

基于分层遗传算法的电力变压器优化设计

刘彦琴¹, 孟向军¹, 王曙鸿¹, 邱捷¹, 冯斌², 刘方华², 魏彩霞², 刘凤琴²

(1. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安; 2. 青岛变压器集团有限公司, 266109, 山东青岛)

摘要: 在研究了分层遗传算法的基础上, 分析了该方法动态编码及动态调整遗传算子的优点, 提出了一种改进的交叉变异机制. 该机制在交叉操作时, 不能在关联变量内部选择交叉点, 在变异操作时, 如果其中一个变量发生了变异, 则与其关联的变量也要同时进行变异操作, 并且可以将所有个体限制在有效的搜索空间内. 文中将分层遗传算法应用于电力变压器优化的问题中, 与单层遗传算法相比, 在相同计算量的情况下, 多层遗传算法成本节约 1.83%, 负载损耗下降 1.01%.

关键词: 分层遗传算法; 电力变压器; 优化设计

中图分类号: TM402 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)06-0113-05

Design Optimization of Power Transformer Based on Multilevel Genetic Algorithm

LIU Yanqin¹, MENG Xiangjun¹, WANG Shuhong¹, QIU Jie¹, FENG Bin²

LIU Fanghua², WEI Caixia², LIU Fengqin²

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Qingdao Transformer Group Co. Ltd., Qingdao, Shandong 266109, China)

Abstract: An optimization method, multilevel genetic algorithm (MLGA), is presented. The advantages of dynamic encoding and adjustment of genetic operators in MLGA are analyzed. And improved crossover and mutation techniques in MLGA are proposed. The correlated variables, described as points, in individuals can be operated with crossover and mutation simultaneously. These techniques ensure that all the individuals are limited in effective search space. This MLGA is applied in optimization design of power transformer successfully. A comparison with single level ordinary GA shows that MLGA reduces the cost of transformer by 1.83% and the no-load loss by 1.01% with similar computational consumption.

Keywords: multilevel genetic algorithm; power transformer; optimization design

电力变压器优化设计是以最优化数学模型理论为基础, 借助于计算机, 自动寻求最优的变压器设计方案. 由于变压器设计变量多为整数型和实数型离散变量, 在数学上可归纳为约束非线性的混合离散规划问题. 同时, 变压器设计目标函数的解具有多极值的复杂特点, 并且目标函数和约束函数是设计变量的隐含形式, 因此是一个多变量、多约束、强耦合的非线性问题^[1-2].

遗传算法(GA)作为一种高度并行随机全局搜索方法, 通过代表整个解集的种群进化, 以内在并行

的方式搜索多个非劣解, 决策者可以在多个解中选择决策方案. 樊叔维等人首次将遗传算法应用于变压器的电磁设计, 促使了进化类算法在变压器行业的应用^[3-4]. 但是, 单层的遗传算法仅在一个种群内部进行遗传操作, 并不适合自然界多种群的竞争方式, 容易出现早熟现象, 而且由于它一般具有较大的种群规模, 需要对较多的个体进行大量的遗传和进化操作, 使得进化运算过程缓慢, 难以达到计算速度上的要求^[5]. Li 等人应用分层遗传算法求解混合离散非线性问题, 并通过对结构控制系统的优化

验证了算法的有效性^[6].

本文将分层遗传算法应用到变压器优化设计,以期取得良好的效果.

1 分层遗传算法原理

传统的遗传算法是将所有设计优化变量进行编码形成一个向量(染色体),然后由染色体组成一个种群进行进化操作. 分层遗传算法的基本思想是将设计优化变量根据工程实际权重或优化先后顺序分类并进行独立编码,放置在不同的层中,每层中可以有多个种群进行并行的遗传操作,因此每个种群可以采用不同的遗传算子和遗传参数并行地设计.

不失一般性,这里以3层遗传优化算法为例,简要介绍分层遗传算法原理^[6-7],如图1所示.

