

文章编号 1004-924X(2009)05-1072-06

悬臂梁单晶压电发电机的实验

袁江波,单小彪,谢 涛,陈维山

(哈尔滨工业大学 机电工程学院,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:建立了悬臂梁单晶压电振子的发电测试系统,针对压电晶体与磷青铜基板材料的厚度比对单晶压电振子输出电压的影响进行了有限元分析,得出了压电晶体与磷青铜基板材料的最佳厚度比并进行了实验验证,同时对具有最佳厚度比的单晶压电振子进行了压电发电能力测试。研究表明,当压电晶体与磷青铜金属基板的最佳厚度比为0.5时,单晶压电振子的输出电压最大,有限元分析与实验结果基本吻合。单晶压电振子输出电压随着负载的增大而增大,而输出功率并不随负载的增大而增大。压电振子存在一个最佳负载,当负载与压电振子内阻相匹配时,输出功率最大,能量转化效率最高。单晶压电振子在负载为50 k Ω 时,输出电压最大可达5.4 V;当负载电阻为10 k Ω 时,负载与压电振子内阻匹配良好,输出功率达到最大为1.18 mW,产生的能量能满足网络传感器等低耗能电子产品的供能需求。

关键词:单晶压电振子;压电发电机;厚度比;有限元分析

中图分类号:TM31;TN384 **文献标识码:**A

Experiment of monocrystal piezoelectric generator with cantilever beam structure

YUAN Jiang-bo, SHAN Xiao-biao, XIE Tao, CHEN Wei-shan

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: With the aim to measure and study the electricity generating performance of Piezoelectric Ceramics(PEC), a measuring system for the electricity generating capacity of the PEC is developed. A piezoelectric cantilever vibrator is designed and the effect of Optimal Thickness Ratios(ORT) of the PEC to the metal plate on the piezoelectric vibrator is analyzed by Finite Element Method(FEM). The results show that the output voltages and power are maximal at the resonance frequency. The ORT of the piezoelectric cantilever vibrator is 0.5 obtained by FEM, which is consistent with the experimental results. Moreover, the output voltages of the piezoelectric cantilever increase as the resistive load increases, and the voltage approaches to 5.4 V when the resistive load is 50 k Ω . Nevertheless, the electrical power decreases when the load resistances are further increased, and the maximal output power is about 1.18 mW from the piezoelectric cantilever in a resistive load of 10 k Ω at the resonance frequency. Experiments show this power level is high enough for some wireless communication systems.

Key words: piezoelectric cantilever vibrator; piezoelectric generator; optimal thickness ratio; Finite Element Method(FEM)

收稿日期:2008-07-03;修订日期:2008-08-27.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50875057);哈尔滨工业大学科研创新基金资助项目(No. HIT. NSRIF. 2008.50)

1 引言

随着集成电路、MEMS 和便携式电子设备的应用日益广泛,以化学电池为主的供能方式存在着诸多弊端,如体积大、质量大、供能寿命有限、需要定期更换等,由此所带来的材料浪费、环境污染等问题也不容忽视,尤其对于目前发展日益迅速的无线网络和嵌入式系统来说,电池供电的缺陷更加明显。因此,如何为这些低耗能的电子产品供能,已成为迫切需要解决的问题。根据能量转换机理的不同,获取电能的有效方法有电磁式^[1]、静电式^[2]和压电式^[3-7]等3类。与其它的发电原理相比,压电发电具有结构简单、不发热、无电磁干扰、无污染和易于实现微小化及集成化等诸多优点,并因能满足低耗能产品的供能需求而成为目前研究的热点^[6]。

以往的研究表明,压电体的发电能力主要取决于压电振子的结构参数、频率和负载等。吉林大学阙君武等^[7]对悬臂梁压电振子进行了数学建模和数值模拟分析,通过数值模拟得出了压电振子中压电晶体与金属基板的最佳厚度比,并分析了金属基板材料的弹性模量与最佳厚度比的关系,进而有利于压电振子的结构优化以提高压电振子的压电发电能力。通常情况下,环境中的能量很有限,且常见振源的频率较低,单晶压电振子在低频低载的情况下,相比于双晶压电振子具有更大的输出能量和更高的能量转化效率^[8]。本文设计制作了悬臂梁单晶压电振子的压电发电测试系统,针对压电晶体与金属基板材料的厚度比对压电振子发电能力的影响进行了有限元仿真分析和实验验证,并对具有最佳厚度比的单晶压电振子进行了压电发电能力测试。

