



纳米发电机应用: 自驱动系统

蒲雄*, 刘佳鑫, 李绍欣, 魏迪*

中国科学院北京纳米能源与系统研究所, 北京 101400

* E-mail: puxiong@binn.cas.cn; weidi@binn.cas.cn

收稿日期: 2023-02-27; 接受日期: 2023-04-03; 网络版发表日期: 2023-05-12

摘要 智能传感是未来数字社会和智能社会的基础. 然而, 如何给数量庞大、分布广泛的各类传感节点提供持续的电源供给是一项巨大的挑战. 摩擦纳米发电机(TENG)是近年来兴起的一种新型的机械能量收集技术, 可以有效地将低频、低幅的机械能量转换为电能, 一方面可以实现自主的、自驱动的机械信号传感; 另一方面可以与能量存储器件集成, 实现自充电的电源系统. 同时, 由于TENG在材料选择和结构设计上的多样性, 适宜的应用场景非常广泛. 因此, 本文系统介绍TENG在自驱动系统方面的应用研究进展, 主要包括自驱动传感和自充电系统两方面的典型研究工作, 最后分析展望了现有研究的挑战和未来的潜在方向.

关键词 摩擦纳米发电机, 自充电系统, 自驱动传感

1 引言

物联网和人工智能是未来社会发展的重要驱动力, 也是第四次工业革命迈向智能时代的基础. 在未来的智能时代中, 数万亿个可移动电子节点互联, 形成智能分布式互连网络. 虽然每个电子节点的功耗较小, 但整个互连网络的功耗不容小觑, 数量巨大, 且地理分布广泛. 通过电缆传输电力的传统方式在大多数情况下并不适用, 而电化学储能电池则需要频繁的充电或更换, 维护成本高、且造成潜在的资源浪费和环境污染问题, 因此, 使用传统储能电池驱动所有节点也是不切实际的^[1]. 收集生活环境或人体运动中的分布式能量是一种有前途的解决方案, 包括环境中的风能、太阳能、热能和机械能源等^[2].

纳米发电机自诞生以来就引起了广泛的关注.

2012年, 王中林团队^[3]首次发明了能够在生活环境中收集机械能的摩擦纳米发电机(TENG). TENG是以麦克斯韦位移电流理论为基本理论的分布式能量收集装置^[4]. 具体来说, 它是基于接触起电和静电感应的耦合效应, 将两种不同极性的摩擦电材料接触分离产生的高熵机械能转换为电能, 以此收集分布式能量, 并作为自供电和可持续的电源^[5]. TENG的四种基本工作模式包括垂直接触分离模式、横向滑动模式、单电极模式和独立层模式^[6]. 由于结构简单、材料多样、且成本低廉, TENG广泛应用于海洋能量收集^[7,8]、微纳电源^[9,10]、自驱动传感^[11,12]等多个领域.

经过十年的发展和研究, 纳米发电机已经取得了极大进展. 例如: 研究人员针对不同领域开发出了多种摩擦电材料和电极材料, 通过提高材料表面电荷密度提高了输出性能, 也开发了柔性可拉伸的材料以适

引用格式: 蒲雄, 刘佳鑫, 李绍欣, 等. 纳米发电机应用: 自驱动系统. 中国科学: 技术科学, 2023, 53: 967-988

Pu X, Liu J X, Li S X, et al. Nanogenerator applications: Self-powered systems (in Chinese). Sci Sin Tech, 2023, 53: 967-988, doi: [10.1360/SST-2023-0082](https://doi.org/10.1360/SST-2023-0082)

应可穿戴电子设备和柔性传感器的需求等^[13,14], 针对发电机内阻抗大、转换效率低等问题, 研究人员设计了电源管理模块, 实现了能量转换效率最大化; 发明了直流纳米发电机, 并设计了阻抗匹配的合适的储能装置等^[15,16]. 基于这些研究, 基于TENG的自驱动系统应用相关的研究也成为了逐年上升的研究热点: 一方面, TENG可以自主实现机械信号到电信号的转换, 作为自驱动传感器感知各类机械物理信号, 如应力、速度、角度以及人体运动、生理信号等; 另一方面, TENG作为电源器件, 收集环境机械能量, 并集成能量存储和管理, 实现自充电电源系统, 为各类用电设备提供持续电源供给(图1). 因此, 本文将从纳米发电机的发展角度出发, 针对自驱动传感和自充电系统两个应用方向的典型进展进行回顾和分析, 并对相应的创新技术及应用场景进行了总结归纳, 以便对基于TENG的自驱动系统的未来应用提供参考与借鉴.

2 自驱动传感

2.1 生理信号感知

人类在日常生活中的大多数生理活动所产生的机械能量都能作为TENG的能量输入, 通过对输出的电信号进行采集分析, 就能够实现生理信号传感. 基于TENG的传感器还可以制作成柔性可拉伸材质, 因此在可穿戴电子设备中具有很大的潜力.

(1) 声音传感. 人体通过声带振动可以发出声音, 不同的语言可以产生不同的声波, 而声波可以激励TENG中薄膜的振动, 并将这些声波信号转换为电信号, 实现声学感应. 研究人员研发了一种可用于机器人或者人类助听器的听觉传感器, 具有高灵敏度和宽频范围响应^[17]. 该装置在接收到声音信号时, Kapton膜自由振动并在振动过程中与聚全氟乙丙烯(FEP)薄膜发生接触分离运动产生电信号. 这种传感器可以在100~5000 Hz频率范围内响应, 几乎涵盖了人类声音的整个频率范围, 可应用于机器人的语音控制或用于听障人士的助听设备. 另一种可以附着在喉咙上的麦克风同样也可以直接检测声带振动^[18]. 从麦克风采集的电信号波形与原始声波信号高度吻合, 可以精确分辨用户的声音. 为了进一步拓宽使用场景, Lin等人^[19]开发了一种可穿戴的防水声学传感腕带, 这种腕带具有100 Hz~20 kHz的宽频响应范围, 即使是在手腕出汗或腕带处于不同形状时仍然具有稳定的传感性能. Sun等人^[20]利用激光诱导石墨烯制造了一种双功能TENG传感设备, 同时具备声学传感器和扬声器的功能, 如图2(a)所示. 该装置同样实现了宽频响应(20 Hz~20 kHz)以及高灵敏度(45000 mV Pa⁻¹), 且能够根据频谱特征完成对人类语音内容、身份和情感的识别.

(2) 触觉传感. 触摸操作产生的接触分离运动或滑动运动可以作为TENG触觉传感器的机械激励, 这种低频机械运动能够通过TENG转换为较大的电信号输



图1 基于TENG的自驱动传感与自充电系统
Figure 1 TENG-based self-powered sensors and self-charging power systems.

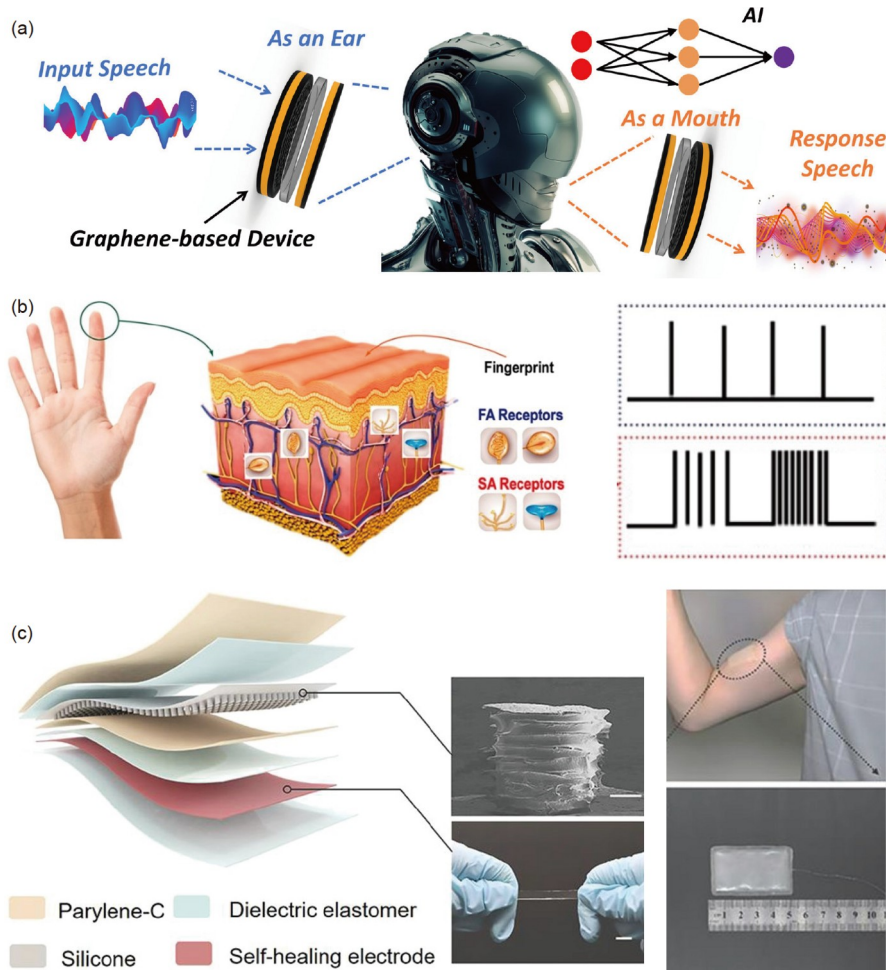


图2 基于TENG的声音、触觉和人体运动传感。(a) 双功能声学传感器与扬声器^[20]; (b) 触觉纹理传感器^[21]; (c) 自愈合传感器用于监测人体肌肉状态^[22]

Figure 2 TENG-based acoustic, tactile, and body-motion sensing. (a) Dual-function acoustic sensors and speakers ^[20]; (b) tactile texture sensor ^[21]. Copyright©2019, American Chemical Society; (c) self-healing sensors for monitoring human muscle status ^[22]. Copyright©2021, American Chemical Society.

出。如图2(b)所示, Chun等人^[21]发明了一种柔性触觉纹理传感器, 进行表面纹理识别。通过快速傅里叶变换分析, 将纹理特征信息从电信号中提取出来, 再通过深度学习技术识别出不同的纹理。另一种多功能传感器不仅可以检测压力和温度, 还可以识别不同的材料^[23]。通过聚二甲基硅氧烷(PDMS)和石墨烯复合材料的压阻和热电效应分别实现压力和温度传感, 由聚四氟乙烯(PTFE)薄膜和铜电极组成的单电极TENG用于材料识别, 根据PTFE接触不同材料产生的不同的电输出区分材料类别。Li的团队^[24]最近设计了一种超越人类触觉能力的智能手指, 可以基于摩擦电传感识别材料的类型和粗糙度, 当智能手指触摸待测材料时, 识别信

息可以直接显示到屏幕上。为了让触觉传感器更轻便透气, 研究人员研发了一种厚度为89 μm 和重量仅为0.23 g的触觉传感器, 这种基于电纺纤维的传感器同时具有800%的拉伸率, 能够满足皮肤的舒适需求^[25]。

(3) 人体运动传感。人类的肢体活动会产生大量的低频机械能, 可以通过TENG收集这些机械能用于不同肢体部位的运动传感。Wang等人^[26]报道了一种以电纺TPU和离子电极为主要材料的身体运动传感器件, 将这种传感器固定在人体的不同位置, 可以实现对喉咙吞咽、手臂弯曲和膝盖弯曲等运动的监测。Zhang等人^[27]提出了一种可拉伸的、透明的和热稳定的TENG用于感知四肢运动, 这种压力传感器使用无溶

剂的离子弹性体电极, 灵敏度可达到 2.87 kPa^{-1} . 肌肉状态对于康复训练和身体代谢评估具有重要意义, 图2(c)示意了一种可拉伸和自愈合的TENG传感器用于监测肌肉状态^[22], 该传感器可以检测的最小压力为 0.2 mN , 相当于一粒米的重量, 最小响应时间为 1.03 ms . 通过在肱二头肌、肱三头肌和肘部这些位置安装这种传感器, 可以准确检测到肌力和弯曲角度. Liu等人^[28]研制了一种自驱动传感阵列, 用于测量行走过程中足底的压力, 可以间接监测腰椎退行性疾病的状况. 该传感器阵列安装在鞋垫上, 并通过监督学习算法识别半蹲、蹲、跳、走和慢跑等活动, 准确率高达 99.2% . 除此之外, 在对62例腰椎退行性变性患者进行临床样本测试后, 人工智能诊断准确率可达 100% .

2.2 生物医学监测

随着人口老龄化的加速, 医疗需求逐渐增大, 监测身体的生物医学信号对早期临床诊断或康复治疗都具有重大意义. 基于TENG的传感器通常具有高信噪比、灵活轻便和可穿戴的优势, 可用于监测多种类人体生物医学信号. 信号的稳定性容易受到如手臂摆动、行走等其他肢体活动的影响, 针对这些问题使用数据滤波等方式可以获得稳定信号.

