

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20220909001

文章编号: 1672-9331(2023)03-0032-20

引用格式: 熊瑶, 孙其君. 摩擦纳米发电机: 物联网时代的高熵新能源技术[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2023, 20(3): 32-51.

Citation: XIONG Yao, SUN Qijun. Triboelectric nanogenerator: a novel technology for harvesting high-entropy energy toward the era of the Internet of Things [J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2023, 20(3): 32-51.

摩擦纳米发电机: 物联网时代的高熵新能源技术

熊瑶, 孙其君

(中国科学院 北京纳米能源与系统研究所, 北京 101400)

摘要: 世界正迈向物联网、大数据和人工智能时代, 广泛分布的传感网络是这个时代最重要的元素。鉴于众多分布式电子设备和传感网络的移动性需求不断提高, 物联网时代需要与之匹配的分布式能源。广泛分布在周围环境中、随机、不规则的微纳机械高熵能量是一种很有潜力的可回收能源, 开发匹配的收集技术对于满足新时代可持续能源的要求势在必行。摩擦纳米发电机(triboelectric nanogenerator, TENG)利用麦克斯韦位移电流作为驱动力, 是一种非常有效的微纳机械高熵能源收集技术。TENG具有选材广泛、成本低、易于制造、适应性广, 以及在工业上扩展性强等优点。相比电磁发电机(electromagnetic generator, EMG), TENG特别适用于低频(通常小于 5 Hz)机械能量采集并获得比EMG更高的效率和输出性能。此外, 无需外加电源TENG就可以将外界机械刺激直接转换为电信号从而实现主动式和自适应式传感, 这对于开发自驱动传感系统具有重要意义。更为重要的是, 多个TENG单元可以集成形成一个“能量捕获网”, 通过高效收集海洋中丰富、清洁、可再生的波浪能来实现大规模蓝色能源技术。TENG在收集高熵能源(微纳小能源到蓝色大能源)方面具有广阔的应用前景。TENG不仅适用于物联网时代的分布式能源需求, 更是未来稳定碳排放的可持续能源的典型范例。

关键词: 新能源技术; 摩擦纳米发电机; 高熵能源; 物联网; 碳中和

中图分类号: TM619

文献标志码: A

0 引言

能源是人类赖以生存的基础, 优质能源的开发和先进能源技术的进步更是人类社会发展的主要推动力。例如, 原始人钻木取火就是热能最早被人类利用的证据, 后来, 人类主要是通过燃烧生物质和煤炭等方式来获取热能。蒸汽机的发明实现了将热能转化为机械能, 人类成功利用机器代替手工劳动, 推动了第一次工业革命和机械化时代的发展。随后, 电磁发电机(electromagnetic generator, EMG)的发明引发了第二次工业革命, 实现了机械能到电能的转化, 使得电力迅速在世界范围内应用起来, 并成为人们日常生活中不可或缺的元素, 标志着人类社会进入电气化时代。自此, 以煤炭、石油、天然气为基础的能量供给方式,

通过蒸汽机将热能转化为机械能, 蒸汽机带动发电机发电, 电能再从电厂、电网和变电站传输到千家万户。这就是目前主流的密集型能源供给方式。

石油的出现使航空业、汽车业迅速发展, 直到现在石油都是人类赖以生存的化石能源, 但煤炭、石油、天然气等化石能源面临着储量有限和环境污染等严峻问题。随着第三次工业革命迅猛发展带来的巨大变化, 人类工具早已不局限于简单的机械, 而是蕴含了更多高新技术的变革, 例如互联网、人工材料、遗传工程、航天技术, 甚至原子能等高科技产品和技术。以互联网为媒介的信息技术和配套的先进电子终端几乎把日常生活中的每个人、各种工业机器人和多样的服务平台等都联系了起来^[1]。

现如今, 世界正在高速迈向物联网、大数据和

收稿日期: 2022-09-09; 修回日期: 2022-10-10; 接受日期: 2022-11-03

通信作者: 孙其君(1985—)(ORCID: 0000-0003-2130-7389), 男, 研究员, 主要从事摩擦纳米发电机、新一代信息器件、微纳传感系统方面的研究。E-mail: sunqijun@binn.cas.cn

投稿网址: <http://cslgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxxbzk/home>

人工智能时代,因此,多功能传感网络成为了硬件发展的重要方向,这也构成了迈向智能世界的第四次工业革命的基础。对于移动和无线的传感网络,电池等储能单元将是电源的首选,但电池等储能单元存在寿命有限和环境污染等问题。鉴于众多分布式电子设备和传感器网络的移动性需求,物联网时代需要与之匹配的分布式能源。此外,目前的电能供给主要是靠发电厂集中供电,到2021年中国仍有71.13%的电力是火力发电,这势必会导致二氧化碳的过多排放。为了实现碳达峰碳中和目标,发展可再生能源和分布式能源势在必行。那么,在物联网时代,满足需求的新时代能源是什么?我们应该朝哪方面的能源研究努力呢?

1 物联网分布式能源熵理论

传统电能供给是通过电缆从发电厂输送到每个工厂、学校和家庭的。然而,这种密集固定的电能供给方式却不能满足大多数分布式用电器的需求。在物联网时代,万物互联,物体分布广泛,移动性强,它们必须由储能单元或小型发电机供电。思科的一项研究表明,如果电子器件都通过电池供电,那么现有的物联网90.0%将不能正常工作。幸运的是,物联网周围环境中存在着各种各样随机、无序的微纳机械高熵能量(如环境微风、机器散热、设备振动、人类随机动作等),这些能量以太阳能、风能、热能、机械触发/振动等形式体现,都可以作为潜在的可回收能量。因为物联网中每个移动设备的功耗都相对较小,大多在微瓦到瓦范围内,并且处于周期性工作/待机模式下,所以采集高熵能量是针对物联网能量供给非常可行的方案。同时,物联网对能源分布的需求经历了从密集型到分布型,从有序到无序,从有线到无线的转变,亟须一种经济高效的分布式高熵能量采集手段,即纳米发电机。纳米发电机由王中林院士在2006年首次发明^[2],经过十几年的迅猛发展,目前已在世界范围内获得广泛认可^[3]。

更重要的是,王中林院士还首次提出通过熵理论来理解物联网时代的能量分布。通常发电厂对外输出的电力来自有序、集中、高质量的不可再生化石能源(如煤炭、石油和天然气等),而物联网的驱动能量呈现出分布式、移动性、自适应性的特

点,并且其质量要求相对较低,如图1所示。发电厂的有序电力可以为固定场所的有序利用以及小部分无序的分布式应用提供电力。而从环境中采集的无序能量却可以用于解决分布式能源供给问题,这是能量采集的一个新领域。随着21世纪世界的进步,越来越多的移动终端和电子产品被生产出来,这意味着电子元件正在广泛分布和无序化。最普遍的是,我们每个人都至少有一部手机和其他配套电子用品。因此,物联网环境下这种无序的能源分布趋势是不可逆转的。

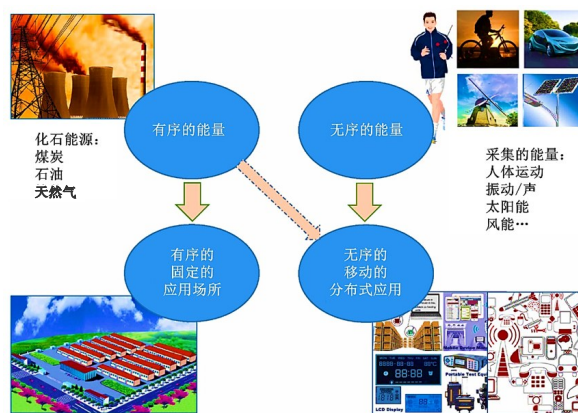


图1 电力分配中的熵理论^[4]

Fig. 1 Entropy theory in power distribution^[4]

热力学中,熵 S 作为衡量系统的无序性/随机性的量度,与系统宏观状态中所包含的微观状态总数 Ω 有直接关系,即 $S = k_B \ln \Omega$ (k_B 为玻尔兹曼常数)。根据热力学第二定律,对于不可逆过程,孤立系统的总熵总是随着时间的推移而增加,例如,煤、石油、天然气等低熵能源,经过燃烧、发电、驱动和使用等环节,最后变为低品质的高熵能源(表现为动能、势能、热能、电磁辐射能等弥散式能源)耗散在自然界里。根据热力学第一定律,对于一个孤立的系统来说,能量既不能被创造也不能被消亡,它只能从一种形式转化为另一种形式,比如从机械能到热能,从热能到电能。如果地球是一个孤立的系统,那么世界的总能量是守恒的。但它正在从集中/有序和高质量的化石能源转变为分布式、无序和低质量的能量。这是一个不可逆转的过程,全球变暖是不可避免的,因为人类燃烧了太多的化石能源^[4],而这些高熵能源则只能无处不在、无时不有的散布在自然界中(散乱却总量巨大),即熵增原理。

针对大规模物联网供能,电厂的有序能量可以有效地给物联网中固定站点和传感网络供电。

从熵增理论看来,我们不断地增加对智能手机、笔记本电脑及其他物联网电子终端的供能使用,这也是一个不可逆转的过程,意味着在物联网时代使用电子设备的随机性将遵循熵理论。因此,物联网运行所需要的无序能量需要通过从周围环境中采集分布式能量来提供。随着世界迈向全面物联网时代,传统的化石能源发电厂对于世界的有序运行至关重要,而其他能源采集技术则是重要的补充。因此,高效、经济、无污染的新型能量采集技术是解决物联网部分电力需求的重中之重。近年来,王中林院士及其团队发明并发展的摩擦纳米发电机(triboelectric nanogenerator, TENG)提供了一种将在环境中获得的机械能转换为电能的新方法和颠覆性技术^[5-11]。TENG是一种非常有效的微纳机械高熵能源收集技术,特别适用于将不规则、低频、微弱的机械能转化为电能。TENG所利用的高熵能源不仅是新能源,更是能适应物联网时代需求的能源。现有的相关研究表明,TENG不仅适用于物联网时代的分布式能源需求,更是未来稳定碳排放的可持续能源的典型范例^[12-13]。

2 摩擦纳米发电机的理论基础

2.1 摩擦纳米发电机的起源和理论模型

摩擦起电现象早在2 600多年前的古希腊时期就已为人所知,广泛存在于我们日常生活中的各个方面。虽然摩擦起电效应已存在数千年,但人们对摩擦起电的物理机制的了解仍然有限,并普遍认为摩擦静电会对生产和生活中的人们带来不必要甚至不利的影响。

摩擦学在现代工业、运输业和建筑行业都有重要应用,主要研究摩擦这一高度复杂的过程,在两种材料的机械接触/滑动过程中会发生许多局部物理/化学反应(包含弹性/塑性变形、化学键断裂、产生热量、形成新的表面层等)。然而,摩擦学的研究主要围绕试验观察,截至目前也没有形成定论来精确地预测、描述摩擦现象,定量解释摩擦更是一个巨大的挑战。

摩擦起电是摩擦学结合界面电荷转移过程的一个普遍现象,首次摩擦起电现象是在雷暴天气的闪电中观察到的,如图2(a)所示。在大风下,空气中的水滴与空气分子接触带上负电荷,尽管带同种电荷的水滴会相互排斥,但是风产生的局部

压力还是会使小水滴组合成大水滴,从而导致降水。水滴在凝结过程中比表面积减小导致表面电荷密度增加,一旦局部电场穿过空气击穿电场,就会产生闪电。在这个现象中,有一个关键问题:为什么雨滴都带负电荷?这与教科书中动物毛皮与塑料棒摩擦产生摩擦起电现象是类似的,如图2(b)所示,塑料棒将带上负电,而毛皮将带上正电,但到目前为止,没有人能解释为什么会发生这种现象。实际上,摩擦起电的科学术语是接触起电,可以理解为电荷通过物理接触产生,而机械摩擦并非必要的起电过程,但可以辅助传递电荷^[14]。虽然摩擦起电现象非常普遍,也是电的最基本效应之一,但是摩擦起电的过程非常复杂,其机理也很难研究。

