

复合式动能采集器的多自由度宽频带设计优化^{*}

余小庆 陈仁文 徐栋霞

(南京航空航天大学 机械结构力学及控制国家重点实验室 南京 210016)

摘要:提出了一种多自由度宽频带压电-磁电复合式动能采集器,该动能采集器可以在多方向采集动能,有效地工作于较宽的频带,且可以同时以压电和磁电方式收集动能,大大提高了动能采集效率。介绍了复合式动能采集器的结构;分析和优化了采集器的拾振系统,从理论上验证了采集器的多自由度和宽频带的特性;介绍了磁电换能系统。研究表明,采集器在不同的工作频率下出现了两个振动峰值,验证了采集器的宽频带动能采集特性。通过实验测试进一步得出,与压电或磁电换能系统各自的输出性能相比,压电-磁电复合式换能系统的总体输出性能有所提高。

关键词:动能采集;多自由度;宽频带;压电-磁电

中图分类号: TN303 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4030

Design and optimization of multi-degrees-of-freedom and wide-band hybrid vibration energy harvester

Yu Xiaoqing Chen Renwen Xu Dongxia

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical structures, Nanjing 210016, China)

Abstract: The paper presents a hybrid piezoelectric and magnetoelectric vibration energy harvester with multiple degrees of freedom and broadband. The harvester can extract vibration energy on multiple directions and work in a wide frequency band effectively. It can greatly improve the efficiency of harvesting vibration energy with piezoelectric mechanism and magnetoelectric mechanism together. The paper introduces the structure of the hybrid vibration energy harvester. The vibration system is analyzed and optimized, and the characteristics of multiple degrees of freedom and broadband of the harvester are verified theoretically. And the paper also introduces the system of magnetoelectric transducer. The results show that under different operating frequencies, it appears two vibration peaks, which verifies the characteristic of broadband. Through experiment tests, compared with the output performance of piezoelectric transducer system or magnetoelectric transducer system respectively, the output performance of hybrid piezoelectric and magnetoelectric transducer system has greatly improvement.

Keywords: vibration energy harvesting; multiple degrees of freedom; broadband; piezoelectric and magnetoelectric

1 引言

目前,随着微电子技术的发展,无线传感器等低功耗电子器件得到广泛的应用。但这些器件大多分布在环境苛刻、人类难以直接接近的地方,传统供电方式因其自身的弊端已经无法满足上述新兴技术对电能的需求。振动能量作为一种新型环境能量^[1-3]可以对其进行回收并转换为电能,为特定环境下的无线传感器等器件进行供电。因

此,如何对振动能量进行采集并提高利用率已经成为众多研究者们所关注的问题。

现在多数研究的振动能量采集器,其工作频率较窄,且大多只适用于单方向振动能量采集,而这与自然界中振源的宽频带、方向任意的特性相悖^[4-5]。因此,为了拓宽采集器工作频带,JOSE^[6]等人提出了一种多悬臂梁压电式振动能量采集装置,KULAH^[7]教授领导的研究小组提出了一种通过阵列化固有频率不同的悬臂梁的方法来增加

收稿日期:2016-11

* 基金项目:航空科学基金项目(2014ZC52039)、江苏高校优势学科建设工程项目资助

共振点;为了增加能量采集方向,CHOI Y^[8]等人提出了一种球形永磁体动能采集器。

针对目前采用单一发电模式的动能采集器大多存在工作频带窄、输出能量密度低及能量转换效率低等缺点,众多研究者们结合不同发电模式的特性,提出了一种复合式振动能量采集器^[9-10]。2009年厦门大学萨本栋微机电研究中心的任婧^[11]等人提出了一种将压电式悬臂梁和可变电容器结合起来的一种MEMS复合式动能采集器。2015年中北大学的杨杰^[10]等人提出了一种四悬臂梁-中心质量块结构的压电-磁电复合式振动能量采集器。

