

定质量分数交变气体载荷激励下压电阵列发电机实验

程廷海¹ 王英廷¹ 付贤鹏¹ 赵宏伟² 包钢³ 赵希禄⁴

(1. 长春工业大学机电工程学院, 长春 130012; 2. 吉林大学机械科学与工程学院, 长春 130025;

3. 哈尔滨工业大学机电工程学院, 哈尔滨 150080; 4. 埼玉工业大学工学部机械工学科, 深谷 3690293)

摘要: 提出一种定质量分数交变气体载荷激励的盘型压电阵列发电机, 设计了盘型压电阵列发电机的样机结构并对压电阵列的工作原理进行了分析, 理论分析结果表明盘型压电片具有良好的承载能力, 适合对具有较高压力的气体能量进行收集, 压电发电量是由气体压缩过程中的体积压缩量、压缩速度、供气压力、周期及流量等多种要素共同决定的。对盘型压电片进行了有限元仿真分析, 分析结果表明盘型压电片适合对高压气体载荷进行能量收集与转换, 压电材料的微小变形就可输出较大的电压。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 的气缸设计了实验样机, 利用气动组件来模拟气体环境搭建测试系统。分别调节压力、周期、流量等参数进行了实验测试。实验结果表明, 当压力固定时, 随着流量的增加峰值电压逐渐升高, 盘型压电片并联式具有较好的效果, 当 5 片压电片并联时最佳匹配电阻为 3 M Ω 且最大的瞬时功率为 6.53 μ W, 输出功率可满足低功耗传感器的能量需求。

关键词: 压电阵列发电机; 定质量分数; 交变气体载荷; 能量转换

中图分类号: TH49 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)02-0407-06

Experiment on Piezoelectric Plate Array Energy Harvester Excited by Alternate High Air Pressure with Constantly Gaseous Mass

CHENG Tinghai¹ WANG Yingting¹ FU Xianpeng¹ ZHAO Hongwei² BAO Gang³ ZHAO Xilu⁴

(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)

Abstract: A piezoelectric plate array energy harvester was proposed, which was excited by constant mass compressed gas, and the alternate high air pressure can be recovered. The structure of the system and working principle of the presented harvester were introduced, and the theoretical and experiment were analyzed. The theoretical analysis results showed that the piezoelectric plate had high bearing capacity and it can collect the compressed gas energy effectively. The piezoelectric harvester was subjected by various parameters such as compression volume and compression speed. The expected effect can be adjusted by changing different parameters. The diameter and thickness of piezoelectric unimorph were 12 mm and 0.2 mm, respectively. The diameter and distance of cylinder were 63 mm and 150 mm and the prototype were fabricated. The test system was built to research the rules and performances of piezoelectric array energy harvester. In the test, the pressure, cycle and flow were adjusted. Experimental results showed that the output voltage was simultaneously increased with the increase of flow when the pressure was fixed. With the increase of parallel number of piezoelectric plates, the output power was increased either. It had optimal effect when the five piezoelectric plates were parallel connected. The optimal load resistance was 3 M Ω and instantaneous power was 6.53 μ W under the five piezoelectric plates parallel.

Key words: piezoelectric array energy harvester; constantly gaseous mass; alternate high air pressure; energy transformation

收稿日期: 2016-06-13 修回日期: 2016-07-31

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(20150312006ZG)、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)、中国博士后科学基金面上项目(2015M571356)和教育部“春晖计划”合作科研项目(Z2015023)

作者简介: 程廷海(1983—),男,副教授,主要从事压电发电和压电驱动技术研究,E-mail: chengtinghai@163.com

引言

针对不同环境条件合理地利用能量收集技术是提高能量收集效率的有效途径^[1-3]。压电材料具有结构简单、能量密度大、不受电磁干扰等特点,易于和微电子产品结合实现集成化与微型化^[4-8]。利用压电材料对低功耗传感器供能的研究已逐步成为国内外压电能量收集领域研究的热点^[9-13]。

