

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.09.003

# 基于离子膜的高灵敏电容式柔性压力传感器

刘平<sup>1</sup>, 汪晓佳<sup>1</sup>, 刘彩霞<sup>1</sup>, 田合雷<sup>1</sup>, 徐宝华<sup>2</sup>, 张恩灿<sup>2</sup>

(1. 合肥工业大学 微电子学院, 安徽 合肥 230601; 2. 国网安徽省电力有限公司 滁州供电公司, 安徽 滁州 239000)

**摘要:**针对精确测量微小人体生理信号的需求,文章采用聚乙烯醇、氢氧化钾为材料,结合砂纸倒模技术,制作一种具有微结构复合离子膜介电层的高灵敏柔性电容式压力传感器。详细阐述传感器制作流程,表征离子膜的化学特性,分析并优化介电层材料配比及微结构尺寸,在对传感器静态和动态特性进行测试后将之应用于人指尖脉搏波测量。结果表明,基于离子膜微结构介电层的柔性电容式传感器具有高灵敏度( $8.29 \text{ kPa}^{-1}$ )和快速响应时间(45 ms),将该传感器安装到手指夹具中,通过脉搏波测量系统即可实现对指尖脉搏的精确测量。该研究为可穿戴医疗电子设备提供了一种新的选择。

**关键词:**压力传感器;电容式;离子膜;微结构;高灵敏

中图分类号:TP212.1 文献标志码:A 文章编号:1003-5060(2024)09-1170-06

## High sensitivity capacitive flexible pressure sensor based on ionic membrane

LIU Ping<sup>1</sup>, WANG Xiaojia<sup>1</sup>, LIU Caixia<sup>1</sup>, TIAN Helei<sup>1</sup>, XU Baohua<sup>2</sup>, ZHANG Encan<sup>2</sup>

(1. School of Microelectronics, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China; 2. Chuzhou Power Supply Company, State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Chuzhou 239000, China)

**Abstract:** In order to meet the needs of precise measurement of subtle human physiological signals, by adopting polyvinyl alcohol and potassium hydroxide as the materials, and combined with sandpaper reverse mold technology, this paper produces a kind of high sensitivity flexible capacitive pressure sensor with microstructured composite ionic membrane dielectric layer. The production process of the sensor is described, the chemical characteristics of the ionic membrane are characterized, and the dielectric layer material ratio and microstructure size are analyzed and optimized. Then, the static and dynamic characteristics of the sensor are tested, and the sensor is applied to the human fingertip pulse wave measurement. The results show that the sensor has high sensitivity ( $8.29 \text{ kPa}^{-1}$ ) and fast response time (45 ms). The sensor is installed in the finger clamp, and the pulse wave measurement system realizes the accurate measurement of the human fingertip pulse, which provides a new choice for the wearable medical electronic devices.

**Key words:** pressure sensor; capacitive; ionic membrane; microstructure; high sensitivity

## 0 引言

近年来,随着智能机器人<sup>[1]</sup>、可穿戴技术<sup>[2-3]</sup>的发展,具有柔韧性和生物相容性的柔性传感器

受到广泛关注。从工作原理来看,柔性传感器可分为电阻式<sup>[4]</sup>、电容式<sup>[5]</sup>、谐振式<sup>[6]</sup>等多种类型。其中,电容式柔性传感器因结构简单、功耗低、响应速度快、可重复性高等特点,在电子皮肤、可穿

收稿日期:2022-07-04;修回日期:2022-08-23

基金项目:浙江省科学技术厅领雁资助项目(2022C03052;2024C01150);安徽省教育厅协同创新资助项目(GXXT-2023-075);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(JZ2020HGTB0027);合肥工业大学大学生创新创业训练计划资助项目(S202210359267)和国家电网有限公司科技资助项目(B312M023000R)

作者简介:刘平(1983—),男,湖南娄底人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师,通信作者,E-mail:liuping@hfut.edu.cn.

