

DOI: 10.3901/JME.2022.20.150

# 双磁耦合式压电振动俘能器的性能分析与试验<sup>\*</sup>

王淑云<sup>1</sup> 任泽峰<sup>1</sup> 阚君武<sup>1,2</sup> 杨泽盟<sup>1</sup> 张忠华<sup>1,2</sup>  
黄乐帅<sup>1</sup> 孟凡许<sup>1,2</sup>

(1. 浙江师范大学精密机械与智能结构研究所 金华 321004;  
2. 浙江省城市轨道交通智能运维技术与装备重点实验室 金华 321004)

**摘要:** 为满足远程监测系统的自供电需求, 针对现有压电振动俘能器存在的问题, 提出一种双磁耦合式压电振动俘能器, 通过将压电振子对称安装于辅助悬臂梁两侧构成组合换能器, 使压电片在俘能过程中主要受压应力。经建模仿真, 获得了定磁铁间距与水平耦合间距对系统势能的影响规律, 以及不同激励条件下的系统动力学响应特性。为验证俘能器原理的可行性与仿真结果的正确性, 制作了样机并测试了不同条件下俘能器的输出特性。结果表明: 激励频率对俘能器输出波形影响较大; 选取适当的定磁铁间距和水平耦合间距( $11\text{ mm} \leq d \leq 12\text{ mm}$ ,  $10\text{ mm} \leq l \leq 16\text{ mm}$ ), 可有效降低俘能器固有频率、拓宽频带且幅频特性曲线较为平坦, 进而提高了俘能器的环境适应性和可靠性; 激励频率为 12 Hz、16 Hz 及 20 Hz 时, 试验所获得的最大输出功率分别为 1.27 mW、2.88 mW 及 5.31 mW, 其所对应的最佳匹配电阻约为 70 k $\Omega$ 。

**关键词:** 压电; 振动俘能器; 磁耦合; 组合换能器; 宽频

**中图分类号:** TN384; TM619

## Design, Characterization and Testing of Magnetically Coupled Piezoelectric Vibration Energy Harvester Using Double Magnets

WANG Shuyun<sup>1</sup> REN Zefeng<sup>1</sup> KAN Junwu<sup>1,2</sup> YANG Zemeng<sup>1</sup>  
ZHANG Zhonghua<sup>1,2</sup> HUANG Leshuai<sup>1</sup> MENG Fanxu<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Precision Machinery and Smart Structure, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004;  
2. Key Laboratory of Urban Rail Transit Intelligent Operation and Maintenance Technology and Equipment of Zhejiang Province, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004)

**Abstract:** In view of some drawbacks of many existing piezoelectric vibrator energy harvesters, a magnetically coupled piezoelectric vibration energy harvester using double magnets is proposed to meet the demands of self-powered remote monitoring systems in this paper. This harvester was characterized by the combined transducer, where two piezoelectric vibrators were symmetrically fixed on each side of the additional elastic beam and thus the vibrators were mainly subjected to the unidirectional compressive stress. To figure out the effect of the involved structural parameters on the harvester's performance, the simulation was firstly conducted based on the theoretical modelling. The results indicated that the vertical distance between two fixed magnets as well as the horizontal distance between the fixed magnet and movable magnet brought a significant impact on the potential energy of the system. Also, the dynamic response characteristics of the harvester under different excitation situations were obtained. Then, a harvester prototype was fabricated and its output characteristics was tested to verify the feasibility of the energy harvester and the correctness of the simulation results. The experimental results showed that the excitation frequency had a great influence on the output voltage waveform of the energy harvester. Meanwhile, with an appropriate vertical and horizontal distance ( $11 \leq d \leq 12\text{ mm}$ ,  $10 \leq l \leq 16\text{ mm}$ ), not only the

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(51877199, 52077201)、浙江省重点研发计划(2021C01181)、浙江省自然科学基金(LY20F010006)和国家大学生创新创业训练计划(201910345047)资助项目。20201201 收到初稿, 20211216 收到修改稿

natural frequency of the energy harvester could be significantly reduced and the working bandwidth could be broadened, but also a relatively flat voltage-frequency curve could be obtained in a quite wide frequency range. Thus, the environmental adaptability and reliability of the energy harvester was further improved. Besides, the maximum output powers of 1.27 mW, 2.88 mW and 5.31 mW were achieved with an optimal load resistance of 70 k $\Omega$  at the excitation frequency of 12 Hz, 16 Hz and 20 Hz, respectively.

