DOI:10.19789/j.1004-9398.2022.03.004
文献引用:桑英军,滕藤,曹阳,等.电磁与压电复合式振动能量收集系统研究[J].首都师范大学学报(自然科学版),2022,43(3):17-23+29.
SANG Y J,TENG T,CAO Y,et al. Research on electromagnetic and piezoelectric hybrid vibration energy harvesting system[J]. Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition),2022,43(3):17-23+29.

电磁与压电复合式振动能量收集系统研究*

桑英军[1**],滕 藤[1],曹 阳[1],范媛媛[2],盛政霖[1],黄静雯[1],董 昭[2],尹明宇[2]
(1.淮阴工学院自动化学院,江苏 淮安 223003;2.淮阴工学院数理学院,江苏 淮安 223003)

摘要:微型能量收集技术是物联网领域发展中的一项重要技术,为了解决振动环境中低功耗器件长期稳定供电问题,本文设计了一种基于悬臂梁结构的电磁与压电复合式振动俘能系统.对该系统进行电压输出分析,并设计了电磁与压电复合式能量转换电路,利用电路仿真软件对其进行仿真并制作了实验电路,通过模拟环境振动进行实验,实现了能量收集和电压转换.实验结果表明,电磁与压电复合式振动俘能系统能够输出稳定电压,以发光二极管负载为例验证了转换电路可以实现较长时间稳定供电,复合模式下负载功率较之单一方式有了较大幅度提高.

关键词:电磁;压电;复合式;悬臂梁;俘能系统
中图分类号:TM61

Research on electromagnetic and piezoelectric hybrid vibration energy harvesting system*

SANG Yingjun[1**], TENG Teng[1], CAO Yang[1], FAN Yuanyuan[2], SHENG Zhenglin[1],
HUANG Jingwen[1], DONG Zhao[2], YIN Mingyu[2]
(1. Faculty of Automation, Huaiyin Institute of Technology, Huai'an Jiangsu 223003;
2. Faculty of Mathematics and Physics, Huaiyin Institute of Technology, Huai'an Jiangsu 223003)

Abstract: Micro-energy harvesting technology is an important technology in the development of the Internet of Things. In order to solve the problem of long-term stable power supply of low-power devices in vibration environment, an electromagnetic and piezoelectric composite vibration energy harvesting system based on cantilever beam structure is designed. The voltage output of the system is analyzed, and the electromagnetic and piezoelectric composite energy conversion circuit is designed. The circuit simulation software is used to simulate it and make the experimental circuit. The energy harvesting and voltage conversion are realized through the experiment of simulating environmental vibration. The experimental results show that the electromagnetic and piezoelectric composite vibration energy harvesting system can output stable voltage. Taking the light-emitting diode load as an example, it is verified that the conversion circuit can achieve stable power supply for a long time, and the load power in the composite mode is greatly improved compared with the single mode.

Keywords: electromagnetic; piezoelectric; composite; cantilever beam; energy capture system
CLC: TM61

收稿日期:2021-12-14
* 国家自然科学基金青年基金项目(51307070)
** 通信作者:sangyingj@hyit.edu.cn

0 引 言

随着微机电系统(micro-electro-mechanical system,MEMS)、低耗能传感器和集成电路技术的快速发展,无线传感器网络(wireless sensor networks,WSN)的应用越来越广.WSN因其结构中传感器节点体积微小、廉价、部署简单等优点,被广泛应用于健康检测、环境监测、居家生活以及军事等各种领域[1].目前,市场上大多数无线传感器的节点供电方式是电池供电,而传统化学能电池自身存在能量有限、需定期更换和污染环境等缺陷,难以发挥无线传感器的最大作用[2-4].考虑到微电子器件功耗通常极小,已经有学者利用周围环境中随处可见的振动能量为其供电.这类通过将环境中的振动能转化为电能的装置统称为振动发电装置.基于环境振动的微型发电装置具有体积小、重量轻、使用寿命长、经济环保和可延长微系统的使用寿命等优点.所以,将周围环境中振动能转换为电能的微型俘能装置已经逐渐成为研究的热点之一[5-7].

