

文章编号 1004-924X(2024)01-0073-11

## 磁耦合式可调频压电振动俘能器

王淑云, 杜洁雅, 黄喆人, 阚君武, 柴超辉, 张忠华\*  
(浙江师范大学 精密机械与智能结构研究所, 浙江 金华 321004)

**摘要:**为提高压电振动俘能器的环境适应性,提出一种磁耦合式可调频压电振动俘能器,利用激励器上主动磁铁和组合换能器上被动磁铁间的耦合作用及横摆簧片实现压电振子的单向限幅激励。通过对俘能器及磁对的建模和仿真分析,获得了俘能器结构参数对俘能器输出性能的影响,在此基础上制作俘能器样机并进行实验研究,获得了俘能器纵摆质量 $m_1$ 、横摆质量 $m_2$ 、横向距离 $L_x$ 、纵向距离 $L_y$ 、竖向距离 $L_z$ 及负载电阻对俘能器输出性能的影响规律。结果表明:存在两阶谐振频率 $f_1$ 和 $f_2$ 使输出电压出现峰值 $U_{n1}$ 和 $U_{n2}$ ,调节 $m_1, m_2, L_x, L_y$ 及 $L_z$ 会影响 $f_1, f_2, U_{n1}$ 及 $U_{n2}$ ;其他条件一定时,存在最佳负载电阻2 200 k $\Omega$ 使输出功率达到0.122 mW。通过选择合适的结构参数能够提升俘能器的有效频带和输出电压,对增强压电振动俘能器的可靠性和频率适应性具有一定的参考价值。

**关键词:**压电;可调频;磁耦合;组合换能器;能量回收

中图分类号:TN384;TM619 文献标识码:A doi:10.37188/OPE.20243201.0073

## Magnetically-coupled tunable piezoelectric vibration energy harvester

WANG Shuyun, DU Jieya, HUANG Zheren, KAN Junwu, CHAI Chaohui, ZHANG Zhonghua\*

(Institute of Precision Machinery and Intelligent Structure, Zhejiang Normal University,  
Jinhua 321004, China)

\* Corresponding author, E-mail: zhangzh@zjnu.edu.cn

**Abstract:** To improve the environmental adaptability of a piezoelectric vibration energy harvester, a magnetically-coupled tunable piezoelectric vibration energy harvester (PVEH) is proposed. The coupling action between the active magnet on the actuator and the passive magnet on the combined transducer and transversal spring was used to realize the unidirectional limiting excitation of the piezoelectric vibrator. Through modeling and simulation analyses of the energy harvester and magnetic pair, influences of the structural parameters of the energy harvester on the corresponding output performance could be determined. On this basis, the energy harvester prototype was developed by selecting a better magnet diameter via experimental research. The influence laws of the energy harvester's longitudinal mass  $m_1$ , transversal mass  $m_2$ , transversal magnet spacing  $L_x$ , longitudinal magnet spacing  $L_y$ , vertical magnet spacing  $L_z$ , and load resistance on the output performance were also obtained. The results show that two order resonant

收稿日期:2023-07-20;修订日期:2023-08-10.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51877199, No. 52077201);浙江省重点研发计划资助项目(No. 2021C01181);浙江省自然科学基金资助项目(No. LY20F010006);国家大学生创新创业训练计划资助项目(No. 202210345062)

frequencies  $f_1$  and  $f_2$  cause the output voltage to peak to  $U_{n1}$  and  $U_{n2}$ , respectively. Moreover, adjusting  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $L_x$ ,  $L_y$ , and  $L_z$  will affect  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $U_{n1}$ , and  $U_{n2}$ . Therefore, the effective frequency band and output voltage of the energy harvester can be increased when appropriate structural parameters are selected for the energy harvester. When other conditions are given, there is an optimal load resistance of 2 200 k $\Omega$  that increases the output power to 0.122 mW. Therefore, the effective frequency band and output voltage of the energy harvester can be improved by selecting suitable structural parameters and distance between magnets. The results provide good reference value for enhancing the reliability and frequency adaptability of the PVEH.

**Key words:** piezoelectric; adjustable frequency; magnetic coupling; combination transducer; energy recovery

## 1 引言

近年来,随着环境污染的日益严重,社会越来越重视对绿色能源的使用,清洁稳定的能源对人类生活越来越重要,广泛应用于交通运输、军事国防及生产生活等领域<sup>[1]</sup>。传统化学电池的工作寿命短、质能比过高、更新困难,严重制约了现代微电子器件的进步,因此,基于环境能量回收的微型发电机的需求不断增加。目前,常见的发电方式有电磁式<sup>[2]</sup>,静电式<sup>[3]</sup>及压电式<sup>[4-5]</sup>。其中,压电式俘能器利用压电效应工作、结构简单、不需要外接电源,更适用于微电子器件和监测系统。

根据使用环境,压电俘能器可分为振动式<sup>[6]</sup>、旋转式<sup>[7]</sup>及流体激励式<sup>[8]</sup>等。压电振动俘能器是通过外界振动激励使压电材料弯曲变形从而实现振动能到电能的转换。然而,自然环境中的振动能具有分布频带较散、频率低、随时间变化的特点<sup>[9]</sup>,现有的压电振动俘能器大多只能在很窄的频带内工作,俘能器的固有频率无法与外界激励频率相匹配时发电效率较低。针对该问题,人们提出了两种调频方法,一种是通过采用浮动质量<sup>[10]</sup>、非线性调谐<sup>[11]</sup>和分段线性调谐<sup>[12]</sup>等方式进行调频;另一种是通过多模态俘能技术<sup>[13]</sup>拓宽压电振动俘能器的有效频带,最常见的是利用磁力改变俘能器系统刚度来调节谐振频率及拓宽频带。Du等<sup>[14]</sup>提出了一种磁力调频压电电磁复合发电机,利用调节磁力间距离调节发电装置的固有频率实现宽频换能。Yang等<sup>[15]</sup>通过弹簧连接可移动磁铁,频带相对固定磁铁增加两倍。Wu等<sup>[16]</sup>将压电层安装在正弦形状的梁上下表

面,能更有效地突破壁垒使峰值电压达 1 377 mV。Wang等<sup>[17]</sup>提出了一种双磁耦合式压电振动俘能器,通过调节系统参数来改变俘能器的固有频率及拓宽频带。以上压电振动俘能器虽然在增强频率适应性和拓宽频带上有所突破,但压电振子的弯曲方向与环境激励方向一致,难以同时实现可调频、频带拓宽及限幅激励。

本文提出了一种磁耦合式可调频压电振动俘能器,它由分别安装主动磁铁和被动磁铁的激励器和组合换能器构成,通过调节俘能器的结构参数实现低频、宽带、高强度及大振幅振动能量回收。在理论和实验上研究纵摆质量、横摆质量、磁铁间距离及负载电阻对俘能器输出性能的影响,证明磁耦合式可调频压电振动俘能器能够在较宽的频带上实现调频。

