

文章编号 1004-924X(2006)01-0083-06

轴向磁化永磁微电机磁场分析及设计方法研究

杨杰伟^{1,2}, 吴一辉¹, 贾宏光¹, 张平¹, 王淑荣¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 在轴向磁化永磁电机设计中, 为研究尺寸效应对其性能的影响, 采用有限元方法对这种双转子电机的磁场进行了仿真计算, 得出了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, 即随着气隙长度的增加, 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; 随着磁体厚度的增加, 气隙磁密为一上升曲线, 当磁体厚度达到某一点时, 气隙磁密幅值基本为一常数; 减小转子直径时, 随着磁体厚度的降低, 平均半径处气隙磁密幅值的减小幅度越来越不明显, 但不使气隙磁密波形变形严重, 永磁转子径向长度需至少大于 1.5 mm。磁场分析结果可对该类电机微型化过程中的设计起指导作用。对计算结果做了理论分析, 并将计算结果和实验结果进行了比较, 计算值和实测值基本一致。

关键词: 永磁微电机; 轴向磁化; 气隙磁密; 磁场分析; Nd-Fe-B

中图分类号: TM351 **文献标识码:** A

Design method and magnetic field analysis of axial-magnetized permanent magnet micromotor

YANG Jie-wei^{1,2}, WU Yi-hui¹, JIA Hong-guang¹, ZHANG Ping¹, WANG Shu-rong¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*; 2. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: In order to investigate the impact of the size effect on its performance in designing axial-magnetized permanent magnet micromotor, the finite element method was adopted to simulate the magnetic field of this kind of dual rotor motor, and the flux density wave form distributed in the air-gap was obtained. The influences of the external dimensions, pole numbers and magnet thicknesses of the rotor and the airgap distances on the flux density were analyzed, the analytical results were given. With the increasing of the airgap distance, the flux density under more poles reduces more quickly than under fewer poles. With the increasing of the magnet thickness, the flux density is a rising curve, and after the magnet thickness gets to a certain point, it is almost a constant. While reducing the diameter of the rotor, the decreasing of the flux density is slower and slower with the reducing of the magnet thickness. The results of the magnetic field analysis can guide the design of the microminiaturization of the motor. Moreover, the results are analyzed theoretically and the simulated values are

收稿日期: 2005-07-22; 修订日期: 2005-11-18.

基金项目: 国家自然科学基金(No. 60574089)和中科院创新项目。

almost consistent with the experimental values.

Key words: permanent magnet micromotor; axial-magnetizing; flux density; magnetic field analysis; Nd-Fe-B

1 引言

近年来,电子机械系统微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]。微电机微型化将引起一系列性能的相应变化,即随着尺寸的减小,一方面,定子线圈微型化,使线圈制作困难且匝数下降;另一方面,电机的转矩、功率和效率降低。制作永磁转子的常规方法是,将较大的烧结磁块切割成小磁体,对小磁体逐个进行磁化,然后安装定位于转子铁轭。在微电机微型化过程中采用这种方法制作永磁转子就很困难了,因为微电机的微型化必然促使永磁体向微型化方向发展,这样不但使永磁体充磁困难,而且由于磁体是在组装之前被磁化的,对磁体的安装定位也很不方便。为克服传统方法的弊端,采用一体化多极磁化方法,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,使后续的组装工作也比较顺利。

微电机的磁性部件尺寸减小时,它所产生的作为机电能量转换媒介的气隙磁场也相应变化^[2],在应用领域中,微电机的主要性能指标是输出转矩,而转矩正比于永磁转子在气隙中产生的磁感应强度,当电机尺寸改变时,加载电流后,转矩也将随之改变。因此转子磁场分析对该类结构电机的设计非常重要。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,直接放置在轴向气隙中,气隙相对普通电机较大^[3]。

2 转子磁场有限元仿真

2.1 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(见图 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匀,不同半径处的磁路

长度不相同,致使其磁场计算比普通圆柱式电机复杂。为了精确计算磁场分布,利用有限元软件 ANSYS 对平面电机进行电磁场仿真分析^[5]。

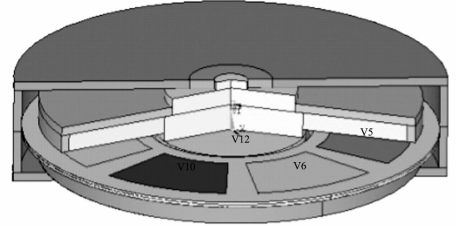


图 1 微电机结构

Fig. 1 Configuration of the micromotor

平面电机的空载磁场是静磁场,用标量磁势法进行计算。麦克斯韦方程组是电磁场有限元分析的依据和出发点,由麦克斯韦方程组可知,在稳定磁场的无电流区域,磁场强度矢量的旋度为零,即

