

# 面向压电能量收集的传感器自供电电源设计

徐强菊<sup>1</sup>,葛丽莉<sup>1</sup>,宗昌灏<sup>1</sup>,杨雨诺<sup>1</sup>,孙科学<sup>1,2</sup>

(1. 南京邮电大学 电子与光学工程学院,江苏 南京 210023;2. 射频集成与微组装技术国家地方联合工程实验室,江苏 南京 210023)

**摘要:**随着物联网传感器网络的快速发展,微弱能量收集电路因其诸多优越性而备受关注。该文设计了一种基于压电能量收集技术的电路,其通过收集环境中的低频机械振动能量,经压电陶瓷(PZT)换能器产生交流电压,再经四倍压电路放大,并通过 LTC3588-1 电源管理电路整流变换,最终产生一个可供低功耗传感器工作的可切换的标准电压。实验结果表明,该电路可有效支持低功耗传感器正常工作。

**关键词:**压电换能器;振动能量收集;自供电;电源管理

**中图分类号:**TN384;TK01

**文献标识码:**A

**DOI:**10.11977/j.issn.1004-2474.2019.02.014

## Design of Self-Powered Power Supply of Sensor for Piezoelectric Energy Harvesting

XU Qiangju<sup>1</sup>, GE Lili<sup>1</sup>, ZONG Changhao<sup>1</sup>, YANG Yunuo<sup>1</sup>, SUN Kexue<sup>1,2</sup>

(1. College of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China;

2. Nation-Local Joint Project Engineering Lab of RF Integration & Micropackage, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** With the rapid development of sensor network in internet of things, the weak energy harvesting circuit has attracted much attention due to lots of advantages. In this paper, a circuit based on piezoelectric energy harvesting technology is designed, which collects the low-frequency mechanical vibration energy in the environment, generates AC voltage through PZT piezoelectric ceramic transducer, and then amplifies it through quadruple voltage circuit, and rectifies and transforms through the LTC3588-1 power management circuit, eventually generates a switchable standard voltage for low-power sensor operation. The experimental results show that the circuit can effectively support the low power sensor to operate normally.

**Key words:** piezoelectric transducer; vibration energy harvesting; self-power; power management

### 0 引言

在过去的 10 多年里,各类处理、通信、存储技术迅速发展,随之发展的无线传感器网络技术已深入生活各方面,在工业中也得到广泛应用。其可靠性高,成本低,覆盖面广,功耗极低。而电源技术发展较慢,能量密度上无明显提高。传统上,各类无线传感器一直采用电池供电的方式测量并发送无线数据<sup>[1-2]</sup>。这种供电方式工作可靠,难度低,但维护成本(如更换电池费用)高,尤其是大部分传感器节点电池代价高,部分甚至不能更换。另外,采用太阳能等作为自供电能量来源,必须是在有光的环境下。刘创等<sup>[3]</sup>提出了移动充电的解决方案,但这要求传感器节点具备无线充电能力。还有一些特殊场合不

允许搭载或进入外部供电设备。因此,能够适应诸多应用场景的微弱能量收集技术,已成为无线传感器网络进一步发展的前提<sup>[4-6]</sup>。

本文介绍了基于压电效应的振动能量收集技术,并设计了一个围绕 LTC3588-1 电源管理芯片的能量收集电路。

### 1 悬臂梁式压电换能器理论模型及工作方程

#### 1.1 悬臂梁式压电换能器理论模型

通常压电能量收集器为单层或双层压电陶瓷片构成的悬臂梁结构<sup>[7]</sup>,即压电单晶片或压电双晶片,作为收集器的悬臂梁固定在振动的宿主结构上,压电层中变化的应变产生交变电压并通过陶瓷上的电极输出。本文选取压电单晶片作为激励源,如图 1

收稿日期:2018-05-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11304160);江苏省研究生实践创新计划基金资助项目(SJCX18\_0286);江苏省大学生创新创业训练计划基金资助项目(SYB2017003)

