

文章编号 1004-924X(2016)11-2753-08

## 磁力调频压电电磁复合发电设计与实验

杜小振<sup>1\*</sup>, 张龙波<sup>1</sup>, 于红<sup>2</sup>

- (1. 山东科技大学机械电子工程学院, 山东 青岛 266590;
2. 中国石油大学(华东)理学院, 山东 青岛 266580)

**摘要:**开展了基于环境振动发电作为微电源弥补传统化学电池供能缺陷的研究。基于非线性磁力调频开发了低宽频振动能采集压电电磁复合发电系统。介绍了发电装置工作原理;利用 ANSYS 和 Ansoft Maxwell 有限元分析软件仿真分析了压电和电磁发电的输出特性;最后,搭建了压电电磁复合宽频发电装置实验测试系统,测试了发电系统在磁力自调过程中的输出特性。实验结果显示:复合发电系统在谐振频率 60 Hz 时输出开路电压峰值为 5.8 V,高于压电系统(5.5 V)和电磁系统(410 mV)独立发电的开路电压峰值。施加磁力拓宽装置后,当压电悬臂梁沿竖直方向上下移动 0~15 mm 时,系统适应谐振频带拓宽为 45~76 Hz;悬臂梁沿水平方向平移 0~30 mm 时,谐振频带拓宽为 51~70 Hz。结果表明仿真分析与实验测试结果吻合很好。该宽频带能量采集技术可用于低频振动环境的能量采集,可在频变环境中为微型低功耗系统提供低电能。

**关键词:**压电发电;电磁发电;宽频发电装置;磁力调节;微电源;有限元分析

**中图分类号:**TM919 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162411.2753

## Design and experiment of piezoelectric electromagnetic hybrid broadband generator with magnetic force tuning

DU Xiao-zhen<sup>1\*</sup>, ZHANG Long-bo<sup>1</sup>, YU Hong<sup>2</sup>

- (1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;
  2. College of Science, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)
- \* Corresponding author, E-mail: du\_xzh@163.com

**Abstract:** This paper focuses on environmental vibration energy harvesting generator to provide low energy for a micro low-power system. A piezoelectric electromagnetic hybrid broadband power generator was developed based on nonlinear magnetic force tuning. The working principle of the power generator was introduced, and its output power characteristics by the piezoelectric system and electromagnetic system were respectively simulated with the software of ANSYS and Ansoft Maxwell. Then, an experiment system was set up to test the output power characteristics of the power generator with the magnetic force tuning. Experimental results indicate that the peak output open voltage from the power generator is 5.8 V at the resonance frequency of 60 Hz, which is higher than

收稿日期:2016-04-20;修订日期:2016-05-27.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51105234);中国博士后科学基金资助项目(No. 2015M582113);山东省自然科学基金资助项目(No. 2016EEM23);青岛市黄岛区科技项目小微企业发展和孵化器专项资金资助项目(No. 2014-01-107)和应用研究与公共卫生专项资金资助项目(No. 2014-01-42)

that of the piezoelectric system(5.5 V)and the electromagnetic system (410 mV)independently. When the natural frequency is adjusted with the magnetic force tuning, its resonance frequency band expands from 45 to 76 Hz as the piezoelectric cantilever beam moves from  $-15$  mm to  $15$  mm in the vertical direction. And the resonance frequency band expands from 51 to 70 Hz similarly as the cantilever beam moves from 0 to 30 mm in the horizontal direction. The experiments show that the simulation analysis results are coincided with that tested results well. It demonstrates that the broadband energy harvesting system can use in low-frequency environment random vibration and can satisfy the demands of low-power of wireless sensor systems.

**Key words:** piezoelectric generation; electromagnetic generation; broadband generator; magnetic force tuning; micro power; finite element analysis

## 1 引言

近年来无线传感网络节点、MEMS 压力传感器、末端执行器等低功耗电子元器件逐渐向微型集成化发展<sup>[1-3]</sup>,然而无线传感网络节点数量多、分布广、工作环境多样、维护困难,嵌入式微传感器更换电池程序繁琐,因此研制自供能系统将实现无线传感器网络技术突破<sup>[4-5]</sup>。近年来收集环境振动能微电源技术成为研究热点,其具有稳定持久、结构简单易集成和环保无污染等优点,有望替代传统化学电池成为新型微电源<sup>[6-7]</sup>。目前研究的振动型能量转换形式主要有静电式、压电式和电磁式等<sup>[8-10]</sup>;其中拾振系统多采用悬臂梁结构<sup>[11-12]</sup>,而非调频发电系统拾振频带窄不利于多频能量收集。为适应环境随机振动特点,需拓宽发电装置谐振频带,提高换能效率<sup>[13-14]</sup>。

