

能量收集电路与系统综述

引言

能量收集技术是一种从环境中吸收不同形式的能量，转化为电能，为工作电路电能的技术。使用能量收集技术的芯片能够从附近的能量来源收集能量，转化为电能，并储存到能量储存装置中或为工作电路充电。常用的能量来源包括射频信号、温差梯度、机械振动、光能等[1]。

在射频能量收集系统中，射频信号的来源是全球行动通信系统（GSM）和无线局域网（WLAN）等通信系统[1]。根据 Hubregt 等的工作[2]，在距离 GSM 基站 25~100 米时，能量密度可达到 0.1mW~3mW 每平方米，而在 WLAN 环境下，能量收集系统获得的能量密度更低。射频能量收集中，射频信号也具有不同的频率范围，目前在欧洲得到应用的 GSM900 系统的下行链路频率范围为 935~960MHz，GSM1800 系统的下行链路频率范围为 1805.2~1879.8MHz，WiFi 系统的下行链路频率范围为 2.4~2.5GHz。

在机械振动能量收集系统中，压电材料是将机械振动转换为电能的关键部件。压电材料在发生机械形变时，会在表面积聚电荷，由此形成电压。常见的压电材料有：石英、硫化镉、氧化锌等压电单晶体，锆钛酸铅等压电多晶体，以及聚偏二氟乙烯等压电聚合物。以压电材料为能量转换器的能量收集电路输入是机械振动，并且具有使输出电压最大的共振频率，因此在应用中常使电路工作在共振频率下，并需要相应的接口电路来利用电路输出的能量。

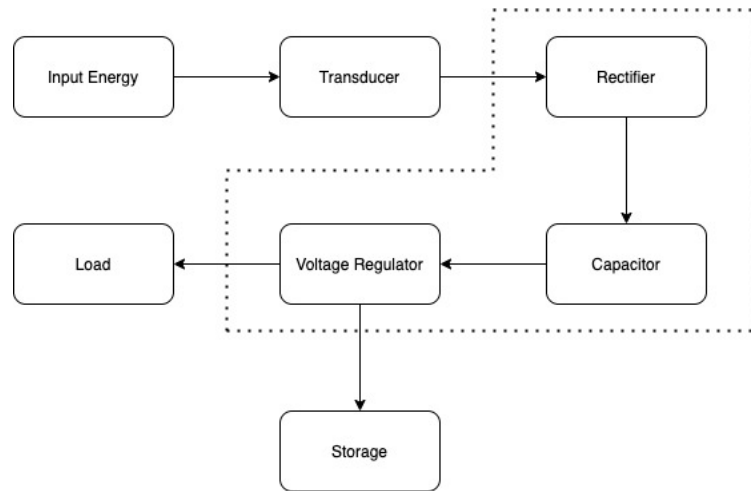
温差梯度能够通过热电效应转换为电能。热电效应包含赛贝克效应、帕尔帖效应以及汤姆森效应。在赛贝克效应中，半导体的两端保持温差，则在较热的一端和较冷的一端之间会产生与温差成正比的电压[4]。实际应用中，常用两种不同的金属材料连接在一起形成热电偶，由温度梯度产生电压进行供电。热电偶由于没有机械部件，能够被应用在对大小有限制的使用能量收集技术的传感器中，但由于其尺寸较小，难以形成较大的温度梯度，又需要散热器等进行弥补，从而增大了系统的体积[1]。

光伏电池是使用光能的能量收集电路的能量转换器。近年来，光伏电池的能量转换率不断提高，从基于小分子量材料的多结光伏电池约 5.7%的能量转换率[4]提高到微米级铟化镓光伏电池的 14%[5]，因此光伏电池也在能量转换系统中得到越来越多的应用。

能量收集技术具有提供长时间稳定的电能的优点，在一些电池功率密度不符合要求或难以更换电池的场合，能量收集技术得到了广泛的应用。在无线传感器网络中广泛地使用能量收集技术，因为常规电池的功率密度与无线传感器的

长时间小尺寸的需求不匹配。此类使用能量收集技术的无线传感器的应用领域包括如心电监测等的健康检测领域、如胎压监测等的汽车工业领域、人类存在检测等的智能建筑领域等[6]。

能量收集系统框图如下：系统接收输入的能量，通过能量转换器转换为电能，通过整流器、电容器、电压变换器等组成部分，将能量转换器的输出进行转换，与负载进行匹配或储存到电池、电容器等储能装置中。能量转换器有多种类型，每种能量转换器都对应着一种环境中的能量形式，而虚线中的组成部分又统称为接口电路。对于不同类型的能量转换器，接口电路的形式不同。在实际应用中需要根据能量转换器设计接口电路，接口电路也是能量转换芯片的核心部件。



本文的结构如下：在第二节中，我们对几种能量转换器的原理做了详细的介绍，并且分别介绍几种较为成熟的系统的指标。在第三节中，我们选取以压电效应为能量来源的电路中最重要的一部分，接口电路，分析其关键参数指标和关键性能，对几种接口电路的设计进行比较。

能量转换器

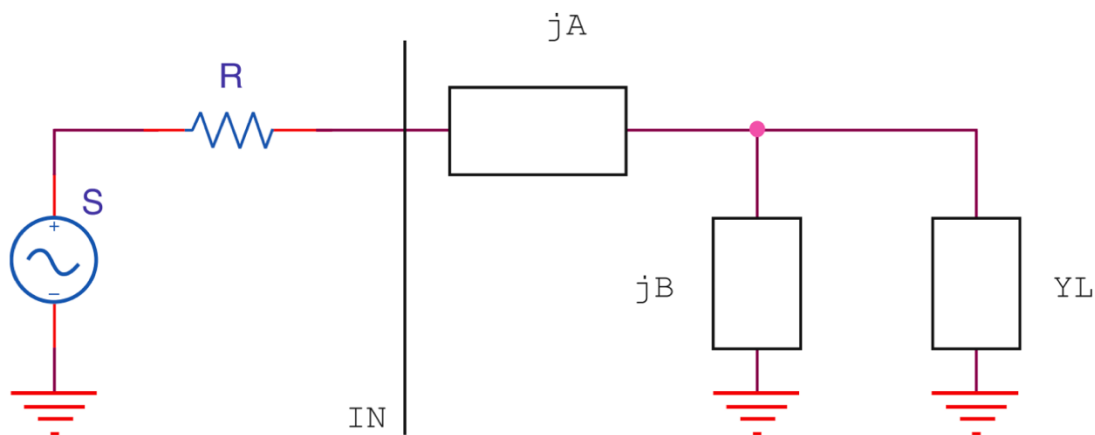
在这一部分中，我们将介绍各种能量收集系统的能量转换器原理。

射频能量收集系统的能量转换器是天线。低频信号可以通过电感耦合方式来收集信号的能量，而射频信号需要通过天线发射与接收电磁波来收集信号的能量。在射频能量收集系统中，常用发射天线发射电磁波，经过空间的传播与衰减后，用接收天线接收电磁波，利用电磁波携带的能量为负载提供电能。

在发射天线-空间-接收天线的系统中，发射电磁波的能量与接收电磁波的能量遵循弗里斯传输公式：接收能量与发射能量之比与接收与发射的能量密度成正比，而与天线之间的距离的平方成反比[7]。

$$\frac{P_r}{P_t} = D_t D_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2$$

在应用中，我们常在接收天线后接阻抗匹配网络，以达到负载或能量储存装置能够最多地获得接收能量的效果。阻抗匹配网络即是射频能量收集系统的接口电路。接收天线等效电路与阻抗匹配网络如下图所示：



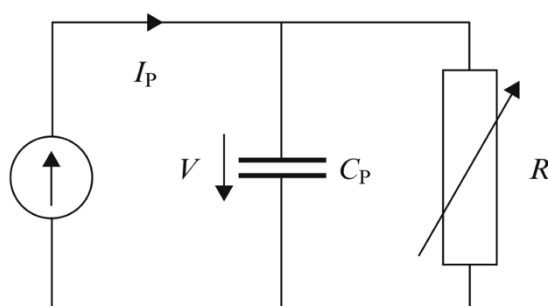
接收天线可以看作理想电压源与天线内阻的串联，而通过阻抗匹配网络后输出的最大电压如下：

$$v_{out} = \frac{1}{2} \sqrt{1 + Q^2} \times 8R^2 P_{inc}$$

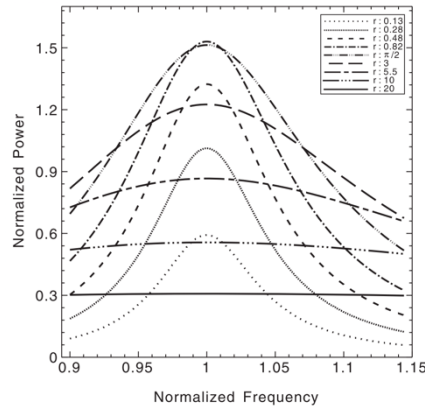
输出最大电压与阻抗匹配网络品质因素、天线内阻与输入功率有关。

压电能量收集系统的能量转换器是压电材料。压电效应由法国的居里兄弟于1880年发现[8]。他们发现对石英晶体施加压力时，晶体的表面会产生电荷，这便是压电效应。与压电效应相对的逆压电效应是，压电材料会在电场中发生极化，进而产生形变。