戴设备等多个领域被深入研究。

为提高电容式传感器的灵敏度,一方面,研究者们通过混合、掺杂的方式,借助电学特性不同的填充粒子改性弹性聚合物材料,获得性能优异的介电层材料<sup>[7]</sup>。如文献[8]将二氧化钛纳米片掺入纤维素中,制成可重复性良好的柔性压力传感器,能够检测0~30 N的外界压力;文献[9]以氮化硼改性聚二甲基硅氧烷(PDMS)作为介电层,制成分辨率低至1 Pa的高灵敏电容式压力传感器。但受限于弹性基体本身的绝缘性,以该方式制成的器件大多具有较低的电容变化量,需求复杂的检测电路,应用范围受限。

另一方面,研究者们尝试为传感器介电层或电极加工微结构以改善器件性能<sup>[10-11]</sup>。文献[12]通过静电纺丝工艺加工多孔介质层结构,使传感器具有 $0.6 \text{ kPa}^{-1}$ 的高灵敏度;文献[13]以PDMS海绵为介电层,制得具有较大可压缩性的柔性压力传感器。但传统的多孔、发泡结构会对器件的响应速度及迟滞特性产生影响<sup>[14-17]</sup>,同时,复杂的微观结构又依赖于繁琐的加工工艺<sup>[18]</sup>。可见,设计具有优良介电性能的介电层材料,借助简单的加工方式为器件加工有效的微结构,获得高灵敏度柔性电容传感器仍是一项具有挑战性的工作。

本文将氢氧化钾(KOH)与聚乙烯醇(PVA-117)混合,制备介电性能良好的离子膜介电层,同时通过简单、低成本的砂纸倒模为介电层加工微结构,获得具有高灵敏度( $8.29 \text{ kPa}^{-1}$ )、快速响应时间(45 ms)和良好重复性(1 000次循环)的电容式压力传感器。该传感器可分辨微小压力(0.1 N),将该电容式传感单元装配到3D打印的手指夹具中,可用于精确测量人指尖的脉搏波,这为制作可穿戴医疗电子设备提供了一种新的选择。

## 1 柔性传感单元研制

### 1.1 传感器制备流程

电容式压力传感器的制备流程如图1所示。将2.0 g PVA-117加入20 mL去离子水中,并在127 °C的恒温下加热搅拌2 h,直至PVA-117颗粒完全溶解,随后加入2.5 g KOH继续在127 °C恒温下加热搅拌2 h;待PVA-KOH溶液搅拌均匀呈现黏稠状态后,将其缓慢倾倒在400目砂纸表面,通过旋涂工艺加工厚度均匀的PVA-KOH膜,旋涂转速设为800 r/min,时间设为8 s;将离子膜干燥固化17 h后进行脱模处理,即得到具有

微结构的离子膜介电层,膜层厚度为 $(130 \pm 10) \mu\text{m}$ 。裁剪所得的方形离子膜尺寸为 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ ,以导电铜箔作为电极材料贴附于离子膜两侧,即制备得到具有微结构离子膜的高灵敏电容式压力传感器。

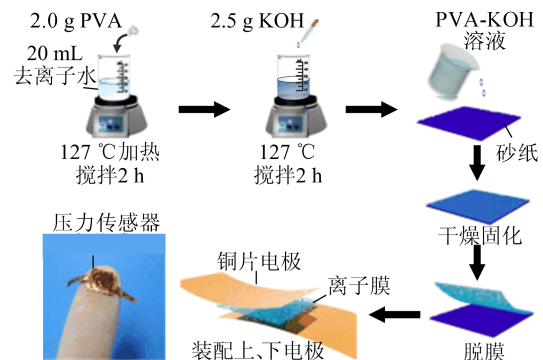


图1 传感器制备流程

### 1.2 离子膜化学特性表征

本文选取力学性能良好、亲水性好的PVA作为基体材料,以KOH离子液体作为填充材料,制备离子膜介电层。得益于PVA本身的弹性,所得离子膜具有优良的力学性能。同时由于PVA分子链表面—OH基团数量较多,可有效存储KOH和水分子,并作为氢氧根离子导电路径实现离子转移,因此所制得的离子膜具有良好的介电性能。

为验证PVA与KOH间的结合,分别取纯PVA薄膜、KOH质量分数为55%的离子膜和KOH质量分数为66%的离子膜进行化学特性表征。离子膜的X射线衍射(X-ray diffraction, XRD)图谱如图2a所示。从图2a可以看出,纯PVA材料在 $20^\circ$ 处具有较高的峰值,说明纯PVA材料结晶度较高,加入KOH后 $20^\circ$ 处的尖峰显著下降,说明复合材料整体非晶畴增加,这同KOH与PVA分子链间的相互作用有关。KOH分子和水分子滞留于PVA网络内,一方面增强了复合材料整体的电学性能,另一方面降低了材料的结晶度,削弱了材料刚性,使其更易受压变形。

