

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2312311

高性能多方向双圆弧形压电能量收集系统*

曹益恺, 王德波

(南京邮电大学集成电路科学与工程学院 南京 210023)

摘要:为了解决传统压电能量收集系统通频带窄、功率密度低的问题,本文采用线性多模态共振法,提出一种双圆弧形悬臂梁内外反向拼接的压电能量收集系统。两根梁上各覆盖一个压电层,压电层之间串联连接。建立二自由度系统集总参数模型和机电耦合模型来分析频率响应和输出性能。对比压电层弧度不同的压电能量收集系统的输出性能,根据测试结果,当弧度为 0.5π 时输出性能最佳。设置激励加速度为 0.1 g ,一阶模式下,谐振频率为 82.19 Hz ,开路电压为 49.65 V ,最大输出功率为 3.74 mW ;二阶模式下,谐振频率为 119.14 Hz ,开路电压为 44.74 V ,最大输出功率为 3.54 mW 。测试结果表明,该结构可有效拓宽通频带宽度至 52 Hz ,且功率密度高。该压电能量收集系统结构简单易于制备,工作频带宽,可在频率波动大的环境下供电,同时体积小、功率密度大,能在多方向激励下高效率收集能量,可应用于可穿戴设备、低功率设备等多个领域。

关键词: 压电能量收集;多模态;多方向;谐振频率;功率密度

中图分类号: TH89 TN62 TP212.1 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.3030

High performance multi-directional dual circular piezoelectric energy harvester

Cao Yikai, Wang Debo

(College of Integrated Circuit Science and Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract:To solve the problems associated with the narrow bandwidth and low power density in conventional piezoelectric energy harvesters, a piezoelectric energy harvester with dual circular cantilever beams spliced inside and outside the inverse direction is designed with the linear multimodal resonance method. Each of the two beams is covered with a piezoelectric layer and the piezoelectric layers are connected in series. A two-degree-of-freedom system lumped parameter model and an electromechanical coupling model are studied to analyze the frequency response and output performance. The performance of the piezoelectric energy harvester is assessed with different radians of the piezoelectric layers, achieving optimal output performance when the radian is 0.5π . Setting the excitation acceleration at 0.1 g , the resonant frequency is 82.19 Hz , the open-circuit voltage is 49.65 V , and the maximum output power is 3.74 mW in the first-order mode. The resonant frequency is 119.14 Hz , the open-circuit voltage is 44.74 V , and the maximum output power is 3.54 mW in the second-order mode. The measured results show that the structure can effectively broaden the bandwidth to 52 Hz with high power density. This piezoelectric energy harvesting system is simple in structure, easy to manufacture, wide in a working frequency band, and can supply power in the environment with large frequency fluctuation. Meanwhile, it has the advantages of small volume, high power density, and high-efficiency energy collection under multi-directional excitation. Therefore, this system can be applied to many fields, such as wearable devices, low-power devices, and so on.

Keywords: piezoelectric energy harvesting; multi-mode; multi-directional; resonant frequency; power density

0 引言

随着电子技术的不断进步,可穿戴设备和低功率设备等电子器件往往体积小、功耗低,但却需要稳定的长期供电^[1-4]。作为电池的替代品,压电能量收集系统为这些设备提供了一种可行的能源解决方案^[5-6]。2003年, Lu等^[7]设计出第一个压电能量收集系统,悬臂梁宽长比为1/10,谐振频率高达3 kHz,输出功率为15 μW 。2008年 Qi等^[8]设计了一种阵列式能量收集系统,在一个矩形主梁两侧安装多个矩形副梁,通频带为15~34 Hz。2012年, Wu等^[9]提出在矩形梁内部挖去一部分来嵌套另一根梁从而构建二自由度系统,一、二阶谐振点相差2.4 Hz,通频带为8 Hz,但功率密度仅为53.46 $\mu\text{W}\cdot\text{g}^{-2}\cdot\text{mm}^{-3}$ 。2017年 Čeponis等^[10]设计了一种方形结构,具有5个谐振频率点,但一、二阶谐振频率之差大于100 Hz,调谐效果不佳。2019年 Li等^[11]提出夹层结构,然而一、三阶输出性能远低于二阶。2021年 Huang等^[12]提出一种U型梁加矩形梁的结构,通频带为13.6~28.4 Hz。2023年, Piyarathna等^[13]设计了一种由四个弧形分支梁和两个矩形梁构成的收集系统,可以实现0~8 Hz范围内有6个相近的谐振频率点,但结构尺寸太大导致功率密度过低,难以在实际中广泛运用。

综上所述,目前研究的压电能量收集系统普遍通频带较窄,且体积大、功率密度较低。为了解决这些问题,本文基于线性多模态共振法,设计一种双圆弧形能量收集系统。双梁设计实现了在工作频带内有两个相近的谐振频率点,并且可以有效地实现多方向能量收集;两根梁上各有一个压电层,压电层之间先整流再串联,极大程度利用了双梁振动产生的机械能,避免了只存在单一压电层而造成其余梁振动能量的损失。该结构可有效降低能量收集系统的谐振频率,在拓宽通频带的同时,提高功率密度。

