

DOI: 10.13475/j.fzxb.20180200308

可穿戴技术在纺织服装中的应用研究进展

孙悦¹, 范杰¹, 王亮¹, 刘雍^{1,2}

(1. 天津工业大学 纺织科学与工程学院, 天津 300387; 2. 高性能纤维及纺织复合材料制备技术
国家地方联合工程研究中心, 天津 300387)

摘要 为促进可穿戴技术与智能纺织服装领域的融合及产业化发展, 系统介绍了近年来国内外关于可穿戴设备的材料、制备方法与工艺及其特点。针对目前可穿戴技术在纺织服装领域的研究现状, 介绍了可穿戴设备的发展历程及其柔性化进程, 对纺织服装领域用可穿戴设备进行了分类; 详细阐述了信号感测、收集与传输装置、能量收集与管理装置、纺织天线等典型柔性可穿戴设备的发展现状; 最后讨论了目前可穿戴设备存在的一些问题, 并对其未来的发展趋势和前景进行展望。

关键词 可穿戴技术; 智能服装; 柔性传感器; 电子设备

中图分类号: R 443.8 文献标志码: A

Research progress of wearable technology in textiles and apparels

SUN Yue¹, FAN Jie¹, WANG Liang¹, LIU Yong^{1,2}

(1. School of Textile Science and Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China; 2. National Joint Engineering Research Center for High Performance Fibers and Textile Composites, Tianjin 300387, China)

Abstract In order to facilitate application of wearable devices in textiles and apparels and promote the industrialization in the field of smart clothing, the materials, preparation methods, processes of wearable devices developed in recent years were systematically introduced. According to the current research status of wearable devices in the field of textiles and apparels, the development history of wearable devices was also introduced. At the same time, the wearable devices were classified firstly in this field. The development of several typical flexible wearable devices such as signal sensing, collection and transmission devices, energy harvesting and management devices and textile antennas were described in details. Finally, some problems existing in wearable devices were further analyzed. Meanwhile, the development trends and prospects for wearable devices were forecasted.

Keywords wearable technology; smart clothing; flexible sensor; electronic device

可穿戴设备主要指可直接穿戴在人身上的电子设备, 是可以整合到衣服中或类似服装的电子产品^[1]。可穿戴技术通过融合材料技术和信息技术, 结合大数据平台、移动互联网对人体相关信息进行收集、处理和反馈, 成为新的数据流量入口, 因此, 可穿戴设备势必成为移动互联网时代的新宠。自 2014 年开始, 随着硬件热潮、并购热潮以及投资热潮的出现, IT、科技巨头纷纷推出可穿戴产品, 在行业内掀起了一场可穿戴热潮; 在之后的全球移动通

信大会上, 可穿戴设备再次成为媒体聚焦的重点。可穿戴硬件设备的柔性化、可穿戴设备与服装的集成已成为 21 世纪科技公司和学术研究的热点领域之一。如 2016 年谷歌公司 I/O 开发者大会上, 谷歌联合 Levi's 推出了一款智能夹克——Project Jacquard。2017 年, 美国专利商标局公布了苹果公司的 3 种智能织物发明专利: 可识别触摸手势的触敏纺织装置、具有嵌入式输入输出设备的 3D 织物结构、具有嵌入式电子元件的织物。可以看出, 现在

收稿日期: 2018-02-01 修回日期: 2018-09-11

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51573133)

第一作者简介: 孙悦(1993—), 女, 博士生。主要研究方向为可穿戴电子智能纺织服装技术。

通信作者: 刘雍, E-mail: liuyong@tjpu.edu.cn。

的服装不仅具有保护人体、维持热平衡、时尚美观等基本功能,且能够实现信息传递、娱乐通信、监测健康等特定功能^[2],增加了服装的功能性、时尚性和科技含量。可穿戴设备与服装的融合可为人类提供更为便利的智能服务^[3],尤其是在医疗保健、运动健身和休闲娱乐等领域具有广阔的应用前景。

然而,目前市场上存在的可穿戴产品绝大部分以“戴”为主,而“穿”的产品屈指可数。以智能手环、手表、眼镜为主流的可穿戴设备并不是收集数据、传递信息的最佳选择,也不是放置传感器的最佳位置。与之相比,服装作为消费者的刚性需求,具有柔软、舒适、可折叠、长期穿着等无可比拟的优势,更易被消费者所接受。目前,可穿戴设备与服装的整合正处于起步阶段,没有明确的标准对其进行评价。此外,在纺织服装领域中,对可穿戴设备发展的相关文献报道较少。本文对可穿戴技术在纺织服装领域的发展进行系统叙述,对柔性电子常用的功能性材料和服装中的主要柔性设备进行分类,力图全面展现基于纺织服装可穿戴设备的研究现状和最新进展,以期在智能纺织服装的创新发展中,推动智能服装成为新一代的可穿戴设备,为可穿戴科技产品注入新鲜血液,并带动传统纺织服装行业的转型升级。

