

# 提高盘式微电机电磁转矩的分析测试与改进设计

刘波, 刘慧

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林省 长春市 130033)

## Analysis and Testing and Improved Design for Enhancing the Electromagnetic Torque of Disc-type Micromotor

LIU Bo, LIU Hui

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,  
Changchun 130033, Jilin Province, China)

**ABSTRACT:** To improve the electromagnetic torque of disc-type micromotor, the effects of torque characteristics, magnetic field distribution, and thermal convection on air-gap flux density and armature current intensity were investigated. According to the Ampere's law, the electromagnetic torque formula for the plane electronic winding in the axial flux of magnetic field was derived. Three-dimensional (3D) numerical calculation and actual measurement were carried out on the air-gap magnetic field produced by the permanent magnets, and the most important factor for increasing the magnetic flux density was found out. According to the air convection heat transfer mechanism based on thermal-fluid coupling, the temperature field distribution law was analyzed and measured, and an active cooling structure being conducive to convection was proposed. The study results show that the air-gap thickness has a significant effect on magnetic flux density, the torque constant increases 22.6% when the air-gap thickness decreases from 1.5mm to 1.0mm, while the magnet thickness has a saturation characteristic. Establishing the convection channel helps dissipation of Joule heat, and increases the current intensity by 52%. The designed micromotor owns good performance and high practical value. The proposed calculating and analyzing method has a high precision and the potential for popularization.

**KEY WORDS:** disc-type micromotor; electromagnetic torque; 3D magnetic field; thermal-fluid coupling; convection cooling

基金项目: 吉林省与中国科学院科技合作高技术产业化专项资金(2013SYHZ0005); 中国科学院国防科技创新重点部署项目(Y45137F140)。

Project Supported by Special Funds for Science and Technology Cooperation in High Technology Industrialization Between Jilin Province and Chinese Academy of Sciences(2013SYHZ0005); Project Supported by the Key Development Foundation of Chinese Academy of Sciences for National Defense Science and Technology Innovation(Y45137F140).

**摘要:** 为了提高盘式微电机的电磁转矩, 针对气隙磁通密度和电枢电流强度两个方面, 对转矩特性、磁场分布和对流散热等影响因素进行研究。根据安培力的产生原理, 推导了平面定子绕组在轴向磁场中的电磁转矩公式; 对永磁体产生的气隙磁场进行了三维数值计算和实际测量, 给出提高工作磁通密度的重要因素; 根据基于热-流耦合的空气对流散热机理, 分析并实测了温度场分布规律, 提出利于对流的主动散热结构。研究表明: 气隙厚度对磁通密度影响显著, 由 1.5 mm 减小到 1.0 mm, 转矩常数增加 22.6%; 而磁体厚度的增加具有饱和特性。对流通道的建立大大加强了发热的耗散, 改进后电流强度可提高 52%。所设计的微电机性能良好, 具有较高的实用价值, 对其研究的计算分析方法精度较高, 具有推广的潜力。

**关键词:** 盘式微电机; 电磁转矩; 三维磁场; 热-流耦合; 对流散热

## 0 引言

盘式(亦称片状、平面型)永磁微电机具有轴向尺寸小、输出力矩大、换相性能好和响应速度快等优点, 在航空航天、国防军工、生物医疗和现代通讯等高端领域具有广阔的应用前景, 特别适合于有空间限制的薄型和表面安装场合<sup>[1]</sup>。

自 20 世纪末以来, 对于电磁型微电机的小型化和实用化技术研究在我国各大研究机构中得到不断发展。基于微机电系统(micro electro mechanical system, MEMS)制造技术, 以上海交通大学为代表对直径为 1~2 mm 的微型电机进行了研制<sup>[2-6]</sup>, 该校于 1995 年成功制造出我国首台直径为 2 mm 的电磁型微电机, 填补了国内空白。但是, 该类电机所用轴承为滑动接触, 摩擦阻力和磨损限制了运转性能和运行寿命, 并且单转子驱动力矩显得过于微小, 狭小气隙空间的工作磁场和转矩也无

法测量, 这些问题都影响了其实际应用<sup>[3,6]</sup>。为推动微电机的实用化进程, 中国科学院长春光机所研制的盘式微电机尺度定位在 1~2 mm 直径上<sup>[7-9]</sup>, 该类电机可视为宏观电机的微型化, 结合了微细加工与精密机械技术, 其特点之一是定子绕组利用电镀生成于采用深刻蚀或复制技术制作的基底沟槽内<sup>[10]</sup>, 大深宽比使导体截面增加、电阻减小从而提高电流强度。另一方面双转子结构不仅使永磁工作磁通密度成倍增加, 而且磁路更加封闭从而减少漏磁、提高效率。这两方面技术的实施使微电机电磁力矩得到提高, 滚动轴承的采用更是避开了滑动摩擦的弊端。虽然初步解决了实用化问题, 但在提高微电机力矩性能方面所做的工作还不够充分。

