

文章编号 1004-924X(2014)07-1850-07

## 蒲公英状压电振动能量收集装置宽频带设计

刘祥建<sup>1\*</sup>, 陈仁文<sup>2</sup>, 侯志伟<sup>3</sup>

- (1. 金陵科技学院 机电工程学院, 江苏 南京 211169;
2. 南京航空航天大学 机械结构力学及控制国家重点实验室, 江苏 南京 210016;
3. 淮阴工学院 机械工程学院, 江苏 淮安 223003)

**摘要:**研究了蒲公英状压电振动能量收集装置的宽频带设计,以解决环境振源振动频率多变的问题。建立了蒲公英状压电振动能量收集装置谐振频率的理论模型并进行了数值模拟,结果表明,该能量收集装置的谐振频率并不是可以任意拓展的。为验证理论分析的正确性,进行了蒲公英状压电振动能量收集装置的频率响应实验,得到的实验结果与理论分析基本吻合,说明了本文理论分析的可靠性。最后对宽频带的蒲公英状压电振动能量收集装置进行了发电性能测试实验,结果表明,通过对蒲公英状压电振动能量收集装置的宽频带设计,其在 20~34 Hz 有较大的功率输出,且最大输出功率达到了约 2.3 mW。本文的设计有效地拓宽了该装置的谐振频率范围,易于实现与环境振源的匹配而获得较高的能量收集能力。

**关键词:**压电振动能量收集装置;宽频带;谐振频率

**中图分类号:** TN384 **文献标识码:** A **doi:**10.3788/OPE.20142207.1850

## Wide-band design of dandelion-shape piezoelectric vibration energy harvester

LIU Xiang-jian<sup>1\*</sup>, CHEN Ren-wen<sup>2</sup>, HOU Zhi-wei<sup>3</sup>

- (1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, China;
  2. State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
  3. Faculty of Mechanical Engineering, Huaiyin Institute of Technology, Huai'an 223003, China)
- \* Corresponding author, E-mail: xiangjianliu@126.com

**Abstract:** The wide-band design of a dandelion-shape piezoelectric vibration energy harvester was investigated to process the variety of the ambient vibration energy sources. A analysis model of resonant frequency for dandelion-shape piezoelectric vibration energy harvester was established. The theoretical results show that the frequency band of resonant frequency of the energy harvester can not be increased randomly. To verify the theoretical analysis, a frequency response experiment was performed, and the results obtained from the theoretical model indicate that theoretical analysis is

**收稿日期:**2013-12-20;**修订日期:**2014-01-25.

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(No. 51305183);江苏省“青蓝工程”资助项目;金陵科技学院博士科研启动基金资助项目(No. jit-b-201412)

basically in agreement with the experimental results. Finally, the experiments were performed to measure the generating capacity of the dandelion-shape piezoelectric vibration energy harvester. The research results show that after a wide-band design for the dandelion-shape piezoelectric vibration energy harvester, it has higher output power in the range of 20 Hz—34 Hz and the maximal output power is around 2.3 mW. The results demonstrate that the proposed piezoelectric vibration energy harvester can effectively increase the band of resonant frequency through the wide-band design and is easy to match the ambient vibration energy sources to get more vibration energies.

**Key words:** piezoelectric vibration energy harvester; wide-band; resonant frequency

## 1 引 言

随着世界工业化进程的不断加快,各国对能源的需求剧增,而一些不可再生能源的过度开采,使世界面临着能源短缺问题。因此,各国都在探索无污染的可替代新能源。可利用的自然能源包括太阳能、风能、水力能、地热能以及振动能等。其中,为满足日益普遍的微电子产品的供能需求,人们研制了相应的微能源器件,如微型太阳能电池、微型锂电池、微型燃料电池等,但这些供能方式都存在一定的应用缺陷,阻碍了其进一步大规模的应用。例如,微型太阳能电池虽可实现长时间供能,但必须要考虑天气因素;而微型锂电池、微型燃料电池的能量密度较低,需要经常更换,这限制了野外一些监测网点应用的微型电子产品的供能。振动作为自然界的一种常见能量形式,几乎无处不在,由于其具有较高的能量密度<sup>[1]</sup>,同时也不受天气、季节因素的影响,目前对振动能量的收集已成为一种最具潜力的能量收集方式。