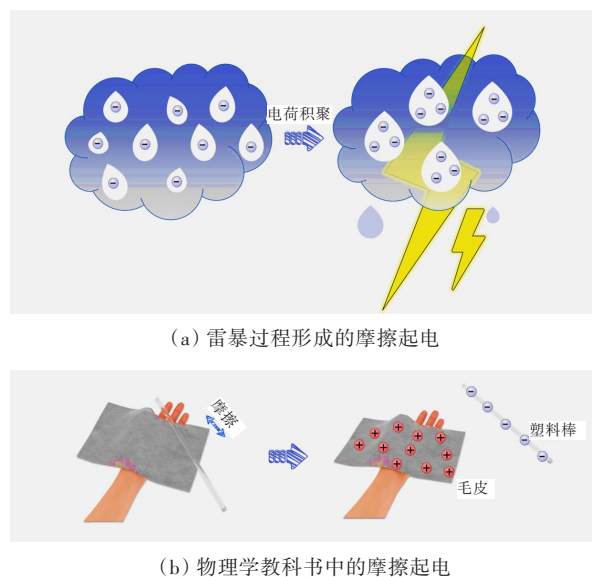


图2 基本摩擦起电案例示意图

Fig. 2 Schematic illustration of basic triboelectrification examples

自王中林院士团队在2012年发明TENG以来,摩擦起电效应的用途被逐渐拓宽,并在新能源技术中有了一席之地。TENG是一项将不规则、无序、低频和分布式的机械能转换为电能的重要技术。TENG的面积功率密度目前已经达到了 500 W/m^2 ,体积功率密度已经达到 490 W/m^3 ,并且转换效率高约70.0%。TENG非常适用于采集日常生活中无处不在的却被忽略的高熵机械能,如自然界的流水/微风、室内外人的动作/行走、车间机械振动/工人通勤、轨道交通/轮胎旋转等,收集这些能量在物联网供能和分布式能源网络中有着重要的应用^[15-17]。此外,TENG还可以用作自驱动传感器,利用TENG的电压/电流输出信号和外界机

械运动的相关性,实现对机械运动过程的主动监测。基于TENG的自供电传感器在机器人、柔性电子和人工智能方面都有着潜在的应用^[18-19]。TENG网络可用于采集海水波浪能和风能,有望为全世界的能源生产做出巨大贡献。TENG具有选材广泛、成本低、易于制造、适应性广、工业扩展性强等优点。因此,鉴于TENG的发明和潜在的应用,TENG的研究旨在建立以摩擦起电效应为基础的新能源技术并提升其性能。

原则上,任何具有不同电子亲和力的材料都可用于制作TENG。TENG的基本工作模式包含以下4种:垂直接触分离模式、面内滑动模式、单电极模式和独立摩擦层模式^[20]。不同工作模式下的发电机制是相通的,都是利用摩擦起电和静电感应产生静电荷,通过不同的机械运动形式来驱动静电荷分离,从而在外电路中产生感应电流^[21]。第一个TENG器件选用的摩擦层材料是聚对苯二甲酸乙二醇酯(polyethylene terephthalate, PET)和聚酰亚胺薄膜(Kapton)^[5]。图3描述了接触分离模式下的TENG短路电流的形成原理。在初始状态下,由于两种材料没有接触也就未产生电荷,因此两电极之间没有电势差。当外界施加压力使这两种材料表面接触时,摩擦起电效应导致这两种材料的接触界面发生电荷转移。因为Kapton的电子亲和力比PET的强,所以PET表面电子会转移到Kapton表面,使得Kapton的表面带负电,而电子转移后的PET表面则带正电。由于Kapton、PET等高分子材料的绝缘性很好,所以其表面的诱导静电荷可以保持很长时间(几小时甚至几天)。由于接触起电诱导的相反电荷在界面处相互平衡,所有两个电极之间没有电势差。当加载在TENG上的力被撤掉时,由于材料自身的弹性,PET和Kapton开始分离,诱导产生的电荷不能相互平衡而使得电极之间形成电势差,这时,如果电极接到外部负载就会有电流产生直到电荷被完全抵消。当在TENG上重新施加压力时,两摩擦层间距减小,再次形成电势差,并使得外电流以相反的方向流动。当这两种材料的接触状态发生变化时,即当它们经历循环按压或弯曲运动时,该装置可以产生连续的交流电输出。根据上述讨论,TENG的基本工作原理可阐述为:基于摩擦起电和静电感应的耦合效应,利用材料表面产生的静电极化电荷,通过机械触发产生电势差从而实现机械能向

电能转换。这种定性的原理描述在宏观上提供了一种对接触分离模式TENG的直观理解,但TENG的理论机制仍不清楚。

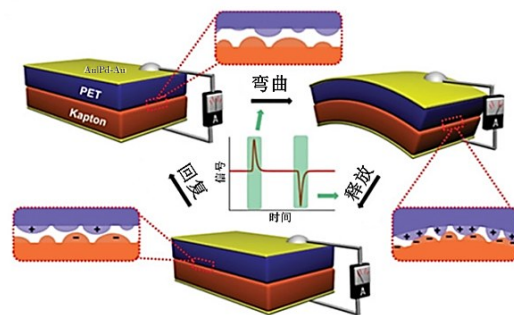


图3 第一个TENG及其工作原理^[5]

Fig. 3 Schematic illustration of the first TENG and its operation cycle^[5]

经研究发现,TENG的理论根基源于麦克斯韦位移电流,这与通常观察到的自由电子导致的传导电流是不同的。位移电流是由随时间变化的电场(真空或介质)所产生的电流^[22-24]。麦克斯韦方程组的原表达式如下:

$$\nabla \cdot \mathbf{D}' = \rho_f \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (3)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_f + \frac{\partial \mathbf{D}'}{\partial t} \quad (4)$$

式中: \mathbf{D}' 为电位移矢量; ρ_f 为空间中自由电荷的分布; \mathbf{B} 为磁感应强度; \mathbf{H} 为磁场强度; \mathbf{E} 为电场强度; \mathbf{J}_f 为电流密度; t 为时间。

2017年,王中林院士拓展了位移电流的表达式^[20],并首次在电位移矢量 \mathbf{D}' 中引入了 \mathbf{P}_s 项来推导TENG的输出功率, \mathbf{P}_s 项代表机械触发诱导的表面静电荷所带来的极化,它不同于外加电场引起的介质极化 \mathbf{P} ,这些电荷可以来自摩擦起电或者压电极化,与外加电场无关^[25-26]。因此,拓展的麦克斯韦位移电流为TENG提供了坚实的理论基础^[27-29]。

此外,在外力作用下,运动介质的形状和运动状态通常也会发生变化。介质表面由于接触起电或压电效应而产生静电荷并伴随介质形状或运动状态变化,不仅会导致介质表面局部的电荷密度 ρ_s 随时间变化,同时会引起局部的“虚拟”电流密度,进而引起介质极化^[16-18]。为了描述这些现象,在电位移矢量 \mathbf{D}' 中加入 \mathbf{P}_s 项是非常有必要的。 \mathbf{P}_s 项是介质表面由外力作用引起的静电荷导致的极

化,因此称为动生极化。修正后的电位移矢量 \mathbf{D} 的表达式为:

$$\mathbf{D} = \mathbf{D}' + \mathbf{P}_s = \varepsilon \mathbf{E} + \mathbf{P} + \mathbf{P}_s \quad (5)$$

式中:第一项 $\varepsilon \mathbf{E}$ 是自由电荷引起的电场,其中 ε 为真空介电常数;第二项 \mathbf{P} 代表介质内部的极化——感应极化;第三项 \mathbf{P}_s 为动生极化。值得注意的是, \mathbf{P}_s 主要是表面静电荷的存在或边界形状随时间变化引起的,因此可以从理论上解释 TENG 的工作机理。动生极化无论是在物理意义上还是在数学表达式上都与感应极化不同,因此两者不能合并。

由式(5),位移电流 \mathbf{J}_D 的表达式为:

$$\mathbf{J}_D = \frac{\partial \mathbf{D}'}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{P}_s}{\partial t} \quad (6)$$

式中: $\partial \mathbf{D}'/\partial t$ 代表时变电场引起的位移电流,称为感应位移电流; $\partial \mathbf{P}_s/\partial t$ 代表带电介质在外力的作用下产生的电流,称为动生位移电流,也是纳米发电机机械能转化为电能的关键所在。

位移电流不同于真正意义上的电流,它可以在介质中产生,也可以在真空中产生。将位移电流加入安培环路定律中至少起到两方面的作用,一方面,位移电流的引入修正了安培环路定律,即除了传导电流之外还有一个额外的电流。麦克斯韦之前的电磁理论方程,包括电荷守恒方程,在引入位移电流之前其内部是矛盾的,不自洽的,麦克斯韦修正了这一缺陷。另一方面,像真正的电流一样,位移电流也会产生磁场,其本质核心是增加了“变化的电通量产生磁场”这一重要概念;此时安培环路定律变为安培-麦克斯韦定律。

接触分离模式 TENG 的基本模型如图 4(a) 所示。由于接触起电,两个摩擦层表面带相反电荷,表面电荷密度定义为 $\pm \sigma_{\text{tribo}}$ (通常在初始接触后饱和,与分离距离 z 无关)。摩擦诱导的表面静电荷形成电场,驱动自由电子通过外部负载在电极间流动,而电极上累积的转移电荷量 $\pm \sigma_{\text{tr}}$ 是 z 的函数,因此,这部分引起 z 变化的机械能就被转化为电能,相应的位移电流可根据式(7)进行计算:

$$\mathbf{J}_D = \frac{\partial \mathbf{D}_z}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_{\text{tr}}(z, t)}{\partial t} \quad (7)$$

式中: \mathbf{D}_z 为分离距离为 z 时的电位移矢量; $\partial \mathbf{D}_z/\partial t$ 为时变电场引起的位移电流; $\partial \sigma_{\text{tr}}(z, t)/\partial t$ 为转移电荷量的时间微分。

为了便于定量分析和直观描述,该物理模型可以简化为具有时变电容的电容器模型,而随时

间和间距变化的带相反电荷的表面则可以等效于不同时间下具有不同电容的电容器^[30]。等效模型的关键理论起源于位移电流。TENG 的电容模型如图 4(b) 所示,其电流 I 表示如下:

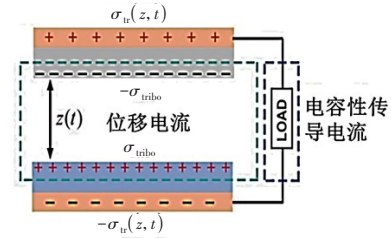
$$I = \frac{dQ}{dt} = A \frac{d\sigma_{\text{tr}}}{dt} \quad (8)$$

TENG 对应的输出电压 V 可以写为:

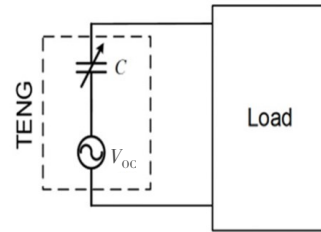
$$V = -\frac{1}{C(z)} Q + V_{\text{oc}}(z) \quad (9)$$

式中: Q 为极板带电量; t 是时间; A 为极板面积; σ_{tr} 为转移电荷量; C 为两极板间的电容; z 为极板间距; V_{oc} 是开路输出电压。

类似欧姆定律, TENG 的时变电容模型为 TENG 的设计、构建、研究和优化提供了理论依据。此外,随距离变化的电场概念和诺顿定理的模型也被提出,以便更精确地预测 TENG 在外部负载下的输出行为^[31-36]。而上述拓展的麦克斯韦的位移电流则是所有这些 TENG 模型的根本原理和源头。



(a) 接触分离模式下 TENG 的位移电流模型^[19]



$$V = -\frac{1}{C(z)} Q + V_{\text{oc}}(z)$$

(b) TENG 的等效电路模型^[19]

图 4 TENG 的理论模型

Fig. 4 Theoretical models of TENG

图 5 展示了麦克斯韦位移电流的两个分量对主要基础科学、技术和产业的影响^[25]。第一项是时变电场和感应介质极化下的位移电流,该项催生了电磁波理论,并促使无线通信、雷达、天线、电视、无线电、微波、电报和空间技术的出现。而第二项 \mathbf{P}_s 项 (也被称为“wang”项),表示外部应变场导致的位移电流。因此,纳米发电机被称为新时代能源,即物联网、大数据、人工智能、神经形态计

