

# 双梁磁力压电振动能量采集器的实验和仿真\*

石朝成<sup>1</sup> 李响<sup>1</sup> 袁天辰<sup>1</sup> 陆泽琦<sup>1</sup> 宋汉文<sup>2</sup> 陈立群<sup>1†</sup>

(1. 上海大学应用数学和力学研究所, 上海 200072) (2. 同济大学航空航天与力学学院, 上海 200092)

**摘要** 基于非线性技术改善能量采集器的能量采集效果作用, 本文研究了非线性磁力耦合的双悬臂梁压电振动能量采集器, 该采集器由两条不同的固有频率悬臂梁与永磁体组成. 本文给出双梁磁力耦合压电能量采集器模型并建立了动力学方程式, 通过实验测试获取相关参数与拟合磁力公式, 数值仿真分析了双梁固有频率比 1:1.2 与 1:1.5 和永磁体初始间距 40mm 与 30mm 的 4 种结构能量采集器的电压输出性能与频率特征. 根据数值分析设计实验: 外激励加速度  $3\text{m/s}^2$  作用下, 双梁磁力结构能量采集器比单梁线性结构多一个电压共振峰; 双梁固有频率比为 1:1.5 比双梁固有频率比 1:1.2 的电压响应带宽宽; 初始磁距 30mm 共振峰值分别为 (12Hz, 39.4V) 与 (18Hz, 13.4V) 比初始磁距 40mm 两电压共振峰高且电压共振峰之间的电压输出比其他组合结构高.

**关键词** 压电振动能量采集器, 磁力, 双梁固有频率比, 初始磁距

DOI: 10.6052/1672-6553-2016-036

## 引言

随着微电机系统 (MEMS) 与传感器网络广泛应用, 其传统化学电池供能方式续航性差制约着其发展<sup>[1]</sup>. 振动是自然界普遍存在的一种现象, 振动型能量采集器能将自然界中的机械能转化为电能, 可以代替化学电池为 MEMS 供能. 当前振动能量采集器有静电式、压电式与电磁感应式. 其中, 压电式振动型能量采集器因其结构小且能量转化效率高备受人们关注<sup>[2-3]</sup>.

1996 年, Williams 和 Yates<sup>[4]</sup> 在微型结构中收集振动能转化为电能并投入实际使用. Jesong S J 等<sup>[5]</sup> 研究了上下压电层厚度不同的双层压电片能量采集器在比较近的频率范围内得到两个共振频率, 使频率响应带宽增加. 线性压电式能量采集器的不足之处为工作频率高, 输出电压共振峰值低且频带窄, 不利于收集环境中的振动能量. 非线性技术可以有效地改善能量采集器的采集效果<sup>[6]</sup>. 郭抗抗和曹树谦<sup>[7]</sup> 研究了能量采集器的结构非线性影响, 将压电材料的本构方程考虑为二次非线性, 发现压电材料非线性对系统响应的影响规律并实验

验证. 2008 年 Challa 等<sup>[8-9]</sup> 提出在压电悬臂梁末端设置 4 块永磁体, 研究了磁力方向对能量采集器采集频率的影响, 通过主动调节可以拓宽采集频带. M. Ferrari 等<sup>[10]</sup> 将压电悬臂梁和两个永磁体组合构成非线性能量采集器, 提高结构在一定振动频带范围内的输出电压. 2011 年, 马华安等<sup>[11]</sup> 根据 Challa 理论模型搭建实验平台, 测试了振动型能量采集器的低频响应带宽效果, 永磁铁代替压电悬臂梁端部的质量块, 同时在悬臂梁上下放置可变换极性的永磁铁, 测试结果表明, 相比传统无磁铁压电式振动能量采集器, 有效地扩展了频率响应带宽和提高了输出功率. 以上是单悬臂梁结构非线性能量采集器研究成果. 2009 年, Yang 等<sup>[12]</sup> 数值分析了双梁压电弹簧耦合振动的不同弹簧刚度和尖端质量的能量采集效果, 结果表明选取适当参数可以拓宽共振频带, 但共振峰值会减小. 2012 年, Tang 等<sup>[13]</sup> 设计了两自由度非线性压电振动型能量采集, 其结构为两悬臂梁端部固定永磁体, 磁力为吸引力, 永磁体初始磁间距为 10mm, 研究对比了单梁线性能量采集器和单梁非线性能量采集器能量采集器性能, 数值仿真与实验结果表明, 双梁结构

2016-01-26 收到第 1 稿, 2016-04-07 收到修改稿.

