

几种压电电磁复合俘能器的发电性能实验研究

赵庆玲¹, 于蓬勃¹, 刘诗雨¹, 杨崇秋¹, 杨小辉¹, 宋汝君^{1,2}

(1. 山东理工大学机械工程学院, 255000, 山东淄博;

2. 山东省精密制造与特种加工重点实验室, 255000, 山东淄博)

摘要: 针对线性的单一的振动能量俘能器存在工作频带狭窄、输出效率低等问题,提出了 3 种压电电磁复合式俘能器结构,可增大对环境中振动能量的俘获。首先,设计了无磁力单梁压电电磁复合俘能器,该结构俘能器仅设有上方的压电单梁,压电梁首端的磁铁进入到固定的线圈中;然后,设计了磁力刚性梁压电电磁复合俘能器,该结构俘能器在无磁力装置的基础上增加带有磁铁的刚性梁,当两块磁铁极性相对时,则产生磁斥力;接着,设计了磁力双梁压电电磁复合俘能器,该结构俘能器是将磁力刚性梁装置中的刚性梁换作与压电梁相同尺寸的悬臂梁,两磁铁位置保持不变,形成双梁系统;最后,对 3 种俘能器的发电性能分别进行实验研究,对比分析 3 种俘能器的输出功率和输出电压值。实验结果表明:磁力的引用,提高了电磁的发电性能,但同时也降低了压电梁的输出功率;双悬臂梁的加入,增加了装置的自由度,拓宽了装置的工作频带;3 种俘能器的发电综合峰值基本相当;无磁力单梁装置中的压电发电性能最好,更适合高阻抗环境;磁力双梁装置中电磁发电性能最优且压电输出存在双峰值,更适合宽频带、低阻抗环境。实验结果证明了磁力双梁压电电磁复合结构俘能器可俘获能量的频带最宽,具有较优的输出性能。

关键词: 振动;磁力;压电电磁复合;俘能;宽频

中图分类号: TH39;TH113.1 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202211020 **文章编号:** 0253-987X(2022)11-0195-10

Experimental Study on Power Generation Performance of Several Types of Piezoelectric-Electromagnetic Composite Energy Harvesters

ZHAO Qingling¹, YU Pengbo¹, LIU Shiyu¹, YANG Chongqiu¹,
YANG Xiaohui¹, SONG Rujun^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255000, China; 2. Shandong Provincial Key Laboratory of Precision Manufacturing and Non-Traditional Machining, Zibo, Shandong 255000, China)

Abstract: This paper proposes three types of piezoelectric-electromagnetic composite energy harvester structures that can increase the capture of vibration energy in the environment to address the problems of narrow working frequency band and low output efficiency of linear single vibration energy harvesters. First, a non-magnetic single-beam piezoelectric-electromagnetic composite energy harvester is designed with only an upper piezoelectric beam, the magnet at the head of which enters the fixed coil. Then, a magnetic rigidbeam piezoelectric-electromagnetic composite energy harvester is designed. When the polarity of the two magnets is opposite, the magnetic repulsion force will be generated. After that, a magnetic double-beam piezoelectric-

收稿日期: 2022-06-14。 作者简介: 赵庆玲(1998—),女,硕士生;宋汝君(通信作者),男,副教授,硕士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51905316);中国博士后科学基金资助项目(2021M691968)。

网络出版时间: 2022-07-29

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20220728.1710.002.html>

electromagnetic composite energy harvester is designed. This is a doublebeam system whose cantilever beams are of the same size as the magnetic rigid beams of the piezoelectric-electromagnetic composite energy harvester, and the positions of the two magnets remain unchanged. Finally, experimental study was conducted on the power generation performance of the three types of energy harvesters, and their output power and output piezoelectric values are compared and analyzed. According to the experimental results, the use of magnetic force improves the electromagnetic power generation performance, but also reduces the output power of the piezoelectric beam; the addition of double cantilever beams increases the degree of freedom of the device and widens its working frequency band. The comprehensive peak power output of the three types of energy harvesters is basically the same. The non-magnetic single-beam device has the best piezoelectric power generation performance, which is more suitable for high impedance environment. The magnetic double-beam devices have the best electromagnetic power generation performance and double peaks of piezoelectric output, making them more suitable for broadband and low impedance environment. The experimental results show that the magnetic double-beam piezoelectric-electromagnetic composite energy harvester can harvest energy in the widest frequency band and has good output performance.

Keywords: vibration; magnetic force; piezoelectric-electromagnetic composite; energy harvesting; broadband

近年来,随着科技的进步和社会的发展,无线传感技术、便携式电子设备和微电机系统等技术各个领域得到了广泛的应用^[1],进而对微电子产品的供能也有了更高的技术要求^[2]。但是,目前的供能技术主要是使用传统的电池,传统电池的供能存在容量小、使用寿命短、容易污染环境等缺点^[3-4],不能满足现在微电子产品的发展要求,制约其发展进程。为解决传统供能方式存在的问题,高效环保的供能方式研究引起了诸多学者的关注^[5-7]。在近阶段的发展中,很多学者关注到一种从自然环境中获取能量供微电子产品使用的技术,这是一种具有良好发展前景的技术,并成为国内外研究学者的研究热点。环境中存在很多能源,如太阳能、潮汐能、风能、振动能和温差能等,这些能量可以通过特定的方式被人们获取利用,是新型的环保能源^[8-11]。其中,振动能是普遍存在且较易俘获的能源类型之一,对其进行的获取利用研究也是最为广泛的。振动能是一种性能稳定的能源,它的能量密度较高,不受地理位置和环境的影响^[12-15],因此越来越多研究学者将研究重心放在振动能俘获并转化成电能上。振动能转化为电能的方式主要有压电式、电磁式和静电式,其中压电式和电磁式是学者关注较多的转换方式^[16]。压电式系统结构简单,可以输出较高的电压,并且容易集成化,但它输出的电流值较低。电磁式系统可以输出较大的电流^[17-20],但是输出的电压

