

轴向磁化永磁微电机最小尺寸分析及研制

杨杰伟¹, 赵江铭¹, 郑艳萍¹, 刘治华¹, 吴一辉²

(1. 郑州大学机械工程学院, 河南省 郑州市 450001; 2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所
应用光学国家重点实验室, 吉林省 长春市 130033)

Minimum Dimension Analysis and Fabrication of Axial-magnetized Permanent Magnet Micromotor

YANG Jie-wei¹, ZHAO Jiang-ming¹, ZHENG Yan-ping¹, LIU Zhi-hua¹, WU Yi-hui²

(1. College of Mechanical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan Province, China;

2. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, Jilin Province, China)

ABSTRACT: To investigate the impact of size on its performance in designing an axial-magnetized permanent magnet micromotor, the edge-based finite element method is adopted to simulate the torque of this kind of dual rotor motor. The winding density in the stator is analyzed and the optimal scheme is that both of the line width and the space between lines are 50 μm . The minimum dimension of the motor, which is limited by such aspects as configuration, torque and flux density, is also analyzed. The minimum motor, which satisfies the practical applications in the range of fine mechanics, can produce a torque of 47 μNm when the current flowing through is 0.1 A. The minimum diameter is 10 mm and the minimum thickness is 4 mm. The rotor is fabricated by integrative magnetization method and the stator on silicon substrate is fabricated by deep-etching molding electroforming technology. The method and the analysis results can guide a miniaturization of such motor.

KEY WORDS: axial-magnetized; finite element method; Lorentz force; planar coil; high-aspect-ratio

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, 采用基于单元边的有限元方法对这种双转子电机的转矩进行了仿真计算, 得出了轴向磁化永磁微电机定子线圈线宽和线间距均为 50 μm 的最佳布线密度, 分析了电机在结构、转矩和气隙磁场多方面因素共同限制下所能达到的最小尺寸, 即精密机械意义上的能满足实际应用的最小电机直径为 10 mm, 最小厚度为 4 mm, 通以 0.1 A 的电流时能获

得 47 μNm 的转矩。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 10 mm 电机的转子永磁体和硅片上的平面定子线圈。分析方法和结果可对该类电机微小化过程中的设计起指导作用。

关键词: 轴向磁化; 有限元法; 洛仑兹力; 平面线圈; 高深宽比

0 引言

近年来, 在包括电机和执行器在内的电子机械系统的微型化过程中, 人们做出了巨大的努力^[1], 国内外在微电机的研制上已取得一系列的成果。从 1988 年至今, 人们对微电机的原理、材料和工艺做了多次改进, 使微电机的性能有了很大的提高。总之, 研究围绕着克服转子与定子间的摩擦力和提高输出扭矩两个核心问题展开, 设计制作出了静电式、压电式、电磁式等多种形式的微电机。先后有美国加州大学、威斯康星州大学、日本松下电器产业公司、东芝公司、德国卡尔斯鲁厄研究中心、梅因兹微技术研究所、中国清华大学和上海交通大学等分别研制出了毫米级或微米级的静电型、电磁型微电机, 这些成就表明微电机研究已经形成自己的特色, 在微型机械研究领域占有了一席之地, 但是, 这些微电机转矩都比较小, 最多只有几微牛米大小, 很难应用于实际需要。微电机小型化时, 其性能如转矩的变化、满足实际应用的最小电机尺寸以及最优的微电机设计方法等并没发现相关文献报道, 因此, 有必要研究电机微小化过程中尺寸效应对电机转矩的影响, 并总结出电机小型化过程中

基金项目: 国家自然科学基金项目(60574089); 中国科学院创新项目。

Project Supported by National Nature Science Foundation of China (60574089).

