

基于改进NSGA-II算法的 干式空心电抗器多目标优化设计

张成芬, 赵彦珍, 陈锋, 马西奎

(电力设备电气绝缘国家重点实验室(西安交通大学), 陕西省 西安市 710049)

Multi-objective Optimum Design of Dry-type Air-core Reactor Based on Improved NSGA-II Algorithm

ZHANG Cheng-fen, ZHAO Yan-zhen, CHEN Feng, MA Xi-kui

(State Key Lab of Electrical Insulation and Power Equipment(Xi'an Jiaotong University), Xi'an 710049, Shaanxi Province, China)

ABSTRACT: Based on the analysis of the relationship of aluminum wire weight and power loss to the average wire diameter of dry-type air-core reactor, this paper proposed that it was more applicable to the engineering practice situation to make the power loss as an objective function with the optimum design of reactor. Taking both aluminum wire weight and power loss as objective functions, a multi-objective optimization model for dry-type air-core reactor was built. NSGA-II algorithm, an algorithm with good optimization effect, was used to solve the model. In order to increase the population diversity and improve searching ability of the algorithm, it was proposed that the dominated individuals of the population were selected in a certain proportion; before non-dominated sorting, partial variables which belonged to the repeated individuals and dense individuals of combined population were mutated in a certain probability; external nondominated set was set in elitist strategy and the individuals of which participate in tournament selection. By using the improved algorithm, the optimum design results of 50 kvar reactor show that the distribution of Pareto optimal solutions is more uniform.

KEY WORDS: dry-type air-core reactor; multi-objective optimization; genetic algorithm; NSGA-II

摘要: 在分析干式空心电抗器铝导线质量和损耗与平均线径之间关系的基础上, 提出把电抗器损耗作为一个目标函数更符合电抗器优化设计的工程实际情况。以铝导线质量和电抗器损耗为目标函数, 建立了干式空心电抗器的多目标优化模型。求解模型采用优化效果较好的 NSGA-II 算法。为了增加种群的多样性和提高算法的搜索能力, 提出以一定比例选择种群中的支配个体; 在非支配排序前以一定概率对合并种群中重复个体和较密集个体的部分变量进行变异; 在精英策

略中设置了外部非支配集, 并使其中的个体参与锦标赛选择。50 kvar 干式空心电抗器的优化设计结果表明, 采用改进 NSGA-II 算法得到的 Pareto 最优解分布更加均匀。

关键词: 干式空心电抗器; 多目标优化; 遗传算法; NSGA-II

0 引言

干式空心电抗器是电力系统中用于限流、稳压和无功补偿的重要设备之一, 它对降低系统故障和提高运行质量有着重要的作用。目前干式空心电抗器的设计普遍采用计算机辅助设计方法^[1]。由于需要根据经验人工给定电抗器的内径、包封数、各包封内的层数及线径等结构参数, 使得这种设计方法不仅繁琐费时, 而且得到的设计结果仍然会有较大改进和提高的余地。干式空心电抗器的优化设计不仅可以避免繁琐的人工干预问题, 还可以节约原材料和提高电抗器性能。文献[2]和[3]分别采用复合形法和伸缩保差法对电抗器进行优化。文献[4-5]把遗传算法引入干式空心电抗器的优化设计中。文献[6]提出遗传算法和模拟退火法相结合的优化算法, 对电抗器进行优化设计, 提高了遗传算法的局部搜索能力。文献[7]利用单纯形算法的特点提出遗传算法和单纯形算法相结合对干式空心电抗器进行优化设计, 在提高算法局部搜索能力的同时提高了算法的收敛速度。上述各种方法均是以铝导线质量或电抗器体积为单目标函数, 而对电抗器损耗的处理, 要么作为约束条件要么根本就没有考虑这个重要的性能指标。

传统的多目标优化方法一般是给不同的优化

目标分配不同的权重,通过调整权重得到一组近似 Pareto 最优解;另外,也可以将部分优化目标转化为约束条件,实现多目标优化,如文献[8],在设计过程中通过对电抗器损耗取一系列不同的上界值,来寻求一组裸导线质量最小值。这些传统的多目标优化方法均是把多目标优化问题转化为单目标优化问题后进行求解,这样处理其实已经引入了人的主观因素,而且每次计算只能产生一个解。基于进化算法的多目标优化算法在求解实际工程优化问题时,需要较少的工程背景经验知识,而且一次运行就可以求出一组 Pareto 最优解。

