

蝴蝶式多层悬臂梁压电发电装置研究

龚俊杰,沈丽佳,唐春秀,陈晓尧

(扬州大学 机械工程学院,江苏 扬州 225127)

摘要:为了提高压电发电装置的发电能力,设计了一种新型的蝴蝶式多层压电悬臂梁。为了研究该装置中每个压电双晶梁的发电性能,建立了在自由端外力作用下压电悬臂梁的输出电压理论模型,以此用来分析压电双晶梁的开路输出电压。制作了多层压电发电装置,并搭建实验平台对装置的发电电压进行实验测试,将实验测试数据与理论计算结果进行比较,两者误差小于10%。将发电装置中的6层压电片串联后研究发现,装置的发电电压基本不变,而发电功率可达单层的6倍,说明该新型蝴蝶式多层压电悬臂梁结构可提高发电能力。

关键词:蝴蝶式结构;压电悬臂梁;发电电压;输出功率;实验测试

中图分类号:TN836;TN712 **文献标识码:**A

Study on Butterfly Piezoelectric Generator with Multilayer Cantilever Beams

GONG Junjie, SHEN Lijia, TANG Chunxiu, CHEN Xiaoyao

(College of Mechanical Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China)

Abstract: A butterfly piezoelectric generator with multilayer cantilever beams is designed for improving the generating performance of piezoelectric generator. To investigate the generating performance of piezoelectric bimorph beam in the equipment, the output voltage theoretical model of piezoelectric cantilever beam with load on free end is established for analyzing the open-circuit output voltage of piezoelectric bimorph beam. The experimental setup is put up and physical device is also fabricated to measure the output voltage. The present theoretical results of multilayer piezoelectric generator coincide well with the related experimental data; the error is less than 10%. After the six layers of piezoelectric generator are in series, the output power can be up to six times that of the single layer, while the output voltage remains the same. It indicates that the novel butterfly multilayer piezoelectric cantilever can significantly improve the generating capacity of piezoelectric generator.

Key words: butterfly structure; piezoelectric cantilever beam; generating voltage; output power; experimental test

0 引言

与传统的电磁发电方法相比,压电发电装置具有结构简单,体积小,无污染,成本低及能量密度大等优点,已引起了人们的广泛关注,利用压电发电材料结合动力学系统、测试技术等对环境中的机械能进行能量回收已成为一项备受关注的高新技术,在军事、医疗、建筑等领域已展开了相关的研究^[1-5]。研究表明,压电发电装置的发电能力主要取决于压电振子的结构参数、施加的外力(或加速度)、频率等,输出功率较有限,所以如何有效地提高压电发电装置的发电能力,提高有限体积压电发电装置的机电能量转换效率,是迫切需要解决的关键问题^[2]。

悬臂梁式压电能量收集器是目前较常用的结构

形式,主要由压电单晶梁或压电双晶梁构成,可将自身的应变转变成电压并通过电极输出。所以建立可靠的压电发电理论模型,可得到给定条件下能量收集器的输出电压和最大输出功率,并研究一系列电学和力学变量对能量收集器发电性能的影响,进而对压电发电装置进行结构设计和优化是目前主要的研究方向之一^[6]。

2010年,Zhu等^[7]提出一种新型可调谐的电磁振动微发电机,并对尺寸进行了优化设计来达到输出电压和功率的最大化。2011年,Korla等^[8]提出了一种结构紧凑独立的压电能量收集装置,带有由4个二极管和1个电容器组成的整流电路,并对圆形和方形两种截面的装置做了发电性能测试。缪建

收稿日期:2013-10-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51275447);扬州大学2012年度大学生学术科技创新基金资助项目(B12052)

作者简介:龚俊杰(1969-),男,江苏扬州人,副教授,博士,主要从事工程问题的计算机建模与仿真、压电发电研究。E-mail: gjunj@126.com。

等^[9]提出一种新型的对偶子式的压电微悬臂双梁,采用简化的等效器件建立数学分析模型,并利用 ANSYS 对这种对偶子微悬臂梁进行模拟仿真分析。

本文提出了一种新型蝴蝶式多层悬臂梁压电发电装置,通过力学分析发现该新型多层结构的各层结构对称,所以对其中的单层压电发电悬臂梁建立了相关的压电发电理论模型,用于预测其输出电压,并进行了实验测试与理论验证,在此基础上,研究了将多层压电发电装置中的 6 层压电片串联后的发电效果。

1 多层悬臂梁压电发电装置的结构设计

蝴蝶式多层悬臂梁压电发电装置采用双边对称悬臂梁结构及质量块钣金结构,包括基座、质量板、基板、桥板、质量块等部分组成,基板上、下粘贴压电陶瓷片,其结构示意图如图 1 所示^[10]。

