

文章编号 1004-924X(2011)06-1327-07

无源压电振动发电机接口电路的改进

朱莉娅*, 陈仁文

(南京航空航天大学 智能材料与结构航空科技重点实验室, 江苏 南京 210016)

摘要: 为了克服压电振动发电机接口电路中负载匹配及电路损耗问题, 提出了一种改进的无源同步电荷提取电路。利用无源峰值检测开关电路及单端反激变换电路, 使压电振动发动机中压电元件两端电压适时反向, 从而输出与负载大小无关的恒定功率。使用 Multisim 进行电路仿真, 仿真结果表明该无源同步电荷提取电路输出功率为 1.83 mW, 且不存在最优负载问题。搭建了压电振动发电机实验平台, 分别对无源同步电荷提取电路及经典电路进行发电性能测试, 结果表明, 无源同步电荷提取电路实际输出功率达到 1.135 mW, 是经典电路实际输出功率 0.381 mW 的 2.98 倍。

关键词: 能量采集; 压电发电机; 悬臂梁; 同步电荷提取电路

中图分类号: TN384; TM35 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111906.1327

Improvement of passive circuit for vibration-based piezoelectric generator

ZHU Li-ya*, CHEN Ren-wen

(Aeronautical Science Key Laboratory for Smart Materials & Structures,
Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

* Corresponding author, E-mail: julia_860527@163.com

Abstract: To overcome the shortcomings of the interface circuit for a piezoelectric generator in load matching and circuit losses, an improved passive Synchronous Charge Extraction(SCE) interface for the piezoelectric generator was proposed. Furthermore, by taking advantage of the passive electronic switch on maxima and the single-end flyback converter, the voltage across the piezoelectric element was reversed according to the control topology to output a constant power independent with the resistance. Simulated with the Multisim, the constant output power of the improved passive SCE circuit reaches 1.83 mW. Moreover, the electricity generating capacity measurements were conducted with the measuring system for the vibration-based piezoelectric generator. As shown in the experiments, the harvested power with the passive SCE circuit is 1.135 mW, which is 2.98 times of the 0.381 mW from the standard circuit.

Key words: energy harvesting; piezoelectric generator; cantilever; synchronous charge extraction circuit

1 引言

近年来,微机电系统发展迅速,广泛应用于工业、农业、通信、国防、航空航天、医学等领域。小尺寸、低功耗、低成本的微机电节点,通过无线通信方式组成分布式、自组织的无线传感器网络。无线传感器网络采用电力线供电或定期更换电池等传统供电方式。然而,采用电力线供电方式成本较高、体积与质量较大且维护困难;而采用电池供电寿命有限,且在特定应用场合更换困难。目前,利用环境能量为无线传感器节点供电,已成为解决无线传感器网络能量自给问题的有效方法之一。各种环境能量中,振动能量因其存在广泛,已成为近年来无线传感器网络自供能研究领域的热点。根据能量转换原理不同,振动发电技术可分为静电式、电磁式及压电式 3 类。其中,压电发电装置发展最快,其优势在于机电能量转换效率高、易于与微机电系统集成、成本较低、无电磁干扰且结构简单^[1-2]。

由于压电元件输出电压是交变的,而无线传感器节点通常需要稳定的直流电压,因此需要在压电元件与负载之间设计接口电路。经典电路由整流桥和滤波电路组成,Lefevre 等人提出了 3 种由同步开关阻尼电路改进的接口电路,分别是并联同步开关电感电路、串联同步开关电感电路及同步电荷提取电路(Synchronous Charge Extraction, SCE)。其中,并联、串联同步开关电感电路及经典电路均存在负载匹配问题,即仅当负载与最优负载值一致时,压电发电机输出功率才达到最大。相反,同步开关电荷电路输出功率与负载无关,且输出功率可以达到经典电路的 4 倍以上^[3]。然而,多数同步开关阻尼电路均由 DSP 处理器及集成电路组成,开关电路本身的功耗甚至超过了压电发电机所能输出的最大功率^[4]。因此,本文提出一种自供能的无源同步电荷提取电路,通过建立压电发电机的机电模型,着重研究一种低功耗、输出功率始终保持最优的接口电路,最后通过实验比较了该电路与经典电路的输出功率。

