

冲击式波浪能摩擦纳米发电机的设计与半物理实验

潘磊^{1,2}, 范健宇^{1,2}, 杨绍辉^{1,2,3}, 柯江岩^{1,2}, 杜志昌^{1,2}, 李晖^{1,2,3}

- (1. 集美大学海洋装备与机械工程学院, 福建 厦门 361021;
2. 海洋可再生能源装备福建省高校重点实验室, 福建 厦门 361021;
3. 福建省能源清洁利用与开发重点实验室, 福建 厦门 361021)

[摘要] 提出并设计了一种基于冲击式空气透平的波浪能摩擦纳米发电机, 将其应用于振荡水柱波浪能转换装置中, 能够将低频的海洋波浪能高效转换为电能。详细阐述了该发电机的结构与工作原理, 搭建了两个实验平台, 分别进行了电极参数优化实验和电学输出性能实验。实验结果表明, 利用聚四氟乙烯作为电极的介电材料, 其电学输出性能最优, 聚四氟乙烯的厚度越大, 电学性能输出越好。当发电机电极角度逐渐减小时, 短路电流呈上升趋势。设计并制造了冲击式波浪能摩擦纳米发电机, 进行了单风向半物理仿真实验。研究了不同风速下的电学输出性能, 并进行了电容充电实验。通过电路设计驱动点亮了33盏LED。验证了冲击式波浪能摩擦纳米发电机的可靠性以及对小型传感器供能的潜力。

[关键词] 波浪能; 空气透平; 摩擦纳米发电机 (TENG); 振荡水柱

[中图分类号] P 743.2

Design and Semi-Physical Experiment of an Impulse Wave Energy Triboelectric Nanogenerator

PAN Lei^{1,2}, FAN Jianyu^{1,2}, YANG Shaohui^{1,2,3}, KE Jiangyan^{1,2}, DU Zhichang^{1,2}, LI hui^{1,2,3}

- (1. College of Marine Equipment and Mechanical Engineering, Jimei University, Xiamen 361021 China;
2. Fujian Province Key Laboratory of Energy Cleaning Utilization and Development, Xiamen 361021 China;
3. Cleaning Combustion and Energy Utilization Research Center of Fujian, Xiamen 361021 China)

Abstract: An impulse air turbine based wave energy triboelectric nanogenerator (impulse wave energy TENG, IW-TENG) is proposed and designed to be applied in an oscillating water column wave energy conversion device, which can efficiently convert low frequency ocean wave energy into electrical energy. The structure and working principle of IW-TENG were elaborated, and two experimental platforms were built to carry out electrode parameter optimization experiments and electrical output performance experiments respectively. The experimental results indicate that using PTFE as the dielectric material of the electrode, the electrical output performance is optimal, and the larger the thickness of PTFE, the better the electrical output performance. When the electrode angle of the generator gradually decreases, the short-circuit current tends to rise. IW-TENG was designed and manufactured to conduct a single-wind direction semi-physical simulation experiment to study the electrical output performance under different wind speeds and conduct a capacitor charging experi-

[收稿日期] 2022-10-17

[基金项目] 国家自然科学基金项目 (51779104); 福建省对外合作项目 (2020I0021); 福建省自然科学基金项目 (2020J01694)

[作者简介] 潘磊 (1998—), 男, 硕士生, 研究方向为海洋可再生能源装备。通信作者: 范健宇 (1990—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为智能机构及波浪能发电技术研究。

ment. The circuit design was driven to light up 33 LEDs. The reliability of IW-TENG and its potential to supply energy to small sensors are verified.

Keywords: wave energy; air turbine; triboelectric nanogenerator (TENG); oscillating water column

0 引言

随着化石能源的大量消耗以及碳排放量逐年升高, 碳中和的提出使得清洁能源的开发受到研究者的青睐。覆盖了地球表面约 71% 的海洋储藏着丰富的蓝色能源——波浪能, 具有储量大、能流密度高等特点^[1-4]。面对复杂海洋环境, 如何把波浪能有效地转换成机械能, 进而产生稳定、高效的电能, 是海洋波浪能技术领域的研究重点^[5-6]。

根据工作原理的不同, 波浪能转换装置 (wave energy converter, WEC) 可分为振荡水柱式、越浪式和振动浮子式^[7-10]。振荡水柱波浪能装置因其具有结构简单、制造成本低、没有水下运动部件、可维护性强、海生物附着影响小、性能可靠等优点^[11-14], 已成为波浪能捕获与转换技术的主流方式。

传统的振荡水柱式波浪能发电装置主要由具有空腔的振荡浮体、空气透平与电磁感应式发电机组成^[15-17], 而电磁感应式发电机在大规模利用波浪能发电的过程中存在能量转换效率较低的问题^[18]。主要是因为电磁感应发电机在高频 (高转速) 下才能达到较高的转换效率^[19], 而将低频波浪能转换为电磁发电机的高频转动, 会引起整体机械结构复杂并且难以缩小体积等问题, 这不是一种很有效的采集方式。针对此问题, Fan 等^[20]提出了基于接触起电和静电感应耦合的摩擦纳米发电机 (triboelectric nanogenerator, TENG), 它能够高效地将低频波浪能转化为电能, 为波浪能的高效收集与转换提供了一条新的途径。例如, Wang 等^[21]设计了一种全封闭滚动的球型 TENG, 用以采集全方位的低频波浪能, 在实验中能够同时点亮几十个 LED。Jiang 等^[22]设计了一种应用于收集低频波浪能的摆动结构摩擦纳米发电机, 通过圆柱形内部摆动结构可以有效延长其摆动时间, 其在固定位移为 7 cm 的不同加速度下, 4 个并联的基本单元能够输出 572 V 开路电压及 6.3 μA 短路电流。Zhang 等^[23]设计了一种基于摩擦纳米发电机的点吸收波浪能发电装置 (MG-TENG), 通过滑动摩擦能够输出 60 μA 短路电流和 140 V 峰值开路电压, 并能同时点亮 68 个 LED。Cheng 等^[24]设计了一种大气压差驱动的振荡水柱波浪能摩擦纳米发电装置 (DS-TENG), 风速下能够输出 360 V 开路电压和 4 μA 短路电流, 能够给 40 个 LED 供电。但其装置仅在岸式振荡水柱波浪能装置上适用, 因其收集装置的叶片仅支持收集单一方向的气流, 需要将装置的进、出风口错位, 才能收集双向气流。