压电材料能够在形变下产生电荷，因此被作为将机械能转换为电能的能量转换器。其可以等效为一个电流源与电容和电阻的并联，如下图所示：



在对压电材料施加正弦形变激励后，其输出也会是正弦形式。因此可以把等效电路中的电流源看成是正弦电流源。对于一般的压电材料，正弦电流源的输出随着正弦形变激励的频率增加而先增大后减小，并存在着一个谐振使压电材料的输出功率最大[9]。典型的压电材料输出功率随形变激励的频率的变化如下图：



不同的压电将机械能转换为电能的效率不一样，这是通过机电耦合系数来描述的。机电耦合系数的平方定义为压电效应中输出电能与输入机械能的比值，或逆压电效应总输出机械能与输入电能的比值[10]：

$$k^2 = \frac{\text{mechanical energy converted into electric energy}}{\text{input mechanical energy}}$$

or

$$k^2 = \frac{\text{electric energy converted into mechanical energy}}{\text{input electric energy}}$$

压电能量收集电路的接口电路的选择也与压电材料的机电耦合系数有关。[9]中对 SSHI 接口电路在各种机电耦合系数的情况下进行了分析，得到其在强耦合系统中的响应与标准接口电路接近，而 SSHI 接口电路最适用于中等耦合系统，并且能够在一定程度上减少非理想情况的影响。

接口电路设计与性能指标

在能量收集电路的研究中，除了发电机结构本身的评估和开发，最大化发电结构的输出功率以外，还需要接口电路，因为几乎没有元件或电路可以直接由发电结构的输出提供动力。能量回收接口电路是能量回收系统的重要组成部分，其功能包括高效的交直流转换，提取最大的输出功率，缓冲电能等。

接口电路的关键性能指标包含以下几个部分：

- 1、采集功率的独立性，采集功率相对于负载（即缓冲电压）应保持恒定。
- 2、功率增益：考虑到所有电路损耗，接口电路的功率增益应优于标准二极管整流器且尽可能高。
- 3、操作独立性：正确的操作应与励磁频率，压电电压和缓冲电压无关。
- 4、自主性：正确操作所需的每个信号都应从压电电压或缓冲电压中提取出来。这意味着不需要外部参考电压信号。
- 5、自供电/高效：控制电路应尽可能降低功耗，以免浪费收割机产生的宝贵电力。任何其他损失，例如传导损耗或开关损耗也应保持尽可能低。因此，可以由缓冲电容器中存储的能量直接提供控制电路，并且可以实现高转换效率。

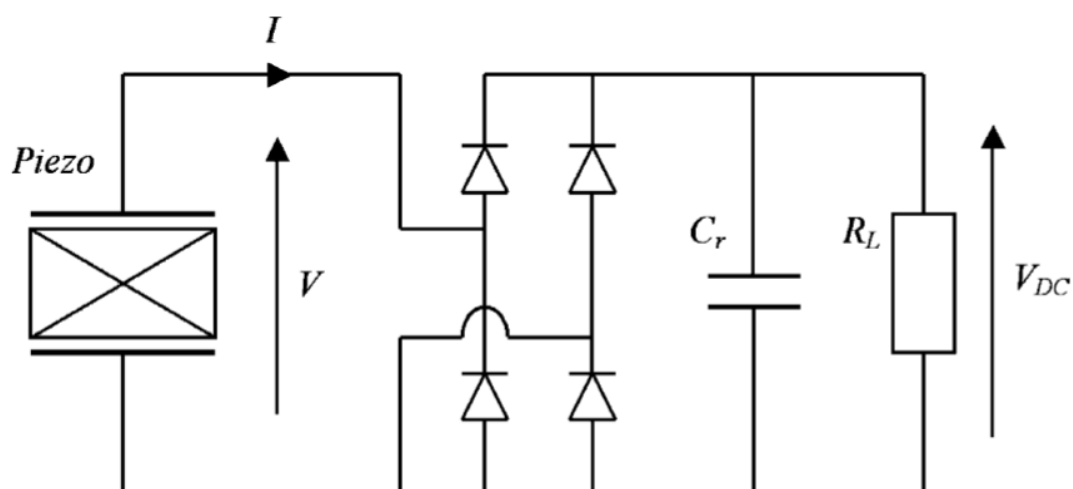
6、启动：电路应能够从未充电的缓冲电容器启动。

其中最为重要的指标是功率增益或称功率提取效率，更高的功率增益允许我们使用更小的发电元件或使用耗电量更高的负载，目前的许多接口电路研究也关注于设计新的结构来提升功率增益。

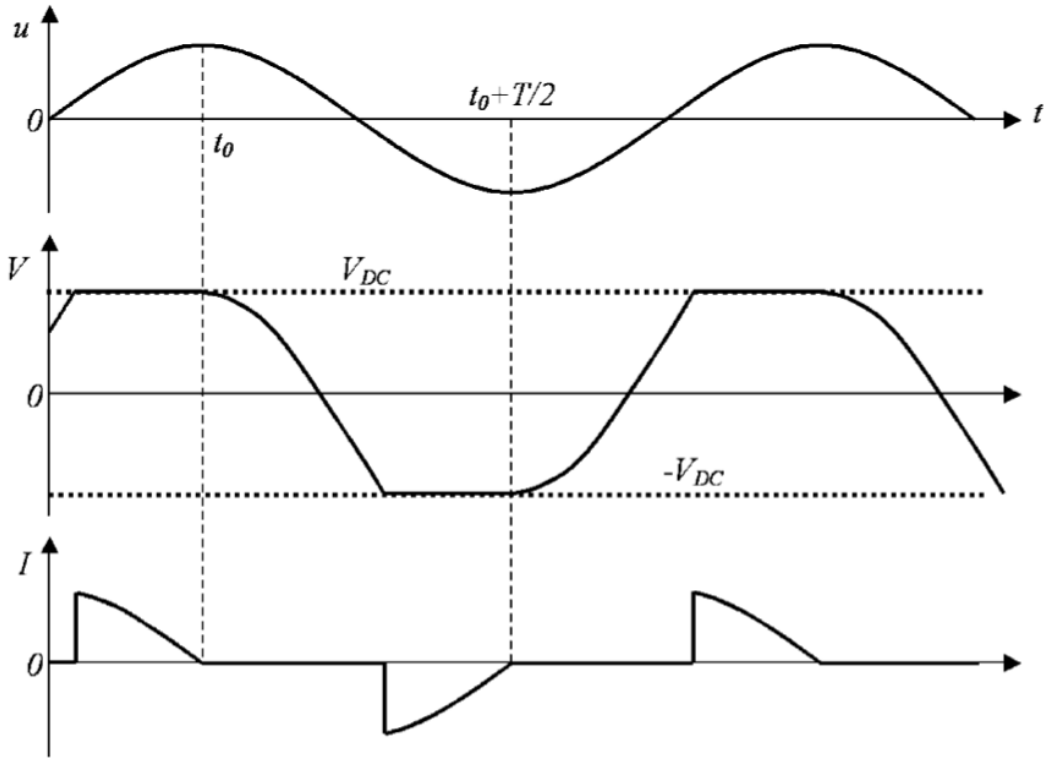
本节讨论的接口电路都使用压电元件来作为发电结构，即压电能量回收系统。四种经典接口电路结构是标准接口（standard interface），同步电荷提取电路（SECE），并联同步开关电感电路（Parallel-SSHI），串联同步开关电感电路（Series-SSHI），并由这四种经典接口电路衍生出了多种具有高功率增益的接口电路。[11]

首先我们分别介绍这四种经典接口电路原理和性能。

1、标准电路



图中所示的标准接口电路包括一个二极管整流桥和一个滤波电容器。这实际上是用来整流和平滑交流电压的最简单的电路[12]。电路中负载电路等效为负载电阻 R_L ，负载功耗就等于负载上的平均输入功率。以下分析基于压电元件收到一个正弦振动，则机械振动 u 是一个正弦信号。当 $R_L C$ 的时间常数远大于机械振动周期时， u 和输出电压 V 、电流 I 的关系如下：



稳态工作时，整流电压 V_{DC} 和平均输出功率 P 可以用下式表达：

$$V_{DC} = \frac{R_L \alpha}{R_L C_0 \omega + \frac{\pi}{2}} \omega U_M$$

$$P = \frac{V_{DC}^2}{R_L} = \frac{R_L \alpha^2}{(R_L C_0 \omega + \frac{\pi}{2})^2} \omega^2 U_M^2$$

在弱耦合能量收集设备的情况下，与机械功率相比，收集到的功率可以忽略不计。因此等效负载电阻值 R_L 对机械位移的幅度 U_M 没有显着影响。在这种情况下，平均收集功率达到最佳时等效负载电阻 R_{opt} 和最佳平均功率 P_{max} 可以用下式表达：

