



并联结构 d_{15} 模式 PZT-51 悬臂梁的俘能性能

张智雄¹, 郑学军¹, 张 勇¹, 梅靖羚¹, 费明祥¹, 祝元坤²

(1. 湘潭大学 机械工程学院, 湘潭 411105;

2. 上海理工大学 材料科学与工程学院, 上海 200093)

摘 要: 利用高剪切压电系数, 设计并制作并联结构 d_{15} 模式 PZT-51 悬臂梁装置, 测量其在不同负载电阻下输出峰-峰值电压和输出功率随频率变化的关系以及不同负载电阻下共振瞬时输出电压和振动激励电压与输出峰-峰值电压关系。当频率为 96 Hz、负载电阻为 100 k Ω 时, 该 PZT-51 悬臂梁装置的输出峰-峰值电压最大值为 1.96 V, 输出功率达到最大为 19.21 μ W。随着振动激励电压的增大, 并联结构 d_{15} 模式 PZT-51 悬臂梁装置的输出峰-峰值电压随之增大, 并联结构 d_{15} 模式 PZT-51 悬臂梁俘能特性的研究可为设计 d_{15} 模式压电俘能器提供指导。

关键词: PZT-51 陶瓷; 悬臂梁; d_{15} 模式; 并联; 剪切压电系数

中图分类号: TN384; TM282; TP211

文献标志码: A

Features of d_{15} mode PZT-51 ceramic cantilever piezoelectric energy harvester with parallel connection

ZHANG Zhi-xiong¹, ZHENG Xue-jun¹, ZHANG Yong¹, MEI Jing-ling¹, FEI Ming-xiang¹, ZHU Yuan-kun²

(1. School of Mechanical Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China;

2. School of Materials Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Utilizing the high shear piezoelectric coefficient of PZT-51 ceramic, the parallel connection device of d_{15} mode PZT-51 cantilever beam was designed and fabricated. The dependences of output peak-to-peak voltage and output power on frequency were studied at various load resistances. The dependence of peak-to-peak voltage on excitation voltage and the resonance transient output voltage were measured at various load resistances. Maximum output peak-to-peak voltage of 1.96 V and maximum output power of 19.21 μ W for PEH with load resistance of 100 k Ω are obtained at frequency of 96 Hz. With increasing vibration excitation voltage, the output peak-to-peak voltage of PEH increases. The proposed structure will provide useful guidelines for the design of d_{15} mode piezoelectric energy harvesters.

Key words: PZT-51 ceramic; cantilever; d_{15} mode; parallel connection; shear piezoelectric coefficient

近年来, 利用压电效应直接从环境振动源中提取能量的俘能装置和结构, 因其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^[1-3]。将机械振动转化为电能有静电式、电磁式和压电式 3 种方法; 其中, 压电悬臂梁俘能装置因其具有结构简单、不发热、无电磁干扰、无污染、易于加工制作和

实现机构的微小化、集成化等诸多优点而备受关注^[4-6]。压电能量收集器(Energy harvester, EH)主要针对 0.1~10 mW 的微小功率需求, 用于无线通讯和传感器等。小于 100 μ W 的功率就足以静音模式操作无线节点。目前, 自供电无线传感器节点的应用需求不断增长, 包括公共设施, 如桥梁和管道的状态监控,

基金项目: 教育部长江学者和创新团队发展计划滚动支持项目(IRT_14R48); 国家自然科学基金资助项目(51272158, 11402149); 长江学者奖励计划资助项目([2009]17); 上海市自然科学基金资助项目(14ZR1428000)

