

基于改进遗传算法的电流互感器优化计算软件的开发

郭 卉

(中国科学院电工研究所, 北京 100080)

Development of Optimal Calculation Software for Current Transformer Design Based on Modified Genetic Algorithm

GUO Hui

(Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

摘要: 结合工程实际进行了基于改进遗传算法的电磁式电流互感器优化计算软件的设计,该改进方法采用进化前后期分别调整交叉概率和变异概率、二次交叉、对指定基因集中变异以及移民策略等,以保证在整个进化过程都能有效地进行空间搜索,克服了传统算法容易陷入局部最优的缺点。

关键词: 电流互感器; 遗传算法; 交叉; 变异

中图分类号: TM471

文献标识码: A

Abstract: Combined with engineering case, an optimal calculation software for current transformer based on modified genetic algorithm is developed. The algorithm adopts the method of adjusting probability of crossover and mutation in the evolutionary process, second crossover, focus mutation to the special gene and emigration strategies. It can ensure space search effectively in the entire evolution process and overcome the disadvantage of traditional genetic algorithm that is subject to getting a local optimal results.

Key words: current transformer; genetic algorithm; crossover; mutation

1 引言

遗传算法是基于进化论的原理发展起来的一种广为应用的、高效的随机搜索与优化的方法。遗传算法对所解的优化问题没有太多的限制和要求,且其鲁棒性和隐含的并行性使得遗传算法能够非常有效地进行概率意义下的全局搜索,尤其是遗传算法通过其混合领域构造的多样性,对各种特殊问题的优化提供了极大的灵活性,这些优点使遗传算法得到了越来越广泛的应用。但遗传算法还存在着明显的缺点,即在经常使用的传统遗传算法的进化过程中,交叉算子产生新染色体的能力和种群的多样性不断降低,从而会使个体浓度过高,无法很好地保持个体多样性,易陷

入未成熟收敛。笔者结合保定天威集团大型变压器公司互感器分厂的设计实例,对上述缺点提出了改进的方法^[1],并设计了相应的基于改进遗传算法的电磁式电流互感器优化计算软件。研究结果对于提高电流互感器的优化设计水平具有重要的意义^[2]。

2 优化模型

该软件针对额定电压为 110 kV 的 $2 \times (50 \sim 1\,000)$ A 的 11 个标准电流等级及其它非标准电流等级设计了计算程序。

该软件所针对的设计变量是:一次导线的规格、二次导线的规格、并联根数、铁心尺寸。由于该设计中的铁心采用的是卷铁心,所以铁心尺寸又包括铁心内径、外径和高度。对这些设计变量,采用实数编码,实数编码较二进制编码而言,缩短了染色体的长度,且无须设计变量和二进制编码之间的转换。其中一次导线的规格、二次导线的并联根数及铁心尺寸均为整数离散变量,只需随机产生这些设计变量允许范围内的整数,即可实现相应实数编码,对于一、二次导线规格,将导线规格对应为导线规格号,然后随机产生这些规格号允许范围内的整数,即可实现相应的实数编码。

该设计的优化要求,即为使整个互感器所有材料的成本最低,考虑到设计过程中有一部分材料成本固定,故而仅要求产品设计过程中可变材料的成本最低即可。根据该优化要求确定优化的目标函数 $F(X)$ 如下:

$$F(X) = C_{Cu} \times G_{Cu} + C_{Fe} \times G_{Fe} + C_{Al} \times G_{Al} + C_{Yl} \times G_{Yl} + E$$

式中: C_{Cu} , G_{Cu} , C_{Fe} , G_{Fe} , C_{Al} , G_{Al} , C_{Yl} , G_{Yl} 分别为铜、铁、铝及变压器油的单位价格和重量; E 为储油柜、油箱等其他可变成本。

该优化计算的约束条件主要包括产品的动热稳定性能、产品的温升性能和产品的误差性能等。

优化约束条件可描述为:

$$\text{s.t. } g_i(x) \geq 0; \quad i=1, 2, \dots, m$$

采用如下惩罚函数处理约束条件:

$$\text{eval}(x) = f(x) + p(x)$$

其中:

$$p(x) = \begin{cases} 0 & \text{若 } x \text{ 可行} \\ \sum_{i=1}^m r_i |g_i(x)| & \text{若 } x \text{ 不可行} \end{cases}$$

其中: r_i 是约束 i 的可变惩罚系数, 这些惩罚系数的选取影响了解的质量。惩罚系数过小, 会降低算法的速度, 甚至会收敛于不可行解, 惩罚系数过大, 则等价于拒绝策略, 可能导致解的过早收敛。令可变惩罚系数 r_i 随迭代次数的增加而增加, 即:

$$r_i = C_i \times t$$

其中: C_i 为与不同的约束条件对应的常数; t 为迭代次数。在进化前期, r_i 较小, 以放大个体的适应度, 避免解的过早收敛; 随着进化的继续, 不断加大 r_i , 避免种群收敛于不可行解。

