

文章编号: 1673-3193(2023)04-0455-010

非谐振式的电磁-摩擦复合式纳米发电机

任 静, 何 剑

(中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051)

摘要: 针对人体机械能频率低(<10 Hz)、振幅高、运动不规则的特点, 为了实现对人体机械能的高效采集, 本文利用非线性频带拓宽技术的单稳态法设计了一款非谐振式摩擦-电磁复合式能量采集器。该器件将电磁发电机(Electromagnetic Nanogenerator, EMG)和摩擦纳米发电机(Triboelectric Nanogenerator, TENG)集成至一个具有非线性特性的磁悬浮系统中, 利用非线性系统幅频曲线共振峰值偏移现象, 拓宽了器件的频率响应范围; 引入了柔性多层摩擦发电单元, 不仅增强了器件的低频响应特性, 还提高了器件的输出功率。测试结果表明: 在 6 Hz、 10 m/s^2 的振动条件下, 当外接电阻为 $100\text{ M}\Omega$, 顶部摩擦发电单元 TENG1 和底部摩擦单元 TENG2 的瞬时输出功率分别为 $202.5\text{ }\mu\text{W}$ 和 $348.1\text{ }\mu\text{W}$; 当外接电阻为 $60\text{ }\Omega$ 时, 两组电磁发电单元 EMG1 和 EMG2 的瞬时输出功率均可达到 150 mW 。此外, 设计的复合式能量采集器不仅可以通过人体在 4 min 内的运动将容值 0.022 F 的电容器从 0 V 充电到 3.3 V , 还可以驱动低功耗传感器。所设计能量采集器突破了传统谐振式能量采集器在低频、随机振动环境下能量采集效率低的难题, 能够用于自供电式低功耗便携式电子产品。

关键词: 复合式能量采集器; 磁悬浮系统; 电磁发电机; 摩擦纳米发电机; 人体机械能; 便携式电子产品

中图分类号: TK6

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1673-3193.2023.04.017

An Electromagnetic-Triboelectric Hybrid Nanogenerator Based on Non-Resonant Mechanism

REN Jing, HE Jian

(Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement(North University of China), Ministry of Education, Taiyuan 030051, China)

Abstract: To efficiently collect human mechanical energy with low-frequency (<10 Hz), high-amplitude, and irregular vibrations, a non-resonant electromagnetic-triboelectric hybrid energy harvester was proposed by using the nonlinear frequency band broadening technology-monostable method proposed in this paper. The device integrated electromagnetic nanogenerator (EMG) and Triboelectric nanogenerator (TENG) into a magnetic levitation system with nonlinear characteristic, and could broaden the frequency response range by using the phenomenon of the resonance peak shift of the amplitude-frequency curve in the nonlinear system. In addition, two flexible multi-layer triboelectric nanogenerators were introduced, which could not only enhance the low frequency response characteristic, but also improve the output power of the device. The test results show that at an external load of $1\times 10^8\text{ }\Omega$ and with vibration

收稿日期: 2023-03-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(62171414, 52175554, 52205608, 62171415, 62001431); 山西省基础研究计划(20210302123059, 20210302124610)

作者简介: 任 静(1991-), 女, 硕士生, 主要从事 MEMS 智能微纳器件及系统集成的研究。

通信作者: 何 剑(1985-), 男, 教授, 博士, 主要从事 MEMS 智能微纳器件及系统集成的研究。

at 6 Hz and 10 m/s^2 , the instantaneous output power of the top (TENG1) and bottom (TENG2) are $202.5 \mu\text{W}$ and $348.1 \mu\text{W}$, respectively. The instantaneous output power of the top (EMG1) and bottom (EMG2) both achieve 150 mW at an external of 60Ω . Moreover, the designed energy harvester can not only charge a capacitor of 0.022 F from 0 V to 3.3 V in 4 minutes from human motions but also drive low-power sensors. The device can break through the problem of low energy acquisition efficiency of the traditional resonant energy harvesters in low-frequency and random vibration environment, and can be used to self-powered low-power portable electronic products.

Key words: hybrid energy harvester; magnetic levitation system; electromagnetic nanogenerator; triboelectric nanogenerator; human mechanical energy; portable electronic product

0 引言

近年来,随着低功耗技术的发展,众多集成了各种传感器的便携式电子产品被广泛应用于日常生活中,提高了人们的生活质量。目前,大多数便携式电子产品仍以一次性电源或者可充电电池作为其能量供给方式。但上述电池存在着储能有限、功率密度低,环境污染大以及更换不便等问题,严重阻碍了便携式电子产品进一步的发展^[1-2]。为了打破传统供电方式的限制,国内外许多研究学者致力于寻求一种可持续的、可再生的、环境友好的补充能源来解决便携式电子产品的能源问题^[3]。

人体运动的能量被认为是最丰富的能量来源之一,在发电方面有着广阔的前景。电磁-摩擦复合能量采集技术已被证明是实现人体振动能量高效获取与转换的有效途径^[4]。摩擦纳米发电机(TENGs)具有较高的输出电压和较低的输出电流(一般为 μA 级),而电磁发电机(EMGs)的输出电流较大^[5-6],两者的组合可以满足较高能量转换的需求。近年来,国内外研究团队为解决低功耗便携电子产品的供能问题,采取摩擦-电磁复合机制,研制出众多复合式能量采集器。为了有效采集人体机械能,Ren等^[7]设计了一款非接触式磁力驱动的摩擦-电磁复合式纳米发电机,摩擦纳米发电机和电磁纳米发电机的最优负载功率分别为0.23 mW和3.14 mW。Liu等^[8]基于摩擦发电技术与电磁发电技术设计了一款便携式“充电宝”,将其至于背包上,经过35 min的运动后可将锂电池从3.28 V充电至3.49 V,该复合式能量采集器可充当一个户外“充电宝”,作为自供电便携式设备的补充电源。陈延辉等^[9]提出了一种基于人体机械能采集的电磁-摩擦复合式能量采集器,摩

