

文章编号 1004-924X(2014)07-1864-07

## 旋转激励磁铁数对压电俘能器输出性能的影响

阚君武, 李洋, 王淑云\*, 汪彬, 沈亚林, 李胜杰  
(浙江师范大学精密机械研究所, 浙江金华 321004)

**摘要:**考虑现有旋转发电机无法适应高/匀速旋转运动且振动冲击/噪音大、可靠性低等弊端,提出了一种由旋转磁铁激励的压电俘能器,并从理论及试验两方面研究了旋转磁铁数量(间距)对激振力及压电振子发电特性的影响规律。结果表明,在其它条件确定的情况下,存在使激振力最大的最佳旋转磁铁间隙比(磁铁直径与相邻磁铁间距离之比);间隙比为2时的激振力幅值为间隙比为0和4时的6.2倍。采用2,12,24个旋转磁铁激励发电时,电压-转速特性曲线中均存在多个使输出电压出现峰值的最佳转速,其中最大峰值电压及其所对应的最佳转速分别为29.4,87.2,28.4 V和1 282.5,707.5,2451 r·min<sup>-1</sup>;12个旋转磁铁激励的最大输出电压为其它两种情况的3倍。此外,压电振子一次激励所生成电能(波形数量及幅值)还与旋转磁铁数量及转速有关。2个旋转磁铁在低转速时仅能激励出1个较大幅值电压波形,而高转速时可生成4个幅值较大的自由振荡波形;12个磁铁在任何转速下都仅能激励出1个电压波形。实验显示动磁铁数量是影响旋转压电俘能器发电量及输出功率的关键要素。

**关键词:**压电俘能器;旋转激励;磁铁间距;输出电压

**中图分类号:** TN384, TM619 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142207.1864

## Influence of NRMs on energy-generation performance of piezoelectric harvesters

KAN Jun-wu, LI Yang, WANG Shu-yun\*, WANG Bin, SHEN Ya-lin, LI Sheng-jie

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

\* Corresponding author, E-mail: jutwsy@163.com

**Abstract:** As existing rotating generators can not adapt to a high speed shock and vibration and have higher noise and lower reliability, this paper proposes a piezoelectric energy harvester excited by rotating magnets. The influence of the number of the rotating magnets (NRMs) on the exciting force as well as the output voltage of the piezoelectric harvester is investigated theoretically and experimentally. The results show that there is an optimal gap ratio (the gap  $\lambda_l$  between two adjacent magnets to the magnet diameter) for the excitation force to achieve maximum. The obtained excitation force at  $\lambda_l=2$  is 6.2 times that at  $\lambda_l=0$  and  $\lambda_l=4$ . When the voltage generation excited with 2,12,24 rotating magnets in the experiments, there are several optimal rotating speeds for the generated voltages to achieve the peak. The maximal peak voltages and the relative optimal speeds for 2,12,24 rotating magnets are 29.4,87.2,28.4 V and 1 282.5, 2 707.5, 2 451 r·min<sup>-1</sup>, respectively. The

收稿日期:2013-11-28;修订日期:2014-01-16.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51277166, No. 51377147, No. 51075371);浙江省新苗人才计划资助项目(No. 2013R404066, No. 2013R404071)

maximal voltage generated under 12 rotating magnets is about 3 times those under other excitation conditions. The voltage waveform generated from the piezoelectric harvester under one excitation depends on the NRMs and rotating speeds. For 2 rotating magnets, the number of voltage waveforms generated at low and high rotating speeds are 1 and 4, respectively. For 12 rotating magnets, only one voltage waveform generates at any speed. These results demonstrate that the NRMs have great influence on energy generation and output powers of piezoelectric energy harvesters.

