

轴向磁化永磁微电机磁场分析及定转子制作

杨杰伟¹ 高建设¹ 任天平¹ 吴一辉²

1 郑州大学 (450001)

2 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 (130033)

Magnetic Field Analysis on Axial-magnetized Permanent Magnet Micromotor
and Fabrication of Its Stator and Rotor

Yang Jiewei Gao Jianshe Ren Tianping Wu Yihui

Zhengzhou University

Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences

摘 要: 为研究尺寸效应对轴向磁化永磁电机性能的影响,用有限元方法对这种双转子电机的磁场进行仿真计算,得出轴向磁化永磁电机转子的气隙磁密波形分布。分析了转子外形尺寸、充磁极数、磁体厚度和气隙长度对气隙磁密的影响。采用一体化多极磁化方法和深刻蚀成型电铸工艺分别制作了直径10mm电机的转子永磁体和硅片上的平面定子线圈。

关键词: 轴向磁化 气隙磁密 磁场 线圈

Abstract: In order to research dimensional effect on the performance of axial magnetic PM motor, the finite element method was applied to simulate and calculate the magnet field of this kind of the double-rotor motor, thus, the flux wave in the air gap of the rotor of the axial PM motor was gained. The influence on the flux wave in the air gap by the rotor shape & dimension, poles numbers of magnetizing, thickness of magnets and length of the air gap were analyzed. Finally, the 10mm diameter PM rotor and planar coil on the silicone sheet were manufactured by means of the integrative multi-poles method and electro etching forming technology respectively.

Keywords: Axial-magnetized Flux density Magnetic field Coil

电子机械系统微小型化的发展日新月异。微电机作为微机电系统的关键部件,在电子机械系统中起主要作用^[1]。微电机微小型化将造成性能的相应变化,定子线圈微小型化,使线圈制作困

难且安匝数下降。

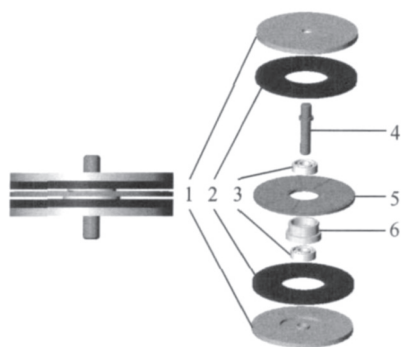
微电机的磁性部件尺寸减小,其作为机电能量转换媒介的气隙磁场也相应变化^[2],微电机的主要性能指标输出转矩也将随之改变。因此,转子磁场分析对该类电机的设计非常重要,而轴向磁化永磁微电机定子线圈采用MEMS工艺光刻电铸而成,为无槽结构,故气隙相对普通电机较大^[3]。

1 转子磁场有限元仿真分析

1.1 微电机转子的物理模型和数学模型

轴向磁化永磁微电机采用包括若干个平面线圈的定子和轴向磁化的烧结钕铁硼双转子共同组成的三明治结构(图1),转子一体化多极轴向充磁,N、S交替成辐射状均布于圆盘表面^[4]。电机中各部分磁密分布不均,不同半径处的磁路不相同,致使其磁场计算比圆柱式电机复杂。为了计算磁场分布,利用有限元软件ANSYS模块对电机进行电磁场仿真分析^[5]。

平面电机的空载磁场是静磁场,用标量磁势法进行计算。据麦克斯韦方程组,在稳定磁场的无电流区域,磁场强度矢量的旋转角度为零,即:



1 铁轭 2 钕铁硼磁环 3 深沟球轴承
4 轴 5 定子线圈 6 轴承套

图1 微电机结构图

$$\nabla \times \vec{H} = 0 \quad (1)$$

引入标量磁势作为待求量:

$$\vec{H} = -\nabla \varphi_m = -\frac{\partial \varphi_m}{\partial x} \vec{i} - \frac{\partial \varphi_m}{\partial y} \vec{j} - \frac{\partial \varphi_m}{\partial z} \vec{k} \quad (2)$$

式中: φ_m ——标量磁势;

\vec{H} ——磁场强度矢量。

将式(2)代入式(1),可导出标量磁势满足的偏微分方程,即拉普拉斯方程:

$$\nabla^2 \varphi_m = \frac{\partial^2 \varphi_m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi_m}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi_m}{\partial z^2} = 0 \quad (3)$$

