

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407359

T型磁力耦合压电俘能器发电性能研究*

罗莲健¹ 赵文浩² 宋汝君¹ 常文艳¹ 王郭泰¹

(1. 山东理工大学机械工程学院 淄博 255000; 2. 淄博宇海电子陶瓷有限公司 淄博 255200)

摘要:针对传统压电俘能器存在共振频率高、输出功率低的问题,提出了一种T型磁力耦合压电俘能器。通过引入两侧互异的磁力耦合作用使压电梁产生弯-扭振动,以增加压电梁的形变量,进而提高俘能器输出电压响应。首先分析了该压电俘能器的工作原理及结构设计,并对其振动特性进行仿真分析,最后,制作试验样机进行实验测试,通过仿真分析与实验测试验证了该压电俘能器的有效性。结果表明,存在最优负载电阻使压电俘能器输出功率最大。调整装置自由端质量块质量可对俘能频率进行控制,增大激励加速度能显著提高俘能器输出功率。引入磁力耦合,并通过对比实验分析了磁力耦合引起的弯-扭复合运动对俘能器输出性能的影响,当激励加速度为0.2 g时,磁力耦合装置Ⅲ由于发生弯扭复合振动,其工作频率与最大输出功率分别为5.5 Hz和3.71 mW。相比无磁力耦合的俘能装置Ⅰ,输出功率提高了约47%,因此,该T型磁力耦合压电俘能器在低频环境下具有较高输出效率。

关键词:磁力耦合;弯-扭耦合振动;压电俘能;低频

中图分类号: TN39; TH113.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

Research on power generation performance of T-type magnetically coupled piezoelectric energy harvester

Luo Lianjian¹ Zhao Wenhao² Song Rujun¹ Chang Wenyan¹ Wang Guotai¹

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

2. Zibo Yuhai Electronic Ceramics Co., Ltd, Zibo 255200, China)

Abstract: In order to solve the problems of high resonance frequency and low output power of traditional piezoelectric energy harvesters, a T-type magnetically coupled piezoelectric energy harvester was proposed. By introducing the magnetically coupled interaction between the two sides, the piezoelectric beam is induced to generate bending-torsional vibration, which increases the deformation of the piezoelectric beam, and further enhances the output voltage response of the harvester. Firstly, the working principle and structural design of the piezoelectric energy harvester were analyzed, and its vibration characteristics were simulated and analyzed, and finally, the experimental prototype was made for experimental testing, and the effectiveness of the piezoelectric energy harvester was verified by simulation analysis and experimental tests. The results show that the optimal load resistance maximizes the output power. The energy harvesting frequency can be controlled by adjusting the weight of the mass at the free end of the device, and the output power improves with the increase of excitation acceleration. Introducing magnetic coupling, the influence of the bending-torsional coupling vibration caused by magnetic coupling on the output performance of the harvester was analyzed through comparative experiments. When the excitation acceleration is 0.2 g, Due to the bending-torsion complex vibration, the working frequency and maximum output power of the magnetic coupling device Ⅲ are 5.5 Hz and 3.71 mW, respectively. Compared to the energy harvesting device Ⅰ, without magnetically coupled, the output power is increased by about 47%. Therefore, the T-type magnetically coupled piezoelectric energy harvester has a high output efficiency in the low-frequency environment.

Keywords: magnetic coupling; bend-torsion coupling vibration; piezoelectric energy harvesting; low frequency

0 引言

随着现代社会的不断发展,人类在社会生活和工作方面对能源的消耗量迅速增长,传统的化石能源开采存储量小、环境不友好性和不可再生性等问题,不符合可持续发展战略要求。近年来,微电子技术迅速发展,特别是 MEMS 技术的提高,科技设备逐渐向微型化、便携式、低功耗等方向发展,化学电池由于存在尺寸大、更换不便、易污染环境等问题而不适用于微电子系统供电。为此,研究人员开始寻求新的能源转换技术。环境俘能^[1]以其巨大优势在实现无线传感网络的自供电操作方面展现出巨大潜力,主要的俘能方式有压电式、电磁式、静电式,其中压电俘能技术^[2]被认为是一种高效、可靠的新型能源转换技术,成为了电池替代方案的突破口。

