

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2312168

# 深度与形貌检测的仿生磁致伸缩触觉 传感器设计及实验测试\*

孙英<sup>1,2</sup>, 郭腾蛟<sup>1,2</sup>, 李笑<sup>1,2</sup>

(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 300401; 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 300401)

**摘要:**物体表面形貌深度信息对于智能机器人检测物体表面特征、人机交互具有重要意义。受动物毛发感知机理启发,设计了一种新型仿生磁致伸缩触觉传感器单元及阵列;基于逆磁致伸缩效应、欧拉-伯努利梁理论和胡克定律,推导了深度检测的输出电压模型。仿真研究确定了最佳偏置磁场和阵列间距,实验测试了传感器单元在静态和动态下的输出特性,在0.05~4.8 mm深度检测范围内,灵敏度为185.72 mV/mm,响应时间和恢复时间分别为31 ms和43 ms,且具有良好的重复性,传感器阵列中单元之间输出电压的耦合影响不超过2.4%。将传感器单元及阵列安装在机械手上,选择合适的滑动速度滑过不同物体表面时,根据输出电压波形精确测量各种深度和形貌,结果表明该传感器单元和阵列可为深度与形貌检测提供参考。

**关键词:**深度检测;形貌检测;逆磁致伸缩;触觉传感器

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

## Design and experimental test of the bionic magnetostrictive tactile sensor for depth and shape detection

Sun Ying<sup>1,2</sup>, Guo Tengjiao<sup>1,2</sup>, Li Xiao<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 2. Key Laboratory of Electromagnetic Field and Electrical Apparatus Reliability of Hebei Province, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

**Abstract:** The depth information of object surface topography is of great significance for intelligent robots to detect object surface features and human-computer interaction. Inspired by the mechanism of animal hair perception, a novel bionic magnetostrictive tactile sensor unit and array are designed. Based on the inverse magnetostrictive effect, Euler-Bernoulli beam theory, and Hooke's law, the output voltage model of depth detection is derived. The simulation study determined the optimal bias magnetic field and array spacing. The output characteristics of the sensor unit under static and dynamic conditions were tested. In the depth detection range of 0.05~4.8 mm, the sensitivity is 185.72 mV/mm, and the response time and recovery time are 31 ms and 43 ms, respectively. It has good repeatability, and the coupling effect of the output voltage between the units in the sensor array does not exceed 2.4%. The sensor unit and array are installed on the manipulator. When the appropriate sliding speed is selected to slide through the surface of different objects, various depths, and morphologies are accurately measured according to the output voltage waveform. The results show that the sensor unit and array can provide a reference for depth and morphology detection.

**Keywords:** depth detection; shape perception; reverse magnetostrictive; tactile sensor

## 0 引言

深度和形貌信息的检测能力可以使传感器更好协助机器人进行精密操作,对完善人机交互至关重要<sup>[1-2]</sup>。近年来,研究人员开发了基于各种传感原理的触觉传感器来检测物体表面深度与形貌等触觉信息,例如压电式<sup>[3]</sup>、电容式<sup>[4]</sup>、光敏式<sup>[5]</sup>、电阻式<sup>[6]</sup>和磁敏式<sup>[7]</sup>等。2020年韩国大邱庆北科学技术院 Shin 等<sup>[8]</sup>开发出具有针型模块的压电触觉传感器,利用时域压电电压信号积分值分析表面形貌深度信息;2021年印度科技学院 Prasad 等<sup>[9]</sup>设计光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)触觉传感器,采用多轴机械杠杆放大机构,用于表面厚度和形状测量;2022年澳门大学 Zhou 等<sup>[10]</sup>设计触须磁化微纤毛阵列(MMCA),通过输出电压峰值、相位间隔等定量反映形貌深度变化。上述触觉传感器在形貌深度感知方面做出了贡献,但存在深度方向检测范围小,灵敏度低等问题。

铁镓合金(Galfenol)具有机电耦合效率高、灵敏度高和响应时间快等优点<sup>[11-13]</sup>,在受力时表现出优良的磁致伸缩特性,作为敏感材料被广泛设计为磁致伸缩触觉传感器,可以用于感知物体几何形状<sup>[14]</sup>、物体刚度<sup>[15]</sup>、纹理表面分类<sup>[16]</sup>和倾角测量<sup>[17]</sup>等。2022年河北工业大学赵智忠等<sup>[18]</sup>设计磁致伸缩触觉传感阵列,以铁镓合金片作为悬臂梁敏感传感器,检测轮胎的裂纹和磨损程度;2023年河北工业大学 Weng 等<sup>[19]</sup>设计磁致伸缩触觉传感器,将铁镓丝倾斜放置,模拟动物毛发感知形貌深度变化。由于目前磁致伸缩触觉传感器结构等限制,在形貌深度方向上的感知能力较差。

本文以弹簧和铁镓丝为敏感元件,设计了用于深度和形貌检测的传感器单元和阵列;将深度方向位移与力进行转换,利用逆磁致伸缩效应、欧拉-伯努利梁理论和胡克定律,推导了深度检测的输出电压模型。根据输出电压模型,对传感器单元进行优化,实验测试了静态和动态输出特性,经50次重复实验,输出稳定,重复性好,验证了输出电压模型的准确性。通过仿真和实验测试相结合的方式对阵列中单元间距进行优化,减小耦合影响。将传感器单元及阵列安装在机械手上,选择合适的滑动速度滑过不同物体表面,分析产生的输出电压波形,来检测深度和表面形貌,实验结果表明设计的传感器单元和阵列具有良好的性能,在智能机器人检测物体表面特征、人机交互领域具有较大的潜在应用。

