

基于滑槽-转轴间歇接触结构的高耐久性 摩擦纳米发电机*

金哲林# 曹杰# 雷锐 尤靖渊 米乐天 居桂章
高阳 曲召奇 程广贵†

(江苏大学智能柔性机械电子研究院, 镇江 212013)

(2025年11月7日收到; 2025年12月9日收到修改稿)

摩擦纳米发电机 (TENG) 问世以来在自供能传感和环境能量收集领域展现出巨大潜力, 但其长期运行的可靠性受制于摩擦层的磨损问题. 本文提出一种基于滑槽-转轴间歇接触结构的摩擦纳米发电机 (SR-TENG), 通过在转动轴上制备特定的滑槽结构, 使旋转盘沿滑槽做周期性的接触分离运动, 从而将电极层与摩擦层之间由持续接触变为周期性短暂接触, 这一滑槽-转轴结构有效地减少了 90% 的接触摩擦时间. SR-TENG 在 200 r/min 转速下可稳定输出 40 V 的电压, 经 28.8 万次循环后表面微结构仍存在且性能保持超过 95%. 作为自供能转速传感器, SR-TENG 展现出优异的线性响应特性和快速动态响应. 本研究不仅为解决 TENG 在长期运行中的磨损问题提供了有效结构设计策略, 也为构建长效稳定的自供能传感系统开辟了新路径, 在工业状态监测、智能物联网设备等领域具有重要的应用价值.

关键词: 摩擦纳米发电机, 摩擦损耗, 间歇接触, 高耐久

DOI: 10.7498/aps.75.20251517

CSTR: 32037.14.aps.75.20251517

1 引言

随着物联网技术和智能传感器技术的发展, 万物互联的时代正加速到来. 大量的分布式传感设备在实时监测^[1-3]、智能交通^[4-6]、健康医疗^[7-9]及工业互联网^[10-12]等领域扮演着日益重要的角色. 然而, 传统传感系统依赖外部电源或电池供电, 存在布线复杂、续航有限、维护成本高等问题, 严重制约其在特殊环境与大规模场景中的应用^[13]. 在此背景下, 从环境中收集能量并实现自供能传感系统逐渐成为研究热点^[14-16]. 摩擦纳米发电机 (TENG)

作为一种新兴的机械能收集技术^[17], 凭借其高电压输出^[18,19]、材料选择广泛^[20,21]、结构灵活^[22,23]等优势, 在实现主动式传感与微系统供能方面展现出巨大潜力^[24,25]. 然而, 传统接触分离式^[26]或滑动式^[27]TENG 在工作过程中, 往往依赖摩擦层之间的持续物理接触与摩擦^[28], 长期运行下易引发材料磨损和界面疲劳, 进而导致结构失效以及电输出性能显著衰减, 严重制约了其实际应用的可靠性与使用寿命.

目前针对摩擦层耐用性的研究主要集中在两个方向: 一是通过开发新型复合材料来提高摩擦层的耐磨性, 如掺杂纳米颗粒或采用高分子复合材

* 国家自然科学基金青年科学基金 (批准号: 52505188)、中国博士后科学基金 (批准号: GZC20250899)、江苏省优秀博士后人才资助计划 (批准号: 2025ZB830)、江苏省“333 工程”、江苏省研究生科研立项 (批准号: KYCX23_3728) 和江苏大学人工智能与智能制造学院创新实践基金 (批准号: RZCX2024013) 资助的课题.

同等贡献作者.

† 通信作者. E-mail: ggcheng@ujs.edu.cn

料^[29,30];二是优化器件结构设计来减少摩擦损耗,如采用非接触式摩擦等形式^[31,32].然而,前者往往导致材料的成本增加,而后者则面临着输出效率降低的问题.因此,在保证高效能量转换的同时提高器件的使用寿命是 TENG 研究领域的一项关键挑战.基于此,本工作提出了一种基于滑槽-转轴间歇接触结构的高耐久性摩擦纳米发电机 (SR-TENG),通过在转动轴上制备特定的滑槽结构,转动时滑块运动带动滑动盘产生轴向往复运动,使电极层与摩擦层之间由持续接触变为周期内间歇接触,在保持高效电荷转移的同时,将摩擦时间减少 90% 以上.理论分析和实验研究表明,该设计在输出稳定性、循环寿命和环境适应性等方面都具有显著优势,为开发长效稳定的自供能系统提供了新的技术路线,在工业监测、分布式传感网络等领域具有重要的应用价值.

2 实验准备

2.1 SR-TENG 制备

为了测得 SR-TENG 在不同激励条件下的电输出规律,搭建了如图 1(a) 所示的测试平台,平台主要采用旋转马达对器件施加不同参数的激励,并通过静电测量计来测得相应的输出.对于本文提出的 SR-TENG,其机械结构整合了带滑槽的转动

轴、可轴向移动的滑动盘、外壳、弹簧及轴承等多个组件,整体结构见图 1(b).关键零件通过光固化 3D 打印技术制成,并对工作接触面进行了打磨抛光处理,以确保表面光洁度.此外,在滑动盘的外表面以及与之内外相对的转动轴轮盘内表面,均覆盖了一层柔性介质层作为摩擦材料.柔性基底材料为 Ecoflex 00-30,聚四氟乙烯薄膜购自泰州晨光塑业公司,厚度为 0.05 mm,表面粗糙度为 0.1 μm .同时,为提高 SR-TENG 工作期间铝电极与聚四氟乙烯薄膜间的有效接触面积,在二者之间引入了柔性衬底.图 1(c) 展示了 SR-TENG 的装配流程:首先,将轴承固定于外部腔体的预设位置;随后,使滑动盘沿转动轴上的滑槽进行轴向定位;最后,将转动轴整体装入腔体.由于转动轴与轮盘之间通过特定的键槽结构相互配合,因此在最终装配时需对其周向位置进行对准.

2.2 SR-TENG 测试仪器

SR-TENG 的结构尺寸为 35 mm \times 35 mm \times 50 mm.实验中,采用直流减速电机结合可编程控制器对器件施加旋转激励,其电学输出性能通过静电计 (Keithley 6514)、示波器 (Tektronix TBS1102B) 及无源高压探头 (P5100A) 进行测量.所有测试均在恒温恒湿条件下完成,环境温度为 25 $^{\circ}\text{C} \pm 5$ $^{\circ}\text{C}$,相对湿度保持在 40% \pm 5%.

