

基于VB的永磁同步电机设计及优化平台*

王 琇, 范承志*

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 为解决传统永磁同步电机由于设计计算和查表工作复杂、耗时长、计算修正参数过多而导致精确性较差等问题,将禁忌算法和模糊控制应用到传统永磁同步电机设计中,利用 Visual Basic 编写程序,对永磁电机磁路法设计过程进行了编程,建立了动定子结构尺寸和电机工作特性曲线之间的关系,提出了一种优化电机效率和功率因素,调整电机结构尺寸的方法;利用有限元软件对永磁同步电机的电感、功率等几个重要参数加以验证,并进行了瞬态仿真试验。仿真试验结果表明,该优化方法可提高电机的功率因素和效率,减小定子的电流密度,并可有效地优化永磁同步电机。

关键词: 永磁同步电机;禁忌算法;模糊控制

中图分类号: TM351;TH39

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2012)04-0458-03

Permanent magnet synchronous motor optimization platform based on VB

WANG Xiu, FAN Cheng-zhi

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In order to solve the problem that calculation and look-up table work in traditional permanent magnet synchronous motor (PMSM) design is complex, time-consuming, and that calculated correction parameters used in design cause poor accuracy, Taboo algorithm and fuzzy control was applied to the traditional design of permanent magnet synchronous motor, a simple man-machine interface using Visual Basic was investigated. After the analysis of the relationship between moving stator structure and motor characteristic curve, an optimization of motor efficiency and power factor was put forward in the permanent magnet motor magnetic circuit design process. The finite element software was used to inspected several important parameters such as the inductance of permanent magnet synchronous motor and motor power. The experimental results show that, after the optimization, motor power factor and efficiency has been improved, the stator current density decreases, optimization of permanent magnet synchronous motor is effective.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); Taboo algorithm; fuzzy control

0 引 言

永磁同步电机具有体积小、损耗低、效率高等优点。在节约能源和环境保护日益受到重视的今天,永磁同步电机更是以其卓越的性能,被广泛地应用于国民经济的各个领域。所以,对其进行深入研究就显得非常必要。而今永磁电机设计方法包括电磁场的方法和磁路的方法,其中传统的磁路方法计算繁琐,查表复

杂,并且计算中需要引入多个系数对计算结果进行修正,导致其计算的准确程度下降。文献[1-2]用磁路法建立了一种新型电机的空载等效电路模型,所求参数仍和有限元分析有误差;而利用有限元计算的电磁场的方法,计算准确,但其计算过程复杂、计算量大、对计算机性能要求高些,在一些复杂结构以及优化上,耗时长,需反复验证。文献[3]改变了永磁体的形状来达到局部消磁,但结构复杂成本高;文献[4]改变了电机

收稿日期:2011-11-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50607016);浙江省教育厅资助项目(20051025)

作者简介:王 琇(1988-),女,浙江杭州人,主要从事永磁电机设计及驱动方面的研究。E-mail:wangxiuyoyo@163.com

通信联系人:范承志,男,副教授。E-mail:fanchengzhi@zju.edu.cn

结构来提高性能,但电机体积增大。

在简化永磁电机设计方面,文献[5-6]也讨论了多目标优化算法,说明其有应用前景;文献[7]也研究了计算机辅助设计程序,然而并非针对永磁同步电机。

本研究采用VB程序代替繁琐的磁路计算公式,界面简洁明了,并且利用禁忌算法设计优化程序,计算方便快捷。最后运用有限元仿真验证关键参数,以证明设计和优化是有效的。

1 电机设计平台

本研究将繁琐的磁路计算公式编入可视化程序,界面简洁友好,用有限元软件计算和验证程序中的重要参数,最后利用禁忌算法设计了优化电机性能的程序,计算方便快捷。形成了一个集电机设计、分析、优化一体的,界面友好的电机设计软件平台。

笔者通过构造电机平台,主要希望达到以下目的:

- (1) 永磁电机的直观图形显示和快速设计;
- (2) 永磁电机工作特性,电机电磁参数计算;
- (3) 利用有限元验证其参数计算和工作特性合理性;
- (4) 利用改进的禁忌算法优化电机性能,微调电机尺寸。

2 优化永磁电机尺寸设计

首先,本研究通过磁路法,利用VB简化了繁琐的计算以及查表过程,直观地对输入数据进行处理,输出工作特性曲线、 X_q/I_q 曲线等结果。

输入信息包括电气技术参数,定转子尺寸、绕组参数、磁路参数、输出信息包括电机计算参数、 X_q/I_q 曲线、工作特性曲线。

其次,本研究以定子内径、定子槽底部半径、定子外径、定子铁芯长,计算极弧系数为优化变量,以槽满率、气隙磁密幅值、空载电动势、定子槽面积为约束条件,利用禁忌算法,选取合适的交轴磁通和转矩角,可以计算出电机在各个状态下的优化方案。

