

doi: 10.7690/bgzdh.2022.12.006

基于柔性摩擦纳米发电机的水下仿生胡须传感器研究

徐 鹏^{1,2}, 刘建华¹, 谢广明², 徐敏义¹

(1. 大连海事大学轮机工程学院大连市海洋微纳能源与自驱动系统重点实验室, 辽宁 大连 116026;

2. 北京大学工学院, 北京 100871)

摘要: 为帮助自主水下航行器 (autonomous underwater vehicle, AUV) 感知周围环境信息, 设计一种基于柔性摩擦纳米发电机的仿生胡须传感器 (bionic whisker sensor, BWS)。该传感器通过氟化乙烯丙烯薄膜和导电油墨之间的接触分离产生电信号, 通过分析收集到的电信号, 估计外部载荷的方向、位置和大小等特征; 为演示传感器的实用性, 将胡须传感器放置在循环水洞中测试其水下的感知能力。实验结果表明, 该传感器能够感知包括流动速度、涡流引起的振荡频率等流场信息。

关键词: 胡须传感器; 自驱动; 触觉感知; 摩擦纳米发电机

中图分类号: TP212 **文献标志码:** A

Research on Underwater Bionic Whisker Sensor Based on Flexible Friction Nanogenerator

Xu Peng^{1,2}, Liu Jianhua¹, Xie Guangming², Xu Minyi¹

(1. Dalian Key Laboratory of Marine Micro/Nano Energy and Self-powered Systems, Marine Engineering College,

Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;

2. College of Engineering, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: A bionic whisker sensor (BWS) based on flexible friction nanogenerator is designed to help autonomous underwater vehicle (AUV) sense the surrounding environment information. The sensor generates electrical signals through the contact and separation between the fluorinated ethylene propylene film and the conductive ink, and estimates the direction, location and size of the external load by analyzing the collected electrical signals. In order to demonstrate the practicability of the sensor, the whisker sensor is placed in a circulating water tunnel to test its underwater sensing ability. The experimental results show that the sensor can sense the flow field information including the flow velocity and the oscillation frequency caused by the vortex.

Keywords: whisker sensor; self-driven; tactile sensing; frictional nanogenerator

0 引言

自主水下航行器 (AUV) 因其在水下作业的出色适用性而被研究, 并且已经设计出不同的传感器来帮助 AUV 完成特定任务^[1-3]。这些任务包括利用双目立体视觉绘制局部海平面图^[4]、借助生物传感器测量水柱中的特定参数^[5]以及使用惯性传感器导航^[6-7]。当 AUV 在水质浑浊或者空间狭窄的环境中运行时, 仍然难以准确获取周围环境信息, 导致 AUV 的工作效率显著下降。造成这种情况的主要原因是 AUV 缺乏具有与海洋生物相当的触觉感知能力; 因此, 开发触觉传感器提升 AUV 的感知能力成为亟待解决的问题。

具有触觉感受器官的海洋哺乳动物能够感知周围未知环境的复杂刺激。在大多数水生和半水生

物类群中, 触觉是感知周围环境的主要方式^[8]。作为具有代表性的海洋哺乳动物, 海獭具有非常灵敏的触觉感觉器官。胡须是海獭获取外部信息的重要器官, 尤其是在黑暗和浑浊的水下环境中^[9]。当海獭的胡须阵列感知到外部扰动时, 胡须触发毛囊结构中触觉神经元, 将触觉信息传递给大脑, 海獭依靠获取的触觉信息来感知周围环境。

摩擦纳米发电机 (triboelectric nanogenerator, TENG) 作为一种新兴的机电转换技术, 由于其低功耗和重量轻而受到广泛关注。值得注意的是, 基于 TENG 的传感器与触觉感受器兼容, 通常用于摩擦电传感器的软材料的杨氏模量与海洋哺乳动物触觉感受器的杨氏模量处于同一水平。当前, TENG 已被设计为多种机电能量转换设备^[10-11], 如一些能用于不规则和超低频蓝色能量收集摩擦电器件^[12-13]

收稿日期: 2022-08-17; 修回日期: 2022-09-14

作者简介: 徐 鹏 (1991—), 男, 江苏人, 硕士, 从事海洋和 underwater 机器人的仿生设计和控制、基于摩擦纳米发电机的自驱动传感系统和控制研究。E-mail: pengxu@dlmu.edu.cn.

