

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108753

一种高灵敏度磁性液体倾角传感器的研究*

赵心语¹, 姚杰¹, 刘嘉盟¹, 胡洋¹, 李德才^{1,2}

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

摘要:磁性液体独特的二阶悬浮力可以替代固体弹性元件为倾角传感器的惯性元件提供一个柔性弹性力,能够极大提高倾角传感器的抗冲击性能,已经在石油勘探行业成功应用。为进一步提高磁性液体倾角传感器的灵敏度,基于磁性液体的二阶悬浮特性提出了一种新的结构和检测方法,对传感器中两个永磁体间磁场的空间分布进行了理论计算和仿真,并通过试验对比分析了在选定不同参数条件下传感器的静态性能,最终得到当侧向间隙为3 mm,磁性液体注入量为1.4 g时,传感器量程为0°~50°,线性度误差为1.004 7%,灵敏度为2.3 mV/°,分辨率为0.023°,重复性误差为3.18%,工作性能最佳,且该传感器性价比高,壳体用材环保,具有很好的实用价值。

关键词:磁性液体;倾角传感器;悬浮特性;静态性能;回复力

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

Study on a magnetic fluid inclination sensor with high sensitivity

Zhao Xinyu¹, Yao Jie¹, Liu Jiameng¹, Hu Yang¹, 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 liquid can replace solid elastic element with its unique second-order suspension force to provide the inertial element of the dip sensor with a flexible elastic force, which can greatly improve the impact resistance of the dip sensor. It has been successfully applied in petroleum exploration industry. To improve the sensitivity of the magnetic liquid dip sensor, a new structure and detection method is proposed based on the second-order suspension characteristics of magnetic liquid. The spatial distribution of magnetic field between two permanent magnets is calculated by the theory, and the static performance of the sensor with different parameters is analyzed by experiment comparisons. Results show that when the lateral clearance is 3 mm and the amount of magnetic fluid is 1.4 g, the measurement range is 0°~50°, the linearity error is 1.004 7%, the response rate is 2.3 mV/°, the resolving power is 0.023°, the repeatability error is 3.18%, and the working performance of the sensor is the best. In addition, the performance-price-ratio index of the sensor is high and the material of the housing is environmental, which makes it has a good practical application value.

Keywords: magnetic fluid; inclination sensor; suspension characteristics; static performance; restoring force

0 引 言

磁性液体作为一种新型功能材料,因为兼备液体的流动性和固体材料的磁性,所以对磁场的作用有极高的响应灵敏性^[1]。此外,磁性液体特有的一阶和二阶悬浮特性,能够使大密度比的非磁性物体或浸没在其中的永磁体处于悬浮状态,能够极大地降低被悬浮物体运动过

程中的阻尼力^[2-3]。当该悬浮特性应用于传感器检测领域时,磁性液体悬浮力可以替代固体弹性元件的弹性力,提高设备的抗冲击性能^[4]。因此,基于磁性液体悬浮特性的传感器已经被用于测量加速度^[5]、压力^[6-10]和倾角^[11-14]。