带精英策略的快速非支配排序遗传算法^[9-10](fast and elitist multiobjective genetic algorithm, NSGA-II)具有计算复杂度较低、采取了有效的精英策略和不需要人为指定共享半径等优点,已经成为多目标进化算法的基准算法之一,并成功应用于求解各种复杂的工程优化问题^[11-16]。基于此,本文选择 NSGA-II 算法对电抗器进化多目标优化,并针对该算法在电抗器优化设计时种群中重复个体较多、种群多样性较差的问题,改进了算法的选择操作和精英策略,最后以 50 kvar 干式空心电抗器的优化设计为例,验证了改进算法的有效性。

1 干式空心电抗器的多目标优化模型

1.1 目标函数的选取

以 50 kvar 干式空心电抗器为例,让电抗器的包封数、总层数和内径保持不变,平均线径从小到大变化,计算所得的铝导线质量随平均线径递增,而电抗器损耗随平均线径递减。可见,要求所用铝导线质量轻和电抗器损耗小这两个目标是相互矛盾的,因此将电抗器损耗作为一个目标函数对电抗器进行多目标优化设计更符合工程实际情况。

1.2 数学模型

优化设计问题包括设计变量、约束条件和目标函数 3 个元素。干式空心电抗器的优化设计是一个多变量、有约束的非线性优化问题。本文借鉴文献[17]的附加等式约束平衡设计原则,即电抗器的设计过程在层等电阻电压、包封等温升和包封等高之间寻求平衡。根据干式空心电抗器的结构特点,包封数 N_p 、总层数 N_c 、电抗器内径 D_m 和导线的以平均线径 d_{av} 为设计变量,建立以铝导线质量 W_{AL} 最轻、电抗器损耗 P_{loss} 最小为目标函数的多目标数学优化模型:

$$\begin{cases} \min W_{AL} = \frac{\pi^2 N_b \rho}{4} \sum_{i=1}^{N_c} w_{ci} D_{ci} d_{ci}^2 \\ \min P_{loss} = \frac{4K_{loss}}{\gamma N_b} \sum_{i=1}^{N_c} \frac{w_{ci} D_{ci} I_{ci}^2}{d_{ci}^2} \end{cases} \quad (1)$$

不等式约束条件为

$$\begin{cases} T_{pi} \leq T_{max}, \quad i=1,2,\dots,N_p \\ J_{min} \leq J_{cj} \leq J_{max}, \quad j=1,2,\dots,N_c \\ N_{pmin} \leq N_p \leq N_{pmax} \\ 3N_p \leq N_c \leq 5N_p \\ D_{inmin} \leq D_{in} \leq D_{inmax} \\ d_{avmin} \leq d_{av} \leq d_{avmax} \end{cases} \quad (2)$$

式中

$$T_{pi} = \begin{cases} 0.432\beta_i^{0.8} \left[\frac{K_{loss}(D_{piIn} + D_{piOut})}{2\gamma(D_{piIn} + D_{piOut})} \right]^{0.8}, \quad i=1 \\ 0.432\beta_i^{0.8} \left(\frac{K_{loss}}{2\gamma\alpha_i} \right)^{0.8}, \quad 1 < i < N_p \\ 0.432\beta_i^{0.8} \left[\frac{K_{loss}(D_{piIn} + D_{piOut})}{2\gamma(\alpha_i D_{piIn} + D_{piOut})} \right]^{0.8}, \quad i=N_p \end{cases} \quad (3)$$

其中

$$\begin{cases} \beta_i = \frac{J_{pi} w_{pi} I_{pi}}{H_{pi}^{0.75}}, \quad 1 \leq i \leq N_p \\ J_{cj} = \frac{4I_{cj}}{N_b \pi d_{cj}^2}, \quad j=1,2,\dots,N_c \end{cases} \quad (4)$$

层等电阻电压条件为

$$\frac{w_{c1} D_{c1} I_{c1}}{d_{c1}^2} = \frac{w_{c2} D_{c2} I_{c2}}{d_{c2}^2} = \dots = \frac{w_{cN_c} D_{cN_c} I_{cN_c}}{d_{cN_c}^2} \quad (5)$$

包封等温升条件为

$$T_{p1} = T_{p2} = \dots = T_{pN_p} \quad (6)$$

式(1)~(6)中: w_{ci} 为各层匝数; D_{ci} 为各层中径即内径和外径的平均值; d_{ci} 为各层导线的线径; I_{ci} 为各层电流; N_b 为并绕根数; ρ 为铝的质量密度, γ 为铝的电导率; K_{loss} 为损耗系数; T_{pi} 为第 i 包封的温升; T_{max} 为最大包封温升限值; D_{piIn} 和 D_{piOut} 分别为第 i 包封的内径和外径; H_{pi} 、 J_{pi} 、 w_{pi} 和 I_{pi} 分别为第 i 包封的高度、电流密度、平均匝数和电流; $\alpha_i = 0.56\sqrt{\delta^{1.6}/H_{pi}}$ 为第 i 包封的散热系数, δ 为气道宽度; J_{cj} 为第 j 层的电流密度; J_{min} 和 J_{max} 分别为最小层电流密度限值和最大层电流密度限值; N_{pmin} 、 N_{pmax} 、 D_{inmin} 、 D_{inmax} 、 d_{avmin} 和 d_{avmax} 为设计变量的上下限值。考虑到电抗器设计的合理性,总层数的取值范围应是包封数的 3~5 倍。

