

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.09.001

面向电力巡检机器人视触觉融合作业的 柔性触觉末端研究

胡秋生¹, 刘平¹, 胡若海¹, 滕飞², 杨茜茜², 马渊明¹

(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: 电力巡检机器人具备实时信息传输和智能分析预警功能, 能有效提升电力设备管理水平, 然而现有的巡检机器人主要依赖视觉技术, 侧重于“巡检”功能, 缺乏问题工况智能作业的能力。文章首先制备一种基于聚乙烯醇(polyvinyl alcohol, PVA)和磷酸铁锂(LiFePO₄)复合材料的电容式柔性压力传感器, 并采用砂纸倒模对介电膜进行微结构处理, 提升电容式传感器的灵敏度, 使其电容相对变化达2 700倍(0~50 N), 并具备快速响应(47 ms)和高稳定性(1 000次循环)特性; 然后基于自电容工作机理, 设计最远探测距离大于5 mm的接近觉传感器; 最后构建4×4电容压力阵列的柔性触觉末端。将该柔性触觉末端应用于电力巡检机器人进行插头及网线拔取作业, 并统计100次作业的操作成功率, 结果表明, 视触觉融合模式下的高精度作业成功率显著提升, 证明该触觉末端能够为电力巡检中高精度作业任务提供物理支撑。

关键词: 触觉末端; 压力感知; 接近感知; 视触觉融合; 机器人

中图分类号: TP212.12

文献标志码: A

文章编号: 1003-5060(2025)09-1153-08

Research on flexible tactile end for visual-tactile fusion operations of power inspection robots

HU Qiusheng¹, LIU Ping¹, HU Ruohai¹, TENG Fei², YANG Qianqian², MA Yuanming¹

(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: The power inspection robot can transmit real-time information and provide intelligent analysis and early warning, strengthening the management ability of power equipment. The existing inspection robots are mainly based on visual technology, with a focus on inspection, and lack the capability for intelligent operation under problematic conditions. In this paper, a capacitive flexible pressure sensor based on a composite material of polyvinyl alcohol (PVA) and LiFePO₄ was developed. The dielectric film was subjected to microstructure treatment using sandpaper inversion to improve the sensitivity of the capacitive sensor. The relative capacitance change of the sensor reached 2 700 times (0-50 N), and it had fast response speed (47 ms) and high stability (1 000 cycles). Meanwhile, based on the working mechanism of self-capacitance, a proximity sensor with a maximum detection distance greater than 5 mm was designed. Finally, a flexible tactile end with a 4×4 capacitive pressure array was constructed and applied to the power inspection robot for the plug and network cable extraction tasks. By analyzing the success rate of 100 operations, it was found that the success rate of high-precision operations was significantly improved in the scenario of visual-tactile fusion, indicating that the tactile end can provide physical support for high-precision tasks in power inspection.

Key words: tactile end; pressure sensing; proximity sensing; visual-tactile fusion; robot

收稿日期: 2023-12-29; 修回日期: 2024-01-18

基金项目: 浙江省“领雁”研发攻关计划资助项目(2022C03052; 2024C01150); 国家电网有限公司科技资助项目(B312M023000R)

作者简介: 胡秋生(1997—), 男, 安徽淮北人, 合肥工业大学硕士生;

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.

人工电力巡检劳动强度大、工作效率低、检测质量分散、手段单一,且存在一定的漏检风险。而电力巡检机器人能够快速采集工况、实时信息传输、智能分析预警,提高了电力设备管理能力,确保了电网安全稳定运行,因此,采用机器人搭配各类传感器实现自动化巡检替代人工操作,已成为当前研究热点。

当前电力巡检机器人主要基于图像识别和红外热成像技术对电力故障实现巡查^[1],这种巡检方式虽能识别常见的电力故障,但难以满足智能检修需求。通过在机器人触觉末端集成触觉传感器可赋予机器人触觉感知能力,触觉传感器能实时获取物体的尺寸、形状、硬度等特征参数,这些触觉信息可显著提升机器人的物体识别精度和操作准确性,从而实现更智能化的作业。

触觉传感器主要分为接近觉传感器和压力觉传感器两类,可以实现对压力、距离、振动、滑动等物理量的检测。

常见的接近觉传感器主要分为光电感应式、超声波式和电容式^[2],其中电容式传感器因具有响应速度快、环境适应性强等特点更加适用于机器人触觉末端的接近探测。

压力觉传感器则主要分为压电式^[3]、压阻式^[4-9]和电容式^[10-14]3类。目前压电式传感器集成度低、制备工艺复杂;压阻式传感器容易受温度影响且没有较好的时间稳定性;相较之下,电容式传感器制备工艺简单,成本较低,具有良好的可靠性和稳定性,而且更容易实现大面积集成。但是,目前的电容式传感器灵敏度和分辨率较低,无法实现高精度压力感知。