\* 国家自然科学基金重点资助项目 (11232009)

† 通讯作者 E-mail: lqchen@staff.shu.edu.cn

不仅拓宽了频率响应带宽,而且提高了系统输出功率.

本文研究了非线性磁力耦合双梁压电式振动能量采集器,理论建模得到该能量采集器的动力学方程式,实验测试得到方程式中参数.数值仿真分析了两悬臂梁不同固有频率比相同初始磁距的共振频率与输出电压性能;同一两悬臂梁固有频率比不同磁距,两电压共振峰间的电压输出性能.设计实验验证了数值仿真结果.

## 1 原理

本文能量采集器由两硬铝材质悬臂梁、压电陶瓷片(PZT-5A)与永磁体(NdFeB)构成.结构如图1所示,使用环氧树脂胶将压电陶瓷片粘在距离悬臂梁1根部,悬臂梁端部固定永磁体A组成压电悬臂梁,悬臂梁2端部固定永磁体B组成普通悬臂梁.各悬臂梁固定在固定块上,在水平基座上移动固定块,可使永磁体A、B的磁芯相对且磁距为 $D_0$ .在激励力 $F$ 作用下,压电悬臂梁与普通悬臂梁左右往复运动.永磁体磁距因双梁运动发生改变,磁力发生变化.受磁力影响,悬臂梁1、2运动相互干扰,压电悬臂梁产生非线性振动.压电悬臂梁上的压电片因悬臂梁运动而变形使内部偶极子不对称,两个相对表面出现正负相反的电荷,产生压电效应而输出电能,实现机-电转换.当永磁体A、B同(异)磁极相对时,磁力为排斥(吸引)力,本文采用排斥力.

根据图1所示得到本文双梁非线性能量采集器动力学方程:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1 + k_1 x_1 + \mu V - F_{mag} = m_1 \ddot{x}_f \\ m_2 \ddot{x}_2 + c_2 \dot{x}_2 + k_2 x_2 + F_{mag} = m_2 \ddot{x}_f \\ C_s \dot{V} + V/R - \mu \dot{x}_1 = 0 \end{cases} \quad (1)$$

若悬臂梁1、2端部永磁体为等质量铁块,此时能量采集器为单梁线性能量采集器,其动力学方程:

$$\begin{cases} m_i \ddot{x}_i + c_i \dot{x}_i + k_i x_i + \mu V = m_i \ddot{x}_f \\ C_s \dot{V} + V/R - \mu \dot{x}_1 = 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中 $m_i$ 、 $c_i$ 、 $k_i$ ( $i=1,2$ )为各悬臂梁一阶模态质量、阻尼系数和刚度. $\ddot{x}_f$ 为系统激励加速度, $C_s$ 为压电片电容, $R$ 为负载电阻, $\mu$ 为能量采集器系统的机

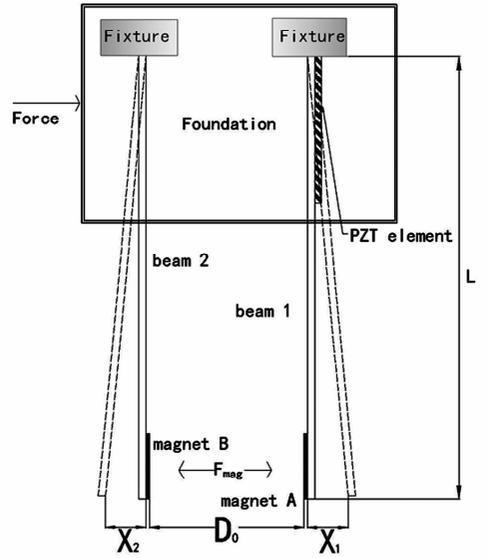


图1 双梁非线性压电式能量采集器模型

Fig. 1 Model of double-cantilever-beam nonlinear piezoelectric energy harvester

电耦合系数.多项式描述磁力公式 $F_{mag}$ :

$$F_{mag}(x) = \sum_{i=0}^l a_i x^i \quad (3)$$

公式(3)中的 $x$ 为永磁体的磁距, $D_0$ 为永磁体A、B的初始磁距, $x_1$ 、 $x_2$ 为外激励作用下悬臂梁1、2的变形量,向右为正方向,则 $x = x_1 - x_2 + D_0$ .

