

混合滤波系统中无源滤波器的 均匀设计多目标优化方法

赵曙光¹, 赵明英¹, 王军宁², 王宇平³

(1. 西安电子科技大学 电子工程学院, 陕西 西安 710071;

2. 西安电子科技大学 通信工程学院, 陕西 西安 710071;

3. 西安电子科技大学 理学院, 陕西 西安 710071)

摘要: 针对在很大程度上决定混合滤波系统整体性能的无源电力滤波器参数优化问题, 提出一种基于均匀设计的多目标自适应遗传算法, 其核心是基于元件标称值的高效编/解码方案, 基于权值均匀生成、动态调整和 Pspice 仿真的多目标合成与评估方法, 可提高后代质量并减少运算量的多父本均匀交叉算子, 以及兼顾种群多样性和遗传进程的遗传概率自适应策略。实验结果表明, 该方法仅需单次运行即可获得一组经过优化且反映多目标间均衡关系的实用化设计结果。

关键词: 混合电力滤波系统; 无源电力滤波器; 自适应遗传算法; 多目标优化; 均匀设计

中图分类号: TM 711; TP 18 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2005)01-0007-05

1 问题描述

由无源电力滤波器 PPF(Passive Power Filter)^[1]和有源电力滤波器 APF(Active Power Filter)结合而成的混合滤波系统 HPFS(Hybrid Power Filter System)^[2,3], 可较好地克服 PPF 和 APF 的缺点并实现优势互补, 以较低的成本获得较好的滤波效果和稳定性, 故被视为最具前途的电力系统谐波治理设备; 但其整体性能在很大程度上仍取决于其中 PPF 的参数优化程度。以图 1 所示的并联型 HPFS 为例, PPF 由多组分别调谐于主要谐波频率的单调谐滤

波器(双调谐滤波器调试较困难, 且可用两组单调谐滤波器代替, 故较少采用)和截止频率较高的高通滤波器并联构成, 通过旁路谐波源产生的谐波电流, 对电网起到带阻和低通滤波的作用^[1]; APF 通常由电压型逆变器构成, 经变压器耦合与 PPF 串联后并联在电网上, 作用是改善 PPF 的滤波效果和抑制串、并联谐振。在理想情况下, 谐波电流全部流过 HPFS, APF 的额定容量主要取决于谐波电流在 PPF 上产生的谐波电压幅度, 而最终则取决于 PPF 的滤波效果即参数优化程度。显然, 在同等条件下, HPFS 中 APF 的额定容量较“纯 APF”明显地减小; 且 PPF 的参数优化程度愈高, APF 的额定容量便愈小, 而 HPFS 的成本愈低, 性能愈好。因此, 为了显著地降低 HPFS 的成本和提高其整体性能, 可以且必须提高 PPF 的整体优化程度。

HPFS 设计是典型的非线性、多目标优化问题, 涉及技术、经济、安全等多方面的要求。对其中的 PPF, 首先应根据谐波源的特性即谐波次数和强度等, 参照谐波限制的有关标准(国家或国际标准), 选定 PPF 的结构和滤波参数, 包括单调谐滤波器的组数和每组各自的谐振频率, 高通滤波器的截止频率等。其次, 应以综合效益最佳为原则, 并考虑背景谐波、元件容差和系统频率、环境温度的变化等实际因素, 最终确定最优的 LC 参数组合和元件规格: 既要使 PPF 的滤波性能最佳, 即在满足预期指标的基础上尽可能地减小残余的谐波含量, 又要努力降低 PPF 的成本即初期投资, 并且预留足够的安全裕度。忽视其中的任何要求均无法实现全面优化。

