

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2026.05.001

离子电容和霍尔效应协同的柔性多维力传感器

潘明旭¹, 王帆¹, 刘家希¹, 赵吉宾¹, 朱伟², 刘平²

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110169; 2. 合肥工业大学微电子学院, 安徽 合肥 230601)

摘要:文章采用聚乙烯醇和纳米纤维素纤维作为基体,以氯化钙和硼酸钠作为离子源,并结合倒模工艺,制备了一种基于离子介电层和皮革表层微结构的高灵敏度电容式压力传感单元,该传感单元在0~500 kPa压力传感范围内,灵敏度高达 24.6 kPa^{-1} ,响应时间为35 ms,循环稳定性超过1 000次;同时设计一种基于三轴霍尔芯片的切向力传感单元,该传感单元切向力在 $\pm 20 \text{ N}$ 范围内,检测的磁感应强度变化率约为 $1.362 \times 10^{-2} \text{ T/N}$ 。将所研制的压力传感单元与切向力传感单元集成得到一种机器人多维力传感器,并将其应用于电力巡检机器人巡检时的插拔作业。结果表明,基于多维力传感器的信号特征,该机器人可以实时监测并判断插拔作业中如滑移、正常、卡壳等典型工作状态,有效提升了机器人作业过程的全程感知能力及安全程度。

关键词:多维力传感器;电容式;霍尔式;插拔作业;智能机器人

中图分类号:TP212.1

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2026)05-0577-09

Synergistic ionic capacitive and Hall effect-based flexible multi-dimensional force sensor

PAN Mingxu¹, WANG Fan¹, LIU Jiayi¹, ZHAO Jibin¹, ZHU Wei², LIU Ping²

(1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110169, China; 2. School of Microelectronics, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China)

Abstract: A high-sensitivity capacitive pressure sensing unit was fabricated using polyvinyl alcohol (PVA) and nanocellulose fibers as the matrix and calcium chloride and sodium borate as ionic sources, combined with an inverse molding process. This unit, featuring an ionic dielectric layer with leather-inspired surface microstructure, demonstrates a maximum sensitivity of 24.6 kPa^{-1} within 0–500 kPa, a response time of 35 ms, and cyclic stability exceeding 1 000 cycles. Meanwhile, a tangential force sensing unit based on a triaxial Hall chip was designed, showing a magnetic induction intensity variation rate of approximately $1.362 \times 10^{-2} \text{ T/N}$ over a tangential force range of $\pm 20 \text{ N}$. By integrating the developed pressure and tangential force sensing units, a robotic multi-dimensional force sensor was constructed and applied to plugging/unplugging tasks of electric power inspection robots. Experimental results confirm that, based on multi-dimensional force sensor signal characteristics, the robot can monitor and discriminate typical states, such as slippage, normal operation, and jamming, in real time during plugging/unplugging operations, significantly enhancing the robot's operational perception and safety.

Key words: multi-dimensional force sensor; capacitive; Hall effect-based; plugging/unplugging operations; intelligent robot

机器人在执行操作任务如插拔、按、拧等操作时仍面临诸多挑战,主要源于机器人缺乏执行此类操作时所需的高度精准控制能力以及触觉信息

感知能力。引入触觉智能提升机器人作业安全性已成为工业界和学术界的共识。目前,机器人触觉感知能力主要依赖于柔性压力传感器,其按工

收稿日期:2025-08-13;修回日期:2025-11-05

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2024YFB4711204);浙江省科学技术厅领雁计划资助项目(2024C01150)

作者简介:潘明旭(1987—),男,辽宁沈阳人,博士,中国科学院沈阳自动化研究所副研究员;

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.

作原理主要分为电阻式^[1-3]、电容式^[4-7]、压电式^[8]等类型。其中电容式柔性压力传感器由于结构简单、功耗低、稳定性好等优点显现出较好的应用效果。目前电容式柔性压力传感器相关研究工作主要聚焦于新型介电材料与微结构设计,以实现传感器灵敏度的提升。文献[9]以羧基化纤维素纳米纤维(cellulose nanofibers, CNF)增强的共价交联聚丙烯酰胺网络为刚性网络,同时引入聚乙烯醇(polyvinyl alcohol, PVA)和聚乙烯吡咯烷酮构建三元半互穿网络,制备了三元半互穿纳米复合水凝胶,研制的电容式压力传感器具有 0.97 kPa^{-1} 的灵敏度、250 ms 的低响应时间和大于 1 000 次的循环稳定性;文献[10]使用离子液体改性三维纤维网络制备了电容式压力传感器,所制备的传感器具有 1.83 kPa^{-1} 的灵敏度、44 ms 响应时间和 2 000 次循环稳定性。虽然现有电容式柔性压力传感器研究在性能提升方面取得了较多进展,但受限于介电材料特性,仍然存在灵敏度较低、响应时间长及循环稳定性差的问题。

柔性多维力传感器设计通常需要多个敏感单元或复杂的机械结构。文献[11]提出榫卯结构多维力传感器,对信号耦合与解耦进行了结构分析和算法研究;文献[12]提出具有 4 个底部电极加 1 个顶部电极的柔性电容式三维力传感器;文献[13]设计并研究了一种柔性三维力传感器,该传感器具有 5 片电极,由于法向力与切向力之间存在强耦合,解耦过程需依赖复杂结构设计或专门解耦算法,如采用十字形电容器电极对或基于理论模型开发的解耦算法^[11-12]。另外,此类设计信号电极数量多、引线规模大,阵列化后电极与引线复杂度更高,电极间串扰风险加剧,导致传感器一致性差。相较之下,多轴霍尔传感器直接测量磁场矢量的 3 个正交分量 B_x 、 B_y 、 B_z ,从而在物理层面实现对多维磁场的“自解耦”;并且霍尔芯片采用成熟 MEMS 工艺制成,已经完全商业化生产,具有简单易用、体积小和一致性好等优点。但是仅使用单个霍尔芯片,施加于传感器的法向力会改变磁铁与芯片间的垂直距离,引起多维磁场强度变化;同时,切向力则会导致磁铁横向位移,改变磁场的横向分量;这 2 种效应使得单一霍尔芯片需要校正零点,且直接、独立地解耦出法向力与切向力变得困难^[14]。

