

DOI: 10.3901/JME.2022.20.120

风向自适应型涡激振动压电俘能器的试验研究^{*}

侯成伟¹ 单小彪¹ 宋汝君² 谢 涛¹

(1. 哈尔滨工业大学机器人技术与系统国家重点实验室 哈尔滨 150001;
2. 山东理工大学机械工程学院 淄博 255049)

摘要: 风能在自然界中是一种储量丰富、可持续利用的清洁能源。利用压电俘能器将风能转换为电能代替传统化学电池为低功耗电子设备持续供电已经获得了国内外学术和工业领域的认可。针对自然环境中风场的风向和速度时变特点,提出一种新颖的风向自适应型涡激振动压电俘能器。本俘能器可以根据风向的变化,自主调节迎风角度,从而使得俘能器能够在不同方向来风激励时拥有良好的输出性能。其主要由两个L型压电俘能梁、轴承底座、旋转固定座、导向翼等部分组成。通过搭建的小型风洞测试系统,对俘能器样机进行了测试和分析:受不同方向来风激励时,俘能器的输出功率绝对积分面积的平均相对偏差不大于6.1%;俘能器的风向自适应开启状态相对关闭状态,两个压电俘能梁的输出功率绝对积分面积平均值分别提升了468.2%和492.3%。自适应型压电俘能器的研究结果对提高俘能器的环境适应能力和增强输出性能有良好的参考价值。

关键词: 自适应; 涡激振动; 压电; 俘能; 风能

中图分类号: TM619

Experimental Study of Orientation Adaptive Piezoelectric Energy Harvester Based on Vortex Induced Vibration

HOU Chengwei¹ SHAN Xiaobiao¹ SONG Rujun² XIE Tao¹

(1. State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001;
2. School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049)

Abstract: Wind energy is a kind of clean energy with rich reserves and sustainable utilization in nature. It has been recognized in domestic and foreign academic and industrial fields that piezoelectric energy harvester(PEH) can take place traditional chemical battery to continuously supply power for low-power electronic equipment. For overcoming the time-varying characteristics of wind direction and velocity in nature, a novel orientation adaptive piezoelectric energy harvester based on vortex-induced vibration is proposed. The energy harvester can autonomously adjust the windward angle according to the change of wind direction. It mainly composes two L-shaped parts (EH1, EH2), bearing base, rotating fixed seat, and guide wing. And the prototype of the energy harvester is tested and analyzed: when excited by wind from different directions, γ is no more than 6.1%; Comparing close state of orientation adaptive, S_{AVG} of open state is increased by 468.2% and 492.3% for EH1 and EH2 respectively. The results of the proposed orientation adaptive PEH have a good reference value for improving the environmental adaptability and output performance of harvesters.

Key words: orientation adaptive; vortex-induced vibration; piezoelectricity; energy harvesting; wind energy

0 前言

近年来,从自然环境中直接获取能量的俘能器

作为传统化学电池的潜在自供电替代品引起了许多学者的关注。因此,自然环境中的各种能源,如太阳能、地热能、风能和潮汐能,已被用于电能转换^[1-3]。其中风能是一种可持续利用的清洁能源,可以通过压电^[4-6]、电磁^[7-9]、静电^[10-12]和摩擦电^[13-14]等采集机制收集并转化环境能量为电能。它可广泛

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51875116, 51705296)。20220323 收到初稿,20220829 收到修改稿

应用于微机电系统、便携式和无线传感器等低功耗电子器件领域。风致振动^[15]主要包括三种典型类型: 涡激振动^[16-18]、驰振^[19-21]和颤振^[22-24]。为了捕获由风引起的振动能量, 压电俘能器得到了广泛的研究^[25]。WANG 等^[26]提出了一种基于驰振的三稳态压电俘能器。通过引入非线性磁力, 俘能器的输出性能优于传统的驰振式俘能器。他们还提出了涡激振动和驰振相互耦合的压电俘能器, 并通过引入非线性磁力改进了俘能器的性能^[27]。LI 等^[28]通过引入一对磁铁来提高颤振式俘能器的输出性能, 获得了更低的起始风速, 拓宽了有效风速范围。除压电式俘能器外, 还有一些电磁式俘能器用于风能捕获。ZHANG 等^[29]设计了绕流刚体横截面形状为 Y 形的电磁俘能器, 建立了数学模型并通过试验证明了数学模型的准确性和可靠性。该俘能器在风速为 4 m/s 时, 平均输出功率可以达到 2.5 mW。HALIM 等^[30]提出了一种电磁式旋转俘能器, 用以捕获人类行走时的关节的转动能量。WU 等^[31]设计了一种结合摩擦电与电磁式能量采集机制的水波俘能器。试验测试了在 162 s 内, 超级电容器可充电至 1.84 V, 电能存储量约为 1.64 mJ。对于摩擦电纳米俘能器, WANG 等^[32]提出了一种耐湿的旗型摩擦电纳米俘能器, 可以用于风速和风向感知。