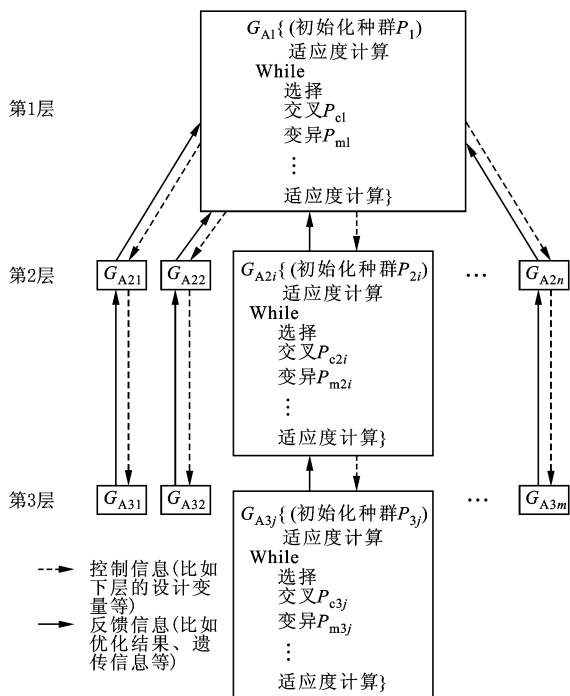


图1 分层遗传算法框图

第1层 G_{A1} 是控制其他模块的独立遗传算法,第2层 G_{A2} 和第3层 G_{A3} 分别由一系列的模块组成,每个模块对应一个子问题,每个子问题对应一个独立的 G_A ,且同一层中的各个模块的编码相同. 一个独立的 G_A 可以用以下格式来描述

$$G_A = (P_O, P_S, I_S, F_{IT}, S_O, C_O, M_O) \quad (1)$$

式中: P_O 、 P_S 、 I_S 、 F_{IT} 分别表示初始种群、种群大小、编码长度以及适应度值; S_O 、 C_O 、 M_O 分别表示选择、交叉、变异. 分层遗传算法可以用下式描述

$$G_{Aij} = (P_{Oij}, P_{Sij}, I_{Sij}, F_{ITij}, S_{Oij}, C_{Oij}, M_{Oij}) \quad (2)$$

式中:下标 i 和 j 表示分层遗传算法第 i 层第 j 个模块; G_{Aij} 表示用独立遗传算法求解第 i 层第 j 个模块. 由于上层和下层以及同层相邻模块之间的影响,如果考虑上层和下层之间的影响,则 G_{Aij} 可以表示为

$$G_{Aij} = (P_{Oij}(G_{Ai-1,j}), P_{Sij}(G_{Ai-1,j}), I_{Sij}(G_{Ai-1,j}), F_{ITij}(G_{Ai-1,j}), S_{Oij}(G_{Ai-1,j}), C_{Oij}(G_{Ai-1,j}), M_{Oij}(G_{Ai-1,j})) \quad (3)$$

如果考虑同层相邻模块的影响,则 G_{Aij} 可以表示为

$$G_{Aij} = (P_{Oij}(G_{Ai-1,j}, G_{Ai,j-1}, G_{Ai,j+1}), P_{Sij}(G_{Ai-1,j}, G_{Ai,j-1}, G_{Ai,j+1}), I_{Sij}(G_{Ai-1,j}, G_{Ai,j-1}, G_{Ai,j+1}), F_{ITij}(G_{Ai-1,j}, G_{Ai,j-1}, G_{Ai,j+1}), S_{Oij}(G_{Ai-1,j}, G_{Ai,j-1}, G_{Ai,j+1}), C_{Oij}(G_{Ai-1,j}, G_{Ai,j-1}, G_{Ai,j+1}), M_{Oij}(G_{Ai-1,j}, G_{Ai,j-1}, G_{Ai,j+1})) \quad (4)$$

可以看出, G_{Aij} 除了受到自身的变量数目、变量变化范围以及目标解的精度影响外,还受到上层 $G_{Ai-1,j}$ 或者同层模块 $G_{Ai,j-1}$ 和 $G_{Ai,j+1}$ 的影响. 分层遗传算法的优点如下.

(1)动态编码:下层染色体的编码长度、设计变量的变化范围和精度等随着上层染色体的编码动态地调节变化.

