

基于多模态谐振的宽频雨水压电俘能器设计*

李昊^{1)3)#} 周晶晶^{2)#} 孙琪³⁾ 陈文¹⁾³⁾ 周静^{1)3)†}

1) (武汉理工大学三亚科教创新园, 三亚 572024)

2) (阜阳师范大学, 安徽省重点实验室信息功能材料与器件, 阜阳 236000)

3) (武汉理工大学材料科学与工程学院, 武汉 430070)

(2025年2月21日收到; 2025年5月6日收到修改稿)

随着全球对可再生能源需求的持续增长, 雨水资源的开发利用逐渐成为研究热点. 压电俘能技术因其结构简单、能量转换效率高且无需外部电源等优势而备受关注. 然而传统压电俘能器受限于单一谐振频率, 难以适应复杂多变的环境激励. 本研究设计了多种用于雨水能量收集的宽频压电悬臂梁俘能器, 通过理论分析和数值模拟, 对压电悬臂梁的结构参数进行优化. COMSOL 仿真和实验结果表明, U形压电俘能器在拓宽谐振频率范围和延长振荡时间方面显著优于其余俘能器结构设计, 可以实现单次冲击下 23.7 s 的振荡时间、2.82 μC 的电荷俘获及 37.76 W/m^2 的输出功率密度, 展现了其在宽谐振范围下的高效能量俘获能力. 此外, U形设计还可以实现结构防水, 增强了其在雨水环境中的适用性. 本研究为雨水能量收集提供了具有普适性的新方法, 拓展了压电能量俘获技术的应用场景, 为宽频能量收集器的设计及应用提供了理论参考和实践指导.

关键词: 有限元模型, 雨水能量收集, 压电俘能器, 结构设计**PACS:** 77.84.Lf, 47.55.D-, 88.40.fc**DOI:** 10.7498/aps.74.20250213**CSTR:** 32037.14.aps.74.20250213

1 引言

近年来, 人类社会对能源需求的不断增长催生了可再生能源的迅速发展, 水蕴含着多种形式的巨大能量, 如波浪能、潮汐能和水流能等, 是最有前途的可再生能源之一. 雨水分布广泛, 能量丰富, 且不受地理环境的制约, 具有巨大的开发潜力^[1]. 然而由于缺乏有效和经济的能量收集技术, 雨水资源尚未得到充分利用. 当前雨水能量收集的主要方式包括压电技术、电磁发电技术、以及摩擦纳米发电技术等, 其中压电俘能技术 (piezoelectric energy harvesting, PEH) 通过正压电效应, 将雨滴冲

击造成的结构变形转换为电能输出, 是目前最为高效的雨水俘能方案之一^[2-5].

为对雨水能量的高效收集, 俘能器的结构至关重要. 现有压电俘能器主要利用悬臂梁弯曲振动的一阶谐振进行能量收集, 当俘能器与外部能量的频率匹配时进入谐振状态, 可以实现最高的电能输出^[6,7], 然而传统压电俘能器受限于单一谐振频率, 难以有效利用自然降水的多频率能量. Yao 等^[8]用 L 形压电悬臂梁对振动能量收集, 在 0—200 Hz 出现两个压电峰值, 分别产生 6.16 V 和 3.65 V 的电压输出, 拓宽了工作频带. 陈南南^[9]设计的 Z 形多层折叠压电悬臂梁在折叠层数为 7 层时, 以 0.8g 强度激励下, 在 0—40 Hz 的低频范围实现了 4 个

* 海南省自然科学基金创新研究团队项目 (批准号: 524CXTD431)、信息功能材料结构与器件安徽普通高校重点实验室开放课题 (批准号: FMDI202407) 和阜阳师范大学青年人才基金重点项目 (批准号: rcxm202402) 资助的课题.

同等贡献作者.

† 通信作者. E-mail: zhoujing@whut.edu.cn

电压峰值, 峰值电压为 17.7 V, 表现出明显的多模特性. Huang 等^[10] 提出平面式 U 形悬臂梁俘能阵列, 通过调节尖端质量改变阵列中每个悬臂梁的固有频率, 从而实现宽频能量收集. 此外, 还有研究提出添加多个不同尺寸的附加梁^[11]、质量块^[12] 或其他附加组件 (如磁性元件、弹簧)^[13-15] 等多种结构优化策略, 实现了不同程度的俘能效果提升.

但对水滴冲击而言, 过多的额外组件将会显著增大系统质量, 从而减弱悬臂梁的振动效果, 在小冲击力下难以实现较高的电输出. 此外, 用于雨水能量收集的压电材料长期在高湿环境下工作会吸潮进水, 使得材料性能下降, 进而可能导致材料失效. 为提高使用寿命并增强耐用性, 需要对压电材料进行防水封装处理. 封装层能够有效隔绝潮湿环境的影响, 但由于增加了振动阻尼, 显著抑制了压电梁的一阶弯曲振动, 从而降低电输出性能. 在实际应用中, 需要平衡系统防水保护和振动能量转化的需求, 开发兼具防水效果和能量俘获效果的压电俘能器结构.

因此, 本研究通过理论和仿真分析, 系统研究了水滴冲击悬臂梁后的振动特性和能量转换过程. 通过对水滴冲击力与悬臂梁振动响应进行模拟, 设计了多种压电俘能器结构, 分析了不同结构参数对俘能器电输出性能的影响. 基于仿真结果, 制备了具有最优雨水能量收集效果的压电俘能器样品, 并通过对悬臂梁结构的调整, 在实现结构防水的同时, 进一步探索有利于雨水能量俘获效果的结构.

2 研究方法

2.1 俘能器力电耦合理论分析

为分析不同结构的压电俘能器在受到冲击载荷下的振动特性, 本研究设计了三种主要结构模型, 如图 1 所示. 其中图 1(a) 为标准压电悬臂梁, 记为 S1 结构; 图 1(b) 为带有防水封装层的压电悬臂梁, 记为 S2 结构; 图 1(c) 为带有附加梁的 U 形压电悬臂梁, 记为 S3 结构.

