

文章编号 1004-924X(2012)12-2737-07

非线性压电式能量采集器

崔 岩^{1*}, 王 飞¹, 董维杰², 姚明磊¹, 王立鼎¹

(1. 大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024;

2. 大连理工大学 电子科学与技术学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 由于非线性技术可使压电式能量采集获得较宽的振动频率和较高的输出电压, 本文基于非线性振动研究了一种压电式能量采集器。基于 Duffing 模型测试得到了非线性压电能量采集器的振动方程, 对其振动特性进行了仿真测试。在不同永磁体间距的条件下, 测试了非线性压电式能量采集器的开路输出电压, 结果表明, 当激振台加速度为 20 m/s^2 时, 该非线性压电式能量采集器的最大输出电压从线性系统输出时的 131 V 提高到 208 V, 最大输出功率为 43.264 mW, 主共振频率变化范围达到 18 Hz。该 Duffing 模型的结构可以在小范围内改变非线性压电式能量采集器的共振频率, 同时提高其输出电压。

关键词: 非线性振动; 压电式能量采集器; 共振频率; 激振测试

中图分类号: TN384 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122012.2737

Nonlinear piezoelectric energy harvester

CUI Yan^{1*}, WANG Fei¹, DONG Wei-jie², YAO Ming-lei¹, WANG Li-ding¹

(1. *Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining*

Technology of the Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. *School of Electron Science and Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China*)

* *Corresponding author, E-mail: yan@dlut.edu.cn*

Abstract: As nonlinear technology allows piezoelectric energy harvesting to obtain a wider vibration frequency and a higher output voltage, this paper proposed a piezoelectric energy harvester based on nonlinear vibration. The oscillation equation of the piezoelectric energy harvester was obtained based on testing Duffing mode and its vibration characteristics were simulated. With the various sinusoidal excitation frequencies and different magnet spacings, the opened output voltage was measured. The results show that when the excitation acceleration is 20 m/s^2 , the output voltage from the energy harvester has been improved to 208 V from 131 V, its maximum output power is 43.264 mW, and the resonance frequency region can range up to 18 Hz. The Duffing model structure can change the resonant frequency of the nonlinear piezoelectric energy harvester in small scope, and can increase the output voltage.

Key words: nonlinear vibration; piezoelectric energy harvester; resonance frequency; excitation test

收稿日期: 2012-05-28; 修订日期: 2012-07-17.

基金项目: 辽宁省教育厅科研突破计划资助项目 (No. LS2010038)

1 引言

随着微型器件功耗的降低,将环境中的振动能量转换为低功耗微型器件所需要的电能成为可能。2000年,有学者发现压电式能量采集器能够产生很高的电压和能量密度^[1-3],因此对机械振动的压电式能量采集的研究备受关注。典型的压电式能量采集器是由末端带有质量块的压电悬臂梁构成的,用更省电的方式驱动微芯片,将压电材料所产生的电力放大,再将其和低成本、小型化的系统进行整合是该项技术的要点。人们希望能通过机械结构自调谐的能量采集技术实现任意振动环境下输出功率的优化,目前可行的方法是使用并联元件,即多悬臂振动能量采集结构^[4-6]。通过多个压电梁来实现宽频的制约因素是环境中的频率范围太宽,单个悬臂梁的共振频率只是尖峰形状,频带窄,很难实现频率匹配^[7];另外,环境中的频率多为低频,如果要降低压电式能量采集器的固有频率,需要改变能量采集器的物理参数,比如长度、刚度或者质量块的位置等,实现起来非常困难。为了克服这些困难,有必要研究非共振的能量采集技术或者非线性压电能量采集技术。非线性压电能量采集技术的非线性可以是压电材料的非线性,即通过改变压电材料的硬度来影响谐振频率,也可通过非线性振动来获得较宽的振动频率范围和较高的输出电压。基于这一原理,国内外很多学者对基于非线性振动的能量采集技术进行了相关研究。Cottone F^[8], Gammaitoni L等^[9], Samuel C等^[10]研究了双稳态现象及其产生的条件,并指出在磁场的作用下,压电能量采集器的振动势能函数为一个多项式。B Ando等^[11]制作了一个基于 BESOI-MEMS (back etched SOI) 的双稳态结构微型装置。Francesco Cottone等^[12]研究了随机激励的双稳态动态特征。Luca Gammaitoni等^[13]研究了类似倒立摆系统的双稳态模型,其压电梁在水平方向做小振幅振动。Dibin Zhu等^[14]分析了压电悬臂梁末端在承受横向(轴向)拉伸和压缩负载的条件下,其结构的共振频率的变化特性,并认为压缩负载比拉伸负载能更有效地改变频率,原因是排斥力可以改