(2)抑制早熟:同层中不同模块进行并行的遗传操作,且相对独立,能有效增强群体的多样性,如果其中一个子模块陷入局部最优,可以通过其他模块的进化跳出局部搜索,在全局范围内进行搜索.

(3)动态遗传算子:每个子模块之间的关系相对独立,所以选择、交叉、变异、种群大小、进化代数等遗传操作可以在程序实现的时候动态变化.

2 分层遗传算法的实现及改进

文献[6]不考虑层与层之间优良个体的信息传递,将二进制编码分层遗传算法用于三层优化模型中,文献[5]中的分层思想实质是上层把下层的种群作为个体进行操作,对于抑制近亲繁殖有明显效果,所有设计变量设计成一个向量(染色体). 本文结合二者的优点,针对变压器设计优化,将求解问题的设计变量分为两层,第1层变量对第2层变量具有决定性作用,并加入传统遗传算法中的精英保留策略、自适应调整和移民策略(将每个模块的精英个体提取出来放在一起进化一定代数,再放回交配池).

2.1 初始种群设计

本文在专家给定的规则库里确定优化变量的上下限,并根据优化变量之间的耦合关系缩小搜索空

间.在可行域里随机初始化两层优化变量,种群在预定约束条件限制下初始化,形成由有效染色体构成的子空间,从而可以大大减少搜索空间,有利于提高收敛速度.

2.2 遗传算子设计

(1)实数编码机制.为了克服二进制编码的缺点,对于实际工程问题可以采用实数编码.这样可以直接在解的表现上引入与问题领域相关的启发式信息,增强遗传算法的搜索能力.实数编码中对于连续设计变量利用如下线性变换

$$x_i = x_i^L + u(0,1)(x_i^U - x_i^L) \quad i = 1 \sim n \quad (5)$$

对于离散设计变量利用如下线性变换

$$x_i = x_i^L + \text{int}((u(0,1)(x_i^U - x_i^L))/l_i + 0.5)l_i \quad (6)$$

式中: x_i^U 和 x_i^L 为设计变量的上、下边界; $u(0,1)$ 为 $[0,1]$ 内的随机数; $\text{int}()$ 为取整函数; l_i 为设计变量步长,将同层所有变量对应的 x_i 依次连接,可构成问题解的编码形式 $(x_1, x_2, \dots, x_n)$.

(2)改进的交叉和变异机制.变压器的优化变量之间具有很强的关联性,为了避免交叉和变异后产生无效解组合,致使算法在无效解空间里搜索,降低算法收敛速度,本文提出了一种改进的交叉和变异机制,表示为

$$\begin{array}{ccccccc} X(x_1, x_2, \underbrace{x_3 x_4 x_5}_{\uparrow \downarrow \uparrow}, x_6, \dots, x_m) & X'(y_1, x_2, y_3 y_4 y_5, x_6, \dots, y_m) \\ & \uparrow \downarrow \uparrow & \uparrow \downarrow & \uparrow \downarrow & \Rightarrow & & \end{array} \quad (7)$$

式(7)描述了两个个体进行关联交叉的情形,其中变量 $x_3 x_4 x_5$ 在可行解搜索空间中表现为关联关系,即如果其中一个或几个变量变化后,与其关联的其他变量不做出调整就会使个体解落在非可行解搜索区域中,所以在交叉操作时,不能在 $x_3 x_4 x_5$ 内部选择交叉点,在变异操作时,如果 $x_3 x_4 x_5$ 中的一个值进行了变异,则其余两个值也要同时进行变异操作.

(3)同层自适应交叉、变异算子.同层的不同模块使用相同的交叉和变异概率上、下界,自适应的交叉和变异概率分别为

$$P_{ij}^c = \begin{cases} K_{i1} - \frac{(K_{i1} - K_{i2})(f'_{ij} - f_{ij}^{\text{avg}})}{f_{ij}^{\text{max}} - f_{ij}^{\text{avg}}} & f'_{ij} \geq f_{ij}^{\text{avg}} \\ K_{i1} & f'_{ij} < f_{ij}^{\text{avg}} \end{cases} \quad (8)$$

$$P_{ij}^m = \begin{cases} K_{i3} - \frac{(K_{i3} - K_{i4})(f_{ij} - f_{ij}^{\text{avg}})}{f_{ij}^{\text{max}} - f_{ij}^{\text{avg}}} & f_{ij} \geq f_{ij}^{\text{avg}} \\ K_{i3} & f_{ij} < f_{ij}^{\text{avg}} \end{cases} \quad (9)$$