本文即针对振动能量的采集提出了一种多自由度宽频带压电-磁电复合式动能采集器。

2 动能采集器结构设计

多自由度宽频带的压电-磁电复合式动能采集器结构如图1所示,采用Catia软件建立该装置的三维模型。

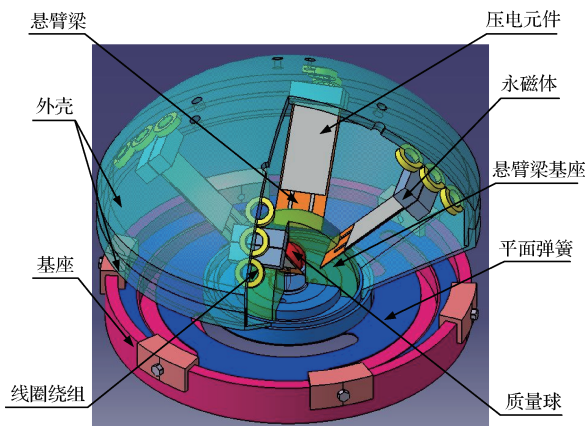


图1 能量采集装置三维模型剖面图

该结构中,基座、平面弹簧以及外壳内所包含的多个结构构成的质量体组成了采集器的弹性放大机构。悬臂梁基座、悬臂梁及永磁体阵列构成的质量块组成了采集器的拾振机构,与弹性放大机构形成了一个双自由度振动系统,并且在此基础上增加了拾振结构个数,构成多自由度拾振系统。该拾振系统中的压电悬臂梁的结构参数均相同,即每个压电悬臂梁结构的谐振频率相同,从而使得采集器在共振区具有稳定的输出性能。压电元件、线圈绕组及永磁体构成了采集器的换能系统。外界激励通过弹性放大机构将激励放大后,继续传递至采集器的拾振换能结构,使压电悬臂梁产生弯曲振动,最终压电元件由于受到了周期性机械应力,从而产生周期性输出电压。除此之外,压电悬臂梁的振动使悬臂梁自由端永磁体阵列所构成的质量块与线圈绕组产生相对运动,从而产生感应电动势。这就将压电和磁电结合起来,形成了一个复合式动能采集器。

3 采集器的拾振系统分析与优化

3.1 拾振系统的物理模型建立和动力学分析

由于拾振系统中的压电悬臂梁的结构参数均相同,故在此只介绍单个双自由度拾振系统。

建立了带有弹性放大机构的拾振系统物理模型,如图2所示,即在传统的悬臂梁式振动能量采集系统的基础上增加了一组弹性放大装置,该放大装置主要由“弹簧-质量-阻尼”系统构成。

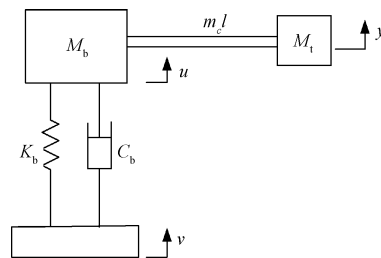


图2 双自由度拾振系统物理模型

图2中, K_b 、 C_b 、 M_b 分别为弹性放大器的等效刚度、等效阻尼及等效质量, m_c 、 l 、 M_l 分别为悬臂梁的单位长度质量、长度及自由端质量块的质量, v 为基础激励位移, u 为弹性放大器位移响应, w_{rel} 为压电悬臂梁自由端相对于其固定端的位移响应。

假设基础振动为 $v = v_0 e^{i\omega t}$,可得“弹簧-质量-阻尼”系统的运动微分方程为:

$$M_b \ddot{u} = -K_b(u - v) - C_b(\dot{u} - \dot{v}) \quad (1)$$

令 $w = u - v$ 为质量块 M_b 相对于基础的运动位移,则式(1)可变形为:

$$M_b w + C_b \dot{w} + K_b w = M_b v_0 \omega^2 e^{i\omega t} \quad (2)$$

采用复数法求解该微分方程的稳态振动,令:

$$w = \omega_0 e^{i(\omega t + \theta)} \quad (3)$$

将式(3)代入式(2)可得:

$$\omega = \frac{\omega_0 \omega^2}{\omega_b^2 - \omega^2 + 2\zeta_b \omega_b \omega i} v_0 e^{i\omega t} \quad (4)$$

则弹性放大器质量块 M_b 的运动绝对位移为:

$$u = \frac{\omega_b^2 + 2\zeta_b \omega_b \omega i}{\omega_b^2 - \omega^2 + 2\zeta_b \omega_b \omega i} v_0 e^{i\omega t} = \sqrt{\frac{(\omega_b^2)^2 + (2\zeta_b \omega_b \omega)^2}{(\omega_b^2 - \omega^2)^2 + (2\zeta_b \omega_b \omega)^2}} v_0 e^{i(\omega t + \psi)} \quad (5)$$

