

镀银针织物柔性传感器运动监测研究

杨洲¹, 范星宇¹, 谢国炎², 周婵婵¹

(1. 西安工程大学 纺织科学与工程学院, 陕西 西安 710048;

2. 浙江东进新材料有限公司, 浙江 绍兴 312072)

摘要: 肢体运动监测在康复医学领域有着重要的应用, 柔性可穿戴织物传感器成为该领域的热点。文中选用锦纶镀银纱线作为导电元件, 通过纬编针织技术使其与羊毛纱线混织成罗纹结构针织物柔性传感器, 验证锦纶镀银纱可编织性, 测试不同导电纱含量的柔性传感器传感性能和透气性能, 并证实该传感器可用于肢体运动监测的可能性, 如手指和手腕运动。该传感器具有宽传感范围和高灵敏度以及优异稳定性, 该研究为康复医学领域和体育领域监测肢体运动提供思路和解决方案。

关键词: 针织物; 传感器; 肢体运动监测; 传感性能; 灵敏度

中图分类号: TS 184.4

文献标志码: B

文章编号: 1000-4033(2024)05-0016-05

Motion Monitoring Study of Silver-Plated Knitted Fabric Flexible Sensor

Yang Zhou¹, Fan Xingyu¹, Xie Guoyan², Zhou Chanchan¹

(1. College of Textile Science and Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

2. Zhejiang Dongjin New Material Co., Ltd., Shaoxing, Zhejiang 312072, China)

Abstract: Limb motion monitoring has important applications in the field of rehabilitation medicine, and flexible wearable fabric sensors have become a hot spot in this field. In this paper, silver-plated yarn is selected as the conductive element, which is knitted with wool yarn by weft knitting technique to form a ribbed structure knitted flexible sensor. The knitting ability of nylon silver-plated yarn is verified, the sensing performance and breathability of the flexible sensor with different conductive yarn contents are tested, and the possibility of the sensor being used for limb motion monitoring is confirmed, such as finger and wrist movements. The sensor has a wide sensing range and high sensitivity as well as excellent stability. This study provides an idea and solution for monitoring limb movements in the field of rehabilitation medicine and sports.

Key words: Knitted Fabric; Sensor; Limb Motion Monitoring; Sensing Performance; Sensitivity

目前临床上用来测试肢体运动的装置大多为刚性运动捕捉系统, 穿在身上的舒适性较差。许多研发机构在纺织服装中嵌入了柔性织物传感器, 通过柔性传感器的电阻变化反映人体运动状态, 以达到运动监测目的。织物传感器从导电材料上看有金属基^[1]、碳基^[2-3]、高聚物基^[4]等, 从基底材料上看有

梭织物^[5]、针织物^[6]、海绵^[7]等。同梭织物相比, 针织物具有优越的弹性, 在监测大幅度关节运动方面具有更大优势。

制备柔性织物传感器时主要通过两种方式来制备^[8]: 一种是利用导电纱线在纬编针织机上直接编织而成; 另一种则是在织物基体上进行导电物质特殊处理(涂层^[9]、

印刷^[10]、浸渍^[11]等)。Chi et al^[12]用碳纳米管和银墨水制备了基于压力传感器手套, 用于抓握运动监测。Zhao et al^[13]用横机编织了一种柔性电容式传感器, 用于手指按压、足底压力、拳头用力等各种压力检测。An et al^[14]评估了 16 种具有不同导电拉伸织物的拉伸传感器; 导电纱采用针织镀银纱线和针

基金项目: 中国纺织工业联合会科技指导性项目(2022040); 中国博士后科学基金面上资助(2023M732750)。

作者简介: 杨洲(1998—), 男, 硕士研究生。主要从事智能可穿戴材料的研究。

通讯作者: 范星宇(1990—), 女, 副教授。E-mail: xyfan@xpu.edu.cn。

织不锈钢纱线,结果表明,镀银纱线传感器在灵敏度、线性和稳定性方面具有更好的性能。但是柔性传感器中导电纤维含量的不同会显著影响运动监测效果。通过表面特殊处理得到的传感器也将面临循环测试下导电层破裂造成导电非连续性的问题。因此,本文采用锦纶镀银纱与羊毛纱并线,然后制备不同导电纱含量的针织结构柔性传感器,将镀银纱作为导电介质,采用灵敏度和稳定性上表现良好的1+1罗纹组织,而后对其在人体运动监测方面的灵敏度进行对比,期望能够为针织结构可穿戴传感器的发展带来参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