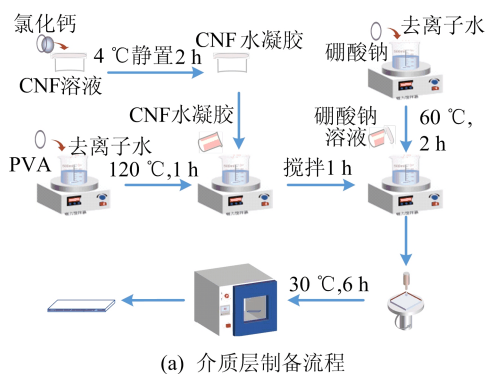
针对上述问题,本研究采用 PVA 和 CNF 为基体,以氯化钙和硼酸钠为离子源,结合倒模工艺,制备一种基于离子介电层和皮革表层微结构

的高灵敏度电容式压力传感单元,该压力传感单元在 $0 \sim 500 \text{ kPa}$ 范围内,灵敏度最高可达 24.6 kPa^{-1} ,响应时间更短(约 35 ms),并具有良好的循环稳定性;同时设计基于三维霍尔芯片的差动式切向传感单元。通过集成压力与切向力单元,构建一种离子电容与霍尔效应协同的小型多维力传感器,与传统柔性多维力传感器相比,减少了电极数量和引线复杂度;差动式设计进一步抑制了共模干扰如温度漂移,确保多维力感知的独立性与准确性;通过法向与切向传感的物理层分离,无需复杂的多维耦合信号矩阵求解算法。

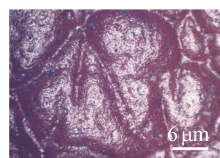
1 柔性压力传感单元设计及制备

1.1 压力传感单元制备流程

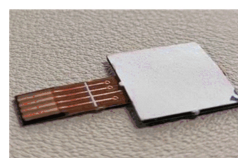
介质层制备流程和传感模块实物图如图 1 所示。



(a) 介质层制备流程



(b) 离子凝胶微结构电镜图



(c) 传感单元实物图

图 1 介质层制备流程和传感模块实物图

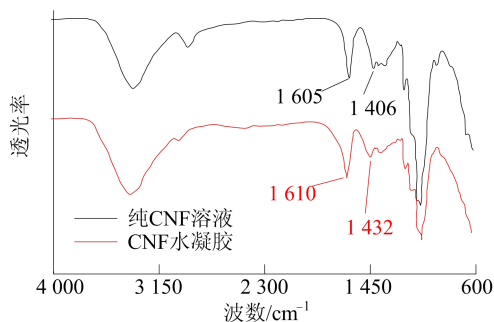
图 1a 所示为传感单元制备流程。将氯化钙与 CNF 溶液混合,氯化钙质量浓度为 2 mg/mL ,在 4°C 下保存 2 h,得到 CNF 水凝胶;将 PVA 加入去离子水中, 120°C 下搅拌 1 h 后冷却,得到质量分数为 15% 的 PVA 溶液;将硼酸钠溶解到去离子水中, 60°C 下搅拌 2 h,得到质量分数为 10% 的硼酸钠溶液;取 2.5 g CNF 水凝胶加入 6.5 g PVA 溶液中,磁力搅拌后,再加入 1.0 g 硼酸钠溶液;将 PVA/CNF 凝胶缓慢而均匀地旋涂在喷有脱模剂的荔枝纹皮革上,在 30°C 下真空干燥箱中放置 6 h,当介电材料完全固化后脱模,即得到具有皮革表面微结构的离子凝胶介电膜。

本研究通过倒模工艺将皮革的微观形貌转移

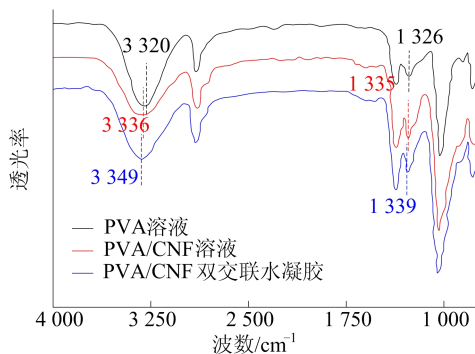
至 PVA/CNF 离子凝胶表面。图 1b 所示为离子凝胶介电层的光学电镜图,从图 1b 可以看出在 PVA/CNF 离子凝胶介电层表面成功构建了仿荔枝纹微结构。将离子凝胶介电膜裁剪为 $15\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ 方形片体,并以导电铜箔为电极,采用三明治结构封装,得到基于 PVA/CNF 离子凝胶介电层的电容式柔性压力传感单元,如图 1c 所示。

1.2 离子凝胶介电层材料体系设计

将氯化钙加入富含羧基的 CNF 后,CNF 链之间可通过钙离子交联形成第二交联网络,从而提高介电材料的机械稳定性。取纯 CNF 溶液、CNF 水凝胶进行傅里叶变换红外光谱(Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)分析,以验证 CNF 与钙离子之间的结合,实验结果如图 2a 所示。取 PVA 溶液、PVA/CNF 溶液和 PVA/CNF 水凝胶进行 FTIR 表征,实验结果如图 2b 所示。



