

文章编号 1004-924X(2013)02-0342-07

## 基于圆弧限位的压电发电装置

王淑云<sup>1</sup>, 阚君武<sup>2\*</sup>, 王鸿云<sup>2</sup>, 凌荣华<sup>2</sup>, 杨振宇<sup>2</sup>, 蒋永华<sup>2</sup>, 张忠华<sup>2</sup>

(1. 浙江师范大学 数理与信息工程学院, 浙江 金华 321004;

2. 浙江师范大学 精密机械研究所, 浙江 金华 321004)

**摘要:**提出一种基于圆弧限位压电发电装置来提高发电能力及可靠性。介绍了该装置的结构及工作原理,建立了其机电能量转换模型。通过模拟仿真分析获得了压电振子厚度比(基板与总厚度比)对最小限位圆弧半径及能量、及压电振子厚度和限位圆弧半径对电压及能量的影响规律。结果表明,最小限位圆弧半径随厚度比的增加而线性减小,且存在共同的最佳厚度比(0.35)使不同厚度压电振子的输出电压和能量最大;在最佳厚度比时,输出电压和能量随压电振子厚度增加或限位圆弧半径降低而增加。制作了一组限位圆弧半径不等的发电装置,并进行了相关试验测试。结果表明,压电振子的最大输出电压(变形量)仅与限位圆弧半径有关,故采用最小限位圆弧半径可同时获得最大的发电能力和较高的可靠性。

**关键词:**压电发电装置;能量转换;限位圆弧

**中图分类号:**TH384;TM35 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132102.0342

## Piezoelectric energy generator based on deflection-limiting circular arc

WANG Shu-yun<sup>1</sup>, KAN Jun-wu<sup>2\*</sup>, WANG Hong-yun<sup>2</sup>, LING Rong-hua<sup>2</sup>,  
YANG Zhen-yu<sup>2</sup>, JIANG Yong-hua<sup>2</sup>, ZHANG Zhong-hua<sup>2</sup>

(1. *College of Mathematics Physics and Information Engineering,*  
*Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China;*

2. *Institute of Precision Machinery, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China)*  
\* *Corresponding author, E-mail: jutkjw@yahoo.com.cn*

**Abstract:** A piezoelectric energy generator with a Deflection-limiting Circular Arc (DLCA) was presented to enhance its generated energy and reliability. The structure and working principle of the piezoelectric generator were introduced and an energy conversion model for the piezoelectric generator was established. By simulation, the influence of thickness ratio of the substrate thickness to the total thickness of the piezo-cantilever on the minimal radius of DLCA as well as the generated energy, and that of total thickness of the piezo-cantilever and the radius of DLCA on the generated voltage as well as electrical energy were obtained. The analytical results show that the minimal radius of the DLCA decreases linearly with the increasing of thickness ratio, and there is a shared optimal thickness ratio (0.35) for piezoelectric generators with different total thicknesses to achieve maximal output voltage

**收稿日期:**2012-10-08;**修订日期:**2012-11-30.

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(No. 51277166, 51075371);浙江省自然科学基金资助项目(No. LQ12E07002, Y4110315);浙江省新苗人才计划资助项目(No. 2011R404027)

and energy. Several piezoelectric generators with different radii of DLCA were fabricated and tested. The results show that the maximal voltage (displacement) of the piezoelectric generator depends mainly on the radii of DLCA. When a minimal radius of DLCA is set, both the maximal electrical energy and higher reliability can be achieved.

**Key words:** piezoelectric energy generator; energy conversion; deflection-limiting circular arc

## 1 引言

现有微功率便携式电子产品基本都由电池供电,而电池因体积大、寿命短而逐渐不能满足使用要求;同时,废旧电池含有重金属,如处理不当会造成严重的环境污染。因此人们开始寻求电池的替代品——微型发电装置,以便在某些特殊的应用领域替代电池或自动为电池充电。目前,基于压电及电磁等原理的微型发电装置的研究已成为国内外的研究热点,美国、日本、荷兰、英国等国家都在进行相关研究<sup>[1-4]</sup>。每种类型的发电装置都有其自身的特点和应用领域,如压电发电装置的优点在于结构简单、不发热、无电磁干扰、易于加工制作和实现结构上的微小化、集成化等,故应用范围更广。目前,人们已成功开发了用于卫星定位跟踪的压电发电鞋、压电自供电汽车轮胎压力报警器、压电自供电无线传感器及遥控器<sup>[5-9]</sup>等,表明压电发电技术已从最初的基础理论研究向实用化研究方向发展。为加快压电发电装置实用化进程,必须同步解决的两个关键问题是使其具有足够的发电能力和可靠性。

