

文章编号 1004-924X(2011)04-0789-08

Rainbow 型压电换能结构的有限元分析与实验

刘祥建, 陈仁文

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

摘要:提出了一种换能部分采用新颖的 Rainbow 型压电结构的多方向振动能量收集装置。为了分析和测试 Rainbow 型压电换能结构的发电性能,对该装置进行了有限元分析和实验测试。有限元分析表明,金属基片的宽度与厚度、压电薄膜的宽度与长度及换能结构初始曲率半径的增大会引起换能结构输出开路电压的降低;金属基片长度的增大会引起换能结构输出开路电压的增加;压电薄膜厚度的增大会使得换能结构输出开路电压先增加后减小。实验显示,有限元分析与实验结果具有较好的一致性,且都在压电薄膜厚度为 0.25 mm 时换能结构的输出电压最大,得到的结果验证了有限元分析的可靠性。另外,在输出功率测试中,换能结构的输出功率达到了 7.75 μW 。分析及测试结果为 Rainbow 型压电换能结构的设计、制作提供了指导性意见。

关键词: Rainbow 型压电换能结构;多方向振动能量收集;有限元分析;发电

中图分类号: TN384; TM31 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111904.0789

Finite element analysis and experiments on Rainbow shape piezoelectric energy transferring elements

LIU Xiang-jian, CHEN Ren-wen

(*Key Laboratory for Smart Materials and Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China*)

Abstract: A designing structure which can harvest multi-direction vibration energies was proposed by using the new Rainbow shape piezoelectric energy transferring elements. In order to analysis and test the electricity generation of the piezoelectric energy transferring elements, the finite element analysis and practical tests were performed. The simulation results indicate that the open circuit voltage of Rainbow shape piezoelectric energy transferring elements will be reduced with the increases of the width and thickness of a metal substrate, the width and length of a piezoelectric film and the initial curvature radii of energy transferring elements; and it will be increased with the increase of the length of the metal substrate and shows a maximum with the increase of the thickness of piezoelectric film. The experimental result demonstrates the validity of finite element analysis and emphasizes that the open circuit voltage of energy transferring elements will have a maximum when the thickness of piezoelectric film is 0.25 mm. Furthermore, in the output power tests, the maximal output power of Rainbow shape piezoelectric energy transferring elements is about 7.75 μW . The results of simulation and

收稿日期: 2010-03-23; 修订日期: 2010-08-06.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 10972102); 江苏省科技支撑计划资助项目(No. BE2009163)

experiment provide helps for designing, manufacturing and realizing the Rainbow shape piezoelectric energy transferring elements.

Key words: Rainbow piezoelectric energy transferring element; multi-direction vibration energy harvesting; finite element analysis; generating electricity

1 引言

随着微机电系统技术和集成电路技术的不断发展,小尺寸、低能耗微电子设备的研发取得了巨大进展;而与之相关的微型能源技术的发展却相对滞后。同时,由于电池尺寸大、寿命有限和需要更换等缺点^[1],在一些微电子产品中的应用受到了限制,尤其对于目前发展迅速的无线传感网络和嵌入式系统,这种缺陷表现得更加明显。尽管人们运用微机电系统工艺研制了相应的微能源器件,如微太阳能电池、微锂电池及燃料电池等,但微太阳能电池虽然可以实现长期供能,其使用却受天气、应用场合所限制,而锂电池及燃料电池能量密度较低、寿命有限,因此,如何实现微机电系统器件的长时间供能已成为目前亟待解决的问题。振动作为自然界常见的现象,由于其几乎无处不在且具有较高的能量密度^[2]而日益受到人们的关注,对振动能量的转化及其收集利用的研究在近几十年逐步兴起,而如何实现对不同方向环境振动能量的收集及其利用如今已引起人们越来越多的思考^[3]。

目前,用于实现振动能量收集的装置种类繁多,有电磁收集装置^[4]、静电收集装置^[5-6]及压电收集装置^[7-12]等,其中,以压电收集装置的研究为最多。压电材料具有正压电效应和逆压电效应,利用其正压电效应可以将压电材料用于传感器或发电装置的制作。如今,随着对基于压电材料的振动能量收集装置研究的广泛展开,出现了各种各样的压电发电装置,如悬臂梁单晶结构、bi-morph 结构、圆膜结构等,但这些装置收集的能量主要是单方向的,在存在各种方向随机振动的场合,有能量收集效率低的缺陷,而且收集的振动频带窄,虽然近几年有研究者提出了阵列式能量回收装置,可以拓宽收集的振动频带,但是,其能量收集的单向性仍然制约着其在某些振动方向经常变化的场合的使用。

