

# 人体健康监测用织物基智能可穿戴传感器研究进展

文 | 杨 坤 程浩南 殷允杰 王潮霞

**摘要:** 智能可穿戴传感器的人体健康监测工作可以分为传感器对人体数据的探测和收集。常见的导电织物根据导电材料的不同可分为金属基导电织物、碳基导电织物和聚合物基导电织物,文章介绍了这3种导电织物的制备方法和特点;讨论了电阻式传感器、电容式传感器和压电式传感器的特点、制备方法以及数据采集方式;并进一步对织物传感器在人体健康领域的应用进行了总结;最后针对织物传感器制备和使用中的问题及未来的发展趋势进行了分析。

**关键词:** 智能可穿戴;导电织物;织物传感器;数据收集和处理;人体健康

**中图分类号:** TP368.33; TQ342.83 **文献标志码:** A

## Research Progress of Fabric-based Smart Wearable Sensors for Human Health Monitoring

**Abstract:** The work processes of smart wearable sensors for human health monitoring include detection and collection of human data. Conventional conductive fabrics are divided into metal-based conductive fabrics, carbon-based conductive fabrics and polymer-based conductive fabrics based on different conductive materials. This paper introduces the preparation methods and characteristics of these three conductive fabrics. Besides, fabric sensors represented by resistive sensors, capacitive sensors and piezoelectric sensors are explained from their performance characteristics, preparation methods and data collection. And the paper summarizes the applications of textile sensors in the field of human health and analyzes the problems in the preparation and the use of textile sensors as well as future development trends.

**Key words:** smart wearable; conductive fabrics; textile sensors; collection and processing of data; human health

智能可穿戴传感器无需复杂的检测程序即可全天候实时追踪参数的变化,实现对生命体征的监测,适合日常健康评估及病症预防,有助于降低老龄化社会的医疗费用。随着织物与导电材料的发展以及数据收集处理技术的不断提高,以导电织物为感应材料的智能可穿戴传感器在人体健康监测方面展现出了较为明显的优势。导电织物基传感器可以对用户健康进行持续监测和个人管理,逐步实现在医疗范畴由医疗体系向个体医疗的转

变,满足了公众对于健康生活和医疗便利的追求。

织物具有出色的拉伸性能,可以适应人体的生理活动,是良好的载体。以织物为基材的传感器对温度、压力和湿度等外界物理化学刺激敏感,具有高耐久性,已成为可穿戴技术发展的必然趋势。

### 1 导电织物

导电织物主要有金属基导电织物、碳基导电织物和聚合物基导电织物3种,是通过不同的手段和处理技术将导电材料(金属基材料、碳基材料和导电聚合物)附着在织物表面或内部而成。导电织物的导电特点使其成为智能可穿戴传感器的潜在候选材料。

#### 1.1 金属基导电织物

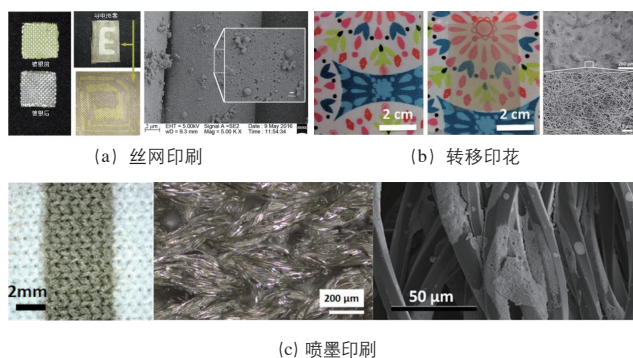
**作者简介:** 杨 坤,男,1996年生,硕士在读,研究方向为应变传感器的设计和制备。

**通信作者:** 王潮霞,教授, E-mail: wchaoxia@sohu.com。

**作者单位:** 江南大学纺织科学与工程学院。

常见的金属材料如金、银、铜，具有导电性，在过去常被缝在服装里，与刚性元件连接。然而，刚性金属材料与织物在机械性能上的巨大差异使其在柔性可穿戴传感器上的应用失效。金属基导电织物则有效克服了上述缺点，兼具优异的拉伸性，是制备可穿戴传感器的良好选择。

