

# 摩擦发电机在微弱能量收集中的应用

赵至真, 甘蓝月, 胡又凡\*

北京大学电子学院, 北京 100871

**摘要** 新型的摩擦发电机是基于摩擦起电效应和静电感应相互耦合的能量转换设备, 是一种可持续的、稳定的、绿色的能源供给方式。当摩擦发电机应用于各种微弱环境能量的收集时, 其器件结构需要精心地设计, 以满足灵敏度和效率的要求。概述了多种适用于微弱能量条件的摩擦发电机设计, 分析了其工作原理与应用场景, 展望了该技术未来在人体健康监测与医疗设备的发展、可持续电子系统的建立以及安全预警设备的完善等方面应用的前景。

**关键词** 摩擦发电机; 微弱能量收集; 高灵敏度; 高效率

一直以来, 人类的各项活动都离不开对能源的利用, 先进的能源技术促进人类社会不断发展。21世纪以来, 电子设备不断进步, 对于能源的要求更高, 作为环境能源中重要的一部分, 各种机械运动已被利用并转化为电力。如果能够找到一种合适的方法, 吸收广泛存在于生活环境中的机械能, 对整个电子系统将起到非常重要的作用。在此背景下, 2012年, 王中林<sup>[1-12]</sup>发明了世界上第1台摩擦发电机, 这种基于摩擦起电效应和静电感应相互耦合的能量转换方式, 是一种可持续、稳定、绿色的能源供给方式, 对于便携性的电子设备有非常重要的意义。以图1(a)所示的拱形摩擦发电机为例<sup>[13]</sup>, 上半部分的上表面是镀有金属电极的基于二氧化硅的拱形结构, 上半部分的下表面为聚二甲基硅氧烷

(PDMS), 下半部分是以铝箔(Al)为主的拱形结构, 相应的制备过程如图1(b)、(c)。PDMS和铝的接触分离构成了整个摩擦发电机的基本工作原理: 发生接触时, 由于得失电子的差异性, 铝会失去电子而荷正电, PDMS会得到电子而荷负电, 一旦这2个表面发生接触分离的运动过程, 上下电极之间由于静电感应, 就会产生电势差, 驱动载流子在外电路中运动。为了能够提升表面的带电密度, 类似金字塔和长方体的表面微结构被制备到了PDMS和铝上, 如图1(d)、(e)所示。接触分离式摩擦发电机的理论已经被研究完善<sup>[14]</sup>, 此外还有滑动式摩擦发电机<sup>[15]</sup>、单电极摩擦发电机<sup>[16]</sup>和独立层的摩擦发电机<sup>[17]</sup>等。

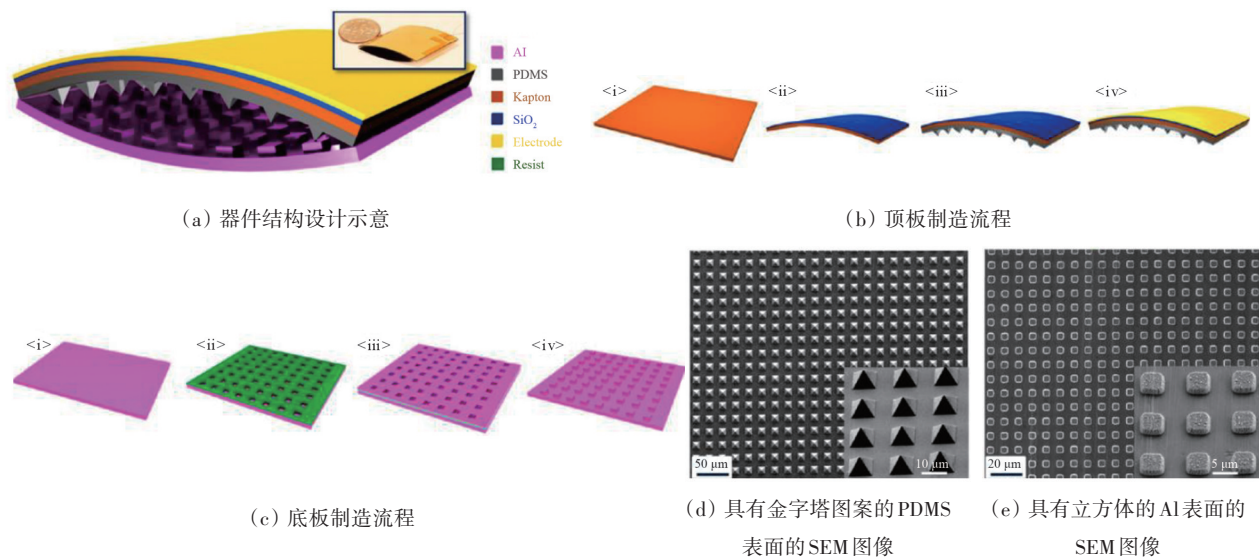
为了提高摩擦发电机的效率和扩展应用环境,

收稿日期: 2018-10-10; 修回日期: 2020-08-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(61971012)

作者简介: 赵至真, 博士研究生, 研究方向为能量采集技术, 电子信箱: 1701111240@pku.edu.cn; 胡又凡(通信作者), 副教授, 研究方向为柔性电子技术, 电子信箱: youfanhu@pku.edu.cn

引用格式: 赵至真, 甘蓝月, 胡又凡. 摩擦发电机在微弱能量收集中的应用[J]. 科技导报, 2022, 40(17): 36-45; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2022.17.004

