

非线性压电-电磁复合式俘能器的结构设计

武丽森, 刘海鹏, 张广义

(北京理工大学 爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

摘 要:非线性技术可使压电式能量采集获得较宽的振动频率和较高的输出电压, 该文基于非线性振动研究提出了一种新型的非线性压电-电磁复合式俘能器, 将非线性压电-电磁复合式俘能系统等效为含有非线性刚度的质量-弹簧-阻尼振动系统, 推导出俘能器的总输出平均功率公式。在 0.6 g 简谐激励下, 磁铁间距为 2.5 mm, 3 mm, 4 mm 时, 对非线性压电-电磁复合式俘能器进行了实验测试, 结果表明, 随着磁铁间距的减小, 引力增大, 非线性俘能器的谐振频率降低, 3 dB 带宽升高。

关键词:压电; 电磁; 非线性; 俘能; 功率

中图分类号: TN384

文献标识码: A

Design of a New Nonlinear Hybrid Piezoelectric and Electromagnetic Energy Harvester

WU Lisen, LI Haipeng, ZHANG Guangyi

(State Key Lab. of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: As nonlinear technology allows piezoelectric energy harvesting to obtain a wider vibration frequency and a higher output voltage, this paper proposed a new nonlinear hybrid piezoelectric and electromagnetic energy harvester based on nonlinear vibration. The new nonlinear hybrid piezoelectric and electromagnetic energy harvester could be equivalent to a quality-spring-damper vibration system with nonlinear stiffness, the total average output power of the energy harvester was deduced. In 0.6 g harmonic excitation, the distance between magnets was 2.5 mm, 3 mm, 4 mm, the nonlinear hybrid piezoelectric and electromagnetic energy harvester was measured. The results showed that as the distance between magnets decreased with increasing gravity, the resonant frequency of the nonlinear energy harvester was reduced, and the 3 dB bandwidth increased.

Key words: piezoelectric; electromagnetic; nonlinear; energy harvest; power

0 引言

随着微机电系统技术的发展, 微能源技术日益受到人们的重视, 2000 年以来, 国内、外学者开始研究采用环境中普遍存在的振动驱动发电的微电源, 能量转换形式以压电式和电磁式为主。压电式微电源具有输出电压高, 结构简单, 易与包含硅体的微电子传感器集成和所需外围能量控制器件较少等优点, 但输出电流较低; 电磁式微电源输出电流较大, 但输出电压较低。压电-电磁复合俘能器将压电和电磁两种能量转换结构集成在一个系统中, 既综合了压电转换和电磁转换的优点, 又提高了微电源

的能量转换效率和能量密度。另外, 环境中的频率多为低频, 如果要降低压电式能量采集器的固有频率, 需改变能量采集器的长度、刚度或者质量块的位置等物理参数, 实现起来很难。为了克服这些困难, 有必要研究非共振的能量采集技术或非线性压电能量采集技术。非线性压电能量采集技术的非线性可以是压电材料的非线性, 即通过改变压电材料的硬度来影响谐振频率, 也可通过非线性振动来获得较宽的振动频率范围和较高的输出电压。基于这一原理, 国内、外学者对基于非线性振动的能量采集技术进行了相关研究。2008 年, Alireza 等将压电-电磁复合式俘能器等效为一个弹簧-质量-阻尼系统进行

收稿日期: 2015-08-13

基金项目: 国家“八六三”计划基金资助项目(SS2013AA011104)

作者简介: 武丽森(1990-), 男, 山西朔州人, 硕士生, 主要从事俘能器方面的研究。刘海鹏(1973-), 男, 北京人, 副教授, 主要从事微机电技术, 高速条件下的控制技术研究。