(a) 纯 CNF 溶液和 CNF 水凝胶



(b) PVA 溶液、PVA/CNF 溶液和 PVA/CNF 水凝胶

图 2 不同复合材料配比介电层的 FTIR 特性表征

从图 2a 可以看出:CNF 溶液具有 1605 、 1406 cm^{-1} 等特征峰;加入氯化钙后,复合材料的红外光谱除保留上述 CNF 溶液的特征峰外,还出现了 1610 、 1432 cm^{-1} 等新特征峰,证明 CNF 的羧基与钙离子之间存在配位键,表明 CNF 水凝胶中形成了 CNF 链间的交联网络。

由图 2b 可知: 3320 cm^{-1} 附近宽而强的峰是

由 —OH 基团的伸展振动引起的,其对氢键作用十分敏感;与 PVA 溶液相比,PVA/CNF 溶液中的 —OH 伸展峰向更高波数移动,且峰值强度增强,这表明 CNF 与 PVA 分子链之间存在氢键作用;此外,在将硼酸钠溶液引入后, —OH 伸展峰进一步移动到 3349 cm^{-1} ,这表明硼酸钠与 PVA 之间出现了氢键作用。这对于改善水凝胶的力学性能、自愈能力和尺寸稳定性是有益的。可见,与传统的 PVA 水凝胶相比,本文设计的水凝胶含有动态硼酸盐键、金属羧酸盐配位键和氢键,有助于水凝胶形成交联网络,提高水凝胶的力学性能。

1.3 离子凝胶介电层微结构设计

本研究以荔枝纹皮革作为模板,制备了具有皮革表层微结构的离子凝胶介电层,传感器工作机理如图 3 所示。施加电压时,离子凝胶介电层中阴、阳离子分别被电极板中聚集的正、负电荷吸引而分别向离子凝胶电极接触界面聚集,形成具有超高电容值的双电层电容,双电层电容值主要受凝胶电极接触面积和单位面积电容值大小影响。当传感器空载时,离子凝胶表面少量尖端与电极接触,接触面积小,离子在接触界面的聚集受限,单位面积电容值小,因此传感器空载时的初始电容小;当向传感器施加压力时,离子凝胶受力压缩,表面尖端不断被压缩,与电极之间的接触面积增加,传感器电容值增加。

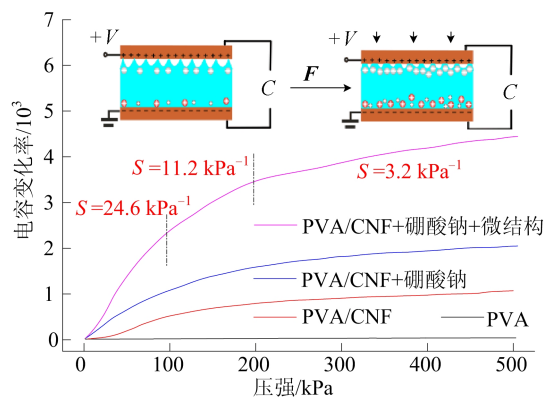


图 3 离子传感器传感机理及介电层微结构分析

为探究多孔结构设计对传感器性能的影响,分别采用纯 PVA、PVA/CNF、PVA/CNF+硼酸钠、PVA/CNF+硼酸钠+微结构制备了 4 组不同介电层的传感器样品,实验结果如图 3 所示。纯 PVA 介电层制得的传感器在 $0 \sim 100\text{ kPa}$ 压力下的灵敏度约为 0.2 kPa^{-1} ;当引入氯化钙处理的

CNF时,传感器灵敏度得到一定幅度的提升,在0~100 kPa 压力下可达到 5.0 kPa^{-1} ;在PVA/CNF中引入硼酸钠水溶液之后,传感器灵敏度进一步提升,在0~100 kPa 下可达 11.0 kPa^{-1} ,但在100 kPa 后趋于饱和;在加入离子液体的同时引入微结构时,传感器的灵敏度和传感范围均得到提升,传感范围可达500 kPa,传感器的平均灵敏度在0~100 kPa 压力下为 24.6 kPa^{-1} ,在100~200 kPa 压力下为 11.2 kPa^{-1} ,在200~500 kPa 压力下为 3.2 kPa^{-1} 。可见,微结构能有效提升传感器灵敏度和传感范围。

1.4 压力传感单元特性测试

通过拉压力试验机和数字电桥 (TH2829) 对所制备的压力传感单元进行相关的静、动态特性分析。为了测量量程以及分辨力,对传感单元进行台阶加载测试,结果如图 4a 所示,可以看出传感器具有较高的分辨力和量程。传感器的多级循

环加载测试如图 4b 所示,可以看出传感器具备良好的重复特性和结构弹性恢复性能;传感器迟滞特性测试采用 0~500 kPa 的加载-卸载循环,如图 4b 内嵌图所示,可以看出加载与卸载曲线存在分离,该滞后现象主要源于离子凝胶介电材料的黏弹性响应及其内部微结构在压缩后的非瞬时恢复行为,测得迟滞误差约为 5%。传感器响应时间测试结果如图 4c 所示,对传感单元施加瞬态压力时,电容相对变化从 0 ms 上升至电容稳定所用时间为 35 ms,卸载压力时,电容回归到接近稳定所用时间为 32 ms,可见传感器的响应时间短,能够检测瞬态压力变化。

为进一步评估传感器稳定性,在 120 kPa 压力下进行了多次循环加载测试,结果如图 4d 所示,多次循环的力-电响应曲线高度重合,且输出信号波动幅度小,表明传感器具有良好的重复性和稳定性。