离子膜的傅里叶变换红外光谱(Fourier transform infrared spectrometer, FTIR)图谱如图2b所示。从图2b可以看出:当加入KOH后,复合材料光谱在 $1560 \text{ cm}^{-1}$ 和 $1640 \text{ cm}^{-1}$ 处出现新峰,这两处峰值是KOH特有的,说明复合材料中KOH与PVA相互结合;同时,加入KOH后,复合材料在 $2926 \text{ cm}^{-1}$ 和 $3281 \text{ cm}^{-1}$ 处的峰值也

产生了较大改变,这是由于当复合材料中引入 KOH 和水分子后,其中的 O—H 键和 C—H 键发生伸缩振动,导致红外光谱峰值变化。该现象也从侧面反映出,当向 PVA 分子链网络中加入 KOH, PVA 表面—OH 基团将与 KOH 以及水分子之间产生氢键相互作用,复合材料性能更加稳定。

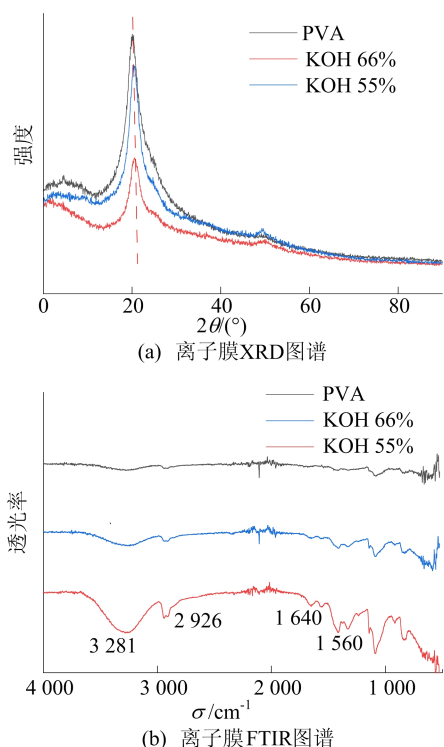


图 2 离子膜化学特性表征

### 1.3 传感器灵敏度特性测试与分析

作为电容传感器的介电层材料, PVA-KOH 复合离子膜的介电性能将极大地影响器件整体的灵敏度。为明确复合材料配比对离子膜介电层的影响, 本文改变复合材料中 KOH 质量分数, 制备 9 组不同配比的离子膜材料, 并分别进行器件灵敏度性能测试。在样品制备过程中, 固定砂纸目数为 240 目, PVA-KOH 溶液中 KOH 质量分数分别为 0、20%、33%、42%、50%、55%、60%、64%、66%。

相对电容-压力变化曲线随质量分数的测试结果如图 3 所示。由图 3 可知: 随着 KOH 质量分数上升, 传感器电容变化量逐渐增加, 这是由于 KOH 质量分数的上升, 使离子膜中离子数量增多, 当器件受压后界面处离子聚集度随之上升; 但当 KOH 质量分数超过 60% 时, 由于离子质量分数过大, 传感器受压后产生击穿现象, 无法感知较

大压力, 因此在制备离子膜时, KOH 质量分数应低于 60%。

从图 3 还可以看出: KOH 质量分数为 55% 时, 电容相对变化率曲线斜率最大, 电容传感器具有相对更高的灵敏系数, 为  $1.16 \text{ kPa}^{-1}$ , 其传感范围也相对较大; 其次是 KOH 质量分数为 50% 和 42% 时, 介电层 KOH 质量分数越小, 电容传感器的灵敏度越低; 当 KOH 质量分数为 0 时, 所得的 PVA 薄膜介电性能较差, 灵敏度极低。因此, 最终采用 KOH 质量分数为 55% 的 PVA-KOH 复合材料制备离子膜介电层。

