



基于 MWCNTs/PDMS 的仿蝎子栉器结构柔性压力传感器制备及性能表征

陈朝阳, 杜孟生, 贾博玉, 张慧卿

(1. 西安建筑科技大学理学院, 西安 710055; 2. 西北工业大学柔性电子研究院, 西安 710129)

摘要: 针对传统刚性传感器缺乏便携性和柔韧性等缺点以及现有柔性压力传感器普遍存在工艺复杂、成本高且无法同时实现宽检测范围和高灵敏度等问题, 以实现柔性压力传感器的宽检测范围和高灵敏度协同优化为目标, 以多壁碳纳米管(Multi-walled carbon nanotubes, MWCNTs)/聚二甲硅氧烷(Polydimethylsiloxane, PDMS)复合材料为导电层, 采用仿蝎子栉器结构与根部直径皱缩的设计, 制备出一种高性能的仿生柔性压阻式压力传感器。采用场发射扫描电镜对蝎子栉器和传感器的表面形貌进行系统表征; 利用 ABAQUS 验证仿生结构的合理性和优异性, 并测试传感器的灵敏度、响应时间、检测范围和耐久性等传感性能。结果表明: MWCNTs 均匀分散在 PDMS 基底中, 仿生结构具有显著的应力集中效应; 传感器在 4.73 Pa~790 kPa 的宽检测范围内具有 2.755 kPa^{-1} 的高灵敏度, 并且响应时间低至 170 ms; 传感器在监测人体生理信号时也具有优异的性能。该研究为柔性压力传感器介电层的结构设计提供了一种新的仿生思路。

关键词: 柔性压力传感器; 仿生结构; 蝎子栉器; 高灵敏度; 宽检测范围; 健康监测

中图分类号: TP212

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2026)05-0298-08

引文格式: 陈朝阳, 杜孟生, 贾博玉, 等. 基于 MWCNTs/PDMS 的仿蝎子栉器结构柔性压力传感器制备及性能表征[J]. 浙江理工大学学报(自然科学), 2026, 55(3): 298-305.

Reference Format: CHEN Zhaoyang, DU Mengsheng, JIA Boyu, et al. Fabrication and performance characterization of a scorpion comb-inspired flexible pressure sensor based on MWCNTs/PDMS[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2026, 55(3): 298-305.

Fabrication and performance characterization of a scorpion comb-inspired flexible pressure sensor based on MWCNTs/PDMS

CHEN Zhaoyang, DU Mengsheng, JIA Boyu, ZHANG Huiqing

(1. School of Science, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. Institute of Flexible Electronics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

Abstract: Traditional rigid sensors lack portability and flexibility while existing flexible pressure sensors generally suffer from complex fabrication processes, high costs, and failure to simultaneously achieve a wide detection range and high sensitivity. To address these issues, this study aimed to realize the synergistic optimization of wide detection range and high sensitivity for flexible pressure sensors. It fabricated a high-performance bionic flexible piezoresistive pressure sensor using a design integrating a bionic scorpion pectine structure and root diameter reduction, with multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs)/polydimethylsiloxane (PDMS) composite as the conductive layer. Field emission scanning electron microscopy was used to systematically characterize the surface morphologies of scorpion pectines and the sensor. ABAQUS was employed to verify the rationality and superiority of the bionic structure, and the sensor's sensing performances including sensitivity, response time, detection range and durability were tested through experiments. Results show that MWCNTs disperse uniformly in the PDMS matrix.

收稿日期: 2025-11-27 网络出版日期: 2026-01-27

作者简介: 陈朝阳(2001—), 女, 陕西商洛人, 硕士研究生, 主要从事柔性压力传感器设计与制备方面的研究。

通信作者: 张慧卿, E-mail: 18391922165@163.com

The bionic structure exhibits significant stress concentration effect. The sensor achieves a high sensitivity of 2.755 kPa^{-1} over a wide detection range of 4.73 Pa to 790 kPa , with a response time as low as 170 ms . It also demonstrates excellent performance in monitoring human physiological signals. This study provides a new bionic approach for the structural design of the dielectric layer in flexible pressure sensors.

Key words: flexible pressure sensor; bionic structure; scorpion pectine; high sensitivity; wide range; health monitoring

0 引言

近年来,随着可穿戴健康检测、医疗辅助和运动追踪等新兴领域的快速发展,压力传感器作为这些领域中的关键器件,已经成为研究热点并且受到广泛关注^[1-2]。压力传感器是衔接客观力学环境与电子信息系统的重要媒介,在受到压力作用时,其传感层会产生压缩或弯曲形变,并将力信号转化为可传输、可处理的电信号,为各类设备的稳定运行提供基础支撑^[3]。随着应用场景的持续拓展和日益复杂,各类设备对压力传感器也提出了更严格的性能要求。一方面,传感器需要具备良好的柔韧性和便携性,以适应各种复杂的应用场景;另一方面,还须兼具高灵敏度、宽检测范围以及快速响应等优良的传感性能^[4-5]。传统刚性传感器虽具有高灵敏度等优势,但难以满足便携式可穿戴设备对传感器便携性和柔韧性的基本需求,在新兴领域中的应用局限性正在逐步凸显^[6-7]。在此背景下,柔性压力传感器应运而生,并迅速成为新兴领域中的研究重点。依据传感工作原理的差异,可将柔性压力传感器分为电容式、压阻式、压电式和摩擦电式 4 类;其中,柔性压阻式压力传感器凭借结构简单、响应性能好、精度高以及信号处理方便等突出优势,获得了研究人员的广泛关注与深入研究^[8-9]。