2 压电振子结构及工作原理

压电陶瓷在外电场作用下可发生形变,人们利用这一逆压电效应开发了压电泵^[9]、精密位移机构^[10]、超声波电机^[11]等多种驱动器。与之相反,本文则是利用压电体在外力作用下产生电荷的正压电效应来构造压电发电装置。图1为悬臂梁单晶压电振子的结构示意图,压电振子由金属悬臂梁、压电片和支座组成。金属悬臂梁的上层

粘贴压电材料,在压电层和金属基板上分别引出电极。悬臂梁的一端固定在支座上,另一端随环境的振动源自由振动,其中 L 和 w 分别为压电振子的长和宽, t_p 为压电片的厚度, t_m 为金属基板的厚度,则压电片与金属基板的厚度比为

$$\alpha = t_p / t_m \quad (1)$$

由于外界振动将引起悬臂梁的受迫振动,导致悬臂梁发生弯曲变形,进而引起压电层内应变和应力的变化。根据压电学理论,当压电振子自由端受外力作用而产生弯曲变形时,其表面将有自由电荷生成。压电体所受应力及产生电场的关系可表示为^[12-13]

$$D = dT + \epsilon^T E \quad (2)$$

$$S = s^E T + dE \quad (3)$$

式中, D 是电位移, E 是电场强度, d 是压电常数矩阵, S 和 T 分别是应变和应力, ϵ^T 为应力恒定时的自由介电常数矩阵, s^E 为电场恒定时的短路弹性柔顺系数矩阵。由于压电晶体的弯曲变形,压电层的上下电极之间将产生变化的电势差,进而为负载供能。当环境振动频率等于悬臂梁固有频率时,将引起悬臂梁的共振,压电层应力和应变的变化达到最大,从而使发电机输出电压的变化达到最大。

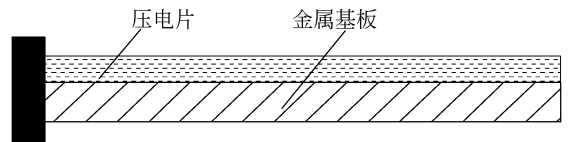


图1 压电悬臂梁结构示意图

Fig.1 Sketch map of piezoelectric unimorph cantilever

3 有限元仿真分析

根据表1的结构参数建立了压电振子有限元模型,如图2所示。在悬臂梁端部施加外力 0.1 N ,金属弹性梁选用磷青铜,其弹性模量大,能承受更大的变形,压电陶瓷选用 PZT-5H。压电悬臂梁的边界条件为一端固定,另一端自由,电学上采用短路连接。压电晶片其相对介电常数矩阵(ϵ_r)、压电常数矩阵($e \times \text{C}/\text{m}^2$)和压电弹性系数矩阵($c \times 10^{10} \text{ N}/\text{m}^2$)分别为:

$$[\boldsymbol{\varepsilon}_r] = \begin{bmatrix} 804.6 & 0 & 0 \\ 0 & 804.6 & 0 \\ 0 & 0 & 659.7 \end{bmatrix},$$

$$[\boldsymbol{e}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -4.1 \\ 0 & 0 & -4.1 \\ 0 & 0 & 14.1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10.5 & 0 \\ 10.5 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$[\boldsymbol{c}] = \begin{bmatrix} 13.2 & 7.1 & 7.3 & 0 & 0 & 0 \\ 7.1 & 13.2 & 7.3 & 0 & 0 & 0 \\ 7.3 & 7.3 & 11.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2.6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2.6 \end{bmatrix}.$$

在 ANSYS 软件中用于压电分析的单元有 Solid5 和 Solid98 两种单元, Solid5 单元是 6 面 8 节点的耦合场单元, Solid98 单元是 4 面 4 节点的耦合场单元。采用 Solid5 单元更适合于压电薄膜的模型单元划分, 其他层采用 Solid45 单元, 并略去黏结层的影响, 即压电薄膜和磷青铜两者理想黏结, 在黏结层上它们的位移和力是连续的^[14]。

表 1 压电振子结构参数

Tab. 1 Geometrical parameters of piezoelectric cantilever

参数	PZT-5H	磷青铜
密度/(kg/m ³)	7 500	8 920
弹性模量/GPa		106
泊松比		0.35
L/mm	60	60
w/mm	20	20

