

腔式压电气流发电机结构与性能研究

王淑云 余杰 阚君武 蒋永华 郑佳佳 谢心怡

(浙江师范大学精密机械与智能结构研究所, 金华 321004)

摘要: 为满足农业物联网实时状态监测系统的供电需求,提出了一种腔式压电气流发电机,并从理论和试验两方面进行了研究,获得了激励参数(激励距离、气流压力)及结构参数(主副腔长度及直径)对输出电压的影响规律。研究表明,其他参数确定时,存在最佳距离 d_f^* 、最佳主腔长度 l_c^* 及最佳腔盖孔径 d_r^* ,使发电机输出电压最大,且 d_f^* 、 l_c^* 、 d_r^* 及其所对应的最大电压均随气流压力增加而增加。此外,气流压力较低时存在最佳副腔长度 l_r^* ,使输出电压最大,且 l_r^* 随气流压力增加而减小,所对应的最大电压随气流压力增加而增加;相反,气流压力较高时,输出电压随副腔长度减小而增加,无副腔时输出电压最大。故实际测试中可根据气流压力确定腔体尺度。试验测得发电机最大功率为2.61 mW。

关键词: 发电机; 腔式压电; 结构; 性能

中图分类号: TN384; TM614 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)01-0421-05

Structure and Performance of Piezoelectric Airflow Energy Harvester

WANG Shuyun YU Jie KAN Junwu JIANG Yonghua ZHENG Jiajia XIE Xinyi

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

Abstract: To meet the energy demand of micro-type sensor and real-time condition monitoring system, and reduce the pollution of chemical batteries to water and soil, a piezoelectric airflow energy harvester based on resonant cavity was presented. In order to obtain the vibration state of the fluid in the energy harvester and the deformation characteristics of the piezoelectric transducer when the structure was different, the energy harvesters with different structures were established and simulated by COMSOL, the results showed that the structure of the generator had great influence on the deformation and vibration frequency of the piezoelectric transducer. The influential factors on the harvester properties were analyzed and proof experiments were carried out, the effects of excitation parameters (excitation distance and air pressure) and structural parameters (the length and diameter of the cavity and neck) on the output voltage were obtained. Under other given parameters, there were optimal excitation distance (d_f^*), length of cavity (l_c^*) and diameter of hole (d_r^*) for the voltage to achieve their peaks, besides, $l_f^*/l_c^*/d_r^*$ and the corresponding maximum voltage were increased with the increase of air pressure. In addition, when air pressure was low, there was optimal length of neck to maximize the output voltage, l_r^* also was decreased with the increase of the air pressure and the corresponding maximum voltage was increased with the increase of the air pressure; on the contrary, when air pressure was high, the output voltage was the maximum without neck, and it was increased with the decrease of length of neck. As a result, the structure and scale of the cavity should be determined according to the air pressure. Under other given parameters, the optimum external resistance (R^*) was increased with the increase of the length of neck (l_r), and the output power (P_g) was decreased with the increase of the length of neck (l_r), the maximum power of the energy harvester was 2.61 mW in the process of experiment.

Key words: energy harvester; cavity and piezoelectricity; structure; performance

收稿日期: 2017-05-08 修回日期: 2017-07-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(61574128、51377147、51577173、51277166)和浙江省自然科学基金项目(LY17F010004、LY16F010003)

作者简介: 王淑云(1965—),女,教授,主要从事压电俘能、驱动及控制技术研究, E-mail: jutwsy@163.com

通信作者: 阚君武(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事压电俘能与驱动、精密机械与微小机械研究, E-mail: jutwsy@163.com

0 引言

为实现农业物联网状态实时监测与远程控制系统节点的能源自给,减少化学电池对水及土壤的污染,相继提出了基于环境能量回收的压电、静电、热电及电磁等原理的微型发电机(又称俘能器或能量捕获器)^[1-4]。每类发电机都有其自身的优势和适用领域,压电发电机具有结构简单、无电磁干扰、易于制作且易于实现结构上的微小化与集成化等优势,适用范围更广^[5-6]。目前,压电发电机已可有效回收环境振动能^[7]、旋转体动能^[8]以及水流能/风能^[9-10]等。前两类压电发电机研究较早且所获成果较多,已逐步用于无线传感器及健康监测系统等领域。然而,压电流体发电机的研究国内外还都刚开始,尚处于探索和起步阶段^[11-13]。

