

双端磁耦合式压电振动俘能器结构设计

董新博, 刘海鹏, 陈林雄, 高世桥

(北京理工大学 爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

摘要: 现有的非线性压电俘能器的输出功率提升主要通过改变俘能器的结构或引入非线性元素, 但这些方法在提高俘能结构的输出功率, 拓宽俘能器的俘能频带方面能力受限。该文设计了一种双端磁耦合式悬臂梁结构压电俘能结构, 在利用永磁体引入非线性元素的基础上优化俘能结构, 进一步提高系统的输出电压, 拓宽俘能频带。通过将悬臂梁俘能结构等效为复杂边界条件的悬臂梁, 推导磁耦合式悬臂梁结构的工作状态方程, 并得到磁耦合式悬臂梁俘能结构的输出电压与永磁铁间距的关系, 并通过实验测试进行验证。结果表明, 在永磁体间距为 5 mm 时, 压电俘能结构获得最大的输出功率, 在最佳的永磁铁间距和负载电阻下, 双端压电磁耦合式悬臂梁的输出功率可达传统悬臂梁式压电俘能结构的 1.5 倍, 谐振频率下降约 7 Hz。

关键词: 压电材料; 俘能器; 压电磁耦合; 永磁体; 输出电压

中图分类号: TN384; TP212 **文献标识码:** A

Structure Design of Piezomagnetoelastic Energy Harvester Based on Double Cantilever Vibration

DONG Xinbo, LIU Haipeng, CHEN Linxiong, GAO Shiqiao

(State Key Lab. of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The improvement of the output power of the existing nonlinear piezoelectric energy harvesters is mainly realized by changing the structure or introducing into the nonlinear elements. However, these methods have limited ability to improve the output power of the devices and broaden the harvesting bandwidth. In this paper, a double-cantilever piezomagnetoelastic structure is designed to optimize the harvester. In addition, by setting permanent magnets, the output voltage can be further improved, and the bandwidth can be broadened. The double cantilever structure is equivalent to a cantilever with complex boundary conditions. The working state equations of the piezomagnetoelastic energy harvester are deduced and the relationship between the output voltage and the space of the permanent magnet is obtained and verified by experimental. The experiment results show that the maximum output power is obtained when the distance between permanent magnets is 5 mm. Under the optimal permanent magnet distance and load resistance, the output power of the double cantilever piezomagnetoelastic energy harvester is 1.5 times as much as that of the conventional cantilever energy harvester and resonance frequency decreases about 7 Hz.

Key words: piezoelectric material; energy harvester; piezomagnetoelastic; permanent magnet; output voltage

0 引言

由于传感器领域的迅速发展, 超低功耗无线传感器的产品已越来越多。在很多应用环境中, 制约无线传感器性能的不是其灵敏度或其他技术参数, 而是驱动其工作的电池寿命。因此, 为了深度挖掘无线传感器的潜力, 国内、外研究人员将目光集中在可自供能的器件。先进的无线传感器的功耗低, 可从环境中获取能量来驱动低功耗传感器。环境振动、温度差和热辐射是几种可能的能量源。其中, 振

动在工业环境中较常见, 且可持续为小型器件供电。目前, 将振动能量转化为电能的方式有压电式、电磁式、静电式及磁致伸缩式^[1]。

目前, 国内、外多数振动能量俘获技术集中在以线性压电方程为理论基础的线性压电振子, 其俘能结构的最大输出功率通常限制在其固有频率处, 一旦环境振动频率稍微偏离俘能结构的固有频率, 输出功率会迅速下降。环境振动频率通常分布在某个频带内, 而不是固定在某个固定频率。

收稿日期: 2016-11-16

作者简介: 董新博(1991-)男, 黑龙江大庆人, 硕士生, 主要从事俘能器的研究。通信作者: 刘海鹏(1973-)男, 辽宁人, 副教授, 主要从事微机电技术的研究。

近几年,国内、外研究人员为解决俘能结构输出带宽问题,提出了几种非线性压电俘能结构。

LEADENHAM S 等^[2]设计了一种 M 形低频非线性俘能结构,与线性结构相比,基频输出功率提高了 6 倍。SHEN W 等^[3]设计的一种阵列式压电磁耦合能量收集器,实验表明,阵列式压电磁耦合能量收集器能有效提高输出功率。