式中: K_{i1}, K_{i2} 为第 i 层的交叉概率上、下限; K_{i3}, K_{i4} 为第 i 层的变异概率上、下限; $f_{ij}, f_{ij}^{\text{max}}, f_{ij}^{\text{avg}}, f'_{ij}$ 分别为第 i 层第 j 个模块的个体适应度、种群最大适应度、平均种群适应度和交叉两个个体中适应度较大者的适应度; P_{ij}^c, P_{ij}^m 分别为第 i 层第 j 个模块的交叉概率和变异概率.

3 分层遗传算法在变压器优化中的应用

3.1 电力变压器优化设计的数学模型

$$\begin{cases} \min f(X) & X = [x_1, x_2, \dots, x_n] \in \Omega \\ \text{s. t.} & g_i(X) \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (10)$$

式中: X 为优化变量; $f(X)$ 为目标函数; Ω 为解空间; $g_i(X)$ 为约束函数; m 为约束函数个数.

遗传算法本身是一种无约束的优化算法,为此本文在处理约束函数时引入了具有惩罚因子的惩罚函数,使变压器优化的约束问题变成了非约束问题.

3.2 目标函数的选取

变压器设计的主要指标有两个:一是性能指标,二是材料成本.在满足性能指标的前提下,希望变压器的质量轻,材料消耗少.针对上述两项指标,本文在设计程序中通过约束函数来确保其性能,而把经济指标材料成本最低作为优化设计的目标函数,其表达式为

$$F(X) = C_{\text{FE}} G_{\text{FE}} + C_{\text{CU}} G_{\text{CU}} + C_0$$

式中: $C_{\text{FE}}, C_{\text{CU}}$ 为硅钢片、铜线的单价; $G_{\text{FE}}, G_{\text{CU}}$ 为硅钢片、铜线的质量; C_0 为与设计变量无关的固定费用.

对于单台变压器的优化设计,优化的目标函数可以取有效的材料成本、空载损耗、负载损耗等,本文优化目标函数为关键材料成本^[8].

3.3 优化变量的分层原则

(1)第1层优化变量的选取.根据专家经验,在设计的过程中,按照经验公式算出铁心直径后,调节导线线规、油道尺寸或者线圈之间的空道来满足约束,只有约束阻抗电压超出给定值后才调节铁心直径,否则铁心直径保持不变.所以,选铁心直径作为外层优化变量,在内层铁心直径一定的情况下寻找最优可行解.

磁通密度为连续变量,其他优化变量都为离散变量.根据磁通密度和低压线圈匝数之间的线性关系^[9],将磁通密度转化为低压线圈的匝数,这样所有设计变量都为离散型,可以利于编码,减少染色体长度,同时在有效空间搜索更易找到优化解.低压线圈匝数的求取与铁心截面积相关,故将低压线圈匝数

也作为第 1 层的优化变量。

(2)第 2 层优化变量的选取. 第 2 层的优化变量有高、中、低压的线规, 导线的并绕根数, 高压饼数和低压到铁心、高中、中低线圈之间的空道。

由于线规及高压饼数已知, 可以根据单位高度上的安匝平衡原理, 得出相应的中压及低压线圈的饼数, 这样可以减少优化变量个数, 缩短染色体长度。

(3)第 1 层和第 2 层之间的关系. 第 1 层将优化变量值传给第 2 层, 第 2 层根据第 1 层的变量值调节编码的长度, 并初始化每个模块. 第 1 层的初始种群的大小就是第 2 层独立模块的数目。

第 2 层各个模块根据第 1 层传来的变量信息分别进行独立的遗传操作, 最后将每个模块中优化出的最优个体的所有信息传给第 1 层. 第 1 层根据第 2 层中各个模块最优个体的适应度值, 进行遗传操作。