擦发电机的峰值功率为 $84 \mu\text{W}$,电磁发电机的峰值功率为4.61 mW,证明了该复合器件对低频复杂机械能的高效采集能力,并通过能源管理电路,实现了计步器自供能的正常工作。刘龙等^[10]研制了一种电磁-摩擦电复合式纳米发电机(HETNG),用于收集生物力学能量。利用整流电路,HETNG在 160Ω 的外部负载下的峰值输出功率可以达到0.55 W,能够为温度计、计步器等电子设备提供电能。

尽管近年来摩擦-电磁复合式人体振动能量收集技术已经取得了一些阶段性的成果,但是人体运动的低频率性、无规律性(幅度和频率)仍然限制了能量采集器的工程化应用。人体运动能采集技术依然面临着诸多挑战,例如:1)基于共振的振动能量采集器谐振频率高,在低频($<10 \text{ Hz}$)、随机的环境振动下很难实现人体机械能的高效转换;2)大多数能量收集装置采用具有较高摩擦阻力和较低灵敏度的滑动结构,对于低频的微弱环境振动响应效果差;3)虽然一些基于滚动起电的器件具有较高的鲁棒性、较低的材料磨损,但这些器件往往只能在固定的方向滚动,人体运动多方向的特点会严重影响器件的换能效率。

结合上述分析,为了有效地收集人体运动产生的机械能,本文基于单稳态法设计了一款非谐振式摩擦-电磁复合式能量采集器。该器件的质量为200 g,呈圆柱形结构($\Phi 50 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$),在有限的空间里集成了4组能量采集单元。该采集器依靠对环境振动敏感的中心悬浮磁铁来传递机械能,具有动力学冲击引起的非线性特性。同时,作为复合式能量采集器,其具有结构简单、灵敏度高、频率响应宽、低频随机环境适应性好等特点,可以为便携式电子产品的供能提供一种新的解决思路。

1 设计与原理

1.1 磁悬浮结构设计

传统谐振式振动能量采集器的工作频带很窄,只有当外界激励频率与其谐振频率相同时,器件才会发生共振,从而产生最优电学性能的输出;只要外界激励频率与其谐振频率稍微存在很小的偏差,其输出性能就会急剧下降^[11-12]。因此,为了解决谐振式能量采集器工作频带受限、输出功率小、环境适应性差等问题,大多数振动能量采集器被设计为非谐振式^[13]。非谐振式能量采集器通常采用非线性拓频技术构成一个非线性系统,该系统的幅频曲线会发生共振峰值偏斜现象,进而拓宽能量采集器的工作频带^[14]。单稳态法作为非线性频带拓宽技术之一,指的是通过调节能量采集器系统使质量块(或者运动磁铁)在该系统中具有唯一一个稳定平衡点的方法,已被广泛应用于各种振动能量采集装置中^[15]。本文基于单稳态法设计了由 3 块磁铁组成的磁悬浮系统,中心悬浮磁铁在响应外界激励上下运动时,其所受的作用力与相对位移呈非线性力-位移关系。这种非线性效应将导致能量采集器的幅频响应曲线弯曲,从而实现拓宽工作频率范围的作用^[16]。

在磁悬浮结构设计之初,为了确定 3 块磁铁的尺寸,首先对中心悬浮磁铁进行了受力分析。如图 1 所示,悬浮磁铁在运动过程中分别受到自身的重力以及来自顶部磁铁、底部磁铁的斥力。底部磁铁对其的斥力为 F_1 ,当其数值与顶部磁铁所提供的斥力 F_2 与自身重力之和相等时,中心悬浮磁铁可处于自悬浮状态。

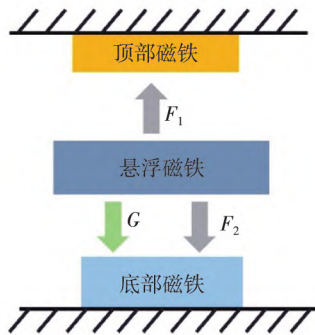


图 1 中心悬浮磁铁受力分析示意图

Fig. 1 Force analysis diagram of the central suspension magnet

实验初期拟定顶部磁铁与底部磁铁的尺寸分别为 $\Phi 5 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 和 $\Phi 10 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 。利用

Maxwell 16.0 对不同尺寸的中心磁铁($\Phi 40 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$, $\Phi 40 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$, $\Phi 40 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$, $\Phi 40 \text{ mm} \times 14 \text{ mm}$)进行受力仿真分析,结果如图 2 所示。选用尺寸为 $\Phi 40 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的中心悬浮磁铁,当其处于平衡状态时,只偏离中心位置 2 mm。实验结果表明,对比其他两种尺寸的中心磁铁,尺寸为 $\Phi 40 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的中心悬浮磁铁具有最优的适应性。因此,最终选用顶部磁铁、中间磁铁、底部磁铁的尺寸分别为 $\Phi 5 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$, $\Phi 40 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 和 $\Phi 10 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 。