本文设计一种集成压力觉与接近觉的触觉末端系统,并将其应用于电力巡检作业。该系统采用聚乙烯醇(polyvinyl alcohol,PVA)和磷酸铁锂(LiFePO_4)制作的复合离子膜作为电容式压力传感器的介电层。在压力阵列传感器、接近觉传感器与视觉系统的协同作用下,触觉末端对插头及网线的抓取成功率显著提升,其中网线抓取成功率从纯视觉引导的37%提高至96%。这一性能的提升验证了本文所研制的触觉末端在增强电力巡检作业可靠性方面的有效性。

1 柔性压力传感器设计与制备

1.1 柔性压力传感器制备工艺

传感器的制备流程如图1所示。

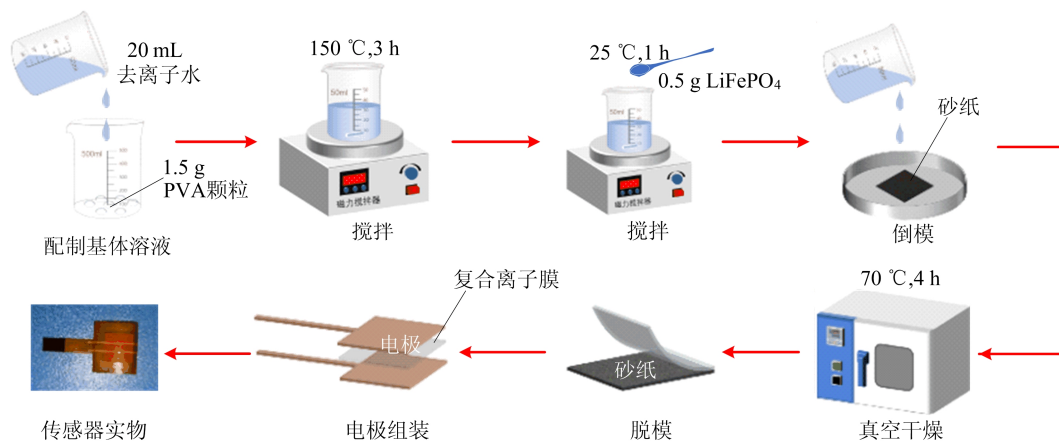


图1 传感器制备流程

首先将20 mL去离子水与1.5 g PVA颗粒混合,并在150 °C条件下搅拌3 h使PVA完全溶解形成PVA溶液;然后将0.5 g LiFePO_4 缓慢地加入到PVA溶液中,并持续搅拌1 h,以确保 LiFePO_4 与PVA溶液均匀混合;接着将320目的砂纸平放在培养皿中,并将混合溶液倒入培养皿中,再放入真空干燥箱,在70 °C下加热固化4 h;固化后脱模得到厚度约120 μm 、整体颜色呈淡黄色的PVA/ LiFePO_4 复合介电材料离子膜;

将离子膜切割成11 mm×11 mm大小,平整夹放在2片1 mm×10 mm的铜电极中,即完成传感器的制作。

1.2 基于 LiFePO_4 的介电材料体系设计

本研究选取PVA作为基体,以 LiFePO_4 离子液体作为填充材料,制备离子膜介电层。高单位电容密度的离子膜充当介电层时可以有效提升电容压力传感器的灵敏度,对 LiFePO_4 质量分数分别为0.5%、10%、15%、20%、25%、30%的离

子膜进行实验,明确离子液体配比对 PVA/LiFePO₄ 离子膜单位电容密度的影响,实验结果如图 2a 所示。从图 2a 可以看出:PVA 的介电膜单位电容密度仅为 0.53 pF/cm²;随着 LiFePO₄ 质量分数的增加,离子介电膜的单位电容密度增加,LiFePO₄ 的质量分数为 25% 时,单位电容密度为 33.45 pF/cm²;当质量分数达到 30% 时,单位电容密度不再显著提升,这是由于聚集在介电层表面的离子达到饱和。本研究选择 LiFePO₄ 质量分数为 25% 的离子膜制作电容式压力传感器的离子型介电薄膜。

为验证 PVA 与 LiFePO₄ 结合的有效性,分别取纯 PVA、LiFePO₄、PVA/LiFePO₄ 介电膜进行傅里叶变换红外光谱 (Fourier transform infrared spectrometer, FTIR) 表征,结果如图 2b 所示。由图 2b 可知:2 998 cm⁻¹ 附近为 PVA 的乙烯基的拉伸振动吸收峰,1 535 cm⁻¹ 附近为 PVA 羟基的弯曲振动吸收峰;1 176 cm⁻¹ 附近为 LiFePO₄ 的磷酸根伸缩振动显示出的吸收峰;791 cm⁻¹ 附近为铁氧键伸缩振动的吸收峰。4 种特征峰均出现在 PVA/LiFePO₄ 的 FTIR 谱图中,说明 PVA 与 LiFePO₄ 得到了充分且有效的结合。