由于 TENG 具有结构简单、质量小、成本低、材料抗腐蚀性强、适合在低频 (低转速) 下运行等优点^[25], 因此本文将其与冲击式空气透平相结合, 提出并设计了一种冲击式波浪能摩擦纳米发电机 (以下简称 IW-TENG)。对 IW-TENG 的一个周期内电学输出性能进行了理论推导, 同时搭建了 2 个实验平台, 分别测试了 IW-TENG 在不同转速下的开路电压和短路电流, 以及在不同风速下测试了 IW-TENG 对电容充电的速度与点亮 LED 的能力, 验证了其可靠性、实用性及可行性。

1 IW-TENG 的结构设计及工作原理

1.1 结构设计

IW-TENG 装置的结构示意图如图 1 所示, 主要由动叶片、导流叶片、转子、定子、轴系等组成。定子固定安装在轴上, 转子可绕轴旋转。转子和定子分别安装在动叶片侧和导流叶片侧。定子和转子电极材料均为铜, 基底的材料是玻璃纤维, 制造由 PCB 加工制造, 其结构如图 2 所示。转子的电极数为定子电极数的一半。定子不相邻的电极分别由 2 条内、外圈的细铜导线相连, 并在其中两相邻电极留有微小的过孔, 过孔背部留有焊盘, 以便焊接导线形成外部回路, 定子表面粘贴介电材料。动叶片和导流叶片设计参考 Setoguchi 结构^[26], IW-TENG 具有 30 个动叶片和 26 对导流叶片, 平面结构图如图 3 所示, 叶片设计参数如表 1 所示。

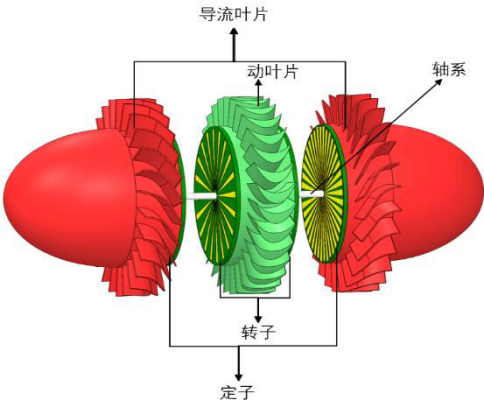


图 1 IW-TENG 装置结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the structure of the IW-TENG

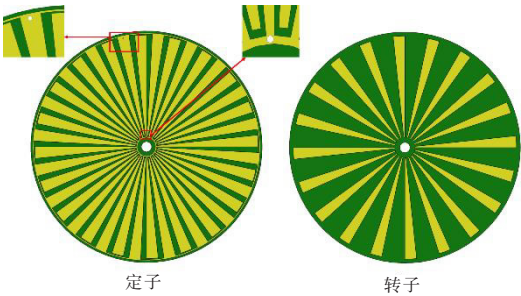


图 2 定子、转子结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the stator and rotor structure

表 1 IW-TENG 叶片物理参数
Tab. 1 Physical parameters of IW-TENG blade

参数	数值	参数	数值
轮毂直径 d/mm	115.5	动叶片压力面圆弧半径 R_p/mm	16.6
轮缘直径 D/mm	165.0	动叶片间距 S_p/mm	14.7
导流叶片圆弧段半径 R_g/mm	20.4	动叶片与导流叶片的间距 G/mm	11.0
导流叶片圆弧段圆心角 $\delta/(\circ)$	60.0	动叶片流程宽 t_a/mm	5.8
导流叶片直线段长 l_s/mm	19.1	动叶片入射角 $\beta/(\circ)$	60.0
导流叶片入射角 $\theta/(\circ)$	30.0	动叶片径向弦长 l_r/mm	29.7
导流叶片弦长 l_g/mm	38.5	动叶片椭圆长半轴 e_a/mm	69.2
导流叶片螺距 S_g/mm	16.9	动叶片椭圆短半轴 e_c/mm	22.8
导流叶片厚 t_g/mm	0.3		

1.2 工作过程及发电原理

如图 4 所示，将 IW-TENG 安装于中心管式振荡水柱浮体中。浮体在波浪作用下做垂荡运动，使得浮体内部中心空腔的水位升沉，压缩腔体内部气体形成往复气流，往复气流推动动叶片旋转^[27-28]。由于采用了导流叶片，使得往复气流能够带动动叶片始终单方向旋转^[29-30]。

IW-TENG 的发电原理如图 5 所示。发电过程共分为初始状态、中间状态和最终状态 3 种状态，初始状态和最终状态均为转子电极与定子电极对齐状态，中间状态为转子电极在电极 1 与电极 2 之间滑动。初始状态下，转子电极表面与介电材料表面直接接触，由于摩擦起电和材料得失电子能力不同，转子电极表面产生正电荷，介电材料表面产生负电荷。在旋转过程中满足电荷守恒定律，为了保证在介电材料与电极 1、电极 2 接触区域满足这一定律，将在电极 1 与电极 2

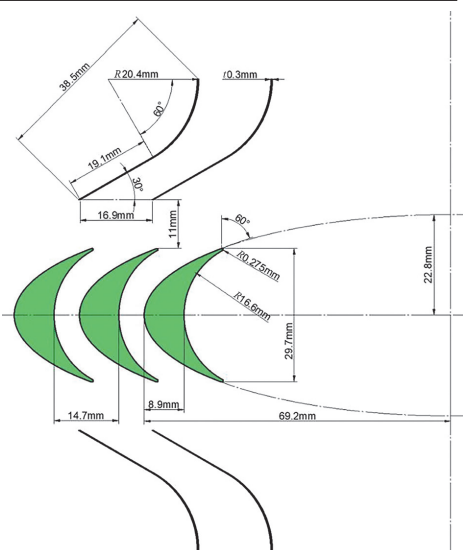


图 3 IW-TENG 动叶片与导流叶片平面图
Fig. 3 Plan view of IW-TENG moving blades and guide vanes