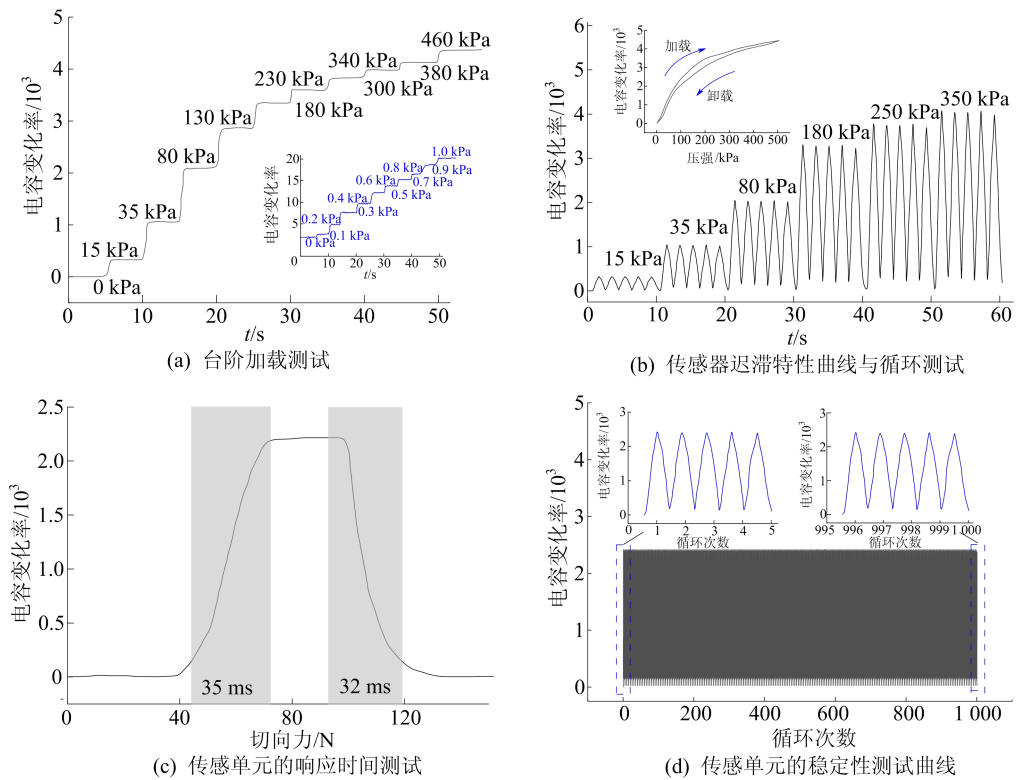


图 4 传感单元的静、动态特性测试

为了评估本文所研制的压力传感单元的综合性能,将其与近期报道的高性能柔性电容式压力传感器进行了主要静、动态特性指标对比,结果见表 1 所列。从表 1 可以看出,本文研制的压力电容传感器在灵敏度与检测范围之间取得了优异的平衡,展现出较好的综合优势。

表 1 不同电容式压力传感器性能对比				
传感器	检测范围/kPa	灵敏度/ kPa^{-1}	响应、恢复时间/ms	循环稳定性
本文	0~500	24.60	35,32	>1 000
文献[5]	0~20	35.10	<80	>1 000
文献[6]	0~400	0.18	100,100	10 000
文献[7]	0~450	0.15	6,6	10 000
文献[10]	0~1 000	0.54	2,16	1 200

2 多维力传感模块及触觉末端设计

2.1 多维力传感模块设计

为实现机器人插拔作业中的多维力感知需求,本文进一步研制多维力传感模块,其前视角下的剖面结构如图5所示,主要由法向力传感单元、具有差动式结构的切向力传感单元和PETG底座组成。法向力传感单元主要由TPU触头、橡胶封装层和电容式压力传感器组成,其中:压力传感单元下表面粘接在PETG连接件开槽底面上;TPU触头下表面则粘接在压力传感单元上表面。切向力传感单元主要由嵌入PETG连接件的永磁铁、PETG隔板、两侧硅橡胶垫片以及焊有2片霍尔芯片和电容采集芯片的电路板组成,其中:2片霍尔芯片构成差动式结构,初始状态下永磁铁位于这2片霍尔芯片的中间;硅橡胶垫片两侧分别粘接在PETG隔板和PETG连接件上。

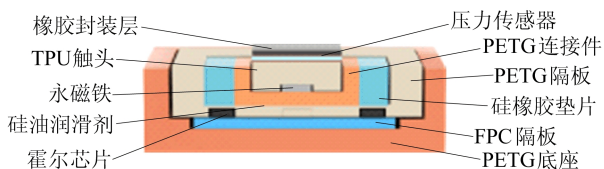


图5 多维力传感模块结构设计图

施加法向力时,TPU触头压缩法向力传感单元,电容信号由穿过TPU触头、PETG连接件、PETG隔板上开孔的引线连接到FPC板。由于法向力传感单元处于TPU触头上方,磁铁不会在法向力作用下移动,且由于硅油的作用,PETG连接件与PETG隔板之间摩擦系数极小,则PETG连接件的切向位移距离受法向力的影响极小。施加切向力时,TPU触头在切向力作用下带动PETG连接件切向滑动并压缩硅橡胶垫片,如图6内嵌图所示,永磁铁的磁场随PETG连接件切向移动,2片霍尔芯片测得的磁感应强度随之变化,切向力的大小与磁铁切向位移及霍尔芯片输出信号一一对应。由于采用了差动式结构,切向力初始信号接近0,实现了自动调零。此外,差动式结构会使传感器的切向力检测灵敏度增大约2倍,线性度也得到有效改善。

在20 N恒定法向力作用下,对传感模块施加切向力,其切向力大小与输出信号的关系曲线如图6所示,其中正、负仅表示力的方向。从图6可以看出,随着切向力大小的增加,传感器的切向解耦输出值呈现非线性增长趋势,且传感器对两侧

方向的切向力具有相似的响应特性。对曲线进行线性拟合,切向力平均灵敏度约为 1.362×10^{-2} T/N,线性拟合 $R^2 \approx 0.98$,表明传感器在宽量程内均具备良好的力感知分辨率。

