

自供能压电振动能量回收接口电路优化设计

孙子文, 沈 星, 陈金金

(南京航空航天大学 机械结构力学及控制国家重点实验室、智能材料与结构研究所, 江苏 南京 210016)

摘 要:为了更适用于为无线传感网络供电,设计了一种自供能双同步开关电感电路(Self-powered DSSH 电路)。在压电换能器中增加了2个压电片:一片为传感器,通过微分器和比较器产生与振动同步的脉冲信号;另一片为供能片,为微分器和比较器供能。由无源峰值检测开关组成的DC-DC变换器能及时地将能量回收为负载供电。实验结果证明,设计的自供能双同步开关电感电路输出功率达到305 μW ,相比标准电路提高了3.05倍,且一直保持最佳输出功率。

关键词:无线传感网络;能量回收;压电发电机;双同步开关电感电路;自供能

中图分类号:TN384;TM619

文献标识码:A

Optimal Design of Self-powered Piezoelectric Vibration Energy Harvesting Circuit

SUN Ziwen, SHEN Xing, CHEN Jinjin

(State Key Lab. of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Lab. for Smart Materials & Structures, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to become more suitable to supply power for wireless sensor network, the self-powered Double synchronized switch harvesting circuit (self-powered DSSH circuit) was designed. Two piezoelectric patches were added into piezoelectric generator. One patch was sensor that generated pulse synchronous signal through differentiator and comparator. The other patch was used for supplying power for differentiator and comparator. The DC-DC converter composed of passive peak detection switch can harvest energy timely to supply power for the load. The experimental results showed that the output power of the self-powered DSSH circuit could be up to 305 μW , which was 3.05 times of standard circuit, and it could keep the optimal output power.

Key words: wireless sensor network; energy harvesting; piezoelectric generator; double synchronized switch harvesting; self-powered

0 引言

能量回收技术是无线传感技术向微型化和实用化发展的关键技术之一。在已有的几类能量回收技术中,基于压电材料的振动能量回收技术最有发展前途,这是因为其具有能量密度高,结构简单,易于系统集成,成本较低及无电磁干扰的特点^[1]。

在压电式振动能量回收系统中,不同的接口电路对于能量回收效率有显著影响。基于同步开关阻尼技术的接口电路能有效地提高能量回收的效率:同步开关电感(SSHI)电路相比标准回收(SEH)电

路,效率能提高8倍;同步电荷提取(SECE)电路能提高4倍,且输出功率恒定与负载无关。本文重点介绍了一种双级接口电路:双同步开关电感(DSSH)电路,该电路相比SEH电路,效率能提高5倍,且一直保持最佳输出功率。最后本文提出了一种自供能的DSSH电路实现策略。

1 理论分析

当包括压电元件在内的整个结构都是线弹性结构时,悬臂梁式压电振动发电机的机电耦合模型可等效为一个单自由度的弹簧-质量块系统。图1为

收稿日期:2012-08-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50802043)

作者简介:孙子文(1987-),男,安徽合肥人,硕士生,主要从事压电式振动能量回收的研究。E-mail:szw_19871105@163.com。通信作者:沈星(1975-),男,江苏常州人,教授,主要从事智能材料与结构的研究。E-mail:shenx@nuaa.edu.cn。

悬臂梁式压电振动发电机及其等效模型。

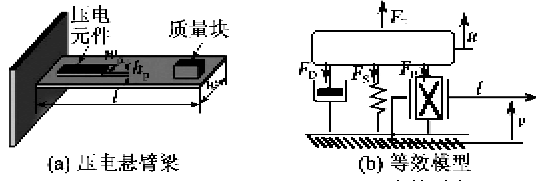


图1 悬臂梁式压电振动发电机及其等效模型

运动微分方程为

$$\begin{cases} M\ddot{u} + C\dot{u} + K_E u + C_p V = F \\ I = \alpha \dot{u} - C_p V \end{cases} \quad (1)$$

式中: M 为结构的等效模态质量; C 为机械损失因子; K_E 为短路时结构的模态刚度; u 为结构位移; C_p 和 α 分别为压电片的受夹电容和力因子; I 、 V 分别为压电元件的流出电流和两电极间的电压。

1.1 标准回收电路原理

标准能量回收电路如图2所示,主要由一个全波整流器和一个滤波电容组成。

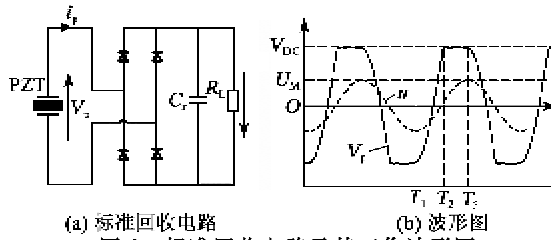


图2 标准回收电路及其工作波形图

从图2可看出,在 $T_1 \sim T_2$ 阶段,随着梁的振动,电荷在压电片上积累。在 T_2 时刻,梁的 u 达到一定程度时,压电片电压 V_p 大于 V_{DC} , $T_2 \sim T_3$ 阶段整流桥导通压电片开始输出电流 i_p ,随着梁振动幅度的增大,压电片流出的电流越来越小,直到梁振动幅度变为最大值 U_M 时整流桥截止, i_p 降为0,在 T_3 时刻充电结束。

