

## 研究与设计

# 应用改进实数编码遗传算法的三相异步电动机优化设计

韩力, 李景灿

(重庆大学, 重庆 400044)



韩力 1963年1月生, 重庆大学副教授, 硕士研究生导师, 主要研究方向为电机与电器设备的现代设计方法、电机电磁场的分析与计算。

**摘要** 为了更好地将遗传算法应用于三相异步电动机的优化设计, 论文对简单遗传算法进行了改进, 提出了采用双亲四子交叉算子、自适应变异算子及多轮次循环优化策略的改进实数编码遗传算法 (RGA), 采用退火罚函数方法对约束条件进行处理, 并用3个经典数学函数进行了验证。在研究三相异步电动机优化设计特点的基础上, 提出了10个优化变量、8个约束条件的电机优化设计数学模型, 将RGA应用于Y系列三相异步电动机优化设计, 分别以提高效率和降低材料成本为目标进行了优化。结果表明, RGA能有效提高电机效率和降低电机主要材料成本, 算法可靠有效, 具有工程实用价值。

**关键词** 三相异步电动机 优化设计 遗传算法

## Application of Improved Real-coded Genetic Algorithm to Three-phase Induction Motors' Optimal Design

Han Li, Li Jingcan

(Chongqing University)

**Abstract:** For the better application of Genetic Algorithm in the optimum design of 3-phase induction motors, an Improved Real-coded Genetic Algorithm (RGA) is developed, which has self-adaptable mutation operator, multi-turns evolution strategy and annealing penalty function for solving nonlinear restrained optimization problems. The improved algorithm is tested by three classical mathematical examples. According to the feature of 3-phase induction motors, a mathematical model of optimum design of 3-phase induction motors is established. The algorithm is applied to the optimal design of Y series motors. The results show that RGA can improve the operation performance and decrease the economic costs obviously, and these show that the algorithm is reliable, valid and suitable to the application in the engineering.

**Key words:** Three-phase induction motor Optimum design Genetic algorithm

### 1 前言

随着石油和能源的不断枯竭, 能源价格不断上涨, 世界各国对高效率电机的需求越来越迫切。与之相应的以效率或材料成本为目标的电机优化

设计技术也普遍受到电机学术界和工程界的关注。对于电机优化设计, 不但需要选择一个合适的算法, 而且还需要结合电机设计的特点对算法进行改进。此外, 设计时还需要考虑电机产品的系列性、通用性以及电机参数的离散性。

众所周知,电机优化设计是一个有约束、多目标、多变量以及多峰值的复杂的非线性问题。用基于古典极值理论的算法和传统的随机算法往往都只能求得局部极值点,而从 20 世纪 90 年代后使用的遗传算法、模拟退火算法等从理论上可以求得全局最优解<sup>[1]</sup>。

遗传算法具有自组织、自适应和自学习的智能性,适合大规模并行运算,具有不受搜索空间限制性条件(如可微、连续、单峰等)的约束及不需其它辅助信息(如导数)的特点,因此受到人们青睐<sup>[2]</sup>。这些特点非常适合用于电机的优化计算。

但是传统的简单遗传算法也存在一些问题<sup>[4]</sup>:在搜索中出现早熟现象,二进制的编码方式增加了算法的复杂性等。针对这些问题,本文结合电机设计的实际,从编码方式、遗传操作、适应度函数、收敛准则等方面对简单遗传算法进行了改进,并用经典数学函数验证了改进后的遗传算法具有良好的全局寻优能力。在这一改进遗传算法的框架下,采用了退火罚函数方法把非线性约束最优化问题变成无约束极值问题进行求解。在此基础上,将改进的遗传算法应用于电机优化设计,对 Y 系列三相异步电动机进行了优化计算,结果表明算法有效实用。

## 2 遗传算法及其改进

### 2.1 简单遗传算法

简单遗传算法(Simple Genetic Algorithm,简称 SGA)是一种基于自然选择和群体进化体制的全局优化算法。它按某种指标从初始解群选取较好的个体,利用交叉、变异等遗传算子对其进行运算,产生新解群,重复此过程直至满足收敛条件<sup>[2]</sup>。SGA 主要由编码、初始化、评价、选择和基因操作等步骤组成。由于 SGA 基于二进制编码方式,因此在求解过程中计算量非常大,对于大规模多变量优化问题还将影响算法的收敛性。

