

轮毂式永磁无刷直流电机空载气隙磁密波形的模拟分析

车良松, 潘柏松*, 戈道川, 郑立君, 刘伟江

(浙江工业大学 特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室, 浙江 杭州 310014)

摘要:针对轮毂式永磁无刷直流电机空载气隙谐波含有大量的谐波问题,采用有限元法设计轮毂式永磁无刷直流电机,对影响其性能的空载气隙磁密波形进行了数值模拟,降低了谐波损耗,提高了轮毂电机的性能。通过正交试验法改变定子齿槽宽度、气隙大小和磁极厚度,减少了气隙磁密谐波的含量,并通过绘制因素水平影响趋势图,分析了各个因素对于电机空载气隙磁密波形的影响。实验结果表明,9次正交试验中的最佳方案可使轮毂电机的结构参数得到优化,为电机设计提供依据。

关键词:正交试验法;数值模拟;气隙磁密;波形畸变率

中图分类号:TM302

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2011)03-0374-03

Simulation analysis for no-load air-gap flux-density waveform of wheel-hub permanent-magnet brushless DC motor

CHE Liang-song, PAN Bai-song, GE Dao-chuan, ZHENG Li-jun, LIU Wei-jiang
(Key Laboratory of E&M, Ministry of Education & Zhejiang Province,
Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Aiming at the problems of improving high quantity of harmonic in no-load air-gap flux density in the motor, wheel-hub permanent-magnet brushless DC motor adopt finite element method. The no-load air-gap flux-density waveform was optimized, which affected the performance of wheel-hub permanent-magnet brushless DC motor. By this way, the air-gap flux-density harmonics was reduced, the performance of wheel-hub permanent-magnet brushless DC motor had also been improved. The width of rebate, the gap and the thickness of poles were changed in order to reduce the air-gap flux-density harmonics. Through drawing the diagram of factor levels influent trend, how various factors affect on air-gap flux density waveform has been analyzed. The diagram of factor levels influent trend was analyzed which was described according the last simulated results. The results indicate that the most optimized scheme can optimize the motor structure parameters and provide a basis for motor design.

Key words: orthogonal experiment method; numerical simulation; air-gap flux density; total harmonics distortion(THD)

0 引 言

气隙磁密波形质量对永磁电机性能的影响主要表现为系统转矩脉动大,梯形波的气隙磁场含有丰富的谐波,这必然导致附加的振动噪声,系统振动噪声大。如果气隙磁场谐波含量较大,将导致电机的铁心损耗比异步电机大得多,这不仅影响系统额定运动时效率,

还因空载损耗增大,直接影响到电机轻载时的效率^[1-4]。现在有不少的国内研究者对于气隙磁密进行了研究,如湖南大学的黄晟、任智杰等^[5]对永磁同步电动机气隙磁密优化方法进行了研究;哈尔滨工业大学的刘吉柱、郝双晖等^[6]对永磁同步轮毂电机设计及其弱磁控制方法进行了研究;浙江大学的何伟军、卢琴芬等^[7]对大功率异步起动永磁同步电动机空载气

隙磁密进行了研究。但是由于影响电机的指标很多,各个因素又相互地影响,仅仅采用单个因素进行分析,很难获得最佳的设计方案。

为了使产品的各个指标达到理想的状态,本研究针对轮毂式永磁无刷直流电机,以减小电机空载气隙磁密波形中的谐波含量为目标,即减小波形的畸变率,提出齿槽宽度、气隙大小和磁极厚度组成正交试验表,通过极差分析,确定各因素及各因素水平对气隙磁密波形质量的影响程度。

1 轮毂式永磁无刷直流电机气隙磁密的分析方法

1.1 正交试验法

正交试验设计是利用规格化的正交表,恰当地设计出试验方案并有效地分析出试验结果,提出最优配方和工艺条件,进而设计出可能更优秀的试验方案的一种科学方法^[8]。轮毂永磁无刷直流电机的设计工作是一个复杂的过程,影响气隙磁密波形的参数较多,为了更好地进行试验,采用正交试验法,通过极差分析,确定各个因素的影响。

1.2 模拟试验目的

模拟试验主要针对轮毂式永磁无刷直流电机进行分析,寻找较好的相关参数,以减小轮毂式永磁无刷直流电机空载气隙磁密波形的谐波。

1.3 分析的基本步骤

组合正交试验法用来安排模拟试验,轮毂电机模拟分析的基本思路如下:

确定模拟试验的目标→确定影响因素及水平→选择正交试验表→选取模拟试验模型→ANSYS 模拟分析→模拟试验结果数据处理

2 轮毂式永磁无刷直流电机气隙磁密的有限元分析

2.1 有限元分析前处理

本研究采用有限元软件 ANSYS 对电机实体模型进行参数化建模,由于是对电机电磁场做二维平面分析,单元类型选用 PLANE53。首先构建基本几何形状,然后利用布尔操作得到电机物理模型,轮毂式永磁无刷直流电机的二维模型如图 1 所示。

2.2 材料初始条件及网格的划分

定义气隙、线圈、硅钢片及永磁体 4 种材料。永磁体磁极采用极坐标方法设置永磁体充磁方向。定子的

材料选择为 DW540-501。通过 overlap 命令将具有特定属性的各面域融合到一起。将上述定义的材料属性分别赋给对应的电机几何面域。通过适当的网格划分,并在气隙处进行网格的加密处理,永磁无刷直流电机的有限元网格模型如图 2 所示。

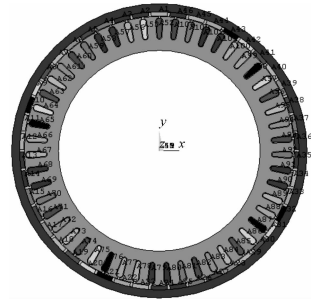


图 1 轮毂电机二维模型

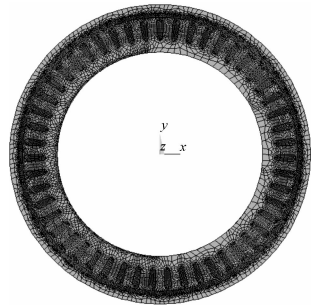


图 2 轮毂电机有限元网格模型

2.3 边界条件及求解

(1) 加边界条件:在电机的外径和内径上加边界条件 $A_z = 0$ 满足第一类边界条件(即齐次狄里克莱边界条件)。

(2) 求解:轮毂式永磁无刷直流电机采用二维模型,采用常用的波前求解器。

(3) 后处理阶段将所需求的气隙磁密映射到气隙圆周的路径上,从而获得波形数据,然后利用 Matlab 进行数据处理,通过傅里叶分解,分析气隙磁密波形的畸变率。

3 轮毂式永磁无刷直流电机气隙磁密的试验设计

3.1 模拟试验安排

影响电机气隙磁密的因素较多,根据文献^[9]选择了对电机影响较大的 3 个因素:齿槽宽度、气隙大小及磁极厚度。每个因素安排 3 个水平,如表 1 所示。因素 A 为齿槽宽度(1.44 mm, 1.48 mm, 1.52 mm),因素 B 为气隙大小(0.45 mm, 0.5 mm, 0.55 mm),因素 C 为磁极厚度(2.8 mm, 3 mm, 3.2 mm)。基于 3 因素

3 水平,选取田口型正交表 $L_9(3^4)$ 。确定试验的目标为气隙磁密的波形质量,具体的表现形式为波形的畸变率(THD):扣除基波分量后气隙磁密的有效值和气隙磁密基波分量的有效值的比值^[10],如表 2 所示。

表 1 正交试验因素水平表

编号	A:齿槽宽度 l/mm	B:气隙大小 g/mm	C:磁极厚度 t/mm
水平 1	1.44	0.45	2.8
水平 2	1.48	0.5	3
水平 3	1.52	0.55	3.2

表 2 $L_9(3^4)$ 正交试验结果

方案	影响因素水平设置			试验结果
	A	B	C	畸变率 THD/(%)
1	1	1	1	29.31
2	1	2	2	27.83
3	1	3	3	27.53
4	2	1	2	28.63
5	2	2	3	28.80
6	2	3	1	28.07
7	3	1	3	30.22
8	3	2	2	28.38
9	3	3	1	28.17

为了得到更好的方案,以气隙磁密波形的畸变率为目标,其值越小,气隙磁密波形的质量越高,则轮毂电机的性能也越高。在分析的 9 个方案中,方案 7 的气隙磁密波形的畸变率最大,为 30.22%,表示气隙磁密的波形质量较差,含有大量的各次谐波。方案 3 的气隙磁密波形的畸变率最小,为 27.53%,表示此时气隙磁密的波形质量较好,其气隙磁密线分布如图 3 所示,此种分布特点有利于提高空载时的效率,减小齿槽转矩。

