

多悬臂梁压电换能器电路的设计与实现

罗翠线^{1,2}, 李朋伟^{1,2}, 王艳芬^{1,2}

(1. 太原理工大学 信息工程学院 微纳系统研究中心, 山西 太原 030024;

2. 新型传感器与智能控制教育部与山西省重点实验室, 山西 太原 030024)

摘 要:介绍了一种多悬臂梁压电换能器电路。与标准能量采集电路(SEH)相比,三悬臂梁压电换能器电路的理论最大平均采集功率提高了300%。利用Multisim软件仿真,结果表明,三悬臂梁压电换能器电路的最终输出电压为SEH电路的2.11倍;进一步搭建实际电路,其最终最大输出功率为SEH电路的3.12倍,能量转化与利用效率显著提高。

关键词:压电换能器;多悬臂梁;标准能量采集电路;电压调整电路;输出功率

中图分类号:TM28 **文献标识码:**A

Design and Implementation of Piezoelectric Transducer Circuit Based on Multi-cantilever

LUO Cuixian^{1,2}, LI Pengwei^{1,2}, WANG Yanfen^{1,2}

(1. MicroNano System Research Center, College of Information Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. Key Lab. of Advanced Transducers and Intelligent Control System, Ministry of Education and Shanxi Province, Taiyuan 030024, China)

Abstract: This paper reports a piezoelectric transducer circuit based on multi-cantilever consisting of piezoelectric transducer module, rectifier module, storage module, voltage regulator module and load module. Comparing with the standard energy harvesting (SEH) circuit, the theoretical value of maximum average power harvesting of piezoelectric transducer circuit based on three cantilevers was increased by 300%. Simulation results by using Multisim software show that the output voltage of piezoelectric transducer circuit based on three cantilevers was 2.11 times as much as that of SEH circuit. Further, practical circuits was fabricated and the experimental results prove that the output power of piezoelectric transducer circuit based on three cantilevers was 3.12 times as much as that of SEH circuit. The efficiency of energy conversion and utilization were significantly improved.

Key words: piezoelectric transducer; multi-cantilever; standard energy harvesting circuit; voltage regulator circuit; output power

0 引言

近年来,随着微电子制造技术与微纳米技术的不断进步和迅猛发展,在高噪、强震等恶劣环境中利用环境振动能量为低功耗传感器件供电的研究也得到越来越多的关注。与典型的静电式^[1]、电磁式^[2]等能量采集方式相比,压电式^[3]振动能量采集方式具有能量密度大,输出电压高,无污染,寿命长,抗电磁干扰能力强,结构简单,便于集成化等优点。然而,压电换能器所采集到的电能具有交变及小电流等特征,不能直接提供给负载,因此,需要在压电换能器与负载间接入能量调整电路。能量调整电路是

解决交流电到负载所需额定电压及增大电流问题的重要方法。Guyomar等^[4]设计的标准能量采集电路(SEH)电路可完成基本的能量采集与转换,然而仅在负载电阻为最佳值时才有最大平均收集功率,且能量采集密度较低。为提高电路的采集与转化效率,Lesieutre^[5]等采用低功耗集成电路(LT3502、MAX666等)设计了DC-DC变换的优化SEH电路,使电源管理电路的电荷提取效率增大一倍,但加入的DC-DC变换电路导致功耗变大。Lefeuvre^[6]等进一步提出了非线性电路采集思想,包括同步电荷提取技术、串联电感同步开关采集技术和并联电

收稿日期:2014-07-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51205276,51205275);国家博士后科学基金资助项目(20110491629,2013T60268);山西省青年科学基金资助项目(2012021021-5,2013021017-1);山西省科技重大专项基金资助项目(No. 20121101004);山西省高等学校特色重点学科建设基金资助项目(No. 晋教财[2012]45号)

作者简介:罗翠线(1990-),女,陕西泾阳人,硕士生,主要从事电路与系统、微能源方面的研究。通信作者:李朋伟(1981-),男,河南漯河人,副教授,研究生导师,主要从事纳米材料、微纳电子器件、MEMS传感器系统的研究。

