

# 基于 JMAG 高速永磁电机的研究与设计\*

赵龙涛, 尹延杰, 窦钟森

(山东科技大学信息与电气工程学院, 山东省 青岛市 266590)

**摘要:** 为精确而高效的设计高速永磁电机, 本文基于磁路分析设计法, 提出了 5kW 高速永磁电机的设计方案, 并对设计过程中的电机极数、永磁体厚度、绕组节距以及极弧系数进行了优化分析。通过 JMAG 软件建模分析, 完成了对高速永磁电机的磁密、磁感线、空负载电动势以及电机转矩的分析。分析结果表明, 该电磁方案可以为高速永磁电机设计与优化分析提供一定的理论依据。

**关键词:** 高速永磁电机; JMAG; 仿真

中图分类号: TM 32 文献标志码: A 文章编号:

## Research and design of high-speed PM motor based on JMAG

ZHAO Longtao, YIN Yanjie, DOU Zhongsen

(College of Information and Electrical Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong Province, China)

**Abstract:** In order to design the high-speed PM motor precisely and efficiently, based on the magnetic circuit analysis method the design of 5kW high-speed PM motor was proposed and optimized the motor poles, the thickness of the PM, the winding pitch and pole arc coefficient. Through the analysis software JMAG modeling, completed the analysis of the high-speed permanent magnet motor flux density, magnetic field lines, air force and the motor load torque. The analysis results showed that the electromagnetic scheme can provide certain theoretical basis for high-speed permanent magnet motor design and optimization analysis.

**Key Words:** high-speed PM motor, JMAG, simulation

## 0 引言

高速永磁电机通常指转速超过 10000rpm 的电机, 此类电机具有较高的转速, 功率密度远大于同功率的其它类型的中低速电机, 而从几何尺寸上又远小于同功率的中低速电机; 采用永磁体励磁, 可以降低电铜耗, 提高电机效率, 另一方面电机的结构简单, 便于电机的维护; 同时, 高速永磁电机具有转动惯量小, 动态响应速度快的优点。鉴于此, 高速电机在高速离心压缩机、储能飞轮、高速磨床等场合应用较广, 同时在航空航天、动力汽车以及军事等领域应用前景较好<sup>[1-2]</sup>。

上世纪中期以来, 高速电机一直都是国内外研究的热点。在诸多参考文献<sup>[3-5]</sup>中许多学者分别从高速电机的损耗、振动与噪声以及电机的轴承结构特性等方面进行深入研究, 且研究成果显著。然而, 针对高速电机的电磁设计方面的文献相对较少, 于是本文从出具高速电机的电磁方案出发, 基于 JMAG 仿真软件来研究设计一台 5kW、转速为 15000rpm4 极 12 槽的高速永磁电机。

## 1 电机参数优化选择

电机是一个多物理场的耦合, 其中包括电磁场、温度场、流体场等。这些庞大的耦合, 使得电机的计算分析非常复杂, 电机参数的选取及优化分析变得尤为重要。在此采用 JMAG 软件进行电机的优化计算。

### 1.1 JMAG

目前, 市场上的针对电机的仿真软件很多有 Ansoft、Flux、MotorSolve、JMAG 等。其中, JMAG 软件是日本 JSOL 公司研发的一款针对电磁场研究的软件, 主要应用于各种电机的仿真设计与电磁设备的磁场分析, 与同类型软件相比, 具有良好的工作界面、庞大的材料属性库、精确而高速的分析计算以及开放的接口界面等优势。JMAG 软件的仿真流程如下图 1 所示:

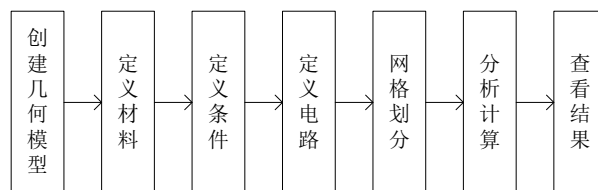


图 1 仿真流程

Fig.1 The simulation process

\*基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2011FM008); 青岛市创新型中小型企业培养计划项目(11-1-4-2-gx)

1) 仿真模型可以通过 CAD 导入、Geometry Editor 绘制以及 JMAG-Express 参数化建模等方式来完成, 本仿真分析的模型如图 2 所示; 2) 定义材料是指使模型中的各部分具有相应的物理属性; 3) 定义条件主要是定义电机的运动方式、边界条件、绕组的电流方向等; 4) 定义电路即设定电机的电路连接与控制方式; 5) 网格划分是对电机模型进行分割, 便于计算机的有限元计算, 如图 3 所示; 6) 分析计算是计算机对电机模型进行计算的过程; 7) 查看结果是对电机各重要仿真参数进行查看分析的过程<sup>[6-7]</sup>。