### 2.2 改进的遗传算法

本文通过对遗传算法的研究,提出了改进的实数编码遗传算法(Improved Real-coded Genetic Algorithm,简称 IRGA)。

IRGA 定义适应值函数为:  $FF(X) = F_0 - F(X)$ ,  $F_0$  为当前种群中最大的目标函数值,  $F(X)$  为个体的目标函数值。这样能保证各候选解的适应值函数值非负及极大化,使环境条件随遗传代的加深而变得苛刻,充分体现了自然界的

变化情况。

IRGA 采用实数编码方式,以提高收敛速度;采用“双亲四子”的交叉算子<sup>[5]</sup>,以增加种群的多样性。

SGA 通常采用固定的变异概率,算法演化一定代数后,缺乏局部搜索能力。为了提高算法的局部搜索能力,本文采用如下的自适应变异算子:

设  $s = (s_1, s_2, \dots, s_n)$  为一个父代个体,  $FF(s)$  是它的适应值,  $FF_{\max}$  是当前群体中的最大适应值,分量  $s_k$  被选为进行变异操作,其定义区间是  $[a_k, b_k]$ ,变异后的解为  $s = (s_1, s_2, \dots, s_{k-1}, s_k, \dots, s_n)$ ,其中

$$s_k = \begin{cases} s_k + (t b_k - s_k) & rd = 0 \\ s_k - (t b_k - s_k) & rd = 1 \end{cases} \quad (1)$$

$rd$  为等概率生成的二值随机数 ( $rd \in \{0, 1\}$ ),  $t$  为当前迭代次数。函数  $(t, y) = y(1 - r^t)$  中,  $k = 1 - FF(s) / FF_{\max}$ 。这使得适应值大的个体在较小范围内搜索,而适应值小的个体在较大范围内搜索,从而保护好的解,提高搜索能力。

IRGA 的选择算子采用最优保存和两两竞争相结合的方法。即将最优解直接加入匹配集,然后每次随机选取两个串,将适应值大的串加入匹配集。重复这一操作,直到被选择的个数达到预定值为止。

对于电机优化设计中的约束条件,本文采用如下的模拟退火惩罚函数法进行处理:

定义非线性约束优化问题的目标函数为  $f(x)$  的广义目标函数为

$$\min f(x, \lambda) = f(x) + P(x, \lambda) \quad (2)$$

其惩罚函数为

$$P(x, \lambda) = \left[ \sum_{i=1}^m \max\{0, g_i(x)\} + \sum_{i=1}^n \max\{0, h_i(x)\} \right] \quad (3)$$

不等式约束  $m$  个,等式约束  $n$  个。其中  $\lambda = 1/T$ ,  $T_{i+1} = T_i \cdot r$ ,  $r \in [0, 1]$ ,  $T$  为控制温度,  $r$  为温度冷却系数。 $T$  下降,罚因子  $\lambda$  增大,其增大速度由系数  $r$  来控制。随着进化的进行逐渐增大,对非可行解的惩罚压力随之增大,最终解群趋于可行解。

由于随着代数的增加,惩罚力度越来越大,搜索范围越来越小,为了防止搜索陷入局部最优,本文采用了多轮进化的策略。即每一轮的代数较少,每新一轮优化都以上轮最优个体为初值,对在新新一轮又在较大范围重新形成初始群体,重新设

置罚因子,使惩罚力度在新一轮优化中由小逐渐加大。这样分阶段更新优化群体,保持了群体多样性,有利于克服早熟现象,达到全局优化的目的。

### 2.3 数值验证

本文用如下 3 个函数<sup>[2][3]</sup>来检验 RGA 的性能。

(1) 求 Camel 函数的最小值

$$f_1(x, y) = (4 - 2.1x^2 + x^4/3)x^2 + xy + (-4 + 4y^2)y^2 \quad (4)$$

这是一个无约束的优化问题,变量  $x, y$  的取值范围均为  $[-2, 2]$ ,全局最小值为  $-1.031628$ 。

(2) 求 Shubert 函数的最小值

$$f_2(x_1, x_2) = \sum_{k=1}^2 \left\{ \sum_{i=1}^5 \text{icos}[(i+1)x_k + i] \right\} \quad (5)$$