及自供电机械传感器^[14-15]等。基于这些结果，将 TENG 技术和仿胡须毛囊结构相结合能够提供一种水下触觉方案，用来提升 AUV 感知周围环境的能力。

笔者设计一种基于摩擦纳米发电机的仿生胡须传感器(BWS)，帮助 AUV 感知外部环境信息。BWS 的主要部件包括可以感知外部刺激的碳纤维杆、具有良好防水密封性能的环氧树脂底座以及将机械信号转换为电信号的传感单元。传感单元由氟化乙烯丙烯(fluorinated ethylene propylene, FEP)薄膜和导电油墨组成。当 2 种材料接触和分离时产生电荷转移，使传感单元产生相应的电信号。通过分析 BWS 的输出信号，能够估计外部载荷的方向、位置和大小等特征。循环水洞中的实验结果表明，BWS 能够提高水下机器人的环境感知能力。

1 传感器的结构和工作原理

通常，当暴露在皮肤外层的胡须受到外部刺激时，毛囊结构中的触觉神经会接收刺激信号并将其发送到大脑，海獭根据接受到的触觉信息来识别周围环境。

图 1 展示 BWS 的结构分解，其中底座由具有良好水密性和耐腐蚀性的环氧树脂制成，防水罩(半径 $R=35\text{ mm}$ ，高度 $H=66\text{ mm}$)利用 4 根六角铜柱固定在底座上，硅橡胶关节贴合亚克力顶盖固定在防水罩顶部。具体来说，防水罩和亚克力顶盖用来密封传感单元，硅橡胶关节用来约束碳纤维杆运动，记忆合金弹簧提供碳纤维杆的中位回复力，通过底部螺栓调节弹簧的工作高度，来调节传感器的灵敏度。

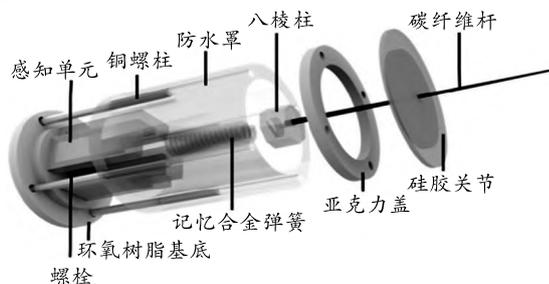


图 1 BWS 的结构

如图 2 所示，传感单元(长 $l=35\text{ mm}$ ，宽 $w=20\text{ mm}$ ，高 $h=9\text{ mm}$)由具有静电屏蔽作用的流延聚丙烯薄膜(castpolypropylene, CPP)、强电负性的 FEP 薄膜、强正电性的导电油墨和良好水密性硅橡胶组成。4 个传感单元对称均匀分布在环氧树脂底座周围。当 BWS 的胡须杆在复杂外部环境中受到刺激

时，碳纤维棒会发生不同程度的弯曲，带动底部连接的八角块撞击传感单元。传感单元受到撞击后发生变形，内部介电层材料由于电负性不同，接触分离后会产生位移电流。弯曲的传感单元内部介电层材料接触导致电荷转移，产生电信号。在传感单元受到外部刺激的电子转移过程中，FEP 薄膜接触导电油墨电极，导致电子云在油墨和 FEP 层上重叠。由于 FEP 比导电油墨具有更大的电负性，导电油墨层的电子进入 FEP 薄膜更深的势阱，即导电油墨表面的自由电子转移到 FEP 界面处的最低分子轨道。

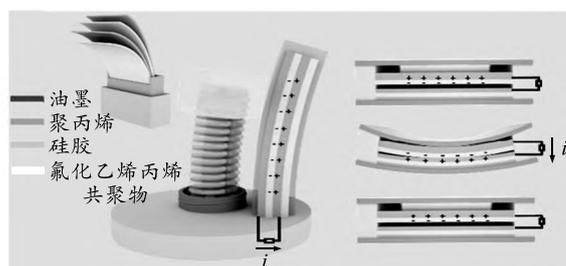


图 2 BWS 传感单元的受力变形和电子转移过程

当 BWS 移除外部负载时，FEP 薄膜与油墨电极分离。由于正负摩擦电荷不再重合在同一平面上，在 2 个接触面之间会产生偶极矩和电势。自由电子通过外部电路转移以平衡局部电场，在导电油墨电极上产生正电荷。电子的流动一直持续到 2 个接触面之间的距离达到最大值。同时，电压差减小，自由电子通过外电路返回。最后，电荷分布恢复到初始状态，完成整个电子转移周期。

