



非谐振式低频电磁-摩擦电复合振动能收集器

陈延辉 谢伟博 代克杰 高玲肖 卢山 陈鑫 李宇航 牟笑静

Non-resonant and low-frequency triboelectric-electromagnetic hybridized nanogenerator for vibration energy

Chen Yan-Hui Xie Wei-Bo Dai Ke-Jie Gao Ling-Xiao Lu Shan Chen Xin Li Yu-Hang Mu Xiao-Jing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 69, 208402 (2020) DOI: 10.7498/aps.69.20200793

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200793>

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

收集振动能的摩擦纳米发电机设计与输出性能

Design and output performance of vibration energy harvesting triboelectric nanogenerator

物理学报. 2019, 68(19): 190201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190806>

磁悬浮式电磁-摩擦复合生物机械能量采集器

Electromagnetic-triboelectric hybridized generator based on magnetic levitation for scavenging biomechanical energy

物理学报. 2017, 66(22): 228401 <https://doi.org/10.7498/aps.66.228401>

基于摩擦纳米发电机的可穿戴能源器件

Triboelectric nanogenerator based wearable energy harvesting devices

物理学报. 2020, 69(17): 170202 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200867>

抗磁悬浮振动能量采集器动力学响应的仿真分析

Simulation analysis of dynamic response of the energy harvester based on diamagnetic levitation

物理学报. 2018, 67(1): 018501 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171551>

新型二维三组元压电声子晶体板的缺陷态及振动能量回收

Defect states and vibration energy recovery of novel two-dimensional piezoelectric phononic crystal plate

物理学报. 2019, 68(23): 234206 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190260>

含振动能激发Boltzmann模型方程气体动理论统一算法验证与分析

Validation and analysis of gas-kinetic unified algorithm for solving Boltzmann model equation with vibrational energy excitation

物理学报. 2017, 66(20): 204703 <https://doi.org/10.7498/aps.66.204703>

非谐振式低频电磁-摩擦电复合振动能量收集器*

陈延辉^{1)2)#} 谢伟博^{1)3)4)#} 代克杰³⁾ 高玲肖^{1)3)†}
 卢山¹⁾ 陈鑫¹⁾ 李宇航⁵⁾ 牟笑静^{1)4)‡}

1) (重庆大学, 光电技术与系统教育部重点实验室, 重庆大学新型微纳器件与系统技术国防重点学科实验室, 重庆 400044)

2) (平高集团智能电力科技有限公司, 平顶山 467001)

3) (平顶山学院电气与机械工程学院, 平顶山 467000)

4) (机械传动国家重点实验室, 重庆 400044)

5) (中国航空气动力技术研究院, 北京 100074)

(2020年5月26日收到; 2020年6月17日收到修改稿)

针对低频复杂的环境振动能量, 本文提出一种非谐振式低频电磁-摩擦电复合能量收集器件. 该能量收集器以旋转陀螺为核心部件, 具有结构简单、俘能灵敏、鲁棒性强、可 360° 全方位俘能等优点. 通过理论分析与软件仿真, 阐述了器件的工作原理; 基于线性电机平台, 系统研究了振荡频率、振荡幅度对器件输出性能的影响, 较好地证明了器件收集振动能量的能力. 在2 Hz的振动环境下, 摩擦发电单元在20 M Ω 负载下的峰值功率约为0.084 mW, 电磁发电单元在800 Ω 负载下峰值功率约为4.61 mW, 系统机电转换效率为0.45%. 最后结合人体运动能收集, 成功验证了该复合能量收集器对低频复杂机械能的收集能力, 并通过能量存储单元, 实现了计步器自供能的正常工作. 本研究不仅为低频振动能量的高效采集与转换提供了一个崭新的思路, 而且在自供电传感网络节点方面具有潜在应用价值.

关键词: 非谐振, 复合能量收集器, 低频振动能

PACS: 84.71.-b, 41.20.-q, 41.20.Cv, 45.20.dg

DOI: 10.7498/aps.69.20200793

1 引言

随着万物互联时代拉开序幕, 各种用于交互通讯的传感器的需求数量急剧增加. 作为传感系统的命脉, 可靠的能源供给是交互通讯网络的关键因素. 然而目前大部分无线传感网络节点仍采用电池供电, 一方面, 电池有限的寿命给海量无线传感网络节点的电池更换或充电提出了巨大的挑战; 另一方面, 化学能电池不仅难以抵抗高、低温等恶劣环

境, 而且会给环境造成污染. 因此无线传感网络节点供电问题已成为制约物联网建设的瓶颈^[1,2]. 环境振动能量是一种储量丰富、分布广泛的可再生清洁能源, 通过能量采集技术, 将环境中的机械能转换为电能, 为无线传感网络节点供电, 是打破传统供电方式限制的有效解决途径^[3-5].

电磁-摩擦复合能量采集技术已被证明是实现振动能量高效获取与转换的有效途径^[6-9]. 摩擦纳米发电机 (TENGs) 具有较高的输出电压, 但是输出电流只有微安级^[10-11], 而电磁发电机 (EMGs)

* 国家重点研发计划 (批准号: 2019YFB2004800)、重庆大学科研后备拔尖人才培养计划 (批准号: CQU2019HBRC1A04) 和中央高校基本科研业务费 (批准号: 2019CDCGGD320) 资助的课题.

同等贡献作者.

† 通信作者. E-mail: 15922620987@163.com

‡ 通信作者. E-mail: mxjacj@cqu.edu.cn

的输出电流可达毫安级^[12–15], 两者的组合可以满足较高能量转换的需求. 被誉为“纳米发电机之父”的王中林院士^[16]首先提出“纳米能源”原创概念, 并将纳米能源推广为“新时代的能源, 即物联网、传感网络、大数据时代的分布式移动式能源”, 由此开启了人类能源模式新篇章. 2018年王中林院士团队^[17]提出了一种具有内部拓扑结构的摩擦-电磁复合纳米发电机, 成功实现了两种发电原理的优势补偿. 其中电磁发电机在 100 Ω 的最优负载下, 峰值功率为 4 mW, 摩擦发电机在的最优负载 100 M Ω 下, 峰值功率为 0.5 mW. 2018年中北大学薛晨阳教授和丑修建教授团队^[18]共同报道了一种用于收集水波能量的盒状摩擦-电磁复合纳米发电机. 在负载为 100 M Ω 时, TENG 的瞬时最大输出功率为 0.08 mW, 在 1 k Ω 的负荷下, EMG 的瞬时最大输出功率为 14.9 mW, 该复合纳米发电机可同时点亮 60 个发光二极管 (LEDs). 2019年苏州大学孙立宁教授, 刘会聪教授与新加坡国立大学 Chengkuo Lee 教授^[19]共同提出了一种旋转式电磁-摩擦电复合型能量采集器, 当驱动频率为 2 Hz, 振幅为 14 cm 时, TENG 和 EMG 的最大功率密度分别为 3.25 和 79.9 W/m², 证明了该装置从多方向和宽频率范围环境中获取能量的有效性; 2020年重庆大学牟笑静课题组^[20]提出了一种基于混沌摆式的电磁-摩擦复合能量采集器, 摩擦发电机的最大瞬时功率为 15.21 μ W, 电磁发电机的最大瞬时功率为 1.23 mW, 成功实现了自供电无线传感节点数据的远程传输.

