

育种进化的改进遗传算法在水电站负荷分配中的应用

邓丽丽¹, 杨侃¹, 王启明², 陈静³, 周佳佳¹

(1.河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2.句容市水利农机局, 江苏 镇江 212400;
3.宜兴市水利农机局, 江苏 宜兴 214207)

摘要:针对遗传算法求解水电站负荷优化分配问题时常出现的收敛性差、易早熟等问题,提出一种基于育种进化的改进遗传算法。改进算法运用部分解约束的初始种群生成法避开空蚀振动区,定义了与群体进化程度有关的种群多样性函数和种群多样性阈值,同时有效地应用了遗传的全局搜索能力和育种的局部搜索能力。以三峡水电站为例与标准遗传算法进行了比较,不同的负荷分配结果表明:育种进化的改进遗传算法能够避开空蚀振动区的影响,保证机组的稳定安全运行;同时由于育种进化的强局部搜索能力,保持了种群的多样性,提高了算法的搜索能力和收敛性。

关键词:厂内经济运行;负荷优化分配;遗传算法;育种;部分解约束

中图分类号:TV697.1

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2015)02-0022-06

引言

水电站厂内经济运行是在保证电力系统安全可靠供电的前提下,使水电厂运行获得最大的经济效益。负荷优化分配(Economic Load Dispatch, ELD)是经济性运行的主要体现,不仅要考虑发电机组最小、最大预想出力的限制,且不能忽略实际负荷分配中存在的机组空蚀振动区等严重影响水轮机稳定和安全运行的限制问题。对空蚀振动问题的处理多采用惩罚的方式^[1,4-5]。周冉等^[1]在求解负荷分配的过程中采用罚函数对空蚀振动区的流量特性曲线进行变换处理。但动态规划法计算速度慢,在水电站机组数和解空间维数增多时会出现“维数灾”问题,达不到实时性的要求。

遗传算法^[2](genetic algorithm, GA)是模拟生物在自然环境中的遗传和进化过程而形成的一种自适应全局优化概率搜索算法。该算法具有鲁棒性强、隐含并行性、全局搜索特性等优点。近年来,随着数学与计算机技术的发展,GA被引入到水电站厂内经济运行领域^[3-4]。张仁贡、韩桂芳等^[3]在评价函数中进行惩罚处理来避开空蚀振动区。周慕逊、王万良等^[4]在适应度函数中采

用惩罚的方法使个体趋于合法化即避开空蚀振动区。上述对空蚀振动区的处理均是在适应度函数中施加惩罚,而标准遗传算法不善于处理非线性约束问题,且适应度函数的选择不当也可能导致算法出现收敛性差、易早熟等问题。育种算法^[5-6](Breeding Algorithm, BA)是由模仿培育优良品种的方法而提出的,具有很强的搜索能力和搜索速度。基于此,本文将遗传和育种相结合,提出了一种育种进化的改进遗传算法(Breed-evolutionary Improved Genetic Algorithm, BIGA),并用部分解约束^[7]的初始种群生成法以保证机组的稳定安全运行,有效的综合了遗传算法的全局搜索能力和育种算法的局部搜索能力,以改善算法收敛能力。

1 水电站负荷优化分配模型分析

1.1 水电站负荷优化分配数学模型

水电站负荷优化分配的目的是当系统要求的负荷,水电站水库上游水位确定时,优化机组功率,使整个电厂发电耗流量最小。最佳的负荷分配需要使机组运行效率最高且保证机组稳定安全运行,故必须避开机组的空蚀振动区。以下是水电站负荷优化分配模型

收稿日期:2013-11-29

基金项目:国家重点基础研究发展规划 973 项目(2012CB417006);国家科技支撑计划课题(2009BAC56B03)

作者简介:邓丽丽(1990-),女,江西宜春人,硕士研究生,研究方向为水库(群)优化调度与经济运行、水资源规划与管理。E-mail:denglili0312@126.com

通讯作者:杨侃(1965-),男,江苏苏州人,教授,研究方向为水库(群)优化调度与经济运行、水资源规划与管理。E-mail:kyang@hhu.edu.cn

结构:

目标函数:

$$\min Q = \sum_{j=1}^n c_j q_j(N_j, H) \quad (1)$$

负荷平衡约束:

$$\sum_{j=1}^n c_j N_j = P \quad (2)$$

机组预想出力约束:

$$N_{1,\min j} \leq N_j \leq N_{1,\max j} \quad (3)$$

机组稳定运行区约束:

$$N_{2,\min j} \leq N_j \leq N_{2,\max j} \quad (4)$$

式中: Q 为水电站机组的发电总耗水量; n 为机组数; j 为机组编号; c_j 为 j 号机组的开停机状态, 取值 0 或 1 分别表示机组关或开; N_j 为 j 号机组的出力, 即负荷; H 为电站水头; $q_j(N_j, H)$ 为 j 号机组在水头 H , 出力为 N_j 时的发电引用水量, 通过由拟合得到的机组流量特性函数计算得到; P 为系统对电厂的负荷要求; $N_{1,\max j}$ 和 $N_{1,\min j}$ 分别为水头 H 下 j 号机组预想出力的上下限; $N_{2,\max j}$ 和 $N_{2,\min j}$ 分别为水头 H 下 j 号机组稳定运行区的上下限。

1.2 机组运行工况约束分析

上述模型中机组运行工况约束不仅考虑了机组预想出力的限制还考虑了避开空蚀振动区的需要。机组运行区一般划分为空蚀振动区 (包括禁止运行区和限制运行区两部分) 和稳定运行区, 划分需要依据机组机架振动、轴承摆度标准来确定。图 1 所示为三峡右岸电站 ALSTOM 机组运行区域图。

在禁止运行区运行时机组极易造成严重破坏。而机组运行在限制运行区时存在一定程度的振动, 长期运行可能会造成疲劳破坏, 不利于机组的安全运行。只有在稳定运行区中机组才能长期连续稳定安全运行。因此进行水电站厂内经济运行研究时, 为了保证机组的稳定安全运行, 必须避开机组的空蚀振动区。由图 1 可知, 稳定运行区的上下限是一个与水头 H 相关的数值, 水头不同, 机组对应的稳定运行区是不同的。由于机组预想出力定义域也是一个与水头 H 相关的区间, 故可通过求交集的方式将上述式 (3) 和 (4) 转化为机组运行工况约束, 表示如下:

$$N_{\min j} \leq N_j \leq N_{\max j} \quad (5)$$

式中: $N_{\max j}$ 和 $N_{\min j}$ 分别为水头 H 下 j 号机组运行的可行区域上下限, 可行区域是水头 H 下 j 号机组按照运行区划分结果避开了空蚀振动区的区域。

2 遗传育种混合算法

遗传育种混合算法有效地结合了遗传算法的全局搜索能力和育种算法的局部搜索能力。为了提高搜索效率, 本文认为两种算法结合的关键是在遗传算法趋向于早熟时通过育种跳出这种局部最优状态, 为了界定什么情况下发生了早熟, 定义了种群多样性函数、种群多样性阈值 2 个参数。

第 k 代种群多样性函数 $u_s(k)$:

$$u_s(k) = \sqrt{\sum_{i=1}^{pop} (F_i - F_{aver})^2} \quad (6)$$

式中: pop 为种群的大小; F_{aver} 为当前种群的平均适应

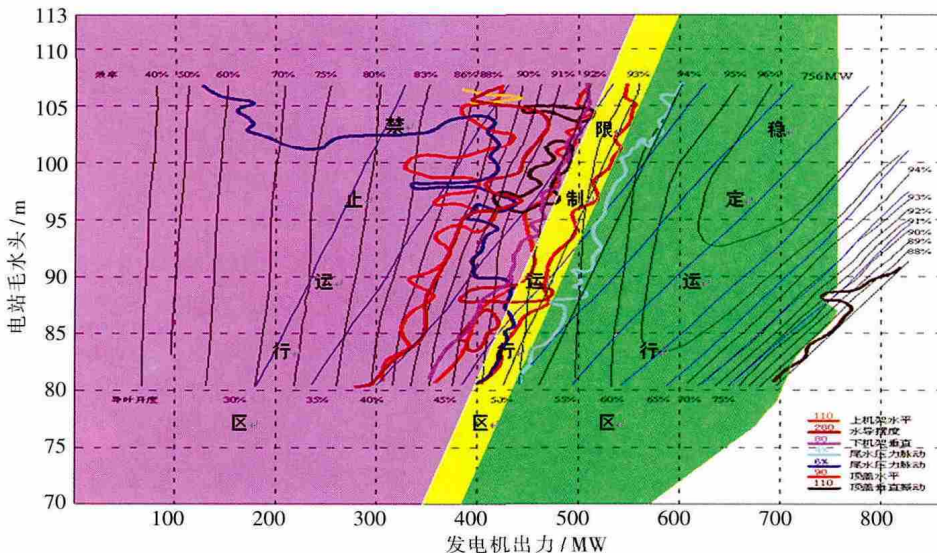


图 1 三峡右岸电站 ALSTOM 机组运行区域图

Fig. 1 ALSTOM unit operation area on the right of Three Gorges

度值; F_i 为当前种群中第 i 个染色体的适应度值。

种群多样性阈值 S 是由标准遗传算法确定的, 根据标准遗传算法中的种群多样性函数值的变化情况进行率定。经过多次试验, 在水电站负荷分配问题中, 认为 S 值可通过式(7)确定, 求得阈值的操作方式为: 首先在相同情况下对标准遗传算法进行多次模拟, 得到每一代的种群多样性函数值, 然后对模拟的种群多样性函数值的平均值按式(7)进行率定, 则可得到种群多样性阈值。

$$S=(1.0\sim 1.5)\frac{\sum_{i=1}^{gen}u_{sb}(k)}{gen} \quad (7)$$

式中: gen 为最大的进化代数; $u_{sb}(k)$ 为标准遗传算法中第 k 代种群的多样性函数值。

种群多样性函数描述的是种群中各个个体的分布情况即种群多样性的优劣, $u_s(k)$ 越小, 表示这一代种群的多样性越差。当 $u_s(k) < S$ 时, 认为算法出现早熟, 需通过育种增加种群多样性。基本思想如下: 通过遗传算法对种群进行全局搜索, 当遗传算法接近早熟时, 对每个个体进行育种进化操作, 通过引进新的信息, 改善群体质量。算法的求解过程见图 2。

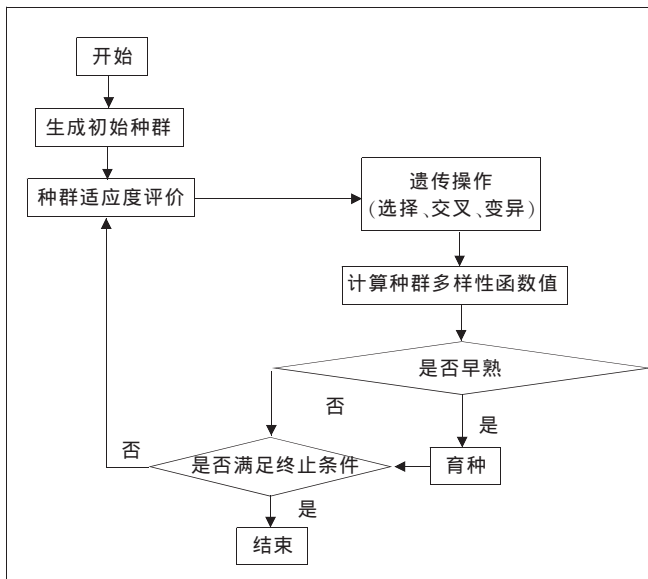


图 2 育种进化的改进遗传算法的求解过程

Fig. 2 The solving process of breed-evolutionary improved genetic algorithm

3 基于育种进化的改进遗传算法(BIGA)的负荷优化分配

育种进化的改进遗传算法(BIGA)是在标准遗传

算法(SGA)的基础上, 将育种运用于遗传算法。遗传算法中选择采用轮盘赌, 交叉采用算术交叉, 变异采用非均匀变异, 交叉概率和变异概率根据文献[8]的参数自适应思想进行调整。本文采用实数编码, 以控制精度为步长离散解空间, 建立编码与机组出力值的对应关系。