采用欧拉-伯努利梁理论, 将 S1 结构压电悬臂梁视为理想状态, 不考虑剪切变形和转动惯量, 也忽略基板与压电材料之间粘合剂的作用, 得到压电悬臂梁的弯曲振动方程为

$$\rho A \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2} + EI \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial x^4} = F(t), \quad (1)$$

式中, ρ 为金属基板的密度, A 为压电悬臂梁的横截面面积, y 为梁的位移, E 为基板的弹性模量, I 为基板的惯性矩. 悬臂梁在受到大小为 F 的冲击载荷后, 其最大尖端位移 δ 为

$$\delta = \frac{FL^3}{3EI}. \quad (2)$$

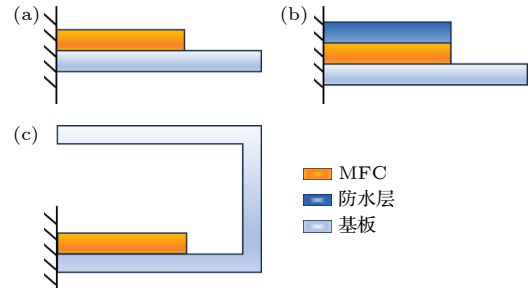


图 1 悬臂梁结构模型 (a) 压电悬臂梁; (b) 封装压电悬臂梁; (c) U 形压电悬臂梁

Fig. 1. Cantilever beam structure models: (a) Piezoelectric cantilever beam; (b) piezoelectric cantilever beam with a waterproof layer; (c) U-shaped piezoelectric cantilever beam.

粘贴在悬臂梁上的压电材料通过正压电效应, 将悬臂梁弯曲振动的机械能转换为电能, 工作模式为 d_{33} 的压电材料在电极面上产生的最大开路电压 V 为

$$V = \frac{g_{33}FL}{A}, \quad (3)$$

式中, L 为压电悬臂梁的长度, g_{33} 为压电材料的电压常数. 对于固定尺寸的压电悬臂梁, 在冲击激励作用下, 最大尖端位移与产生的开路电压均与冲击力 F 成正比.

对于带有防水封装层的 S2 结构, 可以将其简化为等截面的多层梁, 只考虑 y 方向上的变形, 由于多层之间受到相等的应力, 但应变不同, 可以采用等应力串联模型:

$$\frac{1}{E_c} = \frac{\varphi_1}{E_1} + \frac{\varphi_2}{E_2} + \cdots + \frac{\varphi_n}{E_n}, \quad (4)$$

式中, E_c 为复合层的弹性模量, φ_n 代表第 n 层所占体积分数, E_n 代表第 n 层材料的弹性模量, 代入得到:

$$\delta = \frac{4FL^3}{Ah^2} \left(\frac{\varphi_1}{E_1} + \frac{\varphi_2}{E_2} + \cdots + \frac{\varphi_n}{E_n} \right), \quad (5)$$

式中, h 为复合梁的总厚度. 随着封装层厚度增大, 尽管可以起到更优的防护效果, 但整体弹性模量升高, 使得复合梁具有更大的刚度, 导致压电悬臂梁

的尖端位移显著降低, 不利于能量收集. 在实际应用中, 需要控制封装层厚度以平衡防水性和能量收集效率.

而对于具有连续多段悬臂梁的 S3 结构, 利用微分求积法求解振动特性, 在梁长度方向上分别划分 N_1 与 N_2 个节点, 各节点坐标为

$$x_i = \frac{1}{2} \left[1 - \cos \frac{(i-1)\pi}{N_1-1} \right] l_1, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (6)$$

选用拉格朗日插值基函数进行离散, 由插值理论可得

$$f(X) = \sum_{j=1}^N p_{1j}(X) f(x_j). \quad (7)$$

在传统的节点替代法的基础上, 将施加于内部点的边界条件全部改为边界点, 并减少靠近边界点处相应数量内部点的四阶微分控制方程, 得到固有频率 ω , 化简为矩阵形式得到:

$$(K - \omega^2 M)\alpha = 0, \quad (8)$$

式中, $\alpha = [\phi_1(x_{11}), \phi_1(x_{12}), \dots, \phi_1(x_{1N_1}), \phi_2(x_{21}), \phi_2(x_{22}), \dots, \phi_2(x_{2N_2}), \phi(x_{11}), \phi(x_{12}), \dots, \phi(x_{1N_1})]^T$.

对于复杂的多悬臂梁结构, 代数方法难以实现精准求解. 因此本研究使用有限元仿真软件 COMSOL Multiphysics 对 S3 结构的多模态振动特性及其频域响应进行研究. S3 结构的示意图如图 2(a) 所示, 主要由悬臂梁基板与压电片组成,

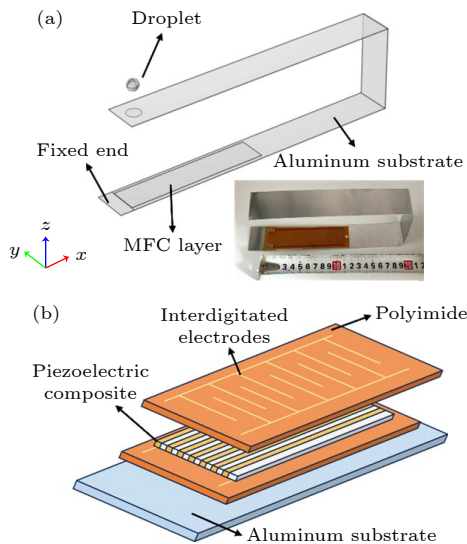


图 2 (a) 压电俘能器模型示意图及实物图; (b) MFC 结构示意图

Fig. 2. (a) Schematic and photo of the energy harvester; (b) schematic of MFC.

压电片粘附在下主梁固定端根部位置. 与传统悬臂梁结构相比, S3 结构增加了多段附加梁, 水滴冲击上附加梁后, 通过连接段带动主悬臂梁产生振动. 上附加梁可以有效阻挡雨水直接冲击, 避免压电片与雨水接触, 从而大大降低了冲击损坏及进水损耗的风险, 提升了系统长期稳定性.

在材料选择方面, 由于水滴冲击力较小, 本研究选用轻质柔性铝板作为悬臂梁基板, 以提高系统的灵敏度和响应能力. 压电片则采用课题组研发的压电纤维复合材料 (macro fiber composite, MFC)^[16-18], 其结构如图 2(b) 所示, 是由压电陶瓷纤维、聚合物基体和叉指电极复合构成的多层智能材料, 交替复合的压电相和聚合物相赋予了 MFC 高压电性和高柔韧性, 从而实现了更高的电输出性能.

2.2 器件制备与平台搭建

本研究使用的 MFC 采用切割填充法制备, 以 PZT-5H 压电陶瓷作为压电相, 环氧树脂 DP 460 作为聚合物相, 并以聚酰亚胺薄膜将两相共同封装于叉指电极中. 在高压极化后得到兼具压电性和柔韧性的 MFC. 根据仿真得到的最佳尺寸参数结果, 以环氧树脂作为粘接剂, 使用真空热压法将 MFC 粘贴至铝基板上, 得到 S1 结构的压电梁. S2 结构以环氧树脂进行额外封装, S3 结构接入铝板作为附加梁. 将得到的压电梁一端进行固定, 得到所需的压电俘能器. 搭建模拟雨水冲击实验平台, 通过不锈钢针头控制水滴的滴出体积, 并调整注射器的高度以改变水滴初速度, 使水滴冲击压电悬臂梁的尖端位置. 使用 7510 型数字万用表对压电俘能器的电输出性能进行测量, 电阻箱并联接入不同的负载电阻 (0.1—10 M Ω), 记录电输出随负载的响应.