由图6实验结果可知,当仅施加法向力时,传感器的切向输出信号亦接近于0。实验结果表明,通过本设计中物理层面的信号分离与差动结构,实现了法向与切向力的有效解耦,无需复杂的耦合信号求解算法。首先,由于磁铁固定于PETG连接件中,法向载荷不会引起磁铁发生切向位移;其次,硅油确保PETG连接件与隔板间的摩擦系数极低,法向力对切向运动机构的“卡滞”效应可忽略不计;最后,差动式结构本身对共模干扰(如温度漂移、法向力可能引起的微小磁场变化)具有天然的抑制作用。

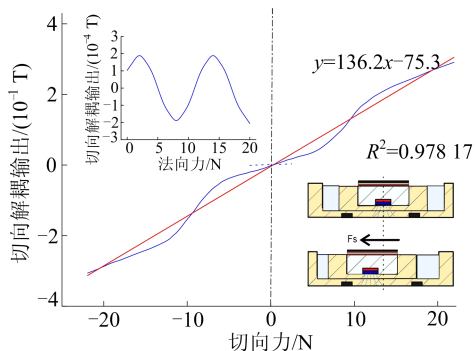


图6 传感单元随切向力输出变化曲线

2.2 霍尔式传感器温度稳定性实验

对MLX90393三轴霍尔芯片进行温漂实验。设置电源电压为3 V,将霍尔式传感模块置于SANWOOD高低温箱内,恒定磁场(室温下约为 1.2310×10^{-1} T)置于箱体外,测得温度稳定性曲线如图7所示。

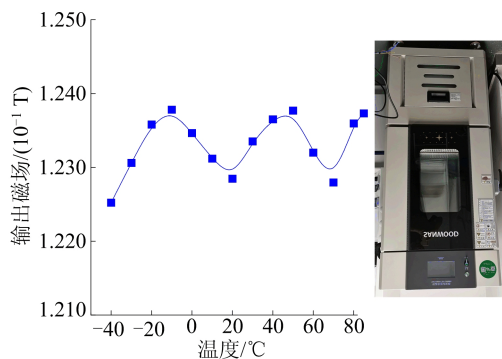


图7 霍尔式传感器温度稳定性实验

从图7可以看出:在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时传感器响应为 1.2252×10^{-1} T;在 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时传感器的响应为

1.237 7 $\times 10^{-1}$ T。以 25 ℃ 传感器响应为基准,此时霍尔传感器的温漂在 0.6% 之间,符合 MLX90393 使用手册给定的 3% 温漂范围。同时,使用手册建议每隔 6 个月对传感器进行一次校准,以保证测量的准确性。

2.3 触觉末端电路及结构设计

触觉末端总体结构设计如图 8 所示。图 8 中:末端支架为 PETG 材料通过 3D 打印制成,可通过螺丝固定在机器人 Robotiq 2F85 机械二指夹具上;多维力传感模块通过螺丝固定在末端支架上,切向力传感器如图 8 所示, x 轴正方向为切向力传感单元检测的正方向。

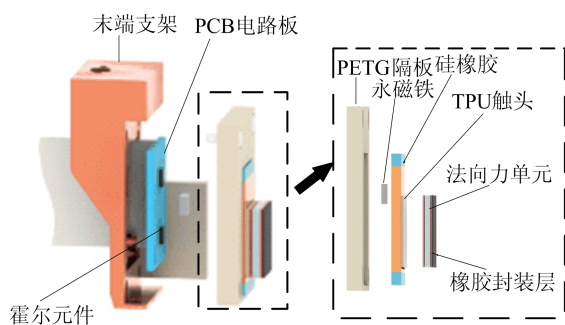


图 8 触觉末端结构

触觉末端电路设计如图 9 所示。法向力单元信号通过 AD7147 电容采集芯片采集,得到的数字信号通过 IIC 通讯协议传输到 ESP8266 微处理器模块。切向力单元中磁铁位移产生的磁感应强度变化由 2 片 MLX90393 三轴霍尔芯片采集,

得到的差分数字信号直接传输到 ESP8266 微处理器模块^[15]。ESP8266 微处理器将采集到的法向力和切向力传感单元输出信号打包通过蓝牙传输模块传输到上位机。

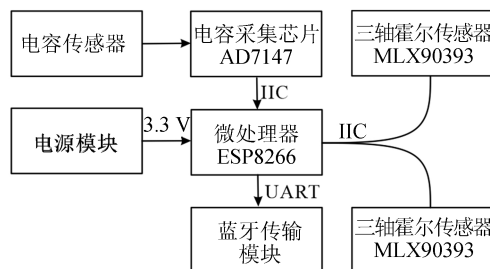


图 9 触觉末端电路结构

2.4 多维力传感器综合性能评估

本文研制的多维能力传感器与近年来报道的柔性多维力传感器关键性能对比见表 2 所列。

从表 2 可以看出本文方法的综合优势:在传感性能方面,本文传感器具有较高的法向力灵敏度(24.6 kPa $^{-1}$)和切向力灵敏度(1.362 $\times 10^{-2}$ T/N);在结构方面,本文传感器无复杂多维、多层结构,降低了制备难度;在信号解耦方面,现有多维力传感器为从耦合信号中分离出各方向分力,需依赖复杂的电极构型或专门的解耦算法,增加了传感器制备的难度,也引入了解耦误差,导致传感器一致性差,与之相比,本研究基于非接触式的三维霍尔效应,能够实现磁场矢量的三维自解耦,从根本上规避了电容式与电阻式传感器的信号耦合问题。