(1) 心跳和脉搏传感. 其主要原理是收集心脏跳动的低频机械信号, 将其放大为有规律的电信号, 用于心血管疾病的早期识别诊断. 如图3(a), Li的团队报道了一种用于心血管疾病诊断的自驱动脉搏传感器^[29], 该

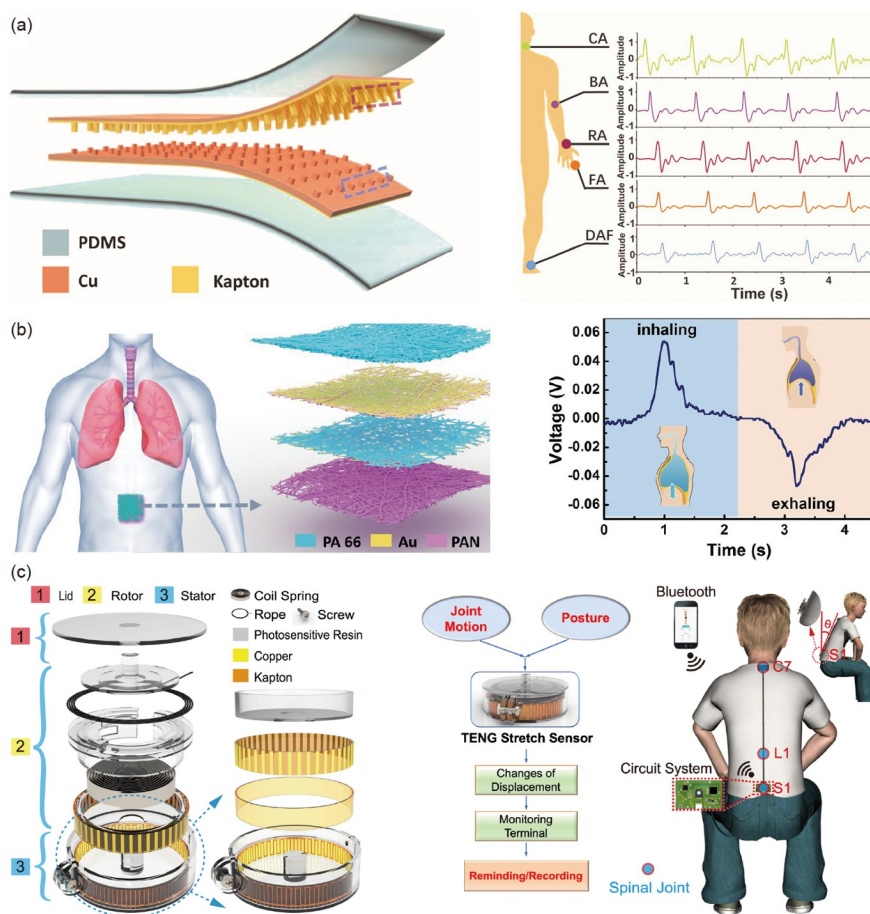


图3 基于TENG的生物医学监测. (a) TENG用于监测人体不同位置动脉的脉搏波^[29]; (b) TENG电子皮肤用于监测呼吸状态^[32]; (c) 用于监测关节和脊柱运动的TENG卷轴传感器^[33]

Figure 3 TENG-based biological medical monitoring. (a) TENG-based sensors for monitoring pulse waves of arteries at different points in the body^[29]; (b) TENG-based electronic skin for monitoring breathing status^[32]; (c) the TENG-based reel sensor for monitoring joint and spinal motions^[33]. Copyright©2017, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim; Copyright©2021, Wiley-VCH GmbH; Copyright©2021, The Author (s).

传感器由一层铜和Kapton材料组成, 整体由PDMS封装, 当传感器戴在手腕上时, 脉搏的跳动会让铜和Kapton进行接触分离运动. 从传感器输出的信号中可以获得冠心病、心房间隔缺损和房颤等疾病等信息; 除了手腕以外, 颈动脉、肱动脉、桡动脉和踝关节等位置的动脉也可以检测. 此外, 研究人员也发明了一种编织结构的TENG传感器, 不仅可以测试脉搏还可以测量血压, 该传感器可以检测手腕、耳朵、手指和脚踝位置的脉搏^[30]. 测量血压时, 分别在指尖和耳朵上放置两个传感器, 通过两个传感器脉搏波的延迟量计算出血压. 最近, Ouyang等人^[31]开发了一种生物可吸收的TENG压力传感器, 用于心血管患者的术后护理, 该传感器主要材料为聚乳酸(PLA)和镁, 都是生物可降解材料, 而且可植入人体. 工作时传感器在血管中滚动, 当血管发生阻塞, 传感器会产生异常电信号. 除此之外, 这种压力传感器还可以检测呼吸困难和心律失常等人体异常情况.

(2) 呼吸行为监测. 呼吸是一种不间断的生物体行为, 过程总是伴随着胸部或腹部的低频运动, 通过这些位置放置基于TENG的传感器来监测呼吸的强度、深度和速率. 如图3(b)所示, Peng等人^[32]研发了一种自供电电子皮肤来检测腹部运动. 在吸气过程中, 腹部向外扩张, 摩擦电材料互相接触, 在呼气过程中摩擦材料互相分离, 这种接触分离运动使TENG输出与呼吸同步的电信号. 将采集到的数据进行处理能够得到呼吸的频率和振幅, 在此基础上构建的睡眠监测系统可以有效检测阻塞性睡眠呼吸暂停低通气综合症. 呼吸时口腔或鼻子附近的气流也含有丰富的机械能, Cao等人^[34]将传感器与面罩集成, 用来感知呼吸状态, 该传感器中TENG的摩擦层材料是聚偏二氟乙烯(PVDF)纤维膜, 电极材料是丝网印刷银纳米颗粒油墨. 呼吸时口部的气流流动会使PVDF与电极之间产生接触分离运动, 输出的电信号可用于监测人体的呼吸状态. 呼吸产生的气体也可以作为健康状况的一个指标, 基于TENG的传感器也可用于检测气体的化学成分. Wang等人^[35]报道了一种呼吸驱动的气体传感器, 这项工作中作为主要摩擦材料的是铈(Ce)掺杂的ZnO-PANI复合膜, 呼出气体中的氨气将和复合膜反应导致TENG的输出降低, 这种传感器可帮助诊断肾脏相关疾病.

(3) 骨骼状态评估. 骨科疾病的诊断和康复同样需要传感器参与辅助评估, 滑动或转盘模式的TENG可

监测骨骼或关节运动产生的位移或角度的变化, 从而监测脊柱、膝盖等位置的健康状态. 如图3(c)所示, Li等人^[33]报道了一种可伸缩和可穿戴的徽章卷轴传感器, 用于监测人体脊柱运动. 卷轴采用环空结构, 主要部件是圆形的滑动TENG. 工作原理如下: 将卷筒固定在脊尾位置, 与卷筒转子连接的绳索固定在颈后, 当脊椎弯曲时, 绳子会带动转子旋转, 并产生类似正弦波的电信号. 根据频率和信号峰的数量, 可以检测脊柱弯曲运动的速度和角度. 这些数据可以用来预防久坐人群的脊柱疾病或判断受伤后的脊柱恢复状态. 膝关节炎症是困扰中老年的疾病之一, 由于患病范围广、医疗资源有限, 患者康复困难. 因此, 研究人员研发了一种便携式、模块化的自驱动传感系统, 用于膝关节炎症患者康复过程中的自我监测和治疗^[36]. 将一个旋转的TENG固定在膝关节侧面, 与测力计配合, 可以有效测量速度、角度和力矩. 然后通过一个应用程序和深度学习技术评估患者的日常活动, 并提供训练建议.

2.3 人机交互

可穿戴设备和柔性传感器使人机交互系统能够实时获取人体生理信号或周围环境信号, 结合人工智能技术, TENG自驱动传感器在未来智能生活中具有广阔的应用前景.

(1) 信息解码通信

(i) 手语识别. Zhou等人^[37]报道了一种基于机器学习的手语语音翻译传感器阵列. 在每根手指上放置基于TENG的纤维形状传感器, 组成的传感器阵列可以将手动动作转换为电信号. 通过机器学习算法对产生的电压信号进行分类处理, 最后将不同手势翻译成文字并显示在手机上, 解决了手语者和非手语者之间的沟通障碍. 图4(a)所示报道的用于手语识别和虚拟现实(VR)通信的摩擦电智能手套具有相似的功能^[38]. TENG基传感器分布在手的每个关节上, 戴上这款手套后手指的弯曲或释放动作都会产生电信号, 信号的不同组合代表不同单词, 人类可以在VR场景中成功地与虚拟角色交流.

(ii) 唇语解码. 当出现声带病变、喉部或舌部损伤的情况时, 唇语是另一种有效的交流方式. 如图4(b)所示, Lu等人^[39]提出了一种基于摩擦电传感器的唇语解码系统. 该传感器与面具整合, 通过感知嘴唇运动来检测语言. 整个系统基于循环神经网络模型, 在训练20个

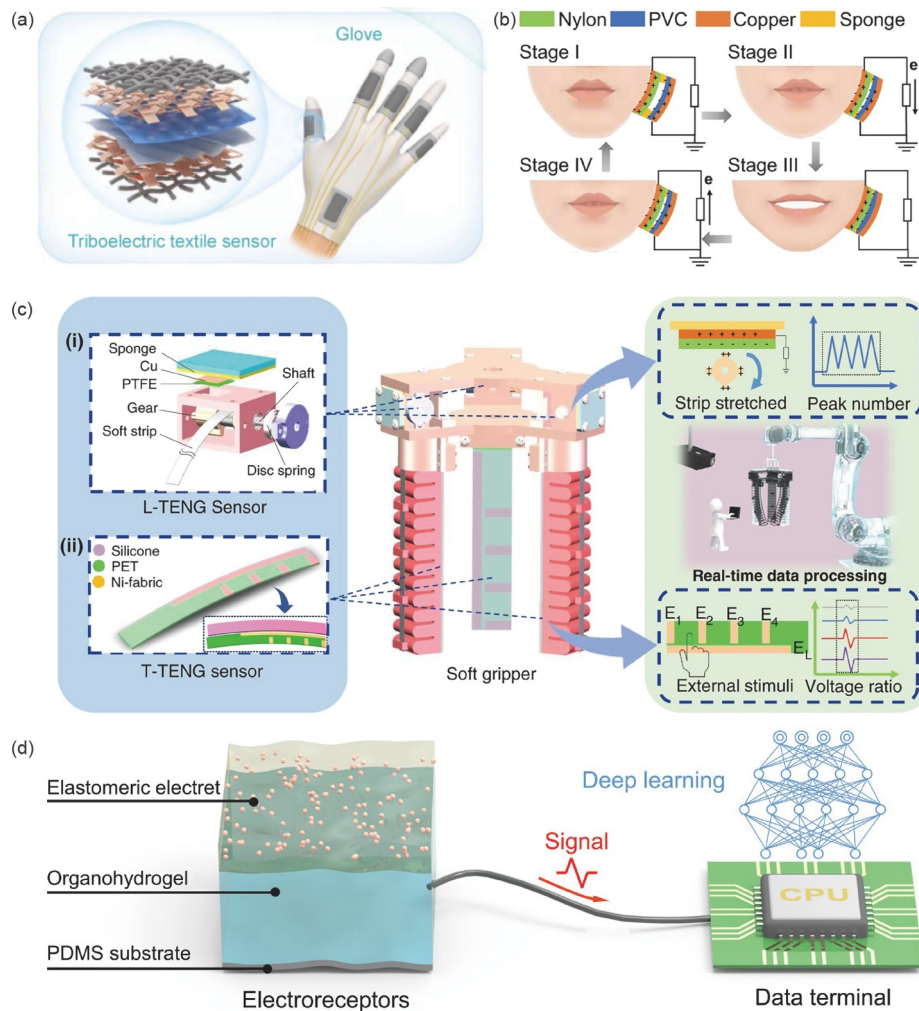


图 4 基于TENG的自供电人机交互系统. (a) 在手指关节上分布有TENG传感器的智能手套^[38]; (b) 紧贴脸颊的TENG传感器用于唇语识别^[39]; (c) 布置有TENG传感器的软机械手^[41]; (d) 基于TENG静电感应原理的非接触式人工电感器^[43]

Figure 4 Self-powered human-machine interaction systems based on TENG sensors. (a) Smart gloves with TENG sensors distributed on the finger joints [38]; (b) lip recognition realized by TENG sensors attached closely on the cheek [39]; (c) soft gripper with the TENG sensors applied on the fingers [41]; (d) non-contact artificial electroreceptors based on the electrostatic induction mechanism of TENG sensors [43].

类, 每个类100个样本时, 测试准确率可达到94.5%.

(iii) 眼部传感. Pu等人^[40]开发了一种眼部运动触发的自供电传感器, 可用于机械感应通信系统. 这种自驱动传感器主要以天然乳胶和FEP作为摩擦层材料, 将其安装在眼镜臂上. 当人眼进行眨眼运动时, TENG以单电极模式工作, 天然乳胶会接触FEP并产生750 mV的电压信号. 通过与微程序控制单元集成(MCU), 可用于控制多种设备, 包括台灯、电风扇、钟表等.

