

多对偶夹角开合式 TENG 的结构设计和发电性能分析

李 晖^{1,2,3}, 杨绍辉^{1,2,3}, 张 军^{1,2,3}, 纪志飞^{1,2,3}, 王士铎⁴

(1. 集美大学海洋装备与机械工程学院 福建 厦门 361021; 2. 福建省能源清洁利用与开发重点实验室 福建 厦门 361021;
3. 海洋可再生能源装备福建省高校重点实验室 福建 厦门 361021; 4. 中国石油大学(华东)新能源学院 山东 青岛 266580)

[摘要] 提出一种多对偶夹角开合式摩擦纳米发电机的结构设计, 将多个极板进行圆周布置, 使各极板与相邻极板均构成摩擦对偶, 形成多对偶夹角开合式发电结构。利用 COMSOL Multiphysics 有限元仿真软件研究了该新型摩擦纳米发电机的电势分布、开路电压、电极电荷量等参数随极板极角或时间的变化规律。结果表明: 1) 单对极板的开路电压随两板间极角的增大而增大; 2) N 对“串联”极板的开路电压均值是单对极板开路电压均值的 N 倍; 3) 极板的电极电荷量随两板夹角增大而缓慢增大; 4) 极板的主体区域电势分布较为均匀, 但在极板端部电势分布具有明显的边缘效应。

[关键词] 摩擦纳米发电机; 接触-分离; 夹角开合; 多对偶; 开路电压; 数值模拟

[中图分类号] P 743.2; TM 612

Structure Design and Electrical Performance Study of the Angular Contact-Separation TENG with Multi-Dielectric Plate Pairs

LI Hui^{1,2,3}, YANG Shaohui^{1,2,3}, ZHANG Jun^{1,2,3}, JI Zhifei^{1,2,3}, WANG Shiduo⁴

(1. School 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. Key Laboratory of Ocean Renewable Energy Equipment, Fujian Province University, Xiamen 361021, China;

4. College of New Energy, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

Abstract: A conception of the angular contact-separation TENG with multi dielectric pairs is proposed, in which a plurality of polar plates are arranged circumferentially so that each plate and its neighbouring plate are paired to form a friction dual thus all the plates forming a multi dual angular contact-separation structure to generate electricity. The variations of the parameters such as potential distribution, open circuit voltage, electrode charge of the proposed TENG with the polar angle or with time are studied by the finite element simulation software named COMSOL Multiphysics. The results show that: 1) the open circuit voltage of the single plate pair increases with the polar angle; 2) the average open circuit voltage of N plate pairs “in series” is N times of that of the single plate pair; 3) the amount of the electrode charge increases slowly with the angle between the two plates; 4) the potential distribution in the main area of the plate is relatively uniform, but it shows obvious edge effect at the end of the plate.

Keywords: triboelectric nanogenerator; contact-separation; angular contact-separation; multi-dielectric plate pairs; open circuit voltage; numerical simulation

[收稿日期] 2022-04-14

[基金项目] 国家自然科学基金项目 (51779104); 福建省自然科学基金项目 (2020J01694)

[作者简介] 李晖 (1974—), 女, 博士, 教授, 主要从事海洋可再生能源开发利用、摩擦纳米发电等方向研究。

<http://xuebaobangong.jmu.edu.cn/zkb>

0 引言

摩擦纳米发电机 (triboelectric nanogenerator, TENG) 是机械能发电和自驱动系统领域的一个里程碑式的发明^[1], 它利用摩擦起电和静电感应的耦合, 配合薄层式电极的设计, 实现能量的转换和电流的输出。由于 TENG 具有设计简单、质量轻、成本低、效率高等优点, 在微型电子产品、自供能传感器、波浪能利用等领域具有广阔的应用前景^[2]。

TENG 的基本工作模式有四种, 分别是: 接触-分离式^[3-6]、单电极式^[7-8]、水平滑移式^[9]和独立摩擦层式^[10-11]。其中, 接触-分离式是最基本、最常用的一种工作模式^[12-15], 它利用两种材料相接触而产生的表面静电荷所导致的电场来驱动电荷流动。垂直接触-分离式 TENG 有在两极间放置间隔物的结构^[16-17]、一极设置为拱形的结构^[18]、两极之间加装弹簧支撑的结构^[19-20], 以及多层叠加的结构^[20-21], 但这些都没有改变两极板平行放置的基本设计, 使得垂直接触-分离式 TENG 在进行极板拓展和集成时所需的空间变大, 不利于封装。而两极板呈夹角放置的夹角接触-分离式 TENG 的设计和研发则不多见。夹角接触-分离式 TENG 由于可沿周向进行多层拓展, 更节约空间和便于封装, 因而应用潜力巨大。但目前有关夹角接触-分离式 TENG 的设计仅见 Lin 等^[22]报道的用于收集风能的角形 TENG 结构, 该结构采用两块呈夹角放置的铝极板间加装 FEP 薄膜的形式, 通过风力引起的 FEP 薄膜颤振进行发电, 从而收集风能。由于实用时 FEP 薄膜易受破坏, 因此该结构仍存在改进空间。由此可见, 对于夹角接触-分离式 TENG 来说, 对其进行进一步的设计和研发非常有必要。