的规律,以指导实际设计。

轴向磁化永磁微电机的气隙是平面型的,气隙磁场是轴向的,这种特殊结构使其与传统电机相比有结构简单、易散热、小尺寸和大转矩等特点,目前在随身听和移动电话震动器等消费类电子产品中已有应用,可取代计算机软盘、光盘和硬盘驱动器中所使用的传统电机,且在医疗仪器、精密光学、自动控制及现代通信等众多领域有着广阔的应用前景^[2]。随着轴向磁化永磁微电机应用领域内电子机械系统逐渐微型化,电机也处在微型化的发展过程中,因此本文对该过程中微电机的尺寸变化对其转矩等性能的影响以及最佳布线密度下满足实际应用的最小电机尺寸等问题进行了研究。数值计算结果比较精确,所以采用有限元方法对该种电机的转矩进行仿真计算,计算结果用来指导实际设计。

1 电机最小尺寸分析

1.1 电机结构及受力分析

轴向磁化永磁微电机定子由若干个平面线圈组成,2个烧结钕铁硼转子对称分布于定子轴向两侧,组成双转子的三明治结构(图 1),转子轴向充磁,磁极 N、S 交替成辐射状均布于圆盘表面^[3]。考虑到电机尺寸、定转子制造的难易、电机运转的平稳性以及驱动控制方式等多方因素,计算中采用了定子 9 个线圈、转子 6 个永磁极的方案。

在计算转矩之前,必须先明确气隙磁通密度的分布情况和电枢绕组中电流分布的情况:轴向磁化永磁电机的气隙磁密分布决定于永磁转子的磁极分布;定子线圈为平面结构,电流分布相应为平面式辐射分布。针对普通电机的有槽定子,需要知道电枢的切向力或转矩究竟作用在什么地方。电机加载电流后,定子线圈受两部分的切向力,一部分作用在导线上,即导线电流在磁场中的受力;另一部分作用在电枢铁上,即磁场对铁心磁偶极子的有质动力。由于铁心的相对磁导率远远大于空气,磁力线绝大部分进入铁心,导线处在磁密微弱的槽中受力很小,因此有槽电枢绝大部分的切向力是从电枢铁上来的^[4]。轴向磁化永磁微电机定子线圈采用无槽结构^[5],以 PCB 板材或硅片为基底的线圈直接放置在轴向气隙中,即定子上无铁心,导线完全处在气隙磁密中。由于环氧层压材料和硅材料的相对磁导率与空气相近,在空气中没有有质动力,所以定子线圈的切向力完全来源于载流导线在磁场中的受力。

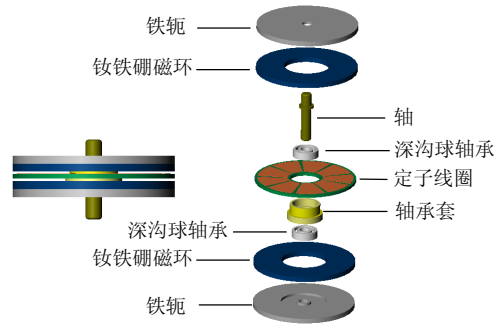


图 1 微电机结构图

Fig. 1 Configuration of the micromotor

电机采用三相星形全桥驱动方式,任一时刻的通电线圈是其中的两相,图 2 为产生轴向磁通及周向力的电机定转子极分布示意图,图中叉和点表示磁通来自转子永磁体的 2 种磁极。图 3 为其中单个载流线圈产生力的示意图,线圈中的环形箭头表示电流方向,由洛仑兹定律,产生在线圈左右两边的力为^[6]

$$F_L = F_R = N_c I_c I_m B_m (\theta, t) = N_c I_c I_m B_{m0} \cos(\omega t - p\theta) \quad (1)$$

式中: N_c 为线圈匝数; l_c 为等效导线长度; I_m 为电机电流; B_{m0} 为磁密幅值; ω 为旋转磁场的角速度; p 为极对数。整个线圈的受力为左右圈边受力之和,即

$$F_T = F_L + F_R \quad (2)$$

将式(1)代入式(2),得

$$F_T = 2N_c I_c I_m B_{m0} \cos(\omega t - p\theta) \cos(\alpha_c / 2) \quad (3)$$

