

# 磁场增强压电悬臂梁震动发电装置

韩权威<sup>1</sup>, 李坤<sup>1</sup>, 严玲<sup>1</sup>, 周金龙<sup>1</sup>, 王雨<sup>2</sup>, 陈王丽华<sup>2</sup>

(1. 江苏工业学院 材料学院, 江苏 常州, 213164; 2. 香港理工大学 应用物理系及材料研究中心, 香港)

**摘要:** 在压电悬臂梁的自由端施加非均匀磁力增加梁的振幅, 探索研究了磁力对悬臂梁的谐振频率漂移、输出电压和输出功率的影响。结果表明, 引入非均匀磁场斥力, 压电悬臂梁的输出电压和输出功率得到明显提高。当负载电阻为 100 k $\Omega$ , 振动台(LDS)用 0.200 V 正弦电压驱动时, 由尺寸 75 mm $\times$ 7.8 mm $\times$ 0.35 mm 的锆钛酸铅(PLZT)长压电片和 80 mm $\times$ 7.8 mm $\times$ 0.10 mm 黄铜片构成的压电悬臂梁在谐振频率的电压和功率输出分别为 19.02 V 和 1.8 mJ。

**关键词:** 压电; 悬臂梁; 振动传感器; 压电发电; 磁场增强振动

中图分类号: T N384; O 59 文献标识码: A

## Magnetic Field Enhanced Piezoelectric Cantilever Structure Vibration Generator

HAN Quanwei<sup>1</sup>, LI Kun<sup>1</sup>, YAN Ling<sup>1</sup>, ZHOU Jinlong<sup>1</sup>, WANG Yu<sup>2</sup>, CHAN Helen Lamwah<sup>2</sup>

(1. College of Materials Science and Engineering, Jiangsu Polytechnic University, Changzhou 213164, China;

2. Dept. of Applied Physics and Materials Research Centre, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong)

**Abstract:** The swing amplitude of the piezoelectric cantilever can be improved via applying a non uniform magnetic force on its free end. The effect of the magnetic force on the resonant frequency shift, output voltage and output power of the cantilever has been investigated. The results showed that the output voltage and output power of the cantilever could be improved obviously when a nonlinear magnetic repulsion force was applied. When a 100 k $\Omega$  resistor was loaded and the vibrator (LDS, Ling Dynamic System) was driven by 0.200 V sine wave voltage, the output voltage and output power of the cantilever, which was composed of a piece of PLZT (size of 75 mm $\times$ 7.8 mm $\times$ 0.35 mm) and a piece of brass (size of 80 mm $\times$ 7.8 mm $\times$ 0.10 mm), were found to be 19.02 V and 1.8 mJ respectively at resonant frequency.

**Key words:** piezoelectric; cantilever; vibration sensor; piezoelectric generator; magnetic field enhanced vibration

### 0 引言

薄臂压电悬臂梁已在振动探测和应力监测方面得到了广泛应用, 潜在的应用还包括发电, 典型的应用有直升机旋翼、垂直稳定旋翼、可弯曲机械臂、风力涡轮机、特殊无线系统供电及交变磁场测量<sup>[1-6]</sup>。通常使用的压电悬臂梁有单压电片和双压电片两种结构。单压电片结构由一块薄压电陶瓷片和一片面积相近的金属薄片粘结而成; 压电陶瓷沿厚度方向极化, 复合长片的一端固定于基座, 压电片内的应力来自于悬臂梁弯曲振动时曲面长度的变化。双压电片结构由两片尺寸相同、极化方向相反的薄压电陶瓷片粘结而成, 将叠合片的一端固定在底座上形成悬臂梁。叠合片的上下表面连通过作为一个电极, 另一电极由夹层中间引出。当悬臂梁弯曲振动时, 施加于两个压电片的应力矢量正好相反, 但由于两个压

