文章编号:1007－6735(2025)05－0542－15　　DOI: 10.13255/j.cnki.jusst.20240823001

基于磁感应式柔性触觉传感器的三维接触力测量及力控抓取研究

许俊豪，　罗宇轩，　申慧敏，　杨丽红，　李炳初，　甘　屹

（上海理工大学 机械工程学院，上海 200093）

摘要：三维接触力感知对机器人灵巧操作和人机交互至关重要，但现有触觉传感器多局限于单维力测量，难以满足复杂交互需求。针对这一问题，设计了一种基于磁感应的柔性触觉传感器（MFFTS），能够实现高精度的三维接触力测量，并对其接触力反馈的抓取控制策略进行探索。通过有限元仿真对比 6 种柔性基底结构对其灵敏度的影响，结果表明，空心金字塔型结构展现出最优的综合性能，其法向灵敏度达到 1 183 μT/N，切向灵敏度为 113.10 μT/N。选用空心金字塔作为 MFFTS 结构，并研究其多维接触力解耦估计问题，通过磁–固耦合仿真揭示不同方向接触力对 MFFTS 输出的耦合影响，利用反向传播神经网络（BPNN）构建三维接触力解耦估计方法，对比了 BPNN 的实际值与估计值，验证其三维接触力测量精度。测试数据显示，该方法的法向力和切向力平均绝对误差分别为 0.4049 N 和 0.1111 N，均方根误差分别为 0.5112 N 和 0.1531 N。将 MFFTS 部署于机械夹持器表面以进行力控抓取，构建了基于多维接触力反馈的抓取控制框架。实验表明，MFFTS 可实时反映抓取过程中夹持器与抓取物的接触状态，有助于提升抓取稳定性。MFFTS 结构简单，易于制备，为机器人系统大规模集成三维接触力传感器提供了探索方向。

关键词：触觉传感器；磁感应式；三维接触力；力反馈；抓取控制

中图分类号：TP 24　　**文献标志码：**A

3D contact force measurement and force-controlled grasping based on magnetic-field-based flexible tactile sensor

XU Junhao,　LUO Yuxuan,　SHEN Huimin,　YANG Lihong,　LI Bingchu,　GAN Yi

(*School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China*)

Abstract: Three-dimensional contact force perception is crucial for dexterous robotic manipulation and

收稿日期: 2024−08−23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目（51935007, 52205063）

第一作者: 许俊豪（1999—），男，硕士研究生．研究方向：机器人新型传感器．E-mail：xujunhao9905@126.com

通信作者: 李炳初（1988—），男，副教授．研究方向：机器人力、触觉感知及控制．E-mail：bclicsu@sina.com

引文格式: 许俊豪，罗宇轩，申慧敏，等．基于磁感应式柔性触觉传感器的三维接触力测量及力控抓取研究[J]．上海理工大学学报，2025，47(5)：542-556.

Citation: XU Junhao, LUO Yuxuan, SHEN Huimin, et al．3D contact force measurement and force-controlled grasping based on magnetic-field-based flexible tactile sensor[J]．Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2025, 47(5)：542-556.

human-robot interaction. However, most existing tactile sensors are limited to single-axis force measurement, failing to meet complex interaction demands. To address this challenge, a magnetic-field-based flexible tactile sensor (MFFTS) was proposed for high-precision 3D contact force measurement. A grasping control strategy with force feedback was also explored. It was demonstrated through finite element simulation that the hollow pyramid structure exhibited superior overall performance among the six flexible substrate designs, with a normal sensitivity of 1 183 μT/N and a tangential sensitivity of 113.10 μT/N. This structure was selected for 3D contact force analysis and the MFFTS multi-axis force decoupling estimation was investigated. Magnetic-mechanical coupling simulations revealed the coupling effects of different directional forces on MFFTS output. A backpropagation neural network (BPNN) was used to develop a decoupling method for 3D force estimation. The BPNN predictions were compared with test data, showing high measurement accuracy. The mean absolute errors for normal and tangential forces were 0.404 9 N and 0.111 1 N, respectively. The root mean square errors were 0.511 2 N and 0.153 1 N. The MFFTS was integrated onto a robotic gripper for force-controlled grasping. A multi-axis force feedback control framework was established. Experiments demonstrated that the MFFTS could monitor contact states in real time, improving grasping stability. The sensor's simple structure facilitates fabrication, providing a potential solution for large-scale integration of 3D force sensors in robotic systems.

Keywords: *tactile sensor*; *magnetic-field-based*; *three-dimensional contact force*; *force feedback*; *grasping control*

接触力是机器人与操控对象及工作环境物理交互界面的重要属性，接触力感知对提升机器人自主操控能力具有重要作用，是机器人智能化的基础条件[1]。机器人获取接触力信息主要依靠触觉传感器，包括刚性触觉传感器和柔性触觉传感器两类。柔性触觉传感器由可变形柔性材料制成，可提供比刚性触觉传感器更安全的物理交互界面，是近年来机器人触觉感知的研究热点[2]。

根据传感机制，柔性触觉传感器可分为电阻式[3-4]、电容式[5-6]、压电式[7-8]、视觉式[9-10]和磁场式[11-12]等。滕飞等[3]利用多种导电复合材料，通过非溶剂致相分离法构建多孔三维导电网络，开发出高灵敏度(应变系数达 40.66)、宽拉伸范围(0～25%)且循环稳定的柔性电阻式应变传感器。Kim 等[4]制造了由 32×32 个电阻应变片组成的触觉传感器阵列，应变片电阻值在 0～0.6 N 范围内随法向力线性增加。Lee 等[5]在单个传感单元中嵌入 4 个方形电极电容，顶部放置聚二甲基硅氧烷(PDMS)凸块，外力迫使凸块形变产生电容差异，以计算力的大小和方向。黄梁松等[6]通过结合 PDMS 与碳黑、多壁碳纳米管(MWCNTs)导电材料，并利用砂纸微结构和弧形凸起构建双面多级微结构，开发出高灵敏度(1.287 5 kPa^{-1})、宽检测范围(100 kPa)和快速响应(80 ms)的柔性电容式压力传感器。张锦桐等[7]通过纳米 SiO_2 改性 PDMS 衬底解决了柔性电极裂纹问题，构建了 5 层结构柔性压电式电子皮肤，利用基板粗糙度调控电极−介电层褶皱接触，以增强电导率和压电响应。Lin 等[8]利用压电材料薄膜制作了触觉传感器阵列。Yuan 等[9]设计了视觉式触觉传感器 GeLSight，可检测接触力和接触物体形状，放置于机器人灵巧手上还可检测滑动信息。Lambeta 等[10]设计了一种紧凑型高分辨率触觉传感器 DIGIT，采用 RGB-LED 模组以及相机模块，通过相机捕捉变形引起的反射面颜色变化来计算接触力。通过上述研究可以看出，为实现三维接触力测量，电阻式、电容式和压电式触觉传感器均需要集成多个传感单元，根据不同位置传感单元的响应差异计算接触力大小及方向，存在结构尺寸大、制造工艺复杂和布线难度高等问题。视觉式触觉传感器由于内置图像采集单元，成本较高且需要较大安装空间。

基于磁感应的柔性触觉传感器(magnetic-field-based flexible tactile sensor，MFFTS)将传感器表面接触信息转换为磁场变化量，主要由磁源(永磁

体、磁粉或者磁颗粒）、柔性基底和磁场传感器 3 部分构成。当接触力作用于传感器时，嵌入柔性基底中的磁源产生偏移，引起空间磁场分布变化，通过磁场传感器可检测磁场变化，并根据磁感应强度与接触力的映射关系来识别接触力大小及方向。由于磁场是矢量场，可反映磁源的三维移动，MFFTS 自身具有检测三维接触力的功能，不需要进行多传感单元集成。磁场式触觉传感器初步的原型想法由 Clark 在 1988 年提出，直到近几年才开始深入研究。Tomo 等[11] 提出用于机器人灵巧手的阵列式 MFFTS uSkin，由 24 组永磁体及霍尔传感器组成，并集成在 iCub 机器人[12] 中进行物体形状测量。MFFTS 的灵敏度受磁源位置、柔性基底结构等因素影响，目前国内外学者还未对此进行深入研究。Fang 等[13] 将 MFFTS 用于柔性机械手，集成永久磁性颗粒的柔软触觉皮肤，可估计指尖与物体间的接触信息，同时实现感知与抓取。Man 等[14] 受人类皮肤毛发仿生学启发，研制出一种基于磁纤毛阵列的柔性 MFFTS，该传感器将磁性颗粒置于柔性纤毛上，通过检测磁纤毛弯曲引起的磁场变化获取外力信息。不同方向接触力所引起的磁场响应互相影响，三维接触力解耦是 MFFTS 应用的难点。Tomo 等[15] 建立三维接触力−磁场响应正向映射关系，但并未根据磁场响应进行三维接触力估计。Chathuranga 等[16] 制备了圆柱形 MFFTS，通过理论建模获得三维接触力−磁场响应正向映射关系，其理论值与实测值之间的误差小于 5%，但建模过程较为复杂，且需要精确的传感器尺寸及力学参数。Dwivedi 等[17] 通过神经网络对金字塔型 MFFTS 进行三维接触力估计，该方法实施过程较简单，但需要大量训练数据，且训练数据需完整覆盖工作区间。Yan 等[18] 通过巧妙设计磁性薄膜表面磁场实现 MFFTS 自解耦，磁场传感器处的法向力仅影响磁感应强度，而切向力仅影响磁场方向，该方法需要定制磁性薄膜，制作难度限制了其应用。

