

自适应宽频振动压电电磁复合发电系统分析

杜小振,张龙波,朱文斗,张燕

(山东科技大学机械电子工程学院,山东青岛266590)

摘要:为提高微型环境振动能量收集微电源能量转换效率,采用一对磁极产生的磁力自动调节拾振系统刚度,实现系统固有频率与环境振动频率相匹配的自适应压电电磁复合宽频发电系统,同时增强电磁发电系统磁力线密度。该文研究了系统磁力对压电悬臂梁刚度的影响因素,确立自适应宽频系统的理论模型。压电电磁宽频发电数值计算结果表明,未施加磁力调节时,环境振动频率偏离系统固有频率47 Hz时输出功率急剧降低;施加自适应磁力调节后,发电系统可调固有频率范围为42~51 Hz,最大输出功率范围6~10 mW,拓宽拾振频带。

关键词:压电发电;电磁发电;磁力调节;宽频;微电源

中图分类号:TN712.5;TM91 **文献标识码:**A

Analysis of Self-Adaptive Hybrid Broadband Piezoelectric-Electromagnetic Power Generation System

DU Xiaozhen, ZHANG Longbo, ZHU Wendou, ZHANG Yan

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: The cantilever stiffness will automatically adjust with the magnetic force from a pair of permanent magnets to adapt the environment vibration frequency. The new micro hybrid energy harvesting generator will extend the bandwidth and improve the energy conversion efficiency. At the same time, the pair of permanent magnets can enhance the magnetic flux density for the electromagnetic power system. The theoretical model of adaptive broadband system is established and the effect of the magnetic force of the system on the piezoelectric cantilever stiffness is studied. The numerical calculation results show that the output power drops tremendously without applying the magnetic adjustment when the environment vibration frequency shifts away from 47 Hz of the natural frequency of harvesting system. However, the resonance frequency expands from 42 Hz to 51 Hz with the magnetic adjustment. Meanwhile, the output power maintains the higher value of 6~10 mW.

Key words: piezoelectric power generation; electromagnetic power generation; magnetic force tuning; broadband; micro power

0 引言

随着微机电系统(MEMS)快速微型化、集成化发展,体积小、结构复杂、植入式的微机电系统的电源微型化成为突出技术难点^[1]。收集环境中普遍存在的振动能为MEMS供能成为近年来国内外学者研究的热点^[2]。振动能转换为电能的形式主要有静电式、压电式、电磁式和复合式等^[3-6]。复合式能量收集技术能量密度高、适应广, Jiankang Huang等^[7]将压电材料嵌入两层磁致伸缩材料中间组成三明治型磁场感应器,当外磁场驱动时,磁致伸缩层伸

长(或缩短)驱使压电层发生形变进而输出电能。王红艳^[8]分析了压电悬臂梁和质量块及自身阻尼比对压电电磁复合俘能器谐振频率和输出功率的关系。Mohd Fauzi, Ab Rahman等^[9]改进了压电电磁复合能量收集系统的电磁发电部分,采用在四极磁铁中间嵌入线圈结构提高了能量转换率。

传统振动能量收集系统在环境振动源频率偏离其固有频率时,输出功率大幅度降低。为了提高环境随机振动条件下的输出功率,需拓宽能量收集系统的工作频带。Lallart M等^[10]采用致动器调节悬

收稿日期:2015-10-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51105234);中国博士后科学基金资助项目(2015M582113);山东省科技发展计划基金资助项目(2013YD04018);青岛市黄岛区科技项目小微企业发展和孵化器专项基金资助项目(2014-1-107)和应用研究与公共卫生专项基金资助项目(2014-1-42);山东省高等学校优秀中青年骨干教师国际合作培养基金资助项目;青岛市博士后基金资助项目