根据激励方式,现有压电流体发电机主要可分为直激式^[14]、钝体扰流式^[15]和共振腔式^[16-17]三大类。前两类发电机是利用悬臂梁型压电换能器与流体直接耦合作用发电的,但其激励原理不同^[18]。直激式发电机中,压电换能器与流体速度方向垂直或成一定的角度,流体流过压电换能器时漩涡的交替生成与脱落会引起流体压力变化,从而激励压电换能器产生电能,该类俘能器结构简单,适于低速气体环境,高速或液体环境下压电换能器因变形过大而易损毁。钝体扰流式发电机中,压电换能器与流体速度方向平行且置于钝体之后,通过流体绕过钝体时所产生的不对称漩涡间接激励(漩涡是由钝体与流体间的耦合作用产生的),主要用于液体环境,缺点是结构复杂、体积较大,难以实现微小化与集成化。不同于直激式及钝体扰流式压电发电机的结构原理及应用场合,谐振腔式发电机是利用谐振腔内流体高频振荡激励圆形压电换能器发电的,具有结构简单、体积小、强度高优势,适于高速气体环境,除构造各类自供电引信^[19]外,还可用于航空器、高铁等载运工具(引起高速气流)以及气动控制系统等的自供电监测^[16-17]。

本文在借鉴声学谐振腔俘能器结构的基础上设计腔式压电气流发电机,并从理论和试验两方面进行研究,获得主副腔长度及直径等对其发电性能的影响规律。

1 结构与工作原理

腔式压电气流发电机结构如图 1 所示,主要由压电换能器、主腔及副腔构成。发电机置于流场中时,外部气流迫使主副腔内的气体产生振动,从而迫使压电换能器振动并将流动动能转换成电能。所生

成电压与腔内气体振动引起的气体压力差及压电换能器中心点变形量呈较好的线性关系,而腔内气体压力差及压电换能器中心变形量又是由主副腔结构尺寸所决定的。

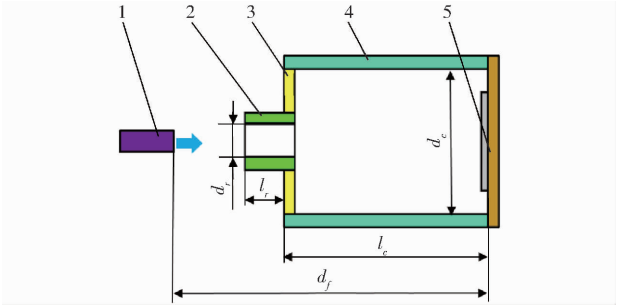


图 1 腔式压电气流发电机结构示意图
Fig. 1 Structure diagram of piezoelectric harvester
1. 出风口 2. 副腔 3. 腔盖 4. 主腔 5. 压电换能器

为便于性能对比及叙述,将主副腔尺度不同的发电机定义成 4 种不同类型:A 型,主副腔同时存在,即图 1 所示结构;B 型,仅有主腔和腔盖(图 1 中副腔长度为 0);C 型,仅有主腔(图 1 中副腔长度为 0,副腔内径等于主腔内径);D 型,无主副腔、腔盖,仅有压电换能器。

2 建模与仿真分析

为获得结构尺度不同时腔式发电机腔内流体的振动状态及压电换能器的变形特性,建立了 A、B 及 C 型发电机的 COMSOL 模型并进行了仿真分析,所用模拟仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真及试验分析用相关参数
Tab. 1 Parameters for simulation and test

