

文章编号 1004-924X(2003)02-0120-05

# 电磁型平面微电机及其制作工艺

郭占社, 吴一辉, 宣明, 王淑荣

(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 长春 130022)

**摘要:**为得到一种尺寸小、输出力矩大、转速高的直流可调速微电机,提出了一种利用微机械加工工艺制作微电机的方法。定子和转子都做成平面结构,定子线圈采用了平面型、无槽式集中绕组;线圈之间采用了三相星形连接方式,采用了微机械 LIGA 工艺和硅微机械加工工艺;转子采用钕铁硼永磁材料,进行轴向充磁,成辐射状间隔分布。装配时转子分布于定子两侧,不但减小了电机尺寸,还有利于定子的散热。把装配完毕的微电机接通三相半控控制电路对其转速和力矩进行了测试,测试结果表明,电机运转平稳,输出力矩大。

**关键词:**平面微电机; LIGA 工艺

**中图分类号:** TM359.9 **文献标识码:** A

## Electro-magnetic planar micromotor and its fabrication

GUO Zhan-she, WU Yi-hui, XUAN Ming, WANG Shu-rong

(State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics,  
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, 130022, China)

**Abstract:** A kind of MEMS technology has been proposed for fabrication of micromotors, which are small in size, high in output torque and rotational speed, and speed controllable. The rotors and stators of the micromotor are all planar, the windings are made planar, grooveless and concentric using the LIGA technology and silicon micromachine technology. They are connected with three-phase stellated NdFeB permanent-magnet material and the rotor is magnetized axially. Two rotors are distributed at both sides of the stator, symmetrically. This kind of structure can not only reduce the axial dimension of the micromotor, but also reduce the convection of rotors and stators to the air. Finally, the assembled micromotor is run by three-phase square wave current. The results show that the micromotor has many advantages, such as stable speed and less ripple in the output torque.

**Key words:** planar micromotor; LIGA technology

## 1 引言

微电机自从问世以来就以其体积小、重量轻、相对输出力矩大等优点而在现代工业设备、仪器仪表、计算机外部设备、办公机器、汽车、航空、军事装备和家用电器等方面得到了广泛的应用。微

电机分电磁型和静电型两种。静电型微电机存在着驱动力矩小、输入电压高、运行寿命短等诸多弱点,使其实用化极其困难<sup>[1-4]</sup>。为解决上述困难,许多的科学家都致力于电磁型微电机的研究。传统结构形式的电磁型微电机由于无法充分利用电磁转换过程中的体积效应,因而传动效率不高。

收稿日期:2002-12-24;修订日期:2003-02-15.

基金项目:国家 973 资助项目(No. G1999033102)

为克服上述缺点,提出了利用微机械加工工  
艺制作电磁型平面微电机的方法,电机的定子和  
转子都采用平面结构,转子采用钕铁硼永磁材料  
做成圆盘,电枢线圈制作在定子一侧,采用平面  
式、无铁心的结构,使电机的轴向尺寸大幅度减  
小;不存在由于齿槽效应引起的转矩脉动,转矩输  
出平稳;不存在磁滞损耗和涡流损耗,可达到较高  
的效率;定子线圈电感小,因此具有良好的换向性  
能;由于定子线圈两端直接与气隙接触,有利于线  
圈的散热,具有较大的电负荷;相对于传统的平面  
微电机的制作方法如 IC 工艺、切片法或绕线法  
等,利用微机械工艺制作的平面微电机增加了线  
圈匝数和深宽比,还减小了电机的轴向装配尺寸  
和体积,增加了定子线圈的电流密度和输出力矩。

## 2 结构及工作原理<sup>[5-6]</sup>

### 2.1 工作原理

图 1 为平面电机定子线圈单面分布示意图,  
定子绕组设计采用了平面型、无槽式、集中绕组。  
正面和反面各 18 个线圈,对称分布于基片两侧。  
线圈之间采用三相星形连接,按照 A、B、C 相间  
隔的顺序呈辐射状均布于以硅为衬底的平面上。正