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

引入标量磁势作为待求量

$$\mathbf{H} = -\nabla \varphi_m = -\frac{\partial \varphi_m}{\partial x} \mathbf{i} - \frac{\partial \varphi_m}{\partial y} \mathbf{j}, \quad (2)$$

式中 φ_m —标量磁势 \mathbf{H} —磁场强度矢量。

将(2)代入(1),可导出标量磁势满足的偏微分方程,即拉普拉斯方程

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

将该泛定方程与边界条件合在一起,构成了边值问题,即稳定磁场求解问题的数学模型

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

式中: Ω —求解区域 Γ_1 —Dirichlet 边界条件 Γ_2 —Neumann 边界条件 B_n —磁通密度矢量的法向分量 μ —磁导率

2.2 磁场计算结果

磁场计算结果表明,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 所示。

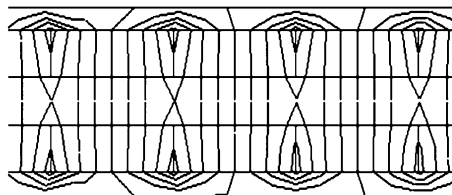


图 2 微电机磁通分布

Fig. 2 Flux distribution of the micromotor

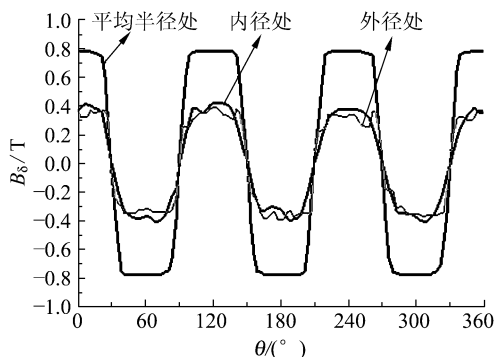


图 3 气隙磁场波形图

Fig. 3 Waveform of the magnetic field

图 4 为气隙磁密幅值随半径的变化曲线,可见,在平均半径附近,气隙磁密基本为平顶波,幅值为最大。因此,以下所指磁密幅值为平均半径处气隙磁密幅值。

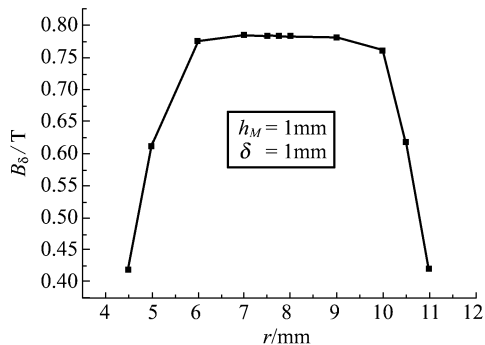


图 4 气隙磁场与转子半径关系

Fig. 4 Relationship between magnetic field and radius of the rotor

2.2.1 充磁极数、气隙长度对气隙磁密的影响

对于电机转子设计,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)。图中曲线为转子极数与对应的磁密幅值关系,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。极数的选择应综合考虑磁密幅值、漏磁和充磁的难易等多方面因素。

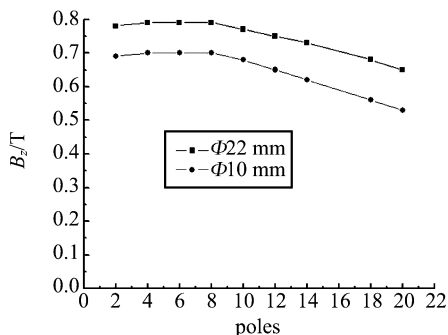


图 5 磁场与充磁极数的关系

Fig. 5 Relationship between magnetic field and poles

图 6 比较了直径 10 mm 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变化的曲线图。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。

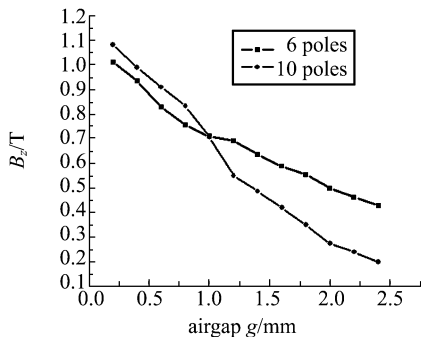


图 6 磁场随气隙长度变化曲线

Fig. 6 Evolution of field vs. air gap distance

2.2.2 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,可以提高磁路的气隙磁密,但磁体厚度的增加并不能无限提高气隙磁密。图 7 所示为直径 10 mm 的转子(气隙 1 mm),不同极数时气隙磁密幅值与磁体厚度的关系曲线。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,曲线的斜率逐渐减小,即气隙磁密增加的幅度逐渐减小,永磁体的利用变得不很经济。计算中发现磁体厚度和极数及主要几何尺寸之间的关系为:当磁体厚度 $h > \frac{\pi(D_o + D_i)}{2p}$ 时 (D_o 、 D_i 为磁体外、内径, p 为极数),气隙磁密幅值基本为一常数;当磁体厚度 h 缩减到小于 $\frac{\pi(D_o + D_i)}{2p}$ 时,磁密幅值开始大幅度减小。理想情况下,磁体最经济的尺寸是其厚度近似等于气隙长度。