磁性液体倾角传感器主要是由惯性质量块、支撑壳体以及用以实现信号转变的集成电路等部分组成。基于集成电路采集信号的种类,可将磁性液体角度传感器分

为电感式和电容式两大类。Olaru 等^[15]提出了电感式磁性液体角度传感器,将两块磁向反置的永磁体之间所产生的排斥力作为惯性质量块的回复力,故而当传感器产生倾角时,铁芯产生位移,使感应线圈的电感值有变动,进而被采集电路捕捉并转化、输出;但由于惯性质量块与容器壁之间仍旧存在摩擦损耗,使该传感器的测量精度和量程都有较大欠缺。苏树强等^[16]基于电感式磁性液体传感器的工作原理,设计了芯体结构进而引入 LVDT 以提高传感器的检测灵敏度,最终可测角度范围达到 $-90^{\circ} \sim 90^{\circ}$,但结构上较为复杂。钱乐平等^[17]提出了通过非磁性壳体内腔增设锥角结构以产生回复力,并改用内含铁芯的圆柱形永磁体作惯性质量块,并得出磁性液体注入量对传感器性能影响存在最优值的结论。虽然此类传感器结构简单、对磁性液体使用量较少,但使用的感应线圈尺寸相对较大,并且重复性不佳。Yauvz 等^[18]基于霍尔元件提出了电容式磁性液体角度传感器,产生回复力的原理与电感式相同,只是当传感器倾斜时,表层覆有磁性液体的磁铁产生位移,改变两块磁铁之间的磁通密度,从而改变线性霍尔元件的输出电压值,最终被采集电路接收并转以电信号形式输出;该传感器虽然可做到双向测量且灵敏度可调节,但制作成本相对较高,且迟滞性较差。Yao 等^[19]基于霍尔元件提出了在惯性质量块产生偏离时,将其一端与非磁性下壳体侧面的间隙中填充的磁性液体因受到挤压所产生的回弹力作为回复力的设计。当该传感器发生偏转时,惯性质量块偏离原位,改变磁极间的磁通密度,后续产生和电感式磁性液体传感器相同的转化过程,灵敏度较高并且有效降低了成本。故而侧向间隙的数值和磁性液体的注入量,成为决定惯性质量块的活动范围、永磁体被磁性液体裹覆的全面性以及惯性质量块水平方向上位移与回复力的线性相关度的重要参数,需要对惯性质量块的尺寸及分布、非磁性下壳体的结构及尺寸、磁性液体注入量进行寻优。

基于上述问题,设计了一种新型磁性液体倾角传感器,通过实验优化了影响传感器工作性能的相关参数,最终提高了传感器的线性度和灵敏度,并且该传感器用材环保、占用空间小、成本低,因而具有较强的实用价值。

1 结构模型和工作原理

基于磁性液体的二阶浮力特性,结合霍尔元件设计了一种由惯性质量块、非磁性壳体、少量磁性液体和霍尔元件组成的磁性液体倾角传感器。其中,惯性质量块是由铝制连接架连为整体的两块矩形永磁体组成,可以悬浮于壳体左右两个不连通的腔内;铝制连接架的主要作

用是使两块永磁体之间的距离为一定值,为保证其强度与轻量化,选用铝合金材料;作为磁源的永磁体,为保证其具有较高的剩余磁通量、矫顽力和最大磁能积,选择钕铁硼材料,同时,为提高其稳定性还对永磁体进行了涂层处理;非磁性壳体是由上盖板和下壳体组成,一方面,为了降低磁性液体的挥发,在下壳体加工了密封槽,另一方面,为了防止惯性质量块移动时与下壳体侧面间隙形成局部真空从而影响传感器的工作稳定性,在下壳体左右侧壁上增设内凸台结构(如图1所示);两个霍尔元件以背对背的形式被安装在两块永磁体的中间,用以将惯性质量块随传感器的倾转而产生移动时,两块永磁体之间磁通密度的变化转化为电压形式输出。

传感器的结构如图1所示,当倾转一定的角度时,惯性质量块偏离原位,其两端与下壳体左右两侧内壁的间距不对称,从而使间距较小一端和下壳体内侧壁共同挤压充斥在两者之间的磁性液体,进而产生使惯性质量块回到原平衡位置的回复力;同时,惯性质量块产生位移后引起两块永磁体之间的磁通密度不同于原态,进而被安装在其间的霍尔元件检测到,并将这种变化转化为电压形式输出,完成角度信号到电压信号的转变。

