

具有力放大功能的压电俘能器多模态俘能性能分析

谢建宏¹, 刘烈鑫², 朱立青¹

(1. 南昌大学 先进制造学院, 江西 南昌 330031;
2. 惠州市德赛西威汽车电子股份有限公司, 广东 惠州 516000)

摘要:为提升压电俘能器的能量转换效率,将压电堆栈耦合到力放大框架结构中,构建了具有力放大功能的压电俘能器。对该力放大框架进行了力学分析及其力放大系数的理论建模,并对框架结构参数进行了 Sobol's 敏感性分析及遗传算法优化。基于最优结构的力放大框架,建立了压电俘能器的集总参数理论模型,对该压电俘能器在非谐振激励下及多模态谐振激励下的俘能性能进行了对比分析。结果表明,该压电俘能器在第三阶和第四阶固有频率激励下的开路输出电压峰值和最大输出功率分别为 55.07 V、124.19 V 和 1.63 W、14.97 W,分别是 10 Hz 非谐振低频激励下的开路输出电压峰值和最大输出功率的 12.9 倍、29.1 倍和 2 999.77 倍、27 550 倍。相较于非谐振激励模式,该压电俘能器在谐振激励频率下工作时的输出电压与输出功率有显著提升。对压电俘能器附加质量块可有效降低其谐振频率并提高输出电压,实现压电俘能器的低频扩展应用。

关键词:压电俘能器;力放大框架;多模态分析;低频扩展应用;遗传算法

中图分类号:TM619;TN384;TN86 **文献标识码:**A

Multi-Modal Energy Harvesting Performance Analysis of Piezoelectric Energy Harvester with Force Amplification Function

XIE Jianhong¹, LIU Liexin², ZHU Liqing¹

(1. School of Advanced Manufacturing, Nanchang University, Nanchang 330031, China;
2. Huizhou Desay SV Automatic Co., Ltd., Huizhou 516000, China)

Abstract: To improve the energy-conversion efficiency of piezoelectric energy harvesters, a piezoelectric stack was intergrated with a force-amplification framework structure to construct a piezoelectric energy harvester featuring force amplification. Mechanical analysis and theoretical modeling of the force amplification coefficient were conducted, and Sobol sensitivity analysis and genetic algorithm optimization were applied to the structural parameters of the framework. Based on the optimal structure of the force-amplification framework, a lumped-parameter theoretical model of the piezoelectric energy harvester was established. The energy-harvesting performance of this energy harvester under non-resonant and multi-modal resonant excitations was compared and analyzed. The research results indicate that the open circuit output voltage peak and maximum output power of the piezoelectric energy harvester at the third and fourth natural frequency excitations are 55.07 V, 124.19 V and 1.63 W, 14.97 W, respectively. These values are 12.9, 29.1, 2 999.77, and 27 550 times greater than the open-circuit output voltage peak and maximum output power under 10 Hz non-resonant low-frequency excitation. Compared to non-resonant excitation, operating the harvester at the resonant excitation frequency significantly increases its output voltage and power. Moreover, the inclusion of mass blocks in energy harvesters effectively reduces their resonant frequency and increases output voltage, thereby enabling low-frequency extension applications for piezoelectric energy harvesters.

Key words: piezoelectric energy harvester; force amplification framework; multi-modal analysis; low frequency extension applications; genetic algorithm

0 引言

压电俘能器是一种基于振动的能量俘获装置,作为一种新兴的可再生能源技术,使小型、低功耗、便携式和远程电子设备实现了自供电,具有巨大的应用潜力,同时可大幅减少碳排放对环境的影响,因此受到学术界和工业界越来越多的关注^[1]。目前,压电俘能器的能量转换效率低是一个亟待解决的问题^[2]。围绕能量转换效率的提升,研究人员从压电材料、俘能结构、转换电路等方面开展了大量研究^[3-5]。机械结构与压电材料的结合往往能提高压电俘能器的输出性能。通常将压电材料耦合到机械结构中,这些机械装置根据能源和具体应用为压电材料提供了一个高效吸收机械能的平台。机械放大结构是一种通过放大输入激励来输出更大的位移、力等物理量的框架结构,可以增强压电俘能器的功率输出。因此,机械结构的设计对压电俘能器的输出性能起决定性作用,机械结构的优化设计对提升压电俘能器的输出性能具有重要的研究意义^[6]。

