

一种磁耦合激励的涡轮式压电气流俘能器

阚君武^{1,2}, 杨泽盟¹, 王淑云^{1,2}, 黄鑫¹, 张忠华^{1,2}, 廖泳¹, 文一杰¹

(1. 浙江师范大学精密机械与智能结构研究所, 浙江 金华 321004;

2. 浙江省城市轨道交通智能运维技术与装备重点实验室, 浙江 金华 321004)

摘要: 为满足气流管道监测系统的自供电需求, 提出一种磁耦合激励的涡轮式压电气流俘能器。建立了俘能器的理论模型并进行了仿真分析, 设计制作了样机并进行了试验测试, 获得了磁铁排布、附加质量、压电振子串并联及负载电阻对其输出特性的影响规律。结果表明: 在其他条件确定时, 存在多个较佳气压使输出电压出现峰值, 主频峰值的大小和分频的位置均与激励磁铁排布有关; 通过附加质量可以调节最佳气压和输出电压峰值, 采用多个不同附加质量的压电振子串联或并联可以拓宽俘能器的气压适应范围; 存在不同的最佳负载使多个压电振子串联和并联时俘能器的输出功率达到最大, 最佳负载及其所对应的最大输出功率分别为(40 k Ω , 41 mW), (15 k Ω , 50 mW)。

关键词: 压电俘能器; 气流俘能; 涡轮; 旋磁; 间接激励

中图分类号: TM619; TN384 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2022)05-1174-07

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2022.05.015

引言

压电俘能器具有结构简单、能量密度大、易于微小化与集成化、无污染、易于加工等优势, 故其研究与应用备受国内外学者的关注^[1-3]。目前, 已经开发了用于收集振动能^[4-5]、流体动能^[6-7]及旋转能^[8]等能源的多类压电俘能器。其中, 压电流体俘能器主要用于收集环境中广泛存在的流体能, 如风能、水流感、波浪动能及潮汐能等^[9-10]。各类压电俘能器有其自身的特点及适用领域, 针对不同的应用场合, 国内外学者已成功开发了形式多样的压电流体俘能器, 如: ①流致振动式压电俘能器^[11], 通过悬臂梁式压电片收集流动引起的振动能, 振动形式可为涡流引起的涡激振动^[12]、颤振^[13]和驰振^[14]等, 该类俘能器稳定运行所需流速较高, 不适宜低流速场合; ②谐振腔式压电俘能器^[15], 利用高速流体冲击谐振腔, 并经谐振腔放大激振力激励压电振子振动发电, 适用于超高流速场合能量收集, 且对谐振腔长度尺寸要求高, 流速适应性较差; ③压电风车式俘能器^[16-17], 利用叶轮获取流体能, 再由拨盘或磁铁激励压电振子振动发电, 其结构较为简单且所需驱动力低, 故更适于流体黏度及流速低的场合。

学者们对流致振动和流致转动俘能器进行了大量理论与试验研究, 然而现有的压电流体俘能器大都是用于收集自然界中的风和水流等开放环境中的流体能, 尚未发现用于收集管道流体能的俘能器的相关研究。这类能源广泛存在于工业设备的吹/出气、微管道气体传输、能量存储以及气动系统(例如火车、长途汽车、豪华轿车、卡车和拖车中大量使用的以压缩空气为动力的气动悬挂系统)中^[18-20], 且常常被耗散浪费。现有的流体俘能器在结构及原理上均存在某些难以克服的弊端, 不适于气体管道的能量回收。

基于现有压电流体俘能器存在的问题, 本文提出一种磁耦合激励的涡轮式压电气流俘能器, 其优势在于: 涡轮与压电振子间通过磁耦合实现运动和能量传递, 压电振子不与流体直接耦合, 故运行稳定、可靠性高; 此外, 俘能器输出性能还易于通过激励磁铁排布、等效质量等参数加以调整。本文从理论和试验两方面研究气流压力、激励磁铁排布方式、附加质量及负载电阻等对俘能器输出性能的影响规律, 以验证其结构原理的可行性, 获得其发电特性的影响要素, 为涡轮压电俘能器的实用化及推广应用奠定基础。

收稿日期: 2021-01-10; **修订日期:** 2021-04-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51877199, 52077201); 浙江省自然科学基金资助项目(LY20F010006); 浙江省重点研发计划资助项目(2021C01181); 国家级大学生创新创业训练计划资助项目(201910345047, 202010345068, 202010345044)。