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, 但是大多是研究单一风向激励下俘能器的输出特性, 对于面对风向时变的来风激励下的压电俘能器特性还不清楚。而且在自然环境中, 风向随时间和不同地理条件会发生变化, 只受单一风向激励的俘能器不能较好地应对现实环境中的风场。因此, 探索一种可以实现俘能器自主调节迎风角度的方法, 来解决时变风向的风场有效俘能问题, 是具有一定的社会价值和研究意义的。为此, 本文提出了一种风向自适应型涡激振动压电俘能器, 通过试验探究其自主调节迎风角度性能和功率输出特性。

1 风向自适应型俘能器模型

以圆柱体作为风的绕流刚体, 提出了风向自适应的涡激振动式压电俘能器, 如图 1 所示。俘能系统主要由轴承底座、旋转固定座、压电梁、导向翼、圆柱组成, EH1 代表左侧的俘能器, EH2 为右侧的俘能器。L 型的压电梁固定在旋转固定座上, 旋转固定座上的转轴连接在有一对深沟球轴承的底座中。当来风吹向俘能装置时, 导向翼会在其两侧产

生压力差, 从而能够根据风向自动调节系统的迎风角度, 其原理如图 2 所示。由于导向翼旋转过程中会受到摩擦力等因素的影响, 只有导向翼受到的激励转矩(M_w)大于受到的摩擦转矩(M_f), 导向翼才会发生旋转, 实现自动调节迎风角度^[33], 表达式如下

$$M_w > M_f \quad (1)$$

式中, M_w 和 M_f 表达式可以表示为

$$M_w = \rho U^2 \cos \alpha / 2 \cdot A \quad (2)$$

$$M_f = \mu F_{load} d / 2 \quad (3)$$

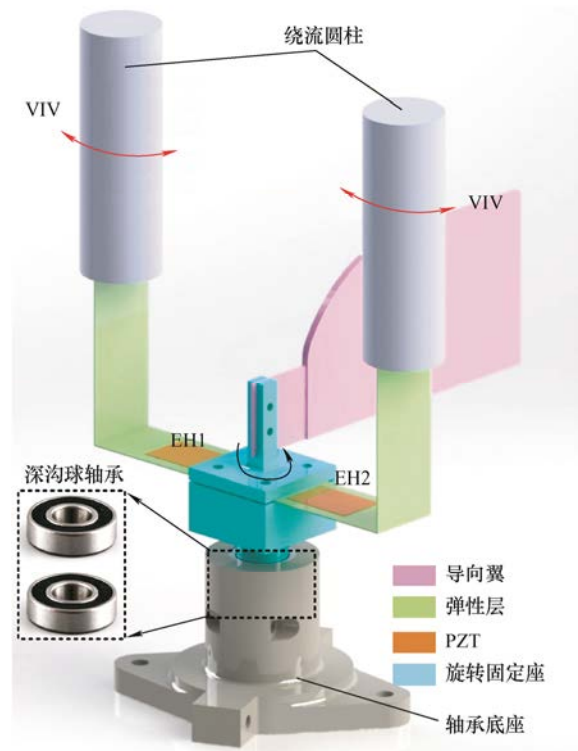


图1 自适应型涡激振动压电俘能器模型

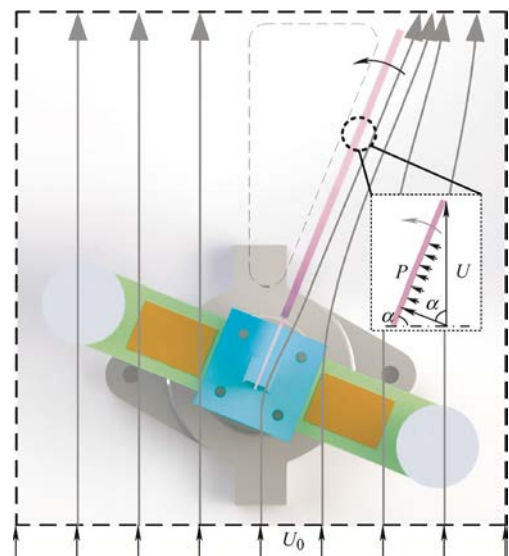


图2 导向翼工作原理图

式中, ρ 为空气的密度, U 为风速, A 为导向翼面积, μ 为摩擦因数, F_{load} 为轴承载荷, d 为轴承的内径。

导向翼根据风向调整俘能器的迎风角度后, 在一定风速范围内, 绕流圆柱刚体会在风场中发生涡激振动, 振动方向沿着弹性层的法线方向。可以预见在振动过程中, L 型弹性梁的长短两段梁都会发生弹性变形。压电材料的正压电效应与其受到的弹性应变存在紧密联系。因此, 利用仿真软件来分析 L 型弹性梁在图 1 的固定方式下, 其弹性应变的情况, 其结果如图 3 所示。仿真过程中俘能系统选取的结构和材料参数如表 1 所示, 并且圆柱表面受到的简谐力幅值设定为 0.2 N。从图中可以得到压电片粘贴于弹性梁的水平部分的弹性应变要高于其竖直部分的弹性应变。因此, 俘能系统的试验测试与分析中将主要分析压电片粘贴在 L 型梁水平部分的情况。