值得肯定的是,人们在提高发电能力方面已经取得了大量卓有成效的研究成果,相继提出了多种基于磁力耦合技术的微幅振动发电机结构以及可有效提高能量回收效率的控制电路<sup>[3,10-11]</sup>。然而,对于悬臂梁式压电发电装置,目前的研究重心还多集中在如何使其在具体的工作环境中产生共振方面(具体包括降低谐振频率和增加振幅两方面内容),未能充分考虑这类共振式发电装置的可靠性问题。众所周知,一端固定、一端自由的悬臂梁式发电装置变形时其固定端所受应力最大,而自由端应力为0,故发电能力未得到充分发挥;更重要的是,这类结构的发电装置因自由端配置集中质量块,即使非共振条件下也会因激励幅值的过大而损毁(固定端压电陶瓷碎裂),尤其是在车载、手摇及基于磁力耦合作用等非结构激励条

件下。鉴于现有悬臂梁式压电发电装置在可靠性及发电能力方面所存在的问题,本文提出一种基于圆弧限位的压电发电装置,以期同时提高发电能力及可靠性。

## 2 发电装置的结构及工作原理

基于圆弧面限位的压电发电装置的基本结构如图1所示:主要由压电振子、安装于压电振子端部的质量块及限位圆弧构成,其中的压电振子由金属基板及其两侧所粘接的压电晶片(电学并联)构成。

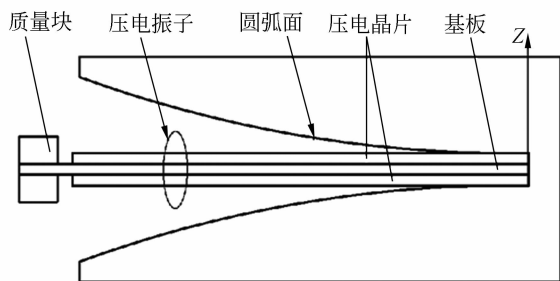


图1 发电装置的结构原理简图

Fig.1 Structure of piezoelectric generator

图1为圆弧限位发电装置的基本结构,在此基础上还可进一步发展成用于遥控器的手摇式发电装置、基于磁力耦合激励的纵振式及旋转式发电装置等。对于上述类型的发电装置,工作时压电振子可获得足够大的外力使其沿限位圆弧表面变形,进而提高其发电能力及可靠性。

压电发电装置主要用于为传感器及遥控器等微功率无线系统提供实时的能量供应,因其产生的电能具有高电压、低电流的特点,需经专门的能量收集转换电路转换后方可使用,如图2所示。对于由图1所示发电装置及图2所示能量转换电路构成的系统,可采用两种工作方式:(1)储能供电,即采用较大容量的超级电容连续存储,再根据使用要求输出给发射系统;(2)实时供电,采用容

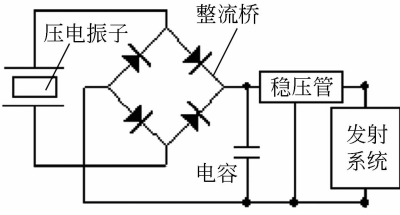


图 2 能量转换电路与供电原理图

Fig. 2 Schematic diagram of energy conversion and supplying circuit

量较小的普通电容储能,同时辅以能量检测电路监测电容电压,当电容电压达到预定值时即将能量输出给发射系统。

### 3 发电装置的能量转换模型

根据压电学理论,当压电振子自由端受外力作用而产生弯曲变形时,其表面便有电荷生成,所产生电场与所受应力的关系为:<sup>[12]</sup>

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

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

其中: $S_1$ 、 $T_p$  分别为  $x$  方向的应变和应力,  $D_3$ 、 $E_3$  分别为  $z$  方向的电位移和电场强度,  $g_{31}$  为压电常数,  $\beta_{33}^T = 1/\epsilon_{33}^T$  为介电隔离率,  $\epsilon_{33}^T$  为  $z$  方向介电常数,  $E_p$  为压电材料杨氏模量。

