

文章编号 1004-924X(2019)03-0577-07

可调频旋磁激励式压电发电机的设计与试验

阚君武, 何恒钱, 王淑云*, 张忠华, 陈松, 陈泽锋

(浙江师范大学 精密机械与智能结构研究所, 浙江 金华 321004)

摘要:为提高旋转式压电发电机的安全性与有效带宽,提出一种可调频旋磁激励式压电发电机,并从理论、仿真与试验三个方面对发电机的工作特性进行了研究。建立了压电梁在端部外载荷作用下的刚度/频率偏移模型,并通过仿真获得了刚度、动磁铁数量对发电机响应特性的影响规律。结果表明,压电梁刚度随端部拉/压力的增大而线性增大/减小,固有频率相应地提高且趋于平缓/降低且速率增大,而动磁铁数量将影响发电机的谐振峰数量与放大比。在此基础上进行了相关试验,试验表明,压电梁受拉伸/压缩都将提高发电机的固有频率并降低输出电压幅值,且受压时减幅更大;此外,动磁铁数量除仿真中影响因素外对发电机的固有频率也具有一定影响;通过改变动磁铁数量与调节量,实现了发电机固有频率在39.2~112 Hz内的调整,最大频率偏移为185.7%。

关键词:压电俘能;旋磁激励;能量回收;变刚度;调频

中图分类号: TN384; TM619 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20192703.0577

Structure and performance of rotating piezoelectric generator with tunable frequency

KAN Jun-wu, HE Heng-qian, WANG Shu-yun*, ZHANG Zhong-hua,
CHEN Song, CHEN Ze-feng

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

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

Abstract: To improve the security of a rotary piezoelectric generator and broaden the effective frequency band, a rotating piezoelectric generator with tunable frequency was studied and its performance was evaluated through theoretical analysis, simulations, and experiments. Natural frequency offset and stiffness offset models were first established, and the effects of stiffness and the number of rotating magnets on the response performance of a generator were determined through a simulation. The analytical results show that the stiffness of the generator linearly increased with axial tension and linearly decreased with axial compression. In addition, the natural frequency increased and became steady with axial tension but decreased at a fast rate with axial compression. Based on the fact that the number of rotating magnets affects the number of resonant peaks as well as the amplitude ratio of the generator,

收稿日期: 2018-07-16; **修订日期:** 2018-09-12.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51877199, No. 61574128, No. 51577173, No. 51377147); 浙江省自然科学基金资助项目(No. LY17F010004, No. LY16F010003); 国家级大学生创新创业训练计划资助项目(No. 201810345037)

a prototype rotating piezoelectric generator was fabricated and tested. The test results reveal that the natural frequency of the generator increases and that generated voltage decreases depending on whether the piezoelectric beam is stretched or compressed, with the latter having a greater influence on voltage reduction. In addition, the number of rotating magnets affects the natural frequency of the generator. By changing the number of rotating magnets and conducting pre-stretching and pre-compression, the natural frequency of the generator can be adjusted to within a range of 39.2-112 Hz with a maximum frequency shift of 185.7%.

Key words: piezoelectric power harvest; rotating excitation; energy harvester; stiffness adjustment; frequency adjustment

1 引言

随着微功率无线传感器和分布式传感技术在健康监测、航空航天与程序控制等领域中的普及,作为其主要供能方式的化学电池所带来的环境污染问题变得不容忽视^[1-2]。为此,回收自然环境中振动能^[3-4]、人体运动能^[5-6]、旋转动能^[7-8]和流体能^[9-10]等能量的微小型发电机在国内外受到广泛的关注。旋转式压电发电机是回收旋转体动能的重要方法之一,其能量回收方式主要有惯性激励^[11]、拨动激励^[12]、冲击激励^[13]以及旋磁激励^[14]。其中,旋磁激励由于无冲击、低噪声、安全性相对较高,而在近年来倍受关注。

旋磁激励虽然很大程度上解决了冲击与噪声的问题,但其安全性仍有提高的余地。目前,大多相关研究都采用悬臂梁型压电振子^[15-16],试验中悬臂梁易因变形过大而损毁,而简支梁式压电振子的应力分布均匀,变形更为可控,它作为发电单元安全性更高。此外,有效带宽是各类发电机亟待解决共同难题。解决带宽问题的方法主要有两类:(1)增大机械阻尼,拓宽发电机谐振频率的频带,缺点是会降低发电机的整体发电性能;(2)构造与激励频率相近的固有频率,使能量俘获变得更加高效。通常来说,后者的运用更为广泛。