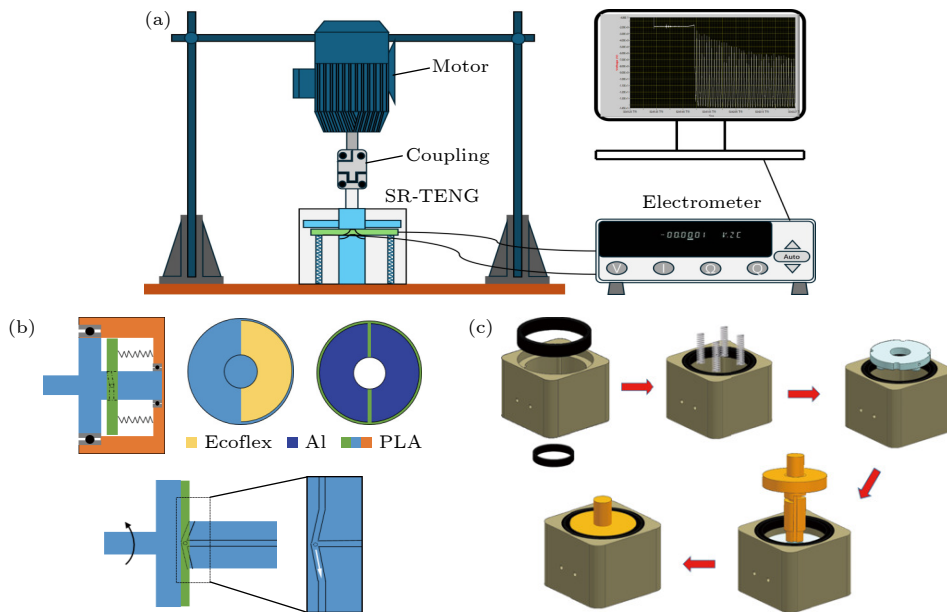


图 1 (a) 输出测试平台示意图; SR-TENG 的 (b) 结构示意图和 (c) 装配过程示意图

Fig. 1. (a) Schematic diagram of the output test platform; (b) schematic diagram of the structure of the SR-TENG; (c) schematic diagram of the assembly process of the SR-TENG.

3 SR-TENG 理论分析

3.1 机械转动结构设计

SR-TENG 的工作原理如图 2(a) 所示. 当外部驱动力使转轴逆时针旋转时, 转动盘随之转动. 在初始位置, 转动盘与滑动盘保持紧密接触, 如图 2(a)(i) 所示. 随着转轴继续旋转, 连接键带动滑动盘沿滑槽向外侧移动, 使得两盘逐渐分离. 当旋转至 90° 位置时, 滑动盘到达行程最远端. 随后在弹簧恢复力的作用下, 滑动盘沿滑槽向内复位, 重新与转动盘贴合, 从而完成一个工作循环. 该滑动-贴合过程随转动持续周期性地地进行. 具体过程如图 2(a)(i)—(iv) 所示. 实现这一转动过程的滑槽结构及其平面展开图如图 2(b) 所示. 由于特殊的滑槽结构, 一个周期内电极层与摩擦层之间仅产生一次短时接触, 同时基于滑槽结构的几何展开与匀速运动分析, 接触行程占比约为 9.9%, 相比传统的独立层式滑动摩擦减少了 90% 的接触时间. 这种间歇接触的结构设计有效地避免了持续接触对于摩擦层表面产生的摩擦损耗与输出衰减现象.

3.2 原理及理论仿真

图 3(a) 为 SR-TENG 的工作原理示意图. 初始时, 摩擦层与电极 1 接触, 由于两者电负性差异, 在接触界面分别产生等量异种电荷, 此时系统处于静电平衡状态, 如图 3(a)(I) 所示; 当转轴在外力作用下从 0° 旋转至 90° 时, 摩擦层沿虚线轨迹向右上方向滑动而逐渐远离电极 1, 此时系统的静电平衡态被打破, 电极 1 与电极 2 之间的电势差驱动电子在外部电路中运动, 形成由电极 1 至电极 2 的电流, 如图 3(a)(I)—(III) 所示; 当转轴继续从 90° 旋转至 180° 时, 摩擦层与电极 2 的正对面积逐渐增大, 至 180° 时达到最大, 如图 3(a)(IV) 所示, 此时, 电极 1 与电极 2 之间的电势差达到最大值; 随后, 在转轴从 180° 旋转至 270° 的过程中, 摩擦层逐渐远离电极 2, 与前半个周期类似, 电势差驱使电子从电极 2 转移至电极 1', 在外电路中形成反向电流, 如图 3(a)(V) 所示; 当转轴自 270° 旋转至 360° 时, 摩擦层与电极 1' 的正对面积逐渐恢复, 此时摩擦层被推向下一周期的初始位置 (电极 1'), 系统恢复至初始状态, 进入下一个工作循环. 为进一步从电场与电势分布的角度验证上述工作原理, 利用 COMSOL 有限元软件建立了 SR-TENG 的二维

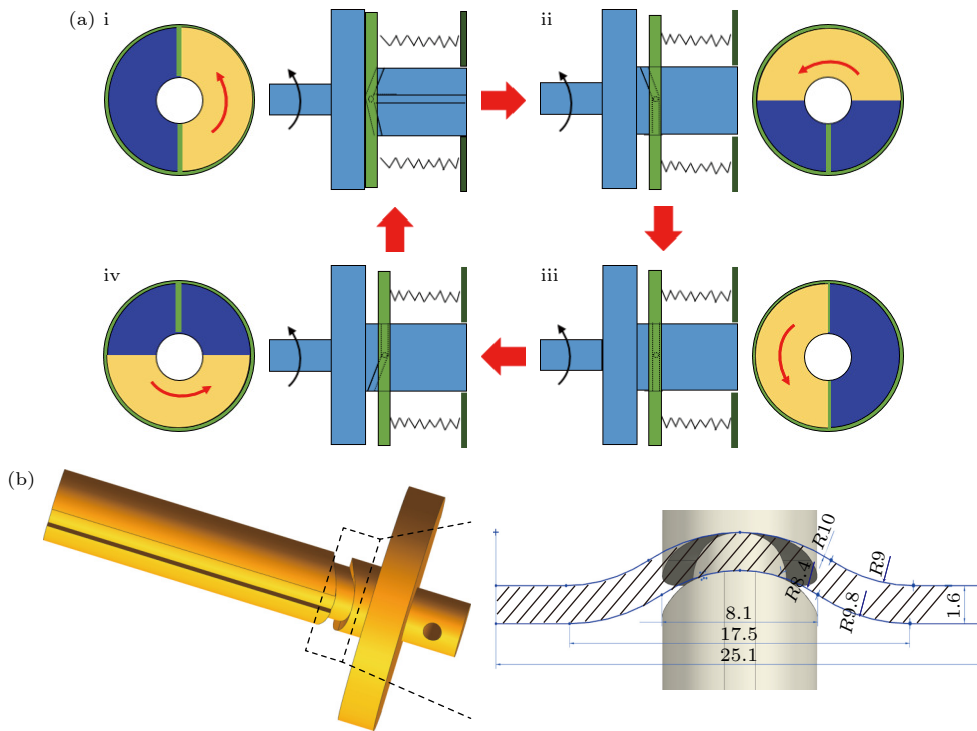


图 2 (a) SR-TENG 的工作过程示意图; (b) 转动轴滑槽结构及平面展开图
 Fig. 2. (a) Working process of SR-TENG; (b) structure of rotating shaft chute and its planar view.