3.1 初始种群的生成

水电站厂内经济运行中负荷优化分配的目的在于满足负荷要求的前提下使机组避开空蚀振动区且耗流量最小。考虑到水电站厂内经济运行的特殊性, 本文运用了一种部分解约束的初始种群生成法, 解除了种群中部分个体的约束, 而另一部分个体虽没有解除约束, 但比较接近约束边界。

假设有 n 台机组参与发电, 则前 $n-1$ 台机组的负荷在负荷上下限范围内随机生成, 其编码方式及对应的负荷如式(8)、(9)所示。

$$k_{i,j} = \text{int} \left(\left(\frac{N_{\max,j}}{dt} - \frac{N_{\min,j}}{dt} + 1 \right) Rnd + \frac{N_{\min,j}}{dt} \right), j \neq n \quad (8)$$

$$N_{i,j} = dt * k_{i,j}, j \neq n \quad (9)$$

式中: $k_{i,j}$ 为第 i 个个体 j 号机组出力编码值; dt 为控制精度即出力离散的步长; Rnd 为一个(0,1)的均匀随机数; int 为取整函数; $N_{i,j}$ 为第 i 个个体 j 号机组出力编码对应的出力值。

第 n 台运行机组的负荷及编码通过式(10)、(11)、(12)确定。

$$N_{i,n} = p - \sum_{j=1}^{n-1} N_{i,j} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \text{if: } N_{i,n} > N_{\max,n} & \text{then: } N_{i,n} = N_{\max,n} \\ \text{if: } N_{i,n} < N_{\min,n} & \text{then: } N_{i,n} = N_{\min,n} \end{cases} \quad (11)$$

$$k_{i,n} = \frac{N_{i,n}}{dt} \quad (12)$$

在每次交叉、变异和育种操作后, 都需对第 n 台机组执行一次上述的操作。

3.2 适应度函数

水电站负荷分配模型中的约束条件主要包含负荷平衡约束(等式约束)和运行工况约束(不等式约束)两种。部分解约束的方法只能保证所有个体满足运行工况约束, 而对于负荷平衡约束, 只有部分个体满足。因此, 负荷平衡约束需要在适应度函数中采用惩罚函数来处理。适应度函数如下:

$$F_i = \frac{M}{(U_i + 0.001)} \quad (13)$$

式中: M 为一个较大的常数; U_i 是第 i 个 ($i=1, 2, 3, \dots$,

pop) 母体所对应的问题(1)至(2)的增广目标函数值见式(14)。

当运行机组的总负荷大于系统给定的负荷时, 由于惩罚的作用, 增广目标函数值 U_i 会增大, 但当运行机组的总负荷小于系统给定的负荷时, 由机组的流量特性曲线可知运行机组的总耗水量也会减少, 这时本文在增广目标函数中再加入一个惩罚因子, 使其满足要求。

$$U_i = \begin{cases} Q + R \left(\alpha * \left(P - \sum_{j=1}^n N_{i,j} \right) \right)^2, & \text{if: } \sum_{j=1}^n N_{i,j} \geq P \\ \left(Q + R \left(\alpha * \left(P - \sum_{j=1}^n N_{i,j} \right) \right) \right)^2 \times r, & \text{if: } \sum_{j=1}^n N_{i,j} < P \end{cases} \quad (14)$$

式中: R 和 r 均为惩罚因子; Q 为水电站运行机组的总耗水量, m^3/s ; P 为系统给定的负荷, kW ; $\sum_{j=1}^n N_{i,j}$ 为运行机组的总出力, kW ; α 为平衡量级系数, 使负荷罚函数的量级与流量相同, 这里取 10^{-4} 。