这是一个无约束的优化问题,变量  $x, y$  的取值范围均为  $[-10, 10]$ ,全局最小值为  $-186.7309$ 。

(3) 求下列有约束条件的优化问题

$$\begin{cases} \min & f_3(x_1, x_2) = x_1^2 + (x_2 - 1)^2 \\ \text{s t} & x_2 - x_1^2 = 0 \\ & -1 \leq x_1 \leq 1 \\ & -1 \leq x_2 \leq 1 \end{cases} \quad (6)$$

已知该问题的最小值为  $0.750000455$ 。问题 3 在处理约束条件时使用了模拟退火方法。

随机运行程序 20 次,结果如表 1 所示。表中最优解平均值反映解的优劣,最优解标准差反映算法的稳定性。从表中可以看出 RGA 具有较好的稳定性和较高的求解精度。

表 1 IRGA 的计算结果

目标函数	已知最优解	最优解平均值	最优解标准差
$f_1$	-1.031628	-1.031628067	9.33916E-07
$f_2$	-186.7309	-186.7309088	1.97467E-06
$f_3$	0.750000455	0.750000078	6.78554E-07

## 3 优化设计数学模型

优化设计的数学模型由目标函数、约束条件、设计变量组成<sup>[2][3]</sup>

$$\begin{cases} \min & f(X) \\ \text{s t} & g_i(x) \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m \\ & h_j(x) = 0 \quad j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (7)$$

电机优化设计的目标函数与变量之间的关系相当复杂,无法写成显式表达式。在优化时,均呈现强烈的非凸性和非线性,局部甚至不连续。因此,建立好的数学模型是优化设计的前提和关键。

### 3.1 目标函数

在优化设计中,需要一个衡量设计方案好坏的评价标准,其数学表达式称为目标函数。电机设计中最优标准由设计者按照电机的不同类型、用途及用户的特殊要求制定,可以是费用(如有效材料费用、制造费用、运行费用等)、体积、重量,也可以是性能指标。本文分别选取主要材料成本和效率作为目标函数。

$$\begin{cases} f = K_{Fe}G_{Fe} + K_{Cu}G_{Cu} + K_{Al}G_{Al} \\ f = \end{cases} \quad (8)$$

式中  $K_{Fe}, K_{Cu}, K_{Al}$ ——分别为铁、铜、铝的单价  
 $G_{Fe}, G_{Cu}, G_{Al}$ ——每台电机铁、铜、铝的重量  
——电机效率

### 3.2 设计变量

三相异步电动机的参数多达数十个。有的参数可以根据经验、工艺、结构和使用要求预先确定,而另一部分对目标函数、约束条件和性能指标影响直接的参数可以作为设计变量。设计变量越多,优化方案可能越理想,但设计的难度也越大。因此,在满足设计要求的前提下,应尽量减少设计变量的个数,一般不超过 10 个。此外,设计变量应该相互独立。

本文针对如图 1 所示定子圆底槽、转子梯形槽(也可求解转子圆底槽、凸形槽、刀形槽),选取定子铁心长度  $L$ 、定子绕组每圈匝数  $Z_0$ 、定子槽下部圆弧半径  $R$ 、定子槽上部槽宽  $b_{s1}$ 、定子槽下部高度  $h_{s2}$ 、转子槽第一段槽宽  $b_{r1}$ 、转子槽第二段槽宽  $b_{r2}$ (当转子为圆底槽时为转子槽下部圆弧半径  $r_2$ )、转子槽第二段槽高  $h_{r2}$ 、定子铁心内径  $D_{il}$ 、气隙 这 10 个参数作为独立设计变量。

独立变量  $X$  为

$$X = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}] = [L, Z_0, R, b_{s1}, h_{s2}, b_{r1}, b_{r2}, h_{r2}, D_{il}, \quad ] \quad (9)$$

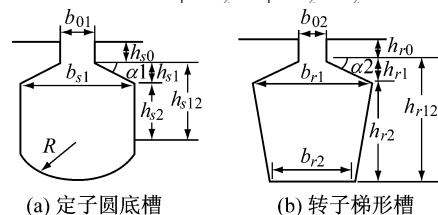


图 1 定子、转子槽形

### 3.3 约束条件

约束条件除了设计变量自身的约束外,还有性能约束、工艺约束。本文选择效率、功率因数、最大转矩倍数、起动电流倍数、起动转矩倍数、热负荷等性能指标,以及电磁负荷、槽满率作为约束条件。铁心长度尺寸(cm)取0或5为尾数。具体表示如下

$$\begin{cases} g_1(x) = L - 0 \\ g_2(x) = \cos\phi - \cos\phi_{min} = 0 \\ g_3(x) = T_m - T_{mmax} = 0 \\ g_4(x) = T_{st} - T_{stmax} = 0 \\ g_5(x) = I_{st} - I_{stmax} = 0 \\ g_6(x) = AJ_0 - AJ_{max} = 0 \\ g_7(x) = 80 - S_f = 0 \\ g_8(x) = S_f - 70 = 0 \end{cases} \quad (10)$$