作者简介:徐强菊(1997-),男,江苏连云港人,主要从事压电能量收集及其电路设计的研究。孙科学(1981-),男,安徽界首人,副教授,硕士生导师,博士,主要从事电子电路设计、嵌入式系统与通信软件设计的研究。E-mail:sunkx@njupt.edu.cn。

所示,其中, $M$ 为重物质量, $R_1$ 为负载, $u(t)$ 为输出电压。末端固定一重物作为振子降低谐振频率<sup>[8]</sup>,以适应低频工作环境;固定基座,当振子振动时,压电材料产生形变,从而在压电层上、下表面产生电位差,当振子做往复运动时,将在负载 $R_1$ 上产生一个近似正弦波的连续电压。

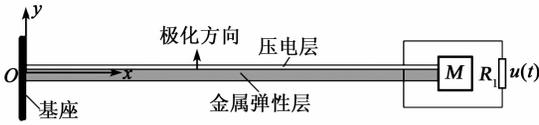


图1 压电能量收集器结构

1.2 压电换能器工作方程

表征压电层在厚度方向的耦合输出方程及电位移表达式<sup>[9]</sup>为

$$\begin{cases} T_1 = c_{11}^E S_1 - e_{31} E_3 \\ D_3 = e_{31} S_1 + \epsilon_{33}^S E_3 \end{cases}$$

式中: $T_1$ 为轴向应力; $S_1$ 为轴向应变; $c_{11}^E$ 为压电层在恒电场条件下的弹性刚度(即杨氏模量); $e_{31}$ 为压电常数; $E_3$ 为电场强度; $D_3$ 为电位移; $\epsilon_{33}^S$ 为恒应变条件下的介电常数。

2 电源管理电路

为了将压电换能器输出的交流电转化为可供传感器工作的稳定电压,需要经过一个电源管理电路。目前,国内外的解决方案主要有基于传统分立电路能量收集技术、采用芯片的能量收集技术及采用高度集成电路的能量收集技术<sup>[10]</sup> 3种。

传统的分立电路主要由整流电路、DC/DC变换电路及微控制器组成,制作成本低,但这种类型的分立电路的电路功耗大,电压门限高,不适合对低输出的压电陶瓷(PZT)换能器进行处理。Li Yani等<sup>[11]</sup>设计的分立电路将功耗降至 $1.42 \mu\text{W}$ ,但电路结构较复杂。采用高度集成电路效率高<sup>[12-13]</sup>,可适用于各种应用场景,但制作成本高。本文采用易设计、功耗较低的基于电源管理芯片的能量收集电路。

2.1 LTC3588-1 电源管理芯片

LTC3588-1支持 $2.7 \sim 20 \text{ V}$ 的输入,其在内部集成了一个低损耗全波桥式整流器和一个降压型稳压器,可直接连接至一个压电电源,经整流和降压后给出一个稳定的输出,可为传感器、微控制器等供电。另外,芯片可通过配置G0、G1引脚提供4种不同的输出( $1.8 \text{ V}$ , $2.5 \text{ V}$ , $3.3 \text{ V}$ , $3.6 \text{ V}$ ),如表1所示。表中,0代表对应引脚接地,1代表对应引脚接

至输入端 $V_{\text{IN}}$ 。电路如图2所示。以LTC3588芯片为核心,PZ<sub>1</sub>,PZ<sub>2</sub>双端或 $V_{\text{IN}}$ 单端为输入端, $C_7$ 为输出端储能电容, $V_{\text{CC}}$ 为电压输出端。