为使发电机的固有频率与激励频率相适应,可以从系统的质量与刚度两个方面进行调节。笔者曾通过改变压电悬臂梁端部的附加质量对发电机的固有频率进行调节^[17];而 Morris 等人利用压电薄膜的扩展^[18]、Peters 等人以电控方式^[19]、Challa 等人以磁限位方式^[20],通过改变压电薄膜或压电悬臂梁的刚度继而实现调频。以上方法为拓宽压电发电机的有效带宽做出了较大贡献,但

也存在各种问题:首先,改变附加质量在微机构中实现起来并不容易,尤其不适于现场调节,且随着附加质量的增大,系统固有频率只能越来越低,无法升高;而刚度调节方案中存在频率调节范围窄或发电量小的问题。

针对上述问题,本文提出一种通过对压电筒支梁添加轴向拉伸/压缩位移量的可调频旋磁激励式压电发电机,并着重研究了其固有频率的调节能力,为提高旋转式压电发电机的发电效率提供新思路。

2 发电机的结构及工作原理

本文提出的可调频旋磁激励式压电发电机的结构及原理如图 1 所示。它主要由转盘与可实现拉伸/压缩的压电筒支梁组成,两者通过相互排斥的动、定磁铁实现激励。工作时,转盘转动使动、定磁铁间的排斥力交替增大与减小,在磁铁耦合

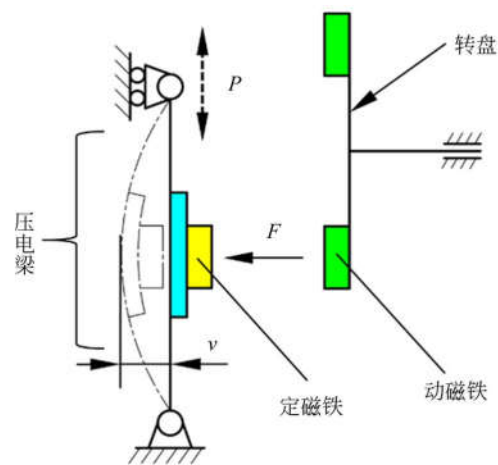


图 1 发电机结构原理图

Fig. 1 Principle sketch of piezoelectric generator

力与压电梁自身弹性力的作用下,压电梁产生往复弯曲变形继而生成电能。其固有频率 f_0 可通过轴向力 P 进行调节,由振动理论可知, f_0 为:

$$f_0 = \sqrt{\frac{k}{m_c}}, \quad (1)$$

式中: k 为压电梁的等效弯曲刚度; m_c 为压电梁的等效质量。

当压电梁端部受到拉伸/压缩(即 P 改变)时, k 发生变化。在压电梁的弹性变形之内,在轴向拉力和压力的作用下激励中心的变形量 u_s 与 u_c 分别为^[21]:

$$u_s = \frac{F(2e^{\lambda l} - e^{2\lambda} - 1)}{P_s t(e^{2\lambda} - 1)} + \frac{Fl}{2P_s}, \quad (2)$$

$$u_c = \frac{2F \sin^2(\lambda/2)}{P_c \lambda \sin(\lambda)} - \frac{Fl}{2P_c}, \quad (3)$$

式中: $P \neq 0$; $\lambda = \sqrt{\frac{P}{2EI}}$; P_s, P_c 分别为压电梁承受的轴向拉力和压力; E 为压电梁的杨氏模量; I 为压电梁的惯性矩; l 为压电梁的跨距。

刚度公式为:

$$k = \frac{F}{u}. \quad (4)$$

由此可得 k_s, k_c 与 P 的关系为:

$$k_s = \frac{2P_s \lambda (e^{2\lambda} - 1)}{2(2e^{\lambda} - e^{2\lambda} - 1) + \lambda(e^{2\lambda} - 1)}, \quad (5)$$

$$k_c = \frac{2P_c \lambda \sin(\lambda)}{4 \sin^2(\lambda/2) - \lambda \sin(\lambda)}. \quad (6)$$

为更直观地获得 k 与 P 间的关系,设置相关参数如下: $E = 1.2 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$, $I = 4.5 \times 10^{-14} \text{ m}^4$, $l = 0.1 \text{ m}$, $m_c = 22 \text{ g}$ 。通过 Matlab 绘制压电梁刚度与轴向力的关系曲线,如图 2 所示。由图

