

树形分叉压电振动俘能结构设计及实验验证^{*}

邓王蒸 秦卫阳[†] 李琦 贺祺钊

(西北工业大学 力学与土木建筑学院,西安 710072)

摘要 对于实际环境中的宽频弱激励振动能量,传统的压电俘能结构效率不高.本文针对这种弱基础激励,为了提高俘能效率,设计了一种树形分叉倒立梁结构,梁的根部粘贴了压电材料,结构在基础激励下可以产生大幅振动与输出.首先分析了结构的振动特性,然后开展了实验研究.由研究结果可以看出,在水平宽频随机激励下,梁的振动可以产生比较大的电能输出.其次,在此基础上对结构进行了改进,在中梁自由端增加了质量块,利用其惯性力激励俘能器产生更大的输出.实验结果表明,改进后的结构在弱随机激励下电能输出可以大幅提高.当激励功率谱密度 PSD 为 $0.045g^2/\text{Hz}$ 时,在尺寸为 $20\text{mm}\times 10\text{mm}\times 2\text{mm}$ 的压电片上,电能输出的 RMS 功率可以达到 $61.72\mu\text{W}$,是未改进结构的 2.32 倍.

关键词 宽频激励, 能量收集, 分叉梁, 压电材料, 输出功率

中图分类号:TH113.1

文献标志码:A

Design of Tree-Like Tri-Fork Piezoelectric Vibration Energy Harvester and Its Validation Experiments^{*}

Deng Wangzheng Qin Weiyang[†] Li Qi He Qizhao

(Department of Engineering Mechanics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract In harvesting wideband and weak vibration energy in practical environments, classical piezoelectric energy harvesters often can't give a high electric output. To overcome this limitation, we introduce a novel design of tree-like tri-fork vibration energy harvester with piezoelectric patches bonded to the clamped end. Under base excitations, the harvester is expected to be able to produce large amplitudes and electric outputs. Firstly, the mathematical model is established, and corresponding simulations are conducted. Then, the prototype was fabricated and validation experiments are carried out. The experimental results prove that under wideband stochastic excitations, the harvester can oscillate with a large amplitude and produce large output. Based on the results, we upgrade the structure by adding a mass on the tip of middle beam, the inertial force produced by the tip mass under excitation can drive the tri-fork beam to generate large vibration and output. Corresponding experiments were carried out to verify the improved structure. The results show that with the change in structure, the electric output increases dramatically for the same excitation intensity. For the stochastic excitation of $\text{PSD}=0.045g^2/\text{Hz}$, across a piezoelectric patch featuring the size of $20\text{mm}\times 10\text{mm}\times 2\text{mm}$, the structure with the middle tip mass can produce an output of RMS power of $61.72\mu\text{W}$, about 2.32 times that without the tip mass.

Key words wideband excitation, energy harvesting, tri-fork beam, piezoelectric material, output power

引言

物联网(IoT)的实现,要求建立由大量无线节点传感器组成的传感器网络.对于每个微型无线传感器,需要一种稳定、廉价、绿色的能源,以保证其不间断地工作.针对这个需求,出现了环境振动能量俘获技术并显示出很好的发展潜力.

振动能量俘获通常采用压电材料与梁结构,这方面的研究出现了很多有实际意义的成果.Reddy等^[1]通过在悬臂梁内部开三角形空腔来提高压电梁的输出电压,实验结果表明带有三角形空腔的压电梁的电压输出提高了108%.Pradeesh等^[2]分析了附加质量的大小、形状、位置、尺寸等对于压电悬臂梁俘能效率的影响.Yang等^[3]提出了一种弧形压电悬臂梁俘能器,其固定端为一段弧形压电梁.实验结果显示弧形压电梁产生的输出功率可以达到直形梁的4.25倍.Li等^[4]在梁上开了不同形状与长度的槽,然后用转轴将其连接起来.这种带转轴的压电梁的输出功率是原来压电梁的7.3倍.Wang等^[5]设计了一种折线梯形压电梁,用来收集低频的振动能量.实验结果发现这种结构具有较宽的工作频带,最高输出功率可以达到217 μ W.郑友成等^[6]提出了一种具有非对称、变势能阱的三稳态压电振动能量采集器,由一个末端带磁铁的压电悬臂梁以及一对可随弹簧拉伸和压缩而变动的外部磁铁构成.研究发现在低振幅激励下,非对称变势阱比对称势阱有更宽的频带和更高的采集效率.张旭辉等^[7]提出了一种直梁与拱形梁结合的双稳态压电振动俘能结构,研究发现组合其幅频响应存在跳跃、多解现象,结果证明改变磁铁间距及激励幅值可调节不稳定区域范围.Du等^[8]针对旋转激励,从压电梁结构出发,提出了一种屈曲的双稳态俘能器.实验研究表明这种结构在低频范围1.0~9.0Hz范围内,具有很好的输出特性.Huang等^[9]设计了一种L形的自适应压电梁俘能器,实验结果表明这种俘能器可以通过滑块定位自动适应外激励频率,相比传统的L形压电梁,新结构的工作频带是其3.5倍.石朝成等^[10]研究了非线性磁力耦合的双悬臂梁压电振动能量俘能器,通过非线性磁力将两压电悬臂梁连接起来,可以获取两个电压峰值,从而提高了单悬臂梁式俘能器的电压输出性能,同时也拓宽了响应频带.Man等^[11]提出了一种