## 2 工作原理

图 1 给出了磁耦合式可调频压电振动俘能器的结构原理。该俘能器的主要部件为激励器和组合换能器,激励器由弹簧、纵摆质量块、刚性摆臂及其端部安装的主动磁铁构成,刚性摆臂借助轴承和转轴可实现纵向摆动;组合换能器由横摆质量块、横摆簧片及两侧固定的压电振子和端部安装的被动磁铁构成。主动磁铁和被动磁铁同极相斥,压电振子包括末端弯折的金属基板及其一侧粘接的压电晶片,压电晶片发生单向弯曲故只承受单向压应力,分别用横向距离  $L_x$ 、纵向距离  $L_y$  及竖向距离  $L_z$  来表示主被动磁铁间距离  $L$  在直角坐标系  $x, y, z$  上的投影。

工作时,激励器的刚性摆臂在惯性作用下上

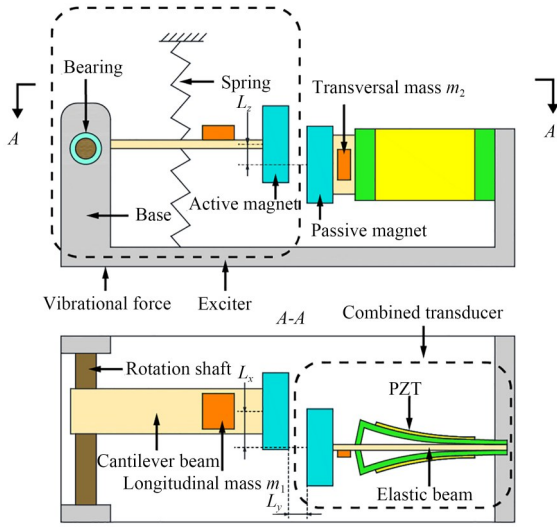


图 1 压电振动俘能器结构原理

Fig. 1 Structure and working principle of piezoelectric vibration energy harvest(PVEH)

下摆动,主动磁铁和被动磁铁间位置及磁力发生变化,使横摆簧片往复摆动、压电晶片弯曲,压电振子的形变会随着激励振幅的增大达到最大,然后停止增加,避免外界激励增大时压电振子受到突然冲击而损坏,提高了俘能器的环境适应性。俘能器的输出性能由激励器和组合换能器的结构参数共同决定,故通过调节激励器和组合换能器上质量块质量及磁铁间距离可以提升俘能器的有效带宽和输出电压。

### 3 仿真分析

#### 3.1 理论建模与仿真分析

根据图 1 得到图 2 所示的俘能器物理模型。图中,  $M_1$ ,  $M_2$  分别为激励器和组合换能器的等效

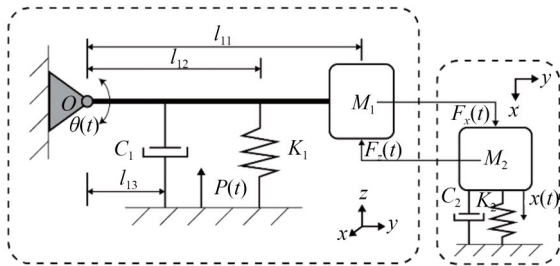


图 2 压电振动俘能器的物理模型

Fig. 2 Energetics model of piezoelectric vibration energy harvest(PVEH)

质量,  $C_1$ ,  $C_2$  分别为激励器和组合换能器的等效阻尼,  $K_1$ ,  $K_2$  分别为激励器和组合换能器的等效刚度,  $l_{11}$ ,  $l_{12}$  及  $l_{13}$  分别表示激励器等效质量、激励器等效弹簧及激励器等效阻尼和支点  $O$  的距离,  $P(t)$  为基础位移,  $\theta(t)$  为激励器的角位移,  $x(t)$  为组合换能器的位移,  $F_x(t)$  和  $F_z(t)$  分别为磁耦合力的横向分量和竖向分量。

由振动分析理论建立俘能器系统的振动微分方程为:

$$\begin{cases} J_1 \ddot{\theta}(t) + C_1 l_{13} \dot{\theta}(t) l_{13} + K_1 l_{12} l_{12} \theta(t) = \\ K_1 l_{12} P(t) + C_1 l_{13} \dot{P}(t) + F_z(t) l_{11} \\ M_2 \ddot{x}(t) + C_2 \dot{x}(t) + K_2 x(t) = F_x(t) \end{cases} \quad (1)$$

根据刚度计算方法得到激励器和组合换能器的等效刚度为:

$$K_1 = 2k_s, \quad (2)$$

$$K_2 = \frac{3EI}{l_2^3}, \quad (3)$$

式中:  $k_s$  为激励器弹簧刚度,  $E$  为横摆簧片的杨氏模量,  $l_2$  为横摆簧片长度。

根据磁耦合力的计算方法<sup>[18]</sup>, 主动磁铁与被动磁铁间磁力在  $x$  与  $z$  方向的最大分量为:

$$F_{xm} = \frac{3u_0 M^2 L_x}{2\pi (L_x^2 + L_y^2 + L_z^2)^{\frac{5}{2}}} \times \left[ 1 - \frac{5(L_x^2 + L_z^2)}{8(L_x^2 + L_y^2 + L_z^2)} \right], \quad (4)$$

$$F_{zm} = \frac{3u_0 M^2 L_y}{2\pi (L_x^2 + L_y^2 + L_z^2)^{\frac{5}{2}}} \times \left[ 1 - \frac{5(L_y^2 + L_z^2)}{8(L_x^2 + L_y^2 + L_z^2)} \right], \quad (5)$$

式中:  $\mu_0$  为真空磁导率,  $M$  为磁力矩。

工作过程中, 磁耦合力与磁铁间距离及其重叠面积相关, 时域上可以近似视为正弦函数, 即:

$$F(t) = F_m \sin(2\pi\omega t). \quad (6)$$

令  $P(t)$  为振动幅值为  $A$  的简谐振动, 则有:

$$F(t) = A \sin \omega t. \quad (7)$$

根据系统振动微分方程进一步计算得到主动磁铁与被动磁铁的位移  $Z(t)$  与  $Y(t)$ , 分别为:

$$Z(t) = \theta(t) \cdot l_{11} = \frac{A l_{11} \sqrt{(K_1 l_{12})^2 + (C_1 l_{13} \omega)^2} \times \sin(\omega t - \varphi_1)}{[(k_1 l_{12}^2 - J_1 \omega^2)^2 + (C_1 l_{13} \omega^2)^2]^{\frac{1}{2}}} \quad (8)$$

$$Y(t) = \frac{Al_{11}\sqrt{(K_1l_{12})^2 + (C_1l_{13}\omega)^2} \times \sigma \times \sin(\omega t - \varphi_2)}{[(k_1l_{12}^2 - J_1\omega^2)^2 + (C_1l_{13}^2\omega^2)^2]^{1/2} [(K_2 - M_2\omega^2)^2 + (C_2\omega)^2]^{1/2}}, \quad (9)$$

