

基于分块压电悬臂梁的压电地板单元研制

董维杰,金海泉,谢颖

(大连理工大学 电子科学与技术学院,辽宁 大连 116024)

摘要:为了提高压电地板的发电功率,将压电圆盘或正方形压电结构分块成悬臂梁。有限元静态分析表明,当承重和材料体积相近时,三角形分块的输出功率分别是方形分块和压电圆盘的20倍、7倍;对比分析了顶角为 60° 、 90° 、 120° 的三角形悬臂梁压电地板单元的发电性能,发现减薄压电片和基板厚度使踩踏位移相同时,3种压电地板单元的输出功率相同;若压电片和基板厚度相同,顶角为 60° 的三角形分块压电地板单元输出功率最大。用6个 60° 三角形压电悬臂梁制作压电地板单元,以手按压,可轮流点亮两个发光二极管。

关键词:能量收集;压电地板;悬臂梁;分块

中图分类号:TN712+.5;TN384 **文献标识码:**A

Development of Piezoelectric Floor Using Piezoelectric Cantilever Blocks

DONG Weijie, JIN Haiquan, XIE Ying

(School of Electronic Science and Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: In order to improve the generation power of piezoelectric floor, the piezoelectric disk or square structure is divided into blocks of cantilever beam. The finite element static analysis shows that the output power of the triangle cantilever beam is 20 times and 7 times of the piezoelectric square and disk respectively in the case of the same bearing and material volume. The generating performances of the triangle cantilever beam piezoelectric floor units with the vertex angles of 60° , 90° and 120° are compared and analyzed. It is found that these 3 kinds of piezoelectric floor generate same output power when the piezoelectric plates and substrate thickness are reduced to make the trample displacement same; when the piezoelectric plate and substrate thickness are the same, the triangle piezoelectric blocks with vertex angle of 60° generate the maximum power. Six triangular piezoelectric cantilevers with vertex angle of 60° are used for making the piezoelectric floor units, and two light emitting diodes are lightened in turn by hand pressing.

Key words: energy harvesting; piezoelectric floor; cantilever beam; block

0 引言

人体运动产能丰富,即使在走路时,也会产生几瓦到几十瓦的电能^[1]。压电地板可把人群移动时产生的踩踏动能转换成电能,为低功耗用电设备供电,且不影响人的自由活动,具有不受电磁干扰、不产生噪音、无传动装置等优点。

压电地板的设计包括压电材料的选取、尺寸和结构设计、后端电路设计等方面,其中设计可靠的结构是提高能量转换效率的关键。最常用的压电地板单元是压电陶瓷圆盘形结构,此结构简单,稳定性好,承受能力大,成本低,广泛应用于压电发电地板装置上^[2-3],但压电结构变形小,如果能增大挠度可

进一步提高能量密度。目前较成熟的能量收集装置是压电悬臂梁结构,由于易在低频振动环境下谐振^[4-6]、压电元件有较大的平均应变,所以更适合收集环境振动能量。

本文把圆盘压电结构和方形压电结构分块成扇形和三角形,对比分析了分块压电结构在相同承载时的踩踏位移和输出功率,设计并制作了几种三角形压电悬臂梁来提高发电功率,测试了以正三角形压电悬臂梁组成的压电地板单元样品的发电性能。

1 压电效应与压电方程

当压电片在沿一定方向上受到作用力而产生变

收稿日期:2016-10-10

基金项目:辽宁省科学技术计划基金资助项目(2014020009)

作者简介:董维杰(1968-),女,吉林省白山市人,教授,博士,主要从事压电传感器、振动能量收集的研究。E-mail: dongwj@dlut.edu.cn。

形时,其内部极化状态改变,在两个电极表面上出现正、负相反的电荷。将压电片与金属基底组成的压电结构拼成地板,人体通过时的重力作用使压电结构变形,压电片上产生电荷,这就是压电地板的工作原理。

采用 ANSYS 中的压电模块来分析整体和分块压电结构的机电耦合。压电地板受到的踩踏力属于短时脉冲力,无论压电圆盘还是压电悬臂梁都以静态响应为主。所使用的压电方程为

$$\begin{cases} \mathbf{T} = \mathbf{c}^E \mathbf{S} - \mathbf{e}_i \mathbf{E} \\ \mathbf{D} = \mathbf{e} \mathbf{S} + \boldsymbol{\epsilon}^S \mathbf{E} \end{cases} \quad (1)$$

