

一种综合改进型遗传算法及其在综合负荷建模中的应用

金群¹, 李欣然¹, 刘艳阳¹, 陈辉华², 唐外文²

(1. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙, 410082; 2. 湖南电力调度通信中心, 湖南 长沙 410007)

摘要: 针对基本遗传算法本身存在收敛速度慢和易早熟的缺陷, 提出一种综合改进型遗传算法并成功地应用于负荷建模。该改进遗传算法通过对初始种群的选择、最优个体的保留、自适应的交叉和变异率、早熟现象的防止策略等各方面进行综合的科学设计, 能十分有效地克服早熟、避免近亲繁殖、明显提高收敛速度, 并具有优良的自适应特性。基于现场实测负荷特性数据的负荷建模实践表明, 所提出的综合改进型遗传算法对于加速收敛缩短辨识时间、提高模型拟合精度、克服模型参数的分散性均具有显著作用, 是一种很适合于负荷建模的优秀优化算法。

关键词: 电力系统; 负荷建模; 参数辨识; 遗传算法; 综合改进

中图分类号: TM714 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)10-0018-05

0 引言

电力系统综合负荷建模在模型结构确定后, 参数辨识便成为建模的核心。应用于负荷模型参数辨识的传统方法很多, 但它们都有一共同的缺点: 必须给定待辨识参数初始值且初始值的不同对模型参数的辨识结果影响很大; 对目标函数要求苛刻, 不仅有单峰要求, 对于基于目标函数解析性质的优化方法还要求存在一阶导数甚至二阶导数。电力系统综合负荷从理论上讲具有高阶和严重非线性的特点, 目标函数和解空间都相当复杂, 解空间内不仅有多个极值点, 且有些极值点之间的差异细微。因此传统优化方法用于负荷建模往往使参数辨识结果呈现较大的分散性, 此为负荷建模研究成果实用化的严重障碍。正因为如此, 优化算法选择在负荷建模研究中的作用正在受到越来越多的重视^[1]。

遗传算法(GA)作为一种有效的全局直接搜索方法, 具有求解过程与梯度信息无关的优点和将复杂的非线性问题经过有效搜索和动态演化而达到优化状态的特性, 使得其在应用于复杂问题的优化上具有很大的优势^[2,3]。因此, 遗传算法的提出为负荷建模的参数辨识开辟了新途径。然而研究表明基本遗传算法有两大缺陷: 易发生早熟和收敛速度慢^[4]。鉴于此, 许多学者针对不同的具体应用问题对基本遗传算法的改进作了一系列的研究, 但往往

将注意力集中于对选择、交叉和变异等基本算子, 可实际上遗传算法的不足并不仅仅由这些原因造成, 控制参数选择不当对结果的影响也很大^[5]。本文结合基本算子的改进和控制参数的选择, 提出一种综合改进型遗传算法来解决基本遗传算法的缺点并成功地应用于基于现场实测负荷特性数据的综合负荷建模。该改进遗传算法通过对初始种群的选择、最优个体的保留、采用自适应的交叉和变异率、早熟现象的防止策略等各方面进行综合的科学设计, 能够十分有效地克服早熟、避免近亲繁殖、明显提高收敛速度, 并具有优良的自适应特性。基于现场实测负荷特性数据的负荷建模实践表明, 本文提出的综合改进型遗传算法对于加速收敛缩短辨识时间、提高模型拟合精度、克服模型参数的分散性均具有显著的作用, 是一种很适合于负荷建模的优秀优化算法。

1 遗传算法的基本特点

1.1 遗传算法的基本思想

遗传算法是一种非线性优化方法, 其基本思想是: 按照一定的规则生成基因编码的初始群体, 然后从这些代表问题的可能潜在解的初始群体出发, 挑选适应度强的个体进行交叉和变异, 以期发现适应度更佳的个体^[6]。