柔性压阻式压力传感器的工作原理如下:外部压力使传感器的介电层材料产生一定的压阻效应,导致传感器的电阻值发生变化,通过测量其电阻的变化量即可衡量所受压力的大小^[10]。已有研究表明,通过介电层的结构设计可以增加其接触面积或调整应力分布,有效提高传感器的性能^[11-13]。目前,研究人员已将金字塔^[14]、微圆顶^[15]、微槽^[16]及互锁^[17]等传统微结构广泛应用于提高柔性压力传感器的性能中,仿生结构设计正逐步成为国内外学者关注和研究的焦点。Chen 等^[18]通过模仿玫瑰花瓣表面的微纳结构,制备了一种具有三维层次阵列结构的柔性压阻式压力传感器,其检测范围达 $0.033 \sim 535.000 \text{ kPa}$,灵敏度达 0.432 kPa^{-1} ,并且响应时间

短、恢复速度快以及耐久性较长,成功实现了传感器高灵敏度和宽检测范围的协同优化。Liu 等^[19]以人体皮肤的生理结构为仿生原型,通过力和应变传感元件模仿 Merkel 细胞与 Ruffini 末梢在人体皮肤中的三维布局,成功制备了一种与“表皮”“真皮”和“皮下组织”结构相对应的电子皮肤,该电子皮肤力传感单元的灵敏度为 $5 \times 10^{-5} \text{ kPa}^{-1}$,线性响应范围 $0 \sim 80 \text{ kPa}$,响应时间约为 0.25 s ,具有出色的解耦传感性能,可精准识别不同尺度的压力信号。He 等^[20]结合了鲨鱼皮的微脊结构和鳄鱼皮的多级穹顶结构,提出了一种基于复合结构设计的柔性压力传感器,该传感器在 $1 \text{ Pa} \sim 80 \text{ kPa}$ 的检测范围内具有 18.2 kPa^{-1} 的高灵敏度。目前,仿生结构的研究已经在柔性压力传感器的性能上取得了一些改进,但大多数研究只是简单模仿生物结构的形状,未针对该形状开展力学优化设计。

本文在模仿蝎子栉器结构的基础上,加入根部直径皱缩的设计对该结构进行力学优化,制备出一种基于多壁碳纳米管(Multi-walled carbon nanotubes, MWCNTs)/聚二甲基硅氧烷(Polydimethylsiloxane, PDMS)复合材料的柔性压阻式压力传感器。通过增强应力集中效应,优化传感器的灵敏度和检测范围;采用 ABAQUS 仿真软件,分析仿生结构和普通圆柱结构的力学响应机制;通过场发射扫描电镜(SEM)表征蝎子栉器和传感器的表面形貌;通过数字源表等设备对传感器的灵敏度、检测范围和响应时间等性能进行测试,明确该仿生结构相较于普通圆柱结构的优势,为制备高性能和低成本柔性压力传感器提供新的结构设计思路。

1 传感器制备与表征

1.1 传感器制备

MWCNTs/PDMS 仿生结构压力传感器的制备工艺流程如图 1 所示。首先,将 PDMS 预聚物与固化剂(型号为 Sylgard 184,美国道康宁公司)按照质量比为 $10:1$ 进行混合,同时加入质量分数为 6% 的 MWCNTs(深圳市穗衡科技有限公司),并在磁力搅拌机上以 800 r/min 的转速搅拌 12 h ,得到组分分

布均匀的 MWCNTs/PDMS 复合溶液;其次,将 MWCNTs/PDMS 复合溶液注入具有仿生皱缩结构阵列的 3D 打印模具(尺寸为 $15\text{ mm} \times 15\text{ mm} \times 4\text{ mm}$)中,并在 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 的条件下固化 2 h;固化完成后,进行脱模处理,得到具有仿生皱缩结构的

MWCNTs/PDMS 导电层;再次,将 2 个 MWCNTs/PDMS 导电层面对面嵌合,得到传感器的介电层;最后,在介电层上下两侧的表面粘贴 $15\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ 的铜片作为电极,完成 MWCNTs/PDMS 仿生结构压力传感器的组装工作。