压电振动俘能器因其能量密度高,结构简单且易于制造,不发热、无电磁干扰、寿命长、环境友好等优点^[3-4],成为研究热点之一。压电振动俘能器可用于储能、传感与控制,及大规模能源转换等方面,具有广阔的发展前景,研究人员对此展开了大量研究^[5-6]。起初主要侧重于线性压电振动俘能研究,但线性俘能系统的输出电压和电能密度通常较低,只有在激励频率与其固有频率相匹配时才能得到最大输出效率,而环境中的振动频率范围较宽,两频率不相匹配时,其发电性能会大幅下降。为了拓宽振动俘能频带,提升发电性能,各学者探究了多种方法,如引入磁力耦合^[7]、多模态^[8]、多自由度^[9]、增加止动块^[10]、复合结构^[11]等。巩启等^[12]研究了一种抗磁-气流混合悬浮结构,并通过实验与仿真分析验证该结构高旋转速度和较大悬浮间隙的优点,对俘能器的研究提供了一定参考。引入磁力耦合^[13]也是增强压电俘能系统输出功率的一种方式,一定程度上可以拓宽俘能器俘能频

带并提高其输出响应。齐炫凯等^[14]提出一种有限元模型,针对圆弧螺旋型压电俘能器的振动特性与输出特性进行分析研究,该俘能器在低频、多向能量收集和高输出方面展现良好特性,且仿真与实验测试误差较小。Yao 等^[15]研究了 L 型压电梁的宽带俘能和动态响应,给出几种优化的 L 型压电梁结构,证明倒双稳 L 型梁结构具有明显的双稳态特性和硬弹簧特性,能有效拓宽频带。多模态技术可以实现宽带俘能,Shao 等^[16]提出了一种带有宽频带止动块的双自由度压电俘能器,实验表明,选择适当的参数组合,可将反共振点移到两个共振峰外,并扩大两个峰的频率响应。

为了进一步提升俘能系统的发电性能,实现低频高效输出,本文提出了一种 T 型磁力耦合压电俘能器,引入磁力耦合,将弯曲与扭转变形结合以提升压电俘能器的发电性能。该压电俘能器在低频环境下具有良好输出性能。

1 俘能器原理设计与实验平台搭建

1.1 俘能器原理设计

本研究提出的 T 型磁力耦合压电俘能器结构设置如图 1 所示。由固定支架、悬臂梁、压电片、永磁铁、滑轨和底座组成。悬臂梁材质为铝,压电片材料为 PZT-5H,通过丙烯酸酯将压电片粘贴在弹性梁上,自由端设置磁铁,随压电梁一起移动。固定支架材料为树脂。将压电俘能器压电梁的上端固定在振动台上,末端的两块磁铁沿压电梁中心对称分布,称为移动磁铁,在俘能器振动过程中,压电梁自由端的移动磁铁可以随压电梁一起摆动,正对移动磁铁下端粘贴两块磁铁在滑轨上,称为固定磁铁,通过滑轨可调节移动磁铁和固定磁铁之间距离来控制固定-移动磁铁之间的磁力耦合作用大小。

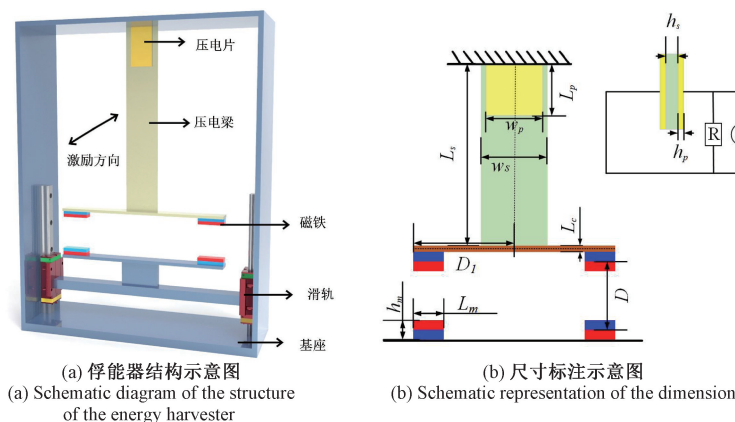


图 1 T 型磁力耦合压电俘能器结构设置

Fig. 1 Structural setup of T-type magnetically coupled piezoelectric energy trap

俘能器的尺寸设置如表1所示, L_s 、 L_p 、 L_m 、 L_c 分别为悬臂梁长度、压电片长度、磁铁长度和磁铁偏移长度; h_s 、 h_p 、 h_m 分别为悬臂梁厚度、压电片厚度和磁铁厚度; w_s 和 w_p 分别为悬臂梁和压电片宽度。