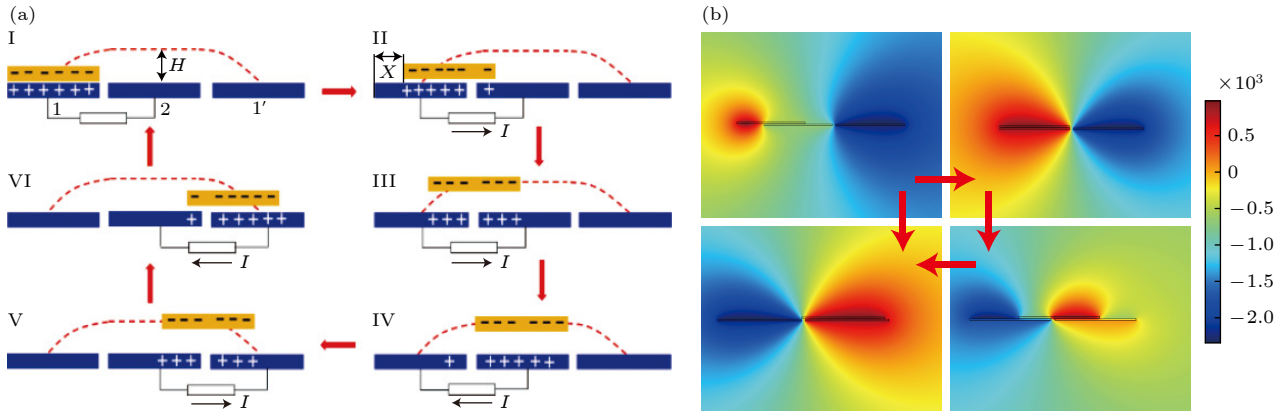


图 3 SR-TENG 工作原理分析 (a) 工作原理示意图; (b) 仿真电势分布图

Fig. 3. Mechanism analysis of SR-TENG: (a) Schematic diagram of the working principle; (b) simulated potential distribution diagram.

模型, 对其单个工作周期内的电学特性进行了仿真, 鉴于 SR-TENG 起电层材料间的电负性差异, 在 COMSOL 仿真中将聚四氟乙烯薄膜与铝电极的表面电荷密度分别设定为 $-\sigma$ 与 $+\sigma$ ($\sigma = 1 \times 10^{-6} \text{ C/m}^2$). 所建立的仿真模型如图 3(b) 所示, 其中从上至下三个矩形分别对应聚四氟乙烯、铝电极 1 和铝电极 2. 模型中, 聚四氟乙烯与电极的间距设为 1 mm, 两电极之间的距离则为 15 mm. 由电势图可以看出电极对的表面电势随着摩擦层的转动而发生变化, 变化趋势与 SR-TENG 的工作原理分析一致, 进一步验证分析的可靠性.

尽管 SR-TENG 的工作周期包含短暂的物理接触阶段以完成电荷激励, 但其绝大部分的电能输出发生在摩擦层与电极非接触的阶段, 通过静电感应驱动电子在外电路定向流动产生. 在此阶段, 摩擦层作为一个携带恒定负电荷的“独立层”在电极上方运动, 其间距 $H(t)$ 的变化, 直接改变了系统的电容结构. 为了分析 SR-TENG 的非接触静电感应过程, 利用电路中节点的概念对整个静电系统分析^[33], 如图 4 所示, 将摩擦层下表面的一小部分 dk 视为节点 1、电极 1 与电极 2 分别视为节点 2 和节点 3. 该模型的核心在于将动态变化的机械运动转化为电路中电容的参数变化, 从而能够纯粹从电路理论的角度, 精确描述 SR-TENG 在非接触工作阶段的输出特性与性能极限.

由于电介质表面的电势不是常数, 便先假设电介质表面的一小部分 dk 包含摩擦电荷, 电荷密度为 σ , 在结构宽度为 w 的情况下, 在电极 1 及电极 2 上的电荷量为 σwdk . 电极 1 及电极 2 在短路情况下的电荷 (dQ_1 及 dQ_2) 可以用下列的公式表示, 其

中 $C_i(k)$ 代表小界面及电极 i 之间的电容:

$$dQ_1 = \frac{\sigma wdk}{1 + C_2(k)/C_1(k)}, \quad (1)$$

$$dQ_2 = \frac{\sigma wdk}{1 + C_1(k)/C_2(k)}. \quad (2)$$

根据静电场叠加原理, 电极 1 及电极 2 上的总电荷可以表示为

$$Q_1 = \sigma w \int_0^L \frac{dk}{1 + C_2(k)/C_1(k)}, \quad (3)$$

$$Q_2 = \sigma w \int_0^L \frac{dk}{1 + C_1(k)/C_2(k)}. \quad (4)$$

因此, 转移电荷 $Q_{sc,max}$ 可以表示为

$$Q_{sc,max} = \int_0^L \frac{\sigma wdk}{1 + C_2(k)/C_1(k)|_{x=g+L}} - \int_0^L \frac{\sigma wdk}{1 + C_2(k)/C_1(k)|_{x=0}}. \quad (5)$$

通过 (5) 式可知当摩擦层在两电极之间滑动时, 分别处于两端极限位置 ($x = 0$ 和 $x = g + L$) 时, 转移电荷 Q_{sc} 可以达到最大值, 最大值 $Q_{sc,max} = \sigma wL$.

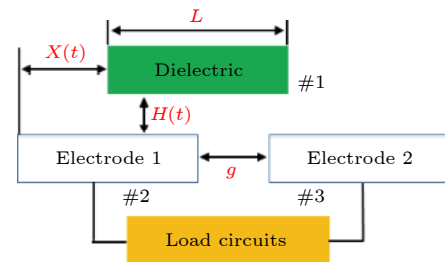


图 4 非接触独立层式 TENG 理论模型图

Fig. 4. Theoretical diagram of non-contact independent-layer TENG.

