

# 宽频压电振动能量采集器的实验研究\*

王光庆, 岳玉秋, 展永政, 李萧均, 高帅帅

(浙江工商大学信息与电子工程学院 杭州, 310018)

**摘要** 为改善线性单频谐振式压电振动能量采集器的输出性能, 研制了双自由度宽频压电振动能量采集器样机模型, 搭建了样机实验测试平台, 研究了系统刚度比和负载电阻等参数对能量采集器输出性能的影响。通过调节系统刚度比, 不仅可以拓宽压电振动能量采集器的工作率带, 还提高了压电振动能量采集器的输出电压和输出功率。结果表明: 在基础振动加速度为  $40 \text{ m/s}^2$  和负载电阻为  $471 \text{ k}\Omega$  条件下, 双自由度宽频压电能量采集器的工作频带是单频系统的 7 倍, 最大输出功率是单频系统的 4.5 倍。

**关键词** 宽频带; 压电振动能量采集器; 弹性放大系统; 样机模型

**中图分类号** TN712+.5; TN752; TH703.2

## 引言

在一些低功耗电子产品(如无线传感器节点、便携式微型智能设备和 MEMS)的供能系统中, 电化学电池寿命短、需频繁定期更换等问题日益突出<sup>[1]</sup>, 无法满足微电子产品快速发展的应用需求。因此, 研制可替代电化学电池的供能系统引起了广泛的关注<sup>[2]</sup>。

能量转换器是解决该问题的主要方法之一, 它包括 3 种典型的转换形式, 即电磁感应<sup>[3-4]</sup>、静电转换<sup>[5-6]</sup>和压电转换<sup>[7]</sup>。压电振动能量采集器(piezoelectric vibration energy harvester, 简称 PVEH)具有结构简单、易制作、环保性好、无电磁干扰和高能量密度等诸多优点, 吸引了国内外研究学者的研究兴趣。

典型 PVEH 一般由金属基板和压电晶片粘结而成, 属于线性谐振式系统, 它通常在谐振激励状态下采集能量与转换效率达到最佳<sup>[8-9]</sup>。然而, 激振条件易受周围环境的影响, 环境振动频率很难和 PVEH 谐振频率一致, 这严重影响 PVEH 的输出性能。通过扩展 PVEH 的工作频带可以有效地解决该问题, 主要方法有: a. 调节 PVEH 的谐振频率, 使其与环境振动频率保持一致。文献<sup>[10-11]</sup>采用此方法研究分析了宽频 PVEH 的输出特性, 该方法对频率调节器的精度要求高, 不适合频率变化较快的场合。b. 采用耦合弹性结构或非线性振荡等技术。

Stanton 等<sup>[12]</sup>通过理论模型和数值仿真等方法证明了非线性双稳态系统能够拓宽能量采集频率, 但是忽略了机械结构与压电晶体之间和压电晶体与电路之间的耦合作用。c. 优化结构参数。Sodano 等<sup>[13]</sup>建立了 PVEH 的数学模型, 并对模型结构参数进行了优化, 但是没有考虑阻抗匹配对输出性能的影响。

文献<sup>[14]</sup>将 PVEH 和弹性放大器( elastic magnifier, 简称 EM)集成为一体, 设计了双自由度的宽频振动压电能量采集器(Broadband PVEH, 简称 BPVEH), 并运用有限元方法建立了机电耦合模型, 研究分析了线性谐振状态下刚度比、质量比以及负载电阻等因素对能量采集器输出性能的影响。在文献<sup>[14]</sup>的基础上, 笔者研制了 BPVEH 样机模型, 利用 INV1601 型振动与控制教学实验系统系列、Tektronix TDS2024C 示波器和 HP 电脑等设备搭建了实验系统, 对样机模型进行压电输出特性的测试, 最后, 将实验结果与理论分析的结果进行对比。

## 1 样机模型制作

BPVEH 的结构如图 1 所示, 图中 BPVEH 主要由 PVEH 和 EM 两部分组成: PVEH 由金属基板、双压电晶片、末端集中质量  $M_1$  和负载电路组成; EM 由刚度系数为  $K$  的弹簧和质量块( $M$ )构成。PVEH 金属基板的上、下表面粘有压电晶片 PZT<sub>1</sub>