收稿日期: 2014-04-01; **修订日期:** 2015-05-16

通信作者: 郑学军, 教授, 博士; 电话: 0731-58293210; E-mail: zhengxuejun@xtu.edu.cn

工厂用的化学传感器和发动机监控等。由于压电悬臂梁可安装在机械噪音环境中利用直接压电效应将环境的机械振动转变为电能,所以,在一些太阳能不能被利用的环境,压电 EH 是一种可选择的能源^[7]。集成的 MEMS 压电薄膜 EH 体积大大减小,在有限的器件空间里提高了能量收集效率。然而, Si 衬底上的压电薄膜 EH 很难同时具有接近环境频率的低谐振频率(机械加工振动频率约 100 Hz)和高功率密度^[8]。典型的压电 MEMS 器件是将压电薄膜沉积在 Si 衬底上,通过表面和体型微加工得到各种 3-D 微结构,包括膜式、桥式和悬臂梁等。将压电薄膜沉积在金属衬底上,利用金属的精细加工技术,可以大大简化压电 MEMS 器件的制备工艺,避免对薄膜、电极和衬底的刻蚀工艺等^[9]。采用过渡层变形控制技术,在金属衬底上引入钙钛矿结构氧化物种子层,缓解薄膜和金属衬底的晶格失配和热失配,可实现压电薄膜/金属集成结构的低温构造^[10]。避免使用贵金属电极和单晶衬底等可降低衬底成本,因而,近年来,集成铁电/压电陶瓷与金属衬底的研究逐渐兴起^[11]。金属衬底可同时用做电极和衬底,且与铁电/压电陶瓷的粘附力很好,但金属容易氧化,使其电极特性下降。同时,金属陶瓷之间的扩散可能会导致陶瓷铁电、压电和介电性能的恶化。此外,振动的 EH 输出交流电,需要通过整流转变成直流电才能存储在电池中。高介电常数铁电/压电陶瓷电容大,输出电压小,不利于半导体整流器进行有效整流。压电器件的性能不仅由压电系数决定,还受其他电学和力学性能如介电常数和机械品质因子等因素的影响。除组元优化和取向控制等材料设计方法外,压电/金属界面应变调控和电极结构优化设计等力学方法手段都是提高器件性能和效率的重要途径。

MAJIDI 等^[12]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以产生多达 $100 \mu\text{W}/\text{cm}^3$ 的能量密度。CHEN 等^[13]提出了一个应用于微流体系统的新颖换能器,它利用 PZT 致动器的剪切变形驱动换能器中的膜片。XU 等^[14]报道了由 3 个竖直纳米线阵列组成的 d_{33} 模式纳米发电机,单个的输出电压分别为 80、90 和 96 mV,串联后的输出电压为 243 mV。SAADON 等^[15]评论串联能够提高 d_{31} 模式压电俘能器在高负载下的输出功率。郑学军等^[16]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,设计并制作一种 d_{15} 模式串联两个压电单元的 PZT-51 压电悬臂梁装置,与只有一个压电单元的 PZT-51 压电悬臂梁装置俘能性能进行对比,在负载电阻为 $2.2 \text{ M}\Omega$ 下前者的输出峰-峰值

电压约为后者的 2 倍^[17]。虽然设计 d_{15} 模式串联结构的压电俘能器能够提升俘能器的输出电压峰-峰值,但是其最大输出功率只有 $8.4 \mu\text{W}$ 。一般而言,用于压电悬臂梁俘能装置的压电材料对应的压电系数越高,其输出电压和功率越大^[12, 18]。因此,压电系数作为压电俘能器的重要指标之一,受到了研究者广泛的研究和关注。

而一些典型压电材料的压电系数由大到小依次为 d_{15} 、 d_{33} 、 d_{31} , 如 PMN-PT 单晶^[19]、PZT4、PZT-5A、PZT-5H、PZT-6B、PZT-7A 系列及 BaTiO_3 、 $\text{Na}_{0.5}\text{K}_{0.5}\text{PbTiO}_3$ ^[13]等。REN 等^[19]制备了 d_{15} 模式的 PMN-PT 单晶压电悬臂梁俘能器,与 d_{31} 模式 PMN-PT 单晶压电悬臂梁俘能器对比,其压电材料的体积仅为后者的一半,但输出电压是后者的 8.3 倍,对应最大输出功率约为后者的 7 倍。该报道认为,其原因之一是由于 PMN-PT 压电单晶的压电系数 $d_{15}(d_{15}=3708 \text{ pC/N})$ 高于 $d_{31}(d_{31}=-1000 \text{ pC/N})$ 。PZT 压电陶瓷因其优良的压电性能、热电性能、铁电性能、光电性能和介电性能,成为 MEMS 器件极具潜力的材料。特别是 PZT 压电陶瓷作为微传感及驱动器件应用时的高灵敏度和高输出应变的特点,已经使其成功地应用于谐振器、换能器、传感-驱动器阵列等 MEMS 器件中^[20-22]。MALAKOOTI 等^[23]通过对比研究 d_{15} 模式和 d_{31} 模式的 PZT 压电悬臂梁的俘能性能,证明 d_{15} 模式比 d_{31} 模式具有更好的阻抗-频率响应。也就是随着外部阻抗的变化, d_{15} 模式压电悬臂梁的最大输出功率随频率的移动较明显。这样可以通过调节外部阻抗的大小,使 d_{15} 模式压电悬臂梁适用于更宽的频率范围内。与此相对, d_{31} 模式的阻抗-频率效应和适用范围要小得多。基于 d_{15} 模式的压电俘能器比基于 d_{33} 、 d_{31} 模式俘能器具有更好的俘能性能,如何提高 d_{15} 模式压电俘能器俘能性能是当前的研究热点^[24-25]。然而,相比于 d_{33} 和 d_{31} 模式压电俘能器,国内外对 d_{15} 模式压电俘能器的研究相对较少,对其俘能特性以及不同因素影响机制的研究尚不明确。 d_{15} 模式悬臂梁俘能器利用压电材料剪切压电系数高的特点,有望获得优异的俘能特性,这对俘获环境中振动能具有重要意义。