气动技术因其具有工作状态稳定、无污染等特点而被广泛应用于工业生产中^[14]。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,传统的供能方式不仅会造成环境的污染,电池的定期更换还会浪费极大的人力物力。因此研究一种针对气动系统低功耗电子器件供能的发电机可有效解决上述问题^[15-17]。但由于气动系统中的气体压力较大,当前普遍采用的梁结构压电发电装置虽然在一定程度上起到发电的效果,但其仍然难以承受高压所带来的巨大冲击。盘结构压电片具有良好的抗冲击能力,但其形变量比悬臂梁结构要小,因此发电效果在很大程度上受到了影响^[18-20]。

针对上述压电发电装置在气动系统能量回收的现状,本文提出一种盘型压电阵列发电机,借助密闭环境下定质量气体压缩所带来的压力变化,研究交变气体载荷激励下盘型压电阵列的联合发电特性。以盘型压电单晶片为例,建立盘型压电片发电模型,并进行理论分析与仿真研究,制作实验样机并搭建测试系统进行测试。

1 压电阵列发电机结构

提出一种基于定质量分数交变气体载荷激励的盘型压电阵列发电机,其通过多个盘型压电振子联合作业来提高发电能力。图1为多片盘型压电片与气缸共同组成的压电发电机,其主要由发电腔、压缩腔、活塞以及压电阵列组成。其中发电腔基底带有凹槽,凹槽与压电阵列可形成多个微型密封腔。当活塞受到交变气体载荷提供的压力时会对压缩腔进行体积压缩,由于压缩腔与发电腔都是密封空间,与外界没有气体质量交换,因此压缩腔与发电腔内的压力会随着压缩腔的体积减小而增大。此时发电腔与微型密封腔会产生压力差,在压力差的作用下盘型压电阵列产生弯曲变形而实现气体压力能与电能的转换。

对图1所示的压电阵列发电机,可通过调节气体负载的供气压力及供气流量使活塞进行不同速度的移动。不同的压力变化可使压电阵列产生多种电

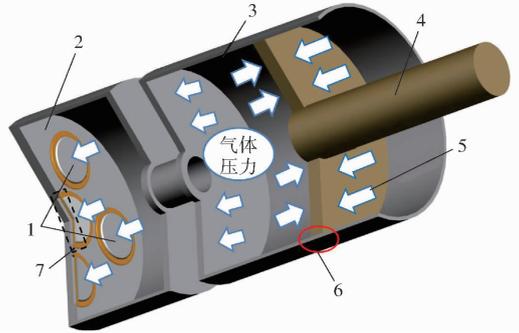


图1 压电发电机结构及原理图

Fig.1 Structure and working principle sketch of piezoelectric energy harvester

1. 压电阵列 2. 发电腔 3. 压缩腔 4. 活塞 5. 气体负载
6. 摩擦力 7. 微型密闭腔

压输出形式。

如图2所示为压电片与基底粘接方式示意图。为满足交变气体作用下,压电陶瓷与铜板基板的挠曲变形保持一致,将压电陶瓷与铜板基板之间进行面与面粘接。为使粘接后的压电片产生较大的形变量,铜板基板与基底采用环形胶粘的方式进行粘接,通过胶粘后铜板基板与基底之间可产生一个微型密封腔,因该腔的存在可使压电片产生较大的挠曲变形,从而使气体能量有效地转换为电能。

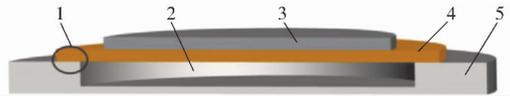


图2 压电片与基底粘接方式示意图

Fig.2 Bonding way on piezoelectric plate and basement

1. 环形胶粘区 2. 微型密封腔 3. 压电陶瓷 4. 铜板基板
5. 基底

2 盘型压电阵列能量转换原理

由于压电发电机是以盘型压电片作为能量转换媒介,因此需对盘型压电片在气体压力作用下的弯曲挠度及能量转化特性进行分析。盘型压电片会在气体载荷 P_x 的作用下产生弯曲变形,根据克希霍夫假设即盘弯曲时其中面保持中性,盘中面内各点无应变,只有沿中面法线的挠度;盘变形前中面的法线,在板弯曲后仍为直线,且仍垂直于变形后的中面;平行于中面的各层材料互不挤压,即板内垂直于板面的正应力不予考虑且不计算。

