

# 压电层厚度对 $d_{15}$ 模式 PZT-51 悬臂梁俘能特性影响

费明祥<sup>1</sup>, 祝元坤<sup>2</sup>, 张勇<sup>1</sup>, 张智雄<sup>1</sup>, 郑学军<sup>1,2</sup>

(1. 湘潭大学 材料与光电物理学院, 湖南 湘潭 411005; 2. 上海理工大学 材料学院, 上海 200093)

**摘要:** 设计并制作了压电层厚度分别为 0.6 mm、0.7 mm、0.8 mm、0.9 mm 的  $d_{15}$  模式层合串联结构 PZT-51 压电悬臂梁俘能器。测量了开路 and 1.0 M $\Omega$  负载下, 俘能器的振动频率与输出电压和输出功率的关系曲线, 以及 1.0 M $\Omega$  负载时的振动激励电压与输出峰-峰值电压关系曲线。结果表明, 随着压电层厚度的减少, 压电俘能器的谐振频率降低, 输出电压和功率增大。压电层厚度为 0.6 mm 的压电俘能器具有最大开路输出电压 1.69 V, 在 1.0 M $\Omega$  负载下最大输出功率为 0.708  $\mu$ W。

**关键词:**  $d_{15}$  模式; PZT-51; 压电俘能器; 层合结构; 悬臂梁

**中图分类号:** TN384

**文献标识码:** A

## Effect of Piezoelectric Film Thickness on Energy Harvesting Performance of $d_{15}$ Mode PZT-51 Cantilever Beam

FEI Mingxiang<sup>1</sup>, ZHU Yuankun<sup>2</sup>, ZHANG Yong<sup>1</sup>, ZHANG Zhixiong<sup>1</sup>, ZHENG Xuejun<sup>1,2</sup>

(1. Faculty of Materials, Optoelectronics and Physics, Xiangtan University, Xiangtan 411005, China;

2. College of Material Science, University of Shanghai for Science & Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** The  $d_{15}$  mode PZT-51 piezoelectric energy harvesters (PEHs), which of piezoelectric layer thicknesses were 0.6 mm, 0.7 mm, 0.8 mm, and 0.9 mm respectively, were designed and fabricated. The curves of vibration frequency versus output voltage and output power were measured at open circuit and load resistance of 1 M $\Omega$ , and the dependence of output peak-peak voltage on input vibration excitation voltage was also tested at load resistance of 1 M $\Omega$ . It is shown that with the decrease of piezoelectric layer thickness, the resonant frequency of PEH decreases, while the output voltage and output power increase. The laminated structure  $d_{15}$  mode PZT-51 PEH with piezoelectric layer thickness of 0.6 mm shows the maximum open circuit output peak voltage of 1.69 V and maximum output power of 0.708  $\mu$ W at load resistance of 1 M $\Omega$ .

**Key words:**  $d_{15}$  mode; PZT-51; piezoelectric energy harvester; laminated structure; cantilever beam

### 0 引言

近年来, 利用压电效应直接从环境振动源中获取能量的俘能装置和结构, 因具有应用于微型无线传感器和便携电子设备的潜能而成为一个热门话题<sup>[1]</sup>。将环境振动能转化为电能主要有静电、电磁和压电 3 种方式<sup>[2]</sup>。其中, 利用压电材料的正压电效应而制作一种能够俘获环境中能量的装置称之为压电俘能器。压电俘能器因具有结构简单, 不发热, 无电磁干扰, 无污染, 易加工制作和实现机构的微小化、集成化等优点而备受关注<sup>[3-4]</sup>。压电俘能器通常存在  $d_{31}$ 、 $d_{33}$ 、 $d_{15}$  3 种俘能模式。一般采用的压电材

料对应的压电系数越高, 则压电俘能装置的输出电压和功率越大<sup>[5-6]</sup>。较大部分压电材料的压电系数满足  $d_{15} > d_{33} > d_{31}$  的关系, 如 PMN-PT 单晶<sup>[7]</sup>、PZT4、PZT-5A、PZT-5H、PZT-6B、PZT-7A 系列及 BaTiO<sub>3</sub>、PbTiO<sub>3</sub><sup>[8]</sup> 等。因此,  $d_{15}$  模式的压电俘能器有望比  $d_{33}$ 、 $d_{31}$  模式俘能器具有更好的俘能性能。