本文在单对偶夹角开合式 TENG 的基础上, 提出一种多对偶夹角开合式 TENG 的结构设计, 并用 COMSOL Multiphysics 有限元仿真软件研究了该新型 TENG 的发电特性。

1 多对偶夹角开合式摩擦纳米发电机的结构设计

本文提出的多对偶夹角开合式 TENG 主要用于波浪能发电, 其结构如图 1 所示。

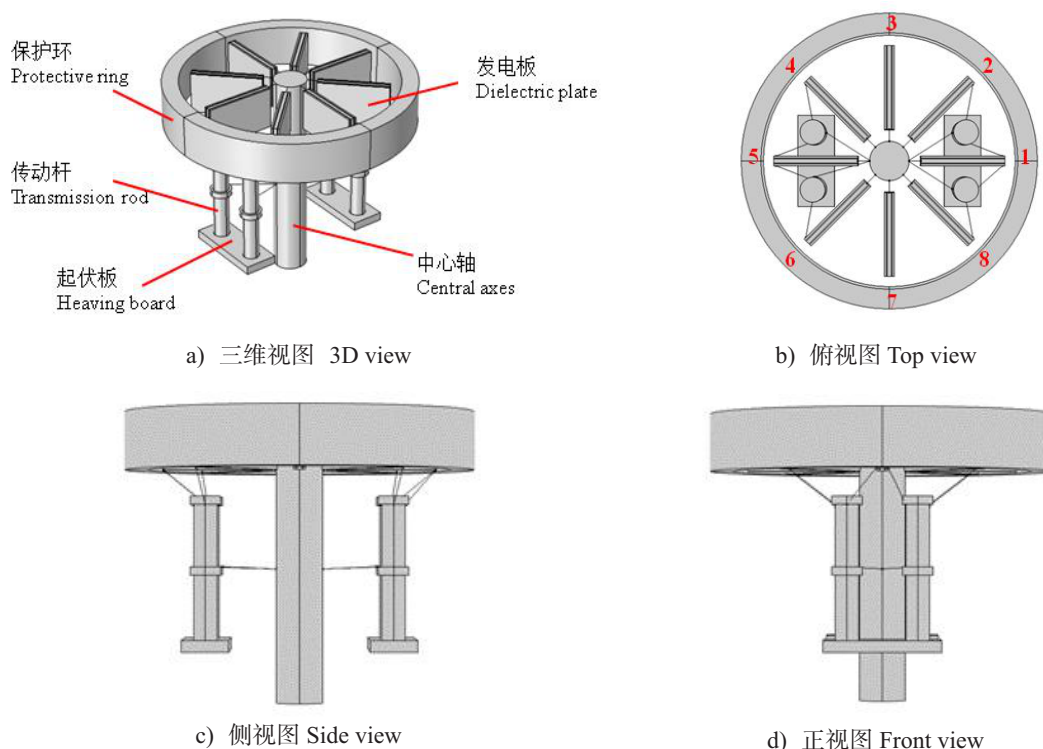


图1 多对偶夹角开合式TENG的结构示意图

Fig.1 Structural diagram of the angular contact-separation TENG with multi-dielectric plate pairs

图 1a 显示, 该发电机由发电板、中心轴、保护环、传动杆和起伏板等部分组成。发电板是由介电材料、电极材料和电绝缘材料构成的平板。本设计采用 8 块发电板, 其中 4 块为固定不动的约束板, 其余 4 块为可绕中心轴进行转动的活动板。如图 1b 所示, 编号为 1, 3, 5, 7 的板为固定板, 编号为 2, 4, 6, 8 的板为活动板, 固定板和活动板交替放置。中心轴是位于结构中心的一根圆柱, 它除了作为旋转轴外, 还起到支撑整个发电设备并使之保持悬浮不动的作用。保护环则是一环状外壳, 起到保护极板的作用。传动杆位于中心轴的四周, 四个传动杆的上部通过柔索机构分别与四个活动板相连, 下部则与起伏板相连。起伏板是位于传动杆下部的一个平板, 其随波浪做起伏运动。当起伏板把波浪的垂直往复运动传给传动杆时, 与传动杆相连的柔索将拉动活动板循环靠向与其相邻的两块固定板中的一块, 这样, 就把传动杆随波浪所做的垂直方向的往复运动, 转化为活动板绕中心圆柱的旋转运动。

