

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407215

# 双L支架回扣式压电俘能器:设计与实验\*

赵庆玲 宋汝君 罗莲健 王郭泰 周海安

(山东理工大学机械工程学院 淄博 255000)

**摘要:**为了获得一种便携式、简单的振动俘能器,克服传统俘能器输出低、频率高等问题,提出了一种双L支架回扣式压电俘能器,结合了张拉结构的非线性特性与压电技术,有效提高了俘能系统的动态响应和输出性能。对俘能器进行实验探究,分析了外接电阻值、磁距、激振加速度和角度等因素对俘能器输出性能的影响。实验结果表明,俘能器存在最优外接电阻值使输出功率达到峰值,最优外接电阻值为200 k $\Omega$ 。磁力的引入能显著提高俘能器的输出性能。在磁铁距离为18 mm时,俘能器俘获的能量最多,其最佳输出性能在12.1 Hz时达到1.12 mW。此外,激振加速度对俘能系统的输出特性有着显著影响,激振加速度越大,俘能器的输出电压与输出功率也随之增大。在激振加速度为0.4 g,频率为12 Hz的条件下,俘能系统达到了1.39 mW的最大输出功率。双L支架回扣式俘能器在0°~45°角度范围内具有良好的输出电压与输出功率,具有在不确定激振方向条件下工作的优势。实际应用实验进一步证明,该俘能器能够持续输出较大且稳定的电压,为解决传统俘能器输出低等问题提供了有效的解决方案。

**关键词:** 振动能; 双L支架; 磁力; 压电; 俘能

**中图分类号:** TN384; TH113.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

## Double L bracket buckle type piezoelectric energy harvester: Design and experiment

Zhao Qingling Song Rujun Luo Lianjian Wang Guotai Zhou Haian

(School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China)

**Abstract:** In order to obtain a portable and simple vibration energy harvester and overcome the problem of low output of traditional energy harvesters, a double-L bracket kickback piezoelectric energy harvester was proposed, which combined the nonlinear characteristics of the tensile structure with piezoelectric technology, which could effectively improve the dynamic response and output performance of the energy harvester. The effects of external resistance, magnetic distance, excitation acceleration and angle on the output performance of the harvester were analyzed. The experimental results show that the output power reaches the peak value of the harvester at the optimal external resistance value, and the optimal external resistance value is 200 k $\Omega$ . The introduction of magnetic force can significantly improve the output performance of the energy harvester. At a magnetic distance of 18 mm, the harvester captures the most energy, and its optimal output performance reaches 1.12 mW at 12.1 Hz. In addition, the excitation acceleration has an obvious impact on the output characteristics of the energy harvesting system, and the output voltage and output power of the energy harvester also increase with the larger the excitation acceleration, and the maximum output power of the energy harvesting system reaches 1.39 mW under the condition of the excited acceleration of 0.4 g and the frequency of 12 Hz. The harvester has good output voltage and output power in the angle range of 0°~45°, and has the advantage of working under the condition of uncertain excitation direction. Practical application experiments further prove that the energy harvester can continuously output a large and stable voltage, which provides an effective solution to solve the problem of low output of traditional energy harvester.

**Keywords:** vibration energy; double L bracket; magnetic force; piezoelectricity; energy harvesting

收稿日期:2024-01-17 Received Date: 2024-01-17

\* 基金项目:山东省自然科学基金(ZR2021ME211)、山东省自然科学基金(ZR2022ME053)、山东省高等学校青年创新团队发展计划(2022KJ234)项目资助

## 0 引言

随着微电机系统和无线电传感技术快速发展,大量低功耗的电子设备出现并运用在各个领域中。但是上述电子设备供电使用传统的化学电池<sup>[1-2]</sup>,化学电池的使用量大并且需要定期更换或者充电,存在着很大的安全隐患和巨大的资源浪费问题<sup>[3]</sup>。如果废弃的化学电池得不到妥善处理,还会对自然环境造成严重污染,也会危害人们的生活环境<sup>[4]</sup>。