## 1 传感器单元设计与输出电压模型

### 1.1 传感器单元设计

毛发是大脑感知外界刺激的重要器官,帮助动物感

知外部世界信息,如老鼠通过触须分析物体的大小和方向<sup>[20]</sup>,海豹通过胡须感应周围动物在水中产生波动判断猎物的大小<sup>[21]</sup>。当毛发接触到外界环境时发生形变,机械感受器感受到毛发变化并将信息传递给大脑。如图1所示,受此启发,设计磁致伸缩触觉传感器,传感器单元由铁镓丝、永磁体、TMR传感器、底座、下触头、弹簧、套筒、上触头和单元外壳组成。

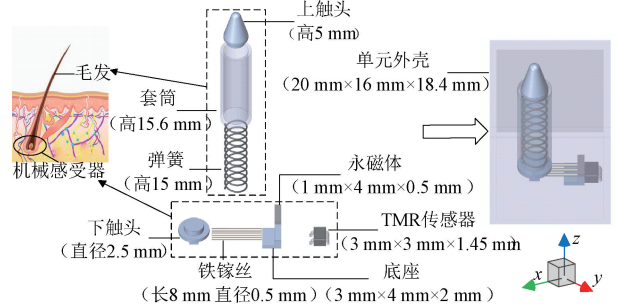


图1 仿生触觉传感器单元设计

Fig. 1 Bionic tactile sensor unit design

铁镓丝作为传感器单元的核心元件,尾端水平插入底座中,构成悬臂梁结构,前端固定在下触头中,弹簧、外壳及上触头位于下触头上端,外壳和单元外壳起到固定作用,底座上方水平放置永磁体,为铁镓丝提供偏置磁场,TMR传感器放置在底座后方,接收磁信号转化为电信号传递给计算机。

### 1.2 传感器单元输出电压模型

当对铁镓丝自由端施加力时,根据逆磁致伸缩效应,位于传感器单元尾端的TMR传感器检测到磁感应强度变化并转化为输出电压 $U$ 。TMR传感器采用差分电压输出,设 $U_A$ 和 $U_B$ 分别为正向输出电压和负向输出电压,则TMR传感器的输出电压 $U$ 为:

$$U = U_A - U_B \quad (1)$$

设 $R_H$ 和 $R_L$ 分别为TMR传感器在正、反向磁饱和时的电阻值, $R_M$ 为等效磁阻, $R_M$ 、 $R_H$ 、和 $R_L$ 之间的关系为:

$$R_M = \frac{R_H - R_L}{R_L} \quad (2)$$

$U_A$ 和 $U_B$ 为:

$$U_A = \left( \frac{B_1}{H_s - H_0 + (2/R_M)H_s} + 1 \right) \frac{U_s}{2} \quad (3)$$

$$U_B = \left( \frac{-B_1}{H_s - H_0 + (2/R_M)H_s} + 1 \right) \frac{U_s}{2} \quad (4)$$

据式(1)~(4),得TMR传感器输出电压 $U$ 为:

$$U = \frac{U_s}{H_s - H_0 + (2/R_M)H_s} B_1 \quad (5)$$

式中: $U_s$ 为直流电源输入电压, $B_1$ 为TMR传感器处的磁

感应强度,  $H_s$  为饱和磁场强度,  $H_0$  为初始磁场强度。

铁镓丝内部磁感应强度  $B_{Gal}$  与 TMR 传感器处磁感应强度  $B_1$  之间的关系为:

$$B_1 = K_s B_{Gal} \quad (6)$$

式中:  $K_s$  为铁镓丝内部磁感应强度与 TMR 传感器处磁感应强度之间的转换系数。

根据线性压磁方程:

$$B_{Gal} = d_{33}\sigma + \mu H \quad (7)$$

式中:  $d_{33}$  为压磁系数,  $\sigma$  为应力,  $\mu$  为铁镓丝的磁导率,  $H$  为偏置磁场强度。

由于铁镓丝横截面的几何尺寸远小于轴向几何尺寸, 可将其视为简化的悬臂梁结构<sup>[22]</sup>。以悬臂梁中性轴为  $x$  轴, 垂直于悬臂梁的方向为  $y$  轴, 法方向为  $z$  轴建立坐标系。假设磁场沿  $x$  轴均匀分布, 固定端为  $x=0$ 。根据欧拉-伯努利动力学理论, 悬臂梁  $x$  轴正方向, 悬臂梁任意一点挠度  $\omega$  与施加力  $F$  之间的关系为:

$$\omega(x, F) = \frac{Fx^2}{6EI}(3l - x) \quad (8)$$

式中:  $E$  为杨氏模量,  $I$  为圆形截面惯性矩,  $l$  为悬臂梁长度。

悬臂梁自由端挠度  $\omega$  与施加力  $F$  之间的关系为:

$$\omega = \frac{Fl^3}{3EI} \quad (9)$$

半径为  $R$  的圆形截面上惯性矩  $I$  为:

$$I = \int_{-R}^R z^2 (2\sqrt{R^2 - z^2}) dz = \frac{\pi R^4}{4} \quad (10)$$

在  $z$  点处应变为:

$$\varepsilon = \omega''(x, F)z = \frac{F(l - x)z}{EI} \quad (11)$$

铁镓丝的应力分布为:

$$\sigma = E\varepsilon = \frac{F(l - x)z}{I} \quad (12)$$

在铁镓丝的自由端施加力, 铁镓丝的上表面和下表面会分别产生一个拉应力和压应力, 其中拉应力对铁镓丝内部的磁感应强度影响不大可以忽略, 压应力的影响相对较大, 铁镓丝上的平均应力为:

$$\sigma_{av} = \sigma = \frac{1}{V} \int_l \int_{-R}^0 2\sqrt{R^2 - z^2} \sigma(x, z) dz dx \quad (13)$$

