

文章编号 1004-924X(2025)18-2899-15

力放大式三自由度压电俘能器的设计 建模与实验研究

徐冬梅*, 杨 阳, 于思淼, 张 驰, 潘家楠, 张旭辉

(西安科技大学 陕西省矿山机电装备智能检测与控制重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要:为提升单自由度压电俘能器的能量转化效率和拓宽俘能工作方向,结合压电能量转化机制、多自由度压电俘能器原理和力放大结构原理设计了一款新型三自由度压电俘能器。俘能器由两两正交悬臂梁式俘能器和力放大拉压模式俘能器组合而成。基于 MATLAB/Simulink 搭建模型进行仿真分析,获得了激励参数与结构参数对系统动态响应的影响。在此基础上制作俘能器的实验样机,通过实验验证了所设计的俘能器在 XYZ 三方向均能有效输出电能,以及结构参数(悬臂梁间距、质量块质量和弹簧刚度)对俘能器性能的影响。实验表明 X, Y 方向在电阻为 15 k Ω 时,输出功率为 2.924 mW,可点亮 22 个 LED 二极管, Z 方向在电阻为 40 k Ω 时,输出功率为 4.871 mW,可点亮 33 个 LED 二极管。结果表明在不同振动方向下俘能器均能实现稳定电能输出,为低功耗无线传感器提供能源支持的可行性。研究成果为新型多自由度压电俘能器的设计提供了一定理论指导。

关键词:三自由度; 振动能量收集; 力放大结构; 正压电效应; 拉压模式

中图分类号: TN384; TM619 文献标识码: A

doi: 10.37188/OPE.20253318.2899 CSTR: 32169.14.OPE.20253318.2899

Design, modeling and experimental research on force amplification type three-degree-of-freedom piezoelectric energy harvester

XU Dongmei*, YANG Yang, YU Simiao, ZHANG Chi, PAN Jianan, ZHANG Xuhui

(Shaanxi Key Laboratory of Mine Electromechanical Equipment Intelligent Detection and Control,
South China Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

* Corresponding author, E-mail: dongmeixu@xust.edu.cn

Abstract: To improve the energy conversion efficiency of a single-degree-of-freedom (SDOF) piezoelectric energy harvester and broaden its operational direction, a novel three-degree-of-freedom (3-DOF) piezoelectric energy harvester had been designed by integrating the piezoelectric energy conversion mechanism, multi-degree-of-freedom piezoelectric harvesting principles, and force amplification structures. The proposed harvester had consisted of orthogonally arranged cantilever-beam harvesters and a force-amplified

收稿日期: 2025-08-01; 修订日期: 2025-08-13.

基金项目: 国家自然科学基金(No. 62303370, No. 52005398); 陕西省自然科学基金研究计划(No. 2025JC-YBMS-586); 中国博士后科学基金面上项目(No. 2024M762449); 陕西省教育厅服务地方专项项目(No. 24JC055); 安徽省博士后研究人员科研项目(No. 2023B753)

compression-tension mode harvester. A simulation model had been established using MATLAB/Simulink to analyze the effects of excitation and structural parameters on the system's dynamic response. Based on the simulation, a prototype had been fabricated and experimentally validated. The results had demonstrated that the harvester could effectively generate electrical energy along the X , Y , and Z directions, with structural parameters (cantilever spacing, proof mass, and spring stiffness) significantly influencing its performance. Experiments showed that the X and Y directions achieved an output power of 2.924 mW at a load resistance of 15 k Ω , capable of illuminating 22 LEDs, while the Z direction delivered 4.871 mW at 40 k Ω , powering 33 LEDs. The findings confirm the harvester's stable energy output across different vibration directions, demonstrating its feasibility for powering low-power wireless sensors. This study provides theoretical guidance for the design of novel multi-degree-of-freedom piezoelectric energy harvesters.

Key words: three degrees of freedom; vibration energy collection; force amplification structure; positive piezoelectric effect; tension-compression mode

1 引 言

近年来,环境能量收集技术已经成为学者们的热门研究方向,其依托传感器技术的快速发展受到一定关注^[1-4]。随着传感器供电能量需求的减少和不同机构中传感器使用率的提高,传统有线供电模式由于布线复杂且适用场景有限,不能满足多传感器工况环境。无线供电模式由于采用化学电池为传感器供电,其无法保证长时间稳定运行,因此从环境中收集能量为传感器供电是一种较有优势的供电手段^[5-8]。与太阳能受时间和天气因素等影响,热能受布置区域等因素影响相比,环境振动能量在日常更为普遍^[9-10]。其中,压电俘能技术在振动能量收集领域受到持续关注。压电俘能技术与其他振动能量收集技术相比具有能量密度高、无电磁干扰等优点被认为是一种有前景的可持续能源解决方案^[11-15]。

由于单自由度压电俘能器仅当敏感轴向与振动激励方向一致时,俘能器才有较大的能量输出,损耗了非敏感轴方向的振动能量^[16]。研究人员为充分利用振动能量设计了不同种类的多自由度压电俘能器。Chen 等人提出了一种蒲公英式压电俘能器,当谐波励磁频率为 22 Hz,振幅为 0.28 mm,负载电阻为 8 k Ω 时,负载功率可达 0.28 mW,能量转换效率可达 3%^[17]。Zhou 等人设计了一种柔性纵向之字形压电俘能器,将多个单向压电俘能器按不同方向串联起来,可以在平面上任意方向收集振动能量,实验最大输出功率为 1.016 mW^[18]。Zhao 等人设计出了一种 V 型

结构压电俘能器,主要由两根呈 θ 角的压电梁组成。实验表明,适当的 θ 角可以增大俘能器输出性能,由于多梁结构的存在该俘能器同时具有多方向收集能力^[19]。Kim 等人提出了一种两自由度耦合多模态压电俘能器结构,由平动和旋转自由度来实现 2 个自由度的耦合,在 0.15 g 加速度激励下,相比单自由压电俘能器拓展了 2 Hz 的工作频带^[20]。Zhao 等人提出了一种基于螺旋结构的压电俘能器,采用螺旋形柔性梁代替传统的薄柔性梁,其能够沿任意方向灵活弯曲和伸展,实现多自由度能量收集^[21]。杨沂等人提出一种两自由度压电式轨道俘能器,可以同时俘获两个方向的振动能量同时在简谐激励下的带宽为 55 Hz,即该俘能器能在 294~349 Hz 频率之间持续进行较大的能量采集^[22]。

由于环境中的振动激励相对较小导致输出功率偏低,不同学者进一步引入力放大机构以提升俘能器能量收集效率。Qian 等人设计了一种新型压电鞋式压电俘能器,该结构利用柔顺结构设计了一种力放大器,桥式增力机构能有效提高鞋式压电俘能器的输出功率^[23]。Chen 等人设计了一种基于柔顺力放大器和压电叠堆的新型压电俘能器,该柔顺力放大器有限元验证放大比为 6.2,当频率为 5 Hz,10 Hz 和 20 Hz 同时输入激励为 0.4 g 时,最大平均输出功率分别为 8.4 mW,15 mW 和 32.4 mW^[17]。Li 等人提出了一种基于桁架的压缩模式压电俘能器,利用桁架结构放大施加在压电元件上的力以提高激励大小从而使俘能器达到高功率输出,实验结构最大功率可达到 38.2 mW^[24]。

本文设计了一种可俘获多个方向振动的压电俘能器,并利用力放大结构提高俘能器的能量输出,使俘能器实现高效率、多方向的能量收集。

2 三自由度压电俘能器结构设计

现有的悬臂梁式压电俘能器具有能量收集方向单一、收集效率低等缺点,结合力放大机构研究理论,设计了力放大式三自由度电俘能器,结构如图 1 所示。

机构主要由两两正交的悬臂梁压电俘能器、拉压模式压电俘能器、基座以及相关配件组成。其中,两两正交的压电俘能器由两对平行的悬臂梁相互正交而成。矩形压电陶瓷薄片贴于悬臂梁外侧。连接板上设计了不同间距的孔,用于调节平行悬臂梁之间的距离。拉压模式压电俘能器由二级力放大结构、弹簧、质量块、限位圈、光杆和支架组成。限位圈用于限制质量块的位移,确保弹簧在共振状态下不会脱离导杆。

