

一种基于导电泡绵的柔性压力传感器及其阵列设计

姜云鹏¹ 李昊祺¹ 蔡春锋² (通讯作者)

1 浙大城市学院 信息与电气工程学院, 浙江杭州, 310015;

2 浙大城市学院 理学基础教育中心, 浙江杭州, 310015;

摘要: 本文提出了一种基于导电泡绵材料的柔性压力传感器及其阵列设计。该传感器所采用的压敏材料是弹性导电泡绵材料。为了提高传感器耐用性, 将导电泡绵材料包裹在柔性 PVC 薄膜材料制作的密封胶囊中。通过构建 $n \times n$ 采样阵列与多级多路模拟开关实现单片机数据采集与通信。通过在压力传感器采样电路中串接单向导通二极管消除电阻测量阵列中周围节点引起的串扰问题。

关键词: 柔性压力传感器; 导电泡绵; 防褥疮垫

DOI: 10.69979/3041-0673.26.05.004

背景

褥疮(又称压疮)是因长时间受压导致皮肤及皮下组织缺血、缺氧而引发的局部损伤, 常见于长期卧床、坐轮椅或活动受限的患者。据统计, 全球每年约有 250 万患者受褥疮困扰, 其引发的感染、败血症等并发症显著延长住院周期, 重症患者死亡率高达 60% (WHO, 2021)。褥疮的形成与压力分布不均、护理不及时密切相关, 尤其在老年、糖尿病及脊髓损伤人群中高发。预防褥疮不仅是减轻患者痛苦的关键, 更能降低医疗成本及护理负担。传统依赖人工翻身的被动防护存在效率低、易疏漏等问题, 而现有智能监测设备则因成本高昂或舒适性不足难以普及。因此, 开发低成本、高精度且舒适性佳的实时压力监测系统, 对提升护理质量、改善患者预后具有重要社会价值与经济意义。

国外在柔性压力传感器用于医疗监测领域的研究起步较早, 主要集中在以下方向: 压阻式传感器阵列, 光纤传感技术, 电容式传感器。美国加州大学 Smith 团队开发了基于石墨烯/PDMS 的柔性压力传感器阵列, 可实时监测患者体压分布, 但其成本较高且对湿度敏感^[1]。德国 Fraunhofer 研究所利用光纤光栅 (FBG) 设计智能床垫, 通过光信号变化检测压力, 精度高但系统复杂^[2]。韩国首尔大学团队提出多层叉指电极电容传感器, 适用于动态压力监测, 但存在信号串扰问题^[3]。

国内在柔性压力传感器的研究中, 更加注重经济性与实际应用的结合。例如, 中科院深圳先进院研发的 PVDF 压电薄膜阵列, 通过电荷变化实现压力监测, 为临床护理提供了一定的参考^[4]。然而, 在长期应用过程

中, 如何保持传感器的稳定性和耐用性仍是一大挑战。东华大学团队利用导电纱线将织物传感器集成到床垫中, 实现了压力分布的可视化, 但传感器在汗液环境中的耐腐蚀性问题需要进一步优化^[5]。随着新型生物基材料和纳米复合材料的不断涌现, 国内部分高校和研究机构开始尝试引入环保、低成本且具有良好的生物相容性的材料(如丝素蛋白、导电聚合物等), 以优化传感器性能^[6]。改进材料表面处理技术和封装工艺, 不仅能够有效提高传感器在潮湿环境下的稳定性, 还能降低信号干扰, 满足临床长时监测的要求。国内在数据处理、算法优化和系统集成方面也取得了一定进展。基于嵌入式微处理器和无线通信技术的系统设计, 使实时压力数据能够快速传输到护理人员的监控终端。与此同时, 借助图像处理 and 人工智能技术, 对压力分布进行直观可视化分析, 为护理决策提供科学依据^[7]。整体来看, 国内研究更注重产品的实用性和低成本化, 这为大规模普及提供了可能, 但如何在确保高精度监测的同时降低制造和维护成本, 仍是亟待攻克的问题。本项目提出的柔性传感器采用弹性与导电性较好的导电泡绵材料, 将其密封在由柔性 PVC 或者 TPU 薄膜材料制作的密封胶囊中, 具有压力回弹灵敏, 耐汗液等腐蚀, 在防褥疮垫的领域具有潜在的应用价值。