2 压电发电机模型分析

2.1 压电发电机机电模型建立

压电发电机利用压电效应,将外界振动激励产生的机械应变转化为压电元件表面电荷的累积,通过不同形式的接口电路将压电元件输出的交流电转换为负载所适用的直流电,并存储在电池或超级电容中,以提供持续、稳定的电源。本文采用悬臂梁式压电发电机,其优点在于梁的变形主要是弯曲变形,相较于杆的纵向振动或轴的扭转振动,易于激发且振动频率较低、能量转换效率较高。

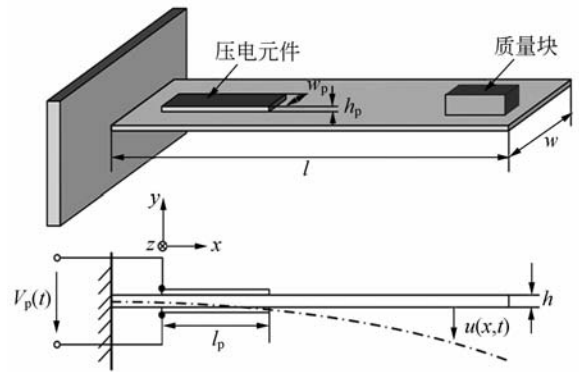


图 1 悬臂梁式压电发电机结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of piezoelectric generator with cantilever

悬臂梁式压电发电机基本结构如图 1 所示,压电元件工作在 d_{31} 模式。如图所示建立坐标系,设悬臂梁的长度、宽度和厚度分别为 l, w 和 h ,压电元件长度、宽度和厚度分别为 l_p, w_p 和 h_p 。由于悬臂梁横截面积远小于其纵向尺寸且工作于低频段,可以将该悬臂梁结构看作 Bernoulli-Euler 梁。仅考虑梁的一阶振动,当悬臂梁在外界激励下振动时,悬臂梁 x 位置处 t 时刻的 y 向位移可以表示为^[5-6]:

$$u(x, t) = \Phi(x)u(t), \quad (1)$$

其中, $\Phi(x)$ 为悬臂梁的一阶固有振型函数, $u(t)$ 为梁的纵向位移随时间的变化函数。 $\Phi(x)$ 可以进一步表示为:

$$\Phi(x) = \cosh sx - \cos sx + v(\sinh sx - \sin sx), \quad (2)$$

其中,

$$v = \frac{\sin sl - \sinh sl}{\cos sl + \cosh sl}, \quad (3)$$

式中,梁的一阶振型所对应 $sl=1.8751$ 。

对工作在 d_{31} 模式的压电元件而言,其压电方程可以表示为:

$$\begin{cases} T_1 = c_{11}^E S_1 - e_{31} E_3 \\ D_3 = e_{31} S_1 + \epsilon_{33}^S E_3 \end{cases}, \quad (4)$$

式中, T_1, S_1 分别为压电元件的应力与应变, E_3, D_3 分别为电场强度和电位移, c_{11}^E 为压电元件弹性刚度常数, e_{31} 为压电应力常数, ϵ_{33}^S 为应变为零时的介电常数。

由此压电元件产生的回复力 $F_p(t)$ 、压电元件输出电流 $I_p(t)$ 可以表示为:

$$\begin{cases} F_p(t) = K_p u(t) + \alpha V_p(t) \\ I_p(t) = \dot{a}u(t) - C_p \frac{dV_p(t)}{dt} \end{cases}, \quad (5)$$

式中, K_p 为压电元件刚度, α 为压电应力因子, C_p 为压电元件静态夹持电容。其中, α, C_p 与悬臂梁压电发电结构各物理参数关系可以表示为^[7-8]:

$$\begin{cases} \alpha = \frac{\omega_p h_p e_{31}}{2} [\dot{\phi}(l_p) - \dot{\phi}(0)] \\ C_p = \frac{2\epsilon_{33}^S l_p \omega_p}{h_p} \end{cases}, \quad (6)$$