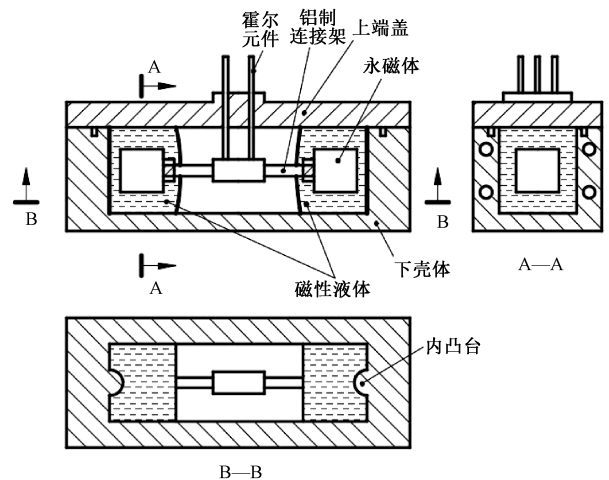


图1 传感器结构图

Fig. 1 The structure diagram of the sensor

2 理论分析

磁性液体倾角传感器的灵敏度极大程度上由磁通密度的变化决定,故而需要对两块永磁体之间的磁感应强度进行理论分析。考虑到霍尔元件的体积远小于永磁体的体积,故而只对水平方向上的磁通密度分析计算,以惯性质量块的几何中心为坐标原点 O 建立直角坐标系,并将两块永磁体分别等效两个磁极密度为 $\pm J$ 的平面,建立了磁场模型如图2所示。

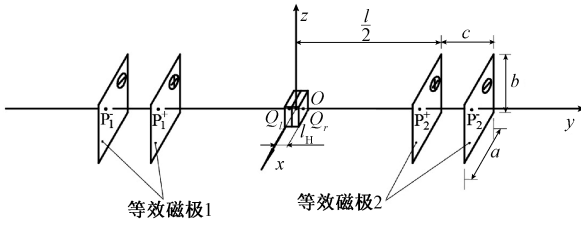


图2 磁极间的磁场模型

Fig. 2 Magnetic field model between magnetic poles

图2中,永磁体的尺寸为 $a \times b \times c$,两个磁通密度为 J 的等效平面间距为 l ,两个霍尔元件在水平方向的宽度为 l_H ,设惯性质量块在水平方向上的位移量为 y_m 。

永磁体与霍尔元件间的任意一点的磁通密度,可列:

$$\begin{cases} \mathbf{B} = \mathbf{B}_1 + \mathbf{B}_2 \\ \mathbf{B}_1 = \frac{J}{4\pi} \left(\int_{S_1^+} \frac{\mathbf{P}_1^+ \mathbf{Q}}{|\mathbf{P}_1^+ \mathbf{Q}|^3} dS_1^+ - \int_{S_1^-} \frac{\mathbf{P}_1^- \mathbf{Q}}{|\mathbf{P}_1^- \mathbf{Q}|^3} dS_1^- \right) \\ \mathbf{B}_2 = \frac{J}{4\pi} \left(\int_{S_2^+} \frac{\mathbf{P}_2^+ \mathbf{Q}}{|\mathbf{P}_2^+ \mathbf{Q}|^3} dS_2^+ - \int_{S_2^-} \frac{\mathbf{P}_2^- \mathbf{Q}}{|\mathbf{P}_2^- \mathbf{Q}|^3} dS_2^- \right) \\ |\mathbf{S}_1^+| = |\mathbf{S}_1^-| = |\mathbf{S}_2^+| = |\mathbf{S}_2^-| \end{cases} \quad (1)$$

式中: S_1^+ 、 S_1^- 、 S_2^+ 、 S_2^- 分别为4个等效平面。

各点坐标分别为:

$$\begin{aligned} P_1^+ & \left(x_1, -\frac{l}{2}, z_1 \right) & P_2^+ & \left(x_1, \frac{l}{2}, z_2 \right) \\ Q_1 & \left(0, y_m - \frac{l_H}{2}, 0 \right) & P_1^- & \left(x_1, -\frac{l}{2} - c, z_1 \right) \\ P_2^- & \left(x_2, \frac{l}{2} + c, z_2 \right) & Q_2 & \left(0, y_m + \frac{l_H}{2}, 0 \right) \end{aligned}$$

化简可得:

$$B(y) = \frac{J}{\pi} \left[\sin^{-1} \frac{ab}{\sqrt{(a^2 + 4y^2)(b^2 + 4y^2)}} + \sin^{-1} \frac{ab}{\sqrt{(a^2 + 4(y+c)^2)(b^2 + 4(y+c)^2)}} \right] \quad (2)$$