1 结构与原理

本文设计的压电能量收集系统为一个二自由度系统,由两根半圆弧形悬臂梁、两个质量块、两个压电层组成,具体结构如图1所示。悬臂梁、质量块材料为黄铜,压电层的材料为PZT-5H,材料参数如表1所示。当结构受到外界激励时,压电层会受到应力并发生形变,在上、下两个表面产生极化电荷,并随着外界激励方向而改变,从而产生交流电压^[14]。压电层上表面作为正极(+)用导线引出,下表面作为负极(-)通过导线连接至地。

整体结构的俯视图如图2所示,内梁首端连接外梁末端,并与外梁反向放置,悬臂梁的外、内径分别为 R_1 、 R_2 。两个质量块分别位于内、外梁连接处以及内梁末端。

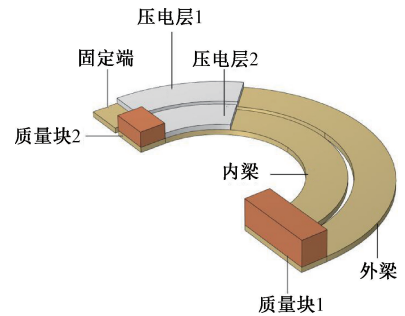


图1 二自由度能量收集系统结构

Fig. 1 Structure of 2-DOF piezoelectric energy harvester

压电层分别覆盖内梁末端和外梁首端,弧度均为 θ 。各部分结构尺寸参数如表2所示。

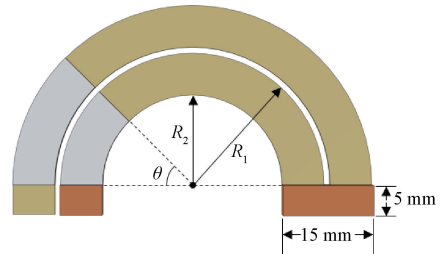


图2 二自由度压电能量收集系统俯视图

Fig. 2 Top view of 2-DOF piezoelectric energy harvester

表1 材料参数

Table 1 Material parameters

参数	黄铜	PZT-5H
密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	8 900	7 500
泊松比	0.35	0.34
杨氏模量/GPa	119	76
相对介电常数		1 433

表2 尺寸参数

Table 2 Structural parameters

结构	尺寸			
	R_1/mm	R_2/mm	厚度/mm	弧度
外梁	30	23	1	π
内梁	22	15		
压电片1	30	23	1	θ
压电片2	22	15		
结构	尺寸			
	长/mm	宽/mm	高/mm	
质量块1	15	5	5	
质量块2	7	5	3	

2 理论与模型

2.1 谐振频率分析

该压电能量收集系统主要由两根弧度为 π 的圆弧形悬臂梁首尾平行连接而成。因此,可以等效为由质量块-弹簧-阻尼组成的二自由度集总参数模型。该模型由两个单自由度系统组成,分别是集总质量块 m_1 -弹簧 k_1 -阻尼器 η_1 和集总质量块 m_2 -弹簧 k_2 -阻尼器 η_2 ,如图3所示。

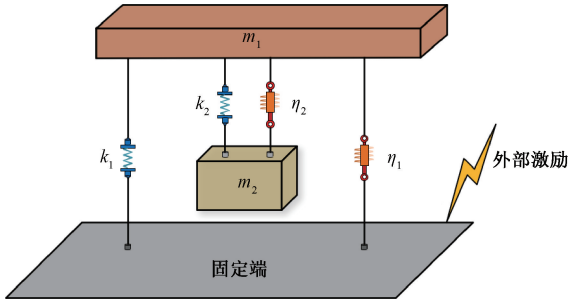


图3 二自由度系统集总参数模型

Fig.3 The 2-DOF lumped parametric model

对于二自由度系统,其运动控制方程为^[15]:

$$M\ddot{\mathbf{u}}(t) + \eta\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) = \mathbf{F}(t) \quad (1)$$

其中, M 为质量矩阵, η 为阻尼矩阵, \mathbf{K} 为刚度矩阵, $\mathbf{u}(t)$ 为系统位移向量, $\mathbf{F}(t)$ 为外部激励向量。

二自由度系统的质量矩阵、刚度矩阵以及阻尼矩阵

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{k_1 m_2 + k_2(m_1 + m_2) - \sqrt{-4k_1 k_2 m_1 m_2 + [k_1 m_2 + k_2(m_1 + m_2)]^2}}{2m_1 m_2}} \quad (9)$$

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{k_1 m_2 + k_2(m_1 + m_2) + \sqrt{-4k_1 k_2 m_1 m_2 + [k_1 m_2 + k_2(m_1 + m_2)]^2}}{2m_1 m_2}} \quad (10)$$

