DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2412953

# 应变-磁场双感知磁致伸缩柔性传感系统与手势交互*

王 千[1,2,3],李明明[1,2],郭萍萍[1,2],翁 玲[1,2],黄文美[1,2]

(1.河北工业大学 省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室 天津 300130; 2.河北工业大学 河北省电磁场与电器可靠性重点实验室 天津 300130; 3.华北理工大学电气工程学院 唐山 063210)

**摘 要**:具有人体关节弯曲状态和空间位置感知相结合的柔性应变-磁场双模传感器可提供一种响应迅速、界面友好和应用灵活的人机交互方法。受传感结构制约、小型化可穿戴平台算力及功耗的限制,这类器件目前难以实现人体姿态、位置等多信息的同时感知,以及多信息交互所需复杂模型的部署。为了实现高灵敏度和快速响应的力-磁双感知,提出了一种由 Co-Fe 薄膜和平面磁场传感线圈组成的磁致伸缩柔性传感器。在 10~65 mm 的弯曲半径 $\rho$ 作用下,传感器的最大灵敏度为 22 mV/mm。在 1~11 kA/m 的磁场 $H$ 作用下,传感器的最大灵敏度为 1.78 mV/(kA/m)。在 1~4 Hz 的不同 $\rho$ 和 $H$ 下,传感器灵敏度变化均小于 1.6%,具有较好的动态输出稳定性。通过分析双感知传感器的输入/输出信号特征,构建了支持传感器信号处理和传输的传感系统,实现了双感知数据的采集。利用自适应模糊神经网络分析手势和位置信息用于手势识别,对传统应力或弯曲传感器易混淆的 12 种手势进行分类识别,准确率达到 90.1%。此外,结合触觉反馈方法增强系统的信息交互能力,通过产生不同幅度和持续时间的振动反馈,帮助用户更好地掌握虚拟环境中的动作效果和相对位置。传感系统推理用户的手势动作和指令,并触觉反馈设备的响应结果,实现了人与设备之间的双向信息交互。

**关键词**:磁致伸缩;柔性传感器;电沉积薄膜;弯曲;磁性

**中图分类号**:TP212 TH702 **文献标识码**:A **国家标准学科分类代码**:510.99

# Strain-magnetic field dual-sensing magnetostrictive flexible sensing system with gesture interaction

Wang Qian[1,2,3], Li Mingming[1,2], Guo Pingping[1,2], Weng Ling[1,2], Huang Wenmei[1,2]

(*1. State Key Laboratory of Reliability and Interlligence of Electrical EquipmentHebei, University of Technology, Tianjian 300130, China; 2. Key Laboratory of Electromagnetic Field and Electrical Apparatus Reliability of Hebei ProvinceHebei, University of Technology, Tianjian 300130, China; 3. College of Electrical Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China*)

**Abstract**: Flexible sensors capable of detecting both pressure and magnetic fields serve as the cornerstone for merging the real and virtual worlds and facilitate the advancement of wearable devices by providing a rapid response, user-friendly interface, and flexible human-machine interaction method. Constrained by the sensing structure, the arithmetic power of miniaturized wearable platforms and power consumption, these devices are currently difficult to realize the simultaneous sensing of multiple information such as human posture and position, as well as the deployment of complex models required for multi-information interaction. In order to bi-perceptive of high sensitivity and fast response, we proposed the magnetostrictive flexible sensor, which consists of the Co-Fe film and plane magnetic field sensing coils. The maximal sensitivity of the sensor is 22 mV/mm in the bending of 10~65 mm. The maximal sensitivity of the sensor is 1.78 mV/(kA/m) in the magnetic field of 1~11 kA/m. The sensor demonstrates excellent dynamic output stability, with sensitivity variations of less than 1.6% under different ρ and H conditions at frequencies of 1 to 4 Hz. By analyzing the input/output signal characteristics of the dual-sensing sensor, a sensing system supporting sensor signal processing and transmission is constructed to realize dual-sensing data acquisition. Adaptive fuzzy neural network is used to analyze the gesture and position information for gesture recognition, achieving a classification accuracy of 90.1% for 12 gestures that are commonly confused by traditional stress or bending

收稿日期:2024-06-15 Received Date: 2024-06-15

*基金项目:国家自然科学基金(51801053,52077052,52377007)、河北省自然科学基金(E2022202067)项目资助

sensors. In addition, the information interaction capability of the system is enhanced by combining the haptic feedback method, which helps the user to better grasp the effect of movement and relative position in the virtual environment by generating vibration feedback with different amplitudes and durations. The sensing system infers the user's gesture movements and commands, and haptic feedback device response results, enabling a bidirectional information exchange between the user and the device.

**Keywords**: magnetostriction; flexible sensor; electrodeposited films; curvature; magnetism

## 0 引 言

随着微机电系统技术(micro-electromechanical system technology, MEMS)和人工智能技术(artificial intelligence, AI)的发展,柔性传感器在下一代人机交互(human machine interaction, HMI)应用中具有广泛的应用前景[1-3]。用于触觉感知和非接触感知的机械应力和磁场双模态器件在手势识别和虚拟交互方面引起了越来越多的关注[4-6]。目前报道的力-磁双模感知技术可概括为以分散填充磁性颗粒的高分子载体为敏感元件,外力或磁场作用下磁性颗粒的移动导致材料或器件内微观结构变化,进而引起电阻[7]、电容[8]、磁阻[9]、摩擦电[10]、置换反应电压[11]等响应信号变化,从而实现法向应力和接近传感。相关研究极大地推进了力-磁双模感知技术的发展,但是,磁性颗粒不能区分力或磁场的不同方向,容易受到拉伸、压缩、弯曲和面内磁场的影响[12],使得传感器不能同时感知人体关节的姿态和位置,无法应用于复杂的可穿戴应用中。同时,复杂的微观结构存在静态与动态难以兼顾、传感响应慢、制造工艺复杂、稳定性差等诸多问题亟待解决。

磁致伸缩材料由于其独特的力-磁耦合效应,可以通过应力/磁场作用下磁化状态的变化实现双重信息传感[13-14],结合 MEMS 技术可实现应力或磁场传感器的柔性化、轻量化设计。刘莎莎等[15]设计了一种基于 Galfenol 丝的仿生磁致伸缩触觉传感单元,该传感器的灵敏度为 14.52 mV/N,响应时间为 30 ms,可准确感知抓取物体的触觉信息。Suwa 等[16]提出了一种宽度为 0.5 mm、厚度为 2 μm 的压力传感器,由夹在两个磁致伸缩薄膜之间的平面线圈组成。Kwon 等[17]制备了具有自旋阀结构的 Co-Fe 和 Ni-Fe/Co-Fe 磁致伸缩薄膜,以通过磁各向异性的变化来表征弯曲应力。Park 等[18]设计了磁致伸缩 Fe-Ga/Cu 纳米线薄膜与巨磁电阻传感器的组合结构,通过磁阻随纳米线在接触压力下的偏转而变化,传感器的灵敏度为 1~4 MΩ/kPa。

虽然面向磁场或应变感知的单工作模式磁致伸缩传感器已经得到了一定的发展,但无法通过应变-磁场的同时感知掌握人手的弯曲状态和空间位置信息,导致手势信息不全面,从而阻碍人机交互,无法满足日益增长的多功能需求[19]。例如,单手攥拳伸出拇指的手部姿势,拇指指向上方和下方具有相反含义,这对于只检测手指动作的传感器是无法区分的[20]。而磁性传感器受限于磁场随距离的快速衰减,也不能实现手臂距离长度的精确位置信息检测。简单结合应变和磁场两类传感器,存在多模信号融合的模态鸿沟和弱配对等问题,不同模态数据结合需要设计复杂的跨模态学习算法,并增加对硬件设备的算力要求,间接增加了可穿戴设备的体积和功耗。

