**文章编号:**1004-2474(2016)03-0445-05

# 微型压电电磁振动能采集器设计制作工艺研究

杜小振1,曾祥伟1,2,关 乐2,张 然2,张龙波1

(1.山东科技大学 机械电子工程学院,山东 青岛 266510; 2.大连理工大学 机械工程学院,辽宁 大连 116024)

摘 要:为收集环境中普遍存在的振动能,设计了一种微型压电电磁式振动能量采集器,研究系统设计参数对 输出功率的影响因素。依据压电电磁集成发电工作原理设计了复合采集器,建立能量转换的理论计算模型分析压 电电磁复合发电系统的输出功率及其与感应线圈高度的关系,分别讨论了压电和电磁独立发电系统和集成发电系 统等的输出功率及其相互关系。经反复试验确定了微电源集成制作流程。

关键词:压电发电;电磁发电;微电源;微工艺;微机电系统(MEMS)

中图分类号:TM91 文献标识码:A

# Design and Fabrication Process of Micro Piezoelectric-electromagnetic Vibration Energy Harvester

DU Xiaozhen<sup>1</sup>, ZENG Xiangwei<sup>1,2</sup>, GUAN Le<sup>2</sup>, ZHANG Ran<sup>2</sup>, ZHANG Longbo<sup>1</sup>

( 1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, China;
 2. College of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract**: A micro piezoelectric-electromagnetic vibration energy harvester is designed to collect the widespread vibration energy. The effect of the system design parameters on the output power is investigated. The electricity generation principle of the vibration energy harvester is discussed and the calculation model is established. The relationship between the output power of micro piezoelectric-electromagnetic vibration energy harvester and the height of induction coil is analyzed based on the established energy transformation model. The micro fabrication process is explored to fabricate the micro compound energy harvester prototype.

Key words: piezoelectric power generation; electromagnetic power; micro power; micro technology; micro electromechanical systems(MEMS)

0 引言

利用微加工技术制作的微机电系统(MEMS) 产品已广泛应用到无线传感网络、医疗与卫生、生物、环境监测、气象预报、军事、信息通信和矿井检测 等领域,当前研究的无线传感器等微系统主要依赖 传统电池供能,但其有限的使用寿命阻碍了各类微 机电系统的广泛应用。2000年以来,国内外学者开 始研究采用环境中普遍存在的振动能驱动发电的微 电源,且能量转换形式以电磁式和压电式为主<sup>[1]</sup>。 压电式微电源具有输出电压高,结构简单,易与采用 硅基体材料的微电子传感器集成,外围能量控制器 件较少,无电磁干扰等优点,但输出电流低;而电磁 式微电源输出电流高,电压低。本文研究将压电和 电磁两种能量转换结构集成,既综合了压电转换和 电磁转换的优点,又提高了微电源的能量转换效率 和能量密度<sup>[2-3]</sup>。

Vinod R C 等<sup>[2]</sup> 通过实验说明压电-电磁耦合 装置的总输出功率并不是单个系统输出功率简单叠 加。哈尔滨工业大学的谢涛课题组<sup>[4-5]</sup> 对基于谐振 式悬臂梁的压电-电磁复合俘能技术开展了初步研 究,发现复合后压电梁的最大输出能量有所降低,但 复合电源总的输出功率得到提高。Yonas T 等<sup>[6]</sup>设 计和制作了一种复合式压电-电磁集成能量采集器, 测试结果表明,低频率时,电磁系统输出功率高;高

收稿日期:2015-07-08

基金项目:国家自然基金资助项目(51105234);中国博士后科学基金资助项目;山东省科技发展计划基金资助项目(2013YD04018);青岛 市黄岛区科技项目小微企业发展和孵化器专项基金资助项目;应用研究与公共卫生专项基金资助项目;青岛市博士后基金资助 项目