3 永磁同步电动机优化算法

优化设计数学模型:

$$\begin{cases} \max F(X), X \in R^n \\ \text{St. } G_{\min} \leq G_i(X) \leq G_{\max} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $F(X)$ —目标函数, $G_i(X)$ —约束函数, X —优化变量。

3.1 基于禁忌优化的模糊控制

在电机的优化设计中,通常的单一禁忌算法容易造成局部优化^[8],本研究中用模糊控制加以改善,跳出

了局部优化,典型的基于常规模糊控制器的电机控制结构如图1所示, k_a, k_b 为比例因子,它不依赖于电机的具体参数,使得系统具有较强的鲁棒性。但固定的模糊控制表很难同时满足各种工况的要求,这就要求模糊控制规则或参数随着工作情况的改变自动地调整、修改。本研究中软件以电机的性能为首要评价标准,取电机输出的功率因素和效率为主要变量,取 f_1 和 f_2 为权重,目标函数如下:

$$\text{Max}F(X) = f_1 \times at + f_2 \times \cos c \quad (2)$$

式中: f_1, f_2 —隶属度函数,在功率因素 $\cos c$ 和效率 at 的变化范围内均匀变化。

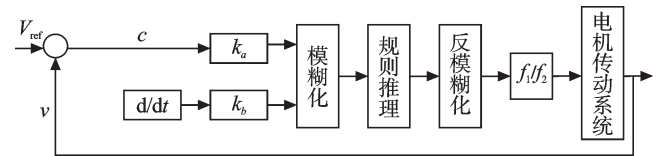


图1 模糊控制示意图

3.2 约束条件

电机优化中的约束条件有工艺限制的条件,比如槽满率,设置不合适时嵌线困难;有电机性能的要求,比如气隙磁密,空载电动势。

该程序选定了4个约束条件:槽满率一般控制在60%~70%之间;气隙磁密控制在0.72 T左右,以防止过饱和引起的效率降低;空载相电动势控制在200 V~210 V;定子槽面积控制在1.2 cm²~1.6 cm² [9-10]。

3.3 优化变量

改变优化变量会引起电机各个参数和性能的改变;增加优化变量会增加系统的自由度和设计的难度,因此要综合考虑优化变量的选取和数量。该程序选取了5个优化变量:定子内径 x_{D2} , 定子槽底部半径 x_{r1} , 定子外径 xx_{D1} , 定子铁芯长 x_{L1ef} , 计算极弧系数 x_{ail} 。即:

$X = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5] = [x_{D2}, x_{r1}, xx_{D1}, x_{L1ef}, x_{ail}]$ 。它们各自满足:

$$\begin{cases} D2 \min \leq x_{D2} \leq D2 \max \\ r1 \min \leq x_{r1} \leq r1 \max \\ D1 \min \leq xx_{D1} \leq D1 \max \\ L1ef \min \leq x_{L1ef} \leq L1ef \max \\ ail \min \leq x_{ail} \leq ail \max \end{cases} \quad (3)$$

部分实现程序如图2所示。

```

Dim best As Double
Dim bestdot As Integer

bestdot = 0
For i = 0 To 19

If Fx(xD2(bestdot), xr1(bestdot), xxD1(bestdot), xL1ef(bestdot), xail(bestdot)) - Fx(xD2(i), xr1(i), xxD1(i), xL1ef(i), xail(i)) < 0 Then
best = Fx(xD2(i), xr1(i), xxD1(i), xL1ef(i), xail(i))
bestdot = i
End If
Next i

```

*是否为最好点

图2 VB程序实现图

3.4 终止条件

该程序采用了最大迭代步数准则,每个循环判断一次是否到达迭代步数,到达了则退出计算。

4 算例程序优化结果

本研究以一台额定功率为 18 kW,额定电压为 220 V, W 型永磁体,定子 36 槽的四极电机为例,采用磁路方法计算其电机尺寸和性能。优化后,本研究所取优化变量如表 1 所示。

表 1 未优化和优化后的优化变量对比

	未优化	优化后
x_{D2}/cm	18	18.375 905 2
x_{r1}/cm	0.47	0.474 217 649
$x_{x_{D1}}/\text{cm}$	26	26.216 253 5
x_{L1efl}/cm	18	18.094 816 8
x_{ail}	0.95	0.964 284 065

