

基于折纸结构摩擦纳米发电机的不倒翁式水波能收集器及电源管理

曹杰^{1#}, 高阳^{1#}, 金哲林¹, 刘海生¹, 张维强², 程广贵^{1†}

¹ 江苏省智能柔性驱控省高校重点实验室, 江苏大学, 镇江 212013

² 西安电子科技大学空间科学与技术学院, 西安 710126

摘要

水波能作为海洋能的重要组成部分, 具有储量丰富、分布广泛和绿色可持续等优势, 但其低频、无序和多方向的特性使得高效捕获和电能转换面临挑战。近年来, 新兴的摩擦纳米发电机技术在低频机械能收集方面展现出显著优势, 但现有器件结构对水波运动的适应性不足限制了水波能的转换效率。基于此, 本文提出了一种基于折纸结构摩擦纳米发电机的不倒翁式水波能收集器 (RWEH), 并根据其输出特性开发了电源管理电路以提高所收集水波能的能量利用率。首先, 结合折纸结构与不倒翁自复位机构完成 RWEH 的整体结构设计, 并利用 ANSYS 对其运动响应特性进行仿真分析; 随后搭建了等效水波激励实验平台, 系统表征了不同激励条件下 RWEH 的输出性能。在此基础上, 设计了适用于 RWEH 输出特性的电源管理电路, 分析了其工作机制和能量最大化原理, 并通过电路仿真、PCB 设计制作和电容充电特性测试验证了电源管理电路的有效性。结果表明, 所设计的 RWEH 能够在水波激励下保持稳定摆动, 实现持续有效的能量转化和电能输出, 峰值输出功率达 $61.2\ \mu\text{W}$; 所开发的电源管理电路能量管理效率达 79.1%, 实现了电容充电速度提高 2.5 倍及输出能量增大 3.3 倍, 显著改善了 RWEH 输出能量的利用效率。该研究为低频随机水波能的高效收集-利用提供了新的技术方案, 可为自供能海洋环境监测和海洋物联网提供可靠的能源支持。

关键词: 水波能收集; 摩擦纳米发电机; 折纸结构; 不倒翁结构; 电源管理

基金: 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”

共同贡献作者, 曹杰 (caojie@ujs.edu.cn), 高阳 (2222503155@stmail.ujs.edu.cn)

† 通讯作者, 邮箱: ggcheng@ujs.edu.cn

1 引言

随着物联网、分布式传感网络及海洋环境监测技术的发展,水域低功耗电子设备对持续稳定供电的需求不断增长。然而,现有电池和太阳能供电方式存在维护成本高、续航能力有限且易受环境条件影响等问题,亟需开发更加稳定可靠的环境能源供电技术。相比于太阳能、风能等环境能源,水波能作为海洋能的重要组成部分,具有储量丰富、绿色可持续、分布广泛等优势^[1,2],其诱导产生的浮体运动机械能够持续存在于各类水域环境,为低功耗电子设备提供稳定的能源来源^[3-6]。然而,实际水波运动通常具有低频、多方向、随机及非稳定幅值等特征,导致传统电磁式能量收集技术存在启动阈值高、结构复杂及低频响应能力不足等问题,难以满足分布式水域电子设备长期稳定供电的需求。因此,开发适用于水波环境的高效能量收集技术,对于推动海洋资源开发具有重要意义。

摩擦纳米发电机(Triboelectric Nanogenerator, TENG)基于摩擦起电与静电感应耦合效应,可将环境机械能直接转换为电能^[7-11],具有材料选择广泛、结构设计灵活、成本低及低频响应性能优异等优势^[12-16]。近年来,研究者围绕水波能收集提出了摆动式、球形封装式和弹簧辅助式等多种 TENG 结构^[17-19],通过优化器件的运动响应形式和接触模式等提高其在低频水波激励下的输出性能^[20-22]。然而,真实水面环境中的浮体运动往往是多方向、变频、变幅值的随机晃动。当发电单元仅沿单一方向布置时,其输出容易受到激励方向变化影响而难以充分捕获水波的多方向机械能。因此,如何提升 TENG 对复杂水波运动的方向适应能力,实现随机机械能的高效捕获,仍然是当前水波能收集领域的重要研究问题。

除了机械结构对复杂水波运动的适应能力外,电能利用效率也是影响 TENG 实际应用的重要因素^[23]。TENG 通常具有高电压、低电流及高内阻的输出特性,若仅采用整流桥直接为储能单元或负载供电,容易产生阻抗失配、电荷转移不充分及能量损耗较大等问题^[24-26]。已有研究表明,TENG 单周期输出能量与其电压-电荷(V-Q)循环过程密切相关,通过合理调控电荷积累、释放及能量转移过程,可显著提高能量利用效率^[27,28]。近年来,用于 TENG 的电源管理策略吸引了广泛的研究并在能量利用率优化方面取得了显著进展^[29,30]。然而,现有研究大多将机械结构与电源管理作为两个相互独立的问题进行优化,针对复杂水波环境构建兼顾机械能高效捕获与电能高效利用一体化水波能收集系统仍鲜有报道。

针对上述问题,本文提出了一种基于折纸结构摩擦纳米发电机的不倒翁式水波能收集器(Roly-Poly Water Wave Energy Harvester, RWEH),构建了“高效捕获-高效利用”一体化的水波能收集系统。其中,以弹簧-重块组成的不倒翁结构作为主体,在其周向集成多个折纸结构摩擦纳米发电机(Spring Origami-Structured Triboelectric Nanogenerator, SO-TENG)作为基本发电单元。利用不倒

翁结构优异的自复位能力实现对多方向随机水波运动的有效响应,并借助折纸结构的柔性变形特性增强周期性接触-分离过程以提高水波能捕获能力。在此基础上,分析 RWEH 的运动响应特性,搭建了等效水波机械激励平台并表征了其输出性能;进一步根据 RWEH 的输出特性设计电源管理电路,通过电路仿真、PCB 设计制作和电容充电特性测试验证了电源管理电路的有效性。本工作为低频水波能的多方向收集与高效利用提供了新的思路,在自供能海洋环境监测和海洋物联网领域具有广阔的应用前景。

2 RWEH 结构与运动响应分析

2.1 RWEH 结构与运动特性仿真

针对水波低频、多方向和不规则等特性,本文采用不倒翁式结构作为 RWEH 的主体,其结构示意图如图 1(a) 所示,主要包括弹簧-重块响应单元和圆形支撑外壳。其中弹簧-重块响应单元由中心重块、竖直弹簧和圆形底部支撑组成,中心重块通过弹簧与圆形底座弹性连接。8 个 SO-TENG 单元通过双面胶均匀集成于弹簧-重块响应单元和圆形支撑外壳之间(即不倒翁结构腔体内部),沿径向放置并分别标记为 #1-#8,相邻SO-TENG单元间夹角为 45° ,如图 1(b) 所示。图 1(c) 展示了实验室制备的 RWEH 样机,其主体外壳和支撑部件通过 3D 打印制备,中心重块和弹簧为金属材料。SO-TENG 的结构示意图如图 1(d) 所示,其选用打印纸和氟化乙烯丙烯共聚物(FEP)为摩擦层材料,导电胶带和纤维纸分别用作电极层和介电层。在外部机械激励作用下,RWEH 的内部重块受惯性和弹簧回复力作用产生往复摆动,使得周向 SO-TENG 发生周期性的压缩与释放,进而引起FEP与打印纸之间产生往复的接触-分离运动。由于材料电负性的巨大差异,打印纸材料失去电子而FEP材料得到电子,两种材料表面的异号电荷产生的电势差驱动感应电荷通过外部电路转移以实现静电平衡,单个周期内的发电原理示意图如图 1(e) 所示。SO-TENG 的具体制备流程及输出特性等信息可查阅本团队另一个工作^[15]。

