

一种压电振动能量回收电路

孙皓文, 龚立娇, 吴延祥, 郭俊成

(石河子大学 机械电气工程学院, 新疆 石河子 832003)

摘要:为了提高压电式振动能量回收系统的能量回收能力和解决在负载变化使能量回收效率变差的问题,以悬臂梁式压电振动发电系统为例,提出了一种高效的压电振动能量收集电路设计方案,即并联型双同步开关电感接口电路,可将压电梁转换振动能量得到的电能高效地储存在电容中。实验结果表明,压电梁在频率为 38.4 Hz、加速度有效值为 0.035 m/s^2 振动激励下工作时,给出的并联双同步开关能量回收(P-DSSH)接口电路可释放的瞬时功率达 0.25 mW,是全桥整流接口电路(SEH)最优功率的 5.8 倍,是并联同步开关电感(P-SSHI)接口电路可释放的瞬时功率的 2.2 倍,是 LTC3588-1 电路可释放的瞬时功率的 1.27 倍,且其工作不受负载变化的影响。

关键词:能量收集;并联双同步开关能量回收电路(P-DSSH);压电振动;接口电路;能量回收效率

中图分类号:TN384;TM619

文献标识码:A

A Kind of Piezoelectric Vibration Energy Recovery Circuit

SUN Haowen, GONG Lijiao, WU Yanxiang, GUO Juncheng

(College of mechanical and Electrical Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, China)

Abstract: In order to improve the energy recovery ability of piezoelectric vibration energy recovery system and solve the problem of recovery efficiency decreased by load change, a high efficient design scheme of piezoelectric vibration energy harvesting circuit is presented by using the piezoelectric vibration power generation system as an example, that is, the parallel double synchronous switch inductive interface circuit. The electric energy which is converted from the vibration energy by the piezoelectric vibration beam can be effectively stored in the capacitor. The experimental results show that the piezoelectric beam is working at the vibration excitation frequency of 38.4 Hz and the acceleration effective value arms of 0.035 m/s^2 . The instantaneous power of the parallel dual synchronous switch harvesting(P-DSSH) interface circuit is up to 0.25 mW, that is 5.8 times of the full bridge rectifier circuit (SEH) interface circuit optimal power, 2.2 times of the instantaneous power of the(P-SSHI) interface circuit connected in parallel with the inductive interface circuit of the synchronous switch and 1.27 times of the instantaneous power released by LTC3588-1 circuit. The operation is not affected by load variation.

Key words: energy collection; parallel dual synchronous switch harvesting circuit(P-DSSH); piezoelectric vibration; interface circuit; energy recovery efficiency

0 引言

随着集成电路技术和电子技术的不断发展,小尺寸、低功耗的微电子产品的研发有了很大的进步,因此,通过压电结构利用环境中的振动能进行发电为其供电是一种行之有效的方式,尤其适用于特殊场合^[1-4](如大型建筑局部、工矿等)中的微电子

设备。

在压电能量采集系统中接口电路是其重要的组成部分,已有的研究表明^[5-10],全桥整流接口电路(SEH)结构简单,功耗较低,但有半个周期的能量损失,且功率受到负载变化的影响;并联同步开关电感接口电路(P-SSHI)在整流桥的前端增加了并联

收稿日期:2016-10-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50907042);石河子大学高层次人才科研启动基金资助项目(RZCX201544)

作者简介:孙皓文(1992-),男,河北石家庄人,硕士生,主要从事新型环境能量采集技术的研究。E-mail:495801541@qq.com。通信作者:龚立娇(1978-),女,甘肃省武威市人,副教授,博士,主要从事传感测试系统及其输配电技术的研究。E-mail:glj_mac@shzu.edu.cn。

电感,解决了能量损失问题,同样输出功率也受到负载变化的影响。为了解决功率随负载变化的问题,需要将接口整流电路和DC-DC转换电路结合起来。最后提出一种并联双同步开关能量回收电路(P-DSSH)方案,并进行了实验。

1 振动能量采集装置结构和接口电路分析

1.1 压电能量收集器的理论模型

悬臂梁式压电振动发电装置的结构模型类似于一个单向自由度的弹簧和质量块系统^[3],如图1所示。图中, K 为弹簧的弹性系数, F 为外部激振力,PZT为压电材料; s 为模态等效质量位移。