值较低。学者们起初仅研究单一的俘能方式,其中,单自由度的线性系统工作带频很窄,当激励频率和系统的固有频率匹配时,俘能器的俘能效率最高,发电性能最好^[21-22];当激励频率变化无法与系统的固有频率匹配时,俘能器的俘能效率会降低,发电性能随之衰减^[23]。单自由度线性系统的俘能器无法高效俘获外界宽带频的振动能,不能满足实际的需求。为使俘能器具有更宽的俘能带宽和更高的发电效率,学者们通过引入电学调谐和机械调谐的研究来调整俘能系统的刚度或质量^[24-25],从而达到了拓宽工作频带和提高俘能效率的目的,同时使俘能系统的输出性能获得了极大地提升。

国内外的学者对基于磁力非线性振动的能量俘获技术进行了大量的研究。Challa 等^[26]提出了一种磁力调谐压电俘能器系统,在压电悬臂梁末端放置磁铁引入磁力作用,磁铁的吸引力和排斥力能够改变系统的谐振频率,拓宽系统的工作频带。Aboulfotoh 等^[27]提出了一种自动调频的压电电磁复合能量采集装置,调整两块磁铁之间的间距能够改变压电悬臂梁的机械应变力,进而使得悬臂梁与环境振动共振,大幅度提高系统的发电效率。高世桥等^[28]设计了一种新型的复合式俘能装置,它由多个俘能模块组成,采用多种悬臂梁尺寸,可以兼顾多个环境振动频率,拓宽带宽频率,提高发电效率。武丽森等^[29]提出了一种非线性压电电磁复合式俘能

器的结构,并将其等效成质量弹簧阻尼振动的系统,用两组磁铁构成双稳态体系,充分利用非线性技术拓宽俘能带宽,改善工作频率范围,增加输出功率。张振振等^[30]通过研究复合俘能器的耦合负载特性得出,复合俘能器具有更好的俘能效率且具有一定的宽频俘能特性,能更好地适应当前的发展要求。目前磁力耦合压电式俘能器是国内外的研究热点问题,但当前的研究中仍然存在着一些不足和问题。例如,当装置存在多个共振频率时,俘能器不能很好地兼顾多个离散振动频率,俘能效率有待提高;非线性磁力耦合装置能够拓宽俘能的频带,但一般需要很大的激振加速度,不适合较低激励强度环境。鉴于此,本文在较低激振加速度下探究了 3 种磁力耦合压电电磁俘能器的发电性能和宽频特性,分别通过实验探究 3 种装置的输出功率,并对磁力双梁压电电磁俘能装置的输出功率和发电性能展开研究。

1 实验模型装置

1.1 物理模型结构

本文提出的 3 种压电电磁复合俘能器的结构,结构各个组成部件的尺寸参数如表 1 所示,涉及线圈、压电片、悬臂梁、刚性梁和磁铁等组成部分。悬臂梁的材料选用铝,长、宽、厚分别用 L_s 、 W_s 和 h_s 表示;压电片的材料选用锆钛酸铅,它的长、宽、厚分别用 L_p 、 W_p 和 h_p 表示; L_r 、 W_r 和 h_r 分别表示刚性梁的长、宽、厚,刚性梁的材料选用亚克力板。3 种结构俘能器的示意图如图 1 所示。俘能器中将磁铁固定在悬臂梁的自由端,两块磁铁在同一竖直方向上,再将压电片贴在悬臂梁上表面构成单晶压电悬

表 1 俘能器的结构参数

Table 1 Structural parameters of energy harvester		
部件	参数	数值
悬臂梁	长 L_s 、宽 W_s 、厚 h_s /mm	160、25、0.6
	密度 $\rho_s/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2 700
	杨氏模量 E_s/GPa	69
连接管	厚 h_a /mm	25
	直径 d_a /mm	13
PZT	长 L_p 、宽 W_p 、厚 h_p /mm	40、20、0.3
	弹性模量 E_p/GPa	58
线圈	匝数 N	2 300
	直径 d_c /mm	40
磁铁	质量 M/g	6.2
刚性梁	长 L_r 、宽 W_r 、厚 h_r /mm	160、25、10

