

用于柔性交互界面的木质触觉传感器设计

郑杨纬哲¹, 朱晓冬^{1*}, 刘玉²

(1. 东北林业大学 家居与艺术设计学院, 哈尔滨 150040; 2. 东北林业大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150040)

摘 要: 开发兼具环境友好性、独特美学触感与高性能的柔性触觉传感器, 是推动可持续人机交互技术发展的关键。针对此问题, 提出一种基于天然木材的柔性触觉传感器制备新策略。该方法首先通过脱木质素及半纤维素处理天然木材, 得到保留微观多孔结构的柔性透明木质模板。然后, 通过原位聚合在该模板内部均匀负载聚吡咯, 并利用导电银浆进行图案化打印, 最终构建三明治结构传感器。该传感器在保持木材触感和机械柔性的同时, 实现高精度压力检测, 为柔性触觉交互界面提供可靠方案。性能评估结果表明, 该木基柔性传感器在 2~10 kPa 的不同压力下能够稳定地通过自身的非线性动态响应进行初步数据处理。此外, 对其在交互界面与可穿戴设备中的潜在应用价值进行分析, 提出的可扩展、高效的木材功能化策略, 不仅为木基柔性传感器提供柔性、高性能且环保的触觉传感解决方案, 也为兼顾材料可持续性、美学价值与触觉功能的交互系统设计开辟新途径。

关键词: 柔性木质材料; 木质纤维素; 聚吡咯; 原位聚合; 触觉传感; 交互界面; 压力传感器; 柔性电子

中图分类号: S75; TP212

文献标识码: A

DOI: 10.7525/j.issn.1006-8023.2026.03.007

Lignocellulose-Based Tactile Sensor for Flexible Interactive Interfaces

ZHENG Yangweizhe¹, ZHU Xiaodong^{1*}, LIU Yu²

(1. College of Home and Art Design, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 2. College of Materials Science and Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: Developing flexible tactile sensors that combine environmental friendliness, unique aesthetic tactile qualities, and high performance is crucial for advancing sustainable human-computer interaction technologies. This paper presents a new strategy for fabricating flexible tactile sensors based on natural wood. The method begins with the delignification and hemicellulose removal of natural wood to obtain a flexible, transparent wood template that retains its micro-porous structure. Subsequently, polypyrrole is uniformly loaded inside the template via *in-situ* polymerization, and patterning is achieved using conductive silver paste to create a sandwich-structured sensor. This sensor not only preserves the tactile and mechanical flexibility of the wood but also enables high-precision pressure sensing, providing a reliable solution for flexible tactile interactive interfaces. The performance evaluation results indicate that the wood-based flexible sensor can stably perform preliminary data processing through its intrinsic nonlinear dynamic response under different pressures ranging from 2 kPa to 10 kPa. Furthermore, this study highlights its potential applications in interactive interfaces and wearable devices. The proposed scalable and efficient wood functionalization strategy offers a flexible, high-performance, and environmentally friendly tactile sensing solution. It also paves the way for the design of interactive systems that balance material sustainability, aesthetic value, and tactile functionality.

Keywords: Flexible wood materials; wood cellulose; polypyrrole (PPy); *in-situ* polymerization; tactile sensing; interactive interface; pressure sensor; flexible electronics

0 引言

触觉传感器能够模拟人类皮肤的触觉感知功能,

将外界接触信息转化为电信号,从而识别不同的压力信号^[1]。在人机交互(human-computer interaction, HCI)中,高性能触觉传感器对于提升交互体验具有关

收稿日期:2025-10-09

基金项目:国家自然科学基金项目(32201481)。

第一作者简介:郑杨纬哲,硕士研究生。研究方向为设计与材料。E-mail:zhengyangweizhe@nefu.edu.cn

*通信作者:朱晓冬,博士,教授。研究方向为生物质复合材料。E-mail:pse4646@126.com

引文格式:郑杨纬哲,朱晓冬,刘玉. 用于柔性交互界面的木质触觉传感器设计[J]. 森林工程, 2026, 42(3): 511-520.

ZHENG Y W Z, ZHU X D, LIU Y. Lignocellulose-based tactile sensor for flexible interactive interfaces[J]. Forest Engineering, 2026, 42(3): 511-520.

键作用^[2]。然而,传统刚性触觉传感器存在耐用性低、舒适性差、柔性不足、体积重量大、成本高及难以回收等问题,限制其在智能手套、可穿戴服饰、康复医疗设备、互动显示及电子皮肤等应用中的推广^[3]。虽然现有柔性触觉传感器在轻量化^[4]、柔性和耐用性方面取得进展,但其主要材料如导电高分子^[5]、弹性体^[6]、压电材料^[7]、水凝胶^[8]和硅基复合材料等,多为不可再生或不可降解资源,带来高能耗和环境污染问题。水凝胶或纸基传感器虽在环保和生物相容性上表现良好,但在机械强度、耐久性和复杂形状适应性方面仍难以兼顾^[9]。同时,现有制备方法,如微机电系统(micro-electro-mechanical system, MEMS)^[10]、3D 打印^[11-13]和自组装技术^[14],通常需要高精密设备和复杂操作,使普通用户难以使用。由此可见,柔性触觉传感器在材料可持续性、机械性能、制备便捷性及环境友好性等方面仍存在显著空白,为开发低成本、环保且可实现可变压力感知的柔性触觉传感器提供了明确研究机会^[15-17]。

对上述问题,本研究提出开发基于天然木材的柔性触觉传感界面的方法。研究目标是设计一种操作简便、无需昂贵设备即可制备的木质柔性触觉传感器,同时保持高机械强度、折叠性、可再生性和生物可降解性,实现可变压力感知。具体而言,通过脱木质素和半纤维素处理,将天然木材转化为高强度、柔性且透明的木质衍生薄膜^[18];随后通过原位聚合制备聚吡咯导电层,并采用印刷工艺引入导电银浆,构建三明治结构传感器,实现压力与电信号的映射,见图1。试验中使用数字示波器测量电信号,并通过非线性拟合函数建立输入输出关系,验证传感器的压力灵敏度和准确性。本研究旨在利用天然木材的分层多孔结构、可再生性和生物可降解性,为人机交互系统提供一种低成本、高性能、环保且易操作的柔性触觉传感器方案。这不仅突破了现有材料在可持续性和机械性能方面的局限,也降低了应用门槛,为柔性触觉交互技术向普及化和可持续化发展提供新思路。