MFFTS 作为柔性触觉传感的一种解决方案，具有结构简单、布线方便和成本低等显著优点。然而，该类传感器的高灵敏度设计、多维接触力之间的耦合问题以及在实际系统中的集成应用，仍有待深入研究。为突破这些局限，本文重点对 MFFTS 的结构与信号处理算法进行了优化，并验证其在机器人力控抓取任务中的有效性。

1 MFFTS 结构优化设计

1.1 MFFTS 的基底结构

MFFTS 工作原理如图 1 所示，图中：B_x、B_y、B_z 分别表示沿空间直角坐标系 x、y、z 方向的磁感应强度分量；B_0 表示永磁体在初始位置时的磁感应强度；L 为柔性基底的高度；d 和 δ 分别为柔性基底受法向力 F_z 和切向力 F_y 作用时，沿 z 轴和 y 轴方向产生的形变量。当外界接触力作用于柔性基底表面时，嵌入在柔性基底中的永磁体位置会发生变化，引起永磁体周围磁场分布发生变化。通过位于柔性基底下方的磁场传感器可测量磁感应强度，根据磁感应强度变化计算外界接触力。单位力作用下磁感应强度的变化量定义为 MFFTS 的灵敏度，灵敏度越高则越易测量更细微的外力变化。

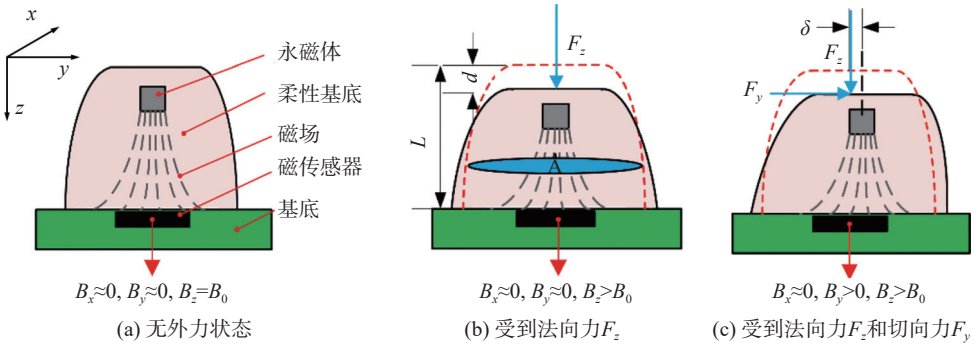
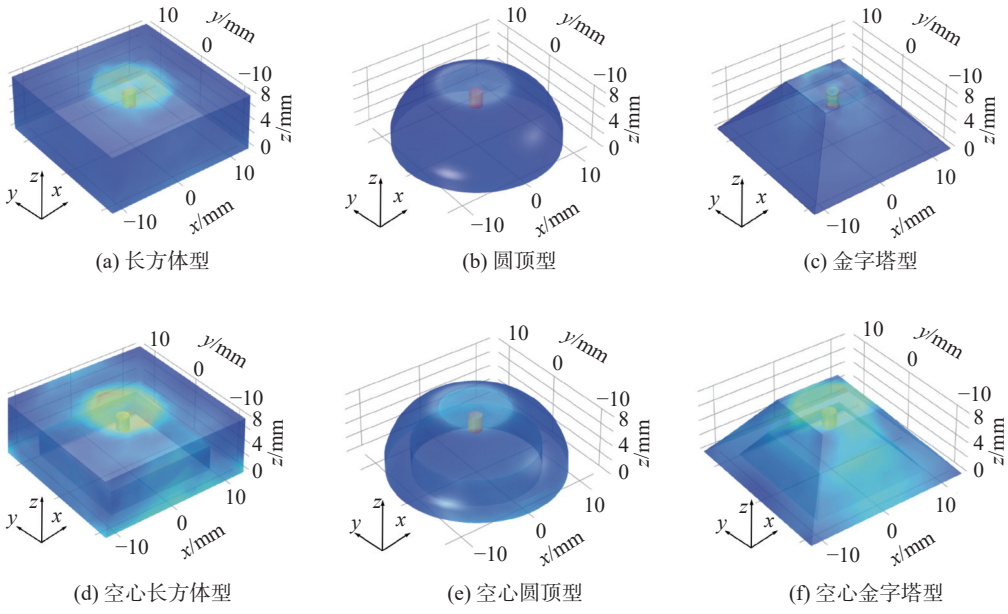


图 1 MFFTS 结构及工作原理

Fig.1 Structure and working principle of MFFTS

MFFTS 的柔性基底采用长方体、圆顶型、金字塔型等多种结构。由于不同结构在相同外力作用下产生的形变不同，基底结构对传感器的灵敏度有显著影响。本研究通过磁−固耦合有限元仿真比较 6 种不同柔性基底结构 MFFTS 的响应，6 种柔性基底结构如图 2 所示。



(a) 长方体型　(b) 圆顶型　(c) 金字塔型

(d) 空心长方体型　(e) 空心圆顶型　(f) 空心金字塔型

图 2　不同柔性基底结构的 MFFTS

Fig.2　MFFTS with different flexible substrate structures

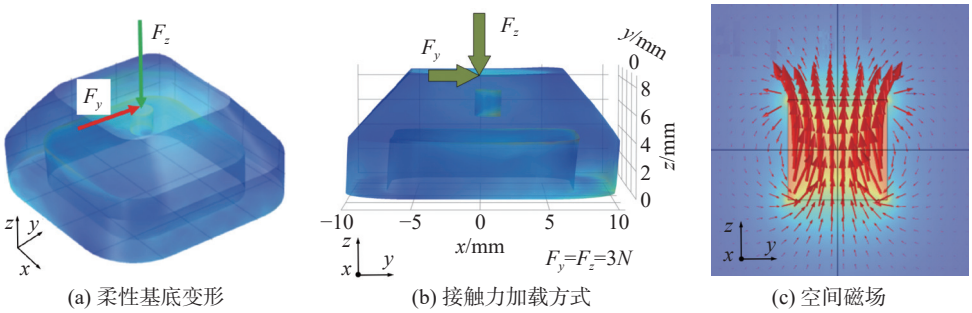
1.2　仿真方法

MFFTS 的磁场响应取决于柔性基底变形和永磁体磁场分布，为掌握接触力到磁场响应的准确传导过程，本研究利用 COMSOL 软件对 MFFTS 进行磁−固耦合仿真。由于不同结构的柔性基底和永磁体在 x 轴与 y 轴方向均对称，仅分析 y 轴和 z 轴 2 个方向的接触力即可，如图 3(a) 所示。传感器在法向和切向接触力作用下的变形响应如图 3(b) 所示。由图 3(b) 可知，嵌入在柔性层中的永磁体在多维接触力作用下位置发生变化，导致下方放置的磁场传感器检测到的磁场也会发生变化。永磁体所形成的空间磁场如图 3(c) 所示，该磁场随柔性基底变形而移动或偏转。

1.3　不同基底结构 MFFTS 比较

为了比较不同柔性层结构的灵敏度特性，在传感器表面每隔 0.5 N 施加 0～7 N 范围内的法向力和切向力，作用在直径 5 mm 的圆面上。在永磁体中心设置监测永磁体位移变化的域点探针，并在触觉传感器底部设置监测磁通密度变化的域点探针，记录仿真数据。磁场传感器处磁感应强度（仅考虑 z 轴分量）变化如图 4 所示。由图可知，在相同法向力作用下，长方体型、圆顶型和金字塔型结构中永磁体的法向位移基本一致，磁感应强度变化也基本一致，这 3 种柔性基底结构的灵敏度接近。将上述 3 种柔性基底结构进行内部空心设计，与未进行内部空心设计的基底结构对比，永磁体法向位移和磁感应强度变化显著增大，表明空心结构可提高 MFFTS 的灵敏度。从图 4(a) 中可以看出，较小变形范围内，永磁体的法向位移与法向力呈线性关系。从图 4(b) 可以看出，采用内部空心设计时，MFFTS 磁感应强度在 0～5 N 范围内是线性增大的，之后随着法向力的增大，磁感应强度呈非线性变化。

对线性范围（0～5 N）内磁感应强度与法向力



(a) 柔性基底变形　(b) 接触力加载方式　(c) 空间磁场

图 3　MFFTS 磁−固耦合仿真

Fig.3　Magnetic-mechanical coupling simulation for MFFTS

的关系进行拟合，结果如式 (1) 所示。

$$\begin{cases} B_{z1} = 0.929\,4F_z + 52.22 \\ B_{z2} = 25.320\,0F_z + 38.99 \\ B_{z3} = 0.778\,6F_z + 52.23 \\ B_{z4} = 23.280\,0F_z + 40.87 \\ B_{z5} = 1.269\,0F_z + 52.18 \\ B_{z6} = 11.830\,0F_z + 48.13 \end{cases} \tag{1}$$

式中，B_{z1}、B_{z2}、B_{z3}、B_{z4}、B_{z5}、B_{z6} 分别是长方体型、空心长方体型、圆顶型、空心圆顶型、金字塔型和空心金字塔型结构的磁感应强度 z 轴分量。

