

双变截面风柱压电俘能器发电性能研究

张森荣¹, 侯燕¹, 宋汝君¹, 张丹², 张磊安¹

(1. 山东理工大学机械工程学院, 255000, 山东淄博; 2. 山东理工大学电气与电子工程学院, 255000, 山东淄博)

摘要: 为了研究风柱的变截面设计对俘能器振动特性及俘能效果的影响,提出了一种双变截面风柱压电俘能器。该设计针对风致振动环境下的能量进行俘获,通过激振试验和风洞试验分别研究了俘能器在振动激励和涡激振动条件下的振动特性与发电性能。俘能器由悬臂梁、压电片及两侧变截面风柱构成,设计了 3 种安装方式(正-正、反-反、正-反),探究负载电阻、激振频率、加速度及风速对输出性能的影响。激振试验与风洞试验结果表明:最佳负载电阻为 80 k Ω ,正-正安装方式在 4.7 m/s 风速下输出功率最高达 4.06 mW,显著优于同类研究。对称结构(正-正、反-反)因同步振动模式能提升压电片形变的叠加效应,在外部振动激励下的发电性能优于非对称结构(正-反);反装结构可降低装置的固有频率与启动风速,但在风洞试验中对涡流利用效率较低。激振加速度增大可显著提高俘能器的发电性能。该研究为风致振动环境下的高效能量采集提供了新思路,拓展了变截面风柱压电俘能器的研究。

关键词: 压电俘能;风致振动;变截面;涡激振动;振动激励

中图分类号: TM619;TH113.1 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202601022 **文章编号:** 0253-987X(2026)01-0223-10

Study on the Power Generation Performance of Piezoelectric Energy Harvester with Dual Variable Cross-Section Wind Columns

ZHANG Senrong¹, HOU Yan¹, SONG Rujun¹, ZHANG Dan², ZHANG Leian¹

(1. School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255000, China;

2. School of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255000, China)

Abstract: To investigate the influence of variable cross-section design of wind columns on the vibration characteristics and energy harvesting performance of energy harvesters, a piezoelectric energy harvester with dual variable cross-section wind columns is proposed. This design aims to capture energy from wind-induced vibration environments. The vibration characteristics and power generation performance of the harvester under both vibration excitation and vortex-induced vibration conditions are studied through shaker excitation tests and wind tunnel tests, respectively. The harvester consists of a cantilever beam, a piezoelectric patch, and two variable cross-section wind columns on both sides. Three installation methods (positive-positive, negative-negative, positive-negative) are designed to explore the effects of load resistance, excitation frequency, acceleration, and wind speed on the output performance. The results from the shaker excitation and wind tunnel tests indicate that the optimal load resistance is 80 k Ω . The positive-positive installation method achieves the

收稿日期: 2025-04-02。 作者简介: 张森荣(2001—),男,硕士生;宋汝君(通信作者),男,副教授,硕士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52075305);山东省自然科学基金资助项目(ZR2022ME053);中国博士后科学基金资助项目(2025MT71362)。

网络出版时间: 2025-08-26

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20250825.1907.009>

highest output power of 4.06 mW at a wind speed of 4.7 m/s, which is significantly superior to similar studies. Symmetrical structures (positive-positive, negative-negative) demonstrate better power generation performance under external vibration excitation compared to the asymmetrical structure (positive-negative), due to the superposition effect of piezoelectric patch deformation enhanced by synchronous vibration modes. The reverse installation structure can reduce the natural frequency and the cut-in wind speed of the device, but it shows lower efficiency in utilizing vortices during wind tunnel tests. Increasing the excitation acceleration significantly improves the power generation performance of the harvester. This study provides new insights for efficient energy harvesting in wind-induced vibration environments and expands the research on piezoelectric energy harvesters with variable cross-section wind columns.

Keywords: piezoelectric energy harvesting; wind induced vibration; variable cross-section; vortex-induced vibration; vibration excitation

随着物联网、万物互联以及智慧城市的提出,机电系统和无线电传感技术等科学领域迅速发展,大量低功耗的电子设备出现并运用在各个领域中^[1]。目前,电子设备的供电方式还是以人工更换传统化学电池为主。然而,传统化学电池由于寿命和容量有限,需要频繁充电和更换^[2],同时其处理过程容易造成环境污染^[3],难以满足现代微电子产品的发展要求。

近些年,许多学者注意到可以从自然环境中直接获取能量从而为微电子产品供能^[4],因此环境能量采集技术在微机电系统供电领域获得了极大地关注^[5]。自然环境中存在多种常见的能量形式,如风能^[6]、振动能^[7]、太阳能^[8]、潮汐能^[9]等,这些能源可以通过特定能量采集技术被人们获取利用,是新型的环保能源^[10]。其中,风能有着分布广、可循环、无污染等优点,有着良好的应用前景和研究价值。风致振动主要分为3种类型:涡激振动、驰振和颤振。为了保证风致振动产生的振动能量能够得到高效应用,人们设计了许多能将振动能量转化为电能能量采集器,这类振动能量采集器主要包括压电式^[11]、电磁式^[12]和静电式^[13],其中压电式凭借其输出性能好、结构简单和使用寿命长等特点,受到了学者们的广泛关注^[14]。

为了从环境中获取风能,最常见的气能采集器是利用风致振动原理的钝体结构,它由一个压电悬臂梁和一个固定在压电悬臂梁一侧的钝体构成。许多学者针对钝体结构展开了研究,Abdelkefi等^[15]研究了截面为三角形的钝体各种顶角横截面的能量收集,并证明可以采用等腰钝角三角形来有效收集驰振能量。Hu等^[16]在风柱两侧放置两个平行于轴线的小风柱,随着小风柱直径的增加,收获功率逐渐增加。Iqbal等^[17]提出了一种具有翼型结构的压电电磁联动风能采集器,在激励加速度为0.4g和风速为6m/s的混