电片的极化方向相反, 在叠合片的上下表面产生的电荷相同。为了获得大的应力, 一般在悬臂梁的自由端加 1 个重物负载。这种方法也可降低悬臂梁的谐振频率。从环境振动收集电能, 悬臂梁的面积要做得较大, 负载的物体也较重, 因为环境振动的频率一般较低, 振幅也小。但由于负载物的惯性较大, 突发的高强度振动会引起悬臂梁的折断。将一块相对较小的磁铁负载于悬臂梁的自由端, 通过另一个相反放置的磁铁对其施加互相排斥的磁力, 以增加梁的振动幅度, 降低谐振频率。NdFeB 具有  $4.3 \times 10^5$  J/m<sup>3</sup> 的磁能积, 是目前永磁铁中最强的永磁材料, 可产生强的磁力。锆钛酸铅(PLZT)有较大的面向压电应变常数  $d_{31}$ 、大的面向机电系数  $k_p$ , 因此选用它来制作悬臂梁的压电薄片。另外, 由于压电片的电学阻抗会影响压电悬臂梁的电输出功率, 也综合考虑了材料在工作频率附近的电学阻抗。

收稿日期: 2010-01-12

基金项目: 香港政府研究基金资助项目 (TBBZ3, G-U561)

作者简介: 韩权威(1983), 男, 河南郑州人, 硕士生, 主要从事无机材料及器件的研究。

## 1 磁增强压电悬臂梁的制作和性能测试

用氧化物烧结工艺制备  $\text{Pb}_{1-1.5x}\text{La}_x(\text{Zr}_{0.58}\text{Ti}_{0.42})_{1-1.25y}\text{Nb}_y\text{O}_3 + 0.01\% \text{Bi}_2\text{O}_3$  (PLZT,  $x = 0.06, y = 0.02$ , 质量分数) 粉体。用轧膜工艺制成粗坯膜片,并于  $1285^\circ\text{C}$  烧结  $90\text{ min}$  成为尺寸约为  $75\text{ mm} \times 7.8\text{ mm} \times 0.35\text{ mm}$  和  $75\text{ mm} \times 7.8\text{ mm} \times 0.20\text{ mm}$  的陶瓷薄片。X 线衍射仪(Philips Dual X'pert)分析表明 PLZT 为纯相立方结构。涂覆电极的陶瓷薄片在  $4.0\text{ kV/mm}$  电场下于  $80^\circ\text{C}$  极化  $10\text{ min}$ 。短路老化两天后用阻抗分析仪(HP4294A)和  $d_{33}$  测量仪(ZJ3) 测量陶瓷薄片的电学性能。电学参数根据谐振-反谐振法计算,如表 1 所示。比较表中数据可知,较厚的压电片的性能较好,所以本文后面讨论的压电悬臂梁均用厚度为  $350\text{ }\mu\text{m}$  的 PLZT 压电片制作。

表 1 PLZT 陶瓷片和厚膜的性能

样品	薄片	薄片	圆片
厚度/mm	0.200	0.350	1.230
极化电场/( $\text{kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ )	4.0	4.0	4.0
$d_{33}/(\text{pC} \cdot \text{N}^{-1})$	664	675	682
$k_t$	0.51	0.51	0.51
$k_{31}$	0.31	0.33	0.33
$\varepsilon$	2821	2939	2950
$\tan \delta(1\text{ kHz})$	0.035	0.031	0.030

将 PLZT 压电片用环氧树脂粘贴在厚  $100\text{ }\mu\text{m}$ 、长  $80\text{ mm}$ 、宽  $8\text{ mm}$  的黄铜片上形成叠层结构,再将其一端固定在玻璃基座上构成悬臂梁。在悬臂梁的自由端粘贴一块  $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 1\text{ mm}$  (楔形部分宽  $2\text{ mm}$ ) 的 Nd-Fe-B 磁铁,另一块尺寸为  $10\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 1\text{ mm}$  (楔形部分宽  $3\text{ mm}$ ) 的 Nd-Fe-B 磁铁沿磁场相斥方向固定在悬臂梁前方。磁铁间的距离可调节,如图 1 所示。为了比较斥力的作用对梁振动的影响,本研究还用相同尺寸的方块磁铁组装了悬臂梁,对两种悬臂梁的电压和功率输出进行了比较。