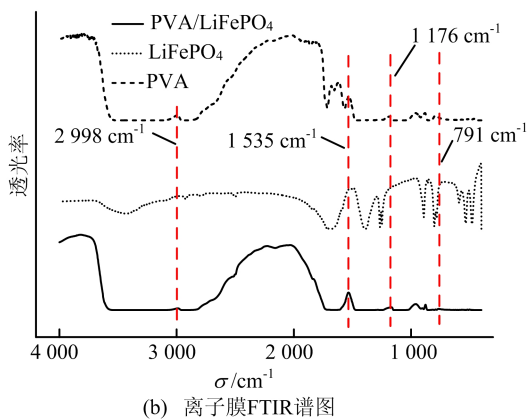
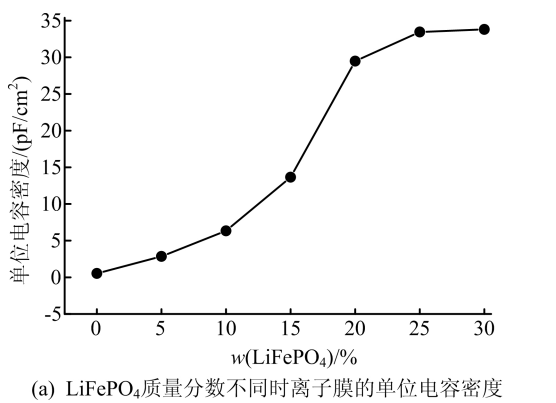
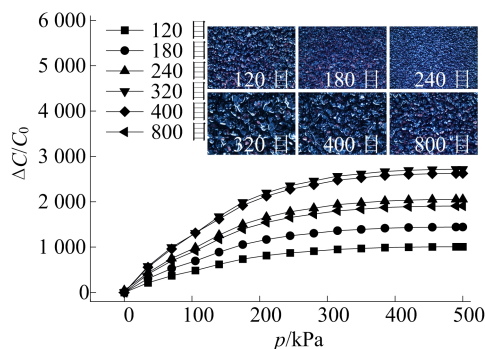


图 2 介电材料体系设计

1.3 介电材料表面微结构设计

为进一步提升传感器的灵敏度,将离子膜在砂纸上倒模,使离子膜表面产生微结构。微结构的引入使得电极和介电材料在受到压力时,电极与介电层的接触面积变大,从而使传感器的灵敏度提升。

分别使用 120、180、240、320、400、800 目的砂纸倒模制备微结构,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如图 3 所示。



从图 3 可以看出,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;高目数砂纸所制作的微结构尺寸较小,微结构产生并不明显;而在 320 目砂纸倒模下,离子膜的微结构清晰可见,表现出的灵敏系数最高,为 10.821 kPa⁻¹。

通过实验最终选取 320 目砂纸倒模制备压力传感器。

2 压力传感器工作机制及特性

2.1 压力传感器工作机制

压力传感器的工作机制如图 4 所示。

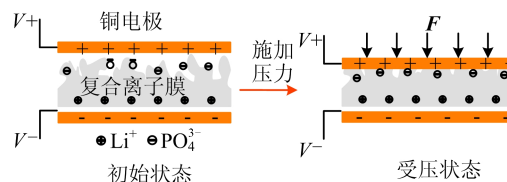


图 4 压力传感器工作机制

LiFePO₄ 在 PVA 基体中以自由离子形式存在。当在传感器两端施加电压时,正、负离子因受到电极正、负电荷的吸引而聚集在介电层表面,继而在介电层上、下表面分别形成微电容。上、下电

容为串联形式,降低了传感器的初始电容。当传感器受力发生形变时,微结构使得上电容的接触面积发生变化,聚集在介电材料表面的电荷量变多,继而使整个传感器的电容发生变化。同时,由于形成的上电容的正、负电荷间距很小,电容变化受面积变化的影响更大,从而使传感器具有高灵敏度。

2.2 压力传感器静态及动态特性

对压力传感器进行静、动态特性测试,结果如图 5 所示。

从图 5a 可以看出:当压力小于 150 kPa 时,传感单元具有较高的灵敏度,为 10.821 kPa^{-1} ,线性拟合度为 0.975,线性度较好;当施加压力大于 300 kPa 时,传感单元灵敏度降低,约为 1.183 kPa^{-1} 。