\* 国家自然科学基金资助项目(51277165); 浙江省自然科学基金资助项目(LY15F10001); 浙江省教育厅资助项目(Y201223050); 浙江省高校优秀青年教师资助计划项目; 浙江工商大学青年人才基金资助项目(QY11-23)

收稿日期: 2015-03-27; 修回日期: 2015-08-20

和 PZT<sub>2</sub>, 两晶片的极化方向沿厚度方向, 且方向相反, 并与外加负载电阻  $R$  形成串联结构。PVEH 的左端与 EM 的质量块  $M$  相连, 并与弹簧固定在基础振源上。  $u$  表示系统的基础振动位移,  $i$  表示流经负载电阻  $R$  的电流。工作时, 基础振动位移经 EM 放

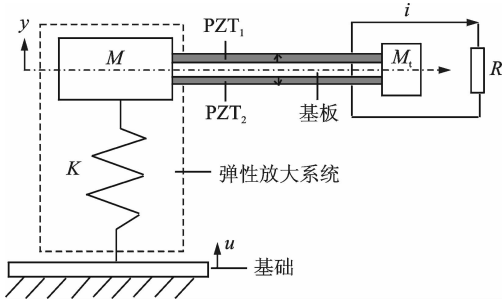


图 1 宽频压电悬臂梁振动能量采集器

Fig. 1 The broadband piezoelectric vibration energy harvester

表 1 宽频压电振动能量采集器的结构参数

Tab. 1 Structural parameters of BPVEH

参数	数值
悬臂梁长度 $L$ /mm	50.8
梁宽度 $b$ /mm	30.8
PZT 厚度 $h_p$ /mm	0.26
基板厚度 $h_s$ /mm	0.14
PZT 密度 $\rho_p / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	7 800
基板密度 $\rho_s / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	9 000
基板弹性模量 $E_s / \text{GPa}$	105
基板泊松比 $\gamma$	0.33
弹性放大器阻尼系数 $\zeta_a$	0.002
结构阻尼系数 $\xi$	0.027
末端集中质量 $M_t / \text{kg}$	0.011
末端集中质量长度 $L_t / \text{mm}$	6
末端集中质量厚度 $b_t / \text{mm}$	7

## 2 系统参数确定

由文献[14-15]可知, BPVEH 的输出性能主要受系统质量比、刚度比的影响。假设系统质量比和刚度比分别为  $a$  和  $r$ , 且定义

$$a = M/M_{eq} \quad (1)$$

$$r = K/K_{eq} \quad (2)$$

其中:  $M_{eq}$  和  $K_{eq}$  分别为 PVEH 的等效质量和等效刚度系数。

### 2.1 PVEH 等效质量和等效刚度的确定

PVEH 的等效质量  $M_{eq}$  和等效刚度系数  $K_{eq}$  可以通过式(3)和式(4)来确定, 具体推导可参见文献[15]。

大后激励 PVEH 作大幅周期振动, 达到提高 PVEH 输出性能的目的。

图 2 为研制的 PVEH 和 BPVEH 原理样机, 表 1 为原理样机结构参数, 样机基板材料为黄铜, 压电陶瓷选用无锡海鹰集团公司生产的 PZT-5A。

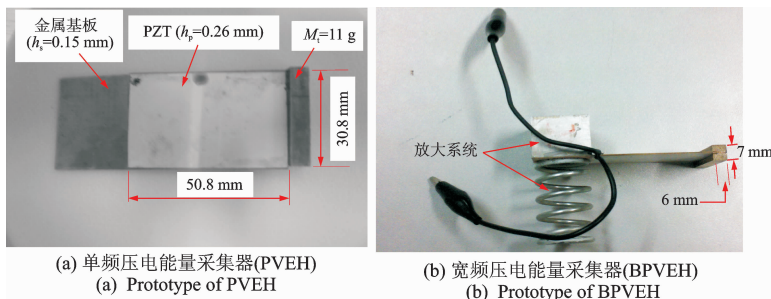


图 2 研制的样机模型

Fig. 2 Prototypes of the PVEH and BPVEH

$$M_{eq} = \beta_M \rho A L + M_t \quad (3)$$

$$K_{eq} = \beta_K E I / L^3 \quad (4)$$

其中:  $\beta_M$  和  $\beta_K$  为常数;  $\rho, E, I, A$  和  $L$  分别表示 PVEH 的等效密度、等效弹性模量、等效转动惯量、截面面积和长度。

