文章编号: 1007 - 4252(2021) 04 - 0004 - 340

摩擦纳米发电机原理及其在仿生及软体机器人的应用

刘海生,冯 帅,吴 旋*
(江苏大学 机械工程学院,镇江 212013)

摘要: 全球经济的快速发展,带来的是资源的疯狂消耗。如今,越来越多的声音倡导资源绿色、可持续发展,摩擦纳米发电机也就被更多人发现并研究。通过从摩擦纳米发电机的结构、摩擦层表面微结构和摩擦电材料不断进行探索和研究,许多高性能的摩擦纳米发电机装置被设计制造。这些高性能的摩擦纳米发电机已经在自供能传感器、仿生应用及软体机器人驱动和传感等方面得到了广泛的应用。本文将对摩擦纳米发电机发电工作模式进行介绍,列举一些用于提高摩擦纳米发电机性能的材料的研究,并综述一些摩擦纳米发电机被应用于仿生及软体机器人的研究,最后也对未来进行了展望,希望给未来的摩擦纳米发电机的应用提供更多的思路。

关键词: 摩擦纳米发电机; 工作模式; 发电; 传感器; 应用
中图分类号: TM619 **文献标志码:** A

Principle of triboelectric nanogenerator and its application in bionic and soft robot

LIU Hai-sheng,FENG Shuai,WU Xuan*
(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Rapid development of the global economy has brought about crazy consumption of resources. Nowadays, more and more voices advocate green and sustainable development of resources, and triboelectric nanogenerators have been discovered and researched by more people. Through exploration and research on the structure of the triboelectric nanogenerator, the surface microstructure of the friction layer and the triboelectric materials, many high-performance triboelectric nanogenerator devices have been designed and manufactured. These high-performance triboelectric nanogenerators have been widely used in self-powered sensors, bionic applications, and soft robot drive and sensing. This work introduced the power generation mode of triboelectric nanogenerators, listed some researches on materials used to improve the performance of triboelectric nanogenerators, and summarized some researches on the application

收稿日期: 2021-06-29; **修订日期:** 2021-07-22
基金项目: 江苏省自然科学青年基金项目 (BK20200913) ; 江苏大学高级人才科研启动基金项目 (18JDG010) .
作者简介: 刘海生(1997-) , 男, 硕士, 主要研究方向为柔性电子器件 (E-mail: 1548440744@ qq.com) ;
冯 帅(1996-) , 男, 硕士, 主要研究方向为柔性电子器件 (E-mail: 99403781@ qq.com) .
通信作者: 吴 旋(1986-) , 男, 博士, 教授, 主要研究方向为新型能量采集技术、柔性电子器件、微纳米技术 (E-mail: wuxuan@ ujs.edu.cn) .

of triboelectric nanogenerators on bionics and soft robots. Finally, prospect of triboelectric nanogenerators are proposed that hope to provide more ideas for the application of triboelectric nanogenerators in the future.

Key words: Triboelectric nanogenerator; Power generation; Sensor; Working mode; Application

0　引言

摩擦纳米发电机(Triboelectric nanogenerator，简称 TENG) 是利用摩擦起电和静电感应的原理，将外界的机械能转化为电能的装置[1]。摩擦纳米发电机的典型结构是两种不同聚合物的一面贴上或镀上一层金属电极，这两个电极即为电能输出电极，聚合物另一面则为摩擦面。摩擦纳米发电机的工作模式分为四种: 垂直接触-分离模式、水平滑动式、单电极模式和独立层模式，如图 1 所示。摩擦纳米发电机是利用两种极性不同的材料接触所产生的表面静电荷产生随时间变化的电场来驱动电子在外电路中流动形成电流。常见材料的摩擦电序列[3,4] 如图 2 所示。

摩擦纳米发电机可以作为发电机，收集能量，如人的脚步[5]、汽车的各种机械能[6]、风能[7]、海浪拍打海岸的机械能[8]、振动能量[9] 等这些能量都是被浪费但可以运用摩擦纳米发电机进行收集的能量。但是，摩擦纳米发电机的价值不只局限于用它进行发电，在其他方面的应用其实更具潜力。比如，摩擦纳米发电机在自供电传感器上的应用，如风能自供电传感器[10]、自驱动车载传感器[11]、自供电人体运动信息采集的柔性传感器[12] 等。摩擦纳米发电机在受到外界的机械激励下产生电信号，通过对电信号分析，进而对机械信号进行判断。另外，由于摩擦纳米发电机的制备材料大多为弹性材料，传感器对环境的适应性相较于其他传感器具有明显的优势，如在仿人体皮肤的电子皮肤方面，摩擦纳米发电机具有刚性传感器所无法代替的优势。在曲面或者其他复杂的工作环境摩擦纳米发电机也拥有广阔的应用前景。甚至在未来的软体机器人领域，摩擦纳米发电机很有可能成为其主要的组成部分，如应用于软体机器人的传感以及驱动等方面。