金属基导电织物的制备手段有溅射技术和印刷打印技术（图 1）。溅射技术将金属薄膜沉积在纤维的表面，薄膜均匀并且和织物结合牢固，导电性能优异。织物在经过磁控溅射银处理后，其导电性是聚合物基导电织物的15倍以上。印刷打印使大批量金属基导电织物的生产成为可能，传统的丝网印刷（图 1（a））简便高效，可以自由设计导电图案；转移印花技术（图 1（b））可以在织物表面印制透明的银纳米线层，得到不完全覆盖表面的导电网状结构，在具备良好导电性的基础上，织物更加美观；喷墨印刷（图 1（c））是单一步骤的自动化制造过程，其使用的油墨比丝网印刷少得多，可以在选定的图案区域沉积一层薄薄的导电层，在纤维表面形成导电网络。



注：图（a）来源于文献[5]，图（b）来源于文献[6]，图（c）来源于文献[7]。

图 1 印刷打印技术制备金属基导电织物

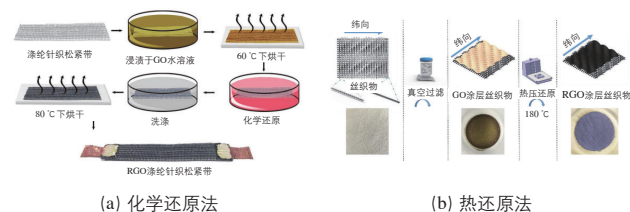
## 1.2 碳基导电织物

碳基导电织物制备过程中所用导电材料主要有碳纳米管（CNTs）和还原氧化石墨烯（RGO），两种材料的导电性能都来自大范围的离域 $\pi$ 键。

CNTs可以看成是弯曲成圆柱形的石墨烯薄片，它既可以是单壁碳纳米管（SWNTs），也可以是多壁碳纳米管（MWNTs），是一种制备织物基传感器的理想导电材料。CNTs导电织物的制备可以通过涂覆法，将CNTs涂覆在织物的表面，在织物表面形成导电网络；也可以利用纺丝法，制备CNTs与热塑性纤维的复合材料。

以RGO作为导电物质制备的导电织物不仅导电性好，还具有良好的机械性能，可以跟踪各类型的人体运

动。氧化石墨烯（GO）还原成RGO的方法主要有化学还原和热还原法（图 2）。化学还原是将织物基材充分浸渍在GO的水溶液中，在干燥之后，通过还原剂使织物上的GO还原成RGO；热还原的方式需要先对织物进行预处理，从而使GO涂层附着在表面，之后进行热压还原，得到RGO，这种方法避免了化学还原剂的使用。



注：图（a）来源于文献[12]，图（b）来源于文献[13]。

图 2 还原法制备RGO导电织物

## 1.3 聚合物基导电织物

导电高聚物通常都具有离域 $\pi$ 键结构，由化学或电化学掺杂使单体聚合。相比其他类别的导电材料，导电聚合物在各个领域中具有更加广阔的应用前景，这是由于其电导率可以根据不同的掺杂效果分布在各导电区间（金属导体、半导体、绝缘体），这种特性是现今其他导电材料所不具备的。传统的导电聚合物有聚吡咯（PPy）、聚苯胺（PANI）、聚（3,4-乙撑二氧噻吩）（PEDOT）。3种聚合物基导电织物的性能如表 1 所示。

表 1 常见导电聚合物基导电织物性能

织物类型	制备方法	聚合物电导率/ ( $S \cdot cm^{-1}$ )	优点	缺点
PPy基导电织物	原位聚合、气相沉积法、电化学法	$10^2$	易合成性、生物相容性好、环境稳定性好	黏牢度差
PANI基导电织物	原位聚合、涂层法	10	化学稳定性好、绿色无污染	耐疲劳性差
PEDOT基导电织物	原位聚合、浸泡法	$10^3$	化学稳定性好、热稳定性好、操作工艺简单	机械性能较差