如何提高  $d_{15}$  模式压电俘能器的俘能性能是当前的研究热点<sup>[7-8]</sup>。C. MAJIDI 等<sup>[5]</sup>制作了一个基于  $d_{15}$  模式压电耦合的 ZnO 纳米带阵列, 其在由滑动摩擦或机械振动导致的弹性形变下可产生多达 100  $\mu$ W/cm<sup>3</sup> 的能量密度。B. Ren 等制备了  $d_{15}$  和

收稿日期: 2014-07-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51272158); 长江学者奖励计划基金资助项目 ([2009]17); 上海市自然科学基金资助项目 (14ZR1428000)

作者简介: 费明祥 (1991-), 男, 湖南衡阳人, 硕士生, 主要从事电子科学与技术的研究。通信作者: 郑学军, 教授, 博士, E-mail: zhengxuejun@xtu.edu.cn

$d_{31}$  模式的 PMN-PT 单晶压电俘能器,前者压电材料的体积仅为后者的 1/2,但其输出电压是后者的 8.3 倍,对应最大输出功率约为后者的 7 倍<sup>[7,9]</sup>。本课题组结合单自由度模型与  $d_{15}$  模式压电效应,分析模拟了剪模式压电悬臂梁俘能器在低频振动环境中的俘能性能<sup>[10]</sup>。另外还设计制作了一种  $d_{15}$  模式串联 2 个压电单元的 PZT-51 压电悬臂梁装置,并与只有一个压电单元的 PZT-51 压电悬臂梁装置进行俘能性能对比,在负载电阻为 2.2 M $\Omega$  下前者的输出峰-峰值电压约为后者的 2 倍<sup>[11]</sup>。利用高的剪切压电系数材料,设计  $d_{15}$  模式的悬臂梁俘能装置以期获得优异的俘能特性,对俘获环境中振动能压电俘能器的应用具有重要意义。以上的报道虽然提出了可通过改变电路结构使俘能器获取更好的性能,但并未考虑优化压电层尺寸来增益层合串联结构  $d_{15}$  模式 PZT-51 压电俘能器性能。

选取较高  $d_{15}$  系数的 PZT-51 压电陶瓷作为压电材料,设计制作不同厚度压电层的  $d_{15}$  模式 PZT-51 层合结构悬臂梁,研究压电层厚度对  $d_{15}$  模式层合结构 PZT-51 压电悬臂梁俘能性能的影响。实验中,测量频率和负载电阻不同时该压电悬臂梁的输出电压峰-峰值和输出功率,以及负载为 1.0 M $\Omega$  时瞬时电压和振动激励电压与输出峰-峰值电压关系曲线,分析压电层厚度变化对共振频率及共振频率下瞬时输出电压和功率的影响。

## 1 实验

图 1 为层合结构  $d_{15}$  模式 PZT-51 悬臂梁压电俘能装置示意图和测试样品图。设计制作压电层厚度分别为 0.6 mm、0.7 mm、0.8 mm、0.9 mm 的层合结构悬臂梁  $d_{15}$  模式 PZT-51 压电俘能器装置。该结构包含 2 个压电层(PZT-51 压电陶瓷),1 个金属层(铜片)及 1 个质量块(铜块)。2 个 PZT-51 压电陶瓷的极化方向水平且相同,并利用导电胶对称粘贴在金属层上、下端。两导线分别接在上 PZT-51 压电层的顶电极和下 PZT-51 压电层的底电极。当俘能器受到振动激励信号后产生垂直方向受迫振动时,上、下 PZT-51 压电层剪切形变方式一样,从而构成上、下 PZT-51 压电层的串联结构模式。具体的材料参数和几何参数如下:

压电层:材料为 PZT-51,长 $\times$ 宽为 50 mm $\times$ 10 mm,密度为 7 500 kg/m<sup>3</sup>, $d_{15} = 700 \times 10^{-12}$  C/N,弹性常数  $C_{11}^E = 16$  N/m<sup>2</sup>, $C_{33}^E = 9$  N/m<sup>2</sup>, $C_{55}^E =$

23 N/m<sup>2</sup>,介电常数  $\epsilon_{33}^S/\epsilon_0 = 1\ 500$  F/m, $\epsilon_{11}^S/\epsilon_0 = 916$  F/m。

金属层:材料为铜片,长 $\times$ 宽 $\times$ 厚为 50 mm $\times$ 10 mm $\times$ 0.2 mm,密度为 9 000 kg/m<sup>3</sup>,弹性模量为 105 GPa,泊松比为 0.3。

