

Doi:10.3969/j.issn.1003-5060.2013.11.007

## 锆钛酸铅压电陶瓷的制备及发电系统的研制

毛福斌<sup>1,2</sup>, 代超<sup>1</sup>, 潘浩<sup>1,2</sup>, 袁睿豪<sup>1</sup>, 左如忠<sup>1</sup>

(1. 合肥工业大学 材料科学与工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 合肥工业大学 电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:**文章利用压电陶瓷的正压电效应,收集环境中振动能量并将其转化成电能,设计了一套从压电陶瓷制备、压电发电装置设计到电能管理的压电陶瓷发电的完整的优化方案,解决了压电发电高电压、低电流、持续供电时间短的问题,能够较好地满足小功率、低损耗电路的供电要求。通过制作简易装置并进行测试,初步验证了该装置为低功耗负载持续稳定供电的可行性,并对该装置提出了进一步的展望。

**关键词:**压电陶瓷;正压电效应;压电发电装置;能量采集;电能管理

**中图分类号:**TM282.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2013)11-1309-05

## Preparation of PZT piezoelectric ceramics and the development of power generation system

MAO Fu-bin<sup>1,2</sup>, DAI Chao<sup>1</sup>, PAN Hao<sup>1,2</sup>, YUAN Rui-hao<sup>1</sup>, ZUO Ru-zhong<sup>1</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. School of Electric Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** A whole optimization solution for power generation consisting of the preparation of piezoelectric ceramics, the design of piezoelectric generation appliance and the management of electric energy was developed to collect the vibration energy from environment and to convert the energy into electric energy using the direct piezoelectric effect. The solution fixed the common problem that piezoceramics-based power supply has the properties of high-voltage, micro-current and short-duration output. The solution could provide energy for low-power, low-loss circuits satisfyingly. The feasibility of the device's steady power supply for low-power loads was validated by testing on a prototype platform. The further outlook concerning the device was put forward as well.

**Key words:** piezoelectric ceramics; direct piezoelectric effect; piezoelectric generation appliance; energy collection; electric energy management

随着经济的飞速发展和社会的进步,人们对于能源的需求越来越紧迫。面对传统能源日益匮乏的现状,人们开始寻求新的能源。压电材料作为一种具有正压电效应的新型材料<sup>[1-2]</sup>,可作为能量收集的媒体。当受到机械压力的作用时,在其压电材料两电极面会有电压信号产生,可替代电池为电路供电。压电材料的这种自供电能力成为新兴的研究方向,引起了人们的广泛关注。

作为研究压电发电基础的压电陶瓷,也得到了更多的关注,各种新型性能优良的压电陶瓷不断地被研制出来。锆钛酸铅(PZT)是最为常用的压电材料之一,具有压电性、铁电性、热释电性等特性,在微电子和光电子等技术领域显示出十分重要的现实应用价值及潜在应用的前景<sup>[3]</sup>。

压电陶瓷制作而成的压电发电装置具有无污染、无电磁干扰、不发热,结构简单、易于加工制

收稿日期:2013-02-25;修回日期:2013-07-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50972035);国家大学生创新性实验计划资助项目(111035915)

作者简介:毛福斌(1990—),男,山东烟台人,合肥工业大学硕士生;

左如忠(1971—),男,江苏淮安人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师。

作、可以实现结构上的微小化、集成化,能满足低耗能产品的电能需求等优点。

压电陶瓷在外力的作用下可以产生电能,所产生的电能可以直接用来制作电子打火机、打火器等。当压电陶瓷所产生的能量很大时,可以用来为电子器件提供电源或者构造微型发电机。但压电陶瓷在受到外部激励后产生的是高电压、低电流,而且每次变形产生的电荷量较少,无法直接为大部分电路供电<sup>[4-6]</sup>。因此,如何提高压电发电装置的发电量并将其储存利用是亟待解决的问题。本文从压电陶瓷的制备、压电发电装置的设计以及电能的管理 3 个方面入手,设计能量转换系统,并尝试利用其为负载供电。

## 1 压电陶瓷的制备

本实验所用的压电陶瓷粉末为 PZT 基多元系压电陶瓷粉末(自制)。压电陶瓷的制备过程大致可分为:造粒、成型、烧结、制备电极、极化等<sup>[7]</sup>。

(1) 造粒。由于所使用的粉末粒度非常小,比表面积大,粉末流动性差,在干压成型时不容易均匀充满模具,出现成型件有空洞、边角不致密、层裂、弹性失效等问题,所以在压制成型之前需向粉料中加入适量的聚乙烯醇,研磨成均匀的细小颗粒,达到造粒目的。