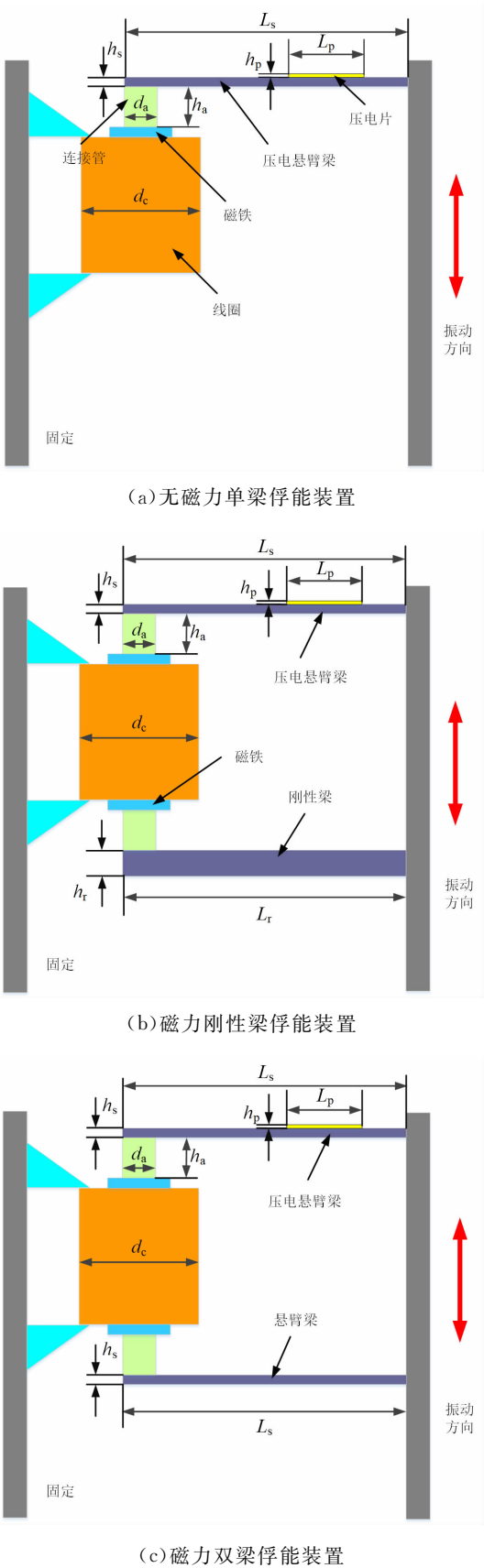


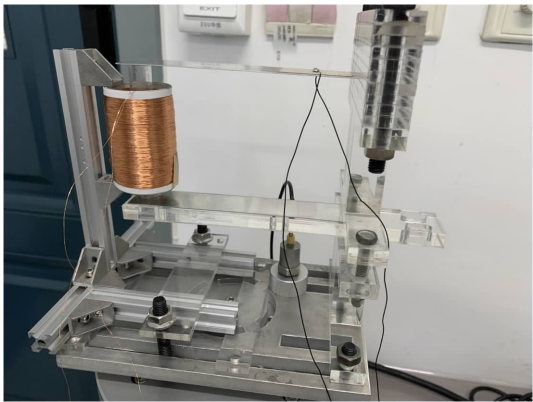
图 1 3 种压电电磁俘能装置结构尺寸图

Fig. 1 Structural dimension diagram of three piezoelectric electromagnetic energy harvesting systems

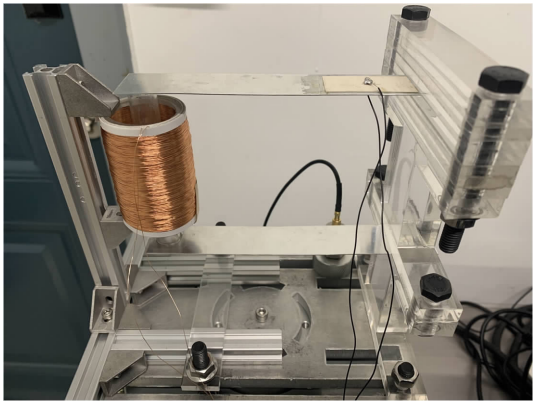
臂梁结构。图 1(a)装置仅设有上方的压电单梁,线圈的固定位置使得磁铁全部进入线圈内部,形成无磁力单梁的俘能装置;图 1(b)装置上方设有压电单梁,在线圈下方放置有磁铁的刚性梁,上下两块磁铁极性相对,都进入到线圈内部,形成磁力刚性梁的俘能装置;图 1(c)装置将图 1(b)装置中的刚性梁替换成与压电悬臂梁相同尺寸的弹性梁,保持磁铁位置不变,形成磁力双梁的俘能装置。

1.2 实验平台搭建

根据装置物理模型的结构参数制作出俘能器的实验样机,并搭建相应的实验平台,如图 2 和图 3 所示。图 3 所示是图 1 中 3 种俘能装置的实验样机。实验系统由实验样机、数据采集卡、可变电阻、激振器、振动控制台、功率放大器、加速度传感器和计算机组成。数据采集卡(NI®)连接在计算机上,可以连续实时地采集俘能装置输出的电压等实验数据。可变电阻分别连接在线圈和压电片输出端,可以通过调节电阻值的大小来获取最优的功率输出。将实验样机放置在激振器上,加速度传感器也通过永磁体固定在激振器上。将振动控制台和功率放大器连接在一起,再将振动控制台连接在计算机上,设置不



(b)磁力刚性梁装置实验样机



(c)磁力双梁装置实验样机

图 3 3 种俘能装置的实验测试样机

Fig. 3 Experimental test prototypes of three kinds of energy harvester devices

同的实验参数可改变激振器不同的振动状态。

图 3 所示的实验样机中磁铁和悬臂梁之间用亚克力管连接,用丙烯酸酯结构胶将压电片粘贴在悬臂梁上表面的根部,用亚克力夹板将悬臂梁固定好,用固定夹将线圈固定好,使磁铁全部进入线圈内部。实验时,不考虑其他外在因素的影响,对 3 种装置进行实验,探究装置输出功率的大小,并通过外接电阻值、激振频率和加速度数值来重点探究磁力双梁压电电磁复合俘能装置的输出性能。

2 结果分析

对俘能装置无磁力单梁的输出功率进行实验探究,实验平台如图 3(a)所示,在激振加速度为 0.2g (g 为重力加速度),压电梁连接 110 kΩ 的外接电阻、线圈连接 140 Ω 的外接电阻时,对电磁和压电部分的输出功率分别进行采样分析,其结果如图 4 (a)、(b)所示。由图 4(a)、(b)可知,无磁力单梁线圈和压电梁的输出功率和输出电压都是随激振频率

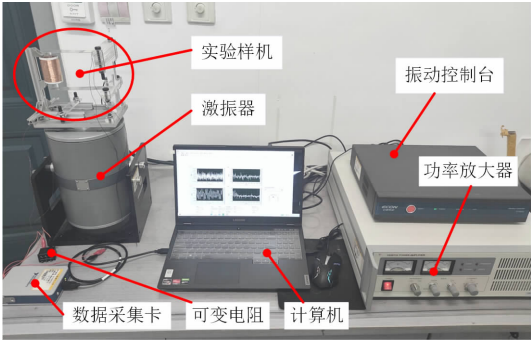
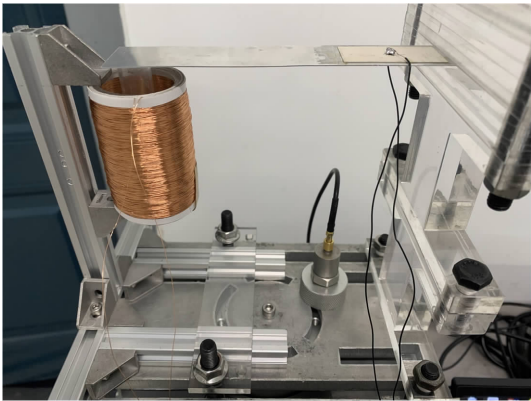
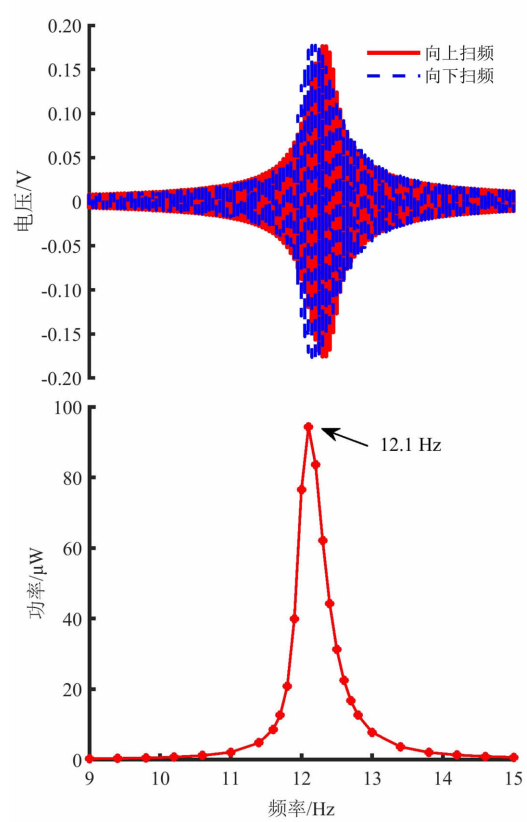


