

引文格式:

岳文基, 余守骏, 阮越, 等. 基于可编程摩擦电原理的晃动式脉冲发生器 [J]. 集成技术, 2023, 12(2): 64-74.

Yue WJ, Yu SJ, Ruan Y, et al. Shaking pulse generator based on programmable triboelectric nanogenerators [J]. Journal of Integration Technology, 2023, 12(2): 64-74.

基于可编程摩擦电原理的晃动式脉冲发生器

岳文基¹ 余守骏¹ 阮越² 董鹏³ 陈支通^{1,4} 宋冰^{1,4} 王昊^{1*}

¹(中国科学院深圳先进技术研究院 深圳 518055)

²(剑桥大学 Wellcome-MRC 代谢科学研究所 剑桥 CB2 0QQ)

³(霍华德·休斯医学研究所珍利亚研究园区 阿什本 VA 20147)

⁴(国家高性能医疗器械创新中心 深圳 518000)

摘 要 摩擦纳米发电机具有结构简单、适用性广的优点, 近年来是热门的研究内容。但在实际应用中, 摩擦纳米发电机仍面临诸多技术难题: 传统摩擦纳米发电机的能量来自摩擦产生的电荷, 但摩擦过程中产生的热量会转换成内能, 这极大程度降低了能量转换效率, 且容易损耗摩擦层材料, 进而影响摩擦发电机的耐久性; 由于物理接触的摩擦力存在, 其机械结构需要较大的外界驱动力, 当外界只有较为轻微的机械晃动(如人走路)时, 难以有效驱动相应的机械结构, 无法实现高频操作; 由于摩擦力和器件输出能力均与器件的摩擦面积成正比, 因此多层堆叠的器件会随着有效面积的增大而难以驱动。该文基于可编程摩擦纳米发电机的原理, 提出了一种晃动式脉冲发生器, 通过摇晃小尺寸的器件可实现百伏级的脉冲电压输出。即使器件的摩擦层材料相同, 如聚四氟乙烯薄膜, 仍能实现较高的电压输出, 且摩擦层不需要接触式摩擦, 可将器件的摩擦能量损耗最小化, 降低驱动器件所需的能量阈值, 提高能量转化效率。

关键词 可编程摩擦电原理; Bennet 倍增电路; 脉冲发生器

中图分类号 TM 31 文献标志码 A doi: 10.12146/j.issn.2095-3135.20221013002

收稿日期: 2022-10-13 修回日期: 2022-10-26

基金项目: 广东省基础与应用基础研究项目(2019A1515110843, 2022A1515011129); 深圳市国际合作项目(GJHZ20200731095206018)

作者简介: 岳文基, 硕士研究生, 研究方向为摩擦纳米发电机; 余守骏, 硕士研究生, 研究方向为神经科学; 阮越, 副研究员, 研究方向为可穿戴设备研发; 董鹏, 副研究员, 研究方向为系统生物学; 陈支通, 研究员, 研究方向为等离子体医疗器械研发; 宋冰, 研究员, 研究方向为生物电信号的生物医学应用; 王昊(通讯作者), 副研究员, 研究方向为神经科学和柔性器件研发, E-mail: hao.wang@siat.ac.cn.

Shaking Pulse Generator Based on Programmable Triboelectric Nanogenerators

YUE Wenji¹ YU Shoujun¹ RUAN Yue² DONG Peng³ CHEN Zhitong^{1,4}
SONG Bing^{1,4} WANG Hao^{1*}

¹(Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

²(The Wellcome-MRC Institute of Metabolic Science, University of Cambridge, Cambridge CB2 0QQ, UK)

³(Howard Hughes Medical Institute/Janelia Research Campus, Ashburn, VA 20147, USA)

⁴(National Innovation Center for Advanced Medical Devices, Shenzhen 518000, China)

*Corresponding Author: hao.wang@siat.ac.cn

Abstract Nowadays, triboelectric nanogenerators have shown their potential in energy harvesting research with far-reaching impacts, since they have simple structure and wide applicability. However, several drawbacks have yet to be overcome for further extension of its application and commercialization. One major issue is friction, the origin of energy generation and a major factor in limiting energy conversion efficiency. The friction induces energy loss by heat dissipation and also causes the loss of friction layers, lowering the device's durability. Meanwhile, the friction also increases the threshold force required to drive the device. A multi-layer stacked device with increased friction area will be difficult to be powered by slight shaking generated by wind or human walking. This study proposes a shaking pulse generator based on the principle of programmable Triboelectric Nanogenerator to solve the above-mentioned issues. Even if the material of the friction layers is the same, such as the PTFE film, hundreds of volts can still be achieved. Unlike the traditional theory, there is no real contact friction which minimizes energy loss, reduces driving energy, and improves energy conversion efficiency.