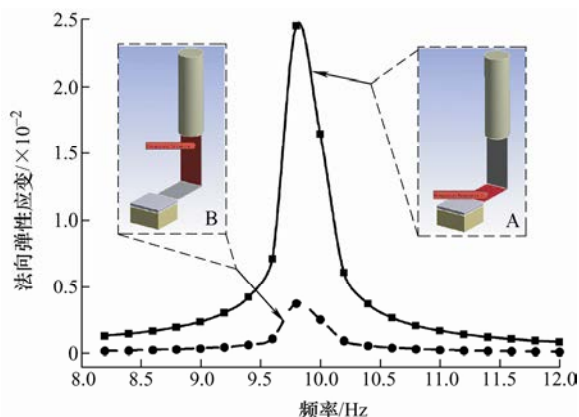


图 3 L 型梁不同表面的弹性应变幅频特性

表 1 俘能系统的结构和材料主要参数

项目	材料	参数	数值
L 型梁	铝	长 L_{b1}/mm	55
		长 L_{b2}/mm	67
		长 L_{b3}/mm	33
		宽 w_b/mm	30
		厚 h/mm	0.4
		密度 $\rho_s/(\text{kg/m}^3)$	2 700
		弹性模量 E_s/GPa	69
圆柱刚体	泡沫	直径 D/mm	30
		高度 L_c/mm	100
PZT	锆钛酸铅	密度 $\rho_p/(\text{kg/m}^3)$	7 800
		弹性模量 E_p/GPa	58
		长 L_p/mm	30
		宽 w_p/mm	20
		厚 h_p/mm	0.3

2 试验测试与分析

2.1 小型风洞测试系统

为了测试所提出的风向自适应型压电俘能器, 设计了小型风洞测试系统, 如图 4 所示。图中所设计的风洞可以在测试段保持稳定均匀的风速。风洞测试段的风速调节范围为 0~20 m/s。俘能系统的轴承底座固定在测试段中的安装板上, 轴承底座上方装有刻度盘, 方便读出导向翼的旋转角度。试验中数据采集设备包括 NI 采集卡、风速仪以及便携式计算机, 用以采集、显示以及记录俘能系统的实时输出电压。轴承底座的材料为树脂, 通过 3D 打印制作而成。刻度盘为不锈钢材质, 最小刻度为 1° , 其中 0° 刻度线平行于风洞测试段的侧壁, 中心与俘能系统旋转中心在同一条轴线上。刻度盘安装在亚克力板制成的盘架上。

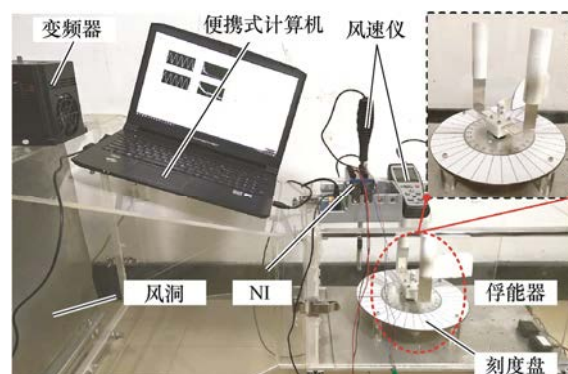


图 4 小型风洞试验测试系统

2.2 俘能器性能分析

通过第 2.1 节的小型风洞测试系统, 该节对风向自适应压电俘能器进行了试验测试。主要对风场风速、外接电阻、导向翼与风向不同夹角等因素对俘能系统输出性能影响的研究。如图 5 所示, 通过改变俘能系统的外接电阻, 绘制出俘能系统输出功率与外接电阻之间的关系。从图中的变化趋势可以得到俘能器的最优外接电阻值(R_{op})大约为 200 k Ω , 最优激励风速大约为 2.2 m/s。

将风场的风速固定为 2.4 m/s, 采集到俘能系统的输出电压(U_{RMS})随外接电阻的变化情况如图 6a 所示。随着外接电阻的逐渐增加, 输出的电压值趋于平稳。取外接电阻值为 200 k Ω 时, 俘能系统在 30~31 s 时的实时电压(U_{RT})变化情况。虚线代表 EH1 的实时电压, 实线表示 EH2 的实时电压。从实时电压曲线可以得到, 两个俘能器之间的振动并不是同相位振动, 而是相差了 π 。图 6b 为实时电压的相位图,

