

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.202006

霍尔式磁性液体微压差传感器的设计及特性研究^{*}

谢 君,李德才,朱锐棋

(北京交通大学机械电子与控制工程学院 北京 100044)

摘 要:磁性液体作为一种重要的功能材料,在传感器领域的应用日渐广泛。本文基于霍尔元件设计了一种霍尔式磁性液体微压差传感器,该传感器以透明玻璃管为载体,内部圆柱状永久磁铁的端部吸附有磁性液体,磁性液体形成环状起到润滑和密封的作用,使得永久磁铁在竖直方向运动时的摩擦发生在固体和液体之间,底部磁环用来提供回复力,转换元件采用霍尔元件。当永久磁铁在透明玻璃管内移动时,霍尔元件处的磁场发生变化,进而系统输出电压信号。最终优化后的传感器直径 10 mm,长度 80 mm,当采用 3 mm 磁环和 50 mm 永久磁铁组合时,在 0~1 000 Pa 的测量范围内,测量精度为 1 Pa,线性度误差 5.8%,迟滞误差 5.3%,重复性误差 2.9%,该传感器体积小、成本低,具有很强的实用价值。

关键词:霍尔元件;磁性液体;微压差;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 characteristic research on the magnetic fluid micro-pressure difference sensor based on Hall elements

Xie Jun, Li Decai, Zhu Ruiqi

(School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: As an important functional material, magnetic fluid has been widely used in the sensor field. An innovative magnetic fluid micro-pressure difference sensor is designed based on Hall elements. Magnetic fluid is absorbed at the end of the cylindrical permanent magnet placed in the middle of transparent glass tube. In this way, circular rings are formed, which can be used to lubricate, seal and make the friction happen between solid and liquid. The ring permanent magnet fixed on the bottom of the transparent glass tube is utilized to provide restoring force. When the permanent moves in the tube, the magnetic field of the Hall elements that acts as a transformation component will change with the displacements. Then, the voltage signals of the system are output. Finally, the optimized sensor has a diameter of 10 mm and a length of 80 mm. When it is combined with a 3 mm magnetic ring and a 50 mm permanent magnet, the measurement accuracy is 1 Pa within the measurement range of 0~1 000 Pa. The linearity error is 5.8%, the hysteresis error is 5.3%, and the repeatability error is 2.9%. The sensor is small in size and low in cost, which shows a strong practical value.

Keywords: Hall elements; magnetic fluid; micro-pressure difference; sensor

0 引 言

磁性液体(又称磁流体)是一种新型的人工制备的液体磁性纳米材料,是将纳米量级的铁磁性固体颗粒(如纳米四氧化三铁颗粒)均匀分散在基载液中形成的一种高稳定性的胶体溶液^[1]。铁磁性固体颗粒被表面活性剂均匀包裹,由于表面活性剂的作用,使得铁磁性颗粒彼此

分离而不发生团聚,最终使得该胶体溶液在磁场、电场和重力场作用下能够稳定地存在^[2]。通过理论推导可知磁性液体内部磁性颗粒每年的沉降约为 1 mm,基本可以忽略不计。且磁性液体属于超顺磁性物质(无剩磁和矫顽力),是目前已知的人工合成的唯一一种能够长期稳定存在的兼具流动性和磁性的液体,因此磁性液体作为一种新型功能材料广泛应用于传感测量领域^[2]。磁性液体在传感方面的主要应用包括倾角传感器^[3-9]等。