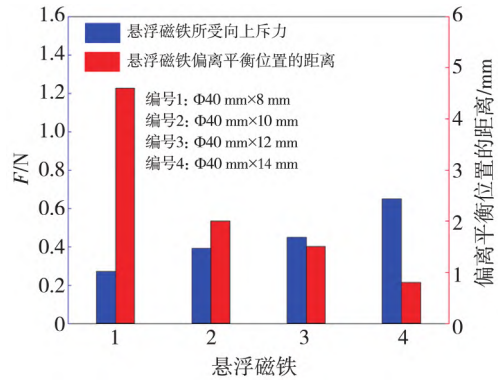


图 2 中心悬浮磁铁的受力分析仿真结果

Fig. 2 Force analysis simulation of the central suspension magnet

在完成磁悬浮结构设计后,本文通过 Maxwell 16.0 对中心悬浮磁铁在不同位置的磁感应强度 B 进行了仿真分析,结果如图 3 所示。

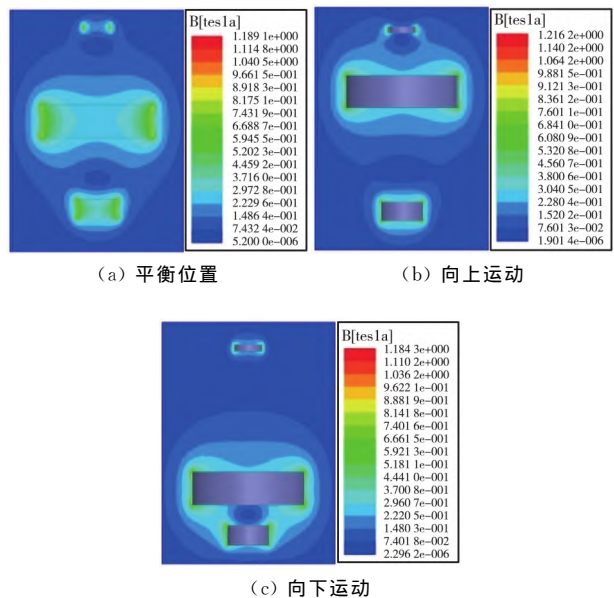


图 3 中心磁铁在不同位置的磁感应强度云图

Fig. 3 Nephogram of magnetic induction intensity analysis of central magnets at different positions

由图 3 可以看出:当该复合式能量采集器受到外力作用时,中心悬浮磁铁响应外界激励脱离

平衡位置做上下往复运动,在该过程中,周期性运动的磁铁周围会产生变化的电磁场;此外,从仿真结果还可得出紧贴悬浮磁铁左右两侧的磁感应强度 B 最大。因此,在后续壳体制备时,在保证壳体机械强度的前提下,尽可能减小壁厚,从而实现电磁单元的最优输出。

1.2 复合式能量采集器结构设计

图 4(a)和图 4(b)分别为复合式能量采集器的结构示意图和实物图,该器件为上下对称的圆柱形结构,重量为 200 g,直径为 50 mm,高为 80 mm。其以磁悬浮结构为核心部件,集成了电磁发电机(EMG)以及摩擦纳米发电机(TENG)。磁悬浮结构由 3 块磁铁组成,中间磁铁依靠粘贴在顶部和底部的磁铁的斥力悬浮起来,3 块磁铁的直径和高度从上至下分别为 $\Phi 5 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$, $\Phi 40 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 和 $\Phi 10 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 。电磁能量采集器由中心悬浮磁铁与缠绕在壳体上的两组铜线圈组成;其中,铜线直径为 $100 \mu\text{m}$,线圈内径为 45 mm,外径为 48 mm,经万用表测量,电阻约为 60Ω 。在摩擦能量采集器中, $200 \mu\text{m}$ 厚的聚对苯二甲酸乙二醇酯(Polyethylene Glycol Terephthalate, PET)柔性薄膜通过均匀间隔的变形形成 Z 型结构,将其作为摩擦发电模块的衬底;分别选用 $700 \mu\text{m}$ 厚的 Ecoflex-0030 硅胶薄膜和导电布作为负性摩擦材料和正性摩擦材料。图 4(c)展示了 TENG 的制作过程, TENG 由 4 组摩擦发电单元并联而成,该结构有利于提高器件的空间利用率和功率密度。

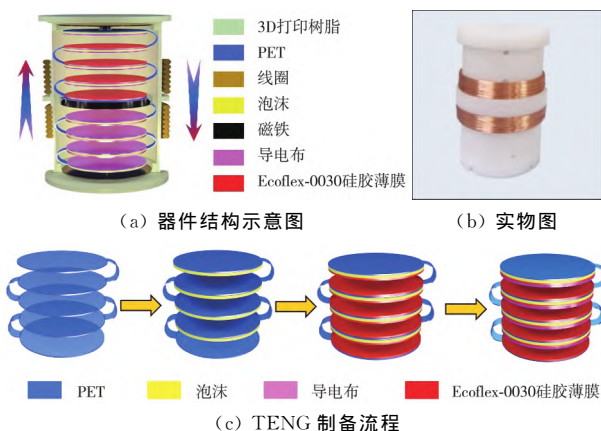


图 4 复合式能量采集器

Fig. 4 Hybrid energy harvester

1.3 复合式能量采集器发电单元工作原理

复合式能量采集器以磁悬浮结构作为器件敏

感单元,当受到外部激励时,悬浮磁铁相对于器件进行上下周期运动,通过不同发电单元的协同作用,实现机械能至电能的转换。当悬浮磁铁上下振动时,贴附在其上下表面的 Z 型摩擦发电单元随其进行接触分离式的周期运动,这样摩擦发电单元中正、负摩擦材料就形成了接触-分离模式。摩擦纳米发电机的工作原理是基于摩擦起电效应以及静电感应的耦合作用^[5],其发电过程如图 5(a)所示。本文选择一层摩擦能量采集单元来分析。首先,在悬浮磁体上下周期运动的驱使下,顶部 Ecoflex-0030 硅胶薄膜与导电布相互接触,在顶部电极上产生负摩擦电荷,在硅胶薄膜表面产生正摩擦电荷(状态 i);然后,顶部硅胶薄膜与导电布的分离在两个电极之间产生电位差,使自由电子从顶部电极流向底部电极(状态 ii),从而产生了电流;当顶部硅胶薄膜与导电布达到最大分离(状态 iii)时,电流消失;当顶部硅胶薄膜和导电布再次受到外力作用而相互靠近直至完全接触时,自由电子从底部电极回流到顶部电极,产生反向流动电流(状态 iv)。由于顶部硅胶薄膜和导电布之间周期性的接触和分离,从而在电路中产生了周期性的电信号输出。