需要指出，在上述目标函数中，自变量 w_{ci} 、 D_{ci} 、 d_{ci} 和 I_{ci} 是由包封数 N_p 、总层数 N_c 、电抗器内径 D_{in} 和平均线径 d_{av} 这 4 个设计变量所共同决定的，其计算过程如图 1 所示。约束条件中，变量 D_{piIn} 、 D_{piOut} 、 H_{pi} 、 J_{pi} 、 w_{pi} 、 I_{pi} 可以由自变量计算得到。

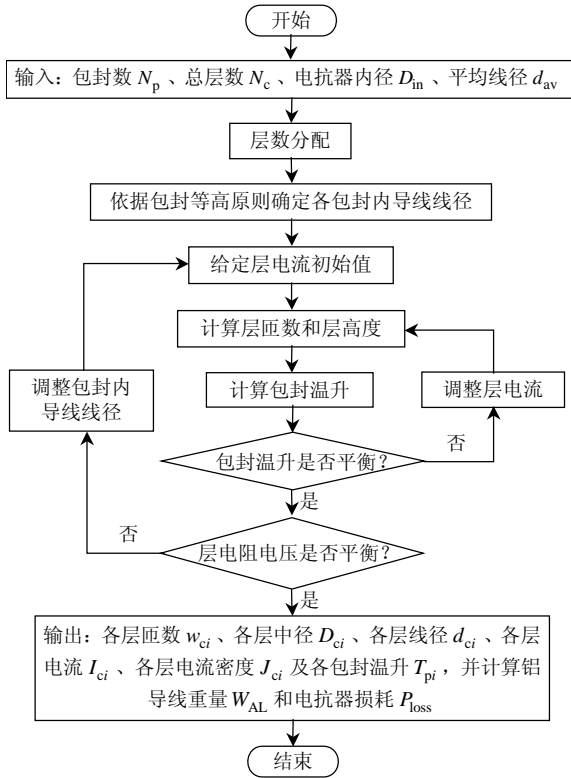


图 1 目标函数计算流程图

Fig. 1 Flow chart of the calculation of objective functions

2 基于改进NSGA-II算法的干式空心电抗器优化设计

2.1 标准NSGA-II算法分析

NSGA-II 算法是众多多目标优化算法中影响较大的算法，其最突出的特点是：1) 采用快速非支配排序，提高了算法的收敛速度；2) 通过定义拥挤距离，有效地避免了共享参数选择困难的问题；3) 精英策略采用 $\mu + \lambda$ 选择，这种机制能使新一代种群比前一代种群更有效。虽然 NSGA-II 算法有上述优点，但是它的锦标赛选择机制和精英策略却会促使进化过程中少数较优非支配个体在种群中迅速繁殖，产生较多的重复个体，降低了种群的多样性，最终导致搜索不能有效进行。

首先，锦标赛选择产生了较多的重复个体。对于有约束的复杂工程优化问题，在种群进化初期，只有少量满足约束条件的个体，这些个体可能会被重复随机选入配对群，从而导致被重复选入子代种

群。其次，实数编码个体采用 SBX 交叉，搜索性能相对较弱，经过变异后仍有一定数量的重复个体。最后，在精英策略阶段，将父代种群和子代种群合并产生新种群的过程中，当新种群中的个体数少于种群规模 N 时，无论合并种群中有无重复个体，前 k 层个体都会被全部选入新种群。

为了增加种群的多样性，提高算法的搜索能力，得到分布更加均匀的 Pareto 最优曲线，学者们提出了许多改进的算法。文献[18]提出删除相似程度最大的个体，文献[19]、[20]提出删除重复个体。在分析 NSGA-II 算法种群多样性减少原因的基础上，本文提出了改进选择策略和改进精英策略。

2.2 改进的选择操作

锦标赛选择是把每次随机配对的较优个体选入子代种群中。这种选择模式可能导致较优个体的大量繁殖，降低种群的多样性，造成过早收敛。为了增加种群的多样性，本文提出按一定比例选择一些支配个体，选取规则为

$$m_k = E_k l^k, \quad k = 1, \dots, D_{\max} \quad (7)$$

式中： m_k 为从种群第 k 非支配分层个体中选取的个体数； E_k 为第 k 非支配分层的个体总数； l^k 为比例因子，表示第 k 非支配分层个体选取的比例，其中 $l = a + g / g_{\max} (b - a)$ ， $a, b \in (0.5, 1)$ ，且 $a < b$ ， g 为迭代代数， g_{\max} 为最大迭代代数； D_{\max} 为非支配分层总数。

