

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311258

基于磁化-涡流效应的磁性液体倾角传感器研究*

喻峻^{1,2}, 李德才², 王德义², 何新智²

(1. 中国科学院赣江创新研究院系统工程与装备研究所 赣州 341119; 2. 北京交通大学机械与电子控制工程学院 北京 100044)

摘要: 永磁体在磁性液体中的稳定悬浮在倾角传感器中有着广泛的应用。提出一种利用圆环永磁体、软磁金属和非磁性金属构成惯性质量的磁性液体倾角传感器,利用磁性液体悬浮力作为惯性质量的回复力,通过复合软磁金属的磁化效应和非磁性金属的涡流效应来增加倾角传感器的灵敏度,利用软磁和非磁性金属组成外壳包裹永磁体防止剧烈冲击下的损坏。推导了数学公式用于计算磁性液体悬浮力;研究了惯性质量的轴向长度对悬浮力和线圈电感的影响,论证了信号源对传感器输出电压的影响规律。将磁性液体倾角传感器用于倾角的测量,当倾角的范围为 $0^\circ \sim 42^\circ$ 时,输出电压和倾角之间的线性度约为6.5%,灵敏度为 $5 \text{ mV}/^\circ$,迟滞不超过1%。

关键词: 磁性液体;倾角传感器;磁悬浮;涡流效应;磁化效应

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 the magnetic fluid inclination sensor based on magnetization-eddy current effect

Yu Jun^{1,2}, Li Decai², Wang Deyi², He Xinzhiz²

(1. Institute of Systems Engineering and Equipment, Ganjiang Innovation Academy, Chinese Academy of Sciences, Ganzhou 341119, China; 2. School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: The stable levitation of permanent magnets in magnetic fluid has a wide range of applications in tilt sensors. In this article, a magnetic fluid inclination sensor using ring permanent magnets, soft magnetic metals, and non-magnetic metals as inertial mass is proposed. The magnetic fluid levitation force received by the inertial mass is used as restoring force. The magnetization effect of soft magnetic metals and the eddy current effect of non-magnetic metals are used together to increase the sensitivity of the inclination sensor. The soft magnetic and non-magnetic metals are used to wrap the permanent magnet to prevent damage under severe impact. The calculation formula is derived to calculate magnetic fluid levitation force, the influence of the axial length of inertial mass on the levitation force and coil inductance has been studied, and the effect of signal source frequency on the output voltage of the sensor is demonstrated. The magnetic fluid inclination sensor is used for the measurement of inclination. When the range of inclination angle is $0 \sim 42^\circ$, the linearity between the output voltage and the inclination angle is about 6.5%, the sensitivity is $5 \text{ mV}/^\circ$, and the hysteresis is less than 1%.

Keywords: magnetic fluid; inclination sensor; magnetic levitation; eddy current effect; magnetization effect

0 引言

磁性液体(又称铁磁流体)是兼具磁性和流动性的胶体溶液。磁性液体在磁场下表现出独特的悬浮性能,即物体受到的悬浮力可以通过磁场进行调控,因此密度

较大的永磁体也能稳定地悬浮于磁性液体中,即磁性液体的第二类悬浮。磁性液体的第二类悬浮在倾角传感器^[1-2]、动能采集器^[3-5]、动力吸振器^[6-8]、微泵^[9-11]和微压差传感器^[12]等领域有着广泛的研究,具有广阔的应用前景。

磁性液体倾角传感器是一种新型的倾角传感器,其工作原理是惯性质量在倾角和回复力的作用下偏离平衡

收稿日期:2023-04-03 Received Date: 2023-04-03

* 基金项目:国家自然科学基金(52105286)项目资助

位置并产生一定的位移,利用敏感元件将惯性质量的位移转换成电信号,从而实现倾角的测量。其惯性质量可分为:含有永磁体的物体、非磁性物体和磁性液体。

当惯性质量含有永磁体时,可利用磁性液体悬浮力作为回复力^[13-15],也可将外加永磁体和惯性质量之间的磁性排斥力作为回复力^[16-18],但外加永磁体增大了倾角传感器的体积,且磁性排斥力容易导致惯性质量翻转并卡在外壳上,影响倾角传感器的正常使用。当惯性质量为单独的永磁体时,此时,由于磁性液体的相对磁导率较低,导致倾角传感器的灵敏度较低。为了增加倾角传感器的灵敏度,可采用永磁体和磁芯构成惯性质量^[17-18],但永磁体会磁化磁芯,限制了灵敏度的提高。为了解决永磁体对磁芯的磁化问题,可利用非磁性棒隔离永磁体和磁芯^[17],从而增大倾角传感器的灵敏度,但非磁性棒将显著增大倾角传感器的体积。磁性液体倾角传感器通常采用线圈^[13]或霍尔元件^[19-20]作为敏感元件来感知惯性质量的位移。