已报道的 PPF 优化方法普遍针对部分技术、经济指标, 基于工程经验或简化模型近似地求解, 因而

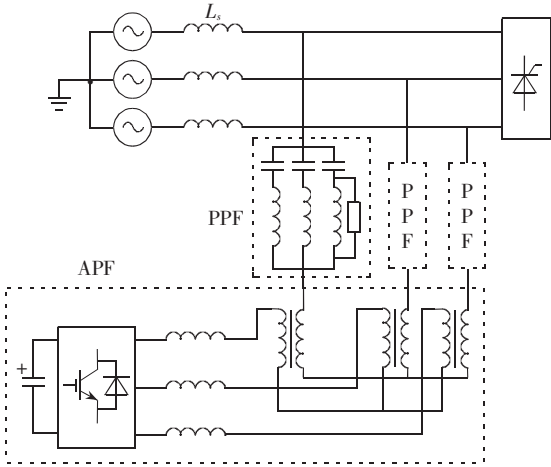


图 1 并联型 HPFS 的原理框图

Fig.1 The block diagram of parallel hybrid power filter system

无法实现综合优化^[1~3]。文献[4]利用遗传算法^[5],以初期投资最小为主要优化目标,而将谐波含量最小等优化目标转化为用于判定候选解可行性的约束条件,并利用复杂的选择机制使对这些“次要目标”而言表现“较好”的染色体有较大的生存机会,但“次要目标”对评价标准和进化方向的约束较弱且难以量化和控制。文献[6]将遗传算法^[5]用于以谐波电压和初始投资最小为目标的PPF优化,通过根据2个适应度函数各选1个交叉父本来回避常用的“加权法和法”的权值选择问题,但其实质与采用固定权值(0.5,0.5)的“加权法和法”等效^[7],且难以推广至多目标(2个以上)的情况。对此,本文提出基于均匀设计的多目标自适应遗传算法,通过在编/解码、适应度评估、交叉算子和遗传概率调整等方面采取多种措施,可以获得兼顾多种优化目标且优化程度和实用性得到显著提高的PPF设计结果。

2 编/解码方案

遗传算法的操作对象是染色体,即有关变量的编码字符串,其编码方式、结构和长度等均对算法性能影响很大^[5,8]。PPF优化问题的编码对象是PPF中各元件的参数,即电容量、电感量、电阻值等。本文采用二进制编码,但为了缩短编码长度不进行直接编码,而是根据工程上普遍采用的96级(即1%误差等级)标称值系列^[8],对各参数在“标称值表”中的序号进行编码

$$X = [C_{b1}]_2 \& [L_{b1}]_2 \& [R_{b1}]_2 \& \cdots \& [C_h]_2 \& [L_h]_2 \& [R_h]_2 \quad (1)$$

式中 $[C_{b1}]_2, [L_{b1}]_2, [R_{b1}]_2$ 分别为第1组单调谐滤波器中电容、电感、电阻参数的二进制编码,其他 $M-1$ 组单调谐滤波器的编码格式与之相同; $[C_h]_2, [L_h]_2, [R_h]_2$ 分别为高通滤波器的电容、电感、电阻参数编码。

这样,对每个元件仅需9位编码便可覆盖超过5个数量级的取值范围,而直接编码则需要18位,故上述“序号编码”的码长缩短50%;染色体的总长度为 $L_c = 27M + 27$,且译码所需的查表操作非常简便,运算量极小。相应地,假设与染色体有关的遗传操作的计算复杂度为 $O(L_c^2)$, L_c 为染色体长度,则“序号编码”的运算量可减少约3/4。此外,因该方案容许元件参数误差,故有利于提高设计结果实用性和降低成本(如采用价格较低的标准化元件)。

3 多目标适应度评估方法

PPF设计等多目标优化问题可形式化描述为:在由 m 个约束条件 $g_i(\mathbf{X}) \leq 0$ 确定的域 Ω 内,寻找决策向量 $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$,使包含 k 个子目标函数 $f_j(\mathbf{X})$ ($1 \leq j \leq k$) 的向量函数 $\mathbf{f}(\mathbf{X})$ 最优,即

$$\begin{aligned} \max / \min \mathbf{f}(\mathbf{X}) &= (f_1(\mathbf{X}), f_2(\mathbf{X}), \dots, f_k(\mathbf{X})) \\ \text{s.t. } g_i(\mathbf{X}) &\leq 0 \quad 1 \leq i \leq m \end{aligned} \quad (2)$$

这类问题通常没有唯一的全局最优解,却存在包含多个最优解的集合——其中的各元素就全体子目标而言不可比较,但对每个元素均无法进一步优化部分子目标而不劣化其他的子目标,故被称为 Pareto 最优解或非劣最优解;所有对应于 Pareto 最优解的目标向量共同构成多目标问题的 Pareto 有效界面(Pareto Front)^[7,8]。受运算量等制约,目前求解该类问题通常使用“加权法和法”,即通过将各子目标加权求和,使问题转化为较易于使用进化算法求解的单目标优化问题:

$$\max / \min \mathbf{f}(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^k w_i f_i(\mathbf{X}) \quad (3)$$