合激励下,其压电部分可以产生的最大负载电压为6279mV,功率为155.7μW。当外部气流频率接近俘能器的固有频率时,其输出效率显著增加^[18]。

为了进一步提高压电俘能器的俘能效果,学者们引入了磁耦合等方法。Hou等^[19]将非线性磁力引入单稳态能量采集器,发现在能量采集器中添加磁体后获得了更大的共振域,在1.6m/s的风速激励下,该能量采集器的最大输出功率为0.21mW。Sui等^[20]开发了一种基于低速风致振动的磁耦合弯扭压电能量采集器,与传统的非线性能量采集器相比,其功率输出和带宽分别增加了约180%和230%。Hou等^[21]提出了一种宽带压电-电磁混合式能量采集器,在涡激振动和基底振动的联合激励下,能量采集器的输出功率相较于单一涡激振动提高了1242.86%,工作频带拓宽了400%。Wang等^[22]设计了一种由圆形截面和方形截面所组成的混合风柱压电俘能器,具有合适截面以及适当攻角的混合风柱可以结合涡激振动和驰振的优点,使俘能器在较大风速范围内大幅提高输出性能。王宜晴^[23]在论文中设计了3种变截面风柱模型,研究表明,变截面混合风柱存在变截面部分互相影响的情况,较短的基底风柱长度能增强风场流动进而提高输出响应,较长的基底风柱能减弱风场流动从而抑制振动。

虽然国内外学者对基于风致振动的俘能器进行了相关研究,但是大多都研究单个均匀风柱的压电俘能器输出特性。因此,本文提出了一种压电俘能器,对双变截面风柱进行振动特性以及发电性能的研究。

1 俘能器结构设计与工作原理

以变截面圆柱体作为风的绕流刚体,所提出的双变截面风柱压电俘能器物理模型如图1(a)所示。该俘能器系统主要由悬臂梁、陶瓷压电片、两个变截

面圆柱和托架组成。悬臂梁平行于水平面安装在托架上方并由 4 个爪扣固定,两端连接有变截面圆柱,陶瓷压电片固定在悬臂梁的上部中心。双变截面风柱压电俘能器系统的参数见图 1(b),参数值见表 1。

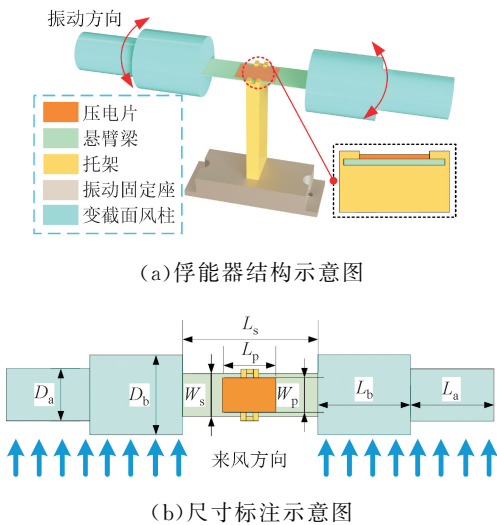


图 1 双变截面风柱压电俘能器结构设置

Fig. 1 Structure setting of piezoelectric energy harvester with dual variable cross-section wind columns

表 1 俘能器结构参数

Table 1 Structural parameters of energy harvester

结构	参数	数值
风柱	长度 L_a /mm	50
	直径 D_a /mm	30
	长度 L_b /mm	50
	直径 D_b /mm	46
压电片	长度 L_p /mm	30
	宽度 W_p /mm	20
	厚度 h_p /mm	0.2
	杨氏模量 E_p /GPa	57
	介电常数 ϵ /(nF · m ⁻¹)	32.15
	压电常数 e /(C · m ⁻²)	-17.24
	密度 ρ /(kg · m ⁻³)	7 500
悬臂梁	长度 L_s /mm	80
	宽度 W_s /mm	25
	厚度 h_s /mm	0.4

当来风吹向俘能器时,俘能器两侧的风柱会在稳定的风场中受到风的激励,产生涡激振动,在垂直于风向的方向上振动,驱动悬臂梁发生弯曲变形。陶瓷压电片由于悬臂梁的弯曲振动从而发生正压电效应产生电荷。悬臂梁材料由铝制成,变截面风柱由泡沫材料组成。

为了研究双变截面风柱压电俘能器在工作环境中的振动特性以及发电性能,设计并测试了几种情

况,如图 2 所示。针对风柱的安装方式进行了相应的调整。变截面风柱由一个长 50 mm 直径 30 mm 的小圆柱和一个长 50 mm 直径 46 mm 的大圆柱组成,在装置Ⅰ的设计上,采用两侧变截面风柱均为大圆柱在内侧的安装方式(简称为正-正安装);装置Ⅱ采用两侧变截面圆柱均为小圆柱在内侧的安装方式(简称为反-反安装);装置Ⅲ两侧采用一大一小两个圆柱相对的安装方式(简称为正-反安装)。这样设计的原因是,为了研究变截面风柱的大小截面分布对双变截面风柱压电俘能器的振动特性以及发电性能的影响。

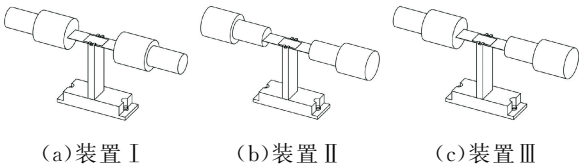


图 2 3 种装置设置

Fig. 2 Three types of device settings

2 试验平台搭建

利用图 3 所示的试验平台对双变截面风柱压电俘能器的振动特性进行试验测试,试验平台由计算机、振动控制台、功率放大器、加速度计、激振器、数据采集卡以及可变电阻组成。在试验过程中,俘能器固定在激振器的铝基板上,通过可变电阻与信号采集卡相连。计算机可以对试验参数进行设置,同时驱动振动控制台和功率放大器对激振器发出振动信号。加速度计吸附在激振器的铝基板上,数据采集卡连接计算机可以实现对俘能器压电层输出电压等试验数据的连续采集。

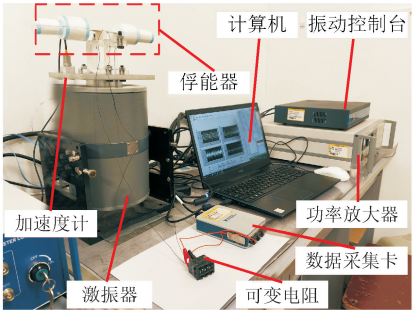


图 3 激振试验平台

Fig. 3 Excitation test platform

为了进一步研究该压电俘能器的风能俘获效果及发电特性,搭建了如图 4 所示的风洞试验平台。在试验过程中,俘能器放置在风洞测试区域中心的基座上,且俘能器中心与风洞试验区中心在一条轴线上,风洞试验区的空间尺寸为 800 mm×400 mm×400 mm。气流从离心风机进入风洞,在风洞内经过