当惯性质量为非磁性物质时,通常将惯性质量受到的磁性液体悬浮力作为回复力,可利用电容^[21]或电感^[22-23]作为敏感元件来检测惯性质量的位移。由于磁性液体和非磁性物质的磁导率差异不大,导致这类倾角传感器的灵敏度不高。

当惯性质量采用磁性液体时,通常可以用重力^[24]、励磁线圈产生的磁力^[25]和永磁体产生的磁力^[26-27]作为回复力,敏感元件一般采用电感线圈。磁性液体较低的相对磁导率导致倾角传感器灵敏度也较低。

综上所述,受限于磁性液体较低的相对磁导率,采用单独的永磁体、非磁性物体或磁性液体作为惯性质量不利于发展高灵敏度的倾角传感器。采用永磁体和磁芯组成惯性质量可以提高倾角传感器的灵敏度,但需要防止永磁体对磁芯的磁化,且过大的体积使倾角传感器的使用受到限制^[17]。此外,永磁体质脆易碎,需防止永磁体在强振动时损坏。

为了提高磁性液体倾角传感器的灵敏度并防护永磁体,采用圆环永磁体、内芯和保护外壳作为惯性质量,利用电线圈作为敏感元件,将磁性液体悬浮力作为惯性质量的回复力。利用软磁内芯和外壳、非磁性内芯和外壳的组合,在增加倾角传感器灵敏度的同时,防止永磁体在剧烈振动工况下的损坏。

1 结构设计和工作原理

倾角传感器的结构和电感变化原因如图1所示,传感器结构如图1(a)所示,采用沿轴向磁化的圆环永磁体、软磁内芯和外壳、非磁性内芯和外壳组成惯性质量,其中软磁内芯和外壳材料为坡莫合金,非磁性内芯和

外壳材料为铝合金。非磁性内芯和软磁内芯插入永磁体的通孔,软磁外壳和非磁性外壳环绕永磁体,不增加惯性质量的轴向长度。同时,包裹永磁体的外壳能够防止永磁体在剧烈振动下的损坏。软磁内芯和软磁外壳固定在圆环永磁体轴向中心位置,远离永磁体两端的磁极,减小永磁体对软磁内芯和软磁外壳的磁化,增加倾角传感器的灵敏度。惯性质量放置于由绝缘的POM材料制作的非磁性腔体中,腔体中填充磁性液体,惯性质量悬浮于磁性液体中。利用沿轴向的磁性液体悬浮力充当回复力,无需外加永磁体,进一步减小了倾角传感器的体积。非磁性腔体外缠绕有电感线圈,通过线圈来检测惯性质量的位移,实现倾角的测量。

电感变化原理如图1(b)所示,当磁性液体倾角传感器向右倾斜时,惯性质量沿轴向向右移动。此时软磁内芯和软磁外壳插入电感线圈1的长度变大,软磁内芯和软磁外壳的磁化效应导致电感线圈1的电感增大;与此同时,非磁性内芯和非磁性外壳插入电感线圈1的长度减小,非磁性内芯和外壳的涡流效应对电感线圈1的电感的影响减弱,进一步增加了电感线圈1的电感。同理,此时电感线圈2的电感减小。通过复合软磁金属的磁化效应和非磁性金属的涡流效应,增加了线圈电感的变化量,进而提高了倾角传感器的灵敏度。惯性质量受到的磁性液体悬浮力是影响其位移的关键因素,对倾角传感器的灵敏度有重要的影响。

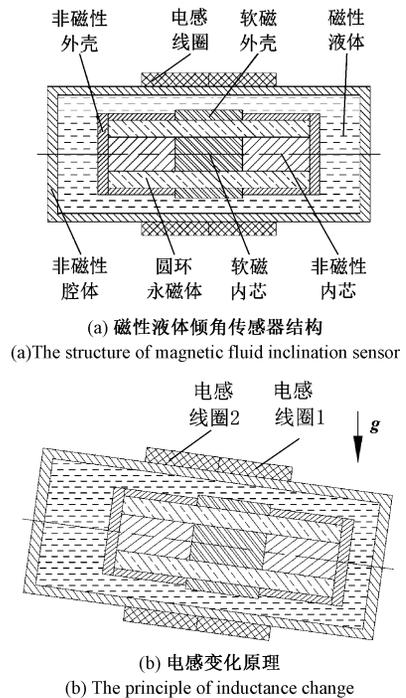


图1 倾角传感器的结构和电感变化原理

Fig. 1 The structure and principle of inductance change of inclination sensor

2 理论分析

如图 2(a) 所示, 当惯性质量浸没于磁性液体中时, 惯性质量受到的磁性液体悬浮力可以表示为:

$$\mathbf{F}_l = \int_{S_m} \mathbf{n}_m \cdot \mathbf{T}_m dS \quad (1)$$

式中: S_m 为惯性质量的表面积; \mathbf{n}_m 为垂直 S_m 且指向磁性液体的单位向量; \mathbf{T}_m 为磁性液体内部的应力张量。

$$\mathbf{T}_m = - \left\{ p^* + \frac{1}{2} \mu_0 H^2 \right\} \mathbf{I} + \mathbf{B}\mathbf{H} \quad (2)$$