式中:

$$\begin{cases} \psi = \arctan\left(-\frac{2\zeta_b \omega_b \omega^3}{\omega_b^2(\omega_b^2 - \omega^2) + (2\zeta_b \omega_b \omega)^2}\right) \\ \omega_b = \sqrt{\frac{K_b}{M_b}} \\ \zeta_b = \frac{C_b}{2\sqrt{M_b K_b}} \end{cases} \quad (6)$$

定义 β_b 为该弹性放大器的位移振幅放大因子, 将式(5)无量纲化, 即令弹性放大机构频率比为 $\lambda_b = \omega/\omega_b$, 故存在:

$$\beta_b = \sqrt{\frac{1 + (2\zeta_b \lambda_b)^2}{(1 - \lambda_b^2)^2 + (2\zeta_b \lambda_b)^2}} \quad (7)$$

图3所示为弹性放大机构的阻尼系数取0.1时, 系统的位移幅频特性曲线。从图中可以看出, 当外界激振频率与弹性放大系统的固有频率相接近, 并且满足条件 $\lambda_b < \sqrt{2}$ 时, 作用于装置上的基础激励在经过弹性放大机构后被放大。

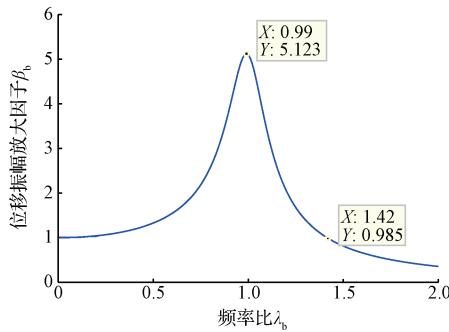


图3 弹性放大系统的位移幅频特性曲线

同样可得悬臂梁自由端的相对运动位移为:

$$w_{rel} = \frac{\mu_1 \omega^2}{\omega_1^2 - \omega^2 + 2\zeta_{eq} \omega_1 \omega i} u = \frac{\mu_1 \omega^2 \sqrt{\frac{(\omega_b^2)^2 + (2\zeta_b \omega_b \omega)^2}{(\omega_b^2 - \omega^2)^2 + (2\zeta_b \omega_b \omega)^2}}}{\sqrt{(\omega_1^2 - \omega^2)^2 + (2\zeta_{eq} \omega_1 \omega)^2}} v_0 e^{i(\omega t + \varphi)} \quad (8)$$

式中:

$$\begin{cases} \varphi = \arctan\left(-\frac{2\zeta_{eq} \omega_1 \omega}{\omega_1^2 - \omega^2}\right) \\ \omega_1 = \sqrt{\frac{k_{eq}}{m_{eq}}} = \sqrt{\frac{3EI/l^3}{0.24m_c l + M_t}} \\ \zeta_{eq} = \frac{c_{eq}}{2\sqrt{m_{eq} k_{eq}}} \end{cases} \quad (9)$$

而得出经过弹性放大装置后, 悬臂梁末端质量块振动相对位移与输入激励的关系。定义 $\beta_{rel \rightarrow b}$ 为装置中悬臂梁自由端的相对位移振幅放大因子, 悬臂梁频率比为 $\lambda_b = \omega/\omega_b$, 从而将式(8)无量纲化, 可以得出:

$$\beta_{rel \rightarrow b} = \frac{\mu_1 \lambda_b^2}{\sqrt{(1 - \lambda_b^2)^2 + (2\zeta_{eq} \lambda_b)^2}} \cdot \sqrt{\frac{1 + (2\zeta_b \lambda_b)^2}{(1 - \lambda_b^2)^2 + (2\zeta_b \lambda_b)^2}} \quad (10)$$

式中: ω_b 为弹性放大器的固有频率, ζ_b 为弹性放大器的阻尼系数, E 为悬臂梁的弹性模量, I 为悬臂梁截面关于中性轴的惯性矩, m_{eq} 为悬臂梁系统的等效质量, K_{eq} 为悬臂梁系统的等效刚度, C_{eq} 为悬臂梁系统的等效阻尼, ω_1 为悬臂梁系统的固有频率, ζ_{eq} 为悬臂梁系统的阻尼系数。