**Key words:** piezoelectric; vibration energy harvester; magnetic coupling; combined transducer; broadband

## 0 前言

随着无线传感设备的普及,微功率远程实时监测系统及其相关的电子设备在日常生活中的应用越来越广泛,为传感监测系统供能的化学电池所带来的环境污染问题愈发严重,因此基于静电、电磁、热电及压电等原理的微型俘能器代替传统化学电池成为了目前研究的热点<sup>[1-5]</sup>。其中基于压电效应的俘能器具有结构简单、易微小化、输出能量密度大等优势,故其适用范围更广,研究价值更高<sup>[6]</sup>。

目前,压电俘能器可回收的能量包括旋转动能<sup>[7]</sup>、环境振动能<sup>[8]</sup>、人的肢体运动能<sup>[9]</sup>以及流体动能<sup>[10]</sup>等。由于振动在自然环境中无处不在<sup>[11]</sup>,且不易受天气等因素影响,因此振动俘能器在现实生活中的应用较广,比如用于收集桥梁、海浪等自然环境中的振动能。自然环境中各种振动的振动频率较低、振幅不稳定、频率变化范围较大,如车、船等载运工具工作时的振动频率大多为 10~30 Hz<sup>[12-13]</sup>。以往的压电振动俘能器,可工作的频带窄,应用范围受限,因此拓宽工作频带是振动俘能器研究的重点<sup>[14]</sup>。目前拓宽俘能器工作频带的方式主要有:① 多自由度<sup>[15]</sup>,通过增加压电振子数量或者在振子自由端增设“悬臂梁+质量块”的结构方式,使俘能器具有两个或多个相邻的谐振峰,但不易微小化且需额外增设整流桥电路,实用性不高;② 施加轴向屈曲力<sup>[16]</sup>,在简支梁两端施加轴向预压力,可实现俘能器在单、双稳态间切换来拓宽频带,其主要弊端是需要设置额外的机械部件来调节轴向力以便与环境条件相适应;③ 设置止动块<sup>[17]</sup>,通过设置刚性或弹性挡块使俘能器具有多段刚度实现拓频,但会产生较大的噪音且撞击易使压电振子损坏。上述方法均采用单体压电振子弯曲振动发电,工作中受到交替的拉压应力,在非结构环境中振幅较大,压电振子易碎,可靠性低。

针对现有压电振动俘能器不能满足振动频率变化范围较大、振幅不稳定的车船等载具能量回收的需求,本文提出一种双磁耦合式压电振动俘能器,

通过辅助悬臂梁与压电振子构成组合换能器,利用辅助悬臂梁激励压电振子产生单向变形。从理论和试验两方面研究了相关参数对俘能器输出性能的影响规律,为构造工作频带宽、可靠性高的新型振动俘能器提供新方法。

## 1 压电振动俘能器的结构及工作原理

本文所提出的双磁耦合式压电振动俘能器结构原理如图 1 所示,主要由一对预弯压电振子、辅助悬臂梁、动磁铁、定磁铁及框架构成,压电振子由铜基板和压电片粘接而成,并通过一定预应力使其形成初始的预弯结构,其一端经由垫块固定于框架,自由端则由于预弯结构使其顶在辅助悬臂梁上,可通过调整垫块使压电振子与辅助悬臂梁之间形成一定预压力,两个压电振子对称安装在辅助悬臂梁两侧,动磁铁置于辅助悬臂梁自由端,定磁铁置于框架上。由图 1 可知,当定磁铁间距、水平耦合间距、磁铁种类及附加质量等系统参数组合不同时,俘能器的性能会有较大差异,因此可调节这些参数来优化俘能器的性能。

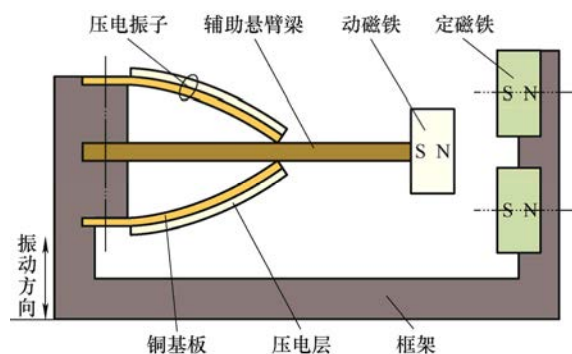


图 1 压电振动俘能器的结构示意图

工作过程中,两个压电振子相互制约。辅助悬臂梁向上振动时迫使上方压电振子向上弯曲变形,此时动磁铁受上方定磁铁的吸引力较大且吸引力越来越大,同时其下方压电振子受自身弹力复位。复位过程中,由于预压力的影响,下方压电振子仍然接触辅助悬臂梁;辅助悬臂梁向下振动时,动磁铁受下方定磁铁的吸引力较大,上方压电振子复位,

下方压电振子受到的压力增大。俘能过程中, 由于压电振子的预弯结构, 压电层主要承受压应力。同时, 由于压电振子的变形是辅助悬臂梁振动引起的, 当辅助悬臂梁处于非一阶振动时, 俘能器依然能有效工作。

在系统参数配置合理的情况下, 辅助悬臂梁有两个平衡位置, 系统形成双稳态振动。本文主要研究相吸磁铁的发电性能, 相斥磁铁的多稳态具体可以表现为: 辅助悬臂梁振幅较小时, 由于磁铁的排斥力使其振幅进一步变小; 振幅很大时, 在磁力的作用下将会放大振幅。相较于相斥磁铁, 相吸磁铁在振幅过小时利用磁力吸引动磁铁来提升俘能器的发电性能; 振幅过大时通过磁力限制动磁铁的位移, 拓宽了工作频带, 在有效俘能的同时提高了可靠性, 适用于车船等载具的能量回收。