1 研究内容

本文提出的柔性压力传感器基于“三明治”结构设计。传感器外层为 0.3 mm 厚 PVC 柔性薄膜(可拉伸性 >200%)制成的密封胶囊。中间层为填充导电泡绵的微腔阵列(单腔尺寸 10×10 mm)。在导电泡绵上下两

面制备叉指电极与柔性电路板 (FPC) 集成。为了提高监测精度, 采用高密度电阻网络进行压力实时监测。针对单片机测量引脚有限的问题, 采用 $n \times n$ 阵列式扫描方式, 并采用多级模拟开关控制行列选通。为了解决电阻阵列中采样存在串扰的问题, 在每个压力传感器支路上串联一个二极管, 使采样电路具有单向导通性, 消除周围电路的串扰问题。

图 1 (a) 为密封在 PVC 胶囊中的导电泡绵柔性传感器照片。导电泡绵被密封在胶囊中, 提高了稳定性与耐汗液腐蚀性。采用铜箔粘结在导电泡绵表面作为电极, 避免形变过程中电极脱落。(b) 为 4×4 柔性压力传感器阵列。电极采用 FPC 柔性电极, 并在其上集成了贴片二极管, 防止测量串扰。

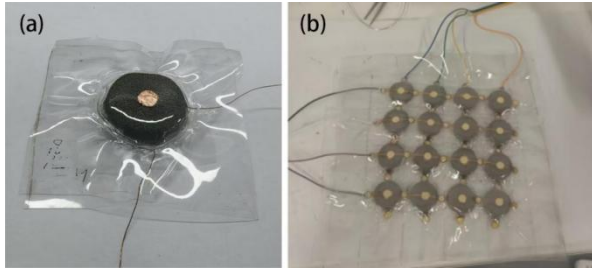


图 1, (a) 密封在 PVC 密封胶囊中的导电泡绵压力传感器实物照片。(b) 制作的 4×4 柔性压力传感器阵列实物。

图 2 (a) 单个柔性压力传感器未串接二极管 (红色曲线) 与串接二极管 (绿色曲线) 的 I-V 曲线。串接二极管后, 反向不导通, 有效抑制电阻阵列串扰问题。由于二极管存在开启电压, 因此会影响电阻阻值的精确测定。实际应用中需要结合算法对电阻进行标定。

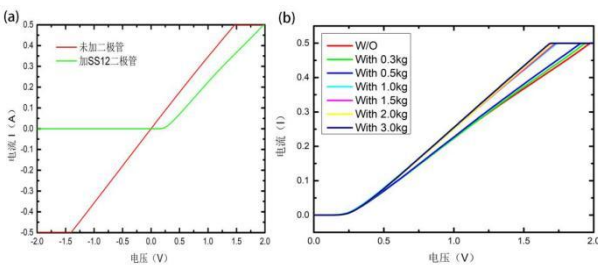


图 2, (a) 单个柔性压力传感器未串接二极管 (红色) 和串接二极管 (绿色) 的 I-V 曲线。(b) 单个柔性压力传感器施加不同重物后的 I-V 曲线。

图 2 (b) 是单个柔性压力传感器施加不同重物压力后的 I-V 曲线。随着重物压力增加, I-V 曲线斜率变大。当压力小于 0.5kg 时, 压力传感器阻值变化较小。当压力在 0.5-1.0kg 时, 阻值变化最明显, I-V 曲线斜率变化最大。而当压力大于 1.5kg 后, 阻值变化又趋于平缓。图 3 为柔性压力传感器在按压后的电阻变化情况。从数

