

无线传感器网络的节点能量自供给方法*

陈丽娟¹, 许晓慧^{1,2}, 吴在军¹, 江兵³

(1. 东南大学电气工程学院 南京, 210096) (2. 中国电力科学研究院 南京, 210003)

(3. 南京邮电大学自动化学院 南京, 210046)

摘要 从实际应用角度出发, 全面分析了无线传感器网络节点的功能特点、压电悬臂梁的频率选择以及储能电路的功能特性, 提出了集成化的环境振动能量采集器, 并进行了实验研究。结果表明, 所制备的环境振动能量采集器的整体装配尺寸约为 83 mm×55 mm×12 mm, 在 33 mA 的驱动负载下能提供稳定的 3.3 V 供电电压, 根据储能电路的输入输出特性, 可计算出其综合转换效率约为 79%。

关键词 无线传感器网络; 能量自供给; 压电; 储能器

中图分类号 TN384

引言

随着集成电路和微机电系统 (micro-electro-mechanical system, 简称 MEMS) 技术的发展, 低成本、小尺寸、低功耗的电路与传感器的研发取得了巨大进步, 使大型无线传感器网络的构建成为可能。无线传感器网络 (wireless sensor networks, 简称 WSN) 的一个关键部分就是能量供给系统^[1-3]。目前, 主要采用传统的化学能电池作为 WSN 的能量供应装置。但由于电池尺寸大、寿命有限和更换成本高等缺点, 其应用受到了限制。而基于压电陶瓷的自供电技术由于具有结构简单、不发热、无电磁干扰、寿命几乎无限等优点, 已经成为国内外研究的热点。Alex Mathers 等^[4]研究了基于 PMN-PT 的压电取能器, 在 1.3 kHz 激振频率下得到最大功率输出, 约为 0.3 mW。Lei Gu 等^[5]研究了基于体材料的低频压电发电机, 共振频率在 20.1 Hz, 最大输出可达 1.53 mW, 发电机长度达 100 mm。E K Reilly 等^[6]研究了基于 MEMS 工艺的压电薄膜悬臂梁取能方式, PZT 压电层厚度为 1 μm, 在一阶共振频率 (967 Hz) 附近的最大输出为 24.5 pW。Jeon 等^[7]研究了 1 μm 厚 PZT 的悬臂梁结构, 在谐振频率 13.9 kHz 附近的最大输出功率为 1 μW。Swae-Leong Kok 等^[8]研究了压电厚膜的 multimorph 悬臂梁, PZT 厚 55 μm, 在 400 Hz 工作频率下的输出可达 40 μW。

从目前的研究状况来看, 压电储能器的研究重点主要围绕提高输出功率、减小尺寸、降低工作频率、提高储能电路效率等方面展开, 并在各方面均已取得较大的进展^[9-13]。笔者从实际应用角度出发, 通过对无线传感器网络节点功耗的实际需求分析^[4], 设计了较为完整的环境振动储能方案, 并进行了实验研究。

1 理论分析

目前, 随着 IT 技术的不断进步, 电源电路、传送与接收信号使用的无线 IC、微控制器与传感器等器件的功耗得到大幅降低, 这为基于环境的能量采集进入实用化阶段提供了充分的基础。

基于环境振动的能量自供给无线传感器网络节点主要由储能器、传感器、微控制器以及无线收发模块等部件组成, 如图 1 所示, 其中储能器为其他各部件提供能量供应。

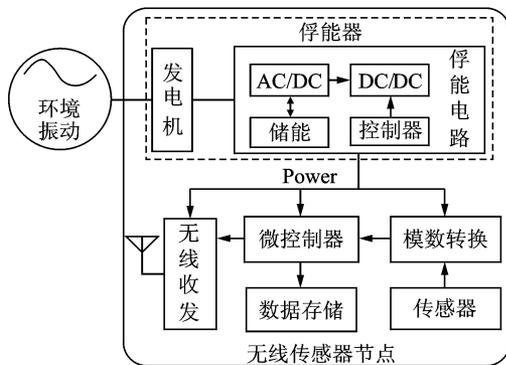


图1 无线传感器网络节点示意图

* 国家自然科学基金资助项目(编号:51007007,51107010,50807008);江苏省科技计划资助项目(编号:bc2009471)
收稿日期:2011-08-25;修改稿收到日期:2011-10-19

