

文章编号 1004-924X(2016)05-1087-06

直激式压电风能捕获器的性能分析与实验

阚君武, 张肖逸, 王淑云*, 汪彬, 沈亚林, 杨灿, 傅青青
(浙江师范大学精密机械研究所, 浙江金华 321004)

摘要:提出一种由压电梁及其端部附加质量构成的直激式压电风能捕获器。在考虑了压电振子静平衡变形的基础上,根据涡激振动理论建立了柔性压电振子的自激振动理论模型并进行了仿真分析,获得了压电梁厚度比、附加质量及风速对其发电性能的影响规律。结果表明,存在最佳的压电梁厚度比使输出电压、电能及功率最大,电压/电能/功率所对应的最佳厚度比分别为0.5/0.65/0.65。其它参数确定时,存在最佳风速/附加质量使输出电压最大,且最佳风速随附加质量增加而降低、最佳质量随风速增加而降低。制作了风能捕获器样机并进行了试验测试,风速为4.8/7.2/10 m/s时,对应的最佳附加质量及最大电压分别为15/11/7 g和1.9/3.94/6.18 V;风速为10 m/s时,10 g附加质量下的输出电压为0/20 g附加质量下的4.1/1.2倍。结果证明根据实际风速范围确定合理的附加质量可提高发电能力。

关键词:压电风能捕获器;直激式风能捕获器;风速;发电性能

中图分类号:TN384;TK83 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162405.1087

Performance analysis and test of blowing-type PZT wind energy harvester

KAN Jun-wu, ZHANG Xiao-yi, WANG Shu-yun*, WANG Bin,
SHEN Ya-lin, YANG Can, FU Qing-qing

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

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

Abstract: A blowing-type PZT wind energy harvester consisting of a piezo-cantilever and a proof mass on its free-end was presented. By considering the static balance deformation of the piezoelectric vibrator, an analysis model of a flexible piezoelectric vibrator was established and simulated on the basis of the theory of vortex-induced vibration. Then, the influences of thickness ratios, wind speeds and proof masses on the electrical energy generation were obtained. The results show that there are individual optimal thickness ratios for the generated voltage, energy and the output power to achieve peaks, and the optimal thickness ratios for the generated voltage/energy/power are 0.5/0.65/0.65, respectively. Under other parameters given, there are optimal wind speeds and optimal proof masses for the voltage to achieve their peaks, and the optimal wind speed (proof mass) decreases with the increasing of proof mass (wind speed). A PZT wind energy harvester was fabricated and tested under different proof masses and wind speeds. The experiment results show that the achieved optimal proof masses and optimal voltages under wind speeds of 4.8/7.2/10 m/s are 15/11/7g and 1.9/3.94/6.18 V respectively. In the case of wind speed of 10 m/s, the generated voltages under 10 g proof

收稿日期:2015-12-05;修订日期:2016-01-10.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61574128, No. 51277166, No. 51377147, No. 51577173);国家级大学生创新创业项目(No. 201510345033)

mass is 4.1/1.2 times those under 0/20g proof mass respectively. It concludes that a reasonable proof mass is helpful for a PZT wind energy harvester to generate more energies.

Key words: piezoelectric wind energy harvester; blowing-type wind energy harvester; wind speed; electrical energy generation

1 引言

为满足微功率电子产品及微小型远程传感监测的自供电需求,避免大量废弃电池对环境造成严重污染,国内外学者相继提出了基于静电、电磁、热电及压电等原理的微小型能量捕获器(亦称微小型发电机或俘能器)^[1-3]。每类俘能器均具有各自的特点和适用领域,其中压电能量捕获器以其结构简单、无电磁干扰、能量密度大、易于实现微小化和集成化等优势而得到广泛应用^[4]。目前,利用压电换能器可回收的能量包括人的肢体/器官运动能^[5]、环境振动能^[6]、旋转体动能^[4]以及水流/风能^[7]等;其中用于人体运动及振动能量回收的压电能量捕获器研究较早、取得成果较多,并逐步用于传感器、健康监测及无线发射系统等领域。然而,国内外对于旋转体及流体激励的能量捕获器的研究刚开始,尚处于探索和起步阶段^[4]。