摩擦纳米发电机装置结构、表面微结构(表面形态) 和摩擦电材料是影响摩擦纳米发电机性能的三大要素。为了提高摩擦纳米发电机输出性能及机械性能，研究者从这三个方面出发已经做了大量的探索。例如，利用弹簧辅助摆动结构的球形摩擦电纳米发电机来有效收集水波能量[13]；通过在尼龙表面添加十六烷液膜制备的摩擦纳米发电机性能显著增强[14]；从大蒜汁中提取的大蒜素用于增强纤维素纳米纤维摩擦电性能[15]；通过引入聚丙烯腈纳米纤维和氧化石墨烯纳米片来改善摩擦纳米发电机的机械和摩擦电性能，制备了一种阻燃和自熄的摩擦纳米发电机[16] 等。除了从传统的角度来寻求提高摩擦纳米发电机性能的思路，研究者们也会从自然界中找寻灵感，制备出仿生摩擦纳米发电机。例如，根据植物仿生，制备了具有海带森林形态的草坪结构的摩擦纳米发电机阵列[17]，利用粒子光刻法制作了类荷叶表面形貌的三维分级超疏水表面，用来增强摩擦纳米发电机的电性能、耐湿性和耐污染性[18]，还制备了具有凤眼莲叶柄充气腔特点的一种具有超高转移电荷密度的仿生多孔结构纳米纤维基摩擦纳米发电机[19]；根据动物仿生，借鉴蛛网布局制备了基于蛛网布局中单电极摩擦纳米发电机的生物感应摩擦电界面[20]，由树蛙脚趾垫启发设计制备了一种材料表面有非聚集微珠阵列的摩擦纳米发电机[21]，受鸟巢的启发制备了一种分层多孔电介质-电极混合物用于摩擦纳米发电机[22]。

围绕基于摩擦纳米发电机的柔性传感器，本文将首先介绍摩擦纳米发电机的四种基本工作模式，并简单陈述各种工作模式适合的工作环境; 其次阐述几种提高摩擦纳米发电机性能的方法，并综述一系列提高摩擦纳米发电机性能的应用研究; 然后综述一些摩擦纳米发电机在仿生应用和软体机器人上的应用; 最后对本文进行总结并对未来摩擦纳米发电机的发展进行展望。

1　摩擦纳米发电机四种模式的工作原理

1.1　垂直接触-分离模式工作原理

垂直接触-分离式摩擦纳米发电机，利用两种材料的得失电子的能力不同，即摩擦电极性的不同，外接负载使电子得以循环流动。如图 3 所示，初始

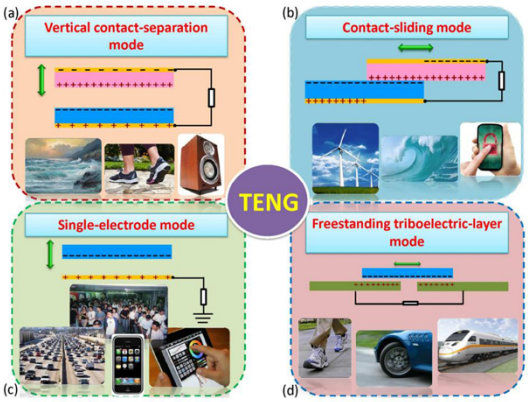

图 1 TENG 四种工作模式:(a) 垂直接触-分离模式;(b) 水平滑动式;(c) 单电极模式和(d) 独立层模式 [2]

Fig. 1 Four working modes of TENG: (a) Vertical contact-separation mode; (b) Contact-sliding mode; (c) Single-electrode mode and (d) Freestanding triboelectric-layer mode [2]

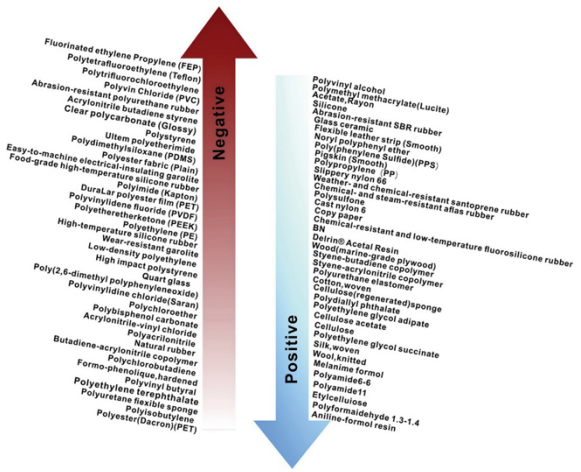

图 2 常见材料的摩擦电序列 [3]

Fig. 2 Triboelectric sequence of common materials [3]

状态为两种摩擦材料处于分离状态,通过施加外力,两个摩擦层发生接触,并在接触面产生等量的异种电荷,此时处于电势平衡状态; 然后撤去外力,使得两个摩擦层分离,由于高分子的绝缘性能好,材料表面产生的电荷可以保持很长时间,两电极之间便会形成电势差; 当两极板恢复到原始位置时,两电极之间的电压为最大; 再重新施加外力,电势逐渐降低; 当两摩擦层重新接触时,电势为 0。如此循环,如果外接电路,电势差会在增大时先驱使电极中的电子从上极板流向下极板,再在减小时驱动电子从下极板流向上极板,产生交流电流。这种模式的摩擦纳米发电机可以收集冲击、拍打、声波振动等能量。