**Key words:** piezoelectric energy harvester; rotating excitation; Number of Rotating Magnets (NRMs); generated voltage

## 1 引言

为满足微功率电子产品及微小型远程传感/埋植监测系统的自供电需求并避免大量废弃电池污染环境,基于电磁/静电/热电/电容/压电等原理的微小型俘能器(亦称微小型发电机)已成为国内外的研究热点<sup>[1-3]</sup>。基于不同换能原理的各类俘能器都有其自身的优势和适用领域,压电俘能器由于结构简单、无电磁干扰、易于制作和实现结构上的微小化与集成化等而适用范围更广,已逐步应用于传感器、健康监测及无线发射系统等领域,展示了压电发电及其自供电技术的光明前景。

目前,压电发电领域的研究重心已从最初的“能量转换机理与储能技术的基础研究”向“以特定环境(能量来源)/对象为目标的应用研究”方向发展。根据能量来源的形式,人们已成功开发了多种类型的压电俘能器,如:基于人体运动/手动发电的人力发电机<sup>[4]</sup>,收集环境振动能的振动俘能器<sup>[5]</sup>,回收流体能量的流能发电机<sup>[6]</sup>,旋转体激励的旋转式发电机<sup>[7]</sup>等。其中,前两种压电俘能器的研究较早、取得的成果较多,而基于流体及旋转体激励的俘能器研究还处于探索和起步阶段。

根据激励方式的不同,现有旋转式压电俘能器主要可分为以下三类:利用压电振子转动过程中受力方向的变化使其弯曲变形的惯性激励式<sup>[7-8]</sup>,利用旋转机构拨动压电振子的拨动式<sup>[9]</sup>,和利用旋转坠落的钢球撞击压电振子的撞击式<sup>[10]</sup>。虽然它们在原理及构成上存在较大差别,但均是采用周向激励方式发电,即压电振子沿着旋转体的回转方向变形发电。因此,高速工作条件下,拨动式俘能器将产生较大的冲击噪音或因撞击损毁,而惯性式及撞击式俘能器将因离心力

过大而无法正常工作。

为消除现有旋转发电机不适用于高/匀速旋转运动、振动冲击/噪音大、可靠性低等弊端,本文提出一种基于旋转磁铁激励的旋转式压电俘能器,并从理论和试验两方面研究了激励磁铁数量对压电振子所受激振力、输出电压及电能(电压幅值及波形数量)的影响规律,为旋转式压电俘能器进一步研究提供了借鉴。

## 2 压电俘能器结构及工作原理

提出的旋转压电俘能器是通过轴类旋转体的旋转运动激励发电的,主要用于构造自供能的旋转体健康监测系统,其原理如图1所示。由金属基板和压电晶片粘结而成的圆形压电振子安装在轴承盖上,压电振子中心处安装有“定磁铁”,安装有“动磁铁(即旋转磁铁)”的转盘与旋转轴固定连接,且动磁铁和定磁铁距转轴中心距离相等。

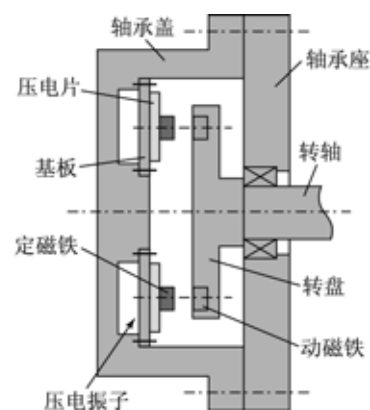


图1 压电发电机结构原理图

Fig. 1 Schematic diagram of piezoelectric generator

当转盘随转轴转动时,“动磁铁”与“定磁铁”间的距离以及两磁铁间的轴向距离呈周期性变

化,使压电振子产生轴向弯曲变形,将机械能转换成电能。根据压电学知识,当压电振子的结构及材料参数确定时,其弯曲变形生成电压为:<sup>[11]</sup>

$$V_g = \lambda_0 z(t), \quad (1)$$

其中: $\lambda_0$  为与压电振子结构尺寸及材料参数有关的系数, $z(t)$ 为压电振子中心处的动态变形量,其大小取决于压电振子受磁力作用时的响应特性。

### 3 压电振子所受激振力及其响应特性分析

为便于分析,将旋转压电俘能器中定磁铁与动磁铁间的相互作用关系展开成图 2 所示的形式。根据旋转压电俘能器结构原理可知,当转盘转速  $n$ 、磁铁结构参数及磁场强度、动磁铁回转半径  $R$  等参数确定后,压电振子所受作用力大小、作用力形式、以及激励频率均与旋转磁铁数量  $n_0$  有关。