虽然近年来基于电磁-摩擦复合式的振动能量收集技术已经取得了一些阶段性的进展, 但是其工程化应用依然面临着众多挑战: 1) 现有的能源收集装置只有在较高频且规则振动环境中才有较好的输出, 而随机、不规则的环境振动往往处于超低频 (<10 Hz), 因此高频谐振器件很难实现复杂的环境振动能量的高效获取与转换; 2) 大多数能源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, 但它们往往只能在固定的方向滚动, 针对复杂多变的环境振动很难实现较高的换能效率.

综合以上分析, 针对复杂多变的环境振动能量, 本文提出了一种非谐振式低频电磁-摩擦复合

振动能量采集装置. 采用具有灵敏度高、鲁棒性强、可 360°旋转俘能等特性的旋转陀螺结构, 结合电磁-摩擦工作原理, 使系统能够高效地俘获低频、不规则的环境振动能量. 通过理论分析与软件仿真, 阐述了器件的工作原理; 基于线性电机平台, 系统地研究了振荡频率和幅度对器件输出性能的影响, 较好地证明了器件收集振动能量的能力. 在 2 Hz 的振动环境下, 摩擦发电单元在 20 M Ω 负载下的峰值功率为 0.084 mW, 电磁发电单元在 800 Ω 负载下峰值功率为 4.61 mW, 系统机电转换效率为 0.45%. 将器件分别置于人体的腿部和手臂, 分析了复合能量收集器件对于人体简单运动能量的收集能力, 并结合能量存储单元, 实现了计数器自供电的正常工作. 本研究不仅为低频振动能量的高效采集与转换提供了一个崭新的思路, 而且在自供电传感网络节点方面具有潜在应用价值.

2 设计与原理

2.1 结构模型

为了实现波浪能的高效获取与转换, 本文提出了一种非谐振式低频电磁-摩擦复合振动能量收集器件, 其结构模型如图 1(a) 所示, 结构分解图如图 1(b) 所示. 其核心结构主要包括: 一个集自转与公转为一体的空心旋转陀螺 ($\phi 35$ mm \times 40 mm), 4 个 1000 匝的线圈 ($\phi 20$ mm \times 20 mm), 一个圆柱形钕铁硼磁铁 ($\phi 18$ mm \times 20 mm), 一个 PCB 电极板 ($\phi 100$ mm), 一个圆柱形框架 ($\phi 110$ mm \times 40 mm) 和一些连接部件 (图 1(c)). 空心旋转陀螺与圆柱形框架均采用 3D 打印技术由白色树脂打印而成. 在圆柱形框架的底部粘贴有一块镀有叉指锡层的 PCB 板, 用来作为摩擦电极, 其与粘贴在空心陀螺外表面的 FEP 薄膜共同组成摩擦单元. 磁铁采取与陀螺母线方向垂直的方式用热熔胶固定于空心陀螺内部, 其与等距粘贴在圆柱形框架底部外侧的 4 个线圈共同组成电磁发电单元 (图 1(c) 所示). 陀螺采用螺钉和套环连接方式固定在圆柱形框架的中心, 从而实现自转滚动与公转滚动. 为了减小陀螺在运动过程中的阻力, 将一个具有中孔 ($\phi 3.5$ mm) 的圆球 ($\phi 4.5$ mm) 放置于连接环与螺帽之间. 整个系统的正反面实物照片如图 1(d), (e) 所示. 在外界激励的作用下, 旋转陀螺将绕其顶点顺时针或逆时针滚动, 从而实现 360°旋转俘能.

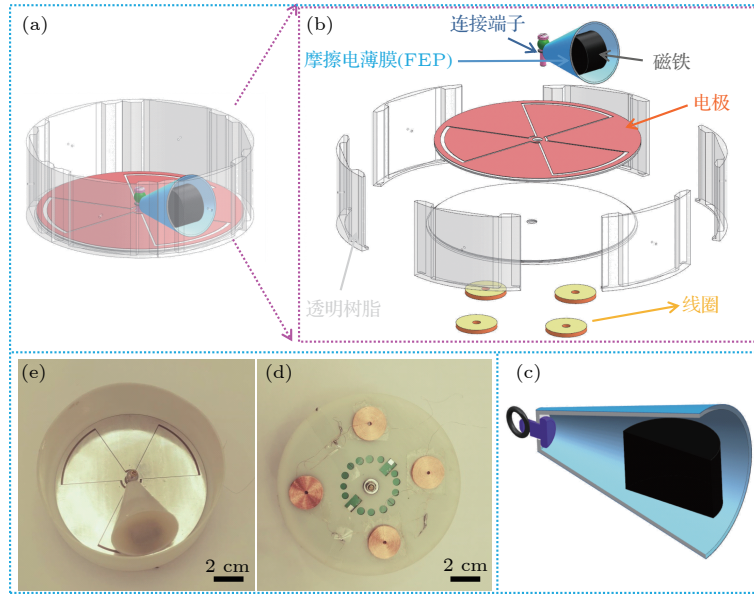


图 1 系统结构模型 (a) 电磁-摩擦复合能量收集器模型图; (b) 复合能量收集器结构分解示意图; (c) 陀螺剖面图; (d), (e) 电磁-摩擦复合能量收集器的正反面照片

Fig. 1. The structure model of the system: (a) The model diagram of the hybridized nanogenerator; (b) schematic diagram of structural decomposition of the hybridized nanogenerator; (c) the cross-section of the gyro; (d), (e) digital photograph of the TENG and EMG hybridized nanogenerator.

2.2 理论分析

本文所提出的基于旋转陀螺结构的滚动摩擦发电机模型可以等效为一个独立滚动摩擦层 (FEP) 与一些金属电极对 (锡) 之间的滚动摩擦起电过程. 每相邻的一对叉指电极与陀螺外层的摩擦材料 (FEP) 即可构成一个发电单元, 以一个发电单元为例详细阐述其起电原理, 如图 2(a) 所示. 当陀螺滚动到电极 1 上时, 由材料电负性可知, 金属锡相对 FEP 具有更强的正电荷亲和性^[21], 因此会在电极 1 上积累一定数量的正电荷, 在 FEP 上积累相同数量的负电荷 (图 2(a) I); 当陀螺在外界激励作用下从电极 1 向电极 2 上滚动时, 电极 1 上的正电荷将会通过外部电路由电极 1 流向电极 2, 形成发电的前半周期 (图 2(a) II); 当陀螺由电极 1 完全滚动到电极 2 上后, 电极 1 上的正电荷也全部转移至电极 2 上 (图 2(a) III); 随后陀螺在外界激励的作用下继续滚动离开电极 2, 电极 2 上的正电荷会通过外部电路回流到电极 1, 从而在外部电路中产生反向电流 (图 2(a) IV). 因此当陀螺在外界激励的作用下, 在叉指电极上滚动时, 会产生交流发电过程. 采用 COMSOL 5.3 a 对图 2(a) III 状态下的表面电势分布进行了仿真, 仿真结果如图 2(b) 所示.