表1 输出电压选择

G0	G1	输出电压/V	输出电流/nA(静态电流)
0	0	1.8	44
0	1	2.5	62
1	0	3.3	81
1	1	3.6	89

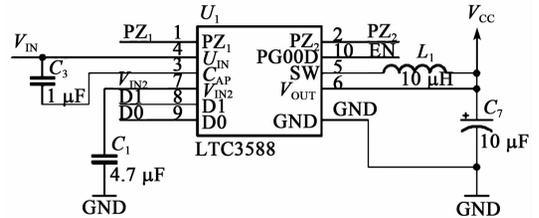


图2 电源管理电路

2.2 倍压电路

由于在低频低应力振动下,压电换能器输出较小,而LTC3588-1电源管理芯片的输入要求最低为 $2.7 \text{ V}$ ,故设计一个四倍压电路。将压电换能器的输出进行倍压后,再送入电源管理电路,倍压电路如图3所示。

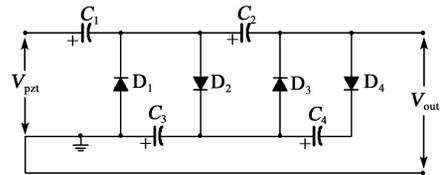


图3 四倍压电路

在 $V_{\text{pzt}}$ 正弦波的第一个半周,二极管 $D_1$ 导通, $D_2$ 截止,电流经过 $D_1$ 对电容 $C_1$ 充电至峰值 $V_{\text{pzt}}$ ;第二个半周时,二极管 $D_2$ 导通, $D_1$ 截止,此时, $C_1$ 上的电压与 $V_{\text{pzt}}$ 串联叠加,经过 $D_2$ 对电容 $C_2$ 充电,此时,充电电压为 $V_{\text{pzt}} + V_{\text{pzt}} = 2V_{\text{pzt}}$ ,经过一段时间, $C_2$ 上的电压基本为 $2V_{\text{pzt}}$ ;第三个半周,二极管 $D_1$ 和 $D_3$ 导通, $D_2$ 截止,电流除经过 $D_1$ 对 $C_1$ 充电外,又经过 $D_3$ 对 $C_3$ 充电, $C_3$ 上的充电电压为 $V_{\text{pzt}} + V_{\text{c}2} - V_{\text{c}1} = 2V_{\text{pzt}}$ ;第四个半周,二极管 $D_2$ 和 $D_4$ 导通, $D_1$ 和 $D_3$ 截止,电流除经过 $D_2$ 对 $C_2$ 充电外,又经 $D_4$ 对 $C_4$ 充电, $C_4$ 上的充电电压为 $V_{\text{pzt}} + V_{\text{c}1} + V_{\text{c}3} - V_{\text{c}2} = 2V_{\text{pzt}}$ ,此时,电路的输出电压 $V_{\text{out}} = V_{\text{c}2} + V_{\text{c}4} = 4V_{\text{pzt}}$ 。

图4为四倍压电路波形。事实上,由于压电激励源的不稳定性,在前几个周期内, $V_{\text{out}}$ 并不能很快达到 $4V_{\text{pzt}}$ ,在经历了10个或更多周期后,输出电

压才会达到预定值  $4V_{pzt}$ 。设计电路输入端为压电换能器低频工作条件下的等效输出,频率为 3.3 Hz,电压峰值为 3 V,最终输出约为 11 V。

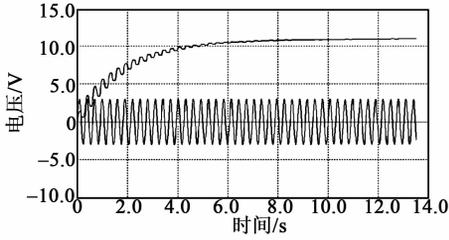


图 4 四倍压电路波形图

### 2.3 整体电路

图 5 为整体电路。压电换能器将收集到的机械能转化为电能,输出一正弦波,经四倍压电路后,送入 LTC3588-1 电源管理电路,最终输出一个稳定的电压,为低功耗传感器件供电。