(2) 成型。分别称取 6 份已造粒的粉料,每份质量为 8 g,小心装入内径为 20 mm 的圆柱形模具,置于压片机上,缓慢均匀加压至 10 MPa,保压 3 min 左右脱模得到压坯。

(3) 烧结。将压坯置于烧结炉中烧结,设置烧结制度:① 将室温以每小时 3 °C/min 的速度升温至 550 °C,保温 4 h;② 以 5 °C/min 的速度升温到 1 280 °C,保温 2 h;③ 以 10 °C/min 的速度降温至 500 °C;④ 在炉内自然冷却至室温。取出烧结坯,清理表面黏附的粉料,观察表面有无明显裂纹和气孔,若有则剔除。用游标卡尺多次测量烧结坯的直径和高度,取其平均值,并记录。

(4) 制备电极。用棉签蘸取银浆涂于陶瓷片两表面并置于干燥炉中干燥,制成银电极用以引出电荷。

(5) 极化。将压电陶瓷置于盛有硅油的磁力搅拌器中,硅油温度设为 120 °C。用高压直流电源在陶瓷两端面缓慢加载电压,电压值为 2 kV/mm。保温保压 20 min 后,缓慢降温至室温,再缓慢降压至 0。取出陶瓷,清理表面的硅油,压电陶瓷制备完成。

制备所得的压电陶瓷成品为平均直径 17.40 mm、平均高度 4.60 mm 的圆柱体。

制备完成的压电陶瓷需要测定其性能参数,包括压电常数  $d_{33}$ 、介电常数  $\epsilon_{33}$ 、品质因数  $Q_m$ 、机电耦合系数  $K_p$ 。其中压电常数由准静态  $d_{33}$  测量仪测量,其余由阻抗分析仪测量,结果见表 1 所列。由表中数据可以看出,压电陶瓷的各性能参数均较高,且各陶瓷之间数据接近,表明所制备的压电陶瓷性能优良且稳定,达到预期的性能要求,能够满足后续实验需求。

表 1 压电陶瓷性能参数测量值

序号	$d_{33}$ (pC · N <sup>-1</sup> )	$K_p$	$Q_m$	$\epsilon_{33}$
1	745	0.61	43	4 200
2	766	0.61	42	4 158
3	717	0.59	45	4 218
4	755	0.60	49	4 387
5	754	0.61	42	4 482
6	766	0.61	44	4 159

## 2 压电陶瓷发电装置的设计

压电陶瓷能量采集装置是利用压电陶瓷的正压电效应,将作用在压电晶体上的机械能转化为电能。当压电陶瓷受到沿极化方向的外力作用时,在电极面上感应出电荷,电荷集聚而形成电压。为了能够将电能取出,在压电陶瓷承受载荷方向的上下 2 个极面敷银。

对于上述制备的压电陶瓷(圆柱形压电陶瓷片),选用弯曲振动形式,工作方式采用  $d_{33}$  模式,选择 LE 振动模式,其极化方向和形变方向与电场方向垂直。

在以上工作条件下,开路状态且压电陶瓷片周边不夹持,沿压电陶瓷的极化方向作用有单向压力  $F$  时,压电陶瓷产生压缩变形,在 2 个极面上激发电荷  $Q$ 、单个压电陶瓷片极面间形成电压  $V$ ,如图 1 所示。

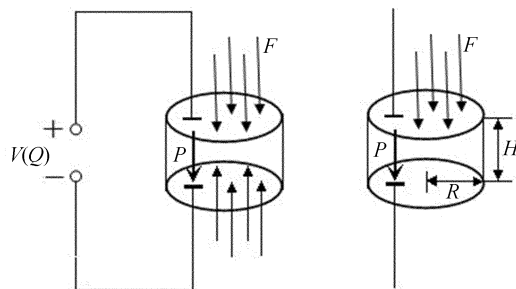


图 1 正压电效应示意图

图 1 中,  $P$  表示极化方向, 且

$$V = \frac{HFg_{33}}{\pi R^2} \quad (1)$$

$$Q = Fd_{33} \quad (2)$$

$$g_{33} = \frac{d_{33}}{\epsilon_{33}\epsilon_0} \quad (3)$$

其中,  $H$  为单个压电陶瓷片的厚度;  $R$  为单个压电陶瓷片的半径;  $d_{33}$  为压电常数;  $\epsilon_{33}$ 、 $\epsilon_0$  分别为相对介电常数和真空介电常数 ( $8.85 \times 10^{-12}$  F/m)。

