

V 型压电换能器的有限元分析与实验*

侯志伟^{1,2}, 陈仁文¹, 刘祥建¹

(1. 南京航空航天大学智能材料与结构航空科技重点实验室 南京, 210016)

(2. 淮阴工学院机械工程学院 淮安, 223003)

摘要 为实现对不同方向环境振动能量的收集, 提出了一种新颖的 V 型压电换能器, 对其进行了有限元仿真分析和实验测试。有限元分析表明, 压电陶瓷片与金属弹性基片之间有一个最佳厚度比, 为 0.5, 使得换能器发电能力最强。随着换能器两金属基片夹角的增大, 其输出电压不断减小。实验测试显示, 有限元分析与实验结果具有较好的一致性, 且都在压电陶瓷片厚度为 0.15 mm 时, 其输出开路电压最大, 验证了有限元分析的可靠性。在输出功率测试中, V 型压电换能器对外负载供能具有较好的优越性, 且在峰值为 0.3N 的作用力下, 输出功率达到 22 μ W。

关键词 压电换能器; 压电陶瓷; 有限元仿真; V 型; 发电

中图分类号 TM31; TN384

引言

近年来, 在现代机电产品朝着“高”、“精”、“尖”发展的同时, 其体积外形也日趋美观及微型化; 因此, 其能量供给问题日益凸显并成为制约其应用发展的一个瓶颈。目前, 化学电池因体积大、使用寿命较短以及易造成环境污染等诸多弊端^[1]而促使人们开始进行新型能源的探索。其中, 环境中的振动能由于其存在的普遍性及其具有较高的能量密度^[2]而受到相关的收集利用研究^[3]。

根据能量转换机理的不同, 用于振动能量收集的装置主要有电磁式^[4]、静电式^[5-6]和压电式^[7-12]3 大类。相比较其他的能量收集形式, 压电式振动能量收集装置由于具有结构简单、不发热、无电磁干扰、清洁环保和易于微型化等诸多优点而成为目前的研究热点之一, 相继研究开发出了悬臂梁单晶/双晶结构^[10,12]、Cymbal 结构^[8]、L 形结构^[7]等压电式发电装置。但这些装置收集的振动能量主要是单方向的, 如果应用在多种方向振动的场合中将会导致能量收集的效率低下。

为实现对不同方向环境振动能量的收集, 笔者提出了一种多方向压电振动能量收集结构^[13], 该设计结构的换能部分为粘结有聚偏二氟乙烯 (polyvinylidene fluoride, 简称 PVDF) 压电薄膜的

Rainbow 型压电换能器。考虑到该换能器中 PVDF 压电薄膜材料的压电常数较小, 为提高多方向振动能量收集结构中压电换能器的发电能力, 又提出了一种 V 型压电换能器。该 V 型压电换能器的压电材料为压电陶瓷, 具有较大的压电常数, 且输出阻抗相对于 PVDF 压电薄膜较小, 有利于振动能量的收集。

1 V 型压电换能器及其工作原理

图 1 为 V 型压电换能器的结构示意图, 其组成主要包括 V 型金属弹性基片、刚性固定块、压电陶瓷片和电极等。V 型金属弹性基片的上、下表面粘贴压电陶瓷片, 在压电陶瓷片的上、下表面分别制作有金属电极, 用来输出产生的电压。

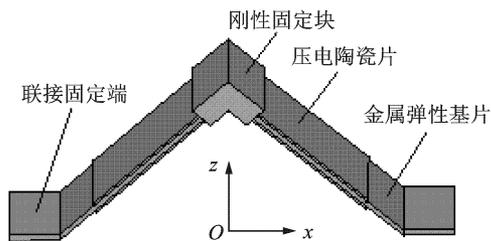


图 1 V 型压电换能器示意图

图 2 为由 V 型压电换能器构成的多方向压电振动能量收集系统示意图。该系统由立方体形金属框

* 国家自然科学基金资助项目(编号:10972102);教育部博士点基金资助项目(编号:200802870007);江苏省科技支撑计划资助项目(编号:BE2009163)