如图3所示,建立了盘型压电片受力模型,其采用极坐标系 (r, θ, z) ,其中黑色网格区域为压电陶瓷材料PZT-5H,白色区域为铜板基板。因为模型是建立在薄板小挠度的前提下,根据克希霍夫假设,可得

$$Q_r dr d\theta + P_r dQ_r + P_x R_p dr = 0 \quad (1)$$

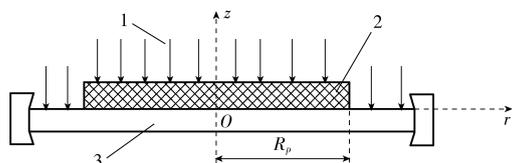


图3 盘型压电片受力模型

Fig. 3 Force model of PZT plate

1. 气体压力 2. 压电陶瓷 3. 铜板基板

式中 Q_r ——横向剪力

R_p ——压电陶瓷的半径

圆板变形后的径向应变 ε_r 与周向应变 ε_θ 分别为

$$\varepsilon_r = \frac{z(\varphi + d\varphi) - z\varphi}{dr} = z \frac{d\varphi}{dr} \quad (2)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{2\pi(r + z\varphi) - 2\pi r}{2\pi r} = z \frac{\varphi}{r} \quad (3)$$

由几何关系可得

$$\varepsilon_r = -z \frac{d^2\omega}{dr^2} \quad (4)$$

$$\varepsilon_\theta = -\frac{z}{r} \frac{d\omega}{dr} \quad (5)$$

盘型压电片在均布载荷作用下弯曲微分方程为

$$\frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{d\omega}{dr} \right) \right] = \frac{P_x r}{2D'} \quad (6)$$

式中 D' ——抗弯圆盘刚度

由于发电机中的压电陶瓷与铜板基板需具有一致的挠曲变形,因而采用面与面相粘接的形式,以及铜板基板与发电腔基底之间采用环形胶粘方式固定,因此其边界条件为盘的周边固支。盘型压电片的斜率和挠度方程为

$$\frac{d\omega}{dr} = -\frac{P_x r}{16D'} (R^2 - r^2) \quad (7)$$

$$\omega = \frac{P_x r}{64D'} (R^2 - r^2)^2 \quad (8)$$

根据材料弹性理论及压电学知识,圆盘压电片弯曲变形时应力及电场强度关系为

$$T_1 = \frac{E_p}{1 - \nu_p^2} \left(z \frac{d^2\omega}{dr^2} + \nu_p \frac{z}{r} \frac{d\omega}{dr} \right) - \frac{g_{31} E_p}{1 - \nu_p} D_3 \quad (9)$$

$$T_2 = \frac{E_p}{1 - \nu_p^2} \left(\frac{z}{r} \frac{d\omega}{dr} + \nu_p \frac{d^2\omega}{dr^2} \right) - \frac{g_{31} E_p}{1 - \nu_p} D_3 \quad (10)$$

$$E_3 = -g_{31} (T_1 + T_2) - \beta_{33}^T D_3 \quad (11)$$

式中 T_1 ——径向应力 T_2 ——切向应力

g_{31} ——压电电压常数

D_3 —— z 轴方向电位移

E_3 —— z 轴方向电场强度

ν_p ——泊松比 E_p ——弹性模量

β_{33}^T ——介电隔离率

由式(6)可知,盘型压电片的挠曲程度与所受

压力 P_x 有关,压力越大挠曲程度越大,由方程(7)、(8)、(11)可知,虽然盘型压电片的承载能力强但其挠曲程度小,导致同等压力下的电量小于悬臂梁结构,为此利用多片压电片之间的串并联关系能有效地提高气体压力能转换效率。

3 盘型压电片电压输出仿真

利用 ANSYS 有限元仿真软件对盘型压电片输出电压进行多物理耦合场仿真分析。在所建立的有限元模型中压电陶瓷材料和铜板基板分别采用 solid45 单元和 solid226 单元进行定义,在材料设置面板进行压电材料属性设定,其具体的材料参数如表 1 所示。

表 1 盘型压电片材料和尺寸参数

Tab. 1 Material and dimension parameters of PZT plate

参数	压电陶瓷	铜板基板
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7 500	8 640
泊松比		0.373
厚度/mm	0.2	0.2
直径/mm	12	16