之间产生电势差, 并形成一个反向电流直至最终状态。在不断的旋转过程中, 电路中会形成交变电流。

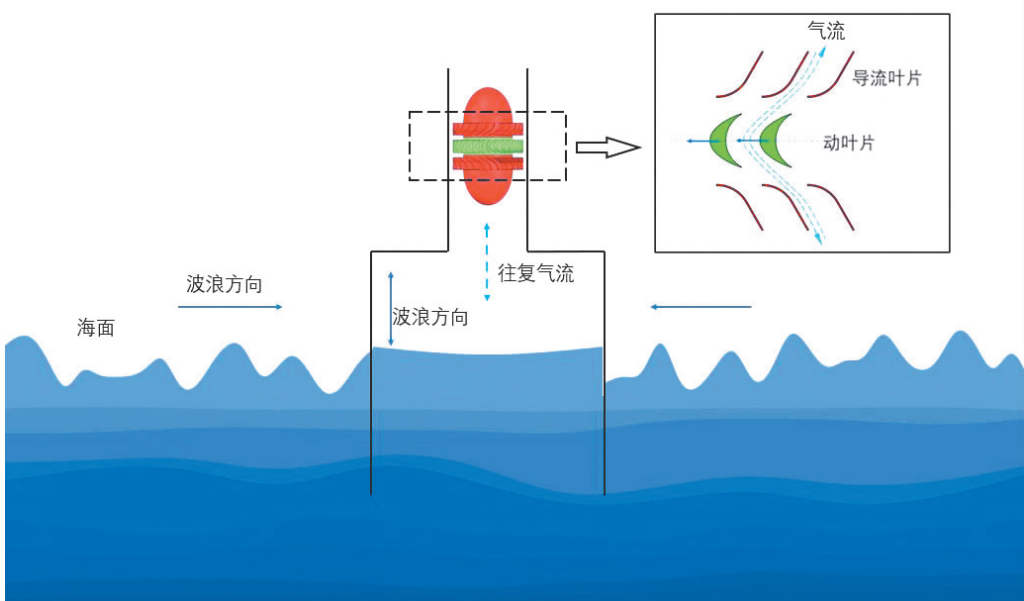


图 4 振荡水柱波浪能发电装置工作原理图

Fig. 4 Working principle of the oscillating water column wave energy generation device

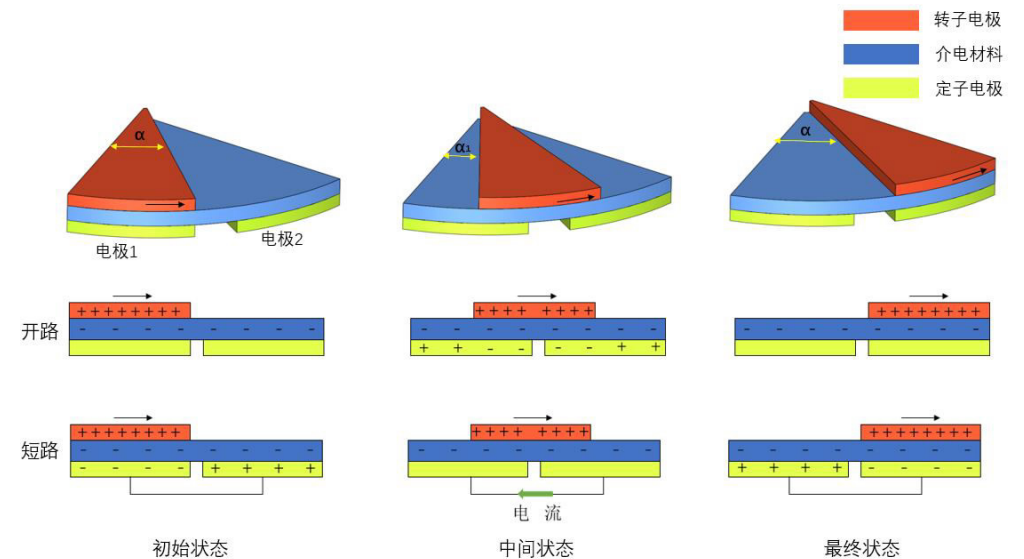


图 5 IW-TENG 的发电原理示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the power generation principle of the IW-TENG

由于介电材料的厚度 d 远小于其宽度, 通过模型简化, 金属电极可视为无穷大的平行板电容并且忽略其边缘效应的影响。电极 1 和电极 2 之间的细缝宽度忽略不计, 在开路条件下, 假设单个扇形电极角度为 α , 转子沿着电极转动角度为 α_1 ($0 \leq \alpha_1 \leq \alpha$), 在转子电极与电极 1 分离区域表面均匀分布的电荷密度为 $-\sigma$, 电极 1 和电极 2 之间的开路电压为 V 。

当转子与电极 1 重叠时, 如图 6 所示。当转子与电极 1 对齐时即初始状态的开路电压 $V_1 = 2d\sigma/(\epsilon_0\epsilon_r)$, 其中 ϵ_0 为真空介电常数, ϵ_r 为介电材料的相对介电常数。当转子与电极 2 对齐时即最终状态的开路电压 $V_2 = -2d\sigma/(\epsilon_0\epsilon_r)$, 在一个周期内, 电压的最大值 $V_E = 4d\sigma/\epsilon_0\epsilon_r$, 而当转子与电极 1 或电极 2 未对齐时, 上式不适用。

