

动态气体载荷下磁力辅助式压电俘能器设计与实验

程廷海¹ 刘文博¹ 卢晓晖^{1,2} 王英廷³ 包 钢³

(1. 长春工业大学机电工程学院, 长春 130012; 2. 吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室, 长春 130025;
3. 哈尔滨工业大学机电工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 为了实现气动系统低功耗传感器的自供能需求,提出了一种新型磁力辅助式压电俘能器,以此提高俘能器俘获动态气体载荷能的效率。将磁铁间的非接触力作为磁力诱导的预应力施加在压电片中心,当动态气体载荷作用在压电片上时,磁力诱导的预应力可以通过改变压电片的位移来调节压电片表面正负电荷的分布,进而提高俘能器的机电转化效率。仿真研究表明,斥力诱导的预应力可增加俘能器的输出电压,而吸引力诱导的预应力则降低了俘能器的输出电压。采用外径 22 mm、厚度 0.23 mm 的压电单晶片及缸径 63 mm、行程 150 mm 的气缸制作实验样机,利用气动组件搭建测试系统。分别调节压力、周期、流量以及磁力等参数进行实验测试。实验结果表明,当俘能器的最佳匹配负载为 0.87 MΩ 时,最大的瞬时功率为 1.39 mW,俘能器的最大瞬时功率提升 12.6%,而引入磁力诱导的预应力仅为气体载荷的 0.6%,磁力诱导预应力可有效提高俘能器俘获气动系统动态气体载荷能的效率。

关键词: 压电俘能器; 高压气体; 磁力辅助式; 动态气体载荷

中图分类号: TH49 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)09-0176-07

Design and Experiment on Magnetic-assisted Piezoelectric Plate Harvester Excited by Dynamic Air Pressure

CHENG Tinghai¹ LIU Wenbo¹ LU Xiaohui^{1,2} WANG Yingting³ BAO Gang³

(1. School of Mechatronic Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China
2. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130025, China
3. School of Mechatronic Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to realize the demand of low power sensor for pneumatic system, a new type of magnetic-assisted piezoelectric energy harvester was proposed and it can promote the efficiency of harvesting the dynamic high air. The non-contact force between the magnets was used as magnetic induced pre-stress acted on the center of the piezoelectric circular diaphragm. The magnetic induced pre-stress can adjust the surface charge distribution of the piezoelectric circular diaphragm when the dynamic air pressure acted on the piezoelectric circular diaphragm. The simulation research showed that the repulsive force increased the output power of the magnetic-assisted piezoelectric plate harvester, while the attractive force decreased the output power of the magnetic-assisted piezoelectric plate harvester. The diameter and thickness of piezoelectric unimorph were 22 mm and 0.23 mm, respectively. The diameter and distance of cylinder were 63 mm and 150 mm, respectively, and the prototype of the magnetic-assisted piezoelectric plate harvester was fabricated. The test system was built to research the rules and performances of the magnetic-assisted piezoelectric plate harvester. In the test, the pressure, cycle, flow and the magnets distances were adjusted. Experimental results showed that the instantaneous power was 1.39 mW when the optimal load resistance was 0.87 MΩ, and the output power of the generator was promoted 12.6%, while the magnetic induced pre-stress was only about 0.6% of the hyperbaric air load. Therefore, the magnetic induced pre-stress can effectively improve the efficiency of the dynamic high air in the pneumatic system.

