

文章编号 1004-924X(2017)05-1222-07

气动高压激励的阵列式盘型压电俘能器

程廷海^{1*}, 刘文博¹, 赵宏伟², 高海波³, 赵希禄⁴

- (1. 长春工业大学 机电工程学院, 吉林 长春 130012;
2. 吉林大学 机械科学与工程学院, 吉林 长春 130025;
3. 哈尔滨工业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080;
4. 日本埼玉工业大学 工学部机械工学科, 深谷市 3690293)

摘要:提出了利用气动高压激励的阵列式盘型压电俘能器实现气体能量的转化,以满足低功耗传感器的自供能需求。通过压电单晶片将气缸内部高压气体能量转化为电能,设计了阵列式盘型压电俘能器的样机结构;结合气缸的正常工作状态,分析了压电阵列的工作原理并进行了相应的实验。理论分析显示:盘型压电阵列具有较高的电荷量与良好的电容性,适合对具有交变载荷的高压气体能量进行收集。采用外径为 12 mm、厚度为 0.2 mm 的压电单晶片及缸径为 63 mm、行程为 150 mm 的气缸制作了实验样机,利用气动组件模拟气体环境搭建了测试系统。分别调节压力、周期、流量等参数进行了实验测试。结果表明:在交变的气动高压激励下,阵列式盘型压电俘能器可较好地收集交变高压气体载荷能量,其最佳匹配电阻为 600 k Ω ,最大的瞬时功率为 1 052 μ W,输出功率可满足低功耗传感器的能量需求。

关键词:压电俘能器;气动高压;盘型压电阵列;压力波动;能量转化

中图分类号:TH138;TN384 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172505.1222

Array piezoelectric plate harvester excited by pneumatic compressed air

CHENG Ting-hai^{1*}, LIU Wen-bo¹, ZHAO Hong-wei², GAO Hai-bo³, ZHAO Xi-lu⁴

- (1. School of Mechatronic Engineering,
Changchun University of Technology, Changchun 130012, China;
 2. School of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China;
 3. School of Mechatronic Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China;
 4. Department of Mechanical Engineering,
Saitama Institute of Technology, Saitama 3690293, Japan)
- * Corresponding author, E-mail: chengtinghai@163.com

Abstract: An array piezoelectric plate harvester excited by pneumatic compressed air was proposed to implement gas energy conversion and to satisfy the demand of energy supplying for low-power wireless sensors. By converting the alternate high air pressure energy in a pneumatic system into the electric

收稿日期:2016-09-18;修订日期:2016-11-16.

基金项目:吉林省科技发展计划资助项目(No. 20150312006ZG, No. 20160204054GX);哈尔滨工业大学机器人技术与系统国家重点实验室开放基金资助项目(No. SKLRS-2016-KF-14);吉林省教育厅“十三五”科学技术研究项目(吉教科合字[2016]第 332 号);教育部“春晖计划”合作科研项目(No. Z2015023)

energy with piezoelectric plates, the structure of a prototype for the array piezoelectric plate harvester system was designed. Then, based on the normal working states of the presented harvester, its working principles were introduced and corresponding experiments were performed. The theoretical analysis results show that the array piezoelectric plate has high output voltage capacities and collects the compressed gas energy effectively. An experimental prototype was fabricated by combing a piezoelectric single chip with a diameter of 12 mm and a thickness of 0.2 mm and an air cylinder with a diameter of 63 mm and a travel of 150 mm. A test system was built to research the performance of array piezoelectric plate harvester in simulated gas conditions. In the test, the pressures, cycles and flows were adjusted, respectively. Experimental results at the alternate high air excitation show that the proposed harvester collects the load gas energy of alternate high pressure air, and its optimal load resistance is 600 k Ω and instantaneous power is 1 052 μ W, which meets the demands of low power sensors for energy applying.