作者简介:杜小振(1978-),男,河南邓州人,副教授,博士,主要从事微电源、海洋能发电和传感器技术等研究。E-mail: du_xzh@163.com。

臂梁固有频率实现拓宽谐振频带,但因需辅助电能而缺乏实用性。Li等^[11]提出一种基于柔性梁的指状组合型悬臂梁阵列结构,优化每根悬臂梁的尺寸适应多个环境振动频率,实现宽频俘能,相对于单梁拾振能量密度较低。Challa等^[12]调节磁铁间磁力以改变悬臂梁固有频率,实现单梁宽频激振。本文依据磁力调节来研究压电电磁复合宽频发电,实现宽、低频能量收集技术,有效提高了环境振动能量收集系统的输出功率。

1 发电系统模型结构及其工作原理

自适应宽频振动压电电磁复合发电系统模型结构如图1所示。铜基双面压电悬臂结构采用有机玻璃夹板固定,可沿螺杆上下移动;压电悬臂梁自由端固定一对圆柱磁铁质量块,在其上、下正对位置各放一块圆柱磁铁,上对磁铁产生吸引力,下对磁铁产生排斥力;平面线圈固定在有机玻璃基座的上、下两面。其工作原理是当受到外界振动源的激励时,压电悬臂梁做上下简谐运动,驱动粘贴在铜基板上的压电片发生形变,根据正压电效应,压电片上、下表面将聚集正、负相反自由电荷,与外接电路联接产生输出电流。同时,自由端磁铁与平面线圈作相对运动,穿过平面线圈的磁通量发生变化,根据法拉第电磁感应定律,平面线圈内产生感应电流。当外界振动源的频率低于压电悬臂梁固有频率时,往上调节压电悬臂梁(吸引力会减小悬臂梁的刚度,降低固有频率);当外界振动源的频率高于压电悬臂梁固有频率时,往下调节压电悬臂梁(排斥力会增大悬臂梁的刚度,提高固有频率),从而形成自适应宽频振动压电电磁复合发电系统。

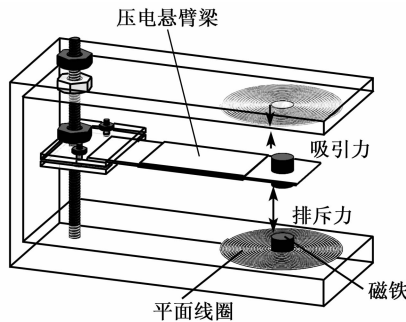


图1 自适应宽频振动压电电磁复合发电系统示意图

2 自适应磁力调节理论

2.1 磁力对压电悬臂梁固有频率的影响

圆柱磁铁与压电悬臂梁自由端磁铁之间的磁力^[12]为

$$F_{\text{mag}}(d) = \left[\frac{B_r^2 S_m^2 (h_m + r_m)^2}{\pi \mu_0 h_m^2} \right] \times \left[\frac{1}{d^2} + \frac{1}{(d + 2h_m)^2} - \frac{2}{(d + h_m)^2} \right] \quad (1)$$

式中: d 为磁铁间的相对距离; B_r 为剩余磁通密度; S_m 为磁铁间的相对面积; r_m 为磁铁半径; h_m 为磁铁高度; μ_0 为中介质磁导率。

当施加磁力时,悬臂梁谐振刚度改变,且磁力产生的磁刚度为

$$K_{\text{mag}} = \pm \frac{\delta F_{\text{mag}}}{\delta d} \quad (2)$$

式(2)中,当对压电悬臂梁施加吸引力时,磁铁间磁力 $K_{\text{mag}} \leq 0$;施加排斥力时, $K_{\text{mag}} \geq 0$ 。

