

智能纺织品中的柔性传感器及其应用

温雯, 方方*

(东华大学 服装与艺术设计学院, 上海 200051)

摘要:传感器是智能纺织品实现智能化的核心部分,柔性传感器以其柔软、可弯曲拉伸和电学性能优异等特点,在可穿戴智能纺织品中发挥着重要的作用。以传感器工作原理为分类依据,综述了近年来用于智能纺织品的柔性传感器研究进展,分别介绍不同传感器的感知机理、传感材料以及应用现状等;总结了目前用于智能纺织品的柔性传感器主要研究方向:生理参数检测、压力检测、动作检测,并对3个研究方向的应用进行综述。在此基础上指出了智能柔性传感器存在的问题及其发展前景。

关键词:可穿戴技术;智能纺织品;柔性传感器;智能纺织材料

中图分类号:TP 212.6 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-1928(2019)03-0223-07

Application and Research Progress of Flexible Sensor for Smart Textiles

WEN Wen, FANG Fang*

(College of Fashion and Design, Donghua University, Shanghai 200051, China)

Abstract: Sensors are the core of smart textiles to achieve intelligence, and flexible sensors with soft, flexible, stretch and other characteristics play an important role in wearable smart textiles. Based on the sensing principle of sensors widely used in current application, this paper reviews the research progress of flexible sensors used in intelligent textiles in recent years from the perception mechanism, sensing materials and application status of different sensors. The main research directions of current flexible sensor are summarized, that is pressure monitoring research, physiological monitoring research and action recognition research. Moreover, the paper points out the problems and development prospect of intelligent flexible sensors.

Key words: wearable technology, smart textile, flexible sensor, smart textile material

智能纺织品是指将电子、计算机、生物、材料等高新技术融入纺织服装中,使纺织服装能够模拟生命系统,具有感知和反应双重功能^[1-2]等,其中传感器是智能纺织品能够感知和反馈外界环境变化的一个关键部件。随着人们对智能纺织品的要求越来越高,对传感器测量的范围、精度和稳定性等方面的期望值也逐步提高,同时希望传感器还能够具有柔韧、延展、便于携带和折叠等特点。近年来,可穿戴式柔性传感器技术的发展成为智能纺织品研究领域的一大热点^[3],柔性传感器与纺织材料相结合,使得智能纺织品在实现智能化的同时,还能够保持织物的柔软、舒适等特性^[4],在医疗健康监测、

健身运动、军事、航空航天等领域发挥着重要的作用^[5]。文中根据不同的感知机理将现有柔性传感器分为柔性压力-电学传感器和柔性应变-电学传感器,介绍了这两类传感器的研究进展及其在人体生理参数、压力以及运动监测方面的最新应用。

1 柔性传感器的分类及特点

智能纺织品通常由3部分组成:传感器、致动器和控制单元^[6-7]。作为可穿戴式的柔性监测装置,传感器需嵌入纺织品中,并能充分接触人体皮肤表面,监测到较广的体征数据,同时又不影响人体正常的活动,保持一定的穿着舒适性。目前用于

收稿日期:2018-06-03; 修订日期:2018-10-10。

作者简介:温雯(1994—),女,硕士研究生。

*通信作者:方方(1974—),女,副教授,硕士生导师。主要研究方向为服装数字化和服装人体工效学。

Email: fangfang@dhu.edu.cn

智能纺织品的柔性传感器种类较多,分类方式各异。如按信号转换机理分类,柔性传感器主要包括电容式、电阻式、电感式、光纤式柔性传感器等^[8];按织物结构分类,柔性传感器主要包括基于针织结构的柔性传感器^[9]和基于机织结构的柔性传感器^[10]。

有效地将外部刺激转换为电信号是柔性传感器应用的关键技术。根据传感器不同的电信号转换机制与工作原理,可将常见的技术相对成熟、使用范围较广的传感器分为 4 类:以压力-电学为主的柔性传感器、以应变-电学为主的柔性传感器、柔性光纤传感器以及柔性气敏传感器。

1.1 柔性压力-电学传感器

柔性压力-电学传感器包括柔性电容式传感器、柔性压阻式传感器、柔性压电式传感器等,通过被测物体在压力作用下电容、电流或电压的变化,进而间接探测外界压力的变化。由于柔性压力-电学传感器具有较高的测试灵敏度和精确度,故得到广泛运用。

