

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2413282

# 基于电磁感应的抗磁悬浮倾角传感器\*

徐园平,袁高展,周瑾,于敏

(南京航空航天大学机电学院 南京 210016)

**摘要:**倾角传感器作为重要的角度测量仪器,广泛应用于航空航天器姿态监测等领域。高分辨率、高灵敏度的倾角传感器是准确角度获取的前提,但现有倾角传感器难以摆脱摩擦造成的精度影响,制约其在精密测量领域应用。提出一种基于电磁感应的抗磁悬浮倾角传感器,具有高分辨率和非接触测量的特点。通过采用抗磁性物质作为敏感元件,构建具有势能阱的永磁体阵列,实现敏感元件稳定悬浮;基于测量单元与敏感元件间电磁感应效应,敏感元件悬浮位置随倾角改变而变化的特点,提出倾角测量原理;搭建实验平台进行传感器性能测试。实验表明倾角传感器可以实现双轴 $\pm 1.3^\circ$ 范围倾角测量,分辨率为 $0.005^\circ$ ,线性度为 $0.18\%$ ,在微小倾角精密测量领域具有广阔应用价值。

**关键词:**倾角传感器;抗磁悬浮;电磁感应

中图分类号: TH703 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

## Diamagnetic levitation inclinometer based on electromagnetic induction

Xu Yuanping, Yuan Gaozhan, Zhou Jin, Yu Min

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 20016, China)

**Abstract:** As an important angle measurement device, the inclinometer is widely applied in aerospace attitude monitoring and other fields. High-resolution and high-sensitivity inclinometer is a prerequisite for accurate angle acquisition. However, existing inclinometers are often affected by friction-induced accuracy limitations, hindering their applications in precision measurement fields. This article proposes a diamagnetic levitation inclinometer based on electromagnetic induction, characterized by high resolution and non-contact measurement. By utilizing diamagnetic materials as a sensitive element and constructing a permanent magnet array with a potential energy well, stable levitation of the sensitive element is achieved. The measurement principle of the inclinometer is proposed based on the electromagnetic induction effect between the measurement unit and the sensitive element, the levitation position of the sensitive element changes with the input angle. An experimental platform is established to test the sensor's performance. Experimental results show that the inclinometer can achieve dual-axis angle measurements within a range of  $\pm 1.3^\circ$ , resolution of  $0.005^\circ$ , and linearity of  $0.18\%$ . It has significant potential for applications in the precision measurement of small tilt angles.

**Keywords:** inclinometer; diamagnetic levitation; electromagnetic induction

## 0 引言

倾角传感器作为重要的测量仪器,广泛应用于各类测量物体相对参考平面偏离程度的场合<sup>[1]</sup>。如航空航天器飞行姿态<sup>[2]</sup>、起重机主梁弯曲程度<sup>[3]</sup>、工件精密加工<sup>[4]</sup>等领域。随着测量技术的不断进步与发展,测量精度要求不断提升,高灵敏度、高分辨率的倾角传感器得到越来越

越多的应用。尤其是精密加工领域,角度测量用于确保工件加工的精度和质量。因此在精密测量领域对高灵敏度、高分辨率的倾角传感器具有着重要需求<sup>[5-7]</sup>。

倾角传感器一般主要由定子、敏感元件和测量单元组成。当倾角传感器倾斜时,敏感元件与定子之间产生相对位移,测量单元通过直接或者间接测量定子与敏感元件之间的相对位移来反映倾角的大小。随着科学技术的不断进步,倾角传感器种类愈发多样,敏感元件的选择

收稿日期:2024-09-15 Received Date: 2024-09-15

\* 基金项目:国家自然科学基金(52275537)项目资助

不仅仅局限于固态物体,采用液态或者气态物体作为敏感元件的倾角传感器也愈发成熟。根据不同的测量手段,目前倾角传感器主要类型可以分为光栅式、电感式、磁阻式等倾角传感器。Wang 等<sup>[8]</sup>提出了一种光栅式倾角传感器,使用光学栅格来监测敏感元件倾斜程度,在倾角作用下,光线与栅格交点位置产生信号通过监测该信号对倾角进行监测。该传感器分辨率为  $0.1^\circ$ ,线性度为  $2\%$ 。Li 等<sup>[9]</sup>提出了一种电感式倾角传感器,通过测量传感器电感变化并将其转化为电信号输出,这种非接触式设计提高了传感器分辨率,分辨率为  $0.09^\circ$ ,线性度为  $0.3\%$ 。Kumar 等<sup>[10]</sup>提出了一种磁阻式倾角传感器,利用磁阻效应,通过监测磁性材料的敏感元件内部磁阻随倾角变化来反映倾角变化,其分辨率为  $0.08^\circ$ ,线性度可达  $0.23\%$ 。

