

文章编号 1004-924X(2019)12-2618-10

磁致伸缩触觉传感单元及其输出特性

翁 玲^{1,2}, 解观然^{1,2}, 张 冰^{1,2}, 黄文美^{1,2*}, 王博文^{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)

摘要:为了满足机器人精确感知和抓取物体的需要,首先设计了以铁镓丝为敏感元件的新型触觉传感单元,搭建了传感单元输出特性测试平台,测试了其输出电压与施加静态和动态压力的关系。以触觉传感单元为核心设计了传感器阵列结构,并将传感阵列安装在机械手上,进行了抓取实验。实验结果表明,施加静态压力时,在 1.908 kA/m 的偏置磁场下,长度为 16 mm、直径为 0.8 mm 的铁镓丝组成的触觉传感单元在 2 N 压力下的输出电压可达 96 mV,灵敏度为 48 mV/N。在 1~4 Hz、0~2 N 的动态压力作用下,传感单元输出曲线平滑,灵敏度高。传感器阵列安装在机械手上,能感知多路压力信息,精确显示机械手指的受力分布情况,可广泛应用在机械手准确抓取与智能控制领域中。

关键词:触觉传感单元; 机械手; 传感器阵列; 铁镓合金

中图分类号: TP212.1 文献标识码: A doi:10.3788/OPE.20192712.2618

Magnetostrictive tactile sensor unit and its output characteristics

WENG Ling^{1,2}, XIE Guan-ran^{1,2}, ZHANG Bing^{1,2}, HUANG Wen-mei^{1,2*}, WANG Bo-wen^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment,
Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;

2. Laboratory of Electromagnetic Field and Electrical Apparatus Reliability of Hebei Province,
Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

* Corresponding author, E-mail: huzwm@hebut.edu.cn

Abstract: In order to enable robots to accurately perceive and grasp objects, a novel type of tactile sensing unit using an iron-gallium wire as the sensitive component was designed, and a test platform was developed to evaluate the output characteristics of the sensing unit. The relationship between the output voltage and the applied static and dynamic pressure was tested. A sensor array structure was designed using the tactile sensing unit as the core; then, the sensing array was mounted on a mechanical hand, and the gripping experiment was performed. The experimental results show that the tactile sensing unit, consisting of a Fe-Ga wire with a length of 16 mm and diameter of 0.8 mm in a bias magnetic field of 1.908 kA/m and a static pressure of 2 N, can achieve an output voltage of 96 mV and a sensitivity of 48 mV/N. Under the dynamic action of 1-4 Hz frequency and 0-2 N pressure, the output curve of the sensing unit is detected to be smooth, and the sensitivity is observed to be high. The sensor array is capable of sensing multiple sets of pressure information to accurately display the force distribution of the mechanical fingers. These properties make the unit widely applicable in the

收稿日期: 2019-05-20; 修订日期: 2019-07-19.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51777053); 河北省自然科学基金重点项目(No. E2017202035)

field of accurate grasping and intelligent control.

Key words: tactile sensor; manipulator; array sensor; Fe-Ga alloy

1 引 言

智能机器人在复杂环境下需要多种传感器相互精确配合才能进行工作,触觉作为机器人仅次于视觉的一种重要知觉形式,在信息交互和传感认知过程中具有十分重要的作用^[1-4]。功能敏感材料是传感器之本,科研人员不断研究新的敏感材料和敏感机理来模仿触觉,设计出压阻式^[5]、压电式^[6]、电容式^[7]、电磁式^[8]、光电式和超声式等多种传感器。

韩国延世大学 Minhoon Park 等^[9]使用 MoS₂ 和石墨烯电极制造的压阻式触觉传感阵列具有较高的检测灵敏度,且测试重复性优良,但压阻式传感器的优势通常体现在对静态力的检测上。意大利热那亚大学 Laura Seminara 等^[10]将压电薄膜粘贴于平面基体上,使用多个阵列传感器单元,通过检测不同部位的电压能够得到外力的三要素。由于静态时压电产生的电荷量会随着时间的推移变少,因此,压电传感器的静态力检测能力较差,仅适用于动态力的检测。美国犹他大学 Surapaneni Rajesh 等^[11]设计的梳齿状电容式触觉传感器将切向力的测量单元进行了分离,消除了维与维之间的影响,从而可以进行三维力的测量,但电容式传感器的信号易受干扰,测试量程偏小。合肥工业大学黄英等^[12]用带有炭黑的橡胶作为传感器的空间电介质层,该传感器具有间距柔性,可阵列和高灵敏性等优点。但是由于炭黑填充的硅橡胶的蠕变特性和导电性质非线性,该传感器测量误差较大,且只能测量法向力。

相比于由压电与压阻材料设计的传感器,磁致伸缩触觉传感器既能实现静态力的测量,又能实现动态力的测量,具有精度高,电路结构简单,受温度影响小等优点。Yunkai 等利用铁镓片设计了触觉传感器^[13],该传感器可测试 0~5 N 的静态压力,并通过实验得到了传感器的输出特性。当输入为 2 Hz 和 4 Hz 动态力时,输出电压峰值可达 470 mV 和 468 mV。文献^[14]设计的触觉传感器不仅可以检测物体的接触力,而且可以检