根据激励方式,现有的压电流能捕获器主要可分为风车式^[8]、谐振腔式^[9]、钝体扰流式^[10]及直激式^[11]4 大类。前三种压电流能捕获器的结构复杂、体积相对较大,适于流速较高的场合;而直激式流能捕获器直接利用流体流经压电梁所形成的涡激振动发电,故结构简单、体积小,适于自然界中低风速的应用。虽然钝体扰流式及直激式流能捕获器都是基于涡激振动发电的,但其结构及工作原理不同:钝体扰流式流能捕获器是利用流体流过圆柱等刚性钝体所形成的漩涡激励压电振子,压电振子的长度方向与流体流动方向相同;相反,直激式流能捕获器中压电振子与流体流动方向相互垂直,利用流体流过压电振子后漩涡脱落所形成的压力变化实现激励。

目前,有关直激式流能捕获器的研究基本以试验为主,尚无可借鉴的理论成果。本文在考虑了压电振子静平衡变形的基础上,根据涡激振动

理论建立了柔性压电振子的自激振动理论模型,研究了流体速度、压电振子结构尺度及附加质量等对流能捕获器自激振动特性及发电能力的影响规律,并进行了试验验证,为直激式压电流能捕获器的后续研究提供了借鉴。

2 压电风能捕获器的结构及工作原理

悬臂梁压电风能捕获器结构及工作原理如图 1 所示,主要由压电悬臂梁与其自由端的附加质量构成,且压电梁与风的方向垂直。根据流体动力学理论,当风吹过压电悬臂梁产生弹性变形(静平衡角为 $\Delta\varphi$),且梁的后面产生卡门漩涡,漩涡脱落会使梁前后两侧压力交替变化,从而使压电梁产生自激振动并将风能转换成电能;当漩涡的脱落频率(即涡激频率)与风能捕获器的固有频率相同或相近时,压电悬臂梁将产生共振^[11]。

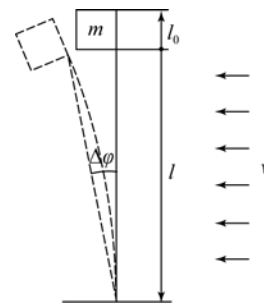


图 1 压电风能捕获器的结构示意图

Fig. 1 Structure of piezoelectric harvester

由压电晶片和金属基板黏接而成的两叠片压电梁在风力作用产生弯曲变形时,所生成的电压、单位时间内产生的电能以及最大输出功率可分别表示为^[12]:

$$V_g = \frac{3\lambda_h(1-\lambda_h)\lambda_E g_{31} E_p}{4K(1-\lambda_h+\lambda_h\lambda_E)} \left(\frac{h}{l}\right)^2 F, \quad (1)$$

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

$$P = \frac{\omega_s C_f V_g^2}{4}, \quad (3)$$

式中: $C_1 = \eta_1 (1 - \lambda_h + \lambda_h \lambda_E) \omega l / [(1 - \lambda_h) \beta_{33}^T \eta_1 h]$, $\eta_1 = \lambda_h^4 (1 - \lambda_E)^2 - 2\lambda_h (2\lambda_h^2 - 3\lambda_h + 2)(1 - \lambda_E) + 1$, $\eta_2 = \eta_1 (1 - \lambda_h + \lambda_h \lambda_E) (1 + k_{31}^2) - 3\lambda_h^2 (1 - \lambda_h) \lambda_E^2 k_{31}^2$, l, ω 及 $h = h_p + h_m$ 分别为压电梁长、宽及厚度, h_p, h_m 分别为压电晶片及基板的厚度, $\lambda_h = h_m / h$ 为厚度比, $\lambda_E = E_m / E_p$ 为弹性模量比, E_p, E_m 为压电晶片及基板的弹性模量, $k_{31}^2 = E_p g_{31}^2 / \beta_{33}^T$, $\beta_{33}^T = 1 / \epsilon_{33}^T$ 为介电隔离率, $\epsilon_{33}^T = 1\ 300 \epsilon_0$ 为介电常数, g_{31} 为压电电压常数, K, F 分别为压电梁的等效刚度和自由端所受等效作用力, $f_s = \omega_s / 2\pi$ 为涡激振动频率。

