

文章编号 1004-924X(2023)24-3570-10

可变形翼型钝体的风致振压电俘能器

张忠华, 李 哲, 孟凡许, 王淑云, 李 赫, 阚君武*

(浙江师范大学 精密机械与智能结构研究所, 浙江 金华 321004)

摘要:针对现有风致振压电俘能器工作风速范围窄、高风速下振幅过大等问题,提出一种可变形翼型钝体的风致振压电俘能器,主要由可变形翼型钝体、悬臂梁以及压电组合梁构成,钝体的弹性翼受风力影响产生形变,从而实现系统振动特性的自我调节,以期提高俘能器的环境适应性。建立了俘能器的 COMSOL 有限元模型,通过仿真与试验分析了风速对其钝体形状及振动特性的影响,并获得了迎风角和弹性翼厚对俘能器输出性能的影响规律。结果表明:选取迎风角 120° 和弹性翼厚 0.15 mm 时俘能器的工作风速范围达到 21 m/s ,且当风速小于 8 m/s 时,弹性翼变形较小,系统以驰振为主,输出电压随风速增加而增大;当风速在 $8\sim 17\text{ m/s}$ 时,弹性翼形变量进一步增大,系统由驰振逐渐向涡振转变,输出电压变化较小;当风速在 $17\sim 25\text{ m/s}$ 时,钝体因弹性翼变形过大呈弯弧状,系统以涡振为主,其振幅被有效控制,输出电压随风速增加而减小;存在匹配电阻为 $250\text{ k}\Omega$ 时俘能器所产生的最大输出功率为 3.78 mW 。因此,该风致振压电俘能器在满足结构可靠、起振风速低及风速范围宽条件下同时可输出较大的电能。

关键词:压电俘能器;风致振动;可变形钝体;驰振;涡激振动

中图分类号: TN384; TM614 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20233124.3570

Wind-induced vibration piezoelectric energy harvester with a deformable airfoil-shape blunt body

ZHANG Zhonghua, LI Zhe, MENG Fanxu, WANG Shuyun, LI He, KAN Junwu*

(Institute of Precision Machinery and Smart Structure, Zhejiang Normal University,
Jinhua 321004, China)

* Corresponding author, E-mail: jutkw@163.com

Abstract: A novel wind-induced-vibration piezoelectric-energy harvester with a deformable airfoil-shaped bluff body is proposed in this study to solve the problems of narrow wind speed bandwidths and excessive amplitudes at high wind speeds. The harvester mainly consists of a deformable bluff body, cantilever beam, and piezoelectric vibrator. The elastic wing of the bluff body deforms at different wind speeds, thus achieving the self-adjustment of the vibration characteristics and improving the environmental adaptability of the harvester. A COMSOL finite element model of the energy harvester is established, and the effect of wind speed on the shape and vibration characteristics of the bluff body is analyzed via simulations and experiments. In addition, the effects of windward angle θ and elastic wing thickness e on the output performance of the energy harvester are determined. The results show that the wind speed bandwidth of the har-

收稿日期: 2023-06-22; 修订日期: 2023-07-28.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 52077201, No. 51877199); 浙江省自然科学基金资助项目(No. LY20F010006); 浙江省重点研发计划资助项目(No. 2021C01181); 国家级大学生创新创业训练计划项目(No. 202310345038)

vester ranges from 4 m/s to 25 m/s at a windward angle θ of 120° and an elastic wing thickness e of 0.15 mm. Furthermore, the deformation of the elastic wing becomes small when the wind speed is lower than 8 m/s. When the wind speed ranges from 8 m/s to 17 m/s, the harvester experiences a transformation from galloping to vortex-induced vibration, resulting in a decrease in the output voltage. When the wind speed ranges between 17 m/s and 25 m/s, the bluff body has an arc shape because of the excessive deformation of the elastic wing. The harvester is dominated by vortex-induced vibration, and thus, its amplitude can be effectively suppressed. The output voltage decreases with increasing wind speed. Additionally, the test results show that the harvester can yield a maximum output power of 3.78 mW at a matching impedance of 250 k Ω . Both the theoretical analysis and experimental results indicate that the proposed harvester can satisfy the requirements of high reliability, low cut-in wind speed, and broad wind speed bandwidth, as well as generate considerable electric power.

Key words: piezoelectric energy harvester; wind-induced vibration; deformable blunt body; galloping; vortex-induced vibration

1 引 言

随着微功率便携式电子产品和无线传感器节点的自供电需求越来越高,寻求一种可持续、安全稳定的俘能技术成为了国内外学者讨论的热点话题,为此人们对以电磁、摩擦、压电等原理为基础的俘能器进行了多方面的研究^[1-4]。电磁式适用于高速旋转环境、摩擦式适用于微表面接触环境,相较于前两者,压电俘能器的优势在于结构简单,易集成一体化微机电系统、无电磁干扰及对材料的损耗较小等^[5-7]。根据应用领域工作环境中存在能量的不同,压电俘能器大致可分为风致振式^[8]、旋转式^[9]、振动式^[10]三类。其中,风致振压电俘能器主要依靠钝体受风力影响产生振动激励压电陶瓷进行发电,其根据激励钝体的结构主要分为三类,分别为单钝体式、多钝体式及复合钝体式,三者各有特色,单钝体式的研究最为普遍,在此基础上的多钝体及复合钝体式振动特性多样,已然成为风致振压电俘能器的研究前沿。

早期,学者们主要研究的是卡门涡街对海洋建筑物的振动损害^[11],但随着研究的深入,利用单钝体在这种振动中的特性进行俘能的方法逐渐成为热点话题。2019年,Wang等人^[12]通过在风力作用下圆柱壳体所产生的涡振间接激励壳体内的压电悬臂梁振动发电,有效避免了环境对发电单元的影响,且最佳负载下的功率可达0.4 mW。2021年,Liu等人^[13]提出一种顺流激励