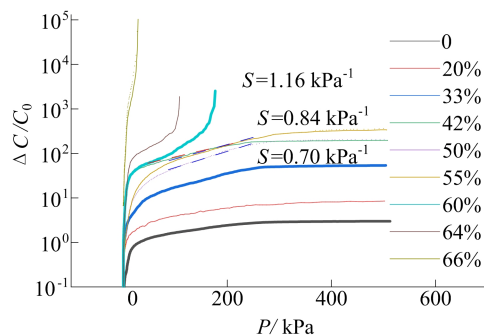
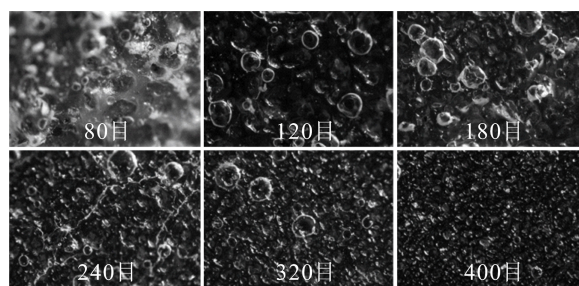
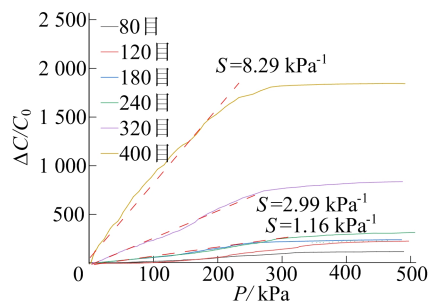


图 3 不同 KOH 质量分数下电容变化与施加压力的关系

为分析不同目数砂纸倒模制备的微结构传感单元电容相对变化与施加压力的关系, 探究微结构尺寸大小对传感单元灵敏系数的影响, 分别使用 80、120、180、240、320、400 目的砂纸倒模制备微结构, 如图 4 所示。



(a) 不同目数砂纸制备的微结构形貌(光学电镜表征(40×))



(b) 不同微结构尺寸的传感单元电容变化与施加压力的关系

图 4 微结构尺寸大小与传感单元灵敏系数

从图 4a 可以看出,目数较小的砂纸所制作的微结构尺寸较大,分布均匀性较差,而目数越大的砂纸所制备的离子膜微结构尺寸越小,分布越均匀。

从图 4b 可以看出,在 400 目砂纸倒模下,离子膜的微结构小,在压力作用下容易发生变化,灵敏系数最高,为  $8.92 \text{ kPa}^{-1}$ 。

当砂纸目数较低时,离子膜微结构尺寸更大,难以发生形变,所制得的传感器电容变化率趋于平缓,灵敏度低,但其变形范围较宽,具有更宽的传感范围,而高目数砂纸所制作的微结构尺寸较小,变形范围窄,在较小的压力下将达到压缩阈值,故传感范围也相对最小。

为兼顾器件灵敏度与检测范围,最终选取 400 目砂纸倒模制备压力传感器。

#### 1.4 传感器静态及动态特性测试

通过拉压力机 ZQ-990B 对压力传感器进行静、动态特性测试,结果如图 5 所示。

由图 5a 可知:在施加压力小于  $250 \text{ kPa}$  时,传感单元具有更高的灵敏系数,为  $8.29 \text{ kPa}^{-1}$ ,拟合度为  $0.989$ ,线性度较好;在施加压力大于  $250 \text{ kPa}$  时,传感单元灵敏系数降低,但仍呈现出稳定的上升趋势。

根据迟滞公式计算可得传感器迟滞约为  $7.5\%$ ,压力加载曲线与压力卸载曲线的不重合程度反映了传感单元介电层材料的弹性滞后,如图 5b 所示,得益于较小的微结构尺寸,该传感器迟滞较小。

为了测量传感单元的量程以及分辨率,对传感单元进行步进分别为  $0.1 \text{ N}$  和  $5.0 \text{ N}$  的台阶加载测试,结果如图 5c 和图 5d 所示。图 5c 中,传感器最小分辨率可达  $0.1 \text{ N}$ ,具有较高的分辨精度;图 5d 为大步进压力加载测试结果,压力传感器的量程可达  $45.0 \text{ N}$ ,具有较宽的监测范围,可以用于准确识别脉搏波等各种人体微小信号的接触压力。

图 5e 所示为传感器响应时间测试结果,可以看出:通过拉压力机对传感单元施加瞬态压力时,电容相对变化从 0 开始上升直至电容稳定经历时间为  $45 \text{ ms}$ ;当卸载压力时,电容回归到接近稳定所需时间为  $65 \text{ ms}$ ,传感器的响应时间较短,能够用于监测瞬态压力变化。