振动能量的收集主要有电磁式<sup>[2-3]</sup>、静电式<sup>[4]</sup>和压电式<sup>[5-10]</sup>3种方式。压电式振动能量收集装置由于具有便于制作、无电磁干扰、绿色环保及易与微机电系统集成等优势而被广泛研究。目前,研究者提出的压电式振动能量收集装置主要有悬臂梁结构、圆盘结构及叠堆结构等,其中以悬臂梁结构的研究最为广泛。上述各种形式的压电式振动能量收集装置可以实现一定频率下的振动能量收集,但现实环境中的多数振动源的振动频率往往是多变的,这造成了能量收集效率的大幅降低。为此,压电式振动能量收集装置的宽频带设计成为目前要着力解决的难题之一。目前,国内外的研究者在压电式振动能量收集装置的宽频带设计方面做了一定的探索,如2008年华中科技大学的

胡元太等人提出了一种采用悬臂梁阵列结构来拓宽频带的方法<sup>[11]</sup>;2009年弗吉尼亚理工大学的Erturk A等人提出了一种L型悬臂梁结构<sup>[12]</sup>;2010年重庆大学的温志渝等人提出一种多悬臂梁-单质量块形式的压电结构,通过使结构的前两阶固有频率相接近来实现频带的拓展<sup>[13]</sup>。

基于压电式振动能量收集装置的频带过窄问题,本课题组提出一种多方向、宽频带的蒲公英状压电振动能量收集装置。为实现该装置对较宽频带范围内振动能量的有效收集,本文研究了该装置的宽频带设计问题,以进一步丰富压电式振动能量收集装置发电能力的研究,为设计高能量收集能力的压电结构提供参考。

## 2 结构及其工作原理

蒲公英状压电振动能量收集装置如图1所示。该装置由多个悬臂梁压电发电结构、多面支撑体及振动基座组成。其中,各个悬臂梁压电发电结构沿不同方向固定在多面支撑体上,当装置受到外部激励时,相应方向布置的悬臂梁压电发电结构就会产生受迫振动,实现对环境振动能量的收集。同时,为实现装置对不同频率振动源能量的收集,在保持各个悬臂梁压电发电结构悬臂梁部分尺寸参数相同的情况下,将各个悬臂梁压电发电结构末端设置大小不等的质量块来敏感不同频率的振源,以获得较高的能量收集能力。

从蒲公英状压电振动能量收集装置的结构形式可知,各个悬臂梁压电发电结构是其实现振动能量收集的关键部分,如图2所示。显然,各个悬臂梁压电发电结构的形式是完全相同的,只是尺寸参数有所区别。这里,设悬臂梁压电发电结构的长度为 $l$ ,宽度为 $b$ ,压电片的厚度为 $t_p$ ,弹性金属基片的厚度为 $t_m$ ,并设环境激励方向与悬臂梁

梁面夹角为  $\alpha$ 。其中,除了沿 3 个坐标轴方向的梁外,其余各梁与 XZ 平面所夹锐角均为  $45^\circ$ 。

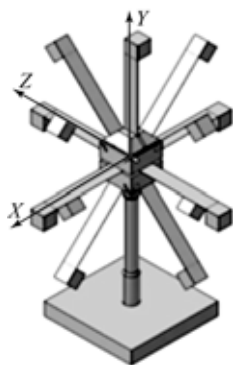


图 1 蒲公英状压电振动能量收集装置示意图

Fig. 1 Sketch map of dandelion-shape piezoelectric vibration energy harvester

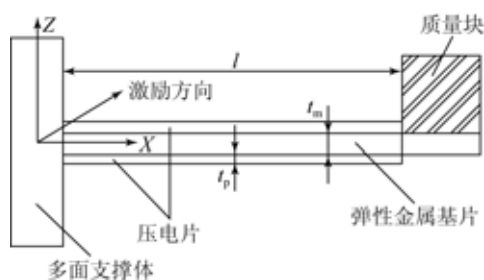


图 2 悬臂梁压电发电结构示意图

Fig. 2 Sketch map of cantilever piezoelectric transducer

### 3 蒲公英状结构谐振频率分析

#### 3.1 谐振频率的理论分析

相关的研究结果证明<sup>[9]</sup>,悬臂梁压电发电结构对外界激励频率非常敏感,微小外界激励频率的变化就会导致悬臂梁压电发电结构发电能力的显著下降。然而,自然界多数振源的振动频率多变,虽然变化有时很微小,但足以引起压电振动能量收集装置能量收集效率的大大降低。基于此,可以考虑将若干个谐振频率连续的悬臂梁压电发电结构组成一个宽频带的压电振动能量收集装置来有效地拓宽其工作频率范围,从而使蒲公英状压电振动能量收集装置在一定宽度的频带内都能够收集到较高的能量,提高其能量收集效率。