将式(11)、(12)代入式(13)得:

$$\sigma_{av} = \frac{4Fl}{3\pi^2 R^3} \quad (14)$$

由式(6)~(14)得:

$$B_1 = K_s \left( \frac{4d_{33}Fl}{3\pi^2 R^3} + \mu H \right) \quad (15)$$

当施加力  $F=0$  N 时, TMR 传感器的输出电压  $U_{ref}$  作为参考电压, 将式(15)代入式(5)得:

$$U = \frac{K_s U_s}{H_s - H_0 + (2/R_M) H_s} \left( \frac{4d_{33}Fl}{3\pi^2 R^3} + \mu H \right) - U_{ref} \quad (16)$$

由式(16)可知, 磁致伸缩传感器单元输出电压  $U$  与施加力  $F$  之间的关系, 当施加力增大时, 输出电压也随之增大。

在滑动过程中, 铁镓丝与弹簧均在弹性范围内, 由图2可知, 传感器单元深度方向位移为  $S$ ,  $t$  和  $x$  分别代表弹簧和铁镓丝悬臂梁的位移, 借鉴文献[23]中的模型, 可等效为2个弹簧串联, 等效弹性系数  $K$  为:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{K_t} + \frac{1}{K_x} \quad (17)$$

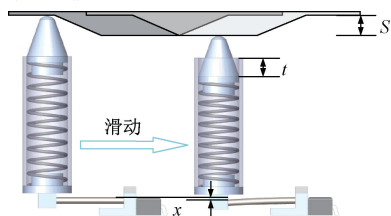


图2 滑动分析示意图

Fig. 2 Sliding analysis diagram

由欧拉-伯努利梁理论, 结合式(8)~(10)可得铁镓丝悬臂梁在弹性范围内的等效弹性系数为:

$$K_x = \left| \frac{3F}{\omega} \right| = \frac{9EI}{l^3} \quad (18)$$

施加力  $F$  与深度方向位移  $S$  关系为:

$$F = KS = \left( \frac{1}{K_t} + \frac{1}{\left( \frac{9EI}{l^3} \right)} \right) S = \left( \frac{1}{K_t} + \frac{l^3}{9EI} \right) S \quad (19)$$

弹性系数  $K_t$  为常数, 在弹性形变范围内, 深度方向位移  $S$  与施加力  $F$  满足线性关系。

将式(19)代入式(16), 可得传感器输出电压  $U$  与深度方向位移  $S$  关系为:

$$U = \frac{K_s U_s}{H_s - H_0 + (2/R_M) H_s} \times \left( \frac{4d_{33} \left( \frac{1}{K_t} + \frac{l^3}{9EI} \right) Sl}{3\pi^2 R^3} + \mu H \right) - U_{ref} \quad (20)$$

由式(20)可知, 当深度方向位移  $S$  增大时, 输出电压  $U$  也随之增大。

## 2 传感器单元结构优化与特性测试

### 2.1 传感器单元结构优化

为确保传感器单元工作在最佳状态, 对偏置磁场、铁

镓丝长度和弹簧参数进行优化。输出电压模型参数如表 1 所示。

表 1 模型参数值  
Table 1 Parameters of the model

| 参数                                 | 数值                    |
|------------------------------------|-----------------------|
| TMR 饱和磁场强度 $H_S/(kA \cdot m^{-1})$ | 3.990                 |
| TMR 初始磁场强度 $H_0/(kA \cdot m^{-1})$ | -1.596                |
| TMR 等效磁阻 $R_M$                     | 70                    |
| 压磁系数 $d_{33}/(T \cdot GPa^{-1})$   | 1.05                  |
| 磁感应转换系数 $K_s$                      | 0.002 61              |
| 磁导率 $\mu/(H \cdot m^{-1})$         | $4\pi \times 10^{-7}$ |
| 杨氏模量 $E/GPa$                       | 70                    |

首先对偏置磁场进行优化,选取长度为 8 mm、半径为 0.5 mm 的铁镓丝进行 COMSOL Multiphysics 仿真,传感器单元输出电压  $U$  与施加力  $F$ 、磁场强度  $H$  的关系如图 3 所示。