3.3 育种进化

育种与培育优良品种的方法类似, 即在种群中不断选择一些品质较优秀的种子, 不断繁殖, 直到种子对应的函数值达到全局最大。在遗传算法中, 随着种群的不断进化, 种群的相似度会逐渐增加, 多样性不断下降, 当种群趋向于早熟时, 选择种群中的所有个体作为种子繁殖下一代, 种群中的新个体由这些种子繁殖而来, 增加了种群的多样性, 同时也部分继承了种子的优秀特性, 避免算法陷入局部最优。BIGA 中育种进化的具体实现方法为如下:

- (1) 选择种群中所有个体作为种子进行繁殖。以其中一颗种子为例;
- (2) 将种子复制一份, 即为 G ;
- (3) 在 G 的染色体中随机产生两个基因号 S_1 和 S_2 (在水电站中即为机组的编号), 对 S_1 号和 S_2 号之间 (包括 S_1 号和 S_2 号) 的基因进行非均匀变异, 得到一个新个体 G_1 ;
- (4) 在染色体中随机选取一个基因座作为交叉点, 对个体 G 和 G_1 实施交叉, 得到新个体 G_2, G_3 ;
- (5) 计算 G, G_1, G_2, G_3 的适应度值并选择适应度最

高的个体代替原个体;

- (6) 其它种子也按 (2)~(5) 进行繁殖。

4 实例应用

三峡水库是一个具有防洪、发电、航运等多项综合效益的大型水利水电工程。三峡电厂装配单机容量为 $70 \times 10^4 \text{kW}$ 的混流式水轮发电机 32 台, 单机容量为 $5 \times 10^4 \text{kW}$ 的电源发电机组 2 台, 其中左岸电站装配 14 台, 右岸电站装配 12 台, 地下电站装配 6 台, 电源电站 2 台, 总装机容量 $2250 \times 10^4 \text{kW}$ 。这里仅对左岸和右岸的 26 台单机容量为 $70 \times 10^4 \text{kW}$ 的混流式发电机组进行分析研究, 从左岸到右岸, 依次对其排序编号。由于机组数目、类型众多, 机组工况组合方式多样, 因此三峡水电站机组负荷优化分配是一个高维复杂非线性优化问题。

本文分别采用育种进化的改进遗传算法 (BIGA) 和标准遗传算法 (SGA) (SGA 中初始种群采用传统的生成方式且等式及不等式约束均在适应度函数中用惩罚的方法处理) 优化三峡水电站 86m 水头下的负荷分配, 并以出力 $1 \times 10^4 \text{kW}$ 作为控制精度。表 1 列出了三峡水电站 86m 水头下各机组的稳定运行区。鉴于 GA 是以随机理论模拟生物在自然环境中遗传和进化的算法, 本文对 GA 优化电站 86m 水头下负荷分配的过程进行 8 次模拟, 并取最好的一次作为最终优化结果。为了比较两种算法的特性, 选择了大、中、小 3 种量级的负荷作为优化的目标负荷。两种算法的种群规模为 200, 迭代终止条件均为进化 500 代。

为了全面的比较两种算法的性能, 选择了 3 种比较指标—最小耗流量、最大耗流量和平均耗流量, 其中最小耗流量表示两种算法 8 次模拟中最好的一次寻优结果, 最大耗流量表示两种算法 8 次模拟中最差的一次寻优结果, 平均耗流量表示两种算法 8 次模拟的平均寻优结果。86m 水头下 BIGA 和 SGA 优化 3 种量级目标负荷的结果对比见表 2。两种算法优化 86m 水头下 3 种量级目标负荷的最优分配方案对比见图 3。图 3 中负荷上下限为 86m 水头下各机组对应的稳定运行区上下限。两种算法优化 86m 水头下不同量级

表1 86m水头下三峡水电站各机组的稳定运行区
Table1 Stable operation area of each unit in Three Gorges corresponding to each water head