根据式(8)解出的 $\omega_i^2 (i=1,2)$ 被称为特征值, $\omega_i^2 (i=1,2)$ 的正平方根被称为二自由度系统的第 i 阶共振频率 ($\omega_1 < \omega_2$)。 $\omega_i^2 (i=1,2)$ 对应的特征向量为二自由度系统的第 i 阶模态振型,可表示为 $\lambda_i = (\lambda_{i1}, \lambda_{i2})^T (i=1,2)$ 。

由式(9)和(10)可以看出,系统的第一、二阶谐振频率 ω_1 和 ω_2 除了和集总质量块质量 m_1 、 m_2 有关外,还和等效弹性系数 k_1 、 k_2 有关。对于弧度为 π 的圆弧形悬臂梁,其等效弹性系数可表示为:

$$k = \frac{3E(h_b + \gamma h_p)w}{8\pi^2 r^2} \quad (11)$$

其中,比例系数 $\gamma = \theta/\pi$, E 为弹性模量, h_b 为悬臂梁的厚度, h_p 为压电层的厚度, θ 为压电层的弧度, w 为悬臂梁及压电层的宽度, r 为悬臂梁及压电层的半径。圆弧形悬臂梁的弹性模量可通过式(12)来求解。

可分别表示为:

$$M = \begin{pmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$K = \begin{pmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\eta = \begin{pmatrix} \eta_1 + \eta_2 & -\eta_2 \\ -\eta_2 & \eta_2 \end{pmatrix} \quad (4)$$

其中, m_1 、 m_2 为两个子系统集总质量块的质量, k_1 、 k_2 为两个子系统的等效弹性系数, η_1 、 η_2 为两个子系统的等效阻尼系数。

式(1)中令 $\mathbf{F}(t) = \mathbf{0}$, 得到二自由度系统的自由振动方程:

$$M\ddot{\mathbf{u}}(t) + \eta\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) = \mathbf{0} \quad (5)$$

对于图3所示的二自由度系统, $\omega_i > 0 (i=1,2)$, 系统在两个坐标方向上都做同频率、同初始相位的简谐振动。在无阻尼振动情况下 ($\eta = \mathbf{0}$), 这种主振动可表示为:

$$\mathbf{u}(t) = \boldsymbol{\lambda} \sin(\omega t + \varphi) \quad (6)$$

其中,非零列向量 $\boldsymbol{\lambda} = (\lambda_1, \lambda_2)^T$ 。将式(6)代入式(5),得到如下的齐次方程组:

$$(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M})\boldsymbol{\lambda} = \mathbf{0} \quad (7)$$

由于式(7)存在非零解 $\boldsymbol{\lambda}$, 故系数行列式为 0, 即满足:

$$\begin{vmatrix} k_1 + k_2 - \omega^2 m_1 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 - \omega^2 m_2 \end{vmatrix} = 0 \quad (8)$$

整理可得:

$$E = \frac{2E_p[4(\gamma h_p)^3 + 3h_b^2 + 6h_b(\gamma h_p)^2] + E_b h_b^3}{2[4(\gamma h_p)^3 + 3h_b^2 + 6h_b(\gamma h_p)^2] + h_b^3} \quad (12)$$

其中, E_p 为压电层弹性模量, E_b 为悬臂梁弹性模量。联立式(9)~(12)即可求得能量收集系统的一、二阶谐振频率 ω_1 和 ω_2 。

2.2 输出性能分析

对于本文的二自由度压电能量收集系统,可以对其单个压电振子进行分析。考虑机电耦合的影响,建立振动位移 $u(t)$ 、速度 $\dot{u}(t)$ 、电压 $V_{out}(t)$ 以及电流 $I(t)$ 之间的关系^[16],如式(13)、(14)所示。

$$M\ddot{\mathbf{u}}(t) + \eta\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) + \alpha\dot{V}_{out}(t) = \mathbf{F}(t) \quad (13)$$

$$\alpha\dot{\mathbf{u}}(t) - C_p\dot{V}_{out}(t) = I(t) \quad (14)$$

其中, α 为机电耦合系数, C_p 为寄生电容。式(14)

两边同除 C_p 得:

$$\frac{\alpha \dot{u}(t)}{C_p} = \dot{V}_{out}(t) + \frac{I(t)}{C_p} \quad (15)$$

式(15)两边对 t 积分可得:

$$\frac{\alpha u(t)}{C_p} = V_{out}(t) + V_p(t) \quad (16)$$

其中, $V_p(t)$ 为寄生电容两端的电压。由式(16)得到电路模型,可以用电压源串联电容来描述如图 4 所示。

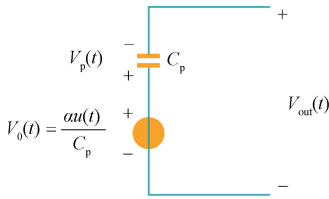


图 4 等效电压源模型

Fig. 4 The equivalent voltage source model

对于本文提出的双圆弧形能量收集系统,可根据内、外两段圆弧形梁拆分为子系统 A 和子系统 B。子系统 A、B 各有一个压电层,由于两个压电层所处位置不同,考虑到在实际外界激励下振动时,产生的交流电压之间可能存在相位差,直接串联会导致总电压降低。故本文采取对两个压电层先各自整流再串联连接的方案,如图 5 所示,其中 C_{r1} 、 C_{r2} 均为滤波电容。