1.1 WSN 节点能耗分析

无线传感器网络节点的能耗可由各组成部件的能耗累计得到,具体各部件的能耗如表1所示^[14]。

表1 无线传感器网络节点各部件的功耗

器件	工作电压/V	工作电流	备注
微控制器 MCU	2.1~3.6	0.1~100 mA	如MSP430F系列
传感器	1.5~5	~100 μ A	
模数转换	—	—	已和MCU集成
无线收发	~3.3	~25 mA	如CC1100

从表1数据可以看出,影响无线传感器网络节点能耗的主要部件是无线收发模块,占据了节点整体能耗的95%以上;因此,俘能器只要能够提供3.3 V的稳定电压,并且持续供应电流达到30 mA,即俘能器能够在一定的时间内持续稳定地输出100 mW左右的功率,就可以保证无线传感器网络节点间隙式的稳定工作。一般情况下,无线发射模块的工作时间在数十毫秒至数百毫秒,具体跟无线收发的数据量相关。

1.2 俘能器设计

俘能器主要包括发电机和俘能电路两大部分。发电机负责将外界的振动能量转换成电信号,该部分的设计要点是使其一阶共振频率和外界环境的振动频率相匹配,以实现输出的功率最大化;因此,俘能器工作频率的选择应充分考虑其应用场合的特点。笔者主要考虑用于工业场合的无线传感器网络节点,而工业环境的振动一般为工频,故发电机的一阶共振频率应在50 Hz左右。

笔者所设计的发电机是一种常规的双压电悬臂梁结构,上、下层为PZT,中间层为不锈钢弹性层,如图2所示。其中悬臂梁有效长度为42 mm,PZT厚均为200 μ m,弹性层厚为100 μ m,PZT和弹性层通过环氧胶粘贴,胶层厚度约为3 μ m。上、下层PZT分别处于不同的极化状态,极化电压为3 kV/mm。PZT采用并联结构方式以增加输出电流,即上层PZT的上电极和下层PZT的下电极并联为一端,不锈钢弹性层作为另一端。

为了调节悬臂梁的一阶共振频率,通常在悬臂梁的自由端安放一质量块,通过对质量块质量的调节可以有效改变悬臂梁的一阶共振频率。根据文献[8]所提供的方法,可定量地计算质量块的质量对悬臂梁一阶共振频率的影响,结果如图3所示。计算过

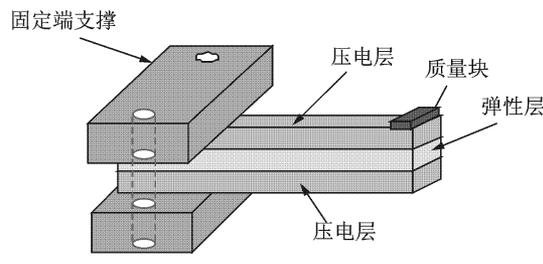


图2 双压电悬臂梁结构示意图

程中采用的材料物理属性和几何参数如表2所示。由图3可以看出,随着质量块质量的增加,悬臂梁的一阶工作频率快速下降,但是其变化率逐渐变小;因此,根据设计的需要,选取质量块的质量在9 g左右,理论上可以使悬臂梁的一阶共振频率在50 Hz附近。

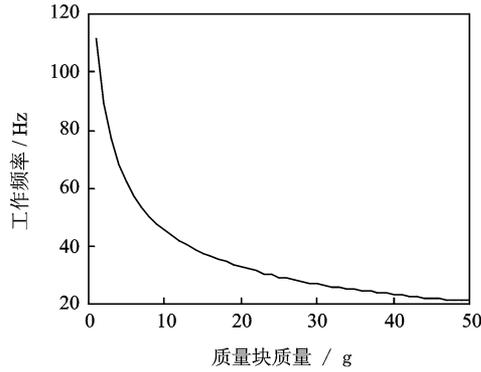


图3 端部质量块对悬臂梁共振频率的影响

表2 压电悬臂梁的材料属性及几何尺寸

材料	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性 模量/ GPa	厚度/ μm	宽度/ mm	长度/ mm
压电层	7 800	68	200	20	42
弹性层	7 900	200	100	20	42
电极层	10.5	83	5	20	42
环氧胶	1 000	3	3	20	42