3 改进的遗传算法

3.1 交叉与变异概率

遗传算法的参数中交叉概率 P_c 和变异概率 P_m 的选择对解的质量有很大的影响, 笔者认为, 当 $k_0 = \frac{f_{\max} - f_{\text{avg}}}{f_{\text{avg}}} > k$ 时 (k 为一常数), k 如果取得太大, 则影响收敛速度, k 如果取得太小, 则可能导致过早收敛, 故而该例取 0.25。式中: $f_{\max}$ 为种群中的最大个体适应度; f_{avg} 为种群中的平均个体适应度。种群中处于进化前期, 此时种群中适应值的分散程度较大, 故采用较大的交叉概率和较小的变异概率, 以提高解的收敛速度; 当 $k_0 \leq k$ 时, 种群中处于进化后期, 种群中适应值的分散程度较小, 种群易出现早熟, 故采用较小的交叉概率和较大的变异概率, 以扩大解空间的搜索范围, 避免进化陷入局部最优解, 实现全局优化^[3,4]。令 $k_1 = \frac{f_{\max} - f_{\text{avg}}}{f_{\max}}$, 在该例中, 进化前期 P_c 和 P_m 的选择如下:

$$P_c = P_{c0} \times e^{\frac{k_1 - k}{k_1}}; P_m = P_{m0} \times e^{-\frac{k_1 - k}{k_1}}$$

其中: P_{c0} 和 P_{m0} 分别为 P_c 和 P_m 的基值, 该例分别取 0.3 和 0.2。进化后期 P_c 和 P_m 的选择如下所示:

$$P_c = P_{c0} \times e^{\frac{k_1 - k}{k}}; P_m = P_{m0} \times e^{-\frac{k_1 - k}{k}}$$

3.2 二次交叉

选择父代中两个个体 x_1, x_2 进行交叉, 交叉后产生子代个体 x'_1, x'_2 , 采用算术交叉, 即:

$$\begin{cases} x'_1 = \lambda x_1 + (1 - \lambda) x_2 \\ x'_2 = \lambda x_2 + (1 - \lambda) x_1 \end{cases}$$

其中: λ 为 (0, 1) 之间的随机数。由于在进化陷入局

部最优时, 会出现交叉后的子代个体与交叉前的父代个体相同的情况, 即出现无效交叉, 无效交叉会使进化无法跳出局部最优, 为避免无效交叉, 在出现无效交叉时, 进行二次交叉, 即令父代个体直接与随机产生的新个体进行交叉得到子代个体。这种做法可使在某代陷入早熟后, 还能在后续循环中跳出局部最优值, 在多次循环后就可找出全局的最优解。

3.3 对指定基因进行变异

选择父代中个体 x_k 进行变异, 变异后产生子代个体 x'_k , 产生变异的运算为动态变异运算。

$$x'_k = x_k + \Delta(t, x_k - x_k)$$

函数 $\Delta(t, y)$ 返回 $[0, y]$ 中的一个值, 使得 $\Delta(t, y)$ 随 t 的增加而趋于 0。函数的这个性质使得初始迭代时, 搜索均匀分布在空间, 而到后期则分布在局部范围内。 $\Delta(t, y)$ 给出如下:

$$\Delta(t, y) = y \times r \times (1 - \frac{t}{T})^b$$

其中: r 是 $[0, 1]$ 间的随机数; T 为最大代数; b 为确定不均匀度的参数。 b 越大, 基因变异幅度越小, 该例中取 1。

由于设计变量中铁心尺寸对解的适值影响最大, 故而在进化后期, 若变异仅发生在除铁心尺寸外的其他基因上, 这些基因上的变异并不能使解的适值发生大的偏移, 因而容易陷入局部最优。所以在进化后期, 除加大变异概率外, 还使变异集中发生在铁心内径、外径和高度这些对解具有较大影响的基因上。

3.4 移民策略

为避免遗传算法在进化后期收敛于局部最优解, 引入了移民策略。在进化后期每间隔 20 代采用一次移民操作补充新个体, 替换适应度值最小的 10% 个体, 从而增加种群中个体基因的多样性。该方法有利于优化搜索跳出局部最优, 达到全局最优^[5]。

总之, 改进遗传算法在交叉概率、变异概率等参数的选择上较传统遗传算法更加灵活, 且还采用了二次交叉、对指定基因进行变异以及引入移民策略等方法, 进一步防止搜索陷入局部最优, 以实现全局最优化。

4 软件介绍

该软件具有采用全汉化菜单形式的友好界面, 用户可以根据汉字提示以及菜单选择, 按其意愿进行产品设计、优化。该软件最大的优点是具有很强大的设计实用性, 能够设计出满足用户不同设计需求的设计方案: ①经验设计方案, 即与当前工厂普遍采用的人工产品设计方法相一致的设计方案。②最优设计方案, 即根据优化要求采用改进遗传算法对产品进行优化设计后得到的最优设计方案。③人工干预设计方案, 即满足用户的人工干预要求的最优设计方案。

此外,软件输出时可方便灵活地进行打印。该软件还具有强大的文件处理功能,能够给 CAD 制图所需的参数提供便利的接口。

5 数据结果

采用该软件对表 1 所示设计要求分别进行了经验设计和基于改进遗传算法的优化设计。为了进一步比较传统遗传算法和改进遗传算法的使用效果,笔者也列出了采用传统遗传算法进行优化设计的结果。