Keywords programmable triboelectric nanogenerators; Bennet doubler; pulse generator

Funding This work is supported by Basic and Applied Basic Research Program of Guangdong Province (2019A1515110843, 2022A1515011129), Shenzhen International Cooperation Project (GJHZ20200731095206018)

1 引言

目前, 微型化、便携化和智能化的电子设备正逐渐走进人们的日常生活。但电池驱动的电子设备仍存在更替频繁、回收难度较大及对环境不友好等问题, 自供电可持续能源的开发问题亟待解决。发展可持续能源, 提高能源利用率, 已成为关系世界工业化和经济发展的重要问题。

近年来, 摩擦纳米发电机^[1-5]是热门的研究

内容, 其工作机理是在两种不同电负性的介电材料背面贴附电极, 当两种介电材料产生摩擦或接触时, 会产生静电荷, 使两个电极之间产生电动势^[6-7], 从而产生能量。摩擦纳米发电机结构简单, 适合柔性制造, 适用性广, 已被广泛应用于各类柔性传感和能量收集^[8-12]。

然而, 摩擦纳米发电机因其工作机理, 不可避免地产生了影响能量效率的两个问题: (1) 摩擦纳米发电机所需的摩擦, 既是系统能量的

来源, 又是消耗系统能量的主要途径。因此, 在摩擦的过程中, 收集的大量能量会转化成热能, 造成能量浪费。(2) 水平滑动式器件^[13-16]或接触分离式器件^[17]所需的机械结构, 在驱动时需要较大的驱动力, 因此, 在许多只有轻微震动或晃动的应用场景中, 器件往往难以驱动。目前, 关于摩擦纳米发电机性能的研究, 主要集中在摩擦材料^[18-22]和装置结构^[23-27]方面。重庆大学的胡陈果老师课题组介绍了一种非接触的悬浮移动式摩擦纳米发电机^[28], 可有效避免器件磨损问题, 耐用性较好。该器件通过引入倍压电路和二极管, 使动子电极与定子电极之间形成正反馈, 实现输出电荷连续自增以提高输出。加利福尼亚大学的陈俊课题组提出了一种基于旋转动力学的手驱动型摩擦纳米发电机^[29], 可通过旋转利用低频和线性生物机械能量, 还可通过周期性地轻柔地向外拉动和向内松开弦线, 使器件的运行转速达 10 000 r/min 以上, 输出功率为 0.85 W/m²。对于无接触式器件, 可以避免接触摩擦导致的摩擦界面热损失和磨损, 减少摩擦电器件表面电荷密度的降低。

基于可编程摩擦纳米发电机原理^[30], 本课题组开发了一种可实现电荷、能量循环放大的晃动式脉冲发生器, 并对其操作程序及无接触式结构进行研究, 可有效解决上述影响能量效率的两个问题。此外, 该器件还具备以下优点: 在电极和开关数量、开关操作较少, 物理实现难度较小的基础上, 通过电荷在极板之间的产生、转移和输出, 可实现高效的能量增益; 在机械结构方面, 建立一个可以物理实现该程序的无接触式结构, 使其满足便携性和可操作性, 并将其从单层单组结构推广到多层结构, 丰富了机械结构设计; 在材料选择方面, 选用多种绝缘材料, 具有较高的发电量。该装置采用开关放电的形式控制放电, 可产生具有高瞬时电压的脉冲。此外, 该装置还具有良好的便携性和可操作性, 其多层结构可以

定量地控制输出电压的峰值大小, 适用性较广、扩展性较强。

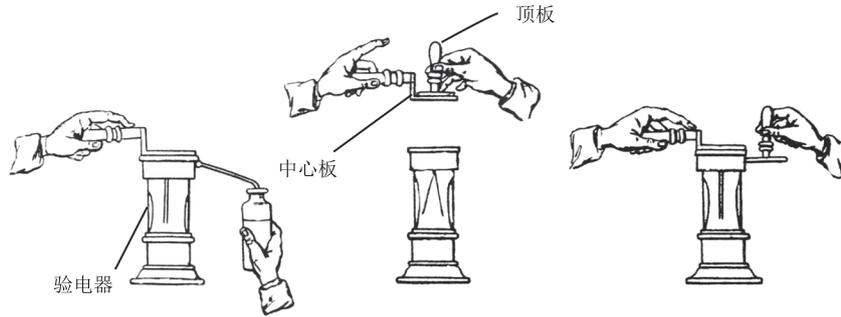
2 基于可编程摩擦电原理的晃动式脉冲发生器的工作原理

1787 年, 亚伯拉罕·班纳特牧师发明了一个设计巧妙的装置——Bennet 倍增电路, 用于研究空气的电学状态, 如图 1(a) 所示。其结构简单, 包括 1 个验电器、1 个中心板和 1 个顶板。将初始电荷加到验电器后, 如图 1(a) 所示, 通过操作中心板与顶板的接触和分离, 可实现电荷连续倍增。

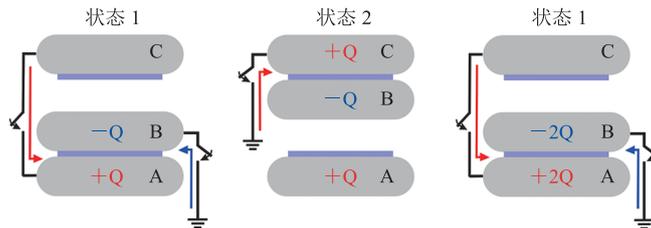
使用可编程摩擦电原理对其进行解释, 如图 1(b) 所示, Bennet 倍增电路的初始版本有 3 个电极, 分别为对应验电器的电极 A、中心板的电极 B 和顶板的电极 C。假设, 电极 A 带有初始电荷 +Q, 将电极 B 与电极 A 靠近, 同时将电极 B 接地, 由于静电感应效应, 电极 B 将带有与电极 A 等量但电性相反的电荷, 将电极 B 断开后, 电极 B 上仍带有 -Q 的电荷, 同理, 可在电极 C 上产生 +Q 的电荷。然后, 将电极 B 与电极 A 靠近, 将电极 A 与电极 C 连通, 同时将电极 B 接地, 此时电极 C 上的电荷流向电极 A, 电极 A 上将带有 +2Q 的电荷, 电极 B 上将带有 -2Q 的电荷。通过上述操作, 电极 A 和电极 B 可获得翻倍的电荷量, 从而实现电荷倍增。