Key words: piezoelectric energy harvester; hyperbaric air; magnetic-assisted; dynamic high air pressure

收稿日期: 2018-02-27 修回日期: 2018-06-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(51775130)、教育部春晖计划项目(Z2017033)、吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室开放基金面上项目(20171116)和中国博士后科学基金项目(2016M601377)

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

0 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、网络节点等被引入气动系统。为实现低功耗电子产品自供能技术,压电材料因具有结构简单、能量密度大、不受电磁干扰等特点而被广泛应用于收集各种能量^[2-5]。高压空气是一种特殊的环境,因具有较大的能量密度,越来越多的研究人员对俘获高压气体能进行了理论和实验研究^[6-12]。然而,目前压电发电装置的发电量、能量转换效率及输出功率依然十分有限,通常只能通过能量累积(储能供电)的方法获得所需的输出功率^[13-14],因此需要研究更加高效的压电俘能装置。

预应力致动器是由陶瓷层和一个或多个基板层(通常是金属)组成的复合材料。利用不同的热膨胀系数或烧结收缩率实现复合材料预加应力加载。在冷却过程中,陶瓷层和金属层之间的热膨胀系数或烧结收缩率的差异会引起各向异性的内应力,预应力的作用,压电系数得到增强^[15-17]。许多研究都利用了预应力效应,无论是在预应力执行器中还是在能量收集装置中,该效应均可以显著地改善压电系数。当研究从振动机械源获取能量时,通过施加重量或轴向预应力可以提高输出^[18-21]。然而,利用预应力效应提升压电俘能器获取气动系统压力能效率的相关研究还比较少见。此外,传统机械加载预应力的方式会大幅度降低压电陶瓷的寿命。

为了解决上述问题,本文设计一种磁力辅助式压电俘能器。通过调节磁铁和高压气体参数,研究动态气体载荷激励下磁力辅助式盘型压电俘能器的发电特性。

1 设计与理论分析

磁力辅助式压电俘能器通过磁力调节盘型压电片表面电荷分布来提高发电能力。图1为磁力辅助式压电俘能器原理与结构示意图。陶瓷压电片由铜板基板与PZT-5H压电陶瓷组成,容腔的中心处带有圆形孔,圆形孔直径小于铜板基板直径,铜板基板通过高强度密封粘结剂固定在容腔底部中心,两个相同的圆柱形强磁铁分布在同一直线上,一个通过碳纤维棒固定在铜板基板的正中心,另一个固定在支撑架上,通过改变支撑架的位置实现对磁力诱导预应力的调控。当高压气体作用于压电片表面时,由于容腔内外的压差导致压电片发生弯曲形变,由

正压电效应可知,随着变形量的产生会有多余电荷溢出压电材料从而产生电能。但盘型压电片在受到高压气体载荷作用时,同一表面会产生正负两种电荷,两种电荷相互抵消会抑制俘能器的输出效率,施加在盘型压电片中心的磁力可以改变压电片的变形量,进而调节电荷分布、提高输出效率。

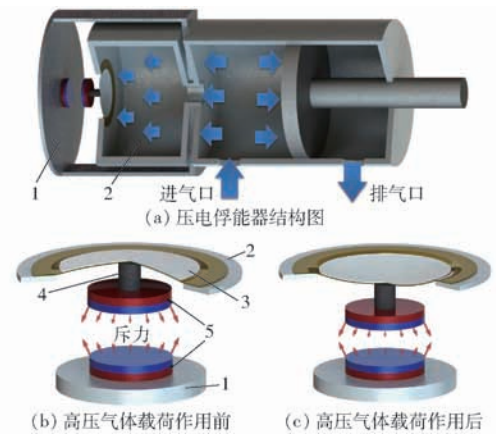


图1 压电俘能器结构及原理图

Fig. 1 Structure and working principle of piezoelectric energy harvester

1. 支撑架 2. 容腔 3. 压电片 4. 碳纤维棒 5. 强磁铁

为了研究磁力诱导预应力对动态气体载荷下压电俘能器的影响,以斥力工况为例,对磁力辅助式压电俘能器进行理论分析。图2为磁力辅助式压电俘能器的受力分析模型,其中M1和M2分别表示两块磁铁, d 、 P 和 P_0 分别表示两磁铁之间的距离、磁力诱导的预应力和气体载荷。