式中: μ_0 为真空磁导率; \mathbf{B} 为磁感应强度; \mathbf{H} 为磁场强度; \mathbf{I} 为单位张量; p^* 为磁性液体内的复合压强。

静止时, 磁性液体受到合力为零, 即:

$$- \int_{S_c} \mathbf{n}_c \cdot \mathbf{T}_m dS - \int_{S_m} \mathbf{n}_m \cdot \mathbf{T}_m dS + \int_{V_{mf}} \rho \mathbf{g} dV = 0 \quad (3)$$

式中: S_c 为磁性液体和腔体的接触表面; \mathbf{n}_c 为垂直 S_c 且指向磁性液体的单位向量; ρ 为磁性液体的密度; \mathbf{g} 为重力加速度; V_{mf} 为磁性液体的体积。

联立式(1)和(3)可知:

$$\mathbf{F}_l = - \int_{S_c} \mathbf{n}_c \cdot \mathbf{T}_m dS + \int_{V_{mf}} \rho \mathbf{g} dV \quad (4)$$

假设有一个包围 S_c 的封闭曲面 S'_c 如图 2(b) 所示, 且 S_c 和 S'_c 之间的距离为无穷小, 可以认为 S_c 和 S'_c 的面积相等。 S'_i 为一个无穷大的封闭曲面, 且 S'_c 和 S'_i 之间没有磁性物质, 此空间内不存在磁力作用, 可表示为:

$$\int_{S'_i} - \mathbf{n}_i \cdot \mathbf{T} dS + \int_{S'_c} - \mathbf{n}'_c \cdot \mathbf{T} dS = 0 \quad (5)$$

式中: \mathbf{n}_i 为垂直 S'_i 且指向 S'_i 内部的单位向量; \mathbf{n}'_c 为垂直 S'_c 且指向 S'_c 外部的单位向量; \mathbf{T} 为麦克斯韦应力张量, 其可以表示为:

$$\mathbf{T} = \mu_0 \mathbf{H}_0 \mathbf{H}_0 - \frac{1}{2} \mu_0 H_0^2 \mathbf{I} \quad (6)$$

式中: \mathbf{H}_0 为真空的磁场强度。

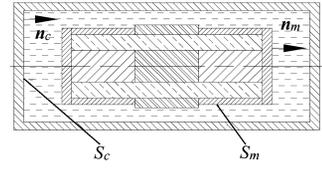
由于惯性质量和 S'_i 的距离为无穷远, S'_i 的面积正比于 r^2 ; 而空间内 H_0 成 r^3 衰减, 其中 r 为一维空间内的距离。因此 $\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{T}$ 在曲面 S'_i 上的积分为零, 根据式(5)可知:

$$\int_{S'_c} - \mathbf{n}'_c \cdot \mathbf{T} dS = \int_{S_c} \left(\mathbf{n}_c \cdot \mathbf{B}_0 \mathbf{H}_0 - \frac{1}{2} \mu_0 H_0^2 \mathbf{n}_c \right) dS = 0 \quad (7)$$

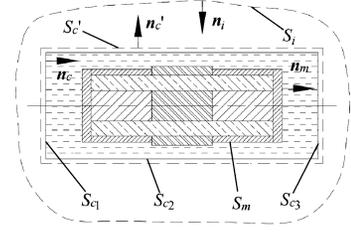
联立式(4)和(7)可知:

$$\mathbf{F}_l = \int_{S_c} p^* \mathbf{n}_c dS + \int_{V_{mf}} \rho \mathbf{g} dV +$$

$$\int_{S_c} \left(\frac{1}{2} \mu_0 H^2 \mathbf{n}_c - \frac{1}{2} \mu_0 H_0^2 \mathbf{n}_c - \mathbf{n}_c \cdot \mathbf{B}\mathbf{H} + \mathbf{n}_c \cdot \mathbf{B}_0 \mathbf{H}_0 \right) dS \quad (8)$$



(a) 有限空间模型
(a) Finite space model



(b) 无限空间模型
(b) Infinite space model

图 2 惯性质量在不同空间范围内的悬浮模型

Fig. 2 The levitation model of inertial mass in different spatial ranges

在 S_c 上, 磁场的边界条件可以表述为:

$$\mathbf{n}_c \cdot (\mathbf{B} - \mathbf{B}_0) = 0 \quad (9)$$

$$\mathbf{n}_c \cdot (\mathbf{H} - \mathbf{H}_0) = 0 \quad (10)$$

由于 $\mathbf{B}_0 = \mu_0 \mathbf{H}_0$, $\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M})$, 其中 \mathbf{M} 是磁性液体的磁化强度, 式(8) 右边最后一项可以写为:

$$\mu_0 (H^2 - H_0^2) \mathbf{n}_c = - \mu_0 (2B_n / \mu_0 - M_n) M_n \mathbf{n}_c \quad (11)$$

$$\mathbf{n}_c \cdot \mathbf{B}_0 \mathbf{H}_0 - \mathbf{n}_c \cdot \mathbf{B}\mathbf{H} = B_n M_n \mathbf{n}_c \quad (12)$$