图1 拱形摩擦纳米发电机设计<sup>[13]</sup>

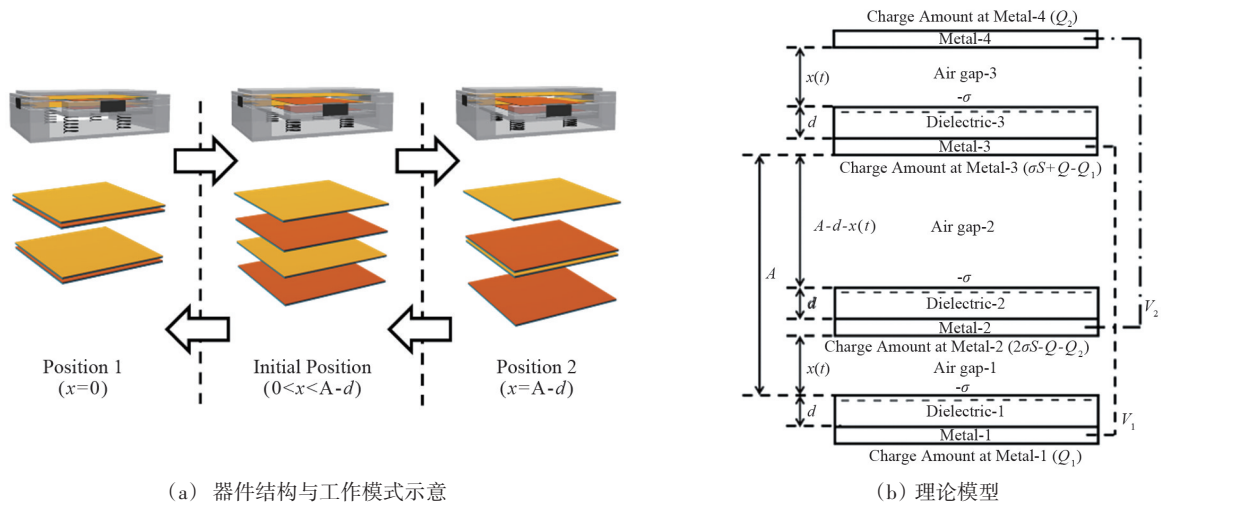
大量的改进与优化被用于器件的结构设计与制备: 基于超薄柔性材料的摩擦发电机可以识别裸露的手指敲击<sup>[18]</sup>, 输出  $1 \mu\text{A}$  的电流, 瞬时力学检测灵敏度约为  $0.947 \mu\text{A}/\text{MPa}$ ; 利用纸张制成的摩擦发电机结构<sup>[19]</sup>, 实现了高质量/体积与电荷输出比 ( $82 \text{ nC} \cdot \text{g}^{-1}/75 \text{ nC} \cdot \text{cm}^{-3}$ ); 整合了纳米线和碳海绵体结构的摩擦发电机能够降低成本与简化结构<sup>[20]</sup>; 一种基于悬浮结构的摩擦发电机利用不稳定的机械结构<sup>[21]</sup>, 在  $6 \text{ M}\Omega$  负载下, 达到最大输出功率密度  $2.76 \text{ W}/\text{m}^2$ ; 转盘式的分段摩擦发电机可以高速转移电荷, 实现不间断地输出高强的能量<sup>[22]</sup>; 用尼龙和涤纶编制的织物可以收集人体手臂摆动的能量<sup>[23]</sup>, 最大输出电流和电压发电机的功率可达  $0.2 \text{ mA}$  和  $2 \text{ kV}$ 。此外, 还有大量的摩擦发电机结构被设计出来, 用来吸收环境中的各种能量, 包括风能、水能、环境中的各类振动和人体的各种运动<sup>[24-38]</sup>。但是如果考虑微弱的环境能量的收集, 摩擦发电机的设计方式就需要更加精心的设计, 以满足灵敏度和效率的要求。

## 1 超灵敏的多层摩擦发电机

图 2<sup>[39]</sup> 是一个超灵敏的多层摩擦发电机的设计, 它拥有超高的效率, 搭配上研发的电源管理电路用于收集和利用环境中的微弱能量。表面镀铜的氟化乙丙烯 (FEP) 薄膜 (Cu-FEP 薄膜) 通过弹簧

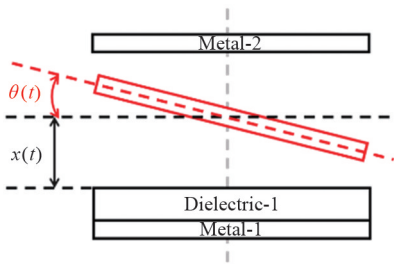
悬浮在单方向堆叠结构中, 图 2(a) 示意了 4 层 Cu-FEP 薄膜的摩擦发电机, 当环境中出现振动时, 悬浮在弹簧上的一组 Cu-FEP 薄膜会上下移动, 中间的每层 Cu-FEP 薄膜会与上下相邻的薄膜组合成 2 个摩擦发电机, 它的理论模型如图 2(b) 所示, 其目的是找到摩擦发电机的实时电压-电荷量-位移距离 ( $V-Q-x$ ) 的关系。运用了新的单方向堆叠结构, 与传统的摩擦发电机相比, 薄膜的发电效率提升了 50%, 而当层数继续增加, 这个值会逼近 100%, 这种增强的电荷转移能力将提高能量收集效率。同时, 由于结构材料的大量减少, 弹簧之上悬挂部分的重量也大大降低。因此, 弹性系数较小的弹簧可被采用, 用于改善设备的灵敏度, 使其更容易吸收环境中的微弱能量。

在之前的实验设计中, 摩擦发电机一般只考虑限制在沿垂直方向的振动模式, 但是在实际应用的环境, 转动模式的运动也大量存在。如图 2(c) 所示, 摩擦发电机中悬浮部分的运动, 也就是到 Metal-2 的运动, 可以分解成平移运动  $x(t)$  和旋转运动  $\theta(t)$ 。这 2 种运动模式都会改变摩擦发电机的电容, 有助于能量收集。通过理论分析和实验研究发现, 平动对于机械能到电能的转换效率远大于转动的转换效率 (图 2(d)), 因此降低发电机的转动惯量将有助于将环境中的机械振动更多地转换为悬浮部分的平动运动, 从而增加能量的转换效率, 这