其中,各权值系数 w_i 通常应满足:

$$\sum_{i=1}^k w_i = 1 \quad (4)$$

虽然“加权法和法”可以兼顾所有子目标(而非忽略次要的子目标)且运算量较小,但因仅有唯一的由权值向量 $\{w_i\}$ 决定的基本搜索方向,故每次运行仅能得到单个最优解;而理想目标是求出完整的 Pareto 有效界面,或者其有代表性的抽样(如在它上面均匀分布的多个最优解)。改进的有效途径之一是令算法同时沿多个方向进行搜索^[9,10]。利用均匀设计等试验设计技术^[11],可通过选取特定权值向量 $\mathbf{W}_i = \{w_{ij}\}$ 获得多个均匀指向有效界面的搜索方向^[10]。

对任意的 n 因素 q 水平试验,均匀设计可从全部 q^n 种组合中选出 q 个在组合空间中均匀散布的“试验点”,相应的 q 次试验便可全面地反映各因素的影响及其交互效应;根据不同的均匀性量度,已计算出多种“均匀设计表”和与之配套的“使用表”供选用^[11]。显然,以均匀设计给出的“试验点”作为权值向量,则其各分量(权值)之间的比例关系满足预期的均匀性和完备性。对于 k 个子目标函数 $f_i(\mathbf{X})$,若需要合成 m 个空间指向具备均匀性的适应度函数 f_{it} ,则对应的权值向量选择问题便等价于 k 因素 m 水平的试验设计问题;根据参数 n, q ,查表即可得每行各对应一个试验点的均匀设计矩阵 $\mathbf{U}(k, m)$,并求出归一化(满足式(4))的权值 $w_{i,j}$:

$$w_{i,j} = U_{i,j} / \sum_{j=1}^k U_{i,j} \quad i = 1, \dots, m; \quad j = 1, \dots, k \quad (5)$$

对于 PPF 优化问题,在按式(3)合成前,需预先对量纲和数量级均不相同的各个子目标进行处理。首先,利用个体 $\mathbf{X}$ 的幅频曲线($V \sim f$)与理想曲线的吻合误差 $e_f(\mathbf{X}, t)$ 估计滤波效果

$$e_f(\mathbf{X}, t) = \sum_{k=1}^P a(f_k) [V_{\text{goal}}(f_k) - V_{\text{real}}(\mathbf{X}, t, f_k)]^2 \quad (6)$$

式中 f_k 为采样频点($k = 1, \dots, P$); $V_{\text{goal}}(f_k), V_{\text{real}}(\mathbf{X}, t, f_k)$ 分别为 f_k 处幅频特性理想值和实际值; $a(f_k)$ 权值反映 f_k 处吻合误差的重要程度。

谐波抑制子目标的归一化目标函数定义为

$$F_1(\mathbf{X}, t) = \exp(-K_{F1} e_f(\mathbf{X}, t)) \quad (7)$$

式中 常数 $K_{F1} > 0$ 。

而初期投资子目标对应的归一化目标函数可定义为

$$F_2(X, t) = 1 - K_{F_2} \sum_{j=1}^{M+1} [k_c C_j(X, t) + k_l L_j(X, t)] \quad (8)$$

式中 K_{F_2} 为正的常数; M 为单调谐滤波器的个数; k_c, k_l 分别为电容器、电抗器的价格因子。

相应地,总优化目标和适应度函数 F_s 可表达为

$$\max F_s(X, t) = \sum_{i=1}^2 w_i(t) F_i(X, t) \quad (9)$$

在此基础上,利用 Pspice 等电路仿真软件,通过“解码 → 合成网表 → 电路仿真 → 参数计算”等步骤,逐一评估当前种群中全体个体(备选 PPF)的主要性能。因为 PPF 的滤波原理与电子无源滤波器完全相同,上述基于仿真的评估方式不但合理可行,而且由于将 PPF 整体对待和考虑了各组滤波器之间的相互影响,所以设计结果的优化程度和实用性可望较独立考虑和设计各组滤波器的常规方法有显著提高。

