

DOI: 10.13475/j.fzxb.20180601506

基于经编间隔织物的压力电容传感器特性

孙婉, 缪旭红, 王晓雷, 蒋高明

(江南大学 教育部针织技术工程研究中心, 江苏 无锡 214122)

摘要 为实现用智能坐垫监测人体坐姿, 对人体健康进行辅助治疗的目的, 以6种不同规格的经编间隔织物为介质层制备压力电容传感器, 研究经编间隔织物压力电容传感器的静态性能。对6种传感器进行电学性能测试, 得到应力-电容曲线, 结合经编间隔织物的压缩性能, 将间隔织物电容传感器的应力-电容曲线划分为3个阶段, 分别研究每个阶段的灵敏度和线性度。结果表明: 随着压力的增加, 压力电容传感器的线性度会逐渐变差; 其灵敏度, 呈现出先逐渐增加, 而后逐渐减小的趋势。在间隔织物的压缩平台区, 电容传感器灵敏度最大, 在间隔织物压缩的弹性区, 电容传感器线性度最好。

关键词 间隔织物; 压力电容传感器; 灵敏度; 线性度

中图分类号: TS 181; TS 181.8 文献标志码: A

Characteristics of capacitive pressure sensor based on warp-knitted spacer fabric

SUN Wan, MIAO Xuhong, WANG Xiaolei, JIANG Gaoming

(Engineering Research Center for Knitting Technology, Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

Abstract In order to achieve the intelligent cushion monitoring human sitting posture to assist human health, six types of warp-knitted spacer fabrics were used as the dielectric layer to prepare pressure-capacitance sensors. The static performance of warp-knitted spacer fabric pressure-capacitance sensors was studied. Compression and electrical experiments were performed on six kinds of sensors to obtain a stress-capacitance curve. Combining the compression performance of the warp-knitted spacer fabric, the stress-capacitance curve of the sensor was divided into three stages, and the sensitivity and linearity of each stage were studied. The results show that as the pressure increases, the linearity of the capacitive pressure sensor gradually deteriorates. The sensitivity of the capacitive pressure sensor gradually increases and then gradually decreases. In the compressed platform area of the spacer fabric, the capacitive sensor has the greatest sensitivity, and in the elastic area where the spacer fabric is compressed, the capacitive sensor has the best linearity.

Keywords spacer fabric; pressure capacitive sensor; sensitivity; linearity

压力电容传感器, 是利用电容器受力时极板间距、极板面积或中间介质的改变而引起电容值变化的原理^[1], 将被测压力转化为与之一定关系的电信号输出的传感器。传统的压力传感器元器件笨重突兀, 不能随织物一起发生形变, 且人体舒适感低, 不能满足智能纺织品发展的需求, 因此促进了柔性

传感器的发展。目前, 国内对柔性压力电容传感器的研究较少, 传感器的结构也较为单一, 主要为薄膜结构, 应用于触觉感应领域^[2-3], 主要研究影响传感器静态特性的因素。国外对柔性压力电容传感器的研究起步较早, 传感器结构丰富, 不仅有织物结构, 还有纱线结构, 并且应用领域广泛, 可应用于医疗健

收稿日期: 2018-06-01 修回日期: 2018-08-07

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(JUSRP51727A); 国家轻工技术与工程一流学科自主课题资助项目(2018-28)

第一作者: 孙婉(1993—), 女, 硕士生。主要研究方向为纺织材料与纺织品设计。

通信作者: 缪旭红(1971—), 女, 教授, 博士。研究方向为纺织品结构与性能、纺织新材料。E-mail: miaoxuhong@163.com。

康、运动监测、安全防护和触觉感应: Meyer、Holleczek 等^[4-5]设计了基于间隔织物结构的压力电容传感器,实现了姿态监测;文献[6-7]设计了基于机织物结构的压力电容传感器阵列,实现了压力分布的监测;文献[8-10]设计了基于纱线结构的压力电容传感器,这种结构的传感器体积较小,主要用于触觉感应。国外对柔性压力电容传感器的研究更成熟,多为采用阵列形式,能够实现监测压力分布情况,但是国外对压力电容传感器的基本特性研究较少。而国内对织物结构的压力电容传感器几乎没有。经编间隔织物是三维立体结构,能承受较大的压力,而且经编间隔织物多用于坐垫和床垫^[11-12],因此本文采用经编间隔织物结构的压力电容传感器,用于人体坐姿监测。本文在经编间隔织物上下表面贴覆导电布,制成单个压力电容传感器,并研究其传感特性,为设计压力电容传感器阵列,实现人体坐姿监测奠定基础。