根据电机中电磁力的产生原理, 提高驱动力矩的本质在于增大其电磁容量。其中, 增强磁场以提高转矩性能的研究一直是电机领域的热点课题。早期人们利用磁荷积分法<sup>[3,7]</sup>计算永磁磁场分布和电磁力矩, 该原理基于等效假设的方法, 必然存在计算精度低的缺点; 磁路分析法<sup>[11]</sup>清晰简洁、概念明确, 但误差较大, 仅能用于初步估算; 二维有限元法<sup>[12-13]</sup>和二维解析法<sup>[14-15]</sup>仍是简化的近似方法, 考虑不到三维磁场分布的边缘效应。随着数值仿真和计算机技术的发展, 近年来不断出现利用有限元进行三维空间磁场计算的报道<sup>[16-17]</sup>, 该方法被认为是目前最为精确有效的计算手段, 且被作为检验简化计算结果的理论标准<sup>[11-15]</sup>。另一方面, 电机的热特性限制了电流承载能力的提高, 包括发热、耐热和散热 3 个方面。文献[18]说明了高速永磁电机电磁损耗包括铜损、铁损和风摩擦损耗, 文献[19]为抑制损耗, 采取了改变结构、优化参数和更换材料等措施; 文献[4]从降低铜耗发热和提高材料耐热两个方面对微电机进行了改进; 对于电机风冷散热的研究已经应用了基于计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)的三维温度场数值计算方法<sup>[20-24]</sup>, 宏观电机的冷却方式大多采用外加风扇强制通风<sup>[23-24]</sup>, 但微电机却无法附加该类装置。

本文在充分总结前人研究的基础上, 并借鉴宏观电机的研究方法, 利用目前最为高效可靠的三维有限元方法对微电机永磁磁场和热-流耦合场进行精确计算, 对气隙磁场和电机温度的测量结果验证了分析方法的有效性, 通过综合对比得出影响磁场增强和促进风冷的重要因素, 根据这些结果对电机参数和结构进行改进, 从而使其驱动性能得到大幅提升。

## 1 盘式微电机的设计

### 1.1 电机结构与磁路

电机主体结构如图 1 所示, 直径为 20 mm, 总厚度为 5 mm。上下相对布置的转子采用具有高磁能密度的钕铁硼永磁材料作为磁极, 轴向充磁的 N、S 极交替扇形磁体贴合于磁轭表面。超薄型电机定子具有双面线圈结构, 属于非重叠式集中绕组, 该结构形式适合于采用 MEMS 技术加工制作<sup>[10]</sup>。

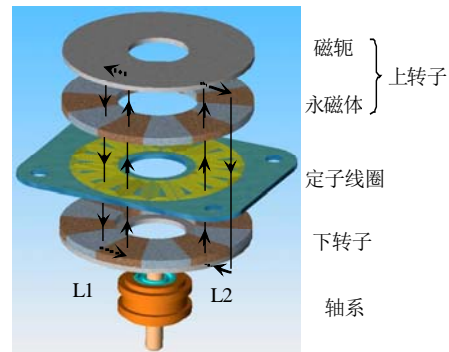


图 1 盘式微电机结构与主磁路示意图

Fig. 1 Sketches for structure and main magnetic path of disc-type micromotor

不同于传统的圆柱式径向磁通电机, 盘式电机定子和转子呈扁平结构, 气隙磁通沿轴向穿过, 而载流导体近似于径向分布。无铁心的盘式电机气隙磁场呈开域式的三维分布, 按照磁通流动方向永磁体产生的主磁路可分为两类: L1 沿周向流通, 穿过上下转子的各两片磁极形成闭合, L2 沿径向经过转子边沿穿过上下各一片磁极。可以预见, 工作气隙磁场分布复杂, 不同半径处的磁路长度也不相同。

### 1.2 电磁转矩的推导

在计算或测量出气隙中的磁感应强度(磁通密度) $\mathbf{B}(r, \theta)$ 的分布后, 可用载流导体在磁场中所受的安培力来计算电磁转矩, 以一匝线圈为例进行推导, 其他绕组相同。

以电机轴心为原点, 建立极坐标系  $C(r, \theta)$ , 如图 2(a)所示。设线圈上的任意点  $K(r_1, \theta_1)$  的磁感应强度矢量为  $\mathbf{B}(r_1, \theta_1)$ , 截取该点的微电流元矢量  $I \cdot d\mathbf{l}$ , 则其所受安培力为

$$d\mathbf{F} = I \cdot d\mathbf{l} \times \mathbf{B} \quad (1)$$

设  $\mathbf{B}$  的有效分量为轴向磁感应强度  $B$ ,  $d\mathbf{l}$  在平面线圈上为标量  $dl$ ,  $d\mathbf{F}$  的有效分量为面内力  $dF$ 。

线圈上的周向导体的受力沿径向, 不产生力矩。对于近似沿半径方向的导体, 按电流方向可分为两组, 在图 2(a)中, 设  $K(r_1, \theta_1)$  点所在处的导体所受电磁转矩为正, 则  $J(r_2, \theta_2)$  点导体电流方向相反, 但轴

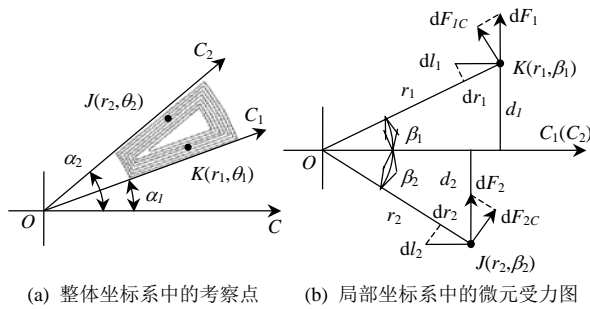


图 2 线圈中考察点的坐标

Fig. 2 Coordinates of the investigated point of the winding  
向磁通密度  $B(r_2, \theta_2)$  方向也相反, 电磁力矩为正。根据平面线圈的排布特点, 为该匝线圈的左、右导体建立局部坐标  $C_1(r_1, \beta_1)$  和  $C_2(r_2, \beta_2)$ , 如图 2(b) 所示, 把总坐标  $C$  分别旋转一个角度  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$ , 使导体分别与极轴  $C_1(C_2)$  平行。