3.4 变压器电磁设计的约束条件

(1)材料及工艺约束主要包括硅钢片的厚度和性能参数, 导线的规格型号、绝缘厚度和宽厚比等。

(2)性能约束主要包括短路阻抗、负载损耗、空载损耗、温升等, 而且这些要求也会随着社会的发展变得越来越高, 如新的节能标准就对负载损耗和空载损耗有很严格的要求^[9]。

4 优化算例及结果验证

以 220 kV 三圈有载调压变压器和 220 kV 两圈无载调压变压器为例, 分别利用遗传算法及改进的分层遗传算法进行优化, 比较优化前后的主要性能指标和成本, 本文是在满足所有约束条件下取成本最低为最佳方案。

220 kV 两圈无载变压器优化中, 经过反复试算, 取单层 GA 种群个体数为 300, 迭代次数为 2 000, 改进的双层 GA 第 1 层种群个体数为 10, 迭代次数为 6, 第 2 层每个种群个体数为 100, 迭代次数为 100. 表 1 列出手工设计、传统 GA 和双层 GA 的优化结果, 改进的双层 GA 比单层 GA 成本节省了 3.02%, 但空载损耗增加了 0.37%, 比手工设计方案成本节约 9.48%。

对于 220 kV 三圈有载调压变压器优化, 经过反复试算, 取 GA 种群个体数为 300, 迭代次数为 5 000. 改进双层 GA 第 1 层种群个体数为 30, 迭代次数为 10, 第 2 层每个种群个体数为 100, 迭代次数为 50. 表 2 列出手工设计、传统 GA 和双层 GA 的优化结果. 在同样计算量的前提下, 从表2可以看

表 1 两圈无载调压变压器 SFS10-120000/220 优化结果

		原始方案	单层 GA	双层 GA
设计变量	铁心直径/mm	780	790	780
	低压线圈匝数	93	93	94
	高压段数	54	50	54
	高压正常段并联根数	3(复合)	2(复合)	3(复合)
	高压正常段线规/mm ²	1.7×10	2.5×10.6	1.7×10
	高压屏蔽段并联根数	3(复合)	2(复合)	3(复合)
	高压屏蔽段线规/mm ²	1.7×10	2.36×12.5	1.7×10
	低压并联根数	20(并绕)	24(并绕)	24(并绕)
	低压线规/mm ²	3.15×13.2	3×11.8	2.65×13.2
	高压分接并联根数	2(复合)	2(复合)	2(复合)
	高压分接区线规/mm ²	1.8×11.2	1.8×11.8	1.8×11.2
	高低压间空道/mm	67	67	67
性能指标	负载损耗/kW	387	387	383
	空载损耗/kW	71.31	68.77	69.03
	高低阻抗电压/%	13.73	13.72	13.71
	高压线圈温升/K	18.88	19.62	19.02
	低压线圈温升/K	28.2	26.14	26.50
	油顶层温升/K	47	46	45
	硅钢片和铜的成本标么值	1	0.933	0.905
	所用时间/s		710	719

表 2 三圈有载调压变压器 SFSZ10-150000/220 优化结果

		原始方案	单层 GA	双层 GA
设计变量	铁心直径/mm	860	880	870
	低压线圈匝数	192	182	187
	高压段数	54	48	52
	中压段数	124	118	120
	低压段数	100	94	96
	高压正常段并联根数	3(复合)	2(复合)	3(复合)
	高压正常段线规/mm ²	1.9×13.2	2.5×13.2	1.8×12.5
	高压屏蔽段并联根数	3(复合)	2(复合)	3(复合)
	高压屏蔽段线规/mm ²	1.8×12.5	2.5×13.2	1.8×12.5
	中压并联根数	4(复)3(并)	4(复)3(并)	4(复)3(并)
	中压线规/mm ²	2.12×11.2	2×10.6	1.9×10.6
	低压并联根数	6(并绕)	5(并绕)	5(并绕)
性能指标	低压线规/mm ²	2.8×13.2	3.35×13.2	3.15×14
	高调并联根数	4(并)单裸	4(并)单裸	4(并)单裸
	高调导线线规/mm ²	4×15	4.25×14	4×15
	高中压间空道/mm ²	64	69	66
	中压和低压间空道/mm	45	48	43
	高至高调间空道/mm	53	53	53
	负载损耗/kW	503	496	491
	空载损耗/kW	85.67	88.23	85.38
	高中阻抗电压/%	23.91	23.72	23.63
	高低阻抗电压/%	7.83	7.87	7.82
	中低阻抗电压/%	13.72	13.71	13.70
	高压线圈风冷温升/K	23.04	23.73	21.76
	中压线圈风冷温升/K	18.70	17.18	18.29
	低压线圈风冷温升/K	20.73	20.36	20.82
	油顶层风冷温升/K	44.65	43.62	44.83
	硅钢片和铜的成本标么值	1	0.963	0.945
	所用时间/s		1 639	1 599

