

文章编号 1004-924X(2024)24-3594-09

## 间接激励磁耦合式压电旋转发电机

王淑云, 刘盼盼, 任泽峰, 周积俊, 阚君武, 张忠华\*  
(浙江师范大学 精密机械研究所, 浙江 金华 321004)

**摘要:**为满足远程无线传感监测系统的自供电需求,提出一种间接激励磁耦合式压电旋转发电机,通过改变气体腔高改善系统的动力学响应,并利用多片压电振子耦合发电,提升了系统的体积能量密度。通过建模和仿真分析,获得了激励磁铁数量比、激励磁铁与受激磁铁间距、系统等效刚度等参数对系统振幅放大比的影响规律。在此基础上,设计制作了样机并进行了试验研究,获得了激励磁铁数量比、激励磁铁与受激磁铁间距、气体腔高及负载电阻对压电发电机输出性能的影响规律。研究表明,激励磁铁数量比和激励磁铁与受激磁铁间距对发电机输出电压有较大影响,气体腔高可以显著调节发电机的转速带宽,故可通过结构参数设计调节发电机的输出电压和有效带宽;其他条件一定时,存在最佳负载电阻(16 k $\Omega$ )使输出功率最大(12 mW)。

**关键词:** 旋转;间接激励;发电机;能量收集;压电

**中图分类号:** TN384; TM619 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20243224.3594

## Piezoelectric rotational energy harvester with indirect magnetic excitation

WANG Shuyun, LIU Panpan, REN Zefeng, ZHOU Jijun, KAN Junwu, ZHANG Zhonghua\*

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

\* Corresponding author, E-mail: zhangzh@zjnu.edu.cn

**Abstract:** In order to meet the demand of self-power supply of remote monitoring systems under special environment, a piezoelectric rotational energy harvester with indirect magnetic excitation was proposed. The dynamic response of the system was improved by changing the height of the damping cavity, and the volume energy density of the system was increased by coupling the piezoelectric vibrators. Through modeling and simulation analysis of harvester, the effects of exciting magnet number ratio, excited magnet distance, system equivalent stiffness and other parameters on the amplitude-magnification ratio of the system are obtained. On this basis, a prototype is designed and made, and the effects of exciting magnet number ratio, excited magnet distance, the cavity height and load resistance on the output voltage characteristics of the harvester are obtained. The results show that the number ratio of exciting magnets and the distance between exciting and excited magnets have a great influence on the maximum output voltage of the harvester, and the bandwidth of the harvester can be significantly adjusted by the cavity height, so the output volt-

收稿日期:2024-09-30;修订日期:2024-11-13.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51877109, No. 52077201);浙江省重点研发计划资助项目(No. 2021C01181);浙江省自然科学基金资助项目(No. LY20F010006)

age and effective bandwidth of harvester can be adjusted through the design of structural parameters. When other conditions are given, there is an optimal load resistance (16 k $\Omega$ ) to maximize the output power (12 mW).

**Key words:** rotational; indirect excitation; harvester; energy harvesting; piezoelectricity

## 1 引言

为满足无线传感器、医学健康监测系统及便携式电子产品等微功率设备实时供电的需求、减少废弃化学电池处理所造成的资源浪费与环境污染等问题,基于环境能量回收的压电发电机研究已成为国内外的热点<sup>[1-3]</sup>。根据环境能源形式的不同,现有的压电发电机可分为振动式<sup>[4-5]</sup>、流体激励式(风能与液体流动能量)<sup>[6-8]</sup>及旋转式<sup>[9]</sup>等,每一类发电机都有其自身的特点及适用领域。

常见的压电旋转发电机可以分为磁耦合式和非磁耦合式<sup>[10-11]</sup>。非磁耦合式压电旋转发电机主要通过撞击力,拨动力以及惯性力等激励压电振子,这种发电机电力作用较强通常能够获得较高的能量输出,不足之处在于存在着接触冲击、噪音及磨损,机械可靠性低、易损毁,增加维护成本<sup>[12]</sup>。旋磁激励式压电发电机中受激磁铁通常直接安装在压电振子上,当发电机开始工作时,耦合力直接作用在压电振子上,压电振子在磁耦合激励力的作用下发生弯曲变形<sup>[13]</sup>。为了解决上述问题,阚等<sup>[14]</sup>提出一种可调频的压电旋转发电机,受激磁铁直接固定在可伸缩的压电梁上,激励转盘转动时,压电梁产生往复变形发电。Zou等<sup>[15]</sup>提出一种两自由度的旋磁激励式压电发电机,两个压电梁端部固定磁铁,转盘转动产生磁耦合力,使压电悬臂梁来回摆动发电。Na等<sup>[16]</sup>提出一种基于梯形压电振子的旋磁耦合的压电旋转发电机。Zhang等<sup>[17]</sup>提出一种预弯式磁耦合压电旋转发电机,预弯压电振子圆周固定受到转动时产生的磁耦合力,只发生单向变形。Xie等<sup>[18]</sup>提出一种非线性的压电旋转发电机,通过磁耦合力激励压电悬臂屈曲梁用于低频俘。Fu等<sup>[19]</sup>提出一种磁耦合压电旋转发电机收集人体运动能。Fu等<sup>[20]</sup>提出一种基于双稳态变形的旋转压电发电机。Xie等<sup>[21]</sup>提出了一种磁耦合压电旋转俘能器,收集低速旋转能量。Nezami等<sup>[22]</sup>提