俘能电路也是整个俘能器中比较重要的部分,其效率的高低直接影响最终的能量转换效率。笔者采用了Linear公司新推出的LTC3588-1芯片,该芯片是一款专为高输出阻抗能源而优化的完整能量收集解决方案。LTC3588-1集成了一个低损失全波桥式整流器和一个高效率降压型转换器;因此,用作俘能电路的主体芯片在工作效率、电路体积以及集成化等方面具有较大的优势。具体设计的俘能电路如图4所示。

俘能电路设计中的一个较为重要的参数设计是储能电容的选择。一般情况下,压电俘能器的输出具

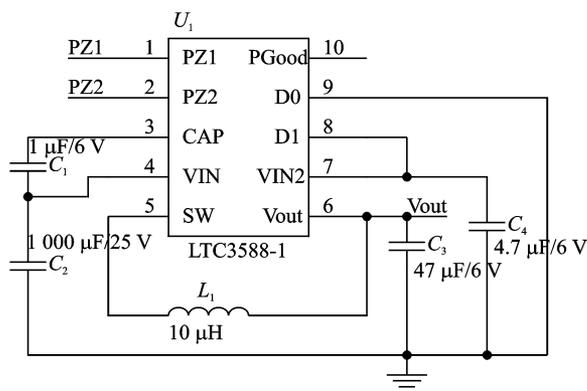


图4 基于LTC3588-1芯片的能量回收电路(输出电压为3.3 V)

有高电压、低电流的特性,因此,储能电容的选择应该具备足够的耐压。此外,储能电容的容量应根据无线传感器网络节点的能量来选择。由于受能量供应的限制,无线传感器网络节点一般工作在间隙模式,单次工作时间(即主要是无线收发的时间)一般在几百毫秒,以300 ms时间计算,节点一次工作需求的能量为

$$W_{\text{node}} = 3.3 \text{ V} \times 30 \text{ mA} \times 0.3 \text{ s} = 29.7 \times 10^{-3} (\text{W} \cdot \text{s}) \quad (1)$$

假设储能电容开始放电时的电压为 U_0 ,放电300 ms后的电压为 U_1 ,对于LTC3588-1而言,开始放电的电压最小为5 V,放电到4 V左右之后LTC3588-1停止工作,处于关闭状态。因此在300 ms内储能电容 C 释放的能量为

$$\Delta W_c = C(U_0^2 - U_1^2)/2 = 4.5C(\text{J}) \quad (2)$$

由于需要满足 $W_{\text{node}} \leq \Delta W_c \times \eta$ (η 为俘能电路转换效率),因此,结合上述两式可得 $29.7 \times 10^{-3} \leq 4.5 \times C \times \eta$,即 $C \geq 6.6 \times 10^{-3} / \eta$ 。

当俘能电路的效率 η 为75%时, C 应该不小于 $8.8 \times 10^{-3} \text{ F}$,因此,笔者选择容量为0.01 F的储能电容,以尽量缩短充电时间。

2 实验

图5所示为实验系统示意图,由波形信号发生器、功率放大器、振动台、加速度计、示波器和压电悬臂梁俘能器等装置组成。波形发生器产生频率可调的正弦波信号,此信号经功率放大器放大后激励振动台的振动。在合适的振动输入下,固定于振动台上的压电悬臂梁俘能器输出正弦交流电压,并进入俘能电路,能量达到一定程度后可输出稳定的直流电压,向负载供电。加速度计测量输入的激振加速度。