## 2 参数测试

测试结构的压电陶瓷片、悬臂梁1、2获取能量采集器动力学方程的相关参数,测试磁力与磁距关系,拟合出磁力公式 $F_{mag}$ .

硬铝悬臂梁1、悬臂梁2a和悬臂梁2b尺寸分别为 $290 \times 10 \times 3 \text{ mm}^3$ 、 $270 \times 10 \times 3 \text{ mm}^3$ 和 $250 \times 10 \times 3 \text{ mm}^3$ ,压电陶瓷片为锆钛酸铅(PZT-5A),其尺寸为 $30 \times 10 \times 1 \text{ mm}^3$ .永磁体(NdFeB)尺寸为 $\varphi 20 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ .UT39C数字万用表测得双层压电陶瓷片电容值为 $10.3 \text{ nF}$ .梅特勒-托利多PL2002精密天平(精度 $0.01 \text{ g}$ )测量压电悬臂梁质量、悬臂梁2a质量和悬臂梁2b质量分别为 $25.67 \text{ g}$ 、 $21.89 \text{ g}$ 和 $20.30 \text{ g}$ ,永磁体质量为 $17.01 \text{ g}$ .根据公式: $m_{eq} = \frac{33}{140}$

$M + M_b$ ,求得各悬臂梁的等效质量,其中 $M$ 为悬臂梁测量质量, $M_b$ 为悬臂梁顶端集中质量.

### 2.1 振动阻尼测试

根据“自由衰减法”使用亿恒AVANT MI-7008D数据采集与分析仪测试获取压电悬臂梁、悬

臂梁 2a 与悬臂梁 2b 的阻尼系数  $c$ 、一阶固有频率  $f$ . 外激励作用点在各悬臂梁顶端, 获得压电悬臂梁自由衰减曲线如图 2 所示.

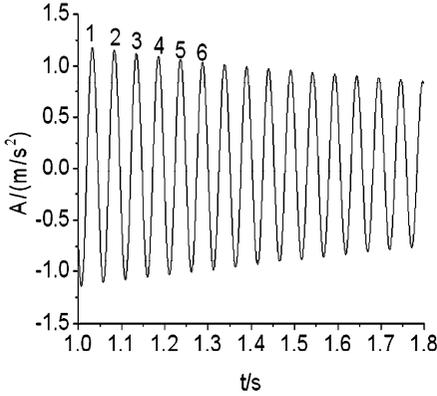


图 2 压电悬臂梁自由振动衰减曲线

Fig. 2 Decay curve of free vibration for piezoelectric cantilever beam

从图 2 可知, 压电悬臂梁的一阶固有频率为 11.5 Hz, 阻尼系数  $c$  为 0.026, 同理可知悬臂梁 2a 和悬臂梁 2b 的固有频率为 13.75 Hz 和 17.25 Hz, 阻尼系数  $c$  分别为 0.021 和 0.024. 根据  $w_1 =$

$$\sqrt{\frac{k_{eq}}{m_{eq}}}, \text{ 得到各悬臂梁的等效刚度 } k_{eq}.$$

由上获取公式 (1)、(2) 中压电悬臂梁、悬臂梁 2a 和悬臂梁 2b 参数, 如表 1 所示.

表 1 各悬臂梁的参数

Table 1 Identified parameters of cantilever beams

| Parameter       | Piezoelectric beam    | cantilever 2a | cantilever 2b |
|-----------------|-----------------------|---------------|---------------|
| $M_{eq}/g$      | 23.060                | 22.170        | 21.800        |
| $K_{eq}/(N/m)$  | 120.270               | 165.310       | 255.830       |
| $C_{eq}/(Ns/m)$ | 0.026                 | 0.021         | 0.024         |
| $\mu/(N/V)$     | $2.91 \times 10^{-4}$ | —             | —             |
| $C_s(nF)$       | 10.300                | —             | —             |

## 2.2 磁力公式拟合

使用数字测力计 (精度 0.001 N, 量程  $\pm 5$  N)、激光测距仪 (精度 0.001 m) 与永磁体固定导轨组成测试装置. 得到排斥磁力与磁距关系曲线, 如图 3 所示. 图 3 可拟合得到公式 (3) 中磁力公式:

$$F_{mag} = -2.793 \times 10^9 x^5 + 4.2384 \times 10^8 x^4 - 2.57083 \times 10^7 x^3 + 7.842 \times 10^5 x^2 - 12271x + 78.367$$

拟合残差模 0.21703.

