

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2007150

磁性液体触觉传感器的设计及特性研究*

谢 君¹, 鲁妍池¹, 刘宇童¹, 李紫豪¹, 李德才^{1,2}

(1. 北京交通大学机械电子与控制工程学院 北京 100044; 2. 清华大学摩擦学国家重点实验室 北京 100084)

摘 要:磁性液体兼具液体材料的流动性和固体材料的磁性,能够在重力场和磁场的作用下长期稳定存在。磁性液体具有独特的一阶浮力特性,在磁场梯度的作用下能够悬浮起比自身密度大的非磁性物体。基于磁性液体的一阶浮力特性,设计了一种新型的磁性液体触觉传感器。当接触压力作用在悬浮触棒的非磁性触点时,悬浮触棒的移动将引起霍尔元件处的磁场变化,进而输出电压信号。该结构能够进行接触压力、表面轮廓和微小位移的同时测量。该触觉传感器体积小,相比于传统的硅片式触觉传感装置成本更低。磁性液体相比于固体材料来说,能够在系统中起到缓冲吸能的作用,进而提高了传感器系统的耐冲击性。在0~0.09 N的接触压力测量范围内,测量精度能够达到 10^{-2} N量级,灵敏度3.34 V/N,线性度误差3.4%,迟滞误差1.4%,分辨率1.1% F.S.。

关键词:霍尔元件;磁性液体;触觉;传感器

中图分类号: TH113.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Design and characteristics research on the magnetic fluid tactile sensor

Xie Jun¹, Lu Yanchi¹, Liu Yutong¹, Li Zihao¹, Li Decai^{1,2}

(1. School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. State Key Laboratory of Tribology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Magnetic fluid has both the fluidity of liquid materials and the magnetism of solid materials, which can exist stably for a long time under the action of gravitational field and magnetic field. The unique first-order buoyancy principle of magnetic fluid makes it could suspend non-magnetic objects, whose density is higher than itself, under the action of magnetic field gradient. Based on the first-order buoyancy principle of magnetic fluid, a novel magnetic fluid tactile sensor is designed. When the contact pressure acts on the non-magnetic point of the suspended rod, the movement of the suspended rod will cause the change of magnetic field at the Hall element. Then, the output voltage signal will change accordingly. The structure can be used for simultaneous measurement of contact pressure, surface profile and micro displacement. Compared with the traditional silicon wafer, the tactile sensor has small size and low cost. In addition, the magnetic liquid can absorb energy in the system, which can help to improve the impact resistance of the sensor system. Within the contact pressure measurement range of 0~0.09 N, the measurement accuracy can reach in order of 10^{-2} N. The sensitivity is 3.34 V/N, the linearity error is 3.4%, the hysteresis error is 1.4%, and the resolution is 1.1% F.S.

Keywords: Hall element; magnetic fluid; tactile; sensor

0 引 言

磁性液体是一种人工合成的新型的功能材料,兼具液体材料的流动性和固体材料的磁性,作为唯一一种能

够在重力场和磁场作用下长期稳定存在的液体磁性材料,磁性液体在密封^[1]、传感^[2-3]、减振^[4]方面都得到了广泛的应用。

国内外学者利用磁性液体对磁场的响应特性在微压力^[5-7]、加速度^[8]、速度^[9]、倾角^[10-12]等领域的传感测量进

收稿日期:2020-12-24 Received Date: 2020-12-24

* 基金项目:中央高校基本科研业务费人才基金(2019RC036)、国防科技创新特区项目(18-163-21-TS-001-007-01)、国家自然科学基金重大科研仪器研制项目(51927810)资助

行了深入的研究。提出的 U 型管式和惯性质量块式的微压力传感器测量范围为 0~1 000 Pa,精度 1 Pa;基于磁性液体二阶浮力原理,提出的加速度传感器测量精度能够达到 0.1 m/s^2 ;基于磁性液体液滴的相对磁导率大于空气,提出的倾角传感器测量精度达到 0.01° 。随着在磁性液体应用方面的研究不断深入,磁性液体触觉传感器逐渐成为研究的热点。

触觉传感器的作用是通过触觉传感器与被测物体相接触或相互作用来完成对物体表面特征和物理性能的感知,是对物体的粗糙度、硬度、导热性、温度、湿度、锐利性、振动、触觉力、触觉压力等物理性能的综合反映^[13]。触觉传感器设计的最终目的是能够像人的皮肤一样,能够同时感受与物体是否接触,接触压力的大小,物体的三维形状,物体相对传感器表面是否滑动,滑动速度的大小以及物体的热学性能等多种指标^[14]。目前的触觉传感器主要包括压阻式、压电式、电容式、磁电式、光电式、机械式、超声式等 7 种不同的形式,敏感材料主要包括半导体材料、无机材料、金属材料、高分子材料和生物材料等^[15]。

国外学者对磁性液体触觉传感器也进行了初步的研究。Volkova 等^[16]基于霍尔元件和磁性液体对磁场的响应特性,提出了一种能够检测固体表面凹凸特性的触觉传感器,该传感器的触点在固体表面滑动,当固体表面的凹凸特性发生变化时,触点的倾斜角度发生变化,进而引起顺磁性质量块在磁性液体内的移动,从而改变霍尔元件处的磁场强度,进而输出电压信号。Ahmed 等^[13]基于磁性液体提出了一种穿戴式的磁性液体感应设备,该设备将磁性液体注入到软质硅胶管内,硅胶管内有铜线圈,随着磁场的变化,硅胶管内磁性液体的形状将会发生变化,进而引起硅胶管外形的变化,基于此原理,在内部有铜线圈的硅胶管内注入磁性液体后将其固定在人的手指或其他可弯曲部位,就能够通过检测硅胶管内铜线圈输出信号的变化,进而检测人体被测部位所弯曲的角度。Candiani 等^[17]基于微流控芯片技术,设计了一种基于磁性液体尖峰的剪切滑觉传感器,该传感器将磁性液体液滴封装在 PDMS 制成的芯片中,在磁场的作用下,磁性液体液滴在芯片内形成尖峰,当外界剪切作用时,磁性液体液滴的尖峰将发生偏移,进而输出电压信号。