该关系式中，法向力的系数即为传感器灵敏度，上述不同结构 MFFTS 的灵敏度分别为 92.94、2 532、77.86、2 328、126.90、1 183 μT/N。比较可知，MFFTS 采用空心结构具备更好的法向受力灵敏度。

在切向力作用下，不同 MFFTS 中永磁体切向位移和磁场传感器处磁感应强度（仅考虑 y 轴分量）变化如图 5 所示。

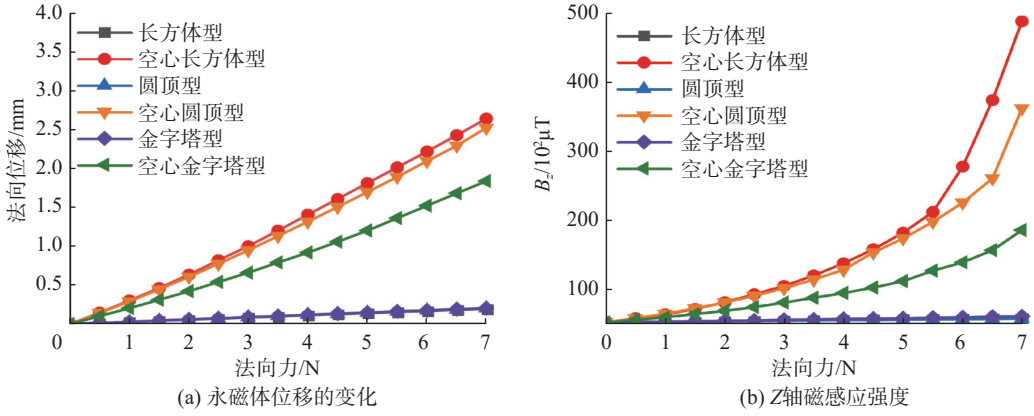
相同切向力作用下，金字塔型结构中永磁体位移最大，磁场分布变化也最为明显。采用内部空心设计时，永磁体切向位移和 y 轴磁感应强度变化显著增大。与法向受力不同，在 0～7 N 范围内，6 种柔性基底结构的 MFFTS 磁感应强度随切向力呈线性变化。

对线性范围 (0～7 N) 内磁感应强度与切向力的关系进行拟合，拟合结果如式 (2) 所示。

$$\begin{cases} B_{y1} = 0.427\,2F_y + 0.096\,17 \\ B_{y2} = 0.990\,8F_y - 0.001\,01 \\ B_{y3} = 0.461\,0F_y + 0.132\,40 \\ B_{y4} = 1.109\,0F_y + 0.209\,40 \\ B_{y5} = 0.542\,8F_y + 0.105\,10 \\ B_{y6} = 1.131\,0F_y + 0.089\,11 \end{cases} \tag{2}$$

式中，B_{y1}、B_{y2}、B_{y3}、B_{y4}、B_{y5}、B_{y6} 分别是长方体型、空心长方体型、圆顶型、空心圆顶型、金字塔型和空心金字塔型结构的磁感应强度 y 轴分量。

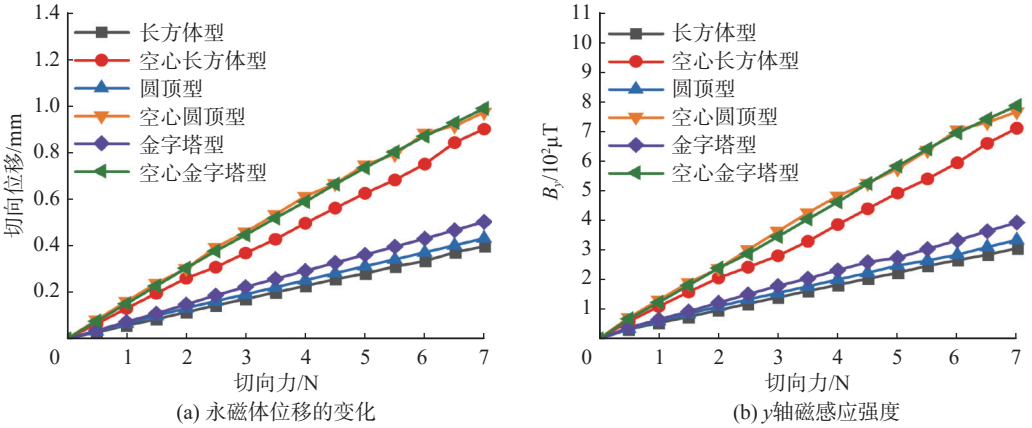
根据式（2）可得，6 种结构 MFFTS 的切向灵敏度分别为 42.72、99.08、46.10、110.90、54.28、113.10 μT/N。比较可知，空心金字塔结构 MFFTS



(a) 永磁体位移的变化　(b) Z轴磁感应强度

图 4　法向力作用下 MFFTS 磁场响应

Fig.4　Magnetic field response of MFFTS under normal force



(a) 永磁体位移的变化　(b) y轴磁感应强度

图 5　切向力作用下 MFFTS 磁场响应

Fig.5　Magnetic field response of MFFTS under tangential force

的切向灵敏度最大。

综上所述，空心金字塔结构 MFFTS 具有较好的法向和切向灵敏度，本文选用该结构进行三维接触力估计及力控抓取研究，采用注射成型工艺制造 MFFTS。考虑到成型质量，对空心金字塔结构的棱角处进行了平滑处理。该处理并不改变空心金字塔结构的力学特征，对其灵敏度影响不大，但可显著提高成型质量。

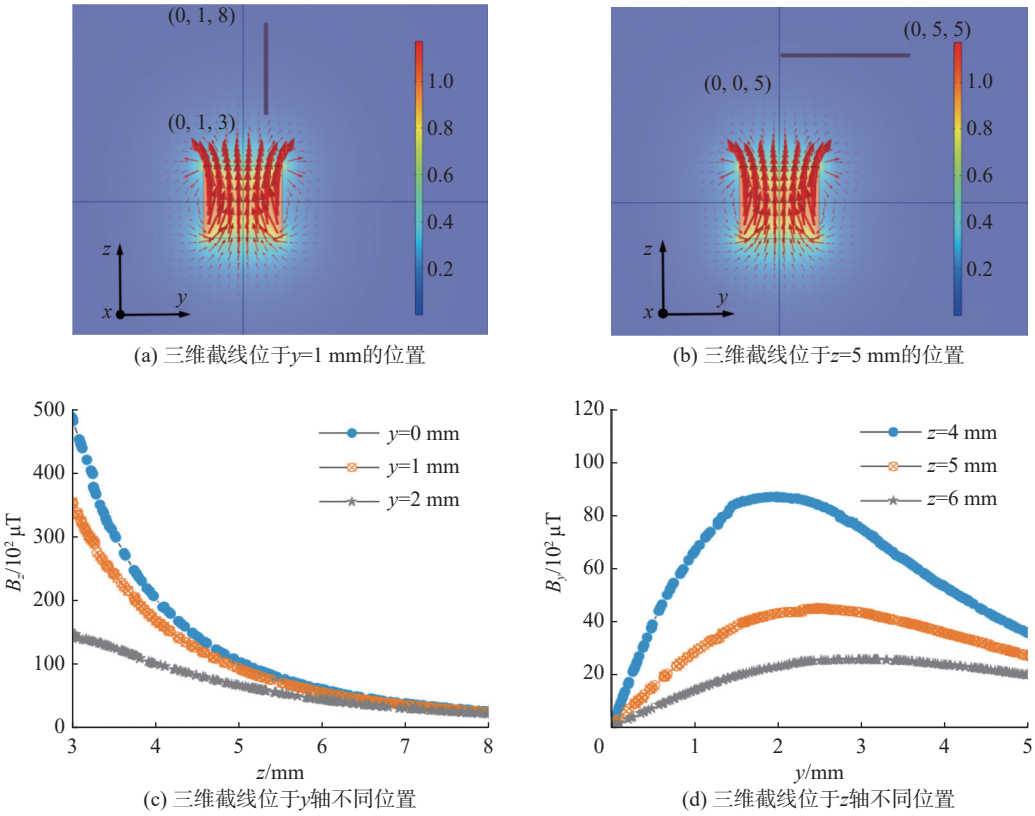
2　MFFTS 三维接触力估计

MFFTS 通过单个永磁体和三轴磁场传感器即可进行三维接触力测量，但由于不同方向的接触力均会引起磁场变化，在获取的磁场信号中三维接触力之间互相干扰，需对三维接触力进行解耦以获得精确结果。本文首先对 MFFTS 在三维接触力作用下的磁场响应进行仿真，揭示不同方向接触力之间的耦合形式。然后，利用反向传播神经网络（backpropagation neural network，BPNN）进行三维接触力解耦，并通过仿真数据验证该方法的可行性。

基于前文提到的永磁体磁场仿真，在其空间不同位置设置三维截线：(a) 在 y 轴方向不同位置设置竖直的三维截线，导出不同截线上 B_z 随 z 轴距离变化的数据；(b) 在 z 轴方向不同位置设置水平的三维截线，导出不同截线上 B_y 随 y 轴距离变化的数据。由图 6 可得，当三维截线在 y 轴方向处于不同的位置时，B_z 在 z 轴方向的磁场变化曲线是不同的。同样，当三维截线在 z 轴方向处于不同的位置时，B_y 在 y 轴方向的磁场变化曲线也是不同的。因此，磁场在各轴的分量之间会相互影响，在进行多维接触力检测时，未解耦的磁场式触觉传感器各个方向的接触力之间会有串扰。