对于本文所提出的基于圆弧限位的发电装置,其关键是确定合理的限位圆弧半径,以期同时获得较大的发电量和较高的可靠性。当采用圆弧限位时,压电振子长度方向各点的应力相等,即  $S_1 = -z/R$ , 其中  $R = R_0 + h/2$  为压电振子中界面半径,  $R_0$  为限位圆弧面半径,  $h = 2h_p + h_m$  为压电振子厚度,  $h_p$ 、 $h_m$  分别为压电晶片和金属基板的厚度。故由式(1)、(2)可得:

$$E_3 = g_{31}E_p \frac{2z}{2R_0 + h} + \beta_{33}^T (1 + k_{31}^2) D_3, \quad (3)$$

其中:  $k_{31}^2 = E_p g_{31}^2 / \beta_{33}^T$ 。由此可得压电振子中压电晶片电极表面的电压为:

$$V = \int_{h_m/2}^{h/2} E_3 dz = \frac{(1-a)h}{4} \left[ \frac{g_{31}E_p(1+a)h}{2R_0 + h} + 2\beta_{33}^T (1 + k_{31}^2) D_3 \right], \quad (4)$$

其中:  $a = h_m/h$  称为厚度比。上式可改写成电位移的函数:

$$D_3 = \frac{1}{2\beta_{33}^T (1 + k_{31}^2)} \left[ \frac{4V}{(1-a)h} - \frac{g_{31}E_p(1+a)h}{2R_0 + h} \right]. \quad (5)$$

因电极处于等位面上,电压不随压电振子长度的变化而变化,故将电位移对面积积分即为压电振子表面所生成的电荷量:

$$Q = 2 \int_0^L \int_0^W D_3 dy dx = \frac{WL}{\beta_{33}^T (1 + k_{31}^2)} \left[ \frac{4V}{(1-a)h} - \frac{g_{31}E_p(1+a)h}{2R_0 + h} \right]. \quad (6)$$

式(6)为外力及电场同时存在时电荷量的计算表达式,对于发电而言,所施加的外电场为 0,因此,单纯由外力作用所生成的电荷量为:

$$Q_g = -\frac{WL}{\beta_{33}^T (1 + k_{31}^2)} \frac{g_{31}E_p(1+a)h}{2R_0 + h}. \quad (7)$$

根据电荷、电容及电压间的关系( $Q = CV$ )及式(6),可得压电振子的自由电容:

$$C_f = \frac{4WL}{\beta_{33}^T (1 + k_{31}^2) (1-a)h}. \quad (8)$$

由式(7)、(8)可得外力作用下所产生的开路电压及电能分别为:

$$V_g = -\frac{Q_g}{C_e} = \frac{g_{31}E_p(1-a^2)h^2}{4(2R_0 + h)}, \quad (9)$$

$$U_g = \frac{1}{2} C_f V_g^2 = \frac{WLh^3(1-a)}{8\beta_{33}^T (1 + k_{31}^2)} \left[ \frac{g_{31}E_p(1+a)}{2R_0 + h} \right]^2. \quad (10)$$

对于一端固定、一端自由的传统压电悬臂梁,其弯曲变形时固定端应力最大、自由端应力为 0,故平均输出电压仅为固定端生成电压的二分之一。如采用圆弧面限制压电振子的变形,压电振子长度方向上各点的应力及所产生的电压均相同。当压电振子结构尺寸及材料相同、且采用圆弧限位时压电振子上各点的应力与无圆弧限位时固定端的应力相同时,则有圆弧限位的输出电压及电能分别为无圆弧限位时的 2 倍和 4 倍。因此,采用圆弧限位的方法可有效提高发电量,同时还可避免压电陶瓷因变形量过大而损坏。