联立式(2)、(3)、(6),即可得到 α 。

3 两种接口电路的输出功率分析

3.1 经典接口电路

经典接口电路由整流桥和滤波电容组成,目的是将压电元件输出的交流电压转换为负载所需的直流电压,如图 2 所示。图中, R_L 为与实际负载消耗相同的等效电阻,滤波电容 C_f 远大于静态夹持电容 C_p ,目的在于减小输出电压纹波^[3-4]。

经典接口电路工作过程可以分为两个阶段,一是所有二极管均反向偏置,静态夹持电容上累积电荷;至压电元件两端的电压 V_p 大于滤波电容电压,整流桥导通,压电元件上存储的电能传输

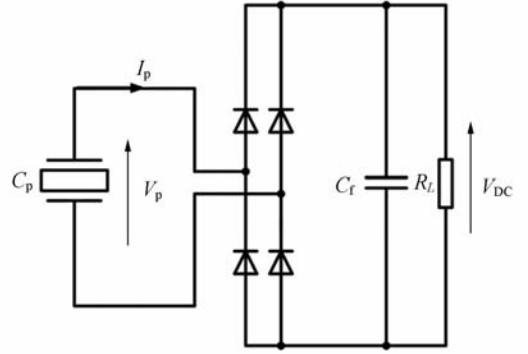


图 2 经典接口电路原理图

Fig. 2 Schematic illustration of standard circuit

至负载,经典电路工作波形如图 3 所示。

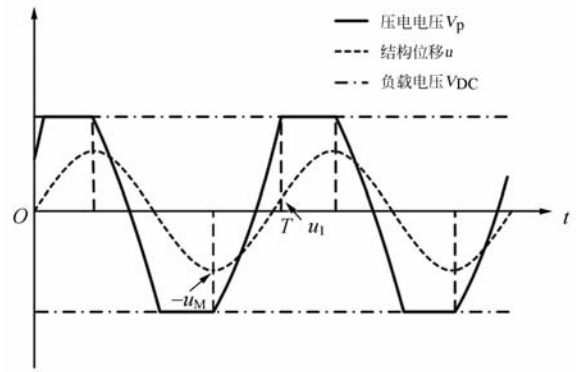


图 3 经典电路工作波形图

Fig. 3 Waveforms of displacement and voltage of standard circuit

图中, u_M, u_1 分别为压电发电机位移峰值与压电元件两端电压达到负载电压时刻对应的位移,两者关系可以表示为:

$$u_1 = \frac{2C_p V_{DC}}{\alpha} - u_M. \quad (7)$$

设悬臂梁机械振动频率为 f ,则压电发电机输出功率可以表示为:

$$P_{Standard} = 2f \int_{t_0}^{t_0 + T} V_{DC} I_p dt = \frac{\omega \alpha V_{DC}}{\pi} (u_M - u_1) = \frac{2\omega}{\pi} (\alpha u_M V_{DC} - C_p V_{DC}^2), \quad (8)$$

则压电发电机输出最大功率可以表示为:

$$(P_{Standard})_{max} = \frac{\omega \alpha^2 u_M^2}{2\pi C_p}. \quad (9)$$

最大输出功率对应的最优负载可以表示为:

$$R_{opt} = \frac{\pi}{2\omega C_p} \quad (10)$$

3.2 同步电荷提取电路

当压电元件两端电压与结构振动速度始终保持同向时,压电发电机输出功率较高。同步电荷提取电路原理如图 4 所示,当压电元件两端电压 V_p 达到峰值时,闭合开关 S ,则压电等效电容 C_p 与电感 L 形成振荡回路,压电元件上累积的电能短时间内转移为电感中的磁能存储;电能转移完成后,开关打开,压电元件开路,同步电荷提取

