

# 基于改进遗传算法的SF<sub>6</sub>断路器匀场设计

刘晓明, 闻福岳, 曹云东, 王尔智

(沈阳工业大学电气工程学院, 辽宁省 沈阳市 110178)

## Design on Uniform Electric Field of SF<sub>6</sub> Circuit Breaker Based on the Improved Genetic Algorithm

LIU Xiao-ming, WEN Fu-yue, CAO Yun-dong, WANG Er-zhi

(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110178, Liaoning Province, China)

**ABSTRACT:** A variable interval genetic algorithm (VIGA) optimization strategy was presented based on the conventional genetic algorithm (GA) to optimize the electrical apparatus with complicate structure. For increasing the crossover efficiency, the real-code mode was adopted, and an improved hybrid crossover strategy was proposed. To improve the convergence accuracy, avoiding local convergence, the generation mode of filial generation was adjusted. Moreover, the proposed VIGA was applied to optimize two typical testing functions with multimodal and multivariate. From the comparison of different optimized solutions by conventional GA, simulated annealing algorithm (SA) with the analytical for the testing functions, the feasibility and validity of the VIGA was verified. Electrode contour optimization of arc quenching chamber of a 550 kV 1-break extra high voltage (EHV) SF<sub>6</sub> circuit breaker using the VIGA was carried out to obtain not only a uniform electric field but also a dynamic distribution of electric field strength along different surfaces of electrode and shielding cover. The simulation result shows that the VIGA is valid for improving the electric field distribution and realizing the optimum design of the EHV circuit breakers.

**KEY WORDS:** genetic algorithms; real-coded; hybrid crossover; circuit breaker; optimization design; electric field

**摘要:** 提出一种适于求解复杂结构优化问题的改进遗传算法(variable interval genetic algorithm, VIGA)。采用实数编码方式以及混合杂交算子以提高实数编码杂交效率,同时,通过调整子代种群生成方式,提高算法收敛性,不至于过早收敛到局部极值。以2个典型测试函数为例,分别进行了多峰值、

多变量测试函数寻优测试,通过将VIGA寻优结果与测试函数解析解、传统遗传算法(genetic algorithm, GA)以及模拟退火优化(simulated annealing algorithm, SA)策略所得优化结果进行对比分析, VIGA的可行性和有效性得到证实。以550 kV单断口SF<sub>6</sub>断路器灭弧室为研究对象,进行触头结构优化设计,得到灭弧室内部各触头及屏蔽罩沿面电场分布。仿真结果表明,基于VIGA的电场逆问题求解可有效改善超高压断路器灭弧室电场分布,实现结构优化设计以及灭弧室内匀场设计。

**关键词:** 遗传算法; 实数编码; 混合杂交; 断路器; 优化设计; 电场

## 0 引言

提高绝缘性能是断路器产品研发的目标之一,基于现代智能优化策略的电场逆问题求解为断路器绝缘设计提供了可实现条件<sup>[1-3]</sup>。遗传算法以其通用性强、鲁棒性强、不依赖问题模型、适于并行分布处理等特点已在函数优化、组合优化、自适应控制以及人工生命等领域得到广泛应用<sup>[4-7]</sup>,与传统优化方法相比,具有更好的全局寻优能力,且自身具有并行特点,寻优效率较高。但由于GA自身存在早熟收敛,有迭代次数多、收敛速度较慢,以及局部搜索能力不强等缺点,不易实现复杂结构开关电器优化设计。

基于此,为了在保证不会存在重要基因缺失前提下减少计算时间,同时解决计算精度和收敛时间的矛盾,提出一种改进混合杂交遗传算法。通过采用实数编码、改进杂交算子、消除变异算子等策略以提高算法寻优效率,调整子代种群生成方式,实现快速全局优化设计。进而将VIGA用于SF<sub>6</sub>断路器灭弧室结构优化设计中,实现在不改变灭弧室整机体积前提下的电场匀场设计。

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(50537010, 50677039); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20060142001)。

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (50537010, 50677039); The Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (RFDP)(20060142001).