Bennet 倍增电路的原始程序需要接地, 难以实现独立的小型器件, 因此, 本实验增加了一个电极 D, 使程序无须接地就能保持原有的电荷倍增能力, 具体结构组成如图 2 所示。在该程序中, 共有 4 个电极: 电极 A、电极 B、电极 C 和电极 D, 各个电极间为绝缘材料, 另有 4 个开关。

假设, 电极 A 和电极 B 上带有一定的初始电荷, 电荷量均为 Q, 极性相反。在步骤(i)中, 电



(a) Bennet 倍增电路示意图



(b) 可编程原理的 Bennet 倍增电路

图 1 Bennet 倍增电路初始版本的原理图

Fig. 1 Original Bennet doubler

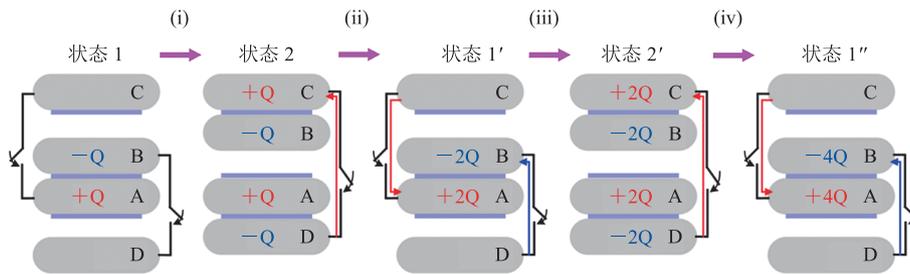


图 2 功率倍增程序

Fig. 2 Program of the Bennet doubler-based P-TENGs

极 B 与电极 C 相对, 电极 A 与电极 D 相对, 此时电极 B 和电极 C、电极 A 和电极 D 分别形成一个电容。同时打开电极 C 和电极 D 之间的开关, 由于静电感应效应, 相同电荷量但极性相反的电荷将在电极 C 和电极 D 之间转移, 电极 C 将带有 +Q 的电荷, 电极 D 将带有一 Q 的电荷。在步骤 (ii) 中, 电极 A 与电极 B 相对, 此时电极 A 和电极 B 形成一个电容。同时打开电极 A 和电极 C、电极 B 和电极 D 的开关, 电极 C 的电荷将转移至电极 A, 电极 A 将带有 +2Q 的电荷, 电极 D 的电荷将转移至电极 B, 电极 B 将带有一 2Q 的

电荷。此时, 电极 A 和电极 B 可获得翻倍的电荷量(从 +Q 到 +2Q)。同理, 经过步骤 (iii) 和步骤 (iv), 电荷将再次翻倍(从 +2Q 到 +4Q)。

两个相邻的步骤, 如步骤 (i) 和步骤 (ii) 或步骤 (iii) 和步骤 (iv), 可视作一个周期, 电极 A 和电极 B 上的电荷可以在每个周期中翻倍。因此, 这两个电极可被认为是一个电荷泵, 电荷可以累积在电荷泵中。随着电荷泵中电荷的累积, 电极 C 和电极 D 上感应电荷的数量将增加, 从而提高输出的能量。只要电极 A 和电极 B 不接地, 电极泵的电荷就能保持。实际上, 在每个相邻步骤的

中间状态，如步骤(i)到步骤(ii)，4个电极相互独立、彼此分离(假设电极与电极不重叠，忽略边缘效应，如图3所示)。在这种状态下，所有电极都面对空气，所有开关都关闭。在该程序中，共有3种可能的状态，往复式操作更适合在物理结构中实现该程序。

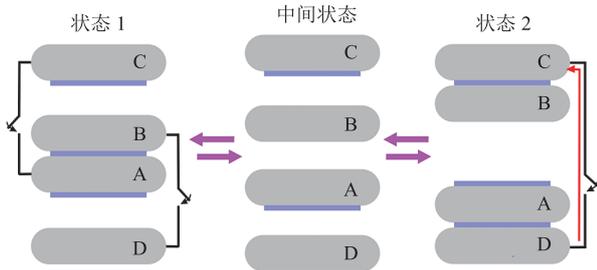


图3 功率倍增程序的3种状态

Fig. 3 Three states of the Bennet doubler-based P-TENGs

受 Bennet 倍增电路启发的可编程摩擦纳米发电机，通过简单的循环结构或往复式结构，可实现类似于电荷泵的累积效果，达到功率倍增。可编程摩擦纳米发电机的结构更加简洁，逻辑更加清晰，不仅可轻松实现功率倍增效果，而且不需要始终接地，具有很强的整体性。

基于功率倍增程序的原理和使用情景，本实验用水平滑动式的模型结构解释说明该功率倍增程序的运行，如图4所示。由图4可知，程序在两种状态间往复运行，电荷在电极A和电极B上不断倍增。