未优化的工作特性曲线和优化后的工作特性曲线对比如图 3 所示。

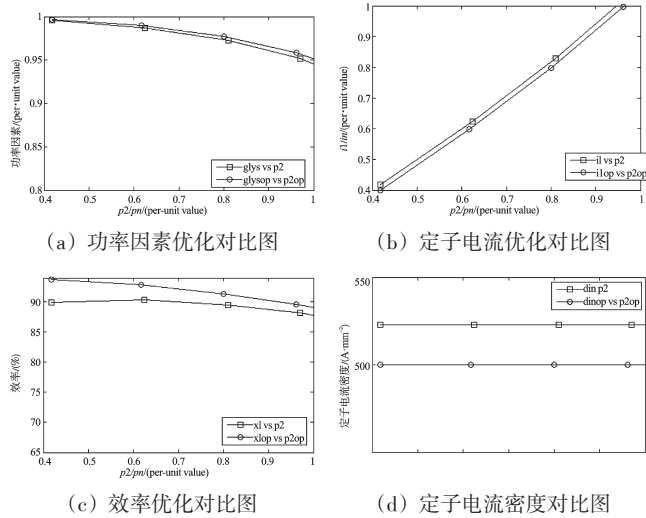


图 3 优化后与优化前的工作特性曲线对比图

由图 3 可看出,优化后的功率因素和效率有了明显的提高,这是由于定子电流密度降低,转子铜耗降低所引起的。电机通常工作在 $p2/pn=0.7$ (p.u.) 左右,此时电机效率已在 93% 左右,突出地体现了永磁同步电机的高效率性能,也说明优化是有意义的。

5 ansoft 对关键参数的校验

在永磁电机的设计与分析中,准确计算电磁参数是十分重要的^[11]。参数的设计对永磁同步电动机的性能有很大的影响^[12]。

5.1 电枢反应电抗的参数校验

参数设计中电枢反应电抗 X_{ad} 的精确计算一直是困扰该类电机设计的一个难题。 X_{ad} 值大小对电机牵

入同步过程中电机的牵入能力有很大影响。减少 X_{ad} , 可明显提高电动机的过载能力,但对恒功率调速运行电动机的弱磁扩速能力不利,可以使用场路结合法,利用 ansoft 等软件计算校正 X_{ad} 的值,对比可以校验软件计算值是否准确,经对比,软件计算 $X_{ad}=5.39 \Omega$, 而由 ansoft 计算出 L_{ad} , 再由 $X_{ad}=\omega \cdot L_{ad}$ 算得 $X_{ad}=5.88 \Omega$, 其误差为 9%, 基本符合要求。

5.2 计算极弧系数的参数校验

本研究求解并绘出一个极下的气隙磁密分布图,如图 4 所示,进而计算出平均气隙磁密和最大气隙磁密,两者相比得出计算极弧系数,和程序对应,取极弧系数为 0.9, 为此本研究计算得计算极弧系数为 0.943, 磁极充磁方式改为径向充磁。可以看出,当磁极不偏心时,对于径向充磁的磁极,极弧系数与计算极弧系数很接近,并且与优化变量中的计算极弧系数数值基本符合。

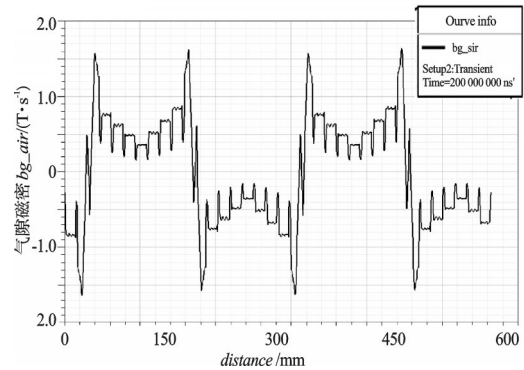


图 4 永磁同步电机气隙磁密图

6 结束语

(1) 本研究建立了基于 VB 的永磁同步电动机优化设计平台,通过对 1 台 18 kW 永磁同步电动机进行优化设计,发现对于电机优化设计中的多变量、多约束条件的优化问题,采用禁忌优化的模糊控制设计简单,效果显著。

(2) 本研究中通过 VB6.0 建立的定子与转子参数模型在永磁同步电机中应用广泛,对于不同的电机修改参数即可试用,有一定的实用性。

(3) 从图 4 可以看出,程序计算结果与有限元计算结果相符合,而将优化结果与未优化的方案进行了对比,基于禁忌算法的优化设计能显著提高电动机效率,降低了定子电流密度,也就降低了铜耗,证明其优化是有效果的。

参考文献 (References):

[1] 张卓然,严仰光,苏凯程. 切向磁钢混合励磁同步电机空载磁路计算及三维场分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(30): 84-89.