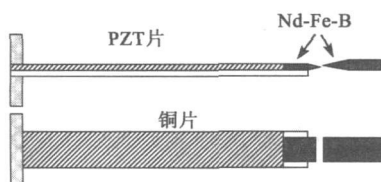


图 1 磁增强压电悬臂梁结构示意图

悬臂梁固定于振动台(LDS)。振动台的频率和振幅由函数信号发生器产生的信号电压和频率控

制。因为振动台的加速度随频率的变化在低频区 ( $< 100\text{ Hz}$ ) 为非均匀关系,在平行测量中信号电压为  $0.2\text{ V}$  的正弦波以确保测量结果的可靠性。压电悬臂梁的输出电压用 HP Infinium 54820A 示波器测量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 磁铁的作用

无磁力影响时,压电悬臂梁振动遵从虎克定律。以单压电片悬臂梁长度方向为  $x$ ,厚度方向为  $z$ 。根据材料的弹性理论,压电片的应力和应变的关系为

$$T_p = E_p(S_1 - g_{31}D_3) \quad (1)$$

$$E_3 = -g_{31}T_p + \beta_{33}^T D_3 \quad (2)$$

式中:  $S_1 = -\rho$  和  $T_p$  分别为  $x$  方向的应变和应力,  $\rho$  为曲率半径;  $g_{31}$  为压电电压常数;  $E_p$  为压电材料的杨氏模量;  $D_3$  和  $E_3$  分别为  $z$  方向的电位移和电场强度;  $\beta_{33}^T = 1/\epsilon_{33}^T$  为介电隔离率,  $\epsilon_{33}^T$  为  $z$  方向的介电常数。

压电梁端部受外力作用时会引起弯曲变形,从而在其表面产生电荷,而电量的多少取决于其应力分布状态或变形形状。对于非对称结构的单压电片梁,压电片和金属基板以  $x$  轴为公共中介面弯曲,可利用 Euler-Bernoulli 法确定其上表面到中介层的距离  $z_s$ 。当压电梁自由端受外力作用时,力矩方程为

$$M = n \int_0^L \int_{z_s-h_p}^{z_s} z T_p dy dz + \int_0^L \int_{h^+z_s}^{h^+} z T_m dy dz = (x-L)F \quad (3)$$

式中:  $L$ 、 $W$  和  $h$  分别为压电梁的长、宽、高,下标  $p$  和  $m$  分别为压电片和基板;  $n$  为压电片的数量;  $T_m = E_m S_1$  是基板在  $x$  方向的应力。

闾君武等人通过积分和边界条件下近似可得出单片压电片梁产生的电能为<sup>[7]</sup>

$$U_g(F) = \frac{9(1-\alpha)(1-\alpha+\alpha\beta)\alpha^2\beta^2k_{31}^2L^3}{2ABE_pWh^3} F^2 \quad (4)$$

或

$$U_g(\delta) = \frac{9(1-\alpha)\alpha^2\beta^2k_{31}^2E_pAWh^3}{32(1-\alpha+\alpha\beta)BL^3} \delta^2 \quad (5)$$

其中

$$A = \alpha^4(1-\beta)^2 - 2\alpha(2\alpha^2 - 3\alpha + 2)(1-\beta) + 1 \quad (6)$$

$$B = A(1-\alpha+\alpha\beta)(1+k_{31}^2) - 3\alpha^2(1-\alpha)\beta^2k_{31}^2 \quad (7)$$

$$k_{31}^2 = E_p g_{31}^2 / \beta_{33}^T \quad (8)$$

式中:  $\alpha$  为金属基板厚度与总厚度的比值;  $\beta = E_m/E_p$  为杨氏模量比;  $E_m$  为金属基板的杨氏模量;  $k_{31}$  为横