混合的三稳态压电梁俘能器,他们研究了参数的影响,发现其可以在弱激励下进行阱间运动,从而得到较大的电能输出.Febbo等^[12]设计了一种双梁结构的压电俘能器,并针对其提出了一套建模方法,开展了实验验证,证明了分析与优化方法是正确的.陈丽华等^[13]对微型双稳态板式压电俘能器进行了研究,发现其在不同的激振频率下存在不同的变形状态,且存在多态转换交替出现的现象.Rosso等^[14]设计了一种由磁铁运动驱动悬臂压电梁振动,进而产生输出的俘能器.研究结果表明此结构具有升频功能.陈婷婷等^[15]提出了一种准零刚度驱动式压电振动能量俘能器,可将环境、人体及部分机械设备的低频振动能量高效地转化为电能.当频率为2.5Hz时,准零刚度压电振动能量俘能器中一个能量转化单元的峰值电压达到25V.Fang等^[16]由鸟类的拍动翅膀飞行现象出发,设计了一种模仿这种运动的压电—电磁俘能器.实验结果显示对于低频激励,俘能器的输出可以达到12.2mW.Li等^[17]在一组屈曲梁上,安装了质量块与压电悬臂梁,此结构可以实现多个频率的升频,因此可以提高振动能量的俘能效率.Xiang^[18]研究了摩擦激励下的压电梁俘能效果.研究结果显示,提出的摩擦俘能器可以有效地将摩擦振动转换为电能.He等^[19]提出了一个两自由度的多稳态折梁结构,同时带有位移限制结构.每个梁都可以看成一个带末端质量的悬臂梁结构,压电层粘贴在附属梁上.此结构可以拓宽工作频带,并提高输出峰值.

自然环境中的振动能量,一般振动幅值较小,同时频带较宽,呈现弱随机激励的特点.在这种激励下,传统的俘能器很难在宽频带范围内一直保持大幅的电能输出,因而转换效率需要进一步提高.针对这一问题,本文提出了一种树形分叉的倒立压电梁结构,并对其进行了改进.与传统倒立梁型振动能量俘能器相比,树形分叉结构在受到水平基础激励时,力系简化时会产生一个附加力偶,使得结构产生更大的振幅与变形.因此树形分叉俘能结构在随机弱激励下,能够产生比较大的电压与功率输出.

1 树形分叉压电俘能结构仿真

图1为提出的树形分叉压电俘能结构示意图.该俘能结构由主梁以及靠近主梁自由端左右对称的两根小梁组成.压电片贴于主梁固定端根部.激

励方式为水平方向随机激励。

仿真及实验中采用的梁参数相同,树形分叉梁的材料为不锈钢,厚度为 0.5mm,宽度为 10mm,倒立梁长度为 140mm,两个叉形梁的长度相同,为 60mm;压电材料为 PZT 5H,尺寸为 20mm×10mm×2mm. 对该俘能结构进行模态分析,由于实际环境中的振动频率通常都比较低,所以分析了其前三阶模态,前三阶模态如图 2 所示. 其第 1 阶固有频率为 7.751Hz,第 2 阶为 51.958Hz,第 3 阶为 119.500Hz.