1 实验部分

1.1 间隔织物压力电容传感器的制备

本文中的压力电容传感器,是以经编间隔织物为介质,用导电布做柔性电极,贴覆在经编间隔织物的上表面和下表面,制成具有一定厚度的间隔织物电容器,尺寸规格为 10 cm×10 cm。用绝缘胶布将导线固定在导电布上,作为测量电容时夹具夹持点,如图 1 所示。当间隔织物受到压力的作用,间隔丝弯曲,上下电极间距缩小,从而引起电容值的变化,这就是间隔织物压力电容传感器的工作原理。

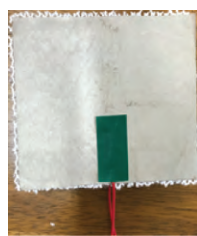


图 1 经编间隔织物压力电容传感器
Fig.1 Pressure capacitive sensor based on warp-knitted spacer fabric

传感器介质规格:传感器以经编间隔织物为介质,本文所用的经编间隔织物是在 RDN6 机器上织造的,样布由常熟源硕织造公司提供,其详细规格如表 1 所示,上下组织结构如图 2 所示。采用这 6 种规格样布,主要研究间隔丝粗细、间隔丝密度和间隔丝长度对传感器特性的影响。由经编间隔织物的压缩可知,表面结构对其压缩性能影响不大,因此本文不研究表面结构对间隔织物压力电容传感器性能的影响。

表 1 经编间隔织物规格
Tab.1 Warp-knitted spacer fabric specification parameters

编号	上表面结构	下表面结构	间隔丝直径/mm	间隔丝面密度/(根·cm ⁻²)	间隔丝长度/mm
1 [#]	结构 1	结构 1	0.16	80	22.6
2 [#]	结构 2	结构 2	0.16	64	21.0
3 [#]	结构 1	结构 1	0.18	97	29.5
4 [#]	结构 3	结构 4	0.18	63	15.5
5 [#]	结构 1	结构 1	0.20	94	30.2
6 [#]	结构 5	结构 6	0.20	91	12.1

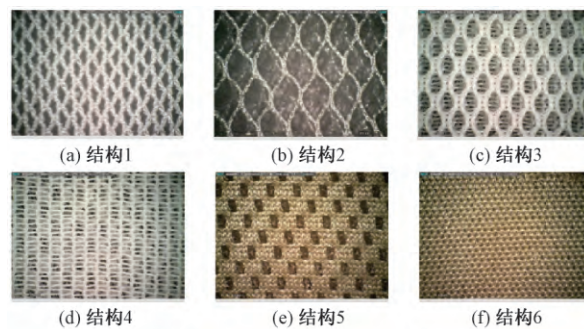


图 2 经编间隔织物表面结构

Fig.2 Surface structure of warp-knitted spacer fabric.
(a) Structure 1; (b) Structure 2; (c) Structure 3;
(d) Structure 4; (e) Structure 5; (f) Structure 6

传感器电极:电极采用一种单面胶导电布,这种单面胶导电布由深圳市永誉胶黏制品有限公司提供,是在高强度的聚脂纤维布上镀以高导电的铜与镍混合金属,再涂布以高导电性的亚克力自黏胶而成。其厚度为 0.1 mm,宽度为 10 cm,长度可根据使用情况自行剪裁,本文使用长度为 10 cm,电阻为 10⁵ Ω/cm²,具有一定的柔韧性、导电性、耐磨及抗高温性,另具较为优良的服贴性。

1.2 实验仪器与实验条件

本文主要研究间隔织物压力电容传感器的电力学性能,即力与电容的关系,采用 YF-900 压缩仪器为 TH2830 型电容测量仪器。实验温度为 16 ℃,湿度为 64%。

