

# 基于同步电荷提取的高效多压电能俘获电路设计

李 毅, 夏银水, 王修登, 夏桦康, 郑翰泽

(宁波大学信息科学与工程学院, 浙江宁波 315211)

**摘要:** 本文提出了一种基于同步电荷提取的高效多压电能俘获电路(High Efficiency Multi-piezoelectric Energy Harvesting Circuit Based on Synchronous Electric Charge Extraction, EM-SECE). 所提出的电路利用改进的正负峰值检测结构, 减小了压电元件(Piezoelectric Transducer, PZT)达到电压峰值处和开关动作之间的相位差, 从而提高了单个压电元件的能量收集效率. 并且利用单电感的时分复用, 实现基于单电感的多个压电元件振动能俘获. 所提出电路具有无整流桥结构, 且可以实现自供电的特点. 实验结果表明, 相同实验条件下, 单压电 EM-SECE 电路的俘获功率为标准能量俘获电路(SEH)最大功率的3.09倍; 在仅用一个电感的情况下, 双压电 EM-SECE 电路的俘获功率为两个单压电 EM-SECE 电路之和的97%.

**关键词:** 振动能采集; 多压电; 时分复用; 自供电; 同步电荷提取电路

**中图分类号:** TN384 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2021)08-1625-08

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.12263/DZXB.20200002

## High Efficiency Multi-piezoelectric Energy Harvesting Circuit Design Based on Synchronous Electric Charge Extraction

LI Yi, XIA Yin-shui, WANG Xiu-deng, XIA Hua-kang, ZHENG Han-ze

(Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China)

**Abstract:** In this paper, a high efficiency multi-piezoelectric harvesting circuit based on synchronous charge extraction (EM-SECE) is presented. The proposed circuit utilizes an improved positive and negative peak detection structure so that the phase difference between the peak voltage of the piezoelectric transducer and the switching action is reduced, and then the energy harvesting efficiency of the single piezoelectric transducer is improved. Further, using time division multiplexing of single inductor, multi-piezoelectric energy harvesting is achieved. The proposed circuit is of self-powered characteristic with no rectifying bridge structure. The experimental results show that under the same experimental condition, the harvesting power of the EM-SECE circuit for single piezoelectric transducer is 3.09 times than the maximum power of the standard energy harvesting circuit; with only one inductor, the harvesting power of the EM-SECE circuit with double piezoelectric transducers is 0.97 times of the harvesting power sum of two piezoelectric transducers.

**Key words:** piezoelectric energy harvesting; multiple PZTs; time division multiplexing; self-powered; synchronous electric charge extraction

### 1 引言

无线传感网络广泛应用于环境监测、可穿戴设备、人类健康监测等领域. 传统的无线传感网络的节点采用电池供电, 但是电池寿命有限, 导致无线传感网络节点的能量供应成为制约其发展的瓶颈<sup>[1]</sup>. 从环境中收集能量是有效解决上述问题的方案之一. 光、热和机械振动是三种环境中最常见的能源<sup>[2]</sup>. 其中, 压电元件(Piezoelectric Transducer, PZT)的振动能量采集由于可

以小尺度制造和相对较大的能量密度引起了尤其广泛的研究兴趣<sup>[3]</sup>.

由于环境中振动频率和幅度会随时发生改变, PZT输出是交流电流, 但一般电子设备需要直流供电, 所以PZT无法直接和负载相连, 两者之间需要一个接口电路进行能量采集和整流. 为此, 人们已提出了众多的能量接口电路, 其中最简单的是桥式整流电路, 也称为标准能量采集(Standard Energy Harvesting, SEH)电路, 但是

二极管的导通电压  $V_{th}$  的存在导致 SEH 能量提取效率较低, 并且效率容易受到负载的影响. 迄今, 研究人员提出了多种非线性能量提取电路, 如串联同步开关电感 (Series Synchronized Switch Harvesting on Inductor, S-SSHI) 电路<sup>[4]</sup>, 并联开关电感 (Parallel Synchronized Switch Harvesting on Inductor, P-SSHI) 电路<sup>[5]</sup>. 虽然 S-SSHI 和 P-SSHI 通过电压反转可以提高采集效率, 但是其能量收集效率受负载电阻的影响, 需要阻抗匹配电路来提高能量采集效率<sup>[6]</sup>. 研究人员进一步提出了同步电荷提取 (Synchronous Electric Charge Extraction, SECE) 电路<sup>[7,8]</sup>, 其工作过程分为两个阶段: 电荷提取和电感续流, 用电感实现 PZT 与负载的去耦. 理论上, SECE 电路的输出功率不受负载影响. 由于电路大部分时间处于开路状态, 电路中的电感仅在 LC 谐振的 1/4 周期内工作, 而剩余的时间处于不工作状态, 因此电感可以实现时分复用. 2014 年, Romani 等人<sup>[9]</sup> 基于 SECE 提出基于电感的时分复用的多压电能量俘获电路. 但是电路需要微控制器用于信号控制以及在每个 PZT 两端加上桥式整流电路, 而整流电路的存在不利于接口电路能量收集效率的提升<sup>[10,11]</sup>. 2016 年, Ren 等人<sup>[12]</sup> 基于无铅 BiFeO<sub>3</sub> 提出一种柔性纳米能量采集器, 在重复按压的情况下, 可产生约 3V 的电压, 2018 年其又提出了同轴旋转独立式摩擦电纳米发电机, 可从环境旋转中收集机械能<sup>[13]</sup>. 2016 年, Zhao 等人<sup>[14]</sup> 提出了生物相容性压电纳米发电机, 可产生 0.14V 输出电压, 20.5 nA/cm<sup>-2</sup> 电流密度. 2019 年, Shareef 等人<sup>[15]</sup> 提出了一种无整流器多压电能量收集接口电路, 但是该电路需要复杂的开关控制, 从而降低了电路的俘能效率.