1 可穿戴设备在纺织服装上的应用

可穿戴设备与纺织服装的结合始于 20 世纪 70 年代末,当时的电子产品体积大且功能单一,而纺织品只是作为特殊的载体来安装电子器件(如可穿戴的计算机)用于医疗、军事和航空航天等特殊领域^[4]。之后,可穿戴设备处于发展阶段,产品相继出现提升了公众的认知。1997 年,第 1 套穿戴式电子服装是由飞利浦服装设计公司、电子研发公司以及 Levi's 公司共同研发的系列电子服装,包含娱乐和通信功能^[4]。随着新型有机材料、芯片高度集成化以及柔性电子技术的发展,电子元件趋于微型化、柔性化,加速了服装与电子产品的融合。2004 年,Starlab 研制的真正用于日常穿着的男士智能化衬衫问世;2009 年,美国 MIT 媒体技术实验室开发的可接入互联网系统的服装标志着一个全新的电子纺织时代的到来^[5]。

2012 年以来,可穿戴设备随着移动网络的快速发展而呈现出爆发式增长,出现了一系列以智能手环、智能手表、智能眼镜以及智能跑鞋等为主的可穿戴产品,具有实时监测人体的各项生理参数、运动指标、通信和定位等功能。2014 年 Mimo 推出了 1 款婴儿连体衣,通过安装在服装表面的感应器来监测

婴儿的呼吸^[6]。2016 年,利用虚拟现实技术开发出 VR 眼镜和 VR 头盔等设备。这些可穿戴设备大都以佩戴为主。在可穿戴智能服装中,大部分电子器件都进行了硬壳保护,为穿着舒适性和可机洗性带来一定的问题。为使电子设备与纺织品更易结合,纺织服装行业和电子产业正积极寻求解决办法,谷歌与 Levi's 公司合作,利用导电纱线制成电容式触控感测器连接织物控制器^[7],再与服装面料融合,利用织物来控制移动设备,开辟了可穿戴全新的交换方式。

总而言之,利用功能性材料通过纺织服装加工的方式生产具有电子性能的柔性器件,使二者在保持自身特有的功能下完美融合,是未来智能可穿戴发展的重要趋势。

2 柔性可穿戴设备、材料与制备工艺

一般来说,柔性可穿戴设备的发展大致经历了 3 个阶段:刚性化—柔性化—智能化,未来必将朝着信息精准化方向迈进。一种新材料的出现往往都会产生新一代器件及其相应的制作工艺。例如,半导体硅材料的出现决定了传统微电子采用硬质硅基板或平面玻璃,而要制造这些固态电子设备又使光刻技术得以发展^[8]。20 世纪 60 年代对有机材料电学性能的研究以及导电聚合物的相继发现,柔性基材取代传统的刚性基板,溶液化工艺取代光刻工艺,提高了生产效率,降低了制造成本,极大地推动了柔性电子的发展。

对于电子智能纺织品而言,除具备柔韧性和可机洗外,还要满足信号传输等要求,因此,人们越来越重视导电纤维的开发和应用。智能纺织品所用的导电纤维主要分为 2 种:直接导电和经后处理得到的导电纤维^[9]。一般而言,直接导电的纤维有拉丝、切削获得的金属纤维和导电高分子材料直接纺丝形成导电高分子纤维。然而,金属纤维手感较差,通常需要与普通纤维进行混纺制备导电织物。另一种通过后处理可得到导电纤维,如喷涂导电涂层、纤维表面吸附导电物质、掺杂碳黑、金属化合物与成纤维物质混合纺丝获得导电纤维。导电纤维的研制极大地推动了可穿戴设备与服装面料的融合,但在使用过程中仍需考虑导电纤维的力学强度和耐水洗等性能。

可穿戴设备的柔性化和智能化需要柔性基底为依托。目前,主要利用纤维、纱线、织物、聚合物薄膜和导电涂层等柔性材料来制备柔性可穿戴电子设备。表 1 示出制备柔性可穿戴基材常用的材

料和制作方法。可以看出,涂层和掺杂是目前获得功能性材料的主要方法。尤其是将低维纳米材料掺杂在聚合物中获得复合材料可弥补单一材料的不足,能够显著提高材料的综合性能,因此,被广泛用于柔性电子器件的制作。利用编织、刺绣、组合等方法对柔性基材进行结构设计获得所需性能的电子元件,借助纺织工艺集成到服装中^[10],然后通过无线通信技术与软件建立联系,实现数据传输与信息处理等功能。

表 1 制备柔性基材常用材料和方法

Tab.1 Common materials and methods for preparing flexible substrates

材料类型	常用物质	制作方法
金属材料	Ag、Cu、Au、Ni	化学镀、电镀、磁控溅射、涂层
纳米材料	碳纳米管、银纳米线、石墨烯、ZnO 纳米线/棒	填充/掺杂、涂覆、沉积
导电聚合物	聚苯胺、聚吡咯、聚噻吩	纺丝、涂覆、沉积
导电涂料	导电碳黑、导电银墨	丝网印刷、3D 打印
绝缘材料	硅橡胶、聚酯、聚二甲基硅氧烷、聚酰亚胺	旋涂、喷涂

通过上述方法制备的柔性材料,虽然在一定程度上改善了刚性器件的不足,但用于日常可穿戴服装中仍需要解决材料自身存在的问题,表 2 概括了纤维、膜和涂层在开发可穿戴设备中的优缺点。