(2) 智能机械臂

机械抓手是工业领域常用的电子装置, 满足装

配、分拣和搬运等生产作业的夹持需求. 开发具有柔韧性和感知能力的智能夹持器具有重要意义. 已经有人报道了一种用于软机械手的TENG传感器^[41], 如图4(c)所示. 在夹持器关节位置安装一个转盘式TENG用于角度传感, 在夹持器臂部安装滑动模式TENG用于检测滑动速度、接触位置和夹持方式. 在此基础上再利用机器学习技术, 软机械手实现了感知夹持状态和目标识别的功能. 在数字孪生应用场景如智能工厂的情况预测和生产管理中, 这种软机械手也具有巨大潜力. Hu的团队^[42]制作了一种摩擦电量化传感器, 用于机器人手臂的手势控制. 当传感器安装在手指上时, 产

生的正电压脉冲和负电压脉冲分别表示手指的弯曲状态和伸直状态. 通过计算产生的脉冲数, 可以确定手指的角度位置, 大大简化信号处理和分类算法. 该传感器可实现对机械臂的精确控制, 最低分辨率为 3.8° .

(3) 非接触交互

在一些应用场景下非接触式传感传递信息的方式尤为重要, Wu等人^[44]报道了一种用于运动感知的自驱动非接触式电子皮肤. 电子皮肤由涂覆了氧化铟锡(ITO)的聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)和一层PDMS组成. 四个ITO电极在一个平面上呈圆形分布, 当一个物体携带电荷接近这四个电极时, 会产生一个电压信号, 根据峰值电压能够确定物体的位移. 与这个工作类似, 另一种自供电电子皮肤阵列也用于非接触式位移传感^[45]. 在PDMS阵列基底上喷涂有图案的银纳米线作为电极, 将电晕充电后的PTFE贴在手指上作为信号源, 根据得到的电压信号, 在三自由度直角坐标系中能够实现位移传感, 该阵列分辨率可达 0.75 mm , 1.07 mm 和 2.20° . Pu的团队^[43]受鲨鱼电感系统的启发, 设计了一种生物相容的柔性非接触式人工电感受器, 当外部目标接近时该人工电感受器产生较大电信号, 从而可感知目标的接近距离, 并进一步实现了机器人手臂和电脑游戏的非接触控制界面. 在机器学习算法的辅助下, 还证实了利用电感受器矩阵构建可识别三维物体轮廓的人工近端体感系统的可行性(图4(d)). 总之, 基于TENG的传感器在检测各种与人类相关的信号时候展示了极大的潜力, 这些传感功能与人工智能的结合预计使医疗保健、通信和娱乐等生活方式发生巨变.

2.4 自驱动化学传感

化学传感器是一种小型化的、有针对性的和可逆地对某种化学成分进行应答反应的器件, 并能产生与该成分浓度成比例的可测信号. TENG的摩擦层材料经过特定修饰后, 对检测分子具有特异性吸附的功能, 促使TENG在变化的化学氛围中产生相应的电信号响应, 由此可用于自驱动化学传感. 例如, 检测体液中某些生物标志物的变化, 包括葡萄糖、尿酸、某些神经递质以及汗液等外分泌物. 同时, 在污水处理中, TENG可以帮助确定污染物的类型和数量, 如重金属离子和有机物(如抗生素)等. 这些进展充分体现了TENG在化学传感领域中具有巨大的应用潜力.

(1) 气体检测. 随着人们生活水平的不断提高和对环保的日益重视, 探测各种有害气体、居住环境氛围以及食品的气体传感器提出了更高的要求, 并且实时监测易腐食品的质量对于减少社会成本和食源性疾病至关重要. Cai等人^[46]介绍了一种基于TENG的自驱动无线气体传感器系统, 以实现冷链供应食物质量的高灵敏、准确和无线实时监测. 该系统主要由TENG组件和无线电路模块组成, 有效实现了冷链供应中的实时无线食品质量评估. 由于易腐蚀食品在腐败过程中释放的主要气体成分含有氨气, 因此可以将其作为此类食品的质量评估指标. 该系统在不同浓度的氨气环境中的电信号变化趋势表明其开路电压随着氨气浓度的增加而降低, 即在 $0, 50, 100, 200, 300, 400$ 和 500 ppm 的氨气中, 其输出电压分别约为 $47, 39, 34.2, 25.5, 11.8$ 和 5.7 V . 该系统对氨的敏感性是可靠和稳定的, 为TENG作为化学传感在食品质量评估的应用领域提供了一个设计概念, 同时也促进了自驱动系统在食品行业的发展. 由于TENG的内部电容器属性, Su等人^[47]通过将气体传感材料集成到TENG的接触层上来构建独立的电容模式, 如图5(a)所示. 在这种模式下, 从呼气中吸附的气体分子会改变传感材料的介电常数, 从而改变在气体的膨胀和收缩过程中TENG的输出信号. 这种气体传感器具有高灵敏度(452.44%)和线性度(0.976). 此外, 在 50 ppm 的固定气体浓度下, 对 NO_2 的响应比其他气体(如 $\text{CO}, \text{H}_2\text{S}, \text{SO}_2, \text{NH}_3$ 和 CO_2)的响应高20倍以上, 表现出优异的选择性.

(2) 离子检测. 近年来, 为解决环境污染问题, 越来越多的研究致力于检测和去除环境中的重金属离子, 特别是排放工业废水中的重金属离子. Li等人^[48]利用摩擦起电和静电感应耦合作用设计了一个基于TENG的重金属离子监测装置(图5(b)). 通过物理吸附用适当的配体分子对阳极氧化铝纳米孔进行化学修饰, 使阳极氧化铝纳米孔对不同的金属离子具有良好的螯合性能, 这些修饰配体分子能够选择性地吸附重金属离子. 重金属离子和配体分子之间络合常数的差异导致对金属离子的亲和力不同, 络合度越高, 金属离子的吸附能力越强, 络合度越弱, 金属离子的吸附量就越有限. 随着阳极氧化铝表面吸附的金属离子数目的增多, PTFE纳米线和阳极氧化铝纳米孔之间的摩擦效率会逐渐降低, 从而降低摩擦纳米传感器的输出电信号. 因此通过分析摩擦纳米传感器的电输出信号可实现对重金属离

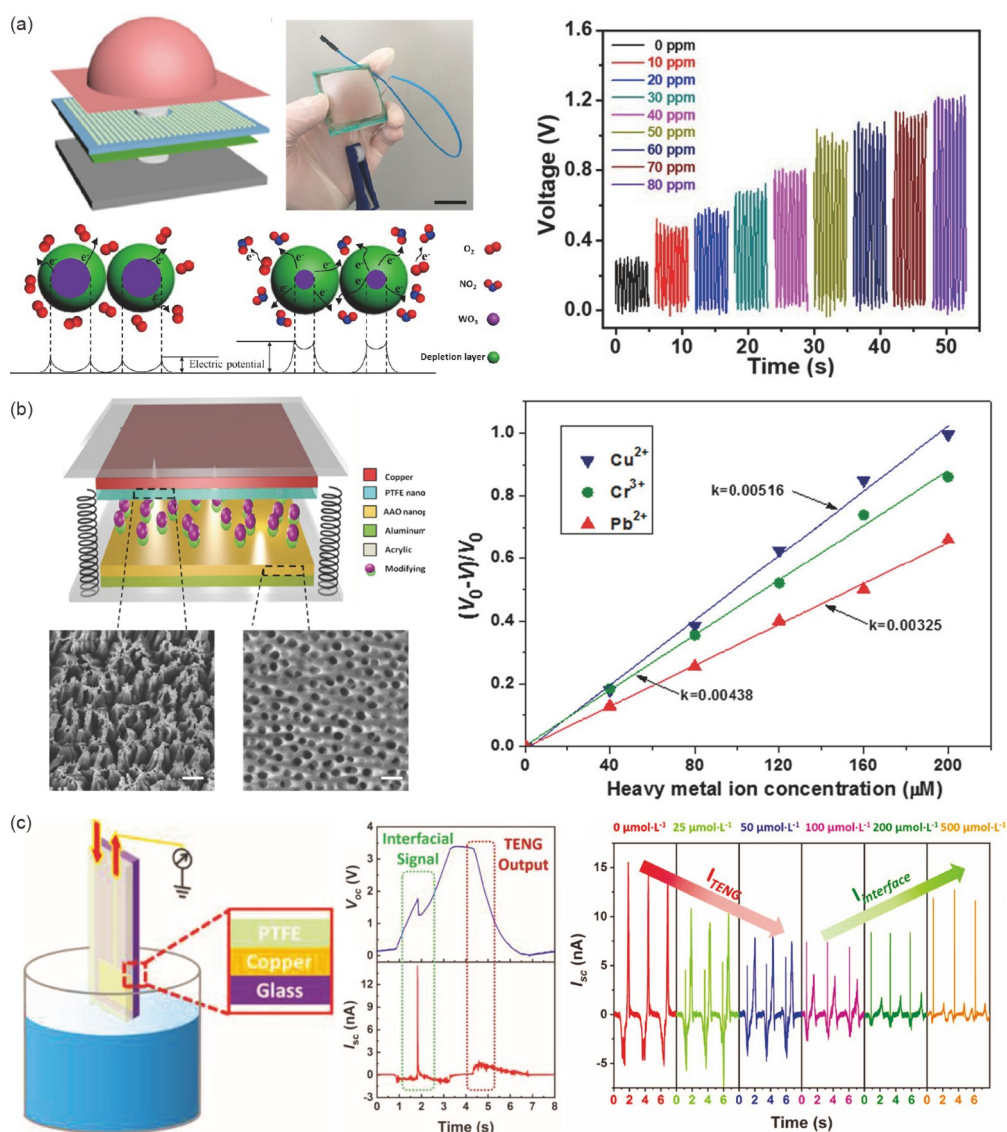


图 5 基于 TENG 的自驱动化学传感。(a) 肺泡启发的可穿戴 NO₂ 气体传感器^[47]; (b) 用于重金属离子检测的 TENG 离子敏感器^[48]; (c) 用于多巴胺检测的双信号化学传感器^[49]

Figure 5 Self-powered chemical sensing based on TENG sensors. (a) Alveolus-inspired wearable NO₂ gas sensor [47], Copyright©2020, American Chemical Society; (b) the TENG sensor for heavy metal ion detection [48], Copyright©2016, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim; (c) the dual-signal chemical sensor for dopamine detection [49], Copyright©2019, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.

子的检测. 将不同浓度但体积恒定为 20 μL 的重金属离子溶液滴在经过修饰后的阳极氧化铝纳米孔表面上, 发现在 $0\sim 200\times 10^{-6} \text{ mol L}^{-1}$ 范围内, 利用 TENG 输出开路电压比 $((V_0 - V)/V_0)$ 对溶液中的重金属离子浓度的敏感度能够有效检测溶液中的 Cu^{2+} , Pb^{2+} 和 Cr^{3+} 的含量, 并且其检测灵敏度分别高达 0.005×10^{-6} , 0.003×10^{-6} 和 $0.004\times 10^{-6} \text{ L mol}^{-1}$. 这种基于 TENG 的自驱动重金属离子检测和去除系统具有环保、经济、简单、检测灵

敏度高、去除效率高等优点, 在工业废物管理、临床毒理学、免疫学监测、环境监测、退化、评估和循环经济等方面具有巨大的发展潜力.

(3) 有机物检测. 多巴胺是中枢神经系统功能的重要神经递质, 其生理水平与帕金森病、亨廷顿病和精神分裂症等神经系统疾病有关, 因此监测多巴胺含量对于人体健康监测具有重要的意义. Jiang 等人^[49] 用 PTFE 薄膜、铜电极和玻璃基片制作了一个单电极

TENG(图5(c)). 当TENG插入油/水多相时, 会产生两个独特的信号, 一个是液体和PTFE薄膜之间由于接触起电和静电感应而产生的电信号(V_{TENG} 和 I_{TENG}), 另一个是油/水界面电荷在铜电极上由于静电感应而产生的电信号($\Delta V_{\text{interface}}$ 和 $I_{\text{interface}}$), 这种信号只有当TENG插入油/水界面时才会产生. 将TENG以 0.05 m s^{-1} 的速度浸入不同浓度的多巴胺溶液中后再取出, 同时记录TENG的短路电流. 研究表明, V_{TENG} 和 I_{TENG} 随着多巴胺浓度的增加而逐渐减小, 而 $\Delta V_{\text{interface}}$ 和 $I_{\text{interface}}$ 随着多巴胺浓度的增加而逐渐增加. 因此, 通过基于固液TENG的自驱动双信号检测系统可以准确、有效地对多巴胺进行检测. 相比于单信号检测系统在复杂的样品(如生物基质)中可能出现假阳性或者假阴性的结果, 这种基于固液TENG的双信号检测系统在生物传感检测平台上可以进一步提高其检测的准确性, 并且展示了固液TENG在生物传感方面的应用潜力.

2.5 其他传感

在物联网背景下需要广泛分布大量的自驱动传感节点, 彼此之间或与云服务器之间相互通信, 从而形成人体、自然环境和生活环境的智能网络. 在工业、体育和交通等应用方向已经进行了越来越多的自驱动传感研究, 使人类能够在生活环境与工业场景内共享多模态环境信息和用户偏好, 在不同的条件和场景中实现更精确的大数据收集和分析.

