

# 基于相似性自适应学习的遗传算法在无功优化中的应用

蔺红, 晁勤, 吐尔逊, 樊艳芳

(新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830008)

**摘要:** 针对常规遗传算法(GA)的不足, 提出了一种改进的遗传算法—基于相似性自适应学习的遗传算法, 为提高遗传算法的计算速度、收敛性和全局最优搜索能力, 采取了以下改进措施: ①针对遗传算法产生新解无序, 提出邻域搜索策略; ②为提高算法的搜索效率和效果, 按适应值相似性对个体分级、加速; ③为提高收敛速度, 提出了邻域收缩策略。将改进遗传算法应用于电力系统进行无功优化, 在收敛速度和全局收敛性与常规遗传算法进行了比较, 结果表明改进遗传算法的有效性。

**关键词:** 无功优化; 相似性; 邻域搜索; 遗传算法

## A genetic algorithm based on similitude frame of evolutionary computation applied in reactive power optimization

LIN Hong, CHAO Qin, TU Er-xun, FAN Yan-fang

(College of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830008, China)

**Abstract:** Aiming at the shortage of general genetic algorithm, a modified genetic algorithm based on similitude frame of evolutionary computation is proposed. The modified step that is used to improve calculation speed and astringency and entire optimum search ability is given. First, aiming at GA producing no order new individual, the near field search strategy is proposed. Second, according to adaptive value comparability the individual is classified and accelerated for improving search efficiency and effect. Third, the near field shrinkage strategy is proposed for improving rate of convergence. The improved algorithm is used in reactive power optimization of distribution network. Compared with the rate of convergence and the entire astringency of the general and modified genetic algorithm. The results from calculation examples show that the modified method is effective.

This project is supported by National Natural Science Foundation of Xinjiang Uigur Municipality Government(No.200421127).

**Key words:** reactive power optimum; comparability; near field search strategy; GA

中图分类号: TM76; TM714

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)16-0046-04

## 0 引言

电力系统无功分布的合理与否直接影响电力系统的安全和稳定。电力系统运行过程中, 提高电能质量, 减少电能损失具有特别重要的现实意义。在处理无功优化问题时, 控制变量的投切电容组和有载调压器主变抽头位置都是离散变量, 发电机端电压为连续变量, 系统潮流的方程为非线性方程, 电力系统无功优化问题是一个多维、变量类型混和、非线性、多目标规划问题。在当前电力系统中, 无功优化研究是一个十分热门的课题, 近年来国内外学者对此进行了大量的研究工作, 已提出了一系列的优化算法<sup>[2-9]</sup>。

遗传算法(GA)是一种基于自然选择和基因遗传学原理的随机并行搜索算法, 是一种寻求全局最优解而不需要任何初始化信息的高效优化方法<sup>[1]</sup>,

与传统算法相比该算法具有简单, 对目标函数不要求可导、可微, 且能方便地处理离散变量和获得全局最优解等优点。

理论研究表明, 传统遗传算法的主要环节存在固有的缺陷, 导致了早熟和局部收敛<sup>[1]</sup>, 针对遗传算法的不足, 本文提出了一种基于相似性自适应学习的遗传算法SFEC (Similitude Frame of Evolutionary Computation), 提出了新解产生机制, 按适应值相似性对个体分级、加速及邻域收缩策略, 从而保证了算法的收敛速度和全局最优搜索能力。

## 1 基于相似性自适应学习的改进遗传算法

### 1.1 基于相似性的邻域搜索

相似性是衡量对象之间相似程度的指标, 通过计算对象在特征空间 $F$ 中的距离获得。个体 $x, y$ 在特征空间 $F$ 上的距离为:

$$d_F(x, y) = \left[ \sum_{i \in F} \omega_i \sigma(x, y) \right]^{\frac{1}{r}}$$

$$\text{其中: } \sigma(x_i, y_i) = \begin{cases} |x_i - y_i|, & \text{如果 } F_i \text{ 连续} \\ 0, & \text{如果 } x_i = y_i \\ 1, & \text{其它} \end{cases}$$