式Y型钝体压电俘能器,试验表明半角为 60° 的Y型钝体使俘能器输出电压提升了近十倍。2022年,侯成伟等人^[14]将圆柱钝体涡振式俘能器放在可转动圆盘上,通过圆盘的导向翼自主调节迎风角度,从而大幅提高了其在多风向环境中的适应能力。综上,单钝体式俘能器具有结构简单、理论基础深厚的优势,但由于钝体单一固定,振动特性几乎不可调,无法适应多变的环境从而导致发电效率较低。

为改善单钝体式压电俘能器的振动特性并提高其发电性能,多钝体及复合钝体式应运而生。多钝体式指两个及以上独立存在钝体共同影响俘能器工作,2021年,Hu等人^[15]提出了一种由方柱钝体和梳状钝体共同作用的压电俘能器,相较于单一方柱钝体,它降低起振风速的同时输出功率提高了约171.2%;2022年,Liao等人^[16]在圆柱壳体后方安置了一个矩形钝体来改善原有振动特性,实现了小振幅涡振向大振幅驰振的转变,使其输出功率达到近2.22 mW;2023年,Kan等人^[17]提出了一种顺流激励式双钝体压电俘能器,通过下游挡板钝体扰动上游圆柱钝体的流场来弥补顺流激励振幅小的缺陷,提升高风速下俘能器的结构可靠性及发电能力。复合钝体式指在单一钝体上耦合一种及以上部件来改变俘能器原有的振动特性,2020年,Wang等人^[18]提出一种不同横截面的混合钝体式风致振压电俘能器,通过调节钝体中圆柱与方柱的占比以及迎风面形状改善流固耦合特性,使其最大输出电压

提高 71%；2021 年，该团队又设计了一种非光滑圆柱钝体来改变涡振特性^[19]，研究表明，不同表面的圆柱钝体可以增强或抑制系统的振动，以期适用于不同的工作环境。综上，多钝体结构或复合钝体结构能有效改善俘能器的振动特性，降低其起振风速、拓宽工作风速范围，但这两类俘能器多数以驰振形式工作，容易造成发电单元的损坏，故其高风速环境下的适应能力还存在提升空间。

除此之外，近几年还出现了一种可变钝体式的风致振压电俘能器，2018 年，Zhou 等人^[20]提出利用弯曲机翼的 Y 形钝体所产生的相干共振来提高低速气流的风能效率；2020 年，Sun 等人^[21]提出一种滑动式圆柱钝体的风致振压电俘能器，实现拓宽锁频范围、提高平均功率的目的。综上，该类俘能器为风能的采集开辟了新方向。

针对上述各类问题并结合现有研究，本文提出一种可变形翼型钝体的风致振压电俘能器，它主要由可变形翼型钝体（弹性翼+刚性翼）、悬臂梁及压电组合梁构成，钝体的弹性翼受风力影响产生形变，从而实现系统振动特性的自我调节，以期达到降低起振风速、拓宽工作风速范围及限制高风速系统振幅的目的。通过建模仿真和试验两种方法研究结构参数（钝体迎风角和弹性翼刚度）、风速及负载电阻对俘能器输出特性的影响规律，证明该结构原理能够提高其环境适应性，为构造满足自供电需求的俘能器后续研究提供了新思路。

2 俘能器的结构与工作原理

可变形翼型钝体风致振压电俘能器的结构原理如图 1 所示，主要由基座、悬臂梁、垫块、铜基板、压电陶瓷、刚性翼及弹性翼组成。其中，垫块、铜基板和压电陶瓷三者构成压电组合梁，并安装在悬臂梁的两侧，呈对称分布；刚性翼和弹性翼构成可变形翼型钝体，并安装在悬臂梁的自由端。钝体的迎风角由两片刚性翼组成的角度决定，钝体的形状则通过弹性翼在风力作用下产生的变形量决定；压电组合梁自由端的垫块可实现振动能力的间接传递，避免压电陶瓷因承受超过许用应力的拉应力而损毁^[22]。

风致振压电俘能器主要通过风经过钝体后

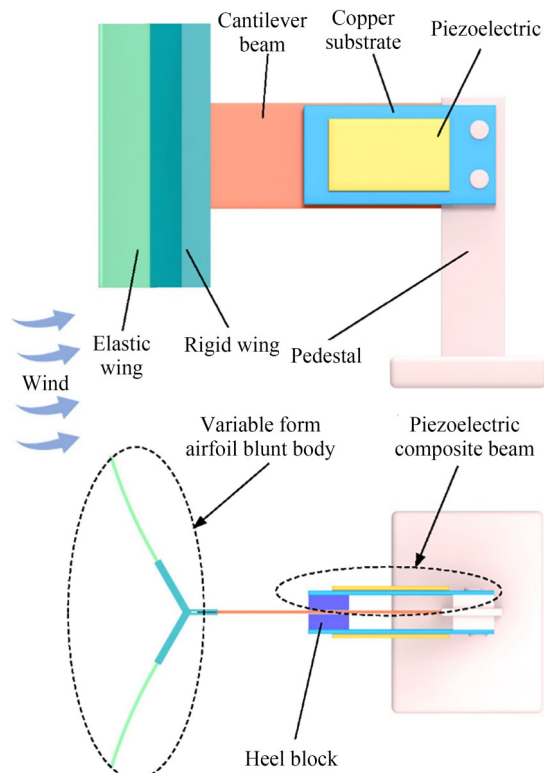


图 1 俘能器的结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of energy harvester