参数	数值	参数	数值
陶瓷杨氏模量 E_p/Pa	8.2×10^{10}	陶瓷半径 r_p/mm	17
基板杨氏模量 E_m/Pa	8.9×10^{10}	基板半径 r_m/mm	20
空气密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1.2	陶瓷厚度 δ_p/mm	0.25
陶瓷密度 $\rho_p/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	8 700	基板厚度 δ_m/mm	0.25
基板密度 $\rho_m/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	7 500	主腔长度 l_c/mm	80
腔盖开孔半径 r_r/mm	7	主腔内径 d_c/mm	38
激励距离 d_f/mm	145	副腔长度 l_r/mm	10
入口流速 $v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	30	副腔内径 d_r/mm	14
气流压力 p/MPa	0.3	壁厚 d_b/mm	1

图 2 为风速 30 m/s 时 A、B 及 C 型压电气流发电机腔内稳态时流场的速度云图。从图 2 可以看出,3 种结构发电机的腔体底部都有漩涡不断地生成,从而引起腔体内气流速度和压力不断变化,迫使压电换能器产生弯曲变形发电。因 3 种类型发电机结构不同,稳态时其腔内流场分布及漩涡形态都具有明显的区别,进而导致压电换能器的振动及发电特性不同。

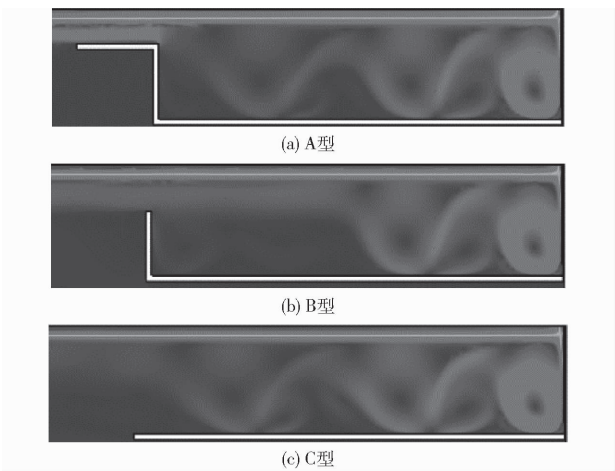


图 2 3 种类型发电机内的气体速度云图
Fig. 2 Velocity nephograms of flow field under three different structures

图 3 给出了稳态时 3 种类型发电机中压电换能器中心点处的振动波形图,图中曲线表明,发电机的结构对压电换能器中心点的变形量、振动频率及静位移差异都有较大影响,其中 A、C 型发电机中压电换能器的变形量相对较小,B 型发电机中压电换能器的变形量最大且产生了较大的静变形。上述现象表明,其他条件确定时可能存在最佳的副腔长度使发电机输出电压(压电换能器变形量)最大,而该最佳副腔长度还应与气流速度及主副腔孔径等其他参数有关。

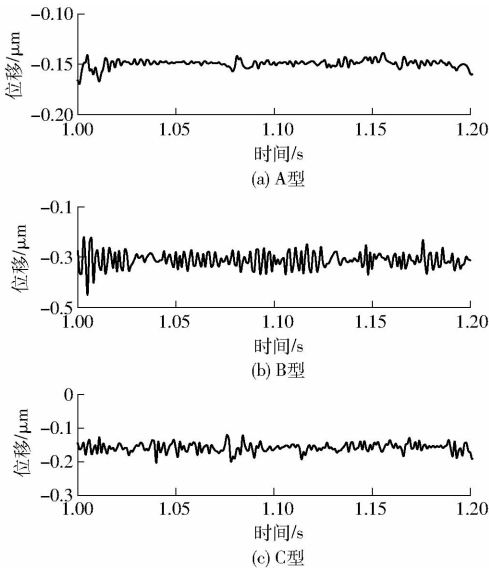


图 3 3 种类型发电机压电换能器圆心点处振动波形图
Fig. 3 Displacement of the center of pzt vs time under three different structures

3 试验测试

为获得腔式压电气流发电机输出性能与相关参数的关系,设计了样机及测试系统(图 4)。所用仪器设备为:DS5042M 型数字存储示波器、AR2000 型

调压阀(气流压力范围 0 ~ 0.5 MPa,调压步长 0.05 MPa)、无油空气压缩机(额定排气压力 0.7 MPa)等。试验中通过调节调压阀来改变出风口压力(间隔 0.05 MPa,气流压力 0.1 ~ 0.5 MPa,所对应的气流速度为 6 ~ 30 m/s,气流速度与气流压力呈较好的线性关系);圆形压电换能器尺寸为:铜片基板直径 46 mm,厚度 0.25 mm;压电陶瓷直径 41 mm,厚度 0.25 mm。

