

文章编号 1004-924X(2019)05-1121-07

间接激励式压电风力俘能器

王淑云, 严梦加, 阚君武*, 张忠华, 陈松, 吕鹏
(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:为提高环境监测自供电系统的可靠性及风速适应性,提出一种间接激励式压电风力俘能器,通过圆柱型壳体与风场耦合作用产生的涡激振动间接激励壳体内部的压电梁振动发电,具有可靠性高、动态特性调节范围宽等优点。介绍了其结构及原理,并进行了理论和试验研究。结果表明:壳体质量、压电梁质量对风力俘能器输出性能都有较大影响;当俘能器总质量确定时,试验范围内通过增加压电梁质量,减小壳体质量可以有效提高压电俘能器的输出性能;此外,不同风速下存在最佳负载使输出功率最大,且本文试验范围内输出功率及最佳负载均随风速增加而增大,风速为 28 m/s、电阻 600 k Ω 时所获得的最大输出功率为 0.4 mW。因此,应根据实际风速范围确定合理的压电梁质量/壳体质量以提高俘能器输出能力。

关键词:间接激励;压电发电;风力俘能器

中图分类号: TN384; TK83 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20192705.1121

Study of piezoelectric wind energy harvester with indirect excitation

WANG Shu-yun, YAN Meng-jia, KAN Jun-wu*, ZHANG Zhong-hua, CHEN Song, LÜ Peng

(*Institute of Precision Machinery and Smart Structure,
Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China*)
* Corresponding author, E-mail: jutkjw@163.com

Abstract: To improve the reliability and bandwidth of self-powered systems for environmental monitoring, a piezoelectric wind energy harvester with indirect excitation was presented. The piezoelectric beam in the shell was excited by the turbo-excited vibration generated by the coupling of the cylinder shell and wind. The proposed harvester had the advantages of high reliability and a wide dynamic adjustment range. This study introduced its structure and the principles of its operation while conducting theoretical and experimental research. The results show that the shell mass and piezoelectric beam quality have considerable influence on the output voltage of the energy harvester. Specifically, the output voltage increased with an increase in piezoelectric beam quality and decrease in shell mass. In addition, an optimal load was determined to maximize the output power under different wind speeds. The output power and optimal load were found to increase with increasing wind speed. When the wind speed is 28 m/s and the external resistance is 600 k Ω , the maximum output power is 0.4 mW under test conditions. Therefore, a reasonable shell mass and piezoelectric beam quality should be de-

收稿日期: 2018-10-15; **修订日期:** 2018-12-17.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 61574128, No. 51377147, No. 51577173, No. 51877199)浙江省自然科学基金资助项目(No. LY17F010004, No. LY16F010003)国家级大学生创新创业训练计划资助项目(No. 201810345036)

terminated based on the actual range of wind speed to improve the capacity of the capture device.

Key words: indirect excited; piezoelectric power generation; wind energy harvester

1 引言

随着各类无线传感监测网络的发展与需求,利用压电、电磁等原理构造的微型能量俘能器(亦称俘能器、捕获器等)的研究已逐渐成为国内外的热点,压电俘能器因其结构简单、无电磁干扰、易于制作/实现微小化与集成化、尤其在自然环境下可产生较高的电压等优点,相较于电磁式、静电式等俘能方式适用范围更广^[1-4]。目前,利用压电俘能器可回收的能量包括人的肢体/器官运动能、环境振动能、旋转体动能以及流体能等^[5]。在自然生产活动及海洋环境中,通过回收流体能构造自供电无线传感器网络节点较为理想^[6-7]。