当基座受到 X 方向或 Y 方向的外部振动激励时,结构进行往复摆动。这一摆动将导致悬臂

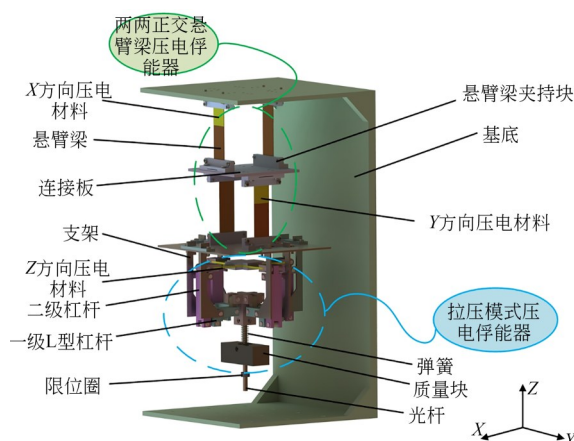


图 1 三自由度压电俘能器结构

Fig. 1 3-DOF piezoelectric energy harvester structure

梁端部粘贴的压电材料发生形变,从而通过压电效应产生电能,如图 2(b)所示。当基座受到 Z 方向的外部振动激励时,只有拉压模式压电俘能器处于工作状态。质量块因振动而进行往复运动,力通过弹簧传导至力放大机构,并经由二级力放大机构进行放大,最终作用于压电材料上,将机械能转化为电能,如图 2(c)所示。

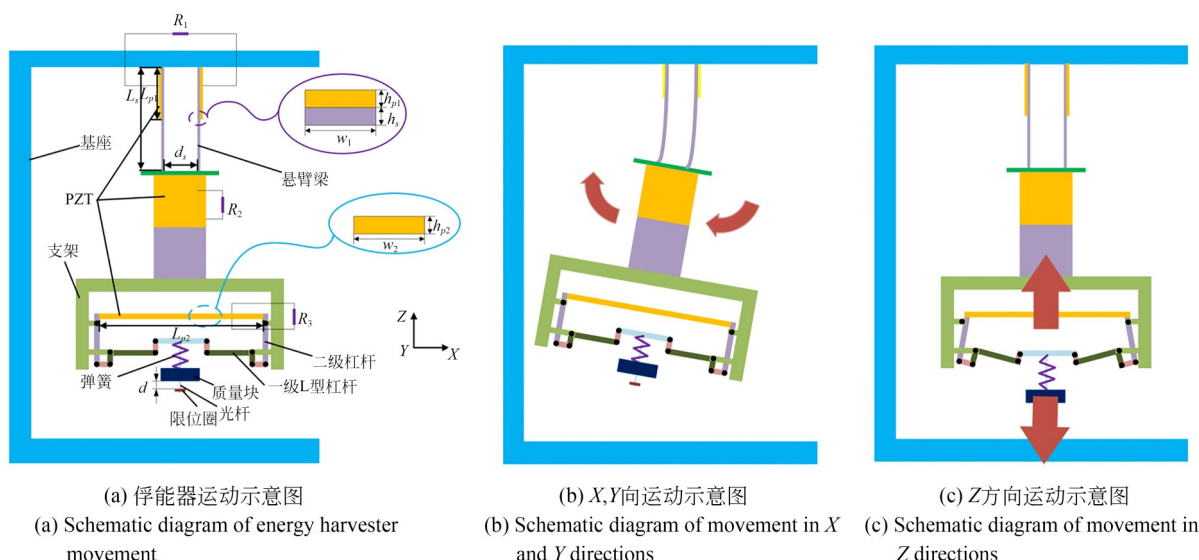


图 2 X, Y, Z 方向俘能器运动示意图

Fig. 2 Schematic diagram of energy harvester movement in X, Y and Z direction

3 建模与仿真

3.1 力放大机构和悬臂梁间距分析

为了建立压电俘能器的机电耦合模型,首先

对拉压模式俘能器中力放大机构的放大比进行计算。二级力放大机构如图 3 所示,该机构由一级 L 型杠杆结构和一级普通杠杆结构串联而成。输入力将依次通过这两个力放大结构进行放大,

最终作用于压电材料上,放大比简图如图 4 所示。

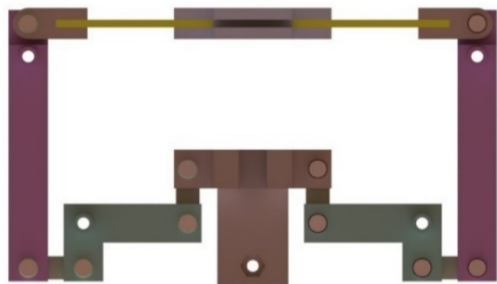


图 3 力放大结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of force amplification structure

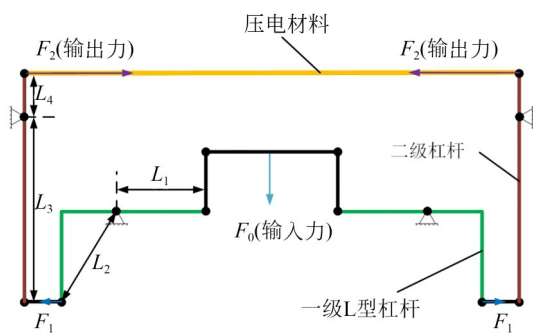


图 4 力放大结构放大比计算简图

Fig. 4 Calculation diagram of magnification ratio of force amplification structure

第一级 L 型杠杆结构的力传递放大比：

$$F_1 = \frac{L_1}{L_2} F_0, \quad (1)$$

其中： F_1 为 L 型杠杆结构输出力； L_1 为 L 型杠杆结构的动力臂长度； L_2 为 L 型杠杆结构的阻力臂长度； F_0 为 L 型杠杆结构输入力。

第二级普通杠杆结构的力传递放大比：

$$F_2 = \frac{L_3}{L_4} F_1, \quad (2)$$

其中： F_0 为普通杠杆结构输出力； L_3 为普通杠杆结构的动力臂长度； L_4 为普通杠杆结构的阻力臂；联立式(1)与式(2),得到二级杠杆力放大结构的放大比 i 为：

$$i = \frac{F_2}{F_0} = \frac{L_1 L_3}{L_2 L_4}, \quad (3)$$

其中： L_1, L_3 为两级, L_2, L_4 尺寸参数如表 1 所示。

为了验证公式计算的正确性,对构建的有限元模型进行仿真分析。该仿真模型的系统参数

表 1 力放大结构各部分尺寸

Tab. 1 Dimensions of each part of force amplification structure

尺寸	大小/mm
L_1	26.5
L_2	11.5
L_3	54.5
L_4	8.5

和后文的物理原型相同,图 5 展示了力放大机构在输入力为 5 N 的输出力大小。通过式(3)计算得出理论放大比为 14.68,而仿真结果得到的放大比为 14.77,同时,验证了机构设计的合理性。

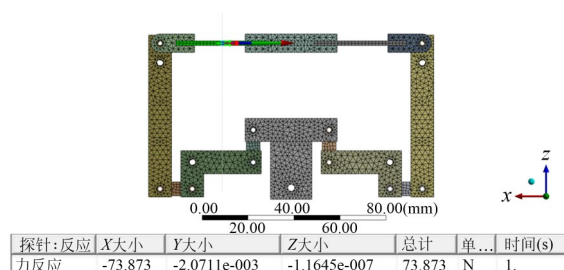


图 5 力放大比仿真结果图

Fig. 5 Simulation result diagram of force amplification ratio

两两正交悬臂梁的等效刚度不仅与悬臂梁本身尺寸有关,还与悬臂梁之间的间距有关。利用有限元法拟合出两两相交压电俘能器的等效刚度的数学表达式。

由于铍青铜具有较高的弹性极限和疲劳寿命,以及具有出色的耐腐蚀性和无磁性特性因此选用铍青铜作为悬臂梁的材料,而粘贴在悬臂梁上的压电材料则选用 PZT-5H。悬臂梁和 PZT 的具体尺寸参数与后文实验章节参数相同。将粘贴有 PZT 的一端固定,在质量块一端施加力,施加力的范围为 $-24 \text{ N} \sim 24 \text{ N}$ 。以末端质量块的位移作为求解目标。求解结果如表 2 所示。

