

文章编号: 1673-3193(XXXX)XX-0001-10

基于互补式摩擦纳米发电机的宽频带 振动能量采集系统

田力, 石云波*, 赵锐, 曲云天, 高世杰

(中北大学 电子测试技术重点实验室, 山西 太原 030051)

摘要: 为解决传统摩擦纳米发电机(Triboelectric Nanogenerator, TENG)在振动能量采集中普遍存在的有效工作带宽窄、输出电压不稳定等问题, 本文提出一种基于互补接触-分离机制的宽频带耦合能量采集系统。该系统采用上下对称的双TENG单元与弹簧-质量块耦合结构, 通过两对TENG在振动过程中的交替接触与分离, 实现能量输出的时间互补与平滑叠加, 从而显著拓宽工作带宽并提升输出稳定性。本文首先建立了系统的二自由度弹簧-质量-阻尼动力学模型, 并利用描述函数法对碰撞非线性进行等效线性化处理, 推导出振幅相关的等效刚度与等效阻尼表达式, 揭示了系统在碰撞介入后共振频率向高频移动的带宽拓展机理。进一步通过有限元仿真分析了垂直-接触分离模式下摩擦层间距对电势分布的影响, 验证了理论模型的合理性。在此基础上, 采用控制变量法系统探究了弹簧刚度(250~350 N/m)、质量块质量(50~110 g)、上层TENG初始间隙(1~3 mm)及外部激励加速度(9~15 m/s²)等关键参数对系统频率响应与输出电压的影响规律。仿真与实验结果表明, 当弹簧刚度为300 N/m、质量块为80 g、上层TENG初始间隙为1 mm时, 系统在加速度为15 m/s²的激励下可实现11~25 Hz的宽频稳定工作带宽, 峰值输出电压可达较高水平。本研究提出的互补式耦合结构有效克服了单路TENG输出脉冲性强、能量空白期长的缺点, 为低频振动环境下的持续能量采集提供了一种结构简单、无需外源控制的解决方案, 适用于转速在900~1 500 r/min(对应频率15~25 Hz)的工业电机、泵机等设备的振动能量回收, 可为物联网传感节点实现自供电。

关键词: 摩擦纳米发电机; 振动能量采集; 互补机制; 宽频带; 耦合能量采集系统

中图分类号: TM31

文献标识码: A

doi: 10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2025.11.0023

引用格式: 田力, 石云波, 赵锐等. 基于互补式摩擦纳米发电机的宽频带振动能量采集系统[J]. 中北大学学报(自然科学版), DOI:10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2025.11.0023.

Tian Li, Shi Yunbo, Zhao Rui, et al. Broadband Vibration Energy Harvesting System Based on Complementary Triboelectric Nanogenerators [J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), DOI: 10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2025.11.0023.

Broadband Vibration Energy Harvesting System Based on Complementary Triboelectric Nanogenerators

Tian Li, Shi Yunbo*, Zhao Rui, Qu Yuntian, Gao Shijie

(Key Laboratory of Electronic Testing Technology, North China University of Technology, Taiyuan 030051, China)

Abstract: To solve the problems of narrow effective working bandwidth and unstable output voltage widely existing in vibration energy harvesting of traditional Triboelectric Nanogenerators (TENG), this

收稿日期: 2025-11-20

作者简介: 田力(2001—), 男, 硕士生, 主要从事摩擦纳米发电器件设计的研究。

* 通信作者: 石云波(1972—), 男, 教授, 博士, 主要从事MEMS技术、微惯性技术、硬件电路的研究。E-mail: shiyunbo@nuc.edu.cn。

paper proposed a broadband coupling energy harvesting system based on a complementary contact-separation mechanism. The system utilized a vertically symmetrical double TENG unit and a spring-mass coupling structure. Through the alternating contact and separation of two pairs of TENGs during vibration, the time complementation and smooth superposition of energy output were achieved, thereby significantly broadening the working bandwidth and improving output stability. This paper first established a two-degree-of-freedom spring-mass-damper dynamic model of the system. The describing function method was employed to linearize the collision nonlinearity, and the amplitude-dependent equivalent stiffness and equivalent damping expressions were derived, which revealed the bandwidth expansion mechanism where the resonance frequency shifts to high frequency after collision intervention. Furthermore, the influence of the friction layer spacing on the potential distribution under the vertical contact-separation mode was analyzed through finite element simulation, and the rationality of the theoretical model was verified. On this basis, the controlled variable method was used to systematically explore the influence laws of key parameters such as spring stiffness (250—350 N/m), mass block mass (50—110 g), upper TENG initial gap (1—3 mm), and external excitation acceleration (9—15 m/s²) on the system frequency response and output voltage. Simulation and experimental results show that when the spring stiffness is 300 N/m, the mass is 80 g, and the initial gap of the upper TENG is 1 mm, the system achieves a broadband stable working bandwidth of 11—25 Hz under the excitation of 15 m/s² acceleration, and the peak output voltage reaches a high level. The complementary coupling structure proposed in this study effectively overcomes the shortcomings of strong output pulsatility and long energy blank periods of single-channel TENGs. It provides a simple solution without external control for continuous energy harvesting in low-frequency vibration environments, is suitable for vibration energy recovery of industrial motors and pumps with speeds of 900—500 r/min (corresponding to frequencies of 15—25 Hz), and enables self-powering for IoT sensor nodes.

