

DICH 压电能量回收接口电路设计

张宝强,王宏涛,孟莹梅

(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

摘要:设计了一种新的能量回收接口电路——双中间电容回收(DICH)接口电路,该电路由2个LC振荡电路、一个buck-boost转换器和2个中间电容组成。完成了在恒定激励位移情况下该电路的回收功率的理论分析和计算。利用Multisim仿真软件对标准电路、同步电荷提取(SECE)接口电路、并联-同步开关电感回收(SSHI)、串联-SSHI和DICH接口电路进行了仿真比较,结果表明,双中间电容回收(DICH)接口电路在最优负载时的最大回收功率仅小于并联-SSHI接口电路,约是SECE接口电路的2倍,且具有与SECE接口电路同样的特性,即回收功率与负载无关。

关键词:能量回收;压电效应;接口电路;振动;机电转换

中图分类号:TK01;TM282

文献标识码:A

The Design of DICH Interface Circuit in Piezoelectric Energy Harvesting System

ZHANG Baoqiang, WANG Hongtao, MENG Yingmei

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

Abstract: A new interface technology of double intermediate capacitor harvesting (DICH) for piezoelectric energy harvesting system is presented. The interface consists of two LC oscillation circuits, a buck-boost converter and two intermediate capacitors. The theoretical analysis and calculation of the harvested power obtained by using such an interface technique are proposed considering constant displacement amplitude. The harvested powers of standard, SECE, Parallel-SSHI, Series-SSHI and DICH interface are simulated and compared by using the Multisim software. The results show that the harvested power of DICH interface circuit under the optimal load is only less than the parallel-SSHI interface circuit, DICH interface technology has similar features with SECE whose effect is not influenced by the load resistance value, furthermore, the DICH interface circuit increases the harvested power dramatically by almost up to 200% compared with the SECE method under the same vibration condition.

Key words: energy harvesting; piezoelectric effect; interface circuit; vibration; electromechanical conversion

0 引言

能量回收系统是无线传感网络自供能和微型化发展的关键技术之一,压电能量回收技术因具有结构简单,成本低,易于系统集成,能量密度高及无电磁干扰的特点^[1]而发展迅速。能量回收接口电路是能量回收系统重要组成部分,最基本的接口电路为标准接口^[2]。随后Lefevre等^[3]提出了同步电荷提取(SECE)接口电路,该接口电路输出功率与后续电路负载无关,与标准接口电路相比,其最大回收功率提高了4倍。Lefevre和Guyomar等^[4]提出了并联同步开关电感回收(SSHI)接口电路,Taylor等^[5]将控制开关与压电单元串联连接,称其为串联

SSHI技术,在最优负载条件下两种SSHI接口电路回收功率是标准接口电路最大回收功率的15倍。除了这4种常见的接口电路外,还有Lallart等^[6]提出的双同步开关回收(DSSH)接口电路和SHEN Hui等^[7]提出的增强型同步开关回收(ESSH)接口电路等。

设计并提出了双中间电容回收(DICH)接口电路,该电路的回收功率约是SECE接口电路的2倍,且不随负载变化而变化。

1 机电耦合模型

当粘贴了压电片的振动结构在一阶共振频率附近发生振动时,其机电耦合模型^[8]可用{质量+阻尼

收稿日期:2014-08-18

基金项目:航空科学基金资助项目(2012ZA52009)

作者简介:张宝强(1990-),男,山东临沂人,硕士,主要从事微机电控制的研究。王宏涛(1968-),女,吉林长春人,教授,博士生导师,博士。
E-mail:meehtwang@nuaa.edu.cn。

十弹簧)模型表示,如图 1 所示。图中, M 、 A 和 K_s 分别为结构在一阶共振频率下的等效质量、等效阻尼和等效刚度, u 为质量块的位移, F 为作用在结构上的外力之和, V_{C_0} 为压电片受夹电容两端的电压, I_1 为从压电片流出的电流。