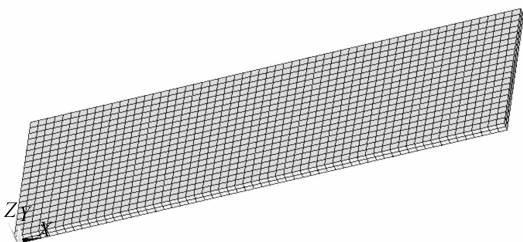


图 2 悬臂梁单晶压电振子有限元模型

Fig. 2 Finite element model of piezoelectric unimorph cantilever

图 3 给出了压电振子输出电压随基板磷青铜与压电片厚度变化的曲线。由图可知, 随着基板厚度增加, 输出电压逐渐减小; 随着压电片厚度的增加, 输出电压先增大后减小。压电片与基板材料间存在一个最佳厚度比使压电振子的输出电压达到最大。

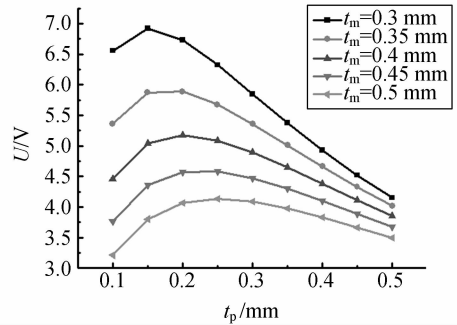


图 3 不同厚度参数压电振子的电压输出曲线

Fig. 3 Output voltages of piezoelectric cantilever with different thicknesses

图 4 给出了磷青铜厚度为 0.3 mm 时压电振子输出电压随压电片与基板的厚度比变化的曲线。由图可知, 随着压电片与基板磷青铜的厚度比的增加, 输出电压呈现先增大后减小的趋势, 当压电片与基板磷青铜的厚度比为 0.5 时, 悬臂梁压电振子输出电压达到最大, 经换算与文献[7]的分析结果吻合。

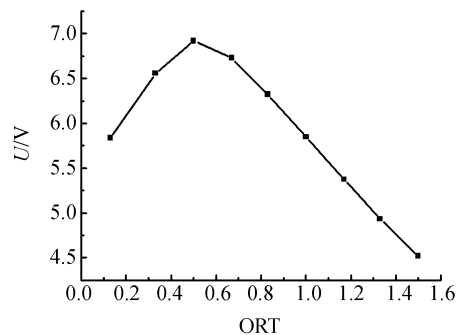


图 4 厚度比对输出电压的影响

Fig. 4 Output voltage vs different thickness ratios

4 实验研究

在实验前需制作压电振子, 首先将磷青铜加工成金属基板所需要的尺寸, 然后对其进行热处理, 并让其自然冷却, 然后用砂纸去除磷青铜表面

的氧化膜,同时用丙酮溶液清洗压电陶瓷片和制作好的金属基板表面上的灰尘、油污等污迹。将压电片和金属基板制黏接,并引出电极。为了减小各压电振子间的差异,压电振子的黏接过程要求较高,黏接过程中不能损坏压电陶瓷片及表面镀银电极,为了避免由于烘干过程带来的温度影响,导电胶应采取自然凝固。在保证黏接良好的情况下,黏接层越薄越好,若太厚可能引起不导电的现象。

为了测试压电晶体与金属基板厚度比对压电振子发电效果的影响,建立悬臂梁单晶压电振子发电实验装置,如图 5 所示。实验装置主要包括 HEAS-5 功率放大器、HEV-50 高能激振器、能量存储电路、测力传感器和 DS-5000 系列数字存储示波器。功率放大器内置信号发生器,信号发生器可输出一个频率可调的正弦激励信号,正弦激励信号经功率放大后对高能激振器进行振动控制,并采用测力传感器测得激振力大小,从而为压电悬臂梁振子提供恒定的激励源。同时压电振子由于振动产生的自由电荷经能量存储电路向负载供能。

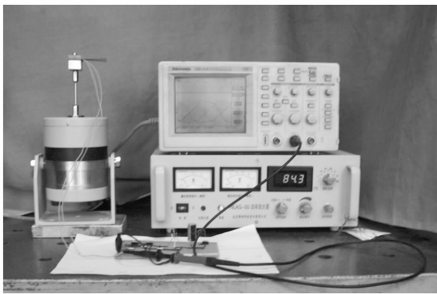


图 5 压电振子实验装置图

Fig. 5 Experimental setup of energy harvesting with piezoelectric unimorph cantilever

实验中采用的能量存储电路如图 6 所示,主要由全桥整流器、存储电容和负载组成。压电振子由振动产生的电荷经整流器整流后存储在电容中,并对外负载供能。利用数字存储示波器对负载的输出电压进行实时测量。

图 7 给出了激振力为 0.1 N,激振频率为 57 Hz,金属基板厚度为 0.3 mm 时,具有不同厚度比的单晶压电振子的功率输出曲线。由图可知,当外接负载为 10 kΩ 时,压电振子输出功率最大,对于不同的负载,悬臂梁压电振子的输出功率会