向长度伸缩振子机电耦合系数。

把一块磁铁粘贴在悬臂梁的自由端,并在该磁铁的对面沿磁场互斥方向固定另一块较大磁铁,这样就向悬臂梁结构中引入了互斥磁力(见图 1)。悬臂梁自由端所受力由小磁铁重力  $F_{重力}$ 、小磁铁在磁场中的扭矩  $F_{磁距}$  和磁场斥力  $F_{斥力}$  部分组成。

$$F = F_{重力} + F_{磁距} + F_{斥力} \quad (9)$$

当两块磁铁呈直线排列时,磁力沿轴向互斥,处于亚稳定态。当其中一块磁铁偏离轴线时会产生垂直方向的分力矢量,这个分力与振动力一起推动悬臂梁使其振幅更大。磁场为非均匀磁场,磁场斥力和扭矩力均随磁铁间距离  $r$  迅速衰减。用类似于电场的方法近似处理,其大小与  $1/r^2$  成正比。由于  $r$  远小于梁长度,摆角较小时两块磁铁顶端与固定处可近似为等腰三角形,因此有

$$r = 2L \sin(\theta/2) \quad (10)$$

$$F_{磁距} + F_{斥力} \propto \frac{1}{4L^2 \sin^2(\theta/2)} \quad (11)$$

式中  $\theta$  为悬臂梁摆动角。

近似压电悬臂梁的能量与摆动角的关系可用示意图来描述,如图 2 所示。其中  $\theta_0$  为能量最低时的摆动角。

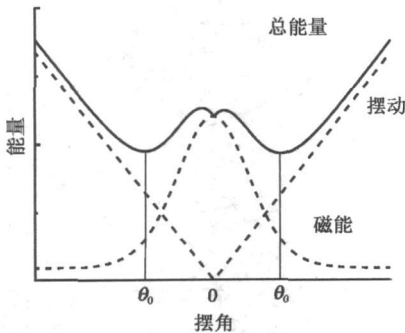


图 2 悬臂梁摆角与能量关系示意图

由图 2 可知,磁能的引入使悬臂梁在摆动角为 0 的位置出现了一个势垒。如果振动能不足以克服该势垒,它就会被限制在势阱中。通过选择合适磁铁尺寸和调整两磁铁间的距离确保压电悬臂梁摆动时能克服磁能势垒。

### 2.2 悬臂梁测试结果与讨论

图 3 为压电悬臂梁的阻抗随频率变化图谱。其中叠层片的一端有 17 mm 长夹持在刚性玻璃基座中。图中显示悬臂梁弯曲振动模式的谐振频率为 70 Hz,在谐振频率处的阻抗约为 170 kΩ,谐振峰规则而干净。无磁铁块负载时谐振频率为 92 Hz 阻抗约为 120 kΩ。

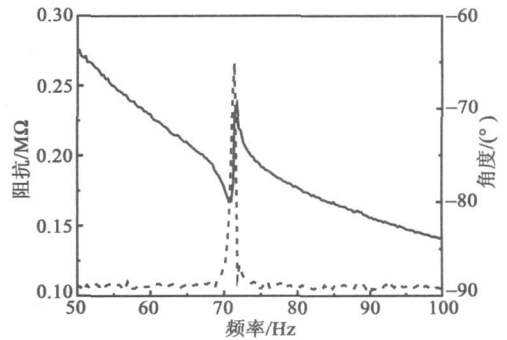
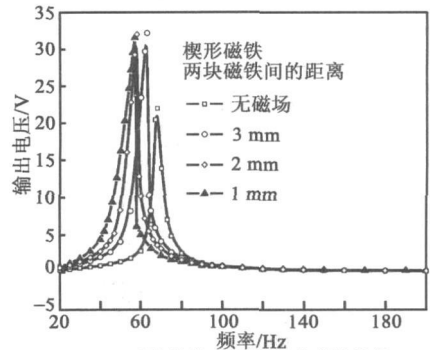
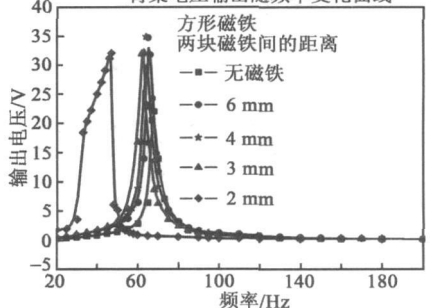