(1) 智慧交通. 交通方式的改变有助于汽车行业和道路、桥梁、隧道等基建行业的发展, 智慧化交通在降低人工成本的同时也提高了工作和运输效率. Xu等人^[50]通过简单的塑料封装, 构建了具有腔体结构的自回收胶囊形TENG, 在较低压力下可准确识别1 mm的距离变化和 0.86 V kPa^{-1} 的压力. 将该传感器用于桥梁的支撑结构处以检测是否有变形或沉降, 能够有效地实现自驱动交通设施的健康监测, 并通过应用程序为工作人员提供实时反馈. Zhang等人^[51]开发了一种基于机械调节软接触混合纳米发电机的隧道照明系统, 混合发电机经过电源管理后的短路电流提高到25 mA, 能够在没有任何电源的情况下从移动的车辆中收集能量, 并将交通信息无线传输到智能交通系统. 矢量传感器在车辆控制系统中起着重要作用, 通过检测运动方向、位移、角度、速度、加速度等矢量运动参数有助于无人驾驶汽车维持良好秩序, 减少交通事故的发生

率. 图6(a)所示的自驱动的双型脉冲信号传感器可以直接将运动变量转换为电信号, 并在不同的运动方向上切换交流或直流两种类型的电信号^[52]. 实现了精度为 $500 \mu\text{m}$ 的线性传感器和精度为 2° 的角度传感器, 其理论最小分辨率分别达到 $6.79 \mu\text{m}$ 和 0.12° . 该传感器凭借自驱动、高精度、简单的运动方向识别等技术优势, 实现了机器人运动的实时轨迹跟踪和车辆行驶方向监控, 在智能机器人和自动驾驶汽车领域具有广阔的应用前景.

(2) 工业传感. 随着现代工业的快速发展, 机械装备在工业生产中一直发挥着重要作用, 检测设备的正常运行在工业生产中非常重要. Yang等人^[53]为工业输送系统设计了TENG位置传感器, 该系统可以精确定位物体, 与光电传感器相当, 同时还能够用于货物计数. 实时监测如氨气等食品腐败的标志气体对于食品工厂至关重要, Chang等人^[54]设计了一种自供电的全套氨泄漏监测系统, 该装置由TENG、氨传感系统以及信号采集传输系统组成. TENG安装在船舶的发动机上, 收集振动的机械能为整个传感系统提供动力. 这种氨传感系统具有检测限低(0.2 ppm)、响应时间短(约90 s)、选择性好、稳定性好、成本低等特点. 部分工厂建立在偏远地区, 需要远距离的电能输送, 如果断电导致设备运行异常, 不仅会造成财产损失, 还会造成安全隐患. Wu等人^[55]提出了一种基于弹簧的TENG组成的单个主动振动传感器(AVS)单元, 用于输电线路的在线振动监测, 如图6(b)所示. 其中TENG可以提供3.2 mW的最大功率, 能够驱动整个系统, AVS单元将外部电子电路模块(包括信号处理电路, MCU, 蓝牙模块等)组装在一起, 演示了异常振动状态警告的自驱动无线报警系统, 实现全线异常振动警告和振动分布监测, 用于监测输电线路中断状态.

(3) 智能体育. 体育活动过程中的运动数据大多以机械信号的形式表达, 通过TENG能够直接转化为电信号. Luo等人^[56]提出了一种灵活耐用的木质TENG用于制造智能乒乓球桌, 将乒乓球和球桌表面之间的冲击力转换为电信号作为体育传感. 通过在工作台上设置TENG阵列, 实现自驱动下降点分布统计系统, 进行速度传感、运动路径跟踪和分布统计. 通过精确检测和采集训练数据进行大数据分析, 为运动员提供科学的训练评估和指导. 此外, 还构建了自驱动边缘球判断系统, 实时辅助裁判判罚. 当乒乓球撞击桌子的顶

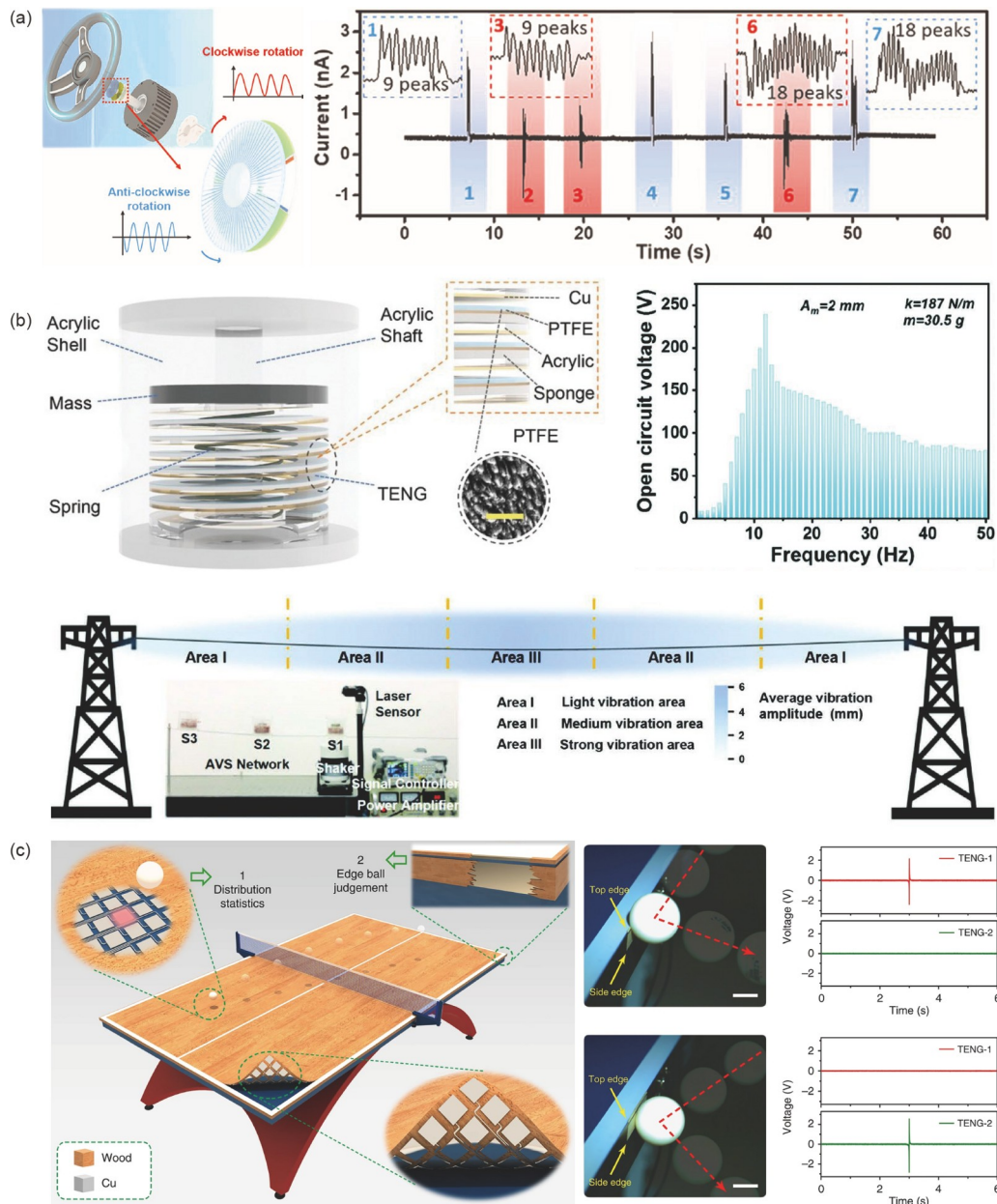


图 6 基于TENG的其他类型传感。(a) 用于自动驾驶的矢量运动传感器^[52]; (b) 用于输电线路监测的主动振动传感器^[55]; (c) 基于TENG传感阵列的智能乒乓球桌^[56]

Figure 6 Other types of sensing based on TENG. (a) Vector motion sensor for autonomous driving ^[52]; (b) active vibration sensor for transmission line monitoring ^[55]; (c) intelligent table tennis table based on TENG sensing array ^[56]. Copyright©2022, Wiley-VCH GmbH; Copyright©2019, The Author(s).

部边缘时, 顶部TENG将产生明显的输出信号. 通过对两个TENG同步输出的数值比较, 可以准确地确定两种边缘球, 如图6(c)所示. Wang等人^[57]设计了一种具有多股内芯和外织层结构的纱线基弹性编织绳, 具有31 MPa的高强度和良好的机洗性(>500次洗涤)、通过弹性芯的选择和控制编织纹理的密度能够定制拉伸

性, 并在拉伸状态下表现出优异的电压稳定性. 基于这种高强度弹性绳研发了一种自驱动蹦床双模传感系统, 可以连续记录跳跃和犯规行为, 提高裁判效率的同时也可以为运动员的日常训练提供指导. 未来, 采用人工智能和云计算技术建立科学的锻炼计划和比赛策略, 预防运动损伤, 以及为运动员创建个人数据库, 体

育大数据分析将作为新的驱动力, 给传统体育行业带来新的变革。

3 自充电系统

自充电系统(SCS)的概念于2008年首次提出^[58], 其基本思想是集成能量收集、存储、管理和用电器件, 补偿电量消耗, 不需要进行额外充电或使用电力电缆输送电能, 电子系统自身可以实现能源的自给自足。早期研究的自充电系统是基于压电纳米发电机, 近来基于TENG的自充电电源系统也被广泛报道^[59]。大多数小型电子产品都需要一个低于5 V的稳定直流电力供应, 而TENG通常输出高电压和低电流的脉冲交流电, 且具有较大内部阻抗。因此, 针对不同应用方向的SCS, 首先应设计与TENG相适配的管理电路提高能量利用效率, 其次选择合适的储能单元储存TENG不稳定的电能, 最后在指定时间为电子产品提供稳定电源, 如图7所示。

3.1 自充电系统应用

TENG具有结构简单和材料多样的特性, 因此, 基于TENG的自充电系统(SCS)具有广泛的应用前景。针对不同的应用方向, TENG可收集来自于人体、自然界、生活环境、工业装备等不同条件下的机械能, 进行电能的高效转换, 以解决智能穿戴、生活设施、智慧建筑、污染防治、化学工业等应用方向的自供电需求。

(1) 自充电可穿戴电子。纤维、纱线、机织或针织纺织品等具有轻便透气的特点, 这些材质的TENG已经被广泛报道。Chen等人^[60]通过传统的编织方法实现

了带有梳状交叉电极的滑动模式TENG, 并展示了一种以光纤超级电容器为储能单元的一体式SCS纺织品。Liu等人^[61]报告了一种基于纱线的SCS, 对TENG纺织品进行了氟化表面改性以增强输出性能, 使用高能非对称超级电容器作为储能单元, 并且获得了 $78.1 \mu\text{W h cm}^{-2}$ 的高能量密度。Mao等人^[62]提出一种集成TENG和超级电容器的全纱基SCS。这种TENG可以用于收集各种生物运动能源并产生最大约380 V的输出电压。将全固态纱线型非对称超级电容器作为储能单元, 具有较高的体能量密度和优异的循环稳定性。如图8(a)所示, Xu等人^[63]提出了一种可拉伸、可水洗、透气和可扩展的机器编织TENG, 使用小型电源管理模块后能够为电子设备提供恒定的电源。

(2) 纸基自充电系统。几乎所有类型的材料都接触带电现象, 由于纸张具有轻量、易于加工和环保等特点也在SCS研究中广泛应用。Shi等人^[64]提出了一种环保的纸基SCS, 涂有聚吡咯(PPy)的纤维素纸同时作为电极和正摩擦层, 硝酸纤维素膜用作负摩擦层, 该TENG与纸基和凝胶电解质制成的超级电容器组成了便携式, 轻量 and 可持续工作的SCS。Ma等人^[65]最近也报道了一种纸基SCS, 将TENG收集的手部运动产生的机械能存储在微型电容器中, 整个装置集成在一张纸上。

(3) 自充电智能温室。雨滴下落时将产生大量的机械能, Zhang等人^[71]报告了一种自清洁SCS, 它从落下的雨滴中收集和储存能量。采用双疏PTFE作为摩擦层, 在与水滴直接接触时会产生静电荷。为提高自供电温室的能量收集效率和对恶劣环境的抵抗力, Ping的团队^[66]用等离子体刻蚀(ICP)的聚乙烯(PE)膜代替部分包层材料(图8(b)), 并创新地将开关效应用于结构设计中, 构建了自供电温室湿度无线监测系统, 无需

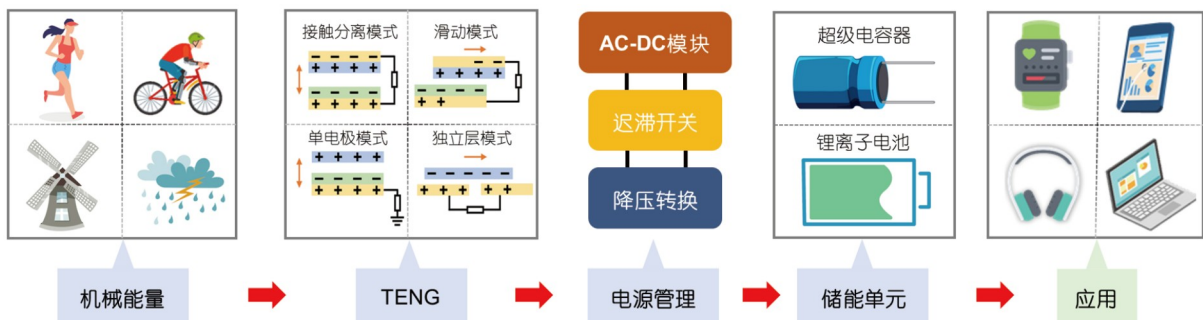


图7 自充电系统概述

Figure 7 Overview of self-charging power systems.