收稿日期:2020-04-20 Received Date: 2020-04-20

^{*} 基金项目:中央高校基本科研业务费人才基金(2019RC036)项目资助

U 型管式磁性液体微压差传感器是在玻璃管的两臂上对称、均匀缠绕感应铜线圈,缠绕后应保证两臂缠绕线圈的匝数和电感完全相同。缠绕完成后在 U 型玻璃管内注入磁性液体,根据连通器原理,当 U 型管竖直放置时,若无压差作用,即 U 型玻璃管两端的大气压强满足 $P_1 = P_2$,则 U 型玻璃管两臂中的液面相平,此时左、右两臂线圈的电感初始值满足(磁芯为磁性液体) $L_1 = L_2$,当 U 型玻璃管一侧压强 P_1 增大,另一侧压强 P_2 不变时,就会产生压强差 $\Delta P = P_1 - P_2$ 。此时 U 型玻璃管两臂中的磁性液体会产生液面高度差 Δh ,由于磁性液体的磁导率大于空气,因此磁性液体在 U 型玻璃管中的位置变化会引起感应线圈中磁性液体长度的变化,进而引起两臂感应线圈电感的变化,从而导致两臂感应线圈的电感产生差值 $\Delta L = L_1 - L_2$,在预先设定的测量范围内,通过理论推导和实验分析证明了两臂感应线圈的电感差 ΔL 与外界大气压差 ΔP 满足线性关系^[9]。该传感器测量精度在 10 Pa 量级,线性度大于 10%,由于磁粘效应,迟滞和重复性误差均大于 10%,其长度约为 100 mm,高度约为 200 mm,单个传感器使用的磁性液体约为 30 mL,因此体积较大,需要注入的磁性液体量较多,成本较高,国内外学者基于此提出了电感式^[10-12]和电容式^[13]磁性液体微压差传感器,一定程度上降低了磁性液体的使用量,但是电感式传感器线圈尺寸较大,重复性较差,电容式传感器成本较高,迟滞特性差。近年来,国外学者对于磁性液体液滴应用于传感器系统也进行了初步研究^[14-15],但由于液滴体积小/质量轻,其行为受其他因素干扰较大,基于此,国外学者对液滴行为的控制也进行了初步的研究和分析^[16]。主要集中在液滴的产生、分裂和融合等方面,基于 T 型通道、Y 型通道和十字连接通道深入探讨了液滴在产生和分裂过程中的影响因素,并对液滴在重力场、电场、磁场、外部激励等作用下的融合进行了初步的探讨。

为解决上述问题,本文设计了一种霍尔式磁性液体微压差传感器,该传感器主体结构为 10 mm 直径,80 mm 长的透明玻璃管,单个传感器的磁性液体用量小于 0.5 mL,具有良好的静态压差响应特性,本文还对其进行了详细的参数选择、结构优化和实验研究。

1 霍尔式磁性液体微压差传感器的结构设计和工作原理

本文基于霍尔元件提出了一种霍尔式磁性液体微压差传感器的结构模型,如图 1 所示。将两端吸附有磁性液体的圆柱形永久磁铁放入底部固定有回复力磁环的透明玻璃管中,应保证圆柱形永久磁铁与回复力磁环同名端相对,然后将霍尔元件固定在透明玻璃管的顶部。吸附在圆柱形永久磁铁上的磁性液体形成磁性液体环,能

够在圆柱形永久磁铁和透明玻璃管中间起到润滑和密封的作用。

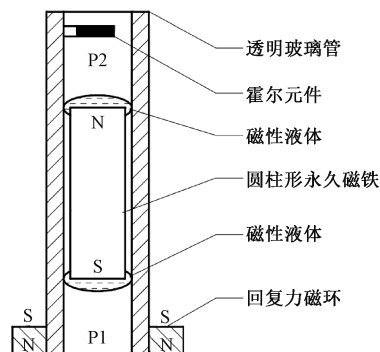


图 1 霍尔式磁性液体微压差传感器结构

Fig. 1 The structure diagram of the magnetic fluid micro-pressure sensor based on Hall elements

初始状态时,圆柱形永久磁铁在自身重力和回复力磁环回复力的作用下,位于透明玻璃管中的平衡位置,此时圆柱形永久磁铁上部的压力 P_2 和下部的压力 P_1 都等于大气压,霍尔元件处的磁场强度为初始磁场强度,此时霍尔元件输出的电压信号记为 0。当透明玻璃管下方的压力 P_1 增大时,圆柱形永久磁铁和回复力磁环之间的受力平衡被破坏,圆柱形永久磁铁和磁性液体密封环在压力差的作用下将向上移动,此时圆柱形永久磁铁的顶部和霍尔元件之间的距离将减小,霍尔元件处的磁场强度将增大,霍尔元件通过测量电路输出的电压信号将随之增大。

分析可知圆柱形永久磁铁的受力公式:

$$F_M + \Delta PA = mg \quad (1)$$

式中: F_M 为圆柱形永久磁铁与回复力磁环之间的磁场力; ΔP 为 P_1 和 P_2 的压强差; A 为透明玻璃管内截面积; mg 为圆柱形永久磁铁的重力; 由于磁性液体约为 0.1 mL,因此磁性液体的重力忽略不计。根据此前磁性液体传感器的研究成果^[10-12],为研究方便可将永久磁铁之间的磁场力视为分段线性,因此假设在某一区间内磁场力满足线性关系,即 $F_M = k_1 \Delta x$, 则式(1)可以写作:

$$k_1 \Delta x + \Delta PA = mg \quad (2)$$

式中: 压强差 ΔP 与位移 Δx 满足线性关系,由霍尔元件的特性可知, Δx 与霍尔元件处的场强度 H 并不满足线性关系,因此还需要找到霍尔元件工作时的线性区间。由测量电路可知磁场强度 H 与输出电压 ΔU 满足线性关系,即:

$$\Delta U = k \Delta P \quad (3)$$

因此,该传感器系统需要通过仿真和实验分析找到圆柱形永久磁铁与回复力磁环之间回复力的最佳线性区间。

取轴向长度 30 mm,直径 7 mm 的圆柱形永久磁铁与 2 mm 厚的环形磁铁进行磁场力的仿真分析和实验研究,结果如图 2 所示,可知实验结果和仿真分析是吻合的,但是由于仿真数据不够平滑,因此以实验数据作为参考,进一步进行研究。

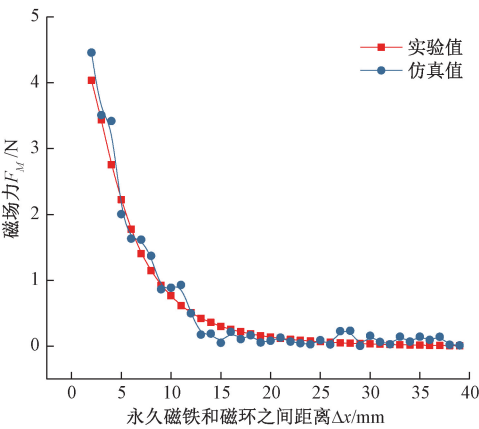


图 2 永久磁铁和磁环之间回复力仿真与实验研究
Fig. 2 Simulation and experimental research on the restoring force between the permanent magnet and the ring magnet

由图 2 可知,在全位移范围内,圆柱形永久磁铁与环形磁铁之间的磁场力并不满足线性关系,但是可看作是分段线性的(不同磁铁的线性区间不同,需根据所选择的磁铁单独测量确定其线性区间),因此要根据霍尔式磁性液体微压差传感器的量程范围找到合适的线性区间。

图 3 所示给出了 3 组永久磁铁与磁环之间回复力的实验数据,从图 3 中可以看出在永久磁铁与回复力磁环距离 5 mm 左右时,磁场力出现了尖峰,这是由于回复力磁环厚度较小,N 极和 S 极的磁感线都会对圆柱形永久磁铁受到的磁场力产生影响,在选择适用于霍尔式磁性液体微压差传感器的线性区间时,应避免磁场力的尖峰。

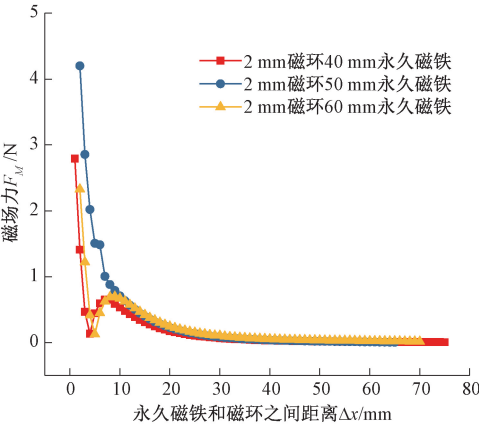


图 3 永久磁铁和磁环之间回复力的实验研究
Fig. 3 Experimental research on the restoring force between the permanent magnet and the ring magnet

实验过程中采用的永久磁铁的尺寸参数、磁场力的线性区间等如表 1 所示。

表 1 不同尺寸永久磁铁磁场力线性区间
Table 1 Linear range of magnetic force of permanent magnets with different sizes

磁环 /mm	圆柱形永久 磁铁/mm	线性区间 /mm	磁场力范围 /N	永久磁铁 重力/N
2	40	8~18	0.649~0.218	0.106
		19~30	0.196~0.068	
	50	6~18	1.005~0.254	0.132 5
		19~28	0.227~0.093	
	60	9~18	0.671~0.274	0.159
		20~35	0.223~0.094	

永久磁铁间的线性区间得到后,需要进一步确定霍尔元件工作的线性区间,本文采用的霍尔元件型号为 SS49E,属于通用型霍尔元件,由于霍尔元件在工作过程中,所测量的并不是某一个固定点的磁场强度,而是霍尔元件表面的平均磁场强度。因此,取 40、50 和 60 mm 的永久磁铁分别进行实验研究,实验结果如图 4 所示。