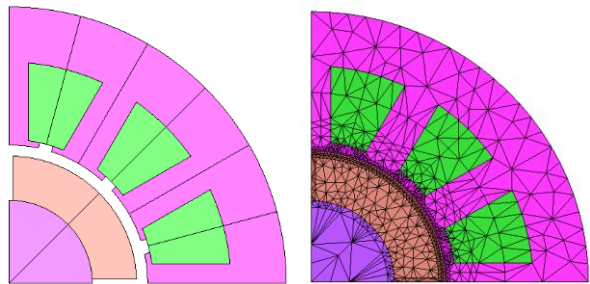


图 2 仿真模型

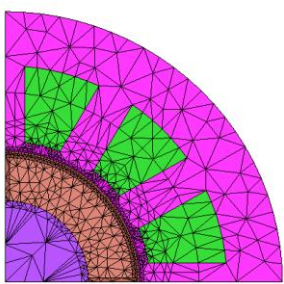


图 3 网格划分

Fig.2 The simulation model Fig.3 The Grid division

1.2 极数

由于电机的转速由公式  $np=60f$  决定, 其中  $n$  为电机转速,  $p$  为电机极对数,  $f$  为电源频率。可以看出电机的转速由电机的极对数与电源频率决定。考虑到电机硅钢片的电磁损耗与频率的指数关系, 高速电机的极数选取的越小越好, 通常取 2 极或 4 极<sup>[8]</sup>。

同转速的电机, 2 极电机定子中的电磁交变频率为 4 极电机的 1/2, 可以在一定程度上减少电机的铁耗, 而端部绕组的跨度较大, 铜耗相应的增加, 另一方面极数越少, 定子轭部越容易出现磁密局部饱和的现象, 同时漏磁比例也会相应的增加; 高速永磁电机极数不同使得电机采用的永磁体数不同, 从加工工艺上讲, 4 极电机的永磁体易于加工, 同时 4 极电机与 2 极电机相比更有利于增大并改善反电势。在此, 确定高速永磁电机的极数为 4 极。

1.3 永磁体厚度

由于高速永磁电机采用永磁体励磁, 永磁的厚度决定了电机各部分磁密的大小。由于永磁体的价格较高, 通常在电机性能达标的情况下, 永磁体的厚度越小越好。

通过下表 2, 可以看出在 3-7mm 范围内, 随着永磁体厚度增加, 电机的气隙磁密、齿部磁密、轭部磁密都有明显的增大的趋势, 但当永磁体的厚度达到 8mm 左右时, 永磁体厚度的增加对各部分磁

密影响较小, 甚至出现磁密下降的现象。在此, 为提高永磁体的利用率, 节约材料, 选用厚度为 8mm 永磁体。

表 1 永磁体厚度对磁密的影响

Tab.2 Impact of the thickness of PM on magnetic density

永磁体厚度 mm	气隙磁密 T	齿部磁密 T	轭部磁密 T
3	0.609	1.011	0.641
5	0.704	1.148	0.746
7	0.734	1.186	0.774
8	0.734	1.187	0.775
9	0.729	1.180	0.770
10	0.719	1.168	0.761

1.3 绕组节距

本设计中的高速永磁电机采用的是 4 极 12 槽的组合形式。极矩  $\tau=\frac{Q}{2p}$   $Q$  为电机的定子槽数,  $p$  为电机的极对数, 经过计算电机的极矩为 3。不同节距对电机相反电动势的影响如下表所示:

表 2 绕组节距对电势的影响

Tab.2 The impact of winding pitch on the potential

第一节距 $y_1$	1	2	3	4
基波电动势 V	28.75	29.86	30.85	24.43
三次谐波电势 V	0.5	0	3.35	5.2

通过上面的表格可以看出当绕组节距为 2 时, 电机采用的短距绕组可以消除一些高次谐波, 相反电动势的三次谐波为 0V。

1.4 极弧系数

极弧系数是指永磁体的宽度占一个极矩的比例, 是影响电机性能的重要参数之一。选取极弧系数主要考虑对电机相反电动势的影响, 极弧系数通过影响相反电动势的基波以及各次谐波的大小, 进而影响电机合成相反电动势波形。通常认为相反电动势的波形越接近正弦, 电机的性能越好。同时, 极弧系数的变化在一定程度上会影响电机漏磁的多少。

如下图所示, 在半个周期内极弧系数对相反电动势波形的影响, 可以看出随着极弧系数的增加相反电动势幅值逐渐增大, 当达到一定程度则不在增加; 同时, 相反电动势的波形随极弧系数的增大, 其正弦性逐渐突出。综合考虑, 相反电动势的波形与漏磁, 在此选择极弧系数为 0.9。

