文章编号:1008-1542(2018)01-0009-08　　doi:10.7535/hbkd.2018yx01002

主动式压电俘能电路研究分析

崔宜梁,王海峰,李　蒙,孙凯利,李春雨

(青岛大学机电工程学院,山东青岛　266071)

摘　要:现有的压电俘能器大多是针对某一较窄频率范围内的振动情况而设计,但周围环境的频率范围非常宽泛且随时可能发生变化,导致一般俘能器很难实现能量俘获或俘能效率低,为了解决这一问题,设计了一种新的 T 型压电悬臂梁作为俘能装置。从结构设计和电路设计 2 方面出发,进行了静力学分析、模态分析和谐振分析,得出压电结构装置的固有频率和激振力频率等响应,对新型的主动式俘能电路进行设计,计算电路的功率损耗以及元器件损耗量。通过对主动式俘能电路进行计算仿真验证,以及对主动技术和被动技术进行对比分析,得到主动技术所获得的最大功率是被动技术的 5 倍。由此可知,运用电压控制型主动边界控制方法进行接口电路设计,主动利用每个压电换能周期中触发的电学边界条件,可有效增加输入压电俘能器的机械能,进而增大输出的电能。该研究创新了利用压电材料主动俘能的方式,对压电俘能的发展有积极的促进作用。

关键词:传感器技术;压电效应;固有频率;激振力频率;俘能电路

中图分类号:TM401　　**文献标志码**:A

Analysis of active piezoelectric energy harvester

CUI Yiliang, WANG Haifeng, LI Meng, SUN Kaili, LI Chunyu

(College of Mechanical & Electrical Engineering, Qingdao University, Qingdao, Shandong 266071, China)

Abstract: Most of the existing piezoelectric traps are designed for a narrow frequency range of vibration, but the surrounding environment has a very wide frequency range, and the frequency may also be subject to change, causing the problem of difficult to achieve energy capture or capture inefficiency. In order to solve problem, a new T-type piezoelectric cantilever is proposed as a capture energy structure in the paper. To begin with the aspects of structural design and circuit design, the static analysis, modal analysis and resonance analysis of the structure are carried out and the natural frequency and excitation frequency of the device are analyzed. The design and calculation of the power consumption and the loss of the components of the circuit are analyzed by the simulation and verification of the active capture energy circuit, and the active and passive techniques are compared and analyzed, the simulation of the active capture circuit is verified by analyzing the power consumption of the circuit and the maximum power obtained by the active technology is 5 times of that of the passive technology. And then the voltage-controlled active boundary control method can be used for interface circuit design, taking the initiative to use each piezoelectric transduction cycle triggered by the electrical boundary conditions to effectively increase the input piezoelectric pump energy, and then

收稿日期:2017-03-21;修回日期:2017-07-26;责任编辑:王海云

基金项目:国家自然科学基金(51405255);山东省科技发展计划(政策引导类项目)(2012YD04038);山东省高等学校科技计划项目(J12LN95)

第一作者简介:崔宜梁(1991—),男,山东邹平人,硕士研究生,主要从事智能仪器与测控方面的研究。

通信作者:王海峰副教授。E-mail:marvelysy@126.com

崔宜梁,王海峰,李　蒙,等.主动式压电俘能电路研究分析[J].河北科技大学学报,2018,39(1):9-16.

CUI Yiliang, WANG Haifeng, LI Meng, et al.Analysis of active piezoelectric energy harvester[J].Journal of Hebei University of Science and Technology,2018,39(1):9-16.

increase output power. The way of utilizing the active trapping of piezoelectric materials is innovated, which has a positive effect on the development of piezoelectric traps.

Keywords: sensor technology; piezoelectric effect; natural frequency; exciting force frequency; energy harvesting circuit

目前,能源短缺问题日益严峻,如何从周围环境中收俘能量受到众多研究者的关注。人类可利用的环境能源有太阳能、热能、振动能等,因受限于自然条件,太阳能与热能供能技术很难广泛应用,但振动在自然环境中时刻发生着,而且能量密度极高。因此,利用振动能收集装置将环境中的振动能收集储存并为低功耗微型器件供能[1-2]有着广泛的发展前景。