为了解决传统化学电池供电的问题,许多研究学者都在寻找环保的供电方式。环境中存在很多形式的能量,如太阳能<sup>[4]</sup>、振动能<sup>[5]</sup>、风能、温差能和潮汐能等<sup>[6-7]</sup>。其中,振动能是一种来源广泛、相对稳定且能量密度较高的能量<sup>[8]</sup>。将振动能转化为电能的方式主要有压电式<sup>[9]</sup>、电磁式<sup>[10]</sup>、静电式<sup>[11]</sup>和摩擦式<sup>[12]</sup>等。压电式是应用较为广泛的方式,它的结构简单,制造成本低<sup>[13-14]</sup>,输出性能也较好,因此受到了研究人员的广泛关注与研究。Wang等<sup>[15]</sup>研究了一种具有双外磁体的三稳态压电能量采集器。实验结果表明,双外磁体的三稳态压电能量采集器具有较好的输出性能。除了运用磁力非线性外,还有部分人对几何非线性进行研究。Narolia等<sup>[16]</sup>从旋转运动中受启发提出了一种剪切型压电能量采集器,压电片通过磁性剪切力振荡,提高了装置的输出功率。Zhou等<sup>[17]</sup>设计了一种中心对称结构的凸轮增频混合压电电磁俘能器。压电部分和电磁部分最大峰值电压分别为

53.74和3.16V。Han等<sup>[18]</sup>受蚊子翅膀振动启发提出了一种新型的多方向自适应压电俘能器。该俘能器实现了被动自适应旋转,无需人工和电源调整。实验显示,该装置能够实现多向振动能量的收集,还具有稳定方向上的电压输出。Hou等<sup>[19-20]</sup>从折纸结构中获得启发,提出了一种Orio型双稳态压电能量俘能器。用理论与实验的方法研究了俘能器的动态响应和俘能特性,俘能器的输出功率达到2.2mW,具有很大的供电潜力。从以上文献可以看出,几何结构非线性和磁力非线性都能提高俘能器输出性能,俘获更多能量。将压电理论与几何结构结合的研究越来越受关注,如折纸结构、车轮结构。然而,将张拉结构与压电理论结合的研究没有得到太多关注。鉴于此,本文提出一种受张拉结构启发的双L支架回扣式压电俘能器,引入磁力,将几何非线性与磁力非线性结合。

## 1 结构设计和工作原理

张拉结构具有非线性的特点,图1(a)显示的为经典简单张拉结构。它由两个支撑架结构和3根绳索组成,支撑架相对放置,由3个绳索连接在一起。受到图1(a)张拉结构的启发,将张拉结构的绳索去掉,上支架更换成L单支架,用铝板将L底支架和L单支架连接在一起。图1(b)是根据张拉结构提出的具有非线性的俘能装置,同时引入磁力,在装置的底部和顶部各加一对磁铁,如图1(c)所示。

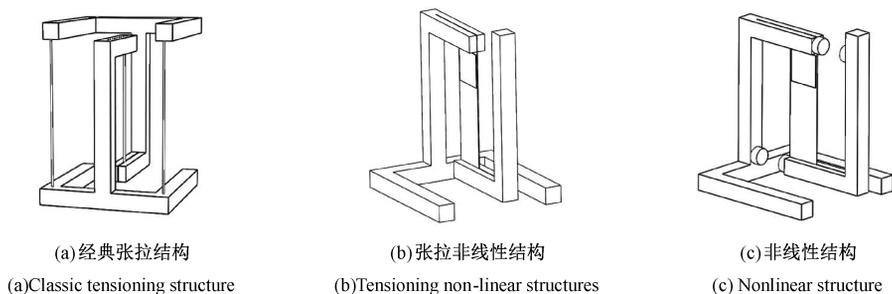


图1 张拉结构及其变形结构

Fig. 1 Tensioning structure and its deformation structure

绘制如图2所示的双L支架回扣式俘能器物理模型,该俘能器由L底支架、L单支架、弹性梁、压电片和磁铁组成。用粘合剂将压电片粘在弹性梁上形成一个压电梁。压电梁一端夹持在L底支架上方,另一端固定在L单支架横梁上。当装置受到外界激励时,L单支架进行左右摆动,使压电片发生弯曲,压电材料内部的晶格结构受力变形后使正负电荷发生上下偏移,导致压电材料两端产生电势差。电势差使电荷在电路中流动,从而产生电流,实现了将机械能转化为电能。该俘能器具有结构

简单、安装容易和制作成本低的优点。

## 2 实验平台制作与设置

实验测试平台如图3所示,样机制作采用3D打印技术,包括L底支架和L单支架,材质为PLA聚乳酸,弹性梁的材质为铝,压电片选用PZT-5H。实验测试装置由实验测试系统和数据采集系统组成。实验测试系统包括激励器、加速度计、功率放大器、控制器、计算机、外接电阻