水头 / m	左岸电站 VGS 机组 (1~3, 7~9 号)	左岸电站 ALSTOM 机组 (4~6, 10~14 号)	右岸电站东电机组 (15~18 号)	右岸电站 ALSTOM 机组 (19~22 号)	右岸电站哈电机组 (23~26 号)
86	46.5~70	51.5~70	45.5~70	49~70	45.5~70

目标负荷的种群最优适应度值随进化代数的变化对比见图4。图4中种群最优适应度值表示两种算法8次模拟中寻优最好一次的种群最优适应度值。表3比较了在种群规模和进化代数相同的情况下,两种算法优化3种负荷8次模拟的平均计算时间。

表2 86m水头下量级负荷的模拟结果对比

Table 2 The contrast results of magnitude load corresponding to 86 water head

负荷 /10 ⁴ kW	优化算法	最小耗流量 / m ³ ·s ⁻¹	最大耗流量 / m ³ ·s ⁻¹	平均耗流量 / m ³ ·s ⁻¹
1 380	BIGA	17 624	17 679	17 628.2
	SGA	17 782	17 823	17 839.1
	节约的耗流量	158	144	210.9
1 500	BIGA	18 948	18 999	18 952
	SGA	19 082	19 178	19 144
	节约的耗流量	134	179	192
1 600	BIGA	20 076	20 197	20 079.5
	SGA	20 218	20 382	20 243.2
	节约的耗流量	142	185	163.7

表3 两种算法平均计算时间对比(s)

Table3 The contrast of mean computation time from the two algorithms(s)

优化算法	负荷 / 10 ⁴ kW		
	1 380	1 500	1 600
BIGA	229.003	214.746	222.343
SGA	132.425	133.716	131.188

由表2可知,对于大、中、小三种负荷,在相同的种群规模和进化代数下,BIGA都能搜索到更好的解。由图4的关系曲线对比可以看出,SGA在优化负荷分配问题时,其收敛曲线快速上升,到一定代数后就不再变化,陷入局部最优,而BIGA的收敛曲线在进化过程中缓慢上升,能跳出局部最优,所遍历的解的空间更大,有更好的求解精度。这表明GA在迭代过程中由于种群多样性下降,最优个体解比较早的出现收敛现象,而BIGA通过在种群趋向早熟时进行局部搜索,总能找到更好的个体,跳出局部最优,因此BIGA具有更好的收敛能力。由图3可知,BIGA求得的最优分配方

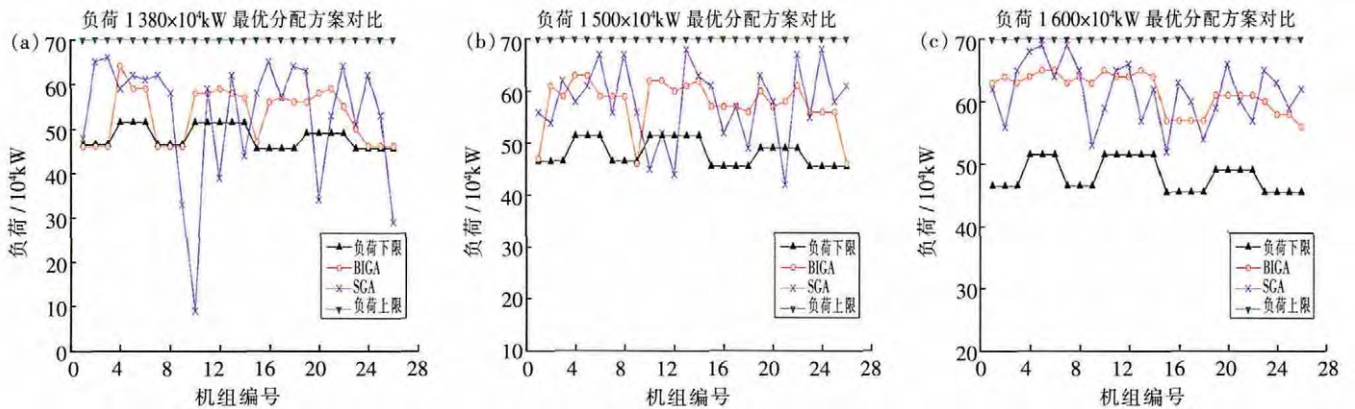


图3 86m水头下两种算法优化三种量级负荷的最优分配方案对比

Fig. 3 Optimal three-level load optimum allocation scheme comparison between the two algorithms for 86 water head