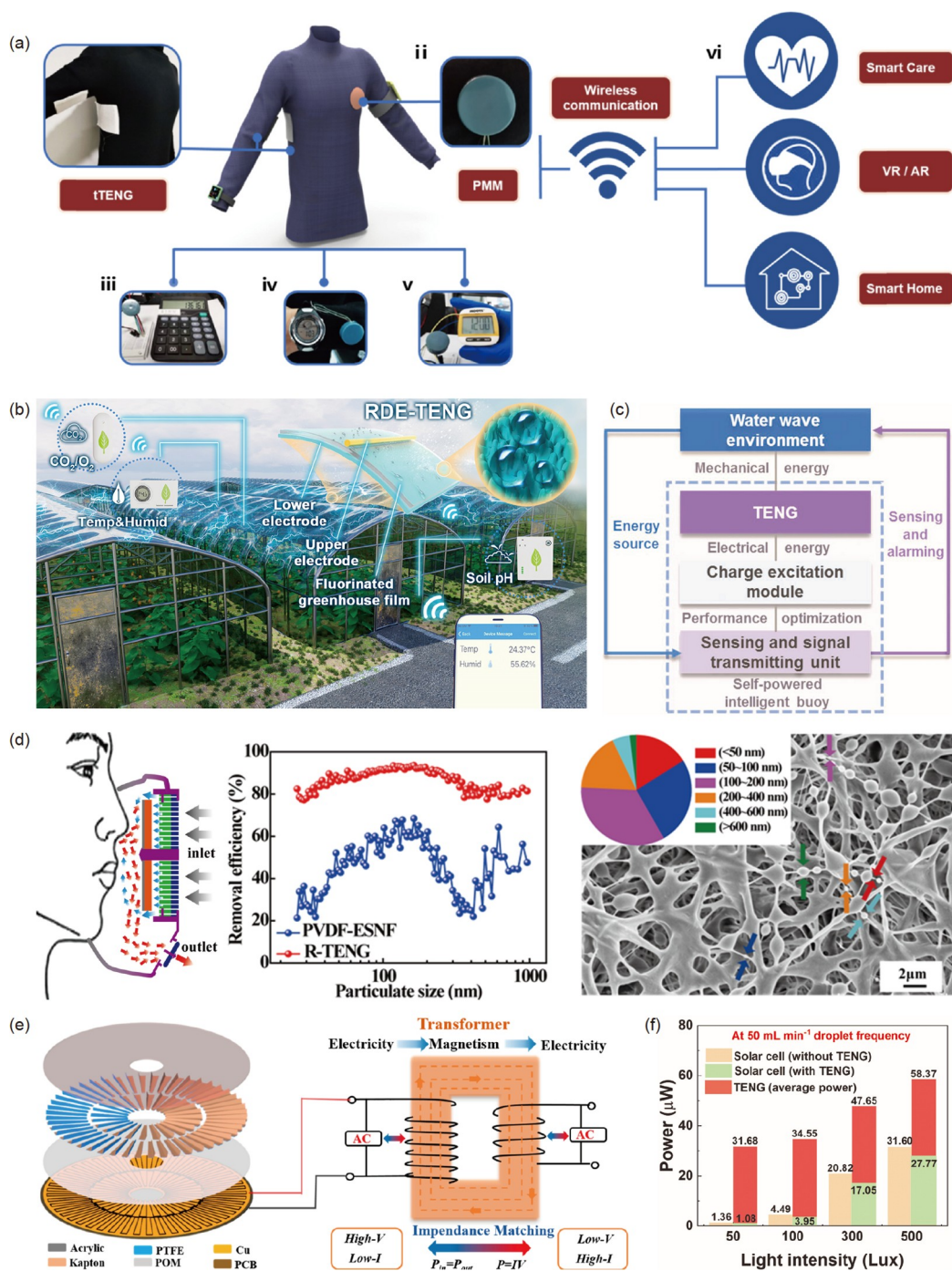


图 8 基于TENG的自充电系统的应用示例。(a) 面向可穿戴电子的自充电系统^[63]；(b) 用于智能温室环境的自充电系统^[66]；(c) 用于海上物联网的自充电浮标^[67]；(d) 用于高效空气净化器的自驱动口罩^[68]；(e) 集成变压器的自充电海水电解系统^[69]；(f) 具有更高功率的多能量协同收集系统^[70]

Figure 8 Applications of TENG-based self-charging power systems. (a) Self-charging power systems for wearable electronics [63], Copyright©2021, Elsevier Ltd; (b) intelligent greenhouse environment based on self-charging power systems [66], Copyright©2021, American Chemical Society; (c) the conceptual diagram of the working process of the self-powered intelligent buoy [67]. (d) TENG-based self-powered electrostatic-adsorption mask for efficient air purification [68], Copyright©2018, American Chemical Society; (e) self-charging seawater electrolysis system with integrated transformer [69], Copyright©2022, American Chemical Society; (f) synergistic energy harvesting system with higher power [70], Copyright©2023, Wiley-VCH GmbH.

外接电源即可实时监测温室内温湿度变化, 及时调节作物生长环境。

(4) 自驱动灾害预警系统. 洪涝、山火等自然灾害的发生对生态系统造成严重破坏, 同时也威胁人们的生命并造成巨大的经济损失. Cao的团队^[72]研发了一种坚固和阻燃的木质TENG用于构建自充电的智能无线火灾监控系统. 阻燃木材具有323.1 MPa的高拉伸强度, 是天然木材的8倍左右, 在250°C下保持60%以上的原始电输出, 并在从明火中移开时自熄, 该SCS可以准确定位火灾位置并向个人电子设备发送报警信号. Liang等人^[67]设计了一种自充电智能浮标用于水位报警, 将装有四个螺旋TENG单元的球形装置, 布置成一个规则的四面体, 并将新的电荷激励模块与TENG集成以进一步提高其输出性能, 最后和功能电路连接在一起, 构建了自充电智能浮标, 并演示了浮标与手机之间的水位信息交换场景, 如图8(c)所示。

(5) 自驱动废水处理. TENG从水流和水波中收集能量并转换成电能, 驱动电化学反应, 能够降解废水中的有机物和无机离子. Li等人^[73]将 β -环糊精作为苯酚识别剂与TENG集成在一起, 收集水波动能并将其转化为电能后直接诱导电化学反应降解废水中的苯酚. 该装置将TENG中的Ti和Ti/PbO₂电极经过整流桥连接后分别作为阴极和阳极置于苯酚溶液中, 并在苯酚溶液中添加NaCl电解质以提高苯酚溶液的电导率, 然后使用紫外-可见分光光度计以固定的时间间隔测量苯酚溶液的吸收光谱. 实验结果表明废水中苯酚的特征吸收峰明显降低, 这表明自驱动电化学反应降解苯酚的有效性. Zhou等人^[74]设计了一个自驱动去除六价铬离子Cr(VI)的集成系统, 该系统主要由三部分组成, 包括作为电源的旋转型R-TENG、电极以及作为电解质的NaCl溶液. 为驱动去除Cr(VI)的电化学反应, R-TENG连接了一个整流器, 用于将交流电输出转换为脉冲直流输出(PDC)信号, 去除Cr(VI)反应与脉冲信号的开启(T_{on})和关闭(T_{off})时间有着密切的关系. 在 T_{on} 阶段中, Cr(VI)得到电子被还原成三价铬离子Cr(III), 同时铁片表面会产生Fe²⁺离子. 在 T_{off} 期间, 溶液中存在的Fe²⁺也会将Cr(VI)还原为Cr(III). 因此可以通过精准控制 T_{on} , T_{off} 的时间比例, 从而最大限度地利用阳极中产生的Fe²⁺来去除Cr(VI), 从而获得更高的Cr(VI)去除效率. 通过优化TENG的PDC信号, 在5 Hz频率和开关比(T_{on}/T_{off})为=1:4的情况下, 仅需0.072 C电荷即可完全去除Cr(VI)

(初始浓度为1 mg L⁻¹). 在水流量为6 L min⁻¹的情况下, 可以驱动R-TENG稳定旋转, 作为直接驱动电化学反应的可持续电源, 随着电化学反应的进行, Cr(VI)的颜色逐渐变浅, 紫外吸光度下降, 当反应时间达到100 min后, 去除效率可达到91.5%, 这表明仅通过TENG从水流中提取的电能就可以充分、有效地去除Cr(VI)重金属污染物. 这不仅建立了电化学反应去除废水中污染物的优化方法, 而且证实了基于TENG的自供电系统在同步节能和环境治理方面的前景广阔。

(6) 自驱动空气净化. Guo等人^[75]报道了基于TENG的空气负离子发生器, 利用独立式或者接触分离式TENG作为高压电源电离空气. 实验结果表明, 其电子-离子转换效率分别达到97%和70%, 并使用质谱法对生成的空气负离子进行表征可发现, 在一个运动周期内手掌大小的FS和CS-TENG分别可产生 2×10^{13} 个空气负离子(理论上, 在100 m³空间内每立方厘米有 2×10^5 个离子)和 1.5×10^{12} 个空气负离子(理论上, 在100 m³空间内每立方厘米有 1.5×10^4 个离子), O⁻, O²⁻, O³⁻, O⁴⁻, CO²⁻, CO³⁻, CO⁴⁻, NO²⁻, NO³⁻, OH⁻等空气负离子的成分离子被成功检测. 另外, 在TENG设备的工作频率为0.25 Hz的情况下, 封闭玻璃室(5086 cm³)中的颗粒物PM 2.5在80 s内迅速从999下降到0 $\mu\text{g m}^{-3}$. 如图8(d)所示, Liu等人^[68]制备了一种自驱动静电吸附面罩, 用于净化人体吸入的空气. 基于PVDF静电纺丝纳米纤维薄膜的TENG可以有效去除大颗粒以及超细颗粒. 在240 min、间隔30天的磨损实验中, 静电吸附和物理过滤机制的耦合作用使粗颗粒和细颗粒的去除率均高于99.2 wt%, 在30 cm s⁻¹风速下, 对超细颗粒的去除率仍维持在86.9%以上. 基于TENG的空气净化技术具有便携、高效、材料多样性和低成本的优势, 是一种经济、简便和安全的方法。

(7) 自驱动产氢系统. 氢作为一种具有高能量密度的可再生清洁能源, 可以通过各种方法储存和传输, 以解决遥远海洋的电力传输问题^[76]. TENG能将来自海洋的大量机械能转化为电能, 这些电能可以用于电解水生产氢气且无二氧化碳排放, 因此基于TENG的自驱动水分解系统是一种很有前途的蓝色能源利用方案^[77,78]. Zhang等人^[69]设计了一个由风驱动TENG (W-TENG)、变压器和海水分解装置共同组成的自供电海水分解系统(图8(e)), 可以有效地将风能转化为可再生的氢能. 变压器与W-TENG的阻抗匹配后, W-TENG中

外环和内环的电流分别从1.0和0.42 mA增加到26.3和28.2 mA. 碳纸支撑的NiCoP-金属有机骨架具有优异的传递系数和超细结构(<10 nm), 在制氢中表现出较高的电催化活性和对水分解的稳定性, 最终产氢速率高达 $90 \mu\text{L min}^{-1}$ 和 $1723.9 \mu\text{L min}^{-1} \text{m}^{-2}$. Li等人^[79]设计了由水流驱动的一半整流HRWF-TENG与耦合的水分解单元构成的自驱动水解系统. 整个系统不需要额外的变压器或电容器, 可以减少传统全波整流造成的能量损失. 低频不规则的水流动能转化为高直流输出, 实现连续产氢, 获得2.38%的高氢能转换效率.

(8) 自驱动水质监测. 日常生活和工业生产用水应满足不同的水质规定, 过量的离子、颗粒和细菌可能会导致工业生产问题或人体健康问题, 在线实时监测水质至关重要. Chen等人^[80]提出了一种在输水管道中的、TENG驱动的自驱动在线监测系统, 基于PCB制作的RD-TENG由涡轮风扇驱动, 将管道中流水的机械能转换为电能. 此外, 其自制的离子浓度传感器具有 $1 \times 10^{-5} \text{ mol L}^{-1}$ 的高灵敏度, 用于监测水中的离子浓度, 并构建了一个报警电路用于水质实时监测. Bai等人^[81]开发了一种收集水波能量的高输出TENG, 平均功率密度达 7.3 W m^{-3} , 能够为正常工作电压和电流分别为3 V和3 mA的高功耗商用水测试笔供电. 这种自充电测试系统可以扩展至监测网中, 在大范围内进行原位实时水质测绘.