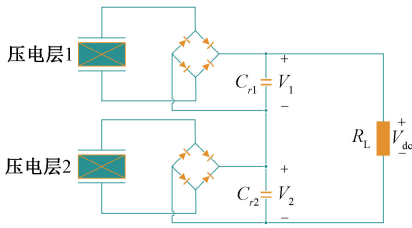


图 5 双压电层串联连接模型

Fig. 5 Model of dual piezoelectric layers connected in series

假设外界激励 $F(t) = F_m \sin(\omega t)$, 其中 F_m 为激励幅值, ω 为激励频率。两个压电层的位移 $u_i(t) = u_{im} \sin(\omega t - \varphi_i)$, 其中 u_{im} 为位移幅值, φ_i 为相对相移 ($i = 1, 2$)。测试中,每个压电层连接到桥式整流加滤波电容电路。选取的滤波电容 C_r 足够大,从而保证时间常数远大于压电层的振动周期。由于在半周期内,流过滤波电容 C_r 的平均电流为 0,故压电层在某个特定半周期内(从 τ 到 $\tau + T/2$)产生的电荷等于流过负载电阻 R_L 的电荷。从而得到:

$$\int_{\tau}^{\tau+T/2} Idt = \frac{T}{2} \cdot \frac{V_i}{R_L} \quad (17)$$

其中, V_i ($i = 1, 2$) 为两个压电层整流之后的直流电

压。根据式(17),得到 V_i 是关于位移幅值 u_{im} 的函数:

$$V_i = \frac{\alpha \omega R_L}{\frac{\pi}{2} + \omega C_{pi} R_L} \cdot u_{im} \quad (18)$$

其中, C_{pi} ($i = 1, 2$) 为两个压电层的寄生电容。因此,将两个压电层各自整流之后串联得到的总直流电压为:

$$V_{dc} = \sum_{i=1}^2 V_i = \alpha \omega R_L \cdot \sum_{i=1}^2 \frac{u_{im}}{\frac{\pi}{2} + \omega R_L C_{pi}} \quad (19)$$

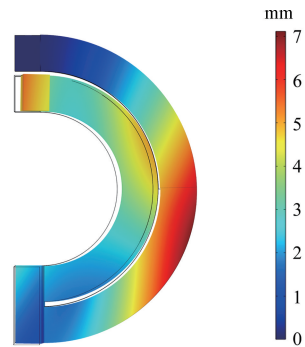
相应的输出功率为:

$$P_{dc} = \frac{V_{dc}^2}{R_L} = \alpha^2 \omega^2 R_L \cdot \left(\sum_{i=1}^2 \frac{u_{im}}{\frac{\pi}{2} + \omega R_L C_{pi}} \right)^2 \quad (20)$$

3 有限元仿真

通过有限元分析,建立双圆弧形能量收集系统的仿真模型。设置外界激励方向平行于 Z 轴,大小为 0.1 g。悬臂梁为线性弹性材料,阻尼类型为各向同性损耗因子,损耗因子为 0.001。压电层的阻尼类型也为各向同性损耗因子,损耗因子为 0.001。

当 $\theta = 0.5\pi$ 时,双圆弧形能量收集系统的一、二阶振型图如图 6 所示。一阶振型下,外梁首端(压电层 1 覆盖处)和内梁末端(压电层 2 覆盖处)振动位移都较大;二阶振型下,外梁首端振动位移很小,而内梁末端振动位移更加明显,高于其一阶位移。根据压电材料的正压电效应理论,压电层形变越大,与极化方向垂直的上、下表面电势差就越大^[17]。因此,压电层 1 一阶振型下的开路电压显著高于二阶;压电层 2 二阶振型下的开路电压高于二阶,但差值小于压电层 1。而双圆弧形能量收集系统的两个压电层之间采用串联连接,压电层 1、2 可以相互弥补对方在一、二阶振型下的开路电压差值,所以本结构的一、二阶开路电压差值小。



(a) 一阶
(a) The 1st mode

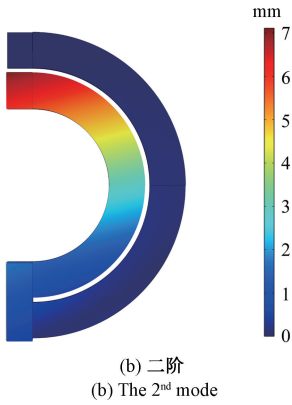


图6 能量收集系统振型 ($\theta=0.5\pi$)
Fig. 6 Displacement of energy harvester ($\theta=0.5\pi$)