以组成蒲公英状压电振动能量收集装置的悬臂梁压电发电结构作为研究对象,并假设在外界环境激励下,悬臂梁压电发电结构的末端位移与激励加速度有如下关系:

$$v(s) = \frac{u_{ou}(s)}{\ddot{u}_n(s)}, \quad (1)$$

式中:  $u_n$  为悬臂梁压电发电结构沿垂直梁面方向的振动分量;  $u_{ou}$  为悬臂梁压电发电结构末端位移。

对于悬臂梁压电发电结构沿垂直梁面方向的振动分量,若设蒲公英状压电振动能量收集装置受到的环境激励形式为  $u \sin \omega t$ , 其中,  $u$  为环境激励振幅,  $\omega$  为环境激励频率,则该振动分量可表示为:

$$u_n = u \sin \alpha \sin \omega t. \quad (2)$$

根据机械振动学理论,可以将悬臂梁压电发电结构简化为弹簧-质量-阻尼系统,且等效模型的动力学方程可表示为:

$$m \ddot{u}_{ou} + c \dot{u}_{ou} + k u_{ou} = -m_s \ddot{u}_n, \quad (3)$$

式中:  $m$  为悬臂梁压电发电结构的等效质量;  $c$  为悬臂梁压电发电结构的等效阻尼;  $k$  为悬臂梁压电发电结构的等效刚度;  $m_s$  为悬臂梁压电发电结构的实际质量。

根据力学理论,对于悬臂梁压电发电结构的等效质量为:

$$m = m_m + \frac{33}{140} lb (\rho_m t_m + 2 \rho_p t_p), \quad (4)$$

式中:  $m_m$  为悬臂梁压电发电结构末端质量块质量。

根据悬臂梁压电发电结构同一横截面上等效前后的力矩相同,悬臂梁压电发电结构的等效刚度为:

$$k = [2 E_p t_p (4 t_p^2 + 3 t_m^2 + 6 t_p t_m) + E_m t_m^3] \cdot [0.5 b t_p (4 t_p^2 + 3 t_m^2 + 6 t_p t_m) + 0.25 b t_m^3] / [(8 t_p^3 + 6 t_m^2 t_p + 12 t_m t_p^2 + t_m^3) l^3]. \quad (5)$$

对式(3)进行拉氏变换,并将其代入到式(1)中,可得:

$$v(s) = -[(m_m + \rho_m l b t_m + 2 \rho_p l b t_p) \sin \alpha] / (m s^2 + c s + k), \quad (6)$$

式中:  $\rho_p$  为压电材料的密度;  $\rho_m$  为弹性金属基片材料的密度。

根据无穷范数的定义可知,  $v(s)$  无穷范数即为其最大值,因此,对于式(6),取其无穷范数,可得:

$$\|v(s)\|_\infty = [(m_m + \rho_m l b t_m + 2 \rho_p l b t_p) \sin \alpha] / (2 \xi k \sqrt{1 - \xi^2}), \quad (7)$$

式中  $\xi$  为悬臂梁压电发电结构的阻尼比。

设计宽频带蒲公英状压电振动能量收集装置的最优情况就是装置中各个悬臂梁压电发电结构的谐振频率连续分布且差别较小,各个悬臂梁压电发电结构的频率响应  $v(s)$  的无穷范数应基本相同。在此条件下,蒲公英状压电振动能量收集装置各个悬臂梁压电发电结构频率响应  $v(s)$  的无穷范数可认为是相等的,可以表示为:

$$v = [(m_m + \rho_m l b t_m + 2\rho_p l b t_p) \sin \alpha] / (2\xi k). \quad (8)$$

