

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905671

基于双电层电容的柔性触觉传感器机理研究^{*}

赵海文^{1,2}, 王曼菲^{1,2}, 刘吉晓^{1,2,3}, 王 鹏^{1,2}, 郭士杰^{1,2,3}

(1. 河北工业大学机械工程学院 天津 300132; 2. 河北工业大学 河北省机器人传感与人机融合重点实验室 天津 300132; 3. 河北工业大学 省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室 天津 300132)

摘 要: 触觉信息是机器人感知工作环境的重要途径之一,也是人机协作中保证安全性和舒适性的关键因素。然而,相对于视觉、听觉、嗅觉传感器的发展,机器人触觉传感器的应用和产业化仍相对滞后。提出了一种基于双电层电容原理的机器人柔性触觉传感器,该压力传感器具有结构简单、灵敏度高、测量范围大、高柔性、高信噪比、制备和使用成本较低等优点。传感器由上下两层电极以及中间离子凝胶的纤维层组成,当外界压力作用在传感器上时,离子纤维层压缩,电极与离子纤维层接触面积增大,导致传感器电容变大。实验数据表明,压力和电容有着良好的线性关系,且传感器灵敏度高,可达到 3.97 nF/kPa,压力测量范围广,可达到 500 kPa,最大迟滞性误差为 5.97%,且动态响应可以较好跟随外部压力刺激。此柔性触觉传感器可广泛应用于机器人传感、人机交互、可穿戴设备等场合,具有广泛的学术研究和产业推广价值。

关键词: 触觉传感器;双电层电容;机器人触觉感知;压力图形化

中图分类号: TH823 TP212 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Mechanism study of flexible tactile sensor based on electrical double-layer capacitor

Zhao Haiwen^{1,2}, Wang Manfei^{1,2}, Liu Jixiao^{1,2,3}, Wang Peng^{1,2}, Guo Shijie^{1,2,3}

(1.School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300132, China; 2.Hebei Key Laboratory of Smart Sensing and Human-Robot Interaction, Hebei University of Technology, Tianjin 300132, China; 3.State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment, Hebei University of Technology, Tianjin 300132, China)

Abstract: Tactile information is one of the important ways for robots to perceive the working environment and a key factor of ensuring safety and comfortability in human-robot collaboration. However, compared with the development of visual, auditory and olfactory sensors, the application and industrialization of robotic tactile sensors still relatively lag behind. This paper proposes a robot flexible tactile sensor based on the principle of the electrical double-layer capacitor. The pressure sensor has the advantages of simple structure, high sensitivity, large measurement range, high flexibility, high signal to noise ratio, low fabrication and use cost, etc. The sensor consists of upper and lower two layers of electrodes and a fiber layer of intermediate ion gel. When external pressure is applied to the sensor, the ion fiber layer is compressed, and the contact area between the electrodes and the ion fiber layer is increased, which results in the increasing of the sensor capacitance. The experiment data shows that the pressure and capacitance have a good linear relationship, and the sensitivity of the sensor is high, which can reach 3.97 nF/kPa, the pressure measurement range is wide, which is up to 500 kPa, the maximum hysteresis error is 5.97%, and the dynamic response can properly follow the external pressure stimulus. The proposed tactile sensor could be widely applied to the situations such as robotic sensing, human-robot interaction, wearable equipment, and so on, and has great academic and industrial value.

Keywords: tactile sensor; electrical double-layer capacitors; robotic tactile sensing; pressure graphing

0 引言

近年来,触觉传感器的开发和应用已经取得了重大的进展,越来越多的国内外机构参与到触觉传感器的研制中,并且取得了一定的科研成果,其中特别重视模仿人工皮肤的机械兼容性和高灵敏度特性^[1]。随着触觉传感器日益广泛的应用,其进一步的研究已经成为当前需要攻克的重点。在未来,开发具备触觉感知功能的柔性设备是机器人时代发展的必然趋势。

随着人类生活的进步,触觉传感器在很多方面都有了广泛的应用,尤其是可穿戴设备^[2-3],仿生机器人^[4-5]、医疗护理^[6-7]等领域。触觉传感器是机器人与外部环境直接作用的必需媒介,很大程度上决定机器人能否准确获取外界信息。目前触觉传感器主要用来感受机械外力,将压力信号转化为可测量电信号的装置,按照转换方式主要分为压阻式^[8-10],电容式^[11-13],压电式^[14-15]和其他形式的触觉传感器。压阻式传感器可以把压力的变化转换为电阻的阻值变化,具有范围调节容易、响应速度快、灵活性高的特点^[16],然而,在很多应用中,它会发生漂移和滞后现象^[17]。压电式传感器利用材料的压电效应,即当压电体受到压力时会产生变形,内部材料发生极化,从而产生电位差,压电式传感器测量动态压力灵敏度高且反应速度快^[18],但传感器中压电材料有随着时间的推移而漂移以及静态传感特性不佳等缺点;传统电容式传感器设计分析设备和控制系统简单,具有应变敏感性好、测量简单、功耗低的优点^[19-20],但若是增大电容和信噪比,设备的分辨率会大大减小。