图 3 悬臂梁的阻抗频率谱

图 4 为悬臂梁输出电压与频率的关系。振动台由 0.200 V 正弦电压驱动。不加磁场时(将悬臂梁对面的磁铁拆掉),固定在悬臂梁自由端的磁铁仍作为重物负载,保持梁的质量不变。由图可知,引入附加磁场可提高输出电压,降低悬臂梁的谐振频率。负载楔形磁铁的悬臂梁,两块磁铁间的距离对谐振频率的影响更明显。这一现象主要是由于楔形磁铁的刀锋附近磁场分布集中。以其制作的悬臂梁的势垒峰的宽度较窄。



(a) 开路条件下负载楔形磁铁的悬臂梁电压输出随频率变化曲线



(b) 尺寸相同但磁铁为方块形状的压电悬臂梁开路电压

图 4 悬臂梁输出电压与频率的关系

磁铁刀锋附近的磁力线曲率大于方块磁铁顶端附近的磁力线曲率。因此,两块楔形磁铁只要有少量错开就会产生垂直于梁长度方向的推力。与没有磁力辅助的压电悬臂梁对比,磁增强压电悬臂梁

的振幅增大,输出电压增大。磁力为非均匀力,随磁铁间距离增大迅速衰减。该悬臂梁的长度较长,尖端处的摆动幅度较大,当悬臂梁振幅大到某一程度后磁力会变得很弱,几乎可忽略。所以,磁铁直线排列的间距缩小到一定范围内时,悬臂梁最大输出电压几乎相同。

图5为负载电阻时悬臂梁输出电压。在负载电阻相同时,磁增强悬臂梁的输出电压明显高于无磁场的悬臂梁。由于在工作频率时悬臂梁中PLZT片的阻抗很高,负载电阻与PLZT压电片为串联,阻值较大的电阻分享的总电压也会越大。输出电压随负载电阻的增加而增加。另外,在低于谐振频率时输出电压的增幅高于在谐振频率时的增幅,这主要是因为谐振频率前后悬臂梁弯曲模式的变化。在低于谐振频率的低频区,悬臂梁弯曲为统一的左右摇摆弯曲。PLZT压电片整体被挤压或拉伸。在同一电极上产生的电荷符号相同。如果谐振频率高于谐振频率,振幅会下降。当振动频率接近3次谐波时,会悬臂梁上产生1个节点。悬臂梁的波节两边处弯曲方向相反,节点两边的PLZT陶瓷片内感受的应力分别为拉应力和压应力,产生的电荷符号相反而部分相互抵消。因此,高于谐振频率时输出电压和功率均降低。

