液滴发电机的新充电模式及影响因素

夏雨晨, 周致富*, 宋德培, 黄羿琿, 高雨轩, 陈斌

西安交通大学, 动力工程多相流国家重点实验室, 西安 710049

* 联系人, E-mail: zfzhou@mail.xjtu.edu.cn

2021-08-08 收稿, 2021-09-24 修回, 2021-09-26 接受, 2021-09-28 网络版发表

国家自然科学基金(52176163)、国家重点研发计划政府间国际科技创新合作重点专项(2017YFE0134200)和航空基金民发专项(2019ZB070002)资助

摘要 基于液滴撞击摩擦起电效应的液滴发电机(droplet-based electricity generator, DEG)可以将雨水等液滴的机械能转换成电能. 近年来, 其因具有广泛的应用前景而受到密切关注. 但是, 目前DEG仍存在带电荷能力与输出电压上限较低等问题. 本文发现了一种适用于DEG的新充电模式, 即在通过液滴撞击聚四氟乙烯(polytetrafluoroethylene, PTFE)薄膜进行充电的基础上, 对PTFE薄膜表面附加往复摩擦, 以对其进行预充电. 相比单纯的液滴撞击充电, 新充电模式可以使DEG的输出电压提高约2.3倍, 进而可以匹配高压用电环境. 本文研究了摩擦工具、液滴下落频率与高度以及停止工作时长这4种因素对DEG发电效果的影响规律. 研究结果可为提高DEG发电效果提供新思路与新方法.

关键词 摩擦起电, 液滴发电机, 聚四氟乙烯薄膜, 新充电模式

电能被广泛应用于日常生活与生产制造等各个领域, 是科学技术发展、社会经济飞跃的主要动力. 由于当今世界化石能源日益短缺^[1], 且为了实现“碳达峰、碳中和”的目标, 依靠传统化石能源产生电能的方式将面临重大挑战. 传统水力发电主要利用电磁发电机将水体的机械能转变为电能, 具有相对清洁、可再生以及来源广泛等优点. 但是这种方式需要充足的供水量, 并且能量转换装置体积大、系统复杂, 并不适合收集雨滴机械能等小规模能量. 高空中的雨滴具有不可忽视的机械能, 一滴雨水降落到地面时蕴含约2.5 mJ的动能^[2]. 将这种低品位、小规模的能量加以回收, 便可以应用于户外照明、便携式移动电子设备供电及汽车玻璃发电等场合. 这既具有广阔的应用前景, 又能达到节能减排的目的.

正是因为雨滴摩擦发电具有巨大的潜在应用前景, 研究者对液滴发电机(droplet-based electricity generator,

DEG)开展了广泛的研究. 很早就有研究报道了水滴撞击聚四氟乙烯(polytetrafluoroethylene, PTFE)表面并滑动时的带电现象^[3]. 研究人员利用这种现象研制了一种由PTFE薄膜、氧化铟锡(indium tin oxide, ITO)玻璃与铝电极组成的液滴发电机^[4], 并从数学上建立各种模型分析了DEG的起电机理, 例如液滴发电机的数值分析^[5]、液固接触带电及电双层形成中的电子转移研究^[6]、摩擦纳米发电机的接触状态和空气击穿研究^[7]以及液滴发电机的动力学研究^[8]等. 许多研究对影响DEG工作效果的因素作出了分析, 如不同发电材料(聚丙烯/多孔聚四氟乙烯/聚丙烯驻极体)电荷储存稳定性的异同^[9]、湿度和压力对DEG的影响^[10]、微尺度表面粗糙度对水滴接触带电的影响^[11]以及不同官能团对聚合物接触带电的贡献^[12]等. 近年来, DEG有了许多新的发展, 产生了诸如基于连续接触带电与静电感应过程的具有超疏水和自清洁特性的新型摩擦电纳米发电