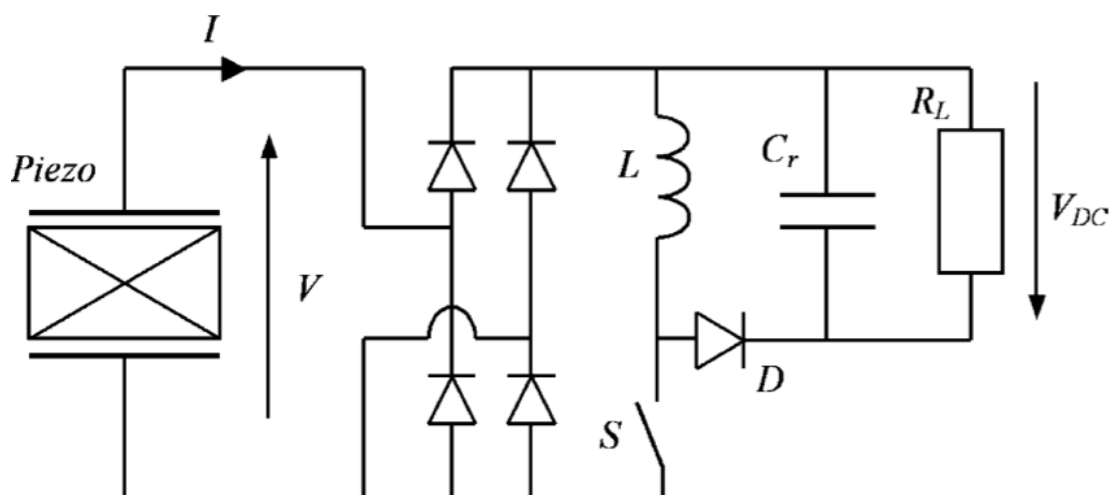
$$P_{MAX} = \frac{\alpha^2 \omega}{2\pi C_0} U_M^2$$

$$R_{OPT} = \frac{\pi}{2C_0 \omega}$$

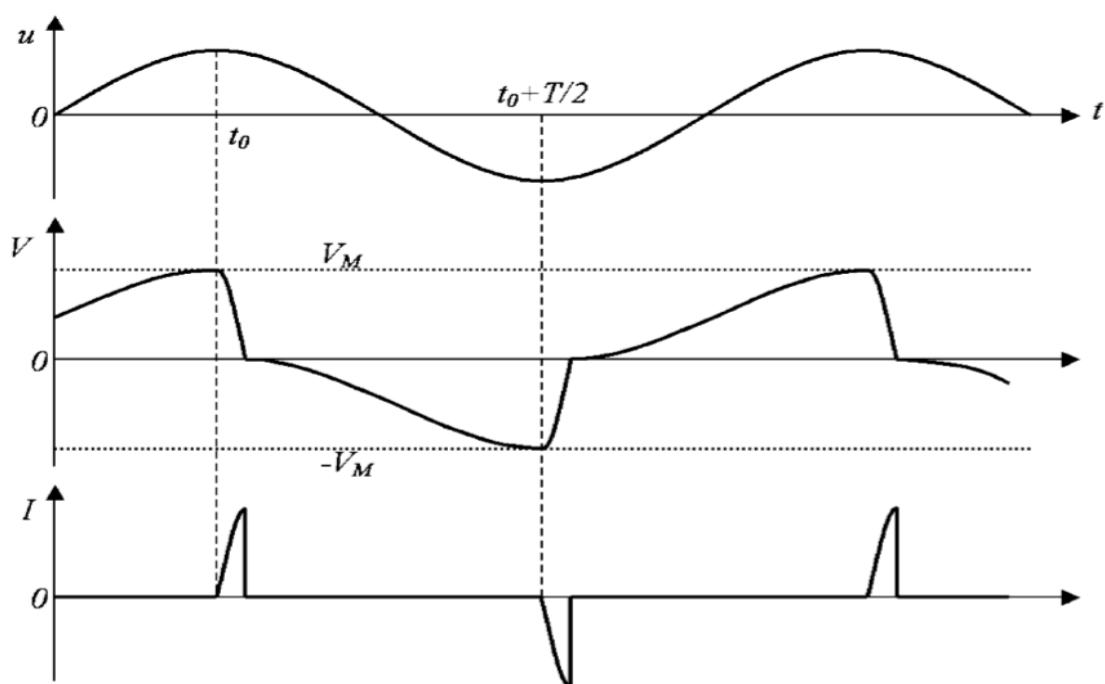
2、同步电荷提取电路

同步电荷提取[12]原理在于周期性地去除积聚在压电元件的阻塞电容器 C_0 上的电荷，并将电能传输到负载或能量存储元件。该技术具有两个特点，第一个特点是电能从压电元件中提取的过程与机械振动同步。第二个特点是压电元件大部分时间都处于开路状态，这样在非电荷转移阶段浪费的功率就很小。

一个基本的 SECE 电路如图所示：



当开关 S 闭合时，储存在压电元件等效电容 C_0 上的电荷转移到电感 L 上。当压电元件上的电荷完全去除，开关 S 打开，压电元件处于开路状态，储存在电感 L 中的能量通过二极管 D 转移到缓冲电容器 C_f 。提取时刻在位移 u 最小和最大时触发，与机械振动同步。通过改变电感 L 的值，可以控制电荷提取阶段持续时间。理论上的位移 u 和输出电压 V 、电流 I 的关系如下：



图中可以看出，电路只有在提取电荷时存在电流，功率损失较小。且压电元件上的电荷可以近似为瞬时被提取出来。压电元件输出电压和位移幅度的关系、压电元件输出的平均功率和负载上收到的平均功率可以用以下公式表达：

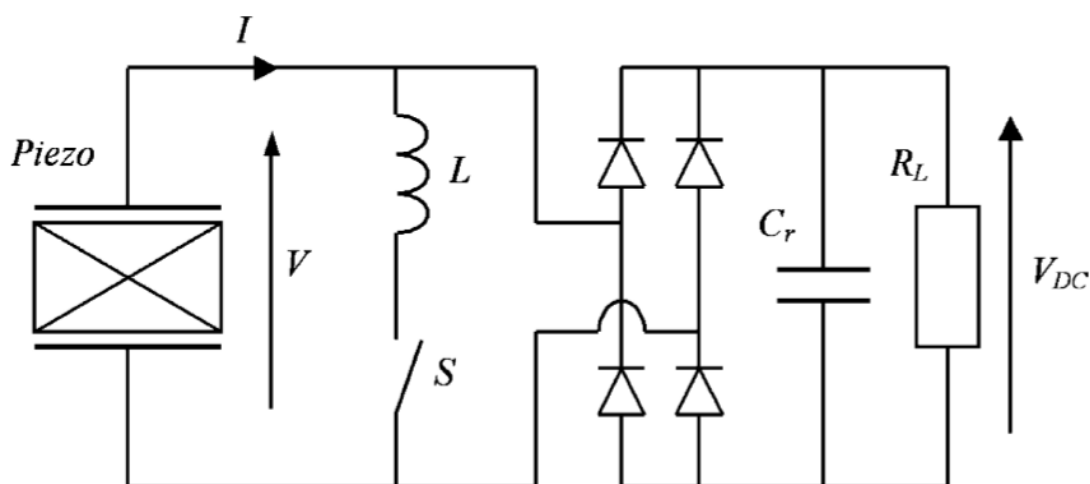
$$V_m = 2 \frac{\alpha}{C_0} U_M$$

$$P = \frac{1}{2} C_0 V_M^2 \frac{\omega}{\pi}$$

$$P = 2 \frac{\alpha^2 \omega}{\pi C_0} U_M^2$$

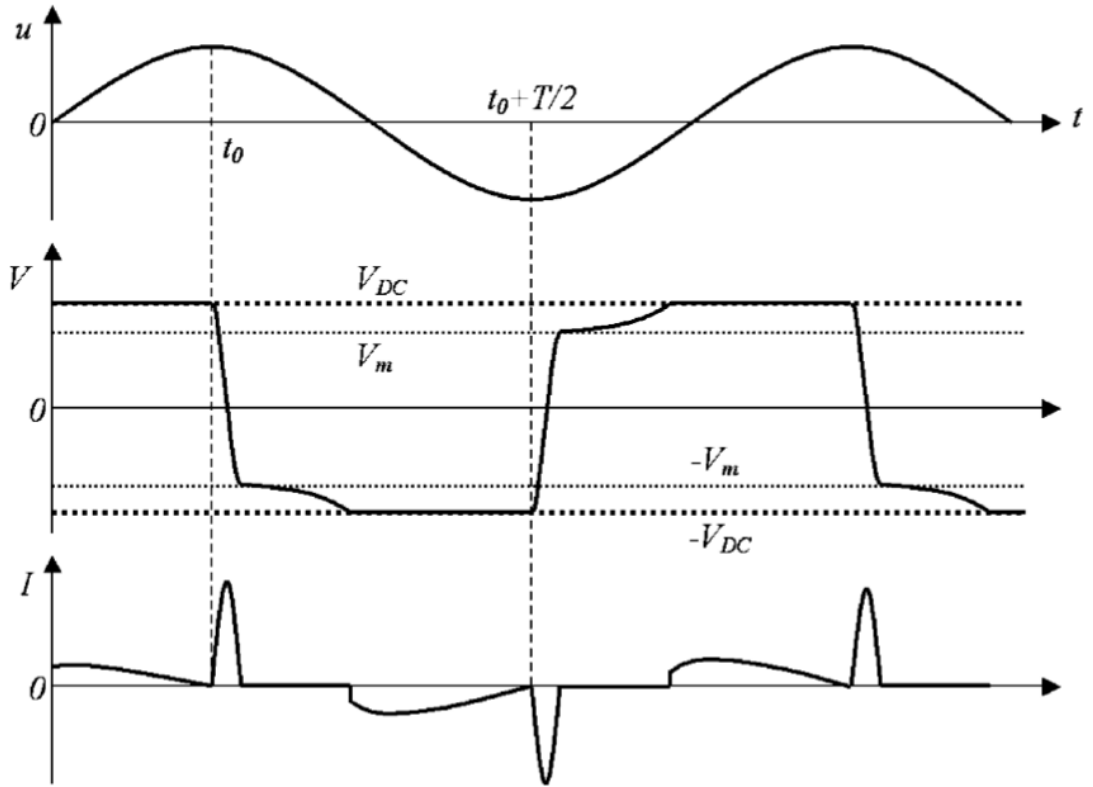
3、并联同步开关电感电路

典型 P-SSHI 接口电路如图所示：



P-SSHI [13-14] 在压电元件和整流桥之间并联了一个由电感 L 和开关 S 构成的非线性电路，当压电元件位移达到最大时，开关 S 短暂闭合，构建了一个 LC 振荡电路，使压电元件两端电压迅速翻转，则压电元件反向位移时会收到更大的阻尼，可以充分将机械能转化为电能。