表1 俘能器结构尺寸参数

Table 1 Structural size parameters of energy harvester

结构名称	符号	数值
悬臂梁长宽厚/mm	L_s, w_s, h_s	145, 30, 0.4
支架长宽厚/mm	L_c, w_c, h_c	100, 8, 1
压电片长宽厚/mm	L_p, w_p, h_p	40, 20, 0.2
压电片密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	ρ_p	7 386
杨氏模量/GPa	E_p	63
介电常数/($\text{nF}\cdot\text{m}^{-1}$)	ϵ_{33}	32.16
压电常数/($\text{C}\cdot\text{m}^{-2}$)	e_{33}	-17.26
磁铁长宽厚/mm	L_m, h_m, w_m	19, 9, 3
磁铁密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	ρ_m	7 800

为了深入探究该压电俘能器的发电性能,给出了如图2所示的3种实验装置。悬臂梁自由端设置质量块,将该结构作为装置I;加入固定磁铁,引入耦合磁力,移动-固定磁铁间有一定距离,两对磁铁间极性相同,将该结构作为装置II;两对磁铁之间极性互异,将该结构作为装置III。俘能器固定于振动台上,振动台沿横向施加周期简谐振动激励。装置I两端质量块对称分布,装置II两端磁铁间极性相同,两装置在振动时均会发生弯曲振动;装置III末端两对磁铁间磁力相反,在振动时会产生弯曲运动的同时会发生扭转运动,相比于工作在 d_{31} 模式下的纯弯曲压电俘能器,该结构会产生弯-扭复合运动,结合了机电耦合系数更高的 d_{15} 模式,能够产生更大的形变,进而增强输出性能。调节固定磁铁与移动磁铁之间的距离可以控制耦合磁力耦合作用大小。

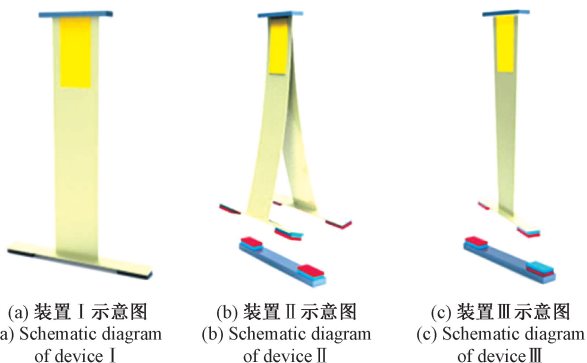


图2 3种装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of three devices

1.2 实验平台搭建

利用图3所示的实验测试系统对该压电俘能器的发电性能进行实验测试。该测试系统包括实验样机、振动激励机、功率放大器、振动控制器、NI数据采集卡、外接

电阻和PC。加速度传感器吸附在激振器上的铝基板上。实验样机固定在振动台上,振动控制台与功率放大器和计算机相连,设置不同的参数可改变振动台的振动状态。通过数据采集器采集电阻两端的电压信号以评估该压电俘能器的输出性能。

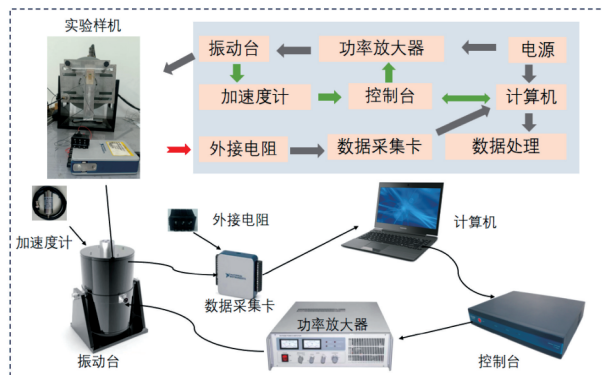


图3 实验测试与数据采集系统

Fig. 3 Experimental test and data acquisition system

2 实验测试与仿真分析

本章将通过实验和仿真分析方法,探究外接电阻、质量块、激励加速度、激励频率、磁力大小对该俘能器输出性能的影响,对比仿真与实验测试结果,验证该俘能器的有效性,得到其最佳发电条件。