为减少寄生电容对实验的影响,以及防止电容与压缩仪器产生谐振现象,在压缩仪器的上下铁盘上用强力胶黏贴木块,木块与间隔织物压力电容传感器直接接触,根据作用力与反作用力原理,木块的添加并不会改变力值大小。电容测量仪器的测试速度设定为慢速,测试频率采用 100 kHz。根据 FZ/T 01051.2—1998《纺织材料和纺织制品压缩性能 第 2 部分 连续压缩特性的测定》进行压缩实验,压缩速度为 10 mm/min,样品规格为 10 cm×10 cm。实验方式如图 3 所示,每压缩 10% 的应变,记录此时的力与电容值。每种规格样品,取 5 次实验中结果

的平均值作为最后实验结果。由于间隔织物具有一定的厚度,不能进行 100%的压缩,而且随着压缩距离的减少,应力越来越大,为保证实验的精确性,当应变超过 60%时,以实际的压缩距离作为应变。

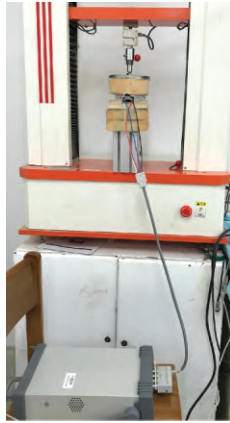


图 3 实验过程示意图
Fig.3 Experimental process

2 结果与分析

将实验数据在 Origin 中作图,得到应力-电容曲线图、应力-电容变化率曲线,结果(见图 4)和应力-应变曲线图(见图 5)。分别研究这 6 种间隔织物压力电容传感器的线性度和灵敏度。

2.1 间隔织物压力电容传感器曲线特征

由间隔织物压力电容传感器的应力-电容曲线(见图 4(a))可知,这 6 种传感器应力-电容曲线都呈现出以下规律:随着应力的增大,电容逐渐增大。当应力小于 50 kPa 时,电容的增大趋势较为急剧;当应力大于 50 kPa 时,电容的增大趋势逐渐变缓。结合间隔织物压力电容传感器的应力-应变曲线,以及对传感器的输出特性进行线性化处理的原则,将应力-电容曲线划分为 3 个阶段^[13],且这 3 个阶段对应传感器压缩的弹性区、平台区和压溃区^[14]。

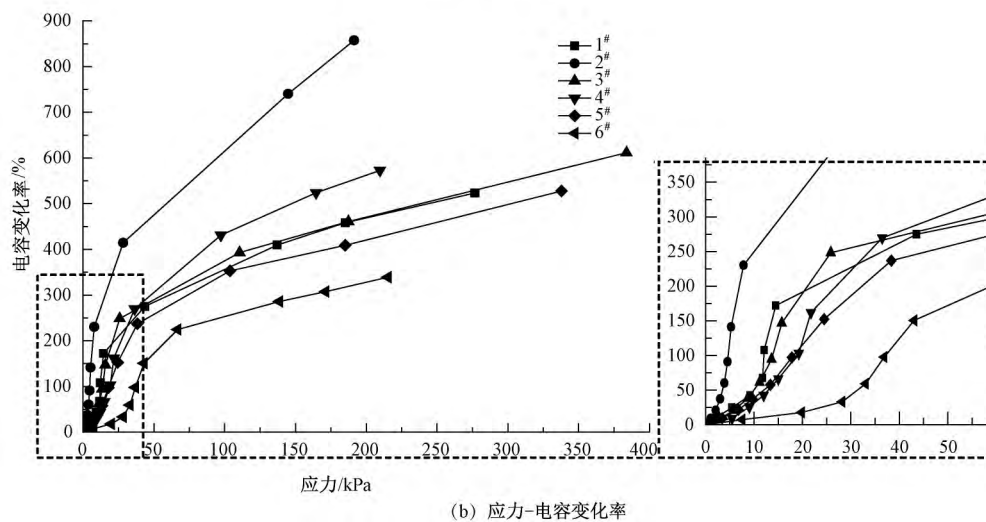
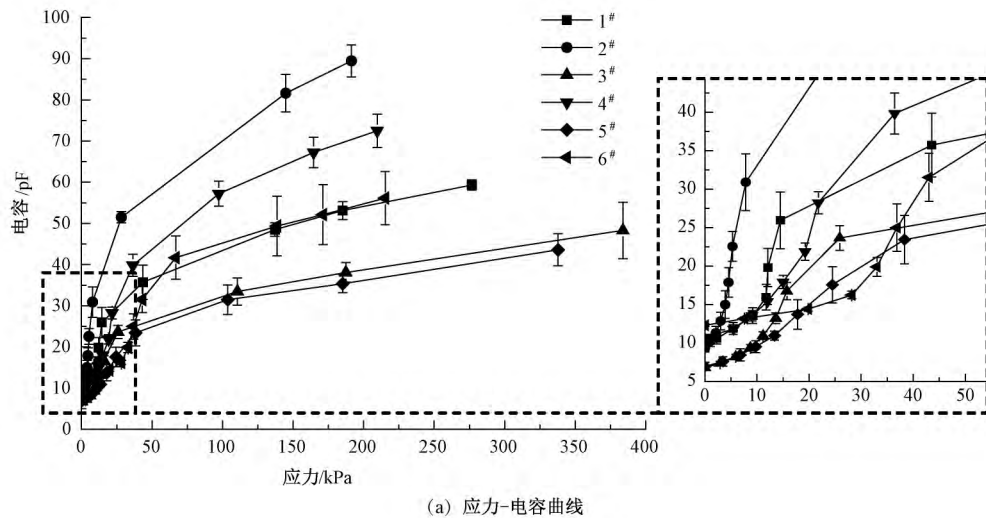