式中: \mathbf{c}^E 为场强恒定时的弹性刚度系数矩阵; \mathbf{e} 为压电应力系数矩阵; \mathbf{e}_i 为 \mathbf{e} 的转置; $\boldsymbol{\epsilon}^S$ 为应变恒定时的介电常数矩阵; \mathbf{S}, \mathbf{E} 分别为应变列向量和电场列向量。仿真计算和实验测试均采用 PZT-5H 压电材料。

弹性刚度系数矩阵 \mathbf{c} 为 6×6 对称矩阵,其中 $c_{11}, c_{21}, c_{31}, c_{22}, c_{32}, c_{33}, c_{44}, c_{55}, c_{66}$ 的值分别为 $7.6 \times 10^{10}, 7.1 \times 10^{10}, 7.3 \times 10^{10}, 7.6 \times 10^{10}, 7.3 \times 10^{10}, 20.83 \times 10^{10}, 3.0 \times 10^{10}, 4.54 \times 10^{10}, 4.54 \times 10^{10}$, 其余值都为 0。

$\boldsymbol{\epsilon}^S$ 为 3×3 矩阵,其中 $\epsilon_{11}, \epsilon_{22}, \epsilon_{33}$ 均为 5.133×10^{-8} , 其余值为 0。 \mathbf{e} 为 3×6 矩阵,其中 $e_{13}, e_{23}, e_{33}, e_{53}, e_{61}$ 的值分别为 $186 \times 10^{-12}, 670 \times 10^{-12}, 670 \times 10^{-12}, 660 \times 10^{-12}, 660 \times 10^{-12}$, 其余值都为 0。

2 有限元仿真

压电悬臂梁基板和压电片的厚度选取很重要,太厚不易变形,太薄则可能上下浮动位移过大。压电结构的设计依据以下两个原则:

1) 压电片和磷青铜基板最优厚度比为 0.5,此时相同激励下压电片的输出功率最大^[7]。

2) 在人行走过程中,最佳舒适度踩踏位移在 $1 \sim 3 \text{ mm}$ ^[8]。

以下仿真计算以压电地板踩踏位移小于 2 mm 为前提。并假定所有 n 个分块压电结构完全相同,那么,当负载相同时 n 个分块压电结构产生的总功率是一个分块的 n 倍。

2.1 圆盘与扇形分块压电结构

为了研究分块压电结构的发电性能是否优于整体式结构,首先对比了整体式圆盘和 4 个扇形分块的压电结构,如图 1 所示。选择压电片厚为 0.2 mm ,铜基板厚为 0.4 mm ,二者的半径分别为 $20 \text{ mm}, 25 \text{ mm}$ 。将压电圆盘分成 4 个扇形,以下称压电圆盘为压电地板单元,4 个扇形压电结构也称为一个压电地板单元。压电圆盘属于周边固支圆

板,扇形压电结构则为悬臂梁。

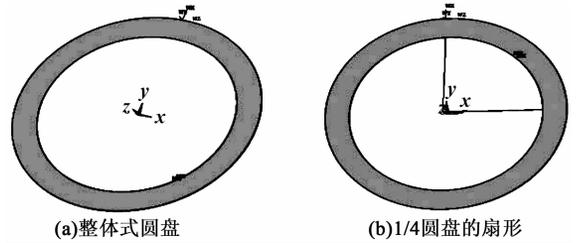


图 1 压电圆盘和扇形分块压电结构

均匀铺设 16 个压电地板单元,可组成一个面积为 $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 的压电地板。假设行人体重为 100 kg ,正好踩踏在整块压电地板上,根据承受重量大小,对扇形压电结构和压电圆盘分别施加 15.31 N 和 61.25 N 、持续时间为 0.1 s 的脉冲力,计算得两种压电结构的踩踏位移和最大开路电压如表 1 所示。