2.1 无磁力压电俘能装置

首先,利用装置I在无磁力作用下测试俘能器的发电性能,包括输出功率随外接负载电阻、激励频率、激励加速度以及末端质量块的变化情况。

1) 外接电阻的影响

采用上述实验平台测试装置I随负载电阻变化的功率响应。加速度为0.1g。如图4所示,不同激励频率下,增大外接电阻值,俘能器的输出均随电阻值先逐渐增大,在 $R = 120 \text{ k}\Omega$ 时输出最大,而后迅速下降,且越接近其固有频率,输出功率越大。由此,该俘能器的最优负载电阻为 $120 \text{ k}\Omega$,后续实验均在该电阻条件下进行。

2) 末端质量块质量的影响

激励加速度为0.2g,利用装置I探究质量块重量变化对俘能器输出性能的影响。在质量块质量分别为 $M_1 = 3.5 \text{ g}$ 、 $M_2 = 4 \text{ g}$ 、 $M_3 = 5.5 \text{ g}$ 和 $M_4 = 7 \text{ g}$ 时进行实验测试。图5(a)为俘能器在不同质量块下的功率响应,图5(b)为不同质量块下俘能器的输出电压响应,可知,电压响应随质量块增加而增大。显然,共振频率会随着质量块质量的增加而逐渐降低,质量为 M_1 时,其共振频率为 5.5 Hz ;而当质量增加到 M_4 时,共振频率为 4.2 Hz 。

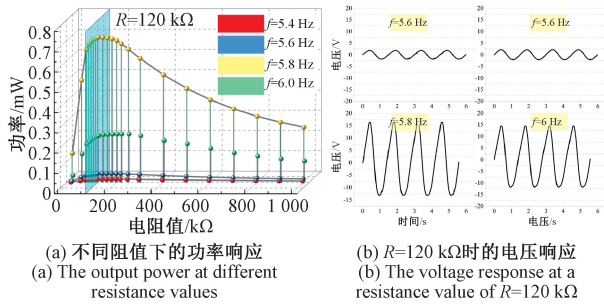


图 4 实验测试:不同频率下俘能器输出随外接电阻的变化
Fig. 4 Experimental test: the output of the energy harvester varies with the external resistance at different frequencies

相较于质量为 M_1 时,共振频率迁移了 1.3 Hz。实验结果显示,随着末端质量块质量的增加,其输出功率得到大幅提升,由 M_1 时的 2.52 mW 增大到 M_4 时的 4.51 mW,提升了约 79%。通过仿真软件分析俘能器的输出性能,结果如图 5(c)、(d) 所示。质量块不同,共振频率不同。仿真与实验测试结果相符,误差在可控范围内,这些误差可能是由实验误差、环境误差以及测试装置制作误差导致。因此,改变俘能器质量块重量可以实现频率可控;同时增大输出功率。总体而言,该俘能器能在较低共振频率环境下高效采集振动能量。