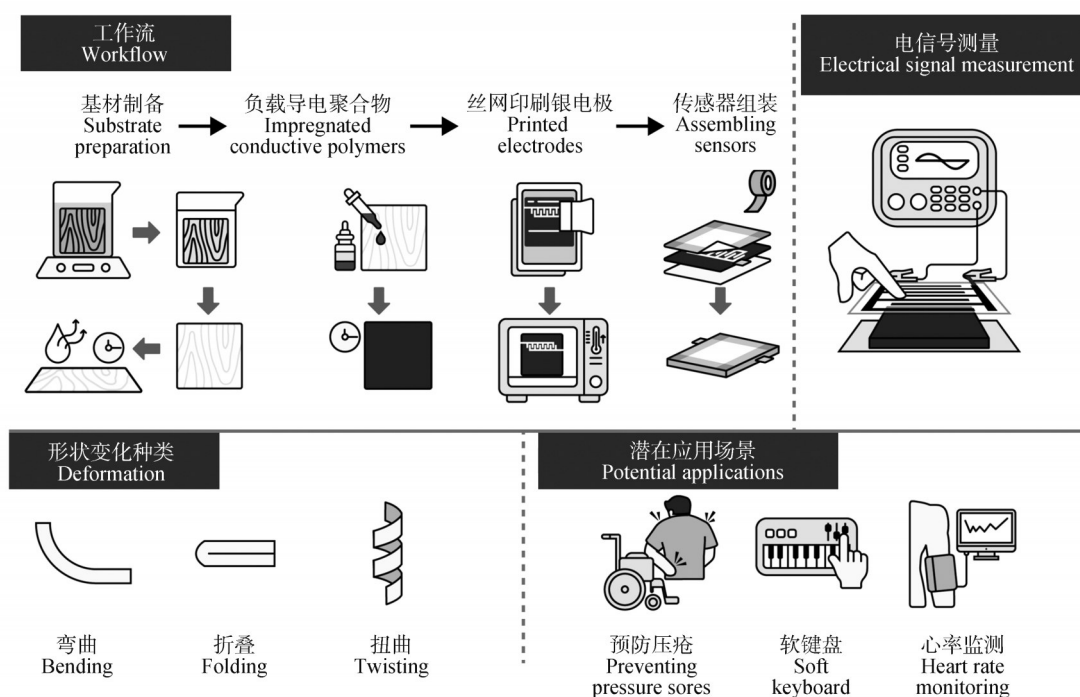


图1 柔性木质触觉传感器技术

Fig. 1 Schematic diagram of the fabrication process of the lignocellulose-based flexible tactile sensor

1 材料与方法

1.1 材料

轻木(*Ochroma pyramidale*)购自广州新奇高轻木贸易有限公司,规格为100 mm×100 mm×1 mm(纵向×径向×切向)。亚氯酸钠(80%, NaClO₂)、氢氧化钠

(>96%, NaOH)、乙酸钠(CH₃COONa)、吡咯单体以及三氯化铁(FeCl₃),均购自上海麦克林生化科技有限公司;导电银浆购自深圳新为科技公司。所有试剂均为分析纯,试验用水为实验室自产去离子水。

1.2 基底制备

柔性透明木薄膜的制备采用木质素与半纤维素

选择性去除法,见图2。首先,将木材样品切割为100 mm×100 mm×1 mm规格后,置于质量分数为5%、pH=4.6的亚氯酸钠溶液中,在80℃条件下浸煮5 h,以去除大部分木质素,见图2(a)。将处理后的轻木薄片用去离子水清洗以去除残留的亚氯酸钠溶液,将样品浸泡于质量分数为1%的氢氧化钠溶液中2 h,以进一步去除残余木质素与半纤维素,见图2(b),将样品以蒸馏水漂洗,直至滤液接近中性。最终将样品平铺在玻璃板上,在20~25℃、相对湿度为60%~65%的室温条件下自然干燥得到半透明片状的透明木薄膜基底,见图2(c)。

1.3 柔性传感器制造

1.3.1 传感层制备

将透明木薄膜基底先后浸渍于质量分数为0.8%的三氯化铁溶液中2 h和0.105%吡咯单体溶液中3 h,通过原位氧化聚合反应在基底表面及孔隙内生成传感层,见图2(d)。

1.3.2 电极层制备

在本研究中,选择叉指电极作为传感器的核心结构设计。这种设计能够有效提高传感器的灵敏度和响应速度。叉指电极通过其独特的几何结构,能够在感应区域内形成电场集中效应,从而提高电流的响应效率。具体来说,叉指电极在感知外部物理刺激(如压力、应变等)时,通过电流变化将其转化为电信号,具有高灵敏度和快速响应的特点。此外,叉指电极的设计还能够有效减少电极之间的干扰,提高传感器的稳定性,尤其适用于需要高精度和高频响应的应用。

在电极设计阶段,采用Adobe Illustrator软件进行叉指电极的矢量图设计。通过该软件可精确控制电极指宽、指间距、长度及整体对称性等参数,从而在设计阶段实现电学性能与图案美学的平衡。设计过程中综合考虑了导电路径的均匀性、电场分布及应变响应区域,确保传感器在不同压力下具有稳定的压阻特性。在电极的尺寸设计上,选择电极宽度与间距均为0.75 mm的参数,电极的宽度与间距对电场分布和电流流动具有重要影响。过宽的电极可能会导致信号反应不够灵敏,而过窄的电极则可能造成电极间串扰。0.75 mm的宽度与间距设计在保证信号灵敏度的同时,确保电极的稳定性,适应柔性基底的特性,避免因过窄或过宽而导致的结构问题。