3 基于可编程摩擦电原理的晃动式脉冲发生器的设计与制备

3.1 基于可编程摩擦电原理的晃动式脉冲发生器的原型机设计

基于可编程摩擦电原理进行便携式摩擦发电机开发，设计出能够实现上述程序的原型机，如图5所示。

该原型机包括：定子，其上设置有相互绝缘的A极板和C极板，并覆盖有绝缘材料；转子，其上设置有相互绝缘的B极板和D极板，也覆盖有绝缘材料；4个极板(A极板、B极板、C极板和D极板)的接线柱，分别与A极板、B极板、C极板和D极板电性连接；3个开关。

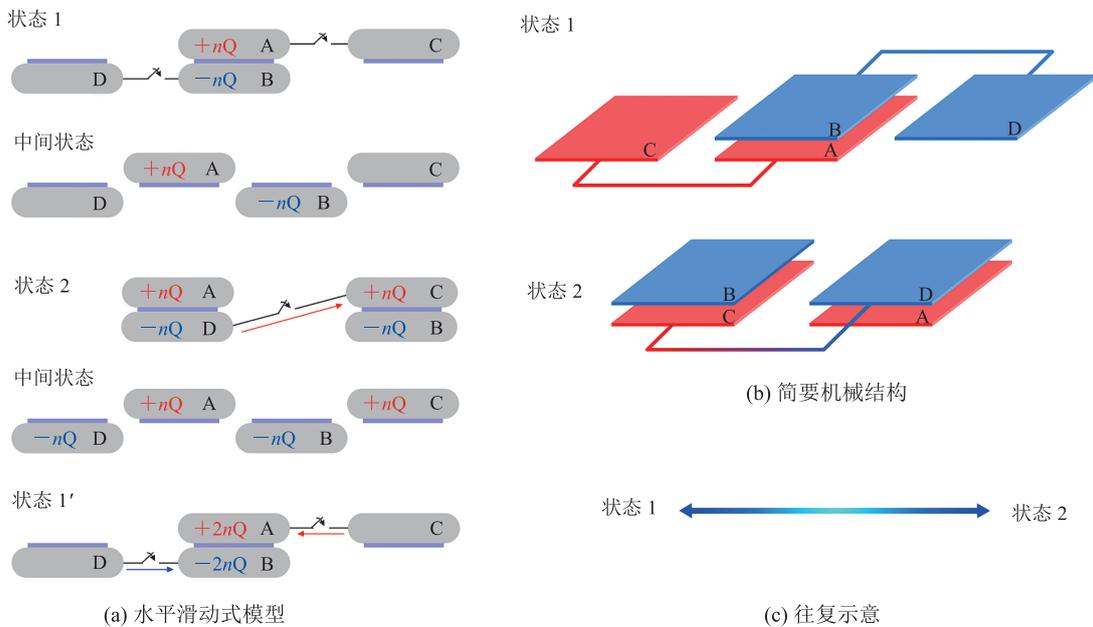


图4 功率倍增程序的图解

Fig. 4 The diagram of the Bennet doubler-based P-TENGs

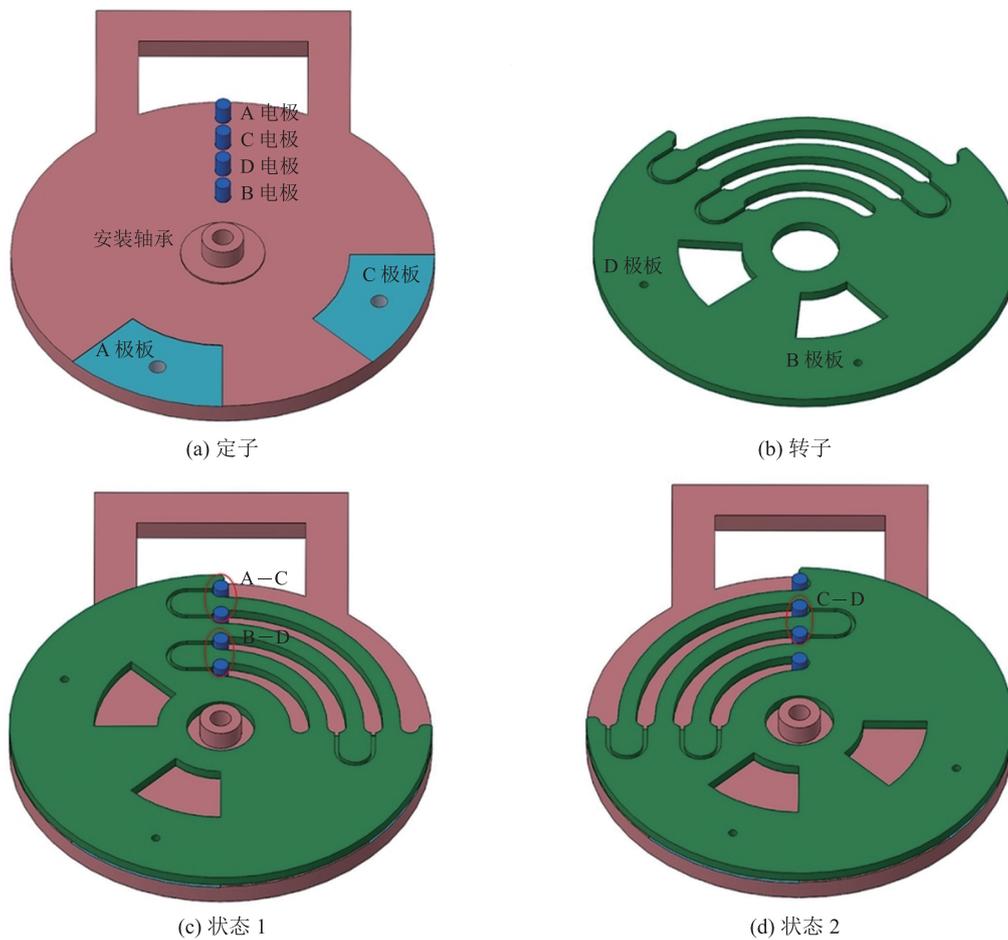


图 5 器件的组件和状态

Fig. 5 Components and states

A 极板、C 极板、A 极板的接线柱和 C 极板的接线柱同时设于定子上, 且对应连接; B 极板和 D 极板同时设于转子上, 分别与定子上的 B 极板的接线柱和 D 极板的接线柱对应连接。

根据其机械结构示意图, 制备相应的器件, 绝缘材料为 0.03 mm 厚的聚四氟乙烯薄膜, 安装后的原型机如图 6 所示, 转动角度为 90°。

3.2 基于可编程摩擦电原理的晃动式发电机的原型机

将器件连接到外部负载为 1 MΩ 的测试电路中, 测试结果如图 7(a) 所示。由图 7(a) 可知, 电荷输出值从一个非常小的初始电荷逐渐增加, 该装置能够使电荷加倍, 电荷在电极 A 和电极 B

上逐渐积累, 使器件的输出电压整体呈现倍增的趋势, 器件的最大输出电压约为 80 V。

分别选用厚度为 0.03 mm、0.05 mm 和 0.10 mm 的聚四氟乙烯薄膜作为介电层材料, 晃动器件的频率为 3 Hz。测试结果如图 7(b) 所示, 其击穿电压分别为 80 V、105 V 和 155 V 左右。经计算, 单次输出能量分别为 2.28×10^{-8} J, 2.84×10^{-8} J 和 3.74×10^{-8} J, 等效电容分别为 0.357 nF、0.403 nF 和 0.570 nF。

理论上, 随着操作的进行, 电荷可以无限积累在上下极板上, 但在实际测试中, 电压输出性能被限制在一定范围内。操作数次后, 上下极板间将会发生击穿。除绝缘材料的种类和厚度影