3 结果与讨论

3.1 水滴冲击动力学理论分析

压电俘能器依靠雨水冲击进行能量收集, Zhang 等^[19]研究了水滴与固体表面冲击行为以及受力分析, 结果表明, 水滴冲击固体表面的峰值冲击力与润湿性无关, 仅与液滴韦伯数 We 相关:

$$We = \frac{\rho_a v^2 d}{\sigma}, \quad (9)$$

式中, ρ_a 为空气密度, v 为水滴运动速度, d 为水滴

的特征长度, σ 为空气与水之间的表面张力系数. We 越大, 意味着水滴惯性力与表面张力之比越大, 水滴将越难以维持其形状的稳定.

在自然界中, 雨水在下落过程中受到重力作用持续加速, 随着速度增大, 水滴会受到空气阻力的作用, 当重力和空气阻力受力平衡时, 水滴将达到最高下落速度 v_m :

$$mg = \frac{1}{2}C_d\rho_aAv_m^2, \quad (10)$$

式中, m 为水滴质量, g 为重力加速度, C_d 为阻力系数, A 为水滴的迎风面积. 将自然界中雨滴简化为密度为 ρ_w , 直径为 D_0 的球体作为研究对象, 代入 (10) 式中进行计算, 直径为 4 mm 的水滴在受重力和空气阻力平衡时终端速度 v_m 为 9.5 m/s, 达到终端速度所需要的下落高度为 20 m. 而云层高度在 2 km 以上, 因此自然界中雨滴均可以达到最高下落速度, 以雨水作为能量源可以实现较大的动能输入.

为深入研究水滴的冲击作用, 可以将水滴冲击的瞬态载荷简化为半正弦脉冲, 其时域表达式为

$$x(t) = A \sin\left(\frac{\pi t}{\tau}\right), \quad (11)$$

其中, A 为峰值冲击力, τ 为脉冲宽度, 即水滴冲击作用时间. 对冲击脉冲信号傅里叶变换进行频谱分析, 其频率特性为

$$X(f) = \int_0^\tau A \sin\left(\frac{\pi t}{\tau}\right) e^{-j2\pi ft} dt. \quad (12)$$

可以得到, 频率集中在 $f \leq 1/\tau$ 频域范围内, 由于水滴冲击的作用时间很短, 仅在 10 ms 以内, 水滴冲击的频率分布在 0—100 Hz 的较宽频域范围内. 研究使用 COMSOL 仿真软件模拟水滴冲击固定平面, 仿真时域范围设置为在 10 ms 以内, 并采用 0.1 ms 的时间步长, 水滴对固定平面的冲击力如图 3 所示.

图 3(a) 为不同直径水滴冲击固定平面的冲击力曲线, 图上标注了水滴不同阶段的变形状态. 水滴刚接触表面时, 处于状态 1, 整体形态仍呈球型, 最先接触表面的部分受力减速, 而剩余部分继续向下运动, 水滴边缘受到挤压向外延展, 进入状态 2 的铺展阶段, 此时水滴惯性力占主导, 动能转化为表面能, 水滴显著变形. 随着水滴完全铺展至最大直径, 进入状态 3, 动能完全转换为表面能. 随后水滴开始回缩, 进入状态 4, 此时, 水滴表面张力占主

导, 驱动液滴从边缘部分开始向中心回缩, 对于韦伯数较大的水滴, 由于来不及完全回缩而发生碎裂; 对于韦伯数较小的水滴, 水滴可以完全回缩并以完整的形态发生弹跳^[20]. 图 3(a) 中显示水滴直径与峰值冲击力呈正比关系, 图 3(b) 则显示水滴冲击速度与峰值冲击力呈二次关系, 由 (9) 式可得, 水滴峰值冲击力与韦伯数成正比. 由 (2) 式、(3) 式得到悬臂梁受到的冲击载荷与尖端位移、开路电压成正比关系. 综上结果表明, 水滴韦伯数与冲击悬臂梁后产生的开路电压呈线性正比关系.

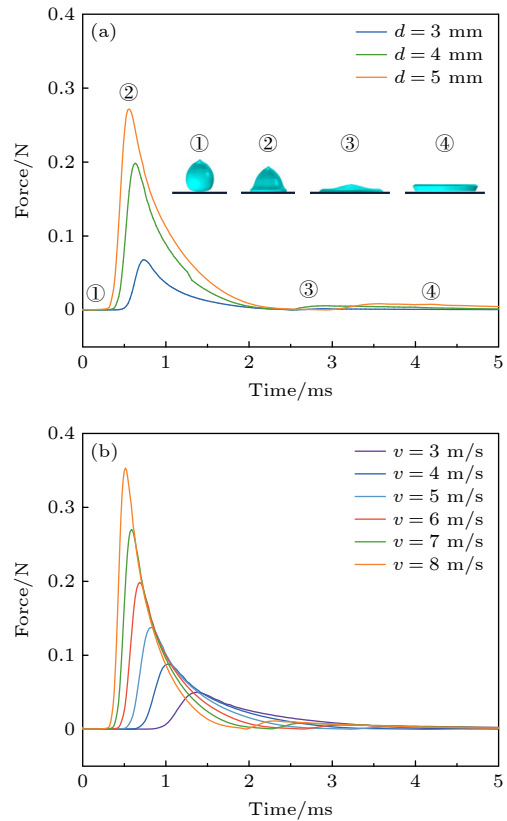


图 3 (a) 不同水滴直径和 (b) 不同冲击速度的冲击力曲线
Fig. 3. Impact force curves under different (a) droplet diameters and (b) impact velocities.

对不同水滴进行冲击力的傅里叶变换分析, 将时域上的水滴冲击力结果转化为频域上的结果, 如图 4 所示. 在水滴冲击的频率范围内出现了 3 个显著的谐振峰, 其峰位分别位于 5.8, 39.6 和 94.3 Hz. 雨水频域主要分布在 0—80 Hz 以内, 结合系统的动力学特性, 在雨水频域内系统可能表现出更为强烈的振动响应, 通过优化结构设计以调控谐振频率分布, 可以提升系统在实际降雨环境中的性能适应性.

