算法 (CGA) 考虑个体之间及个体与环境之间的关系,在进行个体评价时,需要利用其他种群的部分个体信息,构成完整的决策变量编码,再利用适应度函数进行评价,使遗传算法在解决复杂的优化问题时效率得到提高。

CGA 算法不但考虑了个体之间的竞争和协作,还考虑了种群之间进化过程的相互影响、相互协调和相互进化过程。CGA 算法通过表征决策解和罚因子的两类种群的基于 GA 算法的协同进化,自适应地调整罚因子,并最终得到约束优化问题的最优解。CGA 算法的流程如图 1 所示。

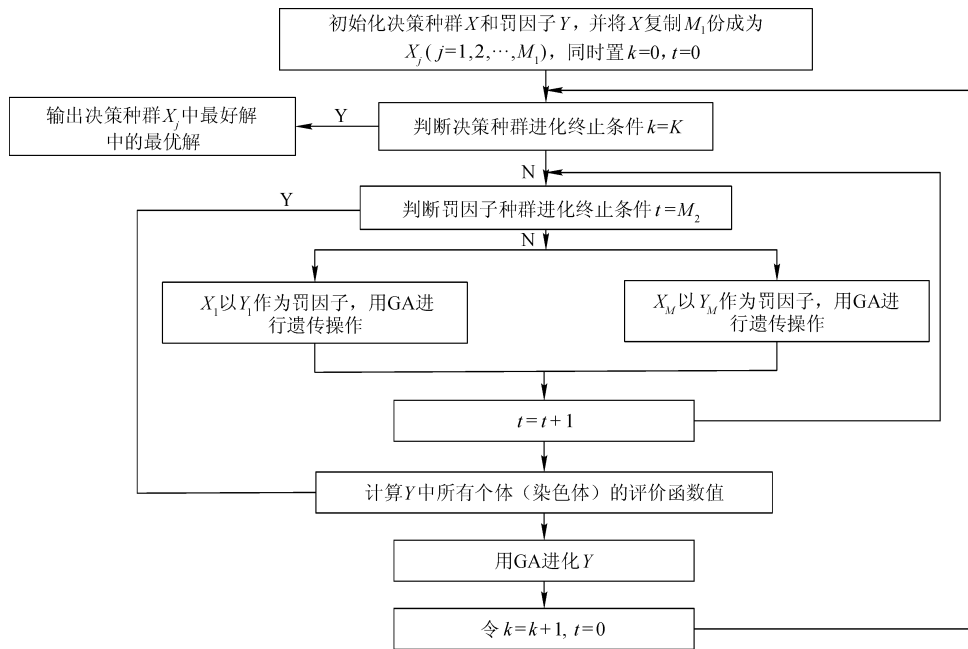


图 1 CGA 算法流程图
Fig. 1 The framwork of CGA

水库群供水优化调度是一个具有各类约束条件的大型、动态的复杂非线性系统的优化问题,如何协调各种约束之间的关系,成为研究的难点与热点问题。在约束算法中,惩罚技术用来在每一代的种群中保持部分不可行解,使遗传搜索可以从可行域和不可行域两边来达到最优解。利用罚函数 $P(x)$ 方法处理约束问题时,其性能很大程度上取决于罚因子的选择。典型的罚函数如式(6)所示:

$$P(x) = \sum_{i=1}^n r_i \times G_i(x) + \sum_{j=1}^p s_j \times H_j(x) \quad (6)$$

式中, $G_i(x)$ 和 $H_j(x)$ 分别表示优化问题中不等式约束和等式约束相对应的违反量的函数; n 和 p 分别表示优化问题中不等式约束和等式约束的个数; r_i 和 s_j 分别表示相应的罚因子。

