

# 柔性传感器在智能可穿戴中的应用研究进展

王 银,王 萍,匡才远\*,秦 芳

(金陵科技学院,江苏 南京 211169)

**摘 要:**智能可穿戴是一项多学科综合交叉的新兴技术,作为其重要组成部分的柔性传感器受到各国科研院所、技术研发企业等的广泛关注。从智能可穿戴技术出发,以传感器物理感知性能为分类依据,综述了近5年柔性传感器的应用研究进展;归纳了目前智能可穿戴技术中柔性传感器在生理参数监测、动作监测以及环境监测领域的应用,以期推动智能可穿戴技术的发展。

**关键词:**柔性传感器;人工智能;可穿戴

**中图分类号:**TP212.9

**文献标识码:**A

**文章编号:**1673-0356(2020)07-0013-04

智能柔性可穿戴产品是一种由功能部件、显示部件和绑定部件组成,具有可穿戴性、便携性、智能性的特征,并且能够穿戴在用户身体上进而发挥其特定功能的智能产品<sup>[1]</sup>。近年来,随着互联网、超级计算、大数据、脑科学等高新技术的兴起,人类进入了智能化时代。各国为了占领智能柔性可穿戴领域的技术制高点,纷纷制定研发计划,着力突破技术难关<sup>[2]</sup>。其中,柔性传感器充当智能可穿戴设备的功能部件,成为相关人员的重点。以传感器物理感知性能作为分类依据,智能可穿戴中柔性传感器可分为电-力学、气体学、光纤学三大类。总结了目前嵌入柔性传感器的智能可穿戴产品的三大应用领域,即生理参数监测、动作监测以及环境监测。

## 1 智能可穿戴柔性传感器的分类

### 1.1 柔性电-力学传感器

柔性力学传感器是一种由基本电路、力学敏感元件和转换元件组成,可以将压缩、拉伸、弯曲等特定力学信息通过某种转换机制转换成电信号输出的智能可穿戴器件。2018年,田明伟等<sup>[3]</sup>依据敏感元件的不同,将力学传感器归类为电容式力学传感器与电阻式力学传感器。2019年,黄武桐<sup>[4]</sup>通过采用氧化石墨烯等材料,制备出具有高灵敏度、高识别度、高抗外界干扰能力的可穿戴柔性电阻式力学传感器。该传感器采用双

层电阻设计,不仅能够用于检测小于25 Pa的压力,还能用于监测不同材料表面的粗糙度、音乐的节奏、手腕处的脉搏及人体的呼吸等,用途广泛。同年,孙旭光等<sup>[5]</sup>以碳纳米管-聚合物为基础,研究出一种可拉伸、高灵敏度、可量产、适合大面积制作的6×8柔性压阻触觉传感器阵列,解决了触觉传感器的高灵敏度与空间分辨率结合度不足的问题。

美国 Tekscan 公司研发的 Flexiforce 柔性电阻式压力传感器不仅使用、携带方便,而且在滞后性、灵敏度、漂移等方面具有优良性状。2017年,庞欣等<sup>[6]</sup>借助该传感器,研究压力袜不同部段的人体压力,验证了人体大腿、小腿、脚踝等部位压力值符合压力袜的设计。2019年,李思明等<sup>[7]</sup>将质量分数为20%的不锈钢颗粒嵌入黏胶导电纤维中纺成纱线,织造出柔性压力传感器,通过研究压力监测袜应变与压力的关系,得出传感器的灵敏度与电阻值随着压力的增加而降低直至不变的结论。

导电纤维与导电纱线在智能可穿戴领域扮演了重要的角色,针织导电织物通过导电纱线在受力变形时产生电阻传感,是未来高端纺织业的发展方向<sup>[8]</sup>。2016年,蔡倩文等<sup>[9]</sup>通过研究镀银纤维、铜纤维、不锈钢微丝与铜丝等导电纤维与黏胶及弹力锦纶/氨纶包芯纱混织,得出此5种材料均适合柔性传感器的制作,其中镀银纤维导电性最佳,铜丝织造的柔性传感器手感较差,需要后续研究改善。2019年,王晓等<sup>[10]</sup>采用铜纳米材料线,得到一个可以反复拉伸或弯折也能保持优良导电性能的电极。

### 1.2 柔性气体传感器

氨气(NH<sub>3</sub>)是一种具有腐蚀性和强烈刺激性的气

收稿日期:2019-11-19

项目基金:中国纺织工业联合会科技指导性项目(2016060);江苏省“青蓝工程”;江苏高校哲学社会科学基金项目(2017SJB0489、2017SJB0491)