本文提出了一种不含整流桥结构的自供电多压电能俘获电路设计. 通过电感进行时分复用, 在一个周期内, 提取多个 PZT 中的电荷, 并且通过减少开关延迟来提升单个 PZT 的能量收集效率.

## 2 压电等效模型及经典电路分析

### 2.1 压电等效模型

压电材料受到外部作用力发生形变时, 会导致内部电荷移动而产生电流. 利用机电耦合模型, 将其从机械域耦合到电气域, 如图 1 所示. 在机械域,  $L_m$  代表机械质量,  $C_m$  代表机械刚度,  $R_m$  代表机械损失, 电气域中,  $C_p$  表示压电材料受夹电容. 当产生正弦振动时, 压电材料的等效模型可以近似为正弦电流源  $I_p$ 、压电材料受夹电容  $C_p$  和电阻  $R_p$  并联<sup>[16-18]</sup>.

### 2.2 同步电荷提取电路分析

图 2 所示为 SECE 电路原理图, 在桥式整流电路的基础上增加了一个电感, 一个续流二极管, 一个开关.

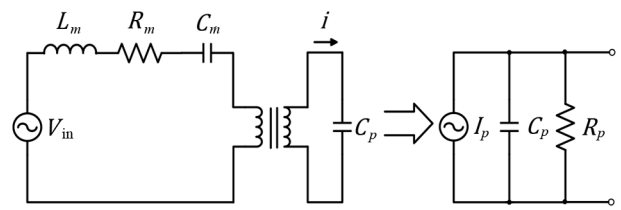


图1 压电等效模型

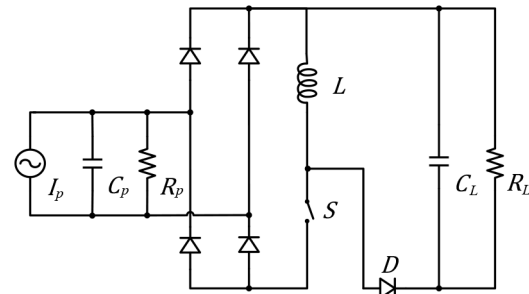


图2 SECE 电路原理图

当 PZT 两端的电压达到最大值时, 开关导通, 通过 LC 谐振使 PZT 受夹电容  $C_p$  中的电荷转移到电感上. 然后, 开关断开, 经过电感续流使电感上的能量转移到负载电容上, 从而为负载供电. 理论上, SECE 电路的输出功率为

$$P_{SECE} = 4f \cdot \frac{\alpha^2 u_M^2}{C_p} \quad (1)$$

其中,  $f$  表示 PZT 振动频率,  $\alpha$  为压电应力因子,  $u_M$  表示 PZT 机械振动的最大位移. 而 SEH 电路在最佳负载下, 其最大输出功率为

$$P_{SEH, \max} = f \cdot \frac{\alpha^2 u_M^2}{C_p} \quad (2)$$

所以理论上, SECE 电路俘能效率为 SEH 电路的 4 倍. 实际上由于峰值检测开关动作时刻与压电片峰值电压时刻存在时间差, 会降低电路的俘能效率. 如果开关动作提前, 所积累的电荷未达到最大值; 反之, 所积累的电荷会反向流失, 都会造成能量损失, 降低电路俘能效率. 此外, 利用更少的元器件, 可以降低电路的能耗, 提高电路俘能效率.

## 3 电路设计与工作原理分析

### 3.1 EM-SECE 电路

本文提出的基于同步电荷提取的高效多压电能俘获电路 (EM-SECE) 如图 3 所示. 它含有多个压电能量采集模块, 续流二极管  $D$ , 共享电感  $L$ , 储能电容  $C_L$  及负载  $R_L$ , 快速恢复二极管  $D_1 \sim D_6$ , 肖特基二极管  $D_7 \sim D_{10}$ . 每个压电能量采集模块含有一片 PZT、零电位切换结构及正负峰值检测电路. 零电位切换结构由  $D_1$  和  $D_2$  构成, 目的是使 PZT 两端电压高的一端接地, 与电感构成