针对现有技术的不足,本文提出了一种新型的柔性触觉传感器,以达到柔性、结构简单、加工简单、灵敏度高的需要。该传感器基于双电层电容原理,对触觉传感器的整体结构及电极的阵列结构进行设计,并测试传感器性能,通过实验评估压力传感器相关的关键参数。

1 传感器结构原理与材料性能分析

本文提出了一种新型柔性触觉传感器,设计为三层结构,分别为上电极层,离子纤维层和下电极层,如图1(a)所示。将导电油墨采用丝网印刷的方式印刷到聚氨酯薄膜(PU膜)上制成上下电极,如图1(b)所示。将无纺布浸泡在聚乙烯醇-磷酸离子凝胶溶液(H_3PO_4 -PVA,5%)中制得离子纤维层,如图1(c)所示。电极层留出接线端,测试部分通过双面胶与离子纤维层封装,所得传感元件如图1(d)所示。制作的大面积传感器主要用于机器人触觉感知领域,实现人机交互,传感器裹覆机械臂如图1(e)所示。

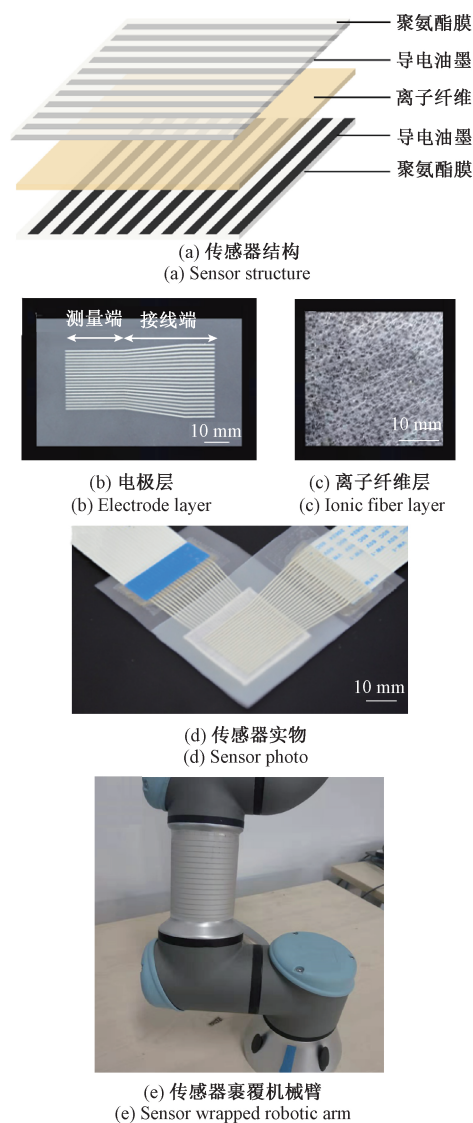


图1 柔性双电层电容传感器

Fig.1 Flexible electrical double-layer capacitor

传统的双极板电容主要是由上下两块电极板和中间一层电介质构成,当在两个电极板之间加上电压,电极板上就会聚集相应的电荷,电容器实际上相当于一个储能元件。如果不考虑边缘效应,其产生的电容量为:

$$C = \frac{\epsilon A}{d} \quad (1)$$

式中: ϵ 为电容极板间介电层材料的相对介电常数, F/m ; A 为两个平行极板间所覆盖的有效面积, m^2 ; d 为电容上下极板之间的距离, m ; C 为电容器产生的电容量, F 。

当测量参数发生改变时,会引起电容极板间介电层材料的相对介电常数 ϵ 、平行极板间所覆盖的有效面积 A 或电容上下极板之间的距离 d 变化,电容量就会产生相应改变。因此改变其中任意一个参数,都会导致电容量变化,电容量的变化可以通过外部检测电路来获得。在

双极板电容中,当电极尺寸较小时,其总电容量较低,很容易受到外界电容(人体等)和电磁信号干扰。因此,本文研究引入于双电层电容原理设计和制备触觉传感器,提升单位面积的电容值,优化信噪比和传感器灵敏度。

双电层电容作用原理是当电极材料与电解质的两端分别接触,并施加外部电源后,电极表面电荷会从电解质中吸附离子,这些离子会聚集在电极/电解质界面的电解质一侧,形成一个电荷数量与电极内表面荷电数目相等、且符号与其相反的界面层,由于电极/电解质界面上存在着电位差,使得两层电荷都不能越界而彼此中和,因此形成了结构稳定的双电层,产生了双电层电容^[21-23]。双电层电容值通常比传统平行板电容高出至少 1 000 倍,传统平行板电容通常为几十皮法,而双电层电容值可达到几十纳法甚至更大值。