在国外,Poulin-Vittrant等[8]较早研究了利用人体动能为便携式手提设备提供能源,并分析研究了系统的数学模型;Wacharasindhu和Kwon[9]设计了一种微型发电机,通过压电转换极值和电磁感应原理将手指敲击键盘时产生的机械能转变为电能,实验结果表明,压电部分生成的最大输出能量为40.80 μW,电磁部分产生的最大输出功率为1.15 μW;Challa等[10]利用悬臂梁压电-电磁集成发电原理模型,推导了压电-电磁复合发电并搭建了实验测试平台,测得整体输出能量为332.00 μW,相比于单一压电和电磁方式下输出功率得到了很大提高.在国内,陈婷婷[11]采用功能薄膜,结合电磁转换理论跟压电耦合效应,搭建振动能量俘能测试系统,该研究综合采用压电与电磁发电的优点,将二者结合起来,使其输出电流与电压变大,能量转换效率提高;Li等[12]将压电和电磁模式结合,并结合静电模式设计了一种复合式能量收集装置,并验证了将其应用于波动环境下的可行性.本文提出一种基于悬臂梁结构的电磁与压电复合式振动俘能系统,设计了电磁与压电复合式能量转换电路,对该系统进行电压输出分析.利用电路仿真软件对其进行电路仿真,通过模拟环境振动对系统本体结构和设计电路进行实验验证,实现了能量收集和电压转换,输出稳定电压.设计系统及电路可以实现较长时间发光二极管负载的稳定供电,且复合模式下负载功率较之单一方式有了较大幅度提高.

1 电磁与压电复合式振动俘能系统模型研究

1.1 俘能器结构及工作原理

电磁与压电复合式俘能器结构如图1所示,压电悬臂梁末端固定永磁铁,当悬臂梁受激振动时,永磁铁切割其下方的线圈产生感生电动势.根据已有的研究结论可知,调节永磁铁质量的大小可以显著调整悬臂梁结构谐振频率,使其更加贴近环境振动频率以提高发电效率.当悬臂梁的另一端固定在频率为ω、振幅为A的简谐振源上时,悬臂梁的振动带动永磁铁上下运动.在压电片及磁感线圈处分别接上合适的接口电路进行能量收集,整个系统的输出能量即为电磁与压电发电机能量输出的总和[13-14].

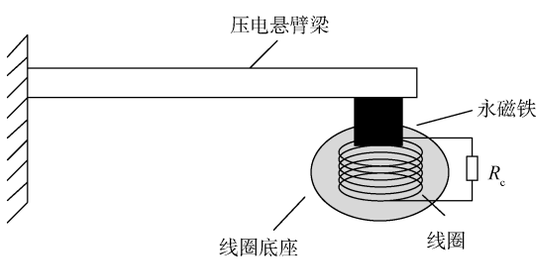


图1 电磁与压电复合式俘能器结构

1.2 俘能系统的功率分析

针对电磁与压电复合式俘能系统结构,引入典型的弹簧-质量-阻尼振动模型如图2所示.m_s和k_s分别表示振动结构的广义质量和广义刚度.模型中阻尼分为机械阻尼(b_m)和电气阻尼(b_e),其中b_m是由于结构及阻力因素引起的能量损失[15],b_e则表示不同的俘能原理所俘获的能量.由于本研究所提出的复合式俘能系统包含2种不同的发电机制.因此,在模型中引入了压电阻尼(b_{ep})和电磁阻尼(b_{em}),则系统总阻尼为$b_t = b_m + b_{ep} + b_{em}$.

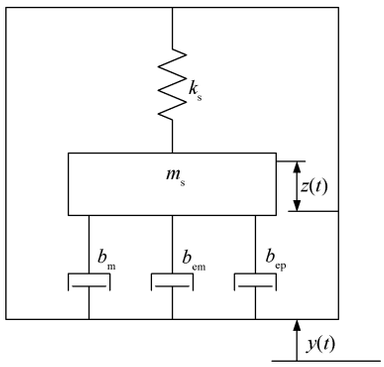
当外界施加正弦激励$y(t) = Y_0\sin\omega t$时,质量块(m_s)相对于整个系统的位移为$z(t)$.系统的运动微分方程为

$$m_s\ddot{z}(t) + b_t\dot{z}(t) + k_s z(t) = -m_s\ddot{y}(t). \quad (1)$$

作用于m_s上的惯性力为$F = -m_s\ddot{y}(t)$,等于作用在整个系统的惯性力.系统的瞬时功率可表示为

$$p(t) = -m_s\ddot{y}(t)[\dot{y}(t) + \dot{z}(t)]. \quad (2)$$

由式(1)和(2)得到系统的能量输出为



注:m_s和k_s分别表示振动结构的广义质量和广义刚度;b_m是由于结构及阻力因素引起的能量损失;b_{em}和b_{ep}分别表示电磁阻尼和压电阻尼;$z(t)$和$y(t)$分别表示系统的位移和正弦激励.