当转子与电极 1 和电极 2 未重叠时,如图 7 所示,根据电荷守恒原理,转子与电极 1 和电极 2 未重叠区域的电荷密度 $\rho = \sigma$, 转子与电极 1 重叠区域的电荷密度 $\rho_1 = -\sigma\alpha_1/(\alpha - \alpha_1)$, 转子与电极 2 重叠区域的电荷密度 $\rho_2 = -\sigma(\alpha - \alpha_1)/\alpha$ 。根据高斯定理及图 7 所示电荷密度分布,得出转子与电极重叠区域介电材料电场强度 $E_1 = -\sigma\alpha_1/[\varepsilon_0\varepsilon_{r1}(\alpha - \alpha_1)]$ 和 $E_2 = -\sigma(\alpha - \alpha_1)/(\varepsilon_0\varepsilon_{r2}\alpha_1)$ 。可以计算出开路电压: $V_{oc} = E_1d - E_2d = [d\sigma(\alpha - \alpha_1)/(\varepsilon_0\varepsilon_{r2}\alpha_1)] - [d\sigma\alpha_1/[\varepsilon_0\varepsilon_{r1}(\alpha - \alpha_1)]]$, 当电极 1 和电极 2 使用相同介电材料时,开路电压可简化为: $V_{oc} = E_1d - E_2d = d\sigma\{[(\alpha - \alpha_1)/\alpha_1] - [\alpha_1/(\alpha - \alpha_1)]\}/(\varepsilon_0\varepsilon_r)$ 。通过理论计算可以得出,当电极材料及定子电极表面覆盖材料确定后,在一个周期内,开路电压值的大小与覆盖电极的介电材料厚度及材料的表面电荷密度成正比。

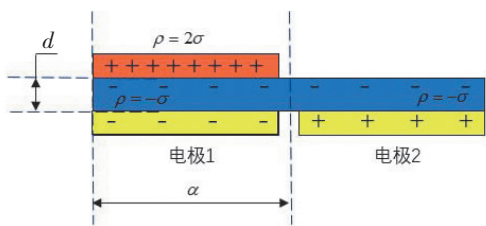


图 6 转子与电极 1 对齐状态图

Fig. 6 Rotor aligned with electrode 1

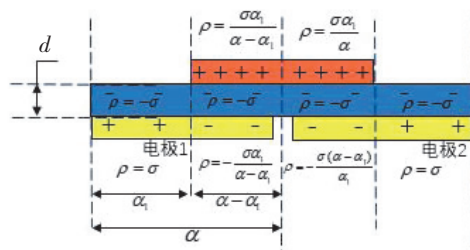


图 7 转子与电极非对齐状态

Fig. 7 Rotor and electrode non-aligned state

通过 COMSOL Multiphysics 软件仿真,其中电极材料选择铜,介电材料选用聚四氟乙烯 (PTFE),在一个周期内空间的电势分布图如图 8 所示。

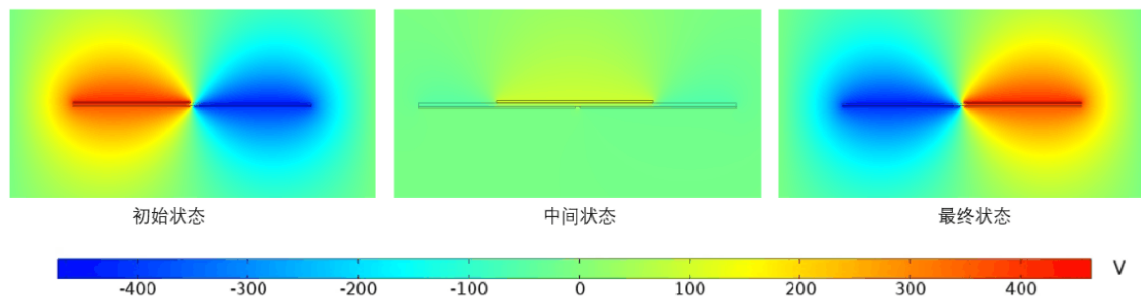


图 8 一个周期内空间的电势分布图

Fig. 8 Potential distribution in space over one cycle

2 IW-TENG 的实验及分析

2.1 IW-TENG 的电极参数优化实验分析

为了优化所设计的 IW-TENG 的结构与参数,首先搭建了电极参数优化实验测试平台,如图 9 所示,该测试平台由 Keithley6514 静电计、数据采集系统、步进电机、可编程驱动控制器及电源、XY 轴工作平台、Z 轴工作平台组成。TENG 由 Z 轴和 XY 轴平台控制使其保持同心并接触,通过步进电机可编程驱动控制器控制步进电机的转速,数据采集由 Keithley6514 静电计采集,并通过计算机专用数据接收软件实时显示并保存。TENG 中定子、转子直径为 114 mm,扇形铜电极的内径为 10 mm,外径为 110 mm,有电极角度为 15°、9°、6°共 3 组。对于定子,相邻电极间隙为 3°,如图 10 所示。

1) 介电材料的选择实验。首先将电极角度选用为 15°,分别在定子电极上粘附厚度为 0.05 mm 的 PET、KAPTON、PTFE 3 种不同介电材料。测试在相同转速 (50 r/min) 下不同介电材料的电学性能输出,测试结果如图 11 所示。PET 的开路电压约为 34.6 V,短路电流约为 1.19 μA, KAPTON 的开路电压约为 124 V,短路电流为 1.74 μA, PTFE 的开路电压为 108 V,短路电流为 3.63 μA。比较 3 种介电材料电学性能输出,PTFE 的发电性能相对较优。因此,后面实验中定子电极的介电材料均选用 PTFE。

2) 介电材料厚度的选择实验。为了研究不同 PTFE 厚度对电学性能输出的影响。圆盘电极角度为 6° ，采用 0.05、0.08、0.10 mm 3 种不同厚度 PTFE。测试在 50 ~ 250 r/min 5 组不同转速的电学性能输出，测试结果如图 12 所示。从 3 组数据中可见，当 PTFE 厚度确定时，转速越高，短路电流越大，而开路电压不随转速的升高而发生明显的变化。当转速一定、PTFE 的厚度为 0.05 ~ 0.10 mm 时，开路电压变化趋势不大，短路电流有小幅提升。PTFE 的厚度越大，电学性能输出越好，验证了理论计算中开路电压的影响与覆盖电极的介电材料厚度有关。