对表中数据进行详细分析。采用多项式拟合方法,最终得到输入外力大小与末端质量块输出位移的数学表达式,如式(4):

$$F(x_1) = (2180000d_s^3 + 266000d_s^2 - 12000d_s + 7920)x_1, \quad (4)$$

其中： d_s 为悬臂梁之间的间距； x_1 为末端质量块位移。

表 2 不同悬臂梁间距力位移关系仿真表

Tab. 2 Simulation table of force-displacement relationship with different cantilever beam spacing

外力/N	25 mm 间距末端位移/mm	35 mm 间距末端位移/mm	45 mm 间距末端位移/mm
-24	-3.140 2	-3.143 5	-3.524
-21	-2.747 7	-2.750 6	-3.083 5
-18	-2.355 1	-2.357 6	-2.643
-15	-1.962 6	-1.964 7	-2.202 5
-12	-1.570 1	-1.571 8	-1.762
-9	-1.177 6	-1.178 8	-1.321 5
-6	-0.785 04	-0.785 88	-0.881 01
-3	-0.392 52	-0.392 94	-0.440 51
0	0	0	0
3	0.392 62	0.393 02	0.441 37
6	0.785 25	0.786 03	0.882 75
9	1.177 9	1.179 1	1.324 1
12	1.570 5	1.572 1	1.765 5
15	1.963 1	1.965 1	2.206 9
18	2.355 7	2.358 1	2.648 2
21	2.748 4	2.751 1	3.089 6
24	3.141	3.144 1	3.531

3.2 三自由度压电俘能器模型

本文设计的三自由度压电俘能器旨在俘获 XYZ 三个方向的振动能量,当结构受到单方向激励时,其他方向俘能器的俘能效果极低,因此在建模过程中,忽略了其他方向俘能器在受到非俘能方向激励的影响。当俘能器受到 X 方向和 Y 方向的简谐振动激励时,该俘能器可被简化为一个单自由度的质量块-弹簧模型。图 6 中展示了平行悬臂梁俘能器的等效集总参数模型。

$$C_1 \dot{x}_1 + K_1 x_1 - F_{p1} = -M_1 (\ddot{x}_1 + \ddot{y}_1), \quad (5)$$

其中: M_1 和下文中的 M_2 均为两两正交俘能器的等效质量, M_3 为质量块质量; F_{p1} 为 PZT 发电时为悬臂梁产生的反作用力; K_n 为结构等效刚度; C_n 为结构等效阻尼; x_n 为末端质量块的相对位移; y_n 为基座受到的振动位移。

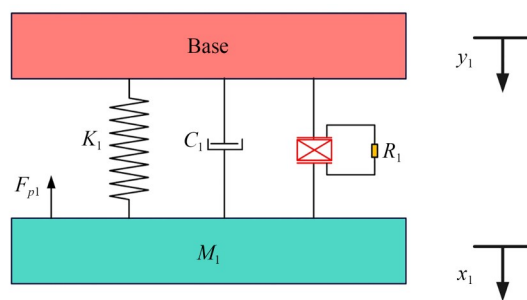


图 6 X, Y 方向集总参数模型

Fig. 6 Lumped parameter model in X and Y directions

对式(5)进行整理,得到一对平行悬臂梁压电俘能器集总参数运动方程:

$$M_1 \ddot{x}_1 + C_1 \dot{x}_1 + K_1 x_1 - F_{p1} = -M_1 \ddot{y}_1. \quad (6)$$

当压电俘能器受到 Z 方向的简谐激励振动时,两自由度悬臂梁被视作固定端。质量块与基座之间会产生相对移动,拉压模式压电俘能器可以简化成一个单自由度的质量块-弹簧模型,如图 7 所示。

$$C_3 \dot{x}_3 + K_3 x_3 + g(x_3) - F_{p3} = -M_3 (\ddot{x}_3 + \ddot{y}_3), \quad (7)$$

其中: F_{p3} 为 PZT 发电时为悬臂梁产生的反作用力。

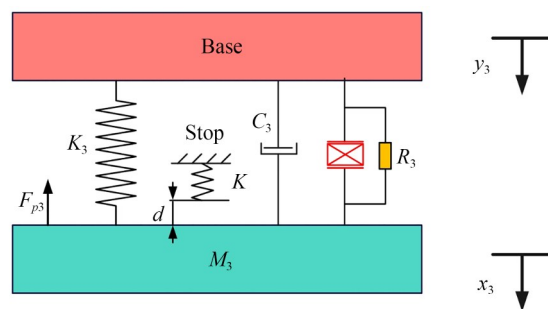


图 7 Z 方向集总参数模型

Fig. 7 Z-direction lumped parameter model

对上述方程进行整理,可以得到拉压模式压电俘能器的集总参数运动方程:

$$M_3 \ddot{x}_3 + C_3 \dot{x}_3 + K_3 x_3 + g(x_3) - F_{p3} = -M_3 \ddot{y}_3. \quad (8)$$

依据基尔霍夫电流定律,可以推导出压电模块的电学方程为:

$$\theta_p \dot{x} = C_p \dot{U} + U/R, \quad (9)$$

其中: θ_p 为压电俘能器的压电材料的机电耦合系数; U 为压电俘能器的外接电阻的负载电压; C_p 为压电俘能器的等效阻尼; R 为压电俘能器的外接电阻。

对式(9)进行整理,得到:

$$U/R + C_p \dot{U} - \theta_p \dot{x} = 0. \quad (10)$$

能够得到的压电俘能器的机电耦合动力学模型如下:

$$\begin{cases} M_1 \ddot{x}_1 + C_1 \dot{x}_1 + F(x_1) - \theta_{p1} U_1 = -M_1 \ddot{y}_1 \\ U_1/R_1 + C_{p1} \dot{U}_1 - \theta_{p1} \dot{x}_1 = 0 \\ M_2 \ddot{x}_2 + C_2 \dot{x}_2 + F(x_2) - \theta_{p2} U_2 = -M_2 \ddot{y}_2 \\ U_2/R_2 + C_{p2} \dot{U}_2 - \theta_{p2} \dot{x}_2 = 0 \\ M_3 \ddot{x}_3 + C_3 \dot{x}_3 + k_3 x_3 + g(x_3) - \theta_{p3} U_3 = -M_3 \ddot{y}_3 \\ U_3/R_3 + C_{p3} \dot{U}_3 - \theta_{p3} \dot{x}_3 = 0 \end{cases}, \quad (11)$$

其中: ω_n 为压电材料的无阻尼固有频率, 计算公式为 $\omega_{n1} = (K_1/M_1)^{1/2}$; θ_{pn} 为系统的机电耦合系数; $g(x_3)$ 为质量块冲击限位圈时产生的冲击力,

$$g(x_3) = \begin{cases} K(x_3 - d), & x_3 \geq d \\ 0, & x_3 < d \end{cases}.$$

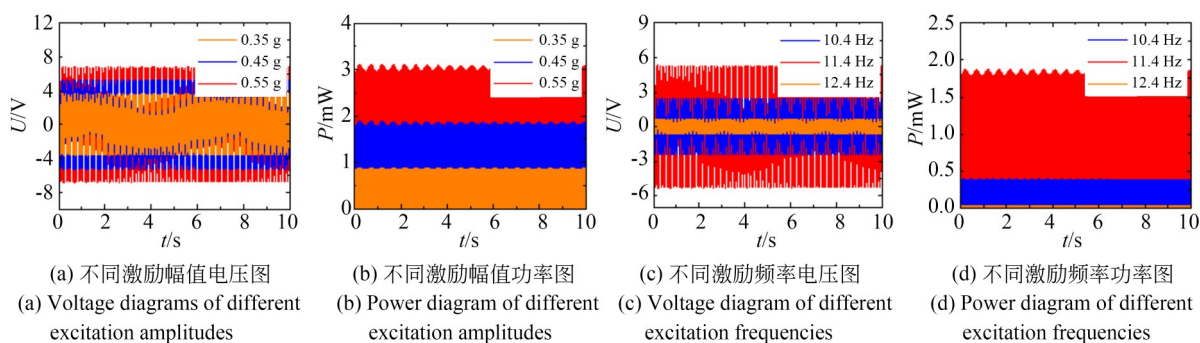


图 8 不同激励参数悬臂梁仿真图

Fig. 8 Simulation diagram of cantilever beam with different excitation parameters