算时代的能源。在可预见的未来,这棵“树”的理念有望变得更大、更强、更高,并有望为人类社会带来巨大的技术突破。

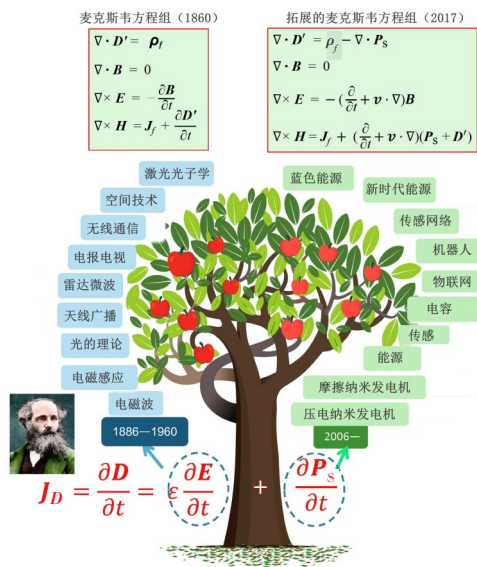


图5 静态介质和移动带电介质的麦克斯韦方程组比较

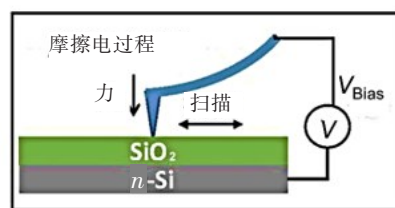
Fig. 5 Comparison of Maxwell's system of equations for static and moving charged media

2.2 接触起电的电荷转移机理

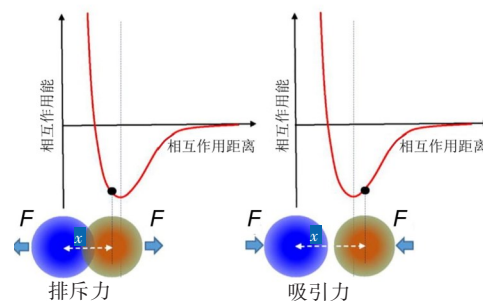
如果用金属打磨坚硬的岩石,会产生火花,出现放电现象,这是由金属-电介质摩擦起电所引起的。尽管这个现象司空见惯且历史悠久,但直到最近,科研人员才开始使用开尔文探针显微镜 (Kelvin probe force microscopy, KPFM) 对其进行纳米级的研究^[37-40]。图6(a)展示了KPFM轻敲模式下铂(Pt)原子力显微镜尖端扫描SiO₂表面的情况。通过在一个5 μm的区域内反复扫描,静电荷被传递到SiO₂表面。在扫描8次后,表面电荷密度达到饱和。通过KPFM获得的扫描区域线型图展示了整个区域的电位分布,并指出该表面有负的静电荷。值得注意的是,无论使用KPFM的轻敲模式还是接触模式,在接触时间足够长的情况下,其表面电荷密度的饱和极限值都会保持一致,这是由材料表面可以容纳的最大电荷密度和材料表面在空气中的击穿阈值所决定的。

最近,王中林团队发现,接触起电在固体-固体之间的主导机制是电子转移。电介质和金属之间的接触起电过程可以用电介质表面状态模型和金属的费米能级模型来描述。试验发现,当两种材料的距离大于分子键长时,材料中的原子相互吸引,只有当原子间距小于键长时,即原子间距介

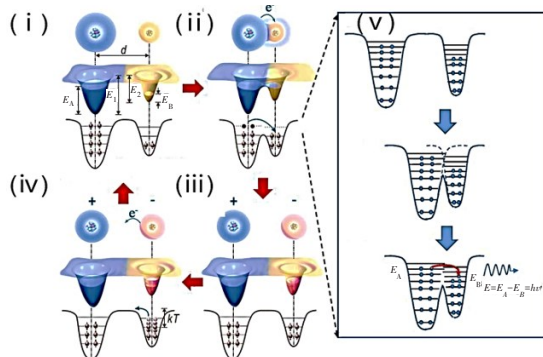
于两个原子相互作用电位斥力区时,接触起电才会发生,如图6(b)所示。为了解释一般情况下的电子跃迁,王中林团队创新性地提出了重叠电子云模型^[21],如图6(c)所示。在初始状态下,两种材料的电子云在原子级接触之前保持分离。随后在机械接触过程中,两个原子彼此靠近且发生接触,这时两个原子之间会出现电子云重叠,导致势垒降低并伴随原子之间的电子转移。该机械压力的作用是缩短原子间距并使电子云重叠效果最大化。该跃迁模型是任意两种材料之间接触起电的通用模型,且可以扩展到接触起电的其他情况。这项工作是接触起电里程碑式的基础工作,为TENG提供了一种新的研究方法。为了便于引用和描述,该电子跃迁模型被命名为“王氏跃迁”。



(a) 原子力显微镜尖端和KPFM实验装置示意图



(b) 两个原子之间的相互作用能



(c) 接触起电过程中的电子-云-势-阱模型

图6 接触起电中的“王氏跃迁”模型^[14]

Fig. 6 Wang's overlapping electron cloud model of contact electrification^[14]

除了固体与固体接触起电,液体与固体之间的接触起电现象在我们的日常生活中也相当普遍,例如,从管道中流出的水是带电的。液-固之间接触起电目前已成为许多技术和物理化学现象的基础,例如,液-固摩擦纳米发电机、疏水性和亲水性表面,以及双电层(electric double layer, EDL)的形成等。王中林团队研究了液体和固体之间接触起电的机理,并探索了温度对陶瓷表面接触起电的影响^[41]。结果表明,在液-固接触起电过程中既有电子转移,也有离子转移,且水溶液中的溶质(如 Na^+ 和 Cl^- 等)可以减少水溶液和固体之间的电子转移。电离反应诱导的液-固接触起电过程中的离子转移会受到液体pH值的显著影响。此外,研究发现亲水表面和水溶液之间的接触起电以离子转移为主;而疏水表面和水溶液之间的接触起电以电子转移为主。这是对2019年王中林院士提出的王氏混合双电层模型的首次试验验证^[14],这对电催化、机械化学、电化学存储、电泳等双电层相关领域的研究具有重要意义。

2.3 摩擦纳米发电机和传统电磁发电机对比

在各种机械能量采集技术中,EMG应用广泛且对人类文明发展的影响深远。对新兴的TENG与历史悠久的EMG的技术特点和性能进行对比非常有必要也是非常有意义的,这将有助于进一步理解TENG,对更好地利用TENG有着指导性的作用。图7对比了EMG与纳米发电机(nanogenerators, NG)的基本物理机制,其中,EMG基于洛伦兹力驱动传导电流机制,而纳米发电机(包含压电、热释电、摩擦电、静电、驻极体等不同类型)采用的是麦克斯韦位移电流机制。TENG的原理是基于介质之间的相对非匀速运动,运动导致介质极化,进而产生动生位移电流,将输入的机械能转换为电能。在物理上,TENG可以有效地将宽频段、高熵机械能转化为电能/电信号,这代表了以位移电流作为驱动力的研究方向和宏大领域。虽然EMG和TENG基于不同的物理机制,但都统一于麦克斯韦方程。

EMG在工作过程中,闭合电路中的一部分导体在磁场里做切割磁感线运动而产生电动势,该电动势取决于磁通密度。对于面内滑动模式的TENG,一种摩擦材料在另一种材料上滑动以诱导电荷分离,电荷分离产生的电流取决于表面电荷密度,如图8(a)所示^[42],图中 U 、 U_m 分别为感应电

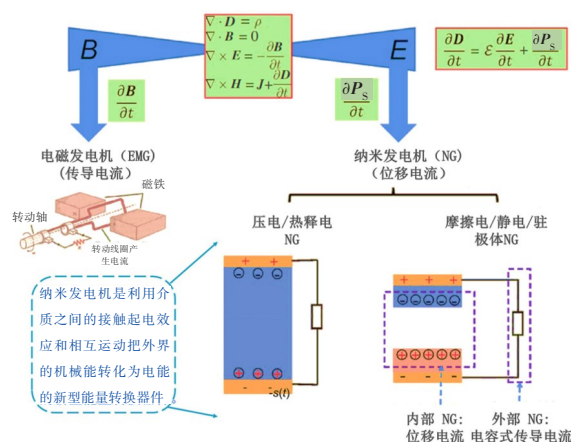


图7 电磁发电机与纳米发电机的理论基础比较^[25]

Fig. 7 Comparison of the theoretical basis of EMG and TENG^[25]

压、最大感应电压。类似地,对于旋转式的EMG和TENG,EMG由于磁通量变化产生感应电压,TENG由于转移电荷产生感应电流。通过对两者基本工作原理、器件结构和方程表达式进行详细比较,可以发现新兴的TENG与传统的EMG在理论上有很好的对应关系。通过对不同外部负载电阻下的输出功率进行对比分析,可以评估EMG和TENG对应的匹配阻抗,结果表明:TENG的匹配阻抗比EMG的大得多,如图8(b)所示。就阻抗特性而言,EMG可以看作是一个阻抗很小的电压源,而TENG则等效于具有大电容阻抗的电流源。此外,EMG串联电阻的输出功率是单个EMG的两倍,TENG并联电阻的输出功率是单个TENG的两倍,如图8(c)所示。这项工作是理解EMG和TENG之间关系的一个里程碑,该结论为TENG和EMG组成混合发电机的研究奠定了理论基础。

随后,ZI等^[43]对EMG和TENG在低频下的机械能收集特性进行了评估和更深入的讨论。如图8(d)所示,对于EMG,接触分离模式(contact-separation mode, CS)是通过一组铜(Cu)线圈和一块方形磁铁之间的接触分离来实现的。类似地,可以通过在氟化乙烯丙烯共聚物(fluorinated ethylene propylene, FEP)薄膜上沉积Cu电极来制备接触分离模式的TENG。独立滑动模式EMG是通过将一块方形磁铁在两组相邻的铜线圈(以相反方向缠绕)上方水平滑动(linear-sliding mode, LS)实现的,而独立滑动模式TENG是将FEP在两块相邻的沉积Cu电极的亚克力板上水平滑动实现的。图8(e)、8(f)分别展示了接触分离模式、独立滑动模式的EMG和TENG在不同工作频率下的

平均功率密度。针对这两种工作模式的研究结果表明,EMG的输出功率密度与其工作频率的平方 f^2 成正比,而TENG的输出功率密度与其工作频率 f 成正比。这是由EMG和TENG电输出频率的依赖性不同导致的。EMG的开路电压与其工作频率成正比,但TENG在不同频率下的开路电压保持不变。相比EMG要求的高频率,TENG在低于某阈值频率时具有优异的能量收集特性。TENG的优势可以很好地体现在对发光二极管(light emitting diode, LED)等具有一定阈值电压的电子设备的供电等用途上。具体来讲,EMG在低频(0.1~3.0 Hz)下的输出电压很小,不能驱动LED,而TENG的普遍输出电压(10~100 V)与频率无关,可以同时驱动多个单元。因此,TENG在低频下的高效能量采集是经典EMG或其他同类技术无法比拟的。根据以上结果,TENG在低频机械能量(从人类活动等小规模生物机械能量到大规模蓝色海洋波浪能)采集中将大有可为且极具应用价值。

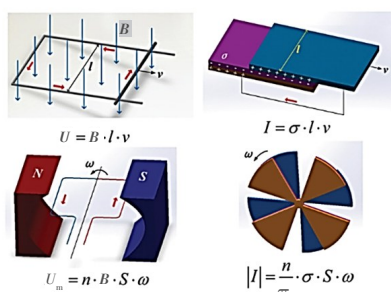
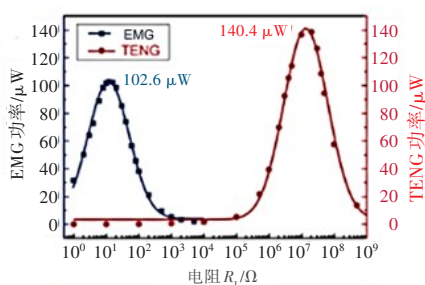
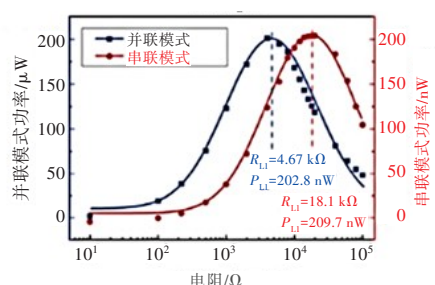
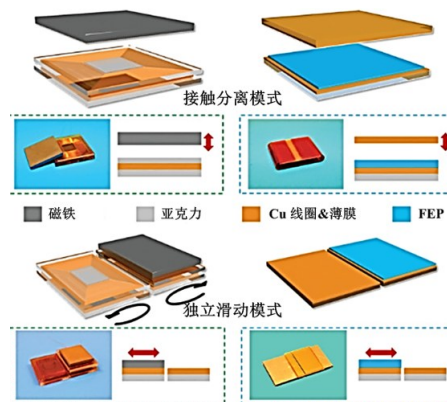
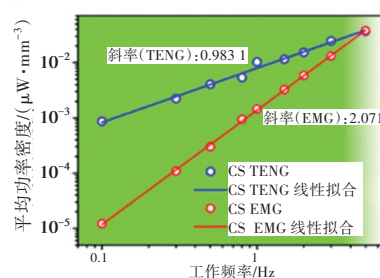
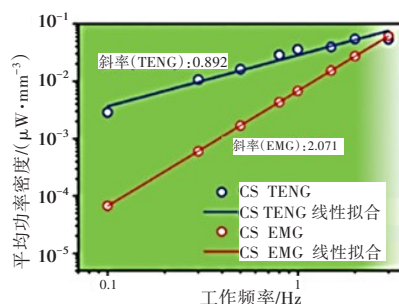
(a) 控制方程^[42](b) 功率对比^[42](c) 不同连接方式的功率对比^[42](d) 接触分离模式、滑动模式下的EMG和TENG示意图和照片^[43](e) 接触分离模式EMG和TENG在不同工作频率下的平均功率密度^[43](f) 滑动模式EMG和TENG在不同工作频率下的平均功率密度^[43]