施加磁力调节前,悬臂梁刚度:

$$K = \frac{3EI}{L^3} = \frac{Ebh^3}{4L^3} \quad (3)$$

式中: E 为杨氏模量; I 为转动惯量; L 为悬臂梁长度; b 为悬臂梁宽度; h 为悬臂梁厚度。

悬臂梁固有频率:

$$\omega_c = \sqrt{\frac{K}{m_e}} \quad (4)$$

式中 m_e 为悬臂梁有效质量(自由端圆柱磁铁的质量加上悬臂梁质量的0.23倍)。

压电悬臂梁分别受到磁场吸力或斥力调节作用时,其有效总刚度相应发生变化,则有

$$K_e = K + K_{\text{mag}} \quad (5)$$

其固有频率为

$$\omega_e = \sqrt{\frac{K_e}{m_e}} \quad (6)$$

2.2 压电发电输出功率分析

当压电悬臂梁受到振动源激励时,在自由端惯性质量块作用下发生弯曲变形,根据压电材料的正压电效应,压电片上、下表面产生的电压^[13]为

$$V_p = \frac{-3d_{31}h_p Eha}{8\epsilon L^2 \zeta \omega_s^2} \quad (7)$$

式中: d_{31} 为压电应变常数; h_p 为压电层厚度; a 为振动源加速度; ϵ 为压电材料介电常数; ζ 为系统总阻尼比; ω_s 为振动源频率(压电悬臂梁共振时, $\omega_s = \omega_e$)。

压电悬臂梁压电层内阻用 R_s 表示,发电系统连接负载电阻(R_L),则压电部分输出功率为

$$P_p = \frac{V_p^2 R_L}{(R_s + R_L)^2} \quad (8)$$

当 $R_L = R_s$ 时,压电发电功率输出最大:

$$P_p = \frac{V_p^2}{4R_L} \quad (9)$$

由式(7)、(9)可得压电发电最大输出功率:

$$P_p = \frac{9}{256} \times \frac{(-d_{31} E h a h_p)^2}{R_L \epsilon^2 L^4 \zeta_i^2 \omega_s^4} \quad (10)$$

2.3 电磁发电输出功率分析

圆柱磁铁随着悬臂梁振动与平面线圈作相对运动,如图2所示。根据法拉第电磁感应定律,平面线圈内穿过的磁通量发生变化时产生感应电流和感应电动势^[14]。图中, $|p|$ 、 $|r|$ 、 B 分别为第*i*匝平面线圈距离中心轴的水平距离,磁铁端面中心与第*i*匝平面线圈的倾斜距离及磁场强度。

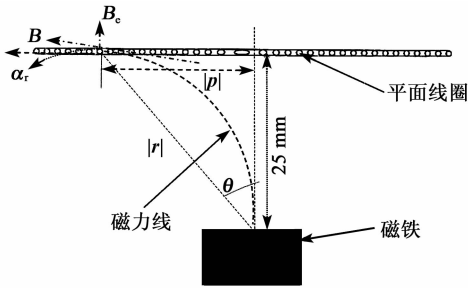


图2 磁铁与平面线圈相对位置关系示意图

初始时刻,上、下圆柱磁铁端面中心与平面感应线圈中心的垂直距离均为25 mm,圆柱磁铁端面中心与第*i*匝平面线圈的倾斜径向矢量为 r ,平面线圈与中心轴的倾斜角为 θ ,单匝平面线圈距离中心轴的水平径向矢量为 p ,垂直于平面线圈上下振动的磁场将形成切割磁感线,有效磁场强度为

$$B_e = \frac{3\mu_1 \mu_r m_o}{4\pi |r|^3} \cos \theta \sin \theta \cdot \alpha_r \quad (11)$$

式中: μ_1 为圆柱磁铁相对磁导率; μ_r 为真空磁导率; m_o 为单位尺寸载流线圈的磁偶极子; α_r 为单位径向矢量。

平面线圈的感应电动势为

$$V_e = \frac{3\mu_1 \mu_r m_o}{4\pi} \sum_{i=1}^n |p_i|^2 \left\{ \frac{z_j (z_i - 15)}{|r|^5} + \frac{z_i z_j [|r| - 5(z_i - 15)^2 / |r|^3]}{|r|^6} \right\} \quad (12)$$

