

一种“回”字形多方向压电能量收集方法

荣本阳¹, 李宗伦¹, 朱虎霸², 何卓威², 杨晶晶¹

(1. 昆明理工大学 民航与航空学院, 云南 昆明 650500; 2. 昆明理工大学 机电工程学院, 云南 昆明 650500)

摘要:该文介绍了一种“回”字形的多方向微型压电振动能量收集装置, 其由尺寸为 $34\text{ mm} \times 2\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 的正方形边框包围, 内部结构包含4个非对称的组合悬臂梁, 主悬臂梁固定于边框内壁, 并与 z 方向垂直, 次悬臂梁连接在主悬臂梁的末端质量块上。首先建立基础激励条件下组合悬臂梁振动系统的动力学模型。然后, 通过有限元仿真分析对比了不同刚度和质量对位移幅值的影响, 验证了组合悬臂梁系统的振动特性, 并确定了最佳结构参数值: 当主、次悬臂梁厚度均为 0.3 mm , 主、次质量块的最佳惯性质量分别为 619.32 g 、 342.3 g 。经仿真计算得到 z 方向可输出电功率为 3.1385 mW , x 、 y 方向可输出功率均为 0.7205 mW 。最后搭建微型能量收集器实验平台, 在实际测试中 z 方向的输出功率为 2.85 mW , x 、 y 方向的输出功率均为 0.57 mW 。

关键词:多方向; 压电能量收集器; 振动能量; 悬臂梁; 有限元仿真

中图分类号: TN384 **文献标识码:** A

A “回” Shaped Multi-Directional Piezoelectric Energy Collection Method

RONG Benyang¹, LI Zonglun¹, ZHU Huba², HE Zhuowei², YANG Jingjing¹

(1. School of Civil Aviation and Aviation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: This paper introduces a multi-directional miniature piezoelectric vibration energy collection device with a zigzag shape, which is surrounded by a square frame with a size of $34\text{ mm} \times 2\text{ mm} \times 1\text{ mm}$, and its internal structure consists of four asymmetric combined cantilever beams. The main cantilever beam is fixed on the inner wall of the frame and is perpendicular to the z direction, whereas the secondary cantilever beam is connected to the end mass block of the main cantilever beam. In this study, first, the dynamic model of a composite cantilever beam vibration system under basic excitation is established. Subsequently, through a finite element simulation, the influence of different stiffness and mass values on the displacement amplitude is analyzed and compared, the vibration characteristics of the composite cantilever beam system are verified, and the optimal structural parameters are determined. When the thickness of the primary and secondary cantilever beams is 0.3 mm , the optimal inertial mass of the primary and secondary mass blocks is 619.32 and 342.3 g . The simulation calculation shows that the collectable electric power in the z direction is 3.1385 mW , and the collectable power in the x and y directions is 0.7205 mW . Finally, an experimental platform of a miniature energy collector is built, and in actual testing, the output power in the z direction is 2.85 mW , the output power in the x , y direction is 0.57 mW .

Key words: multi-directioning; piezoelectric power harvester; vibration energy; cantilever beam; finite element simulation

0 引言

无线传感器节点具有体积小、质量小及易安装等特点, 广泛应用于各类结构健康状态监测系统中^[1-3]。通过使用这些节点, 可以对装备的健康状况、疲劳程度和损伤程度进行评估和预警。虽然无

线传感器节点功耗很低, 但是许多装备的工作环境特殊, 无法合理安装并及时与地面进行持续补给, 在面对庞大的传感器网络节点时, 能源供电系统会面临供电紧张和能源更换难等问题^[4-5]。为了解决上述问题, 利用环境本身的能量对电子设备进行供

收稿日期: 2024-01-03

基金项目: 飞行器无线传感网络振动能量收集器的研究(KKSY201765024); 昆明理工大学-云南港翔航空技术有限公司产教融合研究生联合培养基地(109920220119)

作者简介: 荣本阳(1999-), 男, 重庆市人, 硕士生。通信作者: 杨晶晶(1988-), 男, 湖北省钟祥市人, 博士, 副教授。

能成为一种新的方向^[6-7]。利用静电、电磁和压电式转换机制的振动能量收集在过去几十年的发展尤为迅速^[8-13]。这种环境能量供电的方法既减少了对传感器节点的外部电池或电源的依赖性,又提供了更长时间的持续工作能力。

近年来,广大科研工作者进行了环境振动能量收集和转换技术的研究,其中关于压电式能量收集器的研究更是炙手可热。为了实现能量收集器的多方向收集,2010年Kim等^[14]提出了二维振动能量收集器,将两个能量收集方向不同的悬臂梁结构结合,实现了两个不同的压电悬臂梁共享一个自由端质量块,从而实现二维能量收集。2013年Ando等^[15]提出了另一种结构的二维压电振动能量收集器,该结构将一个主悬臂梁结构与另一个方向不同且在自由端设置永磁体的副悬臂梁结合,得到了一种新型双轴振动能量收集器。2017年Demori等^[16]提出了一种基于压电转换器的能量收集系统,该系统从气流中提取能量并将其用于无电池传感器,在最佳流速为4 m/s时,收获功率约为650 mW。Li S等^[17]提出了一种基于贴片式结构设计的垂直杆翻叶发电机,用于收集风能。在实验条件下,该发电机的最大输出功率达到0.25 W。在复合型压电悬臂梁结构能量收集器研究的基础上,2022年张宇轩等^[18]提出了一种新型组合螺旋压电能量收集器,将悬臂梁的直角螺旋结构与圆弧螺旋结构的优点相结合,得到一种底层是直角螺旋梁而顶层是圆弧螺旋梁的新型多方向能量收集器,其结构新颖独特,但空间占有率高。2023年,杨俊斌等^[19]设计了一种基于复合梁结构的压电-电磁式能量收集器,将电磁结构与复合多维压电悬臂梁结构相结合,进一步补充了压电能量收集器的输出功率。