对于悬臂梁压电发电结构的谐振频率,根据机械振动学理论,可以表示为:

$$\omega_r = \sqrt{\frac{k}{m}}. \quad (9)$$

根据式(4)、(8)和(9),得到蒲公英状压电振动能量采集装置的各个单悬臂梁的谐振频率应满足:

$$\omega_r = [(m_m + \rho_m l b t_m + 2\rho_p l b t_p) \sin \alpha]^{\frac{1}{2}} / \left\{ 2\xi v \left[ m_m + \frac{33}{140} l b (\rho_m t_m + 2\rho_p t_p) \right] \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (10)$$

该模型即蒲公英状压电振动能量收集装置各个悬臂梁压电发电结构谐振频率的理论模型。显然,要想使蒲公英状压电振动能量收集装置获得某一频带内最大的能量输出,除了要保持各个悬臂梁压电发电结构的结构尺寸为合理的参数,还要调整各个悬臂梁压电发电结构末端质量块的质量,使得它们的谐振频率满足上述要求,从而可以获得在要求的频带范围内最优的各个悬臂梁设计结构。

### 3.2 谐振频率的数值模拟

通过理论分析获得了蒲公英状压电振动能量收集装置谐振频率的理论模型,为了解在悬臂梁压电发电结构末端质量块质量变化时,蒲公英状压电振动能量收集装置谐振频率可以拓展的范围,有必要对上述理论模型进行数值模拟。各个单悬臂梁的长度  $l=40$  mm,宽度  $b=6$  mm,压电陶瓷片的厚度  $t_p=0.2$  mm,弹性金属基片的厚度  $t_m=0.2$  mm,阻尼比  $\xi=0.04$ ,频率响应的最大值取  $0.0005$  s<sup>2</sup>,压电陶瓷片采用 PZT-5H,其密度为  $7500$  kg/m<sup>3</sup>,弹性金属基片采用铍青铜,其密度为  $8290$  kg/m<sup>3</sup>。

图 3 和图 4 给出了蒲公英状压电振动能量收集装置在各个悬臂梁压电发电结构末端质量块质量变化时的谐振频率可拓展的范围。从图中曲线

可以看到,在各个悬臂梁压电发电结构末端质量块质量增大的过程中,对于各个与环境激励方向垂直的梁,其谐振频率最大可拓展为  $25\sim 52$  Hz,对于各个与环境激励方向成  $45$  或  $135^\circ$  的梁,其谐振频率最大可拓展为  $21\sim 44$  Hz,说明蒲公英状压电振动能量收集装置的谐振频率并不是可以任意拓展的。

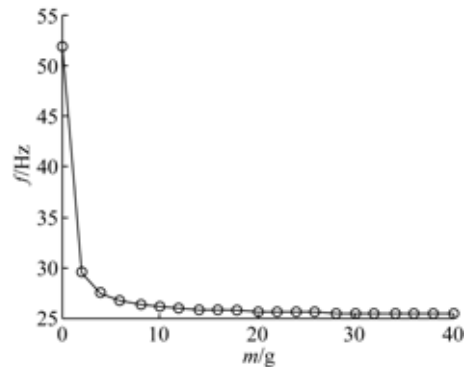


图 3 垂直激励方向梁谐振频率与末端质量块质量关系曲线

Fig. 3 Effect of mass of rigid block on resonant frequency

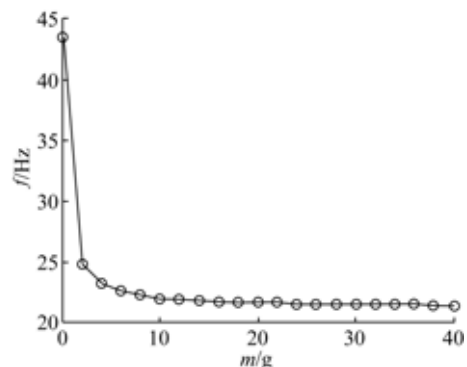


图 4 45 或 135° 方向梁谐振频率与质量块质量关系曲线

Fig. 4 Effect of mass of rigid block on resonant frequency

## 4 实验研究

### 4.1 蒲公英状装置的频率响应实验

为进一步验证蒲公英状压电振动能量收集装置谐振频率的拓展能力,进行了蒲公英状装置的频率响应实验。首先制作了蒲公英状压电振动能量收集装置的原理样机,压电片材料选用 PZT-5H,弹性金属基片材料选用铍青铜,装置的尺寸参数根据式(10)进行设计,具体参数如表 1 所示。其中,与激励方向垂直梁的结构参数如表 1 中序号 1~4 所示,与激励方向平行梁的结构参数如表

