

基于同步电荷提取的压电能量俘获电路设计

林周鹏,周福强,李梦涛,赵泽毅

(北京信息科技大学 现代测控技术教育部重点实验室,北京 100192)

摘要:利用压电振动能量收集技术具有的力-电耦合效应高,无电磁干扰,机构简单等特点,该文提出了一种对称式自供电同步电荷提取电路(SSP-SECE),使用互补三极管实现同步开关控制,通过导向二极管与检测电容可实现峰值自检测。使用 Multisim 软件建模仿真测试了电路方案的合理性,实验验证了电路的有效性。实验结果表明,采用优化设计的 SSP-SECE 接口电路使负载电阻功率比标准能量采集电路高约 4.23 倍,相对于 SECE 电路整体提升了 23.02%。

关键词:能量俘获;同步电荷提取;压电片;自供电;电路仿真

中图分类号:TN712+.5 **文献标志码:**A

Design of Piezoelectric Energy Harvesting Circuit Based on Synchronous Electric Charge Extraction

LIN Zhoupeng, ZHOU Fuqiang, LI Mengtao, ZHAO Zeyi

(Key Laboratory of Modern Measurement and Control Technology Ministry of Education,

Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: Taking advantage of the characteristics of high electromechanical coupling effect, no electromagnetic interference and simple mechanism of the piezoelectric vibration energy harvesting technology, a symmetrical self-powered synchronous electric charge extraction (SSP-SECE) circuit is proposed in this paper, which uses complementary transistors to realize synchronous switching control, and the peak value self-detection can be realized by the steering diodes and detecting capacitors. The rationality of the circuit scheme is tested by modeling and simulation using Multisim software, and the validity of the circuit is verified by experiments. The experimental results show that the load resistance power of the optimized SSP-SECE interface circuit is 4.23 times higher than that of the standard energy harvesting circuit, and 23.02% higher than that of the SECE circuit as a whole.

Key words: energy harvesting; synchronous charge extraction; piezoelectric patch; self-power; circuit simulation

0 引言

随着能量俘获技术的深入研究,振动能因具有较高的力-电耦合效应、无电磁干扰、易获取等优点而被广泛关注^[1-2]。

压电式能量收集方式是利用压电材料的压电效应,将机械产生的振动能通过压电材料转化为电能^[3]。压电元件最初转化的是高阻抗、小电流的交流电,不能直接为负载供电,需要在负载与压电元件之间增加一个交流转直流(AD-DC)的接口电路^[4]。

其中最常见的是 Ottman 等^[5]设计的由 4 个肖特基二极管组成的整流桥,一个滤波电容组成的标准桥式整流电路(SEH),但在标准桥式整流电路中滤波电容存储的电能会抑制输出电压的大小,导致由振动能向交流电能转化率变低,且只有负载阻抗与输入电压项匹配时,负载才能获得最大电能。为了提高 AD-DC 转换效率,Lefeuvre 等^[6-8]先后设计了并联同步开关电感电路(P-SSH1)、串联同步开关电感电路(S-SSH1)及同步电荷提取电路(SECE)。孙皓文等^[9]对上述电路进行优化并设计出双同步开关接

收稿日期:2021-11-18

基金项目:现代测控技术教育部重点实验室开发课题(KF20201123203)

作者简介:林周鹏(1996-),男,江苏省南通市人,硕士生,主要从事压电能量俘获方面的研究。E-mail:330097537@qq.com。通信作者:周福强,男,山东省德州市人,研究员,硕士生导师,主要从事机械振动,超声波测温方向的研究。E-mail: fuqiangzhou@126.com。

口电路(DSSH)。这些电路在提高转化率的同时,都依赖外供电辅助电路系统对其进行峰值监测与开关控制。针对上述需要依赖外部辅助电路的问题,LIANG 等^[10]在 P-SSHI 基础上设计了自供电同步开关电感电荷电路(SP-SSHI)。WU 等^[11]在 SECE 基础上进行优化并设计了优化型同步电荷提取电路(OSECE)。曲凤霞等^[12]进一步在 WU 的基础上做出改进,设计出自供电同步电荷提取电路(SP-OSCE)。