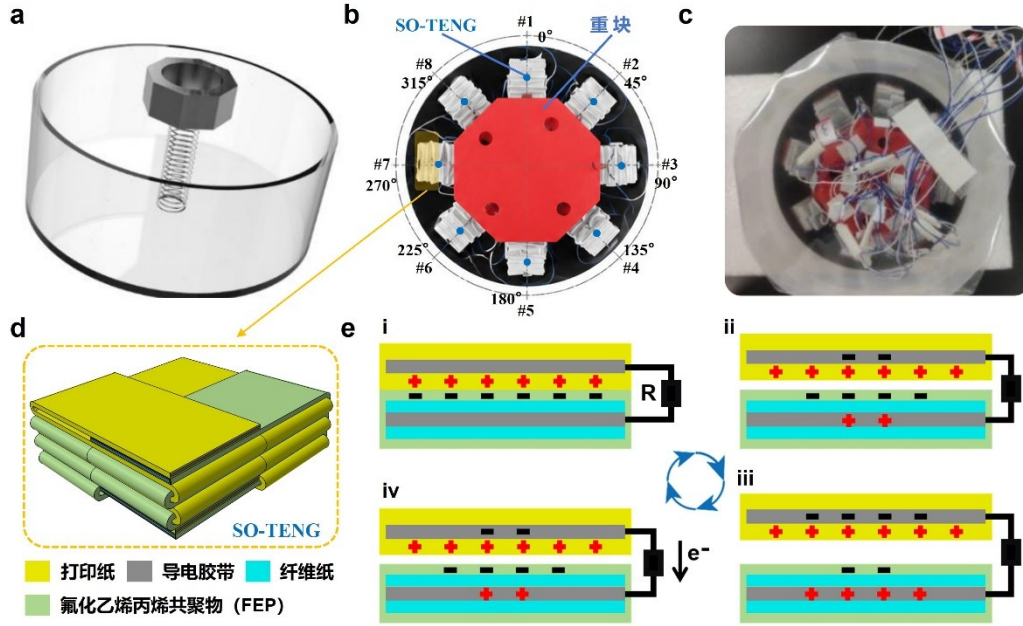


图 1 RWEH 结构设计。(a) 弹簧-重块基不倒翁结构示意图；(b) 周向 SO-TENG 阵列布置及编号示意图；(c) RWEH 样机实物图；(d) SO-TENG 单元结构示意图及 (e) 发电原理示意图。

Fig. 1. Structural design of RWEH: (a) Schematic diagram of the spring–mass response unit; (b) Schematic diagram of the circumferential arrangement and numbering of the SO-TENG array; (c) Photograph of the encapsulated RWEH prototype; (d) Schematic diagram of the SO-TENG unit and (e) its power generation principle.

为了分析弹簧-重块不倒翁结构在水波晃动条件下的运动响应，本文基于 ANSYS Workbench 构建了其核心响应结构模型并进行有限元仿真。真实水波作用下，浮体通常同时发生竖直升沉和周期性倾斜。为简化分析，本文将规则水波作用等效为底座 Z 轴位移激励和底座倾角激励 θ 的耦合输入，而不考虑复杂流体动力学过程。在这个条件下，水波波形可近似表示为随时间变化的余弦函数，物体与水面接触点相对于水波平均水平面的竖直位移可表示为：

$$y(t) = A \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \quad (1)$$

式中， $y(t)$ 为物体与水面接触点相对于水波平均水平面的竖直位移， A 为水波振幅， T 为水波周期， t 为时间。由式 (1) 可知，浮体在规则水波作用下会随水面高度变化产生周期性升沉，因此可将该竖直位移作为有限元仿真中的 Z 轴位移激励。同时，水波波面存在局部坡度变化，浮体在升沉过程中也会产生倾斜，其倾角 θ 可由波面曲线在接触位置处的局部斜率近似表示为：

$$\theta = \arctan(k) \quad (2)$$

式中， k 为水波曲线在物体接触位置处的局部斜率。本文采用 Z 轴位移激励和倾角 θ 激励的耦合输入模拟 RWEH 在规则水波作用下的主要运动形式。

有限元仿真中采用的RWEH简化模型如图 2(a) 所示。为突出弹簧-重块结构的主要运动响应，模型仅保留圆形底座、弹簧和上部重物等关键部件，并省略周向 SO-TENG 单元和外部封装结构。仿真过程中，Z轴位移激励和倾角激励被共同施加于结构底座，使底座在等效水波激励下产生周期性升沉和倾斜运动。由于上部重物存在惯性滞后，其运动不能与底座完全同步，同时弹簧发生弯曲和回复变形，因此重物与底座之间形成周期性相对偏转。一个运动周期内的典型变形状态如图 2(b) 所示。图中底座的倾斜表示 RWEH 随水面的整体运动，上部重物相对于底座的偏转则反映了 RWEH 内部的相对运动，并为周向 SO-TENG 单元提供周期性的压缩和释放驱动力。如图 2(c) 所示，底座Z轴位移激励、底座倾角激励以及结构最大位移响应均呈周期性变化。结构最大位移响应与外部激励并未完全同步，这是由上部重物的惯性滞后和弹簧回复力共同作用造成的。上述仿真结果表明，弹簧-重块不倒翁结构能够将外部低频升沉和倾斜输入转化为内部相对摆动，为周向 SO-TENG 单元提供稳定的周期性接触-分离运动触发条件。

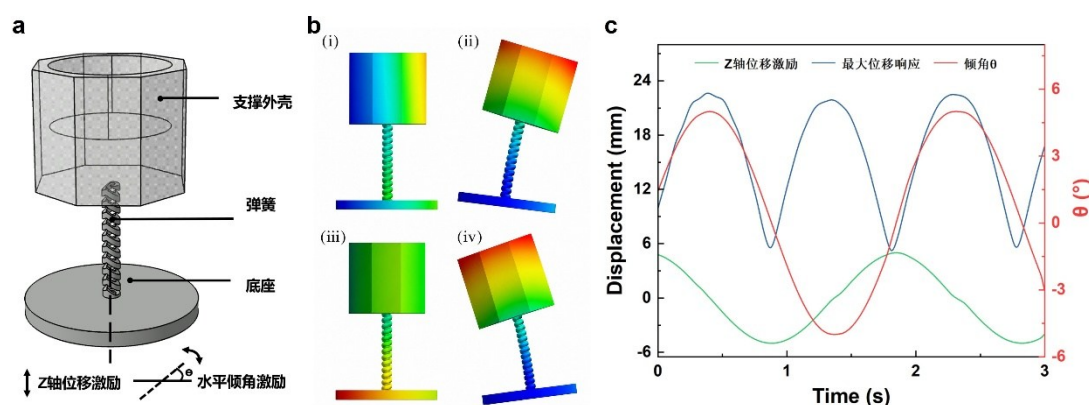


图 2 RWEH 的有限元仿真。(a) 有限元简化模型；(b) 一个运动周期内的典型变形状态；(c) 底座 Z 轴位移激励、底座倾角激励 θ 与结构最大位移响应曲线。

Fig. 2. Finite element simulation of RWEH. (a) Simplified finite element model; (b) Typical deformation states within one motion cycle; (c) Curves of the base Z-axis displacement excitation, base tilt angle θ and maximum structural displacement response.