收稿日期:2012-02-22;修改稿收到日期:2012-05-21

架、金属质量球和8个相同的V型压电换能器组成。为实现该能量收集装置对不同方向振动能量的收集,在V型压电换能器与金属框架及金属质量球的联接设计上,采用了万向柔性铰链的结构形式,且整个能量收集装置的内部是完全对称的结构。系统中的振动平台在实际应用中可以为桥梁、振动的车辆等振源,在实验测试中可以为实现多个方向振动的模拟实验台。为了对收集的振动能量进行利用,该多方向振动能量收集系统还包括与V型压电换能器联接的能量存储电路及供能负载。为简便起见,图2为其中的一组引出线与能量存储电路及负载的联接情况。

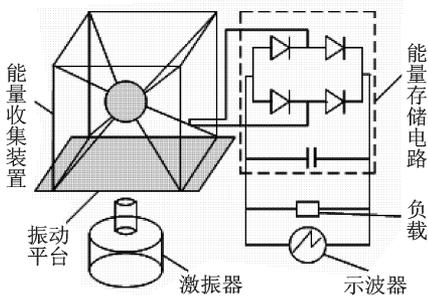


图2 多方向振动能量收集系统示意图

在V型压电换能器的受迫振动过程中,换能器金属弹性基片发生弯曲变形,进而引起压电陶瓷片内应变和应力的变化。压电体所受应力及产生电场的关系^[14]可表示为

$$\mathbf{S} = \mathbf{s}^E \mathbf{T} + \mathbf{dE} \quad (1)$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{dT} + \boldsymbol{\epsilon}^T \mathbf{E} \quad (2)$$

其中: \mathbf{S} 为应变向量; \mathbf{D} 为电荷密度向量; \mathbf{E} 为电场强度向量; \mathbf{T} 为应力向量; $\boldsymbol{\epsilon}^T$ 为应力恒定时的自由介电常数矩阵; \mathbf{s}^E 为电场恒定时的短路弹性柔顺系数矩阵; \mathbf{d} 为压电应变常数矩阵。

2 V型压电换能器的有限元仿真分析

V型压电换能器的分析过程采用直接耦合的方法,其基本尺寸如表1所示。有限元建模中,压电陶瓷片和金属弹性基片分别采用Solid98单元和Solid92单元进行网格划分,并略去粘结胶层的影响,即压电陶瓷片和金属弹性基片理想粘结,在粘结层上它们的位移和力是连续的。

在有限元仿真分析中,为模拟V型压电换能器在立方体状多方向振动能量收集装置中的工作过程,将换能器的一端固定,另一端对 z 方向位移进行约束,并作为可移动端对其进行 x 方向激励,激励力大小

表1 换能器材料和尺寸参数

参数	PZT-5H	铍青铜
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7 500	8 290
弹性模量/GPa		131
泊松比		0.35
厚度/mm	0.1	0.3
宽度/mm	3	3
长度/mm	8	8
两金属基片夹角/rad	0.5π	

为0.1 N,且压电陶瓷片采用电学串联。此外,将压电陶瓷片与金属弹性基片接触面的电压设为0,并对上层压电陶瓷片上表面和下层压电陶瓷片下表面的电压进行耦合。仿真中,金属弹性基片选用铍青铜材料,压电陶瓷为锆钛酸铅(lead zirconate titanate,简称PZT-5H),其相对介电常数矩阵 $\boldsymbol{\epsilon}_r$ 、压电应力常数矩阵 \mathbf{e}_v (C/m^2)和压电弹性系数矩阵 \mathbf{c}_v ($10^{10}\text{N}/\text{m}^2$)分别为

$$\boldsymbol{\epsilon}_r = \begin{bmatrix} 804.6 & 0 & 0 \\ 0 & 804.6 & 0 \\ 0 & 0 & 659.7 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{e}_v = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -4.1 \\ 0 & 0 & -4.1 \\ 0 & 0 & 14.1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10.5 & 0 \\ 10.5 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{c}_v = \begin{bmatrix} 13.2 & 7.1 & 7.3 & 0 & 0 & 0 \\ 7.1 & 13.2 & 7.3 & 0 & 0 & 0 \\ 7.3 & 7.3 & 11.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2.6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2.6 \end{bmatrix}$$