针对上述电路遇到的各种问题,本文提出一种基于 SECE 电路设计的对称式自供电同步电荷提取电路(SSP-SECE),所提出的电路采用三极管将电路严格分为正向和负向两部分,从而减少相位转换时能量损失。通过 Multisim 软件建模仿真,以及物理实验进行验证,证明了所设计电路的有效性。

1 经典接口电路工作原理

1.1 压电等效模型

在外部力的作用下,压电元件表面会产生电荷,从而形成电流,压电等效模型如图 1 所示^[13-16]。图中, F 为外部激振力, u 为位移, L_s 为等效阻尼, K_s 为结构刚度, R_m 为机械质量, n 为耦合系数, C_p 为寄生电容, R_p 为压电片内阻, I_p 为正弦电流。在实际应用中,电路系统的响应比机械系统快,因此,接口电路系统在运行时不会对机械系统的状态造成影响。当对压电片做正弦振动激发时,此时压电片可以等效为一个非耦合的电流源模型,如图 1(c)所示,其中电容 C_p 、电阻 R_p 和电流 I_p 并联构成电路模型。

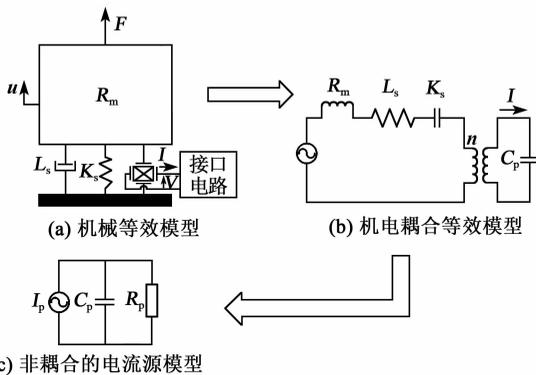


图 1 压电等效模型

1.2 标准桥式电路 SEH

标准桥式整流电路如图 2 所示,电路结构由 4 个肖特基二极管组成的整流桥及滤波电容组成。

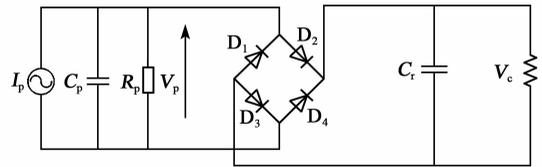


图 2 标准桥式电路 SEH

工作时各部分波形图如图 3 所示。图中, u 为振动位移, V_p 为压电元件两端电压, I 为压电元件两端电流。

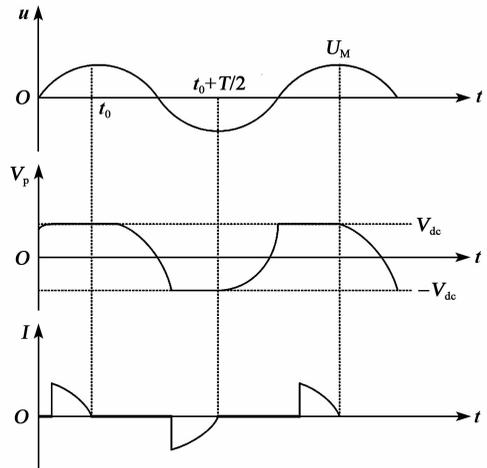


图 3 标准桥式电路波形图

由图 3 可知,在 $[t_0, t_0 + \frac{T}{2}]$ 半个周期内,SEH 电路根据电荷守恒可得:

$$-\int_{t_0}^{t_0+\frac{T}{2}} I dt = \frac{V_{dc}}{R} \cdot \frac{T}{2} \quad (1)$$

$$V_{dc} = \frac{2\alpha U_M \omega R}{2RC_p \omega + \pi} \quad (2)$$

由此通过计算可得 SEH 电路的输出功率 P 为

$$P = \frac{V_{dc}^2}{R} = \frac{4\alpha^2 U_M^2 \omega^2 R}{(2RC_p \omega + \pi)^2} \quad (3)$$