如图4所示为经过弹性放大装置对激励振幅进行放大之后, 采集器模型中悬臂梁末端质量块的相对位移幅频特性关系曲面。如图5所示为传统采集装置中悬臂梁末端质

量块的相对位移幅频特性关系曲线。通过观察比较, 可以得出采集器经弹性放大机构对激励幅值进行放大后, 输出激励幅值有了显著的提升, 并且当环境激励频率与采集器悬臂梁的固有频率和弹性放大机构的固有频率接近时, 整个系统处于谐振状态, 此时, 输出的振动响应幅值达到最大。同时, 经过弹性放大机构对激励振幅放大后, 悬臂梁末端质量块的相对位移幅频特性曲面出现了两个振动峰值。

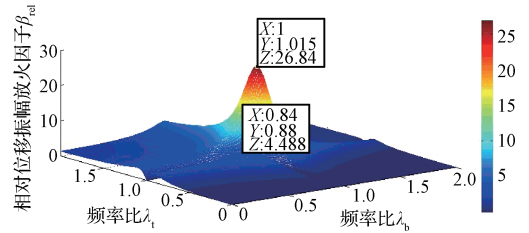


图4 放大后相对位移幅频特性曲线

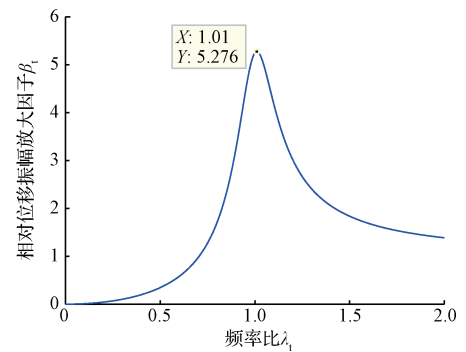


图5 放大前相对位移幅频特性曲线

3.2 拾振系统结构参数分析及优化

根据前面对采集器拾振系统物理模型的动力学分析, 结合所设计出的带有弹性放大机构的多自由度宽频带动能采集器, 进一步探究采集器的质量比、刚度比以及阻尼比对采集器输出性能的影响。假设采集器质量比为 $\gamma = M_b/m_{eq}$, 刚度比为 $\kappa = K_b/k_{eq}$, 阻尼比为 $\chi = \xi_b/\xi_{eq}$ 。

通过数值计算仿真, 得到在不同质量比、刚度比及阻尼比的情况下, 对系统输出位移响应的影响, 如下各图所示。其中, 如图6所示为在刚度比值 $\kappa = 100$ 和阻尼比值 $\chi = 1$ 时, 采集器的质量比对输出性能的影响; 如图7所示为在质量比值 $\gamma = 25$, 阻尼比值 $\chi = 1$ 时, 采集器的刚度比对系统输出性能的影响; 如图8所示为在质量比为 $\gamma = 25$, 刚度比为 $\kappa = 100$ 时, 采集器的阻尼比对系统输出性能的影响。

图中, 在质量比为 $\gamma = 10^{-10}$, 刚度比为 $\kappa = 10^{10}$, 即 $\gamma \rightarrow 0, \kappa \rightarrow \infty$ 时, 弹性放大机构等效于一个与振动基础固联的刚体, 则该拾振系统等效于一个单悬臂梁拾振系统。对比可得, 经过弹性机构放大后的采集器振动响应幅值在一定频率范围内均比单悬臂梁振动系统的响应赋值大, 且悬臂梁自由端质量块的相对位移与基础激励位移之比随频率的变化曲线均出现了两个峰值,