根据能量转换原理,俘获机械振动能量的方式被分为电磁式[3-4]、静电式[5-6]、压电式[7]。压电俘能器区别于一般的压电换能装置的实质是:前者是能量的供给者,而后者是一种用来研究非电信号的过渡手段[8]。压电俘能器是依据压电效应将振动能转换成电能,通常采用末端有质量块的悬臂梁的振荡系统来实现。宾夕法尼亚州立大学研制的铙钹型换能器属于典型的夹心式压电俘能器,该装置主要由上下2个钢铁材质的帽子以及被夹在中间的压电片构成,而且压电陶瓷片的上下两端都与钢帽粘结,这样可以提高自身的机械强度和可靠性能[9]。美国科学家设计出了一款用于低频振动环境下的压电俘能器[10],该俘能器的弹性梁采用了ABS塑料,有2片锆钛酸铅压电陶瓷材料(PZT)固定在装置的一端,在ABS弹性梁的末端,将一个质量块放在压电悬臂梁的中间,该装置与传统的压电悬臂梁装置对比,其俘获的电能明显更强,可以实现在低频环境中的能量回收。LEFEUVRE等[11]分别设计了一级、二级和三级接口电路,这是专门针对压电俘能器的电源管理电路。香港理工大学的WANG等[12]提出鼓型换能器,该装置主要是回收振动能量,并且还提出换能器的固有频率随着预紧力的逐渐增加而减小。SCRUGGS[13]基于H2最优控制理论,设计了一个反馈控制器,用于最大化压电双晶悬臂梁的输出电能。试验结果初步验证了他的设计思想,但是在他的试验中用于执行最优控制理论的智能控制器和外围门电路的能量是由外部独立电源供给的,它们的功耗显然超出了压电俘能器的最大能量收集水平。MARZENCKI等[14]采用微制造技术将电源管理电路中的所有元器件都封装在一个ASIC芯片中,集成度的提高使得能耗进一步降低,从而使得俘能器具备了收集微弱振动能的能力。基于前人所研究的成果,本文利用锆钛酸铅压电陶瓷材料(PZT)的正压电效应,设计了一种可以在振动频率较低的周围环境中将机械能转化成电能的压电发电装置,其中为使所设计的T型压电梁结构的固有频率与周围环境的振动频率近似,设计了主动式俘能电路,在发生共振时从周围环境中俘获最大的能量转换成电能,获得了较高的发电效率。

1 理论基础

1.1 压电理论基础

某些电介质在一定方向上受到外力作用而变形时,其内部会产生极化现象,同时在它的上下表面出现正负相反的电荷。当外力去掉后,它又会恢复到不带电的状态,这种现象称为正压电效应。相反,当在电介质的极化方向上施加电场,这些电介质也会发生变形,电场去掉后,电介质的变形随之消失,这种现象称为逆压电效应[15]。目前,应用较广泛的压电材料有锆钛酸铅压电陶瓷(PZT)和聚偏氟乙烯(PVDF)。

压电效应由耦合方程描述:

$$S = s^E T + d^t E, \tag{1}$$

$$D = dT + \varepsilon^T E。 \tag{2}$$

压电俘能器的研究者们大多数采用悬臂梁式压电振子,而且悬臂梁式压电俘能器又分为单、双晶压电俘能器[16];单晶式压电俘能结构是压电片贴在金属弹性片的一侧,悬臂梁振动的时候,会发生变形,正电荷会出现在压电片上,金属弹性片上会产生负电荷;同样,双晶式压电俘能器是由2个压电片和1个金属弹性片组成,压电片分别贴在金属弹性层的两侧,而且双晶式的连接方式有串联和并联之分,串联连接的电压加倍,电流大小不变;并联连接的电压大小不变,电流加倍。需要注意的是串联和并联只能改变电压和电流的比值,并不能改变它们的输出功率。

1.2 俘获能量的数学表达式

压电俘能装置能够实现将环境中的机械能转换成电能的诸多能量收集技术的目标。俘能电路是压电装

置与电气负载之间的接口，在压电俘能系统中起着非常重要的作用。所俘获的能量由压电材料产生的电量来体现。为了简化分析，机械激励的幅值和频率设定为常数，即 $f(t)=-F\sin(\omega t)$。那么压电材料一侧的平均功率就变为

$$P_{\text{conv}}=\frac{1}{T}\int_{t_0}^{T+t_0}v(t)i(t)\mathrm{d}t, \tag{3}$$

又因为电流 $I=\dot{Q}=d_{31}\frac{l}{h}\dot{F}+C\dot{V}$。

$$P_{\text{conv}}=\frac{1}{T}\int_{t_0}^{T+t_0}\left(d_{31}\frac{l}{h}v(t)\dot{f}(t)+Cv(t)\dot{v}(t)\right)\mathrm{d}t, \tag{4}$$