表 1 设计要求

电压等级/kV	110	测量绕组满匝负荷/(V·A)	50
一次满匝额定电流/A	750	测量绕组抽头负荷/(V·A)	30
测量绕组个数和保护绕组个数	各 3 个	测量绕组抽头一次额定电流/A	500
爬电比距	1.6	测量绕组二次电流/A	5
短时热电流/A	5 300	保护绕组准确级	5 P
储油柜选择	铸铁储油柜	保护绕组准确限值系数	20
膨胀器选择	盒式膨胀器	保护绕组额定负荷/(V·A)	50
测量绕组满匝准确级	0.5	保护绕组二次电流/A	5
测量绕组抽头准确级	0.5		

经验设计结果与基于改进遗传算法的优化设计结果对比如表 2 所示。

从表 2 可以看出,在满足优化模型约束条件,即电流互感器的动热稳定性能、温升性能和误差性能的情况下,采用改进遗传算法对电流互感器进行优化后的可变成本,较经验设计降低了 17%,较传统遗传算法降低了 14%,优化结果有了进一步提高;且从进化代数可以看出,采用传统遗传算法在进化代数为 177 代时,群体适应值已经陷入局部最优,而采用改进遗传算法进行优化后,在进化代数仅为 151 代时,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。

6 结语

将遗传算法引入电流互感器的设计领域,确立了电流互感器产品的设计计算程序,其中包括电磁计算、动热稳定计算、重量计算等,并选择了改进的遗传算法对其进行了优化,使产品综合指标达到最优。软件的设计结果证明了该改进遗传算法在电流

表 2 设计结果

	经验设计结果	传统遗传算法优化结果	改进遗传算法优化结果
测量绕组铁心高度/mm	35	30	30
测量绕组导线并联根数	2	2	2
测量绕组导线内径/mm	1.5	1.5	1.4
测量绕组导线外径/mm	1.608	1.608	1.506
测量绕组铁心内径/mm	160	170	180
测量绕组铁心外径/mm	220	220	220
保护绕组铁心高度/mm	65	70	70
保护绕组导线并联根数	1	1	1
保护绕组导线内径/mm	2.12	1.80	1.80
保护绕组导线外径/mm	2.243	1.916	1.916
保护绕组铁心内径/mm	180	180	180
保护绕组铁心外径/mm	245	245	220
一次绕组平均温升/℃	62.9	63.4	63.2
实际测量绕组二次电流密度/(A·mm ⁻²)	9.9	10.1	10.3
实际保护绕组二次电流密度/(A·mm ⁻²)	10.01	10.95	11.88
一次热稳定电流密度/(A·mm ⁻²)	6.33	6.34	6.34
铁心重量/kg	42.3	40.9	38.9
铜线重量/kg	12.5	10.5	8.46
铝管重量/kg	17.22	16.55	15.63
油重/kg	154.35	125.6	118.02
其他可变成本/元	4 405	3 965	3 623
总可变成本/元	6 269	5 364	5 155
进化代数		177	151
降低可变成本率/%		14	17

互感器优化设计中的可行性和高效性。

参考文献:

- [1] J W Nims, R E Smith. Application of a Genetic Algorithm to Power Transformer Design [J]. Electric Machines and Power Systems, 1995, 24(10): 669-680.
- [2] 董连文, 印 华. 基于遗传算法的电流互感器参数优化方法 [J]. 高压电器, 2003, 39(4): 41-45.
- [3] 樊叔维, 汪国梁, 谢 卫. 遗传算法在电力变压器优化设计中的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(5): 346-348.
- [4] 严 峻. 一种改进的基于成熟前收敛判断的自适应遗传算法 [J]. 南京邮电学院学报, 1993, 19(1): 35-38.
- [5] 刘志刚, 欧阳森, 耿英三, 等. 遗传算法在空心电抗器优化设计中的应用研究[J]. 电工电能新技术, 2003, 22(3): 45-49.

作者简介:郭 卉(1977-),女,博士后,从事电器优化设计及电器智能化技术的研究。

全国中压 SF₆ 气体绝缘组合电器(CGIS)设计、制造、运行及监测专题研讨会将于 2005 年 1 月在江苏常州召开

简 讯

随着电力系统的发展,对高压开关设备包括 GIS 的可靠性和自动化的要求也日益提高,而中压 SF₆ 气体绝缘组合开关设备是近年来国际上新发展起来的高新技术的系列产品,代表着新一代中压开关设备的发展方向和世界先进的技术水平。中国电工技术学会电器智能化系统及应用专委会为推动行业的技术进步,特邀请国内外专家学者,就中压 SF₆ 气体绝缘组合电器(CGIS)设计、制造、运行及监测的现状 & 发展前景展开学术交流。前来讲课的专家有:①西安高压电器研究所 王 平高工;②国电热工研究院 孟玉婵高工;③西安高压电器研究所 陈振生高工;④现代南自电气有限公司南韩专家等。

电话/传真: 025-83786421

联系人: 周泽存 张宏笙