柔性电容式传感器一般采用柔性材料(导电薄膜、纤维、纱线、织物等)作为电容器极板,并以泡沫、橡胶等为间隔层,根据电容器工作原理,传感器将感知压力或剪切力的变化量传递给用户^[11]。这种柔性传感器可与纺织品结合,制备出能够感知外力变化、结构简单、灵敏度高且柔软易变形的智能纺织品,其最大的优势在于可实现对微小静态外力的检测。

相比于电容式传感器,柔性压阻式传感器具有尺寸小、形式多样、分辨率高且易与纺织品结合的特点。压阻式传感器是根据材料的压阻效应以及集成电路制成的传感器^[12-13],受压力作用时,由于传感材料内部金属粒子之间发生转移,从而产生导电性,通过测量电阻的变化推断施加压力的大小。该传感器通常采用碳系材料或石墨烯等灵敏系数大、具有良好压阻性能的复合材料作为压阻材料。将该传感器与纺织品结合可用于测量作用于织物上的压力、加速度等参数。但是,基于压阻和电容信号机制的压力传感器存在着信号串扰等问题,影响其测量精度。

柔性压电式传感器是通过对压电材料施加压力后产生压电效应而制成的传感器^[14]。其中压电材料是指在机械压力下可产生电荷的特殊材料,目前多采用压电系数高且灵敏度高的导电材料复合压电薄膜或偏聚氟乙烯(PVDF)薄膜等。采用压电薄膜制成的智能纺织品可检测人体部位弯曲时所

产生的压力,或对人体足底步态稳定性进行检测等,具有灵敏度高、结构设计简易且性能稳定等优点。由于输出的是电压信号,因此柔性压电式传感器在电路设计以及信号采集上相对简单,灵敏度高且信噪比高;但这类传感器会产生电荷泄露,输出的直流响应性差等问题。

1.2 柔性应变-电学传感器

柔性应变-电学传感器是一种具有“应变-电阻效应”的传感器,如拉阻式传感器等。柔性拉阻式传感器也称柔性应变传感器^[15],其原理与压阻式传感器相同,即材料、织物受到机械应力作用后,传感器本身的电信号发生变化,可将被测物体上局部形变转换成直观可测的电学变化。此类传感器的制备成本低,且测试原理以及采集方式简易,具有舒适性佳、灵敏度高等优点。在智能纺织品领域,这种传感器通常按照制备方式分类,主要包括柔性涂层式应变传感器和柔性嵌织式应变传感器。

涂层式应变传感器以聚吡咯涂层柔性传感器^[16]为代表,通过在织物表面以涂层加工形式(如印花、印刷、拼贴)涂覆导电高分子聚合物制得织物柔性应变传感器。涂覆原料通常选择碳系复合涂层^[17],这种高分子导电涂层在织物上有很好的附着力,同时具有良好的灵敏度和线性相关度;但存在涂层工艺困难、易造成表面涂层粗糙开裂等问题。

嵌织式应变传感器以导电纤维、纱线材料为主要传感元件,可采用机织或针织的交织方式制备相应的导电纺织品。通过纱线线圈结构在应变力作用下产生的形变影响电阻变化,实现测量。常用的纺织用导电纤维材料包括 3 种类型:金属导电纤维、碳纤维和有机导电纤维^[18]。其中复合型有机导电纤维是将具备导电性能的纱线与其他纱线通过包芯纱等复合方式得到复合导电纱线,其综合性能最为优良。由导电纤维纱线制备而成的应变传感器具有灵敏度优良且测量方便、穿戴舒适性高的优点;但由于线圈结构的特殊性,对于可穿戴纺织品而言,其耐水洗性、可重复性仍需要进一步改善。

1.3 柔性光纤传感器

柔性光纤传感器是利用光导纤维的传光特性,把被测物理量转换为光特性变化的传感器^[19]。其中光特性包括了如光波的振幅、相位、波长等特征参量。相较于传统的柔性电阻式传感器,柔性光纤传感器具有质量轻、精度高、响应速度快、重复性好以及稳定性高、成本低等优势。目前国内外文献中,探讨将光纤织入纺织品中构成光纤传感器。光纤传感器除了能够感知压力、温度、速度、振动和角