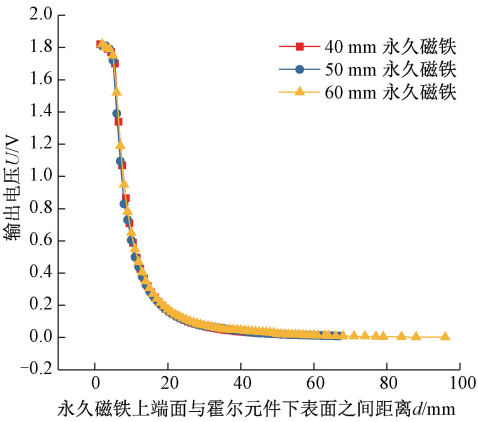


图 4 霍尔元件输出特性
Fig. 4 Output characteristics of Hall elements

由图 4 可知,针对不同尺寸的永久磁铁,霍尔元件的输出特性差异不大,且霍尔元件的输出特性也可看做是分段线性的,对图 4 中的数据进行处理,如表 2 所示。

由表 2 可知,永久磁铁顶端与霍尔元件之间的距离可以按照 5~10 mm 和 10~15 mm 两段进行近似线性分析,后文实验设计将依据此处的实验数据进行。

此外,磁性液体微压差传感器的量程与磁性液体环的密封耐压能力密切相关,磁性液体微压差传感器的量程范围应小于磁性液体环的密封耐压值,这样才能满足长期测量的需求,因此对磁性液体环的密封耐压能力的理论分析尤为重要。

表 2 霍尔元件磁场强度的线性区间

Table 2 Linear range of magnetic field of Hall elements

圆柱形 永久磁铁/mm	线性 区间/mm	输出 电压/V	线性区间 斜率/V/mm
40	5~10	1.7~0.588	0.222 4
	10~15	0.588~0.279	0.061 8
50	10~15	0.604~0.287	0.063 4
60	5~10	1.75~0.65	0.22
	10~15	0.65~0.307	0.068 6

本文中,理论方面将对传感器的耐压性能和霍尔元件的工作原理进行说明,实验方面将依据本节内容进行结构设计,并探讨霍尔式磁性液体微压差传感器的灵敏度、线性度、迟滞和重复性等技术指标,给出优化尺寸。

2 霍尔式磁性液体微压差传感器的理论分析

磁性液体在霍尔式磁性液体微压差传感器中起到润滑和密封的作用,其运动微分方程可以写作^[14]:

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

式中: $\mathbf{v}$ 为磁性液体的速度矢量; p^* 为磁性液体内部任意一点的复合压力; μ_0 为真空磁导率; η 为磁性液体的动力粘度系数。可以利用磁性液体表面的边界条件^[15]来确定磁性液体密封环的耐压值,其张量关系如下:

$$\mathbf{n} \cdot (\mathbf{T}'_{m,2} - \mathbf{T}'_{m,1}) - n2h\sigma = 0 \quad (5)$$

$$\mathbf{T}'_{m,1} = -(p_1^* + \frac{1}{2}\mu_0 H_1^2)\mathbf{I} + \mathbf{B}_1 \mathbf{H}_1 \quad (6)$$

$$\mathbf{T}'_{m,2} = -(p_0^* + \frac{1}{2}\mu_0 H_2^2)\mathbf{I} + \mathbf{B}_2 \mathbf{H}_2 \quad (7)$$

式中: $\mathbf{n}$ 为法向方向的单位向量; σ 为磁性液体沿着法线方向单位长度表面张力; $\mathbf{T}'_{m,1}$ 为分界面处磁性液体一侧的应力张量; $\mathbf{T}'_{m,2}$ 为分界面处空气一侧的应力张量; h 为空气和磁性液体分界面曲率半径的算术平均值; p_1^* 为分界面磁性液体侧的复合压力; p_0^* 为分界面空气一侧的复合压力。分界面上应满足磁场强度的切向分量相等,磁感应强度的法向分量相等,可以写作^[13]:

$$H_{1t} = H_{2t} \quad (8)$$

$$B_{1n} = B_{2n} \quad (9)$$

将分界面的基本条件带入上面公式(5)~(7)进行张量计算,即可得出磁性液体密封环处边界条件^[15]:

$$P_1^* + P_n = P_{0,2} + P_c \quad (10)$$

式中: P_n 表示分界面法向压力; $P_{0,2}$ 表示大气侧压力。磁

性液体与普通液体相比,内部的压力还包括磁致伸缩压力和磁压力,因此能够得出最终的边界条件如下:

$$P_3^* = P_4, P_2^* = P_1$$

在理论推导的过程中,忽略了磁性液体密封环在密封间隙内受到的挤压,只将磁场梯度纳入影响磁性液体密封环的耐压因素进行考虑,经过推导计算可得磁性液体密封环的耐压公式:

$$\Delta P = P_4 - P_1 = \mu_0 \int_{H_1}^{H_2} M dH = \mu_0 M \Delta H \quad (11)$$