针对遗传算法在求解水库群供水优化调度这一实际问题中罚函数设计的不足,提出了基于协进化的遗传算法。其基本思路是在算法中包含了两类种群,一类种群 X 用于进化决策解,该类种群包含 M_1 个子种群 $X_j (j = 1, 2, \dots, M_1)$, 子种群的规模均为 M_2 , 种群中的每个个体 $x_i (i = 1, 2, \dots, M_1 \times M_2)$ 则表示问题的一个决策解;另一类种群 Y 用于进化 X_j 中的罚函数因子,种群规模同样为 M_1 , 其中每个 $y_j (j = 1, 2, \dots, M_1)$ 代表一组罚因子。 X_j 中的每个个体利用 y_j 表示的罚因子计算罚函数,从而计算该子种群的适配值,并连续采用遗传算法进化 $k (k = 1, 2, \dots, K)$ 代获得一个新的种群 X_j ; 然后,根据 X_j 中所有解的优劣信息,评价 Y 中个体 y_j 的优劣,即评价罚因子;当 Y 中所有个体 y_j 均得到评价后, Y 采用遗传算法优化下一代,从而获得新的种群 Y 。在一代协进化结束后, X_j 再分别用新的 Y 进行评价计算,直到满足算法终止条件。将通过比较所有 X_j 而得到的历史最优解作为所求解,同时 Y 中所对应的最优个体即为最佳罚因子。

2.2 决策个体的评价函数

在式(6)所示的罚函数中,仅仅计算了个体违反约束的总量,没有充分利用不可行解违反约束的信息。对于只违反一个约束和违反两个约束的个体,其违反约束的总量可能相同,而实际上前者可能更靠近可行域。若罚函数即是违反约束数量的函数,又是违反约束程度的函数,则其效果要比罚函数仅为违反约束数量的函数情况好^[7-8]。鉴于上述情况,采用式(7)作为决策群 X_j 中个体 i 的评价函数的适配值函数。

$$F_i(x) = f_i(x) - sum \times \omega_1 - num \times \omega_2 \quad (7)$$

式中, $f_i(x)$ 表示优化问题的目标函数, sum 表示该

个体违反约束的总量, num 表示该个体违反约束的个数, ω_1 和 ω_2 是 Y 中个体 y_j 所对应的罚因子,其中 sum 按式(8)进行计算。

$$sum = \sum_{i=1}^N G_i(x) \quad \forall G_i(x) > 0 \quad (8)$$

式中, N 表示所有不等式的总数,在此所有等式约束已转化为不等式约束。

2.3 罚因子的评价函数

Y 中的每个个体 y_j 均代表一组罚因子 ω_1 和 ω_2 , 当 X_j 进化 k 代后, y_j 按照下述方法进行评价。

1) 若 X_j 中至少有一个可行解,则称 y_j 为一个有效个体,并按式(9)进行评价。

$$P(y_j) = \frac{1}{num_{fit}} \quad (9)$$

$$num_{fit} + \sum_{i=1}^{num_{fit}} F_i(x)$$

式中, num_{fit} 表示 X_j 中所有可行解的个数,

$\sum_{i=1}^{num_{fit}} F_i(x)$ 表示 X_j 中所有可行解的适配值的总和。

式(9)在评价罚因子时,综合考虑了对应解群中可行解的数量和质量。可行解的总目标值 $\sum_{i=1}^{num_{fit}} F_i(x)$ 越大或可行解数量 num_{fit} 越多,都会使 $P(y_j)$ 越小。如此,有利于 X_j 向着可行解数量多而且目标值好的区域进化。

2) 若 X_j 中没有可行解(可认为因罚函数过小所致),则称 y_j 为无效个体,并按式(10)进行评价。

$$P(y_j) = \max(F_i) + \frac{\sum sum}{\sum num} + \sum num \quad (10)$$

式中, $\max(F_i)$ 表示 Y 中所有有效个体的最大适配值, $\sum sum$ 表示 X_j 中所有个体违反约束的总量, $\sum num$ 表示 X_j 中所有违反约束的个体总数。从式(10)可知,对于种群 X_j 而言, $\sum sum$ 和 $\sum num$ 越小,则 $P(y_j)$ 越小,即罚因子相对较好,有利于 X_j 向着搜索空间中违反约束个数少以及违反量小的方向进化。