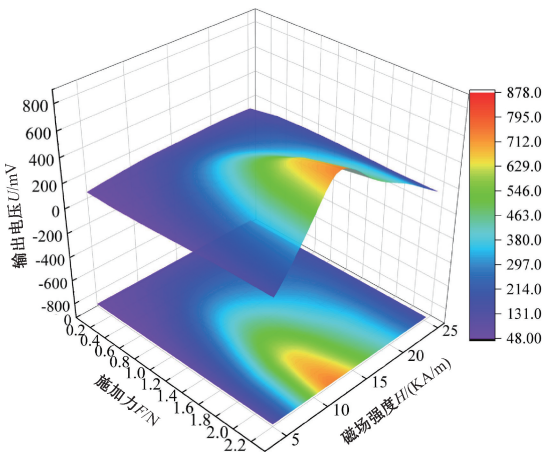


图 3 输出电压随磁场强度与力变化的仿真结果

Fig. 3 The simulation results of output voltage changing with magnetic field strength and force

为了使铁镓丝尾端的磁场强度不超过 TMR 传感器的线性区间,永磁体的磁场强度范围设置为 5~25 kA/m。当施加力  $F$  大小为 0~2.2 N,永磁体磁场强度为 12 KA/m 时,传感器单元的输出电压最高,因此选择磁场强度 11.97 kA/m 的永磁体为铁镓丝提供偏置磁场。

在永磁体优化基础上,选取直径为 0.5 mm,长度分别为 8 mm 和 6 mm 的铁镓丝进行实验测试,实验结果与基于式(16)的理论结果如图 4 所示。由图 4 中可知,在 0~2.2 N 作用力下,长度不同的铁镓丝受到同一作用力,输出电压呈线性增加,随着长度增加,输出电压也随之增大。但在作用力分别超过 2.2 和 3 N 后,长度 8 和 6 mm

的铁镓丝由于发生非弹性形变,输出电压不再线性。考虑到如果滑动过程力过大,将发生波动,导致输出电压波形不稳定,且两者线性电压峰值接近,因此选择直径 0.5 mm,长度 8 mm 的铁镓丝。

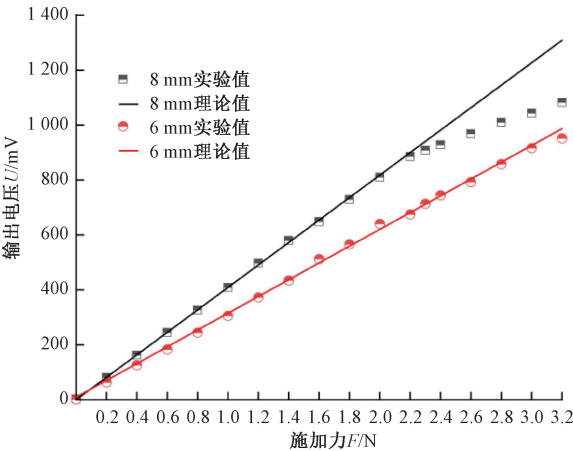


图 4 不同长度铁镓丝实验值与理论值对比

Fig. 4 Comparison of experimental values and theoretical values of different lengths of iron gallium wire

选择长度为 15 mm,弹簧弹性系数  $K_s$  分别为 0.3、0.5 N/mm 进行实验测试,弹性系数为 0.3 N/mm 的弹簧由于恢复力低而无法将力传递给铁镓丝,而弹性系数为 0.5 N/mm 的弹簧可以较好地传递给铁镓丝,在 0~4.8 mm 范围内输出线性,且灵敏度更高,因此选择弹性系数为 0.5 N/mm 的弹簧。

综上所述,选择磁场强度 11.97 kA/m 的永磁体,直径为 0.5 mm、长度为 8 mm 的铁镓丝,长度为 15 mm、弹性系数为 0.5 N/mm 的弹簧组成传感器单元,传感器单元尺寸为 20 mm×20 mm×25 mm。本文所有实验均在此优化基础上进行。

2.2 静态特性测试

传感器单元静态测试系统如图 5 所示,包括传感器单元、数字测力计(HP-10)、数据采集卡(DH8301)和 PC 及直流稳压电源。

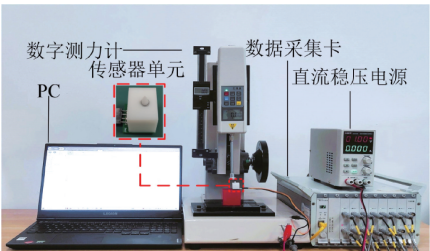


图 5 传感器单元静态测试系统

Fig. 5 Static test system of sensor unit

采用直流稳压电源对传感器单元供电,通过数字测



力计对传感器单元施加垂直方向的作用力,采用数据采集卡测量传感器单元的输出电压变化,得到不同下压深度情况时传感器单元的输出电压如图 6(a) 所示。由图 6(a)可知,当下压深度为 0.05 mm 时传感器单元输出电压可区别于数据采集卡的电压噪声,表明传感器单元最小检测深度为 0.05 mm。当下压深度超过 4.8 mm 时,由于铁镓丝产生了非弹性形变,输出电压进入非线性区,且导致传感器单元灵敏度降低甚至损坏,因此传感器单元线性检测范围为 0.05~4.8 mm。传感器单元静态实验结果与基于式(20)的理论结果如图 6(b) 所示。由图 6(b)中可知,实验结果与输出电压理论值基本一致,确定了在 0.05~4.8 mm 的深度检测范围内,灵敏度为 185.72 mV/mm。