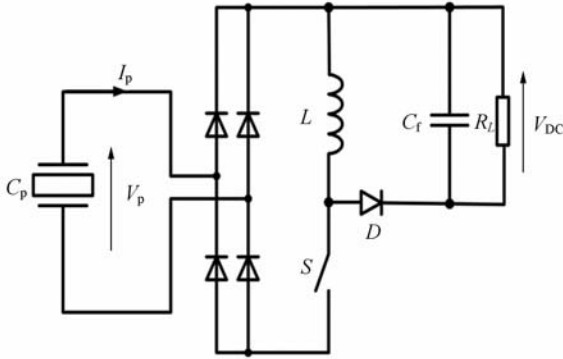


图 4 同步电荷提取电路原理图

Fig. 4 Schematic illustration of SCE circuit

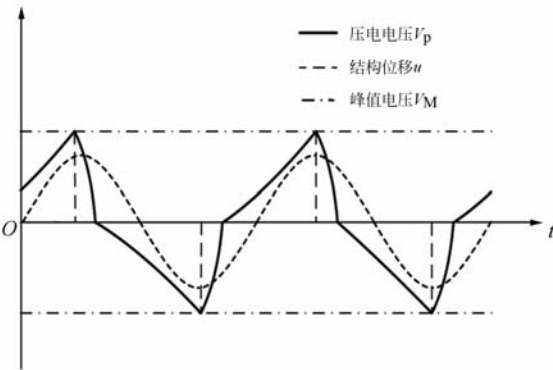


图 5 同步电荷提取电路工作波形图

Fig. 5 Waveforms of displacement and voltage of SCE circuit

电路工作波形如图 5 所示。同步电荷提取电路输出功率恒定,其原因在于开关闭合时间等于 $L-C_p$ 回路振荡周期的 $1/4$,恰在这段时间内电能全部转换为磁能,与负载大小无关, $L-C_p$ 回路振荡周期可以表示为:

$$T_{LC_p} = 2\pi\sqrt{LC_p} \quad (11)$$

除开关闭合的时间外,压电元件均处于开路状态,即 $I_p = 0$,则压电元件两端峰值电压可以表示为:

$$V_M = \frac{2\alpha u_M}{C_p} \quad (12)$$

则压电发电机输出功率可以表示为:

$$P_{SCE} = f \cdot \Delta E = \frac{2\omega\alpha^2 u_M^2}{\pi C_p} = 4(P_{Standard})_{max} \quad (13)$$

4 改进的无源同步电荷提取电路控制策略

本文提出用自供能、低功耗的无源同步电荷提取电路作为压电元件与负载之间的接口电路,如图 6 所示^[9-11]。无源同步电荷提取电路包括整流桥、无源峰值检测开关电路及单端反激变换电路。经过桥式整流后,输入峰值检测开关电路的电压和电流信号方向始终不变。

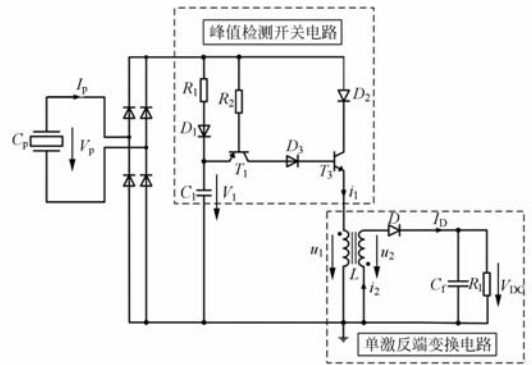


图 6 改进的无源同步电荷提取电路原理图

Fig. 6 Schematic illustration of improved passive SCE circuit

无源峰值检测开关电路的工作原理为:设 T 为压电发电机机械振动周期,在 $[0, T/4)$ 期间,电容 C_1 两端电压 V_1 为压电元件电压 V_p 的延时, V_p 始终大于 V_1 , D_1 导通,而 D_2, D_3, T_1, T_3 均截止; $t = T/4$ 时, V_p 到达峰值后开始减小,直到 V_1 与 V_p 电压差大于 T_1 导通电压后,二极管 D_1 截止,而开关管 T_1, D_3, T_3, D_2 导通, C_p 经过整流桥及 D_2 ,