图 9 IW-TENG 测试系统平台

Fig. 9 The test rig for IW-TENG system

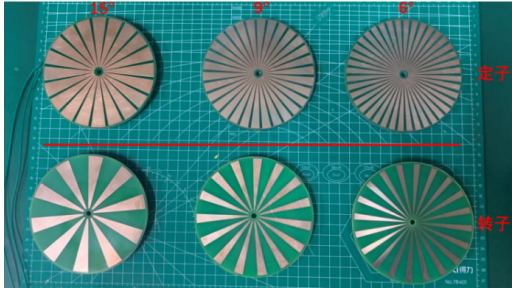


图 10 电极角度分别为 15° 、 9° 、 6° 的定子与转子

Fig. 10 Stator and rotor with electrode angles about 15° , 9° and 6° respectively

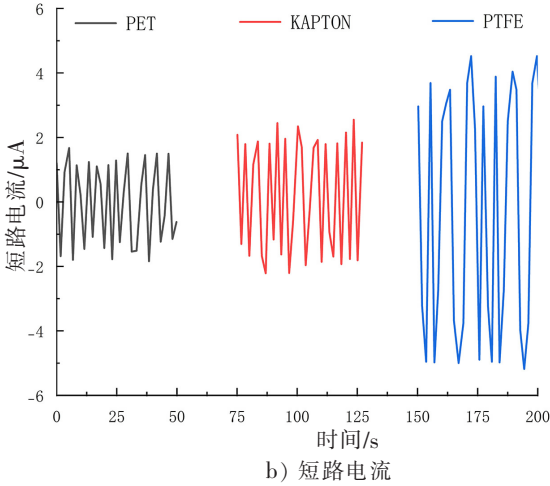
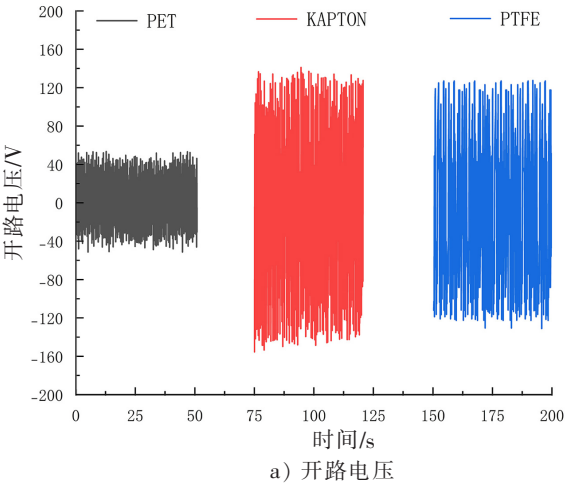
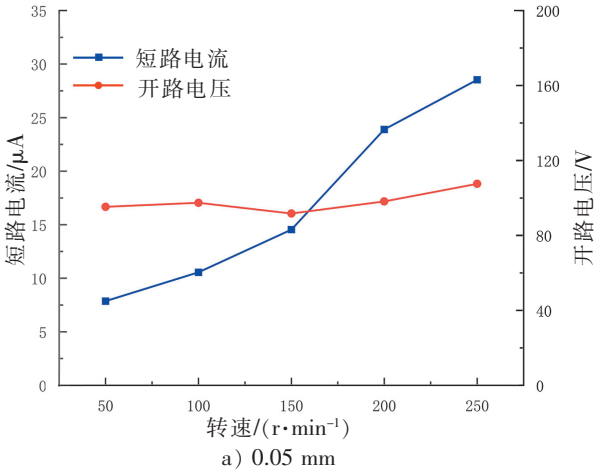


图 11 50 r/min 3 种不同介电材料的电学输出

Fig. 11 Electrical output of three different dielectric materials at 50r/min

3) 不同电极角度的比较实验。为了研究不同电极角度对于电学性能输出的影响，介电材料选用厚度为 0.05 mm 的 PTFE。测试在 50 r/min 的转速下 3 组 6° 、 9° 、 15° 不同电极角度的电学性能输出，测试结果如图 13 所示。电极角度为 15° 的开路电压约为 108 V，短路电流约为 $3.63 \mu\text{A}$ ；电极角度为 9° 的开路电压约为 110 V，短路电流约为 $7.27 \mu\text{A}$ ；电极角度 6° 的开路电压约为 107 V，短路电流约为 $7.86 \mu\text{A}$ 。从电极角度的变化的电学性能输出能够得知，当电极角度逐渐减小时，短路电流呈上升趋势，而开路电压基本保持一致。



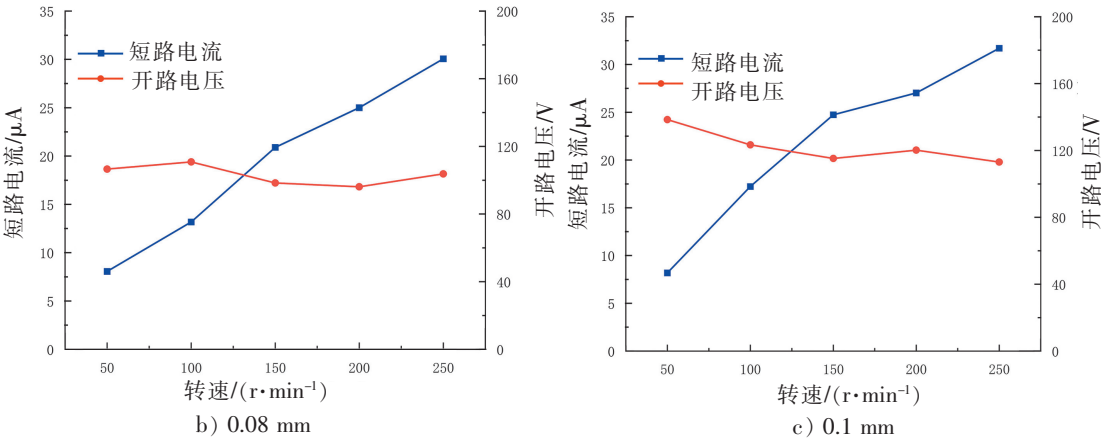


图 12 3 种不同厚度 PTFE 各转速下的电学性能输出

Fig. 12 Electrical performance output at various speeds for three different thicknesses of PTFE

