

非线性宽频振动能量采集的最新研究进展

凌宇飞, 张亦弛, 郑健宁, 陈赵江*

浙江师范大学物理与电子信息工程学院, 浙江 金华

收稿日期: 2025年7月29日; 录用日期: 2025年9月2日; 发布日期: 2025年9月11日

摘要

振动能量采集技术可将环境中的振动能量转化为电能, 从而为低能耗的电子设备提供了一种自供能解决策略。但是传统线性采集器受限于有效频带狭窄、能量密度低等问题, 难以应对广泛频率范围的振动环境, 极大限制了采集器在实际生活中的应用。如今研究如何通过扩大振动能量采集器的频率范围和提高其能量密度已经受到广泛关注。本文, 对非线性能量采集器宽频技术最新进展进行了全面的总结和分析, 并详细介绍了其工作机制、理论依据以及实施技术, 最终还对未来振动能量采集器的发展趋势进行了深入的思考和展望。

关键词

振动能量采集, 非线性宽频技术, 压电能量采集器, 摩擦纳米发电机

Recent Research Advances of Nonlinear Broadband Vibration Energy Harvesting

Yufei Ling, Yichi Zhang, Jianning Zheng, Zhaojiang Chen*

School of Physics and Electronic Information Engineering, Zhejiang Normal University, Jinhua Zhejiang

Received: Jul. 29th, 2025; accepted: Sep. 2nd, 2025; published: Sep. 11th, 2025

Abstract

Vibration energy harvesting technology can convert ambient vibration energy into electrical energy, providing self-powering solutions for low-power electronic devices. However, traditional linear vibration harvesters are constrained by issues such as a narrow effective bandwidth and low energy density, making them unsuitable for vibration environments with a wide frequency range, which greatly limits their practical application. Therefore, methods to broaden the bandwidth and increase the energy density of energy harvesters to improve harvesting efficiency have become a popular

*通讯作者。

文章引用: 凌宇飞, 张亦弛, 郑健宁, 陈赵江. 非线性宽频振动能量采集的最新研究进展[J]. 应用物理, 2025, 15(9): 713-726. DOI: 10.12677/app.2025.159076

area of research. This paper provides a comprehensive summary and analysis of nonlinear broadband vibration energy harvesting technologies, introducing their operating principles, theoretical foundations, and implementation techniques. Moreover, it offers thoughts and prospects on the future development directions of vibration energy harvesters.

Keywords

Vibration Energy Harvesting, Nonlinear Broadband Technique, Piezoelectricity Energy Harvester, Triboelectric Nanogenerator

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着物联网的高速发展,无线传感器应用广泛,人们对于微电子产品的需求不断增加。但传统化学电池存在衰减快、寿命短、体积大等问题,难以满足微电子产品需求。为此,许多科研人员提出使用能量采集技术的方法,通过将环境中的其它能量形式转换为电能,为电子设备提供能量,该技术通常具有结构简单、无磁场干扰和响应快等优点[1]。然而,传统的线性振动能量采集技术通常仅在共振频率附近的较窄带宽内工作,其捕获的振动能量密度也较小。因此需要进一步发展具有宽频响应和高能量密度的振动能量采集器,以有效利用环境中低频范围内多种振动能量源。目前,已初步实现高效宽频振动能量采集有压电式[2]和摩擦式[3]两种。本文将综合分析近年来国内外基于压电式和摩擦式采集技术实现非线性宽频振动能量采集的研究进展,并展望未来发展趋势。

2. 工作机理

2.1. 非线性压电振动能量采集器宽频工作机理

非线性压电能量采集器的非线性动力学机制突破传统线性系统的频率限制,其核心在于外部激励下势能函数的多稳态特性与非线性刚度的协同作用,从而实现从低频到中高频能量的高效捕获与转换[4]。非线性压电振动能量采集器的简化运动方程可表示[5]:

$$\ddot{x} = -\frac{dU(x)}{dx} - \gamma\dot{x} + f(t) \quad (1)$$

式中, x 为采集器振动位移, $U(x)$ 为势能函数, γ 为阻尼系数, $f(t)$ 为环境振动产生的激振力。多数非线性振动能量采集器的振荡特性与非线性达芬振子类似,其势能函数 $U(x)$ 可表示为:

$$U(x) = \frac{1}{2}ax^2 + \frac{1}{4}bx^4 \quad (2)$$

式中, a 和 b 为常数,将式(2)代入式(1)得到:

$$x + \gamma\dot{x} + ax + bx^3 = f(t) \quad (3)$$

从式(3)中可看出其振动方程含有 x 的三次方的项,系统刚度呈非线性。该系统的幅频响应中, β 为振幅, ω 为激励角频率。当 $b > 0$ 时,系统的恢复力(即弹性力)随着位移的增大而增加得更快,表现出“硬弹簧”特性。系统的频响曲线呈现出向右弯曲的趋势。当 $b < 0$ 时,系统的恢复力随着位移的增大而增加

得较慢,表现出“软弹簧”特性。在这种情况下,软弹簧系统的频响曲线呈现向左弯曲的特性。当激励频率较低时,系统的响应幅度较大,并且随着频率的增高,系统的响应幅度逐渐减小。因此在低频激励下,软弹簧系统能够保持较大的振动幅度,从而能够有效地收集外界的低频振动能量。软弹簧和硬弹簧的特性可以分别覆盖高频和低频范围,从而实现宽频响应。

2.2. 非线性摩擦纳米发电机宽频工作机理

碰撞摩擦纳米发电机是目前摩擦纳米发电机实现宽频能量采集的有效办法,其工作原理基于碰撞引发的非线性动力学效应。当振子与板碰撞接触时,系统的速度会发生突变。碰撞引入的非线性效应改变了系统的振动特性,使得系统能够在更宽的频率范围内响应外部激励,显著提高能量转换效率[6]。此外,碰撞机制引发混沌和分岔等非线性行为,有助于在低频振动环境下捕获能量。碰撞时,用 t^- 和 t^+ 表示碰撞前后时刻,速度变化关系表示为[7][8]:

$$v(t^+) = -rv(t^-) \quad (4)$$

其中, $v(t^-)$ 和 $v(t^+)$ 分别表示碰撞前后的相对速度, r 是恢复系数。速度的瞬时突变使得系统能够迅速调整其振动状态,从而拓宽了能量捕获的频宽。

此外,通过引入碰撞模式,可提升双稳态摩擦纳米发电机低频能量捕获效率,拓宽工作频带,从而在低频振动环境下依然能够保持较好的能量转换性能。碰撞纳米发电机系统的运动方程可表示为[9]:

$$m\ddot{z} + c\dot{z} + kz + F_{nl}(z, \dot{z}) = F_0 \sin(\omega t) + F_{coll}(t) \quad (5)$$