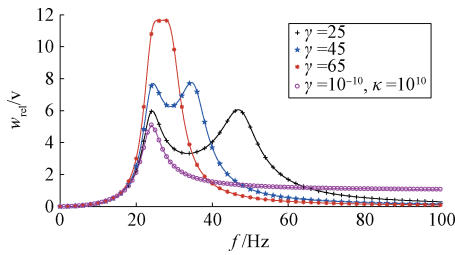


图6 不同质量比情况下位移幅频特性曲线

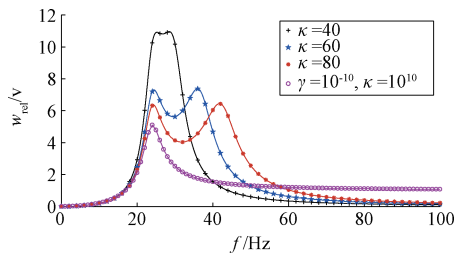


图7 不同刚度比情况下位移幅频特性曲线

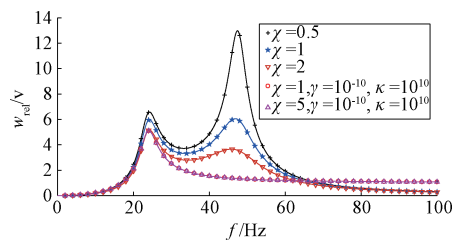


图8 不同阻尼比情况下位移幅频特性曲线

并且随着采集器中弹性放大机构与悬臂梁拾振机构质量比的增加以及刚度比的减小,两个峰值逐渐增加,峰值之间的距离逐渐缩短,最终形成一个宽频带窗口。而两者之间阻尼比的变化只会改变位移响应幅频特性曲线,不会影响采集器工作频带。从这里可见,该结构实现了宽频带的性能。

4 磁电能量转换系统

创造性地将3个线圈绕组分别布置在一个剖面结构为“E”型的磁芯骨架上,永磁体分别安装在悬臂梁末端的上下表面,磁极沿悬臂梁中性线方向相反,两块永磁体之间用隔磁板隔开,端部用导磁板衔接。该磁电换能系统的结构示意图如图9所示,当悬臂梁处于图中的弯曲状态时,线圈绕组1和线圈绕组2的磁芯与两块永磁体和导磁板之间形成一个闭合磁路。同样,当悬臂梁产生向下弯曲时,线圈绕组2和3的磁芯与永磁体及导磁板之间则产生类似的闭合磁路。

以图9所示的运动状态建立磁路等效模型,对磁路进行分析。则该磁路的等效模型如图10所示。同时,假设磁路段内介质材料是均匀、线性的,且磁路中无漏磁。

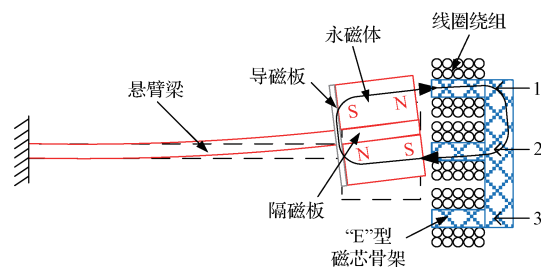


图9 磁电换能结构示意图

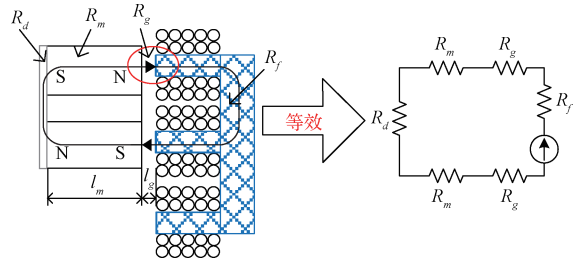


图10 磁路等效模型

图9中,该磁路由永磁体磁动势源,导磁性较好的磁芯和导磁板及气隙组成。考虑到磁芯和导磁板的磁导率 μ_{Fe} 很大,因此这里忽略导磁板的磁阻 R_g 和磁芯的磁阻 R_f 。

通过计算推导计算,最终可以将单个线圈绕组的感应电动势表示为:

$$V = -N \frac{\partial \Phi}{\partial t} = -\frac{N \Phi_g \tilde{v} \pi}{d_c} \cos\left(\frac{\pi v t}{d_c}\right) \quad (11)$$

式中: N 为线圈匝数, Φ_g 为气隙磁通量, d_c 为线圈轴线之间的间距, \tilde{v} 为永磁体与线圈的相对运动速度。

从中可得该设计可以将磁场集中在磁电换能结构之间,增加气隙磁通,减少漏磁,提高能量转换效率。同时,线圈骨架主要采用了“E”型磁芯,线圈分别布置在该磁芯骨架上,形成三组线圈绕组。在结构振动过程中,三组线圈绕组与永磁体阵列之间两两形成一个交替的闭合磁路。研究表明,该磁芯的存在大大提高了采集器的能量转换性能。

