

# 磁致栅型结构提高接触 / 非接触柔性传感器的性能

孙瑞雪<sup>1</sup>, 寿梦杰<sup>1</sup>, 陈桥<sup>1</sup>, 冯辉宗<sup>2</sup>

(1. 重庆邮电大学自动化学院 重庆 400065;

2. 重庆邮电大学先进制造学院 重庆 400065)

Email: sunrx@cqupt.edu.cn

**摘要:** 作为一种先进的感知技术, 双模柔性感知将接触和非接触感知相结合, 推动众多智能设备朝着更实用和高效的方向发展。本文提出了一个双模感知系统, 由具有磁致栅型结构的双层感知器件和测试设备组成。该系统能够同时利用机械压力感知接触刺激并利用磁传感感知非接触刺激。此外, 在未知信号源存在的情况下利用摩擦起电效应实现了接触和非接触信号的解耦。在此基础上讨论了固化磁感应强度和磁性颗粒浓度对感知信号的影响。最后, 通过在软花瓣和传感器阵列上展示 B-MIGS 作为双模监测系统的实际价值, 并探索其在水下环境中的潜在应用。

**关键词:** 磁场; 双模; 柔性感知; 接触和非接触; 摩擦起电效应

## 1、研究背景

柔性感知在人工智能<sup>[1, 2]</sup>、电子皮肤<sup>[3-5]</sup>、生物医学<sup>[6]</sup>和智能制造<sup>[7]</sup>等各个领域引起了广泛关注。随着目标物体和感知过程的复杂性增加, 对柔性感知系统提出了新的需求。这些需求包括在正常条件下具有理想的延展性、在机械负载下具有适应性、在操作状态下响应的选择性, 最重要的是实时准确区分感知模式。传统的双模柔性感知系统主要依赖物理接触和跟踪信号技术, 其中最常见的应用是具有压力和距离检测能力的柔性电容结构。然而, 电容感知系统面临的根本挑战是难以区分来自其他物体和信号源的干扰。为了克服这一挑战, Ge 等人设计了一个感知系统, 将磁性薄膜与磁性传感器相结合, 利用它们固有的磁性特异性来减轻与无关物体的干扰<sup>[8]</sup>。同时, Kawasetsu 等人提出了一种由磁体、磁传感器和双层弹性体组成的柔性传感器, 能够对接触和非接触状态进行响应<sup>[9]</sup>。然而, 在利用磁性特异性进行接触和非接触感知的研究领域, 仍存在一些值得关注的突出问题。首先, 双模信号的感知原理仍不清楚。其次, 优化双模感知的性能, 包括在磁性聚合物复合材料中微纳米粒子的分布、定向和复杂协调控制, 仍然是一个重大挑战<sup>[10-12]</sup>。因此, 突破传统技术的限制, 开发具有双模接触和非接触感知能力的新型系统, 并优化它们的综合感知性能, 具有重要的科学和实际价值。

本文提出了一个双模感知系统 (B-MIGS), 由具有磁诱导网格结构的双层感知器件和测试设备组成。利用巨磁阻效应和摩擦起电效应, 实现了在存在未知信号源的情况下对接触和非接触信号的感知, 从而在单一感知平台上实现了双模信号的监测。此外, 通过利用磁场在微纳米粒子上产生磁力和力矩, 调控磁性聚合物复合材料的形态和结构, 从而影响其电机械性能, 优化了 B-MIGS

的感知特性。系统在非接触模式下的灵敏度在 0 mm ~ 5 mm 的距离范围内达到约 20 mm<sup>-1</sup>，而在接触模式下，在 0 kPa ~ 20 kPa 的压力范围内，灵敏度达到 2.25 kPa<sup>-1</sup>。此外，还讨论了温度和湿度对感知信号的影响。最后，为了展示 B-MIGS 的实际应用价值，设计了磁性目标的灵敏度测试和接触感知实验。此外，还制作了一个水下目标监测装置，探索了 B-MIGS 双模感知器件在水下环境中的潜在应用。该系统不仅增强了电子皮肤和虚拟现实领域的感知能力，还对多功能和高度兼容的人机界面的发展具有重要意义。

## 2、研究内容

### 2.1 B-MIGS 的双模感知理论模型

磁性聚合物复合材料被用作柔性感知层。永磁体产生空间磁场，巨磁电阻传感器获取柔性感知层中磁通量的变化，作为检测信号的参考。

### 2.2 非接触模式的理论模型

当磁性物体靠近 B-MIGS 时，它会引起 B-MIGS 周围磁通密度的分布和大小发生变化，从而影响通过巨磁电阻传感器的磁通量。磁性物体离 B-MIGS 越近，通过巨磁电阻传感器的磁通量越大，导致输出电压越高。通过分析输出电压，可以确定磁性物体与 B-MIGS 之间的距离和方向。