图2　电磁与压电复合式俘能系统的振动模型

$$P_{co}=\frac{m_s\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^3\omega^3\zeta_t Y_0^{\,2}}{\left[1-\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2+\left(2\zeta_t\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2},\tag{3}$$

式中:ω是简谐振源的振动频率,ω_n是系统无阻尼谐振频率,且$\omega_n=\sqrt{k_s/m_s}$,Y_0是位移响应,ζ_t是总阻尼比,$\zeta_t=\zeta_m+\zeta_{ep}+\zeta_{em}$,其中$\zeta_m$为机械阻尼比,$\zeta_m=b_m/2m_s\omega_n$,$\zeta_{ep}$和$\zeta_{em}$为电气阻尼比,$\zeta_{ei}=b_{ei}/2m_s\omega_n$,$i$=m,p.

通过式(3)可得,当系统工作在谐振状态,即$\omega=\omega_n$时,功率输出达到最大,此时能量输出可表示为

$$P_{co}=\frac{m_s\omega_n^{\,3}Y_0^{\,2}}{4\zeta_t^{\,2}}.\tag{4}$$

2　电源管理电路

为了给电子负载提供合适的电压和电流,提高能量转换效率,电源管理电路通常会加入不同类型的直流-直流(direct current- direct current,DC-DC)变换电路,其原理如图3所示.DC-DC变换器的功能一般为输出调压,将能量储存电路输出的不符合要求的电压和电流转换为合适的直流电压和电流.多数选择微功耗的集成电路充当DC-DC变换器,以减少电路损耗[16].



注:AC-DC表示交流-直流;DC-DC表示直流-直流.

图3　DC-DC变换电路原理

因此,如何更高效率地收集发电源产生的电荷,是优化电路功率的重要方向.本文使用电感同步开关采集电路(synchronized switch harvesting on inductor,SSHI)(图4),可以高效地采集压电发电电荷.SSHI包含2种电路形式,分别是串联同步开关电路(series-synchronized switch harvesting on inductor, S-SSHI)和并联同步开关电路(parallel-synchronized switch harvesting on inductor,P-SSHI).

Badel等[17]研究了标准能量收集电路(standard energy harvesting,SEH)和SSHI的最大输出功率为:

$$V_M=\frac{2\alpha U_M}{C_p},\tag{5}$$

$$P_{SEH.max}=\frac{1}{T}C_pV_M^{\,2}=\frac{\alpha^2\omega}{2\pi C_p},\tag{6}$$

$$P_{S\text{-}SSHI.max}=\frac{\alpha^2\omega U_M^{\,2}}{2\pi C_p}\cdot\frac{1+e^{-\frac{\pi}{2Q}}}{1-e^{-\frac{\pi}{2Q}}},\tag{7}$$

$$P_{P\text{-}SSHI.max}=\frac{\alpha^2\omega U_M^{\,2}}{\pi C_p}\cdot\frac{1}{1-e^{-\frac{\pi}{2Q}}},\tag{8}$$

式中:V_M为压电片输出端的电压,C_p为压电电容,α为应力因子,ω为振动角频率,U_M为压电元件振动位移幅值,Q为电路品质因子.通过式(6)和(7)可知,S-SSHI电路的最大输出功率是SEH电路的(1+

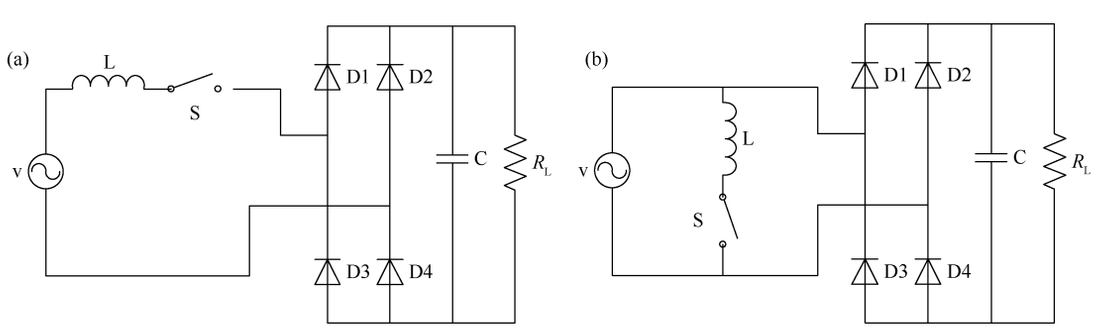


图4　电感同步开关采集电路

(a)串联同步开关(S-SSHI)电路;(b)并联同步开关(P-SSHI)电路

$e^{-\pi/2Q})/(1-e^{-\pi/2Q})$倍,该电路的最大输出功率可以通过选择合适的$Q$而显著提高.选取$Q$=10作为一个合理的品质因子,同等条件下,理论上S-SSHI比SEH电路的最大输出功率增加了12.76倍.