建立盘型压电片三维实体模型,并假定压电陶瓷片与铜板基板之间采用理想粘接,并且两种材料在粘结层上的位移和力是连续形式。压电材料采用 swap 网格划分形式,铜板基板采用 free 网格划分形式,最小的网格单元为 0.1 mm。分别对铜板基板的底面及压电材料的上表面进行结点耦合,并将铜板基板底面设置为零势能面。铜板基板周围需施加 x 、 y 、 z 方向自由度约束,并在盘型压电片上表面施加压力载荷。如图 4 所示为盘型压电片轴向位移云图。

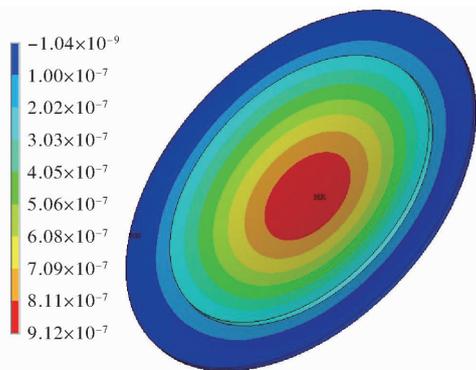


图4 盘型压电片位移云图

Fig. 4 Displacement cloud chart of PZT plate

如图 4 所示,在盘型压电片上表面内施加均布气体压力载荷后,压电片会产生位移变化,由云图可以看出,在压电片的中心区域会产生最大的变形量,其变形位移为 9.12 μm ,即说明盘形结构在承受气体均布载荷激励时可较好地保护陶瓷压电材料,使

之不易发生过大大变形而产生断裂。

图5所示为盘型压电片电压输出云图。在有限元仿真分析时,为了更准确地得到仿真结果,盘型压电片采用机械周向固定约束,并将压电片置于电学开路条件下进行有限元分析,其仿真状态与将采用的实验条件一致。

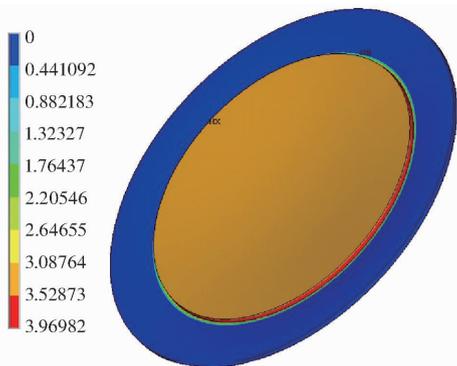


图5 盘型压电片电压输出云图

Fig.5 Output voltage cloud chart of PZT plate

通过计算得出,在定质量气体交变载荷激励环境下,当输出端气压达到 150 kPa 时,盘型压电片的开路电压输出最大可达 3.97 V。仿真结果表明,在气体压力作用下盘型压电片适合对交变气体载荷进行能量收集与转换,压电材料在微小变形的情况下就可输出较大的电压。

4 盘型压电阵列实验系统搭建与测试

根据仿真结果进行样机设计,所设计的样机选用直径为 12 mm,厚度为 0.2 mm 的压电陶瓷材料,铜板基板为直径 16 mm,厚度 0.2 mm。底座中带有沉头孔,直径为 14 mm,以便产生压力差。制作样机时采用密封胶对压电片进行环形粘接,处于基底与压电片之间的环形密封胶厚度大约为 0.1 mm。进气孔直径为 10 mm,容腔内径为 60 mm。为了产生定质量气体交变载荷激励效果,选用缸径为 63 mm,行程为 150 mm 的双作用气缸进行实验研究。图6为盘型压电发电机样机实物图。

压电阵列发电性能测试实验系统如图7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,调节好的气体进入气缸活塞杆一端的进气口作为气体压力载荷。交变的气体压力载荷使密封在缸筒内部的定质量气体压缩从而压缩压电片产生变形。在压缩气体的作用下压电发电阵列可进行电能输出,输出的电压通

