

文章编号 1004-924X(2011)06-1306-07

# 旋转式微发电机的设计与制造

孙韶春\*, 石庚辰

(北京理工大学 机电工程与控制国家级重点实验室, 北京 100081)

**摘要:**为了实现旋转式微发电机对微系统的持续供电,研究了旋转式微发电机的设计、制造以及实验方法。首先,设计了具有单转子和单定子的三相、永磁同步微发电机模型。使用传统的磁路分析法得出了微发电机气隙磁密和感应电动势的表达式,确定了微发电机的主要设计参数。对模型进行有限元分析,得到了感应电动势波形。然后,利用精密加工技术加工了转子和定子各构件,并装配成为尺寸为 $(\Phi 7 \times 2) \text{ mm}^3$ 的微发电机样机。最后,通过实验得出了微发电机在不同气隙厚度和不同转速下的感应电动势。实验结果显示,在气隙厚度为 $300 \mu\text{m}$ ,转子转速为 $10 \text{ kr/min}$ 时,微发电机的一相感应电动势峰峰值为 $26.2 \text{ mV}$ ;当接入 $0.23 \Omega$ 的对称负载时,三相输出功率为 $357.3 \mu\text{W}$ 。结果表明,微发电机输出结果比较理想,有望作为微系统的电源装置。

**关键词:**微机电系统;微电源;微发电机;旋转式发电机

**中图分类号:** TM382 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111906.1306

## Design and fabrication of micro rotational generators

SUN Shao-chun\*, SHI Geng-chen

(State Key Laboratory for Mechatronic Engineering and Control,  
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

\* Corresponding author, E-mail: sunshaochun 66@gmail.com

**Abstract:** In order to provide continuous electric powers to micro systems by using micro rotational generators as power sources, the design approach, fabrication technique and test method of a micro rotational generator were researched. Firstly, a model of three-phase and permanent magnet synchronous generator with a rotor and a stator was designed. The formulas for air density and induced Electromotive Force(EMF) were given by a magnetic circuit analysis and main design parameters of the micro generator were determined. Then, Finite Element Analysis(FEA) was used to analyze the model to obtain the waveform of induced EMF. Furthermore, the precise machining technique was used to fabricate the components of the rotor and stator and to assemble to a micro generator with a size of  $(\Phi 7 \times 2) \text{ mm}^3$ . Finally, micro generator was tested in variations of air-gap thickness and rotation speed. Experimental results indicate that with a air-gap thickness of  $300 \mu\text{m}$  and a rotation speed of  $10 \text{ kr/min}$ , the induced EMF in one phase is  $26.2 \text{ mV}_{\text{pp}}$ ; when symmetrical loads of  $0.23 \Omega$  are connected to the generator, the sum of output power is  $357.3 \mu\text{W}$ . Compared to the FEA results, the micro generator shows an ideal output, which means that the generator may be used in micro systems as the power sources.

收稿日期:2010-08-16;修订日期:2010-09-29.

基金项目:装备预研基金资助项目

**Key words:** Micro-electro-mechanical Systems (MEMS); micro power source; micro generator; rotational generator

## 1 引言

随着机电系统(Micro-Electro-Mechanical Systems, MEMS)技术的迅速发展,各种基于MEMS技术制造的微型传感器、执行器以及构件等使器件的尺寸不断减小、成本不断降低,为系统的设计与应用开辟了崭新的领域。相比之下,能源装置小型化的发展却比较缓慢,而MEMS装置(如微型机器人)的体积和寿命很大程度上由能源供应决定,因此,微能源成为MEMS技术的重要研究内容。在微能源研究中,微发电机可将获取的外界环境能量转化为电能,不仅可以长期使用,并且无污染,已经成为国内外研究的热点。从工作方式上划分,微发电机可分为振动式和旋转式两类。目前,国内已展开了关于振动式微发电机的研究工作<sup>[1-2]</sup>,并取得了一定的成果;而关于旋转式微发电机的研究才刚刚起步。