整流、稳流两个阶段,在风洞测试区域内形成稳定的风速场,变频器通过控制风机转速来控制试验段的风速。数据采集卡通过电阻与压电层相连,采集压电层的输出信号,并将其传输给计算机。离心风机将风流以一定的速度送入风洞,通过扩散段进入蜂窝装置,从而对风流的涡流状态进行破坏,进而模拟了直流风场。

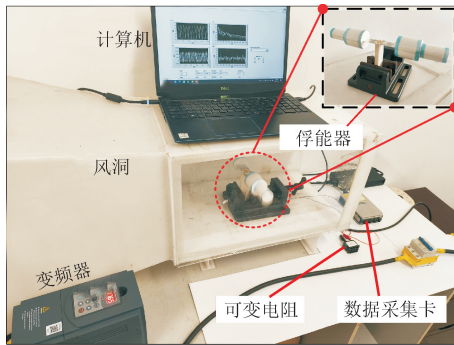


图 4 风洞试验平台
Fig. 4 Wind tunnel test platform

3 试验结果与分析

通过试验的方法,研究负载电阻、激振频率、激振加速度、风速等试验因素对俘能器输出性能的影响。在每个试验因素的试验过程中,均采用单个试验平台对试验因素进行测试。

3.1 俘能器最优负载电阻的测量

为了确定双变截面风柱压电俘能器的最佳负载电阻,试验选用图 4 所示的风洞试验平台并选择装置 I 进行测试,将装置 I 放置在 3 个风速下测量其输出功率和输出电压随负载电阻变化的曲线,试验结果如图 5、图 6 所示。

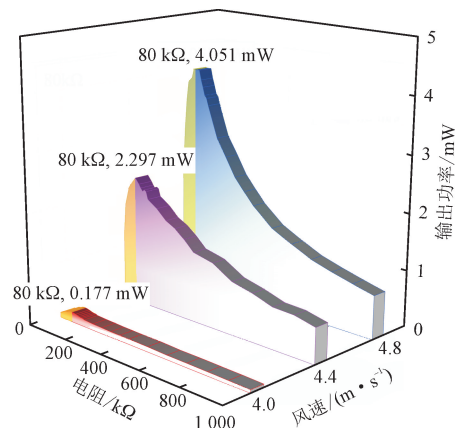
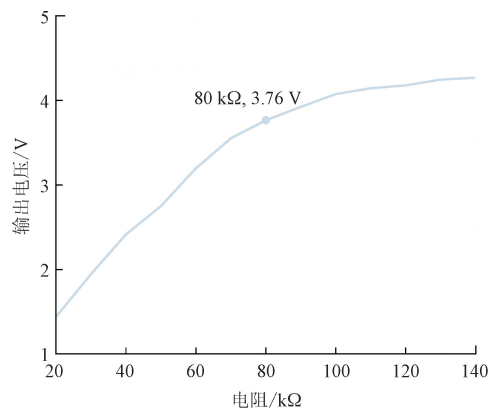
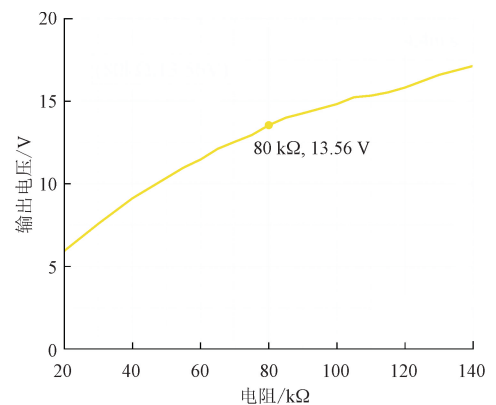


图 5 不同风速下俘能器输出功率随负载电阻的变化
Fig. 5 Variation of output power of energy harvester with resistance value at different wind speeds

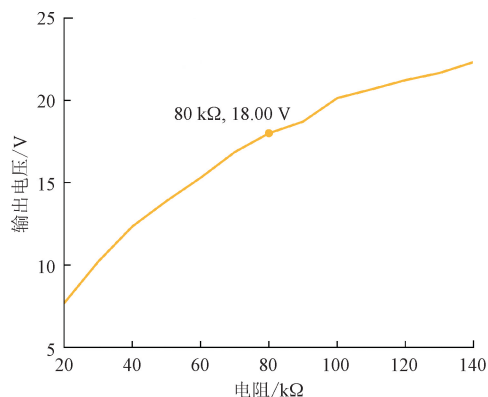
图 5 表示在不同风速下双变截面风柱压电俘能器输出功率随负载电阻的变化。在试验选取的 3 种风速条件下,当负载电阻小于 $80\text{ k}\Omega$ 时,俘能器的输出功率随负载电阻的增大而迅速增大;当负载电阻等于 $80\text{ k}\Omega$ 时,3 种风速下的俘能器输出功率均达到最大值,其中风速条件为 4.8 m/s 的俘能器输出功率达到 4.051 mW 。在此之后,随着负载电阻继续增加,3 种风速下的俘能器输出功率平稳下降。同时,图 5 在 $4.0\sim 4.8\text{ m/s}$ 风速段,还表现出在负载电阻不变的条件下,俘能器的输出功率会随风速的增加呈上升趋势。图 6 展示了俘能器在不同风速下输出电压随负载电阻的变化。在试验选取的 3 种风速条件下,俘能器输出电压会随着负载电阻的增大表现出先增大后趋于稳定的趋势。当负载电阻小于 $80\text{ k}\Omega$ 时,俘能器输出电压随负载电阻的增加而迅速增加;当负载电阻大于 $80\text{ k}\Omega$ 时,俘能器输出电压虽依然保持增长趋势但是增长速度变缓。同时,图 6 在 $4.0\sim 4.8\text{ m/s}$ 风速段,还表现出在负载电阻不变的条件下,俘能器的电压会随风速的增加呈上升趋势。由此可以推断,双变截面风柱压电俘能器的最佳负载电阻在 $80\text{ k}\Omega$ 左右,后续试验均在该电阻条件下进行。



