

智能服装关键制备技术的研究进展

李卉^{1,2}, 刘皓^{1,2}, 陈莉¹

(1.天津工业大学 纺织科学与工程学院,天津 300387;

2.天津工业大学 智能可穿戴电子纺织品研究所,天津 300387)

摘要:介绍柔性传感器与功能纺织品、柔性发电与储能装置、柔性显示器件、低功耗芯片与柔性电路、柔性可拉伸导线、柔性器件的加工与封装、新型检测仪器与检测标准以及信息安全8种智能服装制备的关键技术。重点介绍柔性传感器在智能服装技术中的研究进展,同时总结智能服装在医疗监测、体育健身以及军事领域等方面的应用。最后对智能服装与服饰的发展前景提出展望。

关键词:智能服装;柔性传感器;制备技术;研究进展

中图分类号:TS 941.7

文献标志码:B

文章编号:1000-4033(2021)12-0053-06

Research Progress of Key Manufacturing Technologies of Smart Garments

Li Hui^{1,2}, Liu Hao^{1,2}, Chen Li¹

(1.School of Textile Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China;

2.Institute of Smart Wearable Electronic Textiles, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

Abstract: Smart clothing and apparel can perceive the physiological parameters, sports parameters and environmental parameters of the human body, and make a reasonable response through the feedback mechanism. At present, smart clothing preparation technology is a hot spot in the scientific research field and investment market, which attracts a large number of scientific researchers, investors and entrepreneurs to join. This article introduces flexible sensors and functional textiles, flexible power generation and energy storage devices, flexible display devices, low-power chips and flexible circuits, flexible stretchable wires, processing and packaging of flexible devices, new testing instruments and testing standards, and information security—the eight key technologies for the preparation of smart clothing. It focuses on the research progress of flexible sensors in smart clothing technology, and summarizes and sorts out the applications of smart clothing in medical monitoring, sports and fitness, and military fields. Finally, the development prospects of smart clothing and apparel has been forecasted.

Key words: Smart Garment; Flexible Sensor; Manufacturing Technology; Research Progress

智能服装发展是大势所趋^[1]。智能服装的研究与开发主要是利用高新技术与信息技术改变和提升传统的服装功能,集成了材料技术、纺织技术、计算机技术、通信技术、网络技术和人工智能技术,感知人体的生理参数、运动参数和环境参数,通过反馈机制做出合理响

应。智能服装的制备技术成为当今纺织科研领域的研究热点,尤其柔性传感器开发技术受到众多纺织科研人员的关注。本文对当前智能服装的关键制备技术以及智能服装在医疗监测、体育健身、军事领域的应用进行归纳与分析,总结我国智能服装与服饰市场尚存在的

问题并预测其发展趋势,为未来智能服装的应用奠定一定基础。

1 智能服装关键制备技术

1.1 柔性传感器与功能纺织品

传感器能够将人体的生理信号和运动信号转换为数字信号,实现人体参数的采集。柔性传感器和功能纺织品是实现人体信息获取

基金项目:国家自然科学基金(51473122);中国博士后科学基金(2016M591390);天津市自然科学基金(18JCYBJC18500)。

获奖情况:“2021 全国纺织服装时尚与科技创新大会”优秀论文。

作者简介:李卉(1997—),女,硕士研究生。主要从事柔性智能压阻传感器以及生物电干电极方面的研究。

通讯作者:刘皓(1977—),男,教授。E-mail:liuhao_0760@163.com。

和对人体做出响应的关键部件,是组成智能服装与服饰的重要部件。

1.1.1 柔性传感器

柔性传感器是用柔性材料制成的传感器,具有良好柔韧性、延展性,甚至能自由弯曲或折叠。按照用途大致可分为:监测人体运动、呼吸和脉搏等参数的柔性压力传感器;监测人体心电、脑电等信号的生物电干电极;监测人体汗液成分和出汗量的柔性离子传感器;监测人体湿度的柔性湿度传感器等。

a. 柔性压力传感器

柔性压力传感器在智能服装、智能运动、机器人皮肤等方面有广泛应用。聚偏氟乙烯、硅橡胶、聚酰亚胺等作为基底材料广泛用于柔性压力传感器的制作,具有较好的柔韧性、导电性及压阻特性^[2]。