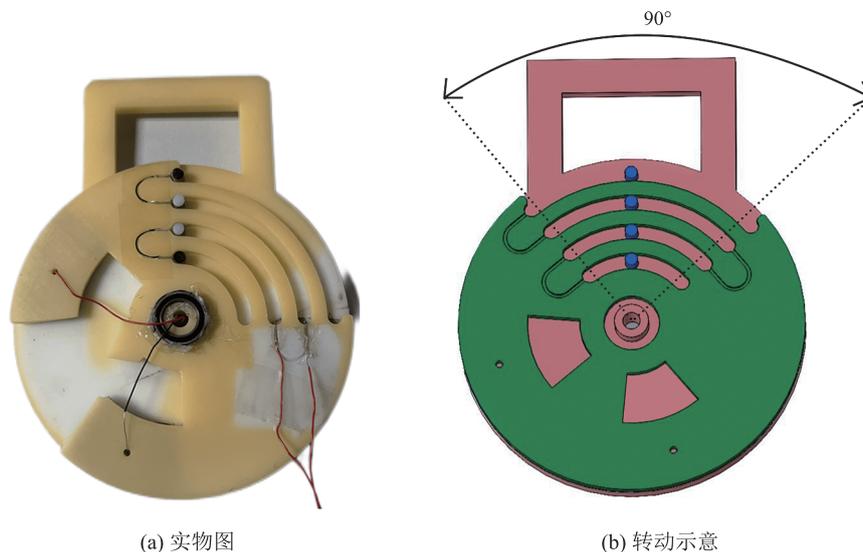


图6 模型实物图及转动示意图

Fig. 6 Device and the diagram of rotation

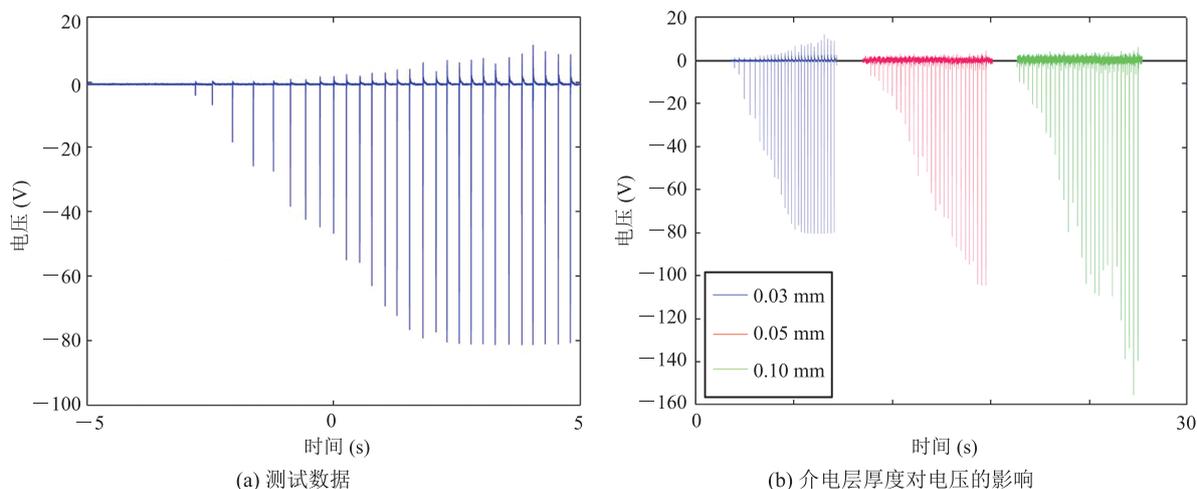


图7 原型机测试结果

Fig. 7 Prototype test results

响击穿电压外，当上下极板错开时，电荷倾向于集中在极板边缘，极板边缘单位长度上电荷密度增大，也容易发生击穿，这是限制器件输出能力的主要因素。理论上，可通过在电极表面镀膜，提高器件的击穿电压，进一步提高器件的输出能力，如图8所示。

3.3 基于可编程摩擦电原理的晃动式脉冲发生器

由于该装置为层状晃动式结构，如图9(a)所示，为最大化利用其内部空间，充分发挥结构优

势，本实验采用多层堆叠电极的形式。如图9(b)所示，其输出性能与层数直接相关，增加或减少电极的层数，可定量控制输出电压的峰值。

该晃动式脉冲发生器的电极部分由柔性电路板制成，相同电极部分，如所有电极A位于同一片柔性电路板上，将4部分电极装配到模具中，使用金属弹簧作为器件的开关，组装完成的多层器件如图9(c)所示。分别装配1~5层的电极后，在相同测试环境下，晃动器件的频率保持为