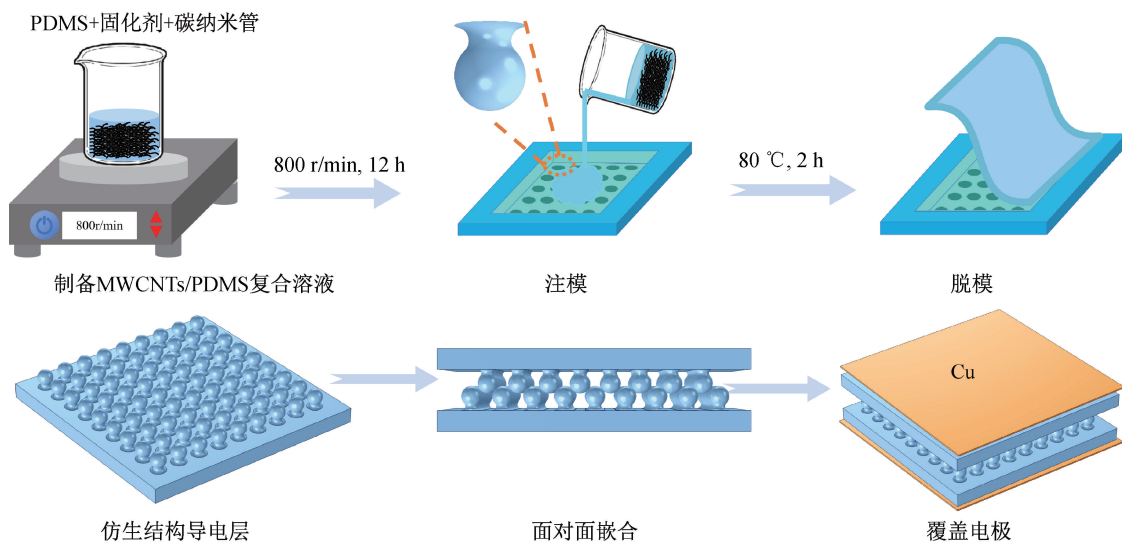


图1 MWCNTs/PDMS 仿生结构压力传感器制备工艺流程图

1.2 传感器结构的力学表征

本文设计的传感器导电层结构,其根部横截面呈现先向内收缩再向外扩展的特点,结构的顶部则采用球形设计。当传感器表面受到外界压力作用时,结构根部的直径收缩区域会产生明显的应力集中效应,使得传感器即使在承受微小的压力作用时,也能表现出清晰且易于测量的电阻变化。为了验证该结构相较于普通圆柱结构的合理性和优越性,本文采用 ABAQUS 仿真软件,分别对 2 种结构的单

个单元在受竖直力和水平力的工况下开展了力学仿真。图 2 为单个普通圆柱与仿生结构在不同工况下的应力云图,从云图中可以看出 2 种结构在受到不同力的作用后的应力动态扩散过程。通过对比分析可知,在相同力的作用下,加入根部直径皱缩设计的仿生结构相较于圆柱结构应力水平和形变有了明显提升,而且应力集中的位置恰好在根部直径皱缩的区域,这一仿真结果验证了根部直径皱缩的设计对于结构应力集中效应的放大作用。

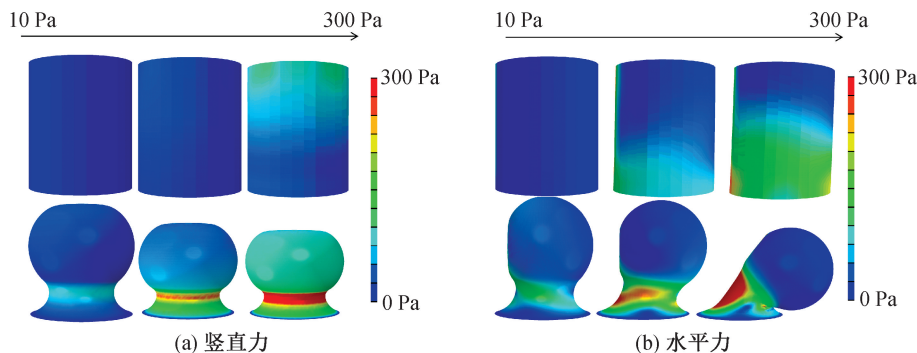


图2 单个普通圆柱与仿生结构在不同工况下的应力云图

鉴于实际应用中传感器的结构通常采用阵列式设计,为进一步验证该仿生结构在复杂受力场景下的力学性能,本文对阵列式仿生结构分别开展了竖直力和水平力作用下的力学仿真分析,阵列式仿生结构在不同工况下的应力云图如图 3 所示。从图 3

中可以看出:与单个结构一样,阵列结构中每个单元的根部直径皱缩区域以及单元之间的接触区域均会出现应力集中现象。这表明阵列结构不会影响单个结构的力学响应机制,并且仿生结构在复杂受力场景下依旧有良好的力学性能。