柔性压力传感器按照工作原理可分为压阻式、电容式、压电式和摩擦发电式^[3]等。压阻式柔性压力传感器基于感应材料的电阻率变化,将力学量转换为电信号;压电式柔性压力传感器受到压力作用时,压力薄膜产生变形导致内部产生极化现象,薄膜表面因此出现正负电荷并输出电信号;电容式柔性压力传感器基于感应材料的电容量变化,将被测力信息转换为电信号;摩擦发电式柔性压力传感器利用摩擦电效应,使两种不同材料表面间产生静电荷,当压力改变材料两端距离或大小时,可输出电流或电压信号。4种柔性压力传感器传导机理和器件的示意图^[4]见图1。

近年来,纺织领域科研人员对压力传感器研究众多,应用广泛。Lu et al^[5]以锥型阳极氧化铝为模板,采用原位聚合单体吡咯(PPy)和旋涂聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)的方法制备了纳米锥阵列PPy@PMMA导电膜,并采用互锁结构制备

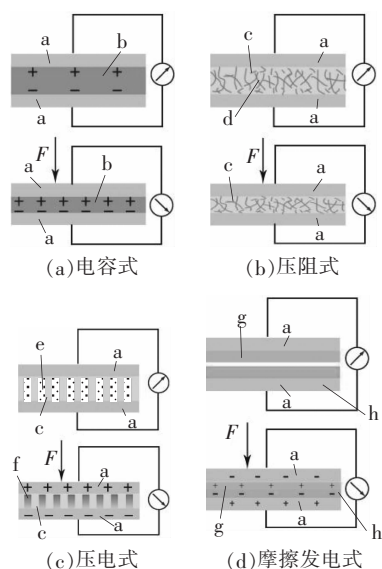


图1 4种柔性压力传感器传导机理和器件的示意图
a.电极;b.介电层;c.基质;d.导电网络;e.压电材料;f.产生压电效应的压电材料;g.摩擦发电材料;h.不同摩擦电序的摩擦发电材料;+、正电荷;-、负电荷。

图1 4种柔性压力传感器传导机理和器件的示意图

出灵敏度高达 268.36 kPa^{-1} 、低迟滞性 ($\pm 3.156\%$) 的柔性压阻传感器。Pang et al^[6]利用纳米多孔硅板和紫外固化技术制备了具有规整纳米纤维阵列的聚氨酯丙烯酸酯膜,用于监测心跳与脉搏。Gong et al^[7]提出一种用超薄金纳米线制作可穿戴、高灵敏度压力传感器的方法,测量弯曲、扭转和声学振动以及手腕的脉搏跳动。

b. 生物电干电极

生物电干电极主要有平面薄膜干电极、织物干电极、微针阵列干电极3个类型。平面电极中的织物电极可以与服装服饰很好地集成,提高生物电检测系统的舒适性。

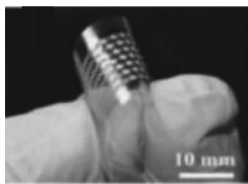
平面薄膜干电极与皮肤表面角质层直接接触,随着接触时间变长,皮肤表面汗液可以填充皮肤与电极之间间隙,从而降低噪声^[8]。常用于制作平面薄膜干电极的导电材料包括金属材料、碳材料和导电聚合物材料。Hoon et al^[9]制备了一种基于 AgNWs-CNTs-PDMS 的