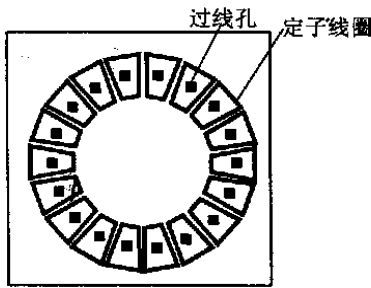


图 1 电机定子线圈示意图  
Fig. 1 Sketch of stator windings

面线圈和反面线圈之间通过过线孔连接。转子  
(图 2)采用钕铁硼永磁材料制成盘状,在气隙中  
产生足够的轴向磁通密度,提高电机的驱动力矩。  
转子共有 6 对磁极,N、S 间隔成辐射状均布于圆  
盘表面。电机的装配如图 3 所示,采用了直流无  
刷电机结构,定子和转子之间采用轴向连接,定子  
固定在电机壳体上,转子共两个,对称分布于定子  
两侧,这种连接方式从结构上解决了轴向电机单

边拉力的问题。平面结构保证了定子线圈电流密  
度大,散热性好,提高了电机工作效率。

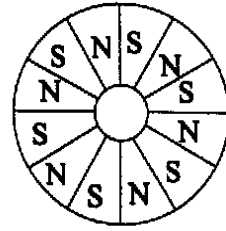


图 2 电机转子示意图  
Fig. 2 Sketch of rotors

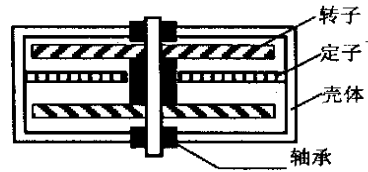


图 3 微电机装配示意图  
Fig. 3 Structure of micromotor

图 4 的示意图说明了电磁型平面微电机的工作  
原理,图中把定子绕组上面的转子和定子绕组  
重叠在一起画出,绕组下面的转子相对于定子线  
圈的运动的情况和上面的情况相同。示意图为电  
机装配图的俯视图。其中转子磁极取与下面的定  
子线圈相对应的一面。转子的磁化方向垂直电机  
转子平面,远离转子平面的磁场方向(S 极)用  
表示,进入转子平面的磁场方向(N 极)用 ⊙ 表示。  
转子共有六对磁极,N、S 间隔分布于以转子中心  
为对称点的平面上。设电机定子线圈和转子磁极  
的初始相对位置如图 4(a)所示,此时进入电机转  
子磁极平面的方向(N 极)和定子一相线圈中心对  
齐(假设为 A 相),取其中一个转子磁极为运动参  
考点,用 做标记。对一相定子线圈通以电流(B  
相,图 4(a)),由于受到定子上部转子磁场的作用,  
定子线圈两侧向(径向)导线将受到电磁力的作  
用,作用力方向如图 4(a)所示,由于绕组线圈是  
固定在硅衬底上的,定子处于固定状态,所以转  
子受到的反作用力方向正好和定子受到的作用力  
大小相等、方向相反。当转子 N 极(与定子线圈  
相对的磁极)与线圈(B 相)中心重合时,如继续对  
该相线圈通电,转子上受到的反作用力将阻止转  
子的转动。这时,如对另一相线圈接着通电(C  
相,如图 4(c)),只要电流方向与 B 相线圈通电方  
向相同,其驱动转子的转动方向正好与前述线圈

的驱动方向相同。因此,按照一定的通电顺序连续对电机线圈通过三相方波电流(如 A、B、C 顺序),就保证了定子的连续转动。由于在每一个时刻都有 6 个与转子线圈相对应线圈通电,只要磁