在 P-SSHI 电路中，能量损耗主要是由于电压翻转过程不够理想，非线性过程会引起很小的能量损失。振动位移 u 和输出电压 V 、电流 I 的关系如下：



压电元件两端翻转后电压与翻转前电压的关系可以有电感品质因素 Q_i 来表示

$$V_m = -V_{DC}e^{-\pi/2Q_i}$$

平均输出功率，最大输出功率和最佳电阻可以用下式表示，可以看到输出功率很大程度上取决于电感品质因素 Q_i ：

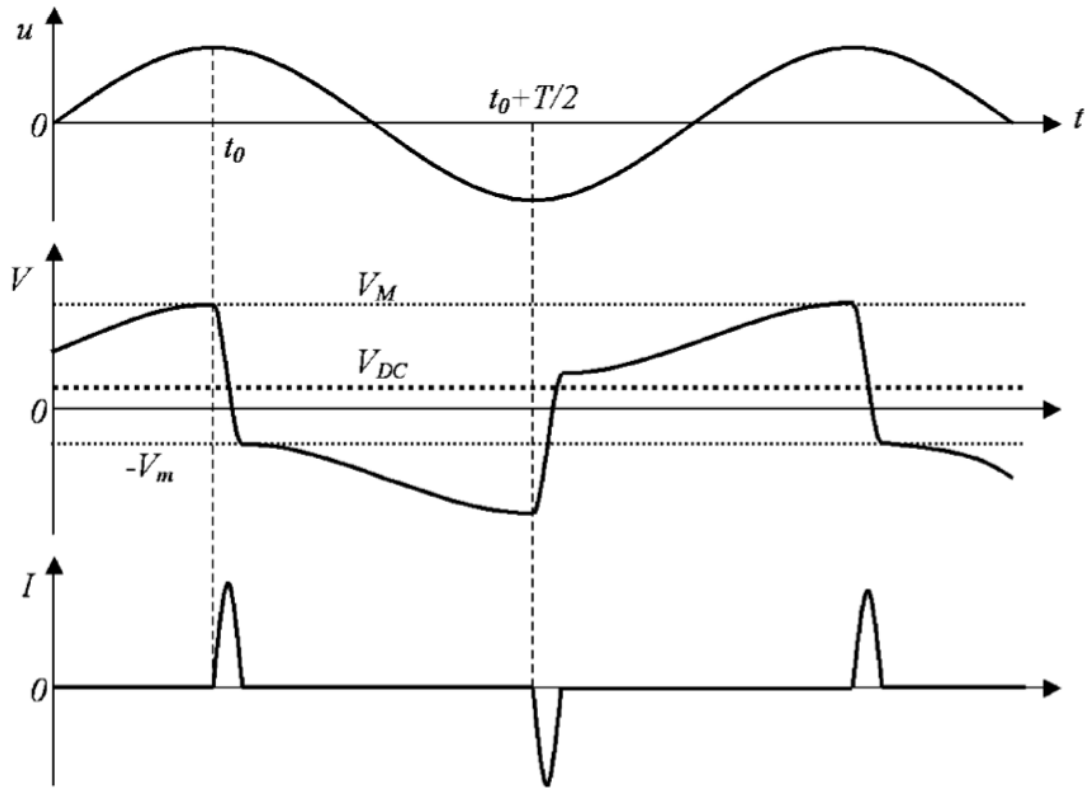
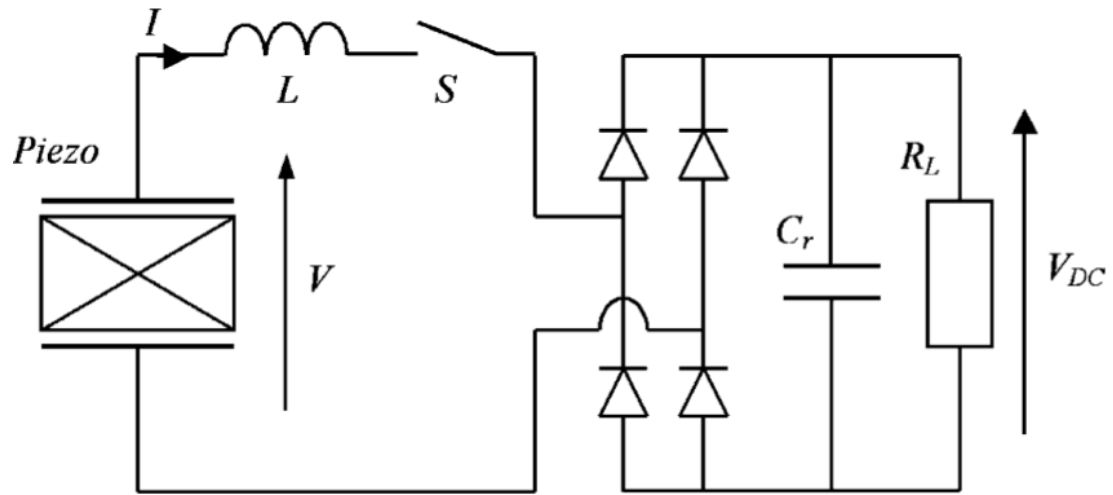
$$P = \frac{V_{DC}^2}{R_L} = \frac{4R_L\alpha\omega^2}{(R_L C_0\omega(1 - e^{-\pi/2Q_i}) + \pi)^2} U_M^2$$

$$P_{MAX} = \frac{\alpha^2\omega U_M^2}{\pi C_0(1 - e^{-\pi/2Q_i})}$$

$$R_{OPT} = \frac{\pi}{C_0\omega(1 - e^{-\pi/2Q_i})}$$

4、串联同步开关电感电路

S-SSHI 和 P-SSHI 电路类似[13-14]，只不过将电感 L 和开关 S 构成的非线性电路串联在压电元件和整流桥中间。开关 S 同样在位移达到某个方向的最大值时闭合，储存在压电元件等下电容中的电荷通过整流桥转移到缓冲电容中。电路结构，位移和输出的关系如图所示：



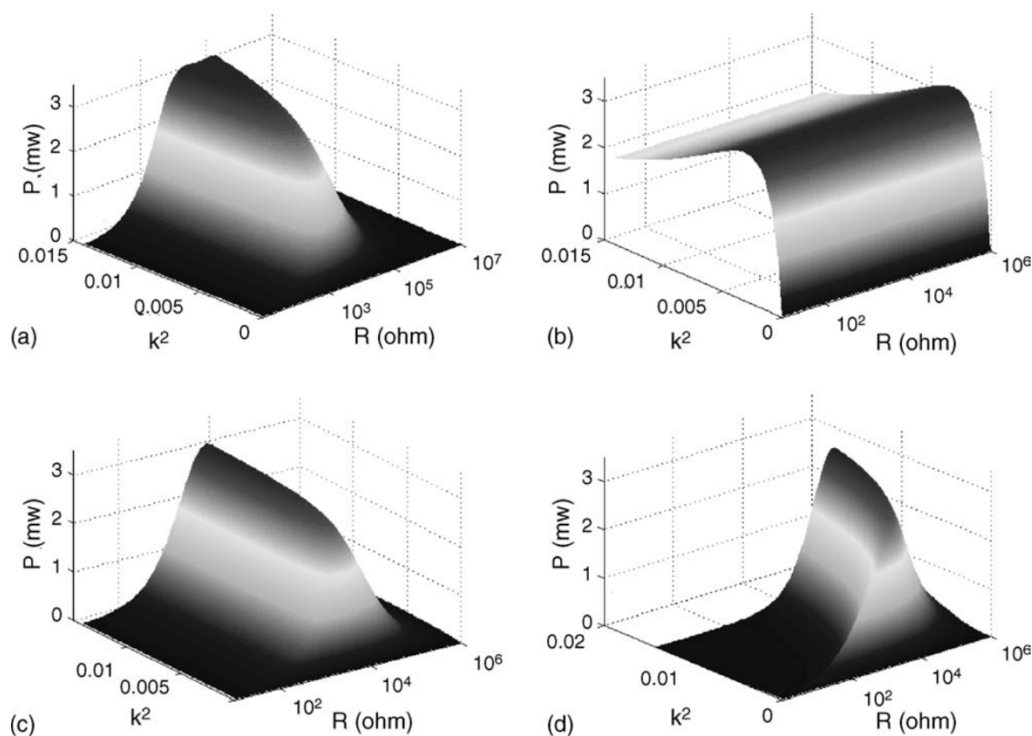
和 P-SSHI，S-SSHI 的输出可以用下式表示，同样取决于电感品质因素 Q_i

$$P = \frac{V_{DC}^2}{R}$$

$$P_{MAX} = \frac{\alpha^2 U_M^2 \omega}{2\pi C_0} \frac{1 + e^{-\pi/2Q_i}}{1 - e^{-\pi/2Q_i}}$$

$$R_{OPT} = \frac{\pi}{2C_0 \omega} \frac{1 - e^{-\pi/2Q_i}}{1 + e^{-\pi/2Q_i}}$$