图8 EMG和TENG基本原理和能量采集特性的比较

Fig. 8 Comparison between EMG and TENG on basic principles and energy harvesting characteristics

2.4 摩擦纳米发电机的评价标准

近年来,TENG技术已经成为一个高效经济,能够将环境中机械能转化为电能的高熵能源采集技术。由于TENG的工作模式、结构设计、材料选择及机械触发条件均不同,因此需要制定一个标准来定量表征和分析不同模式下TENG的输出性能^[41,44]。

类比于太阳能电池的效率和热电材料的品质因数——ZT因子,ZI等^[45]于2015年提出了定义TENG性能的品质因数(performance figure-of-merit, FOM_p),这个品质因数由结构品质因数(structural figure-of-merit, FOM_s)和材料品质因数

(material figure-of-merit, FOM_M)组成。其中, FOM_S 与发电机的结构设计有关, FOM_M 为材料表面电荷密度的平方, FOM_P 、 FOM_S 、 FOM_M 的量符号分别用 f_{FOM_P} 、 f_{FOM_S} 、 f_{FOM_M} 表示。研究人员对水平滑动模式 TENG 的输出行为展开了相关研究,其结构如图 9(a)所示。该研究用有限元法(finite element method, FEM)模拟了一个外接 100 M Ω 电阻的滑动式 TENG,初始状态定义为 $(Q, V)=(0, 0)$ (Q 为转移电荷量; V 为输出电压)。从 V - Q 曲线出发,我们注意到仅几个周期后 TENG 的运行会达到一个稳定状态(直接关注这个稳态输出就可以对 TENG 进行标准评价),如图 9(b)所示。在该稳定状态下 TENG 相应的 V - Q 曲线是一个闭合的环路,曲线的封闭区域则代表了每个周期的输出能量 J ,每个周期的输出能量 J 可以通过匹配电阻进行优化。图中的周期循环为能量输出循环(cycles for energy output, CEO),在稳定状态下最大和最小转移电荷量的差值为总循环电荷 Q_C 。对应每个 CEO,总循环电荷 Q_C 总是小于最大转移电荷 $Q_{SC,max}$ (特别是对于外接电阻较大的情况)。通过最大化总循环电荷,即使 $Q_C=Q_{SC,max}$,每个周期的输出能量 J 都可以进一步提高。在短路条件下, $Q_C=Q_{SC,max}$ 可以实现,因此,该试验设计了一套不断重复的步骤来获取瞬时短路条件。图 9(c)展示了利用一个和外接电阻并联的开关来获取瞬时短路条件的步骤:①在开关为开路的情况下,摩擦层发生相对运动,从 $x=0$ 到 $x=x_{max}$;②开关闭合,使 $Q_C=Q_{SC,max}$,然后打开开关;③摩擦层在开关为开路时再次发生相对运动,从 $x=x_{max}$ 到 $x=0$;④开关闭合,使 $Q=0$,然后再打开开关。在这个过程中,步骤②和④实现了瞬时短路条件并使总循环电荷最大化,即 $Q_C=Q_{SC,max}$ 。图 9(d)所示为不同外接电阻下的最大化能量输出循环(cycles for maximized energy output, CMEO),由该图可以看出,外接电阻越大,每个周期的输出能量就会越高。当 $R=+\infty$ 时,可以获得最大输出能量 J_m :

$$J_m = \frac{1}{2} Q_{SC,max} (V_{OC,max} + V'_{max}) \quad (10)$$

式中: $Q_{SC,max}$ 为最大短路转移电荷量; $V_{OC,max}$ 为最大开路电压; V'_{max} 为最大绝对电压。 $Q_{SC,max}$ 、 $V_{OC,max}$ 、 V'_{max} 都与表面电荷密度 σ 成正比,因此, J_m 与 σ^2 成正比。

TENG 的结构品质因数 FOM_S 可以定义为一个无量纲的量,其只与结构和最大位移量 x_{max} 相关:

$$f_{FOM_S} = \frac{2\varepsilon}{\sigma^2} \frac{J_m}{Ax_{max}} \quad (11)$$

式中: ε 为真空介电常数; A 为面积。

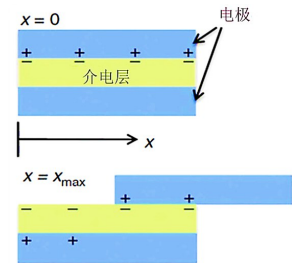
FOM_S 从结构设计角度直接体现了 TENG 的品质,可以通过调整 x_{max} 的值对其进行优化,如图 9(e)所示。

TENG 总的性能品质因数 FOM_P 可以通过下式定义:

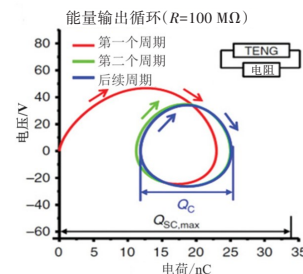
$$f_{FOM_P} = f_{FOM_S} \cdot \sigma^2 = 2\varepsilon \frac{J_m}{Ax_{max}} \quad (12)$$

其中, σ^2 只与材料的性质有关,为材料品质因数。

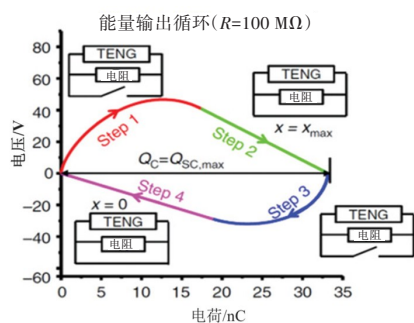
图 9(f)所示为不同模式下 TENG 的 FOM_S 。这些模式包括垂直接触分离模式(CS)、水平滑动模式(lateral sliding, LS)、接触式单电极模式(single electrode, SEC)、滑动式独立层模式(sliding freestanding triboelectric layer, SFT)和接触式独立层模式(contact freestanding triboelectric layer, CFT)。由该图可以发现,在相同尺寸下,由于单电极模式 TENG 的转移电荷量和电压都较低,因此,具有成对电极的 TENG 性能要比单电极模式的好得多。此外,由于接触分离模式 TENG 的性能优于滑动模式 TENG 的,因此,为了取得同样的最大开路电压 $V_{OC,max}$,滑动模式需要更高的最大位移量 x_{max} 。通过引入独立层结构设计可以有效提高 TENG 的输出性能,这是由于电极之间的电容被大大降低,同时中间介电层的双面起电可以获得更多转移电荷,这使得接触式独立层结构 TENG 的最大结构品质因数($FOM_{S,max}$)大幅提升。



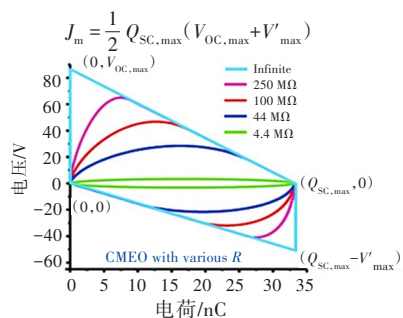
(a) 水平滑动模式发电机的示意图



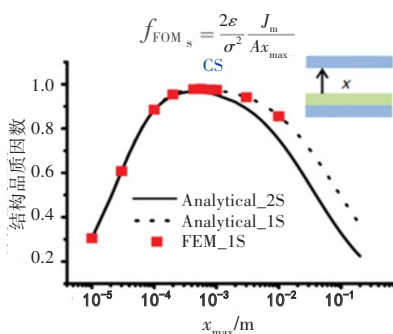
(b) 外接电阻 $R=100\text{ M}\Omega$ 的能量输出循环(CEO)



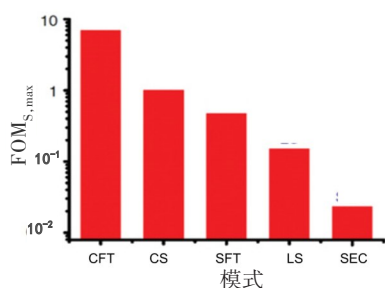
(c) 最大化能量输出循环



(d) 不同外接电阻的最大化能量输出循环



(e) 接触分离模式下的结构品质因数



(f) 由有限元分析法得到的不同结构的最大结构品质因数

图9 摩擦纳米发电机的评价标准^[45]Fig. 9 Evaluation standards for TENG^[45]

3 摩擦纳米发电机的新应用

3.1 微纳分布式能源

随着物联网的迅猛发展,便携式电子产品和传感器网络对可持续、可再生和清洁能源的需求

变得越来越高。数万亿个分布式无线节点需要逐一供电。与常规可再生能源(如太阳能、风能、地热能等)相比,机械能是环境中普遍存在且分布最广泛能量形式,并且不受工作环境和天气等条件的影响。TENG通过耦合摩擦起电和静电感应,可以有效地把微小、分布式、高熵的机械能转换为电能,展示出这种颠覆性技术所具有的史无前例的特点和优势。TENG提供了一种全新的用于收集机械能的技术,是未来高熵动能发电和自驱动系统领域的一个里程碑式的发明。基于TENG的新技术可以采集环境中的微纳机械高熵能源,并可作为自供电系统的微功率源。这是新兴的领域,是纳米材料和纳米能源为数十亿电子器件提供分布式能源的典型应用。同时,TENG的制作简便,选材广泛,形式/结构多样且质量较轻,非常适用于收集日常生活中耗散的各种形式的机械能(如人体运动、机器/设备振动、轮胎转动、风能/水能等),并可以通过电能存储与利用,实现多功能自驱动系统,为大规模物联网的构建奠定坚实的基础^[46-50]。

图10(a)展示了一种可用于能量收集、存储和利用的多功能同轴能量纤维^[51]。该能量纤维由纤维结构TENG、超级电容器(SC)及自驱动压力传感器组成。其内核是一种用于储存能量的纤维状超级电容器,外侧保护层是用于能量收集的单电极模式的纤维TENG,而外摩擦层和内部电极层又构成了自供电压力传感器。纤维TENG的最大功率可达 $2.5 \mu\text{W}$,能够为电子手表和温度传感器供电。该图所展示的多功能同轴能量纤维将引领织物可穿戴电子设备朝着更智能、更易获得、更环保的方向发展。图10(b)展示的是一种自供能木质地板^[52]。通过可扩展的等离子体处理来增强原生木材的极化特性,可以最大限度地保留木材的暖色和机械坚固性,同时有效提高其摩擦电学特性输出。将采用等离子体处理过的木材组装成自供电地板可以将房间居住者行走等活动的机械能直接转化为可用的电能,为家用灯或电致变色窗户供电。该工作为下一代大型自供电建筑材料奠定了基础,通过促进建筑环境脱碳技术的发展,为“净零排放”的未来开辟了有利的技术途径。基于液-固界面接触起电,Nature报道了一种水滴能收集器件^[53],相比之前的液滴TENG,该器件的瞬时功率提升了上千倍(高达 50.1 W/m^2),从 15 cm 的

