

DOI: 10.13382/j.jemi.B2508308

# 变振角式双端共振宽体压电俘能器\*

牛钟锐<sup>1</sup> 臧佳林<sup>1</sup> 常文燕<sup>1</sup> 司马中文<sup>1</sup> 宋汝君<sup>1,2</sup>

(1. 山东理工大学机械工程学院 淄博 255000; 2. 山东国创精密机械有限公司 滨州 251700)

**摘要:**传统俘能器存在能量转换效率低、工作频带范围小等问题,为了获得一种高性能、低成本的压电俘能器,提出了一种变振角式双端共振宽体压电俘能器。该俘能器以中心对称型加宽悬臂梁为振动载体,夹持端位于中轴线处,以中部夹持双振动端激励的模式工作,通过在宽梁面上移动质量块来改变其振角,并通过此设计优化了系统的动态响应特性。研究通过搭建激励器实验平台并制作实验样机进行控制变量实验,实验结果表明,俘能器在一定外接电阻下有最优的输出功率;振角的改变能提高俘能器的输出性能;在质量块增加时系统输出功率增加;在20°夹持角度,激振加速度为0.4g,频率为17.8 Hz时,俘能器达到最优的输出功率为4.66 mW;通过改变力臂长短来改变输出性能和谐振频率,可以通过并列多个力臂不同的装置来拓宽工作频带。通过中心对称悬臂梁结构与可变振角设计,实现了压电梁复合形变下的动态响应优化,为振动能量采集提供了新的理论依据。

**关键词:** 压电俘能; 振动能; 变振角; 中心对称式; 宽梁

**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

## Variable angle double ended resonant wide body piezoelectric energy harvester

Niu Zhongrui<sup>1</sup> Zang Jialin<sup>1</sup> Chang Wenyan<sup>1</sup> Sima Zhongwen<sup>1</sup> Song Rujun<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China;

2. Shandong Guochuang Precision Machinery Co., Ltd., Binzhou 251700, China)

**Abstract:** Traditional energy harvesters have problems such as low energy conversion efficiency and narrow operating frequency bands. To obtain a high-performance and low-cost piezoelectric energy harvester, a variable vibration angle dual-end resonance wide-body piezoelectric energy harvester is proposed. This harvester uses a centrally symmetric widened cantilever beam as the vibration carrier, with the clamping end located at the central axis, and works in a mode of mid-span clamping with dual vibration end excitation. The vibration angle is changed by moving the mass block on the wide beam surface, and the dynamic response characteristics of the system are optimized through this design. In this study, a vibration exciter experimental platform was built and an experimental prototype was made to carry out controlled variable experiments. The experimental results show that the harvester has the optimal output power under a certain external resistance; the change of vibration angle can improve the output performance of the harvester; the system output power increases when the mass block increases; at a clamping angle of 20°, excitation acceleration of 0.4g, and frequency of 17.8 Hz, the harvester reaches the optimal output power of 4.66 mW; the output performance and resonant frequency can be changed by altering the length of the force arm, and the operating frequency band can be widened by paralleling multiple devices with different force arms. This study realizes the optimization of dynamic response under the composite deformation of the piezoelectric beam through the centrally symmetric cantilever beam structure and variable vibration angle design, providing a new theoretical basis for vibration energy harvesting.

**Keywords:** piezoelectric energy harvesting; vibration energy; variable vibration angle; centrosymmetric form; wide beam

收稿日期: 2025-04-13 Received Date: 2025-04-13

\* 基金项目: 中国博士后科学基金(2025M771362)、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项目(2022KJ234)资助



表 1 俘能器的结构尺寸参数

Table 1 Structural size parameters of energy harvester

部件	符号	数值
压电片尺寸/mm	$l_1, w_1$	30, 20
压电片厚度/mm	$t_p$	0.2
压电片密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$\rho_p$	7 500
悬臂梁尺寸/mm	$L_1, L_2, L_3, W_1$	65, 60, 73, 64
悬臂梁厚度/mm	$t_c$	0.5
悬臂梁密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$\rho_c$	2 700
固定支架宽度/mm	$w_b$	10
质量块尺寸/mm	$D$	10
质量块厚度/mm	$t_m$	5
质量块密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$\rho_m$	7 800
其他尺寸标注/mm	$R, w_2, w_3$	100, 12, 50
角度标注/( $^\circ$ )	$\theta_1, \theta_2, \theta_3$	33.69, 20, 146.31
重力加速度/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ )	$g$	10
杨氏模量/GPa	$E_p$	63