上述研究均能实现装置环境中振动能量的收集且效率较高,但是传统能量收集器面临3大挑战:

1) 有限的安装空间。通常设备具有狭小或难以访问的空间,不适合容纳和安装体积较大的能量收集器^[20]。

2) 复杂的结构和形状。某些设备可能涉及到曲面、角落或不规则表面等复杂的形状或结构,传统设计无法紧密贴合,进而影响振动能量的有效采集^[21]。

3) 多方向振动采集。由于装备会与各个工作部件振动耦合,通常会承受来自多个方向上的振动,而多数能量收集器仅专注于单一方向的振动^[22]。

针对上述问题,本文提出了一种可以同时收集横、纵、竖3个方向振动能量的平面环绕式微型压电能量收集器结构优化设计。该振动能量采集器结构扁平,可以紧贴于装备的狭小空间内并能采集多个方向的振动能量。为了研究振动能量收集器的能量收集性能,采用数值模拟仿真与实验相结合的方法。首先建立微型能量收集器的数学模型并进行分析;随后进行有限元仿真验证及优化设计;最后设计制作了收集器原型样机并搭建了实验平台,对能量收集器的最优结构参数和性能进行了详细的测试和分析,验证了设计的可行性。

1 设计与建模

1.1 收集器结构设计

本文设计了一款方状“回”字形振动能量收集器,结构图如图1所示。由图可见,设计的收集器外部被尺寸为34 mm×2 mm×1 mm的正方形边框包围,内部由4组L形组合悬臂梁构成,每组L形组合悬臂梁由一根主悬臂梁和一根次悬臂梁垂直连接,每根悬臂梁上贴有压电片。主悬臂梁用来收集竖直方向上较大的振动能量(z 方向),而4根次悬臂梁分别收集横轴(x 方向)和纵轴(y 方向)的振动能量。这种扁平的正方形框架结构小巧简单,可贴附于装备的狭小空间,如飞机机翼内表面、汽车引擎盖、火车车厢侧壁或轮船推进器外壳等,为结构健康状态监测的无线传感器节点提供能源。

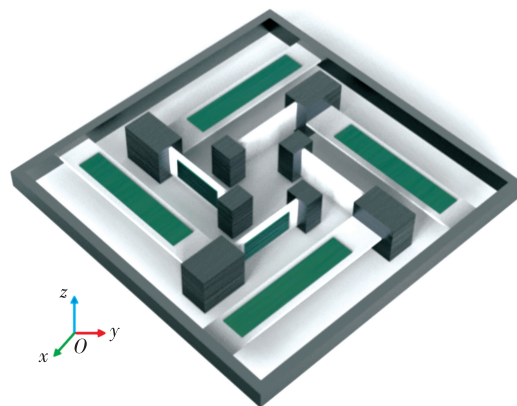


图1 “回”字形压电能量收集器结构图

“回”字形结构压电能量收集器还能同时在横、纵、竖3个方向上捕捉振动能量,适用于各种振动来源。此设计不仅有助于适应复杂的设备结构,还能

够最大程度地利用有限的空间,提高振动能量的采集效率。同时,简化的结构可使能量收集器更易于安装和维护,降低了使用成本。为了验证设计的有效性,本文使用 Comsol Multiphysics 软件建立了平面环绕式微型压电能量收集器的有限元模型,相关的材料及尺寸参数如表 1、2 所示。

表 1 模型的材料参数表

材料参数	数值
边框/质量块材料: 碳钢	
边框/质量块弹性模量/GPa	200
边框/质量块密度/(kg·m ⁻³)	7 700
边框/质量块泊松比	0.3
悬臂梁基底材料: 黄铜	
悬臂梁弹性模量	107
悬臂梁密度/(kg·m ⁻³)	4 500
悬臂梁泊松比/GPa	0.32
压电片材料: PZT-5H	
压电片弹性模量/GPa	63
压电片密度/(kg·m ⁻³)	7 500
压电片泊松比	0.34
相对介电常数	3 130
压电应力常数/(C·m ⁻²)	-6.5

表 2 模型的尺寸参数表

几何参数	数值
边框边长/mm	34
边框高度/mm	2
边框壁厚/mm	1
(主/次悬臂梁长度)/mm	19/8
(主/次悬臂梁厚度)/mm	0.3/0.3
(主/次悬臂梁宽度)/mm	3.6/3.6
(主/次压电片长度)/mm	13.6/5.6
(主/次压电片厚度)/mm	2.4/2.4
(主/次压电片宽度)/mm	0.1/0.1
(主/次质量块长度)/mm	3/2
(主/次质量块厚度)/mm	5/2.6
(主/次质量块宽度)/mm	4.3/4
(主/次质量块宽度)/mm	4.3/4