5 实验测试

设计并制作了动能采集装置试验样机,如图11所示。并搭建了如图12所示的实验测试系统平台。

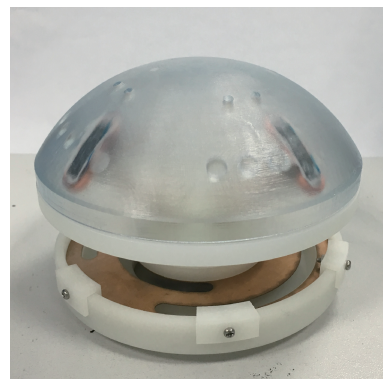


图11 动能采集器实验样机

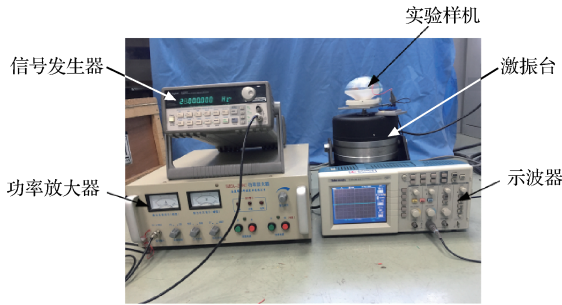


图 12 实验测试系统平台

实验测试了在激振频率为 26 Hz 的情况下,压电换能系统和磁电换能系统两端负载阻抗均达到最优时,两种换能系统的功率输出之和。

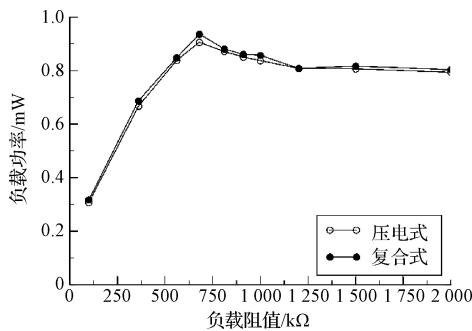


图 13 压电输出功率随负载阻值变化曲线对比

如图 13 所示为压电换能系统和磁电换能系统进行复合后压电换能系统输出功率随负载阻值的变化曲线和复合前压电换能系统的输出功率随负载阻值的变化曲线对比图。

如图 14 和图 15 所示分别为压电换能系统和磁电换能系统进行复合后磁电换能系统中线圈 2 以及线圈 1、3 串联后的输出功率随负载阻值的变化曲线和复合前磁电换能系统的输出功率随负载阻值的变化曲线对比图。

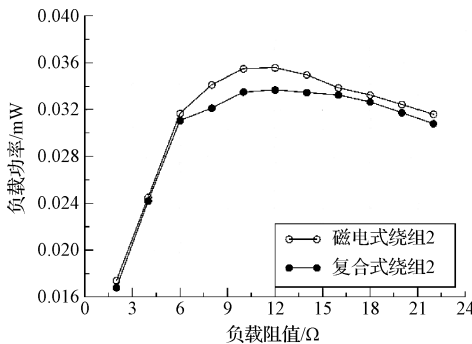


图 14 线圈 2 输出功率随负载阻值变化曲线对比

从图 14 中可以看出,虽然压电能量转换系统和磁电能量转换系统进行复合后,各自单独输出功率均有所下降,但是下降幅值很小,而复合式换能系统的最大功率可以进行叠加,该压电-磁电复合式换能系统的最大输出功