了理论建模,并设计了基于 z 型梁结构的压电-电磁复合式俘能器,实验结果表明,复合式俘能器中压电部分和电磁部分产生的最大功率分别为 37 mW 和 6 mW^[1],Cottone F^[2]、Gammaitoni L 等^[3]、Samuel C 等^[4]研究了双稳态现象及其产生的条件,并指出在磁场作用下,压电能量采集器的振动势能函数为一个多项式。意大利的 M. Ferrari 等^[5]将压电悬臂梁和 2 个永磁体组成非线性双稳态系统,在一定的宽频振动范围内提高了输出电压。韩权威等通过在压电悬臂梁的末端施加非均匀磁力,得出引入磁力可增大振幅和电能输出的结论。目前,压电-电磁复合俘能技术仍处于起步阶段,并未出现可应用的产品,仍有许多工作需进行更深入的研究,压电-电磁复合式俘能器主要采用线性振动法进行研究,其最大的弊端就是有效俘能带宽太窄,工作频率单一,非线性俘能技术可有效提高俘能带宽,并实现工作频率的调节。

1 结构设计

本文将压电-电磁复合式俘能器的结构进行了改进,在振动磁铁的上、下两侧分别再固定一个磁铁,利用磁铁间相互作用的非线性磁力来改善俘能器的性能。对于本系统而言,非线性磁力的主要作用是用来改变俘能器的谐振频率与带宽,以适应不同的工作环境的要求^[6-10]。

非线性压电-电磁复合式俘能器的结构示意图如图 1 所示。

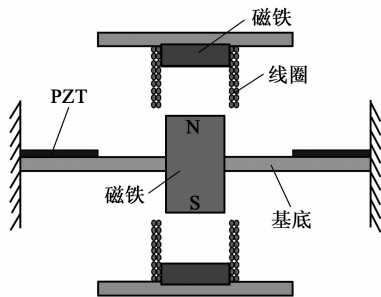


图 1 非线性压电-电磁复合式俘能器示意图

由图 1 可知,磁铁位于双端固支梁中心,作为整个俘能系统的质量块通过双端固支梁支撑,并在磁铁中心上、下对称布置两个线圈,压电陶瓷(PZT)层分别粘结在基底梁左、右两侧的上表面。当梁在外界激励下振动时,中间振动磁铁的位置不断变化,此时会在上、下线圈周围产生一个变化的磁场,从而在线圈中产生感应电压,同时梁的振动变形使 PZT 层产生应变,由压电方程可知,此时 PZT 层上、下表面

出现电势差,从而输出电压。在中间磁铁振动的过程中,受到上、下两侧固定磁铁的非线性磁力的作用,而磁铁非线性力的大小与磁铁间的距离相关,距离越近中间振动磁铁受到的非线性作用力越大,通过调节磁铁间距可改变双端固支梁的有效刚度,从而使非线性压电-电磁复合式俘能器的谐振频率发生改变,从而起到调节俘能器谐振频率的作用。

2 理论分析

非线性压电-电磁复合式俘能器所用磁铁为圆柱型,根据文献[11-13],圆柱型磁铁间的作用力为

$$F_m = \frac{3\mu_0 M_1 V_1 \cdot M_0 V_0}{2\pi d^4} \quad (1)$$

式中: $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m 为磁导率; V_1 、 V_0 分别为两磁铁的体积; M_1 、 M_0 分别为两磁铁的磁化强度; d 为磁铁间的静态距离。在设计俘能器时,当上、下磁体相同,且与质量块磁铁的静态距离分别相等时,将式(1)在俘能器的静态位置处泰勒展开($z < d$),忽略三阶以上的高阶项则磁铁间作用力为

$$F_m(z) = k_1 z + k_3 z^3 \quad (2)$$

其中

$$k_1 = -12\mu_0 M_m V_m \frac{M_b V_b}{\pi d^5} \quad (3)$$

式中: z 为俘能器动磁铁的某瞬时振幅; M_m 、 V_m 分别为质量块磁体的磁化强度和体积; M_b 、 V_b 分别为下固定磁体的磁化强度和体积。

$$k_3 = \frac{5}{d^2} k_1 \quad (4)$$

设计的非线性压电-电磁复合式俘能系统等效为含有非线性刚度的质量-弹簧-阻尼振动系统,结合俘能单元的电学方程可得到非线性压电-电磁复合式俘能器的状态方程为

$$m_e \ddot{z}(t) + c_m \dot{z}(t) + kz(t) + F_m(z(t)) + g_e I_{em}(t) + \theta V_p(t) = -m_e \ddot{y}(t) \quad (5)$$