下面分析不同激励频率对三自由度压电俘能器 X, Y 方向输出特性的影响。激励幅值设置为 0.45 g , 并分别选择 10.4 Hz , 11.4 Hz 和 12.4 Hz 作为激励频率, 测量了俘能器在不同激励频率下的输出电压和输出功率, 测量结果如图 8(c) 和(d)所示。由仿真结果可知俘能器对激励频率具有较强的选择性。随着激励频率的增大, 俘能器的输出电压和输出功率呈现出先增大后减小的趋势。俘能器受到与固有频率相匹配的振动频率激励时, 能获得最大的输出功率。

3.3 仿真分析

构建有限元模型。该仿真模型的系统参数和后续实验章节中的结构参数相同。依据式(11), 利用 MATLAB/Simulink 软件所具备的 ODE45 函数, 对所构建的模型进行数值计算与求解, 后续仿真分析均为对俘能器的一阶振动模态进行分析。

将悬臂梁的间距 d_s 设置为 35 mm , 末端质量块的质量为 85 g 。结合拉压模式压电俘能器的质量, 末端质量块质量为 704.3 g 。负载阻抗阻值 R_1 为 $15 \text{ k}\Omega$ 。分析 X, Y 方向振动激励参数对压电俘能器输出性能的影响, 由于 X, Y 方向仿真结果相同, 将只展示 X 方向的仿真结果。将正弦激励的频率给定 11.4 Hz , 激励幅值选取 0.35 g , 0.45 g 和 0.55 g , 不同激励幅值时的输出电压和功率仿真结果如图 8(a) 和(b)所示。通过对数据的分析可知, 当激励幅值从 0.35 g 增加到 0.55 g 时, 俘能器的输出电压和输出功率均呈现出随激励幅值增大而增大的趋势。输出电压从 3.54 V 提升至 6.81 V , 输出功率从 0.87 mW 增长至 3.08 mW 。

由于拉压模式压电俘能器设置有限位圈, 在质量块位移过大时会触碰到限位圈, 为俘能器引入非线性力。如图 9 所示, 为不同激励幅值下压电俘能器扫频的输出电压和输出功率, 当激励幅值为 0.6 g 时, 压电俘能器在 10.59 Hz 对应的峰值电压和功率分别为 14.16 V 和 5.3 mW , 在激励幅值增大到 0.8 g 时, 压电俘能器在 10.07 Hz 对应的峰值电压和功率分别为 18.57 V 和 8.62 mW 。从电压和功率的变化趋势中得到, 电压和功率表现出明显的软弹簧特性。

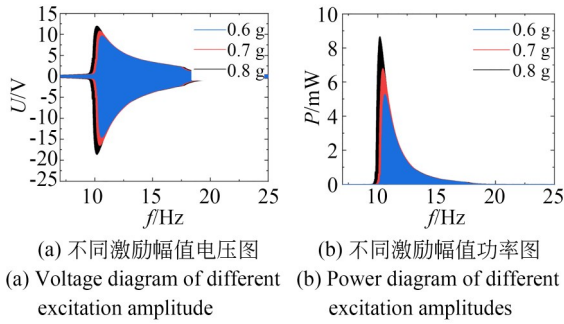


图 9 不同激励幅值拉压模式俘能器仿真图

Fig. 9 Simulation diagram of energy harvester with different excitation amplitude in tension and compression mode

分析激励频率的影响规律,激励幅值设置为 0.7 g,并分别选择 11 Hz,12 Hz 和 13 Hz 作为激励频率,测量了俘能器在不同激励频率下的输出电压和输出功率。测量结果如图 10 所示,可以发现 Z 方向的仿真结果与 X,Y 方向的规律相同。

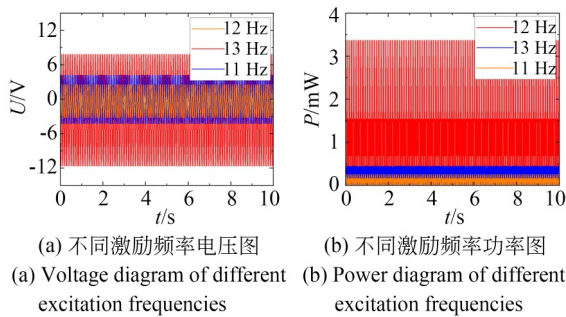


图 10 不同激励频率拉压模式俘能器仿真图

Fig. 10 Simulation diagram of energy harvester with different excitation frequencies in tension and compression mode

接下来分析压电俘能器结构参数的影响规律。首先分析悬臂梁参数的影响,电阻设置为 15 k Ω ,激励幅值设置为 0.45 g,末端质量块的质量为 85 g。悬臂梁间距设置为 35 mm,51 mm 和 67 mm,分析悬臂梁间距对俘能器输出性能的影响,仿真结果如图 11 所示。可以发现间距越大,系统的共振频率越高,输出电能越强。

质量块质量也对俘能器输出具有较大的影响,将扫频范围设置为 7~25 Hz,电阻设置为 40 K Ω ,激励幅值设置为 0.7 g,选用弹簧尺寸为

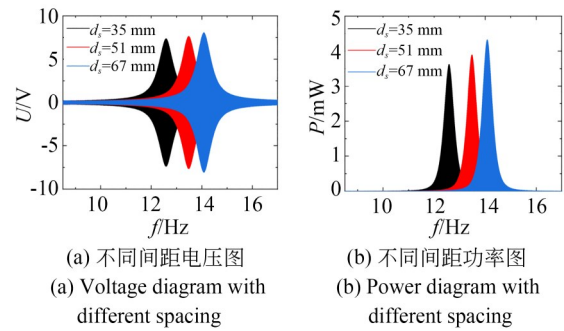


图 11 不同悬臂梁间距两两正交悬臂梁俘能器仿真图

Fig. 11 Simulation diagram of energy harvester with orthogonal cantilever beams with different cantilever beam spacing

45 mm 的长度、9 mm 的外径和 0.8 mm 的线径。选用三种质量分别是 60 g,85 g 和 105 g 的质量块,仿真结果如图 12(a)(b)所示,从图中可以发现,当质量块质量为 60 g 时,压电俘能器谐振频率点为 11.47 Hz,对应的峰值电压和功率分别为 6.44 V 和 2.07 mW;当质量块质量为 85 g 时,压电俘能器谐振频率点为 10.34 Hz,对应的峰值电压和功率分别为 17.27 V 和 7.32 mW;在质量块质量增加到 105 g 时,谐振频率逐渐减小到 9.88 Hz,对应的峰值电压和功率分别为 24.10 V 和 14.66 mW。由此可以体现出选择合适的质量很大程度上影响压电俘能器的输出性能。

分析弹簧刚度对压电俘能器输出性能的影响。电阻设置为 40 k Ω ,激励幅值设置为 0.7 g,质量块的质量为 85 g。选用长度为 45 mm、外径为 9 mm 的弹簧,其线径分别为 0.7 mm,0.8 mm 和 0.9 mm。从 12(c)和(d)图中可以分析得到,弹簧线径为 0.7 mm 时,压电俘能器可以在 9.5 Hz 时拥有 31 V 的输出电压和 25 mW 的输出功率,当弹簧线径增加到 0.8 mm 时,压电俘能器的谐振频率增加到 10.3 Hz,对应的输出电压和输出功率为 17.08 V 和 7.32 mW。当弹簧线径增加到 0.9 mm 时,压电俘能器的谐振频率增加到 11.38 Hz,对应的输出电压和输出功率为 13.6 V 和 4.61 mW。因此,选择合适的弹簧刚度也很重要。