对于  $K(r_1, \beta_1)$  点的导体微元  $dl_1$ , 所受的安培力在切向的投影为

$$dF_{lc} = dF_1 \cdot \cos(\beta_1) = I \cdot B \cdot dl_1 \cdot \cos(\beta_1) \quad (2)$$

该力元产生的微转矩为

$$dT_1 = dF_{lc} \cdot r_1 = I \cdot B(r_1, \theta_1) \cdot r_1 \cdot dr_1 \quad (3)$$

由几何关系得极角  $\beta_1 = \arcsin(d_1/r_1)$ , 其中  $d_1$  为考察点到极轴的距离; 又根据  $C_1(C_2)$  相对于  $C$  坐标的转角关系有  $\theta_1 = \alpha_1 + \beta_1$  ( $\theta_2 = \alpha_2 + \beta_2$ ), 代入式(3), 得  $K$  点对总转矩的贡献为

$$dT_1 = I \cdot B[r_1, \alpha_1 + \arcsin(d_1 / r_1)] \cdot r_1 \cdot dr_1 \quad (4)$$

同理可得  $J$  点转矩微元为

$$dT_2 = I \cdot B[r_2, \alpha_2 - \arcsin(d_2 / r_2)] \cdot r_2 \cdot dr_2 \quad (5)$$

对式(4)和式(5)沿各导体半径积分并求和, 推得该组线圈的电磁转矩如公式(6)所示。

可以看出, 电磁转矩分别与转子磁通密度  $B(r, \theta)$  和定子电流强度  $I$  成正比, 所以本文将从这两方面着手找出提高电磁转矩的方法。

$$T = \sum_{i=1}^n \left[ \int_{R_{in1i}}^{R_{ou1i}} dT_1 + \int_{R_{in2i}}^{R_{ou2i}} dT_2 \right] = \sum_{i=1}^n \left\{ \int_{R_{in1i}}^{R_{ou1i}} IB[r_1, \alpha_1 + \arcsin(d_{1i} / r_1)] r_1 dr_1 + \int_{R_{in2i}}^{R_{ou2i}} IB[r_2, \alpha_2 - \arcsin(d_{2i} / r_2)] r_2 dr_2 \right\} = I \sum_{i=1}^n \left\{ \int_{R_{in1i}}^{R_{ou1i}} B[r_1, \alpha_1 + \arcsin(d_{1i} / r_1)] r_1 dr_1 + \int_{R_{in2i}}^{R_{ou2i}} B[r_2, \alpha_2 - \arcsin(d_{2i} / r_2)] r_2 dr_2 \right\} \quad (6)$$

式中:  $n$  为一匝线圈的环数;  $R_{in1i}$ 、 $R_{in2i}$ 、 $R_{ou1i}$  和  $R_{ou2i}$  分别为每环左、右导体端点的内、外半径。

## 2 三维磁场分析与测量

### 2.1 分析测量方法

利用 ANSYS 软件的电磁分析模块, 建立全电机磁轭、磁体及气隙的三维有限元模型, 对空载磁场进行计算, 得出电机中的磁通密度分布特性, 进而考察磁体厚度  $\delta$ 、气隙高度  $h$  和磁极间隔率  $\xi$  等参数对气隙磁通密度  $B$  的影响。电机转子采用的钕铁硼永磁体沿轴向均匀充磁, 材料属性如表 1 所示。

表 1 永磁体材料属性

Tab. 1 Properties of permanent magnet material

剩磁/T	矫顽力/(kA/m)	最大磁能积/(kJ/m <sup>3</sup> )	密度/(g/cm <sup>3</sup> )
1.12	825	255	7.45

为验证仿真计算结果, 建立电机磁感应强度测量装置, 如图 3 所示。

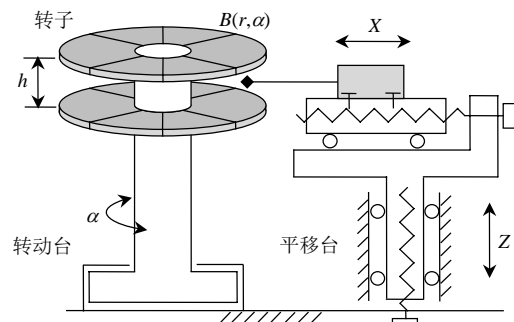


图 3 气隙磁通测量装置原理图

Fig. 3 Schematic diagram of equipment measuring air-gap flux

磁强计(PFX-035 型)置于可沿  $X$ - $Z$  双轴移动的精密切平台, 电机转子安装于可绕竖轴转动具有角度测量的转台上。调整好平台竖向位置  $Z$  并固定, 使磁强计探针对准转子工作气隙, 通过移动平台的  $X$  轴和转动转台的角度  $\alpha$ , 改变探针相对于电机转子的位置, 测量设定位置的气隙磁通密度  $B(r, \alpha)$  的分布。