则霍尔元件左右端面的磁通密度变化为:

$$\Delta B_H = B_{Hl} - B_{Hr} \quad (3)$$

$$\begin{cases} B_{Hl} = B(y_{r1}) - B(y_{l1}) \\ y_{r1} = \frac{l}{2} + \left(y_m - \frac{l_H}{2} \right) \\ y_{l1} = \frac{l}{2} - \left(y_m - \frac{l_H}{2} \right) \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} B_{Hr} = B(y_{r2}) - B(y_{l2}) \\ y_{r2} = \frac{l}{2} - \left(y_m + \frac{l_H}{2} \right) \\ y_{l2} = \frac{l}{2} + \left(y_m + \frac{l_H}{2} \right) \end{cases} \quad (5)$$

鉴于永磁体表面的磁场梯度较大,导致基于磁性液体二阶浮力特性,计算作用于磁性物体表面的浮力不易求解,简化为对非磁性物体表面磁流体悬浮力的计算,则需要添加限制条件使得永磁体与霍尔元件之间的磁性液体与下壳体接触边界的磁场梯度为恒定值。在接触边界上任取两点1和2。可以列出受力平衡方程:

$$\begin{cases} P_1 = P_0 + P_1' - \mu_0 \frac{M_{fn}^2}{2} \\ P_2 = P_0 + P_2' - \mu_0 \frac{M_{fn}^2}{2} \end{cases} \quad (6)$$

且:

$$v_1 = v_2 = 0 \quad (7)$$

式中: $\mu_0 M_{fn}^2 / 2$ 为悬浮体引起的法向磁场畸变; P_0 为大气压强; P_1' 和 P_2' 分别为1,2点处的毛细压强; v_1 和 v_2 分别为1,2点处的流速。

代入伯努利方程,得到:

$$\begin{aligned} P_1' - \mu_0 \frac{M_{fn}^2}{2} + \rho g h_1 - \mu_0 \int_0^{H_1} M dH &= \\ P_2' - \mu_0 \frac{M_{fn}^2}{2} + \rho g h_2 - \mu_0 \int_0^{H_2} M dH & \end{aligned} \quad (8)$$

式中: ρ 为磁性液体密度; h_1 和 h_2 分别为点1,2处的高度; H_1 和 H_2 分别为点1,2处的磁通密度。

若简化为对非磁性物体的分析,则:

$$H_1 = H_2 \quad (9)$$

则必须满足约束条件:

$$\begin{cases} P_1' - \mu_0 \frac{M_{fn}^2}{2} + \rho g h_1 \ll \mu_0 \int_0^{H_1} M dH \\ P_2' - \mu_0 \frac{M_{fn}^2}{2} + \rho g h_2 \ll \mu_0 \int_0^{H_2} M dH \end{cases} \quad (10)$$

在限制条件下,分别沿 x 、 y 、 z 轴对作用于永磁体表面的磁流体悬浮力进行分析,得到:

$$\begin{cases} |\mathbf{F}_x| = |-(\mathbf{F}_{x^+} + \mathbf{F}_{x^-})| = \mu_0 \int_{S_x} \left(\frac{M_{fn}^2}{2} + \int_0^H M_f dH \right) x dS_x \\ \mathbf{F}_{x^+} = \mathbf{F}_{x^-} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} |\mathbf{F}_y| = |-(\mathbf{F}_{y^+} + \mathbf{F}_{y^-})| = \mu_0 \int_{S_y} \left(\frac{M_{fn}^2}{2} + \int_0^H M_f dH \right) y dS_y \\ \mathbf{F}_{y^+} = \mathbf{F}_{y^-} \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} |\mathbf{F}_z| = |-(\mathbf{F}_{z^+} + \mathbf{F}_{z^-})| = \mu_0 \int_{S_z} \left(\frac{M_{fn}^2}{2} + \int_0^H M_f dH \right) z dS_z \\ \mathbf{F}_z = -(m_b + m_f) g \mathbf{z} \end{cases} \quad (13)$$

式中: \mathbf{F}_{x^+} 和 \mathbf{F}_{x^-} 分别为作用在永磁体前后面上的悬浮力; \mathbf{F}_{y^+} 和 \mathbf{F}_{y^-} 分别为作用在永磁体左右面上的悬浮力; \mathbf{F}_{z^+} 和