式中  $\sigma$  为力的传递系数。

令  $Y_{\max}$  为组合换能器的响应幅值, 求得组合换能器的位移传递率为:

$$\beta = \frac{Y_{\max}}{A} = \frac{l_{11}\sigma\sqrt{(K_1l_{12})^2 + (C_1l_{13}\omega)^2}}{[(K_1l_{12}^2 - J_1\omega^2)^2 + (C_1l_{13}^2\omega^2)^2]^{1/2} \times \frac{1}{[(K_2 - M_2\omega^2)^2 + (C_2\omega)^2]^{1/2}}}. \quad (10)$$

根据式(9)得到一次压电振子形变产生的电压为<sup>[19]</sup>:

$$V_g = \eta Y(t), \quad (11)$$

式中  $\eta$  为与压电材料的结构尺寸和材料特性相关的系数。

由上述公式可知, 激励器上纵摆质量  $m_1$ 、组合换能器上横摆质量  $m_2$  和磁铁受力等因素会影响俘能器的输出性能。这里利用 MATLAB 仿真获得  $m_1$  和  $m_2$  对俘能器响应特性的影响规律, 仿真参数如表 1 所示。

表 1 压电振动俘能器的仿真结构参数

Tab. 1 Simulation structure parameters of piezoelectric vibration energy harvest

参 数	值
悬臂梁长度 $l_{11}/\text{mm}$	125
弹簧一支点距离 $l_{12}/\text{mm}$	75
阻尼一支点距离 $l_{13}/\text{mm}$	45
横摆簧片尺寸 $l_2 \times a_2 \times b_2/\text{mm}^3$	$68 \times 20 \times 0.32$
激励器转动惯量 $J_1/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-2})$	$325 + m_1$
组合换能器等效质量 $M_2/\text{g}$	$180 + m_2$
激励器等效阻尼 $C_1/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	0.1
组合换能器等效阻尼 $C_2/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	0.16
传递系数 $\sigma$	1

图 3 为激励器上纵摆质量  $m_1$  不同时位移传递率  $\beta$  与激励频率的关系曲线。由图可知, 存在两阶谐振频率使位移传递率最大,  $m_1$  主要影响一阶谐振频率及二阶谐振频率对应的位移传递率:

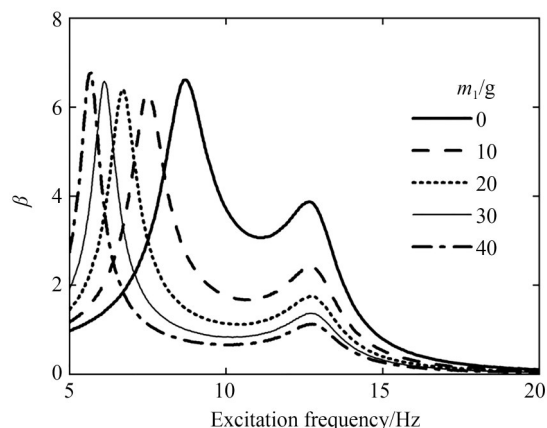


图 3 纵摆质量不同时位移传递率与激励频率的关系曲线  
Fig. 3 Relation curves between displacement transmissibility and excitation frequency at different longitudinal mass

$m_1$  增大时, 一阶谐振频率降低, 所对应的位移传递率基本不变; 二阶谐振频率基本不变, 所对应的位移传递率逐渐减小。由于增大  $m_1$  相当于增大激励器的等效转动惯量使其谐振频率降低, 一阶和二阶谐振频率分别为激励器和组合换能器的谐振频率。

图 4 为组合换能器上横摆质量  $m_2$  不同时位移传递率  $\beta$  与激励频率的关系曲线。由图可知, 随着  $m_2$  的增大, 一阶谐振频率保持不变, 二阶谐振频率减小, 所对应的位移传递率均逐渐增大。其原因在于增大  $m_2$  相当于增大组合换能器的等

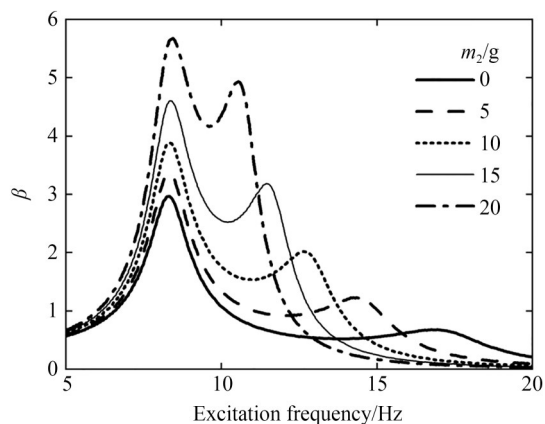


图 4 横摆质量不同时位移传递率与激励频率的关系曲线

Fig. 4 Relation curves between displacement transmissibility and excitation frequency at different transversal mass



效转动惯量使其谐振频率降低,两阶谐振频率逐渐靠近,俘能器电压耦合叠加作用加强、输出电压增大。

综上可知,磁耦合式可调频压电振动俘能器的动力学响应曲线存在两个谐振峰,一阶和二阶谐振频率分别为激励器和组合换能器的谐振频率,改变纵摆质量  $m_1$  和横摆质量  $m_2$  可以分别调节俘能器的一阶和二阶谐振频率,两阶谐振频率相差较小时位移传递率较大、相差较大时位移传递率较小,故通过调节  $m_1$  和  $m_2$  可以使俘能器在较宽的频带上获得更好的输出性能。

### 3.2 磁对的有限元建模与仿真分析

根据俘能器的结构原理,组合换能器通过主动磁铁和被动磁铁间的耦合作用获得激振力,激振力与磁铁直径和磁铁间距有关。在实际工作中,主动磁铁和被动磁铁的运动轨迹是非线性的,无法通过计算进行定量分析,故仅研究静态条件下环形磁铁的径向磁力和轴向磁力。基于麦克斯韦方程并利用 COMSOL 建立了环形磁对在径向距离  $l_x=0$  mm 和轴向距离  $l_y=5$  mm 时的磁势云图,如图 5 所示。