测物体的刚度。文献^[15]设计的触觉传感器,可利用传感器感知到的压力信息来识别物体。

不过,基于铁镓片设计的触觉传感器体积较大,分辨率还有待提高。本文设计了基于铁镓丝的新型触觉传感单元,推导了传感单元输出电压与压力的关系,测试了传感单元的静态与动态输出特性,并以此为基础设计了触觉传感器阵列。

2 触觉传感单元工作原理及数学模型

基于铁镓丝的触觉传感单元结构如图 1 所示。传感单元由硬质触杆、铁镓丝、永磁体、霍尔元件和外壳等组成。铁镓丝的长度、直径分别为 12~21 mm、0.5~0.8 mm,丝的中心线上方放置永磁体,为铁镓丝提供沿长度方向的偏置磁场 H ;硬质触杆为柱状结构,作为力的传递元件引起铁镓丝形变;霍尔元件为信号的采集单元,放置在靠近悬臂梁固定端的外表面。

铁镓材料作为一种磁致伸缩材料^[16],具有逆磁致伸缩效应^[17-18],即铁镓材料在一定偏置磁场下,当铁镓合金未受力时,磁畴方向均沿偏置磁场方向(铁镓丝长度方向)排列。当铁镓合金受力为 F 时,合金中性面截线上方的磁畴基本上未发生偏转,下方的磁畴向梁弯曲的方向转动,导致其内部磁化强度 M 发生变化。本文设计的触觉单元采用铁镓丝作为悬臂梁,利用其逆磁致伸缩效应,当触觉传感单元受到硬质触杆传递的压力时,材

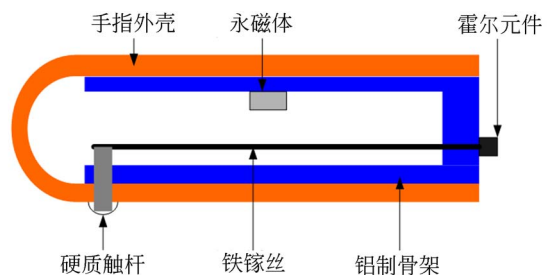


图 1 磁致伸缩触觉传感单元结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of magnetostrictive tactile sensing unit

料内部磁感应强度发生变化,再由单轴霍尔元件检测该磁感应强度的变化,从而得到输出电压信号。

根据霍尔元件的磁电转换特性,输出电压 U_H 与霍尔元件检测的磁感应强度 B_H 的关系如下:

$$U_H = K_H \times B_H, \quad (1)$$

式中 K_H 为等效霍尔参数。

由图 1 可以看出,霍尔元件检测的是铁镓材料外部的磁感应强度,材料表面磁感应强度的变化与材料内部磁感应强度的变化呈近似线性的关系,可以表示为:

$$B_H = K_S \times B, \quad (2)$$

式中 K_S 为铁镓材料内外磁感应强度的传递系数。由磁感应强度公式可知,铁镓材料内部的磁感应强度 B 可表示为:

$$B = \mu_0(H + M), \quad (3)$$

式中: H 为外加偏置磁场, M 为材料的磁化强度。由铁磁材料磁化强度的磁滞模型分析外加磁场 H 与材料内部磁化强度的关系,在不考虑材料磁滞时,材料的磁化强度 M 等于无磁滞磁化强度 $M_{an}^{[19]}$,具体如下:

$$H_e = H + \alpha M + H_\sigma = H + \tilde{\alpha} M, \quad (4)$$

$$M = M_{an} = M_s \left[\coth \left(\frac{H_e}{a} \right) - \frac{a}{H_e} \right], \quad (5)$$

$$\tilde{\alpha} = \alpha + \frac{9\lambda_s \sigma}{2\mu_0 M_s^2}, \quad (6)$$

式中: αM 为材料磁畴间相互作用产生的磁场, H_σ 为应力作用下产生的磁场, α 为畴壁相互作用系数, M_{an} 为无磁滞磁化强度, a 为无磁滞磁化强度形状系数, λ_s 为饱和磁致伸缩系数, σ 为应力, μ_0 为真空磁导率, M_s 为饱和磁化强度。

由式(5)得:

$$\frac{M}{M_s} = \coth \left(\frac{H_e}{a} \right) - \frac{a}{H_e}, \quad (7)$$

用泰勒公式将式(7)展开得:

$$\begin{aligned} \frac{M}{M_s} = & L(0) + \frac{L'(0)}{1!} \frac{H_e}{a} + \frac{L''(0)}{2!} \left(\frac{H_e}{a} \right)^2 + \dots + \\ & \frac{L_n(0)}{n!} \left(\frac{H_e}{a} \right)^n + o \left[\left(\frac{H_e}{a} \right)^{n+1} \right]. \end{aligned} \quad (8)$$

式(8)中,当 $n=2$ 时忽略高次项得:

$$M = M_s \frac{H_e}{3a}. \quad (9)$$

将式(4)代入式(9)得:

$$M = \frac{M_s}{3a - M_s \tilde{\alpha}} H. \quad (10)$$

将式(6)代入式(10)得:

$$M = \frac{M_s H}{3a - M_s \left[\alpha + \frac{9\lambda_s \sigma}{2\mu_0 M_s^2} \right]}. \quad (11)$$

将式(11)代入式(3)得:

$$B = \mu_0 H \left[1 + \frac{M_s}{3a - M_s \left[\alpha + \frac{9\lambda_s \sigma}{2\mu_0 M_s^2} \right]} \right]. \quad (12)$$