对于以上这几种经典的接口电路，LGEF 实验室比较了在外力幅值固定的情况下，各接口电路的能量提取效率，整理如下图所示：



总结来说，四种经典的接口电路在关键性能指标——功率增益和负载对效率的影响上进行了取舍。标准接口电路结构简单，不需要额外的控制电路来控制开关，但能量回收效率在四种电路中最低且功率增益随电路负载变化。SECE 接口电路的回收功率约是标准接口电路最大回收功率的四倍，且与电路负载无关，只和品质因素有关。并联 SSHI 接口电路的基本原理是在压电元件两端并联同步开关电感。串联 SSHI 接口电路的基本原理是在压电元件两端串联同步开关电感。在最优负载条件下两种 SSHI 电路回收功率大约是标准接口电路最大回收功率的 15 倍。虽然 SSHI 最大回收功率更大，但和负载有关。

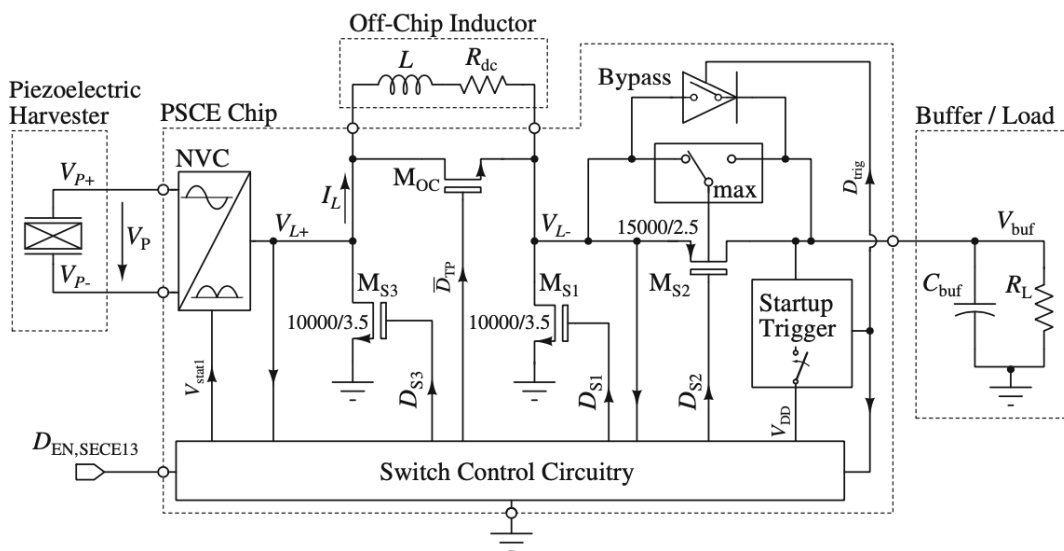
除了四种经典的接口电路以外，从中还衍生出了多种新的接口电路结构以及经典接口电路的 CMOS 实现，主要关注于提升功率提取效率和压电元件与负载的解耦。

杨帆课题组使用 MOS 管实现了 P-SSHI 结构，去除了整流桥中的二极管并给出了一种简单的控制电路，降低了二极管压降损失的功耗。在和标准电路的比较中（基于 0.5 μ m CMOS 工艺仿真）显示，其收集的功率是标准电路的 4 倍以上[15]。孙凯利课题组针对压电风能采集装置设计了一种自供能、自感知式

的同步电感能量接口电路，使和标准电路相比，输出功率提高 30%[16]。孟莹梅提出了 ESEI 接口电路，当电路负载大于一定值时，电路功率提取效率和负载无关，且具有比 SECE 电路更高的功率提取效率，略低于 SSHI 电路[17]。

压电元件的接口电路的设计可以根据元件的参数来设定电路的参数，而无需改变接口电路结构，因此各类接口电路的设计主要为获取更高的功率提取效率，但越复杂的电路则需要更复杂的控制电路，其中存在额外损耗且更有可能出现错误，因此一个控制简单且具有更高功率提取效率的电路是必须的。

接口电路实现



这是一种使用压电元件，结合 SECE 接口电路的能量收集芯片实现。使用了结合启动触发器，如果缓冲电压太低而无法为开关控制电路供电，则可以通过旁路对缓冲电容器进行被动充电。

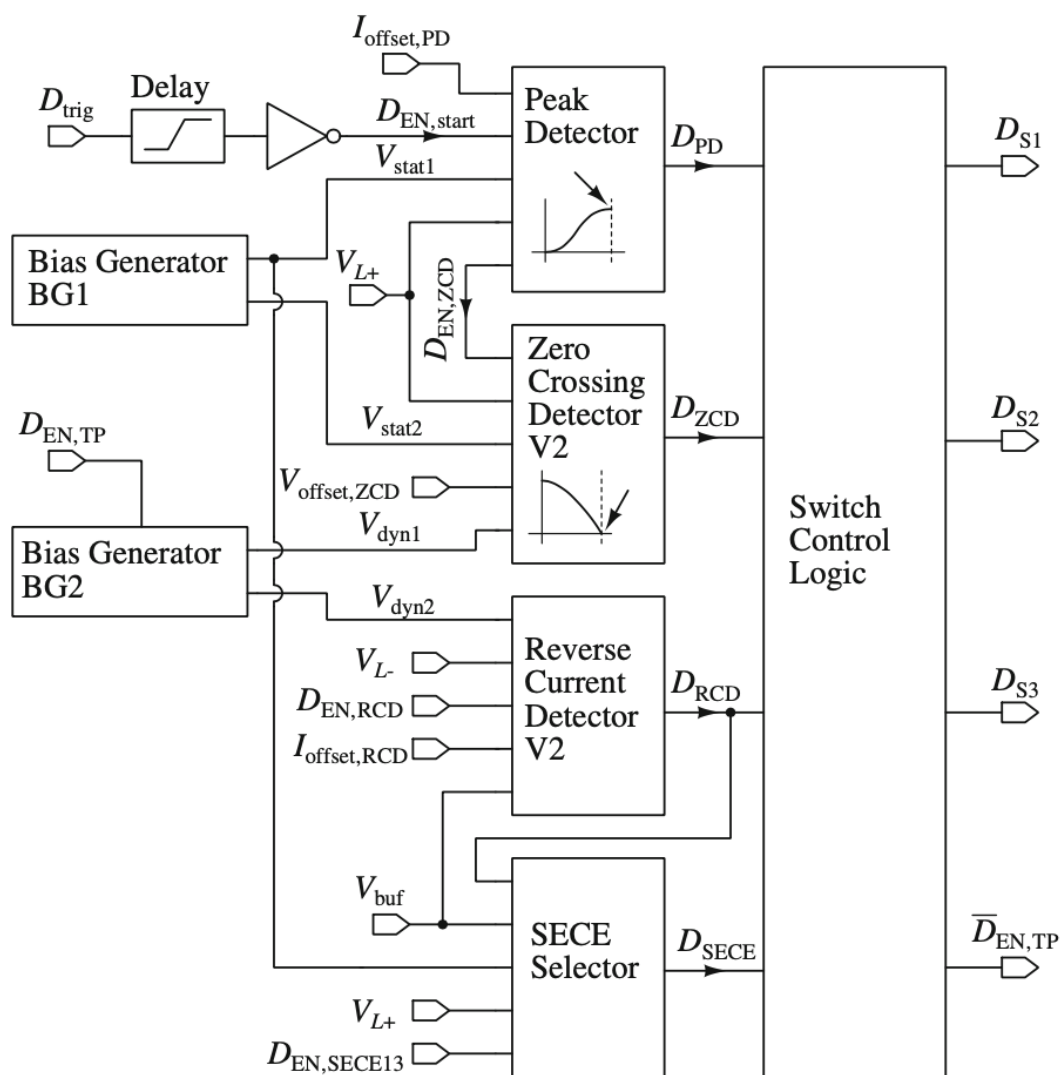
这个电路采取了多种措施来确保在多种激励和负载条件下，电路都可以正常运行。使用了振荡消除电路来减少传输过程结束时发生的振荡。用一种新的 ZCD 结构和 RCD 在应对变化的激励参数。使用一个供电无关的偏置电路来为有源器件提供一和缓冲电压无关的偏置。电路中的晶体管使用可承受 18V 的高压晶体管，以便连接具有宽输出电压范围的压电采集器。

图中可以看到芯片的压电采集器、电感器和缓冲电路是连接到芯片上的外部组件。因为电感器上每个传输周期中必须传输大量能量，需在毫亨范围内，缓冲电容器也需要具有微法拉级的容值，因此都不能集成在芯片上。