图 4 传感器的应力与电容以及电容变化率曲线

Fig.4 Sensor characteristic curve of stress-capacitance (a) and stress-relative capacitance(b)

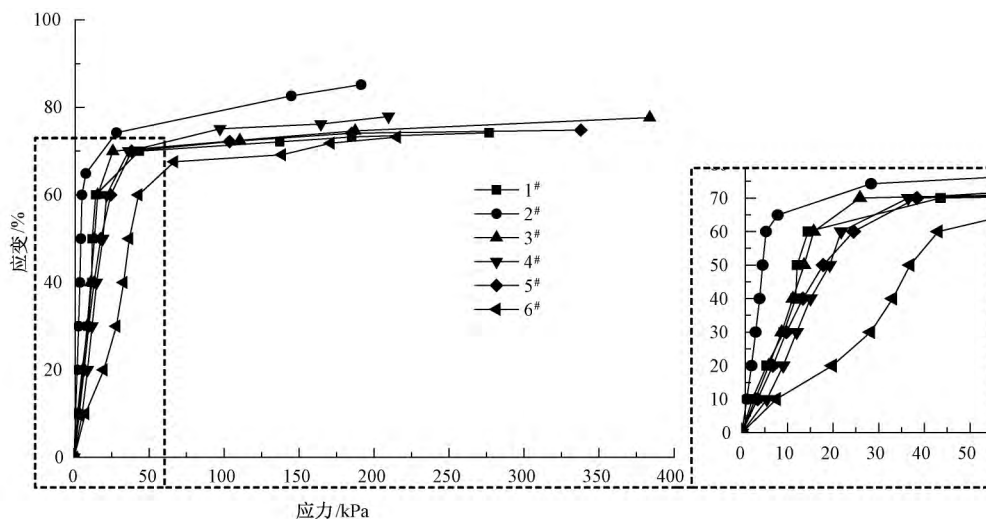


图 5 传感器的应力与应变曲线

Fig.5 Sensor characteristic curve of stress-strain

第 1 阶段为 0~30% 应变区域, 该区域为压缩的弹性区, 电容随应力的增大呈现出近似线性的增大趋势; 第 2 阶段为 30%~60% 应变区, 该区域为压缩的平台区, 电容随着应力的增大而急剧增大; 第 3 阶段为 60%~85% 应变区, 该区域为压缩的压溃区, 电容随应力的增大而呈现出缓慢增大的趋势。

2.2 间隔织物压力电容传感器线性度特征

线性度是描述传感器静态特性的几个性能之一。所谓传感器的线性度就是其输出量与输入量之间的实际关系曲线偏离直线的程度, 又称为非线性误差^[13], 可用下式表示:

$$E = \pm \frac{\Delta I_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\%$$