其中,应力 σ 是铁镓悬臂梁在硬质滑杆传递的压力下产生的。

图 1 中,设梁的长度方向为 x 轴,梁垂直纸面的方向为 z 轴, x 轴取在梁的中性面层,梁的固定端为 $x=0$ 处。

由欧拉-伯努利梁结构动力学理论可知,悬臂梁挠度和所受压力的关系为:

$$\omega(x, F_f) = -\frac{F_f x^2}{6EI} (3l - x), \quad (13)$$

式中: x 为梁到固定端的距离, F 为梁自由端硬质滑杆施加的压力, E 为铁镓材料的刚度系数, I 为悬臂梁圆形截面的转矩, R 为梁的直径, l 为梁的长度。

在偏置磁场 H 保持不变的情况下,根据材料力学可以得出悬臂梁受到压力 F 发生弯曲变形时,在高度为 z 处的 x 轴向应变与曲率的关系为:

$$\varepsilon = \omega''(x, F) z = \frac{F(l-x)}{EI} z. \quad (14)$$

整个材料的应力分布为:

$$\sigma(x, z) = E\varepsilon = \frac{F(l-x)}{I} z. \quad (15)$$

根据圆形截面距公式得:

$$I = \frac{\pi R^4}{64}. \quad (16)$$

材料的中性面上方受到沿轴向的拉力,中性面下方受到沿轴向的压力,当偏置磁场较高时,拉应力不会引起磁感应强度的变化,故中性面上方的磁化强度 M 不变^[20]。应力的平均分布为:

$$\sigma = \frac{1}{V} \int_0^l \int_{-R/2}^0 2 \sqrt{(R/2)^2 - z^2} \sigma(x, z) dz dx. \quad (17)$$

将式(15)、式(16)代入式(17)得:

$$\sigma = \frac{32Fl}{3\pi^2 R^3}. \quad (18)$$

将式(18)代入式(12)得:

$$B = \mu_0 H \left[1 + \frac{M_s}{3a - M \left(\alpha + \frac{48\lambda_s Fl}{\mu_0 \pi^2 M_s^2 R^3} \right)} \right]. \quad (19)$$

将式(19)和式(2)代入式(1)得:

$$U_H = K_S K_H \mu_0 H \times \left[1 + \frac{M_s}{3a - M_s \left(\alpha + \frac{48\lambda_s Fl}{\mu_0 \pi^2 M_s^2 R^3} \right)} \right], \quad (20)$$

引入参考电压 U_s , 将它带入式(20)得:

$$U = U_s - U_H. \quad (21)$$

由式(20)可以清楚地看出触觉传感单元尺寸确定后,参数 $K_S, K_H, \mu_0, R, \lambda_s, a, M_s, l, \alpha$ 为定值,输出电压只与偏置磁场和压力有关,因此只要确定偏置磁场后就可以通过输出电压的变化检测出压力的变化,为机械手抓物体提供判断依据。

模型参数如表 1 所示^[13,21]。

表 1 触觉传感单元的输出电压模型参数

Tab. 1 Parameters in output voltage model of tactile sensing unit

参 数	取 值
饱和磁化强度 M_s	1.43×10^6 A/m
无磁滞磁化强度形状系数 a	7 012 A/m
畴壁相互作用系数 α	0.01
空气磁导率 μ_0	$4\pi \times 10^{-7}$
磁感应强度传递系数 K_s	0.003
饱和磁致伸缩系数 λ_s	200×10^{-6}
等效霍尔参数 K_H	416.66 mV/mT

3 实 验

3.1 实验平台搭建

图 2 为实验平台的实物图,包括直流稳压电源、触觉传感单元、压力调节装置和数据采集装置等。其中,直流稳压电源为触觉传感单元上的霍尔元件提供 5 V 电压;压力调节装置由信号发生器、功率放大器和直线电机构成,信号发生器产生正弦激励信号经由功率放大器放大之后输出到直线电机,直线电机输出杆前端装有石英压电传感

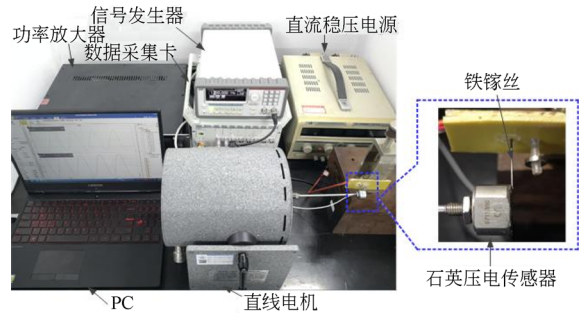


图 2 磁致伸缩触觉传感实验平台

Fig. 2 Photo of experimental platform for magnetostriuctive tactile sensor

器,可以检测与悬臂梁的接触力;江苏东华测试技术有限公司生产的动态信号测试分析系统数据采集装置用以采集霍尔元件输出的电压信号。

3.2 静态力测量与分析

将表 1 中的数据代入式(20)可知,相同偏置磁场与压力下,传感器的输出电压与其长度 l 和直径 R 有关。当偏置磁场、施加压力和铁镓丝直径均不变时,输出电压与铁镓丝长度成正比,铁镓丝长度越长,传感器输出电压越高。当偏置磁场、施加压力、铁镓丝的长度均不变时,传感器的输出电压与铁镓丝直径的三次方成反比,铁镓丝直径越小,传感器输出电压越高。