### 2.2 磁通密度矢量分布特性

根据微电机原始设计参数, 初步设定磁体厚度  $\delta=0.95$  mm, 气隙高度  $h=1.5$  mm, 计算得出电机磁场三维分布特性, 结果如图 4 所示。

图 4 左为过电机转轴剖面上的磁通密度矢量分布, 包括磁体、气隙和磁轭, 可以看出, 工作气隙中的主磁场具有较好的轴向取向, 并且具有较高的磁通密度, 这是双转子励磁所特有的优势。

图 4 右是一片转子相邻两块磁极 N-S 间的侧面漏磁矢量, 可见漏磁通密度较大。为抑制漏磁从而提高永磁体利用效率, 可采用增大相邻磁极间隙的办法, 分析表明间隙越大则磁阻越大, 漏磁系数越

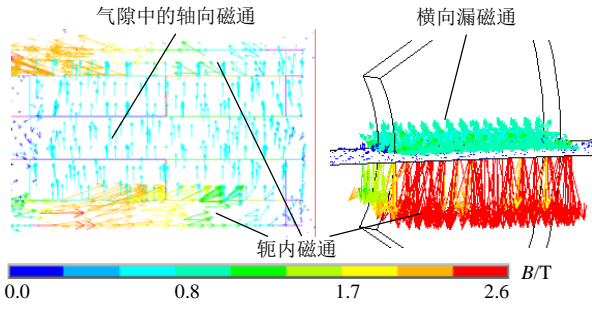


图4 主磁场和极间漏磁通的磁通密度矢量图

Fig. 4 Vector diagrams of magnetic flux intensity for main field and leakage flux between the adjacent poles

小,如图5所示,其中 $\sigma$ 为漏磁系数, $\xi$ 为磁极间隔率(空隙所占比例)。

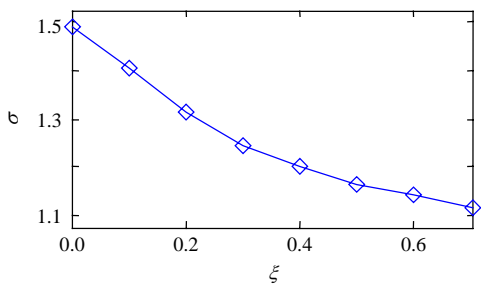


图5 漏磁系数与间隔率关系

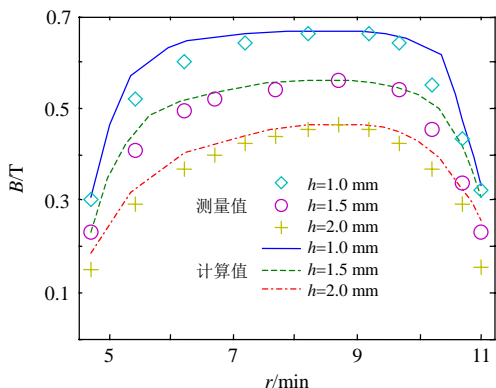
Fig. 5 Relationship between coefficient of flux leakage and varying interval rate

但根据电机学原理可知,永磁体扇面越大则励磁磁场越强,所以在以提高转矩为研究目标,考察其他参数对电机性能的影响时,本文计算与测试模型仅考虑无间隙满磁情况,取参数 $\xi=0$ 。

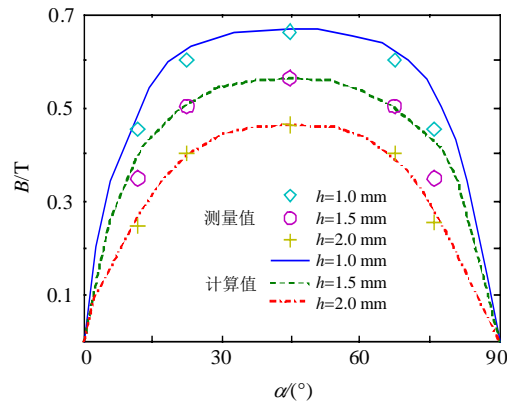
### 2.3 气隙厚度对主磁场分布的影响

保持磁体厚度 $\delta=0.95\text{ mm}$ 不变,改变上下磁极间工作气隙高度 $h$ 的大小,分别取为1.0、1.5和2.0 mm,计算并测量出气隙磁通密度 $B$ 分别随半径 $r$ 和磁极电角度 $\alpha$ 的变化,结果如图6所示,可见计算与测量取得了较好的一致。

在图6(a)中的径向分布曲线体现出一定的斜顶方波特征,且气隙越小特征越明显;而图6(b)的周向分布曲线更趋近于正弦波。两方向分布差异的主



(a) 随半径的变化( $\alpha=90^\circ$ )



(b) 随电角度的变化( $r=8.5\text{ mm}$ )

图6 不同气隙厚度下的磁通密度

Fig. 6 Magnetic flux densities with different air-gap thicknesses

要原因在于极间侧向漏磁的影响,削弱了在周向的高次分量。但随着工作气隙的减小,两方向曲线侧边都变得陡峭,说明小气隙的磁通更容易穿过气隙进入对面的磁极,从而减小漏磁。

由分析结果明显可见,工作气隙各处磁通密度 $B$ 随气隙高度 $h$ 的减小而变大。其基本原理是工作气隙路径变短,磁阻变小,磁场强度减小,从而使永磁体工作点提高,增大磁通密度。所以在工艺等条件允许范围内应尽可能减小气隙高度,从而增大电机转矩。

