

文章编号 1004-924X(2018)09-2181-09

## 压电阵列径向分布的二维振动能量采集器

刘 星, 王佩红\*, 张小舟, 赵海波

(安徽大学 物理与材料科学学院, 安徽 合肥 230601)

**摘要:** 为了有效采集多个方向的振动能量, 本文提出了一种圆柱形的压电阵列径向分布的二维(2D)振动能量采集器。通过将柔性弧形压电阵列径向分布在圆柱体上, 该采集器可以收集到二维(2D)平面内任意方向的振动能量。同时, 引入了角度带宽来描述采集器获取二维振动能量的能力。实验结果表明: 这种新型结构采集器的角度带宽接近  $180^\circ$ ; 而且, 通过把对称位置的聚偏二氟乙烯(PVDF)压电元件进行反向串联, 采集器的最大输出电压可以达到 11.6 V; 当把对称位置的聚偏二氟乙烯(PVDF)压电元件反向并联时, 最大输出功率达到  $13.5 \mu\text{W}$ 。与传统的悬臂式压电振动能量采集器相比, 该二维(2D)采集器具有更好的多方向振动能量采集性能。

**关键词:** 压电振动能量采集器; 二维振动; 径向分布的压电阵列; 角度带宽

**中图分类号:** TB853.29 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182609.2181

## Two-dimensional vibration energy harvester with radially distributed piezoelectric array

LIU Xing, WANG Pei-hong\*, ZHANG Xiao-zhou, ZHAO Hai-bo

(School of Physics & Materials Science, Anhui University, Hefei 230601, China)

\* Corresponding author, E-mail: wangpeihong2002@ahu.edu.cn

**Abstract:** In order to effectively collect vibration energy from multiple directions, a Piezoelectric Vibration Energy Harvester (PVEH) with a radially distributed piezoelectric array was proposed for scavenging two-dimensional (2D) vibration energy. By employing an arc-shaped piezoelectric array that was radially distributed on a flexible cylinder, the proposed harvester could scavenge vibration energy from various directions in a 2D plane. A novel concept, termed angle bandwidth, has also been introduced for describing the ability of harvesting 2D vibration energy. The obtained experimental results show that the proposed design can achieve a large angle bandwidth of approximately  $180^\circ$ . Furthermore, the maximum output voltage of the PVEH can reach a value of 11.6 V by connecting the symmetric polyvinylidene fluoride (PVDF) elements in series, whereas the maximum output power can attain a value of  $13.5 \mu\text{W}$  by connecting the symmetric PVDF elements in parallel. Hence, compared to a traditional cantilever-shaped PVEH, the proposed 2D PVEH possesses superior ability for harvesting multi-directional vibration energy.

**收稿日期:** 2018-05-15; **修订日期:** 2018-06-29.

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目(No. 61671017); 安徽省高校优秀青年人才支持计划重点项目(No. gxyqZD2018004); 安徽省高等学校省级自然科学研究重点项目(No. KJ2016A787); 安徽省自然科学基金面上项目(No. 1508085ME72)

**Key words:** piezoelectric vibration energy harvester; two-dimensional vibration; radially distributed piezoelectric array; angle bandwidth

## 1 引言

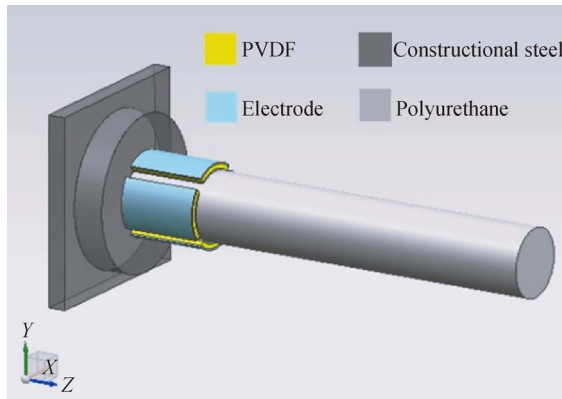
随着微电子、无线传感器网络、通信技术以及微机电系统的快速发展,集成化电子产品的应用已成为人们生活中不可或缺的环节。这种趋势必然会加速产品便携化与智能化发展的脚步。因此,如何有效地为各种环境下的众多传感器或传感器节点以及便携式微型电子产品供电,已成为当务之急。传统的电源通过使用电池或电线来实现,但是电池使用寿命短,笨重且不环保,需要定期充电或更换;安装电线的成本又非常高,特别是在森林、海洋和无人区等特殊场合。采集周围环境中的机械/振动能量,然后利用能量采集技术将这些能量转化为电能从而实现器件的自供电,这被认为是代替电池或电线的一种有效的方法。因为在大型工业机器,便携式电子设备和人体运动等许多环境当中,机械能量非常丰富。一般来说,振动能量采集器可以分为电磁式<sup>[1-2]</sup>、压电式<sup>[3-4]</sup>、静电式<sup>[5-6]</sup>和摩擦电式<sup>[7-8]</sup>。其中,压电式振动能量采集器(Piezoelectric Vibration Energy Harvester, PVEH)由于其功率密度大、制作工艺简单、无电磁干扰、绿色环保以及易于与微系统集成且无需外部电源输入等优点而被广泛研究<sup>[9-10]</sup>。目前,有关压电式振动能量收集器的大部分研究和工作的基本上都是悬臂梁结构为主要对象,且研究内容和方向都是侧重于如何扩大工作频率带宽<sup>[11]</sup>,但这些实验和研究却都忽略了外部环境中振动源的振动方向对于压电式振动能量收集器性能的影响。与此同时,传统的悬臂式 PVEH<sup>[12]</sup>通常只能有效地收集单一方向的振动能量。如果激励来自悬臂梁弯曲方向以外的方向,则悬臂式 PVEH 的输出功率将会显著地下降。但是,实际上,很多振动源的频率和方向是会同改变的。因此,如何高效地获取多方向的振动能量成为近年来的热点问题。B. Andò 等人提出了一个二维的宽频带振动能量采集器,它由两个具有正交偏转方向的磁耦合双稳态压电悬臂梁组成<sup>[13]</sup>。这种系统改进了基于线性机械原理的传统采集器,如果环境中的主要振动频率被调到机械共振,则该传感器仅提供适当的响应。Yang 等人<sup>[14]</sup>提出了一种框架结构的压电能量收