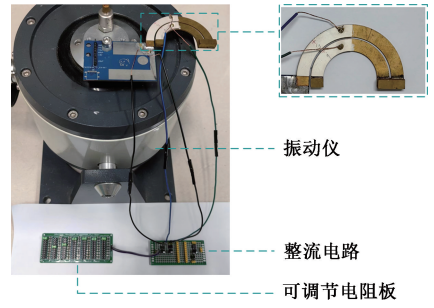


图8 测试照片
Fig. 8 Photo of measurement

4 测量与讨论

实验测试平台由信号发生器 (KEYSIGHT 336MEM2U 型)、功率放大器 (YMC271A02 型)、振动仪 (SA-JZ020 型)、毫伏表 (KEYSIGHT 34450A 型) 以及示波器 (KEYSIGHT DSOX2004A 型) 组成, 实验流程如图 7 所示。其中, 双圆弧形能量收集系统被固定在振动仪上。首先, 信号发生器产生一定频率的正弦信号。其次, 将正弦信号通过功率放大器进行放大, 使振动仪产生相同频率的振动, 带动能量收集系统发生形变, 从而产生电压。最后, 将毫伏表和示波器连接至能量收集系统。毫伏表可测量输出电压的幅值, 而示波器可观察输出电压的波形。测试照片如图 8 所示。

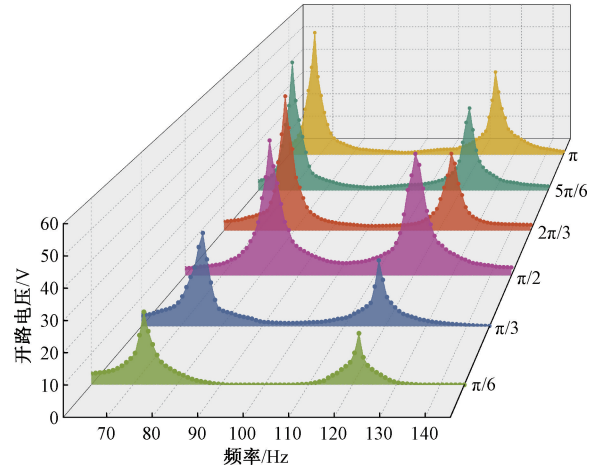


图9 不同压电层弧度下的频率响应
Fig. 9 Frequency response with different piezoelectric layer radians

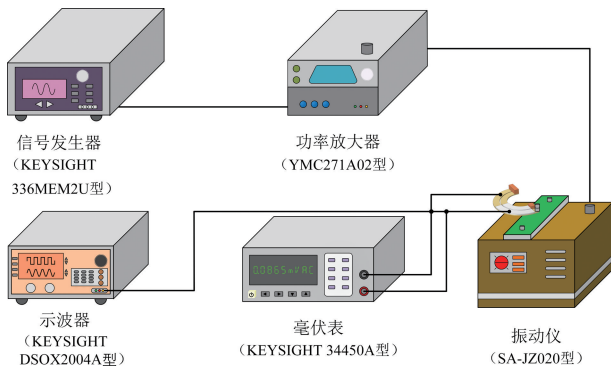


图7 实验平台连接关系
Fig. 7 Connection relationship of test platform

表3 不同压电层弧度的能量收集系统性能参数
Table 3 Performance parameters of energy harvesters with different piezoelectric layer radians

参数	θ					
	$\pi/6$	$\pi/3$	$\pi/2$	$2\pi/3$	$5\pi/6$	π
一阶谐振频率/Hz	72.26	75.68	82.19	77.31	70.09	68.82
一阶开路电压/V	23.49	32.24	49.65	52.48	53.01	53.38
二阶谐振频率/Hz	121.57	118.79	119.14	123.40	122.54	124.73
二阶开路电压/V	16.53	22.81	44.74	30.05	34.12	36.19
频带宽度/Hz	15	31	52	36	33	38

4.1 频率响应测试

将压电能量收集系统固定在振动仪上, 施加加速度大小为 0.1 g 的激励, 调节信号发生器输出信号的频率, 分别测试不同压电层弧度下开路电压随激励频率的变化, 如图 9 所示。表 3 给出了不同压电层弧度的能量收集系统的性能参数。

通过对比可知, 当弧度 θ 从 $\pi/6$ 变化至 π , 一阶谐振频率呈现先增后减的趋势, 在 $\theta=0.5\pi$ 时取得最大值 82.19 Hz , 一阶开路电压一直增大且增加量越来越小, 最终稳定至 54 V 左右; 二阶谐振频率变化不大, 二阶开路电压先增大后减小, 在 $\theta=0.5\pi$ 时取得最大值 44.74 V 。值得注意的是, $\theta=0.5\pi$ 时一、二阶开路电压差值最小, 仅为 4.91 V , 这一点和振型分析部分的讨论结果是一致

的。开路电压差值越小,代表能量收集系统的两个谐振点电压峰值越相近,在两个谐振点各自的附近频域内输出性能就更接近。此外, $\theta=0.5\pi$ 时一、二阶谐振频率点调谐效果最优,同时通频带仍是6种不同压电层弧度中最宽的,可达52 Hz,在75~127 Hz的频率范围内都有较大的直流电压输出。测试结果表明, $\theta=0.5\pi$ 的双圆弧形压电能量收集系统性能最为优越,后续测量和对比都是基于 $\theta=0.5\pi$ 的结构。