式中:  $\omega_i$  是特征值  $x_i$  的权重  $\omega_i \geq 0$ ;  $r$  可以根据实际问题取值。个体  $x, y$  关于  $F$  的适应值相似性函数为:

$$s_F(x, y) = \frac{1}{d_F(x, y)}$$

表明相似性与对象之间的距离成反比。

### 1.2 分级

针对遗传算法中存在的搜索效果和效率平衡问题, 提出了利用适应值相似性对个体进行分级的搜索策略。分级的原则是把适应值相似的个体分配在同一级, 分级的目的是让优秀的个体进行局部极小值的搜索, 让较差的个体进行搜索空间的搜索, 以发现新的局部极小值。

根据父代个体的适应值的大小关系来调整算子的搜索范围和产生新解的数目, 使得较差的个体作更多更大范围的搜索, 以保证群体的多样性, 较好的解则在较小的范围内进行搜索, 以保证解的质量。

### 1.3 加速

针对遗传算法搜索效率较差的问题, 结合传统算法和数值分析的加速思想, 提出了用父代个体信息的组合进行加速的搜索策略, 对级别较高的个体进行简单加速, 对级别较低的个体进行单纯形加速。

$$\text{简单加速公式: } X^* = X^{(K)} + \lambda(X_i^{(K)} - X^{(K)})$$

$$\text{单纯形法加速公式: } X^* = \bar{X} + \lambda(X_j^{(K)} - \bar{X})$$

其中:  $X^*$  为局部极小点,  $X^{(K)}$  是第  $K$  代种群中的个体,  $X_i^{(K)}, X_j^{(K)}$  为  $X^*$  生成的子个体,  $\bar{X}$  为子群体的重心,  $\lambda$  是加速因子。

通过加速算子的使用, 算法的搜索效率得到提高。

### 1.4 邻域收缩

为提高收敛速度, 对适应值好的对象可以找到更好的值, 所以在搜索过程进行半径收缩; 对适应值差的对象以探索搜索空间为目标, 所以在搜索过程中不进行半径的收缩, 以保持种群的多样性。收缩公式为:  $r_{k+1} = \alpha r_k$ ,  $\alpha \in (0, 1)$ , 这里  $r_k$  为第  $k$  代的邻域半径。

通过邻域收缩, 算法的搜索速度明显提高。

## 2 基于相似性自适应学习的遗传算法在无功优化中的应用

### 2.1 无功优化的数学模型

无功优化模型的变量被分为控制变量和状态变量。本文在优化中选取了发电机 PV 节点电压、无功补偿容量和可调变压器的变比作为控制变量, 以 PQ 节点电压为状态变量, 以系统有功网损最小为目标函数, 把负荷节点电压越限和 PV 节点的发电机无功越限这两类不等式约束作为罚函数, 构成电力系统无功优化的数学模型。

#### (1) 目标函数

在此采用罚函数的形式构造适合于基于相似性自适应学习的遗传算法 SFEC 的无功优化目标函数:

$$\text{Min} F = \text{Min} [\Delta P + \lambda_v \sum_{i=1}^{n_1} \left( \frac{\Delta V_i}{V_{im}} \right)^2 + \lambda_G \sum_{i=1}^{n_2} \left( \frac{\Delta Q_i}{Q_{im}} \right)^2]$$