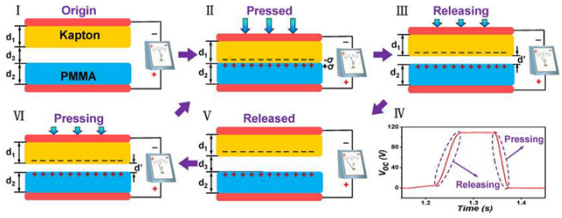

图 3 垂直接触-分离模式工作原理图 [23]

Fig. 3 Working principle diagram of vertical contact-separation mode [23]

1.2 水平滑动模式工作原理

水平滑动模式的摩擦纳米发电机与垂直接触分离式的摩擦纳米发电机主要是其工作的运动形式不一样,水平分离式主要是收集移动的机械能,其工作原理与垂直接触分离式差不多。如图 4 所示,初始状态为两摩擦层材料接触,并在接触面产生等量异种电荷,此时处于电荷平衡状态; 当施加外力,使两个摩擦层发生相对滑动,平面上会有未被平衡的电荷,因此会在两极板之间产生电势差; 随着两极板的相对滑动运动的进行,两极板之间的电势差越来越大,当两摩擦层接触面积为 0 时,电势达到最大; 当摩擦层的运动方向发生换向时,电势差逐渐降低,回到初始位置时电势差为 0。如此循环,如果外接电路,电势差会在增大时先驱使电极中的电子从下极板流向上极板,再在减小时驱动电子从上极板流向下极板,产生交流电流。这种摩擦发电机适用于相对滑动的形式的机械能,并且由于其两摩擦层之间没有空隙,可以很大程度的节省空间,便于集成、封装,大大增加了器件的应用范围。

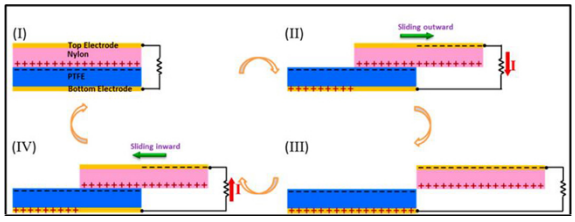

图 4 水平滑动模式工作原理图 [24]

Fig. 4 Working principle diagram of horizontal sliding mode [24]

1.3 单电极模式工作原理

接触式和滑动式摩擦发电机都必须拥有两个电极才能形成回路中电子的定向流动。这种设计不仅限制了发电机能量收集形式的多样性,而且局限了相关的应用,如转轮的能量收集、管道中滚动物体

等。为了克服诸类问题，出现了单电极模式的摩擦发电机，如图 5 和图 6 所示。

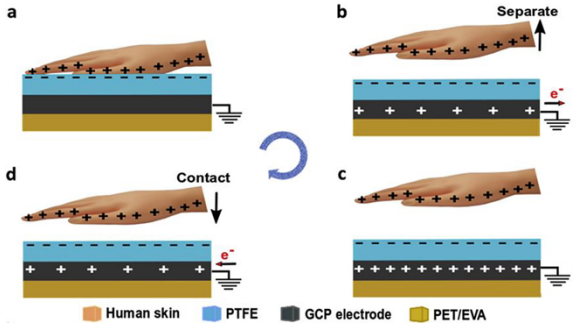

图 5　单电极模式工作原理图[25]

Fig. 5 Working principle diagram of single electrode mode[25]

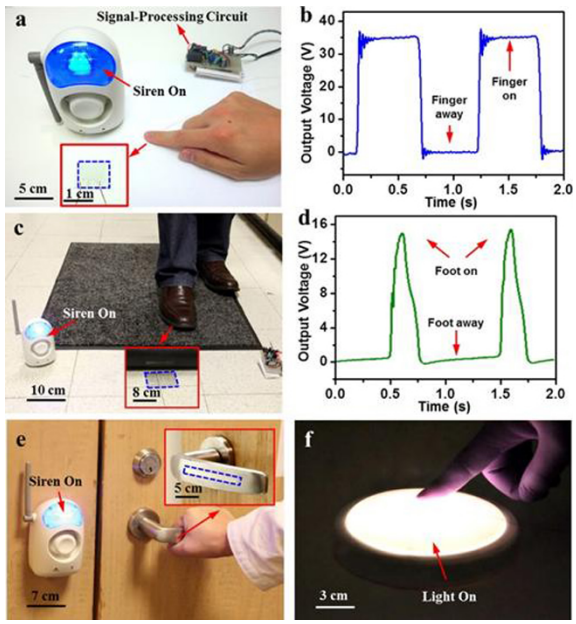

图 6　基于单电极模式的 TENG 及自供能传感器的实际应用[26]

Fig. 6 Practical application of TENG and self-powered sensors based on single-electrode mode[26]

这种模式可以用于人机界面、旋转体能量收集，运用的场景及运动形式更加灵活。如图 5 所示，将手皮肤作为一种摩擦层，与另外一种摩擦材料接触，并且将电极接地，进行发电。初始状态为手与下摩擦层接触，在两摩擦表面产生等量异种电荷，此时处于电荷平衡状态; 当手皮肤离开下摩擦层，由于摩擦电荷的产生，为了平衡摩擦层上的电荷，电极上的电子流向大地; 当手皮肤再次接触下摩擦层，电子从大地回流电极。如此循环，可以产生交流电流。单电极摩擦纳米发电机的用途如图 6 所示，可以检测力的存在，感应人的动作。