# 1 VIGA 算法的思想与实施

## 1.1 改进混合杂交

在实数编码遗传算法 (real-coded genetic algorithm, RGA) 中, 常用杂交算子包括标准杂交、算术杂交、混合杂交、基于方向的杂交等算子<sup>[8-14]</sup>。其中, 标准杂交算子是二进制单点杂交和多点杂交在实数下的扩展, 类似于遗传学中染色体杂交<sup>[15-19]</sup>, 但寻优效率与求解精度受到影响。为提高优化设计效率, 根据电器结构优化的具体情况, 选取混合杂交方式作为VIGA杂交算子。

提出改进混合杂交算子如下: 对父代(x, y)的每个分量(x<sub>i</sub>, y<sub>i</sub>), 设x<sub>i</sub><y<sub>i</sub>, D<sub>i</sub>=(1-t/T)|x<sub>i</sub>-y<sub>i</sub>|, 且0<α<1, 则后代在区间[x<sub>i</sub>-αD<sub>i</sub>, y<sub>i</sub>+αD<sub>i</sub>]中随机产生, 改进算子控制参数, 消除混合算子导致算法发散的可能性。其中, t、T分别为当前迭代次数和最大迭代次数。向量形式为

$$\mathbf{x}'=R[\mathbf{x}-\alpha\mathbf{D}', \mathbf{y}+\alpha\mathbf{D}'] \quad (1)$$

$$\mathbf{y}'=R[\mathbf{x}-\alpha\mathbf{D}', \mathbf{y}+\alpha\mathbf{D}'] \quad (2)$$

式中R函数的意义为取区间中的任意值。

二维混合杂交示意图如图1所示, 后代将在阴影部分产生。

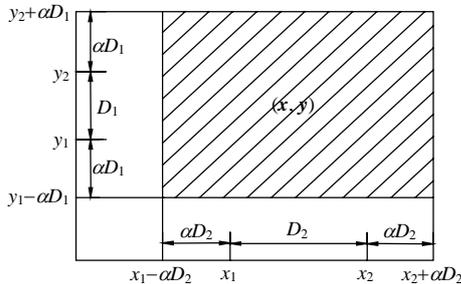


图1 二维情况下混合杂交示意图

Fig. 1 Blend-crossover in tow dimension case

在GA中, 变异算子的作用是弥补杂交过程中重要基因信息的遗漏, 虽然很重要, 但只是一辅助算子。如表1所示, 种群包含4个随机生成个体, 这些个体无论通过何种方式杂交, 位串左数第6的位置均不可能为1。若优化结果位串要求该位置为1, 显然仅依赖杂交不可能实现, 需引入变异算子以产生新的基因形式。而在RGA中, 通过混合杂

表1 变异算子在弥补基因缺失中的作用

Tab. 1 Role of the mutation operator

编号	染色体位串	适应值
1	1101101	109
2	0011001	25
3	1100101	101
4	1011100	92

交操作, 算法能够搜索到整个解空间, 也就是说, 以产生新的基因形式。而在RGA中, 通过混合杂交即使没有变异, 也不会存在重要基因缺失问题。因此, 本文提出的改进遗传算法, 取消了变异算子, 仅采用改进混合杂交算子, 提高了算法效率。

## 1.2 子代种群产生

GA一般以适应值大小来确定子代种群, 容易产生早熟, 而且在优化进程中, 是否能够以一定概率吸收劣解, 对算法全局收敛性能起着至关重要的作用。混合杂交算子可能会导致算法发散, 同时容易破坏当前种群优良基因。为保证算法具有较好的全局收敛性能, 弥补杂交算子导致算法发散的不足, 采用如下子代种群生成方式: 在当前种群与临时子代种群中选取N(种群规模)个较好个体作为子代种群; 以当前最优解替换子代种群中最差解, 构成最终子代种群, 继承优良个体。