现有的自激振动式压电流体俘能器大都基于涡激振动理论^[8],根据流体特性及压电梁激励方式,自激式振动流体俘能器可归为三类:(1)脱涡致振型^[9-10],压电梁与流体流向成一定夹角安装,流体经过时旋涡的交替生成与脱落使压电梁前后两侧流体压力交替变化,从而进行往复弯曲振动并发电;(2)尾涡扰流致振型^[11-12],压电梁与流速方向平行安装,圆柱形钝体置于压电梁前方且其轴线与风速方向垂直,流体流经钝体时所生成的旋涡迫使压电梁弯曲振动并发电;(3)钝体拖动致振型^[13-14],压电梁自由端装有钝体,压电梁平面与风速方向平行,流体流经钝体时产生的升力(方向与流体速度方向垂直)使钝体产生往复摆动并带动压电梁变形发电。上述三类流体俘能器都有其自身特色和应用场合,其共性是压电梁与流体直接耦合作用发电,存在的弊端是:(1)压电梁自身动态特性调节范围有限,环境(流体黏度、速度等)适应性差;(2)可靠性低,压电梁由流体直接激励且流速较大时压电梁会因变形过大而损毁。显然,现有自激振动式流体俘能器的结构原理、可靠性等都无法满足环境流体发电的需求,尤其不适用于风速变化范围大的自然环境中。

本文提出一种间接激励式压电风力俘能器,通过风力间接激励压电梁实现流体能、振动能及电能间非接触式传递,具有可靠性高(间接激励压电梁,防止因变形大而损坏),动态特性调节范围

宽、流体适应性强(易于通过附加质量及刚度调节系统固有频率)等优点。进行了理论分析与试验研究,获得了壳体/压电梁质量对输出电压及功率的影响规律,证明了间接激励式压电风力俘能器的可行性。

2 风力俘能器的结构及工作原理

本文提出的间接激励式压电风力俘能器结构如图 1 所示,主要由壳体、弹簧、质量块一/二及压电梁构成,壳体水平放置并垂直于来流方向;在壳体及压电梁端部分别装有质量块一和质量块二,方便试验中调节壳体及压电梁质量。当流体流经弹性支承的壳体时,壳体上下两侧将产生卡门涡街^[15](如图 2),激励壳体进行自激振动并间接激励壳体中压电梁振动发电。当脱涡频率 f_s 与系统固有频率 f_n 相近时,俘能器将产生共振,压电梁振幅及发电量较大。

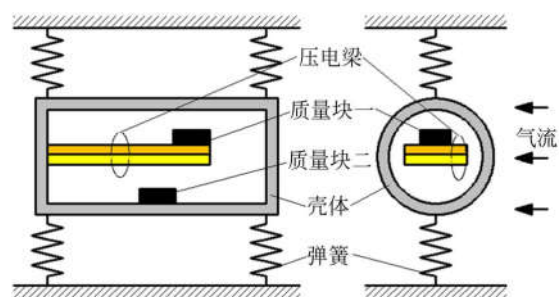


图 1 风力俘能器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of wind energy harvester

根据流体动力学理论,将作用在壳体上的脱涡激振力在垂直于流动方向上的分力定义为升力,而将在流动方向上的分力定义为阻力(同升力相比阻力较小,两者相差一个数量级,通常建模时可忽略其对结构的影响),升力及脱涡角频率可表示为^[7]:

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho v^2 D \cos \omega_s t, \quad (1)$$

$$\omega_s = 2\pi f_s, \quad (2)$$

式中: ρ 为空气密度, D 为壳体直径, v 为风速, C_L 为与雷诺数 $\left[Re = \frac{\rho v D}{\mu}\right]$ 及壳体直径相关的升力系

数, μ 为流体的运动学粘性系数, $f_s = \frac{S_t v}{D}$ 为脱涡频率, S_t 为与雷诺数相关的 Strouhal 数。由于不同雷诺数时脱涡形成的尾流区形状差异较大(如图 2 所示), 雷诺数对 F_L 及 S_t 都有较大的影响, 故可通过改变流速调节脱涡激振升力和脱涡频率。