干电极材料,并将其集成到耳机上监测人体EEG信号,耳机兼具记录生理电信号和听音乐的功能,研究证明,EEG耳机具有检测睡眠发作以及区分睡眠和清醒状态的能力。织物干电极因柔韧性、透湿性和易集成性受到研究人员的青睐。但是由天然纤维(如棉或羊毛)或合成纤维(如锦纶或聚酯)组成的织物是电绝缘体,其电阻大于 $10^8 \Omega$,需要使用不同的导电材料生产织物干电极,主要包括金属包纱、碳材料和导电聚合物。Liu et al^[10]通过在校织物上绣镀银纱线制作织物电极,并电化学沉积氯化银于镀银纱线上,探究氯-银原子比对电化学行为和信号采集能力的影响。

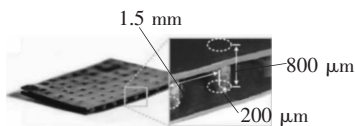
微针电极能与皮肤更好地接触,提高生物电信号检测的稳定性。当附着在皮肤表面的电极发生形变或相对位移时,电极接触阻抗会发生相应变化从而引入较多测量噪声,此外毛发和粗糙的皮肤表面也会阻挡电信号传递。因此,如何在噪声干扰和信号阻挡层作用下采集微弱的生物电信号是亟待解决的问题^[11]。微纳结构化是一个解决方案,当干电极存在微纳结构时,毛发可以被容纳在微纳结构内而不影响接触面积,随着接触面积增加,电极的皮肤接触阻抗降低,使得生物信号的测量变得更容易。与无微纳结构的干电极相比,微纳结构干电极具有更高的导电性。此外,电极表面的微纳结构增加了电极与皮肤之间的摩擦力,以此来保持稳定接触。根据是否穿透皮肤,表面微纳结构干电极可分为穿透接触式电极和非穿透接触式电极。表面微纳结构干电极示例见图2。

c. 柔性离子传感器

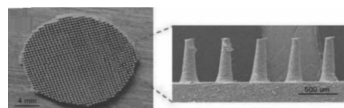
柔性离子传感器能监测人体汗液成分和出汗量。通过集成多种



(a) 36根微针电极组成柔性微针阵列电极



(b) 通过两次复制成形工艺开发的微工程化导电弹性体电极



(c) 仿生纤毛导电聚二甲硅氧烷(PDMS)的图案化柔性电极

图2 表面微纳结构干电极示例

离子传感器且无感贴附于人体表面的电子皮肤设备,实时分析人体汗液中 Na^+ 、 K^+ 含量变化,可以对运动员训练、慢性病监测、药物滥用等领域带来巨大发展。目前,对于柔性离子传感器的研究设计,主要针对敏感材料指标、柔性器件制造、微型化设计以及集取结构设计。Lin et al^[11]基于柔性氧化石墨烯,设计制作一种微型化汗液乳酸传感器。Yang et al^[12]采用激光刻印技术制造可穿戴汗液传感器,对汗液中尿酸和酪氨酸进行检测,通过检测食用富含嘌呤膳食后患者和健康人体汗液中尿酸水平,发现痛风患者汗水尿酸水平高于健康人体。

d. 柔性湿度传感器

湿度传感器主要有电阻式、电容式两大类。湿敏电阻传感器是在基片上覆盖一层用感湿材料制成的膜,当空气中水蒸气吸附在感湿膜上时,元件电阻率和电阻值都发生变化,利用这一特性即可测量湿度。美国北卡罗来纳州立大学朱勇教授等开发一种柔性可密切贴合皮肤表面的皮肤湿度传感器,采用具有极好导电性能和力学性能的