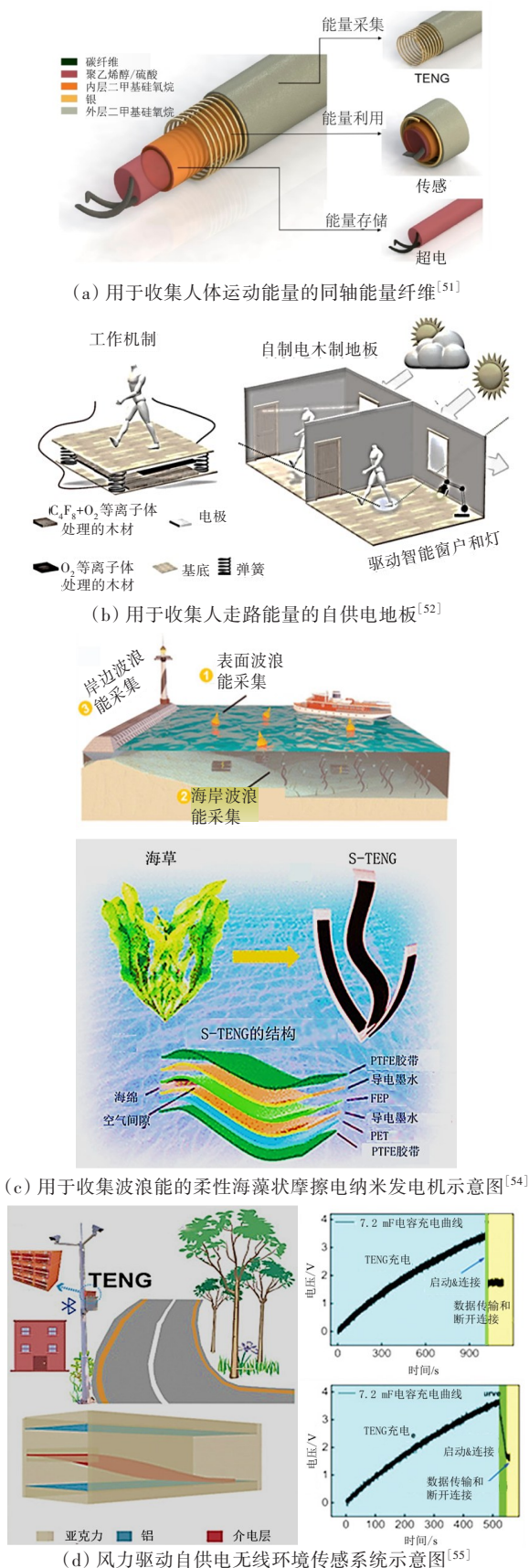


图10 微纳分布式能源采集

Fig. 10 Micro-nano distributed energy harvesting

高度释放的 $100\ \mu\text{L}$ 水可以产生超过 $140\ \text{V}$ 的电压并可以点亮 100 个小 LED 灯, 成功突破了先前液滴发电机发电功率密度不高的技术瓶颈。WANG 等^[54]报道了用一种柔性海藻状 TENG 来采集波浪高熵能源, 该 TENG 在波浪下通过弯曲和摆动实现接触分离, 从而产生电能, 如图 10(c) 所示。此外, 该研究对海藻状 TENG 电输出进行了系统测试, 试验结果表明, 海藻状 TENG 网络可有效为数百个商用 LED 供电。LIU 等^[55]设计和优化了风驱动的自供电系统, 该系统可以有效地从环境中采集风能并加以利用, 如图 10(d) 所示。该研究说明了研究的条件范围和局限性, 以此来界定和强调研究发现的适用范围, 并阐述了对于将来研究的建议及如何将这发现应用到实际中等内容。

3.2 自驱动传感

无需施加电源, TENG 就可以直接将机械刺激转换为电信号, 在自驱动传感方面具有突出的优势^[56-60], 如触觉传感器、运动传感器、加速度传感器、化学传感器、声传感器、光电传感器等。基于 TENG 的自驱动传感在分布式监测系统、工业互联网、轨道交通、医疗、体育运动等方面都具有广阔的应用前景。

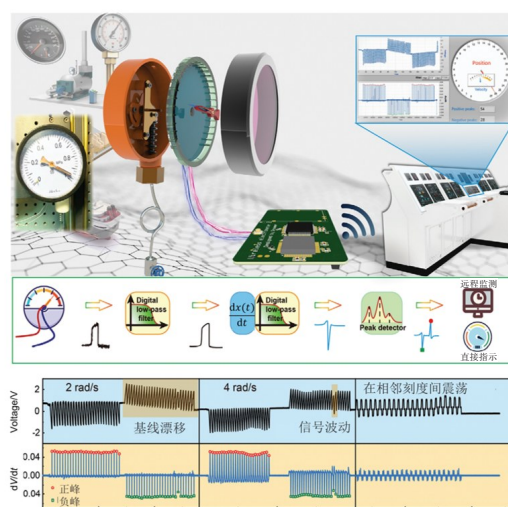
通过模仿动物利用毛发传感器探索周围环境的方式, AN 等^[61]设计了一种可弯曲的仿生触须机械感受器及后端基于静电计原理的信号采集电路, 并将机械感受器和采集电路应用于机器人和工业生产中的触觉传感系统, 如图 11(a) 所示。微弱的机械信号被毛须的杠杆作用放大, 同时被仿生机机械感受器的毛囊所感知, 实现对外部刺激的超高灵敏监测(灵敏度低至 $1.1\ \mu\text{N}$)。将该仿生毛须机械感受器的触觉传感系统用于机器人中, 成功实现了环境识别、物体表面形貌收集、自步态分析等功能。该仿生毛须机械感受器还可以进一步拓展至多功能微扰感受器阵列, 为未来机器人导航、猎物跟踪和危险规避的触觉技术提供良好的研究基础。LUO 等^[62]通过简单有效的木材处理方法(天然木材首先使用自上而下的两步法转化为柔性木材, 包括从天然木材中部分去除木质素/半纤维素和热压两步工艺。然后将得到的柔性木材用于制作 TENG 器件), 提高了木材的摩擦发电性能和机械性能, 构建了一种具有良好柔性、耐久性的高性能木基摩擦纳米发电机(W-TENG), 如图 11(b) 所示。W-TENG 具有质量轻($0.19\ \text{g}$)、结构

薄(0.15 mm)、价格低等优点,其输出性能可以提升约70%。因此,这种W-TENG可以被用作自驱动传感器安装于具有多种传感功能的智能乒乓球台上,利用乒乓球撞击球台产生的机械能实现落点分布统计和擦边球判定。该自驱动系统还可以实现对乒乓球的速度传感(在小于4.5 m/s的低速区域灵敏度为0.78 V/ms,在大于4.5 m/s的高速区域灵敏度为0.21 V/ms)、路径追踪和落点分布统计,监测的数据可以结合大数据为运动员训练提供有效的评估和指导。同时,该系统可以准确地判定比赛中两种不同擦边球的情况,从而辅助裁判员做出更准确的判断。该研究开创性地将木基电子器件与自驱动系统相结合,拓展了自驱动系统在智能体育中的应用,并有望延伸到多种体育运动(如羽毛球、网球、篮球、排球、跳远等)的智能分析中。

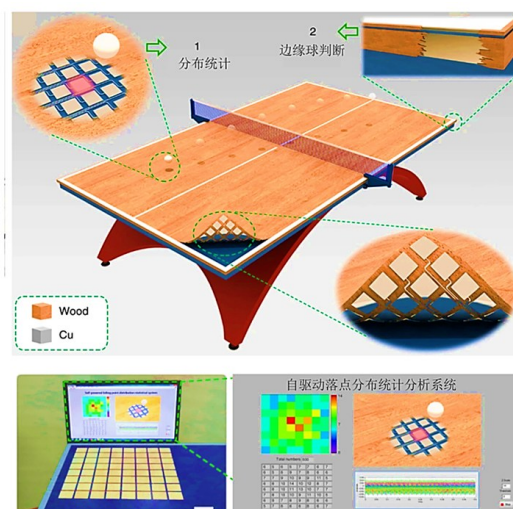
此外,自驱动传感在农业、道路交通运输、电力电网等方面也有重要用途。HAN等^[63]设计了一种软接触的转盘式发电机(SCR-TENG),用于收集低速风的能量,将风能转化为电能并应用于智能农业中。通过将天然兔毛覆在FEP摩擦层上,可以诱导FEP表面产生高密度电荷并有效降低摩擦阻力,从而提高该器件的耐用性。经过48万次循环后,FEP表面无明显磨损,所转移的电荷也没有明显衰减,其机电转换效率达到了15.4%。此外,使用优化后的SCR-TENG,在智能农场中可以实现夜间指示方向、诱捕蚊虫,以及自供电土壤湿度传感和温湿度监测等功能。这项工作证明了TENG在收集低速风的能量并应用于智能农场方面的巨大潜力。LI等^[64]设计了一种可用于自供电的双模态信号摩擦纳米发电机(DSA-TENG),其可有效助力自动驾驶技术。我们知道,自动驾驶汽车技术可以大大缓解交通拥堵和驾驶员的驾驶疲劳。为了保证驾驶安全,角度传感器通过对车辆信息的实时监控和反馈,在自动驾驶汽车中发挥着重要作用。通过将设计的DSA-TENG传感器集成到汽车方向盘的自动控制系统中,可以监控方向盘的旋转角度和方向。同时,汽车的控制系統可以接收来自固定在方向盘上的DSA-TENG信号,通过预设的命令实现对方向盘的控制。通过数据采集卡,根据传感信号的类型、脉冲计数和脉冲宽度可以获得方向盘运动的物理量,例如旋转方向、角度和角速度。智慧城市是最重要的物联

网应用之一,而物联网上的数十亿智能设备会产生大量定向到云进行存储和处理的数据。基于TENG的自驱动传感器可以有效帮助解决智能家居、智能建筑和智能城市中有关能源供应和传感的实际问题。

智能、灵活、自供电的感官系统代表了超越摩尔定律的信息技术的发展趋势,并赋予人工智能以多功能性和多样性。压电/摩擦电能以主动方式将电输出传感信号与外部机械动作直接联动/触发,这在智能灵活的传感器、智能人机交互和自供电系统中非常有前途。压电/摩擦电子学的进一步发展仍有巨大的空间,这将是一个重要的交叉学科,与柔性电子学、神经形态器件、人工智能、自驱动系统,甚至海洋/空间技术都密切相关^[65]。



(a) TENG在工业领域的应用^[61]



(b) TENG在体育行业的传感应用:智能乒乓球桌^[62]

图11 自供电传感

Fig. 11 Self-powered sensing

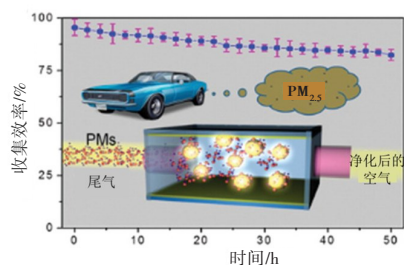
3.3 高压电源

TENG固有的高电压、低电流特性使其可以替代传统高压电源且具有极强的便携性和安全性。基于TENG的高压电源不需要复杂功率转换器就可以轻易获得1~10 kV高电压,可以有效降低系统的复杂性和成本,利用TENG高压电源可以实现对一些电响应材料或设备的有效控制或驱动,如介电弹性体、铁电/压电材料、静电机械手、场发射器和静电空气净化器等^[66-72]。鉴于TENG每个工作循环周期中转移的电荷量有限,理想的TENG高压应用应该对电流的要求不高,能达到和传统的高压电源相当或更好的性能。此外,较低的电流对人员和仪器的威胁要小得多,因为一旦有限的电荷被转移就不能维持高压。

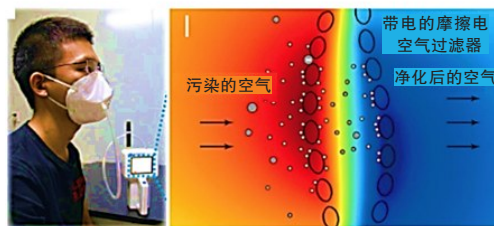
基于此,CHEN等^[71]于2014年首次提出TENG驱动的空气净化器的概念,在空气污染日益严重的情况下,TENG驱动的空气净化器具有巨大的商业化潜力。相比传统的静电除尘器,TENG驱动的空气净化器无需外加高压,可以有效避免臭氧的产生。该概念首先使用风驱动的旋转式TENG进行展示,风驱动的TENG产生的电信号在整流后连接到两个平行电极上。由于库伦力的吸引力和排斥力,带电粒子就会被带电电极收集。此外,旋转式TENG可以提高传统纤维过滤器的颗粒物(particulate matter, PM)去除效率^[72]。此外,HAN等^[73]报道了一种TENG摩擦电过滤器,其可以通过摩擦起电效应去除汽车尾气中的PM。有限元仿真表明,当聚四氟乙烯(polytetrafluoroethylene, PTFE)颗粒与电极碰撞或摩擦时,可以产生大量摩擦电荷并形成高达12 MV/m的空间电场(电极间开路电压约为6 kV)。通过控制PTFE颗粒的填充率和外加振动频率,该TENG摩擦电过滤器中产生的高电场可以有效去除气溶胶中的PM,去除率高达94.0%。在实际的汽车尾气过滤应用中,摩擦电过滤器对于PM_{2.5}的质量收集效率约为95.5%,如图12(a)所示。BAI等^[74]开发了一种多层可水洗摩擦电空气过滤器(triboelectric air filter, TAF),该过滤器由尼龙织物和PTFE织物组成,如图12(b)所示。该TAF可以通过尼龙和PTFE织物之间的摩擦来实现充电功能。对于PM_{0.5}和PM_{2.5},该TAF分别实现了84.7%和96.0%的去除效率。与商用口罩不同的是,在用商用洗涤剂清洁TAF后,TAF的去除效率几乎没有变化,这对于制造可重