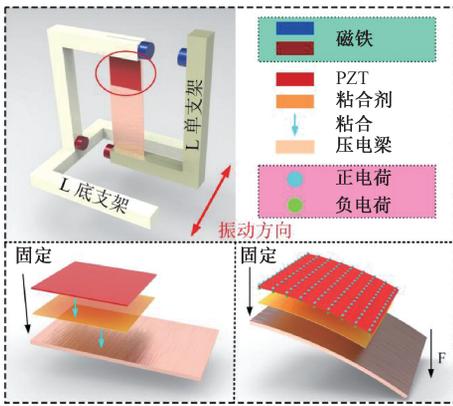


图 2 双 L 支架回扣式压电俘能器物理模型

Fig. 2 Physical model of double L bracket buckle type piezoelectric energy harvester

和 NI 数据采集卡。数据采集系统由计算机和 NI 数据采集卡组成,能实时显示和记录俘能器输出电压。表 1 列出了样机结构尺寸和材料参数。

表 1 俘能器的结构尺寸参数

Table 1 Structural size parameters of energy harvester

部件	参数	数值
PZT	长、宽、厚/mm	20、20、0.2
	密度 $\rho_p / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	7 386
	杨氏模量 $E_p / \text{GPa}$	58
压电梁	长、宽、厚/mm	70、22、0.4
	密度 $\rho_s / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2 700
	杨氏模量 $E_s / \text{GPa}$	69
L 底支架	长、宽、高/mm	80、80、100
L 单支架	长、宽、高/mm	60、10、100
磁铁	半径、厚/mm	5、5
	密度 $\rho_m / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	7 800

测试装置工作过程如图 3 右上背景框内所示。计算机对振动控制器进行设置,使振动控制器向功率放大器发送信号,然后驱动激振器根据设置进行工作。安装在激振器上的加速度计实时监测激振器振动状态,将信号反馈给振动控制器。振动控制器实时修整传输的信号,再次传送到激振器,确保激振器的正常和准确运行。NI 数据采集卡能收集通过外接电阻的输出电压,并保存输出电压值。

### 3 实验结果与分析

通过实验的方法,本章将探究外部电阻、磁力、夹持角度、激振加速度等因素对俘能器输出性能的影响。

#### 3.1 最优外接电阻值的测量

在装置中引入磁斥力,装置 L 底支架和 L 单支架的

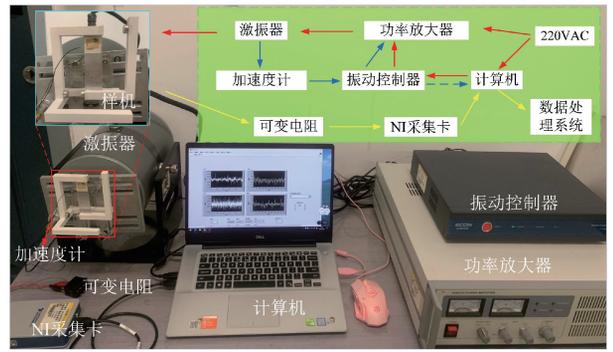


图 3 实验测试系统和数据采集系统示意图

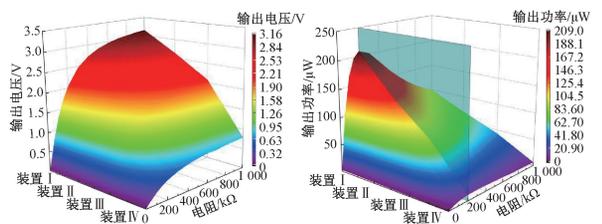
Fig. 3 Schematic diagram of experimental testing system and data acquisition system

上、下方均可放置磁铁。磁铁放置方式具有 4 种:L 单支架上侧放置一个磁铁,L 底支架不放,L 底支架和 L 单支架下侧放置一对磁铁,称为装置 I;L 底支架和 L 单支架上下均放置一对磁铁,称为装置 II;L 底支架和 L 单支架上侧设有一对磁铁,L 单支架下方放置一个磁铁,称为装置 III;把俘能器上所有磁铁去除,使其成为一个非磁性俘能装置,称为装置 IV。在激励加速度为 0.2 g,激振频率为 11 Hz 时,对 4 组不同磁铁放置的装置进行外接电阻值的探究。图 4(b) 显示的是同一频率下,4 种装置输出电压和输出功率随外接电阻增加的趋势图。由图可知,随着外接电阻值的增大,四个装置的输出电压都是先增大后趋于到平稳状态,装置 I 在相同条件下的输出电压值较大,装置 IV 的输出电压值较小。随着电阻值的增加,装置输出功率都是先升后降的趋势,并在最优电阻处具有最大的输出功率值,4 种装置的最优电阻值选取 200 k $\Omega$ 。