霍尔元件是基于霍尔效应工作的,可用来测量位移、转速、加速度、压力、电流和磁场等。由于霍尔式传感器结构简单,体积小,频率响应宽,动态范围大,使用寿命长,可靠性高,因此得到广泛的应用。

霍尔效应是指当电流垂直于外磁场方向通过半导体或半导体薄片时,在薄片垂直于电流和磁场方向的两侧表面之间产生电位差的现象。所产生的电位差称作霍尔电势,它是由于运动载流子受到磁场作用力即洛伦兹力 F_L , 在薄片两侧分别形成电子和正电荷的积累导致的。

霍尔元件输出的电压信号与磁感应强度之间的关系可以表示为:

$$U_H = \frac{IB}{ned} = R_H \frac{IB}{d} = k_H IB \quad (12)$$

式中: R_H 为霍尔系数; I 为加载在霍尔元件两端的电流,成为控制电流。由此可根据所涉及的结构进行霍尔元件的控制参数设计,保证霍尔式磁性液体微压差传感器的高灵敏度。

3 霍尔式磁性液体微压差传感器的实验研究

针对提出的霍尔式磁性液体微压差传感器结构模型搭建的实验台如图 5 所示。图 5 中电源用来给霍尔元件供电,升降丝杠用来调节传感器各部位之间的初始位置,电压表通过测量电路与霍尔元件相连,用来输出电压信号,霍尔元件位于传感器的上方,气源为微压发生器,气源与传感器样机底部相连用来提供稳定的静态气压,微压表通过三通接头与气源相连,同来测量输入气压的大小。微压差发生器为江苏伟业仪表有限公司生产,型号为 WY-YFQ2,压力范围为 -95~600 kPa,微压表量程范围为 ± 5 kPa,最小分辨率为 1 Pa,电源为直流微机电源,由启东达爱思集团生产,型号为 WD990,万用表采用 Fluke287C,在直流伏特档(VDC),精度为 0.001 mV,磁性液体采用北京交通大学制机油基磁性液体,型号为 MF01,饱和磁化强度 470 Gs,满足霍尔式磁性液体微压差传感器对磁性液体密封环耐压性能的要求。

本文传感器的设计目标为量程 0~1 000 Pa,测量精度 1 Pa,实验过程应保证最大测量值大于 1 000 Pa,且实

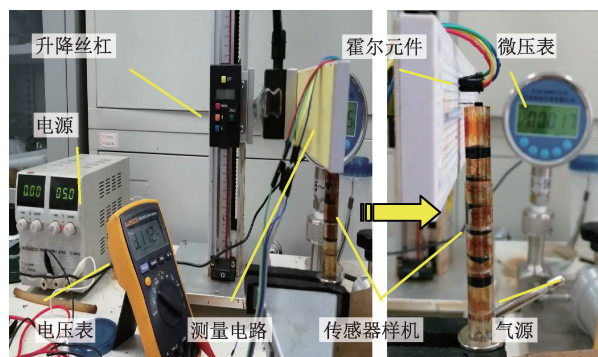


图5 霍尔式磁性液体微压差传感器实验装置

Fig. 5 Experimental facility of magnetic fluid micro-pressure sensor based on Hall elements

验过程保证恒温恒压,减小外界温度和压力对传感器实验结果的影响。

实验目的主要是分析研究霍尔式磁性液体微压差传感器的静态响应特性,包括灵敏度、线性度、迟滞特性和重复性特性。根据前文分析可知,永久磁铁和磁环之间的回复力为分段线性,霍尔元件的响应特性也为分段线性,根据前文选定的线性段,本实验采用的霍尔元件初始距离为 15 mm。由于永久磁铁的轴向长度越大,则单位压强变化下移动距离越小,灵敏度相应降低,因此实验中采用的永久磁铁轴向长度为 40 和 50 mm。回复力磁环轴向厚度的变化将对永久磁铁初始状态下与回复力磁环之间的距离产生影响,如果回复力磁环轴向厚度过小,则磁场太小,回复力不稳定,反之,如果回复力磁环轴向厚度过大,则磁场太大,回复力同样不稳定,且输出容易产生波动。因此选用 2, 3 和 4 mm 3 种厚度的回复力磁环进行实验研究。实验共分为 6 组进行。第 1 组为 2 mm 的磁环和 40 mm 永久磁铁进行组合;第 2 组为 2 mm 的磁环和 50 mm 永久磁铁进行组合,分别进行正反行程的静态特性实验研究,结果如图 6 所示。