Co-Fe 薄膜作为一种磁致伸缩材料,具有较大的磁致伸缩系数和良好的低场软磁性能,可用于双感知柔性传感器[21]。电沉积法制备 Co-Fe 薄膜是一种快速、简单、低成本的技术[22],其薄膜具有良好的柔韧性和光泽度。利用传感线圈检测磁致伸缩薄膜中的磁化态变化,可以反映应变和磁场信号,用于研制传感器[23-25]。通过设计传感器的接口电路和识别算法,该传感系统可以检测和解析手的姿势和位置,从而实现准确的手势识别[26]。自适应神经模糊推理系统(adaptive neuro-fuzzy inference system, ANFIS)具有获取模糊经验知识和自学习的能力[27-28],通过划分应变/磁场状态水平区间,实现对手势的有效评价和分类。此外,将双感知传感器与触觉刺激相结合,建立交互平台实现用户对磁场的感知以及与虚拟物体的交互[29-30]。

## 1 传感器仿真模型构建

利用 COMSOL 多物理场仿真软件分析传感器的磁场空间分布和多物理量的力/磁耦合过程,建立了传感器的三维结构模型,如图 1 所示。传感器自上而下分为 Co-Fe 电沉积层、绝缘 PI 层、拾取线圈和励磁线圈,两个平面线圈沿同一方向缠绕。

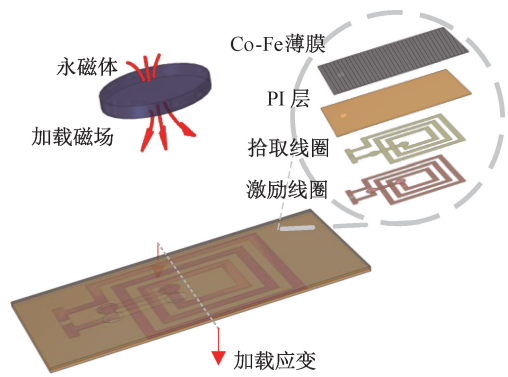



图 1 仿真模型构建

Fig. 1 Simulation model construction

通过调整永磁体与传感器之间的距离以及在传感器的短轴上施加载荷,分别对传感器施加弯曲应变和磁场以评估其响应特性。激励电流作用在激励线圈上,薄膜平面法线方向($z$ 轴)上的磁通密度分布如图 2 所示。从图 2 可以看出,线圈内外侧磁场差别较大,薄膜中心区域场强分布较均匀,薄膜的四周出现边缘效应,磁场存在的区域边缘处,其强度和方向受到空气和 Co-Fe 材料界面的影响,发生一定的畸变。

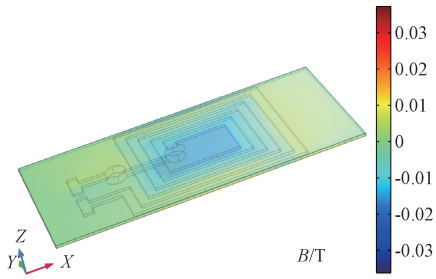
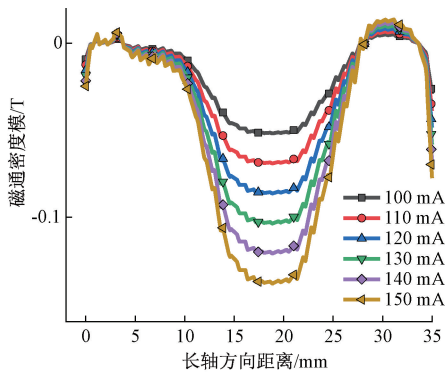



图 2　Co-Fe 薄膜磁通密度分布的云图

Fig. 2　Cloud map of magnetic flux density distribution on Co-Fe film

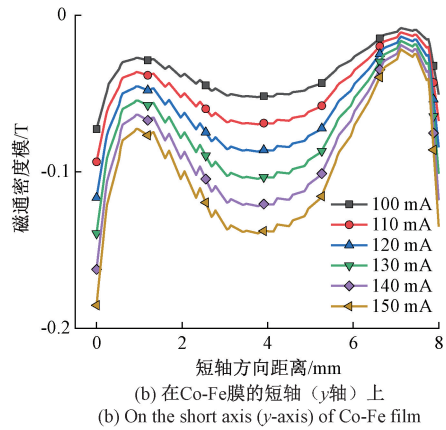
当励磁电流从 100 mA 加载到 150 mA 时,磁通密度沿着 Co-Fe 薄膜的长轴($x$ 轴)和短轴($y$ 轴)的分布如图 3 所示。可以观察到 Co-Fe 薄膜的场强分布在线圈位置呈现出较大的幅值,并且由于平面线圈的有限匝数,沿着长轴($x$ 轴)和短轴($y$ 轴)的磁通分布并不是对称的,线圈引出线一侧显示出较低的磁场。提升激励电流可以增加磁通密度,同时也使得线圈外侧的磁场分布的不均匀。为获得均匀的磁场分布,选择 100 mA 作为激励电流,线圈内侧的磁通密度平均可以达到 0.05 T,薄膜整体显示出较为均匀的磁场分布。

为提高传感器对应变/磁场的敏感度,需要借助仿真模型分析 Co-Fe 薄膜在外场作用下的磁化分布,为捕获磁化状态变化信号的拾取线圈的设计提供参考。为便于表达,先将电沉积磁致伸缩 Co-Fe 层定义为正面,将 PI 层定义为背面,则施加到传感器正面的应变和磁场的符




(a) 在Co-Fe薄膜的长轴($x$轴)上

(a) On the long axis ($x$-axis) of Co-Fe film



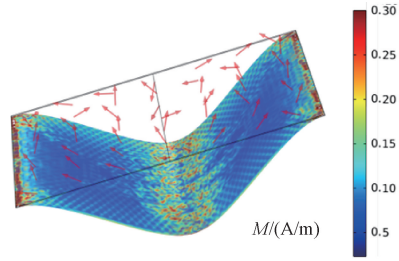

(b) 在Co-Fe膜的短轴($y$轴)上

(b) On the short axis ($y$-axis) of Co-Fe film

图 3　磁通密度分布

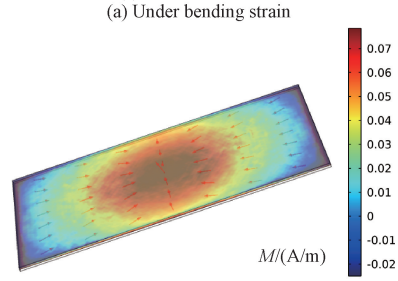
Fig. 3　Distribution of magnetic flux density

号为正,反之亦然。可视化应变和磁场作用下 Co-Fe 薄膜中的磁化强度方向及 $z$ 轴上的强度分布,如图 4(a)、(b)所示。




(a) 弯曲应变作用下

(a) Under bending strain




(b) 永磁体作用下

(b) Under permanent magnet

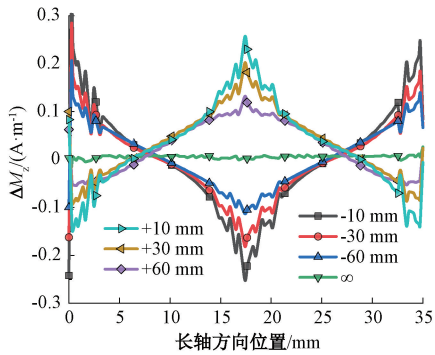
图 4　Co-Fe 膜的磁化分布,其中箭头表示磁化方向,彩色图表示沿 $z$ 轴的磁化强度

Fig. 4　The magnetization distribution of the Co-Fe film, where the arrow indicates the direction of the magnetization and the color map indicates the magnitude of the magnetization along the $z$ axis

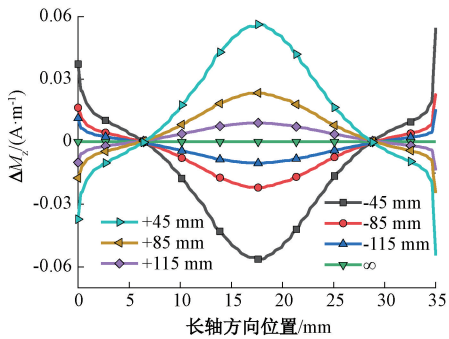
观察磁化强度方向可以看到应变和磁场作用下薄膜的磁化强度分别统计分布在面外和面内方向,考虑到平面线圈感应的是平面法向上的磁化态变化,与激励磁场一样,需要重点评估 $z$ 轴方向的磁化强度。当应变载荷或永磁体沿法线方向在薄膜中心加载弯曲应变或磁场