本文基于磁耦合式压电俘能结构设计了一种双端磁耦合式压电振动俘能器,目的是拓宽俘能频带,提高俘能效率。

1 双端磁耦合式压电俘能系统模型的构建

1.1 传统悬臂梁压电俘能系统模型的构建

图 1 为传统的压电式俘能器的基本结构。当悬臂梁结构受到外界的振动激励时,压电悬臂梁和质量块组成的悬臂梁-质量块结构在简谐振动激励下产生线性振动。

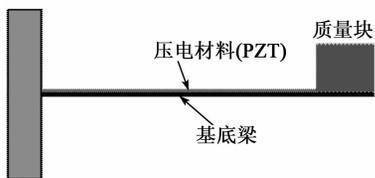


图 1 传统悬臂梁压电俘能结构

由振动力学^[4]可知,典型的欧拉-伯努利梁(见图 2)的横向振动方程为

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EI \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} \right) + \rho A \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} = p(x,t) \quad (1)$$

式中: $y(x,t)$ 是在为悬臂梁上距原点 O 处为 x 的截面在 t 时刻时的横向位移,即该截面处梁的挠度; E 为梁的杨氏模量; I 为梁截面对于中性轴的惯性矩; ρ 为梁的密度; A 为梁的横截面积; $p(x,t)$ 为单位长度梁上的外力分布。

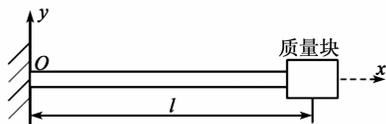


图 2 典型的欧拉-伯努利梁

忽略梁的自重,令 $p(x,t) = m(x,t) = 0$,可得梁的横向自由振动方程为

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EI \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} \right) + \rho A \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} = 0 \quad (2)$$

梁的主振动可假设为

$$y(x,t) = Y(x)bsin(\omega t + \varphi) \quad (3)$$

式中: $Y(x)$ 为梁的振型函数; ω 为激振频率; φ 为相位角。

将式(3)代入式(2)可得

$$EIY^{(4)} - \omega^2 \rho AY'' = 0 \quad (4)$$

对于等截面梁,式(4)为

$$Y'''' - \beta^4 Y = 0 \quad (5)$$

式中 $\beta^4 = \frac{\omega^2 \rho A}{EI}$ 。

利用简谐函数和双曲函数,式(5)通解为

$$Y(x) = C_1 \cos \beta x + C_2 \sin \beta x + C_3 \cosh \beta x + C_4 \sinh \beta x \quad (6)$$

式中 C_1, C_2, C_3, C_4 为微分方程通解的待定系数。

根据复杂梁的边界条件,带有端部质量块的悬臂梁的边界条件为

$$\begin{cases} Y(0) = 0 \\ Y'(0) = 0 \\ Y''(l) = 0 \\ EIY'''(l) = -\omega^2 MY(l) \end{cases} \quad (7)$$

式中: M 为端部质量块质量; l 为悬臂梁长度。

将式(6)代入式(7)中解出频率方程为

$$EI\beta^3 (1 + \cos \beta l \cosh \beta l) = \omega^2 M (\sin \beta l \cosh \beta l - \cos \beta l \sinh \beta l) \quad (8)$$

可得主振型函数 $Y(x)$ 的解为

$$Y_i(x) = C_i [\cos \beta_i x - \cosh \beta_i x - \frac{\cos \beta_i l + \cosh \beta_i l}{\sin \beta_i l + \sinh \beta_i l} (\sin \beta_i x - \sinh \beta_i x)] \quad (i = 1, 2, \dots) \quad (9)$$

将悬臂梁的挠度根据式(9)的振型函数按无穷级数展开可得

$$y(x,t) = \sum_{i=1}^{\infty} Y_i(x) \cdot T_i(t) \quad (10)$$

式中 $T_i(t)$ 为时间的函数。

将式(10)代入式(1),两边同时乘以振型函数 $Y_j(x)$ 并对 x 积分,可得

$$\sum_{i=1}^{\infty} T_i \int_0^l Y_j (EIY_i''') dx + \sum_{i=1}^{\infty} \dot{T}_i \int_0^l \rho A Y_i Y_j dx = \int_0^l p(x,t) Y_j dx \quad (11)$$