1 压电俘能器的结构与工作原理

涡轮式压电俘能器的结构原理如图1所示,主要由支架、涡轮及压电振子等构成。支架相互配合形成圆柱腔体,涡轮通过轴承安装在腔体凸起上,压电振子由支撑夹持,受激磁铁安装在压电振子自由端且与涡轮上的激励磁铁正对。工作过程中,流体与叶片经耦合作用驱动涡轮及激励磁铁转动,激励磁铁激励受激磁铁迫使压电振子弯曲变形,压电振子发生弯曲变形的同时即将机械能转换为电能。

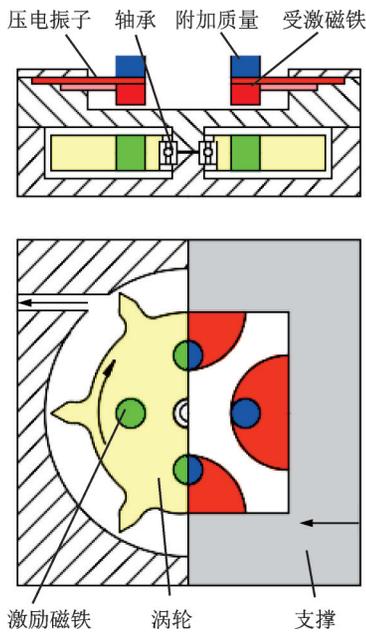


图1 压电俘能器结构原理图

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

所生成的开路电压 V_g 和输出功率 P_g 均由压电振子的变形量 x 及频率决定,且有^[8]:

$$V_g = \eta kx \quad (1)$$

$$P_g = \frac{V_g^2}{2R[1 + 1/(\omega C_f R)^2]} \quad (2)$$

式中 η 为与压电振子结构尺寸和材料性能相关的系数, k 为压电振子的弯曲刚度, C_f 为压电振子自由电容, R 为负载电阻, $\omega = 2\pi/T$ 为激励频率。

压电俘能器的输出性能由压电振子结构尺寸及位移决定,而位移受频率影响。激励频率由磁铁数量及排布方式、气体压力决定,固有频率由刚度和质量决定。下文将研究气体压力、磁铁数量及排布方式、附加质量以及负载电阻对俘能器输出性能的影响规律。

2 俘能器的理论建模与仿真分析

2.1 动力学模型的建立

根据以往的研究可知,压电振子及磁铁构成的振动系统可简化为弹簧质量阻尼系统,其动力学微分方程可表示为:

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = F(t) \quad (3)$$

式中 M, C 和 K 分别为振子等效质量、等效阻尼及等效刚度; X 为位移; $F(t)$ 为激振力。

据振动分析理论,单自由度振动响应函数为^[21]:

$$x = \frac{1}{M\omega_d} \int_0^t F(\tau) e^{-\xi\omega_n(t-\tau)} \sin[\omega_d(t-\tau)] d\tau \quad (4)$$

式中 $\omega_n = \sqrt{K/M}$ 和 $\omega_d = \omega_n \sqrt{1-\xi^2}$ 分别为无阻尼和有阻尼时振子的固有频率, ξ 为阻尼比。下文将通过分析磁力 $F(t)$, 再对等效质量和理论刚度进行有限元仿真,进而求得固有频率。

激振力水平方向的影响可以忽略,垂直方向表达式可近似为^[22]:

$$F(t) = \begin{cases} F_m \sin\left(\frac{\pi}{T_m} t\right), & 0 < t < T_m \\ 0, & T_m < t < T \end{cases} \quad (5)$$

式中 $T_m = 60d/(\pi Dn)$ 为磁力的作用时间, D 为磁铁旋转直径, d 为磁铁直径, n 为涡轮转速, n_0 为轮上的激励磁铁数量, $T = 60/(nn_0)$ 为激励周期, $F_m = \frac{B_r^2 A_m^2 (h+d/2)^2}{\pi \mu_0 h^2} \left[\frac{1}{l^2} + \frac{1}{(l+2h)^2} - \frac{2}{(l+h)^2} \right]$ 为激振力幅值, μ_0 为真空磁导率, B_r 为剩余磁通密度, h 为磁铁长度, A_m 为最大磁铁正对面积, l 为磁铁间距离。压电振子位移 x 对 l 有影响,但文中 $x \ll l$, 故可忽略不计。