在这种情况下,本课题组提出了一种多方向

振动能量收集装置的设计,能量收集装置的换能部分采用了一种新颖的 Rainbow 型压电结构。为了分析和测试 Rainbow 型压电换能结构的发电性能,本文对其进行了有限元仿真分析和实验测试,研究结果为 Rainbow 型压电换能结构的实际设计和课题的顺利进行提供了良好的参考。

2 多方向振动能量收集装置及其系统

图 1 为本文提出的多方向振动能量收集装置的组成示意图。该多方向振动能量收集装置由立方体形金属框架、金属质量球和 8 根相同的分别将质量球与立方体形金属框架连接起来的 Rainbow 型压电能量转换结构组成;为了实现该振动能量收集装置对不同方向振动能量的收集,在 Rainbow 型压电能量转换结构与金属框架及金属质量球的联接设计上,采用了球铰链的结构形式,且整个能量收集装置的内部是完全对称结构,实现了对不同方向振动能量的有效收集,拓宽了其应用范围;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,在实验测试中可以采用由激励器激励的简易振动试验台,当然,其振动方向可以是任意的。

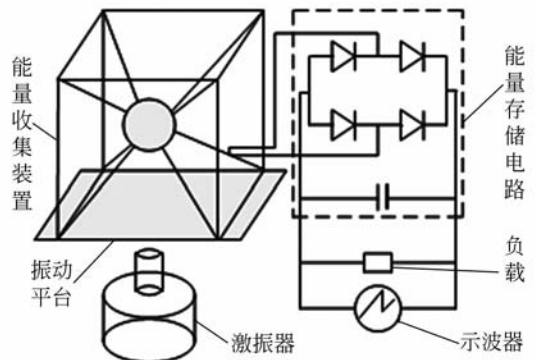


图 1 多方向振动能量收集系统示意图

Fig. 1 Sketch of multi-direction vibration energy harvesting system

在实际应用或实验测试中,将该多方向振动能量收集装置固定在振动平台上,环境振源的振动就会引起 Rainbow 型压电换能结构的受迫振动,导致换能结构产生弯曲变形,从而实现振动能量的收集。为了实现对换能结构收集的振动能量的利用,该振动能量收集系统还包括与 Rainbow 型压电换能结构联接的能量存储电路及供能负载,为简便起见,图中只画出了其中的一组引出线与能量存储电路及供能负载的联接情况。

3 Rainbow 型压电换能结构及工作原理

Rainbow 型压电换能结构的基本构成如图 2 所示,整个结构由预弯的金属弹性基片、压电薄膜和电极组成。预弯金属弹性基片弧形内、外侧两个表面分别粘贴压电薄膜,在压电薄膜的上、下两个表面分别制作电极,以输出产生的电压。

在 Rainbow 型压电换能结构的受迫振动过程中,由于换能结构的弯曲变形,进而引起压电薄膜内应变和应力的变化。根据压电学理论,当压电薄膜内应变和应力变化时,其表面将有自由电荷生成。

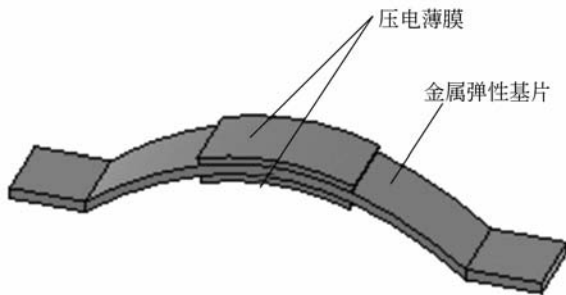


图 2 Rainbow 型压电结构示意图

Fig. 2 Rainbow shape piezoelectric energy transferring elements

压电体所受应力及产生电场的关系可表示为^[13]

$$\mathbf{S} = \mathbf{s}^E \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{d} \mathbf{E}, \quad (1)$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{d} \boldsymbol{\sigma} + \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{E}. \quad (2)$$