式中 $v(t)\dot{v}(t)$值为 0，因为两者相位差为 90°，所以式(4)可转变为

$$P_{\text{conv}}=d_{31}\frac{l}{h}\frac{1}{T}\int_{t_0}^{T+t_0}v(t)\dot{f}(t)\mathrm{d}t。 \tag{5}$$

因此，由压电元件转换成电能的平均功率取决于压电电压和施加力的一阶导数的振幅和相位差。

2　结构设计及仿真分析

压电俘能器的有限元分析是一种结构与电场的耦合分析，对结构的稳态、模态、预应力模态、谐波、预应力谐波以及瞬态进行分析[16]，利用 ANSYS 对模型进行构建，具体参数如表 1 所示。所构建的模型由固定一端的弹性梁、质量块及压电材料组成；基板弹性梁采用金属弹性片(本文选用青铜)；在青铜的上下表面贴压电材料(本文选择 PZT-4)；梁的右端放置质量块(本文选择镍做质料)，模型结构如图 1 所示。

表 1　所构建模型的基本尺寸及材料参数

Tab.1　Basic dimensions and material parameters of the model are constructed

参数	模型		
	PZT-4	金属基板-青铜	质量块-镍
密度/(kg·m^{-3})	7 500	8 300	8 900
杨氏模量/GPa	83	110	180
泊松比	0.3	0.324	0.3
长/mm	15	70	10
宽/mm	30	30	100
高/mm	0.1	0.12	5

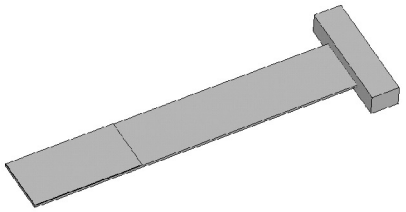


图 1　T 型压电悬臂梁模型

Fig.1　T-type piezoelectric cantilever beam model

1)静力学分析　压电俘能装置的静力学分析主要用于分析 T 型梁的压电振子结构受外部载荷作用而引起的应力、应变、位移等变化，忽略了阻尼的影响和载荷随时间的变化。固定端所受的应力较小，接近 0；自由端处较大，并且由固定端向自由端逐渐增大。

2)模态分析　压电俘能装置的模态分析用于确定压电俘能结构的各阶固有频率以及对应振型，也可以研究俘能装置的各个参数对固有频率的影响[17]。固有频率反映了压电俘能振子处于平衡位置附近做细小振动时，振子所应有的物理性质；振型是俘能振子振动的空间形式。它们与俘能装置材料的密度以及刚度有关。表 2 展示出六阶固有频率。

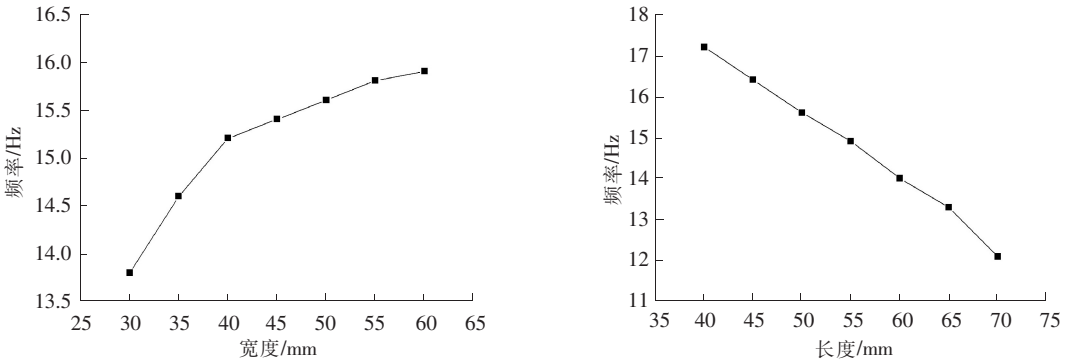
表 2　固有频率

Tab.2　Natural frequency

振型	一阶	二阶	三阶	四阶	五阶	六阶
频率/Hz	15.894 7	34.864 7	98.279 6	301.476 2	336.397 5	649.785 3