压电梁结构参数确定时,可通过提高其自由端变形量提高发电能力。

3 压电风能捕获器的建模与仿真分析

根据图 1 所示风能捕获器的结构原理及涡激振动理论,有风吹过时压电梁将产生自激振动^[13],其处于静平衡状态时单位长度上所受的风力、涡激频率及动力学方程可分别表示为^[13]:

$$p = \frac{\mu_L \rho v \omega}{2} [v \sin(90 + \Delta\varphi)]^2, \quad (4)$$

$$\omega_s = \frac{2\pi v S_t}{L}, \quad (5)$$

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F \sin(\omega_s t), \quad (6)$$

式中: $F = 3 p L / 8, L = l + l_0 (l \gg l_0)$, v, ρ 分别为风速和空气密度, $S_t (= 0.145)$ 为 Strouhal 数, $\mu_L (= 3)$ 为与雷诺数及压电梁结构尺度相关的阻力系数, $M = m + 0.23 m_0, C, K = \frac{\eta_1 E_p \omega h^3}{4(1 - \lambda_h + \lambda_h \lambda_E) l^3}$ 分别为压电梁的等效质量、等效阻尼系数及等效刚度, $m, m_0 = l \omega (h_p \rho_p + h_m \rho_m)$ 分别为压电梁端部附加质量及其自身质量, h_p, h_m 分别为压电陶瓷和基板厚度, ρ_p, ρ_m 分别为陶瓷和基板密度, $\Delta\varphi = p / (4K)$ 。

根据振动分析理论及上述公式,推导出压电梁端部振幅及产生电压为:

$$\delta = \frac{F \sin(\omega_s t - \varphi)}{K \sqrt{(1 - \lambda^2)^2 + (2\lambda\xi)^2}} = \frac{F}{K} \beta, \quad (7)$$

$$V_g = \frac{9}{16} \frac{g_{31} \lambda_h (1 - \lambda_h) \lambda_E \mu_L \rho L l}{\eta_1 h} [v \times \sin(90 + \Delta\varphi)]^2 \beta, \quad (8)$$

式中: $\beta = 1 / \sqrt{(1 - \lambda^2)^2 + (2\lambda\xi)^2}$ 为放大因子, $\lambda = \omega_s / \omega_n$ 为频率比, $\omega_n = \sqrt{K/M}$ 为压电梁的固有频率, ξ 为阻尼系数。显然,压电风能捕获器的性能是由压电梁结构及材料参数、附加质量及风速共同决定的,故可通过上述系统参数调节提高能量捕获器的发电能力。为获得相关参数对压电风能捕获器发电特性的影响规律进行了仿真分析,所用相关固定参数如表 1 所示,其中有些参数是在一定范围内的取值,因为精确的参数值需要大量的试验验证。

表 1 模拟仿真用相关参量

Tab. 1 Constant parameters for simulation

参数	量值	参数	量值
陶瓷杨氏模量 $E_p / 10^{10}$ Pa	8.2	基板杨氏模量 $E_m / 10^{10}$ Pa	8.9
压电常数 $g_{31} / (10^{-3} \text{ Vm} \cdot \text{N}^{-1})$	11.1	空气密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1.2
陶瓷密度 $\rho_p / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	8 700	基板密度 $\rho_m / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	7 500
阻尼系数 ξ	0.2	压电梁长 l / mm	40
质量块长 l_0 / mm	5	压电梁宽 ω / mm	40
陶瓷厚 h_p / mm	0.3	基板厚 h_m / mm	0.3
Strouh 数 S_t	0.2	阻力系数 μ_L	3

式(1)~(3)表明,在压电梁总体尺度及材料参数确定后,其输出电压、电能及功率将由厚度比 λ_h 决定,并将存在最佳厚度比使输出电压、电能及功率最大。为使后续相关仿真分析结果更合理,故需确定拟采用的厚度比。图 2 给出了 $m = 15 \text{ g}, v = 12.5 \text{ m/s}$ 时厚度比对输出电压、电能及功率的影响规律曲线。曲线的变化趋势表明,存在最佳的厚度比使输出电压、电能及功率最大,对应最大电能及最大功率的最佳厚度比相同(0.65)且大于对应最高电压的最佳厚度比(0.5),设计中应根据关键目标确定合理的厚度比。鉴于实际环境中风速较低且变化范围较大,为使低风速下生成的电压满足使用要求,采用使电压最大的最佳厚度比(0.5)进行仿真计算。