式中: $|p_i|$ 为第*i*匝线圈距离圆柱磁铁中心线的水平距离; z_i 为圆柱磁铁垂直振动位移量; z_j 为圆柱磁铁振动速度。

平面线圈内阻为 R_c ,连接负载电阻 R_e ,则电磁发电功率为

$$P_e = \frac{V_e^2 R_e}{(R_e + R_c)^2} \quad (13)$$

当 $R_e = R_c$ 时,电磁发电输出功率最大:

$$P_e = \frac{V_e^2}{4R_e} \quad (14)$$

由式(12)、(14)可得电磁发电最大输出功率:

$$P_e = \left\{ \left\{ \frac{3\mu_1 \mu_r m_o}{4\pi} \sum_{i=1}^n |p_i|^2 \left\{ \frac{z_j (z_i - 15)}{|r|^5} + \frac{z_i z_j [|r| - 5(z_i - 15)^2 / |r|^3]}{|r|^6} \right\} \right\}^2 \right\} / (4R_e) \quad (15)$$

2.4 自适应宽频振动压电电磁复合发电输出功率分析

自适应宽频振动压电电磁复合发电系统输出总功率等于压电系统和电磁系统输出功率之和。在磁力调节作用下 $\omega_s = \omega_e$,复合发电系统产生最大输出电压和功率分别为

$$V = V_p + V_e = \frac{-3d_{31} h_p E h a}{8\epsilon L^2 \zeta_i \omega_e^2} + \frac{3\mu_1 \mu_r m_o}{4\pi} \sum_{i=1}^n |p_i|^2 \cdot \left\{ \frac{z_j (z_i - 15)}{|r|^5} + \frac{z_i z_j [|r| - 5(z_i - 15)^2 / |r|^3]}{|r|^6} \right\} \quad (16)$$

$$P = P_p + P_e = \frac{V_p^2}{4R_L} + \frac{V_e^2}{4R_e} \quad (17)$$

3 结果与分析

自适应宽频系统理论模型材料特性和几何参数如表1所示。

表1 材料特性和几何参数

铜基悬臂梁长度 L/mm	80
铜基悬臂梁宽度 b/mm	25
铜基悬臂梁厚度 h/mm	0.5
h_p/mm	0.3
m_e/g	26.8
磁铁间相对公共面积 S_m/mm^2	50.24
磁铁高度 h_m/mm	5
磁铁半径 r_m/mm	4
压电应变常数 $d_{31}/(\text{C}/\text{N})$	1.7×10^{-10}
相对介电常数 $\epsilon/(\text{F}/\text{m})$	1.76×10^{-8}
E/Pa	3.81×10^{10}
相对磁导率 μ_1	0.999 9
$\mu_r/(\text{H}/\text{m})$	1.26×10^{-6}
磁偶极子 $m_o/(\text{A} \cdot \text{m}^2)$	6.13×10^{-3}
振动源加速度 $a/(\text{m}/\text{s}^2)$	9.8
磁铁剩余磁通密度 B_r/T	1.1

3.1 磁铁和平面线圈相对位置对有效磁场强度的影响

平面线圈由铜线绕制而成,铜线直径 $\varnothing 0.1 \text{ mm}$,

最内层半径 4 mm,最外层半径 22 mm,每匝线圈间距 1 mm。压电悬臂梁自由端磁铁在激振源驱动下做上、下简谐运动,穿过平面线圈的磁通量会发生变化。由式(11)可得有效磁场强度与磁铁和平面线圈相对位置关系如图 3 所示。

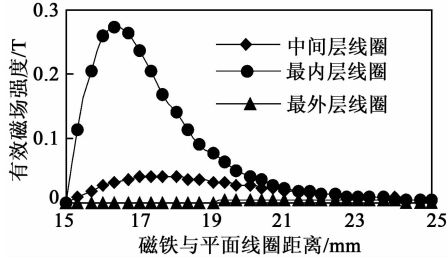


图3 磁铁和平面线圈相对位置与有效磁场强度关系图

随着磁铁与平面线圈相对位置发生变化,穿过平面线圈的有效磁场强度也随之改变。磁铁与最内层线圈距离最近,因此产生的有效磁场强度最强。当磁铁与平面线圈的距离在 15~19 mm 变化时,穿过平面线圈的有效磁场强度最大,产生的感应电动势也最大,因此,尽量设计磁铁在此范围内振动。最外层平面线圈附近的有效磁场强度几乎为 0,产生感应电动势很弱。