极方向判别正确,则每时刻都有 6 只绕组线圈同时通过电流驱动转子的转动,因而能保证电机具有较大的转动转矩。

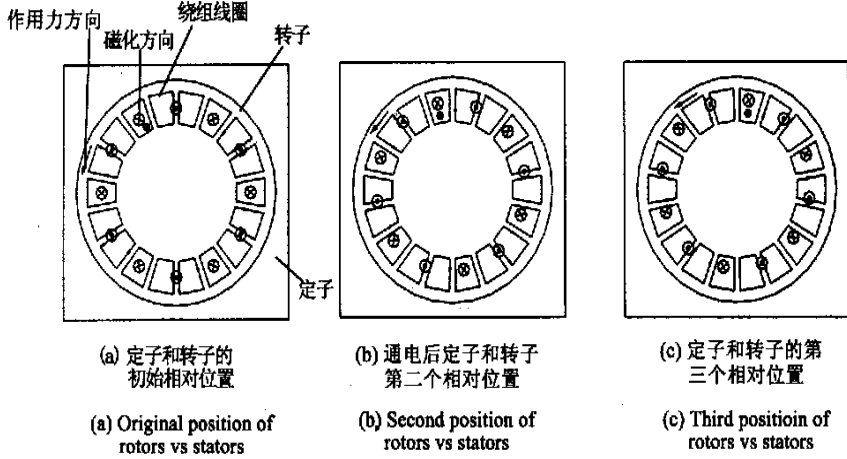


图 4 定子线圈和转子相互作用示意图

Fig. 4 Interaction relationship between stator windings and rotors

### 3 电机定子线圈的制作工艺

平面微电机的制作主要分为定子绕组的制作和永磁转子的制作。转子制作主要是把钕铁硼永

磁材料做成盘状,然后轴向充磁得到的<sup>[7]</sup>。定子线圈的制作是平面电机制作最重要的部分,工艺比较复杂。制作采用了硅微机械加工工艺和 LIGA 工艺,以硅为衬底,其上热氧化一层 SiO<sub>2</sub>,然后溅射一层铜作为种子层。通过双面光刻、双面显影、双面

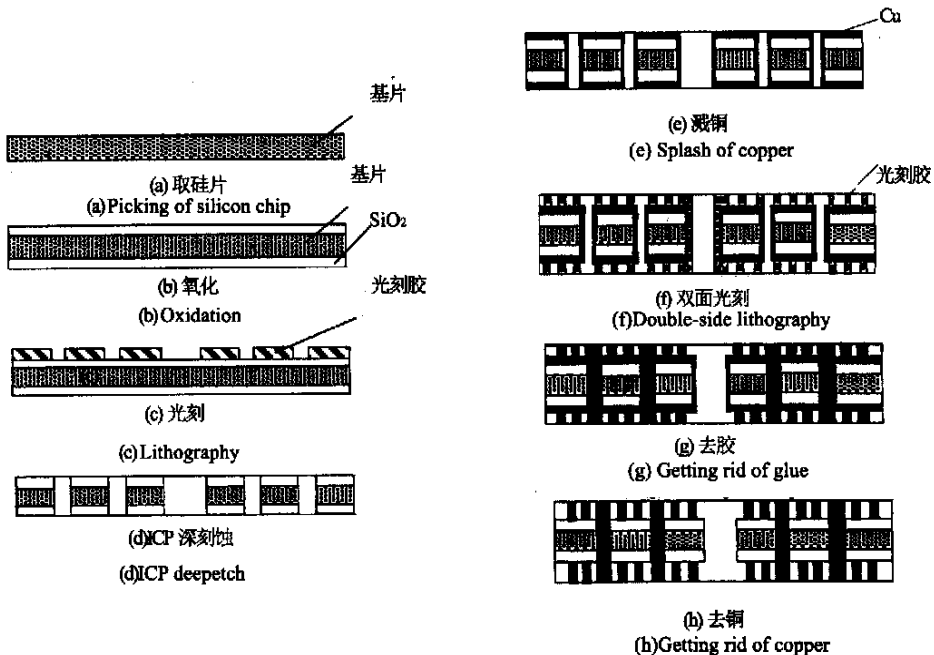


图 5 微电机定子线圈制作工艺流程

Fig. 5 Process course of windings

电铸等工艺过程,最后在硅衬底两面各形成 18 个大约  $30\ \mu\text{m}$  厚的线圈。实验证明,定子线圈与衬底之间结合紧密,正反面线圈之间导电性好。线圈没有脱落、剥离等现象。线圈的制作工艺过程主要包括两部分,第 1 部分主要是利用 ICP 工艺在硅衬底上制作过线孔;第 2 部分主要利用 LIGA 工艺在硅衬底上制作平面线圈。以铜为种子层,通过光刻、电铸、去种子层等工艺过程,得到电机定子线圈。具体制作工艺如图 5 所示,首先取一片  $\langle 100 \rangle$  晶向的硅片(图 5(a)),放在氧化炉中进行双面氧化,最后在硅片表面氧化出来约  $1\ \mu\text{m}$  厚的  $\text{SiO}_2$  绝缘层(图 5(b)),通过甩胶、前烘、光刻、显影等工艺过程,在硅片上得到过线孔窗口,窗口部分为  $\text{SiO}_2$ ,其余部分被光刻胶保护起来(图 5(c))。把硅片放入氢氟酸溶液中,腐蚀掉窗口的  $\text{SiO}_2$ ,然后把去掉光刻胶后的硅片 ICP 离子刻蚀机中进行干法刻蚀,得到图 5(d) 所示的过线孔窗口。把腐蚀完毕的过线孔窗口清洗后烘干,双面溅射铜作种子层(图 5(e))。把溅射完铜的硅片通过双面甩胶、前烘、双面光刻电机线圈、双面显影得到电机线圈的窗口(图 5(f)),把光刻完毕的硅片放入电铸仪中进行电铸,得到电机定子线圈。然后把硅片放入丙酮中去胶(图 5(g)),