银纳米线作为主要导电材料,可拉伸性能优异的硅胶作为包裹银纳米线载体,使得电极可以在人体活动中仍然与皮肤保持良好贴合^[13]。

1.1.2 功能纺织品

a. 电加热服装

电加热服可通过自主发热为低温环境下的活动提供热量,具有加热过程中表面温度均匀、温度可控、灵活、结构简单等优点,被广泛研究并应用于主动保暖服装领域。电加热服通过将电热元件嵌入服装中,把电源和控制元件连接起来从而实现电能到热能的转换。电热元件作为电加热服装的热源,其电热性能对服装的加热功能至关重要。从19世纪初开始,陆续出现了加热手套、柔性电加热垫、电热背心、电加热服等加热产品。目前在电加热服装的制备中已经有多种将普通纺织品与导电物相结合的工艺,如浸涂法、原位聚合、气相聚合、电化学聚合以及刺绣等^[14]。

b. 相变储能纺织品

通常采用填充、涂覆、湿法或熔融纺丝等方法制备微米级传统相变纤维。相变调温服装是利用某些物质在相转变过程中吸热和放热实现热能储存和温度调控的服装。相变调温材料能够根据人体服装内部温度变化,使服装在设定温度下吸收或释放热量,在服装周围形成温度基本恒定的微气候环境,实现温度调节功能。德国 Kelheim 纤维公司与 Outlast 公司合作开发出 Outlast 黏胶型纤维,是将相变材料微胶囊加入到黏胶纤维纺丝液中,其隔热效果达到 42.5%^[15]。

c. 变色纺织品

变色纺织品是指随外界环境条件如光、温度等变化而显示不同色泽的纺织品,包括光敏变色、温敏变色、湿敏变色、结构变色和压

敏变色纺织品等。智能变色纺织品服用性能较好,可用于民用、军用、高危行业等多个领域,如电致变色服装可在服装上实现电视屏幕般的功能,美国康涅狄格大学 Greg Sotzing 博士研制能随电荷改变颜色的电致变色纤维材料^[16],有望在服装上实现电视屏幕般的功能。

1.2 柔性发电与储能装置

长续航能力是智能服装与服饰能够应用推广的一个重要因素。除电池设备外,柔性自发电元件和柔性储能元件是智能服装服饰电子设备电能提供的有效途径。柔性自发电元件分为柔性染料敏化太阳能电池、柔性摩擦纳米发电机、柔性仿电鳗凝胶发电机。染料敏化太阳能电池(DSSC)为未来的能源供应提供高效且易于实施的技术。与传统的硅太阳能电池相比,它以较低的材料和制造成本提供相当的功率转换效率为优势。DSSC 材料如氧化钛是廉价、丰富、对环境无害的材料,可在环境温度下进行加工,因此可以利用卷对卷工艺在大规模生产线上印刷 DSSC。DSSC 在较低的光强度下表现更好,这使它们成为室内应用的良好选择。Gong et al^[17]从器件建模、最新技术和新型器件结构的角度,综述了其先进技术和研究趋势。

Pu et al^[18]报告了一种便捷且可扩展的全固态柔性纱线超级电容器的制造方法,其与摩擦发电织物整合,得到一种自充电纺织品。Lai et al^[19]通过摩擦发电和静电感应效应提出第一个本质上可机械耐用且具有弹性的纳米发生器——皮肤状的摩擦纳米发电机。它通过内在可拉伸组件实现由触摸产生电力,从而不受用途所需的各种极端变形带来的影响。凭借其完美的灵活性,纳米发生器可以完

全适用于各种非平面或不规则物体,即使遇到严重撕裂损坏,仍可充当其他组件的有效动力源。

Schroeder et al^[20]介绍了一种受电鳗启发的电感式电源的概念,利用微型聚丙烯酰胺水凝胶隔间之间的离子梯度,制备了在开路时能产生 110 V 电压或每平方米每凝胶单元 27 mW 电压的凝胶电池,同时可避免接触之前的功耗。与典型的电池不同,这些系统柔软、灵活、透明,并具有潜在的生物相容性。这些特征表明,人造电子器官可以用来为下一代植入材料提供能量,如起搏器、植入式传感器或生物和非生物系统混合的修复装置。Sun et al^[21]提出了一种新型柔性电化学电容器,该电容器模仿电鳗中电细胞的串联结构,能够提供高达 1 000 V 的高输出电压。这些结构具有柔韧性、可拉伸性和可织造性,这对于便携式和可穿戴电子产品尤其具有前景。