完成设计后,将矢量图导出用于后续丝网印刷的掩膜的制备^[19],以确保电极尺寸的精确控制与良好重复性。电极的制备方法通过丝网版将导电银浆印刷至透明木薄膜基底表面,印刷后在140℃烘箱中烧结

10 min,得到电极层,见图2(e)。丝网印刷工艺具有高精度的图案转移能力,相较于其他传统的制备方法,丝网印刷工艺具有较高的生产效率和成本优势,适合大规模生产,并且可以灵活调节电极的图案和厚度,以满足不同的应用需求。

在电极材料的选择上,本研究采用导电银浆。银具有优异的导电性能,是所有金属中电导率最高的材料之一,能够显著提高传感器的响应速度和信号传输效率。此外,银材料的加工性能也非常好,适合通过丝网印刷等工艺进行精细加工,确保电极结构的稳定性与高效性。

1.3.3 传感器组装

传感器采用三明治式结构,由3层组成:中间层为聚吡咯传感层;顶层为电极层,印刷银电极的一侧与传感层直接接触;底层为透明木薄膜基底,同时电极端部固定铜箔胶带作为外部引出端子。组装完成后使用聚酰亚胺胶带沿边缘密封,见图2(f)。组装完成的传感器具有良好的柔韧性,能够在多次弯曲或折叠过程中保持稳定形态,见图2(g),适应不同的使用需求。

1.4 压阻效应与电信号转换

木基柔性传感器的工作原理是基于聚吡咯的压阻效应^[20]。聚吡咯作为一种导电聚合物,其导电性依赖于聚合物链上的自由电子或掺杂离子。在外界压力作用下,聚吡咯材料的结构发生变化,尤其是在受压区域,材料的分子链发生压缩或弯曲,导致其导电通道的阻碍或拓宽,进而引起电阻的变化。这种压阻效应使得聚吡咯能够将外界的压力转化为电阻变化,从而实现压力信号的感知。具体而言,当外部压力施加于传感器表面时,压力会引起聚吡咯分子链的局部弯曲、压缩或拉伸,改变导电路径的几何形状与电子流动的路径,使得电阻发生变化。

为将电阻变化转化为电信号,试验中通过外接示波器实时监测电阻变化所引起的电压变化。示波器通过高频采样和高精度测量捕捉到电压信号,并将其转化为数字信号。示波器的输出信号会被传输到数据采集系统,然后进行进一步的处理。数据处理过程中,使用非线性拟合方法对原始电压信号进行去噪声和校准,以确保电信号与实际施加的压力之间呈现出准确的非线性关系。

通过这种方式,示波器不仅起到了电信号采集的作用,还能够通过精确测量电压变化来提供关于压力的实时反馈。最终,通过对电信号进行非线性拟合函数进行处理和分析,能够准确量化传感器所感知的压力强度,并与实际的压力值进行对比,从而为后续的触觉感知分析提供基础。

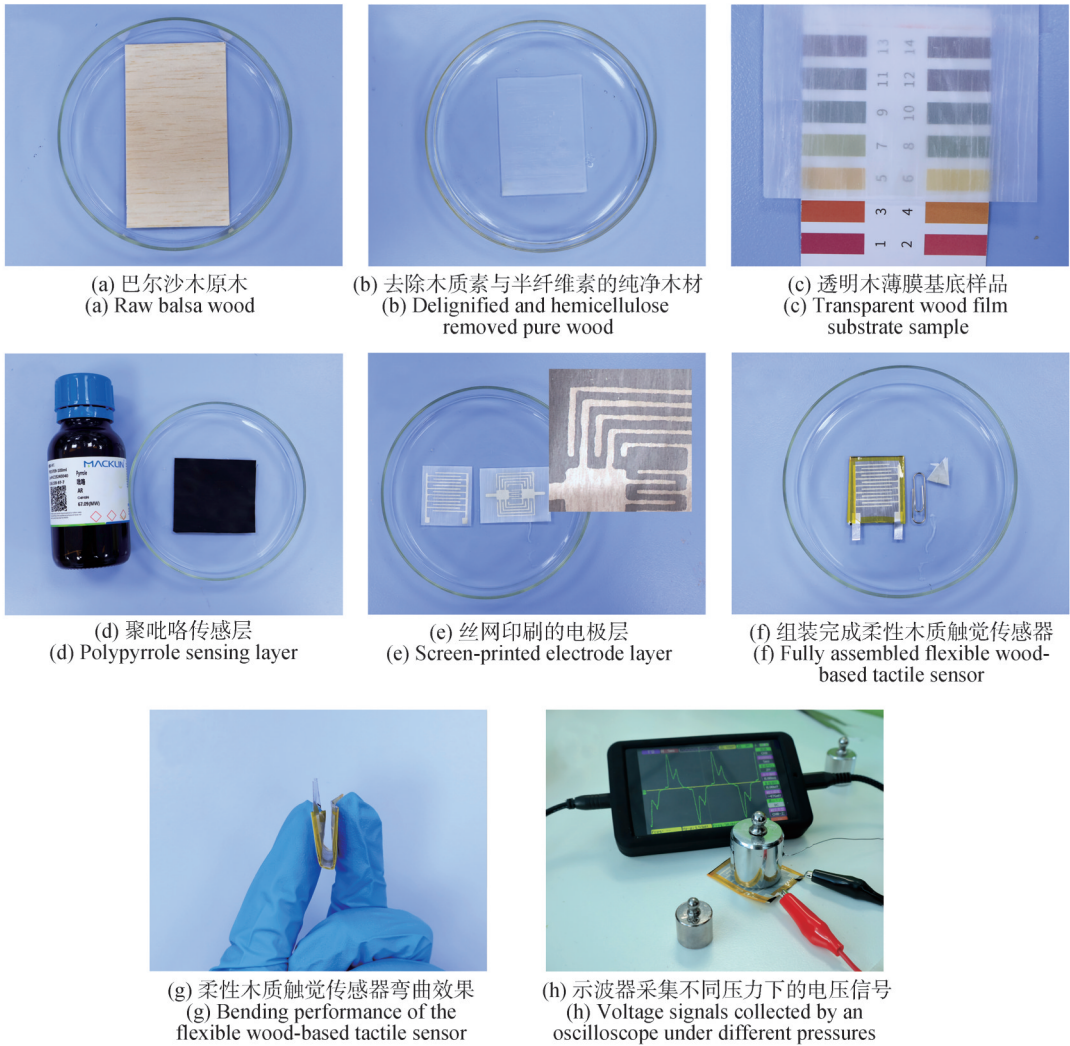


图 2 柔性木质触觉传感器样品制备过程

Fig. 2 Fabrication process of the lignocellulose-based flexible tactile sensor samples