根据基尔霍夫电流定律,半个周期中从压电片流出的总电荷量等于半个周期流过电阻的总电荷量,可得

$$\frac{V_{DC}}{R_L} \cdot \frac{T}{2} = \int_{t_0}^{t_0+T/2} i_p dt \quad (2)$$

联立方程(1)可得

$$P_{SEH} = \frac{V_{DC}^2}{R_L} = \frac{4a^2 U_M^2 \omega^2 R_L}{(2C_p R_L \omega + \pi)^2} \quad (3)$$

则最优功率和最大负载为

$$(P_{SEH})_{\max} = \frac{\omega a^2 U_M^2}{2\pi C_p} \quad (4)$$

1.2 双同步开关电感电路原理

基于 SSHI 电路的原理, Mickael Lallart 等设

计了一种双同步开关电感电路^[2], DSSH 电路可分为两部分:整流桥前段类似于串联 SSHI 电路,整流桥后段是一个典型的 Buck-Boost DC-DC 转换器,电路如图3所示。

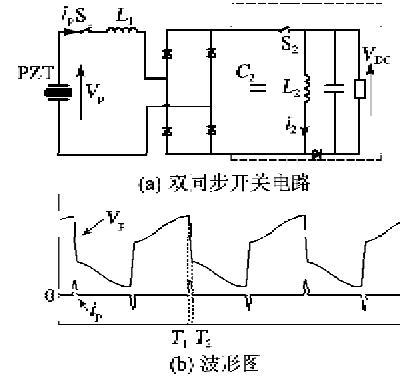


图3 双同步开关电感电路及其工作波形图

DSSH 电路的工作过程相对复杂,当压电悬臂梁振动到极值时,开关 S_1 闭合,在 $1/2$ 个 LC 周期后压电元件上存储的电荷转移至中间电容电荷 C_2 , V_p 翻转,如图3所示, $T_1 \sim T_2$ 为 LC 振荡。转移完成后,开关 S_2 断开, S_2 闭合, DC-DC Buck-Boost 转换器开始工作, $1/4$ 个 LC 周期后电能完全从 C_2 转移到电感 L_2 中,此时断开 S_2 , L_2 通过续流二极管转移至滤波电容中为负载供电。压电片电压如图4所示。

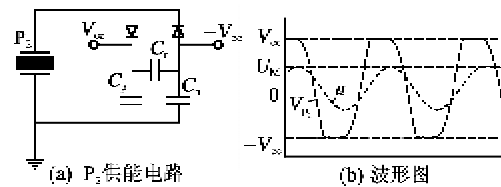


图4 P_2 供能电路及其波形图

Mickael Lallart^[3] 等对 DSSH 电路进行了计算,当 C_2 取最优值时,可得

$$P_{DSSH} = \frac{\lambda_c \omega (1 + \lambda)^2 \alpha^2 U_M^2}{4\pi(1 - \lambda)C_p} \quad (5)$$

式中: λ 为 L_1 的翻转系数,与电感的品质因数有关; λ_c 为 Buck-Boost DC-DC 转换器的转换效率。对比式(4),当 $\lambda = 0.75$, $\lambda_c = 0.8$ 时, DSSH 电路的效率约为 SEH 电路的 5 倍,且一直保持最佳输出功率,输出功率与负载大小无关。

2 自供能的双同步开关电感电路设计

传统的同步开关阻尼技术一般需要外接电源才能实现,不便于为无线传感网络供电。为了实现同步开关和自供能,我们在系统中增加了两片压电片:

P_3 作为传感片,输出与压电发电机 P_1 同相位、同频率的正弦信号; P_2 作为供能片,为 P_3 信号调理电路中的运算放大器提供电源。

2.1 供能片 P_2 分析

参考 Yu-Yin Chen^[4]等设计的自供能 SSHI 电路,供能片 P_2 主要用来提供两个稳定的电源电压 V_{CC} 和 $-V_{CC}$,具体电路如图 4 所示。