(a) 4 种磁铁放置位置

(a) Four types of magnet placement positions



(b) 不同电阻下的输出电压和功率

(b) Output voltage and power under different resistances

图 4 俘能器在不同外接电阻下的输出变化图

Fig. 4 Output variation diagram of energy harvester under different external resistances

### 3.2 磁力的作用

用图4(a)所示装置研究磁力对俘能系统输出性能的影响。在俘能器最优外接电阻值为200 kΩ,加速度为0.3 g的条件下,分别对几组装置进行实验,结果如图5所示。在9 Hz时,L单支架竖梁摆动幅度较大,横梁保持平稳,此时达到竖梁的共振频率点,输出功率出现先增后减的现象,但输出值较小,可忽略不计。随着频率的增加,竖梁处于竖直稳定状态,横梁开始增大摆动幅度,使系统输出功率随着频率的增大而增大,在共振频率12 Hz左右到达最大值后开始衰减。装置I和装置III输出功率值相差不大,都小于装置II的输出功率。装置IV的输出功率值最小,谐振频率点约为13.4 Hz。从图可知,引入磁力可以增加俘能器的输出功率值,磁斥力对俘能器的输出功率具有很大促进作用,并且使共振频率点向左发生偏移。双磁力作用的系统输出性能更好。这是因为两对磁力之间相互作用,使L单支架振动能增加。装置II在11.9 Hz时的输出功率为1.12 mW,装置III在12.2 Hz时的输出功率为0.85 mW,装置II输出功率在装置III的基础上优化了31.8%。本文将对装置II进行进一步的探究。

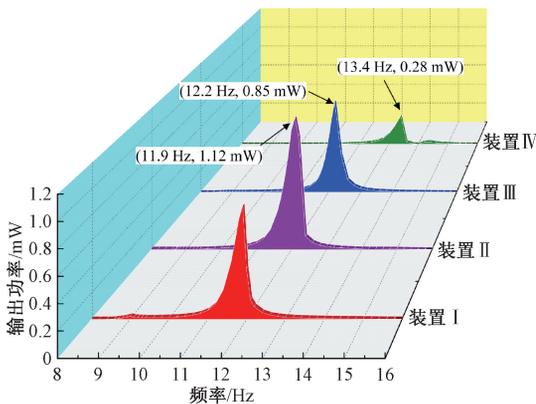


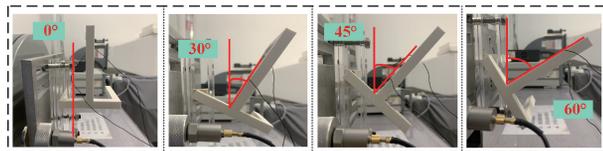
图5 不同装置输出功率与激振频率关系图

Fig. 5 Diagram of the relationship between output power of different devices and excitation frequency

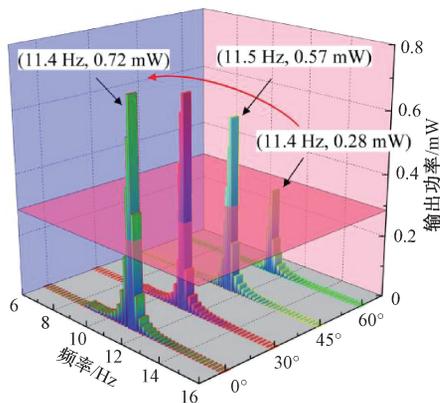
### 3.3 夹持角度的影响

利用装置II探究不同的夹持角度对俘能系统输出功率的影响。图6(a)展示了不同夹持角度的实验样机图。实验加速度设置为0.3 g,外接电阻值为200 kΩ,磁铁之间距离为20 mm,在此条件下探究振动台与俘能装置不同夹角输出功率的关系。夹持角度分别为0°、30°、45°和60°时,输出功率与激振频率的关系如图6(b)所示。当装置与激振台角度减小时,输出功率峰值会提高,例如,装置夹角为0°、30°和45°时的输出功率大于60°时的输出功率。夹角为60°的装置在11.4 Hz时输出功率最大,最大值为0.28 mW,输出效果不佳。45°夹角在

11.5 Hz时的最大输出功率为0.57 mW,是60°夹角输出值的2倍。传统俘能器的受力角度对输出性能存在较大程度影响,受力角度不同时,压电片内部晶格结构受力方向会不同,导致内部电荷位移和分布发生改变,受力方向与压电材料优势工作方向一致时才可输出较好性能。本文提出的俘能器俘能效果在0°~45°受夹角变化影响小,相比于传统俘能器,该俘能器具有在一定激振角度范围内输出性能良好的优点。