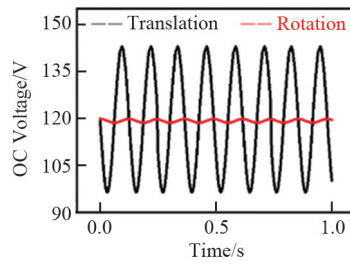


(a) 器件结构与工作模式示意

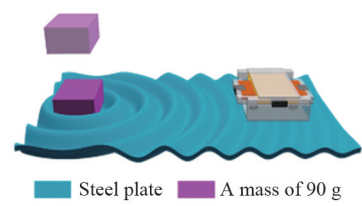
(b) 理论模型



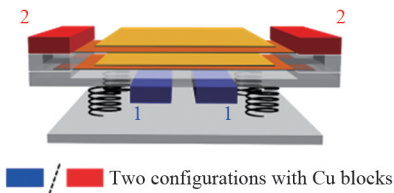
(c) 将摩擦发电机中悬浮部分的运动分解成平移运动和旋转运动



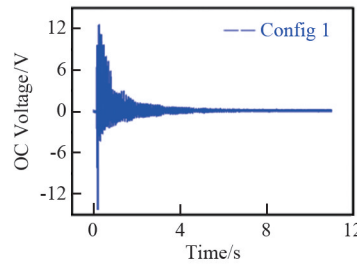
(d) COMSOL模拟相同输入动能下平移和旋转情况下的OC电压输出对比



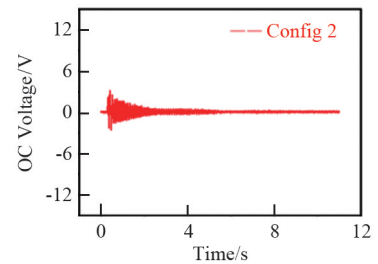
(e) 不同惯性动量下摩擦发电机性能表征的实验装置示意



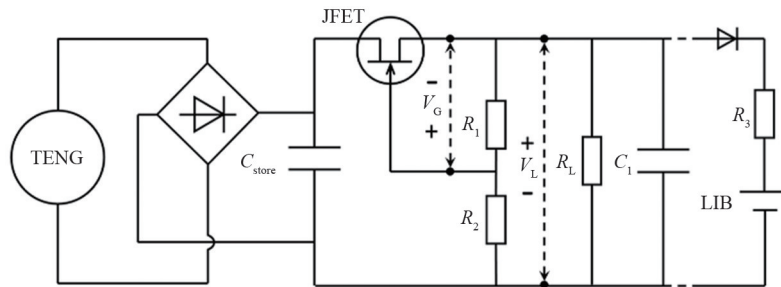
(f) 2个相同的铜块放置在2种不同的位置上 来改变摩擦发电机的惯性动量示意



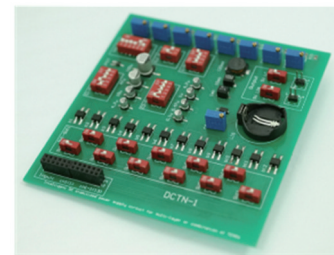
(g) 位置1情况下的OC电压输出



(h) 位置2情况下的OC电压输出



(i) 应用于微弱环境的电路设计



(j) 电路实物

图2 超灵敏的多层摩擦发电机设计

一点也通过相应的实验进行了验证(图 2(e)~(h))。摩擦发电机的输出一般为脉冲式,并且输出阻抗较大,因此在实际应用中,能量管理电路是非常重要的部分。对于微弱能量的收集,启动时间短、自身损耗低是能量管理电路非常重要的 2 个设计要求。线性稳压由于能够快速响应,在微弱能量收集应用中具有提高效率的优势,它以操控场效应晶体管的线性区作为可变电阻来调节电压。图 2(i)、(j)所示为基于线性稳压的电源管理电路,命名为 DCTN-1,它集成了一个 n 型 JFET(junction field-effect transistor)(2sk545, ON Semiconductor®), 2 个电容器和多个电阻器,可以实现可调节的输出电压来适用于不同应用场景。在这里,电能首先存储在存储电容器  $C_{store}$  中,输入能量时,  $C_{store}$  上的电压增加,栅极  $V_G$  因负载电压  $V_L$  增加而下降。因此, JFET 中的漏极电流下降,导致  $V_L$  下降,这样的负反馈过程将 DCTN-1 的输出电压维持在设置的水平,而电容器  $C_1$  用作滤波电容器,最终该电路实现了 1.5、3.3、4.5、5 和 6 V 不同的稳压输出电压。相比于商用的电压管理模块 LTC3588-1, DCTN-1 的效率更高,启动速度也更快。此外,多余的能量也可以被存储在锂电池中。这里展示的能源管理提供了一种有前景的方法,可实现更强大、更可持续的自供电系统,使环境中微弱机械能更好地转换,适应于不同的应用环境。

## 2 可机洗的织物摩擦发电机

由于近几年来对可穿戴技术的巨大需求,基于纺织品的电子设备迅速发展,作为可穿戴系统的重要组成部分,以织物为基础的能量收集器件已展现出潜力,能够成为未来轻巧、便携、灵活和绿色的可穿戴设备中的能量供应设备。特别是织物摩擦发电机,表现出出色的机械能收集能力和易于制造的优势。然而,一些问题仍然阻碍着织物摩擦发电机的进一步发展。首先,迄今为止报道的织物摩擦发电机大多依赖于滑动或接触分离的模式,需要至少一个纺织品作为基本表面(例如织物)和另一个表面(例如另一种织物或薄膜),需要显著的人体运动

来产生器件的变形或者接触分离,从而产生摩擦起电。即使采用单电极的方式,器件设计仍然很笨重,既不能用温和的方式收集微弱能量,也不适用于可穿戴的人体传感应用,例如生命体征的监控。其次,这些织物摩擦发电机往往是通过复杂的方式制造的,复杂的程序很难在传统纺织制造业中大规模制造。在图 3<sup>[40]</sup>所示的这项工作中,一个合理设计的织物摩擦发电机解决了上述挑战<sup>[40]</sup>。它通过直接编织铜(Cu)包覆的聚对苯二甲酸乙二醇酯(Cu-PET)的经纱和聚酰亚胺(PI)包覆的(PI-Cu-PET)纬纱在工业编织机织成样品(图 3(a))。与已有报道的其他织物摩擦发电机不同,这个器件设计充分利用编织结构本身的优势:在敲击或弯曲下,织物产生微妙的变形,每组经纬纱线十字交叉点的接触面积发生变化,产生摩擦电荷,实现的最大短路电流密度达 15.50 mA/m<sup>2</sup>,当负载电阻为 60 MΩ 时达到最大输出功率密度 33.16 mW/m<sup>2</sup>。