$$\frac{V_p(t)}{R_p} + C_p \dot{V}_p(t) - \theta \ddot{z}(t) = 0 \quad (6)$$

$$L_e \dot{I}_{em}(t) + (R_e + R_m) I_{em}(t) - g_e \dot{z}(t) = 0 \quad (7)$$

式中: $\ddot{y}(t)$ 为激励加速度; m_e 为振动系统的等效质量; c_m 、 k 为振动系统的阻尼系数和线性刚度; R_p 为压电俘能单元的外接负载; C_p 为压电层的等效电容; V_p 为压电俘能单元的输出电压; I_{em} 为电磁俘能单元的输出电流; R_e 为线圈内阻; L_e 为线圈电感; R_m 为电磁俘能单元的外接负载; θ 、 g_e 为压电、电磁传递因子。

当非线性俘能器受到的激励为谐波激励时,在低频振动中,线圈阻抗主要表现为线圈的电阻,线圈电感的作用可忽略不计。当俘能器的输入加速度激励为 $\ddot{y} = -Y \cos(\omega t + \varphi)$, 且令 $\omega_n^2 = \frac{K}{m_e}$, $K = k + k_1$,

$2\zeta\omega_n = \frac{c_m}{m_e}$, $\beta = \frac{g_e}{R_c + R_m}$, $\mu = \frac{1}{R_p C_p}$ 。根据谐波平衡法,考虑弱非线性情况,假定俘能系统的响应主要为单谐波频率,则分析中设俘能器的振动响应、压电俘能单元的输出电压及电磁俘能单元的输出电流分别为

$$z(t) = A_1 \cos \omega t \quad (8)$$

$$V_p(t) = A_2 \cos(\omega t + \varphi_1) \quad (9)$$

$$I_{em}(t) = A_3 \cos(\omega t + \varphi_2) \quad (10)$$

式中: $z(t)$ 为俘能器动磁铁的某瞬时振幅; $V_p(t)$ 为压电俘能单元的瞬时输出电压; $I_{em}(t)$ 为电磁俘能单元的瞬时输出电流。

将式(8)~(10)代入式(5)中,并忽略高阶谐波项可得

$$A_1(\omega_n^2 - \omega^2) \cos \omega t - 2A_1 \zeta \omega_n \omega \sin \omega t + \frac{3k_3 A_1^3}{4m_e} \cos \omega t + \frac{A_2 \theta}{m_e} \cos(\omega t + \varphi_1) + \frac{A_3 g_e}{m_e} \cos(\omega t + \varphi_2) = Y \cos(\omega t + \varphi) \quad (11)$$

使方程两边 $\sin \omega t$ 、 $\cos \omega t$ 的系数分别相等,则

$$A_1(\omega_n^2 - \omega^2) + A_1^3 \frac{3k_3}{4m_e} + A_2 \frac{\theta}{m_e} \cos \varphi_1 + A_3 \frac{g_e}{m_e} \cos \varphi_2 = Y \cos \varphi \quad (12)$$

$$2A_1 \zeta \omega_n \omega + A_2 \frac{\theta}{m_e} \sin \varphi_1 + A_3 \frac{g_e}{m_e} \sin \varphi_2 = Y \sin \varphi \quad (13)$$

将式(11)~(13)代入式(6)中,得

$$z_M^2 = A_1^2 = \frac{Y^2}{\left[(\omega_n^2 - \omega^2) + z_M^2 \frac{3k_3}{4m_e} + \frac{\theta}{m_e} \frac{\theta \omega^2}{C_p(\omega^2 + \mu^2)} \right]^2 + \left[2\zeta \omega_n \omega + \frac{\theta}{m_e} \frac{\mu \theta \omega}{C_p(\omega^2 + \mu^2)} + \frac{g_e}{m_e} \beta \omega \right]^2} \quad (25)$$