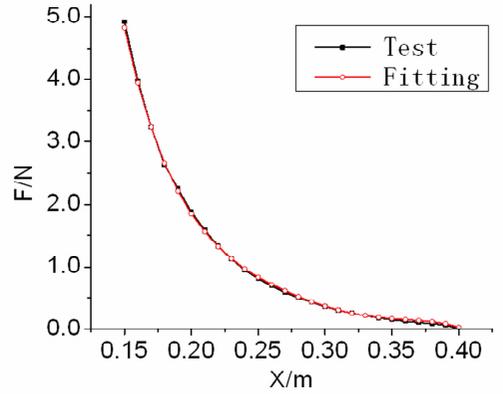


图 3 排斥力与磁距关系曲线

Fig. 3 Relationship of repulsive force and magnet space

## 3 仿真分析

压电悬臂梁与普通悬臂梁端部为永磁体时, 压电悬臂梁发生非线性振动, 构成双梁非线性能量采集器. 由参数测试可知, 两悬臂梁的两个固有频率比分别为 1:1.2 与 1:1.5. 若两悬臂梁端部为等质量铁块时, 双梁运动无相互影响, 此时结构为单梁线性能量采集器.

使用 MATLAB 软件数值仿真, 外激励加速度  $a = 3 \text{ m/s}^2$ , 负载电阻值  $R = 40 \text{ k}\Omega$ , 结果如下:

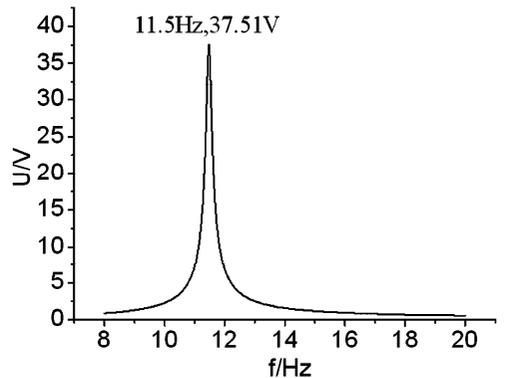


图 4 单梁线性能量采集器电压输出曲线

Fig. 4 Output voltage of single-cantilever linear PEH

将悬臂梁端部换成永磁铁, 设定初始磁距为 40 mm, 得到双梁非线性能量采集器的电压输出曲线, 如图 5 所示.

从图 4 可知, 单梁线性能量采集器有单个电压共振峰. 从图 5 可知, 双梁非线性能量采集器有两个电压共振峰. 从图 4、图 5 可知, 双梁非线性能量采集器的第一电压峰值比单梁线性能量采集器电压共振峰低, 共振频率高 0.5 Hz. 比较共振峰间电压输出, 如图 6 所示.