图 2 压电电磁俘能装置整体实验系统

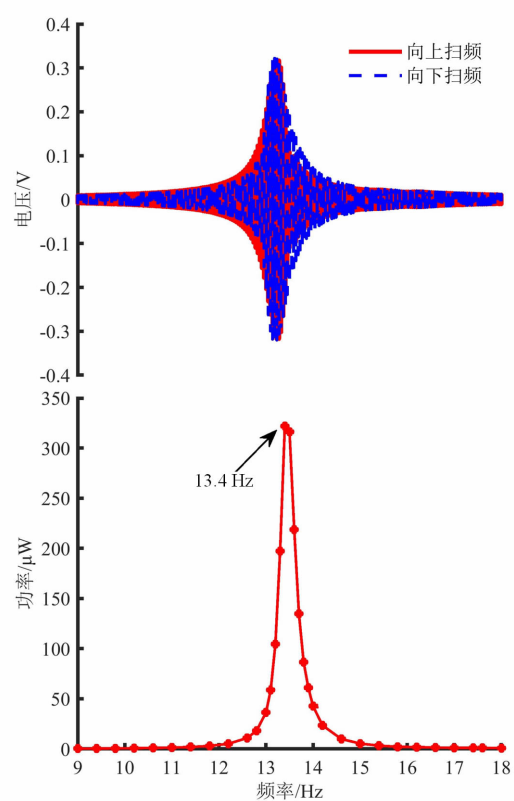
Fig. 2 Overall experimental system of piezoelectric-electromagnetic energy harvester device