式中, \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, $\boldsymbol{\sigma}$ 为应力向量; $\boldsymbol{\varepsilon}^T$ 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。

由于压电薄膜振动过程中的连续弯曲变形,压电薄膜的上、下电极之间将产生交替变化的电势差,进而为负载供能。当环境振动频率等于由换能结构所构成系统振动的固有频率时,将引起系统的共振,压电薄膜内应力和应变的变化将达到最大,从而使换能结构输出的能量达到最大。

4 Rainbow 型压电换能结构的有限元仿真分析

有限元方法是工程技术领域广泛应用的一种数值分析方法,能够实现多物理场耦合的仿真。Rainbow 型压电换能结构的分析过程采用直接耦合的方法,其基本尺寸如表 1 所示。

表 1 换能结构的基本尺寸

Tab. 1 Dimensions of energy transferring elements

项目名称	尺寸 (mm)
弹性基片宽度	2
弹性基片厚度	0.3
弹性基片长度	12
压电薄膜宽度	2
压电薄膜厚度	0.2
压电薄膜长度	4
结构初始曲率半径	10
结构两端固定部分长度	2

在有限元仿真分析及后面的实验研究过程中,由于仅针对 Rainbow 型压电换能结构进行研究,因此,为了模拟换能结构在多方向振动能量收集装置中的实际工作状态,将换能结构的一端固定,即 x, y, z 3 个方向的自由度设为 0,另一端对 z 向位移进行约束,并作为可移动端对其进行 x 向激励。此外,在有限元仿真分析中,将压电薄膜与金属弹性基片接触面的电压设为 0,并对上层压电薄膜的上表面和下层压电薄膜下表面的电压进行耦合。当给换能结构可移动端施加沿水平方向的力时,换能结构产生变形并在压电薄膜的电极面上输出一定大小的电压,为便于仿真模拟,将力施加在换能结构可移动端右端面的 4 个关键点上且力的大小相同。仿真中,金属弹性基片选用铍青铜材料,其密度为 $8\,290 \text{ kg/m}^3$,弹性模量为

131 GPa,泊松比为 0.35;压电薄膜选用 PVDF 材料,其密度为 $1\ 780\ \text{kg}/\text{m}^3$,相对介电常数为 12,压电应力常数为 $0.010\ 4\ \text{C}/\text{m}^2$ 。

图 3 是金属弹性基片的宽度由 2 mm 增加到 11 mm,其余尺寸均为初始尺寸时 Rainbow 型换能结构输出电压的变化。不难看出,随着弹性基片宽度的增加,换能结构的输出电压单调减小,其原因是由于弹性基片宽度的增加,使得换能结构的等效刚度增大,导致在相同的力下,压电薄膜的应变减小,结合压电方程式(2)知,压电薄膜输出电压将减小。图 4 和图 5 分别是金属弹性基片的厚度和长度发生变化时,换能结构输出电压的变化曲线。可以看到,随着金属弹性基片厚度的增加,换能结构的输出电压不断下降;而随着金属弹性基片长度的增加,换能结构的输出电压不断升高。出现上述现象的原因是当金属弹性基片的厚度增加时,整个换能结构的等效刚度增加,同时由于铍青铜材料的弹性模量相对较大,使得换能结构的输出电压下降较快;当金属弹性基片长度增加时,力对换能结构横截面产生的力矩和法向分力增大,使得压电薄膜的应变增大,从而输出电压增大。因此,为了使换能结构获得较大的输出电压,应在符合加工工艺要求的前提下,将金属弹性基片的厚度设置得较小,而长度设置得大一些为宜。

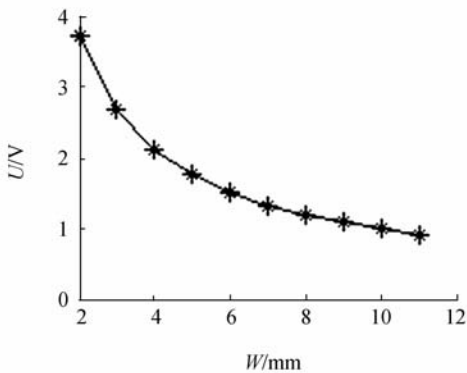


图 3 电压-金属弹性基片宽度曲线

Fig. 3 Curve of voltage-flexible substrate width

图 6 是压电薄膜的宽度由 2 mm 变化到 10 mm,金属弹性基片的宽度为 10 mm,其余尺寸均为表 1 中相应尺寸时 Rainbow 型压电换能结构输出电压的变化曲线。可以看到,随着压电薄膜宽度的增加,换能结构的输出电压单调递减变化,但从递减的数值来看,压电薄膜的宽度对换能结