鉴于压电振子中压电陶瓷的上、下表面(即  $z = h/2$ )处的应力最大,且压电陶瓷的抗压极限应力远大于抗拉极限应力,所以设计时仅需考虑陶瓷表面受拉的情况。根据式(5),单纯外力作用下的电位移为:

$$D_3 = -\frac{g_{31}E_p(1+a)h}{2\beta_{33}^T (1 + k_{31}^2) (2R_0 + h)}. \quad (11)$$

将式(11)及  $z = h/2$  带入式(1)得压电陶瓷表面所承受的拉应力为:

$$T_p = -\frac{E_p h}{2R_0 + h} \left[ 1 - \frac{(1+a)g_{31}^2 E_p}{2\beta_{33}^T (1 + k_{31}^2)} \right], \quad (12)$$

上式可改写成限位圆弧半径的函数,即

$$R_0 = \frac{h}{2} \left\{ \frac{E_p}{T_p} \left[ \frac{(1+a)g_{31}^2 E_p}{2\beta_{33}^T (1+k_{31}^2)} - 1 \right] - 1 \right\}. \quad (13)$$

当上式中应力为最大极限应力 ( $T_p = T_p^*$ ) 时,所得半径即为限位圆弧的最小许用半径  $R_0^*$ 。需要说明的是,对于一端固定、一端自由的悬臂梁压电振子,自由端受外力作用时其弯曲形状及发电量与基板的弹性模量及激励频率有关,且存在最佳频率使其发电量最大;而对本文圆弧限位的发电装置,当自由端所受外力足够大时,其变形形状与限位圆弧面完全相同,故其单次变形发电量与基板材料及激励频率无关。

## 4 发电装置的设计分析与试验测试

### 4.1 发电特性的影响因素分析

为直观地表达相关参数对圆弧限位发电装置输出特性的影响,依据上述所得理论公式进行了单因素仿真分析,所用固定参数为:压电振子的尺寸为  $60 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 0.6 \text{ mm}$ ,  $T_p^* = -3.64 \times 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ ,  $g_{31} = 10.6 \times 10^{-3} \text{ Vm} \cdot \text{N}^{-1}$ ,  $E_p = 8.2 \times 10^{10} \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ ,  $\epsilon_{33}^T = 1300\epsilon_0$ ,  $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

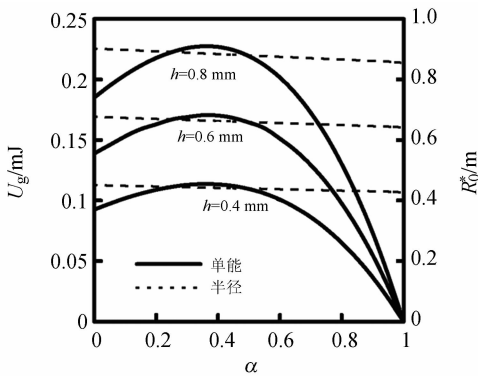


图 3 厚度比对最小圆弧半径及其发电量的影响

Fig. 3 Influence of thickness ratio on minimal radius and generated energy

图 3 给出了厚度比对最小限位圆弧半径、以及最小限位圆弧半径时所生成电能的影响关系关系曲线。图中曲线表明,压电振子厚度固定时,最小限位圆弧半径随厚度比的增加而线性降低,但存在最佳的厚度比使发电量最大;对比图中曲线还可发现,随着压电振子厚度的增加,最小限位圆弧半径及其所对应的电压/电能增加,使电能最大