数据点呈现为单圆环状, 表明俘能系统中圆柱刚体振动表现为极限环振荡 (Limit-cycle oscillation, LCO)。

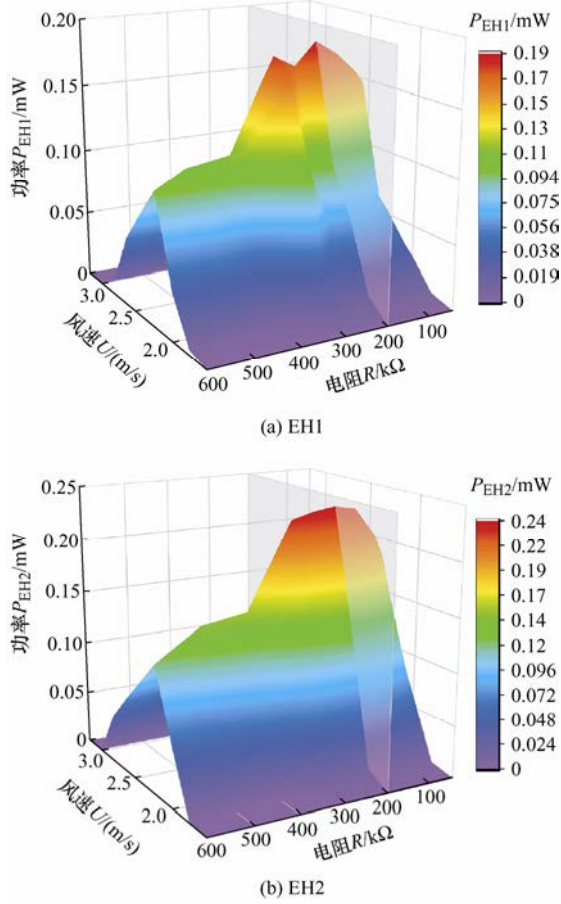


图5 不同风速时输出功率与外接电阻的三维关系图

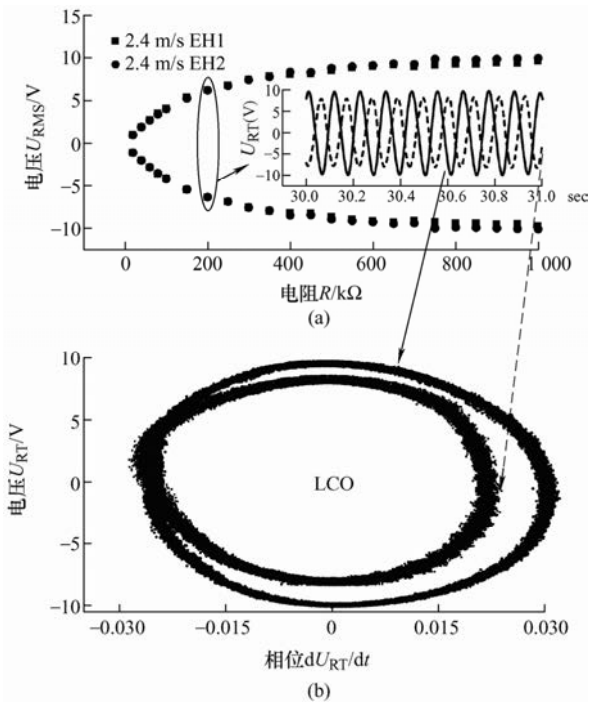


图6 在 2.4 m/s 时 RMS 电压随电阻变化曲线和相位图

同时, 在风场风速分别为 2.6 m/s 和 2.8 m/s 时, 试验采集到不同外接电阻下俘能系统的实时输出电压, 如图 7 所示。图 7a 中的 RMS 电压值随电阻变化的趋势与图 7b 相似, 即随着外接电阻值的增加先增加后趋于平稳。并且, 在相同时间段内, EH1 和 EH2 在不同外接电阻值下的实时电压相位差都为 π 。因此, EH1 和 EH2 之间的电路接线不能简单地串/并联处理。