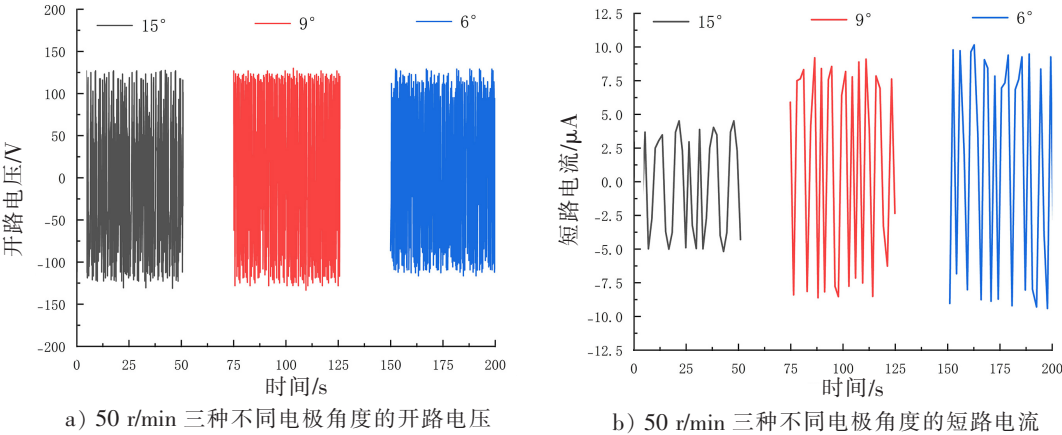


图 13 50 r/min 三种不同电极角度的电学输出

Fig. 13 Electrical output for three different electrode angles at 50r/min

2.2 IW-TENG 的整体性能分析

利用 3D 打印技术，完成了冲击式透平的整体制作。在透平的动叶片和导流叶片两侧分别粘附电极角度为 6° 的定子和转子。定子电极粘附厚度为 0.1mm 的 PTFE 作为摩擦电极材料。为了测试不同风速下 IW-TENG 装置的整体发电性能，搭建了系统性能测试平台，如图 14 所示，测试平台由可调速鼓风机、风速计、IW-TENG 装置以及 Keithley6514 静电计、外接负载电路和数据采集系统组成。系统的外接负载电路如图 15 所示，IW-TENG 所产生的两部分交流电分别通过两个整流桥整流为直流电给电容充电。该外接负载电路主要用于研究 IW-TENG 装置对于小型传感器的供能的可实现性，并测试装置对电容充电的速率。通过实验，IW-TENG 装置在 3 m/s 以上的风速下即可实现驱动。测试了在 3、4、6、8、10 m/s 共 5 组不同风速下的电学性能输出，测试结果如图 16。随着风速从 3 m/s 不断提高，短路电流由 10.7 μA 上升至 39.1 μA ，开路电压基本维持在 140 V。

实验测试了在风速为 4 m/s 时，IW-TENG 装置瞬时平均电流和功率与电阻关系，结果如图 17 所示。输出功率 $P = I^2 R$ ，由图 17 可知，在 50 M Ω 匹配负载下，最高瞬时输出功率达到 327 μW 。IW-TENG 装置输出电能 $W = \int_0^T I_t^2 R dt$ ，可得输出电能约为 9.8 mJ。IW-TENG 装置输入的机械能 $E = mR^2 (\pi n/30)^2/2$ [31]。其中：转子质量 m 为 0.268 kg；转子半径 R 为 0.082 m，4 m/s 下转子转速 n 为 86 r/min，可以得到 $E = 73$ mJ。因此，机械能到电能转换效率约为 13.4%。

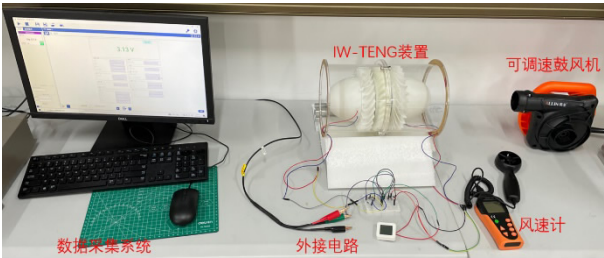


图 14 IW-TENG 系统性能测试平台
Fig. 14 The test rig for the performance of IW-TENG system

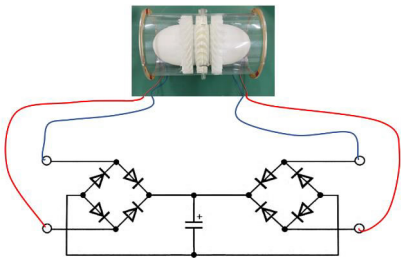


图 15 IW-TENG 外接负载电路图
Fig. 15 IW-TENG external load circuit diagram

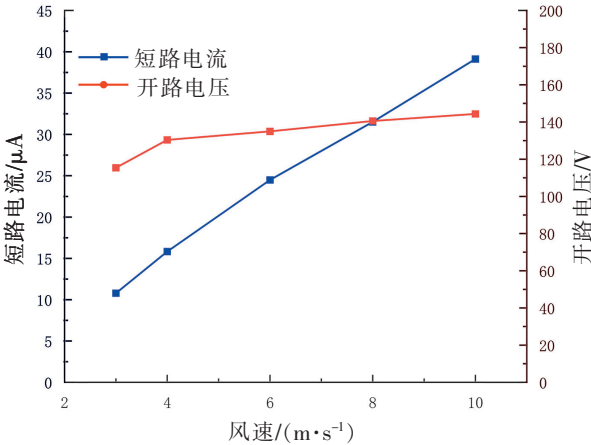


图 16 不同风速下 IW-TENG 装置电学性能输出
Fig. 16 Electrical performance output of the IW-TENG device at different wind speeds