改进的选择操作具体步骤如下：1) 首先从种群 P 的每一非支配分层中按式(7)选取 $\sum_{k=1}^{D_{\max}} m_k$ 个个体。2) 如果迭代代数 $g = 1$ ，则再从种群 P 中锦标赛选择个体，直到新群体的规模为 N ；如果迭代代数 $g > 1$ ，则从外部非支配集 D 和种群 P 中锦标赛选择个体，直到新群体的规模为 N 。

改进的选择操作通过比例因子调整所要选取支配个体的数量。一方面，随着迭代代数的增加， l 从 a 到 b 线性递增，对于第 k 非支配分层来说比例因子 l^k 也是随代数递增的。因为在进化初期，支配个体的质量较差，不利于种群进化，所以在进化初期 l^k 值较小，选取支配个体的数量相对进化后期也较少；而进化后期，支配个体的质量较好，选取一定数量的支配个体增加了种群的多样性，提高了算法的全局寻优能力。另一方面，比例因子 l^k 随着 k 的增大而减小，意味着较靠前非支配分层的个体有更多被选择的机会，即在保证较优个体有更大几率被选择的前提下增加种群的多样性。

在改进的选择操作中，外部非支配集 D 和种群 P 一起参与锦标赛选择，使得历代迭代所得到的最优非支配个体有机会被选择进来，保证了子代群体的质量。

2.3 改进的精英策略

精英策略即保留父代中的优良个体直接进入子代，是保证算法收敛的必要条件。NSGA-II 算法采用的方法是：先把父代种群 P 和子代种群 Q 合并成一个种群 $R = P \cup Q$ ，规模为 $2N$ ；对种群 R 快速非支配排序并计算虚拟适应度；从合并种群 R 中选取前 N 个较好的个体来形成新的父代种群 P 。但是，由于重复个体具有相同的非支配层序号，所以精英策略可能会将大量的重复个体选入新的父代种群中，减少了种群的多样性，影响算法的搜索能力。

针对 NSGA-II 算法精英策略的不足，本文提出如下改进策略：

1) 在非支配排序前，对合并种群 R 中的重复个体和较密集个体进行变异。在实际应用中，根据电抗器的结构特点，包封数和总层数的改变对目标函数影响较大，为了避免导致算法的随机搜索，只对总层数进行小概率变异，对内径和平均线径以较大的概率变异。

2) 考虑到遗传进化的随机因素，每一代进化所得的优良个体在进化的过程中都有可能被丢失。借鉴文献[21]的 Pareto 存档策略，在精英策略中设置一个规模为 M 的外部非支配集 D ，将合并种群 R 中的第一层非支配个体存入外部非支配集 D 中，同时删除 D 中的支配个体和较密集的个体。

在本文中，密集个体定义如下：

定义 对于双目标的优化问题，首先选一个目标函数为指标，对其升序排序，当个体 i 与其前一个体或后一个体在此目标函数上的欧氏距离小于一个给定的小数 ε 时，认为个体 i 为密集个体。即

$$s_{i1} = \sqrt{(f_{1,i} - f_{1,i-1})^2 + (f_{2,i} - f_{2,i-1})^2} \quad (8)$$

$$s_{i2} = \sqrt{(f_{1,i+1} - f_{1,i})^2 + (f_{2,i+1} - f_{2,i})^2} \quad (9)$$

式中： $i = 2, \dots, N_1 - 1$ ， N_1 为个体数； s_{i1} 、 s_{i2} 分别为个体 i 与其前一个体和后一个体在目标函数上的欧氏距离； $f_{j,i}$ ($j = 1, 2$) 为个体 i 的第 j 个目标函数。若 $s_{i1} < \varepsilon$ 或 $s_{i2} < \varepsilon$ ，则认为个体 i 为密集个体。

在改进的精英策略中，首先对合并种群 R 中的重复个体和密集个体的部分变量进行变异，增加了种群 R 的多样性，从而得到多样性更好的新父代种群 P ；其次设置了外部非支配集 D ，把迭代的优秀非支配个体保存到外部集中，防止了优良个体在进化过程中丢失，在选择操作时 D 中个体参与选择，提高了进化效率。