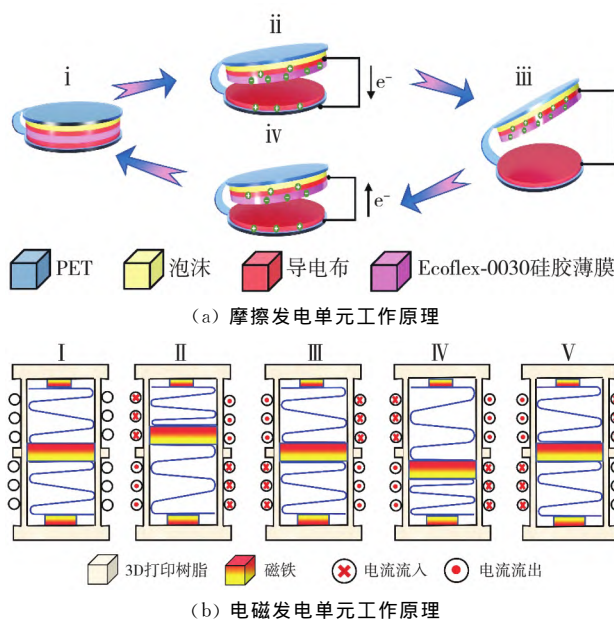


图 5 复合式能量采集器工作原理

Fig. 5 Working principle of the hybrid energy harvester

在电磁发电单元中,感应电流由悬浮磁铁的往复运动引起铜线圈内磁通量发生改变而产生,图 5(b)即为电磁发电单元的发电过程分析。依据法拉第电磁感应定律,铜线圈内产生感应电动势 $\varepsilon = \Delta\varphi / \Delta t$,继而产生感应电流,其中, $\Delta\varphi$ 为线圈

中磁通量的变化量, Δt 为发生变化所用的时间^[17]。对于电磁发电单元(EMG1 和 EMG2), 当器件处于初始状态 I 时, 在上下磁铁的约束下, 中心磁铁处于平衡位置, 磁体与线圈之间没有相对位移, 线圈内没有感应电流产生。当装置感受到外部振动时, 中心磁铁响应外部振动的变化向上移动到状态 II。由于中心磁铁在运动过程中切割磁场线, EMG1 产生正向感应电流, EMG2 产生反向感应电流。中心磁铁继续移动到中心位置(状态 III)。根据楞次定律, 由于磁体切割磁力线方向与状态 II 方向相反, EMG1 和 EMG2 产生与状态 II 方向相反的感应电流。同样, 当中心磁铁移动到状态 IV 和状态 V 时, 与前一状态相反方向的感应电流将流过两个线圈。由于装置是对称结构设计, 通过 4 组换能模块共同发电, 提升了复合式能量采集器的输出性能。

2 复合式能量采集器的电学输出性能和功能化应用

2.1 复合式能量采集器的输出性能测试系统

为了对本文所设计的复合式能量采集器进行电学性能表征, 本文搭建了如图 6 所示的测试系统。该测试系统包括实验样机、激振台、功率放大器、信号发生器、加速度检测计和上位机。由于信号发生器输出信号的功率较小, 测试平台采用功率放大器将信号发生器输出信号放大来驱动激振台工作。在实验之初, 将复合式能量采集器安装在激振台托片上, 同时, 将不同发电单元的输出连接到数据源表 2611B 来进行电学性能采集。为了更好地控制激振台的加速度, 在激振台与支撑杆中间添加加速度传感器进行信号反馈, 从而实现了对激振台工作频率与加速度的定量控制。

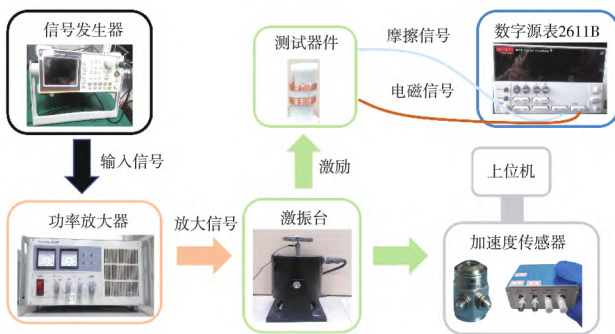


图 6 复合式能量采集器测试系统

Fig. 6 Test system of the hybrid energy harvester

2.2 复合式能量采集器的频率与加速度响应特性

复合式能量采集器的电学输出性能测试主要包括开路电压、短路电流、阻抗匹配以及电容充电特性等。为了验证本文构建的复合式能量采集器对人体运动机械能采集的可行性, 首先利用测试系统测试了器件在不同频率(2 Hz~10 Hz)的输出特性, 测试结果如图 7(a)~图 7(d)所示。当外界激励频率为 2 Hz 时, 4 组发电模块均能产生有效的电学性能输出, 以电压值为例, EMG1、EMG2、TENG1 以及 TENG2 产生的电压值分别为 1.8 V, 1.8 V, 25 V 和 76 V; 在 6 Hz 时, 4 组发电模块的电压值分别为 6 V, 6 V, 100 V 和 140 V, 分别增长了 160.87%, 160.87%, 300% 和 84.20%。在 6 Hz~10 Hz 之间, 随着振动频率的升高, EMG1 和 EMG2、TENG1 和 TENG2 产生的电压值均逐渐减小, 在 10 Hz 时, 产生的电压值分别为 2.5 V 和 2.6 V, 18 V 和 38 V。综合上述分析, 复合式能量采集器的 4 组换能单元在 2 Hz~10 Hz 都能进行有效的能量转换; 开路电压和短路电流均呈现先升高后下降的趋势, 且 EMG1 和 EMG2, TENG1 和 TENG2 的输出性能在 6 Hz 时达到最大值。实验证明了该装置具有较宽的频率响应范围, 且适合工作在低频振动环境下。