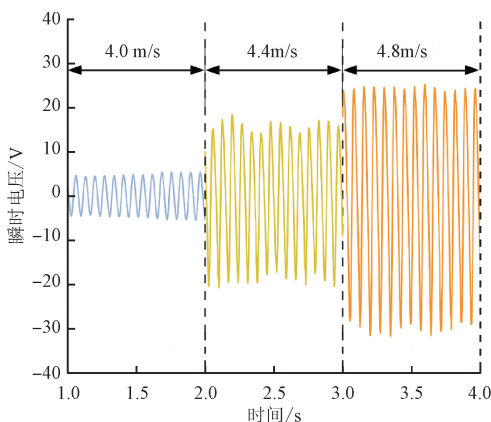
(a) 4 m/s 风速下的输出电压



(b) 4.4 m/s 风速下的输出电压



(c) 4.8 m/s 风速下的输出电压



(d) 电阻为 80 kΩ 时瞬时电压对比波形图

图 6 不同风速下俘能器的输出电压和瞬时电压

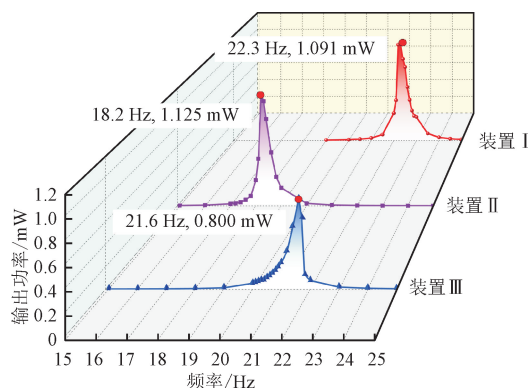
Fig. 6 Output voltage and instantaneous voltage of energy harvester under different wind speeds

3.2 俘能器固有频率的研究

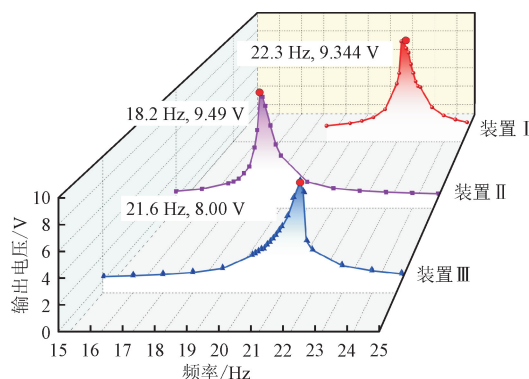
选用图 3 所示的激振试验平台,将激振台的激励加速度设为 3 m/s^2 ,针对激振器频率改变时双变截面风柱压电俘能器的输出功率和输出电压变化进行试验,结果如图 7 所示。由图可知,各个装置的输出功率和输出电压均表现出随频率增加而先升后降的情况,当激振频率和俘能器固有频率接近时,俘能器的输出功率和输出电压将会达到最大值,由此可知,装置 I、II、III 的固有频率分别为 22.3、18.2、21.6 Hz 左右。与其他两个装置相比,装置 I 所采取的正-正安装方式让俘能器在振动特性方面有着更高的固有频率。相反,采用反-反安装的装置 II 和正-反安装的装置 III 的固有频率相较装置 I 均向左发生了偏移,且装置 II 的偏移幅度最大。采用正-反安装的装置 II 的固有频率介于装置 I、装置 III 之间,将装置 III 分别与装置 I、装置 II 进行比较分析,反装结构安装能够降低双变截面风柱压电俘能器的固有频率。

由图 7 对 3 种装置的发电性能进行分析可知,共振频率下的装置 I 和装置 II 在功率和电压的输出方面

表现的十分接近,发电性能均在 1.1 mW 、 9.4 V 左右。这说明结构对称安装的装置在其固有频率下的发电性能相同,而非对称安装的装置 III 的发电性能要低于对称安装的装置 I、II。这是因为,对称结构能够使俘能器获得更好的同步振动模式,即为悬臂梁两侧均同上或同下振动,使得压电片的形变程度进一步叠加从而获得更高的输出功率和输出电压。



(a) 输出功率



(b) 输出电压

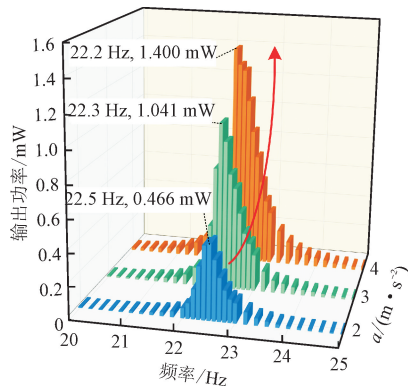
图 7 不同频率下各个装置的发电性能

Fig. 7 Power generation performance of each device at different frequencies

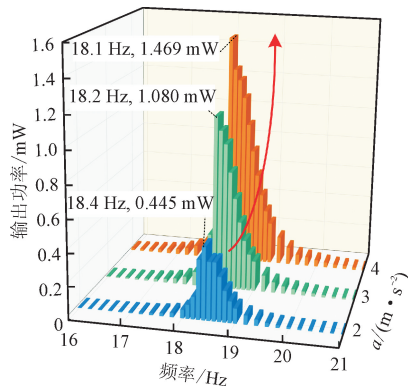
3.3 激振加速度对俘能器的影响

采用图 3 的激振试验平台进行试验,研究在不同激振加速度下 a 俘能装置的输出功率和输出电压,结果如图 8、图 9 所示,图 9 圆周向数据为频率,单位 Hz。由图可知,3 种装置的俘能器输出功率和输出电压均随着激振频率的增加在共振频率处先升后降。当激励加速度为 2 m/s^2 时,装置 I 的最大输出功率和输出电压在 22.5 Hz 处为 0.466 mW 、 6.11 V ;装置 II 的输出功率和输出电压在频率 18.4 Hz 时取得最大值为 0.445 mW 、 5.97 V ;装置 III 的最大输出功率和输出电压在 21.5 Hz 时达到 0.349 mW 、 5.29 V 。当激励加速度增加到 4 m/s^2 时,装置 I 的最大输出功率和输出电压在频率为 22.2 Hz 时达到