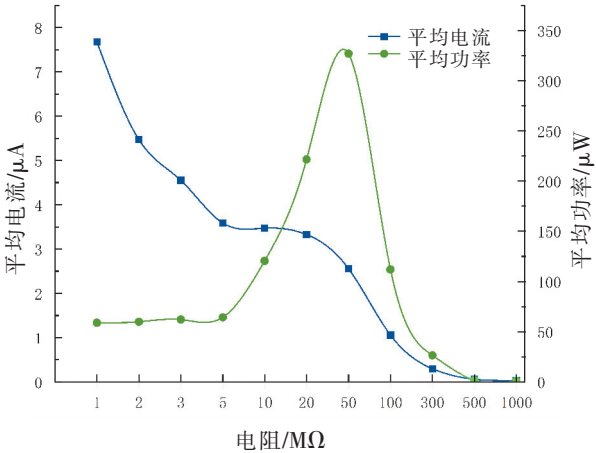


图 17 风速 4 m/s 下瞬时平均电流和功率-电阻关系曲线
Fig. 17 Instantaneous average current and power-resistance relationship profiles for the IW-TENG at the wind speed of 4 m/s

风速为4m/s下,对100,330,470,1000 μF 电容充电至2V进行实验测试,分别用时42,53,82,121s,充电曲线如图18所示。由于电容阻抗与电容容量成反比,小电容充电速度快于大电容。同时在3,4,6,8,10m/s风速下,对1000 μF 电容充电至2V进行实验测试,分别用时223,122,68,56,38s,充电曲线如图19所示。

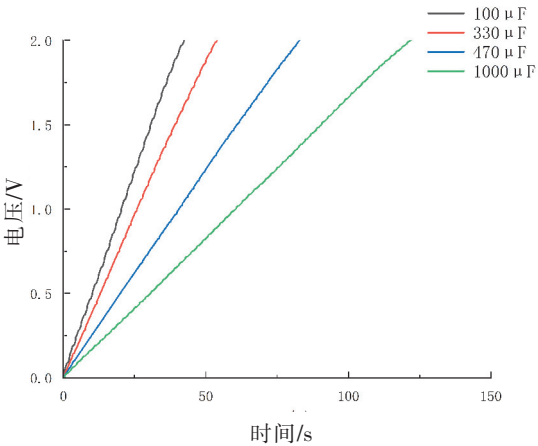


图 18 4 m/s 风速对 4 种不同电容充电曲线
Fig. 18 Charging curves for 4 different capacitors at a wind speed of 4 m/s

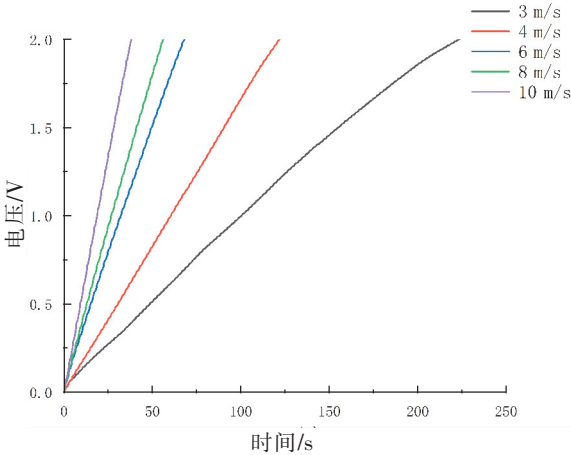


图 19 5 种不同风速对 1000 μF 电容充电曲线
Fig. 19 Charging curve of 1000 μF capacitor for 5 different wind speeds

通过设计电路并实验测试 IW-TENG 装置点亮 LED, 测试结果如图 20 所示, 成功驱动了 33 个 LED 灯的正常点亮, 可以看出 IW-TENG 在振荡水柱波浪能装置的应用对于波浪能的收集与利用具有一定的潜力。

3 结论

本文融合冲击式空气透平与摩擦纳米发电机的特点, 提出并设计出了一种基于冲击式空气透平的波浪能摩擦纳米发电机 (IW-TENG), 用于振荡水柱波浪能装置的能量转换。对 IW-TENG 进行了发电原理分析, 通过实验研究了不同介电材料、介电材料不同厚度及不同电极角度对发电性能的影响, 并进一步进行了 IW-TENG 装置整体性能分析实验。根据实验数据分析, 可以得到以下 3 点结论:

1) 在不同介电材料实验中, PTFE 性能最优。在介电材料不同厚度实验中, 当转速一定时, PTFE 的厚度越大, 电学性能输出越好。而当厚度一致时, 随着转速的提升, 开路电压无明显变化, 而短路电流提升较大, 该结果也验证了理论计算中开路电压的影响与覆盖电极的介电材料厚度相关。

2) 在不同电极角度实验中, 当电极角度逐渐减小时, 短路电流呈上升趋势, 而开路电压基本保持一致。

3) 建立了单向的风速实验平台, 通过风力驱动 IW-TENG 旋转。测试不同风速下的电学性能输出, 在 4 m/s 风速和最佳负载阻抗为 50 M Ω 匹配负载下, 最高瞬时输出功率可达 327 μ W, 机械能到电能转换效率约为 13.4%。在整流电路下, 进行了不同风速对 1000 μ F 电容以及同风速不同电容充电至 2 V 的实验, 并且测试点亮了 33 盏 LED。

综上所述, IW-TENG 能够收集气动能, 通过整流给电容充电后, 能够为小型传感器或设备提供电能使其正常运作。若将其应用于振荡水柱波浪能装置, IW-TENG 实现运转, 其对于波浪能的收集与利用具有一定发展潜力。