## 1.3 VIGA 优化实施

VIGA 实施流程:

1) 由初始化种群、杂交率、种群规模及最大迭代次数, 计算初始种群目标函数值和适应值。

2) 若|F<sub>max</sub>-F<sub>min</sub>|<ε, 或达到最大迭代次数, 则输出寻优结果, 停止迭代; 否则, 转入下一步。其中F<sub>max</sub>、F<sub>min</sub>分别为当前种群中最优个体和最差个体的函数值, ε为给定精度。

3) 用轮盘赌选择法选择杂交双亲。

4) 产生一随机数r, 若r>p<sub>c</sub>, 则进行混合杂交; 否则, 将选取的杂交双亲直接放入子代种群。其中r∈(0, 1), p<sub>c</sub>为杂交概率。

5) 判断是否产生了N个子个体, 若成立, 则进入下一步; 否则, 重复步骤3)和4)。

6) 根据最优个体保持原则, 在原始种群与临时新种群之中选择新种群, 转入步骤2)。

# 2 VIGA 在多峰值及多变量测试函数中的应用

为验证VIGA在高维多峰复杂函数优化问题中的可行性和有效性, 选取典型测试函数进行寻优。计算环境为Pentium IV, CPU 2.80 GHz, 512 MB内存。

1) 测试函数 1:

$$F_1(x, y) = x \sin(\sqrt{|x|}) + y \sin(\sqrt{|y|}), \quad x, y \in [-500, 500] \quad (3)$$

最优值为

$$F_{1\max}(420.968 \ 746, 420.968 \ 746) = 837.965 \ 77 \quad (4)$$

2) 测试函数 2:

$$F_2(x) = -\sum_{i=1}^{30} (x_i \sin(\sqrt{|x_i|})), \quad |x_i| \leq 500 \quad (5)$$

最优值为

$$F_{2min}(x^*) = f_2(420.9687, 420.9687, \dots, 420.9687) = -12\,569.5 \quad (6)$$

图 2 为测试函数  $F_1(x, y)$  的峰值图,  $R$  所指为 VIGA 寻优轨迹, 优化参数设置如表 2 所示。此外, 采用 VIGA、GA 以及 SA 对上述两个测试函数进行寻优对比, 寻优结果及时间如表 3 所示, 测试函数寻优进程如图 3 所示。

由测试函数寻优结果可知, VIGA 可用于求解多峰值、多变量连续函数优化问题。对于多变量优化问题, VIGA 的寻优精度及寻优效率均高于 GA 和 SA; 对于多峰值问题, VIGA 同样具有较高的精度和寻优效率。

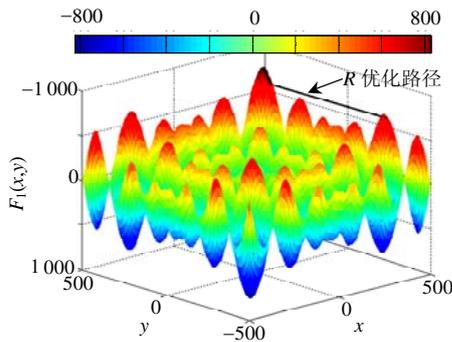


图 2 采用 VIGA 的测试函数  $F_1(x, y)$  及寻优轨迹  
Fig. 2  $F_1(x, y)$  and the seeking track of the optimum

表 2 采用 VIGA 的优化参数设置  
Tab. 2 Optimal parameter using the VIGA

测试函数	$N$	$p_c$	$\epsilon$
$F_1(x, y)$	50	0.8	0.0001
$F_2(x)$	50	0.85	0.001

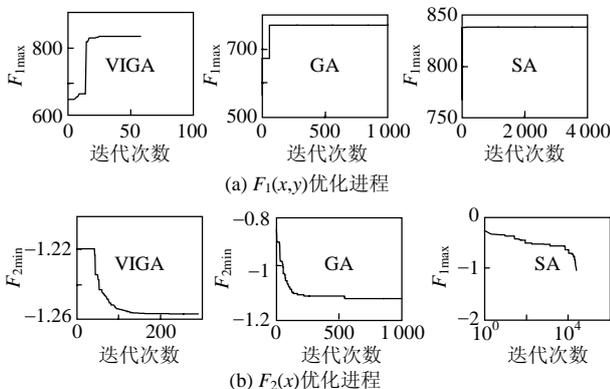


图 3 不同测试函数优化进程对比  
Fig. 3 Comparison of the optimization course for different testing functions