2.2 等效水波激励平台搭建

图 3(a) 展示了规则水波模型示意图，其中 A 、 λ 和 θ 分别表示水波振幅、波长及浮体随波面变化产生的倾角。为系统评价 RWEH 在水波激励下的输出性能，本文搭建了一种等效水波机械激励平台用于模拟浮体在水波作用下产生的周期性倾斜运动。如图 3(b) 所示，该平台主要由旋转电机、减速机、连杆机构、滑块、固定支架和模拟平台组成，整体采用四杆滑块反转机构，电机输入的连续旋转运动经连杆机构转换成对模拟平台的周期性倾斜-回复运动。测试时，RWEH 固定在模拟平台上随平台产生低频倾斜-回复运动，从而驱动内部弹簧-重块结构发生相对摆动，进一步触发周向 SO-TENG 单元的压缩与释放，搭建完成后的实

验平台如图 3(c) 所示。

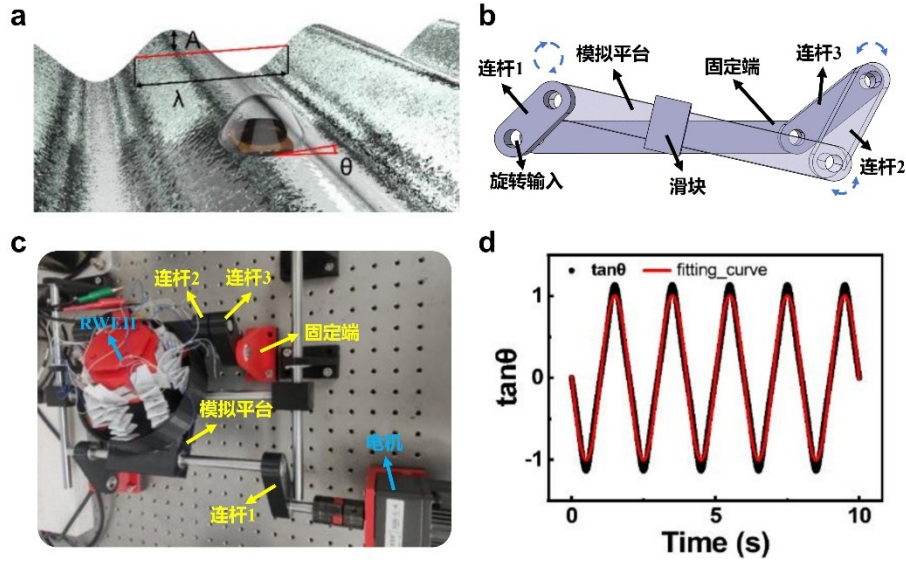


图 3 等效水波激励平台搭建。(a) 规则水波模型示意图；(b) 四杆滑块反转机构模型示意图；(c) 机械激励平台实物图；(d) 模拟平台 $\tan\theta$ 变化曲线及正弦函数拟合结果。

Fig. 3. Construction of the equivalent water-wave excitation platform: (a) Schematic diagram of the regular water-wave model; (b) Schematic diagram of the four-bar slider reversing mechanism; (c) Photograph of the mechanical excitation platform; (d) Variation curve of $\tan\theta$ of the simulated platform and the sinusoidal fitting result.

为验证该平台输出倾角的周期性和稳定性,本文采用 Adams 软件对四杆滑块反转机构进行运动学仿真,并提取模拟平台在运动过程中的倾角变化数据。对仿真得到的倾角数据采用 Levenberg-Marquardt 优化算法进行正弦函数拟合,如图 3(d) 所示。模拟平台倾角对应的 $\tan\theta$ 随时间呈现近似正弦变化,拟合曲线与仿真数据展现了良好的吻合度,拟合系数 R^2 为 0.988,表明搭建的激励平台能够产生稳定的等效水波倾斜激励。因此,所搭建的等效水波激励平台能够将电机连续旋转运动转化为稳定、可调的低频倾斜输入,为后续 RWEH 的多方向输出性能测试和电源管理提供实验基础。需要说明的是,该机械激励平台主要用于在可控和可重复条件下模拟浮体随规则水波产生的主要倾斜运动,并不能完全复现实际水域中多频率、多方向及非稳定幅值共同作用的复杂水波环境。

2.3 RWEH 输出性能表征

在上述搭建的等效水波激励平台基础上,进一步对 RWEH 的输出性能进行了表征,测试装置示意图如图 4(a) 所示。通过电机驱动使 RWEH 沿图 4(b) 所示方向进行周期性倾斜-回复运动,利用 Keithley 6514 静电计搭配 NI USB-6218 采集卡对 RWEH 的电输出性能(开路电压、短路电流和转移电荷量)进行测量。图 4(c) 展示了 RWEH 在不同负载下的峰值输出功率,单个 SO-TENG 单元(#1)和 RWEH 均在外部负载为 $50\text{ M}\Omega$ 时达到最大峰值功率,分别为 $6.2\text{ }\mu\text{W}$ 和 $61.2\text{ }\mu\text{W}$ 。周向均匀布置的 8 个 SO-TENG 单元在机械激励下的输出测试结

果如图 4(d)-(f) 所示。在 1 Hz 单方向激励下，位于主激励方向的 #1 和 #5 单元输出最大，开路电压约为 60 V，短路电流约为 500 nA，转移电荷量约为 30 nC，偏离主方向的 #2、#4、#6 和 #8 单元输出次之，近似垂直于主激励方向的 #3 和 #7 单元输出较低。不同 SO-TENG 单元输出信号的差异主要源于其径向布置方向与主激励方向之间的夹角不同。位于主激励方向上的 #1 和 #5 单元具有较大的有效压缩-释放行程，使摩擦层之间产生更充分的接触-分离；#2、#4、#6 和 #8 单元与主激励方向存在一定夹角，有效轴向变形量相对减小；#3 和 #7 单元近似垂直于主激励方向，其变形主要表现为侧向弯曲，有效接触-分离程度较低。测试结果说明，周向 SO-TENG 阵列能够响应不同方向的机械输入，其输出强度与激励方向密切相关，展现了 RWEH 对低频水波激励方向性的良好响应。