变压电悬臂梁的刚度,进而实现较宽的共振频率变化范围。美国的 Vinod R Challa^[15]等通过在悬臂梁末端的上下表面固定不同极性的永磁体来分别产生引力和斥力,进而改善系统的等效刚度,使压电式能量采集器的共振频率变化范围达到 $\pm 20\%$ 。意大利的 M. Ferrari等^[16]将压电悬臂梁和 2 个永磁体组成非线性双稳态系统,在一定的宽频振动范围内提高了输出电压。韩权威等^[17]通过在压电悬臂梁的末端施加非均匀磁力,得出引入磁力可以增大振幅和电能输出的结论。

目前公布的很多文献都是从单/双稳态和 Duffing 模型的角度来研究非线性压电能量采集器振动的,验证了非线性拓宽频带与提高输出电压作用,但没有详细研究磁性排斥力大小对模型的影响。本文在杜芬模型的基础上,测试求解了磁力作用的非线性压电能量采集器的振动方程,并对其振动特性进行了仿真与测试。

2 原理

非线性压电式能量采集器的模型如图 1 所示,2 个相同的永磁体 A 和 B 的横向间距为 x ,压电悬臂梁弯曲时的纵向位移为 y ,永磁体 A 和永磁体 B 之间的排斥力为 F , F 在纵向方向和横向方向的分量分别为 F_1 和 F_2 ,排斥力 F 与横向方向的夹角为 θ ,压电悬臂梁末端的垂直位移 y 和角 θ 的关系为 $y = x \cdot \tan \theta$ 。

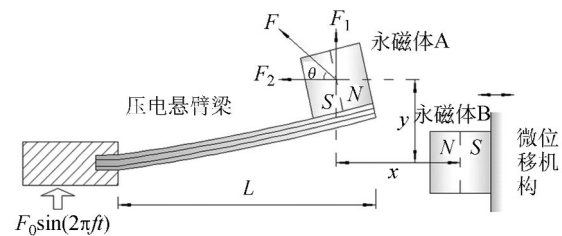


图 1 非线性压电式能量采集器的模型

Fig. 1 Model of nonlinear piezoelectric energy harvester

该模型受外界激励时,能够出现双稳态振动^[18]。压电悬臂梁和永磁体 A 组成的整体结构在外界简谐激励作用下会产生线性振动,因此定义为线性压电能量采集器。当永磁体 B 存在,并

且永磁体 B 对永磁体 A 产生排斥力作用时,压电悬臂梁才能出现非线性振动,定义为非线性压电式能量采集器。

排斥力的垂直分力 F_1 和 y 的关系如下:

$$F_1 = F \cdot \sin \theta = F \cdot \frac{\tan \theta}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta}} = \frac{F}{x} \cdot \frac{y}{\sqrt{1 + (y/x)^2}} \quad (1)$$

由于系统纵向受力平衡,可以得到:

$$m_{\text{eff}} \frac{d^2 y}{dt^2} + c \frac{dy}{dt} + ky - F_1 = F_0 \sin(2\pi ft) \quad (2)$$

其中, m_{eff} 为系统等效质量, c 是阻尼系数, k 是线性压电式能量采集器的刚度, $F_0 \sin(2\pi f_0 t)$ 是外界正弦激振力, f 是激振频率。

垂直力 F_1 在 $x=0$ 附近按泰勒式展开,并保留到三次项得到:

$$F_1 \cong \frac{F}{x} y - \frac{F}{2x^3} y^3 \quad (3)$$

令 $\alpha = F/x$, $\beta = F/2x^3$, 代入式(3)得到:

$$F_1 \cong \alpha y - \beta y^3 \quad (4)$$

将式(4)代入式(2),则有

$$m_{\text{eff}} \frac{d^2 y}{dt^2} + c \frac{dy}{dt} + (k - \alpha) y + \beta y^3 = F_0 \sin(2\pi ft) \quad (5)$$