在其两侧表面产生的交替漩涡促使钝体连带着悬臂梁进行往复摆动，从而间接激励压电组合梁变形发电，同时钝体形状主要由弹性翼变形量决定，因此可以通过弹性翼受风速影响的大小来改变俘能器的流固耦合及振动特性。为直观体现出风速对俘能器工作过程及钝体形状的影响，采用 COMSOL 仿真对其进行了模拟试验，获得了俘能器的输出电压波形及工作过程，分别如图 2 和图 3 所示，其中图 3 是分别在不同风速下提取一个振动周期 T 内的波峰 ($0.25T$)、平衡位置 ($0.5T$) 及波谷 ($0.75T$) 的振动形态组成的。根据图中俘能器钝体形状和输出电压大小的变化，将工作过程分为两个阶段：

(1) 发散性振动阶段：当风速在 $0 \sim 10 \text{ m/s}$ 之间时，弹性翼变形较小，钝体迎风面呈 V 字形，其振幅及输出电压均随着风速的增加而增大，结合流体力学理论和现有关于 V 型钝体的研究^[13,23]，此时俘能器主要以驰振的方式工作，其中风速 $v = 5 \text{ m/s}$ 和 $v = 10 \text{ m/s}$ 时的俘能器工作过程分别如图 2(a) 和图 2(b) 所示；

(2) 收敛性振动阶段：当风速在 $10 \sim 15 \text{ m/s}$

之间时,弹性翼变形较大,钝体迎风面呈弯弧状,其振幅及输出电压均随风速的增大而出现减小趋势,而这种迎风面类似于圆柱钝体表面的形状,根据流体力学理论和现有关于圆柱钝体的研究^[24]可知,在这一风速范围内,俘能器是以类似涡振的方式进行工作,基本实现通过钝体形状随风速变化而变化的特性来防止系统振幅无限制增大的目的,其中风速 $v=15\text{ m/s}$ 时的俘能器工作过程如图 2(c)所示。

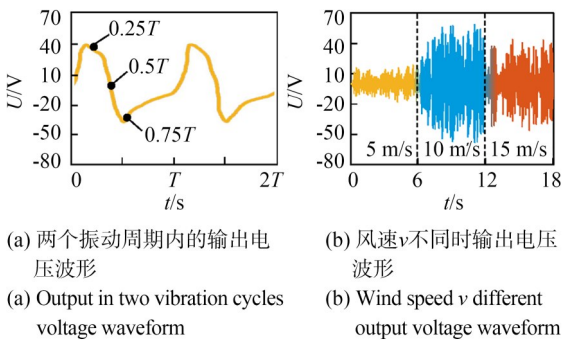


图 2 输出电压的波形图
Fig. 2 Output voltage waveform

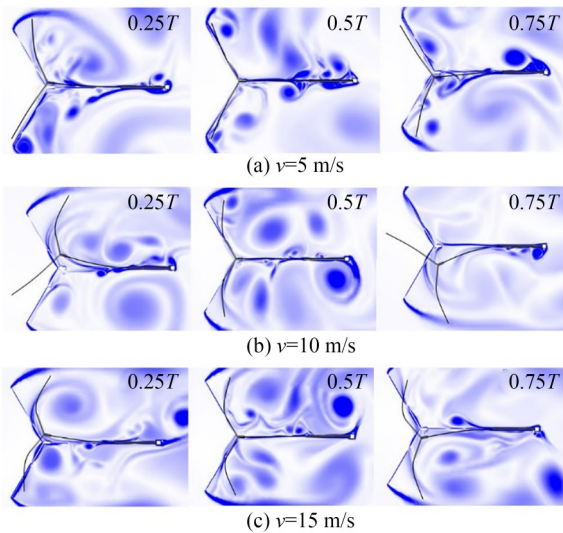


图 3 风速 v 不同时俘能器的工作过程
Fig. 3 Working process of the energy harvester with different wind speeds

3 有限元建模与仿真

为研究可变形翼型钝体迎风角和弹性翼刚度对俘能器的流固耦合特性及输出性能的影响

规律,利用 COMSOL 对不同参数下的俘能器进行了模拟仿真,其中由于本文研究重点在于钝体及其变形状态,故将压电组合梁简化成单层的压电陶瓷,几何模型的基本结构参数及材料如表 1 所示。

图 4 为俘能器的几何模型及流场设置,其中作为变量的迎风角 θ 分别为 $0^\circ, 40^\circ, 80^\circ, 120^\circ, 160^\circ$ 及 180° ;弹性翼刚度因测量不便,将其厚度 e 作为刚度变量,其分别为 $0.15\text{ mm}, 0.3\text{ mm}, 0.45\text{ mm}, 0.6\text{ mm}$ 及 0.75 mm 。此外,仿真时采用的测试风速为 10 m/s ,出口压力为 0 Pa ;本文采用宽为钝体总翼长 10 倍(400 mm)、长为其 20 倍(800 mm)的流场进行测试^[25]。

表 1 俘能器的基本结构参数及材料表

Tab. 1 Basic structure parameters and materials of the energy harvester

名称	量值或材料
压电梁总长 l_p/mm	20
压电梁总厚 l_e/mm	0.5
悬臂梁长 L/mm	60
悬臂梁厚 d/mm	0.25
刚性翼长 R_l/mm	15
刚性翼厚 R_e/mm	0.6
弹性翼长 T_l/mm	25
压电陶瓷材料	PZT-4
悬臂梁材料	热处理后的铍青铜
刚性翼材料	铝板
弹性翼材料	高分子聚乙烯片材