Key words: triboelectric nanogenerator; vibration energy harvesting; complementary mechanism; broadband; coupling energy harvesting system

0 引 言

在现代工程领域中,环境与机械系统普遍存在着大量低频振动能量,如桥梁与建筑结构的风致振动^[1-3]、轨道交通与车辆运行中的机械振动^[4-6]、工业设备运转过程中的周期性机械扰动等^[7-8]。这些普遍存在的低频机械振动往往被浪费为热能或噪声,若能有效加以收集与转化,可为分布式传感系统、结构健康监测装置及低功耗微机电系统提供持续能源来源^[9-12]。因此,振动能量采集(Vibration Energy Harvesting, VEH)技术逐渐成为实现长期自驱动监测和智能基础设施的重要研究方向^[13-15]。

在众多能量采集方式中,摩擦纳米发电机因其高输出电压、材料选择灵活、易于结构设计等优势,在低频机械能转化领域受到广泛关注^[16-18]。ZHANG等构建的TENG能够在约13.9 Hz的谐

振频率下实现11.2 Hz的有效工作带宽^[19];然而,单路TENG通常存在鲁棒性差、工作带宽窄及输出随振动频率显著波动等问题。BHATIA团队进一步提出了级联冲击式串联TENG结构,采用多模态机制通过组合多个不同频率的振动单元,将多个响应区域进行相互叠加,实现了较宽的工作带宽^[20],但其对关键结构参数及带宽优化机制未作系统探讨,仍难满足复杂振动环境下的宽频稳定输出需求。

针对上述传统TENG带宽窄、输出不稳的问题,本文提出了一种基于互补接触-分离机制的宽频带耦合能量采集系统(CEH)。该系统采用弹簧-质量块结构,通过上下两对TENG的交替运动,使一对处于接触阶段时另一对处于分离阶段,从而实现输出的互补与平滑,有效拓展TENG的工作带宽至11~25 Hz,并提升其在低频振动环境下的稳定能量采集能力,工作带宽对比其他工作有一定的提升,如表1所示。

表1 不同文献工作带宽对比

Tab. 1 Comparison of operating bandwidth in literature

其他作者工作	器件工作带宽/Hz
TOYABUR等 ^[21]	10.0
ZHANG等 ^[19]	11.2
CHEN等 ^[22]	13.4
本文	14.3

许多工业场景中的感应电极、压缩机及水泵,其正常运行转速通常处于900~1500 r/min范围,根据频率换算公式 $f=n/60$ 计算,其中 n 为转速,对应的工作频率恰好落在15~25 Hz区间,与CEH的有效工作频带契合。通过将CEH装置直接安装于这类设备的电机外壳或泵机基座,可高效收集设备运行过程中产生的固有振动能量,再经配套电路处理后,为振动传感器、温度传感器等物联网传感节点提供持续稳定的供电支持。

1 系统结构与工作机理

1.1 互补式CEH结构设计

设计了一种包含两对弹簧-质量块结构的耦合能量采集系统。当其中一对正负摩擦层处于分离阶段时,另一对则处于接触阶段。当在系统工作带宽内受到较小频率的激励时,D-TENG的输出大于U-TENG,而当频率变大时,U-TENG的输出电压更大,显著提高系统输出的稳定性。在材料选择方面,聚全氟乙丙烯(Fluorinated Ethylene Propylene, FEP)与铜(Copper, Cu)因其优异的接触带电性能,被分别用作负摩擦层与正摩擦层。外壳与支撑层选用亚克力板材料,主要基于其优良的可塑性和结构稳定性。具体的制造步骤详见实验部分。该耦合能量采集装置(CEH)的三维结构如图1所示。

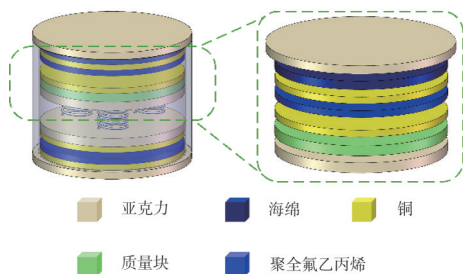


图1 三维结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the three-dimensional structure

整体结构呈圆柱形直径50 mm,高为40 mm,圆柱体内顶部与底部的亚克力板内表面分别作为两对TENG单元的负摩擦层,其结构均由FEP薄

膜及其背面附着的Cu薄膜构成厚度均为0.05 mm。为减缓冲击,在顶部亚克力板与负摩擦层之间加入了海绵层1 mm作为缓冲材料。中间的活动部件由两块亚克力板通过弹簧连接组成,上方亚克力板的外表面与正摩擦层之间安装有质量块,下方亚克力板则直接与正摩擦层接触。在工作过程中,CEH装置固定于振动台上,底部亚克力板将外界振动传递至中间的活动部件。活动部件在周期性振动作用下,与顶部和底部的亚克力板交替碰撞,使正负摩擦层反复接触与分离,从而实现机械能到电能的转换。

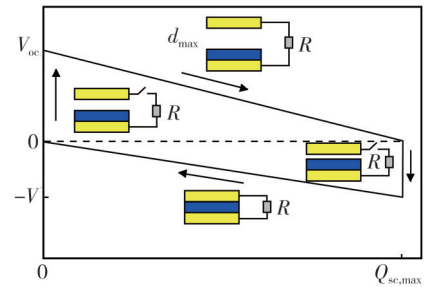


图2 摩擦纳米发电机最大能量输出

Fig. 2 Maximum energy output of triboelectric nanogenerators

根据摩擦纳米发电机的电容模型,图2为摩擦纳米发电机的最大能量输出策略,单次循环输出的能量 E 等于 $V-Q$ 闭合曲线所包围的面积即 $E=\int VdQ$,传统的最大能量输出策略(CMEO)通常通过电源管理电路中的开关控制来实现。如图所示,理想的CMEO循环包含四个步骤:1)开路分离导致电压升高;2)峰值电压下的闭合开关放电;3)开路接触导致电压反向;4)再次闭合开关复位。然而,对于单一的TENG单元,其能量生成主要集中在接触-分离的半个周期内,导致在整个振动周期中,有效能量输出的占空比较低。本文提出的CEH系统中,利用机械结构的互补特性解决了这个问题。由于上部U-TENG与下部D-TENG在空间上呈镜像分布,二者在振动过程中存在180°的固有相位差。当U-TENG处于分离阶段导致开路电压 V_{oc} 上升至峰值时,D-TENG刚好处于接触复位阶段,反之亦然。这种工作模式使得系统在任意时刻均有一个TENG单元处于高电势能积聚状态。相较于单路TENG的脉冲式输出,双路互补结构在时间域上实现了 $V-Q$ 能量循环的交替叠加有效填补了单一单元在复位阶段的能量空白。结合后续设计的无源管理电路,系统能够交替捕捉两个TENG在各自峰值位移处的