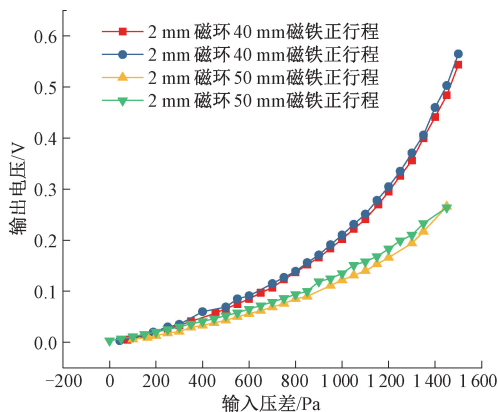


图6 第1,2组实验结果

Fig. 6 Experimental results of group 1 and 2

由图 6 可知,两组实验的分段线性度都较好,在 0~1 000 Pa 的目标量程范围内,输出压差和输出电压之间基本满足线性关系。但是通过斜率可知第一组灵敏度更高,而且第 1 组明显正反行程迟滞更小,这是由于 50 mm 的永久磁铁重力更大,因此单位压强作用下位移减小,且稳定性降低。因此选用第 1 组,即 2 mm 回复力磁环与 40 mm 永久磁铁的组合进行后续的静态响应特性分析研究。

第 3 组为 3 mm 的磁环和 40 mm 永久磁铁进行组合,第 4 组为 3 mm 的磁环和 50 mm 永久磁铁进行组合,分别进行正反行程的静态特性实验研究,结果如图 7 所示。

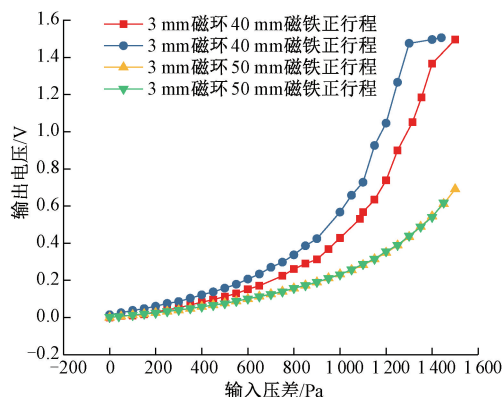


图7 第3,4组实验结果

Fig. 7 Experimental results of group 3 and 4

由图 7 可知,第 4 组的线性度和迟滞特性更好,这是由于回复力磁环厚度增加后,回复力相应增大,此时较小的永久磁铁反而会变的不稳定,因此输出曲线会出现波动,因此选用第 4 组进行静态特性研究。

第 5 组为 4 mm 的磁环和 40 mm 永久磁铁进行组合,第 6 组为 4 mm 的磁环和 50 mm 永久磁铁进行组合,分别进行正反行程的静态特性实验研究,结果如图 8 所示。

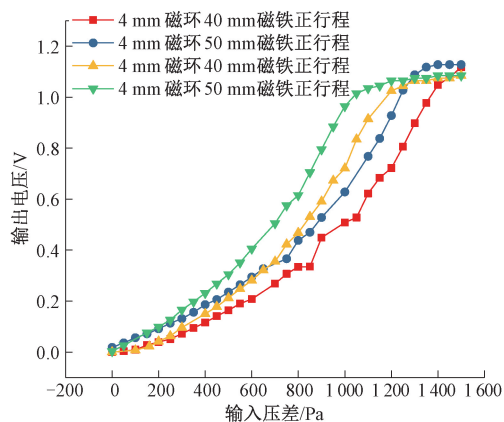


图8 第5,6组实验结果

Fig. 8 Experimental results of group 5 and 6

由图 8 可知,当回复力磁铁厚度增大到 4 mm 后,回复力过大,此时传感器输出曲线不再平滑,线性度变差,迟滞明显增加,出现了明显的迟滞回线。说明回复力磁环厚度过大后,霍尔式磁性液体微压差传感器的输出特性变差。后文不再对 4 mm 及以上的回弹力磁环进行输出特性计算。

由上述实验可知,第 1 组数据(2 mm 回复力磁环与 40 mm 永久磁铁)和第 4 组数据(3 mm 的磁环和 50 mm 永久磁铁)较好,下面对这两组是参数进行重复性实验研究。