目前研究拓宽装置采集频带的方法主要分为机械式和电气式,可通过改变振动体结构、直接或间接碰撞拾振体、对悬臂梁施加外力作用、逆压电效应调频等实现,另外多频组合结构也可实现宽频发电。美国普杜大学的 David F. Berdy 等人首次将无线传感网络节点集成到宽频压电式能量收集系统内,结构设计紧凑但需手动调节,调频响应慢且精度低,不适应振动频率易变化环境<sup>[15]</sup>。立陶宛考纳斯科技大学的 Rolanas Dauksevicius 等人设计低频谐振梁直接碰撞影响高频压电悬臂梁<sup>[16]</sup>,韩国光云大学的 M A Halim 等人设计通过金属球碰撞两侧柔性壁间接作用于压电悬臂梁冲击力进行频率转换<sup>[17]</sup>,均可实现在低频振动环境下宽频发电效果,但持续碰撞产生额外振动噪声并降低装置工作寿命。美国加州大学伯克利分校的 Leland E S 等人通过施加轴向预紧力压缩

固支梁可有效改变发电装置固有频率<sup>[18]</sup>,韩国全南国立大学的 X. Wu 等人设计低高频 PVDF 悬臂梁之间非接触式磁力耦合效应实现宽频发电<sup>[19]</sup>,但增加系统阻尼降低能量输出效率。美国弗吉尼亚理工大学的 Lallart M 等人设计了双压电层包裹悬臂梁结构,底部压电层用于输出电能,根据逆压电效应利用制动器对顶部压电层施加电压激励实现悬臂梁刚度调节,可实时对环境频变做出反馈但需额外供电,缺乏实用意义<sup>[20]</sup>。北京理工大学的高世桥等人设计了压电电磁复合式宽频俘能器,包含多组固有频率不同的俘能器单元,可在一定频带范围内实现宽频谐振换能,但谐振频率离散、结构复杂、能量密度低<sup>[21]</sup>。美国史蒂文斯理工学院 Challa 等人通过对压电悬臂梁自由端磁铁施加磁力改变其刚度来拓宽发电装置谐振频带<sup>[22]</sup>,上海大学张国策对 Challa 模型的磁力产生非线性因素做了深入研究,采用数学理论方法分析磁铁与悬臂梁的质量比和系统磁力对悬臂梁固有频率调频关系<sup>[23]</sup>。本文根据压电电磁发电悬臂梁结构特点,利用磁力调节发电装置固有频率自适应环境频变实现连续谐振换能,提高环境能量转换效率。

## 2 微型压电和电磁发电基本原理

压电式能量转换基于压电材料的正压电效应,当压电材料受到外界作用力时发生机械形变,材料内部发生电极化现象致使上下表层聚集正负相反束缚电荷,当与外部负载联接输出电能,电荷密度与作用力大小成正比。压电式能量转换系统机电转换系数高、输出电压高、能量密度大。

电磁式能量转换采用法拉第电磁感应定律原理,当磁铁与闭合线圈发生相对运动,穿过闭合线

圈的磁通量发生变化产生感应电动势,其大小取决于磁通量的变化率。根据磁铁与闭合线圈相对运动形式不同,可分为动铁型、动圈型和铁圈同动型。其中,电磁式发电输出电流大、电压低,易受外围磁场干扰。

### 3 实验原理和实验装置

#### 3.1 实验原理

压电电磁复合宽频发电装置结构设计如图 1 所示。压电悬臂梁固定在双层有机玻璃夹板内,其自由端上下各设置圆柱形磁铁质量块,整体可沿左端螺杆上下移动,磁铁正对有机玻璃基座面位置各设置圆柱形磁铁和平面线圈,上对磁铁之间产生吸引力,下对磁铁之间产生排斥力。压电悬臂梁对应水平方向位置同样设置自由端带有圆柱形磁铁的悬臂梁,可在双层有机玻璃夹板内水平方向移动对压电悬臂梁施加磁力,整体固定在右端螺杆上。当发电装置受到外界环境振动激励时,压电悬臂梁随磁铁质量块做上下简谐运动,驱使黏贴在其上下表面的压电片发生机械形变,同时压电悬臂梁自由端磁铁与平面线圈做相对运动。根据压电式和电磁式能量转换发电原理,发电装置与外接电路联接实现电能输出。在竖直或水平方向调节磁铁间距离可改变发电装置固有频率匹配环境振动频率,根据 Challa V R 提出的磁力调节原理:当作用于压电悬臂梁磁力为吸引力减小其刚度,降低固有频率;相反作用于压电悬臂梁磁力为排斥力增大其刚度,提高固有频率;通过变化磁力改变压电悬臂梁刚度调节其固有频率,拓宽发电装置谐振频带适应环境频变,实现宽频高效换能。