可见, 遗传算法包括: 参数编码、初始种群的设定、适应度函数的设计、遗传操作的设计和控制参数的设定, 也就是通常所说的遗传策略。

1.2 与其他算法的比较

传统的搜索方法对问题性质有较高的要求, 从

基金项目: 《高等学校骨干教师资助计划》资助(教技司[2002]65号); 《湖南省教育厅重点项目》资助(湘教通[2001]197号)

初始可行解开始,运行新的可行解产生规则,持续在当前解的领域中搜索比当前解更好的可行解^[6]。它的运行机理决定了其只在当前可行解的附近进行搜索,所以有很好的局部搜索和解的求精能力。然而,在多峰函数问题上,能否搜索到全局最优解以及算法的计算效率等问题,与初始解的选择和领域结构的设计存在着直接关系。

早期的随机搜索法在问题空间中随机选择一定数量的点后从中选优,带有一定的盲目性,而且计算效率低,不适用于大型优化问题求解。

GA是一种结合了有向和随机两种能力的通用搜索方法。从整体上讲,由于GA采用群体搜索策略,GA的操作对象是一组可行解,即群体中的各个个体并行地爬山,并利用遗传信息和竞争机制来指导搜索方向。可有效防止搜索过程收敛于局部最优解,且对问题函数的限制很少,不要求连续、可微,适用面广,这是由于GA使用适应值这一信息进行搜索,并不需要问题导数等与问题直接相关的信息。

相比较而言,对于求解整体优化问题的全局最优解,GA具备较高的搜索能力。

2 遗传算法的综合改进及策略设计

GA应用于优化问题求解,在搜索过程中,不仅需要搜索解空间上的全局最优解,而且应当充分利用已获得的解信息逼近当前局部最优解,这就是GA的广度和深度搜索能力^[7]。我们将GA应用于电力负荷建模,取同步坐标下的三阶感应电动机模型作为综合负荷模型^[8],对于这种复杂的电力负荷建模应用问题,往往需要遗传算法兼备上述两种能力。

为此,我们针对遗传策略的设计和参数控制对遗传算法进行了一系列的改进研究。主要包括初始种群的设定、遗传操作的设计和参数控制参数的设定。

2.1 群体的设计与分析

群体是GA进化过程的基础,是GA能够搜索全局最优解的基本条件。对于遗传计算过程来讲,保证了遗传算子正常发挥进化和重组效应。

本文采取的办法是将整个可行域设为初始种群的生成区域,随机生成一定数目的个体,本文称之为“初始随机种群”,其所含个体数设为 n_0 ;从中挑出较好的个体构成GA的初始群体,本文称之为“解群”,其所含个体数设为 N ;要求解群中各体间存在一定差异且遍及整个空间。

2.2 随机-精英策略

通常采用的轮盘赌选择法存在超强个体和封闭竞争的问题,使求解过程缓慢,收敛于局部解,即产生早熟收敛。为了克服这些问题,我们采用以下方法:随机产生一个规模为 n 的种群,在种群中随机选择 l 个个体,通常取 $l=2$,将这 l 个个体中适应度最高的个体保存到下一代群体中,直到保存到子代的个体数达到预设值(解群个体数 N)。同时为了防止由于选择误差,或者交叉和变异的破坏作用而导致当前群体的最佳个体在下一代的丢失,还采用了最优个体保存法:将种群中适应度最高的个体不进行交叉和变异,而直接复制到下一代中。

这种选择方法既保证了子代中的个体在解空间中有较好的分散性,同时又使子代中的个体具有较大的适应度,我们把这种种群选择策略称之为“随机-精英策略”。

2.3 避免近亲繁殖的交叉算子

交叉操作一般包括一点交叉、两点交叉和多点交叉等。为了研究交叉操作时断点个数对算法性能的影响,我们进行了大量的仿真比较。结果表明,一点交叉的信息量比较小,交叉点位置的选择可能带来较大偏差,不利于长距模式的保留和重组,位串末尾的重要基因总是被交换;多点交叉增加了交叉的信息量,但仿真发现它在精度、速度上并不优于两点交叉,而传统的两点交叉由于两个新染色体是同一对父代产生,极易造成新一代群体的近亲繁殖。