其中, m 是系统的质量, c 是阻尼系数, k 是线性刚度, $F_{nl}(z, \dot{z})$ 表示由材料或几何结构引起的非线性力, $F_0 \sin(\omega t)$ 是周期性激励, $F_{coll}(t)$ 是碰撞引起的冲击力,通常用冲量函数描述。碰撞时系统的相对速度发生的瞬时变化由式(4)表示。在此基础上加入电磁层[10],利用电磁感应原理将线圈中磁通量变化产生感应电流,这样的耦合机制使得系统能够同时响应不同频率的振动,从而实现宽频响应。

3. 非线性宽频振动能量采集技术研究进展

非线性振动能量采集器基于非线性动力学理论,实现多种非线性宽频振动能量采集,其技术路径主要通过材料非线性设计与多物理场协同调控实现高效宽频响应与采集能量密度提升。其中,压电能量采集器和摩擦纳米发电机(TENG)构成了实现非线性动力学机制的核心技术基础框架。

3.1. 非线性压电宽频振动能量采集器

非线性压电宽频振动能量采集器的核心原理在于通过双稳态或多稳态动力学设计打破传统线性系统的窄宽谐振限制。在外界振动激励下,系统因非线性刚度(如磁力耦合、屈曲梁)产生双稳态或多稳态势阱[11],当激励能量超过势垒阈值时,系统发生跨势阱跃迁,触发大幅度非线性振动,从而将低频能量迁移至高频响应频段并拓宽有效带宽。

3.1.1. 基于磁力耦合的非线性宽频振动能量采集器

在该类型采集器中磁铁之间的非线性磁力是最主要的非线性因素,主要由压电悬臂梁的末端粘贴磁铁、固定端粘贴磁铁和U型槽组成。当磁体排列方式使系统存在多个稳定平衡位置时,则会表现出双稳态或多稳态特性。这种非线性磁耦合使得系统能够在较低激励频率下实现跨势阱运动,从而激发大幅振动,提高能量转换效率。与传统线性能量采集器相比,磁力耦合的能量采集器频率响应范围明显拓宽,尤其是在低频环境中更具优势。此外,通过调节磁体间距、磁极排列方向和压电结构的几何参数,可以灵活调控系统的势阱深度和非线性程度,从而优化其能量采集性能。

2021年,张颖等提出了一种精确的磁力建模方法[12],用于多稳态俘能系统的非线性动力学特性分析。基于磁荷理论和磁铁间相对位置建立磁力非线性模型并通过实验验证。结果表明,双稳态和三稳态系统的磁力峰值误差分别为4.3%和6.49%。同时,研究团队探究了系统结构参数对势阱及其对响应电压的影响,并确定了临界位置。双稳态转单稳态的临界位置位于 $h = 36\sim 38\text{ mm}$,三稳态转单稳态的临界位置位于 $h = 30\sim 32\text{ mm}$;随着水平距离 d 增大,临界位置发生变化。此实验成果为多稳态俘能系统的后续研究,特别是对结构参数的优化提供了理论依据。

2022年,Zhang等设计了一种双稳态宽频压电俘能器[13]。该俘能器通过可移动铰支座与非线性磁力的结合,拓宽工作频带。他们在研究中,分析了线性与非线性刚度、磁矩、负载阻抗及外激励等因素的影响。结果表明,引入非线性磁力后,系统呈现负刚度特性,实现了在低频下的单稳态与双稳态的转换;此外,通过调节支座来改变系统的长细比,成功实现0至16 Hz的宽频范围振动能量采集效果。

2023年,梁超等深入研究在双稳态结构中接入非线性电路进行俘能[14]。他们提出将非线性二阶RLC谐振电路引入至三弹簧构型的双稳态俘能结构中,形成一个具有两个自由度的非线性耦合系统,从而增强其俘能响应和动力学性能。当电路系统变为二阶谐振电路时,由于系统的共振耦合效应,系统的电流明显增加,俘能带宽拓宽。系统的硬刚度特性更加明显,表明系统具有更强的非线性来提升俘能特性。随着激励幅值增加,对应的电流增加,俘能带宽也进一步拓宽。因此,该非线性谐振电路俘能器不仅显著提升电流输出强度和系统振动响应,而且拓宽俘能带宽。

2024年,张旭辉等设计了一种磁力耦合阵列式压电俘能器(MA-PEH)[15],结构如图1所示,其特点在于引入了非线性磁力以实现双稳态特性。在无磁力影响下,两组合梁(梁1、梁2)谐振频率分别为22.2 Hz和15.4 Hz,当激励幅值 $A = 16\text{ m/s}^2$ 时,各自均方根电压值为34V和33.7 V。随着外部激励频率的逐步增加,两梁的均方根电压响应曲线表现出了硬化的趋势,并且整体向右偏移。当系统处于双稳态状态,在同样激励幅值下,工作带宽显著拓宽,尤其是在 $f = 11.7\sim 15.3\text{ Hz}$ 和 $20.6\sim 22\text{ Hz}$ 频率区间内,阵间周期运动的频带宽度达到5 Hz,并伴随着混沌运动,这一发现进一步拓宽了俘能器的有效频率响应范围。此外,当激励频率趋近于梁1的谐振频率时,增大激励幅值会促进梁1的能量输出,但同时会对梁2的输出产生抑制作用;反之亦然。

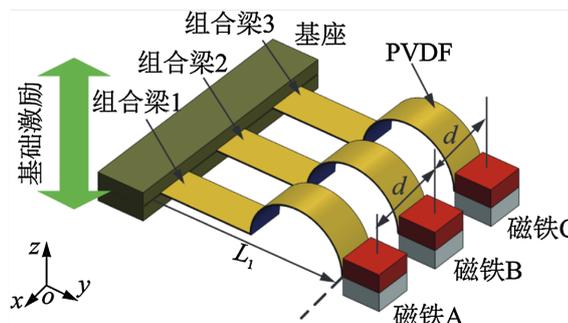


Figure 1. Magnetic coupling array piezoelectric energy harvester
图1. 磁力耦合阵列式压电俘能器

2025年Feng等提出了一种基于正交磁耦合悬臂梁的振动能量采集器[16]。如图2所示,通过调整两个悬臂梁压电振荡器之间的角度和磁间距,使得振荡器在受到外部宽带振动源激励时能够产生大尺度和稳定的振动。当激励幅值为0.2 g,双梁半径为16 mm,磁角为 130° 时,整个系统的能量捕获效果最佳。在5~20 Hz的频率范围内,系统可以有效地捕获所有频段的更高有效电压,总捕获电压值约为15.3 V,与其余情况相比能量采集能力提高了770%。