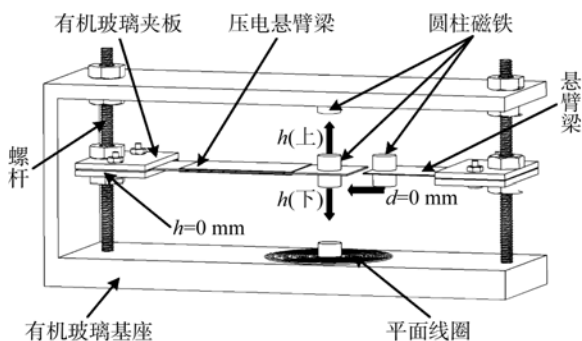


图 1 压电电磁复合宽频发电装置结构示意图

Fig. 1 Structure schematic of hybrid broadband piezoelectric-electromagnetic power generation device

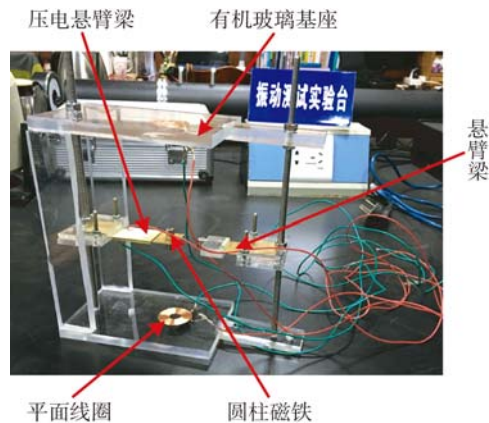
#### 3.2 实验装置

压电电磁复合宽频发电装置实验测试系统如图 2 所示。



(a) 实验装置

(a) Experimental setup



(b) 发电装置实物照片

(b) Photograph of proposed power generation device

图 2 磁力调频压电电磁复合发电实验测试系统

Fig. 2 Experiment testing system of hybrid piezoelectric-electromagnetic power generation device with magnetic force tuning

压电发电部分选用尺寸为 40 mm×30 mm×0.3 mm 的 PZT-51 型压电片和尺寸为 90 mm×30 mm×0.5 mm 的黄铜片组合构成压电悬臂梁结构,并固定在有机玻璃夹板上。电磁发电部分包括固定在有机玻璃基座上下的内径  $r=10$  mm、外径  $R=45$  mm 的铜制平面线圈和固定于压电悬臂梁自由端的圆柱形磁铁,圆柱形磁铁尺寸均为直径  $d=8$  mm、高  $h=10$  mm。同时在悬臂梁自由端上下正对位置各放一块圆柱形磁铁,采用其与压电悬臂梁自由端圆柱形磁铁的相互引力和斥力改变系统刚度。测试时信号发生器(GFG-8016G)发出不同频率值的正弦波信号经

过功率放大器(YE5872A)输入给激振器(JZK-10),可获得不同频率和振幅的振动激励源,示波器(GDS-820S)测量发电装置输出电压值。发电装置固定在激振器上,连接好测试仪器,设定激振加速度  $0.4\text{ g}$  ( $1\text{ g} = 9.8\text{ m/s}^2$ ),接通电源依次调节信号发生器输出不同频率值的正弦波信号,分别测试压电和电磁各自独立发电部分输出开路电压与振动频率关系,以及负载电阻与输出功率和电压关系。设定信号发生器输出固定频率值的正弦波信号,通过竖直或水平方向调节磁铁间距离改变发电装置固有频率来匹配激振器振动频率,测试得到发电装置输出开路电压与振动频率关系,研究分析磁力调频实现的宽频发电输出特性。

### 4 有限元仿真分析

#### 4.1 压电发电输出开路电压仿真分析

采用 ANSYS 有限元分析软件对压电发电部分进行结构建模并划分网格,分析类型选择模态分析和谐响应分析。定义悬臂梁材料为 Cu,压电片材料为 PZT-51,圆柱形磁铁材料为 NdFe35。其中悬臂梁和磁铁选用 Solid 45 单元,压电片选用 Solid 5 单元。先进行模态分析得出压电悬臂梁一阶固有频率值  $64\text{ Hz}$ ,在谐响应分析里面设定扫描频率范围,施加激励加速度  $0.4\text{ g}$ ,仿真计算得到压电悬臂梁输出开路电压与振动频率关系曲线如图 3 所示,谐振状态下输出峰值开路电压为  $5.1\text{ V}$ 。