度等信号外,还能用于测量拉伸应力以及位移的变化。这种嵌入式光纤柔性传感器可用于测量微小的应变情况^[20],例如测量人体肘部、手指关节的弯曲变化,或者与呼吸相关的细微应变信号等。

1.4 柔性气敏传感器

柔性气敏传感器也称柔性气体传感器^[21],其测量原理是当传感器处于气体环境中时,传感器的电导率随着空气中被测气体的浓度和种类的不同而发生改变,对接触气体产生响应并转换为电信号。这种传感器除了广泛应用于环境污染检测、公共安全等领域,还能用于医疗诊断。目前用于可穿戴的新型气敏传感器一般在柔性可拉伸的基底上构筑高分子复合物薄膜传感器,这种传感器具有高的气敏性能,体积小、质量轻、稳定性好且柔性可拉伸。将检测不同气体类型的柔性气敏传感器集成在纺织品上可用于制作智能纺织品,如服装、多功能口罩等。

2 柔性传感器的应用

在未来可穿戴设备的发展中,柔性传感器将发挥着举足轻重的作用。目前,用于智能纺织品的柔性传感器的研究主要针对人体健康状况的检测,如人体基本生理参数检测、压力检测以及运动识别等。

2.1 生理参数检测

呼吸、心率、脉搏是人体重要的生理参数,在人体日常生命监护中起到重要的参考价值。因此,在选择传感器时,尽量选择具有优良灵敏度、精度高、基体高弹性的柔性传感器。

人体呼吸时皮肤表面产生拉伸形变,可以通过检测这种形变从而间接测量呼吸频率和深度等生理数据,因此能够贴合皮肤、利于携带且灵敏度高、重复性好的传感器具有明显优势。DE JONCK-HEERE J 等^[22]将光纤通过钩针织入弹性织物中制成光纤传感器,以弥补医用中核磁共振成像的金属材料对检测信号的影响。呼吸引起的腹部以及胸部的伸展运动导致织物中光纤位置产生形变,通过测量光信号的变化从而监测病人的呼吸状况。郭秋晨等^[23]采用6种不同材料的导电纱线以局部添纱的形式将传感器嵌入到无缝试样中,通过对不同尺寸的试样进行定伸长拉伸回复实验模拟人体呼吸及心跳引起的皮肤形变。HUANG C H 等^[24]研究了对织物传感器产生影响的3个主要因素:纱线结构、纺织结构、织物结构,利用单、双根导电纱线分别缠绕在核心纤维上并编入织物中,可实现对人体

呼吸频率的检测。另外,由于人体呼吸的扩展运动,使得体表与贴身服装之间产生相互的压力作用,通过压力传感器可以方便检测到呼吸变化。KANG T H 等^[25]将镀银弹性织物与镀银无弹织物分别作为电容器的两个平行极板,通过电极板在外界压力的作用下产生收缩变形,导致两平行极板之间产生电容的变化,间接监测人体呼吸状况。

由于人体体表结构不规则且曲面复杂,在检测微弱的心率以及脉搏信号时,需要传感器具有轻薄且极高灵敏度。近年来,光纤传感器已经广泛用于开发多种脉搏、心率、呼吸等检测装置。田新宇等^[26]提出了基于光纤布拉格光栅传感器的脉搏检测方法,通过横机编织将传感器植入到织物的空气层中,利用心脏振动引起光纤光栅反射中心波长、波幅的变化,实现脉搏信号实时在线采集与分析。YANG Xiufeng 等^[27]根据光纤微弯效应,设计了一种基于纺织结构的新型光纤微弯传感器,利用多模光纤夹持到平行条带上形成微弯结构,将其一并缝合在弹性基布上用于测量站立和坐下时人体心跳和呼吸频率。除此之外,基于织物的温度传感器还可用于感知人体温度变化,如利用导线钢丝芯线在纬纱方向上与织物整合制备可穿戴温度监控系统,温度传感器感知温度,导电纱传输数据,因此可获取体温变化信号^[28]。