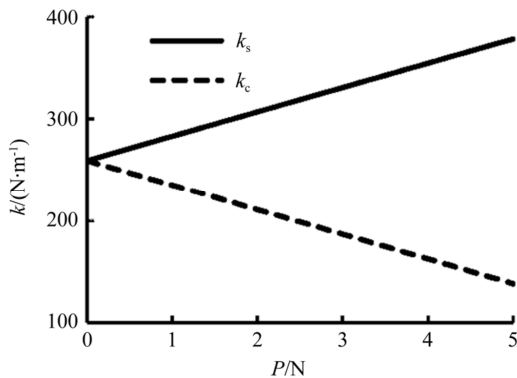


图 2 压电梁刚度与轴向力的关系曲线

Fig. 2 Relation curve between stiffness of piezoelectric beam and axial force

可知, k 随 P_s/P_c 的增大线性增大/减小(需保证压电梁工作在屈服点与临界力之前,即 $P_s < 6000 \text{ N}$, $P_c < \frac{\pi^2 EI}{l^3} = 5.33 \text{ N}$)。

根据式(1)、式(5)和式(6)可得:

$$f_s = \sqrt{\frac{2P_s \lambda (e^{2\lambda} - 1)}{m_c [2(2e^{\lambda} - e^{2\lambda} - 1) + \lambda(e^{2\lambda} - 1)]}}, \quad (7)$$

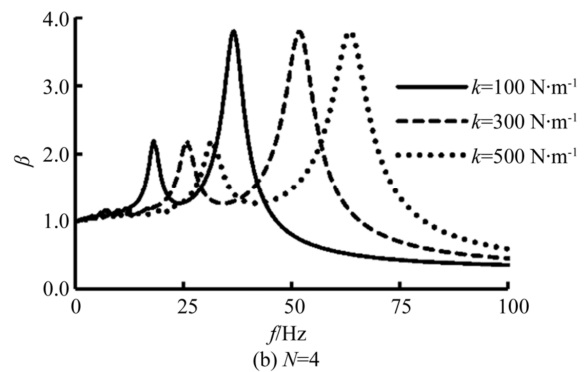
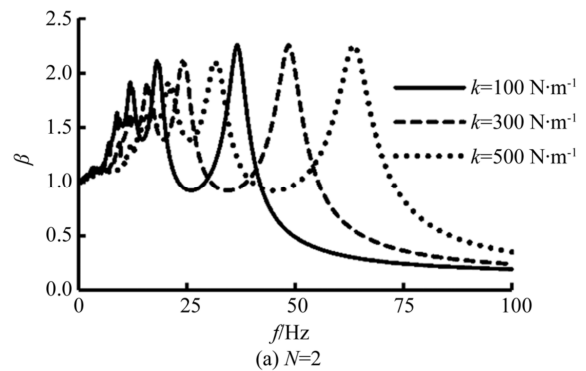
$$f_c = \sqrt{\frac{2P_c \lambda \sin(\lambda)}{m_c [4 \sin^2(\lambda/2) - \lambda \sin(\lambda)]}}. \quad (8)$$

根据 $1/2$ 次幂函数的函数特性可知, f_s 随 P_s 的增大而升高且趋于平缓,而 f_c 则随 P_c 的增大而降低且下降速率变大。

上述内容表明,端部载荷能够对发电机的固有频率起到调节作用。

3 发电机响应特性的仿真分析

基于以上内容,利用 maple 进行了发电机响应特性的仿真测试,仿真参数如下:转盘均布 N 个动磁铁($N=2, 4, 8$),动磁铁半径为 10 mm ,转速 n 为 $0 \sim 2800 \text{ r/min}$,回转半径为 46 mm ,阻尼系数取 0.06 。图 3 为不同磁铁数下发电机的放大比 β (压电梁振动幅值与其最大静变形量之比)