表 3 采用不同优化策略的测试函数寻优结果对比  
Tab. 3 Comparison of the optimum using different methods

目标函数	最优值	寻优时间/s	
$F_1(x, y)$	解析解	837.96577	
	VIGA	837.9658	0.016
	GA	769.4948	0.281
	SA	837.9658	1.344
$F_2(x)$	解析解	-12569.5	—
	VIGA	-12569.39	6.203
	GA	-11392.147	13.67
	SA	-10317.56	108.969

### 3 高压 SF<sub>6</sub> 断路器灭弧室触头结构优化

为实现 550 kV SF<sub>6</sub> 断路器灭弧室内电场匀场设计, 降低最大场强, 采用 VIGA 对灭弧室内触头结构进行优化设计。550 kV SF<sub>6</sub> 断路器灭弧室结构如图 4 所示。

采用有限元法计算灭弧室电场分布, 计算满足拉普拉斯方程

$$\begin{cases} \nabla^2 \varphi = 0 \\ \varphi|_{\Gamma_1} = f_1(p) \\ \frac{\partial \varphi}{\partial n}|_{\Gamma_2} = f_2(p) \end{cases} \quad (7)$$

电场计算条件: 静触头、静侧屏蔽罩及其金属连接件电位为 550 kV; 动触头、动侧屏蔽罩及其金属连接件电位为 0; SF<sub>6</sub>、喷嘴及空气相对介电常数分别取 1.00205、3.6、1.00058。

将图 4 所示的优化变量  $r_1, r_2, r_3, r_4$ , 采用向量形式表示为

$$\mathbf{R} = (r_1, r_2, r_3, r_4) \quad (8)$$

优化目标函数

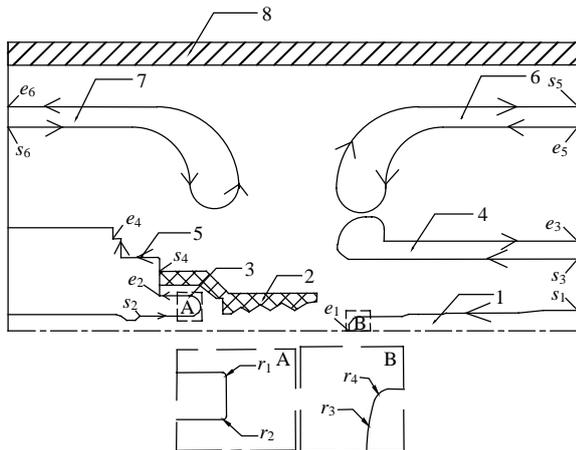
$$F(\mathbf{R}) = \min(E_{\max}(\mathbf{R})) \quad (9)$$

停止准则:  $|F_{\max}(\mathbf{R}) - F_{\min}(\mathbf{R})| < \epsilon$ , 取  $\epsilon = 10^{-4}$ 。

优化参数设置: 种群规模为 200, 杂交概率为 0.8, 最大遗传代数为 500。计算环境与文中 2 个测试函数寻优相同。

优化时间为 28975.891 s, 寻优曲线如图 5 所示, 迭代次数为 123。图 6(a) 为初始模型、产品结构以及优化后灭弧室结构触头型面对比, 图 6(b)~(d) 为不同灭弧室内部结构部件沿面电场分布对比, 图中计算点选取方向如图 4 中  $s_i (i=1, 2, \dots, 6)$ 、 $e_i (i=1, 2, \dots, 6)$  箭头所指。3 种结构最大电场强度如表 4