通过式(7)和(8)可知,S-SSHI电路与P-SSHI电路最大输出功率之比为$(1+e^{-\pi/2Q})/2$.当Q很低时,S-SSHI的最大输出功率只有P-SSHI的1/2[18];当Q较高时,2种方式的输出功率相当,选取合理的Q=10,二者的理论比值为0.927.

2.1　超级电容储能电路

市面上用于储能的电容器件有很多,但是普通电容器能量密度太小,电能存储的时间太短;电池的能量密度高,但充电寿命有限,均不适合用作长期工作的微型发电机的能量存储元件[19].超级电容器是介于电容器和电池之间的储能元件,其容量比常规电容大20.00~200.00倍,超过蓄电池数百倍的充放寿命[20].

2.1.1　数值分析

根据电容充电公式

$$U(t)=U_{C0}+(U_C-U_{C0})(1-e^{-\frac{t}{RC}}), \tag{9}$$

式中:U_{C0}为电容初始电压,U_C为电容充满终止电压,$U(t)$是任意时刻(t)电容两端的电压值,R表示电阻.若电源通过充电电路向电容(C)充电,C初值为0,则

$$U(t)=U_e[1-e^{-\frac{t}{RC}}], \tag{10}$$

$$t=RC\ln\left[\frac{U_e}{U_e-U(t)}\right]. \tag{11}$$

通过式(11)可知,完全充满时,$U(t)$接近U_e,时间无穷大.当$t=3RC$时,$U(t)=0.95U_e$;当$t=4RC$时,$U(t)=0.98U_e$;当$t=5RC$时,$U(t)=0.99U_e$.由此可以得出,充电过程需要3~5个RC周期.

2.1.2　仿真分析

通过以集成电路为重点的仿真程序(simulation program with integrated circuit emphasis,SPICE)仿真,超级电容的电路设计如图5所示.当用电压源直接给电容充电时,接入串联等效电阻(equivalent series resistance,ESR)为3 mΩ的1 F电容时,可以近似看作理想充电情况.充电时间t≈13 ms,超级电容电路的仿真结果如图6所示.

3　总体设计

通过分析,基于振动发电机微功率的特点,本文根据DC-DC变换电路原理设计一种基于微型电子集成电路芯片的DC-DC变换电路,通过整流、储能和调压之后给负载供电.由于电磁和压电各自的发电能力和输出电压有很大的区别,通过实验压电可以产生较高的电压,可以达到5.0 V,而电磁产生的电压受到永磁体和线圈匝数限制,只有2.0~3.0 V.因此,本文采用独立收集能量,选取合适的调压芯片,调压后并联输出的电路设计,电路原理的总体设计方案如图7所示.

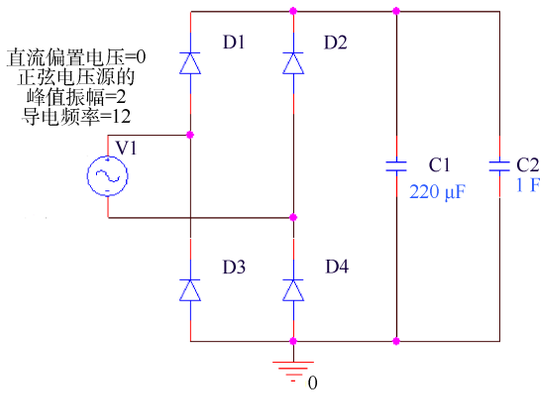


图5　超级电容电路设计

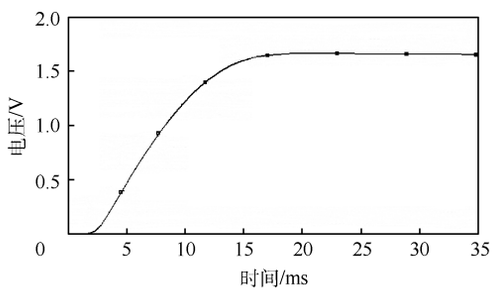


图6　超级电容电路仿真

3.1　压电输出仿真

本文使用的压电悬臂梁在12 Hz时达到谐振状态输出最大电压,其峰值电压最高可达5.1 V.电压转换电路采用HX1002芯片,连接HX1002芯片外围电路,建立压电单元输出的仿真电路如图8(a)所示,通过仿真结果可知,HX1002起到了降压平滑输出的作用,可以得到高质量的3.8 V直流电压,压电单元输出电压波形如图8(b)所示.