表 2 不同多维力传感器性能对比

传感器	传感原理	灵敏度		量程/N		解耦方式
		法向	切向	法向	切向	
本文	电容-霍尔	24.6 kPa $^{-1}$	0.013 62 T/N	112.5	21.9	物理
文献[12]	电容	1.08 N $^{-1}$	1.20 N $^{-1}$	0.7	0.6	算法
文献[13]	电容	0.009 5 N $^{-1}$	0.005 3 N $^{-1}$	10	10	算法
文献[11]	电阻			3	1	物理+算法
文献[14]	霍尔			5	5	物理

3 触觉末端智能抓取应用

本研究模拟智能巡检工作场景,设计机器人抓取系统。该系统包括待操作插头、触觉末端、Robotiq 公司 2F-85 机械夹具、优傲公司 UR10 机械臂、英特尔 D435i 深度相机、光学平台底座。机械臂安装在光学平台底座上,机械夹具安装在机械臂末端位置,即机械臂第 6 个旋转关节上,指夹

部分使用本研究研制的触觉末端代替,深度相机通过 3D 打印的固定支架固定在机械臂末端与夹具之间。

智能巡检作业模拟工作平台如图 10 所示。

针对变电站机柜电力巡检中常见的插头插拔作业,本研究搭建了智能巡检模拟工作场景,分别为 USB 端口的插拔试验以及 DC 插头的插拔试验^[16]。

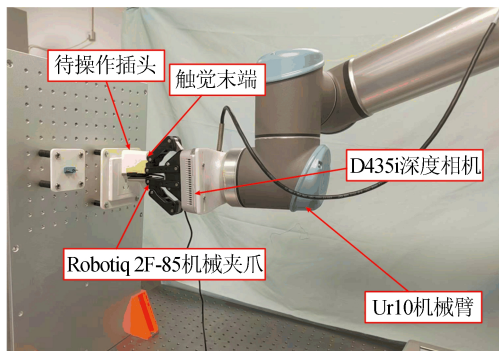


图10 智能巡检作业模拟工作平台

3.1 USB 端口插拔作业

USB 插拔操作过程图和柔性触觉末端信号如图 11 所示。图 11 中:①~④阶段为插入插头阶段;⑤~⑧阶段为拔取插头阶段。

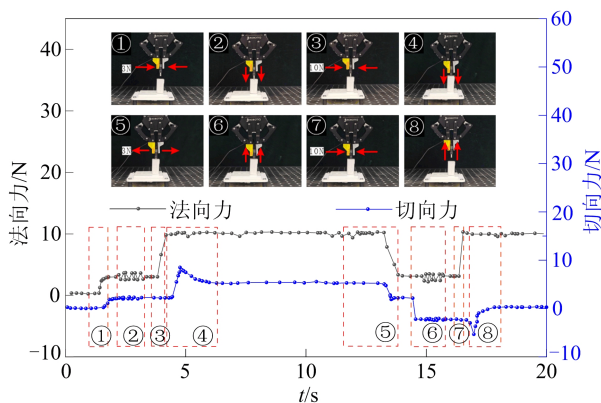


图11 USB 端口插拔作业实物图及信号特征

在阶段①,夹爪闭合以 3.0 N 的力夹持插头,法向力信号增至 3.0 N;在阶段②,操作机械臂向下以 2 mm/s 的速度第 1 次插入插头,此时信号中呈现明显的高频分量,表明夹爪与被夹插头之间出现相对滑移,法向夹持力过小,无法插入插头,机械臂停止插入动作;在阶段③,增加夹爪夹持力至 1.0 N;在阶段④,操作机械臂向下第 2 次插入插头,切向力增大至 8.5 N,表明插头正经过插入接口的一段路程,然后发生短暂抖动后稳定,表明插头完全插入。

在阶段⑤,夹爪张开至以 3.0 N 的力夹持插头;在阶段⑥,操作机械臂向上第 1 次拔取插头,拔取过程中插头经过接口卡扣出现高频信号抖动,表明夹爪与被夹插头之间出现相对滑移,法向夹持力过小,无法拔取插头,机械臂停止拔取动作;在阶段⑦,增加夹爪夹持力至 10.0 N;在阶段⑧,操作机械臂向上第 2 次拔取插头,可见传感单元切向力在 17 s 处增加并且超过 5.3 N,之后传

感单元切向力逐渐减小至 0,表明插头被拔出。

3.2 DC 插头插拔作业

考虑到 DC 电源插头等其他圆形接口的插拔作业中更容易产生滑移,而滑移信号更加微弱,对应的插拔应用需要更加精细化操作,本文将所研制的机器人触觉末端应用于 DC 插头的插拔作业中。DC 插头插拔过程图和对应的触觉末端信号如图 12 所示。

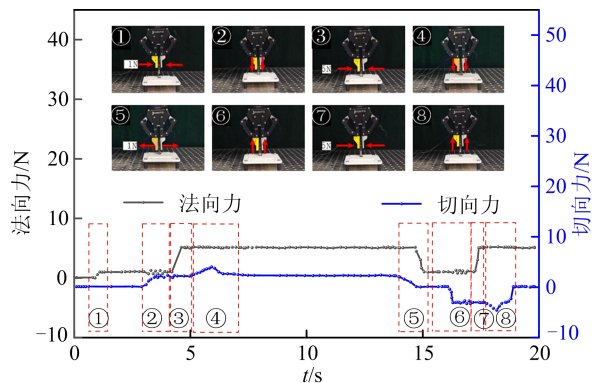


图12 DC 插头插拔作业实物图及信号特征

图 12 中①~④阶段为插入 DC 插头阶段,分别对应于夹取插头、第 1 次插入插头并根据信号判断滑移、操作夹爪增加夹取的法向力、第 2 次插入尾纤并根据信号判断拔取完成。与插入 USB 端口作业中的状态监测相同,可从传感单元信号抖动判断夹爪与被夹物体之间的滑移,同时可从传感单元切向力大小和变化趋势判断拔取工作中的无法插入和插入完成等状态。