2.1　MFFTS 响应分析

在空心金字塔型 MFFTS 表面同时施加不同大小的法向力（z 方向）和切向力（y 方向），在磁场传感器处设置探针，用于检测磁场响应。法向力和切向力范围均为 0～6 N，每间隔 0.5 N 为一组，记录不同幅度法向力和切向力共同作用下永磁体位移（包括 y 轴方向位移 d_y 和 z 轴方向位移 d_z）和磁感应强度（包括 y 方向磁感应强度 B_y 和 z 方向磁感应强度 B_z）。通过仿真可获得 MFFTS 在法向力和



(a) 三维截线位于y=1 mm的位置　(b) 三维截线位于z=5 mm的位置

(c) 三维截线位于y轴不同位置　(d) 三维截线位于z轴不同位置

图 6　特定界面处磁场分布

Fig.6　Magnetic field distribution at specific interfaces

切向力共同作用下的磁场响应，如图 7 所示。

2.2 基于 BPNN 的三维接触力估计

本文采用被广泛使用的非线性逼近工具 BPNN 来求解 MFFTS 中“接触力−磁感应强度”这一逆向映射问题，以实现传感器的三维接触力估计。其输入为磁感应强度 (B_y，B_z)，输出为接触力 (F_y，F_z)。对于仅含 1 个磁场传感器和 1 个永磁体的 MFFTS，由于输入输出数据维度较低，本文采用经典 BPNN 结构，训练中仅对 BPNN 参数进行优化。该神经网络结构如图 8(a) 所示。

由图 8(a) 可见，该神经网络分为前向传播和反向传播两个部分，通过误差反向传播算法来训练网络权重和偏置。$A^{[i]}$(含 $a_n^{[i]}$)是各层神经元的输出激活值，从输入层 $A^{[0]}$(磁场分量 B_y、B_z)经隐藏层 $A^{[1]}$、$A^{[2]}$ 传递至输出层 $A^{[3]}$(预测力分量 F_y、F_z)；$b^{[i]}$ 是各层神经元的偏置参数，影响激活基础水平；$\mathrm{d}W^{[i]}$、$\mathrm{d}b^{[i]}$ 是反向传播中权重与偏置的梯度，表征了损失函数，即预测力与真实目标 $(F_y, F_z)_{\mathrm{target}}$ 之间的均方误差(MSE)相对于参数的变化方向。通过梯度下降法更新网络参数，其核心目标是最小化损失函数，从而建立接触力与磁感应强度之间的精确逆向映射关系。

在前向传播中，数据从输入层开始逐层向前传播，经过每一层的线性变换(权重加和)和非线性变换(激活函数)，最终到达输出层。对于图 8(b) 所示的单个神经元节点，该节点的线性输出 O_{net} 可表示为

$$O_{\mathrm{net}} = \boldsymbol{W}_n \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_n \end{bmatrix} + \boldsymbol{b} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_n \end{bmatrix} \tag{3}$$

式中：$\boldsymbol{W}_n$ 为权重矩阵；$\boldsymbol{b}$ 为偏置向量；h_i 为隐藏层的激活输出。使用非线性激活函数对该线性输出进行非线性变换，该过程可表示为

$$O_{\mathrm{out}} = f(O_{\mathrm{net}}) \tag{4}$$

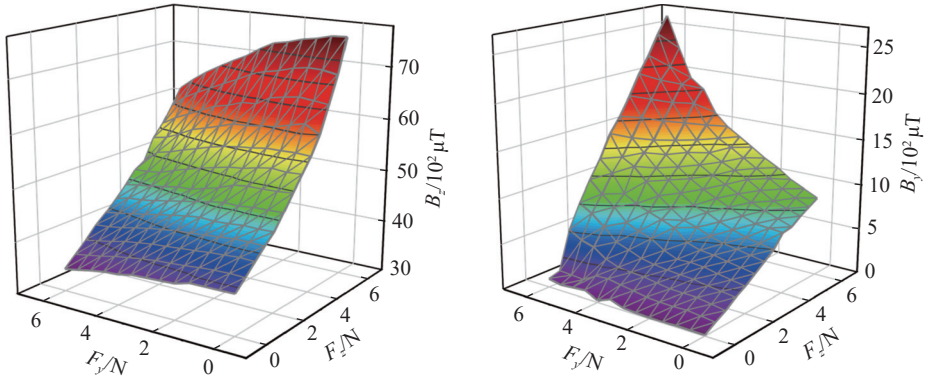
式中：O_{out} 为非线性激活输出值；f 为非线性激活函数。本研究使用 ReLU 函数作为激活函数，该函数表达式为

$$f(x) = \max(0, x) \tag{5}$$

在反向传播过程中，该网络将输出值和目标值进行误差计算，并利用梯度下降法优化网络参数(权重和偏置)，逐层对误差进行反向传播，更新参数。

本文通过 Matlab 的神经网络工具箱进行 BPNN 训练。由于维度以及数据量较小，仅使用一个隐含层的 BPNN，神经元个数为 20。为获取 BPNN 参数，首先构建训练数据集，在 0～6 N 范围内，法向力和切向力每间隔 0.5 N 为一组，共形成 169 组接触力组合。通过磁−固耦合仿真获取接触力及其磁场响应，作为 BPNN 训练数据集。在训练数据集之外，随机生成 20 组接触力组合，通过磁−固耦合仿真获取接触力及其磁场响应，作为 BPNN 测试数据集。为使得数据具有相同的度量尺度，首先对数据进行归一化处理，然后通过列文伯格−马夸尔特(Levenberg-Marquardt, LM)优化算法进行训练。BPNN 的训练过程如图 9所示，在迭代 19 次之后误差稳定。

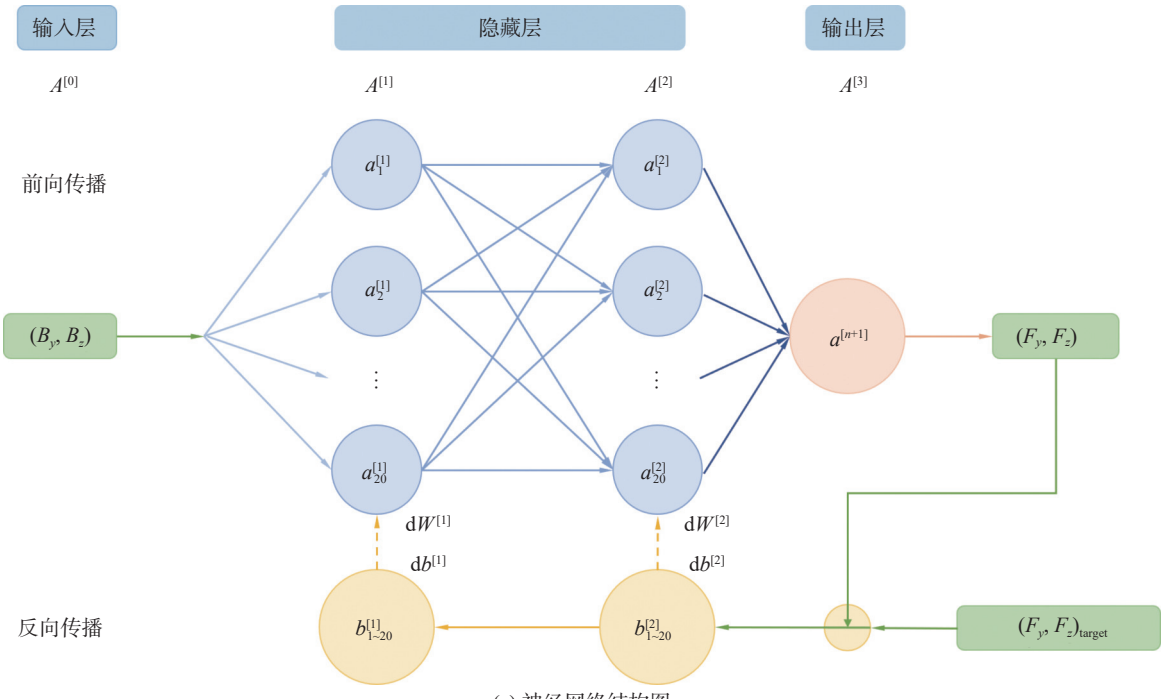
在测试数据集中，将接触力实际值和 BPNN 输出值进行比较。通过平均绝对误差(MAE)和均方根误差(RMSE)两个指标来评估 BPNN 精度，法向力和切向力的平均绝对误差 E_{MAE} 和均方根误差



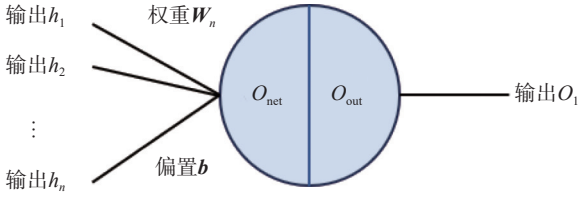
(a) z方向磁感应强度 (b) y方向磁感应强度

图 7 法向力和切向力共同作用下 MFFTS 磁场响应

Fig.7 Magnetic field response of MFFTS under the combined action of normal force and tangential force