电解质是双电层电容的关键组成部分,其离子导电性以及电势范围等也在很大程度上影响双电层电容的电化学性能,聚合物凝胶电解质具有较高电导率,良好的弹性和较强的机械强度。本文选用无毒、无腐蚀性的聚乙烯醇(PVA),而且其具有较好的成膜性,柔性较好且耐撕裂、耐磨;选用磷酸作为导电剂来制备 PVA 聚合物电解质,应用到双电层电容的效果较好。

将浸泡聚乙烯醇-磷酸离子凝胶混合液的无纺布沥干,形成固体离子纤维,即离子凝胶包裹着纤维,且纤维之间存在一定的空隙。双电层电容式传感器的工作原理如图 2(a)所示,施加外部电源后,在压力作用下,电极与离子纤维接触,在接触界面形成双电层电容,外界压力使电极之间的离子纤维压缩,电极与离子纤维的接触面积增大,从而引起电容的增加。传感器的等效电路如图 2(b)所示, C_{top} 和 C_{btm} 是离子凝胶分别与上下电极层形成的电容; C_p 是电极重叠引起的耦合电容; R_{gel} 是离子纤维层的电阻; L 为上下电极之间的距离; d 为电极电子与其从离子纤维中吸附的离子之间的距离,其单位在纳米级别。压力传感器可以等效为上电容 C_{top} 和下电容 C_{btm} 串联后与耦合电容 C_p 并联,电容的改变可转化成相应的电信号传输给之后的处理电路,从而得到压力的施加情况。

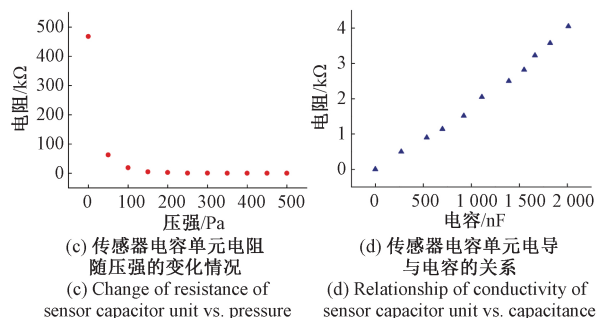
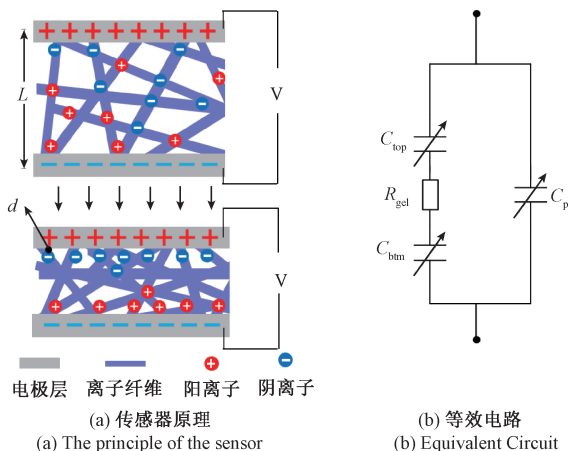


图2 传感器工作原理

Fig.2 Working principle of the sensor

C_{top} 、 C_{btm} 和 C_p 的计算公式为:

$$C_{top} = C_{btm} = \frac{\epsilon S_0}{d} \quad (2)$$

$$C_p = \frac{\epsilon S_1}{L} \quad (3)$$

式中: S_0 为电极与离子纤维之间的接触面积; S_1 为上下电极之间的对应面积。

由于离子纤维与电极层形成的电容 C_{top} 和 C_{btm} 远远大于电极重叠所引起的耦合电容 C_p ,所以耦合电容 C_p 可以忽略不计。传感器的电容主要由 C_{top} 和 C_{btm} 提供,电容变化主要由电极与离子纤维之间的接触面积 S_0 的变化提供。

实验测得传感器单元电阻随压强的变化情况如图 2(c)所示,这是由于离子纤维的横截面积与压力呈负相关,厚度与压力呈正相关,所以离子纤维的电阻随压强的增大而减小。另外,实验发现传感器电阻倒数即电导与电容的关系如图 2(d)所示呈线性关系,初步分析是当外界压力施加到传感器上时,纤维层压缩,由于纤维层本身材料的厚度变化较小,所以纤维层电阻的变化主要由离子纤维的横截面积决定。而由传感器的原理可知,纤维层的横截面积可以等效为双电层电容的电极与离子纤维层的有效接触面积。因为传感器电容值与有效接触面积值呈正相关,所以传感器电阻倒数与电容的关系呈线性关系。

实验选用石墨烯/银复合导电油墨为电极材料,利用可调式涂膜器将导电油墨涂敷在 0.1 mm 厚的聚氨酯薄膜上,制成电极。制作离子凝胶选用水、聚乙烯醇(PVA, 97%)以及磷酸(H_3PO_4 , 85%)以 1:1:18 的比例混合,通过数显恒温磁力搅拌器进行搅拌,并保持 90℃ 加热 30 min,形成均一、透明的混合液,自然冷却到室温,即制得离子凝胶溶液。再将聚丙烯纤维片(无纺布)浸入上述磷酸-聚乙烯醇离子凝胶溶液(5%)中,确保所有的聚丙烯微纤维都被离子凝胶充分浸泡后沥干。用显微镜对无处理的无纺布和浸泡过离子凝胶的离子纤维进行观