此外, 本文还对装置的加速度响应特性进行了测试。在 6 Hz 的振动频率下, 分别测试了装置在 2 m/s^2 , 4 m/s^2 , 6 m/s^2 , 8 m/s^2 , 10 m/s^2 的开路电压和短路电流。结果如图 7(e)~图 7(h)所示。可以看出: 在 6 Hz, 2 m/s^2 振动下, 4 组发电模块同样能产生有效的电学性能输出, EMG1 的电压值和电流值分别为 1.4 V 和 25 mA, EMG2 的电压值和电流值分别为 1.4 V 和 25 mA, TENG1 的电压值和电流值分别为 28 V 和 $2 \mu\text{A}$, TENG2 的电压值和电流值分别为 36 V 和 $3 \mu\text{A}$ 。随着加速度的增加, 复合式能量采集器的 4 组发电模块的输出性能呈现逐渐增加的趋势。在 6 Hz, 10 m/s^2 振动下, EMG1 的电压值和电流值分别为 6 V 和 100 mA, EMG2 的电压值和电流值分别为 6 V 和 100 mA, TENG1 的电压值和电流值分别为 100 V 和 $8 \mu\text{A}$, TENG2 的电压值和电流值分别为 140 V 和 $10 \mu\text{A}$ 。

以上数据充分说明了本文所设计的复合式能量采集器能在低频、随机的环境下实现机械能—电能的转换。

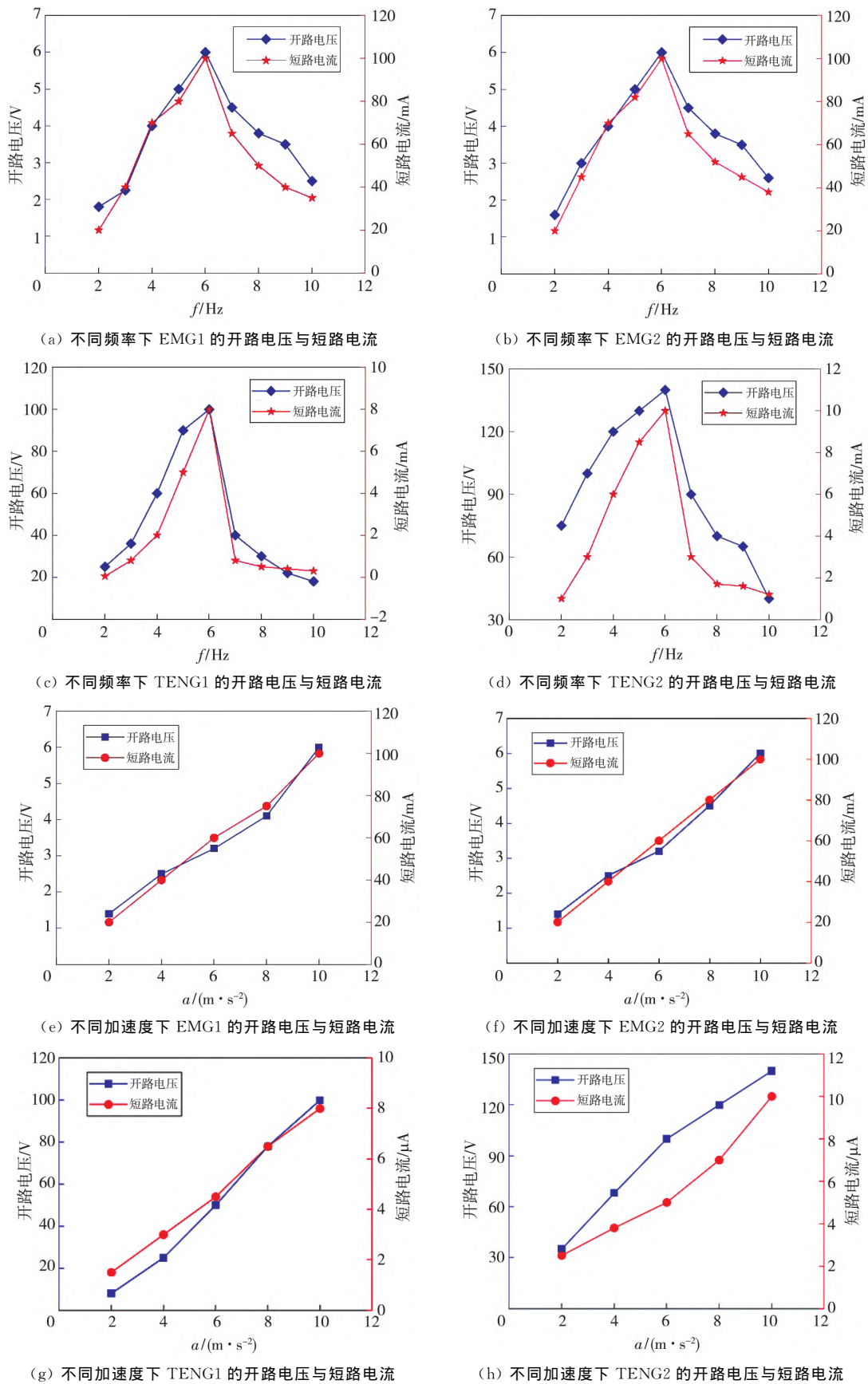


图7 复合式能量采集器在不同频率下以及不同加速度下的开路电压和短路电流

Fig. 7 The open-circuit voltage and short-circuit current of the hybrid energy harvester with different frequency and different acceleration

2.3 复合式能量采集器在 6 Hz 和 10 m/s² 下的电学输出性能

人体运动产生的能量具有频率低 (<10 Hz)、频率和振幅不规则的特点。为了匹配人体运动的特点,将器件放置在振动频率为 6 Hz,加速度为 10 m/s² 的实验环境下,从而定性地表征器件的输出性能,测试结果如图 8 所示。由图 8 可以看出,EMG1 和 EMG2 的开路电压和短路电流分别为 6 V 和 100 mA,6 V 和 105 mA。根据负载功率关系 $P=V^2/R$,当外部负载电阻逐渐接近线圈内