(a) 神经网络结构图



(b) 单个神经元结构图

图 8　BPNN 示意图

Fig.8　Schematic diagram of BPNN

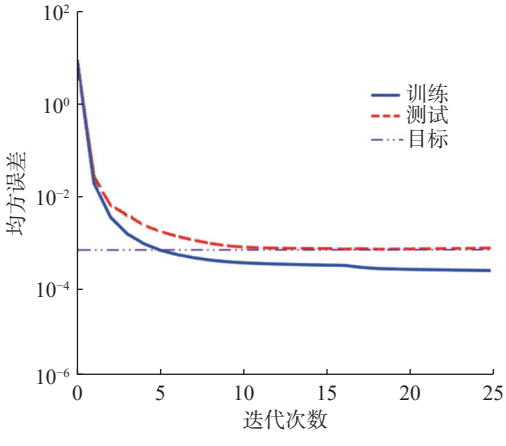


图 9　BPNN 训练过程

Fig.9　Training process for BPNN

E_{RMSE} 的计算分别为

$$E_{\mathrm{MAE}} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|F_{\mathrm{act},i} - F_{\mathrm{est},i}\right| \tag{6}$$

$$E_{\mathrm{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(F_{\mathrm{act},i} - F_{\mathrm{est},i})^2} \tag{7}$$

式中：F_{act} 表示实际接触力；F_{est} 表示 BPNN 的输出结果。

法向力和切向力的 E_{MAE} 分别为 0.0443、0.0621 N，法向力和切向力的 E_{RMSE} 分别为 0.0599、0.0996 N。同时，将 BPNN 的力输出结果与实际值进行对比，如图 10 所示，其对于传感器法向力与切向力的估计值均与实际值高度吻合。仿真条件下，BPNN 可以较好地估计法向力和切向力。

3　MFFTS 三维接触力测量实验

在实际应用中，受制造误差、永磁体剩磁强度不一致、柔性基底非均匀等因素影响，MFFTS 磁场响应与接触力的关系更为复杂。为验证 BPNN 在实际应用中的有效性，本研究制作 MFFTS 样件并进行三维接触力测试。

3.1　MFFTS 测试系统设计与制作

MFFTS 样件由永磁体、柔性基底、磁场传感

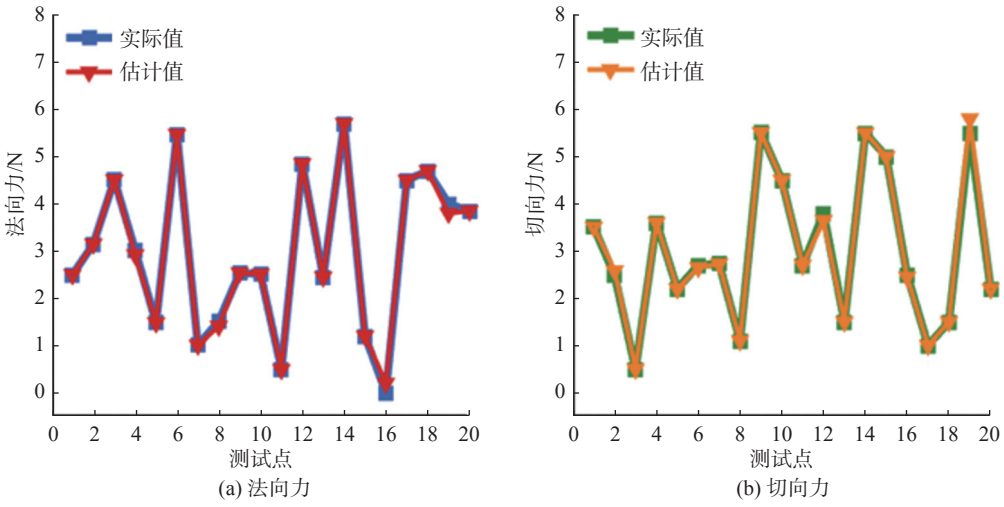


图 10 BPNN 实际值与估计值比较

Fig.10 Comparison between actual values and estimated values of BPNN

器和底板构成。永磁体采用 NdFeB；柔性基底由 PDMS 制作；磁场传感器选用 MLX90393 霍尔传感器，部署于金字塔型柔性基底的底部，通过 Arduino 读取霍尔传感器数据。MFFTS 结构及样件如图 11 所示。

3.2 实验过程

实验对 MFFTS 样件进行数据采集和接触力静态标定，静态标定数据将用于构建训练数据集及测试数据集。标定平台由音圈电机、单轴力传感器、MFFTS、压块和斜块构成，如图 12 所示。

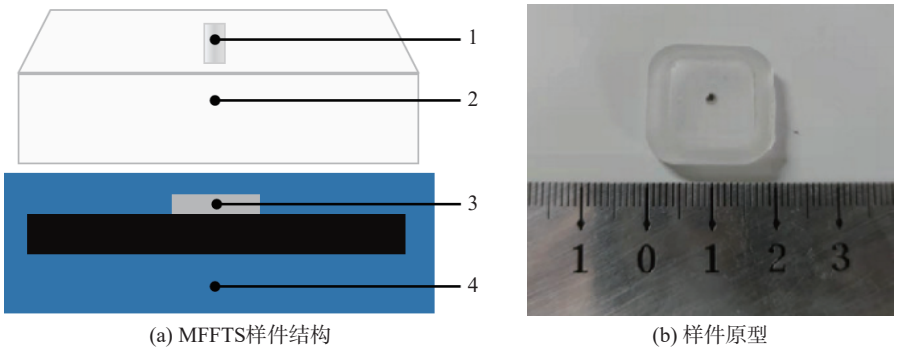
在标定平台中，音圈电机挤压 MFFTS，单轴力传感器用于测量 MFFTS 接触力。由于音圈电机仅提供垂直方向的力，制作具备不同倾斜角的压块和斜块，用于将垂直方向力分解为 MFFTS 的切向力和法向力，切向力和法向力大小与压块和斜块的倾斜角有关。标定过程如下：(a) 制作倾斜角为 15°、30°、45°和 60°的斜块和压块；(b) 将触觉传感器放置到不同倾斜角的斜块上，并将相同角度的压块安装在单轴力传感器下方；(c) 音圈电机输出不同垂向力，同时记录单轴力传感器和磁场传感器数据。

对于训练数据集，音圈电机输出的垂向力范围为 0～9 N，间隔 0.5 N，配合不同倾斜角的压块和斜块，共形成 91 种接触力组合，训练数据集如图 13 所示。随着斜块倾斜角度的增加，音圈电机输出力的法向分量逐渐减小，导致磁场传感器的 z 轴磁感应强度逐渐减小；其切向分量逐渐增加，导致磁场传感器的 y 轴磁感应强度逐渐增加。对于测试数据集，音圈电机输出范围 0～7.8 N，间隔 0.6 N，配合不同倾斜角的压块和斜块，共形成 66 种接触力组合。