在实际计算中,根据设计的俘能器特性参数,利用式(25)可计算得到质量块的振幅值 z_M 。则压电、电磁俘能单元的平均输出功率分别为

$$P_p = \frac{1}{2} \frac{V_p^2}{R_p} = \frac{\theta^2 \omega^2}{2R_p C_p^2 \left[\omega^2 + \left(\frac{1}{R_p C_p} \right)^2 \right]} z_M^2 \quad (26)$$

$$P_{em} = \frac{1}{2} R_m I_{em}^2 = \frac{R_m g_e^2 \omega^2}{2(R_c + R_m)^2} z_M^2 \quad (27)$$

因此,设计的非线性压电-电磁复合式俘能器的总输出平均功率为

$$-A_2 \omega \sin(\omega t + \varphi_1) + \mu A_2 \cos(\omega t + \varphi_1) + \frac{\theta}{C_p} A_1 \omega \sin \omega t = 0 \quad (14)$$

通过方程两边 $\sin \omega t$ 、 $\cos \omega t$ 的系数分别相等得到

$$-A_2 \omega \cos \varphi_1 - \mu A_2 \sin \varphi_1 + \frac{\theta}{C_p} A_1 \omega = 0 \quad (15)$$

$$-A_2 \omega \sin \varphi_1 + \mu A_2 \cos \varphi_1 = 0 \quad (16)$$

$$\sin \varphi_1 = \frac{\mu}{\omega} \cos \varphi_1 \quad (17)$$

$$\cos \varphi_1 = \frac{\theta \omega^2}{C_p(\omega^2 + \mu^2)} \frac{A_1}{A_2} \quad (18)$$

将式(17)、(18)分别平方后相加可得

$$A_2 = \frac{\theta \omega}{C_p \sqrt{\omega^2 + \mu^2}} A_1 \quad (19)$$

利用同样的方法将式(8)~(10)代入式(7)中可得

$$\cos \varphi_2 = 0 \quad (20)$$

$$\sin \varphi_2 = \frac{A_1}{A_3} \beta \omega \quad (21)$$

$$A_3 = A_1 \beta \omega \quad (22)$$

将式(19)、(22)代入式(12)、(13)中可得

$$A_1(\omega_n^2 - \omega^2) + A_1^3 \frac{3k_3}{4m_e} + A_1 \frac{\theta}{m_e} \cdot \frac{\theta \omega^2}{C_p(\omega^2 + \mu^2)} = Y \cos \varphi \quad (23)$$

$$2A_1 \zeta \omega_n \omega + A_1 \frac{\theta}{m_e} \frac{\mu \theta \omega}{C_p(\omega^2 + \mu^2)} + A_1 \frac{g_e}{m_e} \beta \omega = Y \sin \varphi \quad (24)$$

式(23)、(24)分别平方后相加,则得到俘能器质量块振幅为

$$P = P_p + P_{em} = \left\{ \frac{\theta^2 \omega^2}{2R_p C_p \left[\omega^2 + \left(\frac{1}{R_p C_p} \right)^2 \right]} + \frac{g_e^2 \omega^2}{2R_m (R_c + R_m)^2} \right\} z_M^2 \quad (28)$$

由前面理论分析可知,磁铁间非线性磁力的存在,会改变俘能器的工作频率带宽及输出功率,而影响磁铁间磁力的因素主要有磁铁间的距离、磁铁磁极间的对应形式(吸力、斥力)等。

3 俘能性能测试

制作的非线性压电-电磁复合式俘能器样机如图2所示。

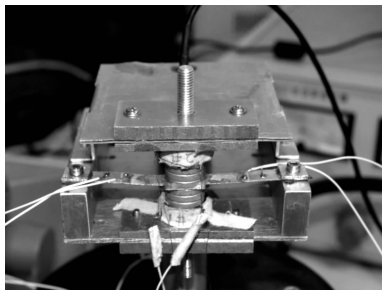


图2 非线性压电-电磁复合式俘能器样机

由式(25)分析可知,当两磁铁间的非线性力表现为吸引力时,固支梁的有效刚度减小,谐振频率降低,3 dB带宽增大。磁铁间引力大小的变化会引起固支梁刚度的变化,复合式俘能器的输出性能也会发生变化,下文对此进行了实验测试。磁铁间的引力通过改变磁铁间的间距进行调节。