为了探究振角变化时对发电性能的影响,给出了 3 种夹持角度如图 2(b) 所示,对应的质量块在梁的 I、II、III 位置处,3 种角度对应的是压电片长度方向上的轴线与水平线的夹角,其中绿色的位置 IV 表示质量块相对于水平放置位置 I 在竖直方向移动了 50 mm,目的是探究压电片在受弯扭复合形变时的发电效率;3 种振角角度分别为  $0^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $33.69^\circ$ ,这 3 种振角角度取水平位置和压电片对角线与水平线的角度为最小和最大的振角角度,分别为  $0^\circ$  和  $33.69^\circ$ ,为了有较高的实验数据对比度,再取其中间偏大一点的振角  $20^\circ$ ,组成一组对照组。其中 I、II、III 3 处质量块距离对称中心的距离均为  $R$ ,在后续实验中也通过改变质量块的质量来探究压电俘能器的输出性能。

## 2 实验样机制作与实验平台搭建

实验设施如图 3(a) 所示,包括激振器、加速度计、功率放大器、激振台控制器、计算机、变阻器和 NI 数据采集卡。实验样机包括铝制梁、PZT-5H 压电片、塑料固定支架以及磁铁作为质量块放置于梁的两侧。

操作流程如图 3(b) 所示,计算机连接激振台控制器,控制激振器进行工作,激振器将对实验样机进行正弦激励。实验样机上两根导线一端贴于压电片和梁上,另一端连接变阻器,NI 数据采集卡同时连接变阻器与电脑,将采集的数据输入到电脑,通过编程后的 LabVIEW 软件采集相应数据。最终将数据利用 MATLAB 软件进行进一步处理。

## 3 实验测试与分析

通过实验测试探究振角、外接电阻、激振加速度、质

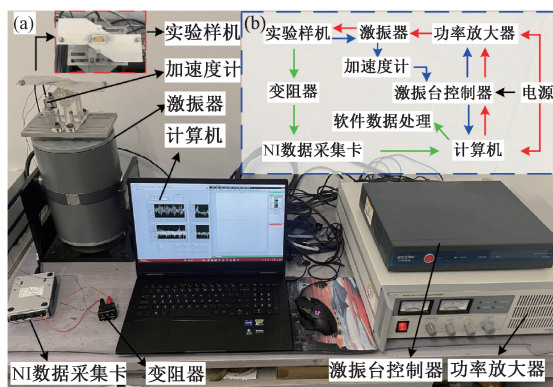


图 3 实验平台示意图以及操作流程

Fig. 3 Schematic diagram and operation flowchart of the experimental platform

量块质量、力臂长短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试

为了测试该俘能器功率输出最佳时的电阻值,采用上述实验平台装置 I 进行随负载电阻变化的功率响应实验,将激振加速度设为  $0.2g$ ,质量块质量为  $5\text{ g}$ 。如图 4(a) 所示,在激振台激振频率一定的情况下,逐渐增大变阻器阻值,俘能器的输出随电阻值的增大而增大,在  $R = 130\text{ k}\Omega$  时输出功率达到最优状态,之后将以此电阻值测试其他变量对俘能器的性能影响。

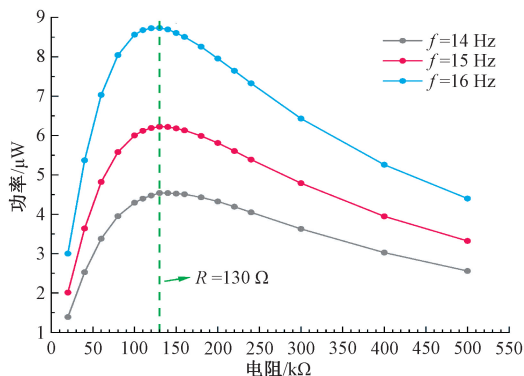


图 4 不同外接电阻下的输出功率及电压响应

Fig. 4 Corresponding output power and voltage under different external resistors

### 3.2 激振加速度的影响

激振台的工作加速度会较大程度影响压电俘能器的输出性能。在质量块质量与振角的设置如图 2 位置 I 所示,在其不变的情况下,研究加速度的变化对俘能系统输出性能的影响。在俘能器最优外接电阻值为  $130\text{ k}\Omega$ ,质量块质量为  $5\text{ g}$  的条件下,分别对装置进行激振加速度为  $0.2g$ 、 $0.25g$ 、 $0.3g$ 、 $0.35g$ 、 $0.4g$  的实验,输出功率以及电压响应结果如图 5 所示。在俘能器激振加速度为