F_{\pm} 分别为作用在永磁体上下面的悬浮力; m_b 为永磁体的质量; m_f 为永磁上附着的磁性液体的质量。

3 实验研究

由于传感器性能指标取决于惯性质量块的运动响应快速性,进而受制于磁性液体的阻尼特性,综合比较之后选取机油基磁性液体,其参数如表 1 所示。

表 1 实验用磁性液体参数

Table 1 The parameters of the magnetic fluid in the experiment

磁性液体种类	机油基
密度/($g \cdot cm^{-3}$)	1.116
粘度/($g \cdot cm^{-3}$)	23
特点	饱和磁化强度高;粘温性好

3.1 惯性质量块各项参数的确定

两块永磁体的距离设定是通过建立三维静磁场,进行仿真分析后,选取可以保证两块永磁体之间的磁场密度在水平方向上具有较稳定的变化梯度的距离值,具体的仿真结果如图 3 所示,最终得到的惯性质量块的各项参数如表 2 所示。并利用激光位移传感器测定不同间隙和磁液注入量条件下,惯性质量块的悬浮高度的变化情况,得到的结果如图 4 所示。

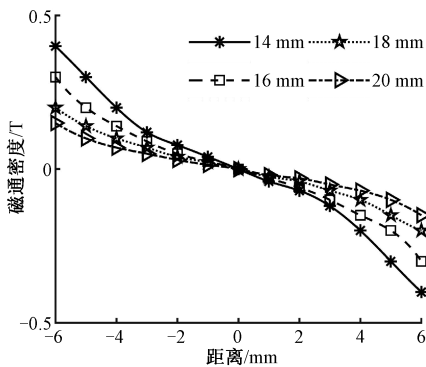


图 3 永磁体的间距与磁通密度的关系

Fig. 3 Relationship between spacing of permanent magnets and magnetic flux density

3.2 惯性质量块水平方向回复力的实验研究

基于结构模型,搭建了研究惯性质量块水平方向上回复力的实验台,如图 5 和表 3 所示。

布置好实验台后,首先将精密天平归零,调节右侧调节手柄直至精密天平示数出现跳跃变化,将水平游标卡尺归零,得到水平方向起点;将精密天平再次归零,调节上方调节手柄使惯性质量块下沉至精密天平示数出现跳

表 2 惯性质量块的参数

Table 2 The parameters of the inertial mass block

永磁体材料牌号	N35
永磁体形状	长方体
永磁体材料的剩余磁通量/T	1.21
永磁体材料的矫顽力/(A/M)	8.9×10^5
永磁体材料的最大磁积能/($kJ \cdot m^{-3}$)	290
永磁体尺寸(长 \times 宽 \times 高)/mm	10 \times 6 \times 8
永磁体质量/g	3.5 \times 2
两块永磁体间距/mm	18

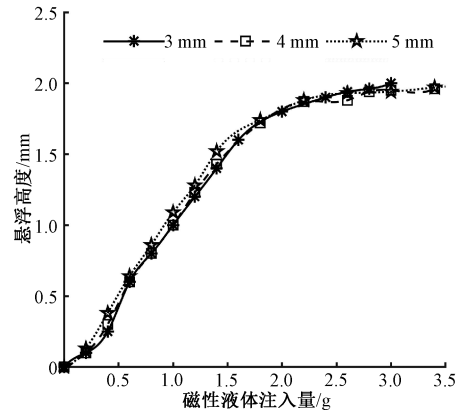


图 4 悬浮高度变化曲线

Fig. 4 The curve of the suspension height variation

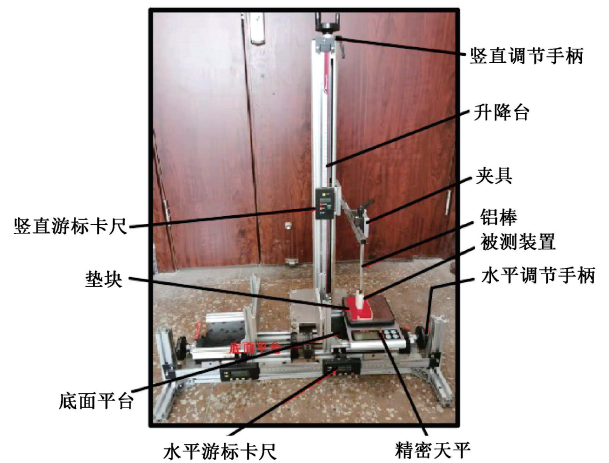


图 5 水平方向回复力研究实验台

Fig. 5 The test bench of the study on restoring force

跃变化,将竖直游标卡尺归零,调节惯性质量块竖直方向上的高度为条件值,将精密天平归零,得到竖直方向起点。

在测量回复力时,以 0.2 mm 为步长下沉惯性质量块,实时记录磁性液体注入量和侧隙(质量块的侧面沿连线方向到内壁的距离)不同条件下,回复力与惯性质量块位移的对应实验数据,得到结果如图 6 所示。