通过设计不同的结构和采用不同的方法可拓宽压电俘能器的工作频率范围,以匹配环境中较宽的振动频率范围,涵盖从人类运动到飞机结构振动的大部分频率范围^[7]。工作在谐振频率下的压电俘能器一般具有更好的输出性能,为了研究其工作性能,需对压电俘能器进行多模态分析^[8]。但是,压电俘能器的谐振频率相对较高,在实际工程领域中受限,为扩展其在工程领域的低频应用,特别是对自然环境中 100 Hz 以下的低频振动源的应用,对压电俘能器的谐振频率进行低频扩展分析具有重要的研究意义^[9]。

本文将压电材料的 d_{33} 叠层堆栈耦合到力放大框架结构中,构建具有力放大功能的压电俘能器,对其力放大框架进行建模与结构优化。基于最优结构力放大框架,对压电俘能器进行建模与多模态俘能性能分析,并对其谐振频率进行低频扩展分析。

1 力放大框架的建模与结构优化

具有力放大功能的框架结构有多种,其中基于梁桥式框架的应力分布更均匀、安全系数更高,故本文采用梁桥式力放大框架。将 d_{33} 压电堆栈嵌入该框架 x 向两侧边块之间,构建具有力放大功能的压电俘能器,如图 1 所示。当施加 y 向外力于框架

顶部中间块时(底部中间块固定),框架 x 向两侧边块将被拉离或压近中心,从而产生 x 向拉力施加在嵌入式压电堆栈两端。

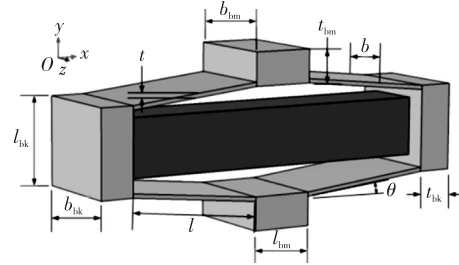


图 1 具有力放大功能的压电俘能器及结构尺寸标注示意图

基于该梁桥式框架结构的双对称性,对该框架结构的 1/4 部分进行力学分析。采用欧拉-伯努利梁理论^[10]分析其侧边块受力、梁受力、梁挠度,得到力放大框架的力放大系数表达式为

$$n = \frac{F_x}{F_y} = \frac{E_p A_p I_{bk} l^2 \sin \theta \cos \theta (12I + Al)}{\alpha - \beta - \gamma - \delta} \quad (1)$$

式中: $\alpha = E_p A_p A I_{bk} l^3 \sin^2 \theta$; $\beta = 12l_p^2 E I A I_{bk}$; $\gamma = 12l^2 E_p A_p I I_{bk} \cos^2 \theta$; $\delta = 4l_{bk}^3 E_p A_p I A$; l 、 A 、 I 分别为梁的长度、横截面积、面积惯性矩; E 为框架材料的弹性杨氏模量; A_p 、 E_p 分别为压电片的横截面积、弹性杨氏模量; l_p 为压电堆栈的长度; l_{bk} 、 I_{bk} 分别为侧边块的长度、面积惯性矩。

由式(1)可知,力放大系数不仅与结构材料的自身属性有关,还与整个框架的几何参数相关,且各参数对框架力放大系数的影响程度不一致。力放大框架设计应优先并着重考虑对力放大系数影响大的参数,运用 Sobol's 敏感性分析方法^[11]对力放大系数随各参数变化的敏感程度进行分析,结果如图 2 所示。由图可看出,框架的力放大系数对梁倾角的变化最敏感,梁厚度、梁长度、侧边块长度和侧边块厚度的变化对力放大系数的影响较大,而梁宽度及堆栈长度的变化对力放大系数影响较小。

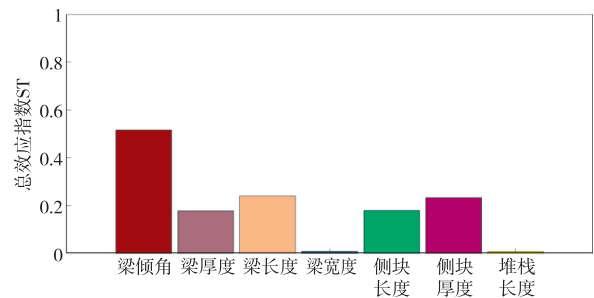


图 2 各几何参数的总效应指数

基于以上分析结果,利用遗传算法结合有限元建模对框架的梁倾角、梁厚度、梁长度、侧边块长度和侧边块厚度参数进行优化,以达到力放大系数的最大化。最终该遗传优化的最优个体力放大系数达到 7.798,相较于优化前的初始框架力放大系数 6.202,提高了约 25.734%^[12]。该最优个体对应的力放大框架各几何参数最优值如表 1 所示。