在0.6 g简谐激励下,分别对磁铁间距为2.5 mm,3 mm,4 mm时,非线性压电-电磁复合式俘能器的输出性能进行了实验测试。实验测得磁铁间距为2.5 mm时,俘能器谐振频率为39.3 Hz,压电单元最佳负载为220 k Ω ,电磁单元最佳负载18 Ω ,3 dB带宽为7.5 Hz;磁铁间距为3 mm时,俘能器谐振频率为50 Hz,压电单元最佳负载为203 k Ω ,电磁单元最佳负载为18 Ω ,3 dB带宽为5.5 Hz;磁铁间距为4 mm时,俘能器谐振频率为69 Hz,压电单元最佳负载为195 k Ω ,电磁单元最佳负载18 Ω ,3 dB带宽为4.5 Hz。

图3、4磁铁间作用力为引力时,不同磁铁间距下压电单元输出电压、功率与激励频率间的关系,分析可知,随着磁铁间距的减小,磁铁间的非线性作用力增大,谐振频率降低,工作带宽增大,压电单元内部阻抗变大,输出电压基本不变,最佳负载下输出功率变小。

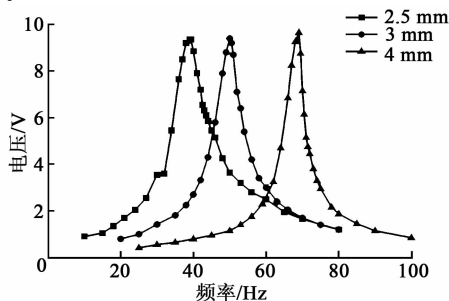


图3 压电单元输出电压对比

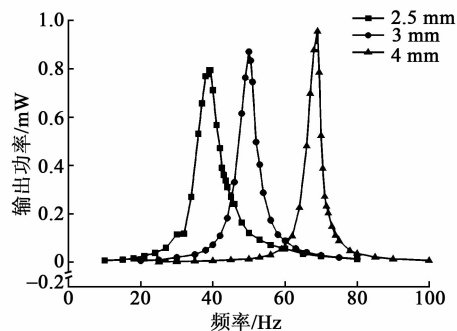


图4 压电单元输出功率对比

不同磁铁间距、激励频率与电磁单元输出电压、功率间的关系如图5、6所示,随着磁铁间距变小,磁铁间的非线性作用力增大,谐振频率降低,工作带宽增大,电磁单元输出电压减小,内阻保持不变,最佳负载下输出功率减小。