Key words: piezoelectric plate harvester; pneumatic compressed air; array piezoelectric plate; pressure fluctuation; energy transmittion

1 引言

气动技术具有可控性强、工作状态稳定、无污染等特点,在工业生产中得到了广泛的应用^[1]。随着工业智能化水平的不断提高,越来越多的低功耗传感器、网络节点等被引入到气动系统。然而,传统的以锂电池等化学电池供能的方式易造成环境污染,处理废旧的电池还无端地浪费了很多人力物力。因此,研究一种新的供能方式为气动系统的低功耗电子器件供电备受该领域国内外学者的关注^[2-4]。目前,一些学者相继提出了基于静电、电磁、热电及压电等原理的微能源收集装置,每类能量收集装置都具有各自的特点和适用领域^[5-7],其中压电俘能器以其结构简单、无电磁干扰、能量密度大、易于实现微型化和集成化等优势而得到广泛应用^[8-11]。

随着压电俘能技术研究的不断深入,出现了各种压电俘能装置^[12-13]。2005年,Priya等人提出通过风力带动旋转机构激励压电元件,将风能转化为电能,其设计的发电装置在风速为2.8 m/s的条件下可输出7.5 mW的电能^[14]。2010年,Akaydin等人基于流-固耦合作用下的涡激振动原理,设计了一种圆筒型结构风能俘获装置,并研究了流固边界层变化对压电俘能特性的影响规律,研究表明涡流激励可以增强压电元件的振动幅值,进而提高其能量的输出^[15]。考虑封闭的气体环境具有能量密度高,气体状态相对可控等特点,国内外学者针对封闭环境下的气体压

力能俘获也进行了深入研究。Kim等人就封闭腔中气体介质所具有的压力波动特性,进行了理论分析和实验研究^[16-17]。针对定容积压电能量收集装置的发电特性也有相关研究,研究结果显示密闭高压冲击可获得毫瓦级的能量输出^[18-19]。

为更好地实现气动系统气体压力能转化为电能,本文提出一种阵列式盘型压电俘能器。借助气缸运行过程中产生的交变压力激励盘型压电片,并研究该工况下盘型压电阵列的联合发电特性,为气动系统无线传感器等低功耗电子器件的自供能技术提供进一步的前期基础。文中以盘型压电单晶片为例,建立了盘型压电阵列发电模型,制作了实验样机并搭建了测试系统,测试结果证明了阵列式盘型压电俘能器可在交变的高压气体载荷作用下进行有效的电能输出。

2 压电阵列结构与俘能原理

2.1 压电阵列结构

本文提出一种交变高压气体激励的阵列式盘型压电俘能器,其可通过多片压电振子协调工作来提高气体压力能回收效率。图1为阵列式盘型压电俘能器原理与结构示意图。

如图1所示,陶瓷压电片由铜板基板与PZT-5H组成,基底的中心处带有圆形凹槽,凹槽直径小于铜板基板直径,铜板基板与基底通过高强度密封黏结剂黏接形成了微型密封腔。当高压气体作用于压电片表面时,压电片会发生弯曲形变,受

正压电效应影响,随着形变量的产生会有多余电荷溢出压电材料从而产生电能。但由于压电材料电能的输出受其固定边界条件的影响,因此采用正确的边界条件对压电材料进行固定可提高其电能输出效率。压电阵列被均布与基底四周,中央一片压电片可直接受到来自进气口高压气体的冲击,而周围四片压电片可在密闭容腔与微型容腔之间产生压力差后发生形变。

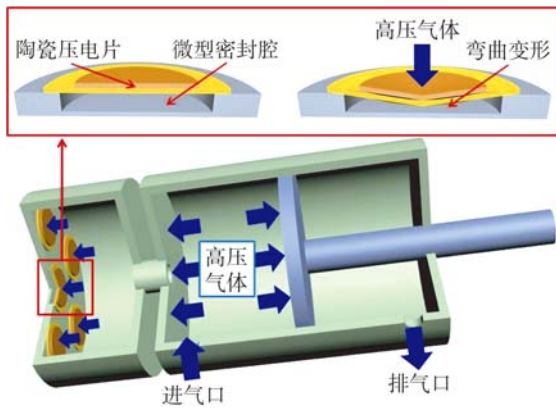


图 1 阵列式盘型压电俘能器原理与结构图

Fig.1 Principle and structure of array piezoelectric plate harvester

2.2 压电阵列俘能原理

阵列式盘型压电俘能器是利用压电材料的正压电效应进行能量转化的。压电材料内部晶体承受压力后会产生与压力成比例的电压,而晶体结构中心的无对称性会导致电荷出现移动从而使压电材料产生电流。单纯从机电耦合的角度考虑,压电材料通常分别为机械自由和机械夹持两种固定边界条件。针对机械自由条件很难承受较大负载力的特点,本文采用机械夹持方式对盘型压电片进行固定。