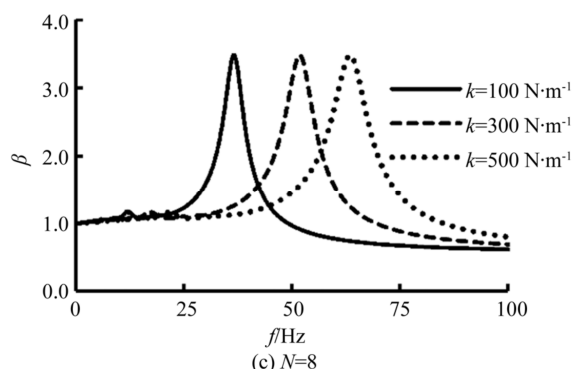


图 3 不同刚度下发电机的放大比-激励频率仿真测试曲线

Fig. 3 Amplitude ratio vs. excitation frequency under different stiffnesses of piezoelectric beam

与激励频率间的仿真曲线。图 3 表明,发电机存在多个使 β 出现峰值的谐振频率 f^* ($f_i^* = n_i N / 60$), f^* 出现的次数随 N 的增大而减少,出现的频率随 k 的增大而升高,且相邻阶数的 f^* 呈分频与倍频关系。

图 4 为 $k=300$ 时不同 N 下的 β - n 仿真曲线。由图可知, k 一定时, N 越大,激励频率越高, f^* 所对应的转速越低,且存在最佳的 N 值使 β 达到最大。根据以往的研究经验,磁铁数较多时(磁铁间距小于磁铁直径),一个周期内电压波形会出现连续的变化,和磁铁数较少时的一般激励有所不同,其力的形式可以等效为一个正向偏置的简谐力,表现为电压幅值减小、激励频率升高。根据振动理论分析,单自由度系统在简谐激励下只出现

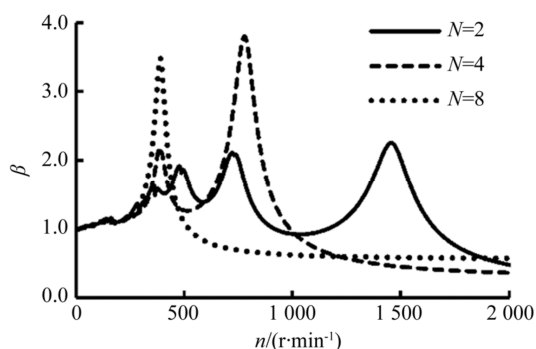


图 4 刚度为 $300 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ 时不同磁铁数下的放大比-转速仿真测试曲线

Fig. 4 Amplitude ratio vs. rotating speed under different numbers of rotating magnets with stiffness of $300 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$

一个谐振峰,这与磁铁数较少时的多谐振峰相区别。

由以上关系可知,调整压电梁的轴向载荷能有效调节压电梁的固有频率,改变动磁铁数目能调节激励频率,两者协同作用能使发电机更容易与外界激励频率匹配,从而增强发电机的输出性能。

4 试验测试与分析

为进一步获得发电机输出性能与压电梁轴向力、动磁铁数量间的关系,搭建了如图 5 所示的试验测试系统。试验仪器主要包括电动机(最高空载转速为 2800 r/min)、变频器(调节范围为 $0 \sim 50 \text{ Hz}$ 、调频步长为 0.1 Hz)及 MSO6014A 型混合信号示波器等。试验样机主要由压电筒支梁和加载结构组成,通过调整调节螺栓可实现加载结构对压电梁的拉伸与压缩;调节螺栓尺寸为 $M6 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ (单线标准粗牙螺栓,导程为 1 mm);压电梁尺寸为 $0.3 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$,压电晶片尺寸为 $\Phi 20 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm}$,附加 5 g 质量块;动磁铁尺寸为 $\Phi 20 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$,定磁铁尺寸为 $\Phi 15 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$,动、定磁铁同性磁极相对安装;转盘参数与仿真参数一致。