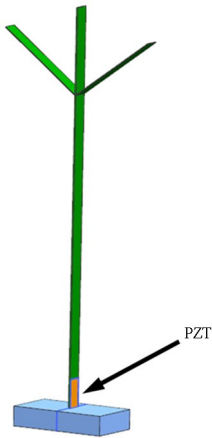
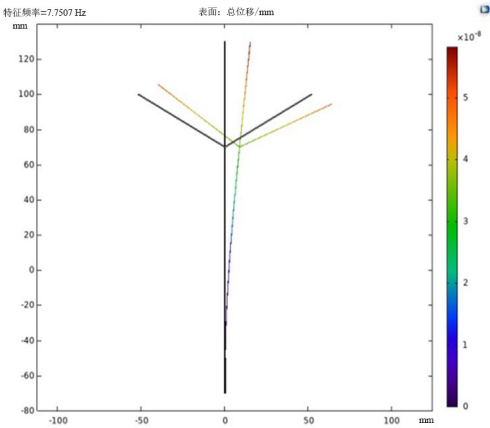
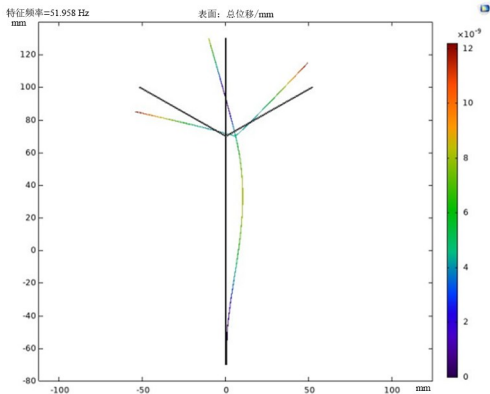


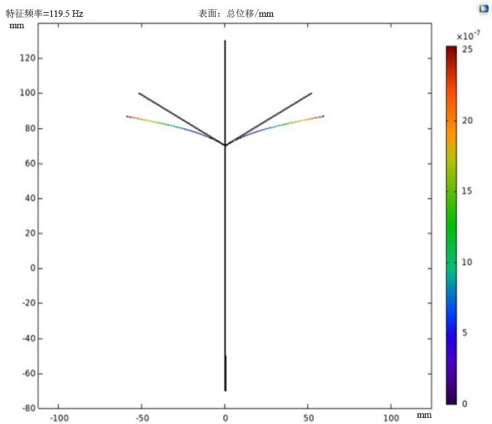
图 1 树形分叉压电俘能结构示意图
Fig. 1 Tree-shaped fork piezoelectric vibration energy harvesting structure



(a) 第1阶振型
(a) The first model shape



(b) 第2阶振型
(b) The second modal shape



(c) 第3阶振型
(c) The third modal shape

图 2 树形分叉压电结构前 3 阶振型
Fig. 2 The first three modes of tree-shaped fork piezoelectric structure

接下来对于建立的模型,进行了仿真计算,分别计算了其在激励功率谱密度 PSD (Power Spectral Density) 为 $0.02g^2/\text{Hz}$ 与 $0.04g^2/\text{Hz}$ 随机激励下的输出电压,分别如图 3 与图 4 所示. $0.02g^2/\text{Hz}$ 激励下电压的均方根值 (Root Mean Square, RMS) $V_{\text{RMS}}=6.3\text{V}$, $0.04g^2/\text{Hz}$ 激励下的 $V_{\text{RMS}}=7.4\text{V}$.