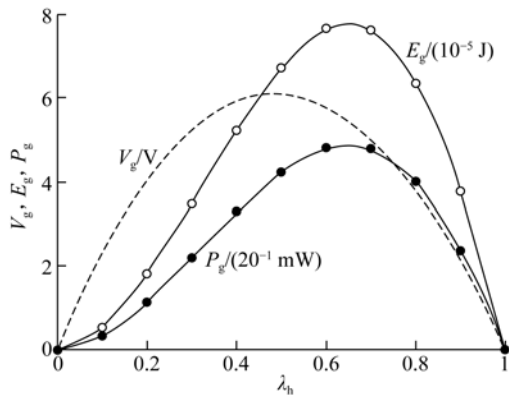


图 2 厚度比对输出电压、电能和功率的影响

Fig. 2 Influence of thickness ratio on output voltage, electric energy and power

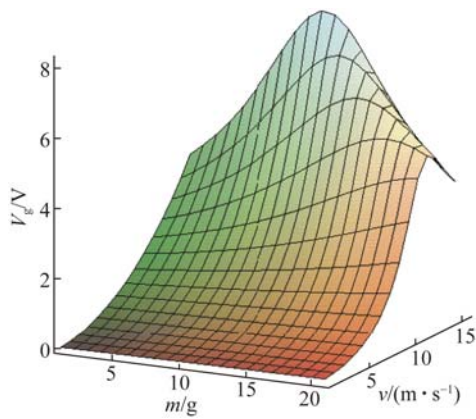


图 3 质量及风速对输出电压的影响

Fig. 3 Influence of proof-mass and wind velocity on output voltage

图 3 为附加质量及风速对输出电压的影响规律曲线。图中曲线变化趋势表明,其它条件确定时,压电风能捕获器的输出性能是由附加质量及风速共同决定的:附加质量较小($m < 12\text{ g}$)时,输出电压随风速增加而增加,但当附加质量增加到一定程度后($m > 12\text{ g}$),存在最佳的风速使输出电压最大;类似地,风速较低($v < 11\text{ m/s}$)时,输出电压随附加质量增加而增加,当风速增加到一定程度后($v > 11\text{ m/s}$),存在最佳的附加质量使输出电压最大。图中输出电压随附加质量(风速)单调增加的原因是风速(附加质量)值相对较小造成的,实际上任何质量(风速)时都存在最佳风速(质量)使输出电压最大,并且最佳风速(质量)随附加质量(风速)增加而降低,但因仿真条件限制

某些最佳值未在图 3 中体现。压电风能捕获器的上述特性是由激振力 F 及放大因子 β 共同决定的($V_g \propto F\beta$),其成因可由图 4 和图 5 说明。