3.2　电磁输出仿真

本测试使用的电磁感应线圈在12 Hz时,其峰值输出电压最大.为了更好地解决波形不够平滑的问题,采用SP6644芯片实现电压变换,电磁单元的电压变换电路如图9(a)所示,接入SP6644进行电压调节的同时,根据经验并联一个较小的电容以获得更好的滤波效果.通过对电磁发电单元仿真,可

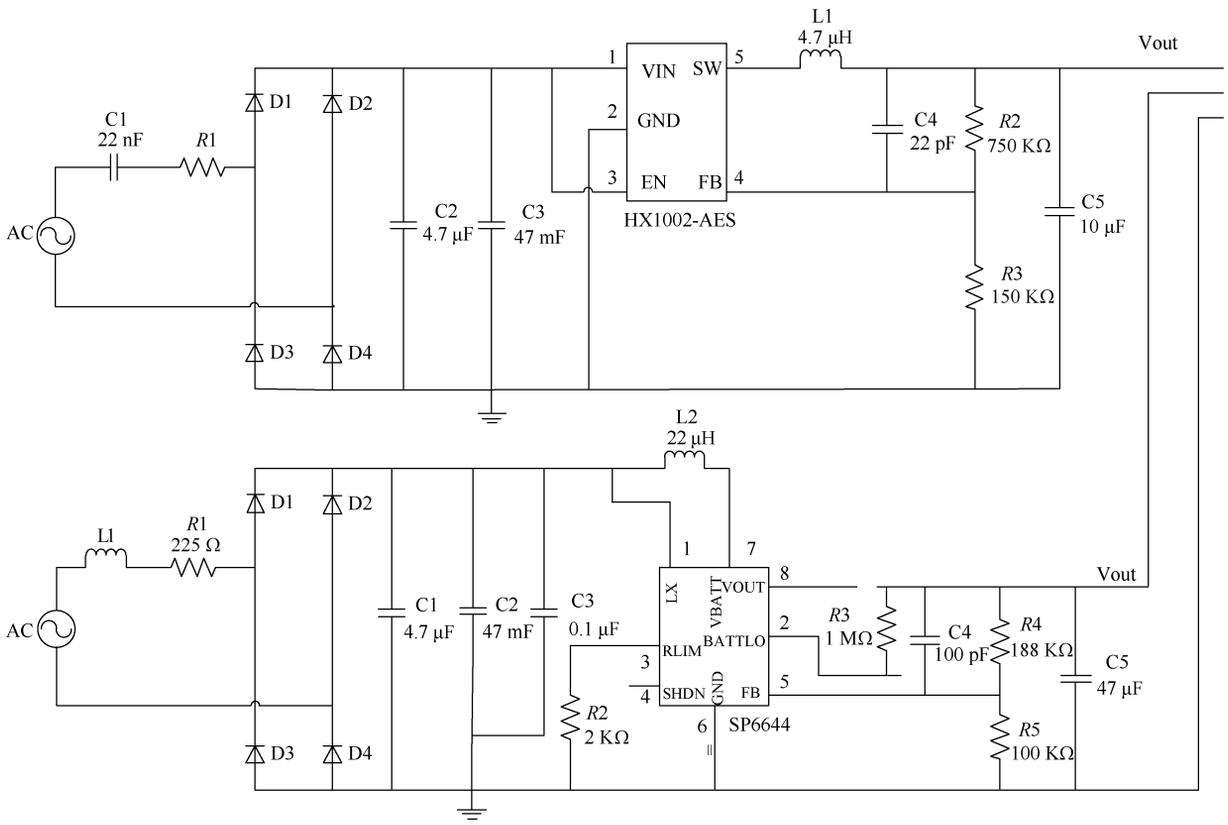


图 7　电路原理的总体设计方案

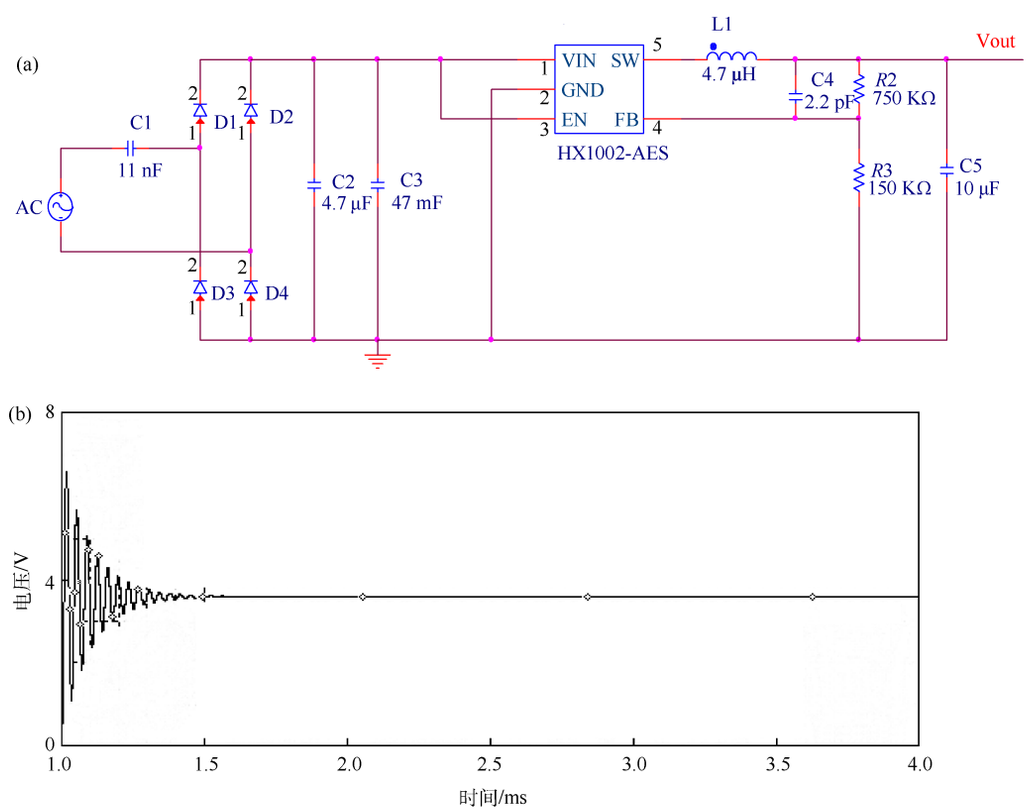


图 8　压电单元的原理及仿真

(a)压电单元输出电路;(b)压电单元输出电压仿真

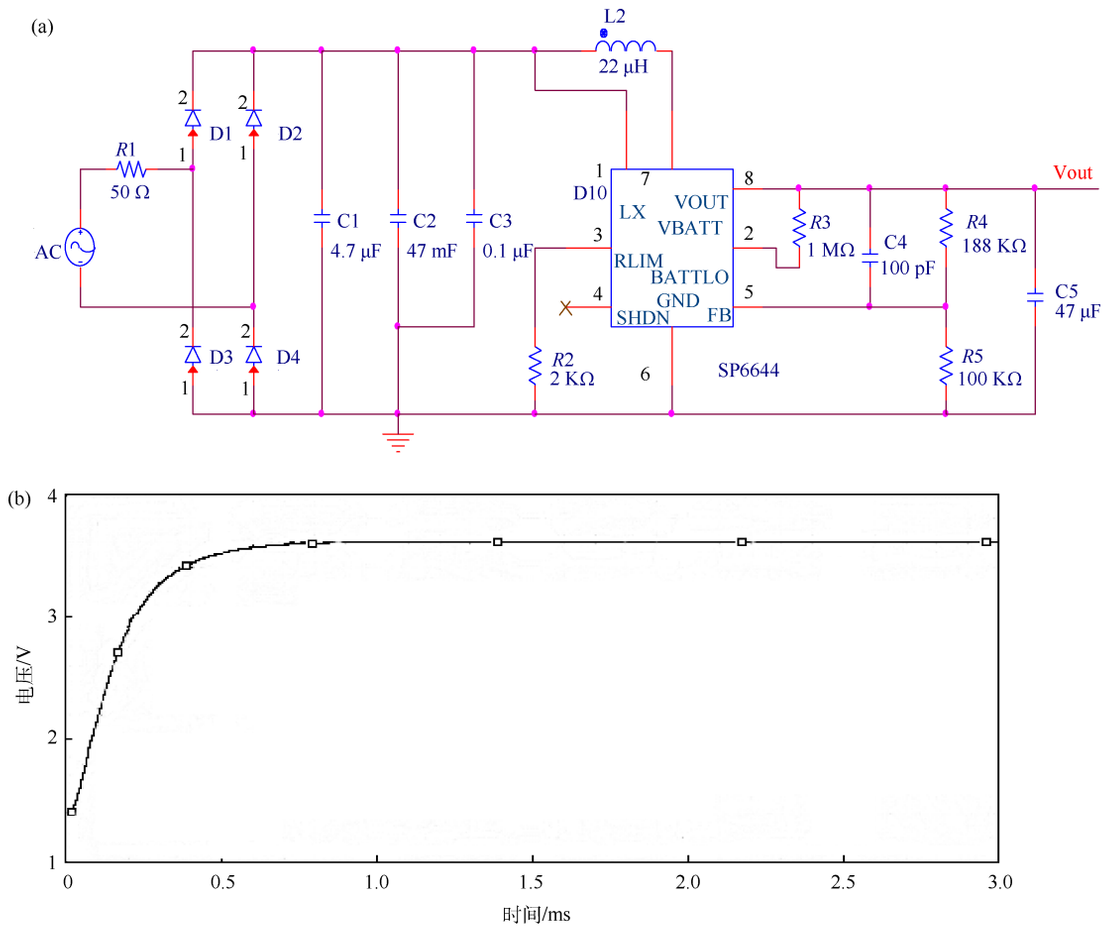


图9　电磁单元的原理及仿真

(a)电磁单元输出电路;(b)电磁单元输出仿真

以通过调整调压电阻阻值得到合适的输出电压,得到3.6 V高质量的直流电压,电磁单元输出波形如图9(b)所示.

3.3　实验测试

实验旨在对整个电磁与压电复合发电结构的发电性能进行分析,测试谐振状态下压电悬臂梁的输出电压、电磁感应线圈的输出电压以及系统输出电压的稳定性.实验电路板如图10所示.通过组合函数信号发生器、功率放大器、激振器和示波器在室内进行振动环境的模拟,并对实验电路进行测试分析,电磁与压电复合式发电系统的实验装置如图11所示.