电磁发电机的起电过程为: 当陀螺在外界激励下滚动时, 镶嵌在其内部的磁铁会随着其一起滚

动, 从而导致线圈内部磁通量的变化, 由楞次定律可知, 线圈中将会产生感应电流来阻碍磁通量的变化, 以一个线圈为例, 详细阐述其起电过程, 如图 2(c). 假设磁铁正对线圈时为初始状态, 此时线圈中没有感应电流 (图 2(c) I); 当陀螺在外部激励下产生滚动时, 磁铁会随着陀螺的滚动远离线圈, 这时线圈内的磁通量将会减小, 因此线圈内将会产生一个顺时针方向的电流来阻碍这种变化, 如图 2(c) II 所示; 当陀螺继续滚动的足够远时, 线圈中磁通量为零, 这时磁铁的运动不会使得线圈内产生感应电流 (图 2(c) III); 当磁铁再次靠近线圈时, 线圈内将产生的一个逆时针的电流来平衡磁通量的变化 (图 2(c) IV). 利用 Maxwell 15.0 软件对磁体的磁通线分布进行了仿真, 如图 2(d) 所示.

由滑动摩擦解析方程可知^[22], 摩擦发电机通过外部的电流可以表示为

$$I = \sigma \omega v \ln \left(\frac{l - vt}{l} \right), \quad (1)$$

式中, σ 为表面电荷密度, ω 为摩擦层的宽度, l 为摩擦层的长度, v 为陀螺的滚动速度, t 为陀螺从电极 1 滚动到电极 2 上的时间. 由欧姆定律可知, 输出电压为

$$V = \sigma \omega v R \ln \left(\frac{l - vt}{l} \right). \quad (2)$$

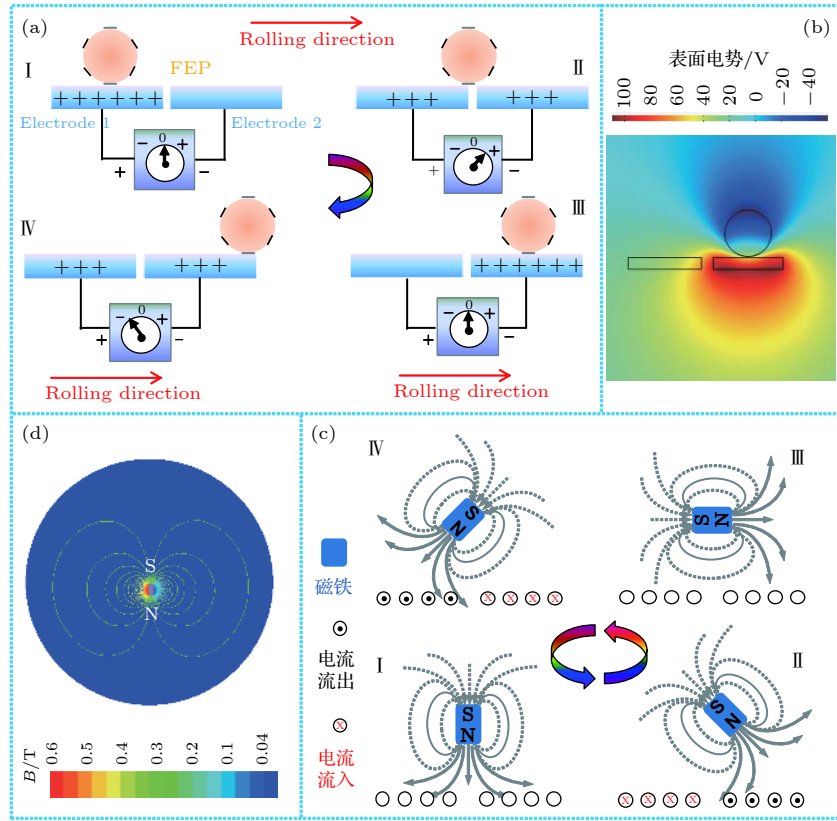


图 2 复合能量收集器的工作原理及其仿真 (a) 摩擦发电单元的工作原理; (b) 摩擦发电单元的仿真; (c) 电磁发电单元的工作原理; (d) 电磁发电单元的仿真

Fig. 2. The operating principle and simulation of the hybridized nanogenerator: (a) The operating principle of the TENG; (b) the simulation of the TENG; (c) the operating principle of the EMG; (d) the simulation of the EMG.

假设表面电荷密度为 $50 \mu\text{C}/\text{m}^2$, 由于本设计装置中陀螺的母线长度为 0.04 m , 摩擦层 FEP 薄膜贴在陀螺侧表面, 因此可以设定摩擦长度 l 为 0.04 m ; 由于地面单个电极为半径为 0.05 m , 圆心角度为 60° 的扇形, 因此可取扇形中位线的长度 0.025 m 为摩擦层的宽度 ω , 陀螺从电极 1 滚动到电极 2 上的时间为 0.0001 s , 外部负载电阻为 $100 \text{ M}\Omega$, 通过 Matlab 仿真可得, 摩擦发电单元输出绝对值与陀螺滚动速度的关系曲线, 如图 3 所示. 由图 3 可知, 摩擦发电机的输出与陀螺的运动速度成正相关关系, 由于滚动相对滑动具有较低的摩擦系数, 因此本文提出的基于旋转滚动陀螺方案对外部激励具有更优的俘能灵敏度.

由法拉第电磁感应定律可知, 电磁发电机的输出电压为^[23]

$$\begin{aligned}
 I &= -N \frac{d\Phi}{dt} = -NS \frac{dB(x)}{dt} \nu \\
 &= -NS \frac{dB(x)}{dx} \frac{dx}{dt} = -NS \frac{dB(x)}{dx} \nu, \quad (3)
 \end{aligned}$$

式中, N 为线圈的匝数, $B(x)$ 为通过线圈的磁通量密度, S 为线圈的面积, ν 为陀螺的滚动速度.

当线圈内阻为 R_{coil} 时, 线圈中产生的短路电流可以表示为

$$I = \frac{V}{R_{\text{coil}}} = -\frac{NS}{R_{\text{coil}}} \frac{dB(x)}{dx} \nu. \quad (4)$$

因此, 电磁发电机的输出电压和电流均与陀螺的运动速度呈正相关关系.