表 1 扇形和圆盘压电结构的踩踏位移和开路电压

压电结构	承受重量/N	踩踏位移/mm	开路电压/V
1 个扇形	15.31	1.68	8.526
圆 盘	61.25	0.49	9.698

由表 1 可知,扇形分块压电结构的踩踏位移是圆盘压电结构的 3.4 倍,但前者的开路电压却小于后者。将一个扇形压电结构和整体圆盘压电结构分别连接电阻,负载电阻从 $0 \sim 1 \text{ M}\Omega$,通过 ANSYS 的电路分析模块分别计算功率,4 个扇形分块的总功率是将 1 个扇形压电结构的功率乘以 4,圆盘和 4 个扇形压电结构的总瞬时峰值功率如图 2 所示。真正 4 个扇形分块电学并联时的电阻应为图中的 $1/4$ 。

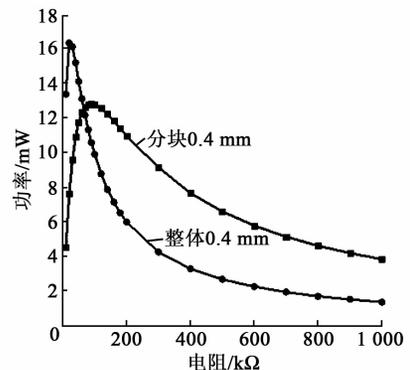


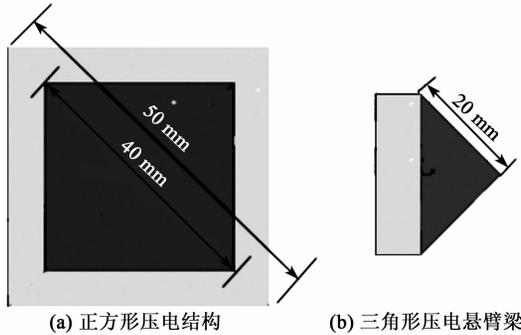
图 2 压电圆盘和扇形压电地板单元的输出功率

由图 2 可知,扇形分块压电结构的峰值功率反而低于压电圆盘,所以扇形分块后不能达到提高发电功率的目的。考虑到地板多为方形块,所以研究方形压电结构及其分块的振动发电特性。

2.2 方形与三角形分块压电结构

由于三角形压电悬臂梁的功率密度比同样底边

长和高度的矩形压电结构大^[9-10], 所以将正方形压电结构沿对角线分割成4个直角三角形结构, 以期减少约束、增加变形量, 如图3所示。



(a) 正方形压电结构 (b) 三角形压电悬臂梁
图3 正方形压电结构及其三角形分块

压电片和铜基板的厚度分别为 0.2 mm、0.4 mm, 方形压电结构压电片对角线长 40 mm, 三角形压电悬臂梁的直角边长为 20 mm, 分割前后压电地板单元的压电材料体积相同。16个方形压电地板单元组成尺寸为 200 mm×200 mm 的压电地板, 若分块后则包含 64个三角形压电悬臂梁。设行人重量 100 kg, 加载和计算方法同前, 踩踏位移和最大开路电压如表2所示。对比表1和表2的开路电压, 压电圆盘优于方形压电结构, 而直角三角形压电悬臂梁优于扇形。

表2 方形和三角形分块的踩踏位移和开路电压

压电结构	承受重量/N	踩踏位移/mm	开路电压/V
1个直角三角形	15.31	1.36	23.173
正方形	61.25	0.68	3.480

进一步计算正方形和三角形压电地板单元的输出功率, 瞬时峰值功率曲线如图4所示。尽管三角形压电悬臂梁的踩踏位移仅为正方形压电结构的2倍, 但是输出瞬时功率是后者的20倍左右, 提高显著。将图4与图2对比可见, 三角形压电地板单元的峰值功率约为压电圆盘的7倍, 是优于压电圆盘的设计方案。

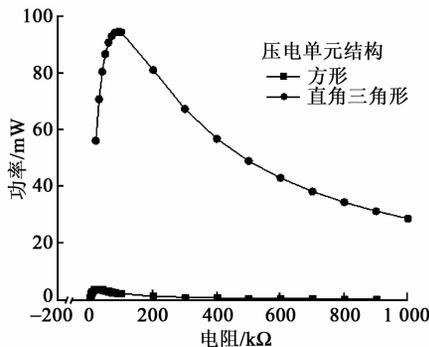


图4 方形和三角形压电地板单元的输出功率

由此可见, 三角形分块结构对于提高压电地板的瞬时输出功率的效果非常好, 建议压电地板单元的设计采取三角形分块方式。三角形分块方式很多, 除了直角三角形以外, 还可以是正三角形或其他角度三角形。下面分析不同顶角三角形压电悬臂梁的发电效果