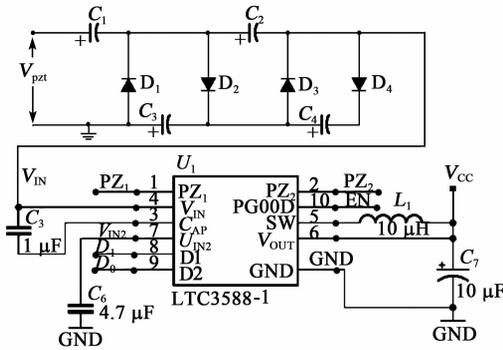


图 5 能量收集电路图

### 3 实验设计与验证

这里选取 ZM-PZT-65×37×0.4 型号的压电发电片,采用悬臂梁结构,压电换能器实物如图 6 所示,通过绝缘薄层隔离压电换能器与基座夹持端,另一端加以重物作为振子适应低频工作环境。通过人体载荷按压压电换能器产生机械振动,并通过压电换能器得到换能器输出波形,实测为振幅接近 5 V、频率约 3.3 Hz 的正弦波。将此输出接入所设计的电源管理电路后,得到 3 个分别近似 1.8 V、2.5 V、3.3 V 的输出波形。

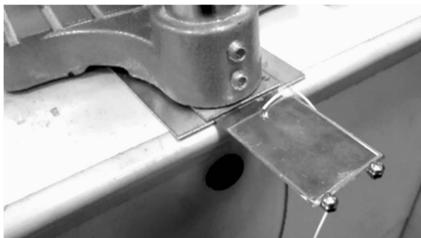


图 6 压电换能器

实验中,将输出的 1.8 V、2.5 V 或 3.3 V 电压作为电源提供给 MSP430 单片机,通过一个按键控制单片机切换 G0、G1 口的 0、1 状态,从而切换输出电压。

实验表明,压电能量收集装置可使处于低功耗 LM3 模式下的 MSP430 单片机正常工作,且每隔 6 s 控制 LED 灯亮 1 s。

实测中,在低功耗模式下,LED 灯亮时,MSP430 的功耗最大值为 6.6 mW,对模块输入端口测试如表 2 所示。由表可看出,在间断工作的场景下,负载依然可正常工作。

表 2 MSP430 输入端测试

供电电压/V	输入端电流/mA	功率/mW
1.8	4.29	7.7
2.5	5.48	13.7
3.3	5.09	16.8

### 4 结束语

压电能量收集技术能够收集环境中的低频能量,并将其转化为电能供低功耗传感器件使用。本文设计了可切换电源电压值的能量收集电路,实测表明,其收集的能量可供一块低功耗 MSP430 单片机正常工作。随着物联网基础设施的全面展开,可以预见该技术具有良好的应用前景。以后工作可考虑增加能量存储电路,以提高电路的瞬时功率输出能力。

### 参考文献:

[1] 陈绍炜,王子,魏刚. 基于压电能量收集技术的无线传感器节点设计[J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(3): 952-955.  
 CHEN Shaowei, WANG Zi, WEI Gang. Design of wireless sensor node based on piezoelectric energy harvesting technology [J]. Computer Measurement and Control, 2014, 22(3): 952-955.

[2] 刘成龙,孟爱华,陈文艺,等. 振动能量收集技术的研究现状与发展趋势[J]. 装备制造技术, 2013(12): 43-47.

[3] 刘创,王珺,吴涵. 无线可充电传感器网络的移动充电问题研究[J]. 计算机技术与发展, 2016, 26(3): 162-167.  
 LIU Chuang, WANG Jun, WU Han. Research on mobile charging issues on wireless rechargeable sensor networks [J]. Computer Technology and Development, 2016, 26(3): 162-167.