运用式(3)和式(4)计算得到文中 PVEH 的等效质量和等效刚度系数分别为  $M_{eq} = 12.9 \text{ g}$ ,  $K_{eq} = 520 \text{ N/m}$ 。

### 2.2 弹性放大系统刚度系数 $K$ 的确定

通过实验方法确定 EM 的刚度系数  $K$ , 具体实验方法如图 3 所示。将一已知质量  $M_0$  与被测弹簧串联组成一阶质量-弹簧系统固定在激振器的基座上, 利用扫频的方式, 信号发生器产生一个扫频信号激励激振器作正弦振动, 通过采集已知质量  $M_0$  的振动位移和基础振动加速信号, 得到其位移-频率响

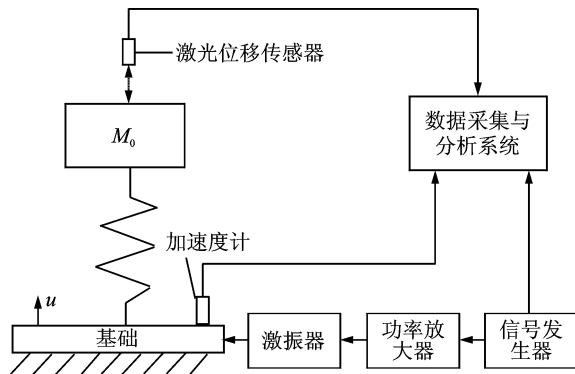


图 3 弹性放大系统刚度系数  $K$  实验示意图

Fig. 3 The stiffness experimental schematic diagram of the elastic amplifier system

应曲线,曲线第一个峰值点对应的频率即为该一阶系统的谐振频率  $\omega_0$ 。由  $K = M_0 \omega_0^2$  可以测得弹簧的刚度系数,再将弹簧刚度系数  $K$  代入式(1)和式(2)计算得到 BPVEH 的刚度比和质量比。实验中 BPVEH 的放大系统弹簧元件取 3 种规格,如图 4(a),(b)和(c)所示,分别定义为 1 号,2 号和 3 号弹簧元件,刚度系数分别用  $K_1, K_2$  和  $K_3$  表示,实验测得 3 种规格弹簧元件的刚度系数和质量  $M$  如表 2 所示。

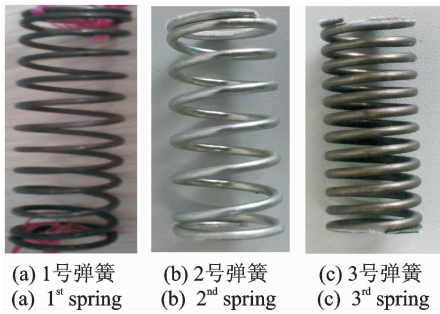


图 4 放大系统弹簧元件实物图

Fig. 4 Prototypes of the spring used in magnifier

表 2 弹性放大系统参数测试结果

Tab. 2 Experimental results of elastic magnifier

$K_1 / (\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	$K_2 / (\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	$K_3 / (\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	$M / \text{g}$
$7.9 \times 10^3$	$3.645 \times 10^3$	$3.118 \times 10^3$	123

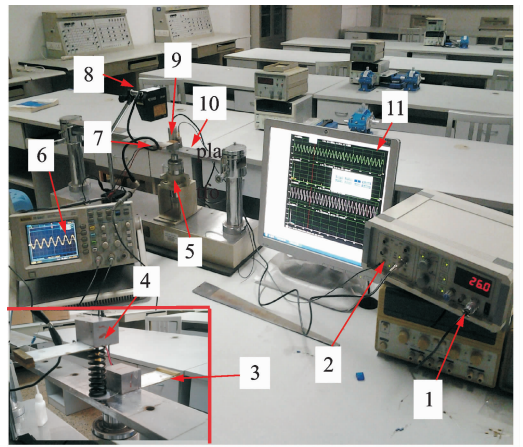
### 3 实验

#### 3.1 实验系统搭建

图 5 为 BPVEH 实验系统,信号发生器作为激励源,其输出经过放大为正弦交流信号,激励激励器和基座作正弦波振动;BPVEH 和加速度计通过高强度 502 胶并列粘结在基础上;通过加速计采集基础振动的加速度,然后送入动态信号分析仪,在显示器上显示出波形;BPVEH 悬臂梁末端振动位移由激光位移传感器采集送入动态信号分析仪输出到显示器;BPVEH 产生输出的电压波形通过示波器显示。