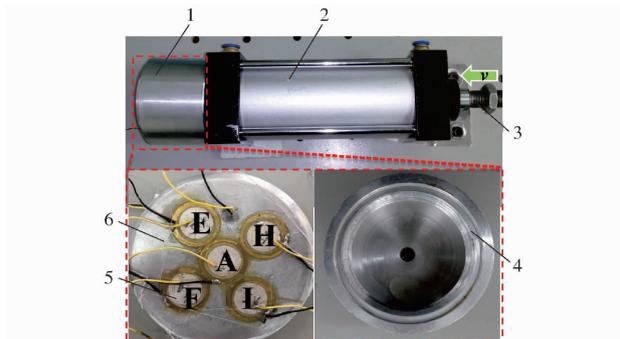


图6 盘型压电发电机样机实物图

Fig.6 Prototype of piezoelectric plate energy harvester

1.发电腔 2.压缩腔 3.活塞 4.容腔 5.压电单晶片 6.基底

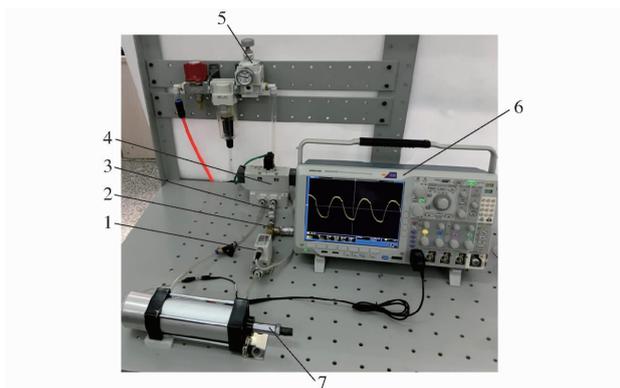


图7 压电发电机性能测试实验系统

Fig.7 Test system of piezoelectric energy harvester

1.流量传感器 2.压力传感器 3.节流阀 4.换向阀 5.调压阀 6.频谱分析仪 7.实物样机

过频谱分析仪进行测试与记录。

发电腔内的压电片发电过程可分为3个阶段:①当压缩气体进入容腔时压电片会产生变形从而进行电能的输出。②当发电腔与微型密闭腔产生压力差时,容腔内部的5片压电阵列都会因压差而产生变形。③当压力又重新回到原有气压时偏离平衡位置的5片压电片会回弹,从而产生负向电流输出。

实验中所使用的各元件已通过性能检测与参数标定,调压阀、换向阀和节流阀适用压力范围为 0 ~ 1.0 MPa,流量传感器使用压力范围在 0 ~ 0.75 MPa 之间,流量调节范围是 50 ~ 500 L/min,最小调节单位为 5 L/min。压力传感器的压力调节范围为 0 ~ 1.0 MPa,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,可进行时域与频域分析。实验系统中各元件信息如表2所示。

为更好地研究其发电性能进行了实验测试。实验过程中,由换向阀提供交变气体载荷压力,如图8所示为交变载荷压力处于 150 kPa,中央 A 片压电片的施加气体载荷周期与峰值电压的输出规律曲线。为了确保实验的准确性,每个数据点都进行了多次

测量,并且在图 8 曲线中附有误差线,可以看出实验误差在合理的范围内。实验结果表明,随着周期的增加峰值电压会减小,而随着负载流量的增加峰值电压显著提高。因此,周期与负载流量对电能的输出有重要影响。当负载流量为 150 L/min、周期为 2.5 s 时,可获得最大峰值电压,为 3.45 V。

表 2 实验系统元件型号

Tab.2 Component model of experiment 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)