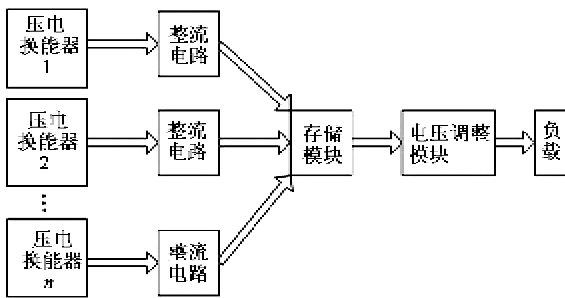
感同步开关采集技术。虽然与 SEH 电路相比,上面 3 种技术的能量采集效率有提高,然而大多数电路实现需额外控制电路的支持。国内许多课题组在能量采集电路研究方面作出较多贡献,如彭敏强等^[7]针对微小型压电式振动设计出了一种功率调理电路,其中包含同步电荷转移模块、电荷汇集电容、可控电压阈值 DC/DC 转换模块及储能器件 4 部分,完成了对微能量的存储,但能量转化效率小;王强等^[8]基于压电材料的振动能量采集提出了一种功率转换电路,该电路采用四倍压整流电路,它能完成 AC-DC 整流、滤波、同时能增加直流电压的大小,然后将直流电存储到超级电容器中,当能量存储到一定值后再通过电压调节器使输出电压达到所需电压,但由于采用四倍压整流电路导致能耗较大,效率无明显提高。

综合国内外研究现状可发现,关于单一振子的能量采集电路研究已较成熟,但单一振子振动能量采集器产生的能量较小,能量转换效率低;多振子能量采集系统可为负载提供较大能量,但相关电路研究不成熟。因此,本文提出了一种多悬臂梁压电换能器电路,通过将多悬臂梁振子并联输出,再整流、存储及电压调整,实现对负载的大功率、稳定输出。

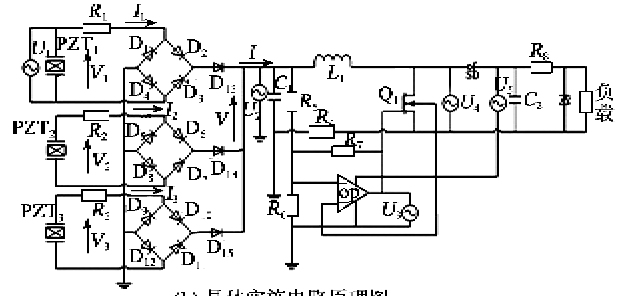
1 电路设计

1.1 设计思想

图 1 为多悬臂梁压电换能器电路设计原理框图及具体实施电路原理图。压电换能器模块是由 n 个压电换能器组成,每个压电换能器模块间是并联连接,并联后电路的等效电阻变小,输出电流增大;整流模块是将正负交替的正弦交流电压整流为单向的脉动电压;存储模块主要是将振动采集到的微小能量利用超级电容存储起来;电压调整模块主要是将存储后的电压进行调整提供给特定的负载;负载模块一般为微型传感器等低功耗微纳电子器件。



(a) 电路设计原理框图



(b) 具体实施电路原理图

图 1 电路设计原理框图及具体实施电路原理图

1.2 电路工作原理

图 1(b) 工作原理为: 3 个压电换能器放置在不同的频点, 将不同频点的振动能转换为电能, 电路的输出电流为 3 个压电换能器并联后输出电流之和, 即

$$I = I_1 + I_2 + I_3 \quad (1)$$

式中 I_1, I_2, I_3 分别为 3 个压电换能器输出电流。整流部分中的整流电路对每个压电换能器所采集的交流电进行整流, 将交流电变为直流电, 然后并联, 电路的等效电阻变小, 输出电流变大; 电压调整模块利用运算放大器作为滞回比较器, 控制场效应管的导通与关断, 实现电感 L_1 给负载稳定供电; 稳压模块主要利用二极管、电容和稳压二极管共同作用使电路输出的电压稳定可靠; 负载一般为发光二极管、微型传感器等一些低功耗微纳电子器件。