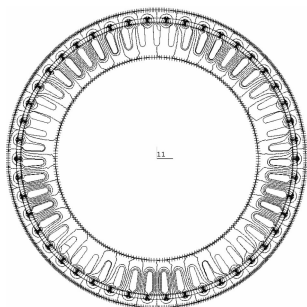


图 3 方案 3 轮毂电机磁密线分布图

3.2 极差分析

极差是指一组数据中最大值和最小值之差,是用来划分因素重要程度的依据。某因素的极差值越大,说明该因素的水平改变所引起试验结果的变化越大,因素越关键,如表 3 所示。水平影响趋势图如图 4 所示。

表 3 级差分析结果

	因素		
	A	B	C
1 水平导致结果之和 K_1	84.67	88.16	85.55
2 水平导致结果之和 K_2	85.5	85.01	84.84
3 水平导致结果之和 K_3	86.77	83.77	86.55
级差 ΔK	2.1	4.39	1.71
结果	B > A > C		

由表 3 列出的 9 组试验结果可以看出,影响电机气隙磁密波形质量的是齿槽宽度、磁极厚度、气隙大小 3 个参数共同作用的结果,通过极差分析,这 3 个因素对于气隙磁密波形的影响由大到小依次是:气隙大小、齿槽宽度、磁极厚度。气隙磁密的畸变率随着气隙大小、齿槽宽度、磁极厚度的改变而变化。在正交试验的 9 次试验中, $A_1B_3C_2$ 组合方案气隙磁密的畸变率最小。通过对正交试验的极差分析,可以确定最佳的组合是 $A_1B_3C_2$,其气隙磁密的畸变率为 27.23%,如图 5 所示。

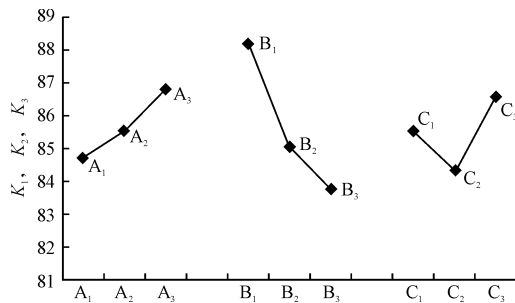


图 4 水平影响趋势图

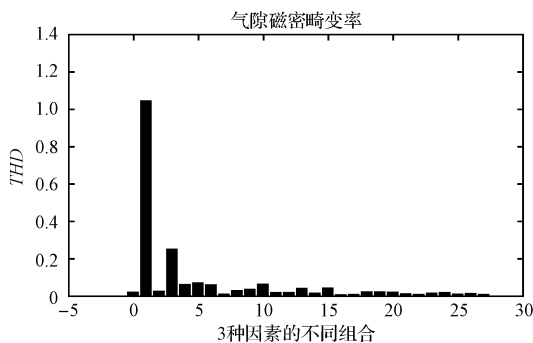


图 5 沿圆周的径向气隙磁密波形畸变率

4 结束语

通过改善轮毂永磁无刷直流电机的气隙磁密波形,减少谐波含量、转矩脉动和噪音振动,应用有限元法建立轮毂电机模型,对轮毂电机气隙磁密波形质量进行了分析。通过正交试验设计及极差分析,确定永磁体气隙大小对气隙磁密波形影响最大,其次为齿槽宽度和磁极厚度。在进行的 9 次正交试验中,得到参数最佳