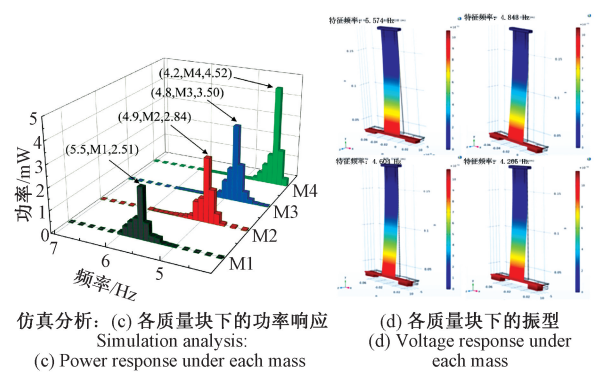
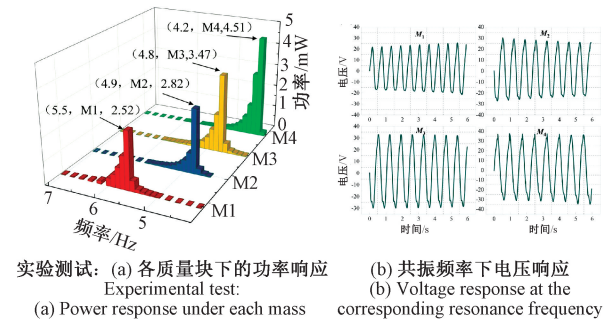


图 5 不同质量块对俘能器输出性能的影响
Fig. 5 Influence of different masses on the output performance of the energy harvester

俘能器的输出功率。设置末端质量块为 M_1 ,在不同激励下测试俘能器的输出性能。图 6(a)、(b) 为不同激励加速度下俘能器实验测试输出响应,加速度由 $a=0.1\text{ g}$ 增加到 $a=0.2\text{ g}$,其输出功率由 0.759 mW 增加到 2.52 mW,输出功率提升了 232%,发电效率显著提升。图 6(c) 所示为不同加速度下仿真输出,输出电压随加速度的增大而提高。仿真和实验结果均表明,随着加速度的增强,俘能器输出功率得到大幅提升。

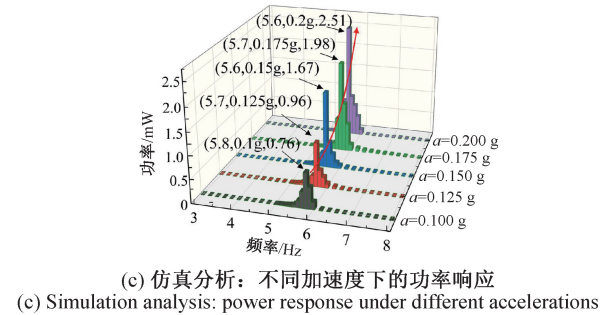
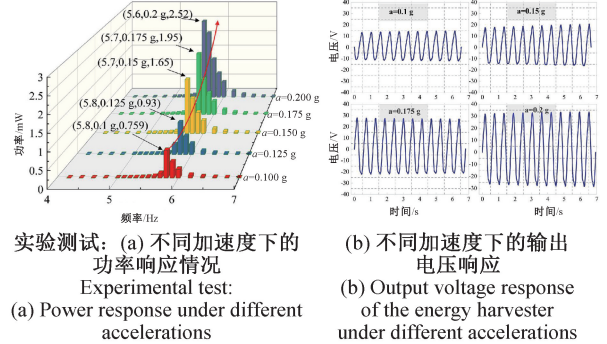


图 6 不同加速度下输出性能变化
Fig. 6 Performance at different accelerations

2.2 磁力耦合压电俘能装置

本节将引入耦合磁力,利用装置 II 与装置 III 针对耦合磁力耦合对俘能器输出性能的影响展开实验测试与仿真分析。自由端磁铁质量设为 M_1 ,进一步研究磁力耦合对俘能器输出性能的影响。

1) 磁力耦合对压电俘能装置 II 输出性能的影响

加速度为 0.2 g 下,调节移动-固定磁铁之间距离以控制磁力大小。在不同磁距下进行实验测试与仿真分析。图 7(a) 为装置 II 在不同激励频率下实验测试所得输出响应。随着磁铁间距的增大,输出功率先增后减,同时,共振频率也随之发生迁移。图 7(b) 为装置 II 的仿真输出功率响应,图 7(c) 为不同磁距下实验测试输出电压响应。当磁距 D 在 23~33 mm 范围时,俘能器受到磁力耦合处于势阱中无法突破势阱而做阱间运动,由于磁力限制,振动幅度小,输出功率偏低。当磁距 D 增加到 38 mm 时,磁力的限制作用减小,俘能器可以突破势阱,