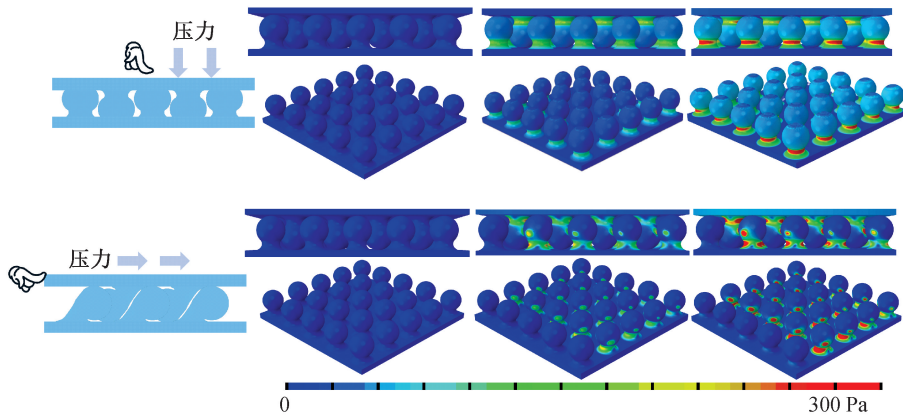


图 3 阵列式仿生结构在不同工况下的应力云图

1.3 性能测试设备

传感器与蝎子栉器的形貌表征采用场发射扫描电镜(型号为 GeminiSEM 500, 德国 ZEISS 公司); 传感器性能测试采用万能试验机 (ElectroForce 3330 型, 美国 TA (BOSE) 公司)、材料力学测试机 (Instron 3344 型, 美国 INSTRON 公司) 和数字源表 (Keithley 2400 S100 型, 美国吉时利有限公司)。

1.4 形貌表征

为验证仿生设计的有效性并观察传感器微观形貌, 本文采用 SEM 对蝎子栉器及仿生结构传感器的表面进行了系统表征。蝎子栉器及传感器的

SEM 及光学图如图 4 所示。图 4(a)–(c) 显示蝎子栉器表面布满微小的圆球状结构, 这一特征为本文仿生设计提供了直接灵感; 图 4(d) 所示的传感器光学图直观展现出该传感器的实物成功复刻了顶部球状以及根部直径皱缩的设计; 图 4(e) 所示的传感器表面低倍 SEM 图显示出该传感器的表面具有明显的粗糙度, 这有助于增加 2 个导电层之间的相对面积, 增大其在压力作用下导电通路的变化数量, 提高传感器的性能; 图 4(f) 所示的传感器表面的高倍 SEM 图像表明 MWCNTs 在 PDMS 基体中已实现均匀分散, 为构建稳定的导电通路奠定了基础。

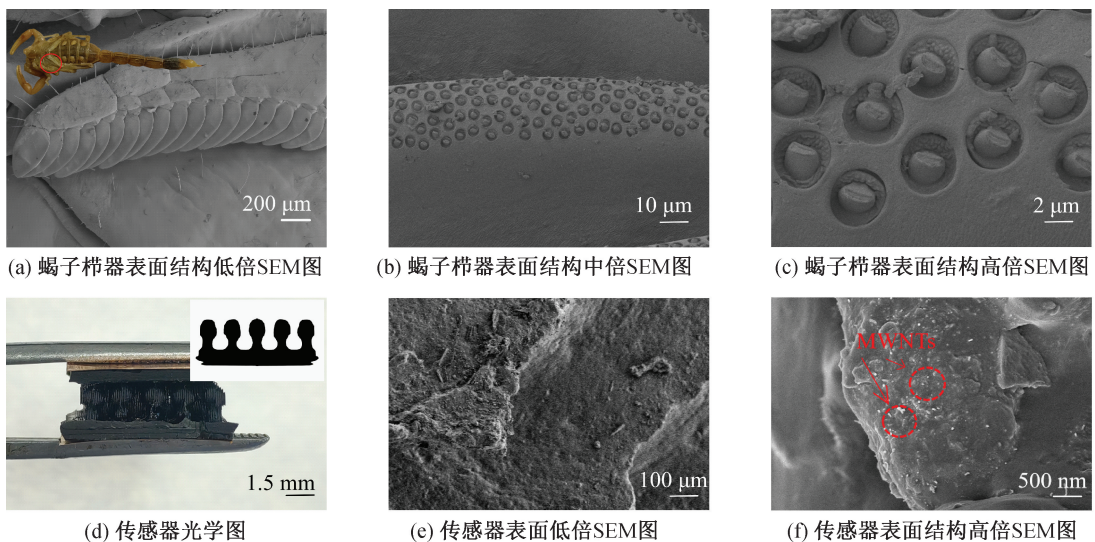


图 4 蝎子栉器及传感器的 SEM 及光学图

2 传感器性能探究和应用

2.1 传感器的原理分析

本文所制备的柔性压力传感器的工作原理是通过施加外部压力来改变 MWCNTs/PDMS 复合膜中 MWCNTs 网络通路的接触数量, 从而改变传感器电阻值的大小。在无外力作用时, 2 片

MWCNTs/PDMS 复合膜的接触面积较小, 其 MWCNTs 导电通路也相对较少, 因而传感器此时的初始电阻较高; 当传感器受到外部压力时, 2 片 MWCNTs/PDMS 复合膜的接触面积逐渐增大, 使 MWCNTs 导电通路的接触数量增多, 且受应力集中效应的影响, MWCNTs/PDMS 复合膜内根部直径皱缩区域的 MWCNTs 导电通路的接触数量也会