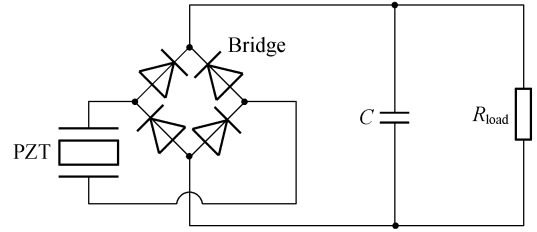


图 6 能量存储电路

Fig. 6 Schematic diagram of energy harvesting circuit

随着厚度比的增大先增大后减小。当压电晶体与基板材料的厚度比为 0.5 时,压电振子输出功率均呈现出最大,可得悬臂梁单晶压电振子压电片与磷青铜金属基板材料的最佳厚度比为 0.5,与有限元仿真分析结果吻合。

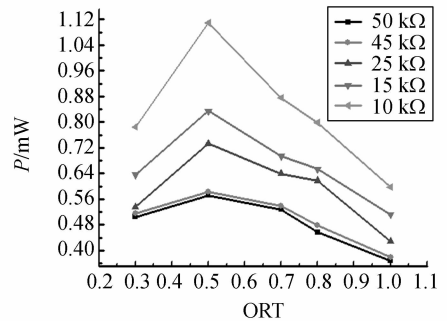


图 7 不同厚度比压电振子功率的比较

Fig. 7 Comparison of powers of piezoelectric cantilevers with different thickness ratios

为了了解具有最佳厚度比的单晶压电振子的发电性能,进行了进一步的实验测试。图 8 和图 9 分别给出了在激振力为 0.1 N,金属基板厚度为 0.3 mm,厚度比为 0.5 时,悬臂梁单晶压电

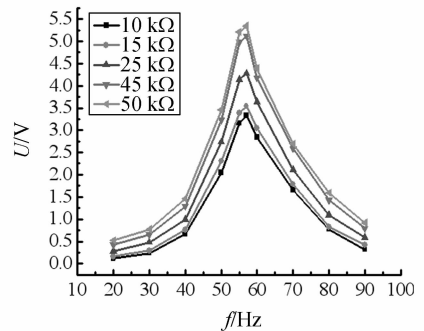


图 8 厚度比为 0.5 时压电振子电压输出曲线

Fig. 8 Output voltages of cantilever in ORT of 0.5

振子的输出电压和输出功率实验曲线。当激振频率为 57 Hz 时,压电振子将产生谐振,此时输出电压和功率均达到最大,且输出电压随着负载的增大而增大,而输出功率并不随负载的增大而增大。对于压电振子存在一个最佳负载^[3],当负载与压电振子内阻匹配时,输出功率最大,能量转化效率也最高。当负载为 50 k Ω 时,单晶压电振子的输出电压达到最大为 5.4 V;当负载电阻为 10 k Ω 时,负载与压电振子内阻匹配较好,输出功率达到最大为 1.18 mW。

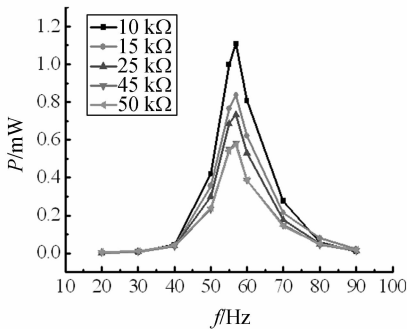


图 9 厚度比为 0.5 时压电振子功率输出曲线

Fig. 9 Output powers of cantilever in ORT of 0.5

参考文献:

- [1] GLYNNE J P, TUDORM J, BEEBY S P, *et al.*. An electromagnetic vibration-powered generator for intelligent sensor systems[J]. *Sensors and Actuators A*, 2004, 110:344-349.
- [2] MITCHESON P D, MIAO P, STARK B H, *et al.*. MEMS electrostatic micropower generator for low frequency operation[J]. *Sensors and Actuators A*, 2004, 115:523-529.
- [3] WANG SH, LAM K H, SUN CH L, *et al.*. Energy harvesting with piezoelectric drum transducer[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90 (11): 1135061-1135063.
- [4] NG T H, LIAO W H. Sensitivity analysis and energy harvesting for self-powered piezoelectric sensor [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2005, 16(10):785-797.
- [5] 曾平, 刘艳涛, 吴博达, 等. 一种新型压电式无线发射装置[J]. 吉林大学学报:工学版, 2006, 36(2):78-82.
- ZENG P, LIU Y T, WU B D, *et al.*. A novel wireless electropult powered by piezoelectricity[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and*