影响俘能器性能的参数较多, 本文将通过建模仿真研究定磁铁间距和水平耦合间距对系统势能的影响以及不同激励条件下的系统动力学响应特性; 并通过试验获得相关参数对俘能器输出特性的影响规律, 验证双磁耦合式压电振动俘能器原理的可行性。

## 2 理论建模与仿真分析

### 2.1 磁力仿真分析

由于动、定磁铁间距离是时变的, 很难用解析的方法来表示, 本文采用有限元的方法对磁力进行研究。为便于分析, 将动磁铁与定磁铁间的磁力关系表示成图 2 所示的形式。其中  $F_m$  为动磁铁与定磁铁间的耦合作用力,  $F_v$  为  $F_m$  的竖直分量,  $d$  和  $l$  分别为初始时刻动磁铁与定磁铁间的水平耦合距离和两定磁铁间的距离,  $Z_m$  为动磁铁的纵向位移。仿真所用相关参数如表 1 所示。

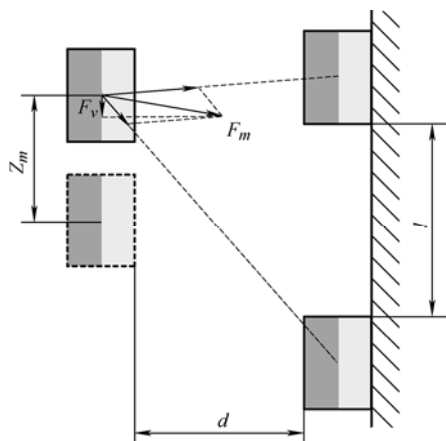


图 2 磁铁分布图

表 1 模拟仿真用相关参数

参数	量值
辅助悬臂梁长 $l_b/\text{mm}$	90
辅助悬臂梁宽 $w_b/\text{mm}$	20
辅助悬臂梁厚 $h_b/\text{mm}$	0.5
辅助悬臂梁弹性模量 $E/\text{GPa}$	130
磁铁长 $l_m/\text{mm}$	12
磁铁宽 $w_m/\text{mm}$	5
磁铁厚 $h_m/\text{mm}$	12
磁铁磁化强度 $M/(\text{kA}\cdot\text{m}^{-1})$	880
真空导磁率 $\mu_0/(\text{H}\cdot\text{m}^{-1})$	$4\pi\times 10^{-7}$
压电应变系数 $d_{31}/(\text{C}\cdot\text{N}^{-1})$	$2.85\times 10^{-14}$
末端质量 $m_2/\text{g}$	5.1
刚度比例系数 $\lambda$	0.87

以初始条件  $d=12\text{ mm}$  和  $l=12\text{ mm}$  为例, 磁力竖直分量仿真曲线与拟合函数曲线如图 3 所示。图中曲线表明, 拟合曲线与仿真曲线基本一致, 残差模仅为 1.1, 故可采用拟合函数来表征振动过程中磁铁所受磁力的竖直分量, 式中用  $u$  来表示动磁铁的纵向位移, 具体公式如下

$$F_v(u) = 0.83u^9 - 0.00015u^8 - 6.4u^7 + 0.0017u^6 + 17u^5 - 0.0064u^4 - 18u^3 - 0.0073u^2 + 4u + 0.011 \quad (1)$$

$$u = \frac{Z_m}{18} \quad (2)$$

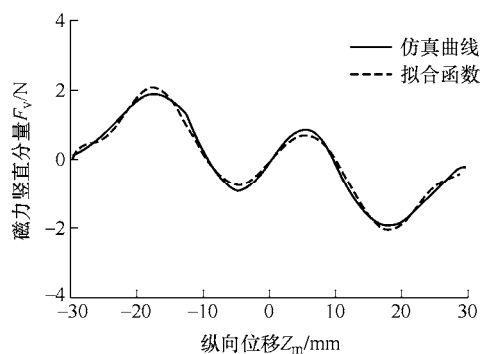


图 3 动磁铁的纵向位移对磁力竖直分量的影响

### 2.2 俘能器动力学模型的建立与分析

根据振动理论, 将压电振动俘能器简化为图 4 所示的弹簧-质量-阻尼系统, 工作时辅助悬臂梁视为受弹性力、磁耦合力、重力、阻尼力和机电耦合力作用, 根据牛顿第二定律和基尔霍夫定律, 俘能器的动力学方程可表示为<sup>[18]</sup>

$$\begin{cases} M_{eq}\ddot{Z} + C_{eq}\dot{Z} + K_{eq}Z - F_vZ - F_p = -AM_{eq}(\cos \omega t) \\ C_p\dot{V} + \frac{V}{R} + \alpha_c\dot{Z} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $M_{eq}$  为系统等效质量;  $C_{eq}$  为系统等效阻尼;  $K_{eq}$  为系统等效刚度;  $Z_n$  为激励位移;  $R$  为外接负载电阻;  $F_p$  为等效质量所受的机电耦合力;  $C_p$  为压电片的等效电容;  $V$  为  $R$  两端的电压;  $\alpha_c$  为机电耦合系数。