式中: α 为压电应变片的压电应力因子; U_M 为振动位移的最大幅值。

由式(3)可知,当 U_M 不变时, P 先增大后减小。由此可知存在最优负载 R_{opt} ,使得 P 取得最大值 P_{Max} 。

令 $dP/dR=0$, 可得最优负载 R_{opt} 为

$$R_{opt} = \frac{\pi}{2C_p \omega} \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)可得最大功率 P_{Max} 为

$$P_{Max} = \frac{\alpha^2 U_M^2}{2\pi C_p} \quad (5)$$

1.3 同步电荷提取 SECE

同步电荷提取电路如图 4 所示,其电路结构由

整流桥 $D_1 \sim D_4$ 、同步开关 S 、续流电感 L 、导向二极管 D_5 、储能电容 C_r 组成。工作时波形图如图 5 所示。

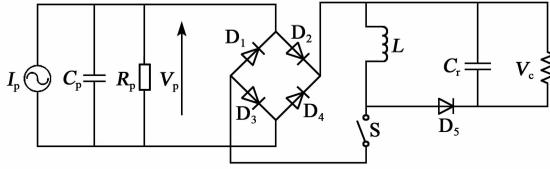


图 4 同步电荷提取 SECE

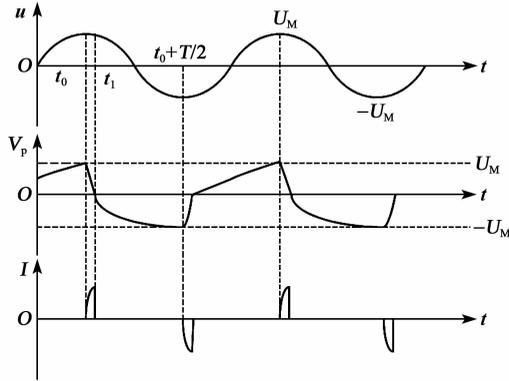


图 5 同步电荷电路波形图

由图 5 可知，在 $[t_1, t_0 + \frac{T}{2}]$ 半个周期内， $I=0$ ，

由此可得：

$$\dot{au} = C_p \dot{V}_p \quad (6)$$

在 $[t_1, t_0 + \frac{T}{2}]$ 内求积分可得电压振幅 V_M 为

$$V_M = \frac{2aU_M}{C_p} \quad (7)$$

从而可得每半个周期电路回收能量 Q 为

$$Q = \frac{1}{2} C_p V_M^2 \quad (8)$$

由图 5 中 V_p 与 I 的波形变化可知，每个周期内同步开关 S 将开合 2 次，故会收集能量 2 次，得到 SECE 电路的输出功率 P 为

$$P = \frac{2a^2 \omega U_M^2}{\pi C_p} \quad (9)$$

由式(5)、(9)可知，在理想状态下，同步电荷提取电路的能量收集效率是标准桥式电路的 4 倍。

2 电路设计

本文提出的对称式自供电同步电荷提取电路 (SSP-SECE) 如图 6 所示。其主要由压电能量采集模块、正负峰值检测模块、同步开关、 C_r 、导向二极管 D_1 、续流电感 L_1 组成。

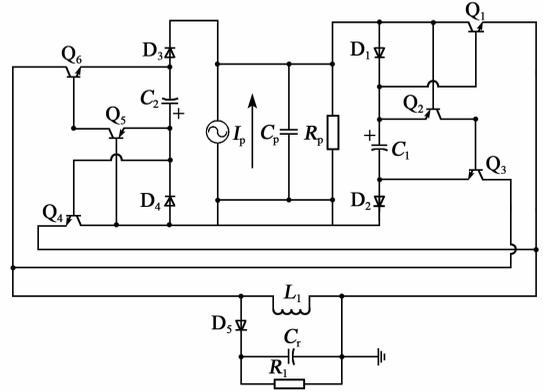


图 6 SSP-SECE 电路原理图

正周期的峰值检测模块由检测电容 C_1 、二极管 D_1, D_2 、NPN 管 Q_1 构成；同步开关模块由 PNP 管 Q_2 、NPN 管 Q_3 构成。负周期的峰值检测模块由检测电容 C_2 、二极管 D_3, D_4 、NPN 管 Q_4 构成；同步开关模块由 PNP 管 Q_5 、NPN 管 Q_6 构成。

为保证 NPN 管 Q_1, Q_3, Q_4, Q_6 能够同时开启、闭合，因此，PNP 管与 NPN 管采用互补配对管。此外，PNP 管 Q_2, Q_5 在电路中有峰值比较的作用。