1.2 收集器数学建模

图 2 为压电振动能量收集器单个组合悬臂梁的动力学模型,其特征频率可以通过分析系统的振动模态进行计算。

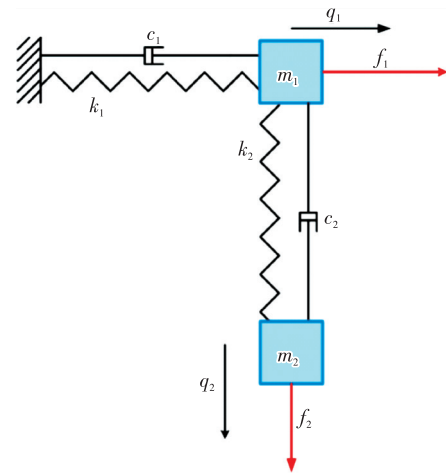


图 2 收集器动力学模型

假设系统的两个自由度分别为 x 、 y , 系统的运动方程可表示为矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 & 0 \\ 0 & c_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: \mathbf{M} 为质量矩阵; \mathbf{K} 为刚度矩阵; \mathbf{q} 为位移向量; \mathbf{C} 为阻尼矩阵; \mathbf{F} 为外力向量。

系统特征频率为

$$A = \left\{ \left[\frac{k_1}{m_1} - \left(\frac{c_1}{2m_1} \right)^2 \right] \left[\frac{k_2}{m_2} - \left(\frac{c_2}{2m_2} \right)^2 \right] - \left[1 - \left(\frac{c_1}{2m_1} \right)^2 \right] \left[1 - \left(\frac{c_2}{2m_2} \right)^2 \right] \right\}^{1/2} \quad (2)$$

$$B = \left\{ \left[\frac{k_1}{m_1} - \left(\frac{c_1}{2m_1} \right)^2 \right] \left[1 - \left(\frac{c_1}{2m_1} \right)^2 \right] + \left[1 - \left(\frac{c_1}{2m_1} \right)^2 \right] \left[\frac{k_2}{m_2} - \left(\frac{c_2}{2m_2} \right)^2 \right] \right\}^{1/2} \quad (3)$$

$$f = A + iB \quad (4)$$

式中: A 表示两个振动模态相互耦合的程度; B 表示振动的阻尼。为减少计算量,建立单悬臂梁模型(见图 3),并设置压电片水平形状面积与基底相同。建立欧拉-伯努利压电悬臂梁的非线性动力学方程,计算出动能表达式、谐振频率公式、阻抗公式及输出功率公式,并给出如下假设:

1) 假设悬臂梁在振动方向上的振幅较小,可以忽略二次及以上的非线性项。

2) 假设悬臂梁的材料是均匀的,且具有线弹性性质。

3) 质量块固定在悬臂梁上,悬臂梁与质量块共同挠曲。

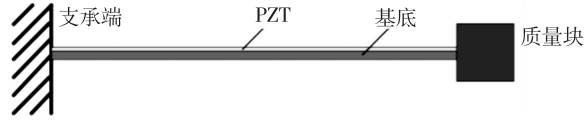


图3 单悬臂梁结构图

根据以上假设可以推导出以下结果:

悬臂梁的弯曲挠度动能为

$$E_k = \frac{1}{2} \int_0^L \left[\rho A \left(\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \right)^2 \right] dx \quad (5)$$

式中: ρ 为悬臂梁的密度; A 为横截面的面积; L 为悬臂梁的长度; w 为悬臂梁的挠度; t 为压电材料的厚度。

谐振频率为

$$\omega = \frac{1}{2} \pi \sqrt{\frac{3E}{\rho A I^4}} \quad (6)$$

式中: E 为悬臂梁的杨氏模量; I 为悬臂梁截面的惯性矩。

特征频率 f 与悬臂梁质量 M 、质量块质量 m 的关系为

$$f = \frac{1}{2} \pi \sqrt{\frac{k}{M+m}} \quad (7)$$

由式(7)表明,当质量块的质量增加时,特征频率降低。这是因为质量块的质量增加使得整个系统的总质量增加,从而降低了系统的特征频率。

输出功率为

$$P_{out} = \frac{1}{2} \text{Re}\{Z(\omega)F(\omega)\text{conj}\{V(\omega)\}\} \quad (8)$$

式中: P_{out} 为输出功率; $\text{conj}\{\}$ 表示共轭运算; $Z(\omega)$ 为阻抗函数; $F(\omega)$ 为外界力的频域; $V(\omega)$ 为压电材料的电压频域。