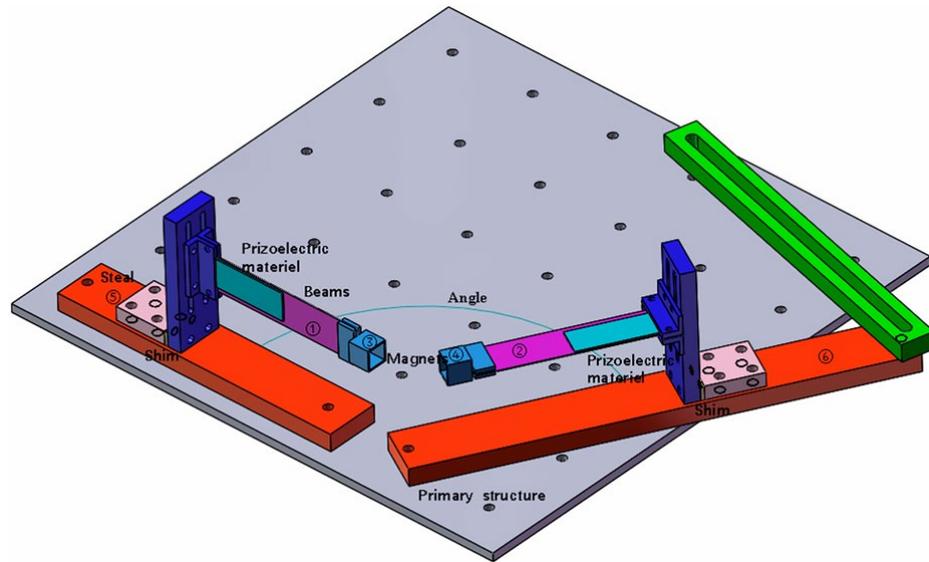


Figure 2. Structure of the magnetic-coupling-double-cantilever-beam vibrational energy harvester

图 2. 磁耦合双悬臂梁振动能量采集器的结构

Table 1. Performance parameter table of nonlinear broadband vibration energy harvester based on magnetic coupling

表 1. 基于磁力耦合的非线性宽频振动能量采集器性能参数

| 作者 | 器件材料及尺寸 | 工作频率 | 输出电压 | 输出功率 |
|--------------|--|----------|-------------------------------|----------------------------|
| 张颖等人[12] | 不锈钢梁: $120 * 20 * 0.3 \text{ mm}^3$ | 1~20 Hz | 12.7 V | 双稳态:10.4 mW 三稳态:16.1 mW |
| Zhang 等人[13] | 钕铁硼磁铁: $20 * 20 * 2 \text{ mm}^3$ 、青铜悬臂梁: $200 * 20 * 1 \text{ mm}^3$ | 0~16 Hz | 3.8 V | 0.8 mW |
| 梁超等人[14] | 磁铁: 内径 9 mm 外径 14 mm 高 10 mm、线圈半径: 16.5 mm | 0~25 Hz | — | 12.9 mW |
| 张旭辉等人[15] | 梁: $40 * 8 * 0.3 \text{ mm}^3$ | 10~30 Hz | 组合梁 1: 35.4 V 组合梁 2: 3.5 V | — |
| Feng 等人[16] | 单条悬臂梁尺寸: $100 * 20 * 0.5 \text{ mm}^3$ 总体尺寸: $170 * 250 * 20 \text{ mm}^3$ | 5~20 Hz | 12.954 V | 9.07 mW |

如表 1 所示, 将上述研究中的性能参数进行了归纳总结。张颖等人和 Zhang 等人的设计主要聚焦于磁力耦合和结构优化, 以实现在低频下更广泛的频带响应。但两者都面临着如何扩展高频响应和提高系统长期稳定性的问题, 可结合两者优势, 通过理论建模和结构调节提高系统稳定性和能量采集效率。梁超等人则通过非线性电路与机械系统的共振耦合, 提升了电流输出和带宽, 但引入的电路增加了系统的复杂性和对电路稳定性的依赖, 电路的设计和调试增加了成本和维护难度。因此在之后研究中可以尝试在电路优化和系统简化方面取得平衡, 以提高系统的实际应用性。张旭辉等人和 Feng 等人的设计则通过磁力耦合阵列和正交磁耦合悬臂梁等创新, 进一步拓宽了工作带宽。但在高精度调节的情况下会大大限制该技术的广泛应用, 因此如何提高系统的自适应能力, 增加在不同振动环境中的可靠性, 将是研究的重点问题。

3.1.2. 基于屈曲梁结构的非线性宽频振动能量采集器

与磁力耦合结构不同, 屈曲梁结构是通过本身的几何非线性, 实现多稳态或强非线性特性, 以拓宽

频率响应带宽。在这种设计中, 压电梁通常处于初始预屈曲状态, 或在端部施加轴向压缩载荷, 使其进入屈曲临界状态甚至后屈曲状态, 从而诱导出非线性刚度特性。该结构可形成双稳态或多稳态势阱, 系统在外部低频激励下能够发生跨势阱运动, 激发大振幅非线性响应, 提高能量采集效率。由于屈曲形态在较小变形范围内即可实现显著的非线性刚度调制, 因此适合于小尺度、低频和高柔性的能量采集应用。

2024年, 栾浩等设计了M形屈曲梁压电振动能量采集装置(M-shaped buckled beam energy harvester, MEH) [17], 通过调整夹具支撑间距和角度对梁施加预压力, 使得M形梁呈现屈曲状态, 从而形成双稳态结构。他们对附加磁铁的情况下的电压输出进行了分析。在附加磁铁(间距40 mm)条件下, 0.3 g加速度激励时, 工作频率范围增至5.5~12.6 Hz(带宽7.1 Hz), 单侧峰值电压为7.3 V; 0.5 g加速度激励下, 工作带宽进一步扩展至5.5~13.8 Hz(带宽8.3 Hz), 单侧峰值电压为9.45 V。显然, 磁铁的加入使得系统在0.3 g和0.5 g加速度激励下的工作频率范围分别提高了12.7%和12.2%, 有效优化了能量采集性能。

2024年梁勇等将屈曲主梁和作为约束边界的支撑梁集成一体来构成双稳态结构[18]。通过实验表明, 该结构在低激励下表现为刚度软化, 在高激励下, 采集器幅频响应发生跳变且频宽随着激励水平增大而变宽。此外, 该采集器主要有单阱振动和阱间振动两种模式, 单阱振动模式下时间-电压响应呈现规律的正弦信号, 周期与激励信号一致。在高频30 Hz下, 电压幅值仅为1.7 V左右。而阱间振动模式下具有更高的输出, 还存在低于正弦波形频率的高电压幅值的响应, 此高电压幅值对应了跳变行为, 伴有高频率的振荡。

2024年Heidari等设计了一种半球形点吸收的压电能量采集器[19], 如图3所示。该装置由钢层和压电层构成的连续屈曲梁组成。两个压电采集器分别放置于浮标内水平和垂直方向, 以捕获海面海浪水平和垂直方向波动的能量。该结构中质量块放置在梁的中间, 来增强系统的采集性能。通过模拟波浪频率在2 Hz到4 Hz范围内的变化, 研究了该能量收集设备的性能。在波浪频率为2 Hz时, 能量收集装置输出电压的有效值为0.13 V, 输出功率的有效值为2.72 mW, 单位功率密度为81.1 W/m³, 收集效率显著提高, 输出电压能力提高了1300%, 输出功率提高了三个数量级, 单位功率密度提高了80倍。实验数据表明, 非线性能量收集系统在特定的波浪频率下的能量收集效率有着显著提升。