1.3 柔性显示器件

柔性显示部件是智能服装服饰与用户交互和信号输出的一种重要手段,具有轻薄、可折叠、弯曲和耐冲击等特点,包括柔性显示器和柔性屏幕。柔性显示器是在塑料薄膜、金属薄片等柔性基材上制备的具有可挠性的平板显示器件,像纸一样薄,即使切掉电源,内容也不会消失,因此也被称为电子纸。柔性屏幕是可弯曲、具有柔韧性的电子屏幕,由背板(基板)和前板两部分组成。目前可用于柔性显示的技术主要有有机电致发光显示(OLED)、液晶显示(LCD)和电泳显示(EPD)等,其中 OLED 以优异的性能脱颖而出,相比于其他类型的显示,它具有自发光、高对比度、色泽鲜艳和低能耗等特点,被认为是下一代显示器件的中流砥柱,具

有较好的前景。把 OLED 器件制作在柔性基板上,开发柔性 OLED 器件,有巨大潜力和广阔市场前景^[22]。

柔性显示器件柔软、轻薄、舒适,如果大面积集成到服装上,还需考虑透气性。2015 年,苹果公布的新专利实现了柔性显示与纺织品的完美结合^[23]。其将光纤编入腕带中,不仅可以与纤维交织出固定的格点,并借此显示各种资讯,而且其形成的多孔结构可以变形并适合人体轮廓。因此,利用编织技术和光纤技术制成具有功能性的大面积显示器的纺织品是柔性显示技术未来的研发方向之一。

1.4 低功耗芯片与柔性电路

智能服装中用于信号处理的 CPU 和信号传输的无线通信模块都会消耗大量电能,因此降低功率消耗也是智能服装服饰提高续航能力的关键技术。降低功率消耗的方法主要有 3 种:优化电路、优化控制流程和算法、使用低功耗微处理器,选择适合智能服装的低功耗芯片。在智能服装的关键制备技术中,对于柔性电路的制备也相当重要,王瑾等^[24]综述了柔性电路的制备方法,包括导电纱线的引入法、丝网印刷、喷墨打印等方法。

1.5 柔性可拉伸导线

柔性导线连接了智能服装中的传感器与信号采集系统,在智能服装的信号传输中起到了桥梁作用。应用于智能服装服饰的柔性导线应具有以下特点:低电导率、可拉伸性好、柔软、耐水洗性好等。

柔性导线的主要制备技术有磁控溅射技术、真空镀膜技术、激光还原氧化石墨烯技术、液态金属打印技术、丝网印技术、高精度纳米沉积技术等。但导线与传感器相比过于细,要增加延伸性难度很大,目前已初步实现可拉伸导电材

料在体内植入及体表贴附的应用。同时,柔性可拉伸导线已发展了岛桥结构和分形结构电路结构,在给定的导线空间内,这些电路结构可以实现柔性可拉伸导线足够的可拉伸性能^[25]。柔性可拉伸导线的研究对未来电子技术、纺织领域等会展现出更广阔的应用前景。

1.6 柔性器件的加工与封装

柔性器件的加工及导线和电子元器件的封装决定了智能服装服饰产品的质量,柔性加工技术决定了柔性器件的可复制性、精度、稳定性和尺寸。主要有模板-旋涂法、激光刻蚀法、等离子刻蚀法、3D 打印等^[26]。封装技术是保护智能服装服饰中易于氧化和破坏器件的重要方法,主要有 3D 打印封装、喷涂封装、浸涂封装、热塑封装等。智能服装与服饰中的芯片和金属导线等元器件必须与外界隔离,以防止空气中的杂质腐蚀芯片电路而造成电气性能下降。通过对不同器件采取适当的封装技术,可使柔性器件的使用寿命实现极大延长^[27]。