2.3 不同三角形分割形状研究

研究了3种三角形分块结构, 分别是两直角边长为 25 mm 的直角三角形, 顶角 120° 的等腰三角形和顶角 60° 的正三角形, 还有作为对照的压电圆盘、压电片和基板的半径分别为 20 mm、25 mm, 如图5所示。16个这样的压电地板单元均可组成尺寸为 200 mm×200 mm 的压电地板。

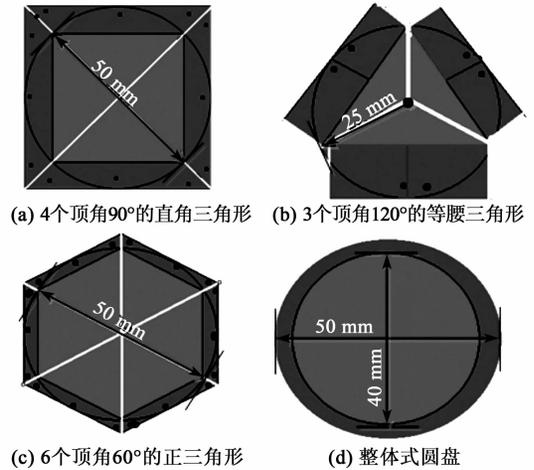


图5 不同三角形和圆盘压电结构单元

调整压电片和铜基板的厚度, 保持厚度比为 0.5, 使体重为 100 kg 的行人经过时踩踏位移为 2 mm, 4种压电结构的厚度、承受重量和最大开路电压如表3所示。

表3 三角形压电梁和压电圆盘同在 2 mm 位移下的尺寸和开路电压

压电结构	个数/个	100 kg 单个承受力/N	压电片/铜板厚度/mm	开路电压/V
60°	6×16	10.20	0.20/0.40	25.097
90°	4×16	15.30	0.17/0.34	27.332
120°	3×16	20.40	0.13/0.26	29.088
圆盘	1×16	61.20	0.125/0.25	15.218

用 ANSYS 仿真 3 种三角形压电悬臂梁和圆盘结构的瞬时功率曲线如图6所示。由图可见, 在同样的承重和踩踏位移下, 3种三角形压电悬臂梁的功率曲线很接近, 而压电圆盘的功率则小很多。

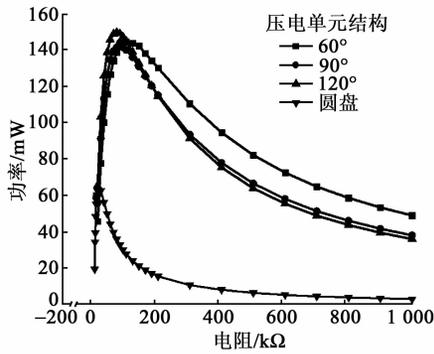


图 6 2 mm 踩踏位移时各压电结构功率曲线

台的振动频率为 15 Hz, 振动加速度幅值为 5.8 m/s²。60°、90°、120°三角形压电梁的最大受力分别是 0.29 N、0.435 N、0.58 N, 相当于压电地板承重 27.84 N。

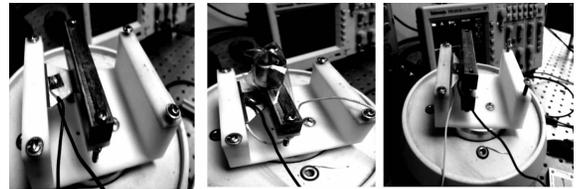


图 9 三角形压电梁发电测试装置

负载电阻值取为 10~500 kΩ, 通过示波器查看电阻的电压, 计算出平均功率。假定相同尺寸的分块完全一致, 算出 200 mm×200 mm 压电地板上所有分块压电悬臂梁的功率总和, 如图 10 所示。96 个顶角为 60°三角形梁输出的功率最大, 48 个顶角为 120°三角形梁输出的功率最小。