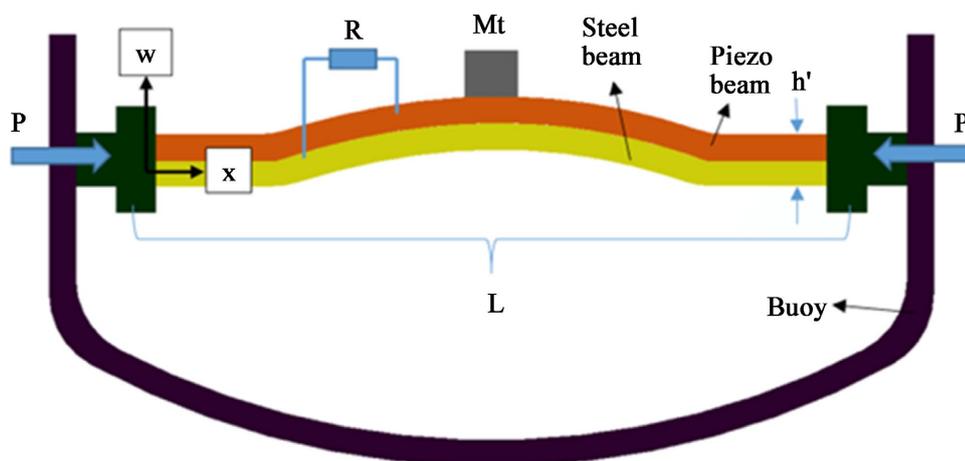


Figure 3. The schematic diagram of hemispherical point absorber piezoelectric collector
图 3. 半球形点吸收器压电采集器示意图

2025年, Pan等提出了一种基于激光加工技术制造的双稳态压电能量采集器结构[20]。该结构由一个屈曲梁和两个支撑梁组成, 旨在无需外部操作下即可在悬臂边界条件下实现双稳态。通过建立动态试验系统, 在10 Hz至40 Hz的频率范围内进行线性频率扫描, 得到该结构在不同加速度下的开路电压输出,

如图 4 所示。结果表明,当加速度达到 1.0 g 时,会触发具有跳跃失稳行为的跨阱振动,正向扫描过程中,宽频带响应频率范围为 16.64 Hz 到 18.94 Hz,而在反向扫描时覆盖的频率范围为 17.61~19.71 Hz。并且随着激励增加到 1.5 g 时,宽频带响应峰值显示出更宽的频带。

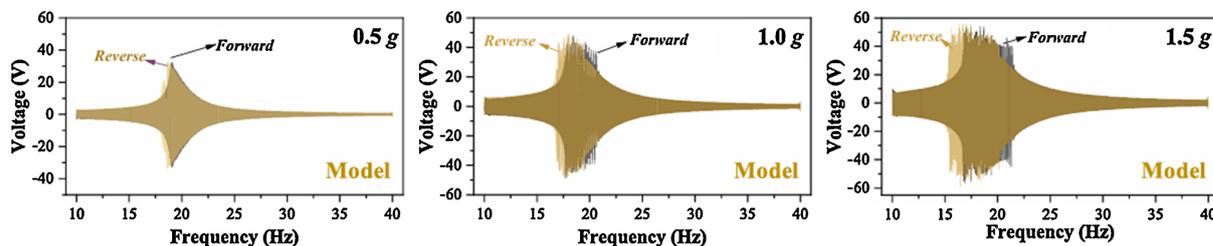


Figure 4. The frequency response results of BPVEH under three different acceleration excitations

图 4. BPVEH 在三个不同加速度激励下的频响结果

2025 年, Xu 等介绍了一种利用双稳态叠加机制的增强型压电 - 电磁混合能量采集器(PEHEH) [21]。PEHEH 的主系统由一个带有压电贴片的屈曲梁组成,两个耦合的三磁体双稳态结构则组成了副系统。通过各种振动测试发现,与单自由度双稳态系统进行相比,采用双稳态叠加机制的 PEHEH 只需 70% 的激励强度即可达到相同的峰值输出。在 15 Hz 振动激励下,该 PEHEH 的电磁部分与压电部分采集能量输出的最优均方根功率分别为 71.46 mW 和 1.42 mW (峰值功率分别为 324.49 mW 和 3.24 mW)。

Table 2. Performance parameter table of nonlinear broadband vibration energy harvester based on buckled beam structure

表 2. 基于屈曲梁结构的非线性宽频振动能量采集器性能参数

| 作者 | 器件材料及尺寸 | 工作频率 | 输出电压 | 输出功率 |
|----------------|--|-------------|-------------------------------|---------------------------------|
| 栾浩等人[17] | 钕铁硼磁铁: 10 * 10 * 5 mm ³ 、M 形屈曲梁、PZT-5H | 0~20 Hz | 9.5 V | — |
| 梁勇等人[18] | 不锈钢梁: 40 * 7 * 0.4 mm ³ PVDF: 1780 kg/m ³ 、5.7 Gpa、0.35 | 10~40 Hz | 34.6 V | 0.6 mW |
| Heidari 等人[19] | 钢梁: 200 * 25 * 0.2 mm ³ 半球直径: 3 m | 0.06~0.2 Hz | 193.9 V | 38 mW |
| Pan 等人[20] | 总钢梁: 50 * 8 * 0.15 mm ³ | 10~40 Hz | 50 V | 0.277 mW |
| Xu 等人[21] | 梁: 128 * 15 * 0.35 mm ³ N35 环形磁铁: 8.5 * 11.5 * 2.5 mm ³ | 0~50 Hz | 压电部分: 34.64 V 电磁部分: 3.04 V | 压电部分: 71.46 mW 电磁部分: 1.42 mW |

如表 2 所示,不同设计方法的研究结果展示了屈曲梁结构在提高振动能量采集效率方面的巨大潜力。栾浩等人设计的 M 形屈曲梁通过磁铁的加入,显著提升了工作频率范围和振动能量采集性能。梁勇等人在集成屈曲主梁和支撑梁的双稳态结构中实现较为宽广的频带响应。Pan 则是将前两者进行结合,通过激光加工的结构设计在无外部操作情况下实现双稳态。Heidari 等人通过设计浮标系统和屈曲梁相结合的结构,在海洋波动中表现出显著的能量收集效率提升。而 Xu 等人的双稳态叠加机制则通过压电与电磁耦合,提供了更高的能量采集效率。尽管低频响应优异,但随着激励强度的增加,部分设计的频带响应可能会发生偏移。在不同振动环境下的适应性和可靠性还需要进一步验证。

3.2. 非线性宽频摩擦纳米发电机

本节主要探讨两种类型的非线性摩擦纳米发电机,重点阐明它们如何克服低频范围内振动能量捕获

频带狭窄的问题，从而显著提升整体振动能量采集系统的性能。这两种发电机分别为基于碰撞机制的摩擦纳米发电振动能量采集系统，以及结合了电磁与摩擦纳米发电技术的复合式振动能量采集系统。