## 2 织物传感器

由导电织物制备的织物传感器可以对人体数据起到良好的监测作用，主要有电阻式织物传感器、电容式织物传感器和压电式织物传感器。织物传感器与单片机和模拟/数字转换器进行组合可以构成一个简单的智能可穿戴设备，实现对目标数据的监测。

### 2.1 电阻式织物传感器

常见的电阻式织物传感器主要有电阻式应变传感器、电阻式温度传感器和电阻式湿度传感器，三者性能如表 2 所示。电阻式应变传感器的工作机理是用导电材

料在人体机械运动过程中发生的电阻变化来表达形变的大小。该电阻变化主要取决于变形过程中导电物质本征电阻率的变化,以及随形变导致的织物纤维结构的变化,因此既要选择具有良好导电性的导电物质,还要兼顾织物纤维基材的拉伸性能和稳定性。电阻式温度传感器是根据温度与电阻的关系将体温信号转化为电信号,一般由金属基和碳基导电织物制备而成。电阻式湿度传感器的导电材料的电阻率通常随湿度的变化而改变,一般由碳基导电织物制备而成。

表 2 电阻式传感器性能

传感器类型	活性材料	工作方式	工作范围	灵敏度	响应时间
应变传感器	CNTs/PDMS	压力	0.6 ~ 1 200 Pa	300 Pa以下 为 1.80 kPa <sup>-1</sup>	10 ms
应变传感器	石墨烯/涤纶	压力	<200 kPa	0 ~ 8 kPa内为 8.36 kPa <sup>-1</sup> ; 30 ~ 200 kPa内 为 0.028 kPa <sup>-1</sup>	159 ms /80 ms
应变传感器	银/蚕丝	拉伸	<50%	1 ~ 15	
应变传感器	石墨烯/丝素蛋白纤维	拉伸	<90%	0 ~ 70%内为 4 ~ 34, 70% ~ 90%内为 470 ~ 634	
应变传感器	PPy/聚氨酯	拉伸	<1 450%	0.1	500 ms
温度传感器	银/聚酰亚胺		-20 ~ 20 °C	0.31%/°C	
温度传感器	石墨烯/丝素蛋白纤维		20 ~ 50 °C	2.09%/°C	
温度传感器	GO/聚氨酯		30 ~ 80 °C	0.80%/°C	
湿度传感器	石墨烯/丝素蛋白纤维		10% ~ 85.1% (RH)	0.03%	3 s/6 s

## 2.2 电容式织物传感器

常见的电容式织物传感器主要有电容式应变传感器和电容式湿度传感器,二者性能如表 3 所示。电容式应变传感器是将人体的机械运动转化为电容的变化,具有功耗低、温度独立性高的优点。电容式织物传感器的有两种制备方法,一种是将 2 块柔性导电织物作为电极板,由泡沫、织物垫片和软聚合物等可流动的电介质层隔开。为了克服常见电介质层力学性能较差、信号漂移的缺点,常常选用具有特定微观结构的介电材料,这种方法制得的传感器灵敏度受到导电织物重叠面积的限制,在设备尺寸较小时灵敏度较差。另一种方法是在复合纤维的制备过程中,利用同轴纺丝或者涂覆工艺,使纤维中的导电物质和介电材料之间具备芯鞘结构,有效地克服了上述缺点,得到灵敏度更佳、耐久性更好、响应速度更快的传感器。电容式湿度传感器还可以通过监测电容变化来反映人体湿度,一般是通过碳基导电织物制备。