3.3 实验结果及分析

3.3.1 实验 I

利用 Matlab 神经网络工具箱进行 BPNN 训练。考虑到实际物理模型较仿真模型更为复杂，选取 BPNN 隐含层个数为 2，每层有 20 个神经



(a) MFFTS样件结构 (b) 样件原型

1. 永磁体； 2. 柔性基底； 3. 磁场传感器； 4. 底板

图 11 MFFTS 样件

Fig.11 Prototype of MFFTS

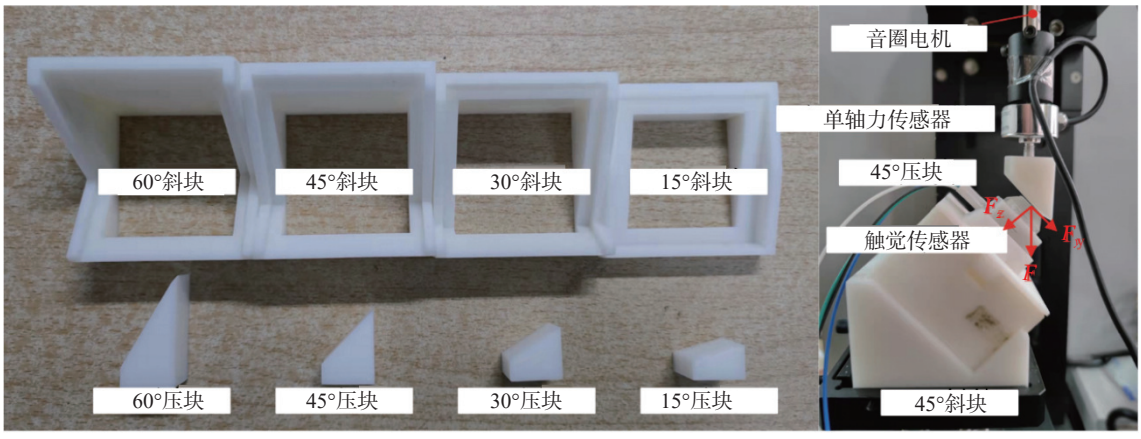
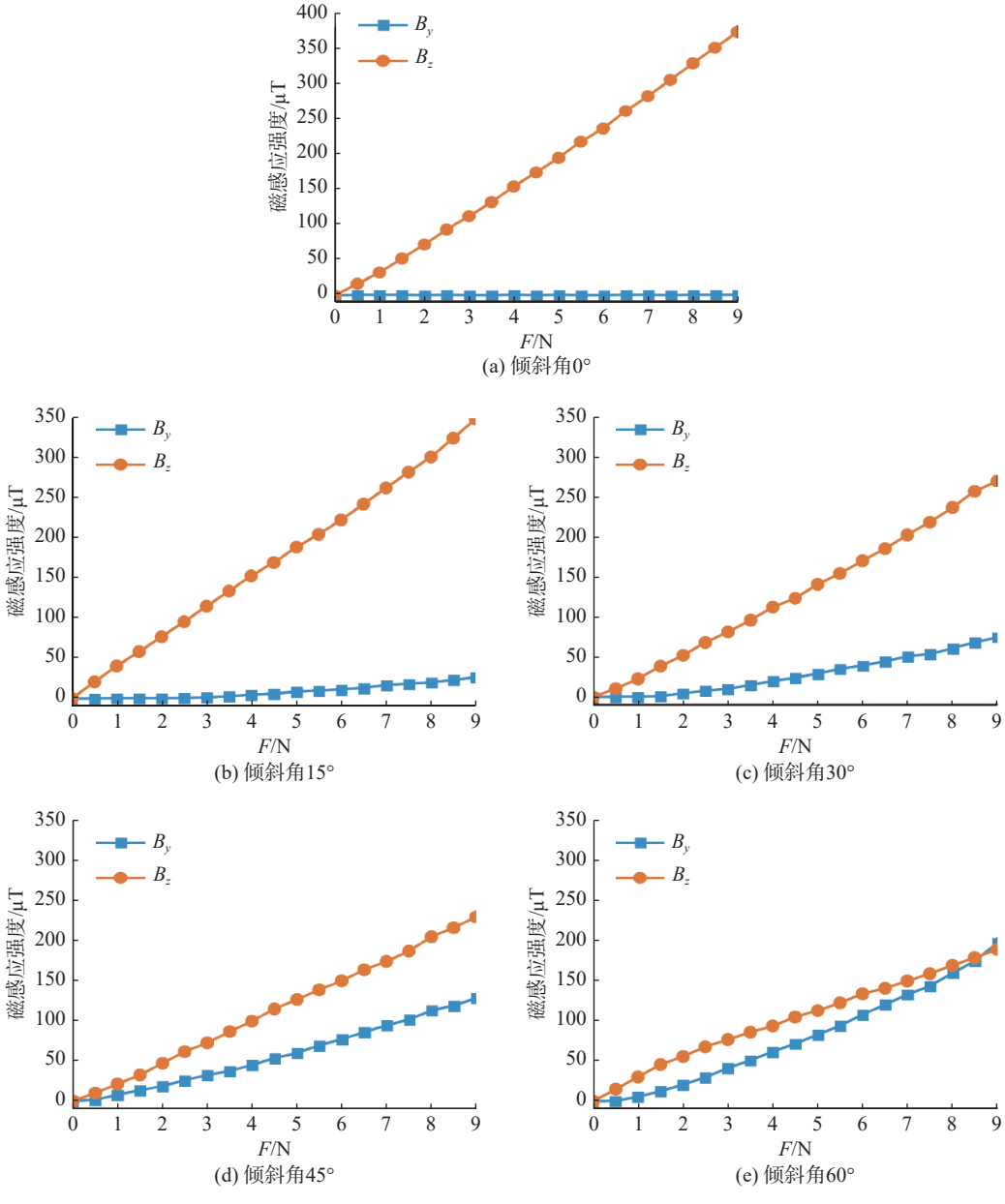


图 12　MFFTS 标定平台

Fig.12　Calibration platform for MFFTS



(a) 倾斜角0°

(b) 倾斜角15°

(c) 倾斜角30°

(d) 倾斜角45°

(e) 倾斜角60°

图 13　不同倾斜角度下 MFFTS 的磁场响应

Fig.13　Magnetic field response of MFFTS with different inclination angles

元。BPNN 训练过程如图 14 所示，在迭代 22 次之后误差稳定。

在测试数据集中，BPNN 实际值与估计值的比较如图 15 所示。法向力和切向力的 E_{MAE} 分别为 0.1536、0.0923 N，E_{RMSE} 分别为 0.2072、0.1293 N。与仿真结果相比，BPNN 在实验中精度降低，主要因为实验数据受音圈电机输出精度、测量噪声、尺寸误差等因素影响而包含较多干扰。对于测试数据集，不同测试点法向力预测误差如图 15(a) 所示，前 52 个测试点（倾斜角为 0°、15°、30°或 45°）误差较小，第 53～66 个测试点（倾斜角为 60°）误差较大。当压块倾斜角较大时，压块与 MFFTS 接触力的切向分量增大而法向分量减小，当切向力大于静摩擦力时，压块和 MFFTS 间发生滑移，导致法向力增大。由于摩擦接触界面固有的不确定性，法向力增大幅度也存在不确定性。因此，第 53～66 个测试点（倾斜角为 60°）的训练集和测试集的法向力数据存在一定干扰，导致其估计误差大于其他测试点。切向力预测误差如图 15(b) 所示，第 1～12 个测试点（倾斜角为 0°）误差较大。当压块倾斜角为 0°时，磁场分量 B_y 值较小，B_y 的读数更易受测量误差、环境磁场等因素干扰，导致第 1～12 个测试点（压块倾斜角为 0°）切向力估计误差大于其他测试点。

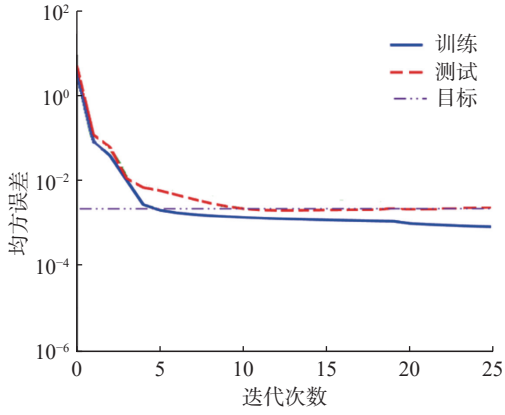


图 14 基于实验数据的 BPNN 训练过程

Fig.14 Training process of BPNN based on experimental data

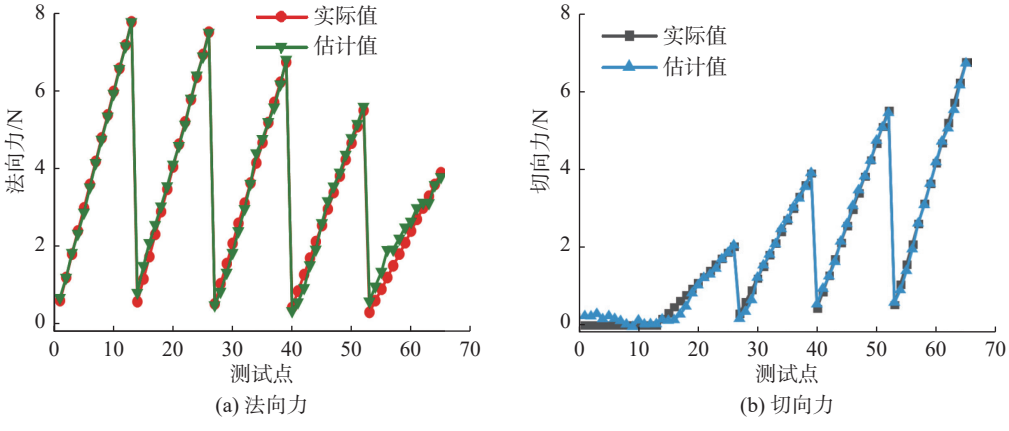


图 15 实验 I 中 BPNN 实际值与估计值比较

Fig.15 Comparison between actual values and estimated values in experiment I

3.3.2 实验 II

为观察 BPNN 的泛化能力，将训练数据集中接触力组合方式与测试数据集显著区分开。将倾斜角为 0°、15°、30°和 60°时的实验数据作为训练数据集，将倾斜角为 45°时的实验数据作为测试数据集。

BPNN 预测值与测试值的比较如图 16 所示。法向力和切向力的 E_{MAE} 分别为 0.4049、0.1111 N，法向力和切向力的 E_{RMSE} 分别为 0.5112、0.1531 N。相比于实验 I，实验 II 中训练数据集与测试数据集的接触力组合方式具有显著差异，BPNN 测试结果误差增大，但基本满足三维接触力测量精度的要求。

