**文章编号:**1004-2474(2017)06-0848-04

## 基于 d<sub>15</sub>模式的 L 型压电俘能器结构与性能研究

刘 月1,董维杰1,2,白凤仙1

(1.大连理工大学 电子信息与电气工程学部,辽宁 大连 116023;2.辽宁省微纳米技术及系统重点实验室,辽宁 大连 116024)

摘 要:剪切模式压电俘能器利用较高的压电系数  $d_{15}$ ,理论上能够收集到更多的能量。该文设计了一种基于  $d_{15}$ 模式的 L 型基座压电俘能器,通过有限元仿真分析与直立型结构进行了对比。结果表明,L 型结构不发生谐振时的俘能性能与直立型结构基本相同,在很宽频带内均有稳定的能量输出;而在一阶模态频率,L 型结构的输出功率有大幅增加。该文制作了 L 型基座  $d_{15}$ 模式 PZT-51 压电俘能器,实测表明,压电俘能器的谐振频率为 86 Hz,当加速度为 2.5 $g(g=9.8 \text{ m/s}^2)$ 时,在匹配负载 203 kΩ 上输出功率为 31.25  $\mu$ W,对应单位重力加速度下的功率密度 为 84  $\mu$ W・cm<sup>-3</sup>。

**关键词:**压电俘能器;d<sub>15</sub>模式;PZT-51;L型基座;有限元 **中图分类号:**TN712+.5 **文献标识码:**A

## Study on Structure and Performance of d<sub>15</sub> Mode-based L-Type Piezoelectric Energy Harvester

LIU Yue<sup>1</sup>, DONG Weijie<sup>1,2</sup>, BAI Fengxian<sup>1</sup>

(1. Faculty of Electronic Information and Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China;

2. Key Laboratory for Micro/Nano Technology and System of Liaoning Province, Dalian 116024, China)

Abstract: The shear-mode piezoelectric energy harvester(PEH) offers potentially improved energy harvesting due to higher  $d_{15}$  piezoelectric coefficient than other modes. An L-type base PEH based on  $d_{15}$ -mode was designed in this paper. The comparison between the L-type structure and the upright structure are carried out through the finite-element simulation analysis. It is shown that the performance of L-type PEH are basically the same as upright PEH when the resonance does not occur, and there is a stable energy output over a very wide band; while the output power of L-type PEH has increased substantially at the first order modal frequency. An L-type base PZT-51PEH proto-type based on  $d_{51}$  mode is fabricated. The measured results show that the resonant frequency of PEH is 86 Hz, the output power is 31.25  $\mu$ W with the acceleration of 2.5 $g(g=9.8 \text{ m/s}^2)$  at the matching load of 203 k $\Omega$ , and the corresponding power density is 84  $\mu$ W  $\cdot$  cm<sup>-3</sup> at the unit gravity acceleration.

Key words: piezoelectric energy harvester; d<sub>15</sub> mode; PZT-51; L-type base; finite-element

0 引言

为了改良传统的化学电池供能系统,收集环境 中机械能量转化成电能的自供能设备一直是研究热 点,压电俘能器就是收集环境中振动能量的一种主 要方式。压电俘能器主要有3种工作模式:d<sub>15</sub>剪切 模式、d<sub>33</sub>纵向模式与 d<sub>31</sub>横向模式。3种模式下压电 片极化方向不同,d<sub>15</sub>模式沿长度方向极化,而 d<sub>33</sub>与 d<sub>31</sub>模式均沿厚度方向极化。典型的压电陶瓷材料 的压电常数均有 d<sub>15</sub>>d<sub>33</sub>>d<sub>31</sub>的关系<sup>[1]</sup>,压电俘能 器的输出功率与压电常数的平方成正比;与 d<sub>33</sub>、d<sub>31</sub> 模式相比,d<sub>15</sub>模式可以简单、有效地提高输出功 率<sup>[2]</sup>,故采用 d<sub>15</sub>耦合模式的压电俘能成为重要研究 方向。Ren Bo 等<sup>[3]</sup>利用一种  $d_{15} = 4\ 600\ pC/N$ 的 PMN-PT 单晶体设计了基座直接竖直固定在激振 台上的压电俘能器,利用中心质量块对两侧的 PMN-PT 单晶片施加剪切力,在激励加速度为 12.16 $g(g=9.8\ m/s^2)$ 、激励频率为 500 Hz 时,向 匹配负载输出功率达到 0.7 mW,这种结构适用于 激励加速度较大的情况。当振动加速度较小时,可 利用悬臂梁结构在低频下易谐振的特点将振幅放 大,从而提高输出功率。Mohammad 等<sup>[4]</sup>提出了利 用两片基底中间夹 PZT 压电片的三明治悬臂梁结 构,由于  $d_{15}$ 模式的极化方向与  $d_{33}$ 、 $d_{31}$ 不同,是垂直 于电极方向,故三明治结构会在压电片两电极面对 称产生拉压应力,从而在压电片内部产生剪切形变,