式中: B_n 是 \mathbf{B} 的法向分量; M_n 是 \mathbf{M} 的法向分量。

联立式(8)、(11)和(12)可知惯性质量受到的悬浮力可以写为:

$$\mathbf{F}_l = \int_{S_c} (p^* + p_n) \mathbf{n}_c dS + \int_{V_{mf}} \rho \mathbf{g} dV \quad (13)$$

式中: $p_n = \mu_0 M_n^2 / 2$ 称为界面磁法向压强。

磁性液体的复合压强(p^*)可展开为:

$$p^* = p + p_m + p_s \quad (14)$$

式中: p 、 p_m 和 p_s 分别为热力学压强, 磁化压强和磁致伸缩压强, 且磁致伸缩压强 p_s 一般可以忽略不计。

根据散度定理, 惯性质量受到的阿基米德浮力为:

$$\mathbf{F}_{lg} = - \int_{S_m} p \mathbf{n}_m dS = \int_{S_c} p \mathbf{n}_c dS + \int_{V_{mf}} \rho \mathbf{g} dV \quad (15)$$

将式(13)减去式(15)可得磁性悬浮力为:

$$\mathbf{F}_{lm} = \int_{S_c} (p_m + p_n) \mathbf{n}_c dS \quad (16)$$

通常情况下, p_n 可以忽略, 则磁性悬浮力可以进一步写为:

$$\mathbf{F}_{lm} = \int_{S_{c1}} p_m \mathbf{n}_c dS + \int_{S_{c2}} p_m \mathbf{n}_c dS + \int_{S_{c3}} p_m \mathbf{n}_c dS \quad (17)$$

式中: S_{c1} 、 S_{c2} 和 S_{c3} 分别是非磁性腔体左端面、侧面和

右端面,且有:

$$S_c = S_{c1} + S_{c2} + S_{c3} \quad (18)$$

侧面 S_{c2} 只能为惯性质量提供沿径向的磁性悬浮力,则沿轴向的磁性悬浮力可以进一步简写为:

$$F_{lma} = \int_{S_{c1}} p_m \mathbf{n}_c dS + \int_{S_{c3}} p_m \mathbf{n}_c dS \quad (19)$$

质量块受到的磁性液体悬浮力为磁性悬浮力和阿基米德浮力之和,当惯性质量沿轴向向左偏离中心时, S_{c1} 上的 $p_m > S_{c3}$ 上的 p_m , 此时轴向磁性悬浮力向右;反之,磁性悬浮力向左。

3 实验验证

图3所示为惯性质量的组成,圆环永磁体的轴向长度 L_m 不仅影响惯性质量受到的悬浮力,还影响软磁内芯和外壳的磁化强度,对倾角传感器的灵敏度具有重要影响。软磁和非磁性内芯为圆柱,软磁外壳为圆环,非磁性外壳包括2个圆环和永磁体两端的2个圆盘。

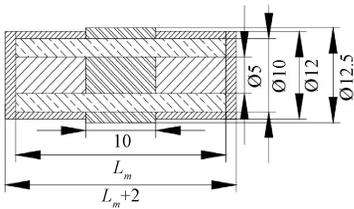


图3 惯性质量的结构尺寸

Fig. 3 The structural dimensions of inertia mass

惯性质量的结构参数如表1所示,惯性质量最大直径为12.5 mm,其余为12 mm,轴向长度为 $L_m + 2$ mm。

表1 惯性质量的结构参数

Table 1 Structural parameters of inertia mass (mm)

| 项目 | 外直径 | 内直径 | 轴向长度 |
|-------|------|-----|----------------|
| 圆环永磁体 | 10 | 5 | L_m |
| 软磁内芯 | 5 | 0 | 10 |
| 软磁外壳 | 12.5 | 10 | 10 |
| 非磁性内芯 | 5 | 0 | $(L_m - 10)/2$ |
| 非磁性外壳 | 12 | 10 | $(L_m - 10)/2$ |
| 非磁性圆盘 | 12 | 0 | 1 |
| 惯性质量 | - | 0 | $L_m + 2$ |