每一块发电板均由两种极性相差比较大的材料 (本研究选取 PET 和 Kapton)、两个铜电极和一块电绝缘板 (FR-4 epoxy 1080 glass weave) 构成, 具体材料分布如图 2 所示。各极板的材料构成顺序是一致的, 两侧外表面为 PET 或 Kapton, 可以和相邻极板的 Kapton 或 PET 构成摩擦对偶, 这样就可以保证每一块极板和相邻极板都能够构成对偶摩擦层, 从而形成单对偶夹角开合式 TENG。采用固定板和活动板间隔布置的好处在于, 不论活动板处于何种位置, 总有相应的互补固定板与之感应, 从而产生更多的电荷量。

从上述工作原理可以看出, 该多对偶夹角开合式 TENG 的主要结构特点是具有多个叠加的摩擦对偶, 从而可进一步提高发电效率, 同时由于极板呈圆周布置, 更利于节省空间和封装制造。除了可用于波浪能发电, 还可以应用于任何使“起伏板”上下移动或者使活动极板绕旋转轴转动的场合, 因此具有较大的应用潜力。此外, 固定极板和活动极板的数量也可以依据实际情况进行增加或者减少, 因此该结构具有很强的拓展性。

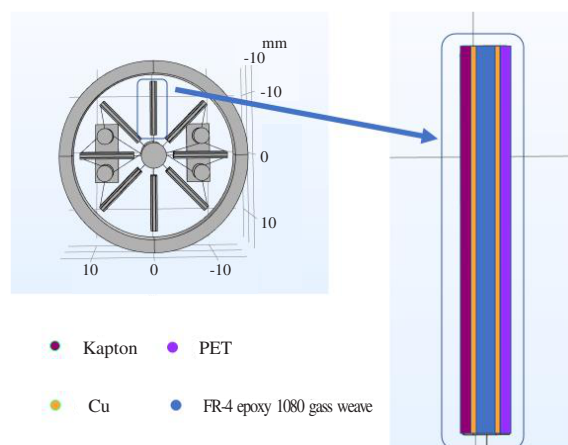


图2 多对偶夹角开合式TENG的发电板材料分布图
Fig.2 Material distribution of the dielectric plate in the angular contact-separation TENG with multi-dielectric plate pairs

2 多对偶夹角开合式摩擦纳米发电机的数值模拟

模拟所采用的软件为 COMSOL Multiphysics 有限元仿真软件, 所依据的控制方程为麦克斯韦方程组^[2]。多对偶夹角开合式 TENG 的几何模拟模型如图 3 所示。

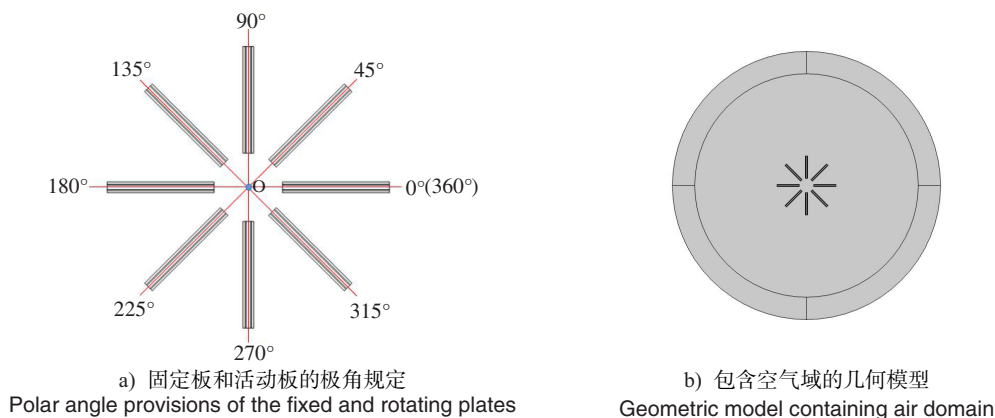


图3 多对偶夹角开合式TENG的几何模型 (模拟用)

Fig.3 Geometric model of the angular contact-separation TENG with multi-dielectric plate pairs (for simulation)

图3是图1结构的简化。模型中只考虑固定极板和活动极板,为了表示模拟中各极板的实时位置,以旋转轴中心所在处为极坐标原点,以固定极板1中心线所在位置为 0° 极角,各极板的极角角度沿逆时针方向增加,初始时刻各极板的极角如图3a所示。为了模拟静电场,在多对偶极板的外围设置了一个外层为无限域的空气域,如图3b所示。