表 1 力放大框架各几何参数最优值

参数名称	参数值
梁长 l/mm	15.987
梁厚度 t/mm	0.500
梁倾角 $\theta/(\text{°})$	6.004
侧边块长 l_{bk}/mm	9.053
侧边块厚 t_{bk}/mm	2.853

以上力放大框架的力学分析及其力放大系数的理论建模、框架结构参数的 Sobol's 敏感性分析,以及框架结构参数的遗传算法优化具体过程参见文献[12]。

2 基于最优结构力放大框架的压电俘能器建模与非谐振激励下的性能分析

2.1 压电俘能器理论建模

以压电效应本构方程为基础,建立基于最优结构力放大框架的压电俘能器理论模型,该模型可以等效为压电堆-质量-弹簧-阻尼-机电耦合组成的集总参数模型。基于对压电俘能器等效模型的分析,可得该压电俘能器系统的动力学模型与电学模型,具体建模与分析过程参见文献[12]。

采用数值方法对压电俘能器系统的动力学模型与电学模型进行求解,其状态向量形式可写成:

$$\dot{\mathbf{X}} = \begin{Bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \\ \dot{X}_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \dot{x}(t) \\ \ddot{x}(t) \\ \dot{V} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} X_2 \\ \frac{1}{M_{\text{eq}}} [k_s F_{\text{px}} - C_{\text{eq}} X_2 - K_{\text{eq}} X_1 - k_{33} X_3] - \frac{V(t)}{RC_p} - \frac{nM\omega_n^2 d_{33}}{C_p} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

通过龙格-库塔方法可求解式(2)。

2.2 压电俘能器非谐振激励下的性能分析

基于以上最优结构力放大框架的压电俘能器的理论模型,对压电俘能器在非谐振激励下的输出性能进行分析。设置输入的正弦激励幅值为 10 N、频率为 10 Hz,力放大系数取最大值 7.798,采用瑞利-里兹法计算系统的等效质量 $M_{\text{eq}} = 8.96 \times 10^{-3} \text{ kg}$,等效阻尼 $C_{\text{eq}} = 0.025$,等效刚度 $K_{\text{eq}} = 3 \times 10^7$ 。通过数值计算,压电俘能器的开路输出电压及在不同负载下的输出功率分别如图 3-4 所示,其中开路输出电压的峰值为 4.268 V,负载电阻在 8 k Ω 附近时输出功率最大(543.375 μW),故最优结构力放大框架能显著提升压电俘能器在非谐振激励下的输出电压和输出功率^[12]。

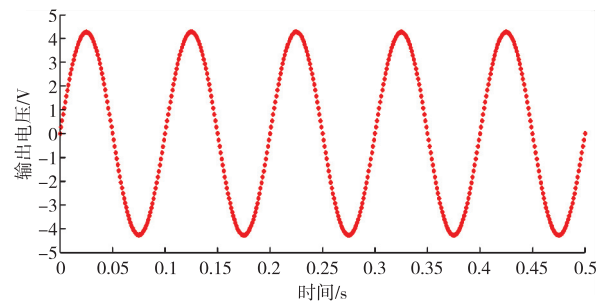


图 3 压电俘能器的开路输出电压

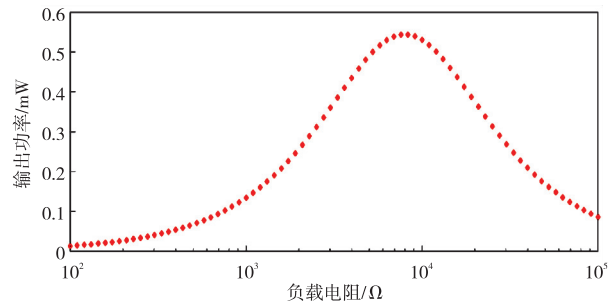


图 4 压电俘能器的输出功率随负载变化

3 压电俘能器多模态俘能性能分析

当压电俘能器工作在谐振频率时,压电堆栈尺寸的变化及弹性效应会影响其等效电容 C_p ,即 C_p 不再是一个静态恒定值,而是一个动态电容,这对压电俘能器的输出电压会产生影响。为研究压电俘能器在谐振频率下的工作性能,对未附加质量块的基础压电俘能器进行多模态俘能性能分析,并分析附加质量对压电俘能器多模态俘能性能的影响。