2.4 算法实现

在电抗器的设计变量中，包封数和总层数是离散的，采用二进制编码；电抗器内径和平均线径是连续的，采用实数编码。

在种群进化过程中，合并种群 R 中每个个体的目标函数值和约束违反值计算要用到 w_{ci} 、 D_{ci} 、 d_{ci} 、 I_{ci} 、 J_{ci} 和 T_{pi} 等变量，这些变量是由个体所表示的包封数 N_p 、总层数 N_c 、电抗器内径 D_{in} 和平均线径 d_{av} 计算得到的，具体过程如图 1 所示。

采用改进的 NSGA-II 算法对干式空心电抗器多目标优化的流程图如图 2 所示。

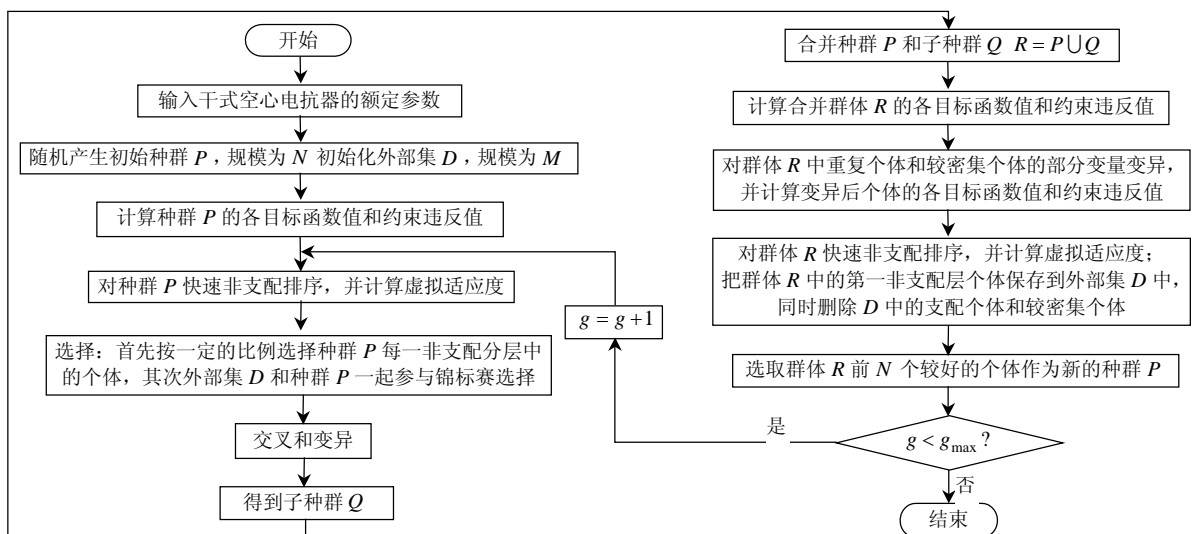


图 2 改进 NSGA-II 算法流程图
Fig. 2 Flow chart of improved NSGA-II algorithm

3 算例分析

3.1 算法验证

为了验证改进算法的有效性，以额定容量为 50 kvar、额定电压为 317.5 V、额定电感为 6.42 mH、圆形截面束绞线单线绕制的单相干式空心电抗器优化设计为例，分别采用 NSGA-II 算法和改进的 NSGA-II 算法对其进行多目标优化，并对结果进行比较。

算例中的参数设置如下：包封数取值范围是 [1, 6]；总层数是包封数的 3~5 倍；电抗器内径的取值范围是 [600, 1 200] mm；平均线径的取值范围是 [2, 4] mm；种群规模 $N=100$ ；外部非支配集规模 $M=100$ ；最大迭代代数 $g_{max}=100$ ； $\varepsilon=0.001$ ； $a=0.7$ ， $b=0.9$ ；交叉概率为 0.85；变异概率为 0.01；重复个体和较密集个体的总层数变异概率均为 0.001，内径和平均线径变异概率为 0.5；损耗系数为 1.2；最高包封温升为 75℃；最小层电流密度为 0.9 A/mm²，最大层电流密度为 1.5 A/mm²。所得的 Pareto 最优设计结果分别如图 3、4 所示。

从图 3、4 可以看出，两种方法均可以找到一组非支配解，本文的方法由于对选择策略和精英策略做了改进，改善了种群的多样性，所获得的 Pareto 解分布更加均匀，为决策者提供了更多可行的设计结果。