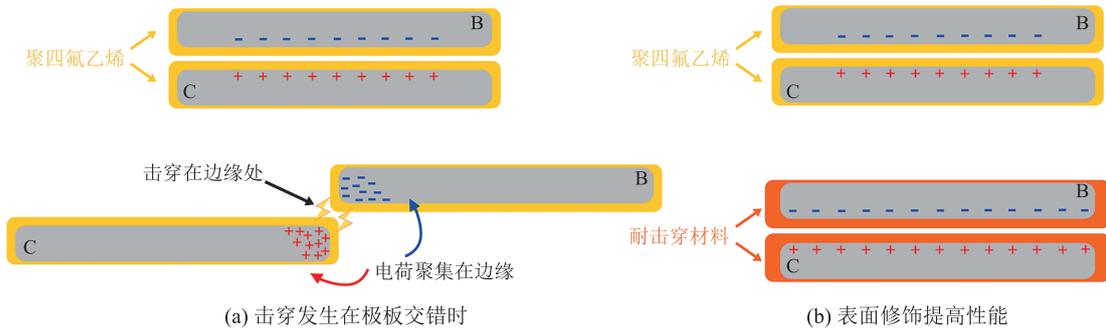


图 8 提高击穿电压措施

Fig. 8 Measures to increase breakdown voltage

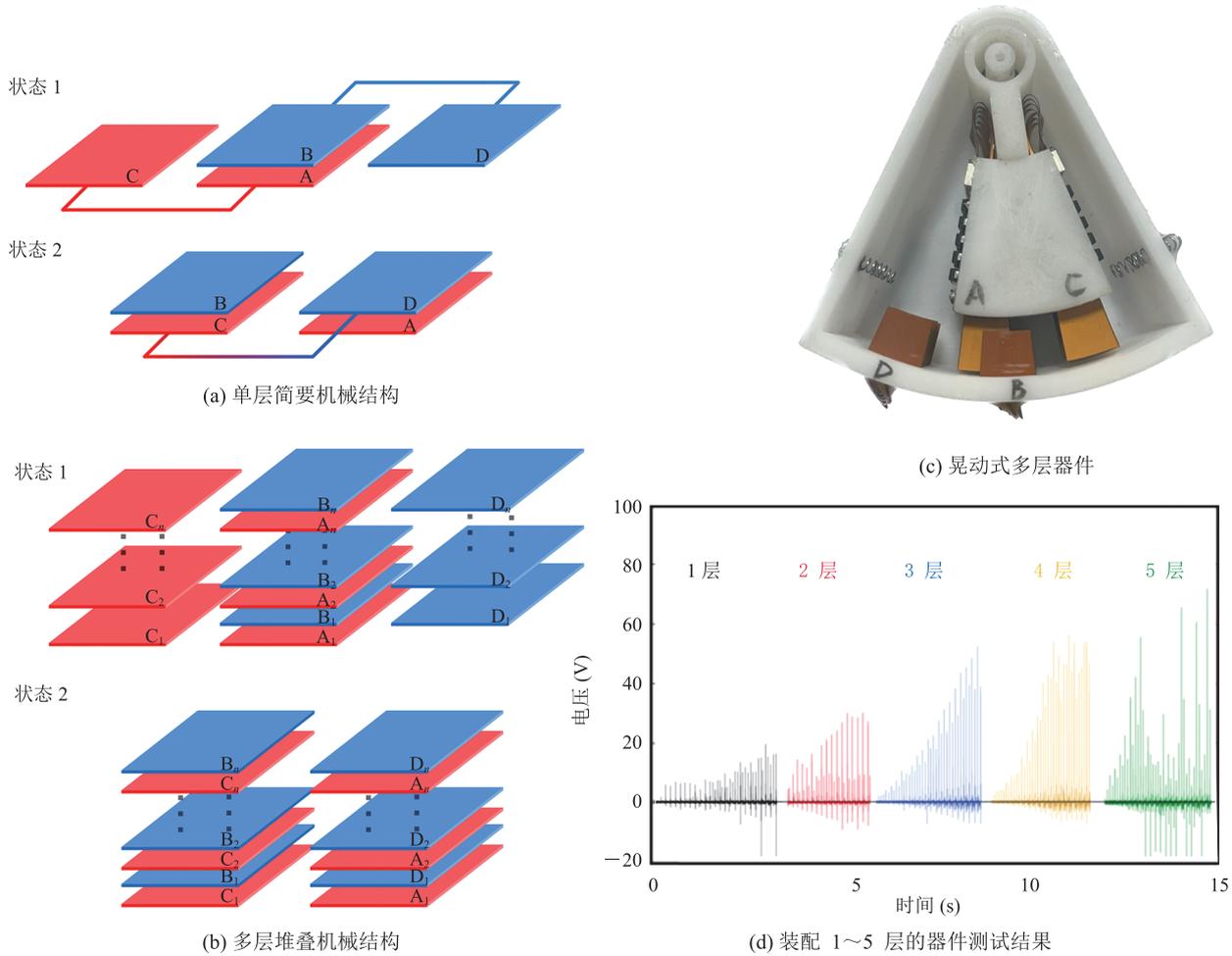


图 9 多层摩擦电器件及测试结果

Fig. 9 Multilayer Bennet doubler-based P-TENGs and test result

3 Hz, 测试结果如图 9(d) 所示。测试结果显示, 1~5 层器件的峰值电压为 25 V、40 V、68 V、70 V 和 95 V。

由于器件每层形成的电容并联, 随着层数不断增加, 电荷的累积量将随之增加, 输出能力提高。测试结果显示, 随着测试层数的增加, 1~3

层器件的峰值电压近乎线性增加,但是在 4 层和 5 层器件的测试中,峰值电压的增加不明显。由此可知,当层数增多时,器件中发生击穿情况更严重。

4 讨 论

在多层摩擦电器件中,当电机层间发生击穿时,与之并联的所有电极上的电荷将转移至该层被击穿消耗掉,而基于可编程摩擦电原理的器件由于击穿导致累积在电荷泵的电荷泄漏,限制了后续操作时器件的输出能力。该现象类似于木桶效应,当增加层数时,虽然理论上的输出能力会提高,但是实际上器件输出的不稳定性也相应提高,导致实际输出能力并未按照理论预计提高。

因此,多层器件中仍存在以下问题:(1)电极层间击穿问题,可通过选择介电常数较高的材料或增加介电层厚度等方法解决;(2)木桶效应问题,可通过在电极间增加二极管,防止电荷反向流失,或提高器件精度,保证层间间距,以防层间电极搭接或错位。综上所述,晃动式脉冲发生器的设计需考虑电极结构、介电层选择、整流电路和机械结构多种因素。

目前,国内外类似的无摩擦的摩擦电器件研究较少,其中较为类似的是重庆大学的胡陈果老师课题组的工作^[28],与之相比,本文的器件同为无接触式结构,但本实验将电荷倍增和开关放电结合到器件操作中,在所需电极数和开关数最少、无需额外电路的条件下,可实现功率倍增,同时可以拓展到同层分组和多层堆叠结构中。未来,仍需进一步解决多层摩擦电器件漏电击穿的问题,以实现更高电压和功率。

5 总 结

基于可编程摩擦发电机概念及 Bennet 倍增