当 $\theta=0.5\pi$ 时,能量收集系统频率响应的测试结果和理论结果如图10所示。一阶模式下,谐振频率测试值为82.19 Hz,理论值为79.35 Hz,相对误差为3.58%;开路电压测试值为49.65 V,理论值为54.81 V,相对误差为9.41%。二阶模式下,谐振频率测试值为119.14 Hz,理论值为115.79 Hz,相对误差为2.89%;开路电压测试值为44.74 V,理论值为46.59 V,相对误差为3.97%。因此,对于频率响应,测试结果与理论结果具有很好的一致性。

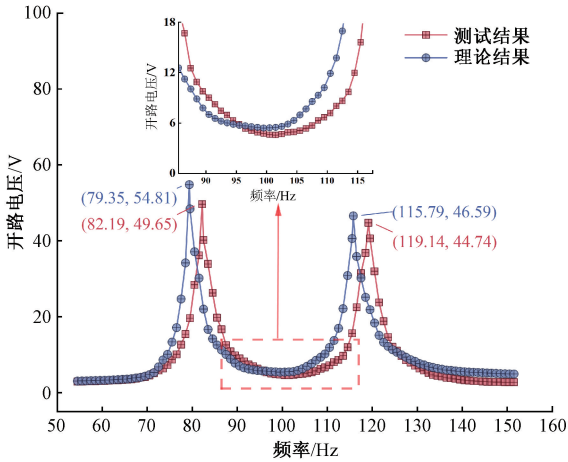


图10 理论结果与测试结果的频率响应对比($\theta=0.5\pi$)

Fig. 10 Comparison of frequency response between theoretical and measured results($\theta=0.5\pi$)

4.2 输出功率测试

两个压电层的上、下表面各自作为电源正、负极整流后串联,再连接至可调节电阻板。改变可调节电阻板阻值,探究双圆弧形压电能量收集系统分别在一、二阶谐振频率下输出功率的变化情况。当输出功率达到最大值时,确定最佳负载电阻。图11给出了 $\theta=0.5\pi$ 时一、二阶模式下输出功率与负载电阻的关系。双圆弧形压电能量收集系统一阶模式下最佳负载为460 k Ω ,最大输出功率为3.74 mW;二阶模式下最佳负载为480 k Ω ,最大输出功率为3.54 mW。可以看到,一、二阶最大输出功率仅相差5.65%。这是由于 $\theta=0.5\pi$ 时,一、二阶模式开路电压和最佳负载都很接近。

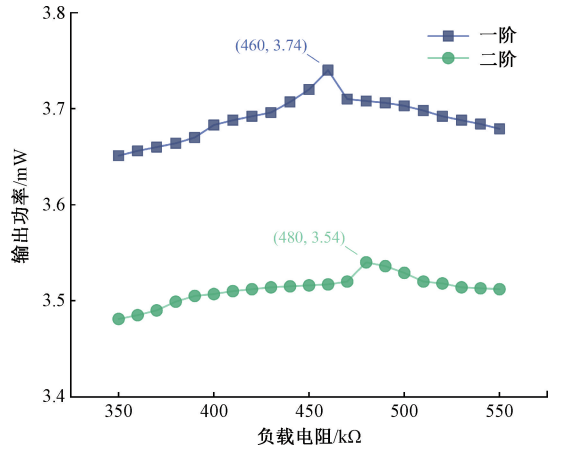


图11 输出功率与负载电阻在谐振频率下的关系($\theta=0.5\pi$)

Fig. 11 Relationship between output power and load resistance at resonant frequency ($\theta=0.5\pi$)

本文将 $\theta=0.5\pi$ 时结构的归一化功率密度、通频带宽度等指标与其他采用线性多模态共振法设计的压电能量收集系统进行比较,如表4所示。归一化功率密度(单位: $\mu\text{W}\cdot\text{g}^{-2}\cdot\text{mm}^{-3}$)可以衡量能量收集系统的能量转换效率^[18],计算公式为:

$$\text{NPD} = \frac{P}{a^2 \cdot V} \quad (21)$$

其中, P 为最大输出功率, a 为激励加速度, V 为压电能量收集系统体积。由表4看出,双圆弧形能量收集系统在有效拓宽通频带宽度的同时,可以保证归一化功率密度较高。和Wu等^[9]的设计相比,同样在加速度为0.1 g的激励下,本文的结构可将通频带宽度扩大至7.43倍,一、二阶功率密度扩大至7.36倍、7.70倍。这主要是因为在两根悬臂梁上都各存在一个压电层,即使当激励频率偏离结构的一、二阶谐振频率点时,压电层串联连接仍可有较为可观的直流电压输出。同时,双压电层的设计极大程度地利用悬臂梁在激励下的振动,避免了基于线性多模态共振法的多梁式能量收集系统只存在单一压电层而造成其余梁振动的机械能损失,大大提高能量转换效率,从而显著提高归一化功率密度。

4.3 多方向测试

在实际环境中,外界激励可能不会垂直作用于压电能量收集系统。因此,多方向收集能力是一个重要的测试指标。定义角度 β 为激励与压电能量收集系统所处平面法线之间的夹角,如图12所示。