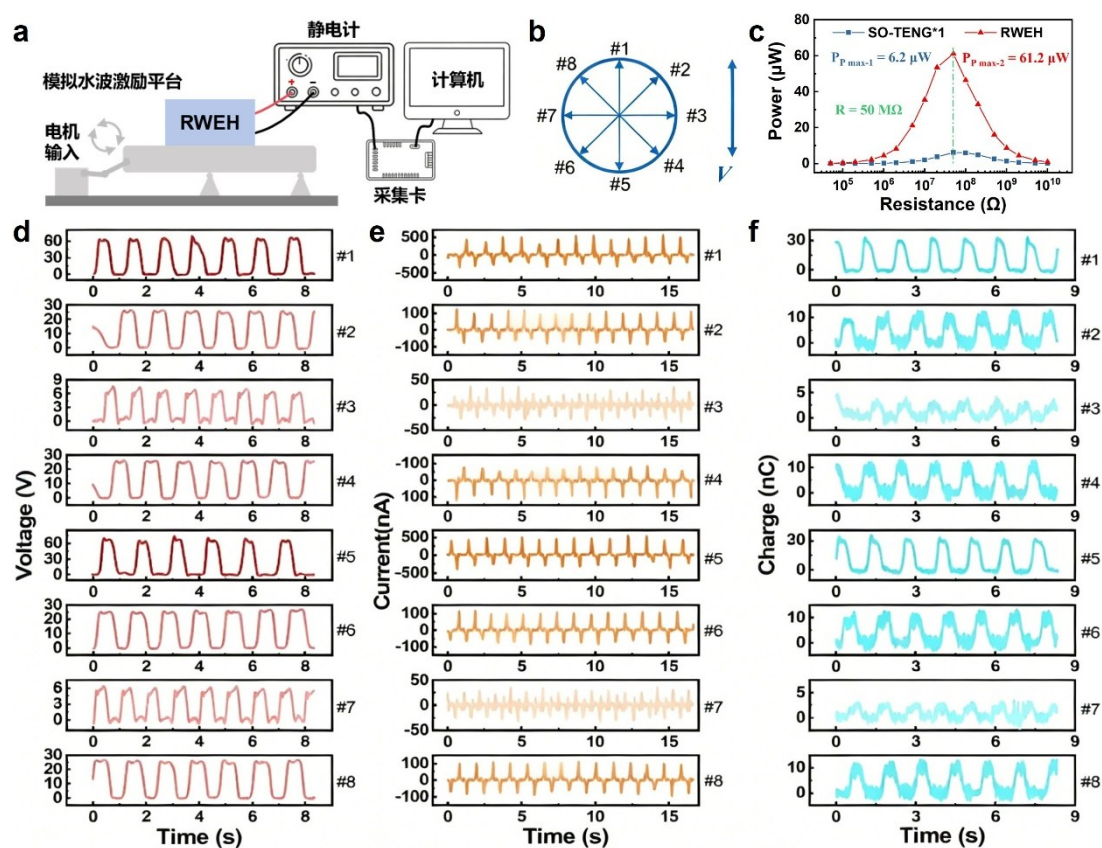


图 4 RWEH 输出性能表征。(a) 测试装置示意图；(b) 外部运动方向示意图；(c) 峰值输出功率；不同 SO-TENG 单元的 (d) 开路电压，(e) 短路电流和 (f) 转移电荷量。

Fig. 4. Characterization of RWEH's output performance. (a) Schematic diagram of testing platform; (b) Schematic diagram of motion excitation direction; (c) Peak output power; (d) Open-circuit voltage, (e) short-circuit current and (f) transferred charge of different SO-TENG units under single-direction excitation.

3 RWEH 的电源管理

3.1 电源管理电路设计及工作原理

前述实验结果表明, RWEH 在低频等效倾斜激励下能够产生稳定的电输出, 但 SO-TENG 作为前端发电单元, 其典型的高电压、低电流和高内阻特性限制了电输出的有效利用。仅通过整流桥连接 SO-TENG 和储能电容或外部负载, 容易出现阻抗失配和电荷转移不充分等问题, 从而影响输出电能的有效储存与利用。因此, 本文基于 SO-TENG 的输出特性设计了电源管理电路, 如图 5(a) 所示。该电路主要由 SO-TENG、整流模块、峰值检测模块和能量管理模块组成。其中, 整流模块采用全波整流, 用于将 SO-TENG 的交流输出转换为直流信号; 峰值检测模块由电容-电阻串联组成的微分电路和晶体管 (用作电子开关) 构成, 用于识别整流后的电压峰值并控制储能通道的导通; 能量管理模块由电感、二极管、电容和电阻组成, 用于储存和管理 SO-TENG 输出的电能。

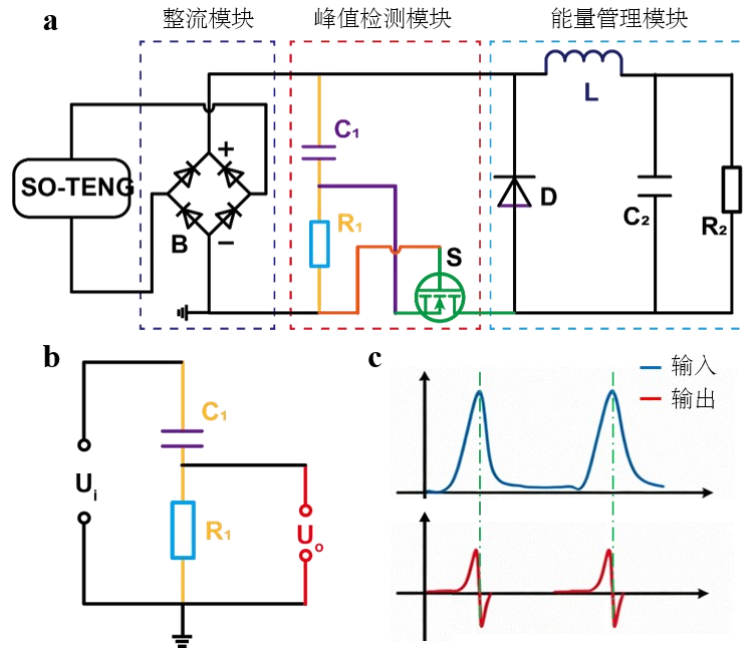


图 5 电源管理电路设计。(a) 电源管理电路示意图; (b) 用于峰值检测的微分电路; (c) 微分电路的输入和输出信号。

Fig. 5. Design of the power management circuit: (a) schematic diagram of the power management circuit; (b) differential circuit for peak detection; (c) input and output signals of the differential circuit.