4 多个体均匀交叉算子

交叉算子是遗传算法产生新个体的重要途径。目前,普遍沿用的 SGA 两个体交叉模式模仿生物有性繁殖,按照预定方式在 2 个被选定父本的邻域中随机或确定性地采样 2 个新试验点作为后代。但在进化算法普遍面临的多模空间中,该类模式隐含的“好点周围蕴含好点”基本假设并不成立,当 2 个父本相距较远时更是如此;同时,交叉操作的运算量在整个遗传算法中占有很大比例,是影响进化速度的一大瓶颈。

对此已提出多种改进方法^[12-14],但均未能兼顾运算量和后代质量并同时适用于实数编码和二值编码。故本文提出如下基于均匀设计的“多父本 & 多后代”交叉方式,寻求既减少交叉次数及运算量又提高交叉采样的均匀性。

4.1 对二值编码

设个体 $P_i = b_{i,1} \& b_{i,2}, \dots, \& b_{i,L}, b_{i,j} \in \{0, 1\}, j=1, \dots, L$;

a. 根据父本个数 $m(m \geq 2)$, 选取 $n < m$, 查表求得均匀设计矩阵 $U(n, m) = [U_{i,j}]_{m \times n}$;

b. 将个体的下标集合 $S = \{1, \dots, L\}$ 随机划分为 n 个互不相交的子集 $S_j: \cap_{i \neq j} S_i \cap S_j = \emptyset, \cup_{i=1}^n S_i = S$;

c. 随机选取 m 个父本(具体方式不限),并按适应度递减的次序依次编号为 $1, \dots, m$;

d. 依照 $S_j(j=1, \dots, n)$ 对各父本做相同的下标划分,其特例是将每个父本分割成 n 个子串;

e. 根据 $U(n, m)$ 的每 1 行合成 1 个后代,元素 $U_{i,j}$ 即指明第 i 个后代的第 j 个划分的索引对象(即父本编号),故可由 m 个父本均匀地合成 m 个后代。

4.2 对实数编码

设个体 $X_j = (x_1, x_2, \dots, x_L), x_j \in R, j=1, \dots, L$;

a. 依据参与交叉的父本个数即“加权和”中权值的个数 $n(n \geq 2)$, 选定权值的变化级数 $m(m > n)$, 查表求得均匀设计矩阵 $U(n, m) = [U_{i,j}]_{m \times n}$;

b. 随机选取 n 个父本(具体方式不限),并按适应度递减的次序依次编号为 $1, \dots, n$;

c. 根据矩阵 $U(n, m)$ 的每 1 行,以“加权和”形式生成 1 个后代,第 i 个后代中第 j 个父本的权值即等于 $U_{i,j}$;

d. 为保证交叉后代的合法性,进一步加以归一化处理,即令

$$X_i'' = \sum_{j=1}^n (U_{i,j} X_j) / \sum_{j=1}^n U_{i,j} \quad i=1, \dots, m \quad (10)$$

e. 对根据 n 个父本生成的 m 个后代 X_i'' , 可进一步进行选择,仅保留 n 个较优良的后代。

函数优化数值实验的结果表明^[8],上述均匀交叉算子通过提高后代质量和减少运算量,可使算法运行时间(与两父本交叉算子相比)减少 50% 以上,且父本数为 4 时改善效果最为明显。

5 遗传概率调整策略

交叉概率 P_c 和变异概率 P_m 均为重要的遗传参数,其最佳取值随具体应用、种群分布和遗传进程而变化,引入自适应机制是适应这种调整要求的较好方法^[5,8]。本文利用当前种群的平均、最大、最小适应度 $fit_{avg}(t), fit_{max}(t), fit_{min}(t)$, 估计当前种群的个体多样化程度:

$$f_d(t) = fit_{avg}(t) / [\varepsilon + fit_{max}(t) - fit_{min}(t)] \quad (11)$$