T_3 与互感线圈的初级线圈 L 形成 $L-C_p$ 振荡回路(取互感线圈初级线圈与次级线圈的电感均等于 L ,且耦合系数为 1,即两者互感 M 也等于 L)。

在 $[0, T/4)$ 期间,压电元件两端电压通过整流桥及开关电路加在初级线圈上,设初级线圈与次级线圈上的电压分别为 u_1, u_2 ,流经初级线圈与次级线圈的电流分别为 i_1, i_2 ,则互感线圈两端线圈的电压、电流关系可以表示为:

$$\begin{cases} u_1 = L \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} \\ u_2 = -M \frac{di_1}{dt} - L \frac{di_2}{dt} \end{cases} \quad (14)$$

在 $[0, T/4)$ 期间,有 $u_1 > 0$,则次级线圈上的感应电压为 $u_2 < 0$,使二极管 D 截止,滤波电容 C_f 为负载提供电能。即次级线圈开路,压电元件输出的电能转换为初级线圈的磁能存储。因此 i_1 从零开始增加,在 $t = T/4$ 时达到最大值 $I_{1\max}$ 。此后, i_1 开始减小,次级线圈的感应电势 u_2 反向,二极管 D 导通,存储在互感线圈中的磁能通过 D 向负载释放。磁能的释放使初级线圈电压 u_1 迅速减小为负值,开关管 T_3 截止,互感线圈与压电元件断开连接,开关 T_3 导通时间近似等于 $L-C_p$ 振荡周期的 $1/4$ 。

5 实验结果与分析

压电发电机实验装置如图 7 所示,悬臂梁尺寸为 $210 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$,在悬臂梁的自由端固定激振器,信号发生器通过功率放大器产生周期变化的激振力。在悬臂梁靠近根部正反对称布置两个压电片,压电元件选择 PZT-502,压电片尺寸为 $59 \text{ mm} \times 13 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ 。实验中激振器频率为 56 Hz ,压电元件等效电容为 53 nF ,压电应力因子为 $0.658 \text{ mN} \cdot \text{V}^{-1}$ 。为了对比同步电荷提取电路与经典电路的输出功率,分别将压电元件与经典电路及改进的无源同步电荷提取电路连接,测量两者输出功率。

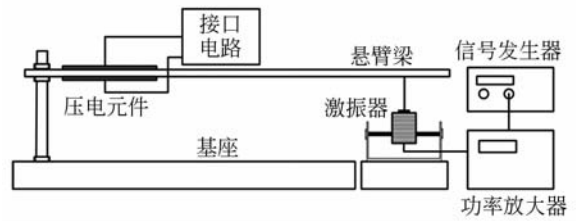
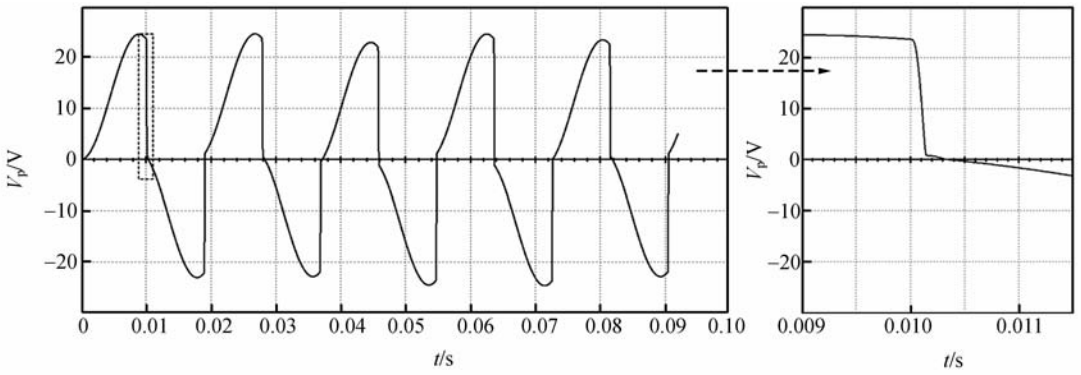