3) 激励加速度的影响激励加速度会极大地影响压电

同时磁力作用增强了振动幅度,输出功率迅速增加到 3.58 mW。相较于装置 I,输出功率提升了 42%。继续增大磁距,磁力作用降低, $D=53$ mm 时,输出功率减小到 3.09 mW。显然,磁力耦合能显著提高压电俘能器的输出效率。

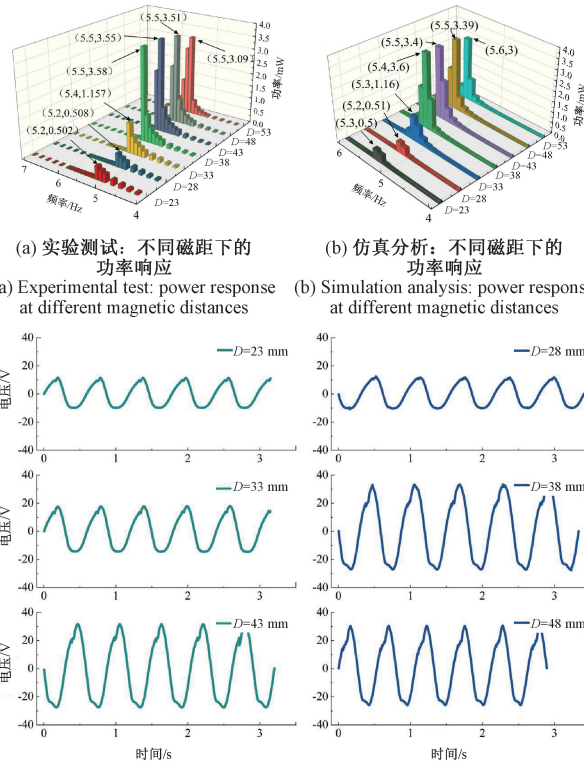


图 7 不同磁距下装置 II 的输出性能变化

Fig. 7 Variation of output performance of device II at different magnetic distances

2) 磁力耦合对压电俘能装置 III 输出性能的影响

为了进一步探究磁力耦合对 T 型磁力耦合压电俘能器输出性能的影响,利用装置 III 在不同磁距下进行实验测试与仿真分析。图 8(a) 为装置 III 在不同磁距下,实验测试所得输出功率响应。可以看出,装置 III 的输出功率与装置 II 的变化趋势一致,随着磁距的增大而先增大后减小。在 $D=33$ mm 时,装置 II 与装置 III 输出功率分别为 1.157 和 3 mW,装置 III 输出功率远高于装置 II。这是由于装置 III 中磁铁间磁力方向相反,压电梁一侧受磁斥力,一侧受磁吸力,俘能器在振动过程中受到非对称磁力耦合作用,产生弯-扭复合运动,能显著提升输出效率。在 $D=38$ mm 时,俘能器最高输出功率为 3.71 mW,相比无磁力装置 I,输出功率提升了 47%。继续增大磁铁间磁距,磁力作用减小,其输出功率也开始降低。图 8(b) 所示为仿真分析输出功率响应,排除实验误差与人为误差,实验与仿真结果大致相符,证明了该俘能器的有效性。