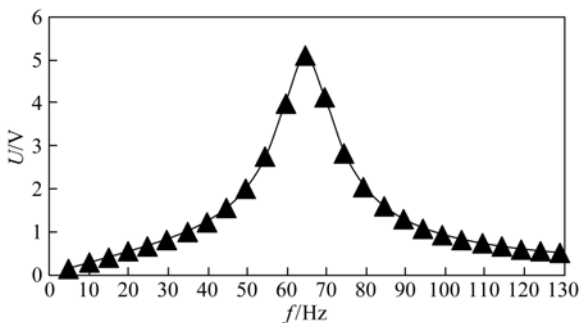


图 3 输出开路电压与振动频率关系曲线

Fig. 3 Curves of output open circuit voltage versus vibration frequency

#### 4.2 磁距对磁力变化影响仿真分析

在 Ansoft Maxwell 3D 环境中建立圆柱形磁铁周围磁场模型如图 4 所示,采用静磁分析。圆柱

形磁铁材料选择 NdFe35,电磁感应强度  $B$  分布云图显示磁铁周围电磁感应强度在  $0.4\sim 0.7\text{ T}$ 。分别设定磁铁充磁方向相同和相反,磁铁之间距离变化为  $50\sim 40\text{ mm}$ ,经计算得磁力大小与磁距关系曲线如图 5 所示,磁力随磁铁之间距离减小,其变化率快速增加,该部分仿真结果将用于系统刚度控制分析。

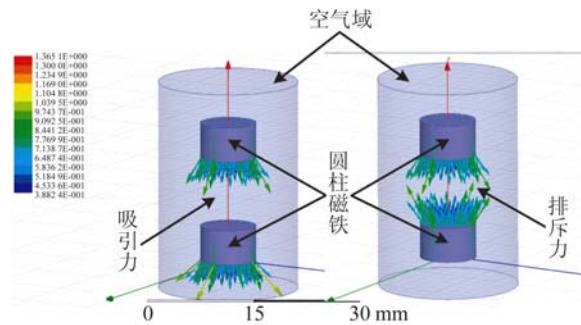


图 4 磁铁之间磁力模型

Fig. 4 Model of magnetic force between magnets

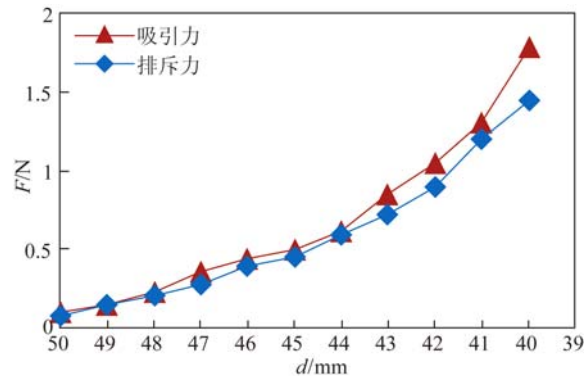


图 5 磁力与磁距关系曲线

Fig. 5 Curves of magnetic force versus the separation distance of the magnets

#### 4.3 电磁发电输出感应电动势仿真分析

用 Ansoft Maxwell 对电磁发电进行结构建模并划分网格,选择瞬态分析。磁铁材料选择 NdFe35,平面线圈材料为 Cu,设定磁铁充磁方向沿  $Z$  轴正方向,在 band(圆柱磁铁的运动轨迹)区域内做上下简谐运动。设定圆柱形磁铁与平面线圈相对位置  $60\text{ mm}$ ,振幅为  $10\text{ mm}$ ,激振频率为  $64\text{ Hz}$ (模拟环境激振频率),仿真计算得平面线圈输出感应电动势随时间变化关系曲线如图 6 所示,感应电动势随时间呈周期性变化峰值达  $350\text{ mV}$ 。

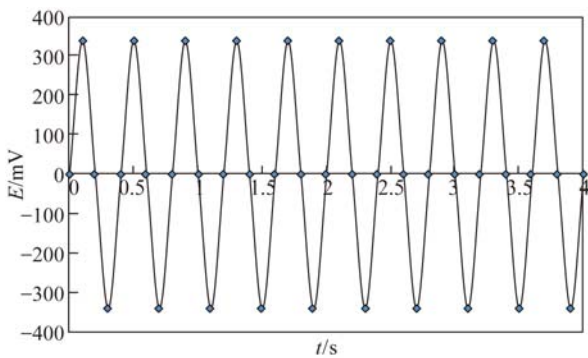


图 6 感应电动势随时间变化关系曲线

Fig. 6 Curves of induction electromotive force changing with time

### 5 实验测试结果分析

#### 5.1 未施加磁力调频分析

##### 5.1.1 压电发电部分输出特性

维持压电悬臂梁在  $d=0$  mm 和  $h=0$  mm 不受磁力作用位置,在激振器模拟环境振动情况下测量压电独立发电输出开路电压,激振频率为  $0\sim 120$  Hz,测得输出开路电压与振动频率关系如图 7 所示。压电悬臂梁谐振频率为 54 Hz(仿真结果 64 Hz),对应输出峰值开路电压达 5.5 V(仿真结果为 5.1 V),当偏离谐振频率时输出电压迅速降低。