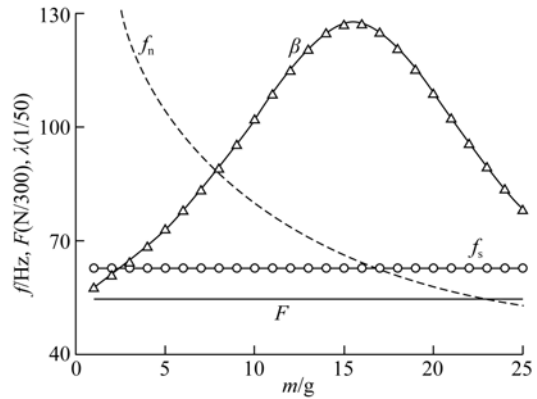


图 4 附加质量对相关参数的影响

Fig. 4 Influence of proof-mass on relative parameters

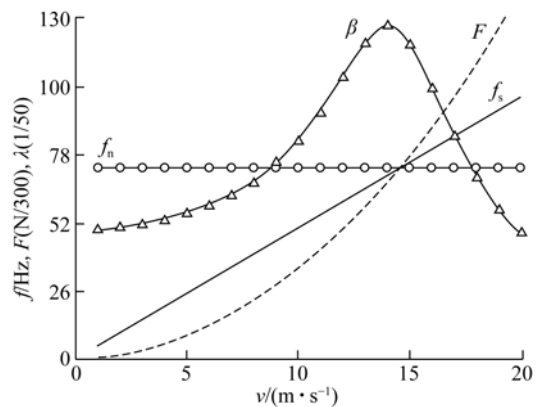


图 5 风速对相关参数的影响

Fig. 5 Influence of wind velocity on relative parameters

图 4、图 5 分别给出了恒定风速 $v = 12.5\text{ m/s}$ (恒定质量 $m = 12\text{ g}$) 时能量捕获器谐振频率 $f_n = \omega_n / (2\pi)$ 、涡激频率 $f_s = \omega_s / (2\pi)$ 、激振力 F 及放大比 β 与附加质量 m (风速 v) 的关系曲线。图中曲线变化趋势表明,风速一定时(图 4),涡激频率及激振力不随附加质量变化,而谐振频率随质量增加而降低,当 $f_s / f_n \approx 1$ 时放大比出现最大值;相反,当质量一定时(图 5),涡激频率及激振力均随风速增加而增加,但谐振频率不变, $f_s / f_n \approx 1$ 同样使放大比出现最大值。对比上述两图还可发现,激振力仅与风速有关、与质量无关,故风速给定时使放大比最大的最佳质量即为使电压最大的最佳质量,而质量固定时使放大比与激振力乘积最大的最佳风速才是使电压最大的风速。

上述仿真结果表明,在压电梁结构尺度确定时,可通过改变附加质量使压电梁的谐振频率与涡激频率相适应,从而提高风能捕获器的输出电压;由式(2)~(5)可推断出,附加质量对电能及功率的影响规律与对电压的影响规律(即最佳质量)相同,故不再单独给出其相关特性曲线。除了附加质量及厚度比外,利用理论模型还可研究压电梁的结构尺寸(长、宽、厚度及厚度比)及材料参数(弹性模量比)等对输出电压、电能及功率等的影响规律。

4 试验测试与分析

为验证压电风能捕获器输出特性与附加质量及风速理论关系的正确性,设计制作了样机及测试系统(如图 6 所示),样机结构尺寸和固定工作参数如表 1 所示。试验所用仪器设备主要包括 DS5042M 型数字存储示波器、变频器(变频范围 0~50 Hz,调频步长 0.5 Hz)、风机(额定转速 2 850 r/min)、风速仪等。试验中通过改变变频器频率调节风速(二者间呈线性关系),距风机出口 300 mm 处的可调风速为 0~10 m/s。



图 6 压电风能捕获器及测试系统

Fig. 6 Piezoelectric energy harvester and test system

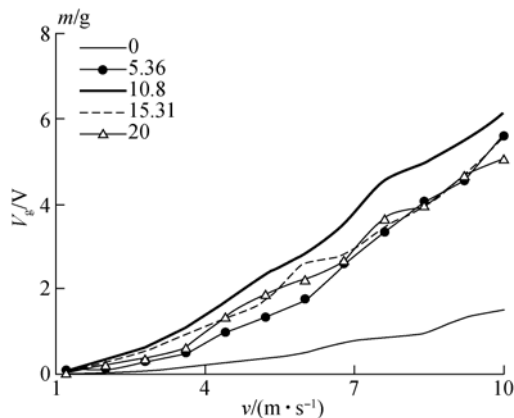


图 7 附加质量不同时输出电压与风速关系

Fig. 7 Generated voltage vs wind velocity under different proof-masses

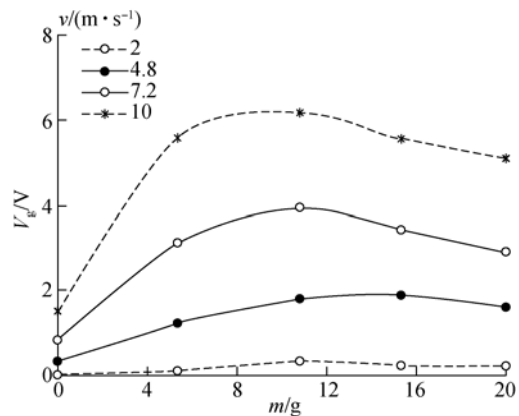


图 8 风速不同时输出电压与附加质量关系

Fig. 8 Generated voltage vs proof-mass under different wind velocities

图 7、图 8 分别为不同附加质量(风速)时输出电压最大值与风速(附加质量)的关系曲线。在压电梁端部附加质量确定时,输出电压随风速(0~10 m)增加呈近似的线性递增关系,这与低风速时的仿真结果相一致;为避免风速过大使压电振子变形过大而损毁、使其它试验得以继续进行,试验中未进一步提高风速并使之达到最佳值。对比图中曲线还可发现,风速给定时存在使输出电压最大的最佳质量,且最佳质量随风速增加而降低、最大电压随风速增加而增加,这与仿真结果相一致,证明所建模型的有效性。风速 4.8/7.2/10 m/s 所对应的最佳附加质量及最大电压分别为 15/.11/7 g 和 1.9/3.94/6.18 V,风速 10 m/s 时质量 10 g 的输出电压分别是无附加质量和附加质量 20 g 时的 4.1 倍和 1.2 倍。因此,应根据实际风速范围确定合理的附加质量以提高输出电压。