1 序号 5 所示,与环境激励方向成  $45^\circ$  或  $135^\circ$  的梁的结构参数如表 1 序号 6~13 所示。

表 1 压电装置结构尺寸

Tab. 1 Dimensions of piezoelectric energy harvester

序号	$l/\text{mm}$	$b/\text{mm}$	$t_m/\text{mm}$	$t_p/\text{mm}$	$m_n/\text{g}$
1	40	6	0.2	0.2	3.33
2	40	6	0.2	0.2	4.14
3	40	6	0.2	0.2	5.39
4	40	6	0.2	0.2	7.58
5	40	6	0.2	0.2	1.41
6	40	6	0.2	0.2	1.63
7	40	6	0.2	0.2	1.90
8	40	6	0.2	0.2	2.25
9	40	6	0.2	0.2	2.72
10	40	6	0.2	0.2	3.40
11	40	6	0.2	0.2	4.45
12	40	6	0.2	0.2	6.28
13	40	6	0.2	0.2	10.30

在原理样机的制作过程中,有以下两点要特别注意:(1)需要对铍青铜弹性金属基片进行热处理,待其自然冷却后,用细砂纸去除其表面的氧化膜,同时用脱脂棉蘸取丙酮溶液去除购买的压电陶瓷片和弹性金属基片表面的油渍及污迹等;(2)在弹性金属基片和压电陶瓷片粘结过程中,由于压电片较脆,在粘结过程中施加的压力,以免在弹性金属基片与压电陶瓷片之间留有气泡,同时,在保证粘结良好的情况下,粘结胶层越薄越好,以减小粘结胶层对蒲公英状压电振动能量收集装置能量采集能力的影响。图 5 所示为粘结好的蒲公英状压电振动能量收集装置的实物图。

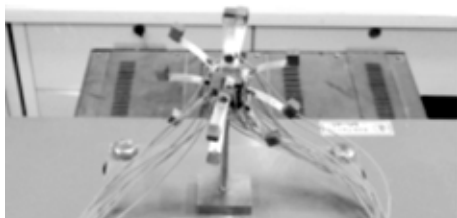


图 5 蒲公英状压电振动能量收集装置原理样机  
Fig. 5 Prototype of dandelion-shape piezoelectric vibration energy harvester

采用激光测振仪对蒲公英状压电振动能量收集装置进行扫频测试,测试中,只要装置中有一个

悬臂梁压电发电结构处于谐振状态,即认为此时蒲公英状压电振动能量收集装置处在谐振状态,此时观察扫频后的振动模拟动画结果,并记录相应装置的谐振频率。

蒲公英状压电振动能量收集装置扫频测试结果如图 6 所示。可以看出,蒲公英状压电振动能量采集装置的谐振频率变化为  $22 \sim 30 \text{ Hz}$ ,有效拓宽了该压电振动能量收集装置收集振动能量的频率范围。同时,梁的谐振频率较高时,理论结果与实验结果相差较大,这说明梁的谐振频率较低时,应用上述理论进行分析较可靠。

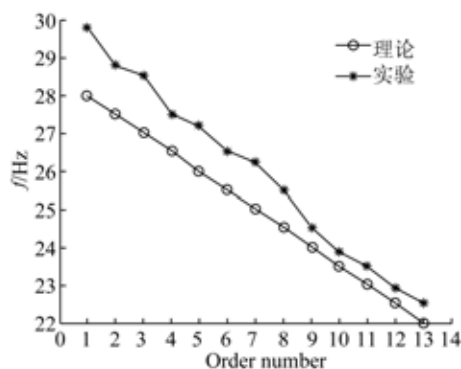


图 6 谐振频率变化曲线

Fig. 6 Curve of resonant frequency

#### 4.2 蒲公英状装置的能量收集性能实验

为了进一步验证该设计结构的可行性及测试其对振动能量的收集能力,搭建了蒲公英状压电振动能量收集装置能量收集实验系统,如图 7 所示。主要仪器设备包括小型多方向环境振动模拟平台、功率放大器、HEV-50 高能激振器和示波器等。