所示,结果表明:优化后触头型面较产品结构更加圆滑;电场分布较初始结构和产品结构均有所改善,灭弧室内部绝缘薄弱部位一动、静弧触头端部沿面电场强度、全场域最大电场强度及断口区域不均匀系数( $\eta=E_{\max}/E_{\text{avg}}$ )均下降;动、静触头侧屏蔽各结构部件沿面电场分布均得到改善.优化后灭弧室结构等电位和电场分布如图7所示.



1—静弧触; 2—喷口; 3—动弧触; 4—静主触;  
5—动主触; 6—静侧屏蔽罩; 7—动侧屏蔽罩; 8—瓷套;  
A—动弧触表面优化变量选取示意图;  
B—静弧触表面优化变量选取示意图;  
 $r_1, r_2$ —动弧触型面结构参数;  $r_3, r_4$ —静弧触型面结构参数;  
 $s_i (i=1,2,\dots,6)$ 、 $e_i (i=1,2,\dots,6)$ 分别表示各结构部件沿面计算点的  
起点及终点。

图4 灭弧室产品结构示意图

Fig. 4 Sketch diagram of the actual arc-quenching chamber

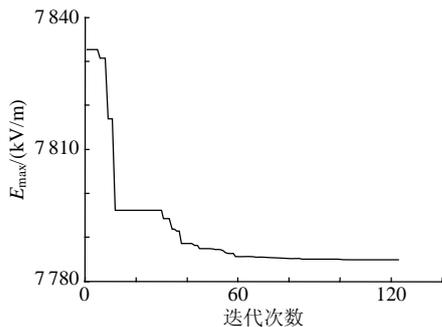
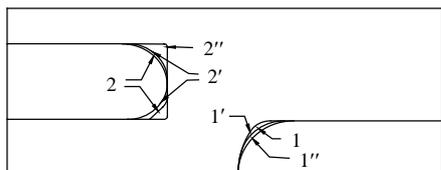


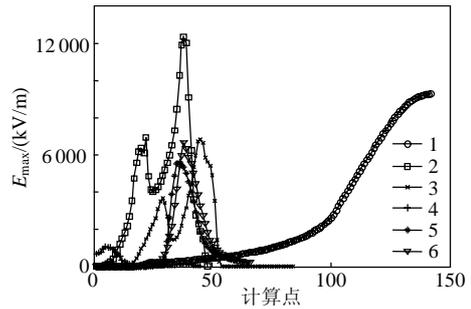
图5 寻优进程中场域最大电场强度变化曲线

Fig. 5 Variation of the maximum electric field strength during the optimization course

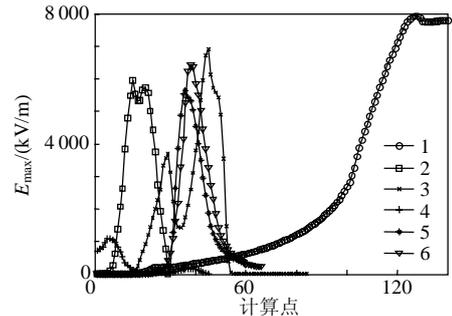


(a) 不同灭弧室结构触头型面对比

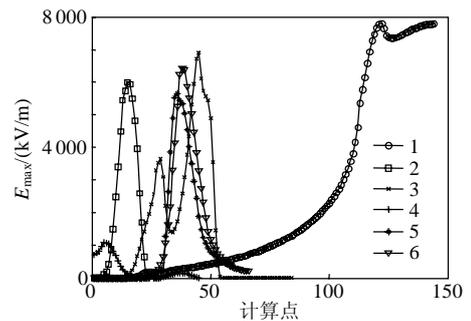
1, 1', 1''—产品结构、优化结构、初始结构静弧触头型面  
2, 2', 2''—产品结构、优化结构、初始结构动弧触头型面