增多,此时传感器的电阻值会明显降低。

2.2 传感器的性能探究

为明确不同质量分数的 MWCNTs 对于传感器压阻响应的调控作用,本文分别对 MWCNTs 质量分数为 3%、6%、9% 的 MWCNTs/PDMS 仿生结构传感器进行了压阻性能测试。图 5 为不同质量分数的 MWCNTs/PDMS 仿生结构传感器电阻变化率 ($\Delta R/R_0$, 其中 ΔR 为电阻的变化量; R_0 为初始电阻) 与压强 P 的关系曲线。由图 5 可知: 在相同压强作用下, 质量分数为 6% 的 MWCNTs/PDMS 仿生结构传感器所对应的电阻变化率明显高于质量分数为 3% 与 9% 的传感器, 这是由于当质量分数为 3% 时, 传感器内部的 MWCNTs 导电通路本就不足, 受压后导电通路的数量也难以发生变化, 导致其电阻变化率较低; 当质量分数为 9% 时, 传感器内部的 MWCNTs 易发生团聚, 部分通路过早形成稳定接触, 削弱了由外力引发的导电通路的数量变化, 其电阻变化率同样较低; 当质量分数为 6% 时, 传感器内部的 MWCNTs 分散均匀, 既能构建充足稳定的初始导电通路, 又能使接触数量随外力发生明显的动态变化, 展现出最优的传感性能。

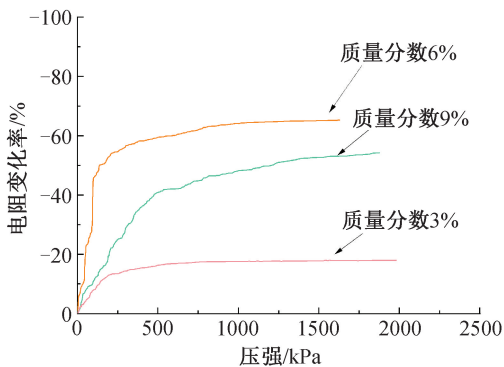


图5 不同质量分数的 MWCNTs/PDMS 仿生结构传感器电阻变化率与压强的关系曲线

基于不同质量分数的 MWCNTs/PDMS 仿生结构传感器压阻测试的结果, 选取样品 MWCNTs 质量分数同样为 6% 的仿生结构传感器以及普通圆柱传感器进行了灵敏度 S 的比较测试。图 6 为传感器电阻变化率与压强的关系曲线, 从图中可以看出, 与普通圆柱结构传感器相比, 仿生结构传感器的灵敏度和检测范围均有较大的提高。在 4.73 Pa~150 kPa 区间内, 仿生结构传感器的电阻变化率与压强近似呈现出线性相关性。传感器的灵敏度是指电阻相对变化量与所受压强的比值, 其数学表达式如式(1):

$$S = \frac{\Delta R/R_0}{P} \quad (1)$$

其中: S 为传感器的灵敏度, kPa^{-1} 。

结合式(1)可知, 仿生结构传感器的灵敏度与压强有着分段对应的关系。当仿生传感器在 4.73 Pa~150 kPa 的压强区间内工作时, 其根部直径皱缩区域尚未达到饱和变形。在压强的作用下, 根部直径皱缩区域会优先产生显著的应力集中效应, 这促使 MWCNTs 导电网络的接触数量快速增加, 接触电阻发生显著变化, 因此其灵敏度保持在一个较高水平, 最大灵敏度可达到 2.755 kPa^{-1} , 并且电阻变化率与压强呈现出良好的线性关系。当仿生传感器在 150 kPa~790 kPa 的压强区间内工作时, 其根部直径皱缩区域逐渐被压紧, 变形趋于饱和, 但尚未完全饱和, MWCNTs 导电网络接触数量的增长速率减慢, 削弱了电阻变化率与压强的线性相关性。因此, 虽然仿生结构传感器的灵敏度在这个区间内有所下降, 但仍能有效响应; 当仿生结构传感器所受压强超过 790 kPa 后, 此时仿生结构已被完全压缩, MWCNTs 导电网络达到最大的接触状态, 随后压强的增大无法增加其内部导电网络的接触数量, 传感器进入响应饱和阶段, 其电阻变化率趋于稳定。普通圆柱结构传感器的检测范围仅为 16.9 Pa~450 kPa, 且其最大灵敏度为 0.138 kPa^{-1} , 远小于仿生结构传感器。这是由于根部直径皱缩增强了仿生结构传感器的应力集中效应, 使仿生结构传感器在微小力的作用下, 内部 MWCNTs 导电通路的数量也可发生明显改变。同时在受到相同的压力作用下, 仿生结构传感器内部 MWCNTs 导电通路的数量变化要比普通圆柱结构的数量变化更加显著, 因此仿生结构传感器的灵敏度比普通圆柱传感器高。