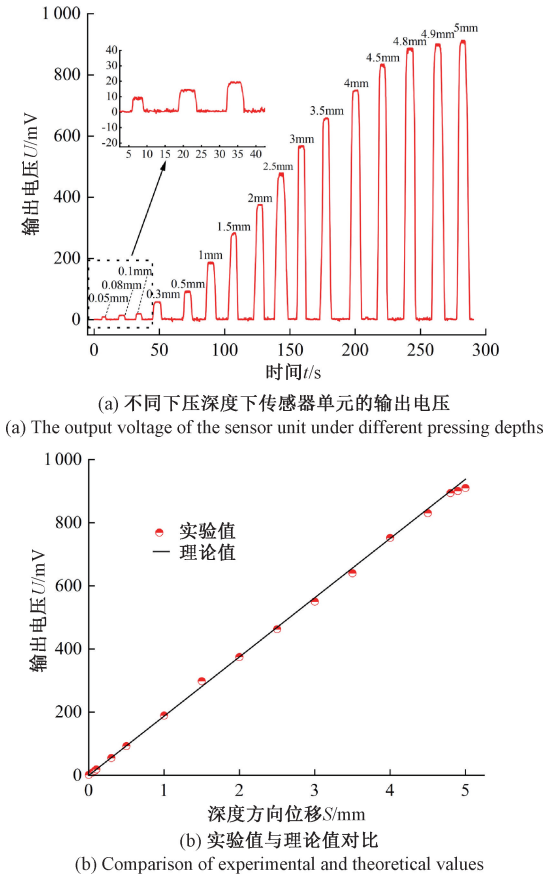


图 6 传感器单元静态输出电压

Fig. 6 Static output voltage of sensor unit

2.3 动态特性测试

传感器单元动态测试系统如图 7 所示,包括传感器单元、信号发生器 (AFG2021-SC)、功率放大器 (MB500VI) 和激振器 (MODAL50)、数据采集卡 (DH8301) 和 PC 及直流稳压电源。

响应时间定义为传感器从初始电压到峰值电压所需的时间,恢复时间为传感器从峰值电压返回初始电压所

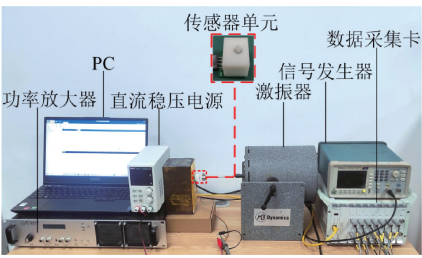


图 7 传感器单元动态测试系统

Fig. 7 Dynamic test system of sensor unit

需的时间。信号发生器产生频率为 2 Hz 的方波力信号,该信号通过功率放大器传输至激振器并作用于传感器单元,为了测试传感器单元的可靠性,测量数据更准确可靠,进行了 50 次重复实验,得到传感器单元响应恢复时间和重复实验结果如图 8 所示。由图 8 可知,传感器单元的响应时间和恢复时间分别为 31 和 43 ms,在 50 次重复性测试中输出电压峰值与其理论值最大误差为 4.4%,表明传感器单元具有良好的重复性。

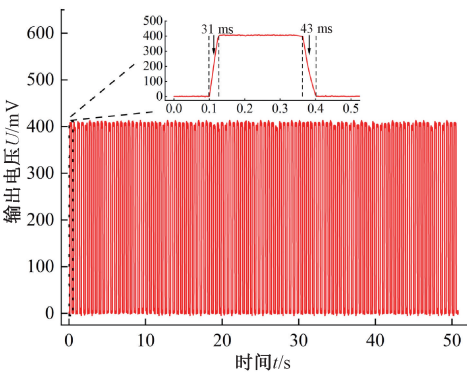


图 8 响应恢复时间与重复性测试

Fig. 8 Response recovery time and repeatability test

2.4 性能参数对比

与其他文献<sup>[8,10,18-19]</sup>中不同类型的形貌深度检测触觉传感器相比较,如表 2 所示。本文提出的新型磁致伸缩触觉传感器的检测范围为 0.05~4.8 mm、灵敏度为 185.72 mV/mm,与文献[18]检测范围比较接近,但灵敏度有较大提升。综合考虑,本文提出的新型磁致伸缩触觉传感器具有检测范围大、灵敏度高的优点,相比与上述类型的传感器在检测深度和表面形貌具有一定优势。

3 传感器阵列设计与滑动速度检测

3.1 传感器阵列的设计

对于复杂的物体表面形貌信息,传感器单元测量信息有限,需设计 3×3 传感器阵列来获取更多触觉信息。

表2 性能参数对比

Table 2 Comparison of performance parameters

| 类型      | 针型压电触觉传感器 <sup>[8]</sup> | 触须磁化微纤毛阵列 <sup>[10]</sup> | 磁致伸缩触觉传感阵列 <sup>[18]</sup> | 磁致伸缩触觉传感器 <sup>[19]</sup> | 新型磁致伸缩触觉传感器  |
|---------|--------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|--------------|
| 检测范围/mm | 0~3                      | 0.01~1.2                  | 0~4.9                      | 0.05~2                    | 0.05~4.8     |
| 灵敏度     | 20 mV/mm                 | 30 $\mu$ V/mm             | 25.26 mV/mm                | 91.5 mV/mm                | 185.72 mV/mm |