3 结果与分析

在直线电机平台 (型号为 DGL200-AUM4) 上对复合能量收集器的动态输出特性进行了评估, 系统研究了振荡频率和幅度对复合能量收集器输出的影响, 如图 4 所示. 为了降低系统的复杂性, 电磁发电机的四组线圈首先进行串联, 然后将串联后的输出连接到测试设备上测量. 首先采用静电计 (型号为 Keithley 6514) 对电磁发电单元在不同频率下的开路电压与短路电流进行了表征, 如

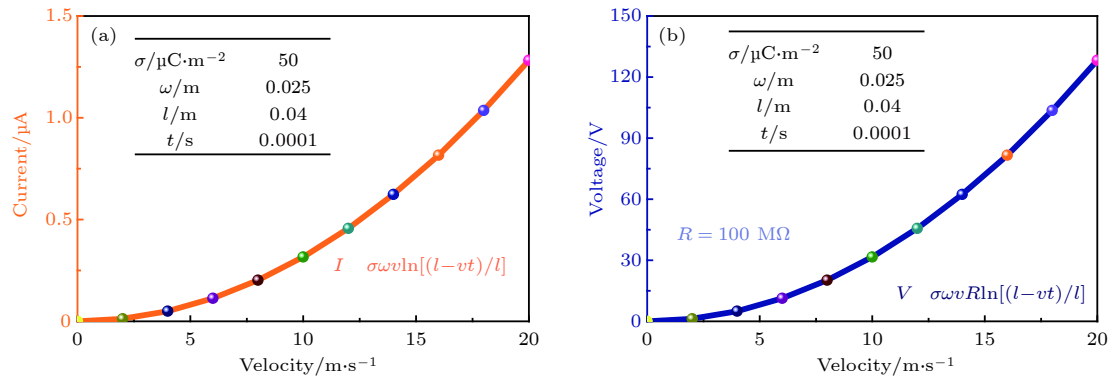


图3 摩擦发电机的输出与陀螺滚动速度的关系 (a) 摩擦发电机的电流与陀螺滚动速度的关系; (b) 摩擦发电机的电压与陀螺滚动速度的关系

Fig. 3. The relation between the output performance of TENG and the rolling speed of gyro: (a) The relation between the output current of TENG and the rolling speed of gyro; (b) the relation between the output voltage of TENG and the rolling speed of gyro.

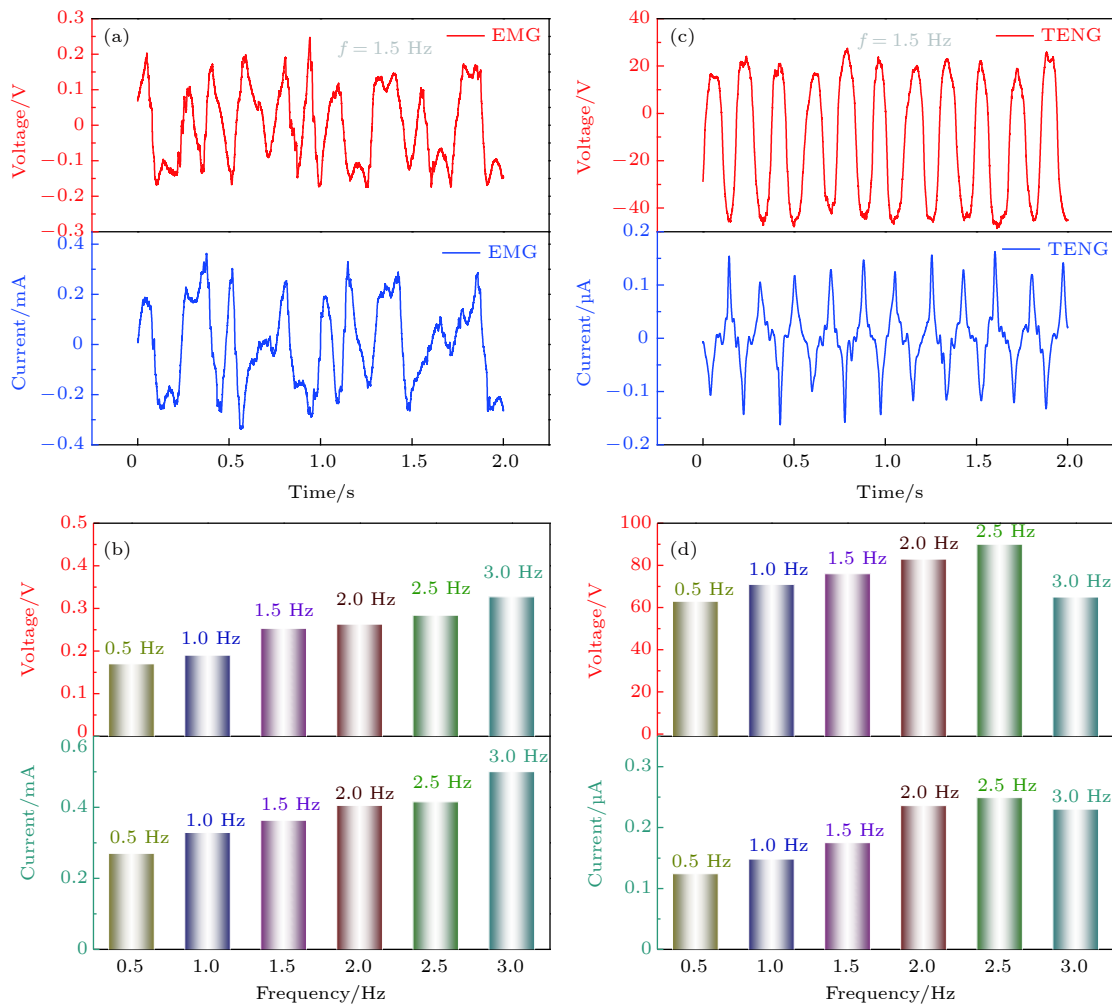


图4 在线性马达不同激励频率下复合能量收集器的输出特性 (a) 1.5 Hz 频率下电磁发电机的输出特性; (b) 不同频率下电磁发电机的输出特性; (c) 1.5 Hz 频率下摩擦发电机的输出特性; (d) 不同频率下摩擦发电机的输出特性

Fig. 4. The output characteristics of the hybridized nanogenerator excited by a linear motor: (a) The output characteristics of the EMG in 1.5 Hz; (b) the output characteristics of the EMG in different frequencies; (c) the output characteristics of the TENG in 1.5 Hz; (d) the output characteristics of the TENG in different frequencies.

图4(a),(b)所示. 随着频率从0.5 Hz 增大到3.0 Hz, 电磁发电机的开路电压从0.17 V 增大到0.33 V, 短路电流从0.27 mA 增大到0.52 mA. 电磁发电机在0.5—3.0 Hz 的超低频率范围具有较好的俘能

效率, 并且输出特性随着频率的增大而增大, 与理论分析吻合. 同样表征了摩擦发电机在不同激励频率下 (0.5—3.0 Hz) 的输出特性, 如图 4(c),(d) 所示. 摩擦发电机的开路电压和短路电流均随着频率的增大呈现出先增大后减小的趋势, 在 2.5 Hz 时达到最大值 (90 V, 0.25 μ A). 由前面理论分析可知摩擦发电机的输出与陀螺的运动速度及频率成正相关关系, 但是实际输出结果当频率大于 2.5 Hz 时表现出减小的趋势, 造成这种结果的主要原因是, 摩擦发电机在较高频率的外界激励下, 处于高速旋转, 在离心力的作用下出现反重力现象, 这时旋转陀螺不能与底部电极完全接触, 从而使得有效摩擦面积减小, 输出降低.