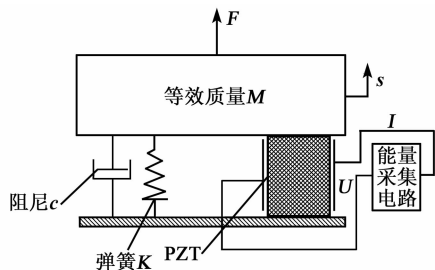


图1 悬臂梁式压电装置的结构模型

弹簧质量块系统的运动方程为

$$M\ddot{s} + D\dot{s} + K_E s = F + F_P \quad (1)$$

式中: D 为共振频率下的模态损耗因子; K_E 为模态等效刚度; M 为模态等效质量; F_P 为压电片产生的恢复力; F 为外部激振力。

系统中机械量 F_P 、 s 与压电片的输出电压 V 和压电片产生的输出电流 I 之间的关系为

$$\begin{cases} F_P = K_{PE}s + \alpha V \\ I = \alpha \dot{s} - C_P \dot{V} \end{cases} \quad (2)$$

式中: K_{PE} 为压电片电学短路刚度; α 为压电片的力电系数; C_P 为压电片夹持电容。

由式(1),(2)可得系统的运动微分方程:

$$F = M\ddot{s} + C\dot{s} + (K_E - K_{PE})s - \alpha V \quad (3)$$

1.2 全桥整流接口电路

图2为全桥整流接口电路。由图可知,SEH由4个二极管组成的整流桥和1个滤波电容构成,压电换能器等效为1个正弦电流源并联1个电容。

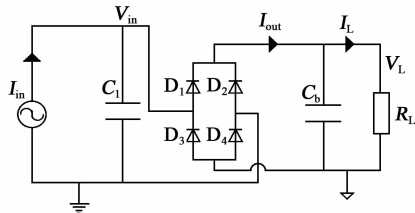


图2 全桥整流接口电路

压电片产生的交流电在经过整流后,电流在给电容 C_b 充电的同时,也为负载供能。 C_b 两端的电压开始增加,负载两端的电压也开始增加。当压电片上电容 C_1 两端电压 $|U_{in}(t)| > U_b + 2U_D$ (U_D 为二极管的导通电压)时,二极管打开,电路导通,电压开始输出并加到 C_b 和负载两端,一方面为负载 R_L 供能,另一方面给 C_b 充电;当 $|U_{in}(t)| < U_b + 2U_D$ 时,二极管关断,这时只有 C_b 为负载供电,电容放电。电路工作波形如图3所示。

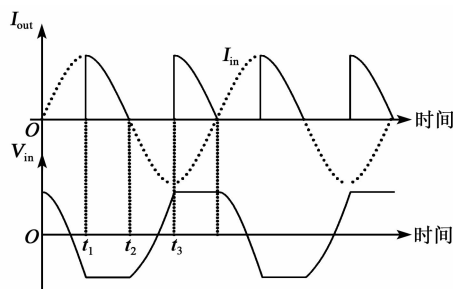


图3 全桥接口电路

根据基尔霍夫电流定律和式(2)可得

$$P_{SEH} = \frac{4\alpha^2 U_M^2 \omega^2 R_L}{(2C_P R_L \omega + \pi)^2} \quad (4)$$

式中: U_M 为悬臂梁振动位移幅值; ω 为振动角频率; α 为力因子。

由式(4)可知,如果 R_L 增大,SEH获得的输出功率也会增大。但在实际中,电路的输出功率不可能随着负载增加变得无限大,当输出电压很高时, R_L 反而会极大地抑制压电悬臂梁的谐振,从而限制输出功率的提高,所以,SEH需要选择最优负载才能保证最大输出功率。虽然这个电路的结构简单,功耗低,电路中只有4个二极管的压降损耗,且不需要外部电源供电,但该电路能量采集效率很低。由图3可知,在1个电流周期内,全桥整流电路只有半个周期电流源给负载供电,半个周期能量流失了。