电源管理电路的工作原理如下: 首先 SO-TENG 产生的交流电输出经整流后形成单向脉冲型电压 (U_i), 然后经峰值检测模块进行处理; 如图 5(b) 和图 5(c) 所示, 在电压上升过程中, MOS 管栅极上的电压始终低于源极电压, MOS 管 (即电子开关 S) 断开, 此时整体电源管理电路处于断路状态, SO-TENG 产生的电能均积累储存在电容 C_1 中; 当 U_i 达到最大值时, 对应微分电路输出的电压 (U_o) 为零, 并且在 U_i 下降瞬间 U_o 的端节点电位瞬间转换为负电位, 此时 MOS 管导通, 使得整体电源管理电路切换为通路状态, 储存在 C_1 中的电能瞬间进入后端能量管理模块; 随着 U_i 进入下一周期, MOS 管再次断开, SO-TENG

产生的电能重新进入预储存状态，直至 U_i 达到最大值后 MOS 管再次导通，如此循环往复，最终实现高效的能量管理和储存。

基于电源管理电路实现输出能量最大化的过程示意图如图 6 所示。以单个 SO-TENG 单元为例。初始状态下 (I)，FEP 摩擦层与纸基摩擦层紧密接触，系统整体处于静电平衡态，此时开关为断开状态；随着器件在弹性回复作用下逐渐分离 (II)，由于摩擦层材料的电负性差异，两个摩擦层表面分别带上等量异种电荷，开关保持断开，电路中并未发生电荷转移；当摩擦层分离到最大距离时 (III)，两个摩擦层表面积累的电荷量达到最大值，两个电极间的电势差也达到峰值；此时开关导通，在电势差作用下，下电极负电荷瞬间转移至上电极以达到新的静电平衡态；随着摩擦层间距离逐渐减小 (IV)，摩擦层表面的异号电荷量逐渐降低，开关也恢复至断开状态；由于外电路断开导致电荷无法回流，进而在两个电极间形成与前述阶段相反的电势差 (V)；直至摩擦层重新恢复至完全接触 (VI)，电极间的电势差再次达到最大值，此时开关导通，电势差驱动负电荷从上电极转移至下电极；随后整个系统重新进入静电平衡态，开关再次断开 (I)，如此循环往复，最终实现 SO-TENG 的能量最大化输出。

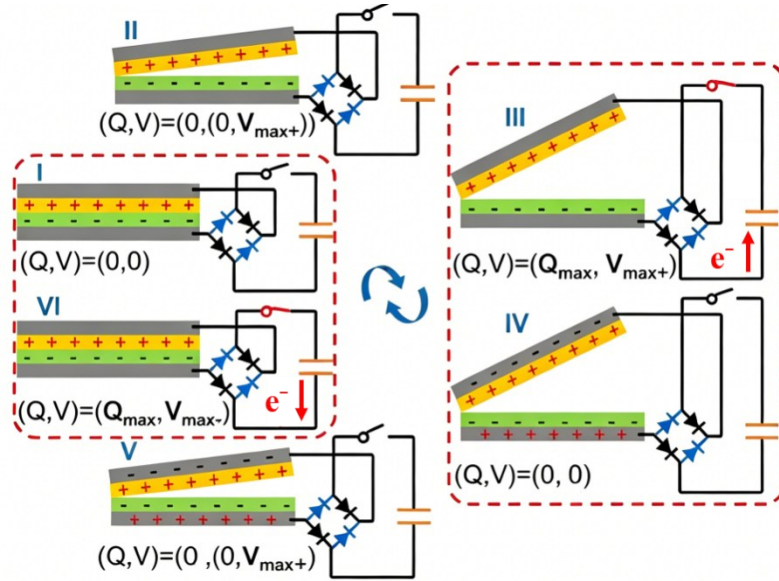


图 6 RWEH 能量最大化原理。

Fig. 6. Energy maximization principle of RWEH.

3.2 电源管理电路仿真与 PCB 设计

为验证所设计电源管理电路的可行性，本文采用 Multisim 软件对整流输出、峰值检测、MOS 管开关控制和储能过程进行仿真分析，仿真电路如图 7 所示。考虑到 TENG 具有电容式输出特征，仿真中采用交流电源与等效电容串联的方式模拟前端输出，并将其接入整流模块、峰值检测模块和后端能量管理模块。交流输入信号经全波整流后被转换为单向脉冲电压信号，电压峰值约为 90 V，频率约为 1.5 Hz，为后续峰值检测和能量管理提供稳定输入。

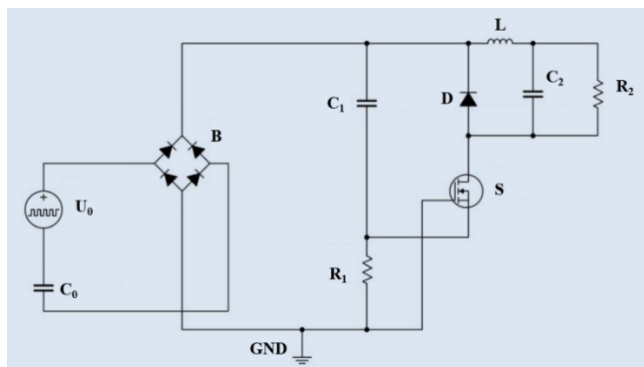


图 7 基于 Multisim 电源管理仿真电路。

Fig. 7. Simulation circuit of power management based on Multisim.

为验证微分电路的峰值检测能力以及 MOS 管开关的控制效果，本文对电源管理电路的关键节点响应信号进行了测试分析。如图 8(a) 所示，当输入的直流脉冲电压由上升阶段转为下降阶段时，峰值检测信号产生瞬时响应，可用于判断整流电压的峰值位置。局部放大结果 (图 8(b)) 显示，直流脉冲电压开始下降至峰值检测信号产生之间的延迟约为 20.7 ms，说明微分电路能够较及时地识别整流后的脉冲电压峰值。进一步地，图 8(c)-(d) 展示了不同输入电压阶段 MOS 管栅极电压和源漏电压的变化，当源漏电压逐渐降低至约 0 V，表明 MOS 管由截止状态转为导通状态，能量管理通道被接通，此时峰值检测信号（即电阻R1的上节点电位）达到 MOS 管开启条件。局部放大结果显示，MOS 管的开启电压约为 2.74 V，开关导通维持时间约 155 ms，随后进入下一个周期。上述结果说明，微分峰值检测电路与 MOS 管开关电路协同工作，可实现对能量管理通道的自动开断控制，进而实现 SO-TENG 的能量最大化效果。

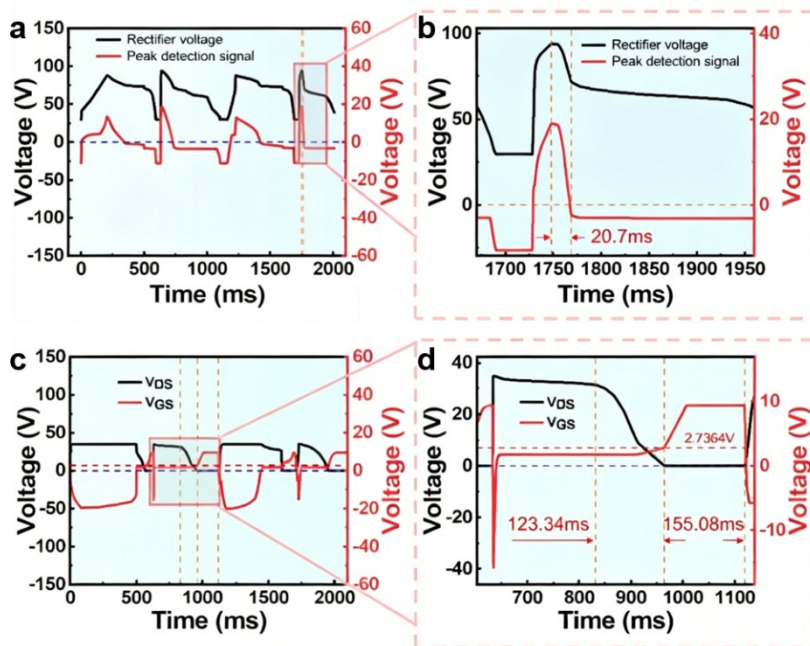


图 8 Multisim 电路仿真响应测试。(a) 整流信号峰值检测响应及其 (b) 局部放大图;