3.2.1. 碰撞机制摩擦纳米发电振动能量采集

碰撞机制摩擦纳米发电振动能量采集基于摩擦起电和静电感应原理，通过设计具有周期性接触-分离特性的异电性材料结构，在外界振动或冲击作用下实现机械碰撞接触，产生表面电荷。随后材料自然分离，形成电场变化并诱导电势差，使电流在外电路中流动，从而完成能量采集与输出。与传统摩擦纳米发电机相比，碰撞机制通过更强的冲击激励实现更充分的接触和电荷转移，显著提升输出性能。同时，其结构更坚固，能适应低频、强冲击等复杂振动环境，具备更高的能量转换效率与环境适应性。

2021年 Zhao 等设计了一种胶囊型摩擦纳米发电机[22]，如图 5 所示。该发电机内部包含一个滑块，能够在胶囊内部两个不同的表面上滑动。此设计促进了滑块与胶囊两端表面的碰撞，结合了粘滑振动和碰撞振动，增强了低频振动能量的采集能力。测试表明在长度约为 15 mm 时，平均功率达到最低值，这可能是由于滑块与胶囊两端表面碰撞频率较低，导致能量转换效率下降。当长度增加到一定程度后，滑块运动范围增大，碰撞频率提高，从而提高能量采集效率。然而，当长度超过 44 mm 时，滑块运动变得过于激烈，导致能量损失增加，功率迅速下降。这表明存在着一个最佳长度范围，在该范围内，碰撞频率和强度达到最佳，从而显著拓宽了频带并提高了电学输出性能。

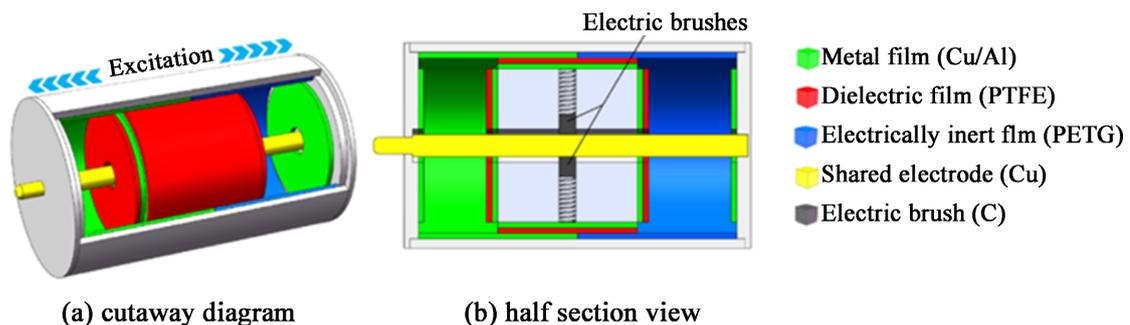


Figure 5. Capsule-type friction nanogenerator

图 5. 胶囊型摩擦纳米发电机

2023年 Tan 等设计了一种集滑动与碰撞于一体的双稳态摩擦纳米发电机(SIBTENG) [23]。该装置由基板、两个柔性铜梁、两个刚性杆等组成。在运行过程中，滑块在导轨上滑动，并与限位器发生碰撞，产生额外的能量输出，从而增强低频振动中的能量采集。在 4~6 Hz 频率范围内，质量块的运动模式转变为势阱内振荡，均方根功率增长率不断增加。该装置相较于传统的滑动式双稳态摩擦纳米发电机，其性能显著提升，幅度达到 114%。这表明碰撞结构的引入显著提高了双稳态摩擦纳米发电机在低频段的采集效率，同时有效拓宽了低频采集的频带。

2024年高思航等设计一种基于多层弹性体垂直碰撞的摩擦电纳米发电机，用于输电线振动能量采集 [24]。如图 6 所示，该装置由聚酰亚胺薄膜、导电铜膜、四氟乙烯膜等组成。通过振动冲击的激励作用，TENG 的上层和下层薄膜碰撞接触，进而将输电线路中微风振动蕴含的能量转化为电能。测试表明，在振频 20 Hz 和振幅 5 mm 时，该装置的开路电压、电路电流和转移电荷分别达到 360 V、47 μ A、350 nC。装置的峰值输出功率可达到 2.8 mW。该装置在 15~35 Hz 频段内表现出较好的稳定性和适应性，能够有效地采集并利用输电线路不同频率下的振动能量。

2025年 Cui 等提出了一种具有多尺寸蜂窝结构的圆盘状摩擦纳米发电机(DL-TENG) [25]。通过为不同直径的 PTFE 球精心设计合适的蜂窝结构，来用于宽频振动传感和能量采集。在 45 Hz 的振动频率下

随着加速度的增加, 输出电压不断增大, 直至在 4.0 m/s^2 时达到稳定。相较于圆形结构的 DL-TENG, 蜂窝结构的输出电压是它的 1.5~2 倍。随着 PTFE 球直径的扩大, DL-TENG 所产生的电压也增加, 尤其是在较低的加速度范围内。在 10~2000 Hz 范围内, 输出电压信号可以准确识别外部振动的主频率, 并且在相同的加速度下, DL-TENG 能够检测到频率变化带来的振幅变化。在相同频率下, 不同的幅度对应不同的加速度, 因此可以判断 DL-TENG 在高频下能够识别不同的加速度。

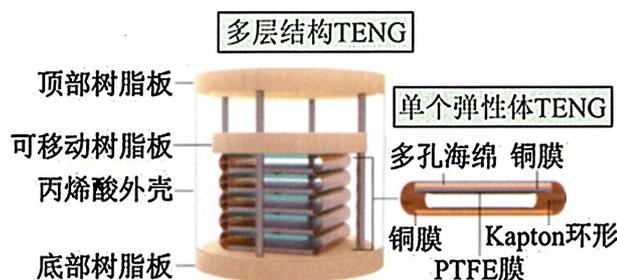


Figure 6. Triboelectric nanogenerator with vertical collision of multilayer elastomers
图 6. 多层弹性体垂直碰撞的摩擦电纳米发电机

2025 年 Tan 等提出了一种利用磁负刚度机制的三稳态摩擦纳米发电机(MTTENG) [26], 它可以在低频区域实现大振幅阱间振荡和高电压输出。当磁铁 B 和磁铁 C 之间垂直距离 a 为 0.018 m 时, $4.8\sim 6.2 \text{ Hz}$ 频率范围内的峰值电压均高于其他频率。随着距离 a 的增加, MTTENG 的阱间振荡频段逐渐变窄, 高电压频率范围缩小了 85.71%。因此, 减小距离 a 可以有效拓宽 MTTENG 的能量收集频带。

Table 3. Performance parameters table of a vibration energy harvester based on collision-induced triboelectric nanogenerator
表 3. 碰撞机制摩擦纳米发电振动能量采集器性能参数表格

| 作者 | 器件材料及尺寸 | 工作频率 | 输出电压 | 输出功率 |
|-------------|---|------------|--------|----------|
| Zhao 等人[22] | 滑块密度: 1180 kg/m^3 胶囊: $80 * 40 \text{ mm}^2$ | 2~14 Hz | 52 V | 0.023 mW |
| Tan 等人[23] | 柔性梁: $100 * 16 * 0.3 \text{ mm}^3$ 拉杆: 46.6 mm | 1~6 Hz | 470 V | 4.5 mW |
| 高思航等人[24] | 总体尺寸: $100 * 100 * 80 \text{ mm}^3$ | 15~35 Hz | 360 V | 2.8 mW |
| Cui 等人[25] | 底层圆盘: $53 * 3 \text{ mm}^2$ | 10~2000 Hz | 39.7 V | — |
| Tan 等人[26] | 磁体体积: 512 mm^3 | 4~7 Hz | 272 V | 0.322 mW |