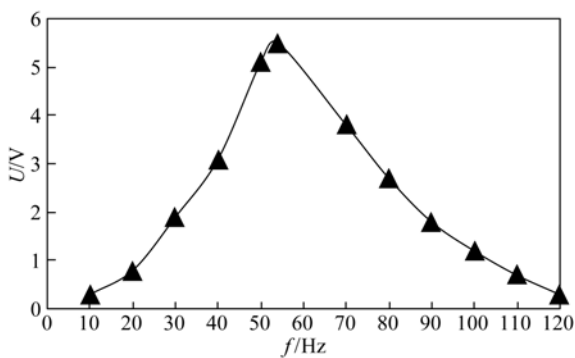


图 7 输出开路电压与振动频率关系曲线

Fig. 7 Curves of output open circuit voltage versus vibration frequency

微电源有效输出功率、负载电压和外部负载电阻关系如图 8 所示。测试条件为模拟环境激振频率 54 Hz,负载电阻变化为  $0\sim 400$  K $\Omega$ 。结果

显示负载功率随负载阻值增大先递增后递减,在最优阻抗值 200 k $\Omega$  时达到峰值。负载电压随负载阻值增大逐渐增大,超过最优阻抗值后增大趋势平缓。

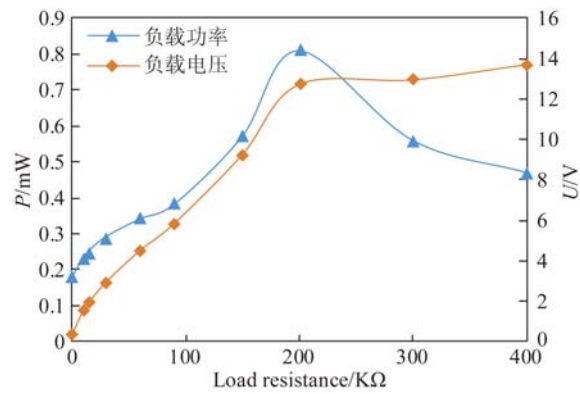


图 8 输出功率和电压与负载电阻关系曲线

Fig. 8 Curves of output power and voltage versus load resistance

##### 5.1.2 电磁发电部分输出特性

同样维持压电悬臂梁在未受磁力作用位置,测试其自由端永磁体磁场穿透平面线圈形成的电磁发电特性,激振频率为  $0\sim 130$  Hz,测得电磁发电输出开路电压与激振频率关系曲线如图 9 所示,在谐振频率 76 Hz 时输出峰值开路电压 410 mV,实验测试结果与仿真分析的峰值感应电动势 350 mV 较为吻合。

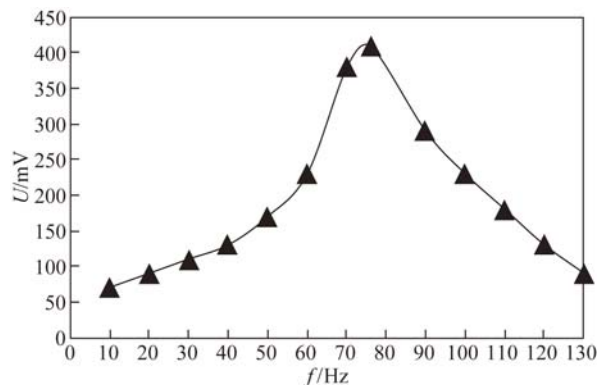


图 9 输出开路电压与振动频率关系曲线

Fig. 9 Curves of output open circuit voltage versus vibration frequency

未调频情况下电磁发电输出特性分析,首先

测得单个平面线圈阻值为  $75\ \Omega$ , 两平面线圈串联接入示波器, 负载电阻变化为  $0\sim 400\ \Omega$ , 测得输出功率和电压与负载电阻关系如图 10 所示。与压电独立发电输出情况类似, 输出功率随负载阻值增大先递增后递减, 当负载阻值达  $150\ \Omega$  时输出功率最大。输出电压随负载阻值增大逐渐增大, 超过最优负载阻值后增大趋势平缓。