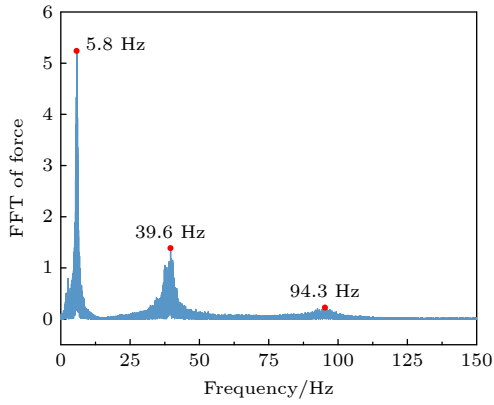


图4 水滴冲击力频域分布图
Fig. 4. Frequency domain of water droplet impact force.

3.2 俘能器结构参数优化

悬臂梁的能量输出效率与其谐振频率密切相关,只有在谐振频率下,悬臂梁才能实现最大的能量输出.基板材料的密度和弹性模量是影响悬臂梁动力学特性的关键参数:密度决定了悬臂梁的整体质量,而弹性模量则反映了结构的刚度特性,这两个参数分别决定了悬臂梁的特征频率和峰值尖端

位移.使用 COMSOL 软件对不同基板材料和基板长度的 S1 结构悬臂梁进行频域研究,根据水滴实际下落速度对应的频率范围,频域研究的频率范围选择 0—80 Hz,步长选择为 1 Hz.得到仿真结果如图 5 所示.

图 5(a) 结果表明,水滴能量收集场景中,铝基板由于其最低的弹性模量 (70 GPa) 展现出最优的柔性,在相同外力作用下产生了最高的输出电压.图 5(b) 结果表明,尽管较长的基板能够产生更大的振动变形,但系统质量的增大导致水滴冲击的效果减弱,当基板长度为 200 mm 时,开路电压达到峰值.后文中以 200 mm 为最优悬臂梁基板长度进行仿真计算.

在封装材料中环氧树脂具有最大的弹性模量,与铝基板弹性模量最为接近,其抑振效果相对较小. S2 结构以环氧树脂为封装层对最优尺寸的 S1 悬臂梁进行防水封装,并在频域和时域上进行有限元仿真,时域研究的时间在 1 s 的单个振动周期内,时间步长选择 0.1 ms,在悬臂梁尖端位置施加水滴冲击载荷,仿真结果如图 6 所示.

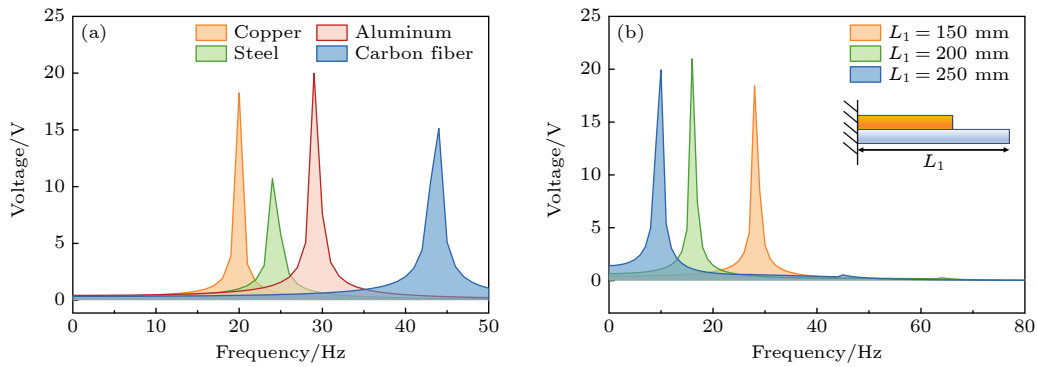


图5 悬臂梁结构扫频 (a) 悬臂梁基板材料; (b) 悬臂梁长度
Fig. 5. Frequency sweep of cantilever beam structure: (a) Substrate materials; (b) cantilever lengths.

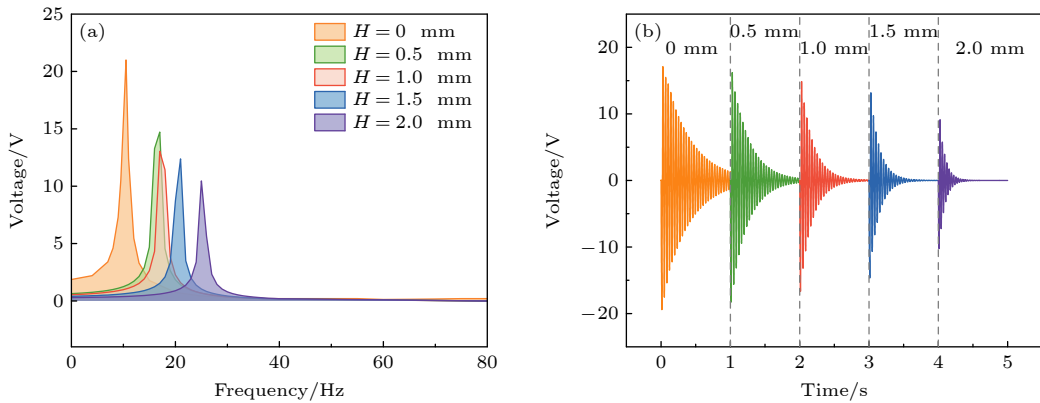


图6 不同封装层厚度电压输出 (a) 频域结果; (b) 时域结果
Fig. 6. Encapsulation layer thickness: (a) Frequency-domain; (b) time-domain.

可以看出,随着环氧树脂封装层厚度增大,系统刚度显著提高,封装层吸收并分散了冲击能量,起到了显著的抑振作用,增大了振动损耗,从而导致峰值开路电压降低.当封装层厚度在 1 mm 时,峰值开路电压的损耗为 13.0%,而在 2 mm 厚度时,峰值开路电压的损耗为 46.2%.在实际应用中,环氧树脂封装层的最优厚度为 1 mm.这一厚度在保证防水性能的同时,最大限度地减小了对振动特性的抑制,从而实现了较高的能量转换效率.

上述研究表明, S1 和 S2 结构只能获得单一的谐振频率,而自然雨水的频域范围较大,难以实现高效雨水能量收集.在 S1 结构单一悬臂梁的基础上,增加附加梁 L_2 , L_3 ,可以得到 U 形结构的 S3 结构俘能器.通过有限元仿真方法,研究了附加梁尺寸对俘能器开路电压的影响,为确保 S3 的结构防水性能,上附加梁 L_3 长度需要大于下梁 L_1 长度 200 mm,仿真结果如图 7 所示.