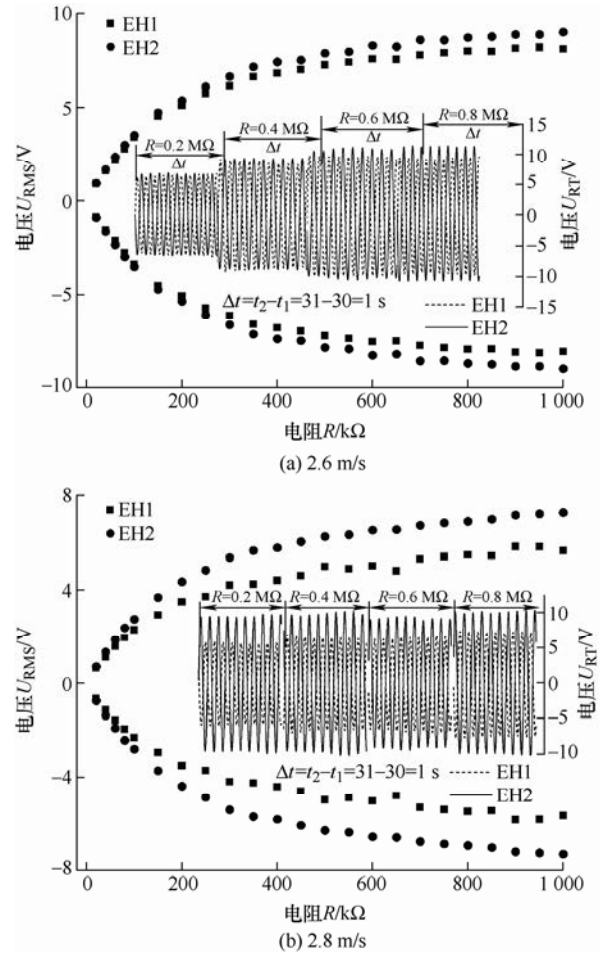


图7 在 2.6 m/s 和 2.8 m/s 时 RMS 电压随电阻变化曲线图

从上述试验结果可以得出, 尽管 EH1 和 EH2 两者的各个参数非常接近, 但是他们的输出功率总存在差距。为了进一步分析 EH1 和 EH2 之间的这种差别, 绘制了图 8 的数据分析图。图 8a 中的周向坐标表示外接电阻的阻值, 径向厚度表示 EH1 和 EH2 的 RMS 电压差值。从图中每条 ΔU_{RMS} (EH1 和 EH2 的 RMS 电压差值) 带的周向变化趋势, 可以得到, 随着外接电阻值的增加, ΔU_{RMS} 的值越大; 观察每条 ΔU_{RMS} 带的径向厚度变化, 在一定风速范围内, 更高的风速会加剧两个俘能器之间的输出差异。对于此, 图 8b 的小提琴图可以更加清晰地展示风速对两个俘能器的输出影响。当风速为 2.4 m/s

时, ΔU_{RMS} 主要分布在 0.5 V 以下的区域, 风速为 2.6 m/s 时, 其主要分布在 0.5~0.8 V, 当风速为 2.8 m/s 时, 其主要分布在 1.75 V 以上。

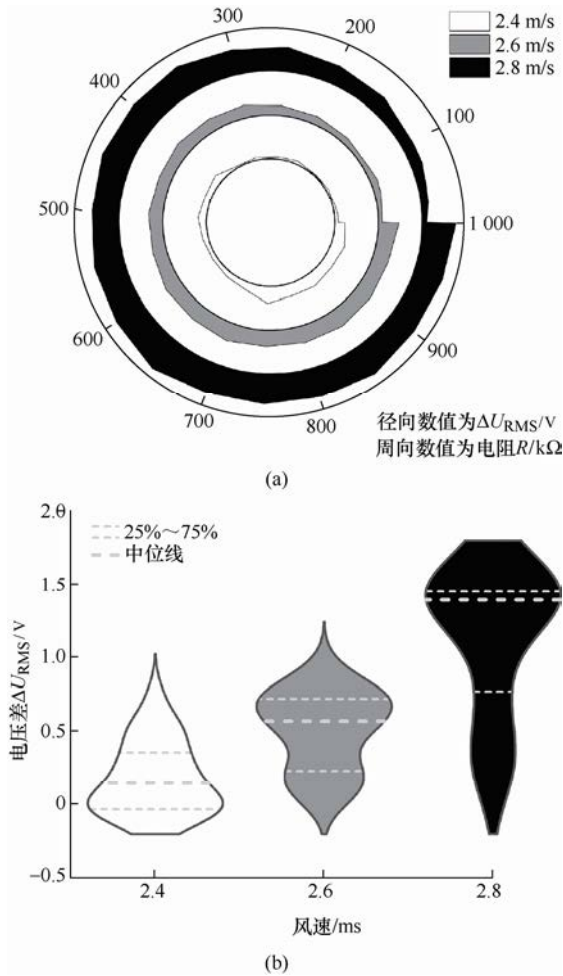


图 8 不同风速时 EH1 和 EH2 之间 RMS 电压差数据分布图

2.3 试验验证压电贴片位置

在第 1 节中, 通过软件仿真分析了圆柱侧面受到简谐力时, L 型弹性梁两个部分的弹性应变关系。图 9 通过试验分别测试了压电片粘贴在 L 型弹性梁两个平面时的输出电压, 得到它们的功率-风速曲线, 结果验证了仿真预测贴片位置的正确性。

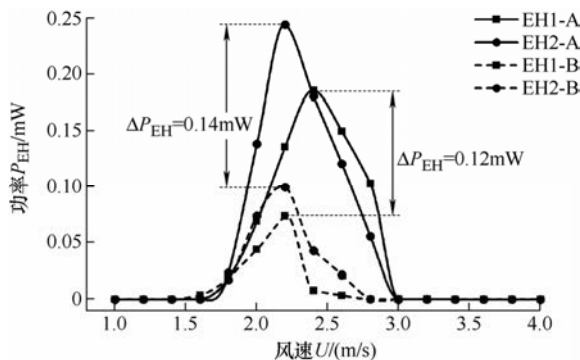


图 9 压电片不同粘贴位置的功率对比图

2.4 风向自适应性能分析

自然环境中的风能储量丰富, 是一种理想的清洁能源, 但是自然界中的风是时刻变化的。最为明显的特点之一就是风向不唯一。本节将通过试验测试, 来分析其风向自适应性能。

定义: ① β 为导向翼与风场风向夹角; ② S 为俘能系统输出功率与风速的关系曲线对功率等于 0 的绝对积分面积^[28]; ③ 以不同夹角 β 来模拟环境风的不同方位来风。