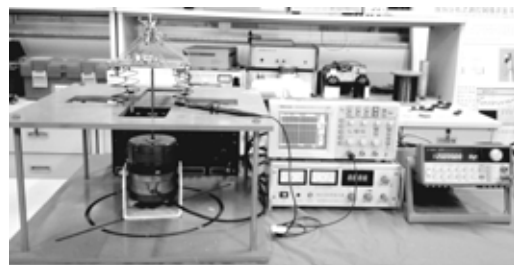


图 7 振动能量收集实验装置图

Fig. 7 Experimental setup of vibration energy harvesting

实验中采用的输出功率测试电路如图 8 所示,主要由多个全桥整流器、存储电容和电阻负载

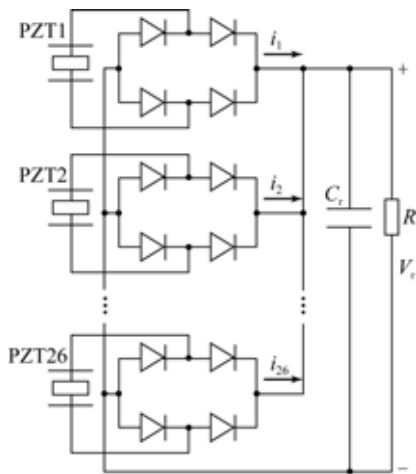


图 8 输出功率电路

Fig. 8 Circuit of the output power

组成,其中,压电振动能量收集装置中各个压电陶瓷片的输出经整流后对同一电阻负载进行供能。利用示波器对电阻负载的输出电压进行实时测量,电阻负载的最大输出功率根据式(11)~(13)得出:

$$C_p = C_1 + C_2 + \dots + C_{26}, \quad (11)$$

$$R = \frac{\pi}{2\omega C_p}, \quad (12)$$

$$P_r = \frac{V_r^2}{R}, \quad (13)$$

式中: $C_1, C_2, \dots, C_{26}$ 为各压电陶瓷片的等效电容; $C_p$ 为各等效电容的总和; $R$ 为电阻负载; $V_r$ 为电阻负载两端的电压; $P_r$ 为电阻负载的最大输出功率。

图 9 给出了在 Y 向激励和 X 向激励时,蒲公英状压电振动能量收集装置输出功率随外界激励频率的变化曲线,其中激励幅值的峰值为 1.0 mm。从图中可以看出,蒲公英状压电振动能量收集装置在 20~34 Hz 内都有较大的功率输出,其中在 Y 向激励且频率为 28 Hz 时,输出功率最大,最大输出功率达到了约 2.3 mW。从曲线的形状也可以发现,蒲公英状压电振动能量收集装置随频率变化的输出功率曲线出现了多个峰值,这主要是由于在这个峰值频率处,蒲公英状压电振动能量收集装置的一个或多个悬臂梁压电发

电结构产生谐振,从而在装置的输出功率曲线上出现了多个峰值和低谷。另外,由于设计的蒲公英状压电振动能量收集装置的各个悬臂梁压电发电结构的谐振频率差值较小,从而在装置的输出功率曲线上的峰值和低谷的功率值相差较小,有效提高了蒲公英状压电振动能量收集装置的能量收集能力。

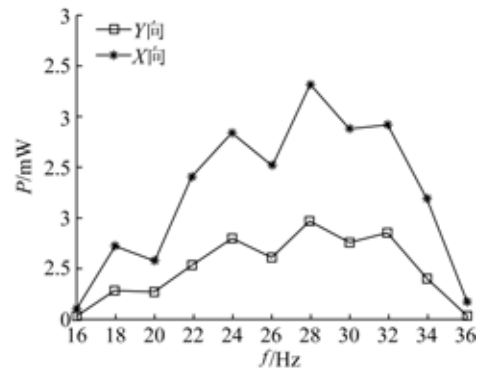


图 9 输出功率随频率的变化曲线

Fig. 9 Effect of frequency on output power

### 5 结 论

考虑到现实环境中振源振动频率多变的特点,为实现振动能量收集装置对较宽频带范围内振动能量的有效收集,本文研究了蒲公英状压电振动能量收集装置的宽频带设计问题,做了如下工作:(1)建立了蒲公英状压电振动能量收集装置谐振频率的理论模型并进行了数值模拟,结果表明,对于蒲公英状压电振动能量收集装置的谐振频率并不可任意拓展。(2)进行了蒲公英状压电振动能量收集装置的频率响应实验,验证了本文理论分析的可靠性。(3)搭建了蒲公英状压电振动能量收集装置能量收集实验系统,研究表明,通过对蒲公英状压电振动能量收集装置的宽频带设计,其在 20~34 Hz 内有较大的功率输出,且最大输出功率达到了约 2.3 mW。通过本文的设计将有效拓宽装置谐振频率的范围,易于实现与环境振源的匹配而获得较高的能量收集能力。

### 参考文献:

[1] ROUNDY S, WRIGHT P K, PISTER K S. Micro-electrostatic vibration to electricity converters[C].