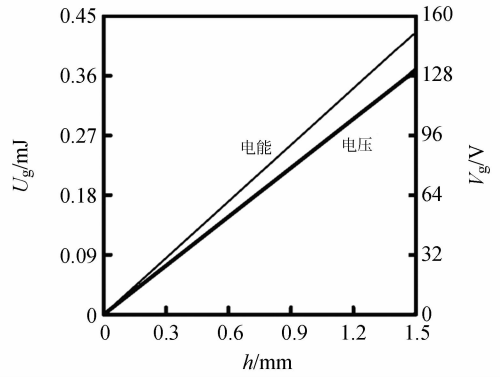


图 4 厚度对电压及发电量的影响

Fig. 4 Influence of thickness on generated voltage and energy

的最佳厚度比均为 0.35。在此最佳厚度比时,输出电压及电能均随压电振子厚度的增加而线性提高,如图 4 所示,因此,当确保压电振子完全贴合在限位圆弧面时,可通过提高压电振子厚度的方法提高发电量。根据图 4,当压电振子厚度为 1.5 mm 时,所产生的电压及电能分别达到 129 V 和 0.43 mJ。

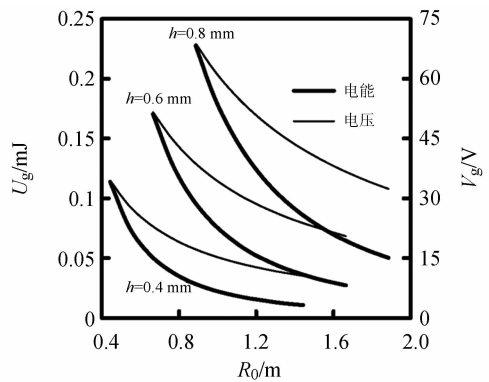


图 5 圆弧半径对电压及发电量的影响

Fig. 5 Influence of radius on generated voltage and energy

图 5 给出了厚度比为 0.35 时 3 种厚度压电振子电压/电能与限位圆弧半径的关系曲线,图中厚度为 0.8、0.6、0.4 mm 压电振子的最小限位圆弧半径分别为 886、665、443 mm。图中曲线表明,当限位圆弧半径大于最小半径时,发电装置输出电压/电能随圆弧半径的增加而迅速降低;当限位圆弧半径相同时,输出电压/能量随压电振子厚度的增加而增加。故当压电振子结构尺寸确定时,应尽可能采用最小限位圆弧半径。

### 4.2 试验测试与分析

为验证限位圆弧对发电能力的影响规律以及发电装置的输出特性,设计制作了一组半径不等的限位圆弧(最小限位圆弧半径为 665 mm),并利用同一个压电振子进行了试验测试,试验中所用压电振子的结构尺寸为 60 mm×10 mm×0.6 mm,其相关参数与模拟仿真相同。为便于控制压电振子与限位圆弧面间的接触关系,试验中利用激振器直接激励压电振子的自由端,试验装置如图 6 所示。

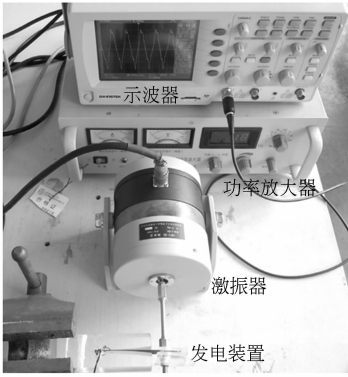
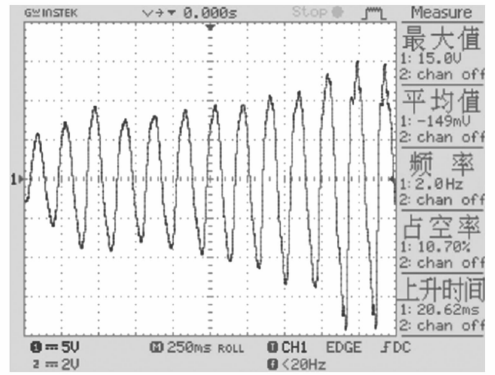