引用格式: 夏雨晨, 周致富, 宋德培, 等. 液滴发电机的新充电模式及影响因素. 科学通报, 2021, 66: 4477–4484

Xia Y C, Zhou Z F, Song D P, et al. New charging mode of a droplet generator and its influencing factors (in Chinese). Chin Sci Bull, 2021, 66: 4477–4484, doi: 10.1360/TB-2021-0803

机^[13]、通过表面润湿梯度驱动使液滴自我推进运动并形成可靠发电的DEG^[14]，以及能够同时进行发电和集水的超疏水液滴磁电混合系统^[15]等新型发电装置。另外，除了通过液滴与聚合物表面摩擦发电，新型的DEG还可通过其他形式发电，如利用水分子与碳层之间的相互作用以及蒸发的水在多孔碳片中的流动产生电压^[16]、利用液滴与液膜的相互作用发电^[17]、通过液滴与微孔聚合物的相互作用感应发电^[18]，甚至在任何人造或天然材料的表面(如PTFE、玻璃、木材、芦荟、蝉翅、石头等)都能通过液滴实现发电^[19]。DEG具有很广泛的应用前景，如持续地为便携式电子设备提供动力^[20]、通过电润湿的方式将液滴向指定方向移动以应用于喷墨打印和生物医学微/纳米芯片系统^[21]、从雨滴与风以及人体运动中获得能量为服装等可穿戴设备上的传感器供电^[22]，以及作为液滴传感器应用于生物医学^[23]等。

经过几十年的发展，DEG已经有了许多技术突破，但仍存在带电荷能力与输出电压上限较低等问题^[4]。针对此类问题，本文研究了一种在液滴所撞击的薄膜表面附加往复摩擦的新充电模式，以提高DEG的带电荷能力与输出电压上限，使DEG可以匹配高压和更大功率用电环境。本文还研究了摩擦工具、液滴下落频率与高度以及停止工作时长这4种因素对DEG发电效果的影响规律。

1 液滴发电机实验系统与测量方法

1.1 液滴发电机实验系统

液滴发电机系统组成如图1(a)所示，它由摩擦发电结构、液滴发生系统、支撑结构以及电测/负载系统这4部分组成，其中最关键的摩擦发电结构示意图如图1(b)所示。摩擦发电结构由铝电极、PTFE薄膜与ITO玻璃复合而成，整体类似增强型金属氧化物半导体(metal oxide semiconductor, MOS)管，铝电极和ITO层相当于源极和漏极，PTFE薄膜相当于栅极。液滴撞击PTFE薄膜并铺展时，自身带正电，PTFE薄膜带负电，ITO层因为与PTFE薄膜产生静电感应而带正电，铝电极与液滴接触后产生接触电容而带负电。此时铝电极即为负极，ITO层即为正极。制作摩擦发电结构时，先将1块30 mm×30 mm×0.7 mm的ITO玻璃用杜邦线导出，再在其整个ITO面粘贴1张50 μm厚的PTFE半透明薄膜，最后在PTFE薄膜上粘贴1块“L”形铝箔并用杜邦线导

出。制成的摩擦发电结构实物如图1(c)所示，其中蓝色条状长方形表示后续实验中用到的摩擦纸张，纸张大小为15 mm×3 mm，摩擦行程为15 mm。

另外，液滴发生系统由蓄水箱、液滴发生器等组成，通过调节阀可控制液滴下落频率。本文使用自来水生成液滴，支撑结构由亚克力板制作，侧板可插入4块45°倾斜的斜板，每块斜板上可均匀布置4块发电结构(本实验均只使用1块)，液滴下落高度可通过顶板进行调节。电测/负载系统由RTE1024示波器、LED灯组等组成。