压电本构方程可以揭示压电材料的发电特性,其集中反映了压电元件所受外力引起的机械形变与输出电能之间的关系。压电本构方程可表示为:

$$\begin{bmatrix} D \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon^T & d_{33} \\ d_{33} & s^E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E \\ T \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中: S 为应变, D 为电位移(C/m^2), E 为电场强度(V/m), T 为应力(N/m^2), ϵ^T 表示在常应力下的介电常数, s^E 表示当电场为常数时的服从系数(即弹性模量的倒数), d_{33} 表示机电耦合系数。设每片盘型压电片的面积为 A ,厚度为 t ,数量为 n ,

则可得压电阵列俘能器整体本构方程:

$$\begin{bmatrix} Q \\ \Delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C & nd_{33} \\ nd_{33} & \frac{1}{K_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ f \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中: Q 为俘能器产生的总电荷量, Δ 为 n 片压电片产生的总变形量, C 为无气体载荷时压电片的电容, K_a 是压电陶瓷片的刚度, V 是输出电压, f 为气体的作用力。其中电容 C 可表示为:

$$C = n\epsilon^T \frac{A}{t}. \quad (3)$$

由此可以得出随着压电片并联数量增加,其输出的电荷量在不断增加,电荷量与电压正相关;随着气体作用力的增加,电压会不断升高。本文实验是利用输出电压研究压电阵列的发电能力。

3 实验系统搭建与测试

阵列式盘型压电俘能器布片位置如图 2 所示,将所购置的压电片分别通过阻抗测试仪分析其动态电阻,并最终选取阻抗相同的 5 片进行实验。为了区分不同位置压电片的发电性能,本文将所用 5 片压电片命名为 A、B、C、D、E。压电片与基底之间通过高强度密封胶进行胶黏连接,基底和容腔通过螺纹副连接,共同组成密闭容腔。为了确保容腔的密封效果,螺纹副之间缠绕多层生胶带进行密封,调节好的高压气体可由进气孔流入密闭容腔。

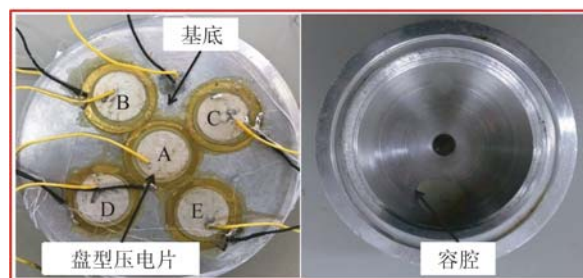


图 2 盘型压电阵列实物图

Fig.2 Array of piezoelectric plates

所设计样机选用直径为 13.0 mm,厚度为 0.2 mm 的压电陶瓷材料进行实验,其中铜板基板的厚度为 0.3 mm,直径为 16.0 mm。为了产生压力差,制作样机时采用密封胶对压电片进行黏接,处于基底与压电片之间的密封胶厚度大约为 0.3 mm,进气孔的直径为 10.0 mm,容腔的内径为 60.0 mm。