参考波浪运动特点,四个活动板——板2、4、6、8的极角随时间 t 的变化分别设置为简谐函数 $45 + 50\sin(2\pi/5t)$ 、 $135 - 50\sin(2\pi/5t)$ 、 $225 + 50\sin(2\pi/5t)$ 、 $315 - 50\sin(2\pi/5t)$ 。图4示出了4个活动板的极角随时间的变化曲线(设4个固定极板的极角保持固定不变,与初始时刻相同)。由图4可见,每个活动极板都在与其相邻的两个固定极板间做周期性往复运动,根据模拟设置,其运动周期为5 s。

需要说明的是,为便于研究,本文模拟的活动极板运动仅为绕旋转轴的转动,并未考虑平动。在这种情况下,由于各极板呈周向排列放置且两两之间留有活动空间,当活动极板和相邻固定极板之间夹角为 0° 时,二者并不能达到完全贴合。而且,在上述极角运动的设置中,每对极板在靠近极限位置时其夹角并非 0° ,而是 -5° (如图4所示)。在实际使用中,可通过柔索传动机构的设计使活动极板在运动中达到与相邻固定极板完全贴合接触,从而产生初始的摩擦电荷。在本文的模拟中,直接指定初始电荷密度。

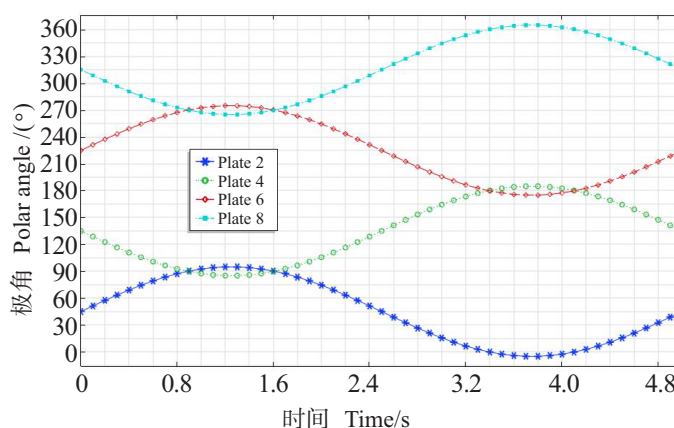


图4 活动板极角随时间的变化曲线

Fig.4 Curves of the polar angles of the rotating plates with time

几何建模完成后,即可进行网格划分,然后设置必要的边界条件,最后利用有限元方法进行模拟计算。基本模拟参数如表1所示。

表1 多对偶夹角开合式 TENG 的模拟参数取值

Tab.1 Simulation parameters of the angular contact-separation TENG with multi-dielectric plate pairs

项目 Item	数值 Value
PET 相对介电常数 Relative permittivity of PET	3.0
Kapton 相对介电常数 Relative permittivity of Kapton	3.0
空气相对介电常数 Relative permittivity of air	1.0
真空绝对介电常数 Vacuum absolute permittivity/($F \cdot m^{-1}$)	8.85×10^{-12}
PET 极板尺寸 Size of PET plate/(mm × mm)	10 × 1
Kapton 极板尺寸 Size of Kapton plate/(mm × mm)	10 × 1
Cu 电极尺寸 Size of Cu electrode/(mm × mm)	10 × 0.5
PET 极板表面电荷密度 Surface charge density of PET plate/($\mu C \cdot m^{-2}$)	1.2
Kapton 极板表面电荷密度 Surface charge density of Kapton plate/($\mu C \cdot m^{-2}$)	-1.2

3 模拟结果与分析

3.1 空间电势分布

图5所示为8块极板在1个周期内4个典型位置的空间电势分布。由图5可见,当活动板向固定板靠近时,铜电极表面感应电荷逐渐减少,两电极间的电势差减小;随着活动板和固定板之间的距离逐渐增大,感应电荷逐渐增多,两电极间的电势差增大。当活动板随海浪进行往复旋转时,各介电极板对的电势差就会发生周期变化,从而造成开路电压的周期性变化。需要注意的是,某活动极板在靠