磁铁结构尺寸不变时,激振力由激励磁铁的数量及排布方式决定。激励磁铁的排布方式包括同极排布和异极交替排布两种,下文用磁铁的排布方式和磁铁数量来表述,例:同极-II、异极-II、同极-IV、异极-IV,对应的排布方式及磁力波形如图2所示。由式(5)及图2可知,激振力作用时间分为激励期 ($0 < t < T_m$) 与非激励期 ($T_m < t < T$)。当激励期较短时,两种波形的正弦波产生的响应相同,排布方式对响应无影响;当激励期较长时,两种波形的正弦波产生的响应不同,同极排布时激励周期为单个磁铁的作用时间 $T = 1/(nn_0)$,异极时激励周期为一对磁铁的作用时间 $T = 2/(nn_0)$ 。 $F(t)$ 变量较多,导致式(4)的计算过于复杂,无法直接给出,振子响应规律将通过有限元仿真获得。

为获取压电振子刚度,先利用有限元对压电振

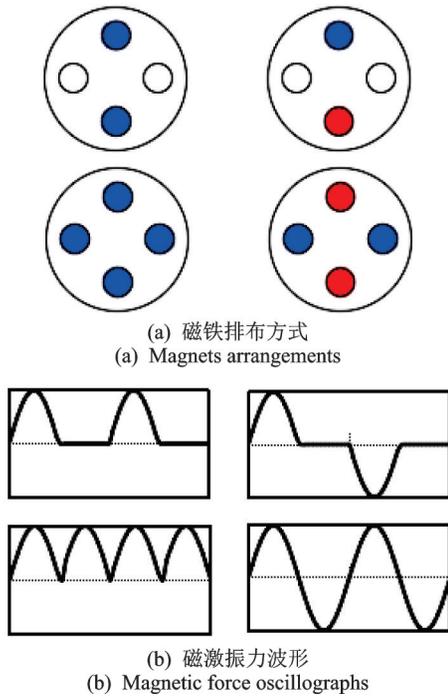


图2 同极-II、异极-II、同极-IV、异极-IV 磁铁排布方式及磁激振力波形

Fig. 2 Magnet arrangements and their magnetic force oscillographs of same magnetic pole-II, different magnetic pole-II, same magnetic pole-IV and different magnetic pole-IV

子进行建模与仿真计算。所用参数:压电陶瓷片为 $\Phi 20 \times 0.15$ mm的PZT-5A,基板为 $\Phi 27 \times 0.15$ mm铜片。仿真计算得:压电片净等效质量为 4.87×10^{-2} g,刚度为13684 N/m。在压电振子端部添加0.9, 1.35, 1.8及2.25 g质量块时,固有频率分别为604.5, 497.6, 432.5及378.3 Hz。按照解析模型 $f_n = \sqrt{K/M} / (2\pi)$ 计算得固有频率分别为604.5, 497.8, 433及388.3 Hz,与仿真结果较为接近,故在压电振子端部增加质量块可直接作为附加质量。

2.2 俘能器的仿真分析

本文以振幅放大比 $\beta = x/F_m$ 表示俘能器的响应能力。为了直观表示磁铁排布和附加质量对放大比的影响,利用有限元软件对振动响应函数进行参数化求解,试验采用的转速步长为10 rad/s。仿真参数如表1所示。

图3和4分别为附加质量为1.35 g、磁铁排布方式不同时放大比 β 与转速 n 的关系曲线和放大比 β 与频率 f 的关系曲线。图3曲线表明,存在多个较佳转速使放大比 β 出现峰值,且不同磁铁排布方式所对应的最佳转速及峰值放大比不同。图4曲线表明,不同磁铁排布方式均在一个主频使放大比 β 出现最大峰值,但放大比峰值不同;同时存在不同分频使放大比 β 出现分频峰值,且不同磁铁排布方式

表1 压电俘能器结构尺寸参数

Tab. 1 Structural dimensions of piezoelectric energy harvester

参数	量值	参数	量值
气孔内径 d_0 /mm	2	基板直径 D_t /mm	27
腔体高度 H_q /mm	6.2	基板厚度 H_b /mm	0.2
腔体直径 D_q /mm	50	PZT直径 D_p /mm	20
涡轮顶径 D_w /mm	49	PZT厚度 H_p /mm	0.2
涡轮根径 d_w /mm	40	磁铁直径 d /mm	5
涡轮高度 H_w /mm	6	磁铁厚度 H_c /mm	3
涡轮净重量 W_w /g	7.2	磁铁间距 L_c /mm	10
磁铁重量 W_c /g	0.45	磁转半径 R_c /mm	7.5
转速步长 $Step$ /(rad \cdot s $^{-1}$)	10	默认附加质量 W_0 /g	1.35