在实际应用中,为了优化传感器的灵敏度,减少信号偏移,寻求更稳定的传感器结构,彭晓慧等^[29]通过在导线纱线之间的接触点处涂覆硅胶提高接触电阻的灵敏度,以增加信号的重复性。但在柔性传感器对人体健康状况提供长期的感知和反馈过程中,柔性传感器的可靠性和稳定性容易受到外界机械摩擦和水洗的影响。尽管蔡倩文等^[30]对一定洗涤次数以及温度下柔性传感器的性能稳定性进行了研究,但还未能真正满足实际消费者日常生活与工作中的性能需求。

2.2 压力检测

柔性压力传感器在智能服装等方面具有广泛的运用,其主要用于检测纺织品在人体上产生的压力分布。

利用传感器电阻应变原理间接计算人体着装各部位压力值。王金凤^[31]通过分析柔性传感器等效电阻与拉伸应变的关系,并综合服装压力与针织物拉伸应变相关性,探索柔性传感器等效电阻与服装压力的关系。根据传感器电阻变化,客观评价了人体主要部位的内衣压力分布以及服装宽松量对内衣压力的影响。除此之外,还可以利用柔性压力

传感器直接进行静态服装压力测试。王永荣^[32]通过静电纺丝方法制备 PVDF 纳米纤维膜,并设计开发了一种能用于人体服装压力测试与监护的柔性压力传感器,利用其压电效果可以实测复杂的人体服装压。衣卫京等^[33]制作了一种涂覆碳系导电复合材料的导电针织面料,具有良好的压阻特性,在非导电面与压头接触时灵敏度高,可作为服装压及柔性人台压力测量的传感器灵敏元件。庞欣等^[34]采用柔性压力传感器设计与搭建了压力袜压力测试平台,测试得到了脚踝、小腿等多部位围度上的压力变化值与压力分布情况。除此之外,在对服装与人体皮肤动态压力接触研究中,汤倩等^[35]基于柔性压阻式传感器、信号调理模块和图形化编程语言构建了运动服动态压力测试系统,实现了人体动态压力数据的采集、处理和显示。

除了测量贴身服装的服装压在人体上的分布以及大小,柔性压力传感器还可用于检测足底压力的分布^[36]。金曼等^[37]采用 PVDF 压电薄膜研制了一种压电测试鞋垫,针对柔性传感器普遍存在的频率响应问题,提出了采用多层感芯结构提高传感器信号响应,并改善柔性传感器的弹性滞后性,可记录不同运动状态下足底压力的分布状况。在其他纺织品制造领域,LEE T H 等^[38]研发了一种用于汽车坐垫的纺织结构光纤压力传感器,将聚合物光纤和纱线交叉编织成网状结构,当坐垫受到较大压力负荷时,光纤产生弯曲形变。

柔性压力传感器不仅可以直接用于纺织品中,还可应用在对服装成衣检测中。金曦^[39]将柔性压力传感器与气囊相结合,提出了一种智能衣架以及数学模型和控制方法,将柔性压力传感器附在衣架上,能够更直接地检测到目标形变,最终显示衣服与衣架的贴合程度,为成衣检测提供一种快速、准确的方法。近年来,柔性机器人压敏皮肤的研究发展进一步实现了机器人的智能化,田合雷等^[40]将炭黑导电材料与柔性基底集成开发了具有 3 层复合结构的柔性机器人压容式传感器皮肤,可将其贴附于机器手,进行抓取、提拉与握紧应用操作。

2.3 运动检测

目前,柔性传感器结合现有的无线传输技术,在对人体的运动行为检测方面应用广泛。除了检测人体运动中呼吸或说话时胸以及颈部的细微运动外,传感器还可以用于捕捉大范围的运动,比如手、胳膊和腿的弯曲运动。

谢娟^[41]采用纬编针织技术将镀银尼龙导电纱线织成柔性针织传感器,分析该传感器在双向拉伸

下的电-力学性能并建立相关的理论模型,将其应用于监护服中实现对肢体动作的识别与监测。HELMER R J N 等^[42]将应变针织传感器绑缚到膝盖处,在不同时间、不同动作幅度和速度下,测量运动员下肢踢足球时的各种动作姿势,并通过无线电子模块将检测到的运动信息利用蓝牙传给电脑终端,实现对肢体动作的检测。TOGNETTI A 等^[43]研制了基于单层和双层针织压电织物 KPF 的应变传感器,用于测量肢体动作拉伸和弯曲。该装置分别在静态和动态下测量膝盖的动作,并与标准相位指示器测量结果进行对比,实验证实双层针织压电传感器的性能较好。张晓峰等^[44]采用原位聚合法制备了 3 种类型的聚吡咯导电织物,分别以这 3 种导电织物为传感元件制作姿态监测织物传感器,并进行上肢运动状态的准静态测试。通过观测聚吡咯导电织物的拉伸电阻变化及其方向性差异,可准确反映上肢的弯曲、旋转及其复合运动。