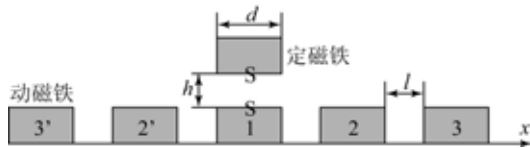


图 2 磁铁配置方式

Fig. 2 Configuration of magnets

根据电磁学理论可知,图 2 中的定磁铁同时与多个动磁铁之间相互作用,总磁力(即压电振子所受激振力)大小及方向取决于相邻两动磁铁的间距(转盘上动磁铁间距为  $l = 2R\sin(\pi/n_0) - d$ ,  $n_0 \geq 2$ ),故激振力为  $F = F_1 + 2(F_2 + F_3 + \dots)$ 。因目前尚无简单有效的总磁力计算方法,本文通过试验的方法获得了动磁铁间距对动磁铁与定磁铁间轴向作用力(以下简称磁力或激振力)的影响关系。

图 3、图 4 分别给出了距离比( $\lambda_x = x/d$ )和间隙比( $\lambda_l = l/d$ )对激振力的影响规律曲线,其中  $x$  为动磁铁与定磁铁间的距离,排斥力定义为正。图中曲线表明,动磁铁与定磁铁之间作用力的大小、形式(吸引或排斥)及变化规律是由距离比和间隙比共同决定的。随着间隙比增加,磁力极大值  $F_d$  增加、极小值  $F_x$  先增加后再减小,存在一个使磁力幅值( $F_t = F_d - F_x$ )最大的最佳的间隙比( $\lambda_l \approx 2$ );当间隙比大于 4 时,两相邻动磁铁间

不具耦合性(动磁铁仅与距离最近的磁铁间产生相互作用力)。尽管试验中动磁铁与定磁铁同性磁极相对安装(轴心重叠时为排斥力),但当间隙比和距离比均大于 1 时可产生吸引力,这是由磁力线的空间分布规律决定的。因此,可通过调整动磁铁间的间隙(即动磁铁数量,  $n_0 = \pi/\arcsin[(l+d)/(2R)]$ )获得所需的磁力。

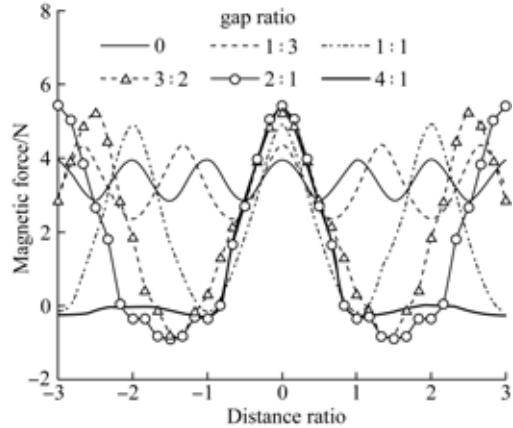


图 3 不同间隙比时磁力与距离比的关系

Fig. 3 Relationship between magnetic force and displacement ratio under given gap ratios

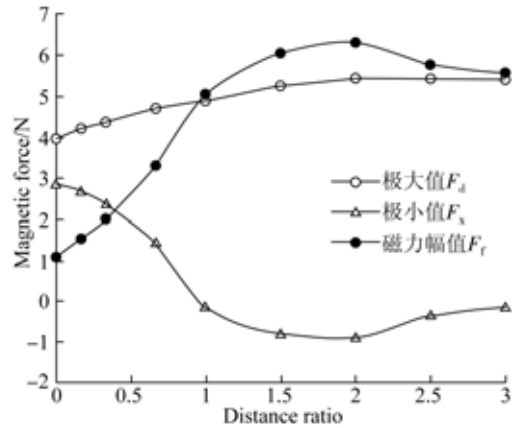


图 4 磁力与间隙比的关系曲线

Fig. 4 Relationship between magnetic force and gap ratio

上述试验结果表明,尽管不同间隙比(动磁铁数量)时磁力大小不同,但都是按一定的周期  $T$  (定磁铁受 2 次激励的时间间隔,称激励周期)变化的,故可将一次力的施加过程视为半余弦波,即:

$$F(t) \approx F_x + F_t \cos\left\{\frac{\pi}{T_m} t\right\}, \quad (2)$$

$$T = \frac{60}{nn_0} = \frac{60}{n\pi} \arcsin\left\{\frac{l+d}{2R}\right\}, \quad (3)$$

