

基于 PVDF 的枕形压电发电装置性能仿真分析

刘祥建¹, 陈仁文²

(1. 金陵科技学院 机电工程学院, 江苏 南京 211169; 2. 南京航空航天大学 机械结构力学及控制国家重点实验室, 江苏 南京 210016)

摘要:提出了一种枕形压电发电装置, 为了解该压电发电装置的发电性能, 该文对其进行了有限元仿真。结果表明, 弹性金属基片厚度、弧形压电梁宽度及初始曲率半径的增加将引起压电发电装置压电薄膜输出电压的降低; 弧形压电梁的长度及弹性模量比的增加将引起压电薄膜输出电压的不断升高; 压电薄膜厚度的增加将使其输出电压先增大后减小; 弧形压电梁内侧压电薄膜的输出电压都要大于外侧压电薄膜的输出电压, 且铍青铜基片压电梁要优于钢基片压电梁。

关键词:聚偏氟乙烯(PVDF); 枕形; 压电发电装置; 性能仿真; 有限元

中图分类号: TN384 **文献标识码:** A

Performance Simulation Analysis on Pillow-shaped Piezoelectric Harvester Based PVDF

LIU Xiangjian¹, CHEN Renwen²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, China,

2. State Key Lab. of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of

Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: A pillow-shaped piezoelectric harvester was proposed in this paper. With the aim to know about the generating capacity of the piezoelectric harvester, the finite element simulation was performed. The simulation results showed that the output voltages of the piezoelectric harvester decreased with the increase of the thickness of the flexible substrate, the width of the piezoelectric cantilever and the initial curvature radius; the output voltages of the piezoelectric harvester increased with the increase of the length of the piezoelectric cantilever and the elastic modulus ratio; the output voltages of the piezoelectric harvester first increased and then decreased with the increase of thickness of the piezoelectric film. Furthermore, the output voltages of the inside piezoelectric film of the piezoelectric cantilever were larger than the outside piezoelectric film and the beryllium bronze substrate piezoelectric cantilever was superior to the steel substrate piezoelectric cantilever.

Key words: PVDF; pillow-shaped; piezoelectric harvester; performance simulation; finite element

0 引言

随着智能材料与智能结构研究领域的不断发展, 基于压电材料的振动能量收集装置^[1-4]的研究成为目前的热点。压电式振动能量收集装置以其制作简单、清洁环保及易与微机电系统集成等优点而成为一种最具潜力的振动能量收集方式。目前, 研究者提出的压电式振动能量收集装置主要有悬臂梁形结构、圆盘形结构及叠堆形结构等。

上述压电振动能量收集装置在环境能量收集中

采用的压电材料都为压电陶瓷, 主要是得益于压电陶瓷材料的高压电常数。然而, 压电陶瓷材料较脆, 若机械加工质量不高, 在装配或应用中易破碎, 这在一定程度上限制了其在某些场合中的应用。近几十年来, 随着新型压电材料的不断出现, 将聚偏氟乙烯(PVDF)压电材料应用于振动能量收集的研究开始引起人们的关注^[5]。PVDF压电材料具有质量轻, 质地柔软, 可加工性好及频响宽等优点, 可满足在不同场合中对振动能量收集的需要, 特别是在一些弯

收稿日期: 2013-09-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51305183); 金陵科技学院博士科研启动基金资助项目(jit-b-201412); 江苏省“青蓝工程”基金资助项目

作者简介: 刘祥建(1980-), 男, 山东日照人, 讲师, 博士, 主要从事压电振动能量收集技术的研究。E-mail: xiangjianliu@126.com。

曲变形较大场合的应用中。

基于 PVDF 压电材料的上述优点,本文研究一种枕形压电发电装置,其可承受较大的压力,同时 PVDF 压电材料可产生较大的形变,从而可收集更多的振动能量,为设计不同应用环境中高能量收集能力的压电振动能量收集装置提供参考。

1 结构与工作原理

压电发电装置的基本结构如图 1 所示,由图可知,该压电发电装置主要由上、下两片刚性金属基板 and 左、右两个弧形压电梁组成,其中,弧形压电梁又由弹性金属基片和 PVDF 压电薄膜构成。当装置工作时,外界环境激励施加于刚性金属基板上,使弧形压电梁产生受迫振动而发生弯曲变形,进而引起 PVDF 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产生变化时,在其表面将有自由电荷产生,从而实现装置由机械能到电能的转化。其中,压电体所受应力及产生电场的关系为^[6]