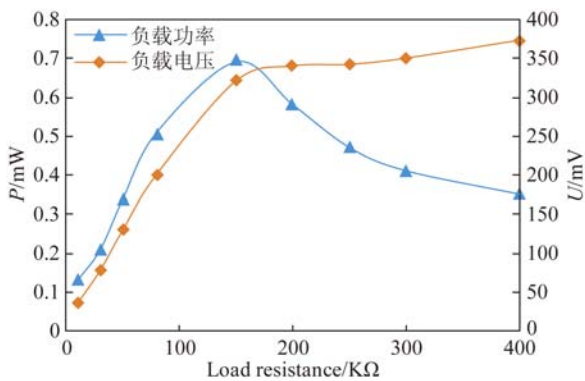


图 10 输出功率和电压与负载电阻关系曲线

Fig. 10 Curves of output power and voltage versus load resistance

## 5.2 竖直方向磁力调节结果分析

压电悬臂梁沿竖直方向上下移动, 利用磁铁间磁力调整拾振系统刚度, 调节发电系统的固有频率与模拟环境激振频率匹配实现谐振发电, 磁距对系统谐振频率的调节结果如图 11 所示。在竖直方向无磁力作用位置  $h=0\ \text{mm}$  处压电悬臂梁上下移动为  $h=-15\sim +15\ \text{mm}$ , 向上移动压电悬臂梁时, 磁铁间吸引力使系统刚度减小, 固有频率降低; 向下移动压电悬臂梁时, 磁铁间排斥力使系统刚度增大, 固有频率增加。在磁力调节作用下, 发电系统固有频率调节为  $45\sim 76\ \text{Hz}$ , 有效拓宽谐振频带  $31\ \text{Hz}$ , 增加了发电系统对环境随机振动的拾振范围, 提高发电效率。

测得输出开路电压与振动频率关系曲线如图 12 所示。当未施加磁力调节即  $h=0\ \text{mm}$  时, 发电系统一阶固有频率为  $60\ \text{Hz}$ , 在谐振状态下输出峰值开路电压为  $5.8\ \text{V}$ , 高于压电和电磁单独输出开路电压, 但略低于二者独立发电输出峰值开路电压总和的  $5.9\ \text{V}$ 。压电悬臂梁上下移动过程中, 系统输出总的峰值开路电压较调节前偏

小, 原因是由于引入磁力调频的同时增加了系统阻尼。

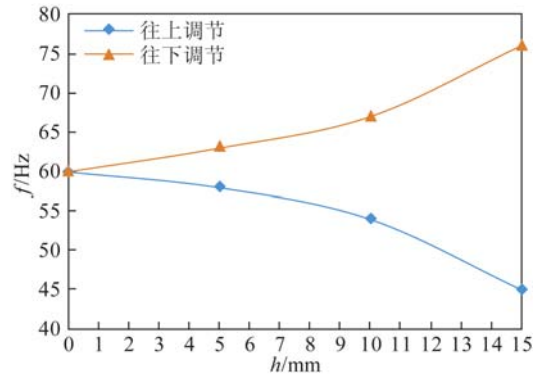


图 11 竖直调节磁距与系统谐振频率关系曲线

Fig. 11 Curves of vertical magnetic distance adjustment versus system resonance frequency

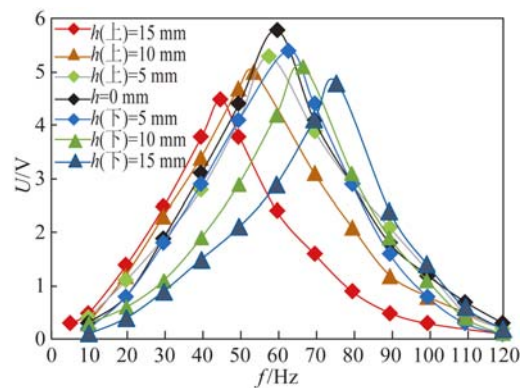


图 12 发电系统输出开路电压与振动频率关系曲线

Fig. 12 Curves of power generation system output open circuit voltage versus vibration frequency

## 5.3 水平方向磁力调节结果分析

利用水平方向磁力调节系统谐振频率, 初始位置和竖直方向测试位置相同, 水平磁距变化为  $0\sim 30\ \text{mm}$ 。磁距与发电系统固有频率关系如图 13 所示, 发电装置固有频率可调为  $51\sim 70\ \text{Hz}$ , 有效拓宽谐振频带  $19\ \text{Hz}$ 。当移动距离  $d$  为  $0\sim 15\ \text{mm}$  时, 由于悬臂梁端磁铁与压电悬臂梁端磁铁之间有效磁力为吸引力, 致使调节过程中固有频率降低; 当移动距离  $d$  为  $15\sim 30\ \text{mm}$  时, 由于两端磁铁之间有效磁力为排斥力, 致使调节过程中固有频率提高。系统输出开路电压与模拟环境激振频率关系如图 14 所示。