表 3 电容式传感器性能

传感器类型	活性材料	工作方式	工作范围	灵敏度	响应时间
应变传感器	CNTs/聚乳酸	压力	12 Pa ~ 430 kPa	1 kPa以下为 0.7 kPa <sup>-1</sup> ; 5 ~ 10 kPa 范围内为 0.13 kPa <sup>-1</sup>	30 ms
应变传感器	CNTs/3D 微孔热塑性纤维	压力	0.1 Pa ~ 130 kPa	5 kPa以下为 0.601 kPa <sup>-1</sup> ; 30 ~ 130 kPa范围内为 0.077 kPa <sup>-1</sup>	
应变传感器	石墨烯/PET	压力	44 mPa ~ 4 kPa	7.68 kPa <sup>-1</sup>	30 ms
应变传感器	CNTs/聚乳酸	拉伸	0.4% ~ 54%	3.33	
湿度传感器	石墨烯/机织物		20% ~ 70% (RH)	0.19%	120 s/ 100 s

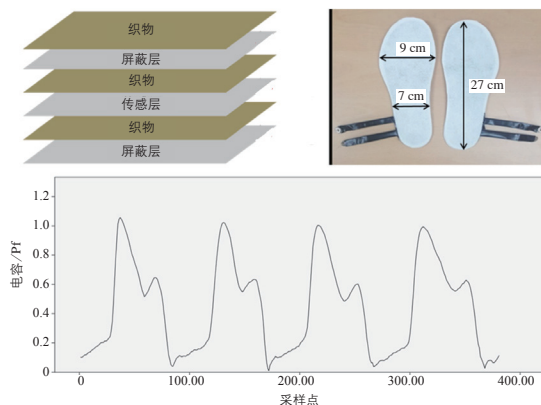
## 2.3 压电式织物传感器

压电式应变传感器可以将由人体产生的动态压力通过压电材料转化为电信号。纺织上常用的压电材料为有机类的聚偏氟乙烯(PVDF),利用纺丝的方法制备压电式织物传感器。虽然有机压电材料具有弹性好、重量轻、易于制造等优点,但灵敏度较低,同时还具有热释电效应,需要解决热干扰对电阻的影响,这都限制了压电式织物传感器在人体监测方面的应用。

## 3 织物传感器的人体健康监测应用

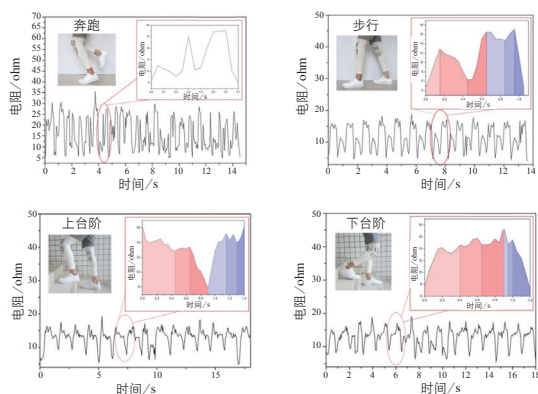
步态分析作为一种临床工具,不仅被应用于运动检测,在医疗诊断和康复中也具有广阔的应用前景。为了准确分析步态,织物传感器常用电容式压力传感器和电阻式应变传感器(图 3)来分别测量步态中的足底压力和腿部运动。通过足底压力可以进行病理足部评估,判断是否具有平底足和糖尿病足,并且结合腿部运动来确定人体步态的运动学和动力学参数,定量评价人体的肌肉骨骼功能。