质量块为  $2.16 \times 10^{-3}$  kg。

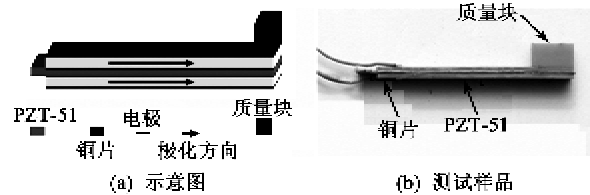


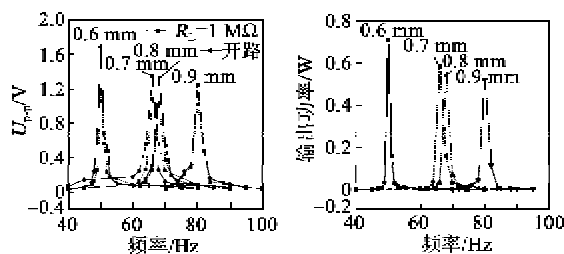
图 1 层合结构  $d_{15}$  模式 PZT-51 悬臂梁压电俘能装置示意图和测试样品

实验中,首先激励信号源由信号发生器产生,通过功率放大器获得足够的功率驱动振动台工作,从而使压电俘能器受迫振动产生输出电压信号,通过数字示波器进行测试。其中俘能器装置一端用绝缘胶带包裹通过一个夹具固定在振动台,另一端黏贴一质量块并处于自由状态,振动台由一个函数发生器和一个功率放大器来驱动并提供正弦振动<sup>[11]</sup>。实验中通过固定功率放大器的输入电流,调整输入电压来改变俘能器所需的机械振动能。在实验测量过程中,输入给振动台的电信号保持为电压 0.2 V。压电俘能器的输出电压  $U$  在不同负载下测量得到,而输出功率可由  $P = U^2 / (2R_L)$  算出<sup>[12]</sup>。此外,为了研究不同的振动台输入电压对俘能器输出电压的影响,测试了振动台电压分别为 0.1 V、0.3 V、0.4 V、0.5 V 条件下的俘能器输出电压。

## 2 实验结果与讨论

图 2 为输出电压( $U_{pp}$ )和输出功率随振动频率的变化曲线。由图可见,随着振动频率的增加,输出电压与功率先增加后减少,在共振频率时达到最大值。这是因为在共振频率时,压电悬臂梁具有最大剪切应变,而输出电压与剪切应变成正比,因此压电俘能器在共振频率时输出电压最大。随着压电片厚度的减少,压电俘能器的共振频率降低,最大输出电压和功率增加。因为在层合悬臂梁结构中,等效剪切刚度正比于压电层和基板厚度<sup>[13]</sup>,当压电层厚度减少时,悬臂梁的剪切刚度减低,从而在同等作用力下剪切形变增大,而输出电压正比于剪切形变。生活中振动源的频率基本处于 20~100 Hz 低频范围<sup>[14]</sup>,而实验所设计的压电俘能器的工作频率正处

于这一范围内,从而可通过减少压电层厚度来降低俘能器的工作频率,并为设计和制作俘获环境中的低频振动能压电俘能器提供指导。



(a) 电压峰-峰值随频率变化曲线 (b) 输出功率随频率变化曲线  
图2 电压峰-峰值和输出功率随频率变化曲线

为了研究不同压电层厚度对  $d_{15}$  模式层合结构 PZT-51 压电俘能器开路瞬时电压的影响,对比在开路状态共振时,不同厚度的压电层的瞬时输出电压,如图3所示。显然,不同厚度压电层  $d_{15}$  模式 PZT-51 层合结构压电俘能器其谐振频率随着厚度的减少而降低。在开路状态下,压电层为 0.6 mm 的  $d_{15}$  模式 PZT-51 层合结构压电俘能器具有最大开路输出峰-峰值电压 1.69 V,其相比压电层为 0.7 mm、0.8 mm、0.9 mm 俘能器峰-峰值电压分别提高 26.1%、28.1%、36.3%。这表明减少压电层的厚度可有效提高  $d_{15}$  模式层合结构 PZT-51 压电俘能器的输出瞬时电压,从而为设计层合结构  $d_{15}$  模式压电俘能器的适合压电层厚度提供依据。