图13给出了激励角度 β 在 $0^\circ\sim 90^\circ$ (以 15° 为间隔)下, $\theta=0.5\pi$ 时的双圆弧形压电能量收集系统的开路电压和最大输出功率的测试结果。由测试结果可知,输出电压和最大输出功率都在 $\beta=0^\circ$ 时取得最大值。在 $0^\circ\leq\beta\leq 60^\circ$ 的范围内,输出性能逐渐降低,且当 $\beta=60^\circ$

表4 不同结构对比
Table 4 Comparison of different structures

文献	加速度/g	通频带宽度/Hz	开路电压/V		最大输出功率/ μ W		归一化功率密度/ $(\mu\text{W}\cdot\text{g}^{-2}\cdot\text{mm}^{-3})$	
			一阶	二阶	一阶	二阶	一阶	二阶
Etrunk 等 ^[19]	1.0	8	14.80	11.30	4 900	2 900	18.85	11.16
Wu 等 ^[9]	0.1	7	14.90	13.90	525	475	24.50	22.17
Zhao 等 ^[20]	0.5	12	37.80	32.80	331	314	12.00	11.38
Zhu 等 ^[21]	1.0	5	24.91	7.99	8 300	1 050	11.41	1.44
Huang 等 ^[12]	0.5	14	6.40	6.20	52.5	48.8	2.10	1.95
本文($\theta=0.5\pi$)	0.1	52	49.65	44.74	3 740	3 540	180.27	170.78

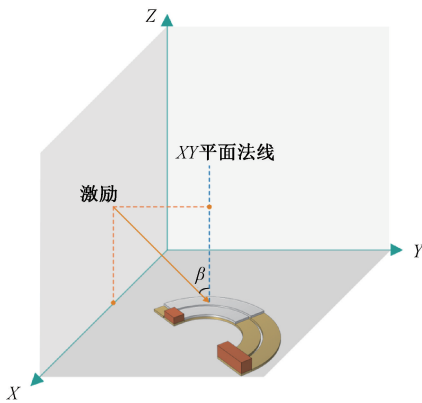


图12 β 的定义
Fig. 12 Definition of β

时,一、二阶开路电压分别达到最大值的66.85%、61.51%,一、二阶最大输出功率分别达到最大值的46.79%、42.66%。在 $60^\circ < \beta \leq 90^\circ$ 的范围内,输出性能急剧下降,此时系统收集能量的性能较低,实际应用中不适合在此角度范围的激励下工作。值得注意的是,随着 β 的改变,该结构的一、二阶输出性能仍较为相近,这依然得益于双压电层串联连接可弥补对方一、二阶模态输出性能之差的设计。因此,双圆弧形压电能量收集系统具有多方向工作的能力。

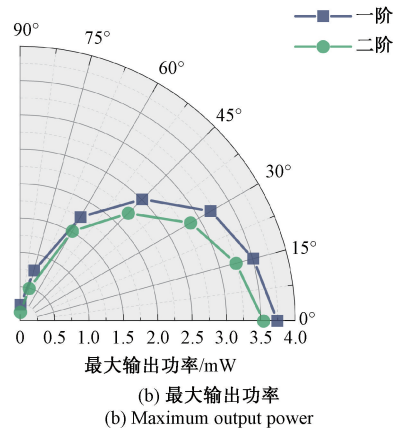
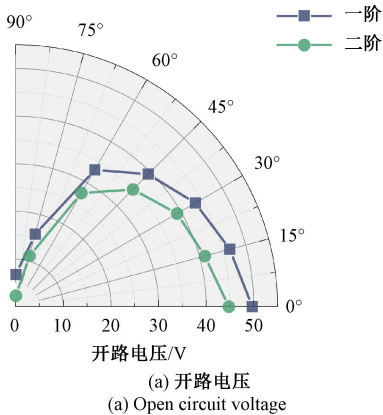


图13 输出性能与 β 的关系($\theta=0.5\pi$)
Fig. 13 Relationship between output performance and β ($\theta=0.5\pi$)

5 结 论

综上所述,本文采用线性多模态共振法设计了一种双圆弧形压电能量收集系统。建立二自由度集总参数模型和附带整流功能的机电耦合模型,理论结果和测试结果较为符合。双梁上各有一个压电层,压电层各自整流后串联连接,在有效拓宽通频带宽度的同时,显著提高了功率密度。 $\theta=0.5\pi$ 时的能量收集系统输出性能最佳。此外,该能量收集系统在 $0^\circ \sim 60^\circ$ 的角度范围内,对于不同角度的激励都有较高的输出,具备多方向能量收集的能力。因此,本文提出的结构可以满足可穿戴设备、低功率设备的自供电需求。

参考文献

[1] KAUSAR A S M Z, REZA A W, SALEH M U, et al. Energizing wireless sensor networks by energy harvesting