抗磁悬浮式倾角传感器作为非接触式倾角传感器的一种,其敏感元件由抗磁性物质组成,无需外界能量输入即可实现被动稳定悬浮在永磁体阵列中<sup>[11]</sup>,简化了传感器结构,提高了倾角传感器的灵敏度和精度。Barrot<sup>[12]</sup>提出了一种基于“V”型永磁体阵列布局的抗磁悬浮倾角传感器,采用 Thomson 跳环和电磁感应手段实现了  $\pm 6^\circ$  角度范围的倾角测量。Xu 等<sup>[13]</sup>提出了一种基于磁极对与石墨棒结构的抗磁悬浮倾角传感器,采用光学测量原理对石墨棒悬浮位置进行监测,从而实现了小量程范围内倾角精密测量。然而目前针对抗磁悬浮倾角传感器的研究依然相对较少,且难以满足小型化、高精度、低成本的需求。结合抗磁悬浮原理和电磁感应测量手段,提出了一种基于电磁感应的抗磁悬浮倾角传感器,以满足更多领域对高分辨率高灵敏度倾角传感器的需求。

首先开展传感器结构与测量电路设计,其次建立了传感器磁场及势能分布、抗磁力及测量电路“位移-电感”模型,并进行了仿真计算;最后进行了传感器性能测试,实验表明该倾角传感器可以实现双轴  $\pm 1.3^\circ$  范围的测量,分辨率可达  $0.005^\circ$ ,线性度为  $0.18\%$ 。

## 1 传感器设计和测量原理

### 1.1 传感器结构设计

基于电磁感应的抗磁悬浮倾角传感器由抗磁悬浮结构和测量电路两部分组成,主要结构包括永磁体阵列、测量单元和敏感元件。如图 1 所示,永磁体阵列由充磁方向交错排列的 4 块方形永磁体组成,测量单元由两组正交排列的正负环结构的平面螺旋线圈组成,其打印在柔性印刷电路板 (flexible printed circuit, FPC) 上<sup>[14]</sup>。敏感元件选择抗磁性材料热解石墨片,其能被动稳定悬浮在永磁体阵列中央上方且在平面螺旋线圈高频激励作用下产生涡流<sup>[15]</sup>。

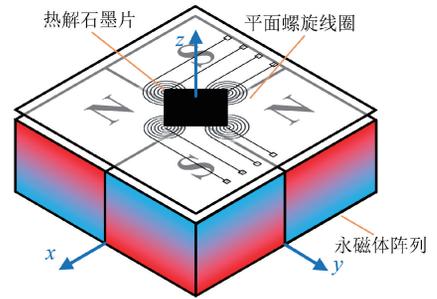


图 1 传感器结构

Fig. 1 Diagram of the sensor structure

热解石墨片在平面螺旋线圈产生的交变磁场中产生涡流,所产生的涡流磁场方向与原始磁场方向相反,阻碍着原始磁场,使平面螺旋线圈的等效阻抗发生相应变化,导致不同回路中的感应电压也不同<sup>[16-17]</sup>,采用差动测量的方法得到输出电压。最终输出电压是由平面螺旋线圈和热解石墨片的相对位置决定的。当传感器受到倾角时,热解石墨片位置发生改变,传感器输出感应电压大小随热解石墨片移动而有规律的变化。通过观测输出电压信号,从而反映传感器倾角大小。

### 1.2 抗磁悬浮倾角测量原理与建模

自然界的物质在外界磁场作用下会被磁化,产生附加磁场。根据物质的磁化率可以将物质分为顺磁性物质、抗磁性物质以及铁磁性物质。抗磁性物质磁化率  $< 0$ ,数值与  $0$  十分接近,所产生的附加磁场与外界磁场方向相反。这种特性使其能在外界磁场中总是受到排斥力,即抗磁力。因此,通过合理设计磁场与热解石墨片的结构,可以使抗磁力合理补偿热解石墨片自身的重力,从而实现热解石墨片在磁场中被动稳定悬浮。