最大静电势能,从而显著提升了单位时间内的振动能量转化效率和输出功率密度。

1.2 TENG理论模型

为了深入了解该二自由度系统的频带特性,建立一个二自由度弹簧-质量-阻尼器机械模型。模型的可动部件由两个质量块组成:质量块 m_1 通过刚度 k_1 和阻尼 c_1 与基座相连,质量块 m_2 通过中间弹簧 k 和阻尼 c 悬挂在 m_1 上。框架顶部可以看作限位器,假设其接触刚度为 k_2 ,阻尼因子为 c_2 ,顶框与可动质量块 m_2 之间的初始距离为 d 。

假设系统受到的激励为 $y=Y\sin(\omega t)$,设 x_1, x_2 分别为质量块 m_1 和 m_2 相对于框架的相对位移。 m_2 质量块的相对运动根据间隙 d 分为两个阶段,第一阶段:非碰撞线性阶段,当 m_2 的相对运动小于初始距离 d ,此时顶框不参与工作,第二阶段:碰撞介入阶段,当 m_2 的相对运动超过 d 时, m_2 撞击框顶,达到第二个阶段, m_2 的整体刚度和阻尼变为 $k+k_2$ 和 $c+c_2$ 。

系统的运动微分方程分为两个部分,即

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + (c_1 + c) \dot{x}_1 + (k_1 + k) x_1 - c \dot{x}_2 - k x_2 = m_1 \omega^2 Y \sin(\omega t), \\ m_2 \ddot{x}_2 + c(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k(x_2 - x_1) + F(x_2, \dot{x}_2) = m_2 \omega^2 Y \sin(\omega t), \end{cases}$$

其中, F 是一个分段函数,具体为

$$F(x_2, \dot{x}_2) = \begin{cases} 0, & x_2 < d, \\ k_2(x_2 - d) + c_2 \dot{x}_2, & x_2 \geq d. \end{cases}$$

由于碰撞力的强非线性利用描述函数法对系统进行线性化处理,将非线性碰撞力近似为与振幅 A_2 相关的等效刚度 K_{eq} 和等效阻尼 C_{eq} ,假设 m_2 为简谐运动 $x_2 \approx A_2 \cos(\omega t + \varphi)$

当 $A_2 < d$ 时 $K_{eq}=0, C_{eq}=0$ 。当 $A_2 \geq d$ 时,等效参数为

$$K_{eq}(A_2) = \frac{k_2}{\pi} \left[\arccos\left(\frac{d}{A_2}\right) - \frac{d}{A_2} \sqrt{1 - \left(\frac{d}{A_2}\right)^2} \right],$$

$$C_{eq}(A_2) = c_2 \frac{1}{\pi} \arccos\left(\frac{d}{A_2}\right).$$

引入等效参数后,系统方程转化为线性形式。写成复数阻抗矩阵形式 $[Z]\{X\}=\{F\}$,即

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22}(A_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix},$$

其中,阻抗项 $Z_{22}(A_2)$ 表示为

$$Z_{22}(A_2) = (k + K_{eq}) - m_2 \omega^2 + j\omega(c + C_{eq}).$$

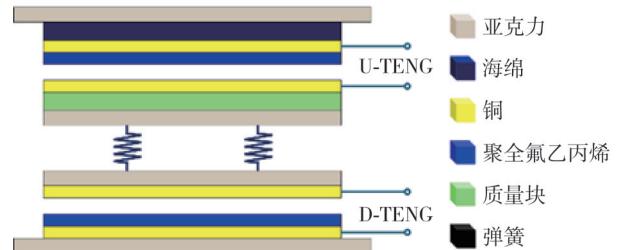
利用克莱姆法则求解 m_2 的振幅 $A_2=|X_2|$,可得到隐式方程

$$A_2 = \left| \frac{Z_{11}F_2 - Z_{21}F_1}{Z_{11}Z_{22}(A_2) - Z_{12}Z_{21}} \right|.$$

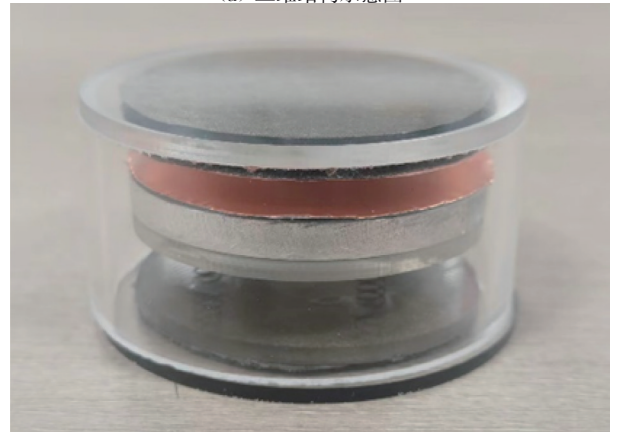
通过数值方法求解该隐式方程,可揭示系统的频响特性:当振幅 $A_2 < d$ 时,系统表现为线性,并在共振频率处出现峰值;随着频率改变,动力吸振效应导致振幅衰减形成反共振谷。当振幅 $A_2 \geq d$ 时,等效刚度 K_{eq} 随振幅增加而显著增大,导致系统总刚度变大,导致共振频率向高频移动,当频率超过临界点,振幅从高点回归到低幅值的线性状态,从而有效拓宽了系统的响应频带。

1.3 TENG工作模式与理论模型

在CEH中,两个TENG单元均采用垂直接触-分离模式工作,其结构与工作原理如图3(a)所示。顶端负摩擦层与活动部件上方的正摩擦层组成上部TENG(U-TENG),底端负摩擦层与活动部件下方的正摩擦层组成下部TENG(D-TENG)。



