

# 变焦策略的高速异步电机优化设计遗传算法

方 瑞 明

(华侨大学信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021)

**摘要** 与传统异步电机相比,高速异步电机采用中频变频器供电,其运行条件发生很大的变化,这使得电机的设计自由度大,难度高.针对此特点,将变频器和电机作为整体考虑,构造一个以系统性能最优为目标的优化模型.提出基于变焦策略的高速异步电机优化遗传算法,借助光学“调焦”原理,引入变焦算子的概念.通过由“粗”至“细”的寻优过程,解决了优化精度与优化效率的矛盾.优化实例表明,该算法是有效的.

**关键词** 高速异步电机, 优化设计, 遗传算法, 变焦策略

**中图分类号** TM 355.02; TP 183

**文献标识码** A

近年来,随着电力电子技术、高强度低损耗电磁材料以及控制技术的发展,高速异步电机在机械工业(如高速加工)、国防工业(航空航天、飞轮储能)等各方面都获得了广泛的应用.由于采用专门的中频变频器供电,高速异步电机的运行条件发生了很大的变化.下述两种具体表现<sup>[1,2]</sup>. (1) 电机起动时可以采用调频调压的方式,将最大转矩调到起动点,并降低电机的起动电流. (2) 对应于每一个运行点,都有不同的运行方式,其中必然可以找到一个最佳运行方式,使得电机的某项性能最佳.通过变频器对异步电机进行矢量控制,可以提高功率因数和效率.上述运行条件的变化使得高速异步电机的设计思想发生了很大变化.一方面,起动性能不再是电机设计的主要约束条件,设计自由度大了.另一方面,优化设计过程中必须综合考虑变频器性能,从机电一体化的角度出发,达到系统性能的最优.这极大地提高了电机设计的难度.因此,有必要研究高速异步电机优化设计算法.遗传算法由于具有较好的性能,可得到全局最优解,受到了广大专家学者的关注.在已提出的一些基于遗传算法的电机设计优化算法中<sup>[3,4]</sup>,通常采用二进制编码.由于编码方法以及码长的限制,算法的搜索空间及分辨率有限,只能覆盖部分解空间,影响了解的精度.如果单纯采用提高码长的方法提高解的精度,又会导致寻优空间过于庞大,搜索效率下降.为了解决上述问题,一些学者提出了自适应遗传算法.通过对遗传算子进行改良,提高搜索效率.但群体规模和进化代数仍然要保持较大的基数,问题没有得到彻底解决.本文根据电机设计的特点,构造系统性能最优为目标的优化模型,提出了基于变焦策略的高速异步电机优化遗传算法.可以在保证解的精度基础上缩小优化空间,提高搜索效率.此外,本文还对遗传算子进行了改进.

## 1 数学模型

发热问题是制约高速异步电机使用寿命的主要因素<sup>[5]</sup>.从电磁设计的角度出发,减少电机损耗是降低热源,提高电机使用寿命的重要手段.因此,高速异步电机优化设计通常以损耗最低(亦即是效率最高)为优化目标.高速异步电机一般采用中频变频器供电.考虑到谐波损耗的影响,电机损耗计算模型为

$$P_{\text{loss}} = P_{\text{Cu1}} + P_{\text{Cu2}} + P_{\text{Fe}} + P_{\text{s}} + P_{\text{mech}}, \quad (1a)$$

$$P_{\text{Cu1}} = \sum_k P_{\text{Cu1}k}, \quad (1b)$$

**收稿日期** 2004-08-30

**作者简介** 方瑞明(1972-),男,讲师,博士,主要从事微特电机系统分析与设计的研究. E-mail:fangrm\_hqu@tom.com

**基金项目** 华侨大学科研基金资助项目(03B01)

$$P_{Cu2} = \sum_k P_{Cu2k}, \quad (1c)$$

$$P_{Fe} = \sum_k (P_{Fe1k} + P_{Fe2k}), \quad (1d)$$

$$P_S = \sum_k P_{Sk}. \quad (1e)$$

在式(1a~e)中,  $P_{loss}$  为电机总损耗,  $P_{Cu1}$  为定子铜耗,  $P_{Cu2}$  为转子铜耗,  $P_{Fe}$  为铁耗,  $P_{mech}$  为电机机械损耗,  $P_S$  为电机附加损耗,  $P_{Fe1}$ ,  $P_{Fe2}$  分别为电机定子、转子铁耗. 下标  $k$  表示谐波次数.