本文作者选取 d_{15} 系数高于 d_{33} 和 d_{31} 系数的 PZT-51 压电陶瓷作为压电材料,设计制作并联结构 d_{15} 模式 PZT-51 悬臂梁,测量其在不同频率和不同负载电阻下的输出电压峰-峰值和输出功率,探求输出电压峰-峰值和输出功率与频率和负载电阻的相关性,以期得到最佳俘能性能时的共振频率和负载电阻。并分析不同负载下的共振瞬时输出电压,研究负载电阻变化对共振瞬时输出电压和工作电流的影响。这些研究

将对该装置在无线传感设备的应用提供指导。同时, 实验研究振动激励电压与输出峰-峰值电压关系曲线, 分析悬臂梁有效应变范围内压电材料的剪切应变对提高俘能特性的贡献, 为利用高剪切压电系数压电材料应用于 d_{15} 模式 PZT-51 悬臂梁压电俘能器提供依据。

1 实验

1.1 PZT-51 压电陶瓷层合悬臂梁

图 1 所示为 d_{15} 模式 PZT-51 悬臂梁装置示意图。该结构包含两个压电层(PZT-51 压电陶瓷)和一个金属层(铜片)。两个 PZT-51 压电陶瓷的极化方向水平且相反(见箭头表示), 极化电压约为 1500 V。两根导线分别接在器件上下压电层的表面电极上, 另一根导线接在金属层的电极上构成并联。两个压电层具有相同的几何尺寸和材料特性, 导电电极完全覆盖压电层的上下表面。整个装置中压电层材料为 PZT-51, 长 $\times$ 宽 $\times$ 厚为 50 mm $\times$ 10 mm $\times$ 0.5 mm, 密度为 7500 kg/m³, 介电常数 $\varepsilon_{33}^S/\varepsilon_0=1500$ F/m, $\varepsilon_{11}^S/\varepsilon_0=916$ F/m, 弹性常数 $C_{11}^E=16$ N/m², $C_{33}^E=9$ N/m², $C_{55}^E=23$ N/m², $d_{15}=700\times 10^{-12}$ C/N。金属层材料为铜片, 长 $\times$ 宽 $\times$ 厚为 50 mm $\times$ 10 mm $\times$ 0.5 mm, 密度为 9000 kg/m³, 弹性模量为 105 GPa, 泊松比为 0.3。

1.2 并联结构剪切模式悬臂梁俘能性能测试装置

图 2(a)所示为并联结构 d_{15} 模式 PZT-51 悬臂梁压电俘能特性测量装置图。该测试装置主要由信号发生器、功率放大器、振动台、数字示波器组成。信号发生器(AFG 3021B, 美国 Tektronix)为测试系统提供正弦电信号; 功率放大器(YE5871A, 江苏联能)将电信号的功率放大, 进而驱动振动台; 振动台(JZK-5, 江

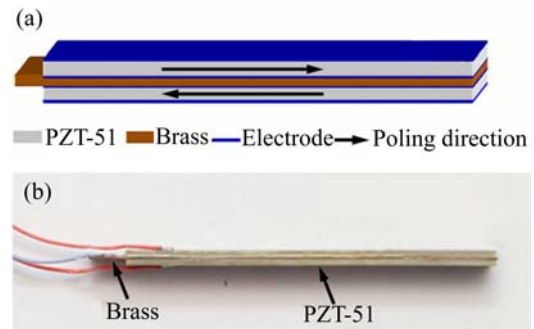


图 1 并联结构 d_{15} 模式 PZT-51 悬臂梁压电俘能装置示意图和测试样品的照片

Fig. 1 Schematic diagram of d_{15} mode PZT-51 bimorph cantilever piezoelectric energy device with parallel connection structure(a) and photo of testing sample(b)

苏联能)具有较大的输出力、较宽的频率范围、较高的可靠性, 可为压电俘能器提供机械振动; 数字示波器(TDS 1002, 美国 Tektronix)具有良好的时基系统, 灵巧的捕获方式和可靠的探头校验向导, 为测量和存储压电俘能器输出的电压。压电俘能特性测量装置自由端用绝缘胶带包裹通过一个夹具固定在振动台上。图 2(b)所示为压电俘能测试系统装置图。操作流程是, 信号发生器产生的正弦信号经功率放大后激励振动台振动, 从而使器件受迫振动输出电信号, 并用数字示波器测量和存储不同频率输出电压。在整个测量过程中, 输入振动台的激励电压信号保持为电压 200 mV。在负载 R 分别为 50 k Ω 、100 k Ω 、470 k Ω 和 1 M Ω 时, 数字示波器提取不同频率下的输出电压峰-峰值, 由公式 $P = U_{p-p}^2 / (2R)$ [26] 可计算得到输出功率, 可得到不同负载下的输出电压峰-峰值和输出功率随频率变化曲线。数字示波器记录在不同负载电阻下达到共振频率时的瞬时电压曲线。