材料:采用锦纶镀银纱线(77.7 dtex,上海普盛金银丝纺织品有限公司);羊毛纱(41.6 tex,100%美丽奴羊毛,广东爱华毛织工艺有限公司)。

1.2 针织结构传感器制备过程

首先采用 HFX-B6 型络筒机(苏州市华飞纺织科技有限公司),将羊毛纱线分别与不同根数的 77.7 dtex 镀银锦纶纱并线形成复合导电纱,并线过程中不加捻。然后采用几种不同复合导电纱线在手摇横机上编织 1+1 罗纹针织结构传感器样品共 5 块(样品尺寸为 5 cm×7 cm)。根据织物中含有的不同导电纱的根数,将传感器分别命名为 S1(含 1 根镀银纱)、S2(含 2 根

镀银纱)、S3(含 3 根镀银纱)、S4(含 4 根镀银纱)和 S5(含 5 根镀银纱)。通过 SonyA6000 相机得到编织后试样的实物图如图 1 所示。由试样实物图发现几种织物试样线圈组织结构清晰,导电纱线分布均匀。5 种试样的弯纱深度一致,锦纶镀银纱线较细,其对织物的密度影响很小,可忽略不计,因此 5 块试样的纵密、横密及总密度数值均相同,分别为 15 根/5 cm、10 根/5 cm、150 圈/25 cm²。

1.3 测试与表征

利用 Quanta600FEG 型扫描电子显微镜(SEM,美国 FEI 公司)对导电纱的纵向和截面微观形貌进行表征,利用 X'pert Highscore 型 X 射线衍射仪(XRD,荷兰帕纳科公司)对导电纱线表面物相成分进行分析。

采用 YG461E-Ⅲ型-全自动透气量仪进行织物透气性的测试,根据国标 GB/T 5453—1997《纺织品 织物透气性的测定》,试样在标准试验测试环境即(20±2)℃、相对湿度(65±3)%下进行。测试压差为 100 Pa,测试面积为 20 cm²。5 块试样分别取 5 个不同的部位进行测试,取平均值。

用 Keithley 2450 数字源表采集不同应变程度下的电阻变化数据。根据国标 GB/T 12703.4—2010《纺织品 表面电阻率的测定》,试样在温度为(20±2)℃、相对湿度为(35±5)%、环境风速在 0.1 m/s 左

右条件下进行。织物传感器 Gauge Factor(灵敏度,简称 GF)的计算见公式(1)。

$$GF = \Delta R / R_0 / P \quad (1)$$

式中: ΔR 为施加力后的电阻与初始电阻差值; R_0 为初始电阻; P 为施加应变。

在分析线性度时得到电阻与应变线性拟合关系方程,如式(2)。

$$R = kP + R_0 \quad (2)$$

式中: P 是应变; k 是电阻与应变线性拟合关系方程的对应斜率。

由式(2)可得 $k = \Delta R / P$,因此灵敏系数 GF 如式(3)。

$$GF = k / R_0 \quad (3)$$

2 分析与讨论

2.1 锦纶镀银导电纱的微观结构及导电性能表征

本文使用的锦纶镀银导电纱线的 SEM 形貌如图 2 所示。可以看出,锦纶镀银导电纱线的纵向微观形貌以及直径较均匀,横截面大致呈圆形,芯部外面包覆有颗粒状的包覆层。

图 3 是导电纱 X 射线衍射图谱,XRD 曲线上观测到尖锐的衍射峰。通过对比衍射峰位置,发现导电纱表面物相组成为金属 Ag,结合上述 SEM 测试结果,可以确定锦纶镀银导电纱样品表面包覆颗粒为金属 Ag 颗粒。试验测得该导电纱电导率约为 2.32×10^2 S/m,锦纶表面这一层均匀、致密的 Ag 颗粒赋予其良好的导电性,为其后续制备织物传感器提供了良好的功