将示波器接到电磁与压电输出端,利用示波器可以观察到开路状态电磁和压电的正弦输出,压电和电磁分别可以产生峰值为5.4和2.6 V的交流输出.将电磁与压电输出端分别接到实验电路的输入端,通过输出端引脚的选择可以分别测试压电、电磁和复合模式的输出,其中压电和电磁模式下分别输出直流电压3.1和3.0 V,实验值均略低于仿真电路中通过调整调压电阻阻值得到的输出电压,实际电路中可以按照相应比例调节电阻参数以得到合适的输出直流电压.复合模式下的电路输出电压降为2.9 V,主要是因为在复合输出状态下,电磁阻尼使得悬臂梁振幅减小,输出稍有降低.

通过电磁与压电电路复合输出电路进行测试,可以得到稳定的直流电压输出,输出端接入发光二



图10　实验电路板



图11　电磁与压电复合式发电系统实验装置

极管,二极管正常工作,二极管供电演示如图12所示.电磁与压电发电方式的结合使得同样共振频率的情况下悬臂梁的振幅降低,提高了装置的稳定性和使用寿命.同时,该实验装置在不增加体积的情况下,既可以选择电磁和压电输出,也可以选择复合输出,且复合输出的负载功率高于电磁输出和压电输出,电磁输出负载功率为2.60 mW,压电输出的负载功率约为0.18 mW,复合后较之单一电磁模式提高了6.5%.实验过程中显示电磁输出功率较为稳定,压电输出功率受到电容容量和放电时间的影响较大,经过一个放电周期会显著下降.

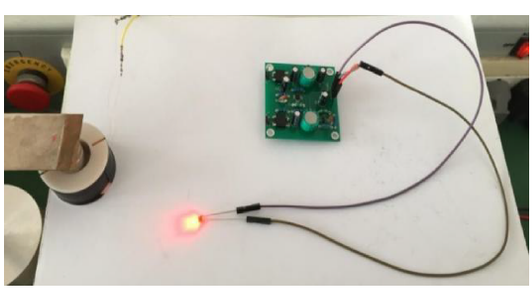


图12　二极管供电演示

4　结　论

通过实验证明电磁与压电复合式俘能系统可以有效地将机械能转换为电能.通过对电磁和压电2种状态下产生的电压进行仿真实物测试,在电磁状态下可以输出2.6 V的交流电,在压电状态下可以产生5.4 V的交流电.通过电源管理电路将交流电转换为器件所需的直流电,可以获得3.0 V左右的直流电.电磁与压电复合式俘能系统能够输出稳定的电压,可以对负载实现长时间的稳定供电.同时,本文设计的电磁与压电复合式振动装置及其电路使得负载功率较之单一方式有了较大幅度增加,有效地提高了单位体积内能量输出效率.

参 考 文 献

[1] 杜小振,曾祥伟,卞丰,等.MEMS自供能压电电磁集成发电研究现状[J].微纳电子技术,2014,51(3):161-167.

[2] 钱铄,杨子杨,崔丹凤,等.电磁-压电复合式机械能量收集器[J].测试技术学报,2019,33(1):61-66.

[3] JIANG J X, LIU S G, FENG L F, et al. A review of piezoelectric vibration energy harvesting with magnetic coupling based on different structural characteristics[J]. Micromachines,2021,12(4):436.