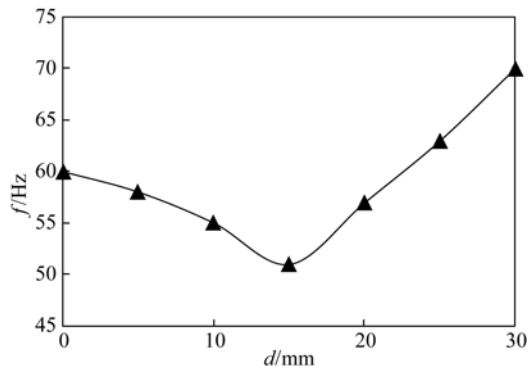


图 13 水平调节磁距与系统谐振频率关系曲线

Fig. 13 Curves of horizontal magnetic distance adjustment versus system resonance frequency

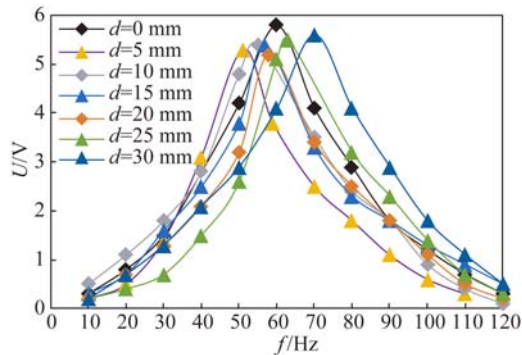


图 14 发电系统输出开路电压与振动频率关系曲线

Fig. 14 Curves of power generation system output open circuit voltage versus vibration frequency

## 参考文献:

- [1] TEKKALMAZ M, KORPEOGLU I. Distributed power-source-aware routing in wireless sensor networks[J]. *Wireless Networks*, 2016, 22(4): 1381-1399.
- [2] 陈德勇, 曹明威, 王军波, 等. 谐振式 MEMS 压力传感器的制作及圆片级真空封装[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(5):1235-1242.  
CHEN D Y, CAO M W, WANG J B, *et al.*. Fabrication and wafer-level vacuum packaging of MEMS resonant pressure sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(5):1235-1242. (in Chinese)
- [3] 崔玉国, 朱耀祥, 娄军强, 等. 压电微夹钳指位移与夹持力的检测[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(5):1372-1379.  
CUI Y G, ZHU Y X, LOU J Q, *et al.*. Detection of finger displacement and gripping force of piezoelectric micro-gripper [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(5): 1372-1379. (in Chinese)
- [4] 贾志超. 压电自供电无线传感器网络节点关键技术

## 6 结 论

本文基于非线性磁力调频研究了低宽频振动能采集压电电磁复合发电系统,并对其输出特性进行仿真分析和实验测试。在 0.4 g 加速度激励下,无磁力调节压电系统在谐振频率为 54 Hz(仿真结果 64 Hz)时输出开路电压峰值为 5.5 V(仿真结果 5.1 V),电磁系统在谐振频率为 76 Hz(仿真结果 64 Hz)时输出开路电压峰值为 410 mV(仿真结果 350 mV)。实验测试复合发电系统在谐振频率为 60 Hz 时输出开路电压峰值为 5.8 V,施加磁力拓宽装置采集频带过程中,压电悬臂梁沿竖直方向上下游动 0~15 mm,系统固有频率可调为 45~76 Hz,拓宽谐振频带为 31 Hz;悬臂梁沿水平方向平移 0~30 mm,系统固有频率可调为 51~70 Hz,拓宽谐振频带为 19 Hz。结果表明,压电和电磁系统输出特性仿真分析与实验测试结果较为吻合;复合发电系统输出开路电压峰值 5.8 V 均高于压电(5.5 V)和电磁(410 mV)单独发电,但略低于二者单独输出开路电压峰值总和 5.9 V;引入磁力调频可有效改变系统谐振频率适应低频环境随机振动,宽频带高效能输出特点更利于在频变环境中为微型低功耗系统供能。

的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学, 2015.