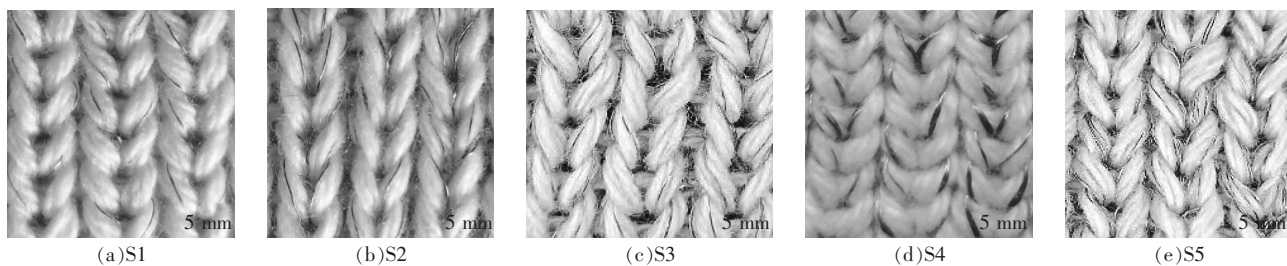


图1 试样实物图

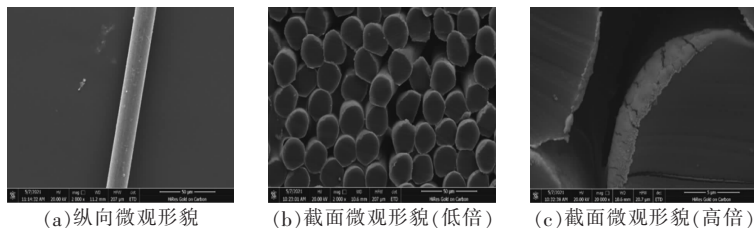


图 2 77.7 dtex 锦纶镀银导电纤维 SEM 图像

能基础。

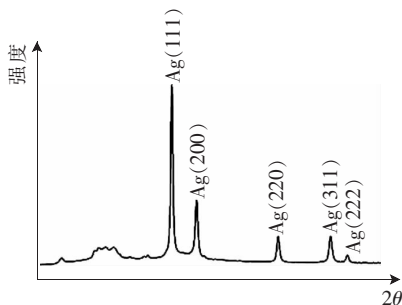


图 3 锦纶镀银 77.7 dtex 导电纤维 XRD 图谱

2.2 基于锦纶镀银导电纱针织物传感器的性能分析

2.2.1 透气性

对 5 种柔性传感器样品的透气性能进行测试,结果如图 4 所示。

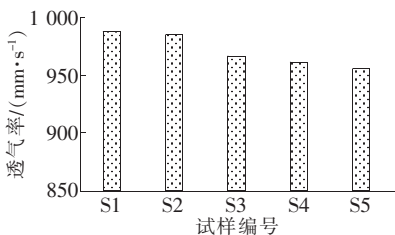


图 4 针织传感器透气率测试结果

由图 4 可知,5 种柔性传感器试样透气性相差不大,均表现良好透气性能,其透气率约 970 mm/s。随着导电纱含量的增加,透气性略微下降,在传感器 S2 与传感器 S3 之间下降 22 mm/s,这一阶段相对于其他阶段较明显,这是由于织物的密度已经达到可以填满多余的孔隙。经过分析,良好的透气性能是由于针织物的特殊线圈结构,其孔隙较多,蓬松度好,织物充满系数较大,是一种典型的多孔结构,因此,针织物透气性能相对来说都较

好。同时,由于镀银纱线的含量对 5 块试样的总密度影响甚微,镀银纱含量对织物透气性影响可忽略不计。

2.2.2 横纵向灵敏度

对不同导电纱含量的针织传感器进行横纵向拉伸电阻变化的测试,结果如图 5 所示。然后在 Origin 软件中对函数进行线性拟合,得到横纵向拉伸应变-电阻的函数关系,并根据式(3)计算灵敏度。

由图 5 可知,随着导电纱含量的增加,电阻初始值下降。在不同导电纱含量下,其电阻与应变率呈反比关系,针织传感器可适应横向

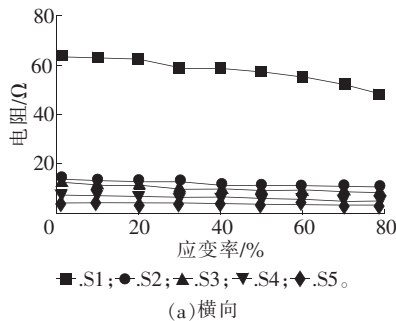


图 5 横纵向拉伸电阻变化分析

表 1 横向拉伸应变-电阻函数关系

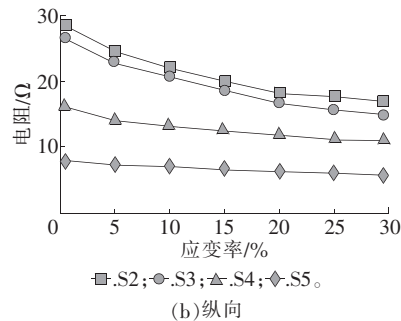
试样编号	横向拉伸电阻 R 与应变 P 的拟合关系(应变 P 从 0~80%)	灵敏度 GF
S1	$R = -0.187 80P + 65.192 15$	-0.288 0
S2	$R = -0.039 80P + 13.687 56$	-0.290 7
S3	$R = -0.047 53P + 12.219 11$	-0.388 9
S4	$R = -0.033 90P + 7.793 78$	-0.434 9
S5	$R = -0.009 57P + 4.439 33$	-0.215 5

