

风车型低频压电振动能量采集器的研究与设计

梁光胜, 李 艺

(华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘 要:基于微机电系统(MEMS)设计了风车型结构的压电振动能量采集器,通过压电效应将低频振动能量转化为电能,用以解决环境中低频能量采集的问题。风车型结构的压电振动能量采集器以硅为基底,以 PZT-5A 为压电材料,包含上、下电极;4 条悬臂梁旋转连接中心质量块与四周固定端,类似于风车结构。数学建模与有限元仿真分析表明,在结构尺寸与材料相同的情况下,圆弧风车型结构的谐振频率较直接连接、直角连接结构的谐振频率更低;4 条悬臂梁距离中心质量块越远,谐振频率越低;在 $0.1g(g=9.8\text{ m/s}^2)$ 加速度谐振状态下,输出电压约为 6.2 V,最大位移接近 1.2 mm。基于 MEMS 工艺,通过 IntelliSuite 软件研究和定义了风车型振动能量采集器的工艺流程。

关键词:低频振动;能量采集;风车型结构;IntelliSuite 软件;微机电系统(MEMS)工艺

中图分类号: TN384

文献标识码: A

DOI: 10.11977/j.issn.1004-2474.2018.03.027

Research and Design of Low-frequency Piezoelectric Vibration Energy Harvester With Windmill Structure

LIANG Guangsheng, LI Yi

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: A piezoelectric vibration energy harvester with windmill structure is designed based on MEMS. The low frequency vibration energy is converted into electric energy by piezoelectric effect, so as to solve the problem of low frequency energy acquisition in the environment. The piezoelectric vibration energy harvester uses silicon as the substrate, with PZT-5A as piezoelectric material, including upper and lower electrodes; four cantilever beams are rotated to connect the center mass blocks with fixed ends around, which is similar to the windmill structure. The results of mathematical modeling and finite element analysis indicate that under the same sizes and materials of the structure, the arc windmill type structure has lower resonant frequency than the direct connection and the right angle connection structure. The farther the 4 cantilever beams are from the center mass, the lower the resonant frequency. At $0.1g(g=9.8\text{ m/s}^2)$ acceleration resonant, the output voltage is about 6.2 V, and the maximum displacement is close to 1.2 mm. On the basis of MEMS process, the process flow of windmill vibration energy harvester is studied and defined by IntelliSuite software.

Key words: low frequency vibration; energy harvesting; windmill structure; IntelliSuite software; MEMS process

0 引言

随着集成电路和微电子技术的不断发展,具有数据采集和发送功能的微型传感器节点越来越多。随着供能需求的增加,传统化学电池供能暴露出尺寸大、供能时间有限、环境污染严重等缺点^[1-2]。目前,如何有效地获取环境中存在的机械能、热能、光能及电磁辐射能等为便携式微功率设

备和无线传感节点供电已成为各国政府关注的重要问题^[3-4]。

基于环境振动能量的采集技术主要有压电式、电磁式和静电式 3 种。其中,压电式能量采集技术具有高能量密度、无电磁干扰、无需额外电源且易与微机电系统(MEMS)集成等特点,成为振动能量采集领域的研究重点^[5-6]。

横向压电悬臂梁结构是目前压电式振动能量

收稿日期:2017-10-09

作者简介:梁光胜(1966-),男,山东省嘉祥县人,副教授,硕士,主要从事嵌入式系统与智能控制、集成电路及系统芯片设计与应用等方面的研究工作。E-mail:lgsh@ncepu.edu.cn。