1.2 实验方法

为研究附加往复摩擦对DEG带电荷量的提升效果，在DEG的铝电极(负极)与ITO层(正极)间接示波器测量输出电压波形。实验基本流程为：先不附加往复摩擦，只通过液滴撞击将输出电压充至基本饱和；然后关闭液滴发生器阀门，使用往复摩擦实验机对PTFE薄膜表面附加摩擦，再打开液滴发生器阀门使液滴继续下落，通过液滴撞击将输出电压充至基本饱和；重复多次附加往复摩擦-液滴撞击充电的过程，观察充电效果。

记录输出电压波形，将全程所有输出电压的脉冲峰值提取并拟合成曲线，确定最优充电策略。将示波器换成LED灯组，观察DEG在新充电模式下的实际发电效果。同时，通过高速摄像机观察记录液滴在PTFE表面的铺展过程并与输出电压脉冲波形对应起来。按平行板电容器的电荷量-电压关系计算PTFE薄膜表面累积的电荷量(PTFE薄膜相当于1平行板电容器)。取样分析液滴收缩时的反向电压(波谷)与铺展时的正向电压(波峰)关系。最后，用控制变量法依次单独改变摩擦工具、液滴下落频率与高度以及停止工作时长这4个实验条件，分析发电效果的变化情况。

2 实验结果与分析

2.1 新充电模式

先不附加往复摩擦，只用液滴撞击PTFE薄膜。设置液滴下落频率为2 Hz、下落高度为15 cm，记录实验前10 s与最后10 s的输出电压。如图2(a)所示，每个液滴撞击过程对应1个电压脉冲。输出电压脉冲峰值提升速度先快后慢，前10 s即可从0 V提升至40 V左右。通过约1500次液滴撞击发电薄膜(约750 s)，输出电压将升至70 V左右并达到饱和。当PTFE薄膜上的表面电荷量未

图1 实验系统。(a)液滴发电机系统组成图。(b)摩擦发电结构示意图。(c)摩擦发电结构实物图

Figure 1 Experimental system. (a) Schematic of the droplet-based electricity generator (DEG) system. (b) Schematic of the frictional electricity generating structure. (c) Photograph of the frictional electricity generating structure

饱和时,前一滴液滴的撞击会对PTFE薄膜进行充电,导致随后液滴撞击时的输出电压有提高趋势;当PTFE薄膜上的表面电荷量达到饱和后,前一滴液滴的撞击仅起到维持PTFE薄膜表面电荷量的作用,使随后液滴撞击时的输出电压保持稳定。截取单个饱和电压脉冲波形如图2(b)所示,可见一个脉冲约持续20 ms。而本实验中每隔约500 ms发生一次液滴撞击,此周期远大于液滴撞击发电过程的持续时长,且由于PTFE薄膜极好的疏水性,液滴从其表面滑落几乎没有残留,故可认为相邻的两次液滴撞击过程在流动上是相互独立的。拟合输出电压脉冲峰值,得到不附加往复摩擦的液滴撞击充电过程的输出电压变化趋势,如图2(c)中的曲线I所示。

此时停止液滴撞击,开始对PTFE薄膜附加往复摩擦。使用往复摩擦实验机,在其摩擦头上粘贴一层15 mm×3 mm且与PTFE薄膜的动摩擦因数为0.18的较光滑纸张。设置往复摩擦行程为15 mm(保证纸张始终与PTFE薄膜左下角的部分区域接触,具体摩擦区域如图1(c)所示,其中蓝色条状长方形表示摩擦纸张)、往复摩擦频率为2 Hz、法向载荷为1 N(确保不会将摩擦发电结构破坏),对PTFE薄膜表面附加100次往复摩擦。这一过程由图2(c)中左起第1条蓝色竖虚线表示。随后恢复液滴撞击,其输出电压如图2(c)中曲线II所示。研究发现,经过100次摩擦后DEG输出电压抬升至90 V左右;再经过1500次液滴撞击,输出电压达到125 V左右的饱和值。再附加100次往复摩擦(累积200次),此摩擦过程由图2(c)中左起第2条蓝色竖虚线表示,输出电压会抬升至155 V左右;再经过1500次液滴撞击后,输出电压稳定在160 V左右的饱和值,如图2(c)中曲线III所