由于振型间存在正交性,式(11)可化简为

$$\ddot{T}_j + \omega_j^2 T_j = \int_0^l p(x,t) Y_j(x) dx \quad (12)$$

式(12)可转化为

$$\begin{aligned} \ddot{T}_j + \omega_j^2 T_j &= [\rho A \int_0^l Y_j(x) dx + \\ &MY_j(l)] a(t) = \alpha_j a(t) \\ &(j = 1, 2, \dots) \end{aligned} \quad (13)$$

式中 $\alpha_j = \rho A \int_0^l Y_j(x) dx + MY_j(l)$; $a(t) = a_M \sin \omega t$

为激励加速度, a_M 为激励加速度幅值。

考虑实际情况中阻尼的影响,式(13)可表示为

$$\ddot{T}_j + 2\zeta_j \omega_j \dot{T}_j + \omega_j^2 T_j = \alpha_j a(t) \quad (j = 1, 2, \dots) \quad (14)$$

式中 ζ_j 为悬臂梁机械振动的阻尼比。将 $a(t) = a_M \sin \omega t$ 代入式(14),则有稳态解为

$$T_j(t) = \bar{T}_j \sin(\omega t - \varphi_j) \quad (j = 1, 2, \dots) \quad (15)$$

式中 \bar{T}_j 为时间函数的幅值; φ_j 为相位角。且

$$\begin{aligned} \bar{T}_j &= \frac{\alpha_j a_M}{\omega_j^2 \sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_j}\right)^2\right]^2 + 4\zeta_j^2 \left(\frac{\omega}{\omega_j}\right)^2}} \\ &(j = 1, 2, \dots) \end{aligned} \quad (16)$$

$$\varphi_j = \arctan \frac{2\zeta_j \frac{\omega}{\omega_j}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_j}\right)^2} \quad (j = 1, 2, \dots) \quad (17)$$

压电俘能器一般工作频率较低,通常在一阶固有频率附近,即 $\omega_j = \omega$,则式(16)、(17)可化简为

$$\bar{T} = \frac{\alpha a_M}{2\omega^2 \zeta} \quad (18)$$

$$\varphi = \frac{\pi}{2} \quad (19)$$

式中 $\alpha = \rho A \int_0^l Y(x) dx + MY(l)$ 。将式(18)、(19)代入式(15)可得悬臂梁一阶谐振时的时间响应函数为

$$T(t) = -\frac{\alpha a_M}{2\omega^2 \zeta} \cos \omega t \quad (20)$$

由式(9)可得悬臂梁的一阶谐振型函数为

$$\begin{aligned} Y(x) &= C_1 \left[\cos \beta x - \cosh \beta x - \right. \\ &\left. \frac{\cos \beta l + \cosh \beta l}{\sin \beta l + \sinh \beta l} (\sin \beta x - \sinh \beta x) \right] \end{aligned} \quad (21)$$

式中 βl 是式(8)的一阶解, C_1 由正则振型的归一化条件确定:

$$\int_0^l \rho A Y^2(x) dx = 1 \quad (22)$$

将式(20)、(21)代入式(10),可得悬臂梁处于一阶固有频率时的挠度为

$$\begin{aligned} y(x, t) &= -\frac{C_1 \alpha a_M}{2\omega^2 \zeta} \left[\cos \beta x - \cosh \beta x - \right. \\ &\left. \frac{\cos \beta l + \cosh \beta l}{\sin \beta l + \sinh \beta l} (\sin \beta x - \right. \\ &\left. \sinh \beta x) \right] \cos \omega t \end{aligned} \quad (23)$$

由文献[5]可知,悬臂梁式压电俘能单元的输出电压的幅值为

$$\bar{V}_p = \left| \frac{e d_{31} Y_p^*}{2\epsilon_{33}^S - d_{31}^2 Y_p^*} \cdot \frac{\alpha a_M}{2\omega^2 \zeta} \cdot Y'(l) \right| \quad (24)$$