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

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

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; \mathbf{T} 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;上标 T 为常应力条件;上标 E 为常电场强度条件。

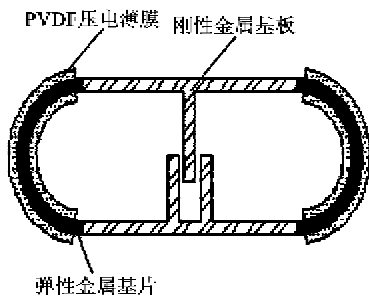


图 1 枕形压电发电装置结构示意图

2 有限元仿真分析

为研究枕形压电发电装置的发电性能,利用有限元软件 ANSYS 对其进行仿真分析。在有限元仿真中,采用 Solid98 单元对压电薄膜进行网格划分,采用 Solid92 单元对弹性金属基片进行网格划分,同时忽略粘结层对压电发电装置发电性能的影响。

表 1 为枕形压电发电装置有限元模型的基本尺寸和材料参数。其中 PVDF 压电薄膜的压电应力常数矩阵(\mathbf{e})和压电弹性系数矩阵(\mathbf{c})分别为

$$\mathbf{e} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.0104 \\ 0 & 0 & -0.0164 \\ 0 & 0 & -0.065 \\ 0 & 0 & 0 \\ -0.0388 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{C/m}^2) \quad (3)$$

$$\mathbf{c} = \begin{bmatrix} 8.1 & 4.84 & 4.84 & 0 & 0 & 0 \\ 4.84 & 6.92 & 4.38 & 0 & 0 & 0 \\ 4.84 & 4.38 & 6.92 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.38 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.38 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.38 \end{bmatrix} \times 10^9 \quad (\text{N/m}^2) \quad (4)$$

表 1 枕形压电发电装置的基本尺寸和材料参数

参数	PVDF	铍青铜	钢
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1780	8290	7800
弹性模量/GPa		131	210
泊松比	0.30	0.35	0.30
厚度/mm	0.2	0.1	0.1
宽度/mm	6	6	6
长度/mm	15.7	15.7	15.7
相对介电常数	12		
初始曲率半径/mm		5	

在有限元仿真分析中,将 PVDF 压电薄膜与弹性金属基片接触面的电压设为 0,并对压电薄膜的另一表面的电压进行耦合。当压电发电装置的刚性金属基板上受到外部激励时,压电发电装置产生变形并在压电薄膜的电极面上输出一定大小的电压,并设刚性金属基板中间位置受到垂直于基板面的外力大小为 1 N。

图 2 为枕形压电发电装置压电薄膜输出电压与其厚度的关系曲线。在改变压电薄膜厚度过程中,保持压电发电装置的其他结构参数不变,可以看出,随着压电薄膜厚度的增加,其输出电压先增大后减小,其中,铍青铜基片压电发电装置的最优压电薄膜厚为 0.3 mm,钢基片压电发电装置的最优压电薄膜厚为 0.4 mm。这说明了在枕形压电发电装置结构设计中,选取的弹性基片材料不同,相应的最优压

电薄膜厚度也不同。

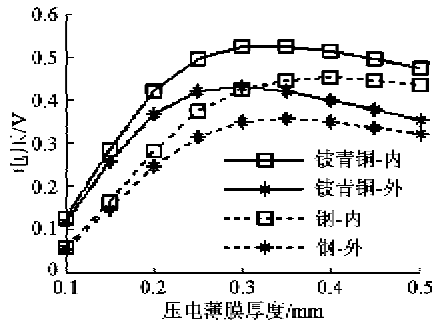


图 2 压电薄膜厚度与电压关系曲线

保持枕形压电发电装置压电薄膜的厚度、弧形压电梁的长度及宽度不变,仅改变弹性金属基片的厚度,得到压电薄膜输出电压与弹性金属基片厚度的关系曲线如图 3 所示。由图可知,随着弹性金属基片厚度的增加,枕形压电发电装置压电薄膜的输出电压不断减小,从输出电压变化的数值来看,在弹性金属基片厚度的增加中,输出电压的下降较快。出现上述现象的原因是当弹性金属基片厚度增加时,弧形压电梁的等效刚度增加,同时由于镀青铜材料的弹性模量相对较大,因此使压电薄膜的输出电压下降较快。