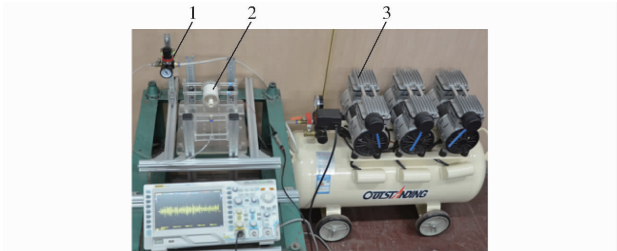


图 4 试验样机及测试系统
Fig. 4 Piezoelectric energy harvester and test system
1. 调压阀 2. 试验样机 3. 空气压缩机

图 5 为气流压力为 0.3 MPa 时 3 种类型压电气流发电机(结构尺寸参数如表 1 所示)的稳态电压波形图。从图 5 可以看出,3 种类型发电机的输出电压差异较大,其中 B 型的输出的电压峰值最高(16.6 V),A 型和 C 型的输出电压峰值相对较低(分别为 11.6 V 和 4.6 V),这与仿真分析中 3 种类型发电机中压电换能器变形量之间的关系是一致的,故研究中可采用压电换能器变形特性表征发电机的电压特性。由图 5 还可得,3 种类型发电机中压电换能器的振动响应及输出电压波形都并非正弦波,这与声学谐振腔^[15]中压电换能器的响应特性存在一定的差异,原因是实际气流速度及其流场分布并不均匀,而是存在一定的随机波动。在后续的试验中,利用稳态时 5 s 内电压波形的峰值代表实际输出电压。

以 D 型发电机为例,图 6 为不同气流压力(即空压机管道出口处的气流压力, p)时输出电压(V_g)与激励距离(d_f)的关系曲线。由图 6 可知, p 给定时存在最佳的激励距离(d_f^*)使输出电压取到最大值(V_g^*),且随 p 的增加 d_f^* 及其所对应的 V_g^* 均呈增加趋势,产生这一现象的原因在于:压电换能器所受的气流静压力随激励距离的增加而降低,激励距离过小时压电换能器静变形过大、刚度增加,从而降低了动态响应能力;相反,激励距离过大时,气流压力及速度衰减较大,即气流的激励能力减弱,从而降低了压电换能器的变形量及输出电压。综合图 6 及其他类型发电机的相关试验结果,本文的后续试验中采用的激励距离均为 80 mm。

以 C 型发电机为例,图 7 给出了不同气流压力

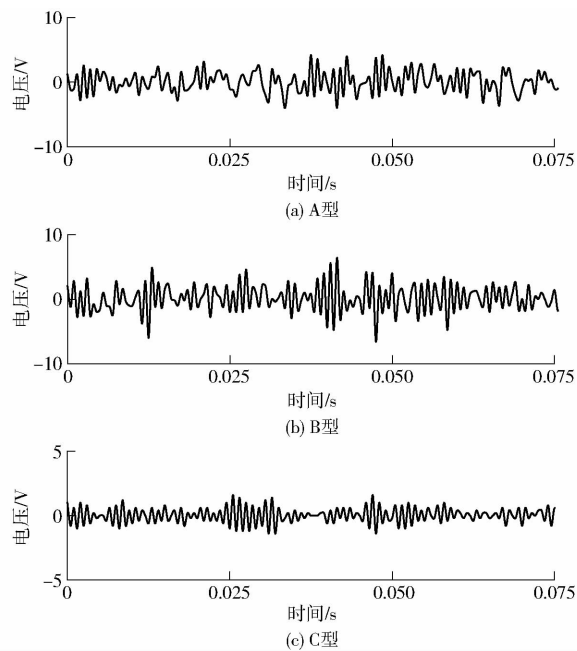


图 5 3 种类型发电机输出电压与时间的关系
Fig. 5 Relationship between generated voltage and time under three different structures