旋转式微发电机(以下简称微发电机)由于具有很小的转动惯量,可以在很高的转速(大于300 kr/min)下工作,从而具有大于传统电机的能量密度<sup>[3]</sup>。在国外,一些研究机构已经研制出毫米级尺寸的微发电机原型样机,能够为电子器件持续提供电能。其中,英国伦敦帝国理工学院研制的微发电机体积为 $0.041\text{ cm}^3$ ,在30 kr/min的转速下输出功率为 $1.1\text{ mW}$ <sup>[4]</sup>。美国麻省理工学院和加州理工学院联合研制了两代高转速微发电机,其中,第一代的体积为 $0.146\text{ cm}^3$ ,在120 kr/min的转速下输出功率为 $1.3\text{ W}$ <sup>[5]</sup>;第二代微发电机体积为 $0.136\text{ cm}^3$ ,转速和功率分别可以达到305 kr/min和 $8.0\text{ W}$ <sup>[6]</sup>。

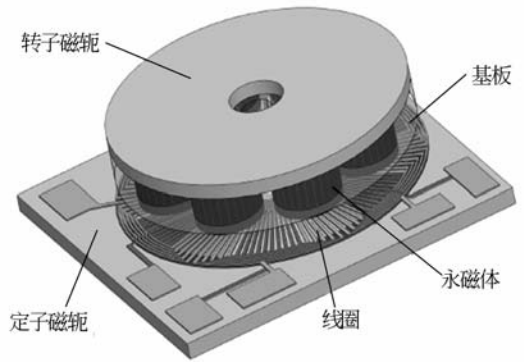
作为初步研究,本文探索了微发电机设计的基本理论和加工、测试方法。设计了尺寸为 $(\Phi 7 \times 2)\text{ mm}^3$ 的微发电机。对微发电机模型进行了理论分析和数值仿真,得到了微发电机输出的理论值,并利用超精密加工技术加工了转子与定子。通过实验,得到了微发电机在不同气隙厚度和转速下的感应电动势,结果与理论分析计算接近,表明所设计的微发电机合理。

## 2 微发电机设计

### 2.1 微发电机结构

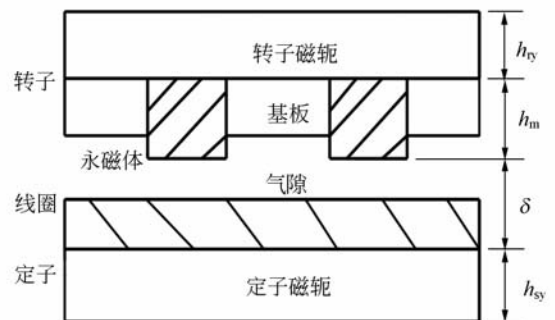
微发电机为电磁式发电机,其工作原理与宏观电磁式发电机类似:转子的转动使转子与定子之间产生交变磁场,定子(或转子)上的线圈不断切割磁力线,从而在线圈中产生感应电动势<sup>[3]</sup>。根据微机械加工技术适合加工平面结构的特点,设计了具有单定子、单转子结构的三相永磁同步微发电机其结构如图1所示。

转子由基板、永磁体阵列和转子磁轭组成。钕铁硼永磁体为磁路提供磁动势,其剩余磁感应



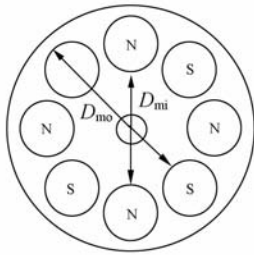
(a) 轴测图

(a) Perspective view



(b) 截面图

(b) Cross section



(c) 转子平面图

(c) Plan view of rotor

图 1 微发电机结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of micro generator

强度  $B_r = 1.2 \text{ T}$ , 永磁体阵列如图 1(c) 所示; 转子磁轭是磁路的一部分, 起导磁作用, 由高饱和磁通密度坡莫合金制成, 其饱和磁通密度  $B_s = 1.5 \text{ T}$ 。

定子由线圈和定子磁轭组成。三相线圈是磁电转换的关键器件; 定子磁轭的作用和材料与转子磁轭相同。

## 2.2 基本电磁关系

与传统的盘式永磁电机相比, 虽然微发电机的尺寸减小, 但结构变化不大。使用传统的磁路分析法, 可得微发电机的气隙磁密为<sup>[7-8]</sup>

$$B_\delta = B_r \frac{h_m}{\sigma K_F h_m + \mu_r \delta}, \quad (1)$$

式中,  $B_r$  为永磁体的剩余磁感应强度;  $h_m$  为永磁体厚度;  $\sigma$  为漏磁系数;  $K_F$  为气隙磁密分布系数;  $\mu_r$  为永磁体的相对磁导率;  $\delta$  为气隙厚度。