除了利用应变传感器检测人体弯曲运动产生的形变变化外,石欣等^[45]还提出了一种基于压力传感器的人体运动识别方法,将压敏传感器置于鞋垫中,根据采集的压力数据变化得到人体运动的距离、时间以及练习次数等,还可以提取到运动难度等运动强度数据。杨航等^[46]展示了压电薄膜柔性传感器在乒乓球运动检测中的应用,将 DT1-028K 压电薄膜贴在乒乓球服的肘部,当挥动球拍时,肘部弯曲使得压电薄膜的两个电极间产生电压变化,可实时检测单击球次数、频率和击球总数。

随着人机交互与情感技术的快速发展,SU Meng 等^[47]首次提出通过压阻柔性可穿戴电子传感器多通道分析进行表情识别的概念。将柔性传感器贴附于人体的体表皮皮肤,可实时监测人在不同环境和心理条件下面部表情的反应。

目前,应用于人体运动检测上的柔性传感器所监测的数据较为单一,主要是以基本的人体屈伸运动为主,在医疗或健身领域的数据分析与实际需求还未能完全匹配,数据的挖掘、综合分析以及利用方面还需不断完善。另外,运动检测是一个长时间的输出与反馈过程,特别是作为采集和传输数据信息的模块,传感器的工作模式常常受到电池能量的制约,能量供应不足会影响数据采集的准确性和稳定性。

3 结 语

柔性传感器相比于传统的可穿戴传感器,具有轻便柔软、电学性能突出、舒适性好、集成度较高等

特点,这些特点影响着未来可穿戴设备的功能设计与发展方向。然而智能柔性传感器快速发展的同时,还存在一些问题。

目前柔性传感器的研发以导电织物为主要传感元件,这些传感器通常存在涂层手感差、可水洗性欠缺、加工工艺复杂以及加工成本高等缺点,还不能达到设计目标和使用性能的要求,难以适应未来柔性传感器大规模、低成本及高效率的生产模式。另外,柔性传感器的能耗和自驱动是保证信号传输稳定的重要条件,而现有的传感器能源供应与实际需求依然存在着很大差距。

柔性传感器的真正发展与应用还需依靠更先进的新材料研发以及计算机技术的发展,随着近几年印刷电子以及3D打印技术受到广泛的关注,以柔性传感器为代表的新型印刷电子元件,以其高效环保、适用便捷并更具定制化的优点,逐步向智能柔性可穿戴产品的先进制造方面靠拢。

在能量供应上,考虑到无线充电技术在电子产品上的普及,因此可以采用相关技术,或接受环境中电磁场或以电磁波形式存在的能量,将其转换为电能作为充电来源。就电池技术而言,研发具有高能量、小体积的电化学电池是研究人员需要重点关注的课题。

柔性传感器在对人体日常生理以及活动的基本物理量测量的同时,也应拓宽其检测的范围,并结合可移动通信设备的数据记录与反馈功能,满足消费者对于智能纺织品定制化、个性化的需求,适应不同人群、不同场合。纳米技术的融合,可将不同功能的柔性传感器以及其他传感器集成在可穿戴纺织品中,实现智能纺织品的高度集成化、微小化以及多元化测量的功能。

参考文献:

- [1] 杨大智. 智能材料与智能系统[M]. 天津:天津大学出版社,2000:24-37.
- [2] 李小兰. 智能纤维与智能纺织品概述[J]. 棉纺织技术, 2009, 37(6):62- 64.
LI Xiaolan. An overview of intelligent fiber and intelligent textiles[J]. Cotton Textile Technology, 2009, 37(6): 62-64. (in Chinese)
- [3] 施楣梧,肖红. 智能纺织品的现状和发展趋势[J]. 高科技纤维与应用,2010,35(4):5-8.
SHI Meiwu, XIAO Hong. The present state and perspectives of the smart textiles[J]. Hi-Tech Fiber and Application, 2010, 35(4): 5-8. (in Chinese)
- [4] COCHRANE C, KONCAR V, LEWANDOWSKI M, et al.