式中:  $\lambda_v$  和  $\lambda_G$  为罚因子, 右边第一项为系统的有功网损; 第二项为对节点电压越限的罚函数,  $n_1$  为系统内 PQ 节点的个数, 第三项为对 PV 节点发电机无功越限的罚函数,  $n_2$  为系统内 PV 节点的个数。

$$\Delta V_i = \begin{cases} V_{i\min} - V_i & V_i < V_{i\min} \\ 0 & V_{i\min} < V_i < V_{i\max} \\ V_i - V_{i\max} & V_i > V_{i\max} \end{cases}$$

$$V_{im} = V_{i\max} - V_{i\min}$$

$$\Delta Q_i = \begin{cases} Q_{i\min} - Q_i & Q_i < Q_{i\min} \\ 0 & Q_{i\min} < Q_i < Q_{i\max} \\ Q_i - Q_{i\max} & Q_i > Q_{i\max} \end{cases}$$

$$Q_{im} = Q_{i\max} - Q_{i\min}$$

### 2.2 约束条件

(1) 功率约束方程, 即潮流方程:

$$\Delta P_i = P_{Gi} - P_{Li} - V_i \sum_{j=1}^n Y_{ij} (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad i \in n$$

$$\Delta Q_i = Q_{Gi} + Q_{Ci} - P_{Li} - V_i \sum_{j=1}^n Y_{ij} (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad i \in n$$

式中:  $i=1, 2, 3, \dots, n$  为除平衡节点外的任一节点;  $P_{Gi}, Q_{Gi}$  为发电机节点的有功和无功出力;  $P_{Li}, Q_{Li}$  为负荷节点的有功和无功负荷功率;  $Q_{Ci}$  为补偿节点的可投切电容器的每组容量;  $G_{ij}, B_{ij}, \theta_{ij}$  为节点  $ij$  之间

的支路电导、电纳和相角差。

(2) 变量约束:

$$\text{控制变量: } \begin{cases} Q_{Ci\min} < Q_{Ci} < Q_{Ci\max} \\ T_{i\min} < T_i < T_{i\max} \end{cases}$$

$$\text{状态变量: } \begin{cases} V_{i\min} < V_i < V_{i\max} \\ Q_{Gi\min} < Q_{Gi} < Q_{Gi\max} \end{cases}$$

式中:  $Q_{Ci}$  是无功补偿节点补偿容量;  $T_i$  是变压器档位;  $V_i$  是 PQ 节点的电压,  $Q_{Gi}$  是发电机节点无功出力。

在进行无功优化过程中, 控制变量的不等式约束将自动得到满足, 同时无功优化过程中潮流方程的求解保证了功率约束方程得到满足, 因此, 在无功优化中, 真正需要考虑的约束条件是状态变量的不等式约束。

基于相似性自适应学习的遗传算法, 主要有目标函数和适应性函数的确定; 对每一级个体进行变异和加速处理; 为提高收敛速度在搜索过程进行半径收缩等几个方面的内容, 按 1 节的策略。

### 2.3 无功负荷容量分级

以无功负荷容量作为优化变量, 设将无功负荷容量分成  $j$  级, 记

$$S_f(Q_1^*) = \max\{S_f(Q_i)\}$$

$$S_f(Q_2^*) = \min\{S_f(Q_i)\}$$

$$L = (S_f(Q_1^*) - S_f(Q_2^*))$$

其中:  $Q_i \in P$ ,  $P$  为种群。对任意的  $Q_i \in P$  若有

$$f(Q_2^*) + \frac{j}{k}L < f(Q_i) \leq f(Q_2^*) + \frac{j+1}{k}L \text{ 则第 } Q_i \in j \text{ 级。}$$