这种良好的性能可归因于以下几点。(1) 交织形式的织物编织结构可以为纬纱和经纱在十字交叉点提供足够的内部摩擦力。(2) Cu-PET 纱线本身具有微米级粗糙度的表面,也有利于摩擦起电过程。这些特点再加上单层织物的结构,有助于提升织物摩擦发电机的灵敏度,从而用于人体微弱运动的监测。通过将织物摩擦发电机两端与一根没有弹性的胸带进行缝合,然后束缚在一个测试者的胸腔外围,在测试者呼吸的过程中,胸腔的扩张和收缩会拉伸和释放发电机,产生相应的信号。为了能够利用织物摩擦发电机检测人体的呼吸模式,专门优化设计的信号处理是必不可少的,用于排除来自其他胸部运动的干扰信号以及环境噪音。数据处理的过程如图 3(b)~(d)所示。由织物摩擦发电机采集到的呼吸信号,首先通过 256 阶有限脉冲响应的低通滤波器,截止频率为 2 Hz。需要说明的是,低通滤波器的阶数、截至频率及采样时间都经过特殊调整,使之适合呼吸监测应用。然后进行一系列数据操作,计算出呼吸频率  $R_{res}$  和潮气量  $V_T$ 。图 3(e)所示为实际测量数据以及通过数据处理得到的测试者呼吸频率和潮气量的信息。此外,为了评估洗涤能力,纺织产品标准——缩水性能测试

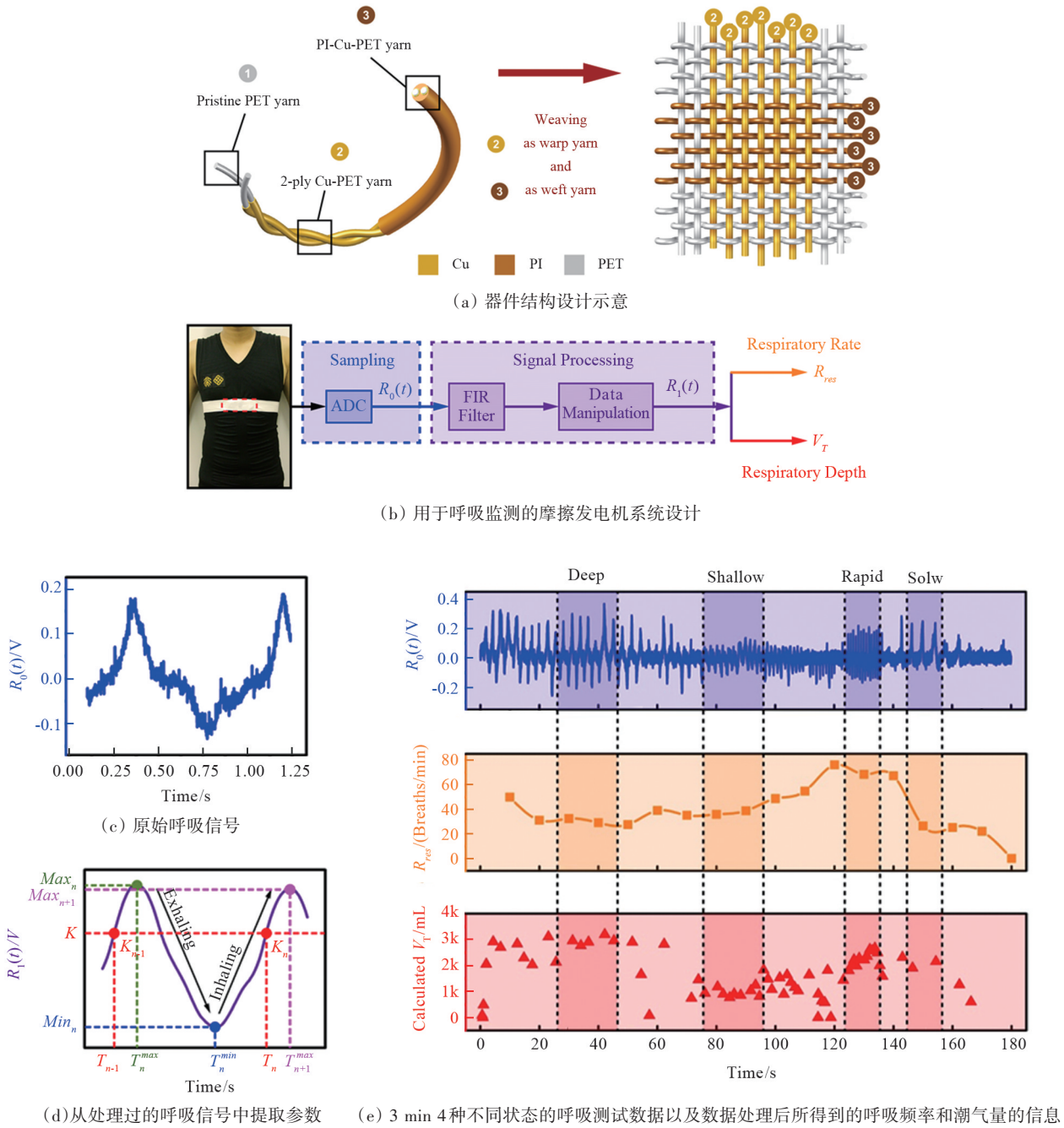


图3 可机洗的织物摩擦发电机设计

(AATCC135)测试方法被用来对样品进行机洗。即使在20次标准洗涤之后,Cu-PET纱线的线性电阻仍然保持小于 $0.6 \Omega \cdot \text{cm}^{-1}$ ,PET纱线上的Cu无任何可观察到的裂缝;而PI-Cu-PET纱线,洗完5次后表面变得有些粗糙。基于这2种纱线纺织得到的器件,在经历2次洗涤测试后,仍然能够正常工

作。这样的新型织物摩擦发电机可以灵敏地感知微弱的人体运动,有效地对穿戴者进行呼吸监测,记录人体呼吸频率和深度。更重要的是,它可以承受标准机洗试验,具有良好的洗涤耐久性与纺织行业兼容性。未来很有希望进一步应用于体育、医疗保健和许多其他领域。

### 3 监测眼球运动的摩擦发电机

人机界面(human machine interface, HMI)是人类与外界环境之间的新型交互渠道,它是将虚拟思维变为现实行动的一种方式。不像传统的HMI,需要手动操作、语音输入等,基于生物电信号的HMI优势明显,特别是对于患有肌肉萎缩硬化症的患者。目前,应用于HMI的生物电信号包括脑电图(EEG)、肌电图(EMG)和眼电图(EOG)信号。基于EEG的HMI是最常用的方法,已经验证对瘫痪患者有用,可以与外界进行相对成本较低的交互。但是,在头皮表面记录的脑电信号( $\mu\text{V}$ 量级)信噪比