根据转移电荷量 Q_{sc} 与开路电压 V_{oc} 、短路电流 I_{sc} 关系式:

$$V_{oc} = \frac{Q_{sc}}{C_0} = \frac{\sigma w L}{C_0}, \quad (6)$$

$$I_{sc} = \frac{dQ_{sc}}{dt}. \quad (7)$$

从上述公式可知, 影响输出的关键因素主要是接触面积和发电机的内部电容 C_0 . 理论上, 随着间距 $H(t)$ 的增加, 系统的耦合电容减小, 导致转移电荷量、开路电压及能量密度随之下降, 直至当间距过大、电场耦合微弱时, 输出完全消失. 而当材料、结构参数相同情况下, 实际接触面积影响了转移电荷量.

4 SR-TENG 性能表征

4.1 基本输出性能测试

根据理论分析, 间距 H 超过阈值输出会出现明显的下降. 为了验证结构参数 H 对 SR-TENG 输出性能的影响, 为探究滑槽结构对输出性能的影响, 本文设计了具有不同间距 H 的转动轴滑槽, 结

构示意图见图 5(a). 在 200 r/min 的恒定转速下对各结构进行基础电学性能测试, 结果如图 5(b)—(d) 所示. 测试数据显示, 随着滑槽间距 H 的增大, 开路电压的正向峰值基本稳定在 40 V 左右, 而反向峰值则呈现下降趋势, 从间距为 0.5 mm 时的 33.2 V 降低至 1 cm 时的 12.9 V. 与此同时, 短路电流与转移电荷量均随 H 增大而逐渐减小: 短路电流从 0.71 μA 降至 0.35 μA , 转移电荷量则由 0.9 nC 下降至 0.41 nC. 这一变化规律主要源于滑槽间距 H 的改变直接影响工作时的电极与摩擦层空间关系. 当 H 增大时, 分别位于转轴和滑动盘上的介质层与对应电极在运动半周期内的平均间距增大, 导致静电感应效应减弱, 从而使得可转移的电荷量减少, 并最终表现为短路电流与转移电荷量的下降, 此时电压和电流随之减小. 实验也发现相较于间距 0.5 mm 时, 间距 1 mm 时电输出下降仅为 5%. 考虑到零部件加工难度, SR-TENG 的结构设计中间距选定为 H 为 1 mm.

为研究电极构型对输出特性的影响, 将整体电极分别分割为多对, 具体分布如图 6(a) 所示. 相应电输出测试结果如图 6(b) 所示, 随着电极对数

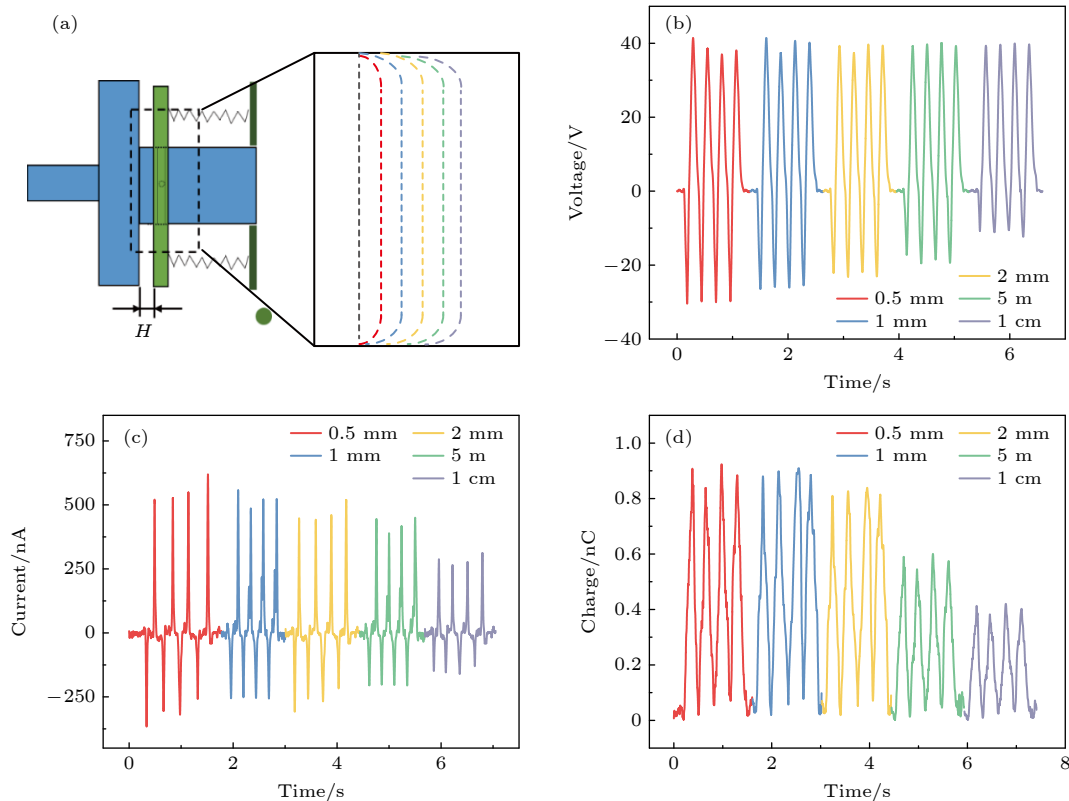


图 5 (a) 不同 H 参数下 SR-TENG 的滑槽结构; (b)—(d) SR-TENG 的基本输出

Fig. 5. (a) Chute structure of SR-TENG under different H parameters; (b)–(d) basic output of SR-TENG.

的增加, 单个运动周期内产生的电压或电流脉冲数目呈线性增长. 开路电压峰值从 40.2 V 下降至 25.6 V; 短路电流密度则从 0.48 $\mu\text{A}/\text{m}^2$ 显著提升至 2.56 $\mu\text{A}/\text{m}^2$. 上述结果表明, 增加电极对数能够增强 SR-TENG 的能量收集能力, 但同时也会导致输出峰值电压有所降低, 后续测量也在单对电极的条件下进行.

4.2 负载及充电性能

在实际能量收集应用中, 外部负载的阻值直接影响摩擦纳米发电机的输出表现, 因此需通过匹配最优负载以实现最佳能量输出效率. 本研究在 200 r/min 的恒定驱动转速下, 系统地测量了器件在不同外接负载时的输出电压、电流和功率. 结果如图 7(a) 和图 7(b) 所示: 随着负载电阻从 1 M Ω 增至 150 M Ω , 负载两端电压相应由 1.45 V 上升至 40.2 V, 而输出电流则从 1.45 μA 逐渐下降至 0.44 μA . 平均输出功率随负载变化呈现先上升后下降的趋势, 并在负载为 60 M Ω 时达到峰值, 此

时最大输出功率为 26.2 μW , 对应功率密度约为 140 mW/m^2 . 此外, 图 7(c) 展示了 SR-TENG 对容性负载的充电能力, 该器件可在 100 s 内将一枚 500 nF 的电容器充电至 6.8 V.