时,平面法向上磁化状态的变化沿长轴方向呈现对称性,应变和磁场作用下薄膜平面法向上磁化强度数量级相近,这有利于传感器同时感知应变/磁场变化,不会造成其中一个物理量的传感信号被另一个淹没。

考虑传感器沿长轴上的对称分布,选择具有代表性的薄膜中心处(长轴上)的 $z$ 轴磁化强度,观察其在不同弯曲半径和与永磁体不同距离下的幅度变化,如图 5(a)、(b)所示。弯曲半径 $\rho$ 为-10~-60 mm 和+60~+10 mm,与永磁体距离为-45~-115 mm 和+115~+45 mm,垂直方向磁化强度显示出沿 $x$ 轴对称的响应特征,其中薄膜中心处的变化最显著。因此,沿着薄膜的长轴中心放置线圈可以最大程度地收集垂直方向上的磁化变化。




(a) 当 $\rho$为-10~-60 mm和+60~+10 mm时
(a) Under ρ of -10~-60 mm and +60~+10 mm

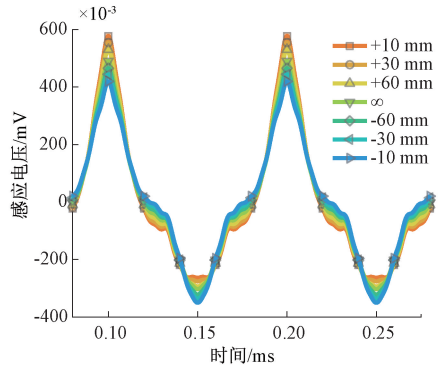



(b) 与永磁体的距离为-45~-115 mm和+115~+45 mm
(b) Under distance from permanent magnet range from -45~ -115 mm and +115~ +45 mm

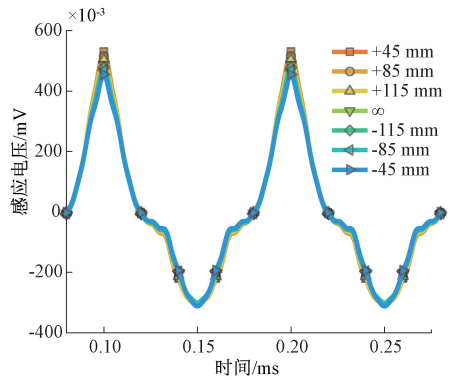
图 5 沿纵向中心线的磁化强度 $M_z$

Fig. 5 Magnitude of magnetization $M_z$ along the longitudinal centerline

传感器的激励线圈通入幅值为 100 mA、频率为 10 kHz 的激励电流,用于在 Co-Fe 薄膜上产生激励磁场。在弯曲半径为-10~-60 mm 和+60~+10 mm 的范围内,拾取线圈输出电压信号的波形如图 6(a)所示。与磁体的距离为-45~-115 mm 和+115~+45 mm 的范围内,拾取线圈输出电压信号的波形如图 6(b)所示。从图 6 可以看出,加载弯曲半径和永磁体位置的符号由负变正,幅值由大变小,输出电压信号波形的幅值随之单调变化。




(a) 弯曲半径$\rho$为-10~ -60 mm和+60~ +10 mm
(a) The bending radius $\rho$ is -10~ -60 mm and +60~ +10 mm




(b) 与磁铁的距离为-45~ -115 mm和+115~ +45 mm
(b) The distance from the magnet from -45~ -115 mm and +115~ +45 mm

图 6 拾取线圈输出感应电压

Fig. 6 The pickup coil output induced voltage

仿真证明了平面线圈传感结构用于应变/磁场传感的可行性,这对于理解传感机理和优化传感器性能至关重要。通过仿真可知,激励和拾取线圈应尽可能铺满薄膜有利于磁场均匀分布,线圈的中心设置于薄膜中心有利于力-磁信号的拾取,为平面线圈设计制造提供理论依据。

## 2 传感系统的设计与制造

利用磁化状态与外加应变/磁场之间的耦合关系,结合磁通门磁场传感技术,构建了一种具有高垂直耦合和低平面内干扰的柔性传感器。新型传感器的基本结构和制备过程如图 7 所示,该传感器由 3 层膜结构组成,包括 2 层柔性印刷电路(flexible printed circuit, FPC)和 1 层电沉积磁致伸缩合金膜。双层 FPC 中设有两个线圈,包括励磁线圈和拾取线圈,可以产生激励磁场并检测磁致伸缩合金薄膜在外部应变或磁场下磁化状态的变化。励磁线圈与拾取线圈的匝数比为 1∶1,线圈匝数均为 15。

FPC 的布线宽度和间隙均为 0.07 mm。传感器的长度、宽度和厚度分别为 35、9 和 120 μm。

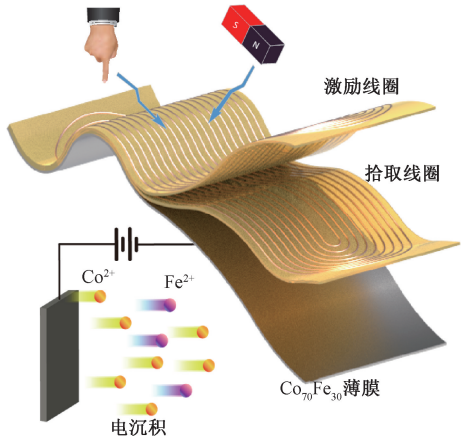


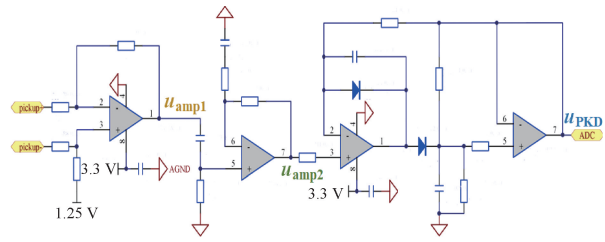

图 7　双感知传感器结构示意图和制造工艺

Fig. 7　Schematic illustration of the bi-perceptive sensor unit and preparation process

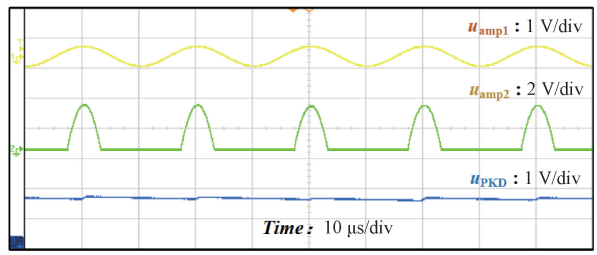
通过电化学沉积制备 Co-Fe 薄膜。电路刻蚀完成后,FPC 的覆铜侧用丙酮清洗,然后用去离子水冲洗。非沉积部分粘贴聚酰亚胺胶带绝缘,作为阴极和电沉积基底,接电源负极。金属铂片(30 mm × 30 mm × 0.1 mm, 99.9 wt%)作为阳极,接电源正极。两电极平行固定并中心对齐,距离为 3 cm,在电解液中组成电流回路。电解溶液成分包括为 0.08 mol/L $FeSO_4$(铁盐)、0.3 mol/L $CoSO_4$(钴盐)、0.3 mol/L $H_3BO_3$(缓冲液)、0.3 mol/L NaCl(提高导电性)、0.4 mol/L 抗坏血酸(抗氧化剂)、0.4 mol/L 甘氨酸(络合剂)和 0.3 mol/L 柠檬酸钠(络合剂)。电解液的 pH 值通过酸度测试仪测量,并使用 10% $H_2SO_4$ 溶液滴定控制。在电沉积制备过程中采用 50℃的温度和 100 r/min 的搅拌速度,以增强金属从电解质向电极表面的质量迁移。通过 40 min 的恒电流沉积,在 FPC 上制备 20 μm 厚的磁致伸缩合金薄膜。