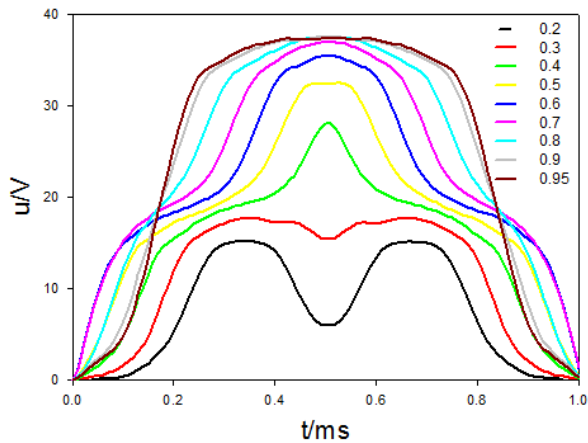


图4 极弧系数对电势的影响

Fig.4 The impact of pole arc coefficient on the potential

2 电磁方案

采用磁路分析设计法以及上述电机参数的优化分析, 得出下表3 电机设计方案的主要参数。

表3 电机的主要参数

Tab.3 The main parameters of the motor

	数据	单位
极数	4	
定子槽数	12	
定子内径	50	mm
定子外径	100	mm
转子外径	46	mm
电机长度	45	mm
气隙长度	2	mm
永磁体厚度	8	mm
极弧系数	0.9	

3 仿真分析

仿真模型可以在 JMAG-Designer 中进行计算分析, 在 Results 选项中查看计算的结果, 进而进行优化分析。

3.1 磁密

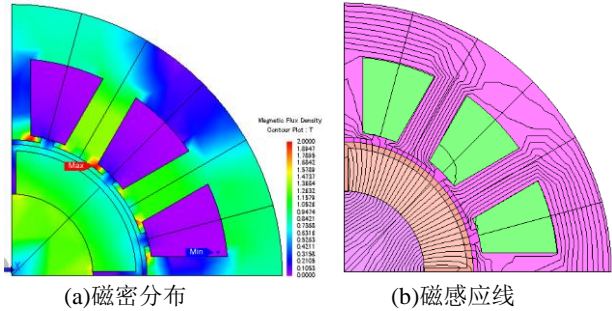


图5 电机的磁密与磁感应线

Fig.5 The magnetic flux density and magnetic induction line

图5(a)为定子磁密的整体分布情况, 可以看出

磁密整体分布较为理想, 定子齿部有部分饱和现象。由图5(b)定子磁感线的走势情况可以看出电机的磁路组成以及电机少量的漏磁通现象。

3.2 电机等效电路

高速永磁电机的等效电路如图6所示, 其中CS1为电机的电源电路, 提供U、V、W三相电源, 右侧部分为电机的定子绕组, 采用星形连接可以消除三次谐波, 降低电机的损耗, 提高电机的效率。

电压表VP1、VP2、VP3分别用来测量U、V、W三相的电压。电机空载的电压波形如图7(a)所示, 电压波形类似于平顶波, 空载电动势的有效值为31.16V。电机负载的电压波形如图7(b)所示。

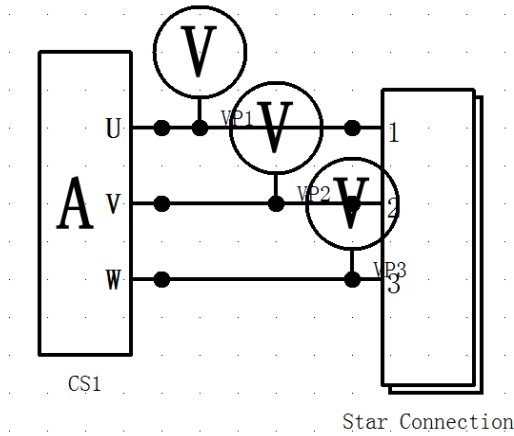
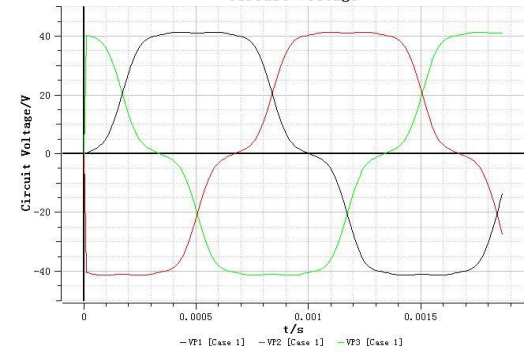
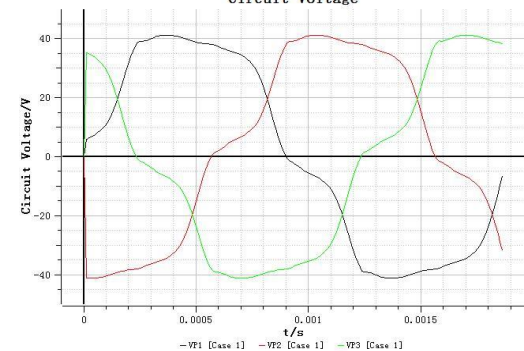