阻 60 Ω 时,EMG1 和 EMG2 的最大瞬时输出功率均可达到 150 mW。

相比电磁发电单元,摩擦发电单元可以产生较大的输出电压和较小的电流。如图 8(g)~图 8(l)所示,TENG1 的开路电压和短路电流分别为 100 V 和 8 μA,TENG2 对应的电压、电流值分别为 140 V 和 10 μA。与 EMG 的输出特性类似,TENG 的输出电压随外部电阻的增加而增加,当外部负载为 10 MΩ 时,TENG1 和 TENG2 输出的最大瞬时峰值功率分别可达 202.5 μW 和 348.1 μW。

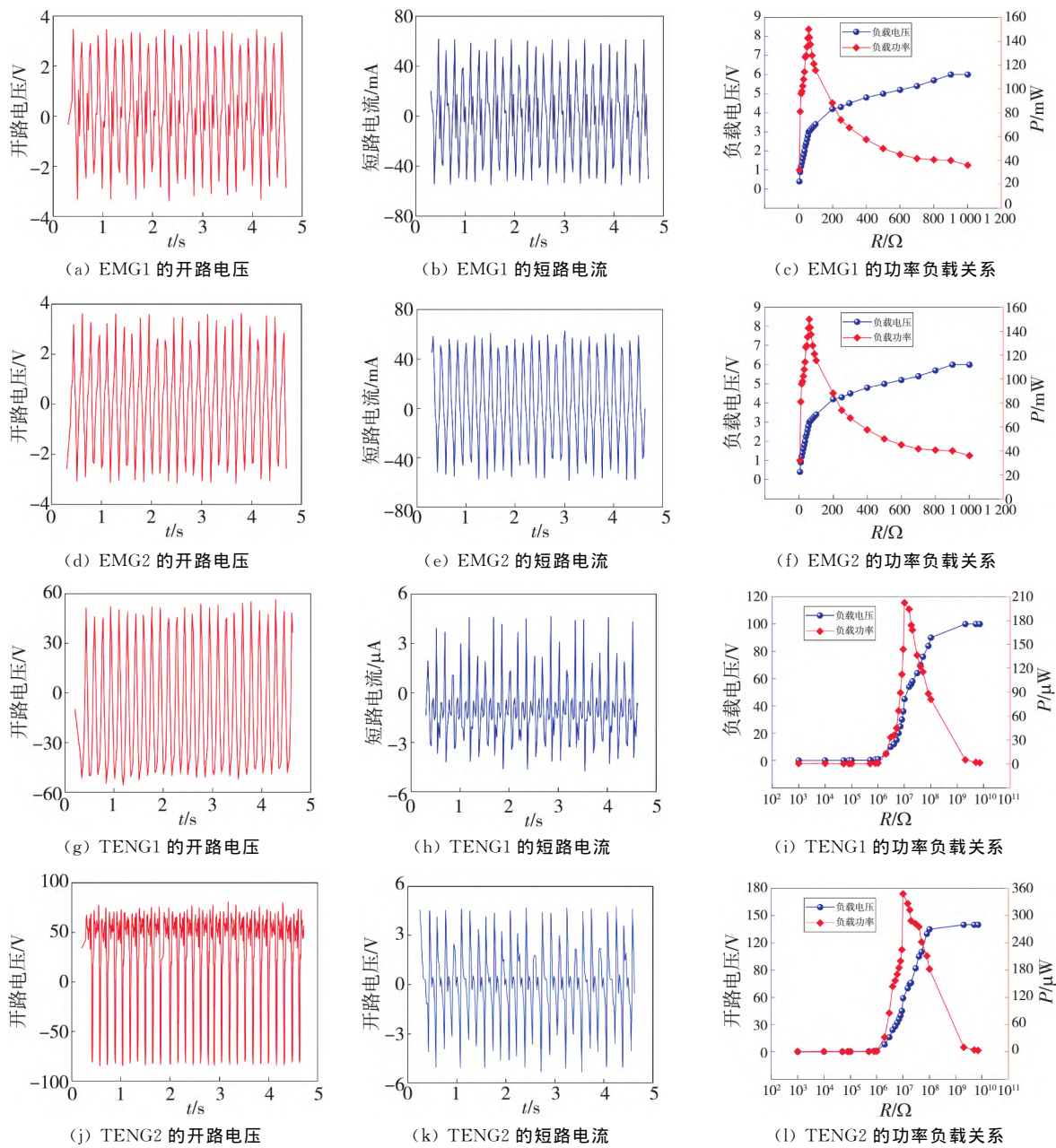


图 8 复合式能量采集器在 6 Hz 和 10 m/s² 振动环境下的性能测试

Fig. 8 Performance test of the hybrid energy harvester under the vibration environment of 6 Hz and 10 m/s²

2.4 复合式能量采集器的充电性能与工作稳定性测试

本文还对器件的充电性能进行了测试,将器件的4组独立发电单元通过整流桥并联输出后连接到容值为 $10\ \mu\text{F}$ 的电解电容上,然后在 $6\ \text{Hz}$ 和 $10\ \text{m/s}^2$ 的测试环境下对复合式能量采集器各个发电模块及其组合的充电能力进行了测试。从图9可以看出,当4组发电单元同时为电容充电时,其充电速率以及电容电压相比其他组合都有很大的提升,在 $250\ \text{s}$ 的时间里,可将 $10\ \mu\text{F}$ 的电容从 $0\ \text{V}$ 充电至 $20\ \text{V}$,充分证明了复合式能量采集器在复合集成所有发电单元后,输出性能得到了较大提升,能量采集效率也更高。从测试结果中还可得出,在复合式能量采集器中EMG拥有最快的充电速度,以EMG1为例,能够在 $250\ \text{s}$ 的时间里将电容充电至 $8\ \text{V}$; TENG充电速度最慢,但是也一直呈上升趋势。