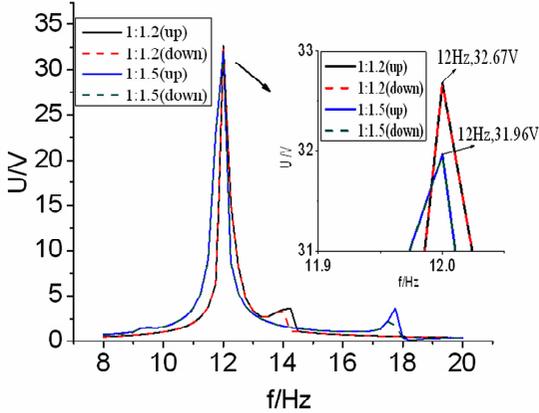


图 5 初始磁距 40mm 双梁非线性能量采集器电压输出曲线

Fig. 5 Output voltage of double-cantilever nonlinear PEH

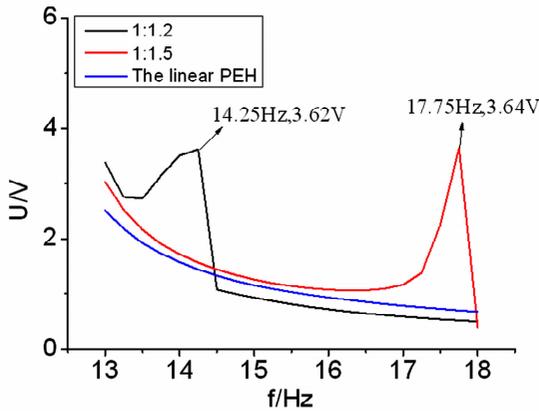


图 6 13 ~ 18Hz 能量采集器电压输出值

Fig. 6 Output voltage of PEH between 13 ~ 18Hz

从图 6 可知, 初始磁距 40mm 时, 双梁非线性能量采集器两共振峰间的电压输出比单梁线性能量采集高. 其中双梁固有频率比 1:1.2 的峰峰间电压输出高于双梁固有频率比 1:1.5 和单梁线性能量采集器在此频域电压输出; 双梁固有频率比 1:1.5 在 14.25 ~ 17.75Hz 频域内的电压输出比双梁固有频率比 1:1.2 与单梁线性能量采集器高. 图 4、图 5 与图 6 比较可知, 双梁非线性能量采集器有效拓宽了单梁线性能量采集器的电压响应频带; 双梁固有频率比 1:1.5 的电压响应频带比双梁固有频率比 1:1.2 宽.

为提高双梁非线性能量采集器的电压共振峰值与共振峰峰间电压输出, 将始磁距设定为 30mm, 其数值仿真结果如图 7 所示.

从图 7 可知, 初始磁距为 30mm 时, 相同固有频率比双梁非线性能量采集器的第一共振峰值均高于初始磁距 40mm 的共振峰值, 但不影响共振频

率. 其中, 初始磁距为 30mm, 双梁固有频率比 1:1.5 的非线性能量采集器获取的第一共振电压峰值为 38.84V. 比较不同初始磁距的双梁非线性能量采集器的第二电压共振峰值与峰峰间电压输出, 如图 8 所示.

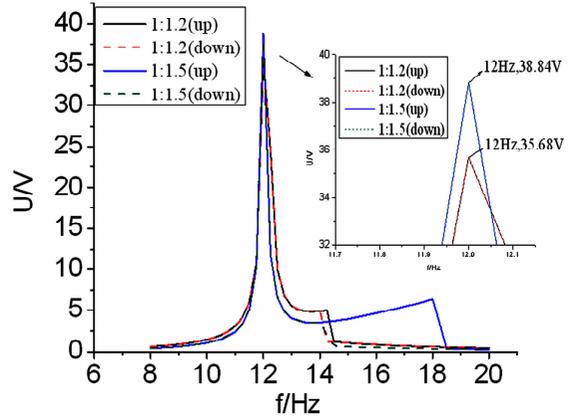


图 7 初始磁距 30mm 双梁非线性能量采集器电压输出曲线

Fig. 7 Output voltage of double-cantilever nonlinear PEH with initial magnetic spacing of 30 mm

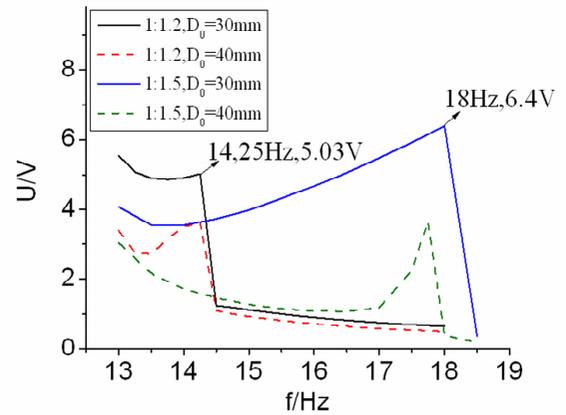


图 8 不同初始磁距 13 ~ 18.5Hz 能量采集器电压输出值

Fig. 8 Different initial magnet space output voltage of PEH between 13 ~ 18.5Hz

从图 8 中可知, 双梁非线性能量采集器初始磁距 30mm 提高了初始磁距 40mm 的第二电压共振峰值与峰峰间电压输出.

从数值仿真可知, 双梁非线性能量采集器拓宽了电压响应频带; 同一初始磁距时, 不同的双梁固有频率比影响采集器的能量采集响应频带域; 同一双梁固有频率比时, 不同的初始磁距影响电压共振峰值与峰峰间电压输出. 其中固有频率比 1:1.5, 初始磁距为 30mm 的双梁非线性能量采集器能量采集性能最佳.