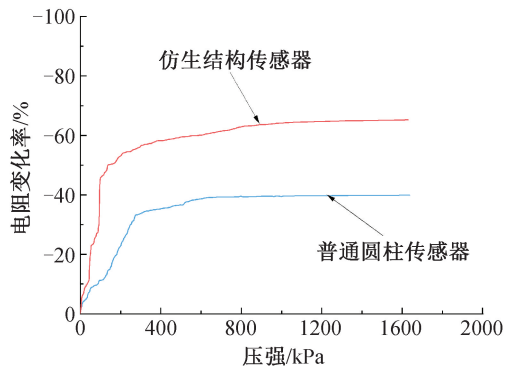


图6 传感器电阻变化率与压强的关系曲线

为了探究质量分数为 6% 的 MWCNTs/PDMS 复合膜的电学基础, 本文使用数字源表测试了该复合膜的体电阻 R , 并通过式(2)计算了复合膜的电导

率 σ_c :

$$\sigma_c = \frac{H}{RS_c} \quad (2)$$

其中: H 为复合膜的厚度,cm; S_c 为复合膜与铜片间的接触面积,cm²。计算结果显示其电导率为 1.415×10^{-3} S/cm。

为探究仿生结构传感器的稳定性,本文采取位移加载的方式,将传感器的厚度压缩 30% 和 60%,保持该压缩状态一定时间后再进行卸载操作。图 7 为传感器在不同压缩程度下电阻变化率和时间的关系曲线。由图 7 可知:在这两种压缩程度下,传感器的电阻变化率均能快速达到稳定状态,并在整个压缩阶段中保持稳定;卸载过程中,传感器也可迅速恢复到相应状态,充分展示出传感器优异的稳定性和重复性。

为了进一步探究仿生结构传感器的长期稳定性,本文在施加位移为 1 mm、频率为 4 Hz 的条件下,对传感器进行了 1800 次循环加载/卸载测试。

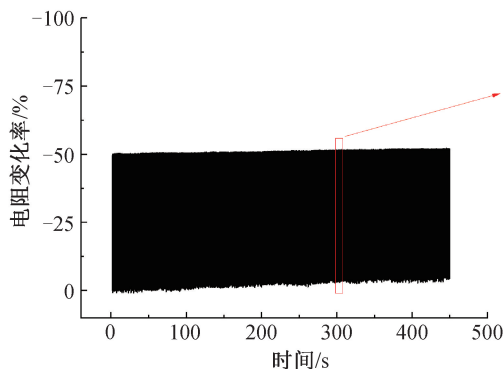


图 8 传感器在循环加载卸载下的电阻变化率和时间的关系曲线

为精准表征传感器的响应时间,将图 8 中传感器在某一时间下的曲线进行局部放大,结果如图 9 所示。由图 9 可知,该传感器的响应时间约为 170 ms。

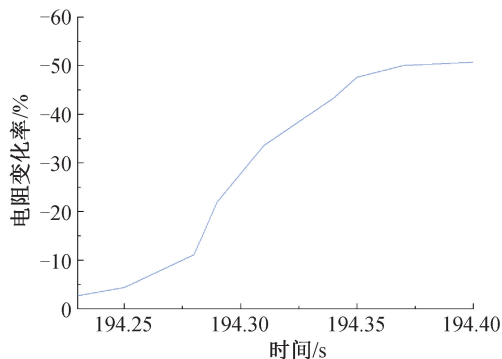


图 9 传感器响应时间图

2.3 传感器的应用

为验证本文所设计的仿生结构传感器在人体信

图 8 为传感器在循环加载/卸载下的电阻变化率和时间的关系曲线,从图中可以看出:传感器的信号波形在随机选取的一段时间内几乎保持一致;从整体情况来看,传感器的电阻变化率在 0%~50% 之间波动,且偏移程度较小。这些结果表明,仿生结构传感器具有良好的长期稳定性。

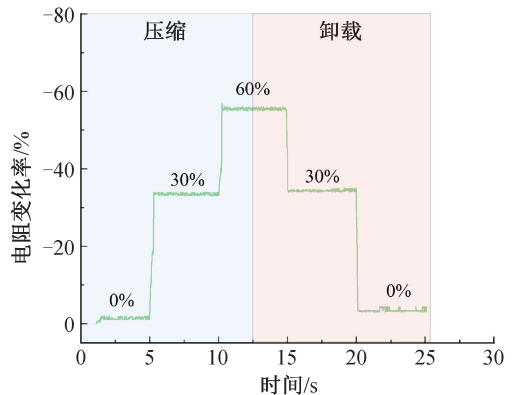
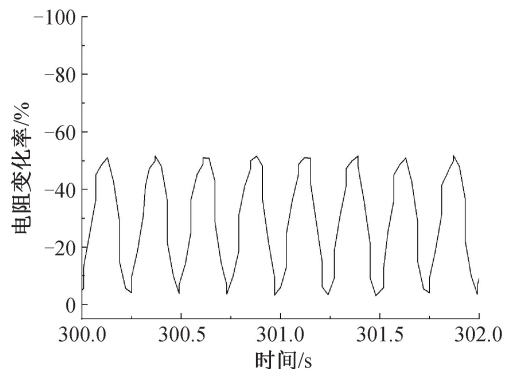