图 7 压电发电机实验装置示意图

Fig. 7 Illustration of piezoelectric generator experimental system

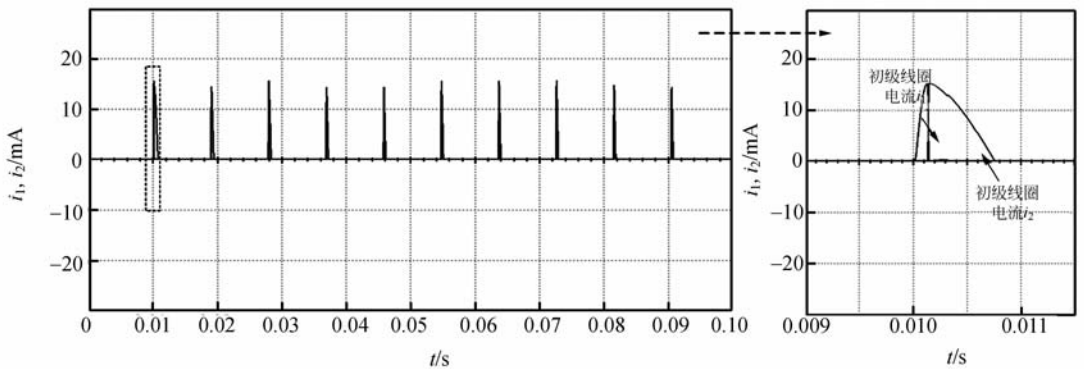
采用无源同步电荷提取电路的压电发电机实验波形如图 8 所示,图 8(a)为压电元件电压 V_p 实验波形图,图 8(b)为互感线圈两侧电流 i_1, i_2 实验波形图。从图 8(a)中可以看出,压电元件电压在峰值处反向至零,反向时间为 $L-C_p$ 振荡周期的 $1/4$;电压反向后,压电元件开路,电压随位移变化。从图 8(b)中可以看出,当无源峰值开关电路检测到压电电压峰值时,开关闭合,次级线圈中无电流,初级线圈中电流从零增至最大值,至开关断开,初级线圈中电流迅速衰减至零,次级线圈为负载供电。

改进的同步电荷提取电路与经典电路输出功率实验比较结果如图 9 所示,从图中可以看出, Multisim 仿真结果表明改进的无源同步电荷提取电路输出功率为 1.83 mW ,且与负载无关。压电振动发动机实验结果表明经典电路输出功率最大值为 0.381 mW ,对应最优负载为 $90 \text{ k}\Omega$;改进的同步电荷提取电路输出功率基本恒定为 1.135 mW ,不存在最优负载问题,改进的同步电荷提取电路输出功率约为经典电路的 2.98 倍。无源同步电荷提取电路输出功率实测结果与仿真结果相差 0.695 mW ,主要原因在于仿真电路选用理想元件,而实测电路存在各种形式的能量损耗。方面能量损耗一部分为互感线圈的电能传输损耗,包括热能损耗、磁滞损耗及涡流损耗等,另一部分为二极管等效电阻及其他阻性元件的热能损耗。



(a) 压电元件电压波形图

(a) Voltage waveform of piezoelectric element



(b) 互感线圈两侧电流波形图

(b) Current waveform of mutual inductance

图 8 改进的无源同步电荷提取电路实验波形图

Fig. 8 Experimental wave forms of voltage and current of improved passive SCE circuits