出一种适用于风力涡轮机叶片等大型机械监测应用的间接激励式旋转压电能量收集器。Liu等<sup>[23]</sup>提出了一种磁耦合激励的低频非接触式压电旋转发电机。

上述研究工作表明,旋磁式压电发电机的研究主要致力于通过磁铁激励来回收旋转能量。基于此,本文提出一种间接激励磁耦式压电旋转发电机。激励磁铁与受激磁铁间的耦合力作用在簧片上,簧片产生弯曲,从而带动压电振子单向变形,压电陶瓷主要承受应力,发电机可靠性高,同时在簧片往复振动过程中,由簧片、垫环和底板构成的气体腔的体积会发生变化,进而影响换能器的动力学特性。下面从仿真分析和试验测试两方面对其输出性能进行研究,研究激励磁铁数量比、激励磁铁与受激磁铁间距及气体腔高对发电机输出性能的影响。

## 2 发电机的结构原理

间接激励磁耦合式压电旋转发电机结构如图1所示,主要由激励磁盘和换能器组成,其中,激励磁盘包括激励磁铁和转盘,换能器由固定环、压电振子、受激磁铁、簧片、腔环及底板组成。由固定环固定住环形布置的多片压电振子、中心安装受激磁铁的簧片、垫环及底板的换能器是一个气体腔的结构。转盘上均布有激励磁铁,受激

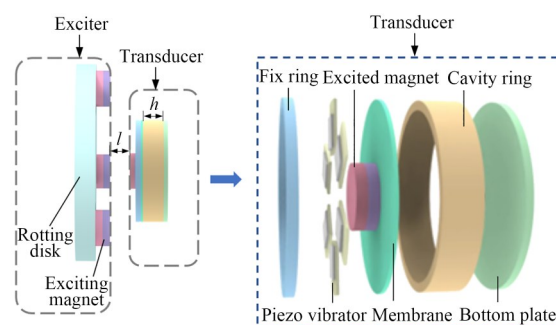


图1 发电机结构示意图

Fig. 1 Structure and working principle of PREH

磁铁安装在簧片中间,激励磁铁与换能器中受激磁铁的极性相反。发电机的转盘置于旋转轴上,转盘转动使激励磁铁与受激磁铁间产生变化的激振力,迫使簧片产生弯曲,从而带动压电振子变形,实现能量的转换。簧片振动时,气体腔内的气体会发生压缩和膨胀进而影响簧片的振动,以调节系统的动力学响应。

工作过程中,转盘转动,激励磁铁与受激磁铁接近时吸引力逐渐增大,簧片弯曲从而带动压电振子变形,气体腔内的体积增加;随着转盘继续转动,激励磁铁与受激磁铁逐渐远离,吸引力减小,簧片受弹性势能复位并继续向下弯曲,此时气体腔内体积逐渐恢复并继续缩小。簧片振动过程中,发电机通过气体腔内气体体积变化以调节系统的动力学响应,从而影响发电机的输出性能。

由间接激励磁耦合式压电旋转发电机的结构和工作原理可知:发电机工作性能由激励转盘和换能器的结构参数共同决定,故可以通过调整激励磁铁数量比和磁铁间距离及气体腔的腔高等要素,来改善发电机的环境适应性。

### 3 理论建模与仿真

#### 3.1 发电机动力学模型的建立

压电振子的变形主要由其结构参数和激励参数决定,为了便于研究,将振动系统简化成图2所示的弹簧-质量-阻尼系统,工作时压电振子刚度随弦长(位移)变化存在一定非线性,但其非线性量值较小,故建模时将刚度线性化处理,根据