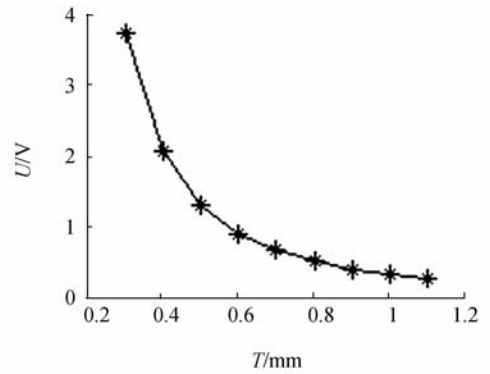


图 4 电压-金属弹性基片厚度曲线

Fig. 4 Curve of voltage-flexible substrate thickness

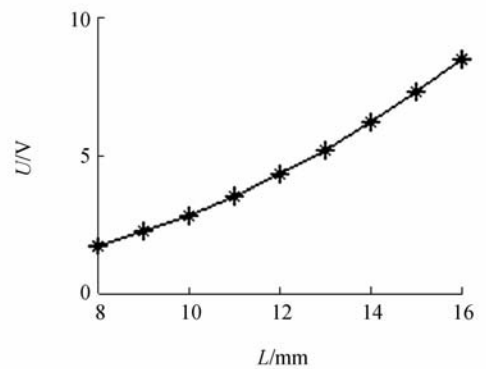


图 5 电压-金属弹性基片长度曲线

Fig. 5 Curve of voltage-flexible substrate length

构输出电压的影响较小。图 7 是压电薄膜的厚度与 Rainbow 型换能结构输出电压的关系曲线,从图中可知,随着压电薄膜厚度的增加,换能结构的输出电压先单调增加,达到某一最大值后单调递减,在压电薄膜的厚度为 0.25 mm 时,换能结构输出了最大的电压值。图 8 是压电薄膜的长度与 Rainbow 型换能结构输出电压的关系曲线,不难看出,随着压电薄膜长度的增加,换能结构的输出电压单调递减。出现上述现象的原因是压电薄膜的宽度增加时,换能结构的等效刚度增加,使得换能结构的应变减小,但由于当压电薄膜的弹性模量相对较小,故对输出电压的影响也较小;当压电薄膜的厚度增加时,也即当压电薄膜沿 z 方向的尺寸增大,根据弹性力学中的曲梁理论,得到换能结构的应变也将增大,另一方面,当压电薄膜的厚度增加时,整个换能结构的等效刚度增大,而当这一因素占主导地位时,在施加相同作用力的条件下,换能结构的输出电压就会减小;当压电薄膜的长度增加时,使得换能结构的等效刚度增大,换能

结构的应变减小,导致换能结构的输出电压减小。从上面分析不难看出,在压电薄膜尺寸的设计过程中,应综合考虑整个换能结构的几何参数而最终确定,特别是压电薄膜的长度和厚度对输出电压的影响较大,为提高换能结构的输出电压,应该通过对换能结构的参数优化而进行合理设计。