- 式中  $L$ ——效率的设计值  
 $\cos\phi$ ——功率因数的设计值  
 $T_m$ ——最大转矩倍数的设计值  
 $T_{st}$ ——起动转矩倍数的设计值  
 $I_{st}$ ——起动电流倍数的设计值  
 (右上角加“ $0$ ”号的为各量的国家标准值)  
 $AJ, AJ_0$ ——热负荷的设计值和企业要求值  
 $S_f$ ——槽满率

成本、效率为目标函数进行了优化设计。在设计中考虑以下因素:不变动统一设计型谱,相同极数和机座号共用定转子冲片;定子外径、转子内径及槽的形状、槽配合不变;铁心材料仍为D23硅钢片;风摩损耗依据统一设计值。

优化结果如表2(设材料单价为:硅钢片4元/kg,铜线25元/kg,铸铝15元/kg),转子槽形如图1所示梯形槽。从表中可以看出,原始设计方案仅仅是可行方案,而不是最优方案。以材料成本最低为目标优化时,材料成本比原设计方案降低了8.03%,而以效率最高为目标优化时,效率比原方案高2.14%,但主要材料成本提高了16.37%。

表3中列出了11台Y系列电机以主要材料成本和效率为目标函数优化得到的结果。

从表中可以看出,以主要材料成本为目标优化时,电动机的性能参数均满足国家标准,而主要材料成本有较大幅度的减少,就所计算的各种型号的电动机而言,主要材料成本平均节省11.86%,而且随着机座号的增大,有效材料节省的百分比也有随之增大的趋势。而以效率为目标优化时,各种电动机的效率平均提高了1.65%,而且随着机座号的增大效率提高的百分比有随之降低的趋势。

## 4 电机优化设计实例

本文对Y90S-2三相异步电动机分别以材料

表2 基于IRGA算法的Y90S-2三相异步电动机优化结果

型号	Y90S-2	原始设计方案	优化设计方案	
			材料成本最低	效率最高
独立变量	定子铁心长度 $L$ /cm	8.5	7.5	11.0
	定子绕组每圈匝数 $Z_0$	74	77	69
	定子槽下部圆弧半径 $R$ /mm	0.485	0.4767	0.4626
	定子槽上部槽宽 $b_{s1}$ /mm	0.77	0.7246	0.8403
	定子槽下部高度 $h_{s2}$ /mm	0.6	0.5475	0.4521
	转子槽地一段槽宽 $b_{r1}$ /mm	0.69	0.495	0.8272
	转子槽第二段槽宽 $b_{r2}$ /mm	0.29	0.195	0.3171
	转子槽第二段槽高 $h_{r2}$ /mm	1.03	0.75	1.1717
	定子内径 $D_{fl}$ /cm	7.2	7.0	7.0
	气隙 $\delta$ /mm	0.35	0.3	0.3
约束条件	效率 $\eta$ 0.78	0.7989	0.7817	0.816
	功率因数 $\cos\phi$ 0.85	0.8306	0.8538	0.8501
	最大转矩倍数 $T_m$ 2.2	2.8508	2.7703	2.8957
	起动转矩倍数 $T_{st}$ 2.2	2.8441	3.3609	2.9632
	起动电流倍数 $I_{st}$ 7.0	6.0214	5.4163	6.8708
	70 槽满率 $S_f$ 80/	70.01	79.47	78.01
	热负荷 $1500/10^8 A^2/m^3$	1223.98	1294.82	1074.21
主要材料成本 /元	96.38	88.64	112.16	