对于 MFFTS 接触力估计，实验中所构建的训练数据集显著小于仿真情况，BPNN 仍取得较高精度；同时，BPNN 也表现出较好的泛化能力。

4 基于 MFFTS 接触力反馈的抓取实验

接触力反馈对于机器人抓取稳定性至关重要，为探讨 MFFTS 应用于机器人抓取的可行性，实验设计并制作集成 MFFTS 的电动夹持器，并进行力反馈抓取测试。

4.1 抓取机构设计

电动夹持器主要由伺服舵机、滚珠丝杠、直线导轨和夹持器等部分组成，通过滚珠丝杠和直线导轨将舵机的旋转运动变为直线运动，实现夹

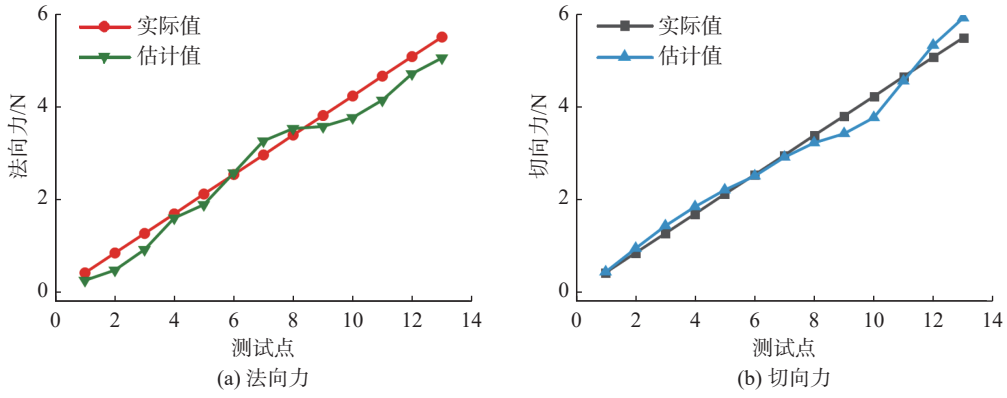


图 16　实验 II 中 BPNN 实际值与估计值比较

Fig.16　Comparison between actual values and estimated values in experiment II

爪的抓取动作，其结构如图 17 所示。滚珠丝杠直径为 12 mm，导程为 4 mm，舵机额定扭矩为 0.8 N·m，采用 12 位高精度磁编码传感器测量角位移，角位移分辨率为 0.088°，MFFTS 部署于夹爪表面。

4.2　基于力反馈的抓取控制框架

夹持器能够稳定抓取的条件是夹持器与抓取物之间的摩擦力大于等于物体重力，而摩擦力与夹持器的夹持力呈比例关系。在非标准环境下，抓取过程可能受到多种干扰，包括抓取物与其他物品接触或抓取物质量变化等，为实现稳定抓取，夹持器需动态调整夹持力以适应环境变化[19-20]。因此，抓取过程中实时监测摩擦力和夹持力至关重要。本文将标定完成的 MFFTS 放置在夹爪表面，在该部署方式下，MFFTS 所受法向力即夹持力，MFFTS 所受切向力即摩擦力。通过 MFFTS，抓取控制器可实时获取抓取过程的夹持力和摩擦力，并根据两者的比较调整夹爪位置，抓取控制框架如图 18 所示。

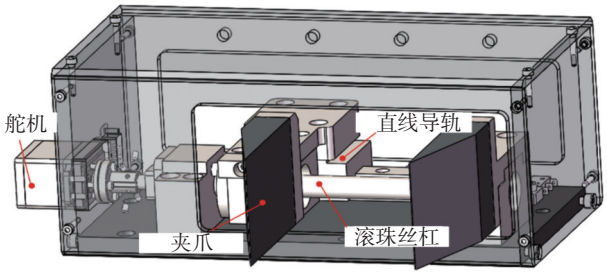


图 17　电动夹持器结构

Fig.17　Structure of electric gripper

该框架主要由 3 部分构成：抓取控制器、运动控制单元和力反馈单元。通过比例-积分控制器（proportional-integral controller）闭环对位置误差持续修正，并通过放大系数 K 调整系统增益，以实现对抓取对象的精准定位与稳健抓取。抓取控制器根据多维力反馈决定夹爪运动位置；运动控制单元根据抓取控制器指令和夹爪当前位置控制伺服电机运转；力反馈单元根据 MFFTS 输出计算接触力，并反馈给抓取控制器。抓取控制器由两部分功能构成。

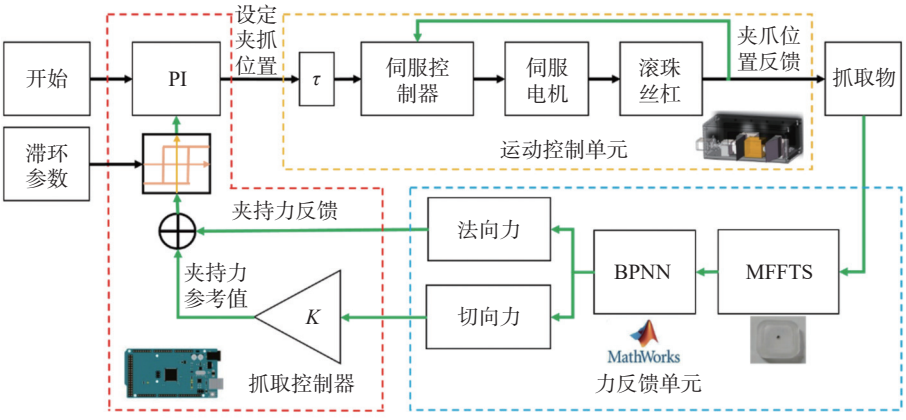


图 18　基于 MFFTS 接触力反馈的抓取控制框架

Fig.18　Framework of contact-force feedback-based grasping using MFFTS

a. 夹持力参考值设定。夹持力与摩擦力呈比例关系，抓取控制器根据 MFFTS 切向力反馈设定夹持力参考值：

$$F_z^{\mathrm{ref}} = kF_y^{\mathrm{fed}} \tag{8}$$

式中：F_z^{ref}表示夹持力参考值；F_y^{fed}表示 MFFTS 反馈的切向力；k为比例系数。

b. 夹爪位置设定。为实现夹持力参考值，需调整夹位置，夹持力控制采取 PI 控制，即

$$P_z^{\mathrm{ref}} = K_{\mathrm{p}}(F_z^{\mathrm{ref}} - F_z^{\mathrm{fed}}) + K_{\mathrm{I}}\int_0^t (F_z^{\mathrm{ref}} - F_z^{\mathrm{fed}}) \tag{9}$$

式中：P_z^{ref}表示夹爪位置参考值；K_{p}和K_{I}分别为比例和积分系数；F_z^{fed}表示 MFFTS 反馈的夹持力。

避免夹持力持续振荡，夹持力的调整采取阈值方法：当 MFFTS 切向力超过阈值上限（设定为 1 N），则夹爪开始进行夹持力控制；当 MFFTS 切向力低于阈值下限（设定为 0.25 N），则夹爪停止夹持动作。阈值可根据抓取物重量和 MFFTS 灵敏度进行调整。为观察抓取中切向力和法向力的响应过程，在抓取控制器和运动控制单元之间添加延时环节，本文将延时时间设置为 $\tau = 1$ s，在实际抓取中，该时间可设置为 0 以保证快速响应。

4.3 抓取实验

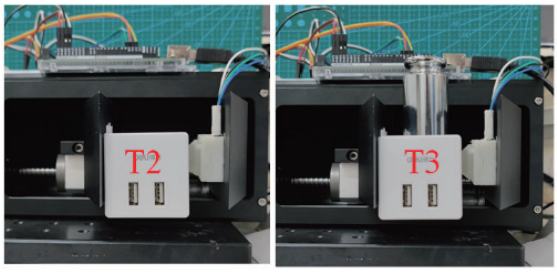
4.3.1 物体抓取及移动

抓取任务分为 3 个阶段：T1 时间段抓取物和夹持器未接触；T2 时间段夹持器对抓取物进行预夹紧；T3 时间段移除抓取物下方的垫块，物体重力与夹持器摩擦力平衡。垫块可以支撑抓取物，垫块移走的过程等效于抓取物抬升移动并离开支撑面的过程。

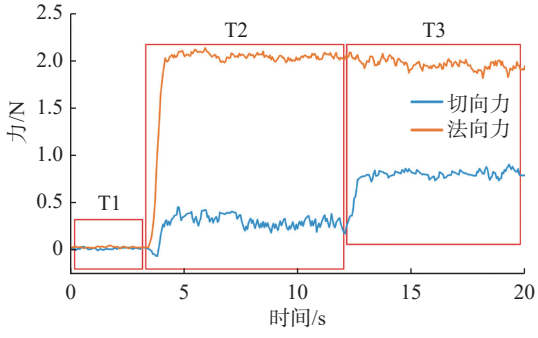
物体抓取过程中夹持器动作顺序及三维接触力变化如图 19 所示。由图可知：在 T1 时间段，MFFTS 的法向力和切向力约为 0；在 T2 时间段，物体开始与夹持器接触，MFFTS 的法向力逐渐增大，剪切力也略有增大，主要由于受挤压时 MFFTS 柔性基底并非完全均匀变形，导致产生一定切向偏移；在 T3 时间段，物体下方支撑垫块被移除，夹持器摩擦力增大到与物体重力相同，表现为 MFFTS 的切向力增大，由于此时切向力尚未触发滞环控制上限，夹持器没有进一步动作。MFFTS 可准确反映抓取过程中夹爪与抓取物的接触情况。