- JIA ZH CH. *The Research on Key Technology of Piezoelectric Self-powered Wireless Sensor Network Nodes* [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)
- [5] CHEN L J, XU X H, ZENG P L, *et al.*. Integration of energy harvester for self-powered wireless sensor network nodes [J]. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2014, 2014(4):1-7.
- [6] 王淑云, 张肖逸, 阚君武, 等. 气体耦合式宽带/低频压电振动俘能器[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(2):497-503.  
WANG SH Y, ZHANG X Y, KAN J W, *et al.*. Wideband/low frequency piezoelectric vibration energy harvester based on pneumato-coupling [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(2): 497-503. (in Chinese)
- [7] 李伟, 车录峰, 王跃林. 横向电磁式振动能量采集器的设计与制作[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(3):694-700.  
LI W, CHE L F, WANG Y L. Design and fabrication of transverse electromagnetic vibration energy

- harvester [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(3): 694-700. (in Chinese)
- [8] MOHAMMADI S, ESFANDIARI A. Magnetostrictive vibration energy harvesting using strain energy method [J]. *Energy*, 2015, 81:519-525.
- [9] DU X Z, ZENG X W, WANG G. Structural design and simulation analysis of a micro-silicon-based piezoelectric cantilever generator [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part N Journal of Nanoengineering & Nanosystems*, 2014, 229(4).
- [10] JOYCE B S, FARMER J, INMAN D J. Electro-magnetic energy harvester for monitoring wind turbine blades [J]. *Wind Energy*, 2014, 17(6): 869-876.
- [11] 刘颖, 王艳芬, 李刚, 等. MEMS 低频压电振动能量采集器[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(9):2476-2482.  
LIU Y, WANG Y F, LI G, *et al.*. MEMS-based low-frequency piezoelectric vibration energy harvester [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(9): 2476-2482. (in Chinese)
- [12] LI P W, LIU Y, WANG Y F, *et al.*. Low-frequency and wideband vibration energy harvester with flexible frame and interdigital structure [J]. *Aip Advances*, 2015, 5(4):8740-1296.
- [13] TANG Q C, LI X X. A wide-band piezoelectric energy-harvester for high-efficiency power generation at low frequencies [C]. *The 17th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers & Eurosensors XXVII)*, 2013 *Transducers & Eurosensors XXVII: Barcelona, ESP*, 2013:697-700.
- [14] 崔岩, 王飞, 董维杰, 等. 非线性压电式能量采集器[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(12):2737-2743.  
CUI Y, WANG F, DONG W J, *et al.*. Nonlinear piezoelectric energy harvester [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(12):2737-2743. (in Chinese)
- [15] BERDY D F, JUNG B, RHOADS J F, *et al.*. Wide-bandwidth meandering vibration energy harvester with distributed circuit board inertial mass [J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2012, 188(12):148-157.
- [16] DAUKSEVICIUS R, BRIAND D, LOCKHART R, *et al.*. Frequency up-converting vibration energy harvester with multiple impacting beams for enhanced wideband operation at low frequencies [J]. *Procedia Engineering*, 2014, 87:1517-1520.
- [17] HALIM M A, CHO H O, PARK J Y. A handy motion driven, frequency up-converting piezoelectric energy harvester using flexible base for wearable sensors applications [C]. *Sensors. IEEE. Busan, Korea*, 2015:1-4.
- [18] LELAND E S, WRIGHT P K. Resonance tuning of piezoelectric vibration energy scavenging generators using compressive axial preload [J]. *Smart Materials & Structures*, 2006, 15(5):1413-1420(8).
- [19] WU X, LEE D W. A high-efficient broadband energy harvester based on non-contact coupling technique for ambient vibrations [C]. *IEEE International Conference on MICRO Electro Mechanical Systems*, 2015:1110-1113.
- [20] LALLART M, ANTON S R, INMAN D J. Frequency self-tuning scheme for broadband vibration energy harvesting [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2010, 21(9): 897-906.
- [21] 高世桥, 李平, 金磊, 等. 基于 MEMS 技术的压电—电磁复合式宽频俘能器: 中国专利 103199738A [P]. 2013.  
GAO S Q, LI P, JIN L, *et al.*. *Piezoelectric and electromagnetic wide-band generator based on MEMS technology: China Patent 103199738A* [P]. 2013. (in Chinese)
- [22] 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):25004-11.
- [23] 张国策. 磁场中悬臂梁的非线性振动[D]. 上海: 上海大学, 2014.  
ZHANG G C. *Nonlinear Oscillations of Cantilevers with Magnetic Interactions* [D]. Shanghai: Shanghai University, 2014. (in Chinese)

#### 作者简介:



杜小振(1978—),男,河南邓州人,博士,副教授,硕士生导师,2003年、2008年于大连理工大学分别获得硕士、博士学位,主要从事微电源,海洋能发电和传感器技术等方面的研究。E-mail: du\_xzh@163.com



张龙波(1990—),男,山东潍坊人,硕士研究生,2012年于中国海洋大学青岛学院获得学士学位,主要从事压电电磁复合宽频微电源技术的研究。E-mail: zhang\_long\_bo123@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)