基于传感器在仿真模型中表现出的输入输出特性,需要为激励和拾取线圈设计适当的接口电路。考虑到传感器的输出信号与单片机 ADC 输入电压不匹配,需要设计信号处理电路连续提取信号的幅度。

传感器在受到弯曲应变和磁场后,检测线圈两端产生感应电压的相继变化。由于其输出的电压太小,无法直接用单片机采集处理。基于仿真中对感应电压信号的分析,提取线圈感应输出的交变信号经过差分放大、半波整形和峰值检测,最终转换为幅值信号用于表征外部力-磁刺激。传感器检测线圈产生的感应电压首先经过差分放大器(输出为 $U_{amp1}$),然后传输到 1.25 V 偏置的半波放大器($U_{amp2}$),最后经峰值电压检测电路(peak detector, PKD)输出电压幅值($U_{PKD}$),如图 8(a)所示。信号处理电路的输出波形,包括 $U_{amp1}$、$U_{amp2}$ 和 $U_{PKD}$,如图 8(b)所示。




(a) 模拟电路原理
(a) Schematic of analog circuit




(b) 模拟电路输出波形
(b) Output waveforms of analog circuit

图 8　信号处理电路

Fig. 8　Signal processing circuit

围绕传感器信号采集设计实时控制电路,所提出的系统架构可以满足多达 5 个传感器的测量,如图 9 所示。电路模块由 MCU 单片机控制,采集的应变/磁场信息通过蓝牙发送到 PC,以便进一步显示和分析。设计双输出 3 A MOSFET 驱动器提供±10 V 方波,为传感器的激励线圈提供激励电流。线性谐振执行器(linear resonance actuator, LRA)由单片机定时器发出的 PWM 控制并由触

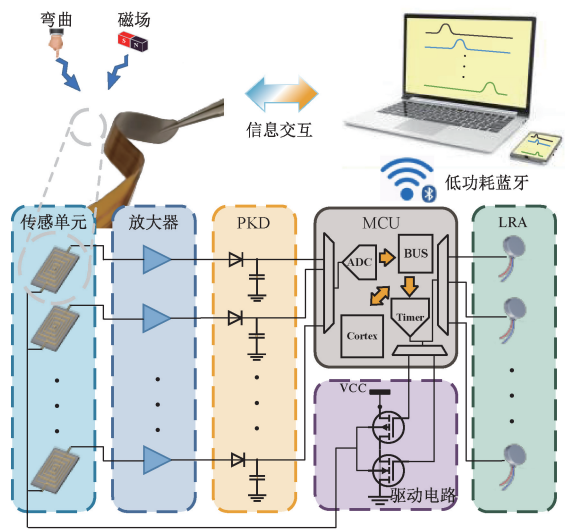


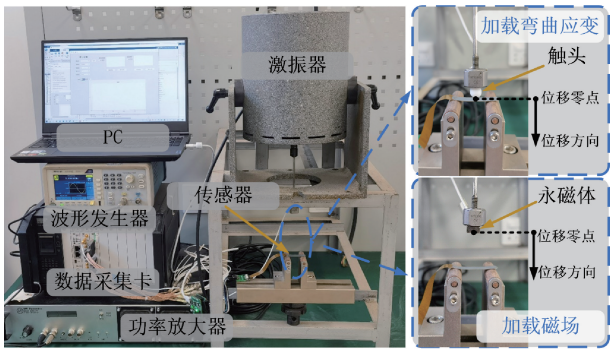

图 9　实时控制电路处理激励、拾取和振动信号,以支持传感器并发送 PC

Fig. 9　The real-time control circuit handles exciting, pickup and vibrative signal for supporting sensor and sending PC

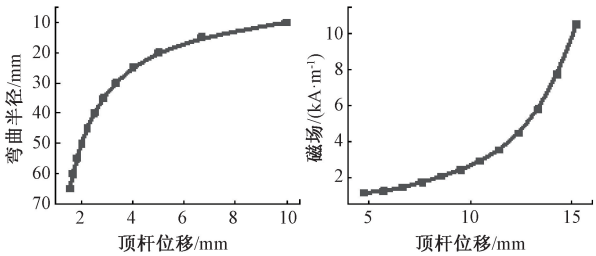
觉驱动器驱动,可以基于传感器信号向用户提供触觉反馈。100%输入占空比提供全振动强度,而 0%~50%输入占空比则不会产生振动强度,并始终强制制动。

## 3 测试系统搭建和传感系统输出特性

为了测试传感系统的输出特性和动态性能,搭建了一个动态应变/磁场测试平台,如图 10(a)所示。该平台使用 AFG1022 信号发生器产生频率和幅度可调的应变或磁场控制信号,通过 MB500VI 功率放大器驱动激振器。激振器的动线圈带动顶杆在周期性的电磁力作用下做往复运动,从而改变顶杆的运动频率和幅度。




(a) 传感器测试平台
(a) Sensor test platform




(b) 顶杆位移与弯曲半径的关系
(b) Relation between ejector displacement and bending radius

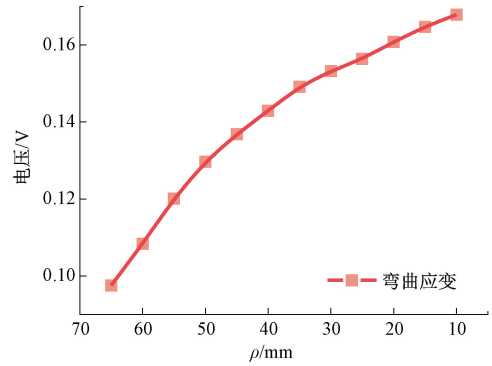
(c) 顶杆位移与磁场的关系
(c) Relation between ejector displacement and magnetic field

图 10 传感器测试平台加载弯曲/磁场示意图

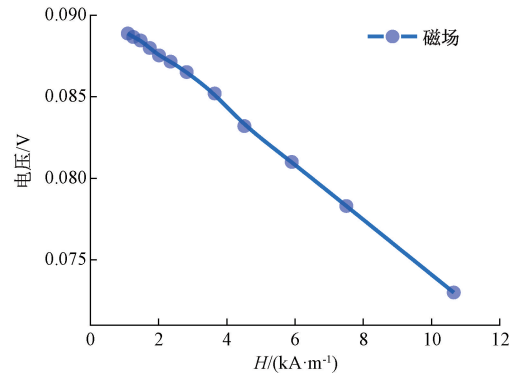
Fig. 10 Sensor test platform loading bending/magnetic field diagram

为了测试传感系统在弯曲应变和磁场下的输出特性,将传感单元固定在一个标准的三点弯夹具上,驱动顶杆为传感器加载外部刺激,并通过顶杆位移标定弯曲半径与磁场强度。顶杆上的触头与传感器直接接触,接触点作为位移零点,通过顶杆下压调整传感器的挠度加载弯曲应变,通过游标卡尺测量顶杆下降位移与传感器弯曲半径的关系,如图 10(b)所示。顶杆带动永磁体($Sm_2Co_{17}$ 28H)靠近传感器对其施加磁场,传感器上方 20 mm 位置为位移零点,通过磁强计测量顶杆下降位移与传感器固定位置磁场强度的关系,如图 10(c)所示。设置波形发生器发出频率变化的正弦波或者方波信号,按标定的曲线驱动顶杆对传感单元加载弯曲半径与磁场强度,使用采集卡记录和标定顶杆输出位置,然后上传到计算机进一步分析。