不仅如此, 高速异步电机运行于调速状态, 应当基于电机整个调速区间的运行状况来考查其性能. 故优化模型为

$$\min(\sum_{i=1}^n a_i P_{lossi}(X)), \quad X \in E^n, \quad g_j(X) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad (2)$$

式中  $a_i$  为电机不同运行点的权因子,  $g_j(X)$  为约束条件. 采用电机的主要性能指标作为约束条件, 工艺约束通过程序内部控制.  $X$  为优化变量, 选取对电机损耗影响较大的 9 个变量为优化设计变量, 即

$$X = [l, Z_l, S, b_s, h_s, b_r, h_r, N, m], \quad (3)$$

式中  $l$  为铁心长度,  $Z_l$  为定子每槽导体数,  $S$  为定子导线截面积,  $b_s$  为定子槽宽,  $h_s$  为定子槽高,  $b_r$  为转子槽宽,  $h_r$  为转子槽高,  $N$  和  $m$  分别为供电变频器的载波比与调制度.

由优化模型可以看出, 高速异步电机损耗不仅与电机本体相关, 还取决于供电变频器输出特性. 供电谐波所产生的谐波损耗在电机总损耗中占有较大的比重, 而变频器输出谐波含量的大小与其调制参数(调制比、载波比、调制方式等)密切相关. 因此高速异步电机优化设计的优化变量多, 搜索范围宽, 设计的自由空间大. 本文根据高速异步电机优化设计的上述特点, 提出采用遗传算法作为优化算法.

## 2 编码方案与“变焦”策略

编码就是将电机优化变量(如铁芯长度、每槽导体数、绕组线径等)表示成适于遗传计算的染色体形式. 每一条染色体包括原问题的所有变量, 故每一条染色体都对应于原问题的一个解点, 即一个电机设计方案. 根据遗传算法的编码评估规范, 要求经编码产生的染色体与原问题空间中的解点一一对应. 既不能肆意扩大解空间, 也不能遗漏解空间的任一解点. 本文采用二进制编码技术, 设设计变量  $x_i$  的上下限分别为  $a_i$  和  $b_i$ . 对于任意待求变量  $x_i$  用  $k$  位字长的 0, 1 进行编码, 对应的二进制编码值为  $m_i$ , 则  $m_i$  和  $x_i$  的实际值之间的对应关系为

$$x_i = a_i + m_i \times \frac{b_i - a_i}{2^k - 1}. \quad (4)$$

编码对应的精度为

$$= \frac{b_i - a_i}{2^k - 1}. \quad (5)$$

二进制编码类似于生物染色体的组成, 算法易于用生物遗传理论解释, 而且遗传操作也容易实现. 但是, 二进制编码时要根据解的精度确定码长. 若算法一开始就选取较高的精度, 则染色体码长度过大, 群体规模和进化代数急剧增加, 会降低搜索效率; 反之, 则又会影响解的精度.

本文从解决串长有限时覆盖区域与分辨率之间的矛盾出发, 借助于光学领域的“变焦”概念. 引进变焦算子的概念, 采取一种变焦搜索的策略. 它采用的是一种类似于“粗—精”搜索策略. 编码时码串长度固定, 先采用较大的步长对优化变量编码(相应精度较低), 在大范围内搜索. 此时虽然分辨率较低, 但能够迅速确定最优解存在的空间. 在此基础上, 再以当前优化结果为中心, 以一定的收缩率对搜索范围进行收缩(同时离散步长也相应收缩). 这样步长减小, 可以提高优化精度. 此外, 变焦优化的新一轮优化既是以上一轮的最佳个体为初值, 具有继承性, 又在较大的范围内形成新的初始群体, 保持了群体的多样性. 这也有利于克服早熟现象.