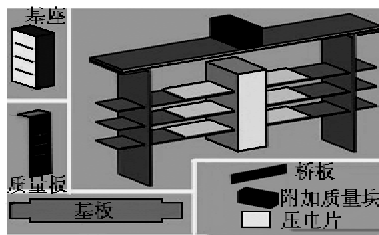


图 1 蝴蝶式多层悬臂梁压电装置

该结构将传统质量块衍变为 2 个带有狭窄方孔的质量板,并通过桥板相连,把梁末端插入方孔中,质量板的方孔与梁之间有微小间隙,可保证各梁连接在一起的同时又能很好地保证末端的自由振动。当起支撑作用的基座固定在激振器或外界振动的物体上作为梁的固定端,随振源一起振动时,质量块钣金结构随之起振,其质量和振动产生的惯性力在质量板的方孔处对梁施加竖直方向的压力。质量板的方孔和梁之间的间隙可使梁的截面在该处自由转动,相当于梁的自由端。所以分析该装置中各层梁的结构形式和受力特性可知,每层梁可视为典型的悬臂梁结构。

2 自由端外力作用下发电电压的理论模型

通过对多层压电发电装置的结构和受力分析可知各层悬臂梁的振动基本一致,且与相同尺寸及材料的单层压电悬臂梁具有相同的发电性能。为简化理论分析,将单层压电悬臂梁的理论模型简化为无质量块的压电双晶片悬臂梁结构。根据 IEEE 标准

176(1978),压电材料的线性本构方程^[11]为

$$\begin{pmatrix} S \\ D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S^E & d \\ d & \epsilon^T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T \\ E \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: S 为机械应变; D 为电位移; T 为机械应力; E 为电场强度; S^E , d 及 ϵ^T 分别为恒电场下的柔度张量,压电电荷常数及绝对介电常数。

对于双晶压电悬臂梁,发生弯曲时的中性层位于其几何中心,所以压电片上表面到中性层的距离为

$$y = t/2 = t_p + t_{Cu}/2 \quad (2)$$

式中 t 为悬臂梁的总厚度; t_p 和 t_{Cu} 分别为压电片和基板的厚度。

当在悬臂梁的自由端末端施加外部作用力 F 时,在距离基座为 x 处任意截面上的力矩^[12]为

$$M = 2 \int_0^{t/2} \int_{t/2-t_p}^{t/2} y T_{px} dy dz + \int_0^{t/2} \int_{-t_{Cu}/2}^{t_{Cu}/2} y T_{Cnx} dy dz = (x-l)F \quad (3)$$

式中: l 为悬臂梁的长度; T_{px} 和 T_{Cnx} 分别为压电层和金属层在 x 方向上的应力。同时推导出压电悬臂梁的曲率半径为

$$\rho = -\frac{3}{AE_p b r^3} [4(x-l)F + (1-\delta^3) b r^3 g_{31} E_p D_3] \quad (4)$$

式中: $A = 1 - \delta^3 + \delta^3 \sigma$ 为系数; δ 为金属层厚度与悬臂梁总厚度之比; b 为悬臂梁的宽度; E_p 为压电材料的弹性模量; σ 为金属基板与压电片材料的弹性模量之比; g_{31} 为压电电压常数; D_3 为电场强度。

最终,由式(1)可得压电双晶悬臂梁的开路输出电压为

$$V = \int_{-t_{Cu}/2}^{t/2} E_3 dy = \frac{1-\delta}{8Abt} [12(1+\delta)g_{31}(l-x)F + Bbt^2 \beta_{33}^T D_3] \quad (5)$$