图 5f 所示为传感器频率响应特性曲线,可以看出,传感器在中低频下的响应特性较好,在  $8 \text{ Hz}$  的加载频率下电容变化量仍然保持稳定,能够用于监测中低频压力的加载信号。

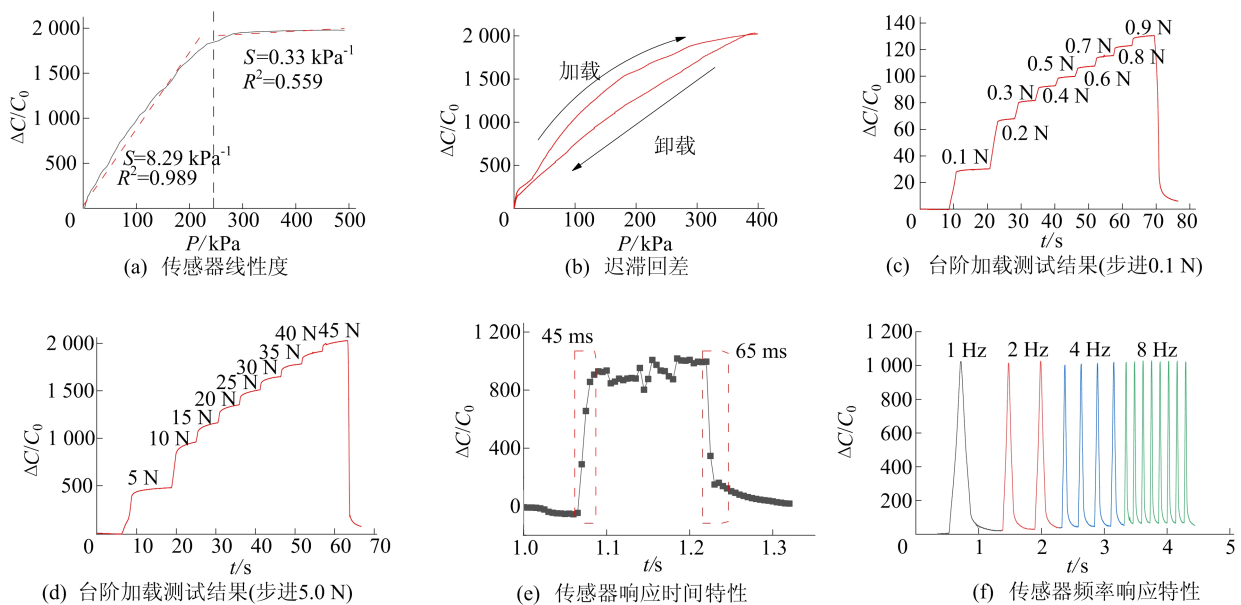


图 5 传感单元的静态特性和动态特性测试结果

## 2 传感器应用

将制作的压力传感单元安装到 3D 打印的手指夹具中,模型如图 6a 所示,传感器由下电极、上电极组成,中间以 PVA-KOH 离子膜作为介质

层。传感器的大小为  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 。当夹具夹在人手指上时,使用测量系统实时监测人指尖的微小跳动信号,该跳动信号即为人的脉搏波。

脉搏波测量系统由上位机显示部分、主控微控制单元(microcontroller unit, MCU)、电容采集

芯片和装配传感器的手指夹具组成,并添加了旋转编码器和数码管,用来进行采样频率的选择及显示,测量电路如图 6b 所示。其中,上位机由 LabVIEW 程序编写而成,MCU 选用 ESP32,电容采集芯片型号为 FDC2214。FDC2214 芯片能将电容值转化为 28 位数字量,该数据由主控 ESP32 处理,通过串口传递到上位机显示。

测量系统采集到的人指尖脉搏波形如图 6c 所示,测得的信号中能够明显观察到脉搏波的主要特征点,如主波、潮波和重搏波等,对这些脉搏波的特征点进一步分析,可以得到人体心率、血压等重要生理参数。