示。在实验过程中发现,摩擦工具与摩擦范围相同时,附加往复摩擦对PTFE薄膜预充电效果基本相同,且改变摩擦区域位置对预充电效果几乎没有影响。附加往复摩擦能明显提高输出电压,其物理原因可能是,附加的摩擦造成了摩擦物与发电薄膜之间的电荷转移,即在液滴撞击充电过程之前对发电薄膜进行了预充电,使其表面电荷增多,进而提高了输出电压。

在图2(c)中的曲线III之后,再附加100次往复摩擦(累积300次),即图2(c)中左起第3条蓝色竖虚线,输出电压不会提高,反而会下降至110 V左右。经过1500次液滴撞击后,输出电压达到150 V左右的饱和值,如图2(c)中曲线IV所示。再附加100次往复摩擦(累积400次),即图2(c)中左起第4条蓝色竖虚线,输出电压会抬升至140 V左右。经过1500次液滴撞击后,输出电压提升至170 V左右的饱和值,如图2(c)中曲线V所示。由图2(c)可见,曲线II、III的起点均高于上一段曲线的终点,而曲线IV、V的起点却都低于上一段曲线的终点。故输出电压不会随附加往复摩擦次数的增多而无限提升,当过度附加往复摩擦时,输出电压不会提升反而会下降。

若在图2(c)中的曲线I之后一次性附加200次往复摩擦,而非上述分两段100次附加,DEG输出电压初始只抬升至115 V左右。经过1500次液滴撞击后,饱和值仅能达到150 V左右,如图2(c)曲线III*所示,其输出电压低于图2(c)中的曲线III,故分段附加往复摩擦效果更好。

综上,分段附加200次往复摩擦可将输出电压提升至先前的约2.3倍(160 V/70 V),不分段或是过度附加往复摩擦都会使充电效果下降。在正极(ITO层)与负极(铝

图2 液滴发动机的输出电压过程. (a) 不附加往复摩擦时前10 s与最后10 s的输出电压. (b) 不附加往复摩擦时的饱和输出电压波形. (c) 全过程输出电压变化趋势. (d) 单个发电结构驱动LED灯组照片

Figure 2 Process of voltage outputs generated by the DEG. (a) Output voltages during the first and last 10 s without reciprocating frictions. (b) Output voltage waveform without additional reciprocating frictions. (c) Variation of voltage outputs throughout the whole process. (d) Photograph of LED lamps powered by a single droplet-based electricity generator

电极)之间接LED灯组, 发现其随液滴接触铝电极而被点亮, 结果如图2(d)所示. 需要说明的是, 附加往复摩擦使液滴发电机需要投入额外的能量, 但本文主要研究抬高输出电压峰值和发电薄膜电荷累积量的方法, 以匹配高压用电环境, 未考虑发电效率与经济性.

将高速摄像机捕获到的液滴撞击在PTFE薄膜表面时的铺展形态与输出峰值为160 V的单个脉冲波形关联起来. 如图3(a)所示, 液滴未接触铝电极时输出电压为0 V; 接触铝电极且铺展至最大时, 输出电压达到峰值160 V左右; 之后随着液滴的收缩, 正向电压逐渐回落并降至0 V以下变为反向电压, 即铝电极的电势高于ITO层, 如图3(a)中红色段所示; 液滴完全由铝电极脱落时, 输出电压重新归零. 液滴铺展和回缩时产生的电压方向不同, 这有些类似于交流发电机的输出结果, 但反向电压相对于正向电压很小(只有后者的10%左右), 实