进一步通过调节线性马达的往复行程, 模拟了复合能量收集器在不同振动幅度下的输出, 如图 5 所示. 图 5(a) 为电磁发电机在马达不同往复行程下的输出, 图 5(b) 为摩擦发电机在马达不同往复行程下的输出. 由测试结果可知, 复合能量收集器的输出能量密度在马达往复行程为 200 mm 时, 明显高于其他行程下的输出能量密度. 这是由于在相同频率的外部激励下, 当行程为 200 mm 时, 器件进入二次谐振模式, 旋转速度明显增大, 因此俘能效率达到最高.

为了评估器件的输出性能, 分别测试摩擦发电机与电磁发电机在 2 Hz 振动激励下, 不同负载下的输出, 如图 6 所示. 图 6(a) 表明摩擦发电机

在负载为 20 M Ω 时输出功率最大, 约为 0.084 mW. 图 6(b) 表明电磁发电机在负载为 800 Ω 时, 输出功率最大, 约为 4.61 mW. 同时, 对复合能量收集器的充电能力进行了测试, 如图 6(c) 所示. 首先分别对摩擦发电机和电磁发电机的输出进行整流, 整流后的输出并联接到不同容量的电容两端进行充电, 设定目标电压为 3 V, 充电曲线如图 6(c) 所示. 实验证明复合能量收集器将 10 μ F 电容充到 3 V 大概需要 500 s 的时间.

本文进一步对复合能量收集器件的俘能效率进行了评估. 首先对外部激励能量进行估算. 由于摩擦发电机的由 6 个叉指电极单元组成 (图 1 所示), 因此每相邻电极单元间隔角度为

$$\theta = 360^\circ/n = 360^\circ/6 = 60^\circ, \quad (5)$$

式中 n 为摩擦叉指电极单元的个数. 因此可通过计算摩擦发电机各个峰值电压点的时间差, 求得器件的瞬时角速度, 由于采用的摩擦发电机整流后的输出波形进行计算, 因此器件的瞬时角速度为

$$\omega_i = \theta/2(t_{i+1} - t_i), \quad (6)$$

式中 t_i 为第 i 个峰值所对应的时间点. 从而可获得器件的瞬时速度

$$v_i = \omega_i \times r, \quad (7)$$

式中 r 为圆锥体的高度. 从而可获得陀螺的瞬时机械能为

$$E_i = \frac{1}{2}mv_{i+1}^2 - \frac{1}{2}mv_i^2. \quad (8)$$

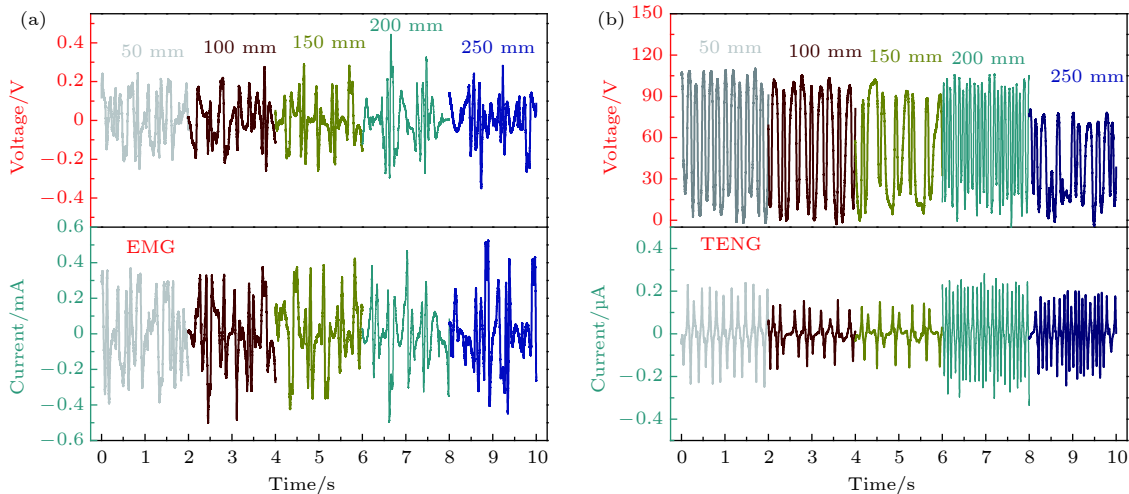


图 5 线性马达不同往复行程激励下复合能量收集器的输出特性 (a) 不同振动幅度下电磁发电机的输出特性; (b) 不同振动幅度下摩擦发电机的输出特性

Fig. 5. The output characteristics of the hybridized nanogenerator under the excitation of different reciprocating stroke of the linear motor: (a) The output characteristics of the EMG under different amplitude; (b) output characteristics of TENG at different amplitudes.