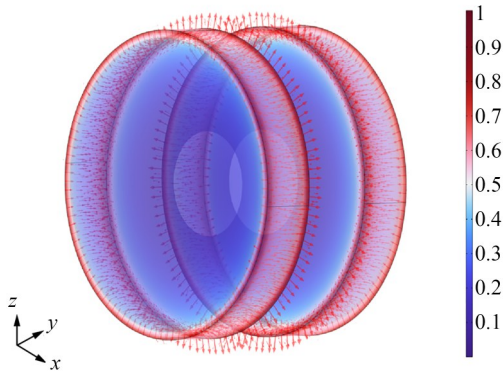


图5 环形磁铁的磁势云图

Fig. 5 Magnetic potential cloud map of ring magnet

图 6 给出了磁铁轴向距离  $l_y=0$  mm、直径  $d$  不同时径向磁力  $F_x$  和径向距离  $l_x$  的关系曲线。由图可知,在  $-15\text{ mm} < l_x < 15\text{ mm}$  内,不同直径磁铁的  $F_x$  随  $l_x$  的变化趋势一致,曲线关于  $l_x=0$  mm 对称,  $l_x$  一定时,  $F_x$  随着  $d$  的增大而增大;在  $-15\text{ mm} < l_x < 0$  mm 内,  $d$  一定时,  $F_x$  随着  $l_x$  的增大而先增大后减小,在  $l_x=0$  mm 时为 0 N,并且在  $l_x=-5$  mm 时达到最大;在  $0\text{ mm} < l_x < 15\text{ mm}$

内,  $d$  一定时,  $F_x$  随  $l_x$  的变化趋势与  $-15\text{ mm} < l_x < 0$  mm 时一致,  $F_x$  在  $l_x=5$  mm 时达到最大。

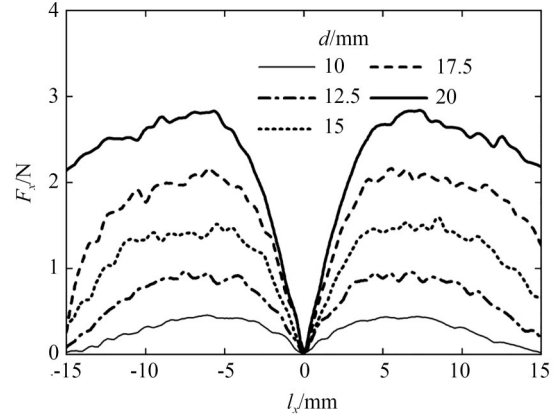


图6 磁铁直径不同时径向磁力和径向距离的关系曲线  
Fig. 6 Relation curves between radial magnetic force and radial distance with different diameters of magnet

图 7 给出了磁铁径向距离  $l_x=0$  mm、直径  $d$  不同时轴向磁力  $F_y$  和轴向距离  $l_y$  的关系曲线。由图可知,在  $4\text{ mm} < l_y < 15\text{ mm}$  内,轴向距离  $l_y$  一定时,  $F_y$  随着  $d$  的增大而增大;磁铁直径  $d$  一定时,  $F_y$  随着  $l_y$  的增大呈指数关系减小。

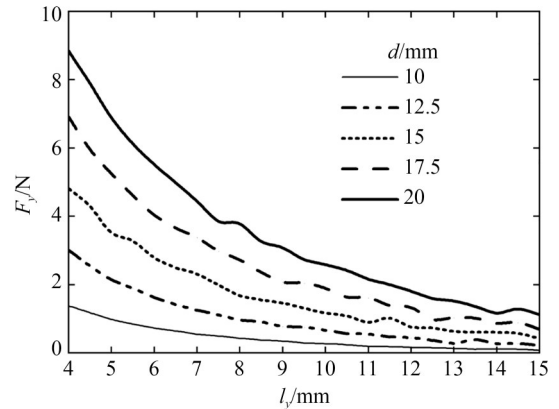


图7 磁铁直径不同时轴向磁力和轴向距离的关系曲线  
Fig. 7 Relation curves between axial magnetic force and axial distance with different diameters of magnet

由上述仿真结果可知,磁铁直径和磁铁间距都会影响磁力大小,故选择合适的磁铁直径可以获得与环境相适应的磁力,从而提高力的传递效率,改变磁铁间距离可以调节俘能器的输出性能,有效提升俘能器的有效频带和输出电压。

## 4 实验测试与分析

为验证磁耦合式可调频压电振动俘能器原理的可行性,并获得系统参数对俘能器输出性能的影响规律,设计制作了实验样机并搭建了测试系统,分别如图 8 和图 9 所示。实验仪器主要包括 DC-1000 振动台、SA-15 功率放大器、MSO6014A 型混合信号示波器、RC-2000 信号控制器及电脑控制端变阻箱等,俘能器的相关参数如表 2 所示。

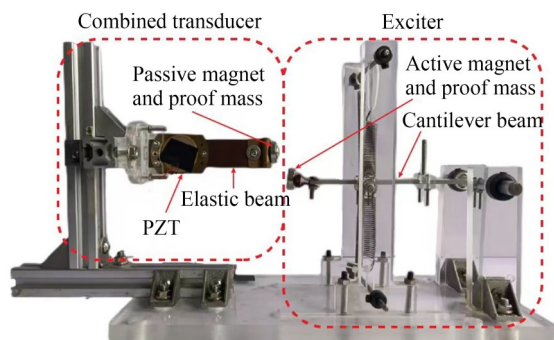


图 8 压电振动俘能器实验样机

Fig. 8 Experimental prototype of piezoelectric vibration energy harvest

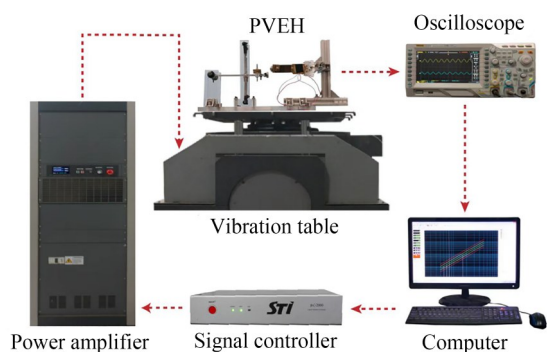


图 9 压电振动俘能器测试系统

Fig. 9 Piezoelectric vibration energy harvest test system

由仿真结果可知,激励器上纵摆质量  $m_1$ 、组合换能器上横摆质量  $m_2$  及磁铁间距  $L$  会影响俘能器的输出性能。为验证理论和仿真的正确性,在其他条件不变的情况下选取合适的磁铁直径,探究  $m_1, m_2, L_x, L_y$  及  $L_z$  对俘能器输出电压幅频特性的影响。

图 10 给出了纵摆质量  $m_1$  不同时输出电压与

表 2 压电振动俘能器的结构尺寸参数

Tab. 2 Structural dimension parameters of PVEH

参 数	初始值
纵摆质量 $m_1/\text{g}$	20
横摆质量 $m_2/\text{g}$	5
横向磁铁间距 $L_x/\text{mm}$	10
纵向磁铁间距 $L_y/\text{mm}$	5
竖向磁铁间距 $L_z/\text{mm}$	15
激励器弹簧刚度 $k/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	300