由(1)式、(2)式可知, 影响压电发电装置输出电压(电荷量)的主要因素包括: 压电陶瓷的性能与结构参数、激振力、压电陶瓷片的支撑方式和联接方式等<sup>[8-12]</sup>。

(1) 压电陶瓷的性能与结构参数。性能参数与陶瓷原料、制备工艺有关, 在上述制备过程中已确定; 由(1)式可得, 圆形压电陶瓷片的输出电压随压电晶片半径的增大而减小, 随压电晶片厚度的增大而增大。

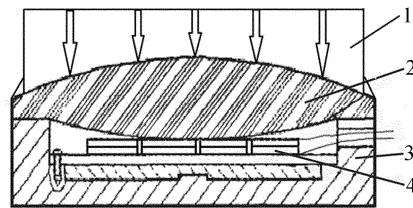
(2) 激振力。当应力不太大(小于压电陶瓷的许用应力)时, 由压电效应产生的极化强度与应力成线性关系。压电陶瓷振动发电的激励方式有: 强制振动式、冲击自由振动式和惯性振动式 3 种。圆形压电陶瓷片由于采用 LE 振动模式, 通常选择强制振动式, 即通过外界施加振幅(如利用带有突起圆盘的转动或通过按钮直接按压), 迫使压电陶瓷片产生交替的弯曲变形来获得电能。

(3) 支撑方式。(1)式、(2)式为在压电陶瓷片周边不夹持的前提下得出的, 因此压电陶瓷片的支撑方式对输出电压也有一定的影响。经进一步实验得出, 简单支撑条件下的压电陶瓷输出电压比其他支撑条件下的输出电压都要高, 这是因为压电振子在简单支撑条件下, 整个压电振子外表面呈向外伸展状态, 这时产生的电荷最多。所以圆形压电振子更适合在简单支撑方式下工作。

(4) 联接方式。(1)式、(2)式仅讨论单个压电陶瓷片的情况, 为使压电发电装置在较小的激励强度下具有较强的发电能力, 可以采用多片压电陶瓷片联接的方式。压电陶瓷片在制作的时候会极化, 所以按压产生形变时就会有正负极之分, 从而产生串联和并联 2 种联接方式, 串联接法的输出电压大, 并联接法的输出电流大(输出电荷多)。综合 2 种方式的优点, 采用多片压电陶瓷片串并联联接的方式构成压电陶瓷组, 以提高压电发电装置俘获电能的能力。

综合上述 4 个方面的分析, 压电发电装置的

结构原理如图 2 所示。



1. 激振器 2. 上缓冲体 3. 下外壳体 4. 压电陶瓷组

图 2 压电发电装置结构示意图

对上述压电发电装置进行测试, 初步测试压电陶瓷的性能。将装置的 2 条引出线直接接入示波器, 以 1 Hz 的频率对装置进行激振, 测定电极两端的电压。测试结果如图 3 所示, 两极间的电压峰峰值为 85.60 V, 最大值为 70.00 V。

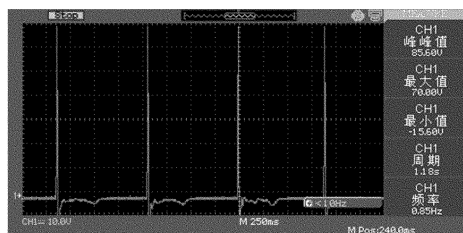


图 3 压电陶瓷输出电压测试结果

### 3 电能的管理

压电陶瓷产生高电压、小电流, 电能是瞬时的, 而且在电能提取过程中压电陶瓷对其有阻尼效应。因此, 压电发电装置产生的电能相对较少, 还不能直接满足大部分电路的供电要求, 必须设计压电发电电源电路, 对压电发电装置产生的电能进行能量转换和存储。

压电发电装置俘获的能量, 通过接入到电能收集单元、电压控制单元和电能存储单元, 实现对电能的有效管理, 以供负载使用。其中, 电能收集单元采用全波桥式整流电路实现整流和滤波, 电压控制单元采用 Buck 型 DC-DC 降压变换电路实现稳压<sup>[13]</sup>。根据上述要求, 选取 LTC3588-2 电源芯片<sup>[14]</sup>, 其具有 1 个集成的低损失全波桥式整流器和 1 个集成的高效率迟滞降压型 DC/DC 转换器, 可以满足高输出阻抗电源(如压电陶瓷发电装置)的能量收集要求。

LTC3588-2 芯片具有一个 16 V 上升门限的超低静态电流欠压闭锁(UVLO)模式, 改善了采用高电压受限型输入时的功率利用率, 实现了

从具有高开路电压的压电发电装置的高效能量抽取,而且能量通过一个高效率同步降压型稳压器从输入电容器转移至输出,16 V UVLO 门限实现输入至输出电流的倍增,如图 4 所示。