际发电效果与直流电类似. 另外, 如图3(b)所示, 由OpenFOAM仿真计算和高速摄像获得的液滴最大铺展面积为 3.6 cm^2 (最大铺展面积定义为即将收缩的主体铺展液膜, 不包含边缘破碎的液丝, 这样简化处理不会造成明显的误差). 由平行板电容器电荷量-电压关系式(1)计算得出, 输出电压为70和160 V时, PTFE表面累积的电荷量分别是9.4与21.4 nC:

$$Q_{\max} = U_{\max} \frac{\varepsilon_p A_{\max}}{d_p}, \quad (1)$$

式中, $Q_{\max}(\text{C})$ 为PTFE薄膜所带的最大电荷量; $U_{\max}(\text{V})$ 为系统的输出电压峰值; ε_p 为PTFE薄膜的介电常数, 取 $1.87 \times 10^{-11} \text{ F m}^{-1}$; $A_{\max}$ 为液滴最大铺展面积($3.6 \times 10^{-4} \text{ m}^2$); d_p 为PTFE薄膜的厚度($5 \times 10^{-5} \text{ m}$).

选择30个脉冲电压波形样本, 提取液滴收缩时的

图3 输出电压波形分析. (a) 液滴运动状态与输出电压波形的对应关系. (b) 液滴冲击PTFE薄膜时最大铺展面积仿真结果. (c) 反向电压峰值与正向电压峰值的线性关系

Figure 3 Output voltage waveform analysis. (a) Relationship between the droplet movement and the output voltage waveform. (b) Simulation result of the maximum spreading area of the droplet impinging on the PTFE film. (c) Linear relationship between negative and positive voltage peaks

反向电压峰值(即ITO层比铝电极低出的最大电势值,为脉冲电压波形上小于0的波谷值)与铺展时的正向电压峰值(即ITO层比铝电极高出的最大电势值,为脉冲电压波形上大于0的波峰值),拟合得出二者存在线性关系,如图3(c)所示. 单个输出电压波形中,反向电压峰值与正向电压峰值呈正相关性. 该线性关系可能说明了反向电压和正向电压产生的机理相似,即PTFE薄膜在液滴撞击发电过程中始终相当于平行板电容器,正、反向电压的大小均与PTFE薄膜表面电荷量遵循平行板电容器的电压-电荷量关系式(1).

2.2 发电效果影响因素

在2.1节的实验中有3个确定条件,即用光滑纸张附加往复摩擦、液滴下落频率为2 Hz以及下落高度为15 cm. 为研究不同因素对发电效果的影响,分别单独改变这3个实验条件中的1个,并保持其余2个条件不变. 图4(a)为液滴下落频率为2 Hz左右、下落高度为15 cm时,将附加往复摩擦所用的动摩擦因数为0.18的较光滑纸张换为动摩擦因数为0.2的较粗糙纸张,DEG输出电压与纸张表面状况的对比结果. 如图4(a)所示,使用较光滑纸张可使DEG输出160 V左右的饱和电压,使用较粗糙纸张可使DEG输出215 V左右的饱和电压,约为较光滑纸张的1.3倍. 可见,发电效果对摩擦工具极为敏感,且一般增加摩擦工具表面的粗糙度可增强摩擦过程的电荷转移,产生更高的输出电压. 图4(b)为液滴下落高度为15 cm、使用动摩擦因数为0.18的较光滑纸张附加往复摩擦,液滴下落频率分别为0.33(最慢)、2及11.2 Hz(最快)时DEG的饱和输出电压箱线图. 研究发现,0.33 Hz时DEG可输出145 V左右的饱和电压,