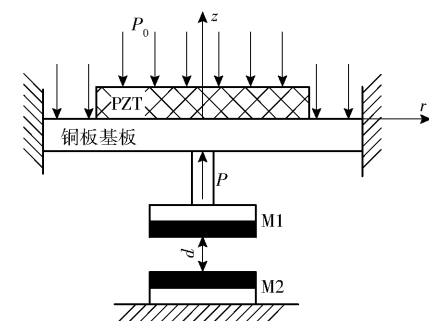


图2 磁力辅助式压电俘能器受力模型

Fig. 2 Force model of piezoelectric circular diaphragm generator

当动态气体载荷产生的压力作用在压电片上时,根据铁摩辛柯板壳理论可知,在均布载荷作用下压电片上表面中心区域受压而周边区域受拉,因此在压电片同一表面上会同时产生正负两种电荷。夹持型圆形压电片受到均布载荷作用时,其压电本构方程可表示为^[22]

$$\begin{cases} F = c\omega - \alpha U \\ Q_i = \alpha\omega + CU \end{cases} \quad (1)$$

式中 ω ——压电片位移

c ——机械刚度
 α ——机电耦合系数
 C ——系统电容
 U ——施加在压电片上的电压
 Q_i ——极化电荷
 F ——压电片上的力

压电片上施加的电压 U 为零,因此动态气体载荷下,压电片位移 ω 与施加在压电片上的力 F 成正比,压电片极化电荷 Q_i 与位移 ω 成正比。因此通过在圆形压电片中心施加磁力诱导预应力 P ,可以调解压电片中心区域在动态载荷 P_0 作用下的位移,进而调节压电片中心区域极化电荷 Q_i ,抑制同一表面两种电荷的相互抵消作用,提高俘能器的输出电压。

2 仿真分析

为了研究磁力对磁力辅助式压电俘能器的位移和输出电压的影响,利用 COMSOL 结构力学模块进行有限元仿真分析。图 3a 所示为磁力辅助式压电俘能器仿真模型。假定压电陶瓷片、铜板基板、容腔以及碳纤维棒之间采用理想粘接,并且两种材料在粘结层上的位移和力是连续形式。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。

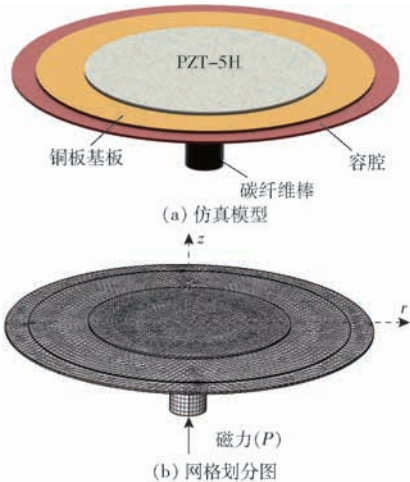


图 3 压电俘能器模型及网格划分图
Fig. 3 Model and gridding distribution of piezoelectric generator used in FEA

图 3b 所示为仿真模型网格划分。PZT-5H 压电陶瓷片、铜板基板和碳纤维棒沿着 z 轴方向划分网格,最小的网格单元为 0.1 mm。在碳纤维棒末端施加 1 N 的力代替磁力,在盘型压电片上表面施加 0.2 MPa 压力载荷。

为了验证理论分析的正确性,即压电片在均布载荷作用下,同一表面会产生正负两种电荷。仿真

分析了压电片在均布载荷作用下表面电荷分布情况。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,压电片表面的中心区域会产生负电荷而周边区域产生正电荷,即说明盘型压电片在承受气体均布载荷激励时同一表面会产生正负两种电荷。压电片输出电压是表面所有电荷的累加,而两种电荷的相互抵消作用会降低俘能器的能量转化效率。