(a) 二维结构示意图



(b) 实物图

图3 结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram

该工作模式基于接触起电与静电感应的耦合作用^[23],其完整的工作循环可分为四个阶段,如

图 4(a) 所示。在 I 阶段, TENG 的 Cu 薄膜与 FEP 薄膜完全接触。由于两种材料功函数存在差异, 电子由 Cu 薄膜转移至 FEP 薄膜表面, 使两者分别带有数量相等、极性相反的电荷。由于 FEP 具有优良的绝缘性, 电子被束缚在其表面。进入 II 阶段, 摩擦层逐渐分离, 在静电感应作用下, FEP 薄膜对应的 Cu 电极带正电, 部分电子由该电极流向 Cu 薄膜, 从而产生感应电流。当系统达到 III 阶段时, 摩擦层间距达到最大, 电荷转移过程趋于平衡, 系统处于静电平衡状态。随后进入 IV 阶段, 即再接触过程, 在静电吸引作用下, 电子重新由 Cu 薄膜流回 Cu 电极, 系统电荷恢复至初始分布, 最终返回 I 阶段, 完成一个完整的能量转换周期。

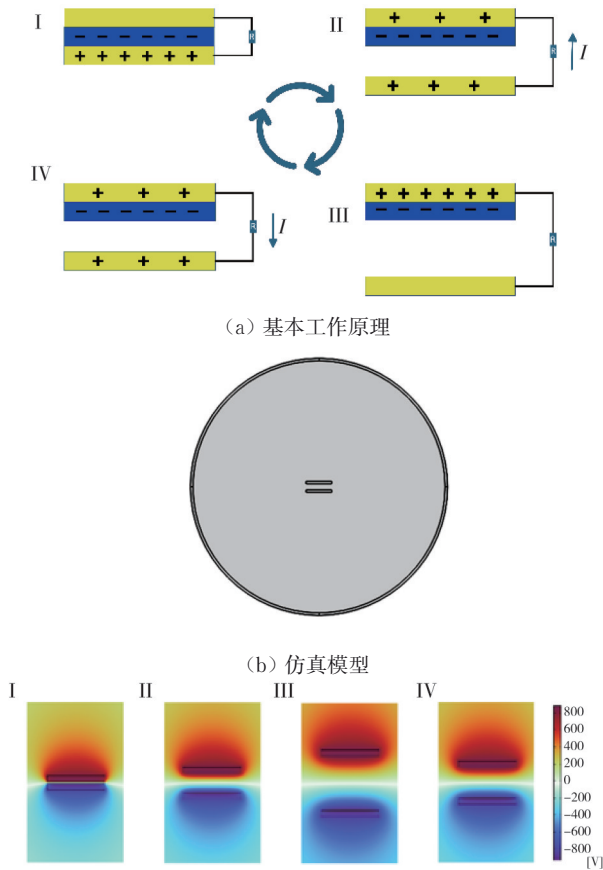


图 4 TENG 工作原理

Fig. 4 Working principle of triboelectric nanogenerators

1.4 电位分布仿真

利用有限元仿真软件对 TENG 垂直接触-分离过程的电位分布进行了数值模拟, 其模型参数如表 2 所示, 设置其边界为接地, 摩擦层的表面电荷密度分别为 $\pm 5 \times 10^{-6} \text{ C/m}^2$, 通过参数化扫

描摩擦层之间的间距来分析其电场分布情况。

表 2 模型结构参数

Tab. 2 Model geometric parameters

摩擦层长度 l/mm	摩擦层高度 h/mm	电场半径 r/mm
10	1	50

结果如图 4(b) 所示, 从 I 阶段至 III 阶段, 随着摩擦层间距的增大, 层间电势差逐渐上升; 而从 III 阶段至 IV 阶段, 随着间距减小, 电势差随之降低。仿真结果与理论分析具有良好一致性, 验证了模型的合理性。

2 系统性能仿真与参数优化

2.1 运动仿真

为拓宽 CEH 的工作带宽, 提升其对不同振动环境的适应能力, 对其幅频特性进行分析。构建如图 5 所示的动力学模型, 模型由四个尺寸相同的圆柱体组成, 自上而下分别代表上固定板、上活动板与质量块、下活动板、下固定板, 其中自上而下第二块设置为 80 g, 模拟质量块对系统振动行为的影响。

表 3 关键参数

Tab. 3 Key parameters

U-TENG 间隙 d/mm	弹簧刚度 $k/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	质量块质量 m/g
1	300	80

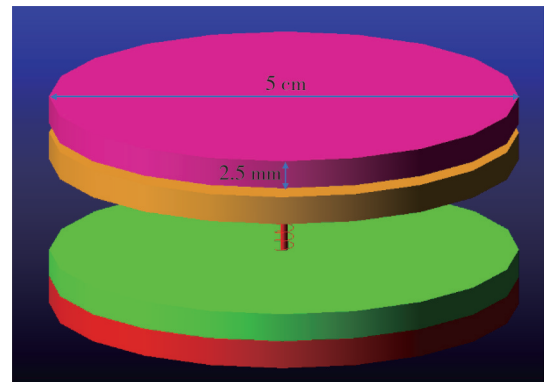


图 5 仿真模型

Fig. 5 Simulation model

为了使得系统一阶谐振频率处于常见的环境低频振动范围(约 15~20 Hz)内, 其相关参数如表 3 所示, 通过在底部极板施加不同频率的正弦加速度激励来模拟实际振动条件下 U-TENG 与 D-TENG 的运动过程。设置中间两个质量块之间弹簧连接, 两两质量块之间创建接触, 对每个质量块都施加沿 Z 轴的平移副, 通过对结构与激励参

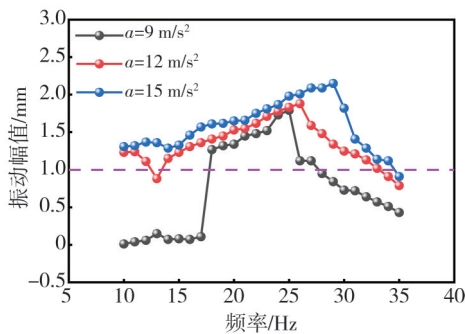
数进行参数化扫描,获得U-TENG与D-TENG的幅频特性,进一步确定系统的有效工作带宽。