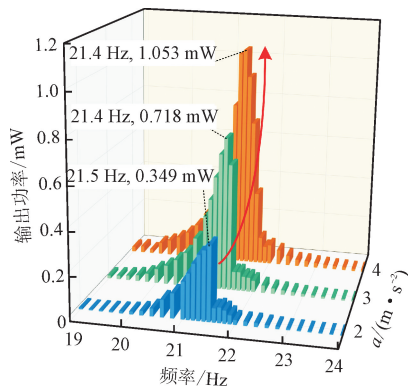
1.400 mW、10.58 V;装置Ⅱ的最大输出功率和输出电压在 18.1 Hz 处为 1.469 mW、10.84 V;装置Ⅲ的最大输出功率和输出电压在 21.4 Hz 时为 1.053 mW、9.18 V。对比激振加速度的变化可知,俘能器随着激振加速度的增加,发电效果越好。



(a) 装置 I



(b) 装置 II

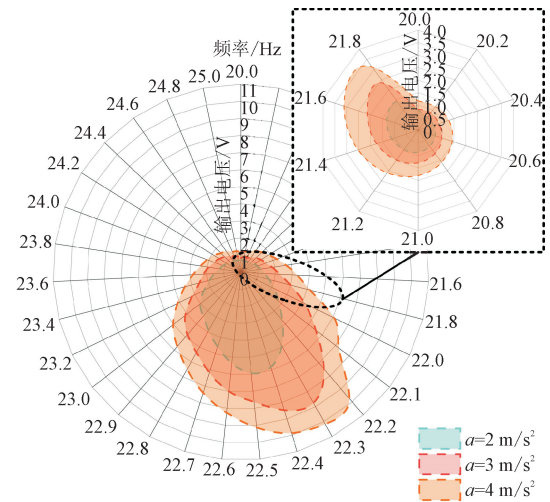


(c) 装置 III

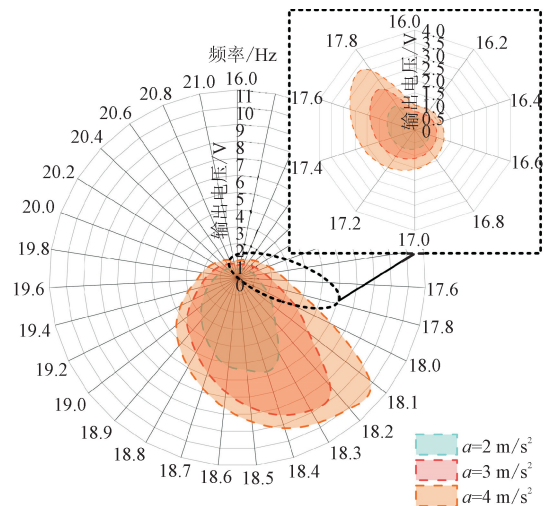
图 8 不同激励加速度下各种装置输出功率随频率的变化
Fig. 8 Variation of output power of various devices with frequency under different excitation accelerations

根据试验结果,对装置 I 和装置 II 这种对称结构的发电性能进行数值分析可知,对称结构在其他条件相同且达到装置最佳振动效果的情况下,二者发电性能几乎相同。这是因为,对称结构能够使俘能器获得更好的同步振动模式,同步振动模式使得

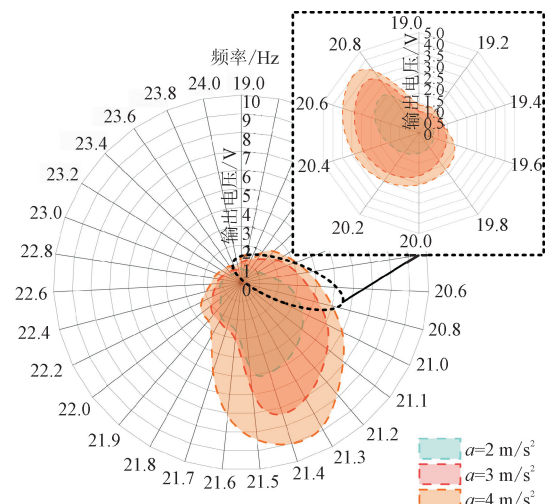
压电片获得了相同的形变量,因此两个装置的发电性能在数值上表现相同。



(a) 装置 I



(b) 装置 II



(c) 装置 III

图 9 不同激励加速度下各种装置输出电压随频率的变化
Fig. 9 Variation of output voltage of various devices with frequency under different excitation accelerations

3.4 俘能器最佳输出风速的探究

为了确定 3 种装置的最佳输出风速,探究各个装置在不同风速下的输出性能,在图 4 所示的风洞试验平台进行试验,结果如图 10 所示。由图可知,3 种装置的输出功率和输出电压都随着风速的增强而逐渐增加。具体地,当风速达到 4 m/s 时,达到装置 I 的起振风速,其发电性能开始出现上升趋势,当风速从 4.1 m/s 上升到 4.5 m/s 时,装置 I 由于涡流的脱落频率接近其固有频率,导致涡流诱导装置 I 共振,从而使得输出功率快速增加。在风速为 4.7 m/s 时,获得了 4.06 mW 的峰值输出功率和 18.02 V 的输出电压。然而在 5 m/s 的风速之后,装置 I 的输出功率和输出电压开始迅速下降,由此可知装置 I 在工作风速为 4.5~5 m/s 条件下有着良好的俘能效果。