如图 3 所示，COMSOL 软件用于模拟 2 个薄膜之间的电位分布结果并验证其工作原理。

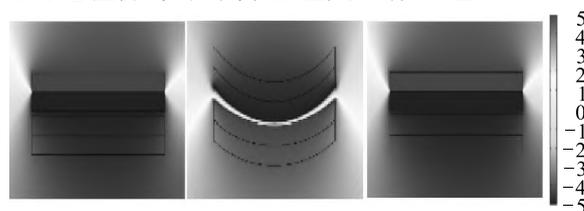


图 3 COMSOL 软件模拟电位分布

图 4 展示 BWS 安装在水下机器人上的应用。当水下机器人穿越复杂的水下环境时，通过分析 BWS 传输的信号评估周边环境信息，保证水下机器人不被损坏的同时完成制定的任务，如水下集群作业、局部地图映射和自主导航等。胡须传感器的发展为水下机器人的环境感知能力提供有力的保障。

2 BWS 感知特性研究

为探究 BWS 传感性能，采用如图 5 所示的实验装置。BWS 被安装在带有压力传感器的线性电机

平台上，通过线性电机上的触摸屏调节载荷参数模拟不同的外部负载。电信号由 Keithley (6514) 静电计测量，Ni-6259 用于数据收集。该可视化软件平台基于 LabVIEW 构建，可实现实时数据采集控制和分析。当 BWS 与集成的直线电机发生碰撞时，静电计对电信号进行采样并将数据传输到计算机在 LabVIEW 界面显示。



图 4 BWS 安装在水下机器人上用于感知水下环境

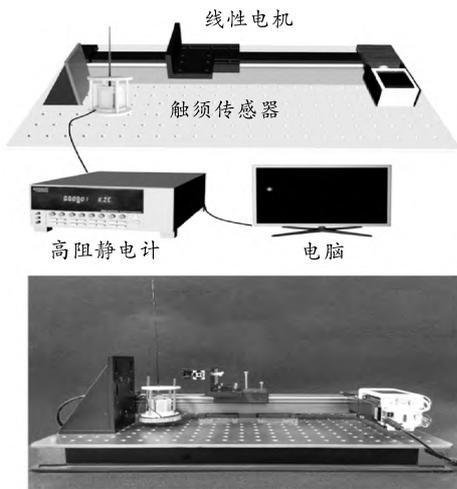


图 5 实验装置

如图 6 所示，测试外部负载的物理参数对 BWS 输出的影响。碳纤维杆的接触位置到传感器底座的距离记为 H ，碳纤维杆受到外部载荷时会发生弯曲，受力点发生的横向位移为 A ，以及载荷频率为 f ，则偏转角为 α ($\tan\alpha=A/H$)。由于传感器的 4 个传感单元的结构和制造方法相同，这里只分析单个传感单元的输出规律。

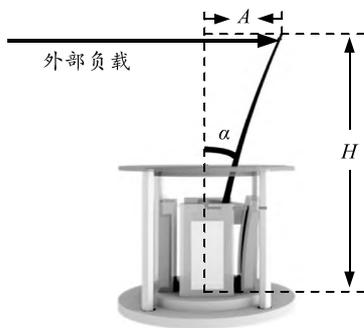


图 6 BWS 受载荷作用下的状态

当载荷频率 $f=0.8$ Hz 和 $H=40$ mm 的条件下，

测试不同负载位移 A 对开路电压的影响。如图 7 所示，当位移从 1.0 mm 增加到 5.0 mm 时，传感单元的开路电压从 1.4 V 增加到 3.5 V。利用多项式拟合工具，负载位移 A 与开路电压 U 之间的线性关系可表示为 $U=0.511\ 94A+1.183\ 9$ ， $R^2=0.916\ 79$ 。因此，负载位移和输出信号之间存在着良好的线性关系。