作者简介:杜小振(1978-),男,河南邓州人,副教授,博士,主要从事微电源,海洋能发电和传感器技术等研究。E-mail: du\_xzh@163.com。

频时,压电系统输出功率高,压电-电磁系统结合实 现宽频范围产生俘能。Bin Yang 等[3] 对 3 种压电-电磁集成结构建立了输出功率理论计算模型;同时 针对该结构进行有限元分析,结果表明:磁铁数量、 线圈和磁铁相对位置、放置磁铁的极化方向等参数 都对能量收集装置的输出电压和功率具有较大影 响。美国霍尼韦尔国际公司<sup>[7]</sup>设计了一种压电电磁 集成发电装置,实现了压电电磁复合发电、储存和输 出一体化。为了提高复合发电效率,高世桥等[8]提 出一种由多俘能单元组成的压电电磁复合式宽频俘 能器,设计多个俘能单元悬臂梁尺寸自动适应多个 环境振动频率,实现宽频发电。Noha A Aboulfotoh 等<sup>[9]</sup>提出一种自动调频的压电电磁复合能量采集装 置,通过调整两块磁铁间距来改变悬臂梁的机械应 变,从而维持悬臂梁与环境振动共振,提高发电效 率。压电-电磁集成微电源计算理论、结构设计及制 造工艺仍处在探索阶段。本文研究基于 MEMS 技 术的压电电磁式振动能量采集器,提出一种3层结 构压电电磁式集成振动能采集器,完成电源的输出 性能理论建模分析,探索完善压电电磁复合能量采 集器制作工艺。

1 能量采集器模型结构和工作原理

微型压电电磁式振动能量采集器模型结构示意 图如图1所示。方形铜线圈位于顶层硅片上表面, 永磁体位于压电硅悬臂梁中心,正对顶层铜线圈,上 下硅片与中间的 PCB 板粘结。悬臂梁的一阶振型 为垂直于永磁体所在平面上、下振动,永磁体的磁极 方向沿圆柱体轴线。



图 1 微型能量采集器示意图

能量采集器的基本工作原理为:当外界振动作 用到压电悬臂梁上时,悬臂梁带动固定于其上的永 磁体上下间歇振动。首先,根据法拉第电磁感应定 律,当通过线圈的磁通量发生变化,线圈内将产生感 应电动势和感应电流;其次,振动过程伴随悬臂梁表 面发生形变从而引起附着其上的压电层发生形变, 根据压电材料的正压电效应,形变的压电层内部产 生电极化现象,在压电层的上下表面产生极性相反 的自由电荷,形成电位差,外接电路产生电流从而输 出电能;最后,对压电-电磁复合发电输出电能综合 管理实现集成发电。

# 2 微电源功率及其与系统阻尼关系

输出功率是振动能采集器的重要性能指标,本 节分别计算压电和电磁部分输出功率和采集器总输 出功率。另外,由于系统能量输出特性与共振的幅 度受结构阻尼比影响,阻尼比越小,能量共振峰越陡 峭,而对应的结构振幅就越大,结构阻尼在受迫振动 中是不容忽视的,为此,本节分析了阻尼与输出功率 的关系。

### 2.1 压电发电部分功率计算

压电能量采集器单独发电输出功率为

$$P_{\rm PZT} = \frac{V_{\rm o}^2 R_{\rm Lp}}{(R_{\rm s} + R_{\rm Lp})^2}$$
(1)

式中:V。为开路电压; R<sub>Lp</sub>为外接负载电阻; R<sub>s</sub>为电源内阻。

当 R<sub>Lp</sub> = R<sub>s</sub> 时,功率输出达到峰值,则压电发电 最大输出功率为

$$P_{\rm PZT} = \frac{V_{\rm o}^2}{4R_{\rm S}} \tag{2}$$

V。由结构应力 σ 和压电材料的材料特性所决定,即

$$V_{o} = \frac{-d_{3i}t_{p}\sigma}{\varepsilon}$$
(3)

式中:一d<sub>3i</sub>为压电应变常数(取 d<sub>31</sub>或 d<sub>33</sub>模型,本文 压电材料受力发生弯曲变形,属于 d<sub>31</sub>压电模型);t<sub>p</sub> 为压电层厚度; c 为压电材料的绝对介电常数。

由式(2)、(3)得到压电部分输出功率为

$$P_{\rm PZT} = \frac{\left(\frac{-d_{3i}t_{\rm p}\sigma}{\varepsilon}\right)^2}{4R_{\rm s}} \tag{4}$$

悬臂梁式结构的平均结构应力为

$$\sigma = \frac{3Eca}{4L^2 \zeta_1 \omega_s^2} \tag{5}$$

式中:E为压电悬臂梁等效弹性模量;c为压电层 上、下电极间距;a为激振源的加速度振幅;L为悬 臂梁长度;ω。为激振源频率(假设悬臂梁在共振频 率下工作);ζ,为系统总阻尼比。由式(4)、(5)得压 电部分输出功率如下式,其随系统总阻尼的增加而 减少。

$$P_{PZT} = \frac{9\left(\frac{-d_{3i}t_{p}Eca}{\varepsilon L^{2}\zeta_{1}\omega_{s}^{2}}\right)^{2}}{64R_{s}}$$
(6)