通过模态分析得出固有频率与结构长度和宽度的关系如图 2 所示。

3)谐响应分析　压电俘能装置的谐响应分析是用于确定一个结构在已知频率的正弦(简谐)载荷作用下的结构响应的技术。为了提高压电元件的输出电压，提高俘获周围环境能量的效率，对电压响应输出特性



a) 固有频率与结构宽度的关系　　b) 固有频率与结构长度的关系

图2 固有频率与结构长度和宽度的关系

Fig.2 Relationship between the natural frequency and the length and width of the structure

进行谐响应分析，计算出一定频率范围下的压电响应，得到电压与频率对应关系曲线（见图3）。从该曲线上可以得到电压峰值响应点，找出其所对应的频率。

从图3中可以看出T型梁压电振子的电压与激振力频率的关系。当外界激振力的频率等于T型梁压电振子的固有频率时，应变最大，此时压电装置产生的电压值最大，随着频率的增加，电压值增加，当频率达到一阶固有频率16 Hz时电压有峰值，随后电压随频率的增大而减小。

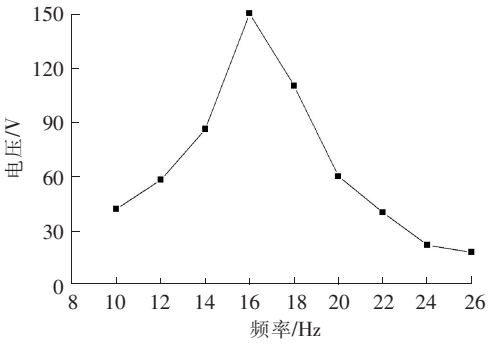


图3 电压与激振力频率的关系

Fig.3 Relationship of voltage and excitation force frequency

3 俘能技术电路设计

3.1 主动技术与被动技术

被动技术电路中的能量是单向流动的，典型电路有二极管整流电路和电荷提取电路，并且其压电装置与典型的电源不同，其内部阻抗是电容性的，由机械振动的不同幅度和频率驱动，此外，负载阻抗可能变化显著，例如电池的阻抗随容量的变化而变化。所以阻抗不匹配会导致大量功率被损耗掉。由于压电效应本身包含正压电效应和逆压电效应2个相互耦合的过程，所以如果能在接口电路设计时，主动利用每个压电换能周期中触发的电学边界条件（如电压幅值和相位），那么在最优的电学边界条件下，一定能够有效地增加输入压电俘能器的机械能，从而进一步增加输出的电能。

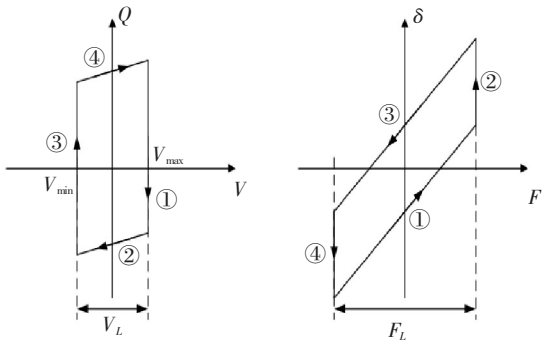


图4 一种电压控制主动式俘能器

Fig.4 A voltage-controlled active capture device

与被动技术不同的是，主动技术需要更灵活的功率接口电路来连接压电设备与负载，也就是说，接口电路能够在4个象限运行。目前，图4给出了一种电压控制的主动式俘能技术。在过程①和过程③中，接口电路两端的电压保持不变，而作用力在最大值和最小值间变化。在过程④和过程②中，作用力保持最小和最大值不变，而接口电路完成充电和放电过程。在一个周期内转换得到的能量可以通过计算图4中的平行四边形电域或机械域的面积得到。主动式俘能技术要求与压电元件连接的电源管理电路必须具有能量双向流动的能力，而且一个周期内转换的能量由该周期内转换的平均功率与激励频率的乘积表示。

3.2 主动技术电路设计

被动技术能量转换效率较低且俘能电路结构简单；主动式俘能技术的转换效率较高，但是其电路较复

杂。本文就此设计了一种新型主动式俘能电路系统，并提出独立电路是由一个单一的或一系列可充电电池供电，无需任何外部电源供应。主动技术核心电路由双向全桥逆变器作为压电装置和高压总线之间的接口电路，总线电容器作为临时储能元件，并且一个单向 DC-DC 变换器作为电压调节器。假设母线电容零电压的初始条件是将所有的 MOSFET 全桥逆变器关闭。在这种情况下，总线电容器在 MOSFET 的体二极管作用下充电，作为全桥整流器。当母线电容电压达到一定水平时，全桥整流器和回扫转换器结合，来执行主动俘能。如图 5 所示，当力/应力达到最大值时，开关 Q_1 闭合、开关 Q_4 以恒定占空比调制，而开关 Q_2 和 Q_3 导通；当力/应力达到其最小值时，开关 Q_2 闭合、开关 Q_3 以恒定占空比调制，而开关 Q_1 和 Q_4 导通。