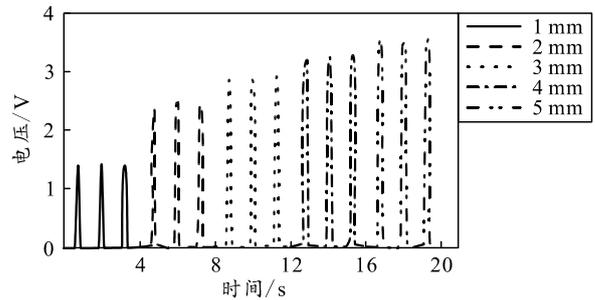


图 7 不同负载位移下的电压输出

图 8 展示在 $H=40$ mm 和 $f=0.8$ Hz 条件下，5 种不同负载位移产生的短路电流。同样，电压随着负载位移的增大而增大。在相同的接触位置下，随着外部负载位移增大，导致内部传感单元产生更大的形变，从而增大电压和电流的输出。

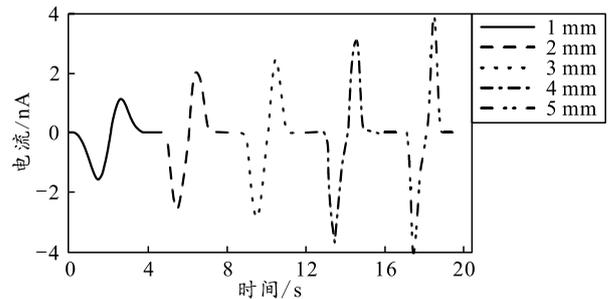


图 8 不同负载位移下的电流输出

图 9 展示在 $A=11$ mm 和 $f=0.8$ Hz 条件下，不同接触位置对开路电压的影响。传感单元的开路电压随着接触高度的降低而增加。接触高度与开路电压的线性关系可表示为 $U=-0.023\ 25A+5.520\ 87$ ， $R^2=0.992\ 81$ 。相比于外部负载位移与输出电压的线性度，接触高度和输出电压的线性度更出色。

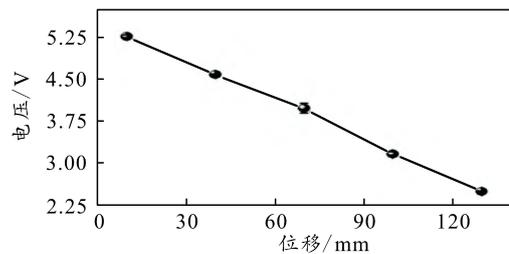


图 9 不同接触高度下的电压输出

如图 10 所示，在这种情况下，传感单元的短路电流同样随着接触高度的降低而增加。这是因为相同的横向位移下，随着接触高度的降低，胡须杆的

挠度越大,增加传感单元中介电层材料的接触面积,从而增加电子转移的数量和电信号的强度。

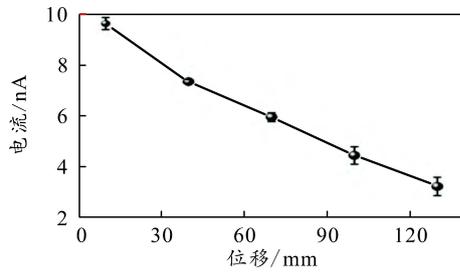


图 10 不同接触高度下的电流输出

随后,分析3种不同劲度系数的记忆合金弹簧对BWS输出性能的影响。在 $f=0.8\text{ Hz}$ 和 $H=40\text{ mm}$ 的条件下,对记忆合金弹簧进行8~17 mm外部载荷位移试验。如图11所示,弹簧刚度系数为160 N/m的记忆合金弹簧比其他2种记忆合金弹簧(190和220 N/m)具有更好的电信号输出。这是因为记忆合金弹簧的挠度随着弹簧刚度系数的增加而减小,刚度系数越高,相同载荷大小下撞击块的横向位移越小,导致传感单元的形变变小,2种介电层材料之间的接触面积也随着越小。

图12给出4个传感单元对不同方向外部负载的输出响应。随着负载方向偏离传感单元的角度增大,对应的传感单元信号输出逐渐减小。结合4个传感单元的输出信号大小,可估计外部载荷的方向信息。因此,安装在水下机器人平台上的BWS可以提供机器人识别外部载荷方向的能力。