以夹角 $\beta = 0^\circ$ (即导向翼与顺风向平行) 时绝对积分面积 S_0 的值为基准, 不同夹角下俘能器的绝对积分面积 S 与基准 S_0 的相对偏差 (γ) 为评判标准, 即 γ 越小, 俘能器自适应性能越好, 计算公式如下

$$\gamma = \frac{|S - S_0|}{S_0} \times 100\% \quad (4)$$

$$P_{\text{EH}} = \frac{U_{\text{RMS}}^2}{R} \quad (5)$$

$$S = \int_{U_1}^{U_2} f_{\text{EH}}(U) dU \quad (6)$$

式中, U_1 和 U_2 分别为试验测试中起始和结束风速, 函数 $f_{\text{EH}}(U)$ 为功率-风速曲线。通过试验测量采集到不同夹角 β 时的俘能器实时输出电压, 得到 U_{RMS} , 然后根据式(5)求得相对应的功率 P_{EH} , 最后根据积分式(6)以及式(4), 得到所需的绝对积分面积 S 和相对偏差 γ , 结果如图 10 所示。

从图 10 右上角的绝对积分面积图中, 可以得到俘能系统在不同夹角时, 输出性能较为稳定, 没有出现积分面积突变的情况。同时, 从相对偏差的角度来分析, 系统不同夹角时的相对偏差低于 15%, 且 EH1 和 EH2 的平均相对偏差分别约为 6.1% 和 2.3%。因此, 可以认为该压电俘能器的自适应性能良好, 面对不同方向来风时, 可以自动调节迎风角度平稳地收集风能并转换为电能。

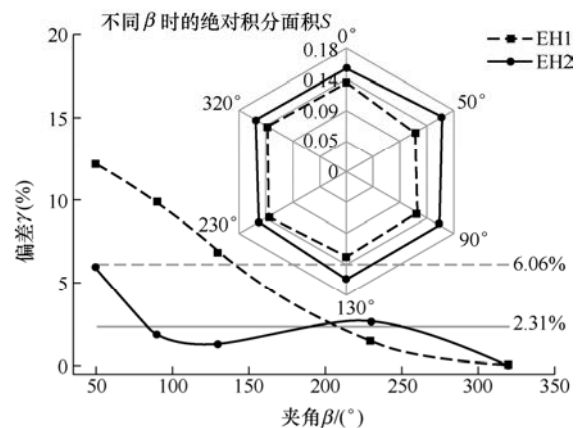


图 10 不同夹角下的绝对积分面积 S 与其对应的相对偏差 γ

图 11a 内容展示的是俘能系统旋转轴固定时, 不同夹角下系统输出功率的绝对积分面积。除了夹角为 0° 时, 系统可以输出良好的功率之外, 其他角度下系统几乎没有功率输出, 如图 11a 右侧放大图所示。图 11b 给出了各个角度下系统输出功率的绝对积分面积(S_{SUM})之和以及均值(S_{AVG})。通过对比俘能系统转轴固定(风向自适应关闭)和正常旋转(风向自适应开启)两种状态下的 S_{SUM} 和 S_{AVG} 可以发现, 该风向自适应俘能系统拥有良好的输出性能, 相对于风向自适应关闭状态下, EH1 和 EH2 输出性能分别提升了 468.2% 和 492.3%。

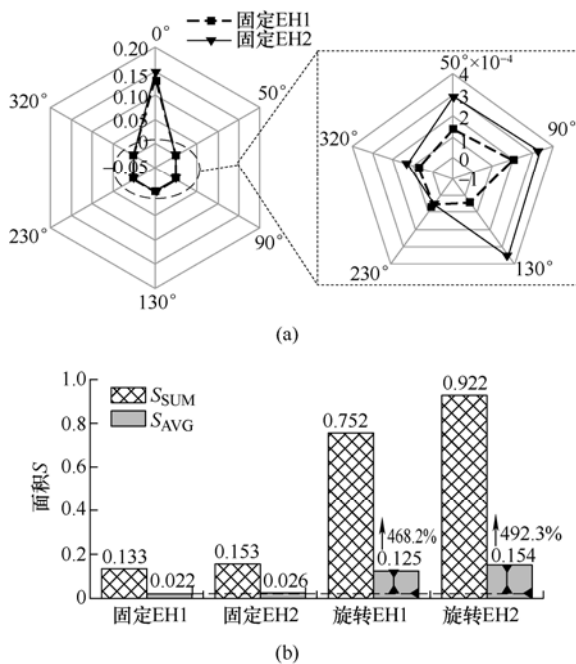


图 11 俘能器旋转轴固定时不同夹角下的绝对积分面积 S

同时, 通过试验测试了该自适应型压电俘能器的实际工作能力, 如图 12a 所示。图中包含小型风洞、俘能器、桥式整流电路、传感器。俘能器的连接了桥式整流电路的交流输入端, 其直流输出端连接了传感器。传感器包含了温度传感器、湿度传感器以及时钟。风机启动 1 s 后传感器的显示器没有任何数据, 在第 16 s 后, 显示器开始出现数据, 在第 24 s 后, 显示器上的数据显示清晰。图 12b 展示了该俘能器的潜在应用场景。环境中的风经过图中场景时, 俘能器可以将其转换为电能为一些传感器功能, 这些传感器可以监测桥梁、轨道等的某些参数, 然后通过网络发送到终端, 相关人员可以实时监测到这些参数, 对相关紧急问题可以迅速地做出应对措施, 降低风险。