其中:  $T_m$  为磁力作用时间,它与激励周期  $T$  虽均与动磁铁间隙有关,但并非完全相等;间隙比较小(如  $\lambda_1 \leq 2$ , 见图 3)时,  $T_m \approx T$ , 压电振子承受连续的周期载荷作用,响应函数应为幅值相等的正弦函数;相反,若间隙比较大(如  $\lambda_1 = 4$ )时,  $T_m \ll T$ , 则压电振子承受周期性脉冲激励,响应函数存在逐渐衰减的自由振动成分。

根据振动分析理论,压电振子受一般性周期激励的稳态响应函数为<sup>[12]</sup>:

$$z(t) = \frac{a_0}{2k} + \sum_{j=1}^{\infty} \frac{a_j \cos(j\omega t - \varphi_j) + b_j \sin(j\omega t - \varphi_j)}{k \sqrt{(1 - j^2 \lambda^2)^2 + (2\xi j \lambda)^2}}, \quad (4)$$

其中:  $k$ 、 $\xi$  分别为压电振子的等效刚度和阻尼比,  $\lambda = \omega/\omega_n$ ,  $\omega$ 、 $\omega_n$  分别为压电振子激励圆频率及固有频率:

$$\varphi_j = \arctan[2\xi j \lambda / (1 - j^2 \lambda^2)], \quad (5)$$

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T F(t) dt, \quad (6)$$

$$a_j = \frac{2}{T} \int_0^T F(t) \cos(j\omega t) dt, \quad (7)$$

$$b_j = \frac{2}{T} \int_0^T F(t) \sin(j\omega t) dt. \quad (8)$$

式(4)表明,在其他条件相同的情况下,压电振子的动态响应及发电性能( $V_g = \lambda_0 z(t)$ )均与动磁铁数量(间距)有关。

#### 4 输出电压的试验测试与分析

为验证旋转压电俘能器输出特性与磁铁数量(间距)的关系,制作了俘能器样机及测试系统,如图 5 所示,固定的结构尺寸及工作参数如表 1 所示。主要的试验仪器包括电动机(额定转速 2 850

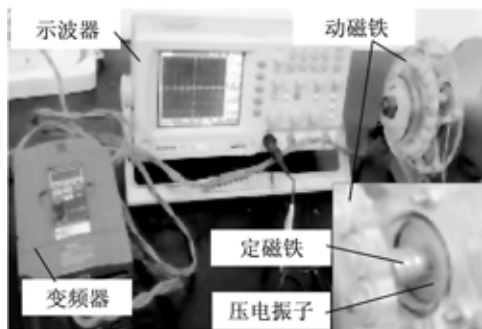


图 5 旋转压电俘能器结构及测试系统

Fig. 5 Piezoelectric energy harvester and test system

$r \cdot \text{min}^{-1}$ )、变频器(变频范围 50 Hz,调频步长 0.5 Hz)、DS5042M 型数字存储示波器、万用表等。试验中动磁铁与定磁铁的同性磁极靠近安装,轴向距离为 3.5 mm。

表 1 俘能器结构尺寸及固定的工作参数

Tab. 1 Constant structural size and working parameters (mm)

| PZT4 晶片 |    | 黄铜基板 |    | 圆柱形磁铁 |    |    |      |
|---------|----|------|----|-------|----|----|------|
| 厚度      | 直径 | 厚度   | 直径 | 内径    | 外径 | 厚度 | 回转半径 |
| 0.3     | 25 | 0.3  | 35 | 3.5   | 12 | 4  | 46   |