表 2 可穿戴传感器柔性化的比较

Tab.2 Comparison of wearable sensor flexibility

柔性基材	优点	缺点
金属纤维与普通纤维包缠	柔软度明显改善	拉伸性差、穿着舒适性差
金属、高分子聚合物薄膜	弯曲和可拉伸性增强、应用范围扩大	需高密度严格处理、电高聚物高温下不稳定
纳米复合材料纺丝/膜	服用性、导电性、灵敏度提高	纤维力学性能受到影响
印刷导电油墨	低成本、高柔性、批量化	黏附性、水洗稳定性有待进一步研究

3 柔性可穿戴设备的类型

可穿戴设备目前尚没有统一的分类标准^[11]。根据利用纺织品等柔性材料制成的可穿戴设备进行分类,主要可分为信号感测、收集与数据传输装置,自供电、能量收集与管理装置,纺织天线 3 种典型柔性可穿戴设备。

3.1 信号感测、收集与数据传输装置

3.1.1 传感器

传感器可通过将生理或环境信号转换成电信号来提供用户和电子系统之间的接口^[12]。适用于可穿戴设备的传感器主要有生物传感器、动作传感器

和环境传感器 3 大类,且这些传感器存在刚性和柔性之分。由于技术成熟、工艺水平完善,刚性传感器成为可穿戴设备中最主要的形式^[13]。虽然这类传感器具有良好的电学性能,但存在强度大、不易弯曲等缺点,很难在复杂表面进行检测,限制了其应用范围。柔性电子技术推动了可穿戴传感器柔性化的进程。目前,使用功能纱线或织物直接织制具有优良电性能的元素一直是纺织业和电子行业努力追求的目标。

新材料的出现推动新设备的研发。20 世纪 70 年代末,金属纤维被广泛应用于纺织行业,因其良好的导电性和可弯曲性,与纺织纤维包缠获得新型金属复合纱线开发触摸传感器^[14],明显改善了传感器的柔软度,但金属纤维易断裂。之后有机材料、薄膜技术和纳米材料的发展,促使出现了一系列具有电性能的纱线、织物和薄膜。利用材料特性、结构设计,以纺织材料为基材制备不同类型的传感器是当前的研究趋势:如利用碳纳米管在拉伸变形时电阻变化的特性制备应变传感器;利用聚偏二氟乙烯的压电性来制备压电传感器以及“三明治”结构的电容传感器。然而,大多数报道的柔性传感器仍处于实验室研发阶段,虽然具有监测运动、心率、呼吸等特殊功能,但真正产业化的设备寥寥无几。

基于传统纺织材料,通过溶液化工艺和特殊的结构设计是制备高灵敏度柔性可穿戴传感器的有效方法^[15-17]。图 1 示出电容式压力传感器的典型制备过程,包含聚合物涂层、浸渍/掺杂、纺织结构设计等方法。Lee 等^[18]在氨纶纤维表面涂覆聚(苯乙烯-丁二烯-苯乙烯)(SBS),然后放在含 Ag⁺ 溶液中浸渍并将其还原转化成银纳米颗粒,最后涂覆聚二甲基硅氧烷(PDMS)获得高灵敏度、优异耐久性、快速响应和松弛时间的高导电纤维,并将其彼此垂直堆叠制造电容式纺织压力传感器。除使用功能性纤维外,还可在柔性聚合物基底上通过纺织工艺与服装结合制备电子元件。在织物表面直接进行图案化处理也是近年来制备传感器广泛应用的方法。通常利用石墨烯、碳纳米管、银纳米线、导电碳黑以及 2 种物质混合制成的导电涂料,或织物上沉积石墨烯氧化物(GO)、ZnO 纳米结构、导电银胶等物质开发高灵敏度柔性传感器^[19-20]。虽然,在此基础上已开发了电容、压阻、压电、光电、电化学和湿度等多种操作类型的传感器,然而,织物与材料间的黏附性以及设备的水洗稳定性仍需进一步的研究。

3.1.2 电极

服装中使用电极主要用来采集与人体有关的生物电信号。早期粘贴式 Ag/AgCl 湿电极^[21]克服了

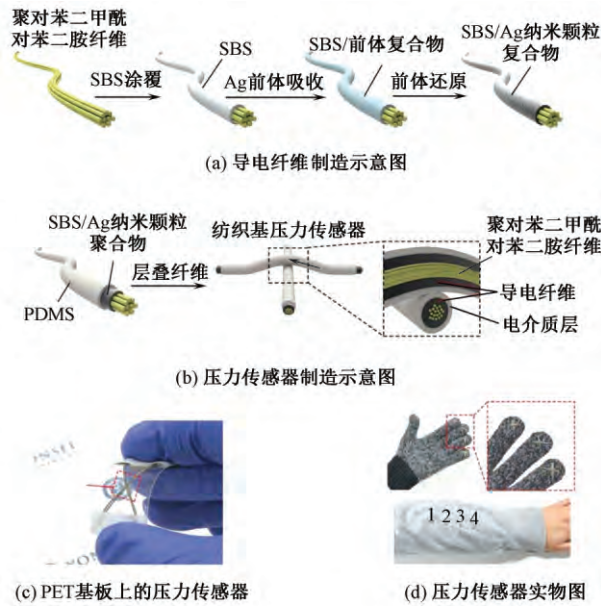


图 1 电容式压力传感器制作示意图及实物照片
 Fig.1 Schematic illustration and picture of fabrication of capacitive pressure sensor. (a) Manufacture of conductive fiber; (b) Pressure sensor manufacturing; (c) Pressure sensor on a PET substrate; (d) Picture of pressure sensor