即含有立方项的非线性振动方程(即杜芬方程^[19])。当 x 固定时,悬臂梁所受的排斥力也是一定的,此时, α 、 β 为恒定值。

3 测试实验

为求解本系统的振动方程进行了以下测试实验。

采用双晶片(Model QDA35-2.5-0.6, SI-

$$k = \frac{\omega}{4 \{ [L^3 - I_m^3] / (E_1 h_1^3) + [I_m^3 (E_1 h_1 + E_m h_m)] / [E_1^2 h_1^4 + E_m^2 h_m^4 + 2E_1 E_m h_1 h_m (2h_1^2 + 3h_1 h_m + 2h_m^2)] \}} = 356 \text{ N/m}$$

其中, E_1 和 E_m 分别为压电悬梁和永磁体 A 的弹性模量, L 和 L_m 分别为压电悬臂梁和永磁体 A 的长度, h_1 和 h_m 分别为压电悬臂梁和永磁体 A 的厚度, ω 为压电悬臂梁的宽度。

3.1 振动阻尼测试

当永磁体 A 与 B 之间无排斥力作用时,采用 OFV-534 单点式激光多普勒测振仪组成的动态测试系统对线性压电式能量采集器进行冲击振动

(NOCERA Piezotronics, Inc.) 作为被测压电悬臂梁,其尺寸为 $35 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm} \times 0.7 \text{ mm}$,弹性层为导电碳纤维材料,压电层为锆钛酸铅(PZT-5A)。永磁体(NdFeB)的尺寸为 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$,横向极化,忽略上下铂(Pt)薄膜电极和绝缘部分的影响,压电悬臂梁的各层材料参数如表 1 所示。使用 ZL5 型智能 LCR 测试仪测试,得到单层 PZT-5A 压电层的电容值为 0.28 nF , PZT 的介电损耗因子为 0.0319 。

表 1 压电悬臂梁的材料参数

Tab.1 Material parameters of piezoelectric cantilever

材料	弹性模量 $E/\text{N} \cdot \text{m}$	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	厚度 h/mm
PZT-5A	6×10^{10}	7 720	0.3
碳纤维	23×10^{10}	1 780	0.1
NdFeB	1.469×10^{11}	7 500	2.5

悬臂梁的质量 $m_1 = \sum_{i=1}^3 (\rho_i A_i) = 4.025 \times 10^{-4} \text{ kg}$,压电式能量采集器的等效质量为:

$$m_{\text{eff}} = \frac{33}{140} (m_1 + l_p' / L_p m_p) = 2.1722 \times 10^{-4} \text{ kg}$$

其中, m_p 为永磁体 A 的质量, L_p 为悬臂梁的长度,

$$l_p' = (140 l_p + \sum_{i=1, i \neq 5}^6 c_i l_p^{i+1} / L^i) / 33,$$

$c_1 = -210$, $c_2 = 105$, $c_3 = 35$, $c_4 = -42$, $c_6 = 5$ 。

压电悬臂梁的等效弹性模量为:

$$E_1 = \frac{2E_2 h_2 + E_p h_p}{2h_2 + h_p} = 9.467 \times 10^{10} \text{ N/m}^2,$$

其中, E_2 和 E_p 分别为弹性层和压电层的弹性模量, h_2 和 h_p 分别为弹性层和压电层的厚度。

线性压电式能量采集器的等效刚度:

测试,冲击信号由压电陶瓷底座提供^[20]。线性压电式能量采集器的自由衰减振动曲线如图 2 所示,此冲击测试为小阻尼自由振动,得到式(5)中的阻尼系数 $c=0.014$ 。

3.2 静态排斥力测试

为了获得悬臂梁所受到的磁铁排斥力 F ,利用电子天平(精度 0.1 mg)和三维微位移机构组成排斥力测试装置。由于压电悬臂梁弯曲变形的

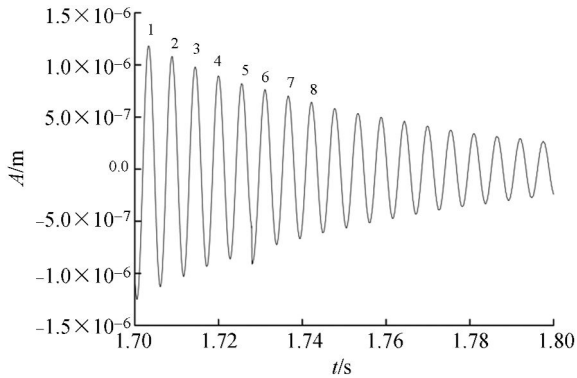


图 2 自由振动衰减曲线

Fig. 2 Free vibration decay curve

影响,得到如图 3 所示的排斥力 F 与永磁体间距 x 的关系曲线。当永磁体 A 和 B 间距 x 值在 1.2~2.5 mm 内变化时,横向排斥力可在 89~130 mN 内变化;纵向排斥力 67~143 mN 内变化;当永磁体 A、B 间距 x 大于 8 mm 时,排斥力近似为 0,此时系统为线性压电能量采集器。