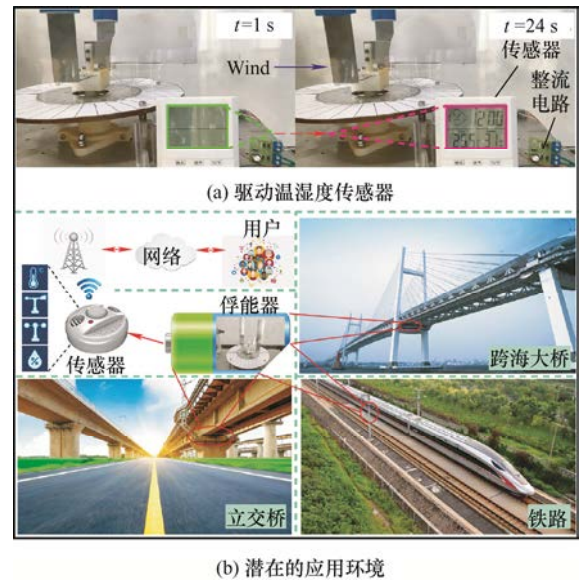


图 12 俘能器的应用

3 结论

本文提出了一种风向自适应型压电俘能器, 包含两个俘能子模块(EH1 和 EH2)。俘能器可以根据来风方向的不同, 调节自身的迎风角度, 捕获来风绕流圆柱刚体时的涡激振动能。通过搭建的小型风洞测试系统, 对俘能器样机进行了测试和分析。试验结果表明:

(1) 风向自适应型压电俘能器能够在不同方向来风下良好地工作。以风向与俘能器导向翼夹角(β)为 0° 时的输出功率的绝对积分面积为基准(S_0), 其他夹角下俘能器输出功率的绝对积分面积 S 对 S_0 的平均相对偏差不大于 6.1%。

(2) 风向自适应大幅度提高了基于涡激振动压电俘能器的环境适应能力和输出性能。俘能器风向自适应开启状态下, EH1 和 EH2 输出功率绝对积分面积的平均值(S_{AVG})相对于风向自适应关闭时分别提高了 468.2% 和 492.3%。

(3) 在一定的风速和外接电阻范围内, 风速越大, 外接电阻越大, EH1 和 EH2 的输出电压(U_{RMS})的差值越大, 但是实时电压中(U_{RT})的相位总是相差 π 。

本文的研究成果可以为进一步设计能量转换高效、适应能力强的流致振动(风、水)压电俘能器提供重要的研究基础, 对加快其在实际中应用具有良好的参考价值。

参 考 文 献

- [1] PEARRE N, SWAN L. Combining wind, solar, and in-stream tidal electricity generation with energy storage