进而可以得到微发电机每相感应电动势最大值的表达式为<sup>[4]</sup>

$$E_m = \frac{1}{4} p k_N N \Omega (D_{mo}^2 - D_{mi}^2) K_F B_\delta, \quad (2)$$

式中,  $p$  为极对数;  $k_N$  为绕组系数;  $N$  为每相线圈匝数;  $\Omega$  为转子的转速, 单位为  $\text{rad/s}$ ;  $D_{mo}$  和  $D_{mi}$  分别为永磁体阵列的外径和内径。

式(1)和式(2)是确定微发电机设计参数的重要依据。同时, 参数值的确定须考虑微加工能力。综合分析后, 确定了微发电机的主要设计参数, 结果见表 1。作为对微发电机的初步研究, 本文为了减小加工难度和降低成本, 线圈匝数设计为 1; 同时, 气隙厚度  $\delta$  可调。

表 1 微发电机设计参数值

Tab. 1 Design parameters of micro generator

参数名	描述	参数值
$D$	电机直径	7.0 mm
$D_{mi}$	永磁体阵列内径	3.0 mm
$D_{mo}$	永磁体阵列外径	6.0 mm
$h_m$	永磁体厚度	1.0 mm
$p$	极对数	4
$h_{sy}$	定子磁轭厚度	350 $\mu\text{m}$
$h_{ry}$	转子磁轭厚度	350 $\mu\text{m}$
$N$	线圈匝数	1
$w_c$	线圈宽度	100 $\mu\text{m}$
$h_c$	线圈厚度	35 $\mu\text{m}$

## 2.3 数值仿真分析

为了验证理论分析的正确性, 并得到更为准确的磁场特性, 使用磁场数值仿真软件对微发电机进行了有限元分析。微发电机的有限元模型和网格划分如图 2 所示。

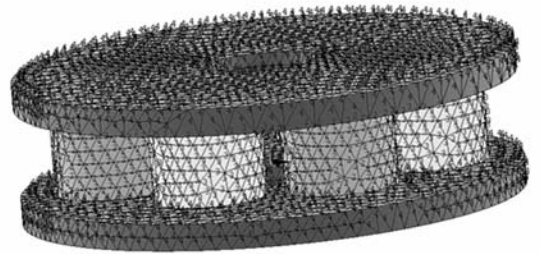


图 2 有限元分析模型和网格

Fig. 2 Model and mesh in FEA

在仿真分析中, 忽略了磁轭的磁滞和涡流等损耗。不同气隙厚度下的气隙磁密可直接由静态分析获得<sup>[9]</sup>。由磁链微分法<sup>[10]</sup>, 微发电机的一相感应电动势可表示为

$$E = N \frac{d\Phi}{dt} = N \frac{d\Phi}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} = N \frac{d\Phi}{d\theta} \Omega, \quad (3)$$

式中,  $d\Phi$  为线圈的磁通变化量;  $d\theta$  为转子的角度变化量, 在实际计算中  $d\theta$  的值应足够小。取  $d\theta = 2.5^\circ$ , 通过数值仿真可得到不同角度  $\theta$  时的磁通量。根据式(3), 当  $N = 1$ ,  $\delta = 300 \mu\text{m}$ ,  $\Omega = 10 \text{ kr/min} = 1047.2 \text{ rad/s}$  时, 得到感应电动势波形如图 3 所示, 其感应电动势峰峰值为 35.7 mV。

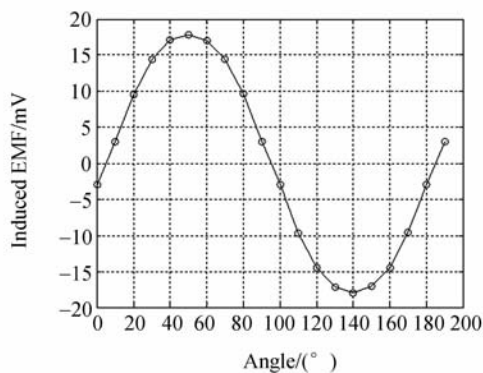


图3 数值仿真感应电动势波形(10 kr/min, 300  $\mu\text{m}$ )