图 7 传感器在不同压缩程度下电阻变化率和时间的关系曲线



号监测领域中的应用潜力,本文将传感器贴合于人体不同部位,开展关节运动等生理信号的应用测试,传感器在监测生理信号下的电阻变化率和时间的关系曲线如图 10 所示。

将仿生结构传感器贴合于手指关节与腕关节处时,传感器监测手指关节与腕关节运动的结果如图 10(a)~(b)所示。由图 10(a)~(b)可知,在关节屈伸的循环运动过程中,传感器的电阻变化率与关节运动呈现出同步波动规律。当关节弯曲时,关节会对传感器施加一定的作用力,使传感器电阻变化率增大;当关节伸直时,关节对传感器的作用力减小,传感器电阻变化率也相应减小。需要特别指出的是,与自动化控制实验相比,每次手动弯曲关节时的角度和受力存在轻微偏差,导致响应曲线重复性相对较弱,但这一现象恰恰从侧面证明了传感器具备

较高的灵敏度,能够捕捉并反映出外界力学刺激的细微变化。上述应用测试结果充分证明,仿生结构传感器不仅可以实时监测关节运动引起的压力变化,还能通过电阻变化率的波动准确反映关节运动的频率和幅度,具备优异的动态响应特性。

将仿生结构传感器佩戴于喉部时,传感器监测喉部喝水运动的结果如图 10(c)所示。由图 10(c)可知,当受试者开始喝水时,喉部肌肉开始运动,导致传感器电阻变化率出现波动。这表明仿生结构传感器能够有效捕捉饮水过程中喉部的运动信息,并

通过电阻变化率的波动反映出喉部肌肉的活动状态。

当使用腕带将仿生结构传感器固定于手腕时,传感器监测脉搏运动的结果如图 10(d)所示。由图 10(d)可知,随着时间的推移,传感器的电阻变化率呈现规律的周期性波动,每个波动周期恰好对应一次脉搏跳动。这一结果表明,该仿生结构传感器能够准确监测脉搏跳动的信号。

综上所述,本文所设计的传感器在人体健康监测和运动追踪等领域具有实际应用潜力。

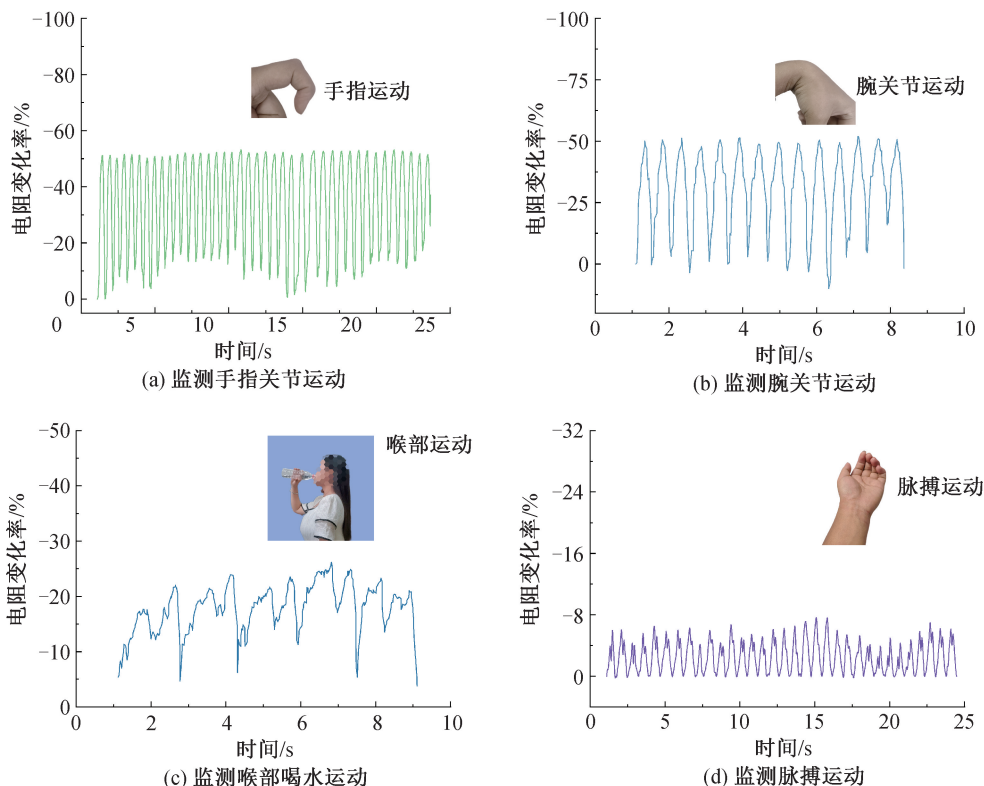


图 10 传感器在监测生理信号下的电阻变化率和时间的关系曲线

3 结论

本文基于 MWCNTs/PDMS 复合材料,通过仿蝎子桡器和根部直径皱缩的双重设计优化传感器介电层结构,制备了一种具备高灵敏度和宽检测范围的柔性压阻式压力传感器。通过仿真分析、性能表征和应用测试,探究了该传感器的结构合理性、传感性能和应用价值,主要结论如下:a)根部直径皱缩的设计使仿生结构相较于普通圆柱结构有明显的应力集中效应,验证了结构设计具有合理性与优越性;b)MWCNTs 质量分数为 6%时该传感器性能最佳,其灵敏度达 2.755 kPa^{-1} ,检测范围为 $4.73 \text{ Pa} \sim 790 \text{ kPa}$,灵敏度与检测范围均优于普通圆柱传感器,响应时间为 170 ms ,且经 1800 次循环加载/卸载测试仍保