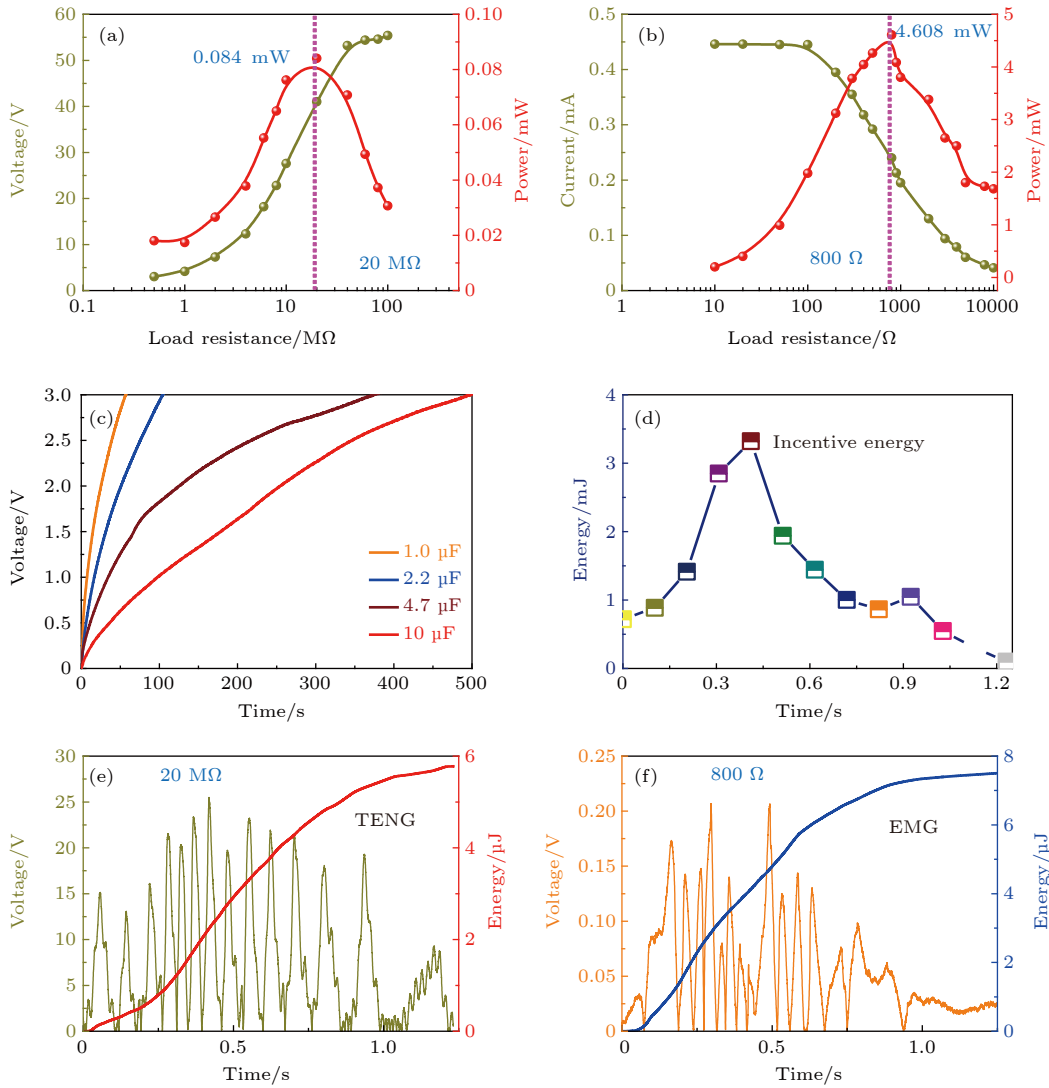


图 6 复合能量收集器的功率与能量 (a) 摩擦发电机在不同负载下的输出电压与输出功率; (b) 电磁发电机在不同负载下的输出电压与输出功率; (c) 复合能量收集器对不同电容的充电曲线; (d) 单次外部激励的机械能量; (e) 摩擦发电机在 20 MΩ 下的储能曲线; (f) 电磁发电机在 800 Ω 下的储能曲线

Fig. 6. The power and energy of the hybridized nanogenerator: (a) The voltage and power curves of TENG under different loads; (b) the voltage and power curves of EMG under different loads; (c) the charging curves of the hybridized nanogenerator for different capacitors; (d) the incentive energy of a single excitation; (e) the output energy of the TENG under 20 MΩ; (f) the output energy of the EMG under 800 Ω.

假设器件第一个瞬时机械能即为单次外部激励能量, 陀螺质量 m 为 0.0435 kg, 高度为 0.03 m, 代入公式可求得单次外部振动能量 E_1 , 结果如图 6(d) 所示, 不同时刻的瞬时机械能采用了不同颜色进行标记. 可知单次外部机械能最大值约为 0.003 J.

器件俘获的电能为

$$E_o = \int_{t_1}^{t_2} \frac{U_{\text{TENG}}^2}{R_{\text{TENG}}} dt + \int_{t_1}^{t_2} \frac{U_{\text{EMG}}^2}{R_{\text{EMG}}} dt. \quad (9)$$

在单次激励下, 对摩擦发电机在 20 MΩ 负载下整流后的输出波形进行积分, 结果如图 6(e) 所示, 器件在单次激励下累积俘获的能量约为 5.8×10^{-6} J;

采用同样的方法, 在单次激励下, 对电磁发电机在 800 Ω 负载下整流后的输出波形进行积分, 结果如图 6(f) 所示, 器件在单次激励下累积俘获的能量约为 7.6×10^{-6} J; 因此复合能量收集器在单次机械激励下的总输出为 1.34×10^{-5} J; 因此器件的机电转换效率为

$$\eta = \frac{E_o}{E_i} \times 100\% = \frac{1.34 \times 10^{-5}}{0.003} \times 100\% \approx 0.45\%. \quad (10)$$

进一步将复合能量收集器置于人体不同部位, 对人体不同运动能量进行采集, 如图 7 所示. 图 7(a) 为电磁发电机在人体行走与跑步状态下的输出,

图 7(b) 为摩擦发电机在人体行走与跑步状态下的输出, 图 7(c) 为电磁发电机在人体行走与跑步状态下的输出, 图 7(d) 为摩擦发电机在人体行走与跑步状态下的输出. 可以看出复合能量收集器在人体行走与跑步状态下均具有卓越的输出人力, 同时跑步状态下的输出明显优于行走状态下的输出, 置于腿部的输出明显优于置于手臂的输出. 这是由于人体跑步状态下的振动较行走下的振动更加剧烈, 同一运动状态下, 腿部的振动较手臂的振动更加剧烈. 此实验充分验证了该复合能量收集器件对于低频复杂振动能量的俘获能力.

为了验证复合能量收集器在自供电传感器中

的应用, 搭建了一个自供电计数器模块, 如图 8(a) 所示. 摩擦发电机与电磁发电机的输出分别整流后, 并联到一个 $100 \mu\text{F}$ 电容器的两端, 首先对电容器进行充电, 此时开关处于断开状态. 由于计数器模块的工作电压为 3 V , 因此当电容器的充电电压略高与 3 V 时, 将开关闭合, 电容器存储的能量可为计数器提供直流电能. 图 8(b) 为 $100 \mu\text{F}$ 电容器的充电曲线, 由图 8(b) 可知, 将复合能量收集器置于人体腿部, 跑步大约 2000 s 后, 可将电容电压充到 3 V 左右. 图 8(c) 为开关闭合后, 计数器工作实物图. 此实验验证该复合能量收集器在自供电传感领域的应用前景.