5 结 论

本文提出了一种由压电悬臂梁及其端部质量构成的直激式压电风能捕获器,并从理论及试验两方面研究了压电梁厚度比、风速及附加质量对其发电特性的影响规律。仿真结果表明,存在最佳的厚度比使输出电压、电能及功率最大,电压/电能/功率所对应的最佳厚度比为 0.5/0.65/0.65;其它参数确定时,分别存在最佳风速和最佳附加质量使输出电压最大,且最佳风速随附加质量增加而降

低、最佳质量随风速增加而降低。试验中,风速 4.8/7.2/10 m/s 所对应的最佳附加质量及最大电压分别为 15/11/7 g 和 1.9/3.94/6.18 V;风速

10 m/s 时,质量为 10 g 的输出电压分别是是附加质量为 0,20 g 时的 4.1/1.2 倍。故应根据实际风速范围确定合理的附加质量以提高输出电压。

参考文献:

- [1] BEEBY S P, ZHU D. Vibration energy harvesting: fabrication, miniaturisation and applications [J]. *Proc. of SPIE*, 2015, 9517:951703.
- [2] MATIKO J W, GRABHAM N J, BEEBY S P, *et al.*. Review of the application of energy harvesting in buildings [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2014, 25: 012002-1-25.
- [3] ELVIN N, ERTURK A. *Advances in Energy Harvesting Methods* [M]. New York: Springer-Verlag New York Inc., 2013.
- [4] 阚君武, 李洋, 王淑云, 等. 旋转磁铁数量对压电俘能器输出电压的影响[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(7):1864-1870.
KAN J W, LI Y, WANG SH Y, *et al.*. Influence of NRMs on energy-generation performance of piezoelectric harvesters [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(7):1864-1870. (in Chinese)
- [5] DELNAVAZ A, VOIX J. Flexible piezoelectric energy harvesting from jaw movements [J]. *Smart Materials and Structures*, 2014, 23:105020 (8pp).
- [6] DAQAQ M F, MASANA R, ERTURK A, *et al.*. On the role of nonlinearities in vibratory energy harvesting: a critical review and discussion [J]. *ASME Appl. Mech. Rev.*, 2014, 66(4):040801.
- [7] TRUITT A, MAHMOODI S N. A review on active wind energy harvesting designs [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufac-*
- turing*, 2013, 14(9):1667-1675.
- [8] LUONG H T, GOO N S. Use of a magnetic force exciter to vibrate a piezocomposite generating element in a small-scale windmill [J]. *Smart Materials and Structures*, 2012, 21(2):025017.
- [9] SKOW E, KOONTZ Z, CUNEFARE K, *et al.*. Hydraulic pressure energy harvester enhanced by Helmholtz resonator [C]. *Proc. of SPIE*, 2015, 9431:943104.
- [10] SIVADAS V, WICKENHEISER A M. A study of several vortex-induced vibration techniques for piezoelectric wind energy harvesting [C]. *Proc. of SPIE*, 2011, 7977:79770F.
- [11] HOBECK J D, GESLAIN D, INMAN D J. The dual cantilever flutter phenomenon: a novel energy harvesting method [C]. *Proc. of SPIE*, 2014, 9061:906113.
- [12] 阚君武, 唐可洪, 王淑云, 等. 压电悬臂梁发电装置的建模与仿真分析[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(1):71-75.
KAN J W, TANG K H, WANG SH Y, *et al.*. Modeling and simulation of piezoelectric cantilever generators [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(1):71-75. (in Chinese)
- [13] SHIGEHICO S, NAKAMURA T, INADA F, *et al.*. *Flow induced Vibrations: Classifications and Lessons from Practical Experiences* [M]. London: Academic Press. 2014.

作者简介:



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、硕士学位,2003年于吉林大学获得博士学位,2005年中科院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:jvtkjw@163.com

通讯作者:



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、硕士和博士学位,主要从事工程问题的理论建模、仿真分析及优化等方面研究。E-mail:jutwsy@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)