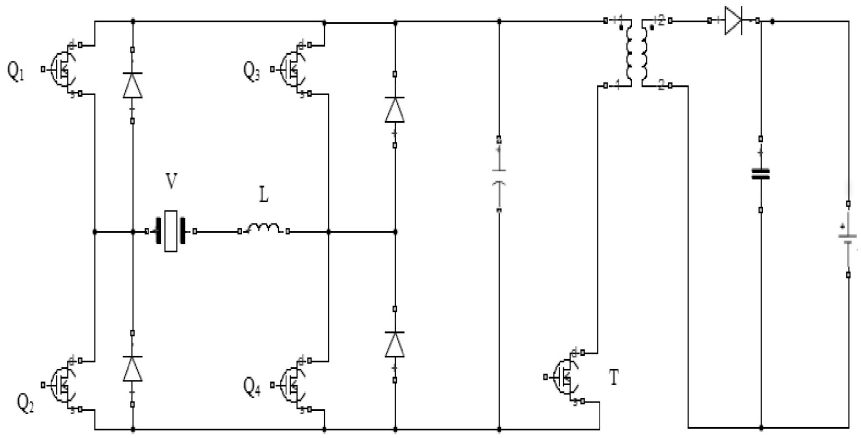


图 5　主动技术核心电路系统

Fig.5　Active technology core circuit system

3.3　耗能估计

1）MOSFET 驱动器损耗

为了切换半导体器件的开关状态，需要插入或者移除控制电荷。式(6)为计算控制 MOSFET 所需要的功率：

$$P_{\text{gate}} = f_{\text{s}} V_{\text{g}} Q_{\text{g}}, \tag{6}$$

式中：f_{s} 为开关频率；V_{g} 为栅极驱动电压；Q_{g} 为 MOSFET 的栅极电荷。

开关损耗限制了实际转换器的开关频率的上限。在开关转换过程中，晶体管的电压和电流是同时增大。晶体管具有较高的瞬时功率损耗。式(7)为计算 MOSFET 的开关功率损耗：

$$P_{\text{sw}} = \frac{1}{2} f_{\text{s}} V_{\text{DS}} I_{\text{D}} (t_{\text{r}} + t_{\text{f}}), \tag{7}$$

式中：V_{DS} 为设备处于关闭状态下的漏源电压；I_{D} 为 MOSFET 处于导通状态下流经的电流；t_{r}，t_{f} 为电压上升和下降的时间。

传导损耗可以分为 2 个部分，一个是开关的导通状态下的电阻散热，另一个是由于二极管正向压降的电阻散热。

式(8)为计算 MOSFET 导通状态下的传导损耗：

$$P_{\text{com}} = f_{\text{s}} I_{\text{D}}^2 R_{\text{on}} t_{\text{on}}。 \tag{8}$$

式(9)是计算由于二极管正向压降的功率损耗：

$$P_{\text{com}} = f_{\text{s}} V_{\text{DS}} I_{\text{D}} t_{\text{on}}, \tag{9}$$

式中：R_{on} 为导通状态下的源极与漏极之间的总电阻；t_{on} 为一个周期的导通时间。

虽然很难精确地计算出各个电路的功率损耗，但可以作为设计电路和选择元器件的参考依据。为了减少功率损耗，开关频率 f_{s} 要尽量小，正好增加了全桥逆变器的核心效率，但也需要考虑压电装置的固有频率，使开关频率 f_{s} 远高于固有频率。全桥逆变器的 MOSFET 是影响主动俘能技术俘能的核心元件，除了满足电压和电流的额定值，其他参数也非常重要，比如栅极电荷 Q_{g}、电压上升和下降的时间 t_{r}，t_{f}。从式(7)中可以看出，开通或者关闭 MOSFET 所需的能量，与栅极驱动电压 V_{g} 和 MOSFET 的栅极电荷 Q_{g} 成正