0.2g、0.25g、0.3g、0.35g、0.4g 条件下,最优输出功率分别为 0.85、1.14、1.74、2.32、3.17 mW,最优输出功率由 0.85 mW 增加到了 3.17 mW,输出功率提升了 373%,俘能器输出效果显著提升,其最优激振频率在 20.2 Hz 左

右,此时达到装置的共振频率。可以看出俘能器的输出功率随着激振加速度的提升而提升,为了保证装置不产生塑性变形以及损坏压电片,将不再继续增大激振加速度来进行实验。

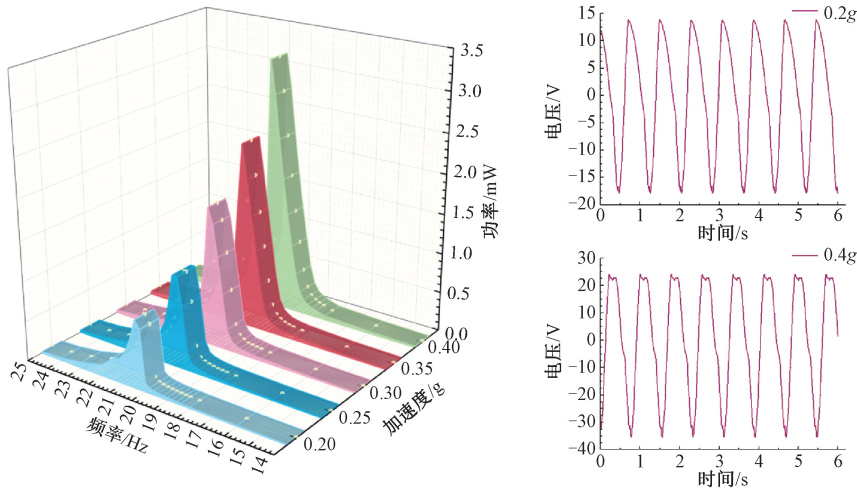


图 5 不同激振加速度下的输出性能

Fig. 5 Output performance under different excitation accelerations

### 3.3 振角改变的影响

测试两组对照实验,第 1 组为在装置位置 I 和 IV 的情况下进行实验,这两组实验样机均为水平放置,通过移动质量块位置来增加扭矩,探究其弯扭复合形变时的发电效率;第 2 组对照实验为 I、II、III 的对照,通过改变振角,探究振角的改变对俘能器输出性能的影响。图 6 所示为不同夹持角度的实验样机俯视图,俘能器外接电阻设置为 130 kΩ,加速度设置为 0.4g,质量块采用 5 g,夹持角度分别为 0°、20°、33.69°。

为单独的一组对照实验,在没有改变夹持方式的情况下将质量块竖直方向上移动了  $w_3$  的距离,  $\theta_1$ -I 在改变质量块的位置之后,使压电片增加了纵向的形变,通过改变质量块位置来改变压电片弯扭形变方式,来探究是否对俘能器输出有影响。如图 7(a)、(b) 所示,在位置 I 上的最优输出频率在 20.6 Hz,最优输出功率为 3.17 mW,位置 II 上的最优输出频率在 18.6 Hz,最优输出功率为 2.55 mW,在位置 I 处有较大的输出功率,在位置 II 处所达到最优输出功率所需的激振频率较小。

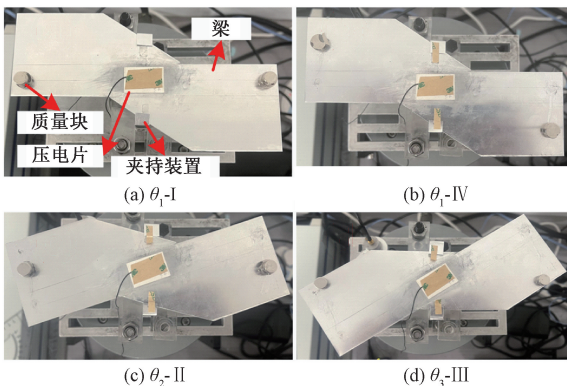


图 6 不同振角样图

Fig. 6 Sample drawings of different vibration angles

图 7 所示为功率输出图以及功率输出最大时的电压响应图。俘能器输出功率如图 7(a) 所示,图 7(b)~(e) 波形分别对应图 6(a)~(d) 4 种样机。  $\theta_1$ -I 与  $\theta_1$ -IV 作