## 3 算例与分析

### 3.1 算例

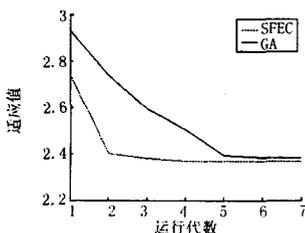


图 1 两机五节点接线图

Fig.1 Two-generator five-bus connection diagram

现对两机五节点系统如图 1 进行优化计算。系统参数如图 1 所示 (采用标么值数据)。算法流程如

图 2 所示。

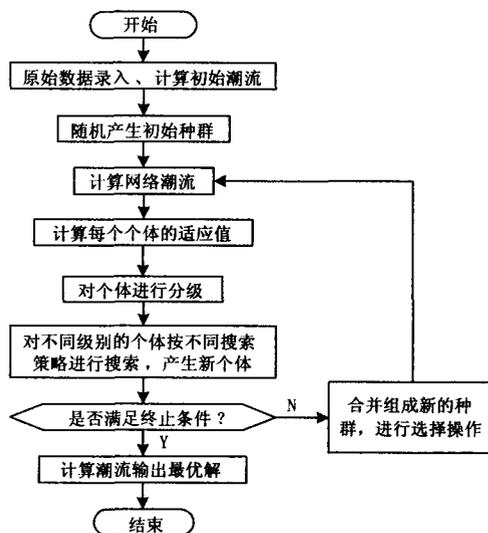


图 2 基于相似性自适应学习的改进遗传算法流程图  
Fig.2 Flow chart of modified genetic algorithm based on similitude Frame of evolutionary computation

本文应用 VC++ 语言进行优化程序设计, 采用实数编码, 在相同遗传代数的条件下采用改进遗传算法与常规遗传算法 GA 进行计算, 优化计算结果如表 1、2、3 所示 (节点电压及功率采用标么值)。

表 1 无功功率的优化配置

Tab.1 Optimal configuration of reactive power			
节点名	初始状态	传统遗传算法	改进遗传算法
g1	1.8131	2.3579	2.3876
g2	2.2994	1.9391	2.0044
b1-220	0.8000	0.3779	0.3600
b2-220	1.0000	1.9830	2.0150
b3-220	1.3000	1.1500	1.2250

表 2 系统的电压优化结果

Tab.2 Optimization results of system voltage					
节点名	电压上限	电压下限	初始状态	遗传算法	改进算法
g1			1.0500	1.0500	1.0500
g2			1.0500	1.0500	1.0500
b1-220	1.10	0.90	0.8622	0.9502	0.9521
b2-220	1.10	0.90	1.0779	1.0763	1.0693
b3-220	1.10	0.90	1.0364	1.0461	1.0471

电力系统无功优化是在满足各设备和电网运行参数等约束条件下, 调节发电机的无功出力, 改变无功补偿设备 (电容器和电抗器) 的投切容量, 来进行电网无功功率的合理分布, 实现电网电压合格率最高、有功网损最小的安全经济运行目标。

表 3 系统网损优化结果及计算时间

Tab.3 Optimization results of system transmission losses and calculate times

算法名称	有功网损	无功网损	计算时间/s
初始潮流结果	0.2794	1.0125	
常规遗传算法	0.2502	0.7861	58
改进遗传算法	0.2419	0.7920	46

从表 1 中可看出发电机节点(节点 g1、g2)无功输出的变化,各负荷节点(节点 b1、b2、b3)无功补偿容量的变化。从表 2 中可以看出,采用改进遗传算法进行优化后,电压标么值从初始值 0.8622(小于电压允许的下限值)升到 0.9521,与常规遗传算法的电压优化结果相比,优化效果更好。从表 3 系统的网损优化结果中可见,采用改进遗传算法的有功网损由初始结果 0.2794 降至 0.2419,降幅为 13.4216%,常规遗传算法的网损降幅为 10.4510%。从表 3 中可以看出采用传统遗传算法计算时间为 58 s,而采用改进遗传算法进行优化时,在相同的进化代数计算时间仅为 46 s,产生最优解,可见改进遗传算法比传统遗传算法的收敛速度快,计算效率高,且优化结果更佳。

### 3.2 收敛性对比

从图 3 中两条曲线的变化走势可以看出,采用改进的遗传算法进行优化时,每代个体最小适应值从一开始就小于常规遗传算法,而且随着遗传进化过程的进行两者之间的差值开始逐渐增大随后又缩小。这证明了改进的遗传算法可以加速淘汰适应值差的个体,不断地促进提高每一代个体平均适应值,对遗传算法进行加速,从而加快进化过程,使种群快速向全局最优解范围收敛,从而最终得到较好的优化计算结果,在同等遗传代数的条件下,其优化计算结果必然优于常规遗传算法的计算结果。