作者简介:王 银(1997-),男,本科在读,研究方向:服装设计与工程。

\*通信作者:匡才远,副教授,E-mail:kcy@jit.edu.cn。

体,对环境和人类的危害都非常大,所以对  $\text{NH}_3$  的监测非常重要,柔性气体传感器应运而生。柔性气体传感器是一类由转换元件和敏感元件组成,能够将被检测气体中特定成分的浓度转换成一定规律电信号的装备或器件,被广泛运用于智能可穿戴设备、环境保护、军事等方面。2018年,聂清欣<sup>[11]</sup>通过选用  $\text{SiO}_2$  等材料,将其制成纳米纤维膜,然后运用原位聚合、静电纺丝、溶胶凝胶等技术,制备出柔性  $\text{SiO}_2$ /聚苯胺(PANI)复合纳米气敏传感器,用以监测大气中  $\text{NH}_3$  含量,确保空气指数在可控、可监测范围。2019年,李思琦<sup>[12]</sup>聚焦聚苯胺等纳米复合敏感材料,利用水热法和原位化学氧化聚合法等,制备了一种具有高灵敏度的室温柔性  $\text{NH}_3$  传感器。同年,刘春华通过利用不同材料之间的协同效应,将聚苯胺与不同  $\text{NH}_3$  敏感材料进行复合,有效提高了薄膜电阻式  $\text{NH}_3$  传感器的灵敏度<sup>[13]</sup>。

不同人体都含有自身特有的气味,人体气味中含有丰富的个人生理信息<sup>[14-15]</sup>。李晗宇等<sup>[16]</sup>依据人体气味识别技术,通过采集不同人体气味并运用气相色谱一质谱分析,研发了一款基于传感器阵列的可穿戴电子鼻。该传感器阵列不仅可以用于识别不同的人体气味,也可以进一步开发应用到人体测试当中。

### 1.3 柔性光纤传感器

柔性光纤传感器是一类由光源、入射光纤、出射光纤、光探测器、光调制器与解调制器组成,具有将从入射光纤进入光源的光学性质转换成被调制的信号光作用的装备或器件,按照传感原理可以分为传光型传感器和传感型传感器<sup>[17]</sup>。2016年,田新宇等<sup>[18]</sup>尝试将光纤布拉格光栅传感器植入到以复合组织为基础的针织物空气层中,以此来实现低失真度对人体脉搏波的检测。

2017年,杨昆等<sup>[19]</sup>利用宏弯原理,通过研究光信号衰减与光纤弯曲曲率半径之间关系,确定了光纤传感器织物的地组织,最终实现了该传感器可通过电压值的变化反应出牵拉过程中光信号对应的织物形状的变化,以此来完成人体生理信号的监测。

2019年,曲道明等<sup>[20]</sup>通过试验确定了光栅中心波长漂移量与聚酰亚胺薄膜曲率之间的关系,建立解调、光纤传感及曲率标定装置,提出一种植入光纤光栅敏感元件的聚酰亚胺薄膜柔性曲率传感器。该柔性传感器可应用于柔性传感测量领域。

## 2 智能可穿戴柔性传感器的应用

### 2.1 生理参数监测

为了实现智能可穿戴服装的无线传输与人体生理参数采集,易红霞等<sup>[21]</sup>将传感器以镀银导电纱线的形式编织在智能可穿戴服装上,运用 ZigBee 的无线网络来采集人体的呼吸信号,继而存储于终端设备以备日后查询,推动了具有生理参数监测功能的智能可穿戴服装的发展。

压力舒适性是服装整体舒适性的重要评价标准。为了测量无缝内衣对于人体腹部产生的压力与服装舒适性,王金凤等<sup>[22]</sup>以局部添纱的形式将镀银导电锦纶纱线织进柔性传感器,简化了服装压力的测量。

SOFTCEPTOR 是一款可以进行连续监测人体心率、呼吸等生理信息的新型柔性应变传感器,它不仅弹性好、灵敏度高,还具有方便连接、可水洗、安全环保等优点,率先在全球将柔性织物与传感器结合。为了探讨该传感器更多的静态性能,方方等<sup>[23]</sup>借助 3365 INSTRON 万能试验机,试验分析了该传感器的线密度、灵敏度、重复性误差、迟滞、传感器织物弹性性能和试验数据校正,得出该传感器具有高灵敏度、良好的弹性性能,但是存在重复性误差较大等问题的结论。