由式(5)-(7)可以看出,刚度、等效质量和阻抗是关键参数,下面对其进行仿真优化。

2 收集器的设计评价

2.1 特征频率分析

为了评价所提出的设计,首先对该模型进行特征频率分析。图4为微型能量收集器给方形边框底座施加固定约束,其他边界条件自由情况下的前4个不同振动模式。

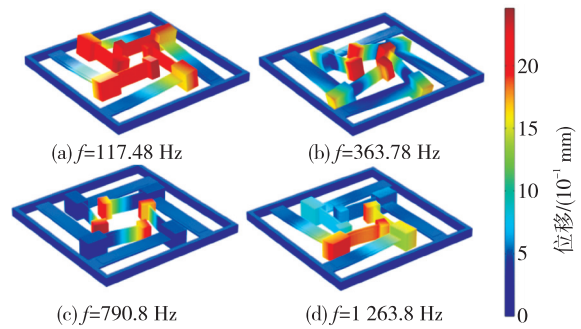


图4 不同响应频率下的振动模式

由图4可见,在117.48 Hz共振频率下,4个组合悬臂梁开始同时发生垂直方向的弯曲振动,弯曲振动全部集中在主悬臂梁上,而次悬臂梁保持相对静止;在363.78 Hz共振频率下,4个组合悬臂梁同时开始振动,但在发生弯曲振动的同时还伴有扭转振动,这并不利于压电片从机械能到电能的转换;在790.8 Hz共振频率下,4个组合悬臂梁的次悬臂梁同时发生横向与纵向的弯曲振动,弯曲振动全部集中在次悬臂梁上,而主悬臂梁相对静止;在1263.8 Hz共振频率下,4个组合悬臂梁发生不规则的弯曲振动,且主悬臂梁产生了沿压电薄片厚度方向的扭转振动,这不利于压电片收集能量,反而有破坏压电片的风险。117.48 Hz的振动模式可以集中收集垂直(z 轴)方向的振动能量,790.8 Hz的振动模式可以集中收集横轴(x 轴)与纵轴(y 轴)方向的振动能量,有效提高能量收集率。因此,后续研究将从第1、第3个振动模式开始。

2.2 谐响应分析

为了更详细地分析振动状态,进行了谐响应分析,模型仿真在激励加速度为 $1g$ ($g=9.8 \text{ m/s}^2$) 的情况下进行。由于结构的特殊性,将模型围绕垂直方向旋转 90° ,次悬臂梁的两个能量收集方向横轴(x 轴)与纵轴(y 轴)即刻调转。为了减少计算量,下文仅分析垂直(z 轴)方向和横向(x 轴)的能量收集情况,纵轴(y 轴)方向能量的收集情况省略。

图5为69~822 Hz扫描频率范围内,主悬臂梁在垂直方向收集的位移赋值,以及次悬臂梁在横向收集的位移赋值。由图可见,在特征频率为111 Hz时,主悬臂梁在垂直(z 轴)方向收集的最大幅值为 $2.257 \times 10^{-1} \text{ mm}$,而次悬臂梁在横轴(x 轴)和纵轴(y 轴)方向的幅值接近于0;在特征频率为790.4 Hz时,次悬臂梁在横向(x 轴)收集的幅值为 $0.5814 \times 10^{-1} \text{ mm}$,而主悬臂梁在垂直(z 轴)方向的幅值也

接近于 0。

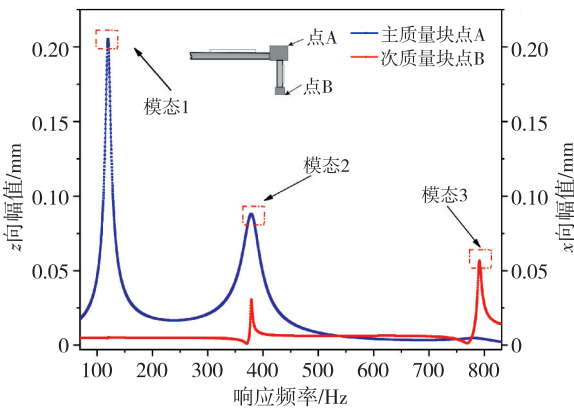


图 5 主次悬臂梁响应频率分析图

3 收集器结构优化及仿真

由于某些微能量收集器的工作环境特殊,需要在狭小的空间内实现尽可能大的功率输出,因此对能量收集器的尺寸有着严格限制,这将极大地影响转换效率。为了获得最优输出性能的结构参数,在微能量收集器边框尺寸固定的情况下,基于上述动力学模型,本文探究了主次悬臂梁刚度、主次质量块惯性质量、最优匹配阻抗等参数对输出性能的影响。为了减少计算量,将垂直方向和横向的位移幅值作为参照对象。

3.1 刚度

悬臂梁的刚度对压电悬臂梁的输出性能具有重要影响。刚度可以被定义为悬臂梁对外部应力或载荷的抵抗能力。在压电悬臂梁中,梁的长度、宽度和厚度是影响共振频率和位移幅值的主要因素。然而,由于固定边框的大小限制了整个收集器的使用空间,故而在本研究中仅考虑了悬臂梁的厚度对其性能的影响,而将长度与宽度定为常数。为了评估不同刚度系数下压电悬臂梁的竖向位移幅值,一共构建了 7 个模型梁,其厚度变化范围为 0.2~0.8 mm。

图 6、7 为主、次悬臂梁在激励条件下宽度与位移幅值的关系图。主悬臂梁在 z 向的位移幅值大于次悬臂梁在 x 向的位移幅值,这符合最初收集不同方向振动能量的主次需求。由图 6、7 可见,当悬臂梁厚度增加时,位移幅值增加,但当悬臂梁厚度超过 0.2 mm 时,位移幅值逐渐减小,特别是在厚度为 0.2~0.5 mm 时,位移幅值下降趋势明显,之后趋于缓和。其中, z 向位移最大幅值为 7.028×10^{-1} mm,而 x 向位移最大幅值为 0.93×10^{-1} mm。这将有助于提高压电悬臂梁的位移幅值,从而增强其输出