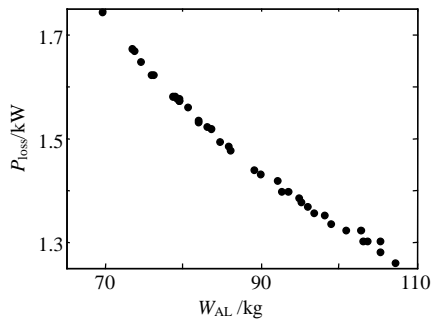


图 3 NSGA-II 算法的 Pareto 前沿
Fig. 3 Pareto front of NSGA-II algorithm

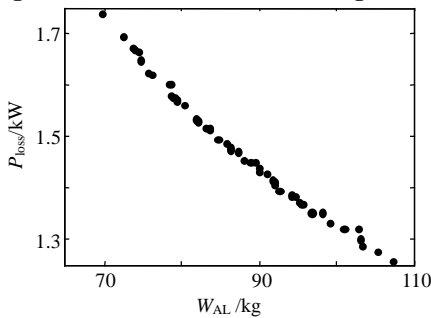


图 4 改进 NSGA-II 算法的 Pareto 前沿
Fig. 4 Pareto front of improved NSGA-II algorithm

对于干式空心电抗器的多目标优化问题，所求得的非支配解集中解向量分布的均匀程度，可用空间评价方法^[9]来评价，评价函数定义为

$$\Delta = \sum_{i=1}^{|F|} \frac{|d_i - \bar{d}|}{|F|} \quad (10)$$

式中： $|F|$ 为所得 Pareto 最优解的个数； d_i 为 Pareto 解集中非支配边界上两个连续向量的欧氏距离； \bar{d} 为这些距离的平均值。

Δ 的值越小表示非支配解集的分布越均匀，当 $\Delta=0$ 时，认为非支配解集呈均匀分布。

分别采用 NSGA-II 算法和改进的 NSGA-II 算法，对 50 kvar 干式空心电抗器多目标优化设计程序独立运行 10 次，所得到的偏差度量 Δ 如表 1 所示。从表 1 可以看出，改进 NSGA-II 算法的偏差度量值相对较小，表明改进 NSGA-II 算法所求得的 Pareto 解集分布较为均匀。可见改进 NSGA-II 算法可以更有效地求解干式空心电抗器多目标优化设计问题。

表 1 NSGA-II 算法和改进 NSGA-II 算法的偏差度量 Δ
Tab. 1 Deviation measure Δ of NSGA-II algorithm and improved NSGA-II algorithm

独立运行次数	偏差度量 Δ	
	NSGA-II 算法	改进 NSGA-II 算法
1	6.773	5.913
2	7.088	6.122
3	6.469	5.979
4	6.232	6.173
5	7.459	5.914
6	6.091	5.947
7	7.413	6.265
8	7.391	6.159
9	6.273	5.899
10	6.229	5.544

3.2 设计结果分析

仍以 50 kvar 干式空心电抗器的设计为例，传统的计算机辅助设计结果^[7]为：铝导线质量为 83.28 kg，电抗器损耗为 1.686 kw。需要人工输入内径、包封数、包封内层数、包封内导线线径等设计参数。表 2、3 给出了用改进 NSGA-II 算法得到的 Pareto 最优设计结果。其中，表 2 为 Pareto 最优解中具有代表性的结果。从表中可以看出，在满足设计要求的前提下，改进的 NSGA-II 算法求得的 Pareto 设计结果与计算机辅助设计结果相比，第 3~11 个设计结果，铝导线质量和电抗器损耗两个目

表2 一组 Pareto 最优设计结果
Tab. 2 A set of Pareto optimal design results

序号	包封数	总层数	D_m/mm	d_{av}/mm	W_{Al}/kg	P_{loss}/kw
1	3	14	804.69	3.218	69.47	1.742
2	3	14	866.25	3.245	72.55	1.696
3	3	14	805.02	3.227	73.74	1.668
4	3	15	812.03	3.234	74.50	1.648
5	3	15	723.31	3.210	75.76	1.625
6	3	14	773.48	3.307	76.14	1.623
7	3	15	827.02	3.257	78.50	1.583
8	3	15	776.12	3.237	79.37	1.572
9	3	14	693.05	3.368	80.45	1.563
10	3	15	768.70	3.315	81.85	1.532
11	3	14	806.01	3.434	83.09	1.521
12	3	15	808.74	3.373	84.62	1.495
13	3	15	749.85	3.366	85.69	1.487
14	4	19	682.61	2.992	87.22	1.473
15	3	15	898.48	3.444	88.85	1.454
16	3	15	755.97	3.401	89.94	1.431
17	4	20	739.59	3.004	91.81	1.418
18	4	20	778.83	3.035	93.99	1.389
19	3	14	785.05	3.603	95.14	1.376
20	3	15	891.14	3.553	96.82	1.354
21	4	18	808.70	3.236	98.09	1.353
22	4	18	725.27	3.285	100.83	1.322
23	3	14	878.29	3.746	103.24	1.293
24	4	18	730.18	3.326	105.21	1.281
25	4	18	737.37	3.362	107.24	1.260