激励频率的关系曲线。由图可知,存在两阶谐振频率使俘能器的输出电压达到峰值,将这两阶谐振频率分别记为  $f_1$  和  $f_2$  ( $f_1 < f_2$ ),峰值电压分别记为  $U_{n1}$  和  $U_{n2}$ ,图 11 为谐振频率  $f$  及所对应的输出电压  $U_n$  与  $m_1$  的关系曲线。由图 10 和图 11 可知:

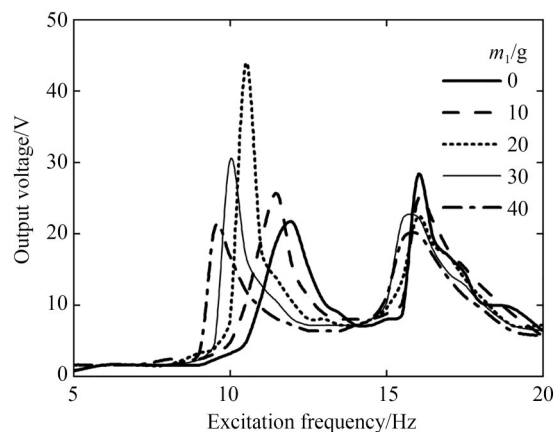


图 10 纵摆质量不同时输出电压与激励频率的关系曲线

Fig. 10 Relation curves between output voltage and excitation frequency with different longitudinal mass

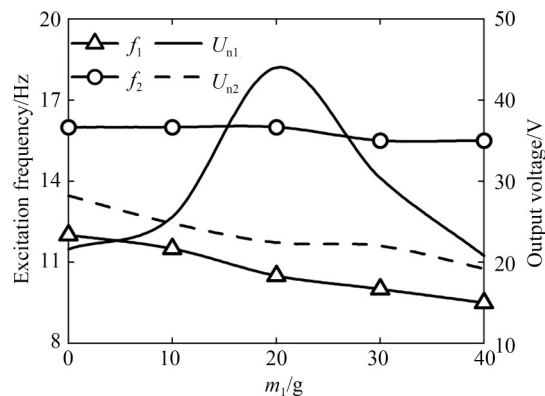


图 11 谐振频率及输出电压与纵摆质量的关系曲线

Fig. 11 Relation curves between output power and excitation frequency with different longitudinal mass

$m_1$  为 0, 10, 20, 30 及 40 g 时 ( $f_1, U_{n1}$ ) 分别为 (12 Hz, 21.6 V), (11.5 Hz, 25.6 V), (10.5 Hz, 44 V), (10 Hz, 30.4 V) 及 (9.5 Hz, 20.8 V); ( $f_2, U_{n2}$ ) 分别为 (16 Hz, 28.2 V), (16 Hz, 24.8 V), (16 Hz, 22.4 V), (15.5 Hz, 22 V) 及 (15.5 Hz, 19.2 V)。由此可知,  $m_1$  增大时,  $f_1$  减小,  $f_2$  基本不变,  $U_{n2}$  减小,  $U_{n1}$  先增大后减小并在  $m_1=20$  g 时达到最大, 实验结果与图 3 数值仿真结果基本一致。

图 12 给出了横摆质量  $m_2$  不同时输出电压与激励频率的关系曲线, 图 13 为谐振频率  $f$  及它对应的输出电压  $U_n$  与  $m_2$  的关系曲线。由图 12 和图 13 可知: 当  $m_2$  为 0, 5, 10, 15 及 20 g 时, ( $f_1, U_{n1}$ ) 分别为 (11 Hz, 20.8 V), (11 Hz, 21.2 V), (11.5 Hz, 24 V), (11 Hz, 27.2 V) 及 (10.5 Hz, 28 V);

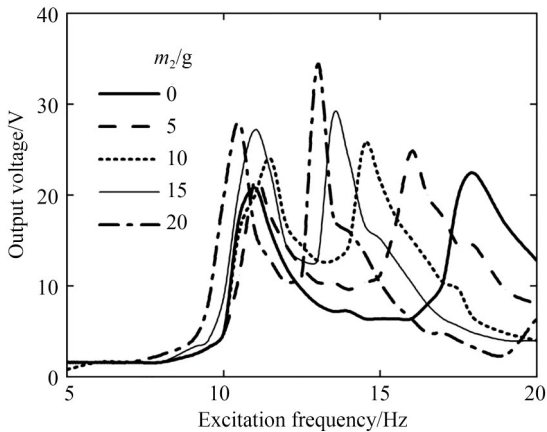


图 12 横摆质量不同时输出电压与激励频率的关系曲线

Fig. 12 Relation curves between output voltage and excitation frequency with different transversal mass

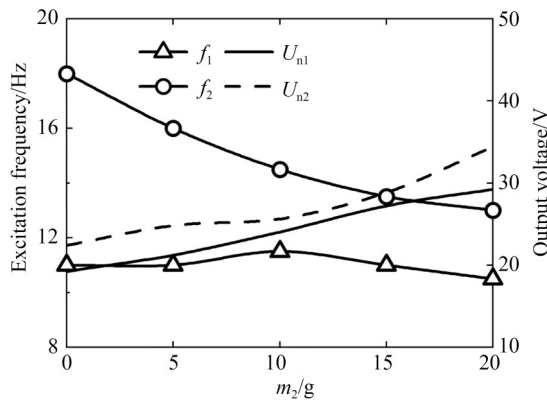


图 13 谐振频率及输出电压与横摆质量的关系曲线

Fig. 13 Relation curves between output power and excitation frequency with different transversal mass

( $f_2, U_{n2}$ ) 分别为 (18 Hz, 22.4 V), (16 Hz, 24.8 V), (14.5 Hz, 25.6 V), (13.5 Hz, 28.8 V) 及 (13 Hz, 34.4 V)。由此可知,  $m_2$  增大时,  $f_1$  基本不变,  $f_2$  减小,  $U_{n1}$  和  $U_{n2}$  增大, 该结果与图 4 数值仿真结果基本一致。

图 14 给出了横向磁铁间距  $L_x$  不同时输出电压与激励频率的关系曲线, 图 15 为谐振频率  $f$  及它对应的输出电压  $U_n$  与  $L_x$  的关系曲线。由图 14 和图 15 可知: 当  $L_x$  为 0, 5, 10, 15 及 20 mm 时, ( $f_1, U_{n1}$ ) 分别为 (12.5 Hz, 26.4 V), (11.5 Hz, 29.6 V), (11.5 Hz, 24 V), (11 Hz, 22.4 V) 及 (11 Hz,