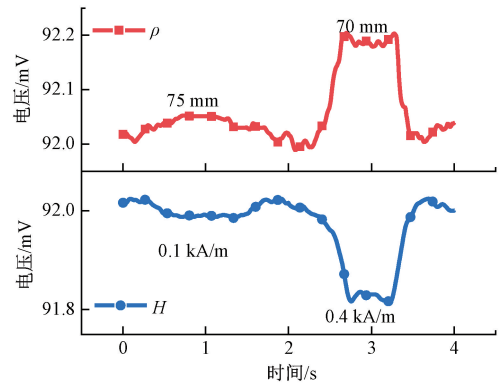
弯曲半径 $\rho$ 在 65~10 mm 的范围内弯曲半径与传感系统输出信号幅值的关系如图 11(a)所示,传感系统输出信号在大应变下表现出非线性,这是由磁致伸缩材料的磁滞特性引起的。传感器灵敏度在 65 mm 时有最大灵敏度为 22 mV/mm,随着弯曲应变增加灵敏度下降,在 10 mm 时灵敏度最小值为 7 mV/mm。磁场强度与传感




(a) $\rho$为10~65 mm时传感器输出电压幅值
(a) Sensor output voltage amplitude under ρ of 10~65 mm




(b) $H$为1~11 kA/m时传感器输出电压幅值
(b) Sensor output voltage amplitude under $H$ of 1~11 kA/m




(c) 传感器在75~70 mm和0.1~0.4 kA/m的输出波形
(c) Sensor output waveform at 75~70 mm and 0.1~0.4 kA/m

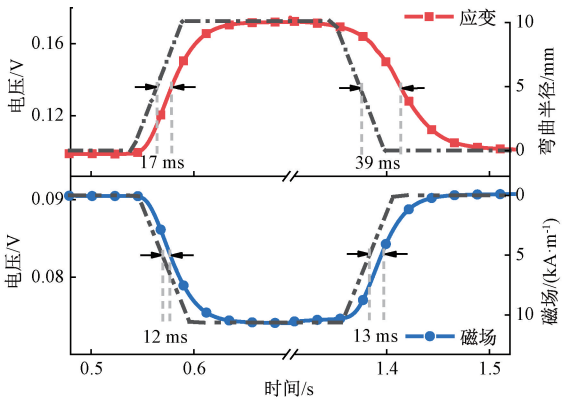
图 11 传感器的静态输出特性

Fig. 11 Static output characteristics of the sensor

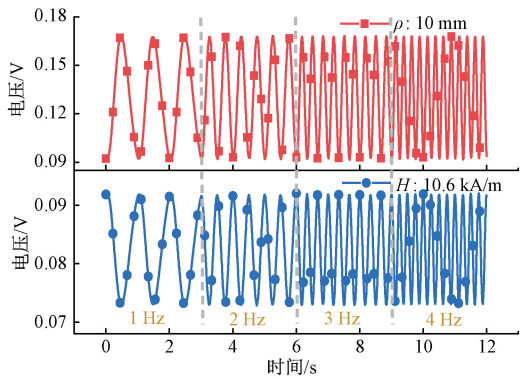
系统输出信号幅值的关系如图 11(b)所示,磁场强度 $H$ 在 1~11 kA/m 的范围内传感系统输出信号随磁场变化是线性的,其灵敏度为 1.78 mV/(kA/m)。

传感器分别在弯曲半径 $\rho$ 为 75~70 mm,磁场强度 $H$ 为 0.1~0.4 kA/m 的脉冲激励下,传感器输出信号波形如图 11(c)所示。传感器在受到应变和磁场脉冲刺激时均保持稳定的输出信号,并在去除外部刺激后恢复初始值,具有较好的静态输出特性。但受到噪声波动的影响,当输入信号小于弯曲半径 70 mm 和磁场强度 0.4 kA/m 时,无法区分噪声和实际信号,因此这一值为传感器分辨率。

在 $\rho$ 为 10 mm、$H$ 为 10.6 kA/m 下,应变和磁场加载和卸载时的输出电压信号如图 12 所示,用于测试传感器输出的滞后性。传感器的最大响应时间为 17 ms,最大恢复时间为 39 ms。分别在弯曲半径 10 mm 以及磁场强度 10.6 kA/m 的激励下,输出频率 1~4 Hz 的正弦波作用于传感单元,测试传感器动态性能,波形输出如图 12(b)所示。传感器灵敏度变化均小于 1.6%,具有较好的动态稳定性。




(a) $\rho$为10 mm和$H$为11 kA/m时传感器的响应时间和恢复时间
(a) Response time and recovery time of the sensor at $\rho$ of 10 mm and $H$ of 11 kA/m




(b) 1~4 Hz动态力和磁场下传感器的输出电压波形
(b) Output voltage of sensor under dynamic force and magnetic field at 1~4 Hz

图 12　传感器的动态输出特性

Fig. 12　Dynamic output characteristics of the sensor

## 4　传感系统的手势数据采集与聚类分析

提出的双感知传感器具有轻便和弯曲的特点,可以舒适地贴附于人的手或手套表面,同时对于大面积的电子皮肤应用具有成本效益。图 13 所示为由实时控制电路、电池(1500 mA,5 V,工作约 3~4 h)、磁铁和数据手套组成的人机交互平台。为了确保每个传感器之间的信号独立,考虑到指关节间运动的相互关联,传感器设置在每根手指的掌指关节。传感器固定在手套缝制夹层中,贴附于使用者指节的位置。永磁体($Nd_2Fe_{14}B$ N35 Φ40×5 mm)设置在用户胸前,磁化方向指向用户内侧,使传感器输出负信号。传感器和电路元件则集成在手套中,构成数据手套。




图 13　人机交互平台

Fig. 13　Photograph shows HMI platform

为了修正由于使用者的佩戴习惯和手指大小不同而导致的传感器的输出差异,在建立数据集的过程中采用了标准化处理,使用传感器的最大和最小输出信号值校准传感系统。在连续信号中分割出活动段数据,用于分类模型的计算和识别。当手处于静止状态和运动状态时,传感器信号的幅度有明显的差异,可以用来确定传感系统采集的手势动作有效信号的起点和终点,即活动段的起点和终点。无作用时,传感器信号波动平稳且幅度较小,作用越大,波动越大。活动段可以根据数据方差进行分段。使用移动窗口来对归一化的多通道数据进行成帧,并且每一帧的方差计算如下:

$$s = \frac{1}{M}\sum_{M}\frac{1}{N}\sum N[X_M(N) - \overline{X_M(N)}]^2 \tag{1}$$

式中:$X_M(N)$ 表示数据帧在任意通道中的信号序列,$N$ 是数据帧的长度,$M$ 是传感器的信道号。

取数据帧长度为 10,数据手套在每个手指上设置一个传感器,则存在拇指(thumb)、食指(index)、中指

(middle)、无名指(ring)和小指(little)共 5 个数据通道,基于样本方差阈值的方法提取不同手势动作相应的活动段信号,传感信号活动段的分割结果如图 14 所示。通过 5 个通道的时序数据计算总方差 $S$,在数据传输窗口内,当 $S>1\times10^{-3}$ 时判定手势信号起点,在起点后 1~10 s 范围内寻找 $S<1\times10^{-3}$ 的时间点作为终点,如果未在后 1~10 s 范围内找到大于 $1\times10^{-3}$ 的时间点,则认为此起点为随机抖动,抛弃此点并重新寻找下一个起点。

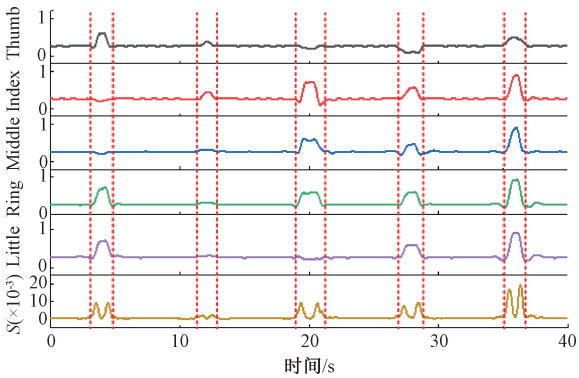



图 14 传感信号活动段分割结果示意图

Fig. 14 The schematic diagram of signal interception

选择常用的自然表达手势,如“胜利(victory)、好的(ok)、打电话(phone)”,以及传统应力或弯曲传感器易混淆(即具有相似姿态但含义不同)的手势,如“喜欢(like),不喜欢(no-like),我(me)”,“嘘声(silence),指向(point),思考(think)”,以及“请(please),致敬(heart),你好(hello)”。选择不同身高和体重的参与者,通过人机交互系统收集手势动作数据。参与者佩戴数据手套做出动作,重复每个手势 100 次,记录传感信号数据如图 15 所示。