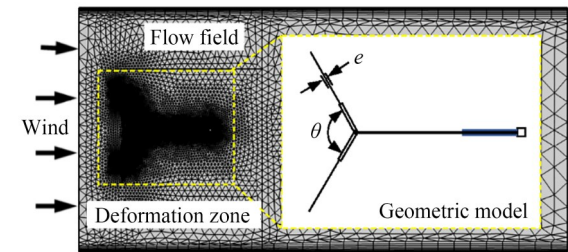


图 4 俘能器的几何模型及流场设置
Fig. 4 Geometric model and flow field setting of energy harvester

图 5 为迎风角和弹性翼厚分别作为变量时的风场流速分布及压力等值线云图。由图可知,当 $\theta=0^\circ, e=0.15\text{ mm}$ 时,压力等值线分布均匀,且

钝体两侧流速基本一致,俘能器无法起振,但随着 θ 的增加,俘能器周边的涡流分布密度和最大压力差均呈先增大后减小趋势;当 $\theta=120^\circ$ 、 e 作为变量时,弹性翼形变量、涡流数量及最大压力差均随着 e 的增大而逐渐增大。

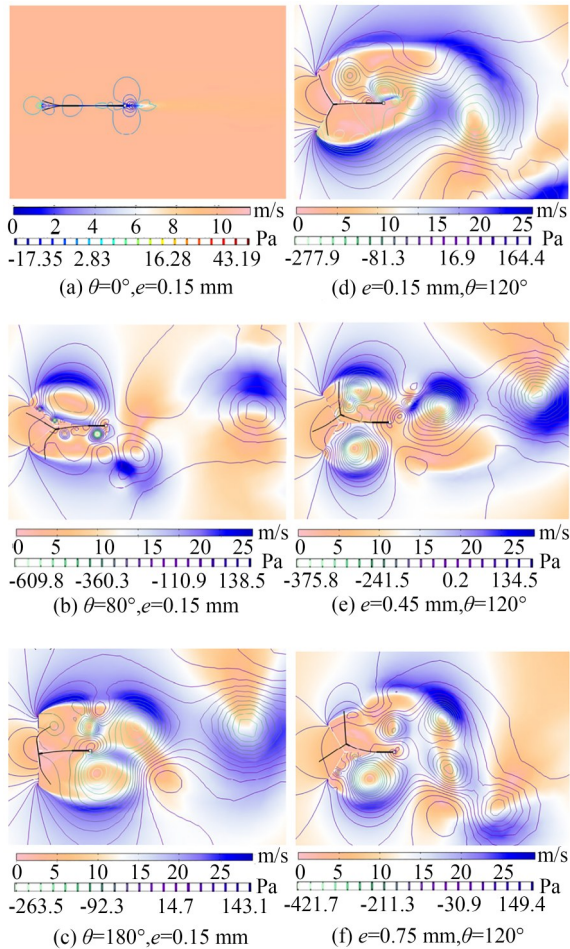
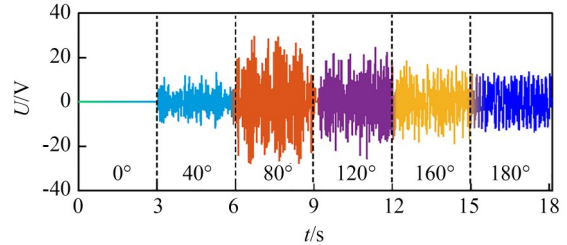


图5 不同变量下的风场流速分布及压力等值线云图

Fig. 5 Velocity distribution and pressure contour cloud map of wind field under different variables

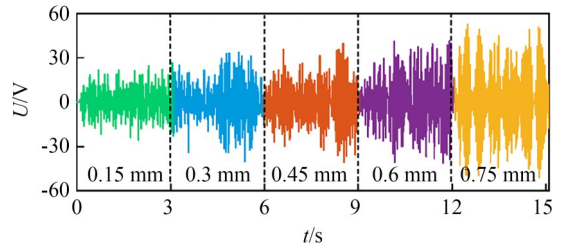
图6为迎风角 θ 、弹性翼厚 e 分别作为变量时的输出电压波形图。由图6(a)可知,当迎风角 $\theta=0^\circ$ 时,由于钝体迎风面积较小,无法产生交替脱落的涡流促使其起振,但当 $0^\circ < \theta \leq 80^\circ$ 时,涡流所提供的压力差随迎风角 θ 增加而增大,故俘能器输出电压呈增大趋势;当 $80^\circ < \theta \leq 180^\circ$ 时,由于涡流压力差及分布密度的减小,俘能器输出电压呈小幅下降趋势。由图6(b)可知,随着弹性翼厚 e 的增加,俘能器输出电压会出现小幅上涨,由此表明,降幅的效果随着弹性翼刚度的增大而减

小。综上,选择合适迎风角 θ 和弹性翼厚 e 能够实现控制钝体振幅、有效降低俘能器起振风速及提高发电能力的目的,为后续俘能器的设计、制作和试验测试提供了理论依据。



(a) 弹性翼厚 $e=0.15$ mm,迎风角 θ 为变量

(b) Elastic wing thickness $e=0.15$ mm, and the windward angle θ is a variable



(b) 迎风角 $\theta=120^\circ$,弹性翼厚 e 为变量

(b) Windward angle $\theta=120^\circ$, and the elastic wing thickness e is a variable

图6 迎风角 θ 、弹性翼厚 e 分别作为变量时的输出电压波形图

Fig. 6 Output voltage waveform diagram with windward angle θ and elastic wing thickness e as variables respectively