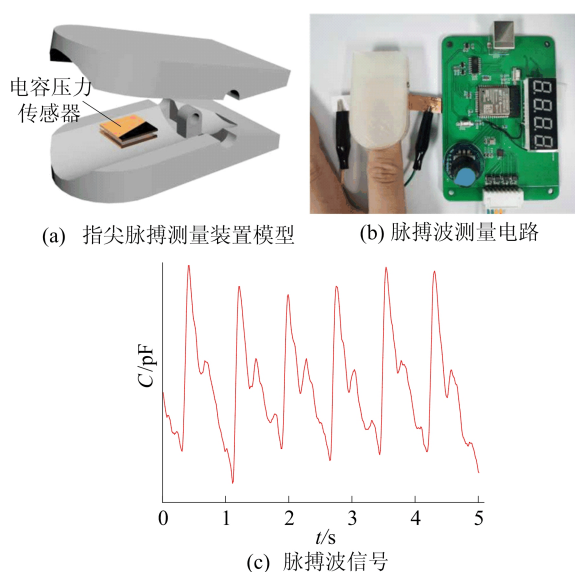


图 6 指尖脉搏检测系统及测量信号

### 3 结 论

本文利用 PVA、KOH 制作 PVA-KOH 复合离子膜,以砂纸倒模工艺制备具有微结构离子膜的柔性电容式压力传感单元。通过分析讨论复合材料配比、微结构尺寸对传感器灵敏度的影响,选取质量分数为 55% 的 KOH、400 目砂纸制得高灵敏柔性压力传感器,灵敏系数达  $8.92 \text{ kPa}^{-1}$ ,同时具有快速响应时间(45 ms)等优势。

将该电容式传感单元组装于手指夹具中,夹在人手指上能够以无创的方式精确测量出人指尖的脉搏波形,再对脉搏波的特征进行分析,即可得到多种生理信号。该离子膜高灵敏电容式柔性压力传感器为可穿戴医疗电子的实现提供了一种新方案。

### 【参 考 文 献】

[1] XIONG Y, SHEN Y, TIAN L, et al. A flexible, ultra-highly

sensitive and stable capacitive pressure sensor with convex microarrays for motion and health monitoring[J]. *Nano Energy*, 2020, 70: 104436.

- [2] ZHANG Q, SHEN L, LIU P, et al. Highly sensitive resistance-type flexible pressure sensor for cuffless blood-pressure monitoring by using neural network techniques[J]. *Composites Part B(Engineering)*, 2021, 226: 109365.
- [3] ZHENG Y N, YU Z, MAO G, et al. A wearable capacitive sensor based on ring/disk-shaped electrode and porous dielectric for noncontact healthcare monitoring[J]. *Global Challenges*, 2020, 4(5): 1900079.
- [4] XIA P, LIU P, WU S G, et al. Highly stretchable and sensitive flexible resistive strain sensor based on waterborne polyurethane polymer for wearable electronics[J]. *Composites Science and Technology*, 2022, 221: 109355.
- [5] QIN J, YIN L J, HAO Y N, et al. Flexible and stretchable capacitive sensors with different microstructures[J]. *Advanced Materials*, 2021, 33(34): 2008267.
- [6] WANG P F, LIU P, FENG H, et al. Flexible and wireless normal-tangential force sensor based on resonant mechanism for robotic gripping applications[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2022, 7: 2101385.
- [7] WU G, PANAH-SARMAD M, XIAO X, et al. Fabrication of capacitive pressure sensor with extraordinary sensitivity and wide sensing range using PAM/BIS/GO nanocomposite hydrogel and conductive fabric[J]. *Composites Part A(Applied Science and Manufacturing)*, 2021, 145: 106373.
- [8] SRIPHAN S, CHAROONSUK T, KHAISAAT S, et al. Flexible capacitive sensor based on 2D-titanium dioxide nanosheets/bacterial cellulose composite film[J]. *Nanotechnology*, 2021, 32(15): 155502.
- [9] TAY R Y, LI H, LIN J, et al. Lightweight, superelastic boron bitride/polydimethylsiloxane foam as air dielectric substitute for multifunctional capacitive sensor applications[J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(10): 1909604.
- [10] JI B, ZHOU Q, CHEN G, et al. In situ assembly of a wearable capacitive sensor with a spine-shaped dielectric for shear-pressure monitoring[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2020, 8(44): 15634-15645.
- [11] THOUTI E, NAGARAJU A, CHANDRAN A, et al. Tunable flexible capacitive pressure sensors using arrangement of polydimethylsiloxane micro-pyramids for bio-signal monitoring[J]. *Sensors and Actuators A(Physical)*, 2020, 314: 112251.
- [12] LIN M F, CHENG C, YANG C C, et al. A wearable and highly sensitive capacitive pressure sensor integrated a dual-layer dielectric layer of PDMS microcylinder array and PVDF electrospun fiber[J]. *Organic Electronics*, 2021, 98: 106290.
- [13] HWANG J, KIM Y, YANG H, et al. Fabrication of hierarchically porous structured PDMS composites and their application as a flexible capacitive pressure sensor[J]. *Composites Part B(Engineering)*, 2021, 211: 108607.