在较小激励条件下,U-TENG的正摩擦层振动幅度可能低于其初始间隙距离,导致正负摩擦层无法接触,从而无法产生输出电压。相比之下,D-TENG的正摩擦层只需在振动过程中脱离负摩擦层即可实现电荷分离并输出电能。当外界激励增大至一定程度时,U-TENG的正摩擦层振幅超过摩擦层初始间隙,与顶部负摩擦层发生碰撞后方可产生电信号。因此,D-TENG的有效工作带宽通常大于U-TENG的工作带宽。基于此,需要优先考虑提升U-TENG的工作带宽,以优化整体能量输出性能。

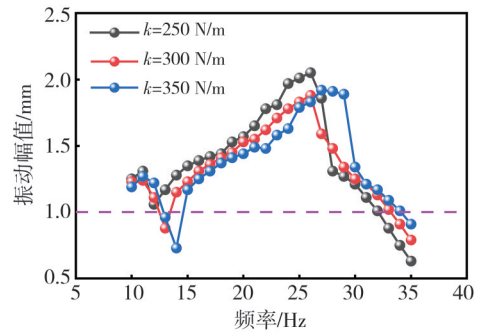
2.2 频率响应特性分析

为了得到最佳的结构参数,通过仿真不同关键参数对系统工作带宽的影响。影响CEH运动特性的主要参数包括:弹簧刚度、外部加速度激励幅值、初始状态下U-TENG摩擦层之间的间隙(此时底部摩擦层相互接触),以及上部质量块的质量。为定量探究各参数对系统振动特性的影响,采用控制变量法进行分析。在研究过程中,固定其中三个参数,仅改变一个参数以观察其对上、下端振幅的影响,四种参数的对照数值分别是质量块80 g,摩擦层间隙距离1 mm,弹簧刚度300 N/m,加速度 12 m/s^2 。仿真结果如图6所示。

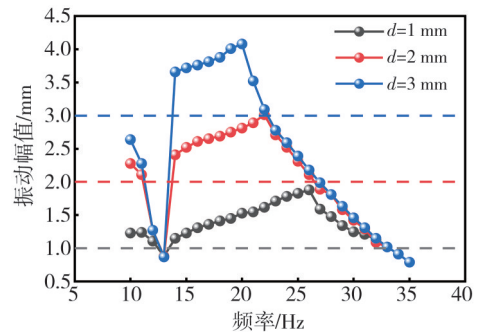
由图6(a)可知,加速度由 9 m/s^2 增加至 12 m/s^2 时,U-TENG的工作带宽由约10 Hz扩展至23 Hz。当质量、刚度、间隙保持一致的情况下,更大的加速度意味着更强的外部驱动,使系统运动更加剧烈,随着加速度激励的增大,系统的工作带宽显著提升。



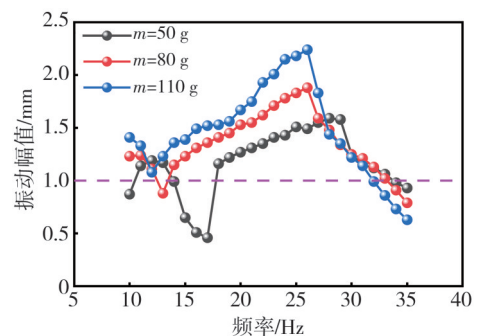
(a) 加速度对振动幅值影响



(b) 弹簧刚度对振动幅值影响



(c) 间隙对振动幅值影响



(d) 质量对振动幅值影响

图6 仿真各个参数对振动幅值的影响

Fig. 6 Simulation of the influence of various parameters on vibration amplitude

图6(b)表明,当刚度由 250 N/m 增至 300 N/m 时,固有频率随之上升,共振峰向高频方向移动,高频段的有效工作带宽得以拓展;但当刚度进一步提高至 350 N/m 时,系统在相同外部激励下的响应幅值减小,带宽反而下降。弹簧刚度对系统工作带宽的影响呈现“先增后减”的趋势。根据线性振动理论,系统固有频率与弹簧刚度平方根成正比。

图6(c)可知,当U-TENG的初始间隙由 3 mm 减小至 1 mm 时,系统工作带宽明显增加。U-TENG的启动存在固定的振幅阈值,只有当振动幅值超过该阈值时系统才能进入有效工作状态。减小初始间隙可降低启动阈值,使系统能够

在更宽范围的环境振动下触发工作,说明较小间隙有助于提升能量采集范围。

图 6(d) 可知,当质量由 50 g 增加至 80 g 时,质量增大使系统固有频率降低,使共振峰向低频移动。同时,更大的质量有助于获得较大的振动幅值,从而对带宽略有提升。然而,当质量继续增加时,系统对高频激励的响应变得迟滞,带宽变化趋于不明显。

综上所述,U-TENG 的工作带宽可通过减小摩擦层初始间隙和提高外部加速度激励两种方式有效拓宽,而弹簧刚度与质量块质量对带宽的影响相对有限。

3 实验验证与结果分析

3.1 测试平台

为验证仿真结果的可靠性并进一步分析 CEH 的频段特性,同时对其电能输出特性与振动幅值进行了实验测试。搭建了如图 7 所示的能量采集器测试平台。主要包括 TIRA 传感器自动校准系统 TIRAVIB 振动台,实验样机, Tektronix 3 系 MDO 混合域示波器与 Tektronix P5100A 无源高压探头, HSV-100 高速激光测振仪与相配套的上位机。其中, TIRA 系统可实现定频、扫频与随机振动等多种激励形式,适用于振动器件的动态校准与性能测试。