以正周期为例，电路在进行能量提取时可分为 4 个阶段：

1) 正周期自然充电阶段。根据正压电效应，压电元件表面开始出现电荷，寄生电容 C_p 开始充电， C_p 两端的电压不断增大，当开路电压大于二极管 D_1 的阈值电压时，检测电容 C_1 开始充电，如图 7(a) 所示。当等效电流 I 过零时， C_p 上电压达到峰值 V_{p1} ，由于二极管存在导通压降 V_{be} ，此时 C_1 的电压为

$$V_{c1} = V_{p1} - V_{be} \quad (10)$$

2) 正周期电流反向阶段。压电片开始反向运动，此时等效电流 I_p 反向给寄生电容 C_p 充能，因此， C_p 两端电压逐渐减小，而检测电容 C_1 上的电压因 NPN 管 Q_1 的基射极阈值电压与二极管 D_1 的反向截止作用而保持不变。由于 PNP 管与 NPN 管采用互补配对管。因此，当 C_p 与 C_1 间的电压差达到 NPN 管 Q_1 的基射极阈值电压时，PNP 管 Q_2 也达到导通阈值电压，此时 NPN 管 Q_1, Q_3 同时开启，如图 7(b) 所示，电路进入下一步工作阶段。此时开路电压 V_p 表示为

$$V_p = V_{c1} - V_{be} \quad (11)$$

3) 能量提取阶段。NPN 管 Q_1, Q_3 同时导通，此时寄生电容 C_p 与 NPN 管 Q_1, Q_3 、续流电感 L_1 、导向二极管 D_4 组成电荷提取回路。其中 C_p 与 L_1 形

成 LC 谐振,经过 1/4 谐振周期后, C_p 上的电荷转移到 L_1 上。同理,检测电容 C_1 与 NPN 管 Q_1 、 Q_3 、 L_1 组成电荷提取回路,将电荷转移到 L_1 上,如图 7(c) 所示。该阶段提取的能量可表示为

$$E_{SSP-SECE} = \frac{1}{2}C_p V_p^2 + \frac{1}{2}C_1 V_{cl}^2 \quad (12)$$

4) 电感续流阶段。续流电感 L_1 通过导向二极管 D_5 将电荷转移到储能电感 C_r 上,用于负载供电,

如图 7(d) 所示。最终正周期 SSP-SECE 电路的输出功率可表示为

$$P_{SSP-SECE} = fE_{SSP-SECE} = f \left[\frac{1}{2} (C_1 + C_p) V_{p1}^2 - (C_1 + 2C_p) V_{p1} V_{be} + \frac{1}{2} (C_1 + 4C_p) V_{be}^2 \right] \quad (13)$$