刚性电极的不足,可快速适应身体形状从而减少运动伪影,更好地接触皮肤降低界面阻抗,由于其较低的成本和良好的性能而被广泛使用^[22]。然而,电极中的凝胶不但会对皮肤产生刺激,还可随时间脱水造成信号降解,不利于心电信号的长期监测。而织物干电极由于具备柔软、舒适、透气和实时采集^[21]等优势,不需要配合导电膏和皮肤,可直接用来测量生物电势信号,因此,成为最具竞争力的研究对象。根据电极和皮肤之间的耦合方式将干电极分为表面电极、穿透电极和电容电极 3 类^[23]。

织物干电极分机织、针织和非织造结构^[21],其中非织造材料具有良好的力学性能和低制造成本,因此,广泛用来开发织物电极。通常,在非织造织物上沉积金属薄膜、导电复合材料、导电涂料或导电纱线刺绣制作纺织电极^[24-25]。Murat 等^[26]在丙烯酸弹性体熔喷非织造布上,通过丝网印刷 Ag/AgCl 导电油墨来制造多层结构干电极,用于心电图(ECG)监测,如图 2 所示。采用聚合物、3D 打印^[27]制作的微针电极逐渐代替了硅和金属微针电极,该微针阵列电极以相对低的压缩力插入皮肤中,并且在电极和皮肤之间保持稳定的接触阻抗,可记录形状和振幅具有良好保真度的肌电图(EMG)、ECG 和脑电图(EEG)信号,有利于生物信号收集^[28]。但需要进一步研究可用于长期监测的电极的皮肤生物相容性、力学和电学稳定性等性能^[23]。关于电容电极的

开发相对较少,仍有极大的研究发展空间。

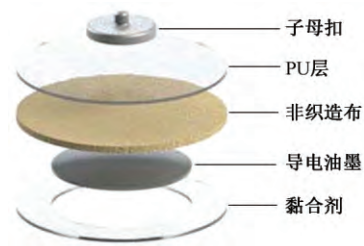


图 2 多层结构干电极示意图
 Fig.2 Schematic illustration of multilayer structure dry electrode

3.2 能量收集与管理装置

3.2.1 电池

由于需要进行电信号处理,电池一般是可穿戴设备的重要部件。目前,大部分可穿戴设备安装的均为质量轻、形状和尺寸多变的锂聚合物电池。电池的续航能力短、制作成本较高等问题制约了可穿戴设备的发展。针对服装中的柔性可穿戴设备,克服传统电池不能弯曲的刚性特征,一系列柔性电池被开发利用。目前,主要采用碳纳米管、石墨烯、导电聚合物、碳纸/碳纤维布和导电纸/导电织物制作柔性电极,使用传统液态和柔性固态电解质,通过打印、喷涂、沉积、层压、纺织等工艺开发可变形柔性电池^[29]。图 3 示出通过水热处理方法在钛箔表面生成纤维状的钛酸锂为负极,锰酸锂为正极,制备的具有优异弯曲性能的柔性叠层结构电池^[30]。

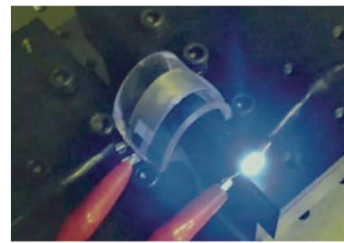


图 3 柔性叠层结构电池照片
 Fig.3 Photograph of flexible battery with layered structure

LG 公司开发了一款具有极佳弯曲和扭转能力的电缆型电池,在 PET 无纺隔膜组装成的空心结构中灌注电解液,以螺旋型的 Ni-Sn 合金为负极,铝箔-钴酸锂(LCO)为正极的新型电池^[31],如图 4 所示。此外,为克服锂离子电池的容量和能量密度问题,开发了 Li-S 电池、太阳能电池和燃料等柔性电池^[32]。

3.2.2 自供电设备

能量采集和自供电设备是指可利用光、风、热

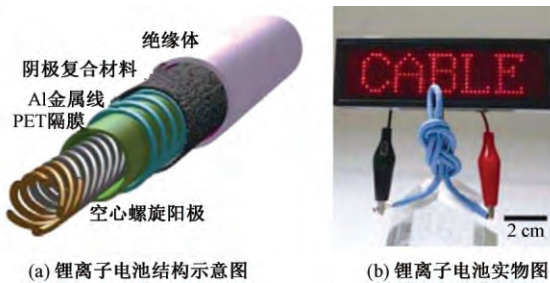


图 4 螺旋形金属线负极的空心电缆锂离子电池
Fig. 4 Cable-shaped Li-ion batteries based on hollow-spiral anode metal materials. (a) Schematic of Li-ion batteries; (b) Photography of Li-ion batteries