5 结 论

本文研制了悬臂梁单晶压电振子的发电测试系统,针对压电晶体与磷青铜基板材料的厚度比与单晶压电振子输出电压的关系进行了有限元仿真分析,得出了压电晶体与磷青铜基板材料的最佳厚度比,并进行了实验验证。同时对具有最佳厚度比的单晶压电振子进行了压电发电能力测试。研究表明,当压电晶体与磷青铜金属基板的最佳厚度比为 0.5 时,单晶压电振子的输出电压为最大,有限元分析与实验结果基本吻合。压电振子存在一个最佳负载,当负载与压电振子内阻匹配时,此时的输出功率最大,能量转化效率最高。单晶压电振子在负载为 50 k Ω 时,输出电压最大可达 5.4 V;当负载电阻为 10 k Ω 时,负载与压电振子内阻匹配良好,输出功率最大达到 1.18 mW,产生的能量能满足网络传感器等低功耗电子产品的供能需求。

- Technology Edition) Supplement2*, 2006, 36 (2): 72-78. (in Chinese)
- [6] 程光明, 庞建志, 唐可洪, 等. 压电陶瓷发电能力测试系统的研制[J]. 吉林大学学报:工学版, 2007, 37 (2):367-371.
- CHENG G M, PANG J ZH, TANG K H, *et al.*. Development of measuring system for electricity generating capacity of piezoelectric ceramics [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2007, 37 (2): 367-371. (in Chinese)
- [7] 阙君武, 唐可洪, 王淑云, 等. 压电悬臂梁发电装置的建模与仿真分析[J]. 光学 精密工程, 2008, 16 (1):71-75.
- KAN J W, TANG K H, WANG SH Y, *et al.*. Modeling and simulation of piezoelectric cantilever generators[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(1): 71-75. (in Chinese)
- [8] NG T H, LIAO W H. Feasibility study of a self-powered piezoelectric sensor Proc[J]. *Smart Structures and Materials Conf. SPIE*, 5389:377-388.
- [9] 阙君武, 彭太江, 唐可洪, 等. 两腔压电泵结构与特性[J]. 压电与声光, 2006, 28(1):39-42.

- KAN J W, PENG T J, TANG K H, *et al.*. The structure and performance of double-chamber piezoelectric pumps [J]. *Piezoelectric & Acoustooptics*, 2006, 28(1): 39-42. (in Chinese)
- [10] 曾平,温建明,程光明,等. 新型惯性式压电驱动机构的研究[J]. 光学精密工程. 2006, 14(4): 623-627.
- ZENG P, WEN J M, CHENG G M, *et al.*. Research on novel inertial piezoelectric actuator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 623-627. (in Chinese)
- [11] 石胜君,陈维山,刘军考,等. 一种基于纵弯夹心式换能器的直线超声电机[J]. 中国电机工程学报. 2007, 27(18): 30-35.
- SHI SH J, CHEN W SH, LIU J K, *et al.*. Ultrasonic linear motor using longitudinal and bending multimode bolt-clamped Langevin type transducer [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2007, 27(18): 30-35. (in Chinese)
- [12] 曲远方. 功能陶瓷的物理性能[M]. 北京:化学工业出版社, 2007: 183-185.
- QU Y F. *Function Piezoelectric Physics Capability* [M]. Beijing: Chemistry Industry Press, 2007: 183-185. (in Chinese)
- [13] WANG Q M, Eric Gross L. Constitutive equations of symmetrical triple layer piezoelectric benders [J]. *Ferroelectrics and Frequency Control*, 1999, 46(6): 1343-1351.
- [14] 姜利飞,杨银堂,樊永祥,等. 压电薄膜微传感器振动模态的仿真分析[J]. 振动与冲击. 2006, 25(4): 165-168.
- LOU L F, YANG Y T, FAN Y X, *et al.*. The vibration modal analysis of piezoelectric thin film micro sensor [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2006, 25(4): 165-168. (in Chinese)

作者简介:



袁江波(1983—),男,湖北人,博士研究生,主要研究方向为压电俘能和压电驱动等。E-mail: yjb0420@126.com



谢涛(1965—),男,湖南人,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为压电俘能、航天模拟器、超声波应用等。Email: xietao@hit.edu.cn.



单小彪(1977—),男,江西人,博士,讲师,主要研究方向为压电发电理论与技术、航空航天运动模拟装备设计与技术等。E-mail: shanxiaobiao@126.com.



陈维山(1965—),男,河北人,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为超声波电机、航天模拟器、仿生结构等。Email: cws@hit.edu.cn.