在整个过程中,示波器可以监测各种输出电信号。

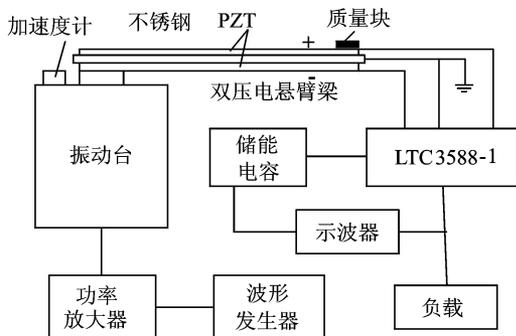


图5 压电俘能器测试系统框图

图6所示为经过简单装配的压电俘能器实物图,主要包括压电悬臂梁、储能电容以及俘能电路等部分,整体尺寸约为83 mm×55 mm×12 mm。

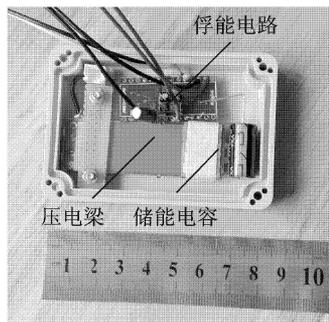


图6 压电俘能器实物图

3 结果及分析

根据上述搭建的实验系统,首先测试了压电悬臂梁俘能器的频率特性,悬臂梁自由端上所施加的质量块质量为9 g。在保持波形发生器输出的正弦波幅值和偏置保持恒定的情况下,不断改变波形发生器的输出信号频率,并通过示波器记录压电悬臂梁俘能器两端之间的电压有效值,得到压电悬臂梁俘能器的频率特性曲线,如图7所示。由实验结果可以看出,俘能器的一阶共振频率约为44 Hz,3 dB带宽约为16 Hz,和理论值的差异可能来源于材料属性的未精确测算以及质量块的安装偏差。在实际应用时,需要在理论指导的基础上,结合具体的实验情况,调整质量块的质量或位置,以使其实际的一阶共振频率和设计值相匹配。如果实际测试的频率低于设计值,则应减少质量块的质量;反之,则应增加质量块的质量。

图8所示为压电悬臂梁俘能器的输出电压有效

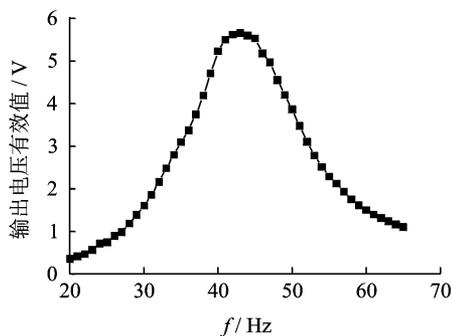


图7 压电俘能器的扫频曲线

值与振动加速度之间的关系。由图8可以看出,两者表现出良好的线性关系,这和理论基本相符。如果要将储能电容的电压充电到5 V,则最大加速度需要达到0.7g左右才行。如果需要降低对最大加速度的需求,将PZT串联输出,则可将最大加速度需求降低至0.35g左右,由此可进一步拓宽俘能器的适用范围。

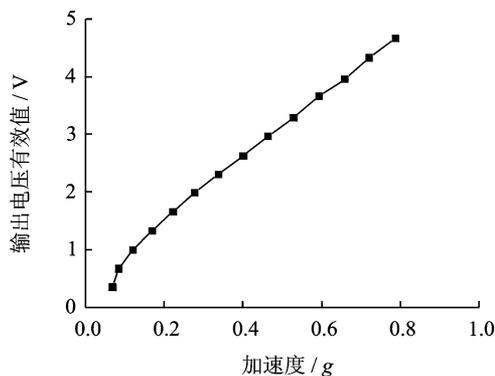


图8 悬臂梁端电压和加速度之间的关系

对俘能器的整体性能进行测试,输入的最大振动加速度为0.9g,储能电容容量为0.01 F,振动台激励频率为44 Hz。当储能电容上的电压达到7.5 V的时候,开始为 $R=100\ \Omega$ 的负载供电,即俘能电路输出33 mA的电流,如图9所示。由图9可以看出,储能电容上的电压不断降低,但是俘能电路输出较为稳定的电压 $U=3.3\ \text{V}$ 。大约经历1.46 s后,电压降低到大约3.5 V,此时LTC3588-1自动关闭,输出变为零。由此,可以计算由储能电容放电给负载供电的综合效率约为79%。从储能电容上的电压降可以看出,如果无线传感器网络节点以33 mA的负载电流工作300 ms,则储能电容上的电压降约为0.7 V。此外,通过压电悬臂梁的振动对储能电容进行充电,在相同振动加速度激励下,从5 V开始升高0.7 V,约需160 s左右。