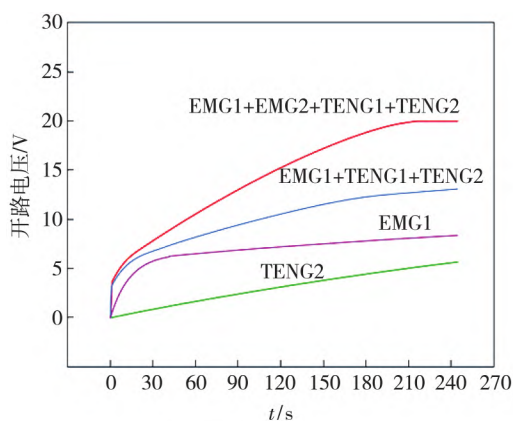
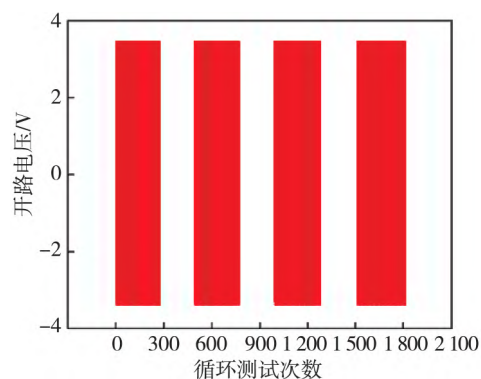


图9 电容充电曲线

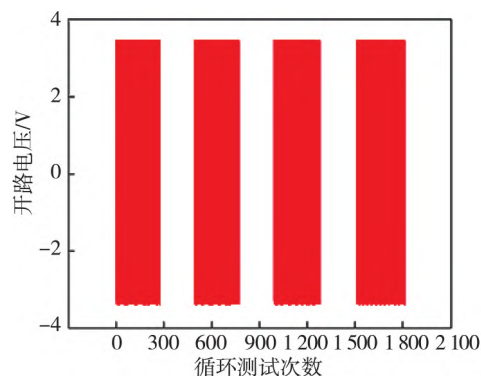
Fig.9 Capacitor charging curve

工作稳定性是衡量一个器件工作性能的重要指标。复合式能量采集器采用中心悬浮磁铁作为振动俘能结构,悬浮磁铁的恢复力来源于没有任何物理接触的磁场,磁铁的磁性除非在高温或强磁场干扰下才会出现衰减或失效,因此,复合式能量采集器具有较高的可靠性。为了验证装置的工作稳定性,将复合式能量采集器安装在激振台托片上,对其进行了抗疲劳测试,结果如图10所示。

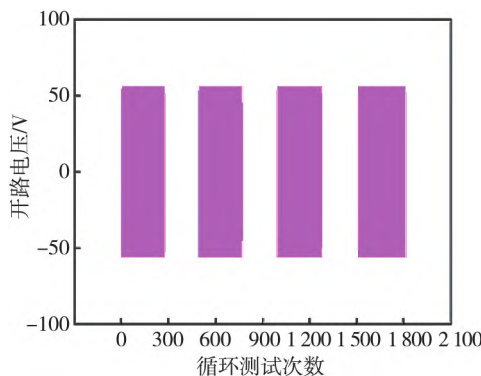
由图10可以看出,在循环工作1800次之后,复合式能量采集器的4组发电模块的电压输出信号几乎没有出现明显的衰减,进而验证了该装置具有良好的可靠性。



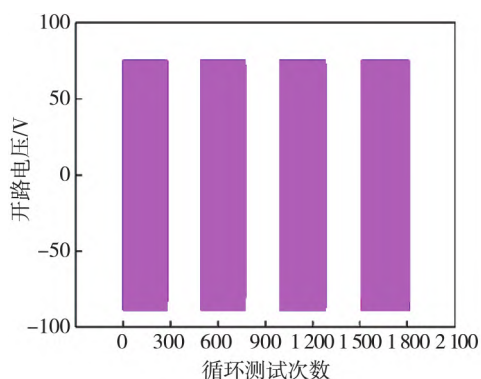
(a) EMG1 循环测试 1800 次



(b) EMG2 循环测试 1800 次



(c) TENG1 循环测试 1800 次



(d) TENG2 循环测试 1800 次

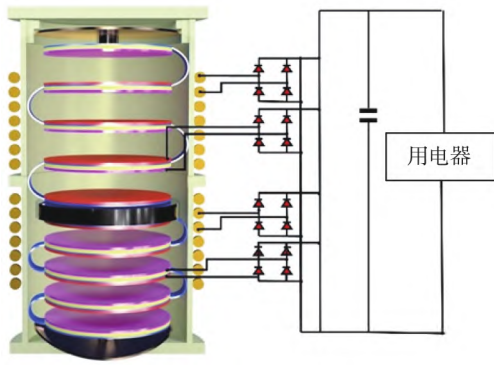
图10 稳定性测试

Fig.10 Stability test

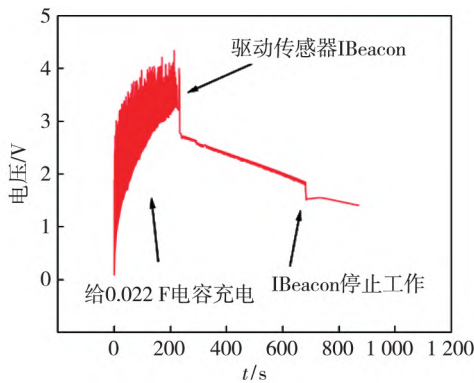
2.5 应用测试

大部分便携式电子产品都需要直流电源来驱

动,而大部分复合式能量采集器所产生的均为交流信号,因此无法直接驱动该产品^[18]。本文首先通过整流电路将所采集的能量存储到电容器中,再由电容器向用电器放电,实现了直流供电。图 11(a)为所设计的整流电路图,4组独立发电单元分别经过整流器后实现了交流电至直流电的转换,并能够对电容器充电,当电容电压达到后续电子产品的工作电压时即可为外接电子设备供电。