以上基于磁性液体研究的触觉传感器基本上只能进行单一触觉量的测量,而触觉的感知实际是多元化的,目前的触觉传感器尚不能像人的皮肤一样能够感受多种物理信号,但是传感器的设计目标应是多维度的同时测量。目前触觉传感器正向着阵列化、三维化和柔顺化的方向发展,最终的目的就是同时实现多维度信号的同时测量。

本文将基于一阶浮力原理,利用磁性液体设计一种新型的触觉传感器,该传感器能够满足体积小,成本低的基本要求,同时该传感器能够进行接触压力、表面轮廓和微小位移的同时测量。该结构能够为将来磁性液体触觉传感器向阵列化方向发展提供重要的研究基础。

1 磁性液体触觉传感器的结构设计和工作原理

如图 1 所示为基于霍尔元件的磁性液体触觉传感器结构。铝块通过连杆与非磁性触点相连,充当敏感元件的永磁体位于非磁性触点的底部,此时铝块、连杆、非磁性触点和敏感元件永磁体共同构成一个整体,以下称为悬浮触棒。将一定量的磁性液体加入到非导磁性外壳中,然后将悬浮触棒放入磁性液体中,使得悬浮触棒的铝块完全浸没在磁性液体中,由于铝的密度($2.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$)远远大于磁性液体的密度($1.3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$),因此悬浮触棒将沉于非导磁性外壳的底部。然后将固定有霍尔元件的密封端盖固定在非导磁性外壳的顶部,密封端盖中心孔的直径大于连杆直径,小于连杆上定位轴肩的直径。最后将封装完成的外壳放置在回复力永磁体上,此时非导磁性铝块在回复力磁铁的磁场梯度作用下,在磁性液体中受到一阶浮力的作用,将悬浮于磁性液体中,当各部位尺寸确定后,在定位轴肩的作用下,悬浮触棒将位于固定的初始位置。初始位置的确定应保证作为敏感元件的永磁体的位移区间位于霍尔元件的近似线性区间,同时应保证铝块的位移区间位于回复力永磁体所提供的一阶浮力的线性区间。本文中忽略永磁体对浸入磁性液体中连杆的浮力作用。

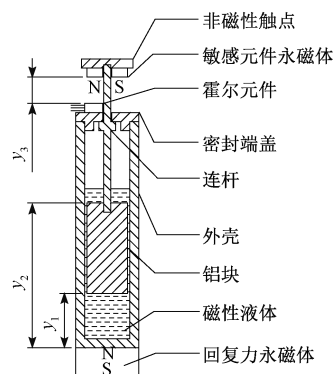


图 1 磁性液体触觉传感器结构

Fig. 1 The structure of the magnetic fluid tactile sensor

装配完成后的磁性液体触觉传感器模型如图 2 所示。本文中的非导磁性外壳采用透明亚克力材质,目的是方便观察铝块在磁性液体中的位置,保证在传感器的工作过程中,铝块始终完全浸没在磁性液体中。



图 2 磁性液体触觉传感器样机

Fig. 2 The prototype of the magnetic fluid tactile sensor

初始状态时,悬浮触棒整体在磁性液体一阶浮力的作用下,悬浮于非导磁性外壳的磁性液体中,连杆上的定位轴肩能够保证悬浮触棒的初始位置固定。各部件的尺寸参数如表 1 所示。

表 1 触觉传感器各部件尺寸参数

Table 1 Dimension parameters of each component of the tactile sensor

部件名称	材质	直径/mm	轴向长度/mm	质量/g
回复力永磁体	钕铁硼	40.0	10	94.2
铝块	铝	10.0	20	4.24
连杆	铝	1.5	37	0.18
敏感元件永磁体	钕铁硼	7.0	2	0.58
非导磁性外壳	亚克力	16.0	60	8.78

磁性液体触觉传感器封装完成后,图 1 中 $y_1 = 15 \text{ mm}$, $y_2 = 35 \text{ mm}$, $y_3 = 13 \text{ mm}$ 。初始状态时,铝块、连杆、非磁性触点和敏感元件永磁体共同构成的悬浮触棒在重力 mg 、一阶浮力 F 和密封端盖对轴肩的压力 F' 作用下保持平衡,力的平衡关系如式(1)所示。

$$F = F' + mg \quad (1)$$

当悬浮触棒的顶端受到接触压力 F_y 的作用时,当 $F_y \leq F'$ 时,悬浮触棒不发生移动,当 $F_y > F'$ 时,悬浮触棒将向下移动,当悬浮触棒的轴肩离开密封端盖后,悬浮触棒的受力关系变为:

$$F = F_y + mg \quad (2)$$

在接触压力 F_y 的作用下,悬浮触棒逐渐向下移动,移动过程中接触压力 F_y 逐渐增大,且由于悬浮触棒的铝块上下表面的磁场梯度逐渐增大,因此一阶浮力 F 也将逐渐增大,在悬浮触棒的移动过程中,始终保持式(2)的