(SNR)低,建模中缺乏有效的分辨率,对分类有更高要求的算法以及长时间的训练限制了基于EEG的HMI广泛使用。EMG和EOG也可以提供良好的控制信号。EOG是在眼球运动的过程中基于角膜-视网膜电位差的信号。眼底通常被定义为负极,而角膜作为正极。原则上在2个暴露的电极上有电势差异,通常Ag/AgCl电极作为湿电极粘贴在敏感区域周围,这会眼睛带来不适。这里,一种无创、高度敏感可重复使用的摩擦发电传感器被用以实时监测眼睛的微动<sup>[41]</sup>,如图4<sup>[41]</sup>所示,它的优点在于易于制造、稳定、小巧、轻便、透明、灵活、亲肤、低成本、耐用。

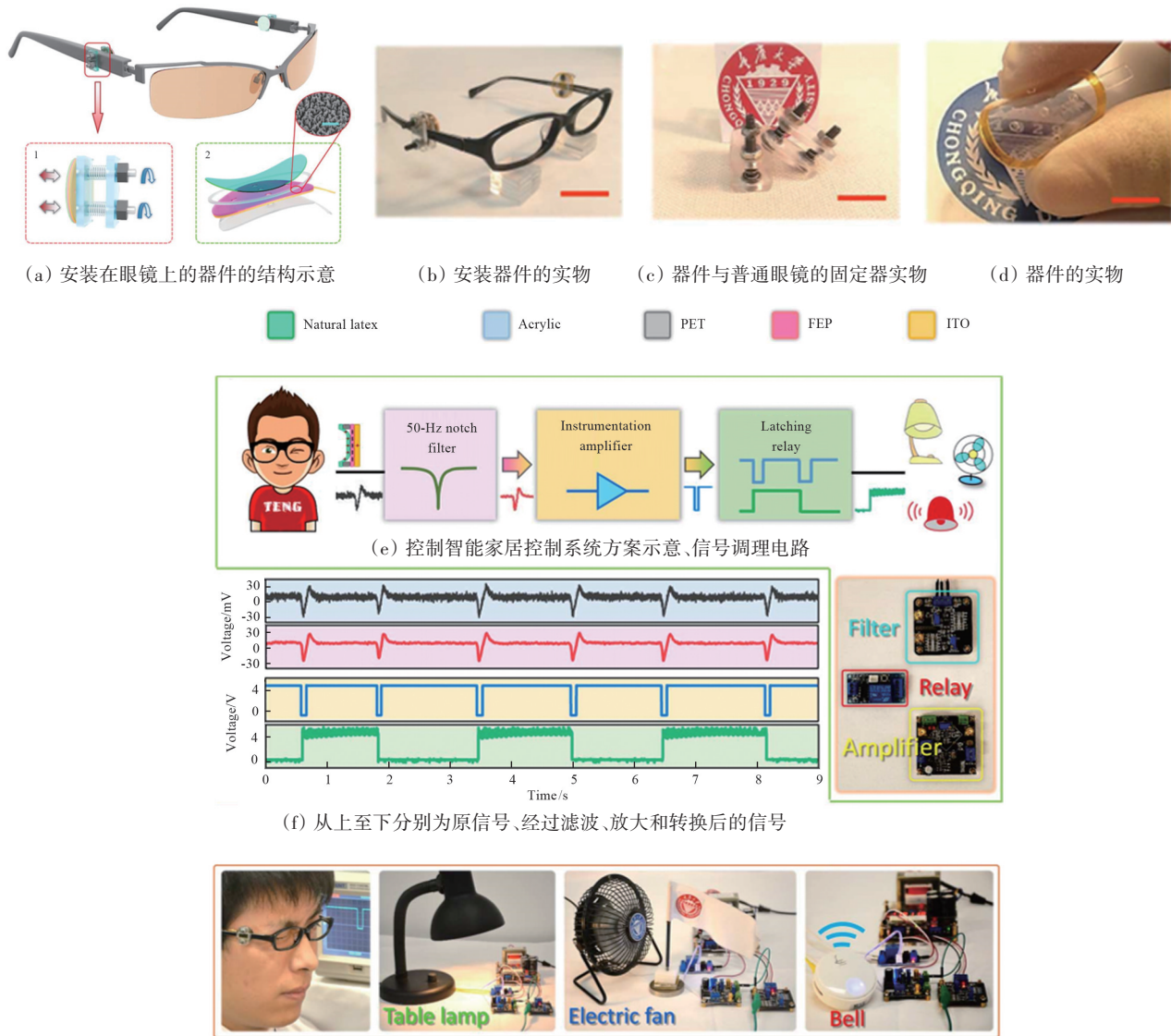


图4 监测眼球运动的摩擦发电机设计

这种感知机械能的摩擦发电机具有多层膜结构,可以灵活地安装并隐藏在眼镜臂后面。如图4(a)~(d)所示,由2块亚克力板、2个螺钉和2个弹簧组装摩擦发电机,提供灵活的机械支持,涂有氧化锡(ITO)的氟化乙丙烯(FEP)薄膜作为背电极层压到PET基板上构成一个带电层;天然胶乳用作相反的带电层,它将接触眼睛附近的皮肤,位于顶部。它们的厚度和直径将确定压力检测极限和范围,之间形成微小的圆柱形空腔作为空气间隔,有助于摩擦电荷的产生和转移。为了加强摩擦起电,FEP薄膜上生长了垂直排列的聚合物纳米线。经过天然乳胶和FEP层之间几个摩擦周期之后,在睁眼阶段,天然乳胶带有正电荷,FEP薄膜上带有负电荷;在眨眼的中间阶段,眼睛周围的肌肉推动天然乳胶薄膜接近FEP层。2层直接的电势差逐渐变低,电子流向ITO。当眼睛最后阶段关闭充分时,天然乳胶薄膜与FEP层接触面积较大,因此约束的电荷几乎处于中和状态,电势差几乎为零。然后,当眼睛回到睁开阶段时,会有相反的电流流入外部电路,这就是发电过程的完整周期。