收集的主要方式,其具有结构简单,能量采集效率高等特点。为了降低和拓宽谐振频率,获得如风力、水流等更多的能量来源,提高输出电压和功率等^[6-9],国内外科研人员设计了很多改进结构。刘颖等^[6]设计了一、二阶传动低频压电振动能量采集器,将压电振动频率降低到 200 Hz 以下,以适应更低的频振动环境。Jin Yang 等^[7]利用磁耦合方式设计竖直三悬臂梁结构,每两层悬臂梁质量块之间固定有磁铁,以此来提高输出功率。Yongbin ZHANG 等^[8]利用谐振腔和音叉簧片设计了借助风力对压电悬臂梁产生振动,进行能量收集。Shahruz 等^[9]为拓宽单悬臂梁谐振频率,提出了一种悬臂梁阵列结构,将多个谐振频率相近的单悬臂梁进行组合。

基于目前压电振动能量采集结构的研究现状,本文创造性地设计了基于 MEMS 技术的风车型结构的低频压电振动能量采集器。通过 MEMS 仿真软件 IntelliSuite 对其进行仿真分析,得到了前 3 阶振动模态频率与图型,对比了相同尺寸的其他两种结构,并讨论了 4 条悬臂梁与中心质量块距离发生改变时对谐振频率的影响,最后给出了风车型振动能量采集器的工艺流程。

1 结构设计与建模

传统悬臂梁结构包括底座、压电材料、电极材料和质量块,如图 1 所示。其中质量块的主要作用是为了降低谐振频率。为进一步降低谐振频率,提高输出电压与功率,设计了以硅为基底,压电材料为 PZT-5A,上、下电极材料分别为 Au/Ti 和 Pt/Ti(Ti 主要增强 Au 和 Pt 的粘性)的风车型结构的压电振动能量采集器,如图 2 所示。4 条圆弧结构的悬臂梁一端与中心质量块连接,一端固定于 4 条边。在与 4 条边固定的悬臂梁长边上加工电极材料与压电材料,与中心质量块连接的悬臂梁短边上由于振动时应力较小,不作为压电材料的加工区域。

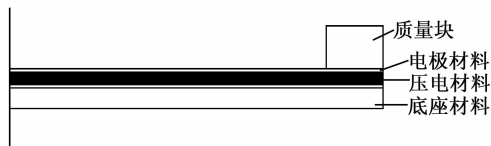


图 1 传统悬臂梁结构

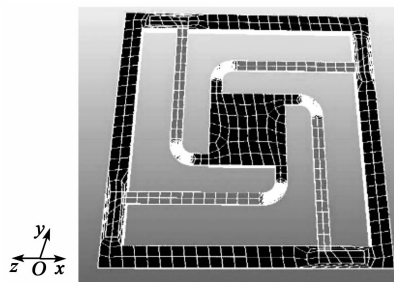


图 2 风车型结构的压电振动能量采集器

为定量分析三自由度的风车型结构的振动能量采集器结构,将其等效为弹簧-质量块-阻尼模型^[10],如图 3 所示。 $z(t)$ 为质量块相对基座移动位移, $x(t) = X\sin \omega(t)$ 为箱体振动位移, $y(t) = z(t) + x(t)$ 为质量块位移。由牛顿动力平衡定律可知,系统方程为

$$kz(t) + (b_e + b_m)\dot{z}(t) + m\ddot{y}(t) = 0 \quad (1)$$

式中: k 为弹簧弹性系数; b_m 为机械阻尼系数; b_e 为电阻尼系数,即表示压电材料转化为电能的部分。由式(1)可得

$$m\ddot{z}(t) + (b_e + b_m)\dot{z}(t) + kz(t) = -m\ddot{x}(t) \quad (2)$$

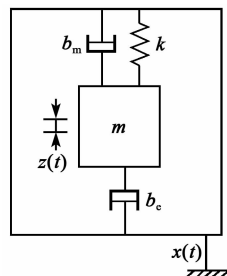


图 3 风车型结构振动能量采集器等效模型

弹簧质量块的本振频率 $\omega_n = \sqrt{k/m}$, 对于悬臂梁而言,刚度 $K = 3EI/l^3$, 其中 E 为弹性模量, I 为矩形截面惯性矩, l 为悬臂梁长。

$$EI = \sum E_i I_i \quad (3)$$

根据风车型振动能量采集器结构(忽略电极层), K 可写成

$$K = 3 \sum \frac{E_i I_i}{l_i^3} \approx \frac{1}{4} \left(\frac{E_s h_s^3}{l_s^3} + \frac{E_{pzt} h_{pzt}^3}{l_{pzt}^3} \right) b \quad (4)$$