### 2.4 磁体厚度对主磁场的影响

保持工作气隙厚度 $h=1.5\text{ mm}$ 不变,改变磁体厚度,分析得出磁通密度 $B$ 随磁极厚度 $\delta$ 的变化,如图7所示。其总体趋势是磁通密度随磁极厚度的增加而增大,但在磁体超过气隙厚度以后,磁密增加已不明显,逐渐出现饱和现象。

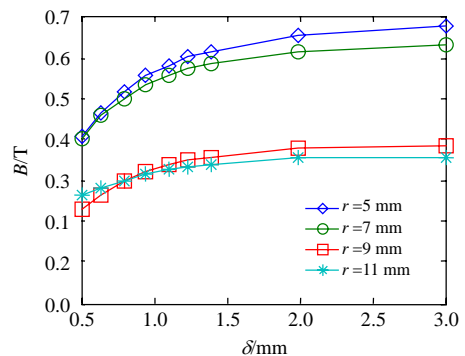


图7 磁通密度随磁体厚度的变化( $\alpha=90^\circ$ )

Fig. 7 Changes of magnetic flux density with magnet thickness ( $\alpha=90^\circ$ )

## 3 热-流场分析

### 3.1 分析模型与求解条件

由公式(6)可见,电磁转矩还与定子绕组的电流



强度成正比关系，无冷却措施地提高电流来增加转矩会使电阻发热严重、电机温度过高，从而带来磁体退磁、线圈烧毁等危害，因此提高电流增加转矩的同时需要采取冷却措施。而传统宏观电机所用的水冷系统或强冷风扇的增加都会使结构复杂、体积增大，从而限制微电机的应用范围。为探索电机温度场分布和散热流质流动的规律，首先对其进行传热分析，进而找出针对微电机的简单有效散热方法。

利用 ANSYS 软件的计算流体力学(CFD)模块，建立电机各器件固体和内外空气流体的有限元模型。为提高仿真精度，将电机与周围空气流质共同列入求解模型，进行整体流-固-热耦合分析。

设定求解条件如下：

- 1) 对绕组施加不同的电流强度值  $I$ ，换算成生热率作为定子线圈的体热载荷；
  - 2) 对转子设定旋转边界条件，转速范围为 100~10000 r/min；
  - 3) 远场空气边界条件设为静止且压强恒定，环境大气温度设为 20℃；
  - 4) 考虑重力因素，体现自然对流效应；
  - 5) 稳态求解，假设电机运行处于平衡状态；
  - 6) 电机高速运转时，采用紊流算法。
- 为进行对比，初步考虑两种分析模型：
- 1) 有封装机壳的封闭模型；
  - 2) 无机壳的全开放模型。

### 3.2 结果对比

计算结果如图 8 所示，列举在 8000 r/min 转速时两种模型的温度分布和内、外流场流线图，可见，最高温度均发生在定子上(下文电机温度即指该处)。

对于图 8(a)的封闭模型，由于机壳的密封作用，转子对外界气流不起作用，内部热量只能通过传导的方式传给机壳，再由自然对流传播到大气中，电机温升高，散热效果差。

图 8(b)的开放模型流场图与封闭模型的结果截然不同，电机表面的空气被迫跟随转子作旋转运动，又在离心力的作用下沿径向流出，其流速远高于空气自然对流时的速度，从而电机热量被受迫流动的空气迅速带走，达到了冷却的效果，即电机转子起到了离心式风扇的作用。

图 9 是在不同电流强度时的电机温升-转速关系曲线。由于风摩损耗的存在，封闭模型的温升随转速略有升高；而在开放模型中，随转速的增大电机温升明显变小，转速越高对流效果越强，从而实现自励冷却。

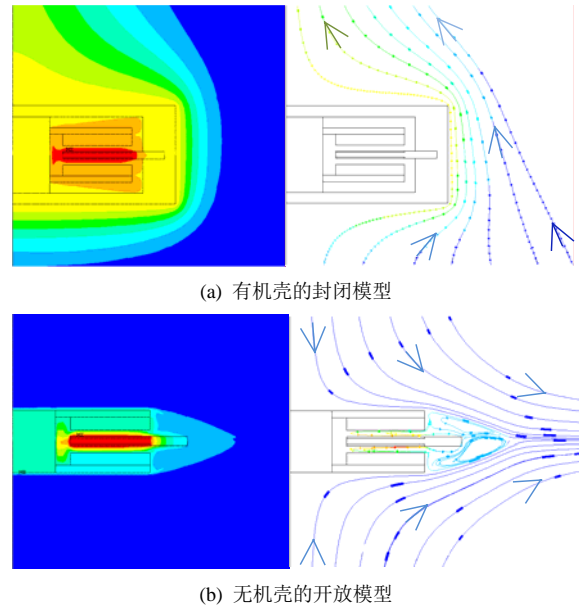


图 8 封闭与开放模型温度分布与空气流线图对比 (n=8 000 r/min)

Fig. 8 Comparisons of temperature distribution and streamline of airflow for closed and open models (n=8 000 r/min)