图 8(c) 所示为在不同磁距下,俘能器的输出电压响应。

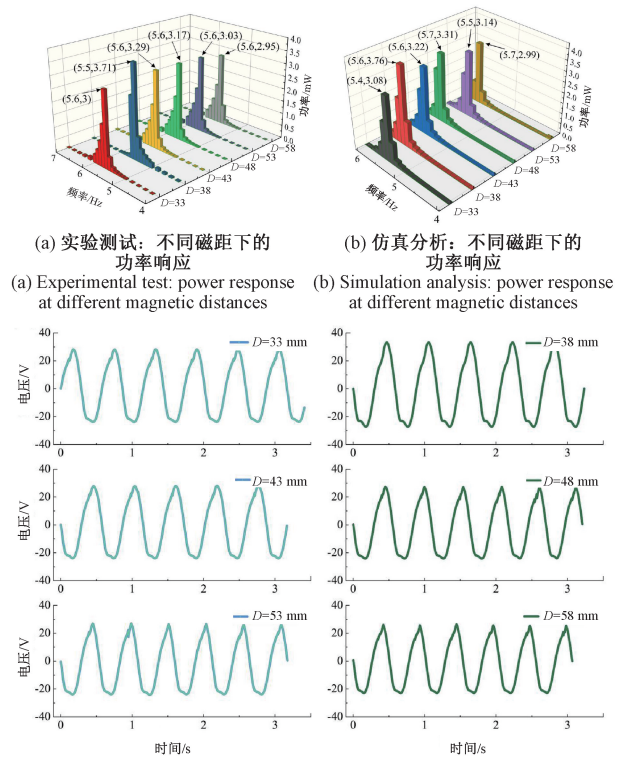


图 8 装置 III 在不同磁距下的输出性能

Fig. 8 Output performance of device III at different magnetic distances

为了证明本研究所提出的 T 型磁力耦合压电俘能器在磁耦合作用下提高电压输出响应的有效性,能够更好地在低频环境下实现高效能量采集,表 2 列出了本研究压电俘能器与其他研究的性能比较。

表 2 本研究与其他研究结果对比
Table 2 Comparison of the results of this study with others

文献	共振频率/Hz	输出功率/mW	结构
Wang 等 ^[17]	12	0.442	
Zou 等 ^[18]	5.2	0.284	
Xie 等 ^[19]	18.5	0.786 8	
Wu 等 ^[20]	11.5	0.179	
本研究	5.5	3.71	

如图 9 所示,本研究可以用于收集风致振动能、机械设备振动能、桥梁振动能以及人体运动、车辆行驶产生的振动能来对小功耗电子设备供能。

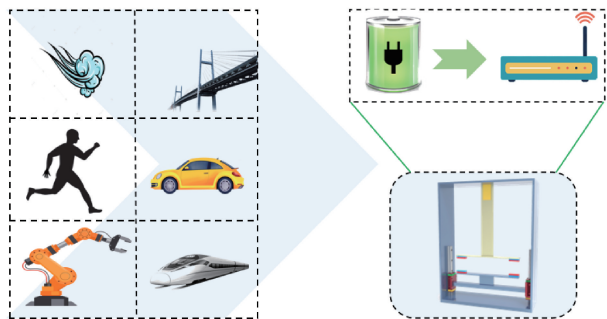


图 9 振动俘能器应用

Fig. 9 Application of vibration energy harvester

3 结 论

本文提出了一种低频高效采集能量的 T 型磁力耦合压电俘能器并对其发电性能进行了深入探究。介绍了俘能器的结构设置与工作原理,利用有限元仿真分析其振动响应特性。制作实验样机模型进行实验测试。对比实验与仿真结果,得出如下结论:

1) 俘能装置在最优电阻 $120\text{ k}\Omega$ 处,可以取得最高输出功率。在无磁力状态下,改变俘能装置 I 自由端质量块重量能够显著影响俘能装置的输出功率与共振频率与输出功率。实验所得输出功率由 M_1 时的 2.52 mW 增大到 M_4 时的 4.51 mW ,发电效率提升了约 79%,共振频率向左迁移了 1.3 Hz ,改变质量块重量来实现频率可控并拓宽俘能频带。同时,激励加速度可以大幅提升对俘能器输出效率。

2) 引入耦合磁力耦合。改变俘能装置自由端磁铁之间作用力方向,利用装置 II 和装置 III 在不同磁铁间距下进行实验测试。探究磁力耦合振动俘能装置在磁距下的输出性能。研究表明,装置 III 由于磁铁设置不同,振动时会发生弯-扭复合运动,所得最大输出功率较装置 II 更大,最大输出功率为 3.71 mW 。总体而言,本研究提出的 T 型磁力耦合压电俘能器在低频环境下能高效采集能量,并实现频率可控。

参考文献

- [1] ZHENG X T, HE L P, WANG S J, et al. A review of piezoelectric energy harvesters for harvesting wind energy[J]. Sensors and Actuators, A. Physical, 2023, 352: 114190-114209.
- [2] 张智娟, 霍慧文. 基于涡激振动的 PVDF 压电风能采集实验研究[J]. 电子测量技术, 2021, 44(20):

43-47.