图 6 发电装置照片及试验装置

Fig. 6 Piezoelectric generator and test system

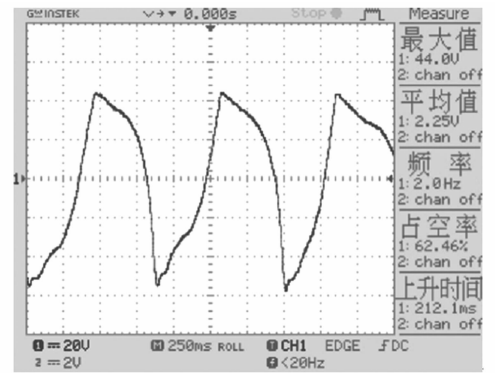
图 7 给出了限位圆弧半径为 765 mm、激振器频率为 2 Hz 时,激振器工作电压不同时的电压波形曲线。试验中首先采用较小的激振器工作电压(0~1.5 V)激励压电振子,使压电振子与限位圆弧不完全接触,此时电压波形为近似的正弦曲线,且电压值随激振器工作电压(代表激振器幅值)的增加而增加,结果如图 7(a)所示。当激振器工作电压增加到一定程度后(2 V),压电振子弯曲变形时完全贴靠在限位圆弧表面,此时压电振子所产生的电压(即变形量)不再随激振器工作电压的进一步增加而增加,且电压波形为非对称波形,结果如图 7(b)所示。上述试验结果表明,采用圆弧限位的发电装置不会因变形量过大而损坏,可靠性较高,压电振子产生的最大电压完全取决于限位圆弧的半径。

图 8 给出了激振器工作电压 2.5 V、频率 2 Hz 时压电振子产生的最大开路电压与限位圆弧半径的关系。为避免脆性压电陶瓷损坏使试验无法顺利进行,试验中首先从较大圆弧半径开始,且压电振子变形后完全贴靠在限位圆弧表面。图中



(a) 激励电压逐渐增加(0~1.5 V)

(a) Voltage increase from 0—1.5 V



(b) 激励电压为 2.0 V

(b) Voltage with 2.0 V

图 7 不同激振器工作电压时的输出电压波形

Fig. 7 Voltage wave-form under different shaking amplitudes

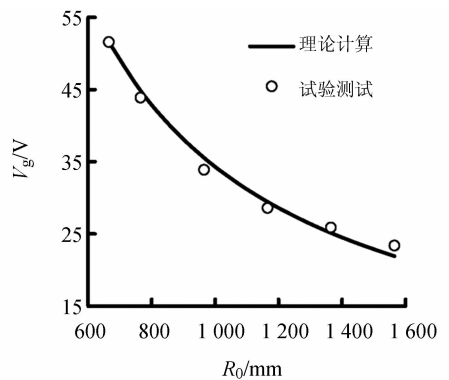


图 8 圆弧半径对电压的影响

Fig. 8 Influence of radius on generated voltage

曲线表明,发电电压随限位圆弧半径的增加而减小,因此,为提高发电能力应尽可能减小限位圆弧半径。当然,过小的半径可能会使压电陶瓷因应力过大而损毁,故应根据压电振子的结构尺寸确

定合理的最小半径。在本文的试验中,限位圆弧半径为 665 和 1 565 mm 时的输出电压为分别为 52.9 和 23.4 V。

## 5 结 论

为提高发电能力及可靠性,提出一种基于圆弧限位的压电发电装置并进行了试验研究。结果

表明,最小限位圆弧半径随厚度比的增加而线性减小,且存在共同的最佳的厚度比(0.35),使不同厚度压电振子的输出电压和能量最大;在最佳厚度比时,输出电压和能量随压电振子厚度增加或限位圆弧半径降低而增加。试验中,限位圆弧半径为 665 和 1 565 mm 时的输出电压为分别为 52.9 和 23.4 V,证明采用合理的限位圆弧半径可有效提高发电能力。