性能。

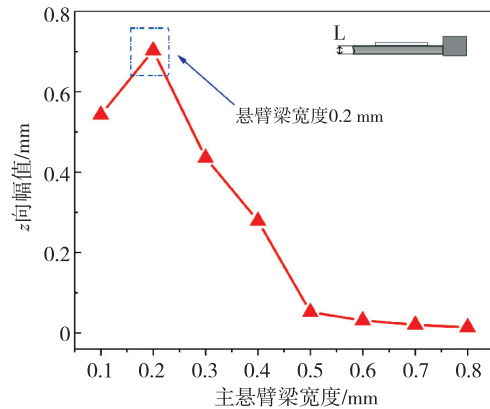


图 6 主悬臂梁宽度与位移幅值的关系图

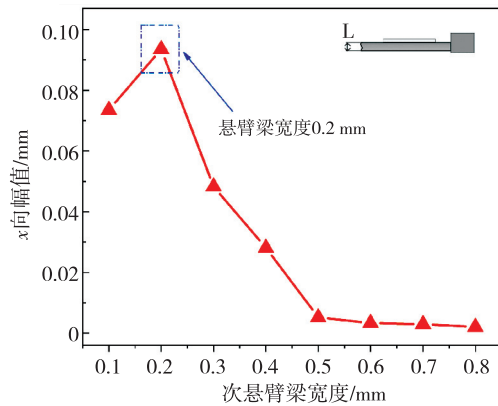


图 7 次悬臂梁宽度与位移幅值的关系图

3.2 惯性质量

惯性质量是压电悬臂梁输出性能的另一个关键参数,对系统的振动具有重要影响。为了评估不同惯性质量下的位移幅值,本文设计了一系列模型仿真,其中包括 9 组主悬臂梁质量块的惯性质量为 415.8~619.32 g,8 组次悬臂梁质量块的惯性质量为 184.8~342.3 g,此时悬臂梁厚度全部设为 0.3 mm。其他模型参数见表 1、2。

根据图 8、9 的模拟结果显示,当主悬臂梁的质量块质量为 415.8~593.88 g 时, z 向位移幅值变化可以忽略不计。当质量块质量达到 619.32 g 时,位移幅值突然增加并达到峰值。次悬臂梁的位移幅值随着质量块质量的增加而增加,在 297.3 g 时出现一个突起,然后在减少 2/5 幅值的情况下再次飙升至峰值。主悬臂梁和次悬臂梁的最大位移幅值分别为 7.2224×10^{-1} mm 和 1.637×10^{-1} mm。这些结果表明了惯性质量对模态转换有着重要影响,但并不是呈线性增长。

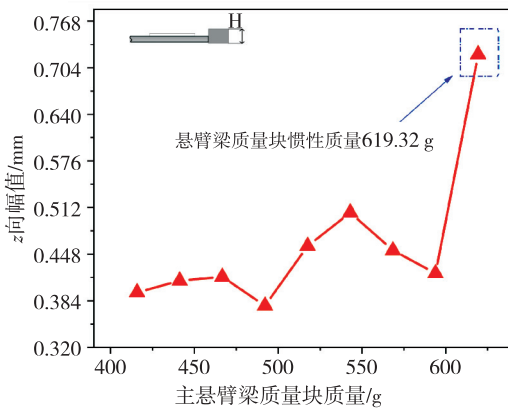


图8 主悬臂梁质量块宽度与位移幅值的关系图

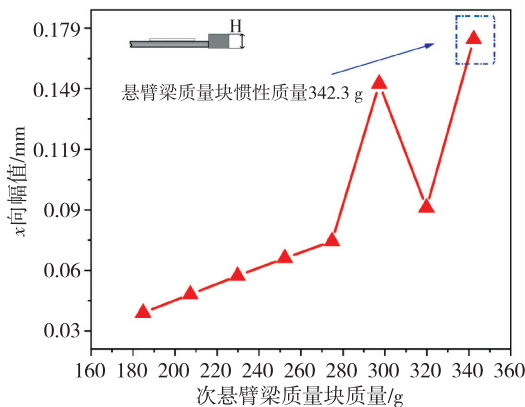


图9 次悬臂梁质量块宽度与位移幅值的关系图

3.3 开路电压

开路电压是指在不负载电阻的情况下,压电能量收集器所产生的电压。作为评估收集器输出能力的重要指标之一,较高的开路电压通常意味着收集器具备更强的电压供应能力,能更有效地驱动负载电阻或充电电池,从而使能量收集和存储过程更加高效化。图10、11为微型压电能量收集器装置在竖直方向和横向接收激励时,开路电压随激励频率的变化曲线。