3.1 基础压电俘能器的多模态俘能性能分析

模态分析是用来研究结构动力特性的方法,通过提取模型的固有频率和模态振型等对模型的固有振动特性进行描述。基于上述最优结构力放大框

架的压电俘能器理论模型,采用有限元仿真方法对该压电俘能器进行多模态分析,可得压电俘能器前 6 阶固有频率分别为 296.81 Hz、513.22 Hz、784.24 Hz、3 092.8 Hz、3 643.1 Hz 和 3 981.2 Hz,各阶固有频率都有其对应的模态振型。

采用频率扫描分析方法对压电俘能器施加幅值为 10 N 的不同频率的正弦激励,得到压电俘能器的开路输出电压,如图 5 所示。由图可看出,压电俘能器开路输出电压出现两个谐振峰,即在激励频率为第三阶固有频率 784.24 Hz 和第四阶固有频率 3 092.8 Hz 附近,压电俘能器产生谐振,压电俘能器的输出电压显著提升。

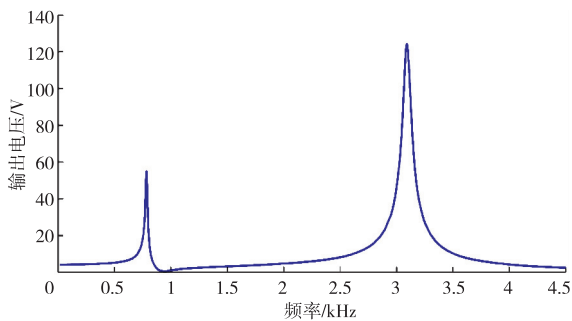


图 5 不同频率激励下压电俘能器的开路输出电压

对输入激励频率分别为 296.81 Hz、513.22 Hz、784.24 Hz、3 092.8 Hz、3 643.1 Hz 和 3 981.2 Hz 的一阶-六阶固有频率进行时域分析,得到压电俘能器在 6 阶固有频率激励下的开路输出电压如图 6 所示。

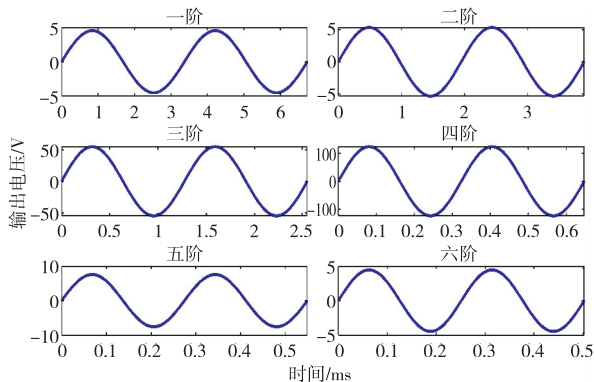


图 6 不同固有频率激励下的压电俘能器开路输出电压

由图 6 可看出,在一阶-六阶固有频率激励下,压电俘能器的开路输出电压峰值均高于上述 10 Hz 非谐振低频激励下的开路输出电压峰值(见图 3)。在第三阶和第四阶固有频率激励下,压电俘能器的开路输出电压峰值分别达到 55.07 V 和 124.19 V,分别是 10 Hz 非谐振低频激励下开路输出电压峰值