(9) 多能量协同收集. 环境中的可再生能源如太阳能、风能和雨滴能等, 具有分布广、能量密度高的优点, 将它们结合起来实现能量的协同收集是解决能源危机和环境问题的有效方案. Wang等人^[82]开发了一种复合纳米发电机, 基于电磁、摩擦电和热电效应的协同作用, 可以同时收集机械和热能. 经电源管理后能够提供5 V的恒定输出电压和约160 mA的脉冲输出电流. Zheng等人^[83]开发了一种瞬时摩擦电纳米发电机(I-TENG), 由仿生表面结构和瞬时开关结构组成, 可将以往TENG器件的输出提高十倍以上. 基于此设计了一个由I-TENG和三元聚合物太阳能电池组成的混合能量收集系统, 能够交替收集雨水和太阳能. Ye等人^[70]报道了一种高透明、大面积、高效率的R-TENG阵列, 与太阳能电池板集成在一起, 可同时收集不规则雨滴能和太阳能. 该R-TENG在雨中拥有比太阳能电池(37.03 m W m^{-2})更高的平均功率密度(40.80 m W m^{-2}), 如图8(f)所示, 复合发电机的总功率

远高于雨天裸太阳能电池的输出功率. 此外, 还设计了一个自充电无线光强监测系统, 不仅能实现实时光强监测, 还能结合智能反馈系统实现信息闭环监测与反馈, 在智能农场、气象监测等领域展现出巨大的应用前景.

3.2 电源管理电路

TENG通常输出高电压(几十伏至几千伏)和低电流(μA 量级), 然而诸如超级电容器或电池等储能单元, 通常在低电压(低于5 V)和大电流(mA量级)的条件下才能够完全充电. 此外, TENG的内部阻抗非常大, 约为 $10^5 \sim 10^7 \Omega$, 而储能电池的内部阻抗通常小于 100Ω (取决于电池的容量). 只有当外部负载阻抗接近其内部阻抗时, TENG的输出功率才最大化, 因此当使用整流桥直接为电池或超级电容器电池充电时, TENG能量利用效率很低. 因此, 电源管理电路对于基于纳米发电机的SCS具有重要意义, 能够减小纳米发电机与储能单元之间的能量差距, 提高能量利用效率. 还有研究表明, 合适的管理电路可有效提高TENG本身的输出性能^[84,85]. TENG的电源管理电路通常包括AC-DC转换模块、电压降压转换器和一个迟滞开关(图7). 也可以通过电感变压器实现AC-AC降压转换, 但对具有间歇脉冲输出的TENG效果不够理想^[86].

(1) AC-DC转换. TENG输出的交流电通过整流器转换为直流输出, 在整流电路后再连接一个与TENG相匹配的缓冲电容(C_{buff}). 大多数报道都使用全波桥式整流器, 之后也有报道使用半波整流器和倍增电路(Bennet's Doubler)进行交直流转换, 增加了整流的直流电压^[87]. 近期, Zhang等人^[88]对基于稳定电荷泵的整流方式进行了综合分析, 并给出了全波和半波整流器可通用的理论模型. 分别使用具有全波整流器与半波整流器的TENG为电容器充电, 通过分析和比较电压动态, 得出以下结论: 半波整流器始终具有更高的饱和电压, 以及更高的每个周期的最大能量, 但缺点是启动时间更长. 只有当输出电压远低于TENG的内部摩擦电电压时, 全波整流器的性能才会更好.

(2) 迟滞开关. 迟滞开关的主要作用是能最大限度地TENG提取能量. Zi等人^[89]首先证明了这个策略. 最初使用机械开关, 但机械开关不会自动跳变, 不便于实际应用. Cheng等人^[90]报道了一种由TENG本身驱动的静电振动开关, Basset的团队^[91]也设计了一种微

机电系统(MEMS)等离子体开关来实现此功能. Xi等人^[92]使用了金属氧化物半导体场效应晶体管(MOS-FET)和比较器, 首先根据TENG的最大电压预设一个基准电压, 当整流电压大于比较器的基准电压时, 晶体管开关打开, 以此实现最大化提取能量的目的. 该电源管理电路还可以降低TENG的匹配阻抗, 从35 M Ω 降低至1 M Ω , 这将减少内部阻抗浪费的能量.

(3) DC-DC降压. 最初Niu等人^[93]使用电感变压器来降低电压, 后来, 研究人员开始使用由并联续流二极管、串行电感器和并联电容器组成的DC-DC大容量转换器^[94]. Liu等人^[95]报道了另一种基于分形设计的电容转换器, 利用整流二极管实现电容器串并联之间的自动切换. 同时, 分形设计可以减少二极管数量, 降低所有二极管的总电压损耗, 最后实现了超过94%的能量传输效率. DC-DC转换后, 输出连接到稳压器, 能够为外部用电设备提供稳定的恒压电源. 根据以上一系列研究, 许多小型电子设备都可通过具有电源管理电路的TENG持续供电, 如计步器、电子手表、计算器等^[63,96].

3.3 储能单元

目前最常见的两种储能方式是电池和超级电容器. 大部分TENG输出间歇性脉冲电流, 滑动模式TENG可以输出正弦波电流; 此外, 由于输入的机械能不连续, 即便使用电源管理电路, 仍然很难保证输出恒定的直流电流. 因此, 研究不同波形电流充电时对电极材料电化学性能的影响, 并寻找高效的TENG储能单元对于SCS的发展也至关重要.

(1) 锂离子电池(LIB). 在电池研究领域, 已经有研究人员利用方波电流和正弦波电流充电来改善电池性能^[97]. 锂离子电池的充电原理如图9(a)所示, 其与恒流充电模式相比优势是, 脉冲间歇或反向电流的休息时间可以抑制局部电荷聚集并降低浓度极化. 同时这段休息时间电池散热, 可以使持续升高的温度降低. 因此, 用TENG为电化学储能器件充电有助于改善性能. Pu等人^[86]报道了使用TENG对锂离子电池进行有效充电的例子. 通过对比发现, 在充电时间和放电速率均相同的情况下, TENG的脉冲电流充电方式比恒流充电的放电容量更大, 如图9(b)所示. 旋转式TENG为商用锂离子电池充电1 h, 电池电压升高至4.2 V, 随后以50 mA电流放电, 能够得到130 mA h的放电容量, 如图9(c)所示. 锂硫电池、锂离子电容器、柔性LIB和锌空

气电池也得到了类似的特性^[98-102]. 然而, Li等人^[103]的研究称, 由于电极颗粒的粉碎, 脉冲充电方式对LIB的循环性能是有害的. 他们的仿真结果表明, 脉冲充电可能导致电极颗粒中的应变更高和裂纹更多. Savoye等人^[104]也发现, 通过与脉冲电流等价的恒流电流充电相比, 周期性脉冲充电对LIB的性能不利. 与上面两个研究结论相反, Chen等人^[105]报告称, 正弦纹波电流充电提高了LIB的充电效率、循环性能和最高温度. 因此, 脉冲充电对LIB的影响仍存在争议, 需要更系统的研究. 已经有几个不同的团队的研究表明, 脉冲电流电镀对锂金属电极有益. Li等人^[106]报告称, 与恒流模式相比, 使用方波脉冲电流充电的对称锂金属电池的寿命增加了一倍以上. 实验结果和分子动力学模拟结果都证明了脉冲电流能够有效抑制金属锂枝晶生长. Wang等人^[107]使用非对称双向方波电流进行实验, 也得到了类似的结果. Qiu等人^[108]发现, 在脉冲电流的间歇期间, 锂离子可以均匀扩散, 并且抑制固态锂金属电池的枝晶生长.

(2) 超级电容器. 当超级电容器用作SCS中的储能单元时, 应注意它们的高自放电率的问题. LIB通常具有较低的自放电率, 但超级电容器, 尤其是带有水性电解质的双电层电容器(EDLC)具有较高的自放电率. 由于TENG的充电电流较低且具有间歇性, 如果超级电容器的自放电率较高, 则为其充电需要更长的时间. Xia等人^[109]提出了在电解质中添加5CB液晶分子(4-*n*-pentyl-4'-cyanobiphenyl)的策略. 排列的液晶分子增加了电解质在带电状态下的黏度, 从而抑制自放电速率, 因此在用TENG充电时表现出了更高的充电效率. 由于氟原子的高电负性和低极化性, 氟化溶剂很难发生电化学氧化反应, 因此含氟溶剂能够作为高压锂离子电池电解质的助溶剂. Yao等人^[110]的实验结果证明, 在超级电容器的电解质中使用氟化醚(TTE)可以有效提高工作电压, 减少自放电. 添加TTE将超级电容器的工作电压从2.7 V提高到3.6 V(图9(d)). 同时, TTE的使用导致自放电率降低. 在3.6 V充电电压下, 没有TTE的超级电容器的开路电压在1 h后降至0.24 V, 而对于在电解液中使用TTE的超级电容器, 开路电压降至1.47 V, 如图9(e)所示. 除此之外, 也有其他类型以超级电容器为储能单元的SCS, 如Han等人^[111]设计了一种以超级电容器为储能单元的多功能同轴能量纤维. 将TENG, 超级电容器和压力传感器集成在同一根同轴

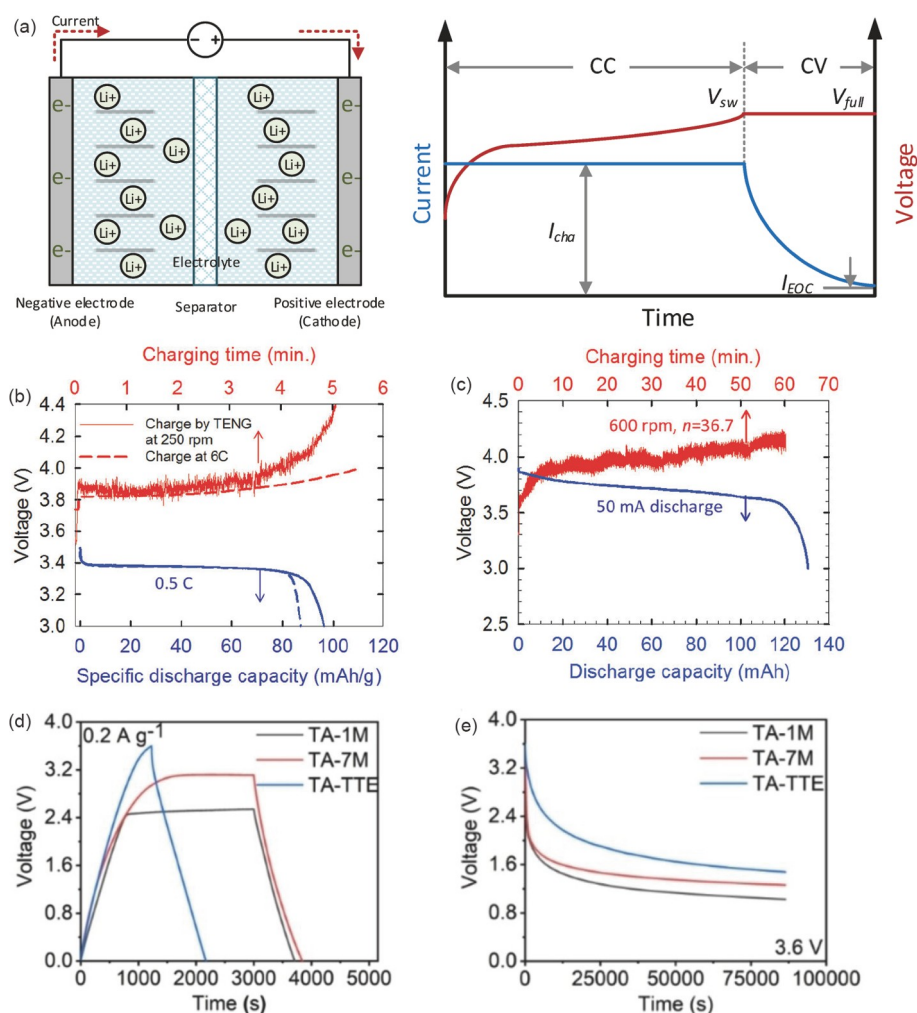


图 9 自充电系统的储能方式. (a) 锂离子电池的充电过程示意图^[97]; (b) LiFePO₄ 电池分别由 TENG 充电和恒流充电的对比^[86]; (c) TENG 为商用锂离子电池充电的电压曲线和后续恒流放电曲线^[86]; (d) 不同电解质的超级电容器充电至 3.6 V 的充放电曲线^[110]; (e) 超级电容器充电至 3.6 V 后的开路电压衰减曲线^[110]

Figure 9 Energy storage for self-charging power systems. (a) Schematic diagram of the charging process of lithium-ion batteries [97]; (b) comparison of voltage profiles of a LiFePO₄ cell charged for five minutes by a TENG and a constant current [86]; (c) voltage profile of a commercial Li-ion battery charged by the TENG and then discharged by constant current [86]; (d) charge-discharge curves of supercapacitors with different electrolytes charged to 3.6 V [110]; (e) decaying profile of open-circuit voltage for the supercapacitors after charging to 3.6 V [110]. Copyright©2022, Wiley-VCH GmbH.