从图 5b 可以看出,传感器的加载与卸载的滞环误差最大值为 $\Delta h_{\max} = 451.69$,传感器最大量程输出值为 2 716.74,因此传感器的迟滞误差为 $\pm 8.31\%$ 。

从图 5c 的逐级分段压力加载测试曲线可以看出:当压力小于 0.5 N 时,传感器对力的分辨率可达 0.1 N;当压力达到 50 N 时,传感器的电容变化仍在增加,说明传感器压力检测范围可达 50 N。

从图 5d 可以看出:加载压力时,电容从 0 开始上升至稳定,经历时间为 47 ms;卸载压力时,电容回归到接近稳定所需时间为 59 ms。

从图 5e 的传感器频率响应测试曲线可以看出,在 0.5~4.0 Hz 的加载频率下,传感器均能正常响应。这表明该传感器对不同频率信号的敏感度和捕捉能力优秀,能够准确、高效地转换输入信号为输出响应。

从图 5f 的重复性测试结果可以看出,对传感器进行的连续 1 000 次的加载-卸载测试中,传感器重复产生接近或相同的输出值,且输出结果的方差较小。这表明该传感器具有出色的重复性,能够进行连续、重复的测量,并能保持高度的测量精度和可靠性。

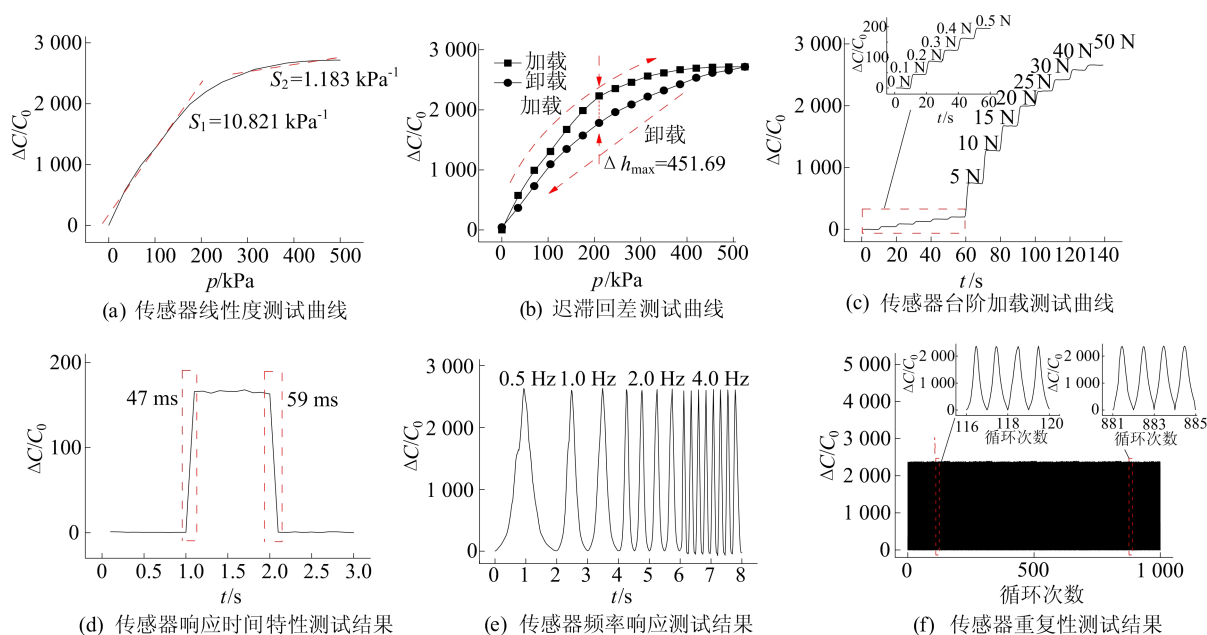


图 5 传感单元的静态特性和动态特性测试

3 柔性触觉末端的设计、制备及测试

3.1 电容式接近觉传感器设计

在触觉末端上加入电容式接近觉传感器,使触觉末端具有距离检测功能,其工作原理如图 6 所示。

电容式接近觉传感器由感应电极和屏蔽电极组成。感应电极通电后会形成感应电场,当有目

标物体靠近时,感应电场的电荷平衡被打破,继而使感应电极与大地之间的电容值变大;当目标物体进一步靠近时,受目标物体影响的电荷更多,感应电极与大地之间的电容进一步增加。屏蔽电极接入恒定的电压并环绕感应电极设计,当目标物体从侧面接近时无法影响到内部的感应电极,使得感应电极只受正方向目标物体的影响而产生电容变化。