2 结果与分析

2.1 微观形貌与化学性质分析

为研究聚吡咯在脱木质素木材多孔骨架中的分布情况,通过扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)观察脱木质素透明木膜与聚吡咯木膜的表面形貌。脱木质素透明木膜表现为致密且均匀的表面结构,无明显孔隙,表面光滑。结果表明,木材基底在脱木质素处理后保持了骨架的稳定性,见图3。

聚吡咯木膜表面则展现出明显的变化,聚吡咯成功地包裹了木质纤维表面,并在木材的纤维表面形成连续的薄膜结构。原位聚合后,聚吡咯在木材纤维的表面形成了光滑的聚合层,同时在一些局部区域出现了球状颗粒和团聚现象,这可能是由于聚吡咯在聚合过程中发生了自聚集,见图4。总体来看,聚吡咯成功地包裹了木质纤维表面,表明原位聚合

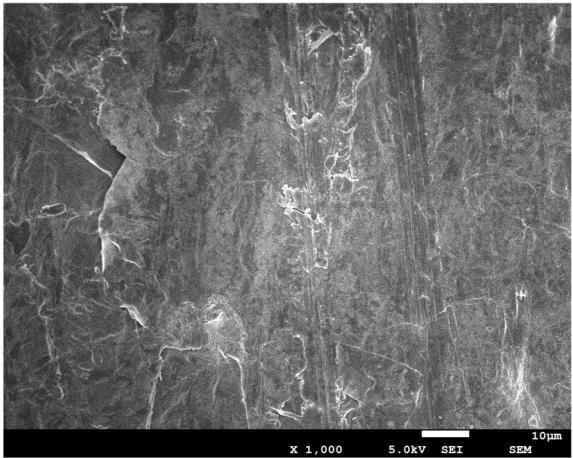


图 3 脱木质素透明木膜的表面形貌
(扫描电子显微镜图像)

Fig. 3 Surface morphology of delignified transparent wood membrane (scanning electron microscope image)

已成功进行,并且聚吡咯在木材的多孔结构中得到有效嵌入。

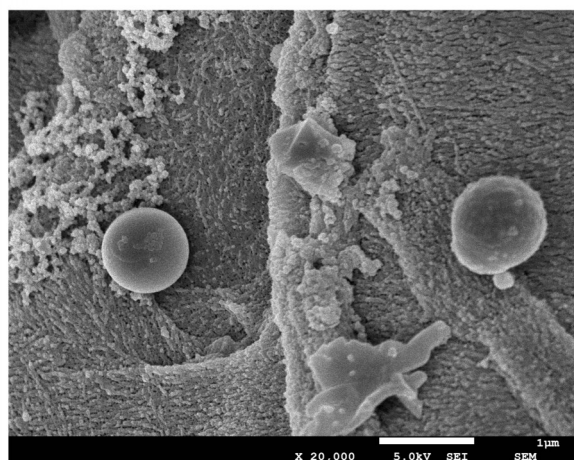


图4 聚吡咯木膜表面形貌及聚吡咯在脱木质素木材多孔骨架中的均匀分布情况(扫描电子显微镜图像)

Fig. 4 Surface morphology of polypyrrole wood membrane and the uniform distribution of polypyrrole within the delignified wood's porous skeleton (scanning electron microscope image)

化学性质分析进一步验证了聚合的成功性,表明聚吡咯在脱木质素木材的多孔骨架中成功聚合,并与木材表面牢固结合。

傅里叶变换红外光谱(Fourier transform infrared spectrometer, FTIR)分析用于确认木材样品的结构特征。使用美国 Thermo Fisher Scientific Nicolet iS20 FTIR 光谱仪(型号:25103133293)采集光谱,以识别木材样品中功能团的变化。在制备聚吡咯导电路径后,进行了FTIR测试以证明聚吡咯的成功合成。由图5可知,在 $1\,263\text{ cm}^{-1}$ 处出现的新峰可以归属于聚吡咯C—N键的伸缩振动峰, $1\,135\text{ cm}^{-1}$ 的峰对应于吡咯环的呼吸振动,而 $1\,541\text{ cm}^{-1}$ 的峰则为吡咯环中—C=C—碳碳双键的伸缩振动峰。这些新生成的特征峰表明,聚吡咯成功地包裹在木质纤维网络中,证明了原位聚合的成功。

2.2 电阻电压-压力值函数拟合与试验验证

2.2.1 电阻电压-压力值函数拟合

根据1.4节的压阻效应原理,木制触觉传感器可以通过电阻电压变化反映压力变化,需要建立电阻电压值与压力值的数学关系。一般情况下,线性回归方法普遍适用于构建2个变量的数学关系。但是考虑到木质材料制作工艺与人工测试的误差影响,电阻电压值与压力值之间难以维持简单的线性关系,这将导致传感器输出的压力值存在精度较差的问题。因此本研

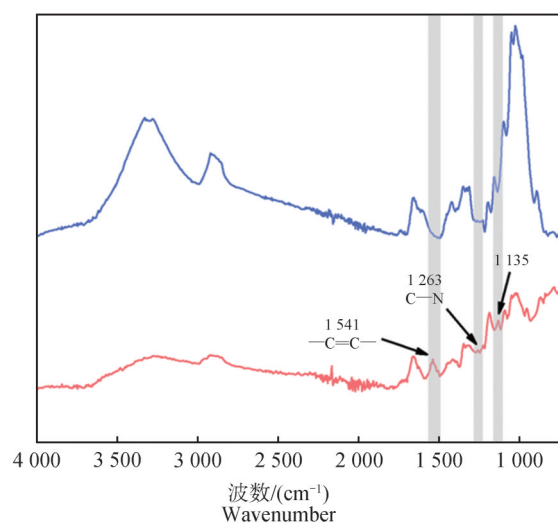


图5 脱木质素透明木膜及聚吡咯负载前后的FTIR光谱

Fig. 5 FTIR spectra of delignified transparent wood films before and after polypyrrole loading