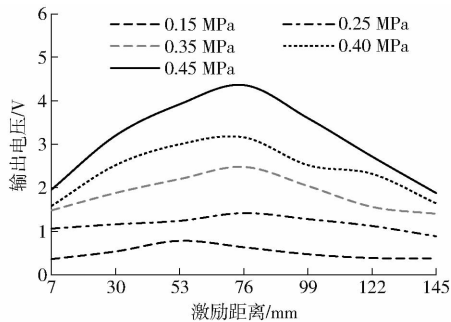


图 6 不同气流压力时发电机输出电压与激励距离的关系
Fig. 6 Relationship between generated voltage and distance under different wind pressures

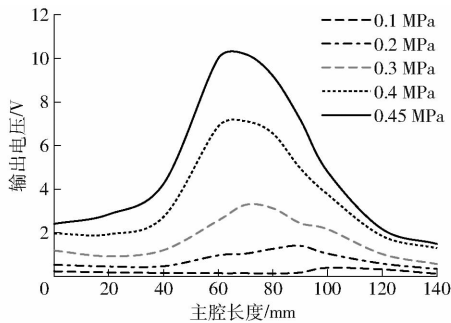


图 7 不同气流压力时输出电压与主腔长度的关系
Fig. 7 Relationship between generated voltage and length of cavity under different wind pressures

时输出电压 (V_g) 与主腔长度 (l_c) 的关系曲线。从图 7 可知, p 给定时存在最佳的主腔长度 l_c^* 使输出电压取到最大值 (V_g^*), 且随 p 的增加 l_c^* 减小, l_c^* 所对应的 V_g^* 增加, $p = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.45$ MPa 时的 l_c^* 及其所对应的 V_g^* 分别为 110、90、70、65、

60 mm 和 0.4、1、2.8、7.1、10.4 V, 故需根据实际的气流压力确定合理的主腔长度, 以提升发电机的输出性能。由图 7 还得, 当 $p > 0.3$ MPa 时, l_c^* 受 p 的影响较小, 故后续试验中的主腔长度确定为 70 mm。

以 B 型发电机为例, 图 8 给出了不同气流压力 (p) 时输出电压 (V_g) 与腔盖孔径 (副腔直径, d_r) 的关系曲线。由图 8 可知, p 给定时存在最佳腔盖孔径 d_r^* 使得输出电压最大 (V_g^*), 且 d_r^* 及其所对应的 V_g^* 均随 p 的增加而增加, $p = 0.1, 0.15, 0.25, 0.35, 0.45$ MPa 时的 d_r^* 及其所对应的 V_g^* 分别为 13、15.5、15、15.5、16 mm 与 2.5、6、12、20、27 V。在气体压力范围内, 各气流压力下的输出电压相对较大时 d_r 在 13 ~ 16 mm 之间, 后续试验中所用副腔直径为 14 mm。

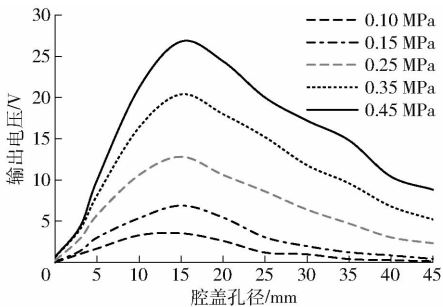


图 8 不同气流压力时输出电压与腔盖孔径的关系
Fig. 8 Relationship between generated voltage and diameter of hole under different wind pressures

图 9 为不同气流压力 (p) 时 A 型发电机输出电压 (V_g) 与副腔长度 (l_r) 的关系曲线。由图 9 可知, 气流压力较低 ($p < 0.3$ MPa) 时, 存在最佳的副腔长度 (l_r^*) 使输出电压最大 (V_g^*), 且 l_r^* 随 p 的增加而减小, l_r^* 所对应的 V_g^* 随 p 的增加而增加; 当气流压力较高 ($p > 0.3$ MPa) 时, 输出电压随副腔长度减小而增加, 无副腔 (仅有腔盖, 实为 B 型发电机) 时输出电压最大。这表明, 在气流压力较低时添加一定长度的副腔能使输出电压有所增加, 而气流压力较