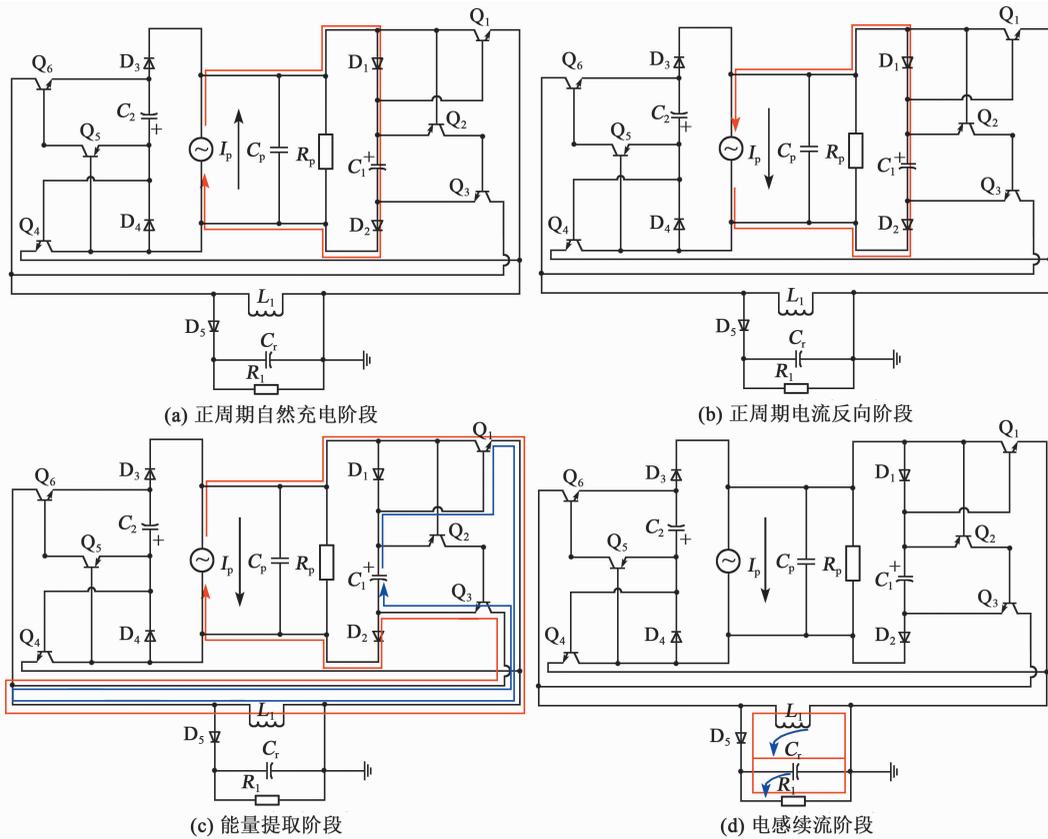


图 7 电路工作 4 个阶段

同理,因电路采用了对称式设计,负周期上的能量收集方式也以类似的方式工作。

3 仿真与实验

3.1 仿真分析

针对本文提出的 SSP-SECE 电路,用 Multisim 软件进行仿真建模,建模所用模型及参数如表 1 所示。其中,所用二极管 (D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 、 D_5) 型号为 1N4007G,PNP 管 (D_2 、 D_5) 型号为 2N5401,NPN 管 (Q_1 、 Q_3 、 Q_4 、 Q_6) 型号为 2N5551。

表 1 模型元件及参数

I_p /mA (50 Hz)	C_p /nF	R_p /MΩ	C_1 、 C_2 /nF	L_1 /mH	C_r /μF
0.5	100	2	10	2	20

SSP-SECE 电路的开路电压和经过续流电感 L_1 的波形图如图 8 所示。对比两个波形图可以发现, L_1 的电流只在开路电压达到峰值并经短暂延时后突然出现,如图 8(a) 所示。其原因是晶体管作为同步开关时,因其存在阈值压降而导致开关的动作时刻与峰值之间存在相位延迟。当晶体管开关打开后,电容 C_p 与电感 L_1 构成 LC 谐振回路,电容中的电荷迅速转移到 L_1 中,导致电容两端电压瞬间下降为 0,如图 8(b) 所示。之后晶体管开关关闭,续流电感中电流通过导向二极管 D_5 流向储能电容 C_r 中,并为负载供电。

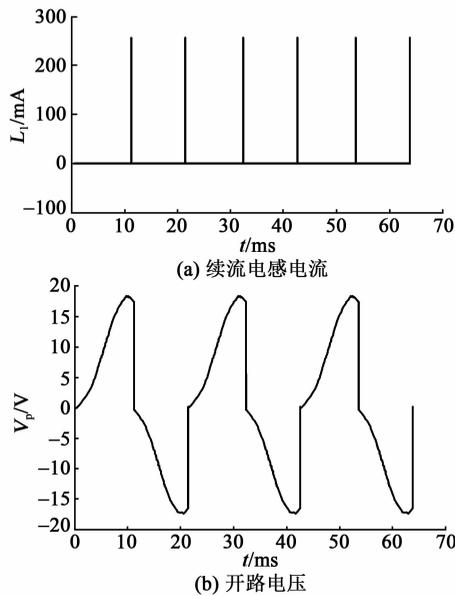


图8 开路电压与续流电感电流波形

为了验证上述分析,对晶体管开关闭合期间的 C_p 、 C_1 、 C_r 、 L_1 中的电流波形进行放大观察。如图9所示,当晶体管开关导通电容中的电荷向续流电感转移,此时电流 I_{C_p} 接近于电感电流 I_{L_1} ,但小于电流 I_{L_1} ,证明了电流经过晶体管时,阈值压降导致损耗, I_{C_p} 与 I_{C_1} 之和等于 I_{C_r} ,由此验证了上述分析的正确性。