究采用数据驱动拟合方法,通过试验采样的数据集,对电阻电压与电压输出值进行数学函数拟合,具体试验步骤如下。

1) 设定5组不同质量的砝码(自变量:压力值)进行压力测试,每组压力测试重复进行8次电阻电压数据(因变量:电阻电压值)的采样。

2) 对每组压力测试的8次数据采用均值滤波算法,得到每组数据的电阻电压均值。

3) 运用MATLAB软件进行多项式非线性数据拟合,并获得非线性拟合函数结果。

根据上述试验步骤,测试得到的试验数据,见图6,获得的拟合函数为

$$y = 0.0099x^3 - 0.2804x^2 + 3.1802x + 2.2485. \quad (1)$$

式中: x 为输入的压力值; y 为输出的电压值。

在具体的试验中,使用尺寸为 $30\text{ mm} \times 35\text{ mm} \times 0.2\text{ mm}$ 的传感单元进行测试。为研究传感器的感应精度,在每个测试强度下进行8次独立测试,以确保数据的可靠性和统计学意义。试验使用5个不同的测试强度,这些强度通过不同质量的砝码来实现,砝码的质量分别为20、50、70、100、200 g。每个测试强度下,使用标准砝码加载传感器,并通过调整砝码的质量来控制施加的压力。为确保每次接触区域均匀一致,在传感器和砝码之间放置一个面积约为 2 cm^2 的铝制间隔器。在试验过程中,2个测试者交替进行测试,其作用包括操作砝码的放置与移除,确保砝码在每次接触时的精准放置与一致性。由于触摸时输出电压可能不稳定,因此仅在示波器电压读数稳定超过1 s时记录数

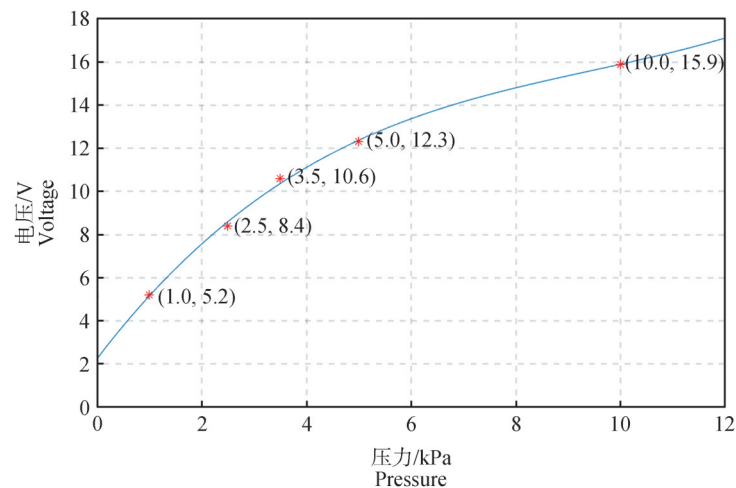


图 6 传感器压力值与电阻电压试验测试结果与数据拟合函数

Fig. 6 Experimental results and data fitting functions of sensor's pressure and resistance voltage

据,确保数据的准确性,减少瞬时波动的干扰。具体而言,当示波器读数连续1 s无变化时,即可记录该数据作为有效测试数据,见图2(h)。

2. 2. 2 试验验证

为验证电阻电压-压力值非线性拟合函数的准确性,进行独立的验证试验,并引入传统的线性回归方法

进行试验对比。该试验的目的是确认压力值与电阻电压输出之间的数学关系是一致的,且模型具有预测能力。在验证试验中,线性回归方法采用与2. 2. 1节相同的试验数据进行函数拟合,拟合结果见图7。线性回归方法得到的拟合函数为

$$y = 1.1161x + 5.5690. \quad (2)$$

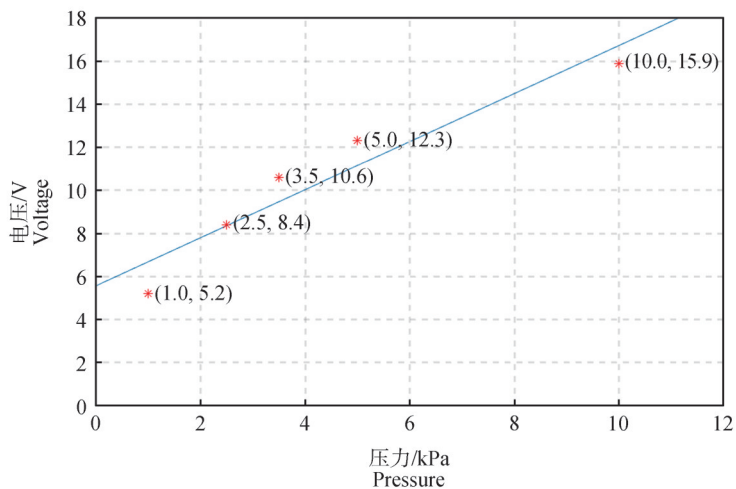


图 7 相应数据的线性回归分析

Fig. 7 Linear regression analysis of the corresponding data

为保证试验的公平性与通用性,试验中将所提出的电阻电压-压力值非线性拟合函数与线性回归方法得到的拟合函数编写入单片机(Arduino Uno R3)中。根据已获取的拟合函数关系,传感器将把实际压力作用导致的电阻电压值直接转换为输出压力值,因此比较传感器输出压力值与实际压力值可以评判拟合函数的准确性。验证试验选取2、4、6、8、10 kPa的压力进行

测试,测试数据见表1。

比较非线性拟合函数与线性回归方法在不同实际压力点的输出与精确度(见表1)的结果表明,非线性拟合在所有测试点的误差均小于线性回归,输出更接近实际压力。例如,在4 kPa时,非线性误差为1.0%,而线性回归误差为25.6%,非线性在该点精确度提高24.6%。5个点上精确度的平均提升约10.6%(最大提升24.6%)。