所以本文在交叉操作时采用双点交叉的方式,交叉后仅保留新染色体中适值较大者,以此来尽量避免下一代中出现近亲繁殖的概率。

2.4 控制参数的确定

在遗传算法的运行过程中,存在着对其性能产生重大影响的一组参数,主要参数包括染色体位串长度,群体规模,交叉概率以及变异概率。

2.4.1 位串长度

位串长度的选择取决于特定问题的规模(例如决策向量空间的维数)、解的精度以及编码方式。在系统辨识问题中,如果采用实数编码,将待辨识参数表示成 d 维向量, $x = [x_1, x_2, \dots, x_d]^T$,则位串长度为 d 个十进制实数,对于确定的问题是给定的;位串中的每一个十进制实数即对应一个待辨识参数 x_j 。

2.4.2 群体规模

小群体会造成有效等位基因先天缺乏,即使采用较大概率的变异算子,生成具有竞争力的高阶模

式的可能性极小;大群体含有较多模式,能提供足够的模式采样容量,但大群体增加了个体适应性评价的计算量,从而使收敛速度降低。因此,确定合理的群体规模是遗传算法的基础。

从 GA 性能和计算量综合考虑,显然对不同问题存在着一个合理的群体规模。综合理论分析和大量仿真实验研究,本文取解群规模 $N = 100$ 。

2.4.3 自适应交叉和变异概率

采用固定的概率显然会影响 GA 的进化性能,很容易导致过早收敛。本文试图将其与群体进化过程中的某些指标联系起来,使得控制参数在进化过程中自动的调整,不仅免去了事先确定一组适合的 GA 参数的困难,而且可以提高整体的搜索效果。

作者提出如下自适应调整控制参数的方法:即使得在进化过程中根据种群的早熟程度自动地调整交叉和变异概率,增强遗传算法的可控制性。交叉和变异概率的自适应调整表达式如下式(1)、(2)所示,其中 p_c, p_m 分别为交叉概率和变异概率, p_{cmin} 和 p_{mmin} 分别为相应设定的最小值, $k_1 \sim k_2$ 为可调参数,为最大适应度函数值与其平均值之差^[8]。

$$p_c = \begin{cases} k_1 - k_2 / [k_3 + \exp(-k_7 \cdot \Delta f)] & p_c > p_{cmin} \\ p_{cmin} & p_c \leq p_{cmin} \end{cases} \quad (1)$$

$$p_m = \begin{cases} k_4 - k_5 / [k_6 + \exp(-k_8 \cdot \Delta f)] & p_m > p_{mmin} \\ p_{mmin} & p_m \leq p_{mmin} \end{cases} \quad (2)$$

基于实测建模研究发现, p_{cmin} 、 p_{mmin} 和 $k_1 \sim k_8$ 这十个可调参数的选取对算法的改善程度和速度有巨大的影响,作者通过大量的实测建模工作并结合具体情况考虑整个进化过程中交叉和变异概率的动态调整,深入分析后选取一组具有自适应性的最佳控制参数组合(本文取 $p_{cmin} = 0.45$, $p_{mmin} = 0.06$, $k_1 = 1.3$, $k_2 = k_3 = 1.0$, $k_4 = 1.0$, $k_5 = k_6 = 9$, $k_7 = 0.0001$, $k_8 = 0.0005$)。式中,由于 Δf 是始终大于或等于 0 的, p_c 和 p_m 是分别在区间 $[0.3, 0.8]$ 、 $[0, 0.1]$ 内随

的增大而下降的变化曲线,可调 $k_1 \sim k_8$ 参数的大小影响 p_c 、 p_m 的变化速度。当 Δf 变小,种群多样性降低而趋于收敛时, p_c 和 p_m 变大,增加交叉和变异的频率,加强种群的探测能力,克服早熟的发生;当