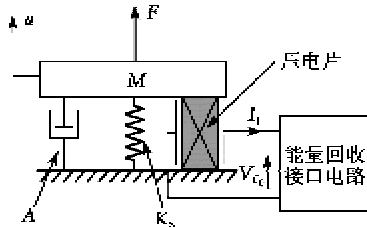


图 1 机电耦合模型

当机电系统达到共振频率时,能量回收系统的动态平衡方程为

$$Mu + Au + K_s u + \alpha V_{C_0} = F \quad (1)$$

$$I_1 = \alpha \dot{u} - C_0 \dot{V}_{C_0} \quad (2)$$

式中: K_R 为压电片短路时系统总的等效刚度; α 为力因子; C_0 为压电片的受夹电容。

在式(1)两边同时乘以 $\dot{u}$ 并对时间 t 积分可得

$$\int F \dot{u} dt = \frac{1}{2} M \dot{u}^2 + \left[A \dot{u}^2 dt + \frac{1}{2} K_R u^2 + \int \alpha V_{C_0} \dot{u} dt \right] \quad (3)$$

式(3)为整个系统的能量转换关系,其中 $\int \alpha V_{C_0} \dot{u} dt$ 为机电转换能,能量回收就是尽可能地将这部分能量回收储到储能元件中。

2 DICH 接口电路原理与理论分析

图 2 为 DICH 接口电路原理图。它可分为 2 个部分:

1) 由 C_0 、电感 L_1 (有内阻 r_1)、开关 S_1 、二极管 D_1 和 C_1 组成的 $L_1 C_0 C_1$ 振荡电路;由 C_0 、 L_1 (有内阻 r_1)、 S_1 、 D_1 和 C_2 组成的 $L_1 C_0 C_2$ 振荡电路。

2) 由电感 L_2 (有内阻 r_2)、开关 S_2 、续流二极管 D_2 、滤波电容 C_r 组成的 buck-boost 转换器。振荡电路连接 buck-boost 转换器,外接负载用等效电阻 R 表示。

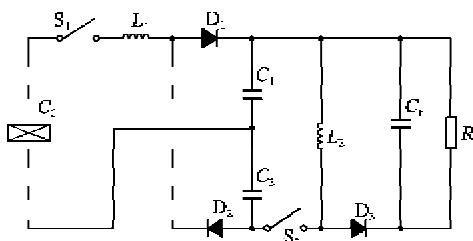


图 2 DICH 接口电路原理图

DICH 接口电路中,压电片大多数时间都处在开路状态(S_1 和 S_2 断开),在每个机械振动周期 T 内进行两次能量回收,每次能量回收可分为 4 个阶段。当机械振动位移 u 以正弦规律 $u = U_M \sin(\omega t)$ (U_M 为机械振动位移幅值)运动时, V_{C_0} 、第 1) 阶段电路中的电流(压电片的输出电流) I_1 、中间电容 C_1 和 C_2 的电压 V_{C_1} 和 V_{C_2} 、第 2)、3) 阶段电路中的电流 I_2 和 I_3 的波形如图 3 所示。下面以图 3 中的 $[t_0, t_0 + T/2]$ (t_0 为机械振动位移达到最大值的时刻)时间段分别详述能量回收的 4 个阶段。

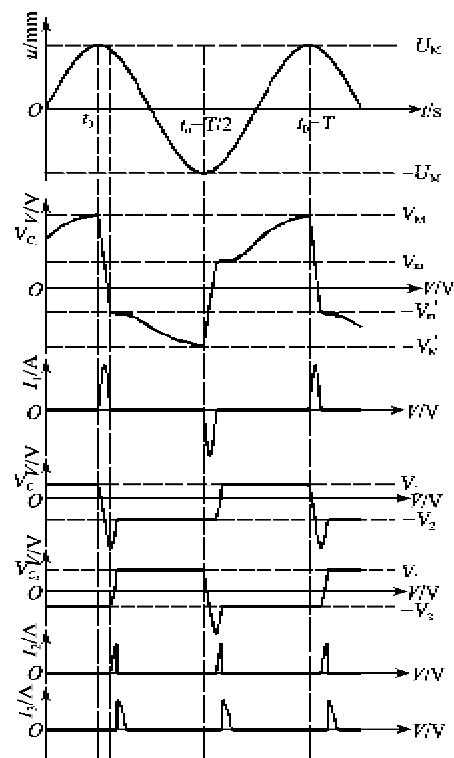


图 3 DICH 接口电路的理论波形

1) 在 t_0 时刻, u 达到最大值 U_M ,此时压电片两端电压达到最大值 V_M , S_1 闭合,存储在压电片上的电能经 L_1 和 D_1 转移到 C_1 上,当 C_1 上面电荷量最大和 $I_1 = 0$ 时, S_1 断开, S_2 闭合。