Fig.3 Waveform of induced EMF by simulation (10 kr/min, 300  $\mu\text{m}$ )

### 3 微发电机加工

本论文所研究的微发电机拟采用 MEMS 加工技术(如光刻、电镀等)进行大批量生产,以达到降低生产成本的目的。然而,作为初步研究并考虑制作成本,微发电机原理样机的构件使用超精密加工技术制造。

在微发电机的结构设计中充分考虑了 MEMS 加工技术的特点,构件均设计为平面结构,没有复杂的三维尺寸,并尽量避免高深宽比的结构等,为最终采用 MEMS 加工技术进行大批量生产打下基础。

#### 3.1 转子的加工

转子由基板、永磁体阵列和转子磁轭组成。基板要求重量轻、机械强度高、加工性能好。材料为硬铝,使用精密数控机床加工。圆柱形钕铁硼

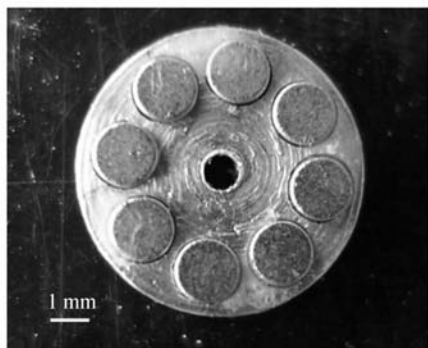


图4 微发电机转子

Fig.4 Rotor of micro generator

永磁体轴向充磁,直径为 1.5 mm,充磁方向厚度为 1 mm,表面镀锌。转子磁轭的材料为高饱和磁通密度坡莫合金,最大磁导率可达 50 000<sup>[11]</sup>。最后,将各构件装配成转子,如图 4 所示。

#### 3.2 定子的加工

定子由线圈和定子磁轭组成。其中,定子磁轭的材料和加工方法与转子磁轭相同。线圈的材料为铜,一般采用电镀或印制电路制成。作为初步研究,使用印制电路(柔性)技术加工双层平面线圈。三相线圈采用波绕组形式<sup>[12]</sup>,外径和内径分别为 6.6 mm 和 2 mm,如图 5 所示。

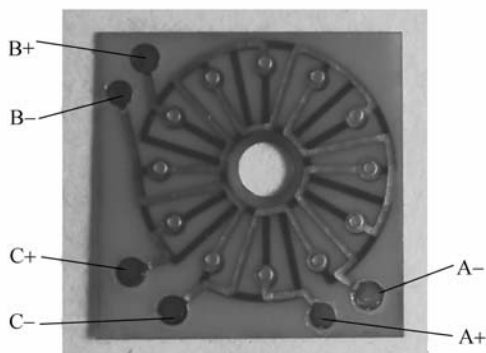


图5 三相、双层平面线圈

Fig.5 Three-phase, double-layer plane coils

### 4 实验与结果

#### 4.1 实验装置

为了保证实验的可靠性,采用光学平台和精密调整架作为实验平台。2个分别具有 6 自由度(3个平动和 3个转动)的精密调整架固定在光学平台上;微发电机的定子固定在其中一个调整架上;转子的微马达带动做高速旋转。微马达在 3 V 电压驱动下转速可达到 30 kr/min。微马达与微发电机的转子固定在另一个调整架上。通过调节调整架,可改变定子与转子的间隙,误差小于 10  $\mu\text{m}$ 。整套测试装置如图 6 所示。

微马达的转速可以由微发电机的感应电动势频率计算得到,公式为<sup>[12]</sup>

$$\Omega = \frac{60f}{p}, \quad (3)$$

式中, $\Omega$  的单位为 Kr/min; $f$  为感应电动势频率。当  $\Omega=10$  kr/min 时, $f=666.7$  Hz。