察,如图3(a)和(b)所示,无处理的纤维层和浸泡过离子凝胶的纤维层有明显的区别,且可以观察到纤维涂覆的离子凝胶较为均匀,这可以保证传感器的均一性。

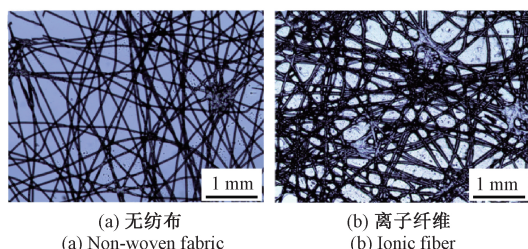


图3 无纺布和离子纤维显微镜观察图像
Fig.3 Microscope observation views of non-woven fabric and ionic fiber

2 丝网印刷微电极及检测

为了实现传感阵列单元压力测量的高分辨率,在上下电极层设计条形电极,上下电极层在装配过程中形成交叉压力传感阵列。电极分传感器测量部分和电路连接部分,传感器测量部分用于与离子凝胶膜进行接触,形成双电层电容,电路连接部分用于连接外围的测量电路。

阵列传感器采用丝网印刷的方式,利用电动式平面网印机在聚氨酯膜上印刷导电油墨制得,可以根据需求设计并印刷不同尺寸的电极,也可以在不同厚度的聚氨酯膜上印刷制作。

图4(a)和(c)所示微电极的电极部分尺寸为0.5 mm,间隙尺寸为0.5 mm,分别印刷在30和100 μm 厚的聚氨酯膜上,作为超薄电极和常规电极。图4(b)和(d)所示展示了电极良好的柔性。传感器制备工艺具有通用性,可以满足不同的需求,小面积传感器如图4(e)所示,也可以印刷大面积的电极,制得大面积的传感器如图4(f)所示。图4(g)所示为制得的微电极在显微镜下的观察结果,可以看出导电油墨在PU膜上印刷的效果很好。图4(h)所示为所制电极的电阻测量结果,电极部分电阻约为2.7 Ω ,整体电极电阻约为6.3 Ω ,较为均一。

3 传感器测试

为了验证压力传感器的工作原理并进行表征,将传感器固定在亚克力板上,利用弹簧压力试验机在传感器的中间部位对进行压力载荷的精确施加,其冲头末端面积大小为10 mm×10 mm,压强通过压力大小除以负载面积,即冲头末端面积得到。通过高精度LCR电桥测试仪来测量压力传感器的静态特征,采用阻抗谱仪对传感器的电容进行动态响应测量。