#### 3.2 实验与分析

实验中 BPVEH 的放大系统弹簧元件取 3 种规格,如图 4(a),(b)和(c)所示,根据表 2 实验结果和式(1)、式(2)可以确定由这 3 个弹簧元件构成的 BPVEH 的刚度比分别为 15,7 和 6,质量比为 9.5。根据得到的质量比和刚度比可以计算得到上述 3 个



1-信号发生器;2-动态信号分析仪;3- PVEH; 4-BPVEH; 5-激励器;6-示波器;7-加速度传感器;8-激光位移传感器;9-速度传感器;10-基座;11-显示器

图 5 实验测试系统

Fig. 5 The experimental setup of BPVEH

弹簧元件构成的 BPVEH 扫频范围为  $[20, 60]$  Hz。采用逐点扫频的方式,调节信号发生器的频率由 20 Hz 逐点增大到 60 Hz,经过放大后激励激励器,使基础和 BPVEH 在相应信号频率下振动,分别用高精度幅度值计和示波器采集读取基础加速度幅值电压和 BPVEH 的输出电压,并制作成曲线图。为了保证不同频率点下的基础振动加速度恒定为  $40 \text{ m/s}^2$ ,通过调节信号输出幅度,利用加速度计检测并采集基础振动加速度信号,当基础加速度连续 5 次采样测量结果在  $40 \pm 1\% \text{ m/s}^2$  范围内,就认为基础振动加速度稳定在  $40 \text{ m/s}^2$ 。图 6 和图 7 中 1, 2 和 3 号曲线分别代表刚度比为 15,7 和 6 所对应系统的基础振动加速度和负载电阻(177 kΩ)输出电压实验结果。由图 7 可以看出,每条输出电压变化曲线都存在左、右两个峰值,这说明了弹簧放大系统的引入使得压电振动能量采集器由单自由度变成了一个两自由度系统,通过调节左、右两个峰值之间的频率间距,可以达到拓宽采集器工作频带的目的。此外,从图中 3 条曲线还可以发现,刚度比  $r=15,7$  和 6 时,曲线左、右两个峰值之间的频率间距分别为 11,14 和 15 Hz。由此看出,当 BPVEH 的刚度比增大时,两峰值间的频率间距随之减小,有利于宽频带窗口的形成。另外,在系统质量比保持不变的情况下,增大系统的刚度比,系统频率响应曲线中左、右两个峰值点发生右移,这表明增大系统刚度比可以提高系统响应频率,这与文献[14-15]的理论研究结果一致。

图 8 为刚度比  $r=15$ ,负载电阻  $R$  分别为 3, 47.1 和 471 kΩ 时, BPVEH 输出电压的实验结果。

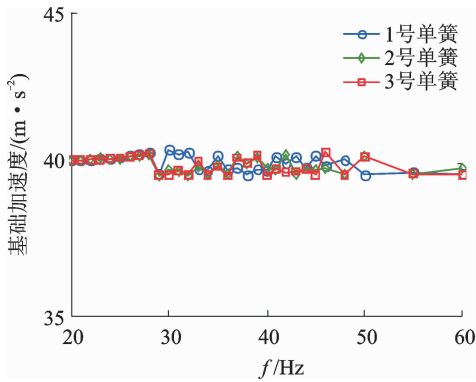


图6 基础加速度测试结果

Fig. 6 Experimental results of the base acceleration

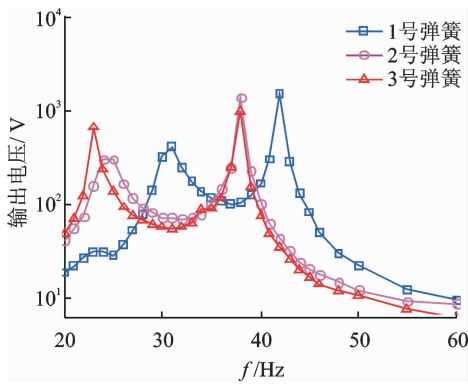


图7 宽频能量采集器输出电压实验结果

Fig. 7 Experimental result of the output voltage

从图8中可以看出,输出电压随着负载电阻的增大而增大,且右峰值频率逐渐右移。这是因为小的负载电阻不易与能量采集器的输出阻抗相匹配,导致输出电压较小。随着负载电阻逐渐增大,BPVEH的输出性能也不断增大,当负载电阻与能量采集器的输出阻抗完全匹配时,BPVEH的输出性能也达到最大。因此,随着负载电阻的不断增大,输出电压也随之增加。