(a) 不同夹持角度样图  
(a) Sample images of different clamping angles



(b) 输出功率关系图  
(b) Output power variation chart

图6 不同夹持角度的样机图和对应的输出功率值  
Fig. 6 Prototype diagrams with different clamping angles and corresponding output power values

### 3.4 磁铁距离的影响

将激振加速度设置为0.3 g,装置外接200 kΩ的电阻值,对装置II进行磁距的实验探究。图7显示了磁铁距离对所提出的装置II输出性能的影响,由图可知,磁铁距离对装置输出性能有一定的影响。由图7(a)可知,俘能器具有两个共振频率点,输出电压值在第2个共振频率处获得最大值。第1个共振频率点是L单支架竖梁产生的,输出电压值较小。第2个共振频率点是L单支架横梁产生的,输出的电压值较大。由图7(b)知,上下两对磁铁距离都为14 mm时,装置在12.4 Hz处输出功率值最大为0.45 mW;磁铁距离为18 mm时,装置在12.1 Hz处输出功率值最大,最大值为1.12 mW。磁铁距离为18 mm时,俘能器输出功率值明显大于其他距离下的输出功率值,这是因为磁距为18 mm时磁斥力较大,使横梁摆动幅值增大,从而输出较大功率。磁铁距离为20 mm时,磁斥力很小,对装置几乎没有影响,横梁不受

磁斥力做简单的钟摆往返运动。因此,俘能器在磁铁距离为 18 mm 时的输出电压和输出功率最大,输出性能最好。

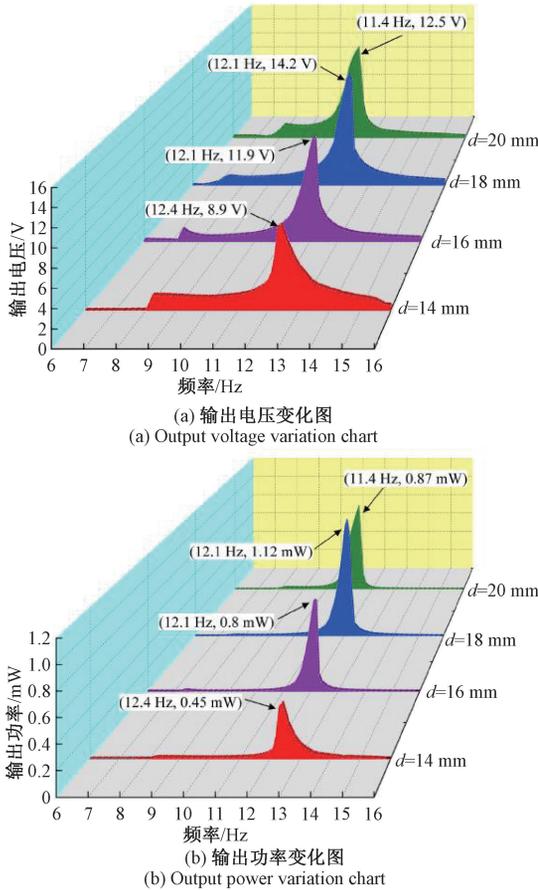


图 7 不同磁铁距离下俘能器的输出电压与输出功率  
Fig. 7 Output voltage and output power of energy harvester at different magnet distances

斥力较大,使横梁摆动幅值增大,从而输出较大功率。磁铁距离为 20 mm 时,磁斥力很小,对装置几乎没有影响,横梁不受磁斥力做简单的钟摆往返运动。因此,俘能器在磁铁距离为 18 mm 时的输出电压和输出功率最大,输出性能最好。

### 3.5 激振加速度的影响

当俘能器受到激振加速度激励时,压电材料会产生相应的振动或变形,使压电材料内部发生压电效应产生电能,激励加速度越大,俘能器振动幅值越大,输出功率值越大。在磁铁距离为 14 mm 时,探究激振加速度对装置输出特性的影响。在装置外接 200 kΩ 的电阻值的情况下进行实验,实验结果如图 8 所示。由图 8(a)可知,随着激振加速度的增加,俘能器输出电压值也逐渐增大。激振加速度从 0.3 g 增加到 0.4 g,输出电压值增大了 1.7 V;从 0.5 g 增加到 0.6 g,输出电压值增大了 0.7 V。