- using a load-perturbation control strategy[J]. *Energy*, 2020, 203: 117898-1179010.
- [2] TIAN X, MEYER T, LEE H. et al. Sustainable design of geothermal energy systems for electric power generation using life cycle optimization[J]. *AIChE Journal*, 2019, 66 (4): 1-18.
- [3] CHEN S, EAGER D, ZHAO L. Enhanced frequency synchronization for concurrent aeroelastic and base vibratory energy harvesting using a softening nonlinear galloping energy harvester[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2021, 33 (5): 1-16.
- [4] 王淑云, 朱雅娜, 阚君武, 等. 旋磁激励式预弯梁压电俘能器建模仿真与试验[J]. *机械工程学报*, 2020, 56 (14): 224-230.
- WANG Shuyun, ZHU Yana, KAN Junwu, et al. Prebending-cantilever piezo-harvester excited by rotary magnet[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56 (14): 224-230.
- [5] XIE X, ZHANG J, WANG Z, et al. An experimental study on a high-efficient multifunctional U-shaped piezoelectric coupled beam[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 224: 113330-113344.
- [6] ZHAO L, YANG Y. An impact-based broadband aeroelastic energy harvester for concurrent wind and base vibration energy harvesting[J]. *Applied Energy*, 2018, 212: 233-243.
- [7] GU Y, LIU W, ZHAO C, et al. A goblet-like non-linear electromagnetic generator for planar multi-directional vibration energy harvesting[J]. *Applied Energy*, 2020, 266: 114846-114864.
- [8] FAN K, LIU J, WEI D, et al. A cantilever-plucked and vibration-driven rotational energy harvester with high electric outputs[J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 244: 114504-114516.
- [9] FAN K, WANG C, CHEN C, et al. A pendulum-plucked rotor for efficient exploitation of ultralow-frequency mechanical energy[J]. *Renewable Energy*, 2021, 179: 339-350.
- [10] GUO X, ZHANG Y, FAN K, 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: 112264-112276.
- [11] 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.
- [12] ZHANG Y, WANG T, ZHANG A, et al. Electrostatic energy harvesting device with dual resonant structure for wideband random vibration sources at low frequency[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(12): 125001-125009.
- [13] TAO K, YI H, YANG Y, et al. Miura-origami-inspired electret/triboelectric power generator for wearable energy harvesting with water-proof capability[J]. *Microsyst Nanoeng*, 2020, 6(56): 1-11.
- [14] ZHAO C, YANG Y, UPADRASHTA D, et al. Design, modeling and experimental validation of a low-frequency cantilever triboelectric energy harvester[J]. *Energy*, 2021, 214: 118885-118895.
- [15] MA X, ZHOU S. A review of flow-induced vibration energy harvesters[J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 254: 115223-115249.
- [16] WANG J, HU G, SU Z, et al. A cross-coupled dual-beam for multi-directional energy harvesting from vortex induced vibrations[J]. *Smart Materials and Structures*, 2019, 28 (12): 1-10.
- [17] NASEER R, DAI H L, ABDELKEFI A, et al. Piezomagnetoelastic energy harvesting from vortex-induced vibrations using monostable characteristics[J]. *Applied Energy*, 2017, 203: 142-153.
- [18] DAI H L, ABDELKEFI A, YANG Y, et al. Orientation of bluff body for designing efficient energy harvesters from vortex-induced vibrations[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108 (5): 053902-053907.
- [19] TAN T, HU X, YAN Z, et al. Enhanced low-velocity wind energy harvesting from transverse galloping with super capacitor[J]. *Energy*, 2019, 187: 115915-115928.
- [20] HU G, WANG J, SU Z, et al. Performance evaluation of twin piezoelectric wind energy harvesters under mutual interference[J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 115 (7): 073901-073905.
- [21] 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: 107301-107322.
- [22] 田海港, 单小彪, 张居彬, 等. 翼型颤振压电俘能器的输出特性研究[J]. *力学学报*, 2019, 51(4): 1148-1155.
- TIAN Haigang, SHAN Xiaobiao, ZHANG Jubin, et al. Output characteristics investigation of airfoil-based flutter piezoelectric energy harvester[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2019, 51(4): 1148-1155.

- [23] LI K, YANG Z, GU Y, et al. Nonlinear magnetic-coupled flutter-based aeroelastic energy harvester: Modeling, simulation and experimental verification[J]. *Smart Materials and Structures*, 2019, 28 (1): 015020-015035.
- [24] LI Z, ZHOU S, YANG Z. Recent progress on flutter - based wind energy harvesting[J]. *International Journal of Mechanical System Dynamics*, 2022, 2 (1): 82-98.
- [25] FANG S, ZHOU S, YURCHENKO D, et al. Multistability phenomenon in signal processing, energy harvesting, composite structures, and metamaterials: A review[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 166: 108419-10480.
- [26] WANG J, GENG L, ZHOU S, et al. Design, modeling and experiments of broadband tristable galloping piezoelectric energy harvester[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2020, 36: 592-605.
- [27] YANG K, QIU T, WANG J, et al. Magnet-induced monostable nonlinearity for improving the VIV-galloping-coupled wind energy harvesting using combined cross-sectioned bluff body[J]. *Smart Materials and Structures*, 2020, 29 (7): 1-12.
- [28] LI K, YANG Z, ZHOU S. Performance enhancement for a magnetic-coupled bi-stable flutter-based energy harvester[J]. *Smart Materials and Structures*, 2020, 29: 085045-085062.
- [29] ZHANG L B, DAI H L, ABDELKEFI A, et al. Theoretical modeling, wind tunnel measurements, and realistic environment testing of galloping-based electromagnetic energy harvesters[J]. *Applied Energy*, 2019, 254: 113737-113749.
- [30] HALIM M A, RANTZ R, ZHANG Q, et al. An electromagnetic rotational energy harvester using sprung eccentric rotor, driven by pseudo-walking motion[J]. *Applied Energy*, 2018, 217: 66-74.
- [31] WU Z, GUO H, DING W, et al. A hybridized triboelectric-electromagnetic water wave energy harvester based on a magnetic sphere[J]. *ACS Nano*, 2019, 13: 2349-2356.
- [32] WANG Y, YANG E, CHEN T, et al. A novel humidity resisting and wind direction adapting flag-type triboelectric nanogenerator for wind energy harvesting and speed sensing[J]. *Nano Energy*, 2020, 78: 105279-105288.
- [33] GONG Y, SHAN X, LUO X, et al. Direction-adaptive energy harvesting with a guide wing under flow-induced oscillations[J]. *Energy*, 2019, 187: 115983-115990.
-
- 作者简介: 侯成伟, 男, 1992 年出生, 博士研究生。主要研究方向为振动俘能。
E-mail: hcwking@163.com
- 单小彪(通信作者), 男, 1977 年出生, 博士, 副教授, 博士研究生导师。主要研究方向俘能技术、抑振技术、超声波振动拉丝技术、超声波振动减阻技术、航空航天仿真装备。
E-mail: shanxiaobiao@hit.edu.cn