基于眼动式摩擦发电机开发了1个智能家居控制系统,这个系统包括1个用户、1对配有眼动式摩擦发电机的眼镜、1个简单的信号处理电路以及一些电器,例如台灯、电扇和门铃。信号处理电路主要由50 Hz低通滤波器用于消除电源干扰、基于AD623的放大器用于放大滤波后的信号和基于单片机的自锁继电器(SCM)这3个部分组成,此外还有用于调节其他信号的电路,例如EEG、EOG等。基于这些电路的信号处理程序如下:从上到下,第1个信号是来自眼动式摩擦发电机的原始闪烁

信号,经过滤波后的信号分别被放大和中继转换,然后给输出终端自锁继电器与电器灯、风扇或警报铃串联,如图4(e)~(g)所示。当用户双眼闪烁时,附着在皮肤的眼动式摩擦发电机检测到机械变化,并将其转换为电信号。这种工作方式在日常生活中的许多潜在的应用,例如开车时接听电话、残疾人自理等。这样的传感器系统中所有设备尺寸都很小,可以装在专门设计的未来眼镜框架中,来自接收器的眨眼信号延迟为14.45 ms,这不会影响日常生活中的常见操作,因此具有非常广阔的前景。

#### 4 超灵敏柔性摩擦发电传感器

触觉(触摸)感知是目前快速发展的领域,广泛应用于人机互动的皮肤类电子产品、工业自动化医疗程序和具有触觉传感器的安全系统等,按工作原理可主要分为电容式、压电式、电阻式和光学式。所有这些传感器的工作原理都依赖于感应单元在力的作用下的变形响应,当涉及非常弱的力学交互,就给触摸检测带来了挑战。上述传感器的另一个主要限制是它们都需要外部电源进行供电,用于接收与表征传感器输出的电学参数,否则它们都无法正常工作,这会导致器件的功耗增加、结构复杂等问题。此外,材料脆弱、成本偏高也是常见的问题,这些都限制了目前触觉传感器的发展。最近,发展了一类全新的自供电柔性摩擦发电传感器<sup>[42]</sup>,在物理接触下,有机薄膜摩擦起电产生电压信号,它不依赖于外部电源,完全解决电力消耗的问题,如图5<sup>[42]</sup>、图6<sup>[42]</sup>所示。这里柔性的摩擦发电传感器由垂直方向的薄膜材料层压组成(图5)。一