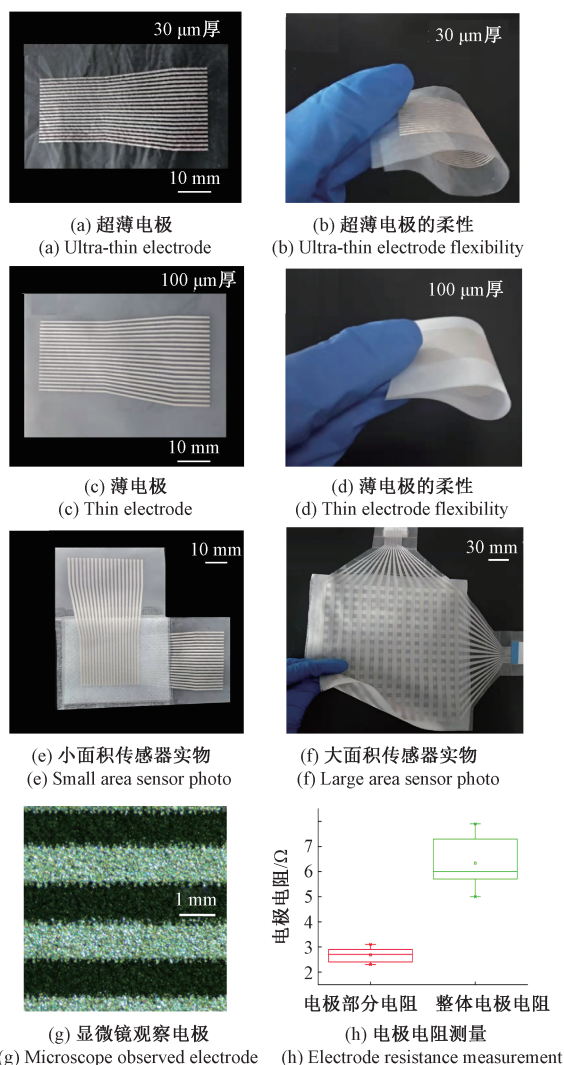


图4 丝网印刷电极
Fig.4 Screen-printed electrodes

在对传感器进行材料选择的时候,分别将无纺布、3 mm厚海绵、纱布和滤纸这4种不同材料浸泡离子凝胶后沥干,并将其与上下电极裁成20 mm×20 mm大小,使用LCR表测量压力传感器的静态特征,设置测量电压为2 V,频率为1 kHz。所得数据如图5(a)所示,由图5可看出,纱布和滤纸的灵敏度较低,海绵的线性度不够好且厚度较厚,所以中间层材料选择无纺布。无纺布有不同的规格,区别在每平方米的纤维密度不同,分别将8,25,40和56 g/m²的无纺布浸泡离子凝胶作为中间层,制得传感器后测量,所得数据如图5(b)所示,可以看出8 g/m²的无纺布效果最好。

测试在施加大量程压力(0~500 kPa)时压力和与电容之间的关系,并将涂覆离子凝胶的无纺布与未涂覆离子凝胶的无纺布进行压容特性对比,所得数据如图6(a)所示,从数据可以看出,施加压力和夹有离子纤

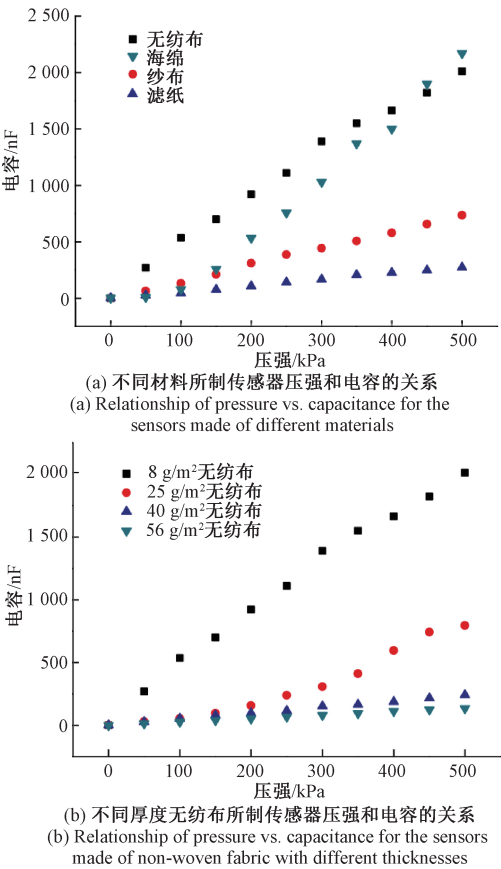


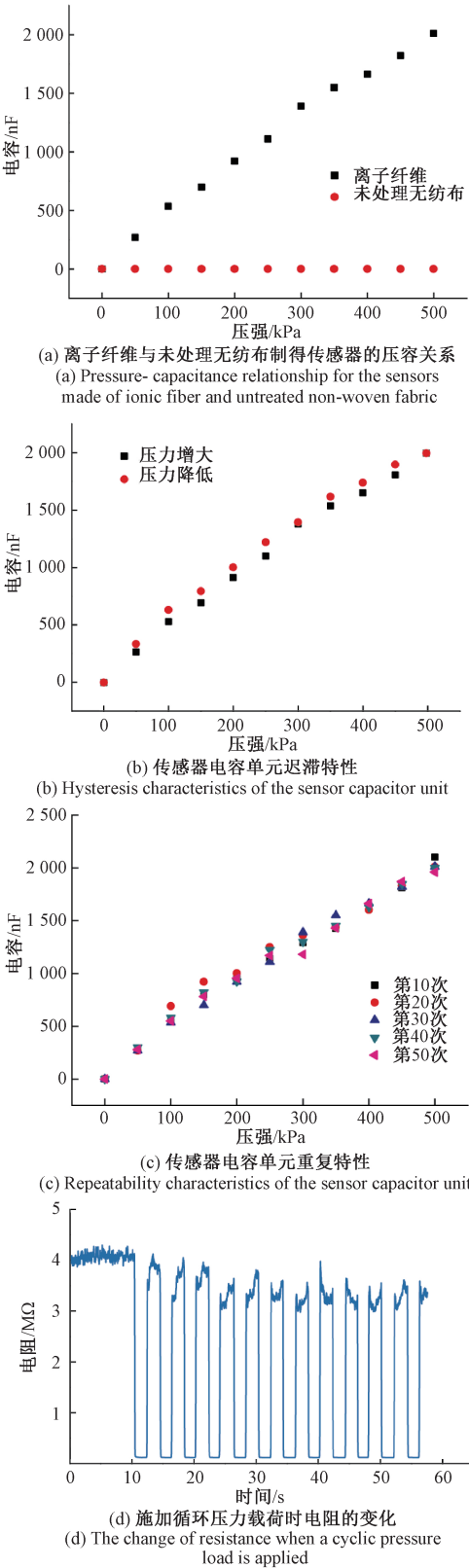
图 5 不同材料的特性

Fig.5 The characteristics of different materials

维的传感器电容之间有良好的线性关系;传感器的灵敏度即曲线斜率大,可达到 3.97 nF/kPa;传感器测量压力范围宽,可达到 500 kPa。同时测量未涂覆离子凝胶的无纺布所制传感器的电容,其变化几乎可以忽略不计。如图 6(b)所示,对该传感器进行了迟滞性测试,最大迟滞性误差为 5.97%。使用压力机对 20 mm×20 mm 尺寸大小的传感器在 0~500 kPa 进行重复加载实验,测量结果如图 6(c)所示,所制作的传感器具有良好的机械重复特性。