集器来实现二维(2D)振动能量采集。该采集器可以在两种基本模式下工作,即垂直振动模式和水平振动模式,并且可以通过调整结构参数从二维平面中的任意方向采集振动能量。此外,刘建祥等人<sup>[15]</sup>提出了一个蒲公英状压电振动能量收集装置的宽频带设计。它能够从各个方向在较宽的频率带宽内采集振动能量。尽管如此,这些工作并没有研究多方向振动对 PVEH 性能的影响。这些现有的多方向 PVEH 通常具有复杂的辅助结构和较大的体积,同时在其它方向上具有非常低的能量转换效率。这些因素限制了这些设备的适用范围。

本文提出了一种圆柱形 PVEH,并详细研究了振动方向和压电元件串并联对 PVEH 性能的影响。该 PVEH 具有径向分布的压电阵列结构,可以在面内任意方向上采集振动能量。更重要的是,我们提出了“角度带宽”概念,用于描述能量采集器采集不同方向振动能量的性能。实验结果表明,该径向分布压电阵列圆柱形 PVEH 具有稳定的频率带宽和角度带宽。与传统的悬臂式 PVEH 相比,它可以更有效地采集多方向的振动能量。因此,该能量采集器在采集风能、监测具有多方向振动情况的桥梁、铁路等工程中具有很好的应用前景。

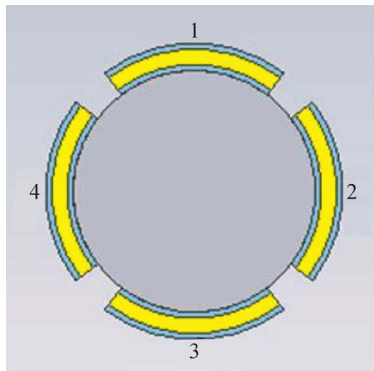
## 2 器件设计及制备

本文所提出的二维 PVEH 由圆柱形棒、夹具和 4 个压电元件组成,如图 1(a)所示。圆柱形棒由聚氨酯材料制成,其半径和长度分别为 12.5 mm 和 240 mm。首先将该弹性棒的一端固定在采集器夹具上,另一端自由,由此可以在  $x$ - $y$  平面内沿任意方向摆动。然后将 4 个片层状 PVDF 压电薄膜元件(FDT1-052K, MEAS USA)用胶水粘在棒的根部,即靠近固定端的位置,待胶水干燥后即可用于实验。压电薄膜元件由 52  $\mu\text{m}$  厚的 PVDF 薄膜夹在两个金属电极之间构成,压电元件因变形产生的电压由两个电极与外部电路连接输出,其总尺寸为 30 mm $\times$ 16 mm $\times$ 0.085 mm。这 4 个 PVDF 元件彼此相隔 90°,如图 1(b)所示。为了便于说明,顺时针将压电元件编号为 1~4。



(a) 径向分布压电阵列圆柱形 PVEH 示意图

(a) Schematic illustration of cylindrical PVEH with radially distributed piezoelectric array



(b) 径向分布的压电阵列横截面图

(b) Cross-section view of piezoelectric array

图 1 压电振动能量采集器的结构示意图

Fig. 1 Schematic illustration of cylindrical PVEH

在  $x$ - $y$  平面上任意方向的外部激励下,圆柱形杆都将弯曲,因此 PVDF 薄膜将被压缩和拉伸。根据压电效应,两个电极之间会产生电压,由此  $x$ - $y$  平面上任意方向的振动能量可以通过该二维 PVEH 转换成电能。

在本文中,压电振动能量收集器基于直接压电效应,这意味着施加的机械力在压电材料的两个表面上都会产生电荷。相应的机电耦合方程可以表示为:

$$\mathbf{D} = \mathbf{d}_i \mathbf{T} + \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{E}, \quad (1)$$