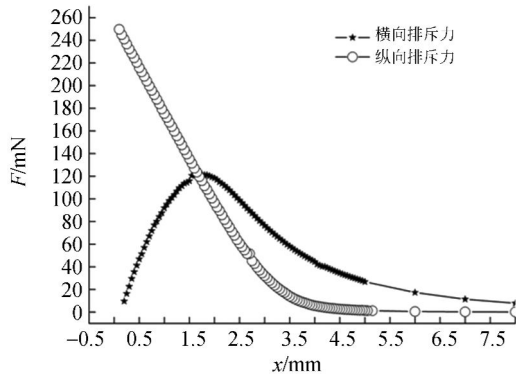


图 3 排斥力与永磁体间距的关系曲线

Fig. 3 Curves of repulsive force versus magnet spacing

当 x 值固定时,通过图 3 可以得到 F 以及 α 与 β 的实验结果。这样就完成了本系统振动方程的求解。

4 仿真分析

忽略排斥力产生的轴向负载对刚度的影响,采用参数: $m_{\text{eff}} = 3.53 \times 10^{-4}$ kg, $k = 278$ N/m, $F_0 = 0.525$ N, $f = 100$ Hz, 由于 $\alpha = F/x$, $\beta = F/2x^3$, 当 x 取值分别为 1, 1.7 和 3 时,采用根据图 3 得到的 α 与 β 值进行仿真^[21], 得到如图 4 所示的激振频率 f 与振幅 y 关系。

从图 4 中可以看出, x 值越小,系统非线性振动现象中的硬特性现象越明显。

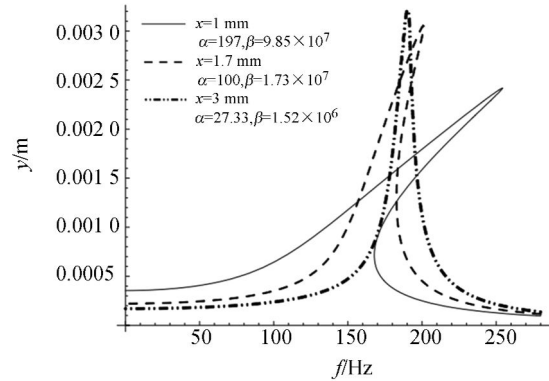


图 4 振幅与频率关系曲线

Fig. 4 Curves of amplitude versus excitation frequency

该系统在正弦激振力作用下,其强迫振动不一定是简谐振动,响应波会发生畸变^[22]。非线性受迫振动系统与线性系统有很大的区别,线性系统中的固有频率和共振不再存在。而非线性系统中,共振可定义为当激振频率在线性系统固有频率附近变化且受迫振动振幅很大时,发生主共振。

5 非线性压电能量采集器的特性测试

由于 PZT 压电材料的介电系数高,其等效电源为高阻抗,压电能量采集器开路输出高电压低电流时,可以直接测试其在正弦激振下的开路输出电压。激振测试系统如图 5 所示,仪器包括 JZK-5T 小型激振台、Tektronix 信号发生器、Tektronix TDS2000B 示波器、YE5871A 功率放大器和三维微位移机构。信号发生器输出一定频率和幅值的正弦信号,经功率放大后输出到 JZK-5T 小型激振台,采用压电加速度传感器(LC0104)测试小型激振台的振动加速度,压电加速度传感器的输出信号由频谱分析仪(Agilent 35670A)读出。分别测试非线性压电式能量采集器的输出电压 U_{pp} 与正弦激振频率 f_0 的变化关系,以及给定正弦激振频率 f_0 时,输出电压 U_{pp} 与永磁体 A、B 间距 x (增大或减小)变化关系。

当激振台的加速度为 16 m/s^2 时,读取输出电压波形的最大峰峰值 U_{pp} 作为输出电压,此时由于压电双晶片与激励振动发生共振形变量最大,输出的电压也是最大值。非线性压电能量采集器的输出电压 U_{pp} 与正弦激振频率 f 之间的关