灵敏度是指测量系统在进行测量时,输出量的增量与输入量的增量之比。对线性测量系统来说,灵敏度为:

$$S = \Delta y / \Delta x = \Delta U / \Delta F. \quad (22)$$

本文中输出电压与压力呈线性变化,因此用线性灵敏度来表示本文的测量结果。灵敏度 S 为输出电压变化量与压力变化量的比值。

该传感单元采用永磁体提供偏置磁场,霍尔元件作为检测装置。由于偏置磁场的选取不受铁镓丝长度的影响,选取长度为 21 mm 的铁镓丝,分别在偏置磁场为 0.795, 1.192 5, 1.59, 1.908, 2.067 kA/m 处进行实验,以选出最佳偏置磁场。每一组数据测量 3 次然后取平均值。

根据图 3 实验结果得出,相同压力下,在磁场强度为 1.908 kA/m 时,霍尔元件的输出电压最高。实验测得长为 21 mm 的铁镓丝,在 1.908 kA/m 的偏置磁场下,受到 2 N 压力时,输出电压达到 112 mV,灵敏度为 56 mV/N。

根据上述实验结果,选择 1.908 kA/m 作为

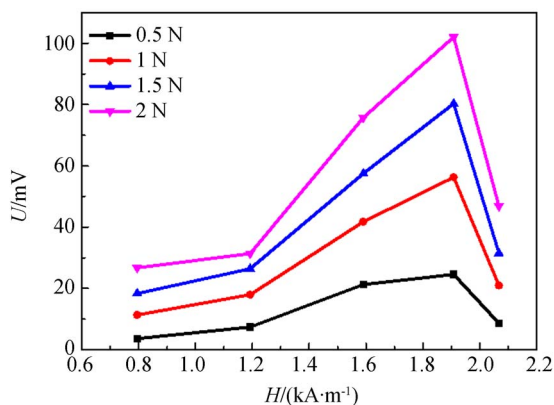


图 3 最佳偏置磁场的确定

Fig. 3 Determination of the best bias magnetic field

最佳偏置磁场,对直径为 0.8 mm,长度分别为 19,16,12,10 mm 的铁镓丝进行 0~2 N 内的压力与输出电压关系测量,观察铁镓丝的长度对输出的影响,实验结果如图 4 中散点所示。根据式(21)计算得到传感器输出电压随压力变化的曲线,如图 4 中实线所示。

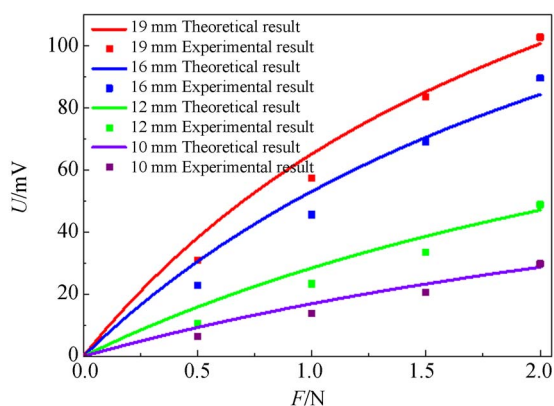


图 4 直径为 0.8 mm,不同长度的铁镓丝输出电压的理论及实验结果

Fig. 4 Experimental and theoretical results of output voltage of gallium-iron wires with different lengths and diameter of 0.8 mm

由图 4 可知,在丝长度为 10~19 mm 时输出的线性度较好,并且输出的电压值比较理想,当铁镓丝长度变短时,输出的电压值也变小,灵敏度也随着铁镓丝长度的减小逐步降低。理论结果与实验结果基本一致。在 1.908 kA/m 的偏置磁场下,对直径为 0.5 mm,长度分别为 12,16,21 mm 的铁镓丝进行 0~0.4 N 输入压力与输出电压关

系的测量,结果如图 5 所示。

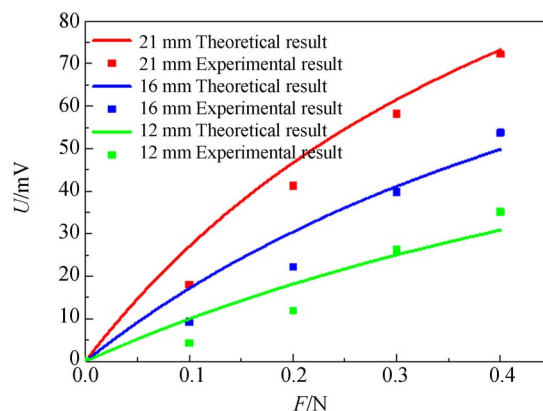


图 5 直径为 0.5 mm,不同长度的铁镓丝输出电压的实验与理论结果

Fig. 5 Experimental and theoretical results of output voltage of gallium-iron wire with different length and diameter of 0.5 mm

由于铁镓丝材料的限制,铁镓丝直径减小时,所测量力的范围也减小。长为 21 mm 的铁镓丝组成的传感单元,在 1.908 kA/m 的偏置磁场下,受到 0.4 N 压力时,输出电压达到 72 mV,灵敏度为 180 mV/N。