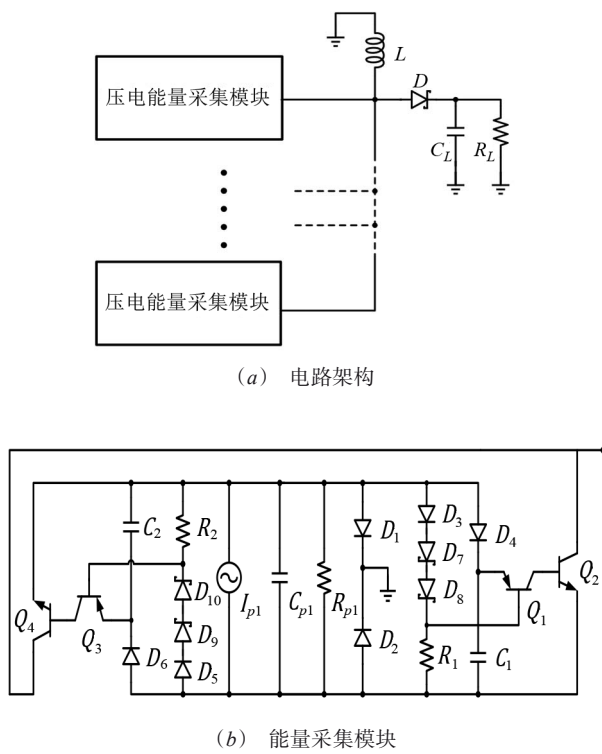


图3 EM-SECE 电路

环路,形成LC振荡环路.

当一个模块的PZT开路电压达到峰值时,峰值检测器控制开关闭合,使共享电感与PZT受夹电容 $C_p$ 发生谐振,将PZT内部电荷转移到电感 $L$ 中,随后开关关

断,电感中电流通过续流二极管向储能电容充电.由于不同模块的PZT存在相位差,当第一个PZT完成电荷提取一段时间后,另一个模块的PZT两端电压也达到峰值,其内部寄生电容也与共享电感发生LC谐振,再通过续流二极管为储能电容充电.由于它们频率相同,相位不同,而LC谐振时间极短,所以多个电路能量提取的过程相互不干扰,从而实现电感的复用.

下面以单PZT对EM-SECE电路为例进行分析.在压电元件产生电压信号的正半周期内,主要分为4个时间段:自然充电阶段、电流反向阶段、电荷提取阶段、电感续流阶段,如图4所示.

(1)自然充电阶段,如图4(a)所示.PZT两端电压逐渐增大,等效电流源 $I_{p1}$ 主要为PZT受夹 $C_{p1}$ 和峰值检测中的电容 $C_1$ 充电,如图中实线所示,其中 $D_1$ 处于导通状态,使PZT电压高的一端接地.当PZT等效电流源 $I_{p1}$ 过零点时,电容 $C_{p1}$ 和 $C_1$ 两端的电压均达到最大值,电路进入第二阶段.

(2)电流反向阶段,如图4(b)所示.PZT等效电流源 $I_{p1}$ 开始反向给 $C_{p1}$ 充电.导致电容 $C_{p1}$ 两端电压下降,因为 $R_1$ 两端的压电为 $C_{p1}$ 两端电压减去三个二极管的电压,所以 $R_1$ 两端的压电也开始下降. $D_4$ 和 $Q_1$ 管发射极PN结的存在,导致电容 $C_1$ 中的电荷保持不变.当电容 $C_1$ 的电压与 $R_1$ 两端电压的电压差大于 $Q_1$ 管基射极开启电压时, $Q_1$ 管导通,电路进入第三阶段.