收稿日期:2017-02-22

基金项目:辽宁省科学技术计划资助项目(2014020009)

**作者简介:**刘月(1993-),女,内蒙古赤峰人,硕士生,主要从事压电俘能器研究。E-mail: 422309594@qq.com。通信作者:董维杰(1968-), 女,教授,博士,主要从事压电传感器与执行器的研究。E-mail: dongwj@dlut.edu.cn。

数值分析结果表明, $d_{15}$ 模式比 $d_{31}$ 模式俘能器多俘 获 50%能量。张智雄等<sup>[5]</sup>研究了基于 $d_{15}$ 模式的 PZT-51双晶片悬臂梁结构,结果证明两片压电片的 并联结构能有效提高输出功率,降低匹配负载。类 似双晶片悬臂梁结构,Wen等<sup>[6]</sup>利用正、负向超磁 致伸缩材料中间夹 PZT-5H 的结构形成 $d_{15}$ 模式压 电俘能器,超磁致伸缩材料的压缩或伸长形变会在 压电片内部产生剪切应变,实现磁场检测与压电俘 能两种功能。除了悬臂梁式结构,还有其他的 $d_{15}$ 模 式压电俘能器,PZT 压电片粘贴在圆管表面,当圆 管做扭转运动时,在压电片上产生剪切应变,在第四 阶扭转模态时得到最优输出0.57 mW,这种扭转结 构俘能器的优点是圆管表面应变分布均匀,压电片 的输出电压相等,适于并联。

本文参考文献[3]和[5],设计了一种将直立型 剪切俘能器与悬臂梁相结合的L型基座 d<sub>15</sub>模式压 电俘能器,利用L型基座底边近似梁的结构发生谐 振,放大振动激励幅度,提高输出功率。通过有限元 仿真研究了激励频率与负载对其俘能特性的影响, 与直立型基座 d<sub>15</sub>模式压电俘能器进行了对比,结果 表明前者在谐振时开路电压约为后者的 2.3 倍,匹 配负载时的输出功率约为后者的 4.8 倍。

1 结构设计

L型 d<sub>15</sub>模式压电俘能器的具体结构与尺寸如 图 1 所示。图中, P 为极化方向。该结构包括钨钢



质量块、压电片与铝基座3部分,压电片沿长度方向 (垂直于厚度方向)进行极化,用铜粉导电胶将压电 片粘在质量块与基座之间。当受到竖直方向激励 时,加速度通过质量块转化为剪切力作用在压电片 上,分别在左、右两电极表面产生正、负电荷。由于 基座的底部水平固定端到竖直部分有15mm的梁 式结构存在,因而装置存在较低的谐振频率。质量 块采用高密度钨钢合金,压电片采用 PZT-51,基座 采用铝合金3D 打印成型,具体参数如表1所示。

表1 L型俘能器主要参数

部件	$\frac{d_{15}}{(\text{pC} \cdot \text{N}^{-1})}$	$\frac{\boldsymbol{\varepsilon}_{11}^T}{\boldsymbol{\varepsilon}_0}$	泊松比	密度/ (kg・m <sup>-3</sup> )	质量/g
质量块	—		0.30	14 800	47.95
压电片	740	3 135	0.34	7 500	0.44
基座	—		0.30	1 820	5.32