手势识别广泛应用于手语识别(SLR)、人机交互(HMI)、虚拟现实(VR)等领域,实现了人与计算机



(a) 监测足底压力的电容式织物传感器



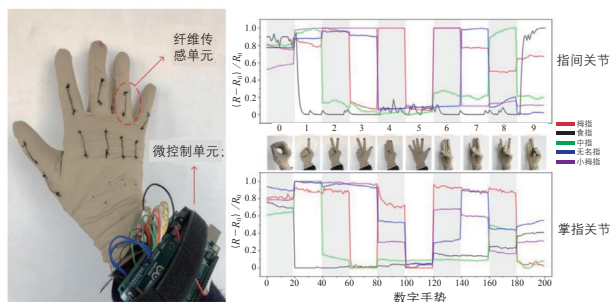


(b) 识别腿部运动的电阻式织物应变传感器

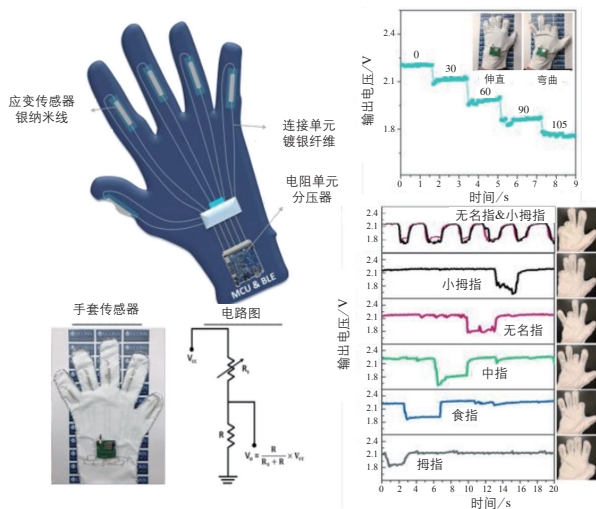
注：图 (a) 来源于文献[1]，图 (b) 来源于文献[21]。

图 3 步态检测的织物传感器

的自然交互，尤其是帮助残疾人通过手语进行信息的交流。手势可以分为静态手势和动态手势。静态手势是根据手的形状来描述的，而动态手势通常是根据手的运动来描述的。织物传感器既可以通过识别某一时刻观察到的手的位置、方向和弯曲的特定组合来进行静态手势识



(a) 缝有RGO涂层纤维的手套传感器



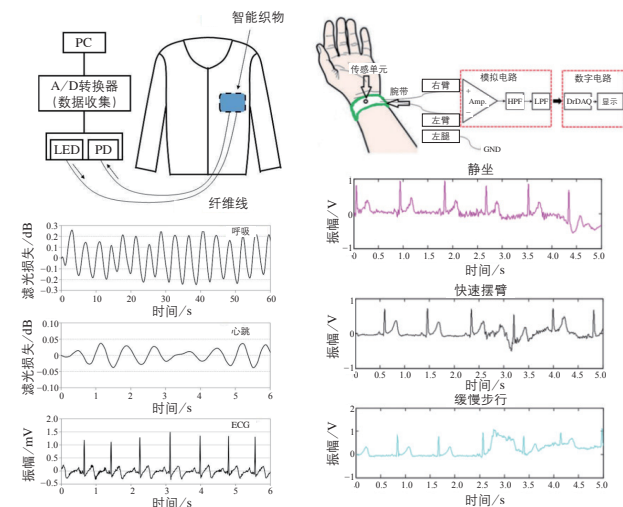
(b) 基于银纳米线的手套传感器

注：图 (a) 来源于文献[23]，图 (b) 来源于文献[24]。

图 4 手势识别织物传感器

别，还可以通过识别很短的时间跨度内通过手指关节动作连接起来的一系列手势进行动态手势识别。图 4 是利用电阻式应变传感器制备数据手套，在一定拉伸条件下电阻和拉伸长度表现出良好的线性关系，在进行各种手势的条件下，保持施加传感器上的恒定电流，通过电阻变化监测手指的运动和姿势。

心电图 (ECG) 是一种被广泛接受的传递心脏电传导系统信息的方法，它已被用来表征心脏状况和诊断心血管疾病，判定心肌细胞的损伤以及药物对心脏的影响。现有的临床心电图信号采集由于监测方法的繁琐与系统的笨重，无法对患者进行多层次检查，容易出现误诊和漏诊的情况。智能可穿戴设备可以进行长时间动态心电图监测，优势明显，其能够及时发现患者心率与血压的异常 (图 5)。可穿戴心电监测传感器通常有电阻式应变传感器和电容式应变传感器，为长时间动态心电图的监测提供便利，尤其在健康监测和疾病预防方面发挥了显著作用。