当 S_1 闭合,压电片、 L_1 和 C_1 组成了一个振荡电路,根据基尔霍夫电压定律得

$$L_1 C_0 \frac{d^2 V_{C_0}}{dt^2} + r_1 C_0 \frac{dV_{C_0}}{dt} + \frac{C_0}{C_1} V_{C_0} + V_{C_0} + \frac{C_1 V_{C_1} - C_0 V_M}{C_1} = 0 \quad (4)$$

当 S_1 闭合的一瞬间(t_0 时刻),压电片两端的电压为 V_M , C_1 两端的电压为 V_1 ,求解式(4)得

$$V_{C_0} = \frac{C_1}{C_1 + C_0} (V_M + V_1) e^{\alpha_1 t} [\cos \beta_1 t -$$

$$(\sigma_1/\beta_1)\sin\beta_1 t] + \frac{C_0 V_M - C_1 V_1}{C_1 + C_0} \quad (5)$$

其中

$$\sigma_1 = -\omega_1 \xi_1 \quad (6)$$

$$\beta_1 = \omega_1 \sqrt{1 - \xi_1^2} \quad (7)$$

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{1}{L_1 \frac{C_1 C_0}{C_1 + C_0}}} \quad (8)$$

$$\xi_1 = \frac{1}{2} r_1 \sqrt{\frac{C_1 C_0}{C_1 + C_0}} \quad (9)$$

式中: ω_1 为系统第 1) 阶段的自然角频率; ξ_1 为系统的阻尼系数。当电路中 $I_1 = 0$ 时, S_1 断开, 即

$$I_1 = C_0 \frac{dV_{C_0}}{dt} = 0 \quad (10)$$

则可分别得到第 1) 阶段能量转移结束后压电片和 C_1 上的电压为

$$-V'_m = \frac{C_1 \gamma_0}{C_0 + C_1} (V_M + V_1) + \frac{C_0 V_M - C_1 V_1}{C_0 + C_1} \quad (11)$$

$$V = -\frac{C_0 \gamma_0}{C_1 + C_0} (V_M + V_1) + \frac{C_1 V_1 - C_0 V_M}{C_0 + C_1} \quad (12)$$

式中 γ_0 为翻转系数, 定义

$$\gamma_0 = e^{-\pi \xi_1 / \sqrt{1 - \xi_1^2}} \quad (13)$$

当第 1) 阶段能量转移完成后, S_1 断开, S_2 闭合, 第 2) 阶段的能量转移开始。

2) 当 S_2 闭合时, C_1 、 C_2 和 L_2 组成一个 LC 振荡电路, C_1 和 C_2 上存储的电能量转移到 L_2 上, 当 L_2 上的能量最大 (I_2 最大) 时, S_2 断开。根据基尔霍夫电压定律得

$$L_2 C_1 \frac{d^2 V_{C_1}}{dt^2} + r_2 C_1 \frac{dV_{C_1}}{dt} + \frac{C_1}{C_2} V_{C_1} + V_{C_1} - \frac{C_2 V_1 - C_1 V}{C_2} = 0 \quad (14)$$

式(12)已给出 C_1 上的初始电压, C_2 上的初始电压为 $-V_1$, 由此初始条件可得 C_1 两端的电压 V_{C_1} 和 $L_2 C_1 C_2$ 振荡电路的 I_2 为

$$V_{C_1} = \frac{C_2 (V - V_1)}{C_1 + C_2} e^{\sigma_2 t} \left(\cos \beta_2 t - \frac{\sigma_2}{\beta_2} \sin \beta_2 t \right) + \frac{C_2 V_1 + C_1 V}{C_1 + C_2} \quad (15)$$

$$I_2 = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} (V - V_1) \frac{\omega_2}{\sqrt{1 - \xi_2^2}} e^{-\omega_2 \xi_2 t} \cdot \sin(\omega_2 \sqrt{1 - \xi_2^2} t) \quad (16)$$

式中: $\sigma_2 = -\omega_2 \xi_2$; $\beta_2 = \omega_2 \sqrt{1 - \xi_2^2}$; ω_2 和 ξ_2 为系统第

2) 阶段的自然角频率和阻尼系数, 分别为

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{1}{L_2 \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}}} \quad (17)$$

$$\xi_2 = \frac{1}{2} r_2 \sqrt{\frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}} \quad (18)$$