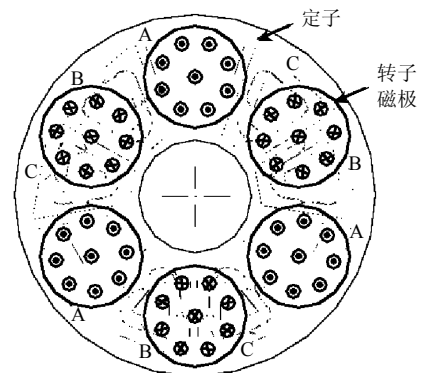


图 2 电机定转子极分布示意图

Fig. 2 Sketch map of rotor and stator

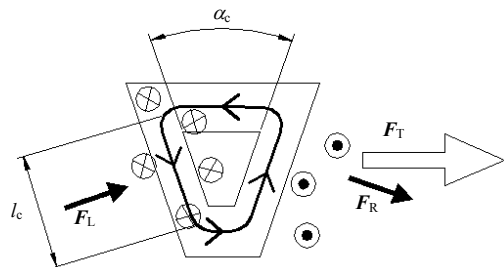


图 3 单个载流线圈中产生力的示意图

Fig. 3 Force generation of one coil

则转矩为

$$T = 2r_0 N_c I_m B_{m0} \cos(\omega t - p\theta) \cos(\alpha_c / 2) \quad (4)$$

式中: α_c 为线圈左右两边的夹角; r_0 为定子中心到线圈中心的距离。

1.2 有限元仿真数学模型

对定子载流线圈, 设 dv 是导线体积元, 处在磁密为 B 的地方, 其中电流密度为 J , 该体积元受到的电磁力^[4]为

$$d\mathbf{f} = (\mathbf{J} \times \mathbf{B}) dv \quad (5)$$

沿导线积分可得载流导线在磁场中的受力, 进而可求出电磁转矩。

电机加载恒定电流后, 产生恒定电磁场, 磁场是有旋无源场, 用麦克斯韦方程组中的式子表示为

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (6)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (7)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (8)$$

由矢量分析知, 无源场可表示为另一矢量场的旋度, 引入矢量位 \mathbf{A} , 则

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (9)$$

这里 \mathbf{A} 任选, 只要能满足麦氏方程即可, 假定 $\nabla \cdot \mathbf{A} = 0$, 将式(8)、(9)代入(6), 则 $\nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) = \mu \mathbf{J}$, 即

$$\nabla^2 \mathbf{A} = -\mu \mathbf{J} \quad (10)$$

求出 \mathbf{A} 的各个方向分量后便可求得 \mathbf{B} , 进而求出导线受力。

求解过程通过有限元软件 ANSYS 电磁模块执行。电机分层的平面式结构使它的受力计算不能使用简化的 2D 矢量势法或常规的 3D 标量势法, 只能采用基于单元边的矢量磁势法计算线圈所受的磁场力, 并需要编制特殊的宏命令对平面螺旋形线圈建模。在基于单元边的方法中, 电流源也要划分网格, 是模型整个网格的一部分, 因此可以计算洛伦兹力。该方法只能使用一种单元 SOLID117, 自由度是矢量势沿单元边的切向分量的积分^[7], 它的物理意义为: 将形成闭合回路的单元边上的自由度求和, 即可得到通过此闭合回路的磁通量。单元边法计算中, 磁力线垂直边界条件自然发生, 程序会自动满足, 只需说明磁力线平行边界条件, 即令边界上的边通量自由度为常数零。单元边法计算导体所受磁力即洛伦兹力采用数值积分式:

$$\mathbf{F} = \int N(\mathbf{J} \times \mathbf{B}) dv \quad (11)$$

式中: N 为形状函数矢量; dv 为导线体积元。

1.3 计算结果及分析

计算时对电机整个结构, 包括铁轭、永磁转子、

定子线圈、空气隙及包围它们的空气建模。因电机采用三相星形全桥驱动方式, 三相六状态运行, 定子线圈每时刻总是两相通电, 即任一时刻的通电线圈数为 6, 建立的通电线圈模型(双面线圈的一面)如图 4 所示。改变定子线圈的线宽和线间距(为方便计算, 建模时令线宽与间距相等), 因电机直径固定, 则线圈匝数相应改变, 计算所得转矩也随之变化(图 5), 计算中保持电流 0.1 A 不变。结果发现, 随着匝数的增加, 转矩基本为一上升直线, 但当匝数增加到 20 匝时, 转矩不再增加, 此时的线宽、间距为 50 μm 。这是因为, 随着匝数的增加, 因直径不变, 必然使线宽减小, 处于气隙磁密中参与洛伦兹力计算的导体单元总体呈增加趋势, 但不能无限增加, 即匝数增加和线宽减小两方面共同作用, 达到平衡状态时, 固定磁极下气隙磁场中的线圈分布达到饱和, 即得到受力最大的绕组线圈, 从而使转矩没有了增加的空间。因此, 在后面的建模中, 为获得最大转矩, 应保持线宽=间距=50 μm 的布线密度。

当电机外径减小时, 定子线圈匝数相应减小, 保持电流不变, 则电磁转矩也要减小, 如表 1 所示。由表可见, 当外径为 10 mm 时, 厚度为 4 mm, 转矩减小到 47 μNm , 转矩较小。又因 $D_0 / D_i = \sqrt{3}$, 取 $D_i = 4.5 \text{ mm}$, 而市场上可用的最小深沟球轴承 ISO681 外径为 3 mm, 从结构方面考虑已不能减小转子外径, 此外, 从转矩上考虑, 进一步减小尺寸, 转矩也非常小, 在精密机械范畴内已不实用。

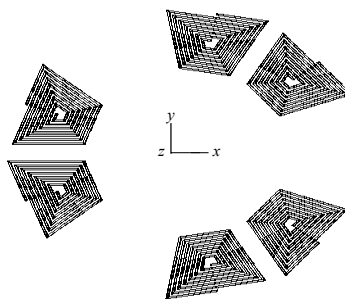


图4 载流线圈模型

Fig. 4 Model of current carrying coils

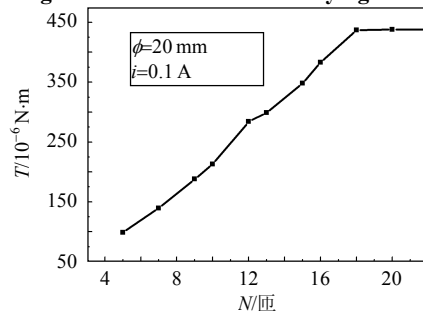


图5 转矩随线圈匝数变化关系

Fig. 5 Relationship between torque and winding number

表 1 转矩随直径的变化
Tab. 1 Evolution of torque vs.diameter

ϕ/mm	匝数	线宽/ μm	电流/A	转矩/ μNm
20	20	50	0.1	438
18	18	50	0.1	328
16	15	50	0.1	204
14	13	50	0.1	138
12	12	50	0.1	71
10	11	50	0.1	47

由式(5)可知,洛仑兹力不仅与电流密度有关,还与气隙磁感应强度有关,图 6 所示为磁环厚度不同时,平均半径处气隙磁密幅值随直径的变化曲线。由图可见,随着电机直径的减小,平均半径处的气隙磁密幅值逐渐减小,当直径减小到小于 10 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,且平均半径处的磁密波形变形严重^[8],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。

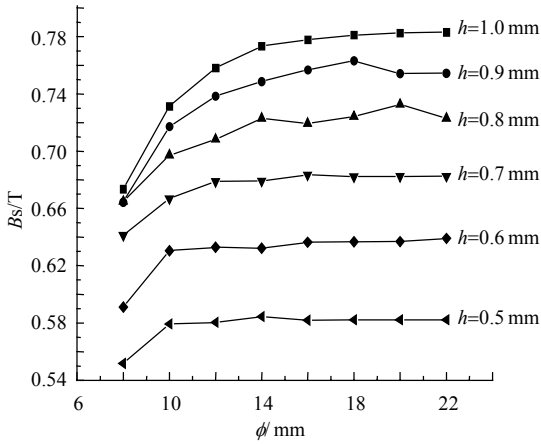


图 6 磁场随永磁体直径变化关系
Fig. 6 Relationship between field and diameter

为验证仿真计算的正确性,对图 7 所示直径 20 mm 电机建模计算。载流线圈模型中线宽 100 μm ,间距 150 μm ,匝数 7,赋予线圈 0.1 A 的电流,ANSYS 计算所得线圈力如表 2 所示。同样的方法,改变电