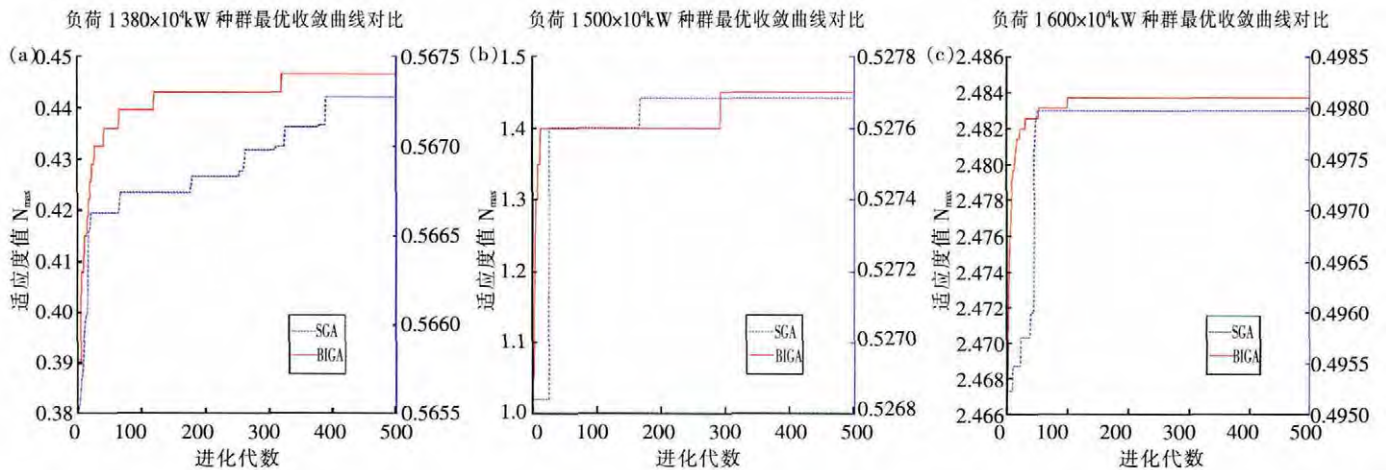


图4 86m水头下两种算法优化3种量级负荷的种群最优解收敛曲线对比

Fig. 4 Optimal three-level load convergence curve of population optimal solution comparison between the two algorithms for 86 water head

案使得所有机组均在稳定运行区中运行,而SGA求得的最优分配方案有部分机组在空蚀振动区运行。SGA得到的方案不能避开空蚀振动区,将会对机组造成很大危害,而BIGA求得的方案中所有机组均运行在稳定运行区,有利于机组的稳定与安全。由表3可知,在相同情况下,BIGA所需的计算时间多于SGA,这是因为BIGA是遗传和育种的耦合,加大了算法的复杂度,其计算时间也就相应增加了。综上所述,可以得出,虽然BIGA的计算复杂度有所增加,但其能充分利用遗传算法的全局搜索能力和育种的局部搜索能力,对于复杂优化问题可以找到质量更好的解。

5 结语

本文提出了一种由遗传和育种结合的求解水电站负荷分配的基于育种进化的改进遗传算法(BIGA)。改进遗传算法中部分解约束的种群生成法不仅找到了机组稳定运行区中的解,提高了机组运行的稳定性和安全性,且使大部分个体在约束范围之内或在约束的边界附近,减少了罚函数对个体优秀基因的排斥;育种进化的局部搜索是在种子的基础上进行繁殖,利用多点变异和特殊的交叉方式引入新个体,扩大了搜索范围,保持了种群的多样性,提高了算法的搜索效率和求解精度。