复使用且高效的空气过滤口罩有着重要意义。

通过在所选基底上合理设计电极,TENG的高电压特性还可以应用于静电驱动,实现对水滴和固体颗粒等微小物体的运动驱动,这是通过TENG电压输出所提供的库仑力来实现的。NIE等^[75]利用TENG驱动开发了自供电液滴运输系统。在这个系统中,用于承载微小物体的托盘由4个液滴支撑。液滴铺设在疏水表面,两条光栅轨道电极线放置在疏水膜下方,以引导液滴的运动,如图12(c)所示。TENG的输出电压施加在轨道电极上,液滴可以通过产生的库仑力移动,从而实现可搭载微小物体的自驱动微型车,其最大负载可达500 mg,最高可控速度为1 m/s,TENG可为微型车提供驱动力和控制信号。通过TENG控制的可被驱动的液滴的最小体积约为70~80 nL,其可以分别在水平和垂直平面上移动。此外,该系统被证实能够有效将纳米颗粒传递到指定位置。这种基于TENG的微运输系统具有自供电、高效率 and 快速响应等优势,在微固体/液体操纵器、药物输送系统、微生物学和人机交互等领域都有潜在应用。CHENG等^[76]通过结合TENG和等离子体源,成功利用机械刺激驱动诱导了大气压等离子体,并将其应用于表面处理和图案化发光。该工作对传统等离子体源的简单和便携式提供了补充,且丰富了现有技术无法实现的等离子体应用的多样性。TENG高压电源技术具有极高的优越性,主要体现在安全、可控、便携和高效等方面,未来必将在高压仪器、制动器、空气净化、药物运输等诸多领域有广泛的应用。



(a) 从汽车尾气中去除PM^[73]



(b) 可水洗空气过滤器^[74]

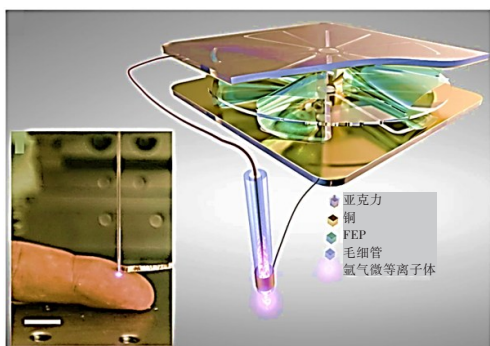
(c) 微流体运输系统^[75](d) 摩擦电微等离子体^[76]

图12 TENG作为直流高压电源的应用

Fig. 12 Application of TENG as a DC high-voltage power source

3.4 蓝色能源梦想

水波是丰富的低频高熵能源之一,广泛分布在河流、湖泊、海洋中。而TENG目前最主要的研究方向就是回收散落在自然界中得不到有效利用的高熵能源,并将其转换为电能。海洋无穷无尽的一波一涌所包含的能量,被王中林院士看中并进行开发,这种能源被命名为“蓝色能源”。与传统的EMG相比,新兴的TENG技术在低频、无序、分布式水波动能收集方面具有极大优势,将多个TENG单元集成到一个网络阵列,更有望实现大规模蓝色能源收集^[77-81]。

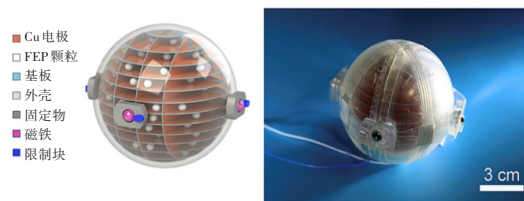
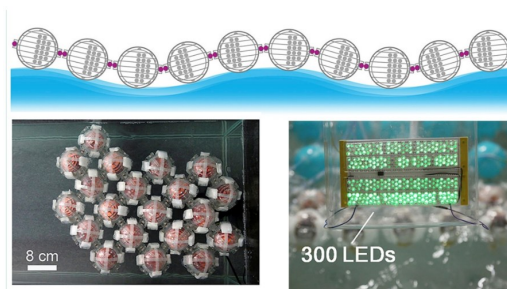
滚动球形结构适用于从各个随机方向收集动能,因此被认为是蓝色能源收集最有应用前景的结构。YANG等^[82]设计了一种具有3D网格电极结构的封装式球形TENG,其中一组电极板被连接在一起形成3D电极并用球形外壳密封,如图13(a)所示。该球形TENG的平均功率密度可以达到 8.69 W/m^3 ,是目前蓝色能源可达到的最大平均功率密度。基于该封装的TENG高性能单元,通过自适应磁接头可以实现宏观自组装能量采集网络(包含18个球形TENG单元的TENG),在水波被搅动时可以驱动上百个LED,图13(b)展示了水中自

组装的TENG网络和300个LED被点亮的照片。

对于实际应用,TENG的能量转换效率和机械耐久性仍有待进一步提高。使用能量管理模块已被证明是最大化TENG能量转换的有效策略^[83-84]。LIANG等^[85]设计了一种基于弹簧辅助多层结构的球形TENG,它可以用于收集多方向上的水波能量,并能够集成能量管理模块来提高输出能量。与TENG直接充电的效果相比,与能量管理模块集成后的TENG对电容器的充电速度可以提高100倍。作为应用演示,TENG成功为水位检测/报警系统和水温计供电。而且,通过能量管理模块,TENG的不规则和随机的电输出可以转换为稳定的直流(direct current, DC)电压,可以更好地满足电子设备的电压需求。

PANG等^[86]设计和制造了一种具有分段摆动结构的基于动物毛皮的TENG(SSF-TENG),以收集低频水波能量。柔软致密的兔毛的引入降低了摩擦阻力和材料磨损,分段结构的设计和优化进一步提升了TENG的输出性能,如图13(c)、13(d)所示。超润滑轴承使SSF-TENG在一次触发后实现了超过5 min的延长能量收集时间,总能量转换效率高达23.6%。在真实水波触发下,SSF-TENG可提供6.2 mW的最大峰值功率和0.74 mW的平均功率。此外,通过SSF-TENG阵列对水波能量进行有效收集,成功实现了自供电海洋环境应用,为大规模蓝色能量收集和智能海洋的实现奠定了坚实的基础。

这些新颖的设计将为TENG在蓝色能源中的实际应用提供新的思路。2014年,王中林院士就

(a) 封装的具有3D电极结构的TENG器件示意图和照片^[82](b) 被水波搅动的TENG网络示意图^[82]

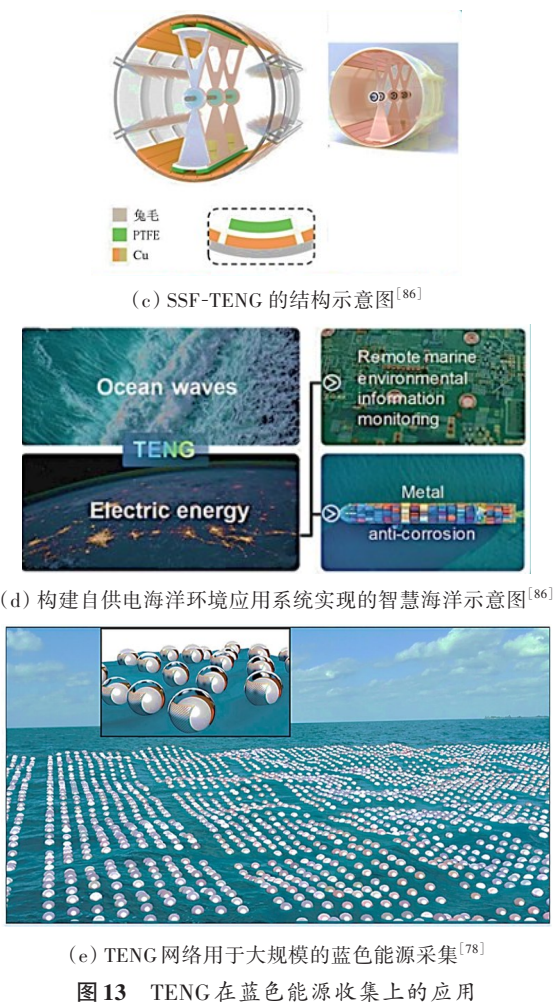


图 13 TENG 在蓝色能源收集上的应用

Fig. 13 Application of TENG in blue energy harvesting

提出了利用 TENG 能源网络收集大规模水波能的想法。该 TENG 网络包含数百万个球形 TENG 单元,这些单元可以根据需求连接成能源网络,如图 13(e)所示。球形 TENG 普遍采用轻质有机和金属材料,球中充满空气,因此它们可以轻易地漂浮在水面上,这样一来,从所有单元收集电能的总能量将是巨大的。通过这样大规模收集波浪能产生的电力是非常有前途的清洁能源,可以进一步通过电缆传输到陆地或岛屿的电网中,为生活和工业提供电力。“蓝色能源”梦想的实现将极大降低人们对化石能源的需求,该技术也没有二氧化碳排放,将给世界能源格局带来巨大的变化,并深刻影响人类社会的各个方面。

4 结论

1831 年法拉第发现了电磁感应,自此之后 EMG 一直是世界主流的电力供给设备。EMG 虽

然提供了一种高效收集常规动能和高质量动能的方法,但在低频下所产生的极小电压使其几乎不适用于驱动任何需要一定阈值电压才能工作的电子设备。无规律微纳机械高熵能量广泛分布在整个环境中,是一种新兴的有前景的可回收能源,开发匹配的能量采集技术对于适应新时代蓬勃发展的可持续能源的需求势在必行。TENG 的物理机制由拓展的位移电流方程主导,是一种非常有效的微纳高熵能源采集技术,特别适用于不规则、低频和微弱机械能的采集,从而弥补 EMG 的不足并广泛用于物联网大背景下的能量供给。

经过数十年广泛深入的研究,目前 TENG 的应用已经融入到我们日常生活的许多方面。其应用主要可分为 4 大领域,包括微纳能源、自驱动传感、高压电源和蓝色能源^[76,78,87-88]。现阶段,TENG 面临的困难和挑战对产业化市场来说仍旧十分严峻。尽管这项技术正在不断创新并朝着产业化的目标迈进,但电源容量、耐久性和稳定性与实际需求之间仍存在较大差距^[89-90]。此外,TENG 大规模应用的另一个关键挑战是如何提供最有效和最经济的方法,以实现与现有电子工业和工程技术的良好兼容。基于此,王中林院士团队对 TENG 的发展方向进行了总结:包括设计创新、器件与性能、系统与集成、产业化(图 14)。

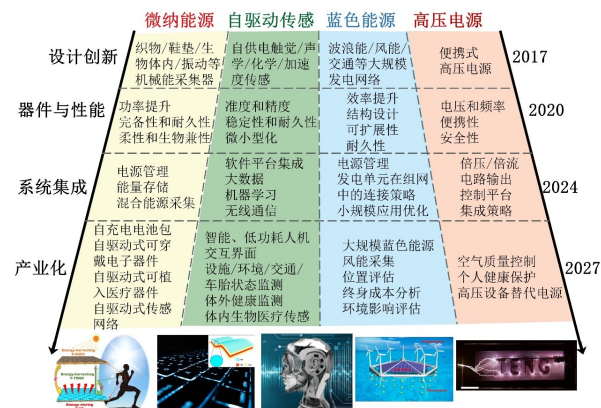


图 14 TENG 的 4 大应用领域和 TENG 技术的发展路线图

Fig. 14 The four major application areas of TENG and the development roadmap of TENG technology