1.3 并联同步开关电感接口电路

针对全桥整流接口电路有半个周期的电流流失,能量采集效率不高的问题,P-SSHI能够解决这个问题。当压电悬臂梁振动到极值时闭合开关 S (见图4),此时 C_1 与并联电感 L 发生高频LC振荡,在 $1/2$ 个LC振荡周期后压电片的电压翻转,此时断开 S 开关。P-SSHI电路是在SEH电路的基础上,增加了1个并联电感,其作用是使压电片电压进行翻转,从而增大压电片的开路电压,减少能量的

损失,周期内增加了能量传输的效率。

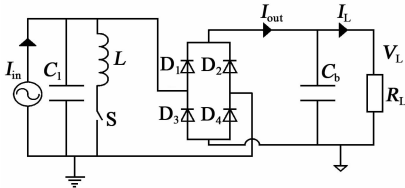


图4 同步开关电感接口电路

根据基尔霍夫电流定律和式(2)可得

$$P_{P-SSH1} = \frac{4\alpha^2 U_M^2 \omega^2 R_L}{[R_L C_P \omega (1 - \lambda) + \pi]^2} \quad (5)$$

式中 λ 为电感的翻转系数。将式(4)、(5)对 R_L 求导,假设 $\lambda=0.75$,由理论公式分析得出,P-SSH1 的功率约是 SEH 的 8 倍。同样,由式(5)可看出,虽然 R_L 增大,功率也会随之增大,但 R_L 也会抑制压电片谐振,影响功率输出。由此可得出,P-SSH1 电路虽然比 SEH 电路在最优负载下的功率采集效率高,但也受到负载变化的影响。

1.4 改进式并联同步开关电感电路

由于 P-SSH1 输出功率受到负载的影响,只有使负载的大小接近最优负载才能提高能量的转换使用效率。悬臂梁压电采集装置一般工作在谐振频率附近的振动环境下,由此可认为对于给定的压电悬臂梁,其最优负载是固定的。一般采集的电能都是储存在可充电电池或超级电容里,而这些电能储存单元的伏安特性曲线与电阻类似。如果将电路储能元件直接接在电路上,随着电压的升高储能元件储能效率亦会受到抑制。为解决能量回收效率变差的问题,提出了一种改进式同步开关电感电路即 P-DSSH,其原理如图 5 所示,当 I_{in} 正向最大时,闭合开关 S_0 、断开 S_1 和 S_2 ,电荷存储到 C_b 中,之后 S_0 断开,等待电流源再次反向;随着 C_b 电压的升高达到阈值开启电压, S_2 断开、 S_1 闭合, C_b 上的电荷迅速向输出电容 C_0 中转移存储,电感 L_2 上的能量不断增加,同时为负载供电。这时控制信号使 S_1 断开, S_2 闭合, L_2 上的电流开始减少,当负载两端的电压小于 C_0 两端电压时, C_0 也开始向负载供电,上述过程不断重复,电压可以达到一个稳定值。当 I_{in} 负向最大时,开关 S_0 、 S_1 、 S_2 的动作与正向时相似。若 C_b 的电压未达到阈值开启电压时, S_1 是断开的,电流不断存储在 C_b 上,等待电压再次达到阈值开启电压。研究发现,经过添加 L_2 、开关 S_2 、 S_1 电路于 C_b 和负载之间,这不仅发挥 P-SSH1 的优点,而且

可以有效提高能量收集效果即改善能量存储使用效率。

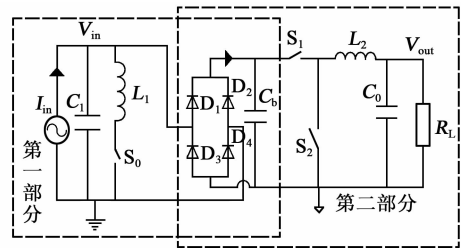


图5 提出的 P-DSSH 接口电路原理图

2 并联双同步开关能量回收电路(P-DSSH)设计与仿真分析

实验中,我们采用了 LTC3588-1 芯片实现 P-DSSH 接口电路,电路如图 6 所示,图中包括 2 个 MOSFET 管构成开关 S_0 ,并联电感 L_1 和 1 个对 C_1 两端电压进行微分的微分电路,1 个为开关电路提供信号的比较器。