对比图 4 和图 5,在 0~0.4 N 的测量范围内,当压力为 0.4 N 时,直径为 0.8 mm、长度为 12 mm 的铁镓丝组成的传感单元的输出电压为 12 mV;直径为 0.5 mm、长度为 12 mm 的铁镓丝组成的传感单元的输出电压为 30 mV。可见相同压力和长度下,随着直径的减小,输出电压增大。

对直径为 0.8 mm,长度为 21 mm 的铁镓丝施加大小相同,方向分别为靠近永磁体、远离永磁体和垂直于纸面方向的力,实验结果如图 6 所示。铁镓丝的输出跟施加力的方向无关,说明磁路引起的影响很小,可以认为电压的输出是由铁镓丝内部磁畴的变化引起的。

3.3 动态力的测量与分析

磁致伸缩触觉传感单元不仅能测量静态力,而且适用于动态力的检测。由文献^[22]可知,机械手抓取物体时的动作频率为 1~4 Hz。在动态力测量实验中,对传感单元在 1~4 Hz 频率下的输出特性进行测量,并与压电传感器的输出进行了

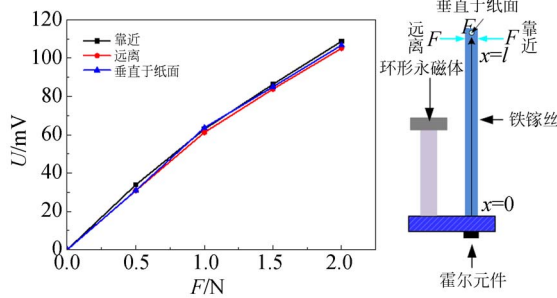


图 6 不同方向的力对输出的影响

Fig. 6 Effect of forces in different directions on output

对比。

在测试所设计的触觉传感单元的动态特性过程中,使用直线电机作为不同振动频率和振幅的可调动力源,在电机输出杆顶端安装石英压电动态力传感器,来确定动态力的幅值。

选择直径为 0.8 mm,长度为 16 mm 的铁镍丝进行 0~2 N 动态压力作用下触觉传感单元动态输出特性的测试。当振动频率为 1 Hz 时,调节功率放大器使石英压电传感器输出的电压幅值为 22 mV,对应的压力为 1 N,磁致伸缩触觉传感单元输出的电压幅值为 48 mV,实验结果如图 7(a) 所示。当频率变为 2 Hz,压力增加到 2 N 时,石英压电传感器输出的电压幅值增加到 44 mV,磁致伸缩传感单元输出的电压幅值变为 96 mV,磁致伸缩触觉传感单元的灵敏度为压电传感器的 2.2 倍,实验结果如图 7(b) 所示。

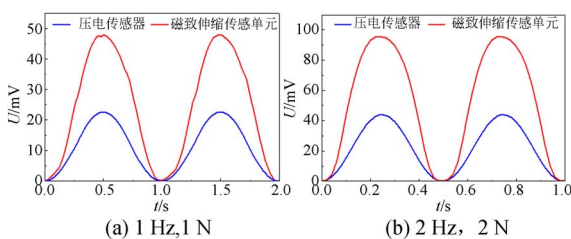


图 7 不同频率和峰值压力下压电传感器与触觉传感单元的输出电压

Fig. 7 Output voltages of piezoelectric sensor and tactile sensor unit with different frequencies and peak forces

图 8(a)~8(d) 分别对应直线电机的振动频率为 1~4 Hz 时,压力从 0 N 增加到 2 N 时磁致

伸缩传感单元的输出电压曲线。频率变化时,相同峰值压力下,输出电压的峰值相同。

在正弦变化曲线中,灵敏度计算见式(22), F 为压力有效值, U 为压力有效值下的输出电压。在峰值电压分别为 0.5,1,1.5,2 N 下,输出电压分别为 22,46,70,96 mV,灵敏度分别为 44,46,46.67 和 48 mV/N。频率为 1~4 Hz 时,不同压力下灵敏度在 44~48 mV/N。可知在 1~4 Hz 频率下,磁致伸缩触觉传感单元对动态信号有较高的灵敏度。

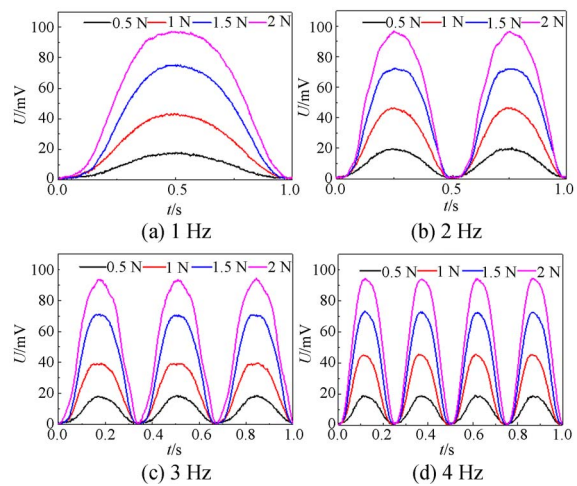


图 8 频率为 1~4 Hz,峰值压力为 0~2 N 时触觉传感单元的输出曲线

Fig. 8 Output curves of tactile sensor unit for frequency in 1~4 Hz and peak force in 0~2 N