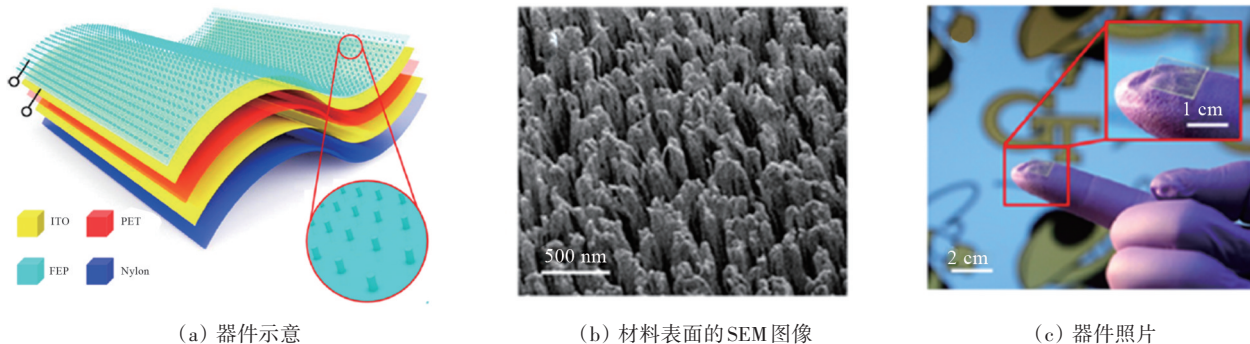


图5 摩擦发电传感器的设计

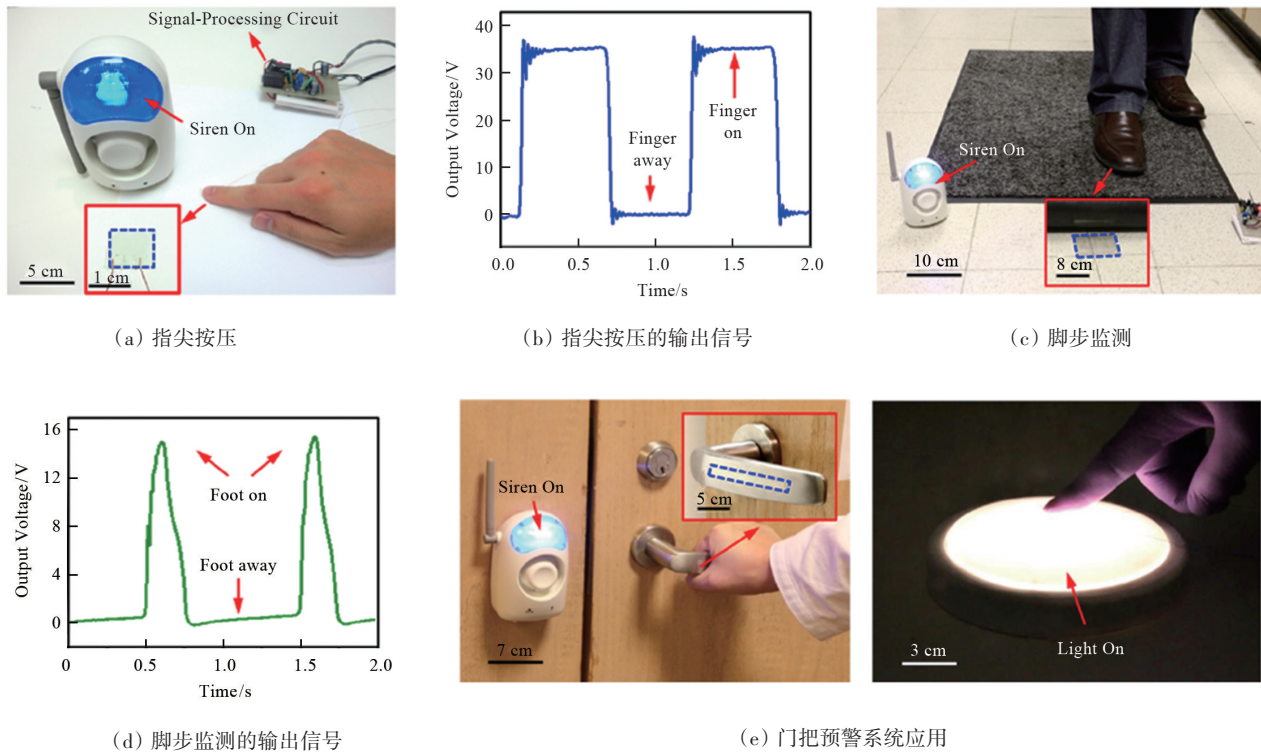


图6 摩擦发电传感器的应用

层PET形成结构骨架,夹在两侧的透明ITO作为电极。在顶侧,有一层FEP用作产生电荷的摩擦带电层,用以产生摩擦电荷。表面的聚合物纳米线(PNW)有利于增加表面电荷密度。利用聚合物纳米线修饰的特殊表面,压力灵敏度可以达到 $44 \text{ mV/Pa}$  ( $0.09\% \text{ Pa}^{-1}$ ),在极低压强区域下( $<0.15 \text{ kPa}$ )最大触摸灵敏度可以达到 $1.1 \text{ V/Pa}$  ( $2.3\% \text{ Pa}^{-1}$ )。由于摩擦生电的原理普遍适用于各类材料,摩擦发电机设计很灵活,可根据任何尺寸、形状和颜色进行定制,使其适应各类曲面。更重要的是,通过整合摩擦发电机和信号处理电路,实现了各种完整的触觉传感系统,可以用于多样化的应用场景。如图6(a)所示,摩擦发电机传感器被定制为 $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ 的尺寸,一旦人的手指轻轻一点,摩擦发电传感器的输出电压(图6(b))触发闪光灯,引起警报器产生尖锐的警报;图6(c)中,将 $10 \text{ cm}$ 边长的摩擦发电传感器放在地上,嵌入在一块地毯下面,当一个人踩到传感器顶部,接触区域将从摩擦发电传感器输出电压(图6(d)),然后引发警笛;图6(e)中,通过将摩擦发电传感器放置在门把手

上,可以实现预警安全的应用。

## 5 结论

摩擦发电机从发明到现在,短短几年时间内发展迅速,能够以一种高效清洁的方式收集环境中的能量,除了能够转换环境中幅度较大的机械能外,对于微弱能量的收集和感知,摩擦发电机也能有很好的表现。如上所述,摩擦发电机具有很强的多样性,有基于柔性薄膜的,有基于织物的;从原理上有基于接触分离的,有基于表面接触面积变化的;从应用上看可用以监测人体的各种指标,例如呼吸的频率和深度,也可以检测指尖微弱的触摸,对于环境中的微弱扰动也可以有很高的灵敏度。再加上摩擦发电机本身具有自供电的特点,搭配上合适的电路设计,这样构建出一个完全自供电的传感系统将会在未来物联网世界的各个领域起到无可替代的作用。与此同时,摩擦发电机的研究还有很多困难,例如摩擦发电机输出受限于摩擦材料的电荷密度、器件的稳定性和后续的能源管理等问题。这

些问题需要来自不同专业背景的研究者的努力,从各方面提升摩擦发电机的性能,最后实现摩擦发电机的广泛应用。

### 参考文献(References)

- [1] Wang X D, Zhang H L, Dong L, et al. Self-powered high-resolution and pressure-sensitive triboelectric sensor matrix for real-time tactile mapping[J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(15): 2896-2903.
- [2] Dong K, Wang Y C, Deng J, et al. A highly stretchable and washable all-yarn-based self-charging knitting power textile composed of fiber triboelectric nanogenerators and supercapacitors[J]. *ACS Nano*, 2017, 11(9): 9490-9499.
- [3] Seol M L, Jeon S B, Han J W, et al. Ferrofluid-based triboelectric-electromagnetic hybrid generator for sensitive and sustainable vibration energy harvesting[J]. *Nano Energy*, 2017, 31: 233-238.
- [4] Song W X, Gan B H, Jiang T, et al. Nanopillar arrayed triboelectric nanogenerator as a self-powered sensitive sensor for a sleep monitoring system[J]. *ACS Nano*, 2016, 10(8): 8097-8103.
- [5] Dhakar L, Pitchappa P, Tay F E H, et al. An intelligent skin based self-powered finger motion sensor integrated with triboelectric nanogenerator[J]. *Nano Energy*, 2016, 19: 532-540.
- [6] Yang W Q, Chen J, Zhu G, et al. Harvesting energy from the natural vibration of human walking[J]. *ACS Nano*, 2013, 7(12): 11317-11324.
- [7] Wang S H, Niu S M, Yang J, et al. Quantitative measurements of vibration amplitude using a contact-mode freestanding triboelectric nanogenerator[J]. *ACS Nano*, 2014, 8(12): 12004-12013.
- [8] Zhu G, Bai P, Chen J, et al. Power-generating shoe insole based on triboelectric nanogenerators for self-powered consumer electronics[J]. *Nano Energy*, 2013, 2(5): 688-692.
- [9] Kou H, Wang H, Cheng R, et al. Smart pillow based on flexible and breathable triboelectric nanogenerator arrays for head movement monitoring during sleep[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(20): 23998-24007.
- [10] Yang Z, Yang Y, Liu F, et al. Power backpack for energy harvesting and reduced load impact[J]. *ACS Nano*, 2021, 15(2): 2611-2623.
- [11] Ryu H J, Park H M, Kim M K, et al. Self-rechargeable cardiac pacemaker system with triboelectric nanogenerators[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 4374.
- [12] Feng Y W, Liang X, An J, et al. Soft-contact cylindrical triboelectric-electromagnetic hybrid nanogenerator based on swing structure for ultra-low frequency water wave energy harvesting[J]. *Nano Energy*, 2021, 81: 105625.
- [13] Wang S, Lin L, Wang Z L. Nanoscale triboelectric-effect-enabled energy conversion for sustainably powering portable electronics[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(12): 6339-6346.
- [14] 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.
- [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] Wang Z L, Lin L, Chen J, et al. Triboelectric nanogenerator: Single-electrode mode[M]. Cham: Springer, 2016: 91-107.
- [17] Niu S M, Liu Y, Chen X Y, et al. Theory of freestanding triboelectric-layer-based nanogenerators[J]. *Nano Energy*, 2015, 12: 760-774.
- [18] Chen S W, Cao X, Wang N, et al. An ultrathin flexible single-electrode triboelectric-nanogenerator for mechanical energy harvesting and instantaneous force sensing[J]. *Advanced Energy Materials*, 2017, 7(1): 1601255.
- [19] Guo H, Yeh M H, Zi Y, et al. Ultralight cut-paper-based self-charging power unit for self-powered portable electronic and medical systems[J]. *ACS Nano*, 2017, 11(5): 4475-4482.
- [20] Li T, Xu Y, Willander M, et al. Lightweight triboelectric nanogenerator for energy harvesting and sensing tiny mechanical motion[J]. *Advanced Functional Materials*, 2016, 26(24): 4370-4376.
- [21] Hu Y F, Yang J, Jing Q S, et al. Triboelectric nanogenerator built on suspended 3D spiral structure as vibration and positioning sensor and wave energy harvester[J]. *ACS Nano*, 2013, 7(11): 10424-10432.
- [22] Lin L, Wang S H, Xie Y N, et al. Segmentally structured disk triboelectric nanogenerator for harvesting rotational mechanical energy[J]. *Nano Letters*, 2013, 13(6): 2916-2923.
- [23] Cui N Y, Liu J M, Gu L, et al. Wearable triboelectric generator for powering the portable electronic devices[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015, 7(33): 18225-18230.
- [24] Seol M L, Lee S H, Han J W, et al. Impact of contact pressure on output voltage of triboelectric nanogenerator based on deformation of interfacial structures[J]. *Nano Energy*, 2015, 17: 63-71.
- [25] Cui N, Gu L, Liu J, et al. High performance sound driven triboelectric nanogenerator for harvesting noise energy[J]. *Nano Energy*, 2015, 15: 321-328.
- [26] Fan X, Chen J, Yang J, et al. Ultrathin, rollable, paper-based triboelectric nanogenerator for acoustic energy harvesting and self-powered sound recording[J]. *ACS Nano*, 2015, 9(4): 4236-4243.
- [27] Chandrasekhar A, Alluri N R, Saravanakumar B, et al. Human interactive triboelectric nanogenerator as a self-