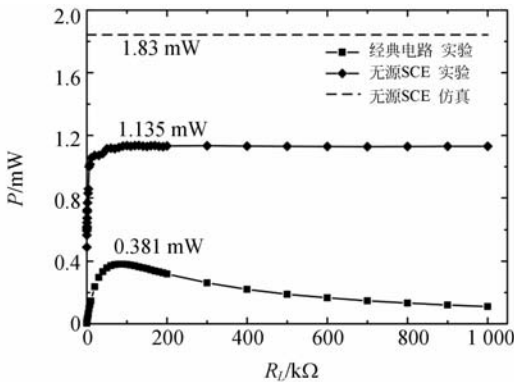


图 9 改进的无源同步电荷提取电路与经典电路功率比较

Fig. 9 Power comparison between improved passive SCE and standard circuits

6 结 论

本文根据无线传感器网络对自供电电源的需求,提出了低功耗、自给能量的无源同步电荷提取电路,并应用于悬臂梁式压电发电机。实验结果证明了所述改进的无源接口电路的可行性,电路实际最大输出功率达到 1.135 mW,为经典电路实际功率的 2.98 倍以上,与理论分析结果一致,为无线传感器自供电提供了依据。

参考文献:

[1] MAKIHARA K, ONODA J, MIYAKAWA T. Low energy dissipation electric circuit for energy

harvesting[J]. *Smart Materials and Structures*, 2006,15:1493-1498.

[2] 袁江波,谢涛,单小彪,等. 压电俘能技术研究现状综述[J]. *振动与冲击*,2009,28(10):36-41.

- YUAN J B, XIE T, SHAN X B, *et al.*. A review of current situation for piezoelectric energy harvesting [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2009, 28(10):36-41. (in Chinese)
- [3] LEFEUVRE E, BADEL A, RICHARD C, *et al.*. A comparison between several vibration-powered piezoelectric generators for standalone systems [J]. *Sensors and Actuators*, 2005, 126:405-416.
- [4] LALLART M, GUYOMAR D. An optimized self-powered switching circuit for non-linear energy harvesting with low voltage output [J]. *Smart Materials and Structures*, 2008, 035030.
- [5] 袁江波, 谢涛, 单小彪, 等. 悬臂梁单晶压电发电机的实验 [J]. *光学精密工程*, 2009, 17(5):1072-1076. YUAN J B, XIE T, SHAN X B, *et al.*. Experiment of monocrystal piezoelectric generator with cantilever beam structure [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(5):1072-1076. (in Chinese)
- [6] 阙君武, 唐可洪, 王淑云, 等. 压电悬臂梁发电装置的建模与仿真分析 [J]. *光学精密工程*, 2008, 16(1):71-75. KAN J W, TANG K H, WANG Sh Y, *et al.*. Modeling and simulation of piezoelectric cantilever generators [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(1):71-75. (in Chinese)
- [7] JI H L, QIU J H, ZHU K J, *et al.*. Two-mode vibration control of a beam using nonlinear synchronized switching damping based on the maximization of converted energy [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2010, 329:2751-2767.
- [8] GUYOMAR D, BADEL A. Nonlinear semi-passive multimodal vibration damping: An efficient probabilistic approach [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, 294:249 - 268.
- [9] TAN Y K. Maximize piezoelectric energy harvesting using synchronous charge extraction technique for powering autonomous wireless transmitter [J]. *IEEE*, 2008:1123-1128.
- [10] LALLART M, LEFEUVRE E, RICHARD C, *et al.*. Self-powered circuit for broadband, multimodal piezoelectric vibration control [J]. *Sensors and Actuators*, 2008, 143:377-382.
- [11] LALLART M, GARBUIO L, PETIT L, RICHARD C, *et al.*. Double Synchronized Switch Harvesting (DSSH): A New Energy Harvesting Scheme for Efficient Energy Extraction [J]. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, 2008, 55:2119-2129.

作者简介:



朱莉娅(1986—),女,江苏徐州人,博士研究生,主要从事压电式振动能量采集方面的研究。E-mail: julia_860527@163.com



陈仁文(1966—),男,湖南平江人,工学博士,教授,博士生导师。主要从事传感器与测试计量技术、新型能量收集技术等方面的研究。E-mail: rwchen@nuaa.edu.cn