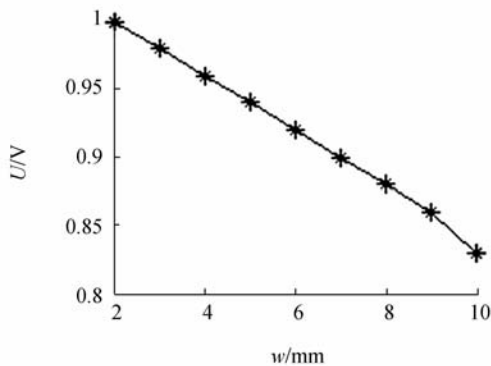


图6 电压-压电薄膜宽度曲线

Fig. 6 Curve of voltage-piezoelectric film width

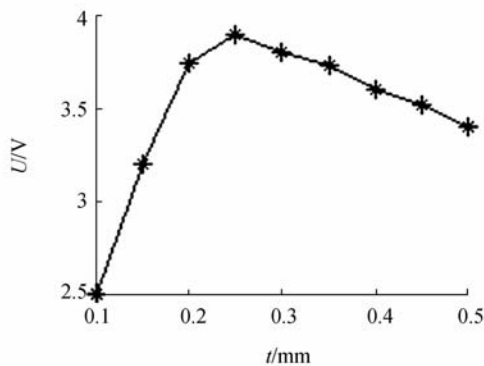


图7 电压-压电薄膜厚度曲线

Fig. 7 Curve of voltage-piezoelectric film thickness

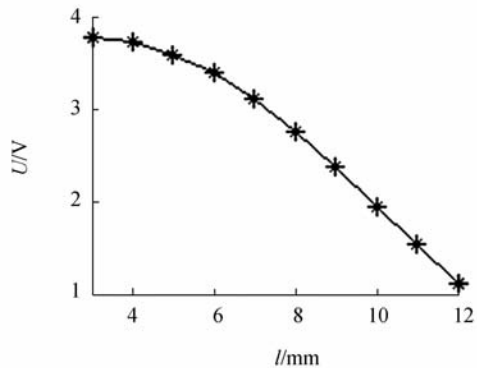


图8 电压-压电薄膜长度曲线

Fig. 8 Curve of voltage-piezoelectric film length

图9是Rainbow型压电换能结构的初始曲率半径与输出电压的变化曲线,其中,压电薄膜长度为12 mm,同时,在改变初始曲率半径过程中保持换能结构的其余尺寸为表1中相应基本尺寸。显然,随着换能结构初始曲率半径的增加,其输出电压单调减小。出现上述现象的原因是在换能结构初始曲率半径增大时,外力对换能结构截面产生的力矩和法向分力将显著减小,导致压电薄膜的应变显著减小,由于压电薄膜产生的电荷量等于电位移 D 在压电薄膜电极表面的积分,根据式(2)得到换能结构的输出电压将不断减小。因此,在Rainbow型压电换能结构初始曲率半径的设计中,可以考虑将换能结构弧形部分设计为半圆的形式,以此来提高其输出电压。

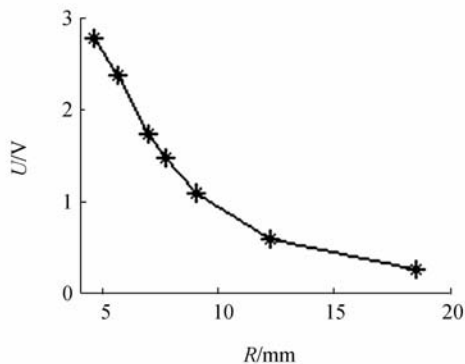


图9 电压-换能结构初始曲率半径曲线

Fig. 9 Curve of voltage-initial curvature radius

5 Rainbow型压电换能结构的实验研究

5.1 开路电压验证实验

为了验证Rainbow型压电换能结构输出开路电压的有限元仿真结果,进行了换能结构开路电压的验证实验,实验主要考察了具有代表性的压电薄膜厚度与换能结构输出开路电压的变化关系,达到了高效、经济的目的。

实验中在加工好的金属弹性基片上粘贴压电薄膜时,需注意以下几点:(1)粘贴前先用脱脂棉蘸取丙酮溶液擦拭金属弹性基片和压电薄膜,以去除其表面的灰尘等污迹;(2)金属基片与压电薄膜间胶层不宜太厚,以免对换能结构性能产生较大影响;(3)在压电薄膜粘贴中,要施加一定的

力,以免在金属基片与压电薄膜间留有气泡,同时施加力的大小又不能过大,以免损坏压电薄膜的电极。

实验时利用 HEV-50 高能激振器以频率为 100 Hz,峰值为 0.1 N 的激振力对换能结构的可移动端进行激励,并通过 Agilent54622D 混合示波器监测电压,实验过程中直接将压电薄膜电极引线输出接探头(Agilent10074C)给示波器以显示输出开路电压波形。