- powered smart seat[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2016, 8(15): 9692–9699.
- [28] Seung W, Gupta M K, Lee K Y, et al. Nanopatterned textile-based wearable triboelectric nanogenerator[J]. ACS Nano, 2015, 9(4): 3501–3509.
- [29] Zhu G, Lin Z H, Jing Q, et al. Toward large-scale energy harvesting by a nanoparticle-enhanced triboelectric nanogenerator[J]. Nano Letters, 2013, 13(2): 847–853.
- [30] Chen J, Zhu G, Yang W, et al. Harmonic-resonator-based triboelectric nanogenerator as a sustainable power source and a self-powered active vibration sensor[J]. Advanced Materials, 2013, 25(42): 6094–6099.
- [31] Zhang X S, Han M D, Wang R X, et al. Frequency-multiplication high-output triboelectric nanogenerator for sustainably powering biomedical microsystems[J]. Nano Letters, 2013, 13(3): 1168–1172.
- [32] 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.
- [33] Luo Y J, Chen P F, Cao L N Y, et al. Durability improvement of breeze-driven triboelectric-electromagnetic hybrid nanogenerator by a travel-controlled approach [J]. Advanced Functional Materials, 2022: 2205710.
- [34] Wang Y Q, Yu X, Yin M F, et al. Gravity triboelectric nanogenerator for the steady harvesting of natural wind energy[J]. Nano Energy, 2021, 82: 105740.
- [35] Zhang X M, Yang Q X, Ji P Y, et al. Modeling of liquid-solid hydrodynamic water wave energy harvesting system based on triboelectric nanogenerator[J]. Nano Energy, 2022, 99: 107362.
- [36] Zhong W, Xu B G, Gao Y Y. Engraved pattern spacer triboelectric nanogenerators for mechanical energy harvesting[J]. Nano Energy, 2022, 92: 106782
- [37] Yan L X, Mi Y J, Lu Y, et al. Weaved piezoresistive triboelectric nanogenerator for human motion monitoring and gesture recognition[J]. Nano Energy, 2022, 96: 107135.
- [38] 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.
- [39] Zhao Z Z, Liu J J, Wang Z H, et al. Ultrasensitive triboelectric nanogenerator for weak ambient energy with rational unipolar stacking structure and low-loss power management[J]. Nano Energy, 2017, 41: 351–358.
- [40] Zhao Z Z, Yan C, Liu Z X, et al. Machine-washable textile triboelectric nanogenerators for effective human respiratory monitoring through loom weaving of metallic yarns[J]. Advanced Materials, 2016, 28(46): 10267–10274.
- [41] Pu X J, Guo H Y, Chen J, et al. Eye motion triggered self-powered mechnosensational communication system using triboelectric nanogenerator[J]. Science Advances, 2017, 3(7): e1700694.
- [42] Zhu G, Yang W Q, Zhang T, et al. Self-powered, ultra-sensitive, flexible tactile sensors based on contact electrification[J]. Nano Letters, 2014, 14(6): 3208–3213.

## Triboelectric nanogenerator for weak energy harvesting

ZHAO Zhizhen, GAN Lanyue, HU Youfan\*

Key Laboratory for the Physics and Chemistry of Nanodevices, School of Electronics, Peking University, Beijing 100871, China

**Abstract** Advanced energy technology has been promoting the development of human society. As a new type of energy collector, triboelectric nanogenerator is based on triboelectrification and electrostatic induction. It is a sustainable, stable and green energy supply. However, in the case of weak energy harvesting, the design of triboelectric nanogenerator should be careful, especially in terms of sensitivity and efficiency. This paper outlines a variety of triboelectric nanogenerator designs for weak energy harvesting, as well as the working mechanism and applications, which in turn presents an outlook for medical equipment, sustainable system and security devices.

**Keywords** triboelectric nanogenerator; weak energy harvesting; high sensitivity; high efficiency ●



(责任编辑 王志敏)