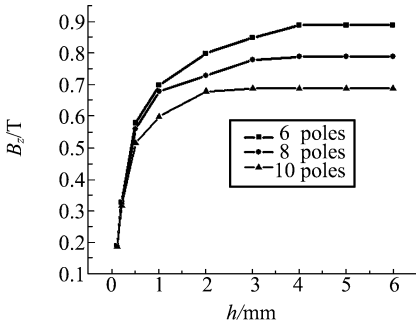


图 7 磁场随磁体厚度变化曲线
Fig. 7 Evolution of field vs. magnet thickness

2.2.3 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 所示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,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。但另一方面,当转子直径减小到 8 mm,内径 5 mm 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相互作用,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。

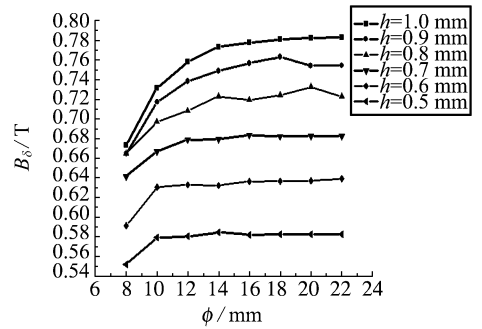


图 8 磁场随直径变化曲线
Fig. 8 Evolution of field vs. diameter

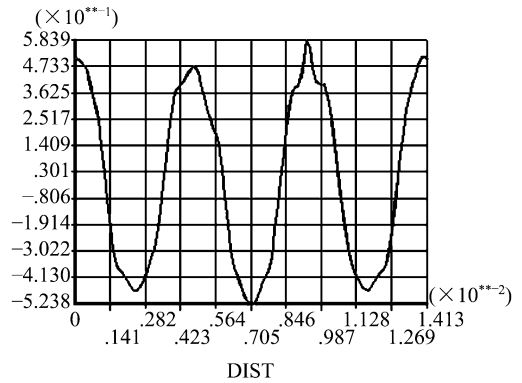


图 9 平均半径处变形的气隙磁密波形
Fig. 9 Distorted waveform at average radius

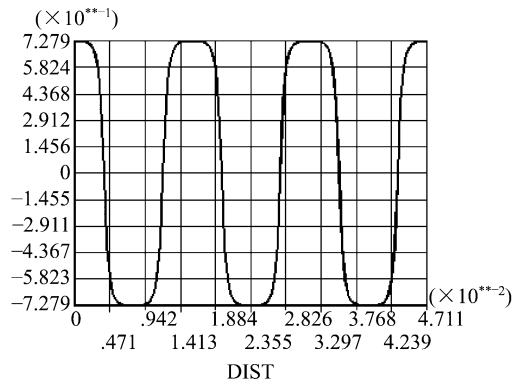


图 10 平均半径处正常的气隙磁密波形
Fig. 10 Normal waveform at average radius

3 结果分析

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: $H_d = -N_h \frac{J}{\mu_0}$, 式中比例系数 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]。

近代科学实践证明,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

排列起来形成“自发磁化区”,这种自发磁化区叫磁畴。磁畴宽度随样品的厚度而变化,对 Nd-Fe-B 单晶体来说,磁体厚度 $h > 10 \mu\text{m}$ 时,畴宽与磁体厚度有如下关系:

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

式中: d_0 —畴宽, γ —畴壁能密度, J —磁极化强度
畴结构受到畴壁能、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: $E_l = 1.7 \times 10^{-7} d_0 \left(\frac{J}{\mu_0} \right)^2$ 。

利用上述理论可解释仿真计算结果:对(2.2.1.)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,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(2.2.2.)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逐渐趋于饱和;对(2.2.3.)减小转子直径时,随着永磁体厚度的降低,畴宽减小,退磁场能相应减小,致使气隙磁密幅值的减小幅度越来越不明显。