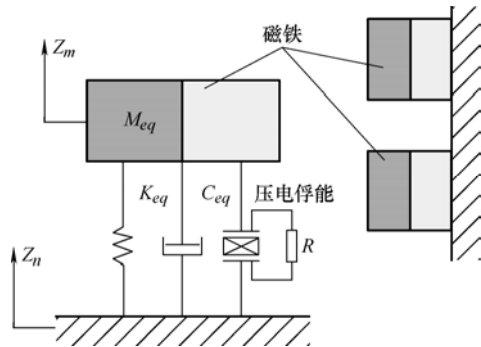


图4 等效集总参数模型

对式(3)进行无量纲处理, 令  $z$ 、 $v$  及  $\tau$  分别为量纲一位移、量纲一电压及量纲一时间, 整理得

$$\begin{cases} \ddot{z} + 2\zeta\dot{z} - \frac{1}{2}z(1-z^2) - \chi v = \alpha \cos \Omega \tau \\ \dot{v} + \lambda v + \kappa \dot{z} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $\zeta$  为系统阻尼比;  $\Omega$  为量纲一激励频率;  $\alpha$  为量纲一激励加速度;  $\lambda$  为时间常数;  $\chi$  与  $\kappa$  均为机电耦合系数。

为探究该俘能器的输出特性, 利用 Matlab 对式(4)进行了数值求解, 定性分析了量纲一激励加速度和量纲一激励频率不同时系统的动力学响应。当系统参数  $\zeta=0.01$ 、 $\Omega=0.7$ 、 $\chi=0.05$ 、 $\kappa=0.5$ 、 $\lambda=0.05$ 、 $z=0$ 、 $v=0$  时, 量纲一激励加速度不同情况下相位的仿真结果如图5所示。由图5可见, 随着  $a$  的增大, 系统先从阱内小幅运动跃阶至阱间大幅运动, 且当  $a$  增大到一定程度时系统响应无明显变化。

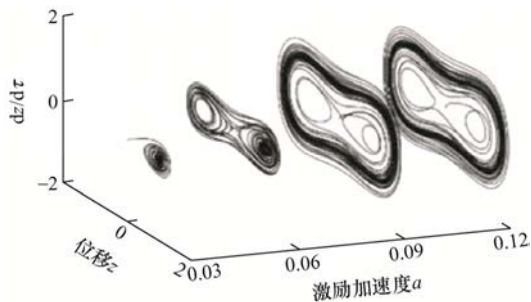


图5 量纲一激励加速度不同时的相位图

图6为系统参数  $\zeta=0.01$ 、 $\chi=0.05$ 、 $\kappa=0.5$ 、 $\lambda=0.05$ 、 $a=0.09$ 、 $z=0$ 、 $v=0$  时, 量纲一激励频率不同情况下的相位图。由图6可知, 随着  $\Omega$  的增大, 系统历经阱间倍周期运动、混动运动、阱内周期运动、阱间周期运动。

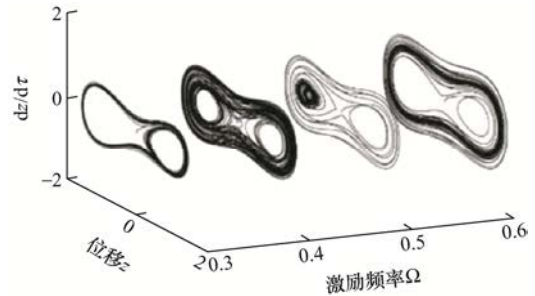


图6 量纲一激励频率不同时的相位图

上述分析表明, 激励加速度与激励频率对俘能器的动力学响应影响较大, 因此可以通过改变激励参数来调整俘能器的输出特性。

### 2.3 系统势能分析

根据俘能器结构原理可知, 当其他参数确定时, 磁力大小由定磁铁间距、水平耦合间距及动磁铁的纵向位移共同决定。而俘能器的势能主要由重力势能、弹性势能及磁势能构成, 具体可以表示为<sup>[19]</sup>

$$U(Z_m) = \int_0^{Z_m} [K_{eq}Z_m + M_{eq}g - F_v(Z_m)] dZ_m \quad (5)$$

下面将研究定磁铁间距、水平耦合间距及纵向位移对系统势能的影响。图7给出了势能  $U$  和纵向位移  $Z_m$  及定磁铁间距  $d$  的关系。由图7可知, 随着  $d$  的增大, 势能曲线由双势阱逐渐变为单势阱, 原点 ( $Z_m=0$ ) 由非稳定点变成了稳定点: 当  $d \leq 12$  mm 时阱深随  $d$  减小而增加, 这表明减小水平耦合间距有助于使辅助悬臂梁形成有效的双稳态振动; 当  $d \geq 20$  mm 时俘能器接近无耦合磁力的系统 ( $d \rightarrow \infty$ ), 其势能曲线只有一个势阱, 说明此时不存在磁力耦合作用或磁耦合力较弱。因此, 可以通过减小水平耦合间距来增强系统的双稳态振动效果。