这些亟待解决的问题在一定程度上制约了未来可持续能源中 TENG 的商业化和产业化发展,这导致当前设备与实际应用之间存在一定的差距。首先,需要设计创新,优化 TENG 的设计和结构,以满足市场需求。其次,对于器件与性能,合适的摩擦材料并匹配大规模制备方法,从而实现

最佳性能、高耐用性和稳定性等。第三,系统集成对于有效收集机械高熵能源至关重要,TENG的原型测试和试点产品开发是产业化之前的必要过程。第四,工业化是任何技术的目标,对于TENG来说也是如此,并且可能有机会像工业革命一样改变世界。

从近期目标看,当下物联网时代下的传感网络、机器人和人工智能应用急需对高熵能源进行有效利用,从而实现对分布广、移动性强、功耗小但数目巨大的电子器件的持续驱动。从长远目标看,还需要以社会高速发展为前提,如何减少对化石能源的需求并提前实现碳中和,根本途径之一就是开发海洋中蕴含的可再生、清洁且丰富的能源(如波浪能、潮汐能、洋流能等),即蓝色能源。

[参考文献]

- [1] ATZORI L, IERA A, MORABITO G. The Internet of Things: a survey [J]. *Computer Networks*, 2010, 54 (15): 2787–2805. DOI: 10.1016/j.comnet.2010.05.010.
- [2] WANG Z L, SONG J H. Piezoelectric nanogenerators based on zinc oxide nanowire arrays [J]. *Science*, 2006, 312(5771): 242–246. DOI: 10.1126/science.1124005.
- [3] CHENG T H, GAO Q, WANG Z L. The current development and future outlook of triboelectric nanogenerators: a survey of literature [J]. *Advanced Materials Technologies*, 2019, 4(3): 1800588. DOI: 10.1002/admt.201800588.
- [4] WANG Z L. Entropy theory of distributed energy for Internet of Things [J]. *Nano Energy*, 2019, 58: 669–672. DOI: 10.1016/j.nanoen.2019.02.012.
- [5] FAN F R, TIAN Z Q, WANG Z L. Flexible triboelectric generator [J]. *Nano Energy*, 2012, 1(2): 328–334. DOI: 10.1016/j.nanoen.2012.01.004.
- [6] WANG Z L. Triboelectric nanogenerators as new energy technology for self-powered systems and as active mechanical and chemical sensors [J]. *ACS Nano*, 2013, 7(11): 9533–9557. DOI: 10.1021/nm404614z.
- [7] WANG Z L. Triboelectric nanogenerators as new energy technology and self-powered sensors: principles, problems and perspectives [J]. *Faraday Discussions*, 2014, 176: 447–458. DOI: 10.1039/C4FD00159A.
- [8] WANG Z L, CHEN J, LIN L. Progress in triboelectric nanogenerators as a new energy technology and self-powered sensors [J]. *Energy & Environmental Science*, 2015, 8(8): 2250–2282. DOI: 10.1039/C5EE01532D.
- [9] ZHU G, PENG B, CHEN J, et al. Triboelectric nanogenerators as a new energy technology: from fundamentals, devices, to applications [J]. *Nano Energy*, 2015, 14: 126–138. DOI: 10.1016/j.nanoen.2014.11.050.
- [10] 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. DOI: 10.1021/nl303573d.
- [11] XIONG Y, HAN J, WANG Y F, et al. Emerging iontronic sensing: materials, mechanisms, and applications [J]. *Research*, 2022, 2022: 9867378. DOI: 10.34133/2022/9867378.
- [12] BAYTEKIN H T, PATASHINSKI A Z, BRANICKI M, et al. The mosaic of surface charge in contact electrification [J]. *Science*, 2011, 333(6040): 308–312. DOI: 10.1126/science.1201512.
- [13] MAITI S, KARAN S K, KIM J K, et al. Nature driven bio-piezoelectric/triboelectric nanogenerator as next-generation green energy harvester for smart and pollution free Society [J]. *Advanced Energy Materials*, 2019, 9(9): 1803027. DOI: <https://doi.org/10.1002/aenm.201803027>.
- [14] WANG Z L, WANG A C. On the origin of contact-electrification [J]. *Materials Today*, 2019, 30: 34–51. DOI: 10.1016/j.mattod.2019.05.016.
- [15] WU H, WANG S, WANG Z K, et al. Achieving ultrahigh instantaneous power density of 10 MW/m² by leveraging the opposite-charge-enhanced transistor-like triboelectric nanogenerator (OCT-TENG) [J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 1–8. DOI: 10.1038/s41467-021-25753-7.
- [16] SUN W J, LI B, ZHANG F, et al. TENG-Bot: triboelectric nanogenerator powered soft robot made of uni-directional dielectric elastomer [J]. *Nano Energy*, 2021, 85: 106012. DOI: 10.1016/j.nanoen.2021.106012.
- [17] WANG Z L. Triboelectric nanogenerator (TENG): sparking an energy and sensor revolution [J]. *Advanced Energy Materials*, 2020, 10(17): 2000137. DOI: 10.1002/aenm.202000137.
- [18] WANG Z M, AN J, NIE J H, et al. A self-powered angle sensor at nanoradian-resolution for robotic arms and personalized medicare [J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(32): e2001466. DOI: 10.1002/adma.202001466.
- [19] WU C S, WANG A C, DING W B, et al. Triboelectric nanogenerator: a foundation of the energy for the new era [J]. *Advanced Energy Materials*, 2019, 9(1): 1802906. DOI: 10.1002/aenm.201802906.
- [20] WANG Z L. On Maxwell's displacement current for energy and sensors: the origin of nanogenerators [J]. *Materials Today*, 2017, 20(2): 74–82. DOI: 10.1016/j.mattod.2016.12.001.
- [21] XU C, ZI Y L, WANG A C, et al. On the electron-transfer mechanism in the contact-electrification effect

- [J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(15): 1706790. DOI: 10.1002/adma.201706790.
- [22] WANG Z L, SHAO J J. Maxwell's equations for a mechano-driven varying-speed motion media system under slow motion and nonrelativistic approximations [J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2022, 52(8): 1198–1211. DOI: 10.1360/SST-2022-0176.
- [23] WANG Z L, SHAO J J. Maxwell's equations for a mechano-driven varying-speed-motion media system for engineering electrodynamics and their solutions [J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2022, 52(9): 1416–1433. DOI: 10.1360/sst-2022-0226.
- [24] LI S X, DENG S, XU R, et al. High-frequency mechanical energy harvester with direct current output from chemical potential difference [J]. *ACS Energy Letters*, 2022, 7(9): 3080–3086. DOI: 10.1021/acsenenergylett.2c01582.
- [25] WANG Z Q. On the expanded Maxwell's equations for moving charged media system: general theory, mathematical solutions and applications in TENG [J]. *Materials Today*, 2022, 52: 348–363. DOI: 10.1016/j.mattod.2021.10.027.
- [26] 王中林, 陈鹏飞. 从物联网时代的高熵能源到迈向碳中和的蓝色大能源: 接触起电的物理机理与摩擦纳米发电机的科学构架 [J]. *物理*, 2021, 50(10): 649–662. DOI: 10.7693/wl20211001.
WANG Zhonglin, CHEN Pengfei. From high-entropy energy in the Internet of Things era to large-scale blue energy for carbon neutralization: the physical mechanism of contact electrification and the scientific framework of triboelectric nanogenerators [J]. *Physics*, 2021, 50(10): 649–662. DOI: 10.7693/wl20211001.
- [27] CAO X, ZHANG M, HUANG J R, et al. Inductor-free wireless energy delivery via Maxwell's displacement current from an electrodeless triboelectric nanogenerator [J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(6): 1704077. DOI: 10.1002/adma.201704077.
- [28] ZHAO H F, XU M Y, SHU M R, et al. Underwater wireless communication via TENG-generated Maxwell's displacement current [J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 1–10. DOI: 10.1038/s41467-022-31042-8.
- [29] WANG H Y, WANG J Q, YAO K M, et al. A paradigm shift fully self-powered long-distance wireless sensing solution enabled by discharge-induced displacement current [J]. *Science Advances*, 2021, 7(39): eabi6751. DOI: 10.1126/sciadv.abi6751.
- [30] WANG Z L. On the first principle theory of nanogenerators from Maxwell's equations [J]. *Nano Energy*, 2020, 68: 104272. DOI: 10.1016/j.nanoen.2019.104272.
- [31] NIU S M, LIU Y, ZHOU Y S, et al. Optimization of triboelectric nanogenerator charging systems for efficient energy harvesting and storage [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2014, 62(2): 641–647. DOI: 10.1109/TED.2014.2377728.
- [32] 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. DOI: 10.1039/C3EE42571A.
- [33] 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. DOI: 10.1039/C4EE00498A.
- [34] 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. DOI: 10.1002/adfm.201500447.
- [35] NIU S M, LIU Y, CHEN X Y, et al. Theory of freestanding triboelectric-layer-based nanogenerators [J]. *Nano Energy*, 2015, 12: 760–774. DOI: 10.1016/j.nanoen.2015.01.013.
- [36] NIU S M, LIU Y, WANG S H, et al. Theory of sliding-mode triboelectric nanogenerators [J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(43): 6184–6193. DOI: 10.1002/adma.201302808.
- [37] ZHOU Y S, LIU Y, ZHU G, et al. In situ quantitative study of nanoscale triboelectrification and patterning [J]. *Nano Letters*, 2013, 13(6): 2771–2776. DOI: 10.1021/nl401006x.
- [38] ZHOU Y S, LI S M, NIU S M, et al. Effect of contact- and sliding-mode electrification on nanoscale charge transfer for energy harvesting [J]. *Nano Research*, 2016, 9(12): 3705–3713. DOI: 10.1007/s12274-016-1241-4.
- [39] ZHOU Y S, WANG S H, YANG Y, et al. Manipulating nanoscale contact electrification by an applied electric field [J]. *Nano Letters*, 2014, 14(3): 1567–1572. DOI: 10.1021/nl404819w.
- [40] LIU J, GOSWAMI A, JIANG K R, et al. Direct-current triboelectricity generation by a sliding Schottky nanocontact on MoS₂ multilayers [J]. *Nature Nanotechnology*, 2018, 13(2): 112–116. DOI: 10.1038/s41565-017-0019-5.
- [41] 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 [J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 1–8. DOI: 10.1038/s41467-019-14278-9.
- [42] ZHANG C, TANG W, HAN C B, et al. Theoretical comparison, equivalent transformation, and conjunction operations of electromagnetic induction generator and triboelectric nanogenerator for harvesting mechanical energy [J]. *Advanced Materials*, 2014, 26