1.4　独立层模式工作原理

独立层模式摩擦发电机的器件结构和工作原理如图 7 所示，由一层绝缘体薄膜层和两个彼此相连的平行金属电极构成。金属电极有两个作用，即作为摩擦材料和导电电极。

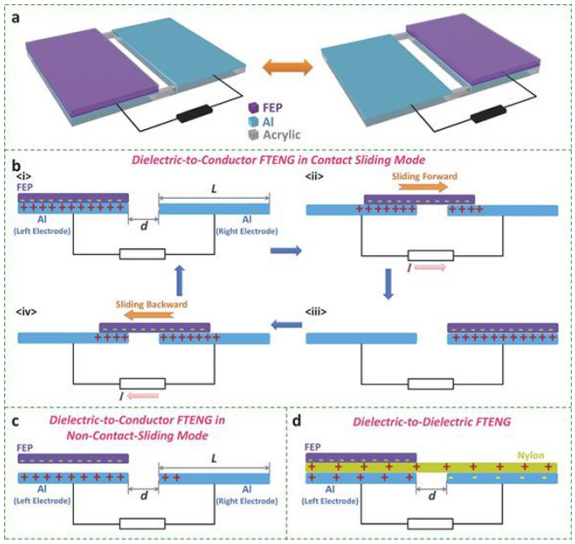

图 7　独立层模式 TENG 工作原理图[27] (a) 独立层 TENG 概图; (b)　工作原理; (c)　非接触模式; (d) 绝缘体-绝缘体模式

Fig. 7 Working principle diagram of TENG in freestanding layer mode[27] (a)　TENG overview of the independent layer; (b) Working principle; (c) Non-contact mode; (d) Insulator-insulator mode

独立层模式摩擦纳米发电机与水平滑动式摩擦纳米发电机的运动形式很相似。只是独立层模式的摩擦层不用作为电极与导线相连，更加的自由，这样很大程度上增强了其运动形式的灵活性。如图 7 (b) 所示，两电极用导线相连，当摩擦层从左往右运动时，由于摩擦起电效应，在摩擦层和左电极的接触表面产生等量异种电荷。当摩擦层向右电极移动时，由于静电感应，右电极上产生与摩擦层带电相反的电荷，电子由右电极板流向左电极板; 当摩擦层运动方向相反时，电子流动方向也发生换向。如此循环，便产生了交流电流。

此外，这种工作模式的摩擦发电机也可以在没有接触和中间间隔一层绝缘材料的情况下正常工作，如图 7 (c) 和(d) 所示。由于不需要接触，这种

模式的摩擦发电机可以收集人行走、汽车或悬浮列车的运动动能等隔着一层材料或者不需要接触的运动形式的能量。

2 各种材料在摩擦纳米发电机上的应用

自从 2012 年摩擦纳米发电机被发明以后，经过不断的探索，摩擦纳米发电机得到了很大的发展。各种材料不断被应用于摩擦纳米发电机，使得摩擦纳米发电机性能越来越好，工作越来越稳定，也更加能够适应各种复杂的工作环境。

Gui-Zhong Li 等人[28]通过将 FDTS 加入到 PDMS 中，引入 F 元素，制成了透明、疏水的柔性 PDMS-FDTS 薄膜，将其作为负摩擦层。普通的 PDMS 的平均水接触角为 89.15°，而 PDMS-0.02FDTS 和 PDMS-0.04FDTS 的平均水接触角分别是 115.12°和 108.52°，如图 8 所示。用 PET 作为正摩擦层，铜纳米线/还原氧化石墨烯(Cu-NWs/RGO)作为电极。实现了 4 cm^2 的 TENG，其输出电压为 125 V，最大转移电荷量为 80 nC，如图 9 所示。在湿度为 60%的环境下也可以达到 105.8 V 的输出电压，并且透光率达 70.1%。Long-Biao Huang 等人[29]制备了一种具有超快自愈、不干燥、耐环境、柔性导电特点的有机水凝胶，并将其作为电极材料；然后通过亚胺键和四氢键交联制备了同样可以自愈、疏水疏冰的 IU-PDMS(Imine UPy polydimethylsiloxane)，并将其作为摩擦层材料。设备采用单电极模式，可以得到 157 V 的开路电压，16 μA 的短路电流和 29 nC 的短路电荷，如图 10、11 所示，并且显示出了摩擦纳米发电机在恶劣环境中具有的可靠输出性能和在实际应用中的巨大的应用前景。

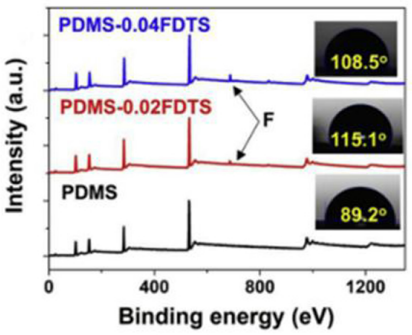

图 8 PDMS-xFDTS 接触角[28]

Fig. 8 PDMS-xFDTS contact angle[28]