式中: b 为悬臂梁各材料层横向宽度; h_s, h_{pzt} 为衬底与压电层厚度; l_s, l_{pzt} 为衬底与压电层的长度; $I = (1/12)bh^3$ 。弹簧质量块质量为

$$m = \sum \rho_i v_i \approx \rho_s v_s + \rho_{pzt} v_{pzt} \quad (5)$$

式中 ρ_s 和 ρ_{pzt} 分别为衬底(含质量块)和压电材料的密度。由此可得弹簧质量块本征频率为

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \approx \sqrt{\frac{\left(\frac{E_s h_s^3}{l_s^3} + \frac{E_{pzt} h_{pzt}^3}{l_{pzt}^3}\right)b}{4(\rho_s v_s + \rho_{pzt} v_{pzt})}} \quad (6)$$

图 2 中,风车型振动能量采集器结构采用 d_{31} 型压电结构。悬臂梁横向弯曲造成其内部沿梁长方向的横向应力变化,从而在压电材料的上、下两平面之间形成电荷堆积和电势差^[11]分别为

$$Q = \frac{IFd_{31}}{h} \quad (7)$$

$$U = \frac{Fg_{31}}{b} \quad (8)$$

式中: d_{31} 为压电应变常数; $g_{31} = d_{31}/\epsilon$ 为压电电压常数, ϵ 为介电常数。

2 结果与讨论

本文采用 MEMS 仿真软件 IntelliSuite 对风车型压电能量采集器结构进行仿真分析,仿真过程中通过 3D Builder 进行模型建立与网格划分,运用 Thermo Electro Mechanical 进行模态分析与谐响应分析,分析过程中四周外表面固定,并将硅衬底与下电极定义为接地,对中心质量块施加沿 z 负方向的 $0.1g(g=9.8\text{ m/s}^2)$ 加速度,在结果中计算谐振频率、位移和电压。工艺流程通过 Blueprint 进行制版,并在 ItelliFab 和 FabSim 进行流程定义与模拟分析。

2.1 风车型压电能量采集器的仿真分析

为了更好地利用自然界中的低频振动能量,设计风车型压电振动能量采集器结构的中心质量块长、宽均为 $2 \times 10^3\text{ }\mu\text{m}$,厚为 $191\text{ }\mu\text{m}$;悬臂梁宽 $300\text{ }\mu\text{m}$ 、厚 $11\text{ }\mu\text{m}$,电极层厚为 $0.2\text{ }\mu\text{m}$;压电层厚为 $3.6\text{ }\mu\text{m}$ 。形成结构的各材料密度、弹性模量和泊松比等材料属性如表 1 所示,其中,PZT-5A 杨氏模量与泊松比采用弹性矩阵方式输入,压电材料还需要输入的属性有压电常数与介电常数,具体数据可参考文献[12]。

表 1 构成风车型压电能量采集器结构的各材料属性

材料	Si	Pt	PZT-5A	Au
密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	2.33	21.45	7.75	19.3
杨氏模量/GPa	190	168	—	70
泊松比	约 0.27	0.38	—	0.44
电阻率/ ($\Omega \cdot \text{cm}$)	—	1.124×10^{-5}	—	2.193×10^{-6}