能、呼吸能以及人体运动等各种能量,将其转化为电能或为可穿戴电子设备提供持续供电的装置^[33]。若将太阳能、热能和动能等清洁能源收集转化成电能以随时为电子设备充电,则通常需要将能量转换部件与能量存储部件结合起来使用。Thomas 等^[34]研制出可同时吸收和储存太阳能的服装,用纱线将由太阳能电池板和超级电容器组成的铜带编织在一起,嵌入到服装中从而实现可穿戴,这种自供电设备避免了因蓄电池体积大、不易携带造成充电困难的问题。除上述这种能量采集方式外,利用风能、蒸汽、热电等能量转换部件与二次电池、超级电容器等能量存储部件联合使用的自供电系统为柔性可穿戴设备提供了新的思路和途径,有望取得突破性进展。如利用温差发电的可穿戴设备——热电发电机,可将热能直接转化成电能^[35]。目前,掺杂 Bi_2Te_3 的合金在热电中处于主导地位^[36],为减少热电材料和互连线材料的电/热损失,人们致力于开发导热系数低的热电材料和低电阻的连接线,并已研究出采用柔性导电聚合物和印刷导电图案来提高热电发电机输出功率的热电发电机^[37]。此外,电阻很低的 EGaIn 液态金属互连线已问世,将用于连接温差电元件^[38],为制备性能更高的柔性可穿戴热电发电机提供了可能。但是另一方面,目前柔性电热自供电设备的输出效率远低于刚性电热设备,制约了柔性热电材料与器件的发展。

近年来,由于摩擦电纳米发生装置(TENG)易于制造且在机械能采集和自供电传感方面性能优异,因此,被广泛研究^[39]。利用 2 种不同材料间因外力导致接触面积的变化使各自带有相反的电荷(通常金属涂层带正电和聚合物带负电)或利用织物上生长氧化锌纳米线/纳米棒压电材料受力变化从而产生电流^[40-41],通过编织、组合制成柔性电子装置并整合到服装上。图 5 示出聚对二甲苯/镍/聚酯摩擦电纳米发生装置制作示意图。尽

管近几年许多研究报道了基于聚合物和金属薄膜的柔性可穿戴摩擦电纳米发生装置,但有机柔性衬底存在不耐高温、稳定性和透气性较差等缺点,仍迫切需要开发轻质、柔软、透气、可洗涤、可拉伸的纺织摩擦电纳米发电装置^[42]。将能量转换装置与超级电容器等能量存储装置联合集成到服装面料中,为可穿戴电子设备持续供电开辟了一条新途径。

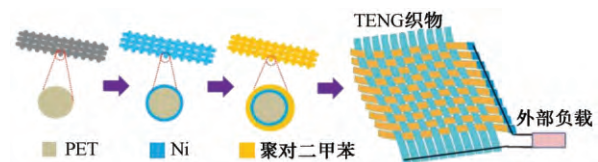


图 5 聚对二甲苯/镍/聚酯摩擦电纳米发生装置示意图

Fig. 5 Schematic illustration of Parylene/Ni/Polyester triboelectric nanogenerators

3.2.3 超级电容器

超级电容器作为一种新型储能装置,其作用类似于电池,具有充电时间短、使用寿命长、可多次充放电、绿色环保等特点。超级电容器常用的电极材料主要有碳材料、金属氧化物和导电聚合物,提高电极材料的比表面积、导电性能及孔径是提高超级电容器的质量比电容和能量密度的关键^[43]。现已用碳纳米管和聚吡咯纳米线与柔性纺织纤维复合制备出纤维状柔性超级电容器^[44],可通过丝网印刷技术直接在纺织品上打印出超级电容器。此外,将超级电容器与能量收集装置结合,制造出既能产生电能又能储存电能的织物状电子元件^[45],如图 6 所示。

3.3 纺织天线

天线是能够将传输线上传输的导行波转换成在自由空间中传播的电磁波,或者进行相反变换的一种变换器,是用来发射或接收电磁波的装置。通过织物来实现人体无线通信网络是未来无线通信的重要发展方向之一^[46],微带天线因其具有薄剖面、体积小、质量轻和易于共形等优点易实现多频带、圆极化等形式,是可穿戴天线中研究最多的一类^[47]。辐射贴片是纺织天线中最核心的部件,通过前面制作导电材料的方法可制备性能不同的辐射单元。贴片和接地板使用的导电材料通常是铜箔、铜、镍、银金属涂层、导电银或铜墨、导电聚合物以及其复合材料等^[48-49];而介质板即纺织天线的基底使用介电常数低的柔性纺织品^[50]。为使天线充分发挥自身的辐射作用,可将贴片设计成不同的形状,如方形、圆形、矩形、椭圆、三角形以