表3 一个 Pareto 最优设计结果计算单

Tab. 3 A calculation list of Pareto optimal design result

包封	线径/mm	温升/°C	层序号	中径/mm	线圈高/mm	匝数	并绕根数	电流/A	电流密度/(A/mm ²)	电阻电压/V
1	3.00	63.92	1	833.10	314.74	92.52	1	9.703	1.37	9.41
			2	839.25	307.89	90.50	1	9.806	1.39	9.37
			3	845.41	302.20	88.83	1	9.835	1.39	9.29
			4	851.56	297.54	87.46	1	9.792	1.39	9.17
			5	857.72	293.84	86.37	1	9.685	1.37	9.02
2	3.15	66.55	6	920.02	277.95	78.09	1	8.991	1.15	7.37
			7	926.46	275.01	77.26	1	8.887	1.14	7.26
			8	932.90	272.71	76.61	1	8.835	1.13	7.20
			9	939.34	271.00	76.13	1	8.837	1.13	7.21
			10	945.78	269.88	75.82	1	8.893	1.14	7.28
3	3.55	64.44	11	1008.60	298.01	74.89	1	12.507	1.26	8.49
			12	1015.80	297.28	74.70	1	12.621	1.28	8.60
			13	1023.01	297.65	74.80	1	12.655	1.28	8.70
			14	1030.21	299.15	75.17	1	12.601	1.27	8.77
			15	1037.41	301.83	75.85	1	12.453	1.26	8.80

注：电抗器内径为 827.02 mm；平均线径为 3.257 mm；铝导线质量为 78.50 kg；电抗器损耗为 1.583 kw；电感为 6.48 mH；电流为 156.1 A。

器的多目标优化设计中，为电抗器优化设计提供了新的思路和方法。针对 NSGA-II 算法在进行电抗器优化时种群多样性差的问题，提出以一定比例选择种群中的支配个体，在非支配排序前以一定概率对合并种群中重复个体和较密集个体的部分变量进行变异；此外，为了保护优良个体和提高算法的搜索能力，在精英策略中设置了外部非支配集，并且外部集中的个体参与锦标赛选择。干式空心电抗器

标函数都得到了优化。此外，铝导线质量最多可减少 16.58%，电抗器损耗最多可减少 25.27%。表 3 给出了表 2 中第 7 个设计结果的详细结构参数，并核算了电抗器的电感、总电流、层电流、层电流密度、层电阻电压和包封温升等参数。表 3 与辅助设计结果相比，铝导线质量减少了 5.74%，电抗器损耗减少了 6.11%，电感计算值和额定值的误差为 0.93%，电流计算值和额定值的误差为 0.88%，均满足设计要求。

从表 2 可以看出，由于两个目标函数是相互冲突的，两个目标函数不可能同时得到优化，最多是一个目标函数优化的同时，另一个目标函数不至于劣化。所以厂家可以根据节约原材料或节约电能的不同需求，选择适合自身特殊要求的计算单。

4 结论

本文在深入分析电抗器铝导线质量和损耗与平均线径之间关系的基础上，以铝导线质量和电抗器损耗为目标函数建立了干式空心电抗器的多目标优化模型，将 NSGA-II 算法引入到干式空心电抗

的优化设计实例表明，采用改进算法所获得的 Pareto 最优解分布更加均匀，从而验证了改进算法的有效性。

参考文献

- [1] 朱敏, 魏新劳, 王永红, 等. 空心电抗器计算机辅助设计系统的开发[J]. 黑龙江电力, 2003, 25(5): 344-347.
Zhu Min, Wei Xinlao, Wang Yonghong, et al. Development of CAD system for hellow reactors[J]. Heilongjiang Electric Power, 2003,