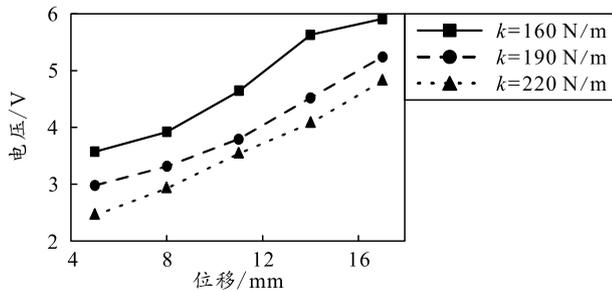


图 11 不同弹簧刚度系数的电压信号

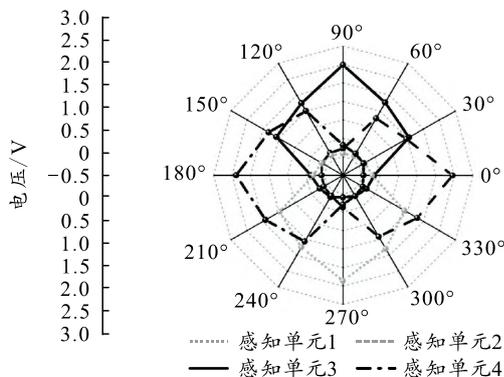


图 12 BWS在不同方向的电压响应

3 BWS在循环水洞下感知特性研究

为分析触须传感器在水下环境中的具体性能,将BWS固定在循环水洞中进行实验,搭建的水洞尺寸为 $0.9\text{ m}\times 0.25\text{ m}\times 0.25\text{ m}$ 。图13展示循环水洞的内部组成,包括螺旋桨、导流板、格栅结构。由变频电机控制螺旋桨的旋转驱动水通过导流板在水洞中逆时针循环流动,同时可以通过调整螺旋桨的转速大小来获得不同的水流速度,变频电机型号为YX3-112M-4,最大转速1455 r/min,变频器型号为AT2-0450X,变频范围0~50 Hz。螺旋桨螺距12.7 cm,流速调节区间为0.133~0.511 m/s。带有稳定流量作用的格栅结构安装于左侧导流板的出口处。

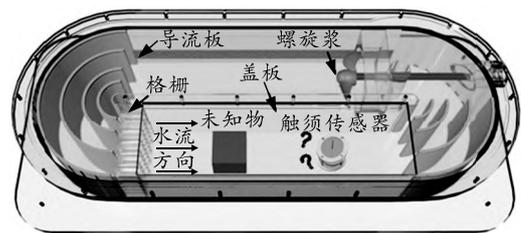


图 13 循环水洞

模拟空旷水域的情况,当触须传感器前面未放置任何物体时,在不同流速情况下对触须传感器的4个感知单元进行开路电压信号测试,如图14所示。随着水流速度从0.05 m/s增加到0.2 m/s,触须传感器的感知单元所产生的开路电压信号呈线性增长趋势。以感知单元2为例,相应的开路电压从0.57 V增加到0.74 V。

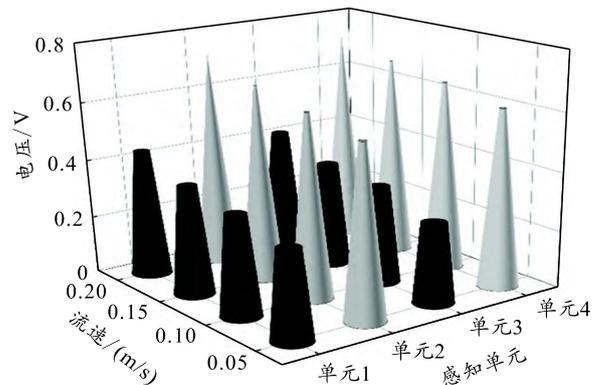


图 14 不同流速下的电压信号

然而,对比4个感知单元的电压值可以看出:感知单元2和感知单元4的输出略高于另外2个感知单元。这是因为当水流经过触须传感器的碳纤维杆时,在碳纤维杆的后侧会形成一个逐渐衰减的尾涡,导致碳纤维杆出现轻微的涡激振动现象。碳纤维杆在垂直于来流方向上的位移效果不是十分明显,感知单元1和感知单元3受到撞击块的挤压程