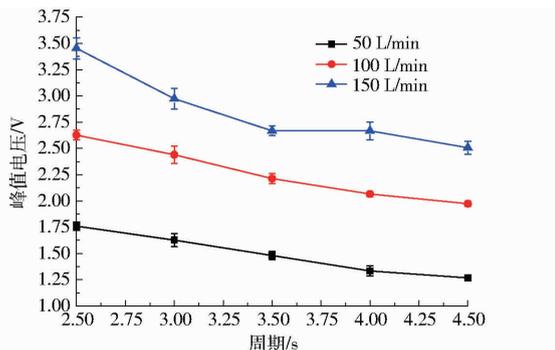


图 8 A 片压电片周期与峰值电压的输出规律曲线

Fig. 8 Curves between cycle and peak voltage of PZT plate

为了明显表征实验结果,以中央 A 片盘型压电片为基准进行多片压电阵列并联测试的对比研究。图 9 为不同并联数量压电片的周期与峰值电压关系曲线。图 9 表明,多片压电片的并联电压明显高于单片压电片的输出电压,这与简单的电路并联规律相悖,由图 9 还可以看出在多片压电片的耦合作用下其输出电压随着并联的压电片数量增加而增加。当压电片数量增至 5 片时,其输出电压达到最大。周期选为 2.50 s、负载流量为 150 L/min 时,5 片并联压电片的峰值电压最大可达到 6.29 V。

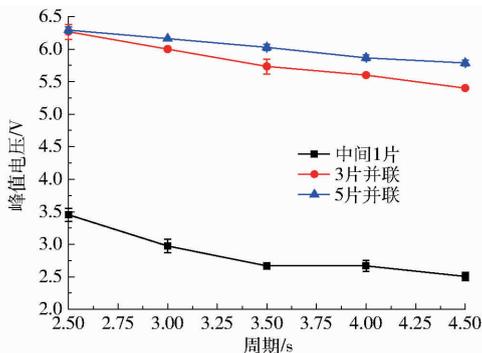


图 9 不同并联数量压电片周期与峰值电压关系曲线

Fig. 9 Relationship curves between cycle and peak voltage with different numbers of PZT plate

研究表明,交变载荷周期越小,输出电压越大,5 片盘型压电片并联时具有最大的开路输出电压,因此选择最小交变周期为 2.5 s,5 片压电片并联的方式进行研究。

图 10 为 5 片并联周期为 2.5 s,不同负载压力下的负载流量与峰值电压关系曲线。随着负载流量的增加,5 片并联的电压输出依然呈明显的上升趋势。随着负载压力的增加,峰值电压也具有上升的特点,当压力为 200 kPa、流量为 150 L/min 时,最大的峰值电压为 7.81 V。

图 11 为不同负载电阻下多片压电峰值电压与瞬时功率,负载压力为 200 kPa、负载流量为 150 L/min、周

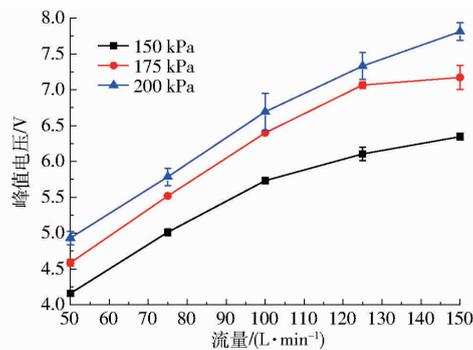


图 10 不同负载压力下流量与峰值电压关系曲线

Fig. 10 Relationship curves between flow and peak voltage under different load resistances

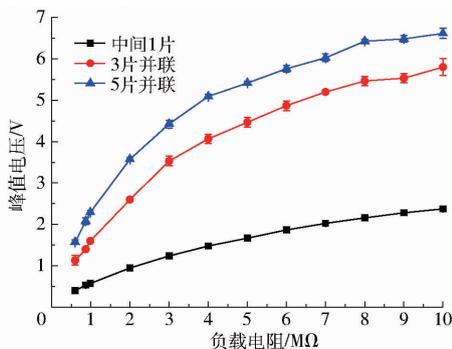
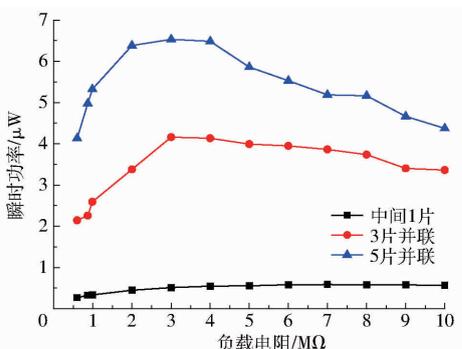