由此可知,俘能器输出电压增加幅度随着激振加速度的变大而缓慢减小。随着激振频率的增加,装置输出功率值增大。在激振加速度从 0.3 g 增加到 0.4 g 时,输出功率增幅最大。这是因为在 0.3 g 时,激励条件较弱,俘能器效果较差,因此输出功率值较小。在 0.4 g 时,激励强度增加,俘能器能获取足够的能量,梁的振幅增大,使俘能器输出功率值增大。

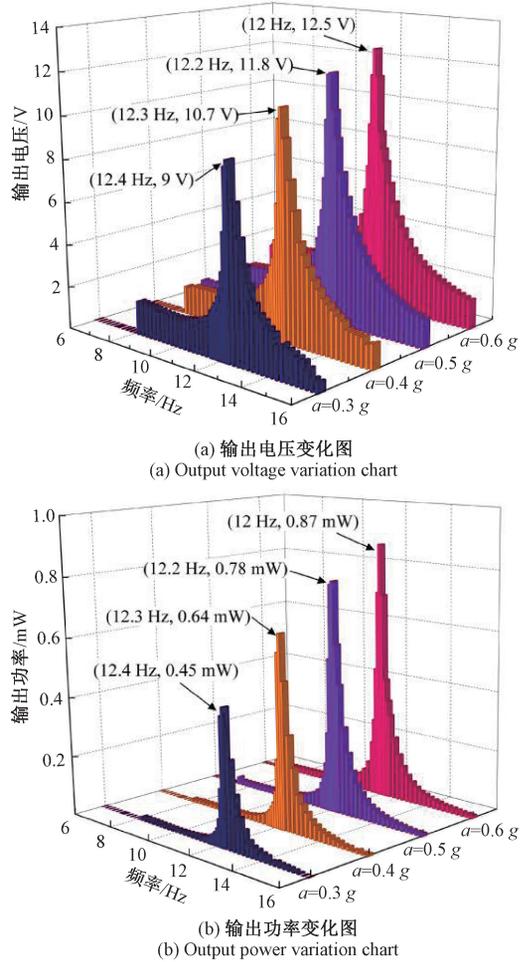
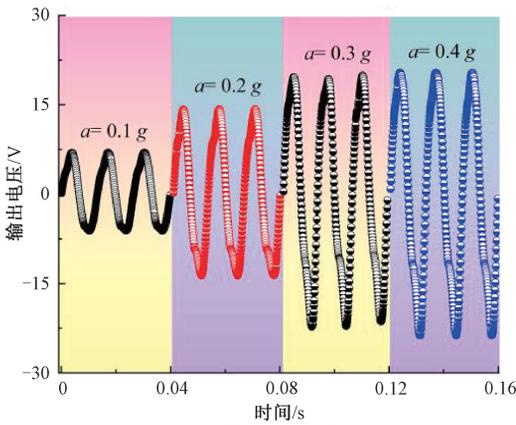
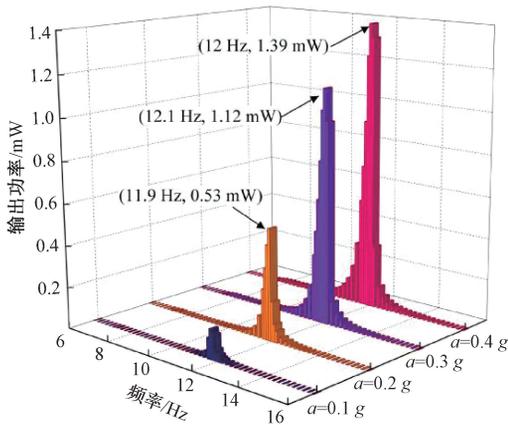


图 8 不同激振加速度下俘能器输出值的变化曲线  
Fig. 8 The variation curve of the output value of the energy harvester under different excitation accelerations

图 9 显示为激振加速度对俘能器输出性能的影响。当外接电阻为 200 kΩ,磁铁距离为 18 mm 时进行实验探究。由图 9 可知,增大激振加速度可以提高俘能系统的输出电压和输出功率值,使俘能系统具有更好的输出特性。在加速度为 0.2 g,俘能器输出功率在 11.9 Hz 处取得最大值,最大值为 0.53 mW;加速度增加到 0.3 g 时,俘能器在 12.1 Hz 取的最大功率值 1.12 mW。当加速度为 0.3 g 时,俘能器的共振频率向右发生偏移,此时输出功率峰值是 0.2 g 时输出功率峰值的 2.1 倍。