压力传感器的动态特性如图 6(d)和(e)所示,为了证明该传感器的灵敏度高且灵活性好,使用压力机对传感器进行压力载荷循环施加,压力施加频率为 2.5 Hz。利用阻抗谱仪对传感器进行动态响应测试,设置电压为 1 V,频率为 1 kHz。由图 6(d)和(e)可以看出,虽然压力机不能完全稳定地手动控制幅值,但电容值可以反应所施加的压力的变化,当压力施加在传感器上时,电容值立即增大,电容的变化与施加在传感器上的压力呈正相关,当压力释放时,电容值又迅速恢复到初始状态。电阻的变化也从另一方面验证了电容随压力载荷的施加而变化的情况。通过多次重复施加压力,证明了传感器的稳定性。传感器的一

致性测试结果如图 6(f)所示,在阵列传感器上选取 8 个不同位置的电容单元,利用压力机和 LCR 表进行测量,由实验数据点可以看出,由于传感器为手工贴合,各个电容单元之间有着略微的差异,但整体一致性良好。



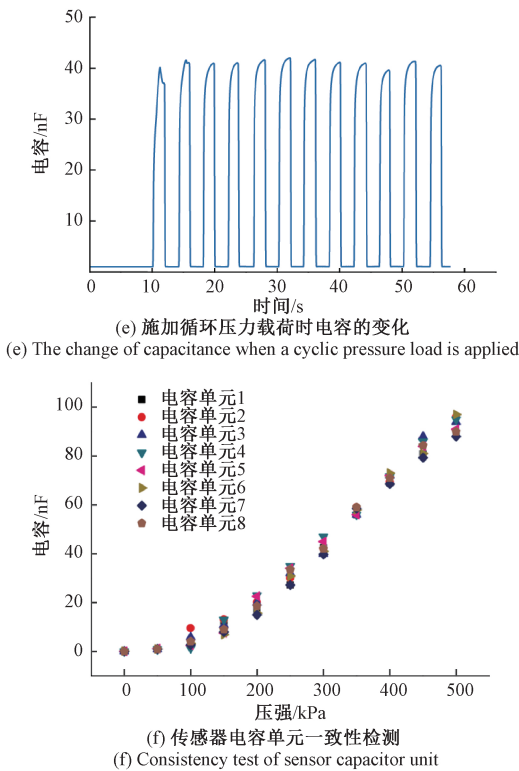


图6 传感器的特性
Fig.6 Sensor characteristics

通过对传感器的测试,总结得到的传感器参数如表1所示。

表1 传感器参数表
Table 1 Sensor parameter table

灵敏度/ (nF/kPa)	测量范围/ kPa	最大分辨率/ 率/(个/ mm ²)	整体 厚度/ mm	单次印刷 最大面积/ m ²
3.97	0~500	4	0.6	0.4

制作阵列为16×32的传感器,其测试部分尺寸为电极宽度为5 mm,电极之间的间隙为2 mm,将传感器裹覆在机械臂上,上位机实时图形化显示传感器收到的压力。用手掌对裹覆触觉传感器的机械臂施加不同的压力,完成5个动作,分别是用食指和中指的指尖推机械臂、拇指和食指的指尖捏机械臂、拇指和食指紧握机械臂、五指的指尖捏机械臂、全部手掌紧握机械臂,动作测试以及图形显示如图7所示,可以看出传感器测试效果良好。图7中红色部分表示触觉传感器受到更大的压力。