其中:  $\mathbf{D}$ ,  $\mathbf{T}$  和  $\mathbf{E}$  分别是电位移矢量、机械应力矢量和电场矢量;  $\mathbf{d}_i$  是压电系数矩阵,  $\boldsymbol{\varepsilon}^T$  是介电常数矩阵<sup>[16]</sup>。

一般来说,压电悬臂梁工作在  $d_{31}$  模式下,这意味着产生的电场垂直于施加的机械应力。对于这种在  $d_{31}$  模式下工作的压电悬臂梁,又没有外界

电场影响<sup>[17]</sup>,因此,由压电层产生的开路电压 ( $V_{oc}$ )可表示为:

$$V_{oc} = T \frac{d_{31}}{\varepsilon_r \varepsilon_0} t_e, \quad (2)$$

其中:  $t_e$  是电极之间的距离,  $\varepsilon_0$  是真空的介电常数,  $\varepsilon_r$  是压电材料的相对介电常数,  $d_{31}$  是压电常数,下标表示应力和极化的方向。

### 3 有限元仿真分析

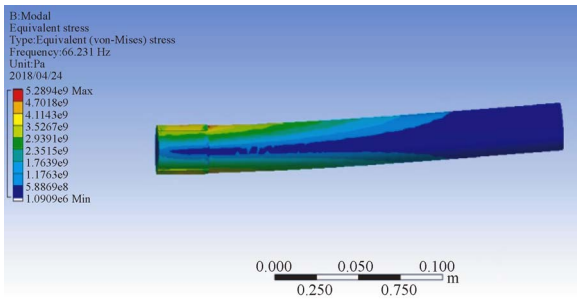
本文首先使用有限元软件 ANSYS15.0 对所提出的圆柱形能量采集器进行有限元仿真。为了简化模型,忽略压电元件的金属电极。表 1 中列出了圆柱形 PVEH 的材料和参数。

表 1 圆柱形 PVEH 的几何和材料参数

Tab. 1 Geometric and material parameters of PVEH

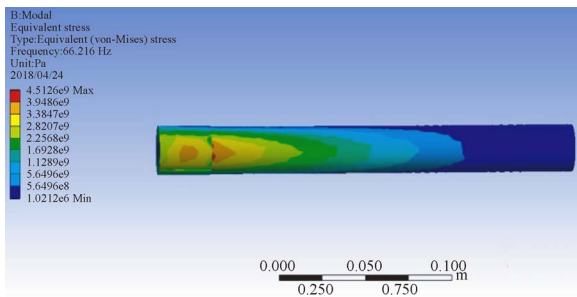
参数	PVDF	聚酯棒
密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	1 780	920
杨氏模量/GPa	2~4	1.07
泊松比	0.35	0.44
体积/ $\text{mm}^3$	$30 \times 12 \times 0.052$	$240 \times 12.5^2 \times \pi$
压电系数/ $\text{C/N}^{-1}$	$d_{31} = 23 \times 10^{-12}$	
相对介电常数	$\varepsilon_r = 16$	

使用上述材料参数进行模态分析,在前两阶模态下 PVEH 的等效(von-Mises)应力分布和共振频率如图 2 所示。对应于前两种模态的谐振频率分别为 66.2 Hz 和 66.3 Hz。可以看出,第一和第二模态是纯粹的弯曲模态,并且由于圆柱体的轴对称结构,它们的谐振频率几乎相同。同时,第一和第二模态在圆柱梁的固定根处具有几乎相同的最大应力,且圆柱体上的应力分布是轴向对称的,如图 2(a)和 2(b)所示。根据公式(2),压电材料承受的应力越大,压电材料产生的开路电压越大。因此,压电层应该放置在圆柱梁的根部,这与本文设计一致。由于周围环境中的正常振动频率较低,因此这里只仿真研究了该 PVEH 的第一模态和第二模态。



(a)一阶模式下的等效(von-Mises)应力分布

(a)Equivalent (von-Mises) stress of PCEH under 1st mode



(b)二阶模式下的等效(von-Mises)应力分布

(b)Equivalent (von-Mises) stress of PCEH under 2nd mode

图 2 PCEH 在前两种模式下的等效(von-Mises)应力分布图  
Fig. 2 Equivalent (von-Mises) stress of PCEH under 1st and 2nd modes

#### 4 实验结果与讨论

图 3(a)为实验装置,通过电脑由 Labview 程序产生基础振动输出到 DAQ 采集卡,并经功率放大器放大后输送给激励器,利用振动监测器与加速度计来测量振动强度。输出电压通过数据采集卡 DAQ 采集并输入到电脑中的 Labview 程序。图 3(b)是用于旋转该 PVEH 的精密旋转装置的局部图。由于振动台不方便改变其角度,因此使用该旋转装置来调整振动角度。另外,激励角  $\theta$  的定义示于图 3(c)中。在试验中,激励台提供的振动方向保持不变,通过旋转 PVEH 来调整作用在压电片上的振动方向。振动方向与压电片法线方向之间的夹角定义为激励角  $\theta$ 。