表 1 压力验证试验测试数据

Tab. 1 Pressure test validation experimental data

实际压力值/kPa Actual pressure value	非线性拟合函数输出压力值/kPa Output pressure value from the nonlinear fitting function	线性回归方法输出压力值/kPa Output pressure value from the linear regression method	非线性拟合函数精确度/% Accuracy of the nonlinear fitting function	线性回归方法精确度/% Accuracy of the linear regression method
2	2.06	1.92	3.0	4.0
4	4.04	5.03	1.0	25.6
6	5.98	6.61	0.3	10.1
8	8.12	8.37	1.5	4.6
10	10.07	8.49	0.7	15.1

通过这一系列试验可以确认传感器在不同压力水平下均能保持良好的响应,其输出电信号能够可靠反映外部压力的大小。这为后续在交互界面、可穿戴设备等应用中的推广提供了坚实的试验基础。

3 应用示例

鉴于木基柔性传感器具有优异的可扩展性,能够便捷地集成至多种物体表面,并适用于不同场景。本研究3个应用实例,以体现其功能性与应用潜力。

3.1 手腕压力监测垫

利用木基柔性传感器的可扩展特性,设计并实现

一款尺寸为 180 mm×250 mm×3 mm 的手腕压力监测垫,见图 8。该装置以市售鼠标垫为基底,在手腕支撑位置集成了木基柔性传感器,从而构建出一款具备手腕压力检测功能的鼠标垫。在现有应用中,该鼠标垫能够识别手腕主要受力点的压力值,并以可视化的方式呈现。未来工作中,该技术有望拓展至床垫等更大面积的应用场景,用于褥疮预防等健康护理。例如,对于昏迷、瘫痪或长期卧床患者,或需长时间使用特定仪器而导致局部皮肤受压的人群,该系统可帮助实现受力分布的监测与干预。

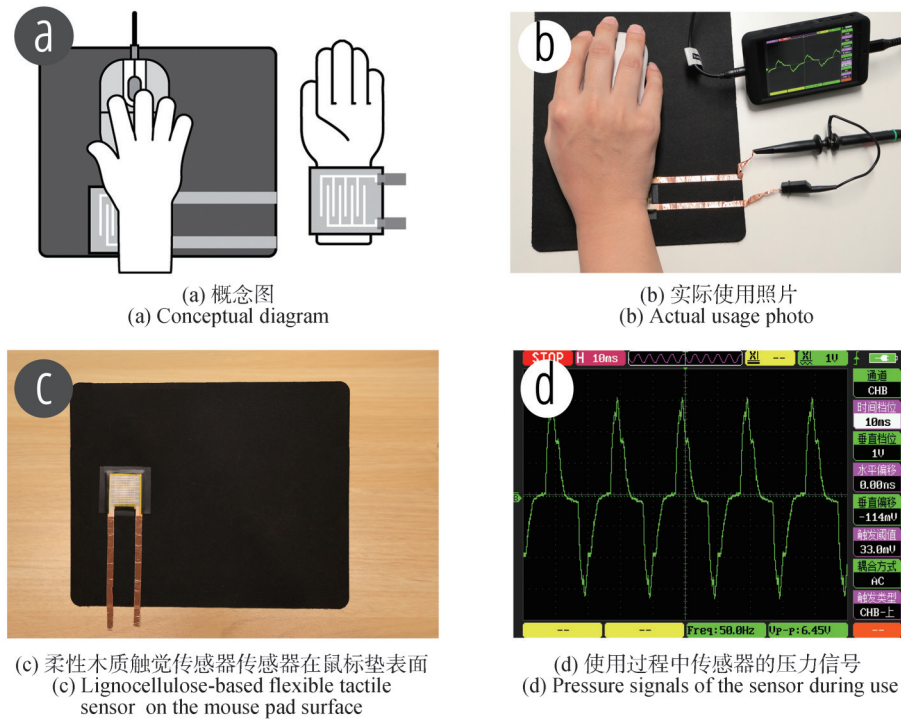


图 8 手腕压力监测垫

Fig. 8 Wrist pressure monitoring pad

3.2 触控控制器

基于木质柔性传感器,实现一种可用于音频操作的触控控制器,见图9。在实现过程中,仅需准备一片已制备好的木质柔性传感器与一块裁剪成适当尺寸的医用PU薄膜,贴合耳后皮肤区域。具体操作为首先揭除医用PU薄膜中带有黏附层的一面,将其平整贴合于

木质柔性传感器表面,然后将整体转移至耳后皮肤,最后撕除最上层覆膜。医用PU薄膜的覆盖并不会影响木质柔性传感器的传感性能。该设计使用户在不便于直接接听电话时,只需轻触耳后即可实现快速接听,从而提升了交互的自然性与便捷性。