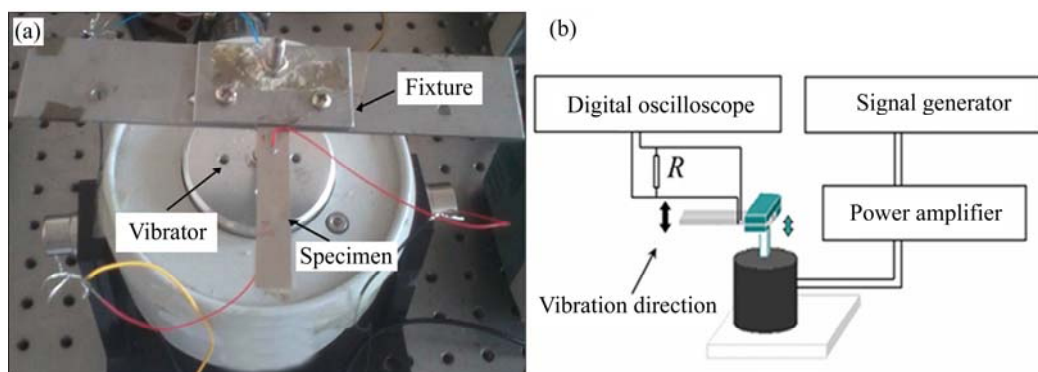


图 2 PZT-51 悬臂梁压电俘能特性测量装置图和测试系统示意图

Fig. 2 Experimental setup of cantilever beam(a) and schematic diagram of measurement system(b)

2 结果与讨论

2.1 输出电压峰-峰值和输出功率随频率变化

图 3 所示为并联结构 d_{15} 模式 PZT-51 悬臂梁在不同负载下随频率变化的输出电压峰-峰值和输出功率关系曲线。从图 3(a)可知, 在负载电阻为 50 k Ω 、100 k Ω 、470 k Ω 和 1 M Ω 时, 输出电压峰-峰值分别为 0.99 V、1.96 V、2.26 V 和 2.86 V, 共振频率为 96 Hz。输出电压峰-峰值先随频率的增大而增大, 在共振频率处达到最大值后, 随着频率的增大而减小。在共振频率下, 输出电压峰-峰值随负载电阻的增大而增大。由图 3(b)可以知, 并联结构 d_{15} 模式 PZT-51 悬臂梁装置在频率为 96 Hz、负载为 50 k Ω 、100 k Ω 、470 k Ω 和 1 M Ω 下的输出功率分别为 9.80 μ W、19.21 μ W、5.43 μ W 和 4.09 μ W。其中, 在负载为 100 k Ω 时, 获得最大输出功率 19.21 μ W。

在共振频率下, 压电悬臂梁的输出峰峰值电压随负载电阻的增大而增大。这是由于压电悬臂梁的输出

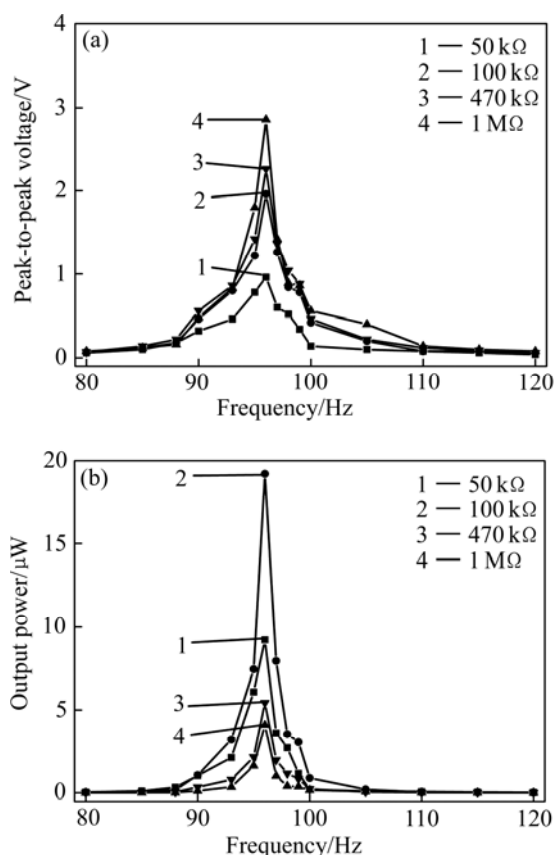


图 3 不同负载电阻时电压峰峰值和输出功率随频率的变化
Fig. 3 Change of peak-to-peak voltage(a) and output power(b) with frequency at different loaded resistances