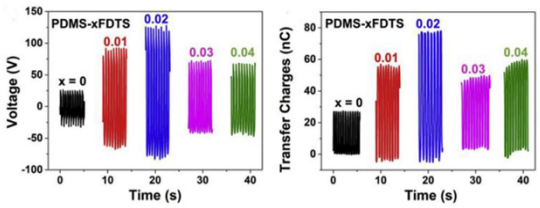

图 9 PDMS-xFDTS 输出电压和转移的电荷量[28]

Fig. 9 PDMS-xFDTS output voltage and transferred charge[28]

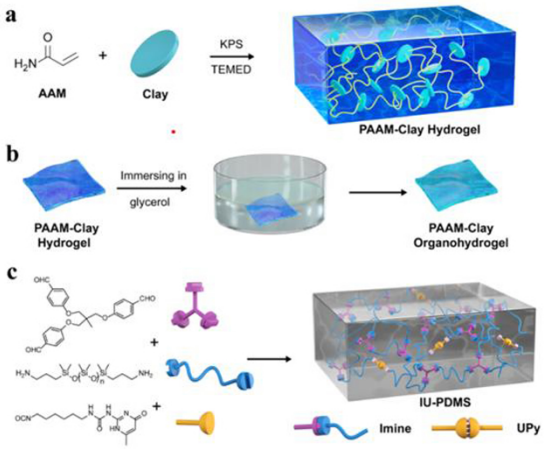

图 10 自愈合聚合材料示意图(PAAM-Clay 有机水凝胶和 IU-PDMS)[29]；(a) PAAM-Clay 水凝胶通过物理连接氢键的化学结构；(b) 甘油原位置换水凝胶制备 PAAM-Clay 有机水凝胶；(c) 亚胺键和四氢键交联制备 IU-PDMS 的合成路线

Fig. 10 Schematic diagram of self-healing polymeric materials (PAAM-Clay organic hydrogel and IU-PDMS)[29]; (a) The chemical structure of the PAAM-Clay hydrogel by physically connecting hydrogen bonds; (b) The PAAM-Clay organic hydrogel is prepared by replacing the hydrogel in glycerol in situ; (c) The imine bond and the tetrahydrogen bond are cross-linked to prepare IU- Synthetic route of PDMS

综上所述，对材料进行研究以实现高性能的摩擦纳米发电机是行之有效的，并且可以使得摩擦纳米发电机满足各种复杂的现实要求。未来如果可以结合一些普通的材料(比如日常生活中的塑料、布料和纸张等材料)进行研究，将各种功能赋予给这些普通的材料，将会对摩擦纳米发电机的发展产生巨大推动作用。

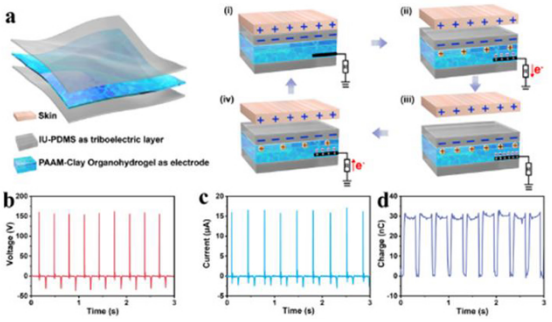

图 11　有机水凝胶 TENG 的工作机理和输出性能[29] (a) 有机水凝胶 TENG 结构示意图和工作原理图; (b) 开路电压; (c) 短路电流; (d) 短路电荷

Fig. 11 The working mechanism and output performance of organic hydrogel TENG[29] (a) The structure diagram and working principle diagram of organic hydrogel TENG; (b) Open circuit voltage; (c) Short circuit current; (d) Short circuit charge

3　摩擦纳米发电机在仿生和软体机器人上的应用

摩擦纳米发电机的特性是高电压、低电流输出和高阻抗。高电压输出是摩擦纳米发电机的一个巨大优势，它可以将外界机械信号转化为明显的高电压信号，用作自供能传感器。如今随着在传感方向的探索，摩擦纳米发电机已经被应用于仿生器件，如仿人类皮肤的电子皮肤[30]，仿人类触觉的触觉传感器[31,32]等。在软体机器人传感方面，摩擦纳米发电机也具有广阔的应用前景。摩擦纳米发电机输出的高电压还可以作为驱动介电弹性体(DEA) 所需要的高电压，用于驱动软体机器人[33]，给软体机器人的驱动提供了新的方法。