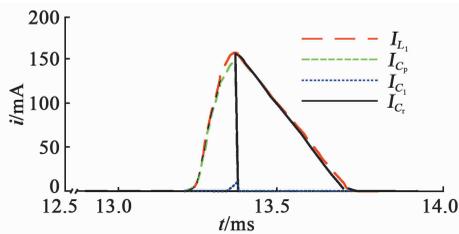


图9 电容 C_p 、 C_1 、 C_r 和续流电感 L_1 的电流波形

3.2 实验验证

针对上述仿真结果进行物理实验验证,搭建悬臂梁式压电能量俘获系统,如图10所示。实验主要由振动台、信号发生器、功率放大器、示波器、悬臂

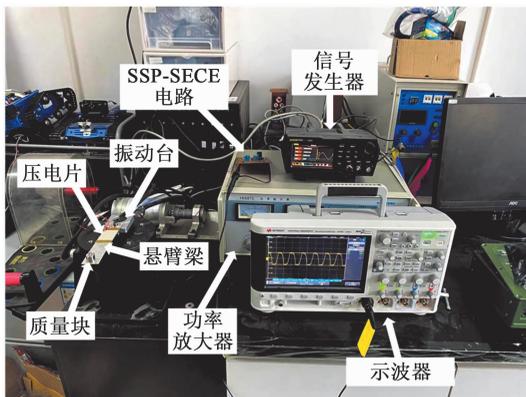


图10 悬臂梁式压电能量俘获系统

梁、压电元件、质量块、SSP-SECE 电路组成,其各实验器材型号与参数如表2所示。

表2 实验器材型号与参数

实验器材	型号与参数
振动台	SA-JZ020
信号发生器	RIGOL-DG992
功率放大器	YE5872
示波器	M5OX3014TY
悬臂梁尺寸/mm	150×30×0.8
压电片	PZT5(60 mm×30 mm×0.45 mm)
质量块质量/g	20

将悬臂梁一端固定在振动台,另一端悬空并在其上粘接压电片与质量块,连接信号发生器与功率放大器,再将功率放大器与振动台连接。信号发生器输出正弦信号,经功率放大器放大后驱动振动台,通过调节信号发生器信号的频率与振幅,即可控制振动台的振动频率与振幅输出。

图11为实验压电片的开路电压波形,其开路电压在达到峰值并经过一定延时后,迅速翻转。对比图11、9发现,两者波形大体一致,符合仿真预期。

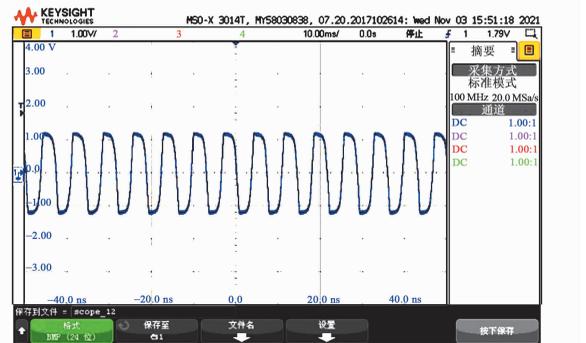


图11 示波器显示压电片开路电压

在保持振动台恒定振动频率下,用万用表分别对SEH电路、SECE电路、SSP-SECE电路中的负载电阻两端电压和过载电流进行测量,并由此计算出输出功率,得到的负载电阻-输出功率曲线如图12所示。

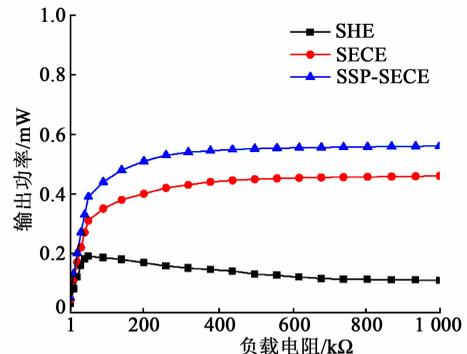


图12 负载电阻-输出功率曲线

由图 12 可知,当负载电阻大于 500 k Ω 时,SECE 电路与 SSP-SECE 电路曲线趋近于平坦,输出功率相对稳定,此时 SEH 电路的输出功率约为 0.13 mW,SECE 电路输出功率约为 0.44 mW,SSP-SECE 电路输出功率约为 0.55 mW。SSP-SECE 电路输出功率约为 SEH 电路输出功率的 4.23 倍,是 SECE 电路输出功率的 1.25 倍。分别取 SSP-SECE 电路与 SECE 电路在 500 k Ω 后的输出功率平均值,对比其值发现,前者的平均输出功率较后者提升了 23.02%。