当 I_2 达到最大时, 第 2) 阶段的能量转移结束, S_2 断开, 因为 $\xi_2 \ll 1$, 由式(16)得第 2) 阶段结束时电路中的电流为

$$(I_2)_{\text{end}} \approx \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} (V - V_1) \omega_2 e^{-\xi_2 \pi / 2} \quad (19)$$

3) 当 S_2 断开时, D_3 导通, 存储在 L_2 上的能量转移到 C_r 和 R 上, 此时电路中的电流为 I_3 。

在这个阶段, 负载电压 V_{DC} 可看为恒定值, 原因是 C_r 和 R 组成电路的时间常数为 $2\pi RC_r$, 远大于振动周期的一半。第 3) 阶段能量转移式为

$$L_2 \frac{dI_3}{dt} + r_2 I_3 + V_{DC} = 0 \quad (20)$$

式中: I_3 为电荷从 L_2 转移到 C_r 产生的电流; r_2 为 L_2 的内部电阻。电流的初始条件为

$$I_3(0) = (I_2)_{\text{end}} \quad (21)$$

由于 r_2 很小, 所以 r_2 所占电压 $r_2 (I_2)_{\text{end}} \ll V_{DC}$, 所以可忽略 r_2 的影响。则式(20)可写为

$$L_2 \frac{dI_3}{dt} + V_{DC} = 0 \quad (22)$$

第 3) 阶段电路中的 $I_3 = 0$ 时, 第 3) 阶段的能量转移结束, 电荷的变化量为

$$\Delta q \approx \frac{1}{2} \frac{L_2}{V_{DC}} (I_2)_{\text{end}} \quad (23)$$

所以整个系统半个周期内回收的能量为

$$E = \int V_{DC} I_3 dt = V_{DC} \Delta q \quad (24)$$

根据式(12)、(19)、(23)、(24)可得

$$E = \frac{1}{2} \eta \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \left[\frac{C_0 (V_0 + V_1) (1 + \gamma_0)}{C_0 + C_1} \right]^2 \quad (25)$$

式中 η 为 buck-boost 转换器的转换效率, 且

$$\eta = e^{-\xi_2 \pi} \quad (26)$$

从式(25)可看出, 整个系统回收的能量与负载上的电压 V_{DC} 的大小无关, 且与 R 无关。

4) 当压电片两端的电压从 $-V'_m$ 变化到 $-V'_M$ 时 (见图 3), 压电片处在开路阶段, 即压电片的输出电流 $I_1 = 0$, 由式(2)可得

$$-V'_M + V'_m = -2 \frac{\alpha}{C_0} U_M \quad (27)$$

下半周期的情况和上半周期的分析类似(见图3),在 $[t+T/2, t_0+T]$ 也分为4个阶段:

在1)阶段 $t_0+T/2$ 时刻, u 达到最小值 $-U_M$,此时压电片两端电压达到最小值 $-V'_M$, S_1 闭合,存储在压电片上的电能经 L_1 和 D_1 转移到 C_2 上,当 C_2 上面电荷量最大和 $I_1=0$ 时,开关 S_1 断开,开关 S_2 闭合。

第2)和第3)阶段与上半周期相同。

在4)阶段,当压电片两端的电压从 V_m 变化到 V_M (见图3)时,压电片处在开路阶段,即压电片的输出电流 $I_1=0$,此时整个振动周期结束。

当能量回收系统的机电耦合较弱时,接口电路回收的能量与振动环境的能量相比可忽略,这时能量回收装置的激振位移幅值 U_M 保持恒定。令 C_1 、 C_2 为

$$C_1 = C_2 = xC_0 \quad (28)$$

根据式(11)、(12)可得压电片两端和 C_1 上的电压为

$$-V'_m = -\frac{x\gamma_0}{1+x}(V_M + V_1) + \frac{V_M - xV_1}{1+x} \quad (29)$$

$$V = -\frac{\gamma_0}{1+x}(V_M + V_1) + \frac{xV_1 - V_M}{1+x} \quad (30)$$

当压电片两端的电压从 $-V'_m$ 变化到 $-V'_M$ 时,压电片处于开路阶段(见图3)。由于 C_1 和 C_2 上的电压 V_1 、 V_2 不同,导致 V_M 和 V'_M 不同,因此通过式(27)、(29)可得

$$V_M - \frac{x\gamma_0}{1+x}(V'_M + V_2) + \frac{V'_M - xV_2}{1+x} = 2\frac{\alpha}{C_0}U_M \quad (31)$$

$$-V'_M + \frac{x\gamma_0}{1+x}(V_M + V_1) - \frac{V'_M - xV_1}{1+x} = -2\frac{\alpha}{C_0}U_M \quad (32)$$