峰峰值电压正比于压电陶瓷片所产生的电荷量。在低负载时, 压电悬臂梁有更短的电路时间常数, 这使得在每个周期中更多的电荷离开压电陶瓷片层, 从而导致输出峰峰值电压较小^[27]。在较大的负载电阻时(或开路条件下), 压电悬臂梁的输出电压峰峰值达到最大; 而在短路条件下, 压电悬臂梁的输出电压为 0。并联结构 d_{15} 模式 PZT-51 悬臂梁装置的输出功率也与负载电阻密切相关。当电阻足够大(开路)或者处于短路状态时, 输出功率为 0。这是由于在短路条件下, 压电悬臂梁的输出电压为 0; 而在开路条件下, 压电悬臂梁的输出电流为 0。该装置获得最大的输出功率处于这两种极端状态的负载电阻之间, 且其共振频率处于开路共振频率和短路共振频率之间。环境中的振动频率基本处于 20~100 Hz 低频范围^[28], 而本研究中设计、制作的并联结构 d_{15} 模式 PZT-51 压电悬臂梁俘能装置的工作频率正好处于这一低频范围内, 这有利于该压电悬臂梁俘能装置更多地捕获环境中的振动能。

2.2 输出电压峰峰值和输出功率随负载变化

图 4 所示为在共振频率 96 Hz 与非共振频率 95 Hz 和 97 Hz 时并联结构 d_{15} 模式 PZT-51 悬臂梁的输出电压峰峰值和输出功率随负载变化曲线。由图 4(a)可知, 输出电压峰峰值随负载电阻的增大而增大, 它的趋势与先前的理论报道^[26]也是一致的。在负载电阻大于 100 k Ω 时, 非共振频率 97 Hz 的输出电压峰峰值和负载电阻的关系曲线基本趋于不变。共振频率 96 Hz 的输出电压峰峰值和负载的关系曲线趋于不变时, 其对应的负载电阻明显要比非共振频率 95 Hz 和 97 Hz 时的大。在不考虑输出功率的条件下, 若要获得尽可能高的输出电压峰峰值, 则需配给并联结构 d_{15} 模式 PZT-51 悬臂梁俘能装置尽量大的负载电阻^[16]。

由图 4(b)可知, 在负载电阻处于 50~100 k Ω 时, 最大输出功率随负载电阻的增大而增大。在负载电阻为 100 k Ω 时, 该装置在共振频率 96 Hz 与非共振频率 95 Hz 和 97 Hz 时达到最大输出功率, 分别为 19.21 μ W、7.44 μ W 和 7.94 μ W。输出功率不仅与装置是否处于共振频率相关, 也和负载电阻是否达到获得最大的输出功率配给的最佳匹配负载电阻相关。该装置在共振频率 96 Hz 下获得的输出电压峰峰值和输出功率, 远大于在非共振频率 95 Hz 和 97 Hz 下获得的输出电压峰峰值和输出功率。若要获得最大的输出电压峰峰值和输出功率则要配给最佳匹配负载电阻。并联结构 d_{15} 模式 PZT-51 悬臂梁在共振频率并配给最佳匹

配负载电阻时, 能够直接从环境振动源中获得最大输出功率的能量, 因而, 被应用于无线传感设备供能; 而该装置在共振频率的输出电压峰峰值和输出功率远大于非共振频率下的输出电压峰峰值和输出功率, 因而被应用于监控振动系统等设备^[29]。

2.3 不同负载下共振瞬时电压

图5所示为并联结构 d_{15} 模式 PZT-51 悬臂梁装置在不同负载电阻下达到共振频率时的输出瞬时电压曲线。由图5可看出, 在负载电阻为 50 k Ω 、100 k Ω 、470 k Ω 和 1.0 M Ω 时, 该装置振动周期均为 8 ms, 输出电压峰-峰值为 0.99、1.96、2.26 和 2.86 V。由公式 $I = U_{p-p} / R$, 可以计算得到对应的工作电流分别为 19.8 μ A、19.6 μ A、4.81 μ A 和 2.86 μ A。显然, 当负载电阻增加时, 输出电压也相应提高, 但是并联结构 d_{15} 模式 PZT-51 悬臂梁装置的工作电流减小。这与先前报道的理论研究结果^[27]是一致的。这意味着可以通过适当增大该装置的负载电阻, 以获得相对较大的输出电压和低工作电流, 从而适用于无线传感设备等。