为便于计算和可视化,提取有效相关信息和摒弃无用干扰信息,需对采集到的手势数据降维。主成分分析(principal component analysis,PCA)可以把具有相关性的高维变量合成线性无关的低维变量,通过旋转原始数据集与其主成分对齐,在第 1 和第 2 主成分平面中可视化 12 个运动向量的二维特征,如图 16 所示。不同的手势动作在图中有明显的聚类中心,同一手势的组内重复性比较好,样本数据相似度高。不同手势的组间有较好的区分度,传感系统收集的数据可作为分类识别的基础。

## 5 基于 ANFIS 模型的手势识别

传感器输出的应变和磁场信息与手势和位置的映射表现出明显的非线性。这种信息映射不能通过特定的数学表达式来建立。然而,通过计算传感信号的力-磁特征的隶属度分布,可以建立模糊神经网络来识别和推断信号。ANFIS 结合模糊控制理论和神经网络的优点,在许多实际应用场景中保留了模糊控制对于不精确知识的经验表示,并具有神经网络自适应学习权重参数的能力。两者相辅相成,具有学习、适应、模糊、识别等功能,能够自适应地学习数据集的模糊性和非线性。

学习和自适应是由 Sugeno 模糊策略的 ANFIS 自适

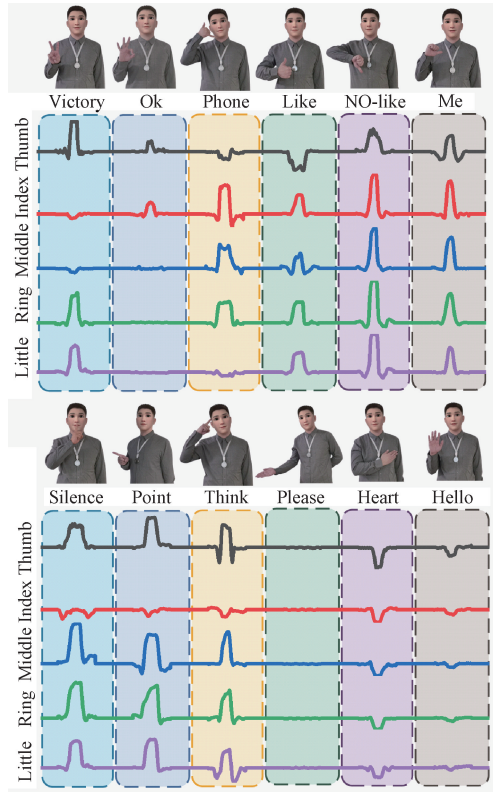



图 15 手势动作对应的传感信号轮廓

Fig. 15 The gestures and the corresponding signal profiles

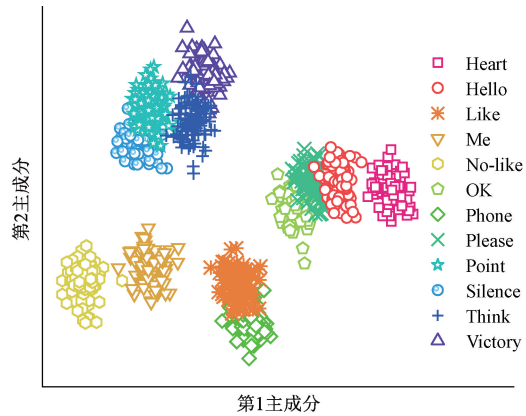



图 16 12 个运动的二维特征的可视化

Fig. 16 Visualization of the 12 motion features

应框架支持。在 ANFIS 的设计中,考虑了一个具有 IF-THEN 规则的一阶 Sugeno 框架模糊模型。ANFIS 网络结构如图 17 所示,自适应节点为正方形,固定节点为圆形。

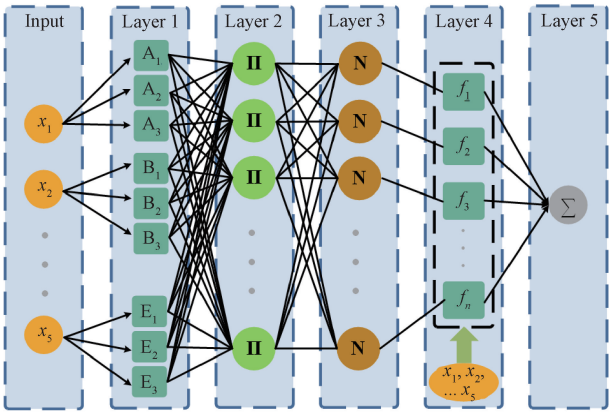



图 17　ANFIS 网络的体系结构

Fig. 17　Architecture of an ANFIS network

1)第 1 层(Layer 1),为确定输入$\{x_1, x_2, \cdots, x_i\}$上的模糊集合 $A$,第 1 层中节点 $i$ 的输出函数为:

$$O_i^1 = \mu_A(x) \tag{2}$$

式中:$\mu(x)$是隶属函数;$\mu_A(x)$为 $x_i$ 对模糊集 $A$ 的隶属度,可将 $x_i$ 映射到[0,1]的区间上。广义钟形隶属函数可以提供灵活性、平滑性、适应性和简便的参数调整,因此选择其作为隶属函数,确保系统在处理复杂数据时具有较好的表现和可靠性。

$$\mu(x) = \exp\left(-\left(\frac{x - c_i}{a_i}\right)^2\right) \tag{3}$$

式中:$x$ 是输入;$a_i$、$c_i$ 是主参数集,分别是正态分布的标准差和平均值。

2)第 2 层(Layer 2),将第 1 层输出信号相乘,以计算每个规则的发射强度。第 2 层的输出如下:

$$O_i^2 = \mu_A(x_1) \cdot \mu_B(x_2) \cdots \mu_E(x_5) \tag{4}$$

3)第 3 层(Layer 3),第 2 层的发射强度由节点归一化,表示如下:

$$O_i^3 = \bar{w}_i = \frac{w_i}{\sum w_i} \tag{5}$$

4)第 4 层(Layer 4),一阶多项式和归一化触发强度的乘积是第 4 层的输出,其中节点是自适应的。输出如下所示:

$$O_i^4 = w_i f_i(x_1, x_2, \cdots x_5) \tag{6}$$

式中:$f_i(x_1, x_2, \cdots x_5) = \sum p_j^i x_j + r^i$,$\bar{w}_i$ 是第 3 层的输出,$p_j^i$ 和 $r^i$ 是结果参数集。

5)第 5 层(Layer 5),所有传入信号由节点相加,整体输出如下所示:

$$O_i^4 = \sum \bar{w}_i f_i \tag{7}$$

ANFIS 学习基于样本数据确定其条件参数和结果参数,以获得稳定的 ANFIS 推理模型,并将其应用于在线实时手势识别。在每次训练迭代中,实际输出和预期输出的均方根误差都会减小。当达到预定的训练次数或误差范围时,训练停止。这种方法确保了模型的不断细化和改进,从而实现更准确可靠的手势识别。通过选择 ANFIS 网络模型,建立了识别手部运动特征的分类学习器。

与卷积神经网络(convolutional neural networks, CNN)和长短期记忆(long short-term memory, LSTM)等常用的时间序列分析算法相比,ANFIS 有其独特的优势。ANFIS 融合了模糊控制理论和神经网络的优点,保留了模糊控制对不精确知识的经验表达,具有神经网络自适应学习权值参数的能力。这使得 ANFIS 具有学习、自适应、模糊性和识别的能力,并且可以自适应地学习数据集的模糊性和非线性。实验评估了不同算法的性能,包括准确性、预测速度和训练时间,如图 18 所示。根据训练和测试的效果,综合优化算法为 ANFIS。