表 2 纵向拉伸应变-电阻函数关系

试样编号	纵向拉伸电阻 R 与应变 P 的拟合关系(应变 P 从 0~30%)	灵敏度 GF
S2	$R = -0.417 93P + 26.607 14$	-1.570
S3	$R = -0.391 86 P + 25.379 29$	-1.544
S4	$R = -0.161 79P + 15.218 21$	-1.063
S5	$R = -0.074 36P + 7.839 64$	-0.948

80%、纵向 30%的宽传感范围,且线性拟合度较好。由于传感器 S1 测试过程中的稳定性较差,导电性能达不到测试要求,所以纵向只测试其余 4 种。如图 5b 所示,纵向拉伸时 4 种传感器在 0~10%区间的变化明显。

5 种柔性传感器拟合关系和灵敏度见表 1、表 2,在导电纱含量相同的情况下,传感器纵向灵敏度普遍远高于横向灵敏度。当导电纱含量不同时,灵敏度随导电纱含量的增加呈现增大趋势。传感器 S5 灵敏度最小是由于当导电纱含量够高,传感器的电阻初值很小,在应变条件下反映出电阻变化相对较小。在纵向拉伸下灵敏度随导电纱含量的增加而下降。经计算,传感器 S2 试样在 0~10%应变范围内的纵向灵敏度最高;传感器 S4 试样在 0~30%应变范围内的综合灵敏度最好。



2.2.3 稳定性

为了进一步验证传感器稳定性,对S2和S4传感器进行横纵向循环拉伸回复测试试验。在250.0 s内对传感器在横向拉伸30%范围、纵向拉伸10%范围条件下进行横纵向各100次的循环拉伸。试验结果如图6所示。

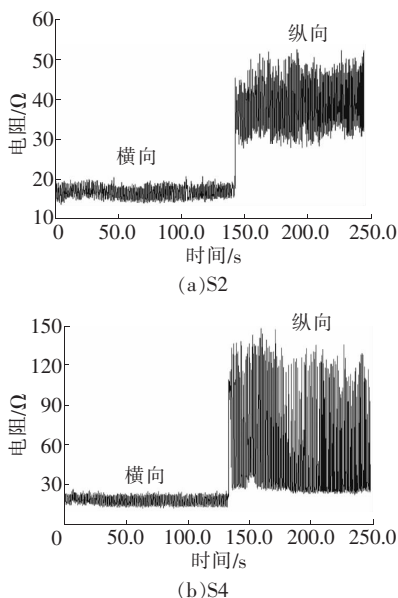


图6 S2与S4传感器循环稳定性测试结果

由图6可知,在横纵向各100次循环拉伸下,两种传感器电阻值基本保持不变,无论是横向还是纵向,都在一定范围内随应变增大而减小,随着回复又回到初始状态,这说明这两种传感器都具有优良的稳定性。由图6a可知,纵向初始电阻值和变化幅度比横向大,验证了纵向灵敏度高于横向灵敏度的结论。相比于图6b可以看出,传感器S4无论是横向还是纵向的变化幅度和峰值谷值都比传感器S2更均匀,说明传感器S4稳定性比传感器S2要好、滞后性较小。但是,从图6中可以看出,传感器在循环上百次拉伸后,电阻发生偏移现象,这是由于经多次拉伸后,针织物出现一定的疲劳,尤其体现在回

复阶段,线圈没有及时回到最初起始位置,造成电阻变大,这种电阻变化范围可控,电阻仍然在一定范围内稳定,对传感性能影响较小。综上所述,选用S4作为针织应变传感器参与后续试验。