其中  $\theta_1$ -I、 $\theta_2$ -II、 $\theta_3$ -III 为 1 组对照实验,探究振角发生变化时对俘能器输出性能的影响。改变振角后,压电片的弯曲方向发生改变,由原来沿长度方向的弯曲形变到沿对角线方向的弯曲形变。由图 7 可知,在改变振角后性能输出略微下降,但所需激振频率有所下降,所以改变振角后对采集较低频率下的振动能有所优势。

### 3.4 质量块质量大小的影响

在激振加速度为 0.4g,外接电阻值为 130 kΩ 的条件下,分别对  $\theta_1$ -I、 $\theta_1$ -IV、 $\theta_2$ -II、 $\theta_3$ -III 4 组装置进行了变换质量块质量的实验。实验采用 3 种质量块的质量分别为  $-M=2$  g、 $M=5$  g、 $+M=8$  g,在梁的两端分别放置此重量的质量块。

图 8(a)~(d) 所示分别为在 3 种质量块质量大小的情况下  $\theta_1$ -I 的输出功率和输出电压,  $\theta_1$ -IV 的输出功率和输出电压,  $\theta_2$ -II 的输出功率和输出电压,  $\theta_3$ -III 的输出功率和输出电压。对比图 8 数据可知,在质量块的质量从 2 g 提升到 8 g 后俘能器的输出性能分别提高了

130%、149%、129%、68%，同时  $\theta_1$ -I 与  $\theta_1$ -IV 两组数据在质量块质量为 8 g 时输出性能最好。 $\theta_1$ -I 在 18.6 Hz 时达到其共振频率，输出功率为 4.65 mW； $\theta_1$ -IV 在 17.8 Hz

时达到共振频率，输出功率也为 4.66 mW。并且  $\theta_1$ -IV 在达到最优输出功率时的共振频率要低，输出电压波形稳定。

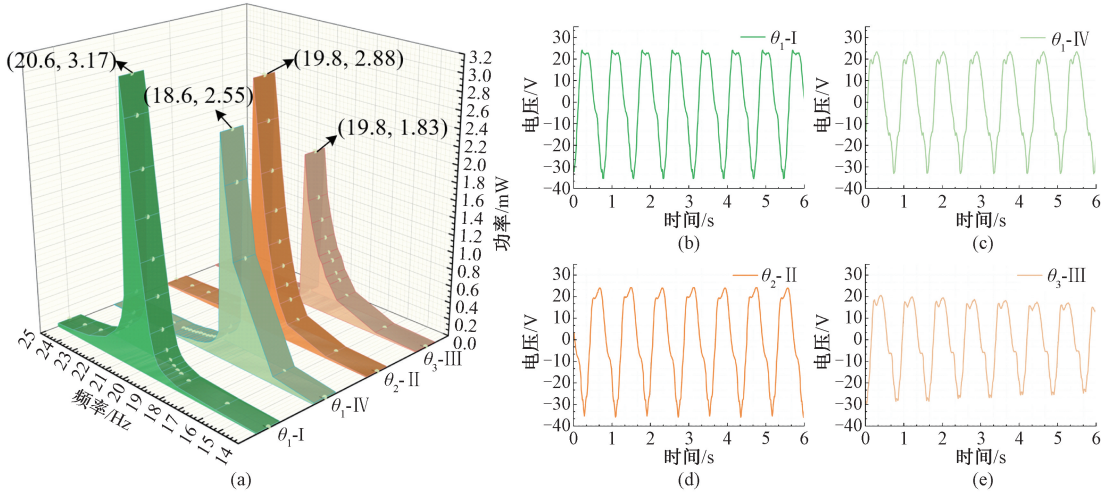
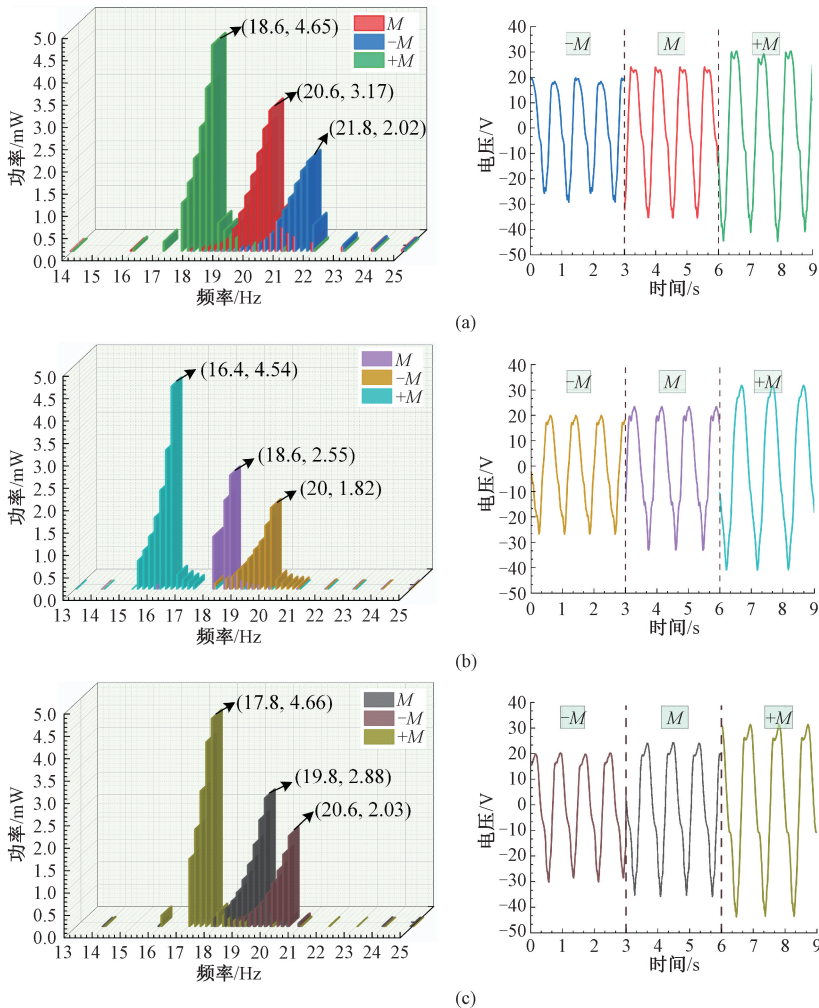