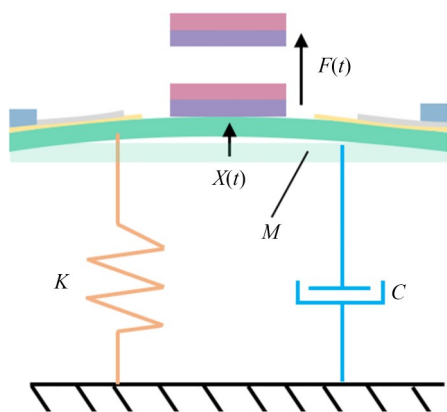


图2 发电机的动力学系统简化模型

Fig. 2 Dynamic equivalent model of PREH

机械振动理论,发电机的振动微分方程为:

$$M\ddot{X}(t) + C\dot{X}(t) + KX(t) = F(t), \quad (1)$$

其中: $K$ 为系统等效刚度、 $M$ 为系统等效质量、 $C$ 为系统等效阻尼、 $F(t)$ 为压电振子所受激振力,其大小与磁铁间的距离以及重叠面积有关。

流体微团动力学方程为:

$$M_0\ddot{X}_0 + K_0X_0 = 0, \quad (2)$$

其中, $M_0$ 、 $K_0$ 及 $X_0$ 分别是流体微团等效质量、流体微团的刚度及振动位移。

腔体模型的共振频率为:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_0}{M_0}}. \quad (3)$$

空气弹簧的刚度为:

$$K_0 = \frac{\rho c^2}{V_0} S_0^2, \quad (4)$$

其中, $\rho$ 、 $V_0$ 、 $S_0$ 及 $c$ 分别是空气密度、气体腔体积、等效微流体团横截面积及声速。

等效的流体微团质量为:

$$M_0 = \rho S_0 h, \quad (5)$$

其中, $h$ 为等效微流体团高度。

由式(3)、式(4)及式(5)得:

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S_0}{hV_0}}. \quad (6)$$

由式(6)可知,腔体的共振频率跟气体腔的体积、阻尼孔的横截面积、真空下的声速以及等效微流体团的高度有关。同时,簧片也是腔体的一部分,当腔体的共振频率改变时簧片的振动频率也会改变。簧片的刚度影响系统的整体刚度,考虑到装置的可靠性以及安装方便性,可以通过改变气体腔的腔高调节系统的刚度特性。

激励磁铁与受激磁铁中心正对时磁耦合力达到最大,而当激励磁铁与受激磁铁逐渐远离时,磁铁之间的吸引力逐渐减小。因此,磁铁间的相互作用力可近似为三角波函数,激励载荷函数表达式为<sup>[24]</sup>:

$$F(t) = \begin{cases} F_m \frac{2t}{T_m}, & 0 < t \leq \frac{T_m}{2} \\ F_m \frac{2(T_m - t)}{T_m}, & \frac{T_m}{2} < t \leq T_m \\ 0, & T_m < t \leq T \end{cases}, \quad (7)$$

其中: $T_m = \frac{120}{n\pi} \arcsin\left(\frac{r}{R_0}\right)$ 为激振力的作用时

间、 $n$ 为转盘转速、 $R_0$ 为激励磁铁旋转半径、 $r(r \ll R_0)$ 为激励/受激磁铁的半径、 $T = \frac{60}{nN_0}$ 为激励周期、 $N_0$ 为激励磁铁的数量。

此时激振力的幅值  $F_m$  和簧片的静位移  $\delta_{st}$  可表示为:

$$F_m = \frac{B_r^2 A_m^2 (h_1 + r)^2}{\pi \mu_0 h_1^2} \left[ \frac{1}{l^2} + \frac{1}{(l + 2h_1)^2} - \frac{2}{(l + h_1)^2} \right], \quad (8)$$

$$\delta_{st} = \frac{F_m}{K} = \frac{B_r^2 A_m^2}{\pi \mu_0} \beta_d, \quad (9)$$

其中:  $B_r$  为剩余磁通密度、 $A_m$  为激励磁铁与受激磁铁间的重合面积、 $\beta_d = \frac{(h_1 + r)^2}{K h_1^2} \left[ \frac{1}{l^2} + \frac{1}{(l + 2h_1)^2} - \frac{2}{(l + h_1)^2} \right]$  为静位移系数、 $h_1$  为激励/受激磁铁的厚度、 $\mu_0$  为真空磁导率、 $l$  为激励磁铁与受激磁铁间的轴向激励距离。

根据式(9)得压电振子一次弯曲变形下产生的输出电压  $V_g$  和功率  $P_g$  分别为:

$$V_g = \eta X(t) = \eta \zeta \delta_{st}, \quad (10)$$

$$P_g = \frac{V_g^2}{2R \left[ 1 + \frac{1}{(\omega C_f R)^2} \right]}, \quad (11)$$

其中:  $\eta$  是与压电振子的结构参数和材料性能相关的电压系数、 $R$  是负载电阻、 $C_f$  是压电振子的自由电容。

振幅放大比为:

$$\theta = X(t) / \delta_{st}. \quad (12)$$

公式(12)可以改写为:

$$\theta = \frac{V_g}{\eta \delta_{st}} = \frac{X(t)}{\delta_{st}} = \frac{K}{F_m} X(t). \quad (13)$$