Δf 变大,种群多样性提升个体特征分散时, p_c 和 p_m 变小,降低交叉和变异的频率,使种群趋于收敛。通过上述分析可知, p_c 和 p_m 在进化过程中根据种群多样性的增减,自适应地调整其值大小。

3 应用检验

3.1 改进遗传算法函数测试

改进遗传算法的优势可以通过一个简单的实例来体现,本文选取 Ackley 函数^[9]来比较。Ackley 函数如下:

$$\min f(x_1, x_2) = -c_1 \cdot \exp \left[-c_2 \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j^2} \right] - \exp \left[\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \cos(c_3 \cdot x_j) \right] + c_1 + e^{-5} \quad 5; j = 1, 2$$

这里, $c_1 = 20$, $c_2 = 0.2$, $c_3 = 2$, $e = 2.71828$ 最优解为 $(x_1^*, x_2^*) = (0, 0)$, $f(x_1^*, x_2^*) = 0$ 。基本遗传算法和改进后遗传算法的结果见表 1。

表 1 算法结果比较

Tab 1 Comparison of algorithm results

比较项目	x_1	x_2	$f(x_1, x_2)$	进化代数
基本 GA	-2×10^{-6}	0	-5.466×10^{-3}	1 000
改进 GA	0	0	0	170

由表 1 可知,本文提出的改进遗传算法能够以比基本遗传算法以小得多的计算代价(1/5)获得更加精确的优化结果。基于此,下文工作中着重就本文提出的改进遗传算法与基本遗传算法应用于负荷建模实践进行比较研究。

3.2 负荷建模实践

采用同步坐标下的三阶感应电动机并联恒定阻抗(导纳)模型,共 8 个独立待辨识参数,参数具体含义见文献[10]。使用某变电站的 3 个现场实测负荷特性数据样本(分类研究表明它们属于不同激励下的同类负荷),采用文献[11]所应用的基本遗传算法与本文设计的改进遗传算法进行参数辨识,收敛速度用进化代数和计算时间衡量。辨识结果见表 2。限于篇幅,模型拟合曲线从略。

3.3 讨论

从我们的建模实践结果可以看出,本文提出的综合改进型遗传算法其综合性能比较基本遗传算法有十分显著的改善,更非传统优化方法可比拟,主要体现在如下三方面:

(1) 综合改进型遗传算法其收敛速度即使在同样的精度要求下也远远优于基本遗传算法,甚至优于传统搜索算法^[11]。

(2) 就不同样本辨识的模型参数分散性而言,无论是单一参数还是总体效果,综合改进型遗传算法的辨识结果之参数稳定性远胜于基本遗传算法。前者的同名参数方差远小于后者,在参数的分散性上得到了很大的改善。这对于负荷建模的实用化具

有重要意义。

(3) 应当指出,机械参数 n 与 T_j 的辨识结果分

散性较大,是由于该 2 参数本身的不敏感性所至,而非算法原因^[12]。

表 2 综合改进遗传算法与文献 [10] 基本遗传算法的参数辨识比较结果

Tab 2 Parameter identification comparison result between synthesis improvement genetic algorithm and the reference [10] basic genetic algorithm