图 7 变振角后输出性能图

Fig. 7 Performance diagram of output after variable vibration angle



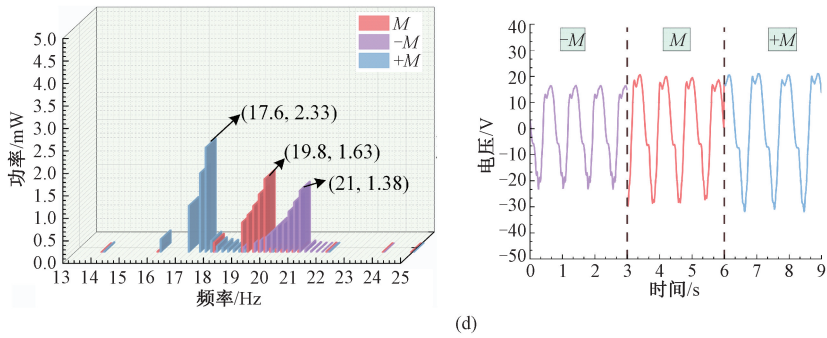


图 8 不同质量块质量下输出性能

Fig. 8 Output performance graph under different block qualities

### 3.5 力臂长短的影响

振动源也就是装置中心距离附加质量块的距离为该装置力臂的长度,力臂的长度影响该俘能器的输出性能。实验激振加速度设置为 0.4g,外接电阻阻值为 130 kΩ,质量块采用 5 g。图 9 所示为实验装置的质量块位置以及装置安装图,分别对水平位置以及振角为  $\theta = 30^\circ$  位置处进行实验; $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  从长到短分别为 3 种不同长度的力臂,长度分别为 9、8、7 cm 分别为每个质量块的距离间隔  $d = 1$  cm。

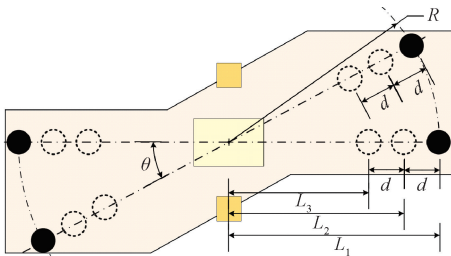


图 9 改变力臂长短

Fig. 9 Change arm length

图 10 所示为实验改变力臂长度的实验数据,图 10(a)为水平位置改变力臂长度后的输出功率与电压,图 10(b)为振角为  $\theta$  改变力臂长度后的输出功率与电压。由实验数据可知,改变力臂长短后改变了谐振频率,使俘能器在不同频率的振动源下有着峰值输出。