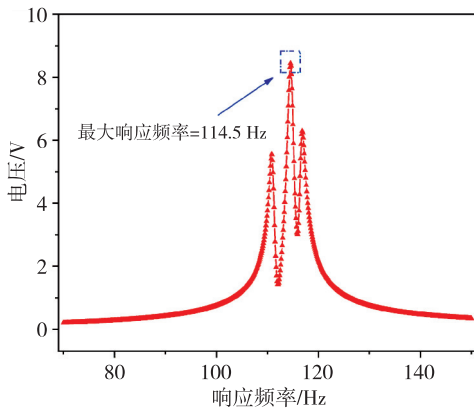


图10 主悬臂梁的电压与频率关系图

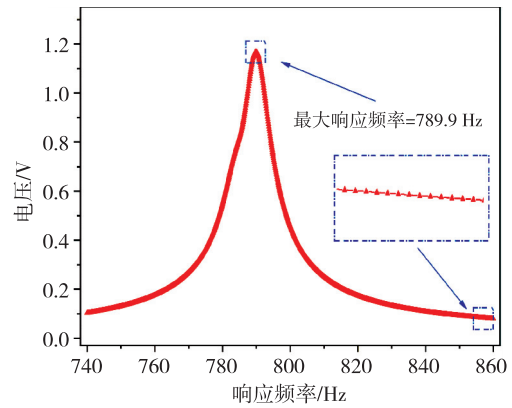


图11 次悬臂梁的电压与频率关系图

由图10、11可见,在114.5 Hz激励频率下,竖直方向的开路电压达到8.438 3 V的峰值;在789.9 Hz激励频率下,横向的开路电压达到1.168 6 V的峰值。竖直(z 轴)方向收集到的电压明显高于横轴(x 轴)。这同样符合本文最初的优先收集最丰富能量方向的设计理念。

3.4 最优阻抗匹配

阻抗匹配是指在能量收集器和负载电路之间选择合适的负载阻抗,以使能量能有效传输。当能量收集器的输出阻抗与负载电路的输入阻抗相匹配时,能量传输效率最高。通过阻抗匹配,能量收集器能够将最大的能量传递给负载电路,减少能量损耗;如果阻抗未匹配,则会导致能量损失。

如图12、13所示,负载功率随着负载电阻线性增加而增加。主悬臂梁上,当达到最佳匹配阻抗17.782 k Ω 时,竖直方向的输出功率达到最大值3.138 5 mW;次悬臂梁上,当达到最佳匹配阻抗5.623 4 k Ω 时,横向的输出功率达到最大值0.720 5 mW。随着电阻继续增大,与压电晶体内阻的阻抗不匹配程度也随之增大,导致输出功率逐渐减小。

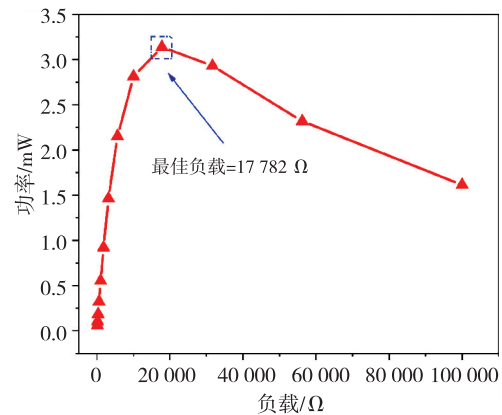


图12 主悬臂梁阻抗匹配关系图

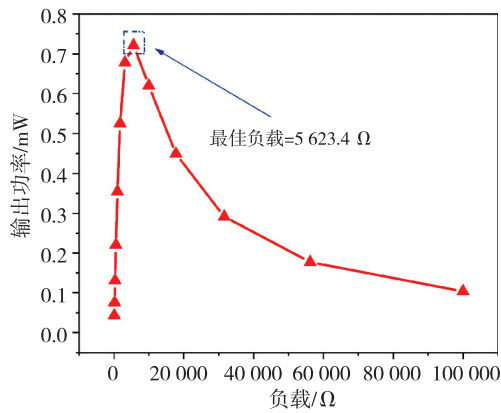


图 13 次悬臂梁阻抗匹配关系图

4 平台实验研究

为了深入研究所设计的压电能量收集器在现实环境中的能量收集性能,加工制造了微型压电能量收集器的原型样机。然而由于一些限制,包括原型机的尺寸较小,加工误差和装配误差的存在,导致实验数据与有限元仿真结果存在一定的差异,但是整个设计过程和原理都是一致的。该样机采用钢制边框、压电片、铜制基底梁和钢制质量块等材料。压电片被粘贴在基底梁的上表面,作为能量收集的主要元件,并将主、次悬臂梁的输出电路分开连接,以确保实验的严谨性。