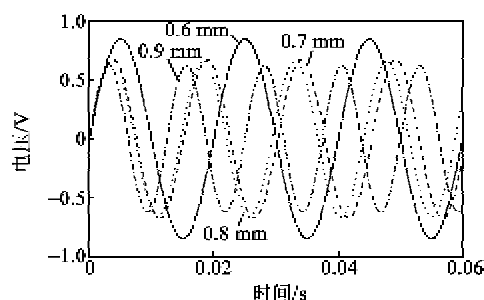


图3 开路下的共振瞬时电压曲线

图4为不同厚度压电层的层合悬臂梁结构  $d_{15}$  模式 PZT-51 压电俘能器在开路输出峰-峰值电压与振动台振动激励电压的关系曲线。当输入振动激励电压为 0.1 V 时,压电层厚度为 0.6 mm、0.7 mm、0.8 mm、0.9 mm 层合悬臂梁结构  $d_{15}$  模式 PZT-51 压电俘能器的输出峰-峰值电压分别为 0.64 V、0.42 V、0.38 V、0.36 V。输入振动激励电压为 0.4 V 时,其相应的输出峰-峰值电压分别为 1.88 V、1.68 V、1.64 V、1.5 V。随着输入振动激励电压增大,压电俘能器的输出峰-峰值电压增大。

这是因为振动台振动激励电压增大,激励振动加速度随之增大,俘能器压电材料的剪切应变和输出电压正比于激励振动加速度<sup>[15]</sup>。剪切应变是层合悬臂梁结构  $d_{15}$  模式压电俘能器输出电压产生的主要来源<sup>[15-17]</sup>。在相同的振动激励电压下,压电层厚度为 0.6 mm 的层合悬臂梁结构  $d_{15}$  模式 PZT-51 压电俘能器比压电层厚度为 0.7 mm、0.8 mm、0.9 mm 压电俘能器具有更好的俘能效率。因此在相同激励振动源条件下,可通过改变压电的厚度来找到最适厚度下的高效率的俘能器。

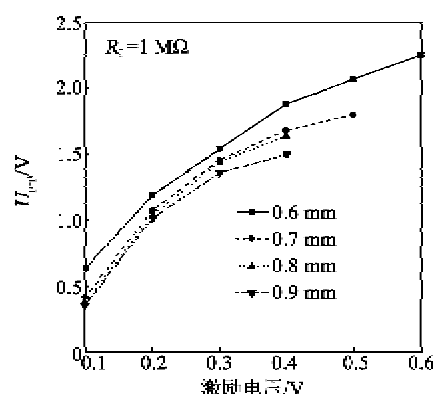


图4 输出电压峰-峰值与振动台振动激励电压的关系曲线

### 3 结束语

压电层厚度的减少降低了层合悬臂梁结构  $d_{15}$  模式 PZT-51 压电俘能器的谐振频率,压电俘能器俘能的输出电压和输出功率随着厚度的减少而增加。压电层厚度为 0.6 mm 层合结构  $d_{15}$  模式 PZT-51 悬臂梁俘能器具有最大输出开路峰-峰值电压 (1.69 V),负载电阻为 1 MΩ 时最大输出功率为 0.708  $\mu$ W。因此,可通过减少压电层厚度来设计能俘获低频振动能的压电俘能器。

### 参考文献:

- [1] 蒋树农,郭少华,李显方. 单压电片悬臂梁式压电俘能器效能分析[J]. 振动与冲击, 2012, 31(19): 90-94.  
JIANG Shunong, GUO Shaohua, LI Xianfang. Performance analysis for a unimorph cantilever piezoelectric harvester[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(19): 90-94.
- [2] ERTURK A, INMAN D J. An experimentally validated bimorph cantilever model for piezoelectric energy harvesting from base excitations[J]. Smart Mater Struct, 2009, 18: 025009.
- [3] AMMAR Y, BUHRIG A, MARZENCKI M, et al. Wireless sensor network node with asynchronous architecture and vibration harvesting micro-power gen-