1.3 电路采集功率

SEH 电路平均功率 P , 振动位移为幅值时的最佳整流电压值 $(V_R)_{opt}$ 、最大平均采集功率 P_{max} 及 3 个 SEH 电路的最大平均采集功率 P_{3max} , 分别为

$$P = \frac{2C_0\omega}{\pi} V_R \left(\frac{\alpha}{C_0} u_M - V_R \right) \quad (2)$$

$$(V_R)_{opt} = \frac{\alpha}{2C_0} u_M \quad (3)$$

$$P_{max} = \frac{2C_0\omega}{\pi} (V_R)_{opt}^2 = \frac{\alpha^2\omega}{2\pi C_0} u_M^2 \quad (4)$$

$$P_{3max} = \frac{6C_0\omega}{\pi} (V_R)_{opt}^2 = \frac{3\alpha^2\omega}{2\pi C_{II}} u_M^2 \quad (5)$$

式中: u_M 为压电元件的振动位移幅值; ω 为共振角频率; C_0 为压电元件的受夹电容; α 为力因子。

图 2 为仿真输出电压波形、三悬臂梁压电换能器电路输出电压波形 M、SEH 电路输出电压波形 N 及 SEH 电路负载随电压变化 $\cap$ 曲线。图中, U_1 为电压源输出电压波形, U_2 为整流后输出电压波形, U_3 为比较器 op 输出电压波形, U_4 为场效应管 Q_1 输出电压波形, U_5 为整个电路输出电压波形。

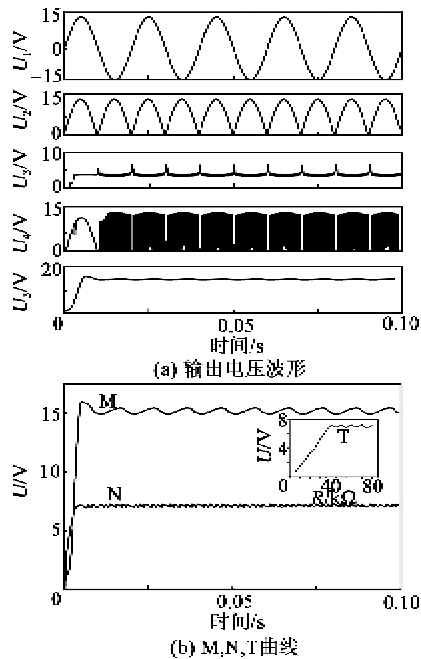


图2 仿真输出电压波形、M、N及T曲线

假定3个相同压电换能器(此处为理论计算方便)的开路电压分别为 V_1 、 V_2 和 V_3 , 其中

$$V_2 = 3V_1 = V_3/3 \quad (6)$$

由于3个压电换能器间相互并联, 则并联后开路状态时的压电电压 $V = 3V_2$, 等效电容 $C = 3C_0$, 压电电压的极大值 V_M , u_M 为压电换能器2的振动位移幅值及 P , 则

$$\alpha \ddot{u} = C \dot{V} \quad (7)$$

$$V_M = 6 \frac{\alpha}{C} u_M \quad (8)$$

$$P = \frac{2}{T} \cdot \frac{1}{2} C V_M^2 = 6 \frac{\alpha^2}{\pi C_0} u_M^2 \quad (9)$$

比较式(4)和(7)可得, 当采用相同的机电装置(即 α 相同), 相同激励频率 ω 和振幅时, 此电路的最大平均采集功率的理论值是标准能量采集电路的4倍。能量采集功率得到显著提高。

2 仿真结果与分析

本文采用 Multisim 11 版本进行仿真, 仿真时提供给压电换能器的电压为

$$Z(t) = \sin st \quad (10)$$

电压峰-峰值为 30 V, 频率为 50 Hz。由图 2(a)可知, U_1 为幅值 15 V、频率 50 Hz 的正弦波; 由于全波整流桥的作用, 将正负交替的正弦交流电压整流为单向的脉动电压, 此时 U_2 电压峰-峰值为 15 V, 频率变为 100 Hz; U_3 是一串频率 100 Hz 的尖脉冲, 0~10 ms 内出现的第一个脉冲较小, 是由