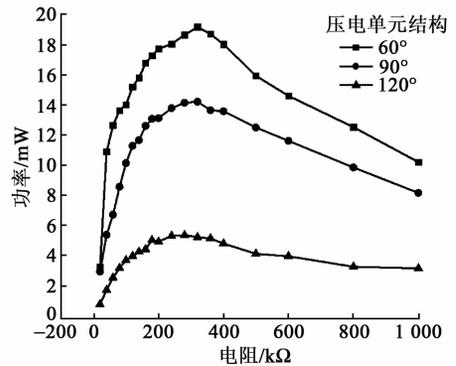


图 10 3 种压电地板的输出功率曲线

比较图 6 和图 10, 3 种厚度渐薄的三角形压电梁在相同位移下的输出功率非常接近, 而当基板和压电片厚度相同时, 顶角为 90°和 120°的三角形压电悬臂梁的输出功率较 60°三角形压电悬臂梁均有大幅衰减。如果不是批量定制, 压电陶瓷片的厚度不易任意选择, 因此, 选用厚为 0.2 mm 的压电陶瓷片制作压电地板单元样品, 为了收集较大的功率, 当然选择 60°的三角形压电悬臂梁较好。

顶角为 60°的三角形压电悬臂梁构成的压电地板单元结构是一个六角形单元, 如图 11 所示。采用 3D 打印技术制作底板、固定压板和盖板; 基板安装在具有内腔的底板上, 6 个压电片分别粘接在 6 个磷青铜基板的前部三角形部分, 粘贴了压电片的 6 个基板以环绕的形式固定在底板和压板之间, 形成三角形压电悬臂梁; 用螺钉将压板、基板和底板固定在一起; 盖板安装在压板上面, 盖板下表面中心具有一个凸台, 正对 6 个三角形压电悬臂梁末端。当踩踏盖板时, 6 个三角形压电悬臂梁向下挠曲, 压电片

3 实验验证

制作了 3 种三角形压电悬臂梁, 顶角分别为 60°、90°、120°, 压电片厚均为 0.2 mm、基板厚均为 0.4 mm, 斜边长为 25 mm, 实物如图 7 所示。压电材料为 PZT-5H, 基板材料为磷青铜。顶角不同的三角形压电悬臂梁在拼成 200 mm×200 mm 的方形压电地板时所需的数量不同, 需要 60°、90°、120°三角形压电悬臂梁分别是 96 个、64 个、48 个。



图 7 3 个压电振子样品

搭建的实验装置来分析测试结果如图 8 所示。图中编号 1~5 依次为信号发生器与功率放大器、激振台、示波器、压电结构、整流电路与负载。信号发生器产生低频正弦信号, 经过功率放大器后驱动激振台, 压电悬臂梁置于激振台上, 激振台的振动加速度通过悬臂梁末端的质量块转换成准静态力, 来模拟人的踩踏力。

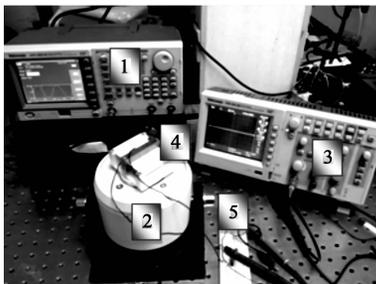


图 8 压电地板测试实验装置

当压电地板承重相同时, 60°、90°、120°三角形压电梁的分载比是 48:64:96, 所以实验中各梁的质量块分别为 50 g、75 g、100 g。将单个三角形压电悬臂梁与质量块固定在振动台上(见图 9), 设置激振

受到拉伸而产生电压。

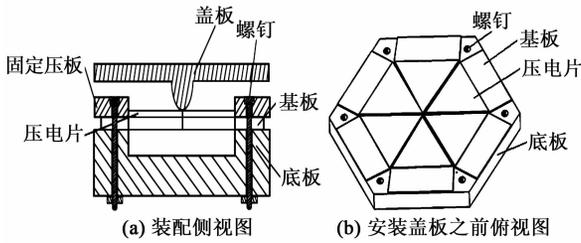


图 11 压电地板单元结构

当单个 60° 的三角形压电悬臂梁单元的负载电阻为 70 kΩ 时,6 个压电片并联时的匹配电阻为 11.66 kΩ。连续将盖板下压 2 mm,压电地板单元在匹配电阻时的电压波形如图 12 所示。最高电压为 3.88 V,功率为 1.29 mW,功率密度达 4.05 mW/cm²。因此,若在 200 mm×200 mm 的压电地板上均匀分布 16 个这样的压电地板单元,体重为 100 kg 的人经过时踩踏位移时恰是 2 mm(见表 3),预计产生功率 20.64 mW。