- erator[C]//Grenoble, Proc 2005 Joint Conf. on Smart Objects and Ambient Intelligence, Innovative Context-Aware Services: Usages and Technologies, 2005: 287-292.
- [4] 刘祥建, 陈仁文. 压电振动能量收集装置研究现状及发展趋势[J]. 振动与冲击, 2012, 31(16): 169-176.  
LIU Xiangjian, CHEN Renwen. Current situation and developing trend of piezoelectric vibration energy harvesters[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(16): 169-176.
- [5] MAJIDI C, HAATAJA M, SROLOVITZ D J. Analysis and design principles for shear-mode piezoelectric energy harvesting with ZnO nanoribbons[J]. Smart Mater Struct, 2010, 19: 055027.
- [6] JEON Y B, SOOD R, JEONG J H, et al. MEMS power generator with transverse mode thin film PZT[J]. Sens Actuators A, 2005, 122(1): 16-22.
- [7] REN B, OR S W, ZHANG Y Y, et al. Piezoelectric energy harvesting using shear mode 0.71Pb(Mg<sub>1/3</sub>Nb<sub>2/3</sub>)O<sub>3</sub>-0.29PbTiO<sub>3</sub> single crystal cantilever[J]. Appl Phys Letter, 2010, 96: 083502.
- [8] CHEN S C, CHENG C H, LIN Y C. Analysis and experiment of a novel actuating design with a shear mode PZT actuator for microfluidic application[J]. Sens Actuators A, 2007, 135: 1-9.
- [9] WANG D A, LIU N Z. A shear mode piezoelectric energy harvester based on a pressurized water flow[J]. Sens. Actuators A, 2011, 167: 449-458.
- [10] ZHOU L, SUN J, ZHENG X J, et al. A model for the energy harvesting performance of shear mode piezoelectric cantilever[J]. Sensor Actuat A-Phys, 2012, 179: 185-192.
- [11] ZHAO J H, ZHENG X J, ZHOU L, et al. Investigation of a d<sub>15</sub> mode PZT-51 piezoelectric energy harvester with a series connection structure[J]. Smart Mater Struct, 2012, 21: 105006.
- [12] HARIGAI T, ADACHI H, FUJII E. Vibration energy harvesting using highly (001)-oriented Pb(Zr, Ti)O<sub>3</sub> thin film[J]. J Appl Phys, 2010, 107: 096101.
- [13] DIETL J M, WICKENHEISER A M, GARCIA E. A Timoshenko beam model for cantilevered piezoelectric energy harvesters[J]. Smart Mater Struct, 2010, 19: 055018.
- [14] MASSARO A, GUIDO S D, INGROSSO I, et al. Free-standing piezoelectric rings for high efficiency energy harvesting at low frequency[J]. Appl Phys Lett, 2011, 98: 053502.
- [15] COOK-CHENNAULT K A, THAMBI N, SASTRY A M. Powering MEMS portable devices—a review of non-regenerative and regenerative power supply systems with special emphasis on piezoelectric energy harvesting systems[J]. Smart Mater Struct, 2008, 17: 043001.
- [16] ROUNDY S, WRIGHT P K. A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics[J]. Smart Mater Struct, 2004, 13: 1131-1142.
- [17] KOK S L, WHITE N M, HARRIS N R. Fabrication and characterization of free-standing thick-film piezoelectric cantilevers for energy harvesting[J]. Meas Sci Technol, 2009, 20: 124010.

(上接第 492 页)

#### 参考文献:

- [1] 张婷. 基于压电陶瓷的钢管混凝土柱界面剥离损伤监测的实验研究[M]. 湖南: 湖南大学, 2011.
- [2] 杨世聪, 王福敏, 渠平. 核心混凝土脱空对钢管混凝土构件力学性能的影响[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2008, 27(3): 360-365.  
YANG Shicong, WANG Fumin, QU Ping. Brief introduction to the core concrete's empty influence on the mechanical performance of concrete filled steel tube components[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2008, 27(3): 360-365.
- [3] 朱宏平, 王丹生, 张俊兵. 基于压电阻抗技术的结构损伤识别基本理论及其应用[J]. 工程力学, 2008, 34-43.
- [4] 赵晓燕. 基于压电陶瓷的结构健康监测和损伤识别诊断[D]. 大连: 大连理工大学土木水利学院, 2008.
- [5] 孙威. 利用压电陶瓷的智能混凝土结构健康监测技术[D]. 大连: 大连理工大学结构工程, 2009.
- [6] 朱宏平, 王丹生, 张俊兵. 基于压电阻抗技术的结构损伤识别基本理论及其应用[J]. 工程力学, 2008, 25(A2): 34-43.  
ZHU Hongping, WANG Dansheng, ZHANG Junbing. Theory and application of structure damage detection based on piezoelectric impedance technique[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(A2): 34-43.
- [7] XU B, ZHANG T, SONG G, et al. Active interface debonding detection of a concrete-filled steel tube with piezoelectric technologies using wavelet packet analysis[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, 36(1): 7-17.
- [8] SAMUEL P D, PINES D J. Classifying helicopter gearbox faults using a normalized energy metric[J]. Smart Materials and Structures, 2001, 10(1): 145.