4 试验测试与分析

为验证该俘能器结构的可行性及仿真结果的正确性,制作并搭建了如图7所示的试验样机及测试系统,其结构尺寸和所用材料与仿真基本相同(详见表1),不同之处在于试验样机采用三维结构,其钝体高度为50 mm,悬臂梁宽度为20 mm,压电陶瓷的直径和厚度分别为18 mm和0.2 mm,铜基板直径和厚度分别为26 mm和0.3 mm。试验所用仪器包括:DS5042M型数字存储示波器、测试风机、变频器、风速仪、电阻箱等。试验中调节变频器频率来间接改变风机的风速,经风速仪测量二者近似呈线性关系($v=0.75f$),变频器步长1 Hz,测试风速范围为0~25 m/s。试验中所提到的输出电压 U 均为单片压电陶瓷的开路峰峰电压

压,输出功率 P 为单片压电陶瓷的峰峰值功率,且主要研究的变量为迎风角 $\theta(0^\circ/40^\circ/80^\circ/120^\circ/160^\circ/180^\circ)$ 和弹性翼厚 $e(0.15\text{ mm}/0.3\text{ mm}/0.45\text{ mm}/0.6\text{ mm}/0.75\text{ mm})$ 。

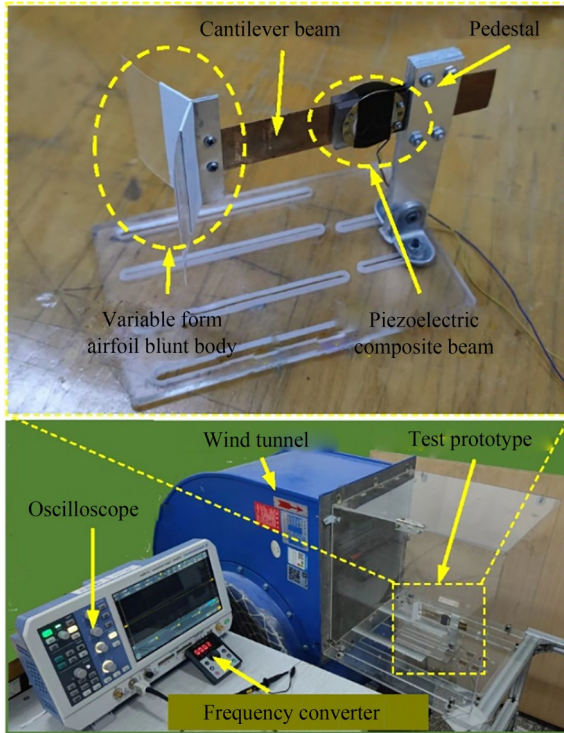


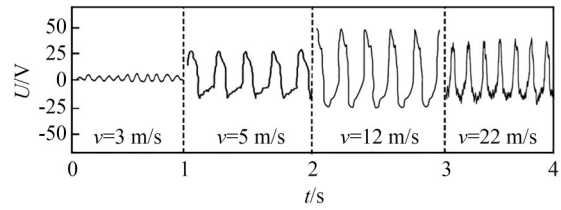
图7 试验样机及测试系统

Fig. 7 Test prototype and test system

为验证不同风速区域内俘能器拥有不同的振动特性,选取迎风角 θ 为 120° 、弹性翼厚 e 为 0.15 mm 的俘能器进行试验,获得了不同振动状态时的电压波形及输出电压与输入风速的关系曲线,分别如图8(a)和图8(b)所示。由图可知,俘能器大致有四种振动状态:

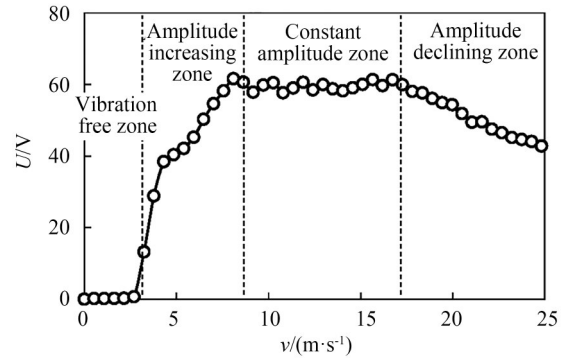
(1)无振区:当风速 v 在 $0\sim 3.24\text{ m/s}$ 之间时,输出电压微弱,俘能器处于静止状态还未起振,产生波形的主要原因为试验台的微振动以及示波器内置电压的干扰;

(2)增幅区:当风速 v 在 $3.24\sim 8\text{ m/s}$ 之间时,由于压电组合梁主要受单向力作用,电压波形呈周期性非对称曲线,此时钝体因风速较小未发生过大大变形,整体呈V型,而根据流体力学理论及现有关于V型钝体的风致振压电俘能器的研究可知,俘能器输出电压会随着风速的增加而快速增大的工作方式,属于驰振;



(a) 不同风速时俘能器的输出电压波形图

(a) Output voltage waveform of the harvester at different wind speeds



(b) 输出电压与输入风速的关系曲线

(b) Relation curve between output voltage and input wind speed

图8 风速对俘能器输出电压及波形的影响

Fig. 8 Effect of wind speed on output voltage and waveform of the energy harvester

(3)等幅区:当风速 v 在 $8\sim 17\text{ m/s}$ 之间时,电压波形与增幅区波形除了幅值外基本一致,俘能器逐渐由驰振转为涡振,输出电压不再随风速的增加而增大,而是达到最大值后维持在一个小范围内上下波动,出现近似“锁频”的状态;

(4)降幅区:当风速 v 在 $17\sim 25\text{ m/s}$ 之间时,电压波形的频率较高但电压值有所减小,此时钝体迎风面受强风影响变为弯弧状,而这种类似于圆柱钝体表面形状的钝体,根据流体力学理论和现有关于圆柱钝体的风致振压电俘能器的研究可知,俘能器输出电压在某一风速带内较大,此后会随风速增大而减小的工作方式,属于涡振。