(3)电荷提取阶段,如图4(c)所示.由于 $Q_1$ 导通,

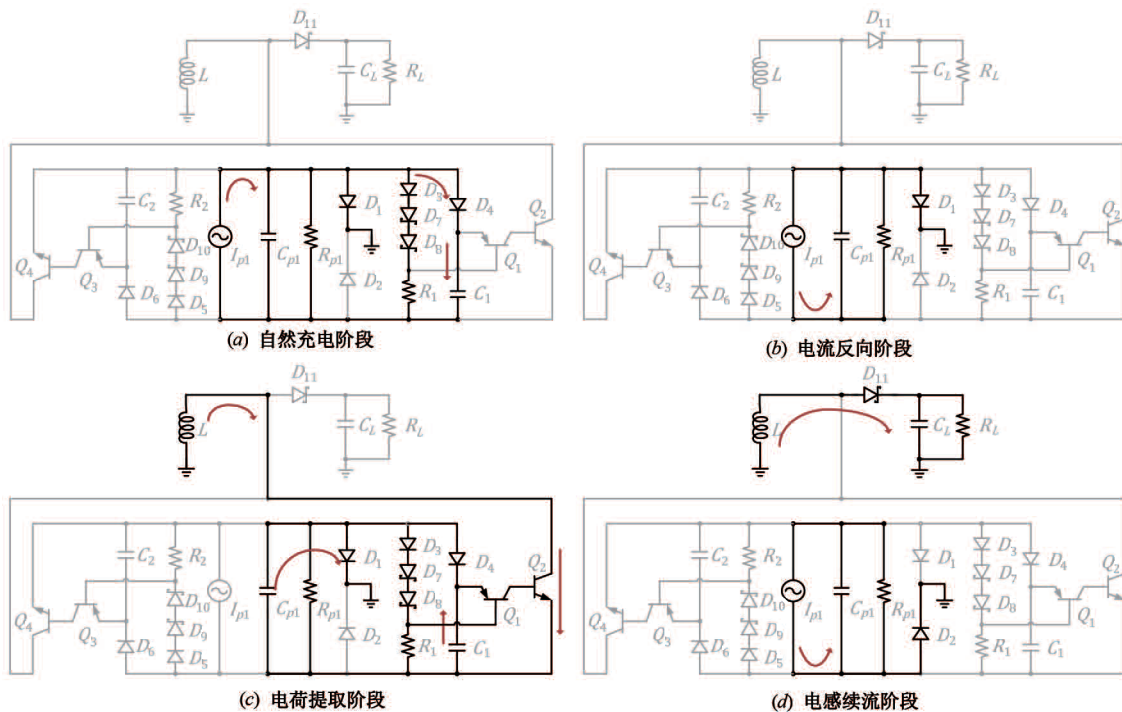


图4 单压电EM-SECE电路工作的四个周期

所以  $Q_2$  管也导通, 因此电感  $L$ 、受夹电容  $C_{p1}$ 、二极管  $D_1$  构成  $LC$  振荡环路, 将电容  $C_{p1}$  中的电荷提取到电感  $L$  中, 完成电能向磁能的转换. 随着  $C_1$  中电荷的释放完成,  $Q_1$  管关断, 此时  $Q_2$  管也关断, 电感上电流达到最大值, 电路进入第四个工作阶段.

(4) 电感续流阶段, 电感续流阶段如图 4(d) 所示. 由于电感电流不能突变, 所以电感  $L$  通过续流二极管  $D_{11}$  将能量转移到储能电容  $C_L$  和负载电阻  $R_L$ . 同时等效电流源  $I_{p1}$  开始反向充电, 继续完成 PZT 负半周期的能量提取.

### 3.2 EM-SECE 电路性能分析

单压电片 EM-SECE 电路工作波形如图 5 所示.  $V_{oc}$  是压电片两端开路电压, 当压电片发生正弦振动时, 它是一种交变电压.  $V_{max}$  是压电片开路电压  $V_{oc}$  的峰值电压, 快恢复二极管导通电压为  $V_{d1}$ , 约为 0.7V, 肖特基二极管导通电压为  $V_{d2}$ , 约为 0.3V,  $I_{cp}$  是压电片等效电流源  $I_{p1}$  上的电流, 电流波形为正弦曲线. 开关导通时刻与  $V_{oc}$  达到峰值时刻不是同步的, 所以会存在相位滞后<sup>[19]</sup>. 为此, 通过抬升三极管  $Q_1$  和  $Q_3$  的基极电压来减少开关的相位滞后. 当  $V_{oc}$  达到峰值时,  $C_1$  两端的压电为  $V_{max} - V_{d1}$ , 随后  $V_{oc}$  开始下降,  $C_1$  两端的压电保持不变. 当开管即将导通时,  $Q_1$  管的发射极和基极之间电压差为  $V_{BE}$ , 约为 0.7V. 因为  $Q_1$  管基极电压为  $V_{oc} - V_{d1} - 2V_{d2}$ , 所以得到

$$V_{BE} = (V_{max} - V_{d1}) - (V_{oc} - V_{d1} - 2V_{d2}) \quad (3)$$

也即  $V_{oc} = V_{max} - (V_{BE} - 2V_{d2})$ . 由于  $V_{BE}$  约为 0.7V,  $V_{d2}$  约为 0.3V, 所以  $V_{BE} - 2V_{d2}$  大于 0. 当  $V_{oc}$  从峰值  $V_{max}$  降低  $(V_{BE} - 2V_{d2})$  时, 开关才会导通, 滞后的相位差  $\theta$  可以表示为

$$\theta = \arccos\left(\frac{V_{max} - (V_{BE} - 2V_{d2})}{V_{max}}\right) \quad (0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}) \quad (4)$$

式中,  $V_{BE}$  是三极管基射极导通电压. 压电片两端开路电压  $V_{oc}$  为电流源  $I_{cp}$  的积分, 故

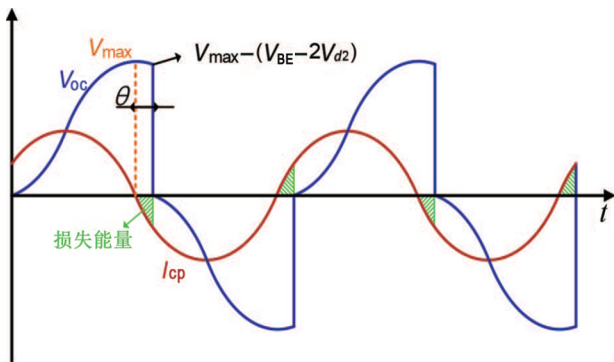


图 5 单压电 EM-SECE 电路工作波形

$$V_{oc}(t) = \frac{1}{C_p} \int_0^t I_{cp}(t) dt \quad (5)$$

压电片开路电压最大值  $V_{max}$  为

$$V_{max} = \frac{1}{C_p} \int_0^{\frac{T}{2}} I_{cp}(t) dt \quad (6)$$

$V_{ext}$  是该电路进行电荷提取形成  $LC$  谐振回路时, 压电元件的开路电压  $V_{oc}$ ,  $V_{lx-max}$  是假设电路没有相位滞后的理想情况下, 压电元件开路电压  $V_{oc}$  的峰值电压.