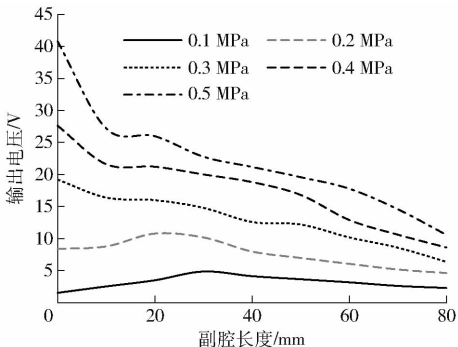


图 9 不同气流压力下输出电压与副腔长度的关系
Fig. 9 Relationship between generated voltage and length of neck under different wind pressures

高时降低副腔长度可提高发电机的发电能力。

图 10 给出的是气流压力为 0.3 MPa 时 A 型发电机不同副腔长度 l_r 下外接负载 R 与输出功率 P_g 的关系曲线。由图 10 可知,存在一个最佳的外接电阻 R^* 使得输出功率达到最大,且 R^* 随着 l_r 的增大而增大, $l_r = 20、40、60\text{ mm}$ 时的 R^* 及其所对应 P_g^* 分别为 12、20、30 k Ω 与 2.61、1.8、1.1 mW。本文提出的腔式压电气流发电机采用圆形压电振子,并且工作在高风速下,所测得的输出功率最大可达 2.61 mW,而直激式、钝体绕流式压电流体发电机大多适用于

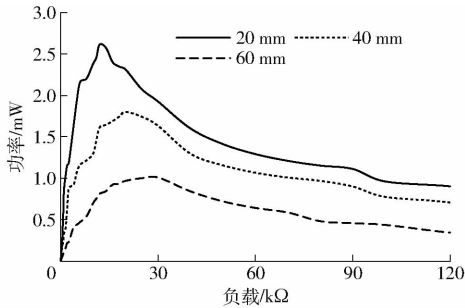


图 10 气流压力为 0.3 MPa 时功率与负载的关系
Fig. 10 Relationship between output power and load resistance under $p = 0.3\text{ MPa}$

中低风速环境,且采用悬臂梁压电振子,测得的最大输出功率分别可达 3.6 mW^[11]、75 μW ^[20]。

4 结束语

提出了一种腔式压电气流发电机,从理论和试验两方面进行了腔式压电气流发电机的研究,获得了激励参数(激励距离 d_f 、气流压力 p)及结构参数(主腔长度 l_c 、腔盖孔径 d_r 、副腔长度 l_r)对输出电压 V_g 的影响规律,其他参数确定时,存在最佳距离 d_f^* 、最佳主腔长度 l_c^* 及最佳腔盖孔径 d_r^* 使发电机输出电压最大(V_g^*),且 d_f^* 、 l_c^* 、 d_r^* 及其所对应的 V_g^* 均随气流压力增加而增加。其他参数确定且气流压力较低($p < 0.3\text{ MPa}$)时,存在最佳副腔长度(l_r^*)使输出电压最大(V_g^*),且 l_r^* 随 p 的增加而减小、 l_r^* 所对应的 V_g^* 随 p 的增加而增加;相反,气流压力较高($p > 0.3\text{ MPa}$)时,输出电压随副腔长度减小而增加,无副腔时输出电压最大。其他参数确定时,最佳外接电阻 R^* 随着副腔长度(l_r)的增大而增大,输出功率(P_g)随着副腔长度(l_r)的增大而减小,试验中测得的发电机输出功率最大为 2.61 mW。