4.3 稳定耐磨性能表征

为进一步验证 SR-TENG 在实际工作条件下的稳定性与高耐久性, 对其进行了连续 24 h 的高强度循环耐久性测试. 测试中, 步进电机以 200 r/min 的转速持续运行以模拟高频往复摩擦工况. 如图 8 所示, 经过长达 28.8 万次的循环后, SR-TENG 所输出的开路电压峰值仍能稳定维持在 40 V 左右, 与测试前相比未出现明显衰减, 表明其具备优异的机械稳定性和输出一致性.

在此基础上, 为进一步探究 SR-TENG 中关键摩擦材料的磨损行为, 开展了材料表面形貌的对比研究. 通过倒置光学显微镜对两种不同工作模式下的材料表面进行观察: 图 9(a) 展示了材料的表面状态在持续旋转摩擦前后的形貌图, 实验中控制

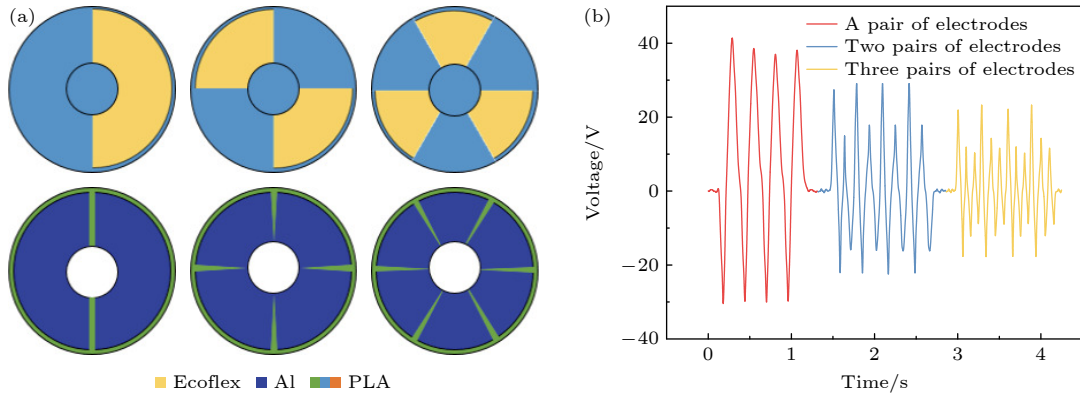


图 6 (a) 不同电极对数示意图; (b) 不同电极对数的电压

Fig. 6. (a) Schematic diagram of different electrode pairs; (b) voltage with different electrode pairs.

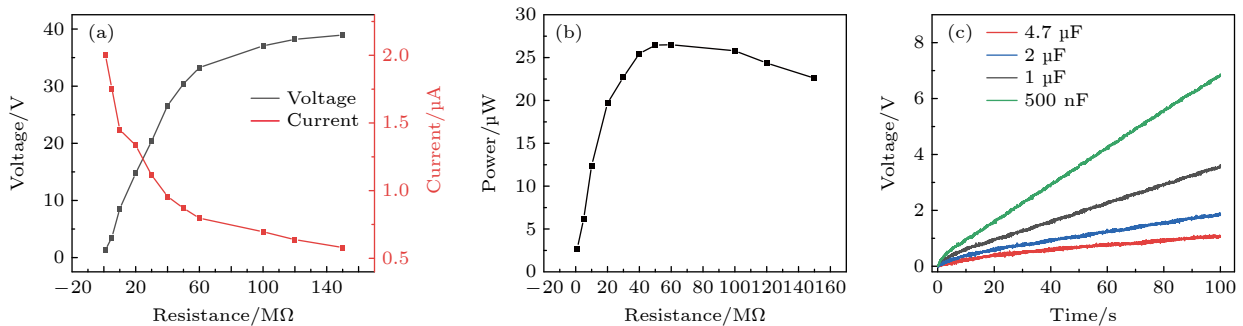


图 7 (a) 不同负载下的输出电压和电流; (b) 不同负载下的输出功率; (c) 电容充电性能

Fig. 7. (a) Output voltage and current under different loads; (b) output power under different loads; (c) capacitance charging performance.

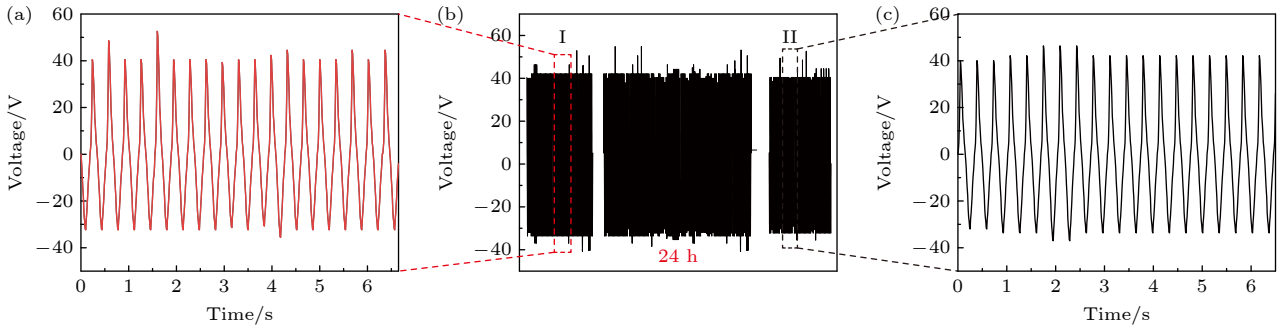


图 8 SR-TENG 耐久性测试
Fig. 8. Durability of SR-TENG.

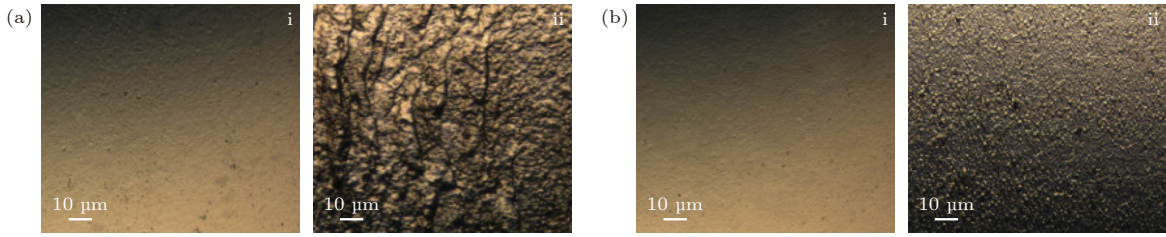


图 9 不同器件结构在服役前后的功能材料表面微观形貌对比 (a) 持续接触式结构; (b) 滑槽-转轴间歇接触式结构
Fig. 9. Comparison of surface micromorphology for different device structures before and after service: (a) Continuous contact structure; (b) chute-rotating shaft intermittent contact.