电路,本文提出了一种功率倍增装置的原理,设计出多种摩擦电器件。该器件结构简洁,包括 4 个电极和 3 个开关等。操作过程简单,装置在两个状态间交替运行,电荷在极板之间产生、转移和输出,在两个特定的电荷泵上积累,通过开关放电的形式,可产生具有高瞬时电压的脉冲;采用转子相对于定子摆动的结构,实现电极间的相对及开关组件的控制;摩擦层无需真正摩擦,摆动方式所需外界驱动力较小;该装置不需要接地操作,极大程度地简化了使用条件。测试结果显示,通过数次晃动,器件可轻易输出百伏级的脉冲电压,适用于多种场景,如收集人体生物能,结合自供能和脉冲式放电的特性,将其应用于自供能神经电刺激器。本研究为摩擦纳米发电机用于能量收集及自供能脉冲发生器提供了一种新的思路和应用。

参 考 文 献

- [1] Fan FR, Tian ZQ, Wang ZL. Flexible triboelectric generator [J]. *Nano Energy*, 2012, 1(2): 328-334.
- [2] Niu S, Wang ZL. Theoretical systems of triboelectric nanogenerators [J]. *Nano Energy*, 2015, 14: 161-192.
- [3] Wang ZL. Triboelectric nanogenerator (TENG)—sparking an energy and sensor revolution [J]. *Advanced Energy Materials*, 2020, 10(17): 2000137.
- [4] Wang ZL. On Maxwell's displacement current for energy and sensors: the origin of nanogenerators [J]. *Materials Today*, 2017, 20(2): 74-82.
- [5] Wang ZL. On the first principle theory of nanogenerators from Maxwell's equations [J]. *Nano Energy*, 2020, 68: 104272.
- [6] Wang ZL, Wang AC. On the origin of contact-electrification [J]. *Materials Today*, 2019, 30: 34-51.
- [7] Lin SQ, Xu L, Chi Wang A, et al. Quantifying electron-transfer in liquid-solid contact