分析压电俘能器受到振动激励时外接负载电阻对压电俘能器的影响,设定 X,Y 方向激励幅值为 0.45 g,激励频率保持在 11.4 Hz;设定 Z 方

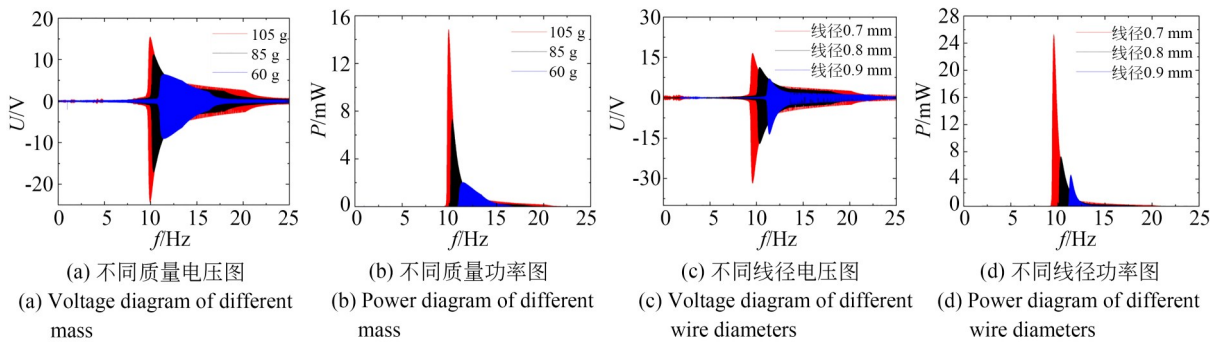


图 12 不同质量块质量和不同弹簧线径拉压模式俘能器仿真图

Fig. 12 Simulation diagram of energy harvester with different mass and different spring wire diameter in tension and compression mod

向激励幅值为 0.7 g,激励频率保持在 12 Hz。图 13 展示了压电俘能器外接不同阻抗电阻的仿真结果。从图中分析得到,16.5 k Ω 为俘能器在受到 X,Z 方向激励时的匹配阻抗,31.2 k Ω 为俘能器在受到 Z 方向激励时的匹配阻抗。

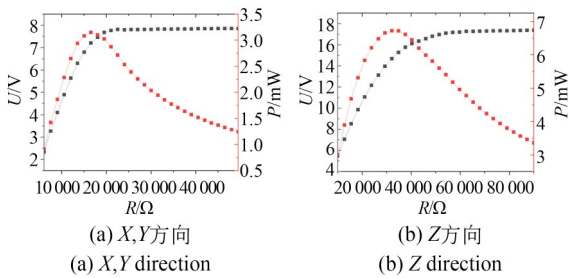


图 13 阻抗匹配仿真图

Fig. 13 Impedance matching simulation diagram

4 实验与验证

4.1 实验结构

为了验证压电俘能器的模型,依据第一节中详细设计的压电俘能器结构,精确加工出实验样机。样机的具体参数如表 3 所示,由于两款 PZT 购买的尺寸和制备工艺不同,所以两款 PZT 的部分参数存在些微差别。而根据表中所列尺寸制造出的压电俘能器则如图 14 所示。

该实验测试平台主要由计算机、稳压器(SVC-2000VA)、振动台(LT-50-ST)、振动台控制器(VT-9008)、功率放大器(VSA-L1000A)、电阻箱以及示波器(DSOX3024T)等组成,如图 15 所示。具体连接顺序为主机、振

动控制器、功率放大器、振动台、压电俘能器、电阻箱和示波器,其中稳压器为功率放大器提供稳定输出。

表 3 实验结构材料参数表

Tab. 3 Parameter list of experimental structural materials

类别	参数	数值
悬臂梁	材料	铍青铜
	长度 L_s/mm	58
	宽度 w_1/mm	20
	厚度 h_s/mm	0.6
PZT(两两正交悬臂梁压电俘能器)	材料	PZT-5H
	长度 L_{p1}/mm	20
	宽度 w_1/mm	20
	厚度 h_{p1}/mm	0.2
	密度/ $(kg \cdot m^{-3})$	7 600
	弹性模量/GPa	60
	压电常数/ $(C \cdot m^{-2})$	-6.6
PZT(拉压模式压电俘能器)	介电常数/ $(nF \cdot m^{-1})$	29.8
	材料	PZT-5H
	长度 L_{p2}/mm	40
	宽度 w_2/mm	20
	厚度 h_{p2}/mm	2
	密度/ $(kg \cdot m^{-3})$	7 600
	弹性模量/GPa	58
	压电常数/ $(C \cdot m^{-2})$	-6.5
	介电常数/ $(nF \cdot m^{-1})$	30

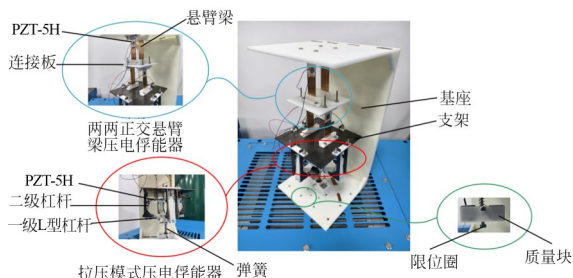


图 14 实验结构图

Fig. 14 Experimental structure diagram

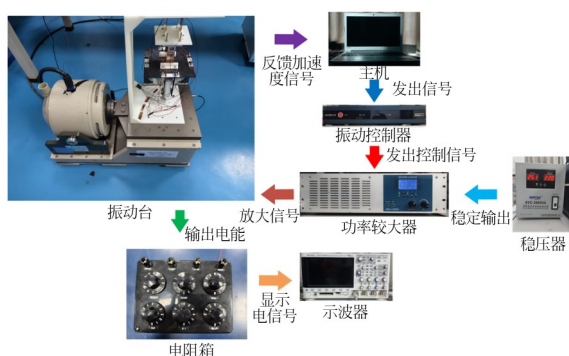


图 15 实验平台介绍

Fig. 15 Introduction of experimental platform

4.2 激励参数实验

实验中,悬臂梁的间距 d 设置为 35 mm,末端质量块的质量为 85 g。最终两两正交悬臂梁压电俘能器的末端质量块质量为 704.3 g。在俘能器输出端外接电阻箱, R_1 设置为 15 k Ω 。

对三自由度压电俘能器在 X, Y 方向振动激励下的性能进行分析,激励频率为 11.4 Hz。分别设置激振峰值为 0.35 g, 0.45 g 和 0.55 g,测量结果如图 16(a) 和 16(b) 所示。当激励幅值从 0.35 g 增加到 0.55 g 时,俘能器的输出电压和输

出功率均呈现出随激励幅值增大而增大的趋势。输出电压从 2.859 V 提升至 5.934 V,输出功率从 0.545 mW 增长至 2.347 mW。

将振动台控制软件的激励幅值设置为 0.45 g,并分别选择 10.4 Hz, 11.4 Hz 和 12.4 Hz 作为激励频率,测量俘能器在不同激励频率下的输出电压和输出功率,测量结果如图 16(c) 和 16(d) 所示。可以得到俘能器对激励频率具有较强的选择性。随着激励频率的增大,俘能器的输出电压和输出功率呈现出先增大后减小的趋势。只有当俘能器受到与其固有频率相匹配的合适振动频率激励时,才能获得最大的输出功率。

受到 Z 方向激励时,选择激励幅值为 0.6 g, 0.7 g 和 0.8 g,图 17 为不同激励幅值下进行正扫和反扫的实验结果,激励幅值在很大程度上影响俘能器输出性能,由于限位圈的作用,为俘能器系统引入了非线性力,使得俘能器的谐振随着激励幅值的增大逐渐向左偏移。当激励幅值为 0.6 g 时,对应的输出电压和输出功率分别为 13.056 V 和 4.56 mW,当激励幅值为 0.7 g 时,对应的输出电压和输出功率分别为 16.384 V 和 6.71 mW,当激励幅值为 0.8 g 时,对应的输出电压和输出功率分别为 26.32 V 和 17.31 mW。

研究不同激励频率对三自由度压电俘能器 Z 方向输出特性的影响。将振动台控制软件的激励幅值设置为 0.7 g,并分别选择 11 Hz, 12 Hz 和 13 Hz 作为驻留激励频率,测量了俘能器在不同激励频率下的输出电压和输出功率,测量结果如图 18(a) 和 18(b) 所示。当激励频率为 11 Hz 时,俘能器的输出电压为 1.702 V,输出功率为