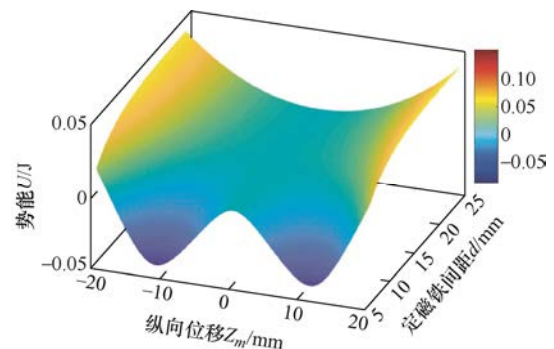


图7 势能和纵向位移及定磁铁间距的关系图



除了纵向位移及定磁铁间距外,水平耦合间距对系统势能也有较大影响。图 8 给出了势能  $U$  和纵向位移  $Z_m$  及水平耦合间距  $l$  的关系。图 8 表明,随着  $l$  的增大,势能曲线由单势阱逐渐变为双势阱最后又变为单势阱:当  $l < 10 \text{ mm}$  时,势能曲线有且仅有一个势阱,如  $l = 0 \text{ mm}$  时,仅有一个势阱且势阱比无磁耦合力的更陡峭;当  $10 \text{ mm} \leq l \leq 36 \text{ mm}$  时,随着  $l$  的增大原点从稳定点变为非稳定点,势能曲线由单势阱逐渐变为双势阱,势阱深度先增大后减小,两个稳定点间的距离不断变大;当  $l > 36 \text{ mm}$  时,势能曲线由双势阱逐渐演变为单势阱,原点从不稳定点变为稳定点。因此,可通过调节定磁铁间距使辅助悬臂梁达到较佳的双稳态振动效果。

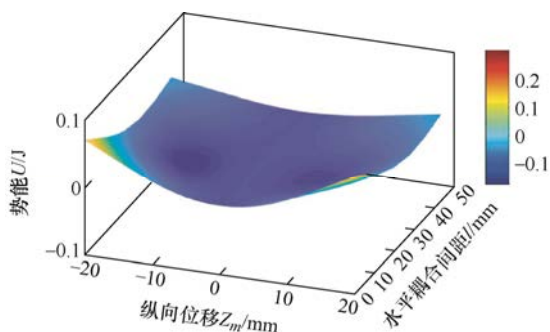


图 8 势能和纵向位移及水平耦合间距的关系图

上述仿真结果表明,俘能器的性能受激励参数、定磁铁间距及水平耦合间距等因素的影响。为验证仿真结果的正确性,下面将通过试验的方法研究俘能器的输出性能。

### 3 试验测试与分析

为探究压电振动俘能器输出特性并验证仿真结果的正确性,设计制作了如图 9 所示的样机及测试系统。试验所用仪器设备主要有 DC-1000 振动台、SA-15 功率放大器、RC-2000 振动控制仪、加速度传感器、俘能器、计算机及数字示波器等。预弯压

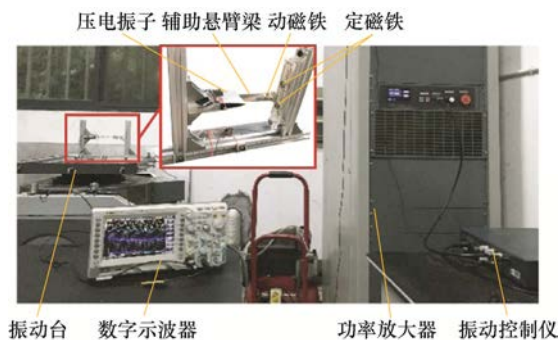


图 9 试验测试平台及样机

电振子(预弯半径为  $140 \text{ mm}$ , 尺寸为  $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ )对称安装在铍青铜辅助悬臂梁(尺寸为  $90 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ )两侧,动磁铁固定在辅助悬臂梁的自由端,定磁铁(动/定磁铁尺寸均为  $\Phi 12 \times 5 \text{ mm}^3$ )安装在框架上,可灵活调节定磁铁间的距离。

图 10 为激励频率不同时输出电压的时域波形图。由图 10 可知,激励频率对输出电压波形影响较大:当  $f = 16 \text{ Hz}$  时,波动幅值较大,出现了均匀的波峰;当  $f$  增大至  $25 \text{ Hz}$  时,波动幅值较小,出现了大小不同的两个波峰。为了合理评价俘能器的电压输出特性,本文提取了电压波形的幅值并结合概率密度函数对正、负半波幅值进行了分析,正、负半波幅值分别对应一个概率密度最大的电压幅值,将两者的差值作为输出电压  $V_g$ ,以此分析俘能器的电压输出特性<sup>[20]</sup>。为了方便起见,规定:①低频段和高频段分别指激励频率  $f$  介于  $10 \sim 25 \text{ Hz}$  和  $25 \sim 40 \text{ Hz}$ ;②有效频带指输出电压大于  $10 \text{ V}$  所对应的频率区间;③试验中,未给出的  $l$  与  $d$  均取  $12 \text{ mm}$ 。