[4] 张旭辉,吴中华,邓鹏飞,等. 可更换式多方向振动能量

- 收集装置优化研究[J]. 压电与声光, 2017, 39(4): 594-598.
- ZHANG Xuhui, WU Zhonghua, DENG Pengfei, et al. Study on the optimized design of replaceable multi directional vibration energy harvesting device[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2017, 39(4): 594-598.
- [5] SODO H A, INMAN D J, PARK G. A review of power harvesting from vibration using piezoelectric materials[J]. The Shock and Vibration Digest, 2004, 36(3): 197-205.
- [6] STEPHEN N G. On energy harvesting from ambient vibration[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 293: 409-425.
- [7] 魏胜. 压电振动能量收集电路的设计与实验研究[J]. 压电与声光, 2017, 39(1): 144-148.
- WEI Sheng. Design and experimental investigating of piezoelectric vibration energy storage circuit[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2017, 39(1): 144-148.
- [8] 江兵, 陈红, 王强. 弓字形单晶梯形压电悬臂梁压电性能分析[J]. 计算机技术与发展, 2014, 24(10): 206-210.
- JIANG Bing, CHEN Hong, WANG Qiang. Piezoelectric performance analysis of an bow glyph single chip trapezoidal piezoelectric cantilever beam[J]. Computer Technology and Development, 2014, 24(10): 206-210.
- [9] PRIYA S, INMAN D J. 能量收集技术[M]. 黄见秋, 黄庆安, 译. 南京: 东南大学出版社, 2010.
- [10] 荣训, 陈志敏, 曹广忠. 微弱能量收集电路技术的研究现状与发展趋势[J]. 传感器与微系统, 2015, 34(9): 6-10.
- RONG Xun, CHEN Zhiming, CAO Guangzhong. Research status and developing trend of ultra low energy harvesting circuit technology[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2015, 34(9): 6-10.
- [11] LI Yani, ZHU Zhangming, YANG Yintang, et al. An ultra-low-voltage self-powered energy harvesting rectifier with digital swith control[J]. IEICE Electric Express, 2015, 12(3): 1-7
- [12] ULUSAN H, GHAREHBAGHI K, ZORLU O, et al. A self-powered rectifier circuit for low-voltage energy harvesting applications [C]// Morphou: 2012 International Conference on Energy Aware Computing, 2012: 1-5.
- [13] YING-KHAI T E H, MOK P K T. Design of transformer-based boost converter for high internal resistance energy harvesting sources with 21 mV selfstart up voltage and 74% power efficiency[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2014, 49(11): 2694-2704.

(上接第 212 页)

#### 参考文献:

- [1] 李洋, 焦宗夏. 直线驱动电静液作动机理的研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(7): 37-37.
- LI Y, JIAO Z X. Research on electrohydraulic actuation mechanism of linear drive [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(7): 37-37.
- [2] KWON K, CHO N, JANG W. The design and characterization of a piezo-driven Inchworm linear motor with a reduction-lever mechanism [J]. Jsme International Journal, 2005, 47(3): 803-811.
- [3] YANG X L, ZHU Y C, FEI S S. Magnetic field analysis and optimization of gain magnetostriptive electrohydrostatic actuator [J]. Journal of Aerospace Power, 2016(9): 2210-2217.
- [4] TANAKA H, SATO Y, URAI T. Development of a common-rail proportional injector controlled by a tandem arrayed giant magnetostrictive actuator[J]. Jsae Review, 2001, 22(3): 369-371.
- [5] 贾振元, 杨兴, 郭东明. 超磁致伸缩材料控制模型的研究[J]. 压电与声光, 2001, 23(2): 164-165.
- JIA Z Y, YANG X, GUO D M. Study on control Model of giant magnetostrictive materials[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2001, 23(2): 164-165.
- [6] 贾振元, 杨兴, 武丹. 超磁致伸缩执行器及其在流体控制元件中的应用[J]. 机床与液压, 2000, 2: 3-4.
- JIA Z Y, YANG X, WU D. Giant magnetostrictive actuator and its application in fluid control elements [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2000, 2: 3-4.
- [7] 陈龙, 朱玉川, 杨旭磊, 等. 超磁致伸缩泵磁路建模及数值分析[J]. 中国机械工程, 2014, 6: 718-722.
- CHEN Long, ZHU Yuchuan, YANG Xulei, et al. Driving magnetic path modeling and numerical analysis in giant magnetostrictive pump[J]. China Mechanical Engineering, 2014, 6: 718-722.