为了体现圆弧风车型结构的压电振动能量采集器设计的合理性,将其与相同尺寸的图 4(a)、(b)两种结构进行对比,并对 3 种结构进行模态分析,记录下前 3 阶谐振频率如表 2 所示。由表可看出,风车型结构的压电振动能量采集器相对于其他两种结构在各阶次谐振频率均有所降低,尤其是相对于直接连接悬臂梁结构,谐振频率降低至 1/3 以下。对直角型结构与圆弧型结构同时施加 1 Pa 压力,进行静态分析,应力图形如图 5 所示。由图可看出,直角型结构在直角处应力较分散,应力大的区域分布较广,而弧形结构应力大的区域较小,主要集中在弧形的内侧边,渐变性好。

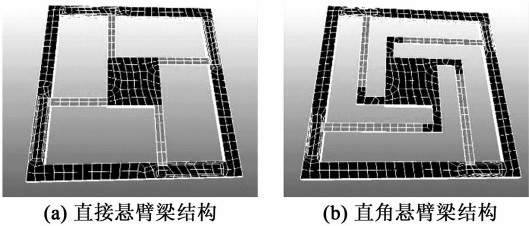


图 4 相同尺寸的两结构

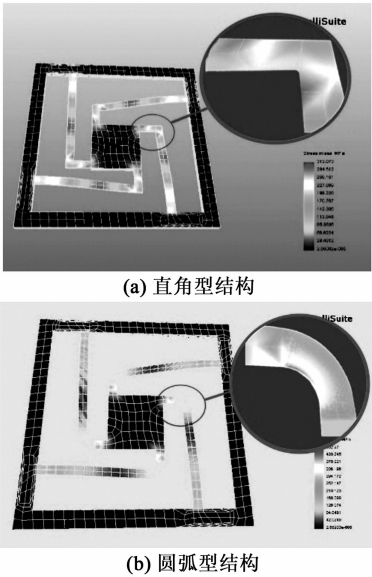


图 5 1 Pa 压力下应力图

表 2 3 种压电能量采集器结构的前 3 阶频率

结构	一阶频率/Hz	二阶频率/Hz	三阶频率/Hz
直接悬臂梁	1 074.02	3 005.62	3 005.79
直角悬臂梁	303.166	875.046	875.406
圆弧悬臂梁	294.900	851.264	851.439

对于传统悬臂梁结构,梁长度越长、宽度越窄、

厚度越薄时,谐振频率越低。基于传统悬臂梁进行改进的其他结构基本相同,因此只研究风车型结构的 4 条悬臂梁距中心质量块距离与谐振频率之间的关系,分析中所有材料的杨氏模量为默认值 (160 GPa),结果如图 6 所示。

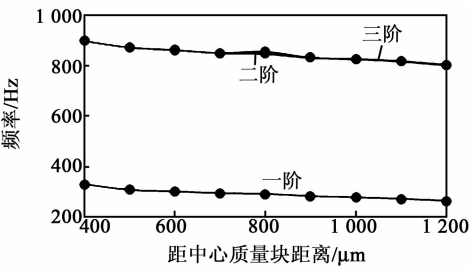


图 6 悬臂梁距中心质量块距离

由图 6 可看出,当悬臂梁距离中心质量块越远,相应阶次的谐振频率越低。由于结构的限制以及抵抗冲击外力的冲击强度和抵抗交变外力的疲劳强度不易过低等,悬臂梁距中心质量块距离不能无限扩大。从整体结构上,距离中心质量块 700 μm 为适宜的距离,接下来的分析中以此结构为依据,其前 3 阶模态图如图 7 所示。