表3 实验台一的组成

Table 3 The components of test bench I

名称	作用
升降台、上方调节手柄	产生竖直方向上位移
竖直游标卡尺(0.01 mm)	测量竖直方向上位移
夹具	固定铝棒
悬柱	连接定位板和永磁体
精密天平(0.01 g)	测量数值方向上回复力
垫块	保证永磁体与天平分离
底面天平、右侧调节手柄	产生水平方向上位移
水平游标卡尺(0.01 mm)	测量水平方向上位移

由图6可知,曲线的斜率随着惯性质量块的位移增加而增加;由图6(a)知,当侧向间隙为3 mm时,磁性液体注入量需要1.6 g才能接触到壳体的侧面;由图6(b)知,当侧向间隙为4 mm时,磁性液体注入量加至1.8 g接触到壳体侧面,溢出现象导致注入量为2.2~2.6 g时,曲线后半段非线性明显;由图6(c)知,当侧向间隙为5 mm时,磁性液体注入量加至2.4 g接触到壳体侧面,且注入量为3.0和3.2 g时,由溢出现象导致的曲线收敛特征更加突出。

3.3 静态性能的实验研究

基于传感器工作原理,建立了研究该传感器静态性能的实验台,具体如表4所示。

表4 实验台二的组成

Table 4 The components of the test bench II

名称	作用
稳压电源(3 V/0.1 V)	为采集电路提供稳压
夹具	固定角度平台
升降台、调节手柄	改变角度平台的倾角
位移传感器(0.01°)	检测角度平台的倾角
精密天平(0.01 g)	测量磁性液体注入量
电压表(0.000 1 V)	测量输出电压
角度平台	产生倾角;固定被测装置
水平游标卡尺(0.01 mm)	测量水平方向上位移

完成实验台的建立后,接通电路并记录电压表所示的初始电压值;安装霍尔元件并使其输出电压为初始电压值;按量注入磁性液体,并记录电压表示数;改变角度平台倾角,记录对应的电压表示数,得到的结果如图7和表5所示。

表5 实验数据汇总

Table 5 Data summary of experiment

测试项目	3 mm 侧隙	4 mm 侧隙	5 mm 侧隙
磁液最优注入量/g	1.4	2.0	2.6
量程/(°)	0~50	0~22	0~18
线性度/%	1.004 7	1.348	3.432
灵敏度/(mV/(°))	2.30	5.15	7.43
分辨率/(°)	0.023	0.029	0.069
重复度/%	3.18	2.85	2.45

通过实验二的数据结果可知,侧隙为3 mm,磁液注入量为1.4 g时,传感器的线性度最优、量程较大、灵敏度较高;而侧隙为5 mm,磁液注入量为2.6 g时,该传感器的分辨率是最佳的;所以综合考虑各项静态性能指标确定侧隙为3 mm,磁液注入量为1.4 g最适合实际应用。