如表 3 所示, 研究碰撞机制摩擦纳米发电振动能量采集器的性能参数总结。Zhao 等人的胶囊型设计验证了装置长度对输出性能的影响, 找到了提高能量转换效率的最优结构参数。Tan 等人的双稳态摩擦纳米发电机通过限位器碰撞增强了能量收集效果, 特别在低频范围表现优异, 同时三稳态 MTTENG 通过磁负刚度设计扩展了能量响应宽度。高思航等人提出的垂直多层碰撞结构在中低频振动下输出稳定, 证明了在电网环境中的应用潜力。Cui 等人开发的蜂窝结构 DL-TENG 在宽频范围内表现出色, 尤其在高频和振动监测方面具有实际应用价值。但它们都面临着能量转换效率、系统稳定性以及结构复杂性之间的权衡, 长期使用可能导致能量损失, 影响装置稳定性和输出功率。因此, 之后应更加关注如何在牺牲系统稳定性的情况下, 简化结构和优化设计, 同时提高能量采集系统的长期稳定性和适应性, 以便更好地适应实际应用场景的多变性和挑战。

3.2.2. 复合机制电磁 - 摩擦纳米发电振动能量采集

复合机制电磁 - 摩擦纳米发电振动能量采集结合了电磁感应与摩擦电效应两种机制，能够在低频或复杂振动环境中实现高效能量采集。电磁感应通过外界振动使磁体与线圈相对运动，产生磁通量变化并转换为电能。该复合机制通过协同利用电磁感应的高输出特性与摩擦纳米发电的高灵敏性，不仅扩展了采集频率范围，还显著提高了输出功率密度和能量转化效率。在系统设计中，电磁感应与摩擦电效应的协同作用引发了复杂的耦合动力学问题。两者在输出特性上的差异，前者为低电压高电流的连续信号，后者为高电压低电流的脉冲信号，对整流与能量管理电路提出了更高要求。发展具备实时感知与调控能力的管理系统，如自适应整流、智能阻抗匹配和多级能量存储策略，以保障系统在多变振动环境下的高效稳定运行。

2022年 Tang 等研发了一种非谐振式复合纳米发电机[27]，该设备结合了压电、电磁以及摩擦电效应，旨在高效捕获低频段人体运动所产生的能量。如图 7 所示，电磁发电装置(EMG)位于中间部分，用于捕捉磁通量的变化。压电能量采集器位于两端，当磁铁撞击时通过压电效应来收集能量。摩擦发电机沿着内表面布置，利用磁铁表面的摩擦电荷产生电流。在实验过程中，随着振动频率的不断上升，各个组成单元的输出电压与电流均呈现出明显地增长趋势。特别是在低频条件下，设备依然保持良好的输出性能。这表明该设备能够在较宽的频率范围内有效采集能量，并且在较宽的频率和位移范围内都能保持良好的性能。

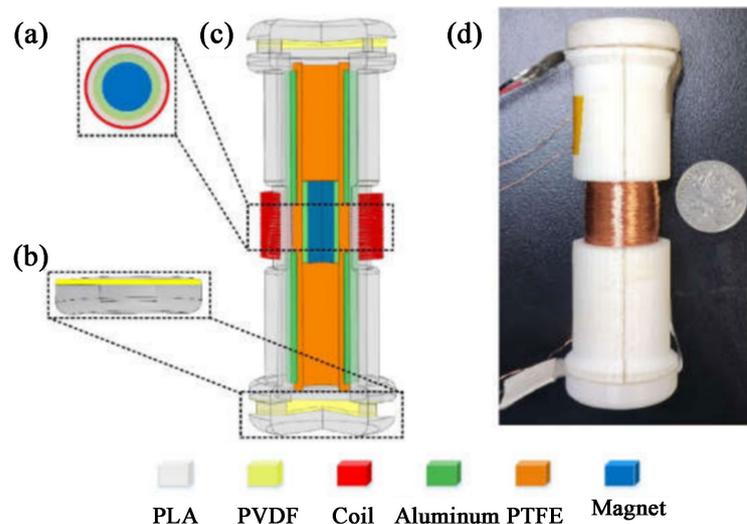


Figure 7. Structure of the piezoelectric—electromagnetic-triboelectric-hybrid energy harvester
图 7. 压电 - 电磁 - 摩擦电混合能量采集器的结构

2023年曹志等设计了一种结合塔状弹簧的复合式摩擦 - 电磁全向发电机[28]，如图 8 所示。该设计由空心圆柱体和圆柱形磁铁组成的上部、由 Z 字形 TENG 单元和塔状弹簧组成。低频段主要由 TENG 机制主导，其通过材料间周期性接触 - 分离产生电荷；而在高频振动条件下，磁铁的快速相对运动增强了电磁感应效应，使 EMG 输出电压显著提高。两种换能机制在塔状弹簧的调制作用下形成柔性耦合，系统表现出典型的频率相关非线性响应行为。在电机运动振幅为 5 cm 时，EMG 的开路电压随着频率的增加而增加，当频率为 2 Hz 时，EMG 的开路电压达到 1.4 V 左右，从而可以看出 TENG 在低频能量采集中更有效，而 EMG 具有随着频率提高而提高的效果，由此表明这种非线性耦合不仅增强了对微弱、多向振动信号的适应性，也有效拓展了发电机的工作频带。

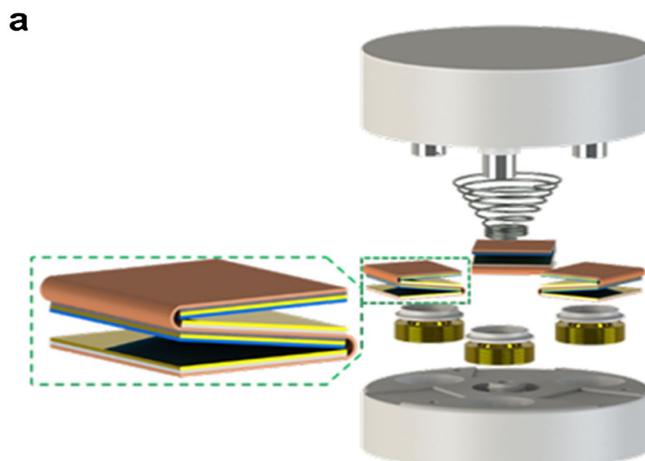


Figure 8. Composite electromagnetic-friction omnidirectional generator
图 8. 复合式电磁 - 摩擦全向发电机