度要偏弱,内部的介电材料接触分离效果不充分,电荷转移量较少,产生的开路电压信号值偏小。

图 15 展示 BWS 信号在不同流速下的频率,实验结果与理论涡激振动的频率近似,服从斯特劳哈尔关系:

$$f = S_r(U/D)。$$

式中: D 为胡须杆的横截面积; U 为循环水洞的流速;斯特劳哈尔数 $S_r=0.2$ 对于雷诺数 $Re < 20\,000$ 的情况。

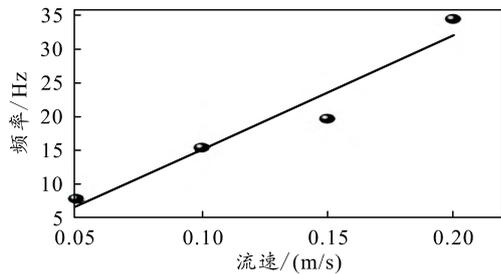


图 15 不同流速下信号频率特征

因此,人工胡须传感器能够感知流场信息,包括流速大小和涡流引起的振荡频率。

4 结束语

笔者设计基于摩擦纳米发电机的仿生胡须传感器,用于构建水下机器人的水下触觉感知系统。传感单元中的介电层材料通过接触分离产生电信号,拟合电信号与外部载荷的关系,可分析外部载荷的高度、位移和频率等特征。得到如下结论:1) 在模拟外部载荷下,BWS 的输出电压和电流随着受力点位移增加而增大;2) BWS 的输出电压和电流随着受力点高度的增大而减小;3) 在一定范围内,记忆弹簧劲度系数的减小会导致输出电压的增大。在此基础上,将 BWS 放置在循环水洞中感知周围流场。实验表明,BWS 能够感知周围流场信息,包括流速大小和涡流引起的振荡频率;因此,BWS 在水下环境感知领域显示出巨大的潜力。

参考文献:

[1] 黄玉龙,张勇刚,赵玉新. 自主水下航行器导航方法综

述[J]. 水下无人系统学报,2019,27(3): 232-253.

- [2] 商承超,王伟,谢广明,等. 水下机器人定位方法综述[J]. 兵工自动化,2013,32(12): 46-50.
- [3] 秦峰,刘甜甜,尤海鹏,等. 基于图像识别的水下机器人自主避障系统[J]. 兵工自动化,2012,31(11): 87-90.
- [4] 朱志鹏,朱志宇. 一种基于双目视觉的水下导引光源检测和测距方法[J]. 水下无人系统学报,2021,29(1): 65-73.
- [5] KRÖGER S, LAW R J. Biosensors for marine applications: We all need the sea, but does the sea need biosensors[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2005, 20(10): 1903-1913.
- [6] 潘爽,施建礼,聂永芳,等. 自主水下航行器同时定位与制图技术研究[J]. 舰船科学技术,2018,40(6): 124-127.
- [7] 郭鑫,刘小雄,何启志,等. 基于 UKF 的水下航行器 IMU 故障检测与诊断方法研究[J]. 计算机测量与控制,2019,27(8): 30-34.
- [8] DEHNHARDT G, MAUCK B, THEWISSEN J G M, et al. Mechanoreception in secondarily aquatic vertebrates[J]. Sensory evolution on the threshold: adaptations in secondarily aquatic vertebrates, 2008(2): 295-314.
- [9] STROBEL S M K, SILLS J M, TiNKERM T, et al. Active touch in sea otters: in-air and underwater texture discrimination thresholds and behavioral strategies for paws and vibrissae[J]. Journal of Experimental Biology, 2018, 221(18): 181347.
- [10] FAN F R, TIAN Z Q, WANG Z L. Flexibletriboelectricgenerator[J]. Nano energy, 2012, 1(2): 328-334.
- [11] XIA X, FU J, ZI Y. A universal standardized method for output capability assessment of nanogenerators[J]. Nature communications, 2019, 10(1): 1-9.
- [12] 李申芳,王军雷,王中林. 利用摩擦纳米发电机的流体能量俘获研究新进展[J]. 力学学报,2021,53(11): 2910-2927.
- [13] 殷梦飞. 用于水能收集的机械调节式摩擦纳米发电机[D]. 长春: 长春工业大学,2021.
- [14] 宁川. 柔性可穿戴摩擦纳米发电机的制备及性能研究[D]. 郑州: 郑州大学,2019.
- [15] 丁亚飞,陈翔宇. 基于摩擦纳米发电机的可穿戴能源器件[J]. 物理学报,2020,69(17): 8-27.