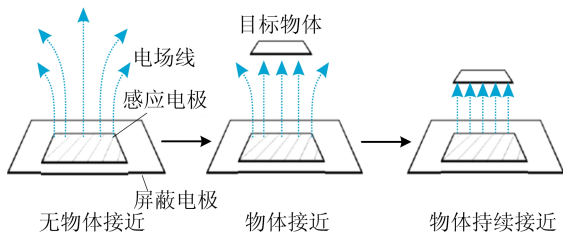
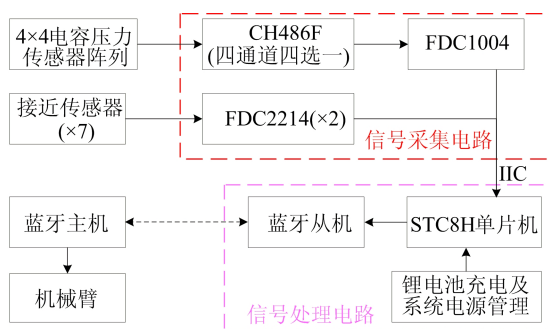


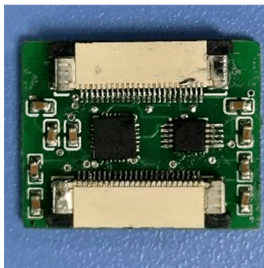
图 6 接近觉传感器工作原理

3.2 触觉末端功能及结构设计

触觉末端电气功能设计及实物图如图 7 所示。



(a) 触觉末端硬件电路设计框图



(b) 信号采集转接板实物图



(c) 信号处理板实物图

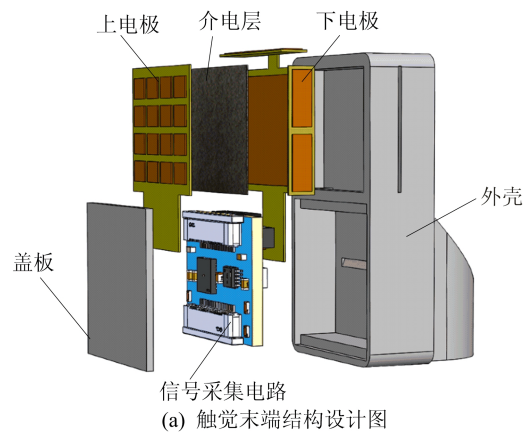
图 7 触觉末端硬件电路设计及实物图

触觉末端共由 16 个压力传感器和 7 个接近觉传感器组成。其中:16 个压力传感器使用 1 片 FDC1004 电容采集芯片和 1 片 CH486F 多路选通芯片进行读取,CH486F 芯片将 FDC1004 芯片原有的四通道电容输入扩展为 16 路;7 个接近觉传感器采用 2 片 FDC2214 电容采集芯片读取。同时,为缩短电容的引线,保证信号质量,采集电路独立在触觉末端内的信号采集转接板上,将模拟的电容信号转化为数字的 IIC 信号传递给后续处理电路。单片机通过读取电容采集芯片的数值获取信号变化,并通过蓝牙将数值传递给机械臂。通过发布 ROS 话题使机械臂的驱动程序可以使用这些数值。

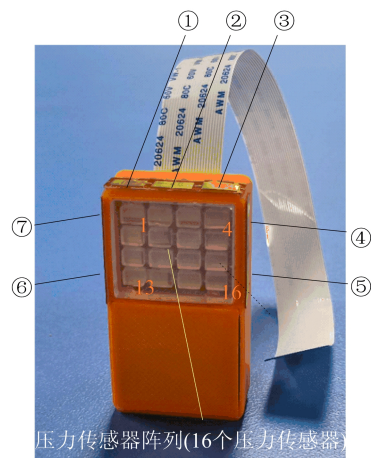
按照上述功能模块设计电力巡检机器人视触觉融合作业的触觉末端,其具体结构设计图和实

物图如图 8 所示。图 8b 中,①~⑦代表接近觉传感器。

触觉末端由 PLA 外壳、盖板、上电极、下电极、介电层、信号采集转接板组成。上电极和下电极使用 FPCB 设计,上电极尺寸为 21 mm×18 mm,内部为 4×4 共 16 个矩形电极,单个电极尺寸为 4 mm×3 mm,下电极为 21 mm×18 mm 的单个电极。介电层使用上述所设计的复合介电材料制作而成。上、下电极与介电层共同组成了 4×4 的电容式压力传感阵列。同时,在下电极的左、右两侧各添加了 2 个电极来实现侧面接近觉功能,单个电极尺寸为 3 mm×8 mm。上侧设计 3 个尺寸为 3 mm×6 mm 的电极来实现顶部接近觉功能。接近觉电极通过外壳上预留的缝隙引出,并通过接近觉电极背部的不干胶直接粘贴在 PLA 外壳的表面。触觉末端外部搭配信号处理板,触觉末端的信号从内部的信号采集电路引出,并使用软排线与外部信号处理电路相连。