2.4 协同进化遗传算法的改进技术

结合水库群供水优化调度和遗传算法的特点,在此提出几点改进措施,以提高 CGA 算法的计算精度与效率。

1) 约束违反量的归一化处理

在计算不可行解违反约束的总量时,若简单地将各个约束违反量相加,则由于各个约束之间尺度的不同,可能某一约束违反量会在总量中占主导地位,从而无法体现其他约束的违反程度。鉴于上述情况,在计算 $\sum sum$ 时对每一个约束的违反量进行归

一化处理。

$$\sum sum = \sum_{i=1}^N \frac{G_i(x_j)}{\max[G_i(x_j)]} \tag{11}$$

式中, $\max[G_i(x_j)]$ 表示在每代进化中所有个体对第 i 个约束的最大违反量。

经过上述处理,不同约束的违反量均被限制在 $[0,1]$ 。

2) 交叉率和变异率

用不变的交叉率和变异率控制遗传进化,容易导致“早熟”,故应用自适应的 P_c 、 P_m 控制遗传进化。

$$P_c = 1/(1 + e^{-k_1\Phi}) \tag{12}$$

$$P_m = 1 - 1/(1 + e^{-k_2\Phi}) \tag{13}$$

式中, k_1 、 k_2 均不小于0; $\Phi = F_{\max} - \bar{F}_{\text{avg}}$ 为评价个体早熟程度的指标,其中 $F_{\max}$ 为最大适应度, $\bar{F}_{\text{avg}}$ 为大于平均适应度的个体的平均适应度。

3) 精英个体保留策略

在每个种群的外边单独设置一个变量,用来记录“当前最好”个体(即“精英”)。在每代进化完成后,计算出各个体的适应度,分别找出最优和最差的个体。再把最优个体与“当前最好”个体进行比较。如果前者比后者还优秀,则用前者覆盖后者,作为新的“当前最好”个体。总是把“当前最好”个体替换该代的最差个体。

3 基于协同进化遗传算法(CGA)的水库群供水优化调度

本文应用 CGA 算法对水库群供水优化调度进行求解。各种群均采用实数编码,且两类种群采用同样的遗传操作。其具体计算步骤如下。

Step1: 个体编码。把水库在时段 t 允许的水位变化区间分成 m 等分,并依次用整数 $1,2,\cdots,m$ 表示,个体的每一向量(基因)即为水库水位的真值,即:

$$Z_t = Z_{t,\min} + N_{\text{rand}} \frac{Z_{t,\max} - Z_{t,\min}}{m} \tag{14}$$

式中, $Z_{t,\max}$ 、 $Z_{t,\min}$ 分别为 t 时段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。

Step2: 初始化决策种群和罚因子种群。给算法参数赋值,以梯级水库上游水位为 Z 决策变量,其维数为水库数目与时段数目之乘积;随机生成初始水库上游水位种群 Z ,种群规模为 L_1 ,并复制 L_2 份为种群 M 。以 ω_1 和 ω_2 为罚因子,随机生成含有 L_2 组罚因子的种群 Y ,其中 $Y_J = (\omega_{1,J}, \omega_{2,J}) (J = 1, 2, \cdots, L_2)$ 。

Step3: 以式(1)作为适应度函数来评价种群中各个体的优劣。

Step4: 决策种群和罚因子种群的遗传操作。对决策种群 M 中的各个子种群 Z 分别以种群 Y 中相同编号的个体作为罚因子,应用 GA 算法进行进化,直至达到设定迭代步数。应用式(9)和(10)计算种群 Y 中所有个体的适配值,并应用 GA 算法对种群 Y 进化下一代,从而获得新的罚因子种群 Y 。