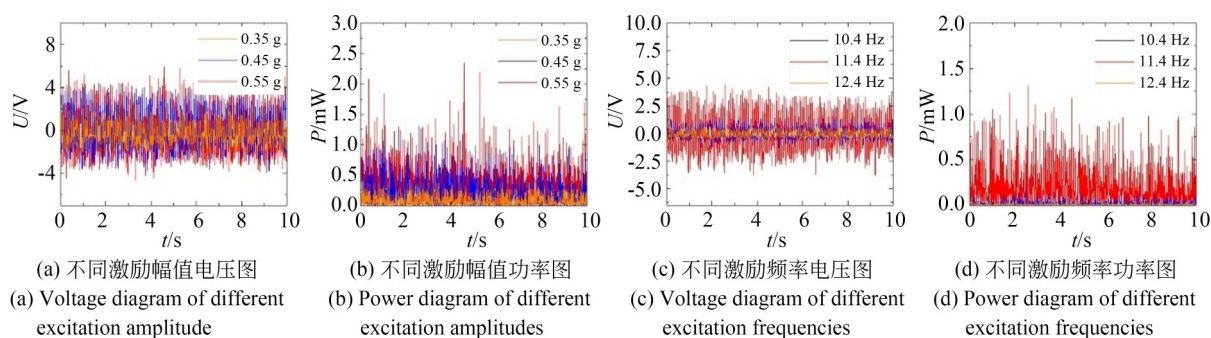


图 16 不同激励参数两两正交悬臂梁俘能器实验结果图

Fig. 16 Experimental diagram of energy harvester of orthogonal cantilever beam with different excitation parameters

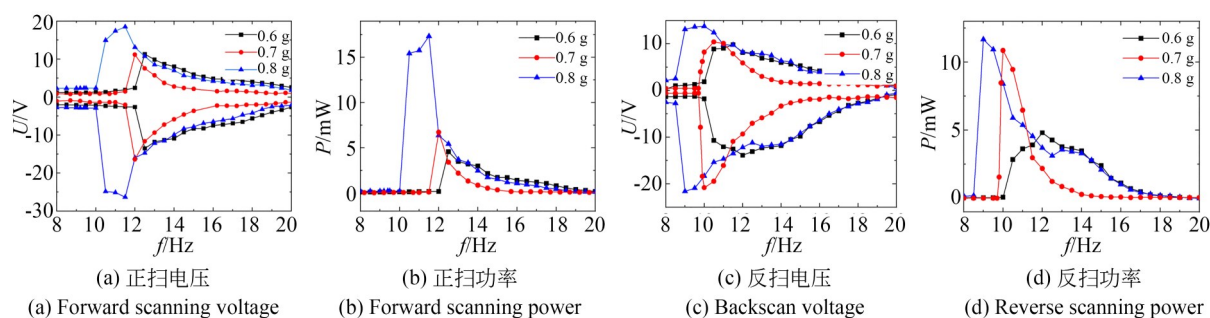


图 17 不同激励幅值拉压模式俘能器实验结果图

Fig. 17 Experimental results of energy harvester with different excitation amplitudes in tension and compression modes

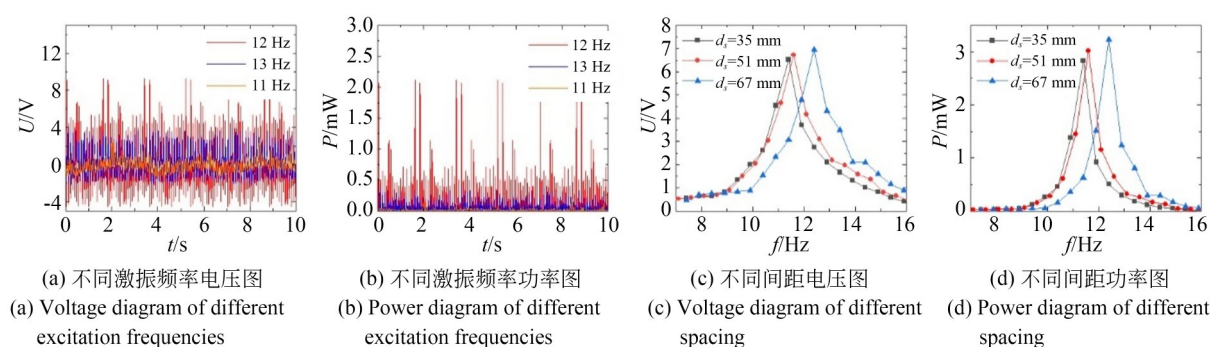


图 18 不同激振频率拉压模式俘能器和不同悬臂梁间距两两正交悬臂梁俘能器实验结果图

Fig. 18 Experimental diagrams of energy harvesters in tension and compression modes with different excitation frequencies and energy harvesters in orthogonal cantilever beams with different cantilever beam spacing

0.073 mW; 当激励频率为 12 Hz 时, 俘能器的输出电压和输出功率达到相对较高的值, 分别为 10.411 V 和 2.709 mW; 而当激励频率为 13 Hz 时, 输出电压和输出功率显著下降, 分别为 4.833 V 和 0.584 mW。由此可见, 俘能器对激励频率具有较强的选择性。随着激励频率的增大, 俘能器的输出电压和输出功率呈现出先增大后减小的趋势。只有当俘能器受到与其固有频率相匹配的合适振动频率激励时, 才能获得较大的输出功率。

4.3 结构参数实验

为了分析平行悬臂梁之间的间距对系统输出响应特性的影响, 采用扫频实验进行验证。激励幅值设定为 0.45 g, 间距 d_s 分别设置为 35 mm, 51 mm 和 67 mm。实验结果如图 18(c) 和 18(d) 所示。当悬臂梁间距为 35 mm 时, 系统的谐振频率为 11.4 Hz, 对应的输出电压和输出功率分别为 6.525 V 和 2.838 mW。当悬臂梁间距为 67 mm 时, 谐振频率为 12.4 Hz, 对应的输出电压和

输出功率分别为 6.962 V 和 3.231 mW。这些结果表明, 悬臂梁之间的间距对系统的刚度有显著影响, 间距越大, 系统的刚度越高。

测量不同质量块质量下拉压模式俘能器在不同频率下的输出电压与输出功率, 激励幅值为 0.7 g, 选用的弹簧具有 45 mm 的长度、9 mm 的外径和 0.8 mm 的线径, 选取 60 g, 85 g 与 105 g 的质量块, 图 19 分别展示了在不同质量块质量条件下, 压电俘能器正扫实验与反扫实验的详细结果。可以清晰地观察到, 当质量块质量从 60 g 逐渐增加至 105 g 时, 压电俘能器的谐振频率点呈现出逐渐降低的趋势, 从 11.3 Hz 降至 10.6 Hz。与此同时, 对应的峰值电压与峰值功率均呈现出显著的提升趋势, 输出电压从 6.481 V 提升至 28.344 V, 输出功率从 1.87 mW 提升至 20.084 mW。

进一步分析弹簧刚度对压电俘能器输出性能的影响机制。采用扫频实验方法, 借助正扫实验与反扫实验, 测量压电俘能器在不同频率

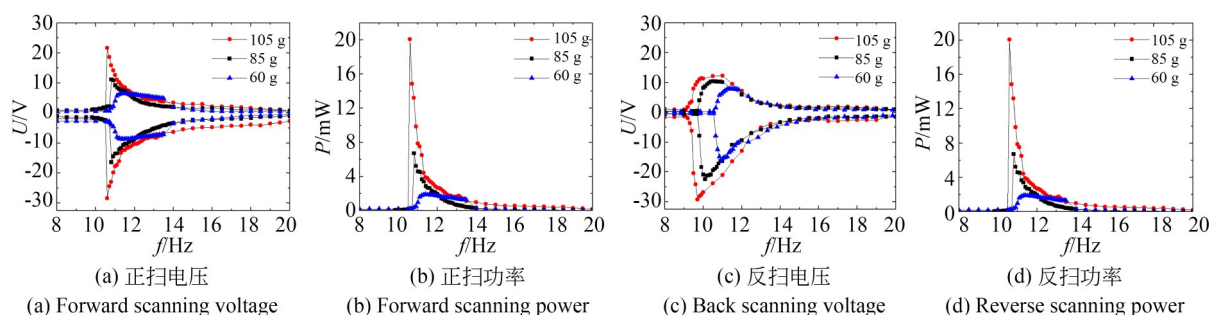


图 19 不同质量块质量拉压模式俘能器正反扫实验结果图

Fig. 19 Experimental diagram of forward and backward scanning of energy harvester in tension and compression mode with different mass blocks

下的输出电压与输出功率,以深入剖析弹簧刚度对其性能的影响。实验过程中,将扫频范围设定为 8~20 Hz,激励幅值严格控制在 0.7 g,选用质量为 85 g 的质量块。同时,选用长度为 45 mm、外径为 9 mm 的弹簧,其线径分别为 0.7 mm, 0.8 mm 和 0.9 mm,通过改变弹簧线径大小来调节弹簧刚度,进而研究其对压电俘能器性能的影响。图 20 分别呈现了在不同弹簧刚度条件下,压电俘能器正扫实验与反扫实验的详细