式中: d_{31} 为 PZT 材料 3-方向的压电常数; Y_p^* 为复合材料的等效杨氏模量。

1.2 双端磁耦合式悬臂梁压电俘能系统模型的构建

线性压电俘能系统的俘能带宽有限。目前国内、外的相关研究主要集中在两方面^[6]:

1) 通过结构及几何尺寸优化设计,利用系统中各个部分的材料特性引入非线性元素,如基梁和 PZT 的非线性应力、应变关系。然而,PZT 本身为硬脆性材料,不能承受大应变,且依靠材料本身的非线性特性不利于系统特性的控制。

2) 通过引入外部的非线性作用力引入非线性元素。这种方式不改变材料本身的性质,避免对结构产生破坏,且外部非线性力可控,便于控制系统的各项参数。

为此,本文提出了一种双端磁耦合式压电俘能系统,用永磁体代替端部质量块,并将两悬臂梁相对放置,利用永磁体之间的相互作用力产生非线性力,作用在悬臂梁俘能结构上。

1.2.1 磁铁间排斥力的计算

如图 3 所示,2 个立方体磁铁几何尺寸、材料相同,两磁铁南极相对放置。图中, d 为永磁体间距, b , w 和 h 分别为永磁体长,宽和高。

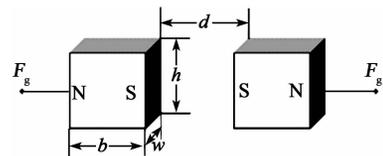


图 3 磁铁间作用力的计算
两块磁铁之间排斥力大小^[7]为

$$F_g = \frac{1.5}{1 + 3d} \times \frac{1}{2\mu_0} B^2 \omega h \quad (25)$$

式中: $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$ 为真空磁导率; B 为磁铁表面中心点处的磁场强度,且

$$B = \frac{B_r}{\pi} \left(\tan^{-1} \frac{\omega h}{2d \sqrt{\omega^2 + h^2 + 4d^2}} - \tan^{-1} \frac{\omega h}{2(b+d) \sqrt{\omega^2 + h^2 + 4(b+d)^2}} \right) \quad (26)$$

式中 B_r 为剩余磁感应强度,对于型号 Y25 的铁氧体磁铁, $B_r \approx 0.36T$ 。

将式(26)永磁体表面磁场强度及其他几何参数代入式(25)计算,可得永磁铁间排斥力为

$$F = \frac{1.5}{1+3d} \times \frac{\omega h}{2\mu_0} \left[\frac{B_r}{\pi} \left(\tan^{-1} \frac{\omega h}{2d \sqrt{\omega^2 + h^2 + 4d^2}} - \tan^{-1} \frac{\omega h}{2(b+d) \sqrt{\omega^2 + h^2 + 4(b+d)^2}} \right) \right]^2 \quad (27)$$

1.2.2 双端磁耦合式悬臂梁压电俘能系统模型的构建

图4为双端压电磁耦合式俘能器。由压电悬臂梁和互相产生磁耦合效应的永磁体组成。当此结构受到外界振动激励时,压电悬臂梁和永磁体组成的悬臂梁-质量块结构在简谐振动激励下产生线性振动,而由于永磁体相互作用产生斥力,压电悬臂梁产生非线性振动,故系统整体为非线性压电俘能结构。图5为磁耦合式俘能结构受力分析。