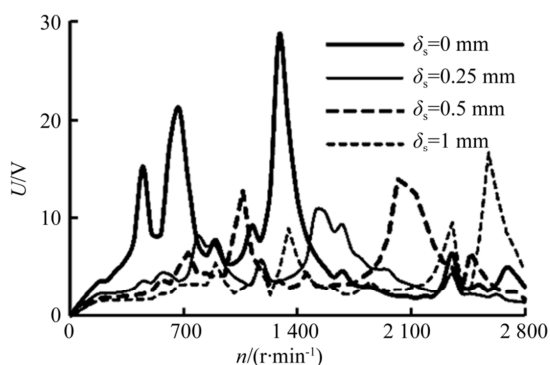
图 5 试验样机及测试系统

Fig. 5 Piezoelectric generator and test system

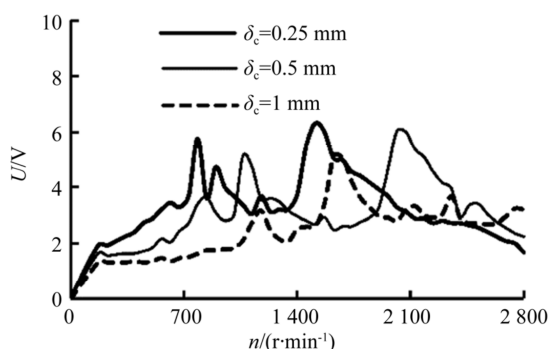
图 6~图 8 为 $N=2, 4, 8$ 时不同调节量 δ 下发电机的 U - n 特性曲线。与图 3 和图 4 的仿真结果相似:初始状态下,即 $\delta=0$ 时,在转速范围内存在一个或多个使 U 出现峰值的最佳转速 n_w ,以 $N=2$ 为例,其 n_w 出现在 $448, 672, 1288 \text{ r/min}$ 处,对应 f^* 分别是 $14.9, 22.4, 42.9 \text{ Hz}$,其中 $f_3^* = f_0, f_1^*$ 和 f_2^* 为 f_0 的整数分之一倍;当 δ 为 $0.25, 0.5, 1 \text{ mm}$ 时, f_1^* 为 $18.7, 24.3,$

29.9 Hz, f_2^* 为 26.1, 35.5, 44.8 Hz, f_3^* 为 50.4, 67.2, 85.9 Hz; 当 δ_c 为 0.25, 0.5, 1 mm 时, $f_1^* = 26.1, 28, 39.2$ Hz, $f_2^* = 29.9, 35.5, 54.1$ Hz, $f_3^* = 50.4, 67.2$ 及 $f_3^* > 93.3$ Hz(超出测试范围)。由以上关系可见,压电梁无论受到拉伸还是压缩,都将提高 f^* , 但 U 会降低, 且受压时减幅更大。试验中压电梁受压 f^* 升高的现象与理论结果产生了差异, 这是由于理论是建立在压电梁的临界力之前, 而试验中最小的压缩量已造成压电梁失稳弯曲(即超过临界力), 形成稳定的拱形结构, 且单向排斥力增大了压电梁的单向变形, 故 k 增加, f^* 升高。

此外, 当 $\delta \neq 0$ 时, 发电机的最大输出电压 U_m 随着 δ_s 的增大而增大, 且存在最佳的 N 值使 U_m 达到最大, 当 $N = 2, 4, 8$ 时, $U_m = 28.6, 49.6, 2.72$ V。



(a) 压电梁受拉伸
(a) Piezoelectric beam is stretched



(b) 压电梁受压缩
(b) Piezoelectric beam is compressed

图 6 磁铁数为 2 时不同调节量下发电机的电压-转速特性曲线

Fig. 6 Generated voltage vs. rotating speed under different adjustments with number of rotating magnets of 2

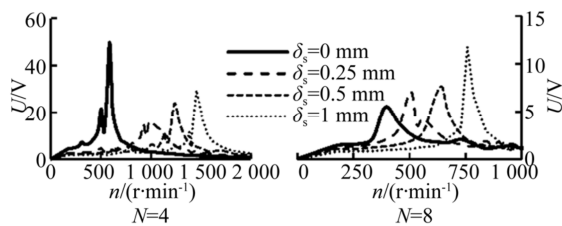


图 7 磁铁数为 4, 8 时不同拉伸量下发电机的电压-转速特性曲线

Fig. 7 Generated voltage vs. rotating speed under different pre-stretching with numbers of rotating magnet of 4 and 8 respectively

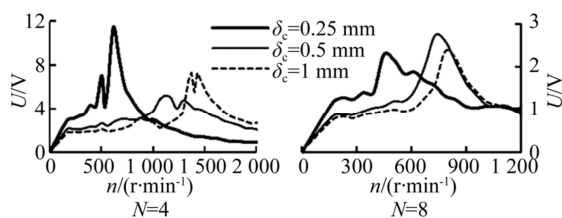


图 8 磁铁数为 4, 8 时不同压缩量下发电机的电压-转速特性曲线

Fig. 8 Generated voltage vs. rotating speed under different pre-compression with numbers of rotating magnet of 4 and 8 respectively