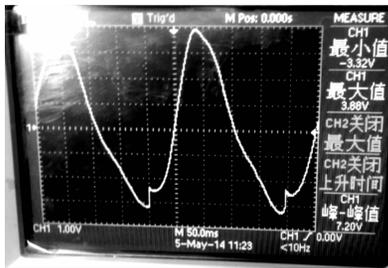


图 12 压电地板示波器电压曲线图

改用发光二极管作为负载进行测试,将正、反向的两个二极管并联接在压电地板单元两个引线上,如图 13 所示,可充分利用压电片产生的正、负电压。当峰值电压达到 3.2 V 时,单个二极管导通电阻为 35 kΩ。当将压电地板单元向下按时,其中一个二极管点亮,当松开时另一个二极管点亮,如图 14 所示。

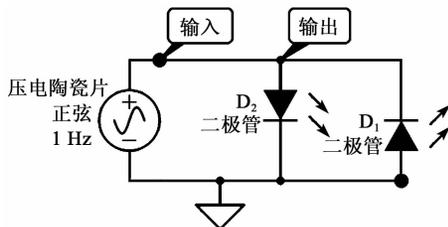


图 13 压电地板单元与二极管连接

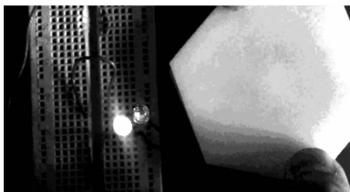


图 14 点亮二极管示意图

4 结束语

本文首先设计并制作了一种基于分块压电悬臂梁的压电地板单元,采用有限元仿真法,对各种分块压电悬臂梁进行仿真分析,对三角形分块压电悬臂梁进行了实验验证,同时测试了压电地板单元能量收集特性。研究表明,圆盘分成扇形未带来功率提高,4 个分块直角三角形结构的输出功率大于整体式方形压电结构。比较了顶角分别为 60°、90°、120° 的三角形分块压电悬臂梁,在承重和踩踏位移均相同时,功率相近。实验表明,同样承重,压电片/基板厚度相同时,顶角为 60° 的三角形结构输出功率最大。最后制作了压电地板单元,连接两个发光二极管,可轮流点亮两个二极管。

参考文献:

- [1] 高峰. 失落的能源-人体能[J]. 青苹果, 2012(3):41.
- [2] 网上车市. 日本人的奇思妙想 地铁站内的离奇实验[EB/OL]. http://www.news.cheshi.comshi_shang20061233412.shtml. 2006-12-30.
- [3] PISHARODY H G. An optimal design for piezoelectric energy harvesting system [C]//S. I.; Innovative Smart Grid Technologies-India. IEEE PES, 2011:244-247.
- [4] ERTURK, ALPER, RENNO J M, et al. Modeling of piezoelectric energy harvesting from an L-shaped beam-mass structure with an application to UAVs [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2009, 20 (5): 529-544.
- [5] SOON-DUCK K. A T-shaped piezoelectric cantilever for fluid energy harvesting [J]. Applied Physics Letters, 2010, 97(16): 164102-3.
- [6] JANPHUANG P, LOCKHART R, UFFER N, et al. Vibrational piezoelectric energy harvesters based on thinned bulk PZT sheets fabricated at the wafer level [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2014, 210(1):1-9.
- [7] 单小彪, 猿江波, 谢涛, 等. 悬臂梁单晶压电振子发电的理论建模与仿真 [J]. 浙江大学学报, 2010, 44 (3): 528-532.
- [8] KEMBALL-COOK L, TUCKER P. Energy harvesting: Pavegen Systems Limited; GB2011/000686 [P]. 2011.
- [9] 邓冠前, 陈仲生, 陶利民. 不同形状压电振子的振动发电行为研究 [J]. 压电与声光, 2010, 32(3):440-443. DENG Guanqian, CHEN Zhongsheng, TAO Limin. Study on vibration energy harvesting behaviors of piezoelectric cantilevers with different geometries [J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2010, 32(3):440-443.
- [10] HOSSEINI R, HAMED M. Improvements in energy harvesting capabilities by using different shapes of piezoelectric bimorphs [J]. Journal of Micromechanics and Micro-engineering, 2015, 25:1-14.