显然, $f_d(t)$ 主要落在 $[0.5, 10]$ 上,故可令 P_c 与 P_m 同时跟随种群多样性变化和遗传进程自适应调整:

$$P_c = P_{c0} e^{-b_1 t / t_{max}} / f_d(t) \quad 0 \leq t \leq t_{max} \quad (12)$$

$$P_m = P_{m0} e^{-b_2 t / t_{max}} f_d(t) \quad 0 \leq t \leq t_{max} \quad (13)$$

式中 t_{max} 为最大进化代数; t 为已进化代数; $P_{m0}, P_{c0} \in [0, 1]$; b_1, b_2 均为正的常数。

这样,当种群分布较集中时(即趋于局部收敛, $f_d(t)$ 较大), P_m 将增加而 P_c 减小,否则相反;而在总的趋势上, P_c 和 P_m 均跟随遗传进程缓慢地减小。在此基础上,进一步通过越界判断将 P_m 和 P_c 限定在规定的合理区间内, $P_m \in [P_{m,min}, P_{m,max}]$, $P_c \in [P_{c,min}, P_{c,max}]$, 便可较好地适应种群分布和遗传进程的变化对 P_m 和 P_c 的不同需要,显著地改善算法性能。

6 算法总结

将上述改进措施融入收敛概率为 1 的最优保留遗传算法(EGA)^[5],便得到本文的 PPF 多目标自适应进化设计方法,下面介绍算法流程和主要步骤。

6.1 参数

种群规模 P_s , 遗传代数 t_{max} , 均匀合成参数 k, m , 均匀交叉参数 s, q 等。

6.2 主要步骤

step1 初始化:由查表得到均匀矩阵 $U(k, m)$ 和 $U(s, q)$;按式(5), (7)~(9)合成适应度函数; $t \leftarrow 0$ 。

step2 产生原始种群:随机产生 NP_s 个染色体 ($N \geq 1$, 本文令 $N=2$), 根据 m 个适应度函数中的每 1 个, 选择 P_s/m 个高适应度染色体, 得到总规模为 P_s 且分布较均匀的初始种群。

- step3 遗传迭代:重复下列步骤 **a~f**, 直到 $t \geq t_{\max}$ 。
- a. 按式 (11)~(13) 计算 P_c 和 P_m 。
 - b. 根据均匀矩阵 $U(s, q)$, 按照第 4 节中所述方式, 进行多个体均匀交叉。
 - c. 对交叉后代以 P_m 为概率, 进行单点变异。
 - d. 对所有个体依次进行解码、Pspice 仿真和适应度计算。
 - e. 种群更新, 根据每个适应度函数, 选择 P_s/m 个高适应度的染色体, 共 P_s 个。
 - f. $t \leftarrow t+1$ 。

step4 根据 k 个目标函数, 按照定义识别并输出末代种群中的 Pareto 最优解。

7 实验与讨论

利用上述方法已完成多组 PPF 的优化设计。针对用于阻感负载整流设备类常见谐波源 (特征谐波为 $6n \pm 1$ 次, n 为自然数) 的 HPFS, 选择由 2 组分别调谐在 5, 7 次谐波上的单调谐滤波器和高通滤波器共同构成 PPF (每相各 1 个, 参见图 2); 并且针对

谐波抑制和初期投资两个优化目标, 设置 5 个根据均匀设计矩阵 $U(2, 5)$ 和式 (5) 得到的搜索方向 (即加权向量, 参见图 3)。

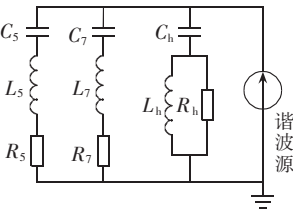


图 2 PPF 的组成与仿真模型
Fig.2 The structure and simulation model of PPF

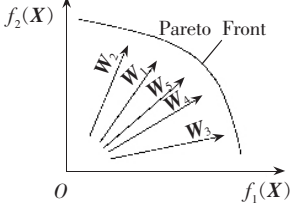


图 3 多方向搜索示意图
Fig.3 Search directions towards the Pareto-front

$$U(2, 5) = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 5 \\ 4 & 1 \\ 5 & 4 \\ 3 & 3 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{aligned} W_1 &= [0.33, 0.67] \\ W_2 &= [0.29, 0.71] \\ W_3 &= [0.80, 0.20] \\ W_4 &= [0.56, 0.44] \\ W_5 &= [0.50, 0.50] \end{aligned}$$