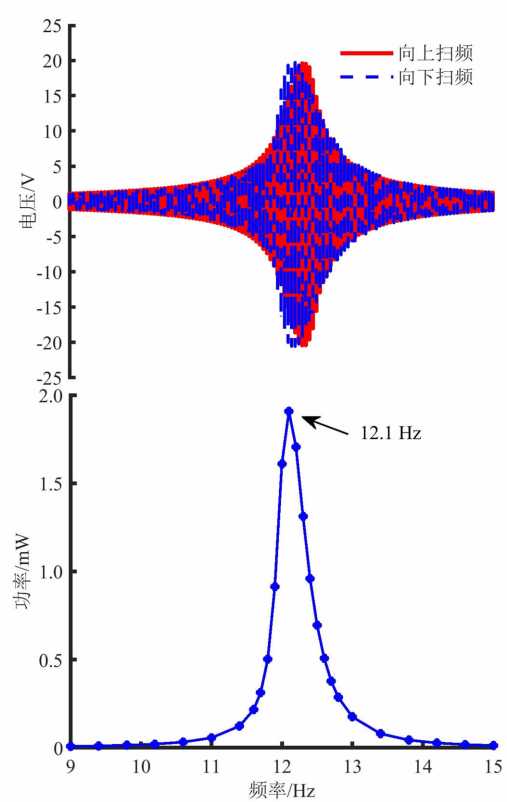
(a)无磁力单梁装置实验样机



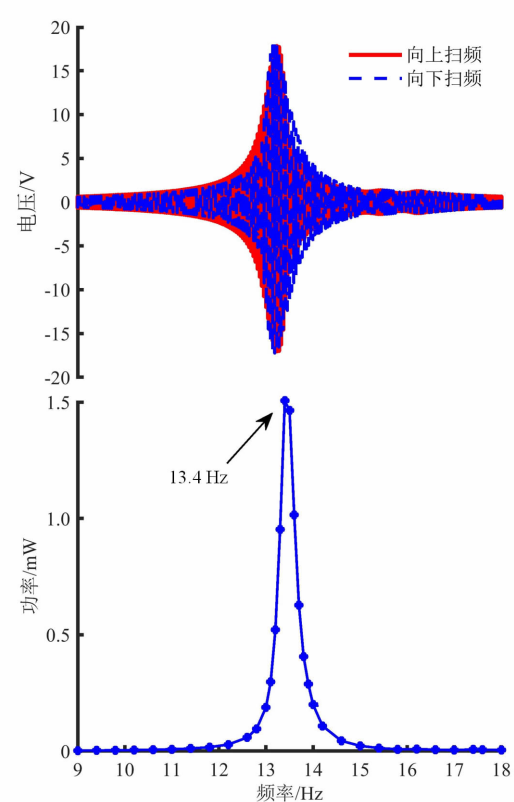
(a)图 3(a)装置电磁输出电压和功率



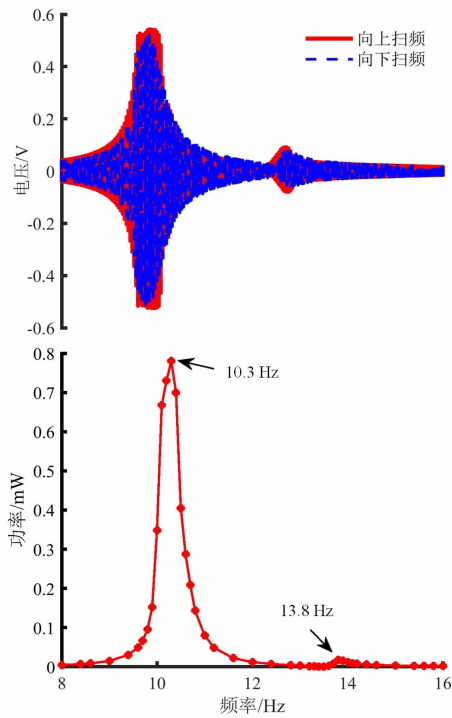
(c)图 3(b)装置电磁输出电压和功率



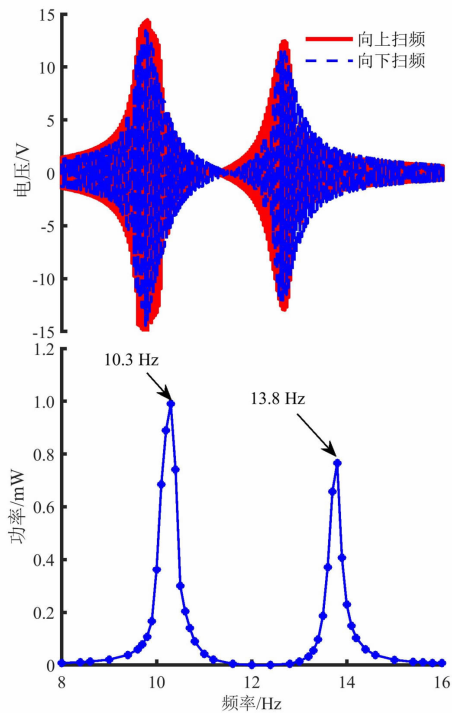
(b)图 3(a)装置压电输出电压和功率



(d)图 3(b)装置压电输出电压和功率



(e)图 3(c)装置电磁输出电压和功率



(f)图 3(c)装置压电输出电压和功率

图 4 3 种装置线圈和压电悬臂梁输出功率和输出电压随频率的变化曲线
Fig. 4 Curves of output power and output voltage with frequency for coils and piezoelectric cantilever beams of three devices

的增大先升后降的,两者的共振频率都是 12.1 Hz,在 12.1 Hz 时输出功率最大;当激振频率和系统的固有频率接近时,系统的输出功率和输出电压达到最大值。

对磁力刚性梁装置的输出功率和输出电压分别进行实验探究,实验装置如图 3(b)所示。在激振加速度为 0.2g,压电梁外接 110 kΩ 的电阻、线圈外接 140 Ω 的电阻时,对装置的输出功率和输出电压分别进行采样分析,实验结果如图 4(c)、(d)所示。由图 4(c)、(d)可知,磁力刚性梁线圈和压电梁的输出电压值和功率值随着激振频率的增大亦是先升后降的,两者在激振频率为 13.4 Hz 时输出功率最大。与图 4(a)、(b)相较可知,磁力刚性梁的线圈输出功率值明显大于无磁力单梁线圈的输出功率值,磁力刚性梁的压电梁输出功率值略小于无磁力单梁的压电梁输出功率值。磁力的引入增大了电磁部分的输出功率,抑制了压电部分的输出功率值,但图 3(a)装置(简称装置 a)的总输出功率值与图 3(b)装置(简称装置 b)的总输出功率值相差不大。

利用图 3(c)所示装置(简称装置 c)搭建实验平台,对磁力双梁的压电电磁俘能装置输出特性进行实验探究。在装置激振加速度设为 0.2g,压电梁外接电阻为 110 kΩ、线圈外接电阻为 140 Ω 时,对线圈和压电梁的输出功率和输出电压进行实验探究,实验结果如图 4(c)、(f)所示。由图 4(c)、(f)可知,线圈和压电梁均存在两个共振频率,共振频率分别在 10.3 Hz 和 13.8 Hz 处,线圈和压电梁都在共振频率 10.3 Hz 下有最大的输出功率和电压,相较之下,共振频率为 13.8 Hz 时的输出功率和电压明显小于 10.3 Hz 下的值。

对图 1 所示的 3 种模型分别进行实验探究,对比图 4(a)、(d)与图 4(b)、(e)可知,装置 b 线圈的最大功率为 321.7 μW,大于装置 a 的最大功率 94.27 μW,装置 b 压电梁的最大输出功率为 1.505 mW,装置 a 压电梁的最大输出功率为 1.907 mW,装置 b 总输出功率为 1.827 mW,与装置 a 的总输出功率 2 mW 相差不大;由图 4(c)、(f)可知,装置 c 的总输出功率在 10.3 Hz 时为 1.77 mW,在 13.8 Hz 时为 0.783 mW,与装置 a 和 b 对比,3 个装置的最大输出功率基本相当,但装置 c 电磁发电部分性能明显提升,且装置易实现低频双峰值发电,有效拓宽工作频带。

由图 4 可知,磁力刚性梁的加入使磁性刚性梁压电电磁俘能系统的共振频率相对无磁力单梁系统

向右发生偏移,因为压电梁受到磁斥力的作用,导致压电梁的等效刚度增大,从而使磁力刚性梁系统的共振频率向右偏移;悬臂梁的加入使磁力双梁压电电磁俘能系统存在两个共振频率,第一个共振频率点(10.3 Hz)为引入悬臂梁的共振频率,第二个共振频率点(13.8 Hz)为压电悬臂梁产生的共振频率;因此,磁力引入,使压电梁共振频率向右偏移。同时磁力双梁还拓宽了系统的俘能频带,增大了装置的输出电压值,能够使俘能装置具有更好的俘能效率和发电性能。基于此,下文重点对图 1(c)所示的磁力双梁装置进行实验,探究电阻和激振加速度对装置 c 输出特性的影响。

用图 3(c)所示装置对激振频率改变时磁力双梁压电电磁俘能装置的输出电压进行实验探究。将装置的激振加速度设为 $0.2g$,令压电梁外接 $110\text{ k}\Omega$ 的电阻,线圈外接 $140\text{ }\Omega$ 的电阻,实验结果如图 5 和图 6 所示。图 5 是电磁部分在激振频率为 $9\sim 16\text{ Hz}$ 下的输出电压变化图。线圈在 10 Hz 时的输出电压最大,在第二个共振频率 14 Hz 时输出电压高于 13 、 15 和 16 Hz 的输出电压,但 14 Hz 下的输出电压低于 10 Hz 下的输出电压。