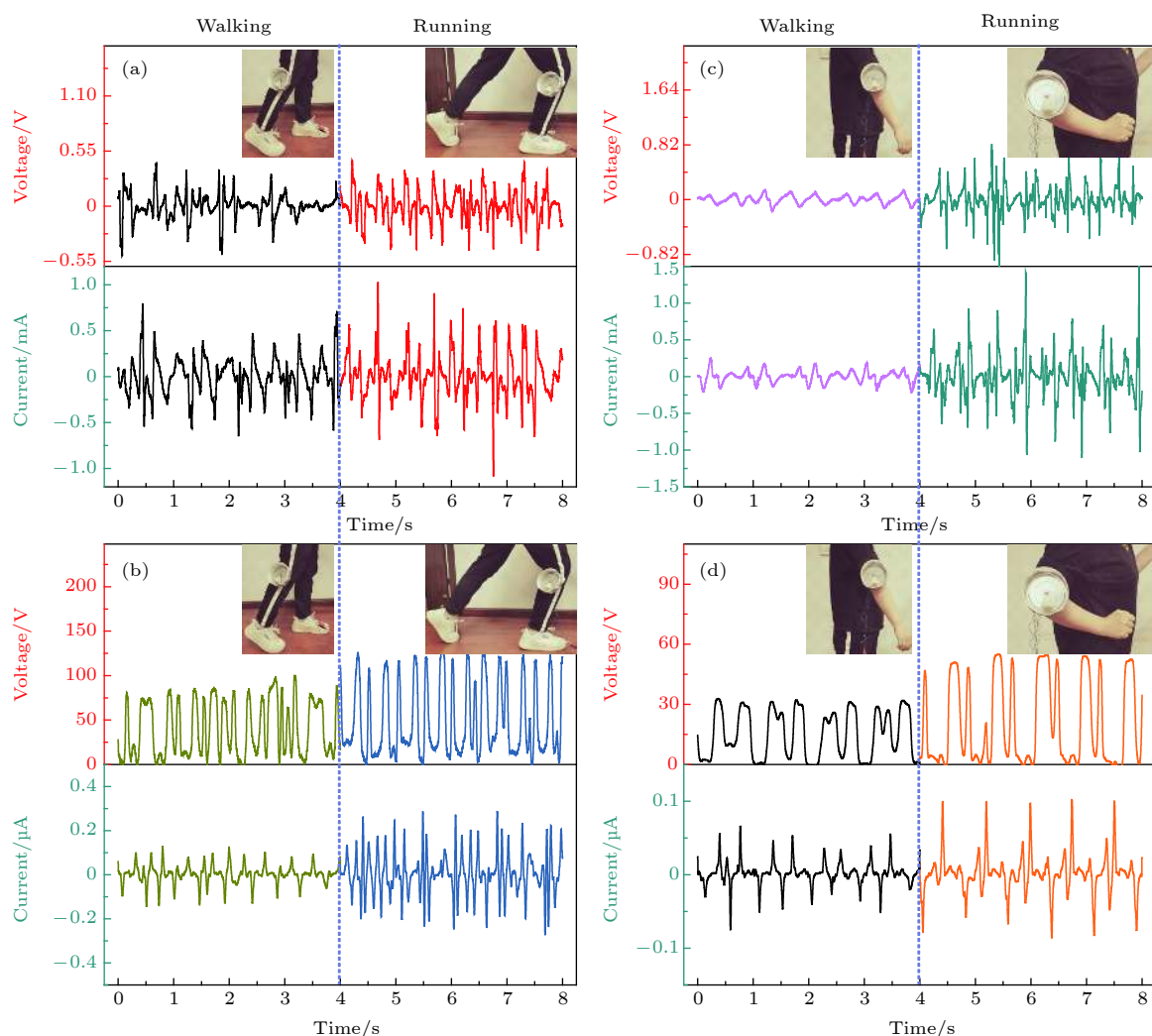


图 7 复合能量收集器对人体运动能的收集能力 (a) 置于腿部, 电磁发电机对人体能量收集的输出曲线; (b) 置于腿部, 摩擦发电机对人体能量收集的输出曲线; (c) 置于手臂, 电磁发电机对人体能量收集的输出曲线; (d) 置于手臂, 摩擦发电机对人体能量收集的输出曲线

Fig. 7. The ability of the hybridized nanogenerator to the kinetic energy of the human body: (a) The outputs of the EMG from human body when it is placed on the leg; (b) the outputs of the TENG from human body when it is placed on the leg; (c) the outputs of the EMG from human body when it is placed on the arm; (d) the outputs of the TENG from human body when it is placed on the arm.

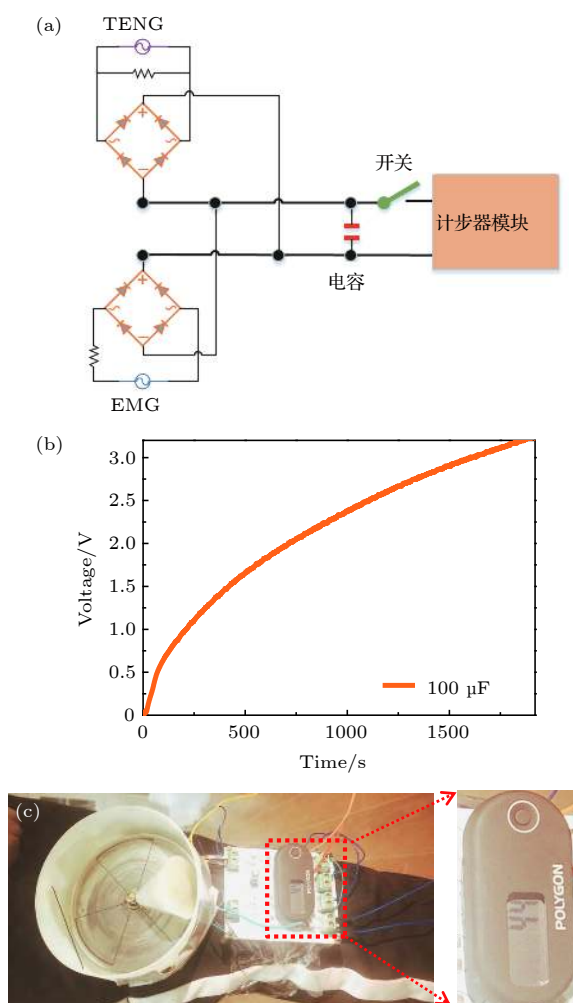


图 8 复合能量收集器在自供电传感器中的应用实验 (a) 自供电计步器模块图; (b) 复合能量收集器对 $100\ \mu\text{F}$ 电容的充电曲线; (c) 自供电计步器实物图

Fig. 8. The application of the hybridized nanogenerator in self-powered sensor: (a) The diagram of self-powered pedometer module; (b) the charging curves of the hybridized nanogenerator for a capacitor of $100\ \mu\text{F}$; (c) the photograph of self-powered pedometer module.

4 结 论

本文提出了一种非谐振式低频电磁-摩擦电复合振动能量收集器, 通过旋转陀螺结构的设计, 实现了在低频和不规则振动下的高灵敏度能量捕获. 分析了器件的俘能机理, 建立了输出与器件运动速度的理论模型. 基于线性电机平台, 系统地研究了振动频率和幅度对器件输出性能的影响, 较好地证明了器件收集振动能量的能力. 在 $2\ \text{Hz}$ 的振动环境下, 摩擦发电单元在 $20\ \text{M}\Omega$ 负载下的峰值功率为 $0.084\ \text{mW}$, 电磁发电单元在 $800\ \Omega$ 负载下峰值功率为 $4.61\ \text{mW}$, 系统机电转换效率为 0.45% . 将器

件分别置于人体的腿部和手臂, 分析了复合能量收集器件对于人体简单运动能量的收集能力, 并结合能量存储单元, 实现了计步器自供电的正常工作. 本项研究不仅为低频振动能量的高效采集与转换提供了一个崭新的思路, 而且在自供电传感网络节点方面具有潜在应用价值.