(a) 输出电压时域图  
(a) Time domain diagram of output voltage



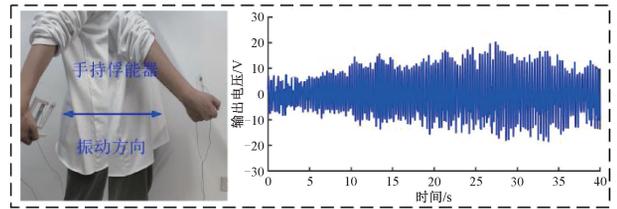
(b) 输出功率变化图  
(b) Output power variation chart

图9 在不同激振加速度下的输出电压与输出功率图

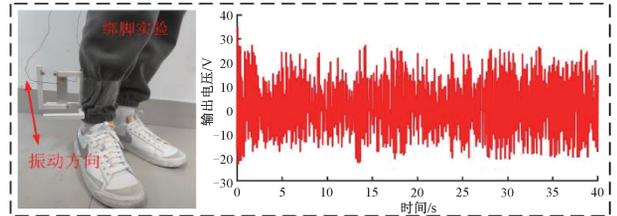
Fig. 9 Output voltage and output power diagram under different excitation accelerations

#### 4 俘能器的应用

为了研究该振动俘能器在人体应用效果,对俘能器进行人体实际实验,实验结果如图10所示。由图10(a)可知,行走时,手臂进行前后的摆动,摆动速度和幅度对俘能器都有影响,但由于该装置在激励方向改变时,仍有较好的输出,受激励方向影响较小。在人体行走过程中,随着手臂摆动速度加快和摆臂幅值的增大,俘能器瞬时输出电压也会随之增大,由图10(a)可以明显看出输出电压缓慢增大的过程。绑脚驱动俘能器时,俘能器有较大的瞬时输出电压,持续输出稳定。两种激励俘能器的方式都有较大的电压输出,且输出电压稳定性较好,能稳定持续为小型器件供电。



(a) 手持式及其瞬时输出电压值  
(a) Handheld and its instantaneous output voltage value



(b) 绑脚式及其瞬时输出电压值  
(b) Binding foot type and its instantaneous output voltage

图10 实际人体俘能实验

Fig. 10 Actual human energy harvesting experiment

#### 5 结论

本文提出了一种可将振动能转化为电能的双L支架回扣式压电俘能器结构。对俘能器进行实验探究,研究各因素对俘能器输出性能的影响,得到结果如下:

1) 俘能器存在最优电阻值,在最优电阻值下俘能系统输出功率值能够达到峰值。磁铁距离对俘能系统输出性能存在一定影响,随着磁铁间距离的增大,系统在共振频率下的输出功率值先升后降,在距离为18 mm时的输出功率值最大,在该距离时,俘能器做大幅度钟摆运动,俘获更多能量。

2) 激励加速度对系统的采集性能有较大的影响,提高激励加速度也能增加系统的输出功率,在激励加速度为0.4 g时,系统的输出功率最大值为1.39 mW。

3) 激振台和俘能器夹角在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 之间,该俘能器俘能效果在一定范围内受夹角影响小,该俘能器具有在一定激振角度范围内输出性能良好的优点。

#### 参考文献

[1] 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 CH 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.