受力平衡。

在悬浮触棒向下移动的过程中,接触压力 F_y 的增大将引起悬浮触棒整体向下发生位移 Δy ,此时作为敏感元件的永磁体与霍尔元件之间的距离减小,即 Δy 的变化将引起霍尔元件处的磁感应强度 B 发生变化,最终引起霍尔元件输出电压 U_H 发生变化,磁性液体触觉传感器的传感过程如下:

$$F_y \rightarrow \Delta y \rightarrow B \rightarrow U_H \quad (3)$$

由此可知,在磁性液体触觉传感器的结构设计和参数选择的过程中,为保证最初输入的触觉压力 F_y 与霍尔元件的输出电压 U_H 之间近似满足线性关系,应保证式(3)中的 3 个过程都近似线性。

在 $F_y \rightarrow \Delta y$ 的过程中,其线性度由回复力永磁体上端 20 mm 范围内的磁场梯度线性区间确定,在 $\Delta y \rightarrow B$ 的过程中,其线性度由霍尔元件对磁感应强度的线性区间确定,在 $B \rightarrow U_H$ 的过程中,由霍尔元件的输出特性确定。

在设计磁性液体触觉传感器的过程中,铝块的轴向长度取短,优点是悬浮触棒在竖直方向的许用位移越长,其上下两表面磁场梯度的线性区间越大,有利于调整悬浮触棒定位轴肩的位置和触觉传感器的线性输出;但是在传感器的整个工作过程中,由于悬浮触棒在磁场梯度的作用下,始终悬浮在磁性液体中,悬浮触棒的连杆与密封端盖之间存在间隙,悬浮触棒的铝块与外壳之间存在间隙,间隙的目的是保证悬浮触棒在竖直方向的运动顺畅,但间隙的存在使得悬浮触棒并不完全竖直,铝块的轴向长度越短,悬浮触棒与竖直方向的相对倾斜角越大,这将导致悬浮触棒的侧倾明显,实验结果的重复性和稳定性变差。因此本文通过实验确定了 20 mm 的铝块长度以及连杆上定位轴肩的位置。

本文中,理论方面将对磁性液体触觉传感器静态响应的工作过程进行深入的理论分析,实验方面将依据本节的结构设计和各部分的尺寸参数进行实验台的搭建和实验分析,着重探讨磁性液体触觉传感器的灵敏度、线性度、迟滞性等静态响应技术指标,并分析磁性液体的粘度和饱和磁化强度对其静态响应特性的影响。

2 磁性液体触觉传感器的理论分析

磁性液体的动力学伯努利方程可以通过其运动微分方程积分求得^[18]:

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = - \nabla p^* + \mu_0 M \nabla H + \eta \nabla^2 \mathbf{v} + \rho \mathbf{g} \quad (4)$$

式中: ρ 为磁性液体的密度; $\mathbf{v}$ 为速度矢量; p^* 为磁性液体中某一点的复合压力; μ_0 为真空磁导率; H 为某点的磁

场强度; η 为动力粘度系数; $\mathbf{g}$ 为重力加速度矢量。该方程来源于传统力学中广义的纳维尔-斯托克斯方程,由于磁场的存在以及磁性液体对磁场的响应特性,使得方程的右侧多出了磁场力项 $\mu_0 \mathbf{M} \nabla H$ 。

矢量恒等式方程为 $\nabla \mathbf{v} = \nabla (\nabla \cdot \mathbf{v}) - \nabla \times (\nabla \times \mathbf{v})$, 在该方程中, $\nabla \times \mathbf{v} = \boldsymbol{\Omega}$ 称为旋度。对于不可压缩流体, 有 $\nabla \cdot \mathbf{v} = -\nabla \times \boldsymbol{\Omega}$ 。如果流体为非粘性流体 ($\eta = 0$) 或者流动是无旋的 ($\boldsymbol{\Omega} = 0$), 这种情况下运动方程中的粘度项恒等于 0, 此时的方程为:

$$\rho (\partial \mathbf{v} / \partial t) + \rho \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} = -\nabla p + \mu_0 \mathbf{M} \nabla H + \rho \mathbf{g} \quad (5)$$

磁性液体中的铁磁性颗粒在表面活性剂的作用下均匀分散在基载液中, 因此磁性液体可以看做各处密度相同的材料, 其磁化强度仅取决于磁场强度 H 和温度 T , 因此:

$$\nabla \int_0^H M dH = M \nabla H + \int_0^H \frac{\partial M}{\partial T} \nabla T dH \quad (6)$$

$$\text{结合矢量恒等式 } \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} = \nabla \left(\frac{1}{2} \mathbf{v}^2 \right) - \mathbf{v} \times (\nabla \times \mathbf{v})$$

可得:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} - \rho \mathbf{v} \times \boldsymbol{\Omega} = -\nabla \left(p^* + \rho \frac{\mathbf{v}^2}{2} + \rho g h - \mu_0 \int_0^H M dH \right) - \int_0^H \left(\frac{\partial M}{\partial T} \right)_{H,v} (\nabla T)_{H,v} dH \quad (7)$$

由于传感器中的激励磁场为永磁产生, 因此为无旋磁场, 认为磁性液体不可压缩, 忽略磁性液体的磁滞, 且认为磁性液体的磁化强度和磁场强度平行, 在整个实验过程温度不发生变化的情况下, 可以得到:

$$\nabla \left(-\rho \partial \phi / \partial t + p^* + \frac{1}{2} \rho \mathbf{v}^2 + \rho g h - \mu_0 \overline{MH} \right) = 0 \quad (8)$$

式中: $\overline{M}$ 为平均磁感应强度, 定义为:

$$\overline{M} = \frac{1}{H} \int_0^H M dH \quad (9)$$

由此可得:

$$-\rho \frac{\partial \phi}{\partial t} + p^* + \frac{1}{2} \rho \mathbf{v}^2 - \mu_0 \overline{MH} = f(t) \quad (10)$$