由此可知,振幅放大比  $\theta$  为压电振子的振动幅值与其静位移的比值,后续仿真中用振幅  $X(t)$  和振幅放大比  $\theta$  来表征系统的输出特性。由于理论模型中忽略了压电振子自身质量和相邻激励磁铁间的耦合力,同时存在磁力的非线性等相关因素,因此该理论模型只能定性分析系统参数对发电机的振动特性的影响趋势。下面将通过仿真分析,探究激励磁铁数量比、激振力幅值、气体

腔高及转速等参数对发电机输出特性的影响规律。

### 3.2 仿真分析

为获得激励系统等效刚度、激励磁铁数量比、转速及激振力幅值等相关参数对系统输出特性的影响,利用数值仿真软件 Maple 对理论模型式(13)进行可视化仿真计算。

定义激励磁铁数量比  $\epsilon$  为实际放置激励磁铁的数量与转盘满载情况下磁铁数量的比值。单因素仿真中,取电压系数  $\eta = 1$ 、激励磁铁数量  $\epsilon = 0.5$ 、系统等效质量  $M = 0.6 \text{ kg}$ 、激励系统阻尼比为 0.05、激励系统刚度  $K = 10 \text{ kN/m}$ 、转速  $n = 300 \text{ r/min}$ 、激励磁铁与受激磁铁半径  $r = 12.5 \text{ mm}$ 、激振力幅值  $F_m = 2 \text{ N}$  及激励磁铁旋转半径  $R = 75 \text{ mm}$ 。同时,规定有效频带指输出电压大于最大电压  $\times 50\%$  ( $V_g \geq 0.5 \times V_g^*$ ) 所对应的频率区间。

图 3 为磁铁数量比  $\epsilon$  不同时振幅放大比  $\theta$  与转速  $n$  的关系曲线。由图中曲线可以看出,当激励磁铁数量比为 0.17 时,存在多个转速使系统振幅放大比达到最大;随着激励磁铁数量比的增加,谐振峰的个数逐渐减少;磁铁数量比为 0.17, 0.33, 0.5 及 1 时的最大振幅放大比分别为 2.12, 2.08, 3.96 及 0.56, 对应的最佳转速分别为 904 r/min, 1 200 r/min, 910 r/min 及 887 r/min。

图 4 给出了磁铁数量比为 0.5、激励系统刚度  $K = 12 \text{ kN/m}$ 、激振力幅值  $F_m$  不同时系统振动幅度与转速  $n$  的关系曲线。由图中曲线可以看

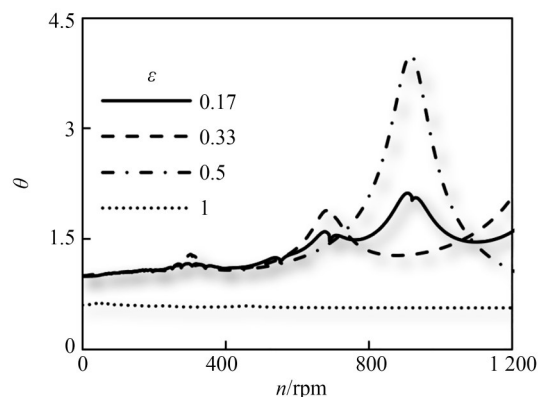


图 3 激励磁铁数量比不同时转速对振幅放大比的影响关系曲线

Fig. 3 Relationship between amplitude ratio and rotating speed under different number ratio of excited magnet

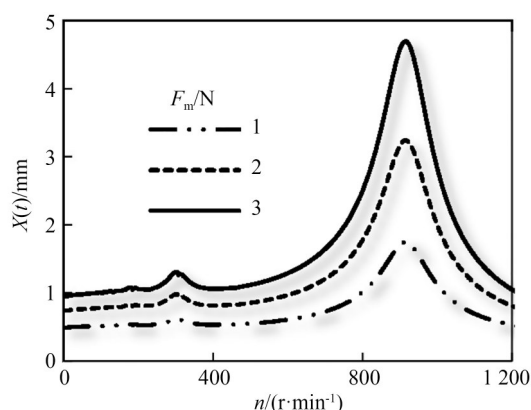


图4 激振力幅值不同时转速对振幅的影响关系曲线

Fig. 4 Relationship between amplitude and rotating speed under different excited force

出,激振力幅值对最大系统振幅影响较大;存在一个最佳转速使系统振动振幅达到最大,激振力幅值的大小对幅频特性曲线的趋势影响较小,系统谐振频率所对应的转速均为 914 r/min;当激振力幅值为 1 N, 2 N 及 3 N 时,最大系统振幅分别为 1.83 mm, 3.14 mm 及 4.77 mm。因此,合理增加激振力幅值能有效增大系统的振幅,提升发电机的输出性能。