式中: ΔI_{\max} 为输出量和输入量实际曲线与拟合直线之间的最大偏差; Y_{FS} 为输出满量程值。

由传感器的应力-电容曲线图可知, 间隔织物压力电容传感器是非线性的, 绝大多数传感器都不具备 $y=bx$ 这种理想线性特性。在使用非线性传感器时, 为直观显示, 便于使用, 必须对传感器的输出特性进行线性化处理^[15]。拟合直线的方法很多, 同一种传感器, 采用不同的拟合方法, 其线性度是不同的, 因此拟合的原则是通过简便的计算获得尽可能小的非线性误差, 常用的方式有端点直线法、端点平移直线法、最小二乘法。端点直线法, 计算简便, 但是拟合精度低, 非线性误差大, 只能粗略估计, 只适用于静态特性曲线非线性较小的传感器; 端点平移直线法, 其非线性误差比端点直线法降低一半, 提高了拟合精度; 最小二乘法拟合精度很高, 但是计算繁琐, 不过现在利用拟合软件可以较为方便地拟合^[15]。本文采用最小二乘法利用 Origin 软件对间

隔织物压力电容传感器的 3 个阶段进行 $y=a+bx$ 线性拟合, 计算每个阶段的线性度, 分别用 E_1 、 E_2 和 E_3 表示, 线性度计算结果如表 2 所示。

表 2 传感器 3 个阶段的线性度及应变范围

Tab.2 Linearity and strain range of sensor in three stages

试样	I		II		III	
	E_1	应变/%	E_2	应变/%	E_3	应变/%
1#	0.216	0~30	12.120	30~60	13.028	60~75
2#	2.968	0~30	6.688	30~60	19.357	60~85
3#	2.861	0~30	7.837	30~60	20.455	60~78
4#	5.678	0~30	7.933	30~60	9.933	60~78
5#	1.750	0~30	3.479	30~60	9.695	60~75
6#	3.633	0~30	4.280	30~60	8.889	60~70

线性度越小, 其非线性误差越小, 则传感器线性越好。由线性度计算结果可知, 这 6 种传感器都在第 1 阶段呈现出较好的线性, 这一阶段处于压缩的弹性阶段, 应变随应力呈现出近似线性的变化, 而在小应变阶段, 电容随应变的变化也可以看成近似线性的变化, 因此第 1 阶段线性度最好。而随着压缩的进行, 应变与应力的线性度越来越差, 电容与应变的线性度也越来越差, 因此传感器在第 2 阶段和第 3 阶段的线性度逐渐变差。

2.3 间隔织物压力电容传感器灵敏度性能

传感器的灵敏度 S 是其在稳态下输出的增量 Δy 与输入增量 Δx 的比值, 表示传感器对输入变化的反应能力^[15]。在国际传感器领域, 尤其是电容传感器领域, 研究学者们大都以单位压力 ΔF 下电容变化的百分比 $\Delta C/C_0$ 表示传感器的灵敏度^[16-18], 计算公式为:

$$S = \frac{\Delta C/C_0}{\Delta F}$$

间隔织物压力电容传感器是非线性传感器,其应力-电容变化率曲线上的 $\Delta y/\Delta x$ 只能表示在某一工作点的灵敏度。本文上述部分进行了间隔织物压力电容传感器线性度研究,将应力-电容曲线分阶段进行线性处理。仍采用相应的分段方

式,分别对应力-电容变化率曲线 3 段进行拟合,用该阶段的斜率表示这个阶段的灵敏度。间隔织物压力电容传感器 3 个阶段的灵敏度分别用 S_1 、 S_2 和 S_3 ,结果如表 3 所示,并记录相应的应力范围。

表 3 传感器 3 个阶段的灵敏度及应力范围

Tab.3 Sensitivity and stress ranges for three stages of sensor

试样	I		II		III	
	S_1	应力范围/kPa	S_2	应力范围/kPa	S_3	应力范围/kPa
1#	4.593	0~9.188	24.662	9.188~14.498	1.292	14.498~276.779
2#	12.254	0~3.026	45.263	3.026~5.307	3.522	5.829~191.420
3#	4.356	0~8.716	15.158	8.716~15.735	1.045	15.735~383.800
4#	3.512	0~12.002	11.576	12.002~21.760	2.062	21.760~209.680
5#	3.770	0~9.750	8.386	9.750~24.486	1.085	24.486~337.887
6#	1.126	0~28.192	8.091	28.192~43.036	1.107	43.036~215.246