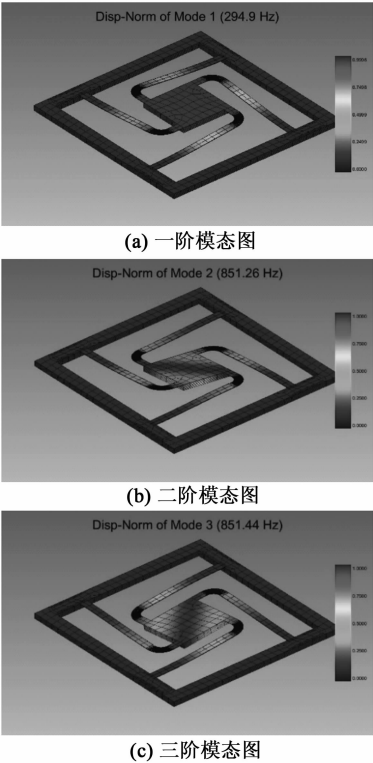


图 7 风车型结构的压电振动能量采集器前 3 阶模态图

由图 7 可看出,一阶振动模态位移沿 z 方向,这是分析应用中主要基于的振动形态,二、三阶振

动模态类似,因此,谐振频率大小接近。对风车型结构的压电振动能量采集器施加沿 z 轴负方向 0.1g 加速度,进行谐响应分析,中心质量块 z 方向的位移与单条悬臂梁输出电势分别如图 8、9 所示。

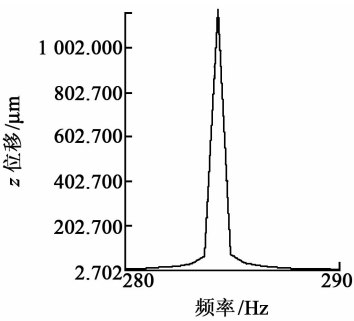


图 8 谐响应分析中心质量块位移输出曲线

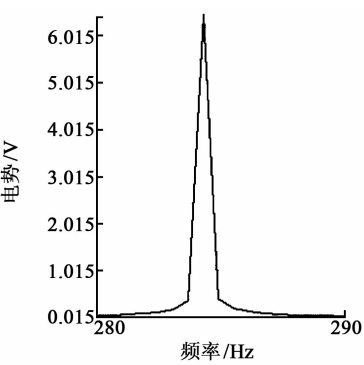


图 9 谐响应分析中单条悬臂梁输出电势曲线

由图 8、9 可见,谐振频率约为 285 Hz(考虑到各材料的属性,故谐振频率比一阶模态频率低),中心质量块 z 方向最大位移接近 1.2 mm,输出电压约为 6.2 V。图 10 为压电材料上表面的电势分布。由图可看出,悬臂梁接近固定端的电势最高,中间电势较低。这是由于振动过程中应力分布不均所致,接近固定端的应力最大,中间较小。