图 5 给出了激励磁铁数量比  $\epsilon=0.5$ 、激振力  $F_m=2$  N, 激励系统等效刚度  $K$  不同时转速  $n$  对系统振幅放大比  $\theta$  的影响关系曲线。由图可知,其他参数不变的情况下,存在一个最佳转速使振幅放大比达到峰值;等效刚度对最大振幅放大比影响较小,不同等效刚度下,系统的最大振幅放

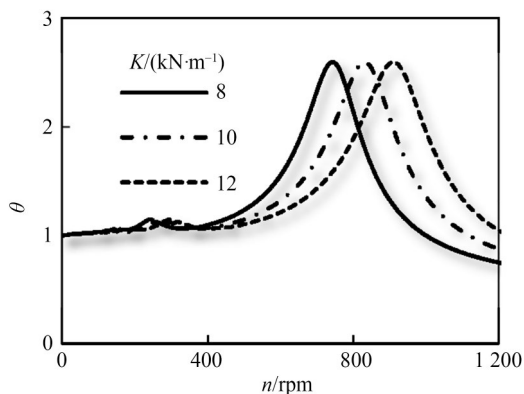


图5 等效刚度不同时转速对系统振幅放大比的影响关系曲线

Fig. 5 Relationship between amplitude ratio and rotating speed under different system equivalent stiffness

大比较为接近,均在 2.56 左右;等效刚度的改变对最佳转速的影响较大,随着等效刚度的增大,最佳转速逐渐增大,激励系统等效刚度为 8 kN/m, 10 kN/m 及 12 kN/m 时,系统的最佳转速分别为 745 r/min, 833 r/min 及 912 r/min。

利用所建立的理论模型还可分析其他要素对发电机响应特性的影响规律。在此不一一列举,下面通过试验的方法研究发电机的输出性能。

#### 4 试验测试与分析

为验证所提出的间接激励磁耦合式压电旋转发电机的可行性和理论仿真结果的正确性,设计制作了样机并搭建了如图 6 所示的测试系统,用以研究激励磁铁数量比、激励磁铁与受激磁铁间距、气体腔高及负载电阻对压电发电机输出性能的影响规律。由式(10)可知,发电机输出电压与压电振子振幅放大比成正比,故为了便于观察及试验数据采集,采用输出电压表征发电机的输出性能。图 6 所示的测试系统激励磁铁均布在转盘上且与簧片中心固定的受激磁铁正对安装,异性磁极产生吸引力,考虑到激励单元所需磁耦合力较大,因此激励磁铁和受激磁铁均为 NdFeB 材料的圆柱磁铁,尺寸分别为直径  $\Phi 25$  mm、高度 8 mm 和直径  $\Phi 25$  mm、高度 6 mm。簧片固定于固定环与垫环间,尺寸为直径  $\Phi 80$  mm、高度 0.2 mm,簧片周围固定有 6 片压电振子,立柱作为固定端需要较高的刚度,故采用铝型材。

图 7 给出了当激励磁铁与受激磁铁间距  $l$  为

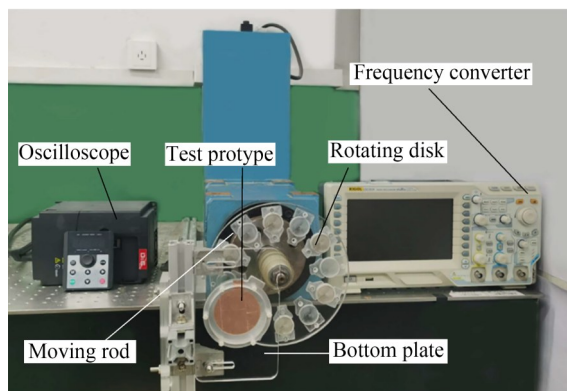


图6 试验测试系统与样机

Fig. 6 Test system and prototype

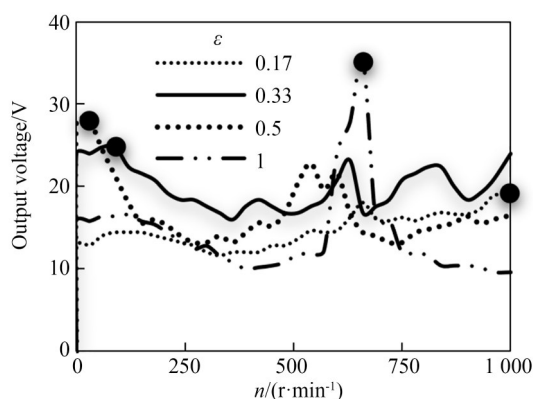


图7 激励磁铁数量比不同时转速对输出电压的影响关系曲线

Fig. 7 Relationship between output voltage and rotating speed under different number ratio of excited magnet