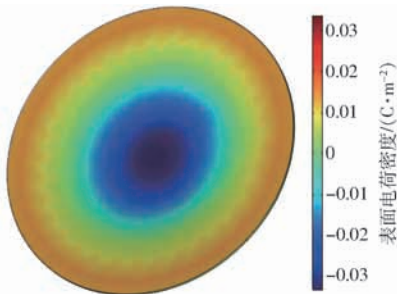


图 4 盘型压电片表面电荷分布云图
Fig. 4 Surface charge cloud chart of PZT plate

盘型压电片在受到高压气体载荷激励时,其各个部分极化出的电荷量与变形量成正比,因此通过调节压电片变形量可以调整其表面电荷分布。圆形压电片上施加的载荷均为圆周对称分布的,因此盘型压电片横截面位移的变化可以代表整个盘型压电片的位移变化。为了更好地展示磁力对高压气体载荷作用下盘型压电片位移的影响,用未施加磁力时横截面的位移减去施加磁力后横截面的位移,得到相对减小位移。图 5 展示了在盘型压电片中心施加斥力和引力情况下,盘型压电片横截面位移的变化。图 5a 所示斥力可以减小高压气体载荷下盘型压电片的位移。图 5b 所示引力可以增加高压气体载荷下盘型压电片的位移并且越靠近中心区域磁力的作用效果越明显。

通过改变两块磁力之间的距离,可以调节施加在盘型压电片中的磁力大小。为了定量研究磁力大小对盘型压电片输出电压的影响,通过仿真和实验测量得到了磁力随磁铁间距离的变化曲线,如图 6 所示。随着磁铁间距离的增加磁力逐渐减小,最终趋于 0 N。当磁铁间距离为 10 cm 时磁力最大,此时斥力为 0.53 N,引力为 0.61 N。

经过以上仿真分析得到磁力可以调节均布载荷下压电片表面电荷分布,将压电片表面电荷积分可以得到磁力对俘能器输出电压的影响。图 7 为当动态气体载荷为 0.2 MPa 时,俘能器输出电压随磁力变化曲线。图 7 中虚线将图分为左右两部分。左侧表示施加引力时磁力辅助式压电俘能器输出电压,右侧表示施加斥力时磁力辅助式压电俘能器输出电

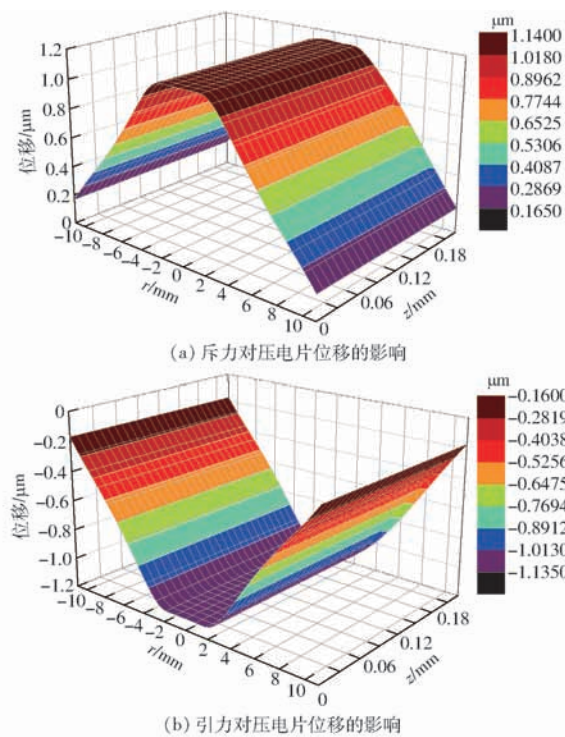


图5 磁力对压电片位移的影响

Fig. 5 Effect of magnetic induced pre-stress on PZT patch

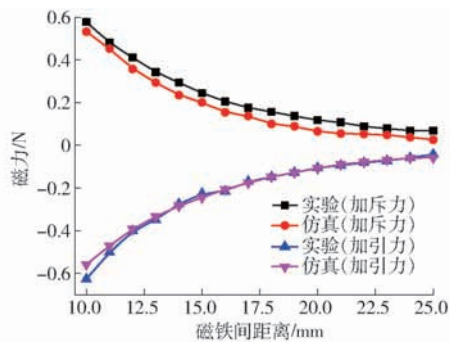


图6 磁力随磁铁间距离变化曲线

Fig. 6 Changing curves of magnetic induced pre-stress for various distances between two magnets