图 14、15 分别为收集器原型样机和振动实验测试平台。

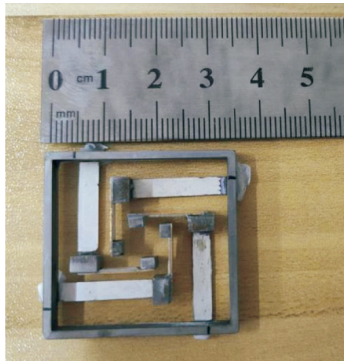


图 14 微型压电能量收集器图

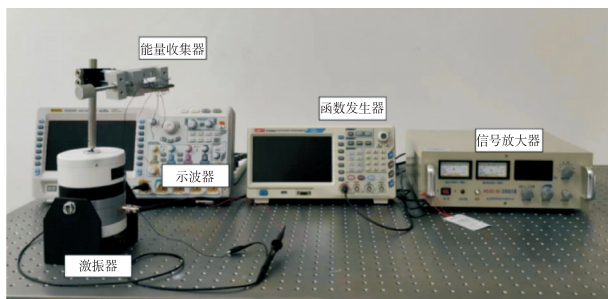


图 15 实验平台图

实验步骤如下:在激振器上方安装一根竖直的顶杆,该顶杆用于传递振动、提供支撑和保持装置的稳定性。通过精确调节夹具的位置,确保能量收集器的高度恰到好处,以使其能够获得所需的振动能量。其次,在竖直顶杆上安装一个夹具,将其与水平支杆连接。通过精确调节夹具的位置,确保振动能量从竖直方向转变为水平方向,为后续实验提供合适的振动传递路径。最后,将微型压电能量收集器夹持在一个铝制夹具上,并将其固定在水平钢管的末端。如此,能量收集器可在振动中保持稳定,并能有效地收集振动能量。通过以上措施确保了实验装置的稳定性和可靠性,为研究压电能量收集器的性能提供了可靠的实验条件。

实验中先对原型样机进行扫频,找到主、次悬臂梁的目标振动频率分别为 102 Hz 与 768 Hz。再使用信号发生器提供相应正弦初始信号,并通过信号放大器将初始信号输入激振器,激振器给主悬臂梁输入加速度为 1g ($g = 9.8 \text{ m/s}^2$),频率为 102 Hz 的激励;给次悬臂梁输入加速度为 1g,频率为 768 Hz 的激励。如图 16、17 所示,主悬臂梁和次悬臂梁都存在一个最佳负载使输出功率最佳,这与仿真结果相吻合。在主收集方向上,当阻抗为 18.796 kΩ 时,压电能量收集器输出功率达到 2.85 mW,而在次收集方向上,当阻抗为 5.916 8 kΩ 时,输出功率达到 0.57 mW。虽然与仿真结果相比,输出功率有所减少,但是这些实验结果仍能提供压电能量收集器在振动条件下关于能量收集性能的有价值的信息。未来的研究可以进一步解决这些问题,以获得更准确的实验结果。

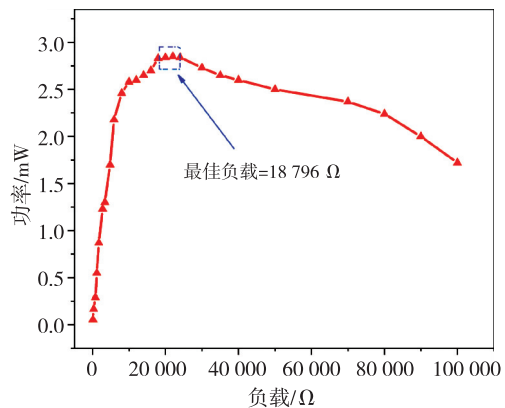


图 16 主悬臂梁输出功率与负载电阻关系图

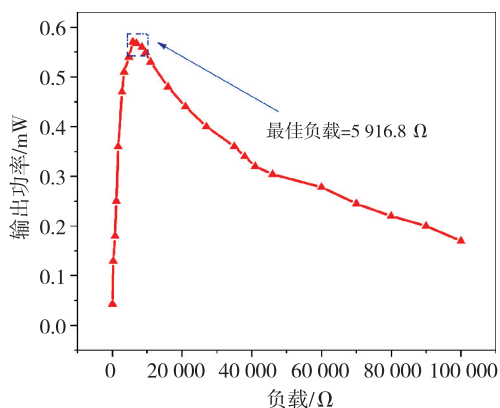


图 17 次悬臂梁输出功率与负载电阻关系图

5 结束语

本文描述了一种“回”字形的多方向微型压电振动能量收集装置的结构设计、优化与实验验证。该收集器结构简单,安装方便,不仅可以贴附于装备的狭小空间,还能同时收集来自横、纵、竖 3 个不同方向的振动能量。研究了通过基础激励条件下相互垂直的组合悬臂梁振动系统的动力学模型,计算得到系统的振动特征频率公式,并利用有限元仿真对比不同刚度和惯性质量对位移幅值的影响,验证了组合悬臂梁系统的振动特性。再通过一系列有限元仿真分析确定了结构参数的最优值:当主悬臂梁厚度为 0.3 mm 时,质量块的最佳惯性质量为 619.32 g;当次悬臂梁厚度为 0.3 mm 时,质量块的最佳惯性质量为 342.3 g。经有限元仿真计算,竖直(z 轴)方向可以收集功率 3.138 5 mW,横轴(x 轴)或纵轴(y 轴)方向可以收集功率 0.720 5 mW。通过搭建微型压电能量收集器实验平台,在实际测试中竖直(z 轴)方向收集功率为 2.85 mW,横轴(x 轴)或纵轴(y 轴)方向的收集功率达到 0.57 mW。这证实了本文所设计的微型能量收集器的可行性,并为后续研究与应用奠定了基础。

参考文献:

[1] KHALAF O I, ROMERO C, HASSAN S, et al. Mitigating Hotspot issues in heterogeneous wireless sensor networks[J]. *Journal of Sensors*, 2022: 7909472.
 [2] ABDULKAREM M, SAMSUDIN K, ROKHANI F Z, et al. Wireless sensor network for structural health monitoring: A contemporary review of technologies, challenges, and future direction [J]. *Struct Health*