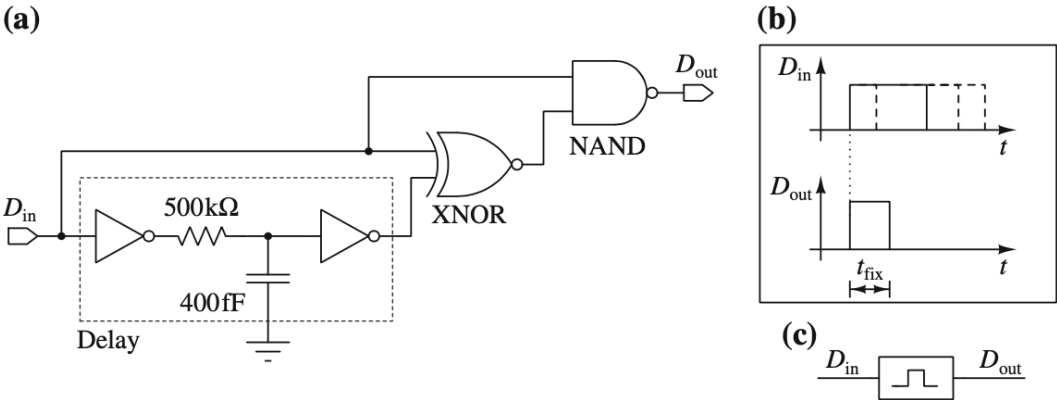
下面的开关控制电路需要由缓冲电容器供电，如果 V_{buf} 不足以使电路正常

工作，会使用旁路确保压电采集器和缓冲电容器之间的充电路径。一旦 V_{buf} 达到某个水平，启动触发器就会发出信号以停用旁路并开始正常运行。

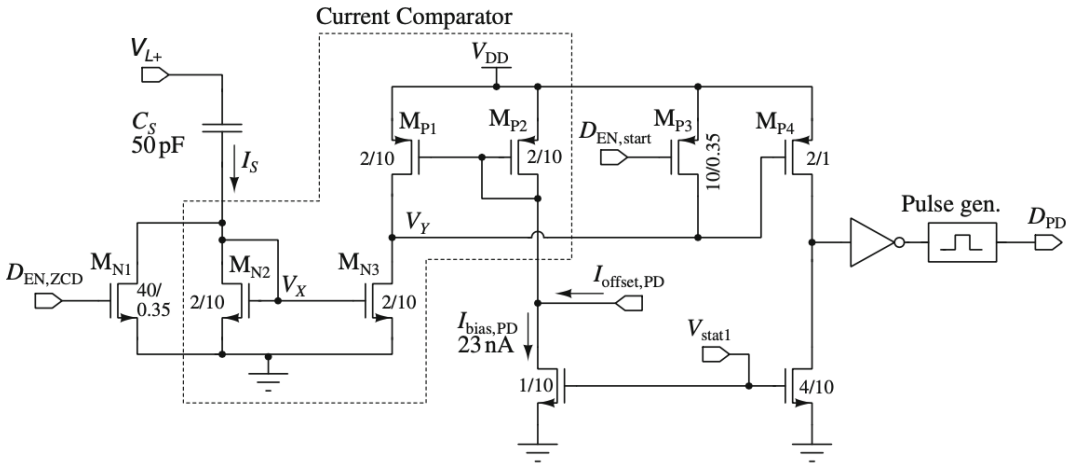
其中开关控制电路由脉冲生成器、峰值检测器、过零检测器、反向电流检测器构成。



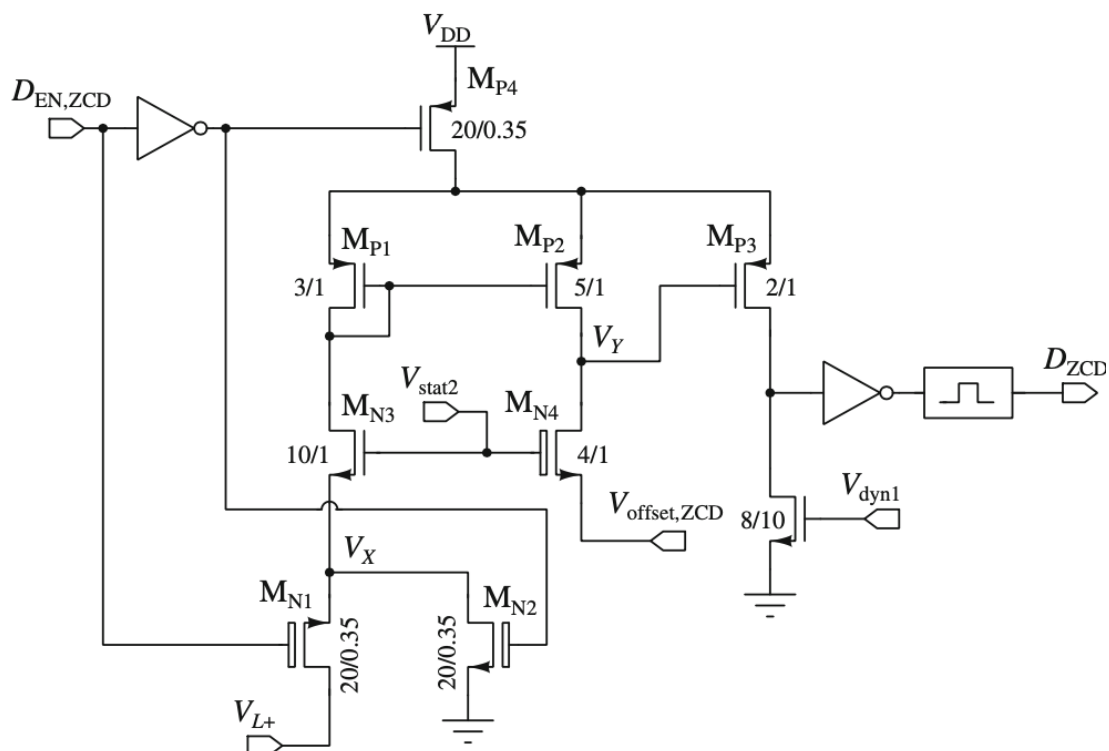
脉冲生成器生成的脉冲由后续峰值检测器和过零检测器（ZCD）等使用，是一个后续可由控制逻辑进一步处理的脉冲序列。



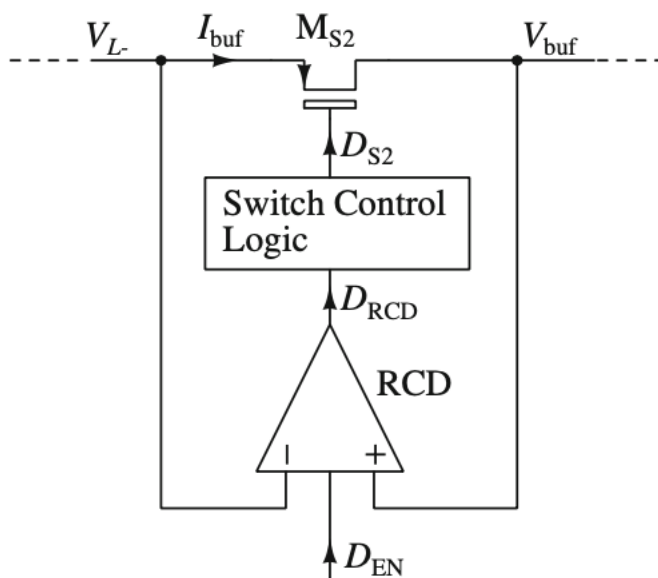
峰值检测器电路的任务是确定整流电压 V_L 达到最大值的时刻。正确检测这一瞬间非常重要，因为它启动了从采集器到缓冲电容器的功率传输。该电路使用的峰值检测器电路使用电流比较器而不是电压比较器，用一个电容器将输入电压转化为输入电流。



过零检测器用来检查能量转移过程开始之后,压电元件两端电压下降,必须正确检测过零时刻来决定转换过程的第二阶段。



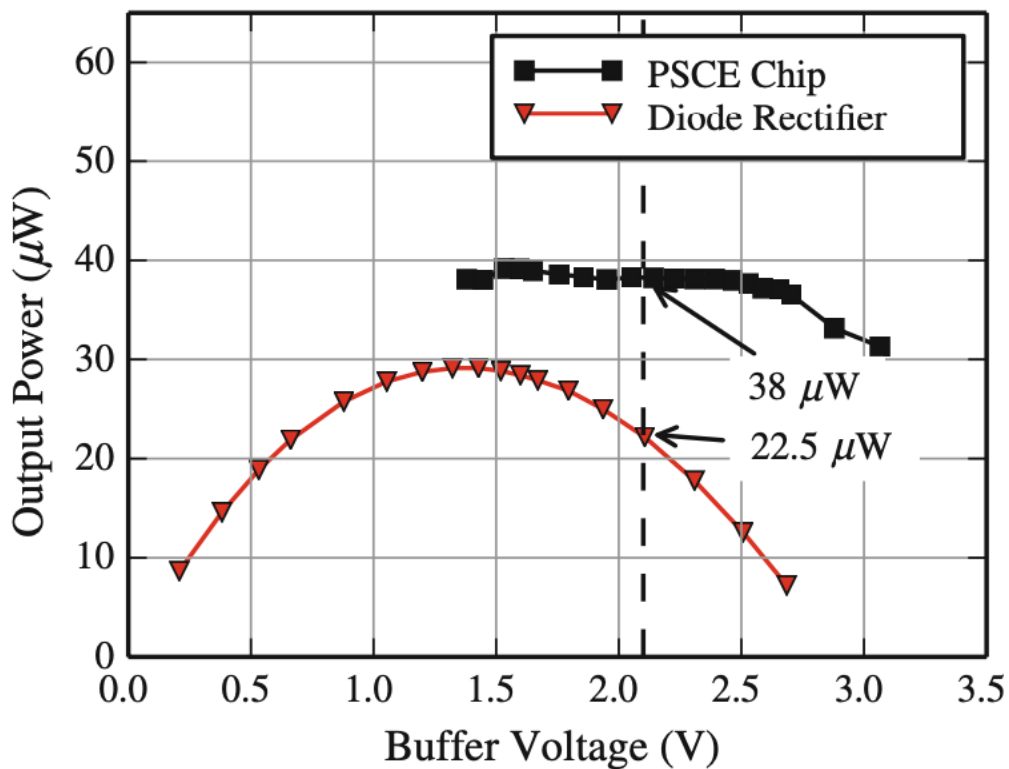
反向电流检测器 RCD 用来阻止传输过程结束后的反向电流，如果没有 RCD，缓冲电容器将在每次传输后放电。