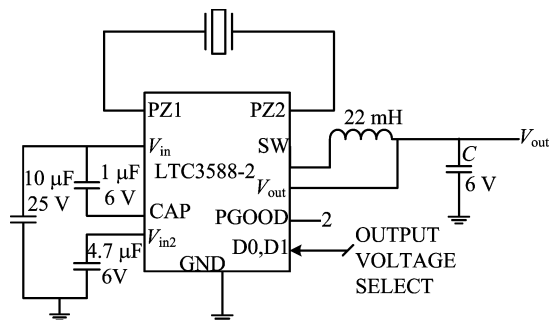


图 4 电能采集电路

此外,可通过引脚来选择 4 种输出电压 (3.45、4.10、4.50、5.00 V),连续输出电流高达 100 mA,适合锂离子电池和磷酸铁锂 ( $\text{LiFePO}_4$ ) 电池以及超级电容器充电。

电能存储单元采用可重复充电的锂电池进行储能。LTC3588-2 芯片选择的输出电压为 5 V,所以采用 MAX1811 芯片对电池进行快速充电<sup>[15]</sup>。MAX1811 是一种高集成度电池充电器 IC,所需外围元件极少,易于控制电路体积,如图 5 所示。

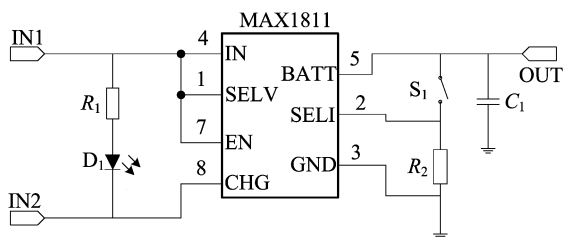


图 5 电能存储电路

当 LTC3588-2 芯片输出电压达到 MAX1811 充电控制端输入电压要求时,以上电路开始工作,通过引脚 SELI 设定充电电流 100 mA 或 500 mA,从而实现快速充电。

按照上述电路图进行电路的焊接,以发光二极管作为电路的负载接入回路中,对整个压电发电装置进行测试,如图 6 所示。

给予压电发电装置持续稳定的激励,测得输出电压 5 V,输出电流 5 mA,发光二极管点亮。撤销激励后,二极管的亮度由强变弱直至熄灭。

上述实验结果表明压电发电装置工作平稳正常,满足预期的性能指标。

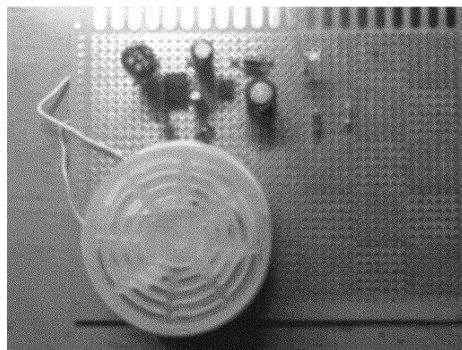


图 6 压电发电装置实物图

## 4 结束语

本文提出了一套完整的压电陶瓷发电装置的设计与制备优化方案,初步解决了压电发电电量不足和无法为低功耗的电路持续供电的问题。

通过搭建实际的简易装置进行测试和验证,在误差允许的范围内,实验结果与理论分析相符,初步证明了该能量转换系统为低功耗负载供电的可行性。因此,在满足环境低功耗自供电要求方面,压电陶瓷发电有着广阔的应用前景。

为了改进和完善压电发电装置的发电性能,让其能够得到更广泛的应用,进一步的研究工作有以下几点。

(1) 在上述装置的基础之上,进一步优化压电陶瓷片的性能参数、结构和尺寸,提高能量的转换效率。

(2) 进一步寻找更优性能的压电材料,尝试采用新型压电陶瓷替代传统的 PZT 陶瓷。

(3) 电能管理电路有一定的损耗,应进一步优化电路设计,减少能量损耗,提高整个发电装置的发电能力。

(4) 压电陶瓷发电装置的制备过程较复杂,下一步要优化制作流程,降低成本。

(5) 拓宽此装置的应用领域,能够更好地应用于生产生活实践中。

## [参 考 文 献]

- [1] 曲远方. 现代陶瓷材料及技术[M]. 上海:华东理工大学出版社,2008:154—165.
- [2] 张福学,王丽坤. 现代压电学[M]. 北京:科学出版社,2001:12—52.
- [3] 刘 爽. 锆钛酸铅(PZT)陶瓷材料相关技术与应用研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2010.