Design and development of a flexible strain sensor for textile structures based on a conductive polymer composite [J]. Sensors, 2007, 7(4): 473- 492.

- [5] 钱鑫,苏萌,李风煜,等. 柔性可穿戴电子传感器研究进展[J]. 化学学报,2016,74(7):565-575.
QIAN Xin, SU Meng, LI Fengyu, et al. Research progress in flexible wearable electronic sensors[J]. Acta Chimica Sinica, 2016, 74(7): 565-575. (in Chinese)
- [6] 殷景华,王雅珍,鞠刚. 功能材料概论[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1999:256-258.
- [7] 刘敏,庄勤亮. 智能柔性传感器的应用及其发展前景[J]. 纺织科技进展,2009(1):38- 40,42.
LIU Min, ZHUANG Qinliang. The application and development foreground of smart flexible sensor[J]. Progress in Textile Science and Technology, 2009(1): 38- 40, 42. (in Chinese)
- [8] 马艳丽,刘茜,刘玮. 用于智能纺织品的柔性传感器研究进展[J]. 传感器与微系统,2015,34(4):1-3,7.
MA Yanli, LIU Qian, LIU Wei. Research progress of flexible sensor for smart textiles [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2015, 34 (4): 1-3, 7. (in Chinese)
- [9] ATALAY O, KENNON W R, HUSAIN M D. Textile-based weft knitted strain sensors: effect of fabric parameters on sensor properties [J]. Sensors, 2013, 13 (8): 11114-11127.
- [10] 李龙飞,丁永生. 基于机织结构的柔性应变传感器的设计与分析[J]. 传感技术学报,2008,21(7):1132-1136.
LI Longfei, DING Yongsheng. Design and analysis of woven structure-based flexible strain sensor[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2008, 21 (7): 1132-1136. (in Chinese)
- [11] WILSON J S. Sensor technology handbook[M]. Holland: Butter-Worth-Heinemann, 2005.
- [12] 庞潍,刘通,李娅萍,等. 纺织结构传感器的研究进展[J]. 产业用纺织品,2012,30(6):1-7.
PANG Wei, LIU Tong, LI Yaping, et al. Review on fabric-based sensor [J]. Technical Textiles, 2012, 30 (6): 1-7. (in Chinese)
- [13] FAN Qingqing, ZHANG Xiaolin, QIN Zongyi. Preparation of polyaniline/polyurethane fibers and their piezoresistive property[J]. Journal of Macromolecular Science, Part B (Physics), 2012, 51(4): 736-746.
- [14] 王庆锋,吴斌,宋吟蔚,等. PVDF 压电传感器信号调理电路的设计[J]. 仪器仪表学报,2006,27(增2): 1653-1655.
WANG Qingfeng, WU Bin, SONG Yinwei, et al. Design of a signal conditioner circuit for the PVDF piezoelectric transducer[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(Sup. 2): 1653-1655. (in Chinese)