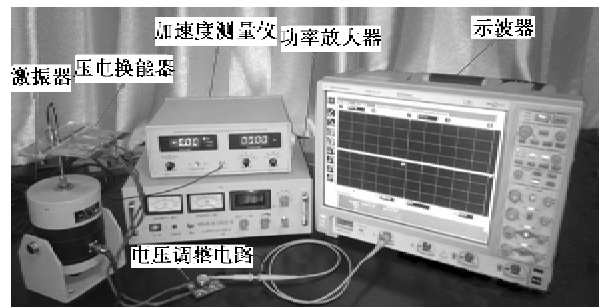
于电路中的滞回比较器需启动时间造成。20 ms 后电路处于稳定状态; U_4 是频率 100 Hz 的矩形波信号, 0~10 ms 内基本保持 U_2 的波形, 是因场效应管有开通延迟时间, 电路需 20 ms 的过渡与反应时间, 20 ms 后处于稳定状态; U_5 波形呈一条直线, 电压稳定在 15.2 V, 0~10 ms 内是输出达到稳定的过渡阶段, 10 ms 后电路输出波形较平滑。

由图 2(b)可知, 两条曲线都呈现规律性的波动。其中, 供给 SEH 电路的电压为 $Z(t) = \sin st$, 峰-峰值为 30 V, 频率为 50 Hz, 对应最优负载为 40 kΩ, 输出最大电压为 7.2 V(见图 2(b)中的 T 曲线)。由图 2(b)中的 M 曲线可看出, 三悬臂梁压电换能器电路的输出电压为 15.2 V, 显然输出的电压值与负载的大小变化无关, 同时输出电压是 SEH 电路的 2.11 倍。

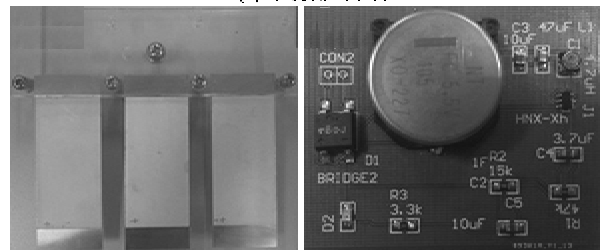
3 实际电路搭建与测试

3.1 测试平台搭建

图 3(a)为系统测试平台, 包括功率放大器(HEAS-50), 激振器(HEV-50), 加速度测量仪(XD2006), 3个并联的悬臂梁压电换能器(见图 3(b)尺寸为 60 mm×30 mm×0.3 mm), 电压调整电路(见图 3(c))和示波器(MSO9104A)。



(a) 系统测试平台



(b) 三悬臂梁压电换能器阵列

(c) 电压调整电路PCB版图

图3 系统测试平台、三悬臂梁压电换能器阵列及电压调整电路 PCB 版图

在实际搭建的电路中, 用 HXN-Xh 芯片代替图 1(b)中电压调整部分的电路。

3.2 实验测试结果与分析

将3个单悬臂梁压电换能器并联, 当悬臂梁结

构和振源发生共振时,此时激振器的频率 38.1 Hz,加速度测量仪为 2.28 m/s^2 ,压电换能器有最大的输出电压 15 V,压电换能器就开始给超级电容器充电,当超级电容的电压达 1.7 V 时,就会驱动芯片 HXN-Xh 工作,使输出电压为 5 V,输出功率为 15 mW。HXN-Xh 芯片是一个高效率的同步升压型 DC/DC 转换器,开启电压为 0.9 V,输入电压为 0.6~4.4 V,输出电压为 2.5~5.0 V 内可调。此处由于压电换能器产生的是高电压小电流,因此当电压达到 0.9 V 时,还不能驱动 HXN-Xh 芯片工作,只有达 1.7 V 时,方可进行正常工作。电压调整电路如图 3(c)所示。