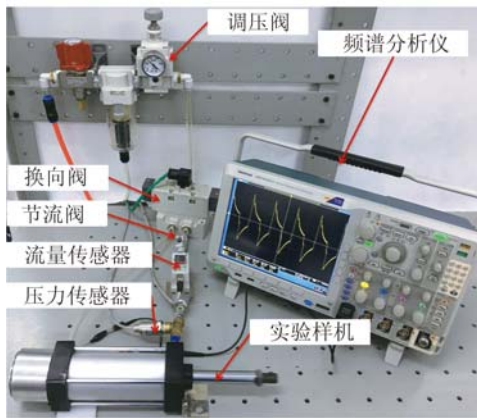


图 3 盘型压电阵列发电性能测试实验系统

Fig. 3 Test system of array piezoelectric plate harvester

压电阵列发电性能测试实验系统如图 3 所示,整套实验系统分别由调压阀、换向阀、节流阀、流量传感器、压力传感器、频谱分析仪和实验样机组组成,高压气体需通过调压阀调节压力,其压力数据由压力传感器进行采集。换向阀可控制密闭腔内高压气体的流入与流出,节流阀可进行流量调节,气体流量参数可以通过流量传感器进行测量,调节好的气体可通过实验样机上部的进气孔流入气缸内部,在高压气体的作用下气缸进行循环往复的运行,从而在密闭的气缸中会产生交变的气体载荷,阵列式盘型压电俘能器在气体载荷作用下可进行电能输出,输出的电压通过频谱分析仪进行测试与记录。

表 1 实验系统的元件型号

Tab. 1 Type of component in test system

名称	公司(型号)
调压阀	SMC (IR3020-04)
换向阀	SMC (VQ7-8-FG)
节流阀	SMC (AS2052F)
流量传感器	SMC (PFA751-04)
压力传感器	SMC (PSE560-01)
频谱分析仪	Tektronix(MDO4054B-3)

实验系统中调压阀、换向阀和节流阀的适用压力为 0~1.0 MPa,流量传感器的使用压力为 0~0.75 MPa,流量在 50~500 L/min 间可调节,最小调节单位为 5 L/min。压力传感器的压力在 0~1.0 MPa 间可调节,其最小测量精度为 10 kPa。频谱分析仪是美国泰克公司生产的四通道检测设备,用于时域与频域分析。实验系统中

各元件名称与具体型号如表 1 所示。

为了研究其发电性能,本文搭建了实验测试系统并对阵列式盘型压电俘能器的发电性能进行了实验测试。为了确保实验的准确性,每个数据点都进行了多次测量。图 4 为 A 片盘型压电片的电压输出曲线。当交变载荷压力为 300 kPa、周期为 2.5 s,气缸行程为 20 mm 时,A 压电片输出的峰值电压可达 36.1 V。为了更好地对比不同位置压电片的发电性能,图 5 给出了 E 片压电片的电压输出曲线。在相同的工况条件下,E 片压电片的输出电压为 26.1 V。

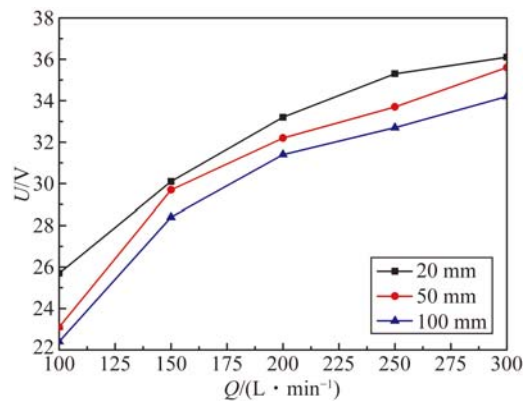


图 4 A 片盘型压电片的电压输出曲线

Fig. 4 Output voltages of A piezoelectric plate

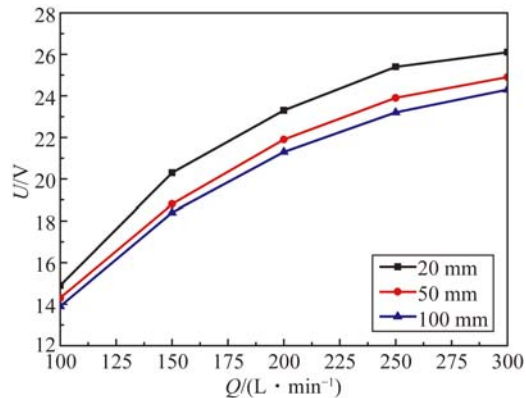


图 5 E 片盘型压电片的电压输出曲线

Fig. 5 Output voltages of E piezoelectric plate

对比图 4 与图 5 可知,均布在周围的压电片输出电压要小于中央 1 片压电片的电压,其原因在于中央 1 片压电片不仅承受了与旁 4 片压电片相同的气体压力载荷,还直接受到快速气流的冲击,因此其发电量比旁 4 片压电片要略高一些。而 A、E 2 片压电片的发电量都随着气缸行程的增加而增加,即在相同压力载荷下,气缸行程与发