## 4 实验结果与分析

实验振动测试系统如图9所示,实验仪器有Labworks-DB139小型激振器、Lab works 激振台水平实验扩展台、Labworks-PA141功率放大器、亿恒VT-9002振动控制器与TektronixTBS1102数字示波器与联想W520笔记本电脑.通过电脑控制实验信号输入,经过功率放大器输出到Labworks-DB139小型激振台,使用压电加速度传感器(LC0406)获取Lab works 激振台水平实验扩展台的振动加速度,频率值与压电速度传感器的输出信号在笔记本读出,TektronixTBS1102数字示波器测量能量采集器的输出电压值.将两悬臂梁固定在水平实验扩展台上,实验中通过各悬臂梁固定位置调整初始磁间距.实验中设置振动台激励频率先从低到高,再从高到低,激励加速度为 $3\text{m/s}^2$ ,测量能量采集器在 $8\sim 20\text{Hz}$ 频域内的输出电压,示波器读取电压波形稳定时电压峰值 $|U|$ 作为该频率输出电压.

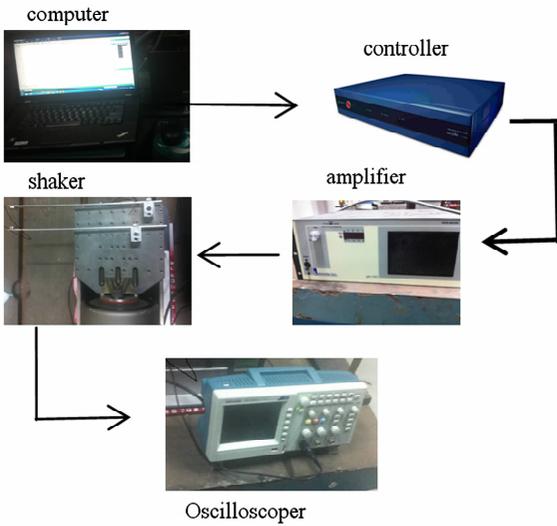


图9 实验振动测试系统

Fig. 9 Excitation test system

为了比较双梁在非线性磁力作用下的能量采集性能,先将双悬臂梁端固定磁铁块,测试单梁线性压电能量采集器,再将端部铁块换成永磁体,永磁体的初始间距为 $40\text{mm}$ ,测试不同双梁固有频率比双梁非线性能量采集器,输出电压 $U$ 与激励频率 $f$ 的关系曲线如图10所示

从图10可知,单梁线性能量采集器有一个电压输出共振峰( $11.5\text{Hz}, 38.4\text{V}$ ).引入磁力作用后

能量采集器有两个电压共振峰,扩展了线性能量采集器的电压响应频带域.双梁非线性能量采集器的第一电压共振峰比单梁线性能量采集器低,且相应频率点均增加 $0.5\text{Hz}$ ,与图5分析结果吻合.双梁非线性能量采集器固有频率比 $1:1.2$ 的电压共振峰值分别为( $12.0\text{Hz}, 35.00\text{V}$ )和( $14.5\text{Hz}, 5.4\text{V}$ ),双梁非线性能量采集器固有频率比 $1:1.5$ 的共振峰值分别为( $12.0\text{Hz}, 33.20\text{V}$ )和( $17.6\text{Hz}, 7.8\text{V}$ ).双梁固有频率比 $1:1.5$ 的第二个电压共振频率从双梁固有频率比 $1:1.2$ 的 $14.5\text{Hz}$ 移到 $17.6\text{Hz}$ ,且峰峰间电压输出比双梁固有频率比 $1:1.2$ 高,有效拓宽了频率响应带宽.

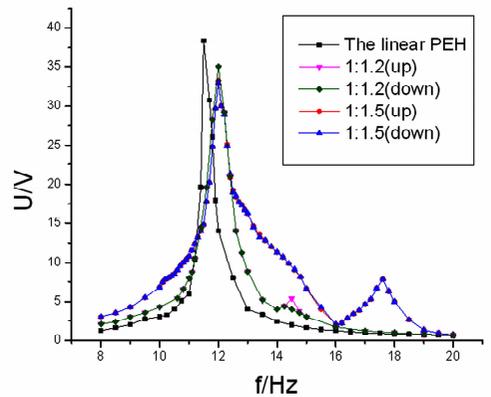


图10 能量采集器电压输出曲线

Fig. 10 Output voltage of PEHs

调整固定块位置,将初始磁间距设定为 $30\text{mm}$ ,测试双梁非线性能量采集器,其电压输出与频率曲线如图11所示.