式中: ϕ 为速度的势函数, 满足 $\mathbf{v} = -\nabla \phi$ 。式(10)是一个跟时间有关的磁性液体伯努利方程, 对于定常流动, 满足 $\partial \phi / \partial t = 0$ 和 $f(t) = \text{const}$, 因此广义的伯努利方程就能写作:

$$p^* + \frac{1}{2} \rho \mathbf{v}^2 + \rho g h - \mu_0 \overline{MH} = \text{const} \quad (11)$$

本文中铝块完全浸没在磁性液体中, 磁性液体的速度为零, 铝块上下表面之间存在磁场梯度, 由于本实验中永磁体的直径远大于铝块, 因此认为铝块上下表面处的磁场强度近似均匀。设下表面的磁场为 H_1 , 上表面的磁场为 H_2 , 由上面的伯努利方程可知:

$$p_1^* + \rho g h_1 - \mu_0 \int_0^{H_1} \overline{M} dH = p_2^* + \rho g h_2 - \mu_0 \int_0^{H_2} \overline{M} dH \quad (12)$$

两表面的压力差即为铝块在磁场作用下在磁性液体中受到的一阶浮力:

$$F = (p_1^* - p_2^*) A = \rho g (h_2 - h_1) A + (\mu_0 \int_{H_2}^{H_1} \overline{M} dH) A = \rho g V_0 + (\mu_0 \int_{H_2}^{H_1} \overline{M} dH) A \quad (13)$$

由式(13)可知, 当外界接触压力为 F_y 时的受力平衡关系为:

$$F_y + m g = \rho g V_0 + (\mu_0 \int_{H_2}^{H_1} \overline{M} dH) A \quad (14)$$

由于回复力永磁体外部的磁场强度 H 为非匀强场, 因此为了使得本文中所设计的磁性液体触觉传感器的输入输出满足线性关系, 应使得铝块位于回复力永磁体磁场强度 H 的近似线性区间, 通过调整连杆上的定位轴肩能够实现, 此时式(14)可以写作:

$$F_y = \rho g V_0 + \mu_0 M_s [H_1 (y_1 - \Delta y) - H_2 (y_2 - \Delta y)] A - m g \quad (15)$$

由此可知 F_y 与 Δy 之间满足线性关系, 当连杆在 y 方向移动时, 敏感元件永磁体与霍尔元件之间的距离 y_3 的变化量同样为 Δy 。

霍尔元件基于霍尔效应工作, 可用来测量位移、加速度、压力、电流转速和磁场等。当电流垂直于外磁场方向通过半导体薄片时, 电子在洛伦兹力的作用下运动, 导致电子和正电荷的在侧面的积累。进而薄片垂直于电流和磁场方向的两侧表面之间产生电位差, 通常称作霍尔电势, 其输出的电压信号与磁感应强度之间的关系可以表示为:

$$U_H = \frac{IB}{ned} = R_H \frac{IB}{d} = k_H IB (y_3 - \Delta y) \quad (16)$$

式中: R_H 是霍尔系数; I 是霍尔元件两端的电流, 称为控制电流或激励电流, 由此可知, 当霍尔元件工作在敏感元件永磁体的近似线性区间(可通过调整连杆外部的长度实现)时, 输出电压 U_H 与连杆位移 Δy 之间近似满足线性关系。综上, 在一定的区间范围内, 输入压力 F_y 与输出电压 U_H 之间近似满足线性关系。由此可根据所设计的结构进行参数设计, 保证磁性液体触觉传感器输出的线性度。

3 磁性液体触觉传感器的实验研究

根据前文的理论模型, 结合理论分析搭建的磁性液体触觉传感器实验台如图 3 所示。图 3 中数显测力计与滚珠升降丝杠相连, 数显测力计采用艾德堡 HP-1000, 量程范围可调, 可同步输出位移和接触压力的大小。本文中设置量程范围为 0~1 N, 测量精度为 0.001 N, 数显测

力计底部触点与磁性液体触觉传感器的非磁性触点接触,滚珠升降丝杠向下移动时将带动触觉传感器的悬浮触棒向下移动,进而实现外部激励的输入。直流电源采用启东达爱思 WD990,调整输出电压为 5 V,用来给霍尔元件供电,霍尔元件的输出端通过测量电路分成两路信号,一路信号与万用表相连,另一路信号与单通道热工表相连。万用表采用 Fluke287C,直流伏特档(VDC),精度为 0.001 V,用来显示霍尔元件的输出电压,单通道热工表采用 220 V 直流供电,输入电压 0~5 V,输出压力 0~2 N,用来将电压信号转换为输入的触觉压力值进行输出。磁性液体采用北京交通大学制磁性液体,本文中采用的 3 种磁性液体的参数如表 2 所示。



图3 磁性液体触觉传感器实验装置

Fig. 3 Experimental facility of magnetic fluid tactile sensor

表2 磁性液体型号及参数

Table 2 Types and parameters of magnetic fluid

组别	类型	代号	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) $\times 10^3$	粘度/(cP) (25 $^{\circ}\text{C}$)	饱和磁化 强度/Gs
1	酯基	MFZ	1.27	358.0	500 $\pm$ 20
2	煤油	MFK	1.48	24.4	450 $\pm$ 10
3	机油	MF01	1.23	102.0	450 $\pm$ 50

本文传感器的设计目标为量程 0~0.1 N,测量精度 0.01 N,实验过程应保证最大输入触觉压力值大于 0.1 N,且实验过程保证恒温,减小外界温度对传感器实验结果的影响。根据前面的理论分析,实验部分将分别研究 $F_y \rightarrow \Delta y$, $\Delta y \rightarrow U_H$ 以及全过程 $F_y \rightarrow U_H$ 的线性区间和其他静态响应特性指标。