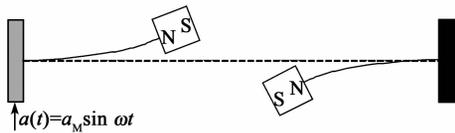


图4 双端磁耦合式俘能结构示意图

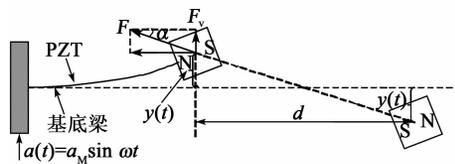


图5 磁耦合式俘能结构受力分析

假设振动过程中永磁体间距 d 保持不变,且两悬臂梁垂直方向的位移量相同,方向相反。可以判断,影响压电悬臂梁的主要是固定永磁体间作用力 F 的垂直分量,即

$$F_v = F \sin \alpha = F \times \frac{2y(t)}{\sqrt{y^2(t) + d^2}} \quad (28)$$

在悬臂梁振动过程中,端部质量振动幅度很小,可近似认为

$$\sin \alpha = \tan \alpha = \frac{y(t)}{d} \quad (29)$$

则 F_v 可简化为

$$F_v = F \tan \alpha = F \times \frac{2y(t)}{d} \quad (30)$$

对于正方体形状的永磁体, $b = \omega = h$, F 可简化为

$$F = \frac{1.5b^2}{2(1+3d)\mu_0} \left[\frac{B_r}{\pi} \left(\tan^{-1} \frac{b^2}{2d \sqrt{2b^2 + 4d^2}} - \tan^{-1} \frac{b^2}{2(b+d) \sqrt{2b^2 + 4(b+d)^2}} \right) \right]^2 \quad (31)$$

将式(30)代入式(7)的边界方程可得

$$\begin{cases} Y(0) = 0 \\ Y'(0) = 0 \\ Y''(l) = 0 \\ EIY'''(l) = -\omega^2 MY(l) - F_v \end{cases} \quad (32)$$

将式(6)代入式(32)求解可得频率方程为

$$EI\beta^3(1 + \cos \beta l \cosh \beta l) = (\omega^2 M + \frac{2F}{d})(\sin \beta l \cosh \beta l - \cos \beta l \sinh \beta l) \quad (33)$$

可得,俘能器的工作状态方程:

$$\begin{cases} \bar{V}_p = \left| \frac{e\delta d_{31} Y_p^*}{2\epsilon_{33}^S - d_{31}^2 Y_p^*} \cdot \frac{\alpha a_M}{2\omega^2 \zeta} \cdot Y'(l) \right| \\ F = \frac{1.5b^2}{2(1+3d)\mu_0} \left[\frac{B_r}{\pi} \left(\tan^{-1} \frac{b^2}{2d \sqrt{2b^2 + 4d^2}} - \tan^{-1} \frac{b^2}{2(b+d) \sqrt{2b^2 + 4(b+d)^2}} \right) \right]^2 \\ EI\beta^3(1 + \cos \beta l \cosh \beta l) = \left(\omega^2 M + \frac{2F}{d} \right) \cdot (\sin \beta l \cosh \beta l - \cos \beta l \sinh \beta l) \end{cases} \quad (34)$$

等效输出电压 V_{eq} 的幅值应满足:

$$\bar{V}_p \propto \left| \frac{\alpha a_M}{\omega^2} Y'(l) \right| = V_{eq} \quad (35)$$

将式(35)通过 MATLAB 数值计算可得出 V_{eq} 随 d 的变化关系,如图6所示。由图可看出, V_{eq} 随着 d 的增大而变小。

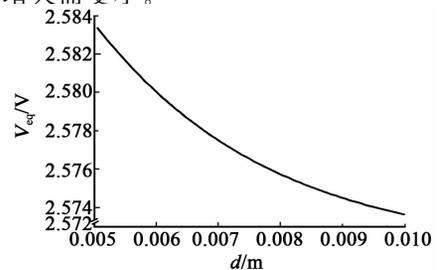


图6 等效输出电压随间距变化关系

2 实验研究

本文以实验测试的方式主要研究了永磁体间距和负载电阻对双端压电磁耦合式俘能器输出电压的影响。

2.1 双端压电磁耦合式俘能器样机的制作

本文中压电材料选用 PZT-5H,俘能结构的基底梁选用单晶铜,其结构参数和性能参数如表 1、2 所示。

表 1 结构材料性能参数

结构单元	压电材料	基底梁	永磁体
材 料	PZT-5H	单晶铜	Y25 铁氧体
剩磁强度/T	—	—	0.36
密度/(kg/m ³)	7.7×10 ³	7.85×10 ³	4.9×10 ³
杨氏模量/Pa	6×10 ¹⁰	2×10 ¹¹	—
泊松比	0.3	0.3	—