结果。从实验结果图中可以清晰地观察到,当弹簧线径从 0.7 mm 逐渐增加至 0.9 mm 时,压电俘能器的谐振频率点呈现出逐渐升高的趋势,从 11.3 Hz 升至 12.5 Hz。与此同时,对应的峰值电压与峰值功率均呈现出显著的降低趋势,输出电压从 16.384 V 降低至 12.662 V,输出功率从 23.761 mW 降低至 4.007 mW,这一结果表明弹簧刚度对压电俘能器的输出性能具有显著的影响。

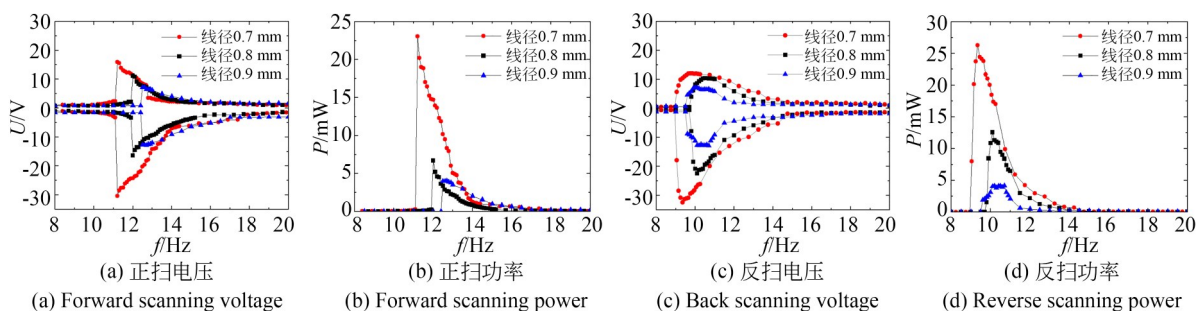


图 20 不同弹簧线径拉压模式俘能器正反扫实验结果图

Fig. 20 Experimental diagram of forward and backward scanning of energy harvester with different spring wire diameters in tension and compression mode

为了验证不同外接负载电阻对系统 X, Y 输出特性的影响,本研究设定了以下实验参数:激励幅值为 0.45 g,悬臂梁间距 d_s 为 35 mm,激励频率为 11.4 Hz,末端质量块的质量为 704.3 g。在实验中,使用外接电阻箱调节外接负载电阻的大小,并记录相应的输出电压和输出功率。图 21 (a)展示了阻抗匹配的实验结果。从图中可以观察到,随着外接负载电阻的增大,俘能器的输出电压迅速增大并趋于稳定,大致稳定在某一特定

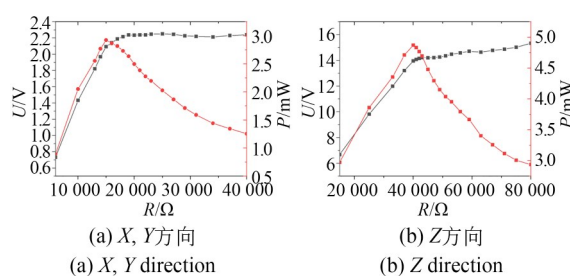


图 21 阻抗匹配实验结果图

Fig. 21 Impedance matching experimental diagram

值 2.3 V。与此同时,输出功率呈现出先增大后减小的规律。在 15 k Ω 时,输出功率达到最大值 2.924 mW,因此可以确定 15 k Ω 为俘能器在受到 X 方向激励时的匹配阻抗。

为了验证不同外接负载电阻对系统 Z 方向输出特性的影响,设定了以下实验参数:激励幅值为 0.8 g,质量块的质量为 85 g,选 45 mm 的长度、9 mm 的外径为 0.8 mm 的线径的弹簧。在实验中,使用外接电阻箱调节外接负载电阻的大小,并记录相应的输出电压和输出功率。图 21(b)展示了阻抗匹配的实验结果。从图中可以观察到,随着外接负载电阻的增大,俘能器的输出电压迅速增大并趋于稳定,大致稳定在某一特定值 15 V。与此同时,输出功率呈现出先增大后减小的规律。在 40 k Ω 时,输出功率达到最大值 4.871 mW,可以确定 40 k Ω 为俘能器在 Z 方向的匹配阻抗。对比实验结果与仿真结果存在一定的误差,经过分析主要误差来源来自选用等效集中参数建模,对于俘能器当中的一些结构进行简化,因此与实验结果存在误差;结构加工误差导致的装配误差和 PZT-5H 粘贴在整体结构粘贴与仿真位置不完全一致中产生的误差。

通过电容充电实验和 LED 二极管点亮实验,对俘能器的供电性能进行测试。在研究中,采用了全桥整流电路来实现交流到直流这一转换。俘能器在 X, Y 方向振动激励下的电容器充电实验图和结果,如图 22(a) 和 23(a) 所示。100 μ F 的电容器在 25 s 时,该电容器完全

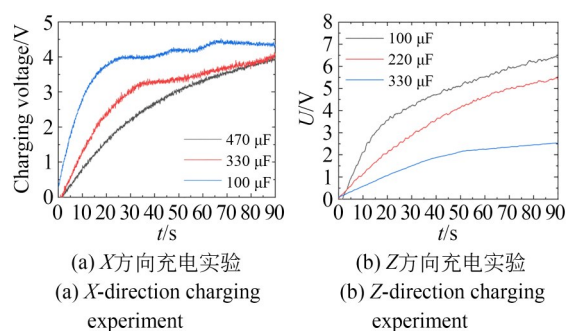


图 23 充电实验结果图

Fig. 23 Charging experiment result chart

充满,其电压稳定在约 4.2 V;330 μ F 的电容器在 38 s 时充满,电压稳定在约 3.5 V,仍呈现缓慢上升的趋势;470 μ F 的电容器在 90 s 内的充电速率逐渐减缓,且从图中并未观察到其充满的趋势。

在 Z 方向充电实验过程中,实验装置示意图与实验结果分别如图 22(b) 和图 23(b) 所示。100 μ F 的电容器当达到 24 s 时,电压上升速度开始逐渐变缓;而 330 μ F 的电容器两端电压上升速度最慢。这一结果有力地印证了压电俘能器在受到 Z 方向振动时仍然能够保持良好的充电效果。

为进一步评估俘能器的供电效果,本研究采用点亮 LED 二极管的方法来进行实验,King-bright L-53HD 红光发光 led 的工作电压为 1.8 V,在纯黑环境中发出最低可见光的功率为 1.8 μ W,当发出最大可见光时功率为 0.9 mW。实验中在室内灯光下可观察到 LED 二极管发光即认为点亮。将前文所述的全桥整流电路的出端连接至 LED 二极管的两端。可以观察到,当俘能器受到 X, Y 方向振动激励时,分别能够点亮 22 个 LED 二极管;在受到 Z 方向振动时能够成功点亮 33 个 LED 二极管。点亮实验验证了设计的三自由度压电俘能器的优良俘能能力,证明了为微小型传感器供电的可行性。

为了更直观地表明设计的力放大式三自由度压电俘能器输出性能,本文与引言中提到的多自由度压电俘能器进行对比,可以发现力放大式三自由度压电俘能器拥有较为不错的输出性能,对比如表 4 所示。

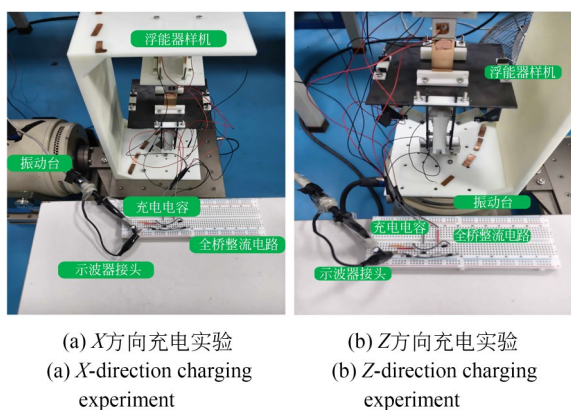


图 22 充电实验图

Fig. 22 Charging experiment diagram

表 4 其他多自由度俘能器输出性能
Tab. 4 Output performance of other multi-degree-of-freedom energy harvesters