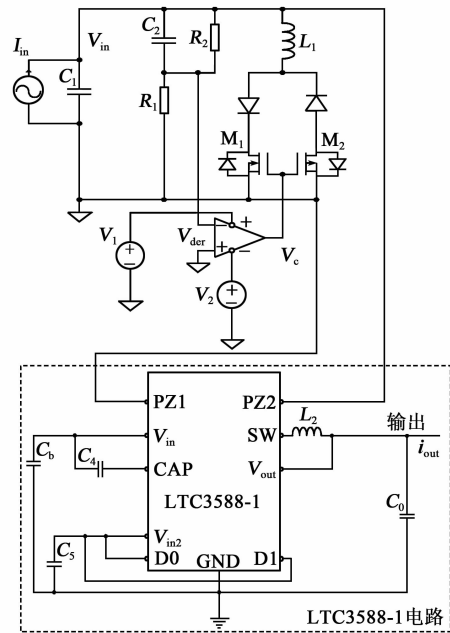


图6 实验用 P-DSSH 接口电路

P-DSSH 电路的第一部分为并联电感电路的功能,从仿真波形图(见图 7)可看出,在 t_1 时刻, C_1 的充电电压 V_{in} 充到 $(-V_L - 2V_d)$,在 $t_1 \sim t_2$ 的时间段内,电流通过芯片 LTC3588-1 中的整流二极管 D_2 和 D_3 流向 C_b 。在 t_2 时刻,电流源方向开始发生改变,在 $t_2 \sim t_3$ 这段时间内,电流开始对自由电容 C_1 反向充电;在 t_3 时刻, C_1 两端电压达到电压反向变化值,即当 C_1 两端电压达到了比较器的阈值切换电压,比较器输出 1 个低电平,导致 P 沟道 MOSFET

管控制的 M_2 打开,在 $t_3 \sim t_4$ 电压翻转的时间段内,由于 M_2 的打开,开关 M_2 ,二极管 D_4 ,谐振电感 L_{res} 和 C_1 构成了 $M_2-D_4-L_{res}-C_1$ 谐振回路。等到 t_4 时刻后, C_1 两端电压完成了翻转,电感上的能量在电压翻转的时刻已完全释放到芯片的 C_b 中,所以电感上的电流也就重新变成了 0。由于能量的损耗和开关的通断存在时间差,所以,电流源将先对 C_1 充电直到 t_5 时刻的 V_{in} 达到 $V_L + 2V_D$ 。

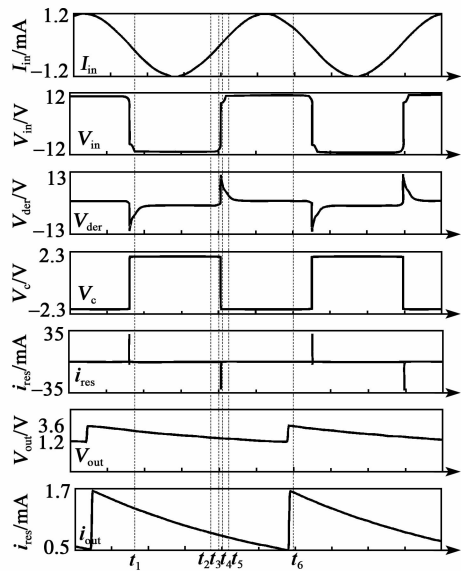


图 7 P-DSSH 电路仿真波形

P-DSSH 电路的第二部分为 DC-DC 电路转换的功能。能量经过并联电感后,芯片 LTC3588-1 内部的全桥整流电路将输出的交流电转变为直流电储存在 C_b 中。参看图 7 的仿真波形图,在 t_6 前的时刻,图 5 中的开关 S_2 是断开的,电荷存储到 C_b 上,同时为内部稳压电路提供电量。在 t_6 时刻,输入端端存储电容的电压大于阈值开启电压, S_2 闭合, C_b 上的电荷转移到了 C_0 上,并为负载供电,由于 C_0 上的电荷被负载消耗,输出端电压开始下降;在 t_6 时刻后,输入端 C_b 两端的电压下降到阈值开启电压以下, S_2 断开,等待 C_b 的电压上升到阈值开启电压,继续重复上述过程。