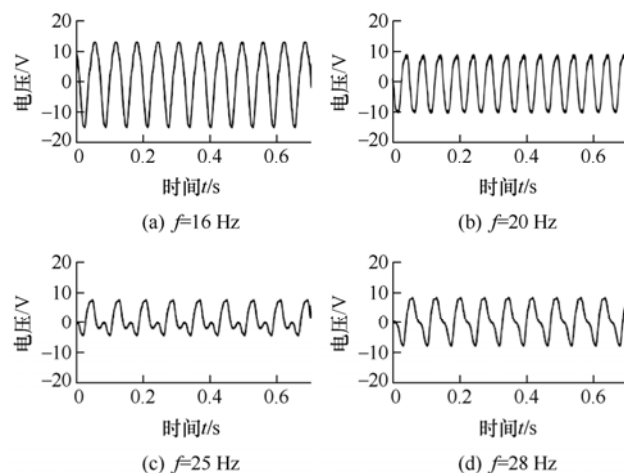


图 10 激励频率不同时输出电压的时域波形

图 11 为水平耦合间距  $d$  不同时的幅频特性曲线。俘能器的固有频率、有效带宽及频带与水平耦合间距  $d$  的关系曲线如图 12 所示。对比图 12 各曲线可以看出:存在一个激励频率使俘能器输出电压达到最大,且最佳激励频率随水平耦合间距的变化而变化,例如当水平耦合间距为  $14 \text{ mm}$  时,系统的固有频率为  $23 \text{ Hz}$ ,而当水平耦合间距为  $12 \text{ mm}$  时,系统的固有频率为  $16 \text{ Hz}$  左右,降低了约  $30\%$ ;在有些情况下存在两个激励频率使俘能器输出电压较大(第二个激励频率即二阶固有频率);当  $10 \text{ mm} \leq d < 11 \text{ mm}$  时,有效带宽随着  $d$  的增大而减小,其原因

为  $d$  较小时磁力较大, 有助于使辅助悬臂梁形成稳定的双稳态振动; 当  $11 \text{ mm} \leq d \leq 12 \text{ mm}$  时, 俘能器出现二阶固有频率, 有效频带较宽且皆在  $20 \text{ Hz}$  左右, 幅频特性曲线较为平坦, 在拓宽频带的同时进一步提高了系统的可靠性; 当  $d > 12 \text{ mm}$  时, 随着  $d$  的增大有效带宽无明显变化, 其原因为磁铁水平耦合间距较大时磁力较小, 系统无法形成稳定的双稳态振动, 且随着  $d$  的进一步增大磁力变化不明显; 上述现象与图 7 仿真结果总体趋势较为一致, 但数值上有所差异, 主要是在模拟仿真中, 无法获取系统实际的阻尼比等参数, 同时存在磁力的非线性因素, 故很难建立精确的模型。综上, 水平耦合间距对俘能器发电性能有较大影响, 因此需要根据实际环境中的振动情况确定较佳的水平耦合间距。

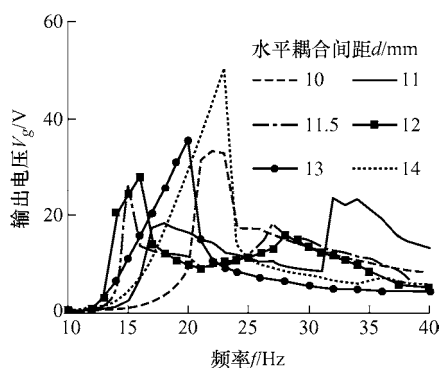


图 11 水平耦合间距不同时的幅频特性曲线

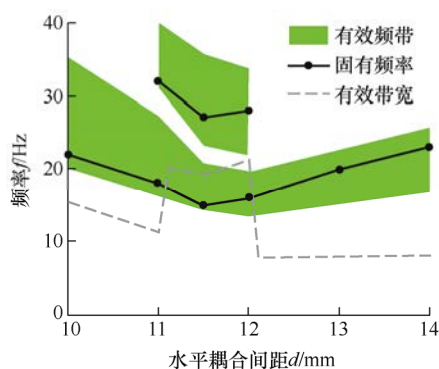


图 12 固有频率、有效频带及有效带宽与水平耦合间距的关系

为进一步探究定磁铁间距对俘能器发电性能的影响, 同时给出了定磁铁间距  $l$  不同时的幅频特性曲线和俘能器的固有频率、有效带宽及频带与定磁铁间距  $l$  的关系曲线, 如图 13、14 所示。图中各曲线变化趋势表明: 存在一个激励频率使俘能器输出电压达到最大, 且最佳激励频率随定磁铁间距的变化而变化, 在有些情况下出现二阶固有频率; 当

$l < 10 \text{ mm}$  时, 有效带宽随着  $l$  的增大而减小, 主要原因为此时代磁铁间距较近, 磁力限制了动磁铁的振幅, 大大降低了俘能器的高频响应; 当  $10 \text{ mm} \leq l \leq 16 \text{ mm}$  时, 俘能器出现二阶固有频率, 有效带宽较宽且皆在  $18 \text{ Hz}$  左右, 幅频特性曲线较为平坦, 在拓宽频带的同时进一步提高了系统的可靠性; 当  $16 \text{ mm} < l \leq 48 \text{ mm}$  时, 有效带宽随着  $l$  的增大先增大后基本不变, 产生该现象原因因在于当  $16 \text{ mm} < l \leq 28 \text{ mm}$  时定磁铁间距适中, 由于磁力的影响动磁铁的振幅随着  $l$  的增大而增大, 有助于使辅助悬臂梁形成双稳态振动; 而当  $l > 28 \text{ mm}$  时, 磁力较小,  $l$  的变化对系统影响有限, 这与理论分析较为吻合。因此, 可通过调节磁铁间距来提高低频响应或降低高频响应。