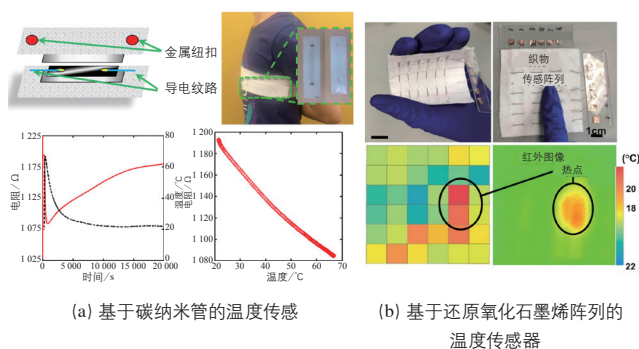
(a) 胸腹部的心电图监测

(b) 手腕部位心电图监测

注：图 (a) 来源于文献[26]，图 (b) 来源于文献[27]。

图 5 心电图监测

体温是可穿戴传感器监测的常见生理参数，也是人体身体状况的重要指标。恒定的体温可以维持人体各项生理功能的稳定，否则将造成代谢紊乱。因此体温监测可以及时预防和治疗因体温异常造成的代谢紊乱等疾病。相比传统体温监测手段依靠多次测量监控体温，由电阻式温度传感器制得的智能可穿戴设备提供了体温实时监测，并且因为活性物质对温度快速响应，可以更准确地反映体温 (图 6)。



注：图 (a) 来源于文献[28]，图 (b) 来源于文献[29]。

图6 体温监测

#### 4 挑战与展望

智能可穿戴织物传感器在人体健康领域的应用愈来愈广泛，为人们的生理信号和日常活动提供了准确可靠的监测信息，确保了一个安全健康的生活环境。尤其是在医疗预防和康复领域，个人用户的体温、心电图、肌肉运动等关键生理信号在可穿戴织物传感器的帮助下得到实时监测和反馈。但是，在传感器的设计、开发、制备和使用的过程中仍然面临着挑战。外形方面，考虑到传感器的穿戴性，轻量化和简易化是未来的发展趋势；舒适性方面，传感器必须在不影响使用者日常活动的前提下监测数据；安全性方面，在传感器的制备中也要考虑材料和化学助剂的安全性，尽可能使用具有生物相容性的材料，避免对人体健康造成损害；数据反馈方面，当形成一个监测系统时，面临巨大的数据流量，信息传递需要避免延迟，从而及时传递和分析数据。未来，借助于纺织科学和材料学的快速发展，设计和开发性能更加优异的活性材料和纺织面料成为可能，智能可穿戴织物传感器会像几十年前的个人电脑那样，给人类生活、社交和活动带来革命性的变化。CTI