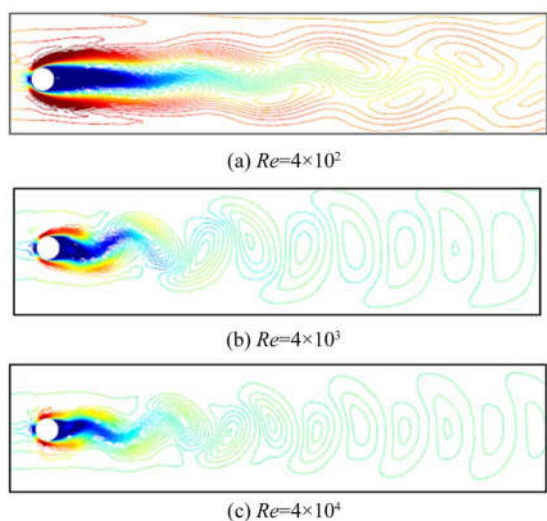


图 2 不同雷诺数下圆柱绕流的脱涡尾迹^[15]

Fig. 2 Decay of flow around cylinder under different Re

3 俘能器的激励与响应特性分析

根据振动分析理论, 压电梁的性能及发电能力主要由压电梁结构尺寸及动态响应决定的。虽然自激振动式压电流体俘能器已有较多的理论及试验成果可借鉴, 但是本文提出的间接激励式压电风力俘能器由气流脱涡引起的脱涡激振力实现壳体自激振动并间接激励压电梁, 压电梁与流体不直接耦合, 有关其动态响应及发电特性都鲜有报道, 故首先需要从理论上研究俘能器的响应特性。

根据机械振动理论^[16], 间接激励式压电风力俘能器模型可简化为二自由度弹簧-质量-阻尼系统, 其模型如图 3 所示, 将升力作为主要激振力, 俘能器的振动微分方程及位移为:

$$\begin{cases} F_L - k_1 y_1 - c_1 \dot{y}_1 - k_2(y_1 - y_2) - c_2(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) = m_1 \ddot{y}_1 \\ k_2(y_1 - y_2) + c_2(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) = m_2 \ddot{y}_2 \end{cases}, \quad (3)$$

$$\begin{cases} y_1 = \frac{(\omega_s^2 m_2 - k_2 - j\omega_s c_2) F_L}{|Z|} \\ y_2 = \frac{(-k_2 - j\omega_s c_2) F_L}{|Z|} \end{cases}, \quad (4)$$

式中: $Z_{ij} = k_{ij} - \omega_s^2 m_{ij} + j\omega_s c_{ij}$, m_1 和 m_2 分别为等效壳体质量(壳体初始质量+质量块一)和等效压电梁质量(压电梁初始质量+质量块二), k_1 和 k_2 为弹簧和压电梁等效刚度, c_1 和 c_2 为结构阻尼、流场附加阻尼总和与压电梁结构阻尼。

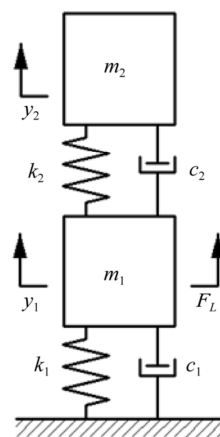


图 3 间接激励式压电风力俘能器的振动模型

Fig. 3 Vibration model of wind energy harvester

以往的研究^[9]表明, 压电梁的输出电压与其变形量成正比, 所生成的开路电压 V_g 、单次形变产生的电能 E_g 及输出功率 P_g 可分别写成:

$$V_g = \eta X_2, \quad (5)$$

$$E_g = \frac{C_f V_g^2}{2} f_s, \quad (6)$$

$$P_g = \frac{\omega_s C_f V_g^2}{4}, \quad (7)$$

式中: η 为与压电梁结构尺寸及材料性能参数相关的系数, X_2 为压电梁的变形量, C_f 为自由电容。上述公式表明, 俘能器的性能受压电梁结构及材料参数、壳体/压电梁质量、弹簧刚度等因素的影响, 但流场分布较为复杂且缺少 S_t , C_f 和 c_1/c_2 等关键系数来获得激振频率和激振幅值, 尚无法建立精确的解析模型; 本文将通过试验的方法研究系统质量及流速对俘能器的输出性能的影响。