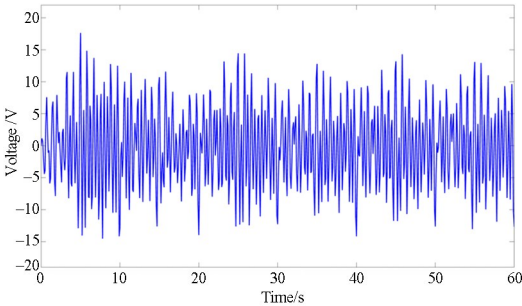


图 3 PSD=0.02g²/Hz 激励下的输出
Fig. 3 The output for PSD=0.02g²/Hz

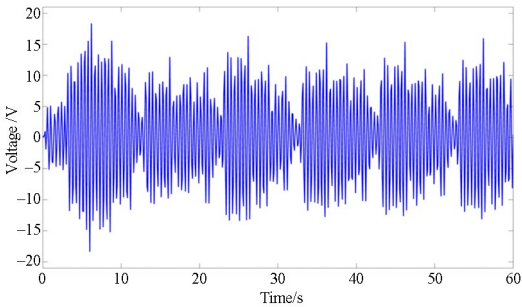


图 4 PSD=0.04g²/Hz 激励下的输出
Fig. 4 The output for PSD=0.04g²/Hz

2 树形分叉结构俘能实验

对于提出的树形分叉压电俘能结构,设计了实验平台,加工了试件,进行了实验研究. 实验装置如

图 5 所示, 树形分叉梁的根部, 用夹具固定在振动台外伸平面上. 在梁的根部, 粘贴了尺寸为 $20 \times 10 \times 2 \text{ mm}^3$ 的 PZT 5H 压电片, 激励由小型振动台 (东菱 ESD-100) 提供, 采用水平激励. 梁的位移采用激光测距仪 (Panasonic HG-C1100) 测量, 采集的电压通过动态应变仪 (东华 DH5922D) 输入到计算机. 为了真实反映结构对于宽频随机激励的能量收集效果, 激励设定为带限白噪声基础激励, 激励的强度逐渐增加, 具体的激励功率谱密度 PSD 分别为 $0.010 \text{ g}^2/\text{Hz}$ 、 $0.015 \text{ g}^2/\text{Hz}$ 、 $0.025 \text{ g}^2/\text{Hz}$ 、 $0.035 \text{ g}^2/\text{Hz}$ 、 $0.040 \text{ g}^2/\text{Hz}$ 、 $0.045 \text{ g}^2/\text{Hz}$, 频带为 $5 \text{ Hz} \sim 55 \text{ Hz}$. 压电片外接电路中, 电阻为 $470 \text{ k}\Omega$.

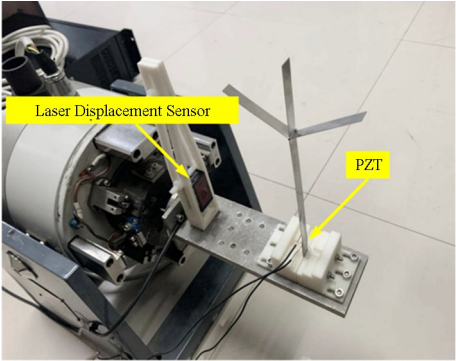


图 5 树形分叉俘能结构试件
Fig. 5 Prototype of tree-shaped fork piezoelectric vibration energy harvesting

实验的结果如图 6 所示, 可以看出, 随着激励强度的增加, 输出的电压幅值也随之增加. 具体地, 在 $\text{PSD} = 0.010 \text{ g}^2/\text{Hz}$ ($a_{\text{RMS}} = 0.548 \text{ g}$), 输出的电压时域信号如图 6(a) 所示, 此时的 $V_{\text{RMS}} = 2.5 \text{ V}$; 当 $\text{PSD} = 0.015 \text{ g}^2/\text{Hz}$ ($a_{\text{RMS}} = 0.671 \text{ g}$) 时, 输出的电压如图 6(b) 所示, 此时的 $V_{\text{RMS}} = 2.80 \text{ V}$; 随着激励进一步增加, 当 $\text{PSD} = 0.025 \text{ g}^2/\text{Hz}$ ($a_{\text{RMS}} = 0.866 \text{ g}$) 时, 俘能结构的输出电压如图 6(c) 所示, 此时的 $V_{\text{RMS}} = 3.14 \text{ V}$; 当 $\text{PSD} = 0.035 \text{ g}^2/\text{Hz}$ ($a_{\text{RMS}} = 1.025 \text{ g}$) 时, 电压的输出入图 6(d) 所示, 此时

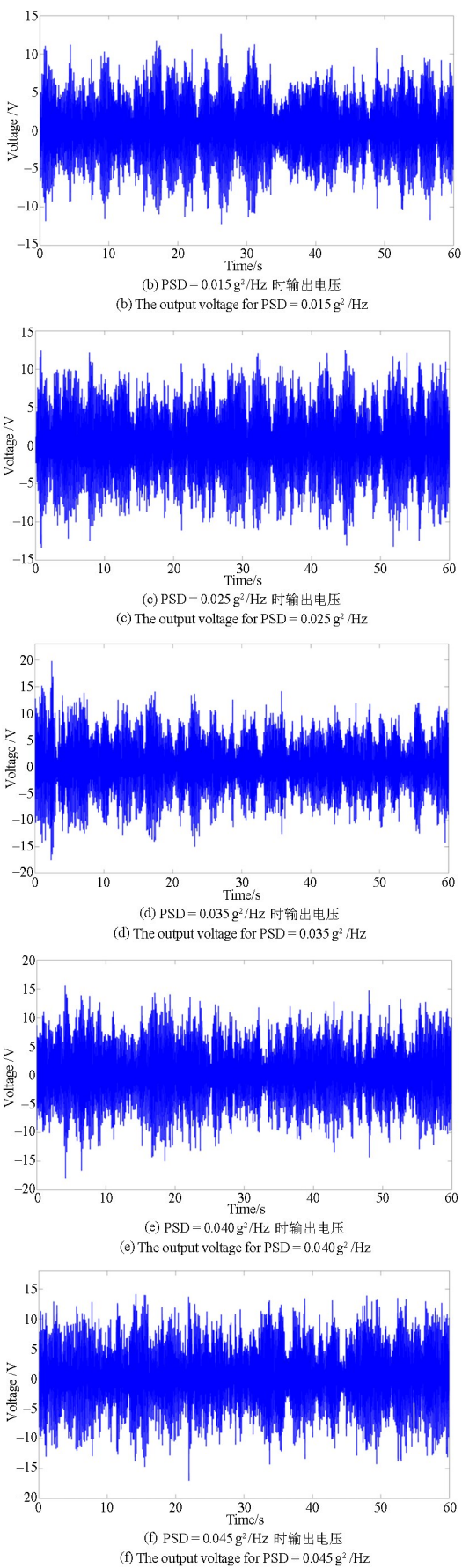
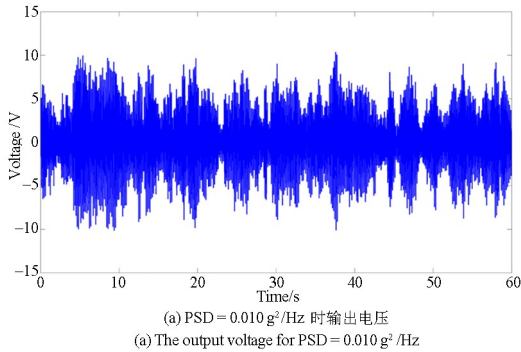