若单元间距太近,会发生相互耦合,导致传感器阵列的输出电压不准确,因此采用 COMSOL Multiphysics 仿真和实验测试相结合的方式进行优化。

首先,对 3×3 传感器阵列进行仿真分析,传感器阵列分布坐标如图 9(a) 所示,传感器单元在横向和纵向方向上的距离定义为  $m$  和  $n$ ,在纵向方向相互错开距离为  $l$ 。

使用 COMSOL Multiphysics 仿真软件对 3×3 传感器阵列进行仿真分析,对 1 号单元上施加 1~2.2 N 作用力时,在横向和纵向方向相邻距离分别为  $m$  和  $n$  的 2 号单元和 4 号单元的输出电压值分别为图 9(b) 和 (c) 所示。由图 9(b) 和 (c) 可知,与 1 号单元相邻的传感器单元的输出电压随着单元间距的增加而逐渐减小。当  $m=14$  mm 和  $n=3$  mm 时,对 1 号单元施加不同作用力,此时 2 号单元和 4 号单元的最高输出电压值不超过输出单元电压的 1.7%,说明阵列中单元间的耦合影响非常小,可以忽略。

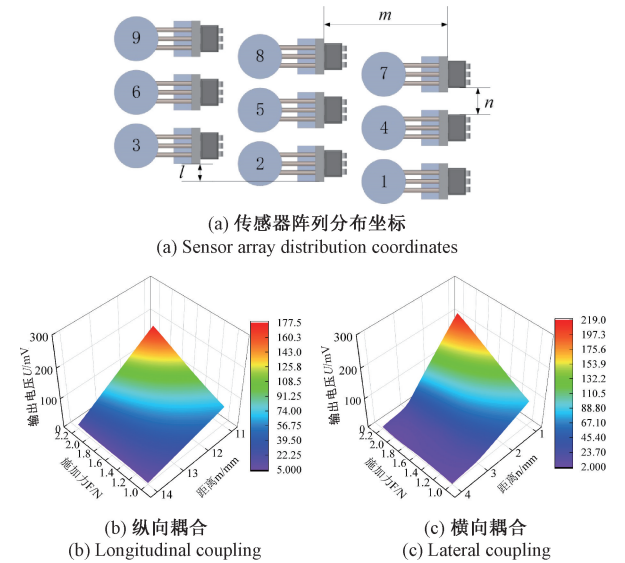


图9 阵列耦合仿真结果

Fig. 9 Array coupling simulation results

利用静态测试系统对传感器阵列进行阵列耦合特性测试,依次按压每个传感器单元,检测该单元与其他单元的输出电压,得到传感器阵列耦合实验结果如图 10 所示。由图 10 可知,当依次按压每个传感器单元时,未受按压的单元最高输出电压不超过输出单元电压的 2.4%,

说明阵列中单元间的耦合影响非常小,所有单元均具有独立性。

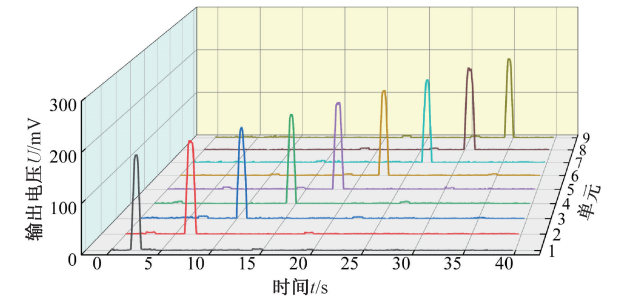


图10 阵列耦合实验结果

Fig. 10 Array coupling experimental results

综合仿真和实验可知,当  $m=14$  mm 和  $n=3$  mm 时,传感器单元间的耦合影响可以忽略不计;传感器单元在纵向方向相互错开距离均为 2 mm,则 3×3 传感器阵列平面分辨率为 2 mm,传感器阵列的整体尺寸确定为 52 mm×28 mm×25 mm。

3.2 滑动速度检测

滑动速度是提高检测精度的重要参数,对于输出稳定的电压波形十分关键。如果滑动太快,会错过一些表面形貌信息,并且滑动速度的检测对于检测表面形貌至关重要。

由于纵向相邻单元间距固定为 14 mm,可通过间距除以测量的时间差来计算滑动速度。将传感器阵列安装在机械手上,分别以 5 和 10 mm/s 的滑动速度进行实验,得到输出电压波形图分别为图 11(a) 和 (b) 所示。由图 11(a) 和 (b) 可知,测量得到的 1 号单元和 2 号单元的时间差分别为 2.85 和 1.48 s,计算得到滑动速度分别为 4.91 和 9.46 mm/s,误差分别为 1.8% 和 5.4%,结果与机械手滑动速度吻合较好,说明其具有确定滑动速度检测的能力,最终选择 5 mm/s 作为实验滑动速度。

4 形貌检测实验

4.1 传感器单元实验

实验样品由 3D 打印制备,包括梯形、三角形、圆弧形和变化三角形 4 类,参数标注如图 12(a) 所示。将传感





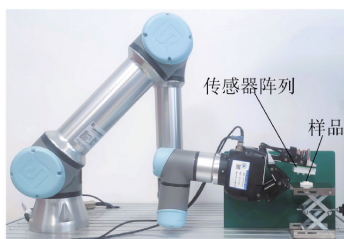
由图 12(b) 的输出电压波形可知,滑过圆弧形样品时,波形曲线更加圆润,3 个圆弧形底边的长度分别为 6.90、12.20 和 17.90 mm,取输出电压峰值 281.2、550.8 和 823.7 mV,结合式(20),得到 3 个圆弧形样品的高度分别为 1.52、2.97 和 4.44 mm。由几何学公式得到 3 个圆弧对应圆的半径及弧长分别为 4.68、7.76 和 7.75 mm、14.04 和 11.24、20.71 mm,检测结果如图 12(c) 所示。