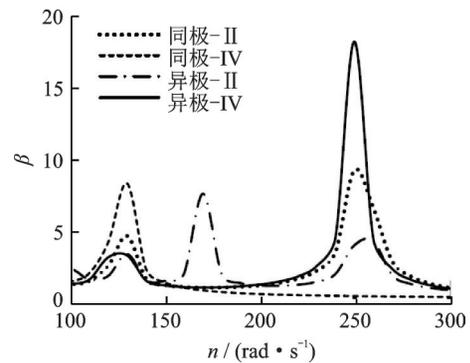


图3 磁铁排布不同时放大比 β 与转速 n 的关系

Fig. 3 Amplification ratio vs rotation rate under different magnets arrangements

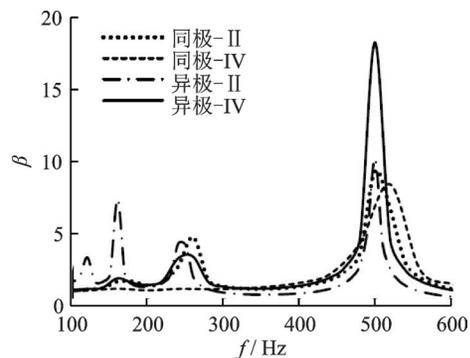


图4 磁铁排布不同时放大比 β 与激励频率 f 的关系

Fig. 4 Amplification ratio vs exciting frequency under different magnet arrangements

所对应的分频频率不同。在激励频率等于共振频率时 $f=f_n=500$ Hz,不同的磁铁排布方式的放大比 β 均存在一个最大峰值,同极-II、同极-IV、异极-II及异极-IV排布的放大比峰值分别为9.4, 8.5, 10.3及18.5。其中异极-IV放大比峰值较大,是因为异极排布(如图2所示)时相邻两个磁铁产生的磁力叠加导致力的峰峰值为同极排布的两倍。同极-II和异极-IV都在二分频 $f=f_n/2$ (转速和频率分别为125 rad/s和250 Hz)产生一个分频峰,对应的放大比分别为4.7和4.3;异极-II在三分频 $f=f_n/3$ (170 Hz)有另一个分频峰7.4。压电振子可能在整数分之一

倍工作频率产生共振^[22],从而产生分频峰。

图 5 为激励磁铁异极-IV 排布、附加质量不同时放大比 β 与转速 n 的关系曲线。图中曲线表明:附加质量不同时,分别存在不同的最佳转速使放大比达到峰值,且相邻最佳转速的间隔随附加质量增大而减小。此外,质量不同的放大比峰值不同。图 6 为附加质量不同时,放大比 β 与激励频率 f 的关系曲线。附加质量为 0.9/1.35/1.8/2.25 g 所对应的最佳转速和最佳激励频率分别为 290/250/210/190 rad/s 和 580/500/420/380 Hz,其所对应的放大比峰值分别为 13.1/18.5/17/11.4。因此,可以通过改变附加质量调节最佳转速及其放大比。

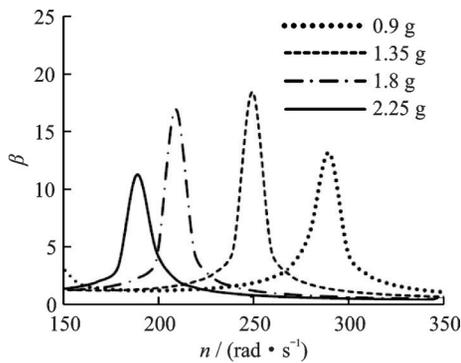


图 5 附加质量不同时放大比 β 与转速 n 的关系

Fig. 5 Amplification ratio vs rotation rate under different additional masses

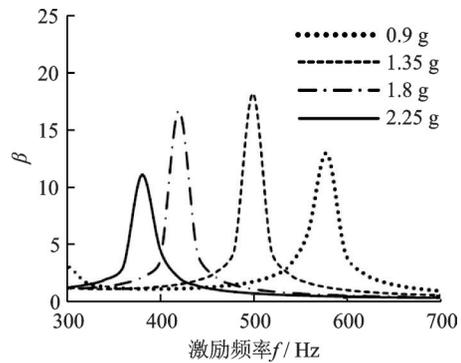


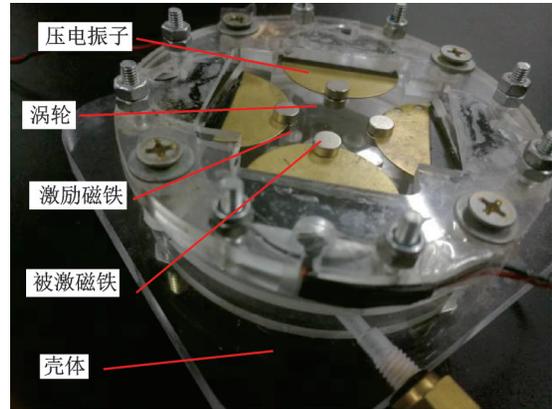
图 6 附加质量不同时放大比 β 与激励频率 f 的关系

Fig. 6 Amplification ratio vs exciting frequency under different additional masses