- 25(5): 344-347(in Chinese).
- [2] 夏天伟, 闫英敏. 干式空心限流电抗器的优化设计问题[J]. 电机与控制学报, 1998, 2(1): 51-53.
Xia Tianwei, Yan Yingmin. Optimum design of dry-type air-core current-limited reactor[J]. Electric Machines and Control, 1998, 2(1): 51-53(in Chinese).
- [3] 曹云东, 夏天伟, 高慧萍, 等. 干式空心电抗器优化设计中约束处理的研究[J]. 电工技术学报, 1999, 14(4): 31-34.
Cao Yundong, Xia Tianwei, Gao Huiping, et al. Research of the equality constrains in the optimum design of the dry-type air reactors [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1999, 14(4): 31-34(in Chinese).
- [4] 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.
Liu Zhigang, Ouyang Sen, Geng Yingsan, et al. Study of genetic algorithm in the optimum design of air-core reactor[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2003, 22(3): 45-49(in Chinese).
- [5] 刘志刚, 耿英三, 王建华, 等. 基于改进自适应遗传算法的空心串联电抗器优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(9): 103-106.
Liu Zhigang, Geng Yingsan, Wang Jianhua, et al. Optimum design of dry-type air-core series reactor based on modified adaptive genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(9): 103-106(in Chinese).
- [6] 刘志刚, 王建华, 耿英三, 等. 一种改进的遗传模拟退火算法及其应用[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(5): 1099-1011.
Liu Zhigang, Wang Jianhua, Geng Yingsan, et al. A modified genetic simulated annealing algorithm and its application[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(5): 1099-1011(in Chinese).
- [7] 康博. 干式空心电抗器的优化模型与混合遗传算法优化设计[D]. 西安: 西安交通大学, 2009.
Kang Bo. Optimization model of dry-type air-core reactor and optimization design based on hybrid genetic algorithm[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2009(in Chinese).
- [8] 陈锋, 赵彦珍, 马西奎. 基于设计变量重构的干式空心电抗器优化设计方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(21): 99-106.
Chen Feng, Zhao Yanzhen, Ma Xikui. Optimum design of dry-type air-core reactor based on design variable reconstruction[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(21): 99-106(in Chinese).
- [9] Deb K, Agrawal S, Pratap A, et al. A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II [C]. 6th International Conference on Parallel Problem Solving From Nature, Paris, France, 2000.
- [10] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [11] 王秀丽, 李淑慧, 陈皓勇, 等. 基于非支配遗传算法及协同进化算法的多目标区域电网规划[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(12): 11-15.
Wang Xiuli, Li Shuhui, Chen Haoyong, et al. Multi-objective and multi-district transmission planning based on NSGA-II and cooperative co-evolutionary algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(12): 11-15(in Chinese).
- [12] 冯志刚, 艾芊. 带精英策略的快速非支配排序遗传算法在多目标无功优化中的应用[J]. 电工技术学报, 2007, 22(12): 146-151.
Feng Shigang, Aiqian. Application of fast and elitist non-dominated sorting generic algorithm in multi-objective reactive power optimization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(12): 146-151(in Chinese).
- [13] 栗梅, 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).
- [14] Kannan S, Baskar S, McCalley J, et al. Application of NSGA-II algorithm to generation expansion planning[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(1): 454-461.
- [15] Murugan P, Kannan S, Baskar S. NSGA-II algorithm for multi-objective generation expansion planning problem[J]. Electric Power Systems Research, 2009, 79(4): 622-628.
- [16] Favuzza S, Ippolito M G, Sanseverino E R. Crowded comparison operators for constraints handling in NSGA-II for optimal design of the compensation system in electrical distribution networks [J]. Advanced Engineering Informatics, 2006, 20(2): 201-211.
- [17] 赵彦珍, 康博, 马西奎. 干式空心电抗器优化模型的建立方法[C]. 电工理论与新技术年会, 杭州, 2009.
Zhao Yanzhen, Kang Bo, Ma Xikui. Optimization model of dry type air-core reactors[C]. CTATEE, Hangzhou, 2009(in Chinese).
- [18] 伍军, 郑金华, 文诗华. 一种基于相似个体的多目标进化算法[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(14): 76-82.
Wu Jun, Zheng Jinhua, Wen Shihua. Multi-objective evolutionary algorithm based on similar individuals[J]. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(14): 76-82(in Chinese).
- [19] 谢炯亮, 郑金华. NSGA-II 中重复个体产生原因分析及影响研究[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(29): 69-72.
Xie Jiongliang, Zheng Jinhua. Research on cause for overlapping solutions and on their influence in NSGA-II algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(29): 69-72(in Chinese).
- [20] Nojima Y, Narukawa K, Kaige S, et al. Effects of removing overlapping solutions on the performance of the NSGA-II algorithm [C]. 3rd International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization, Guanajuato, Mexico, 2005.
- [21] Zitzler E, Thiele L. Multiobjective evolutionary algorithms: a comparative case study and the strength pareto approach[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1999, 3(4): 257-271.



张成芬

收稿日期: 2010-01-11。

作者简介:

张成芬(1979—), 女, 博士研究生, 研究方向为智能优化及其在电力设备优化设计中的应用, eegszhangcf@gmail.com;

赵彦珍(1967—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为工程电磁场数值计算及其软件技术, zhaoyzh@xjtu.edu.cn;

陈锋(1979—), 男, 博士研究生, 主要从事电力设备的优化设计和特性分析, xianfeng0373@stu.xjtu.edu.cn;

马西奎(1958—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电气工程中的多种物理场耦合理论及其数值分析和软件技术、电力电子系统中的复杂行为等, maxikui@mail.xjtu.edu.cn。

(责任编辑 张玉荣)