2.3.1 间隔织物压力电容传感器灵敏度特征

由表 3 可知,这 6 种规格的传感器,其灵敏度在整个压缩过程中呈现出先增大后减小的规律,其中第 2 阶段的灵敏度最高,第 3 阶段的灵敏度最低。由于经编间隔织物的规格不同,其压缩性能不同,每个阶段内的应力范围也不同。由上述结果可看出:第 2 阶段应力范围最小,在 2.281~14.844 kPa;第 3 阶段应力范围最大,在 172.210~368.065 kPa。这主要是因为第 2 阶段是压缩的平台区,此阶段的应力的增幅很小,在几千帕至十几千帕之间(见图 5),而应变很大可达 30%,电容变化率在 120%左右(见图 4(b)),其灵敏度高。而第 3 阶段是压溃区,应力增幅很大,应变较小,在 10%~25%之间,虽然这个阶段电容变化也很大,可达 188.393%~716.201%,但是应力的增幅更大,所以这个阶段的灵敏度最低。

2.3.2 间隔织物压力电容传感器灵敏度影响因素

结合间隔织物的规格(见表 1)可知,在传感器的第 1 阶段和第 2 阶段中,灵敏度受间隔丝粗细的影响较大,呈现出间隔丝越细,灵敏度越大的趋势。而在第 3 阶段,灵敏度的高低与间隔丝粗细之间的关系不明显,但是与间隔丝的密度呈现一定规律:在传感器的第 3 阶段,灵敏度主要受到间隔丝密度的影响,间隔织物间隔丝的密度越大,灵敏度越低。2#的灵敏度最大,其间隔丝密度最小为 63;3#的灵敏度最小,其间隔丝密度最大。

当间隔丝粗细相同时,压力电容传感器的电容变化率受间隔丝长度和间隔丝密度影响。当间隔丝的长度相差不大时,灵敏度主要由间隔丝密度决定,间隔丝密度小时,电容变化率大,如 1#和 2#;当间隔丝长度相差较大时,在压力电容传感器的第 1 阶段和第 2 阶段,其灵敏度主要受间隔丝长度的影响,间隔丝密度对灵敏度的影响较小,间隔丝越长,灵敏度

越大,产生这种现象的主要原因是间隔丝的抗弯刚度与间隔丝长度的平方成反比^[19]。相同应力下,间隔丝越长,形变越大,电容变化率越大,从而灵敏度越高。但随着压力电容传感器极板间距离的减小,进入传感器的第 3 阶段,间隔丝密度对其灵敏度的影响越来越大,这时候间隔丝密度越小,灵敏度越大。如 3#和 4#、5#和 6#,在第 1、第 2 阶段,间隔丝较长的 3#和 5#,其灵敏度大,在第 3 阶段,间隔丝密度较小 4#和 6#,其灵敏度较大。

另外,间隔织物压力电容传感器灵敏的重复性与间隔织物的抗压回弹性和抗压疲劳性有密切关系。随着压缩次数的增加,间隔织物的初始厚度降低,造成初始电容值变大,而应力逐渐减小,从而产生重复性误差。

3 结 论

以 6 种规格的间隔织物为介质,对间隔织物压力电容传感器的输出曲线进行线性处理,将传感器的输出曲线即应力-电容曲线分为 3 个阶段,研究了间隔织物压力电容传感器的静态特性中的线性度、灵敏度,得到主要结论如下。

1) 间隔织物压力电容传感器的应力-电容曲线,在小应力下,电容呈现出较为急剧的增大趋势,在大应力下,呈现缓慢增大趋势的特征。传感器第 1 阶段的线性度最好,而后随着压缩的进行,线性度越来越差。

2) 间隔织物压力电容传感器第 2 阶段的灵敏度最高,第 3 阶段的灵敏度最低。间隔丝的粗细对第 1 第 2 阶段的灵敏度影响较大,间隔丝越细,其第 1 第 2 阶段的灵敏度越高。第 3 阶段的灵敏度主要受到间隔丝密度的影响,间隔丝密度小的传感器,其