## 参考文献:

- [1] KHALIGH A, ZENG P, ZHENG C. Kinetic energy harvesting using piezoelectric and electromagnetic technologies-State of the art [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, 57(3):850-860.
- [2] SAADON S, SIDEK O. A review of vibration-based MEMS piezoelectric energy harvesters [J]. *Energy Conversion and Management*, 2011, 52: 500-504.
- [3] TANG L H, YANG Y W, SOH C K. Toward broadband vibration-based energy harvesting [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2010, 21: 1867-1897.
- [4] QIU J H, JIANG H, JI H L, *et al.*. Comparison between four piezoelectric energy harvesting circuits [J]. *Frontiers of Mechanical Engineering in China*, 2009, 4(2):153-159.
- [5] PAULO J, GASPAR P D. Review and future trend of energy harvesting methods for portable medical devices [C]. *Proceedings of the World Congress on Engineering*, 2010.
- [6] FARINHOLOT K M, MILLER N, SIFUENTES W, *et al.*. Energy harvesting and wireless energy transmission for embedded SHM sensor nodes [J]. *Structural Health Monitoring*, 2010, 9(3): 369-281.
- [7] 闫世伟, 杨志刚, 罗洪波, 等. TPMS用压电发电装置研究 [J]. *压电与声光*, 2010, 32(5):744-776.
- [8] 刘佳鑫, 王宁会, 李国锋. 基于压电俘能器的免电池学习型遥控开关[J]. *通讯电源技术*, 2008, 25(6): 65-67.
- [9] 唐可洪, 阚君武, 朱国仁, 等. 遥控器用压电发电装置的供电特性[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(1): 92-96.
- [10] LIN J T, ALPHENAAR B. Enhancement of energy harvested from a random vibration source by magnetic coupling of a piezoelectric cantilever [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2010, 21: 1337-1341.
- [11] GU L. Low-frequency piezoelectric energy harvesting prototype suitable for the MEMS implementation [J]. *Microelectronics Journal*, 2011, 42: 277-282.
- [12] AYERS J P, GREVE D W, OPPENHEIM I J. Energy scavenging for sensor applications using structural strains [C]. *SPIE*, 2003, 5057: 364-375.
- [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2010, 32(5): 744-776. (in Chinese).
- LIU J X, WANG N H, LI G F. A Battery-free learning remote control switch based on the piezoelectric energy harvesters [J]. *Telecom Power Technology*, 2008, 25(6): 65-67. (in Chinese)
- TANG K H, KAN J W, ZHU G R, *et al.*. Power-supply performance of piezoelectric generator for remote control [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(1), 92-96. (in Chinese)

## 作者简介:



王淑云(1965—),女,吉林长岭人,博士,教授,1988年、2001年和2008年于吉林大学分别获得学士、硕士和博士学位,主要从事工程问题的理论建模、仿真分析及优化等方面研究。E-mail: wshy888@yahoo.com.cn



王鸿云(1976—),女,吉林长岭人,博士,副教授,2003年于东北林业大学获得硕士,2009年于同济大学获博士学位,主要从事智能材料与结构方面的研究。E-mail: emmawhy@zjnu.cn



凌荣华(1988—),男,江苏东台人,硕士研究生,2010年于南京信息工程大学获得学士学位,主要从事压电陶瓷能量回收及自供电振动技术研究。E-mail: lingronghua30@sina.com



杨振宇(1987—),男,山西忻州人,硕士研究生,2011年于忻州师范学院获得学士学位,主要从事压电陶瓷能量回收及自供电振动技术研究。E-mail: 18757603007@163.com



蒋永华(1982—),男,浙江诸暨人,博士,讲师,2004年于杭州电子科技大学获学士学位,2007年于西华大学获硕士学位,2010年于重庆大学获博士学位,主要从事振动测试与故障诊断等领域的研究。E-mail: jyh@zjnu.cn



张忠华(1980—),男,吉林松原人,博士,2002年、2005年于辽宁工程技术大学分别获得学士、硕士学位,2009年于大连理工大学获博士学位,主要从事压电传感器、压电泵及压电发电技术研究。E-mail: zhhzhang225@yahoo.com.cn

## 通讯作者:



阚君武(1965—),男,吉林榆树人,教授,博士生导师,1991年、2000年于吉林工业大学分别获得学士学位、硕士学位,2003年于吉林大学获得博士学位,2005年中科院长春光机所博士后出站,主要从事压电驱动器、能量回收与自供电技术、精密机械与微小机械等方面研究。E-mail: jutkjw@yahoo.com.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)