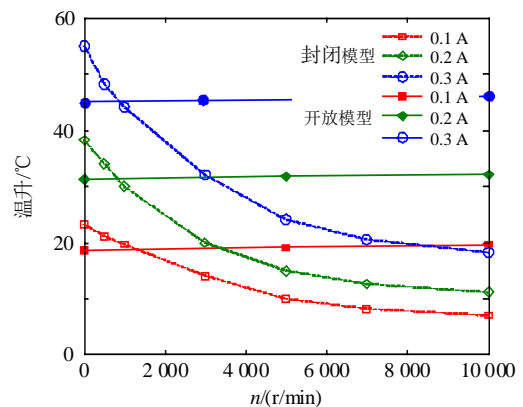


图 9 电机温升-转速关系曲线

Fig. 9 Relationship between temperature rise and rotate speed of the micromotor

## 4 改进设计与实验

### 4.1 电磁转矩测试

根据前述空载磁场的分析与测试结果，保持磁体厚度  $\delta=0.95$  mm 不变，可使永磁体具有较高的利用效率；通过缩短转子支撑轴以减小气隙厚度  $h$ ，从而增大磁通密度，根据精密加工装调水平，由 1.5 mm 减小到 1.0 mm。对改进前、后转矩-电流关系进行测试，图 10 是所制作的电机分解照片。

根据电能与机械能转换守恒原理，通过监测绕组的反电动势  $E$ 、电流强度  $I$  和转速  $n$ ，可由式(7)反求出电机力矩  $T$ ，其中， $U_T$  为功率管压降和， $R$  为定子线圈电阻。



图10 测试电机

Fig. 10 Motor for testing

$$T = \frac{30 UI - U_T I - RI^2}{\pi n} \quad (7)$$

为对比改进前、后的电机驱动能力，并验证分析与计算结果，利用已推得的公式(6)，得出图 11 所示的转矩-电流关系曲线。由图可见，实测值与理论值取得了较好的一致。当气隙厚度由 1.5 mm 减小到 1.0 mm，转矩常数从  $3.1 \times 10^{-3}$  N·m/A 增大到  $3.8 \times 10^{-3}$  N·m/A，提高幅度达到 22.6%。

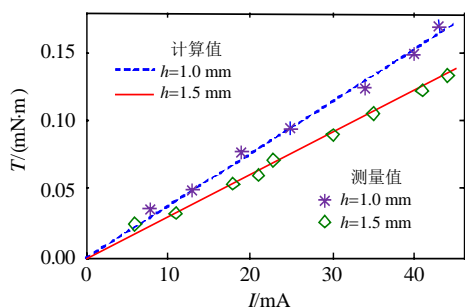


图11 电磁转矩的计算与测试

Fig. 11 Experimented and calculated results of torque

4.2 自冷通道的建立与实验验证

根据前述热-流场分析结果，虽然开放式电机能够因转子的旋转实现自通风冷却，但无外壳的结构可行性较差，如轴系的安装、电机本身的固定等因素都要求其装配机壳。

为实现有机壳自冷散热，考虑在电机的适当位置开设通风孔，根据图 8(b)的流线轨迹，在机壳上下端面转轴周边开设入风口、在机壳侧面开设出风口，见图 10。开孔模型计算的温度与空气流线分布规律如图 12 所示，求解条件与 3.1 节相同，同样利

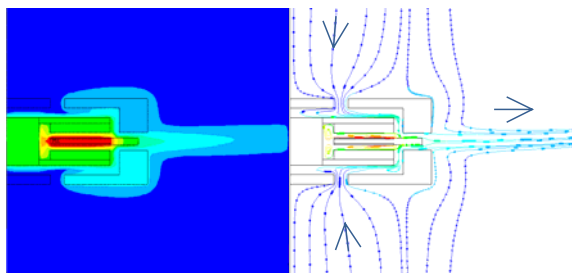


图12 通风孔式微电机温度分布与空气流线图

Fig. 12 Temperature distribution and airflow pattern for model with vents ( $n=8\ 000$  r/min)

用转子本身的旋转运动把空气散热介质吸入，形成强迫对流来对电机内部进行冷却。

为验证分析方法和实际冷却效果，利用温度传感器监测电机温度，图 13 为测试电机定子照片。利用半导体热敏电阻，将其微型探头埋置入定子基底中，与定子基底黏结封装在一起，可使测量结果较为准确，真实地反映电机温度。

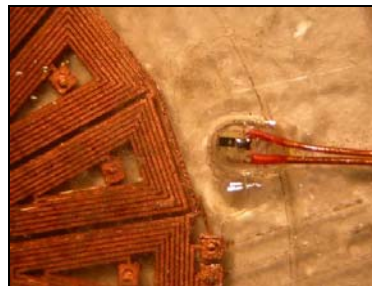


图13 定子基底上的温度传感器

Fig. 13 Temperature sensor on the base of stator

图 14 是建立风冷通道后分析与测试的电机温升-转速关系曲线，同开放式分析模型具有相同的趋势，温升随转速的升高而减小，迫使气体流入流出的动力仍然是转子旋转产生的离心力。可见，开孔式平面微电机能够实现自通风冷却，从限制温升的角度使电机性能得到提高。