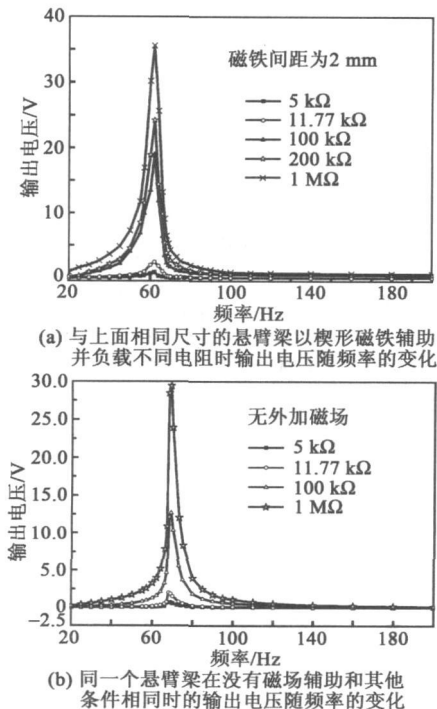


图5 负载电阻时悬臂梁输出电压

图6为不同电阻负载时悬臂梁在谐振频率下的输出功率。无外加磁场时负载磁铁仍作为负重物,保持悬臂梁的自重不变。交流输出功率为

$$W = V_{pp}^2 / 2R \quad (12)$$

式中:  $V_{pp}$  为交流电压峰峰值;  $R$  为负载电阻。虽然高的负载电阻可得到大的电压输出,但最大输出功率出现在负载为  $100 \text{ k}\Omega$  附近。该阻抗接近压电悬臂梁在谐振频率处的阻抗值。通过比较可看出,磁场增强压电悬臂梁的输出功率提高一倍。这主要得益于磁场下梁的弯曲幅度增加,由此增加了压电陶瓷片内应力和输出电压。另外,我们也尝试制作了间距  $10 \text{ mm}$  叉指电极结构的压电薄片,并用其组装了与前面所述尺寸相同的压电悬臂梁。实验发现,该悬臂梁在谐振频率的阻抗为  $2 \text{ M}\Omega$ 。虽然其开路输出电压较高,但负载电阻时的输出电压和功率均大幅下降,最大输出功率只有相同条件下厚度方向极化压电悬臂梁输出功率的  $1/30$ 。压电陶瓷的阻抗普遍较高,对于厚度方向极化的薄压电片,增大电极面积和减小厚度均可降低电阻抗。这有利于提高在低负载下的输出功率。再则,与叉指电极结构的压电薄片相比,厚度极化压电薄片振子易烧制,电极结构简单,极化电压也低得多。

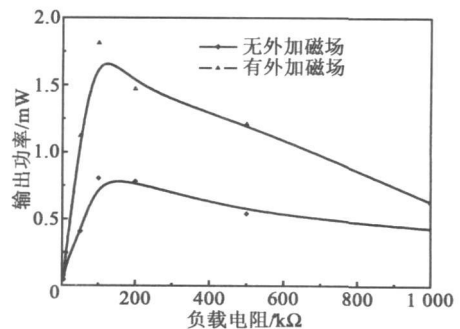


图6 悬臂梁输出功率随负载电阻的变化

### 3 结束语

在悬臂梁结构中引入了磁力以增大振幅和电能输出。实验结果显示,当振动频率在谐振频率以下时,用两个尖头磁铁产生的不均匀磁力可增大悬臂梁振幅,提高输出电压和功率。对于一个用  $75 \text{ mm} \times 7.8 \text{ mm} \times 0.35 \text{ mm}$  的PLZT、 $80 \text{ mm} \times 7.8 \text{ mm} \times 0.10 \text{ mm}$  黄铜及尺寸分别为  $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$  和  $10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$  的两块NdFeB磁铁制作的压电悬臂梁,负载  $100 \text{ k}\Omega$  电阻时输出电压和功率分别为  $19.02 \text{ V}$  和  $1.8 \text{ mJ}$ 。振动台用  $0.200 \text{ V}$  正弦电压驱动。

电机正向的空载转速为 48 r/min, 最大输出功率为 0.67 W, 最大效率为 19.7%, 堵转点转矩为 0.39 N·m, 因转子半径为 22 mm, 最大输出力约为 17.7 N, 直线速度约为 110.5 mm/s。电压、预压力均保持不变, 调频测得电机的最大空载转速为 150 r/min, 直线速度约为 345.4 mm/s。

电机反向的空载转速为 44.8 r/min, 最大输出功率为 0.61 W, 最大效率为 18.1%, 堵转点转矩为 0.37 N·m, 因外圆半径为 22 mm, 最大输出力约为 16.8 N, 直线速度约为 103.2 mm/s。电压、预压力均保持不变, 调频测得电机的最大空载速度 146.4 r/min, 直线速度约为 337.1 mm/s。

#### 4 结束语

针对南京航空航天大学精密驱动研究所研制的“V”形直线超声电机提出了一种新型的夹持方案, 经仿真分析, 此方案具有很好的横向稳定性。通过实验研究了双层板簧的刚度特性及其适用的预压力加载范围。借助于 YW8 超声电机机械特性自动测试系统测试出电机的转矩、转速、效率、输出功率等机械性能, 经分析, 此方案可显著提高电机的稳定性和机械性能, 电机最大输出力达 17.7 N, 最大功率为 0.67 W, 最大效率为 19.7%, 最大空载速度为 345.4 mm/s。

#### 参考文献:

[1] 赵淳生. 超声电机技术与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007.