### 2.3 触觉模式的理论模型

由于永磁体周围的空间磁场，B-MIGS 内部的磁性复合薄膜产生磁通量。与目标物体接触会导致磁性复合薄膜变形，以及柔性感知层内磁性颗粒之间间隙的变化，从而影响其磁通量和磁场分布。压力的大小根据这些变化引起的巨磁电阻器件的输出信号来确定。

### 2.4 B-MIGS 的传感性能

B-MIGS 的输出电压相对变化随距离呈单调递减趋势。如图 3a 所示，电压的相对变化随距离的增加逐渐减小。在 0 mm ~ 5 mm 的范围内，灵敏度可达到 20.76 mm<sup>-1</sup>。在 5 mm ~ 10 mm 的范围内，灵敏度约为 4.2 mm<sup>-1</sup>，而在 10 mm ~ 50 mm 的范围内，灵敏度下降约为 0.25 mm<sup>-1</sup>。这些趋势归因于磁性物体离 B-MIGS 越近，B-MIGS 内部磁通密度的变化越显著，从而导致更高的灵敏度。相反，随着它们之间的距离增加，磁通密度的变化变得较弱，导致灵敏度逐渐降低。在 0 kPa ~ 20 kPa 范围内，B-MIGS 的灵敏度达到 2.25 kPa<sup>-1</sup>，在 20 kPa ~ 50 kPa 范围内为 1.08 kPa<sup>-1</sup>，在 50 kPa ~ 100 kPa 范围内为 0.51 kPa<sup>-1</sup>。

### 3、结论

本文提出了一种双模传感系统，该系统由具有磁致栅型结构的双层传感装置和测试装置组成。它可以在单个传感平台上实现双模式信号监测，将触觉和非触摸信号分离到两个不同的区域。B-MIGS 的栅格结构和沿磁场方向相邻栅格之间的间隙中显著的磁链排列形成了一个坚固的框架，确保了稳定可靠的传感输出。通过改变固化磁感应强度和磁粉浓度，优化了 B-MIGS 的传感特性。在非接触式模式下，系统在  $0\text{ mm} \sim 5\text{ mm}$  距离范围内的灵敏度约为  $20\text{ mm}^{-1}$ ，而在接触式模式下，在  $0\text{ kPa} \sim 20\text{ kPa}$  压力范围内的灵敏度为  $2.25\text{ kPa}^{-1}$ 。为加快实用化发展，在软花瓣和传感阵列上实现了双模监测系统。在此基础上，设计了一种结合距离和物理压力的水下目标监测系统，展示了其作为多模态传感电子皮肤的潜在应用前景。

### 参考文献

- [1] Sun R, Zou Z, Yan R, et al. Magnetically Induced Grid Structure for Enhancing the Performance of a Dual-Mode Flexible Sensor with Tactile/Touchless Perception[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2023, 15(51): 59876-59886.
- [2] Chun S, Kim J S, Yoo Y, et al. An artificial neural tactile sensing system[J]. Nat Electron., 2021, 4: 429-438.
- [3] Shu S, Wang Z, Chen P, et al. Machine-learning Assisted Electronic Skins Capable of Proprioception and Exteroception in Soft Robotics[J]. Adv.Mater. 2023, 35: 2211385.
- [4] Yang J C, Mun J, Kwon S Y, et al. Electronic Skin: Recent Progress and Future Prospects for Skin-Attachable Devices for Health Monitoring, Robotics, and Prosthetics[J]. Adv. Mater. 2019, 31: 1904765.
- [5] Zhang S, Li S, Xia Z, et al. A review of electronic skin: soft electronics and sensors for human health[J]. J. Mater. Chem. B, 2020, 8: 852-862.
- [6] Ren Z, Hu W, Dong X, et al. Multi-functional soft-bodied jellyfish-like swimming. Nat. Commun., 2019, 10 (1): 2703.
- [7] Eshaghi M, Ghasemi M, Khorshidi K, et al. Design, manufacturing and applications of small-scale magnetic soft robots[J]. Extreme Mech. Lett. 2021, 44: 101268.
- [8] Ge J, Wang X, Drack M, et al. A Bimodal Soft Electronic Skin for Tactile and Touchless Interaction in Real Time[J]. Nat. Commun., 2019, 10: 4405.
- [9] Kawasetsu T, Horii T, Ishihara H, et al. Mexican-Hat Like Response in a Flexible Tactile Sensor Using a Magnetorheological Elastomer[J]. Sensors, 2018, 18: 587.

- [10] Zhang M, Chen R, He Z, et al. A stretchable and self-healable all-in-one iontronic elastomer for luminescent caution and multiple perceptions[J]. *Polymer*, 2022, 249: 124837.
- [11] Ma Z, Li S, Wang H, et al. Advanced electronic skin devices for healthcare applications[J]. *J. Mater. Chem. B*, 2019, 7: 173-197.
- [12] Wang F, Jin P, Feng Y, et al. Flexible doppler ultrasound device for the monitoring of blood flow velocity[J]. *Sci. Adv.*, 2021, 7: eabi9283.

中国仪器仪表学会