比。因此,需要选择一个具有较低阈值的电压和较小导通栅极电荷的 MOSFET。此外,拥有较低栅极电荷的 MOSFET 设计栅极驱动电路更简单一些。

2)支撑电路的功率消耗

栅极驱动电路的所有组件是被动的。除控制信号之外,控制电路还负责栅极驱动电路的供能。式(10)为计算驱动高侧 MOSFET 所需的功率:

$$P_{\mathrm{h}}=\frac{2}{\eta_{\mathrm{T}}}\left(f_{\mathrm{s}}Q_{\mathrm{g}}V_{\mathrm{g}}+\frac{V_{\mathrm{g}}^{2}}{2R_{1}}\right), \tag{10}$$

式中 η_{T} 为脉冲变压器的效率。

假设开关频率为 5 kHz,通用电源电压为 5 V,MOSFET 的型号为 IXTY01N100,总栅极电容为 6.9 nF,独立电路所需功率由式(11)得出:

$$P_{\mathrm{Cg}}=4f_{\mathrm{s}}Q_{\mathrm{g}}V_{\mathrm{g}}=0.69\ \mathrm{mW}。 \tag{11}$$

栅极驱动电路的功率消耗由两部分组成,分别是并联电容的功率消耗和并联电阻的功率消耗,假设脉冲变压器的效率是 85%。具体计算见式(12):

$$P_{\mathrm{gate}}=\frac{1}{\eta}\left(nCV_{\mathrm{g}}^{2}+\frac{V_{\mathrm{g}}^{2}}{R}\right)=0.353\ \mathrm{mW}。 \tag{12}$$

式(13)为计算逻辑芯片的功耗:

$$P_{\mathrm{logic}}=n\times V_{cc}\times I_{cc}=0.05\ \mathrm{mW}。 \tag{13}$$

占空比发生器的耗电量 $P_{\mathrm{genarator}}=0.2$ mW,式(14)为计算独立电路总消耗功率 P_{total}:

$$P_{\mathrm{total}}=P_{\mathrm{Cg}}+P_{\mathrm{gate}}+P_{\mathrm{logic}}+P_{\mathrm{generator}}=0.69+0.353+0.05+0.2=1.293\ \mathrm{mW}。 \tag{14}$$

3.4 结果验证

主动控制器的电路板包括浮点数字信号处理器(DSP)、取样测试的模数转换器(ADC)、控制转换器信号输出的脉冲宽度调制器(PWM),如图 6 所示。首先,模拟/数字转换器测量压电装置的力或电流。力信号复杂多变,如果控制器直接应用此信号,施加的电压与机械力很难同步。增加一个数字或模拟滤波器可以缓解信噪比。同时,过滤器通常会产生相移。为了解决这个问题,在 Simulink 仿真中,引入一个锁相环电路。该锁相环产生一个理想的正弦信号的相位(与所施加的力有关),且被用于控制器。前面所述的主动式俘能器的相位要求是在所施加的力的峰值时充电或放电。