图9为弹性翼厚 $e=0.15\text{ mm}$ 、迎风角 θ 不同时输出电压 U 与输入风速 v 的关系曲线,图10为提取不同迎风角 θ 下的起振风速 v_0 、锁频风速 v_l (俘能器完全起振并刚进入等幅振动时的风速)、降幅风速 v_d 及等幅电压 U_c 构成的规律曲线。由图9可知,在试验风速范围内,随着风速 v 的增加,迎风角 θ 在 $0^\circ\sim 80^\circ$ 范围内的俘能器会出现失稳现象(如图中A,B,C点所示),即悬臂梁产生过大变形以致偏转到一边无法回到平衡位置,而

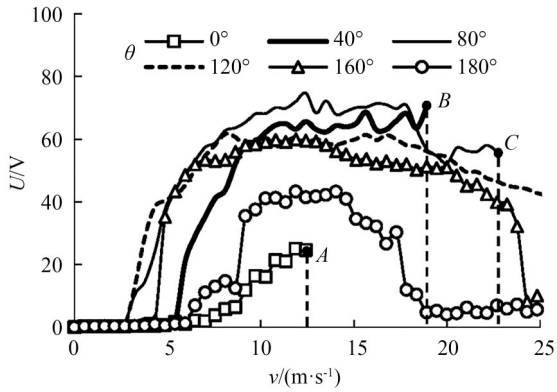


图 9 迎风角 θ 不同时输出电压与输入风速的关系曲线
Fig. 9 Relation curve between output voltage and input wind speed when the windward angle θ is different

迎风角 θ 在 $80^\circ \sim 180^\circ$ 范围内的俘能器随风速增大基本会出现无振、增幅、等幅及降幅四种振动状态,且随着迎风角 θ 的增加,等幅振动的风速范围出现减小趋势,同时降幅区输出电压下降的速率逐渐增大,系统涡振特性愈发明显。由图 10 可知,在试验迎风角范围内,俘能器的起振风速 v_0 随迎风角 θ 的增加呈先减小后增大的趋势;当迎风角 $\theta < 40^\circ$ 时俘能器在起振过程中出现失稳现象,当迎风角 $\theta \geq 40^\circ$ 时俘能器出现等幅电压 U_c ,且其值随迎风角 θ 的增加呈波动式下降趋势,但锁频风速 v_f 随迎风角 θ 增大呈先减小后增大的趋势;当迎风角 $\theta < 120^\circ$ 时俘能器基本不会出现降幅现象,而当迎风角 θ 在 $120^\circ \sim 180^\circ$ 之间时,俘能器出现涡振特性,且降幅风速 v_d 随迎风角 θ 的增

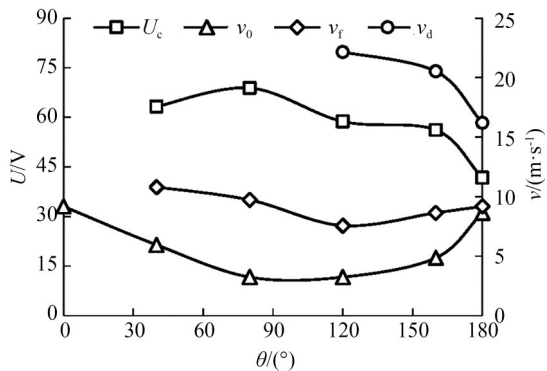


图 10 迎风角 θ 对起振风速 v_0 、锁频风速 v_f 、降幅风速 v_d 及等幅电压 U_c 的影响规律曲线
Fig. 10 Influence of windward angle θ on vibration velocity, frequency locking velocity, drop velocity and constant amplitude voltage

加而减小。

图 11 为迎风角 $\theta = 120^\circ$ 、弹性翼厚 e 不同时输出电压 U 与输入风速 v 的关系曲线,图 12 为提取不同弹性翼厚 e 下的起振风速 v_0 、锁频风速 v_f 、降幅风速 v_d 及等幅电压 U_c 构成的规律曲线。由图 11 可知,在试验风速范围内,当弹性翼厚 $e > 0.3$ mm 时,俘能器在较高风速下会出现失稳现象(如图中 D, E, F 点所示);当弹性翼厚 $e \leq 0.3$ mm 时,随风速增大俘能器均会出现等幅、降幅现象,确保了其结构的安全可靠。由图 12 可知,俘能器的起振风速 v_0 受弹性翼厚 e 影响较小,但锁频风速 v_f 和等幅电压 U_c 均会随着弹性翼厚 e 的增加而小幅增大,且当弹性翼厚 $e \leq 0.3$ mm 时,俘能器的降幅风速 v_d 也随着弹性翼厚 e 的增加而增大,有效拓宽了其稳定工作的风速范围。

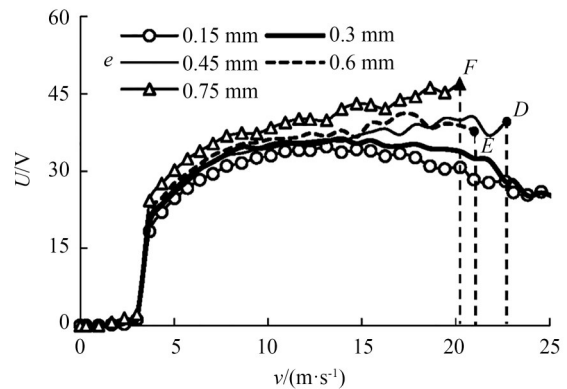


图 11 弹性翼厚 e 不同时输出电压与输入风速的关系曲线
Fig. 11 Relation curve between output voltage and input wind speed when elastic wing thickness e is different