参 考 文 献

- 1 SHAIKH F K, ZEADALLY S. Energy harvesting in wireless sensor networks: a comprehensive review [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2016, 55:1041 – 1054.
- 2 SOJAN S, KULKARNI R K. A comprehensive review of energy harvesting techniques and its potential applications [J]. International Journal of Computer Applications, 2016, 139(3):14 – 19.
- 3 LE M Q, CAPSAL J F, LALLART M, et al. Review on energy harvesting for structural health monitoring in aeronautical applications[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2015, 79:147 – 157.
- 4 CADEI A, DIONISI A, SARDINI E, et al. Kinetic and thermal energy harvesters for implantable medical devices and biomedical autonomous sensors[J]. Measurement Science & Technology, 2014, 25(1):012003.
- 5 BRISCOE J, DUNN S. Piezoelectric nanogenerators—a review of nanostructured piezoelectric energy harvesters[J]. Nano Energy, 2015, 14:15 – 29.
- 6 RASTEGAR J, PEREIRA C M, FENG D, et al. A review of piezoelectric-based electrical energy harvesting methods and devices for munitions[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9799:97992M.
- 7 KAN J, LIU D, WANG S, et al. A piezohydraulic vibration isolator used for energy harvesting[J]. Journal of Intelligent Material Systems & Structures, 2014, 25(14):1727 – 1737.
- 8 KAN J, FU J, WANG S, et al. Study on a piezo-disk energy harvester excited by rotary magnets[J]. Energy, 2017, 122:62 – 69.
- 9 程廷海,王英廷,付贤鹏,等. 定质量分数交变气体载荷激励下压电阵列发电机实验[J/OL]. 农业机械学报,2017, 48(9):194 – 198. http://www.j-m.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170255&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.055.
- CHENG Tinghai, WANG Yingting, FU Xianpeng, et al. Study of drive characterization of fuzevibration piezoelectric generator based on airflow-induced sound [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017, 48(9):194 – 198. (in Chinese)
- 10 文晟,张铁民,杨秀丽,等. 涡致振动型风力压电俘能器流场数值模拟与试验[J/OL]. 农业机械学报,2014, 45(2):269 – 275. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140245&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.02.045.
- WEN Sheng, ZHANG Tiemin, YANG Xiuli, et al. Numerical simulation and experiment of a wind piezoelectric energy harvester based on vortex-induced vibrations [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(2):269 – 275. (in Chinese)
- 11 程廷海,付贤鹏,王英廷,等. 密闭环境气流冲击式压电阵列发电性能实验研究[J]. 液压与气动,2017(3):81 – 86.
- CHENG Tinghai, FU Xianpeng, WANG Yingting, et al. Experimental research for piezoelectric array performance induced by air impact in sealed environment[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2017(3):81 – 86. (in Chinese)

- 11 SUN Feng, ZHANG Ming, JIN Junjie, et al. Mechanical analysis of a three-degree of same-stiffness permanent magnetic spring [J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2016, 52: 667 – 675.
- 12 高海波, 邓宗全, 胡明, 等. 行星轮式月球车移动系统的关键技术[J]. 机械工程学报, 2005, 41(12): 156 – 161.
GAO Haibo, DENG Zongquan, HU Ming, et al. Key technology of moving system of lunar rover with planetary wheel[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(12): 156 – 161. (in Chinese)
- 13 张云鹏, 刘淑琴, 李红伟, 等. 基于磁路分析的轴向混合磁轴承径向承载力解析计算[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 137 – 142.
ZHANG Yunpeng, LIU Shuqin, LI Hongwei, et al. Calculation of radial electromagnetic force of axial hybrid magnetic bearing based on magnetic circuit analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 137 – 142. (in Chinese)
- 14 余跃庆, 崔忠伟, 赵鑫, 等. 柔顺关节并联机器人设计与实验[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(7): 274 – 278. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20130747&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.07.047.
YU Yueqing, CUI Zhongwei, ZHAO Xin, et al. Design and experiment of parallel robot with compliant joints [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(7): 274 – 278. (in Chinese)
- 15 孙凤, 张明, 孙兴伟, 等. 三自由度等刚度永磁弹簧的力学特性研究[J]. 中国机械工程, 2015, 26(8): 1005 – 1009.
SUN Feng, ZHANG Ming, SUN Xingwei, et al. Study on mechanics characteristics of 3-DOF same-stiffness permanent magnetic spring[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(8): 1005 – 1009. (in Chinese)
- 16 陈伟海, 陈竞圆, 崔翔, 等. 绳驱动拟人臂机器人的刚度分析和优化[J]. 华中科技大学学报, 2013, 41(2): 12 – 16.
CHEN Weihai, CHEN Jingyuan, CUI Xiang, et al. Stiffness analysis and optimization of a novel cabledriven anthropomorphic-arm manipulator[J]. Huazhong University of Science and Technology, 2013, 41(2): 12 – 16. (in Chinese)
- 17 杨红, 赵韩. 稀土永磁弹簧的力学特性研究 [J]. 农业机械学报, 2003, 34(1): 111 – 117.
YANG Hong, ZHAO Han. Study on dynamic characters of rare earth permanent magnetic spring[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(1): 111 – 117. (in Chinese)
- 18 田录林, 李言, 王山石, 等. 双筒永磁向心轴承磁力工程化解析算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(6): 57 – 61.
TIAN Lulin, LI Yan, WANG Shanshi, et al. Research on magnetism engineering analytical calculation method for bi-barrel-shaped radial permanent magnetic bearings[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(6): 57 – 61. (in Chinese)
- 19 孙立军, 张涛, 赵兵. 永磁磁轴承数学模型的研究[J]. 机械工程学报, 2005, 41(4): 69 – 74.
SUN Lijun, ZHANG Tao, ZHAO Bing. Study of mathematical model of permanent magnet bearings[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(4): 69 – 74. (in Chinese)
- 20 田录林, 李言, 安源, 等. 轴向放置轴向磁化的双环永磁轴承径向磁力研究[J]. 中国机械工程, 2007, 18(24): 2926 – 2929.
TIAN Lulin, LI Yan, An Yuan, et al. Research on the radial magnetic force of axial placement and axial magnetization bi-annular-shaped PMB[J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(24): 2926 – 2929. (in Chinese)