式中 $B = -3(1-\delta)(1+\delta)^2 k_{31}^2 + 4A(1+k_{31}^2)$, k_{31}^2 为压电耦合系数。

由式(5)可知,在靠近基座处压电双晶悬臂梁产生的开路输出电压较大,且随着自由端作用力的增加,悬臂梁弯曲程度的增加,输出电压也随着增大。

3 理论计算与实验测试结果的比较

为验证自由端外力作用下输出电压理论模型的计算结果,制作了蝴蝶式 3 层双晶梁压电发电装置并搭建了实验测试平台对每层压电悬臂梁的开路输

出电压进行测试,如图 2、3 所示。

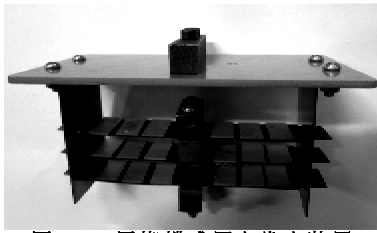


图 2 3 层蝴蝶式压电发电装置

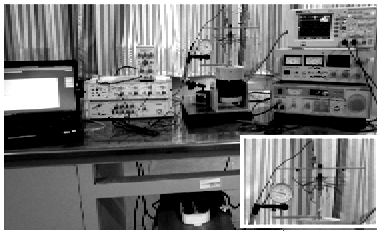


图 3 实验测试平台

测试平台包括信号发生器、功率放大器、电荷放大器、数据采集箱等仪器和设备。将压电发电装置的基座固定在激振器上,当压电悬臂梁在自由端外力作用下发生弯曲而产生发电电压时,通过数字示波器可直观地看到输出电压的波形和数值,通过数据采集系统可记录装置的电压数据。悬臂梁自由端的外力是通过测力计及 1 根细线施加在去掉附加质量块后的质量板中心,再由质量板将施加的力传递到每一个悬臂梁自由端,剪短细线以测量不同恒力外载荷作用下的电压最大值。

表 1 为 3 层蝴蝶式多层双晶梁压电发电装置包含的 6 个压电双晶梁的几何尺寸及材料性能参数。

表 1 压电双晶梁的几何尺寸及材料性能参数

组成	材料	密度/(kg/m ³)	弹性模量/GPa
基板	铍铜	8 230	130
压电片	PZT-5H	7 500	62
泊松比	长/mm	宽/mm	厚/mm
0.42	45	20	0.40
0.32	10	20	0.55

3.1 自由端外力作用下输出电压的实验测试

由式(5)表明,压电片的输出电压与自由端外力的大小和压电片到基座的距离等因素有关,为了验证该结论,首先考虑当压电片中心到固定端(基座)的距离 $x = 15 \text{ mm}$,外载荷变化范围为 $0.05 \sim 0.50 \text{ N}$,载荷增量为 0.05 N 时,测量任一单层压电悬臂梁上压电片的输出电压数据。图 4 为实验测试结果与理论计算结果的数据,比较发现两者较接近。

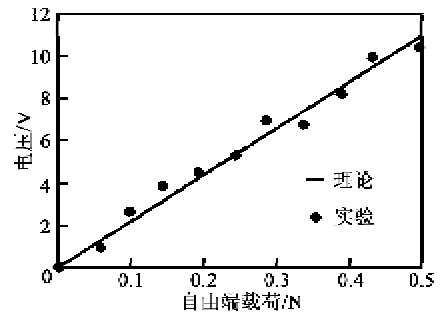


图 4 自由端载荷与电压的关系

然后研究改变压电片到固定端的距离时压电悬臂梁输出电压的变化规律,设定距离变化范围为 $5 \sim 40 \text{ mm}$,增量为 5 mm 。此时,设定压电片自由端施加恒定不变的载荷 $F = 0.25 \text{ N}$ 作用。图 5 为开路电压最大值随压电片到固定端距离 x 变化时输出电压的理论结果和实验结果比较图。

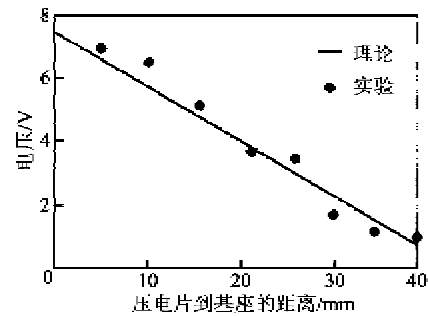


图 5 压电片位置与电压的关系

由图 4、5 可知,压电片的输出电压随外载荷的增加而增大,随压电片到固定端距离的增加而减小,输出电压与外载荷、距离之间有很好的线性度,理论结果与实验结果基本一致,从而验证了理论模型的正确性。

虽然单层压电悬臂梁在外力作用下的开路输出电压较大,但其发电功率较低。为了研究其发电功率大小,将单层压电悬臂梁与 $6\ 500 \ \Omega$ 的电阻负载接成电路,通过测量得到当悬臂梁自由端作用 $F = 0.25 \text{ N}$ 的外力及 $x = 15 \text{ mm}$ 时,单层压电悬臂梁的输出功率约为 $15 \ \mu\text{W}$ 。

3.2 多层压电悬臂梁串联的实验测试

为了与单层压电悬臂梁的发电性能作比较,将 6 层压电悬臂梁串联,测量得外载荷变化范围为 $0.05 \sim 0.50 \text{ N}$,载荷增量为 0.05 N 时的输出电压数据如图 6 所示。