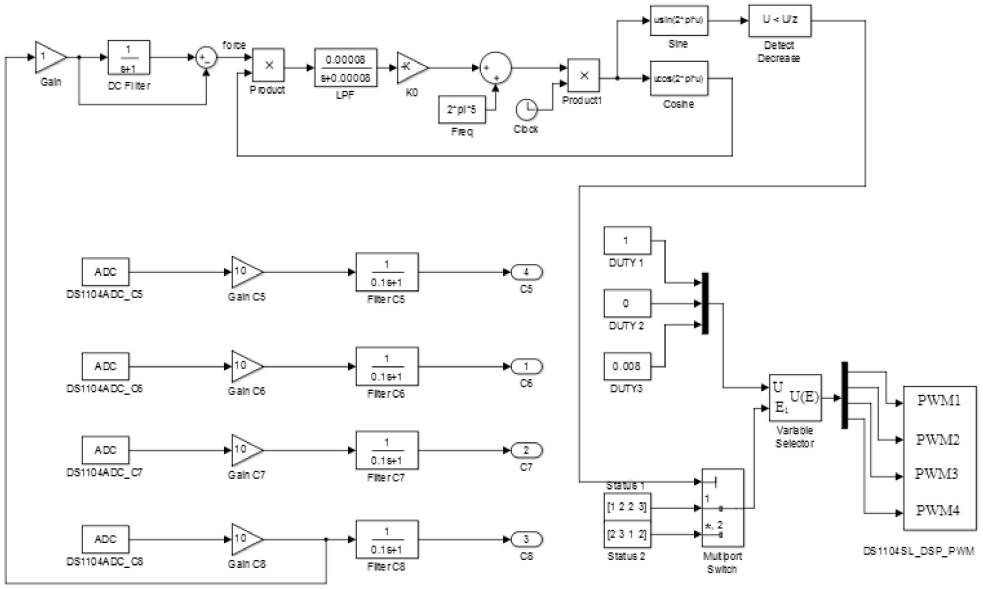


图 6 控制器的组成

Fig.6 Composition of the controller

逆变器的开关频率改为 5 kHz,占空比为 1%时,电压转换应用到低侧 MOSFET。平均收获功率,由减去的功率决定,减去的功率是由直流电压源所提供的直流负载电阻所消耗的功率。需要注意的是,在计算过

程中，计算所获得的功率，不包括栅极驱动和控制系统的功率。从栅极驱动器电路流向逆变器的能量仅用于给 MOSFET 的栅极电容充电，所以不会被添加到俘获的能量中。图 7 显示了这个俘获的功率结果，即有效机械应变为 0.81％情况下的一个直流母线电压与功率的函数。正如理论预测，最佳的母线电压能最大限度地提高俘获的能量。

对主动式俘能技术的性能与有效机械应变作函数研究，如图 8 所示，它与被动技术的最优输出电压下的二极管整流电路所产生的能量相比较，并将二极管整流电路转换为 DC-DC 变换器所需输出电压（1～2 V）所产生的能量与之相比较。对于主动技术来说，手动调整总线电压到最佳值。在图 8 中可以看出，主动技术所获得的最大功率是被动技术的 5 倍。

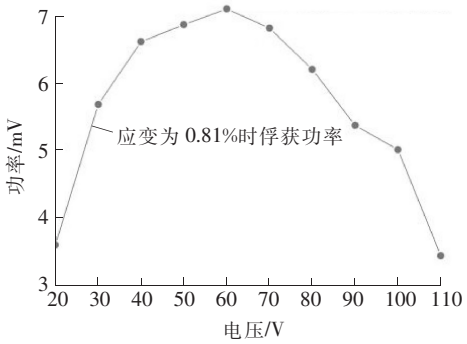


图 7　俘获的功率与电压图

Fig.7　Captured power and voltage plot

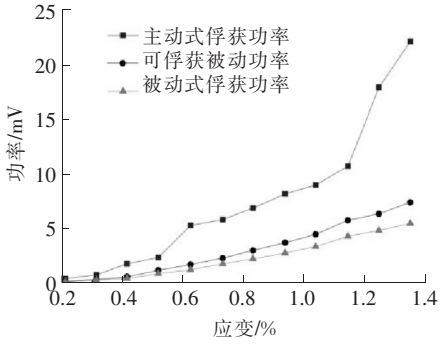


图 8　有效机械应变与功率图

Fig.8　Effective mechanical strain and power diagram

独立电路的总功耗由与电源串联的电流检测电阻（$R_{\text{sensing}}=33\ \Omega$）测出。该电阻上的直流压降是 $V=9.47$ mV，所以式（15）为功耗计算公式：

$$P_{\text{oval}}=\frac{V_{\text{drop}}}{R_{\text{sensing}}}\times V_{\text{supply}}=\frac{9.47}{33}\times 5=1.43\ \text{mW}。\tag{15}$$

由式（15）得到的独立电路功耗的实验结果非常接近式（14）的值 1.293 mW。

4　结　语

本文将锆钛酸铅压电陶瓷片（PZT）作为机电转换材料，利用理论计算和有限元分析方法对压电俘能设备进行结构设计和仿真。关键技术主要体现在压电俘能结构与接口电路 2 个方面：

1）压电俘能结构的固有频率的范围广，最大程度提高了俘获电能效率；接口电路中新加了控制器，使俘获的电能最大化存储；

2）该过程有功率损耗，需减小该损耗。

对压电俘能器的结构进一步优化，可以设想更复杂的结构来提高频率带宽和输出电压，比如分别尝试采用鼓型结构或者桥式结构。主动技术的电源管理电路的功率损耗需进一步降低，提高电能的转化效率。

到目前为止，科研工作者们仍在不断探索应用新型的压电材料，改良压电组件的结构、电源管理电路和储能电路的设计，其目的只有一个，即在现有的技术水平下，实现从周围环境的振动中完成能量收集的最大化。然而在目前的研究中普遍存在以下 2 个问题：