4 试验测试与分析

为验证间接激励式压电风力俘能器原理的可

行性,获得压电梁质量、壳体质量及风速对输出电压及功率的影响规律,设计制作了图 4 所示的样机及测试系统,结构尺寸和相关参数见表 1。试验所用仪器设备为:DS5042M 型数字存储示波器、变频器(变频范围 0~50 Hz)、风机(额定转速 2 800 r/min)、风速仪、变阻器等;试验中通过调节变频器频率改变风速(经试验得二者呈较好的线性关系,测得 $v=0.6 f$),变频器步长 1 Hz,实际风速范围 0~31.8 m/s;基板材料为经热处理的铍青铜,压电陶瓷材料为 PZT-5H。

表 1 俘能器结构尺寸和试验参数

Tab. 1 Harvester structure size and constant parameters

参数	量值	参数	量值
压电梁长 l/mm	71	壳体长度 L/mm	160
压电梁宽 b/mm	19.5	壳体直径 D/mm	50
基板厚 h_m/mm	0.3	风道内径 D_0/mm	122
陶瓷厚 h_p/mm	0.2	壳体初始质量/g	90
弹簧刚度 $k_1/(\text{N}\cdot\text{m})$	200	压电梁初始质量/g	10

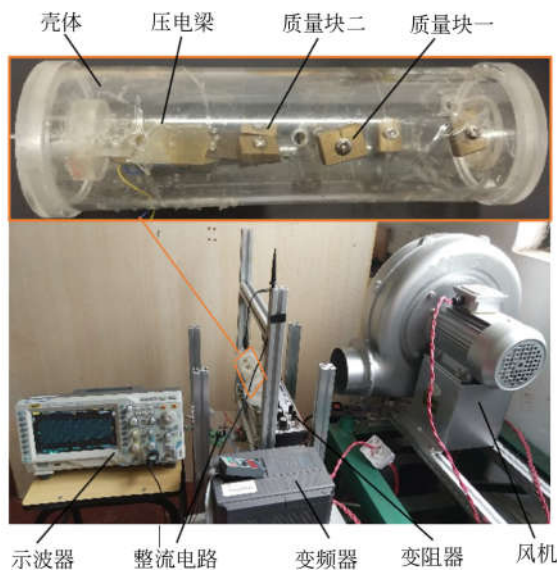


图 4 风力俘能器结构及测试系统

Fig. 4 Wind energy harvester and test system

试验中通过改变质量块一和二的质量调节壳体质量(m_1)和压电梁质量(m_2),在壳体上均布质量块一使壳体受力均匀。为了研究风力俘能器的振动响应,本文通过快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)对采集的波形数据进行频谱分析,如图 5 所示。由图可知,实际输出的电压波形并非理想的正弦波、存在随机振动成分,且波形幅值和振动频率受 m_1, m_2 影响较大,存在振动主频(f)及多个振动次频率叠加振动的现象。下文将进一步研究 m_1/m_2 对 f 及 V_g 的影响。

rier Transorm, FFT)对采集的波形数据进行频谱分析,如图 5 所示。由图可知,实际输出的电压波形并非理想的正弦波、存在随机振动成分,且波形幅值和振动频率受 m_1, m_2 影响较大,存在振动主频(f)及多个振动次频率叠加振动的现象。下文将进一步研究 m_1/m_2 对 f 及 V_g 的影响。