(下转第 1396 页)

把本文模型和经典 EOQ 模型对比检验,为企业库存决策提供有价值的参考。

### [参 考 文 献]

- [1] Harris F W. How many parts to make at once[J]. *Factory, Mag Manage*, 1913, 10(2): 135—136, 152.
- [2] Porteus E L. Optimal lot-sizing process quality improvement and setup cost reduction[J]. *Oper Res*, 1986, 34: 137—144.
- [3] Rosenblatt M J, Lee H L. Economic production cycles with imperfect production processes [J]. *IIE Trans*, 1986, 18: 48—55.
- [4] Lee H L, Rosenblatt M J. Simultaneous determination of production cycles and inspection schedules in a production system[J]. *Manage Sci*, 1987, 33: 1125—1137.
- [5] Tapiero C. Production learning and quality control[J]. *IIE Trans*, 1987, 19: 362—370.
- [6] Fine C H. A quality control model with learning effects[J]. *Oper Res*, 1988, 36: 437—444.
- [7] Fine C H, Porteus E L. Dynamic process improvement[J]. *Oper Res*, 1989, 37: 580—591.
- [8] Chand S. Lot sizes setup frequency with learning in setups and process quality [J]. *Eur J Oper Res*, 1989, 42: 190—202, 290.
- [9] Cheng T C E. An economic production quantity model with flexibility and reliability considerations[J]. *Eur J Oper Res*, 1989, 39: 174—179.
- [10] Cheng T C E. Economic order quantity model with demand-dependent unit production cost and imperfect production processes[J]. *IIE Trans*, 1991, 23: 23—28.
- [11] Hong J, Xu S H, Hayya J C. Process quality improvement and setup reduction in dynamic lot-sizing[J]. *Int J Prod Res*, 1993, 31: 2693—2708.
- [12] Salameh M K, Jaber M Y. Economic production quantity model for items with imperfect quality [J]. *Int J Prod Econ*, 2000, 64: 59—64.
- [13] Taguchi G, Wu Y. Introduction to off-line quality control [J]. *Central Japan Qual Contr Assoc*, 1979: 1—25.
- [14] Bryne D M, Taguchi S. The Taguchi approach to parameter design[J]. *ASQC Quality Congress Transactions*, Anaheim, CA, 1986, 40: 168—177.
- [15] Taguchi G, Clausing D. Robust quality[J]. *Harvard Business Rev*, 1990, 68: 65—75.
- [16] 茆诗松, 程依明, 濮晓龙. 概率论与数理统计教程 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2005: 81—90.

(责任编辑 闫杏丽)

### (上接第 1312 页)

- [4] 曾 平, 佟 刚. 压电发电能量储存方法的初步研究[J]. *压电与声光*, 2008, 30(2): 230—235.
- [5] 杜英哲, 焦 达. 基于 PMNT 压电陶瓷的能量采集技术[J]. *机电产品开发与创新*, 2010, 23(6): 10—14.
- [6] 齐洪东, 杨 涛. 微型压电陶瓷振动发电技术研究综述[J]. *传感器与微系统*, 2007, 26(5): 1—4.
- [7] 毛剑波. PZT 压电陶瓷滤波器的烧结工艺研究[J]. *合肥工业大学学报: 自然科学版*, 2005, 28(2): 135—137, 141.
- [8] 王 强. 基于压电材料的振动能量采集技术的研究[D]. 江苏镇江: 江苏大学, 2008.
- [9] Umeda M, Nakamura K, Ueha S. Analysis of the transformation of mechanical impact energy to electric energy using piezoelectric vibrator [J]. *Jpn J Appl Phys*, 1996, 35: 3267—3273.
- [10] 闫世伟, 杨志刚. 压电陶瓷能量转换系统[J]. *吉林大学学报: 工学版*, 2008, 38(2): 344—348.
- [11] 栾桂冬, 张金铎. 压电换能器和换能器阵[M]. 北京: 北京大学出版社, 2005: 99—294.
- [12] Shenck N S, Paradiso J A. Energy scavenging with shoe-mounted piezoelectrics[J]. *IEEE Micro*, 2001, 21(3): 30—42.
- [13] 张 兴. 电力电子技术[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 55—96.
- [14] Linear. LTC3588-2 piezoelectric energy harvesting power supply with 14V minimum vin datasheets [EB/OL]. [2013-01-20]. <http://www.linear.com/product/LTC3588-2>.
- [15] Maximintegrated. Max1811 USB-powered li + charger datasheets[EB/OL]. [2013-01-20]. <http://china.com/datasheet/index.mvp/id/2536/t/al>.

(责任编辑 张 镅)