2024 年 Ding 等通过创新的磁耦合辅助防水封装设计, 采用磁耦合传动组件代替传统的轴承结构, 开发了一种性能优异且耐用的电磁 - 摩擦混合纳米发电机(TE-HNG) [29], 通过将 TENG 嵌套在 EMG 内部, 使得两种发电机制能够在同一设备中协同工作。在水轮机转速为 75 转/分钟时, TE-HNG 能够产生 114.83 mW 的峰值输出功率, 对应的峰值功率密度为 37.105 W/m³。此外, TE-HNG 在不同的流速和频率条件下均表现出了稳定的输出性能, 这表明其设计在一定程度上能够适应不同频率的能量输入, 从而实现频带的拓宽。并且经过 5 小时的连续运行后, TENG 的电输出衰减小于 3%。该设备的卓越耐久性得到了验证, 表明其能够在持续长时间的运行过程中维持稳定的性能表现, 从而确保了其在海洋能收集实际应用中的可行性和可靠性。

2025 年 Liu 等设计出一种大功率电磁摩擦电混合发电机(ETHG)来解决现有发电机工作带宽窄和输出功率低的问题[30]。ETHG 的整体设计, 包括一个由对称的多弹簧质量骨架支撑组成的拾取单元、一个由两组相互排斥的磁铁和线圈组成的 EMG 组件、一个由两个并联的粘有 FEP 薄膜折纸组成的 TENG 组件和一个外壳。沿着 Z 轴方向振动时, 强模式耦合和非线性相互作用使得谐振峰合并, 当拾取单元与折纸 TENG 碰撞时, 阻尼和刚度的变化会引起非线性效果, 从而将谐振频率向高频方向移动, 与高阶模式的频率重叠, 有效地合并和拓展了工作带宽, 也体现出复合机制发电系统中多自由度间的协同响应特性。

Table 4. Performance parameters table of a vibration energy harvester based on composite electromagnetic-triboelectric nanogenerator

表 4. 复合机制电磁 - 摩擦纳米发电振动能量采集器性能参数表格

| 作者 | 器件材料及尺寸 | 工作频率 | 输出电压 | 输出功率 |
|-------------|--|----------|------------------------------|------------------------------|
| Tang 等人[27] | 空心半圆柱体: 117 * 36 mm ² 圆柱形钕铁硼磁铁: 10 * 30 mm ² | 3~5 Hz | 9.8 V | 26.17 mW |
| 曹志等人[28] | N35 磁铁: 10 * 10 mm ² 塔状弹簧: 线径 0.8 mm | 0.4~2 Hz | 1.4 V | 3 mW |
| Ding 等人[29] | 圆柱形外壳: 240 * 3 * 36 mm ³ 中心轴: 16 * 20 * 264 mm ³ 轴承: 20 * 32 * 7 mm ³ | — | 9.46 V | 114.83 mW |
| Liu 等人[30] | 0.08 mm 厚度的导电织物、 0.05 mm 厚度的 FEP | 10~40 Hz | EMG: 3.28 V TENG: 523.8 V | EMG: 46.9 mW TENG: 8.2 mW |

如表 4 所示的性能参数总结中, Tang 等人提出的非谐振式复合纳米发电机结合压电、电磁与摩擦电效应, 在宽频范围内实现了稳定输出。曹志等人研发的复合摩擦 - 电磁全向发电机在低频下具备良好能量采集能力, 且其电磁部分在高频时输出提升, 拓宽了工作频带。Ding 等人通过引入磁耦合传动组件, 替代传统轴承, 显著增强了系统稳定性与耐久性, 尤其适用于海洋能环境。Liu 等人利用非线性效应和多弹簧质量结构设计, 有效拓展了带宽并提升了输出功率。然而, 当前复合机制仍面临挑战, 如复杂机械结构与多材料组合带来的维护难度, 以及在高频振动环境中潜在的疲劳失效问题。此外, 电磁与摩擦电效应在部分频段存在耦合干扰, 影响整体系统效率的稳定性。

3.3. 基于不同物理机理的宽频振动能量采集器非线性比较

(1) 基于磁力耦合与屈曲梁结构的宽频振动能量采集器

基于磁力耦合的宽频振动能量采集器利用磁力的非线性特性, 在低频和中频范围内可实现高效能量转换, 避免了物理接触带来的磨损, 延长了使用寿命, 但面临磁场稳定性、部件相对运动以及可能对周边设备造成干扰等挑战, 且器件微型化难度较大, 限制了其应用范围; 基于屈曲梁结构的宽频振动能量采集器则通过屈曲梁的双稳态特性实现非线性宽频采集, 具有结构简单、适应性强以及微型化优势, 但精确调控曲率较难, 会影响频带宽度和能量转换效率。

(2) 碰撞式摩擦与复合式电磁 - 摩擦纳米发电振动能量采集器

碰撞式摩擦纳米发电机通过碰撞过程中的接触电荷转移和静电感应效应, 实现机械能到电能直接转化。该技术具有材料选择广泛、结构简单以及良好的自供电特性, 广泛适用于自供电电子设备。但长期使用后机械部件的磨损会导致摩擦界面的损伤, 会影响耐用性和稳定性。此外, EMG 更适合在高频下采集能量。因此两者结合拓宽了工作频带, 使设备能够在更广泛的振动环境下高效工作。但由于结合了两种发电机制, 增加了结构制造上的难度和成本, 这在一定程度上限制了其大规模生产和应用。

4. 总结与展望

非线性宽频振动能量采集技术作为推动低功耗电子设备自供能系统发展的关键手段, 近年来得到了广泛关注和持续深入的研究。通过引入双稳态、磁耦合、等非线性机制, 相关器件在频率响应宽度、能量输出稳定性以及低频激励适应性方面均取得显著进展。然而, 当前技术仍面临材料响应滞后、能量管理集成度不高等挑战, 制约了其在复杂环境下的长期可靠运行。未来的研究方向应着重突破以下几个领域: 一是在建模层面, 发展能够耦合机械、电学、磁学与热力学的非线性多物理场理论, 以预测不同激励条件下的系统响应, 并分析长期疲劳与寿命; 二是在材料层面, 研发具备内禀非线性特性的可调压电、摩擦材料和柔性磁性复合材料, 以促进自适应频率调谐与能量整合; 三是在系统层面, 设计与非线性输出特性匹配的高效能量管理电路(PMIC), 支持智能整流、能量追踪与储能; 四是在应用层面, 根据特定场景如植入式医疗设备和海洋能采集等, 分析振动特性并开发匹配的专用采集器件, 以提升系统在复杂工况下的稳定性与功率密度。随着建模理论、功能材料、系统集成及应用场景理解的不断深入, 非线性宽频能量采集技术将成为推动新一代“能量自主智能系统”发展的核心支撑技术之一。

基金项目

国家自然科学基金(12474470); 浙江省自然科学基金(LY24A040005)。

参考文献

- [1] Tang, L., Yang, Y. and Soh, C.K. (2010) Toward Broadband Vibration-Based Energy Harvesting. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **21**, 1867-1897. <https://doi.org/10.1177/1045389x10390249>