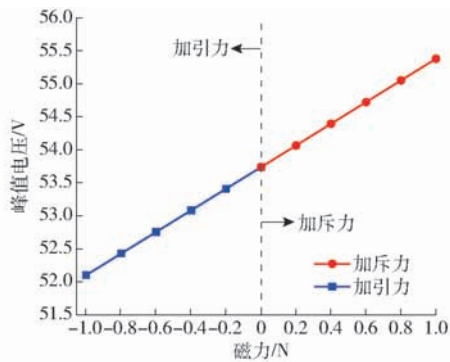


图7 峰值电压随磁力变化曲线

Fig. 7 Changing curve between magnetic force and peak voltage

压。根据仿真结果可以得到,在0~1 N范围内,随着斥力的增加压电片的输出电压逐渐提高。然而引力的作用效果与斥力相反,其降低了俘能器的输出

电压。

仿真分析表明:盘型压电片在动态气体载荷作用下,同一表面会产生正负两种电荷。在盘型压电片中心施加磁力诱导的预应力可以通过改变压电片的位移,进而改变其表面电荷分布,调控压电片表面正负电荷的相互抵消作用。通过改变磁铁间的距离可以调节磁力诱导的预应力的。在一定范围内磁力越大,其对于俘能器输出电压的调节效果越明显。

3 实验与结果分析

磁力辅助式压电俘能器发电性能测试实验系统如图8所示,实验系统由调压阀、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产生动态的气体载荷,磁力辅助式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。

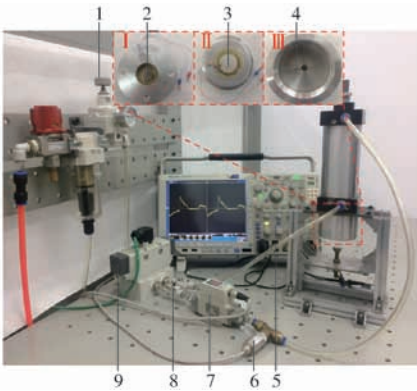


图8 磁力辅助式压电俘能器性能测试实验系统

Fig. 8 Test system of piezoelectric energy harvester

1. 调压阀 2. 磁铁 3. 压电片 4. 容腔 5. 频谱分析仪 6. 压力传感器 7. 流量传感器 8. 节流阀 9. 换向阀

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、换向阀和节流阀均由 SMC 生产,其型号分别为 IR3020-04、VQ7-8-FG 和 AS2052F,适用压力范围均为 0~1.0 MPa。流量控制元件是 SMC 生产的 PFA751-04 型流量传感器,使用压力范围 0~0.75 MPa,流量调节范围为 50~500 L/min,最小调节单位为 5 L/min。压力调节元件为 SMC 生产的 PSE560-01 型压力传感器,其压力调节范围为 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,其可进行时域与频域分析。

根据仿真结果进行样机的设计,如图 8 所示。所设计的样机选用直径为 22 mm、厚度为 0.23 mm 的压电陶瓷材料,铜板基板直径 32 mm、厚度 0.13 mm。容腔底部中心带有圆形孔,直径为 28 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。进气孔的直径为 10 mm,容腔的内径为 60 mm。为了产生定质量气体动态载荷的激励效果,选用缸径为 63 mm、行程为 150 mm 的双作用气缸进行实验研究。

实验过程中,由换向阀控制动态的气体载荷压力,图 9 所示为当动态载荷压力周期 T 为 3 s、流量 Q 为 200 L/min、磁铁间距离 d 为 10 mm 时,加斥力、无磁力和加引力 3 种工况下,磁力辅助式压电俘能器输出电压随压强变化关系。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 9 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,在盘型压电片中心施加斥力可以增加俘能器的峰值电压,施加引力会减小俘能器输出的峰值电压,而且磁力的作用效果不随压强的变化而改变。当压强为 0.2 MPa 时,可获得最大的峰值电压,其值为 56.4 V。