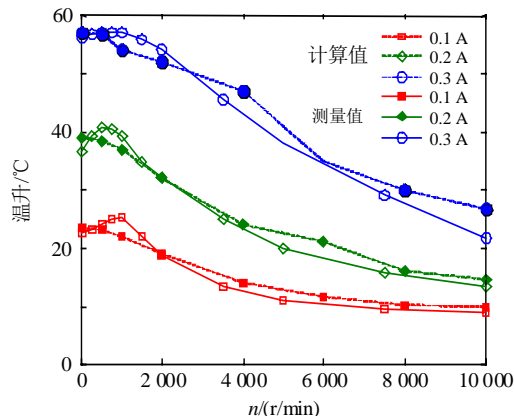


图14 带自冷通道电机的温升曲线

Fig. 14 Temperature rise curve of micromotor with self-cooling channels

良好的冷却对电机驱动能力的提高具有重要意义，在温升能够得到限制的情况下就可增大驱动电流，从而提高带载能力。在相同温升条件下，改进后电机电流强度提高幅度如表 2 所示，在  $n=$

表2 电流强度增幅

Tab. 2 Increase of current intensity %

温升/°C	转速/(r/min)		
	4 000	6 000	8 000
20	31	45	52
30	17	27	40
40	4	16	—

8000r/min 时可达到 52%。

## 5 结论

为了提高盘式微电机的电磁转矩性能, 本文从磁场与电流两个方面进行综合分析测试。给出了磁体厚度、漏磁分布和气隙厚度等因素对气隙磁通密度的影响趋势, 通过分析离心式强迫对流机理找出在不附加散热装置条件下的自冷却方法, 根据分析、测试结果对电机进行相应的改进设计。研究结果表明:

1) 利用三维有限元的永磁磁场计算、基于计算流体力学(CFD) 的流-固-热耦合分析, 与测量、测试结果取得了较好的吻合, 研究方法正确, 具有一定先进性。

2) 气隙厚度对磁通密度影响显著, 从 1.5 mm 减小到 1.0 mm, 转矩常数增加 22.6%; 而磁体厚度的增加对气隙磁通具有饱和作用, 转子磁体厚度在与气隙厚度相近时气隙磁密不再增加。

3) 对流通道的建立大大加强了电机发热的耗散, 在相同温升条件下, 改进电机散热结构后电流强度可提高 52%。

4) 所设计的微电机性能良好, 具有一定的实用价值, 尤其适合于高速应用场合。

盘式微电机气隙厚度的减薄程度依赖于轴系的精密加工和装调技术水平, 对回转精度提高的研究将具有重要意义; 基于 MEMS 工艺的定子制作技术的提升方向是减薄定子绕组基底的厚度, 同时磁体厚度跟随减薄, 轴向尺寸的减小可进一步实现微电机的薄型化。

## 参考文献

- [1] 唐苏亚. 片状微电机的发展概况[J]. 微电机, 1993, 26(4): 34-38.  
Tang Suya. Development review of slice micromotor [J]. Micromotors, 1993, 26(4): 34-38(in Chinese).
- [2] 张寿柏, 张琛, 赵小林, 等. 直径为 2mm 电磁型微电机的研究[J]. 上海交通大学学报, 1996, 30(9): 133-136.  
Zhang Shoubai, Zhang Chen, Zhao Xiaolin, et al. Research on magnetic micromotor 2mm in diameter [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1996, 30(9): 133-136(in Chinese).
- [3] 余晋岳, 张琛, 杨春生, 等. 直径 2mm 电磁型微马达的研制及其气隙磁场的分析[J]. 磁性材料及器件, 1999, 29(6): 1-4.  
Yu Jinyue, Zhang Chen, Yang Chunsheng, et al. Study on  $\phi$ 2mm micro electromagnetic motor and analysis of

- magnetic field[J]. Journal of Magnetic Materials and Devices, 1999, 29(6): 1-4(in Chinese).
- [4] 赵小林, 杨春生, 周狄, 等.  $\phi$ 1mm 电磁型微电机定子绕组研制[J]. 微细加工技术, 1998(3): 58-62.  
Zhao Xiaolin, Yang Chunsheng, Zhou Di, et al. Fabrication of  $\phi$ 1mm stator winding of electromagnetism micromotor[J]. Microfabrication technology, 1998(3): 58-62(in Chinese).
- [5] 余晋岳, 张琛, 杨春生, 等. 直径 1mm 电磁型双定子微马达的结构特点及稀土永磁在其中的应用[J]. 磁性材料及器件, 2000, 31(1): 15-17.  
Yu Jinyue, Zhang Chen, Yang Chunsheng, et al. The structural features of  $\phi$ 1mm micro electromagnetic motor with Bi-stators and application of rare-earth permanent magnet in it[J]. Journal of Magnetic Materials and Devices, 2000, 31(1): 15-17(in Chinese).
- [6] 杨春生, 丁桂甫, 赵小林, 等. 微马达结构、气隙磁场和绕组层数对微马达输出力矩的影响[J]. 微细加工技术, 2001(1): 50-52.  
Yang Chunsheng, Dingguifu, Zhao Xiaolin, et al. Effects of structure gap, magnetic field and winding layers of micromotor on its output torque[J]. Microfabrication Technology, 2001(1): 50-52(in Chinese).
- [7] 吕琼莹, 车录锋. 电磁微电机中微小电磁力的研究[J]. 光学精密工程, 1997, 5(2): 50-53.  
Lü Qiongying, Che Lufeng. Study on micro electromagnetic force in electromagnetic micromotor [J]. Optics and Precision Engineering, 1997, 5(2): 50-53(in Chinese).
- [8] 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).
- [9] 杨杰伟, 吴一辉, 贾宏光, 等. 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, et al. Design method and magnetic field analysis of axial magnetized permanent magnet micromotor[J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(1): 83-88(in Chinese).
- [10] 刘波, 吴一辉, 张平. 基于微模复制技术的平面线圈研制[J]. 传感技术学报, 2006, 19(5): 1963-1969.  
Liu Bo, Wu Yihui, Zhang Ping. Development of planar coils based on micromolding replication techniques [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2006, 19(5): 1963-1969(in Chinese).
- [11] 张宗盛, 王秀和, 杨玉波. 新型混合励磁磁通切换型磁阻电机的变结构磁路模型[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(21): 3467-3474.  
Zhang Zongsheng, Wang Xiuhe, Yang Yubo. A variable