- [2] POZZI M, KING T. Piezoelectric actuators in micropositioning[J]. *Engineering Science and Education Journal*, 2001, 10(3): 31-36.
- [3] LIU Yungtien, HIGUCHI T. Precision positioning device utilizing impact force of combined piezo pneumatic actuator[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2001, 6(4): 467-473.
- [4] BARTH H V. Ultrasonic driven motor[J]. *IBM Technical Disclosure Bulletin*, 1973, 16(7): 2263.
- [5] TOMIKAWA Y, KONDO T, OGASAWARA T. Fundamental considerations of excitation of a flexural progressive wave and its application[J]. *Jpn J Appl Phys*, 1986, 26(1): 194-196.
- [6] KUROSAWA M, TAKAHASHI M, HIGUCHI T. Friction drive surface acoustic wave motor[J]. *Ultrasonics*, 1995, 34(3): 243-246.
- [7] TAKANO T, TOMIKAWA Y, OGASAWARA T. Ultrasonic motors using piezoelectric ceramic multi mode vibrators[J]. *Jpn J Appl Phys*, 1988, 27(1): 192-194.
- [8] 陈永校, 郭吉丰. 超声波电动机[M]. 浙江: 浙江大学出版社, 1994.
- [9] 黄卫清, 孟益民. 一种新型非共振压电直线电机的设计[J]. *中国机械工程* 2009, 20(14): 1717-1721.
- HUANG Weiqing, MENG Yimin. Design of a new type of piezoelectric linear motor based on non resonant vibration[J]. *China Mechanical Engineering*, 2009, 20(14): 1717-1721.

(上接第 88 页)

#### 参考文献:

- [1] XING Zengping, LI Jiefang, VIEHLAND D. Giant magnetoelectric effect in Pb(Zr, Ti)O<sub>2</sub>/bimorph/NdFeB laminate device[J]. *Appl Phys Lett*, 2008, 93(1): 013505-013509.
- [2] LOBONTIU N, LUPEA I, ILIC R, et al. Modeling, design, and characterization of multisegment cantilevers for resonant mass detection[J]. *J Appl Phys*, 2008, 103(6): 064306-064315.
- [3] WANG Zhuo, XU Yong. Vibration energy harvesting device based on air spaced piezoelectric cantilevers[J]. *Appl Phys Lett*, 2007, 90(26): 263512-263514.
- [4] CHUNG H C, KUMMARI K L, CROUCHER S J, et al. Development of piezoelectric fans for flapping wing application[J]. *Sens Actuators A*, 2009, 149(1): 136-142.
- [5] ALLAMEH S M, AKOGWU O, COLLINSON M, et al. Piezoelectric generators for biomedical and dental applications: Effects of cyclic loading[J]. *J Mater Sci Mater Med*, 2007, 18(1): 39-45.
- [6] JEONG W Y, SHIH W Y, MUTHARASAN R, et al. In situ cell detection using piezoelectric lead zirconate titanate stainless steel cantilevers[J]. *J Appl Phys*, 2003, 93(1): 619-623.
- [7] 阚君武, 唐可洪, 王淑云, 等. 压电悬臂梁发电装置建模与仿真分析[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(1): 71-75.
- KAN Junwu, Tang Kehong, WANG Shuyun, et al. Modeling and simulation of piezoelectric cantilever generators[J]. *Opt Precision Eng*, 2008, 16(1): 71-75.