纤维上, 其中全纤维基的 TENG 可以持续为超级电容器提供电能, 实现了高集成度的自充电电源系统. Yin 等人^[112]还设计了超级电容器模块作为整个微电网系统的储能单元. 该工作利用两个 TENG 能量收集装置之间的互补关系, 持续从人体运动中收集能量, 使效率和性能最大化. 最近, Shrestha 等人^[113]报道了一种自充电超级电容器动力电池 (SPC) 与 TENG 的整合器件. 其中 SPC 采用离子液体电解质和金属有机骨架衍生的钴纳米多孔碳/激光诱导石墨烯/铜 (Co-NPC/LIG/Cu) 电极, 聚偏氟乙烯共六氟丙烯 (P(VDF-HFP)) 作为聚合

物隔膜. TENG 的正负摩擦电层分别为尼龙纳米纤维和 Co NPC/LIG/P(VDF-HFP) 薄膜制成, 产生的 2.5 mW 功率在 9 s 内将 SPC 有效充电至 210 mV.

4 总结与展望

信息获取和能源供应是智能数字社会的基础. TENG 在这两个方面均具有极大的潜力: 作为自驱动传感, 上述研究表明 TENG 可以实现对机械应力、速度、角度、形变、化学离子或分子等多种信号的自驱

动感知, 在人体生理信号传感、生物医学监测、人机交互和自驱动化学传感等多个应用领域均取得了极大的进展; 作为自充电系统, 可以收集多种形式的机械能量, 如振动、人体运动、风能、水波能等, 并且集成能量存储和管理, 提高自充电系统的能量利用效率, 实现了多种电子器件的能源自给. 尽管基于TENG的自驱动系统的应用研究进展迅速, 未来仍需要加快技术开发与迭代, 以实现产业应用.

(1) 自驱动传感. 已报道的研究已经充分表明了TENG基自驱动传感器具有应用场景广泛、检测灵敏度高、结构/材料设计丰富等优势, 并且一系列创新性的智能传感器被开发出来. 未来的研究应该侧重于优化自驱动传感器的稳定性以及量化工艺的可重复性; 对于可拉伸柔性传感器, 性能的稳定性和工艺的可重复性更具挑战, 这是由于柔性可拉伸的软材料通常有黏弹性或低回弹性, 因此多功能性和传感稳定性常面

临鱼和熊掌不可兼得的问题; 如何将自驱动传感器与现有的智能电子产品集成也是一项课题; 此外, 在多数应用场景下, 如何体现TENG基自驱动传感对比于传统技术的竞争优势也需要深入研究.

(2) 自充电系统. 自充电系统的关键首先是进一步提高TENG发电机本身的电学输出性能, 近来这方面的研究通过电荷泵浦、自激励电路、材料改性等方法不断地提高了发电机的电学输出, 但受限于材料的击穿极限、空气介质的击穿放电等, 未来进一步的提升需要探索更具创新性的方案. 自充电系统的能量利用率也依赖于电源管理电路的优化, 目前的研究报道了应用于TENG的一些电路方案, 未来研究需侧重于如何实现标准化的、适用性更广泛的管理电路. 在储能器件方面, 无论是二次电池、超级电容器等储能器件均可适用于TENG基自充电系统, 需根据具体应用需求选择适合的储能元件.

参考文献

- 1 Wang Z L. Entropy theory of distributed energy for internet of things. *Nano Energy*, 2019, 58: 669–672
- 2 Fan F R, Tang W, Wang Z L. Flexible nanogenerators for energy harvesting and self-powered electronics. *Adv Mater*, 2016, 28: 4283–4305
- 3 Fan F R, Tian Z Q, Wang Z L. Flexible triboelectric generator. *Nano Energy*, 2012, 1: 328–334
- 4 Wang Z L. On Maxwell's displacement current for energy and sensors: The origin of nanogenerators. *Mater Today*, 2017, 20: 74–82
- 5 Wu C, Wang A C, Ding W, et al. Triboelectric nanogenerator: A foundation of the energy for the new era. *Adv Energy Mater*, 2019, 9: 1802906
- 6 Wang Z L. Triboelectric nanogenerators as new energy technology and self-powered sensors: Principles, problems and perspectives. *Faraday Discuss*, 2014, 176: 447–458
- 7 Liang X, Liu Z, Feng Y, et al. Spherical triboelectric nanogenerator based on spring-assisted swing structure for effective water wave energy harvesting. *Nano Energy*, 2021, 83: 105836
- 8 Liu W, Xu L, Bu T, et al. Torus structured triboelectric nanogenerator array for water wave energy harvesting. *Nano Energy*, 2019, 58: 499–507
- 9 Ren Z, Wu L, Pang Y, et al. Strategies for effectively harvesting wind energy based on triboelectric nanogenerators. *Nano Energy*, 2022, 100: 107522
- 10 Nie S, Fu Q, Lin X, et al. Enhanced performance of a cellulose nanofibrils-based triboelectric nanogenerator by tuning the surface polarizability and hydrophobicity. *Chem Eng J*, 2021, 404: 126512
- 11 Zhang W, Deng L, Yang L, et al. Multilanguage-handwriting self-powered recognition based on triboelectric nanogenerator enabled machine learning. *Nano Energy*, 2020, 77: 105174
- 12 Zhang W, Zhao J, Cai C, et al. Gas-sensitive cellulosic triboelectric materials for self-powered ammonia sensing. *Adv Sci*, 2022, 9: 2203428
- 13 Cao Y, Shao H, Wang H, et al. A full-textile triboelectric nanogenerator with multisource energy harvesting capability. *Energy Convers Manage*, 2022, 267: 115910
- 14 Fan Y, Li S, Tao X, et al. Negative triboelectric polymers with ultrahigh charge density induced by ion implantation. *Nano Energy*, 2021, 90: 106574
- 15 Mi Y, Lu Y, Wang X, et al. From triboelectric nanogenerator to uninterrupted power supply system: The key role of electrochemical batteries and supercapacitors. *Batteries*, 2022, 8: 215
- 16 Meng J, Pan C, Li L, et al. Durable flexible direct current generation through the tribovoltaic effect in contact-separation mode. *Energy Environ*

- Sci*, 2022, 15: 5159–5167
- 17 Guo H, Pu X, Chen J, et al. A highly sensitive, self-powered triboelectric auditory sensor for social robotics and hearing aids. *Sci Robot*, 2018, 3: eaat2516
 - 18 Kang S, Cho S, Shanker R, et al. Transparent and conductive nanomembranes with orthogonal silver nanowire arrays for skin-attachable loudspeakers and microphones. *Sci Adv*, 2018, 4: eaas8772
 - 19 Lin Z, Zhang G, Xiao X, et al. A personalized acoustic interface for wearable human-machine interaction. *Adv Funct Mater*, 2021, 32: 2109430
 - 20 Sun H, Gao X, Guo L Y, et al. Graphene-based dual-function acoustic transducers for machine learning-assisted human-robot interfaces. *InfoMat*, 2023, 5: e12385
 - 21 Chun S, Son W, Kim H, et al. Self-powered pressure- and vibration-sensitive tactile sensors for learning technique-based neural finger skin. *Nano Lett*, 2019, 19: 3305–3312
 - 22 Wang C, Qu X, Zheng Q, et al. Stretchable, self-healing, and skin-mounted active sensor for multipoint muscle function assessment. *ACS Nano*, 2021, 15: 10130–10140
 - 23 Wang Y, Wu H, Xu L, et al. Hierarchically patterned self-powered sensors for multifunctional tactile sensing. *Sci Adv*, 2020, 6: eabb9083
 - 24 Qu X, Liu Z, Tan P, et al. Artificial tactile perception smart finger for material identification based on triboelectric sensing. *Sci Adv*, 2022, 8: eabq2521
 - 25 Jiang Y, Dong K, Li X, et al. Stretchable, washable, and ultrathin triboelectric nanogenerators as skin-like highly sensitive self-powered haptic sensors. *Adv Funct Mater*, 2020, 31: 2005584
 - 26 Wang H L, Guo Z H, Pu X, et al. Ultralight iontronic triboelectric mechanoreceptor with high specific outputs for epidermal electronics. *Nano-Micro Lett*, 2022, 14: 86
 - 27 Zhang P, Chen Y, Guo Z H, et al. Stretchable, transparent, and thermally stable triboelectric nanogenerators based on solvent-free ion-conducting elastomer electrodes. *Adv Funct Mater*, 2020, 30: 1909252
 - 28 Liu D, Zhang D, Sun Z, et al. Active-matrix sensing array assisted with machine-learning approach for lumbar degenerative disease diagnosis and postoperative assessment. *Adv Funct Mater*, 2022, 32: 2113008
 - 29 Ouyang H, Tian J, Sun G, et al. Self-powered pulse sensor for antidiastole of cardiovascular disease. *Adv Mater*, 2017, 29: 1703456
 - 30 Meng K, Chen J, Li X, et al. Flexible weaving constructed self-powered pressure sensor enabling continuous diagnosis of cardiovascular disease and measurement of cuffless blood pressure. *Adv Funct Mater*, 2018, 29: 1806388
 - 31 Ouyang H, Li Z, Gu M, et al. A bioresorbable dynamic pressure sensor for cardiovascular postoperative care. *Adv Mater*, 2021, 33: 2102302
 - 32 Peng X, Dong K, Ning C, et al. All-nanofiber self-powered skin-interfaced real-time respiratory monitoring system for obstructive sleep apnea-hypopnea syndrome diagnosing. *Adv Funct Mater*, 2021, 31: 2103559
 - 33 Li C, Liu D, Xu C, et al. Sensing of joint and spinal bending or stretching via a retractable and wearable badge reel. *Nat Commun*, 2021, 12: 2950
 - 34 Cao R, Wang J, Zhao S, et al. Self-powered nanofiber-based screen-print triboelectric sensors for respiratory monitoring. *Nano Res*, 2018, 11: 3771–3779
 - 35 Wang S, Tai H, Liu B, et al. A facile respiration-driven triboelectric nanogenerator for multifunctional respiratory monitoring. *Nano Energy*, 2019, 58: 312–321
 - 36 Luo J, Li Y, He M, et al. Rehabilitation of total knee arthroplasty by integrating conjoint isometric myodynamia and real-time rotation sensing system. *Adv Sci*, 2022, 9: 2105219
 - 37 Zhou Z, Chen K, Li X, et al. Sign-to-speech translation using machine-learning-assisted stretchable sensor arrays. *Nat Electron*, 2020, 3: 571–578
 - 38 Wen F, Zhang Z, He T, et al. AI enabled sign language recognition and VR space bidirectional communication using triboelectric smart glove. *Nat Commun*, 2021, 12: 5378
 - 39 Lu Y, Tian H, Cheng J, et al. Decoding lip language using triboelectric sensors with deep learning. *Nat Commun*, 2022, 13: 1401
 - 40 Pu X, Guo H, Chen J, et al. Eye motion triggered self-powered mechnosensational communication system using triboelectric nanogenerator. *Sci Adv*, 2017, 3: e1700694
 - 41 Jin T, Sun Z, Li L, et al. Triboelectric nanogenerator sensors for soft robotics aiming at digital twin applications. *Nat Commun*, 2020, 11: 5381
 - 42 Pu X, Guo H, Tang Q, et al. Rotation sensing and gesture control of a robot joint via triboelectric quantization sensor. *Nano Energy*, 2018, 54:

453–460

- 43 Guo Z H, Wang H L, Shao J, et al. Bioinspired soft electroreceptors for artificial precontact somatosensation. *Sci Adv*, 2022, 8: eabo5201
- 44 Wu H, Su Z, Shi M, et al. Self-powered noncontact electronic skin for motion sensing. *Adv Funct Mater*, 2017, 28: 1704641
- 45 Guo H, Wu H, Song Y, et al. Self-powered digital-analog hybrid electronic skin for noncontact displacement sensing. *Nano Energy*, 2019, 58: 121–129
- 46 Cai C, Mo J, Lu Y, et al. Integration of a porous wood-based triboelectric nanogenerator and gas sensor for real-time wireless food-quality assessment. *Nano Energy*, 2021, 83: 105833
- 47 Su Y, Wang J, Wang B, et al. Alveolus-inspired active membrane sensors for self-powered wearable chemical sensing and breath analysis. *ACS Nano*, 2020, 14: 6067–6075
- 48 Li Z, Chen J, Guo H, et al. Triboelectrification-enabled self-powered detection and removal of heavy metal ions in wastewater. *Adv Mater*, 2016, 28: 2983–2991
- 49 Jiang P, Zhang L, Guo H, et al. Signal output of triboelectric nanogenerator at oil-water-solid multiphase interfaces and its application for dual-signal chemical sensing. *Adv Mater*, 2019, 31: 1902793
- 50 Xu J, Wei X, Li R, et al. A capsule-shaped triboelectric nanogenerator for self-powered health monitoring of traffic facilities. *ACS Mater Lett*, 2022, 4: 1630–1637
- 51 Zhang B, Gu Y, Guo H, et al. Sustainable tunnel lighting system based on mechanical-regulated and soft-contact hybridized nanogenerator. *Nano Energy*, 2022, 104: 107868
- 52 Li S, Zhao Z, Liu D, et al. A self-powered dual-type signal vector sensor for smart robotics and automatic vehicles. *Adv Mater*, 2022, 34: 2110363
- 53 Yang Y, Mu B, Wang M, et al. Triboelectric nanogenerator-based wireless sensing for food precise positioning. *Mater Today Sustain*, 2022, 19: 100220
- 54 Chang J, Zhu C, Wang Z, et al. A full-set and self-powered ammonia leakage monitor system based on CNTs-PPy and triboelectric nanogenerator for zero-carbon vessels. *Nano Energy*, 2022, 98: 107271
- 55 Wu H, Wang J, Wu Z, et al. Multi-parameter optimized triboelectric nanogenerator based self-powered sensor network for broadband aeolian vibration online-monitoring of transmission lines. *Adv Energy Mater*, 2022, 12: 2103654
- 56 Luo J, Wang Z, Xu L, et al. Flexible and durable wood-based triboelectric nanogenerators for self-powered sensing in athletic big data analytics. *Nat Commun*, 2019, 10: 5147
- 57 Wang W, Yu A, Wang Y, et al. Elastic Kernmantle E-braids for high-impact sports monitoring. *Adv Sci*, 2022, 9: 2202489
- 58 Wang Z L. Self-powered nanotech: Nanosize machines need still tinier power plants. *Sci Am*, 2008, 298: 82
- 59 Liu R, Wang Z L, Fukuda K, et al. Flexible self-charging power sources. *Nat Rev Mater*, 2022, 7: 870–886
- 60 Chen J, Guo H, Pu X, et al. Traditional weaving craft for one-piece self-charging power textile for wearable electronics. *Nano Energy*, 2018, 50: 536–543
- 61 Liu M, Cong Z, Pu X, et al. High-energy asymmetric supercapacitor yarns for self-charging power textiles. *Adv Funct Mater*, 2019, 29: 1806298
- 62 Mao Y, Li Y, Xie J, et al. Triboelectric nanogenerator/supercapacitor in-one self-powered textile based on PTFE yarn wrapped PDMS/MnO₂NW hybrid elastomer. *Nano Energy*, 2021, 84: 105918
- 63 Xu F, Dong S, Liu G, et al. Scalable fabrication of stretchable and washable textile triboelectric nanogenerators as constant power sources for wearable electronics. *Nano Energy*, 2021, 88: 106247
- 64 Shi X, Chen S, Zhang H, et al. Portable self-charging power system via integration of a flexible paper-based triboelectric nanogenerator and supercapacitor. *ACS Sustain Chem Eng*, 2019, 7: 18657–18666
- 65 Ma W, Zhang M, Yan W, et al. Ultralight self-charging triboelectric power paper with enhanced on-chip energy storage. *Nano Energy*, 2022, 101: 107601
- 66 Zhang Q, Jiang C, Li X, et al. Highly efficient raindrop energy-based triboelectric nanogenerator for self-powered intelligent greenhouse. *ACS Nano*, 2021, 15: 12314–12323
- 67 Liang X, Liu S, Ren Z, et al. Self-powered intelligent buoy based on triboelectric nanogenerator for water level alarming. *Adv Funct Mater*, 2022, 32: 2205313
- 68 Liu G, Nie J, Han C, et al. Self-powered electrostatic adsorption face mask based on a triboelectric nanogenerator. *ACS Appl Mater Interfaces*,

- 2018, 10: 7126–7133
- 69 Zhang B, Zhang C, Yang O, et al. Self-powered seawater electrolysis based on a triboelectric nanogenerator for hydrogen production. *ACS Nano*, 2022, 16: 15286–15296
- 70 Ye C, Liu D, Chen P, et al. An integrated solar panel with a triboelectric nanogenerator array for synergistic harvesting of raindrop and solar energy. *Adv Mater*, 2022, 35: 2209713
- 71 Zhang Q, Liang Q, Liao Q, et al. An amphiphobic hydraulic triboelectric nanogenerator for a self-cleaning and self-charging power system. *Adv Funct Mater*, 2018, 28: 1803117
- 72 Luo J, Shi X, Chen P, et al. Strong and flame-retardant wood-based triboelectric nanogenerators toward self-powered building fire protection. *Mater Today Phys*, 2022, 27: 100798
- 73 Li Z, Chen J, Yang J, et al. β -Cyclodextrin enhanced triboelectrification for self-powered phenol detection and electrochemical degradation. *Energy Environ Sci*, 2015, 8: 887–896
- 74 Zhou L, Liu D, Li S, et al. Effective removing of hexavalent chromium from wasted water by triboelectric nanogenerator driven self-powered electrochemical system—Why pulsed DC is better than continuous DC? *Nano Energy*, 2019, 64: 103915
- 75 Guo H, Chen J, Wang L, et al. A highly efficient triboelectric negative air ion generator. *Nat Sustain*, 2021, 4: 147–153
- 76 Sultan S, Tiwari J N, Singh A N, et al. Single atoms and clusters based nanomaterials for hydrogen evolution, oxygen evolution reactions, and full water splitting. *Adv Energy Mater*, 2019, 9: 1900624
- 77 Tang W, Han Y, Han C B, et al. Self-powered water splitting using flowing kinetic energy. *Adv Mater*, 2015, 27: 272–276
- 78 Zhu Z, Xiang H, Zeng Y, et al. Continuously harvesting energy from water and wind by pulsed triboelectric nanogenerator for self-powered seawater electrolysis. *Nano Energy*, 2022, 93: 106776
- 79 Li S, Jiang J, Zhai N, et al. A half-wave rectifying triboelectric nanogenerator for self-powered water splitting towards hydrogen production. *Nano Energy*, 2022, 93: 106870
- 80 Chen C, Wen Z, Wei A, et al. Self-powered on-line ion concentration monitor in water transportation driven by triboelectric nanogenerator. *Nano Energy*, 2019, 62: 442–448
- 81 Bai Y, Xu L, He C, et al. High-performance triboelectric nanogenerators for self-powered, *in-situ* and real-time water quality mapping. *Nano Energy*, 2019, 66: 104117
- 82 Wang X, Wang Z L, Yang Y. Hybridized nanogenerator for simultaneously scavenging mechanical and thermal energies by electromagnetic-triboelectric-thermoelectric effects. *Nano Energy*, 2016, 26: 164–171
- 83 Zheng Y, Liu T, Wu J, et al. Energy conversion analysis of multilayered triboelectric nanogenerators for synergistic rain and solar energy harvesting. *Adv Mater*, 2022, 34: 2202238
- 84 Liu W, Wang Z, Wang G, et al. Integrated charge excitation triboelectric nanogenerator. *Nat Commun*, 2019, 10: 1426
- 85 Xu L, Bu T Z, Yang X D, et al. Ultrahigh charge density realized by charge pumping at ambient conditions for triboelectric nanogenerators. *Nano Energy*, 2018, 49: 625–633
- 86 Pu X, Liu M, Li L, et al. Efficient charging of Li-ion batteries with pulsed output current of triboelectric nanogenerators. *Adv Sci*, 2016, 3: 1500255
- 87 Xia X, Wang H, Basset P, et al. Inductor-free output multiplier for power promotion and management of triboelectric nanogenerators toward self-powered systems. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2020, 12: 5892–5900
- 88 Zhang H, Galayko D, Basset P. General analysis and optimization of a two-stage power management circuit for electrostatic/triboelectric nanogenerators. *Nano Energy*, 2022, 103: 107816
- 89 Zi Y, Wang J, Wang S, et al. Effective energy storage from a triboelectric nanogenerator. *Nat Commun*, 2016, 7: 10987
- 90 Cheng G, Zheng H, Yang F, et al. Managing and maximizing the output power of a triboelectric nanogenerator by controlled tip-electrode air-discharging and application for UV sensing. *Nano Energy*, 2018, 44: 208–216
- 91 Zhang H, Marty F, Xia X, et al. Employing a MEMS plasma switch for conditioning high-voltage kinetic energy harvesters. *Nat Commun*, 2020, 11: 3221
- 92 Xi F, Pang Y, Li W, et al. Universal power management strategy for triboelectric nanogenerator. *Nano Energy*, 2017, 37: 168–176
- 93 Niu S, Wang X, Yi F, et al. A universal self-charging system driven by random biomechanical energy for sustainable operation of mobile electronics. *Nat Commun*, 2015, 6: 8975

- 94 Harmon W, Bamgboje D, Guo H, et al. Self-driven power management system for triboelectric nanogenerators. *Nano Energy*, 2020, 71: 104642
- 95 Liu W, Wang Z, Wang G, et al. Switched-capacitor-convertors based on fractal design for output power management of triboelectric nanogenerator. *Nat Commun*, 2020, 11: 1883
- 96 Liang X, Jiang T, Liu G, et al. Spherical triboelectric nanogenerator integrated with power management module for harvesting multidirectional water wave energy. *Energy Environ Sci*, 2020, 13: 277–285
- 97 Huang X, Li Y, Acharya A B, et al. A review of pulsed current technique for lithium-ion batteries. *Energies*, 2020, 13: 2458
- 98 Song W, Wang C, Gan B, et al. High performance lithium-sulfur batteries for storing pulsed energy generated by triboelectric nanogenerators. *Sci Rep*, 2017, 7: 425
- 99 Hou H, Xu Q, Pang Y, et al. Efficient storing energy harvested by triboelectric nanogenerators using a safe and durable all-solid-state sodium-ion battery. *Adv Sci*, 2017, 4: 1700072
- 100 Liang X, Qi R, Zhao M, et al. Ultrafast lithium-ion capacitors for efficient storage of energy generated by triboelectric nanogenerators. *Energy Storage Mater*, 2020, 24: 297–303
- 101 Li S, Zhang D, Meng X, et al. A flexible lithium-ion battery with quasi-solid gel electrolyte for storing pulsed energy generated by triboelectric nanogenerator. *Energy Storage Mater*, 2018, 12: 17–22
- 102 Bian J, Cheng X, Meng X, et al. Nitrogen-doped NiCo₂O₄ microsphere as an efficient catalyst for flexible rechargeable zinc-air batteries and self-charging power system. *ACS Appl Energy Mater*, 2019, 2: 2296–2304
- 103 Li S, Wu Q, Zhang D, et al. Effects of pulse charging on the performances of lithium-ion batteries. *Nano Energy*, 2019, 56: 555–562
- 104 Savoye F, Venet P, Millet M, et al. Impact of periodic current pulses on Li-ion battery performance. *IEEE Trans Ind Electron*, 2012, 59: 3481–3488
- 105 Chen L R, Wu S L, Shieh D T, et al. Sinusoidal-ripple-current charging strategy and optimal charging frequency study for Li-ion batteries. *IEEE Trans Ind Electron*, 2013, 60: 88–97
- 106 Li Q, Tan S, Li L, et al. Understanding the molecular mechanism of pulse current charging for stable lithium-metal batteries. *Sci Adv*, 2017, 3: e1701246
- 107 Wang D, Qin C, Li X, et al. Synchronous healing of Li metal anode via asymmetrical bidirectional current. *iScience*, 2020, 23: 100781
- 108 Qiu G, Lu L, Lu Y, et al. Effects of pulse charging by triboelectric nanogenerators on the performance of solid-state lithium metal batteries. *ACS Appl Mater Inter*, 2020, 12: 28345–28350
- 109 Xia M, Nie J, Zhang Z, et al. Suppressing self-discharge of supercapacitors via electrorheological effect of liquid crystals. *Nano Energy*, 2018, 47: 43–50
- 110 Yao J, Shi M, Li W, et al. Fluorinated ether-based electrolyte for supercapacitors with increased working voltage and suppressed self-discharge. *ChemElectroChem*, 2022, 9: e202200223
- 111 Han J, Xu C, Zhang J, et al. Multifunctional coaxial energy fiber toward energy harvesting, storage, and utilization. *ACS Nano*, 2021, 15: 1597–1607
- 112 Yin L, Kim K N, Lv J, et al. A self-sustainable wearable multi-modular E-textile bioenergy microgrid system. *Nat Commun*, 2021, 12: 1542
- 113 Shrestha K, Sharma S, Pradhan G B, et al. A triboelectric driven rectification free self-charging supercapacitor for smart IoT applications. *Nano Energy*, 2022, 102: 107713

Nanogenerator applications: Self-powered systems

PU Xiong, LIU JiaXin, LI ShaoXin & WEI Di

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

Smart sensing is the foundation of the future digital and intelligent society. However, it is a great challenge to provide a continuous power supply to a large number of widely distributed sensing nodes of various types. Triboelectric nanogenerator (TENG) is a new type of mechanical energy harvesting technology emerging in recent years, which can effectively convert low-frequency, low-amplitude mechanical energy into electrical energy, enabling autonomous and self-driven mechanical signal sensing on the one hand; on the other hand, it can be integrated with energy storage and management to realize self-charging power supply systems. At the same time, TENG is suitable for a wide range of scenarios due to its versatility in material selection and structural design. Therefore, this paper systematically introduces the research progress of TENG applications in self-powered systems, mainly including typical research work in both self-driven sensors and self-charging systems, and finally analyzes and envisions the challenges of existing researches and potential future directions.

triboelectric nanogenerator, self-charging systems, self-powered sensors

doi: [10.1360/SST-2023-0082](https://doi.org/10.1360/SST-2023-0082)