(下转第 464 页)

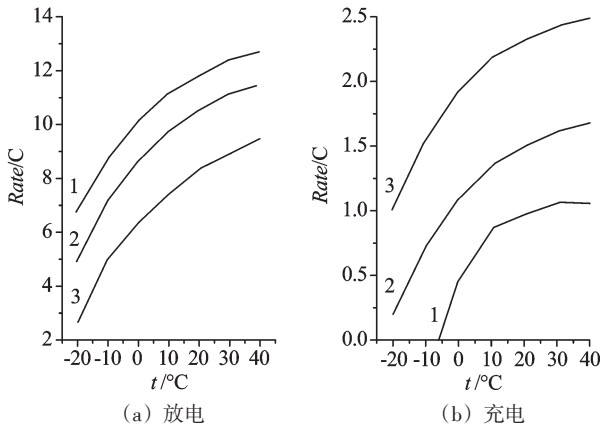


图5 温度与最大充、放电倍率

4 结束语

本研究采用DSP为主控CPU的蓄电池电量计量系统,具有运算速度快、信号处理能力和事件管理能力等优点,可实现数据采集、SOC估计、数据显示、CAN通信、USB存储和安全报警等功能。通过补偿后的安时法估计蓄电池荷电状态,具有结构简单、成本低且适合工程应用的特点;且温度变化对电池容量的影响比充放电倍率大,最大充、放电倍率随温度升高而增大。

参考文献(References):

[1] KIM H. CHA S, PENGH. Optimal control of hybrid electric

vehicles based on pontryagin's minimum principle[J]. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, 2011, 19 (5): 1279-1286.

[2] KIM S. Nonlinear state of charge estimator for hybrid electric vehicle battery [J]. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 2008, 23(4): 2027-2033.

[3] NIKZAD M R, RADAN A. Accurate loss modelling of fuel cell boost converter and traction inverter for efficiency calculation in fuel cell-battery hybrid vehicles[J]. **IEEE Power Electronic & Drive Systems & Technologies Conference**, 2010(1): 218-223.

[4] COLEHAN M, LEE C K, ZHU W G, et al. State-of- Charge determination from EMF voltage [J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2007, 54(5): 2555-2557.

[5] 何莉萍, 赵 曦, 丁舟波, 等. 基于DSP的电动汽车电池管理系统的设计[J]. *湖南大学学报:自然科学版*, 2009, 36 (5): 33-36.

[6] 吴东兴, 关道净, 齐国光. 高精度预测SOC的混合动力车电池管理系统的研究[J]. *高技术通讯*, 2006, 16(4): 391-394.

[7] 雷 肖, 陈清泉, 刘开培, 等. 电动车电池SOC估计的径向基函数神经网络方法[J]. *电工技术学报*, 2008, 23(5): 81-87.

[8] 刘晓康, 詹琼华, 吴杰余, 等. HEV用卷式铅酸电池的性能研究[J]. *电池*, 2006, 36(6): 459-461.

[编辑:李 辉]

(上接第460页)

[2] 米春亭, 陆鹤庆. 稀土永磁同步电动机磁路计算方法[J]. *微电机*, 1992, 25(3): 13-17 .

[3] KIM K C, LIM S B. The shape design of permanent magnet for permanent magnet synchronous motor considering partial demagnetization [J]. **Magnetics, IEEE Transactions**, 2006, 42(10): 3485-3487.

[4] HIPPOLYTE J L, ESPANET C, CHAMAGNE D, et al. Permanent Magnet Motor Multiobjective Optimization Using Multiple Runs of an Evolutionary Algorithm [C]//Vehicle Power and Propulsion Conference 2008. Belfort: [s.n.] , 2008: 1-5.

[5] SOORIYAKUMAR G, PERRMAN R, DODDS S J, et al. Design Optimisation for Permanent Magnet Synchronous Motors using Genetic Aalgorithm[C]//Universities Power Engineering Conference (UPEC) 2010. Cardiff, Wales: [s.n.] , 2010: 1-6.

[6] BINNS K J, SHIMMIN D W. The relationship between Performance Characteristics and Size of Permanent Magnet Motors [C]//Seventh International Conference on (Conf. Publ. No. 412), 1995. Liverpool: [s.n.] , 1995: 423-427.

[7] 贡亚丽, 王文明, 张好明. 起动/ 助力/ 发电一体化新型永磁电机计算机辅助设计[J]. *微电机*, 2009, 42(12): 13-16.

[8] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.

[9] 王秀和. 永磁电机[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.

[10] 任金波, 张 翔. 车用空调永磁直流无刷风机的降噪研究 [J]. *机电技术*, 2011(2): 54-57.

[11] 韩 力, 辛 懋, 罗辞勇. 基于粒子群优化算法的永磁直流电动机设计[J]. *重庆大学学报*, 2009, 32(5): 535-538.

[12] 尚 静, 邹继斌, 赵 猛. 异步起动的永磁同步电动机发展现状与研究方法[J]. *微电机*, 2001, 34(5): 45-50.

[编辑:张 翔]