虽然目前用于人体健康的智能可穿戴设备受到了社会的广泛关注,但是低成本、大面积制备易于转移和自粘性的柔性超薄膜依然面临极大的挑战。中国科学院宁波材料技术与工程研究所陈涛研究员课题组<sup>[24]</sup>从空/水界面处制备出碳纳米管(CNTs)薄膜,然后将热塑性弹性高分子(TPE)溶液喷洒在该薄膜表面,从而形成 CNTs/TPE 非对称二维 Janus 杂化膜,构成一种超薄、自粘附和自支撑的柔性传感器。该传感器不仅可以用于实时监测人体生理行为,还可用于监测声音的扰动与微小气流变化。

### 2.2 动作监测

随着物联网、互联网技术的发展与各种柔性传感器的出现,以智能可穿戴为基础的人体动作监测设备具有良好的发展前景。2015年,谢娟<sup>[25]</sup>借助镀银导电纱线设计出一款可以用来监测人体前后身肩部、肘部关节、膝部关节和腹部呼吸的智能护膝与智能 T 恤,不仅得出了各部位传感器显示的电阻与人体运动姿势存在一定响应关系的结论,还验证了智能护膝的高灵敏度。杨航等<sup>[26]</sup>借助压电薄膜传感器来采集人体进行

乒乓球运动时肘部运动姿势的数据信号,然后设计了一款信号调理电路,最终实现了乒乓球运动时挥拍次数与挥拍频率的测量。张晓峰等<sup>[27]</sup>利用原位聚合法制出3种聚吡咯导电织物,以此来实现人体上肢运动姿势的测量。温雯等<sup>[28]</sup>通过分析传感器应变—电阻数据变化,获取到人体下肢运动姿势,完成了智能运动跑步裤的设计。

2019年,高香玉<sup>[29]</sup>以智能可穿戴设备为基础,设计并研发出人体行为监测系统。该系统通过采集人体活动数据并上传到云平台进行数据分析,从而识别出人体动作,可在人体跌倒时发出报警信号。同年,廖璐璐等<sup>[30]</sup>针对大幅度人体运动姿势的测量与细微人体动作的探测,运用石墨烯等材料,制备出一款柔软、成本低、灵敏度高、电气连接方便的可穿戴传感器。

### 2.3 环境监测

随着柔性微型电路与柔性传感器的研究,大量智能可穿戴设备被运用到环境监测、健康等领域。2015年,中科院苏州纳米技术与纳米仿生研究所<sup>[31]</sup>通过制备氧化石墨烯超薄膜,构建非接触式柔性传感器,实现了对湿度宽范围、高灵敏度的检测。柔性传感器具有柔韧性好的特点,经常被集成于智能可穿戴设备中来实现体表温度的测量。Dankoco M D等<sup>[32]</sup>采用喷墨印刷的技术,将主要成分为银的热敏电阻器积淀在聚酰亚胺薄膜上,从而使该传感器具有测量人体体表温度的功能。李连辉等<sup>[33]</sup>采用喷涂成膜技术,将多壁碳纳米管等材料制成快速响应、高灵敏度的柔性纳米仿生振动传感器。该柔性传感器分辨时间短、检测范围宽,可以高质量地实时检测并记录声音信息,可以用于耳膜损伤导致的耳聋等耳部疾病的辅助治疗。

## 3 结语

虽然国内外对柔性传感器与智能穿戴的研究比较广泛,但是创新类的智能可穿戴仍然存在许多难题。未来,无论是智能可穿戴还是柔性传感器,都将朝专业化、低成本化、市场应用化与多功能方向发展。中国目前的智能可穿戴设备与柔性传感器仍然处于研发初期,但是随着相关研发技术与理论的成熟,相关行业研发模式将会逐渐从以技术为导向转换成以用户为导向,逐渐打破多学科交叉交叉的技术壁垒,走上智能可穿戴的自主研发产业化与市场运用化道路。