初步搭建实验台后,首先采用第 1 组酯基磁性液体进行触觉传感器的封装后进行正反行程实验研究,得到的力和位移结果如图 4 所示。

由图 4 可知:首先,正行程过程中初始状态的起点处斜率明显小于后半段,这是由于初始状态悬浮触棒自身倾斜导致数显测力计的触点与触觉传感器悬浮触

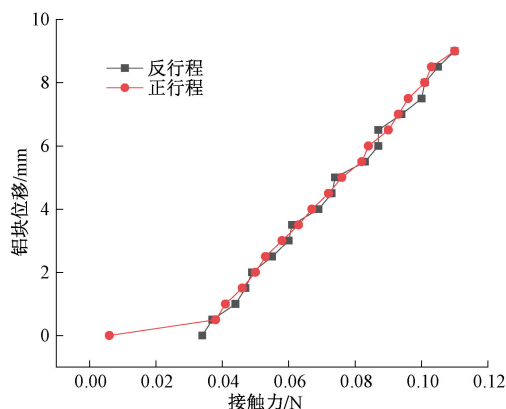
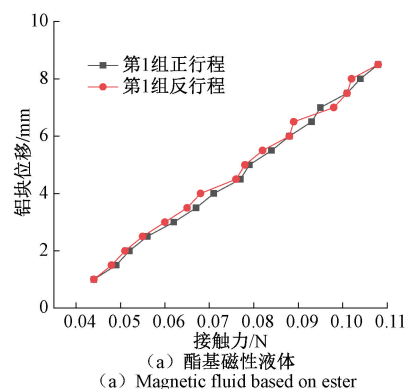


图4 第1组实验结果

Fig. 4 Experimental results of group 1

棒上方的非导磁性触点虚接触,导致两触点的接触位置存在误差,因此在后面的实验中,不再考虑初始的原点,而是在保证数显测力计的触点与触觉传感器触点紧密接触后再进行实验研究;其次,正反行程的输出值相互交错,这由两方面原因引起,一方面是由于连杆与密封端盖之间的摩擦,另一方面是悬浮触棒整体在悬浮过程中的倾斜导致铝块与壳体的壁面之间的摩擦,两部分的摩擦都会引起输出误差;此外,悬浮触棒在初始的移动过程中接触压力需要大于密封端盖对轴肩的压力 F' ,这样移动才能发生,轴肩的压力 F' 越小,初始接触压力的检测越灵敏,但是会使得永磁体提供一阶浮力的线性区间变差,因此综合以上原因,本文对上述结构进行改进,在连杆和密封端盖摩擦处加低粘度润滑油,同时增大铝块的直径和轴向长度,使得铝块和壁面之间的单边间隙为 1 mm,铝块的轴向长度为 20 mm,密封端盖对轴肩的初始压力 $F' = 0.025$ N,后文实验按此参数进行,即数显测力计的数值 > 0.025 N 后开始进行测量。

调整完成后,分别采用表 2 给出的 3 组磁性液体进行正反行程的实验研究,得到的接触力和铝块位移如图 5 所示。



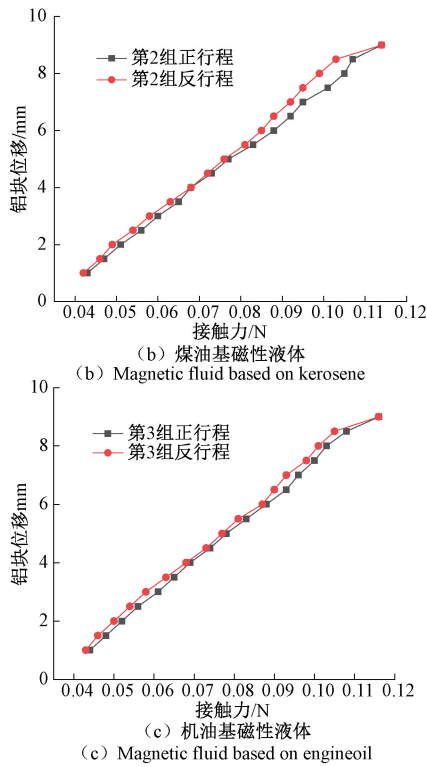


图 5 力和位移的关系

Fig. 5 Relationship between force and displacement

由图 5 可知,封装有第 1 组酯基磁性液体的触觉传感器在 0.04~0.11 N 的接触力输入的正反行程过程中,铝块的位移存在交叉,输出曲线不光滑,这是由于酯基磁性液体的粘度较大造成的。由于铝块和非导磁性壳体之间的单边间隙仅为 1 mm,而且在磁场的作用下磁性液体的剪切粘度变大,随着接触力的逐渐增大,铝块距离回复力磁铁的距离逐渐变小,磁场对磁性液体粘度的影响加剧,造成接触压力>0.09 N 后的正反行程输出数据交叉更加明显。封装有第 2 组煤油基磁性液体和第 3 组机油基磁性液体的触觉传感器在 0.09 N 范围内的测量过程中,接触压力和铝块位移之间显示出了较好的线性度和平滑特性,当测量值>0.09 N 后,一方面输出显示出轻微的灵敏度变化,另一方面正反行程出现了比较明显的迟滞特性。这是由于虽然煤油基和机油基磁性液体的粘度较低,但是随着铝块向下的位移正大,靠近永磁体处的磁性液体剪切粘度在大磁场强度的作用下出现明显增大,由牛顿内摩擦定律可知,粘度的增大将使得磁性液体与铝块和壁面之间的摩擦力增大,将影响触觉传感器的输出和测量。由式(13)可知,充当悬浮磁棒回复力的一阶浮力相比于阿基米德浮力多出了磁场力项,即 $(\mu_0 \int_{n_2}^{n_1} \vec{M} dH)A$, 该项非线性,可通过实验确定回复力永磁体提供回复力的线性区间。下面通过实验研究悬浮磁