3 传感机理

电阻式传感器的传感机理是其导电性能在力学行为下发生变化,即对织物施加压缩或拉伸等外力使织物产生形变、结构发生变化,进而影响和改变织物电阻。影响针织应变传感器等效电阻的主要因素为纱线电阻和纱线间的接触电阻。纱线电阻随应变增加而增大,接触电阻随应变增加而减小。根据接触电阻Holm定律,式(4)说明了接触电阻 R_c 有关的影响因素,其中 $\rho(\Omega/m)$ 为导电材料单位长度电阻、 $H(N/m^2)$ 为材料刚度、 n (个)为接触点数目、 $N(N)$ 为接触力。

$$R_c = \frac{\rho}{2} \sqrt{\frac{\pi H}{nN}} \quad (4)$$

由此可以看出,导电材料之间的接触电阻与接触力和接触点数目均呈反比关系。

由于本织物的传感器是多孔结构,纱线与纱线之间的孔隙较大,所以接触电阻占主导作用。当织物被拉伸时,相邻线圈之间的接触点和接触力增加,接触电阻减小,同时由于上下线圈重叠部分的纱线在拉伸作用下被牵引出来,增加了线圈之间的接触面积,降低了接触电阻,从而使总电阻减小。罗纹织物的横纵向拉伸形变情况如图7所示。

4 应用

根据前面测试结果,选用S4作为应变传感器对手指和手腕不同弯曲角度下电阻的变化进行测试。将传感器固定在被测人员手指

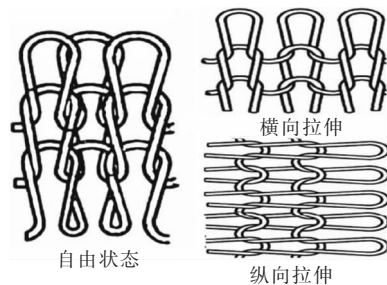


图7 罗纹织物横纵向拉伸图

或手腕关节处,连接Keithley 2450数字源表,被测人员从自然状态开始,以30°为一个梯度逐渐将手指或手腕关节弯曲至90°,测试针织物柔性传感器试样弯曲角度变化过程中电阻的变化,如图8所示。然后分别在手指、手腕处连续做弯曲角度测试,所得到的连续变化曲线如图9所示。

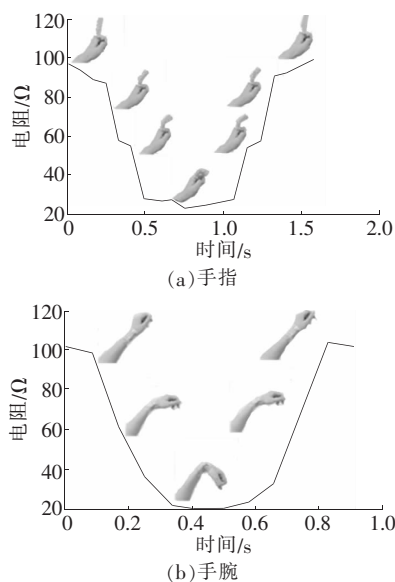


图8 手指、手腕弯曲角度监测结果

由图8a可知,当手指弯曲时电阻值呈现相应的变化规律,可以通过电阻值变化来反映弯曲角度。当手指弯曲到90°时,电阻稳定在20~25 Ω,手指回复到水平状态的过程和弯曲过程曲线基本对称。由图8b可知,当手腕弯曲到45°时,电阻稳定在60 Ω左右,手腕的弯曲曲线相比于手指来说,其过渡更加平滑。

当S4传感器置于手指关节

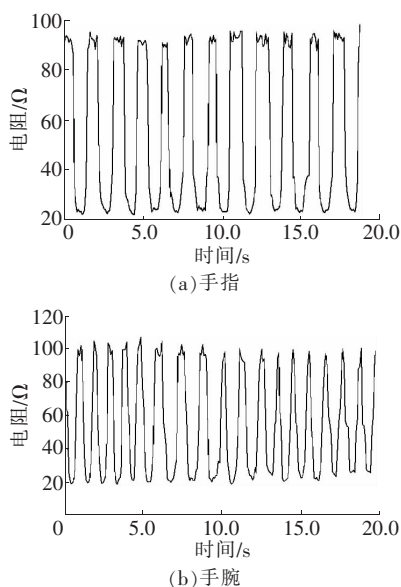


图9 手指、手腕连续弯曲监测结果

时,由图9a可以看出,20.0 s的测试时间内有12对波谷波峰,由此可得,20.0 s内试验员佩戴的S4传感器试样进行了12次手指关节的屈曲运动。当S4传感器置于手腕关节时,由图9b可知,20.0 s的测试时间内有18对波谷波峰,由此可得,20.0 s内试验员佩戴的S4传感器试样进行18次手腕关节屈曲运动。这些都与试验员实际的弯曲频率一致。上述结果充分证明,该针织传感器可以用于手指和手腕的运动监测,为柔性传感器的肢体运动监测领域和康复医疗领域提供了新思路。