图 6 实验中不同激励强度下树形分叉俘能器输出
Fig. 6 The tree-shaped fork harvester's output voltages for different excitation densities

$V_{RMS}=3.38V$;接着,进一步增大随机激励强度,在 $PSD=0.040g^2/Hz$ ($a_{RMS}=1.095g$) 时,输出的电压如图 6(e) 所示,此时的 $V_{RMS}=3.46V$;最后,当 $PSD=0.045g^2/Hz$ ($a_{RMS}=1.162g$) 时,俘能器输出的电压如图 6(f) 所示, V_{RMS} 达到 $3.54V$.

由于电路中接有一个 $470k\Omega$ 的定值电阻,因此可以得到瞬时的输出功率,对应不同的激励强度,得到的 RMS 输出功率的变化如图 7 所示.可以看出,随着激励强度的增加,输出功率快速增加,在激励强度 $PSD=0.045g^2/Hz$ 时 ($a_{RMS}=1.162g$),输出的 RMS 功率为 $26.6\mu W$.

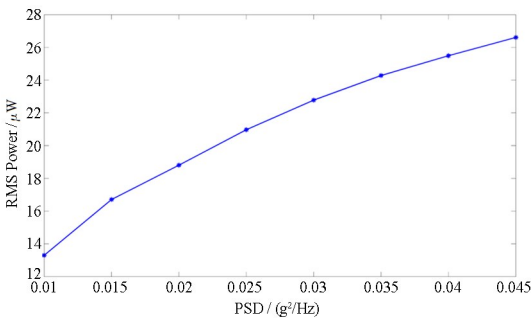


图 7 树形分叉俘能器输出功率随激励强度变化
Fig. 7 The output power of tree-shaped fork harvester versus excitation intensity

3 树形分叉结构改进及实验验证

为了增大树形分叉结构在基础激励下的振动响应,进而输出更大的电压与功率,在分叉结构的中间梁自由端安装了质量块,质量块为 2 块磁铁,每块重 $2.5g$. 这样,在基础激励下,质量块产生的惯性力,会激励结构产生大的振幅与应变,基于压电效应,压电片可以输出更多的电能. 为了验证设计的有效性,对带质量的树形分叉俘能结构进行了验证实验. 实验装置如图 8 所示. 激励仍然采用随机带限白噪声激励,频带宽度为 $5Hz\sim 55Hz$, PSD 为 $0.010g^2/Hz$ 、 $0.015g^2/Hz$ 、 $0.025g^2/Hz$ 、

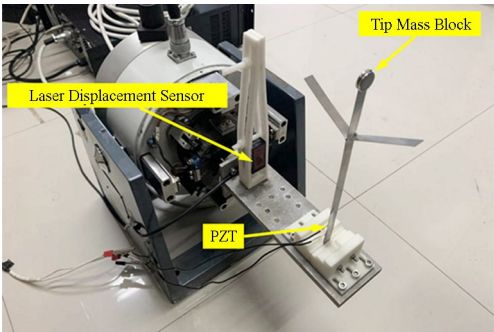
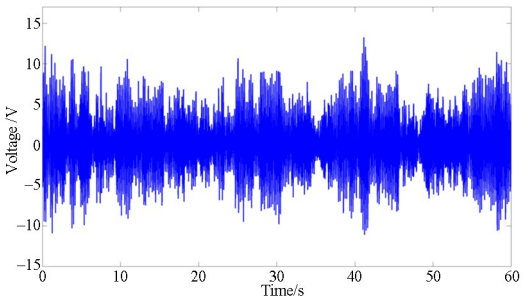