第 1 组参数重复性实验结果如图 9 所示。

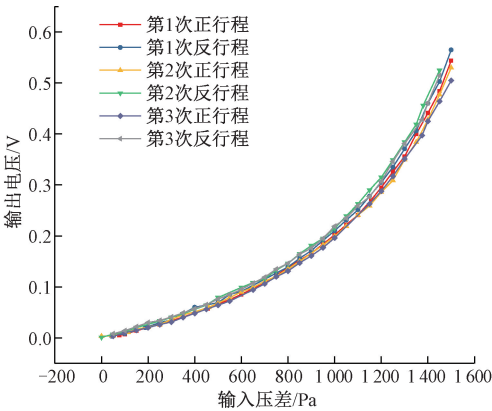


图 9 第 1 组重复性实验研究

Fig. 9 Experimental research on repeatability of group 1

第 1 组的重复性误差可表示为:

$$\xi_R = \frac{\Delta y_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% = \frac{0.008}{0.1802} \times 100\% = 4.9\%$$

第 4 组参数重复性实验结果如图 10 所示。

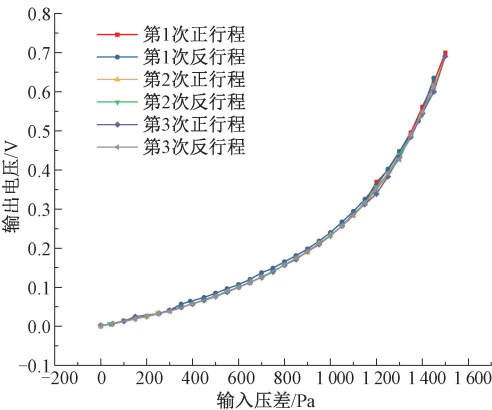


图 10 第 4 组重复性实验研究

Fig. 10 Experimental research on repeatability of group 4

第 4 组的重复性误差可表示为:

$$\xi_R = \frac{\Delta y_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% = \frac{0.006}{0.209228} \times 100\% = 2.9\%$$

综上,霍尔式磁性液体微压差传感器的静态特性如表 3 所示。表 3 中选择灵敏度大的,实验稳定的 4 组(1、3、4、6)进行线性度实验和迟滞实验,根据实验结果选择迟滞小的 2 组(1、4)进行后续的重复性实验。实验过程均为室温(25 ℃)进行,且实验连续进行避免意外误差。

表 3 霍尔式磁性液体微压差出传感器静态特性

Table 3 Static characteristics of magnetic fluid micro-pressure sensor based on Hall elements

实验组别	回复力 磁环长度/mm	永磁铁 长度/mm	与霍尔元件的 初始距离/mm	灵敏度/ 10 ⁻⁴ V/Pa	线性度/%	迟滞/%	重复性 误差/%
第 1 组	2	40	15	2.064 13	12.15	4.44	4.9
第 2 组	2	50	15	1.225 46	—	—	—
第 3 组	3	40	15	3.979 39	14	40.2	—
第 4 组	3	50	15	2.444 58	5.8	5.3	2.9
第 5 组	4	40	15	4.939 67	—	—	—
第 6 组	4	50	15	7.390 90	14.6	38.79	—

从表 3 可知,第 6 组实验结果灵敏度最高,但是线性度极差,迟滞过大,不满足霍尔式磁性液体微压差传感器的设计需求,第 4 组实验结果线性度、迟滞、和重复性误差均为最小,能够满足传感器的设计要求,选取第 4 组实验数据在 0~1 000 Pa 的微压量程范围内进行直线拟合,可得直线方程为:

$$U = -0.05214 + 3.97939 \times 10^{-4} \Delta P$$

至此,本文中所设计的霍尔式磁性液体微压差传感器通过实验分析完成了结构优化,利用霍尔元件对磁场的响应特性以及磁性液体的润滑密封性能,使得设计的传感器测量精度达到 1 Pa,量程范围为 0~1 000 Pa,实现了传感器小型化和低成本的目标。

本文中所设计的磁性液体微压差传感器永久磁铁与透明玻璃管之间的单边间隙为 1 mm,通过理论计算可知

耐压能力为 5 500 Pa,就能够满足要求,通过实验验证,在单边间隙为 1 mm 的情况下,平均耐压能力达到 6 050 Pa,能够满足所设计的磁性液体微压差传感器的量程需求。由于理论计算的过程中,并未考虑磁性液体在永久磁铁和透明玻璃管之间的物理挤压作用,因此理论值略小于实验值。

4 结 论

本文提出了一种霍尔式磁性液体微压差传感器的理论模型,并搭建试验台。通过理论分析和实验验证研究了该传感器的静态响应特性并对其结构进行优化设计。得出如下结论:

1) 本文提出的霍尔式磁性液体微压差传感器直径 10 mm,长度 80 mm,每个传感器的磁性液体用量约为 0.4 ml,体积小,成本低。当采用 3 mm 磁环和 50 mm 永久磁铁组合时,在 0~1 000 Pa 的测量范围内,测量精度为 1 Pa,线性度误差 5.8%,迟滞误差 5.3%,重复性误差 2.9%;

2) 由于磁性液体被挤压在磁性液体和管壁中间,使得磁性液体微压差传感器的实际耐压值比理论耐压值大 20% 左右;

3) 传感器的静态特性指标参数与传感器中各部件的尺寸和初始装配尺寸关系密切。

关于霍尔式磁性液体微压差传感器的输入压强差和输出电压值的动态响应特性将在今后的研究中着重进行讨论。

参考文献

[1] POPPLEWELL J, ROSENSWEIG R E. Magneto-rheological fluid composites[J]. *Journal of Physics D Applied Physics*, 29(9): 2297-2303.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 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.

[5] MA Z, MIAO Y, YI L, et al. A highly sensitive magnetic field sensor based on a tapered microfiber[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(4): 6803308.

[6] LI X, LYU F, WU Z, et al. An all-fiber current sensor based on magnetic fluid clad microfiber knot resonator[J]. *Proceedings of the International Conference on Sensing Technology Iest*, 2020, 7(5): 1-4.

[7] QIAN J K, LV R, ZHAO Y. Magnetic field sensor based on the magnetic-fluid-clad combined with singlemode-multimode-singlemode fiber and large core-offset splicing structure[J]. *Measurement Science & Technology*, 2018, 29(3). DOI: 10.1088/1361-6501/aa9c4e.

[8] 杨文荣, 翟耀, 陈俊杰, 等. 磁性液体正弦微压力信号源的磁场和力的分析[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(12): 92-99.

YANG W R, ZHAI Y, CHEN J J, et al. Analysis of magnetic field and force for magnetic fluid sinusoidal micro pressure signal source[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(12): 92-99.

[9] 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.

[10] XIE J, LI D C, XING Y S. The theoretical and experimental investigation on the vertical magnetic fluid pressure sensor[J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 229: 42-49.

[11] XIE J, LI D C, XING Y S. The theoretical and experimental research of the horizontal magnetic fluid pressure difference sensor[J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 236: 315-322.

[12] XIE J, LI D, XING Y. Parameters optimization of magnetic fluid micro-pressure sensor[J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 235: 194-202.

[13] BRAVO Z, VALDIVIA M. Follicular fluid stimulates capacitation and acrosome reaction in alpaca sperm

(Vicugna pacos) [J]. *Reproduction in Domestic Animals*, 2018, 53(2). DOI: 10.1111/rda.13151.

- [14] SARMA B, SHAHAPURE V, DALAL A, et al. Magnetowetting dynamics of sessile ferrofluid drops on soft surface [J]. *Soft Matter*, 2019, 16 (4). DOI: 10.1039/C9SM01944H.
- [15] D'ANGELO C, RAUFASTE C, KUZHIR P, et al. Ferrofluid leidenfrost droplets [J]. *Soft Matter*, 2019, 15(29). DOI: 10.1039/C9SM00724E.
- [16] BANERJEE U, SEN A K. Shape evolution and splitting of ferrofluid droplets on a hydrophobic surface in the presence of a magnetic field[J]. *Soft Matter*, 2018, 14. DOI:10.1039/C7SM02312J.

作者简介



谢君,2010 年和 2017 年于北京交通大学分别获得学士学位和博士学位,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 and Ph.D. degree both from Beijing Jiaotong University in 2010 and 2017, respectively. He is currently a lecturer at Beijing Jiaotong University. His main research interests include theoretical and application study of magnetic fluid.



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,现为北京交通大学教授,主要研究方向为机电液磁一体化。

E-mail: deli@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 professor at Beijing Jiaotong University. His main research interests include mechanical & electronic & hydrodynamic & magnetism integration.



朱锐棋,2019 年于北京交通大学获得学士学位,现为德恒律治知识产权代理事务所职员。主要研究方向为磁性液体的理论及应用。

E-mail: 15221144@bjtu.edu.cn

Zhu Ruiqi received her B.Sc. degree in 2019 from Beijing Jiaotong University. She is currently an officer in Deheng Luzhi Intellectual Property Agency. Her main research interests include theoretical and application study of magnetic fluid.