表 2 直径 20 mm 电机线圈产生的力
Tab. 2 Force generation of coils in motor ($\phi=20\text{ mm}$)

线圈号	洛仑兹力/N		周向力/N
	X 方向	Y 方向	
1	0.636767×10^{-3}	-0.109983×10^{-2}	0.125×10^{-2}
2	0.137546×10^{-2}	-0.600470×10^{-4}	0.135×10^{-2}
4	0.629957×10^{-3}	0.110087×10^{-2}	0.125×10^{-2}
5	-0.635931×10^{-3}	0.122106×10^{-2}	0.137×10^{-2}
7	-0.127042×10^{-2}	-0.577849×10^{-4}	0.124×10^{-2}
8	-0.736940×10^{-3}	-0.116376×10^{-2}	0.136×10^{-2}
合力/N	—	—	0.782×10^{-2}
转矩/ $10^{-6}\text{ N}\cdot\text{m}$	—	—	120

流大小,可得到一系列转矩值。此外,对图 7 所示电机通以不同电流,将测得转矩与仿真计算值比较(图 8),发现二者基本相等,说明仿真计算可以指导实际设计。误差主要来源于计算误差、建模误差和测量误差。

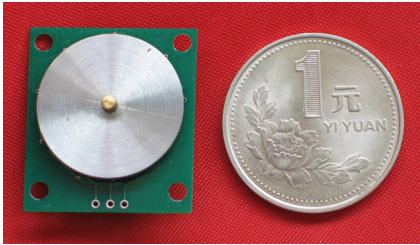


图 7 直径 20 mm 轴向磁化永磁微电机
Fig. 7 Axial-magnetized permanent magnet motor

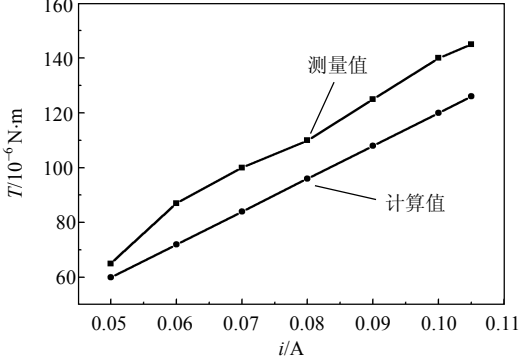


图 8 转矩随电流变化曲线
Fig. 8 Curves of torque versus current

2 微电机定转子制作

2.1 永磁转子制作

制作常规电机永磁转子的方法是,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^[9-10]。在微电机微型化过程中仍然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^[11],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。轴向磁化永磁微电机转子内外径确定后,采用一体化多极磁化方法,充磁夹具接专用充磁电源在一定电压下即可使转子永磁体充磁达饱和,充磁后得到的是 N、S 极交替排列的钕铁硼薄圆环(图 9)。

2.2 定子线圈制作

该类型微电机尺寸较小,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

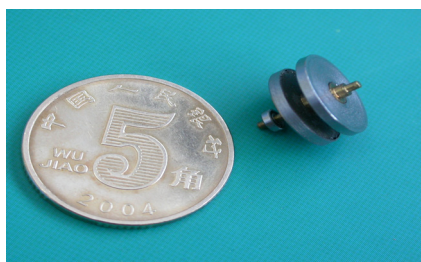


图9 充磁后的直径10 mm微电机转子

Fig. 9 Magnetized rotor of 10 mm motor in diameter

较大的输出转矩, 需要定子线圈能通过较大的电流, 此外还需线圈有较小的电阻, 这就需要在有限大尺寸的定子上制作高深宽比结构的绕组线圈。

制作高深宽比微结构的工艺有很多种, 有基于准 LIGA 工艺、聚合物或 SU-8 的工艺等^[12-15], 但是这些工艺比较复杂、成本高且成品率低。通过对多种工艺的借鉴吸收, 本文对传统平面线圈的制作工艺进行了改进, 研究了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^[16], 综合比较各方面因素, 从中找出了适合该类型电机的高深宽比平面线圈制作工艺。