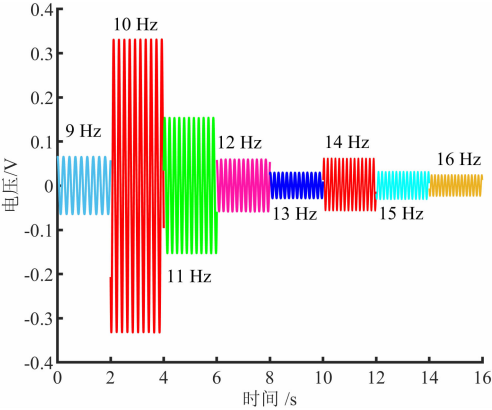


图 5 电磁俘能的输出电压变化曲线

Fig. 5 Output voltage variation curve of electromagnetic energy harvesting

图 6 是磁力双梁压电电磁俘能装置压电部分在激振频率为 $9\sim 16\text{ Hz}$ 下的输出电压变化图。压电梁在激振频率为 10 Hz 时的输出电压最大,激振频率为 14 Hz 时的输出电压小于 10 Hz 时的输出电压,但大于其他频率下的输出电压, 12 Hz 时的输出电压最小。可见,磁铁悬臂梁的加入给装置增加了磁力作用,对压电梁的影响较大,悬臂梁出现共振现象时,压电梁也会出现明显的磁激励振动现象,能够使装置的压电梁获取较高的输出电压,同时还拓宽

了装置的工作频带,使输出性能更好。

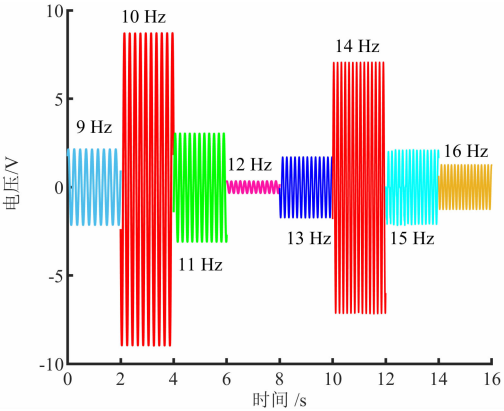
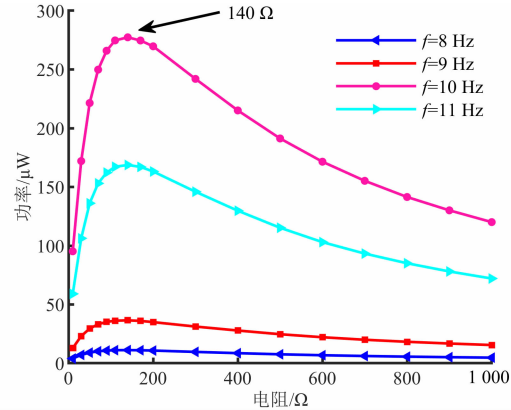


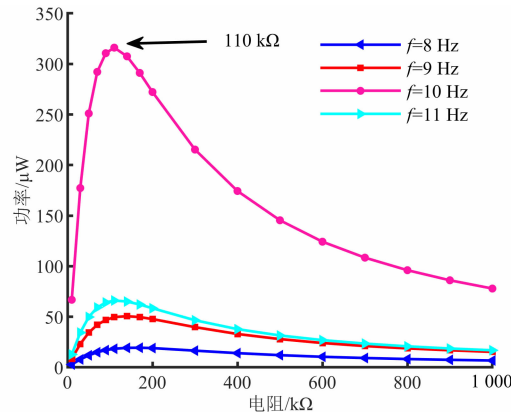
图 6 压电俘能的输出电压变化曲线

Fig. 6 Output voltage variation curve of piezoelectric energy harvesting

图 7 所示的是磁力双梁压电电磁俘能装置在不同的激振频率下其输出功率随电阻的变化曲线。激



(a)电磁部分输出功率随电阻变化曲线



(b)压电部分输出功率随电阻的变化曲线

图 7 不同激振频率下磁力双梁压电电磁俘能器输出功率随电阻的变化曲线

Fig. 7 Variation curve of output power of magnetic double beams piezoelectric-electromagnetic energy harvester with resistance under different excitation frequencies

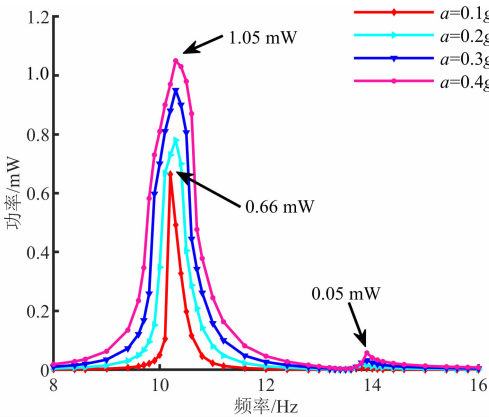
振加速度设为 $0.2g$, 在线圈和压电片分别连接上可变电阻, 给实验装置施加一个恒定的激振频率, 线圈和压电梁的输出功率都是随着外接电阻值的增大先升后降, 最后趋于较平稳的趋势; 在激励频率为 10 Hz 时线圈的最优电阻为 $140\ \Omega$, 压电梁在激振频率为 10 Hz 时的最优电阻为 $110\text{ k}\Omega$ 。压电电磁俘能系统在激振频率接近共振频率时的输出功率大, 线圈在激振频率为 10 Hz 时的输出功率大于 $8, 9$ 和 11 Hz 时的输出功率, 最大输出功率为 $277.3\ \mu\text{W}$ 。压电梁在激振频率为 10 Hz 时的输出功率亦远大于 $8, 9$ 和 11 Hz 时的输出功率, 最大输出功率为 $316.1\ \mu\text{W}$ 。

图 8 所示的是在不同的激振加速度下磁力双梁压电电磁俘能装置的输出功率随激振频率的变化曲线。实验装置的线圈处接 $140\ \Omega$ 的外接电阻, 压电梁处接 $110\text{ k}\Omega$ 的外接电阻, 探究在不同激振加速度