- structure magnetic circuit model of novel hybrid excitation flux switching motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(21): 3467-3474(in Chinese).
- [12] Kamper M J, Wang R J, Rossouw F G. Analysis and performance of axial flux permanent-magnet machine with air-cored nonoverlapping concentrated stator windings[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2008, 44(5): 1495-1504.
- [13] 陈云云, 全力, 朱孝勇, 等. 双凸极永磁双转子电机优化设计与电磁特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(12): 1912-1921.  
Chen Yunyun, Quan Li, Zhu Xiaoyong, et al. Optimal design and electromagnetic performance analysis of double-salient permanent-magnet double-rotor motors [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(12): 1912-1921(in Chinese).
- [14] 井立兵, 章跃进, 李琛, 等. Halbach 阵列同心式磁力齿轮磁场分析与优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(21): 163-169.  
Jing Libing, Zhang Yuejin, Li Chen, et al. Magnetic field computation and optimization design for a concentric magnetic gear with halbach permanent- magnet Arrays [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(21): 163-169(in Chinese).
- [15] 刘蓉晖, 李琛, 章跃进. 偏心式谐波磁力齿轮气隙磁场解析模型[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 126-133.  
Liu Ronghui, Li Chen, Zhang Yuejin. Analytical model for air-gap magnetic field calculation in an eccentric magnetic harmonic gear[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 126-133(in Chinese).
- [16] 李军, 罗应立, 刘晓芳, 等. 低速永磁电动机转矩特性的三维有限元分析[J]. 电机与控制学报, 2011, 15(2): 13-19.  
Li Jun, Luo Yingli, Liu Xiaofang, et al. Analysis of low speed PM motor's torque characteristics by 3D FEM [J]. Electric Machines and Control, 2011, 15(2): 13-19 (in Chinese).
- [17] 曹永娟, 黄允凯, 金龙, 等. 磁极组合型轴向磁场无铁心永磁电机的设计与分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(6): 903-909.  
Cao Yongjuan, Huang Yunkai, Jin Long, et al. Design and analysis of a stator coreless axial-flux permanent magnet machine with module poles[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(6): 903-909(in Chinese).
- [18] 董剑宁, 黄允凯, 金龙, 等. 高速永磁电机设计与分析技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(27): 4640-4653.  
Dong Jianning, Huang Yunkai, Jin Long, et al. Review on high speed permanent magnet machines including design and analysis technologies[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(27): 4640-4653(in Chinese).
- [19] 沈建新, 李鹏, 郝鹤, 等. 高速永磁无刷电机电磁损耗的研究概况[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(3): 62-74.  
Shen Jianxin, Li Peng, Hao He, et al. Study on electromagnetic losses in high-speed permanent magnet brushless machines-the state of the art [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(3): 62-74(in Chinese).
- [20] 丁树业, 郭保成, 冯海军, 等. 变频控制下永磁同步电机温度场分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(9): 1368-1375.  
Ding Shuye, Guo Baocheng, Feng Haijun, et al. Temperature field investigation of permanent magnet synchronous motors controlled by the frequency conversion control system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(9): 1368-1375(in Chinese).
- [21] 孔晓光, 王凤翔, 邢军强, 等. 高速永磁电机的损耗计算与温度场分析[J]. 电工技术学报, 2012, 27(9): 167-173.  
Kong Xiaoguang, Wang Fengxiang, Xing Junqiang, et al. Losses calculation and temperature field analysis of high speed permanent magnet machines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(9): 167-173(in Chinese).
- [22] 路义萍, 付余, 张万全, 等. 一种新型无刷励磁机的三维热流场分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(27): 4699-4705.  
Lu Yiping, Fu Yu, Zhang Wanquan, et al. Analysis of three dimensional thermal and flow fields for a new brushless exciter [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(27): 4699-4705(in Chinese).
- [23] 熊万里, 徐光帅, 吕浪, 等. 高速大功率电机转子通风孔散热效率优化研究[J]. 机械科学与技术, 2014, 33(5): 735-740.  
Xiong Wanli, Xu Guangshuai, Lü Lang, et al. Optimizing heat dissipation efficiency for Air-cooling holes of rotor of high-speed and large-power motor[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2014, 33(5): 735-740(in Chinese).
- [24] 路义萍, 洪光宇, 汤璐, 等. 多风路大型空冷汽轮发电机三维流场计算[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(3): 133-139.  
Lu Yiping, Hong Guangyu, Tang Lu, et al. Calculation of 3D flow field of large air-cooled turbo-generators with multi-path ventilation[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(3): 133-139(in Chinese).



刘波

收稿日期: 2015-03-30.

作者简介:

刘波(1977), 男, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事微机械系统研制、电机结构设计与分析工作, lb.mems@aliyun.com。

(责任编辑 车德竞)