持良好的稳定性,表明该传感器具有良好的传感性能;c)该传感器既可检测人体关节的大幅度运动,也可检测微小的脉搏波动和喉部运动,验证了其在可穿戴健康监测和医疗辅助等相关领域的应用前景。

本文仍有待完善:a)仅对比了圆柱结构和仿生结构的性能差异,尚未系统探究根部直径皱缩程度、排布方式及阵列密度等参数的影响;b)仅验证了传感器在 1800 次循环加载/卸载过程中的稳定性,其长期耐久性有待进一步验证;c)仅对比了结构在水平和竖直力下的力学响应,其在复杂受力情况下的力学响应有待进一步探究。针对上述问题,后续研究可以进一步优化传感器的结构和材料,并构建更贴合实际的受力模型,提高柔性压力传感器性能与实际应用潜力。

参考文献:

- [1] Hu X G, Wu M X, Che L X, et al. Nanoengineering ultrathin flexible pressure sensor with superior sensitivity and perfect conformability[J]. *Small*, 2023, 19(33): e2208015.
- [2] Yang N, Liu H L, Yin X Y, et al. Flexible pressure sensor decorated with MXene and reduced graphene oxide composites for motion detection, information transmission, and pressure sensing performance[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(40): 45978-45987.
- [3] 王海珍,李哲,唐昊阳,等. 基于棱台状微结构电极的多功能柔性压力传感器[J]. *微纳电子技术*, 2025, 62(8): 102-110.
- [4] Xu C, Chen J, Zhu Z, et al. Flexible pressure sensors in human-machine interface applications [J]. *Small*, 2024, 20(15): e2306655.
- [5] Liu Y J, Xu J J, Li Y X, et al. A high-sensitivity and wide-range flexible pressure sensor based on micro-pyramid arrays and porous nanofiber networks[J]. *Nanoscale*, 2025, 17(32): 18583-18592.
- [6] 宿荣芳,文心仪,王俊,等. 智能可穿戴柔性压力传感器的研究进展[J]. *材料工程*, 2024, 52(8): 98-108.
- [7] 金凡,吕大伍,张天成,等. 基于微结构的柔性压力传感器设计、制备及性能[J]. *复合材料学报*, 2021, 38(10): 3133-3150.
- [8] Pan W, Wang Y, Ouyang G, et al. High-sensitivity and low-cost wearable flexible pressure sensor based on MOFs[J]. *ACS Applied Electronic Materials*, 2023, 5(7): 3851-3858.
- [9] Wang X, Yu J, Cui Y, et al. Research progress of flexible wearable pressure sensors [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2021, 330: 112838.
- [10] Li J, Fang L, Sun B, et al. Review: Recent progress in flexible and stretchable piezoresistive sensors and their applications[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2020, 167(3): 037561.
- [11] 秦冲. 新型柔性三维力触觉传感器的设计与研究[J]. *传感器与微系统*, 2023, 42(10): 99-102.
- [12] 赵静,王子娅,莫黎昕,等. 微结构柔性压力传感器的性能增强机制、实现方法与应用优势[J]. *化学进展*, 2022, 34(10): 2202-2221.
- [13] 钟山,贾磊,李晓春,等. 基于 MXene/PEDOT:PSS 柔性压力传感器的制备及其在唇语识别中的应用[J]. *复合材料学报*, 2025, 42(1): 374-385.
- [14] An T, Zhang Y, Wen J, et al. Multi-level pyramidal microstructure-based pressure sensors with high sensitivity and wide linear range for healthcare monitoring[J]. *ACS Sensors*, 2024, 9(2): 726-735.
- [15] Wang M, Wang G, Zheng M, et al. High-performance flexible piezoresistive pressure sensor based on multi-layer interlocking microstructures[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2024, 12(34): 22931-22944.
- [16] Ji J, Zhang C, Yang S, et al. High sensitivity and a wide sensing range flexible strain sensor based on the V-groove/wrinkles hierarchical array [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(20): 24059-24066.
- [17] 刘佳豪, 阚峰. 互锁结构离电式柔性压力传感器的制备及应用 [J/OL]. *济南大学学报(自然科学版)*, 2026: 1-8. (2025-06-10)[2025-11-27]. <https://doi.org/10.13349/j.cnki.jdxbn.20250609.003>.
- [18] Chen J, Song T, Wang X, et al. Ultrasensitive and wide-range MXene/PDMS piezoresistive sensors inspired by rose petals [J]. *Nano Energy*, 2024, 131: 110285.
- [19] Liu Z, Hu X, Bo R, et al. A three-dimensionally architected electronic skin mimicking human mechanosensation [J]. *Science*, 2024, 384(6699): 987-994.
- [20] He J, Zhao R, Guo Z, et al. A high-performance pressure sensor combining the biomimetic structures of shark and crocodile skins[J]. *Advanced Functional Materials*, 2025, 35(52): e10130.

(责任编辑:康 锋)