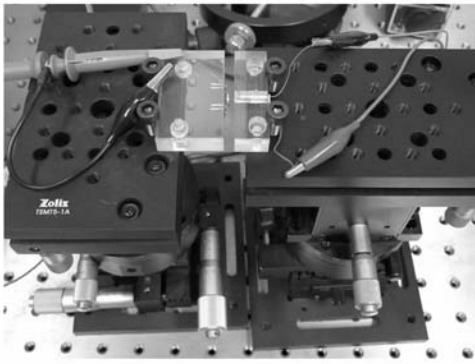
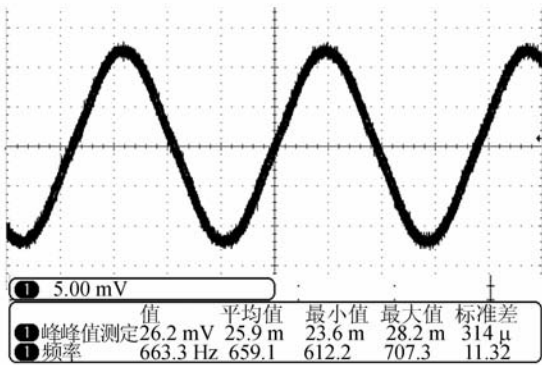


图 6 实验装置

Fig. 6 Experimental setup

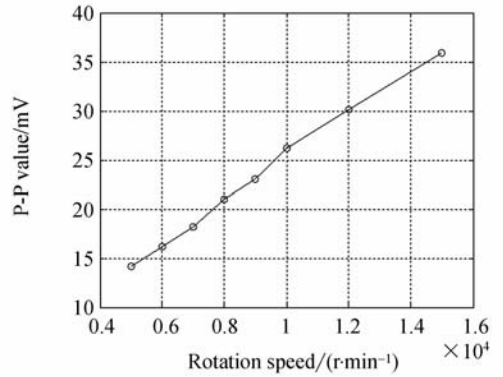
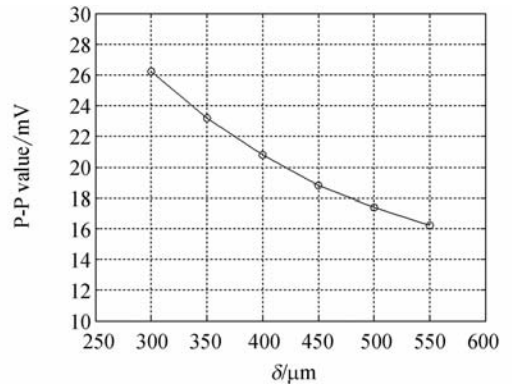
## 4.2 结果

由于加工和装配精度的限制,微发电机的最小气隙厚度约为  $300 \mu\text{m}$ 。在这一气隙厚度下,改变微马达的驱动电压来改变转子的转速。图 7 为微发电机在  $10 \text{ kr/min}$  时一相线圈的感应电动势波形,其峰峰值为  $26.2 \text{ mV}$ 。图 8 为不同转速时微发电机感应电动势的峰峰值。

图 7 一相线圈感应电动势波形( $10 \text{ kr/min}$ ,  $300 \mu\text{m}$ )Fig. 7 Waveform of induced EMF in single phase ( $10 \text{ kr/min}$ ,  $300 \mu\text{m}$ )

改变气隙厚度,同时通过调节微马达的驱动电压使转子转速保持在  $10 \text{ kr/min}$ ,得到微发电机一相感应电动势与气隙厚度的关系,如图 9 所示。

将负载与微发电机线圈连接,微发电机可向负载输出功率。经测量,每相线圈的内阻约为  $0.18 \Omega$ 。将 3 个阻值为  $0.23 \Omega$  的电阻分别接入三相线圈形成对称负载。在气隙厚度为  $300 \mu\text{m}$ ,转速为  $10 \text{ kr/min}$  时,测得电阻两端电压为  $U_m = 14.8 \text{ mV}_{\text{pp}}$ 。一相输出功率可表示为<sup>[12]</sup>

图 8 不同转速下感应电动势峰峰值( $300 \mu\text{m}$ )Fig. 8 P-P value of induced EMF in variations of rotation speed ( $300 \mu\text{m}$ )图 9 不同气隙厚度下感应电动势峰峰值( $10 \text{ kr/min}$ )Fig. 9 P-P value of induced EMF in variations of air-gap thickness ( $10 \text{ kr/min}$ )

$$P = \frac{U_0^2}{R} = \frac{U_m^2}{2R}, \quad (4)$$

式中, $U_0$  为一相输出电压的有效值, $R$  为负载的电阻值。由式(4),可得微发电机在  $0.23 \Omega$  对称负载运行时,一相输出功率为  $119.1 \mu\text{W}$ ;三相输出功率总和为  $357.3 \mu\text{W}$ 。