图 10 给出了 Rainbow 型压电换能结构输出开路电压的峰值与压电薄膜厚度的仿真与实验对比曲线。由图可知,随着压电薄膜厚度的增加,实验测试输出开路电压峰值呈先增大后减小的趋势,当压电薄膜厚度为 0.25 mm 时,输出开路电压峰值达到了最大值。与仿真结果比较表明,实验测试曲线与仿真曲线变化规律基本一致,都在压电薄膜厚度为 0.25 mm 时,输出开路电压达到最大,验证了有限元仿真的可靠性。

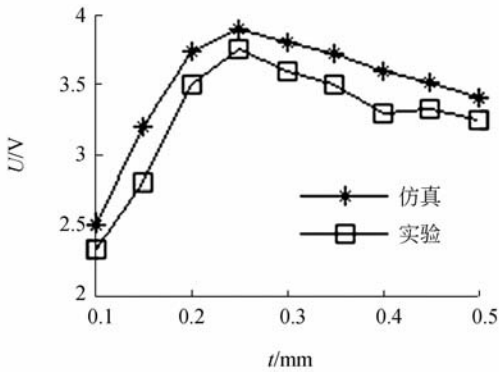


图 10 电压-压电薄膜厚度仿真及实验曲线

Fig. 10 Simulation and experimental curves of voltage-piezoelectric film thickness

仿真分析与实验测试输出电压幅值的不同主要是因为有限元仿真是在对换能结构做了一定的假设之后,在一种理想的条件下得出的结果。而实际测试中却不可避免地会受到各种干扰因素的影响,致使测量结果有较小的波动。产生干扰的因素主要有以下几个方面:

(1)加工工艺条件的影响。在对金属弹性基片及压电薄膜加工过程中,由于该换能结构特殊的拱形结构,且试件为单件加工,受加工条件的限制,将不可避免地会产生一定的加工误差。

(2)粘结胶层的影响。在换能结构的有限元分析中,假设金属弹性基片与压电薄膜之间是理

想粘结的,而在实验测试中,却计入了胶层因素的影响。

另外,实验过程中的测量误差以及结构的摩擦等因素也将会对结果造成一定的影响。

5.2 输出功率实验

为了测试 Rainbow 型压电换能结构对负载供能的可行性,进行了换能结构的输出功率实验。实验中采用的能量存储电路同图 1 中所示,压电薄膜在外力作用下,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能,利用示波器对负载电压进行实时测量。

图 11 给出了外接负载为 $8\text{ M}\Omega$,激振频率为 200 Hz,换能结构的初始曲率半径为 4.6 mm,其它尺寸为表 1 中尺寸条件下,施加不同激励力时换能结构的功率输出曲线。从图中不难看出,随着施加作用力的增大,换能结构的输出功率也在不断增大,在施加峰值 0.2 N 的作用力时,输出功率达到了 $7.75\text{ }\mu\text{W}$,已可满足一些超低耗能微电子器件的供能需求。如果对该 Rainbow 型压电换能结构的材料、尺寸参数加以优化设计,其输出功率将会得到有效提高,有望满足更多低耗能微电子产品的供能需求。

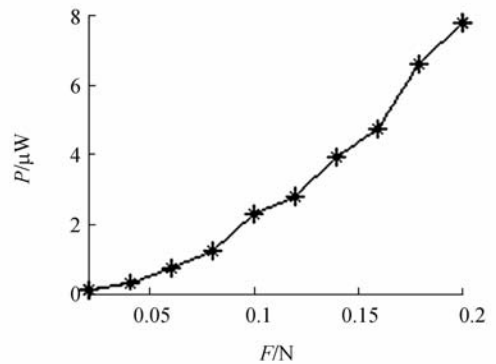


图 11 输出功率实验测试曲线

Fig. 11 Experimental curve of output power

6 结 论

本文提出了一种多方向压电振动能量收集装置的设计结构,同时提出了一种新颖的 Rainbow 型压电能量转换结构。为了分析和测试 Rainbow 型压电换能结构的发电性能,对其进行了有限元仿真分析和实验测试。对 Rainbow 型压电换能

结构的有限元仿真得出,金属弹性基片的宽度与厚度、压电薄膜的宽度与长度及换能结构初始曲率半径的增大将会引起换能结构输出开路电压的降低;金属弹性基片长度的增大将会引起换能结构输出开路电压的增加;压电薄膜厚度的增大将会使得换能结构输出开路电压先增加后减小。实验测试显示,有限元分析与实验结果具有较好的一致性,且都在压电薄膜厚度为0.25 mm时,换能结构的输出电压最大,验证了有限元分析的可