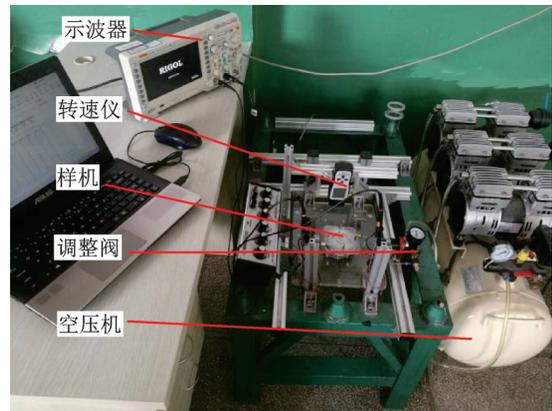
3 试验测试与分析

为验证涡轮式压电俘能器原理的可行性及相关要素对其发电性能的影响规律,设计制作了图 7 所示的样机及测试系统。主要试验仪器包括:OTS-750X3 空压机、GDS-1102 数字示波器及 AS926 光电转速仪等。试验以空压机作为气源,利用减压阀调节涡轮入口处的的气体压力,通过转速仪

和示波器测量转速和电压,测试了磁铁排布方式、附加质量、压电振子串并联以及负载电阻对俘能器输出性能的影响。试验中的电压均为整流后的开路电压有效值。



(a) 压电俘能器试验样机
(a) Prototype



(b) 试验测试系统
(b) Test system

图 7 压电俘能器试验样机和测试系统

Fig. 7 Photos of the prototype and test system

为了解气体压力与涡轮转速的关系,测试了磁铁排布方式不同时气体压力 p 所对应的涡轮转速 n ,二者的关系如图 8 所示。图中曲线表明:无论磁铁如何排布,涡轮转速与气体压力均近似呈线性关系;曲线具有良好的重合度。在所设置的试验条件下,

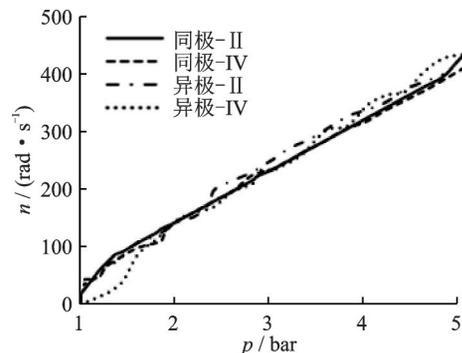


图 8 磁铁排布方式不同时涡轮转速 n 与气体压力 p 的关系
Fig. 8 Rotation rate vs pressure under different magnet arrangements

涡轮转速约为 80 rad/s 每个大气压,故可直接通过气体压力判断涡轮转速。激励磁铁数量及排布方式对涡轮转速影响不大,说明所选取的参数较为合适。

图 9 和 10 分别为磁铁排布方式不同时输出电压与气体压力的关系曲线和输出电压与激励频率的关系曲线。图中曲线表明,存在多个较佳气体压力使电压出现峰值;存在一个主频和两个分频使输出电压出现峰值,且异极排布主频峰值约为同极排布的两倍。上述现象与图 3 和 4 的仿真较为相符。在共振频率下,同极-II、同极-IV、异极-II 及异极-IV 排布输出电压峰值分别为 17.2、20.8、31.5 及 36 V。此外,仅同极-II 与异极-II 排布分别在 $f=263$ 和 174 Hz 时输出电压出现分频峰值 12.6 和 23 V。