算法	数据	残差	收敛速度代数 计算时间	G	B	R_s	X	T_0	n	T_j	a
文献 [8] 的算法	Sm d1	0.000 736	2001/2 39	0.806 0	-0.027	0.245 7	0.940 6	6.430 3	1.180 3	5.376 0	4.621 3
	Sm d2	0.000 815	2001/2 01	0.805 6	-0.024	0.247 2	0.830 3	7.822 9	1.143 3	7.466 4	4.252 4
	Sm d5	0.000 745	2001/1 59	0.799 2	0.030 0	0.146 8	0.655 0	6.044 3	3.891 7	1.499 5	2.570 6
综合 改进 遗传 算法	参数平均值			0.803 6	-0.007	0.213 2	0.808 6	6.765 8	2.071 8	4.780 6	3.814 8
	参数方差			0.005 4	0.046 0	0.081 4	0.203 7	1.323 1	2.229 0	4.281 7	1.545 9
	Sm d1	0.000 34	14/5"	0.488 9	1.074 4	0.139 0	0.339 1	0.756 1	1.865 0	6.519 9	1.800 0
综合 改进 遗传 算法	Sm d2	0.000 36	21/6"	0.417 8	1.036 7	0.140 3	0.340 9	0.717 3	1.866 4	6.519 9	3.230 0
	Sm d5	0.000 37	41/11"	0.483 6	1.061 4	0.140 1	0.339 3	0.761 7	1.867 1	7.959 4	1.401 2
	参数平均值			0.463 5	1.057 5	0.139 8	0.339 8	0.745 0	1.866 1	6.999 8	2.143 7
综合 改进 遗传 算法	参数方差			0.073 4	0.030 1	0.000 9	0.001 3	0.037 5	0.001 5	1.175 3	1.359 9
	上、下限			0~1	-0.8~2.5	0~0.5	0~4	0~5	0~5	0~10	0~5

4 结语

本文在遗传算法理论研究的基础上重点探讨了遗传算法的“早熟”问题,特别围绕遗传策略的设计与参数控制进行了较深入系统的研究分析,提出了一种新的全面综合改进型遗传算法,并将其成功地应用于基于现场实测的综合负荷建模。建模实践表明,本文提出的综合改进型遗传算法在收敛速度、拟合精度和克服参数辨识结果的分散性等方面都比基本遗传算法有十分显著的改善,特别是其良好的参数稳定性能对负荷建模研究的实用化有极为重要的意义。

参考文献:

- [1] 鞠平. 电力系统负荷建模理论与实践 [J]. 电力系统自动化, 1999, 23(19): 1-7.
JU Ping Theory and Practice of Load Modeling in Power Systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(19): 1-7.
- [2] 韩祯祥,文福拴. 模拟进化方法简介 [J]. 电力系统自动化, 1995, 19(12): 5-10.
HAN Zhen-xiang, WEN Fu-shuan An Introduction to the Optimization Methods by Simulated Evolution [J]. Automation of Electric Power Systems, 1995, 19(12): 5-10.
- [3] Goldberg D E, Reading M S Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning [M]. USA: Addison-Wesley Publishing Company, Inc, 1989.
- [4] Rudolph G Convergence Analysis of Canonical Genetic Algorithms [J]. IEEE Trans on Neural Networks, 1994, 5(1): 96-101.

- [5] QI Xiao-feng Theory Analysis of Evolution Algorithms with an Infinite Population Size in Continuous Space, Part 2: Analysis of the Diversification Role of Crossover [J]. IEEE Trans on Neural Network, 1994, 5(1): 120-129.
- [6] 张云涛,龚玲. 数据挖掘原理与技术 [M]. 北京:电子工业出版社, 2004.
ZHANG Yun-tao, GONGLing Data Excavation Principle and Technology [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004.
- [7] 李敏强,寇纪淞. 遗传算法的基本理论与应用 [M]. 北京:科技出版社, 2003.
LI Min-qiang, KOU Ji-song The Genetic Algorithm Elementary Theory and Application [M]. Beijing: Science and Technology Publishing House, 2003.
- [8] 吴浩扬,朱长纯,常炳国,等. 基于种群过早收敛程度定量分析的改进自适应遗传算法 [J]. 西安交通大学学报, 1999, 33(11): 27-30.
WU Hao-yang, ZHU Chang-chun, CHANG Bing-guo, et al Adaptive Genetic Algorithm to Improve Group Premature Convergence [J]. Journal of Xi an Jiaotong University, 1999, 33(11): 27-30.
- [9] 玄光男,程润伟. 遗传算法与工程设计 [M]. 北京:科学出版社, 2000.
XUAN Guang-nan, CHENG Run-wei Genetic Algorithm and Engineering Design [M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [10] 李欣然,贺仁睦,周文,等. 综合负荷感应电动机模型的改进及其描述能力 [J]. 电力系统自动化, 1999, 23(9): 23-27.
LI Xin-ran, HE Ren-mu, ZHOU Wen, et al The Generalized Induction Motor Model and Its Description Ability to Synthetic Loads of Electric Power System [J]. Automar-