2 Hz时DEG可输出160 V左右的饱和电压,11.2 Hz时DEG可输出155 V左右的饱和电压,且2 Hz时的输出电压最稳定. 可见,频率过慢造成的节流效应或频率过快造成的疏水不及时都会导致发电量下降、发电不稳定,尤其是频率过慢影响更大. 值得注意的是,液滴下落最大频率为11.2 Hz时,相邻的液滴撞击过程也不会产生相互影响(一个周期约89 ms,大于单个液滴撞击过程20 ms). 图4(c)为液滴下落频率为2 Hz、使用动摩擦因数为0.18的较光滑纸张附加往复摩擦,不同滴落高度时DEG的饱和输出电压箱线图. 研究发现,滴落高度为15 cm时DEG可输出160 V左右的饱和电压,10 cm时DEG可输出150 V左右的饱和电压,5 cm时DEG仅可输出115 V左右的饱和电压. 可见,在一定范围内,液滴下落高度越高(韦伯数越大),产生的饱和输出电压越大.

保持2.1节中的实验条件不变,即用动摩擦因数为0.18的较光滑纸张附加往复摩擦、液滴下落频率为2 Hz左右、下落高度为15 cm,将已经通过新充电模式充至基本饱和的DEG停止工作不同时长,再重启DEG并进行液滴撞击充电,其输出变化趋势如图4(d)所示. 停止工作10 min后,输出电压降为145 V左右,约为之前的91%(145 V/160 V),经过约1500次液滴撞击,可完全恢复并略高于160 V. 停止工作1 h后,输出电压降为135 V左右,经过约1500次液滴撞击,可完全恢复至160 V左右. 停止工作5 h后,输出电压降为130 V左右,经过约1500次液滴撞击,也可以完全恢复至160 V左右. 但停止工作9 h后,输出电压降为120 V左右,经过约1500次液滴撞击,只能恢复到145 V左右. 可见,电荷流失速率刚开始很快,随后变慢,且若停止工作时间过长,则会无法回升至原先的饱和输出电压.

图4 影响DEG发电效果的因素。(a)使用不同摩擦工具的输出电压情况。(b)不同液滴下落频率的输出电压情况(箱线图由30个样本的平均值绘制而成)。(c)不同液滴下落高度的输出电压情况(箱线图由30个样本的平均值绘制而成)。(d)停止工作不同时长后的输出电压

Figure 4 Factors affecting output voltages of the DEG. (a) Output voltages with different friction tools. (b) Output voltages with different droplet impinging frequencies (each boxplot is based on the average value of 30 samples). (c) Output voltages with different droplet falling heights (each boxplot is based on the average value of 30 samples). (d) Output voltage curves after stopping working for different time

3 结论

液滴发电机可以将雨水等液滴的微小机械能转换成电能,具有广泛的应用前景。为解决液滴撞击摩擦发电技术中发电薄膜带电荷能力与输出电压上限较低的问题,本文研究了一种新的充电模式,即通过附加往复摩擦的方法对发电薄膜进行预充电。在不考虑能量转化效率的前提下,该新充电模式可大幅提高发电薄膜的输出电压至原先的2.3倍,使DEG可以匹配高压用电环境。但是,过量摩擦或不分段摩擦都会使发电效果下降,故摩擦要适度且分段。另外,一个脉冲中的反向电压峰值与正向电压峰值具有线性关系。

本文还研究了影响发电效果的4种因素。一是摩擦工具,发电效果对摩擦工具极为敏感,应选择较易起电的摩擦工具,如粗糙度较高的物品。二是液滴下落频率,太快或者太慢都会导致发电效果与稳定性下降等问题,收集雨水机械能时可加装蓄水装置与调节阀,使撞击频率适中。三是液滴下落高度,在一定范围内,下落高度越高输出电压越大,实际使用时出水口与发电结构应保持足够距离。四是停止工作时长,DEG在停止工作后会流失之前积累的电荷,流失速度开始很快,之后下降。若停止工作时间过长,还会降低发电薄膜的带电荷能力上限,故每次使用前均需附加往复摩擦以抵消电荷流失。

参考文献

- 1 Zhang D, Wang J, Lin Y, et al. Present situation and future prospect of renewable energy in China. *Renew Sustain Energy Rev*, 2017, 76: 865–871
- 2 Montero-Martinez G, Kostinski A B, Shaw R A, et al. Do all raindrops fall at terminal speed? *Geophys Res Lett*, 2009, 36: L11818