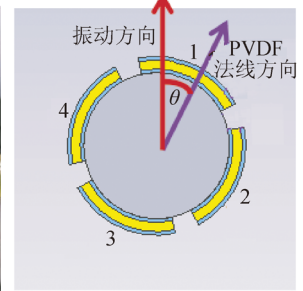
(a)实验装置图

(a)Overview of experimental setup



(b)精密旋转台实物图

(b)Precision rotary stage



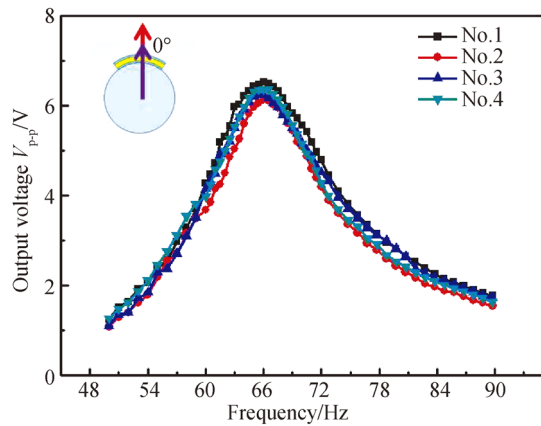
(c)激励角的定义图

(c)Definition of excitation angle

图 3 能量采集器实验装置图

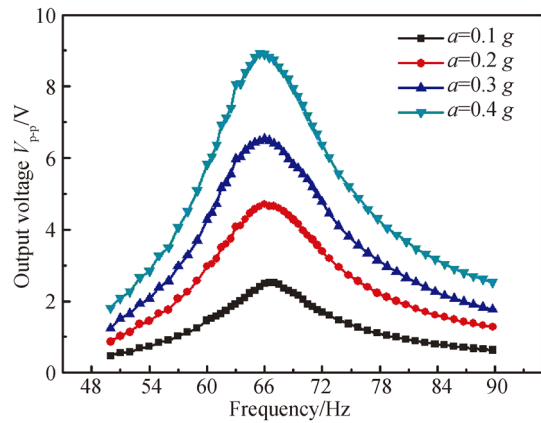
Fig. 3 Experimental setup for fabricated energy harvester

首先,本文分别测试 4 个 PVDF 元件的开路电压的频率响应,结果如图 4(a)所示。在测量过程中,每个 PVDF 元件的法线方向被调整为平行于 Y 轴,然后在能量采集器上施加不同频率(50~90 Hz)和固定加速度( $3 \text{ m/s}^2$ )的正弦激励。从图 4(a)可以发现,每个 PVDF 元件在扫频过程中都有峰值电压。图 4(a)中的曲线显示了 4 个 PVDF 元件的峰值电压和对应频率非常相似,这表明该采集器的谐振频率约为 66.5 Hz。4 个 PVDF 元件的输出性能几乎相同,各 PVDF 元件的输出电压波动可能是由 PVDF 元件和圆柱形衬底之间的黏附力不同造成的。上述实验得到的谐振频率与前面的仿真结果(66.2 Hz)基本一致。因此,接下来的实验中,该能量采集器的谐振频率被设置为 66.5 Hz。进一步测试不同加速度激励下 1 号 PVDF 元件的输出电压与频率的关系,实验结果如图 4(b)所示。在一定频率下,输出电压随加速度的增加而增大,但谐振频率保持在 66.5 Hz 左右。在不同的激励加速度下,计算出的频率带宽(FB)基本保持不变(约为 16.3 Hz)。换句话说,激励对这种弧形 PVDF 元件的 FB 几乎没有影响,这与传统悬臂式线性 PVEH 的性能一致。



(a) 各 PVDF 元件的输出电压峰值与频率关系曲线(加速度为  $3 \text{ m/s}^2$ )

(a) Output voltage versus excitation frequency of each PVDF element at acceleration of  $3 \text{ m/s}^2$



(b) 不同加速度激励下,1号 PVDF 的输出电压峰值与频率关系曲线

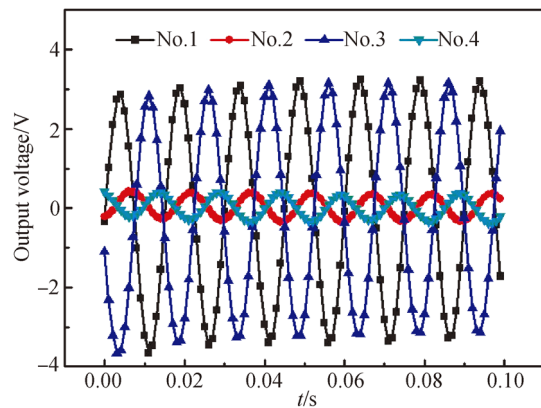
(b) Output voltage of No. 1 element versus excitation frequencies at different input accelerations