3 mm、气体腔高  $h$  为 2 mm,激励磁铁数量比  $\epsilon$  不同时转速对输出电压的影响关系曲线。由图可知,激励磁铁数量比为 0.17,0.33,0.5 及 1 时最大电压分别为 19.2 V,24.8 V,28 V 及 35.2 V。激励磁铁数量比为 1 时,在转速为 660 r/min 左右出现一个谐振峰,在激励磁铁数量比为 0.33,0.5 以及 0.67 时未出现明显谐振峰。

图 8 为激励磁铁数量比  $\epsilon$  为 0.5、气体腔的腔高  $h$  为 4 mm,激励磁铁与受激磁铁间距不同时转速对输出电压的影响关系曲线。观察图中趋势可得,激励磁铁与受激磁铁间距对幅频特性曲线的趋势影响较小、对最大系统振幅影响较大;存

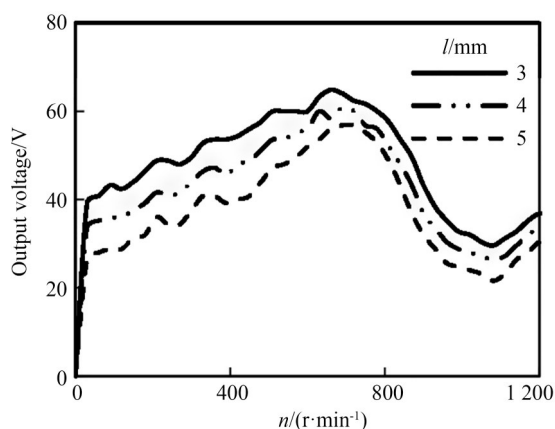


图8 激励/受激磁铁间距不同时转速对输出电压的影响关系曲线

Fig. 8 Relationship between output voltage and rotating speed under different exciting/excited magnet distance

在一个最佳转速使发电机输出电压达到最大。激励磁铁与受激磁铁间距为 3 mm,4 mm 及 5 mm 时,对应的最大输出电压分别为 64.8 V,60.4 V 及 56.8 V。

图 9 给出了激励磁铁与受激磁铁间距  $l$  为 3 mm、激励磁铁数量比  $\epsilon$  为 0.5,气体腔高  $h$  不同时转速对输出电压的影响关系曲线。对比图中各曲线可以看出,气体腔高对发电机输出电压的最大值及有效带宽的影响都有影响,气体腔高为 2 mm,4 mm 及 6 mm 时,对应的最大电压分别为 28 V,57.2 V 及 64 V,有效带宽分别为 1 300 r/min,720 r/min 及 540 r/min。因此,合理配置气体腔的高度能有效改变系统的幅频特性,提升发电机的输出性能。

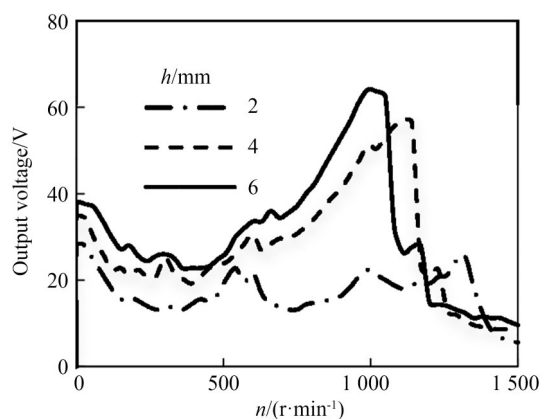


图9 气体腔高不同时转速对输出电压的影响关系曲线  
Fig. 9 Relationship between output voltage and rotating speed under different cavity height

发电机的输出性能除与上述讨论的各要素有较大关系外,还与外负载有关。为此,将发电机外接整流滤波电路和可调电阻器,对其进行了输出功率测试。

图 10 为激励磁铁数量比为 0.5、激励磁铁与受激磁铁间距为 3 mm、气体腔的腔高为 4 mm,转速不同时单片压电振子输出功率与电阻的关系曲线。由图可知,转速为 900 r/min 和负载电阻为 16 k $\Omega$  时发电机中单片压电振子的输出功率最大可以达到 12 mW。

本文还在转速、最佳转速和输出功率方面与以往的相关压电旋转发电机的研究结果进行了比较,所得结论见表 1。结果表明,间接激励磁耦

表 1 发电机的性能对比

Tab. 1 Performance comparison of similar rotating piezoelectric harvester

| Reference                | Range of rotating speed/( $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ ) | Resonant rotating speed/( $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ ) | Maximum power/mW |
|--------------------------|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|------------------|
| Rizal <i>et al.</i> [22] | 250~1 500                                                  | 750                                                        | 3.5              |
| Sun <i>et al.</i> [25]   | 0~700                                                      | 420                                                        | 0.177            |
| Mei <i>et al.</i> [26]   | 60~120                                                     | 120                                                        | 0.03             |
| Zhang <i>et al.</i> [27] | 0~400                                                      | 300                                                        | 2.58             |
| This work                | 0~1500                                                     | 900                                                        | 12               |