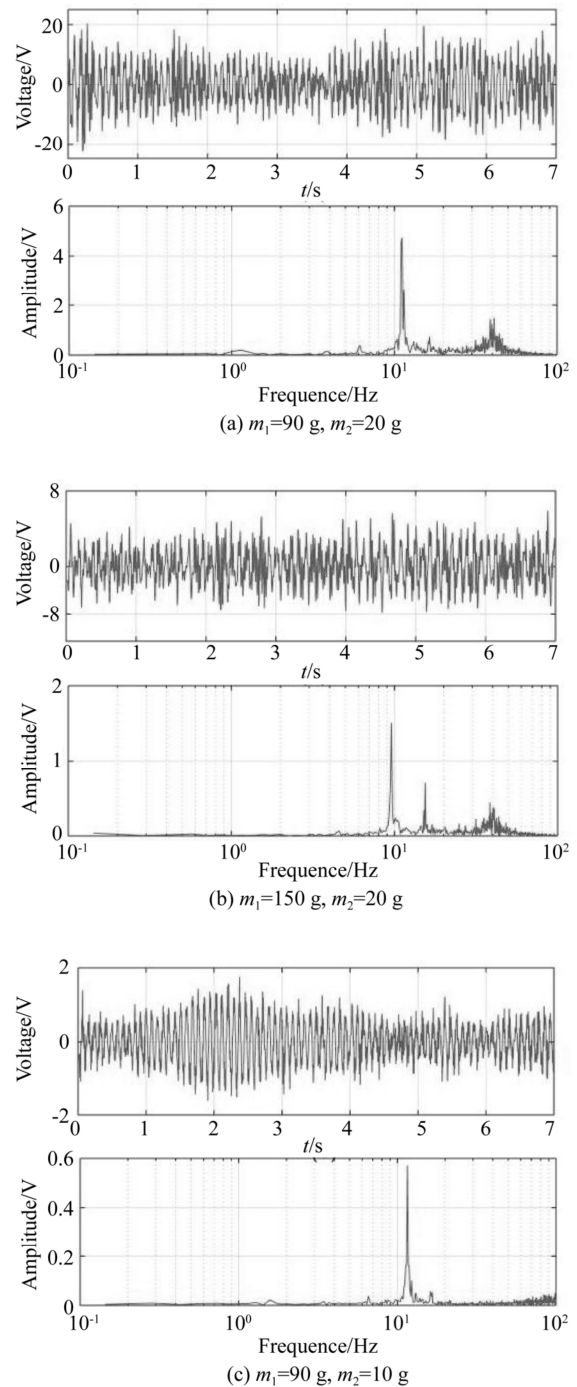


图 5 电压时域波形及其 FFT 分析

Fig. 5 Voltage time domain waveform and FFT

图 6 为压电梁质量 (m_2) 为 10 g,壳体质量 (m_1) 不同时输出电压 (V_g) 与风速 (v) 的关系曲线。曲线表明: V_g 随 v 增大而增大, $v \leq 16$ m/s 时 V_g 随 v 线性增大,其增速较快;但当 $v > 16$ m/s, V_g 的增速放缓,整体变化更加平稳;且 V_g 随 m_1 增大而减小。图 7 为不同风速下振动主频 (f) 与壳体质量 (m_1) 的关系曲线, f 与 m_1 呈较好的线性关系,相同风速下 m_1 越大 f 越小。产生上述现象的原因在于较低风速下 ($v \leq 16$ m/s, $Re \leq 3 \times 10^5$), 壳体所受 F_L 和 V_g 随着 v 的增加而增大;较高风速下 ($v > 16$ m/s, $Re > 3 \times 10^5$) 脱涡现象逐渐明显,尾流变窄且变得十分混乱,存在随机振动的影响, V_g 增幅减小,故可通过减小壳体质量提高俘能器输出电压。

图 8 为壳体质量 (m_1) 为 90 g,压电梁质量 (m_2) 不同时输出电压 (V_g) 与风速 (v) 的关系曲线。曲线表明: V_g 随着 m_2 增大而增大, m_2 为 30 g 时最大 V_g 达到 45 V。图 9 为不同风速下振动主

频 (f) 与压电梁质量 (m_2) 的关系曲线。曲线表明, f 与 m_2 呈较好的线性关系,相同风速下 m_2 越大 f 越小。产生上述原因在于试验范围内随着 m_2 增加可增大压电梁变形量,故可通过增加压电梁质量提高俘能器输出电压。