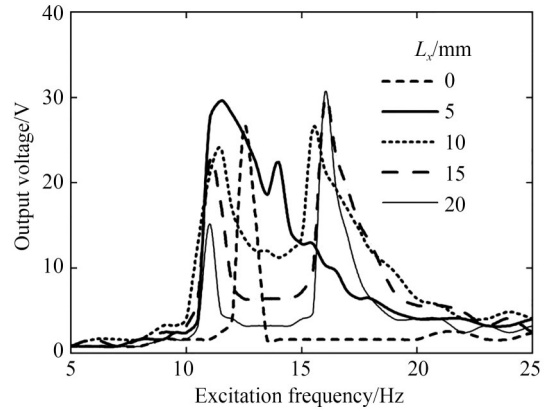


图 14 横向磁铁间距不同时输出电压与激励频率的关系曲线

Fig. 14 Relation curves between output voltage and excitation frequency with different transversal magnet spacings

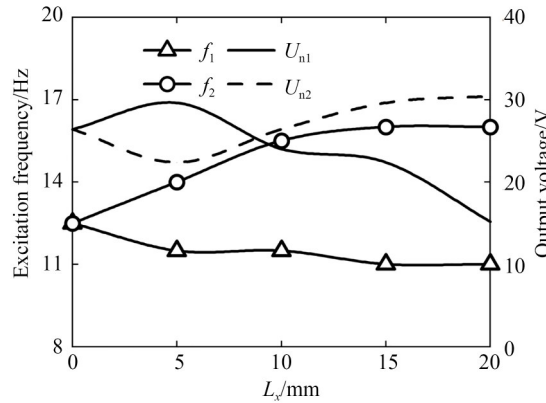


图 15 谐振频率及输出电压与横向磁铁间距的关系曲线

Fig. 15 Relation curves between output power and excitation frequency with different transversal magnet spacings

15.2 V); ( $f_2, U_{n2}$ ) 分别为 (12.5 Hz, 26.4 V), (14 Hz, 22.4 V), (15.5 Hz, 26.4 V), (16 Hz, 29.6 V) 及 (16 Hz, 30.4 V), 即  $L_x$  增大时,  $f_1$  逐渐减小,  $f_2$  逐渐增大,  $U_{n1}$  先增大后减小,  $U_{n2}$  先减小后增大, 在  $L_x=0$  mm 时  $f_1$  和  $f_2$  重合, 输出电压  $U_{n1}$  达到最大值。结合图 6 的仿真结果可知, 随着  $L_x$  的增大, 磁铁间径向磁力先增大后减小, 这与实验中  $U_{n1}$  先增大后减小的结果一致; 此外,  $L_x$  增大时,  $f_1$  和  $f_2$  的差值逐渐增大, 说明频带逐渐变宽, 故调节  $L_x$  可以满足拓宽频带、提高俘能器的环境适应性的实际需求。

图 16 给出了纵向磁铁间距  $L_y$  不同时输出电压与激励频率的关系曲线, 图 17 为谐振频率  $f$  及它对应的输出电压  $U_n$  与  $L_y$  的关系曲线。由图 16 和图 17 可知: 当  $L_y$  为 5, 7.5, 10 及 15 mm 时, ( $f_1, U_{n1}$ ) 分别为 (11.5 Hz, 34.4 V), (11 Hz, 14.4 V), (11.5 Hz, 11.2 V) 及 (11 Hz, 4.8 V); ( $f_2, U_{n2}$ ) 分别为 (15.5 Hz, 23.2 V), (15 Hz, 27.2 V), (14.5 Hz, 24 V) 及 (14.5 Hz, 17.6 V), 即  $L_y$  增大时,  $f_1$  基本不变,  $f_2$  小幅减小,  $U_{n1}$  和  $U_{n2}$  均逐渐减小。结合图 7 的仿真结果可知,  $L_y$  的增大使磁铁间的轴向磁力减小, 压电振子变形量减小导致输出电压  $U_{n1}$  和  $U_{n2}$  减小; 此外, 当  $L_y$  减小时  $f_1$  和  $f_2$  的差值增大, 即有效频带逐渐变宽, 且输出电压  $U_{n1}$  和  $U_{n2}$  增大, 故存在合适的  $L_y$  使俘能器获得较高的输出电压和较宽的有效频带。

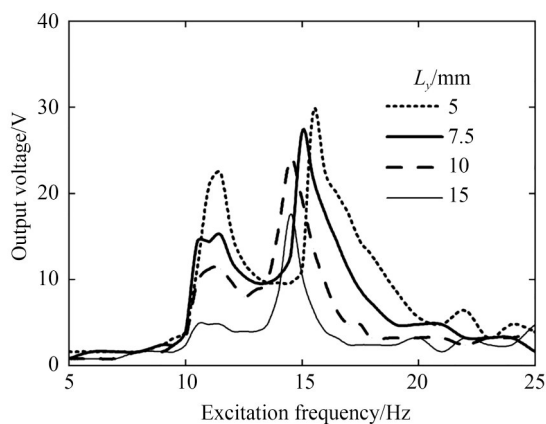


图 16 纵向磁铁间距不同时输出电压与激励频率的关系曲线

Fig. 16 Relation curves between output voltage and excitation frequency with different longitudinal magnet spacings

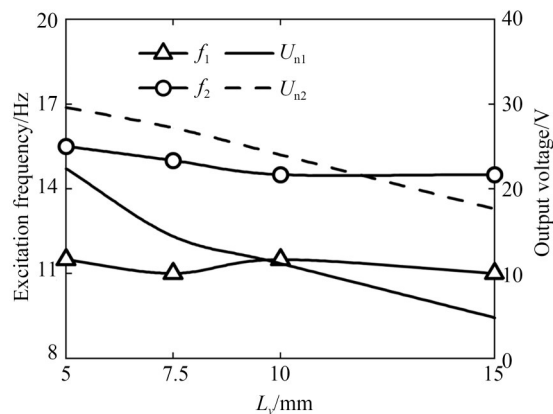


图 17 谐振频率及输出电压与纵向磁铁间距的关系曲线  
Fig. 17 Relation curves between output power and excitation frequency with different longitudinal magnet spacings

图 18 给出了竖向磁铁间距  $L_z$  不同时输出电压与激励频率的关系曲线, 图 19 为谐振频率  $f$  及它对应的输出电压  $U_n$  与  $L_z$  的关系曲线。由图 18 和图 19 可知: 当  $L_z$  为 0, 5, 10, 15 及 20 mm 时, ( $f_1, U_{n1}$ ) 分别为 (9 Hz, 12.8 V), (9.5 Hz, 10.4 V), (10 Hz, 16 V), (11.5 Hz, 33.6 V) 及 (11.5 Hz, 16 V); ( $f_2, U_{n2}$ ) 分别为 (20 Hz, 14.4 V), (20 Hz, 14.4 V), (17.5 Hz, 20.8 V), (15 Hz, 29.6 V) 及 (15.5 Hz, 12 V), 即随着  $L_z$  的增大, 在  $0 \text{ mm} < L_z < 15 \text{ mm}$  内,  $f_1$  增大,  $f_2$  减小,  $U_{n1}$  和  $U_{n2}$  整体趋势均由缓变快大幅增大; 在  $15 \text{ mm} < L_z < 20 \text{ mm}$  内  $f_1$  和  $f_2$  基本不变,  $U_{n1}$  和  $U_{n2}$  逐渐减小, 在  $L_z=15 \text{ mm}$  时