图 8 带质量树形分叉俘能结构实验装置

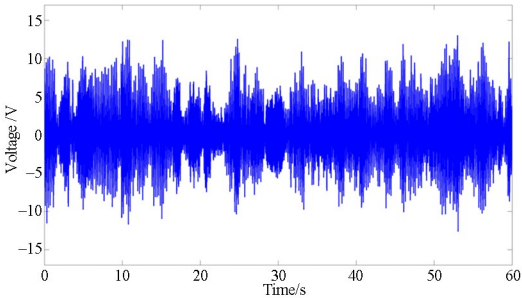
Fig. 8 The prototype of tree-shaped fork harvester with tip mass

$0.035g^2/Hz$ 、 $0.040g^2/Hz$ 、 $0.045g^2/Hz$, 所得的结果如图 9 所示.

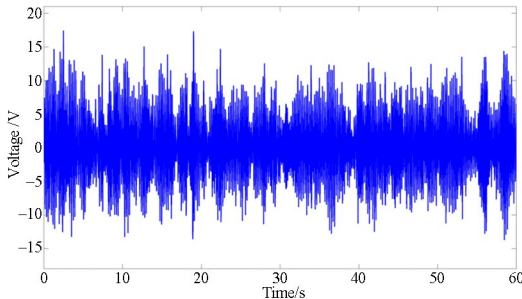
可以看出,随着激励强度的增加,响应中的高电压信号逐渐密集,显示输出的电能不断增加. 在 $PSD=0.010g^2/Hz$ 时,带质量的树形分叉俘能器输出电压如图 9(a) 所示,此时的 $V_{RMS}=3.09V$; 增加激励到 $PSD=0.015g^2/Hz$, 输出的电压如图 9(b) 所示,此时的 V_{RMS} 达到 $3.40V$; 然后,接着增大激励强度,在 $PSD=0.025g^2/Hz$ 时,输出的电压



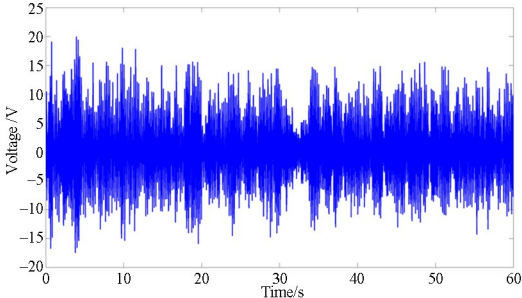
(a) $PSD=0.010g^2/Hz$ 时输出电压
(a) The output voltage for $PSD=0.010g^2/Hz$



(b) $PSD=0.015g^2/Hz$ 时输出电压
(b) The output voltage for $PSD=0.015g^2/Hz$



(c) $PSD=0.025g^2/Hz$ 时输出电压
(c) The output voltage for $PSD=0.025g^2/Hz$



(d) $PSD=0.035g^2/Hz$ 时输出电压
(d) The output voltage for $PSD=0.035g^2/Hz$

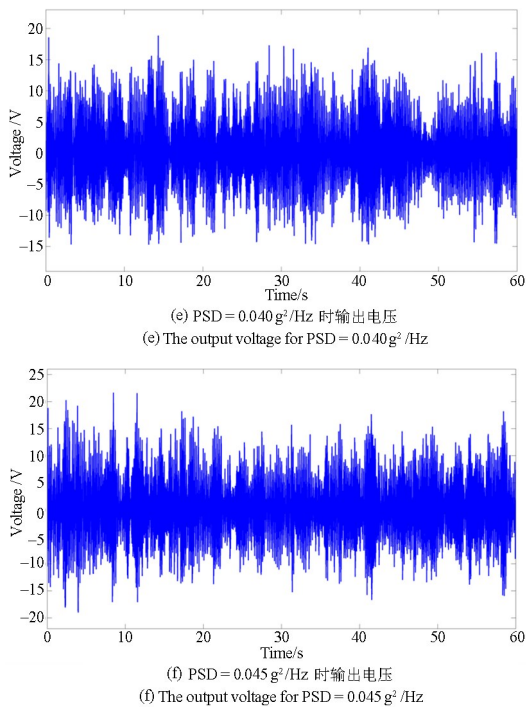


图 9 改进的带质量树形分叉俘能器输出
Fig. 9 The output voltages of the improved tree-shaped fork harvester with tip mass