5 结束语

本文选用导电性能良好的77.7 dtex 锦纶镀银纱线作为导电元件制备针织柔性传感器,针织结构赋予传感器实现宽传感范围和高灵敏度的要求。探究不同导电纱含量对传感器灵敏度和稳定性的影响规律,解释应变传感机理并构建手指手腕运动监测系统。根据测试结果,S4(含4根镀银纱)传感器在综合灵敏度和循环稳定性上表现较好,可适应横向80%、纵向30%的宽传感范围,且线性拟合度较好。

该传感器根据电阻值变化可反映手指和手腕不同弯曲角度变化,符合针织应变传感器基本要求,为针织物作为柔性传感器用于肢体运动监测提供解决方案。然而,镀银导电纱线在多次洗涤和大范围拉伸条件下导电涂层也会破裂,影响其灵敏度和导电性。考虑如何封装传感器或增强导电纱线的耐久性使其在各种条件下都能保持稳定性和灵敏度,是目前面临的问题。集成数据采集、终端信号处理等外部条件,实现智能化、系统化、舒适化的针织柔性传感器,这需要研究人员多方合作、共同探究,为柔性可穿戴传感器应用于人体监测领域带来更多可能。

参考文献

- [1]ASTRID G P, MAHTA K, CARLO M. Wearable device to monitor back movements using an inductive textile sensor[J].Sensors,2020,20(3):905.
- [2]HYUN S C, JIN H Y, JEONG H L, et al. Evaluation of joint motion sensing efficiency according to the implementation method of SWCNT-coated fabric motion sensor[J].Sensors,2020,20(1):284.
- [3]LU D X, LIAO S Q, WEI Q F, et al. Comparative study of different carbon materials for the preparation of knitted fabric sensors[J].Cellulose,2022,29(13):7431-7444.
- [4]KWON C, SEONG D, HA J, et al. Self-bondable and stretchable conductive composite fibers with spatially controlled percolated Ag nanoparticle networks: novel integration strategy for wearable electronics[J].Advanced Functional Materials,2020,30(49):2005447.
- [5]ZHENG Y J, YIN R, ZHAO Y, et al. Conductive MXene/cotton fabric based pressure sensor with both high sensitivity and wide sensing range for human motion detection and E-skin[J].Chemical

Engineering Journal,2020,420(prepublsh):127-130.

[6]YUTIAN L, XU H M, RAFIU K R. Flexible knitted sensing device for identifying knee joint motion patterns [J]. Smart Materials and Structures,2019,28(11):3-6.

[7]王苏,白元元,王书琪,等.基于MXene/多壁碳纳米管的柔性压力传感器[J].传感器与微系统,2022,41(7):5-8.

[8]王盼,王朝晖.纬编导电织物多重性能及其制备的研究进展[J].丝绸,2022,59(6):50-57.

[9]ZHOU X R, HU C Y, LIN X C, et al. Polyaniline-coated cotton knitted fabric for body motion monitoring [J].Sensors and Actuators: A, Physical,2021,321:5-16.

[10]ZHI H M, WEI W, DAN Y. Assembled wearable mechanical sensor prepared based on cotton fabric[J].Journal of Materials Science,2020,55(2):796-805.

[11]ALPER G, BUSRA O, LBRAHIM H B, et al. Silver nanowire coated knitted wool fabrics for wearable electronic applications[J].Journal of Engineered Fibers and Fabrics,2019,14:102-105.

[12]CHI C V, JOO U K. Highly elastic capacitive pressure sensor based on smart textiles for full-range human motion monitoring [J].Sensors and Actuators: A, Physical,2020,314:15-20.

[13]ZHAO B Y, DONG Z J, CONG H L. A wearable and fully-textile capacitive sensor based on flat-knitted spacing fabric for human motions detection [J].Sensors and Actuators: A, Physical,2022,340:5-20.

[14]AN LIANG, REBECAA S, NICK B K. Analysis of sensitivity, linearity, hysteresis, responsiveness, and fatigue of textile knit stretch sensors [J].Sensors,2019,19(16):3618-3618.

收稿日期 2023年8月2日