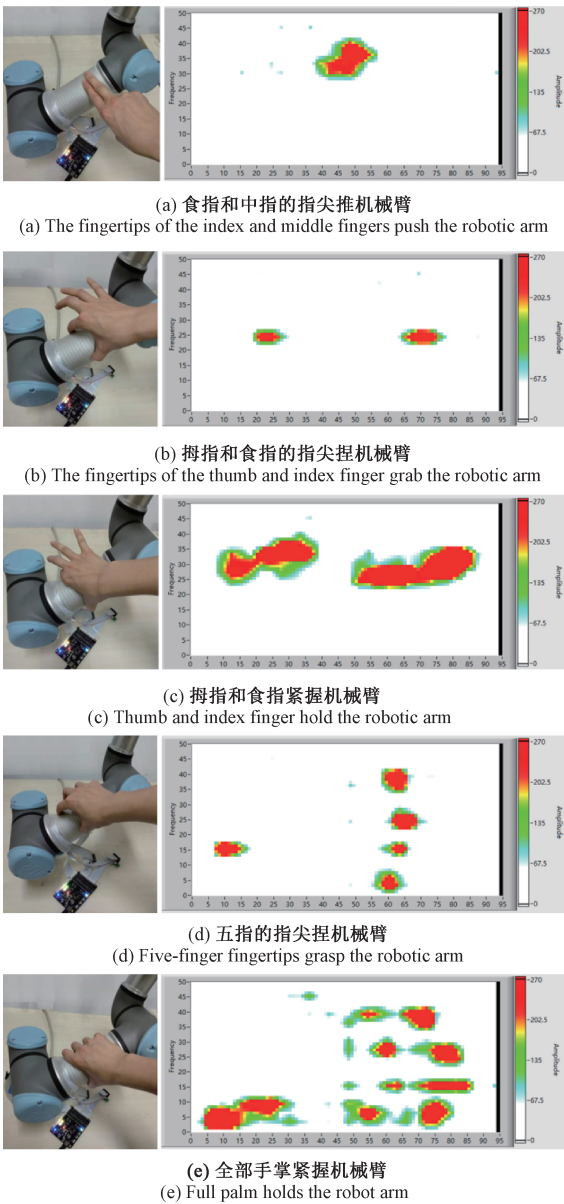


图7 传感器实际测试
Fig.7 Sensor actual test

4 结 论

本文提出了一种新型的柔性压力传感器,包括上下电极层及离子纤维层,利用双电层电容原理,当施加外部载荷时,离子纤维层压缩变形从而引起电容的变化。该传感器制备工艺简单、成本低,可以大面积应用。测试表明该传感器的静态特性和动态特性良好,其灵敏度高,可达到3.97 nF/kPa,线性度良好,可以感知大范围的压力载荷,可达到500 kPa,最大迟滞性误差为5.97%,且动态响应可以较好跟随外部压力刺激。该触觉传感器可广泛

应用于机器人传感、人机交互且该压力传感器能较好地反映压力循环。除此之外,对阵列压力传感器进行了测试,证明了该传感器具有良好的一致性。柔性压力传感器具有空间分辨率高、测量范围宽、制造成本低和效率高等优点,扩大了机器人触觉传感器的范围,在人机交互领域有着广阔的发展前景。

参考文献

- [1] HAMMOCK M L, CHORTOS A, TEE B C, et al. 25th anniversary article: The evolution of electronic skin (e-skin): a brief history, design considerations, and recent progress[J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(42): 5997-6038.
- [2] 梁超,王鹏,曹贝贝,等. 可穿戴智能睡眠质量检测系统[J]. *电子测量与仪器学报*, 2018, 32(5): 159-167.
LIANG CH, WANG P, CAO B B, et al. Wearable intelligent detection system of sleep quality[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2018, 32(5): 159-167.
- [3] KOH A, KANG D, XUE Y, et al. A soft, wearable microfluidic device for the capture, storage, and colorimetric sensing of sweat[J]. *Science translational medicine*, 2016, 8(366): 366ra165.
- [4] 姚建涛,陈俊涛,陈新博,等. 可嵌入式多维柔性力/位传感器[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(10): 184-192.
YAO J T, CHEN J T, CHEN X B, et al. Embedded flexible multi-dimensional displacement and force sensor[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(10): 184-192.
- [5] KIM D H, GHAFFARI R, LU N, et al. Flexible and stretchable electronics for biointegrated devices[J]. *Annual Review of Biomedical Engineering*, 2015, 14(1): 113-128.
- [6] 王亚宾,张小栋,穆小奇,等. 用于助老伴行机器人的老年人摔倒预测方法研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2018, 32(7): 1-7.
WANG Y B, ZHANG X D, MU X Q, et al. Research on the prediction method of elderly fall-down for elderly-assistant and walking-assistant robot[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2018, 32(7): 1-7.
- [7] SAWADA H, KITANI M, HAYASHI Y. Wearable, human-interactive, health-monitoring, wireless devices fabricated by macroscale printing techniques[J]. *Advanced Functional Materials*, 2014, 24(22): 3299-3304.
- [8] CHOU T L, CHU C H, LIN C T, et al. Sensitivity analysis of packaging effect of silicon-based piezoresistive pressure sensor[J]. *Sensors and Actuators: A Physical*, 2009, 152(1): 29-38.
- [9] JULIÁN CASTELLANOS-RAMOS, RAFAEL NAVAS-GONZÁLEZ, MACICIOR H, et al. Tactile sensors based on conductive polymers[J]. *Microsystem Technologies*, 2010, 16(5): 765-776.
- [10] 徐菲,葛运建,双丰,等. 基于新型导电橡胶的三维力柔性阵列触觉传感器研究[J]. *仪器仪表学报*, 2011, 32(6): 1350-1356.
XU F, GE Y J, SHUANG F, et al. Research of a three-dimensional force flexible tactile sensor based on novel conductive rubber[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(6): 1350-1356.
- [11] HU X H, XU Z, MING L, et al. A flexible capacitive tactile sensor array with micro structure for robotic application[J]. *Science China Information Sciences*, 2014, 57(12): 1-6.
- [12] TIWANA M I, SHASHANK A, REDMOND S J, et al. Characterization of a capacitive tactile shear sensor for application in robotic and upper limb prostheses[J]. *Sensors & Actuators: A Physical*, 2011, 165(2): 164-172.
- [13] 颜奕,黄宇,陈鸣,等. 基于电容阵列 I-V 测试仪的光伏 STC 曲线拟合研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2017, 31(2): 272-279.
YAN Y, HUANG Y, CHEN M, et al. Research on photovoltaic STC curves fitting based on capacitors array I-V tracer[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2017, 31(2): 272-279.
- [14] 郭雪培,侯晓娟,杨玉华,等. 基于 PVDF-TrFE 薄膜的柔性自供电传感器[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(7): 42-48.
GUO X P, HOU X J, YANG Y H, et al. Flexible self-powered sensor based on PVDF-TrFE film[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(7): 42-48.
- [15] KIM M S, AHN H R, LEE S, et al. A dome-shaped piezoelectric tactile sensor arrays fabricated by an air inflation technique[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2014, 212(6): 151-158.
- [16] LI C, CORDOVILLA F, JAGDHEESH R, et al. Design optimization and fabrication of a novel structural SOI piezoresistive pressure sensor with high accuracy[J]. *Sensors*, 2018, 18(2): 439.

