

## 从下落的水滴中收集能量

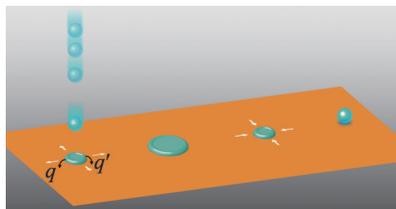
(中国科学院理化技术研究所 戴 闻 编译自 Siddharth Rajupet, Daniel J. Lacks. *Physics*, August 12, 2020)

摩擦电充电和疏水效应的巧妙耦合导致了一种非常有效的纳米发电机。

两个世纪前，考古学家在古巴比伦废墟中的挖掘，得到了一个有趣的发现——追溯到公元前约1800年，用楔形文字书写的粘土碑。这些碑文包括对迷信行为的描述，神职人员通过倾倒在上的油形成的图样，预言未来。这篇古文代表了已知最早的关于疏水效应的参考文献。现在两个独立的现代科学家团队已经使用这个想法，开发了非常有效的没有移动部件的纳米发电机。使纳米发电机有效的关键技术是利用疏水效应。

在巴比伦人提到疏水效应大约1500年后，在古希腊，柏拉图在他的对话录 *Timeaus* 中推测了许多物理现象的性质，包括“水的流动、雷电，以及观察到的奇特的琥珀吸引”。“琥珀吸引”起因于我们现在所说的摩擦带电，当两个表面相对并相互摩擦，发生静电起电。当时柏拉图不知道，“雷电”是由于云中冰晶摩擦起电后所积累的能量爆发。摩擦带电和放电现象以及水的流动行为，是新型纳米发电机设计的关键思路。

新的纳米发电机工作原理如下：水滴落在覆盖于导电板之聚四氟乙烯介电薄膜上。摩擦带电发生



新设备利用水滴在疏水表面上的“呈珠状”优势，为电容器充电并存储能量

在液滴撞击表面时，撞击使液滴带正电，聚四氟乙烯表面带负电。聚四氟乙烯上表面的负电荷在其下表面的导体上感应出正电荷，以介电聚四氟乙烯膜为介质形成电容器。虽然每个液滴的电荷转移很小，但聚四氟乙烯表面的总电荷在接触许多液滴后积累起来。电荷最终饱和，导致电容器携带大量的能量，可以用来为设备供电。除了使聚四氟乙烯表面带电外，水滴还起着另一个作用。当每个液滴在聚四氟乙烯表面扩展时，它暂时接触位于表面上方的某一电极，在聚四氟乙烯表面和电极之间形成导电桥。该电极还与作为电容器底板的带电导体连接。因此，每个液滴都作为一个开关，使电容器逐步放电，以产生一个电流，为负载供电。

传统摩擦电纳米发电机的问题在于：为了使用存储的能量，如果一个电容器被放电，则需要许多后续的液滴接触来充电。以前的纳米发电机没有电容器，而是将每个液滴的能量转换为电流。这样的装置可以工作，但只产生很少量的电流。

现在，香港城市大学和中国科学技术大学的 Wanghuai Xu 和他的同事，巧妙地利用疏水效应，在每次放电后自动为电容器充电。在疏水表面，如聚四氟乙烯，水倾向于“呈珠状”，导致与表面的接触面积很小。然而，当下落的水滴第一次到达表面时，它的垂直动能被转化为径向动能，从而使其扩展。如上所述，扩展导致液滴接触电极并使电容器放电。此外，这种扩展增加

了液滴的势能——因为液滴和表面之间的疏水相互作用，就像拉紧弹簧一样。在径向动能丧失后，这种势能导致扩展液滴退化并珠化。当液滴退化时，电容器就会充电。随着液滴的收缩，其减小的尺寸增加了其表面电荷密度，反向驱动电流给电容器充电。

这些最近的进步是令人兴奋的，因为它们作为纳米发电机可以从环境能源(例如雨滴)收获足够的电力来为小型电子设备充电。例如，纳米发电机可以被有效地应用在远程为偏远地区的传感器供电。

令人惊讶的是，经过2000多年的发展，我们对摩擦带电的了解并不比柏拉图的含糊概念了解得多。当两个表面接触并带静电时，这些“物体”界面中被推来推去的是什么？我们不知道答案——它们可能是电子或某种离子。我们不知道什么材料特性会“推动”电子或离子从一个表面到另一个表面。我们不明白摩擦在摩擦带电中起什么作用，它只是增加接触的表面积，还是提供能量来“划分”电荷？

当我们谈及摩擦起电时，我们通常会想到：在两个固体表面之间带电。然而，液—固摩擦带电，就像在上述纳米发电机中那样，可能比固体—固体充电更简单、更可控。另一方面，液体变形有助于与固体表面充分接触，它们的流动避免了界面键的集中破坏力。也许液体—固体摩擦带电将是进行更精密实验控制的关键，这些实验最终将揭开摩擦带电的奥秘。