图9为刚度比  $r=15$ , 负载电阻为  $471 \text{ k}\Omega$  时,BPVEH的输出功率与PVEH输出功率的实验结果比较。从图9中可以看出,BPVEH左、右两峰点对应的频率分别为  $31$  和  $45 \text{ Hz}$ , 两峰点间的频率间距为  $14 \text{ Hz}$ , PVEH的频带宽( $-3 \text{ dB}$ )为  $2 \text{ Hz}$ , BPVEH工作频带是PVEH系统的7倍;且在整个实验范围  $[25, 60] \text{ Hz}$  内(除了频率点  $37 \text{ Hz}$  外), BPVEH的输出功率均大于PVEH的输出功率。BPVEH系统左、右两峰点和两峰点间的谷点以及PVEH系统的峰点输出功率如表3所示,由表3看出,PVEH的最大输出功率为  $264.5 \text{ mW}$ , BPVEH的最大输出功率达到  $1\,219.94 \text{ mW}$ , 是PVEH输出功率的4.5倍。

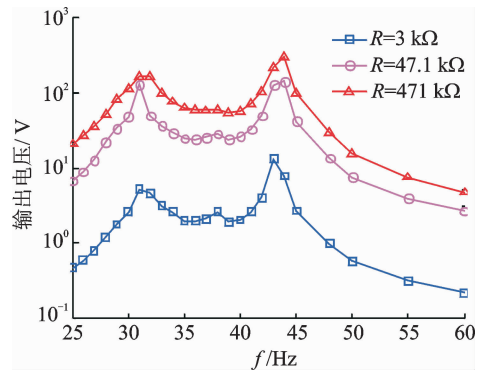


图8 不同负载电阻下输出电压的变化曲线

Fig. 8 Experimental results of the output voltage with different load resistances

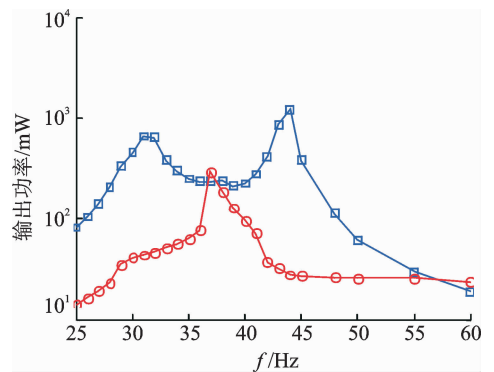


图9 宽频系统与单频系统的输出功率对比

Fig. 9 Comparisons of the output power between BPVEH and PVEH

表3 宽频和单频系统输出功率比较结果

Tab. 3 Power comparisons of BPVEH and PVEH

单频系统	宽频系统			mW
	峰点功率	左峰点功率	右峰点功率	
264.5	663.93	1 219.94	232.65	

综合图8和表3可知,弹簧放大系统的引入使单频压电振动能量采集器由单自由度变为两自由度系统,通过调节系统质量比和刚度比,不仅拓宽了单频压电能量采集器的工作频带,还提高了输出功率。

## 4 结束语

弹簧放大系统的引入使单频压电振动能量采集器由单自由度系统变为两自由度系统,通过调节系统质量比和刚度比,不仅拓宽了单频压电能量采集器的工作频带,还提高了能量采集器的输出功率。增加系统刚度比,左、右两峰值点对应频率左移,系

统的频率响应增大;系统刚度比一定时,系统输出电压随着负载电阻的增大而增大。在基础振动加速度为  $40 \text{ m/s}^2$  条件下,宽频压电振动能量采集系统的工作频带是单频系统的7倍,最大输出功率是单频系统的4.5倍。