1.7 新型检测仪器与检测标准

新型检测仪器和检测方法对智能服装与服饰的技术创新和产品质量改进具有重要推动作用。例如,对于生物电干电极的检测,试验常被直接执行在人体上,并通过获得人体 ECG 或其他生物电信号的质量来评价电极或服装的性能。除了在人体上直接测量电极性能,文献^[28]中介绍了一个用于纺织电极电属性测试的测量单元,测试单元包括盛满电解质的 PVC 桶体和固定两个电极的 PVC 圆盘,电极和电解质能够直接接触,也能够在其间增加微孔膜以模拟人体皮肤。

为定量评价织物基表面生物电干电极的性能,李莎等^[29]在无源测量方案的基础上开发了一套能

够模拟心电信号的有源测量仪器,为表面生物电干电极的性能评价和标准制定提供了一种新方法。

目前,与智能服装与服饰相关的检测方法和产品性能检测仪器还很缺乏,尤其是标准化的测试仪器。标准化对于智能服装与服饰的健康和可持续发展至关重要,能够提高智能服装与服饰的质量竞争。

1.8 信息安全

在互联网、大数据和云计算技术快速发展的背景下,人们的信息安全正在面临越来越严重的挑战。智能服装服饰保存有用户个人基本信息及健康指标信息,并且实时接入到互联网,因此保护好用户隐私信息和确保智能服装服饰的安全使用是智能服装服饰应用推广中要解决的一个重要问题。智能服装与服饰的安全性包括:物理安全、运行安全和信息安全。物理安全包括设备安全、环境安全;运行安全包括数据备份与恢复、病毒检测与消除、电磁兼容;信息安全包括保密性、完整性、可用性、抗抵赖性。加强信息安全的措施主要有:加强设备安全,如加强个人隐私的自我保护等;加强网络安全,如采用自组网技术,加强数据安全,个人应对数据加密,定期备份,厂商应继承性应用当前各种数据保全措施,政府应出台相关政策和标准。

2 智能服装的应用

2.1 医疗健康

智能服装与服饰通过使用移动互联网构建移动医疗云平台,云计算和大数据分析为智能服装系统提供普遍的智能成为可能。智能服装能够集成多种传感器,监测生理信息(如心电图、脑电、呼吸、脉搏、汗液成分等)、运动信息、人体姿态、声音信息及周边环境信息,由处理模块将被采集的信息转换为

数字信号,向智能终端发送并显示数据,让穿着者本人或其家人实时监测生理健康状况,预防或及早发现疾病^[30]。如 Luo et al 开发了一套基于传感器的智能服装,可用于女性更年期过渡的家庭和门诊健康监测^[31]。在多种类型智能服装技术中,带有医疗保健系统的智能服装在市场上获得较高的需求率,用于医疗保健的智能服装有望成为未来市场上需求量较大的产品之一。

目前,智能服装在医疗健康领域有很大需求,改变了传统医疗服务地域性限制,解决了笨重而固定的治疗监护设备带来的不便,是智能服装未来发展重要应用方向^[32]。

2.2 体育健身

智能服装服饰在训练、进行某些活动或运动损伤康复中也起到重要作用。运动服装领域的智能服装按作用原理可分为新型纤维材料类和智能设备结合类。例如,加拿大滑铁卢大学研发的 Athos 智能运动衣和短裤,将肌电运动传感器内置到服装面料中,通过测定肌肉纤维收缩的波动幅度来分析身体部位的运动状态和肌肉疲劳情况等生理数据,然后把这些信息传输到智能手机的软件中,以各种图表的形式呈现给使用者进行各部分肌肉运动状态的判断^[33]。