4 转矩计算和实验

为验证仿真计算的正确性,将计算所得气隙磁密转化为电机空载损耗转矩,与实验所得转矩值进行对比,以说明仿真计算的可行性。

对直流电机来说,用机械角速度 ω_m 来表示感应电势 E_a 通常较为方便,多极电机感应电势:

$$E_a = \frac{p}{\pi} N \Phi \omega_m$$

空载时,感应电势 E_a 上的全部功率都用于供给旋转损耗,旋转损耗 = $E_a I_a$ 。则空载损耗转矩:

$$T = \frac{E_a I_a}{\omega_m} = \frac{(p/\pi) N \Phi \omega_m I_a}{\omega_m} = \frac{p}{\pi} N \Phi I_a = \frac{p}{\pi} N \frac{\pi}{4p} B_\delta (D_o^2 - D_i^2) I_a = \frac{1}{4} N B_\delta (D_o^2 - D_i^2) I_a$$

式中, N 为线圈总匝数, B_δ 为气隙磁密, I_a 为电流。

利用仿真计算所得气隙磁密幅值和上述转矩公式,可计算出电机的空载损耗转矩。与之对应,通过测取实际电机的空载损耗转矩,发现计算值和实测值基本吻合,从而说明可以对该类电机磁场进行有限元仿真,以计算其几何尺寸改变时相应的磁密值。图 11 和 12 所示分别为 $\Phi 22 \text{ mm}$ 和 $\Phi 20 \text{ mm}$ 电机的空载损耗转矩计算值和实测值的对比图。由结果可见,随着电机尺寸的减小,电枢最大电流减小,空载损耗转矩降低。

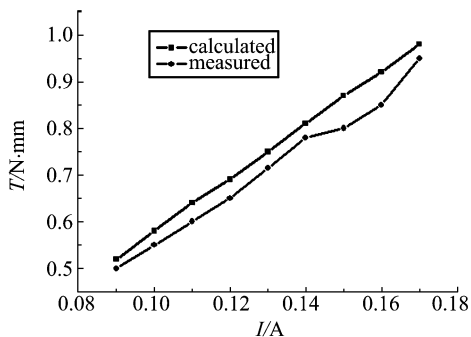


图 11 直径 22 mm 电机转矩
Fig. 11 Torque for $\Phi 22 \text{ mm}$ motor

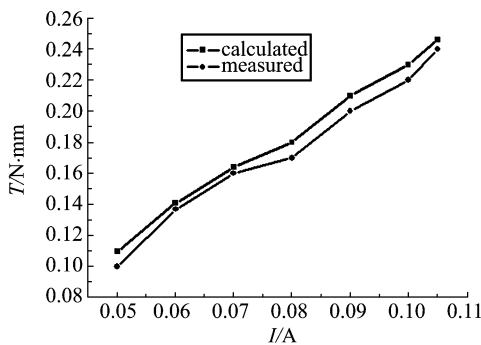


图 12 直径 20 mm 电机转矩
Fig. 12 Torque for $\Phi 20 \text{ mm}$ motor

5 结 论

本文通过仿真计算,得出了轴向磁化永磁微电机转子的气隙磁密波形分布;分析了固定外形尺寸时,不同充磁极数、不同磁体厚度和不同气隙长度的气隙磁密变化趋势;以及转子外形尺寸的变化对气隙磁密的影响,为该种电机微小化过程中性能的分析及设计提供了理论依据和计算方法。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,当磁体厚度 $h < \frac{\pi(D_o + D_i)}{2p}$ 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,但为不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 $> 1.5 \text{ mm}$ 。

参考文献:

- [1] HAMEYER K, NIENHAUS M. Electromagnetic actuators-current developments and examples[J]. *Actuator*, 1999.
- [2] TÖPFER J, PAWLOWSKI B. 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. 现代永磁电机理论与设计[M]. 北京:机械工业出版社,1997.
TANG R Y. *Modern permanent magnet machines-theory and design*[M]. Beijing: Mechanic Industry Press, 1997. (in Chinese)
- [4] 郭占社, 吴一辉, 宣明. 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.
GUO ZH SH, WU Y H, XUAN M, WANG SH R. Electromagnetic planar micromotor and its fabrication[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11(2):120-124. (in Chinese)
- [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.
WANG G Q. *Applied engineering numeric simulation technique and its application in ANSYS*[M]. Xi'an: North-western Polytechnical University Press, 1999. (in Chinese)
- [6] 赵凯华, 陈熙谋. 电磁学[M]. 北京:高等教育出版社,1985.
ZHAO K H, CHEN X M. *Electromagnetics*[M]. Beijing: Higher Education Press, 1985. (in Chinese)
- [7] 周寿增, 董清飞. 超强永磁体[M]. 北京:冶金工业出版社,1999.
ZHOU SH Z, DONG Q F. *Super permanent magnet*[M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 1999. (in Chinese)

作者简介:杨杰伟(1977—),男,河南舞阳人,博士研究生,主要研究方向为集成微光机电系统。