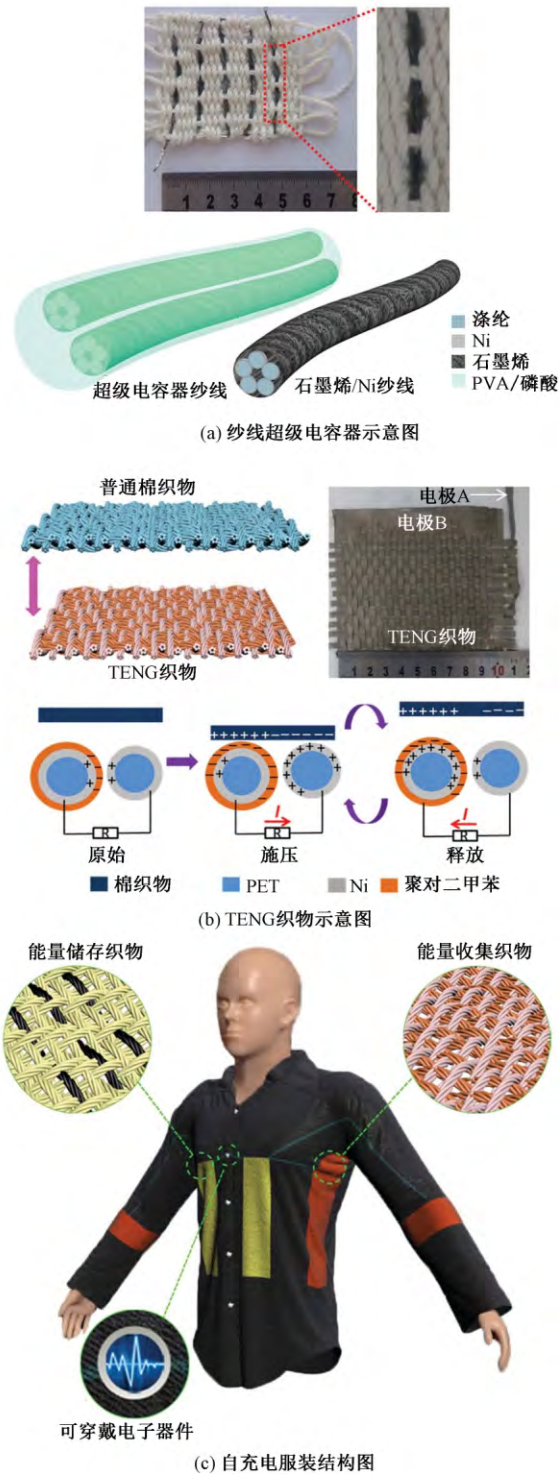


图 6 基于柔性纱线超级电容器和 TENG 织物的可穿戴自充电服装

Fig. 6 Wearable self-charging clothing based on flexible yarn supercapacitor and fabric TENG. (a) Schematic of yarn supercapacitor; (b) Schematic of textile TENG; (c) Schematic of self-charging clothing

及开槽贴片等。纺织天线大都以提高带宽和增益为目的进行设计, 兼顾质量轻、便携化、小型化、柔性化等外观特性, 广泛应用于工业、科学、医疗等领域的通信或监测系统。

4 总结与展望

未来的可穿戴设备与服装融合发展是必然趋势。如今, 智能服装通过与手机 APP、蓝牙设备及其他无线通信设备结合, 实现了可穿戴设备的智能化, 广泛应用于医疗监护和运动健身等领域。但可穿戴设备存在电池续航能力差、产品同质化、缺乏独立性、设计感不足、价格昂贵等突出问题。除此之外, 技术、应用和交互三大挑战限制了可穿戴电子智能服装的发展。在技术方面, 传感器的精准度和灵敏度有待进一步改善; 在应用方面, 数据的采集和分析能力不足以为用户提供真正需要的信息, 限制了应用的范围和领域; 在交互方面, 电子元件不只是单一的感测、收集数据, 更应该增强人机交互和相应的反馈机制, 增强电子智能服装实用性, 因此, 应该加强新型材料的研发与应用, 优化制作工艺和方法, 提高数据收集与处理能力。

可穿戴设备与服装的结合是柔性电子技术、信息技术、纺织服装技术等高技术推动下的产物。柔性电子元件以通信技术为支撑, 以新型功能性纺织材料为基础, 不仅涉及芯片、关键部件的研制, 而且包含操作系统、数据处理等软件的开发, 克服了传统电子设备无法弯曲、拉伸、变形的刚性特征, 赋予了纺织品感知、传导、储存的电子性能, 带动了传统纺织行业的转型升级。随着科技的发展与进步, 相信未来可穿戴智能服装不仅在航空航天、军事等领域发挥重要作用, 而且成为普通人生活、工作、学习等不可或缺的一部分, 应用前景将十分广泛。 FZXB

参考文献:

[1] 黄天蓝. 可穿戴设备的服装结构与工艺研究[J]. 美与时代, 2017(5): 102 - 106.
HUANG Tianlan. Wearable clothing structure and technology research [J]. Beauty and Times, 2017(5): 102 - 106.

[2] CHOI S, KWON S, KIM H, et al. Highly flexible and efficient fabric-based organic light-emitting devices for clothing-shaped wearable displays [J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 6424.

[3] 吴茂林. 2016 年智能可穿戴式设备的那些事儿[J]. 通信世界, 2016(1): 60 - 61.
WU Maolin. 2016 smart wearable devices that those things [J]. Communication World, 2016(1): 60 - 61.

[4] KWAK S I, SIM D U, KWON J H, et al. Design of wearable communication device for body protection from EM wave using the EBG structure [J]. IEEE, 2010: 1433 - 1436.