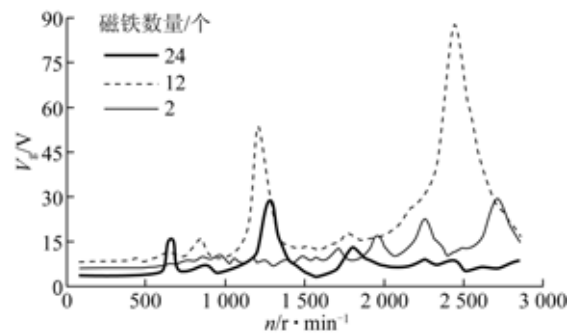


图 6 动磁铁数量不同时输出电压与转速的关系

Fig. 6 Generated voltage vs rotating speed under different number of rotating magnets

图 6 所示为转盘上均布 2/12/24 个动磁铁(对应的间隙比为 6.7/0.98/0)时俘能器输出电压(峰峰电压)与转速的关系曲线。动磁铁数量(间距)不同时,俘能器的电压-转速特性不同,但都存在多个明显的使电压出现峰值的最佳转速,且动磁铁数量不同时其各级最佳转速及其所对应的峰值电压不同。此外,最大峰值电压所对应的最佳转速随动磁铁数量的增加而降低,且存在最佳的动磁铁数量使输出电压最大。2/12/24 个动磁铁所对应的使峰值电压最大的最佳转速分别为  $2\ 707.5/2\ 451/1\ 282.5 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ , 相应的最大输出电压分别为 29.4/87.2/28.4 V; 12 个动磁铁时最大电压分别为 2/24 个动磁铁最大电压的 3 倍。因此,在转盘直径及转速确定时,可通过选取合理的动磁铁数量(间距比)提高压电振子单次变形的输出电压,这与前文有关间距比对激振力影响规律的结论一致。

动磁铁数量除影响激振力外,还直接影响压

电振子的激励频率( $f = nm_0/60$ )。根据旋转压电俘能器的工作原理及动磁铁间的磁力耦合作用分析,压电振子工作中所承受的是周期性半余弦激励(非简谐激励),故当激励频率为压电振子基频整数及整数分之一倍时压电振子都将产生共振,从而使其振幅及输出电压出现峰值。图 7 所示为俘能器的电压-频率特性曲线。虽然动磁铁数量不同,但压电振子发生共振的频率基本相同,与一般周期性激励的响应特性规律一致。因动磁铁数量(间隙比)不同时定磁铁所受激振力不同,故相同激励频率下压电振子的振幅及输出电压不同。图 7 中曲线变化趋势还表明,动磁铁数量越少,压电振子在其谐振点处生成的电压越高,故为获得较大的输出电压,转速增加时动磁铁的数量需相应地减少(以获得与压电振子某阶固有频率相同的激励频率  $f = nm_0/60$ )。试验中,当激励频率低于 100 Hz 时,2 个动磁铁激励所产生的电压最大;激励频率低于 570 Hz,12 个动磁铁激励的输出电压均高于 24 个动磁铁激励的输出电压。

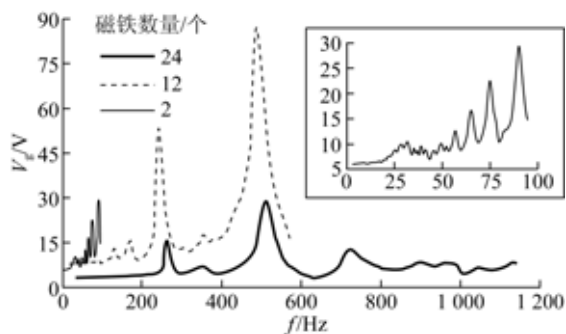
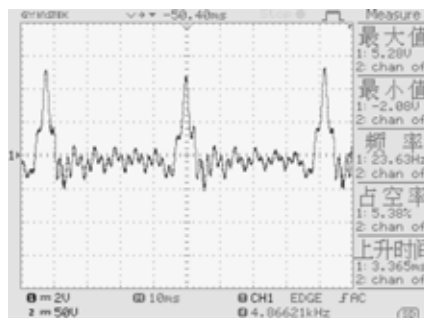