参考文献

- [1] Bai Y, Xu L, He C, Zhu L P, Yang X D, Jiang T, Nie J H, Zhong W, Wang Z L 2019 *Nano Energy* **66** 104117
- [2] Xia F B, Pang Y K, Liu G X, Wang S W, Li W, Zhang C, Wang Z L 2019 *Nano Energy* **61** 1
- [3] An J, Wang Z M, Jiang T, Liang X, Wang Z L 2019 *Adv. Funct. Mater.* **29** 1904867
- [4] Liu G L, Guo H Y, Xu S X, Hu C G, Wang Z L 2019 *Adv. Energy Mater.* **9** 1900801
- [5] Xu M Y, Zhao T C, Wang C, S. L. Zhang S L, Li Z, Pan X X, Wang Z L 2019 *ACS Nano* **13** 1932
- [6] Guo H, Wen Z, Zi Y, Yeh M, Wang J, Zhu L, Hu C, Wang Z L 2016 *Adv. Energy Mater.* **6** 1501593
- [7] Wen Z, Guo H, Zi Y, Yeh M, Wang X, Deng J, Wang J, Li S, Hu C, Zhu L, Wang Z L 2016 *ACS Nano* **10** 6526
- [8] Gao L X, Lu S, Xie W B, Chen X, Wu L K, Wang T T, Wang A B, Yue C Q, Tong D Q, Lei W Q, Yu H, He X B, Mu X J, Wang Z L, Yang Y 2020 *Nano Energy* **72** 104684
- [9] Shao H, Cheng P, Chen R, Xie L, Sun N, Shen Q, Chen X, Zhu Q, Zhang Y, Liu Y, Wen Z, Sun X 2018 *Nano-Micro Lett.* **10** 54
- [10] Gao L X, Hu D L, Qi M K, Gong J, Zhou H, Chen X, Chen J F, Cai J, Wu L K, Hu N, Yang Y, Mu X J 2018 *Nanoscale* **10** 19781
- [11] Gao L X, Chen X, Lu S, Zhou H, Xie W B, Chen J F, Qi M K, Yu H, Mu X J, Wang Z L, Yang Y 2019 *Adv. Energy Mater.* **10** 1902725
- [12] Saha C, Donnell T, Wang N, McCloskey P 2017 *Sensors & Actuat. A-Phys.* **147** 248
- [13] Koukharenko E, Beeby S, Tudor M, White N, Donnell T, Saha C, Kulkarni S, Roy S 2006 *Microsyst. Technol.* **12** 1071
- [14] Grishchuk P 2003 *Physics* **6** 0306013
- [15] Liu H C, Hou C, Lin J H, Li Y F, Shi Q F, Chen T, Sun L N, Lee C K 2018 *Appl. Phys. Lett.* **113** 203901
- [16] Wang Z L 2017 *Nature* **542** 159
- [17] Wang J Y, Pan L, Guo H Y, Zhang B B, Zhang R R, Wu Z Y, Wu C S, Yang L J, Liao R J, Wang Z L 2019 *Adv. Energy Mater.* **9** 1802892
- [18] Hao C C, He J, Zhai C, Jia W, Song L L, Cho J D, Chou X J, Xue C Y 2019 *Nano Energy* **58** 147
- [19] Hou C, Chen T, Li Y F, Huang M J, Shi Q F, Liu H C, Sun L N, Lee C K 2019 *Nano Energy* **63** 103871
- [20] Chen X, Gao L X, Chen J F, Lu S, Zhou H, Wang T T, Wang A B, Zhang Z F, Guo S F, Mu X J, Wang Z L, Yang Y 2020 *Nano Energy* **69** 104440
- [21] Davies D K 1969 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **2** 1533
- [22] Niu S M, Liu Y, Wang S H, Lin L, Zhou Y S, Hu Y F, Wang Z L 2013 *Adv. Mater.* **25** 6184
- [23] Zhang C, Tang W, Han C B, Fan F R, Wang Z L 2014 *Adv. Mater.* **26** 3580

Non-resonant and low-frequency triboelectric-electromagnetic hybridized nanogenerator for vibration energy*

Chen Yan-Hui^{1)2)#} Xie Wei-Bo^{1)3)4)#} Dai Ke-Jie³⁾ Gao Ling-Xiao^{1)3)†}
 Lu Shan¹⁾ Chen Xin¹⁾ Li Yu-Hang⁵⁾ Mu Xiao-Jing^{1)4)‡}

1) (*International R & D Center of Micro-nano Systems and New Materials Technology, Key Laboratory of Optoelectronic Technology & Systems Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China*)

2) (*Pinggao (Group) Smart Electric Power Science & Techology Co., Ltd. Pingdingshan 467001, China*)

3) (*School of Electric and Mechanical Engineering, Pingdingshan University, Pingdingshan 467000, China*)

4) (*State Key Laboratory of Mechanical Transmissions, Chongqing University, Chongqing 400044, China*)

5) (*China Academy of Aerospace Aerodynamics, Beijing 100074, China*)

(Received 26 May 2020; revised manuscript received 17 June 2020)

Abstract

As the age of the internet of everything begins, the demand for various sensors to communicate with each other is soaring. As the lifeblood of the sensing system, reliable energy supply is the key consideration. Environmental mechanical energy harvesting has been a key technology for self-powering sensing system, which can convert mechanical energy into electric energy. Here, we present a non-resonant triboelectric-electromagnetic hybridized nanogenerator, which can scavenge low-frequency vibration energy from environmental vibration. In the device a rotating gyro is used as a core component. An embedded magnet and four coils arranged evenly around at the bottom of the shell form an electromagnetic generator (EMG), and a piece of triboelectric film pasted on the outer surface of the gyro together with a bottom electrode constitutes a triboelectric nanogenerator, (TENG). With the design of rotating gyro, a high sensitive energy capture can be realized under low frequency and irregular vibration. Under the rotation and revolution of the gyro, the triboelectric and electromagnetic energy will be generated. Through theoretical analysis and software simulation, the working principle of the device is expounded. Based on a linear motor platform, the influences of oscillation frequency and amplitude are systematically studied, and the maximum power of 0.084 mW under a loading resistance of 20 M Ω and 4.61 mW under 800 Ω are obtained at a driving frequency of 2 Hz by the TENG and EMG, respectively. The energy conversion efficiency of the system is 0.45%. Moreover, by placing the devices on the legs and arms of the human body respectively, the ability of the hybridized nanogenerator to capture the simple movement energy of the human body is further verified. After that, a self-powering pedometer module is successfully integrated with the energy storage unit. Under the excitation provided by running a body, the hybridized nanogenerator can provide a 20-s pedometer normal operation after charging a capacitance of 100 μ F to 3.2 V. This research not only provides a new idea for the efficient acquisition of vibration energy, but also has potential applications in the energy supply of self-powered sensors.

Keywords: non-resonant, hybridized nanogenerator, vibration energy

PACS: 84.71.-b, 41.20.-q, 41.20.Cv, 45.20.dg

DOI: 10.7498/aps.69.20200793

* Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2019YFB2004800), the Fund for Cultivating Talent of Chongqing University, China (Grant No. CQU2019HBRC1A04), and the Fundamental Reserach Funds for Central Universities, China (Grant No. 2019CDCGGD320).

These authors contributed equally.

† Corresponding author. E-mail: 15922620987@163.com

‡ Corresponding author. E-mail: mxjacj@cqu.edu.cn