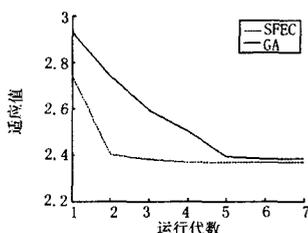


图 3 进化历程

Fig.3 Evolutionary process

### 3.3 种群分布

由图 4(a)可看出,大部分个体已经分布在全局最优解附近,基本上找到了节点 b2 和节点 b3 的最优补偿容量 2.015, 1.225。由图 4(b)可以明显地看出,

绝大多数种群收敛在了最优点,即找到了节点 b2 和节点 b3 的最优补偿容量。由图 4(c)看出,在第四代种群收敛到最优点后,以后的几代中是逐渐对较差的个体进行改进,使其收敛到最优点。表明该改进算法收敛速度快。

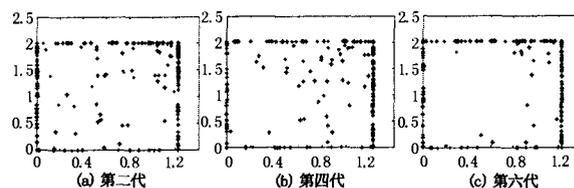


图 4 种群的分布图

Fig.4 Distributing chart of population

## 4 结论

1) 本文建立了无功优化数学模型,并通过算例证明其可行性。

2) 本文提出了一种基于相似性学习自适应的遗传算法,并通过实例仿真计算,表明将其应用于电力系统无功优化是正确有效的,提出的优化方案较好地改善了系统的电压水平和无功分布,提高了供电质量,降低了电能损耗。通过实例对传统遗传算法和改进遗传算法进行了比较,比较结果证明本文提出的改进策略是有效的,快速收敛的,具有良好的理论价值和实用价值。

### 参考文献

- [1] 王凌.智能优化算法及其应用[M].清华大学出版社,2004.
- [2] 张武军,叶剑峰,梁伟杰,等.基于改进遗传算法的多目标无功优化[J].电网技术,2004,28(11): 67-71.  
ZHANG Wu-jun, YIE Jian-feng, LIANG Wei-jie, et al. Multiple-Objective Reactive Power Optimization Based on Improved Genetic Algorithm[J]. Power System Technology,2004,28(11): 67-71.
- [3] 向铁元,周青山,李富鹏,等.小生境遗传算法在无功优化中的应用研究[J].中国电机工程学报,2005,17(9):48-51.  
XIANG Tie-yuan, ZHOU Qing-shan, LI Fu-peng, et al. Research on Niche Genetic Algorithm for Reactive Power Optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2005,17(9):48-51.
- [4] 何建军,郑霓虹,王官洁.基于改进遗传算法的配电网无功优化[J].电力系统自动化学报,2002,14(3):16-19.  
HE Jian-jun, ZHENG Ni-hong, WANG Guan-jie. Reactive Power Optimization Based on Genetic Algorithm in Distribution Network[J]. Proceedings of the EPSA,2002, 14(3):16-19.