4.3.2 物体抓取及移动

为检验接触力反馈对抓取稳定性的影响，抓取过程中在抓取物上方添加砝码模拟外界干扰。



(a) 夹持器动作顺序



(b) 抓取过程中三维接触力变化曲线

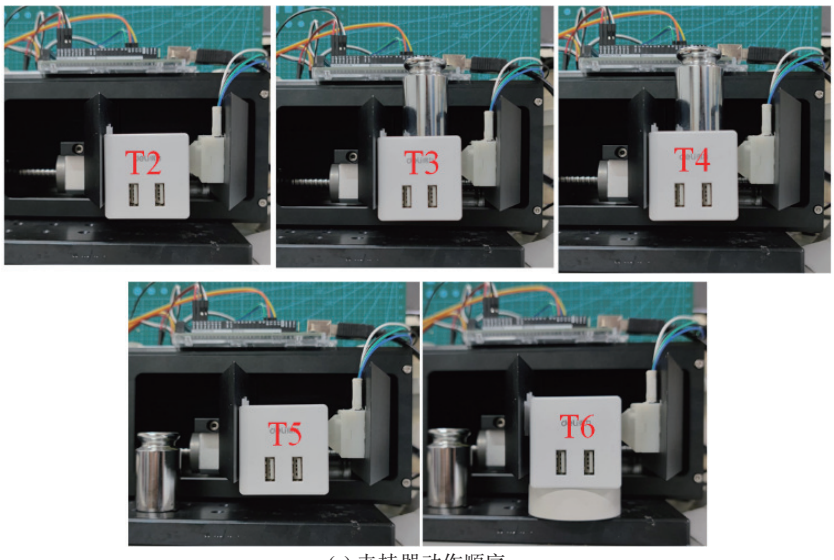
图 19 物体抓取过程

Fig.19 Grasping process

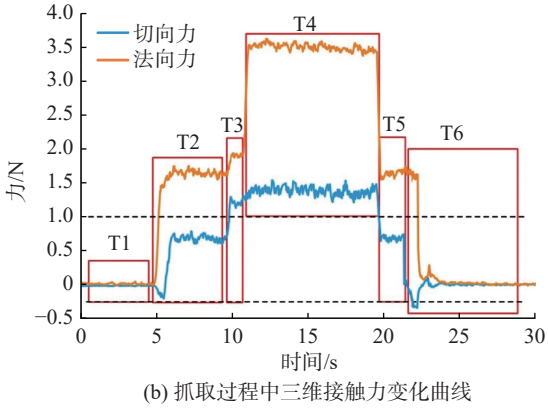
此时，抓取任务分为 6 个阶段：T1 时间段抓取物和夹持器未接触；T2 时间段夹持器对抓取物进行预夹紧；T3～T4 时间段在抓取物上方放置砝码；T5 时间段移除抓取物上方砝码；T6 时间段在抓取物下方放置垫块，即为抓取物提供稳定支撑。

从图 20 可以看出，在 T1 时间段，MFFTS 的法向力和切向力约为 0；在 T2 时间段，夹持器对抓取物进行预夹紧，由于此时抓取物没有垫块支撑，MFFTS 的法向力和切向力同时增大；在 T3 时间段，在抓取物上方添加砝码，MFFTS 的切向力增大，由于添加砝码后物体整体的重心发生偏移，法向力也略微增大；在 T4 时间段，抓取控制器响应切向力变化进一步夹紧物体，夹爪迅速移动，MFFTS 的法向力增大；在 T5 时间段，移除砝码，MFFTS 的切向力和法向力恢复到 T2 时刻状态；在 T6 时间段，在抓取物下方放置垫块，在垫块支撑下 MFFTS 切向力变小。当 MFFTS 切向力小于抓取控制器阈值下限后，抓取控制器停止抓取动作，夹爪离开抓取物，MFFTS 的切向力和法向力恢复到 T1 时间段状态。

外力干扰下抓取实验结果表明，抓取过程中 MFFTS 可实时获取接触力状态；同时，基于接触力反馈，抓取控制器可感知接触力扰动，并根据接触力变化灵活调整抓取力度，提高抓取稳定性。



(a) 夹持器动作顺序



(b) 抓取过程中三维接触力变化曲线

图 20　外力干扰下物体抓取过程

Fig.20　Grasping process with external disturbance

5　结　论

揭示了柔性基底结构对 MFFTS 灵敏度的影响，形成高灵敏度构型设计，针对多维接触力的输出耦合问题，验证磁场触觉传感器在进行多维接触力检测时存在耦合。首先，介绍 BPNN 原理，通过仿真数据进行 BPNN 多维接触力的估计，验证该方法的可行性。其次，对触觉传感器进行实验标定，并进行 BPNN 多维接触力估计，提出基于 BPNN 的三维接触力估计方法。最后，提出一种面向柔性层中永磁体剩磁不一致的接触压力位置与大小鲁棒估计方法，结合磁源定位算法与 BPNN，通过磁场仿真、磁−固耦合仿真建立接触压力−磁源位姿映射关系，并基于结构相同但剩磁不一致的传感器样机实验验证了该方法的有效性及其在机器人力控抓取中的应用可行性。

受限于柔性基底制造条件，本文仍存在如下不足：a. MFFTS 样机中仅集成单个永磁体和单个三维磁场传感器，工作空间维度较低，所需神经网络复杂度也较低，并未完全体现神经网络在高维逆问题求解中的优势，本文采用较为经典的 BPNN，后续将深入研究高维工作空间接触力估计中神经网络的构型选择、参数优化和鲁棒性提升。b. 由于 MFFTS 样机尺寸较大，无法与灵巧手进行集成，因此，仅进行单自由度抓取实验，后续将结合灵巧手研究基于 MFFTS 三维力反馈的多自由度抓取控制。

参考文献：

[1] LI Q, KROEMER O, SU Z, et al. A review of tactile information: perception and action through touch[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2020, 36(6): 1619−1634.

[2] WANG P Y, XIE Z X, XIN W C, et al. Sensing expectation enables simultaneous proprioception and contact detection in an intelligent soft continuum robot[J].

Nature Communications, 2024, 15(1): 9978.

[3] 滕飞, 刘平, 郭欣欣, 等. 一种高灵敏电阻式柔性压力传感器研制及应用 [J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2025, 48(3): 297−301,342.

[4] KIM K, LEE K R, KIM W H, et al. Polymer-based flexible tactile sensor up to 32×32 arrays integrated with interconnection terminals[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2009, 156(2): 284−291.

[5] LEE H K, CHUNG J, CHANG S I, et al. Real-time measurement of the three-axis contact force distribution using a flexible capacitive polymer tactile sensor[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2011, 21(3): 035010.

[6] 黄梁松, 王硕, 张鹏, 等. 基于双面多级微结构的柔性电容式压力传感器 [J]. 传感技术学报, 2024, 37(10): 1692−1699.

[7] 张锦桐, 周刚, 陈桂婷, 等. 电极与介电层褶皱接触对压电式柔性电子皮肤性能的影响 [J]. 复合材料学报, 2020, 37(12): 3194−3200.

[8] LIN W K, WANG B, PENG G X, et al. Skin-inspired piezoelectric tactile sensor array with crosstalk-free row+column electrodes for spatiotemporally distinguishing diverse stimuli[J]. Advanced Science, 2021, 8(3): 2002817.

[9] YUAN W Z, DONG S Y, ADELSON E H. GelSight: high-resolution robot tactile sensors for estimating geometry and force[J]. Sensors, 2017, 17(12): 2762.

[10] LAMBETA M, CHOU P W, TIAN S, et al. DIGIT: a novel design for a low-cost compact high-resolution tactile sensor with application to in-hand manipulation[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 5(3): 3838−3845.

[11] TOMO T P, WONG W K, SCHMITZ A, et al. A modular, distributed, soft, 3-axis sensor system for robot hands[C]//2016 IEEE-RAS 16th International Conference on Humanoid Robots. Cancun: IEEE, 2016: 454–460.

[12] TOMO T P, REGOLI M, SCHMITZ A, et al. A new silicone structure for uSkin—a soft, distributed, digital 3-axis skin sensor and its integration on the humanoid robot iCub[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2018, 3(3): 2584−2591.

[13] FANG B, XIA Z W, SUN F C, et al. Soft magnetic fingertip with particle-jamming structure for tactile perception and grasping[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(6): 6027−6035.

[14] MAN J D, JIN Z H, CHEN J M. Magnetic tactile sensor with bionic hair array for sliding sensing and object recognition[J]. Advanced Science, 2024, 11(2): 2306832.

[15] TOMO T P, SOMLOR S, SCHMITZ A, et al. Design and characterization of a three-axis hall effect-based soft skin sensor[J]. Sensors, 2016, 16(4): 491.

[16] CHATHURANGA D S, WANG Z K, NOH Y, et al. Magnetic and mechanical modeling of a soft three-axis force sensor[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(13): 5298−5307.

[17] DWIVEDI A, RAMAKRISHNAN A, REDDY A, et al. Design, modeling, and validation of a soft magnetic 3-D force sensor[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(9): 3852−3863.

[18] YAN Y C, HU Z, YANG Z B, et al. Soft magnetic skin for super-resolution tactile sensing with force self-decoupling[J]. Science Robotics, 2021, 6(51): eabc8801.

[19] EDIN B B, ASCARI L, BECCAI L, et al. Bio-inspired sensorization of a biomechatronic robot hand for the grasp-and-lift task[J]. Brain Research Bulletin, 2008, 75(6): 785−795.

[20] DING X Y, WANG X B, ZHANG Y Q, et al. Soft magnetic skin with motion and contact sensing for anthropomorphic robotic finger[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2024, 9(12): 11601−11608.

（编辑：丁红艺）