3.2 磁力调节对压电悬臂梁固有频率和系统输出功率影响

根据磁力调节技术改变磁铁相对距离,调整压电悬臂梁固有频率匹配环境振动源频率,满足发电系统维持在共振状态下工作。由式(1)~(6)可得磁铁间距与压电悬臂梁固有频率关系如图 4 所示。未施加磁力调节时,压电悬臂梁的固有频率为 47 Hz,此时上、下对磁铁间距均为 20 mm。当对压电悬臂梁施加吸引力时,产生 $K_{\text{mag}} \leq 0$,总体有效刚度减小;施加排斥力时,产生 $K_{\text{mag}} \geq 0$,总体有效刚度增大。因此,在吸引力模式下,调节磁铁间距范围为 20~10 mm,发电系统固有频率调节范围为 47~42 Hz;在排斥力模式下,调节磁铁间距为 20~10 mm,发电系统固有频率调节范围为 47~51 Hz,有效拓宽了 9 Hz 的频带。

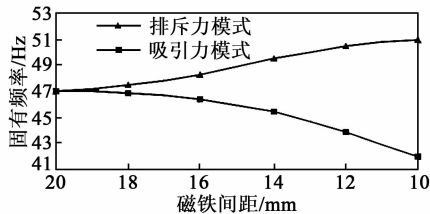


图4 磁铁间距与固有频率关系图

施加磁力调节技术拓宽压电电磁复合发电系统工作频带。取 $R_L = 80 \text{ k}\Omega$, $R_c = 100 \Omega$, 此时,压电电磁复合系统内、外电阻达到阻抗匹配,由式(17)可得磁力调节对发电系统输出功率的影响关系如图 5 所示。

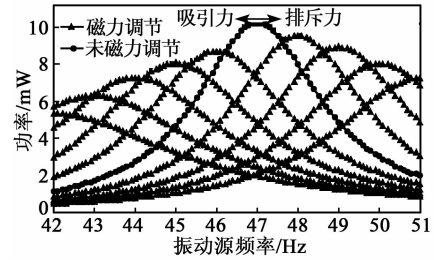


图5 磁力调节与输出功率关系图

未施加磁力调节时,压电悬臂梁的固有频率为 47 Hz。由图 5 可知,发电系统在 $0.1 g$ (g 为重力加速度)的振动源加速度激励下,随着振动源频率的变化,输出功率呈先递增后递减的趋势。当压电悬臂梁固有频率和振动源频率相等时,输出的最大功率为 10 mW。发电系统在达到共振状态时输出功率最大,当振动源频率偏离系统固有频率时,输出功率快速降低。磁力调节影响悬臂梁的刚度,调整系统固有频率使其与环境激振频率相等,该系统显示则随着振动源的频率在 42~51 Hz 间变化。在吸引力模式下,最大输出功率范围为 6~10 mW;在排斥力模式下,最大输出功率范围 7~10 mW,图 5 表明,在变化的振动源频率下,发电系统的输出功率得到显著提升。

4 结束语

本文提出了设计一种自适应宽频振动压电电磁复合发电系统用以收集环境振动动能,施加磁力调节可有效改变发电系统固有频率匹配环境振动频率,使其在共振状态下输出电能。磁铁与平面线圈振动距离在 15~19 mm 输出感应电动势最大;未施加磁力调节时,只在共振状态下发电系统会有功率输出峰值,一旦环境振动频率偏离系统固有频率 47 Hz 时输出功率急剧降低;施加自适应磁力调节后,发电系统固有频率调节范围为 42~51 Hz,最大输出功率范围 6~10 mW。相比未施加磁力调节,对压电悬臂梁施加吸引力、下排斥力,通过改变磁铁之间相对距离,可有效拓宽 9 Hz 的频带,达到宽频发电的效果。