电量成负相关。

图 6 给出了交变载荷处于 300 kPa、气体流量为 300 L/min、周期为 2.5 s 时, A 片压电片的电压输出波形图。由图可知, 在交变的气体载荷作用下, 压电片会产生交变的电压输出, 且在峰值点过后, 会产生电压的波动。其原因在于当高压气体进入气缸时, 气缸活塞处于静止状态, 高压气流迅速冲击活塞以及布置于气缸后端密闭腔室底部的盘型压电片, 在高压气体的作用下, 陶瓷压电片会输出电压, 而活塞在高压气体载荷的作用下会进行加速移动。由于活塞的移动, 气缸缸筒内部压力会随着腔内容积的增大而减小, 因此盘型压电片的电压会有所下降, 当活塞到达最大行程时又处于静止状态, 此时缸筒内部的压力会逐渐升高直到压力饱和, 因此输出电压会出现上升而后下降。

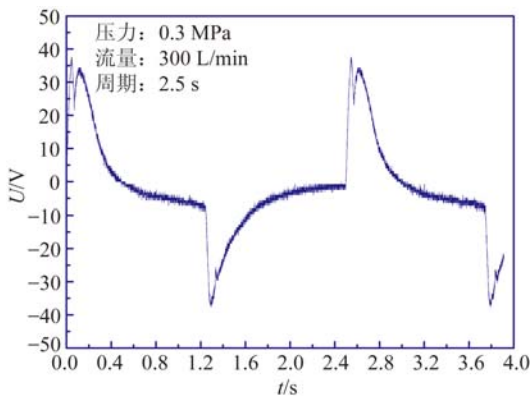


图 6 A 片压电片的电压输出波形图
Fig. 6 Output wave of A piezoelectric plate

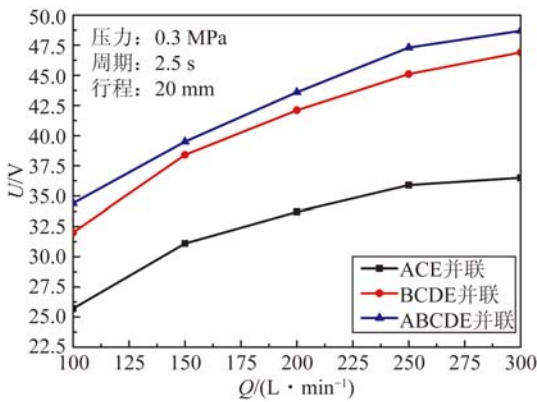
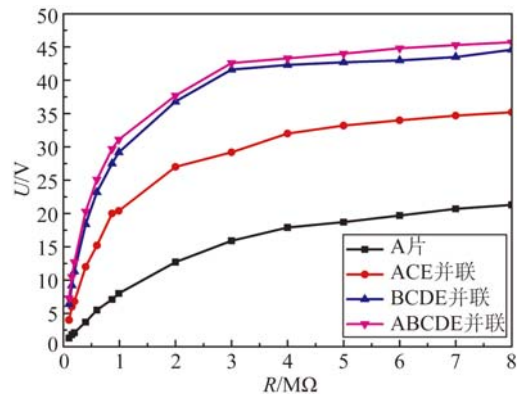