Wenjie Sun 等人[33]开发了一种单向介电弹性体驱动的软体机器人。他们将介电弹性体延伸方向设计为与机器人的运动方向一致，以实现高效的能量转换，并选用了单向轴承用于控制机器人往一个方向运动，如图 12 所示。摩擦纳米发电机采取独立层模式，并直接用摩擦纳米发电机产生的高电压驱动机器人。如图 13 所示，在摩擦纳米发电机的滑动速度和软体机器人的速度之间存在线性关系，此设计最终实现了 110 mm(2.2 倍体长) /s 的最大爬行速度和 40 g 的有效载荷容量。Long Li 等人[34]将摩擦纳米发电机与软体机器人抓手集成在一起。摩擦纳米发电机作为触觉传感器，用于识别物体形状。触觉抓手上安装四个摩擦纳米发电机电极用来感测压力，当压力施加在某个电极上时，该位置的电极将产生电压信号，而当压力施加在某两个电极中间时，相邻两个电极将收到类似的信号(即产生类似的电压信号) ，如图 14 所示。如此，触觉抓手便实现了粗略的识别抓取物体的形状。Xuan Zhao 等人[35]受人类指纹的启发，设计了一种基于单电极工作模式的摩擦纳米发电机的电子皮肤，用于纹理识别。通过设计的指纹结构，有效放大了触摸物体表面凸起的机械刺激，并且输出了稳定的响应信号。在对有序纹理盲文的识别中，由于指纹结构的设计，不同盲文的输出信号的不同可以直接被观察出来，如图 15 所示，并且相同盲文的输出信号非常相似如图 16 所示。

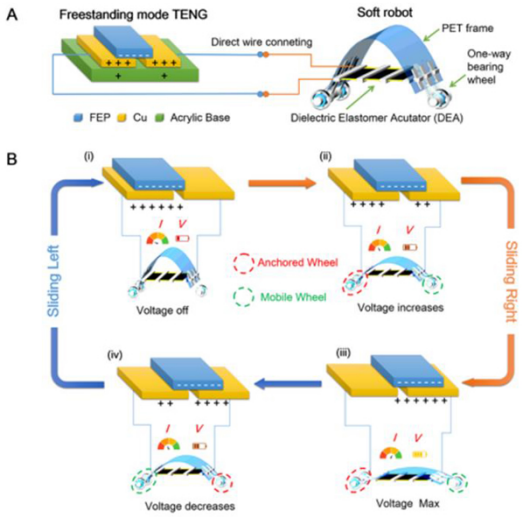

图 12　TENG 和机器人的连接系统[33] (a) 独立式 TENG 直接连接到软机器人，软机器人由一个 DEA、一个柔性弧形体和三个单向轴承轮组成; (b) 当滑动 TENG 时，产生一个电压来驱动 DEA。DEA 伸长和缩回，产生机器人的位移

Fig. 12 TENG and robot connection system[33] (a) The independent TENG is directly connected to the soft robot, which consists of a DEA, a flexible arc body and three unidirectional bearing wheels; (b) When sliding TENG, a voltage is generated to drive DEA. DEA stretches and retracts, generating robot displacement

由以上可知，摩擦纳米发电机作为传感器的应用潜力是无比巨大的。摩擦纳米发电机除了可以应用于提供介电弹性体所需的高电压以驱动机器人，未来也可以将其应用于软体机器人的末端执行器与

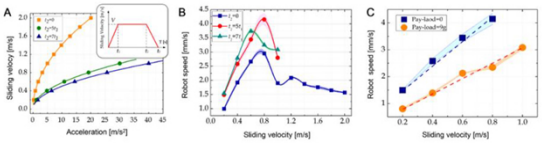

图 13 TENG 的滑动速度和机器人爬行速度的关系[33](a) TENG 在不同加速度下的滑行速度; (b) 软机器人的爬行速度与 TENG 的滑动速度的关系。当 TENG 滑动速度低于 0.8 m/s 时,存在单调关系; (c) 有效载荷对软机器人爬行速度的影响

Fig. 13 The relationship between the sliding speed of TENG and the crawling speed of the robot [33] (a) The sliding speed of TENG at different accelerations; (b) the relationship between the crawling speed of the soft robot and the sliding speed of TENG. When the sliding speed of TENG is lower than 0.8 m/s, there is a monotonic relationship; (c) the effect of payload on the crawling speed of the soft robot

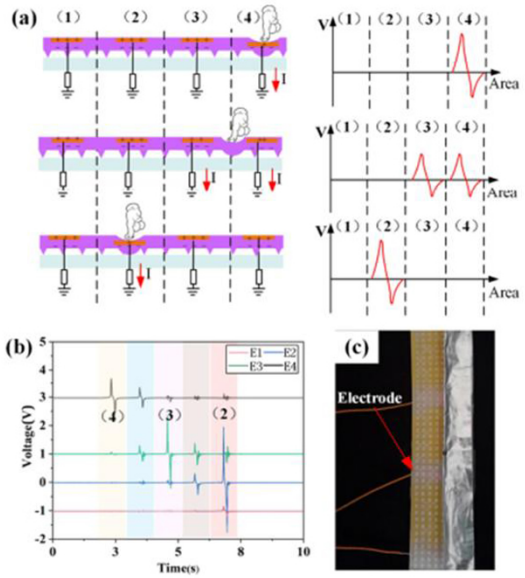

图 14 TENG 触觉传感器测试[34](a) 四个 TENG 电极的理想输出; (b) 从电极 4 到电极 2 的压力测试; (c) TENG 触觉传感器实体

Fig. 14 TENG tactile sensor test [34] (a) Ideal output of four TENG electrodes; (b) Pressure test from electrode 4 to electrode 2; (c) TENG tactile sensor entity