4.268 V 的 12.9 倍和 29.1 倍。

综上所述,压电俘能器在第三阶和第四阶固有频率激励下产生谐振,压电俘能器工作在谐振频率下能显著提升其输出电压。

压电俘能器的输出功率不仅与输出电压有关,还受到负载的影响。对一阶-六阶固有频率激励下的压电俘能器进行纯电阻阻抗匹配分析,结果如图 7 所示。由图可看出,与其他固有频率的激励状态相比,第三阶和第四阶固有频率激励下的压电俘能器输出功率较高。在第三阶固有频率激励下,压电俘能器匹配电阻为 252.19 Ω 时输出功率最大(1.63 W),是上述 10 Hz 非谐振低频激励下的最大输出功率 543.375 μ W 的 2 999.77 倍;在第四阶固有频率激励下,压电俘能器匹配电阻为 125.89 Ω 时输出功率最大(14.97 W),是上述 10 Hz 非谐振低频激励下的最大输出功率 543.375 μ W 的 27 550 倍。因此,使压电俘能器在谐振频率下工作且匹配最佳负载电阻可以极大地提升其输出功率。

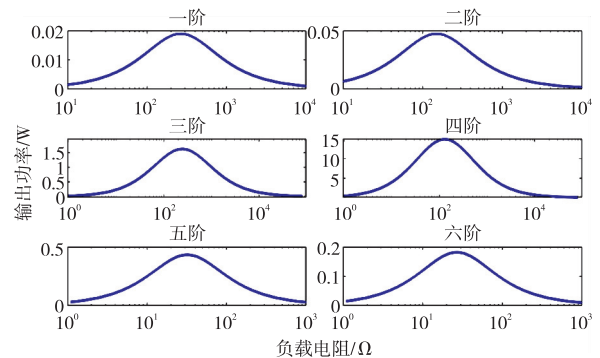


图 7 不同固有频率激励下压电俘能器输出功率随负载电阻的变化

3.2 附加质量对压电俘能器多模态俘能性能的影响

由上述分析可知,压电俘能器的谐振频率相对较高,在实际工程领域应用中受限。为扩展其在工程领域的低频应用,对压电俘能器的谐振频率进行低频扩展分析。

基于结构的固有频率受质量分布的影响,对压电俘能器中间块上端附加不同质量的质量块,采用有限元仿真方法对压电俘能器进行多模态分析,可得压电俘能器的前 6 阶固有频率随附加质量的变化如图 8 所示。由图可看出,压电俘能器的各阶固有频率随附加质量的增加而降低,在附加质量为 200 g 时,压电俘能器的前 6 阶固有频率分别为 74.706 Hz、88.981 Hz、237.66 Hz、620.22 Hz、951.04 Hz 和

1 049.4 Hz,相较于无附加质量的压电俘能器,前6阶固有频率分别降低了222.11 Hz、424.24 Hz、546.58 Hz、2 472.6 Hz、2 692.1 Hz和2 931.8 Hz,这表明附加质量块能有效降低压电俘能器的固有频率,调整附加质量块的质量可使压电俘能器的固有频率达到预期值。

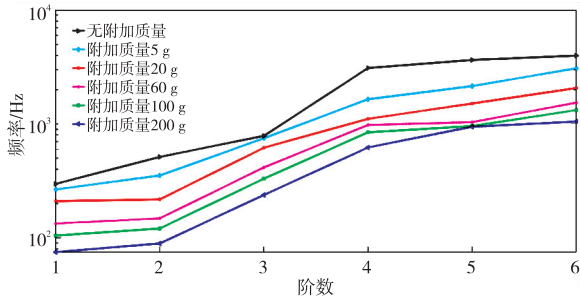


图8 不同附加质量下压电俘能的前6阶固有频率

对附加不同质量的压电俘能器分别施加幅值为10 N的不同频率的激励,得到压电俘能器的开路输出电压如图9-10所示。由图可看出,有、无附加质量的压电俘能器开路输出电压均有两个谐振峰,且两个谐振峰均随附加质量的增大而左移,但第一个谐振峰幅值随附加质量的增大而增大,而第二个谐振峰幅值随附加质量的增大而减小。故通过增大附加质量块的质量,压电俘能器可在更低的谐振频率下输出更高的开路电压。