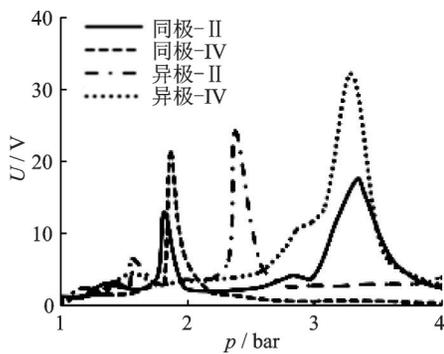


图 9 输出电压 U 与气体压力 p 的关系
Fig. 9 Output voltage vs pressure

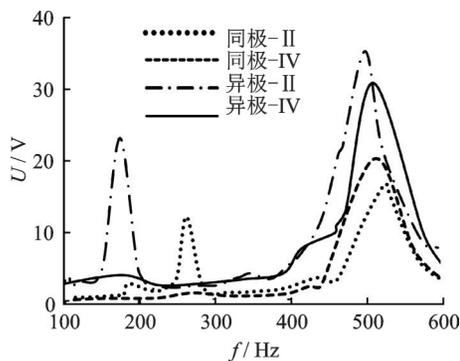


图 10 输出电压 U 与激励频率 f 的关系
Fig. 10 Output voltage vs exciting frequency

图 11 为附加质量不同时输出电压与气体压力的关系曲线;图 12 为四个压电振子串、并联时输出电压与气体压力的关系曲线。图 11 曲线表明:附加质量可改变最佳气压和输出电压峰值,随着附加质量的增加使输出电压出现峰值的气体压力减小。上述现象与仿真基本一致。附加质量 0.9/1.35/1.8/2.25 g 所对应的最佳气压和输出电压分别为 4/3.2/2.8/2.6 bar (100 kPa) 和 32.5/42.4/47/42 V。对比图 11 和 12 可知,不同附加质量的多个压电振子串、并联可拓宽有效工作范围。附加质量为 0.9/1.35/1.8/2.25 g 时,单个振子输出电压 $U > 20$ V 的气压范

围分别为 3.7~4.2/2.9~3.6/2.65~3.2/2.4~3.1 bar (100 kPa);四个压电振子串、并联时气压范围分别拓宽范围至 2.1~4.2/2.4~4.2 bar (100 kPa)。图 13 给出了单个压电振子及各压电振子串、并联时输出电压 U 与激励频率 f 的关系曲线。由图可知,并联输出电压接近各单一压电振子输出电压的较大值,串联输出电压则高于并联输出电压。在同一激励频率下,并联电压输出约等于各压电振子中输出电压的最大值,串联输出电压约等于各振子输出电压之和。

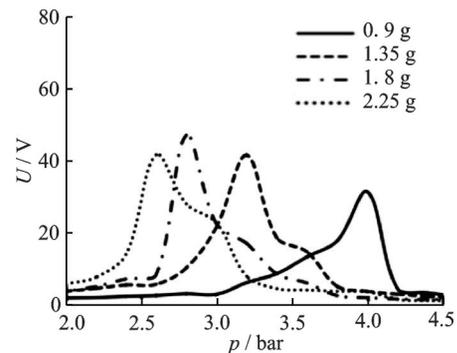


图 11 附加质量不同时输出电压 U 与气体压力 p 的关系
Fig. 11 Output voltage vs input pressure under different additional masses

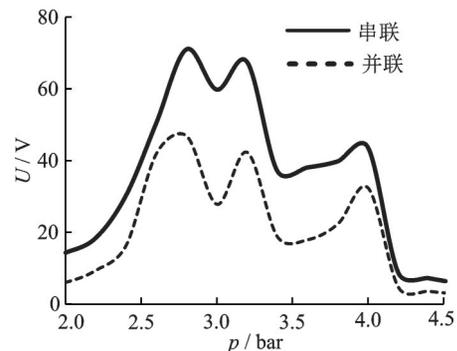


图 12 四个振子串、并联时输出电压 U 与气体压力 p 的关系
Fig. 12 Output voltage vs input pressure under series or parallel

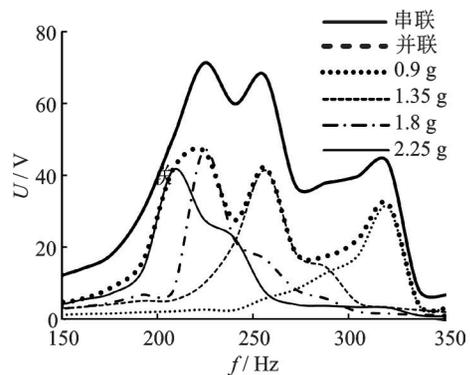


图 13 压电振子串、并联与单压电振子比较的 U 与 f 的关系
Fig. 13 Output voltage vs exciting frequency under the piezo-electric vibrators are connected in series and parallel or single one