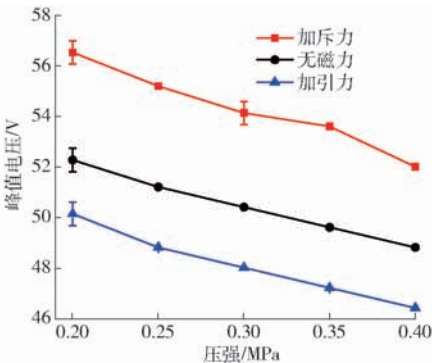


图 9 不同工况下压强-峰值电压曲线

Fig.9 Relationship curves between pressure and peak voltage at different types of magnetic force

3 种工况下,峰值电压随流量变化关系如图 10 所示,其中气体动态载荷的压强 $P_0 = 0.2$ MPa、 $d = 10$ mm、 $T = 3$ s。相比于无磁力工况,施加斥力可以增加峰值电压而引力降低峰值电压。随着流量的变化,磁力的作用效果基本保持稳定,其中最大的峰值电压为 54.1 V。

通过调节磁力间距离可以改变磁力的大小,实验探究了磁力大小对俘能器输出电压的影响。图 11 给出了动态气体载荷处于 0.2 MPa、气体流量为 200 L/min、周期为 3 s 时,3 种工况下峰值电压随

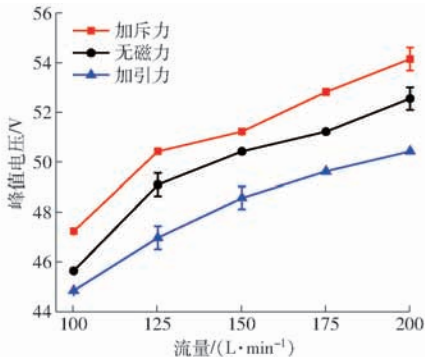


图 10 不同工况下流量-峰值电压曲线

Fig.10 Relationship curves between air flow and peak voltage at different types of magnetic force

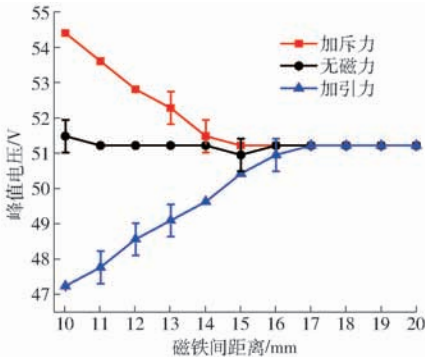


图 11 不同工况下磁铁间距离-峰值电压曲线

Fig.11 Relationship curves between various magnet's distances and peak voltage at different types of magnetic force

磁铁间距离变化规律。在施加斥力的工况下,峰值电压随着磁铁间距离的增加而逐渐减小。在施加引力的工况下,峰值电压随着磁铁间距离的增加而逐渐增加。结果表明,在盘型压电片中心施加磁力可以调节其输出的峰值电压。然而由于俘能器的机械限制,特别是压电陶瓷本身承受应力极限的限制,不能无限增加磁力,因此在实验研究中两磁铁间距离最小为 10 mm,而此时磁力约为 0.6 N。高压气体载荷产生的压力非常大,例如在压强为 0.2 MPa 时其产生的压力为 98 N。引入的磁力约为气体压力的 0.6%,而峰值电压却提高了近 8%。微小的磁力变化导致输出功率产生较大偏差。