开关导通时, 压电片的开路电压为

$$V_{ext} = V_{max} - (V_{BE} - 2V_{d2}) = V_{max} \cdot \cos\theta \quad (7)$$

由于存在相位滞后,  $V_{max}$  比理想条件下压电片最大开路电压  $V_{lx-max}$  低,  $V_{lx-max}$  为

$$V_{lx-max} = \frac{1}{C_p} \int_0^{\frac{T}{2}} I_{cp}(t) dt = \frac{V_{max}}{\cos\theta} = \frac{V_{ext}}{\cos^2\theta} \quad (8)$$

相位滞后这个时间段内, 存储于电容  $C_p$  的能量随着电流的反向而转化为机械能, 造成能量损失, 如图 5 中的阴影区域所示, 损失的能量  $\Delta E_\theta$  可表示为

$$\Delta E_\theta = \frac{1}{2} C_p (V_{lx-max}^2 - V_{ext}^2) \quad (9)$$

理论上电路提取效率  $\eta$  与滞后相位  $\theta$  之间的关系为

$$\eta = \frac{\frac{1}{2} C_p V_{ext}^2}{\frac{1}{2} C_p V_{lx-max}^2} = \frac{V_{ext}^2}{V_{lx-max}^2} = \cos^4\theta \quad (10)$$

在电感的续流过程中, 也会产生能量消耗. 如果忽略电感上能量的损失, 则损失能量主要来自于续流二极管. 由于在续流过程中, 线路中电流相等, 所以电感续流转换效率  $\eta_f$  为

$$\eta_f = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_D} = \frac{V_{out}}{V_{out} + V_D} \quad (11)$$

其中,  $V_D$  为二极管导通电压, 当输出电压  $V_{out}$  较低时, 电感续流转换效率  $\eta_f$  较低,  $\eta_f$  随  $V_{out}$  的增大而增加.

### 3.3 EM-SECE 电路仿真分析

依照提出的图 3 所示的电路选用双 PZT 通过 LT spice 进行仿真分析, 仿真电路图如图 6 所示, 选用的元器件及参数如表 1 所示.

图 7 所示是两个 PZT 的开路电压  $V_{oc1}$ 、 $V_{oc2}$  以及电感电流波形  $I_L$ . 当每个 PZT 开路电压  $V_{oc1}$ 、 $V_{oc2}$  分别达到峰值时, 对应的峰值检测开关导通电感电流产生一次脉冲, 由此过程完成能量的提取. 由于两个 PZT 两端的电压波形存在一定的相位差, 峰值检测开关导通的时间不同, 因此电感提取能量的过程互不影响, 从而实现电感复用.

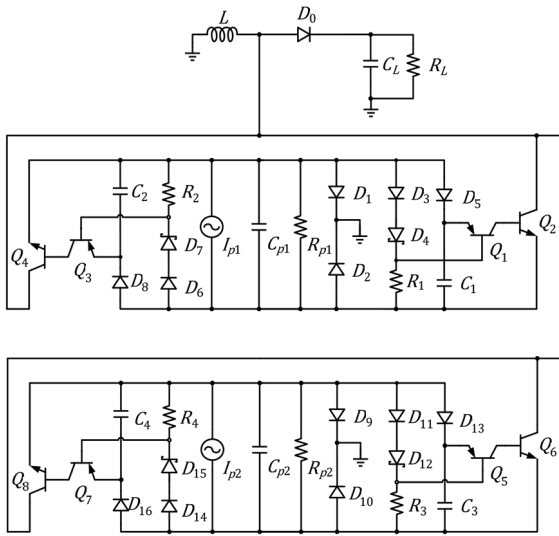


图6 双压电 EM-SECE 电路

表 1 元器件及参数

元件	参数
$I_{p1}, I_{p2}$	180 $\mu$ A/17.4Hz
$C_{p1}, C_{p2}$	100nF
$R_{p1}, R_{p2}$	2M $\Omega$
$R_1 \sim R_4$	10M $\Omega$
二极管	1N4007
肖特基二极管	1N5819
$C_1, C_2, C_3, C_4$	2.2nF
$L$	0.5mH
$C_L$	100 $\mu$ F
$R_L$	100k $\Omega$

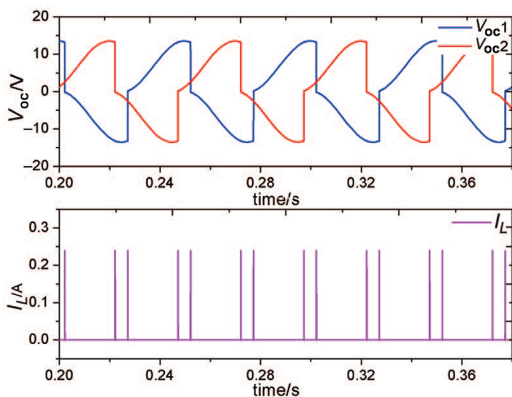


图7 双压电 EM-SECE 电路开路电压及电感电流波形

为了便于分析能量提取的过程,我们对能量提取时,压电片受夹电容上电流  $I_{cp}$ ,电感电流  $I_L$ ,续流二极管电流  $I_{D21}$  的波形进行分析,如图 8 所示.当电感  $L$  与  $C_p$  产生  $LC$  谐振时,经过  $1/4$  个  $LC$  谐振周期,  $C_p$  中的电荷全部转移到电感  $L$  中,  $I_{cp}$  和  $I_L$  从零增加到最大值,随后进

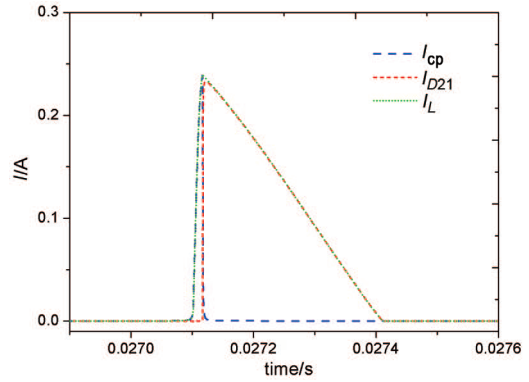


图8 EM-SECE 电能提取瞬间相关电流波形

入电感续流阶段,  $I_{cp}$  快速降为零,电感电流通过续流二极管  $D_{21}$  转移到储能电容  $C_L$ ,续流二极管电流  $I_{D21}$  随电感电流  $I_L$  从最大值逐渐降为零,完成能量的提取.