图 9 为 $N=2$ 时 f^* 随 δ 的变化曲线。由于 $\delta_c = 1$ mm 时试验范围内未出现 f_3^* , 故曲线中以可测量的最高值作为估计值绘制曲线。图 9 表明, 当 $\delta < 0.5$ mm 时, 拉伸与压缩压电梁对提高

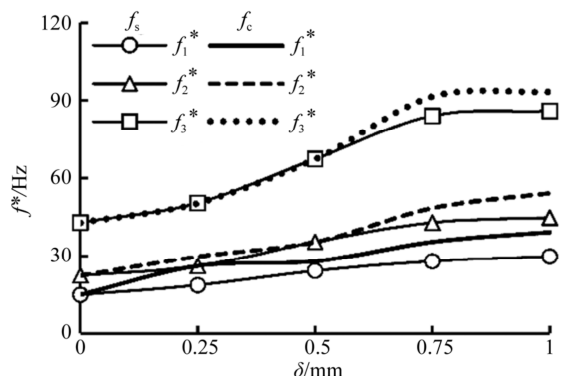


图 9 磁铁数为 2 时不同拉伸和压缩量下各阶谐振频率的变化曲线

Fig. 9 Relation curves of resonance frequency of piezoelectric generator with different pre-stretching and pre-compression amounts when number of rotating magnets is 2

f^* 的能力相近;但在 $0.5 \sim 1$ mm 内,压缩压电梁对提升 f^* 的效果更为显著。其中,当 $\delta_s = 1$ mm 时, f_3^* 达到了 85.9 Hz, 相比初始状态的 42.9 Hz 大约提高了一倍。此外,在试验范围内, f^* 的升高并非呈线性增长而是逐渐趋于平缓,这也与理论研究相吻合。

图 10 给出了 N 不同时 f_0 与 δ 的关系曲线。图 10 表明, N 不同时 f_0 也会有一定的变化,这是由于 N 较多时,磁铁间隙较小,形成“磁环”,对发电机施加了一个持续的排斥力,无形间增大了 k , 使 f_0 有所升高。因此,调整动磁铁数与改变调节

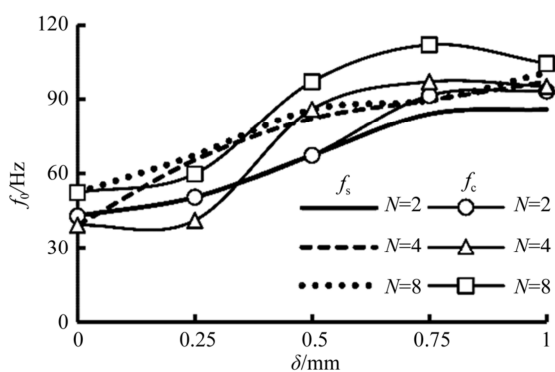


图 10 调节量与发电机固有频率的关系曲线

Fig. 10 Relation curves of natural frequency of piezoelectric generator with pre-stretching and pre-compression amounts

参考文献:

- [1] 程廷海, 刘文博, 赵宏伟, 等. 气动高压激励的阵列式盘型压电俘能器[J]. 光学精密工程, 2017, 25(5):1222-1228.
CHENG T H, LIU W B, ZHAO H W, et al.. Array piezoelectric plate harvester excited by pneumatic compressed air [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(5):1222-1228. (in Chinese)
- [2] 阚君武, 富佳伟, 王淑云, 等. 涡激振动式微型流体俘能器的研究现状与展望[J]. 光学精密工程, 2017, 25(6):1502-1512.
KAN J W, FU J W, WANG SH Y, et al.. Research status and prospect of vortex-induced vibration micro-fluid energy harvester [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(6):1502-1512. (in Chinese)
- [3] CUI Y, ZHANG Q, YAO M, et al.. Vibration piezoelectric energy harvester with multi-beam [J]. *AIP Advances*, 2015, 5(4):4495-4498.