图 4 PVEH 在不同频率和不同加速度下的输出电压

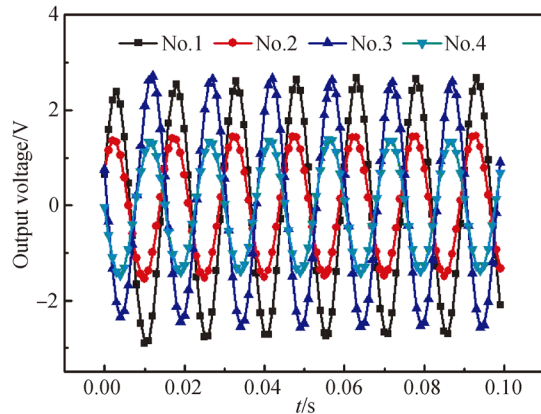
Fig. 4 Output voltage of PVEH under different frequencies and accelerations

为了研究振动方向对该能量采集器性能的影响,这里通过旋转图 3(b)中的转子来改变激励角  $\theta$ 。振动频率为  $66.5 \text{ Hz}$ ,加速度为  $3 \text{ m/s}^2$ ,当激励角度  $\theta$  分别为  $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ$  和  $60^\circ$  时,各 PVDF 的输出电压随时间的变化如图 5 所示。显然,随着激励角  $\theta$  的改变,4 个 PVDF 元件的输出电压大小和相位都会改变。当激励角度  $\theta = 30^\circ$  时,因为 4 个 PVDF 顺时针相隔  $90^\circ$ ,可依次计算出 2,3,4 号 PVDF 的激励角分别为  $120^\circ, 210^\circ, 300^\circ$ 。因为

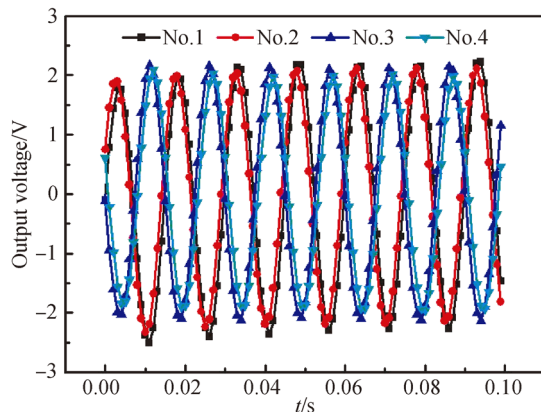
1 号和 3 号,2 号和 4 号 PVDF 具有轴向对称关系(相隔  $180^\circ$ ),无论激励角是多少,1 号和 3 号,2 号和 4 号 PVDF 元件都具有相同的输出电压值,相反的输出电压相位。值得注意的是,在图 5(c)中,激励角度为  $45^\circ$  时,4 个 PVDF 元件的输出电压值几乎相同,且 1 号和 2 号,3 号和 4 号 PVDF(相隔  $90^\circ$ )有相同的输出电压相位。



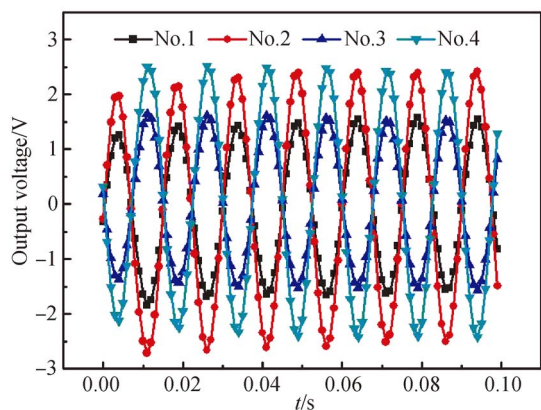
(a)  $\theta = 0^\circ$



(b)  $\theta = 30^\circ$



(c)  $\theta = 45^\circ$

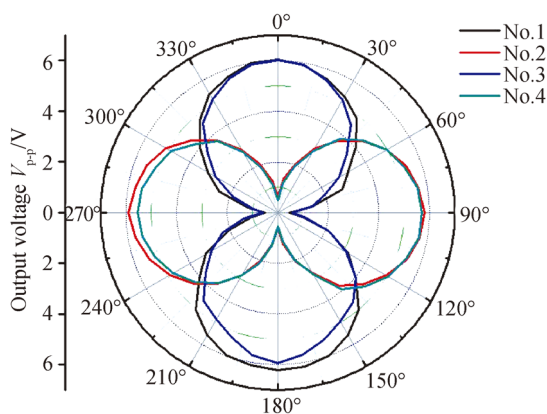


(d)  $\theta=60^\circ$

图 5 不同激励角度下各 PVDF 元件的输出电压与时间的关系曲线(频率=66.5 Hz, 加速度=3 m/s<sup>2</sup>)

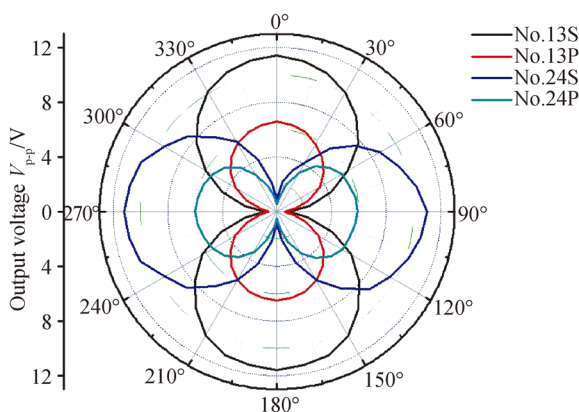
Fig. 5 Output voltage of each PVDF element versus time under different excitation angles (Frequency = 66.5 Hz,  $a=3 \text{ m/s}^2$ )