#### 4 实验验证

为了对上述理论分析及仿真结果进行验证,搭建了如图 9 所示的实验平台进行物理验证.整个实验系统主要包括函数信号发生器、示波器、两个压电陶瓷片、功率放大器、振动台以及 EM-SECE 能量俘获电路.

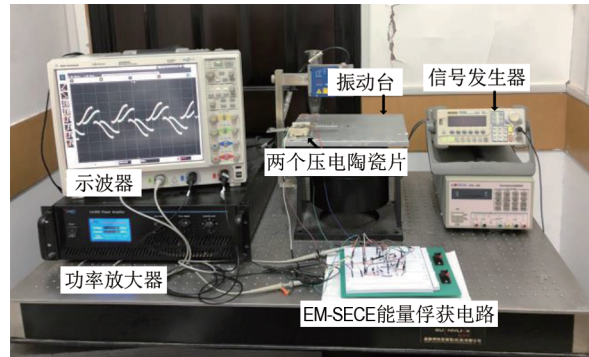


图9 压电能量俘获系统实验平台

各元件型号及参数如表 2 所示.首先我们将两块相同规格的 PZT 固定在振动台上,这样可以保证两个 PZT 保持相同的振动频率,振动频率设置为 17.4Hz.信号发生器连接到功率放大器上,将信号发生器产生的信号放大后来驱动振动台振动.

实验中 PZT1 和 PZT2 的原始开路电压分别为 7V 和 8V,当压电片接入 SECE 电路以后,开路电压将渐变为原始开路电压的两倍.图 10 所示为振动台振动频率为 17.4Hz 时,电路的相关电压电流波形图,  $V_{oc1}$  和  $V_{oc2}$  分别是 PZT1 和 PZT2 的开路电压波形.由于两个 PZT 存在相位差,所以  $V_{oc1}$  和  $V_{oc2}$  处于电压峰值的时间不同,峰值检测开关导通时间也不同.  $I_L$  是共享电感  $L$  上的电流波形,在每个 PZT 开路电压达到峰值处,电感电流  $I_L$  就产生一个脉冲电流,同时负载上输出电压  $V_{out}$  也出现电压

抬升. 我们将电感电流  $I_L$  波形及输出电压  $V_{out}$  波形在能量提取的瞬间进行放大, 如图 10 中下半部右上角的红色框图所示. 电感电流  $I_L$  先逐渐增大而达到最大值时,  $I_L$  开始逐渐降低, 同时输出电压  $V_{out}$  逐渐增大, 直至  $I_L$  降为 0,  $V_{out}$  停止增加, 完成一次能量提取. 实验结果与理论分析及仿真结果吻合.

表 2 元件型号及参数

元件	型号/参数
$C_L$	100 $\mu$ F
$L$	0.5mH
NPN	2N3906
PNP	2N3904
二极管	1N4007
肖特基二极管	1N5819
$C_1, C_2, C_3, C_4$	2.2nF
$R_1 \sim R_4$	10M $\Omega$
信号发生器	DG1022U
示波器	MS09254A
功率放大器	LA-800

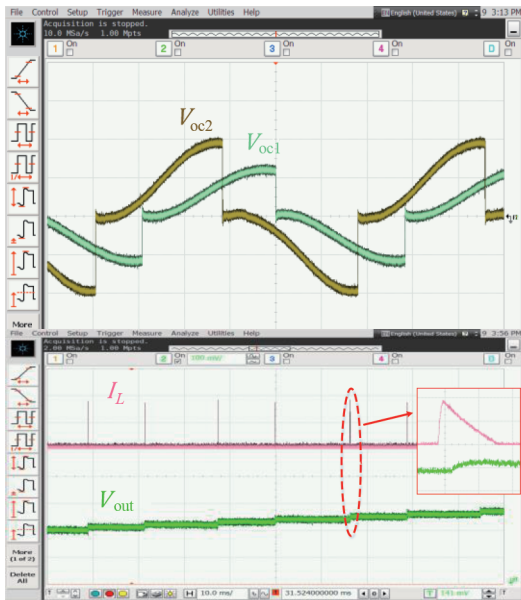
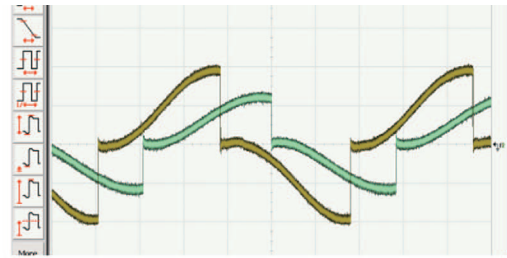