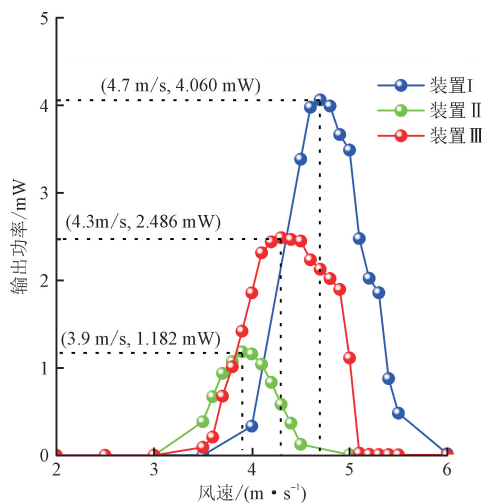


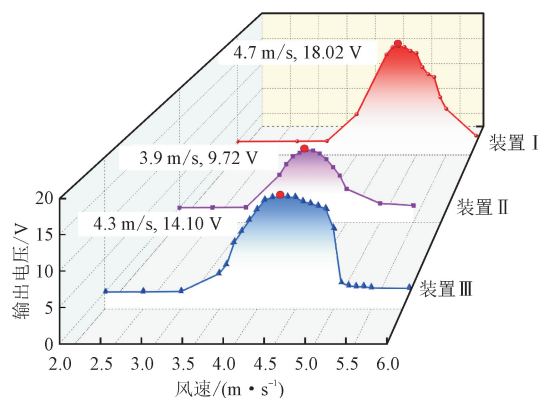
图 10 3 种装置最佳输出风速

Fig. 10 Optimum output wind speed of the three devices

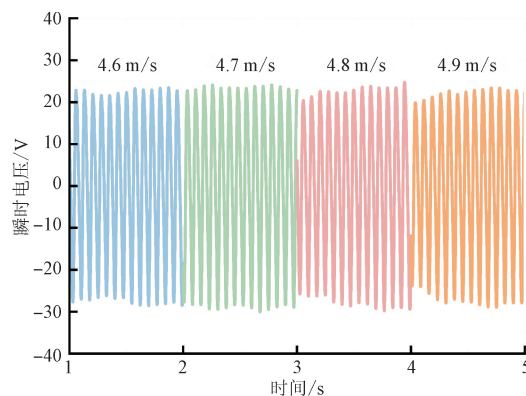
装置 II 的输出功率最低,但其工作所需的起振风速最低。装置 II 在 3.5 m/s 的风速下就达到了起振风速,发生涡激共振。在风速为 3.9 m/s 时,功率达到峰值 1.182 mW,输出电压达到峰值 9.72 V。装置 II 在 4.2 m/s 的风速之后,明显出现下降趋势,因此装置 II 适合在 3.7~4.2 m/s 的风速条件下工作。

装置 III 相较于装置 I 表现出明显较低的输出功率和输出电压,在 3.6 m/s 的风速下达到起振风速,在 3.6~4.0 m/s 的风速条件下,装置 III 的输出功率随风速的增加而迅速增加。在风速为 4.3 m/s 时,装置 III 获得了 2.486 mW 的峰值输出功率和 14.10 V 的输出电压,而在 4.6 m/s 的风速之后,装置 III 的发电性能开始下降,所以装置 III 的工作风速区间应为 4.1~4.6 m/s。

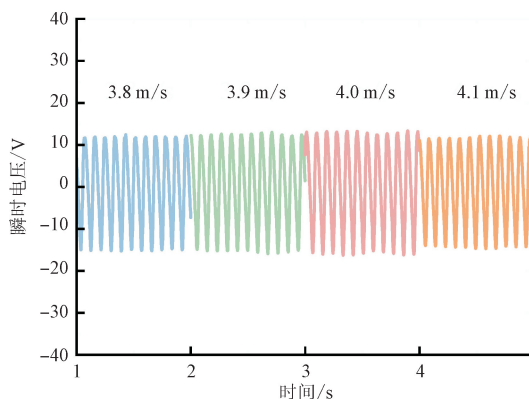
图 11 给出了 3 种装置在最佳风速附近的电压输出。结合上面分析能得出,3 种装置在最佳风速附近输出电压均能表现出正弦波的振动模式,且相对稳定。装置 I 的对称结构能够使俘能器获得更好的同步振动模式,即为悬臂梁两侧均同上或同下振动,压电片的形变程度进一步叠加,从而获得更高的输出功率和输出电压,这使得装置 I 的输出功率相较装置 II、装置 III 提升了 243.5%、63.3%,输出电压提升了 85.4%、27.8%,大幅度提高了俘能器的发电效果。



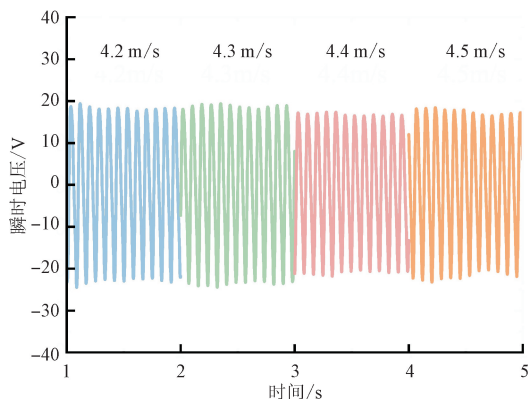
(a) 不同风速下各装置输出电压



(b) 装置 I 部分瞬时电压



(c) 装置 II 部分瞬时电压



(d) 装置Ⅲ部分瞬时电压

图 11 不同风速下各装置的输出电压以及部分瞬时电压

Fig. 11 Output voltages and partial instantaneous voltages of various devices under different wind speeds

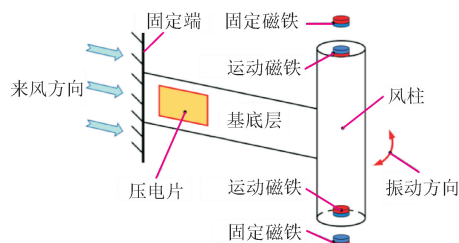
装置Ⅱ与装置Ⅰ均为对称结构,所以其输出功率和输出电压所表现出来的图像大致与装置Ⅰ相似,但装置Ⅱ在风洞试验中所表现出来的发电性能却远远小于装置Ⅰ。根据上文可知,激振加速度试验中的装置Ⅰ和装置Ⅱ在其他条件相同且达到装置最佳振动效果的条件下,二者发电性能却几乎相同。分析出现此差异的原因是,激振台能够给装置提供稳定的振动来源,由于装置Ⅰ、Ⅱ风柱的安装方式不同,使得装置Ⅰ、Ⅱ对于涡流起振的利用效果不同。相比之下,反-反安装的风柱模式虽然通过降低自身固有频率从而降低了俘能器自身的起振风速,但是试验结果所表现出的反装结构对于涡流起振效果的利用效率很低,使得装置Ⅱ起振效果远远达不到装置Ⅰ起振效果,俘能器上的压电片形变量相对较小,俘能效果也较差。装置Ⅲ的正-反安装算是对上面两种装置的中和,从图像上来看,既有类似于装置Ⅰ不错的发电性能,又具备了装置Ⅱ能够降低起振风速的特点。这是由于,装置Ⅲ属于非对称结构,两侧变截面风柱质量分布不均匀,导致振动状态达不到对称结构所具备的同步振动模式,进而无法使压电片进一步形变,使得装置Ⅲ的发电性能不如对称结构装置Ⅰ,同时单个反装结构的存在使装置Ⅲ获得了小于装置Ⅰ的固有频率和起振风速。