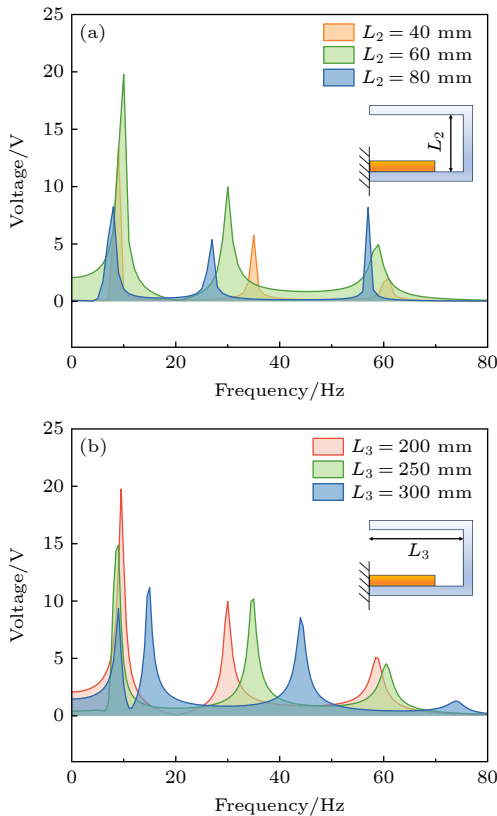


图 7 S3 结构不同附加悬臂梁长度频域分布图
Fig. 7. Frequency-domain of U-shaped cantilever beam with additional beams.

附加梁的存在改变了系统的动力学特性,在频谱上呈现多个谐振峰,出现了多模态振动,从而提升了俘能器的宽频响应能力,具有更高的能量转换

效率.随着 L_2 长度增大,俘能器谐振频率降低,但 L_2 尺寸对俘能器开路电压呈现非线性关系.随着 L_3 尺寸增大,系统质量增大,俘能器的一阶谐振频率降低,一阶谐振峰逐步降低.当 L_2 为 60 mm, L_3 为 200 mm 时,分别在 9, 35 和 60 Hz 处出现多模态谐振,多梁三阶振动频率出现近似 1:4:6 的比例关系,产生内共振效应,多模态振动相互促进,具有最强的振动和电输出性能,并且此时悬臂梁工作频域范围涵盖了水滴冲击频率范围,进一步提升水滴能量俘获效率.

S3 结构时域仿真结果如图 8 所示.随着上梁长度增大,冲击造成的上梁振动将会减弱,导致整体振动时间和电输出性能降低,与频域仿真结果呈现出相同的变化趋势.当上梁长度为 200 mm 时,可以获得 15.3 V 的峰值电压,而当上梁长度增大到 300 mm 后,只有 10.7 V 的峰值电压.此外,振动曲线出现了多杂峰,这是由于多梁的振动模式耦合作用实现了各能量模式的相互转移,使振动能量在多个模式间循环,从而延长了振动衰减时间.单次水滴冲击下的振动时间显著提高,具有宽频水滴能量俘获的巨大潜力.

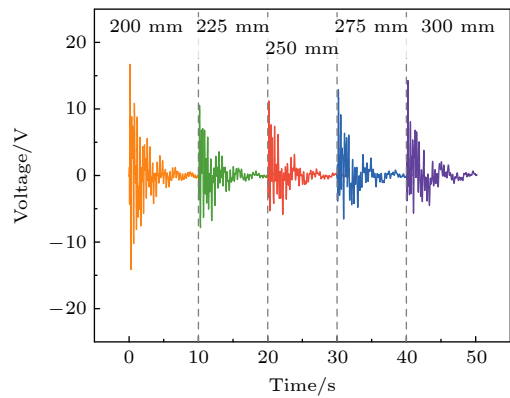


图 8 S3 结构不同上梁长度开路电压仿真结果
Fig. 8. Simulation results of open-circuit voltage of S3.

3.3 电输出性能

以上仿真结果表明,封装处理和宽频结构设计将会对压电俘能器的振动特性和开路电压产生显著影响.为进一步研究水滴压电俘能器的电输出性能,并验证仿真结果可靠性,本节采用仿真最优参数制备了俘能器样机,并在雨水冲击实验平台进行测试.通过水滴冲击实验平台进行水滴冲击测试,固定水滴尺寸为 4 mm,控制水滴出口高度调整冲击速度,对制得的压电俘能器进行水滴冲击,研究

了不同水滴冲击速度对 S1 结构俘能器开路电压的影响, 并使用重复实验减小测试误差, 实验结果如图 9 所示.

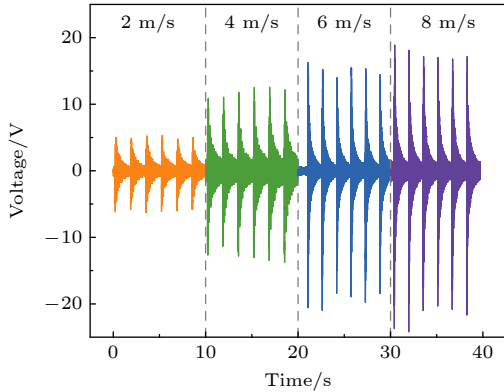


图 9 不同水滴冲击速度下压电悬臂梁开路电压
Fig. 9. Voltage of piezoelectric cantilever beams under different impact velocities.

实验结果表明, 随着水滴冲击速度的增大, 压电俘能器的平均峰值电压也随之提升, 水滴冲击速度从 2 m/s 增至 8 m/s 时, 平均峰值电压从 5.62 V 提升至 19.77 V. 高速水滴在冲击悬臂梁时会产生更大的冲击力, 从而引起悬臂梁的挠度和压电材料的形变量增大, 产生更高的电压输出. 然而, 实际俘能器的电输出性能随着冲击速度的进一步增大, 峰值开路电压增幅逐渐减小. 这是由于高速冲击水滴更容易发生飞溅过程, 导致了更大的能量损失, 无法完全将水滴动能传递到俘能器的电输出性能, 因此单纯提高冲击速度并不能线性地提升能量转换效率, 还需要通过合理设计俘能器结构, 可以进一步利用高速水滴的动能, 实现更高的能量输出.

固定水滴冲击速度为 6 m/s, S2 结构俘能器在不同封装厚度下负载测试结果如图 10 所示.

如图 10 所示, 随着封装厚度增大, 封装后俘能器的负载电压和功率均显著降低. 无封装俘能器的最大输出功率密度可以达到 15.99 W/m^2 , 而 0.5 mm 封装厚度下功率密度 10.95 W/m^2 , 1.0 mm 功率密度仅为 5.64 W/m^2 . 与未封装样品相比, 封装厚度为 0.5 mm 的俘能器负载电压损耗为 21.5%, 功率损耗 31.6%, 封装厚度为 1.0 mm 的俘能器负载电压损耗为 42.4%, 功率损耗 64.8%. 封装材料不仅引入了额外的质量和刚度, 对悬臂梁也具有一定的抑振作用, 从而减弱了压电悬臂梁的形变量, 导致电压及功率的显著下降.