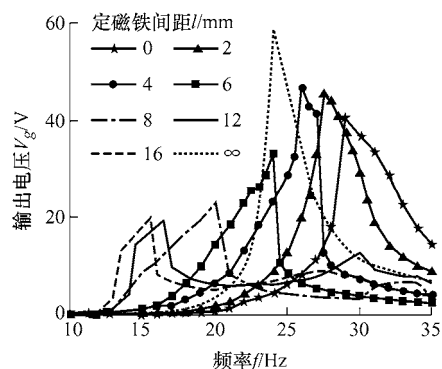


图 13 定磁铁间距不同时的幅频特性曲线

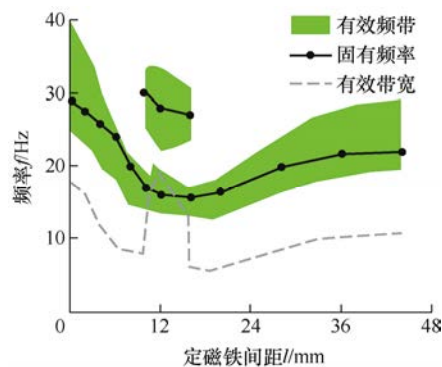


图 14 固有频率、有效频带及有效带宽与定磁铁间距的关系

为获得负载电阻对俘能器输出功率的影响规律, 试验中, 将俘能器输出端接入整流电路中, 再利用数字示波器测试电路中电阻箱两端的电压, 然后计算得到不同负载下俘能器的输出功率  $P_g$ 。图 15 给出了激励频率不同时输出功率与负载电阻的关系曲线。对比图中曲线可以发现: 输出功率随着激励频率的增大而增大; 存在最佳的负载电阻使输出功率最大; 当激励频率分别为  $12 \text{ Hz}$ 、 $16 \text{ Hz}$  及  $20 \text{ Hz}$  时, 最大输出功率分别为  $1.27 \text{ mW}$ 、 $2.88 \text{ mW}$  及

5.31 mW, 且最大功率所对应的最佳匹配电阻约为 70 k $\Omega$ 。

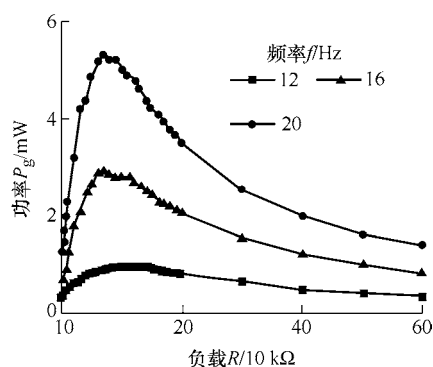


图 15 输出功率与负载电阻的关系

## 4 结论

本文提出了一种双磁耦合式压电振动俘能器, 并从理论和试验两方面研究了水平耦合间距、定磁铁间距及激励参数对俘能器相关参数及发电特性的影响规律, 通过试验发现, 该俘能器的工作频带为 15~30 Hz, 适用于振动频率较低、频率变化范围较大的环境, 具体结论如下。

(1) 改变激励参数会影响俘能器的动力学响应; 随着  $d$  的增大, 势能曲线由双势阱逐渐变为单势阱, 原点由非稳定点变成了稳定点; 随着  $l$  的增大, 势能曲线由单势阱逐渐变为双势阱最后又变为单势阱。

(2) 激励频率对俘能器波形影响较大; 存在一个激励频率使俘能器输出电压达到最大, 在有些情况下出现二阶固有频率; 当  $11\text{ mm} \leq d \leq 12\text{ mm}$  时, 俘能器出现二阶固有频率, 有效带宽较宽且皆为 20 Hz 左右; 当  $10\text{ mm} \leq l \leq 16\text{ mm}$  时, 俘能器出现二阶固有频率, 有效带宽较宽且皆为 18 Hz 左右。

(3) 输出功率随着激励频率的增大而增大; 存在最佳的负载电阻使输出功率最大; 当激励频率分别为 12 Hz、16 Hz 及 20 Hz 时, 最大输出功率分别为 1.27 mW、2.88 mW 及 5.31 mW, 且最大功率所对应的最佳匹配电阻约为 70 k $\Omega$ 。