图 7 并联压电阵列电压输出曲线
Fig. 7 Output voltages of parallel piezo-array

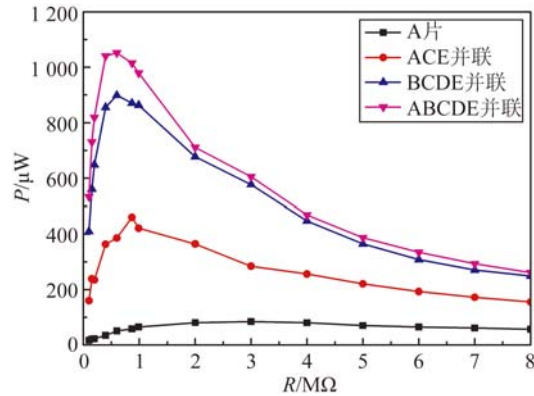
图 7 为并联压电阵列输出电压随流量的变化

曲线。实验条件为交变载荷压力 300 kPa、活塞行程 20 mm、周期 2.5 s, 文中具体分析了流量与峰值电压的输出规律。结果表明, 当气体流量一定时, 随着并联的压电片数量增加峰值电压也随之增大, 这与传统电路并联规律有所区别。与其他实验结果相比, 当压电片数量增至 5 片时, 输出电压效果较明显。在流量为 300 L/min 时, 5 片并联压电片的峰值电压可达到 48.7 V。

为了更好地评价压电阵列外接负载时的发电性能, 以中央 A 片盘型压电片为基准进行多片压电阵列并联实验研究。图 8(a)与(b)分别描述了当增加负载电阻后并联压电阵列的峰值电压与瞬时功率情况。图 8 表明, 5 片压电片并联的输出电压和瞬时功率明显高于单片压电片, 当周期为 2.5 s、活塞行程为 20 mm、负载压力为 300 kPa、气体流量为 300 L/min 时, 外接负载电阻为 8 MΩ 时具有较大的输出电压, 峰值电压为 45.7 V, 5 片并联最佳匹配电阻为 600 kΩ, 最大的瞬时功率为 1 052 μW, 输出功率可满足低功耗传感器的能量需求。



(a) 输出电压与负载的关系曲线
(a) Output voltages in different loads



(b) 输出功率与负载的关系曲线
(b) Outputs power in different loads

图 8 增加负载电阻后并联压电阵列的输出电压和输出功率
Fig. 8 Output voltages and output powers in different loads

4 结 论

设计了一种阵列式盘型压电俘能器,对压电阵列的工作原理进行了分析及实验研究。理论分析结果表明:压电片的电容和电荷量会随着并联压电片数量的增多而增加,电荷量与电压呈正相关,随着激励载荷的增加输出电压会相应提高。阵列式盘型压电俘能器可以通过改变气动参数,

如压力、流量、换向周期等调节发电量。分别研究了不同位置单片压电片与电压输出的关系,得出中央压电片电压输出较高的结论。研究了多片压电片并联的电压输出规律,研究表明5片压电阵列并联具有较好的电能输出效果。实验结果显示,外接负载电阻为8 M Ω 时输出的峰值电压为45.7 V,5片并联最佳匹配电阻为600 k Ω ,最大瞬时功率为1 052 μ W,输出功率可满足低功耗传感器的能量需求。

参考文献:

- [1] 陈启复. 对我国气动工业现状与未来发展的思考——气动行业“十二五”发展规划建议[J]. 液压气动与密封, 2012, 32(1): 16-22.
CHEN Q F. Thinking about the present and Future development of China pneumatic industry: suggestions to the 12th five-year development plan for pneumatic field [J]. *Hydraulics Pneumatics & Seals*, 2012, 32(1): 16-22. (in Chinese)
- [2] 李征, 万杰, 阚君武, 等. 基于流固耦合作用的压电液压振动俘能器[J]. 光学精密工程, 2012, 20(5): 1002-1008.
LI ZH, WAN J, KAN J W, *et al.*. Piezo-hydraulic energy harvester based on solid-fluid coupling vibration [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(5): 1002-1008. (in Chinese)
- [3] 郝鹏飞, 孙喜明, 何枫. 气动技术中无线技术应用[J]. 液压与气动, 2014(11): 1-5.
HAO P F, SUN X M, HE F. Analysis of wireless technology for pneumatic technology application [J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2014(11): 1-5. (in Chinese)
- [4] 王淑云, 张肖逸, 阚君武, 等. 气体耦合式宽带/低频压电振动俘能器[J]. 光学精密工程, 2015, 23(2): 497-503.
WANG S Y, ZHANG X Y, KAN J W, *et al.*. Wideband/low frequency piezoelectric vibration energy harvester based on pneumato-coupling [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(2): 497-503. (in Chinese)
- [5] KUCHLE J J, LOVE N D. Self-powered wireless thermoelectric sensors [J]. *Measurement*, 2014, 47: 26-32.
- [6] SHAIKH F K, ZEADALLY S. Energy Harvesting in wireless sensor networks: A comprehensive review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 55: 1041-1054.
- [7] TOPRAK A, TIGLI O. Piezoelectric energy harvesting: state-of-the-art and challenges [J]. *Applied Physics Reviews*, 2014, 1(3): 031104.
- [8] KISHORE R A, VUČKOVIC Ć D, PRIYA S. Ultra-low wind speed piezoelectric windmill [J]. *Ferroelectrics*, 2014, 460(1): 98-107.
- [9] YANG Y, SHEN Q L, JIN J M, *et al.*. Rotational piezoelectric wind energy harvesting using impact-induced resonance [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(5): 053901.
- [10] 刘祥建, 朱莉娅, 陈仁文. 两自由度悬臂梁压电发电装置的宽频发电性能[J]. 光学精密工程, 2016, 24(7): 1669-1676.
LIU X J, ZHU L Y, CHEN R W. Broadband generation performance of two-degree-of-freedom cantilever beam piezoelectric generator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(7): 1669-1676. (in Chinese)
- [11] 阚君武, 张肖逸, 王淑云, 等. 直激式压电风能捕获器的性能分析与实验[J]. 光学精密工程, 2016, 24(5): 1087-1092.
KAN J W, ZHANG X Y, WANG S Y, *et al.*. Performance analysis and test of blowing-type PZT wind energy harvester [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(5): 1087-1092. (in Chinese)
- [12] 刘颖, 王艳芬, 李刚, 等. MEMS 低频压电振动能量采集器[J]. 光学精密工程, 2014, 22(9): 2476-2482.
LIU Y, WANG Y F, LI G, *et al.*. MEMS-based low-frequency piezoelectric vibration energy harvester [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(9): 2476-2482. (in Chinese)
- [13] 刘祥建, 陈仁文, 侯志伟. 蒲公英状压电振动能量收集装置宽频带设计[J]. 光学精密工程, 2014,

- 22(7): 1850-1856.
- LIU X J, CHEN R W, HOU ZH W. Wide-band design of dandelion-shape piezoelectric vibration energy harvester [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(7): 1850-1856. (in Chinese)
- [14] PRIYA S. Modeling of electric energy harvesting using piezoelectric windmill [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 87(18): 184101.
- [15] AKAYDIN H D, ELVIN N, ANDREOPOULOS Y. Energy harvesting from highly unsteady fluid flows using piezoelectric materials [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2010, 21(13): 1263-1278.
- [16] KIM S, CLARK W W, WANG Q M. Piezoelectric energy harvesting with a clamped circular plate: analysis [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2005, 16(10): 847-854.
- [17] KIM S, CLARK W W, WANG Q M. Piezoelectric energy harvesting with a clamped circular plate: experimental study [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2005, 16(10): 855-863.
- [18] WANG Y T, WANG L, CHENG T H, et al.. Sealed piezoelectric energy harvester driven by hyperbaric air load [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(3): 033902.
- [19] CHENGT H, WANG Y T, QIN F, et al.. Piezoelectric energy harvesting in coupling-chamber excited by the vortex-induced pressure [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 109(7): 073902.

作者简介:



程廷海(1983—),男,黑龙江牡丹江人,博士,副教授,硕士研究生导师,2013年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事环境振动能量俘获与自供能技术和压电驱动技术研究。E-mail: chengtinghai@163.com



刘文博(1991—),男,河北承德人,硕士研究生,主要从事环境能量俘获与自供能技术的研究。E-mail: wenboliu_lsss@163.com