据可得其时间响应满足低取样频率需求, 会弹性满足日常生活中对人体坐姿, 卧姿等实时监控需求。

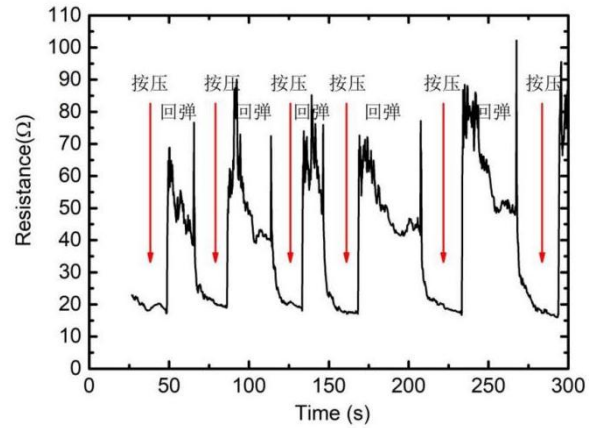


图 3, 按压柔性压力传感器时其电阻变化。按压时, 如红色箭头所示, 传感器阻值明显减小。撤去压力后, 传感器回弹迅速。

2 结论

本文提出一种基于导电泡绵的柔性压力传感器及其阵列设计。通过将导电泡绵包裹在柔性 PVC 透明薄膜胶囊中, 解决其易被破坏, 稳定性差的缺点。通过 FPC 柔性电极, 铜箔胶片与导电泡绵构成多层符合电极, 解决普通电极在按压形变中的不稳定性。在阵列采样中, 采用行列扫描方式减少采样电路, 采用多路复用器和模拟开关减少单片机采样用引脚, 采用在压力传感器电路中串接二极管, 消除测量电路串扰引起的测量偏差。本项目提出的柔性压力传感器具有低成本、高精度且稳定性好等特点, 可以用于实时压力监测系统, 在护理、防褥疮、久坐提醒等方面有应用价值。

参考文献

[1] Smith, J. et al. (2020). Graphene-based flexible pressure sensors for healthcare monitoring. *Nature Electronics*, 3(5), 281-289.
 [2] Müller, R. et al. (2019). Fiber-optic sensor array for pressure mapping in medical applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, 295, 582-590.
 [3] Kim, Y. et al. (2021). Multilayer capacitive pressure sensor array for continuous health monitoring. *Advanced Healthcare Materials*, 10(12), 2002100.
 [4] Wan, X. Y., & Zhang, X. D. (2021). Noninvas

ive manipulation of cell adhesion for cell harvesting with piezoelectric composite film. *Applied Materials Today*, 25, 101218.

[5]Yang, X., & Zhang, K. (2022). Direct Wet-Spun Single-Walled Carbon Nanotubes-Based p-n Segmented Filaments toward Wearable Thermoelectric Textiles. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 14(40), 45021 - 45030.

[6]Zhang, Y., Li, X., Wang, H., & Chen, X. (2021). Silk fibroin-based flexible and stretchable sensors for wearables: Fabrication, mechanisms, and applications. *Advanced Materials Technologies*, 6(12), 2100945.

[7]Smith, J., et al. (2021). Deep learning for

pressure injury prevention in critical care. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 68(3), 890-898.

作者简介：姜云鹏（2003.11-），男，汉族，山东济宁人，本科，研究方向：自动化。

李昊祺（2004.8-），男，汉族，浙江宁波人，本科，研究方向：自动化。

蔡春锋（1985.12-）男，汉族，博士，副教授，研究方向：微电子器件与应用。

本文为浙大城市学院2025年国家级大学生创新训练项目：“一种基于柔性压力传感器的防褥疮垫设计”（项目编号：202513021066）研究成果。