(b) 初始灭弧室结构



(c) 灭弧室产品结构



(d) 优化后灭弧室结构

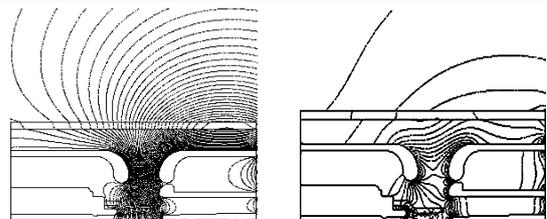
1—静弧触头; 2—动弧触头; 3—静主触头;  
4—动主触头; 5—静屏蔽罩; 6—动屏蔽罩。

图6 不同灭弧室结构电场计算结果对比  
Fig. 6 Comparison of calculation results for different models

表4 不同灭弧室结构电场计算结果对比

Tab. 4 Comparison of the results for different models

计算结构	最大场强/ (kV/m)	最大场强位置	$\eta$
优化结构	7784.9	静弧触头表面	2.52
产品结构	7950.5	静弧触头表面	2.57
初始结构	12394.0	动弧触头表面	4.056



(a) 等电位分布

(b) 等场强线分布

图7 灭弧室优化结构电场分布

Fig. 7 Distribution of electric field for the optimized arc-quenching chamber

## 4 结论

提出一种改进混合杂交遗传算法 VIGA, 通过典型测试函数寻优测试, 证明了其可行性和有效性。将 VIGA 其用于 SF<sub>6</sub> 断路器灭弧室匀场设计中, 降低了计算场域最大场强及不均匀系数, 均匀了灭弧室场域电场分布, 使产品设计在可实现的基础上得到优化, 满足工程实际要求, 为复杂电器结构多变量优化设计提供新途径。