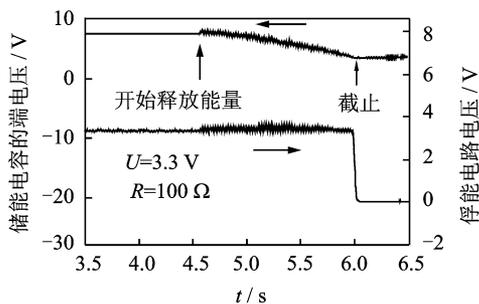


图9 压电俘能器的功率输出

4 结束语

笔者从实际应用角度出发,全面分析了无线传感器网络节点的功耗需求以及压电悬臂梁和俘能电路的功能特性,提出的集成化环境振动能量采集器整体装配尺寸约为 $83\text{mm}\times 55\text{mm}\times 12\text{mm}$,在33mA的驱动负载下能提供稳定的3.3V供电电压,且俘能电路的综合效率约为79%。研究成果有助于推动基于环境振动的压电俘能方法向实用化方向发展。后续工作主要围绕两方面开展:一是将对压电悬臂梁的结构进行优化;二是将压电俘能器与无线传感器结合,构建无线传感器网络实例。

参 考 文 献

- [1] Priya S, Taneja R, Myers R, et al. Piezoelectric and acoustic materials for transducer applications [M]. New York: Springer Science, 2008:373-388.
- [2] 汤宝平,贺超,曹小佳.面向机械振动监测的无线传感器网络结构[J].振动、测试与诊断,2010,30(4):357-361.
Tang Baoping, He Chao, Cao Xiaojia. Topology of wireless sensor networks for mechanical vibration monitoring[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010,30(4):357-361. (in Chinese)
- [3] 李洪兵,余成波,周召敏,等.基于BWAS的无线传感器网络动态分簇路由算法[J].振动、测试与诊断,2011,31(1):105-109.
Li Hongbing, Yu Chengbo, Zhou Zhaomin, et al. Dynamic clustering routing algorithm based on best-worst ant system for wireless sensor networks[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011,31(1):105-109. (in Chinese)
- [4] Mathers A, Moon K A, Yi J. A vibration-based PMN-PT energy harvester[J]. IEEE Sensors Journal, 2009,9(7):731-739.
- [5] Gu Lei. Low-frequency piezoelectric energy harvest-

ing prototype suitable for the MEMS implementation [J]. Microelectronics Journal, 2011,42(2):277-282.

[6] Reilly E K, Wright P K. Modeling, fabrication and stress compensation of an epitaxial thin film piezoelectric microscale energy scavenging device[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2009, (19) 9:095014.

[7] Jeon Y B, Sood R, Jeong J H, et al. MEMS power generator with transverse mode thin film PZT [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2005;122(1):16-22.

[8] Kok S L, White N M, Harris N R. Fabrication and characterization of free-standing thick-film piezoelectric cantilevers for energy harvesting [J]. Measurement Science and Technology, 2009,20(12):124010.

[9] Howells C A. Piezoelectric energy harvesting[J]. Energy Conversion and Management, 2009,50(7):1847-1850 .

[10] Li W G, He Siyuan, Yu Shudong. Improving power density of a cantilever piezoelectric power harvester through a curved L-shaped proof mass [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(3): 868-876.

[11] Zhu Meiling, Worthington E. Design and testing of piezoelectric energy harvesting devices for generation of higher electric power for wireless sensor networks [C]//IEEE Sensors 2009 Conference. Christchurch; IEEE Conference Publications,2009:699-702 .

[12] Shen Dongna, Park J H, Noh J H, et al. Micromachined PZT cantilever based on SOI structure for low frequency vibration energy harvesting [J]. Sensors and Actuators A: Physical,2009,154(1):103-108.

[13] Glynne-Jones P, Beeby S P, White N M. Towards a piezoelectric vibration-powered microgenerator [J]. IEE Proceedings on Measurement Science & Technology, 2001,148:68-72.