## 参 考 文 献

- [1] Raghunathanm V, Kansal A, Hsu J, et al. Design considerations for solar energy harvesting wireless embedded systems[C]// IEEE International Symposium on Information Processing in Sensor Networks. Los Angeles, CA, USA:IEEE Press Piscataway, 2005:24-27.
- [2] Mathuna C O, Martinez-Catalar V, O'donnell T, et al. Energy scavenging for long-term deployable wireless sensor networks [J]. *Talanta*, 2008, 75(3):613-623.
- [3] Cottone F, Frizzell R, Goyal S, et al. Enhanced vibrational energy harvester based on velocity amplification [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2014, 25(4):443-451.
- [4] 赵志刚, 丁旭升, 刘福贵, 等. 微型电磁式振动能量采集器的结构设计及仿真研究 [J]. *电工技术学报*, 2012, 27(8):255-260.  
Zhao Zhigang, Ding Xusheng, Liu Fugui, et al. Structural design and simulation of micro electromagnetic vibration energy harvester [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2012, 27(8):255-260. (in Chinese)
- [5] Bischur E, Schwesinger N. Electric properties of PVDF film material: flexible and lightweight energy harvesting device[J]. *International Society for Optics and Photonics*, 2014, 9057(15):4177-4180.
- [6] Hoffman D, Folkmer B, Manoliy Y. Fabrication, characterization and modeling of electrostatic micro-generators[J]. *Journal of Micromechanics and Micro-engineering*, 2009, 19(9):1489-1503.
- [7] Kim H S, Kim J H, Kim J. A review of piezo-electric energy harvesting based on vibration [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2011, 12(6):1129-1141.
- [8] 展永政, 王光庆. 压电双晶连接形式对振动发电机电输出特性的影响 [J]. *功能材料与器件学报*, 2014, 20(1):48-56.  
Zhan Yongzheng, Wang Guangqing. Effects of piezoelectric bimorph connection on the force-electrical performances of vibration generator [J]. *Journal of Functional Materials and Devices*, 2014, 20(1):48-56. (in Chinese)
- [9] 龚俊杰, 许颖颖, 阮志林, 等. 双晶悬臂梁压电发电装

置发电能量的仿真 [J]. *振动、测试与诊断*, 2014, 34(4):658-663.

Gong Junjie, Xu Yingying, Ruan Zhilin, et al. Simulation on generation capacity for energy harvesting device with piezoelectric bimorph cantilever [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2014, 34(4):658-663. (in Chinese)

- [10] Challa V R, Prasad M G, Shi Y, et al. A vibration energy harvesting device with bidirectional resonance frequency tenability [J]. *Smart Materials and Structures*, 2008, 17(1):15035-15044.
- [11] Wu Wenjong, Chen Yuyin, Lee Borshun, et al. Tunable resonant frequency power harvesting devices [C]// Proceedings of SPIE-the International Society for Optical Engineering. San Diego, CA, USA:[s. n.], 2006.
- [12] 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*, 2010, 239(10):640-653.
- [13] Sodano H A, Liao Y B. Model of a single mode energy harvester and properties for optimal power generation [J]. *Smart Materials and Structures*, 2008, 17(6):2292-2299.
- [14] 展永政, 王光庆. 双自由度压电振动能量采集器的力电输出特性分析 [J]. *振动工程学报*, 2014, 27(6):871-877.  
Zhan Yongzheng, Wang Guangqing. Force-electrical output characteristic analysis of piezoelectric vibration energy harvester with two degrees of freedom [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2014, 27(6):871-877. (in Chinese)
- [15] 王光庆, 金文平, 展永政, 等. 压电振动能量采集器的力电耦合模型及其功率优化 [J]. *传感技术学报*, 2013, 26(8):1092-1099.  
Wang Guangqing, Jin Wenping, Zhan Yongzheng, et al. A force-electric coupling model and power optimization of piezoelectric vibration energy harvester [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2013, 26(8):1092-1099. (in Chinese)



**第一作者简介:** 王光庆,男,1975年1月生,博士、教授。主要研究方向为传感检测与信号处理、超声波电机和压电振动能量采集技术。曾发表《A strategy for magnifying vibration in high-energy orbits of a bistable oscillator at low excitation levels》(《Chinese Physics Letters》2015, Vol. 32, No. 6)等论文。  
E-mail: kele76@163.com