由图 12(b) 的输出电压波形可知,滑过由两种角度组成的变化三角形样品时,在前 0.31 s 输出电压波形保持同一斜率,在 0.31 s 时斜率发生变化,然后保持了 0.53 s,说明样品具有两个不同的坡度,与样品实际参数保持一致,检测结果如图 12(c) 所示。

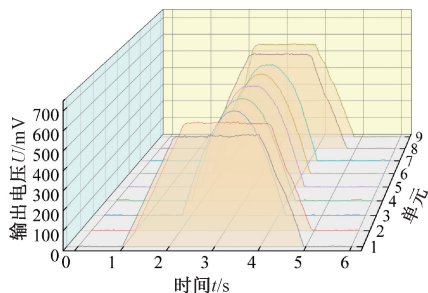
通过分析输出电压波形,利用几何学公式得到边长、角度、半径和弧度信息,与样品实际参数最大误差为 3.5%,说明传感器单元可以精准检测深度和形貌信息。

#### 4.2 传感器阵列实验

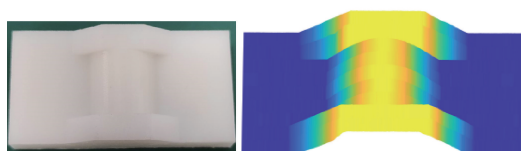
为了对较复杂且面积较大的物体表面形貌进行检测,将传感器阵列安装在机械手上,平行滑过由两个截面为梯形和一个截面为圆弧形的几何体拼接而成的“工”字形样品,滑动实验平台如图 13(a) 所示。由于阵列中纵向相邻单元间距固定为 14 mm,单元间的输出电压波形存在时间差,需将输出电压波形调整到同一时间轴下,实验结果如图 13(b) 所示。由图 13(b) 和(c) 可知,得到的输出电压波形曲线与“工”字形样品较为一致。



(a) 滑动实验平台  
(a) Sliding experimental platform



(b) 传感器阵列输出电压波形  
(b) Output voltage waveform of sensor array



(c) 样品与三维检测结果  
(c) Sample and three-dimensional test results

图 13 传感器阵列三维形貌检测

Fig. 13 Three-dimensional shape detection of sensor array

将各个输出电压波形曲线连接延展为三维曲面,得到样品与三维检测对比结果如图 13(c) 所示。由图 13(c) 可知,通过输出电压波形得到的三维模型与实际样品的深度、形貌信息较为吻合,实现了对物体表面形貌的三维检测,对于实现智能机器人检测物体表面特征具有重要意义。

## 5 结 论

本文基于动物毛发感知机理,以弹簧和铁镓丝为敏感元件,将深度方向位移与力进行转换,设计了一种新型仿生磁致伸缩触觉传感器单元及阵列,可用于机械手滑动过程中深度和形貌检测。基于逆磁致伸缩效应、欧拉-伯努利梁理论和胡克定律,推导了深度检测的输出电压模型,在 0.05~4.8 mm 深度检测范围内,输出结果与理论值基本相符,灵敏度为 185.72 mV/mm,响应时间和恢复时间分别为 31 和 43 ms,输出结果稳定,重复性好。使用软件确定最佳偏置磁场和阵列间距,与受力单元相邻单元的输出电压随着单元间距的增加而逐渐减小;实验测得,非受力单元最高输出电压不超过输出单元电压的 2.4%。

将传感器单元及阵列安装在机械手上,选择 5 mm/s 的滑动速度滑过不同物体表面,根据输出电压波形可以实现精确测量各种深度和形貌,与样品实际参数最大误差为 3.5%,表明该传感器单元及阵列能够精确感知物体表面特征。该磁致伸缩触觉传感器单元及阵列具有良好的可扩展性,可按照实际需要传感器单元进行排列组合,实现更高精度的平面分辨率,使得该传感器阵列在智能机器人检测物体表面特征、人机交互等领域具有广阔前景。

## 参考文献

- [1] CAO Y D, LI T, GU Y, et al. Fingerprint-inspired flexible tactile sensor for accurately discerning surface texture[J]. Small, 2018, 14(16): 1703902.