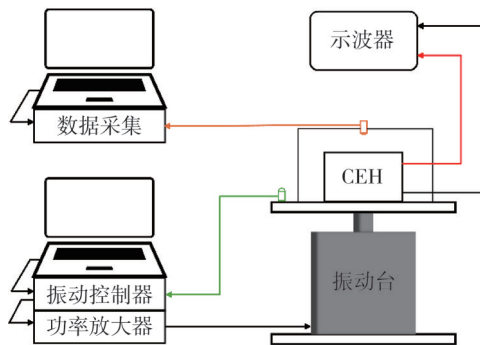


图 7 能量采集器测试平台

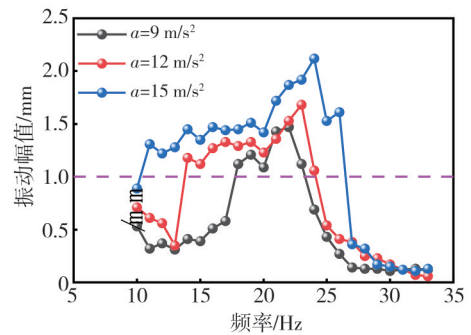
Fig. 7 Energy harvester test platform

实验过程中,将 CEH 样机固定安装于振动台上,不同发电单元的输出端接入示波器以记录电学响应;同时,利用定制工装将激光测振仪定位于 CEH 上端,用于实时测量其振动幅值。上述配置使得电输出特性与结构位移特性能够同步获取,为后续性能分析提供了可靠数据支撑。

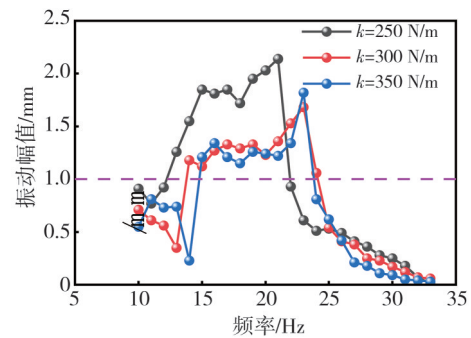
3.2 系统输出与运动状态测试

为系统评估各结构参数对 CEH 工作带宽的影响,采用控制变量法分别考察质量块质量、弹簧刚度及 U-TENG 间隙等关键参数的作用规律,四个参数的基本数值分别设置是质量块 80 g, 弹簧刚度 300 N/m, U-TENG 间隙 1 mm, 加速度 12 m/s^2 。依据参数差异制作了多组器件样机,并利用测试平台对其在不同激励频率及加速度条件下的振动幅值与电输出性能进行测量。相关振动幅值测试结果如图 8(a)~图 8(d) 所示,对应的电压输出结果如图 9(a)~图 9(h) 所示。

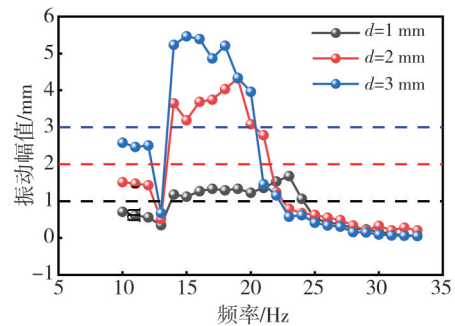
从图 8(a) 可知,当加速度以 3 m/s^2 为步长由 9 m/s^2 增加至 15 m/s^2 时,CEH 的工作带宽随之扩大,说明外部激励强度的提升能够显著增加系统动能,是拓宽工作带宽的有效途径。



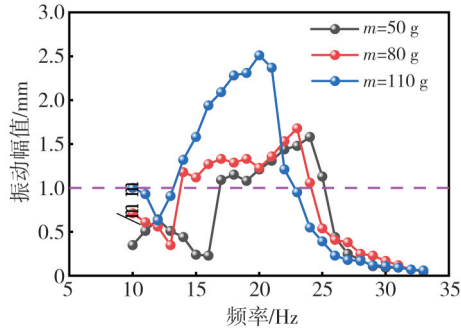
(a) 加速度对振动幅值影响



(b) 弹簧刚度对振动幅值影响



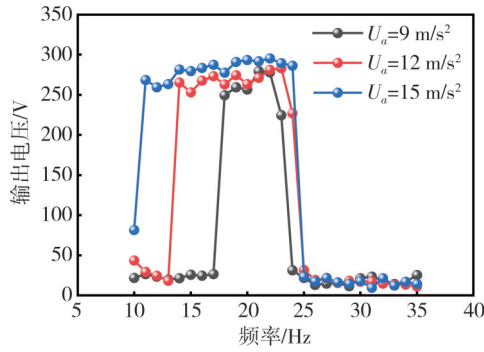
(c) 间距对振动幅值影响



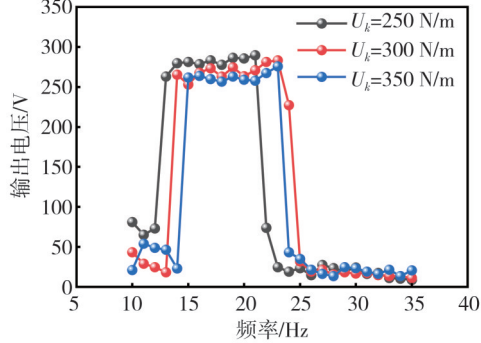
(d) 质量对振动幅值影响

图8 测试各个参数对振动幅值的影响

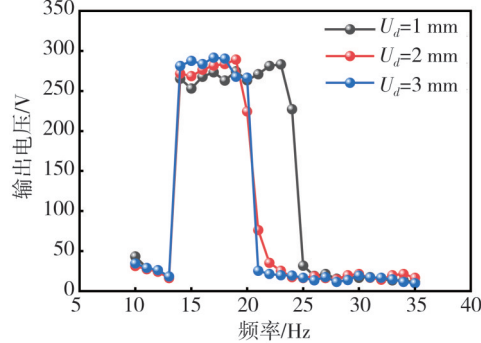
Fig. 8 Testing the effect of various parameters on vibration amplitude