其他材料特性参数见表1。

图3所示为V型压电换能器的开路电压 U 与金属弹性基片厚度 t_m 和压电陶瓷片厚度 t_p 的关系。可以看出,V型压电换能器输出开路电压随着金属弹性基片厚度的增大呈现逐渐减小的趋势;而随着压电陶瓷片厚度的增大则呈现先单调递增后单调减小的变化关系。另外,通过图3的仿真曲线可看出,压电陶瓷片与金属弹性基片之间有一个最佳厚度比0.5,使得换能器发电能力最强。这是由于金属弹性基片厚度的增加导致V型压电换能器的等效刚度增大,在相同的外部激励下,压电陶瓷片的应变减小;而当压电陶瓷片的厚度增大时,由材料力学中的应变计算式可知,压电陶瓷片的应变将会变大。压电陶

瓷片厚度的增大也将引起V型压电换能器等效刚度的增大。这样当某一因素占主导地位时,V型压电换能器输出开路电压将会产生增大或减小的变化趋势。所以在换能器设计中,应保证压电陶瓷片与金属弹性基片的最佳厚度比要求,以获得换能器较高的发电能力。

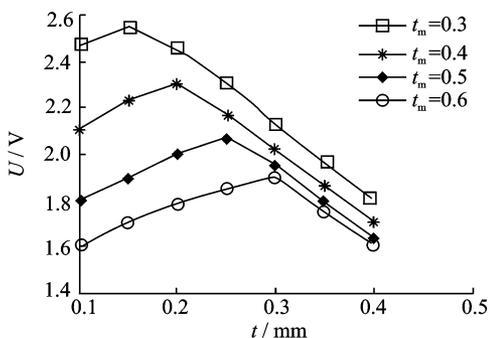


图3 不同厚度参数换能器的电压输出曲线

图4为V型压电换能器输出开路电压 U 与其两金属基片夹角 θ 的关系曲线。可以看出,随着换能器两金属基片夹角的增大,其输出电压不断减小。这是因为随着两金属弹性基片夹角的增大,外力沿金属弹性基片振动方向的分力逐渐减小,使得换能器的输出电压不断减小。为提高换能器的发电能力,应该使换能器两金属基片有较小的夹角,但夹角过小会影响到金属弹性基片的振幅;因此,对于这两方面的权衡要通过优化来进行合理设计。

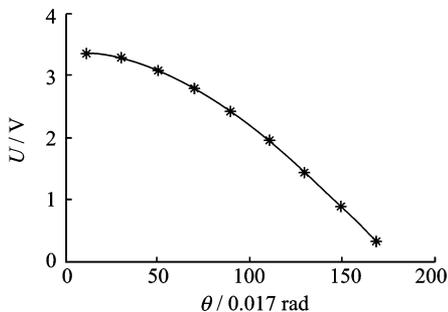


图4 电压与换能器夹角的关系曲线

3 V型压电换能器的实验研究

3.1 开路电压验证实验

通过有限元仿真得到了V型压电换能器开路电压与其结构参数的关系,鉴于有限元仿真中对换能器作了相应的理想化处理,因此有必要进行V型压电换能器的开路电压验证实验。实验中制作了一套V型压电换能器,除压电陶瓷片厚度外,其尺寸如表1所示。实验中用HEV-50高能激振器对V型压电换