图 12 中⑤~⑧阶段为拔取 DC 圆孔插头阶段,分别对应于减小夹爪夹持力、第 1 次尝试拔取 DC 插头并根据信号判断滑移、操作夹爪增加夹取的法向力、第 2 次拔取 DC 插头并根据末端信号判断插头拔取完成。与拔取 USB 端口作业一样,可从传感单元信号抖动判断夹爪与被夹 DC 插头之间的滑移,同时可从传感单元切向力大小和变化趋势判断拔取工作中的无法拔出和拔取完成等状态。

由于 USB 端口、DC 插头等不同接口设备在插拔过程中的插销阻力、插销形状等区别,USB 端口和 DC 插头插拔作业中末端信号的某些缓峰及数值大小均存在区别,但这些信号的曲线特征一般幅度小、变化较缓且与插拔状态判断用信号特征区别很大,故不影响插拔作业状态的监测。

3.3 基于触觉反馈的机器人拔取应用

为验证所研制触觉末端在精密操作任务中的

实际性能,构建了机械臂自动拔取控制系统,其插拔作业控制流程如图 13 所示。该系统基于视觉系统完成目标识别与参数匹配后,规划并执行夹取位姿。通过实时触觉信号构建力闭环,引入频谱分析模块,通过检测高频抖动成分来识别滑移风险,并结合阈值检测对切向力进行持续监测,动态调节夹持状态以确保稳定抓取。

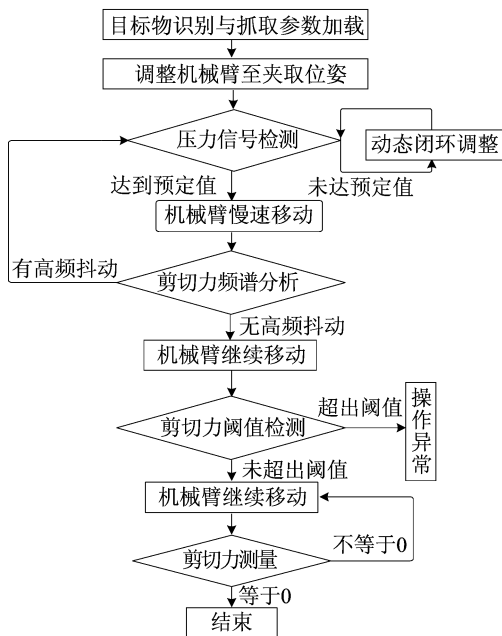


图 13 基于多维触觉感知的机器人插拔作业控制流程

通过设定不同阈值,模拟滑移、正常情况与卡壳 3 种情形:模拟滑移(USB 端口:法向力设为 3 N,剪切力阈值设为 10 N;DC 插头:法向力设为 1 N,剪切力阈值设为 5 N),预设法向力较小,无法拔出插头;模拟正常情况(USB 端口:法向力设为 10 N,剪切力阈值设为 10 N;DC 插头:法向力设为 5 N,剪切力阈值设为 5 N),模拟卡壳(USB 端口:法向力设为 10 N,剪切力阈值设为 5 N;DC 插头:法向力设为 5 N,剪切力阈值设为 3 N),此时,预设切向力阈值过小,应无法拔出插头。设置不同阈值后,使用普通夹爪与智能触觉末端进行了各 100 次重复试验,结果见表 3 所列。

从表 3 可以看出:对应 USB 端口和 DC 插头滑移情况,普通夹爪拔出比例为 0%,触觉末端拔出比例为 100%,表明通过剪切力抖动检测控制法向夹持力,可实现自适应拔取;模拟正常情况时,普通夹爪与触觉末端使用效果相同;对应 USB 和 DC 插头卡壳情况,普通夹爪拔出比例为 100%,触觉末端拔出比例为 0%,表明通过剪切力阈值检测可以实现安全拔取。上述试验结果表

明,触觉末端能够更好地适应复杂工况下巡检机器人安全作业。

表 3 引入触觉末端前、后不同插拔作业成功率对比

位置	状态识别	拔出成功率/%	
		普通夹爪	触觉末端
USB 端口	滑移	0	100
	正常插拔	100	100
	卡壳	100	0
DC 插头	滑移	0	100
	正常插拔	100	100
	卡壳	100	0

4 结 论

本文基于 PVA、CNF、氯化钙、硼酸钠以及倒模工艺制备了一种具有荔枝纹微结构离子凝胶介电层的柔性电容式压力传感单元;同时,基于钐钴磁铁和霍尔芯片设计了一种切向力传感单元;将压力与切向力传感单元集成,得到一种具有多维力感知功能的柔性触觉末端。该触觉末端具有宽压力工作范围(0 ~ 500 kPa)和高灵敏度(24.6 kPa⁻¹),其中霍尔式切向传感单元在感应 ±20 N 范围内检测的磁感应场强度变化率约为 1.362×10⁻² T/N。最后,将研制的机器人触觉末端应用于 USB 端口与 DC 插头类接口的插拔作业。结果表明:本文研制的触觉末端具有实时监测插拔过程中的滑移、无法拔出、无法插入等工作状态的能力,可以有效地应用于接口插拔类的电力巡检机器人巡检作业。所设计的柔性多维力传感器也有望为远程医疗(如微创手术器械的精细力反馈、康复辅助设备的交互力监测)和人机交互(如穿戴式设备的自然触觉交互、协作机器人的安全触碰检测)提供关键的触觉信息输入,提升操作安全性、精确性和交互自然性。

[参 考 文 献]

- [1] 隋京梁. 电阻式柔性压力传感器的准确性提升与应用[D]. 上海:东华大学,2021.
- [2] KIM T, HONG I, KIM M, et al. Ultra-stable and tough bioinspired crack-based tactile sensor for small legged robots[J]. npj Flexible Electronics, 2023, 7: 22.
- [3] XIA P, LIU P, WU S, et al. Highly stretchable and sensitive flexible resistive strain sensor based on waterborne polyurethane polymer for wearable electronics[J]. Composites Science and Technology, 2023, 233: 109876.
- [4] 田玉玉,何韧,吴菊英,等. 电容式柔性压力传感器的性能优化原理及研究进展[J]. 材料导报, 2023, 37(16): 13-26.