近某固定极板的同时, 它必远离另一个相邻固定极板, 因此该结构中各介电极板对的电势变化相位是不同的, 在实际应用中应先进行整流, 然后再进行串联或并联利用。

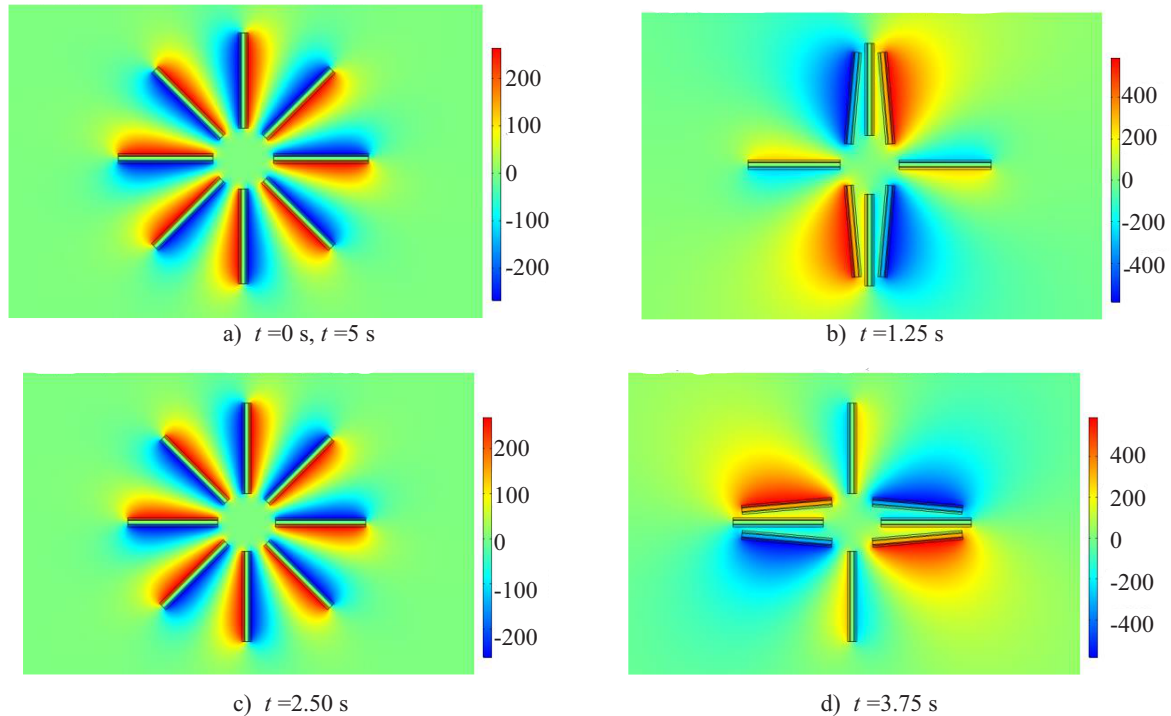


图5 极板在不同位置时的空间电势分布(单位: V)

Fig.5 Spatial potential distribution of the plates at different positions(unit:V)

3.2 金属电极电荷量的变化

电极上感应电荷的变化是摩擦纳米发电机电压输出的根本原因, 本文以四个铜电极层为例研究极板上感应电荷量的变化。这四个铜电极分别是: 板 1 的 Kapton 薄膜背部的铜电极 (记为 “Plate 1-Kapton-Cu”)、板 2 的 PET 薄膜背部的铜电极 (记为 “Plate 2-PET-Cu”)、板 2 的 Kapton 薄膜背部的铜电极 (记为 “Plate 2-Kapton-Cu”) 和板 3 的 PET 薄膜背部的铜电极 (记为 “Plate 3-PET-Cu”)。由多对偶夹角开合式 TENG 的工作原理可知, 前两者 (即板 1 和板 2 电极对) 和后两者 (即板 2 和板 3 电极对) 可以分别构成一对有电势差的电极, 从而输出电压。

图 6a 显示了四个铜电极上电荷量随时间的变化。从中可明显看出, “Plate 1-Kapton-Cu” 和 “Plate 2-PET-Cu” 的电荷量呈对称分布, 即电荷量数量相等而极性相反; “Plate 2-Kapton-Cu” 和 “Plate 3-PET-Cu” 也同样如此。这正是因为它们分别为感应电极对所致。图 6a 中还显示, “Plate 1-Kapton-Cu” 和 “Plate 2-PET-Cu” 的电荷量在 $t = 3.75$ s 时刻达到最小值, 由图 4 可知, 此时板 1 和板 2 之间的夹角为最小, 故感应电荷量最小。同理, “Plate 2-Kapton-Cu” 和 “Plate 3-PET-Cu” 的电荷量在 $t = 1.25$ s 时刻达到最小值, 也是因为在此时刻板 2 和板 3 之间的夹角为最小。需要注意的是, 在两极板之间夹角较小的半个周期 (2.50 s) 内, 极板电荷量会发生较大变化; 而在两极板之间夹角较大的半个周期内, 极板电荷量维持比较稳定的状态。比如, 对于板 1 和板 2 构成的电极对来说, 当 $t = 2.5 \sim 5$ s, 即两极板夹角为 $-5^\circ \sim 45^\circ$ 时, 极板电荷量变化较大; 而当 $t = 0 \sim 2.5$ s, 即两极板夹角为 $45^\circ \sim 95^\circ$ 时, 极板电荷量变化不大。