将该泛方程与边界条件合在一起,构成了边值问题,即稳定磁场求解的数学模型:

$$\left. \begin{aligned} \Omega: \frac{\partial^2 \varphi_m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi_m}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi_m}{\partial z^2} &= 0 \\ \Gamma_1: \varphi_m &= \varphi_{m0} \\ \Gamma_2: \frac{\partial \varphi_m}{\partial n} &= -\frac{B_n}{\mu} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: Ω ——求解区域;

Γ_1 ——Dirichlet边界条件;

Γ_2 ——Neumann边界条件;

B_n ——磁感应强度矢量的法向分量;

μ ——磁导率。

1.2 磁场计算结果

计算结果表明,气隙磁密的分布与半径有关(图2为平均半径处周向展开截面的通量线分布图),在某个半径处气隙磁密分布近似为矩形波,在平均半径附近气隙磁密的幅值为最大,而在靠近最内、最外径处,由于受边缘效应的影响,气隙磁密幅值下降,且波形变形较大,如图3。

图4为气隙磁密幅值随半径的变化曲线,可

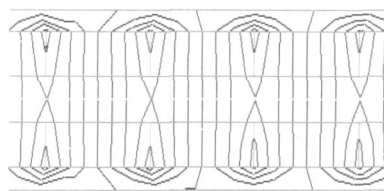


图2 微电机磁通分布

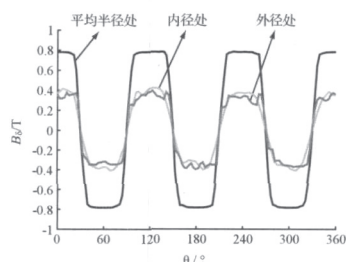


图3 气隙磁场波形图

见,在平均半径附近,幅值最大。因此,以下所指磁密幅值为平均半径处气隙磁密幅值。

1.2.1 充磁极数、气隙长度对气隙磁密的影响

对于电机转子,因充磁极数不同磁体所产生的气隙磁密也不相同。通过对直径固定、极数不同的转子进行建模计算,得出气隙磁密幅值随极数变化的曲线(图5)。可见,在2~10极时磁密幅值较大,随着极数增加,气隙磁密幅值在各对磁极中心退磁场的综合作用下逐渐下降。故极数的选择应综合考虑磁密幅值、漏磁和充磁的难易等因素。

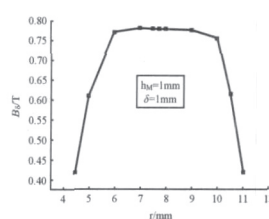


图4 气隙磁场与转子半径关系

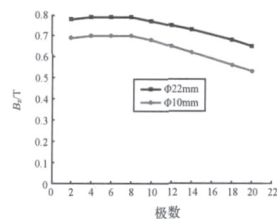


图5 磁场与充磁极数的关系

图6比较了直径10mm的转子轴向分别充6极和10极时,气隙磁密幅值随气隙长度的变化。由图可见,对固定直径的电机,随着气隙长度的增加,气隙磁密幅值逐渐减小;充磁极数多的,其气隙磁密幅值的减小幅度大于充磁极数少的。

1.2.2 永磁体厚度对气隙磁密的影响

在固定的气隙下,保持电机极数和直径不变,增加永磁体的厚度,可以提高气隙磁密,但磁体厚度的增加并不能无限提高气隙磁密。图7

为直径10mm的转子(气隙1mm),不同极数时气隙磁密幅值与磁体厚度关系。随着磁体厚度的增加,气隙磁密为一上升曲线,但到一定厚度后,气隙磁密增加的幅度逐渐减小,永磁体的利用变得不经济。计算中发现磁体厚度和极数及主要几何尺寸间的关系为:当磁体厚度 $h > \frac{\pi(D_o+D_i)}{2p}$ 时(D_o 、 D_i 为磁体外径、内径, p 为极数),气隙磁密幅值基本为一常数;当磁体厚度 $h < \frac{\pi(D_o+D_i)}{2p}$ 时,磁密幅值开始大幅度减小。理想情况下,磁体最经济的厚度近似等于气隙长度。