- [ 2 ] MESCHINO M, WANG L, XU H T, et al. Low-frequency nanocomposite piezoelectric energy harvester with embedded zinc oxide nanowires [ J ]. *Polymer Composites*, 2021, 42: 4573-4585.
- [ 3 ] SHI G, TONG D K, XIA Y S, et al. A piezoelectric vibration energy harvester for multi-directional and ultra-low frequency waves with magnetic coupling driven by rotating balls [ J ]. *Applied Energy*, 2022, 310: 118511.
- [ 4 ] ZHANG X H, ZUO M, YANG W J, et al. A tri-stable piezoelectric vibration energy harvester for composite shape beam: nonlinear modeling and analysis [ J ]. *Sensors*, 2020, 20: 1370.
- [ 5 ] WANG Y, HE H L, XU R Q. An analytical model for a piezoelectric vibration energy harvester with resonance frequency tunability [ J ]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2015, 7: 1-8.
- [ 6 ] BAI Q, LIAO X W, CHEN Z W, et al. Snap-through triboelectric nanogenerator with magnetic coupling buckled bistable mechanism for harvesting rotational energy [ J ]. *Nano Energy*, 2022, 96: 107118.
- [ 7 ] 刘小锋,冯志敏,胡海刚. 压电材料动态称重传感器的融合设计方法 [ J ]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(4): 115-122.
- LIU X F, FENG ZH M, HU H G. Fusion design method of weigh-in-motion sensor based on piezoelectric material [ J ]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(4): 115-122.
- [ 8 ] HE L P, WANG ZH, WU X Q, et al. Analysis and experiment of magnetic excitation cantilever-type piezoelectric energy harvesters for rotational motion [ J ]. *Smart Materials Structures*, 2020, 29: 055043.
- [ 9 ] LI J W, WANG G T, YANG P P, et al. An orientation-adaptive electromagnetic energy harvester scavenging for wind-induced vibration [ J ]. *Energy*, 2024, 286: 129578.
- [ 10 ] 黄子军, 卞雷祥. 压电执行器与应变计复合的电压传感器 [ J ]. *电子测量与仪器学报*, 2023, 37(2): 244-250.
- HUNAG Z J, BIAN L X. Piezoelectric actuator and strain gauge composited voltage sensor [ J ]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2023, 37(2): 244-250.
- [ 11 ] ZOU D L, LIU G Y, RAO ZH SH, et al. Design of a high-performance piecewise bi-stable piezoelectric energy harvester [ J ]. *Energy*, 2022, 241: 122514.
- [ 12 ] CAETANO V J, SAVI M A. Star-shaped piezoelectric mechanical energy harvesters for multidirectional sources [ J ]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2022, 215: 106962.
- [ 13 ] 赵庆玲, 于蓬勃, 刘诗雨, 等. 几种压电电磁复合俘能器的发电性能实验研究 [ J ]. *西安交通大学学报*, 2022, 56(11): 195-204.
- ZHAO Q L, YU P B, LIU SH Y, et al. Experimental study on power generation performance of several types of piezoelectric-electromagnetic composite energy harvesters [ J ]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2022, 56(11): 195-204.
- [ 14 ] 陈科, 陈亚扣, 郑红梅. 多层 PVDF 压电薄膜输出电压研究 [ J ]. *电子测量与仪器学报*, 2018, 32(1): 201-208.
- CHEN K, CHEN Y K, ZHENG H M. Research on output voltage of multilayer PVDF piezo-films [ J ]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2018, 32(1): 201-208.
- [ 15 ] WANG G Q, LIAO W, ZHAO Z X, et al. Nonlinear magnetic force and dynamic characteristics of a tri-stable piezoelectric energy harvester [ J ]. *Nonlinear Dynam*, 2019, 97: 2371-2397.
- [ 16 ] NAROLIA T, GUPTA V K, PARINOV I A. Design and analysis of a shear mode piezoelectric energy harvester for rotational motion system [ J ]. *Journal of Advanced Dielectrics*, 2020, 10(3): 2050008.
- [ 17 ] ZHOU J W, HE L P, YU G, et al. Research on CAM frequency-increasing hybrid piezoelectric electromagnetic energy harvester with center symmetric structure [ J ]. *Renewable Energy*, 2022, 185: 959-969.
- [ 18 ] HAN M L, YANG X, WANG D F, et al. A mosquito-inspired self-adaptive energy harvester for multi-directional vibrations [ J ]. *Applied Energy*, 2022, 315: 119040.
- [ 19 ] HOU CH W, ZHANG X F, YU H, et al. Ori-inspired bistable piezoelectric energy harvester for scavenging human shaking energy: Design, modeling, and experiments [ J ]. *Energy Conversion Management*, 2022, 271: 116309.
- [ 20 ] HOU CH W, SHAN X B, ZHANG X F, et al. Magnetic frequency modulation mechanism of a non-contact magnetism-toggled rotary energy harvester coupling piezoelectric effect [ J ]. *Energy Conversion Management* 2023, 295: 117660.

## 作者简介



赵庆玲,2021年于山东理工大学获得学士学位,现为山东理工大学硕士生,主要研究方向为振动能量的俘获与应用。

E-mail: zqlzhaoqingling@163.com

**Zhao Qingling** received her B. Sc. degree from Shandong University of Technology in 2021. Now she is a M. Sc. candidate of Shandong University of Technology. Her main research interests include capture and application of dynamic energy.



宋汝君(通信作者),2011年于山东科技大学获得学士学位,2016年于哈尔滨工业大学获得博士学位,现为山东理工大学副教授,主要研究方向为振动能量收集。

E-mail: songrujun@sdut.edu.cn

**Song Rujun** (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Shandong University of Science and Technology in 2011 and Ph. D. degree from Harbin Institute of Technology in 2016, respectively. Now he is an associate professor at Shandong University of Technology. His main research interest includes vibration energy collection.