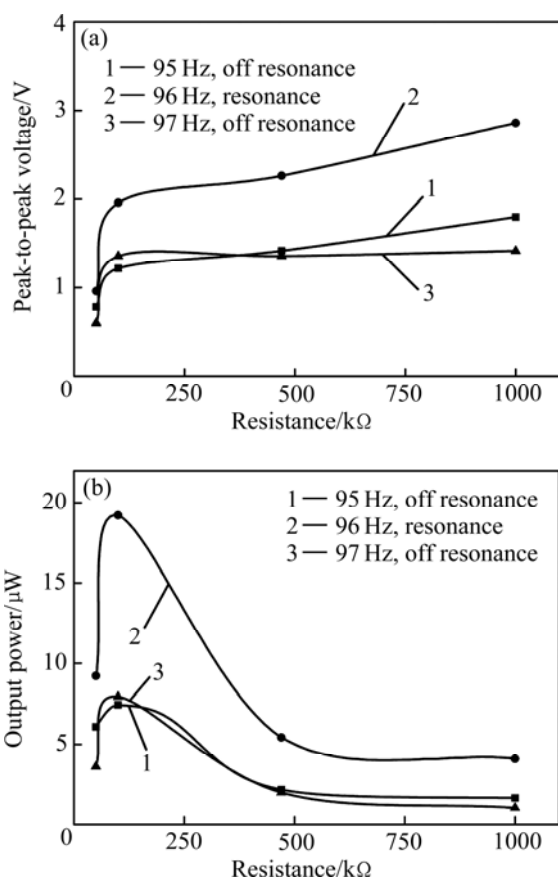


图4 电压峰峰值和输出功率随负载电阻的变化

Fig. 4 Change of peak-to-peak voltage(a) and output power(b) with loading resistance

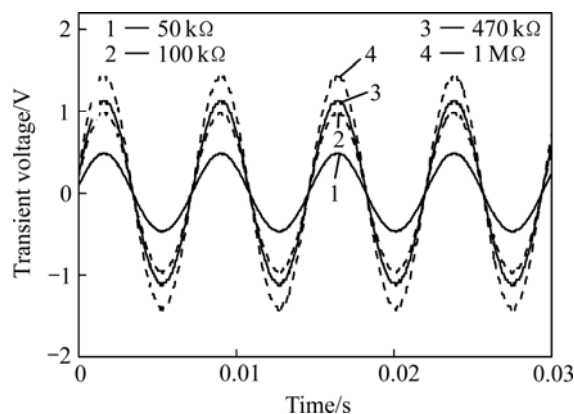


图5 并联结构 d_{15} 模式 PZT-51 悬梁装置不同负载电阻时共振频率下的瞬时电压曲线

Fig. 5 Resonance transient output voltages of d_{15} mode PZT-51 bimorph cantilever at various load resistances

2.4 振动激励电压对输出峰峰值电压的影响

为了研究不同负载电阻时振动台振动激励电压对输出电压峰峰值的影响, 分析共振频率下输出电压峰峰值与振动台振动激励电压的关系。图6所示为并联结构 d_{15} 模式 PZT-51 悬臂梁装置输出电压峰峰值与激励电压的关系曲线。当输入振动激励电压分别为 0.1、0.2、0.3、0.4 V, 负载电阻为 100 k Ω 时, 输出电压峰峰值分别为 0.86、1.12、1.96 和 2.26 V; 负载电阻为 470 k Ω 时, 输出电压峰峰值分别为 2.74、3.0、3.16 和 3.56 V。输出电压峰峰值随输入振动激励电压增大而增大。这是由于振动台振动激励电压增大, 输入的振动加速度增大^[27], 而剪切应变是 d_{15} 模式悬臂梁装置输出电压产生的主要来源, 压电材料的剪切应变和

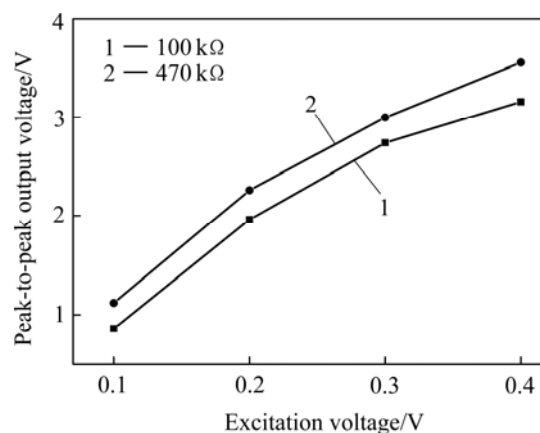


图6 不同负载时共振频率下输出电压峰峰值与激励电压的关系

Fig. 6 Relationship between peak-to-peak of output voltage and vibration excitation voltage at various load resistances