再放入  $\text{FeCl}_3$  溶液中去掉种子层的铜,最后得到完整的电机定子线圈(图 5(h))。

## 4 力矩估算及其测试

### 4.1 电机力矩的估算<sup>[8-9]</sup>

平面电机的输出力矩是根据安培定理进行计算的,假设电机控制电路为三相半控电路,则每个瞬间只有一相定子线圈有电流强度为  $I$  的电流通过。假设每个通电线圈中切割磁力线的导线为  $n$  条,导线所在磁场的磁感应强度为  $B_i$ ,长度为  $L_i$ ,导线受力中心到电机定子中心的距离为  $R_i$ ,根据作用力反作用力原理,该线圈承受到的总力矩

$$T = \sum_{i=1}^n B_i L_i I R_i$$

因为每一相定子线圈都由 12 个线圈串联,转子的输出力矩为  $T_{\text{总}} = 12 T = \sum_{i=1}^n B_i L_i I R_i$ 。

### 4.2 微电机转速—力矩曲线测试

#### 4.2.1 测试原理

微电机力矩是利用非接触测量法<sup>[10]</sup>进行测试的,图 6 说明了非接触测量法的原理示意图。

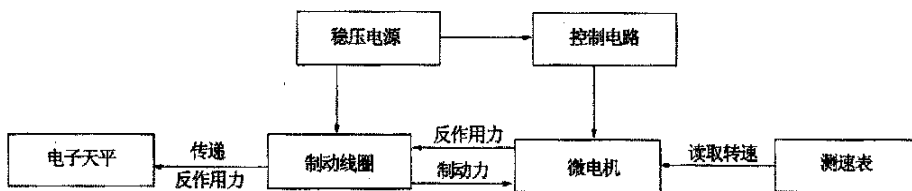


图 6 微电机力矩测试原理示意图

Fig. 6 Testing principle of pull-out torque

测量系统主要由测速表、安装在微小电机上的薄铝盘、非接触制动组件(包括制动磁极和绕于其上的励磁线圈)电子天平和电机及其控制电路等部分组成的。测试时在电机输出轴上装一个薄圆铝盘,铝盘边缘放在制动磁极的间隙中,非接触制动组件放在电子天平上,当电流流过励磁线圈时,在制动磁极的缝隙中便产生了一定强度的磁场。铝盘在被测电动机的带动的大小可以由电子天平读

取出来。制动力的值乘以铝盘的半径便得到电机的输出力矩,对应的转速可以由测速表测量出来。表 1 列出了在铝盘半径为  $23\ \text{mm}$ ,驱动电压为  $3\ \text{V}$ ,定子绕组半径为  $10\ \text{mm}$  时测得的电磁型微电机转速与输出力矩的相关数据,其中转速的测量范围为  $1\ 000 \sim 4\ 000\ \text{r/min}$ 。微电机转速与力矩关系曲线如图 7。