Step5: 算法的迭代。在一代协进化结束后,返回 Step4,直至达到算法的收敛准则。

Step6: 最优解的输出。通过比较种群 M 中得到的所有历史最好解,将最优者作为最终解输出,同时种群 Y 中的最优个体即为最优罚因子。

4 实例分析

天津、唐山、秦皇岛市水资源紧缺,而滦河是北方地区较丰沛的河流之一,滦河下游潘家口水库、大黑汀水库、桃林口水库、于桥水库、陡河水库、邱庄水库是三市的重要水源地,研究滦河六水库联合供水优化调度,可充分发挥各水库的综合效益,降低三市的缺水损失。其中水库间的水利联系见图2,各水库主要特征参数如表1所示。

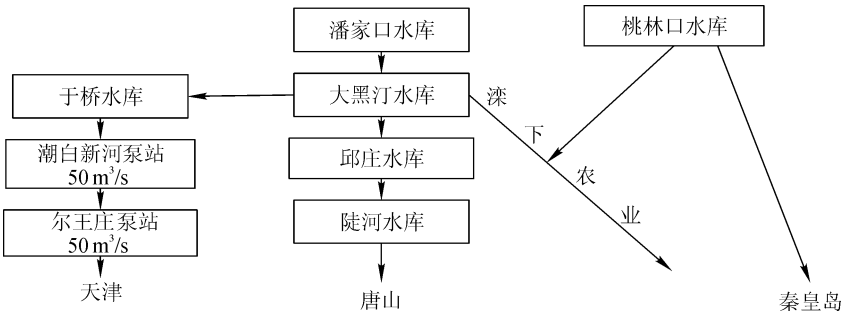


图2 滦河流域各水库间水利联系
Fig.2 The water relation among reservoirs in Luan River basin

表 1 滦河流域各水库主要特征参数

Tab.1 Main characteristic parameters of six reservoirs in Luan River basin

水库名称	校核洪水位/m	设计洪水位/m	总库容/(亿 m ³)	兴利库容/(亿 m ³)	死水位/m	死库容/(亿 m ³)	正常水位/m	正常库容/(亿 m ³)	汛限水位/m	汛限库容/(亿 m ³)
潘家口水库	227	224.5	29.3	19.5	180	3.31	222	22.81	216	19.5
大黑汀水库	133.7	133	4.73	2.07	122	1.13	133	3.2	133	3.2
于桥水库	27.72	25.62	15.59	3.85	15	0.36	21.16	4.21	19.87	2.98
邱庄水库	72.9	68.8	2.04	0.65	53	0.008	66.5	0.67	64	0.43
陡河水库	43.4	40.3	5.15	0.68	28	0.05	34	0.74	34	0.74
桃林口水库	144.32	143.4	8.59	7.09	104	0.51	143	7.6	143	7.6

根据天津、唐山、秦皇岛的 2005 年需水、当地水资源、各水库入流以及计划引水过程,应用协同进化遗传算法(CGA)进行编码,对水库群供水优化调度进行求解。为了验证该算法的合理性与有效性,本实例采用基本遗传算法(GA)与 CGA 算法在同等条件下进行对比研究。于桥、陡河、邱庄、桃林口、大黑汀水库均为年调节水库,故供水起调库容为死库容,调度期末再降到死库容,而潘家口水库为多年调节

水库,其起调库容设定为 15.4 亿 m³。算法通过 VB6.0 语言实现。在基于协同进化的遗传算法中罚因子种群规模 M_1 取 20,决策子种群规模 M_2 取 50,决策种群迭代步数 K 和罚因子种群迭代步数 T 均取 100,两类子种群初始交叉率均为 $P_c=0.8$,初始变异率均为 $P_m=0.1$ 。计算结果见表 2、表 3,潘家口水库库容变化过程见图 3,受水区缺水量随进化代数的变化见图 4。

表 2 基于协同进化遗传算法的水库群供水优化调度的多年平均结果

Tab.2 The annual average result of reservoirs optimal water supply operation used co-evolutionary genetic algorithm