图 6b 示出了 “Plate 2-PET-Cu” 和 “Plate 1-Kapton-Cu” 上的电极电荷量随板 2 极角 (也即板 1 和板 2 的夹角, 因板 1 是固定不动的) 变化的规律。从中可见, 最小电荷量发生在板 2 极角为 -5° 的时候。总体而言, 电荷量随极角增大而缓慢增大, 且在 $-5^\circ \sim 0^\circ$ 之间有较大的变化, 这与上面的分析是一致的。

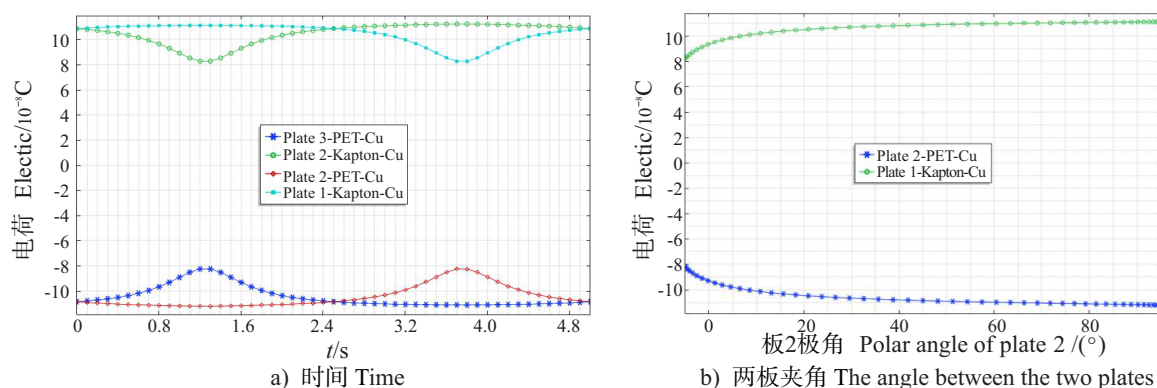


图6 电极电荷量的变化

Fig.6 Variation of the electrode charge

3.3 极板开路电压的变化

图 7a 所示为单对极板和 8 对“串联”极板的开路电压随时间的变化曲线, 此处的“串联”不仅指 8 对极板的位置关系为连续周向排列, 还代表两两极板间产生的开路电压可进行求和相加。从图 7a 中可见, 对于单对极板来说, 开路电压均随时间呈正弦变化, 这与活动极板极角的正弦变化规律相符合。且板 1 和板 2 (plate 1-2)、板 3 和板 4 (plate 3-4)、板 5 和板 6 (plate 5-6)、板 7 和板 8 (plate 7-8) 这 4 对极板的开路电压变化规律完全一致, 而另外 4 对板的变化相位则与之相反。这是因为, 当某活动极板靠近某相邻的固定极板时, 它必远离另一个相邻的固定极板, 因此相邻的两对极板的开路电压相位呈相反状态。对于 8 对极板来说, 其开路电压虽随时间呈周期变化, 变化规律相同, 但后者均值是前者均值的 8 倍, 可以预计, N 对极板的“串联”开路电压均值将会是单对极板开路电压均值的 N 倍。

图 7b 示出了板 1 和板 2 之间的开路电压随板 2 极角的变化。由图 7b 可见, 该极板对的开路电压随极板 2 的极角增大而明显增大, 而在 $-5^\circ \sim 0^\circ$ 和 $90^\circ \sim 95^\circ$ 两个角度范围有更明显的增幅。需要指出的是, 在本文的模拟中, 当板 2 的极角为 0° 时, 板 1 和板 2 为有一定间距的垂直接触式 TENG, 故两者仍有电压输出。这与两板完全接触且夹角为 0° 的情况不同。在后者情况下由于电荷屏蔽作用, 输出电压为 0。