#### 参考文献

- [1] MIN S D, WANG C, PARK D S, et al. Development of a textile capacitive proximity sensor and gait monitoring system for smart healthcare[J]. Journal of Medical Systems, 2018, 42 (4) : 76–87.
- [2] CASTANO L M, FLATAU A B. Smart fabric sensors and e-textile technologies: A review[J]. Smart Materials and Structures, 2014, 23 (5) : 53001–53027.
- [3] GUO R, WANG H M, SUN X Y, et al. Semiliquid metal enabled highly conductive wearable electronics for smart fabrics[J]. ACS Applied Materials and Interfaces, 2019, 11 (33) : doi: 10.1021/acsami.9b08067.
- [4] NANDHAGOPAL P, PAL K A, MOHAN B D. Fabrication of silver and silver-copper bimetal thin films using co-sputtering for SERS applications[J]. Optical Materials, 2019, 97: doi: 10.1016/j.optmat.2019.109381.
- [5] LI M Z, LI Z Y, WANG J, et al. Screen printed silver patterns on functionalised aramid fabric[J]. Fibers and Polymers, 2017, 18 (10) : 1975–1980.
- [6] NUPUR M, MARWA A E, GOLDTHORPE I A. Transfer printing of silver nanowire conductive ink for e-textile applications[J]. Flexible and Printed Electronics, 2019, 4 (2) : doi: 10.1088/2058-8585/ab2543.
- [7] SHAHARIAR H, KIM I, SOEWARDIMAN H, et al. Inkjet printing of reactive silver ink on textiles[J]. ACS Applied Materials and Interfaces, 2019, 11: 6208–6216.
- [8] HU L B, HECHT D S, GRÜNER G. Carbon nanotube thin films: Fabrication, properties, and applications[J]. Chemical Reviews, 2010, 110 (10) : 5790–5844.
- [9] FOGEL M, PARLEVLIET P, OLIVIER P, et al. Manufacturing of conductive structural composites through spraying of CNTs/epoxy dispersions on dry carbon fiber plies[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2017 (100) : 40–47.
- [10] ZHOU J, XU X Z, XIN Y Y, et al. Coaxial thermoplastic elastomer-wrapped carbon nanotube fibers for deformable and wearable strain sensors[J]. Advanced Functional Materials, 2018, 28 (16) : 1–8.
- [11] LI Y H, ZHOU B, ZHENG G Q, et al. Continuously prepared highly conductive and stretchable SWNT/MWNT synergistically composited electrospun thermoplastic polyurethane yarns for wearable sensing[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2018, 6 (9) : 2258–2269.
- [12] RAVINDER R K, GANDLA S, GUPTA D. Highly sensitive, rugged, and wearable fabric strain sensor based on graphene clad polyester knitted elastic band for human motion monitoring[J]. Advanced Materials Interfaces, 2019, 6 (16) : 1–11.
- [13] REN J S, WANG C X, ZHANG X, et al. Environmentally-friendly conductive cotton fabric as flexible strain sensor based on hot press reduced graphene oxide[J]. Carbon, 2017, 111: 622–630.
- [14] 蔡东荣, 周菁, 段盼盼, 等. 导电织物的制备及应用研究进展[J]. 浙江理工大学学报(自然科学版), 2018, 39 (6) : 651–658.
- [15] HADDAD P A, SERVATI A, SOLTANIAN S, et al. Breathable dry silver/silver chloride electronic textile electrodes for electrodermal activity monitoring[J]. Biosensors, 2018, 8 (3) : 79–96.

- [16] WU J, SUN Y M, WU Z X, et al. Carbon nanocoil-based fast-response and flexible humidity sensor for multifunctional applications[J]. ACS Applied Materials and Interfaces, 2019, 11 (4) : 4242–4251.
- [17] ATALAY O, ATALAY A, GAFFORD J, et al. A highly sensitive capacitive-based soft pressure sensor based on a conductive fabric and a microporous dielectric layer[J]. Advanced Materials Technologies, 2018, 3 (1) : 1–8.
- [18] LEE J, KWON H, SEO J, et al. Conductive fiber-based ultrasensitive textile pressure sensor for wearable electronics[J]. Advanced Materials, 2015, 27 (15) : 2433–2439.
- [19] TULLIANI J M, INSERRA B, ZIEGLER D. Carbon-based materials for humidity sensing: A short review[J]. Micromachines, 2019, 10 (4) : 1–30.
- [20] SHU L, HUA T, WANG Y Y, et al. In-shoe plantar pressure measurement and analysis system based on fabric pressure sensing array[J]. IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine, 2010, 14 (3) : 767–775.
- [21] LI Y T, MIAO X H, NIU L, et al. Human motion recognition of knitted flexible sensor in walking cycle[J]. Sensors, 2020, 20 (1) : 35–49.
- [22] BADI H S, HUSSEIN S. Hand posture and gesture recognition technology[J]. Neural Computing and Applications, 2014, 25 (3–4) : 871–878.
- [23] HUANG X, WANG Q, ZANG S, et al. Tracing the motion of finger joints for gesture recognition via sewing RGO-coated fibers onto a textile glove[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19 (20) : 9504–9511.
- [24] HEO J S, SHISHAVAN H H, SOLEYMANPOUR R, et al. Textile-based stretchable and flexible glove sensor for monitoring upper extremity prosthesis functions[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20 (4) : 1754–1760.
- [25] ZHAO Y L, CAO Y Y, LIU J S, et al. Single-wall carbon nanotube-coated cotton yarn for electrocardiography transmission[J]. Micromachines, 2018, 9 (3) : 1–10.
- [26] KOYAMA Y, NISHIYAMA M, WATANABE K. Smart textile using hetero-core optical fiber for heartbeat and respiration monitoring[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18 (15) : 6175–6180.
- [27] DAS P S, KIM J W, PARK J Y. Fashionable wrist band using highly conductive fabric for electrocardiogram signal monitoring[J]. Journal of Industrial Textiles, 2019, 49 (2) : 243–261.
- [28] WANG L, LOH K J. Wearable carbon nanotube-based fabric sensors for monitoring human physiological performance[J]. Smart Materials and Structures, 2017, 26 (5) : 55018–55030.
- [29] JIN Y Q, BOON E P, LE L T, et al. Fabric-infused array of reduced graphene oxide sensors for mapping of skin temperatures[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018 (280) : 92–98.