- [2] 刘久周, 张凤玲, 辛健强, 等. 一种非线性宽频压电能量收集系统的动力学特性分析[J]. 振动工程学报, 2021, 34(3): 567.
- [3] Fan, F., Tian, Z. and Lin Wang, Z. (2012) Flexible Triboelectric Generator. *Nano Energy*, **1**, 328-334. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2012.01.004>
- [4] Cottone, F., Vocca, H. and Gammaitoni, L. (2009) Nonlinear Energy Harvesting. *Physical Review Letters*, **102**, Article ID: 080601. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.102.080601>
- [5] Erturk, A., Hoffmann, J. and Inman, D.J. (2009) A Piezomagnetoelastic Structure for Broadband Vibration Energy Harvesting. *Applied Physics Letters*, **94**, Article ID: 254102. <https://doi.org/10.1063/1.3159815>
- [6] Chen, H., Xu, Y., Zhang, J., Wu, W. and Song, G. (2018) Theoretical System of Contact-Mode Triboelectric Nanogenerators for High Energy Conversion Efficiency. *Nanoscale Research Letters*, **13**, 346-350. <https://doi.org/10.1186/s11671-018-2764-2>
- [7] Wang, Z.L. (2017) On Maxwell's Displacement Current for Energy and Sensors: The Origin of Nanogenerators. *Materials Today*, **20**, 74-82. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2016.12.001>
- [8] Niu, S. and Wang, Z.L. (2015) Theoretical Systems of Triboelectric Nanogenerators. *Nano Energy*, **14**, 161-192. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2014.11.034>
- [9] 丁晓亮. 非线性 M 形梁压电振动能量收集装置的设计与实验研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 青岛大学, 2021.
- [10] 范雪明. 摩擦-电磁复合式高效能量采集器设计研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 中北大学, 2020.
- [11] 周少艺, 黄俊刚, 袁泉, 等. 非线性振动能量采集和阻尼器动力学特性研究[J]. 科技与创新, 2025(3): 13-17.
- [12] 张颖, 王伟, 曹军义, 等. 多稳态俘能系统的准确磁力建模方法[J]. 力学学报, 2021, 53(11): 2984-2995.
- [13] 张伟, 刘爽, 毛佳佳, 等. 磁耦合式双稳态宽频压电俘能器的设计和俘能特性[J]. 力学学报, 2022, 54(4): 1102-1112.
- [14] 梁超, 马洪业, 王珂, 等. 基于非线性谐振电路的双稳态俘能器的俘能与动力学特性研究[J]. 力学学报, 2023, 55(5): 1181-1194.
- [15] 张旭辉, 朱福林, 潘家楠, 等. 磁力耦合阵列式压电俘能器振动特性研究[J]. 振动工程学报, 2024, 37(7): 1191-1199.
- [16] Feng, Y., Wang, J., Chen, X. and Liu, P. (2025) Experimental Study of a Broadband Vibration Energy Harvester Based on Orthogonal Magnetically Coupled Double Cantilever Beam. *Micromachines*, **16**, 722-725. <https://doi.org/10.3390/mi16060722>
- [17] 栾浩, 田立斌, 陈坤铭, 等. 一种磁耦合型 M 形屈曲梁压电俘能器研究[J]. 青岛大学学报, 2024, 37(2): 73-78.
- [18] 梁勇, 潘殿坤, 伍章明, 等. 悬臂双稳态屈曲梁能量收集器动力学响应分析[J]. 机械科学与技术, 2024, 25(7): 118-126.
- [19] Heidari, M., Rahimi, G.H. and Bab, S. (2024) Ocean Non-Linear Energy Harvesting (NEH) with a Buckled Piezoelectric Beam. *Applied Ocean Research*, **150**, Article ID: 104115. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2024.104115>
- [20] Pan, D., Liang, Y., Zhang, Z. and Wu, Z. (2025) Design and Dynamics of a Cantilevered Bistable Buckled Piezoelectric Beam for Vibrational Energy Harvesting. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **224**, Article ID: 112013. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2024.112013>
- [21] Xu, J., Su, X., Zhu, B., Qian, N., Chen, X., Wen, X., et al. (2025) Performance Evaluation and Wireless Sensing Applications of an Enhanced Piezoelectric-Electromagnetic Hybrid Energy Harvester with Bistable Superposition Mechanism. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **226**, Article ID: 112305. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2025.112305>
- [22] Zhao, H. and Ouyang, H. (2021) A Capsule-Structured Triboelectric Energy Harvester with Stick-Slip Vibration and Vibro-Impact. *Energy*, **235**, Article ID: 121393. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121393>
- [23] Tan, D., Zhou, J., Wang, K., Ouyang, H., Zhao, H. and Xu, D. (2023) Sliding-Impact Bistable Triboelectric Nanogenerator for Enhancing Energy Harvesting from Low-Frequency Intrawell Oscillation. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **184**, Article ID: 109731. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2022.109731>
- [24] 高思航, 冯少轩, 刘咏熙, 等. 基于摩擦纳米发电机的输电线路振动能量收集装置[J]. 电力工程技术, 2024, 43(5): 208-215.
- [25] Cui, J., Li, X., Wang, K., Yan, X., Zheng, Y. and Xue, C. (2025) A Wide-Frequency Triboelectric Vibration Sensor for Self-Powered Machinery Health Monitoring. *Nano Energy*, **133**, Article ID: 110481. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2024.110481>
- [26] Tan, D., Ou, X., Zhou, J., Wang, K., Pan, H., Peng, J., et al. (2025) Magnetic Tri-Stable Triboelectric Nanogenerator for Harvesting Energy from Low-Frequency Vibration. *Renewable Energy*, **243**, Article ID: 122517. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.122517>

- [27] Tang, G., Wang, Z., Hu, X., Wu, S., Xu, B., Li, Z., *et al.* (2022) A Non-Resonant Piezoelectric-Electromagnetic-Triboelectric Hybrid Energy Harvester for Low-Frequency Human Motions. *Nanomaterials*, **12**, 1168-1169. <https://doi.org/10.3390/nano12071168>
- [28] 曹志. 基于摩擦-电磁复合式振动能量采集技术及其应用研究[D]: [硕士学位论文]. 南宁: 广西大学, 2023.
- [29] Ding, S., Zhai, H., Tao, X., Yang, P., Liu, Z., Qin, S., *et al.* (2024) A Triboelectric-Electromagnetic Hybrid Nanogenerator with Magnetic Coupling Assisted Waterproof Encapsulation for Long-Lasting Energy Harvesting. *Small*, **20**, Article ID: 2403879. <https://doi.org/10.1002/sml.202403879>
- [30] Liu, H., Wang, Z., Shang, Y., Li, Z., Tang, W., Li, Z., *et al.* (2025) An Electromagnetic-Triboelectric Hybrid Generator (ETHG) for Harvesting Broadband and Multi-Directional Vibration Energy from Transmission Lines. *Next Energy*, **7**, Article ID: 100292. <https://doi.org/10.1016/j.nxener.2025.100292>