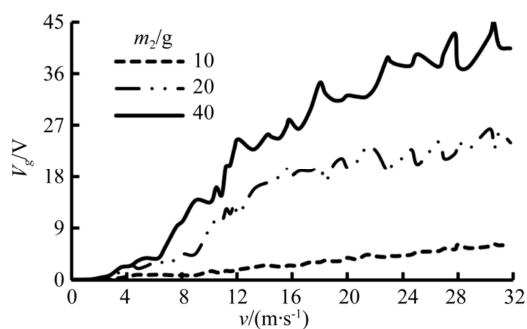


图 8 不同压电梁质量时输出电压与风速的关系
Fig. 8 Relationship between wind velocity (v) and output voltage (V_g) under different m_2

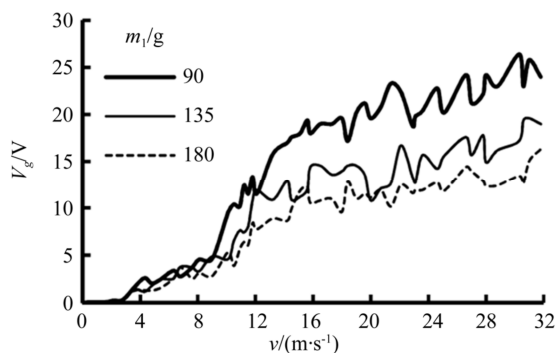


图 6 不同壳体质量时输出电压与风速的关系
Fig. 6 Relationship between wind velocity (v) and output voltage (V_g) under different m_1

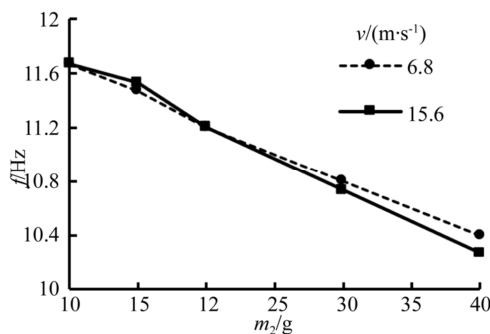


图 9 不同风速下振动主频与压电梁质量的关系
Fig. 9 Relationship between mass (m_2) and vibration main frequency (f) under different v

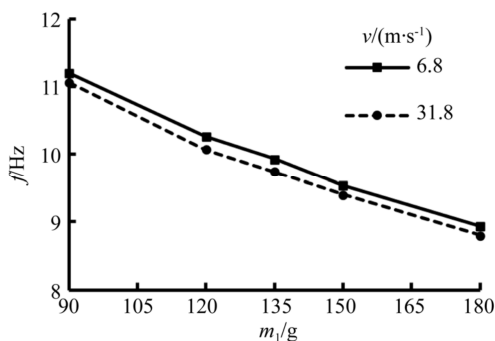


图 7 不同风速下振动主频与壳体质量的关系
Fig. 7 Relationship between mass (m_1) and vibration main frequency (f) under different v

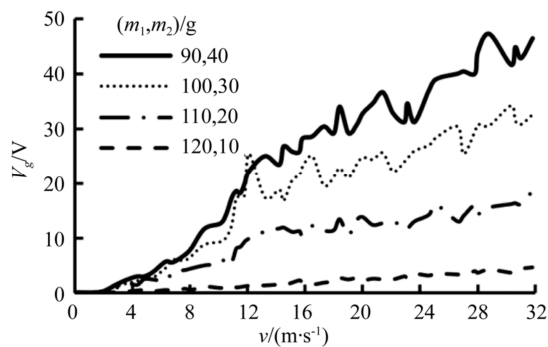


图 10 $m_1 + m_2 = 130$ g 时输出电压与风速的关系
Fig. 10 Relationship between wind velocity (v) and output voltage (V_g) when $m_1 + m_2 = 130$ g