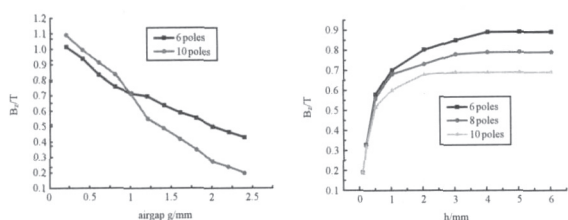


图6 磁场随气隙长度变化曲线 图7 磁场随磁体厚度变化曲线

1.2.3 永磁体直径对气隙磁密的影响

保持气隙长度和极数不变,改变永磁体直径,气隙磁密也会随之变化。图8为不同厚度的永磁体,平均半径处气隙磁密幅值随直径的变化曲线。由图可见,磁密幅值随直径的减小呈下降趋势;另外,随着永磁体厚度的降低,减小转子直径时,气隙磁密幅值的减小幅度越来越不明显。但当转子外径减小到8mm,内径5mm时,转子径向长度很小。由于内外径处边缘效应的综合影响,气隙磁密幅值显著降低,且平均半径处的气隙磁密波形变形严重,如图9所示不再为平顶波。电机负载后,气隙磁通与矩形波定子电流产生的合成电磁转矩纹波较大。图10为正常情况下气隙磁密波形图。

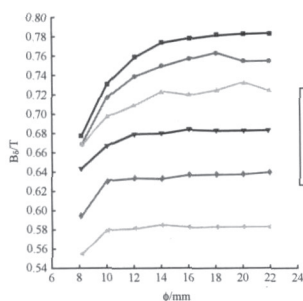


图8 磁场随直径变化曲线

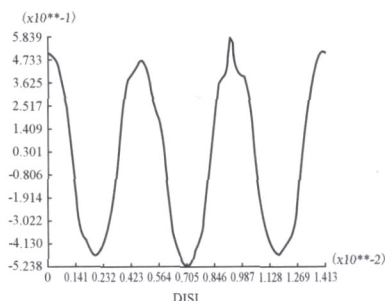


图9 平均半径处变形的气隙磁密波形

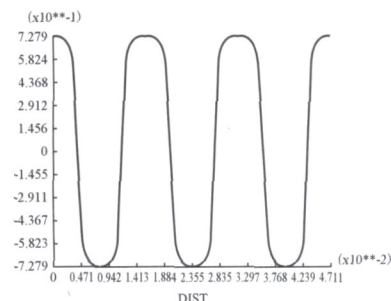


图10 平均半径处正常的气隙磁密波形

2 分析

对开路磁体如圆片状磁体, h 为其厚度、 d 为直径,轴向充磁后,从等效磁荷的观点考虑,两个磁极表面出现正负磁荷,正负磁荷在磁体内部产生一个与磁化方向相反的退磁场 H_d ,退磁场与磁极化强度 J 之间的关系为: $H_d = -N_h \frac{J}{\mu_0}$,式中 N_h 为退磁因子,它的大小由磁体的几何因素 $\frac{h}{d}$ 决定, N_h 随 $\frac{h}{d}$ 的增加而迅速减小^[6]。

实践证明:永磁体的磁性主要来源于电子自旋磁矩,电子自旋磁矩小范围内自发地排列形成“自发磁化区”,称为磁畴。磁畴宽度随磁体的厚度而变化,对Nd-Fe-B单晶体磁体厚度 $h > 10\mu\text{m}$ 时,畴宽与磁体厚度有如下关系:

$$d_0 = \left(\frac{\gamma}{1.7J^2} \right)^{\frac{2}{3}} (h)^{\frac{2}{3}}$$

式中: d_0 ——畴宽;

γ ——畴壁能密度;

J ——磁极化强度。

磁畴结构受到磁畴壁能、退磁场能等因素的综合制约,而退磁场能是磁体分成磁畴的驱动力^[7]。对单个磁极,单位面积的退磁场能为:

$$E_t = 1.7 \times 10^{-7} d_0 \left(\frac{J}{\mu_0} \right)^2$$

利用上述理论可解释仿真计算结果:对固定直径的电机,充磁极数多的转子其等效极距较小,相当于磁体厚度较大,从而畴宽较大、退磁场能较大,则随着气隙长度的增加,其气隙磁密幅值的减小幅度大于充磁极数少的;对保持电机极数和直径不变,磁体厚度 h 增加,退磁因子快速减少,磁体内部的退磁场也相应减小,气隙