3.1 磁性液体悬浮力的研究

磁性液体悬浮力测量方法如图4所示。图4(b)中数字“1”为非磁性腔体;“2”为磁性液体;“3”为惯性质量;“4”为非磁性连接棒。由于轴向的悬浮力可以作为

回复力,在实验过程中保证惯性质量的和腔体的轴线重合,由对称性可知,惯性质量只受到沿轴向的悬浮力。悬浮力的测量装置由测力计、数显游标卡尺、垂直升降台、摇杆和非磁性连接棒等组成,其中非磁性棒连接惯性质量和测力计,测力计与数显游标卡尺和垂直升降台相固定,垂直升降台的垂直高度可通过摇杆调节。测力计用于测量悬浮力,其测量范围为-5~5 N,精度为0.001 N,数显游标卡尺用于测量惯性质量的轴向位移(图4(b)中D),精度为0.01 mm。

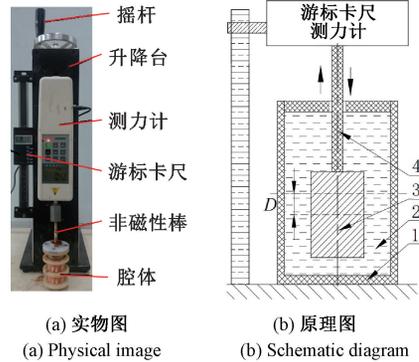


图4 磁性液体悬浮力的测量装置实物和原理

Fig. 4 The physical and schematic diagram of measuring device for magnetic fluid levitation force

实验选用机油基磁性液体,其饱和磁化强度约为29 kA/m。为了研究 L_m 对悬浮力的影响,分别取 L_m 为20、30和40 mm,用“ $L_m = 20$ mm”、“ $L_m = 30$ mm”和“ $L_m = 40$ mm”来表示对应的惯性质量。腔体的内直径为17.5 mm,外直径为20 mm,轴向长度分别为35、45、55 mm。磁性液体充满腔体,惯性质量在腔体内的行程都是13 mm,当惯性质量处于轴向中心位置时,其轴向位移为0 mm。

图5给出了轴向位移对悬浮力的影响,当轴向位移的增大时,悬浮力也增加。当永磁体轴向长度增加时,永磁体产生的磁场强度增加,导致腔体底面 p_m 增大,悬浮力增大;此外,软磁内芯和外壳对腔体底面 p_m 的影响减

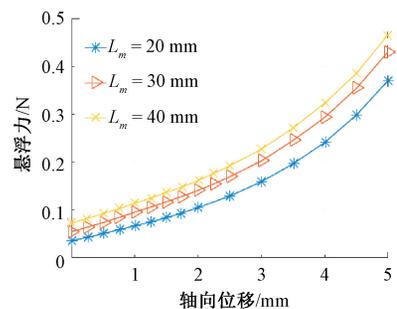


图5 惯性质量的位移和悬浮力的关系

Fig. 5 The relationship between the displacement of the inertial mass and levitation force

小,进一步导致悬浮力增大。当惯性质量向下的轴向位移增大时,底面 p_m 增大,悬浮力也增大。

3.2 线圈电感变化的研究

圆环永磁体的轴向长度越大,软磁内芯和软磁外壳越远离永磁体磁极,软磁材料对线圈电感的影响越大。为了研究 L_m 对线圈电感的影响,选用轴向长度为 10 mm,内直径为 20 mm,匝数为 480 的圆环线圈。线圈电感的测量采用图 4(a) 所示的实验装置,其测量原理如图 6 所示。图 6 中数字“1”为非磁性腔体;“2”为磁性液体;“3”为惯性质量;“4”为线圈;“5”为非磁性连接棒。两个线圈固定在腔体轴向中心两侧,惯性质量和线圈同轴放置;利用垂直升降平台改变惯性质量在腔体内的轴向位置。由于两个线圈的参数一样,故只测量其中一个线圈的电感变化。电感测量采用 UT603 电感电容表,测试频率为 1 kHz。

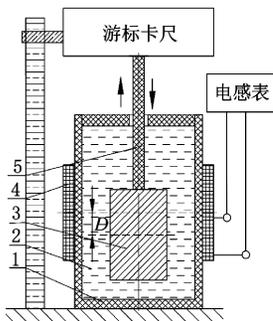


图 6 线圈电感测量原理

Fig. 6 The schematic of coil inductance measurement

电感测量实验结果如图 7 所示,由图可知“ $L_m = 30\text{ mm}$ ”和“ $L_m = 40\text{ mm}$ ”对线圈电感的影响相差不大,而“ $L_m = 20\text{ mm}$ ”对线圈电感的影响较小。表明当圆环永磁体轴向长度大于 30 mm 时,永磁体对软磁内芯和外壳的磁导率影响较小。相比于“ $L_m = 40\text{ mm}$ ”,“ $L_m = 30\text{ mm}$ ”具有更小的体积和质量,有利于磁性液体倾角传感器的小型化和轻量化,因此,在后续的实验中,选择“ $L_m = 30\text{ mm}$ ”作为惯性质量。