选择直径为 0.5 mm、长度为 16 mm 的铁镍丝进行 0~0.4 N 动态压力下触觉传感单元输出特性测试。如图 9(a) 所示,当振动频率为 2 Hz,石英压电输出的电压幅值为 4.4 mV,对应压力为 0.2 N 时,触觉传感单元输出的电压幅值为 25 mV,此时,磁致伸缩触觉传感单元的灵敏度是压电的 5.7 倍。如图 9(b) 所示,当频率增加到 4 Hz,石英压电的输出为 8.8 mV,对应的压力为 0.4 N 时,磁致伸缩传感单元的输出为 54 mV,灵敏度为石英压电的 6.1 倍。

图 10(a)~10(d) 分别对应直线电机的振动频率为 1~4 Hz,压力从 0 N 变化到 0.4 N 时触觉传感器的输出电压。当频率变化时,相同

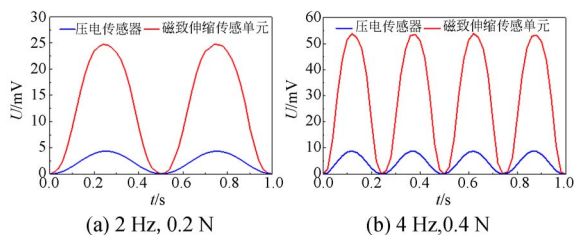


图 9 不同频率和峰值压力下压电传感器与触觉传感单元的输出电压

Fig. 9 output voltage of piezoelectric sensor and tactile sensor unit with different frequencies and peak forces

峰值压力下, 输出电压相同, 灵敏度可达 135 mV/N。

综上所述, 输入为正弦动态力, 压电传感器与触觉传感单元的输出随动态力呈正弦变化, 两者到达峰值的时间相同。由直径为 0.5 mm 的铁镓丝制作的磁致伸缩触觉传感单元表现出良好的灵敏度与精度。

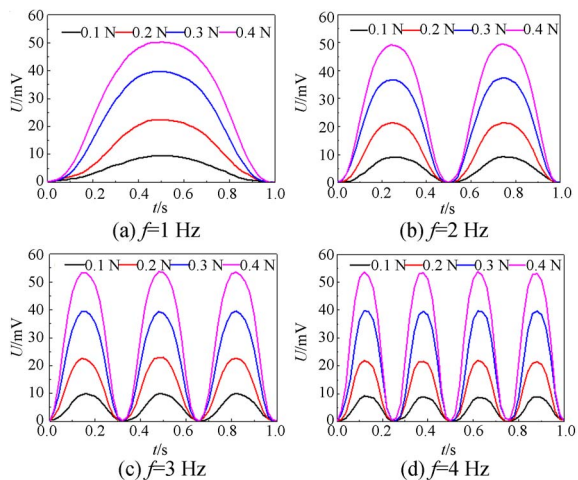


图 10 频率为 1~4 Hz, 峰值压力为 0~0.4 N 时触觉传感单元的输出曲线

Fig. 10 Output curves of tactile sensor unit for peak pressure in 0~0.4 N and frequency in 1~4 Hz

4 磁致伸缩触觉传感器阵列设计

根据以上实验结果, 为了获取更多的压力信息, 基于单根铁镓丝触觉传感单元设计了触

觉传感器阵列, 其 3D 模型如图 11(a) 所示。图 11(b) 为采用 3D 打印技术得到的触觉传感器阵列实物, 所用材料为白色尼龙树脂。该传感器阵列的长、宽、高分别为 20, 15, 22 mm, 内部结构包含 4 根铁镓丝, 每根丝的长度为 16 mm, 直径为 0.8 mm。当铁镓丝承受的最大压力为 2 N 时, 其形变量为 2 mm。为使触头压至最大量时仍在有效范围内, 触头超出结构体的长度设计为 2 mm。

采用一个环形永磁体提供偏置磁场, 铁镓丝与永磁体的分布情况如图 12 所示, 每根丝到永磁体中心的距离相等。根据图 6 的测量结果可知, 4 个传感单元的输出特性相同。

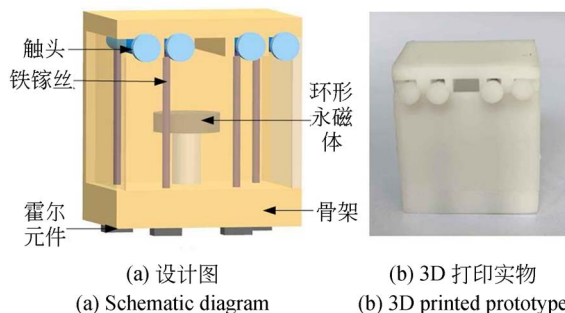


图 11 磁致伸缩触觉传感器阵列结构示意图

Fig. 11 Schematic structure of magnetostrictive tactile sensor array

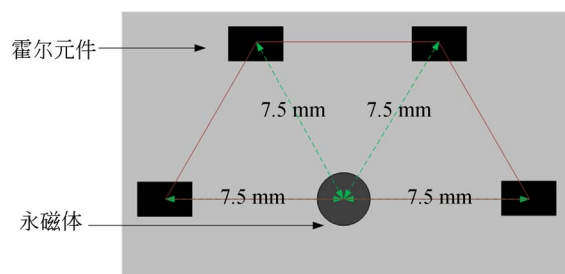


图 12 底面铁镓丝的分布

Fig. 12 Distribution of gallium-iron wire at the bottom

通过测试发现, 当霍尔元件相互之间的距离为 7.5 mm 时, 每个霍尔元件之间的输出互不影响。在机械手的四节指骨上分别安装一个触觉传感器, 每个传感器包含 4 个传感单元, 如图 13 所示。