这个电路中，将电源直接连接到缓冲电容器，构建了两种偏置电路，一种为必须长期开启的器件供电，另一种则为仅在传输过程中激活的器件供电。两种电路都需要一个启动电路来建立需要的电流。

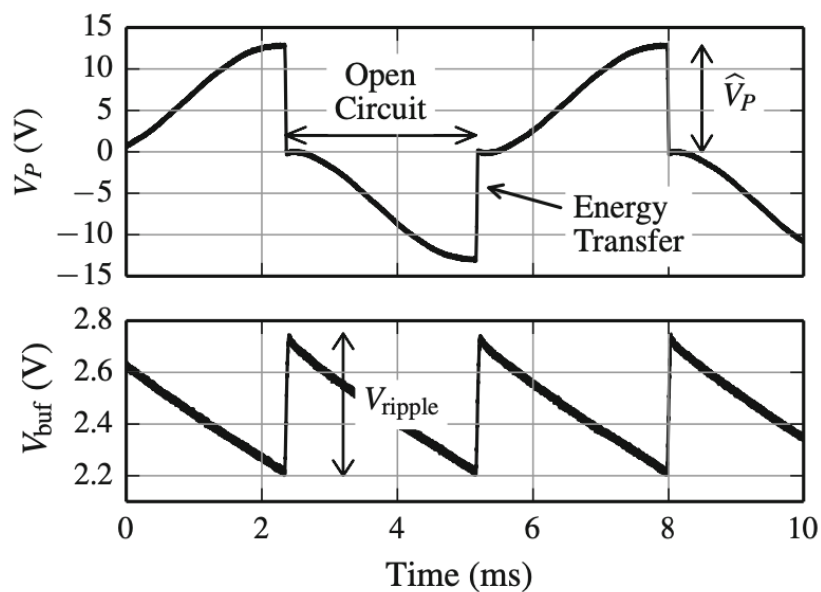
最终实现的电路是基于改进型的 SECE 接口电路，如上所示，为实现更复杂的控制逻辑，需要更复杂的开关控制电路，也需要其他部分来保障电路正常运行。

以下为上面所述芯片的实际测量结果

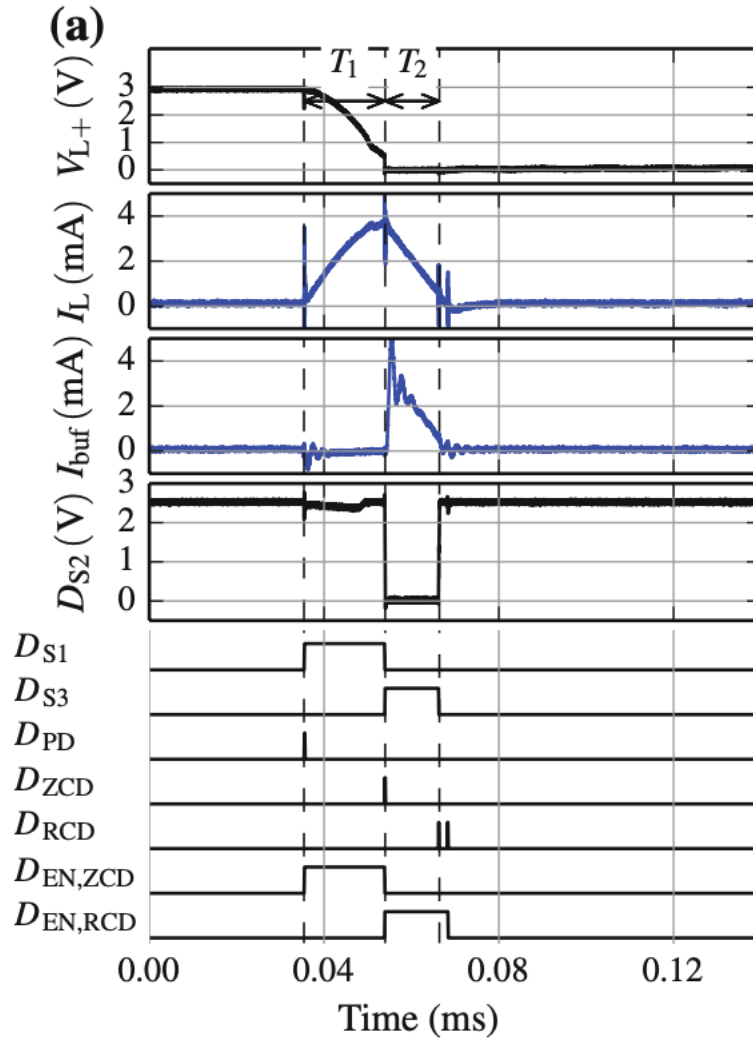


从图中可以看出，和标准接口电路比较，PSCE 芯片不仅能够提供更高的输出功率，而且在缓冲电容器变化时，能够在一个范围内提供稳定的电压，显著降低了电路内的传导损耗。同时通过改变压电元件的振动频率，证明该电路可以应对宽范围的输入频率。

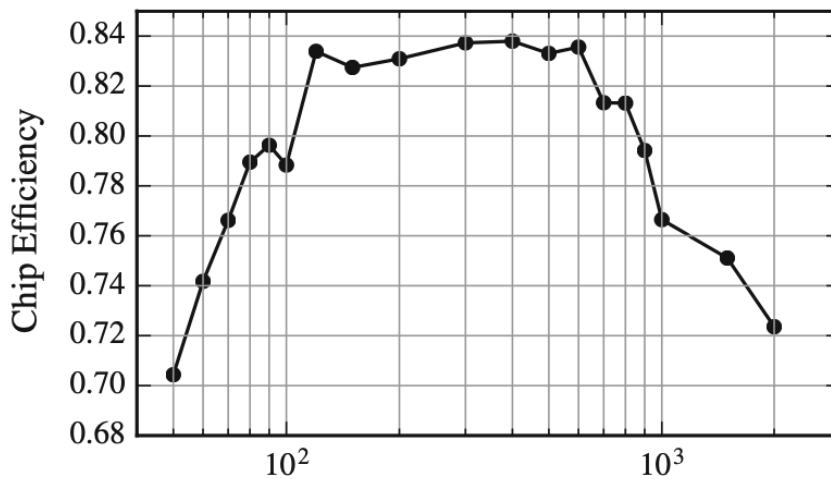
对于电路的瞬态特性，看下图可知，和理论设计比较相符。（设定 $C_{buf} = 1\mu\text{F}$ $R_L = 14\text{k}\Omega$ ）



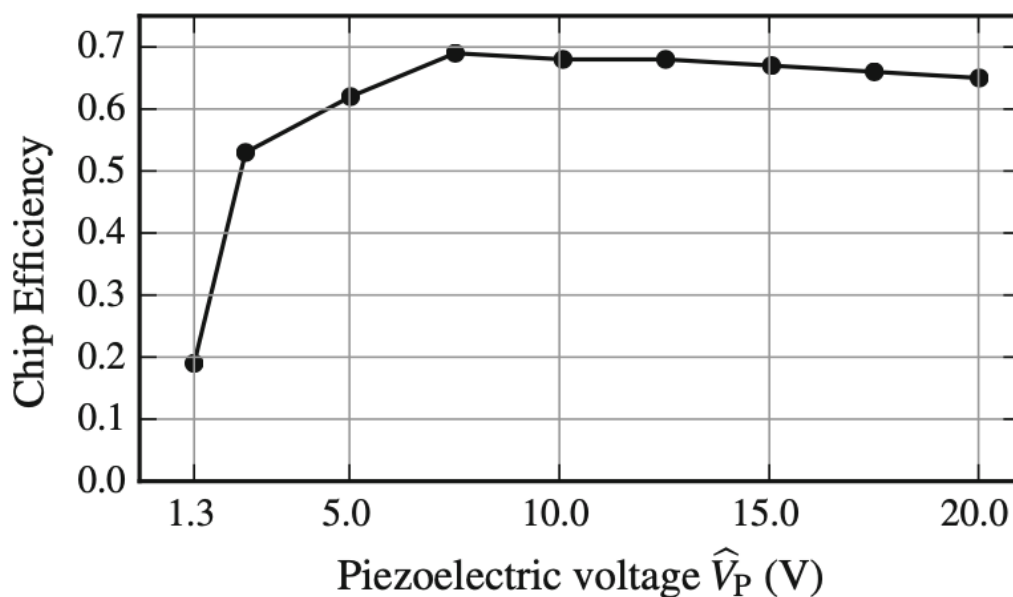
观察下图可知，开关起到了正确的控制作用，压电元件两端电压最大时，S1 闭合，能量转移到电感器上，当压电元件两端电压降至 0 时，S1 断开 S3 闭合，能量从电感器上转移到缓冲电容上。