Proceedings of ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, 2002.

[2] 李伟,车录锋,王跃林. 横向电磁式振动能量采集器

- 的设计与制作[J]. 光学精密工程, 2013, 21(3): 694-700.
- LI W, CHE L F, WANG Y L. Design and fabrication of transverse electromagnetic vibration energy harvester 性[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(3): 694-700. (in Chinese)
- [3] CEPNIK C, RADLER O, ROSENBAUM S, *et al.*. Effective optimization of electromagnetic energy harvesters through direct computation of the electromagnetic coupling [J]. *Sensors and Actuators A*, 2011, 167(2): 416-421.
- [4] MITCHESON P D, MIAO P, STARK B H, *et al.*. MEMS electrostatic micropower generator for low frequency operation[J]. *Sensors and Actuators A*, 2004, 115(2-3): 523-529.
- [5] ALADWANI A, ARAFA M, ALDRAIHEM O, *et al.*. Cantilevered piezoelectric energy harvester with a dynamic magnifier [J]. *Journal of Vibration and Acoustics-Transactions of the ASME*, 2012, 134(3): 1-10.
- [6] 崔岩, 王飞, 董维杰, 等. 非线性压电式能量采集器 [J]. 光学精密工程, 2012, 20(12): 2737-2743.
- CUI Y, WANG F, DONG W J, *et al.*. Nonlinear piezoelectric energy harvester [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(12): 2737-2743. (in Chinese)
- [7] WANG H J, MENG Q F. Analytical modeling and experimental verification of vibration-based piezoelectric bimorph beam with a tip-mass for power harvesting [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2013, 36(1): 193-209.
- [8] 王淑云, 阚君武, 王鸿云, 等. 基于圆弧限位的压电发电装置[J]. 光学精密工程, 2013, 21(2): 342-348.
- WANG S Y, KAN J W, WANG H Y, *et al.*. Piezoelectric energy generator based on deflection-limiting circular arc [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(2): 342-348. (in Chinese)
- [9] 阚君武, 王淑云, 彭少锋, 等. 多振子压电发电机的输出特性[J]. 光学精密工程, 2011, 19(9): 2108-2116.
- KAN J W, WANG SH Y, PENG SH F, *et al.*. Output performance of piezoelectric generators with multi-vibrators [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(9): 2108-2116. (in Chinese)
- [10] 贺学锋, 杜志刚, 赵兴强, 等. 悬臂梁式压电振动能量采集器的建模及实验验证 [J]. 光学精密工程, 2011, 19(8): 1771-1778.
- HE X F, DU ZH G, ZHAO X Q, *et al.*. Modeling and experimental verification for cantilevered piezoelectric vibration energy harvester [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(8): 1771-1778. (in Chinese)
- [11] XUE H, HU Y T, WANG Q M. Broadband piezoelectric energy harvesting devices using multiple bimorphs with different operating frequencies [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*, 2008, 55(9): 2104-2108.
- [12] ERTURK A, RENNO J M, INMAN D J. Piezoelectric energy harvesting from a L-shaped beam-mass structure with an application to UAVs [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2009, 20(5): 529-544.
- [13] 于慧慧, 温志渝, 温中泉, 等. 宽频带微型压电式振动发电机的设计 [J]. 传感技术学报, 2010, 23(5): 643-646.
- YU H H, WEN ZH Y, WEN ZH Q, *et al.*. The design of piezoelectric vibration based generator with wide bandwidth [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2010, 23(5): 643-646. (in Chinese)

#### 作者简介:



刘祥建(1980—),男,山东五莲人,博士,讲师,2012年于南京航空航天大学获得博士学位,主要从事振动能量收集技术方面的研究。E-mail: xiangjianliu@126.com