控制系统的配合上,实现类似于人的手掌触觉与神经的搭配,即给软体机器人一种末端执行器与控制系统之间的双向反馈模式,达到精准控制的效果。

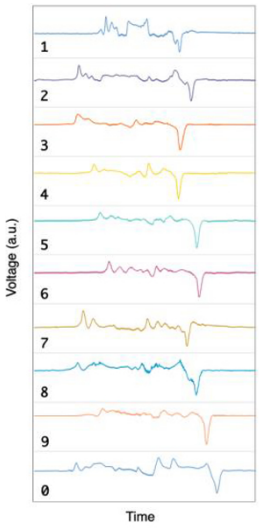

图 15 十种盲文的信号输出[35]

Fig. 15 Ten kinds of Braille signal output [35]

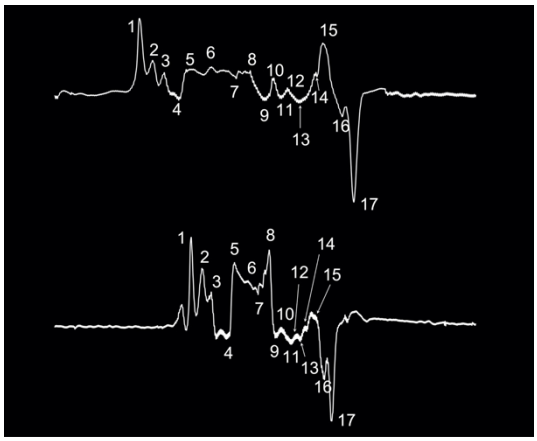

图 16 相同盲文的信号输出[35]

Fig. 16 Signal output of the same Braille [35]

4 结论

摩擦纳米发电机自从发明以来,无论是作为发电器件还是传感器,都已经取得了很大的突破和发展。从结构设计、表面微结构和摩擦电材料的选择及制备上不断得到发展,摩擦纳米发电机被设计出了各种结构来满足不同的工作环境,制备出各种表面微结构以提高摩擦接触面积,选择和开发了各种摩擦电材料以改善摩擦纳米发电机的环境适应性。由于具有良好的特性,并且不断被优化和完善,摩擦纳米发电机如今已经被应用于各种环境,如用作自供能传感器,仿生电子皮肤,驱动介电弹性体以实现机器人运动,作为柔性传感器与软体机器人结合等。

但是，也还存在不足，比如: (1) 两种摩擦电材料之间的摩擦力会导致材料的的磨损及表面损伤，最终导致输出下降，影响摩擦纳米发电机的耐久性，并且尚未提出提高摩擦纳米发电机的耐久性和稳定性的基本方法[35]; (2) 摩擦纳米发电机要想被应用于实际中，必然涉及到了封装技术，然而对摩擦纳米发电机的封装的研究很少，故需要进一步探索研究摩擦纳米发电机的封装技术[36]; (3) 虽然现在很多的材料已经被应用在摩擦纳米发电机上，但是这些材料的制备较为复杂，并且很难产业化，所以如何使这些被使用的材料达到量产，需要更多的实验和研究。

本文介绍了摩擦纳米发电机的研究现状并系统阐述了摩擦纳米发电机的四种工作模式，并且综述了各种材料被开发应用于摩擦纳米发电机和摩擦纳米发电机在仿生和软体机器人上的应用。未来，相信随着各种材料不断被研究和开发，以及仿生领域及软体机器人领域的不断发展，摩擦纳米发电机凭借其制备简单、成本低和制备材料多为弹性材料的特点必将得到更大的发展，实现更大的价值。

参考文献:

[1] Fan F R, Tian Z Q, Wang Z L. Flexible triboelectric generator [J]. Nano energy, 2012, 1(2): 328-334.

[2] Wang Z L. Triboelectric nanogenerators as new energy technology and self-powered sensors - Principles, problems and perspectives [J]. Faraday discussions, 2015, 176: 447-458.

[3] Liu Y H, Mo J L, Fu Q, et al. Nie, Enhancement of triboelectric charge density by chemical functionalization [J]. Advanced Functional Materials, 2020, 30 (50): 2004714.

[4] Zhang X S, Han M, Kim B, et al. All-in-one self-powered flexible microsystems based on triboelectric nanogenerators [J]. Nano Energy, 2018, 47: 410-426.

[5] Yar A. High performance of multi-layered triboelectric nanogenerators for mechanical energy harvesting [J]. Energy, 2021, 222: 119949.

[6] Tani H, Sugimoto M, Fushihara K, et al. Energy Harvesting from Triboelectric Nanogenerator Attached Inside Rolling Tire [C]. 2019 19th International Conference on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications (PowerMEMS). IEEE, 2019: 1-2.

[7] Liu S, Li X, Wang Y, et al. Magnetic switch structured triboelectric nanogenerator for continuous and regular harvesting of wind energy [J]. Nano Energy, 2021, 83, 105851.

[8] Jurado U T, Pu S H, White N M. A contact-separation mode triboelectric nanogenerator for ocean wave impact energy harvesting [J]. 2017 IEEE SENSORS, 2017, 1-3.

[9] Wu X, Li G, Lee D W. A novel energy conversion method based on hydrogel material for self-powered sensor system applications [J]. Applied Energy, 2016, 173: 103-110.