磁密逐渐增加,但不能无限增加,因为随着 h 的增加,畴宽 d_0 增加,退磁场能增加,使畴结构变化,从而使达到平衡状态的磁体在气隙中的磁密增加趋于饱和;对减小转子直径时,畴宽相对增大,退磁场能增加,磁密幅值呈下降趋势。随着永磁体厚度的降低,退磁场能的增加趋缓,致使气隙磁密幅值的减小幅度不明显。

3 计算与实测对比

用磁强计对直径为22mm和20mm电机的气隙磁场进行多点实测,与仿真计算所得气隙磁密进行对比,由图11~12可知,计算值和实测值基本吻合。

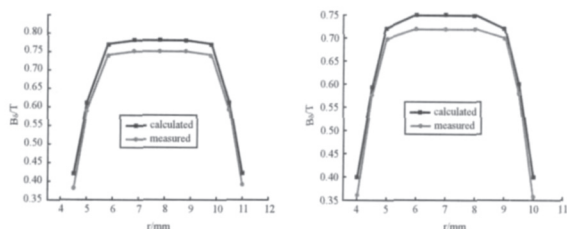


图11 直径22mm电机气隙磁密 图12 直径20mm电机气隙磁密

4 定、转子制作

4.1 永磁转子制作

常规电机永磁转子的制作方法是较大的烧结磁块切割成小磁体,对小磁体逐个磁化,然后安装于转子铁轭^[8]。在微电机小型化过程中仍然采用这种方法制作永磁转子就很困难。为克服传统方法的弊端,采用一体化多极磁化方法^[9],即对整块磁体进行多极脉冲磁化。这样转子永磁体在一个磁化步内即制作完成,使后续的组装也较顺利。采用一体化多极磁化时,充磁夹具接专用充磁电源使转子永磁体充磁达饱和,得到N、S极交替排列的钕铁硼薄圆环。

4.2 定子线圈制作

微电机尺寸较小,主要尺寸确定后转子永磁体的气隙磁感应强度即确定。为保证微电机有较大的输出转矩,需要定子线圈能通过较大的电流及本身具较小的电阻。这就需要在有限尺寸的定

子上制作具一定高、深、宽比的线圈。

制作高、深、宽比的微结构工艺有多种,有基于准LIGA工艺、聚合物或SU-8的工艺。这些工艺较复杂、成本高且成品率低。通过对传统平面线圈的表面电铸制作工艺、深刻蚀电铸制作工艺和深刻蚀成型电铸制作工艺^[10]的研究,综合比较各方面因素,发现深刻蚀成型电铸工艺是一种制作高、深、宽比且无空洞的平面线圈较有效、成品率高、重复性高的工艺。采用该工艺在3寸硅片上制成的平面线圈切割和电铸后(每个定子线圈直径为10mm)的线圈无空洞、无断线、无翻边短路,有较大的深宽比(大于2:1),测得每个定子线圈电阻为2欧姆左右。与转子装配后,对微电机进行测试,发现电机转矩波动小,运转平稳。

5 结论

本文通过仿真计算,得出轴向磁化永磁微电机转子的气隙磁密波形分布,为该种电机微小型化过程中性能的分析及设计提供了依据和计算方法。即:(1)对固定直径的电机,随着气隙长度的增加,气隙磁密幅值逐渐减小,充磁极数多的其气隙磁密幅值的减小幅度大于充磁极数少的;(2)随着磁体厚度的增加,气隙磁密为一上升曲线,当磁体厚度 $h > \frac{\pi(D_o+D_i)}{2p}$ 时,气隙磁密幅值基本为一常数,当 $h < \frac{\pi(D_o+D_i)}{2p}$ 时,磁密幅值开始大幅度减小;(3)保持气隙长度不变,随着永磁体厚度的降低,减小转子直径时,平均半径处气隙磁密幅值的减小幅度越来越不明显,但为使气隙磁密波形变形严重,且保证电机加载时有一定的输出转矩,永磁转子径向长度需至少大于1.5mm。

对平面线圈的制作工艺,宜深入研究光刻、微电铸和深刻蚀工艺,以制作更高深宽比的线圈。成熟的定子线圈制作工艺可以应用在集成电路、大规模数据存储系统以及微泵、微阀等MEMS器件中所使用的高深宽比平面线圈中。

(下转第58页)