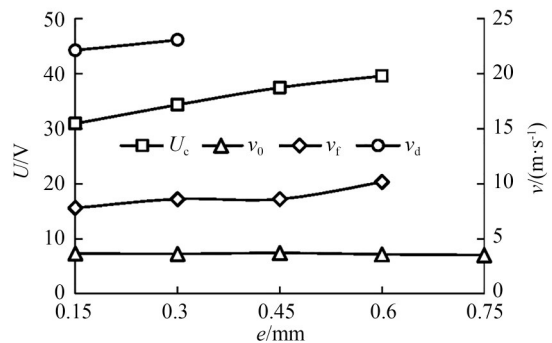


图 12 弹性翼厚 e 对起振风速 v_0 、锁频风速 v_f 、降幅风速 v_d 及等幅电压 U_c 的影响规律曲线
Fig. 12 Influence of elastic wing thickness e on vibration velocity, frequency locking velocity, reduction velocity and constant amplitude voltage

综上,存在迎风角 θ 为 $120^\circ \sim 160^\circ$ 、弹性翼厚 e 为 $0.15 \sim 0.3$ mm 时,俘能器的起振风速较低、工作风速范围较宽,同时其振幅不会因风速的增加而无限增大,提高了俘能器的环境适应性,且试验所获得的规律与仿真分析结果基本保持一致,证实了仿真模型的正确性。

图 13 为弹性翼厚 $e=0.15$ mm、迎风角 θ 不同时输出功率 P 与负载电阻 R 的关系曲线,分别选取三个较为合适的迎风角 $\theta(80^\circ, 120^\circ$ 及 $180^\circ)$,然后在 15 m/s 的风速激励下通过调整负载电阻找到该俘能器的匹配阻抗,以此获得它们的最大输出功率。由图中可知:存在最佳的负载电阻 (250 k Ω) 使该俘能器的输出功率达到最大,当迎风角 θ 为 $80^\circ, 120^\circ$ 及 160° 时,俘能器最大输出功率分别为 3.78 mW, 2.65 mW 及 2.52 mW。

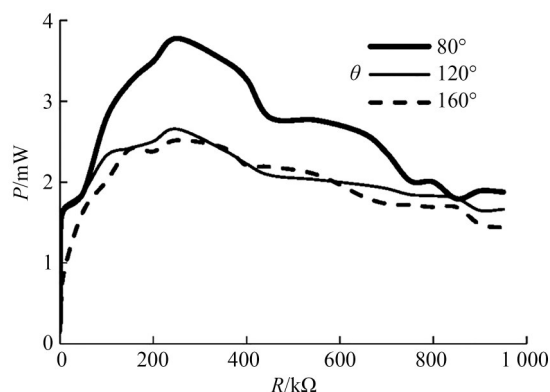


图 13 迎风角 θ 不同时输出功率与负载电阻的关系曲线

Fig. 13 Relation curve between output power and load resistance when windward angle θ is different

5 结 论

为降低起振风速、拓宽工作风速范围及限制高风速下的系统振幅,本文提出一种可变形翼

型钝体的风致振压电俘能器,并通过仿真与试验研究了不同风速下弹性翼厚和迎风角对俘能器输出性能的影响规律,获得如下结论:

(1) 俘能器的钝体由于存在可变形的弹性翼,钝体的形状会随着风速变化而改变,从而使俘能器达到自适应风速调节自身振动特性的目的。当风速较低时,弹性翼形变较小,钝体呈 V 字形,其振幅随风速增大而增大,此时系统以驰振为主;当风速较高但还未超过阈值时,弹性翼形变增大,钝体呈曲面翼型,其振幅不再随风速增加而大幅变化,此时系统进入“锁频”状态;当风速超过阈值时,弹性翼变形较大,钝体呈弯弧状,其振幅随风速增加而逐渐减小,此时系统以涡振为主。因此,俘能器钝体形状适应风速而变化的特性能够使得输出电压随风速增大呈先增大后平缓再减小的趋势;

(2) 迎风角和弹性翼厚对钝体形状变化及其振动特性的影响较大。在试验范围内,当迎风角小于 120° 时,俘能器在较高风速下会出现失稳现象,从而导致其结构易发生损坏;而当迎风角在 $120^\circ \sim 180^\circ$ 之间时,俘能器能够在较高风速下稳定发电,且随着迎风角的增大,起振风速呈增大趋势,锁频风速呈先减小后增大趋势,降幅风速和等幅电压则基本呈减小趋势。当弹性翼厚大于 0.3 mm 时,俘能器由于弹性翼刚度过大产生变形较小,无法改变发散性振动特性而出现失稳现象;但当弹性翼厚不大于 0.3 mm 时,俘能器的振动特性会适应风速的变化,且锁频风速、等幅电压及降幅风速均随弹性翼厚增加而增大;

(3) 当选择较佳的迎风角 ($120^\circ \sim 160^\circ$)、弹性翼厚 ($0.15 \sim 0.3$ mm) 时,俘能器的起振风速可降至 3.24 m/s,稳定工作风速至少可达 25 m/s,且存在最佳负载为 250 k Ω 时俘能器的最大输出功率为 3.78 mW。

参考文献:

- [1] SHARMA S, KIRAN R, AZAD P, et al. A review of piezoelectric energy harvesting tiles: available designs and future perspective[J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 254: 115272.
- [2] MUSCAT A, BHATTACHARYA S, ZHU Y. Electromagnetic vibrational energy harvesters: a re-

view[J]. *Sensors*, 2022, 22(15): 5555.