电路中两个二极管控制了电流的流向,在一个周期内,正半周为 C_p 充电,负半周为 C_n 充电, C_r 上的压降为 $2V_{CC}$ 。

2.2 传感片 P_3 及其调理电路分析

P_3 输出一个与 P_1 同相位同频率的正弦信号,信号调理电路由一个微分器和一个过零比较器组成。微分器将 V_{p_3} 信号延迟 90° ,再经过比较器产生一个半空比为 50% 的脉冲信号,图 5 为 P_3 调理电路及其波形图。由图可知,当 P_2 电压 V_{p_2} 达到极值时,脉冲信号便翻转一次^[5]。

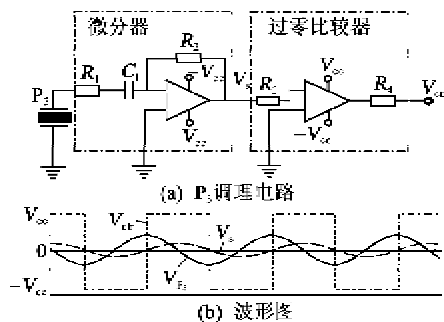


图 5 P_3 调理电路及其波形图

2.3 DSSH 主电路分析

设计的 DSSH 电路主要作了两方面的优化:

1) 采用“双向单通”开关^[6],此开关主要由 1 个 N 型 MOSFET 管,1 个 P 型 MOSFET 管和两个二极管组成,两个 MOSFET 管开关均由 P_3 调理电路输出的 V_{out} 信号控制,这样保证了每一个时刻都有 1 个 MOSFET 管导通。由于与 MOSFET 管串联的二极管的存在,导通具有单向性,这样保证了 P_1 与 L_2 产生 LC 的振荡只能进行 1/2 个周期,电流流向如图 6(a)所示。

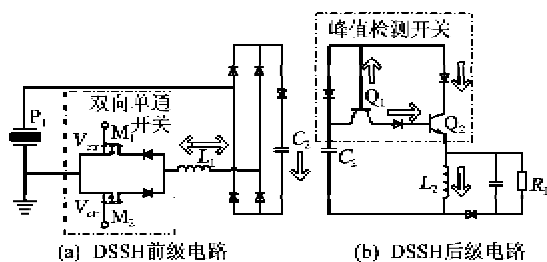


图 6 DSSH 主电路示意图

2) 后级设计了由“无源峰值检测开关”组成的 DC-DC 变换器^[7-8],当 P_1 与 L_1 发生 LC 振荡期间, P_1 给 C_2 充电,此时 PNP 型三极管 Q_1 截止,当 LC 振荡 1/2 个周期电流降为 0,此时 Q_1 导通, NPN 型三极管 Q_2 导通,“能量中转站” C_2 通过 Q_1 、 Q_2 与电感 L_2 产生 LC 振荡,电流由 $Q_{1(eb)}$ 、 $Q_{2(be)}$ 流向 L_2 ,当 C_2 电压低于 Q_2 导通电压时, Q_2 截止,能量传输完成, L_2 将为负载供电。“峰值检测开关”保证了 C_2 与 L_2 的振荡只能进行 1/4 个 LC 周期,电流流向如图 6(b)所示。

压电换能器尺寸及部分参数如表 1 所示,完整的自供能 DSSH 电路及其实验波形图如图 7 所示。

表 1 压电换能器尺寸及参数

铝制悬臂梁质量 M/g	82
悬臂梁(长×宽×高)/mm	350×40×2
悬臂梁一阶频率 f_0/Hz	15.6
P_1 的压电片尺寸/mm	40×22×0.4
P_2 的压电片尺寸/mm	40×12×0.4
P_3 的压电片尺寸/mm	20×5×0.4
P_1 的受夹电容/nF	34
P_2 的受夹电容/nF	17
P_3 的受夹电容/nF	3.5
电感品质因数 Q	5
二极管压降(V_D)/V	0.7
MOSFET 漏电流 $I_L/\mu A$	10

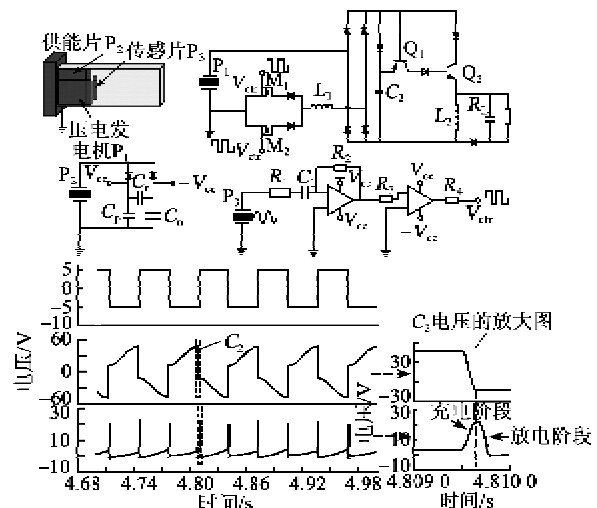


图 7 自供能 DSSH 电路完整电路及其实验波形图

由图 7 可看出, P_1 大部分时间保持开路,仅在 V_{out} 信号发生反转时与 L_1 发生 LC 振荡,振荡期间 P_1 电压迅速翻转,“能量中转站” C_2 电压迅速增加。振荡结束后,充电电流降为 0,此时“无源峰值检测开关”导通, C_2 与 L_2 发生 LC 振荡, C_2 能量迅速流