棒的位移和输出电压之间的线性关系。

由图 6 可知,对于封装有酯基、煤油基、机油基磁性液体的触觉传感器,铝块位移 Δy 与输出电压 U_H 之间的输入输出关系展示出了良好的稳定性。本实验中霍尔元件采用直流 5 V 激励电压,有霍尔元件的特性可知,输出电压初值(无磁场作用时)为 2.5 V,当悬浮磁棒发生位移后,作为敏感元件的永磁体与霍尔元件之间的距离变小,此时霍尔元件处的磁感应强度 B 增大,进而霍尔元件的输出电压增大,该过程的静态特性与霍尔元件本身的特性有关,与磁性液体粘度和饱和磁化强度无关,实验结果与理论分析一致。此外,在铝块位移的全量程范围内,随着霍尔元件与敏感元件永磁体之间的距离逐渐减小,根据永磁体外部的磁感应强度特性可知,其外部的磁感应强度 B 并不线性,根据实验结果可知,在 0~6 mm 的位移范围内,磁感应强度 B 可以

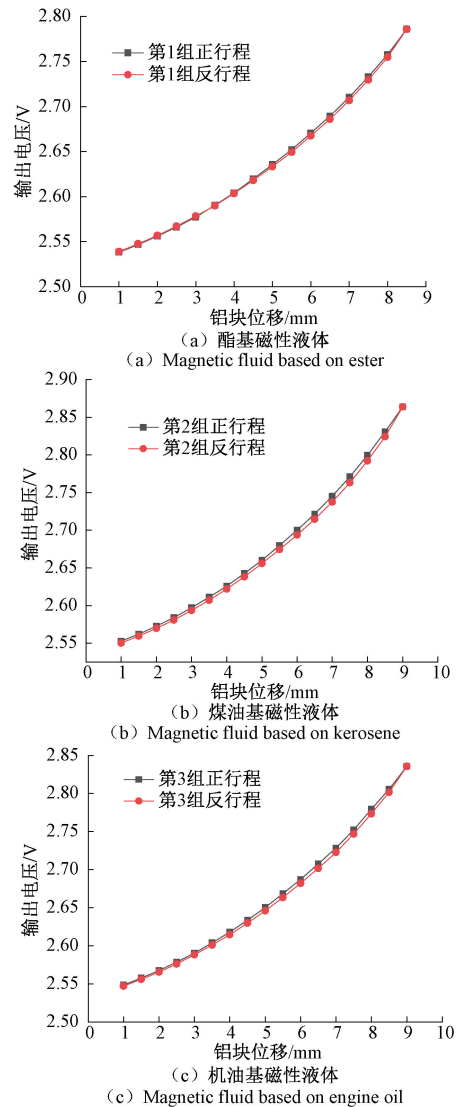


图 6 位移和输出电压的关系

Fig. 6 Relationship between displacement and output voltage

认为是近似线性的,随着位移的逐渐增大,斜率逐渐增大,线性度变差。

最后进行全量程范围内接触力和输出电压的实验研究,实验结果如图7所示。由图7可知,封装有酯基磁性液体的触觉传感器在全量程范围内波动明显,但是迟滞特性不明显,这是由于酯基磁性液体的粘度较大,在大磁场强度的作用下,磁性液体与铝块之间的牛顿内摩擦力和磁性液体对铝块的一阶浮力作用明显,这样铝块在磁性液体内部的不稳定性增大,因此实验数据稳定性较差。封装有煤油基磁性液体和机油基磁性液体的触觉传感器在0~0.09 N的测量范围内,线性度和迟滞特性良好,下面取0~0.09 N输入接触压力的相关实验数据做线性拟合,如图8所示。