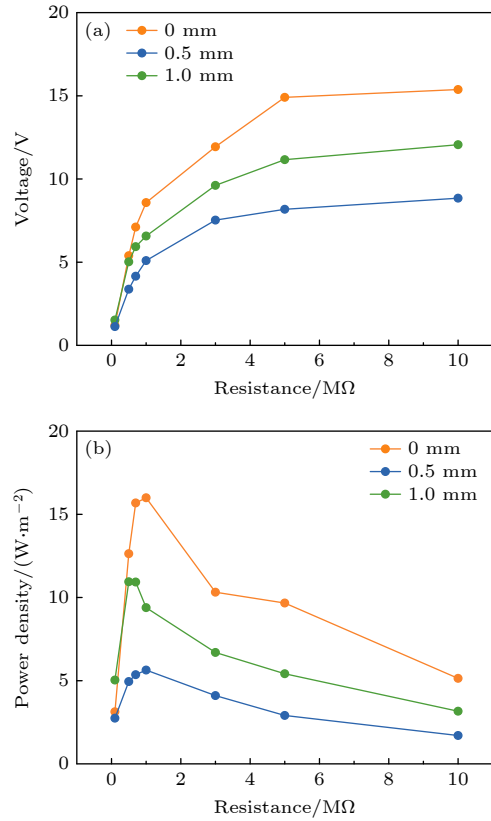


图 10 不同封装厚度 (a) 负载电压; (b) 负载功率
Fig. 10. Under encapsulation thicknesses: (a) Load voltage; (b) load power.

相较于传统悬臂梁结构, 防水封装层大大降低了俘能器的电输出性能, 而具有结构防水性能的 S3 俘能器由于几何构型带来的内共振效应拓宽了工作频带, 表现出更优的能量收集效果. 根据仿真结果, 制备了最优尺寸的 S3 俘能器, 固定下梁长度 L_1 为 200 mm, 连接段长度 L_2 为 60 mm, 并改变上梁长度 L_3 , 具有不同上梁长度 L_3 的 S3 俘能器的性能测试结果如图 11 所示.

由图 11 可以看出, 实验结果与仿真分析规律一致, 随着上梁长度增大, 开路电压降低. 当上梁尺寸为 200 mm 时, 能够在单次水滴冲击下连续振动持续 23.7 s, 并获得平均 12.7 V 的峰值开路电压及 $2.1 \mu\text{A}$ 的峰值短路电流, 而当上梁尺寸为 300 mm 时, 在单次水滴冲击下仍有 21.4 s 的振动时间, 但平均峰值电压降低为 9.5 V, 短路电流降低为 $1.5 \mu\text{A}$. 与仿真结果相比, 由于实际振动损耗, 电输出性能偏低, 但相对误差在 15% 以内, 证明了结果的一致性.

对短路电流进行积分, 得到单滴冲击下的电荷转移量, 结果如图 11(c) 所示, 在 200 mm 时有最高

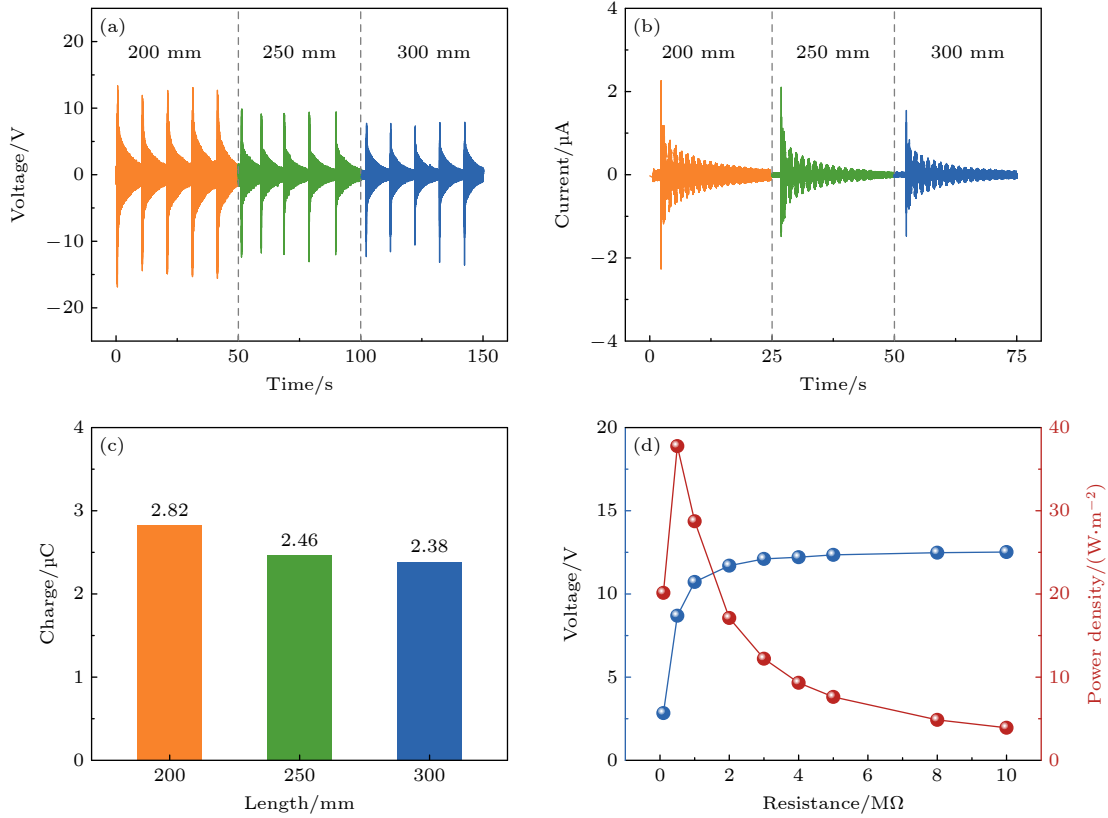


图 11 不同上梁长度比较 (a) 开路电压; (b) 短路电流; (c) 转移电荷量; (d) 负载电压和功率

Fig. 11. Comparisons of upper beam lengths: (a) Open-circuit voltage; (b) short-circuit current; (c) transferred charge; (d) load voltage and power.

的电荷转移量, 达到 $2.82 \mu\text{C}$. 此外, 对负载特性研究结果如图 11(d) 所示, 随着负载电阻阻值增大, 负载电压逐渐增大至峰值开路电压 12.4 V , 负载功率则先增大后减小, 当负载电阻与内阻相同 ($0.5 \text{ M}\Omega$) 时, 峰值负载功率密度为 $37.76 \text{ W}/\text{m}^2$. U 形结构通过多模态设计引入多个共振峰, 使器件能在更宽的频率范围内响应振动, 上下梁振动的耦合作用会将冲击能量分散到多个振动模态, 因此瞬时压电电压幅值降低. 但这些振动模态相互干涉, 形成了非线性耦合作用, 促使能量在模态间转移, 从而延长了振动时间, 降低了在非谐振状态下的能量损耗, 并维持了较高的能量转换效率.