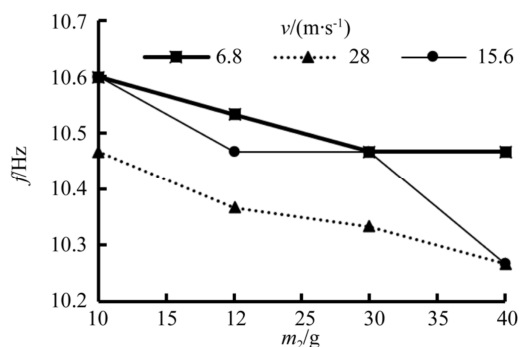
图 11 $m_1 + m_2 = 130$ g 时振动主频与压电梁质量的关系

Fig. 11 Relationship between vibration main (f) and mass (m_2) when $m_1 + m_2 = 130$ g

图 10 为 $m_1 + m_2 = 130$ g 时, 输出电压 (V_g) 与风速 (v) 的关系曲线。对比图中电压波形可得, 试验范围内通过增加 m_2 , 减小 m_1 可以有效提高俘能器 V_g 。图 11 为不同风速下振动主频 (f) 与压电梁质量 (m_2) 的关系曲线。其他参数确定时, m_2 越大、 m_1 越小时 f 越小, 说明 m_2 在俘能过程中相较于 m_1 影响更大, 故可通过质量匹配提高俘能器输出电压。

图 12 为压电梁质量 (m_2) 为 10 g, 壳体质量 (m_1) 为 90 g 时不同风速下输出功率 (P) 与负载 (R) 的关系曲线。由图可知存在最佳 R 使 P 最大, P 随着 v 增大而增加, 且各风速下最佳 R 随着 v 增大而增大。当 v 为 28 m/s 时 P 最大达到 0.4 mW, 最佳 R 为 600 k Ω 。当 v 为 15.6/24 m/s 时最大 P 为 0.25/0.11 mW, 最佳 R 分别为 400/550 k Ω , 这是由于压电陶瓷内阻和外部电阻的不同匹配特性决定的。

参考文献:

- [1] 刘星, 王佩红, 张小舟, 等. 压电阵列径向分布的二维振动能量采集器[J]. 光学 精密工程, 2018, 26(9):2181-2189.
LIU X, WANG P H, ZHANG X ZH, *et al.*. Two-dimensional vibration energy harvester with radially distributed piezoelectric array[J]. *Opt. Precision Eng*, 2018, 26(9):2181-2189. (in Chinese)
- [2] 程廷海, 刘文博, 赵宏伟, 等. 气动高压激励的阵列式盘型压电俘能器[J]. 光学 精密工程, 2017, 25(5):1222-1228.

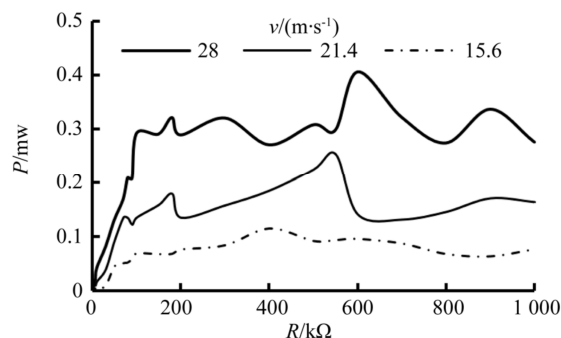


图 12 不同风速下输出功率与负载的关系

Fig. 12 Relationship between output power (P) and load (R) under different v

5 结 论

本文提出了一种间接激励式压电风力俘能器, 从理论和试验两方面研究了风速、壳体质量及压电梁质量对俘能器发电性能的影响规律。

(1) 俘能器输出电压随风速增大而增大, $v \leq 16$ m/s 时输出电压随风速线性增加, 其增速较快; 当 $v > 16$ m/s, 输出电压的增速放缓, 整体变化更加平稳;

(2) 壳体/压电梁质量对俘能器的发电特性都有较大影响, 试验范围内输出电压随压电梁质量增加而增大, 随壳体质量增加而减小; 当总质量确定时, 通过增加压电梁质量, 减小壳体质量可以有效提高压电俘能器的输出性能;