- [15] 王双, 刘玮, 刘晓霞. 柔性应变织物传感器研究进展[J]. 传感器与微系统, 2017, 36(12):1-3.
WU Shuang, LIU Wei, LIU Xiaoxia. Research progress of flexible fabric strain sensor[J]. Transducer and Micro-system Technologies, 2017, 36(12):1-3. (in Chinese)
- [16] 刘皓, 陈婷婷, 赵利端, 等. 聚吡咯涂层织物的研究进展[J]. 纺织导报, 2018(3):64-67.
LIU Hao, CHEN Tingting, ZHAO Liduan, et al. Research progress on the fabric with ppy-coating[J]. China Textile Leader, 2018(3):64-67. (in Chinese)
- [17] 刘焘, 邹奉元. 涂碳纤维导电针织物的结构设计及其传感性能[J]. 纺织学报, 2014, 35(9):31-35, 46.
LIU Tao, ZOU Fengyuan. Structural design and sensing performance of conductive knitted fabrics of carbon coated fibers[J]. Journal of Textile Research, 2014, 35(9):31-35, 46. (in Chinese)
- [18] 李瑶, 陈婷婷, 杨旭东. 纺织用导电纤维及其应用[J]. 产业用纺织品, 2010, 28(4):32-35.
LI Yao, CHEN Tingting, YANG Xudong. Conductive fibers for textile and its applications[J]. Technical Textiles, 2010, 28(4):32-35. (in Chinese)
- [19] ROTHMAIER M, LUONG M P, CLEMENS F. Textile pressure sensor made of flexible plastic optical fibers[J]. Sensors, 2008, 8(7):4318-4329.
- [20] 郭溪, 杨昆, 张诚. 柔性织物传感器的发展与应用[J]. 毛纺科技, 2018, 46(8):86-91.
GUO Xi, YANG Kun, ZHANG Cheng. Research progress of flexible textile sensors[J]. Wool Textile Journal, 2018, 46(8):86-91. (in Chinese)
- [21] 高志一. 基于柔性气体传感器制作区分目标气体的可穿戴口罩[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- [22] DE JONCKHEERE J, NARBONNEAN F, KINET D, et al. Optical fiber sensors embedded into technical textile for a continuous monitoring of patients under magnetic resonance imaging[C]//2008 30th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Vancouver BC:IEEE, 2008:5266-5269.
- [23] 郭秋晨. 集成不同导电材料针织柔性传感器的智能无缝服装的研发[D]. 上海: 东华大学, 2017:37-63.
- [24] HUANG C H, TANG C F, LEE M C, et al. Parametric design of yarn-based piezoresistive sensors for smart textiles[J]. Sensor and Actuators A (Physical), 2008, 148(1):10-15.
- [25] KANG T H, MERRITT C, KARAGUZEL B, et al. Sensors on textile substrates for home-based healthcare monitoring[C]//Proceeding of the 1st Distributed Diagnosis and Home Healthcare (D2H2) Conference. Virginia: IEEE, 2006:5-7.
- [26] 田新宇, 杨昆, 张诚. 光纤布拉格光栅脉搏传感织物的设计[J]. 纺织学报, 2016, 37(10):38-41.
TIAN Xinyu, YANG Kun, ZHANG Cheng. Design of pulse sensing fabric based on fiber Bragg grating[J]. Journal of Textile Research, 2016, 37(10):38-41. (in Chinese)
- [27] YANG Xiufeng, CHEN Zhihao, ELVIN C S M, et al. Textile fiber optic microbend sensor used for heartbeat and respiration monitoring[J]. Sensors Journal IEEE, 2015, 15(2):757-761.
- [28] ÖZDEMİR, HAKAN Ö, KILINÇ S. Smart woven fabrics with portable and wearable vibrating electronics[J]. Autex Research Journal, 2015, 15(2):99-103.
- [29] 彭晓慧, 杨旭东, 胡吉永. 可用于呼吸监测的刺绣性压力传感器的研制[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2014, 40(6):712-717, 727.
PENG Xiaohui, YANG Xudong, HU Jiyong. Study on respiration monitoring piezo-resistive sensors based on embroidery[J]. Journal of Donghua University (Natural Science Edition), 2014, 40(6):712-717, 727. (in Chinese)
- [30] 蔡倩文, 陈慰来, 王金凤. 洗涤及热定型对柔性传感器导电性能的影响[J]. 现代纺织技术, 2017, 25(1):23-27, 55.
CAI Qianwen, CHEN Weilai, WANG Jinfeng. Effect of washing and heat setting on electric conduction of flexible sensors[J]. Advanced Textile Technology, 2017, 25(1):23-27, 55. (in Chinese)
- [31] 王金凤. 导电针织柔性传感器的电-力学性能及内衣压力测试研究[D]. 上海: 东华大学, 2013:94-103.
- [32] 王永荣. 弹性针织物压力性能研究及测试系统的设计与开发[D]. 上海: 东华大学, 2010.
- [33] 衣卫京, 郑嵘, 顾远渊. 导电针织面料在微小压力下的压阻性能研究[J]. 针织工业, 2014(9):12-14.
YI Weijing, ZHENG Rong, GU Yuanyuan. The Piezo-resistive performance of conductive knitted fabric under small pressure[J]. Knitting Industries, 2014(9):12-14. (in Chinese)
- [34] 庞欣, 方园, 李新阳. 基于柔性压力传感器的压力袜压力检测[J]. 浙江理工大学学报(自然科学版), 2017(6):759-764.
PANG Xin, FANG Yuan, LI Xinyang. Pressure testing of compression stockings based on flexible pressure sensor[J]. Journal of Zhejiang Institute of Science Technology University (Natural Sciences), 2017(6):759-764. (in Chinese)
- [35] 汤倩, 肖居霞, 魏取福. 运动服动态压力测试系统的构建与评价[J]. 纺织学报, 2009, 30(9):123-126.
TANG Qian, XIAO Juxia, WEI Qufu. Establishment and evaluation of dynamic pressure measurement system for sportswears[J]. Journal of Textile Research, 2009, 30(9):123-126. (in Chinese)