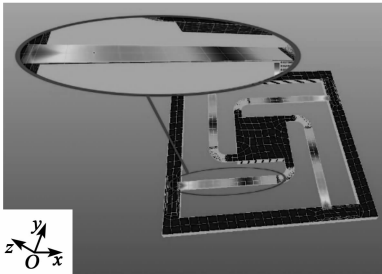


图 10 谐响应分析中单条悬臂梁输出电势分布

2.2 风车型压电能量采集器工艺流程

为使基于 MEMS 技术的风车型振动能量采集

器能够进行加工制造,制作光刻掩模板及每一步工艺流程定义至关重要。基本流程设计及其结果如图11所示。

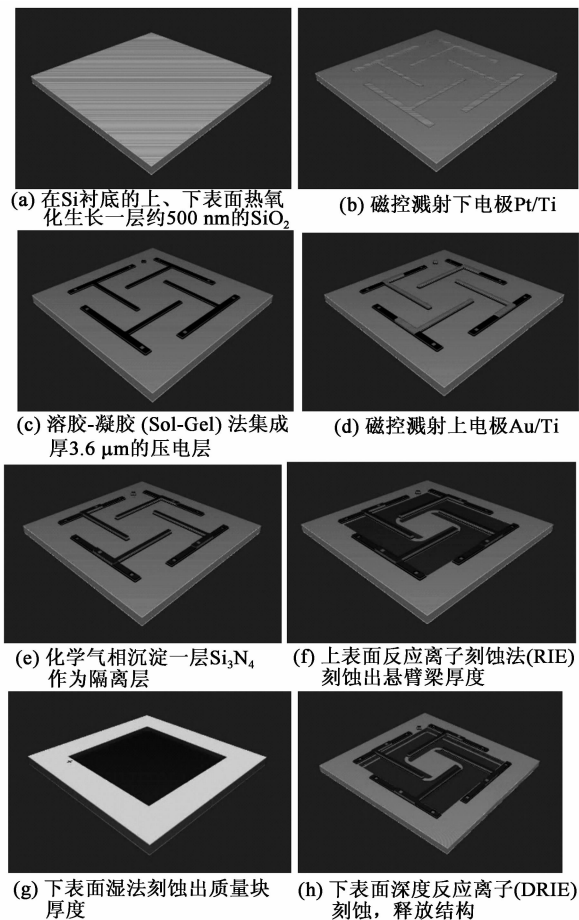


图11 风车型结构的压电振动能量采集器工艺流程

3 结束语

本文设计了风车型振动能量采集器用于收集环境中的低频振动能量。通过仿真分析,带弧度的风车型结构较直接悬臂梁、直角悬臂梁结构在相同尺寸下谐振频率更低。四悬臂梁距离中心质量块越远时,谐振频率越低;当悬臂梁距离中心质量块 $700\ \mu\text{m}$ 时,在 0.1g 加速度情况下,最大输出电压约为 6.2V 。通过IntelliSuite进行制版与流程定义,下一步将进行加工与测试。

参考文献:

[1] 沈修成,方华彬,王亚军,等.基于MEMS的压电微能量采集器的电路研究与测试[J].传感技术学报,2008,

21(4): 692.

- [2] MEIER R, KELLY N, ALMOG O, et al. A piezoelectric energy-harvesting shoe system for podiatric sensing[J]. Engineering in Medicine & Biology Society, 2014: 622.
- [3] 成立,李茂军,王鼎湘,等.基于压电效应的风力发电方法研究[J].压电与声光,2015,37(2): 361-364.
CHENG Li, LI Maojun, WANG Dingxiang, et al. Study on wind power generating method based on the piezoelectric effect[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2015, 37(2): 361-364.
- [4] LI Xiaotian, GUO Mingsen, DONG Shuxiang. A flex-compressive-mode piezoelectric transducer for mechanical vibration/strain energy harvesting[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control, 2011, 58(4): 698.
- [5] 蔡华通,高世桥,李平,等.压电-电磁复合式俘能器的涉及与实验研究[J].压电与声光,2015,37(2): 248-253.
CAI Huatong, GAO Shiqiao, LI Ping, et al. Design and experimental study of hybrid piezoelectric and electromagnetic harvester [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2015, 37(2): 248-253.
- [6] 刘颖,王艳芬,李刚,等. MEMS 低频压电振动能量采集器[J].光学精密工程,2014,22(9): 2476.
- [7] YANG Jin, WEN Yumei, LI Ping, et al. Improved piezoelectric multifrequency energy harvesting by magnetic coupling[J]. Sensors, 2012: 28-31.
- [8] ZHANG Yongbin, PAN Chengliang, MENG Xuekui, et al. Piezo-electric wind energy harvesting device with resonant cavity and tuning fork reeds[J]. IEEE Conference Publications, 2015: 219-222.
- [9] SHAHRUZ S M. Design of mechanical band-pass filters for energy scavenging[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 292(3): 987-998.
- [10] WILLIAMS C B, YATES R B. Analysis of a micro-electric generator for microsystems[J]. Sensors & Actuators A Physical, 1995, 52(1/3): 8-11.
- [11] 丁若尧.基于分形结构的微型宽带振动换能器的设计与制作[D].南京:南京邮电大学,2014.
- [12] 林玲.基于ANSYS的压电陶瓷材料有限元仿真分析[J].科技资讯,2009,36: 39-40.