标准遗传算法(SGA)不能有效地处理非线性约束问题,对空蚀振动区的处理方式是给适应度函数施以惩罚,常常导致收敛性差、易早熟等问题,严重影响算法的搜索效率。本文提出的改进算法为遗传算法处理复杂约束条件的非线性优化问题提供了一种思路。

参考文献:

[1] 周冉,杨侃,郝永怀,等.考虑空蚀振动区的水电站厂内经济运行方法[J]. 中国农村水利水电, 2011,(6):153-155.(ZHOU Ran, YANG Kan, HAO

Yonghuai, et al. Research on the economic operation method for hydropower stations taking account of cavitation and vibration areas [J]. China Rural Water and Hydropower, 2011,(6):153-155. (in Chinese))

[2] 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.(ZHOU Ming, SUN Shudong. The Principle and Application of Genetic Algorithm [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999. (in Chinese))

[3] 张仁贡,韩桂芳,白家骢,等.遗传算法在水电站厂内经济运行中的应用[J]. 华北水利水电学院学报, 2006,27(1):61-64.(ZHANG Rengong, HAN Guifang, BAI Jiacong, et al. The application of genetic algorithm in inner-plant economical operation of hydropower station [J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2006,27(1):61-64. (in Chinese))

[4] 周慕逊,王万良,罗云霞.遗传算法在水电站机组优化组合中的应用[J]. 水力发电学报, 2008,27(5):5-9.(ZHOU Muxun, WANG Wanliang, LUO Yunxia. Research on application of genetic algorithm for unit optimized combination [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008,27(5):5-9. (in Chinese))

[5] 许必照. 育种算法简介[J]. 大众科技, 2005,(9):66-67.(XU Bixi. Breeding algorithms instruction [J]. Popular Science & Technology, 2005,(9):66-67. (in Chinese))

[6] 常晓宇,周春光,管恩政,等. 用育种算子改进遗传算法[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2005,23(2):157-161.(CHANG Xiaoyu, ZHOU Chunguang, GUAN Enzheng, et al. Using breeding operator to improve genetic algorithm [J]. Journal of Jilin University (Information Science Edition), 2005,23(2):157-161. (in Chinese))

[7] 于廷芳,林中达. 部分解约束算法在机组负荷优化组合中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2009,29(2):107-112.(YU Tingfang, LIN Zhongda. Application of float genetic algorithms-partially solved combined with punishing function in power plant units commitment problem[J]. Proceedings of the CSEE, 2009,29(2):107-112. (in Chinese))

[8] Srinivas, M., Patnaik, L. M. Adaptive probabilities of crossover and mutation in genetic algorithms [J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1994,2(4),656-667.

Breed-evolutionary Improved Genetic Algorithm for Load Dispatch of Hydropower Station

DENG Lili¹, YANG Kan¹, WANG Qiming², CHEN Jing³, ZHOU Jiajia¹

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Water Conservancy and Agricultural Machinery Bureau of Jurong City, Zhenjiang 212400, China; 3. Water Conservancy and Agricultural Machinery Bureau of Yixing City, Yixing 214207, China)

Abstract: Facing on the bad convergence and easy premature often emerged in Genetic Algorithm making solution of hydropower station economic load dispatch, the Breed-evolutionary Improved Genetic Algorithm (BIGA) was proposed. BIGA used the partial solution constraint initial population generation method to avoid cavitations-vibration range, so as to describe the level of group-evolution, and define the function of population-diversity and threshold of population-diversity. Meanwhile, the global searching ability of Genetic Algorithm and local searching ability of Breed were effectively applied. A contrast between BIGA and SGA applied for the Three Gorges hydropower station was presented. The distribution results based on several loads show that: In BIGA, stable and safe operation of unit were ensured by avoiding cavitations-vibration range. And, with the strong local searching ability of breed, the population diversity was maintained, and the searching ability and convergence of the algorithm were improved.

Key words: inner-plant economic operation; economic load dispatch; genetic algorithm; breeding; partial solutions constraint