在能量转移的第2)阶段,当 I_2 达到最大时,根据式(15)、(16)可得

$$V_{C_1} = \frac{(V_1 - V)e^{\alpha t}}{2} \frac{\xi_1}{\sqrt{1-\xi_1}} + \frac{1}{2}(V_1 + V) \quad (33)$$

由于 ξ_1 很小,则

$$V_{C_1} \approx (V_1 + V)/2 \quad (34)$$

根据图3和式(34)可得

$$(V_1 + V)/2 = -V_2 \quad (35)$$

$$(V_2 + V')/2 = -V_1 \quad (36)$$

最后根据式(30)~(32)、(35)、(36)可得

$$V_M + V_1 = \frac{4\alpha}{C_0} \frac{x+1}{2x+3-(2x+1)\gamma_0} U_M \quad (37)$$

根据式(25)可得整个系统在半周期内回收的能量为

$$E = 4\eta x \frac{(1+\gamma_0)^2}{[2x+3-(2x+1)\gamma_0]^2} \frac{\alpha^2}{C_0} U_M^2 \quad (38)$$

由于在每个振动周期内进行两次能量回收,因此DICH接口电路的回收功率 P 为

$$P = 4\eta x \frac{(1+\gamma_0)^2}{[2x+3-(2x+1)\gamma_0]^2} \frac{\omega \alpha^2}{\pi C_0} U_M^2 \quad (39)$$

式中 ω 为机械振动角频率。为获得最大的功率值,令 $\partial P/\partial x=0$,可得最优的 x 值为

$$x_{opt} = \frac{3-\gamma_0}{2-2\gamma_0} \quad (40)$$

将式(40)代入式(39)可得最优回收功率为

$$P_{opt} = \frac{\eta(1+\gamma_0)^2}{2(1-\gamma_0)(3-\gamma_0)} \frac{\omega \alpha^2}{\pi C_0} U_M^2 \quad (41)$$

3 回收功率比较

表1为在恒定激振位移情况下5种接口电路的理论回收功率表达式。

表1 5种接口电路的理论回收功率

接口电路	理论回收功率
标准接口	$\frac{4\alpha^2 \omega^2 R}{(2RC_0 \omega + \pi)^2} U_M^2$
SECF	$\frac{2\eta \alpha^2 \omega}{\pi C_0} U_M^2$
串联-SSH1	$\frac{4\alpha^2 \omega^2 (1+\gamma)^2 R}{[\pi(1-\gamma) + 2C_0 R \omega (1+\gamma)]^2} U_M^2$
并联-SSH1	$\frac{4\alpha^2 \omega^2 R}{[\pi + C_0 R \omega (1-\gamma)]^2} U_M^2$
DICH	$\frac{\eta(1+\gamma_0)^2}{2(1-\gamma_0)(3-\gamma_0)} \frac{\omega \alpha^2}{\pi C_0} U_M^2$

图4为在恒定激振位移情况下, $\gamma_0=0.8$, $\eta=0.9$ 时5种接口电路的理论回收功率与 R 的关系图。为使该关系图不受能量回收系统自身参数的影响,对最优负载和最大回收功率分别相对于标准接口的最优负载和最大回收功率进行了归一化处理。

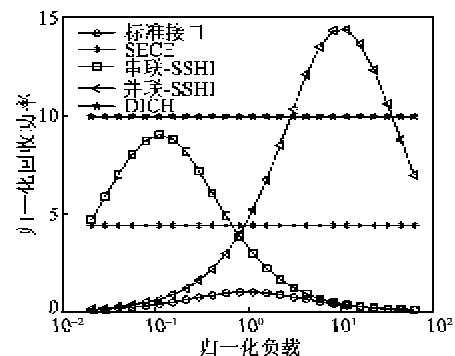


图4 5种接口电路的理论回收功率与负载的关系

由图4可知,标准接口、串联-SSHI、并联-SSHI接口电路的回收功率都是随负载变化而变化的,SECE和DICH接口电路的回收功率都与负载无关,即不随负载的变化而变化,且DICH接口电路回收功率约为SECE的2倍。DICH接口电路在最优负载时的最大功率仅小于并联-SSHI接口电路。