(下转第 612 页)

3) 针对漏电场感应电压安全性问题,提出谐振拓扑的对称优化设计,以平衡线圈对地电位;同时提出增加磁屏蔽机构对地电容的优化方法。2 种优化方法均能将人体接触电压降至安全范围以内,有效避免了系统漏电危险,保障了用户的使用安全。

本文研究成果为 ICPT 系统的安全性提供了一定的理论保障和实验验证,为漏电场安全问题研究提供了基础思路。

[参 考 文 献]

- [1] 李砚玲,杜浩,何正友. 基于双 D 形正交混合拓扑的感应电能传输系统恒流输出研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(3):942-950.
- [2] XU H Q, WANG C F, XIA D W, et al. Design of magnetic coupler for wireless power transfer[J]. Energies, 2019, 12(15):1-12.
- [3] BUDHIA M, BOYS J T, COVIC G A, et al. Development of a single-sided flux magnetic coupler for electric vehicle IPT charging systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(1):318-328.
- [4] 马爱清,王海波,陈磊,等. 基于网格分割人体模型的高压交流输电线路下车辆对人体电击效应[J]. 高电压技术, 2013, 39(12):2876-2881.
- [5] 李秀英. 交流输电线下人体暂态电击模型和实验研究[D]. 北京:华北电力大学, 2013.
- [6] 陈耀羽. DC/DC 拓扑对 LCC-WPT 系统的影响分析与效率

优化研究[D]. 北京:北京交通大学, 2020.

- [7] 童湛安心,苏建徽,张健,等. AGV 无线充电全波同步整流尖峰电压抑制方法[J]. 电气传动, 2023, 53(3):22-27.
- [8] THEODORIDIS M P. Effective capacitive power transfer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(12):4906-4913.
- [9] ZHANG H, LU F, HOFMANN H, et al. A four-plate compact capacitive coupler design and LCL-Compensated topology for capacitive power transfer in electric vehicle charging applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(12):8541-8551.
- [10] SU Y G, MA J H, XIE S Y, et al. Analysis on safety issues of capacitive power transfer system[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2017, 53(4):673-684.
- [11] NESTE C W V, HULL R, ABRAHAM T, et al. Wireless single contact power delivery[C]//2015 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC 2015). Colorado: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2015:1-4.
- [12] IEC. Audio, video and similar electric apparatus-safety requirements: IEC 60065 Edition 8. 0[S]. Geneva: IEC Central Office, 2014.
- [13] 梁阔. 基于 LCC/S 补偿拓扑的感应耦合无线电能传输研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2017.
- [14] 刘硕,苏建徽,张健,等. 一种双边 LCC 补偿无线电能传输变换器谐振网络设计方法[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(6):96-102, 110.

(责任编辑 胡亚敏)

(上接第 584 页)

- [5] PRUVOST M, SMIT W J, MONTEUX C, et al. Polymeric foams for flexible and highly sensitive low-pressure capacitive sensors[J]. npj Flexible Electronics, 2019, 3:7.
- [6] HUANG Y C, LIU Y, MA C, et al. Sensitive pressure sensors based on conductive microstructured air-gap gates and two-dimensional semiconductor transistors[J]. Nature Electronics, 2020, 3:59-69.
- [7] ZHANG Y, YANG J, HOU X, et al. Highly stable flexible pressure sensors with a quasi-homogeneous composition and interlinked interfaces[J]. Nature Communications, 2022, 13:1317.
- [8] 齐芳汐,徐思懿,刘皓,等. 聚偏氟乙烯基柔性压电传感器的研究进展[J]. 化工新型材料, 2024, 52(3):43-47, 52.
- [9] 靳赵阳. 有机纳米复合水凝胶的构筑及其在应变传感器中的应用[D]. 西安:西安工业大学, 2021.
- [10] GAO X, WANG L, PAN Y, et al. Fabrication and performance of ionic liquid-modified 3D fibrous network-based capacitive pressure sensor[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 44(6):3560-3569.
- [11] HU J H, QIU Y, WANG X E, et al. Flexible six-dimen-

sional force sensor inspired by the tenon-and-mortise structure of ancient Chinese architecture for orthodontics[J]. Nano Energy, 2022, 96:107073.

- [12] YAO T Y, GUO X H, LI C C, et al. Highly sensitive capacitive flexible 3D-force tactile sensors for robotic grasping and manipulation[J]. J Phys D: Appl Phys, 2020, 53:445109.
- [13] HUANG Y, YUAN H, KAN W, et al. A flexible three-axial capacitive tactile sensor with multilayered dielectric for artificial skin applications[J]. Microsystem Technologies, 2017, 23(6):1847-1852.
- [14] MOOSAVI NASAB S D, BEIRANVAND A, TALE MA-SOULEH M, et al. Design and development of a multi-axis force sensor based on the hall effect with decouple structure[J]. Mechatronics, 2022, 84:102766.
- [15] 张睿智,厉俊,沈晓峰. 基于非正交多址接入的无人机通感一体化系统[J]. 信息与控制, 2023, 52(6):701-710.
- [16] 朱姿娜,张宇鹏,曾阳浩,等. 一种基于蜂巢结构的颗粒阻塞变刚度软体手指[J]. 机器人, 2024, 46(6):652-662.

(责任编辑 胡亚敏)