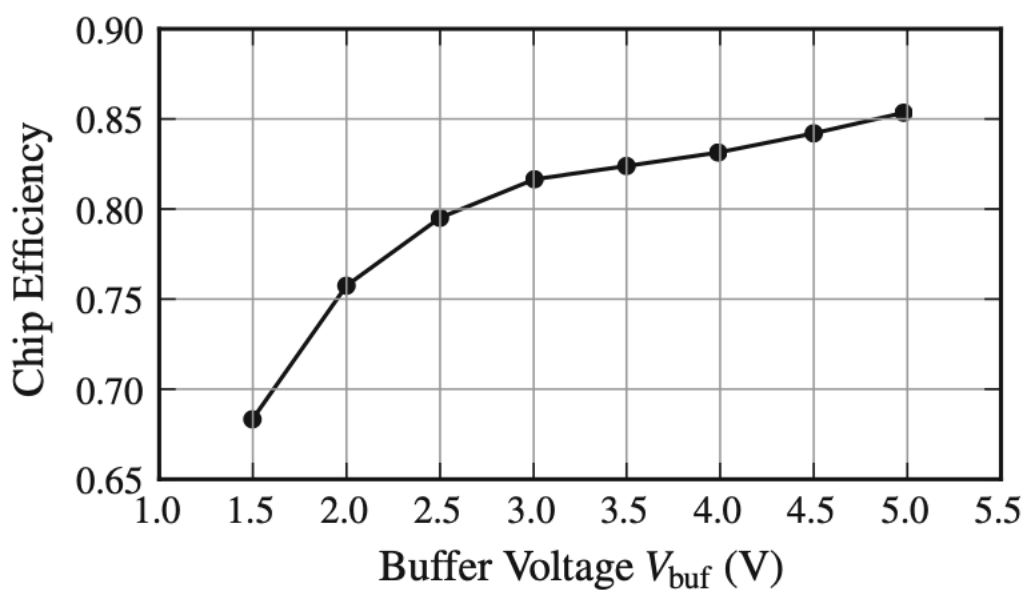
接下来考虑电路能够正常工作的条件。



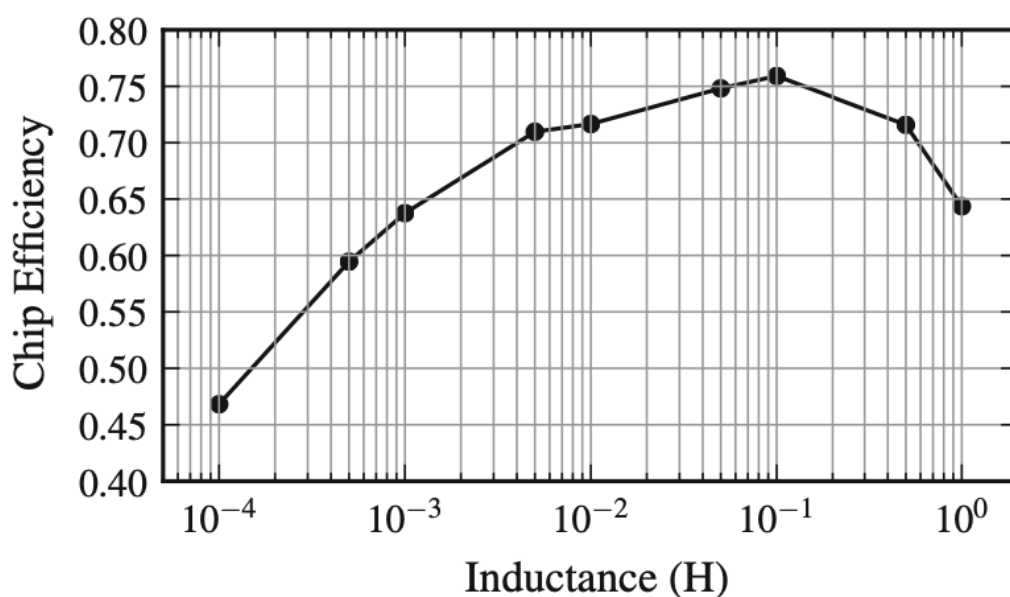
考虑频率特性，电路可正常工作的频率范围在 50-2000Hz，但考虑到功率提取效率，150Hz 是最佳工作频率。



对于外部压电元件的输出电压幅值，在一定范围内，芯片效率随压电元件输出电压提升而提升，最佳工作点为 1.3V。



电路可正常工作的缓冲电压范围，最低电压是旁路的触发电压 1.4V，最高电压则是开关控制电路中 3.3V 晶体管能容忍的最大输入电压 5V。



考虑外部电感，对于低于 $100 \mu\text{H}$ 的电感，压电电压下降过快，导致过零检测器失效。当电感增加到 1H 以上时，压电电压在转移过程后出现振荡，因为振荡抵消不能足够快地去除电感上的残余能量，这些振荡会导致 PSCE 芯片出现故障。

总结

本文中，我们对能量收集芯片的结构进行了阐释，对于介绍了几种能量转换器的原理，比较了几种接口电路的性能。总的来说，需要根据环境中不同的能量来源选取不同的能量转换器，根据负载的情况来决定使用何种结构的负载电路，并通过优化能量收集芯片的结构来提高输出功率。

通过本文，可对于能量收集芯片的架构和发展现状有一定程度的了解。

参考文献

- [1] T. Hehn and Y. Manoli, *CMOS Circuits for Piezoelectric Energy Harvesters*, vol. 38. 2015.
- [2] H. J. Visser, A. C. F. Reniers, and J. A. C. Theeuwes, "Ambient RF energy scavenging: GSM and WLAN power density measurements," *Proc. 38th Eur. Microw. Conf. EuMC 2008*, no. October, pp. 721 - 724, 2008, doi: 10.1109/EUMC.2008.4751554.

- [3] A. W. van Herwaarden and P. M. Sarro, “Sensors based on the seebeck effect,” *Sensors (Peterborough, NH)*, vol. 10, pp. 321 – 346, 1986.
- [4] S. R. Forrest, “The limits to organic photovoltaic cell efficiency,” *MRS Bull.*, vol. 30, no. 1, pp. 28 – 32, 2005, doi: 10.1557/mrs2005.5.
- [5] C. Lucchesi *et al.*, “Near-Field Thermophotovoltaic Conversion with High Electrical Power Density and Cell Efficiency above 14%,” *Nano Lett.*, 2021, doi: 10.1021/acs.nanolett.0c04847.
- [6] R. Vullers, R. Schaijk, H. Visser, J. Penders, and C. Hoof, “Energy harvesting for autonomous wireless sensor networks,” *IEEE Solid-State Circuits Mag.*, vol. 2, no. 2, pp. 29 – 38, 2010, doi: 10.1109/MSSC.2010.936667.
- [7] F. Wikipedia, “Friis transmission equation,” pp. 2 – 4, 2012.
- [8] A. Manbachi and R. S. C. Cobbold, “Development and application of piezoelectric materials for ultrasound generation and detection,” *Ultrasound*, vol. 19, no. 4, pp. 187 – 196, 2011, doi: 10.1258/ult.2011.011027.
- [9] Y. C. Shu, I. C. Lien, and W. J. Wu, “An improved analysis of the SSHI interface in piezoelectric energy harvesting,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 16, no. 6, pp. 2253 – 2264, 2007, doi: 10.1088/0964-1726/16/6/028.
- [10] F. Jean and C. Courtois, “The PZT System,” *Encyclopedia of Materials: Technical Ceramics and Glasses*, vol. 3, pp. 345–357, 2021, doi: 10.1016/B978-0-12-818542-1.00102-8.
- [11] LEFEUVRE, A comparison between several vibration-powered piezoelectric generators for standalone systems[J].*Sensors and Actuators A:Physical*, 2006, 126(2):405–416.
- [12] C. Richard, D. Guyomar, D. Audigier, G. Ching, Semi passive damping using continuous switching of a piezoelectric device, in: *Proceedings of SPIE Smart Structures and Materials Conference*, vol. 3672, 1999, pp. 104 – 113.
- [13] E. Lefeuvre, A. Badel, C. Richard, D. Guyomar, High performance piezoelectric vibration energy reclamation, in: *Proceedings of*

- SPIE Smart Structures and Materials Conference, vol. 5390, 2004, pp. 379 - 387.
- [14] D. Guyomar, A. Badel, E. Lefeuvre, C. Richard, Towards energy harvesting using active materials and conversion improvement by nonlinear processing, IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control 52 (2005) 584 - 595.
- [15] 杨帆, 唐祯安, 徐爱宝, 蔡泓, 基于 P-SSHI 接口电路的高效压电能量收集芯片设计, 《仪表技术与传感器》2016 年第 11 期, 27-30
- [16] 孙凯利, 王海峰, 郭修宇, 崔宜梁, 李 蒙, 同步电感提取技术在压电风能采集装置中的应用, 《青岛大学学报(工程技术版)》Vol. 34 No. 9, 2019
- [17] 孟莹梅, 王宏涛, 张宝强, ESEI 能量回收接口电路的设计与仿真, 《电子元件与材料》Vol. 34 No. 3, 2015