3 硬件实现及实验搭建

搭建悬臂梁结构能量收集装置如图 8 所示。在悬臂梁根部贴上一片压电片,与接口电路相连,将振动能转化为电能。通过设置信号发生器和功率放大器给激振器提供信号,产生的周期力来激振悬臂梁端部,使其在一阶谐振频率发生共振,直流电源为电压比较器供电。在悬臂梁的夹具平台上安装

LC0408T 型加速度传感器,通过 DLF-8 型电荷放大器和 VibPilot 信号采集仪、SO Analyzer 软件来测量梁的振动加速度。实验所用压电悬臂梁参数如表 1 所示。

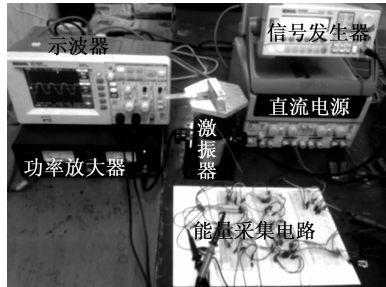


图 8 悬臂梁结构能量收集系统的实物图

表 1 系统参数数据

悬臂梁材料	普碳钢, PZT4
悬臂梁尺寸/mm	93×15×0.3
梁的一阶频率/Hz	38.4
压电片尺寸/mm	30×15×0.2
压电片数量	1

4 实验结果分析

实验中,固定信号发生器的输出正弦信号频率、幅值以及功率放大器放大倍数、使基础的正弦激振力振动的有效值加速度 a_{rms} 为 0.035 m/s^2 ,梁在其一阶共振频率 38.4 Hz 下工作。图 9 (a)为压电梁

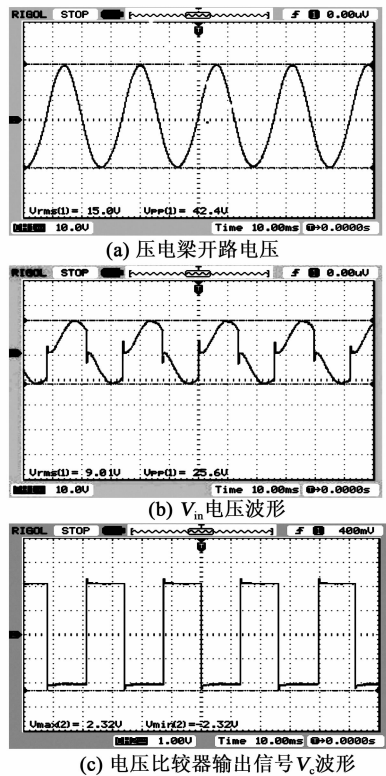


图 9 实验波形

开路时输出的交流电压,图 9(b)为 P-DSSH 电路工作时,压电片上电压波形,图 9(c)为电压比较器输出的对 MOSFET 管通断控制的方波信号。由图可知,在悬臂梁电压达到电压反向变化值时,引起比较器输出切换,导致 MOSFET 管切换通断,从而出现 1 个电压自动翻转,此刻压电片上电压反向。

为对比 P-DSSH 电路的能量回收效率,将压电梁输出引线分别与 SEH、P-SSHI、P-DSSH 和 LTC3588-1 电路相联,进行试验。

图 10 为 P-SSHI 电路和 SEH 电路的输出功率(P)随负载(R)变化曲线。由图可知,SEH 电路的最优负载约是 530 k Ω ,此时的功率约为 0.043 mW。P-SSHI 电路的最优负载约为 120 k Ω ,功率约为 0.111 9 mW。由此可看出,P-DSSH 电路的第一部分 P-SSHI 电路采集的最大功率是 SEH 电路的 2.6 倍,但都受到负载的影响。