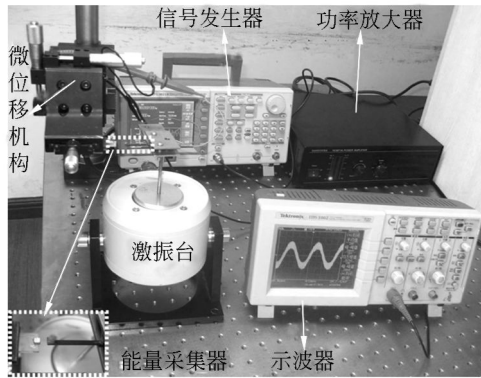


图 5 激振测试系统
Fig. 5 Excitation test system

系曲线,如图 6 所示。当永磁体 A、B 间距 $x \rightarrow \infty$ mm 时,排斥力为 0,测得共振频率为 114 Hz。当永磁体 A 与 B 间距 x 值固定为 5、4、3 mm 时,共振频率分别为 102、99、94 Hz。这是因为当永磁体 A 与 B 间距 x 减小时,非线性压电能量采集器所受轴向排斥力负载增大,此时相当于减小压电悬臂梁的刚度,使共振频率降低。在压电悬臂梁的屈服强度许可范围内,通过施加排斥力来改变压电悬臂梁的共振频率,可使此结构的共振频率变化范围达到 18 Hz。

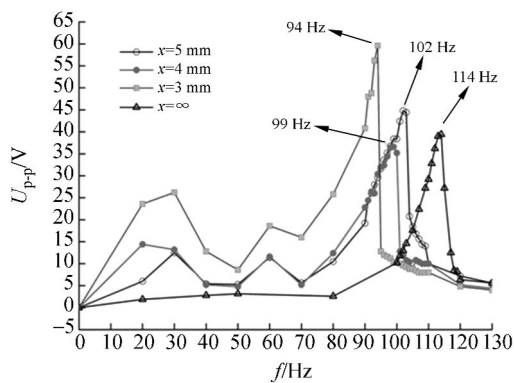


图 6 x 不同时,输出电压与激振频率的关系曲线
Fig. 6 Curves of output voltage versus excitation frequency with different x .

当激振台的加速度为 20 m/s^2 时,在激振频率为 114 Hz 条件下进行测试,得到输出电压 U_{p-p} 曲线的峰值为 131 V,如图 7 所示,此为线性压电式能量采集器的最大输出电压值。当正弦激振频率 f 分别为 90、100 Hz 时,使永磁体间距 x 先变小后变大,测试输出电压与两永磁体 A、B 间距 x 的变化关系曲线,如图 8(a)、8(b)所示,永磁体间

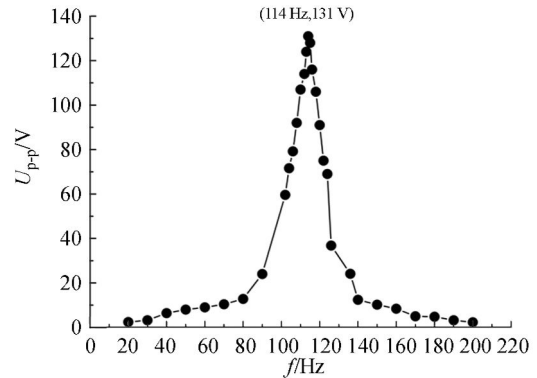
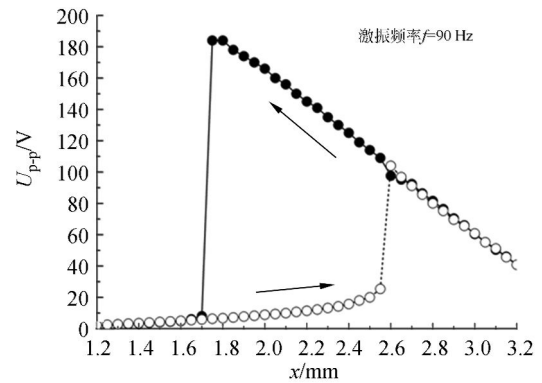
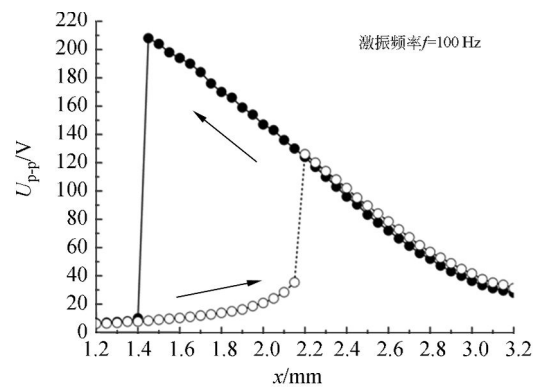