能器的可移动端进行激励,其激振频率为100 Hz,激振力峰值为0.1 N,沿着V型压电换能器的 x 轴进行激励。这里将压电陶瓷片的电极引线直接接示波器以获得开路电压波形,整个实验测试系统装置如图5所示。



图5 V型压电换能器实验装置图

图6给出了V型压电换能器压电陶瓷片输出开路电压 U 的峰值与压电陶瓷片厚度 t_p 的实验曲线。由图6可知,随着压电陶瓷片厚度的增加,输出开路电压峰值呈先增大后减小的趋势。当压电陶瓷片厚度为0.15 mm时,输出开路电压峰值达到了最大值。同时与仿真结果相比较,表明实验测试曲线与仿真曲线变化规律基本一致,都在压电陶瓷片厚度为0.15 mm时,输出开路电压达到最大,验证了有限元仿真的可靠性。

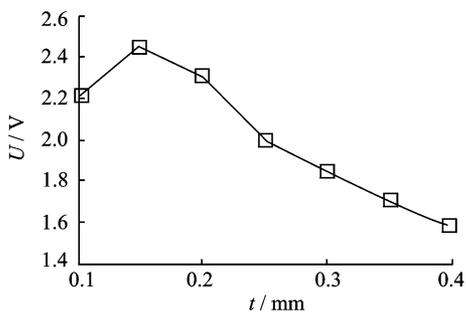


图6 电压与压电陶瓷厚度的实验曲线

实验测试与有限元仿真结果的不同主要是因为有限元仿真是在对换能器作了一定的假设之后,在一种理想的条件下得出的结果,而实验测试中,不可避免地会受到各种干扰因素的影响。产生干扰的因素主要有以下几个方面:

1) 刚性固定块的影响。在换能器的有限元仿真中,假设固定块是刚性的,即在换能器振动中不产生变形,而实际的刚性固定块由于材料本身具有一定的弹性模量,故在换能器的振动中会产生微小的变形,致使结果出现一定的误差。

2) 粘接胶层的影响。在换能器的有限元仿真

中,假设金属弹性基片与压电陶瓷片之间是理想粘结,而在实验测试中,却计入了胶层因素的影响。故在保证粘结强度的情况下,胶层要尽量薄。

3.2 输出功率测试实验

为了测试V型压电换能器对负载供能的可行性,同时也为了对V型压电换能器和Rainbow型压电换能器发电性能进行比较,进行了两种换能器的输出功率实验。实验中采用的能量存储电路同图2所示电路。压电材料在外力作用下,在其两个极面上聚集电荷而形成电压,同时通过充电电路向外负载供电,利用示波器对负载电压进行实时测量。

测试实验中两种换能器的金属弹性基片材料均为铍青铜,V型压电换能器的压电材料为PZT-5H,Rainbow型压电换能器的压电材料为PVDF。其中PVDF压电薄膜的密度为 1780 kg/m^3 ,相对介电常数为12,压电应力常数矩阵 $e_R(\text{C/m}^2)$ 和压电弹性系数矩阵 $c_R(10^9\text{ N/m}^2)$ 分别为

$$e_R = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.0104 \\ 0 & 0 & -0.0164 \\ 0 & 0 & -0.0650 \\ 0 & 0 & 0 \\ -0.0388 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$c_R = \begin{bmatrix} 8.10 & 4.84 & 4.84 & 0 & 0 & 0 \\ 4.84 & 6.92 & 4.38 & 0 & 0 & 0 \\ 4.84 & 4.38 & 6.92 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.38 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.38 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.38 \end{bmatrix}$$

设计V型压电换能器时,其结构参数如下:压电陶瓷片尺寸(长×宽×厚)为 $8\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 0.1\text{ mm}$;金属弹性基片尺寸(长×宽×厚)为 $8\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 0.1\text{ mm}$;两金属弹性基片的夹角为 $0.5\pi\text{ rad}$ 。设计Rainbow型压电换能器时,其结构参数如下:压电薄膜尺寸(长×宽×厚)为 $20\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 0.1\text{ mm}$;金属弹性基片尺寸(长×宽×厚)为 $20\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 0.1\text{ mm}$;结构初始曲率半径为 7 mm 。所制作的V型压电换能器和Rainbow型压电换能器实物如图7、图8所示。