## 2.2 电磁发电部分功率计算

根据法拉第电磁感应定律,永磁铁与感应线圈

相对运动导致永磁体切割磁感线,线圈中会产生感 应电流。电磁部分独立发电输出功率<sup>[10]</sup>

$$P_{\rm em} = \frac{m_{\rm s}\omega_{\rm s}^3(\boldsymbol{\zeta}_{\rm em})Y^2}{4\boldsymbol{\zeta}_{\rm t}^2} \tag{7}$$

式中:m<sub>s</sub>为悬臂梁结构等效质量(包括悬臂梁与质量块,即复合发电结构中的永磁体);ω<sub>s</sub>为激振源振动频率;ζ<sub>em</sub>为电磁阻尼;Y为激振源振幅。

当 R<sub>Coil</sub> = R<sub>Lem</sub> (R<sub>Lem</sub> 为外接负载电阻; R<sub>Coil</sub> 为感 应线圈内阻)时,电磁部分输出功率达到峰值,则

$$P_{\rm em} = \frac{(NBl\omega_{\rm s}Y)^2}{8\zeta_{\rm t}(R_{\rm Coil} + R_{\rm Lem})}$$
(8)

 $a = \omega_b^2 Y^{[11]}, \omega_b$ 为悬臂梁固有频率。设在电磁激励发电过程中励磁频率即悬臂梁激振频率,则 $\omega_s = \omega_b$ ,经整理得电磁发电部分最大输出功率如下式,电磁部分输出功率亦随系统总阻尼增加而减少。

$$P_{\rm em} = \frac{(NBla)^2}{16\zeta_t \omega_s^2 R_{\rm Coil}}$$
(9)

式中:N为感应线圈的圈数;l为感应线圈长度;B 为线圈周围的磁通密度。

本文采用圆柱形永磁铁,则线圈周围的磁通密 度为

$$B = \frac{B_{\rm r}}{2} \left[ \frac{d + h_{\rm m}}{\sqrt{(d + h_{\rm m})^2 + r^2}} - \frac{d}{\sqrt{d^2 + r^2}} \right]$$
(10)

式中:d 为永磁铁到感应线圈的垂直距离;B<sub>r</sub> 为永 磁铁剩余磁通密度;h<sub>m</sub> 为永磁铁高度;r 为永磁铁半 径。

# 2.3 系统总阻尼计算

压电电磁复合系统的总阻尼可等效为由压电阻 尼、电磁阻尼和机械阻尼组成,其中压电阻尼比<sup>[13]</sup>为

$$\zeta_{\rm p} = \frac{\omega_{\rm b} d_{31}^2 \left(\frac{E}{\varepsilon_{\rm p}}\right)}{2 \sqrt{\omega_{\rm b}^2 + \frac{1}{\left(R_{\rm L} C_{\rm p}\right)^2}}} \tag{11}$$

式中: $\epsilon_p$ 为绝对介电常数; $C_p$ 为电极间电容; $R_L$ 为 压电负载电阻。

电磁阻尼比[12]为

$$\boldsymbol{\chi}_{em} = \frac{(NBl)^2}{2m_s \boldsymbol{\omega}_s (R_{Lem} + R_{Coil})}$$
(12)

机械阻尼主要包括结构阻尼、干摩擦阻尼和粘性 阻尼,对于压电电磁式能量采集器,其机械阻尼主要 为机构阻尼和粘性阻尼。由于悬臂梁的振动幅度很 小,平均运动速度极小,可以认为阻尼与速度成正比, 装置在空气的粘性阻尼远小于装置本身的机构阻尼, 可忽略,因此机械阻尼等效为系统的结构阻尼为