海洋工程是指以开发、利用、保护及恢复海洋资源为目的，并且工程主体位于海岸线向海一侧的新建、改建、扩建。一般认为海洋工程的主要内容可分为资源开发技术与装备设施技术两大部分。海洋工程用缆绳是指在资源开发与装备设施施工时使用的用于系泊、锚固、拖拽、起吊等的缆绳，一般包括钢丝绳与化纤缆绳，由于同等强力下钢丝绳的重量重，并且不耐海水腐蚀，在海洋工程领域正逐步被合成纤维缆绳替代。

## 1 海洋工程用缆绳的分类

海洋工程用合成纤维缆绳按照用途可分为深海多点系泊缆（平台固定缆）、单点系泊缆、码头系泊缆、拖缆、吊装缆；按照材质分类主要有高模量聚乙烯纤维（HMPE）缆绳、芳纶缆绳、涤纶缆绳、锦纶缆绳等；按照结构分类主要有单编缆绳、双层编织缆绳与平行夹心绳索包覆缆。海洋工程用合成纤维缆绳的主要用途、材质与结构如表 1 所示。

表 1 海洋工程用缆绳产品

用途	绳索材质	绳索结构
平台固定缆	涤纶	平行夹芯绳索包覆缆
	HMPE	
	芳纶	
单点系泊缆	锦纶 HMPE	双层编织绳索、平行夹芯绳索包覆缆
码头系泊缆	涤纶	单编绳索、双层编织绳索
	HMPE	
	芳纶	
	锦纶 丙纶与聚烯烃	
拖缆	HMPE 锦纶	单编绳索、双层编织绳索
吊装缆	HMPE	单编绳索、双层编织绳索

通常情况下，海洋工程用缆是根据不同的使用工况进行绳索设计。在系泊、拖拽与起吊领域，对纤维材料无特殊要求，粗旦涤纶工业丝、锦纶工业丝、HMPE纤维、对位芳纶、聚芳酯纤维都有使用；在平台固定领域，要求HMPE纤维断裂强度 $\geq 28$  g/D，涤纶断裂强度 $\geq 8.8$  g/D，芳纶断裂强度 $\geq 20.4$  g/D。HMPE双层编织绳索中要求HMPE纤维的蠕变率低；涤纶双层编织缆绳要求涤纶经过拒海水处理，并需测试涤纶纱线的耐摩擦性能；芳纶双层编绳缆绳要求测试芳纶的耐水解性能，并要求对芳纶进行涂层处理。此外，海洋工程缆绳用纤维需要通过船级社认证。