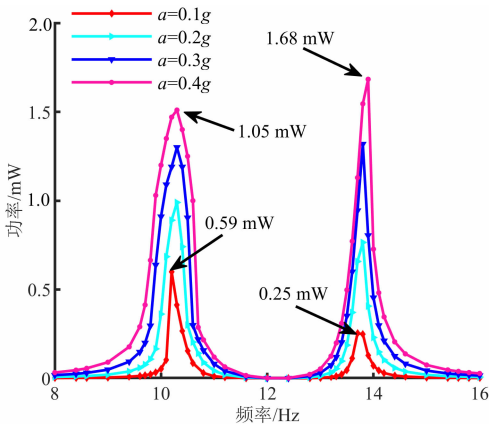
下俘能装置的输出功率, 实验结果如图 8 所示。由图 8(a) 知, 电磁部分具有两个共振频率, 输出功率随着激振频率的增加在共振频率处先升后降。加速度为 $0.1g$ 时, 线圈的最大输出功率在 10.2 Hz 为 0.66 mW ; 当激振加速度为 $0.4g$ 时, 线圈的最大输出功率在 10.3 Hz 为 1.05 mW , 线圈实现了较大功率的输出, 频率为 13.8 Hz 时线圈的输出功率在 $0.4g$ 处最大。在激振加速度为 $0.4g$ 时, 线圈的输出功率大于其他激振加速度下的, 对比 $0.1g, 0.2g$ 和 $0.3g$ 的变化曲线可知, 随着激振加速度的增加, 线圈的工作频带得到了明显的拓宽, 输出的功率更大。由图 8(b) 可知, 压电部分具有两个共振频率, 输出功率在这两个共振频率下都是随着频率的增大先升后降; 在激振加速度为 $0.4g$ 时, 压电梁的输出功率在 10.3 Hz 和 13.8 Hz 有最大值, 分别为 1.51 mW 和 1.68 mW 。压电梁在激振加速度为 $0.4g$ 时的输出功率大于其他加速度下的输出值, 随着加速度的增大, 同一频率下装置的输出功率也逐渐增大。由图 8 可见, 磁力的加入使压电梁在 13.8 Hz 时到达共振频率, 从而使压电梁的振幅增大, 输出功率增大; 在图 8(a) 的 13.8 Hz 处, 当压电梁振动幅值增大时, 电磁输出功率也随之增大, 电磁发电变化曲线出现凸起的峰值。由变化曲线可知, 激振加速度的增加会使装置在同一频率下的输出功率增大, 但激振加速度过大可能造成压电片的断裂, 因此激振加速度的取值在 $0.1g\sim 0.4g$ 之间合适。对比 $0.1g$ 和 $0.4g$ 时的输出曲线明显可知, 激振加速度的增大明显的拓宽了整个装置的俘能频带, 提高了装置的输出功率, 使装置具有更好的发电性能。

3 结 论

本文提出了 3 种压电电磁俘能装置, 主要通过实验分别探究 3 种俘能装置输出性能。实验对比研究表明, 3 个装置综合最大输出性能基本相当; 无磁力单梁装置压电发电性能最优, 磁力双梁装置电磁发电性能最优; 磁力的引入增大了装置的电磁输出功率, 双悬臂梁的加入, 增加了俘能装置的自由度, 拓宽了系统的俘能频带, 综合提高了装置的发电性能。装置存在最优外接电阻值使线圈和压电梁的输出功率最大; 激振加速度的变化对装置影响显著, 激振加速度增大使俘能器的输出功率增大, 并且激振加速度越大, 俘能器的工作频带越宽, 装置的输出功率也越大。本文的研究对压电-电磁俘能装置提高能量转换效率有重要的参考价值。



(a) 电磁部分输出功率随激振频率的变化曲线



(b) 压电部分输出功率随激振频率的变化曲线

图 8 不同激励加速度下磁力双梁压电电磁俘能器输出功率随激振频率的变化曲线

Fig. 8 Variation curve of output power of magnetic double beams piezoelectric-electromagnetic energy harvester with excitation frequency under different excitation accelerations

参考文献:

- [1] 宋汝君, 单小彪, 李晋哲, 等. 压电俘能器涡激振动俘能的建模与实验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(2): 55-60, 79.
SONG Rujun, SHAN Xiaobiao, LI Jinzhe, et al. Modeling and experimental study of piezoelectric energy harvester under vortex-induced vibration [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(2): 55-60, 79.
- [2] 范世全, 朱一诺, 王波仁, 等. 具有自适应电感共享策略的压电能量收集电路设计与实现 [J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(5): 95-104.
FAN Shiquan, ZHU Yinuo, WANG Boren, et al. Design and implementation of piezoelectric energy harvesting circuit with adaptive inductor sharing strategy [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(5): 95-104.
- [3] 周生喜, 曹军义, ERTURK A, 等. 压电磁耦合振动能量俘获系统的非线性模型研究 [J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(1): 106-111.
ZHOU Shengxi, CAO Junyi, ERTURK A, et al. Nonlinear model for piezoelectric energy harvester with magnetic coupling [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(1): 106-111.
- [4] 王曼, 侯成伟, 孟金棚, 等. 磁力非线性耦合的 I-L 组合压电梁俘能器发电性能试验研究 [J]. 振动与冲击, 2022, 41(3): 123-128.
WANG Man, HOU Chengwei, MENG Jinpeng, et al. Experimental test for power generation performance of I-L composite piezoelectric beam energy harvester with magnetic nonlinear coupling [J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(3): 123-128.
- [5] WANG Junlei, ZHOU Shengxi, ZHANG Zhien, et al. High-performance piezoelectric wind energy harvester with Y-shaped attachments [J]. Energy Conversion and Management, 2019, 181: 645-652.
- [6] 张宇, 王建国. 势阱特性对磁力双稳态压电俘能器性能的影响研究 [J]. 应用力学学报, 2019, 36(4): 812-818.
ZHANG Yu, WANG Jianguo. Influence of potential well characteristics on the performance of magnetic bi-stable piezoelectric energy harvesters [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2019, 36(4): 812-818.
- [7] LIU Haipeng, GAO Shiqiao, WU Junru, et al. Study on the output performance of a nonlinear hybrid piezoelectric-electromagnetic harvester under harmonic excitation [J]. Acoustics, 2019, 1(2): 382-392.
- [8] LI Kui, YANG Zhichun, ZHOU Shengxi. Performance enhancement for a magnetic-coupled bi-stable flutter-based energy harvester [J]. Smart Materials and Structures, 2020, 29(8): 085045.
- [9] HUANG Dongmei, ZHOU Shengxi, LITAK G. Theoretical analysis of multi-stable energy harvesters with high-order stiffness terms [J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2019, 69: 270-286.
- [10] SONG Rujun, HOU Chengwei, YANG Chongqiu, et al. Modeling, validation, and performance of two tandem cylinder piezoelectric energy harvesters in water flow [J]. Micromachines, 2021, 12(8): 872.
- [11] SHAN Xiaobiao, TIAN Haigang, CHEN Danpeng, et al. A curved panel energy harvester for aeroelastic vibration [J]. Applied Energy, 2019, 249: 58-66.
- [12] YAO Minghui, LIU Pengfei, MA Li, et al. Experimental study on broadband bistable energy harvester with L-shaped piezoelectric cantilever beam [J]. Acta Mechanica Sinica, 2020, 36(3): 557-577.
- [13] ABOHAMER M K, AWREJCEWICZ J, STAROSTA R, et al. Influence of the motion of a spring pendulum on energy-harvesting devices [J]. Applied Sciences, 2021, 11(18): 8658.
- [14] 张旭辉, 赖正鹏, 吴中华, 等. 新型双稳态压电振动俘能系统的理论建模与实验研究 [J]. 振动工程学报, 2019, 32(1): 87-96.
ZHANG Xuhui, LAI Zhengpeng, WU Zhonghua, et al. Theoretical modeling and experimental study of a new bistable piezoelectric vibration energy harvesting system [J]. Journal of Vibration Engineering, 2019, 32(1): 87-96.
- [15] TAO Kai, YI Haiping, YANG Yang, et al. Miura-origami-inspired electret/triboelectric power generator for wearable energy harvesting with water-proof capability [J]. Microsystems & Nanoengineering, 2020, 6(1): 56.
- [16] ZHAO Chaoyang, YANG Yaowen, UPADRASHTA D, et al. Design, modeling and experimental validation of a low-frequency cantilever triboelectric energy harvester [J]. Energy, 2021, 214: 118885.
- [17] SULTANA A, ALAM M, MIDDYA T R, et al. A pyroelectric generator as a self-powered temperature sensor for sustainable thermal energy harvesting from waste heat and human body heat [J]. Applied Energy, 2018, 221: 299-307.
- [18] JEONG C K, BAEK C, KINGON A I, et al. Lead-free perovskite nanowire-employed piezopolymer for highly efficient flexible nanocomposite energy harvester

- [J]. *Small*, 2018, 14(19): 1704022.
- [19] ZHAO Junqing, ZHEN Gaowei, LIU Guoxu, et al. Remarkable merits of triboelectric nanogenerator than electromagnetic generator for harvesting small-amplitude mechanical energy [J]. *Nano Energy*, 2019, 61: 111-118.
- [20] NGUYEN HUU T, NGUYEN VAN T, TAKAHITO O. Flexible thermoelectric power generator with Y-type structure using electrochemical deposition process [J]. *Applied Energy*, 2018, 210: 467-476.
- [21] ZHANG Lei, ZHANG Binbin, CHEN Jun, et al. Lawn structured triboelectric nanogenerators for scavenging sweeping wind energy on rooftops [J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(8): 1650-1656.
- [22] WANG Xiaofeng, NIU Simiao, YI Fang, et al. Harvesting ambient vibration energy over a wide frequency range for self-powered electronics [J]. *ACS Nano*, 2017, 11(2): 1728-1735.
- [23] HE Wei, ZHANG Jitao, YUAN Shuai, et al. A three-dimensional magneto-electric vibration energy harvester based on magnetic levitation [J]. *IEEE Magnetics Letters*, 2017, 8: 1-3.
- [24] XIAO Tianxiao, LIANG Xi, JIANG Tao, et al. Spherical triboelectric nanogenerators based on spring-assisted multilayered structure for efficient water wave energy harvesting [J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(35): 1802634.
- [25] DU Xinyu, ZHAO Shuyu, XING Yi, et al. Hybridized nanogenerators for harvesting vibrational energy by triboelectric-piezoelectric-electromagnetic effects [J]. *Advanced Materials Technologies*, 2018, 3(6): 1800019.
- [26] CHALLA V R, PRASAD M G, FISHER F T. Evaluation of coupled piezoelectric and electromagnetic technique for vibration energy harvesting [C] // *Health Monitoring of Structural and Biological Systems 2008*. Bellingham, WA, USA: SPIE, 2008: 588-597.
- [27] ABOULFOTOH N A, ARAFA M H, MEGAHED S M. A self-tuning resonator for vibration energy harvesting [J]. *Sensors and Actuators: A Physical*, 2013, 201: 328-334.
- [28] 高世桥, 闫丽, 金磊, 等. 非线性双端固支梯形梁压电俘能器结构设计与特性分析 [J]. *农业机械学报*, 2019, 50(7): 398-405.
- GAO Shiqiao, YAN Li, JIN Lei, et al. Structure design and characteristic analysis of nonlinear double-end fixed trapezoidal beam piezoelectric energy harvester [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(7): 398-405.
- [29] 武丽森, 刘海鹏, 张广义. 非线性压电电磁复合式俘能器的结构设计 [J]. *压电与声光*, 2016, 38(4): 570-574.
- WU Lisen, LIU Haipeng, ZHANG Guangyi. Design of a new nonlinear hybrid piezoelectric and electromagnetic energy harvester [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2016, 38(4): 570-574.
- [30] 张振振, 娄军强, 贾振, 等. 压电电磁复合振动俘能器的耦合负载特性及俘能性能 [J]. *振动工程学报*, 2020, 33(3): 459-466.
- ZHANG Zhenzhen, LOU Junqiang, JIA Zhen, et al. Energy harvesting performance and coupling load effect of a novel hybrid piezoelectric-electromagnetic vibration energy harvester [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2020, 33(3): 459-466.

(编辑 荆树蓉 刘杨)