参考文献:

- [1] STEPHEN N G. On energy harvesting from ambient vibration[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, 293(1):409-425.
- [2] TANG G, YANG B, LIU J, et al. Development of high performance piezoelectric d_{33} mode MEMS vibration energy harvester based on PMN-PT single crystal thick film [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2014, 205(7): 150-155.
- [3] ANTON S R, SODANO H A. A review of power harvesting using piezoelectric materials[J]. *Smart materials and Structures*, 2007, 16(3):R1-R21.
- [4] SI H, DONG J, CHEN L, et al. Study of the ambient vibration energy harvesting based on piezoelectric effect[J]. *International Journal of Nanoscience*, 2014, 14(1/2):1460017.
- [5] LU W L, HWANG Y M, PAN C T, et al. Analyses of electromagnetic vibration-based generators fabricated with LTCC multilayer and silver spring-inducer[J]. *Microelectronics Reliability*, 2011, 51(3):610-620.
- [6] YANG B, LEE C, KEE W L, et al. Hybrid energy harvester based on piezoelectric and electromagnetic mechanisms [J]. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2010, 9(2):023002-023002-10.
- [7] HUANG J K, O' HANDLEY R C, BONO D. New high-sensitivity hybrid magnetostrictive/electroactive magnetic field sensors [J]. *Proc Spie*, 2003, 5050: 229-237.
- [8] 王红艳. 梁结构压电及压电电磁复合俘能器模型的建立与实验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2013.
- [9] AB RAHMAN M F, KOK S L, RUSLAN E, et al. Comparison study between four poles and two poles magnets structure in the hybrid vibration energy harvester[C]//Putrajaya, Malaysia: IEEE Student Conference on Research and Development (SCORED), 2013: 227-231.
- [10] 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.
- [11] LI Pengwei, LIU Ying, WANG Yanfen, et al. Low-frequency and wideband vibration energy harvester with flexible frame and interdigital structure[J]. *AIP Advances*, 2015, 5(4):047151.
- [12] 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 and Structures*, 2011, 20(2):025004.
- [13] SHEN D, PARK J H, AJITSARIA J, et al. The design fabrication and evaluation of a MEMS PZT cantilever with an integrated Si proof mass for vibration energy harvesting[J]. *Journal of Micromechanics and Micro-engineering*, 2008, 18(5):055017.
- [14] LU W L, HWANG Y M. Analysis of a vibration-induced micro-generator with a helical micro-spring and induction coil [J]. *Microelectronics Reliability*, 2012, 52(1):262-270.
- (上接第 734 页)
- [3] LÜ C F, YANG J S, WANG J, et al. Power transmission through a hollow cylinder by acoustic waves and piezoelectric transducers with radial polarization [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2009, 325(4): 989-999.
- [4] KLUGE M, BECKER T, SCHALK J, et al. Remote acoustic powering and data transmission for sensors inside of conductive envelopes[J]. *IEEE Sensors*, 2008, 41-44.
- [5] CONNOR D J, CUMMINGS G F, STAR M J. Acoustic transformer with non-piezoelectric core: 5594705 [P]. 1997-01-14.
- [6] MODELING S P. Design and temperature characterization of an ultrasonic through-wall communication system[D]. Troy, New York: Rensselaer Polytechnic Institute, 2010.
- [7] VIVES A A. Piezoelectric transducers and applications [D]. Berlin: Springer, 2004.
- [8] SAITOH S, HONDA H, KANEKO N, et al. The method of determining k_t and Q_m for low Q piezoelectric materials [J]. *Proceedings of the IEEE Symposium on Ultrasonics*, 1985:620-623.
- [9] SHERRIT S, BADESCU M, BAO X, et al. Efficient electromechanical network models for wireless acoustic-electric feed throughs[J]. *Proceedings of the SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2005: 362-372.