[10] Ma P, Zhu H, Lu H, et al. Design of biodegradable wheat-straw based triboelectric nanogenerator as self-powered sensor for wind detection [J]. Nano Energy, 2021, 86: 106032.

[11] Feng Y, Huang X, Liu S, et al. A self-powered smart safety belt enabled by triboelectric nanogenerators for driving status monitoring [J]. Nano Energy, 2019, 62: 197-204.

[12] He M, Du W, Feng Y, et al. Flexible and stretchable triboelectric nanogenerator fabric for biomechanical energy harvesting and self-powered dual-mode human motion monitoring [J]. Nano Energy, 2021, 86: 106058.

[13] Liang X, Liu Z, Feng Y, et al. Spherical triboelectric nanogenerator based on spring-assisted swing structure for effective water wave energy harvesting [J]. Nano Energy, 2021, 83: 105836.

[14] Wang K, Li J, Li J, et al. Hexadecane-containing Sandwich Structure Based Triboelectric Nanogenerator with Remarkable Performance Enhancement [J]. Nano Energy, 2021: 106198.

[15] Roy S, Ko H U, Maji P K, et al. Large amplification of triboelectric property by allicin to develop high performance cellulosic triboelectric nanogenerator [J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 385: 123723.

[16] Ahmed A, El-Kady M F, Hassan I, et al. Fire-retardant, self-extinguishing triboelectric nanogenerators [J]. Nano Energy, 2019, 59: 336-345.

[17] Zhang L, Zhang B, Chen J, et al. Lawn structured triboelectric nanogenerators for scavenging sweeping wind energy on rooftops [J]. Advanced Materials, 2016, 28(8): 1650-1656.

[18] Zhou Q, Lee K, Kim K N, et al. High humidity-and contamination-resistant triboelectric nanogenerator with superhydrophobic interface [J]. Nano Energy, 2019, 57: 903-910.

[19] Yu B, Yu H, Huang T, et al. A biomimetic nanofiber-based triboelectric nanogenerator with an ultrahigh transfer charge density [J]. Nano Energy, 2018, 48: 464-470.

[20] Shi Q, Lee C. Self - powered bio - inspired spider - net - coding interface using single - electrode triboelectric nanogenerator [J]. Advanced Science, 2019, 6 (15):

1900617.

[21] Bui V T, Zhou Q, Kim J N, et al. Treefrog toe pad - inspired micropatterning for high-power triboelectric nanogenerator [J]. Advanced Functional Materials, 2019, 29(28): 1901638.

[22] Bui V T, Oh J H, Kim J N, et al. Nest-inspired nanosponge-Cu woven mesh hybrid for ultrastable and high-power triboelectric nanogenerator [J]. Nano Energy, 2020, 71: 104561.

[23] Zhu G, Pan C, Guo W, et al. Triboelectric-generator-driven pulse electrodeposition for micropatterning [J]. Nano letters, 2012, 12(9): 4960-4965.

[24] Wang S, Lin L, Xie Y, et al. Sliding-triboelectric nanogenerators based on in-plane charge-separation mechanism [J]. Nano letters, 2013, 13(5): 2226-2233.

[25] Shankaregowda S A, Ahmed R F S M, Nanjegowda C B, et al. Single-electrode triboelectric nanogenerator based on economical graphite coated paper for harvesting waste environmental energy [J]. Nano Energy, 2019, 66: 104141.

[26] Zhu G, Yang W Q, Zhang T, et al. Self-powered, ultrasensitive, flexible tactile sensors based on contact electrification [J]. Nano letters, 2014, 14(6): 3208-3213.

[27] Wang S, Xie Y, Niu S, 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.

[28] Li G Z, Wang G G, Cai Y W, et al. A high-performance transparent and flexible triboelectric nanogenerator based on hydrophobic composite films [J]. Nano Energy, 2020, 75: 104918.

[29] Huang L B, Dai X, Sun Z, et al. Environment-resisted flexible high performance triboelectric nanogenerators based on ultrafast self-healing non-drying conductive organohydrogel [J]. Nano Energy, 2021, 82: 105724.

[30] Park J, Kim Y T. On-skin Based Soft Triboelectric Nanogenerator for Electronics Skin [C]. 2020 IEEE 15th International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular System (NEMS). IEEE, 2020: 273-276.

[31] He J, Xie Z, Yao K, et al. Trampoline inspired stretchable triboelectric nanogenerators as tactile sensors for epidermal electronics [J]. Nano Energy, 2021, 81: 105590.

[32] Cai Y W, Zhang X N, Wang G G, et al. A flexible ultrasensitive triboelectric tactile sensor of wrinkled PDMS/MXene composite films for E-skin [J]. Nano Energy, 2021, 81: 105663.

[33] Sun W, 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.

[34] Li L, Wang T, Jin T, et al. Research on Shape Perception of the Soft Gripper Based on Triboelectric Nanogenerator [C]. 2019 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). IEEE, 2019: 211-216.

[35] Lin Z, Zhang B, Zou H, et al. Rationally designed rotation triboelectric nanogenerators with much extended lifetime and durability [J]. Nano Energy, 2020, 68: 104378.

[36] 郭恒宇. 摩擦纳米发电机的结构设计及其在自驱动系统中的应用 [D]. 重庆: 重庆大学, 2017.