2.3 军事领域

军用保护服能够将太阳能转换成电能,为置于服装中的电子元件提供电源,保护穿着者不受热传感器或电磁探测器干扰,或者可以调节自身颜色以适应周围环境等。弗吉尼亚理工大学的研究人员设计出一种声阵织物带,可以被装配在降落伞、帐篷或一些移动设备上,通过相关装置感应、接收、处理数据,将分析结果传输到其他终端,可用于军用车辆或坦克,进行

移动侦查及军事伪装和某些功能性测试。美国军队率先研究了未来勇士系列,其中战斗服结构分为3层,外层为防弹层,中间层为电源层,内层为生理状态监视系统。防弹层采用高性能陶瓷纤维制成,内层集成生理生化传感器,对血压、心率、体温、空间位置甚至作战能力进行监测。美军勇士织衣作战服属于智能作战服,全身布满微型传感器、功能结构件、小型化功能模块等,负重智能分布于士兵全身,减小作用力。智能部件的功能特性还可以减少士兵的人体代谢消耗,增强身体机能,提高作战能力。

3 结束语

智能服装与服饰以可穿戴、智能化的特点成为研究热点,将纺织、电子、生物、信息等多种技术集于一体,能够根据人体体征参数变化、外界环境变化与刺激、位置变化等做出反馈与调节,在健康监测、医疗保健、军事军用等领域发挥着重要作用。目前,我国智能服装与服饰还存在许多问题,在制备技术层面,拉伸柔性导线、柔性封装等技术需要提高,高精度、高稳定性柔性传感器缺乏;在产业层面,智能服装服饰相关产业链不够完整;在市场层面,智能服装服饰的市场需要更加细分。随着科技的进步和多学科不断地互相渗透、交叉、融合,这些问题将会逐渐得到完善与解决。相信在不久的将来,顺应时代发展趋势,集全方位、多功能、高度智能化为一体的智能服装与服饰将会不断涌入市场,更好地服务于人们的生产生活。

参考文献

- [1] 韩芳,李英琳.可穿戴技术与智能服装[J].化纤与纺织技术,2015,44(4):43-45.
- [2] 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):1-3,9.

[3]SHUSTAK S, INZELBERG L, STEINBERG S, **et al.** Home monitoring of sleep with a temporary-tattoo EEG, EOG and EMG electrode array: a feasibility study[J].Journal of Neural Engineering, 2019,16(2):1-7.

[4]钱鑫,苏萌,李凤煜,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.

[5]LU Y, HE Y, QIAO J, **et al.** Highly sensitive interlocked piezoresistive sensors based on ultrathin ordered nanocone array films and their sensitivity simulation[J].ACS Applied Materials & Interfaces, 2020,12(49):55169-55180.

[6]PANG C, LEE G Y, KIM T, **et al.** A flexible and highly sensitive strain-gauge sensor using reversible interlocking of nanofibres[J].Nature Materials, 2012,11(9):795-801.

[7]GONG S, SCHWALB W, WANG Y, **et al.** A wearable and highly sensitive pressure sensor with ultrathin gold nanowires[J].Nature Communications, 2014,5(1):3132-3138.

[8]SEARLE A, KIRKUP L. A direct comparison of wet, dry and insulating bioelectric recording electrodes[J].Physiological Measurement, 2000,21(2):271.

[9]HOON L J, JI-YOUNG H, JIA Z, **et al.** Flexible conductive composite integrated with personal earphone for wireless, real-time monitoring of electrophysiological signs[J].ACS Applied Materials & Interfaces, 2018,10(25):84-90.

[10]LIU H, TANG D, HU Y, **et al.** The effect of chlorine/argentum atomic ratios on electrochemical behaviors and signal acquisition abilities of embroidered electrodes for bio-potential signal measurement[J].Applied Physics A, 2019, 125(8):1-11.