- (22): 3580–3591. DOI: 10.1002/adma.201400207.
- [43] ZI Y L, GUO H Y, WEN Z, et al. Harvesting low-frequency (<5 Hz) irregular mechanical energy: a possible killer application of triboelectric nanogenerator [J]. *ACS Nano*, 2016, 10 (4): 4797–4805. DOI: 10.1021/acsnano.6b01569.
- [44] YUAN Z Q, PAN C F. Quantifying electron-transfer in liquid-solid contact electrification [J]. *Science Bulletin*, 2020, 65 (11): 868–869. DOI: 10.1016/j.scib.2020.03.009.
- [45] ZI Y L, NIU S M, WANG J, et al. Standards and figure-of-merits for quantifying the performance of triboelectric nanogenerators [J]. *Nature Communications*, 2015, 6 (1): 1–8. DOI: 10.1038/ncomms9376.
- [46] YI F, WANG X F, NIU S M, et al. A highly shape-adaptive, stretchable design based on conductive liquid for energy harvesting and self-powered biomechanical monitoring [J]. *Science Advances*, 2016, 2 (6): e1501624. DOI: 10.1126/sciadv.1501624.
- [47] CHEN J, HUANG Y, ZHANG N N, et al. Micro-cable structured textile for simultaneously harvesting solar and mechanical energy [J]. *Nature Energy*, 2016, 1 (10): 1–8. DOI: 10.1038/nenergy.2016.138.
- [48] PU X, LI L X, LIU M M, et al. Wearable self-charging power textile based on flexible yarn supercapacitors and fabric nanogenerators [J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(1): 98–105. DOI: 10.1002/adma.201504403.
- [49] TANG Q, YEH M H, LIU G L, et al. Whirligig-inspired triboelectric nanogenerator with ultrahigh specific output as reliable portable instant power supply for personal health monitoring devices [J]. *Nano Energy*, 2018, 47: 74–80. DOI: 10.1016/j.nanoen.2018.02.039.
- [50] HAN K, LUO J J, FENG Y W, et al. Self-powered electrocatalytic ammonia synthesis directly from air as driven by dual triboelectric nanogenerators [J]. *Energy & Environmental Science*, 2020, 13(8): 2450–2458. DOI: 10.1039/D0EE01102A.
- [51] HAN J, XU C Y, ZHANG J T, et al. Multifunctional coaxial energy fiber toward energy harvesting, storage, and utilization [J]. *ACS Nano*, 2021, 15(1): 1597–1607. DOI: 10.1021/acsnano.0c09146.
- [52] SUN J G, SCHÜTZ U, TU K K, et al. Scalable and sustainable wood for efficient mechanical energy conversion in buildings via triboelectric effects [J]. *Nano Energy*, 2022, 102: 107670. DOI: 10.1016/j.nanoen.2022.107670.
- [53] XU W H, ZHENG H X, LIU Y, et al. A droplet-based electricity generator with high instantaneous power density [J]. *Nature*, 2020, 578 (7795): 392–396. DOI: 10.1038/s41586-020-1985-6.
- [54] WANG Y, LIU X Y, WANG Y W, et al. Flexible seaweed-like triboelectric nanogenerator as a wave energy harvester powering marine Internet of Things [J]. *ACS Nano*, 2021, 15(10): 15700–15709. DOI: 10.1021/acsnano.1c05127.
- [55] LIU D, CHEN B D, AN J, et al. Wind-driven self-powered wireless environmental sensors for Internet of Things at long distance [J]. *Nano Energy*, 2020, 73: 104819. DOI: 10.1016/j.nanoen.2020.104819.
- [56] FAN W J, HE Q, MENG K Y, et al. Machine-knitted washable sensor array textile for precise epidermal physiological signal monitoring [J]. *Science Advances*, 2020, 6 (11): eaay2840. DOI: 10.1126/sciadv.aay2840.
- [57] HUANG J R, YANG X X, YU J R, et al. A universal and arbitrary tactile interactive system based on self-powered optical communication [J]. *Nano Energy*, 2020, 69: 104419. DOI: 10.1016/j.nanoen.2019.104419.
- [58] YU J R, YANG X X, GAO G Y, et al. Bioinspired mechano-photonics artificial synapse based on graphene/MoS₂ heterostructure [J]. *Science Advances*, 2021, 7 (12): eabd9117. DOI: 10.1126/sciadv.abd9117.
- [59] TAN F X, XIONG Y, YU J R, et al. Triboelectric potential tuned dual-gate IGZO transistor for versatile sensory device [J]. *Nano Energy*, 2021, 90: 106617. DOI: 10.1016/j.nanoen.2021.106617.
- [60] GUO Z H, WANG H L, SHAO J J, et al. Bioinspired soft electroreceptors for artificial precontact somatosensation [J]. *Science Advances*, 2022, 8(21): eabo5201. DOI: 10.1126/sciadv.abo5201.
- [61] AN J, CHEN P F, WANG Z M, et al. Biomimetic hairy whiskers for robotic skin tactility [J]. *Advanced Materials*, 2021, 33 (24): 2101891. DOI: 10.1002/adma.202101891.
- [62] LUO J J, WANG Z M, XU L, et al. Flexible and durable wood-based triboelectric nanogenerators for self-powered sensing in athletic big data analytics [J]. *Nature Communications*, 2019, 10 (1): 1–9. DOI: 10.1038/s41467-019-13166-6.
- [63] HAN J J, FENG Y W, CHEN P F, 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. DOI: 10.1002/adfm.202108580.
- [64] LI S X, ZHAO Z H, LIU D, et al. A self-powered dual-type signal vector sensor for smart robotics and automatic vehicles [J]. *Advanced Materials*, 2022, 34 (14): e2110363. DOI: 10.1002/adma.202110363.
- [65] YU J R, YANG X X, SUN Q J. Piezo/tribotronics toward smart flexible sensors [J]. *Advanced Intelligent*

- Systems, 2020, 2 (7) : 1900175. DOI: 10.1002/aisy.201900175.
- [66] CHEN X Y, WU Y L, YU A F, et al. Self-powered modulation of elastomeric optical grating by using triboelectric nanogenerator [J]. Nano Energy, 2017, 38: 91–100. DOI: 10.1016/j.nanoen.2017.05.039.
- [67] CHEN X Y, PU X, JIANG T, et al. Tunable optical modulator by coupling a triboelectric nanogenerator and a dielectric elastomer [J]. Advanced Functional Materials, 2017, 27 (1) : 1603788. DOI: 10.1002/adfm.201603788.
- [68] LEE J H, HINCHET R, KIM T Y, et al. Control of skin potential by triboelectrification with ferroelectric polymers [J]. Advanced Materials, 2015, 27 (37) : 5553–5558. DOI: 10.1002/adma.201502463.
- [69] CHEN X Y, IWAMOTO M, SHI Z M, et al. Self-powered trace memorization by conjunction of contact-electrification and ferroelectricity [J]. Advanced Functional Materials, 2015, 25 (5) : 739–747. DOI: 10.1002/adfm.201403577.
- [70] ZHANG C, TANG W, PANG Y K, et al. Active micro-actuators for optical modulation based on a planar sliding triboelectric nanogenerator [J]. Advanced Materials, 2015, 27 (4) : 719–726. DOI: 10.1002/adma.201404291.
- [71] CHEN S W, GAO C Z, TANG W, et al. Self-powered cleaning of air pollution by wind driven triboelectric nanogenerator [J]. Nano Energy, 2015, 14: 217–225. DOI: 10.1016/j.nanoen.2014.12.013.
- [72] GU G Q, HAN C B, LU C X, et al. Triboelectric nanogenerator enhanced nanofiber air filters for efficient particulate matter removal [J]. ACS Nano, 2017, 11 (6) : 6211–6217. DOI: 10.1021/acsnano.7b02321.
- [73] HAN C B, JIANG T, ZHANG C, et al. Removal of particulate matter emissions from a vehicle using a self-powered triboelectric filter [J]. ACS Nano, 2015, 9 (12) : 12552–12561. DOI: 10.1021/acsnano.5b06327.
- [74] BAI Y, HAN C B, HE C, et al. Washable multilayer triboelectric air filter for efficient particulate matter PM_{2.5} removal [J]. Advanced Functional Materials, 2018, 28 (15) : 1706680. DOI: 10.1002/adfm.201706680.
- [75] NIE J H, REN Z W, SHAO J J, et al. Self-powered microfluidic transport system based on triboelectric nanogenerator and electrowetting technique [J]. ACS Nano, 2018, 12 (2) : 1491–1499. DOI: 10.1021/acsnano.7b08014.
- [76] CHENG J, DING W B, ZI Y L, et al. Triboelectric microplasma powered by mechanical stimuli [J]. Nature Communications, 2018, 9 (1) : 1–11. DOI: 10.1038/s41467-018-06198-x.
- [77] ZHAO T C, XU M Y, XIAO X, et al. Recent progress in blue energy harvesting for powering distributed sensors in ocean [J]. Nano Energy, 2021, 88: 106199. DOI: 10.1016/j.nanoen.2021.106199.
- [78] WANG Z L, JIANG T, XU L. Toward the blue energy dream by triboelectric nanogenerator networks [J]. Nano Energy, 2017, 39: 9–23. DOI: 10.1016/j.nanoen.2017.06.035.
- [79] WANG X F, NIU S M, YIN Y J, 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. DOI: 10.1002/aenm.201501467.
- [80] XU L, JIANG T, LIN P, et al. Coupled triboelectric nanogenerator networks for efficient water wave energy harvesting [J]. ACS Nano, 2018, 12 (2) : 1849–1858. DOI: 10.1021/acsnano.7b08674.
- [81] JIANG T, YAO Y Y, XU L, et al. Spring-assisted triboelectric nanogenerator for efficiently harvesting water wave energy [J]. Nano Energy, 2017, 31: 560–567. DOI: 10.1016/j.nanoen.2016.12.004.
- [82] YANG X D, XU L, LIN P, et al. Macroscopic self-assembly network of encapsulated high-performance triboelectric nanogenerators for water wave energy harvesting [J]. Nano Energy, 2019, 60: 404–412. DOI: 10.1016/j.nanoen.2019.03.054.
- [83] WANG Y F, JIN X, WANG W Y, et al. Efficient triboelectric nanogenerator (TENG) output management for improving charge density and reducing charge loss [J]. ACS Applied Electronic Materials, 2021, 3 (2) : 532–549. DOI: 10.1021/acsaem.0c00890.
- [84] CHENG X L, TANG W, SONG Y, et al. Power management and effective energy storage of pulsed output from triboelectric nanogenerator [J]. Nano Energy, 2019, 61: 517–532. DOI: 10.1016/j.nanoen.2019.04.096.
- [85] LIANG X, JIANG T, LIU G X, et al. Spherical triboelectric nanogenerator integrated with power management module for harvesting multidirectional water wave energy [J]. Energy & Environmental Science, 2020, 13 (1) : 277–285. DOI: 10.1039/C9EE03258D.
- [86] PANG H, FENG Y W, AN J, et al. Segmented swing-structured fur-based triboelectric nanogenerator for harvesting blue energy toward marine environmental applications [J]. Advanced Functional Materials, 2021, 31 (47) : 2106398. DOI: 10.1002/adfm.202106398.
- [87] CHEN J, ZHU G, YANG J, et al. Personalized keystroke dynamics for self-powered human-machine interfacing [J]. ACS Nano, 2015, 9 (1) : 105–116. DOI: 10.1021/nn506832w.

- [88] WEN Z, YE H M, GUO H Y, et al. Self-powered textile for wearable electronics by hybridizing fiber-shaped nanogenerators, solar cells, and supercapacitors [J]. *Science Advances*, 2016, 2 (10) : e1600097. DOI: 10.1126/sciadv.1600097.
- [89] LUO J J, WANG Z L. Recent progress of triboelectric nanogenerators: from fundamental theory to practical applications[J]. *EcoMat*, 2020, 2(4) : e12059. DOI: 10.1002/eom2.12059.
- [90] CHEN B D, WANG Z L. Toward a new era of sustainable energy: advanced triboelectric nanogenerator for harvesting high entropy energy [J]. *Small*, 2022, 18 (43) : e2107034. DOI: 10.1002/smll.202107034.

Triboelectric nanogenerator: a novel technology for harvesting high-entropy energy toward the era of the Internet of Things

XIONG Yao, SUN Qijun

(Beijing Institute of Nanoenergy and Nanosystems, Chinese Academy of Sciences, Beijing 101400, China)

Abstract: As the world is marching toward the era of the Internet of Things (IoTs), big data, and artificial intelligence, the widely distributed sensing networks are the most critical element for hardware development in this era. Given the need for mobility of numerous distributed electronic devices, the era of IoTs calls for distributed energy sources. The random and irregular micro-nano mechanical high entropy energy is a new promising recyclable energy widely distributed in the surroundings. The development of paired harvesting technology to high entropy energy is imperative to meet the requirements of booming sustainable energy in the new era of IoTs. Triboelectric nanogenerator (TENG), driven by Maxwell's displacement current, is a highly effective technology for micro-nano mechanical high entropy energy harvesting. TENG has the virtues of broad materials choice, low cost, easy manufacturing, wide adaptability, and industrial scalability. Moreover, the TENG has higher efficiency and output performance than an electromagnetic generator (EMG) at low frequencies (typically < 5 Hz). In addition, TENG can directly convert mechanical stimuli into electrical signals without additional power, which is of great significance for self-powered sensing. As the ocean contains abundant and clean renewable energy, large-scale blue energy harvesting can also be achieved by integrating many TENG units into one network. Therefore, TENG has a broad application prospect in harvesting high entropy energy: from tiny micro-nano energy to large-scale blue energy. TENG is not only applicable to the distributed energy demands of the IoT era, but also a promising paradigm of sustainable energy for gearing carbon neutral in the future.

Key words: novel energy technology; triboelectric nanogenerator; high entropy energy; Internet of Things (IoTs); carbon neutrality

Manuscript received: 2022-09-09; **revised:** 2022-10-10; **accepted:** 2022-11-03

Corresponding author: SUN Qijun (1985—) (ORCID: 0000-0003-2130-7389), male, research fellow, research interest: triboelectric nanogenerator, semiconductor device, micro-nano sensing system. E-mail: sunqijun@binn.cas.cn

(责任编辑:刘平;校对:石月珍;英文编辑:彭卓寅)