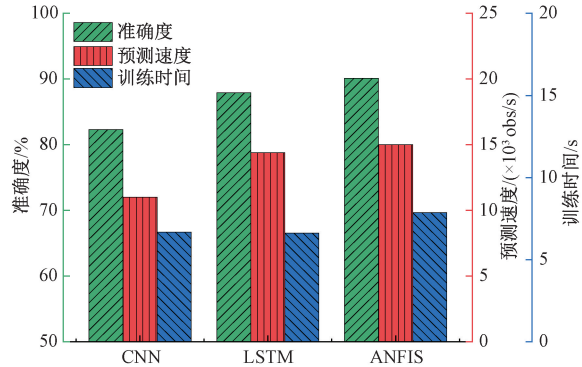



图 18　不同算法的性能比较,包括准确度、预测速度和训练时间

Fig. 18　Comparison of different algorithms performance including accuracy, prediction speed and training time

基于该方法,使用训练模型对 12 个手势进行分类,并通过混淆矩阵评估该模型的性能,如图 19 所示。矩阵的每一行表示真实类中的测试样本,每一列表示预测类中的预测结果。12 种手势的分类准确率达到 90.1%。基于双感知传感器的可穿戴设备可以通过训练和部署模型来准确理解用户意图。

## 6　基于触觉反馈的手势交互

除了使机器获取先进的应变-磁场双感知融合能力用于理解用户意图外,用户同时需要来自于机器的直观快速信息反馈,类似于提供振动或声光警报的传统输入输出设备,例如触摸屏、手柄和控制面板。将振动触觉融

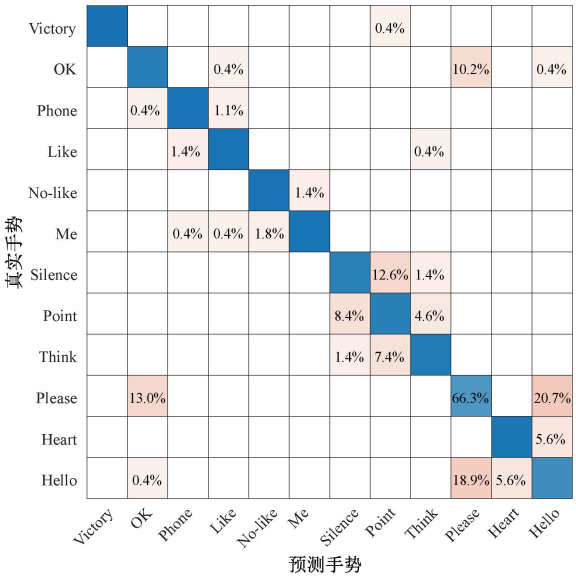
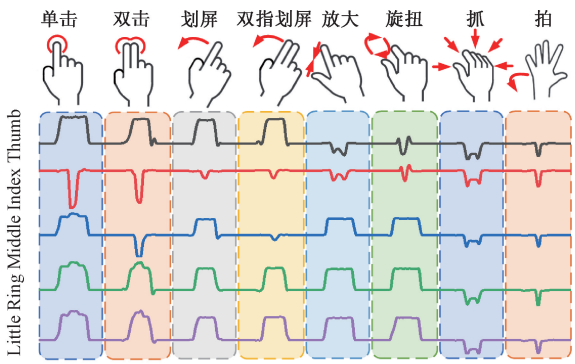



图 19 手势运动信号的混淆矩阵

Fig. 19 The confusion matrix of hand-motion signals

入用户的真实感受中，帮助用户通过感知磁场建立与虚拟物体互动的交互方式。通过将 LRA 振动器集成到数据手套上，实现了具有增强反馈的交互式平台。本文研究中，5 个关节处的传感器记录了人手的运动，并将永磁体（$Nd_2Fe_{14}B$ N35 Φ20×5 mm）放置在手掌下方以模拟虚拟目标物体。通过压电振动传感器可视化表征 LRA 振动器的振动信号。

多手指同时感应和反馈可应用于 AR 应用中的虚拟控制面板和 VR 可穿戴设备的非触摸式手势操作，如轻触和旋转按钮、轻击和变焦屏幕等。每个手指上的传感器可以独立监控手指的运动以进行实时采集，并在接收到非触摸式磁信号后提供不同跨度的振动反馈，如图 20 所示。当传感器的输出电压低于设定的阈值时，驱动 LRA 并产生振动，使人感觉到磁场。当非触摸手势在磁铁上方操作时，触觉反馈帮助用户掌握动作效果。通过增加与磁场和虚拟物体相互作用的振动反馈，获得磁传感能力。操作员将带数据手套的手伸向永磁体，双感知



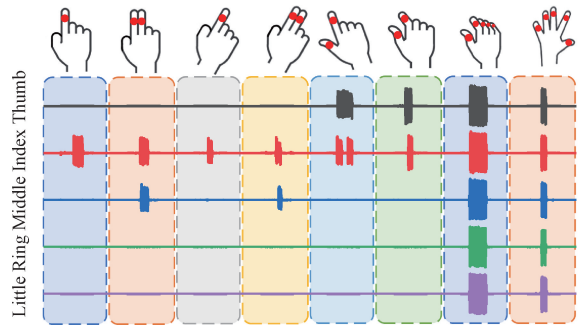




图 20 手势控制输出信号和触觉反馈对应的实时振动强度

Fig. 20 Output signal of gesture control and real-time vibration intensity corresponding to haptic feedback

传感器的输出电压随距离变化。当接近虚拟物体时，振动强度同步增加，将信息从虚拟场景反馈给操作员，如图 21 所示。通过这种简化自然的互动平台和反馈系统，成功地模拟了与虚拟对象的互动操作。

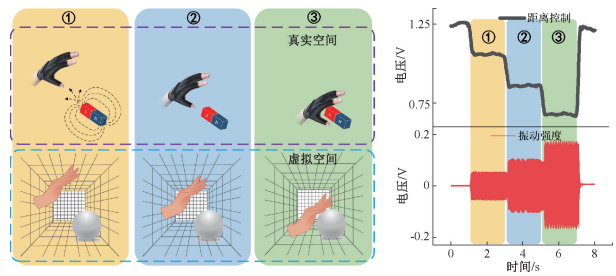



图 21 交互平台控制信号和振动传感器采集的振动信号

Fig. 21 Control signal of the platform and vibration intensity collected by the vibration sensor

## 7 结 论

基于磁致伸缩合金的磁化状态对应变/磁场的高灵敏度，提出了基于电沉积 Co-Fe 薄膜开发应变-磁场双感知柔性传感器。通过 COMSOL 模拟，研究了 Co-Fe 薄膜的磁化强度与外部应变/磁场的耦合关系。结合矢量磁场传感原理，建立了平面线圈柔性传感模型，分析了传感器在应变/磁场作用下的输出特性。基于仿真结果，设计并制作了传感器及其接口电路，建立了用于人机交互的传感系统。

搭建传感系统测试实验平台，测试传感系统的输出特性和动态性能。在 10~65 mm 的弯曲范围内，传感器的最大灵敏度为 22 mV/mm。在 1~11 kA/m 的磁场范围内，传感器的最大灵敏度为 1.78 mV/(kA/m)，在 1~4 Hz 的不同 $\rho$ 和 $H$ 下，灵敏度变化均小于 1.6%，具有较好的动态输出稳定性。提出了一种基于活动段分割和

ANFIS 网络模型的手势分类器。该模型通过划分传感器输出信号的应变/磁场状态电平区间,推断出手势的姿态和位置,实现对手势的有效分类识别。该分类器对被传统应力或弯曲传感器易混淆的 12 种手势进行了分类识别,准确率达到 90.1%。此外,通过在双感知交互平台上结合振动反馈功能,成功地使用户获得磁感应能力,并模拟与虚拟物体的交互操作。

## 参考文献


[1] MOIN A, ZHOU A, RAHIMI A, et al. A wearable biosensing system with in-sensor adaptive machine learning for hand gesture recognition [J]. Nature Electronics, 2021, 4(1): 54-63.