- [3] LIU H, FU H, SUN L, et al. Hybrid energy harvesting technology: from materials, structural design, system integration to applications[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 137: 110473.
- [4] ZHANG C G, LIU Y B, ZHANG B F, et al. Harvesting wind energy by a triboelectric nanogenerator

- for an intelligent high-speed train system[J]. *ACS Energy Letters*, 2021: 1490-1499.
- [5] 阙君武, 富佳伟, 王淑云, 等. 涡激振动式微型流体俘能器的研究现状与展望[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(6): 1502-1512.
- KAN J W, FU J W, WANG S Y, *et al.* Research status and prospect of vortex-induced vibration micro-fluid energy harvester [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(6): 1502-1512. (in Chinese)
- [6] ZHANG L, ZHANG F, QIN Z, *et al.* Piezoelectric energy harvester for rolling bearings with capability of self-powered condition monitoring[J]. *Energy*, 2022, 238: 121770.
- [7] 王朝辉, 贾小东, 王帅, 等. 基于应用环境的路用压电俘能单元尺寸优化与性能评价[J]. *中国公路学报*, 2022, 35(7): 100-112.
- WANG C H, JIA X D, WANG S, *et al.* Size optimization and performance evaluation of road piezoelectric energy harvesting unit based on application environment [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2022, 35(7): 100-112. (in Chinese)
- [8] CHEN Y, YANG Z C, ZHOU S X. Wide bandwidth wind-induced vibration energy harvester with an angle section head [J]. *International Journal of Applied Mechanics*, 2022, 14(3): 2250021.
- [9] ZHANG Z, CHAI J, WU Y, *et al.* A rotational energy harvester utilizing an asymmetrically deformed piezoelectric transducer subjected only to unidirectional compressive stress [J]. *Energy Reports*, 2023, 9: 657-668.
- [10] 阙君武, 王凯, 孟凡许, 等. 换向激励式压电振动俘能器[J]. *光学精密工程*, 2023, 31(3): 371-379.
- KAN J W, WANG K, MENG F X, *et al.* Piezoelectric vibration harvester with excitation direction conversion [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(3): 371-379. (in Chinese)
- [11] 王水田. 卡门漩涡引起的海洋建筑物的振动及其防止(上)[J]. *水道港口*, 1983(4): 47-54.
- WANG S T. Vibration of marine structures caused by the Karman vortex and its prevention (Part 1) [J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 1983(4): 47-54. (in Chinese)
- [12] 王淑云, 严梦加, 阙君武, 等. 间接激励式压电风力俘能器[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(5): 1121-1127.
- WANG S Y, YAN M J, KAN J W, *et al.* Study of piezoelectric wind energy harvester with indirect excitation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(5): 1121-1127. (in Chinese)
- [13] LIU J J, CHEN Y J, XIA W, *et al.* An innovative V-shaped piezoelectric energy harvester for wind energy based on the fully fluid-solid-electric coupling [J]. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2021, 13(6): 063304.
- [14] 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 C W, SHAN X B, SONG R J, *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. (in Chinese)
- [15] HU G, WANG J, TANG L. A comb-like beam based piezoelectric system for galloping energy harvesting [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 150: 107301.
- [16] LIAO W, WEN Y, KAN J, *et al.* A joint-nested structure piezoelectric energy harvester for high-performance wind-induced vibration energy harvesting [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2022, 227: 107443.
- [17] KAN J, WANG J, MENG F, *et al.* A downwind-vibrating piezoelectric energy harvester under the disturbance of a downstream baffle [J]. *Energy*, 2023, 262: 125429.
- [18] WANG J, GU S, ZHANG C, *et al.* Hybrid wind energy scavenging by coupling vortex-induced vibrations and galloping [J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 213: 112835.
- [19] WANG J, SUN S, TANG L, *et al.* On the use of metasurface for Vortex-Induced vibration suppression or energy harvesting [J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 235: 113991.
- [20] ZHOU Z, QIN W, ZHU P, *et al.* Scavenging wind energy by a Y-shaped bi-stable energy harvester with curved wings [J]. *Energy*, 2018, 153: 400-412.
- [21] SUN W, SEOK J. A novel self-tuning wind energy harvester with a slidable bluff body using vortex-induced vibration [J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 205: 112472.
- [22] ZHANG X F, LIN X J, YANG C H, *et al.* Ef-

- fects of radial stress on piezoelectric ceramic tubes and transducers[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2022, 151(1): 434-442.
- [23] LIU F R, ZOU H X, ZHANG W M, *et al.* Y-type three-blade bluff body for wind energy harvesting[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112(23): 233903.
- [24] 杜小振, P.A.MBANGO-NGOMA, 常恒, 等. 流致涡激振动压电发电风能采集技术模拟研究[J]. *振动与冲击*, 2022, 41(23): 168-174.
- DU X Z, P. A. M N, CHANG H, *et al.* Wind energy collection technology simulation with flow-induced VIV piezoelectric film for power generation [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2022, 41(23): 168-174. (in Chinese)
- [25] LIAO W L, HUANG Z J, SUN H, *et al.* Numerical investigation of cylinder vortex-induced vibration with downstream plate for vibration suppression and energy harvesting [J]. *Energy*, 2023, 281: 128264.

作者简介:



张忠华(1980—), 吉林松原人, 男, 博士、教授、硕士生导师, 2009年于大连理工大学获得博士学位。主要研究方向为能量收集技术、压电传感器与驱动器技术、智能结构与系统。E-mail: zhangzhzh@zjnu.edu.cn

通讯作者:



阎君武(1965—), 男, 吉林榆树人, 博士, 教授, 博士生导师, 1991年、2000年于吉林工业大学分别获得学士学位和硕士学位, 2003年于吉林大学获得博士学位, 2005年中国科学院长春光机所博士后出站, 主要从事压电驱动器、能量回收与自供电技术、精密机械与微小机械等方面研究。E-mail: jut-kjw@163.com