输出电压正比于输入的振动加速度^[30]。因此,在悬臂梁有效应变范围内,可以增加压电材料的剪切应变,从而提高压电俘能装置俘能效率。

3 总结

1) 并联结构 d_{15} 模式 PZT-51 压电悬臂梁输出电压峰峰值和输出功率先随频率的增大而增大,在共振频率处达到最大值后,随着频率的增大而减小。在共振频率下获得的输出电压峰峰值和输出功率比在其它频率下的都要大。

2) 输出电压峰峰值随负载电阻的增大而增大,但输出功率在负载电阻 100 k Ω 时,达到最大。在共振频率并配给最佳匹配负载电阻时,能够直接从环境振动源中获得最大输出功率的能量,这有利于其应用于无线传感设备供能和监控振动系统等设备。

3) 当负载电阻增加时,共振瞬时输出电压也相应提高,工作电流减小。在应用于低工作电流无线传感设备时,可以增大负载电阻以求获得更大的输出电压。

4) 压电材料的剪切应变和输出电压正比于输入的振动加速度,剪切应变是 d_{15} 模式悬臂梁装置输出电压产生的主要来源。因此,在悬臂梁有效应变范围内,可以增加压电材料的剪切应变系数,从而提高 d_{15} 模式 PZT-51 压电悬臂梁装置的俘能效率。

REFERENCES

- [1] KULKARNI V, BEN-MRAD R, PRASAD S E, NEMANA S. A shear-mode energy harvesting device based on torsional stresses[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2014, 19(3): 801–807.
- [2] 刘绍军, 王鹏飞, 万冰冰, 马青. Nd 掺杂 $K_{0.53}Na_{0.47}NbO_3$ 基无铅压电陶瓷的结构和性能[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(7): 2010–2015.
LIU Shao-jun, WANG Peng-fei, WAN Bing-bing, MA Qing. Structural and electrical properties of Nd doped $K_{0.53}Na_{0.47}NbO_3$ based lead free piezoceramics[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(7): 2010–2015.
- [3] 单旭, 周昌荣, 杨华斌, 周沁, 成钧, 陈国华, 李伟洲. 高温无铅压电陶瓷 BFMT-BT 的微结构与电性能[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(4): 1380–1384.
SHAN Xu, ZHOU Chang-rong, YANG Hua-bin, ZHOU Qin, CHENG Jun, CHEN Guo-hua, LI Wei-zhou. Microstructure and electrical properties of high temperature BFMT-BT Pb-free ceramics[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(4): 1380–1384.
- [4] LIN Xiu-juan, ZHOU Ke-chao, ZHANG Xiao-yong, ZHANG Dou. Development, modeling and application of piezoelectric fiber composites[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(1): 98–107.
- [5] HAN J C, HU J, WANG S X, HE J L. A novel cylindrical torsional magnetoelectric composite based on d_{15} shear-mode response[J]. Journal of Physics D, 2015, 48: 045001.
- [6] ALADWANI A, ALDRAIHEM O, BAZ A. Single degree of freedom shear-mode piezoelectric energy harvester[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2013, 135: 051011-1–8.
- [7] FUENTES-FERNANDEZ E, BALDENEGRO-PEREZ L, QUEVEDO-LOPEZA M, GNADE B, HANDE A, SHAH P, ALSHAREEF H N. Optimization of $Pb(Zr_{0.53}Ti_{0.47})O_3$ films for micropower generation using integrated cantilevers[J]. Solid-State Electronics, 2011, 63(1): 89–93.
- [8] MURALT P, POLCAWICH R G, TROLIER-MCKINSTRY S. Piezoelectric thin films for sensors, actuators, and energy harvesting[J]. MRS Bulletin, 2009, 34(9): 658–664.
- [9] SUZUKI T, KANNO I, LOVERICH J J, KOTERA WASA H K. Characterization of $Pb(Zr,Ti)O_3$ thin films deposited on stainless steel substrates by RF-magnetron sputtering for MEMS applications[J]. Sensors and Actuators A, 2006, 125(2): 382–386.
- [10] CHENG J R, HE L, YU S W, MENG Z. Detection of residual stresses in $Pb(Zr_{0.53}Ti_{0.47})O_3$ thin films prepared on $LaNiO_3$ buffered metal substrates with Raman spectroscopy[J]. Applied Physics Letters, 2006, 88: 152906.
- [11] LOSEGO M D, JIMISON L H, IHLEFELD J F, MARIA J P. Ferroelectric response from lead zirconate titanate thin films prepared directly on low-resistivity copper substrates[J]. Applied Physics Letters, 2005, 86: 172906.
- [12] MAJIDI C, HAATAJA M, SROLOVITZ D J. Analysis and design principles for shear-mode piezoelectric energy harvesting with ZnO nanoribbons[J]. Smart Materials and Structures, 2010, 19: 055027.
- [13] 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]. Sensors and Actuators A, 2007, 135: 1–9.
- [14] XU S, QIN Y, XU C, WEI Y G, YANG R S, WANG Z L. Self-powered nanowire devices[J]. Nature Nanotechnology, 2010, 5: 366–373.
- [15] SAADON S, SIDEK O. A review of vibration-based MEMS piezoelectric energy harvesters[J]. Energy Conversion and Management, 2011, 52: 500–504.
- [16] ZHOU L, SUN J, ZHENG X J, DENG S F, ZHAO J H, PENG S T, ZHANG Y, WANG X Y, CHENG H B. A model for the energy harvesting performance of shear mode piezoelectric cantilever[J]. Sensors and Actuators A, 2012, 179(3): 185–192.
- [17] ZHAO J H, ZHENG X J, ZHOU L, ZHANG Y, SUN J, DONG