- 3 Yatsuzuka K, Mizuno Y, Asano K. Electrification phenomena of pure water droplets dripping and sliding on a polymer surface. *J Electrostat*, 1994, 32: 157–171
- 4 Xu W, Zheng H, Liu Y, et al. A droplet-based electricity generator with high instantaneous power density. *Nature*, 2020, 578: 392–396
- 5 Cui W, Riaud A. Mathematic and numerical analysis of droplet-based electricity generator. In: 2020 IEEE 15th International Conference on Solid-State & Integrated Circuit Technology (ICSICT). 2020
- 6 Lin S Q, Xu L, Wang A C, et al. Quantifying electron-transfer in liquid-solid contact electrification and the formation of electric double-layer. *Nat Commun*, 2020, 11: 399
- 7 Liu Y K, Liu W L, Wang Z, et al. Quantifying contact status and the air-breakdown model of charge-excitation triboelectric nanogenerators to maximize charge density. *Nat Commun*, 2020, 11: 1599
- 8 Wang X, Fang S M, Tan J, et al. Dynamics for droplet-based electricity generators. *Nano Energy*, 2021, 80: 105558
- 9 Cui L L, Song M H, Kong Y X, et al. The comparative studies of charge storage stabilities among three PP/porous PTFE/PP electret. *J Electrostat*, 2009, 67: 412–416
- 10 Nguyen V, Yang R. Effect of humidity and pressure on the triboelectric nanogenerator. *Nano Energy*, 2013, 2: 604–608
- 11 Helseth L E. The influence of microscale surface roughness on water-droplet contact electrification. *Langmuir*, 2019, 35: 8268–8275
- 12 Li S Y, Nie J H, Shi Y X, et al. Contributions of different functional groups to contact electrification of polymers. *Adv Mater*, 2020, 32: 2001307
- 13 Lin Z H, Cheng G, Lee S, et al. Harvesting water drop energy by a sequential contact-electrification and electrostatic-induction process. *Adv Mater*, 2014, 26: 4690–4696
- 14 Liu C, Sun J, Zhuang Y, et al. Self-propelled droplet-based electricity generation. *Nanoscale*, 2018, 10: 23164–23169
- 15 Ma Z, Ai J W, Shi Y S, et al. A superhydrophobic droplet-based magnetoelectric hybrid system to generate electricity and collect water simultaneously. *Adv Mater*, 2020, 32: 2006839
- 16 Xue G, Xu Y, Ding T, et al. Water-evaporation-induced electricity with nanostructured carbon materials. *Nat Nanotechnol*, 2017, 12: 317–321
- 17 Nie J H, Wang Z M, Ren Z W, et al. Power generation from the interaction of a liquid droplet and a liquid membrane. *Nat Commun*, 2019, 10: 105735
- 18 Shukla P, Saxena P, Bhardwaj N, et al. Microporous polymer membrane assisted water induced electricity generation based on triboelectrification and electrostatic induction. *RSC Adv*, 2020, 10: 40608–40618
- 19 Zhang N, Gu H J, Lu K Y, et al. A universal single electrode droplet-based electricity generator (SE-DEG) for water kinetic energy harvesting. *Nano Energy*, 2021, 82: 1–9
- 20 Wang S, Lin L, Wang Z L. Nanoscale triboelectric-effect-enabled energy conversion for sustainably powering portable electronics. *Nano Lett*, 2012, 12: 6339–6346
- 21 Zhang X S, Su M, Brugger J, et al. Penciling a triboelectric nanogenerator on paper for autonomous power MEMS applications. *Nano Energy*, 2017, 33: 393–401
- 22 Lai Y C, Hsiao Y C, Wu H M, et al. Waterproof fabric-based multifunctional triboelectric nanogenerator for universally harvesting energy from raindrops, wind, and human motions and as self-powered sensors. *Adv Sci*, 2019, 6: 1801883
- 23 Hu S, Shi Z, Zheng R, et al. Superhydrophobic liquid-solid contact triboelectric nanogenerator as a droplet sensor for biomedical applications. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2020, 12: 40021–40030