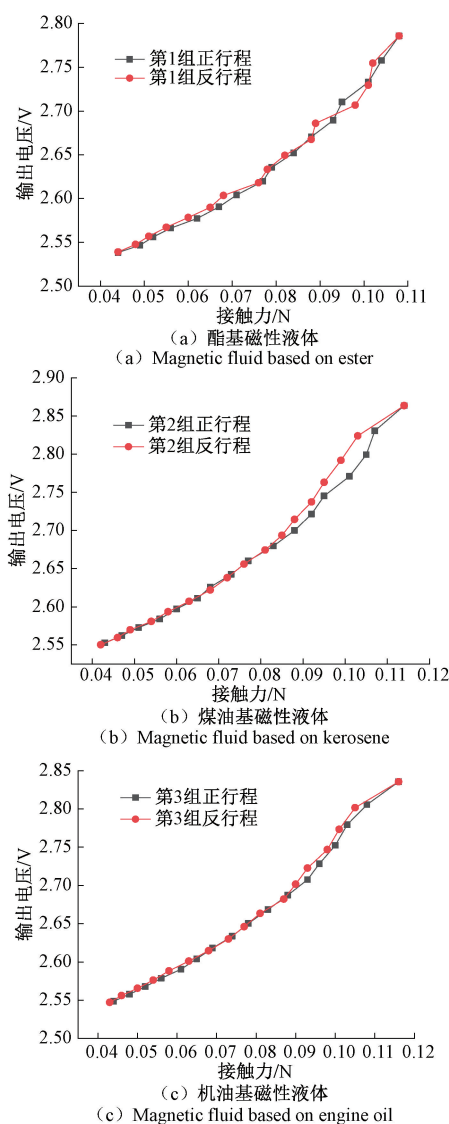


图7 力和输出电压之间关系

Fig. 7 Relationship between force and output voltage

由图8可知,酯基磁性液体在0~0.09 N的输入接触

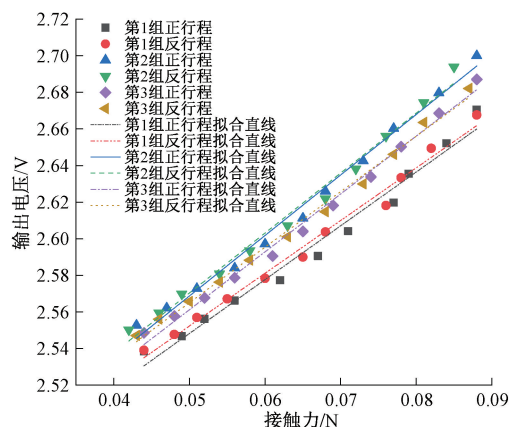


图8 直线拟合对比

Fig. 8 Comparison between fitting lines

压力范围内,输出数据线性度较差,迟滞较大,封装有煤油基和机油基磁性液体的触觉传感器输出电压稳定且线性度较好,封装有煤油基磁性液体的触觉传感器灵敏度大于封装有机油基磁性液体的触觉传感器,这是由于二者虽然饱和磁化强度接近,但是煤油基磁性液体的粘度明显小于机油基磁性液体,因此灵敏度较高。对封装有煤油基磁性液体的触觉传感器进行迟滞特性研究,结果如图9所示。

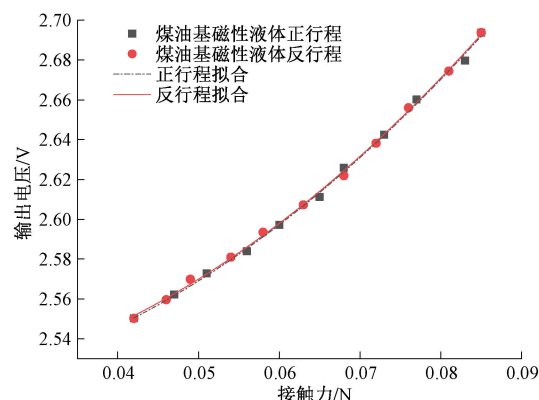


图9 煤油基磁性液体触觉传感器迟滞特性

Fig. 9 The hysteresis characteristic of the tactile sensor based on MFK

通过数据分析可知,煤油基磁性液体触觉传感器的精度为0.01 N,由于密封端盖与定位轴肩的初始压力,触觉传感器在零点位置的阈值为0.025 N,当外界接触压力超过阈值后,触觉传感器进入正常的工作区间,触觉压力的测量范围为0.025~0.09 N,在量程范围内电压输出值的变化范围 ΔU_H 为0.143 6 V,正反行程输出电压的最大迟滞值为0.002 V,线性拟合过程的最大输出偏移量为0.005 V,由此通过计算可得封装有煤油基磁性液体的触觉传感器静态指标如表3所示。

表 3 煤油基磁性液体触觉传感器静态指标
Table 3 Static index of magnetic fluid tactile sensor
based on MFK

参数	指标
拟合直线方程	$U_H = 3.34F_y + 2.4$
精度	0.01 N
灵敏度	3.34 V/N
线性度	3.4%
迟滞	1.4%
分辨率	1.1% F.S.

以上基于酯基、煤油基和机油基 3 种粘度不同的磁性液体,通过实验研究,得到了磁性液体触觉传感器在包括 $F_y \rightarrow \Delta y \rightarrow B \rightarrow U_H$ 在内整个测量过程的实验结果,根据目前的结构模型和尺寸参数,传感器的测量精度能够达到 0.01 N,分辨率为 0.001 N,当传感器进入工作区间后,对 0.001 N 的接触外力能够输出 3mV 的输出电压。

在本文的理论分析中,忽略了磁粘效应对磁性液体触觉传感器输出特性的影响,实验结果表明,对于磁性液体触觉传感器的静态测量过程来说,磁粘效应只在粘度较大的酯基磁性液体中表现明显,对于粘度较低的煤油基和机油基磁性液体触觉传感器的输出特性影响并不显著。本文中触觉传感器在初始阶段的阈值为 0.025 N,应在今后的研究中应通过调整长径比等方式进一步进行结构优化。

4 结 论

本文基于磁性液体的一阶浮力原理提出了一种磁性液体触觉传感器的结构模型,对其工作原理进行了深入的理论分析,并搭实验台进行实验验证。得出如下结论:

1) 本文提出的磁性液体触觉传感器体积小,成本低。在 0~0.09 N 的接触压力测量范围内,测量精度为 0.01 N,灵敏度 3.34 V/N,线性度误差 3.4%,迟滞误差 1.4%,分辨率 1.1% F.S.。

2) 与传统刚性结构的硅片式触觉传感器相比,磁性液体触觉传感器在传感过程中所有的冲击振动都能够被磁性液体吸收,磁性液体在传感过程中起到了缓冲吸能的作用,极大增强了传感器的耐冲击性和鲁棒性。

3) 当接触压力施加于磁性液体触觉传感器的非磁性触点后,悬浮触棒能够产生位移,这使得磁性液体触觉传感器能够同时测量单点的接触压力和复杂表面的形状轮廓,应用范围更广。