- [5] 张灏,刘锋. 智能化电子服装的最新技术及其应用[J]. 纺织导报, 2011(12): 108-110.
ZHANG Hao, LIU Feng. New technology of intelligent electronic garments and its application[J]. China Textile Leader, 2011(12): 108-110.
- [6] WIPULASUNDARA S D. A novel concept for remotely monitoring babies [C]//Engineering Research Conference (MERCon). Moratuwa: IEEE, 2017: 299-303.
- [7] 陈墨. 谷歌联手 Levi's 推出智能服饰[J]. 纺织服装周刊, 2015(21): 49.
CHEN Mo. Google teamed up with Levi's to launch smart apparel [J]. Textile Apparel Weekly, 2015(21): 49.
- [8] 尹周平,黄永安. 柔性电子制造: 材料、器件与工艺[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 34-39.
YIN Zhouping, HUANG Yongan. Flexible Electronic Manufacturing: Materials, Devices and Technology [M]. Beijing: Science Press, 2016: 34-39.
- [9] 丁长坤,程博闻,任元林,等. 导电纤维的发展现状及应用前景[J]. 纺织科学研究, 2006(3): 32-39.
DING Changkun, CHENG Bowen, REN Yuanlin, et al. Development status and application prospects of conductive fibers [J]. Textile Science Research, 2006(3): 32-39.
- [10] STOPPA M, CHIOLERIO A. Wearable electronics and smart textiles: a critical review [J]. Sensors, 2014, 14(7): 11957-11992.
- [11] 蒋小梅,张俊然,赵斌,等. 可穿戴式设备分类及其相关技术进展[J]. 生物医学工程学杂志, 2016(1): 42-48.
JIANG Xiaomei, ZHANG Junran, ZHAO Bin, et al. Classification of wearable devices and related technologies [J]. Proceedings of Biomedical Engineering, 2016(1): 42-48.
- [12] TAO X. Handbook of Smart Textiles [M]. Germany: Springer Singapore, 2015: 129-165.
- [13] 曾天禹,黄显. 可穿戴传感器进展、挑战和发展趋势[J]. 科技导报, 2017, 35(2): 19-32.
ZENG Tianyu, HUANG Xian. Progress, challenges and trends of wearable sensors [J]. Science & Technology Review, 2017, 35(2): 19-32.
- [14] ROH J S. Textile touch sensors for wearable and ubiquitous interfaces [J]. Textile Research Journal, 2014, 84(7): 739-750.
- [15] AHN Y, SONG S, YUN K S. Woven flexible textile structure for wearable power-generating tactile sensor array [J]. Smart Material Structures, 2015, 24(7). DOI: 10.1088/0964-4726/24/7/075002.
- [16] SEIICHI Takamatsu, TAKESHI Kobayashi, NORIHISA Shibayama, et al. Fabric pressure sensor array fabricated with die-coating and weaving techniques [J]. Sensors & Actuators A: Physical, 2012, 184: 57-63.
- [17] ZHOU D, WANG H. Design and evaluation of a skin-like sensor with high stretchability for contact pressure measurement [J]. Sensors & Actuators A: Physical, 2013, 204: 114-121.
- [18] LEE J, KWON H, SEO J, et al. Sensors: conductive fiber-based ultrasensitive textile pressure sensor for wearable electronics [J]. Advanced Materials, 2015, 27(15): 2433.
- [19] REN J, WANG C, ZHANG X, et al. Environmentally-friendly conductive cotton fabric as flexible strain sensor based on hot press reduced graphene oxide [J]. Carbon, 2016, 111: 622-630.
- [20] GUO X, HUANG Y, CAI X, et al. Capacitive wearable tactile sensor based on smart textile substrate with carbon black/silicone rubber composite dielectric [J]. Measurement Science & Technology, 2016, 27(4). DOI: 10.1088/0957-0233/27/4/045105.
- [21] 肖学良,董科,何文涛,等. 可穿戴电子服装中织物电极的研究进展[J]. 服装学报, 2017, 2(1): 1-6.
XIAO Xueliang, DONG Ke, HE Wentao, et al. Progress of electronics in wearable electronic garments [J]. Journal of Clothing Research, 2017, 2(1): 1-6.
- [22] MEZIANE N, WEBSTER J G, ATTARI M, et al. Dry electrodes for electrocardiography [J]. Physiological Measurement, 2013, 34(9): 47-69.
- [23] YAO S, ZHU Y. Nanomaterial-enabled dry electrodes for electrophysiological sensing: a review [J]. JOM, 2016, 68(4): 1-11.
- [24] TRINDAD I G, MACHADOD S J, MIGUEL R, et al. Design and evaluation of novel textile wearable systems for the surveillance of vital signals [J]. Sensors, 2016, 16(10): 1573.
- [25] SAHITO I A, SUN K C, ARBAB A A, et al. Graphene coated cotton fabric as textile structured counter electrode for DSSC [J]. Electrochimica Acta, 2015, 173: 164-171.
- [26] YOKUS M A, JUR J S. Fabric-based wearable dry electrodes for body surface biopotential recording [J]. IEEE Transactions on Bio-medical Engineering, 2016, 63(2): 423-430.
- [27] SALVO P, RAEDT R, CARRETTE E, et al. A 3D printed dry electrode for ECG/EEG recording [J]. Sensors & Actuators A: Physical, 2012, 174(1): 96-102.
- [28] REN L, JIANG Q, CHEN K, et al. Fabrication of a micro-needle array electrode by thermal drawing for bio-signals monitoring [J]. Sensors, 2016, 16(6): 908.
- [29] 刘冠伟,张亦弛,慈松,等. 柔性电化学储能器件研究进展[J]. 储能科学与技术, 2017, 6(1): 52-68.
LIU Guanwei, ZHANG Yichi, CI Song, et al. Research progress on flexible electrochemical energy storage devices [J]. Chinese Journal of Energy Storage, 2017, 6(1): 52-68.