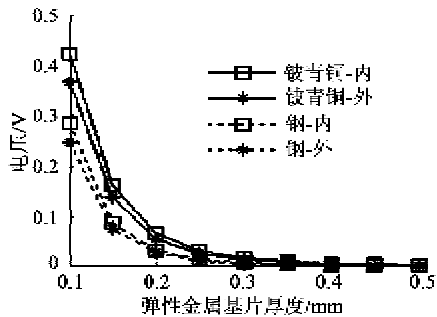


图 3 弹性金属基片厚度与电压关系曲线

图 4 为枕形压电发电装置压电薄膜输出电压与弧形压电梁长度的关系曲线。由图可知,在弧形压电梁长度的不断增加过程中,枕形压电发电装置压电薄膜的输出电压不断升高。出现上述现象的原因

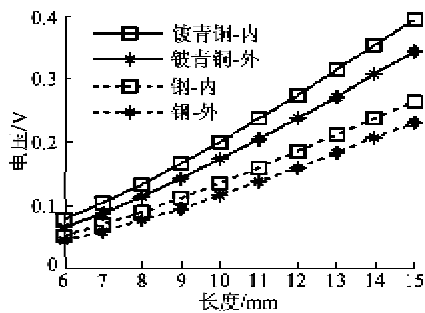


图 4 弧形压电梁长度与电压关系曲线

是当弧形压电梁的长度增加时,力对弧形压电梁横截面产生的力矩和法向分力增大,使压电薄膜的应变增大。因此,为获得压电发电装置较大的输出电压,应在符合加工工艺的前提下,尽量加大弧形压电梁的长度。

固定枕形压电发电装置弧形压电梁的厚度、长度及初始曲率半径,仅改变弧形压电梁的宽度,得到压电发电装置压电薄膜输出电压与弧形压电梁宽度的关系曲线如图 5 所示。由图可知,弧形压电梁宽度的增加将导致枕形压电发电装置压电薄膜输出电压的减小。这是因为弧形压电梁宽度的增加虽然增大了压电薄膜的表面积,使压电薄膜产生的电荷增多,但同时也增大了弧形压电梁的等效刚度,且弧形压电梁等效刚度增加产生的影响要大于压电薄膜表面积增加产生的影响,致使压电薄膜的输出电压不断减小。

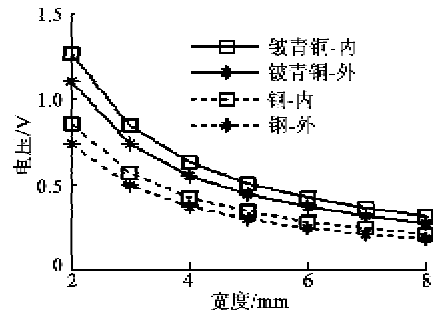


图 5 弧形压电梁宽度与电压关系曲线

图 6 为枕形压电发电装置压电薄膜输出电压与弧形压电梁初始曲率半径的关系曲线。由图可知,随着初始曲率半径的增加,压电薄膜的输出电压不断减小。出现上述现象的原因是在弧形压电梁初始曲率半径增大时,外力对其截面产生的力矩和法向分力将减小,导致压电薄膜的应变减小,由于压电薄膜产生的电荷量等于电位移在压电薄膜电极表面的积分,根据式(2)得到压电发电装置压电薄膜的输出电压将不断减小。为此,在枕形压电发电装置的