发现深刻蚀成型电铸工艺是制作高深宽比且无空洞的平面线圈比较有效、成品率高、可重复性最好的工艺。采用该工艺制成的平面线圈如图 10 所示(基片为 3 寸硅片, 每个定子线圈直径为 10 mm)。微电铸后的线圈无空洞、无断线、无翻边短路, 有较大的深宽比(图 11), 分割后测得每个定

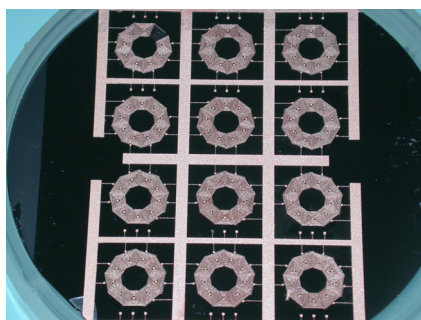


图10 微电铸后的平面线圈

Fig. 10 Micro-electroformed planar coils

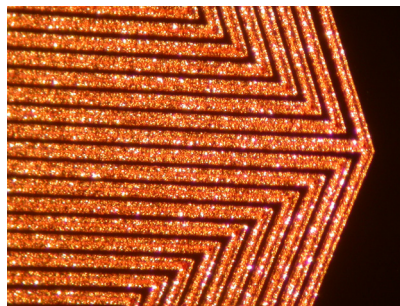


图11 微电铸后的局部平面线圈

Fig. 11 Partial view of electroformed planar coil

子线圈电阻为 $2\ \Omega$ 左右。与转子装配后对微电机进行测试(图 12), 发现电机转矩波动小, 运转平稳。

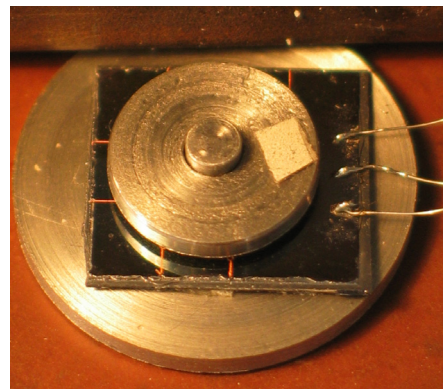


图12 组装后的直径10 mm微电机

Fig. 12 Final 10 mm motor in diameter

3 结论与讨论

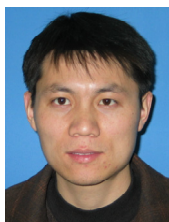
本文通过有限元数值仿真分析, 分别计算了同一直径电机匝数变化对应的转矩值和电机直径变化对应的转矩值, 得出了定子线圈的最佳布线密度及精密机械范畴内电机所能达到的最小直径, 即定子线圈最有效的布线密度为线宽、间距均为 $50\ \mu\text{m}$; 电机的最小尺寸由以下几个方面限制: ①从结构方面考虑, 为减小轴向尺寸, 轴承和磁环同轴且一端共面, 结构限制了转子直径的进一步减小; ②从转矩上考虑, 减小直径, 转矩也相应减小, 当直径减小到一定程度时, 转矩很小, 在精密机械范畴内已没有实用意义; ③从永磁转子产生的气隙磁场方面考虑, 随着电机直径的减小, 平均半径处的气隙磁密幅值逐渐减小, 当直径减小到小于 10 mm 时, 内外径处边缘效应的综合影响使气隙磁密幅值显著降低, 且磁密波形变形严重, 最终导致电机产生的合成电磁转矩纹波较大。以上因素共同限制了电机的最小尺寸, 即精密机械意义上的最小电机直径为 10 mm, 厚为 4 mm, 通以 0.1 A 的电流时能获得 $47 \times 10^{-6}\ \text{N}\cdot\text{m}$ 的转矩。