Monit, 2020, 19(3):693-735.
 [3] NARITA F, FOX M. A review on piezoelectric, magnetostrictive, and magnetoelectric materials and device technologies for energy harvesting applications [J]. *ADV ENG MATER*, 2018, 20(5): 1700743.
 [4] SHAIKH F K, ZEADALLY S. Energy harvesting in wireless sensor networks: A comprehensive review [J]. *RENEW SUST ENERG REV*, 2016, 55: 1041-1054.
 [5] ZOLTAN S, FIALA P, DOHNAL P. Magnetic circuit modifications in resonant vibration harvesters [J]. *MECH SYST SIGNAL PR*, 2018, 99: 832-845.
 [6] KIM J H, PYUN S B, CHOI M J, et al. Synthesis of linear black gold nanostructures processable as sunlight and low-energy light collecting films for photo-thermoelectricity [J]. *ADV SCI*, 2023, 10(13): 2207415.
 [7] HE L X, ZHANG C G, ZHANG B F, et al. A dual-mode triboelectric nanogenerator for wind energy harvesting and self-powered wind speed monitoring [J]. *ACS Nano*, 2022, 16(4):6244-6254.
 [8] GUNTUR H L, HENDROWATI W, SYUHRI S. Designing hydro-magneto-electric regenerative shock absorber for vehicle suspension considering conventional-viscous shock absorber performance [J]. *J MECH SCI TECHNOL*, 2020, 34(1):55-67.
 [9] FARSI M, SHARIATZADEH M J, BIJARCHI M A, et al. Low-speed wind energy harvesting from a vibrating cylinder and an obstacle cylinder by flow-induced vibration effect [J]. *INT J ENVIRON SCI TE*, 2022, 19(3):1261-1272.
 [10] WANG Y. An h-version adaptive FEM for eigenproblems in system of second order ODEs: Vector Sturm-Liouville problems and free vibration of curved beam [J]. *ENG COMPUTATION*, 2020, 38(4): 1807-1830.
 [11] TOHYAMA Y, HONMA H, TOSHIYOSHI H, et al. Bandwidth broadening of MEMS vibration energy harvesters by voltage-boost rectifier circuit [J]. *Sensors and Materials*, 2022, 34(5):1889-1897.
 [12] WEN X, LI Y, YANG C. Design, modeling, and characterization of a tubular linear vibration energy harvester for integrated active wheel system [J]. *Automotive Innovation*, 2021, 4(4):413-429.
 [13] JHABC D, HAO C, LZA B, et al. Decarbonization

- and upgrading of fine-sized coal-series kaolinite via the enhancement of density stability and uniformity of dense-phase gas-solid fluidized bed [J]. *POWDER TECHNOLOGY*, 2021, 394:62-72.
- [14] KIM I H, JUNG H J, LEE B M, et al. Broadband energy-harvesting using a two degree-of-freedom vibrating body[J]. *APPL PHYS LETT*, 2011, 98(21): 214102-1-214102-3.
- [15] ANDÒ B, BAGLIO S, MAIORCA F, et al. Analysis of two dimensional, wide-band, bistable vibration energyharvester [J]. *SENSOR ACTUAT A-PHYS*, 2013:A202176-182.
- [16] DEMORI M, FERRARI M, FERRARI V, et al. Autonomous sensors powered by energy harvesting from von Karman vortices in airflow [J]. *SENSORS-BASEL*, 2017, 17(9): 2100.
- [17] LI S, LIPSON H. Vertical-stalk flapping-leaf generator for wind energy harvesting [C] // Oxnard, California, USA: Asme Conference on Smart Materials, 2013.
- [18] 张宇轩, 薛至诚, 王德波. 新型组合螺旋压电能量收集器的设计与研究[J]. *微电子学*, 2022, 52(6):1065-1070. ZHANG Yuxuan, XUE Zhicheng, WANG Debo. Design and research of a new combination spiral piezoelectric energycollector[J]. *Microelectronics*, 2022, 52(6):1065-1070.
- [19] 杨俊斌, 宋芳, 申俊, 等. 基于复合梁结构的压电-电磁能量收集器研究[J]. *传感技术学报*, 2023, 36(9): 1368-1376. YANG Junbin, SONG Fang, SHEN Jun, et al. Research on piezoelectric electromagnetic energy collector based on composite beamstructure[J]. *Journal of Sensor Technol*, 2023, 36(9):1368-1376.
- [20] 黄宇剑. 压电悬臂式宽频能量采集器设计及参数分析 [D]. 岳阳: 湖南理工学院, 2022. HUANG Yujian. Design and parameter analysis of piezoelectric cantilever broadband energy collector [D]. Yueyang: Hunan Institute of Science and Technology, 2022.
- [21] SHENG Cunyong, XIANG Xiaoyi, SHEN Hui, et al. A novel rope-driven piezoelectric energy harvester for multidirectional vibrations[J]. *Energy Reports*, 2023, 8:3553-3562.
- [22] WEI Xiaoxiang, LIU Xing, ZHENG Changyong, et al. A piezoelectric power generator based on axisymmetrically distributed PVDF array for two-dimension vibration energy harvesting and direction sensing[J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2021, 44(6):101001.