为测试触觉传感阵列的性能, 进行了机械手

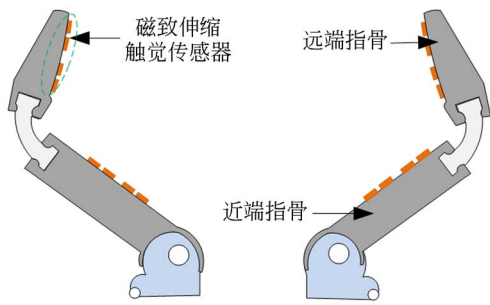


图 13 安装触觉传感阵列的机械手

Fig. 13 Manipulator assembled with tactile sensor array

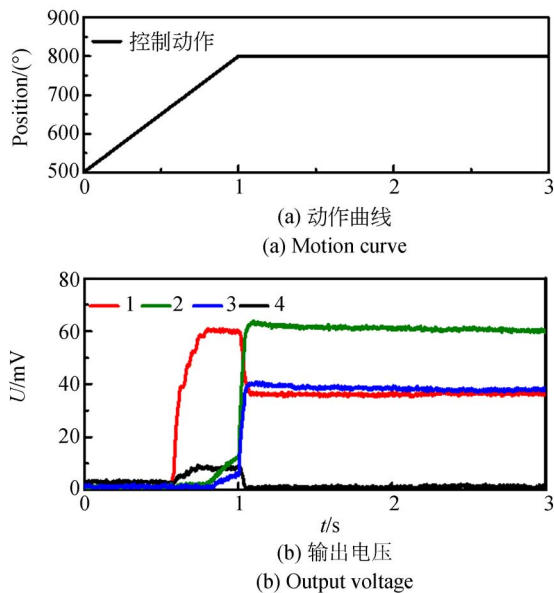


图 14 机械手随机抓取一次输出曲线

Fig. 14 Random grab primary output curve of manipulator

抓取物体动作的实验。图 14(a)是机械手的动作位置曲线,机械手从初始 500° 的位置经过 1 s 的运动到达 850° 的位置。图 14(b)是一个指节上阵

列结构的输出电压(彩图见期刊电子版)。初始位置为未有触头接触物块的位置,终点位置是稳定抓取时的位置。抓取的物体为白色树脂材料打印的一个 $45\text{ mm}\times 45\text{ mm}\times 70\text{ mm}$ 的长方形物块。每个传感单元产生电压的起始时间不同表明每个触头接触物体时的时间不同。其中,红色曲线先上升后下降最后平稳,和黑色曲线先有输出后来输出接近为 0 V ,都是机械手在抓取物体时自动调整最后稳定的过程。图 14 表明,应用该传感器阵列可以感知更多的压力信息,能较准确地测量机械手抓取物体时的压力。

5 结 论

本文设计了一种新型的铁镓丝触觉传感单元,根据逆磁致伸缩效应、电磁学理论等建立了该传感单元的输出电压模型。实验结果与模型计算结果基本一致。确定了触觉传感单元的最佳偏置磁场,测量出最佳偏置下,不同直径、不同长度的铁镓丝作为核心元件的传感单元的输出特性。当铁镓丝直径相同,长度在 $0\sim 21\text{ mm}$ 内,受到相同压力时,长度越长输出电压越大。当铁镓丝长度相同,直径分别为 0.5 mm 和 0.8 mm ,受到相同压力时,直径越小输出电压越大。施加静态压力时,传感器所受压力在 $0\sim 2\text{ N}$ 内,电压与压力呈线性关系。施加正弦动态压力时,铁镓丝传感单元与压电传感器的输出波形都为正弦波,磁致伸缩传感单元的灵敏度比压电传感器高。设计了触觉传感器阵列,该传感器的核心部件采用 4 根直径为 0.8 mm ,长度为 16 mm 的铁镓丝。该传感器阵列可感知多个触点的压力信息,并且体积较小、便于安装,灵敏度较高。

参考文献:

- [1] LI K, FANG Y, ZHOU Y, *et al.*. Non-invasive stimulation based tactile sensation for upper-extremity prosthesis: a review [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(9):2625-2635.
- [2] HARADA S, KANAO K, YAMAMOTO Y, *et al.*. Fully printed flexible fingerprint-like three-axis tactile and slip force and temperature sensors for artificial skin [J]. *ACS Nano*, 2014, 8(12): 12851-12857.
- [3] 邹媛媛,李鹏飞,左克铸. 三线结构光视觉传感器现场标定方法 [J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(6):94-99.