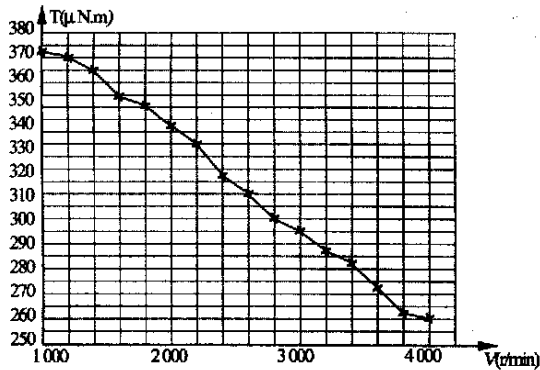


图 7 微电机转速—力矩关系曲线

Fig. 7 Rotational speed  $V$ s torque of micromotor

表 1 输出力矩测试表

Tab. 1 Measurements of output torque

转速 (r/min)	制动力 (g)	输出力矩 ( $\mu\text{N}\cdot\text{m}$ )	制动电压 (V)
1 000	1.47	367.5	25.5
1 200	1.46	365	25.3
1 400	1.44	360	21.5
1 600	1.40	350	20.2
1 800	1.38	345	19.1
2 000	1.35	337.5	17.4
2 200	1.32	330	16.4
2 400	1.27	317.5	15
2 600	1.24	310	13.9
2 800	1.20	300	13.1
3 000	1.18	295	12.7
3 200	1.15	287.5	12
3 400	1.13	282.5	11.8
3 600	1.09	272.5	10.9
3 800	1.05	262.5	10.7
4 000	1.04	260	10.3

## 5 结束语

对基于微机械工艺的电磁型平面微电机的工作原理以及制作工艺进行了较为详细的分析。估

算了电机的输出力矩并且利用非接触测量法对电磁型微电机的转速—输出力矩关系进行了测试。从转速—输出力矩关系曲线可以看出,电机运转平稳、输出力矩大,符合系统传动要求。

### 参考文献:

- [1] 张琛. 电磁型微电机的发展趋势及我们的对策[J]. 微特电机, 1998, 2:24-26.  
ZHANG CH. The developing tendency of electromotor and our countermeasure[J]. *Small and Special Electrical Machines*, 1998, 2:24-26.
- [2] 张琛, 赵小林, 杨春生. 超微型电动机实用化的关键技术及应用前景[J]. 上海交通大学学报, 2000, 34(3):430-432.  
ZHANG CH, ZHAO X L, YANG CH SH. Crux technology for practically of micro-motor and its application prospect[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2000, 34(3):430-432.
- [3] 梁静秋, 姚劲松. 端面摇摆式微型电机研究[J]. 光学 精密工程, 1999, 7(4):76-80.  
LIANG J Q, YAO J S. Study on top-face-sway micromotor[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1999, 7(4):76-80. (in Chinese)
- [4] 贾智, 王立鼎, 梁静秋, 等. 端面摇摆式微型电磁电机工作原理及运动学分析[J]. 光学 精密工程, 1999, 7(4):71-75. (in Chinese)  
JIA ZH, WANG L D, LIANG J Q, et al. Analysis of working principle and kinematics of electromagnetic micromotor with new type of structure[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1999, 7(4):71-75. (in Chinese)
- [5] 余晋岳, 张琛, 杨春生, 等. 直径 1 mm 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 J Y, ZHANG CH, YANG CH SH, et al. The structural features of 1 mm 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.
- [6] 张寿柏, 张琛, 赵小林. 直径为 2 mm 电磁型微电动机的研究[J]. 上海交通大学学报, 1996, 30(9):133-136.  
ZHANG SH B, ZHANG CH. Research on magnetic micromotor 2 mm in diameter[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 1996, 30(9):133-136.
- [7] 杨春生, 赵小林, 丁桂甫. 电磁型微马达的微转子研究[J]. 微细加工技术, 1999, 4:47-50.  
ZHANG CH SH, ZHAO X L, DING G F. Study on microrotors of micro-electromagnetic motor[J]. *Microfabrication Technology*, 1999, 4:47-50.
- [8] NIENHAUS M. Design and realization of a penny-shaped micromotor[J]. *SPIE*, 1999, 3680B:592-600.
- [9] FERNANDEZ V, REYNE G, CUGAT O. Prospective FEM modeling of induction planar micromotors[J]. *IEEE Transaction on Magnetics*, 1999, 35(3):1805-1808.
- [10] WU Y H, JIA H G. Noncontact microrotor torque measurement for motors in MEMS. IEEE 6<sup>th</sup> international conference and exhibition on micro electro[A]. *Opto Mechanical Systems and Components* [C]. Germany, 1998.

作者简介:郭占社(1973-),男,河北永年人,现为中科院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生,研究方向为微光机电集成系统。