- [2] 蔡世波, 陶志成, 万伟伟, 等. 机器人多指灵巧手的研究现状、趋势与挑战[J]. 机械工程学报, 2021, 57(15): 1-14.
- CAI SH B, TAO ZH CH, WAN W W, et al. Research status, trends and challenges of robot multi-fingered dexterous hand [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(15): 1-14.
- [3] WANG X, ZHANG H, D LIN, et al. Self-powered high-resolution and pressure-sensitive triboelectric sensor matrix for real-time tactile mapping [J]. Advanced Materials, 2016, 28(15): 2896-2903.
- [4] SOTGIU E, AGUIAM D E, CALAZA C, et al. Surface texture detection with a new sub-mm resolution flexible tactile capacitive sensor array for multimodal artificial finger[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2020, 29(5): 629-636.
- [5] 张剑敏, 熊鹏文, 韦琦, 等. 面向纹理识别的便携式触觉传感器设计[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(10): 66-73.
- ZHANG J M, XIONG P W, WEI Q, et al. Design of portable tactile sensor for texture recognition[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(10): 66-73.
- [6] KIM J, PARK D, MOON S, et al. Omnidirectional tactile profiling using a deformable pressure sensor array based on localized piezoresistivity [J]. Advanced Materials Technologies, 2021, 33: 2100688.
- [7] 王博文, 王晓东, 李云开, 等. 用于纹理探测的磁致伸缩触觉传感器[J]. 光学 精密工程, 2018, 26(12): 2991-2997.
- WANG B W, WANG X D, LI Y K, et al. Magnetostrictive tactile sensor for texture detection[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(12): 2991-2997.
- [8] SHIN K, KIM D, PARK H, et al. Artificial tactile sensor with pin-type module for depth profile and surface topography detection [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 167(1): 637-646.
- [9] PRASAD A, SEBASTIAN S, ASOKAN S, et al. FBG tactile sensor for surface thickness and shape measurement[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(9): 10695-10702.
- [10] ZHOU Q, JI B, HU F M, et al. Magnetized microcilia array-based self-powered electronic skin for micro-scaled 3D morphology recognition and high-capacity communication [J]. Advanced Functional Materials, 2022, 32(46): 2208120.
- [11] LI Y K, WANG B W, LI Y Y, et al. Design and output characteristics of magnetostrictive tactile sensor for detecting force and stiffness of manipulated objects[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 15(2): 1219-1225.
- [12] 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 sensing array[J]. Transactions of Chinese Electro-technical Society, 2021, 36(12): 2576-2584.
- [13] 黄珊, 王博文, 赵智忠, 等. 应用于机械手的磁致伸缩触觉传感器阵列与物体识别[J]. 电工技术学报, 2021, 36(7): 1416-1424.
- HUANG SH, WANG B W, ZHAO ZH ZH, et al. Magnetostrictive tactile sensor array and object recognition for manipulators[J]. Transactions of Chinese Electrotechnical Society, 2021, 36(17): 1416-1424.
- [14] GAO S Y, WENG L, DENG Z X, et al. Biomimetic tactile sensor array based on magnetostrictive materials[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(12): 13116-13124.
- [15] 翁玲, 高绍阳, 王博文, 等. 用于检测压力与刚度的柔性磁致伸缩触觉传感器阵列[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(9): 110-120.
- WENG L, GAO SH Y, WANG B W, et al. Flexible magnetostrictive tactile sensor array for detecting pressure and stiffness [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(9): 110-120.
- [16] ZHENG W D, WANG B W, LIU H P, et al. Bio-inspired magnetostrictive tactile sensor for surface material recognition [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2019, 55(7): 1-7.
- [17] YANG H W, WENG L, WANG B W, et al. Magnetostrictive tactile sensor array based on L-shaped Galfenol wire and application for tilt detection[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(13): 12645-12655.
- [18] 赵智忠, 沈鑫, 王博文, 等. 用于轮胎胎冠裂纹检测的磁致伸缩触觉传感器研究[J]. 仪表技术与传感器, 2022(7): 11-15.
- ZHAO ZH ZH, SHEN X, WANG B W, et al. Research on magnetostrictive tactile sensor for tire crown crack

detection[J]. Instrument Technique and Sensor, 2022 (7): 11-15.

[19] WENG L, LI Z L, LUO X, et al. Design of magnetostrictive tactile sensor for depth detection[J]. Sensor Rev, 2023, 43(4): 249-258.

[20] LUO Y F, BRESEE C S, RUDNICKI J W, et al. Constraints on the deformation of the vibrissa within the follicle[J]. PLoS computational biology, 2021, 17(4): 1007887.

[21] 李冰, 朱建军, 康胜, 等. 仿海豹胡须的等离子体共振传感器的设计与研究[J]. 仪表技术与传感器, 2021(4): 24-27.

LI B, ZHU J J, KANG SH, et al. Design and research of plasma resonance sensor imitating seal beard[J]. Instrument Technique and Sensor, 2021(4): 24-27.

[22] YANG H W, WENG L, WANG B W, et al. Design and characterization of high-sensitivity magnetostrictive tactile sensor array[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(5): 4004-4013.

[23] WENG L, XIE G R, ZHANG B, et al. Magnetostrictive tactile sensor array for force and stiffness detection[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2020, 513: 167068.

作者简介



**孙英**(通信作者), 分别于 1994 年、2001 年和 2008 年于河北工业大学获得学士、硕士、博士学位, 现为河北工业大学教授、研究生导师, 主要研究方向为智能材料与器件。  
E-mail: sunying@hebut.edu.cn

**Sun Ying** (Corresponding author) received her B. Sc. degree, M. Sc. degree and Ph. D. degree all from Hebei University of Technology in 1994, 2001, and 2008, respectively. She is currently a professor and a master advisor at Hebei University of Technology. Her main research interest is intelligent materials and devices.



**郭腾蛟**, 2021 年于河北工业大学获得学士学位, 现为河北工业大学硕士研究生, 主要研究方向为柔性触觉传感器。  
E-mail: gtj18233937693@163.com

**Guo Tengjiao** received his B. Sc. degree from Hebei University of Technology in 2021. He is currently a master student at Hebei University of Technology. His main research interest is flexible tactile sensor.