灵敏度高。

3) 在设计间隔织物压力电容传感器时,综合线性度、灵敏度和重复性能等,选择合适规格的间隔织物作为压力电容传感器的介质。 FZXB

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 侯玉群. 柔性电容式应力传感器及其灵敏度影响因素研究[D].北京:北京印刷学院,2015:21-39.
HOU Yuqun. Study on the flexible capacitive strain sensor and its effect factors on sensitivity [D]. Beijing: Beijing Institute of Graphic Communication, 2015: 21-39.
- [3] 戴宇. 用于人工假肢的分布式柔性电容触觉传感器的设计与制造[D].杭州:浙江大学,2014:46-49.
DAI YU. Design and fabrication of distributed flexible capacitive tactile sensor for artificial prosthesis [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014: 46-49.
- [4] MEYER J, ARNRICH B, SCHUMM J, et al. Design and modeling of a textile pressure sensor for sitting posture classification [J]. IEEE Sensors Journal, 2010, 10(8): 1391-1398.
- [5] HOLLECZEK T, RÜEGG A, HARMS H, et al. Textile pressure sensors for sports applications [C]//Sensors, 2010 IEEE. [S.L.]: IEEE, 2010: 732-737.
- [6] ENOKIBORI Y, SUZUKI A, MIZUNO H, et al. E-textile pressure sensor based on conductive fiber and its structure [C]//Proceedings of the 2013 ACM Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing Adjunct Publication. [S.L.]: ACM, 2013: 207-210.
- [7] TAKAMATSU S, YAMASHITA T, ITOH T. Meter-scale large-area capacitive pressure sensors with fabric with stripe electrodes of conductive polymer-coated fibers [J]. Microsystem Technologies, 2016, 22(3): 451-457.
- [8] 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.
- [9] MCKNIGHT M, AGCAYAZI T, KAUSCHE H, et al. Sensing textile seam-line for wearable multimodal physiological monitoring [C]//Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2016 IEEE 38th Annual International Conference of the IEEE [S.L.]: IEEE, 2016: 311-314.
- [10] COOPER C B, ARUTSELVAN K, LIU Y, et al. Stretchable capacitive sensors of torsion, strain, and touch using double helix liquid metal fibers [J]. Advanced Functional Materials. DOI: 10.1002/adfm.201605630.
- [11] 缪旭红,葛明桥.衬垫用经编间隔织物的压陷性能[J].纺织学报,2009,30(5):43-47.
MIAO Xuhong, GE Mingqiao. Indentation force deflection property of cushioning warp-knitted spacer fabric [J]. Journal of Textile Research, 2009, 30(5): 43-47.
- [12] 缪旭红,葛明桥.衬垫用经编间隔织物振动特性探讨[J].纺织学报,2008,29(11):57-60.
MIAO Xuhong, GE Mingqiao. Vibration behavior of cushioning warp knitted spacer fabric [J]. Journal of Textile Research, 2008, 29(11): 57-60.
- [13] KWON D, LEE T I, SHIM J, et al. Highly sensitive, flexible, and wearable pressure sensor based on a giant piezocapacitive effect of three-dimensional microporous elastomeric dielectric layer [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2016, 8(26): 16922-16931.
- [14] 缪旭红. 经编间隔织物力学性能研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2009: 44-45.
MIAO Xuhong. The research of warp knitting fabric mechanical properties [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2009: 44-45.
- [15] 张培仁. 传感器原理、检测及应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2012: 8-13.
ZHANG Peiren. Sensor Principle, Detection and Application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012: 8-13.
- [16] LEE H K. Real-time measurement of the three-axis contact force distribution using a flexible capacitive polymer tactile sensor [J]. Journal of Micromechanics and Micro Engineering, 2011, 21(3): 035010.
- [17] KIM H K, LEE S, YUN K S. Capacitive tactile sensor array for touch screen application [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2011, 165(1): 2-7.
- [18] LEI K E, LEE K F, LEE M Y. Development of a flexible PDMS capacitive pressure sensor for plantar pressure measurement [J]. Microelectronic Engineering, 2012, 99: 1-5.
- [19] 叶晓华. 功能性间隔织物的结构与性能研究 [D]. 上海: 东华大学, 2007: 68-70.
YE Xiaohua. Study on the structure and properties of functional spacer fabric [D]. Shanghai: Donghua University, 2007: 68-70.