(a) 整流电路



(b) 电容充电、放电曲线



(c) 驱动传感器 IBeacon

图 11 复合式能量采集器的应用

Fig. 11 Application of hybrid energy harvester

本文所搭建的测试系统可对器件的电学输出特性进行定量分析,然而,由于人体运动频率低以及振幅非均匀性等特点,所研制的采集器还需进一步进行实验验证。实验时将采集器放置在背包上,结果表明该复合式能量采集器可通过采集人体运动过程中产生的机械能,在 4 min 内将 0.022 F 的电容从 0 V 充电至 3.3 V。随后将感

器 IBeacon 接入电路中,电容中的电压迅速下降到 2.78 V,该传感器可持续工作 6 min。传感器在工作过程中能将环境温、湿度以及人体加速度等信息通过蓝牙模块传输至手机等移动电子端。由于传感器的工作电压为 1.7 V,所以,当电容器的电压数值低于 1.7 V 时,该传感器停止工作。

3 结 论

本文基于非线性频带拓宽技术-单稳态法构建了一款非谐振式摩擦-电磁复合式能量采集器,可以有效地将人体产生的低频、不规则的机械能转化为电能。该装置结构简单,质量为 200 g,尺寸为 $\Phi 50 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$;包含两组电磁发电单元和两组摩擦发电单元,利用非线性系统幅频曲线共振峰值偏移现象,拓宽了频率响应范围;引入柔性多层摩擦发电单元,不仅增强了器件的低频响应特性,还提高了器件的输出功率。4组独立发电单元中, TENG1 和 TENG2 在 10 M Ω 负载下的输出功率分别为 202.5 μW 和 348.1 μW , EMG1 和 EMG2 在 60 Ω 负载下的输出功率均可达到 150 mW。经过整流桥及电容储能转换后,该复合式能量采集器可以支持低功耗传感器持续工作。本文研究可以为人体运动能采集器的设计提供新的研究思路与参考。

参考文献:

[1] GUO X G, HE T Y Y, ZHANG Z X, et al. Artificial intelligence-enabled caregiving walking stick powered by ultra-low-frequency human motion[J]. ACS Nano, 2021, 15(12): 19054-19069.

[2] 孙娜. 柔性摩擦纳米发电机的制备及可穿戴自供电系统的研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2018.

[3] HE J, FAN X M, ZHANG D Y, et al. A high-efficient triboelectric-electromagnetic hybrid nanogenerator for vibration energy harvesting and wireless monitoring [J]. Science China Information Sciences, 2022, 65 (4): 225-233.

[4] XIE W B, GAO L X, WU L K, et al. A nonresonant hybridized electromagnetic-triboelectric nanogenerator for irregular and ultralow frequency blue energy harvesting[J]. Research, 2021(1): 304-315.

[5] MAHARJAN P, BHATTA T, RASEL M S, et al. High-performance cycloid inspired wearable electromagnetic energy harvester for scavenging human mo-

- tion energy [J]. *Applied Energy*, 2019, 256 (15): 113987.
- [6] 李晓娜, 陈莉, 武海良, 等. 智能可穿戴摩擦纳米发电机的研究进展[J]. *纺织科技进展*, 2022(12): 1-6. LI Xiaona, CHEN Li, WU Hailiang, et al. Research progress of intelligent wearable friction nanogenerator[J]. *Progress in Textile Science & Technology*, 2022(12): 1-6. (in Chinese)
- [7] REN Xiaohu, FAN Huiqing, WANG Chao, et al. Magnetic force driven noncontact electromagnetic-triboelectric hybrid nanogenerator for scavenging biomechanical energy[J]. *Nano Energy*, 2017, 35: 233-241.
- [8] LIU Long, TANG Wei, CHEN Baodong, et al. A self-powered portable power bank based on a hybridized nanogenerator[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2018, 3(3): 1700209.
- [9] 陈延辉, 谢伟博, 代克杰, 等. 非谐振式低频电磁-摩擦电复合振动能量收集器[J]. *物理学报*, 2020, 69(20): 316-325. CHEN Yanhui, XIE Weibo, DAI Kejie, et al. Non-resonant and low-frequency triboelectric-electromagnetic hybridized nanogenerator for vibration energy [J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(20): 316-325. (in Chinese)
- [10] LIU L, SHI Q F, LEE C K. A hybridized electromagnetic-triboelectric nanogenerator designed for scavenging biomechanical energy in human balance control [J]. *Nano Research*, 2021, 14 (11): 4227-4235.
- [11] 孙诗. 电磁式振动能量采集器非线性拓频方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
- [12] 黄曼娟. 振动能量收集器的非线性拓频方法研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2022.
- [13] 李昕欣, 杨永亮. 一种非谐振非接触式的振动能量采集器: 中国, CN101814817A[P]. 2010-08-25.
- [14] 王艳芬. 低频宽带振动能量采集器的结构设计与实现[D]. 太原: 太原理工大学, 2016.
- [15] ZHOU S X, ZUO L. Nonlinear dynamic analysis of asymmetric tristable energy harvesters for enhanced energy harvesting[J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2018. 61, 271-284.
- [16] NAMMARI A, CASKEY L, NEGRETE J, et al. Fabrication and characterization of non-resonant magneto-mechanical low-frequency vibration energy harvester[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018, 102:298-311.
- [17] 代胡亮, 林时想, 张岚斌, 等. 基于人体运动的压电-电磁混合式振动能量采集研究[J]. *固体力学学报*, 2019, 40(5): 427-440. DAI Huliang, LIN Shixiang, ZHANG Lanbin, et al. A new hybrid energy harvester for human motion power generation[J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2019, 40(5): 427-440. (in Chinese)
- [18] CHEN Yandong, JIE Yang, ZHU Jiaqing, et al. Hybridized triboelectric-electromagnetic nanogenerators and solar cell for energy harvesting and wireless power transmission[J]. *Nano Research*, 2022, 15 (3): 2069-2076.