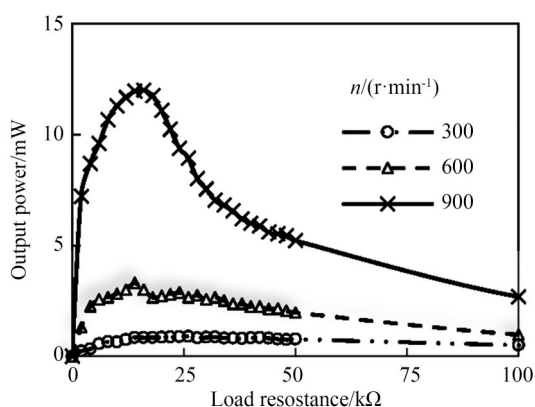


图 10 转速不同时输出功率与负载电阻的关系曲线

Fig. 10 Relationship between output power and resistance under different rotating speed

合式压电旋转发电机在试验的转数范围内,输出功率更高。

## 5 结 论

本文提出一种间接激励磁耦合式压电旋转发电机,介绍了发电机的结构和工作原理,从理论建模仿真和试验测试两方面对发电机进行了研究,探究了激励磁铁数量比、激励磁铁与受激磁铁间距、气体腔高及激励振幅等对其输出性能的影响。结果表明,该发电机可以实现调幅功能,具体结论如下:

(1)激励参数对压电发电机输出电压特性的影响较大,其中激励磁铁数量比对于系统谐振峰

的个数、最大输出电压及不同转速下的输出特性均有影响;当激励磁铁与受激磁铁间距为 3 mm、气体腔高为 2 mm、激励磁铁数量比为 0.17, 0.33, 0.5 及 1 时最大电压分别为 19.2 V, 24.8 V, 28 V 及 35.2 V。激励磁铁与受激磁铁间距对激励力幅值大小有较大影响;当激励磁铁数量比为 0.5、气体腔的腔高为 4 mm、激励磁铁与受激磁铁间距为 3 mm, 4 mm 及 5 mm 时,对应的最大输出电压分别为 64.8 V, 60.4 V 及 56.8 V。因此,可以根据实际工作环境合理配置系统的激励参数。

(2)气体腔可以调节压电振子的振动特性,具有抑制谐振峰幅值的效果,避免压电振子因变形过大而损毁。在激励磁铁与受激磁铁间距为 3 mm、激励磁铁数量比为 0.5 的条件下,当气体腔高为 2 mm, 4 mm 及 6 mm 时,对应的最大电压分别为 28 V, 57.2 V 及 64 V,有效带宽分别为 1 300 r/min, 720 r/min 及 540 r/min。即在一定范围内可以通过减小气体腔高使发电机的输出电压特性变得更稳定,提高发电机的可靠性,而增大气体腔高有助于提高发电机的输出电压。合理配置气体腔高可以改善发电机的输出电压特性,提高其可靠性。

(3)存在一个最佳的负载电阻阻值使得单片压电振子的输出功率最大,当转速为 900 r/min,负载电阻为 16 kΩ 时,输出功率达到最大值为 12 mW。

## 参考文献:

[1] WANG H, JASIM A, CHEN X. Energy harvesting technologies in roadway and bridge for different applications-A comprehensive review [J]. *Applied*

*Energy*, 2018, 212: 1083-1094.

[2] MA X Q, ZHOU S X. A review of flow-induced vibration energy harvesters [J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 254: 115223.