(c) MOS 管源漏电压与栅极电压变化及其 (d) 局部放大图。

Fig. 8. Multisim circuit simulation response test. (a) Peak detection of the rectified signal, and (b) its partial enlarged view; (c) Variations of the source-drain voltage and gate voltage of the MOS transistor, and (d) its partial enlarged view.

在仿真验证的基础上, 本文进一步完成了电源管理电路的 PCB 设计与制备。利用 Altium Designer 软件设计的 PCB 原理图及制备的 PCB 实物图分别如图 9(a)-(b) 所示, PCB 板的尺寸为 $45\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ 。微分峰值检测电路的 RC 参数需要与整流后电压脉冲宽度相匹配, 储能电容和负载电阻需根据后续储能测试需求选取。根据 SO-TENG 的输出特性及仿真结果, 本文中使用的元器件最终参数为: 电容 C_1 为 150 pF , C_2 为 $4.7\text{ }\mu\text{F}$, 电感 L 为 18 mH , 电阻 R_1 和 R_2 均为 $100\text{ M}\Omega$ 。综上, Multisim 仿真结果验证了电源管理电路在峰值检测和 MOS 管开关控制方面的可行性, PCB 设计与制备为后续性能测试提供了硬件基础。

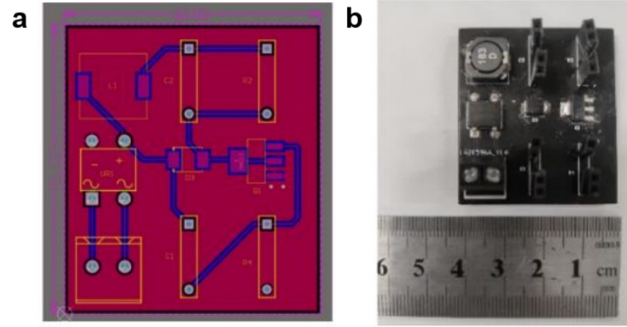


图 9 电源管理电路设计。(a) PCB 原理图和 (b) 实物图。

Fig. 9. Design of power management circuit. (a) Schematic of the printed circuit board (PCB) and (b) its physical image.

3.3 电源管理性能表征

为验证所设计电源管理电路在实际工作条件下的管理效果, 首先测试了其峰值信号检测和开关响应导通功能。图 10(a) 展示了经整流后的直流脉冲式输出电压, 其最大峰值约 200 V , 频率约为 5 Hz 。进一步地, 将整流后的直流脉冲电压信号与微分电路(峰值检测电路)的输出信号进行对比, 如图 10(b)-(c) 所示。结果显示, 当直流脉冲电压达到峰值并开始下降时, 微分电路输出端瞬时产生响应信号, 展现了该电路准确识别输入电压峰值的功能。图 10(d) 展示了开关的响应时间测试结果, 即整流后的直流脉冲电压峰值与微分电路输出电压为零值时的时间差。整流后的直流脉冲输入电压中, 两种不同峰值对应的开关响应时间分别约为 2 ms 和 1 ms , 表明所设计的峰值检测电路具有较快的响应速度, 能够为后续开关导通和能量管理提供稳定的控制。

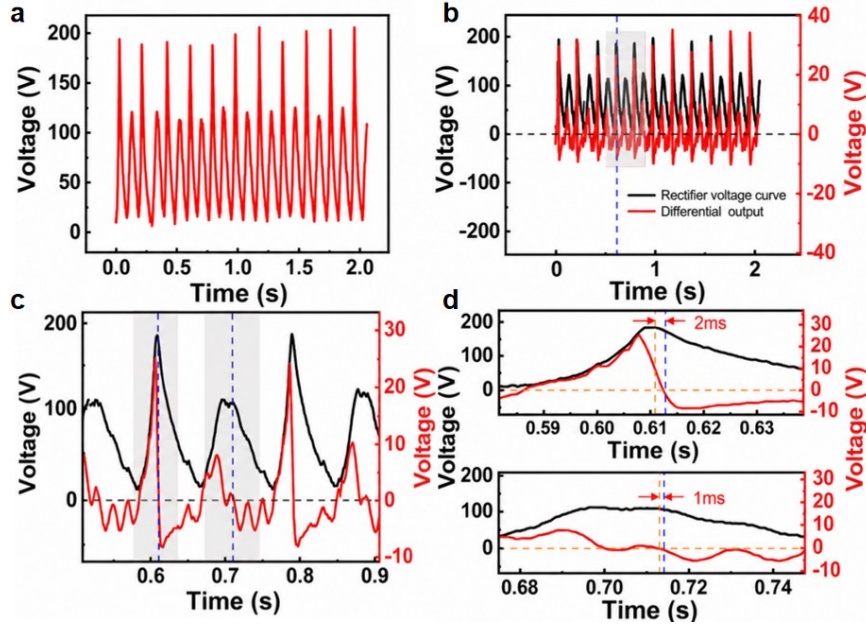


图 10 电源管理电路的峰值检测与开关响应功能测试。（a）整流后的直流脉冲电压；（b）整流后的脉冲电压输入和相应的峰值检测电路电压输出及（c）其局部放大图；（d）开关响应时间。

Fig. 10. Peak detection and switching response test of the power management circuit: (a) Rectified DC pulse voltage; (b) Rectified pulse voltage input and corresponding output voltage of the peak detection circuit and (c) its enlarged view; (d) Switching response time.