图 7 线性系统的电压输出曲线
Fig. 7 Output voltage of linear system



(a)



(b)

图 8 输出电压与永磁体间距的关系曲线

Fig. 8 Curves of output voltage versus magnet spacing

距 x 为 1.2~2.5 mm,输出电压峰值均大于 131 V。与线性压电式能量采集器相比,非线性压电式能量采集器的输出电压得到提高,结果显示当激振频率为 100 Hz 时,最大输出电压值为 208 V。由于非线性振动、压电材料的迟滞效应等因

素的影响,输出电压变化曲线具有跳跃现象和滞后现象,这符合系统的振动仿真结果。当激励力的频率从大到小或从小到大连连续变化时,系统受迫振动的振幅会出现跳跃现象,而且激励频率变化顺序不同时,跳跃点的位置也不同。

6 结 论

本文基于非线性振动研究了压电式能量采集

器,并求解出其振动方程。在不同正弦激励频率 f ,不同永磁体间距 x 的条件下,测试能量采集器的开路输出电压。结果显示,当激励台的加速度为 20 m/s^2 时,非线性压电式能量采集器的最大输出电压 U_{PT} 从线性系统输出时的 131 V 提高到 208 V ,在电阻为 $1 \text{ M}\Omega$ 时,最大输出功率为 43.264 mW 。该结构将线性系统的共振频率 (114 Hz) 降低到非线性系统的共振频率范围,并达到 18 Hz 。

参考文献:

- [1] ROUNDY S J. *Energy Scavenging for Wireless Sensor Nodes with a Focus on Vibration to Electricity Conversion* [M]. New York: Springer, 2003.
- [2] 贺学锋,杜志冈,赵兴强,等. 悬臂梁式压电振动能量采集器的建模及实验验证[J]. 光学精密工程, 2011, 19(8): 1772-1777.
HE X F, DU ZH G, ZHAO X Q, et al.. Modeling and experimental verification for a cantilevered piezoelectric vibration energy harvester [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(8): 1772-1777. (in Chinese)
- [3] 刘祥建,陈仁文. Rainbow 型压电换能结构的有限元分析与实验[J]. 光学精密工程, 2011, 19(4): 790-795.
LIU X J, CHEN R W. Finite element analysis and experiments on Rainbow shape piezoelectric energy transferring elements [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(4): 790-795. (in Chinese)
- [4] 沙山克·普里亚(印),丹尼尔·茵曼(美)著. 能量收集技术[M]. 南京:东南大学出版社, 2011: 175-203.
PRIYA S, INMAN D J. *Energy Harvesting Technologies* [M]. Nanjing: Southeast University Press, 2011: 175-203.
- [5] RODRIGUEZ G A A, DUROU H, OURAK L, et al.. Fabrication and simulation of a PZT energy harvester MEMS [C]. *Proceedings of Power MEMS 2008 and micro MEMS 2008, November 9-12, 2008, Japan: Sendai, 2008*: 193-196.
- [6] 阙君武,王淑云,彭少锋,等. 多振子压电发电机的输出特性[J]. 光学精密工程, 2011, 19(9): 2109-2115.
KAN J W, WANG SH Y, PENG SH F, et al.. Output performance of piezoelectric generators with multi-vibrators [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(9): 2109-2115. (in Chinese)
- [7] 陈仁文. 新型环境能量采集技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2011.
CHEN R W. *New Ambient Energy Harvesting Technology* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2011. (in Chinese)
- [8] COTTONE F, VOCCA H, GAMMAITONI L. Nonlinear energy harvesting [J]. *Phys Rev Lett*, 2009, 102(8): 080601-4.
- [9] GAMMAITONI L, NERI I, VOCCA H. Nonlinear oscillators for vibration energy harvesting [J]. *Appl Phys Lett*, 2009, 94(16): 164102-3.
- [10] STANTON S C, MCGEHEE C C, MANN B P. Nonlinear dynamics for broadband energy harvesting: Investigation of a bistable piezoelectric inertial generator [J]. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 2010, 239(10): 640-653.
- [11] ANDO B, BAGLIO S, TRIGONA C, et al.. Nonlinear mechanism in MEMS devices for energy harvester applications [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2010, 20: 125020.
- [12] COTTONE F, MINCIGRUCCI R, NERI I, et al.. Nonlinear kinetic energy harvesting [J]. *Procedia Computer Science*, 2011, 7: 190-191.
- [13] GAMMAITONI L, VOCCA H, NERI I, et al.. *Vibration Energy Harvesting: Linear and Nonlinear Oscillator Approaches* [M]. Italy: Sustainable Energy Harvesting Technologies-Past, Present and Future, 2012: 172-189.
- [14] ZHU D B, ROBERTS S, TUDOR M J, et al.. Closed loop frequency tuning of a vibration-based micro-generator [C]. *Faculty of Physical and Applied Science, Electronics and Computer Science, EEE, Proceedings of Power MEMS and micro MEMS 2008, November 9-12, 2008, Japan: Sendai, 2008*: 229-232.