[3] AZIMI S, GOLABCHI A, NEKOOKAR A, *et*

- al.* Self-powered cardiac pacemaker by piezoelectric polymer nanogenerator implant [J]. *Nano Energy*, 2021, 83: 105781.
- [4] CAO J Y, WANG W, ZHOU S X, *et al.* Nonlinear time-varying potential bistable energy harvesting from human motion [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 107(14): 143904.
- [5] NASTRO A, PIENAZZA N, BAÙ M, *et al.* Wearable ball-impact piezoelectric multi-converters for low-frequency energy harvesting from human motion [J]. *Sensors*, 2022, 22(3): 772.
- [6] SUN W P, ZHAO D L, TAN T, *et al.* Low velocity water flow energy harvesting using vortex induced vibration and galloping [J]. *Applied Energy*, 2019, 251: 113392.
- [7] 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(1): 114902.
- [8] 张忠华, 李哲, 孟凡许, 等. 可变形式翼型钝体的风致振压电俘能器 [J]. *光学精密工程*, 2023, 31(24): 3570-3579.
- ZHANG Z H, LI Z, MENG F X, *et al.* Wind-induced vibration piezoelectric energy harvester with a deformable airfoil-shape blunt body [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(24): 3570-3579. (in Chinese)
- [9] LO Y C, SHU Y C. Self-powered SECE piezoelectric energy harvesting induced by shock excitations for sensor supply [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 177: 109123.
- [10] 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.
- [11] MUTHALIF A GA, HAFIZH M, RENNO J, *et al.* A hybrid piezoelectric-electromagnetic energy harvester from vortex-induced vibrations in fluid-flow; the influence of boundary condition in tuning the harvester [J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 256: 115371.
- [12] YANG B, YI Z R, TANG G, *et al.* A gullwing-structured piezoelectric rotational energy harvester for low frequency energy scavenging [J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 115(6): 063901.
- [13] WANG J X, SU W B, LI J C, *et al.* A rotational piezoelectric energy harvester based on trapezoid beam: simulation and experiment [J]. *Renewable Energy*, 2022, 184: 619-626.
- [14] 阙君武, 何恒钱, 王淑云, 等. 可调频旋磁激励式压电发电机的设计与试验 [J]. *光学精密工程*, 2019, 27(3): 577-583.
- KAN J W, HE H Q, WANG S Y, *et al.* Structure and performance of rotating piezoelectric generator with tunable frequency [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(3): 577-583. (in Chinese)
- [15] ZOU H X, ZHANG W M, LI W B, *et al.* Design and experimental investigation of a magnetically coupled vibration energy harvester using two inverted piezoelectric cantilever beams for rotational motion [J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 148: 1391-1398.
- [16] NA Y, LEE M S, LEE J W, *et al.* Horizontally assembled trapezoidal piezoelectric cantilevers driven by magnetic coupling for rotational energy harvester applications [J]. *Energies*, 2021, 14(2): 498.
- [17] ZHANG Z H, CHAI J L, WU Y Q, *et al.* A rotational energy harvester utilizing an asymmetrically deformed piezoelectric transducer subjected only to unidirectional compressive stress [J]. *Energy Reports*, 2023, 9: 657-668.
- [18] XIE Z Q, XIONG J T, ZHANG D Q, *et al.* Design and experimental investigation of a piezoelectric rotation energy harvester using bistable and frequency up-conversion mechanisms [J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(9): 1418.
- [19] FU H L, YEATMAN E M. A methodology for low-speed broadband rotational energy harvesting using piezoelectric transduction and frequency up-conversion [J]. *Energy*, 2017, 125: 152-161.
- [20] FU H L, YEATMAN E M. Rotational energy harvesting using bi-stability and frequency up-conversion for low-power sensing applications: theoretical modelling and experimental validation [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 125: 229-244.
- [21] YANG B, YI Z R, TANG G, *et al.* A gullwing-structured piezoelectric rotational energy harvester for low frequency energy scavenging [J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 115(6): 063901.
- [22] NEZAMI S, JUNG H, LEE S. Design of a disk-swing driven piezoelectric energy harvester for slow rotary system application [J]. *Smart Materials and*

- Structures*, 2019, 28(7): 074001.
- [23] LIU L, HE L P, LIU X J, *et al.* Design and experiment of a low frequency non-contact rotary piezoelectric energy harvester excited by magnetic coupling[J]. *Energy*, 2022, 258: 124882.
- [24] KAN J W, FAN C T, WANG S Y, *et al.* Study on a piezo-windmill for energy harvesting[J]. *Renewable Energy*, 2016, 97: 210-217.
- [25] SUN F, DONG R H, ZHOU R, *et al.* Theoretical and experimental investigation of a rotational magnetic couple piezoelectric energy harvester[J]. *Micromachines*, 2022, 13(6): 936.
- [26] MEI X T, ZHOU R, YANG B, *et al.* Combining magnet-induced nonlinearity and centrifugal softening effect to realize high-efficiency energy harvesting in ultralow-frequency rotation [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2021, 505: 116146.
- [27] ZHANG Y S, ZHENG R C, NAKANO K, *et al.* Stabilising high energy orbit oscillations by the utilisation of centrifugal effects for rotating-tyre-induced energy harvesting [J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112(14): 143901.

## 作者简介:



王淑云(1965—),女,吉林松原人,教授,1988年、2001年和2008年于吉林大学分别获得学士学位、硕士学位和博士学位,主要从事工程问题的理论建模、仿真分析及优化等方面研究。  
E-mail: jutwsy@163.com

## 通讯作者:



张忠华(1980—),男,吉林松原人,博士,教授,硕士生导师,2009年于大连理工大学获得博士学位,主要研究方向为能量收集技术、压电传感器与驱动器技术、智能结构与系统。E-mail: zhangzh@zjnu.edu.cn