[2] KIM K K, HA I, KIM M, et al. A deep-learned skin sensor decoding the epicentral human motions [J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 2149.

[3] 张维, 林泽一, 程坚, 等. 动态手势理解与交互综述[J]. 软件学报, 2021, 32(10): 3051-3067.
ZHANG W, LIN Z Y, CHENG J, et al. Survey of dynamic hand gesture understanding and interaction[J]. Journal of Software, 2021, 32(10):3051-3067.

[4] 邓广雯, 梁娇娇, 张驾祥, 等. 基于现场可编程门阵列的可重构手势交互教学机器人设计[J]. 电气技术, 2023, 24(10): 8-16.
DENG G W, LIANG J J, ZHANG J X, et al. Design of reconfigurable gesture interactive teaching robot based on field programmable gate array[J]. Electrical Engineering, 2023, 24(10): 8-16.

[5] 孙英, 汪忠晟, 韩智昊, 等. 镓基液态金属柔性应变传感器的设计优化与实验验证[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(1): 16-26.
SUN Y, WANG ZH SH, HAN ZH H, et al. Design optimization and experimental validation of the gallium-based liquid metal flexible strain sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(1): 16-26.

[6] 杨晓朋, 文玉梅, 陈冬雨, 等. FeGa 膜/AT 切石英晶片双面复合蝶形谐振磁场传感器[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(3): 17-25.
YANG X P, WEN Y M, CHEN D Y, et al. Butterfly-shaped FeGa film/AT-cut quartz wafer double-sided composite resonant magnetic field sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(3): 17-25.

[7] GE J, WANG X, DRACK M, et al. A bimodal soft electronic skin for tactile and touchless interaction in real time[J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 4405.

[8] HUANG P, LI Y Q, YU X G, et al. Bioinspired flexible and highly responsive dual-mode strain/magnetism composite sensor [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2018, 10(13): 11197-11203.

[9] ZHOU Q, JI B, HU B, et al. Tilted magnetic micropillars enabled dual-mode sensor for tactile/touchless perceptions[J]. Nano Energy, 2020, 78(2): 105382.

[10] ZHAO J Q, GUO H, PANG Y K, et al. Flexible organic tribotronic transistor for pressure and magnetic sensing[J]. ACS Nano, 2017, 11(11): 11566-11573.

[11] XU J Q, PEI L, LI J, et al. Flexible, self-powered, magnetism/pressure dual-mode sensor based on magnetorheological plastomer [J]. Composites Science and Technology, 2019, 183(20): 107820.

[12] SHU Q, XU ZH B, LIU SH, et al. Magnetic flexible sensor with tension and bending discriminating detection[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 433(1): 134424.

[13] 黄文美, 陶铮, 郭萍萍, 等. 棒状铁镓合金磁特性测试装置的设计与实验[J]. 电工技术学报, 2023, 38(4): 841-851.
HUANG W M, TAO ZH, GUO P P, et al. Design and experiment of high frequency magnetic properties testing device for rod iron-gallium alloy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(4): 841-851.

[14] REID A H, SHEN X, MALDONADO P, et al. Beyond a phenomenological description of magnetostriction [J]. Nature Communications, 2018, 9(1): 388.

[15] 刘莎莎, 王博文, 黄文美, 等. 仿生磁致伸缩触觉传感阵列设计与输出特性[J]. 电工技术学报, 2021, 36(12): 2576-2584.
LIU SH SH, WANG B W, HUANG W M, et al. Design and output characteristics of bionic magnetostrictive tactile sensor array [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(12): 2576-2584.

[16] SUWA Y, AGATSUMA S, HASHI S, et al. Study of strain sensor using FeSiB magnetostrictive thin film[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010, 46(2): 666-669.

[17] KWON J H, KWAK W Y, CHOI H Y, et al. Effects of repetitive bending on the magnetoresistance of a flexible spin-valve [J]. Journal of Applied Physics, 2015, 117(17): 17E120.

[18] PARK J J, REDDY K S M, STADLER B, et al. Magnetostrictive Fe-Ga/Cu nanowires array with GMR sensor for sensing applied pressure[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(7): 2015-2020.

[19] CAÑÓN BERMÚDEZ G S, MAKAROV D. Magneto-sensitive e-skins for interactive devices[J]. Advanced Functional Materials, 2021, 31(39): 2007788.

[20] 钱牧云，张姣姣，魏新园. 光纤光栅柔性触觉传感器的材质识别功能研究[J]. 仪器仪表学报，2022，43(4)：206-212.
QIAN M Y，ZHANG J J，WEI X Y. Research on material recognition function of fiber Bragg grating flexible tactile sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument，2022，43(4)：206-212.

[21] ZHAO Y L，LI J H，LIU Y Y，et al. Magnetostriction and structure characteristics of $Co_{70}Fe_{30}$ alloy prepared by directional solidification[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials，2018，451(1)：587-593.

[22] NICOLENCO A，CHEN Y，TSYNTSARU N，et al. Mechanical，magnetic and magnetostrictive properties of porous Fe-Ga films prepared by electrodeposition[J]. Materials & Design，2021，208(1)：109915.

[23] XIE CH X，LIU T H，PEI C X，et al. A flexible thin-film magnetostrictive patch guided-wave transducer for structural health monitoring[J]. IEEE Sensors Journal，2022，22(12)：12237-12244.

[24] XU J，TAT T，ZHAO X，et al. A programmable magnetoelastic sensor array for self-powered human-machine interface[J]. Applied Physics Reviews，2022，9(3)：031404.

[25] ZHOU Y H，ZHAO X，XU J，et al. A multimodal magnetoelastic artificial skin for underwater haptic sensing[J]. Science Advances，2024，10(1)：eadj8567.

[26] LEE M，BAE J. Real-time gesture recognition in the view of repeating characteristics of sign languages[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics，2022，18(12)：8818-8828.

[27] 王月月，陈民铀，赖伟，等. 基于 MOSFET 外特性参量的自适应模糊神经网络状态评估模型[J]. 电工技术学报，2018，33(18)：4286-4294.
WANG Y Y，CHEN M Y，LAI W，et al. Healthy condition assessment on MOSFETs based on external characteristic parameters and adaptive neuro-fuzzy inference system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2018，33(18)：4286-4294.

[28] 魏惠芳，王丽梅. 永磁直线同步电机自适应模糊神经网络时变滑模控制[J]. 电工技术学报，2022，37(4)：861-869.
WEI H F，WANG L M. Adaptive fuzzy neural network time-varying sliding mode control for permanent magnet linear synchronous motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2022，37(4)：861-869.

[29] FANG Y，GUO W CH，SHENG X J. Toward a wireless wearable system for bidirectional human-machine interface with gesture recognition and vibration feedback[J]. IEEE Sensors Journal，2022，22(10)：9462-9472.

[30] BERMEJO C，HUI P. A survey on haptic technologies for mobile augmented reality[J]. ACM Computing Surveys，2022，54(9)：1-35.

## 作者简介



**王千**，2007 年于河北工业大学获得学士学位，2019 年于河北工业大学获得硕士学位，现为河北工业大学博士研究生，主要研究方向为新型磁性材料及智能器件。
E-mail：wqharbour@ outlook. com

**Wang Qian** received his B. Sc. degree from Hebei University of Technology in 2007，and M. Sc. degree from Hebei University of Technology in 2019. Now he is a Ph. D. candidate at Hebei University of Technology. His main research interests include novel magnetic materials and intelligent devices.



**李明明**（通信作者），2005 年于山东大学获得学士学位，2013 年于北京科技大学获得硕士学位，2018 年于北京科技大学获得博士学位，现为河北工业大学副教授，主要研究方向为新型磁性材料及智能器件。
E-mail：limm@ hebut. edu. cn

**Li Mingming**（Corresponding author）received his B. Sc. degree from Shandong University in 2005，M. Sc. degree from University of Science and Technology Beijing in 2013，and Ph. D. degree from University of Science and Technology Beijing in 2018. Now he is an associate professor at Hebei University of Technology. His main research interests include novel magnetic materials and intelligent devices.