- W J, DENG S F, PENG S T. Investigation of a d_{15} mode PZT-51 piezoelectric energy harvester with a series connection structure[J]. *Smart Materials and Structures*, 2012, 21: 105006.
- [18] JEON Y B, SOOD R, JEONG J H, KIM S G. MEMS power generator with transverse mode thin film PZT[J]. *Sensors and Actuators A*, 2005, 122(1): 16–22.
- [19] REN B, Or S W, ZHANG Y Y, ZHANG Q H, LI X B, JIAO J, WANG W, LIU D A, ZHAO X Y, LUO H S. Piezoelectric energy harvesting using shear mode $0.71\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_{3-0.29}\text{PbTiO}_3$ single crystal cantilever[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96: 083502.
- [20] ZHANG J T, LI P, WEN Y M, HE W, YANG A C, LU C J. Shear-mode self-biased magnetostrictive/piezoelectric laminate multiferroic heterostructures for magnetic field detecting and energy harvesting[J]. *Sensors and Actuators A*, 2014, 214: 149–155.
- [21] 赵吉鹤, 郑学军, 张 勇, 孙 静, 周 良, 彭书涛. 串联结构 d_{15} 模式 PZT-51 压电俘能器的研究[J]. *压电与声光*, 2013, 35(1): 101–104.
- ZHAO Ji-he, ZHENG Xue-jun, ZHANG Yong, SUN Jing, ZHOU Lian, PENG Shu-tao. Study on d_{15} mode PZT-51 piezoelectric energy harvester with series connection structure[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2013, 35(1): 101–104.
- [22] DU Hong-liang, PEI Zhi-bin, LI Zhi-min, LUO Fa, ZHU Dong-mei, ZHOU Wan-cheng, QU Shao-bo. Effect of sintering temperature and composition on microstructure and properties of PMS-PZT ceramics[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2006, 16(S1): s165–s169.
- [23] MALAKOOTI M H, SODANO H A. Shear mode energy harvesting of piezoelectric sandwich beam[C]// SODANO H. *Active and Passive Smart Structures and Intergrated Systems* 2013. San Diego, California, USA: Proceedings of SPIE, 2013: 86881R-1–13.
- [24] ELSHAFEI M A, ALRAIESS F. Modeling and analysis of smart piezoelectric beams using simple higher order shear deformation theory[J]. *Smart Materials and Structures*, 2013, 22: 035006.
- [25] KHDEIR A A, ALDRAIHEM O J. Analytical investigation of laminated arches with extension and shear piezoelectric actuators[J]. *European Journal of Mechanics*, 2013, 37: 185–192.
- [26] HARIGAI T, ADACHI H, FUJII E. Vibration energy harvesting using highly (001)-oriented $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$ thin film[J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 107: 096101.
- [27] DIETL J M, WICKENHEISER A M, GARCIAL E. A Timoshenko beam model for cantilevered piezoelectric energy harvesters[J]. *Smart Materials and Structures*, 2010, 19: 055018.
- [28] MASSARO A, GUIDO S D, INGROSSO I, CINGOLANI R, VITTOYIO M D, CORI M, BERTACCHINI A, LARCHER L, PASSASEO A. Free-standing piezoelectric rings for high efficiency energy harvesting at low frequency[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98: 053502.
- [29] SUN C L, QIN L F, LI F, WANG Q M. Piezoelectric energy harvesting using single crystal $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_{3-x}\text{PbTiO}_3$ (PMN-PT) device[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2009, 20(5): 559–568.
- [30] KOK S L, WHITE N M, HARRIS N R. Fabrication and characterization of free-standing thick-film piezoelectric cantilevers for energy harvesting[J]. *Measurement Science and Technology*, 2009, 20: 124010.

(编辑 李艳红)