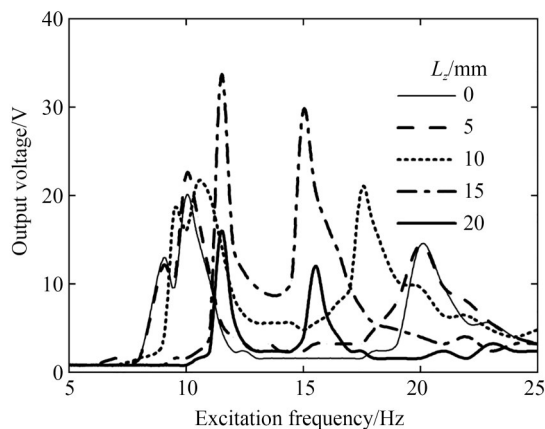


图 18 竖向磁铁间距不同时输出电压与激励频率的关系曲线

Fig. 18 Relation curves between output voltage and excitation frequency with different vertical magnet spacings



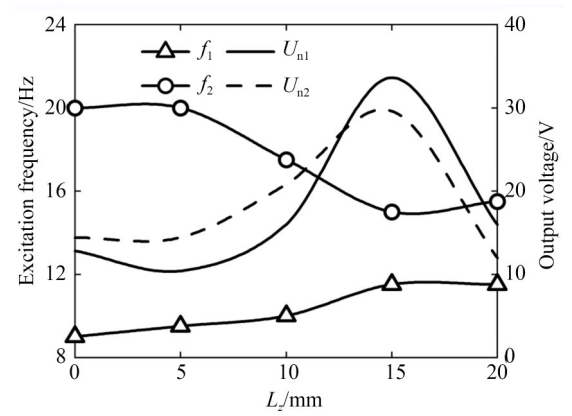


图 19 谐振频率及输出电压与竖向磁铁间距的关系曲线  
Fig. 19 Relation curves between output power and excitation frequency with different vertical magnet spacings

$U_{n1}$  和  $U_{n2}$  达到最大值。俘能器的输出电压变化主要由两方面决定,一方面是横摆簧片受到磁力使压电振子弯曲产生电能,故在不考虑其他影响条件的情况下输出电压随磁力的增大而增大;另一方面是横摆簧片在摆动时会受到主动磁铁的阻力作用,阻力变大会引起横摆簧片的弯曲量变小、输出电压变小。 $L_z$  较小时横摆簧片受到的磁力虽大,但摆动时阻力也很大,此时  $U_{n1}$  和  $U_{n2}$  较小; $L_z$  继续增大到 15 mm 时,横摆簧片摆动受到的阻力较小,故  $U_{n1}$  和  $U_{n2}$  大幅增大; $L_z$  增大到 15 mm 之后由于距离过大,组合换能器受到的磁力较小,故  $U_{n1}$  和  $U_{n2}$  逐渐减小。

图 20 给出了不同激励频率下输出功率与负

载电阻  $R$  的关系曲线。功率测试中,俘能器的结构参数选取与表 2 相同。将俘能器外接两个整流桥,再以串联的方式连接到负载电阻上进行输出功率测试。由图可知,负载电阻和激励频率都会影响俘能器的输出功率,各激励频率下都存在最佳负载电阻使俘能器的输出功率最大;当激励频率为 15 Hz,负载电阻为 2 200 k $\Omega$  时,俘能器的最大输出功率为 0.122 mW。

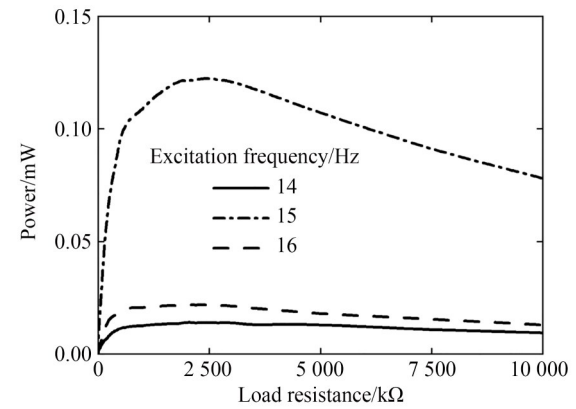


图 20 激励频率不同时输出功率与负载电阻的关系曲线  
Fig. 20 Relation curves between output power and load resistance at different excitation frequencies

表 3 给出了不同压电振动俘能器之间的性能对比。相比之下,本文提出的磁耦合式可调频压电振动俘能器在环境适应性和输出性能方面均有提升,能够更好地满足微电子器件和监测系统自供电的需求。

表 3 压电振动俘能器的性能比较  
Tab. 3 Performance comparison of PVEHs

俘能器	特 点	最大功率/ $\mu$ W	最大电压/V	有效频带/Hz
Wu <sup>[20]</sup> <i>et al.</i>	环形多层压电堆叠	4.76	15.8	50~65
马天兵 <sup>[5]</sup> 等	Z 型悬臂梁	701	13.8	0~40
Tang <sup>[21]</sup> <i>et al.</i>	两自由度悬臂梁	64.69	23.6	25~35
Yao <sup>[22]</sup> <i>et al.</i>	电磁双稳态	3.7	15.81	8~15
本 文	可调频磁耦合	122	44	8~24

5 结 论

本文建立了磁耦合式可调频压电振动俘能

器的物理模型,获得了俘能器纵摆质量及横摆质量与组合换能器位移传递率的关系,通过有限元建模仿真获得了磁铁直径及磁铁间距与磁力的

关系,在此基础上选取较佳的磁铁直径制作了实验样机并进行实验,得到了纵摆质量、横摆质量和磁铁间距离对俘能器输出性能的影响规律。在激励频率小于 20 Hz 时,俘能器存在两阶谐振频率  $f_1$  和  $f_2$ ,使它达到峰值电压  $U_{n1}$  和  $U_{n2}$ ,  $f_1$  和  $f_2$  分别为激励器和组合换能器的谐振频率。当纵摆质量  $m_1$  增加时,  $f_1$  减小,  $f_2$  保持不变;当横摆质量  $m_2$  增加时,  $f_1$  保持不变,  $f_2$  减小,  $f_1$  和  $f_2$  互相靠近时其对应的电压  $U_{n1}$  和  $U_{n2}$  会显著增大,故可通过调节俘能器的纵摆质量和横摆质量来改变有效带宽和输出电压,以适应低频、宽频带的自然振动