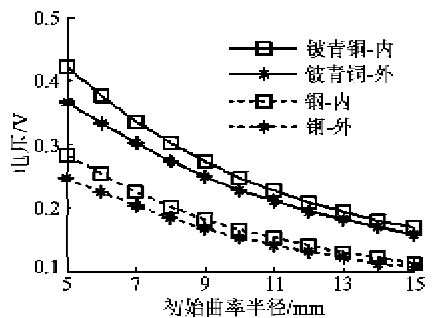


图 6 弧形压电梁初始曲率半径与电压关系曲线

结构设计中,为获得较高的输出电压,可考虑采用半圆形的弧形压电梁结构。

这里,将压电薄膜的弹性模量与弹性金属基片的弹性模量之比定义为弹性模量比。图7为枕形压电发电装置压电薄膜输出电压与弹性模量比的关系曲线。在改变弹性模量比的过程中,保持压电发电装置的结构参数不变。由图可知,随着弧形压电梁弹性模量比的增加,枕形压电发电装置压电薄膜的输出电压单调升高。由此可见,在压电发电装置的设计中,应充分注意压电薄膜和弹性基片材料的选择,较大的弹性模量比将提高压电发电装置输出电压。

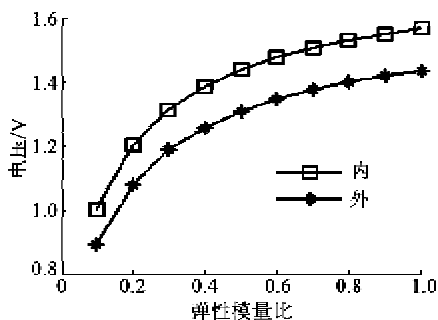


图7 弹性模量比与电压关系曲线

从图2~7可看出,无论弧形压电梁的结构参数和材料特性如何变化,其内侧压电薄膜的输出电压皆大于外侧压电薄膜的输出电压,且铍青铜基片的压电梁优于钢基片的压电梁。这主要是由于弧形压电梁内侧压电薄膜的曲率半径始终都要小于外侧压电薄膜的曲率半径而造成的,同时铍青铜的弹性模量要小于钢的弹性模量,导致弧形压电梁的等效刚度较小(见图7)。

3 结束语

本文提出了一种枕形压电发电装置,为了解其

发电性能,对其进行有限元仿真分析。研究结果表明,弹性金属基片厚度、弧形压电梁宽度及初始曲率半径的增加将引起压电发电装置压电薄膜输出电压的降低;弧形压电梁的长度及弹性模量比的增加将引起压电发电装置压电薄膜输出电压的不断升高;压电薄膜厚度的增加将使压电发电装置压电薄膜的输出电压先增大后减小;弧形压电梁内侧压电薄膜的输出电压都要大于外侧压电薄膜的输出电压,且铍青铜基片压电梁要优于钢基片压电梁。

参考文献:

- [1] CHEW Z J, LI L J. Design and characterization of a piezoelectric scavenging device with multiple resonant frequencies[J]. *Sensors and Actuators A*, 2010, 162(1): 82-92.
- [2] LIAO Y, SODANO H A. Structural effects and energy conversion efficiency of power harvesting[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2009, 20(5): 503-514.
- [3] JEONG S J, KIM M S, SONG J S. Two-layered piezoelectric bender device for micro-power generator[J]. *Sensors and Actuators A*, 2008, 148(1): 158-167.
- [4] FEENSTRA J, GRANSTROM J, SODANO H. Energy harvesting through a backpack employing a mechanically amplified piezoelectric stack[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2008, 22(3): 721-734.
- [5] LIU X J, CHEN R W, ZHU L Y. Energy conversion efficiency of rainbow shape piezoelectric transducer[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2012, 25(5): 691-697.
- [6] 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(5): 769-774.
- [8] HOLSCHER H, SCHWARZ U D. Theory of amplitude modulation atomic force microscopy with and without Q-control[J]. *Int J Non-Linear Mech*, 2007, 42(4): 608-625.
- [9] KIRACOFE D, MELCHER J, RAMAN A. Gaining insight into the physics of dynamic atomic force microscopy in complex environments using the VEDA simulator[J]. *J Rev Sci Instrum*, 2012, 83(1): 013702.

(上接第638页)

- [6] SAN P A, GARCIA R. Unifying theory of tapping-mode atomic-force microscopy[J]. *J Phys Rev B*, 2002, 66(4): 114310.
- [7] KLINOV D, MAGONOV S. True molecular resolution in tapping-mode atomic force microscopy with high-resolution probes[J]. *J Appl Phys Lett*, 2004, 84(14): 2697-2699.