以上实验证明,在磁力辅助式压电俘能器中心施加斥力可以提高俘能器的机电转化效率,因此下面重点研究气动参数对斥力工况下的压电俘能器输出性能的影响。图 12 展示了当磁铁间距离为 10 mm、周期为 3 s 时,压强对峰值电压的影响规律。随着压强的增加峰值电压逐渐减小,随着流量的增加峰值电压逐渐增加。图 13 展示了当磁铁间距离为 10 mm 时,流量对峰值电压的影响。随着流量的增加峰值电压逐渐增加。当压强为 0.2 MPa、流量为 200 L/min、周期为 3 s 时,最大峰值电压为 54.2 V。

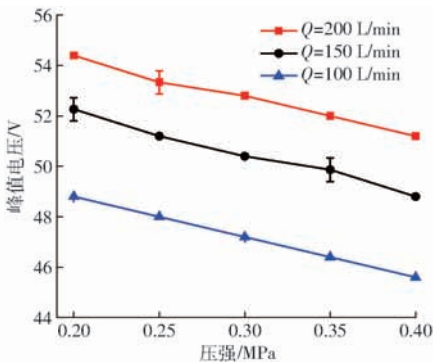


图 12 施加斥力工况下压强-峰值电压曲线
Fig. 12 Relationship curves between pressure and peak voltage under repulsive force

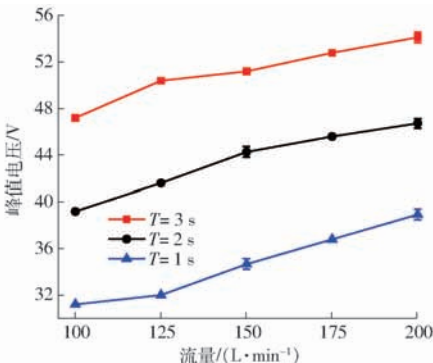


图 13 施加斥力工况下流量-峰值电压曲线
Fig. 13 Relationship curves between air flows and peak voltage under repulsive force

为了更加全面地展示磁力对磁力辅助式压电俘能器发电性能的影响,图 14、15 分别描述了当加斥力、无磁力和加引力 3 种工况下,俘能器的峰值电压与瞬时功率变化情况。当压强为 0.2 MPa、流量为 200 L/min、周期为 3 s、磁铁间距离为 10 mm 时,峰值电压分别为 54.1、51.2、48.8 V。当最佳匹配电阻为 0.87 MΩ 时,加斥力、无磁力和加引力 3 种工况下的电压分别为 34.8、32.8、30.8 V,瞬时功率分别为 1.39、1.24、1.09 mW,能量密度分别为 14.22、12.36、11.14 mW/cm³。相对于无磁力工况,加斥力工况下俘能器的最大瞬时功率提升了 12.6%。

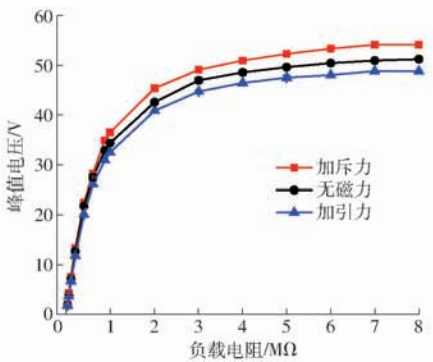


图 14 负载电阻-峰值电压曲线
Fig. 14 Relationship curves between load resistance and peak voltage at different types of magnetic force

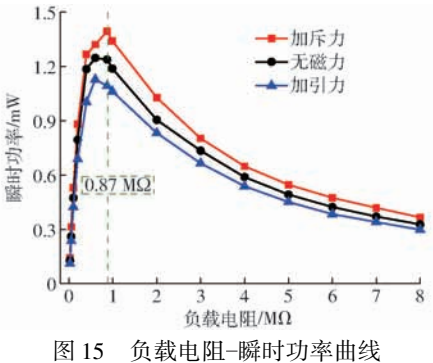


图 15 负载电阻-瞬时功率曲线
Fig. 15 Relationship curves between load resistance and instantaneous power at different types of magnetic force