图14为 $p=2.6\text{ atm}$,四个压电振子串、并联时输出功率与负载电阻的关系曲线。试验中,压电振子与整流滤波电路和可调电阻器相连,通过测量电阻两端电压有效值计算得到其输出功率。由图中曲线可知,压电振子串、并联时均存在最佳的负载电阻使输出功率最大,所对应的最佳负载及其最大功率分别为 $(40\text{ k}\Omega, 41\text{ mW})$, $(15\text{ k}\Omega, 50\text{ mW})$ 。与单振子相比,多振子串联时输出电压与内阻同时增大,然而并联时其电压与内阻均不发生改变,因此串联最佳负载高于并联但最大输出功率低并联。

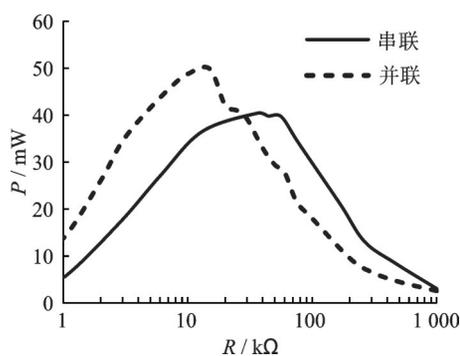


图14 输出功率 P 与负载电阻 R 的关系

Fig. 14 Output power vs resistance

4 结 论

提出了一种磁耦合激励的涡轮式压电气流俘能器,通过理论分析、仿真建模与试验测试,研究了激励磁铁排布方式、附加质量、串并联方式及外接电阻对其输出性能影响规律,结论如下:

(1)存在多个较佳气压使电压出现峰值。主频峰值大小和分频的位置与激励磁铁排布方式有关,分频峰的出现与激励磁铁数量有关。

(2)附加质量可以调节最佳气压和输出电压峰值;采用多个不同附加质量的压电振子串联或并联可以拓宽俘能器的气压适应范围。

(3)分别存在不同的最佳负载使多个压电振子串联和并联时输出功率达到最大,所对应的最佳负载及其最大功率分别为 $(40\text{ k}\Omega, 41\text{ mW})$, $(15\text{ k}\Omega, 50\text{ mW})$ 。

参考文献:

[1] Zhang Z H, Wang S Y, Kan J W, et al. A pneumatic piezoelectric vibration energy harvester based on the compressed air-transducer-structure interaction[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 213: 112861.
 [2] 王淑云,富佳伟,阚君武,等.一种脱涡纵振式压电管道气流发电机[J].机械学报,2019,55(8):24-29.

Wang Shuyun, Fu Jiawei, Kan Junwu, et al. A pipe air-flows piezoelectric energy harvester with longitudinal vibration excited by vortex shedding[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(8): 24-29.
 [3] 张旭辉,赖正鹏,吴中华,等.新型双稳态压电振动俘能系统的理论建模与实验研究[J].振动工程学报,2019,32(1):87-96.
 Zhang Xuhui, Lai Zhengpeng, Wu Zhonghua, et al. Theoretical modeling and experimental study of a new bistable piezoelectric vibration energy harvesting system[J]. Journal of Vibration Engineering, 2019, 32(1): 87-96.
 [4] 吴义鹏,周圣鹏,裘进浩,等.用于超低频振动动能收集的压电弹簧摆结构设计及实现[J].振动工程学报,2019,32(5):750-756.
 Wu Yipeng, Zhou Shengpeng, Qiu Jinhao, et al. Design and implementation of a piezoelectric spring pendulum structure applied in ultra-low frequency vibration energy harvesting[J]. Journal of Vibration Engineering, 2019, 32(5): 750-756.
 [5] 阚君武,文欢,王淑云,等.磁铁夹持式压电俘能器输出性能分析与试验[J].振动工程学报,2019,32(1):80-86.
 Kan Junwu, Wen Huan, Wang Shuyun, et al. Performance analysis and test of a piezoelectric energy harvester based on magnets holding[J]. Journal of Vibration Engineering, 2019, 32(1):80-86.
 [6] Li S, Yuan J, Lipson H. Ambient wind energy harvesting using cross-flow fluttering[J]. Journal of Applied Physics, 2011, 109(2): 026104.
 [7] He X, Yang X, Jiang S. Enhancement of wind energy harvesting by interaction between vortex-induced vibration and galloping[J]. Applied Physics Letters, 2018, 112: 033901.
 [8] Kan J W, Fu J W, Wang S Y, et al. Study on a piezodisk energy harvester excited by rotary magnets[J]. Energy, 2017, 122: 62-69.
 [9] Mutsuda H, Tanaka Y, Patel R, et al. Harvesting flow-induced vibration using a highly flexible piezoelectric energy device[J]. Applied Ocean Research, 2017, 68: 39-52.
 [10] Truitt A, Mahmoodi S N. A review on active wind energy harvesting designs[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2013, 14: 1667-1675.
 [11] Wang J L, Geng L F, Ding L, et al. The state-of-the-art review on energy harvesting from flow-induced vibrations[J]. Applied Energy, 2020, 267: 114902.
 [12] Zhou S, Wang J. Dual serial vortex-induced energy harvesting system for enhanced energy harvesting[J]. AIP Advances, 2018, 8: 075221.