在水平位置下,力臂长度从  $L_3$  变化到  $L_1$ ,俘能器的输出功率从 1 mW 上升到 2.59 mW,输出功率依次提高了 57.00%、64.97%,其中输出功率和电压分别在 24、21.4、19 Hz 处达到峰值。在振角为  $\theta$  位置下,力臂长度从  $L_3$  变化到  $L_1$ ,俘能器输出功率从 0.76 mW 上升到 1.76 mW,输出功率依次提高了 61.84%、43.09%,其中输出功率和电压分别在 23.8、21.4、19.4 Hz 处达到峰值。在改变力臂长短后,俘能器在达到谐振频率时都有稳定的电能输出,并且在加长力臂的情况下输出功率和电压有一定的提升。因此,该俘能器可以通过改变力臂

长短来适应不同振动频率环境下的工作。

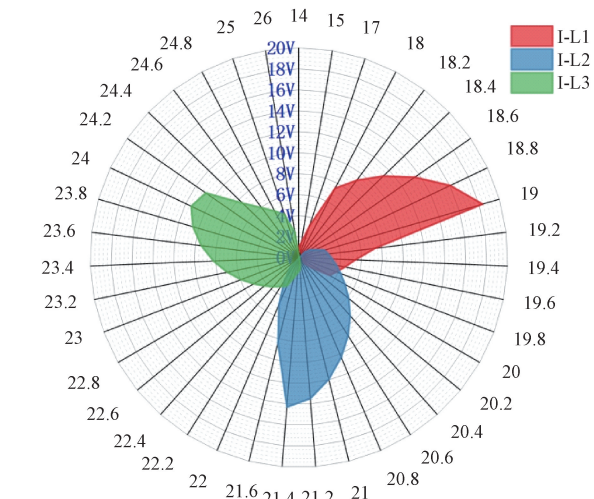
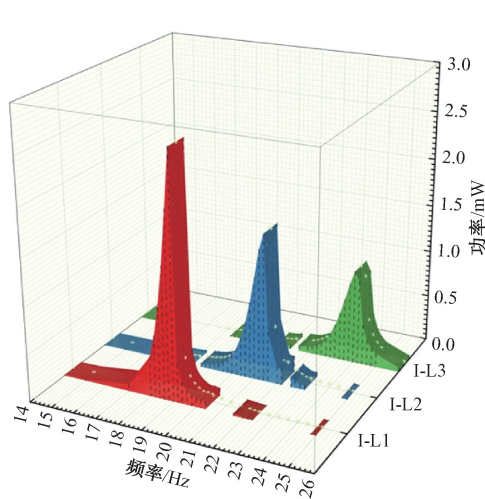
## 4 俘能器的应用

研究的变振角式双端共振宽体压电俘能器具有良好的输出性能以及动态响应,表 2 为与本文研究相似的压电俘能器的性能比较。其中文献[18]的实验在振动台进行,保持振动加速度始终为 0.1g,最终测得测得圆弧螺旋型能量收集器的谐振频率为 158 Hz,最大功率为 53.5  $\mu$ W;文献[19]使用机械振动器,激励加速度为 0.2  $m/s^2$ ,激振频率在 9.2 Hz 下产生了 29.0  $\mu$ W 的平均功率输出;文献[20]的实验样机谐振频率为 15.18 Hz,在振动器加速度为 0.1g 的条件下最佳输出功率为 122.65  $\mu$ W;文献[5]通过仿真实验,采用恒定基础位移振幅 3.5 mm,俘能器在 19~29 Hz 频率范围内输出 2~3 mW 的平均功率。

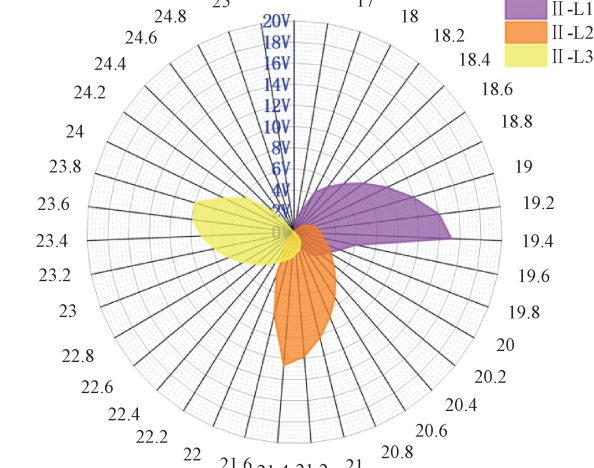
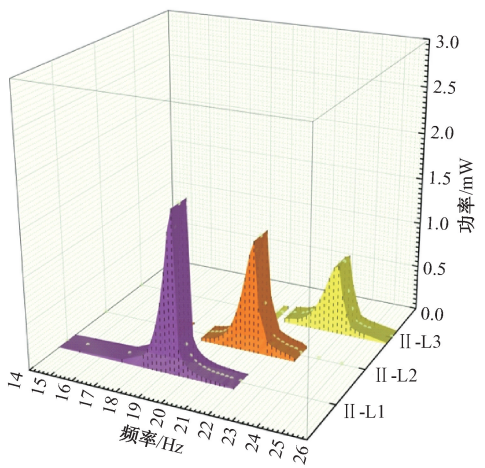
表 2 本研究与其他研究的俘能器性能对比