Summary for “液滴发电机的新充电模式及影响因素”

New charging mode of a droplet generator and its influencing factors

Yuchen Xia, Zhifu Zhou^{*}, Depei Song, Yihui Huang, Yuxuan Gao & Bin Chen*State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China*^{*} Corresponding author, E-mail: zfzhou@mail.xjtu.edu.cn

The traditional fossil energy is becoming increasingly scarce and is a main cause of environmental pollution. Therefore, power generation by fossil fuels will face great challenges in future. Hydraulic power generation has the advantages of being relatively clean, renewable and widely available. However, this way mainly uses electromagnetic generators that are heavy, bulky, and become inefficient with low water supply. In addition, it is not suitable for harvesting energy from water in the form of raindrops which store huge clean energy. The droplet-based electricity generator (DEG) can convert the mechanical energy of droplets such as rain water into electrical energy. DEG has attracted increasing attention in recent years due to its wide application prospects in outdoor lighting, portable mobile electronic devices and automobile glass power generation. However, the DEG still has some critical problems, such as the upper limit of charge capacity and the upper limit of output voltage, which limit its application in practice. In this study, a DEG experimental system is developed firstly, which consists of a droplet generator, electricity generating structures, supporting structures and voltage measurement equipment. The electricity generating structure is the most important part of the whole system, which comprises a polytetrafluoroethylene (PTFE) film on an indium tin oxide substrate (ITO) plus an aluminium electrode. The PTFE, a promising electret material with high charge storage capability and stability could serve as an ideal reservoir for charge storage, while electrostatically inducing opposite charge of the same amount on the ITO for possible charge transfer to an aluminium electrode. A falling water droplet spreads on the PTFE surface, which bridges the originally disconnected components (the PTFE/ITO and aluminium electrode) into a closed-loop electrical system. Then, a new charging mode for DEG has been discovered through extensive experiments. That is, a reciprocating friction experimental machine is used to reciprocate friction to the surface of the PTFE film to pre-charge it using different tools. Then the water drops one by one and impinges on the PTFE film. The PTFE film has been stored with charges as a result of prior reciprocating frictions between solid and solid, and as a result of contact electrification between liquid and solid after continuous droplet impinging. The charge capacity and output voltage of DEG can be increased by about 2.3 times after using this new charging mode compared with the simple droplet impingement charging. This high voltage output makes the DEG possible to match the higher voltage electricity environment. Thirdly, through comparative analysis, the additional reciprocating frictions should be moderate and segmented. The excessive or adding reciprocating frictions at a time will reduce the charging efficiency. This paper also analyzes the relationship between droplet spreading state and output voltage through high-speed camera and oscilloscope. The linear relationship between the negative voltage peak and the positive voltage peak in the power generation process has been observed. The effects of friction tool, falling height and impinging frequency on the DEG have been investigated. It is found that using the friction tool of napkins with larger roughness can generate higher voltage. The impinging frequency of 2 Hz can generate the highest voltage compared with lower and larger impinging frequencies. In the falling height range from 5 to 15 cm, 15 cm height can produce the highest voltage. Lastly, stopping droplets impinging on PTFE film will cause a decrease in the output voltage of DEG. If the stopping time is too long, the upper limit of the charge capacity of the power generation film will decrease. These findings provide new ideas and methods for improving DEGs' power generation capacity.

triboelectrification, droplet-based electricity generator, polytetrafluoroethylene film, new charging modedoi: [10.1360/TB-2021-0803](https://doi.org/10.1360/TB-2021-0803)