将制备的最优尺寸 U 形结构俘能器放置在室外环境, 获得真实雨水冲击下压电俘能器的输出电压, 结果如图 12 所示. 可以看出, 在 60 s 时间范围内, 俘能器可以获得稳定的电压输出, 记录到的最高电压分别为 23.4 V , 平均输出电压超过 10 V . 某一刻出现的极大或者极小输出与降雨速度及雨滴尺寸有关, 与前面的仿真结果吻合.

表 1 所示为近年来不同俘能材料、俘能结构的水滴能量收集装置在单滴水滴作用下的性能数据.

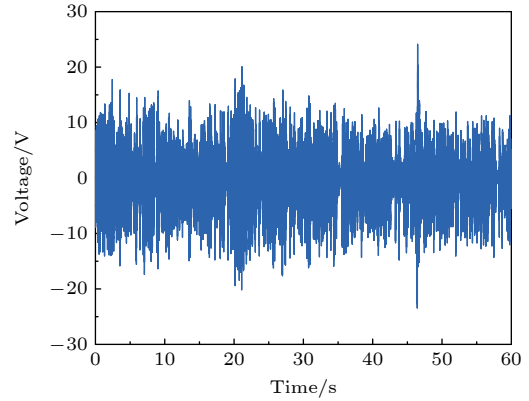


图 12 真实雨水环境测试图

Fig. 12. Rainwater environmental test.

传统压电材料体系中, 压电陶瓷 (如 PZT) 常用于悬臂梁结构中, 具有较高的压电性能, 但其脆性大、易断裂, 难以适应复杂环境下的机械冲击; 压电聚合物 (如 PVDF) 具有较好的柔韧性, 在两端固定梁结构中能够有效改善性能, 但其能量转换效率有限, 难以满足实际应用需求; 压电复合材料 (如 MFC) 兼具柔性和压电性, 具有更优的电输出性能. 近年来, 随着摩擦纳米发电机 (TENG) 技术

表 1 水滴能量收集装置性能数据
Table 1. Performance of the droplet energy harvesting devices from studies.

年份	材料体系	U_{\max}/V	$P_{\max}/(W \cdot m^{-2})$	$Q/\mu C$
2015 ^[8]	PZT-悬臂梁	1.61	0.23	—
2019 ^[21]	PVDF-悬臂梁	3.5	6.92	—
2021 ^[22]	PVDF-两端固定梁	14.3	—	30.2
2020 ^[23]	PTFE-摩擦纳米发电机	143.5	—	49.8
2021 ^[24]	FEP-摩擦纳米发电机	261.2	82.66	101
2024 ^[25]	PP-摩擦纳米发电机	200	—	26.7
本工作	MFC-U形悬臂梁	12.7	37.76	2820

的兴起,以聚四氟乙烯 (PTFE)、特氟龙 (FEP) 和聚丙烯 (PP) 等材料为代表的 TENG 产品逐渐进入研究视野。

从表 1 可以看出,在以上俘能装置在单滴水滴的冲击作用下,传统压电俘能器通过振动梁降低了压电材料的谐振频率,实现了单滴水滴冲击下 1 s 左右的工作时间,但由于压电材料局限性的问题,峰值电压在 20 V 以内,功率密度低于 10 W/m²。而 TENG 则可以实现单滴水滴 100 V 以上的高瞬时电压输出,但仅在水滴接触的 10 ms 以内存在能量输出,而在持续能量输出方面表现较差。在能量收集领域,可以使用单滴水滴作用下,不同俘能装置的电荷转移量来表征其能量收集能力。

本工作设计并制备的 MFC-U 形结构压电俘能器与传统 PZT, PVDF 俘能器相比, MFC 兼具柔性和压电性,具有更优的电输出性能。与直悬臂梁结构相比, U 形悬臂梁结构具有宽频效应,通过结构的内共振作用,显著降低了能量衰减速率,将能量转换时间延长至 20 s 以上,从而增强了在宽频雨水环境下的电输出及电荷转移能力,在雨水能量收集中表现出显著优势。

4 结 论

本研究采用有限元仿真软件 COMSOL 对悬臂梁进行结构设计,得到了一种可用于收集雨水能量的宽频 U 形压电悬臂梁结构,仿真和实验结果符合良好,主要得出以下结论。

1) 在自然降水条件下,随机大小和冲击速度的水滴具有较宽的频率范围,传统悬臂梁仅有单一谐振频率,且防水封装层具有抑振作用,导致压电悬臂梁对雨水能量收集效果较差。

2) U 形悬臂梁在引入附加悬臂梁后出现多模

态谐振,显著拓宽了响应频率范围,当上梁 L_1 和下梁 L_3 尺寸同为 200 mm、 L_2 为 60 mm 时,俘能器具有最强的结构内共振效应,在单滴雨水冲击下,获得的电输出性能为开路电压 12.7 V、短路电流 2.1 μA , 振动时间可延长到 23.7 s, 转移电荷量达到 2.82 μC , 在负载电阻为 0.5 M Ω 时俘能功率密度为 37.76 W/m²。

参考文献

- [1] Zheng Y, Liu T, Wu J P, Xu T T, Wang X D, Han X, Cui H Z, Xu X F, Pan C F, Li X Y 2022 *Adv. Mater.* **34** 2202238
- [2] Sezer N, Koç M 2021 *Nano Energy* **80** 105567
- [3] Ilyas M A, Swingler J 2015 *Energy* **90** 796
- [4] Wong V K, Ho J H, Chai A B 2017 *Energy* **124** 364
- [5] Kumar B, Upadhyay G, Bhardwaj R 2023 *Langmuir* **39** 18768
- [6] Guignon R, Chaillout J J, Jager T, Despesse G 2008 *Smart Mater. Struct.* **17** 015038
- [7] Kim J H, Rothstein J P, Shang J K 2018 *Phys. Fluids* **30** 072102
- [8] Yao M H, Liu P F, Ma L, Wang H B, Zhang W 2020 *Acta Mech. Sin.* **36** 557
- [9] Chen N N 2020 *M. S. Thesis* (Huainan: Anhui University of Technology) (in Chinese) [陈南南 2020 硕士学位论文 (淮南: 安徽理工大学)]
- [10] Huang X H, Zhang C, Dai K R 2021 *Micromachines* **12** 203
- [11] Wang J, Fan B, Fang J W, Zhao J C, Li C 2022 *Energy Rep.* **8** 11638
- [12] Wang L, Lu D J, Jiang Z D, Jia C, Wu Y M, Zhou X Y, Zhao L B, Zhao Y L 2018 *AIP Adv.* **8** 115205
- [13] Upadrashita D, Yang Y 2015 *Smart Mater. Struct.* **24** 045042
- [14] Cao D X, Zhan C H, Guo X Y, Yao M H 2024 *J. Vib. Eng. Technol.* **12** 5073
- [15] Sun S L, Leng Y G, Zhang Y Y, Su X K, Fan S B 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 140502 (in Chinese) [孙帅令, 冷永刚, 张雨阳, 苏徐昆, 范胜波 2020 物理学报 **69** 140502]
- [16] Gao Y K, Zhao J, Zhou J J, Zhou J 2025 *Acta Phys. Sin.* **74** 057701 (in Chinese) [高裕昆, 赵洁, 周晶晶, 周静 2025 物理学报 **74** 057701]
- [17] Zhou J J, Zhou J, Yu Y, Shen J, Zhang P C, Chen W 2023 *Ceram. Int.* **49** 32528
- [18] Zhou J J, Zhou J, Chen W, Tian J, Shen J, Zhang P C 2022 *Compos. Struct.* **299** 116019
- [19] Zhang B, Sanjay V, Shi S L, Zhao Y G, Lv C J, Feng X Q,