$$\zeta_{\rm m} = b_{\rm s}/2m_{\rm s}\omega_{\rm s} \tag{13}$$

式中 b<sub>s</sub> 为结构阻尼系数,它取决于系统本身的质量、弹性模量、形状和尺寸等因素。

综合式(11)~(13),压电电磁复合发电系统总 阻尼比为

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\zeta}_{\scriptscriptstyle 1} &= \boldsymbol{\zeta}_{\scriptscriptstyle P} + \boldsymbol{\zeta}_{\scriptscriptstyle em} + \boldsymbol{\zeta}_{\scriptscriptstyle m} = \frac{\boldsymbol{\omega}_{\scriptscriptstyle b} d_{31}^2 \left(\frac{E}{\boldsymbol{\varepsilon}_{\scriptscriptstyle P}}\right)}{\sqrt{\boldsymbol{\omega}_{\scriptscriptstyle b}^2 + \frac{1}{\left(R_{\scriptscriptstyle LP} C_{\scriptscriptstyle P}\right)^2}}} + \\ & \frac{(NBl)^2}{2m_{\scriptscriptstyle s} \boldsymbol{\omega}_{\scriptscriptstyle s} \left(R_{\scriptscriptstyle Lem} + R_{\scriptscriptstyle Coil}\right)} + \frac{b_{\scriptscriptstyle s}}{2m_{\scriptscriptstyle s} \boldsymbol{\omega}_{\scriptscriptstyle s}} \end{aligned} \tag{14}$$

#### 2.4 复合发电总功率

压电电磁共振耦合发电装置总输出功率等于其 压电部分和电磁部分输出功率总和,本文设计的 4L 型悬臂梁结构在共振时 4 根悬臂梁同时等幅振动, 简化为 4 根独立的悬臂梁建模计算,则依据式(6), 压电部分输出功率计为 4P<sub>PZT</sub>。合并式(6)、(9)得 压电电磁复合发电装置总输出功率为

$$P_{c} = P_{em} + 4P_{PZT} = \frac{(NBla)^{2}}{16\zeta_{t}\omega_{s}^{2}R_{Coil}} + \frac{9\left(\frac{-d_{31}t_{p}Eca}{\varepsilon L^{2}\zeta_{t}\omega_{s}^{2}}\right)^{2}}{16R_{s}}$$
(15)

分析系统的总阻尼对耦合发电系统的总输出功 率影响。压电层的内阻 R<sub>s</sub> = 250 kΩ,图 2 为独立的 压电系统、电磁系统、压电电磁复合系统等随电磁感 应线圈高度变化时的输出功率关系图。经分析发现 在环境振动相同条件下,复合系统中电磁部分的输出 功率比单独的电磁系统输出功率低,复合系统中压电 部分的输出功率比单独的压电系统输出功率低;电磁 部分输出功率随着线圈高度的增加而增加;复合系统 中压电部分的输出功率随着线圈高度的增加而增加;复合系统 中压电部分的输出功率随着线圈高度的增加而减少, 原因是随着线圈高度的增加,系统总阻尼增加;压电 电磁复合系统的输出功率高于单独的压电系统输出 功率和单独的电磁系统输出功率,但低于压电系统和 电磁系统独立发电所能输出功率之和。





包括感应线圈,永磁体-硅基悬臂梁拾振系统制作工 艺和采集器整体样机微组装3部分。

# 3.1 线圈制作工艺流程

线圈制作采用了溅射与电镀两种方式。

1) 溅射单层铜线圈制作工艺流程如图 3 所示。 图 3(b)、(f)将影响感应线圈形状完整性;其中图 3(c)溅射 Ti 为了提高基地结合性能;图 3(e)铜表面 溅射金层作保护层防止铜氧化。溅射的铜层厚度较 薄,控制在 1 μm 左右。



图 3 溅射方法制作感应线圈的工艺流程图

2)单层铜线圈电镀工艺如图4所示。图4(b)、 (d)、(f)、(i)决定线圈形状完整性;图4(c)溅射的种子层为铜,与电镀材料相同,简化了去除种子层的后续工艺。电镀铜线圈高度达10μm。以上工艺保证各匝线圈间隙的正胶去除干净,线条连续均匀,电流导通。图5为溅射工艺制作得到的微线圈电子显微镜照片,满足电磁感应发电要求。



图 4 电镀方法制作感应线圈的工艺流程图



图 5 平面螺旋线圈

# 3.2 硅基压电悬臂梁制作工艺流程

硅基压电悬臂梁制作工艺流程如图 6 所示。图 6(c)、(g)、(j)、(k)试验对器件制作精度影响分析: 图 6(g)中制备的 PZT 薄膜厚度及品质将决定复合 式能量采集器压电部分的工作性能;图 6(j)对 PZT 材料的图形化需采用较精确的腐蚀液配比,其可减小 钻蚀,避免 PZT 层上、下电极边缘形成接触短路导 通;图 6(c)、(k)可控制能量采集器悬臂梁厚度精度。