图6 电机电路

Fig.6 The motor circuit



(a)相反电动势



(b)负载电机电势

图7 电机电动势

Fig.7 The motor electromotive force

### 3.2 电机等效电路

电机的电磁转矩是转子轴受力产生的力矩,是衡量电机性能的重要指标之一。如下图8所示,为高速永磁电机电机的转矩,可以看出电机的平均转矩为2.98Nm,且转矩的值在2.7~3.14Nm之间有些许波动,是由定子齿槽转矩等因素引起的转矩脉动现象。

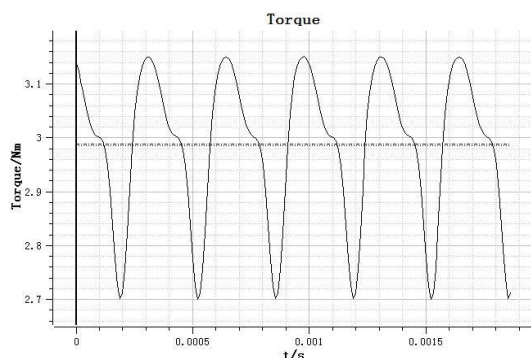


图8 电机转矩

Fig.8 The motor torque

## 4 结论

本文基于 JMag 仿真软件,通过对 5kW 高速永磁电机进行建模仿真分析计算,进而完成了对电机电磁方案的设计。其中,主要分析电机的整体磁密分布,查看了电机的磁感线走向,并绘制了电机的空载与负载电动势以及负载时的转矩波形曲线,为电机的整体设计与优化分析提供了一定的参考依据。

### 【参考文献】

- [1] Young-Kwan Kim, Moon-Chang, Kwang-Ha Suh, et al. High-speed Induction Motor Development for small Centrifugal Compressor[C]. International Conference on Electrical Machines and Systems, 2001, Shenyang: 891-894.
- [2] Wen L. Soong, Gerald B. Kliman, Roger N. Johnson, et al. Novel High-Speed Induction Motor for a Commercial Centrifugal Compressor [J]. IEEE Transactions on Industry Application. 2000, 36(3):706-712.
- [3] 陈燕. 高速电机振动处理及原因分析[J]. 电机技术, 2010, 6:37-40.
- Chen Yan. Dealing with Vibration of the High-speed Electric Motor and Analysis of the Cause[J]. Electrical Machinery Technology, 2010, 6:37-40.
- [4] 王继强,王凤翔,宗鸣. 高速电机磁力轴承-转子系统临界转速计算[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(27):94-98.
- Wang Jiqiang, Wang Fengxiang, Zong Ming. Critical Speed Calculation of Magnetic Bearing-rotor System for a High Speed Machine [J]. Proceedings of the CSEE, 2007,

27(27):94-98.

- [5] 程文杰,耿海鹏,冯圣,等. 高速永磁同步电机转子强度分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(27):87-94.

Cheng Wenjie, Geng Haipeng, Feng Sheng, et al. Rotor Strength Analysis of High-speed Permanent Magnet Synchronous Motors [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(27):87-94.

- [6] 陈小元,陈超. 场路耦合有限元仿真在电机类课程教学中的应用研究[J]. 丽水学院学报, 2013, 35(2):49-53.

Chen Xiaoyuan, Chen Chao. The Application of Coupled Field and Circuit Finite Element Analysis to Electric Machine Teaching [J]. JOURNAL OF LISHUI UNIVERSITY, 2013, 35(2):49-53.

- [7] 杨萍,代颖,黄苏融,等. 基于有限元的车用永磁同步电机的电磁噪声评估[J]. 电机与控制应用, 2012, 39(9):33-37.

Yang Ping, Dai Ying, Huang Surong, et al. Evaluation of Electromagnetic Noise of Permanent Magnet Motor for Electric Vehicle Based on Finite Element Method [J]. Electric Machines & Control Application, 2012, 39(9):33-37.

- [8] 王凤翔. 高速电机的设计特点及相关技术研究[J]. 沈阳工业大学学报, 2006, 28(3):258-264.

Wang Fengxiang. Study on design feature and related technology of high speed electrical machines [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2006, 28(3):258-264.