(上接第 425 页)

- 12 陈扬东, 龚俊杰, 吉灵龙, 等. 新型风力压电发电装置设计及发电性能[J]. 压电与声光, 2017, 39(4): 515 – 519.
CHEN Yangdong, GONG Junjie, JI Linglong, et al. Design of a novel wind piezoelectric generator and its generating performance [J]. Piezoelectrics and Acoustooptics, 2017, 39(4): 515 – 519. (in Chinese)
- 13 陈松, 刘勇, 阚君武, 等. 微型压电泵中引流道对气泡控制的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(12): 379 – 384. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20161248&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.048.
CHEN Song, LIU Yong, KAN Junwu, et al. Effect of lead-flow path on bubble controlling in piezoelectric micro-pump[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(12): 379 – 384. (in Chinese)
- 14 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 Shuyun, SHEN Yalin, KAN Junwu, 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)
- 15 WEINSTEIN A, CACAN M R, SO P M, et al. Vortex shedding induced energy harvesting from piezoelectric materials in heating, ventilation and air conditioning flows[J]. Smart Materials & Structures, 2012, 21(21): 45003 – 45012.
- 16 CHENG T, WANG Y, QIN F, et al. Piezoelectric energy harvesting in coupling-chamber excited by the vortex-induced pressure [J]. Applied Physics Letters, 2016, 109(7): 184101 – 184103.
- 17 MATOVA S P, ELFRINK R, VULLERS R J M, et al. Harvesting energy from airflow with a micromachined piezoelectric harvester inside a Helmholtz resonator[J]. Journal of Micromechanics & Microengineering, 2011, 21(21): 104001 – 104006(6).
- 18 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 Junwu, FU Jiawei, WANG Shuyun, et al. Research status and prospect of vortex-induced vibration micro-fluid energy harvester[J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(6): 1502 – 1512. (in Chinese)
- 19 邹华杰, 陈荷娟, 梁医, 等. 引信振动压电发电机气流致声激励特性研究[J]. 兵工学报, 2015, 36(4): 610 – 618.
ZOU Huajie, CHEN Hejuan, LIANG Yi, et al. Study of drive characterization of fuze vibration piezoelectric generator based on airflow-induces sound [J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(4): 610 – 618. (in Chinese)
- 20 HU G, TSE K T, KWOK K C S, et al. Aerodynamic modification to a circular cylinder to enhance the piezoelectric wind energy harvesting[J]. Applied Physics Letters, 2016, 109(19): 193902.