(a) 触觉末端结构设计图



(b) 触觉末端实物图

图 8 触觉末端结构设计及实物图

3.3 触觉末端性能测试

对制作的触觉末端进行接近及压力性能测试。

首先对触觉末端的接近响应进行测试。将触觉末端放置在由螺旋测微仪组装的支架平台上,调节螺旋测微仪末端金属棒与触觉末端顶部电极的距离,测量得出顶部电极接近距离与电容变化的关系曲线,如图 9a 所示。结果表明,接近觉传感器的最远探测距离大于 5 mm,且越靠近检测电极,接近觉传感器的灵敏度越高,在最靠近检测电极的 0.1 mm 内,电容变化量达到了 0.17 pF。

同样对触觉末端的压力响应进行测试。将触觉末端放置在拉压力计下,使用下夹具固定,分别将直角三角形、圆形的模型件安装在拉压力计的上夹具上,并向触觉末端的压力阵列施加 5 N 的压力,其压力触觉阵列的响应结果如图 9b 和图 9c 所示。测试结果显示,该压力阵列能够准确记录物体表面的压力分布情况,且阵列中各单元间具有较高的一致性。

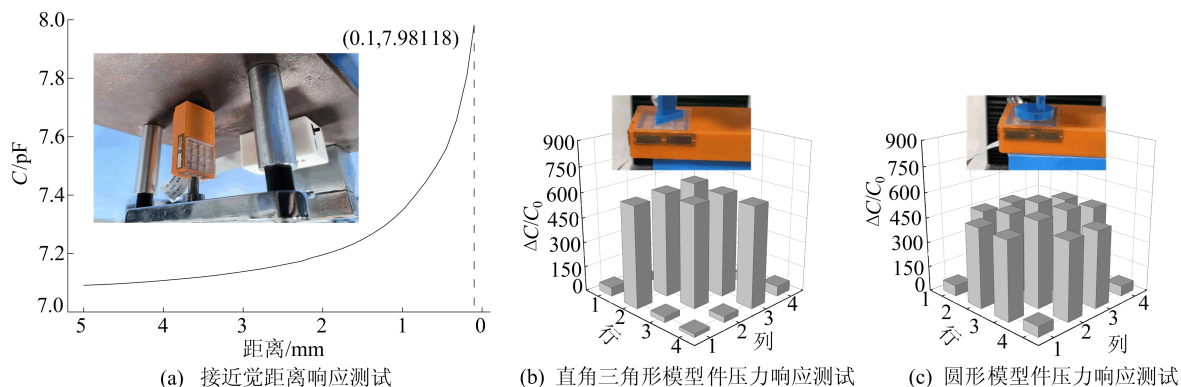


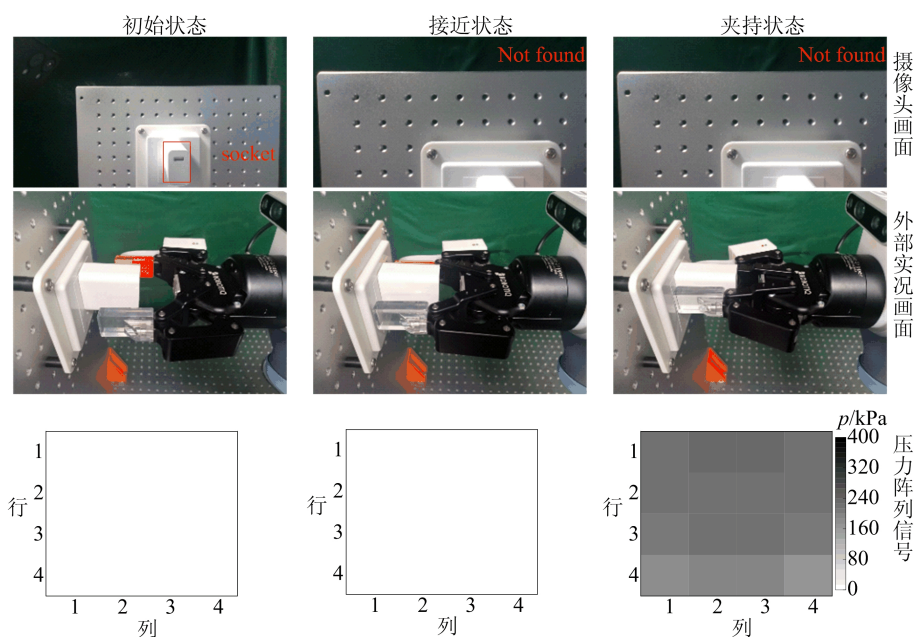
图 9 触觉末端性能测试

以上测试结果说明,触觉末端具备高精度的接近感知和压力感知能力。

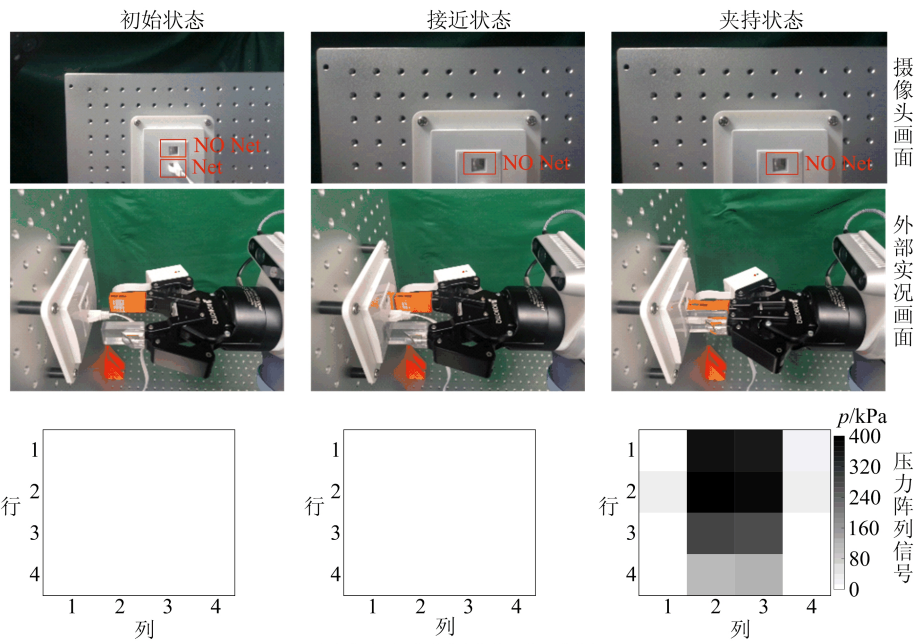
4 基于触觉末端的视触觉融合作业