- [13] McCarthy J M, Watkins S, Deivasigamani A, et al. An investigation of fluttering piezoelectric energy harvesters in off-axis and turbulent flows[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2015, 136: 101-113.
- [14] Liu F R, Zhang W M, Peng Z K, et al. Fork-shaped bluff body for enhancing the performance of galloping-based wind energy harvester[J]. *Energy*, 2019, 183: 92-105.
- [15] 雷军命. 引信气流谐振压电发电机[J]. *探测与控制学报*, 2009, 31(1): 23-26.
Lei Junming. An air-driven fluidic resonance piezoelectric generator for fuzes[J]. *Journal of Detection & Control*, 2009, 23(1): 23-26.
- [16] Kan J, Fan C, Wang S, et al. Study on a piezo-wind-mill for energy harvesting [J]. *Renewable Energy*, 2016, 97: 210-217.
- [17] Zhang J, Fang Z, Shu C, et al. A rotational piezoelectric energy harvester for efficient wind energy harvesting [J]. *Sensors and Actuators A Physical*, 2017, 262: 123-129.
- [18] Bonfá F, Benedetti M, Ubertini S, et al. New efficiency opportunities arising from intelligent real time control tools applications: the case of Compressed Air Systems' energy efficiency in production and use[J]. *Energy Procedia*, 2019, 158: 4198-4203.
- [19] Saravanakumar D, Mohan B, Muthuramalingam T. A review on recent research trends in servo pneumatic positioning systems[J]. *Precision Engineering*, 2017, 49: 481-492.
- [20] Nieto A, Morales A, Chicharro J, et al. An adaptive pneumatic suspension system for improving ride comfort and handling[J]. *Journal of Vibration and Control*, 2016, 22: 1492-1503.
- [21] 陈宇东. 结构振动分析[M]. 长春: 吉林大学出版社, 2008.
Chen Yudong. *Structural Vibration Analysis* [M]. Changchun: Jilin University Press, 2008.
- [22] 阚君武, 李洋, 王淑云, 等. 旋转激励磁铁数对压电俘能器输出性能的影响[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(7): 1864-1870.
Kan Junwu, Li Yang, Wang Shuyun, et al. Influence of NRMs on energy-generation performance of piezoelectric harvesters [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(7): 1864-1870.

Magnetic coupling gas piezoelectric energy harvester based on turbine structure

KAN Jun-wu^{1,2}, YANG Ze-meng¹, WANG Shu-yun^{1,2}, HUANG Xin¹, ZHANG Zhong-hua^{1,2},
LIAO Yong¹, WEN Yi-jie¹

(1. Institute of Precision Machinery and Intelligent Structure, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China;
2. Key Laboratory of Urban Rail Transit Intelligent Operation and Maintenance Technology and Equipment of Zhejiang Province, Jinhua 321004, China)

Abstract: To satisfy the demands of self-powered monitoring system for gas pipe, a magnetic coupling gas piezoelectric turbine energy harvester based on turbine structure is presented. The theoretical model of the energy harvester is established, simulated and analyzed. The prototype is designed and fabricated for test, obtaining the influence of magnets arrangements, proof masses, connections and resistance on the output capability. The results show that multiple appropriate pressures lead to the peak voltage, and the peak value of the main frequency and the position of the frequency division are related to the magnets arrangements. The best pressure and peak output voltage value can be adjusted by proof masses, and the best range of input air pressure can be widened by series or parallel connected PZT oscillators with different proof masses. Besides, there are different optimal loads (40 k Ω , 15 k Ω) to maximize the output power (41 mW, 50 mW) for series or parallel connected piezoelectric oscillator.

Key words: piezoelectric energy harvester; gas energy harvest; turbine; rotating magnets; indirect excitation

作者简介: 阚君武(1965—),男,教授,博士生导师。电话:(0579)82286598;E-mail: kanjw@zjnu.edu.cn。

通讯作者: 王淑云(1965—),女,教授,博士生导师。电话:(0579)82286598;E-mail: wsy888@zjnu.cn。