[4] WASZCZUK K, PIASECKI T, NITSCH K, et al. Modulation of excitation signal as a method for measurement of the mechanical properties of miniature piezoelectric resonant devices in a viscous and conductive environment[J]. Measurement Science and Technology,2013,24(8): 56-58.

[5] KULAH H, NAJAFI K. Energy scavenging from low-frequency vibrations by using frequency up-conversion for wireless sensor applications [J]. IEEE Sensors Journal,2008,8(3):261-268.

[6] 王彩锋,高世桥,刘海鹏,等.压电-电磁复合式俘能器设计及能量收集测试[J].压电与声光,2016,38(6):903-905.

[7] 夏桦康,陈仁文,朱莉娅,等.压电-电磁复合动能采集器无量纲参数建模与分析[J].振动与冲击,2017,36(12):129-133.

[8] POULIN-VITTRANT G, SARRAUTE E, COSTA F. Generation of electrical energy for portable devices: comparative study of an electromagnetic and a piezoelectric system [J]. Sensors and Actuators A Physical,2004,116(3):461-471.

[9] WACHARASINDHU T, KWON J W. A micromachined energy harvester from a keyboard using combined electromagnetic and piezoelectric conversion [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering,2008,18(10):104016.

[10] CHALLA V R, PRASAD M, FISHER F T. A coupled piezoelectric-electromagnetic energy harvesting technique for achieving increased power output through damping match [J]. Smart Materials and Structures,

(下转第29页)

[7] 周涛,李璐.民用飞机电子飞行仪表仿真系统设计与实现[J].电子设计工程,2014,22(22):168-171.
[8] 赵鹏轩,朱江.飞行仿真技术在飞行控制系统研制中的应用研究[J].测控技术,2018,37(B11):383-386.
[9] 张玲,王亚红,马力.基于飞控系统铁鸟试验的飞行仿真系统设计[C]//王彤.2016航空试验测试技术学术交流会论文集.北京:测控技术编辑部,2016.
[10] 郭腾飞,王越之.频响试验在飞控系统地面验证试验中的应用概述[J].科技视界,2017(5):39+147.
[11] 项华,侯世芳,崔保中.某型飞机铁鸟试验台操纵系统动态试验研究[C]//王彤.2015航空试验测试技术学术交流会论文集.北京:测控技术编辑部,2015.
[12] 陈军俊.5G CPE发展现状与展望[J].科技传播,2019,11(20):126-127.
[13] 张宁.5G CPE语音通信解决方案[J].中国新通信,2020,22(8):58-59.
[14] 顾宏斌.飞机地面运行的动力学模型[J].航空学报,2001,22(2):163-167.
[15] 吴胜亮,乔文峰.工程模拟器在线自动配平系统设计[J].科技视界,2018(23):1-6.

(责任编辑:兰丽丽)

(上接第23页)

2009,18(9):7566-7579.
[11] 陈婷婷.MEMS压电-磁电复合式微能源器件优化设计制造及其性能研究[D].太原:中北大学,2014.
[12] LI Y, TANG T, LIU H, et al. An electromagnetic-piezoelectric-triboelectric hybridized energy harvester towards blue energy[C]//TIAN Z Q, ZHANG H X, SUN D H, et al. 2021 IEEE 16th International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS). Xiamen: The Institute of Electrical and Electronics Engineers,2021:1070-1073.
[13] 李志宏,王良,徐圣,等.压电电磁复合式振动能量采集器模型的研究[J].压电与声光,2017,39(4):526-530.
[14] 荣训,陈志敏,曹广忠.一种基于压电效应的振动能量收集电路[J].电子技术应用,2015,41(8):37-39+46.
[15] TOMIMATSU Y, TAKAHASHI H, KOBAYASHI T, et al. A piezoelectric cantilever-type differential pressure sensor for a low standby power trigger switch[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering,2013,23(12):125023.
[16] 张振振,娄军强,贾振,等.压电-电磁复合振动俘能器的耦合负载特性及俘能性能[J].振动工程学报,2020,33(3):459-466.
[17] BADEL A, BENAYAD A, LEFEUVRE E, et al. Single crystals and nonlinear process for outstanding vibration-powered electrical generators[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control,2006,53(4):673-684.
[18] 罗翠线,李朋伟,王艳芬.多悬臂梁压电换能器电路的设计与实现[J].压电与声光,2015,37(2):342-345.
[19] 李政,唐祯安,余隽.一种压电能量收集与管理电路[J].电子器件,2015,38(1):122-125.
[20] 邓隆阳,黄海燕,卢兰光,等.超级电容性能试验与建模研究[J].车用发动机,2010(1):28-32.

(责任编辑:兰丽丽)