4 结论

- (1)设计的磁力辅助式压电俘能器可以通过改变压力、流量、换向周期等气动参数对其发电量进行调节。
- (2)通过引入微小的磁力可以显著提高发电量,在调节气体参数的前提下,合理调节施加在盘型压电片中心的磁力,可有效提高压电俘能器的机电转化功率。
- (3)通过实验测得磁力辅助式压电俘能器的发电功率处于毫瓦级水平,可满足低功耗电子器件的用电需求。

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 [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 suggestions [J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2012(1): 16-22. (in Chinese)

2 KISHORE R A, VUČKOVIĆ D, PRIYA S. Ultra-low wind speed piezoelectric windmill[J]. Ferroelectrics, 2014, 460(1): 98-107.

3 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.

4 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 Xiangjian, ZHU Liya, CHEN Renwen. Broadband generation performance of two-degree-of-freedom cantilever beam piezoelectric generator [J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(7): 1669-1676. (in Chinese)

- 5 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 Junwu, ZHANG Xiaoyi, WANG Shuyun, et al. Performance analysis and test of blowing-type pzt wind energy harvester [J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(5): 1087 – 1092. (in Chinese)
- 6 PRIYA S. Modeling of electric energy harvesting using piezoelectric windmill [J]. Applied Physics Letters, 2005, 87(18): 184101 – 184103.
- 7 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.
- 8 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.
- 9 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.
- 10 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.
- 11 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(8): 044634.
- 12 王淑云, 余杰, 阚君武, 等. 腔式压电流发电机结构与性能研究[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(1): 421 – 425, 420. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180153&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.053.
WANG Shuyun, YU Jie, KAN Junwu, et al. Structure and performance of piezoelectric airflow energy harvester [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 421 – 425, 420. (in Chinese)
- 13 何宏, 高艳囡, 张志宏. 基于压电自供电的无线传感网络网关节点设计[J]. 中国测试, 2016, 42(9): 67 – 71.
HE Hong, GAO Yannan, ZHANG Zhihong. Design of wireless sensor network gateway node based on piezoelectric self-powered [J]. China Measurement & Testing Technology, 2016, 42(9): 67 – 71. (in Chinese)
- 14 黄新波, 罗兵, 刘存孝, 等. 采用 ZigBee 芯片的无线加速度传感器网络节点的实现[J]. 高电压技术, 2010, 36(8): 1962 – 1969.
HUANG Xinbo, LUO Bing, LIU Cunxiao, et al. Designation of wireless acceleration sensor network node using ZigBee chip[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(8): 1962 – 1969. (in Chinese)
- 15 OUNAIES Z, MOSSI K M, SMITH R C, et al. Low-field and high-field characterization of THUNDER actuators [J]. Proc. SPIE, 2001, 4333: 399 – 407.
- 16 MOSSI K M. Prestressed curved actuators: characterization and modeling of their piezoelectric behavior [J]. Proc. SPIE, 2003, 50 – 53: 423 – 435.
- 17 JUUTI J A, JANTUNEN H, MOILANEN V P, et al. Manufacturing of prestressed piezoelectric unimorphs using a postfired biasing layer [J]. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control, 2006, 53: 838 – 846.
- 18 ZHAO D. Waste thermal energy harvesting from a convection-driven Rijke—Zhao thermo-acoustic-piezo system [J]. Energy Convers. Manag, 2013, 66: 87 – 97.
- 19 CHEN X R, YANG T Q, WANG W, et al. Vibration energy harvesting with a clamped piezoelectric circular diaphragm [J]. Ceram. Int, 2012, 38: S271 – S274.
- 20 WANG W, YANG T, CHEN X, et al. Vibration energy harvesting using a piezoelectric circular diaphragm array [J]. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control, 2012, 59: 2022 – 2026.
- 21 SMOKER J, NOUH M. Energy harvesting from a standing wave thermo-acoustic-piezoelectric resonator[J]. Journal of Applied Physics, 2010, 104901: 1 – 14.
- 22 PRIYA S, INMAN D J. Energy harvesting technologies [M]. New York: Springer, 2009.