- Lohse D 2022 *Phys. Rev. Lett.* **129** 104501
 [20] Li X J, Zhang L Q, Feng Y G, Zhang Y L, Xu H Z, Zhou F, Wang D A 2023 *ACS Nano* **17** 23977
 [21] Doria A, Fanti G, Filipi G, Moro F 2019 *Sensors* **19** 3653
 [22] Hao G N, Dong X W, Li Z L 2021 *Energy* **232** 121071
 [23] Xu W H, Zheng H X, Liu Y, Zhou X F, Zhang C, Song Y X, Deng X, Leung M, Yang Z B, Xu R X, Wang Z L, Zeng X C, Wang Z K 2020 *Nature* **578** 392
 [24] Xu X T, Wang Y L, Li P Y, Xu W H, Wei L, Wang Z K, Yang Z B 2021 *Nano Energy* **90** 106573
 [25] Wang H C, Feng M, Wang W P, Wang W Q, Meng J, Liu Y P, Wang Q, Wang D A 2024 *J. Mater. Chem. A* **12** 4727

Design of broadband rainwater piezoelectric energy harvester based on multimodal resonance*

LI Hao^{1)3)#} ZHOU Jingjing^{2)#} SUN Qi³⁾ CHEN Wen¹⁾³⁾ ZHOU Jing^{1)3)†}

1) (*Sanya Science and Education Innovation Park, Wuhan University of Technology, Sanya 572024, China*)

2) (*Anhui Key Laboratory of Information Functional Materials and Devices, Fuyang Normal University, Fuyang 236000, China*)

3) (*School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China*)

(Received 21 February 2025; revised manuscript received 6 May 2025)

Abstract

With the continuous growth of global demand for renewable energy, the utilization of rainwater resources has gradually become a focal point of research. Piezoelectric energy harvesting has received significant attention because the harvester has simple structure, high energy conversion efficiency, and self-powering capability. However, traditional piezoelectric energy harvesters are limited by the narrow resonance frequency bandwidth and the insufficient waterproofing ability, which restricts the adaptability of energy conversion to variable environmental excitations. To solve this problem, a broadband piezoelectric cantilever energy harvester for rainwater energy harvesting is designed in this work. The influence mechanisms of droplet impact parameters, waterproof encapsulation technology, and MFC cantilever structure on the electrical output performance are studied through theoretical analysis, numerical simulation, and experimental validation. It reveals that the droplet's Weber number exhibits a direct proportionality with the impact force, which is distributed within the 0–80 Hz frequency range. Simulations and experimental results demonstrate that the U-shaped piezoelectric energy harvester significantly outperforms other designs in terms of broadening the resonant frequency range and extending oscillation duration, achieving an oscillation time of 23.7 s, a charge transfer of 2.82 μC , and an output power density of 37.76 W/m^2 under a single impact. It demonstrates its efficient energy harvesting capability in a wide resonance frequency range. Additionally, the U-shaped design also improves its waterproof performance, thus further enhancing its applicability in rainwater environments. This study provides a novel, universally applicable approach for collecting rainwater energy, expands the application scenarios of piezoelectric energy harvesting technology, and provides theoretical references and practical guidance for designing and applying broadband energy harvesters.

Keywords: finite element model, rainwater energy harvesting, piezoelectric energy harvester, structure design

PACS: 77.84.Lf, 47.55.D-, 88.40.fc

DOI: 10.7498/aps.74.20250213

CSTR: 32037.14.aps.74.20250213

* Project supported by the Natural Science Foundation Innovation Research Team of Hainan Province, China (Grant No. 524CXTD431), the Key Laboratory of Functional Materials and Devices for Informatics of Anhui Education Institutes Open Project, China (Grant No. FMDI202407), and the Key Project of Fuyang Normal University Youth Talent Fund, China (Grant No. rcxm202402).

These authors contributed equally.

† Corresponding author. E-mail: zhoujing@whut.edu.cn



基于多模态谐振的宽频雨水压电俘能器设计

李昊 周晶晶 孙琪 陈文 周静

Design of broadband rainwater piezoelectric energy harvester based on multimodal resonance

LI Hao ZHOU Jingjing SUN Qi CHEN Wen ZHOU Jing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 147701 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20250213

CSTR: 32037.14.aps.74.20250213

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250213>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

压电纤维复合材料智能传感器的有限元预测与器件性能

Finite element prediction and device performance of piezoelectric fiber composite based smart sensor

物理学报. 2025, 74(5): 057701 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241379>

极化中子散射零磁场屏蔽体的有限元分析

Finite element analysis of zero magnetic field shielding for polarized neutron scattering

物理学报. 2023, 72(14): 142801 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230559>

基于二阶共鸣器单元的宽频消声器研究与设计

Research and design of broadband muffler based on second-order Helmholtz resonators

物理学报. 2022, 71(23): 234301 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221377>

基于热超构材料的能量收集与热电转换特性

Energy harvesting and thermoelectric conversion characteristics based on thermal metamaterials

物理学报. 2022, 71(20): 207304 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221061>

高分子囊泡在微管流中惯性迁移现象的有限元分析

Finite element analysis of inertial migration of polymer vesicles in microtubule flow

物理学报. 2022, 71(18): 188701 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220606>

基于2-2型压电复合材料的新型宽频带径向振动超声换能器

A new broadband radial vibration ultrasonic transducer based on 2-2 piezoelectric composite material

物理学报. 2021, 70(1): 017701 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201352>