ZHANG ZH J, HUO H W. Experimental study on PVDF piezoelectric wind power collection based on vortex-induced vibration [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(20): 43-47.

- [3] HE L P, GU X F, HAN Y, et al. Nonlinear dual action piezoelectric energy harvester for collecting wind energy from the environment [J]. Journal of Alloy and Compounds, 2022, 889(31): 161711.
- [4] 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(1): 129578.
- [5] 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 and Management, 2022, 271: 116309.
- [6] 张坤, 武科迪, 苏宇锋. 基于分段线性系统的宽频振动能量收集器[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(9): 140-145.
- ZHANG K, WU K D, SU Y F. Wideband vibration harvester based on piecewise linear system [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(9): 140-145.
- [7] ZHANG Y H, WANG H R, WANG L. Design and evaluation of a magnetically coupled piezoelectric energy harvester with parallel connection [J]. Review of Scientific Instruments, 2023, 94(8): 081101.
- [8] YU H, FAN L N, SHAN X B, et al. A novel multimodal piezoelectric energy harvester with rotating-DOF for low-frequency vibration [J]. Energy Conversion and Management, 2023, 287: 1. 1-1. 11.
- [9] HU G B, LIANG J R, TANG L H, et al. Improved theoretical analysis and design guidelines of a two-degree-of-freedom galloping piezoelectric energy harvester [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2022, 33(1): 210-230.
- [10] SU M, XU W, ZHANG Y. Stochastic response and bifurcation of a two-degree-of-freedom energy harvesting system with stoppers [J]. International Journal of Bifurcation and Chaos, 2021, 31(5): 2150077.
- [11] SHI G, XU J B, XIA Y SH, et al. An annular tubular wearable piezoelectric-electromagnetic hybrid vibration energy harvester driven by multi magnetic beads [J]. Energy Conversion and Management, 2022, 269: 116119.
- [12] 巩启, 高琳, 苏宇锋. 抗磁-气流混合悬浮理论及仿真分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(11): 76-82.
- GONG Q, GAO L, SU Y F. Theory and simulation analysis of diamagnetic-airflow hybrid levitation [J].

- Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(11): 76-82.
- [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 piezoelectric-electromagnetic composite energy harvesters[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(11): 195-204.
- [14] 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. Theory and simulation analysis of diamagnetic-airflow hybrid levitation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(3): 146-154.
- [15] YAO M H, LIU P F, MA L, et al. Experimental study on broadband bistable energy harvester with L-shaped piezoelectric cantilever beam [J]. Acta Mechanica Sinica, 2020, 36(3): 557-577.
- [16] SHAO N, XU J, XU X. Experimental study of a two-degree-of-freedom piezoelectric cantilever with a stopper for broadband vibration energy harvesting [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2022, 344(1): 113742.
- [17] WANG H, LI B, LIU Y, et al. Low-frequency, broadband piezoelectric vibration energy harvester with folded trapezoidal beam [J]. The Review of Scientific Instruments, 2019, 90(3): 35001.
- [18] ZOU D L, LIU G Y, RAO Z S, et al. Design of a high-

performance piecewise bi-stable piezoelectric energy harvester[J]. Energy, 2022, 241(15): 122514.

- [19] XIE Z Q, LIU L, HUANG W B, et al. A multimodal E-shaped piezoelectric energy harvester with a built-in bistability and internal resonance[J]. Energy Conversion & Management, 2023, 278: 116717. 1-116717. 13.
- [20] WU N, HE Y CH, F J Y. Bistable energy harvester using easy snap-through performance to increase output power[J]. Energy, 2021, 226(2): 120414. 1-120414. 8.

作者简介



罗莲健, 2022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, 主要研究方向为压电振动能量的采集及其应用。

E-mail: luo19862524300@163.com

Luo Lianjian received her B. Sc. degree from Shandong University of Technology in 2022. Now she is a M. Sc. candidate of Shandong University of Technology. Her main research interest includes piezoelectric vibration energy harvesting and its applications.



宋汝君 (通信作者), 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 Ph. D. degree from Harbin Institute of Technology in 2016. Now he is an associate professor at Shandong University of Technology. His main research interest includes vibration energy collection.