结合其他实验参数 (种群规模 $P_s=100$, 最大遗传代数 $t_{\max}=200$, $P_{c0}=0.8$, $P_{m0}=0.1$, $b_1=b_2=3$, 均匀交叉参数 $(s, q)=(3, 4)$, 等), 运行按照上述算法编制的 PPF 优化设计程序, 所获得的部分典型设计结果见表 1。它们已可大致地反映各子目标间的均衡关系, 故可适应不同的偏好和辅助决策。

表 1 部分典型设计结果
Tab.1 The typical design results of PPF

参数指标		设计结果 1	设计结果 2	设计结果 3	设计结果 4	设计结果 5
5 次单调谐参数	$C_5 / \mu\text{F}$	22.6	29.6	28.7	31.6	29.4
	L_5 / mH	17.8	15.2	14.0	13.0	13.7
	R_5 / Ω	0.10	0.01	0.10	0.01	0.01
7 次单调谐参数	$C_7 / \mu\text{F}$	17.4	15.0	16.7	22.6	20.5
	L_7 / mH	12.1	13.7	13.7	9.09	10
	R_7 / Ω	0.10	0.20	0.01	0.02	0.01
高通滤波器参数	$C_h / \mu\text{F}$	255	301	335	348	389
	$L_h / \mu\text{H}$	576	453	410	392	348
	R_h / Ω	1.62	1.21	1.00	1.10	1.00
THD / %		4.5	4.1	3.5	3.2	3.0
$C_{\Sigma} / \mu\text{F}$		295.0	345.6	380.4	402.2	438.9

注: THD 为装设 PPF 后总谐波畸变率; 装设 PPF 前的电压总谐波畸变率 $\text{THD}_V=28\%$; C_{Σ} 为电容器总容量。

8 结论

为了提高 PPF 和 HPFS 的整体优化程度, 本文提出了一种基于均匀设计的多目标自适应遗传算法。理论分析和实验结果均表明, 该方法通过在初始权值向量生成、交叉操作等环节应用均匀设计技术, 既可减少运算量和提高交叉后代的代表性, 又可通过单次运行便获得沿 Pareto 界面近似均匀分布和具代表性的一组 Pareto 最优解; 而基于标称值编码和 Pspice 整体仿真的多目标评估和优化策略, 则可显著提高设计结果的实用化程度。预期该方法仅需对编码和适应度评估等步骤稍加修改, 便可适用

于求解配电网重构、无功优化等电力系统中的多目标优化问题。

参考文献:

[1] 吴竞昌. 供电系统谐波[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
WU Jing-chang. Power supply system harmonics[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1998.

[2] 马大铭, 朱东起, 谢磊. 综合电力滤波系统中无源滤波器的设计[J]. 电工电能新技术, 1997, 16(3): 1-4.
MA Da-ming, ZHU Dong-qi, XIE Lei. Optimum design for passive filter of combined power filter system [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 1997, 16(3): 1-4.