出风孔(百叶窗),底面出风和除尘孔,能很好地解决滑环发热和烧坏问题。

2.1 滑环结构形式新颖、美观实用。

(1) 滑环外罩采用3毫米的Q235钢板焊接的方形结构, 外端为可拆卸的百叶窗, 内端为进风孔。而国内则大多采用12mm以上的钢板焊接或铸造。

(2) 滑环与电机间用4根直径65mm的钢管连接,有利于电机及滑环的保养与维修,比国内的钢板连接结构省料又美观。

2.2 采用高等级绝缘材料制成的风叶

滑环用的风叶采用环氧树脂层压制品,一次成型后切割而成,强度高、可靠性好、不变形及绝缘等级高,不影响集电环之间的绝缘距离。

该新结构滑环在大型绕线电机上,可以只设轴向通风孔和离心风扇叶,不安装滑环罩。该方案的结构如图1~3。

3 结语

自带离心风扇叶和轴向通风孔的绕线电机用滑环, 由于采用新的通风冷却结构, 提高了通风散热作用, 并及时将电刷磨擦产生的粉末排出, 有效地解决滑环短路烧坏问题, 保证电机安全可靠运行。它增加了我公司绕线电机的市场竞争力, 并具有经济效益和社会效益。

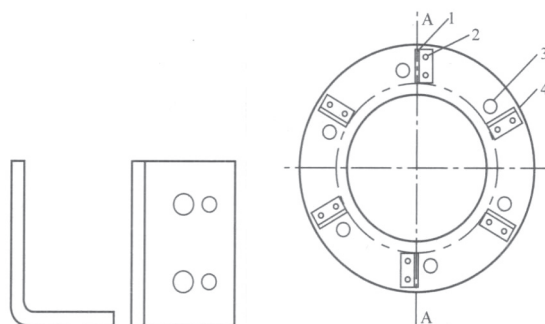


图1 离心风扇叶

1 离心风扇叶 2 铆钉

3 轴向通风孔 4 集电环

图2 钻有轴向通风孔的集电环

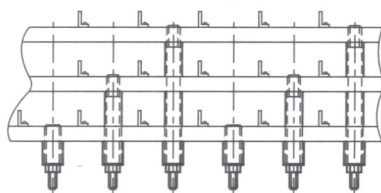


图3 滑环展开图

该新结构滑环已在我公司开发的YRNKK560-6 10kV 630kW、YRNKK500-4 10kV 560kW、YRNKK450-4 10kV 280kW异步绕线调速电动机上成功应用。

(收稿日期: 2008-03-23)



作者简介: 李贤明, 男, 1967年生, 汉族, 1991年7月毕业于哈尔滨电工学院电材系绝缘材料专业, 工学士, 研究生学历, 已取得多项科研成果和国家专利, 主要从事大中型高压电动机的开发设计与研究工作。

(上接第56页)

参 考 文 献

- 1 K.HAMEYER, M.NIENHAUS. Electromagnetic actuators-current developments and examples [J]. Actuator, 1999.
- 2 J.TÖPFER, B.PAWLOWSKI, et al. Multi-pole magnetization of NdFeB magnets for magnetic micro-actuators and its characterization with a magnetic field mapping device[J]. J.Magn.Magn. Mater., 2004, 270: 124~129.
- 3 唐任远等. 现代永磁电机理论与设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997: 311~314.
- 4 郭占社, 吴一辉, 宣明, 王淑荣. 电磁型平面微电机及其制作工艺[J]. 光学精密工程, 2003, 11(2): 120~124.
- 5 王国强. 实用工程数值模拟技术及其在ANSYS上的实践[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1999.

- 6 赵凯华,陈熙谋. 电动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1985: 387~390.
- 7 周寿增,董清飞. 超强永磁体[M]. 冶金工业出版社, 1999.
- 8 Metin Aydin. Axial flux surface mounted permanent magnet disc motors for traction drive applications [D]. Madison, WI: Department of electrical and computer engineering, University of Wisconsin-Madison, 2002.
- 9 J.Töpfer, V.Christoph. Multi-pole magnetization of NdFeB sintered magnets and thick films for magnetic micro-actuators[J]. Sensors and Actuators A, 2004, 113: 257~263.
- 10 杨杰伟, 吴一辉, 王淑荣, 张 平. 平面微电机定子线圈制作工艺研究. 微细加工技术, 2006, 89 (3): 27~32.

(收稿日期: 2008-09-12)