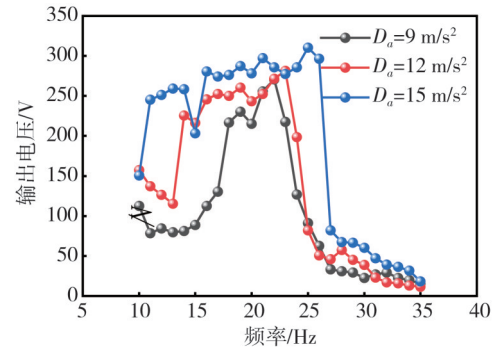
(a) U-TENG 在不同加速度下的输出电压



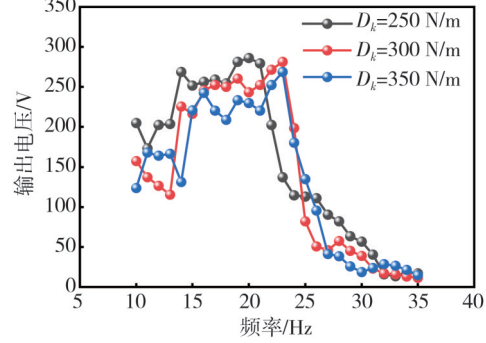
(c) U-TENG 在不同弹簧刚度下的输出电压



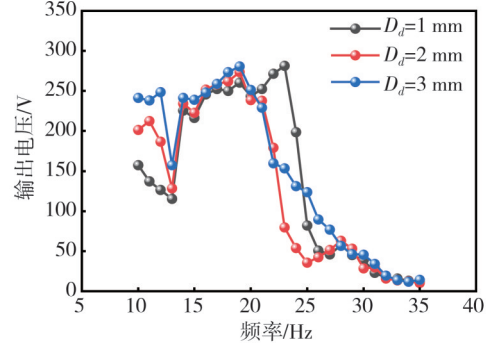
(e) U-TENG 在不同间距下的输出电压



(b) D-TENG 在不同加速度下的输出电压

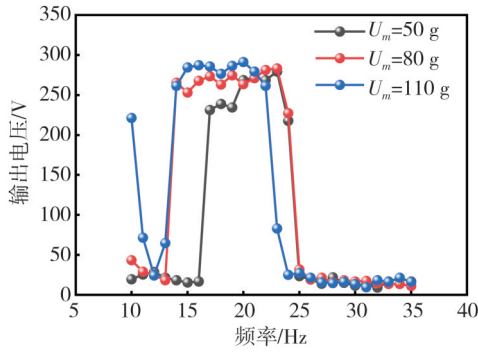


(d) D-TENG 在不同弹簧刚度下的输出电压

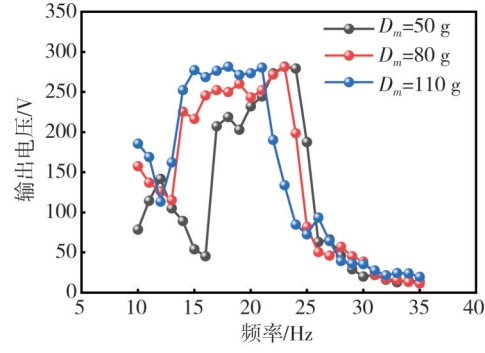


(f) D-TENG 在不同间距下的输出电压

由图 9(a)、图 9(b) 显示 CEH 的输出电压随加速度增大而升高, 这是由于较大的激励导致系统获得更大的振动幅值, 从而提升了输出电压。如图 8(b) 表明, 当弹簧刚度为 300 N/m 时, 可获得最宽的工作带宽, 弹簧刚度对工作带宽影响并非单调变化, 这与仿真结果高度一致。结合图 9(c) 和图 9(d) 可进一步观察到, 在刚度最大为 350 N/m 时, 系统在整个频段内的输出电压均处于较低水平, 与仿真预测一致; 而在 300 N/m 时, 系统能够在更宽的频率范围内保持较高输出。



(g) U-TENG在不同质量下的输出电压



(h) D-TENG在不同质量下的输出电压

图9 不同参数对U-TENG、D-TENG输出电压的影响

Fig. 9 Effect of different parameters on the output voltage of U-TENG and D-TENG

图8(c)表明,当间隙为1 mm时系统获得最宽的工作带宽;当间隙增至3 mm后,CEH的带宽明显减小。如图9(e)、图9(f)所示,在较大间隙下,其在共振点附近的峰值输出电压明显高于小间隙条件,说明小间隙有利于拓宽有效工作带宽,而较大间隙则有助于获得更高的峰值电压。此外,图8(d)显示,当质量块由50 g增加至80 g时,系统工作带宽有所提升,可覆盖14~24 Hz;但当质量继续增至110 g时,带宽出现回落。图9(g)与图9(h)表明,TENG输出电压的变化趋势与仿真结果保持一致,进一步验证了模型的可靠性。

综上所述,通过仿真与实测结果的对比分析可知,CEH的工作带宽随加速度激励的增强而显著提升,而过大的质量块或过高的弹簧刚度会导致带宽下降。在综合考虑各参数的情况下,当质量块为80 g、U-TENG摩擦层间距为1 mm、弹簧刚度为300 N/m时,加速度达到15 m/s²,CEH表现出最优的动态特性,可在11~25 Hz范围内保持稳定的能量输出。

4 结 论

本文提出并实现了一种互补式TENG耦合能量采集系统,通过构建上下双TENG交替接触-分离的运动机制,有效改善了传统TENG输出不稳与带宽受限的问题。实验结果表明,在弹簧刚度为300 N/m、质量块80 g及上层间隙1 mm的参数条件下,系统的有效工作带宽可显著拓展至11~25 Hz,输出电压稳定性明显提升。研究表明,该互补式耦合架构能够在低频振动条件下实现连续、高效的能量采集,为低功耗电子设备供能、机械振动能量回收以及自供电传感系统的工程应用提供了一种可行且具有推广潜力的技术方案。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献:

- [1] 韩艳,胡朋,王力东,等. 风-列车-桥梁耦合振动研究进展[J]. 力学进展, 2025, 55(2): 378-418.
HAN Yan, HU Peng, WANG Lidong, et al. Research advances in wind-train-bridge coupling vibration[J]. Advances in Mechanics, 2025, 55(2): 378-418. (in Chinese)
- [2] 赵林,刘丛菊,葛耀君. 桥梁结构涡激共振的敏感性[J]. 空气动力学学报, 2020, 38(4): 694-704.
ZHAO Lin, LIU Congju, GE Yaojun. Vortex-induced vibration sensitivity of bridge girder structures[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2020, 38(4): 694-704. (in Chinese)
- [3] 傅继阳,吴玖荣,徐安. 高层建筑抗风优化设计和风振控制相关问题研究[J]. 工程力学, 2022, 39(5): 13-33.
FU Jiyang, WU Jiurong, XU An. Some issues on wind resistant optimization design and on wind-induced vibration control of tall buildings [J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(5): 13-33. (in Chinese)
- [4] 姜佑明. 城市轨道交通环境振动影响与减振措施选用[J]. 黑龙江交通科技, 2023, 46(1): 151-153.
- [5] 敬霖,刘凯. 车轮踏面缺陷引起的轮轨动态响应综述[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(1): 285-315.
JING Lin, LIU Kai. Review on wheel-rail dynamic responses caused by wheel tread defects[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(1): 285-315. (in Chinese)
- [6] 贾小平,胡定祥,李大地,等. 不同轨道型式的地铁车辆-轨道耦合振动特性研究[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(7): 56-59.
JIA Xiaoping, HU Dingxiang, LI Dadi, et al.

- Research on metro vehicle-track coupling vibration characteristics of different track types[J]. *Urban Mass Transit*, 2022, 25(7): 56-59. (in Chinese)
- [7] 靳鹏飞. 设备状态在线监测与预测性维护技术应用实践[J]. *电子质量*, 2022(1): 76-78.
JIN Pengfei. Application practice of equipment condition on-line monitoring and predictive maintenance[J]. *Electronics Quality*, 2022(1): 76-78. (in Chinese)
- [8] 陆宁云, 陈闯, 姜斌, 等. 复杂系统维护策略最新研究进展: 从视情维护到预测性维护[J]. *自动化学报*, 2021, 47(1): 1-17.
LU NingYun, CHEN Chuang, JIANG Bin, et al. Latest progress on maintenance strategy of complex system: from condition-based main tenance to predictive maintenance[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2021, 47(1): 1-17. (in Chinese)
- [9] 陈仲生, 曹军义, 秦朝烨, 等. 汽车悬架同步振动抑制与能量收集综述与展望[J]. *机械工程学报*, 2022, 58(20): 3-26.
CHEN Zhongsheng, CAO Junyi, QIN Zhaoye, et al. Simultaneous vibration suppression and energy harvesting of vehicle suspension systems: status and prospects [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(20): 3-26. (in Chinese)
- [10] 周生喜, 陶凯, 秦卫阳. 振动能量俘获专题序[J]. *力学学报*, 2021, 53(11): 2891-2893.
ZHOU Shengxi, TAO Kai, QIN Weiyang. Preface of theme articles on vibration energy harvesting[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2021, 53(11): 2891-2893. (in Chinese)
- [11] 张文明, 赵林川, 邹鸿翔. 振动能量采集与振动控制序[J]. *力学学报*, 2023, 55(10): 2091-2093.
ZHANG Wenming, ZHAO Linchuan, ZOU Hongxiang. Preface of theme articles on vibration energy harvesting and vibration control [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2023, 55(10): 2091-2093. (in Chinese)
- [12] 孟祥凯, 侯玉亮. 振动能量收集技术的近况与展望[J]. *科技与创新*, 2019(11): 94-95.
- [13] 朱强国, 王光庆, 刘周龙, 等. 非线性压电振动能量采集器与非线性接口转换电路的耦合动力学特性研究[J]. *仪器仪表学报*, 2022, 43(9): 178-192.
ZHU Qiangguo, WANG Guangqing, LIU Zhou-long, et al. Harmonic analysis of coupling dynamics between the nonlinear piezoelectric vibration energy harvester and the nonlinear power extraction circuits [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, 43(9): 178-192. (in Chinese)
- [14] LIN Y, QI Y C, WANG J Q, et al. Self-powered and autonomous vibrational wake-up system based on triboelectric nanogenerators and MEMS switch [J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2022, 22(10): 3752.
- [15] 崔明星, 李忻睿, 王俊浩, 等. 摩擦电式低频振动能量收集装置及其电源管理电路[J]. *微纳电子技术*, 2025, 62(1): 101-109.
CUI Mingxing, LI Xinrui, WANG Junhao, et al. Triboelectric low-frequency vibration energy harvesting device and its power management circuit [J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2025, 62(1): 101-109. (in Chinese)
- [16] 任静, 何剑. 非谐振式的电磁-摩擦复合式纳米发电机[J]. *中北大学学报(自然科学版)*, 2023, 44(4): 455-464.
REN Jing, HE Jian. An electromagnetic-triboelectric hybrid nanogenerator based on non-resonant mechanism [J]. *Journal of North University of China (Natural Science Edition)*, 2023, 44(4): 455-464. (in Chinese)
- [17] QIN H, GU G, SHANG W, et al. A universal and passive power management circuit with high efficiency for pulsed triboelectric nanogenerator [J]. *Nano Energy*, 2020, 68: 104372.
- [18] HARMON W, BAMGBOJE D, GUO H, et al. Self-driven power management system for triboelectric nanogenerators[J]. *Nano Energy*, 2020, 71: 104642.
- [19] ZHANG L, JIN L, ZHANG B, et al. Multifunctional triboelectric nanogenerator based on porous micro-nickel foam to harvest mechanical energy [J]. *Nano Energy*, 2015, 16: 516-523.
- [20] BHATIA D, HWANG H J, HUYNH N D, et al. Continuous scavenging of broadband vibrations via omnipotent tandem triboelectric nanogenerators with cascade impact structure[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 8223.
- [21] TOYABUR R M, SALAUDDIN M, CHO H, et al. A multimodal hybrid energy harvester based on piezoelectric-electromagnetic mechanisms for low-frequency ambient vibrations [J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 168: 454-466.
- [22] CHEN J, ZHU G, YANG W, et al. Harmonic-resonator-based triboelectric nanogenerator as a sustainable power source and a self-powered active vibration sensor[J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(42): 6094-6099.
- [23] HU T, WANG H, HARMON W, et al. Current progress on power management systems for triboelectric nanogenerators[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2022, 37(8): 9850-9864.