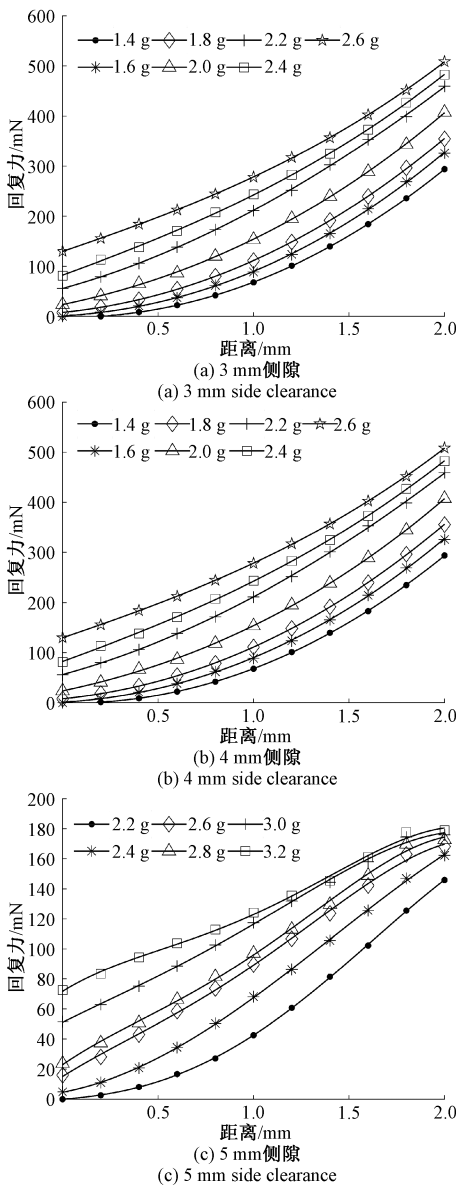


图6 位移与回复力的关系曲线

Fig. 6 The curves of the relationship between displacement and restoring force

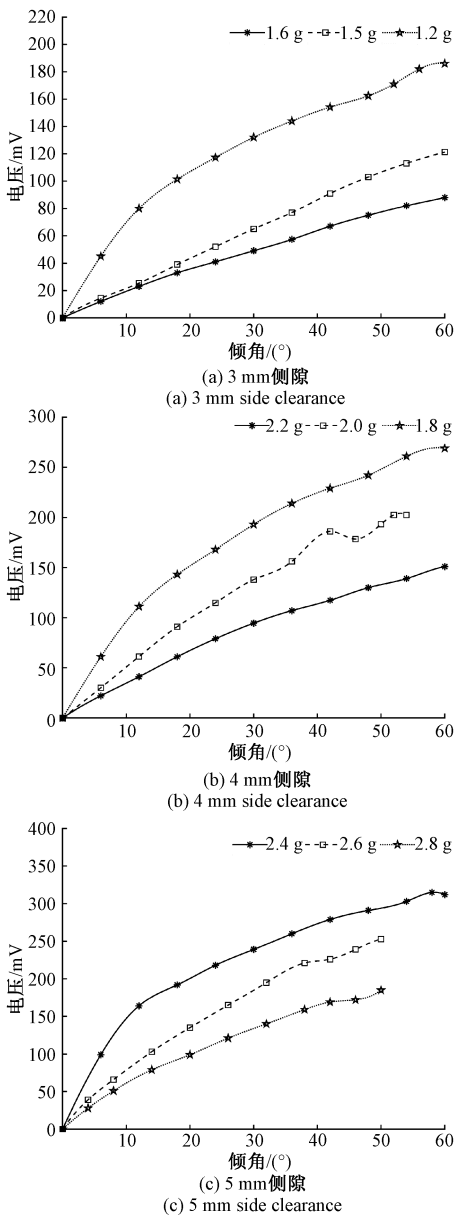


图7 倾角与输出电压的关系曲线

Fig. 7 The curves of the relationship between inclination and output voltage

4 结 论

基于磁性液体的二阶浮力特性建立了一种高灵敏度的磁性液体倾角传感器的结构模型,对两块永磁体间的磁通密度以及所受到的二阶悬浮力进行理论分析,通过实验验证该传感器的静态性能并提出了一组最优设计参数。得出结论如下:

1) 在不同的侧隙条件下,随着磁性液体注入量的增加,惯性质量块的悬浮高度趋近于 2 mm;

2) 回复力的增量随惯性质量块的位移量的增大而增大,但在侧向间隙较大时会因溢出现象而趋于平均;

3) 传感器输出电压的增幅随倾角的增加先为定值,然后减小,最后出现波动。当侧隙为 3 mm,磁性液体注入量为 1.4 g 时,该传感器的线性度等静态性能指标最优。