1）压电俘能器的能量转换效率较低，特别是在低频率的振动环境中；

2）当环境的振动频率发生大幅度变化时，压电俘能器的能量转换效率会急剧降低。运用电压控制型主动边界控制方法进行接口电路设计，主动利用每个压电换能周期中触发的电学边界条件（如电压幅值和相位），以有效地增加输入压电俘能器的机械能，进而增大输出的电能。

参考文献/References：

[1]　王成军，韩董董，陈蕾，等.振动技术在金属材料铸造成形中的应用与发展[J].河北科技大学学报，2014，35(3)：229-232.
WANG Chengjun，HAN Dongdong，CHEN Lei，et al. Application and development of vibration technology in metal casting molding[J].

Journal of Hebei University of Science and Technology, 2014,35(3):229-232.

[2] 贺学锋,温志渝,温中泉,等.振动式压电发电机的理论模型与实验[J].纳米技术与精密工程,2007,5(4):307-310.
HE Xuefeng, WEN Zhiyu, WEN Zhongquan, et al. Mathematical model and experiment of vibration-based piezoelectric generator [J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2007,5(4):307-310.

[3] WILLIAMS C B, YATE R B. Analysis of a Micro-electric generator for microsystems[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 1996, 52(1): 8-11.

[4] ROME K, MATTERN F. The design space of wireless sensor networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2004, 11(6): 54-61.

[5] STANTON S R, SEDAN H A. A review of power harvesting using piezoelectric materials[J]. Smart Material and Structure, 2007, 16(3): 1-21.

[6] ROUNDY S, LELAND E S, BAKER J, et al. Improving power output for Vibration-Based energy scavengers[J]. IEEE Pervasive Computing, 2005, 4(1): 28-36.

[7] MENINGER S, MUR-MIRANDA J O, AMIRTHARAJAH R, et al. Vibration-to-electric energy conversion[J]. Very Large Scale Integration Systems IEEE Transactions on, 2001, 9(1): 64-76.

[8] 方科, 李欣欣, 杨志刚,等. 压电式能量获取装置的研究现状[J]. 传感器与微系统,2006, 25(10): 7-15.
FANG Ke, LI Xinxin, YANG Zhigang, et al. Research state on piezoelectric energy harvesting advice[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2006,25(10):7-15.

[9] HYEOUNG D, WOO K, UCHINO K, et al. Piezoelectric energy harvesting under high prestressed cyclic vibrations [J]. Journal of Electroceramies, 2005, 15(1): 27-34.

[10] GU Lei. Low-frequency piezoelectric energy harvesting prototype suitable for the MEMS implementation[J]. Microelectronics Journal, 2011, 42(2): 277-282.

[11] LEFEUVRE E, SEBALD G, GUYOMAR D, et al. Materials structures and power interfaces for efficient piezoelectric energy harvesting [J]. Journal of Electroceramics, 2009, 22(1/2/3): 171-179.

[12] WANG S, LAM K H, SUN C L, et al. Energy harvesting with piezoelectric drum transducer[J]. Applied Physics Letters, 2007, 90(11):796-799.

[13] SCRUGGS J T. An optimal stochastic control theory for distributed energy harvesting networks[J]. Journal of Sound and Vibration, 2009, 320(4): 707-725.

[14] MARZENCKI M, AMMAR Y, BASROUR S. Integrated power harvesting system including a MEMS generator and a power management circuit[J]. Sensors and Actuators: A Physical, 2008, 145/146(1): 363-370.

[15] 边义祥,杨成华.基于压电材料的振动能量回收技术现状综述[J].压电与声光, 2011, 33(4): 612-622.
BIAN Yixiang, YANG Chenghua. A review of current research for energy harvesting based on vibration of piezoelectric materials [J]. Piezoelectrics and Acoustooptics, 2011, 33(4): 612-622.

[16] 王晓宇. 压电悬臂梁发电装置的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
WANG Xiaoyu. The Research of Piezoelectric Cantilever Power Generator[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University,2009.

[17] 刘新勇, 崔洪斌, 曹朋贤,等.TQLZ 自衡振动筛的静力与模态分析[J]. 河北工业科技,2014,31(2):173-176.
LIU Xinyong, CUI Hongbin, CAO Pengxian, et al. Static and model analysis of TQLZ self-balance vibrating screen[J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology,2014,31(2):173-176.