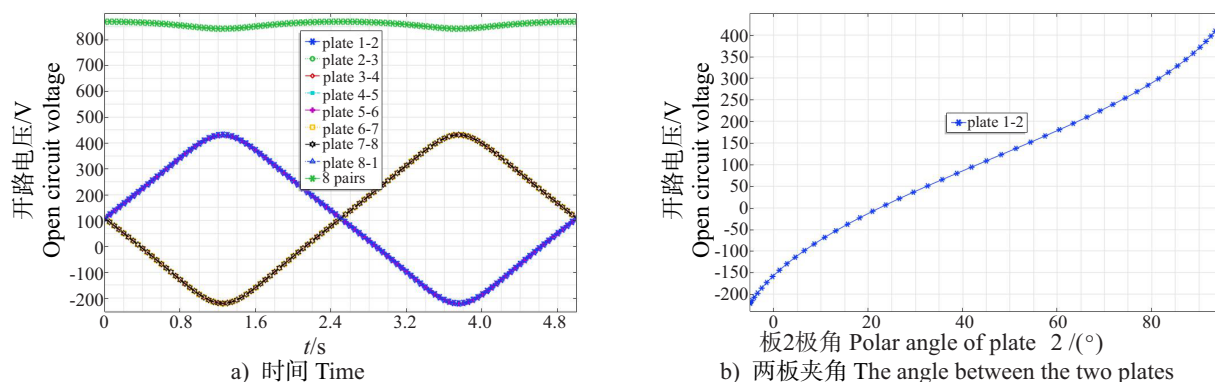


图7 极板开路电压的变化

Fig.7 Variation of the open circuit voltage

3.4 电势沿极板长度的变化

图 8 所示为板 1 的 Kapton 薄膜和板 2 的 PET 薄膜上的电势沿板长的变化, 靠近旋转轴的板端设为坐标 0, 不同颜色曲线代表不同时刻的电势分布 (因篇幅限制, 未展示时刻图例)。由图 8 可见, 在大部分时间内, 极板除两端外的大部分区域电势差别不大, 但在靠近板端部的位置, 电势分布发生明显的边缘效应, 这是因为极板的面积大小有限^[24]。因此, 在实际应用中, 应避免将电路连接在极

板端部,这一点与垂直接触式 TENG 不同。另外,随着时间的推移,两极板的整体电势发生变化,这也意味着所输出的开路电压随极板间夹角的变化而变化。

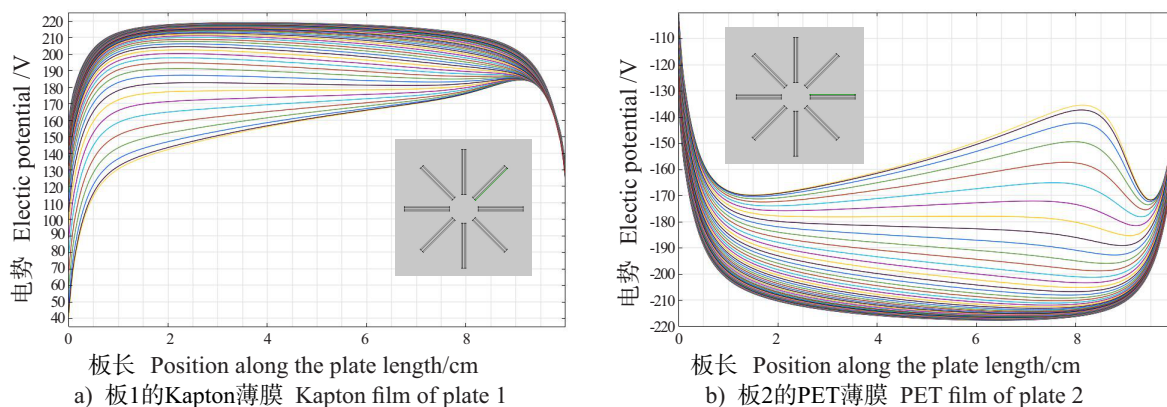


图8 极板电势沿板长的变化

Fig.8 Variation of electrode potential along plate length

综上所述,本文所提出的多对偶夹角开合式摩擦纳米发电机能够连续收集垂直方向的波浪能,根据不同的波浪频率和振幅大小产生相应的电能,具有较好的适用性。并且,由于结构中摩擦对偶层数的增加,所产生的电能较之单对摩擦层有大幅度提高。

4 结论

本文提出了一种多对偶夹角开合式摩擦纳米发电机的结构设计,通过 COMSOL Multiphysics 有限元仿真计算,研究了该新型摩擦纳米发电机的电势分布、开路电压、电极电荷量等参数随极角或时间的变化规律。主要结论如下:

- 1) 单对极板的开路电压随极角增大而增大;
- 2) N 对“串联”极板的开路电压均值是单对极板开路电压均值的 N 倍;
- 3) 电极电荷量随两板夹角增大而缓慢增大;
- 4) 极板的主体区域电势分布较为均匀,但在极板端部电势分布具有明显的边缘效应。

本文所提出的多对偶夹角开合式 TENG 具有摩擦对偶层数多、开路电压大、可拓展性强、发电连续等特点,在波浪能发电等领域具有一定的应用潜力。需要指出,本文的模拟研究主要集中在,对所提出的新型 TENG 极板断路时的电势分布、开路电压以及短路时的电极电荷量进行分析,而有关外电路连接负载后的各电参数的变化规律,以及装置在实际应用中的各种问题,将待后续研究。