Table 2 Comparison of energy harvester performance between this study and other studies

样机	频率/Hz	功率/mW	结构
文献[18](2023)	153	0.055 2	压电片 悬臂梁 质量块
文献[19](2022)	9.2	0.029	(a) Piezoelectric energy harvester (b) Schematic diagram
文献[20](2021)	15.18	0.122 65	(a) Piezoelectric energy harvester (b) Schematic diagram
文献[5](2022)	19~29	2~3	The single harvester Controlling the inclination angle of tip mass
本文	17.8	4.66	固定支架 压电片 质量块



(a)



(b)

图 10 改变力臂长度实验数据

Fig. 10 Experimental data diagram of changing arm length

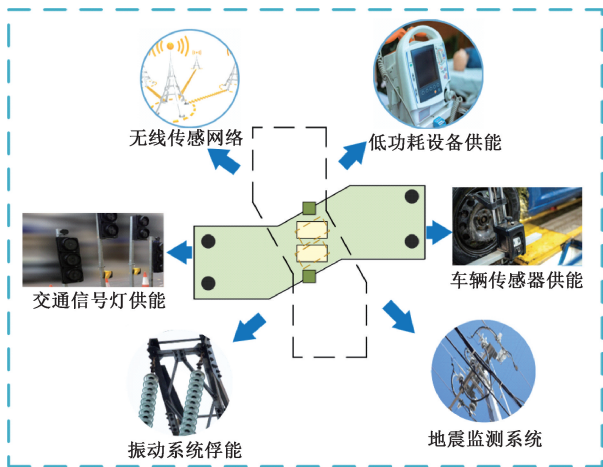


图 11 俘能器的应用场景

Fig. 11 Application scenarios of energy harvester

应用场景如图 11 所示,在实际应用过程中,可根据应用场景增加结构振动端,并且该俘能器结构为宽面梁结构,可阵列多个压电片,并有多种工作模式,多端振动的俘能方式也增加了该结构的动态响应。

### 5 结论

本文提出了一种变振角式双端共振宽体压电俘能器,研究通过改变各种实验因素,探究了俘能器的性能变化,得到如下结论:

俘能器在改变激励加速度的情况下,加速度从 0.2g 增加到 0.4g 时,最优输出功率由 0.85 mW 增加到 3.17 mW,输出功率提升了 373%;当振角在 0° ~ 20° 变化时能将共振频率从 20.6 Hz 优化到 18.6 Hz;

当质量块质量从 2 g 提升到 8 g 后,4 种方案的俘能器的输出性能分别提高了 130%、149%、129%、68%,并在夹角为 20° 时达到了最优输出功率 4.66 mW,并有相对较低的共振频率 17.8 Hz。通过改变力臂的长度可以实现在不同振动频率环境下的俘能,在水平位置下,力臂长度从  $L_3$  变化到  $L_1$ ,俘能器的输出功率从 1 mW 上升到 2.59 mW,输出功率依次提高了 57.00%、64.97%。

本文研究以结构创新为核心研究思路,改变了传统悬臂梁的固定端,通过两端增加质量激励的模式,增强了俘能器的输出功率;设计宽体梁,以此实现多压电片阵列安装以及改变振角的目的,最终通过实验验证了该俘能器的性能。未来结合新型压电材料以及结构自适应调整,实现更精细化的振角等参数的调整。