图 6 4L 型悬臂梁工艺流程图

图 7 为释放前的悬臂梁图,在中间正方形硅框 粘贴永磁铁:汝铁硼 N-30。



图 7 硅基悬臂梁图

#### 3.3 能量采集器的组装步骤

1) 将加工好悬臂梁的硅片和溅射铜线圈的硅片 进行切片,微电源单元平面尺寸为 20 mm×20 mm。

2) 在厚为1 mm 的 PCB 板中间挖出 10 mm×
 10 mm 的正方形框后,以该框为中心,PCB 板为
 100 mm×100 mm 的正方形单元。

3)把切割好的铜感应线圈、PCB板和悬臂梁的 硅片等用胶自上而下粘贴在一起。其中,溅射线圈 的一面朝上,有 PZT 的一面朝下。

4) 最后将直径 Ø2 mm,高1 mm 的永磁铁黏结 在由 L 型悬臂梁围成的正方形硅框上。

组装后的器件如图 8 所示。



图 8 采集器组装图

4 结束语

本文完成微型压电电磁式振动能量采集器模型 结构设计。理论推导压电电磁复合系统的输出功率, 分别讨论了输出功率与系统阻尼、线圈高度的关系。 研究发现线圈高度增高、电磁阻尼比增大,则电磁部 分输出功率提高;此时,耦合系统中压电部分输出功 率却有所减少。结果表明,压电电磁复合系统的输出 功率高于压电系统独立发电和电磁系统独立发电输 出功率,但略低于二者独立发电之和。根据分析设计 复合能量采集器的结构并经实验确定制作工艺流程。

# 参考文献:

- [1] ROUNDY S. A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes[J]. Computer Communi- cations, 2003, 26(11):1131-1144.
- [2] VINOD R C, PRASAD M G, FRANK T F. A coupled piezoelectric-electromagnetic energy harvesting technique for achieving increased power output through damping matching[J]. Smart Materials and Structures, 2009,18(9): 1-11.

- [3] YANG Bin, LEE Chengkuo, WEI L K, et al. Hybrid energy harvester based on piezoelectric and electromagnetic mechanisms [J]. Micro/Nanolith MEMS MOEMS, 2010,9(2): 1-10.
- [4] 任佳琦. 基于谐振式悬臂梁的压电-电磁复合俘能技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
- [5] WANG Hongyan, TANG Lihua, GUO Yuan, et al. A 2DOF hybrid energy harvester based on combined piezoelectric and electromagnetic conversion mechanisms[J]. Journal of Zhejiang University Science A (Appl Phys & Eng), 2014,15(9):711-722
- [6] YONAS T, ZHANG Shujun, SHASHANK P. Multimodal energy harvesting system: piezoelectric and electro- magnetic [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures March, 2009,20: 625-632.
- [7] KARAMI M A, INMAN D. Nonlinear hybrid energy harvesting utilizing a piezo-magneto-elastic spring[J]. Proc of SPIE, 2010: 7643.
- [8] 高世桥. 基于 MEMS 技术的压电-电磁复合式宽频俘 能器:103199738A[P].2013-07-10
- [9] ABOULFOTOH N A, ARAFA M H, MEGAHED S M. A self-tuning resonator for vibration energy harvesting[J]. Sensors & Actuators A Physical, 2015 (2013): 328-334.
- [10] BEEBY S P, TORAH R N, TUDOR M J, et al. A micro electromagnetic genenrator for vibration energy harvesting[J]. Micromech Microeng, 2006,17:1257.
- [11] 刘雪花,温志渝,温中泉. 超级电容器在 MEMS 振动 发电机中的应用[J].中国机械工程,2005,16(21): 145-148.
  LIU Xuehua, WEN Zhiyu, WEN Zhongquan, et al. Applications of supercapacitor in MEMS Vibration generator[J]. Chinese Mechanical Engineering, 2005,
- [12] EL H M, GLYNEE J P, WHITE N M, et al. Design and fabrication of a new vibration based electromechanical power generator [J]. Sensors Actuators, 2001,92:335-342.

16(21):145-148.

[13] CHALLA V R, PRASAD M G, FISHER F T. Evaluation of coupled piezoelectric and electromagnetic technique for vibration energy harvesting[C]//San Diego, California: The 15th International Symposium on: Smart Structures and Materials & Nondestructive Evaluation and Health Monitoring. International Society for Optics and Photonics, 2008.