表 3 基于 IRGA 算法的三相异步电动机优化设计结果

型号	(国家标准)	原始设计方案		以效率最高为目标			以材料成本最低为目标		
			成本		成本 / 元	提高 /		成本 / 元	成本节省 /
Y802-2	0.77	0.7818	77.78	0.7988	87.83	2.17	0.7723	72.25	7.11
Y90S-2	0.78	0.7989	96.38	0.8160	112.16	2.14	0.7817	88.64	8.03
Y100L2-4	0.825	0.8367	189.17	0.8684	156.56	3.79	0.8435	143.7	24.04
Y112M-6	0.805	0.8080	187.65	0.8249	223.46	2.09	0.8050	179.27	4.47
Y132M-8	0.82	0.8238	320.56	0.8441	374.27	2.46	0.8201	288.22	10.09
Y160L-6	0.87	0.8865	665.80	0.8956	790.23	1.03	0.8765	578.71	13.08
Y180L-8	0.865	0.8830	829.50	0.8932	955.10	1.16	0.8753	740.24	10.76
Y200L-8	0.88	0.8858	986.27	0.8970	1071.56	1.26	0.8856	895.09	9.24
Y225M-8	0.90	0.9081	1484.93	0.9166	1552.90	0.94	0.9074	1358.77	8.50
Y250M-8	0.905	0.9110	2036.11	0.9190	2383.47	0.88	0.9050	1696.91	16.66
Y280M-8	0.917	0.9267	2917.66	0.9291	3461.90	0.26	0.9218	2378.38	18.48

## 5 结论

针对三相异步电动机优化设计问题,主要做了以下几方面的工作:

(1)对遗传算法进行了分析、研究和改进,提出了 IRGA。算例表明 IRGA 具有良好的全局寻优能力和求解精度。

(2)根据 Y 系列电动机的设计特点,研究并提出了具有 10 个独立变量、8 个约束条件的优化设计数学模型。

(3)将提出的 IRGA 和优化数学模型应用于 Y 系列三相异步电动机的优化设计,使 11 台电机的主要材料成本平均降低了 11.86%,效率平均提高了 1.65%,优化效果明显。

综上所述,本文提出的方法对电机优化设计具有一定的理论意义和工程实用价值。

## 参考文献

- 1 孟大伟,周美兰. 模拟退火算法在电机设计中的应用. 电机与控制学报, 2001, 5 (3): 154 ~ 158
- 2 潘正君,康立山,陈毓屏. 演化计算. 清华大学出版社, 广西科学技术出版社, 1998, 1 ~ 50
- 3 傅丰礼,唐孝镐. 异步电动机设计手册 (第一版). 机械工业出版社, 2002
- 4 戴晓晖,李敏强,寇纪淞. 遗传算法理论研究综述. 控制与决策, 2000, 15 (3): 263 ~ 266
- 5 韩力,李辉,杨顺昌,何蓓. 改进遗传算法的电力变压器优化设计. 重庆大学学报, 2002, 25 (9): 8 ~ 11
- 6 叶云岳,林友仰. 计算机辅助电机优化设计与制造. 浙江大学出版社, 1998
- 7 吴建华. 基于遗传算法的开关磁阻电机优化设计. 电工技术学报, 1996, 11 (4): 6 ~ 10

收稿日期: 2003-12-18

## 中国电器工业协会中小型电机分会召开价格会议

中国电器工业协会中小型电机分会于 2005 年 3 月 11 日在山东济南召开了价格会议,鉴于国家宏观形势变化、能源紧缺、进口铁矿石的暴涨,导致生产电机的主要原材料价格不同程度地持续大幅上涨,给中小电机行业带来了沉重的经济损失和严重的经营困难,电机生产企业已无法承受原材料上涨的冲击。与会代表经过讨论,达成以下决议:

1、适度提高中小型电机销售价格,各电机生产企业在各自现行价格的基础上上浮,上浮幅度不低于 15% ;

2、2004 年 4 月中小型电机分会以“中电协中

秘 (2004) 018 号文颁布的“行业水平价”是较合理反映近年来电机材料成本变动情况的价格体系,中小型电机行业应最终按此价格体系执行;

3、会议要求分会会员企业会后要迅速采取统一行动,尽快按会议决议提高本企业电机销售价格,通知到客户,同时于 3 月 20 日前将涨价通知寄送到分会秘书处,分会秘书处将跟踪监督执行情况;

4、与会的中小型电机生产企业代表表示,将认真、负责地执行本决议,并呼吁全行业生产企业共同认真执行本决议。

(中国电器工业协会中小型电机分会 供稿)