## 3 遗传算法

### 3.1 初始群体生成

基于变焦策略的高速异步电机优化遗传算法避免陷入局部最优解的关键, 在于遗传算法在进化过

程中始终注意保持群体的多样性. 而传统遗传算法采用随机法生成初始群体时, 由于解空间的复杂性和群体规模的限制, 并不能保证所生成的染色体能够均匀地遍布于整个设计变量空间. 这样一些优秀的遗传基因, 就可能不会出现在初始群体中的各染色体所对应的空间中. 电机优化设计是一个组合优化问题, 上述基因的遗失可能会进一步造成一些潜在的优秀组合的遗失. 从而, 使得遗传算法不能收敛于全局最优解. 针对这种现象, 本文根据电机优化设计的特点, 在生成初始群体时做出一些改进. 分别对  $n$  维优化变量在其搜索空间内均匀分割产生  $k$  个子区间. 设某一变量子区间的边界为  $[b_1, b_2]$ , 则以  $(b_1 + \frac{b_2 - b_1}{2})$  作为该子区间的均值, 采用变量子区间均值的组合作为初始种群. 这样所产生的初始种群可以保证均匀地分布于解空间, 避免性能接近的个体入选.

### 3.2 遗传算子

3.2.1 启发式交叉算子 经典遗传算法在进化过程中交叉算子保持不变, 确定染色体交叉位置时采用等概率随机选取的方法. 然而, 在电机优化遗传算法中, 其染色体是对优化变量的二进制编码. 不同的码位具有不同权值, 改变染色体中不同的基因位值, 将引起优化变量在优化变量空间的不同变化量. 因此, 如果等概率地选取交叉位置, 将不能均匀地在优化空间搜索最优解. 从而, 影响遗传算法的寻优性能. 不仅如此, 交叉操作中交叉父体的选取也直接影响寻优结果. 若所选取的父体过于相似, 则类似于进化过程中的“近亲繁殖”, 必然会对所产生的子体的质量产生不良影响. 本文提出启发式交叉算子, 现介绍具体步骤. (1) 通过选择操作选取两个父体为

$$S_1 = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}, \quad S_2 = \{b_1, b_2, \dots, b_n\}, \\ a_i, b_i \in \{0, 1\}, \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

(2) 计算两个父体的海明距离  $HD(S_1, S_2)$ , 有

$$HD(S_1, S_2) = \sum_{i=1}^k (a_i - b_i). \quad (6)$$

(3) 若  $HD(S_1, S_2) = 1$ , 则这两父体无异位点, 不能产生新的个体, 返回(1). (4) 计算各优化变量的码串长度和首位在染色体中的位置, 存储于数组  $str\_value$  中. 有

$str\_value = \{Num, // \text{优化变量序号};$   
 $length, // \text{优化变量码串长度};$   
 $position // \text{优化变量码串首位在染色体中的位置}\}.$

(5) 随机产生一个 1 至  $L$  之间的整数  $K$  (其中  $L$  为优化变量的总个数), 并根据  $K$  从  $str\_value$  中读取该变量的码串长度与首位位置, 以优化变量为单位进行交叉操作. 上述步骤(1)至步骤(3)通过对交叉父体的选取进行控制, 禁止相似度较强的染色体进行交叉从而丧失群体多样性. 步骤(4), (5)则通过以优化变量为单位进行交叉操作, 更加符合电机优化设计组合优化的特点, 可以避免不可行解的产生.