## 5 讨论

实验结果显示:当气隙厚度为  $300 \mu\text{m}$ ,转速为  $10 \text{ kr/min}$  时,微发电机的一相感应电动势可达  $26.2 \text{ mV}$ 。由图 8 可知,感应电动势与转速成正比,这与式(2)相吻合,因此提高转速可有效增加微发电机的感应电动势。由图 9,感应电动势随气隙厚度的增加而迅速下降。当采用更为精密的装配技术后,可以通过减小气隙厚度来提高感应电动势。

设微发电机转速为 10 kr/min,由式(1)、(2)计算不同气隙厚度下感应电动势的理论值;并由有限元分析得到仿真结果,将以上结果与实验结果进行比较,如图 10 所示。

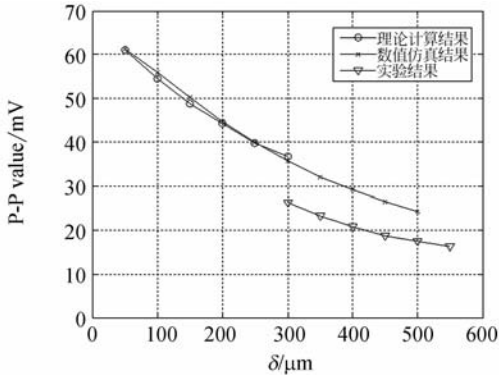


图 10 理论计算、仿真和实验结果比较(10 kr/min)

Fig. 10 Comparison of results by theoretical analysis, simulation and experiment (10 kr/min)

图 10 所示的结果表明,基于磁路分析方法计算的微发电机感应电动势与数值仿真结果能够很好吻合,说明式(1)、(2)可准确计算微发电机的输出特性,可以作为设计的重要依据。实验结果与仿真结果差别较大:当气隙厚度为 300  $\mu\text{m}$  时,仿真结果为 35.7 mV,实验值为仿真值的 73.4%。误差主要原因为:

(1)仿真分析和理论计算都忽略了磁轭的磁滞和涡流等损耗;而在高速旋转中,上述损耗对感应电动势的影响较大。

(2)受实验条件限制,转子与微马达轴装配后的垂直度不很理想,在高速旋转中产生了气隙厚度的波动;而工作中最小气隙厚度为 300  $\mu\text{m}$ 。

(3)永磁体在储存后产生了一定的退磁,并且不能保证 8 个永磁体性能的一致性。

尽管如此,实验结果体现了微发电机作为能

源装置的潜力,即在接入匹配的电阻后,输出功率达到 357.3  $\mu\text{W}$ 。由于  $U_0 \propto \Omega$ ,因此提高转速可有效增加输出功率。如果转速提高到 20 kr/min,输出功率可达 1.43 mW。同时,若采用更精密的装配技术,可以减小气隙厚度,也可以产生更大的能量。在 20 kr/min 的转速下,如果气隙厚度减小到 200  $\mu\text{m}$ ,输出功率可达 2.25 mW。

微发电机的构件都根据 MEMS 加工技术的特点设计。通过改进工艺,可更多利用 MEMS 加工技术制造构件,以提高集成度并达到大批量生产的目的。如转子基板可使用 SU-8 胶光刻成型<sup>[13]</sup>;线圈采用电镀工艺加工在磁性基底上等。若线圈采用电镀技术,当最小线宽达到 20  $\mu\text{m}$ ,匝数可以达到 4 或更高。根据式(2),在 10 kr/min 的转速下,感应电动势可大于 100 mV。