## 参考文献

- [1] 张志远, 何川, 张鹏. 工程全域优化方法的研究进展和发展方向[J]. 水电能源科学, 2003, 21(1): 80-82.  
Zhang Zhiyuan, He Chuan, Zhang Peng. Survey and future development on global optimization algorithms in engineering[J]. Water Resources and Power, 2003, 21(1): 80-82(in Chinese).
- [2] Hanada Y, Hiroyasu T, Miki M. An improvement of database with local search mechanisms for genetic algorithms in large-scale computing environments[J]. IEEE Congress on Evolutionary Computation, 2005, 3(3): 1974-1981.
- [3] 林丹, 李敏强, 寇纪淦. 基于实数编码的遗传算法的收敛性研究[J]. 计算机研究与发展, 2000, 37(11): 1321-1327.  
Lin Dan, Lin Minqiang, Kou Jisong. On the convergence of real-coded genetic algorithms[J]. Journal of Computer Research & Development, 2003, 37(11): 1321-1327(in Chinese).
- [4] 金菊良, 杨晓华, 丁晶. 基于实数编码的加速遗传算法[J]. 四川大学学报, 2000, 32(4): 20-24.  
Jin Juliang, Yang Xiaohua, Ding Jing. Real coding based acceleration genetic algorithm[J]. Journal of Sichuan University, 2000, 32(4): 20-24(in Chinese).
- [5] Eshelman L, Schaffer J. Real-coded genetic algorithms and interval-schema[R]. San Francisco: Foundations of Genetic Algorithms, Morgan Kaufmann Publishers, 1992.
- [6] Miller JA, Potter WD, Gandham R V, et al. An evaluation of local improvement operators for genetic algorithms[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1993, 23(5): 1340-1350.
- [7] Liu Xiaoming, Wen Fuyue, Cao Yundong, et al. Multivariable optimal design of vacuum interrupter using novel self-adaptive genetic algorithm[C]. 22nd ISDEIV Conference, Matsue, Japan, 2006.
- [8] Koumosis V K, Katsaras C P. A saw-tooth genetic algorithm combining the effects of variable population size and reinitialization to enhance performance[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2006, 10(1): 19-28.
- [9] 曹云东, 刘晓明, 刘冬, 等. 动态神经网络法及在多变量电器优化设计中的研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(8): 112-116.  
Cao Yundong, Liu Xiaoming, Liu Dong, et al. Investigation of a dynamic neural network approach and its application of multivariable optimization to electrical apparatus[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(8): 112-116(in Chinese).
- [10] 谢公南, 王秋旺. 遗传算法在板翅式换热器尺寸优化中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(7): 53-57.  
Xie Gongnan, Wang Qiawang. Geometrical optimization design of plate-fin heat exchanger using genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(7): 53-57(in Chinese).
- [11] 陈树勇, 申洪, 张洋, 等. 基于遗传算法的风电场无功补偿及控制方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 25(8): 1-6.  
Chen Shuyong, Shen Hong, Zhang Yang, et al. Researches on the compensation and control of reactive power for wind farms based on genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 25(8): 1-6(in Chinese).
- [12] 郭卉. 改进遗传算法在牵引变压器优化设计中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2006, 25(4): 119-123.  
Guo Hui. Application of modified genetic algorithm to the optimum design of traction transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 25(4): 119-123(in Chinese).
- [13] 刘晓明, 闻福岳, 赵云学. 解空间均匀化自适应遗传算法的应用[J]. 沈阳工业大学学报, 2005, 27(6): 623-628.  
Liu Xiaoming, Wen Fuyue, Zhao Yunxue. Application of self-adaptive genetic algorithm with population uniformity in solution space[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2005, 27(6): 623-628(in Chinese).
- [14] 刘晓明, 闻福岳. 基于改进模拟退火法的电器优化设计[J]. 沈阳工业大学学报, 2007, 27(6): 610-612.  
Liu Xiaoming, Wen Fuyue. Optimal design of electric apparatus based on an improved simulated annealing approach[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2007, 29(6): 610-612(in Chinese).
- [15] 张世华, 睢刚. 一种实数编码的自适应遗传算法及其在热工过程辨识中的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(2): 210-214.  
Zhang Shihua, Ju Gang. A real-coded adaptive genetic algorithm and its application research in thermal process identification[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2): 210-214(in Chinese).
- [16] 粟梅, 孙尧, 覃恒思, 等. 矩阵变换器输入滤波器的多目标优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(1): 70-75.  
Su Mei, Sun Yao, Qin Hengsi, et al. An multi-objective optimized design of input filter of matrix converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(1): 70-75(in Chinese).
- [17] 陈彦桥, 倪敏, 刘吉臻, 等. 实数编码的遗传算法在厂级负荷优化分配中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(20): 107-112.  
Chen Yanqiao, Ni Min, Liu Jizhen, et al. Application of real-code genetic algorithm to economic load dispatch power plants[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(20): 107-112.
- [18] 孙力勇, 张焰, 蒋传文. 基于矩阵实数编码遗传算法求解大规模机组组合问题[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(2): 82-87.  
Sun Liyong, Zhang Yan, Jiang Chuanwen. A solution to the unit commitment problem based on matrix real-coded genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(2): 82-87(in Chinese).
- [19] 余娟, 颜伟, 李文沅. 考虑发电机安全运行极限的非固定分段无功优化模型及其算法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(7): 23-28.  
Yu Juan, Yan Wei, Li Wenyuan. An unfixed piecewise model of reactive optimization and its algorithms considering generator capability limits[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(7): 23-28(in Chinese).



刘晓明

收稿日期: 2008-04-18。

作者简介:

刘晓明(1968—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事现代电器设计与应用以及高电压与绝缘技术的教学与研究;

闻福岳(1982—), 男, 硕士研究生, 主要从事高电压绝缘研究;

曹云东(1963—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事现代电器设计与应用及智能电器教学与研究;

王尔智(1936—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事现代电器设计与应用研究。

(编辑 张玉荣)