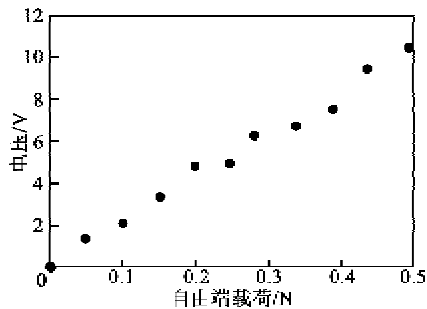


图6 6层串联时的电压

比较图4、6的数据可知,单层压电悬臂梁与6层压电悬臂梁串联后的开路输出电压基本相同。

同样将6层压电悬臂梁串联后再与6500Ω的电阻负载接成电路,在外力大小与压电片到固定端的距离保持不变的条件下,测量得到多层压电悬臂梁串联后的输出功率为84μW,约为单层输出功率的6倍。说明当6层压电悬臂梁串联时,与单层相比电压基本保持不变,但输出功率提高了5~6倍。

4 结束语

本文设计并制作了新型的多层悬臂梁式压电发电装置,建立了每层压电双晶梁自由端在外力作用下的输出电压及基座激励作用下的压电等效电路两种理论模型,可用来预测发电装置的开路输出电压和输出功率等发电性能。为了验证理论结果的正确性,搭建了相应的实验平台,获得了输出电压和功率等发电数据。理论分析及实验测试结果较吻合。开路输出电压随载荷与压电片位置的变化而变化,且具有很好的线性度;输出功率与激励频率和负载电阻有关,并存在两个局部极值。将发电装置中的6层压电片串联在一起后,实验研究发现装置的发电电压基本不变,而发电功率可达单层的6倍,说明该新型蝴蝶式多层压电悬臂梁结构确实可提高发电能力。

参考文献:

- [1] 唐可洪, 阚君武, 任玉, 等. 压电发电装置的功率分析与试验[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2009, 39(6): 1550-1553.
TANG Kehong, KAN Junwu, REN Yu, et al. Power analysis and test of piezoelectric generator[J]. Journal of Jilin University: Eng and Technol Ed, 2009, 39(6): 1550-1553.
- [2] 何学文, 黄国平. 基于 Ansys 的 0-3 型压电振子的有限元分析[J]. 压电与声光, 2011, 33(6): 968-972.
HE Xuewen, HUANG Guoping. Ansys-based finite element analysis of 0-3 model piezoelectric vibrator[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2011, 33(6): 968-972.
- [3] LEFEUVRE E, BADEL A, RICHARD C, et al. A comparison between several vibration-powered piezoelectric generators for standalone systems[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2006, 126(2): 405-416.
- [4] 王强, 骆英, 顾建祖. 基于压电材料的振动能量获取技术的研究[J]. 电子元件与材料, 2008, 27(3): 47-50.
WANG Qiang, LUO Ying, GU Jianzu. Research on harvested technique of vibration energy based on piezoelectric materials[J]. Electronic Components and Materials, 2008, 27(3): 47-50.
- [5] 方科, 李欣欣, 杨志刚, 等. 压电式能量获取装置的研究现状[J]. 传感器与微系统, 2006, 25(10): 7-9.
FANG Ke, LI Xinxin, YANG Zhigang, et al. Research state on piezoelectric energy harvesting advice [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2006, 25(10): 7-9.
- [6] SHASHANK P, DAN I. Energy harvesting technologies[M]. Berlin: Springer, 2009: 40-43.
- [7] ZHU D, ROBERTS S, TUDOR M J, et al. Design and experimental characterization of a tunable vibration-based electromagnetic micro-generator[J]. Sensors and Actuators A, 2010, 158(2): 284-293.
- [8] KORLA S, LEON R A, TANSEL I N, et al. Design and testing of an efficient and compact piezoelectric energy harvester[J]. Microelectronics Journal, 2011, 42(2): 265-270.
- [9] 缪建, 朱若谷. 基于 ANSYS 的压电微悬臂双梁的有限元分析[J]. 压电与声光, 2011, 33(4): 557-560.
MIAO Jian, ZHU Ruogu. The finite element analysis of twin piezoelectric micro cantilever based on ANSYS [J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2011, 33(4): 557-560.
- [10] RUAN Zhilin, GONG Junjie, CAI Mengchang, et al. Structural design and testing of a butterfly piezoelectric generator with multilayer cantilever beams[C]// S. I.; Advanced Materials Research, 2013, 655/657: 823-829.
- [11] MEITZLER A H, BERLINCOURT D, WELSH F S, et al. IEEE Std 176-1987 IEEE standard on piezoelectricity[C]//New York: IEEE, 1987.
- [12] GONG Junjie, XU Yingying, RUAN Zhilin. Experimental investigation of piezoelectric bimorph cantilever on vibration energy harvesting performance[C]// S. I.; Advanced Materials Research, 2013, 655/657: 816-822.