图9、图10给出了激振频率为 159 Hz ,施加峰值为 0.3 N 激励力时V型压电换能器和Rainbow型压电换能器的功率 P_V 和 P_R 的输出曲线。从图中可以看出,随着负载阻值 R 的增大,两换能器的输出功率都存在一个最优值,且V型压电换能器的输出功率

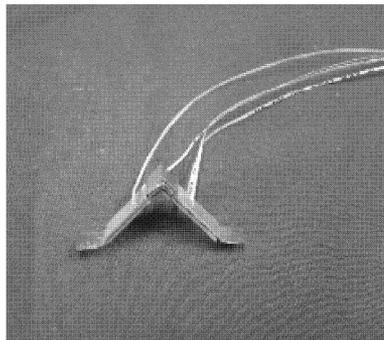


图7 V型压电换能器实物图

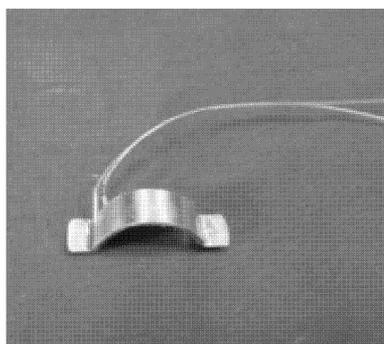


图8 Rainbow型压电换能器实物图

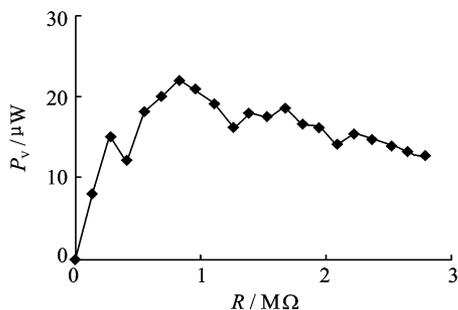


图9 V型换能器输出功率实验曲线

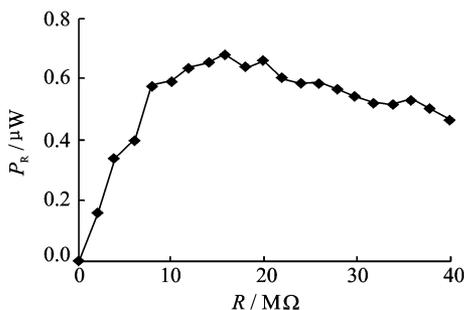


图10 Rainbow型换能器输出功率实验曲线

要高于Rainbow型压电换能器的输出功率。在负载阻值为 $0.84\text{ M}\Omega$ 时,V型压电换能器的输出功率达到了 $22\text{ }\mu\text{W}$,在负载阻值为 $16\text{ M}\Omega$ 时,Rainbow型压电换能器的输出功率达到了 $0.68\text{ }\mu\text{W}$ 。可见,V型压电换能器用于对外负载供电具有较好的优越性,其

输出功率已可满足低耗能微电子器件的供能需求。

4 结 论

1) 提出了一种新颖的V型压电换能器,并对其进行了有限元仿真分析和实验测试。

2) 通过有限元仿真得知,压电陶瓷片与金属弹性基片之间有一个最佳厚度比,使得换能器发电能力最强,且最佳厚度比为0.5。随着换能器两金属基片夹角的增大,其输出电压不断减小。