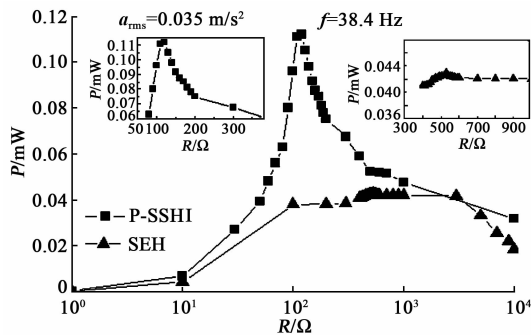
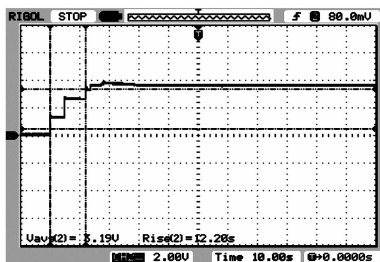
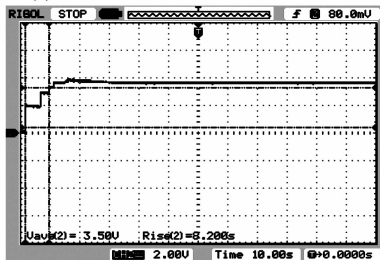


图 10 输出功率随负载变化曲线

图 11(a)是压电片输出引线仅联接集成电路 LTC3588-1 的 PZ1、PZ2 端,当振动频率为 38.4



(a) LTC3588-1 芯片电路的输出端电压



(b) 总电路输出端电压

图 11 输出电压与时间的关系

Hz,加速度 a_{rms} 为 0.035 m/s² 时,示波器捕获的输出电压上升曲线的时间波形图。输出电压 U 设置为 3.6 V 稳压输出,因此,当电压由 0 到达 3.6 V 左右时,上升沿时间为 12.2 s,用秒表测得总时间为 14.05 s。图 11(b)为 P-DSSH 接口电路电压上升曲线波形图。当电压由 0 到达 3.6 V 左右时,上升沿时间为 8.2 s,总时间为 11.08 s。因此,并联电感电路加快了电压达到 3.6 V 稳态的时间。

电容的能量 W 和功率 P 分别为

$$W = \frac{1}{2}CU^2 \quad (6)$$

$$P = W/t \quad (7)$$

功率与电容充电时间的关系为

$$P = \frac{CU^2}{2t} \quad (8)$$

式中: C 为电容; U 为电压; t 为电容充电时间。由式(8)计算可知,P-DSSH 电路(见图 6)的功率仅是采用 LTC3588-1 电路的 1.27 倍。

用一个 1 W 的小灯来测试 P-DSSH 电路,输出端电容是 47 μ F,经过一段时间的充电后,电路输出的电压是 3.6 V,打开小灯开关(见图 12),小灯瞬间点亮,0.5 s 后,输出电压下降到 1.3 V。由于 LTC3588-1 是断续充电,可以使 1 W 的小灯断续闪亮。由式(8)可计算出 P-DSSH 总电路的瞬时功率是 0.25 mW,是 SEH 电路最优功率的 5.8 倍,是 P-SSHI 电路最优的 2.2 倍,且不受负载变化影响。

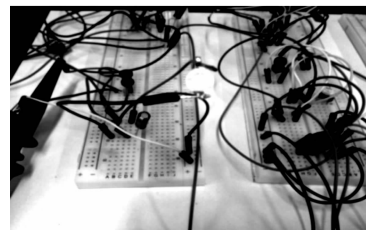


图 12 实物图

5 结束语

为解决全桥整流电路中电流源半个周期无法给负载供电和负载匹配问题,提出了一种振动能量采集电路,将 P-SSHI 电路和 LTC3588-1 电路结合起来做了试验,测得悬臂梁的加速度为 0.035 m/s² 时,P-SSHI 电路采集的最大输出功率是 SEH 电路的 2.6 倍。P-DSSH 电路的可释放的瞬时功率是 LTC3588-1 电路的 1.27 倍,是 P-SSHI 接口电路 2.2 倍,是 SEH 的 5.8 倍。因此,P-DSSH 电路解决了能量采集功率随负载变化的问题和全桥整流电路

中的半个周期电能流失问题,实验中电路阻抗匹配性能良好,总电路的瞬时功率达到 0.25 mW。

参考文献:

- [1] GONG Lijiao, PAN Qiaosheng, LI Wei, et al. Harvesting vibration energy using two modal vibrations of a folded piezoelectric device[J]. Applied Physics Letters, 2015, 107(3):33904.
- [2] ARMS S W, TOWNSEND C P, CHURCHILL D L, et al. Power management for energy harvesting wireless sensors[C]//S. I. ; Proc of SPIE, 2005:267-275.
- [3] GONG L J, PAN C L, PAN Q S, et al. Theoretical analysis of dynamic property for piezoelectric cantilever triple-layer benders with large piezoelectric and electro-mechanical coupling coefficients[J]. J Adv Dielect, 2016, 6(3):1650017.
- [4] LIANG J, LIAO W H. Improved design and analysis of self-powered synchronized switch interface circuit for piezoelectric energy harvesting systems[J]. IEEE Trans Indust Electron, 2012, 59(4):1950-1960.
- [5] LALLART M, GARBUIO L, PETIT L, et al. Double synchronized switch harvesting (DSSH): A new energy harvesting scheme for efficient energy extraction[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control, 2008, 55(10):2119-2130.
- [6] 曹昆. 基于压电材料的振动能量采集系统研究[D]. 南京:南京邮电大学, 2014.
- [7] 孙子文, 沈星, 陈金金. 自供能压电振动能量回收接口电路优化设计[J]. 压电与声光, 2013, 35(4):536-539.
- [8] SUN Ziwen, SHEN Xing, CHEN Jinjin. Optimal design of self-powered piezoelectric vibration energy harvesting circuit[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2013, 35(4):536-539.
- [9] FORMOSA F, AGBOSSOU A E, WU Y, et al. Piezoelectric vibration energy harvesting by optimized synchronous electric charge extraction[J]. Journal of Intelligent Material Systems & Structures, 2013, 24(12):1445-1458.
- [10] WU Y, BADEL A, LIU W, et al. Self-powered optimized synchronous electric charge extraction circuit for piezoelectric energy harvesting[J]. Journal of Intelligent Material Systems & Structures, 2014, 25(17):2165-2176.
- [11] THUREIN P, REGAN Z. Design and optimization of an adaptive non-linear piezoelectric energy harvesting[J]. IEEE Trans Power Electron, 2011, 11(2):412-418.

(上接第 769 页)

参考文献:

- [1] 高仁璟. 微质量传感器及其微带传输天线的结构设计[D]. 大连:大连理工大学, 2011.
- [2] ASEMI H R, ASEMI S R, FARAJPOUR A, et al. Nanoscale mass detection based on vibrating piezoelectric ultrathin films under thermo-electro-mechanical loads[J]. Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, 2015, 68(4):112-122.
- [3] UCHINO K. The development of piezoelectric materials and the new perspective[M]. Oxford: Woodhead Publishing Limited, 2010:1-85.
- [4] ZHAO Jian, ZHANG Yongcun, GAO Renjing, et al. A new sensitivity improving approach for mass sensors through integrated optimization of both cantilever surface profile and cross-section[J]. Sensors and Actuators B:Chemical, 2015, 206(1):343-350.
- [5] ZHANG Zhonghua, KAN Junwu, CHENG Guangming, et al. Influence of multiple piezoelectric effects on sensors and actuators[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, 35(1/2):95-107.
- [6] FERRARI M, BAÜM, TONOLI E, et al. Piezoelectric resonant sensors with contactless interrogation for mass-sensitive and acoustic-load detection[J]. Sensors and Actuators A:Physical, 2013, 202(11):100-105.
- [7] ZHAO J, GAO R, LIU S, et al. A new sensitivity-improving method for piezoelectric resonance mass sensors through cantilever cross-section modification[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(3):1612-1621.
- [8] YAKUPHANOGLU F. Semiconducting and quartz microbalance (QCM) humidity sensor properties of TiO₂ by Sol-Gel calcination method[J]. Solid State Sciences, 2012, 14(6):673-676.
- [9] LATIF U, CAN S, HAYDEN O, et al. Sauerbrey and anti-Sauerbrey behavioral studies in QCM sensors—detection of bioanalytes[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2013, 176(1):825-830.
- [10] JEAN E, SOHNA SOHNA, MATTHEW A. Cooper. Does the Sauerbrey equation hold true for binding of peptides and globular proteins to a QCM?: A systematic study of mass dependence of peptide and protein binding with a piezoelectric sensor[J]. Sensing and Bio-Sensing Research, 2016, 11(12):71-77.