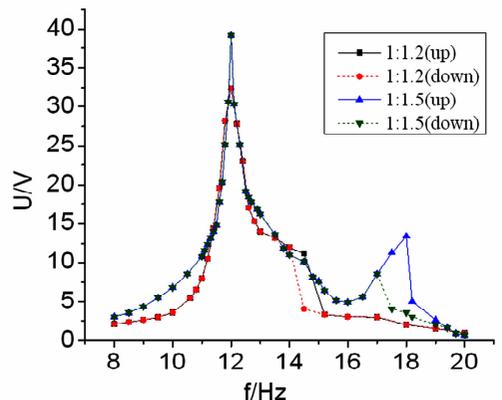


图11 非线性压电能量采集器电压输出曲线

Fig. 11 Output voltage of double-cantilever nonlinear PEH

从图11可知,双梁非线性能量采集器双梁固有频率比 $1:1.2$ 的电压共振峰分别为( $12.0\text{Hz}, 32.4\text{V}$ )和( $14.5\text{Hz}, 11.2\text{V}$ ),双梁固有频率比 $1:1.$

5 分别为(12.0Hz,39.2V)和(18Hz,13.4V),相比初始磁距40mm的两电压共振峰值均增大.与图10比较,改变初始磁距,第一电压共振频率没有改变,双梁固有频率比1:1.2的第二电压共振频率没有改变,双梁固有频率比1:1.5的第二电压频率从17.6Hz增加到18Hz,拓宽了电压响应频带宽;初始磁距30mm的峰峰间电压值比初始磁距40mm高,改善了双梁非线性能量采集器电压共振峰输出与峰峰间电压输出性能.初始磁距30mm,双梁固有频率比1:1.5获取本文结构中最大电压峰值39.2V,与图7和图8仿真结果相符.

## 5 小结

本文研究了两悬臂梁端部固定永磁体的非线性磁力耦合能量采集器,建立了磁力耦合双梁压电式振动能量采集器的动力学模型,使用实验测得结构的一阶模态参数,借助MATLAB研究了初始磁距与双梁固有频率比对双梁非线性能量采集器的电压输出与响应频带域的影响规律.数值仿真与实验验证可知:激励加速度 $3\text{m/s}^2$ ,双梁非线性能量采集器固有频率比1:1.5的响应频带域比双梁固有频率比1:1.2和单梁线性能量采集器宽;相同双梁固有频率比的初始磁距30mm的双梁非线性能量采集器共振电压峰峰电压输出值比初始磁距40mm高.其中初始磁距30mm,双梁固有频率比1:1.5的非线性能量采集器的两共振电压峰值比其他结构高,其值分别为39.2V与13.4V,共振峰峰间电压输出比其他组合的双梁非线性能量采集器高,响应频带域比其他组合的双梁非线性能量采集器宽.本文的双梁能量采集器能在低频振动环境与低外激励强度下具有较好的振动能量采集性能,可以在桥梁、汽车与航天器等中采集振动机械能为相应的MEMS系统供能,具有较广阔的实际应用前景.双梁磁力压电振动能量采集器的特点在于:通过非线性磁力将两压电悬臂梁连接起来,获取两个电压峰值,这样就提高了单悬臂梁式的能量采集器电压输出性能与扩宽响应频率域.