- [30] WANG X, LIU B, HOU X, et al. Ultralong-life and high-rate web-like $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$, anode for high-performance flexible lithium-ion batteries [J]. *Nano Research*, 2014, 7(7): 1073–1082.
- [31] KWON Y H, WOO S W, JUNG H R, et al. Cable-type flexible lithium ion battery based on hollow multi-helix electrodes [J]. *Advanced Materials*, 2012, 24(38): 5192–5197.
- [32] 史菁菁, 郭星, 陈人杰, 等. 柔性电池的最新研究进展 [J]. *化学进展*, 2016, 28(4): 577–588.
SHI Jingjing, GUO Xing, CHEN Renjie, et al. Recent advances in flexible batteries [J]. *Progress in Chemistry*, 2016, 28(4): 577–588.
- [33] 佚名. 散散步 吹吹风 就能充电的“神奇衣物” [J]. *聚氨酯工业*, 2016(10): 48.
ANONYMOUS. Walk and wind, you can charge the "magic clothing" [J]. *Polyurethane Industry*, 2016(10): 48.
- [34] CHAO L, ISLAM M M, MOORE J, et al. Wearable energy-smart ribbons for synchronous energy harvest and storage [J]. *Nature Communications*, 2016(7): 13319.
- [35] BELL L E. Cooling, heating, generating power, and recovering waste heat with thermoelectric systems [J]. *Science*, 2008, 321(5895): 1457–1461.
- [36] CRISPIN D X. Retracted article: towards polymer-based organic thermoelectric generators [J]. *Energy & Environmental Science*, 2012, 5(11): 9345–9362.
- [37] MENON A K, YEE S K. Design of a polymer thermoelectric generator using radial architecture [J]. *Journal of Applied Physics*, 2016, 119(5): 1457–1461.
- [38] SUAREZ F, PAREKH D P, LADD C, et al. Flexible thermoelectric generator using bulk legs and liquid metal interconnects for wearable electronics [J]. *Applied Energy*, 2017, 202: 736–745.
- [39] ZHAO Zhizhen, YAN Casey, LIU Zhaoxian, et al. Wearable technology: machine-washable textile triboelectric nanogenerators for effective human respiratory monitoring through loom weaving of metallic yarns [J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(46): 10267–10274.
- [40] GUO Y, LI K, HOU C, et al. Fluoroalkylsilane-modified textile-based personal energy management device for multifunctional wearable applications [J]. *Acs Appl Mater Interfaces*, 2016, 8(7): 4676–4683.
- [41] SEUNG W, GUPTA M K, LEE K Y, et al. Nanopatterned textile-based wearable triboelectric nanogenerator [J]. *Acs Nano*, 2015, 9(4): 3501–3509.
- [42] PU X, LI L, SONG H, et al. A self-charging power unit by integration of a textile triboelectric nanogenerator and a flexible lithium-ion battery for wearable electronics [J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(15): 2472–2478.
- [43] 王艺颖, 代兴玉, 聂文琪, 等. 面向柔性超级电容器的石墨烯/聚吡咯电极材料的研究 [J]. *产业用纺织品*, 2017, 35(2): 1–7.
WANG Yiyang, DAI Xingyu, NIE Wenqi, et al. Study on graphene/polypyrrole electrode material for flexible supercapacitor [J]. *Technical Textiles*, 2017, 35(2): 1–7.
- [44] 黄三庆, 林文阵, 陈佩珊, 等. 基于聚酯纤维制备纤维状柔性超级电容器 [J]. *电子元件与材料*, 2016, 35(9): 82–87.
HUANG Sanqing, LIN Wenzhen, CHEN Peishan, et al. Polyester-based fibers made of flexible fibrous supercapacitor [J]. *Electronic Components and Materials*, 2016, 35(9): 82–87.
- [45] 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.
- [46] 周祥. 织物电磁特性及纺织天线的研究 [D]. 苏州: 苏州大学, 2010: 10–14.
ZHOU Xiang. Electromagnetic characteristics of textile fabrics and textile antenna [D]. Suzhou: Soochow University, 2010: 10–14.
- [47] 俞梦杰. 两种可穿戴天线的研究和设计 [D]. 大连: 大连海事大学, 2014: 21–57.
YU Mengjie. Two kinds of wearable antenna research and design [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2014: 21–57.
- [48] KOSKI K, VENA A, SYDANHEIMO L, et al. Design and implementation of electro-textile ground planes for wearable UHF RFID patch tag antennas [J]. *IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters*, 2013, 12(99): 964–967.
- [49] LUI K W, MURPHY O H, TOUMAZOU C. A wearable wideband circularly polarized textile antenna for effective power transmission on a wirelessly-powered sensor platform [J]. *IEEE Transactions on Antennas & Propagation*, 2013, 61(7): 3873–3876.
- [50] ALEMARYEEN A A, NOGHANIAN S. AMC integrated textile monopole antenna for wearable applications [J]. *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, 2016, 31(6): 612–618.