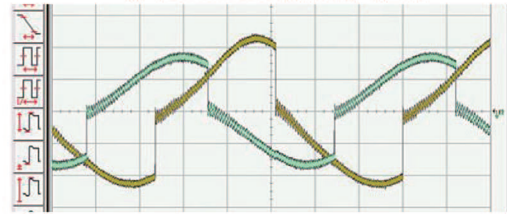
图 10 两个压电片开路电压、电感电流及输出电压波形

将本文的开路电压波形与文献[8]中采用的峰值检测电路得到的开路电压波形进行对比, 如图 11 所示. 图 11(a)为本文开路电压波形, 图 11(b)为本文电路替换为文献[8]中峰值检测结构得到开路电压波形图. 通过对比可以看出, 本文电路达到峰值电压后到峰值检测开关导通时, 存在更小的峰值检测开关相位滞后问题. 因此在压电片振动条件相同、峰值电压相同时, 本文的峰值检测开关导通时电路提取电压  $V_{ext}$  更高. 而在一次电荷提取中, 电路所提取的能量为  $E = 1/2C_p V_{ext}^2$ , 所以本文电路峰值检测电路相比存在相位滞后峰值检

测电路更具优势.



(a) 本文EM-SECE电路开路电压图



(b) 替换文献[8]峰值检测结构开路电压图

图 11 开路电压实验对比图

进一步比较了在 50 $\Omega$ ~150k $\Omega$  负载情况下, 输出功率与负载之间的关系, 如图 12 所示. 我们将实验设为四组, 第一组为接入 PZT1 的 EM-SECE 电路输出功率, 第二组为接入 PZT2 的 EM-SECE 电路输出功率, 第三组为同时接入 PZT1 和 PZT2 的 EM-SECE 电路输出功率, 第四组为接入 PZT1 的 SEH 电路输出功率.

将第一组曲线与第四组曲线进行比较, 两组电路均只接入 PZT1. SEH 电路只有在负载电阻为 45k $\Omega$  输出功率达到最大值, 在其他负载下输出功率显著降低. EM-SECE 电路在负载大于 20k $\Omega$  之后, 输出功率保持稳定, EM-SECE 电路输出功率约为 SEH 最大输出功率的 3.09 倍. 当负载较小时, 输出电压较低, 根据式(11)得出在低输出电压下, 电感续流转换效率  $\eta_r$  也较低, 这与理论分析一致. 在大负载情况下, 电路中充放电回路电流增大, 导致电感等阻抗元件能量损耗增大, 使电路输出功率缓慢降低.

将第一组曲线、第二组曲线和第三组曲线进行比较, 可以看出双 PZT 的 EM-SECE 电路输出功率明显大于只含单个 PZT 的 EM-SECE 电路, 实现了电感复用的功能. 为了更直观地看出电路复用输出功率的变化, 本文绘出第三组输出功率与第一、二组输出功率之和的比值 Rate, 表示如式(12)所示.

$$\text{Rate} = \frac{E_{\text{EM-SECE}}(\text{PZT1} + \text{PZT2})}{E_{\text{EM-SECE}}(\text{PZT1}) + E_{\text{EM-SECE}}(\text{PZT2})} \quad (12)$$

从图 13 中可以看出, 在负载小于 10k $\Omega$  时, 比值 Rate 大于 1, 也即双压电 EM-SECE 电路输出功率大于两个含单独 PZT 的 EM-SECE 电路输出功率, 这是由于双压电 EM-SECE 电路抬升了电路的输出电压, 降低了续流二极管能耗, 从而增大其输出功率. 当负载逐渐增

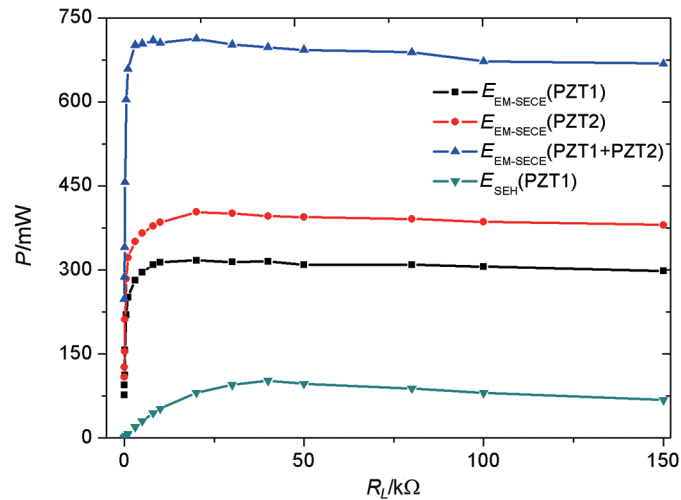


图 12 几种接口电路负载-输出功率曲线

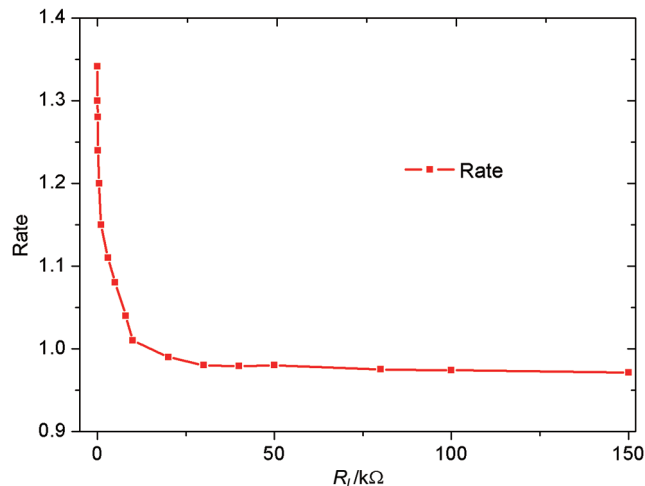


图 13 第三组输出功率与第一、二组输出功率和之比

加时,电路输出电压较大,此时电路中续流二极管能耗已经大大降低,所以双压电抬升的电压对电路效率的提升会有一定的下降,比值 Rate 逐渐稳定在 0.97.