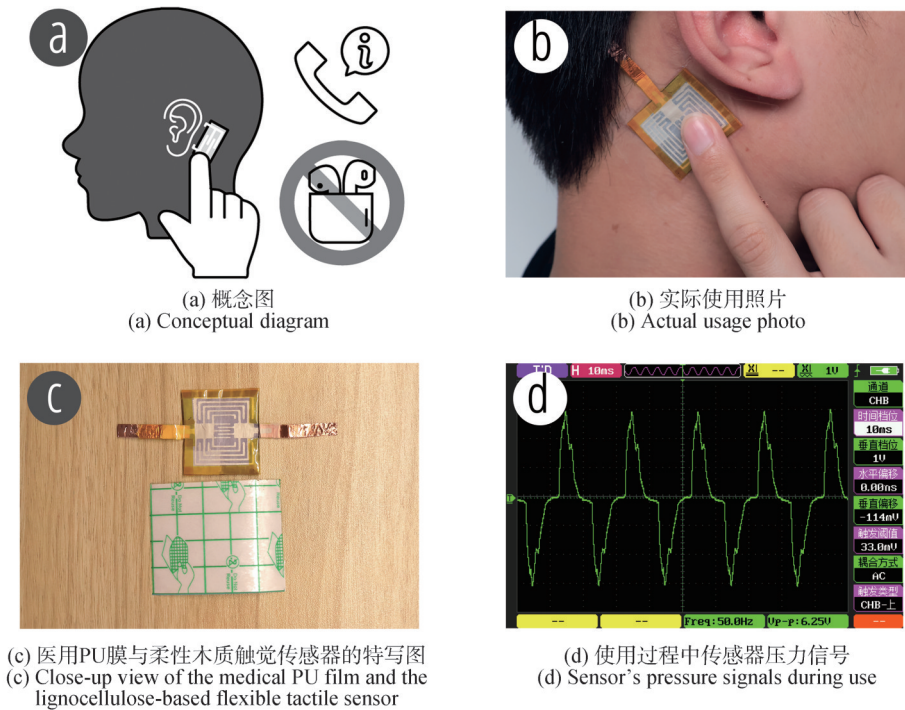


图9 触控控制器
Fig. 9 Touch controller

3.3 打地鼠游戏控制板

进一步开发一种基于掌压的游戏控制器,将木质柔性传感器技术巧妙地集成于操纵杆中,见图10。具体方法是通过医用PU薄膜将木质柔性传感器固定于操纵球表面,从而实现掌压信号的检测。该控制器能够将掌压力度的变化转化为游戏中“锤击地鼠”力度的变化,即通过掌压强度与频率的不同,直接控制游戏中虚拟锤击的强弱与节奏。当游戏中的地鼠冒出地面时,玩家可通过掌击控制器完成自然直观的操作。该设计将物理交互与数字娱乐紧密结合,不仅极大丰富了游戏体验,还实现了现实世界物理力量与虚拟环境的直观映射,使得交互过程更加自然、流畅。

4 讨论与结论

4.1 讨论

尽管该方法具有较低的成本和复制难度,但其

可检测的压力范围有限,且尚不适用于中高压场景。此外,叉指电极的图案设计不仅可以影响传感器的电学性能,还具备一定的美学潜力。未来研究中,可尝试将电极图案设计与几何艺术、仿生结构或参数化设计方法相结合,探索不同图案形态(如放射状、分形和波纹状等)对传感性能及视觉表现的影响。通过兼顾功能性与艺术性的设计,有望提升柔性传感器在可穿戴设备与交互艺术等领域中的整体美感与应用价值。

虽然本研究主要集中在压力检测应用,但柔性传感器的潜力远不止于此。未来,柔性传感器有望广泛应用于身体表面,尤其是关节和其他高活动部位,通过形状变化采集运动和生理信号。这些传感器能够灵活适应复杂的表面,实时感知关节运动、肌肉活动等,并为健康监测、运动追踪等应用提供精确的数据支持。此外,随着物理储备计算(Physical Reservoir Comput-

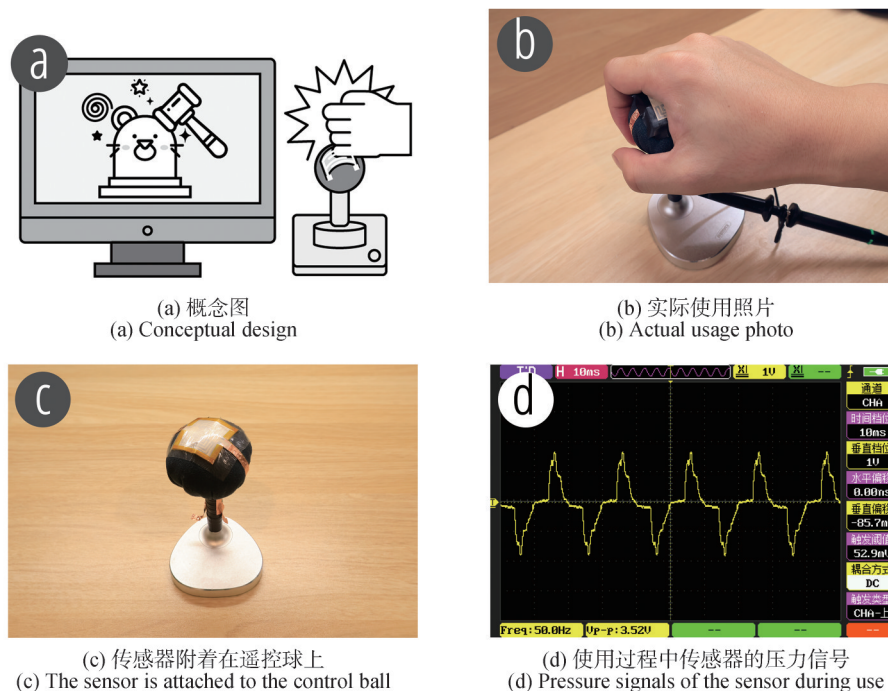


图10 打地鼠游戏控制板

Fig. 10 Whac-A-Mole game control board

ing, PRC)技术的发展,柔性传感器能够通过自身的非线性动态响应进行初步的数据处理,为智能系统提供实时反馈。结合物理储备池计算(physical reservoir computing, PRC)技术,柔性传感器不仅可用于信号采集,还能提高系统的处理能力和响应速度,推动其在智能医疗、可穿戴设备、机器人控制等领域的应用。

当前应用实例仍局限于通过铜箔胶带实现的有线传感方式,未能与微型电路板近场通信技术(near field communication, NFC)相结合。为进一步提升木基柔性传感器的性能与应用范围,未来将探索引入不同功能材料的可编程形变能力,以增强其柔性特征,并结合微型电路板或NFC技术拓展无线传感能力。此外,将开发原型模块库和交互式设计工具,供用户根据需求自由组合并快速预览设计结果,以更好地适应多样化的应用场景。进一步的研究将专注于疏水改性方法的传感器制备工艺,以提升其在不同湿度环境下的适用性,从而推动木基柔性传感器在医疗监测、人机交互及可穿戴设备等领域的应用。