- electrification and the formation of electric double-layer [J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 399.
- [8] Xu LQ, Xuan WP, Chen JK, et al. Fully self-powered instantaneous wireless humidity sensing system based on triboelectric nanogenerator [J]. *Nano Energy*, 2021, 83: 105814.
- [9] Zhao J, Wang D, Zhang F, et al. Real-time and online lubricating oil condition monitoring enabled by triboelectric nanogenerator [J]. *ACS Nano*, 2021, 15(7): 11869-11879.
- [10] Luo Y, Wang ZH, Wang JY, et al. Triboelectric bending sensor based smart glove towards intuitive multi-dimensional human-machine interfaces [J]. *Nano Energy*, 2021, 89: 106330.
- [11] Liu ST, Wang H, He TYY, et al. Switchable textile-triboelectric nanogenerators (S-TENGs) for continuous profile sensing application without environmental interferences [J]. *Nano Energy*, 2020, 69: 104462.
- [12] Liu GL, Chen J, Tang Q, et al. Wireless electric energy transmission through various isolated solid media based on triboelectric nanogenerator [J]. *Advanced Energy Materials*, 2018, 8(14): 1703086.
- [13] Bai Y, Xu L, Lin SQ, et al. Charge pumping strategy for rotation and sliding type triboelectric nanogenerators [J]. *Advanced Energy Materials*, 2020, 10(21): 2000605.
- [14] Jiang T, Chen XY, Yang KD, et al. Theoretical study on rotary-sliding disk triboelectric nanogenerators in contact and non-contact modes [J]. *Nano Research*, 2016, 9(4): 1057-1070.
- [15] Niu SM, Liu Y, Wang SH, et al. Theory of sliding-mode triboelectric nanogenerators [J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(43): 6184-6193.
- [16] Shao JJ, Liu D, Willatzen M, et al. Three-dimensional modeling of alternating current triboelectric nanogenerator in the linear sliding mode [J]. *Applied Physics Reviews*, 2020, 7(1): 011405.
- [17] Niu SM, Wang SH, Lin L, et al. Theoretical study of contact-mode triboelectric nanogenerators as an effective power source [J]. *Energy & Environmental Science*, 2013, 6(12): 3576.
- [18] Zhang JT, Hu SM, Shi ZJ, et al. Eco-friendly and recyclable all cellulose triboelectric nanogenerator and self-powered interactive interface [J]. *Nano Energy*, 2021, 89: 106354.
- [19] Nie SX, Fu Q, Lin XJ, et al. Enhanced performance of a cellulose nanofibrils-based triboelectric nanogenerator by tuning the surface polarizability and hydrophobicity [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 404: 126512.
- [20] Zhang Q, Jiang CM, Li XJ, et al. Highly efficient raindrop energy-based triboelectric nanogenerator for self-powered intelligent greenhouse [J]. *ACS Nano*, 2021, 15(7): 12314-12323.
- [21] Li YH, Zhao ZH, Gao YK, et al. Low-cost, environmentally friendly, and high-performance triboelectric nanogenerator based on a common waste material [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(26): 30776-30784.
- [22] Zhao ZH, Zhou LL, Li SX, et al. Selection rules of triboelectric materials for direct-current triboelectric nanogenerator [J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 4686.
- [23] Wei XL, Zhao ZH, Zhang CG, et al. All-weather droplet-based triboelectric nanogenerator for wave energy harvesting [J]. *ACS Nano*, 2021, 15(8): 13200-13208.
- [24] Zhang Y, Zeng QX, Wu Y, et al. An ultra-durable windmill-like hybrid nanogenerator for steady and efficient harvesting of low-speed wind energy [J]. *Nano-Micro Letters*, 2020, 12(1): 175.
- [25] Liu X, Zhang MY, Yang Z, et al. Alternating

- current electroluminescent device powered by triboelectric nanogenerator with capacitively driven circuit strategy [J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(7): 2106411.
- [26] Feng HQ, Bai Y, Qiao L, et al. An ultra-simple charge supplementary strategy for high performance rotary triboelectric nanogenerators [J]. *Small*, 2021, 17(29): 2101430.
- [27] Chen JH, Wei XL, Wang BC, et al. Design optimization of soft-contact freestanding rotary triboelectric nanogenerator for high-output performance [J]. *Advanced Energy Materials*, 2021, 11(44): 2102106.
- [28] Long L, Liu WL, Wang Z, et al. High performance floating self-excited sliding triboelectric nanogenerator for micro mechanical energy harvesting [J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 4689.
- [29] Zou YJ, Xu J, Fang YS, et al. A hand-driven portable triboelectric nanogenerator using whirligig spinning dynamics [J]. *Nano Energy*, 2021, 83: 105845.
- [30] Wang H, Zhu JX, He TYY, et al. Programmed-triboelectric nanogenerators—a multi-switch regulation methodology for energy manipulation [J]. *Nano Energy*, 2020, 78: 105241.