表 2 结构尺寸

结构单元	长/mm	宽/mm	高/mm
压电材料	20	25	0.2
基底梁	20	25	0.3
Y25 铁氧体	6	6	6

对于压电磁耦合式俘能结构,由于永磁体的作用,基底梁在根部与端部都具有一定的变形量,因此压电陶瓷材料粘贴在整个基底梁上^[8]。

2.2 实验系统搭建

本文的实验系统主要包括 3 部分,即

1) 激振设备。主要包括信号发生器、功率放大器和电动激振台。

2) 信号采集装置。主要包括加速度传感器、万用表、示波器和动态信号分析仪。

3) 实验夹具。为保证输出结果的稳定并保证永磁体在振动过程中不受其他磁场影响,本文采用无磁钢作为振动基座,并设计制作相关夹具,以保证能改变永磁体间距及间距准确,从而保证实验结果。俘能结构负载的变化采用一般电阻和可变电阻箱共同控制。

2.3 输出实验测试

下面通过实验测试的方式对双端压电磁耦合式俘能器进行进一步的分析。首先确定不存在磁耦合效应的情况下,悬臂梁式压电俘能结构的输出特性,确定两梁的固有频率,接下来分析永磁体间距对俘能结构输出的影响。在第一阶段的实验中,保证负载电阻大小不变,单独测量两悬臂梁结构的谐振频

率和输出电压。第二阶段的实验中,固定负载电阻不变,变化永磁体间距,记录输出电压,分析永磁体间距与输出电压间的关系。

图 7 为 1 号悬臂梁在 1 m/s² 下不同永磁体间距下的输出电压随频率变化曲线。显然,当磁耦合效应存在时,1 号悬臂梁出现了 2 个电压峰值,且其主要峰值对应的振动频率降低,说明磁耦合效应不仅可拓宽悬臂梁俘能结构的俘能带宽,且对降低俘能结构的谐振频率也有作用。

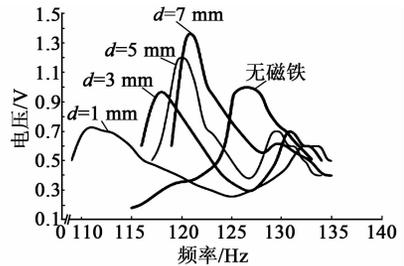


图 7 1 号悬臂梁在 1 m/s² 下不同永磁体间距下的输出电压随频率变化曲线

图 8 是激励加速度分别为 2 m/s² 和 3 m/s² 时 1 号悬臂梁的输出电压随频率变化曲线。由图可看出其变化规律基本相同。显然,1 号悬臂梁的固有频率约 127 Hz。综合考虑其输出电压值及拓宽俘能频带效应,对于 1 号悬臂梁本文选用 5 mm 间距较合适。

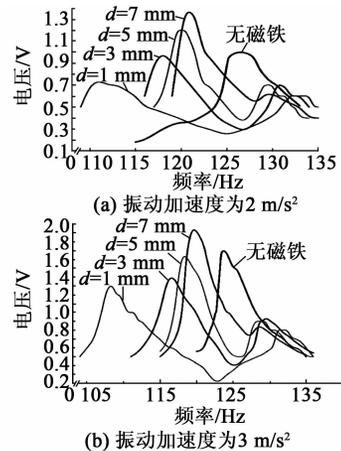


图 8 1 号悬臂梁在 2 m/s²、3 m/s² 下,不同永磁体间距下的输出电压

图 9 为 2 号悬臂梁在振动激励加速度不同时输出电压随频率变化曲线。由图可看出,2 号悬臂梁的固有频率约为 132 Hz,然而 2 号悬臂梁未出现 1 号悬臂梁的双峰值现象,但降低了谐振频率,增大了输出电压。

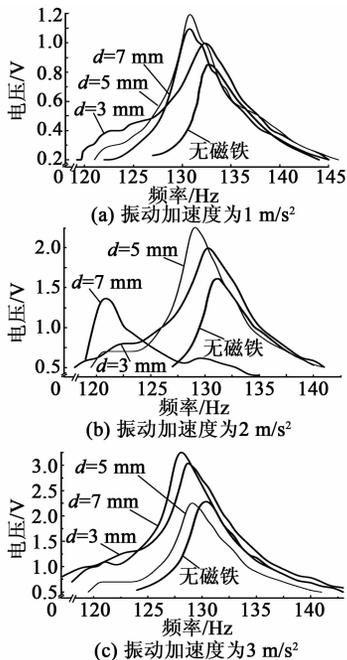


图9 2号悬臂梁在不同振动激励加速度下永磁体间距下的输出电压

3 结论

本文基于磁耦合式压电俘能结构设计了双端磁耦合式俘能器。根据永磁体间作用力的计算和悬臂梁结构的复杂边界条件方程,推导了双端磁耦合式俘能器的工作状态方程,并进行了实验验证,可得结论:

1) 在俘能结构中引入非线性磁力可有效提升压电俘能器的输出电压,且输出电压随永磁体间距

的减小而增大。

2) 在永磁体间距为5 mm时,本文涉及的俘能结构可得最佳的输出功率和输出电压,比悬臂梁式压电结构输出电压提升约50%,谐振频率下降约8 Hz。

参考文献:

- [1] ERTURK A, HOFFMANN J, INMAN D J. A piezo-magnetoelastic structure for broadband vibration energy harvesting[J]. *Appl Phys Lett*, 2009, 94(25):245102.
- [2] LEADENHAM S, ERTURK A. Nonlinear M-shaped broadband piezoelectric energy harvester for very low base accelerations: primary and secondary resonances [J]. *Smart Materials and Structures*, 2015, 24(5): 055021.
- [3] SHEN W, TAO M, CHEN D, et al. Modeling and simulation of piezomagnetoelastic energy harvester with beam array[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2015, 37(2):116-120.
- [4] 倪振华. 振动力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1989.
- [5] 高世桥, 刘海鹏, 金磊, 等. 微振动俘能技术[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2016.
- [6] 陈仲生, 杨拥民. 悬臂梁压电振子宽带低频振动能量俘获的随机共振机理研究[J]. *物理学报*, 2011, 60(7): 430-436.
- [7] 王瑜. 永磁装置中磁场力的计算[J]. *磁性材料及器件*, 2007, 38(5):49-52.
- [8] 蔡华通. 压电-电磁复合式俘能器性能研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.

(上接第710页)

- [10] 余珺, 沈春英. 0.92MgAl₂O₄-0.08(Ca_{0.8}Sr_{0.2})TiO₃ 介质陶瓷微波烧结的研究[J]. *电子元件与材料*, 2015, 34(5):1-4.
YU Jun, SHEN Chunying. Microwave sintering of 0.92MgAl₂O₄-0.08(Ca_{0.8}Sr_{0.2})TiO₃ ceramics [J]. *Electronic Component and Materials*, 2015, 34(5):1-4.
- [11] 龙廉骏, 徐建梅, 公衍生, 等. 微波烧结对 PLZT 陶瓷电学性能的影响 [J]. *无机材料学报*, 2015, 5(30): 499-504.
LONG Lianjun, XU Jianmei, GONG Yansheng, et al. Effect of microwave sintering on electrical properties of PLZT ceramics [J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2015, 5(30):499-504.
- [12] 于洋, 王旭盛, 姚西. Ba_{1-x}Sr_xTiO₃ 陶瓷介电性能的微波烧[J]. *国际陶瓷*, 2013, 39:335-339.

- YU Yang, WANG Xusheng, YAO Xi. Dielectric properties of Ba_{1-x}Sr_xTiO₃ ceramics prepared by microwave sintering [J]. *Ceramics International*, 2013, 39: 335-339.
- [13] 李家茂, 丘泰. Ca_{0.6}La_{0.2667}TiO₃ 介质陶瓷的微波烧结 [J]. *冶金材料国际学报*, 2012, 3(19):245-251.
LI Jiamao, QIU Tai. Microwave sintering of Ca_{0.6}La_{0.2667}TiO₃ microwave dielectric ceramics [J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2012, 3(19):245-251.
- [14] LIOU Y C, YANG S L. Calcium-doped MgTiO₃-Mg-Ti₂O₅ ceramics prepared using a reaction-sintering process [J]. *Materials Science and Engineering*, 2007, 142(2/3):116-120.
- [15] ETINNE S, SYLVAIN M. Peculiar effects of microwave sintering on ZnO based varistors properties [J]. *J Alloy Compd*, 2011, 509(21):6163-6169.