4 接口电路仿真

根据 Ottman 等^[9]的理论,压电片可用一个正弦电流源并联压电片的 C_0 表示。从等效电路流出的电流为

$$I_1 = I_m \sin(\omega t) - C_0 \dot{V} \quad (42)$$

式中 I_m 和 ω 分别为正弦电流源的幅值和角频率。假设机械振动位移 $u = -U_M \cos(\omega t)$,代入式(2)可知从压电片流出的电流 I_1 为

$$I_1 = \omega \alpha U_M \sin(\omega t) - C_0 \dot{V} \quad (43)$$

对比式(42)、(43)可知,压电片等效电路的正弦电流源频率和机械振动频率相同,正弦电流源的幅值 $I_m = \omega \alpha U_M$,即

$$I_m = 2\pi f \alpha U_M \quad (44)$$

式中, f 为机械振动频率。DICH 接口电路的参数设置为 $f = 50 \text{ Hz}$, $\alpha = 1.1 \text{ mN/V}$, $U_M = 0.3 \text{ mm}$, $C_0 = 50 \text{ nF}$, $L_1 C_0 C_1$ 振荡电路翻转系数 $\gamma_0 = 0.8$, buck-boost 转化效率 $\eta = 0.9$ 。

根据以上所给的接口电路参数,用 Multisim 仿真软件对4种常用电路和DICH接口电路进行仿真,根据 f 、 α 、 U_M 的值确定仿真时电流源的 $I_m = 100 \text{ A}$ 。最终得到的标准接口、SECE、并联-SSHI、串联-SSHI、DICH接口电路的回收功率关于 R 的仿真结果如图5所示。其仿真结果与理论计算基本一致,图中SECE和DICH接口电路的回收功率会随着负载的增加而略有增加,这主要是由于仿真软件自身迭代误差造成。

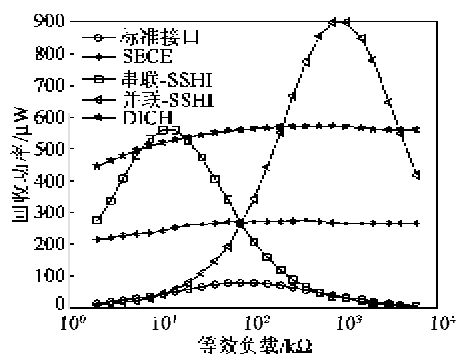


图5 5种接口电路仿真结果

5 结束语

随着微电子技术的快速发展,基于压电效应的振动能量回收技术也越来越受到关注。在接口电路方面,有标准接口电路、SECE、串联-SSHI和并联-SSHI 4种常用的接口电路,本文设计了DICH接口电路,与SECE接口电路一样,它的回收功率不随负载变化而变化,但回收功率约是SECE接口电路的2倍,具有优越的性能,且通过理论分析和仿真得到了验证。

参考文献:

- [1] ANTON S, SODANO H. A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003-2006)[J]. Smart Materials and Structures, 2007, 16(3): R1-R21.
- [2] LEFEUVRE E, BADEL A, RICHARD C, et al. A comparison between several vibration-powered piezoelectric generators for standalone systems[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2006, 126(2): 405-416.
- [3] LEFEUVRE E, BADEL A, RICHARD C, et al. Piezoelectric energy harvesting device optimization by synchronous electric charge extraction[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2005, 16(10): 865-876.
- [4] GUYOMAR D, BADEL A, LEFEUVRE E, et al. Toward energy harvesting using active materials and conversion improvement by nonlinear processing[J]. IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control, 2005, 52: 584-594.
- [5] TAYLOR G W, BURNS J R, KAMMANN S M, et al. The energy harvesting eel: a small subsurface ocean/river power generator[J]. IEEE J Oceanic Engineer, 2001, 26(4): 539-547.
- [6] LALLART M, GARBUIO L, PETIT L, 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(10): 2119-2130.
- [7] SHEN Hui, QIU Jinghao, JI H, et al. Enhanced synchronized switch harvesting: a new energy harvesting scheme for efficient energy extraction[J]. Smart Materials and Structures, 2010, 19(11): 115017.
- [8] BADEL A, LAGACHE M, GUYOMAR D, et al. Finite element and simple lumped modelling for flexural nonlinear semi-passive damping[J]. J Intell Mater Syst Struct, 2007, 18(7): 727-742.
- [9] OTTMAN G, HOFMANN F, BHATT A, et al. Adaptive piezoelectric energy harvesting circuit for wireless remote power supply[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2002, 17(5): 669-675.