量均可调节发电机的固有频率, 调节范围为 39.2~112 Hz, 最大频率偏移为 185.7%。

以上试验分析表明, 改变压电梁端部轴向力与动磁铁数量能有效调节发电机的固有频率与输出特性, 从而拓宽发电机的工作转速范围, 实现多种转速环境下的高效发电。

5 结 论

为提高旋转式压电发电机的安全性与有效带宽, 本文提出一种可调频旋磁激励式压电发电机, 建立其刚度/频率偏移模型, 并对其输出特性进行仿真与试验。理论模型表明, 压电梁刚度随端部拉力的增大而线性增大, 固有频率提高且趋于平缓; 压电梁刚度随端部压力的增大而线性减小, 固有频率降低且速率增大。试验验证了压电梁受拉时能够提升发电机的固有频率, 且当压电梁受压时, 由于过早的失稳及磁铁的单向排斥力作用, 发电机的固有频率也将提高。动磁铁数量不同将改变发电机的输出特性, 表现在谐振峰数量与电压幅值发生变化, 这与仿真结果相吻合, 且试验发现动磁铁数量对发电机的固有频率也具有一定影响。通过改变动磁铁数量与调节量, 实现了发电机固有频率在 39.2~112 Hz 内的调整, 最大频率偏移量为 185.7%。

- [4] WEI C, JING X. A comprehensive review on vibration energy harvesting: Modelling and realization [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2017, 74:1-18.
- [5] PILLATSCH P, YEATMAN E M, HOLMES A S. Real world testing of a piezoelectric rotational energy harvester for human motion [J]. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2013, 476: 012010.
- [6] KUANG Y, YANG Z, ZHU M. Design and characterisation of a piezoelectric knee-joint energy harvester with frequency up-conversion through magnetic plucking [J]. *Smart Materials and Structures*, 2016, 25(8):085029.
- [7] VIET N V, AL-QUTAYRI M, LIEW K M, et al.. An octo-generator for energy harvesting based on the piezoelectric effect [J]. *Applied Ocean Research*, 2017, 64:128-134.
- [8] FU H, 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.
- [9] ZHAO L, YANG Y. Toward small-scale wind energy harvesting: design, enhancement, performance comparison and applicability [J]. *Shock and Vibration*, 2017(4):3585972.
- [10] TAO J X, VIET N V, CARPINTERI A, *et al.*. Energy harvesting from wind by a piezoelectric harvester [J]. *Engineering Structures*, 2017, 133:74-80.
- [11] 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 & Management*, 2017, 148:1391-1398.
- [12] ZHANG J, FANG Z, SHU C, *et al.*. A rotational piezoelectric energy harvester for efficient wind energy harvesting [J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2017, 262: 123-129.
- [13] ZHANG H, JIANG S, HE X. Impact-based piezoelectric energy harvester for multidimensional, low-level, broadband, and low-frequency vibrations [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(22):18-27.
- [14] KAN J, FU J, WANG S, *et al.*. Study on a piezo-disk energy harvester excited by rotary magnets [J]. *Energy*, 2017, 122:62-69.
- [15] JUNG H J, BAEK K H, HIDAOKA S, *et al.*. Design and optimization of secondary shock type piezoelectric system [C]. *Isaf-Ecapd-Pfm*, IEEE, 2012:1-4.
- [16] ZHANG Y, ZHENG R, 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.
- [17] 阚君武, 于丽, 王淑云, 等. 旋磁激励式压电悬臂梁发电机性能分析与试验 [J]. *机械工程学报*, 2014, 50(8):144-149.
- KAN J W, YU L, WANG SH Y, *et al.*. Performance analysis and test of piezo-cantilever generator excited by rotary magnet [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 50(8):144-149. (in Chinese)
- [18] MORRIS D J, YOUNGSMAN J M, ANDERSON M J, *et al.*. A resonant frequency tunable, extensional mode piezoelectric vibration harvesting mechanism [J]. *Smart Materials & Structures*, 2008, 17(6):065021.
- [19] PETERS C, MAURATH D, SCHOCK W, *et al.*. A closed-loop wide-range tunable mechanical resonator for energy harvesting systems [J]. *Journal of Micromechanics & Microengineering*, 2009, 19(9):094004.
- [20] CHALLA V R, PRASAD M G, FISHER F T. Towards an autonomous self-tuning vibration energy harvesting device for wireless sensor network applications [J]. *Smart Materials & Structures*, 2011, 20(2):25004-25011.
- [21] 刘鸿文. 高等材料力学 [M]. 北京:高等教育出版社, 1985.
- LIU H W. *Advanced Material Mechanics* [M]. Beijing: Higher Education Press, 1985. (in Chinese)

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和硕士学位,2003年于吉林大学获得博士学位,2005年于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的研究。E-mail: jutkjw@163.com

通讯作者:



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