出单层和双层 GA 的计算时间相同,在满足性能指标的情况下改进的双层 GA 比单层 GA 的成本节省了 1.83%,负载损耗下降了 1.01%。相比原始的手工设计方案,改进的双层 GA 成本节省了 5.49%。

5 结束语

由于分层遗传算法符合人们的认知规律,可以处理复杂的多层结构优化问题。本文在此基础上,提出了一种改进的交叉变异机制,以解决变量直接的强关联性,建立了变压器混合变量分层优化设计模型,利用分层优化算法进行求解。算例结果表明,双层遗传算法收敛性较好,收敛速度快。

参考文献:

- [1] 裴素萍,王晓雷,陈玉国,等. 基于改进遗传算法的变压器优化设计研究[J]. 中原工学院学报, 2006, 17(2):52-55.
PEI Suping, WANG Xiaolei, CHEN Yuguo, et al. The study of improved genetic algorithm in transformer optimization design[J]. Journal of Zhongyuan Institute of Technology, 2006,17(2):52-55.
- [2] 金明. 基于改进鲍威尔法的电力变压器优化设计[J]. 变压器, 1999, 36(10): 12-14.
JIN Ming. Power transformer optimum design based on improved Powell method [J]. Transformer, 1999, 36(10): 12-14.
- [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.
FAN Shuwei, WANG Guoliang, XIE Wei. Genetic al-

gorithm and its application in power transformer optimization design[J]. Proceeding of the CSEE, 1996, 16(5):346-348.

- [4] 吴德荣,李景川,励庆孚,等. 遗传算法在电机系列优化设计中的应用研究[J]. 西安交通大学学报, 1999, 33(2):14-18.
WU Derong, LI Jingchuan, LI Qingfu, et al. Design optimization of series electrical machines using genetic algorithms [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1999, 33(2):14-18.
- [5] 吴仲超,严新平. 一种多层遗传算法的提出及实现[J]. 武汉交通科技大学学报, 2000, 24(4): 384-387.
WU Zhongchao, YAN Xinpeng. A multi-parallism genetic algorithm and its application[J]. Journal of Wuhan Transportation University, 2000, 24(4): 384-387.
- [6] LI Q S, LIU D K, LEUNG A Y T, et al. A multilevel genetic algorithm for the optimum design of structural control systems [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2002,55:817-834.
- [7] JENKINS W M. On the application of natural algorithms to structural design optimization[J]. Engineering Structures, 1997, 19(4):302-308.
- [8] 王瑞明,杨琼. 自适应遗传算法在电力变压器优化设计中的应用[J]. 变压器, 2006, 43(2): 52-55.
WANG Ruiming, YANG Qiong. Application of adaptive genetic algorithm to optimum design of power transformer[J]. Transformer, 2006, 43(2): 52-55.
- [9] 尹克宁. 变压器设计原理[M]. 北京:中国电力出版社, 2002.

(编辑 杜秀杰)

[本刊相关文献链接]

水分对变压器绝缘纸性能影响的分子动力学模拟. 2009, 43(4):111-115.
 电力变压器局部放电特高频信号外部传播特性研究. 2008, 42(6):718-722.
 直流下油中局部放电脉冲波形测量与特性分析. 2008, 42(4):481-486.
 变压器漏电感参数在线辨识方法研究. 2008, 42(2):199-203.
 基于励磁电感参数识别的变压器励磁涌流判别方法. 2007, 41(10):1214-1218.
 支持向量机在电力变压器故障诊断中的应用. 2007, 41(6):722-726.