### 参考文献:

- [1] 白江涛.基于情感化的老年人智能穿戴产品体验设计研究[D].西安:西安工程大学,2018.
- [2] 舒伟.柔性可穿戴技术的未来——第12期纺织科技新见解学术沙龙编后记[J].纺织学报,2018,39(5):177—180.
- [3] 田明伟,李增庆,卢韵静,等.纺织基柔性力学传感器研究进展[J].纺织学报,2018,39(5):170—176.
- [4] 黄武桐.电阻式可穿戴柔性力学传感器的设计及实验研究[D].成都:电子科技大学,2019.
- [5] 孙旭光,王春凯,刘昶,等.基于碳纳米管—聚合物的柔性触觉传感器研究[J].郑州大学学报(工学版),2019,40(6):1—5.
- [6] 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),2017,37(6):759—764.
- [7] 李思明,吴官正,胡雨洁,等.压力分布监测袜的制备及其传感性能[J].纺织学报,2019,40(7):138—144.
- [8] 王晓雷,缪旭红,李煜天,等.导电纱线在针织柔性应变传感器上的应用进展[J].毛纺科技,2019,47(3):81—84.
- [9] 蔡倩文,王金凤,陈慰来.纬编针织柔性传感器结构及其导电性能[J].纺织学报,2016,37(6):48—53.
- [10] 王晓,王冉冉,施良品,等.铜纳米线的合成、优化及其透明电极的应用[J].无机材料学报,2019,34(1):49—59.
- [11] 聂清欣.SiO<sub>2</sub>/PANI复合柔性纳米纤维的制备及其氨敏性能研究[D].无锡:江南大学,2018.
- [12] 李思琦.基于聚苯胺纳米复合敏感材料的室温柔性NH<sub>3</sub>传感器研究[D].长春:吉林大学,2019.
- [13] 刘春华.聚苯胺纳米复合氨气敏感薄膜制备及特性研究[D].成都:电子科技大学,2019.
- [14] PANDEY S K, KIM K H. Human body-odor components and their determination[J]. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2011, 30(5):784—796.
- [15] LORWONGTRAGOOL P, SOWADE E, WATTHANAWISTUTH N, et al. A novel wearable electronic nose for healthcare based on flexible printed chemical sensor array[J].Sensors, 2014, 14(10):19700—19712.
- [16] 李晗宇,郑雁公,简家文.面向人体气味检测的柔性传感器阵列研究[J].传感器与微系统,2018,37(6):8—10,14.
- [17] 唐宇,刘传菊.光纤传感器及其研究现状[J].科技资讯,2009,(7):17—18.
- [18] 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.
- [19] 杨昆,王飞翔,张诚.宏弯光纤应变传感经编织物的设

计[J].纺织学报,2017,38(8):44-49.

[20] 曲道明,孙广开,孟凡勇,等.光纤植入聚酰亚胺薄膜柔性曲率传感器[J].仪器仪表学报,2019,40(1):109-116.

[21] 易红霞,龙海如,李家成.基于针织柔性传感器无线传输系统构建与测试[J].针织工业,2015,(4):59-62.

[22] 王金凤,钟斌悦,陈慰来.基于柔性传感器的无缝内衣任意围度压力研究[J].针织工业,2018,(12):55-58.

[23] 方方,朱小丹,王梦颖.一种新型柔性织物传感器的静态性能测试与评估[J].丝绸,2019,56(8):13-18.

[24] 新型.宁波材料所在非对称高分子二维复合薄膜制备及其可穿戴传感器应用方面取得进展[J].化工新型材料,2019,47(3):274-275.

[25] 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.

[26] 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,2017,24(1):41-43.

[27] 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.

[28] 温雯,方方,董金依.基于柔性应变传感器的人体下肢运动监测分析[J].纺织科技进展,2019,(2):30-36.

[29] 高香玉.基于可穿戴设备的人体行为监测方法研究[D].徐州:中国矿业大学,2019.

[30] 廖璐璐,高鲲鹏,杨汉嘉,等.面向人体运动检测的纸基柔性压力阵列传感器[J].传感器与微系统,2019,38(10):57-60.

[31] 中科.中科院在非接触式柔性传感器研究中取得新进展[J].军民两用技术与产品,2015,(1):28.

[32] DANKOCO M D, TESFAY G Y, BENEVENT E, *et al.* Temperature sensor realized by inkjet printing process on flexible substrate[J]. Materials Science and Engineering, 2016,205:1-5.

[33] 李连辉,顾杨,徐甲强,等.超灵敏、宽频域新型柔性仿生振动传感器[J].中国科学:技术科学,2017,47(6):632-638.

## Research on the Application of Flexible Sensor in Smart Wearable Devices

WANG Yin, WANG Ping, KUANG Cai-yuan\*, QIN Fang  
(Jingling Institute of Technology, Nanjing 211169, China)

**Abstract:** Smart wearable technology was a multi-disciplinary and integrated technology. Flexible sensors, which were an important part of them, were widely concerned by many countries, research institutes and technology research and development companies. Based on the intelligent wearable technology and the classification of sensor physical perception properties, the application research progress of flexible sensors in the past five years was reviewed. The application of flexible sensors in physiological parameter monitoring, motion monitoring and environment monitoring were summarized, to promote the development of intelligent wearable technology.

**Key words:** flexible sensor; artificial intelligence; wearable

### 关于《纺织科技进展》杂志 加入中国知网“优先出版”平台的启事

本刊已于2016年12月正式加入中国知网的“期刊优先数字出版”平台,可在纸质期刊出版之前,于中国知网的优先数字出版平台中出版,发布已录用、编辑、排版规范定稿的文献。欢迎广大读者、作者来函、来电咨询。