信号如图 9(c)所示, $V_{\text{RMS}} = 4.08\text{V}$, 可以看出, 电压快速增大; 进一步增大激励, 在 $\text{PSD} = 0.035\text{g}^2/\text{Hz}$ 时, 输出电压如图 9(d)所示, 此时 $V_{\text{RMS}} = 4.69\text{V}$; 此后, 当 PSD 增大到 $0.040\text{g}^2/\text{Hz}$ 时, 电压信号如图 9(e)所示, $V_{\text{RMS}} = 4.69\text{V}$; 最后, 当 PSD 达到 $0.045\text{g}^2/\text{Hz}$ 时, 输出的电压如图 9(f)所示, 此时 V_{RMS} 达到 4.9703V .

由于电路中接有定值电阻, 因此可以得到俘能器的 RMS 输出功率, 如图 10 所示. 可以看出, 改进后的带质量树形分叉俘能器, 随着激励强度的增加, 输出电压快速增大, 因此输出的功率也快速增大, 在 $0.045\text{g}^2/\text{Hz}$ 激励下, 输出的 RMS 功率可以达到 $61.72\mu\text{W}$, 是原树形分叉压电俘能器输出的 2.32 倍.

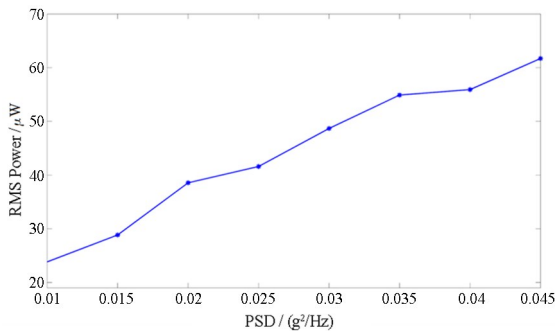


图 10 带质量树形分叉俘能器输出功率随激励强度变化
Fig. 10 The output power of the improved tree-shaped fork harvester versus excitation intensity

为了显示改进后的带质量树形分叉梁结构对随机振动能量的俘能效果, 对于两个俘能器的输出 RMS 电压, 进行了对比, 如图 11 所示. 可以看出, 在各个激励强度下, 改进后的俘能结构输出均有明显提高. 特别是, 随着激励强度的增加, 提高的幅度也越来越明显, 证明了改进设计是有效的.

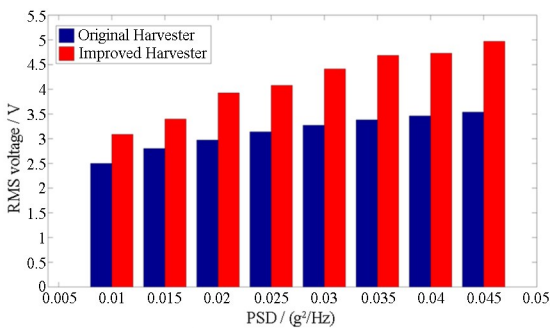


图 11 改进俘能器与原俘能器输出对比
Fig. 11 Comparison between the improved and original tree-shaped fork vibration energy harvester

4 结论

本文针对环境中存在的弱随机宽频基础激励, 设计了一种树形分叉压电俘能结构, 建立了其有限元模型, 并进行了仿真. 为了验证其有效性, 开展了实验研究. 基于实验研究结果, 对树形分叉结构进行了改进, 在中间梁自由端增加末端质量, 形成了带质量的树形分叉俘能器, 对改进的俘能器也进行了实验验证. 由理论分析与实验结果, 可以得到以下结论:

- (1) 树形分叉梁压电俘能结构在弱随机激励下具有有效性;
- (2) 树形分叉俘能结构在宽频弱随机激励下, 可以产生较大的电压与功率输出;
- (3) 改进后的俘能器性能得到很大提高, 宽频弱随机激励下, 可以输出更多的电能. 当激励强度 $\text{PSD} = 0.045\text{g}^2/\text{Hz}$ 时, 改进结构输出的电能 RMS 功率可以达到原结构的 2.32 倍.

参考文献

[1] REDDY A R, UMAPATHY M, EZHILARASI D, et al. Cantilever beam with trapezoidal cavity for improved energy harvesting [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2015, 16(8): 1875—1881.