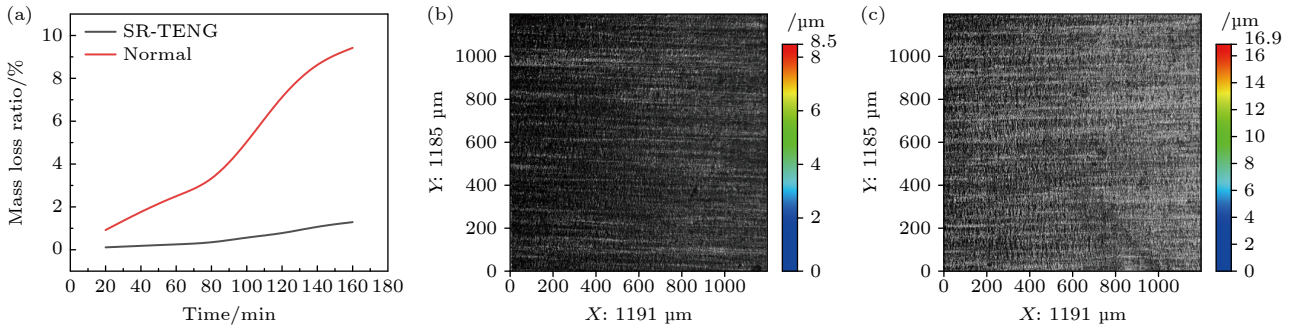


图 10 (a) 不同摩擦模式下的材料磨损对比; (b), (c) 循环测试前后材料的粗糙度变化

Fig. 10. (a) Comparison of material wear ratios under different friction modes; (b), (c) the changes in the roughness of the material before and after the cyclic test.

电机以 200 r/min 的速度旋转, 摩擦层与电极层之间保持紧密接触, 接触力为 5 N, 经过 24 h 连续摩擦接触, 材料表面出现显著磨损、剥落与塑性变形, 损耗严重; 而在 SR-TENG 所采用的间歇性接触工作模式下, 如图 9(b) 所示, 与初始状态相比, 摩擦后的材料表面结构保持相对完整, 未观察到明显的疲劳磨损、裂纹或大面积材料剥离, 仅存在轻微摩擦痕迹。这一对比结果表明, SR-TENG 所采用的间歇接触机制能够有效地降低摩擦过程中的能量积累与热效应, 缓解材料因持续受力而导致的疲劳损伤, 从而显著地延缓了材料性能的退化速度。图 10(a) 展示的是不同摩擦模式下的材料磨损比

变化, 在 160 min 的连续摩擦模式下, 材料的磨损比由 20 min 的 1.07% 迅速提高到 10.9%; 而 SR-TENG 的材料磨损比仅由 0.128% 提高至 1.5%, 证明了滑槽-转轴间歇接触结构可以有效降低材料损耗。图 10(b), (c) 展示了循环测试前后材料的粗糙度变化, 根据测量, SR-TENG 在 28.8 万次循环后的材料表面粗糙度由 8.5 μm 增加为 16.9 μm 。表明该结构有助于拓展 TENG 在持续供能型自驱动传感系统中的实际应用潜力。

SR-TENG 优异的耐久性使其在自供能转速传感器领域具有巨大的潜力。为了测试 SR-TENG 作为转速传感器的响应性能, 使用直流电机为 SR-

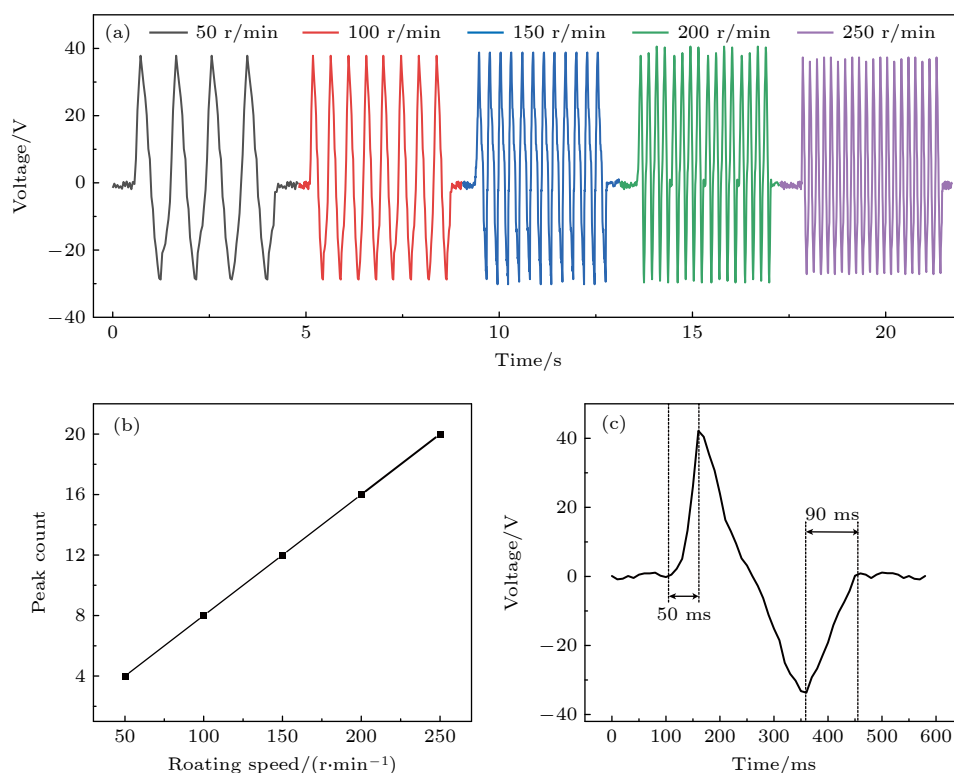


图 11 (a) SR-TENG 在不同转速条件下的电压; (b) 输出的脉冲数与转速的线性对应关系; (c) 摩擦电转速传感器的响应时间
 Fig. 11. (a) Voltage of SR-TENG under different rotational speed; (b) linear relationship between the number of output pulses and rotational speed; (c) response time of the triboelectric rotational speed sensor.