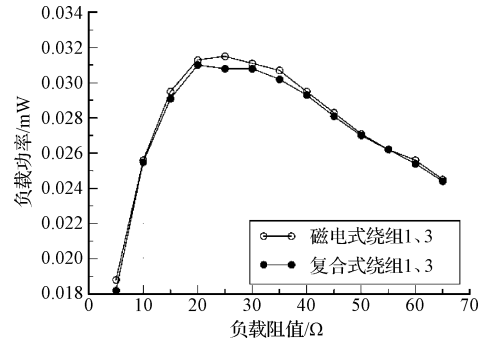


图 15 线圈 1、3 串联后输出功率随负载阻值变化曲线对比图

率可达 0.973 mW,与单独采用压电换能系统或磁电换能系统所输出的最大功率相比有很大的提高,因此压电-磁电复合式换能系统的总体输出性能得到提高。

6 结论

本文主要在传统的单自由度振动能量采集器模型基础上增加了弹性放大机构,形成了具有双自由度的能量采集系统,同时,对其结构参数进行了优化分析,从而实现系统的振动放大性能;继而在双自由度振动系统模型的基础上增加采集器拾振结构个数,构成多自由度振动系统,设计出动能采集装置,并进一步对其动力学特性进行了理论分析和比较。分析表明,所设计出的采集器具有宽频带采集性能。在结构设计的基础上,对装置的换能系统进行了优化与分析,创造性地在系统中引入了一种“E”型线圈绕组磁芯,研究表明,该磁芯的存在大大提高了采集器的能量转换性能。并对设计的结构装置进行实验测试,表明该压电-磁电复合结构可以很大程度地提高动能采集效率。

参考文献

- [1] BOTTERO M, DALLA CHIARA B, DEFLORIO F. Wireless sensor networks for traffic monitoring in a logistic centre[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2013, 26: 99-124.
- [2] 毛世杰,陈仁文. 热电能量采集自适应阻抗匹配电路设计[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(4): 91-94.
- [3] 秦立振,苏宇锋. 抗磁悬浮能量采集器结构参数对输出特性影响[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(9): 1438-1443.
- [4] 王光庆,杨斌强. 非线性宽频压电振动能量采集器的研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(1): 221-230.
- [5] 陈仁文,任龙,夏桦康,等. 多方向宽频带压电式振动能量采集器研究进展[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(12): 2641-2652.
- [6] JO S E, KIM M S, KIM Y J. A resonant frequency switching scheme of a cantilever based on polyvinylidene fluoride for vibration energy harvesting [J]. Smart Materials and Structures, 2012, 21(1): 15007-

- 150148.
- [7] SARI I, BALKAN T, KULAH H. An electromagnetic micro power generator for wideband environmental vibrations[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2008, 145: 405-413.
- [8] CHOI Y, JU S, CHAE S H, et al. Low-frequency vibration energy harvester using a spherical permanent magnet with controlled mass distribution[J]. *Smart Materials and Structures*, 2015, 24(6):065029.
- [9] 展永政,王光庆. 双自由度压电振动能量采集器的力-电输出特性分析[J]. *振动工程学报*, 2014, 27(6):871-877.
- [10] 杨杰,许卓,安坤,等. MEMS 压电-磁电复合式振动能量采集器[J]. *微纳电子技术*, 2015(2):103-107.
- [11] 任婧,陈旭远. 用于多频振动的 MEMS 复合式能量采集器的设计[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(6):1367-1372.

作者简介

余小庆, 1992 年出生, 工学硕士, 主要研究方向为测试计量技术及仪器、智能化测控技术。

E-mail:1424589066@qq.com

(上接第 20 页)

- [10] SHI Y H, EBERHART R C. A modified particle swarm optimizer[C]. *Proceedings of the IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, 1998:69-73.
- [11] EBERHART R C, SHI Y H. Comparing inertia weights and construction factors in particle swarm optimization[C]. *Proceedings of the 2000 Congress on Evolutionary Computation*, 2000:84-88.
- [12] 张顶学,关治洪,刘新芝,等. 一种动态改变惯性权重的自适应粒子群算法[J]. *控制与决策*, 2008, 23(11): 1253-1257.
- [13] DOCTOR S, VENAYAGAMOORTHY G K. Improving the performance of particle swarm optimization using adaptive critics designs[C]. *IEEE Swarm Intelligence Symposium*, 2005:393-396.

作者简介

郭已秋, 1989 年 8 月出生, 博士研究生, 研究实习员, 主要研究方向为目标跟踪和图像处理等。

E-mail:guo_qiuqiu@163.com

宋玉龙, 1980 年 9 月出生, 工学博士, 副研究员, 主要研究方向为图像处理。

宋策, 1987 年 5 月出生, 工学博士, 助理研究员, 主要研究方向为目标跟踪和嵌入式图像处理。

刘立刚, 1987 年 3 月出生, 工学硕士, 助理研究员, 主要研究方向嵌入式系统设计。

任航, 1982 年 9 月出生, 工学博士, 助理研究员, 主要研究方向图像处理。