向 L_2 , 当 C_2 电压降低到 Q_2 导通阈值时, “无源峰值检测开关”关闭, 能量传输完成, 如图 7 中 C_2 电压的放大图所示。

3 实验结果分析

图 8 为 Self-powered DSSH 电路与 SEH 电路输出功率比较。由图可知, 自供能双同步开关电感电路最高输出功率为 $305 \mu\text{W}$, 相比标准电路, 效率提高了 3 倍以上, 且基本一直输出最优功率。电路主要的能量损耗在电感、二极管、三极管等元件的等效阻抗热能损耗, 因为 LC 振荡期间能量在很短时间内完成传输, 电流峰值很大, 热能损耗明显。

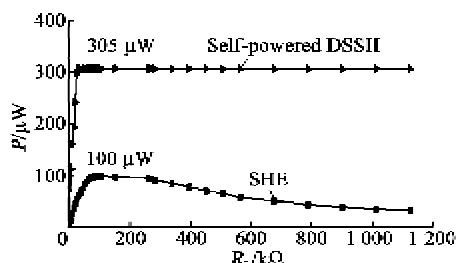


图 8 Self-powered DSSH 电路与 SEH 电路输出功率比较

4 结束语

本文根据无线传感网络供电的需求, 设计了一种自供能双同步开关电感电路, 电路最大输出功率 $305 \mu\text{W}$, 输出功率与负载大小无关, 基本能满足小型无线传感网络的供电要求。

参考文献:

- [1] PRIYA S. Energy harvesting technologies[M]. 黄见秋, 译. 南京: 东南大学出版社, 2011: 174-218.
- [2] LI Jihong, MA Yong, QIU Jinhao, et al. Optimal design

of high efficiency piezoelectric energy harvester[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(12): 2347-2351.

- [3] 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 and Ferroelectrics and Frequency Control, 2008, 55(10): 2119-2130.
- [4] CHEN Yuyin, DEJAN V, FRANCOIS C, et al. Self-powered piezoelectric energy harvesting device using velocity control synchronized switching technique[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 10(2): 1785-1790.
- [5] THUREIN P, REGAN Z. Design and optimization of an adaptive non-linear piezoelectric energy harvesting [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 11(2): 412-418.
- [6] LIANG Junrui, LIAO Weihsin. Improved design and analysis of self-powered synchronized switch interface circuit for piezoelectric energy harvesting systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 4(59): 1950-1960.
- [7] 朱莉娅, 陈仁文. 无源压电振动发电机接口电路的改进[J]. 光学精密工程, 2011, 6(19): 1321-1333.
- ZHU Liya, CHEN Renwen. Improvement of passive circuit for vibration-base piezoelectric generator[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 6(19): 1321-1333.
- [8] LORETO M, LARS L, HENRIK Z, et al. Modified parallel SSHI AC-DC converter for piezoelectric energy harvesting power supplies[J]. 2011 IEEE 33rd International Conference(INTELEC), 2011, 11: 1-7.

(上接第 535 页)

- [2] 郑文科, 商洪才. 针灸疗法的安全性及相关因素[J]. 中华中医药杂志, 2011, 26(2): 2777-2781.
- ZHENG Wenke, SHANG Hongcai. Study on the reasons of acupuncture-related adverse events[J]. China Journal of Traditional Chinese Medicine, 2011, 26(12): 2777-2781.
- [3] 常晓波, 樊小农, 王舒, 等. “针刺量学”研究之探本溯源[J]. 中医杂志, 2011, 52(5): 363-366.
- CHANG Xiaobo, FAN Xiaonong, WANG Shu, et al. Explore the roots of the reseach about “Liang science

of acupuncture”[J]. Journal of Traditional Chinese Medicine, 2011, 52(5): 363-366.

- [4] 李悦欣, 陈伟, 向军, 等. 超声针灸的“针”形声场实现[J]. 压电与声光, 2011, 33(4): 590-593.
- LI Yuexing, CHEN Wei, XIANG Jun, et al. Realization of the needle-shaped sound field for ultrasonic acupuncture[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2011, 33(4): 590-593.
- [5] 冯若, 姚锦钟, 关立勋, 等. 超声手册[M]. 南京: 南京大学出版社, 1999: 301-308.