3) 通过验证实验得知,有限元分析与实验结果具有较好的一致性,且都在压电陶瓷片厚度为0.15 mm时,其输出开路电压最大,验证了有限元分析的可靠性。

4) 输出功率测试表明,在外负载供能方面,V型压电换能器要优于Rainbow型压电换能器,且在峰值为0.3 N的作用力下,V型压电换能器的输出功率达到了22 μ W,已可满足一些低耗能微电子器件的供能需求。

参 考 文 献

- [1] Guan M J, Liao W H. On the efficiencies of piezoelectric energy harvesting circuits towards storage device voltages[J]. *Smart Materials and Structures*, 2007, 16: 498-505.
- [2] Roundy S, Wright P K. Micro-electrostatic vibration to electricity converters[C]// *Proceedings of ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition*. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2002: 1-10.
- [3] 袁江波, 谢涛, 单小彪, 等. 压电俘能技术研究现状综述[J]. *振动与冲击*, 2009, 28(10): 36-42.
Yuan Jiangbo, Xie Tao, Shan Xiaobiao, et al. A review of current situation for piezoelectric energy harvesting[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2009, 28(10): 36-42. (in Chinese)
- [4] Wang Peihong, Dai Xuhan, Fang Dongming, et al. Design, fabrication and performance of a new vibration-based electromagnetic micro power generator[J]. *Microelectronics*, 2007, 38: 1175-1180.
- [5] 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.
- [6] 李林, 郭隐彪, 陈旭远. 基于机电系统的振动能量采集器件设计分析[J]. *机械工程学报*, 2009, 45(9): 238-242.
Li Lin, Guo Yinbiao, Chen Xunyun. Design and anal-

ysis of vibration energy collector based on MEMS[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(9): 238-242. (in Chinese)

- [7] Erturk A, Jamil M R, Daniel J I. Piezoelectric energy harvesting from a L-shaped beam-mass structure with an application to UAVs[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2009, 20: 529-544.
- [8] 文晟, 张铁民, 梁莉, 等. Cymbal型压电堆叠阵列的振动分析[J]. *振动、测试与诊断*, 2011, 31(3): 295-299.
Wen Sheng, Zhang Tiemin, Liang Li, et al. Vibration analysis on Cymbal transducer stack[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2011, 31(3): 295-299. (in Chinese)
- [9] 贺学锋, 温志渝, 温中泉. 压电式振动发电机的建模及应用[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(6): 1436-1441.
He Xuefeng, Wen Zhiyu, Wen Zhongquan. Modeling and application of piezoelectric vibration-based power generator [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(6): 1436-1441. (in Chinese)
- [10] 袁江波, 单小彪, 谢涛, 等. 悬臂梁单晶压电发电机的实验[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(5): 1072-1077.
Yuan Jiangbo, Shan Xiaobiao, Xie Tao, et al. Experiment of monocrystal piezoelectric generator with cantilever beam structure[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(5): 1072-1077. (in Chinese)
- [11] Chew Zhengjun, Li Lijie. Design and characterization of a piezoelectric scavenging device with multiple resonant frequencies[J]. *Sensors and Actuators A*, 2010, 162: 82-92.
- [12] 李龙土, 邬军飞, 褚祥诚, 等. 压电双晶片的有限元分析及实验[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(12): 2378-2383.
Li Longtu, Wu Junfei, Chu Xiangcheng, et al. Finite element analysis and experiment on piezoelectric bimorph [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(12): 2378-2383. (in Chinese)
- [13] 陈仁文, 李彬. 基于压电材料的多方向振动能量收集装置: 中国, 101340160A[P]. 2009-01-07.
- [14] Jiang S N, Li X F, Guo S H, et al. Performance of a piezoelectric bimorph for scavenging vibration energy [J]. *Smart Materials and Structures*, 2005, 14: 769-774.



第一作者简介:侯志伟,男,1966年5月生,教授、博士研究生。主要研究方向为振动主动控制、检测技术等。曾发表《压电纤维复合材料在结构减振中的应用》(《振动、测试与诊断》2010年第1期)等论文。

E-mail: zw_hou@163.com