在此基础上，进一步对电源管理效果进行了表征。SO-TENG 经电源管理前后在不同负载下的平均输出功率如图 11(a) 所示，管理之前 SO-TENG 的本征平均输出功率在外部负载为 $50 \text{ M}\Omega$ 时取得最大值 $23.4 \text{ }\mu\text{W}$ ，管理之后的最大平均输出功率为 $18.5 \text{ }\mu\text{W}$ ，对应的外部负载为 $20 \text{ M}\Omega$ 。这里定义平均输出功率最大值的比值为能量管理效率，根据公式（3），

$$\eta = \frac{P_{A-\max, \text{ after}}}{P_{A-\max, \text{ before}}} \quad (3)$$

其中 $P_{A-\max, \text{ after}}$ 为 SO-TENG 管理之后的最大平均输出功率， $P_{A-\max, \text{ before}}$ 为 SO-TENG 的本征最大平均输出功率。经计算，电源管理电路的能量管理效率为 79.1%，表明该电源管理方案具有良好的管理效果。进一步的，对比了管理前后的电容充电特性。图 11(b) 展示了 SO-TENG 在管理前后给 $4.7 \text{ }\mu\text{F}$ 电容的充电对比。结果显示，通过电源管理电路将电容充电至 6 V 需要 9.88 s ，相对于直接充电（ 24.4 s ）速度提高 2.5 倍；在相同的 30 s 充电时间内，直接通过整流桥充电（管理前）的电容电压为 7.6 V ，而通过电源管理电路充电的电容电压达到 13.8 V ，充电电压提高 1.82 倍；换算为能量，相同时间内经电源管理电路的输出能量是直接通过整流桥的 3.3 倍。为验证电源管理电路对不同容量电容的适

用性, 本文对 $47\ \mu\text{F}$ 和 $100\ \mu\text{F}$ 电容进行了充电测试, 结果如图 11(c) 所示。与通过整流桥直接充电相比, 相同充电时间内, 通过电源管理电路充电的电容电压均表现出更快的上升趋势和更高的最终电压。该结果进一步证实了电源管理电路在 RWEH 能量提取和输出电能利用上的有效性。

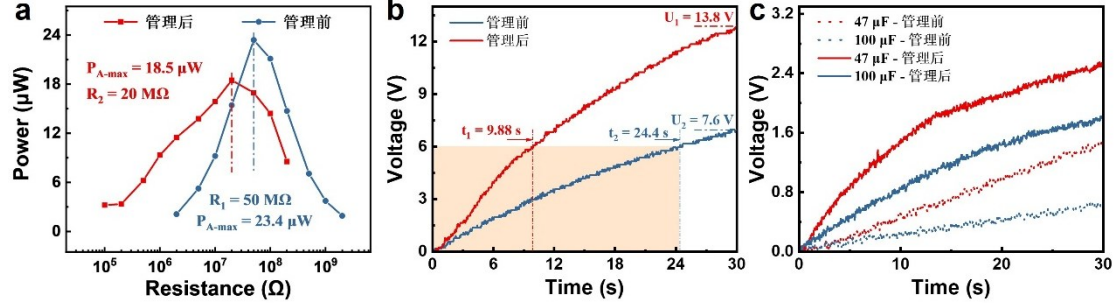


图 11 电源管理效果表征。(a) 电源管理前后的平均输出功率; (b) 电源管理前后给 $4.7\ \mu\text{F}$ 电容充电对比; (c) 电源管理前后给不同电容充电效果对比。

Fig. 11. Characterization of power-management performance. (a) Average output power before and after power management; (b) Comparison of charging voltages of a $4.7\ \mu\text{F}$ capacitor and (c) comparison of charging performance for different capacitors before and after power management.

基于 RWEH 对低频、多方向水波激励的响应能力以及电源管理电路对输出能量的提升效果, 该器件可进一步拓展至自供能水域监测场景。如图 12 所示, RWEH 可通过阵列化布置收集水波机械能, 并结合电源管理与储能模块, 为海洋物联网监测节点、水波状态传感器、浮标自供能系统及水域水文监测设备提供能量支持, 为低功耗水域电子设备的长期运行提供一种潜在方案。

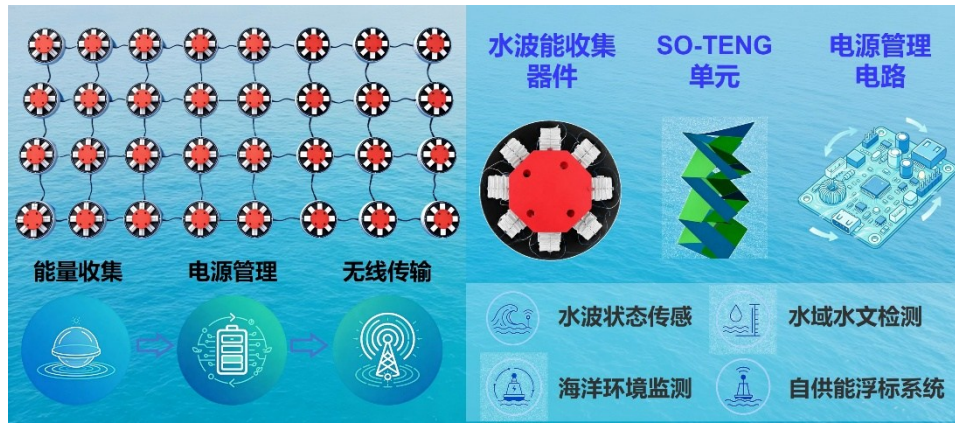


图 12 基于 RWEH 和电源管理的自供能海洋物联网应用展望。

Fig. 12. Application prospect of RWEH arrays for wave energy harvesting and self-powered ocean Internet of Things monitoring.

4 结论

本文针对传统摩擦纳米发电机 (TENG) 对低频随机水波运动适应性不足、能量利用率较低等问题, 提出了一种基于折纸结构摩擦纳米发电机的不倒翁式水

波能收集器（RWEH），并设计了与其输出特性相匹配的电源管理电路，实现了水波能的高效收集与利用。研究表明，不倒翁自复位结构能够充分利用水波激励产生持续摆动，使 RWEH 始终保持稳定的运动响应，为 TENG 提供连续有效的接触-分离驱动力；折纸结构进一步增强了器件的结构柔顺性和运动适应能力，提高了水波机械能向电能的转换效率。针对 TENG 高电压、低电流、阻抗失配引起的能量利用率受限问题，本文根据其输出特性开发了电源管理电路，并通过电路仿真、PCB 设计制造及实验测试验证了管理电路的有效性。所设计的电源管理电路能够实现对 RWEH 输出能量的高效管理和利用，能量管理效率达 79.1%，实现储能电容充电速度提高 2.5 倍、输出能量提高 3.3 倍，表明器件结构优化与电源管理协同设计能够有效提升水波能收集系统的综合性能。与现有水波能收集 TENG 主要依赖结构优化提升输出性能相比，本文进一步将机械结构设计与后端能量管理相结合，构建了水波能高效收集-利用一体化技术路线，实现了从能量产生到能量输出的系统优化，为 TENG 在海洋环境中的实际应用提供了新思路。需要指出的是，本文主要基于实验室搭建的等效水波激励平台开展研究，尚缺乏真实海洋环境下的长期运行验证。未来将结合实际海况进一步优化收集器结构与电源管理策略，提升系统的环境适应性和综合能量利用效率，为自供能海洋环境监测和海洋物联网应用提供更加可靠的技术支撑。