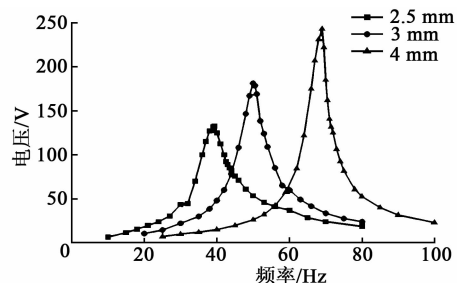


图5 电磁单元输出电压对比

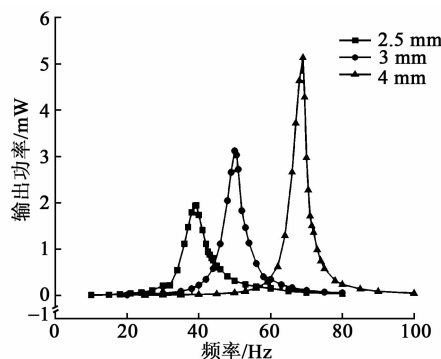


图6 电磁单元输出功率对比

图7为不同磁铁间距,激励频率与非线性压电-

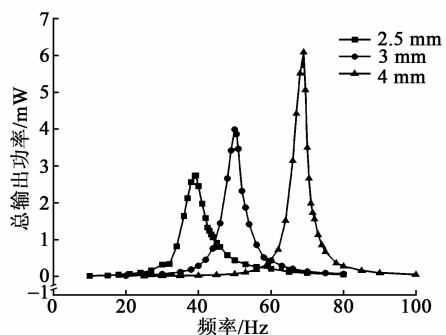


图7 总输出功率对比

电磁复合式俘能器总输出功率之间的关系,在磁铁引力作用下,随着磁铁间距变小,非线性俘能器谐振频率降低,工作带宽增大,总输出功率减小。

4 结束语

综上所述,当磁铁间非线性磁力表现为引力时,随着磁铁间距的减小,引力增大,非线性俘能器的谐振频率降低,3 dB 带宽升高,系统总输出功率减小,压电单元最佳负载值增大,电磁单元最佳负载值基本保持不变。因此,在设计非线性压电-电磁复合式俘能器时要注意磁铁间距对俘能器工作带宽及输出功率的影响,应选择合适的间距,使俘能器的工作频率、带宽、输出功率符合工作要求。

参考文献:

- [1] KHALIGH A, ZENG P, WU X, et al. A hybrid energy scavenging topology for human-powered mobile electronics [C]//S. I.: Industrial Electronics, 2008. IECON 2008. 34th Annual Conference of IEEE, 2008; 448-453.
- [2] COTTONE F, VOCCA H, GAMMAITONI L. Nonlinear energy harvesting [J]. Phys Rev Lett, 2009, 102 (8): 080601-4.
- [3] GAMMAITONIL, NERI I, VOCCA H. Nonlinear oscillators for vibration energy harvesting [J]. Appl Phys Lett, 2009, 94(16): 164102-3.
- [4] STANTON SC, MCGEEHEE C C, MANN B P. Nonlinear dynamics for broadband energy harvesting: Investigation of a bistable piezoelectric inertial generator [J]. Physica D: Nonlinear Phenomena, 2010, 239 (10): 640-653.
- [5] FERRARI M, FERRARI V, GUIZZETTI M, et al. Improved energy harvesting from wideband vibrations by nonlinear piezoelectric converters [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2010, 162(2): 425-431.
- [6] CHALLA V R, PRASAD M G, SHI Y, ET AL. A vibration energy harvesting device with bidirectional resonance frequency tunability [J]. Smart Materials and Structures, 2008, 17(1): 015035.
- [7] LIN J T, LEE B, ALPHENAAR B. The magnetic coupling of a piezoelectric cantilever for enhanced energy harvesting efficiency [J]. Smart Materials and Structures, 2010, 19(4): 045012.
- [8] ZORLU, TOPAL E T, KÜLAH H. A vibration-based electromagnetic energy harvester using mechanical frequency up-conversion method [J]. IEEE Sensors Journal, 2011, 11(2): 481-488.
- [9] TANG Q C, YANG Y L, LI X X. Bi-stable frequency up-conversion piezoelectric energy harvester driven by non-contact magnetic repulsion [J]. Smart Materials and Structures, 2011, 20(12): 125011.
- [10] ZHOU S, CAO J, ERTURK A, et al. Enhanced broadband piezoelectric energy harvesting using rotatable magnets [J]. Applied Physics Letters, 2013, 102(17): 173901.
- [11] COTTONE F, VOCCA H, GAMMAITONI L. Nonlinear energy harvesting [J]. Physical Review Letters, 2009, 102(8): 080601.
- [12] ANDÒ B, BAGLIO S, TRIGONA C, et al. Nonlinear mechanism in MEMS devices for energy harvesting applications [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2010, 20(12): 125020.
- [13] YANG Y W, ZHAO L, TANG L H. Comparative study of tip cross-sections for efficient galloping energy harvesting [J]. Applied Physics Letters, 2013, 102(6): 064105.

《压电与声光》广告免费咨询卡

姓名: _____ 职务: _____ 职称: _____ 单位: _____

地址: _____ 邮编: _____ 电话: _____

您对本刊 _____ 年 _____ 期的 ☐ 彩色 ☐ 黑白 ☐ 刊花广告

_____ 公司(厂家) _____ 产品/技术感兴趣

希望: ☐ 索取公司资料 ☐ 索取产品资料 ☐ 询问价格 ☐ 建立业务联系 ☐ 其他 _____

请将卡片寄往(或传真):《压电与声光》编辑部 读者服务部

通讯地址:重庆南坪 2513 信箱(400060) 电话:023-62919570 传真:023-62805284

复印有效