- [36] 高敏,张一帆,洪成雨,等. 柔性传感器在足底压力测量系统中的应用[J]. 服装学报,2018,3(4):301-307.
GAO Min, ZHANG Yifan, HONG Chengyu, et al. Application of flexible sensors in the plantar pressure measurement system[J]. Journal of Clothing Research, 2018,3(4):301-307. (in Chinese)
- [37] 金曼,丁辛,甘以明,等. 足底压力分布测量鞋垫的研究[J]. 纺织学报,2010,31(9):114-117.
JIN Man, DING Xin, GAN Yiming, et al. A sensing insole for measuring plantar pressure distribution[J]. Journal of Textile Research, 2010,31(9):114-117. (in Chinese)
- [38] LEE T H, KIM E S, KIM T H, et al. Simple pressure sensor for a vehicle seat using a woven polymer optical-fiber sheet[J]. Journal of the Korean Physical Society, 2015, 67(11):1947-1951.
- [39] 金曦. 基于多目标协同优化算法的智能衣架的研究与应用[D]. 上海:东华大学,2017.
- [40] 田合雷,刘平,郭小辉,等. 基于导电橡胶的柔性压力/温度复合感知系统[J]. 传感器与微系统,2015(10):100-103.
TIAN Helei, LIU Ping, GUO Xiaohui, et al. Flexible pressure / temperature composite perceptual system based on conductive rubber[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2015(10):100-103. (in Chinese)
- [41] 谢娟. 针织物传感器双向延伸电-力学性能及肢体动作监测研究[D]. 上海:东华大学,2015:72-80.
- [42] HELEMER R J N, FARROW D, BALL K. A pilot evaluation of an electronic textile for lower limb monitoring and interactive biofeedback[J]. Procedia Engineering, 2011, 13(1):519-518.
- [43] TOGNETTI A, LORUSSI F, MURA G D, et al. New generation of wearable goniometers for motion capture systems[J]. Journal of Neuro Engineering and Rehabilitation, 2014, 11(1):56-73.
- [44] 张晓峰,李国豪,胡吉永,等. 用于人体上肢运动姿态监测的聚吡咯导电织物的机电性能评价[J]. 中国生物医学工程学报,2015,34(6):670-676.
ZHANG Xiaofeng, LI Guohao, HU Jiyong, et al. Mechanic-electronical property characterization of ppy-coated conductive woven fabric for human upper limb motion monitoring[J]. Chinese Journal of Biomedical Engineering, 2015, 34(6):670-676. (in Chinese)
- [45] 石欣,熊庆宇,雷璐宁. 一种基于压力传感器的人体运动识别方法研究[J]. 仪器仪表学报,2010,31(6):1429-1434.
SHI Xin, XIONG Qinyu, LEI Luning. Study on human motion recognition method based on pressure sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(6):1429-1434. (in Chinese)
- [46] 杨航,董维杰. 基于压电薄膜传感器的肘部运动检测系统设计[J]. 电子产品世界,2017(1):41-43.
YANG Hang, DONG Weijie. Design of elbow motion detection system on piezoelectric thin film sensor[J]. Electronic Engineering and Product World, 2017(1):41-43. (in Chinese)
- [47] SU Meng, LI Fengyu, CHEN Shuoran, et al. Nanoparticle based curve arrays for multirecognition flexible electronics[J]. Advanced Materials, 2016, 28(7):1369-1374.

(责任编辑:邢宝妹)