[3] 刘观起, 李庚银, 周明, 等. 混合滤波系统中无源滤波

- 器的参数优化设计软件包[J].电力系统自动化,2000,24(6):56-59.
- LIU Guan-qi,LI Geng-yin,ZHOU Ming,*et al.* A practical software package for parameter optimization of passive power filter in a hybrid power filter system[J]. **Automation of Electric Power Systems**,2000,24(6):56-59.
- [4] 涂春鸣,罗安,刘娟. 无源滤波器的多目标优化设计[J]. 中国电机工程学报,2002,22(3):17-21.
- TU Chun-ming,LUO An,LIU Juan. Multi-objective optimal design of passive power filters [J]. **Proceedings of the CSEE**,2002,22(3):17-21.
- [5] 陈国良,王煦法,庄镇泉,等. 遗传算法及其应用[M]. 北京:人民邮电出版社,1999.
- CHEN Guo-liang,WANG Xu-fa,ZHUANG Zhen-quan,*et al.* Genetic algorithm and its application [M]. Beijing: People's Posts and Telecommunication Press,1999.
- [6] 陶骏,刘正之. 多目标并行优化的高级遗传算法在无源滤波器设计中的应用[J]. 电气传动,2001,31(6):53-56.
- TAO Jun,LIU Zheng-zhi. Application of refined genetic algorithm with multiobjective parallel optimization in the design of passive power filter [J]. **Electric Drive**, 2001,31(6):53-56.
- [7] COELLO COELLO C A. A comprehensive survey of evolutionary-based multiobjective optimization techniques[J]. **Knowledge and Information Systems**,1999,1(3):269-308.
- [8] 赵曙光. 基于进化的电路自动设计方法研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2003.
- ZHAO Shu-guang. Study of the evolutionary design methods of electronic circuits[D]. Xi'an:Xidian University,2003.
- [9] ISHIBUCHI H,MURATA T. A multi-objective genetic local search algorithm and its application to flowshop scheduling[J]. **IEEE Trans. Systems,Man and Cybernetics-Part C**,1998,28(8):392-403.
- [10] LEUNG Y W,WANG Yu-ping. Multiobjective programming using uniform design and genetic algorithm[J]. **IEEE Trans. Systems,Man and Cybernetics-Part C**, 2000,30(3):293-304.
- [11] 方开泰,马长兴. 正交与均匀试验设计[M]. 北京:科学出版社,2001.
- FANG Kai-tai,MA Chang-xing. Orthogonal and uniform experimental design[M]. Beijing:Science Press,2001.
- [12] 吴少岩,张青富,陈火旺. 基于家族优生学的进化算法[J]. 软件学报,1997,8(2):137-144.
- WU Shao-yan,ZHANG Qing-fu,CHEN Huo-wang. A new evolutionary algorithm based on family eugenics[J]. **Journal of Software**,1997,8(2):137-144.
- [13] 朱学军,陈彤,薛量,等. 多个体参与交叉的 Pareto 多目标遗传算法[J]. 电子学报,2001,29(1):106-109.
- ZHU Xue-jun,CHEN Tong,XUE Liang,*et al.* Pareto multiobjective genetic algorithm with multiple chromosomes crossover [J]. **Acta Electronica Sinica**,2001,29(1):106-109.
- [14] 张铃,张钊. 佳点集遗传算法[J]. 计算机学报,2001,24(9):917-922.
- ZHANG Ling,ZHANG Bo. Good point set based genetic algorithm[J]. **Chinese Journal of Computer**,2001,24(9):917-922.

(责任编辑:柏英武)

作者简介:

赵曙光(1965-),男,陕西西安人,教授,博士,研究方向为电子设计自动化、进化计算工程应用等(E-mail:sgzhao@xidian.edu.cn);

赵明英(1962-),男,陕西兴平人,高级工程师,主要研究方向为电力系统自动化、智能电子系统;

王军宁(1957-),男,山西汾阳人,副教授,研究方向为智能电子系统、数字图像处理;

王宇平(1961-),男,甘肃兰州人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为进化计算、多目标进化等。

Uniform design based multi-objective evolutionary design approach for passive power filters in hybrid power filter system

ZHAO Shu-guang¹,ZHAO Ming-ying¹,WANG Jun-ning²,WANG Yu-ping³

(1.School of Electronic Engineering,Xidian University,Xi'an 710071,China;

2. School of Communication Engineering,Xidian University,Xi'an 710071 China;

3. Faculty of Science,Xidian University,Xi'an 710071,China)

Abstract: A UDT (Uniform Design Techniques) based multi-objective adaptive genetic algorithm is proposed and detailed for improving the optimization of PPF (Passive Power Filter), which determines the comprehensive performances of HPFS (Hybrid Power Filter Systems). It is characterized by an efficient and effective encoding-decoding scheme based on the standard series of component values, a mechanism of multi-objective integration and evaluation with dynamic adjusting of uniformly selected weight vectors and Pspice simulation, a UDT based multi-parent multi-offspring crossover operator for improving offspring's quality and decrease the computation cost, and an adaptation technique for genetic parameters to maintain the individual diversity and track the genetic process. Simulative results show that this approach can obtain a group of effective design results of PPFs through an execution, which meets the main optimizing objectives and reflects the impact of these objectives on each other.

This project is supported by the National Natural Science Foundation Key Project of China (60133010) and the National Natural Science Foundation of China (60374063).

Key words: hybrid power filter system; passive power filter; adaptive genetic algorithm; multi-objective optimization; uniform design