靠性;输出功率测试中,在峰值为0.2 N的作用力下,换能结构的输出功率达到了 $7.75 \mu\text{W}$,已可满足一些超低耗能微电子器件的供能需求。在综合考虑金属弹性基片的屈服条件以及整个多方向振动能量收集装置的尺寸空间要求下,通过对换能结构材料及其尺寸参数的优化设计可以有效提高其输出功率,有望满足更多低耗能微电子产品的供能需求。上述分析及测试结果为Rainbow型压电换能结构的设计、制作提供了指导性意见。

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, PISTER K S. Micro-electrostatic vibration to electricity converters [C]. *Proceedings of New Orleans, ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, Louisiana*; ASME, 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 J B, XIE T, SHAN X B, 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] GLYNNE-JONES P, TUDOR M J, BEEBY S P, et al.. An electromagnetic vibration powered generator for intelligent sensor systems [J]. *Sensors and Actuators A*, 2004, 110: 344-349.
- [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. 基于微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 L, GUO Y B, CHEN X Y. Design and analysis of vibration energy collector based on MEMS [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(9): 238-242. (in Chinese)
- [7] INGO K, DJORDJE M, GERALD E, et al.. A new approach for MEMS power generation based on a piezoelectric diaphragm [J]. *Sensors and Actuators A*, 2008, 142: 292-297.
- [8] 廖海洋, 钟正青. 压电陶瓷轮胎发电机的设计 [J]. *光学精密工程*, 2009, 17(6): 1327-1332.
LIAO H Y, ZHONG Z Q. Design of piezoelectric power generator in tire [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(6): 1327-1332. (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 X F, WEN ZH Y, WEN ZH Q. Modeling and application of piezoelectric vibration-based power generator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 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 J B, SHAN X B, XIE T, et al.. Experiment of monocrystal piezoelectric generator with cantilever beam structure [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(5): 1072-1077. (in Chinese)
- [11] ROUNDY S, WRIGHT P K, RABAHEY J. A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes [J]. *Computer Communications*, 2003, 26: 1131-1144.
- [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 L T, WU J F, CHU X CH, et al.. Finite element analysis and experiment on piezoelectric bimorph [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(12): 2378-2383. (in Chinese)
- [13] 陶宝祺. 智能材料结构 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1997: 59-64.
TAO B Q. *Smart Material Structure* [M]. Beijing: National Defense Industrial Press, 1997: 59-64. (in Chinese)

作者简介:



刘祥建(1980—),男,山东五莲人,博士研究生,2002年于青岛农业大学获工学学士学位,2005年于华中农业大学获工学硕士学位,主要研究方向为环境振动能量收集及压电驱动技术等。E-mail:liuxukd@126.com

导师简介:



陈仁文(1966—),男,湖南平江人,博士,教授,博士生导师,1988年、1991年、1999年于南京航空航天大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要研究方向为智能材料与结构、计算机测控技术及振动主动控制等。E-mail:rwchen@nuaa.edu.cn

● 下期预告

大功率 TEA CO₂ 激光器的电磁辐射测试及屏蔽方舱设计

葛欣宏^{1,2}, 郭立红¹, 孟范江¹, 于洪君¹, 王思雯¹, 王鹤淇^{1,2}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

为了抑制大功率 TEA CO₂ 激光器对其他电子设备的电磁干扰,在测量并分析激光器的近场电磁辐射特性的基础上,设计了电磁屏蔽方舱并进行了验证。根据大功率 TEA CO₂ 激光器的工作原理,分析了激光器工作过程中的主要电磁辐射源,结合电磁辐射理论与激光器的实际结构,确定了电磁辐射测试的主要部位为火花开关、主回路和激光器出光口处。测试得到了激光器近场不同方位的主要辐射频率及辐射场的特性,据此设计了屏蔽方舱,并在屏蔽方舱门处进行了屏蔽效能验证。结果表明,大功率 TEA CO₂ 激光器在近场区的电磁辐射源为磁场源,据此设计的屏蔽方舱其屏蔽效能整体达到 40 dB 以上,部分频率的屏蔽效能达到 60 dB 以上。