## 6 结 论

本文设计了尺寸为  $(\Phi 7 \times 2) \text{ mm}^3$  的旋转式微发电机。运用磁路分析法推导了气隙磁密和感应电动势的表达式。通过有限元分析得到了微发电机感应电动势的仿真结果。应用超精密加工技术制造了发电机定子和转子的各构件,并装配成为微发电机原型样机。对原型样机进行分析,得到了微发电机在不同转速和不同气隙厚度时的感应电动势以及接入负载后的输出功率。实验结果表明,当气隙厚度为 300  $\mu\text{m}$ ,转速为 10 kr/min 时,微发电机的一相感应电动势可达 26.2 mV;当接入 0.23  $\Omega$  的三相对称负载后,总输出功率为 357.3  $\mu\text{W}$ 。实验结果体现了微发电机可作为微能源为微系统供电的潜力。下一步的研究工作包括更多利用 MEMS 加工技术制造构件和设计合理的动力源为微发电机提供持续的机械能。

## 参考文献:

- [1] 张杨键,伞海生. MEMS 复合式振动能量采集器[J]. 光学精密工程,2009,17(6):1262-1266.  
ZHANG Y J, SAN H. MEMS hybrid power-generator from vibration energy [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(6):1262-1266. (in Chinese)
- [2] 贺学锋,温志渝,温中泉. 压电式振动发电机的建模

及应用[J]. 光学精密工程,2009,17(6):1436-1441.

HE X F, WEN ZH Y, WEN ZH Q. Modeling and application of piezoelectric vibration-based power generator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(6):1436-1441. (in Chinese)

- [3] ARNOLD D. Review of microscale magnetic power generation [J]. *IEEE Transaction on Magnetics*, 2007,43(11):3940-3951.

- [4] HOLMES A, HONG G, PULLEN R. Axial-flux permanent magnet machines for micropower generation [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2005,14(1):54-62.
- [5] DAS S, ARNOLD D, ZANA I, *et al.*. Microfabricated high-speed axial-flux multiwatt permanent-magnet generators—part I: modeling [J]. *Journal of Micro-electromechanical System*, 2006, 15(5): 1330-1350.
- [6] ARNOLD D, DAS S, PARK J-W, *et al.*. Micro-fabricated high-speed axial-flux multiwatt permanent-magnet generators—part II: design, fabrication, and testing [J]. *Journal of Micro-electromechanical System*, 2006,15(5):1351-1363.
- [7] 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: China Machine Press, 1997. (in Chinese)
- [8] 王秀和. 永磁电机[M]. 北京:中国电力出版社, 2007.  
WANG X H. *Permanent Magnet Machines* [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2007.
- [9] 王晓远,李娟,齐立晓,等. 盘式永磁同步电机永磁体内涡流的有限元分析[J]. 微电机,2007,40(1):5-9.  
WANG X Y, LI J, QI L X, *et al.*. FEM analysis of the eddy current in the permanent magnet of disc type permanent magnet synchronous machines [J]. *Micromotors*, 2007,40(1):5-9. (in Chinese)
- [10] 杜志明. 盘式低速永磁同步电动机的电磁场分析[D]. 天津:天津大学,2007.  
DU ZH M. *Analysis of electromagnetic field of low-speed disc type permanent magnet synchronous machines* [D]. Tianjin: Tianjin University, 2007. (in Chinese)
- [11] 严密,彭晓领. 磁学基础与磁性材料[M]. 杭州:浙江大学出版社,2006.  
Yan M, PENG X L. *Basic Magnetism and Magnetic Material* [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006. (in Chinese)
- [12] 戴文进,徐龙权. 电机学[M]. 北京:清华大学出版社,2008.  
DAI W J, XU L Q. *Electric Machinery* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008. (in Chinese)
- [13] 郑津津,陈有梅,周洪军,等. SU-8 紫外深度光刻的误差及修正[J]. 光学精密工程,2007,15(12): 1926-1931.  
ZHENG J J, CHEN Y M, ZHOU H J, *et al.*. Correction of pattern transfer errors for SU-8 UV deep lithography [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(12):1926-1931.

## 作者简介:



孙韶春(1984—),男,河北张家口人,博士研究生,2006年于东华大学获得学士学位,主要从事微机电系统和测试技术的研究。E-mail: sunshaochun 66@gmail.com

## 导师简介:



石庚辰(1950—),男,河南温县人,教授,博士生导师,1981年于北京理工大学获得硕士学位,主要从事微机电系统和传感与检测技术的研究。E-mail: shigengchen@bit.edu.cn