参考文献	自由度	输出功率/mW
[17]	2	0.28
[18]	2	1.016
[21]	3	0.33
[22]	2	2.23

5 结 论

提出了一种基于力放大结构的三自由度压电俘能器。本文建立了三自由度压电俘能器的机电耦合动力学模型,并借助 MATLAB/Simulink 对模型进行数值求解,深入分析了振动激励参数以及压电俘能器结构参数对其输出性能的影响规律。最终,本文通过制作样机,验证了仿真结果的正确性,并对压电俘能器的供电效果进行了测试。主要得到以下结论:

(1)对激励参数的影响进行研究,当激振幅值变大时,俘能器的输出电压和输出功率都会明显增大。当激振频率变化时,俘能器在共振频率

附近拥有较大的电压和功率输出,随着频率的增大或减小,输出电压及功率逐渐降低。

(2)对结构参数的影响进行研究,悬臂梁间距变大,俘能器的共振频率变大,系统的输出电能变高;质量块质量越大,共振频率越低,输出性能越好;弹簧线径增大时,俘能器的谐振频率点呈现出逐渐升高的趋势,对应的峰值电压与峰值功率均呈现出显著的降低趋势。

(3)验证压电俘能器的充电效能。实施电容器充电实验与 LED 二极管点亮实验,当俘能器受到 X, Y 方向振动激励时,均能够点亮 22 个 LED 二极管,受 Z 方向振动时能够成功点亮 33 个 LED 二极管。结果表明,俘能器在不同方向振动下均展现出优异的电学性能,证实其为低功耗传感器供电的可行性。

作者贡献声明:

- 徐冬梅:论文构思和论文审核;
- 杨阳:结构设计、实验测试和论文撰写;
- 于思淼:论文构思、基金管理、论文审核与编辑写作;
- 张驰:建模、实验数据整理和分析;
- 潘家楠:仿真分析、实验设计;
- 张旭辉:论文构思和审核。

参考文献:

[1] ANG L M, SENG K P. Big sensor data applications in urban environments [J]. *Big Data Research*, 2016, 4: 1-12.

[2] SAH D K, AMGOTH T. Renewable energy harvesting schemes in wireless sensor networks: a Survey[J]. *Information Fusion*, 2020, 63: 223-247.

[3] 褚金奎,林木音,王寅龙,等. 偏振光传感器的无人船导航与编队应用[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(8): 1661-1669.

CHU J K, LIN M Y, WANG Y L, *et al.* Application of polarization sensor to unmanned surface vehicle navigation and formation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(8): 1661-1669. (in Chinese)

[4] 王鑫,孙立宁,施云波. 微型多参数水质传感器芯片的设计及应用[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(10): 2215-2226.

WANG X, SUN L N, SHI Y B. Design and appli-

cation of miniature multi-parameter water quality sensor chip [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(10): 2215-2226. (in Chinese)

[5] 李春龙,黄辉,梁云,等. 面向电力传感器的环境能量收集技术发展趋势及面临的挑战[J]. *中国电力*, 2021, 54(2): 27-35.

LI C L, HUANG H, LIANG Y, *et al.* Power sensor-oriented development and challenges of environmental energy harvesting technologies [J]. *Electric Power*, 2021, 54(2): 27-35. (in Chinese)

[6] SIANG J, LIM M H, LEONG M S. Review of vibration-based energy harvesting technology: mechanism and architectural approach [J]. *International Journal of Energy Research*, 2018, 42(5): 1866-1893.

[7] PRAJWAL K T, MANICKAVASAGAM K, SURESH R. A review on vibration energy harvesting technologies: analysis and technologies[J]. *The*

- European Physical Journal Special Topics*, 2022, 231(8): 1359-1371.
- [8] 阙君武, 王凯, 孟凡许, 等. 换向激励式压电振动俘能器[J]. 光学精密工程, 2023, 31(3): 371-379.
- KAN J W, WANG K, MENG F X, *et al.* Piezo-electric vibration harvester with excitation direction conversion [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(3): 371-379. (in Chinese)
- [9] 樊康旗, 刘朝辉, 王连松, 等. 从人体行走中收集能量的鞋上压电俘能器[J]. 光学精密工程, 2017, 25(5): 1272-1280.
- FAN K Q, LIU Z H, WANG L S, *et al.* Shoe-mounted piezoelectric energy harvester for collecting energy from human walking [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(5): 1272-1280. (in Chinese)
- [10] SEZER N, KOÇ M. A comprehensive review on the state-of-the-art of piezoelectric energy harvesting[J]. *Nano Energy*, 2021, 80: 105567.
- [11] 周生喜, 陶凯, 秦卫阳. 振动能量俘获专题序[J]. 力学学报, 2021, 53(11): 2891-2893.
- ZHOU S X, TAO K, QIN W Y. Topic sequence of vibration energy capture[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2021, 53(11): 2891-2893. (in Chinese)
- [12] 张坤, 赵毫杰, 冯伟, 等. 低频振动能量收集技术研究进展[J]. 仪表技术与传感器, 2022(8): 100-107.
- ZHANG K, ZHAO H J, FENG W, *et al.* Research advance in low-frequency vibration energy harvesting technology [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2022(8): 100-107. (in Chinese)
- [13] LIU H C, ZHONG J W, LEE C K, *et al.* A comprehensive review on piezoelectric energy harvesting technology: Materials, mechanisms, and applications [J]. *Applied Physics Reviews*, 2018, 5(4): 041306.
- [14] AHN J H, HWANG W S, CHO J Y, *et al.* A bending-type piezoelectric energy harvester with a displacement-amplifying mechanism for smart highways[J]. *Journal of the Korean Physical Society*, 2018, 73(3): 330-337.
- [15] 侯成伟, 单小彪, 宋汝君, 等. 风向自适应型涡激振动压电俘能器的试验研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(20): 120-127.
- HOU C W, SHAN X B, SONG R J, *et al.* Experimental study of orientation adaptive piezoelectric energy harvester based on vortex induced vibration [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(20): 120-127. (in Chinese)
- [16] 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 S N, GUO S H, LI X F. Performance analysis for a unimorph cantilever piezoelectric harvester[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, 31(19): 90-94. (in Chinese)
- [17] CHEN X G, LI Y M. Design, modeling and testing of a vibration absorption device with energy harvesting based on force amplifier and piezoelectric stack [J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 255: 115305.
- [18] ZHOU S X, HOBECK J D, CAO J Y, *et al.* Analytical and experimental investigation of flexible longitudinal zigzag structures for enhanced multi-directional energy harvesting [J]. *Smart Materials and Structures*, 2017, 26(3): 035008.
- [19] ZHAO Y, QIN Y, GUO L, *et al.* Modeling and experiment of a V-shaped piezoelectric energy harvester[J]. *Shock and Vibration*, 2018, 2018(1): 7082724.
- [20] KIM I H, JUNG H J, LEE B M, *et al.* Broad-band energy-harvesting using a two degree-of-freedom vibrating body [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98(21): 214102.
- [21] ZHAO N, YANG J, YU Q M, *et al.* Three-dimensional piezoelectric vibration energy harvester using spiral-shaped beam with triple operating frequencies[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(1): 015003.
- [22] 杨沥, 袁天辰, 杨俭, 等. 两自由度压电式轨道振动能量采集器[J]. 上海工程技术大学学报, 2019, 33(3): 225-231.
- YANG L, YUAN T C, YANG J, *et al.* Two-degree-of-freedom piezoelectric track vibration energy harvester [J]. *Journal of Shanghai University of Engineering Science*, 2019, 33(3): 225-231. (in Chinese)
- [23] QIAN F, XU T B, ZUO L. Design, optimiza-

tion, modeling and testing of a piezoelectric foot-wear energy harvester[J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 171: 1352-1364.

[24] LI Z J, YANG Z B, NAGUIB H, *et al.* Design

and studies on a low-frequency truss-based compressive-mode piezoelectric energy harvester [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2018, 23(6): 2849-2858.

作者简介:



徐冬梅(1987—),女,山东青岛人,博士后,副教授,2012年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,2018年于哈尔滨工业大学获得博士学位,现为西安科技大学副教授,主要从事压电俘能和压电精密驱动方面的研究。E-mail: dongmeixu@xust.edu.cn