- Winter Meeting[C]. Perth (Australia):2001. 815-820.
- [4] Fukuyama, Y, Yoshida H. A Particle Swarm Optimization for Reactive Power and Voltage Control in Electric Power Systems[A]. In:Proceedings of the 2001 Congress on Evolutionary Computation[C]. Seoul (South Korea):2001. 87 -93.
- [5] 倪伟, 单渊达. 具有优化路径的遗传算法应用于电力系统无功优化[J]. 电力系统自动化, 2000, 24 (21) : 40-44.  
NI Wei, SHAN Yuan-da. A Refined Genetic Algorithm With Optimal Searching Path Used in Power System Reactive Power Optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24 (21) :40-44.
- [6] 陈星莺, 钱锋, 杨素琴. 模糊动态规划法在配电网无功优化控制中的应用[J]. 电网技术, 2003,27(2):68-71.  
CHEN Xing-ying, QIAN Feng, YANG Su-qin. Application of Fuzzy Dynamic Programming Approach to Optimal Reactive Control in Distribution System[J]. Power System Technology, 2003,27(2):68-71.
- [7] 刘自发, 葛少云, 余贻鑫. 基于混沌粒子群优化方法的电力系统无功最优潮流[J]. 电力系统自动化, 2005, 25(7): 57-61.  
LIU Zi-fa, GE Shao-yun, YU Yi-xin. Optimal Reactive Power Dispatch Using Chaotic Particle Swarm Optimization Algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 25(7): 57-61.
- [8] H. C. Berg, D. A. Brown. Chemotaxis in Escherichia Coli Analyzed by Three-dimensional Tracking[J]. 1972.500-504.
- [9] Bremermann H J. Chemotaxis and Optimization[M]. 1974: 397-404.
- [10] 李威武, 王慧, 邹志君, 等. 基于细菌群体趋药性的函数优化方法[J]. 电路与系统学报, 2005, 1:58-63.  
LI Wei-wu, WANG Hui, ZOU Zhi-jun, et al. Function Optimization Method Based on Bacterial Colony Chemotaxis[J]. Journal of Circuits and Systems, 2005, 1:58-63.
- [11] ZHANG Hai-bo, ZHANG Li-zi, MENG Fan-ling. Reactive power optimization based on genetic algorithm[A]. In:1998 International Conference on Power System Technology[C]. Beijing (China): 1998.1448-1453.
- [12] 刘明波, 李健, 吴捷. 求解无功优化的非线性同伦内点法[J]. 中国电机工程学报, 2002,22 (1) :2-8.  
LIU Ming-bo, LI Jian, WU Jie. Nonlinear Homogeneous Interior-point Method for Reactive-power Optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(1):2-8.

收稿日期: 2007-01-26; 修回日期: 2007-03-10

作者简介:

赵义术 (1975-), 男, 博士, 从事电力系计算分析工作; E-mail:zhaoyishu75@sohu.com

李磊 (1974-), 男, 副教授, 从事电力系计算分析工作;

王大鹏 (1970-), 女, 副教授, 从事电力系计算分析工作。

(上接第 49 页 continued from page 49)

- [5] 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, 2005, 4(2):119-123.  
GUO Hui. Application of Modified Genetic Algorithm to the Optimum Design of Traction Transformer [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 4(2):119-123.
- [6] 张勇军, 任震, 钟红梅. 实时无功优化调度中的邻域搜索改进遗传算法[J]. 电网技术, 2003, 27(1):22-25.  
ZHANG Yong-jun, REN Zhen, ZHONG Hong-mei. An Improved Genetic Algorithm with Neighborhood Search for Real Time Optimal Reactive Power Dispatch[J]. Power System Technology, 2003, 27(1):22-25.
- [7] 戴雯霞, 吴捷. 无功功率优化的改进退火选择选择传算法[J]. 电网技术, 2001, 25(11):33-37.  
DAI Wen-xia, WU Jie. A Modified Genetic Algorithm with Annealing Selection for Reactive Power Optimization[J]. Power System Technology, 2001, 25(11): 33-37.
- [8] 夏可青, 等. 基于自适应遗传算法的多目标无功优化[A]. 中国高等学校电力系统及其自动化专业第二十一届全国学术年会论文集[C]. 2005.766-770.
- [9] 熊信良, 吴耀武. 遗传算法及其在电力系统中的应用[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.

收稿日期: 2007-04-19; 修回日期: 2007-06-30

作者简介:

蔺红 (1969-), 女, 讲师, 主要从事电力系统稳定性分析研究及智能化控制研究与教学; E-mail:tseagle@163.com

晁勤 (1959-), 女, 博士生导师, 主要从事电力系统综合自动化及风力发电技术与教学。