实验结果表明,本文所提出的单电感可扩展压电同步电荷提取电路(EM-SECE)可以实现多压电自供电电压电能俘获,实现电感的复用.实际电路中,重负载时双 PZT 的 EM-SECE 电路输出功率约为两个含单个 PZT 的 EM-SECE 电路的 97%;在轻负载时双 PZT 电路性能甚至要优于两个含单个 PZT 的 EM-SECE 电路.

## 5 结论

根据 SECE 的工作原理,提取压电能量的过程分为两个阶段:电荷提取和电感续流过程,使得 PZT 与负载隔离并且不会相互影响,这为多压电共享单电感俘获能量提供了可能.本文提出的 EM-SECE 电路通过结合电位切换开关电路和改进的峰值检测器,并利用电感时分复用,实现了多输入压电能量采集,并且电路减少

了峰值检测开关的相位滞后,提高了单个压电元件的能量收集效率.理论分析和仿真结果表明了 EM-SECE 电路的优势.

## 参考文献

- [1] 田贤忠,祝驿楠,何佳存,等.一种射频能量捕获网络移动能量源均衡化充电策略[J].电子学报,2018,46(12): 2985-2992.  
Tian X Z, Zhu Y N, He J C, et al. A balanced charging scheme for mobile energy transmitter in RF energy harvesting network [J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46 (12) : 2985 - 2992. (in Chinese)
- [2] Bandyopadhyay S, Chandrakasan A P. Platform architecture for solar, thermal, and vibration energy combining with MPPT and single inductor[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2012, 47(9): 2199-2215.
- [3] Dagdeviren C, Yang B D, Su Y, et al. Conformal piezo-

- electric energy harvesting and storage from motions of the heart, lung, and diaphragm[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014, 111(5): 1927 – 1932.
- [4] 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 – 387.
- [5] Badel A, Guyomar D, Lefeuvre E, et al. Piezoelectric energy harvesting using a synchronized switch technique[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2006, 17(8-9): 831 – 839.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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 F X, Xia Y S, Shi G, et al. Optimized design of self-powered synchronous charge extraction circuit [J]. Journal of Transduction Technology, 2016, 29(3): 349 – 355. (in Chinese)
- [9] 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.
- [10] Kwon D, Rincón-Mora G A. A 2- $\mu\text{m}$  BiCMOS rectifier-free AC-DC piezoelectric energy harvester-charger iC [J]. IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems, 2010, 4(6): 400 – 409.
- [11] Dini M, Romani A, Filippi M, et al. A nanopower synchronous charge extractor IC for low-voltage piezoelectric energy harvesting with residual charge inversion [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(2): 1263 – 1274.
- [12] Ren X, Fan H, Zhao Y, et al. Flexible lead-free BiFeO<sub>3</sub>/PDMS-based nanogenerator as piezoelectric energy harvester [J]. Acs Applied Materials & Interfaces, 2016, 4(30): 7324 – 7331.
- [13] Ren X, Fan H, Wang C, et al. Coaxial rotatory-free-standing triboelectric nanogenerator for effective energy scavenging from wind [J]. Smart Materials and Structures, 2018, 27(6): 065016.
- [14] Zhao Y, Fan H, et al. Lead-free Bi<sub>5x</sub>LaxTi<sub>3</sub>FeO<sub>15</sub> (x = 0, 1) nanofibers toward wool keratin-based biocompatible piezoelectric nanogenerators [J]. Journal of Materials Chemistry C, 2016, 4(30): 7324 – 7331.
- [15] 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, 2019, 34(2): 1446 – 1457.
- [16] 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.
- [17] Shim M, Kim J, Jeong J, et al. Self-Powered 30  $\mu\text{W}$  to 10 mW piezoelectric energy harvesting system with 9.09 ms/V maximum power point tracking time [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2015, 50(10): 2367 – 2379.
- [18] Lu S H, Boussaid F. A Highly efficient P-SSHI rectifier for piezoelectric energy harvesting [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(10): 5364 – 5369.
- [19] Shi G, Xia Y, Ye Y, et al. An efficient self-powered synchronous electric charge extraction interface circuit for piezoelectric energy harvesting systems [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2016, 27(16): 2160 – 2178.

#### 作者简介



李毅 男,安徽亳州人.宁波大学信息科学与工程学院硕士研究生,主要研究方向为基于环境能量俘获的接口电路设计.  
E-mail:liyibu@foxmail.com



夏银水(通信作者) 男,浙江宁波人.博士,宁波大学信息科学与工程学院教授,硕士生导师,主要研究方向为SoC设计、低功耗数字电路设计、逻辑综合及其优化、能量俘获电路设计及优化.  
E-mail:xiayinshui@nbu.edu.cn