## 2 有限元模态分析与瞬态分析

采用 ANSYS 软件建立 L 型结构和直立型结构 俘能器的有限元模型,如图 2 所示。二者的质量块 和压电片的体积、材料均相同,具体参数如表 2 所 示。通过 ANSYS 软件进行模态分析,在 0~2 kHz 内获得 L 型结构的前 4 阶模态频率如表 3 所示。从 目前的研究来看,环境中的振动能量主要分布在较 低频段(<200 Hz)<sup>[8]</sup>。本文主要研究 L 型俘能器 在一阶模态下的俘能特性,一阶模态振型如图 3 所 示。装置以底部固定面为中心面,绕 x 轴在 yOz 平 面内做左右摆动。



表 3 模念分析的结果							
模态	一阶	二阶	三阶	四阶			
谐振频率/Hz	83.628	229.32	1 072.0	1 950.8			

图 3 一阶模态振型图

采用 ANSYS 瞬态分析模块分别测量了两种结构的开路电压和负载特性。在两种结构的质量块上分别施加幅度为 1.25 N、频率在 0~140 Hz 变化的 正弦激励,使激励加速度峰值为 2.5g,得到开路电压随频率的变化曲线如图 4 所示。直立型结构采用 两片压电片并联,为了比较两种俘能器在采用相同体积压电片时的性能,只计算单片压电片上的输出 功率。由图可见,直立型结构的开路电压不受激励频率的影响,始终输出为 3.6 V;而 L 型结构在一阶频率 83.6 Hz 处发生谐振,开路电压大幅增加至 8.2 V,约为前者的 2.3 倍。



图 4 仿真开路电压随激励频率变化曲线

选取非谐振频率点 70 Hz 与一阶模态频率点 83.6 Hz 进行瞬态分析,仿真俘能器输出电压与输出 功率随负载电阻的变化。对两种结构分别施加幅度 为1.25 N、频率分别为70 Hz、83.6 Hz的正弦激励, 使激励加速度峰值为 2.5g,负载电阻为 0~2 MΩ,测 量负载上的输出电压,计算对应的输出功率,结果如 图 5 所示。由图可见,两种结构的输出电压都随负 载增大而增大,直立型结构在两个频率处的输出电 压基本相等;而L型结构在一阶模态 83.6 Hz 发生 谐振,输出电压明显增大。直立型结构在两个频率 处的匹配负载分别为 150 kΩ 和 125 kΩ, 对应的输 出功率分别为 5.4 µW 和 6.48 µW;L 型结构在两 个频率处的匹配负载分别为 300 kΩ 和250 kΩ, 对 应的输出功率分别为 5.28 µW 和 33.64 µW。可 见,一阶模态下的输出功率相比非谐振时提高约 6.4倍,约为此时直立型结构输出功率的4.8倍。 由以上仿真结果可知,L型结构不发生谐振时的俘 能性能与直立型结构基本相同,在很宽频带内均有

稳定的能量输出;而在一阶频率附近时,L型结构的 开路电压和输出功率均有大幅增加,此时的俘能性 能优于直立型结构。



图 5 仿真输出电压、输出功率随负载电阻的变化曲线

3 实验测试

L型俘能器性能测试系统如图 6 所示。信号发 生器(Tektronix AFG 3021B)产生频率与幅度均可 调的正弦电信号,经过功率放大器(YE5871A)进行 功率放大,驱动振动台(JZK-5)为压电俘能器提供 机械振动。振动台上还连接加速度传感器(CYD-127),实时测量振动台的振动加速度,俘能器与传感 器输出同步显示在数字示波器(Rigol DS1074Z)上。 L型俘能器的材料与尺寸均与仿真时相同。