月份	于桥水库		陡河水库		邱庄水库		桃林口水库			潘家口水库、大黑汀水库				
	供水/(亿 m ³)		供水/(亿 m ³)		供水/(亿 m ³)		供水/(亿 m ³)			供水/(亿 m ³)				
	供天津生活用水	供天津工业用水	供唐山生活用水	供唐山工业用水	供唐山生活用水	供唐山工业用水	供秦皇岛生活用水	供秦皇岛工业用水	供滦下农业用水	供天津生活用水	供天津工业用水	供唐山生活用水	供唐山工业用水	供滦下农业用水
1	0.45	0.21	0.25	0.07	0.01	0.09	0.08	0.05	0	0.01	0.16	0.14	0.31	0
2	0.45	0.18	0.25	0.09	0.12	0.11	0.08	0.09	0	0.11	0.16	0.12	0.12	0
3	0.45	0.14	0.25	0.11	0.11	0.08	0.08	0.09	0.68	0.01	0.16	0.02	0.07	0.56
4	0.45	0.12	0.25	0.12	0.02	0.09	0.08	0.09	0.66	0.01	0.16	0.01	0.07	0.51
5	0.13	0.12	0.05	0.11	0.01	0.08	0.08	0.09	0.61	0.32	0.49	0.21	0.17	0.42
6	0.13	0.11	0.10	0.05	0.04	0.07	0.08	0.05	0.44	0.32	0.49	0.15	0.22	0.65
7	0.12	0.12	0.08	0.03	0.03	0.06	0.08	0.05	0.37	0.33	0.49	0.14	0.23	0.58
8	0.12	0.13	0.07	0.04	0.02	0.07	0.08	0.05	0.41	0.33	0.49	0.16	0.35	0.51
9	0.08	0.07	0.08	0.02	0.02	0.08	0.08	0.05	0.42	0.37	0.49	0.23	0.35	0.41
10	0.02	0.06	0.17	0.03	0.04	0.12	0.08	0.09	0	0.43	0.49	0.11	0.17	0
11	0.30	0.05	0.25	0.14	0.11	0.09	0.08	0.09	0	0.15	0.49	0.12	0.16	0
12	0.11	0.06	0.25	0.08	0.01	0.11	0.08	0.09	0	0.34	0.49	0.11	0.18	0

表 3 不同方法计算结果

Tab.3 The results with different methods

方法	供水量/(亿 m ³)			缺水量/(亿 m ³)			计算机时/s
	生活	工业	滦下农业	生活	工业	滦下农业	
CGA	10.61	11.15	7.23	0	2.19	3.15	93
GA	10.61	11.01	7.15	0	2.33	3.23	108
模拟算法	9.87	11.23	6.72	0.74	2.11	3.66	—