3.2.2 自适应变异算子 变异算子是遗传算法中经常用到的遗传算子, 以很小的概率随机地改变染色体串上的某些位. 虽然它属于遗传算法中的次要算子, 但是它在恢复群体中失去多样性方面具有潜在的作用. 通常遗传算法实现变异的方法是赋予每一个基因一个相对较小的变异概率, 通过随机模拟而决定一个基因是否变异. 变异概率过小使解有一定的局限性, 遍历性差. 变异概率较大使得进化的随机性增大, 不容易得到稳定的解. 在采用二进制编码进行染色体表示时, 每次选择之后, 新的群体中的每个染色体的每一位基因以变异率进行  $P_M$  随机改变. 从而每代大约发生  $P_M \times N \times L$  次变异, 其中  $N$  为群体规模,  $L$  为染色体长度. 在标准遗传算法中, 变异概率  $P_M$  通常是一个较小的常数. 这种变异操作策略存在一些问题, 诸如样本多样性丢失依然严重, 变异概率确定只能依赖于经验选择. 同时, 在进行变异的时机把握上存在欠缺, 太过于公式化, 有些情况下根本体现不出变异算子的作用, 或者效果不太明显. 这些问题导致了遗传算法的早熟收敛现象的出现, 同时也有可能导致进化速度减慢, 增加优化迭代次数. 针对标准遗传算法变异算子的上述缺陷, 本文提出一种经过一定措施改进的、新型的自适应变异算子. (1) 采用动态变异策略. 遗传算法中变异操作的主要目的在于恢复群体多样性. 变异概率与进化过程有关, 而不能机械地采用固定的概率值进行遗传操作. 在优化过程中出现样本多样性的丢失, 且后代集中在某个极值点附近. 有可能出现早熟收敛现象时, 加大变异算子有助于恢复样本多样性, 跳出极值点 (当然如果该极值点就是真正的最优解, 经过很少几代的进化仍会收敛于此). 设

$$= \max \left\{ \left| f_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f_i \right|, i = 1, 2, \dots, N \right\}, \tag{7}$$

式(7)中,  $f_i$  为第  $i$  条染色体的适应度值. 变异概率由下式决定, 即

$$P_M = \begin{cases} 0.04 + 0.06 \times \frac{1}{N}, & \frac{1}{N} \leq 1, \\ 0.1, & \text{其它}. \end{cases} \tag{8}$$

反映了群体中各染色体之间的偏离程度, 显然  $\frac{1}{N}$  越小, 群体中各染色体之间越相近. 此时发生早熟收敛的可能性也越大, 应加大变异算子. (2) 增加变异位置选择环节. 若变异的位置是随机而定的, 则染色体中各基因变异的概率相同. 然而, 在多参数编码中, 这种方法有明显得缺陷. 这是因为在多参数编码中, 各参数对应的基因长短不一. 显然, 基因长的参数变异的概率比基因短的大. 再加上变异概率一般比较小, 这就造成了有些参数在整个进化过程中可能一直没有受到变异算子的影响, 而这些参数可能对适应度影响较大. 此时, 遗传算法就没有达到其目的. 故本文在变异算子中增加了变异位置选择的环节, 设优化变量  $X_1, X_2, \dots, X_n$  对应的码串长度分别为  $L_{X1}, L_{X2}, \dots, L_{Xn}$ .  $\text{str\_no}$  为变异位置, 选择变异位置的算法为

```
begin
    I = (m * randomm() + 1) // 选择变异参数
    sub_local = (LXi * randomm() + 1) // 选择参数中变异的位置
    str_no = 0
    j = 1
    while j < i do
        begin
            str_no = str_no + LXj
        end while
    str_no = str_no + sub_local
end
```

### 3.4 优解保留

标准遗传算法无法保证其收敛性<sup>[6]</sup>, 而每代保留最优解的改进遗传算法能够收敛于全局最优解. 因此, 本算法采取了最佳个体保留算子. 若本代群体中的最佳个体不如上一代中的最佳个体, 则把上一代群体中适应度最高的个体直接复制到本代中, 取替本代中的最差个体. 若本代中的最佳个体比上一代的最佳个体优秀, 则不再保存上一代的最佳个体.