图 11 不同负载电阻下输出电压和瞬时功率

Fig. 11 Different output voltage and instantaneous power under resistance load



期为 2.5 s。外接负载电阻为 10 M Ω 的峰值电压为 6.61 V,而此时最佳匹配电阻为 3 M Ω ,最大瞬时功率为 6.53 μ W。

5 结论

(1)设计的压电阵列发电机可以通过对气动参数,如压力、流量、换向周期等的改变来对其发电量进行调节。

(2)多片压电阵列耦合发电可以达到提高发电量的目的,在调节气体参数的前提下对压电片进行合理的并联可有效提高压电发电机的发电功率。

(3)通过实验测得压电阵列发电机的发电功率处于微瓦级水平,若合理增加压电阵列数量则可满足低功耗电子器件的用电需求,因此需在能量存储上进行深入研究。

参 考 文 献

- KUCHLE J J, LOVE N D. Self-powered wireless thermoelectric sensors [J]. *Measurement*, 2014, 47: 26 - 32.
- SHAIKH F K, ZEADALLY S. Energy harvesting in wireless sensor networks: a comprehensive review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 55: 1041 - 1054.
- TOPRAK A, TIGLI O. Piezoelectric energy harvesting: state-of-the-art and challenges [J]. *Applied Physics Reviews*, 2014, 1(3): 031104.
- PRIYA S. Modeling of electric energy harvesting using piezoelectric windmill [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 87(18): 184101 - 184103.
- KISHORE R A, VUČKOVIĆ D, PRIYA S. Ultra-low wind speed piezoelectric windmill [J]. *Ferroelectrics*, 2014, 460(1): 98 - 107.
- 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): 053910.
- KWON S D. A T-shaped piezoelectric cantilever for fluid energy harvesting [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97(16): 164102.
- HOBBS W B, HU D L. Tree-inspired piezoelectric energy harvesting [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2012, 28: 103 - 114.
- 吕娜,蔡建余,陈荷娟. 弹载气流压电发电机环隙变截面进气孔 [J]. *探测与控制学报*, 2012, 34(3): 47 - 51.
LÜ Na, CAI Jianyu, CHEN Hejuan. The annular variable cross-section hole of on-board aerodynamic piezoelectricity generator [J]. *Journal of Detection and Control*, 2012, 34(3): 47 - 51. (in Chinese)
- WEINSTEIN L 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 and Structures*, 2012, 21(4): 045003.
- MEHMOODA A, ABDELKEFI A, HAJJ M R, et al. Piezoelectric energy harvesting from vortex-induced vibrations of circular cylinder [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2013, 332(19): 4656 - 4667.
- DAI H L, ABDELKEFI A, WANG L. Theoretical modeling and nonlinear analysis of piezoelectric energy harvesting from vortex-induced vibrations [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2014, 25(14): 1861 - 1874.
- 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.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140245&flag=1. 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)
- 陈启复. 对我国气动工业现状与未来发展的思考 [J]. *液压气动与密封*, 2012(1): 16 - 22.
CHEN Qifu. Thinking about the present and future development of China pneumatic industry [J]. *Hydraulics Pneumatics and Seals*, 2012(1): 16 - 22. (in Chinese)
- 李征,万杰,阚君武. 基于流固耦合作用下的压电液压振动俘能器 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(5): 1002 - 1008.
LI Zheng, WAN Jie, KAN Junwu. Piezo-hydraulic energy harvester based on solid-fluid coupling vibration [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(5): 1002 - 1008. (in Chinese)
- 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): 1 - 5.
HAO Pengfei, SUN Ximing, HE Feng. Analysis of wireless technology for pneumatic technology application [J]. *Chinese Hydraulics and Pneumatics*, 2014, 11(1): 1 - 5. (in Chinese)
- 阚君武,徐海龙,王淑云,等. 压电-气动隔振器的能量回收特性 [J]. *振动、测试与诊断*, 2013, 33(5): 814 - 819.
KAN Junwu, XU Hailong, WANG Shuyun, et al. Energy harvesting performance of piezo-pneumatic vibration isolator [J]. *Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis*, 2013, 33(5): 814 - 819. (in Chinese)
- 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.
- CHENG T 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.
- WANG Y T, FU X P, CHENG T H, et al. Development of a nonlinear piezoelectric energy harvester for alternating air load [J]. *Applied Sciences*, 2016, 6(11): 325.