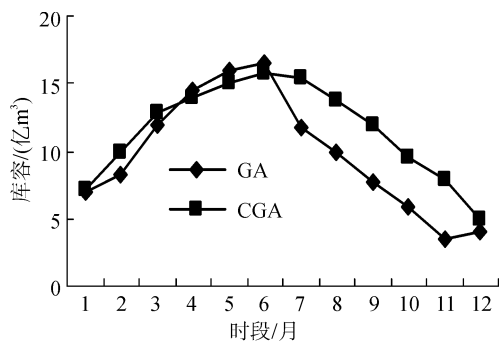


图3 潘家口水库库容变化过程

Fig.3 Variations of storage capacity of Panjiakou reservoir

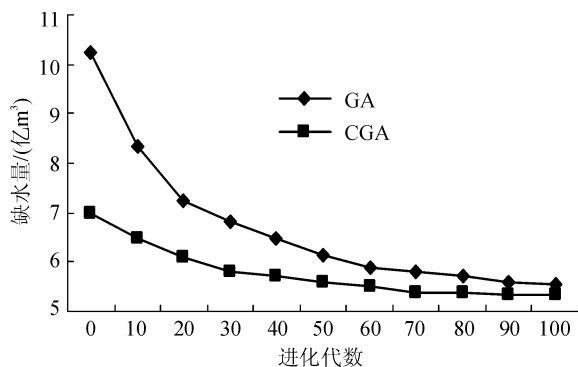


图4 受水区缺水量随进化代数的变化

Fig.4 Water deficiencies variations with evolution generation

从表2、表3和图3、图4可得出以下结论。

1) 将协同进化遗传算法用于水库群供水优化调度是可行的,同时CGA与GA相比较,CGA总缺水量有所减少,且在计算时间上较GA耗时少。这是由于CGA采用仿生原理,可在领域内的任何点进行搜索,大大地提高了计算速度。由图4可以看出CGA大约进化到30代左右时,适应度函数基本不变,算法收敛;而GA大约进化到60代左右时,算法才基本收敛,且缺水量较CGA增加0.22亿 m^3 。

2) 模拟算法没有对供水做区分,将所有用水视为一项用水,由表3可知,当不能满足正常供水时,所有用水同时发生缺水,缺水量较优化调度多1.17亿 m^3 。且生活、工业、农业的缺水损失是不一样的,因此本文水库供水优化调度,当不能满足正常供水时,首先保证生活用水,然后依次限制农业、工业用水,因为相同的缺水对居民生活造成的损失最大,工业其次,农业灌溉最小。

5 结 语

本文在介绍协同进化遗传算法的基础上,结合实际问题,提出了一种罚因子的评价机制,并将改进后的CGA算法应用于水库群供水优化调度中。实际算例结果表明,CGA适合于求解连续最优化问

题,该算法优化调度结果合理、有效,在计算精度和计算效率上能够满足生产实践的需要,为高维、复杂的水库群供水优化调度模型求解提供了一条新的途径。

参考文献:

- [1] Fjerstad P A, Sikandar A S. Next Generation Parallel Computing for Large-Scale Reservoir Simulation; Proceedings of the SPE International Improved Oil Recovery Conference in Asia Pacific[C]. 2005: 33-41.
- [2] Chang Fir-john, Chen Li, Chang Li-chiu. Optimizing the reservoir operating rule curves by genetic algorithms[J]. Hydrological Processes, 2005, 19(11): 2277-2289.
- [3] 陈立华,梅亚东,董雅洁,等. 改进遗传算法及其在水库群优化调度中的应用[J]. 水利学报, 2008, 39(5): 550-556.
Chen Lihua, Mei Yadong, Dong Yajie, et al. Improved genetic algorithm and its application in optimal dispatch of cascade reservoirs[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(5): 550-556.
- [4] 赵文举,马孝义,张建兴,等. 基于模拟退火遗传算法的渠系配水优化编组模型研究[J]. 水力发电学报, 2009, 28(5): 210-214.
Zhao Wenju, Ma Xiaoyi, Zhang Jianxing, et al. Optimal water delivery marshalling model based on simulated annealing genetic algorithm[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 28(5): 210-214.
- [5] 涂启玉,梅亚东. 基于改进遗传算法的溪洛渡水库优化调度研究[J]. 水电能源科学, 2008, 26(3): 39-42.
Tu Qiyu, Mei Yadong. Application of improved genetic algorithm in optimal dispatching of Xiluodu reservoir[J]. Water Resources and Power, 2008, 26(3): 39-42.
- [6] Reis L F, Bessler F T, Walters G A, et al. Water supply reservoir operation by combined genetic algorithm-linear programming (GA-LP) approach[J]. Water Resources Management, 2006, (20): 227-255.
- [7] 李可,马孝义,符少华. 基于改进遗传算法的水电站优化调度模型与算法[J]. 水力发电, 2010, 36(1): 92-96.
Li Ke, Ma Xiaoyi, Fu Shaohua. Scheduling optimization model and algorithm based on improved genetic arithmetic for hydropower station[J]. Water Power, 2010, 36(1): 92-96.
- [8] 慕彩红. 协同进化数值优化算法及其应用研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2010.
Mu Caihong. Co-Evolutionary Numerical Optimization Algorithms and Their Applications[D]. Xi'an: Xidian University, 2010.

(责任编辑 王卫勋)