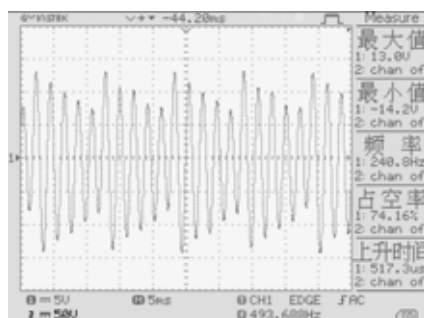
图 7 动磁铁数量不同时输出电压与频率的关系

Fig. 7 Generated voltage vs frequency under different number of rotating magnets

以上讨论的仅是压电振子 1 次弯曲变形时所生成的电压。根据前文分析结果,动磁铁数量不同时载荷作用时间占整个周期的比例( $T_m/T$ )不同,故压电振子受激励 1 次所产生弯曲变形的次数不同。图 8、图 9 分别给出了 2/12 个动磁铁激励的电压波形图。动磁铁数量及转速对电压波形曲线均有较大影响。2 个动磁铁时压电振子承受脉冲激励,激振力消失后产生自由振动,且自由振动幅值随转速增加而增加;低转速( $627\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ )



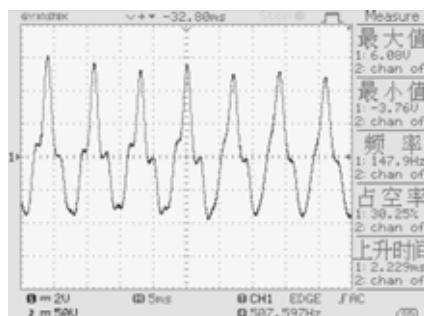
(a)  $627\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$



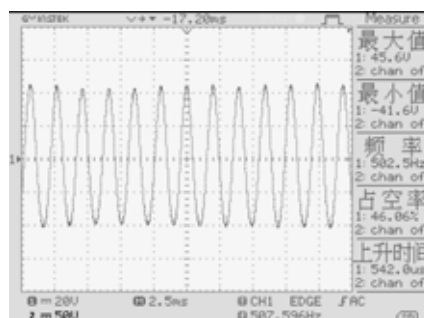
(b)  $2707.5\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$

图 8 2 个动磁铁激励时的电压波形

Fig. 8 Voltage waveforms generated at 2 rotating magnets



(a)  $627\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$



(b)  $451\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$

图 9 12 个动磁铁激励时的电压波形

Fig. 9 Voltage waveforms generated at 12 rotating magnets

时仅激励出1个幅值较大的电压波形,自由振荡幅值小,而在高转速( $2\ 707.5\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ )时则激励出了4个幅值较大的电压波形。12个磁铁激励时,低转速( $627\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ )及高转速( $2\ 451\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ )时压电振子每次受激都仅产生1个电压波形,其响应函数为近似的正弦波。

综合图6~9发现,当转盘转速低于 $2\ 850\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,12个动磁铁激励所产生的电压及单位时间的电能均高于2个磁铁激励的情况;但当转速超过 $2\ 850\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ (尤其达到 $14\ 706\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ ,该转速对应的激励频率接近压电振子固有频率,参照图7)时,2个动磁铁激励的输出电压将高于12个动磁铁激励的情况。此外,在满足所需电压及能量的前提下,系统还需考虑可靠性及速带宽度问题,就此而言采用2个动磁铁激励比较有利。因此,应综合考虑旋转体的实际转速、动磁铁间耦合作用(激振力大小)、以及所需电压/电能等相关要素的制约关系确定合理的动磁铁数量。