[11]LIN K C, MUTHUKUMAR S, PRASAD S. Flex-go(Flexible graphene

oxide) sensor for electrochemical monitoring lactate in low-volume passive perspired human sweat[J].Talanta, 2020, 214(1):120810-120818.

[12]YANG Y, SONG Y, BO X, **et al.** A laser-engraved wearable sensor for sensitive detection of uric acid and tyrosine in sweat[J].Nature Biotechnology, 2020,38(2):217-224.

[13]DUAN Z, JIANG Y, YAN M, **et al.** Facile, flexible, cost-saving and environment-friendly paper-based humidity sensor for multi functional applications[J].ACS Applied Materials & Interfaces, 2019,11(24):21840-21849.

[14]BAI Y, LI H, GAN S, **et al.** Flexible heating fabrics with temperature perception based on fine copper wire and fusible interlining fabrics[J].Measurement, 2018,122(1):192-200.

[15]WU Y, CHEN C, JIA Y, **et al.** Review on electrospun ultrafine phase change fibers (PCFs) for thermal energy storage[J].Applied Energy, 2018,210(1): 167-181.

[16]白洁.智能纺织品的分类及其应用[J].毛纺科技, 2019,47(4):79-83.

[17]GONG J, SUMATHY K, QIAO Q, **et al.** Review on dye-sensitized solar cells(DSSCs): advanced techniques and research trends[J].Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2017,68(1):234-246.

[18]PU X, LI L, LIU M, **et al.** Wearable self-charging power textile based on flexible yarn supercapacitors and fabric nanogenerators[J].Advanced Materials, 2016,28(1):98-105.

[19]LAI Y C, DENG J, NIU S, **et al.** Electric eel-skin-inspired mechanically durable and super-stretchable nanogenerator for deformable power source and fully autonomous conformable electronic-skin applications[J].Advanced Materials, 2016,28(45):10024-10032.

[20]SCHROEDER T, GUHA A, LAM-

OUREUX A, **et al.** An electric-eel-inspired soft power source from stacked hydrogels[J].Nature, 2017,552(1):214-218.

[21]SUN H, FU X, XIE S, **et al.** Electrochemical capacitors with high output voltages that mimic electric eels[J].Advanced Materials, 2016,28(10):2070-2076.

[22]王雅林.柔性显示技术发展综述[J].电子测试, 2019(8):113-114.

[23]SHI X, ZUO Y, ZHAI P, **et al.** Large-area display textiles integrated with functional systems[J].Nature, 2021, 591(1):240-245.

[24]王瑾,缪旭红.基于织物的柔性电路制备方法及应用研究进展[J].丝绸, 2021,58(3):36-40.

[25]苏业旺,李爽,刘浩.一种变线宽的柔性可拉伸导线及其制备方法:中国, 201711178140.8[P].2018-05-01.

[26]孙赛君.离子液体-石墨基温度传感器的制备及性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2018.

[27]周保丰.柔性锂离子电池的封装方法及其对电池性能影响的研究[D].南京:南京邮电大学, 2016.

[28]TAO X. Handbook of smart textile[M].Singapore: Springer, 2015.

[29]李莎,蒋铭媛,谢军,等.织物基表面生物电干电极的性能评价仪器及方法[J].生物医学工程学报, 2019,36(3):460-467.

[30]于静静,邓咏梅.基于生理监测的可穿戴智能服装应用与展望[J].纺织科技进展, 2021(2):6-9,15.

[31]陈莉,张艳琳,刘皓,等.智能可穿戴产品用柔性传感器研究进展[J].针织工业, 2021(11):81-85.

[32]严妮妮,张辉,邓咏梅.可穿戴医疗监护服装研究现状与发展趋势[J].纺织学报, 2015,36(6):162-168.

[33]王海龙.军用智能可穿戴设备发展综述[J].电子技术, 2018,47(2):5-7.

收稿日期 2021 年 4 月 9 日