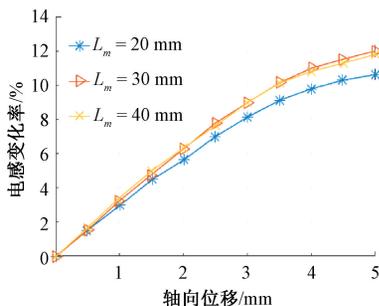


图 7 线圈电感和惯性质量位移的关系

Fig. 7 The relationship between the displacement of inertia mass and coil inductance

3.3 信号源的频率对输出电压的影响研究

采用图 8 所示的电桥调幅电路将线圈的电感变化转换成倾角传感器的输出信号。图中 u_i 表示信号源电压,即变压器电桥的输入电压; u_i 为变压器的次级电压,即施加于线圈两端的电压,且有 $u_i : u_i = 1 : 1$; Z_1 和 Z_2 分别表示 2 个线圈的阻抗, u_o 为倾角传感器的输出电压。适量增大信号源的频率可以有效提高倾角传感器的灵敏度,但当频率过大时,惯性质量中内芯和外壳的涡流效应将增大、线圈的趋肤效应增强,从而降低倾角传感器的灵敏度。利用泰克 AFG2021 任意函数信号发生器产生交流信号源,利用图 4(a) 所示的实验装置调节惯性质量在腔体内的轴向位置,采用福禄克 (FLUKR) 287C 万用表测量调幅电路的输出电压。

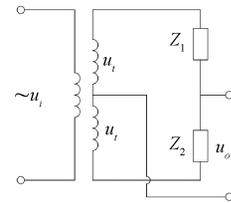


图 8 电桥调幅电路

Fig. 8 The schematic diagram of bridge amplitude modulation circuit

采用选定的惯性质量“ $L_m = 30\text{ mm}$ ”进行实验,2 个线圈采用反向串联的方式,惯性质量的轴向位移和倾角传感器输出电压的依赖关系如图 9 所示。当信号源的频率增加时,传感器的输出电压首先增大,达到最大值后,输出电压不断下降。当频率 $> 10\text{ kHz}$ 时,增加频率不能有效提高输出电压,因此,信号源的频率选择 10 kHz。

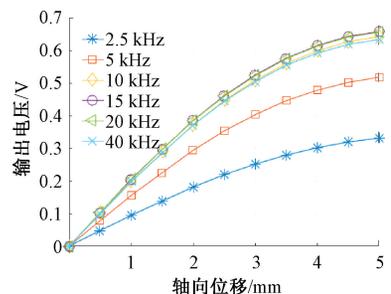


图 9 信号源频率对倾角传感器输出的影响

Fig. 9 The influence of signal source frequency on output of inclination sensor

3.4 倾角测量实验研究

倾角测量实验装置如图 10 所示,将磁性液体倾角传感器放置于平板上,通过改变升降台的高度来改变平板的倾斜角度。平板上放置商用倾角测量仪用来测量平板

的倾斜角度,倾角测量仪测量精度为 $\pm 0.2^\circ$,分辨率为 0.05° ,重复性为 0.1° 。



图 10 倾角测量实验装置

Fig. 10 The experimental device for inclination measurement

倾角测量的实验结果如图 11 所示,图 11(a)为倾斜角度和输出电压的关系,图 11(b)为等效轴向加速度对输出电压的影响。由图可知,倾斜角度和输出电压之间的线性度较好,当测量范围为 $0^\circ \sim 42^\circ$ 时,输出电压和倾角之间的线性度约为 6.5%。磁性液体倾角传感器的灵敏度约为 $5 \text{ V}/^\circ$,灵敏度得到了很大的提高^[22-23,28],最高可达 100 倍。

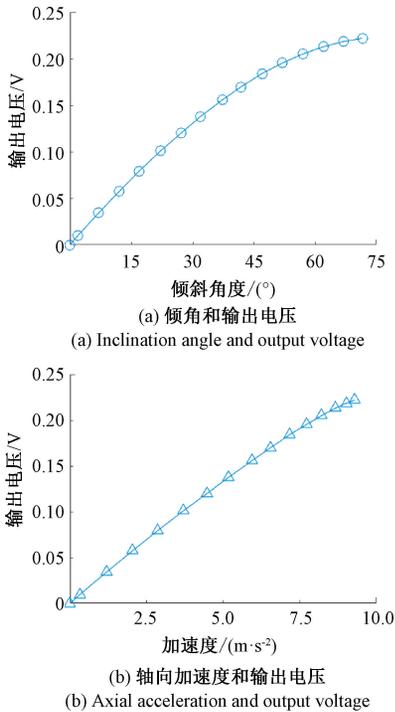


图 11 倾角测量实验结果

Fig. 11 The experimental results of inclination measurement

把倾斜角度从 0° 增加到 71.5° ($0 \sim 9.3 \text{ m/s}^2$)即正行程,随后将倾斜角度从 71.5° 下降到 0° 即反行程,倾角传感器的输出电压如图 12 所示,由图可知倾角传感器正、反行程的实验结果吻合程度较好,迟滞不超过 1%。