下一步将根据本文中的磁性液体触觉传感器结构进一步优化,并将该结构作为阵列式触觉传感结构的一个

传感单元设计阵列式传感结构,以期能够同时完成简单接触、力的大小、三维形状、表面滑移等多维度的同时传感和测量。

参考文献

- [1] ODENBACH S. Recent progress in magnetic fluid research[J]. Journal of Physics: Condensed Matter, 2004, 16(32): R1135-R1150.
- [2] SABATA I D, POPA N C, POTENCZ I, et al. Inductive transducers with magnetic fluids[J]. Sensors and Actuators A Physical, 1992, 32(1-3): 678-681.
- [3] 谢君,李德才,邢延思. 新型磁性液体微压差传感器的设计及耐压分析[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(9): 2005-2012.
XIE J, LI D C, XING Y S. Design of a novel magnetic fluid micro-pressure difference sensor and analysis of its anti-pressure capability[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(9): 2005-2012.
- [4] 杨晓锐,杨庆新,郭兵,等. 活塞式磁性液体减振器的阻尼分析和实验研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(8): 2071-2077.
YANG X R, YANG Q X, GUO B, et al. Damping analysis and experiment research of piston magnetic liquid damper[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(8): 2071-2077.
- [5] XIE J, LI D, XING Y. The theoretical and experimental investigation on the vertical magnetic fluid pressure sensor[J]. Sensors & Actuators A Physical, 2015, 229: 42-49.
- [6] XIE J, LI D, XING Y. Parameters optimization of magnetic fluid micro-pressure sensor[J]. Sensors & Actuators A Physical, 2015, 235: 194-202.
- [7] 谢君,李德才,朱锐棋. 霍尔式磁性液体微压差传感器的设计及特性研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(6): 27-34.
XIE J, LI D C, ZHU R Q. Design and characteristic research on the magnetic fluid micro-pressure difference sensor based on Hall elements[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(6): 27-34.
- [8] 钱乐平,李德才. 新型磁性液体惯性传感器的理论与实验研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(3): 507-514.
QIAN L P, LI D C. Theoretical and experimental study of a novel magnetic fluid inertial sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(3): 507-514.
- [9] YAO J, LI D. Research on the linearity of a magnetic fluid micro-pressure sensor[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2015, 229: 36-41.
- [10] 孙明礼,崔海蓉,汪彬,等. 磁性液体倾斜角传感器

的有限元耦合分析[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(2): 369-374.

SUN M L, CUI H R, WANG B, et al. Coupled FEM analysis of tilt measurement sensor with magnetic fluid[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(2): 369-374.

[11] ANDO B, ASCIA A, BAGLIO S, et al. A novel ferrofluidic inclinometer [J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2007, 56 (4): 1114-1123.

[12] OLARU R, DRAGOI D. Inductive tilt sensor with magnets and magnetic fluid[J]. Sensors and actuators A: Physical, 2005, 120(2): 424-428.

[13] AHMED A, HASSAN I, MOSA I M, et al. An ultra-shapeable, smart sensing platform based on a multimodal ferrofluid-infused surface [J]. Advanced Materials, 2019, 31(11):180-201.

[14] AHMED A, MOHAMMED K, SUSANA C, et al. A magnetoresistive tactile sensor for harsh environment applications[J]. Sensors, 2016, 16(5):650-659.

[15] NAGAHAMA S, MIGITA K, SUGANO S. Soft magnetic powdery sensor for tactile sensing[J]. Sensors, 2019, 19(12): 2677-2689.

[16] VOLKOVA T I, BÖHM V, NALETOVA V A, et al. A ferrofluid based artificial tactile sensor with magnetic field control [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2017, 431: 277-280.

[17] CANDIANI A, KONASTANTAKI M, PAMVOUXOGLOU A, et al. A shear sensing pad, based on ferrofluidic actuation in a microstructured optical fiber [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2017, 23(2):1-7.

[18] ROSENSWEIG R E. Ferrohydrodynamics [M]. Massachusetts: Courier Corporation, 2013: 124-160.

作者简介



谢君, 2010 年于北京交通大学获得学士学位, 2017 年于北京交通大学获得博士学位, 现为北京交通大学讲师, 主要研究方向为磁性液体的理论及应用。

E-mail: xiejun@bjtu.edu.cn

Xie Jun received his B.Sc. degree from

Beijing Jiaotong University in 2010, and received his Ph.D. degree from Beijing Jiaotong University in 2017. He is currently a lecturer at Beijing Jiaotong University. His main research interests include theoretical and application study of magnetic fluid.



鲁妍池, 北京交通大学 2018 级本科生在读, 主修专业为测控技术与仪器。

E-mail: 18221039@bjtu.edu.cn

Lu Yanchi is pursuing her B.Sc. degree at Beijing Jiaotong University from 2018. Her major is measurement and control technology

and instrument.



刘宇童, 北京交通大学 2018 级本科生在读, 主修专业为测控技术与仪器。

E-mail: 18221287@bjtu.edu.cn

Liu Yutong is pursuing his B.Sc. degree at Beijing Jiaotong University from 2018. His major is measurement and control technology

and instrument.



李紫豪, 北京交通大学 2018 级本科生在读, 主修专业为测控技术与仪器。

E-mail: 18221285@bjtu.edu.cn

Li Zihao is pursuing his B.Sc. degree at Beijing Jiaotong University from 2018. His major is measurement and control technology

and instrument.



李德才 (通信作者), 1992 年于北京航空航天大学获得硕士学位, 1996 年于北京交通大学获得博士学位, 现为清华大学长聘教授, 北京交通大学教授, 主要研究方向为机电液磁一体化。

E-mail: dcli@bjtu.edu.cn

Li Decai (Corresponding author) received his M.Sc. degree from Beijing University of Aeronautics and Astronautics in 1992, and received his Ph.D. degree from Beijing Jiaotong University in 1996. He is currently a tenure-track professor at Tsinghua University, and also a professor at Beijing Jiaotong University. His main research interests include mechanical, electronic, hydrodynamic & magnetism integration.