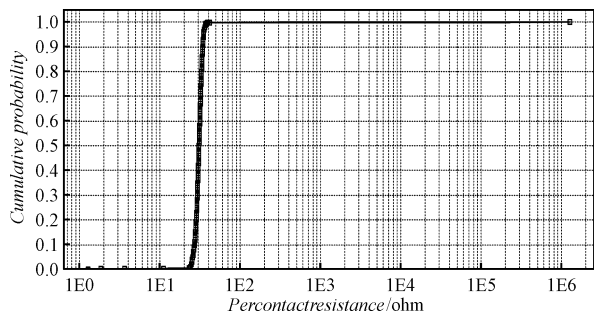


图 6 通孔电阻累积分布图

3 结束语

如何维持及提高成品率对半导体工业至关重要。鉴于 SRAM 电路设计的特殊性,传统的半导体工艺测试结构已经无法满足其可制造性、稳定性和可靠性等要求。因此,在使用电学结构测试 SRAM 工艺时需要转换设计理念:测试结构需要面向产品和工艺开发。本研究阐述了如何设计和使用 SRAM 专用测试结构来快速评估工艺设计的缺陷,从而提高成品率。与通用的测试结构相比,SRAM 专用测试结构还原了产品电路的设计环境,因而能更好地刻画真实环境下的器件特性及其成品率。实验结果表明,SRAM 专用测试结构不但能够准确地测量各种电学参数,还能捕获违背 SRAM 特殊设计规则造成的开路短路缺陷,因而能帮助半导体工艺工程师快速地寻找缺陷,并进一步修正它们从而提升其成品率。

(上接第 376 页)

组合:齿槽长度为 1.44 mm,气隙大小为 0.55 mm,磁极厚度是 3 mm。经过对轮毂电机的数值模拟分析,优化了结构参数,为轮毂式永磁电机的设计提供了依据。

参考文献 (References):

- [1] GHOGGAL A, ZOUZOU S E, RAZIK H, et al. An improved model of induction motors for diagnosis purposes-Slot skewing effect and air-gap eccentricity faults[J]. *Energy Conversion and Management*, 2009, 50(5): 1336-1347.
- [2] ZHANG Xiao-wen, WANG Xiao-yuan, DU Jing-juan, et al. Amelioration of coreless permanent-magnet disk synchronous motor based on FEM: motor with wedge airgap[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2006(13): 427-432.
- [3] ISHAK D, ZHU Z Q, HOWE D. High torque density permanent magnet brushless machines with similar slot and pole numbers[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Mate-*

参考文献 (References):

- [1] SCHLICHTMANN U. Tomorrows High-Quality SoCs Require High-Quality Embedded Memories Today [C]//Proceedings of the International Symposium on Quality Electronic Design. San Jose: [s. n.], 2002:225.
- [2] SIVA N, VIVEK D, RON W. Process Variation: Is It too Much to Handle? [C]//Proceedings of The International Symposium on Quality Electronic Design. San Jose, California: [s. n.], 2002:213.
- [3] 张 峰. 一种新的基于 SRAM 的快速综合技术[J]. 固体电子学研究与发展, 2005, 26(2): 255-258.
- [4] DOONG K Y Y. Defect detection for short-loop process and SRAM-cell optimization by using addressable failure site test structures (AFS-TS) [J]. *Proceedings of SPIE*, 2002, 4692(7): 81-87.
- [5] KHARE J B. Extraction of defect size distributions in an IC layer using test structure data [J]. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 1994, 8(7): 354-368.
- [6] 王万业. CMOS SRAM 存储单元研究[J]. 半导体技术, 1997, 4(2): 32-35.
- [7] KURDAHI F J. System-Level SRAM Yield Enhancement [C]. ISQED 2006. San Jose: [s. n.], 2006.
- [8] 王俊平. 椭圆缺陷的成品率估计[J]. 西安电子科技大学学报:自然科学版, 2006, 33(3): 433-437.
- [9] BALIGA J. Yield Management [M]. Semiconductor International, 1998.
- [10] [美] ZANT P V. 芯片制造 [M]. 赵树武, 译. 4 版. 北京: 电子工业出版社, 2004: 96-98. [编辑: 李 辉]

rials, 2004(272-276): 1769-1769.

- [4] 徐英雷, 李群湛, 王 涛. 永磁同步电机空载气隙磁密波形优化[J]. 西南交通大学学报, 2009, 44(4): 513-516.
- [5] 黄 晟, 任智杰, 黄科元, 等. 永磁同步电动机气隙磁密优化方法研究[J]. 微电机, 2009(10): 26-29.
- [6] 刘吉柱, 郝双晖, 孙明冲, 等. 永磁同步轮毂电机设计及其弱磁控制研究[J]. 微电机, 2001(2): 17-22.
- [7] 何伟军, 卢琴芬, 叶云岳. 大功率异步起动永磁同步电动机空载气隙磁密分析[J]. 机电工程, 2008, 25(7): 55-57.
- [8] 田胜元, 萧曰嵘. 实验设计与数据处理 [M]. 武汉: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [9] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [10] 裴 峰, 高 原, 李玉生, 等. 带整流负载同步发电机的电压波形分析[J]. 机电设备, 2007(7): 37-40.

[编辑: 李 辉]