ZOU Y Y, LI P F, ZUO K ZH. Field calibration method for three-line structured light vision sensor

- [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47 (6):94-99. (in Chinese)
- [4] ALI I, PAOLO G, HUSSEIN C, *et al.*. Real-time digital signal processing based on FPGAs for electronic skin implementation [J]. *Sensors*, 2017, 17 (3):558.
- [5] CHEN H, MIAO L, SU Z, *et al.*. Fingertip-inspired electronic skin based on triboelectric sliding sensing and porous piezoresistive pressure detection [J]. *Nano Energy*, 2017, 40: 65-72.
- [6] SPANU A, PINNA L, VIOLA F, *et al.*. A high-sensitivity tactile sensor based on piezoelectric polymer PVDF coupled to an ultra-low voltage organic transistor [J]. *Organic Electronics*, 2016, 36: 57-60.
- [7] DENEI S, MAIOLINO P, BAGLINI E, *et al.*. Development of an integrated tactile sensor system for clothes manipulation and classification using industrial grippers [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17 (19): 6385-6396.
- [8] BYUNGSEOK YOO, SUOK-MIN NA, ALISON B. FLATAU, *et al.*. Evaluation of magnetorheological elastomers with oriented Fe-Ga alloy flakes for force sensing applications [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2016, 52(7):2501104.
- [9] PARK M, YONG J P, XIANG C, *et al.*. MoS₂-based tactile sensor for electronic skin applications [J]. *Advanced Materials*, 2016, 28 (13): 2556-2562.
- [10] LUCIA SEMINARA, LUIGI PINNA, MAURIZIO VALLE, *et al.*. Piezoelectric polymer transducer arrays for flexible tactile sensors [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2013, 13(10):4022-4029.
- [11] SURAPANENI R, GUO Q, XIE Y, *et al.*. A three-axis high-resolution capacitive tactile imager system based on floating comb electrodes [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2013, 23(7):075004.
- [12] 黄英, 郭小辉, 刘家俊, 等. 可拼接式全柔性电容触觉阵列传感器设计与实验 [J]. *机器人*, 2015, 37(2):136-141.
- HUANG Y, GUO X H, LIU J J, *et al.*. Expandable fully compliant capacitive tactile sensing array; design and experiment [J]. *Robot*, 2015, 37 (2):136-141. (in Chinese)
- [13] 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*, 2019, 15(2):1219-1225.
- [14] ZHENG W D, WANG B W, LIU H P, *et al.*. Structural design and output characteristic analysis of magnetostrictive tactile sensor for robotic applications [J]. *AIP Advances*, 2018, 8: 056622.
- [15] ZHANG B, WANG B W, LI Y K, *et al.*. Detection and identification of object based on a magnetostrictive tactile sensing system [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2018, 54(11):1-5.
- [16] 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):124-130.
- WANG B W, WANG X D, LI Y K, *et al.*. Research on magnetostrictive tactile sensor for texture detection [J]. *Opt. Precision Eng.* 2018, 26 (12):124-130. (in Chinese)
- [17] 王博文, 张露予, 王鹏, 等. 磁致伸缩位移传感器检测信号分析 [J]. *光学精密工程*, 2016, 24(2): 358-364.
- WANG B W, ZHANG L Y, WANG P, *et al.*. Analysis of detection signal for magnetostrictive displacement sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(2):358-364. (in Chinese)
- [18] 王福吉, 贾振元, 刘巍, 等. 复合薄膜磁致伸缩系数求解及悬臂梁结构优化 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(8):1832-1837.
- WANG F J, JIA ZH Y, LIU W, *et al.*. Calculation of magnetostrictive coefficient of composite thin film and structure optimization of cantilever [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19 (8): 1832-1837. (in Chinese)
- [19] 曹淑瑛, 桑杰, 郑加驹, 等. Galfenol 悬臂梁能量采集器的机电耦合动态模型 [J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(21):5623-5631.
- CAO SH Y, SANG J, ZHENG J J, *et al.*. Electromechanical coupling dynamic model of galfenol cantilever beam energy collector [J]. *Proceeding of the CSEE*, 2015, 35 (21): 5623-5631. (in Chinese)
- [20] 翁玲, 吕稼先, 王跃虎, 等. 应力对 Galfenol 合金磁感应强度的影响 [J]. *磁性材料及器件*, 2016,

47(1):1-4.

WENG L, LÜ J X, WANG Y H, *et al.*. Effects of stress on magnetic induction of Galfenol alloy [J]. *Magnetic Materials and Devices*, 2016, 47(1): 1-4. (in Chinese)

- [21] 曹淑瑛, 王博文, 郑加驹, 等. 应用混合遗传算法的超磁致伸缩致动器磁滞模型的参数辨识 [J]. *中国电机工程学报*, 2004, 24(10):127-132.
CAO SH Y, WANG B W, ZHENG J J, *et al.*.

Parameter identification of hysteretic model for giant magnetostrictive actuator using hybrid genetic algorithm [J]. *Proceeding of the CSEE*, 2004, 24(10):127-132. (in Chinese)

- [22] WANG L, SUN G, GUI Z, *et al.*. A reconfigurable general behavior data acquisition system for motor brain machine interface [C]. *International IEEE/EMBS Conference on Neural Engineering*. IEEE, 2015:134-137.

作者简介:



翁 玲(1978—),女,河南信阳人,博士,副教授,博士生导师,2008年于河北工业大学获得博士学位,主要从事新型磁性材料与智能器件等方面的研究。E-mail:llweng@163.com



解观然(1995—),男,河北衡水人,硕士研究生,2017年在河北工业大学获得学士学位,主要从事磁性材料与器件的研究。E-mail:1072134770@qq.com

通讯作者:



黄文美(1969—),女,河北望都人,博士,教授,博士生导师,2005于河北工业大学获得博士学位,主要从事新型磁性材料与智能器件、电机控制等方面的研究。E-mail:huzwm@hebut.edu.cn