- [15] CHALLA V R, PRASAD M G, SHI Y, *et al.*. A vibration energy harvesting device with bidirectional resonance frequency tunability [J]. *Smart Mater Struct.*, 2008, 17:15-35.
- [16] FERRARI M, FERRARI V, GUIZZETTI M, *et al.*. Improved energy harvesting from wideband vibrations by nonlinear piezoelectric converters [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2010, 162:425-431.
- [17] 韩权威, 李坤, 严玲, 等. 磁场增强压电悬臂梁震动发电装置[J]. *压电与声光*, 2011, 33(1):85-88.
HAN Q W, LI K, YAN L, *et al.*. Magnetic field enhanced piezoelectric cantilever-structure vibration generator [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2011, 33(1):85-88. (in Chinese)
- [18] VOCCA H, NERI I, TRAVASSO F, *et al.*. Kinetic energy harvesting with bistable oscillators [J]. *Applied Energy*, 2012, 97:771-776.
- [19] HARRIS C M, PIERSOL A G. *Harris' Shock and Vibration Handbook* [M]. New York: McGraw-Hill, 2002.
- [20] 余东生, 王晓东, 张习文, 等. 低温环境下 MEMS 微构件的动态特性及测试系统 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18(10):2179-2183.
SHE D SH, WANG X D, ZHANG X W, *et al.*. Dynamic testing of MEMS micro-structure and its measurement system at low temperatures [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(10):2179-2183. (in Chinese)
- [21] ENNS R H, MCGUIRE G C. *Nonlinear Physics with Mathematic for Scientists and Engineers* [M]. Boston: Birkhäuser, 2001:294-351.
- [22] 李惠彬. 振动理论与工程应用 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006:185-186.
LI H B. *Vibration Theory and Engineering Application* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006:185-186. (in Chinese)

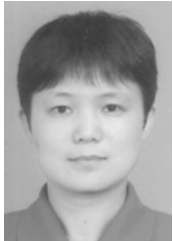
作者简介:



崔 岩(1967—),女,辽宁大连人,硕士,副教授,1989年于大连理工大学获学士学位,2003于德国卡尔斯鲁厄应用科学大学获得第二硕士学位,主要从事微传感器与微执行器、压电薄膜、精密测量等方面的研究。E-mail: yanc@dlut.edu.cn



王 飞(1987—),女,河北保定人,硕士研究生,2010年于太原理工大学获得学士学位,主要从事压电薄膜材料等方面的研究。E-mail: feifei_dlut@yeah.net



董维杰(1968—),女,吉林白山人,博士,教授,主要从事压电 MEMS 传感器与执行器、压电振动能量收集技术等方面的研究。E-mail: dongwj@dlut.edu.cn



姚明磊(1988—),男,山东青岛人,硕士研究生,2011年于沈阳大学获得学士学位,主要从事微传感器与微执行器、压电振动微能量收集技术等方面的研究。E-mail: yaomingleiok@126.com



王立鼎(1934—),男,辽宁辽阳人,教授、博士生导师、中科院院士,精密机械与微纳机械专家,1960年毕业于吉林工业大学,长期从事精密齿轮与纳米级精密机械的研究。E-mail: wangld@dlut.edu.cn