(3) 其它参数确定时, 存在最佳负载使输出功率最大, 且本文试验范围内输出功率及最佳负载随风速增加而增大, 风速为 28 m/s、电阻 600 k Ω 时所获得的最大输出功率为 0.4 mW。

CHENG T H, LIU W B, ZHAO H W, *et al.*. Array piezoelectric plate harvester excited by pneumatic compressed air[J]. *Opt. Precision Eng*, 2017, 25(5):1222-1228. (in Chinese)

[3] WANG J, LI G, ZHANG M, *et al.*. Energy harvesting from flow-induced vibration: a lumped parameter model[J]. *Energ Source Part A*, 2018, 40(24):2903-2913.

[4] KAN J, FAN C, WANG S, *et al.*. Study on a piezo-windmill for energy harvesting[J]. *Renewable Energy*, 2016, 97:210-217.

- [5] 樊康旗,刘朝辉,王连松,等. 从人体行走中收集能量的鞋上压电俘能器[J]. 光学精密工程,2017,25(5):1272-1280.
FAN K Q, LIU ZH H, WANG L S, *et al.*. Shoe-mounted piezoelectric energy harvester for collecting energy from human walking [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017,25(5):1272-1280. (in Chinese)
- [6] 阚君武,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 SH 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)
- [7] 赵兴强,王军雷,蔡骏,等. 基于风致振动效应的微型风能收集器研究现状[J]. 振动与冲击,2017,36(16):106-112.
ZHAO X Q, WANG J L, CAI J, *et al.*. A review on micro wind energy harvesters based wind induced vibration[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017,36(16):106-112. (in Chinese)
- [8] NAKAMURA T. *Flow-induced vibrations: classifications and lessons from practical experiences* [M]. Elsevier, 2008.
- [9] 王淑云,沈亚林,阚君武,等. 刚柔复合梁压电风能采集器的试验测试与分析[J]. 振动与冲击,2016,35(18):23-27.
WANG SH Y, SHEN Y L, Kan J W, *et al.*. Test and analysis of piezoelectric wind energy harvester based on rigid-flexible composite beam[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016,35(18):23-27. (in Chinese)
- [10] SUWA E, TSUJIURA Y, KUROKAWA F, *et al.*. Airflow energy harvesters of metal-based PZT thin films by self-excited vibration[C]. *The International Conference on MICRO and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications*, 2014.
- [11] LI D, WU Y, RONCH A D, *et al.*. Energy harvesting by means of flow-induced vibrations on aerospace vehicles[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2016, 86:28-62.
- [12] HU Y, YANG B, CHEN X, *et al.*. Modeling and experimental study of a piezoelectric energy harvester from vortex shedding-induced vibration[J]. *Energy Conversion & Management*, 2018, 162:145-158.
- [13] ZHOU SH X, WANG J L. Dual serial vortex-induced energy harvesting system for enhanced energy harvesting[J]. *AIP Advances*, 2018, 8(7):075221.
- [14] 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.
- [15] KANG Z, ZHANG C, MA G, *et al.*. A numerical investigation of two-degree-of-freedom VIV of a circular cylinder using the modified turbulence model[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 155:211-226.
- [16] SINGIRESU SR. 机械振动[M]. 李欣业,张明路,译. 第四版. 北京:清华大学出版社,2013.
SINGIRESU SR. *Mechanical Vibration*[M]. LI X Y, ZHANG M L, *tams 1.*. 4th ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2013. (in Chinese)

作者简介:



王淑云(1965—),女,吉林长岭人,教授,1988年、2001年和2008年于吉林大学分别获得学士学位、硕士学位和博士学位,主要从事工程问题的理论建模、仿真分析及优化等方面的研究。E-mail: jutwsy@163.com

通讯作者:



阚君武(1965—),男,吉林榆树人,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年中科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的研究。E-mail: jutkjw @ 163.com