## 5 结 论

针对现有旋转式压电俘能器所存在的问题,

提出一种旋转磁铁非接触耦合激励的新型压电俘能器,并从理论和试验两方面研究了转盘上动磁铁数量(间距)对激振力及压电振子动态/发电性能的影响规律。结论为:(1)动磁铁间距(转盘直径确定时的动磁铁数量)对激振力幅值及波形均有较大影响,存在最佳间隙比使激振力最大,间隙比为2时激振力幅为无间隙时6.2倍,且会出现双向作用力。(2)动磁铁数量不同时,压电振子的转速-电压特性曲线不同,且都存在多个明显的使电压出现峰值的最佳转速。采用2/12/24个动磁铁激励时,其最大峰值电压及相对应的转速分别为 $29.4/87.2/28.4\ \text{V}$ 和 $1\ 282.5/2\ 707.5/2\ 451\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ ,12个动磁铁时的最大峰值电压为其他两种情况的3倍。(3)动磁铁数量对压电振子输出电压波形及电能都有较大影响。动磁铁数量较少(2个)且转速较低时,压电振子每次受激仅产生一个幅值较大的电压波形、而转速高时则可生成多个幅值较大的自由振荡波形;而动磁铁数量较多(12个)时,压电振子一次受激仅生成一个电压波形。

本文工作为旋转式压电俘能器的进一步研究提供了借鉴。

## 参考文献:

- [1] ADNAN HARB. Energy harvesting: State-of-the-art [J]. *Renewable Energy*, 2011, 36: 2641-2654.
- [2] PAULO J, GASPARD P D. Review and future trend of energy harvesting methods for portable medical devices [C]. *Proc. of the World Congress on Engineering*, 2010(2): 909-914.
- [3] KIM H S, KIM J H, KIM J. A Review of piezoelectric energy harvesting based on vibration [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2011, 12(6): 1129-1141.
- [4] THAD S. Human powered wearable computing [J]. *IBM Systems Journal*, 1996, 35(3-4): 618-629.
- [5] SALEM S, OTHMAN S. A review of vibration-based MEMS piezoelectric energy harvesters [J]. *Energy Conversion and Management*, 2011, 52: 500-504.
- [6] POBERING S, EBERMEYER S, SCHWESINGER N. Generation of electrical energy using short piezoelectric cantilevers in flowing media [J]. *Proc. of SPIE*, 2009, 7288: 71-78.
- [7] 闫世伟, 杨志刚, 罗洪波, 等. TPMS用压电发电装置研究[J]. *压电与声光*, 2010, 32(5): 774-777.
- YAN SH W, YANG SH G, LUO H B, et al.. The study of piezoelectric generator for TPMS [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2010, 32(5): 774-777. (in Chinese)

- [8] GUA L, LIVERMORE C. Passive self-tuning energy harvester for extracting energy from rotational motion [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97(8): 081904.
- [9] PRIYA S, CHEN C T, FYE D, *et al.*. Piezoelectric windmill: a novel solution to remote sensing [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*. 2005, 44(3): L104-L107.
- [10] AVALLIER B, BERTHELOT P, NOUIRA H, *et al.*. Energy harvesting using vibrating structures excited by shock [J]. *IEEE Ultrasonics Symposium*, 2005, 2: 943-945.
- [11] 阚君武, 王淑云, 彭少锋, 等. 多振子压电发电机的输出特性 [J]. *光学 精密工程*. 2011, 19(9): 2108-2116.
- KAN J W, WANG SH Y, PENG SH F, *et al.*. Output performance of a piezoelectric generator with multi-vibrator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(9): 2108-2116. (in Chinese)
- [12] 陈宇东. 结构振动分析 [M]. 吉林: 吉林大学出版社, 2008: 69-71.
- CHEN Y D. *Structural Vibration Analysis* [M]. Jilin: Jilin university publisher, 2008: 69-71.

## 作者简介:



阚君武(1965—),男,吉林榆树人,教授,博士生导师,1991年、2000年于吉林工业大学分别获得学士学位、硕士学位,2003年于吉林大学获得博士学位,2005年中科院长春光机所博士后出站,主要从事压电驱动器、能量回收与自供电技术、精密机械与微小机械等方面研究。E-mail: jutkjw@163.com

## 通讯作者:



王淑云(1965—),女,吉林长岭人,教授,1988年、2001年、2008年于吉林大学分别获得学士学位、硕士学位、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

(版权所有 未经许可 不得转载)