TENG 提供不同的转速并测量其响应信号. 根据图 11 所示的实验结果, SR-TENG 作为转速传感器表现出良好的响应特性与线性度. 图 11(a) 显示, 在不同转速区间下, 传感器输出电压峰值均稳定维持在 40 V 左右, 表明其具备较宽的转速适应范围与稳定的信号输出能力. 图 11(b) 进一步表明, 输出电压的脉冲个数与转速之间呈现出完全线性的比例关系, 这是其作为转速传感器的关键基础. 为评估动态响应性能, 在 200 r/min 转速下以 1 kS/s 采样率测得传感器响应曲线 (图 11(c)), 结果显示其接触响应时间为 50 ms, 恢复响应时间为 90 ms, 说明 SR-TENG 能够对转速变化做出快速响应, 具备良好的实时监测潜力.

5 结 论

本文针对传统摩擦纳米发电机中摩擦层材料因持续接触而易发生损耗的关键问题, 提出了一种基于滑槽-转轴结构的间歇接触式高耐久性摩擦纳米发电机. 该设计通过在转动轴上构建特定形态的滑槽, 驱动旋转盘沿滑槽轨迹实现周期性的接触-

分离运动, 从而在维持高效电荷转移能力的基础上, 将摩擦界面实际接触时间大幅降低 90% 以上. 实验表明, SR-TENG 在结构层面实现了高耐久性与输出稳定性的统一: 经历 28.8 万次循环后摩擦材料表面未见明显磨损, 同时输出电压稳定维持在 40 V 左右, 展现出优越的机械与电学稳定性. 作为自供能转速传感器, SR-TENG 展现出优异的线性响应特性和快速动态响应. 该研究不仅提供了一种具体可行的 TENG 结构创新方案, 更重要的是为突破摩擦电设备在长期运行中的耐久性瓶颈提供了“以结构换材料”的全新思路, 对推动自供能系统在工业设备状态监测、广域分布式传感节点等高频机械场景中的实际应用具有重要价值.

参考文献

- [1] Ouyang Q, Rong Y, Wang B, Ahmad W, Liu S, Chen Q 2024 *Food Chem.* **430** 136981
- [2] Zhang Z, Zhang Y, Wang C, Liu X, El-Seedi H R, Gómez P L, Alzamora S M, Zou X, Guo Z 2024 *Food Hydrocolloids* **157** 110475
- [3] Guo Z, Zhang Y, Xiao H, Jayan H, Majeed U, Ashiagbor K, Jiang S, Zou X 2025 *Food Control* **172** 111174
- [4] Lu X, Yan Y, Wei J, Zhang X, Wang C, Li H, Yu Y, Li S, Zhang B, Yang Z, Cheng X, Cheng T 2025 *Adv. Funct.*

- Mater.* **35** e09144
- [5] Cao J, Lin Y, Fu X, Wang Z, Liu G, Zhang Z, Qin Y, Zhou H, Dong S, Cheng G, Zhang C, Ding J *2023 Nano Energy* **107** 108150
- [6] Pang Y, Zhu X, Yu Y, Liu S, Chen Y, Feng Y *2022 Nano Res.* **15** 5450
- [7] Li W, Luo F, Liu Y, Zou Y, Mo L, He Q, Lin P J, Xu Q, Liu A, Zhang C, Cheng J, Cheng L, Ji L *2025 Adv. Mater.* **37** 2419059
- [8] Zhu H, Jin Z, Bai H, Cao J, Dong X, Zhong Y, Dai S, Cheng G, Yuan N, Ding J *2023 Measurement* **207** 112402
- [9] Baburaj A, Banerjee S, Aliyana A K, Shee C, Banakar M, Bairagi S, Naveen Kumar S K, Ali S W, Stylios G K *2024 Nano Energy* **127** 109785
- [10] Cao J, Dong Z, Zhang Z, Gong L, Gao Y, Dai Y, Liu G, Feng Y, Jin Z, Luan R, Wang Z, Dong S, Cheng G, Zhang C, Ding J *2024 Adv. Energy Mater.* **14** 2400659
- [11] Yun L, Li L, Zhang J, Guan J *2025 Int. J. Prod. Econ.* **281** 109517
- [12] Baburaj A, Jayadevan S, Aliyana A K, Sk N K, Stylios G K *2025 Adv. Sci.* **12** 2417414
- [13] Klotz J, Nayar S K *2025 Sol. Energy* **300** 113833
- [14] Shi Y, Li H, Yang L, Wang Y, Sun Z, Zhang C, Fu X, Niu Y, Han C, Xie F *2025 Small Methods* **9** 2401189
- [15] Jiang Z, Fu X, Qi Y, Zeng J, Cao J, Dong Z, Gao Z, Wang Z, Gong L, Liu G, He Z, Cao X, Zhang C *2025 Int. J. Mech. Sci.* **304** 110686
- [16] Peng W, Ni Q, Zhu R, Fu X, Zhu X, Zhang C, Liao L *2024 Nano Energy* **131** 110272
- [17] Fan F R, Tian Z Q, Wang Z L *2012 Nano Energy* **1** 328
- [18] Shi J, Zhao Z, Gao Y, Yuan W, Ma W, Zhang J, Zhang B, Liu D, Wang J *2024 Small* **20** 2311930
- [19] Gao Y, Liu J, Zhou L, He L, Liu D, Yang P, Jin B, Wang Z L, Wang J *2024 Energy Environ. Sci.* **17** 8734
- [20] Zou H, Guo L, Xue H, Zhang Y, Shen X, Liu X, Wang P, He X, Dai G, Jiang P, Zheng H, Zhang B, Xu C, Wang Z L *2020 Nat. Commun.* **11** 2093
- [21] Zou H, Zhang Y, Guo L, Wang P, He X, Dai G, Zheng H, Chen C, Wang A C, Xu C, Wang Z L *2019 Nat. Commun.* **10** 1427
- [22] Feng L, Wu Y, Qu J, Li Z, Wang J, Menon C *2026 Composites Part B* **309** 113081
- [23] Nazarian-Samani M, Alidokht S A, Therien-Aubin H, Zhang L H *2025 Appl. Energy* **391** 125918
- [24] Wu Y S, Liu Q, Cao J, Li K, Cheng G G, Zhang Z Q, Ding J N, Jiang S Y *2019 Acta Phys. Sin.* **68** 190201 (in Chinese) [吴晔盛, 刘启, 曹杰, 李凯, 程广贵, 张忠强, 丁建宁, 蒋诗宇 *2019 物理学报* **68** 190201]
- [25] Cao J, Gu W G, Qu Z Q, Zhong Y, Cheng G G, Zhang Z Q *2020 Acta Phys. Sin.* **69** 230201 (in Chinese) [曹杰, 顾伟光, 曲召奇, 仲艳, 程广贵, 张忠强 *2020 物理学报* **69** 230201]
- [26] Lin L, Xie Y, Niu S, Wang S, Yang P K, Wang Z L *2015 ACS Nano* **9** 922
- [27] Wang S, Lin L, Xie Y, Jing Q, Niu S, Wang Z L *2013 Nano Lett.* **13** 2226
- [28] Wang Z L *2015 Faraday Discuss.* **176** 447
- [29] Wu Q, Zhong Y, Chen R, Ling G, Wang X, Shen Y, Hao C *2024 Ind. Crops Prod.* **222** 119676
- [30] Chao Y, Pang J, Bai Y, Wu P, Luo J, He J, Jin Y, Li X, Xiong J, Li H, Zhu W *2020 Food Chem.* **320** 126666
- [31] Zhao B, Wang Y, Huang S, Tian T, Liao X, Wang W, Li Z *2025 Chem. Eng. J.* **523** 168505
- [32] Li M, Yi P, Li X, Li T, Li X, Zhang C, Wang Z, Zhang X, Wang A *2025 ACS Appl. Mater. Interfaces* **17** 58947
- [33] Wang Z L, Lin L, Chen J, Niu S M, Zi Y L *2017 Triboelectric Nanogenerator* (Beijing: Science Press) pp107–109 (in Chinese) [王中林, 林龙, 陈俊, 牛思淼, 訾云龙 *2017 摩擦纳米发电机* (北京: 科学出版社) 第 107—109 页]