- [14] LI W, JIN X, ZHENG Y, et al. A porous and air gap elastomeric dielectric layer for wearable capacitive pressure sensor with high sensitivity and a wide detection range[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2020, 8(33): 11468-11476.
- [15] CICEK M O, DOGANAY D, DURUKAN M B, et al. Seamless monolithic design for foam based, flexible, parallel plate capacitive sensors[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2021, 6(6): 2001168.
- [16] LI S, DONG K, LI R, et al. Capacitive pressure sensor in-laid a porous dielectric layer of superelastic polydimethylsiloxane in conductive fabrics for detection of human motions[J]. *Sensors and Actuators A (Physical)*, 2020, 312: 112106.
- [17] BIJENDER B, KUMAR A. Flexible and wearable capacitive pressure sensor for blood pressure monitoring[J]. *Sensing and Bio-Sensing Research*, 2021, 33: 100434.
- [18] ZHU Y, WU Y, WANG G, et al. A flexible capacitive pressure sensor based on an electrospun polyimide nanofiber membrane[J]. *Organic Electronics*, 2020, 84: 105759.

(责任编辑 胡亚敏)

(上接第 1158 页)

## [参 考 文 献]

- [1] 徐镇全. 组合曲面上组合曲线的等距方法研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [2] 彭玉海. 曲线运动导轨的设计方法研究[J]. *机械设计与制造*, 2014(10): 143-145.
- [3] 徐白. 面向离散数据的等距与扫掠技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
- [4] LINGG Z K, CHASE T R. Generating the swept area of a body undergoing planar motion[J]. *Journal of Mechanical Design*, 1996, 118(2): 186-192.
- [5] 王金敏, 张恒毅, 李乃华, 等. 平面物体扫掠区域的算法研究[J]. *工程图学学报*, 2004, 25(2): 46-50.
- [6] 尚鹏, 王成焘. 股骨三维重建的轨迹线扫掠法与分支问题处理[C]//21世纪医学工程学术研讨会论文摘要汇编. 北京: 中国生物医学工程学会, 2001: 147.
- [7] ZHUANG J Y, LUO J, LIU Y C. A locking sweeping method based path planning for unmanned surface vehicles in dynamic maritime environments[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2020, 8(11): 887-887.
- [8] 王勇, 刘洋, 祝鑫. 基于三轮全向移动平台的运动控制系统研究[J]. *现代机械*, 2019(6): 5-9.
- [9] 海丹. 全向移动平台的设计与控制[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2005.
- [10] 邢雯丽. 8Mecanum 轮全向移动平台运动学、动力学建模与实验[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.
- [11] 祝鑫. 全向移动机场服务机器人研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
- [12] 丁华斌. 基于加减速控制算法的汽车仪表步进电机控制系统设计与研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2017.
- [13] 慈强. 便携式路面摩擦系数测试仪研究与开发[D]. 西安: 长安大学, 2011.
- [14] 杨晓, 韩冰, 欧成章. 悬挂式单轨最小曲线半径及缓和曲线理论研究[J]. *现代城市轨道交通*, 2019(9): 85-90.

(责任编辑 胡亚敏)

## · 信息与动态 ·

## 《合肥工业大学学报(自然科学版)》专栏征稿启事

为了贯彻落实党的二十大精神,紧密围绕科教兴国战略、人才强国战略、创新驱动发展战略,《合肥工业大学学报(自然科学版)》设置“机器人与人工智能”“环境污染与防治”两个专栏,面向国内外专家学者征集“机器人与人工智能”“环境污染与防治”领域的原创性学术论文、专题综述;稿件一经录用将优先刊发。

来稿要求政治导向正确、论证充分、具有较强的引领性和创新性。格式要求参见《合肥工业大学学报(自然科学版)》网页投稿指南的征稿简则和投稿模板。

在线投稿网址: <http://xbzss.hfut.edu.cn/xbzk.html>。