### 参考文献

- [1] 曾东红,李明,李志远,等. 基于改进双滑模的永磁同步电机无传感器控制 [J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(4): 16-22.
- ZENG D H, LI M, LI ZH Y, et al. Sensorless control of permanent magnet synchronous motor based on improved dual sliding mode [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42(4): 16-22.
- [2] PANDA S, HAJRA S, MISTEWICZ K, et al. Piezoelectric energy harvesting systems for biomedical applications [J]. Nano Energy, 2022, 100: 107514.
- [3] CHEN K Y, GAO F, LIU Z Y, et al. A nonlinear M-shaped tri-directional piezoelectric energy harvester [J]. Smart Materials Structures, 2021, 30(4): 045017.
- [4] FU X, CAO Y, SONG X, et al. Flexible piezoelectric energy harvesters with mechanoluminescence for mechanical energy harvesting and stress visualization sensing [J]. Advanced Functional Materials, 2025, 35(2): 2412507.
- [5] KOURITEM S A, AL-MOGHAZY M A, NOORI M, et al. Mass tuning technique for a broadband piezoelectric energy harvester array [J]. Mechanical Systems Signal Processing, 2022, 181: 109500.
- [6] WAN C, TIAN H, SHAN X, et al. Enhanced performance of airfoil-based piezoelectric energy harvester under coupled flutter and vortex-induced vibration [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2023, 241: 107979.
- [7] WANG H, ZHAO Q, SONG R, et al. Design and performance study of low frequency magnetic coupling bistable piezoelectric and electromagnetic energy harvester [J]. Energy, 2025: 135178.
- [8] 王刚,魏小源,黄玲,等. 钢轨检测压电超声换能器宽频阻抗匹配研究 [J]. 电子测量技术, 2023, 46(1): 57-64.
- WANG G, WEI X Y, HUANG L, et al. Research on broadband impedance matching of piezoelectric ultrasonic transducers for rail detection [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(1): 57-64.
- [9] PAN X, WU Y, WANG Y, et al. Mechanical energy harvesting based on the piezoelectric materials: Recent advances and future perspectives [J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 497: 154249.
- [10] TIAN H, SHAN X, LI X, et al. Enhanced airfoil-based flutter piezoelectric energy harvester via coupling magnetic force [J]. Applied Energy, 2023, 340: 120979.
- [11] TIAN H, YURCHENKO D, LI Z, et al. Dumbbell-shaped piezoelectric energy harvesting from coupled vibrations [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2024, 281: 109681.
- [12] BAO B, WANG Q, WU N, et al. Hand-held piezoelectric energy harvesting structure: Design, dynamic analysis, and experimental validation [J]. Measurement, 2021, 174: 109011.
- [13] ZHANG Z, XIANG H, TANG L. Modeling, analysis and comparison of four charging interface circuits for piezoelectric energy harvesting [J]. Mechanical Systems Signal Processing, 2021, 152: 107476.
- [14] QI N, DAI K, WANG X, et al. Optimization for piezoelectric energy harvesters with self-coupled structure: A double kill in bandwidth and power [J]. Nano Energy, 2022, 102: 107602.
- [15] 赵庆玲,宋汝君,罗莲健,等. 双L支架回扣式压电俘能器:设计与实验 [J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(6): 34-41.
- ZHAO Q L, SONG R J, LUO L J, et al. Double L bracket buckle type piezoelectric energy harvester: Design and experiment [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(6): 34-41.
- [16] ZHANG X, HUANG X, WANG B. A quad-stable nonlinear piezoelectric energy harvester with piecewise stiffness for broadband energy harvesting [J]. Nonlinear

Dynamics, 2024, 112(22): 19633-19652.

- [17] LI D, WANG C, CUI X, et al. Recent progress and development of interface integrated circuits for piezoelectric energy harvesting [J]. Nano Energy, 2022, 94: 106938.
- [18] 齐炫凯, 仇超群, 王子杰, 等. 圆弧螺旋型压电能量收集器的有限元模型研究 [J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(3): 146-154.  
 QI X K, QIU CH Q, WANG Z J, et al. A finite element model of circular arc spiral piezoelectric energy harvester [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(3): 146-154.
- [19] WANG J X, LI J C, SU W B, et al. A multi-folded-beam piezoelectric energy harvester for wideband energy harvesting under ultra-low harmonic acceleration [J]. Energy Reports, 2022, 8: 6521-6529.
- [20] CHEN K, GAO Q, FANG S, et al. An auxetic nonlinear piezoelectric energy harvester for enhancing efficiency and bandwidth [J]. Applied Energy, 2021, 298: 117274.

## 作者简介



Niu Zhongrui received his B. Sc. degree from Shandong University of Technology in 2023. Now he is a M. Sc. candidate of Shandong University of Technology. His 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.