为进一步验证触觉末端的可行性,进行插头及网线的拔取作业实验。实验结果分别如图 10 和图 11 所示。在本实验中,机械臂首先依赖视觉信号对待作业对象进行识别与定位,并根据识别结果

调整机械臂的姿态,使待作业对象处于机械夹爪的夹取范围,在靠近待作业对象后,使用接近觉传感器对夹取的最合适位置进行二次判断,完成夹持后,再通过压力传感阵列信号判断夹取位置是否合适,最后拔出。图 10a 和图 10b 中,从上到下依次为摄像头画面、拔取过程外部实景图、压力传感阵列信号色温图;图 11a 和图 11b 分别为插头拔取作业和网线拔取作业时接近觉传感器的响应图。

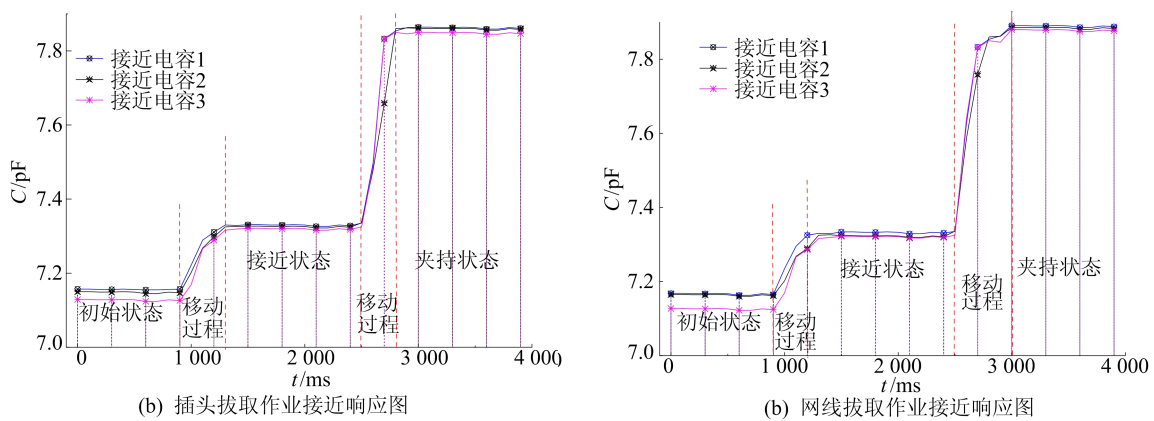


(a) 插头拔取作业压力阵列响应图



(b) 网线拔取作业压力阵列响应图

图 10 插头和网线拔取作业的压力阵列响应图



(b) 插头拔取作业接近响应图

(b) 网线拔取作业接近响应图

图 11 插头和网线拔取作业的接近响应图

从图 10a 和图 11a 可以看出:初始状态下,摄像头捕捉到插头,压力传感阵列和图 11a 的接近觉传感器都没有明显的信号产生;在接近状态下,此时摄像头画面已拍摄不到插头,依赖接近觉传感器的信号值判断出机械臂是否已到达最合适的抓取位置;夹持状态下,压力阵列有明显的信号变化,此时接近觉传感器也因更靠近插座而有明显变化。从压力阵列的 16 路信号大致相同也能判断出触觉末端对插头的夹持位置合适。