参考文献

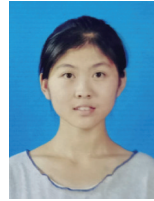
- [1] BALJINDER K, ANUJ K. S, PRAJAPATI Y K. Plasmonic sensor for magnetic field detection with chalcogenide glass and ferrofluid materials under thermal variation in near infrared[J]. *Optical Materials*, 2021, 117:111-175.
- [2] YANG W, LI D, HE X, et al. Calculation of magnetic levitation force exerted on the cylindrical magnets immersed in ferrofluid [J]. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2012, 40(1): 37-49.
- [3] 谢君,鲁妍池,刘宇童,等. 磁性液体触觉传感器的设计及特性研究[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(1): 30-38.
- [4] XIE J, LU Y CH, LIU Y T, et al. Design and characteristic research on magnetic fluid tactile sensor [J]. *Chinese Journal of Science Instrument*, 2021, 42(1): 30-38.
- [5] PHILIP J, LASKAR J M. Optical properties and applications of ferrofluids—A review [J]. *Journal of Nanofluids*, 2012, 1(1): 3-20.
- [6] YADAV N, RANA D, PANT B D, et al. Development of Fe₃O₄ based ferrofluid and ferrofluid bearing based acceleration sensor[J]. *Sensor Letters*, 2016, 14(4): 402-406.
- [7] 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.
- [8] MARTIN J, RASHIDI R. A differential transformer-based force sensor utilizing a magnetic fluid core [J]. *Microsystem Technologies*, 2021, 27(1): 115-126.
- [9] XIE J, LI D, XING Y. Parameters optimization of magnetic fluid micro-pressure sensor [J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2015, 235: 194-202.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [11] 孙明礼, 崔海蓉, 汪斌, 等. 磁性液体倾角传感器的有限元耦合分析[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(2): 367-374.
- 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.
- [12] MEDVEGY T, MOLNAR A, MOLNAR G, et al. Analysis of a ferrofluid core differential transformer tilt measurement sensor [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2017, 428: 189-193.
- [13] DEGRAFF A, RASHIDI R. Ferrofluid transformer-based tilt sensor [J]. Microsystem Technologies, 2020, 26(8): 2499-2506.
- [14] 郭兵, 马晓燕, 杨晓锐, 等. 磁性液体全方位倾角传感器的研究[J]. 压电与声光, 2018, 40(3): 395-399.
- GUO B, MA X Y, YANG X R, et al. Research on magnetic fluid omnidirectional inclination sensor [J]. Piezoelectric and Acoustooptic, 2018, 40(3): 395-399.
- [15] OLARU R, COTAE C. Tilt sensor with magnetic liquid [J]. Sensors and Actuators A Physica, 1997, 59(1-3): 307-310.
- [16] 苏树强, 李德才. 磁性液体倾角传感器研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
- SUN SH Q, LI D C. Research on magnetic fluid inclination sensor [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009.
- [17] 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.

- [18] YAVUZ O, ISMAIL Y. Research on a novel magnetic tilt sensor designed using Hall elements and ferrofluid [J]. Journal of Electrical Engineering, 2019: 407-409.
- [19] YAO J, LIU S, LI Z K, et al. A novel ferrofluid inclinometer exploiting a Hall element [J]. IEEE Sensor Journal, 2016, 16(22): 7986-7991.

作者简介



赵心语, 2021年于河南理工大学获得学士学位, 现为北京交通大学在读研究生, 主要研究方向为智能机械设计与微纳米技术。
E-mail: 21121313@bjtu.edu.cn

Zhao Xinyu received her B.Sc. degree from Henan Polytechnic University in 2021. She is currently a master student at Beijing Jiaotong University. Her main research interests include intelligent mechanical design and micro nano technology.



姚杰 (通信作者), 2011年于北京交通大学获得学士学位, 2018年于北京交通大学获得博士学位, 现为北京交通大学的讲师, 主要研究方向为磁流体的理论和应用, 包括磁流体传感器、阻尼器和密封。

E-mail: jieyao@bjtu.edu.cn

Yao Jie (Corresponding author) received his B.Sc. degree and Ph.D. degree both from Beijing Jiaotong University in 2011 and 2018, respectively. He is currently a lecturer at Beijing Jiaotong University. His main research interests include the theory and application of ferrofluid including ferrofluid sensor, damper, and seal.