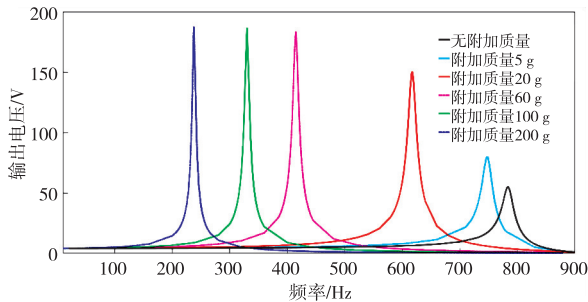


图9 不同附加质量下压电俘能器开路输出电压第一个谐振峰变化情况

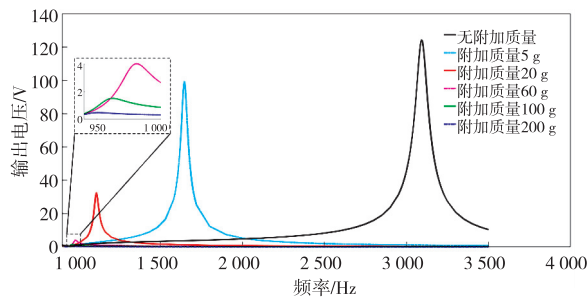


图10 不同附加质量下压电俘能器开路输出电压第二个谐振峰变化情况

对附加质量200 g的压电俘能器进行时域分析,输入激励频率取其前6阶固有频率,得到压电俘能器在一阶-六阶固有频率激励下的开路输出电压,如图11所示。由图可看出,在第三阶固有频率激励下压电俘能器的开路输出电压峰值最大(187.56 V),是上述无附加质量的压电俘能器开路输出电压峰值最大值124.19 V(第四阶固有频率激励下)的1.51倍。

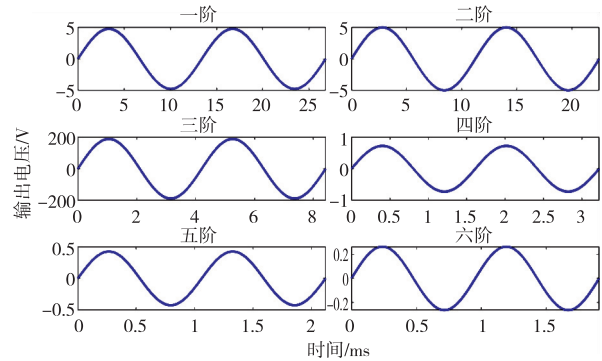


图11 附加质量200 g时不同固有频率激励下的压电俘能器开路输出电压

分别在一阶-六阶固有频率激励下对附加质量200 g的压电俘能器进行纯电阻阻抗匹配分析,结果如图12所示。由图可看出,在第三阶固有频率激励下,压电俘能器匹配电阻为2 511.9 Ω时输出功率最大(1.76 W),该输出功率高于上述无附加质量块的第三阶固有频率激励下压电俘能器的最大输出功率1.63 W,而谐振频率却由784.24 Hz降至237.66 Hz。

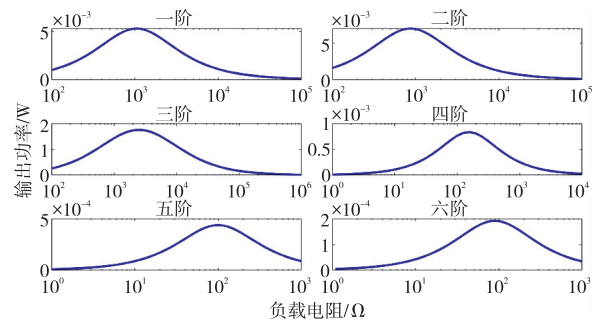


图12 附加质量200 g时不同固有频率激励下的

压电俘能器输出功率随负载电阻的变化

综上所述,对压电俘能器附加质量块可以有效降低压电俘能器的谐振频率,同时提高其输出电压,实现压电俘能器的低频扩展应用。

4 结束语

采用梁桥式力放大框架,将压电堆栈耦合到梁桥式力放大框架结构中,构建了具有力放大功能的

压电俘能器。对该力放大框架进行了力学分析及其力放大系数的理论建模,并对框架结构参数进行了 Sobol's 敏感性分析及遗传算法优化。基于最优结构的力放大框架,对该压电俘能器进行建模与多模态俘能性能分析,并对其谐振频率进行了低频扩展分析。研究表明,相较于非谐振激励模式,该压电俘能器在谐振频率下工作时,其输出电压与输出功率有显著提升。对压电俘能器附加质量块可有效降低压电俘能器的谐振频率,扩展压电俘能器在工程领域的低频应用。

参考文献:

- [1] LIANG Haitong, HAO Guangbo, OLSZEWSKI O Z. A review on vibration-based piezoelectric energy harvesting from the aspect of compliant mechanisms[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2021, 331(1): 1-23.
- [2] WANG Z, HE L, GU X, et al. Rotational energy harvesting systems using piezoelectric materials: A review [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2021, 92(4): 15-25.
- [3] HU G, TANG L, LIANG J, et al. Acoustic-elastic metamaterials and phononic crystals for energy harvesting: A review [J]. *Smart Materials and Structures*, 2021, 30(8): 1-35.
- [4] XI Kaibiao, HOU Yudong, YU Xiaole, et al. Optimizing output power density in lead-free energy-harvesting piezoceramics with an entropy-increasing polymorphic phase transition structure [J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2023, 15(44): 330-338.
- [5] WANG X, XIA Y, SHI G, et al. A self-powered rectifier-less synchronized switch harvesting on inductor interface circuit for piezoelectric energy harvesting [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, 36(8): 9149-9159.
- [6] CHEN X, LI Y. Design, modeling and testing of a vibration absorption device with energy harvesting based on force amplifier and piezoelectric stack [J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 255(3): 53-38.
- [7] AABID A, RAHEMAN M A, IBRAHIM Y E, et al. A systematic review of piezoelectric materials and energy harvesters for industrial applications [J]. *Sensors*, 2021, 21(12): 41-45.
- [8] YU Han, FAN Luning, SHAN Xiaobiao, et al. A novel multimodal piezoelectric energy harvester with rotating-DOF for low-frequency vibration [J]. *Energy Conversion and Management*, 2023, 287(7): 106-116.
- [9] ZHANG Yihe, LEE Aidan, LEE Chulhee. Design and application of piezoelectric and electromagnetic energy harvesters for mechanical energy harvesting in the human-body: A review [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2024, 370(5): 20-26.
- [10] ÖCHSNER A. Classical beam theories of structural mechanics: euler-bernoulli beam theory [M]. Switzerland: Springer Cham, 2021.
- [11] ZHU Qingyu, HAN Qingkai, YANG Xiaodong, et al. Parameter sensitivity analysis of mounting pedestals and multi-objective optimization for a multi-support rigid body system [J]. *Sensors*, 2022, 22(18): 67-74.
- [12] 谢建宏, 刘烈鑫, 朱立青. 具有力放大功能的压电俘能器建模与性能分析 [J]. *压电与声光*, 2024, 46(5): 747-754.
- XIE Jianhong, LIU Liexin, ZHU Liqing. Modeling and performance analysis of piezoelectric energy harvester with force amplification function [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2024, 46(5): 747-754.
- (上接第 949 页)
- [2] 王旭洋. 粘滑压电驱动器的仿生设计与试验研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- [3] 王峥, 卢今伟, 张雪菲, 等. 一种粘滑式直线压电驱动器控制电路设计 [J]. *机电工程技术*, 2022, 51(5): 217-221.
- WANG Zheng, LU Jinwei, ZHANG Xuefei, et al. Design of control circuit for adhesive sliding linear piezoelectric driver [J]. *Mechanical and Electrical Engineering Technology*, 2022, 51(5): 217-221.
- [4] 董宜坤. 粘滑式惯性压电驱动器控制方法研究 [D]. 长春: 长春工业大学, 2023.
- [5] WANG L, WANG H, ZHANG Y, et al. Design and analysis of a micro displacement actuator based on stick-slip principle using piezoelectric ceramic [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2024, 2706: 012067.
- [6] 陈明杨. 一种粘滑式压电驱动器的设计与实验研究 [D]. 广州: 广州大学, 2023.
- [7] 孙靖舒. 基于 DSP 和 FPGA 的通用数字信号处理系统设计 [J]. *电脑知识与技术*, 2020, 16(20): 221-222.
- [8] 牟珊. 基于 DDS 技术的模拟频率调制电路设计及 FPGA 实现 [J]. *无线互联科技*, 2021, 18(10): 52-53.
- [9] 罗辉. 三相中频电压可调精密信号源设计 [D]. 西安: 西安工程大学, 2018.
- [10] 刘静静. 基于 DSP 的数字信号处理系统设计和实现 [J]. *现代制造技术与装备*, 2023, 59(2): 91-93.
- LIU Jingjing. Design and implementation of digital signal processing system based on DSP [J]. *Modern Manufacturing Technology and Equipment*, 2023, 59(2): 91-93.