## 4 优化实例

本文分别采用经典遗传算法、变焦遗传算法(采用变焦策略)、变焦自适应遗传算法(采用变焦策略和改进遗传算子), 对一台高速磨床用主轴电机进行优化设计. 表1为优化设计的表中列出的性能为额

表1 不同优化方法结果的比较(性能为额定运行点数据)

项 目	性能指标	初始方案	经典遗传算法	变焦遗传算法	变焦自适应遗传算法
目标函数	效率/(%)	81.42	82.71	83.20	83.40
	cos > 75 %	75.6	75.12	75.46	75.03
	TM 1.5	1.61	1.67	1.52	1.64
约束条件	AJ 2 000.0	1 845.54	1 943.7	1 893.2	1 867.5
	Sf 0.78	0.754	0.765	0.775	0.78
	Cost < 95.00	92.67	89.74	91.23	91.63
	适应度函数调用次数		8 432	8 864	8 918

定运行点数据.

从表1可看出, 当调用适应度函数大致相当时, 在性能指标符合约束的情况下, 电机效率分别提高了1.29%, 1.78%和1.98%. 其中变焦自适应遗传算法效果最好, 说明该方法能够在保证优化效率的前

前提下提高优化精度。

## 5 结束语

(1) 构造了一个以驱动系统整体性能最优为目标的高速异步电机优化模型。该模型将变频器控制参数和电机结构参数一起作为优化变量,并能综合考虑驱动系统电机在整个调速区间的运行状态。(2) 为解决经典遗传算法搜索效率与优化精度的矛盾,提出了一种固定编码长度、动态调整搜索步长和搜索范围的变焦搜索策略。对经典遗传算法的交叉和变异算子进行了改进,将自适应思想引入遗传算法中。根据群体特性和个体品质选择交叉和变异概率,在交叉和变异位置的选择中充分考虑电机组合优化的特点,以优化变量为单位等概率选择。(3) 基于上述改进构造了高速异步电机优化设计变焦自适应遗传算法,优化结果表明改进后的算法可以在保证优化精度的前提下提高优化效率。

## 参 考 文 献

- 1 孟 朔,赵争鸣,王祥珩. 变频调速异步电机的优化设计及其性能仿真[J]. 清华大学学报(自然科学版),1999,39(3): 125~128
- 2 Nee H P. Rotor slot design of inverter-fed induction motors[A]. In: Kueppers S, eds. Electrical Machines and Drives [C]. Durham: IEEE,1995. 52~56
- 3 方瑞明,翟旭平,胡虔生. 多轮进化遗传算法在电机优化设计中的应用[J]. 微电机,2002,35(3):6~10
- 4 Chung T K, Kin M K, Jung H K. Optimal design of electric machine using genetic algorithms coupled with direct method[J]. IEEE Trans. on Magnetics,1999,35(3):1 742 ~1 745
- 5 Gilon D C. Cooling solution for high-speed high-power induction motor[A]. In: Williamson S, eds. Proceedings of the International Conference on Electrical Machines[C]. Paris: IEEE, 1994. 516~521
- 6 李小平,王凤儒. 优解保留遗传算法收敛性的研究[J]. 电机与控制学报,2000,4(1):52~55

## Zooming Strategy-Based Genetic Algorithm for Optimization Design of High-Speed Asynchronous Motor

Fang Ruiming

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, 362021, Quanzhou, China)

**Abstract** As compared with traditional asynchronous motor, the operational condition changes greatly due to adopting mid-frequency inverter for power supply. This makes the design of motor high in free degree and high in difficulty. Directing against this peculiarity, the author constructs an optimistic model with optimization of system performance as objective by considering inverter and motor as a whole; and puts forward zooming strategy-based genetic algorithm for optimistic design of high-speed asynchronous motor. Backed by the principle of focusing in optics and lead-in the concept of zooming operator, the contradiction between precision of optimization and efficiency of optimization is settled through search process from 'coarse' to 'fine'. The algorithm is shown by optimistic examples to be effective.

**Keywords** high-speed asynchronous motor, optimistic design, genetic algorithm, zooming strategy