## 参考文献

- [1] 阚君武, 张肖逸, 王淑云, 等. 一种错位旋磁激励压电俘能器[J]. 中国机械工程, 2016, 27(16): 2207-2210.  
KAN Junwu, ZHANG Xiaoyi, WANG Shuyun, et al. A piezoelectric harvester excited by malposed rotary magnets[J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(16): 2207-2210.
- [2] ZHANG Z, WANG S, KAN J, et al. A pneumatic piezoelectric vibration energy harvester based on the compressed air-transducer-structure interaction[J]. Energy Conversion and Management, 2010, 213: 112861.
- [3] FAN K, LIU J, CAI M, et al. Exploiting ultralow-frequency energy via vibration-to-rotation conversion of a rope-spun rotor[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 225: 113433.
- [4] WANG J, GENG L, DING L, et al. The state-of-the-art review on energy harvesting from flow-induced vibrations[J]. Applied Energy, 2020, 267: 114902.
- [5] TRAN N, GHAYESH M H, ARJOMANDI M. Ambient vibration energy harvesters: A review on nonlinear techniques for performance enhancement[J]. International Journal of Engineering Science, 2018, 127: 162-185.
- [6] 樊康旗, 刘朝辉, 王连松, 等. 从人体行走中收集能量的鞋上压电俘能器[J]. 光学精密工程, 2017, 25(5): 1272-1280.  
FAN Kangqi, LIU Zhaohui, WANG Liansong, et al. Shoe-mounted piezoelectric energy harvester for collecting energy from human walking[J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(5): 1272-1280.
- [7] KAN J, FU J, WANG S, et al. Study on a piezo-disk energy harvester excited by rotary magnets [J]. Energy, 2017, 122: 62-69.
- [8] ZHANG Z, KAN J, WANG S, et al. Performance dependence on initial free-end levitation of a magnetically levitated piezoelectric vibration energy harvester with a composite cantilever beam[J]. IEEE Access, 2017, 5: 27563-27572.
- [9] SIDDIQUE A R, MAHMUD S, van HEYST B, et al. A comprehensive review on vibration based micro power generators using electromagnetic and piezoelectric transducer mechanisms[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 106: 728-747.
- [10] 王淑云, 余杰, 阚君武, 等. 腔式压电气流发电机结构与性能研究 [J]. 农业机械学报, 2018, 49(1): 421-425.  
WANG Shuyun, YU Jie, KAN Junwu, et al. Structure and performance of piezoelectric airflow energy harvester [J]. Transactions of the Chinses Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 421-425.
- [11] JI H, QIU J, ZHU K. Vibration control of a composite beam using self-sensing semi-active approach[J]. Chinese

- Journal of Mechanical Engineering, 2010, 23(5): 663-670.
- [12] 耿彦超, 胡嘉骏, 汪雪良, 等. 基于模型试验的江海直达船波激振动与砰击载荷研究[J]. 中国造船, 2014, 55(3): 43-52.
- GENG Yanchao, HU Jiajun, WANG Xueliang, et al. Investigation of spring and slamming loads on river-to-sea ships by model test[J]. Shipbuilding of China, 2014, 55(3): 43-52.
- [13] 武俊达, 董大伟, 闫兵, 等. 液压模块挂车刚柔耦合动态响应特性及摆臂疲劳分析[J]. 振动与冲击, 2014, 33(7): 37-44.
- WU Junda, DONG Dawei, YAN Bing, et al. Dynamic response characteristics and swing-arm fatigue analysis for a hydraulic modular trailer based on rigid-flexible coupling simulation[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(7): 37-44.
- [14] 姚丙盟, 刘志平, 李文锋. 基于双稳态的振动能量收集系统的设计[J]. 中国机械工程, 2015, 26(13): 1736-1741.
- YAO Bingmeng, LIU Zhiping, LI Wenfeng. Design of vibration energy harvester based on bistability[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(13): 1736-1741.
- [15] YANG Z, YANG J. Connected vibrating piezoelectric bimorph beams as a wide-band piezoelectric power harvester[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2009, 20(5): 569-574.
- [16] MASANA R, DAQAQ M F. Relative performance of a vibratory energy harvester in mono-and bi-stable potentials[J]. Journal of Sound and Vibration, 2011, 330(24): 6036-6052.
- [17] LIU H, LEE C, KOBAYASHI T, et al. Investigation of piezoelectric mems-based wideband energy harvesting system with assembled frequency-up-conversion mechanism[J]. Procedia Engineering, 2011, 25: 725-728.
- [18] HE X Q, RAFIEE M, MAREISHI S. Nonlinear dynamics of piezoelectric nanocomposite energy harvesters under parametric resonance[J]. Nonlinear Dynamics, 2015, 79(3): 1863-1880.
- [19] ANDÒ B, BAGLIO S, TRIGONA C, et al. Nonlinear mechanism in MEMS devices for energy harvesting applications[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2010, 20(12): 125020.
- [20] 王淑云, 富佳伟, 阚君武, 等. 一种脱涡纵振式压电管道气流俘能器[J]. 机械工程学报, 2019, 55(8): 24-29.
- WANG Shuyun, FU Jiawei, KAN Junwu, et al. A pipe airflows piezoelectric energy harvester with longitudinal vibration excited by vortex shedding [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(8): 24-29.

作者简介: 王淑云, 女, 1965 年出生, 教授。主要研究方向为工程问题的理论建模、仿真分析及优化。

E-mail: wshy888@zjnu.edu.cn

孟凡许(通信作者), 男, 1986 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为振动俘能器、能量回收与自供电技术。

E-mail: fanxumeng@zjnu.edu.cn