## 参 考 文 献

- Guan M J, Liao W H. On the efficiency of piezoelectric energy harvesting circuits towards storage device voltage. *Smart Materials and Structures*, 2007, 16(2): 498 ~ 505
- Kwon D W, Gabriel A R. A2-m BiCMOS rectifier free AC-DC piezoelectric energy harvester-charger IC. *IEEE Transactions on Bio-medical Circuits and Systems*, 2010, 4(6): 400 ~ 409
- 刘梦伟. 基于双压电PZT薄膜单元的悬臂梁式微力传感器研究. 大连理工大学, 2006 (Liu M W. Microforce sensors based on micro-cantilevers with two piezoelectric PZT thin-film elements. Dalian: Dalian University of Technology, 2006 (in Chinese))
- Williams C B, Yates R B. Analysis of a micro-electric generator for micro-systems. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1996, 52(1-3): 8 ~ 11
- Jeong S J, Kim M S, Song J S. Two-layered piezoelectric bender device for micro-power generator. *Sensors and Actuators*, 2008, 148(1): 158 ~ 167
- Shahruz S M. Design of mechanical band-pass filters for energy scavenging. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, 292(5): 987 ~ 998
- 郭抗抗, 曹树谦. 压电发电悬臂梁的非线性动力学建模及响应分析. 动力学与控制学报, 2014, 12(1): 18 ~ 23 (Guo K K, Cao S Q. Nonlinear modeling and analysis of piezoelectric cantilever energy harvester. *Journal of Dynamics and Control*, 2014, 12(1): 18 ~ 23 (in Chinese))
- Challa V R, Prasad M G, Shi Y, et al. A vibration energy harvesting device with bidirectional resonance frequency tunability. *Smart Materials and Structures*, 2008, 17(1): 015035
- Challa V R, Prasad M G, Fisher F T. Towards an autonomous self-tuning vibration energy harvesting device for wireless sensor network applications. *Smart Materials and Structures*, 2011, 20(2): 025004
- Ferrari M, Ferrari V, Guizzet M, et al. Improved energy harvesting from wideband vibrations by nonlinear piezoelectric converters. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2010, 162(2): 425 ~ 431
- 马华安, 刘景全, 唐刚等. 一种宽频的磁式压电振动能量采集器. 传感器与微系统, 2011, 30(4): 66 ~ 68 (Ma H A, Liu J Q, Tang G, et al. A magnetic structure for broadband piezoelectric vibration energy harvester. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2011, 30(4): 66 ~ 68 (in Chinese))
- Yang Z T, Yang J S. Connected vibrating piezoelectric bimorph beams as a wide-band piezoelectric power harvester. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*,

2009,20(5):569~574

harvester with magnetic oscillator. *Applied Physics Letters*,

13 Tang L H, Yang Y W. A nonlinear piezoelectric energy

2012,101(9):094102

## EXPERIMENTAL AND NUMERICAL RESEARCH ON A DOUBLE-BEAM MAGNETIC VIBRATION PIEZOELECTRIC ENERGY HARVESTER\*

Shi Chaocheng<sup>1</sup> Li Xiang<sup>1</sup> Yuan Tiancheng<sup>1</sup> Lu Zeqi<sup>1</sup> Song Hanwen<sup>2</sup> Chen Liqun<sup>1†</sup>(1. *Shanghai Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Shanghai University, Shanghai 200072, China*)(2. *School of Aerospace Engineering and Applied Mechanics, Tongji University, Shanghai 200092, China*)

**Abstract** As nonlinear technology can improve the energy harvest effect of energy harvest system, this paper studies a vibration Piezoelectric Energy Harvester (PEH) with double cantilever beams under a nonlinear magnetic coupling. The harvester consists of two cantilevers with different natural frequencies and one permanent magnet. In this paper, the numerical model of the energy harvester is proposed, and the dynamic equations are established. The relevant parameters and fitting magnetic formula are firstly obtained through experiment. Numerical simulation is then carried out on studying the voltage output ability and frequency characteristic of four different structure energy harvesters with the double-beam natural frequency ratio of 1:1.2 and 1:1.5 and the permanent magnet initial spacing of 40 mm and 30 mm. The experimental results show that under external excitation acceleration of  $3 \text{ m/s}^2$ , the double-beam magnetic PEH experiences two output voltage resonance peaks, but single-beam PEH only has one voltage resonance peak. Meanwhile, the voltage response frequency bandwidth of the PEH with natural frequency ratio of 1:1.5 is wider than that with the natural frequency ratio of 1:1.2. It is also found that the output voltage resonance peaks of the PEH with the initial magnetic spacing of 30 mm are (12Hz, 39.4V) and (18Hz, 13.4V), which are higher than that for the case with the initial magnetic spacing of 40 mm, and the voltage output between two voltage resonance peaks are also higher than that of the other nonlinear PEHs.

**Key words** piezoelectric vibration energy harvester, magnetic force, double beams natural frequency ratio, initial magnetic distance