如图 4(a)所示,实验测试的电压只是仿真输出电压的 0.33 倍,这是因为 Multisim 软件在选择基本元器件库里的交流电源时,只能设置电压峰值和频率选项,没有设置电流的选项,因此仿真时只要电压达到工作要求就会启动电路,与电流无关。然而,在实验测试过程中,由于压电换能器产生的电压高达十几伏,电流低至微安级,因此导致电流太小而不能驱动电路,只有当电压达到一定值时,功率相应提高,此时才能驱动整个电路工作。

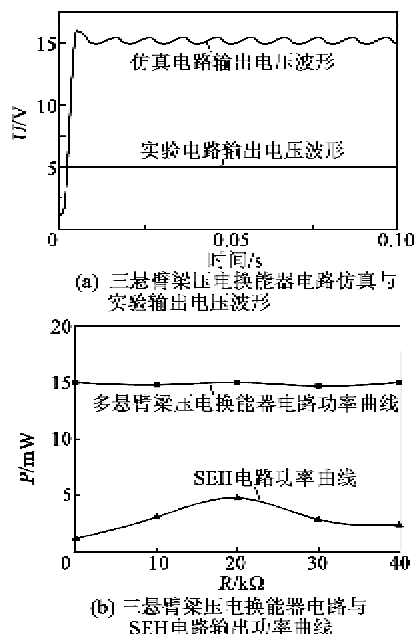


图4 三悬臂梁压电换能器电路仿真与实验输出电压波形及三悬臂梁压电换能器电路与 SEH 电路输出功率曲线

同时搭建 SEH 电路,实验结果显示其功率曲线呈正态分布,发现选择 20 kΩ 的最优负载时,输出电压为 5.6 V,功率为 1.6 mW。将 3 个相同的 SEH 电路并联,最终输出的电压仍为 5.6 V,功率为 4.8 mW。而三悬臂梁压电换能器电路的输出功

率曲线斜率为 0,近似为一条直线,不随负载的变化而变化,输出功率为 15 mW。由图 4(b)可知,三悬臂梁压电换能器电路的输出功率是 SEH 输出功率的 3.12 倍,且输出功率不随负载变化,比较稳定。

4 结束语

本文基于压电式能量采集电路提出了一种多悬臂梁压电换能器电路的新策略,分别对 SEH 电路和三悬臂梁压电换能器电路进行理论对比可知,三悬臂梁压电换能器电路的最大平均采集功率的理论值是标准能量采集值的 4 倍。利用 Multisim 软件对 SEH 电路和三悬臂梁压电换能器电路进行仿真,表明三悬臂梁压电换能器输出电压是 SEH 电路的 2.11 倍,且能将输出电压调整在任何负载所需电压值。进一步搭建 SEH 电路和三悬臂梁压电换能器电路,三悬臂梁压电换能器电路通过升压芯片的调节使输出电压稳定在 5 V,功率为 15 mW,而 SEH 电路只有在负载匹配时最大输出功率为 4.8 mW,则三悬臂梁压电换能器电路的输出功率是 SEH 输出功率的 3.12 倍,显然能量利用与转化效率得到提高。

参考文献:

- [1] ERICK O T, GABRIEL A R M. Electrostatic energy-harvesting and battery-charging CMOS system prototype[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I, 2009, 56(5): 1538-1548.
- [2] WANG D A, CHANG K H. Electromagnetic energy harvesting from flow induced vibration[J]. Microelectronics Journal, 2010, 41: 356-364.
- [3] RENNO J M, DAQAQ M F, INMAN D J. On the optimal energy harvesting from a vibration source[J]. Journal of Sound and Vibration, 2009, 320: 386-405.
- [4] GARBUIO L, LALLART M, GUYOMAR D, et al. Mechanical energy harvester with ultralow threshold rectification based on SSHI nonlinear technique[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(4): 1048-1056.
- [5] LESIEUTRE G A, OTTMAN G K, HOFMANN H F. Damping as a result of piezoelectric energy harvesting[J]. Sound Vibration, 2004, 265(5): 991-1001.
- [6] 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): 865-876.
- [7] 彭敏强. 实现宽频响应的微小型压电式振动能量采集技术的研究[D]. 湖南: 中南大学, 2011.
- [8] 王强. 基于压电材料的振动能量[D]. 江苏: 江苏大学, 2008.