- systems: Scopes, challenges and approaches [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 38: 973-989.
- [2] LIU Y, KHANBAREH H, HALIM M A, et al. Piezoelectric energy harvesting for self-powered wearable upper limb applications [J]. *Nano Select*, 2021, 2(8): 1459-1479.
- [3] E SILVA A G P, SOBRINHO J M B, DA ROCHA SOUTO C, et al. Design, modelling and experimental analysis of a piezoelectric wind energy generator for low-power applications [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2021, 317: 112462.
- [4] ACETI P, ROSSO M, ARDITO R, et al. Optimization of an impact-based frequency up-converted piezoelectric vibration energy harvester for wearable devices [J]. *Sensors*, 2023, 23(3): 1391.
- [5] TOPRAK A, TIGLI O. Piezoelectric energy harvesting: State-of-the-art and challenges [J]. *Applied Physics Reviews*, 2014, 1(3): 1-14.
- [6] LIU H, ZHONG J, LEE C, et al. A comprehensive review on piezoelectric energy harvesting technology: Materials, mechanisms, and applications [J]. *Applied Physics Reviews*, 2018, 5(4): 041306.
- [7] LU F, LEE H P, LIM S P. Modeling and analysis of micro piezoelectric power generators for micro-electromechanical-systems applications [J]. *Smart Materials and Structures*, 2003, 13(1): 57-63.
- [8] QI S, SHUTTLEWORTH R, OYADIJI S O, et al. Design of a multiresonant beam for broadband piezoelectric energy harvesting [J]. *Smart Materials and Structures*, 2010, 19(9): 094009.
- [9] WU H, TANG L, YANG Y, et al. A novel two-degrees-of-freedom piezoelectric energy harvester [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2013, 24(3): 357-368.
- [10] ČEPONIS A, MAŽEIKI D. Investigation of multifrequency piezoelectric energy harvester [J]. *Shock and Vibration*, 2017, 2017(7): 8703680.
- [11] LI X, YU K, UPADRASHTA D, et al. Multi-branch sandwich piezoelectric energy harvester: Mathematical modeling and validation [J]. *Smart Materials and Structures*, 2019, 28(3): 035010.
- [12] HUANG X, ZHANG C, DAI K. A multi-mode broadband vibration energy harvester composed of symmetrically distributed u-shaped cantilever beams [J]. *Micromachines*, 2021, 12(2): 203.
- [13] PIYARATHNA I E, THABET A M, UCGUL M, et al. Linear segmented arc-shaped piezoelectric branch beam energy harvester for ultra-low frequency vibrations [J]. *Sensors*, 2023, 23(11): 5257.
- [14] 陆颢瓚,朱宇宸,刘琪才,等. 悬臂梁压电式能量收集器方向性效率的研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(3): 181-187.
- LU H Z, ZHU Y CH, LIU Q C, et al. Study on directional efficiency of piezoelectric VEH based on cantilever beam [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(3): 181-187.
- [15] KIM M, HOEGEN M, DUGUNDJI J, et al. Modeling and experimental verification of proof mass effects on vibration energy harvester performance [J]. *Smart Materials and Structures*, 2010, 19(4): 045023.
- [16] DUTOIT N E, WARDLE B L. Experimental verification of models for microfabricated piezoelectric vibration energy harvesters [J]. *AIAA Journal*, 2007, 45(5): 1126-1137.
- [17] COVACI C, GONTEAN A. Piezoelectric energy harvesting solutions: A review [J]. *Sensors*, 2020, 20(12): 3512.
- [18] SONG H C, KUMAR P, MAURYA D, et al. Ultra-low resonant piezoelectric MEMS energy harvester with high power density [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2017, 26(6): 1226-1234.
- [19] ERTURK A, RENNO J M, INMAN D J. Modeling of piezoelectric energy harvesting from an L-shaped beam-mass structure with an application to UAVs [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2009, 20(5): 529-544.
- [20] ZHAO N, YANG J, YU Q, et al. Three-dimensional piezoelectric vibration energy harvester using spiral-shaped beam with triple operating frequencies [J].

Review of Scientific Instruments, 2016, 87 (1): 015003.

- [21] ZHU Y, JI X, JIN L, et al. A multi-direction piezoelectric VEH based on circular arc structure [J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(23): 11272-11280.

作者简介

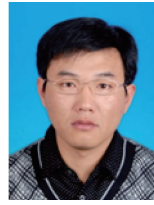


曹益恺,南京邮电大学本科生。主要研究方向为压电能量收集器。

E-mail: 3101985403@qq.com

Cao Yikai is currently an undergraduate at Nanjing University of Posts and Telecom-

munications. His main research interest is the piezoelectric energy harvester.



王德波(通信作者),2007年于河北科技大学获得学士学位,2010年和2012年于东南大学获得硕士学位和博士学位,现为南京邮电大学副教授,主要研究方向为RF MEMS,传感器与执行器。

E-mail: wdb@njupt.edu.cn

Wang Debo (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Hebei University of Science and Technology in 2007, and received his M.Sc. and Ph.D. degrees both from Southeast University in 2010 and 2012, respectively. He is currently an associate professor at Nanjing University of Posts and Telecommunications. His main research interests include RF MEMS, sensors and actuators.