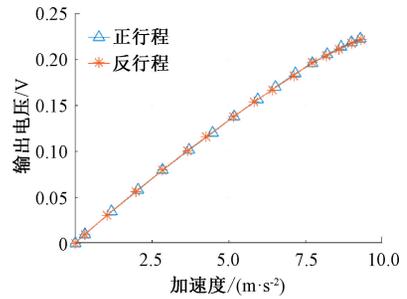


图 12 倾角传感器迟滞测量结果

Fig. 12 The experimental results of hysteresis of inclination sensor

4 结 论

本文提出了一种基于磁化-涡流效应的磁性液体倾角传感器。利用圆环永磁体、软磁金属和非磁性金属组成惯性质量,通过复合软磁金属的磁化效应和非磁性金属的涡流效应来增加倾角传感器的灵敏度;利用软磁和非磁性金属包裹永磁体防止剧烈冲击下的损坏。推导了数学公式用于计算磁性液体悬浮力;研究了惯性质量的轴向长度对悬浮力和线圈电感的影响,结果表明增加圆环永磁体的轴向长度在增加悬浮力的同时也能增加线圈电感的变化;研究了信号源的频率对传感器输出电压的影响,结果表明适当提高信号源频率可以有效提高输出电压,但频率过大反而会降低输出电压。当倾角的范围为 $0^\circ \sim 42^\circ$ 时,输出电压和倾角之间的线性度约为 6.5%,灵敏度为 $5 \text{ mV}/^\circ$,迟滞不超过 1%。相比于利用永磁体或磁性液作为惯性质量的倾角传感器,复合磁化和涡流效应显著提高了传感器的灵敏度。

参考文献

- [1] 赵心语,姚杰,刘嘉盟,等. 一种高灵敏度磁性液体倾角传感器的研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(2): 10-16.
ZHAO X Y, YAO J, LIU J M, et al. Study on a high sensitivity magnetic fluid inclination sensor[J] Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(2): 10-16.
- [2] 杨祖龙. 一种新型磁性液体倾角传感器的设计和性能研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2024.
YANG Z L. Design and performance study of a new magnetic liquid inclination sensor[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2024.
- [3] YU J, LI D C, LI S H B, et al. Electromagnetic vibration energy harvester using magnetic fluid as lubricant and liquid spring[J]. Energy Conversion and Management, 2023, 286: 117030.

- [4] YU J, YAO J, LI D C, et al. A nonlinear electromagnetic vibration energy harvester lubricated by magnetic fluid for low-frequency vibration [J]. *Applied Physics Letters*, 2023, 123(4): 043901.
- [5] YANG X R, ZHENG H, SHAO J L, et al. Output characteristics of an electromagnetic-triboelectric hybrid energy harvester based on magnetic liquid [J]. *ACS Applied Electronic Materials*, 2023, 5(2): 775-783.
- [6] 姚杰, 李辉, 李德才, 等. 一种航天用磁性液体吸振器的减振性能研究 [J]. *振动与冲击*, 2023, 42(21): 298-305.
YAO J, LI H, LI D C, et al. Damping performance of a magnetic liquid vibration absorber for spacecrafts [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2023, 42(21): 298-305.
- [7] 魏义兼. 基于磁性液体二阶悬浮特性的半主动式动力吸振器研究 [D]. 浙江: 温州大学, 2022.
WEI Y J. Research on semi-active dynamic absorber based on second-order levitation characteristics of magnetic fluid [D]. Zhejiang: Wenzhou University, 2022.
- [8] ZHANG Y M, YANG W R, WEI D J, et al. Energy dissipation of tuned magnetic fluid rolling-ball damper in low-frequency vibration [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2023, 59(4): 4600311.
- [9] LI W X, LI ZH G, HAN W, et al. Pumping-velocity variation mechanisms of a ferrofluid micropump and structural optimization for reflow inhibition [J]. *Physics of Fluids*, 2023, 35(5): 052005.
- [10] YAO J, LI H, YU J, et al. Research on the backpressure and backflow of a ferrofluid linear pump [J]. *Sensors and Actuators: A. Physical*, 2024, 375: 115537.
- [11] LI Y J, FAN Y C, HUANG C Y, et al. Application and performance of temperature-sensitive magnetic fluid in micro-thermomagnetic pump system with series connection [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2024, 157: 107759.
- [12] 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.
- [13] 王星. 差动变压器式磁性液体倾角传感器的关键技术研究 [D]. 河南: 华北水利水电大学, 2023.
WANG X. Research on key technologies of differential transformer type magnetic fluid inclination sensor [D]. Henan: North China University of Water Resources and Electric Power, 2023.
- [14] YAO J, LIU J M, HU Y, et al. The theoretical and experimental study of a ferrofluid inertial sensor [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(1): 107-114.
- [15] HE X ZH, YANG Z L, WANG ZH B, et al. Study on second-order buoyancy segment linearity in magnetic liquids [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2023, 585: 171076.
- [16] 牧学禹. 贯通式磁性液体加速度传感器的仿真与实验研究 [D]. 河南: 华北水利水电大学, 2022.
MU X Y. Simulation and experimental study on through-type magnetic fluid acceleration sensor [D]. Henan: North China University of Water Resources and Electric Power, 2022.
- [17] 苏树强. 一种新型磁性液体惯性传感器的理论及实验研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
SU SH Q. Theoretical and experimental research on a new type of magnetic fluid inertial sensor [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [18] LAGUTKINA D Y, SAIKIN M S. The research and development of inclination angle magnetic fluid detector with a movable sensing element based on permanent magnets [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2017, 431: 149-151.
- [19] 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.
- [20] XIE J, LU Y CH, LIU Y T, et al. Design and characteristics research on the magnetic fluid tactile sensor [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(1): 30-38.
张西宁, 夏心锐, 向宙, 等. 一种新型磁流体加速度传感器 [J]. *西安交通大学学报*, 2019, 53(2): 1-8, 79.
ZHANG X N, XIA X R, XIANG ZH, et al. A new type of magnetic fluid acceleration sensor [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2019, 53(2): 1-8, 79.
- [21] PISO M I. Applications of magnetic fluids for inertial sensors [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1999, 201: 380-384.
- [22] QIAN L P, LI D C, YU J. The theoretical and experimental study of a novel two-dimensional magnetic fluid accelerometer [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(23): 8412-8419.
- [23] YAO J, HUANG CH, LI D C. Research on a novel ferrofluid inertial sensor with levitating nonmagnetic