[2] PRADEESH E L, UDHAYAKUMAR S. Effect of

- placement of piezoelectric material and proof mass on the performance of piezoelectric energy harvester [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 130: 664—676.
- [3] YANG Z B, WANG Y Q, ZUO L, et al. Introducing arc-shaped piezoelectric elements into energy harvesters [J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 148: 260—266.
- [4] LI Z J, YANG Z B, NAGUIB H E. Introducing revolute joints into piezoelectric energy harvesters [J]. *Energy*, 2020, 192: 116604.
- [5] WANG H, LI B, LIU Y, et al. Low-frequency, broadband piezoelectric vibration energy harvester with folded trapezoidal beam [J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2019, 90(3): 035001.
- [6] 郑友成, 朱强国, 刘周龙, 等. 非对称、变势能阱三稳态压电振动能量采集器特性研究[J]. *振动工程学报*, 2023, 36(5): 1280—1291.
- ZHENG Y C, ZHU Q G, LIU Z L, et al. Research on tri-stable piezoelectric vibration energy harvester with asymmetric and time-varying potential wells [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2023, 36(5): 1280—1291. (in Chinese)
- [7] 张旭辉, 汪林, 左萌, 等. 线形—拱形组合梁式压电俘能器振动特性研究[J]. *振动工程学报*, 2021, 34(6): 1207—1214.
- ZHANG X H, WANG L, ZUO M, et al. Vibration performance analysis of piezoelectric energy harvester based on linear-arch composed beam [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2021, 34(6): 1207—1214. (in Chinese)
- [8] DU H F, YANG Z C, ZHOU S X. A piezoelectric buckling beam-type bistable energy harvester under rotational excitations [J]. *Journal of Physics D Applied Physics*, 2023, 56(44): 444002.
- [9] HUANG Y, HU G B, ZHAO C Y, et al. An L-shaped and bending-torsion coupled beam for self-adaptive vibration energy harvesting [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2023, 56(28): 284001.
- [10] 石朝成, 李响, 袁天辰, 等. 双梁磁力压电振动能量采集器的实验和仿真[J]. *动力学与控制学报*, 2017, 15(1): 68—74.
- SHI C C, LI X, YUAN T C, et al. Experimental and numerical research on a double-beam magnetic vibration piezoelectric energy harvester [J]. *Journal of Dynamics and Control*, 2017, 15(1): 68—74. (in Chinese)
- [11] MAN D W, ZHANG Y, XU G Z, et al. Improving energy harvesting from low-frequency excitations by a hybrid tri-stable piezoelectric energy harvester [J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2023, 76: 153—165.
- [12] FEBBO M, PRADO B F A, SMARZARO V C, et al. Multi-beam piezoelectric systems by means of dynamically equivalent stiffness concept [J]. *Smart Material Structures*, 2023, 32(8): 085007.
- [13] 陈丽华, 景浩, 陈坦, 等. 微型双稳态板压电俘能器的仿真研究[J]. *动力学与控制学报*, 2019, 17(6): 537—545.
- CHEN L H, JING H, CHEN T, et al. The simulation of bi-stable micro piezoelectric energy harvesting [J]. *Journal of Dynamics and Control*, 2019, 17(6): 537—545. (in Chinese)
- [14] ROSSO M, KOHTANEN E, CORIGLIANO A, et al. Nonlinear phenomena in magnetic plucking of piezoelectric vibration energy harvesters [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2023, 362: 114667.
- [15] 陈婷婷, 王凯, 成利, 等. 准零刚度驱动式压电低频振动能量采集方法[J]. *力学学报*, 2023, 55(10): 2156—2167.
- CHEN T T, WANG K, CHENG L, et al. Research on quasi-zero-stiffness-enabled piezoelectric low-frequency vibration energy harvesting method [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2023, 55(10): 2156—2167. (in Chinese)
- [16] FANG J W, FAN B, LI C, et al. A piezoelectric - electromagnetic hybrid energy harvester inspired by flapping motion of the Diptera insect [J]. *Smart Materials and Structures*, 2023, 32(10): 105018.
- [17] LI Y, YAN P. A compliant mechanism based piezoelectric beam energy harvester with multi-mode frequency up conversion [J]. *Energy Reports*, 2023, 10: 932—940.
- [18] XIANG Z Y, ZHANG J K, LI S J, et al. Friction-induced vibration energy harvesting via a piezoelectric cantilever vibration energy collector [J]. *Tribology International*, 2023, 189: 108933.
- [19] HE Q K, XU Z L, SUN S Y, et al. A novel two-degree-of-freedom nonlinear piezoelectric energy harvester with a stopper for broadband low-frequency vibration [J]. *AIP Advances*, 2023, 13(8): 085014.