- [17] PRAMANIK C, SAHA H, GANGOPADHYAY U. Design optimization of a high performance silicon MEMS piezoresistive pressure sensor for biomedical applications[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2006, 16(10):2060.
- [18] ZHAO X, GAO H, ZHANG G, et al. Active health monitoring of an aircraft wing with embedded piezoelectric sensor/actuator network: I. Defect detection, localization and growth monitoring [J]. *Smart Materials and Structures*, 2007, 16(4):1208.
- [19] 郭士杰,肖杰,刘今越,等. 电容阵列柔性压力传感器设计与分析[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(7):49-55.
GUO SH J, XIAO J, LIU J Y, et al. Capacitor array flexible pressure sensor design and analysis[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(7):49-55.
- [20] DOBRZYNSKA J A, GIJS M A M. Flexible polyimide-based force sensor [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2012, 173(1):127-135.
- [21] 余丽丽,朱俊杰,赵景泰. 超级电容器的现状及发展趋势[J]. *自然杂志*, 2015, 37(3):188-196.
YU L L, ZHU J J, ZHAO J T. The present situation and development trend of supercapacitors[J]. *Chinese Journal of Nature*, 2015, 37(3):188-196.
- [22] 向宇,曹高萍. 双电层电容器储能机理研究概述[J]. *储能科学与技术*, 2016, 5(6):816-827.
XIANG Y, CAO G P. A review on the mechanism of the energy storage about the electrochemical double-layer capacitors[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2016, 5(6):816-827.
- [23] 刘志祥,董国君,张密林. 双电层电容器的制备及性能[J]. *电源技术*, 2001, 25(6):413-415, 435.
LIU ZH X, DONG G J, ZHANG M L. Preparation and performance of electric double layer capacitor [J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2001, 25(6):413-415, 435.

作者简介



赵海文, 2001 年于河北工业大学获得硕士学位, 2007 年于哈尔滨工业大学获得博士学位, 现为河北工业大学副教授, 主要研究方向为机电一体化、智能检测、基于微纳技术的新型机器人电子皮肤。

E-mail: zhw@hebut.edu.cn

Zhao Haiwen received his M. Sc. degree in 2001 from Hebei University of Technology, and received his Ph. D. degree in 2007 from Harbin Institute of Technology. Now, he is an associate professor in Hebei University of Technology. His main research interests include mechatronics, intelligent detection and new robot electronic skin based on micro-nano technology.



王曼菲, 2016 年于北华航天工业学院获得学士学位, 现为河北工业大学硕士研究生。主要研究方向为基于微纳技术的新型机器人电子皮肤。

E-mail: WangMF187@163.com

Wang Manfei received her B. Sc. degree in 2016 from North China Institute of Aerospace Engineering. Now, she is currently a M. Sc. candidate at Hebei University of Technology. Her main research interests include new robot electronic skin based on micro-nano technology.



刘吉晓(通信作者), 2010 年和 2015 年于哈尔滨工业大学分别获得硕士学位和博士学位, 现为河北工业大学机械工程学院讲师, 主要研究方向为机器人电子皮肤和基于触觉信息的机器人控制。

E-mail: liujixiao@hebut.edu.cn

Liu Jixiao (Corresponding author) received his M. Sc. and Ph. D. degrees both from Harbin Institute of Technology in 2010 and 2015, respectively. He is now a lecturer in School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology. His research interests include robotic electronic skin and robot control based on tactile information.