参考文献

- [1] Shi J, Liu W, Sun H, Cao X, Li Y, Zhang C, Thanh N, Zhang L 2025 *Acta Oceanolog. Sin.* **44** 15
- [2] He F, Liu Y, Pan J, Ye X, Jiao P 2023 *J. of Zhejiang Univ.-Sci. A* **24** 91
- [3] Zeng F, Wang T, Li J 2025 *Energy* **320** 135131
- [4] Jia S, Hong C, Shi G, Han J, Xu R, Xia Y, Xia H 2024 *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* **35** 1540
- [5] Bouhrim H, El Marjani A, Nechad R, Hajjout I 2024 *J. Mar. Sci. Eng.* **12** 1922
- [6] Zhao L, Zou H, Xie X, Guo D, Gao Q, Wu Z, Yan G, Wei K, Zhang W 2023 *Nano Energy* **108** 108222
- [7] Wang Z L, Wang X, Kim S W, Zhang R 2025 *MRS Bull.* **50** 258
- [8] Wu C, Wang A C, Ding W, Guo H, Wang Z L 2019 *Adv. Energy Mater.* **9** 1802906
- [9] Xiang H, Peng L, Yang Q, Wang Z L, Cao X 2024 *Sci. Adv.* **10** eads2291
- [10] Cao J, Gu W G, Qu Z Q, Zhong Y, Cheng G G, Zhang Z Q 2020 *Acta Phys. Sinica* **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]
- [11] 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
- [12] Wang Z L, Jiang T, Ma T, Yang R 2025 *MRS Bull.* **50** 450
- [13] Cui J, Li H, Chen B, Wang Z L 2024 *Chem. Eng. J.* **499** 156193
- [14] Zhao T, Xu M, Xiao X, Ma Y, Li Z, Wang Z L 2021 *Nano Energy* **88** 106199
- [15] Jin Z, Cao J, Lei R, Han X, Fu X, Liu G, Liu H, Cheng G, Ding J 2026 *Chem. Eng.*

J. **544** 179167

- [16] Jin Z, Cao J, Lei R, You J, Mi L, Ju G, Gao Y, Qu Z, Cheng G 2026 *Acta Phys. Sin.* **75** 060809 (in Chinese) [金哲林, 曹杰, 雷锐, 尤靖渊, 米乐天, 居桂章, 高阳, 曲召奇, 程广贵 2026 物理学报 **75** 060809]
- [17] Zhang C, He L, Zhou L, Yang O, Yuan W, Wei X, Liu Y, Lu L, Wang J, Wang Z L 2021 *Joule* **5** 1613
- [18] Ouyang R, Miao J, Wu T, Chen J, Sun C, Chu J, Chen D, Li X, Xue H 2022 *Adv. Mater. Technol.* **7** 2200403
- [19] Nan Y, Wang X, Xu H, Zhou H, Sun Y, Wang M, Liu W, Ma C, Yu T 2025 *InfoMat* **7** e12621
- [20] Wang Y, Wu Y, Liu Q, Wang X, Cao J, Cheng G, Zhang Z, Ding J, Li K 2020 *Energy* **212** 118462
- [21] Zhang C, Yuan W, Zhang B, Yang J, Hu Y, He L, Zhao X, Li X, Wang Z L, Wang J 2023 *Small* **19** 2304412
- [22] Long Y, Zhao B, Niu J, Liu Y, Sha W, Wang J, Wang Z L, Hu W 2025 *Nano Res.* **18** 94907052
- [23] Qi C, Yang Z, Zhi J, Zhang R, Wen J, Qin Y 2023 *Nano Res.* **16** 11783
- [24] Qin H, Gu G, Shang W, Luo H, Zhang W, Cui P, Zhang B, Guo J, Cheng G, Du Z 2020 *Nano Energy* **68** 104372
- [25] Wang Z, Wang J, Yang Z, Zhu J, Zhang P, Yu X, Li H, Yu Y, Zhang Y, Wang Z L, Cheng T 2025 *Energy Environ. Sci.* **18** 3761
- [26] 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
- [27] Harmon W, Bamgboje D, Guo H, Hu T, Wang Z L 2020 *Nano Energy* **71** 104642
- [28] Du S, Basset P, Guo H, Galayko D, Karami A 2025 *MRS Bull.* **50** 305
- [29] Zhou H, Liu G, Bu T, Wang Z, Cao J, Wang Z, Zhang Z, Dong S, Zeng J, Cao X, Zhang C 2024 *Appl. Energy* **357** 122475
- [30] Hu T, Wang H, Harmon W, Bamgboje D, Wang Z L 2022 *IEEE Trans. Power Electron.* **37** 9850

A Power Managed Roly-Poly Water Wave Energy Harvester based on Spring Origami-Structured Triboelectric Nanogenerator*

Cao Jie^{1#}, Gao Yang^{1#}, Jin Zhelin¹, Liu Haisheng¹, Zhang Weiqiang², Cheng Guanggui^{1‡}

¹ Key Laboratory of Intelligent Flexible Actuation and Control in Universities of Jiangsu Province, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, P. R. China

² School of Aerospace Science and Technology, Xidian University, Xi'an 710126, P. R. China.

Abstract

Wave energy as an important component of ocean energy is abundant, wide distribution and environmental sustainability. However, its low-frequency, irregular and multidirectional characteristics pose significant challenges to efficient energy capture and electrical energy conversion. In recent years, triboelectric nanogenerator (TENG) technology has demonstrated significant advantages in harvesting low-frequency mechanical energy, yet the limited adaptability of conventional TENG configurations to wave-induced motion severely restricts the energy conversion efficiency of wave energy. To address this issue, a roly-poly water wave energy harvester (RWEH) based on an origami-structured TENG is proposed in this work, together with a power management circuit tailored to its output characteristics to improve the utilization efficiency of the harvested water-wave energy. First, the overall structure of the RWEH was designed by integrating an origami structure with a roly-poly self-righting mechanism, and its motion response characteristics were subsequently investigated through ANSYS simulations. An equivalent wave excitation platform was then established to systematically characterize the output performance of the RWEH under different excitation conditions. On this basis, a power management circuit compatible with the output characteristics of the RWEH was developed, and its operating mechanism and energy-maximization principle were analyzed. The effectiveness of the proposed power management circuit was further verified through circuit simulation, printed circuit board (PCB) fabrication and capacitor charging tests. The results demonstrate that the proposed RWEH can maintain stable oscillatory motion under wave excitation, enabling continuous and effective energy conversion and electrical power generation, with a peak output power of 61.2 μ W. Furthermore, the developed power management circuit achieves an energy management efficiency of 79.1%, increases the capacitor charging rate by 2.5 times and the output energy by 3.3 times, significantly improving the utilization efficiency of the electrical energy generated by the RWEH. This work provides a feasible strategy for the efficient harvesting and utilization of low-frequency random water-wave energy, offering promising technical support for the continuous power supply of self-powered marine environmental

* Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (52505188), Postdoctoral Fellowship Program of CPSF (GZC20250899), Jiangsu Funding Program for Excellent Postdoctoral Talent (2025ZB830), the 333 Project of Jiangsu Province.

These authors contributed equally to the work

‡ Corresponding author: Guanggui Cheng (ggcheng@ujs.edu.cn)

monitoring systems and marine Internet of Things nodes.

Keywords: Wave energy harvesting; Triboelectric nanogenerator; Origami structure; Roly-poly structure; Power management