基于前面的讨论,变截面风柱压电俘能器两端的大小截面分布对双变截面风柱压电俘能器系统的输出功率施加相当大的影响。当两端变截面风柱均采用正-正安装,大小圆柱直径分别为 46、30 mm,外部负载电阻为 80 k Ω 、风速为 4.7 m/s 时,双变截面风柱压电俘能器系统可以产生 4.06 mW 的输出功

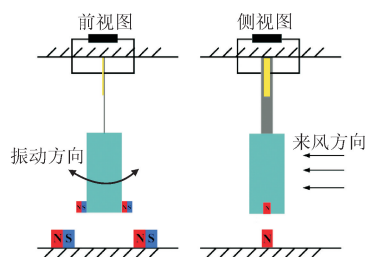
率。当两个变截面风柱均采用反-反安装时,双变截面风柱压电俘能器系统在风速为 3.9 m/s 时获得最大输出功率,峰值为 1.182 mW。

图 12 展示了部分先前发表的类似研究。图 12(a) 为 Hou 等研究的俘能器,该装置可以在 1.6 m/s 风速条件下产生 0.21 mW 的输出功率^[19];图 12(b) 为 Wang 等研究的俘能器,该装置可以在 7 m/s 风速条件下产生 0.73 mW 的输出功率^[24];图 12(c) 为 Meng 等研究的俘能器,该装置可以在 1.6 m/s 风速条件下产生 1.36 mW 的输出功率^[25];图 12(d) 为 Jing 等研究的俘能器,该装置可以在 7 m/s 风速条件下产生 2.88 mW 的输出功率^[26]。本研究可以在 4.7 m/s 风速条件下产生 4.06 mW 的输出功率,输出功率显著优于大多数先前发表的类似类型的研究。

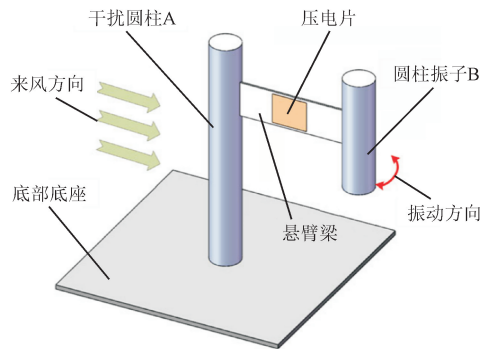
本研究能够将风能、振动能转化为电能输出,可广泛应用于桥梁、轨道、输电线路塔等基础设施场景,为低功耗监测传感电子设备提供持续稳定的能量供应。



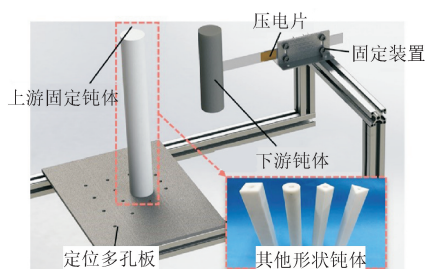
(a) 涡激振动下磁耦合单稳态压电俘能器



(b) 宽带三稳态驰振式压电俘能器



(c) 尾迹耦合涡激振动下压电俘能器



(d)交错双圆柱压电俘能器

图12 其他相关研究

Fig. 12 Other related studies

4 结 论

本文提出了一种用于采集风能的双变截面风柱压电俘能器,并对其振动特性和发电性能进行了深入研究。介绍了俘能器的结构参数与工作原理,设计了3种安装方式,制作了试验样机并进行了试验研究。研究内容主要包括负载电阻、激振频率、激振加速度和风速对双变截面风柱压电俘能器发电性能的影响,分析试验结果,得出如下结论。

(1)该试验装置的最佳负载电阻为 $80\text{ k}\Omega$ 。在最佳负载电阻的条件下,当两端变截面风柱均采用正-正安装、风速为 4.7 m/s 时,该装置可产生 4.06 mW 的最大输出功率。当两端变截面风柱均采用反-反安装,风速为 3.9 m/s 时,该装置可产生 1.182 mW 的最大输出功率。当两端变截面风柱采用正-反安装,风速为 4.3 m/s 时,该装置可产生 2.486 mW 的最大输出功率,且正-正安装的输出功率相较反-反安装、正-反安装提升了 243.5% 、 63.3% ,输出电压提升了 85.4% 、 27.8% 。

(2)对称结构的装置在其他条件相同且达到装置最佳振动效果的条件下,装置发电性能几乎相同。对称结构装置因其同步振动模式可使压电片形变叠加,从而提高输出电压和功率。与正装结构相比,反装结构虽能降低俘能器固有频率和启动风速,但对涡流起振效果利用效率低,导致俘能效果较差。

(3)激振加速度的增大能够明显提高俘能器系统的发电性能,其他条件相同情况下,激励加速度越高,发电性能越好。总体而言,本文提出的双变截面风柱压电俘能器拓宽了变截面风柱压电俘能器的研究,为俘能器对风能的高效利用提供了一种新的研究思路。

参考文献:

[1] 赵庆玲,宋汝君,罗莲健,等. 双L支架回扣式压电

俘能器:设计与实验[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(6): 34-41.

ZHAO Qingling, SONG Rujun, LUO Lianjian, et al. Double L bracket buckle type piezoelectric energy harvester: design and experiment [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(6): 34-41.