[参考文献]

- [1] FAN F R, TIAN Z Q, WANG Z L. Flexible triboelectric generator[J]. Nano Energy, 2012, 1(2): 328-334.
- [2] 王中林, 林龙, 陈俊, 等. 摩擦纳米发电机[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [3] NIU S M, WANG S H, LIN L, et al. Theoretical study of contact-mode triboelectric nanogenerators as an effective power source[J]. Energy & Environmental Science, 2013, 6(12): 3576-3583.
- [4] ZI Y L, WU C S, DING W B, et al. Maximized effective energy output of contact-separation-triggered triboelectric nanogenerators as limited by air breakdown[J]. Advanced Functional Materials, 2017, 27(24): 1700049.
- [5] CHU Y, LIU H L, ZHONG J W, et al. Monitoring vital signs of respiration and heart beat simultaneously via a single flexible piezoelectret sensor[C]//32nd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS). Seoul: IEEE, 2019: 607-610.
- [6] CHU Y, CAO Z Y, XU J K, et al. Theoretical study of nanogenerator with resistive load and its sensing performance as a motion sensor[J]. Nano Energy, 2021, 81: 105628.

- [7] NIU S M, LIU Y, WANG S H, et al. Theoretical investigation and structural optimization of single-electrode triboelectric nanogenerators[J]. *Advanced Functional Materials*, 2014, 24(22): 3332-3340.
- [8] NIU S M, WANG S H, LIU Y, et al. A theoretical study of grating structured triboelectric nanogenerators[J]. *Energy & Environmental Science*, 2014, 7(7): 2339-2349.
- [9] NIU S M, LIU Y, WANG S H, et al. Theory of sliding-mode triboelectric nanogenerators[J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(43): 6184-6193.
- [10] WANG S H, XIE Y N, NIU S M, et al. Freestanding triboelectric-layer-based nanogenerators for harvesting energy from a moving object or human motion in contact and non-contact modes[J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(18): 2818-2824.
- [11] JIANG T, CHEN X Y, HAN C B, et al. Theoretical study of rotary freestanding triboelectric nanogenerators[J]. *Advanced Functional Materials*, 2015, 25(19): 2928-2938.
- [12] CHU Y, HAN R X, MENG F Y, et al. Theoretical study on the output of contact-separation triboelectric nanogenerators with arbitrary charging and grounding conditions[J]. *Nano Energy*, 2021, 89(A): 106383.
- [13] NIU S M, WANG Z L. Theoretical systems of triboelectric nanogenerators[J]. *Nano Energy*, 2015, 14: 161-192.
- [14] NIU S M, WANG S H, LIN L, et al. Theoretical study of contactmode triboelectric nanogenerators as an effective power source[J]. *Energy & Environmental Science*, 2013, 6(12): 3576.
- [15] NIU S M, LIU Y, WANG S H, et al. Theory of sliding-mode triboelectric nanogenerators[J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(43): 6184-6193.
- [16] ZHU G, PAN C F, GUO W X, et al. Triboelectric-generator-driven pulse electrodeposition for micropatterning[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(9): 4960-4965.
- [17] WANG S H, MU X J, WANG X, et al. Elasto-aerodynamics-driven triboelectric nanogenerator for scavenging air-flow energy[J]. *ACS Nano*, 2015, 9(10): 9554-9563.
- [18] WANG S H, LIN L, WANG Z L. Nanoscale triboelectric-effect-enabled energy conversion for sustainably powering portable electronics[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(12): 6339-6346.
- [19] ZHU G, LIN Z H, JING Q S, et al. Toward large-scale energy harvesting by a nanoparticle-enhanced triboelectric nanogenerator[J]. *Nano Letters*, 2013, 13(2): 847-853.
- [20] XIAO T X, LIANG X, JIANG T, et al. Spherical triboelectric nanogenerators based on spring-assisted multilayered structure for efficient water wave energy harvesting[J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(35): 1802634.
- [21] BAI P, ZHU G, LIN Z H, et al. Integrated multilayered triboelectric nanogenerator for harvesting biomechanical energy from human motions[J]. *ACS Nano*, 2013, 7(4): 3713-3719.
- [22] LIN H B, HE M H, JING Q S, et al. Angle-shaped triboelectric nanogenerator for harvesting environmental wind energy[J]. *Nano Energy*, 2018, 56: 269-276.
- [23] 黄美珍, 张湉湉, 谢红, 等. 非平行接触分离式摩擦纳米发电机的理论研究[J]. *大学物理*, 2018, 37(11): 58-63, 65.
- [24] 施佳炜. 基于摩擦纳米发电技术的点吸收式波浪能发电装置研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.

(责任编辑 朱雪莲 英文审校 郑青榕)