图 6 俘能器性能测试系统

为了测量 L 型俘能器在一阶模态下的输出电 压和输出功率,调节信号发生器的激励频率保持在 谐振频率 86 Hz 不变。调节激励电压信号,使激励 加速度在 1.5g、2.0g 和 2.5g之间依次递增,负载 电阻在  $0\sim 2$  M $\Omega$  变化时,得到 3 个激励加速度下俘 能器的输出电压峰-峰值和输出功率随负载变化曲线,如图 7 所示。由图可见,输出电压随着负载电阻的增大而增大,在 3 个激励加速度时,测得输出电压最大值分别为 1.46 V、2.09 V和 2.78 V;输出功率在负载为 203 kΩ 时达到最大,输出功率分别为 8.45  $\mu$ W、18.04  $\mu$ W 和 31.25  $\mu$ W,可见输出电压和输出功率均随激励加速度增大而增大。实验中,每单位重力加速度振动激励下,L型俘能器功率密度达到 84  $\mu$ W・cm<sup>-3</sup>,同等振动下,文献[3]中 PMN-PT 直立型俘能器和文献[5]中 PZT-51 悬臂梁俘能器的折算功率密度分别为 30.3  $\mu$ W・cm<sup>-3</sup>和 78  $\mu$ W・cm<sup>-3</sup>。与本文设计的 L 型俘能器相比,L 型俘能器结合了悬臂梁与直立型俘能器的优点,提高了输出功率密度。





4 结论与展望

本文设计制作了一种将直立型剪切俘能器与悬 臂梁相结合的L型基座d<sub>15</sub>模式压电俘能器,利用L 型基座底边近似梁的结构发生谐振,放大振动激励 幅度,提高输出功率。通过有限元仿真与直立型基 座 d<sub>15</sub>模式压电俘能器进行了对比,结果表明前者在 谐振时开路电压约为后者的 2.3 倍,匹配负载时的 输出功率约为后者的 4.8 倍。通过实验测试,在谐 振频率为 86 Hz、激励加速度为 2.5g 时,L 型基座 俘能器输出开路电压最大为 8.2 V,在 203 kΩ 的匹 配负载上输出功率为 31.25  $\mu$ W,每单位重力加速度 下功率密度达到 84  $\mu$ W · cm<sup>-3</sup>,与文献[3]中 PMN-PT 直立型俘能器和文献[5]中 PZT-51 悬臂 梁俘能器的功率密度相比均有所提升,可见 L 型俘 能器结合了悬臂梁与直立型俘能器的优点。在一阶 模态中,L 型俘能器质量块的振幅在水平方向有分 量;而在三阶模态中,质量块的振幅全部集中在竖直 方向。因此,针对高频振动后续研究将会探讨在其 他模态时能否获得更优输出。

## 参考文献:

- [1] CHENS 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 & Actuators A Physical, 2007, 135(1):1-9.
- [2] ALADWANI A, ALDRAIHEM O, BAZ A. Single degree of freedom shear-mode piezoelectric energy harvester[J]. Journal of Vibration & Acoustics, 2013, 135(5): 83-91.
- REN B, OR S W, ZHANG 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]. Applied Physics Letters, 2010, 96(8):083502.
- [4] MALAKOOTI M H, SODANO H A. Piezoelectric energy harvesting through shear mode operation[J]. Smart Materials & Structures, 2015, 24(5): 1-12.
- [5] 张智雄,郑学军,张勇,等.并联结构 d<sub>15</sub>模式 PZT-51
  悬臂梁的俘能性能[J].中国有色金属学报,2015,25
  (8):2183-2189.
- [6] ZHANG J, LI P, WEN Y, et al. Shear-mode self-biased magnetostrictive/piezoelectric laminate multiferroichetero structures for magnetic field detecting and energy harvesting[J]. Sensors & Actuators A Physical, 2014, 214(4):149-155.
- [7] KULKARNI V, BEN-MRAD R, PRASAD S E, et al. A shear-mode energy harvesting device based on torsional stresses [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2014, 19(3):801-807.
- [8] ANDÒ B, BAGLIO S, TRIGONA C, et al. Nonlinear mechanism in MEMS devices for energy harvesting applications[J]. Journal of Micromechanics & Microengineering, 2010(20):1-12.