图 6(a)详细地展示了激励角度从 0°变为 360°时,各 PVDF 的输出电压与激励角的关系曲线。当一个 PVDF 的法线方向与振动方向平行时,由于该 PVDF 受到的应力最大,其输出电压最大;相反,当一个 PVDF 的法线方向垂直于振动方向时,输出电压最小。在旋转能量采集器的过程中,一个 PVDF 的法向与振动方向平行或垂直时有两个位置,因此,当激励角度在 0°~360°变化时,每个 PVDF 的输出电压具有两个最大值和两个最小值,这是因为所受到的应力方向不同,产生的电压极性相反。另外,从图 6(a)中还可以清楚地看到 4 个 PVDF 的位置关系。为了得到更大的输出,本文把相隔 180°的 1 号和 3 号 PVDF 进行了反向的串联和并联。因为从图 5 和图 6(a)中可知,1 号和 3 号 PVDF 元件具有相同的输出电压值和相反的极性。当正向的对 1 号和 3 号 PVDF 串联或者并联时,输出为 0。在图 6(b)中,“No. 13S”代表 1 号和 3 号 PVDF 反向串联,“No. 13P”代表 1 号和 3 号 PVDF 反向并联。可以看到,反向串联的 1 号和 3 号,2 号和 4 号 PVDF 的输出电压几乎等于单个 PVDF 输出的两倍,反向并联的电压基本上等于单个 PVDF。且它们随激励角的变化趋势与单个压电元件相同。



(a)各 PVDF 输出电压与  $\theta$  的关系曲线

(a)Output voltage of each PVDF element as a function of excitation angle



(b)1 和 3 号,2 和 4 号分别反向串并联时的输出电压与  $\theta$  的关系曲线

(b)Output voltage as a function of excitation angle for Nos. 1 and 3, Nos. 2 and 4 in series and parallel respectively

图 6 PVDF 输出电压与激励角度 ( $\theta$ ) 的关系曲线(频率=66.5 Hz, 加速度=3 m/s<sup>2</sup>)

Fig. 6 Output voltage of PVDF element as a function of excitation angle ( $\theta$ ) ( $a=3 \text{ m/s}^2$ , Frequency = 66.5 Hz)

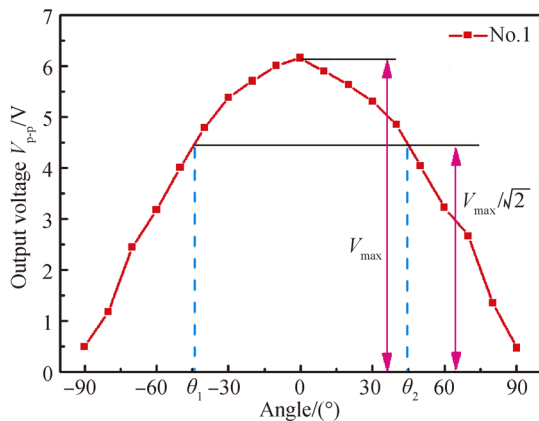
为了研究该能量采集器采集多方向振动能量的性能,这里引入了角度带宽(AB)的概念作为评估标准。角度带宽被定义为:

$$\Delta\theta=\theta_2-\theta_1, \quad (3)$$

其中  $\theta_1$  和  $\theta_2$  是输出电压等于  $V_{\max}/\sqrt{2}$  时对应的角度,如图 7(a)所示。为了方便计算和理解,将 270~360°的激励角度  $\theta$  写成  $-90\sim 0^\circ$ 。根据式(3),可以计算出图 7(a)中 1 号 PVDF 元件的 AB: $\theta_2-\theta_1=43.9-(-45.3)=89.2^\circ$ (理想情况

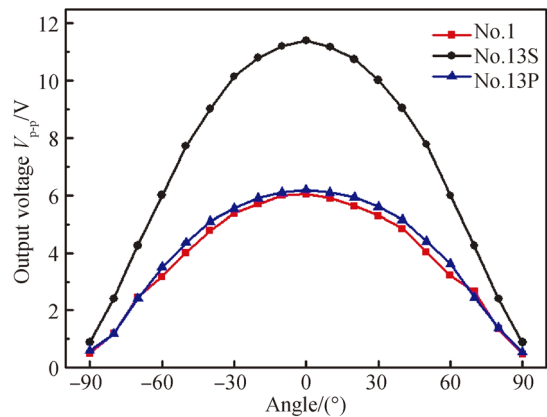
应该是  $\theta_1 = -44.6^\circ, \theta_2 = 44.6^\circ$ 。在图 7(b)中, 1 和 3 号反向并联的输出曲线基本与 1 号曲线一致, 因此它的 AB 值也应该为 89.2 左右(实际计算为 89.5°)。对于反向串联连接, 输出电压几乎增大了一倍, 但通过计算它的 AB 值并没有发生改变(89.4°)。由于每个 PVDF 元件有相同的输出性能(图 4(a)), 2~4 号压电元件的 AB 值也为 89.2°左右。2 号 PVDF 元件与 1 号相隔 90°, 所以 2 号对应的  $\theta_1 = 45.4^\circ, \theta_2 = 134.6^\circ$ 。将 1 号和 2 号分别连接到外接电路同时给电容充电的情况下, 该采集器能够采集到有效电压的角度范围接近 180°。该采集器的输出电压轴向对称(图 6), 只是极性相反, 所以该采集器可以采集到接近 360°的有效电压, 即  $x$ - $y$  平面内的任意方向的振动。且反向串并联可以在不减小角度带宽 AB 的情况下提高其输出电压。