从图 10b 和图 11b 可以看出:初始状态下,摄像头捕捉到网线,依靠相机的双目定位解算出机械夹爪与网线的位置距离关系并向网线靠近,此时接近觉传感器与压力传感阵列并没有明显的信号产生;接近状态下,触觉末端靠近网线座,根据接近觉的信号调整夹爪的位置;夹持状态下,位置

调整合适后进行拔取,根据夹取的压力阵列信号可知,网线夹取位置在触觉末端压力阵列的中间 2 列,夹取位置合适。

本文测试了引入触觉末端前、后两类作业方式下机械臂拔取插头与网线的操作成功率,每类共计作业 100 次,结果见表 1 所列。

表 1 引入触觉末端前、后拔取作业成功率对比 %

任务类型	纯视觉作业	视触觉融合作业
插头拔取	85	99
网线拔取	37	96

从表 1 可以看出:在纯视觉时拔取插头的作业成功率只有 85%,而在引入触觉末端之后,作业成功率达到 99%;而拔取网线的作业成功率更

是从 37% 增长至 96%，增长了 59%。

5 结 论

本文基于 PVA 基底制作了 PVA/LiFePO₄ 复合材料充当电容式柔性压力传感器的介电层，并采用砂纸倒模的方式对 PVA/LiFePO₄ 膜表面进行微结构处理，进一步提升了电容式传感器的灵敏度，实现 50 N 压力传感范围内电容相对变化高达 2 700 倍，同时，传感器可实现 47 ms 的快速响应速度、59 ms 的恢复速度以及 1 000 次加载-卸载循环的高稳定性。

基于自电容的工作机理设计了接近觉传感器，结合所研制的压力传感器构筑了一种具有接近-压力阵列感知功能的机器人触觉末端，其中电容压力阵列由 4×4 电容压力传感器组成。将触觉末端应用于电力巡检机器人进行插头和网线拔取作业，并测试了纯视觉和视触觉融合两类作业方式下机械臂的作业成功率，结果发现视触觉融合的情景下高精度作业成功率显著提升，表明触觉末端能够为电力巡检中高精度作业任务提供物理支撑。

[参 考 文 献]

- [1] 黄山, 吴振升, 任志刚, 等. 电力智能巡检机器人研究综述[J]. 电测与仪表, 2020, 57(2): 26-38.
- [2] 李龙, 陈禾炜, 汪田鸿, 等. 基于接近觉的机械臂避障路径规划[J]. 机器人, 2022, 44(5): 601-612.
- [3] 王俊博, 高国伟. 压电式触觉传感器的优化与应用的研究进展[J]. 微纳电子技术, 2023, 60(2): 165-174.
- [4] 杨平安, 刘中邦, 李锐, 等. 电阻式柔性触觉传感器的研究进展[J]. 材料导报, 2023, 37(9): 36-49.
- [5] 徐娜, 王国栋, 陶亚楠. 柔性可穿戴压阻式压力传感器研究进展[J]. 化工进展, 2023, 42(10): 5259-5271.
- [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(7): 2101385.

- [7] LI J L, LIU P, HU Q S, et al. An ultra-sensitive flexible resistive sensor with double strain layer and crack inspired by the physical structure of human epidermis; design, fabrication, and cuffless blood pressure monitoring application[J]. Advanced Materials Technologies, 2023, 8(10): 2201466.
- [8] FENG H, LIU P, GUO X, et al. PSS modified by 3-aminopropyltrimethoxysilane linking large-area GNPs/PSS to silicone rubber with stable interface combination for high sensitivity flexible resistive sensor[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 465: 143009.
- [9] WU S G, LIU P, TONG W, et al. An ultra-sensitive core-sheath fiber strain sensor based on double strain layered structure with cracks and modified MWCNTs/silicone rubber for wearable medical electronics[J]. Composites Science and Technology, 2023, 231: 109816.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 吴其皓, 廖鹏飞, 茅寅, 等. 高灵敏度电容式柔性压力传感器的设计与优化[J]. 传感器与微系统, 2023, 42(4): 107-110.
- [14] 李文望, 张贺, 杨雨程, 等. 基于 PDMS 微结构介质层的柔性电容式压力传感器[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2023, 62(4): 525-532.

(责任编辑 胡亚敏)