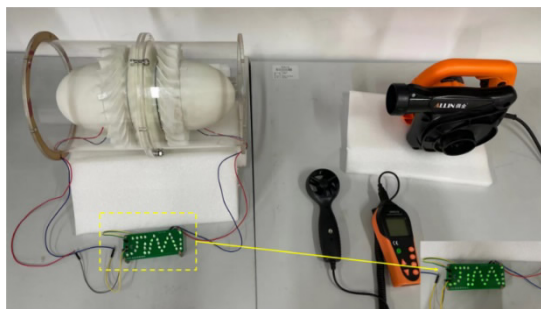


图 20 IW-TENG 点亮 LED 示意图

Fig. 20 Diagram of the IW-TENG lighting LED

[参考文献]

- [1] ELLABBAN O, ABU-RUB H, BLAABJERG F. Renewable energy resources; current status, future prospects and their enabling technology[J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2014, 39: 748-764.
- [2] WANG H, XU L, WANG Z. Advances of high-performance triboelectric nanogenerators for blue energy harvesting[J]. Nanoenergy Advances, 2021, 1(1): 32-57.
- [3] 崔琳, 李蒙, 白旭. 海洋可再生能源技术现状与发展趋势[J]. 船舶工程, 2021, 43(10): 22-33.
- [4] 王立国, 游亚戈, 张亚群, 等. 波浪能发电装置动力摄取系统研究进展[J]. 机床与液压, 2013, 41(1): 165-168.
- [5] 杨绍辉, 何宏舟, 李晖, 等. 点吸收式波浪能发电技术的研究现状与展望[J]. 海洋技术学报, 2016, 35(3): 8-16.
- [6] 杨绍辉, 何光宇, 何宏舟, 等. 多点直驱式波浪能发电系统浮子阵列的模型分析及数值模拟[J]. 水力发电学报, 2015, 34(9): 153-158.
- [7] 史宏达, 刘臻. 海洋波浪能研究进展及发展趋势[J]. 科技导报, 2021, 39(6): 22-28.
- [8] FALCO A F d. Wave energy utilization: a review of the technologies[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(3): 899-918.
- [9] FALCO A F O, HENRIQUES J C C. Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: a review[J]. Renewable energy, 2016, 85: 1391-1424.
- [10] 张亚群, 盛松伟, 游亚戈, 等. 波浪能发电技术应用发展现状及方向[J]. 新能源进展, 2019, 7(4): 374-378.
- [11] 李猛, 陈天祥, 伍儒康, 等. 中心管底部形状对浮标波能转换性能影响的实验研究[J]. 新能源进展, 2016, 4(1): 15-19.
- [12] 刘延俊, 武爽, 王登帅, 等. 海洋波浪能发电装置研究进展[J]. 山东大学学报(工学版), 2021, 51(5): 63-75.

- [13]游亚戈,李伟,刘伟民,等.海洋能发电技术的发展现状与前景[J].电力系统自动化,2010,34(14):1-12.
- [14]谢典,顾煜炯,余志文,等.波浪能发电装置的性能分析及综合评价[J].水力发电学报,2017,36(8):113-120.
- [15]吴必军,李猛,陈天祥,等.改进型中心管模型能量转换性能试验及样机设计[J].海洋工程,2017,35(1):97-104.
- [16]陈文创,张永良,俞慧峰,等.压水板式后弯管波浪能发电装置的试验研究[J].水力发电学报,2020,39(4):1-9.
- [17]梁贤光,孙培亚,王伟,等.往复流中双向导叶冲动透平模型性能试验研究[J].海洋工程,2001(4):84-93.
- [18]王中林,林龙,陈俊,等.摩擦纳米发电机[M].北京:科学出版社,2017:247.
- [19]张弛,付贤鹏,王中林.摩擦纳米发电机在自驱动微系统研究中的现状与展望[J].机械工程学报,2019,55(7):89-101.
- [20]FAN F R, TIAN Z Q, WANG Z L. Flexible triboelectric generator[J]. Nano Energy, 2012, 1(2):328-334.
- [21]WANG X, NIU S, YIN Y, et al. Triboelectric nanogenerator based on fully enclosed rolling spherical structure for harvesting low-frequency water wave energy[J]. Advanced Energy Materials, 2015, 5(24):1501467.
- [22]JIANG T, PANG H, AN J, et al. Robust swing-structured triboelectric nanogenerator for efficient blue energy harvesting[J]. Advanced Energy Materials, 2020, 10(23):2000064.
- [23]ZHANG D, SHI J, SI Y, et al. Multi-grating triboelectric nanogenerator for harvesting low-frequency ocean wave energy[J]. Nano Energy, 2019, 61:132-140.
- [24]CHENG P, LIU Y, WEN Z, et al. Atmospheric pressure difference driven triboelectric nanogenerator for efficiently harvesting ocean wave energy[J]. Nano Energy, 2018, 54:156-162.
- [25]ZHAO T, XU M, XIAO X, et al. Recent progress in blue energy harvesting for powering distributed sensors in ocean[J]. Nano Energy, 2021, 88:106199.
- [26]SETOGUCHI T, TAKAO M. Current status of self rectifying air turbines for wave energy conversion[J]. Energy Conversion and Management, 2006, 47(15/16):2382-2396.
- [27]王辰.振荡水柱式波能转换装置的未来与发展[J].船舶工程,2020,42(8):14-19.
- [28]陈启卷,高功正,岳旭辉,等.水电与新能源机遇与挑战:波浪能发电技术研究进展[J].水电与新能源,2020,34(8):1-6.
- [29]余杨,赵明仁,余建星,等.定常流和往复流下冲击式透平气动特性分析[J].水力发电学报,2021,40(3):103-112.
- [30]FALCAO A F O, HENRIQUES J C C, GATO L M C. Self-rectifying air turbines for wave energy conversion: a comparative analysis[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 91:1231-1241.
- [31]HAN J, FENG Y, CHEN P, et al. Wind-driven soft-contact rotary triboelectric nanogenerator based on rabbit fur with high performance and durability for smart farming[J]. Advanced Functional Materials, 2022, 32(2):2108580.

(责任编辑 马建华 英文审校 郑青榕)