Highly durable triboelectric nanogenerator with chute-rotating shaft intermittent contact structure*

JIN Zhelin[#] CAO Jie[#] LEI Rui YOU Jingyuan MI Letian
JU Guizhang GAO Yang QU Zhaoqi CHENG Guanggui[†]

(Institute of Intelligent Flexible Mechatronics, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

(Received 7 November 2025; revised manuscript received 9 December 2025)

Abstract

Triboelectric nanogenerators (TENGs) have emerged as a transformative technology for self-powered sensing and harvesting ubiquitous ambient mechanical energy. However, a critical bottleneck hindering their long-term reliability is the inevitable material wear and performance degradation caused by sustained friction

* Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 52505188), the Postdoctoral Fellowship Program of CPSF (Grant No. GZC20250899), the Jiangsu Funding Program for Excellent Postdoctoral Talent, China (Grant No. 2025ZB830), the 333 Project of Jiangsu Province, China, the Jiangsu Provincial Postgraduate Scientific Research Innovation Program, China (Grant No. KYCX23_3728), and the Jiangsu University School of Artificial Intelligence and Intelligent Manufacturing Innovation Practice Fund, China (Grant No. RZCX2024013).

[#] These authors contributed equally.

[†] Corresponding author. E-mail: ggcheng@ujs.edu.cn

between contacting layers. This work presents a slotted rotor-based TENG (SR-TENG) that fundamentally addresses this wear challenge through an intermittent contact mechanism. The core innovation lies in a unique structural comprising a rotating shaft with precisely machined axial slots and a rotor disk equipped with a spring-loaded pin. As the shaft rotates, the pin engages with the helical slots, converting the uniform rotary motion into a controlled, periodic vertical reciprocating motion of the entire rotor assembly. This mechanical transformation shifts the operational mode from continuous sliding contact to periodic contact-separation cycles between the rotor-mounted electrode and the stationary bottom triboelectric layer, thereby drastically minimizing direct friction time. Systematic experimental characterization demonstrates the efficacy of this design. Quantitative analysis confirms a 90% reduction in contact friction duration per cycle for this design compared with those for the standard rotary TENGs. The SR-TENG consistently delivers a stable open-circuit voltage of 40 V at 200 r/min. More critically, the device exhibits outstanding durability. After undergoing a rigorous accelerated test consisting of 288000 continuous cycles, the SR-TENG retains over 95% of its initial electrical output. Microscopic inspection via scanning electron microscopy reveals that the delicate microstructures on the triboelectric layer surface remain intact, with no observable abrasion, providing the direct physical evidence of the wear-mitigation effect. Beyond energy harvesting, the SR-TENG functions as a self-powered rotational speed sensor. Its output signal frequency shows an excellent linear relationship with rotational speed, and the device features a rapid dynamic response time of less than 10 ms, enabling precise real-time monitoring. In conclusion, this study proposes a highly effective and mechanically elegant structural strategy to solve the wear problem in rotary TENGs. The SR-TENG design not only ensures exceptional long-term operational stability and performance retention but also demonstrates versatile functionality as a sensor. This work provides a viable pathway for developing durable self-powered systems, with significant application potential in industrial equipment condition monitoring, distributed IoT (Internet of Things) sensor networks, and smart infrastructure.

Keywords: triboelectric nanogenerator, friction loss, intermittent contact, high durability

DOI: [10.7498/aps.75.20251517](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251517)

CSTR: [32037.14.aps.75.20251517](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20251517)

基于滑槽-转轴间歇接触结构的高耐久性摩擦纳米发电机

金哲林 曹杰 雷锐 尤靖渊 米乐天 居桂章 高阳 曲召奇 程广贵

Highly durable triboelectric nanogenerator with chute-rotating shaft intermittent contact structure

JIN Zhelin CAO Jie LEI Rui YOU Jingyuan MI Letian JU Guizhang GAO Yang QU Zhaoqi
CHENG Guanggui

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 060809 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251517

CSTR: 32037.14.aps.75.20251517

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251517>

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

面向高性能摩擦纳米发电机的电介质材料

Dielectric materials for high-performance triboelectric nanogenerators

物理学报. 2024, 73(7): 070702 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240150>

通过机器学习实现基于摩擦纳米发电机的自驱动智能传感及其应用

Self-powered sensing based on triboelectric nanogenerator through machine learning and its application

物理学报. 2022, 71(7): 078702 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211632>

钛酸钡介电调控提升纸基摩擦纳米发电机输出性能

Barium titanate dielectric regulation improved output performance of paper-based triboelectric nanogenerator

物理学报. 2022, 71(7): 077701 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212022>

高通量计算二维材料界面摩擦

High-throughput calculation of interfacial friction of two-dimensional material

物理学报. 2023, 72(2): 026801 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221676>

基于1,2-二氰基苯/聚合物复合材料的高耐久性有机阻变存储器

High endurance organic resistive switching memory based on 1,2-dicyanobenzene and polymer composites

物理学报. 2023, 72(4): 048501 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221507>

前进接触线薄液膜结构与运移机制

Structure and migration mechanism of thin liquid film in vicinity of advancing contact line

物理学报. 2024, 73(1): 016801 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231296>