- tion of Electric Power Systems, 1999, 23 (9): 23-27.
- [11] 李欣然, 刘艳阳, 陈辉华, 等. 遗传算法与传统优化方法应用于电力负荷建模的比较研究 [J]. 湖南大学学报, 2005, 32 (2): 39-32
- LIXin-ran, LU Yan-yang, CHEN Hui-hua, et al Comparative Study of Genetic Algorithm and Traditional Optimization in Power Load Modeling [J]. Journal of Hunan University, 2005, 32 (2): 29-32
- [12] 张红斌. 电力系统负荷建模模型结构与参数辨识的研究 (博士学位论文) [D]. 北京: 华北电力大学, 2003
- ZHANG Hong-bin The Research of Load Modeling

Structure and Parameter Identification in Power System, Doctoral Dissertation [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2003

收稿日期: 2005-10-19; 修回日期: 2005-12-09

作者简介:

金群 (1981 -), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统动态负荷建模; E-mail: jinqun1981@126.com

李欣然 (1957 -), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统分析与控制及负荷建模的教学和研究工作。

Synthetically improved genetic algorithm in power load modeling

JIN Qun¹, LIXin-ran¹, LU Yan-yang¹, CHEN Hui-hua², TANG Wai-wen²

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Hunan Power Dispatcher and Communications Center, Changsha 410007, China)

Abstract: Aiming at the shortcoming of basic genetic algorithm as slow rapidity of convergence and easy to precocity, this paper presents a synthetically improved genetic algorithm and has applied it into power system aggregate load modeling. This improved genetic algorithm has comprehensive scientific designs in many aspects such as choosing original colony, reserving the best individual, adaptive crossover and mutation probability, preventive policy to precocious phenomenon, which can overcome precocity effectively, avoid close relative propagation, enhance rapidity of convergence obviously, and has good adaptive characteristic. The practical modeling based on the field measured data from power substation proves that this improved genetic algorithm has great effects on shortening convergence time, improving model precision, conquering the decentralization of parameters, and is an excellent optimum arithmetic and fairly fits for power system load modeling.

Key words: power system; load modeling; parameter identification; genetic algorithm; synthesis improvement

(上接第 17 页 continued from page 17)

- [7] Song Y H, YAO Liang-zhong, MAO Pei-lin, et al Fast Estimation of Transient Stability Limit by Combining Direct Method with Least Squares Technique [J]. Electric Power Systems Research, 1998, 48: 121-126

作者简介:

谢俊 (1979 -), 男, 博士研究生, 研究方向为电力市场;

陈星莺 (1964 -), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统运行分析与控制, 输配电自动化以及电力市场等方面的研究。E-mail: xychen@hhu.edu.cn

收稿日期: 2005-10-18; 修回日期: 2006-02-15

Fast method for solutions of optimal power flow with transient stability constraints

XIE Jun, CHEN Xing-ying

(Electrical Engineering Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The procedure of the new fast method is as follows. Firstly, by combining potential energy boundary surface (PEBS) method with least squares technique, the functional relation of transient energy margin with different generator power output and different clearing time is established. Then, the transient stability constraint based on the functional relation is formed and added into the traditional optimal power flow (OPF) mathematical model, and the OTS model is established. The OTS problem can be solved by traditional OPF optimization method with the same order of computation complexity. Simulation results on the 10-generator 39-bus New England test system are given to verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: transient stability; optimal power flow; PEBS method; least square techniques