[14] Zhu Dibin, Beeby S P, Tudor M J,et al. A credit card sized self powered smart sensor node[J]. Sensors and Actuators A: Physical,2011,169(2):317-325.



第一作者简介:陈丽娟,女,1982年11月生,高级工程师。主要研究方向为压电材料在电力系统中的应用。曾发表《智能电网导论》(北京:中国电力出版社,2009年)等论文。
E-mail:lijuanchen@seu.edu.cn

向审稿人致谢

(排名不分先后)

- | | | | | | | | | | | |
|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 雷晓燕 | 余岭 | 余海东 | 郭瑜 | 郑世杰 | 纪琳 | 王浩文 | 王振林 | 时彧 | 陈超 | 程军圣 |
| 李志远 | 何旭辉 | 张义民 | 张建辉 | 练松良 | 饶柱石 | 包亦望 | 赵荣珍 | 金家楣 | 段晨东 | 张兆德 |
| 赵玉龙 | 安琦 | 裘进浩 | 上官文斌 | 李辉 | 余成波 | 王忠 | 袁慎芳 | 丁天怀 | 卢子兴 | 何正嘉 |
| 蒋伟康 | 徐志伟 | 李威 | 单颖春 | 王国林 | 林述温 | 姚志远 | 李志农 | 李威 | 闫绍泽 | 赵均海 |
| 李华峰 | 李欣业 | 冷军发 | 李立锋 | 牛军川 | 王轲 | 严谨 | 刘广军 | 李以农 | 曹登庆 | 陈怀海 |
| 季忠 | 余海东 | 黄采伦 | 张小栋 | 张方 | 于德介 | 王良模 | 廖广兰 | 史铁林 | 何欢 | 张梅军 |
| 彭卓 | 随福生 | 杜修力 | 王彤 | 蔡敢为 | 王再英 | 赵学智 | 武新军 | 纪国宜 | 徐赵东 | 丁克勤 |
| 潘宏侠 | 王启明 | 王怀磊 | 徐贺 | 李元齐 | 李晓雷 | 侯书军 | 金栋平 | 张瑞成 | 李礼夫 | 傅攀 |
| 张周锁 | 陈前 | 赵英凯 | 卢碧红 | 黄树红 | 杜向党 | 陈国平 | 赵玉成 | 秦仙蓉 | 王见 | 费庆国 |
| 罗贵火 | 纪跃波 | 姚国风 | 唐贵基 | 陈雪峰 | 赵又群 | 许金余 | 韩晓林 | 常佶 | 姜涛 | 郭勤淘 |
| 万书亭 | 郭瑜 | 郑四发 | 李玉和 | 翁建生 | 朱晓锦 | 杜永祚 | 唐力伟 | 朱劲松 | 王彪 | 朱忠奎 |
| 胡向东 | 廖昌荣 | 郑海起 | 沈春林 | 周长东 | 韩清凯 | 李锡文 | 熊诗波 | 陈春晓 | 谷立臣 | 严如强 |
| 朱宏平 | 程珩 | 韩景龙 | 左晓宝 | 向志海 | 宋雨 | 鹿存跃 | 黄卫清 | 杜成斌 | 李学军 | 张西宁 |
| 严根华 | 陈少林 | 黄耀志 | 吴子燕 | 靳晓雄 | 郭大蕾 | 陈仁文 | 袁惠群 | 孟庆丰 | 张清东 | 谢涛 |
| 钱志余 | 边义祥 | 李鸿晶 | 时彧 | 尚德广 | 刘先斌 | 崔荣鑫 | 王雪 | 卞永明 | 郑松林 | 朱孔军 |
| 刘长利 | 柏林 | 郑辉 | 赵吉文 | 朱华 | 陈彦江 | 陈进 | 邱志成 | 孙文磊 | 姜长生 | 陈南 |
| 汤宝平 | 张铁民 | 黄国勇 | 余雄庆 | 陈勇 | 张云清 | 任建亭 | 胥永刚 | 李春涛 | 伍星 | 万水 |
| 陆力 | 蒋书运 | 赵新铭 | 乔新勇 | 李兆霞 | 严蔚 | 刘献栋 | 赵永辉 | 曹平周 | 陈谋 | 孙平凡 |