- rod[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(5): 1130-1135.
- [24] 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.
- [25] ANDO B, ASCIA A, BAGLIO S. A ferrofluidic inclinometer in the resonant configuration[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2010, 59(3): 558-564.
- [26] 杨文荣, 杨庆新, 樊长在, 等. 磁流体加速度传感器的特征参量分析[J]. 仪器仪表学报, 2006(10): 1228-1231.
YANG W R, YANG Q X, FAN CH Z, et al. Characteristic parameter analysis of magnetic fluid acceleration sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006(10): 1228-1231.
- [27] YANG W R, YANG Q X, YAN R G, et al. Theoretical and experimental researches on magnetic fluid acceleration sensor[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics 2010, 33(1/2): 655-663.
- [28] QIAN L P, LI D C, YU J. Study of the second-order levitation force in the magnetic fluid accelerometer[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(12): 6805-6810.

作者简介



喻峻 (通信作者), 2015 年于北京交通大学获得学士学位, 2020 年于北京交通大学获得博士学位, 现为中国科学院赣江创新研究院副研究员, 主要研究方向为波浪能发电和自供技术、磁性液体悬浮和密封技术。

E-mail: jyu@gia.cas.cn

Yu Jun (Corresponding author) received his B.Sc. degree and Ph.D. degree both from Beijing Jiaotong University in 2015 and 2020. He is currently an associate research fellow at Ganjiang Innovation Academy, Chinese Academy of Sciences. His main research interests include wave energy harvesting, self-

power technology, magnetic fluid levitation, and sealing technology.



李德才, 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, 现为清华大学机械工程系教授, 主要研究方向为磁性液体密封、阻尼减振和传感器技术。

E-mail: lidecai@mail.tsinghua.edu.cn

Li Decai 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 in the Department of Mechanical Engineering at Tsinghua University. His main research interests include magnetic fluid sealing, damping and vibration reduction, and sensor technology.



王德义, 2018 年于河北科技大学获得学士学位, 现为北京交通大学博士研究生, 主要研究方向为磁性液体密封技术。

E-mail: 19116020@bjtu.edu.cn

Wang Deyi received his B.Sc. degree from Hebei University of Science and Technology in 2018. He is currently a Ph.D. student at Beijing Jiaotong University. His main research interest includes magnetic fluid seal technology.



何新智, 2002、2005 和 2011 年于北京交通大学分别获得学士、硕士和博士学位, 现为北京交通大学机械与电子控制工程学院副教授, 研究内容为磁性液体密封技术和惯性传感器。

E-mail: xzhe@bjtu.edu.cn

He Xinzhì received his B.Sc. degree, M.Sc. degree, and Ph.D. degree all from Beijing Jiaotong University in 2002, 2005, and 2011, respectively. He is currently an associate professor in the School of Mechanical, Electronic and Control Engineering at Beijing Jiaotong University. His main research interests include magnetic fluid sealing technology and inertial sensors.