4.2 结论

本研究提出一种基于天然木材的柔性触觉传感器制备方法,通过简化制备工艺、避免对高精度制造设备的依赖,成功实现低成本且易复制的木质薄膜传感系统。该木基柔性传感器在2~10 kPa表现出优异的稳定性。试验结果验证了其在柔性触觉传感应用中的可

行性,尤其在触觉压力感知方面表现出较高的灵敏度和稳定性。

参考文献

- [1] 李文艺,黄崧釉,李昆,等. 基于双层异构光纤的尖锐度感知及仿生触痛觉模拟研究[J/OL]. 光学学报, 2025: 1-19 [2026-05-13]. <https://link.cnki.net/urlid/31.1252.04.20250923.1423.004>.
LI W Y, HUANG S Y, LI K, et al. Research on sharpness perception and bionic touch painsensation simulation based on double-layer heterogeneousoptical fiber [J/OL]. Acta Optica Sinica, 2025: 1-19 [2026-05-13]. <https://link.cnki.net/urlid/31.1252.04.20250923.1423.004>.
- [2] 李名洋. 纤维素基仿生纤毛的制备及其自供电压力传感性能研究[D]. 南宁: 广西大学, 2025.
LI M Y. Preparation of cellulose-based biomimetic cilia and its performance in self-powered pressure sensing [D]. Nanning: Guangxi University, 2025.
- [3] 王江南,葛泉波. 一种EIT触觉传感器的灵敏度强度校正方法[J]. 仪表技术与传感器, 2025(1): 7-13, 19.
WANG J N, GE Q B. Sensitivity intensity correction method for EIT tactile sensor [J]. Instrument Technique and Sensor, 2025(1): 7-13, 19.
- [4] 胡小光. 基于水溶性牺牲层和泡沫印章的超薄柔性电子转印方法及应用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2024.
HU X G. Research on transfer printing methods and appli-

- cations of ultrathin flexible electronics based on water-soluble sacrificial layer and foam stamp [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2024.
- [5] 郑贻强. 基于 MXene 复合材料的柔性传感器设计策略及其在人体健康监测领域的应用研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2024.
- ZHENG Y Q. Flexible sensor design strategies based on MXene composite materials and their application in human health monitoring [D]. Changchun: Jilin University, 2024.
- [6] 朱源祥, 黄尧, 吴大鸣, 等. 基于 PDMS 介质层的双层柔性电容式传感器 [J]. 塑料, 2025, 54(4): 71–75.
- ZHU Y X, HUANG Y, WU D M, et al. Two-layer flexible capacitive sensor based on PDMS dielectric layer [J]. *Plastics*, 2025, 54(4): 71–75.
- [7] LI L, ZHOU X X, JIN B Q, et al. Highly compressible, breathable, and waterproof piezoresistive sensors based on commercial three-dimensional air-laid nonwovens [J]. *Colloid and Polymer Science*, 2024, 302(3): 449–461.
- [8] GUO J J, LIU X Y, JIANG N, et al. Highly stretchable, strain sensing hydrogel optical fibers [J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(46): 10244–10249.
- [9] 陈琳轶, 田君飞. 丝网印刷技术在纸基传感器中的应用 [J]. 分析化学, 2024, 52(7): 901–909.
- CHEN L Y, TIAN J F. Application of screen printing technology in paper-based sensors [J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2024, 52(7): 901–909.
- [10] MUHAMMAD H B, ODDO C M, BECCAI L, et al. Development of a bioinspired MEMS based capacitive tactile sensor for a robotic finger [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2011, 165(2): 221–229.
- [11] 吴美燕, 余雪景, 龚润竹, 等. 半纤维素基水凝胶的制备及应用研究进展 [J]. 林业工程学报, 2025, 10(2): 1–12.
- WU M Y, YU X J, GONG R Z, et al. State of the art in preparation and application of hemicellulose-based hydrogels [J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2025, 10(2): 1–12.
- [12] 杨华. 3D 打印技术研究进展及其在家居领域应用现状分析 [J]. 林业工程学报, 2025, 10(1): 12–21.
- YANG H. Research progress of 3D printing technology and analysis of its application status in home furnishing field [J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2025, 10(1): 12–21.
- [13] 刘衍均, 华晨曦, 宋欣雨, 等. 3D 打印柔性微网格的应变传感性能研究 [J]. 塑料工业, 2024, 52(5): 129–135.
- LIU Y J, HUA C X, SONG X Y, et al. Research on the strain sensing performances of 3D-printed flexible micro-lattices [J]. *China Plastics Industry*, 2024, 52(5): 129–135.
- [14] LI T, LUO H, QIN L, et al. Flexible capacitive tactile sensor based on micropatterned dielectric layer [J]. *Small*, 2016, 12(36): 5042–5048.
- [15] 林媛. 硅微米/纳米线在柔性温湿度传感器中的应用 [D]. 苏州: 苏州大学, 2023.
- LIN Y. Application of silicon micro/nanowires in flexible temperature and humidity sensors [D]. Suzhou: Soochow University, 2023.
- [16] GUO S Z, QIU K Y, MENG F B, et al. 3D printed stretchable tactile sensors [J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(27): 1701218.
- [17] ZHANG C, ZHENG H X, SUN J, et al. 3D printed, solid-state conductive ionoelastomer as a generic building block for tactile applications [J]. *Advanced Materials*, 2022, 34(2): 2105996.
- [18] TANG J F, WU L P, FAN X Q, et al. Superstrong, sustainable, origami wood paper enabled by dual-phase nanostructure regulation in cell walls [J]. *Science Advances*, 2024, 10(30), eado5142.
- [19] 吴家豪, 刘国栋, 石嘉钰, 等. PEDOT:PSS 柔性电极及其发光电化学池的制备和性能 [J]. 精细化工, 2025, 42(10): 2150–2157.
- WU J H, LIU G D, SHI J Y, et al. Preparation and properties of PEDOT:PSS flexible electrode and its luminescent electrochemical cell [J]. *Fine chemicals*, 2025, 42(10): 2150–2157.
- [20] WEI H, LI A, KONG D, et al. Polypyrrole/reduced graphene aerogel film for wearable piezoresistive sensors with high sensing performances [J]. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2021, 4: 86–95.