有限元法由于具体地计算了导线所处位置的磁密值及导线的受力, 使得电机的转矩计算比较准确, 通过修改命令流可以方便地计算电机不同尺寸参数对应的转矩值。为进一步减小计算误差及完善仿真计算, 需要更深入的研究工作, 如对不同直径、不同磁环厚度、不同定子极数以及定子线宽与线间距不同时的各类搭配方案的电机进行建模计算, 并辅以实验验证, 优化建模计算方法, 以指导该类电机微型化过程中的实际设计。

另外, 针对平面线圈制作工艺, 进一步的工作是深入研究光刻、微电铸和深刻蚀工艺, 制作更高深宽比的线圈结构。成熟的定子线圈制作工艺可应用在大规模数据存储系统、微泵及微阀等 MEMS 器件中所使用的高深宽比平面线圈的制作中。

参考文献

- [1] Töpfer J, Pawlowski B. Multi-pole magnetization of NdFeB magnets for magnetic micro-actuators and its characterization with a magnetic field mapping device[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2004, 270(1): 124-129.
- [2] Hameyer K, Nienhaus M. Electromagnetic actuators—current developments and examples[J]. *Actuator*, 1999.
- [3] 郭占社, 吴一辉, 宣明, 等. 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 Zhanshe, Wu Yihui, Xuan Ming, et al. Electromagnetic planar micromotor and its Fabrication[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11(2): 120-124(in Chinese).
- [4] 章名涛, 肖如鸿. 电机的电磁场[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- [5] 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.
- [6] 赵凯华, 陈熙谋. 电磁学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1985.
- [7] 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.
- [8] 杨杰伟, 吴一辉, 贾宏光. 轴向磁化永磁微电机磁场分析及设计方法研究[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(1): 83-88.
Yang Jiewei, Wu Yihui, Jia Hongguang. Design method and magnetic field analysis of axial-magnetized permanent magnet micromotor [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14(1): 83-88(in Chinese).
- [9] Metin Aydin. Axial flux surface mounted permanent magnet disc motors for traction drive applications[D]. Madison, WI: University of Wisconsin, Madison, 2002.
- [10] 周寿增, 董清飞. 超强永磁体[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1999.
- [11] Töpfer J, Christoph V. Multi-pole magnetization of NdFeB sintered magnets and thick films for magnetic micro-actuators[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2004, 113(2): 257-263.
- [12] Watanabe Y, Edo M, Nakazawa H, et al. A new fabrication process of a planar coil using photosensitive polyimide and electroplating[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1996, 54(1-3): 733-738.
- [13] Laermer F, Urban A. Challenges, developments and applications of silicon deep reactive ion etching[J]. *Microelectronic Engineering*, 2003, 67-68(1): 349-355.
- [14] Marty F, Rousseau L, Saadany B, et al. Advanced etching of silicon based on deep reactive ion etching for silicon high aspect ratio microstructures and three-dimensional micro- and nanostructures [J]. *Microelectronics Journal*, 2005, 36(7): 673-677.
- [15] Kejik P, Chiesi L, Janossy B, et al. A new compact 2D planar fluxgate sensor with amorphous metal core[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2000, 81(1): 180-183.
- [16] 杨杰伟, 吴一辉, 王淑荣, 等. 平面微电机定子线圈制作工艺研究[J]. *微细加工技术*, 2006, 89(3): 27-32.
Yang Jiewei, Wu Yihui, Wang Shurong, et al. Study on fabrication process of a planar stator coil[J]. *Microfabrication Technology*, 2006, 89(3): 27-32(in Chinese).



杨杰伟

收稿日期: 2007-12-18。

作者简介:

杨杰伟(1977—), 男, 讲师, 博士, 研究方向为集成微光机电系统和机电一体化, young-me@163.com。

(编辑 刘浩芳)