图 8 显示了激励条件为 0.3 g 和 66.5 Hz 时的输出电压和输出功率与负载电阻的关系。可以看到, 当负载电阻小于 5 M $\Omega$  时, 负载电压急剧增加, 然后缓慢增加到稳定值。表 2 给出了图 8 中 3 种情况的最大输出电压, 功率和对应的最佳外接载荷。从表 2 中可以看到, 虽然反向串联后所需的外接载荷变大了, 但最大输出电压和功率都相应的提高了; 而在反向并联时, 虽然最大输出电压没有增大, 但是输出功率比单个 PVDF 元件时提高了近 2.6 倍。结合图 7、图 8 和表 2 可知, 反向串并联可以有效提高该采集器的输出性能。



(a) 1 号 PVDF 输出电压与  $\theta$  的关系曲线

(a) Output voltage of No. 1 as a function of excitation angle

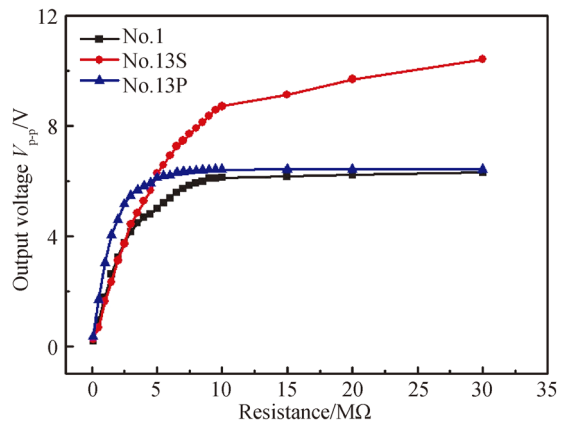


(b) 1 和 3 号 PVDF 分别反向串联和并联的输出电压与  $\theta$  的关系曲线

(b) Output voltage as a function of excitation angle for Nos. 1 and 3 in series and parallel respectively

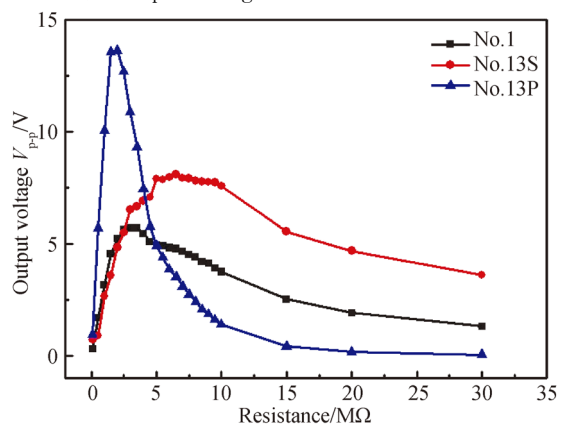
图 7 PVDF 输出电压与激励角度 ( $\theta$ ) 的关系(频率 = 66.5 Hz, 加速度 = 3 m/s<sup>2</sup>)

Fig. 7 Output voltage versus excitation angle ( $\alpha = 3 \text{ m/s}^2$ , Frequency = 66.5 Hz)



(a) 输出电压与负载的关系曲线

(a) Output voltage versus load resistance



(b) 输出功率与负载的关系曲线

(b) Output power versus load resistance

图 8 输出电压和功率与负载曲线(频率 = 66.5 Hz, 加速度 = 3 m/s<sup>2</sup>)

Fig. 8 Output voltage and power in different loads ( $\alpha = 3 \text{ m/s}^2$ , Frequency = 66.5 Hz)

表 2 不同 PVDF 的输出情况  
Tab. 2 Output of different PVDF

	最大输出 电压/V	最佳外接 载荷/M $\Omega$	最大输出 功率/ $\mu$ W
1 号 PVDF	6.02	3	5.71
1,3 号反向串联	11.6	6.5	8.09
1,3 号反向并联	6.05	2	13.5

## 5 结 论

本文提出了一种二维压电振动能量采集器,

利用圆柱体上径向分布的 4 个柔性 PVDF 压电元件来采集面内任意方向振动能量并转换为电能。同时,首次提出了“角度带宽”这一可以描述采集器多方向振动能量采集能力的概念。实验结果表明,单个 PVDF 元件的角度带宽为  $89.2^\circ$ 。通过 4 个压电元件阵列布置,角度带宽几乎可以达到  $180^\circ$ 。通过对轴向对称的 PVDF 元件进行反向串联连接,其输出电压可以提高接近一倍。当轴向对称的 PVDF 单元反向并联时,其输出功率达到  $13.5 \mu\text{W}$ ,为单片 PVDF 压电单元的 2.36 倍。基于这些良好的性能,该 PVEH 适用于多方向振动能量收集环境,也可用作方向传感器。