[2] WANG Hu, ZHAO Qingling, SONG Rujun, et al. Design and performance study of low frequency magnetic coupling bistable piezoelectric and electromagnetic energy harvester [J]. Energy, 2025, 320: 135178.

[3] SUN Wan, WANG Yiheng, LIU Yang, et al. Navigating the future of flow-induced vibration-based piezoelectric energy harvesting [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024, 201: 114624.

[4] 侯成伟,单小彪,宋汝君,等. 风向自适应型涡激振动压电俘能器的试验研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(20): 120-127.

HOU Chengwei, SHAN Xiaobiao, SONG Rujun, et al. Experimental study of orientation adaptive piezoelectric energy harvester based on vortex induced vibration [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(20): 120-127.

[5] SIDDIQUE A R M, MAHMUD S, HEYST B V. A comprehensive review on vibration based micro power generators using electromagnetic and piezoelectric transducer mechanisms [J]. Energy Conversion and Management, 2015, 106: 728-747.

[6] MCKENNA R, LILLIESTAM J, HEINRICHS H U, et al. System impacts of wind energy developments: key research challenges and opportunities [J]. Joule, 2025, 9(1): 101799.

[7] QI Lingfei, SONG Juhuang, WANG Yuan, et al. Mechanical motion rectification-based electromagnetic vibration energy harvesting technology: a review [J]. Energy, 2024, 289: 130030.

[8] 焦圣喜,杨旭,杨汉瑞. 基于叠层与嵌套结构的太阳能吸收器设计[J]. 光子学报, 2025, 54(3): 172-183. JIAO Shengxi, YANG Xu, YANG Hanrui. Design of solar absorber based on laminar and nested structure [J]. Acta Photonica Sinica, 2025, 54(3): 172-183.

[9] 刘丽兰,代航舵,秦英凯,等. 新型海洋浮标波浪能发电装置动力学特性研究[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(1): 203-214.

LIU Lilan, DAI Hangduo, QIN Yingkai, et al. Dynamic characterization of a new ocean buoy wave energy harvester [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(1): 203-214.

- [10] 赵庆玲, 于蓬勃, 刘诗雨, 等. 几种压电电磁复合俘能器的发电性能实验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(11): 195-204.
ZHAO Qingling, YU Pengbo, LIU Shiyu, et al. Experimental study on power generation performance of several types of piezoelectric-electromagnetic composite energy harvesters [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(11): 195-204.
- [11] WANG Min, WU Hao, ZHANG Jingyu, et al. Multi-magnet coupled bistable piezoelectric energy harvesters for performance enhancement [J]. Energy, 2024, 306: 132452.
- [12] 毛新辉, 张继元, 齐欢, 等. 利用斜齿离合升频机制实现瓦级输出的超低频电磁式振动能量收集器 [J]. 力学学报, 2023, 55(10): 2168-2177.
MAO Xinhui, ZHANG Jiyuan, QI Huan, et al. An ultra-low frequency electromagnetic vibration energy harvester with watt-level output driven by the helical clutch frequency-upgrading mechanism [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2023, 55(10): 2168-2177.
- [13] GUO Xinge, ZHANG Yulong, FAN Kangqi, et al. A comprehensive study of non-linear air damping and "pull-in" effects on the electrostatic energy harvesters [J]. Energy Conversion and Management, 2020, 203: 112264.
- [14] WANG Guotai, LUO Lianjian, ZHAO Qingling, et al. A dual-cylinder piezoelectric energy harvester using wind energy [J]. Ferroelectrics Letters Section, 2023, 50(4/6): 150-161.
- [15] ABDELKEFI A, YAN Zhimiao, HAJJ M R. Modeling and nonlinear analysis of piezoelectric energy harvesting from transverse galloping [J]. Smart Materials and Structures, 2013, 22(2): 025016.
- [16] HU Gang, TSE K T, KWOK K C S, et al. Aerodynamic modification to a circular cylinder to enhance the piezoelectric wind energy harvesting [J]. Applied Physics Letters, 2016, 109(19): 193902.
- [17] IQBAL M, KHAN F U. Hybrid vibration and wind energy harvesting using combined piezoelectric and electromagnetic conversion for bridge health monitoring applications [J]. Energy Conversion and Management, 2018, 172: 611-618.
- [18] HUANG Dongmei, ZHOU Shengxi, LITAK G. Theoretical analysis of multi-stable energy harvesters with high-order stiffness terms [J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2019, 69: 270-286.
- [19] HOU Chengwei, SHAN Xiaobiao, ZHANG Leian, et al. Design and modeling of a magnetic-coupling mono-stable piezoelectric energy harvester under vortex-induced vibration [J]. IEEE Access, 2020, 8: 108913-108927.
- [20] SUI Wentao, ZHANG Huirong, YANG Chongqiu, et al. Modeling and experimental investigation of magnetically coupling bending-torsion piezoelectric energy harvester based on vortex-induced vibration [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2022, 33(9): 1147-1160.
- [21] HOU Chengwei, LI Chunhui, SHAN Xiaobiao, et al. A broadband piezo-electromagnetic hybrid energy harvester under combined vortex-induced and base excitations [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 171: 108963.
- [22] WANG Junlei, GU Shanghai, ZHANG Chengyun, et al. Hybrid wind energy scavenging by coupling vortex-induced vibrations and galloping [J]. Energy Conversion and Management, 2020, 213: 112835.
- [23] 王宜晴. 变截面混合钝体流致振动压电俘能特性研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2023.
- [24] WANG Junlei, GENG Linfeng, ZHOU Shengxi, et al. Design, modeling and experiments of broadband tristable galloping piezoelectric energy harvester [J]. Acta Mechanica Sinica, 2020, 36(3): 592-605.
- [25] MENG Jinpeng, FU Xingwen, YANG Chongqiu, et al. Design and simulation investigation of piezoelectric energy harvester under wake-induced vibration coupling vortex-induced vibration [J]. Ferroelectrics, 2021, 585(1): 128-138.
- [26] JING Hao, XIANG Hongjun, WANG Jingyan. Enhancing wind energy harvesting performance through staggered dual cylinders inspired by migrant bird lift sharing effect [J]. Renewable Energy, 2025, 246: 122905.

(编辑 杜秀杰)