4 结束语

针对传统能量俘获接口电路转换率低的问题,本文提出了一种对称式自供电同步电荷提取电路(SSP-SECE)。该电路采用结构简单的对称式设计,通过自供电设计实现峰值检测,使用三极管代替整流桥进行电荷提取,减少了能量损耗。软件仿真结果与物理实验结果均证明了电路的有效性,且相对于 SEH 电路与 SECE 电路有着更高的能量转化率。

参考文献:

- [1] XUE Huan, HU Hongping, HU Yuantai, et al. An improved piezoelectric harvester available in scavenging-energy from the operating environment with either weaker or stronger vibration levels[J]. *Science in China Series G: Physics, Mechanics and Astronomy*, 2009, 52(2): 218-225.
- [2] NIAE M, ZAWAWI N A W A, SINGH B S M. A review of walking energy harvesting using piezoelectric materials[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, 291(1): 2026-2033.
- [3] COOK-CHENNAULTK A, THAMBI N, SASTRY A M. Powering MEMS portable devices—A review of non-regenerative and regenerative power supply systems with special emphasis on piezoelectric energy harvesting systems[J]. *Smart Materials and Structures*, 2008, 17(4): 3001-3034.
- [4] CAO X, CHIANG W J, KING Y C, et al. Electromagnetic energy harvesting circuit with feedforward and feedback DC-DC PWM boost converter for vibration power generator system [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2007, 22(2): 679-685.
- [5] OTTMAN G K, HOFMANN H F, BHATT A C, et al. Adaptive piezoelectric energy harvesting circuit for wireless remote power supply[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2002, 17(5): 669-676.
- [6] LEFEUVRE E, BADEL A, RICHARD C, et al. High-performance piezoelectric vibration energy reclamation [J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2004, 5390: 379-38.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 孙皓文, 龚立娇, 吴延祥, 等. 一种压电振动能量回收电路[J]. *压电与声光*, 2017, 39(5): 770-775.
SUN Haowen, GONG Lijiao, WU Yanxiang, et al. A kind of piezoelectric vibration energy recovery circuit [J]. *Piezoelectric & Acousto-optics*, 2017, 39(5): 770-775.
- [10] LIANG J, LIAO W. Improved design and analysis of self-powered synchronized switch interface circuit for piezoelectric energy harvesting systems [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, 59(4): 1950-1960.
- [11] WU Y, BADEL A, FORMOSA F, et al. Piezoelectric vibration energy harvesting by optimized synchronous electric charge extraction[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2013, 24(12): 1445-1458.
- [12] 屈凤霞, 夏银水, 施阁, 等. 自供电的同步电荷提取电路的优化设计[J]. *传感技术学报*, 2016, 29(3): 349-355.
QU Fengxia, XIA Yinshui, SHI Ge, et al. Optimization design of self-powered synchronous charge extraction circuit [J]. *Journal of Sensing Technology*, 2016, 29(3): 349-355.
- [13] RAMADASS Y K, CHANDRAKASAN A P. An efficient piezoelectric energy harvesting interface circuit using a bias-flip rectifier and shared inductor[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2010, 45(1): 189-204.
- [14] SHAREEF A, GOH W L, NARASIMALU S, et al. A rectifier-less AC-DC interface circuit for ambient energy harvesting from low-voltage piezoelectric transducer array[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, 34(2): 1446-1457.
- [15] MENG M, WANG D, TRUONG B D, et al. A multi-beam shared-inductor reconfigurable voltage/SECE mode piezoelectric energy harvesting interface circuit [J]. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, 2019, 13(6): 1277-1287.
- [16] ROMANI A, FILIPPI M, TARTAGNI M. Micropower design of a fully autonomous energy harvesting circuit for arrays of piezoelectric transducers [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, 29(2): 729-739.