### 参考文献:

- [1] 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 [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(3): 694-700. (in Chinese)
- [2] WANG P H, TANAKA K, SUGIYAMA S, *et al.*. A micro electromagnetic low level vibration energy harvester based on MEMS technology [J]. *Microsystem Technologies*, 2009, 15(6): 941-951.
- [3] 刘颖,王艳芬,李刚,等. MEMS 低频压电振动能量采集器[J]. 光学 精密工程, 2014, 22(9): 2476-2482.  
LIU Y, WANG Y F, LI G, *et al.*. MEMS low-frequency piezoelectric vibration energy harvester [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(9): 2476-2482. (in Chinese)
- [4] WANG P H, DU H J. ZnO thin film piezoelectric MEMS vibration energy harvesters with two piezoelectric elements for higher output performance [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2015, 86 (7): 1131-1144.
- [5] ZHANG Y, WANG T, LUO A, *et al.*. Micro electrostatic energy harvester with both broad bandwidth and high normalized power density [J]. *Applied Energy*, 2018, 212: 362-371.
- [6] TAO K, TANG L H, WU J, *et al.*. Investigation of multimodal electret-based MEMS energy harvester with impact-induced nonlinearity [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2018, 27: 276-288.
- [7] WANG Z L, JIANG T, XU L. Toward the blue energy dream by triboelectric nanogenerator networks [J]. *Nano Energy*, 2017, 39 : 9-23.
- [8] WANG P H, LIU R Y, WANG Z L, *et al.*. Complementary electromagnetic-triboelectric active sensor for detecting multiple mechanical triggering [J]. *Advanced Functional Materials*, 2018: 1705808.
- [9] 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, 5(25) : 1272-1280.  
FAN K Q, LIU ZH H, WANG L S, *et al.*. An on-punch piezoelectric energy harvester that collects energy from a human walk [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 5(25) : 1272-1280. (in Chinese)
- [10] BARTON D A W, BURROW S G, CLARE L R. Energy harvesting from vibrations with a nonlinear oscillator [J]. *Journal of Vibration and Acoustics*, 2009, 132 (2): 427-436.
- [11] 刘祥建,朱莉娅,陈仁文. 两自由度悬臂梁压电发电装置的宽频发电性能[J]. 光学 精密工程, 2016, 24 (7): 1669-1676.  
LIU X J, ZHU L Y, CHEN R W. Width power generation performance of two-degree-of-freedom cantilever piezoelectric generator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24 (7): 1669-1676. (in Chinese)
- [12] 刘骥,刘书田,高仁璟,等. 基于压电悬臂梁的驱动器与传感器性能分析的精确解析模型[J]. 光学 精密工程, 2018, 2(26): 380-387.  
LIU J, LIU SH T, GAO R J, *et al.*. An analytical model for performance analysis of actuators and sensors based on piezoelectric cantilever beams [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 2(26): 380-387. (in Chinese)
- [13] ANDÒ B, BAGLIO S, MAIORCA F, *et al.*. Analysis of two dimensional, wide-band, bistable vi-

- bration energy harvester [J]. *Sensors and Actuators A Physical*, 2013, 202 (11):176-182.
- [14] YANG Y W, WU H, SOH C K. Experiment and modeling of a two-dimensional piezoelectric energy harvester [J]. *Smart Materials and Structures*, 2015, 24 (12):125011.
- [15] 刘祥建,陈仁文,侯志伟. 蒲公英状压电振动能量收集装置宽频带设计[J]. *光学精密工程*, 2014, 22 (7):1850-1856.  
LIU X J, CHEN R W, HOU ZH W. Dandelion-shaped piezoelectric vibration energy harvesting device broadband design [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(7): 1850-1856. (in Chinese)
- [16] JUNG H J, SONG Y, HONG S K, *et al.*. Design and optimization of piezoelectric impact-based micro wind energy harvester for wireless sensor network [J]. *Sensors and Actuators A Physical*, 2015, 222:314-321.
- [17] MEHDIZADEH S N, GANJI B A. Design and simulation of small size MEMS bimaterial cantilever solar cell using piezoelectric layer [J]. *Microsystem Technologies*, 2017, 23 (12):1-6.

#### 作者简介:



刘 星(1992—),男,湖北孝感人,硕士研究生,2015年于武汉科技大学获得学士学位,主要从事压电振动能量采集技术的研究。E-mail: 1255453846@qq.com

#### 导师简介:



王佩红(1978—),男,安徽阜阳人,博士,副教授,博士生导师,2001年、2004年于安徽大学分别获得学士、硕士学位,2010年于上海交通大学大学获得博士学位,主要从事压电薄膜材料、微加工技术、振动能量采集及摩擦纳米发电机(TENG)等方面的研究。E-mail: wangpeihong2002@ahu.edu.cn