环境。  $L_x$  增大时,  $f_1$  减小,  $f_2$  增大,  $U_{n1}$  先增大后减小,  $U_{n2}$  先减小后增大;  $L_y$  增大时,  $f_1$  不变,  $f_2$  小幅减小,  $U_{n1}$  和  $U_{n2}$  均逐渐减小;随着  $L_z$  的增大,在  $0\text{ mm} < L_z < 15\text{ mm}$  内,  $f_1$  逐渐增大,  $f_2$  减小,  $U_{n1}$  和  $U_{n2}$  均由缓变快大幅增大,在  $15\text{ mm} < L_z < 20\text{ mm}$  内,  $f_1$  和  $f_2$  基本不变,  $U_{n1}$  和  $U_{n2}$  逐渐减小,故可通过改变磁铁间距来调节两阶谐振频率及其对应的输出电压。存在最佳负载电阻使输出功率最大,当激励频率为 15 Hz,负载电阻为 2 200 k $\Omega$  时,俘能器的最大输出功率为 0.122 mW。

### 参考文献:

- [1] WANG S, WANG C, GAO Z, *et al.* Design and performance of a cantilever piezoelectric power generation device for real-time road safety warnings[J]. *Applied Energy*, 2020, 276: 115512.
- [2] YANG Z, ZHOU S, ZU J, *et al.* High-performance piezoelectric energy harvesters and their applications[J]. *Joule*, 2018, 2(4): 642-697.
- [3] KEMPITIYA A, BORCA-TASCIUC D A, HELLA M M. Low-power ASIC for microwatt electrostatic energy harvesters[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 60(12): 5639-5647.
- [4] TOMMASINO D, MORO F, BERNAY B, *et al.* Vibration energy harvesting by means of piezoelectric patches: application to aircrafts[J]. *Sensors*, 2022, 22(1): 363.
- [5] 马天兵, 陈南南, 吴晓东, 等. Z 型压电振动能量收集装置[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(9): 1968-1980.  
MA T B, CHEN N N, WU X D, *et al.* Z-type piezoelectric vibration energy harvesting device[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(9): 1968-1980. (in Chinese)
- [6] XU Q Y, GAO A R, LI Y G, *et al.* Design and optimization of piezoelectric cantilever beam vibration energy harvester[J]. *Micromachines*, 2022, 13(5): 675.
- [7] 王淑云, 朱雅娜, 阚君武, 等. 间接激励压电发电机的建模仿真与试验研究[J]. *振动工程学报*, 2021, 34(1): 127-133.  
WANG SH Y, ZHU Y N, KAN J W, *et al.* Performance analysis and test of a piezoelectric energy harvester based on indirect excitation[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2021, 34(1): 127-133. (in Chinese)
- [8] ZHANG Z, HE L P, HU R H, *et al.* A compound cantilever beam piezoelectric harvester based on wind energy excitation[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2022, 93(8): 085003.
- [9] 吴义鹏, 周圣鹏, 袁进浩, 等. 用于超低频振动能收集的压电弹簧摆结构设计与实现[J]. *振动工程学报*, 2019, 32(5): 750-756.  
WU Y P, ZHOU SH P, QIU J H, *et al.* Design and implementation of a piezoelectric spring pendulum structure applied in ultra-low frequency vibration energy harvesting[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2019, 32(5): 750-756. (in Chinese)
- [10] SOMKUWAR R, CHANDWANI J, DESHMUKH R. Bandwidth widening of piezoelectric energy harvester by free moving cylinders in liquid medium[J]. *Microsystem Technologies*, 2021, 27(5): 1959-1970.
- [11] LIN W, XU Y F, WANG S J, *et al.* A nonlinear magnetic and torsional spring coupling piezoelectric energy harvester with internal resonance[J]. *Smart Materials and Structures*, 2022, 31(11): 115007.
- [12] SU W J. Impact-driven broadband piezoelectric energy harvesting using a two-degrees-of-freedom structure[J]. *Microsystem Technologies*, 2020, 26(6): 1915-1924.
- [13] WANG J-X, LI J-C, SU W-B, *et al.* A multi-folded-beam piezoelectric energy harvester for wide-band energy harvesting under ultra-low harmonic acceleration[J]. *Energy Reports*, 2022, 8: 6521-6529.
- [14] 杜小振, 张龙波, 于红. 磁力调频压电电磁复合发电设计与实验[J]. *光学精密工程*, 2016, 24

- (11):2753-2760.
- DU X ZH, ZHANG L B, YU H. Design and experiment of piezoelectric electromagnetic hybrid broadband generator with magnetic force tuning [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(11): 2753-2760. (in Chinese)
- [15] YANG W, TOWFIGHIAN S. A hybrid nonlinear vibration energy harvester[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, 90: 317-333.
- [16] YANG W, TOWFIGHIAN S. Bistable energy harvester using easy snap-through performance to increase output power [J]. *Energy*, 2021, 226: 120414.
- [17] 王淑云, 任泽峰, 阚君武, 等. 双磁耦合式压电振动俘能器的性能分析与试验[J]. *机械工程学报*, 2022, 58(20): 150-157.
- WANG SH Y, REN Z F, KAN J W, *et al.* Design, characterization and testing of magnetically coupled piezoelectric vibration energy harvester using double magnets[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(20): 150-157. (in Chinese)
- [18] YANG W, TOWFIGHIAN S. A parametric resonator with low threshold excitation for vibration energy harvesting [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2019, 446: 129-143.
- [19] KAN J W, FU J W, WANG S Y, *et al.* Study on a piezo-disk energy harvester excited by rotary magnets[J]. *Energy*, 2017, 122: 62-69.
- [20] WU J G, CHEN X, CHU Z Q, *et al.* A barbell-shaped high-temperature piezoelectric vibration energy harvester based on BiScO<sub>3</sub>PbTiO<sub>3</sub> ceramic [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 109(17): 173901.
- [21] TANG G, XIE G Y, HUANG B, *et al.* Two-degree-of-freedom piezoelectric MEMS energy harvester based on bulk PZT film [J]. *Sensors and Materials*, 2019, 31(12): 4079.
- [22] YAO M H, LIU P F, WANG H B. Nonlinear dynamics and power generation on a new bistable piezoelectric-electromagnetic energy harvester [J]. *Complexity*, 2020, 2020: 1-29.

#### 作者简介:



王淑云(1966—),女,吉林长岭人,教授,1988年、2001年和2008年于吉林大学分别获得学士、硕士和博士学位,主要从事工程问题的理论建模、仿真分析及优化等方面的研究。E-mail: jutwsy@163.com

#### 通讯作者:



张忠华(1980—),吉林松原人,男,博士,教授,硕士生导师,2009年于大连理工大学获得博士学位,主要研究方向为能量收集技术、压电传感器与驱动器技术、智能结构与系统。E-mail: zhangzh@zjnu.edu.cn