为便于理论分析,以永磁体阵列下底面为中心建立笛卡尔坐标系。基于安培环路定理,在笛卡尔坐标系中任意一点  $(x, y, z)$  处的磁通密度  $B$  沿坐标轴各分量可以表示为<sup>[18]</sup>:

$$B_x(x, y, z) = \frac{\mu_0 M_s}{4\pi} \times$$

$$\int_0^h \int_0^b \left( \frac{z - z_0}{[(x - a)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2]^{3/2}} + \frac{z_0 - z}{[x^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2]^{3/2}} \right) dy_0 dz_0$$

$$B_y(x, y, z) = \frac{\mu_0 M_s}{4\pi} \times$$

$$\int_0^h \int_0^a \left( \frac{z - z_0}{[(x - x_0)^2 + (y - b)^2 + (z - z_0)^2]^{3/2}} + \right.$$

$$\frac{z_0 - z}{[(x - x_0)^2 + y^2 + (z - z_0)^2]^{3/2}} dx_0 dz_0 \quad (1)$$

$$B_z(x, y, z) = \frac{\mu_0 M_s}{4\pi} \times$$

$$\int_0^h \int_0^b \left( \frac{a - x}{[(x - a)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2]^{3/2}} + \frac{x}{[x^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2]^{3/2}} \right) dy_0 dz_0 +$$

$$\int_0^h \int_0^a \left( \frac{a - x}{[(x - a)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2]^{3/2}} + \frac{x}{[x^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2]^{3/2}} \right) dx_0 dz_0$$

式中:  $\mu_0$  为真空磁导率;  $M_s$  为永磁体磁化强度;  $a$ 、 $b$ 、 $h$  分别为永磁体长度、宽度、高度。

热解石墨片在磁通密度  $B$  下磁化强度  $M$  为:

$$M = \frac{\chi_m}{(1 + \chi_m)\mu_0} B \approx \frac{\chi_m}{\mu_0} B \quad (2)$$

式中:  $\chi_m$  为热解石墨片的磁化率。

由于热解石墨片磁化率具有各向异性,因此需要考虑水平磁化率  $\chi_{//}$  和垂直 2 种磁化率  $\chi_{\perp}$  对热解石墨片磁化强度进行耦合求解<sup>[19]</sup>。

由此可推出体积为  $V$  的热解石墨片在磁通密度  $B$  下的磁势能  $U_{\text{mag}}$  的表达式为:

$$U_{\text{mag}} = - \int M dB = - \frac{\chi_m}{2\mu_0} B^2 V \quad (3)$$

热解石墨片在磁场中的总势能由重力势能  $U_g$  和磁势能  $U_{\text{mag}}$  组成,体积为  $V$  的热解石墨片的总势能  $U_{\text{total}}$  可以表示为:

$$U_{\text{total}} = U_{\text{mag}} + U_g = \iiint_V - \frac{\chi_m}{2\mu_0} B^2 dv + U_g \quad (4)$$

根据力与势能的关系<sup>[20]</sup>,热解石墨片所受抗磁力

$F_{\text{dia}}$  可以表示为:

$$F_{\text{dia}} = \iiint_V \frac{1}{2\mu_0} \chi_m \nabla(B^2) dv \quad (5)$$

抗磁力沿矢量方向  $x$ 、 $y$ 、 $z$  各分量可以表示为:

$$F_{\text{dia},x} = \frac{1}{2\mu_0} \int_0^{h_s} \int_0^{b_s} (\chi_{//} B_x^2 + \chi_{//} B_y^2 + \chi_{\perp} B_z^2) dy dz$$

$$F_{\text{dia},y} = \frac{1}{2\mu_0} \int_0^{h_s} \int_0^{a_s} (\chi_{//} B_x^2 + \chi_{//} B_y^2 + \chi_{\perp} B_z^2) dx dz \quad (6)$$

$$F_{\text{dia},z} = \frac{1}{2\mu_0} \int_0^{h_s} \int_0^{a_s} (\chi_{//} B_x^2 + \chi_{//} B_y^2 + \chi_{\perp} B_z^2) dx dy$$

式中:  $a_s$ 、 $b_s$ 、 $h_s$  为热解石墨片长度、宽度、厚度。

当热解石墨片的总势能为极小值时,由力与势能的

关系可知,处于极小值处的热解石墨片所受合外力为 0,热解石墨片在永磁体阵列中处于稳定悬浮状态。永磁体阵列水平时热解石墨片的总势能的最低点出现在永磁体阵列中心处,此时热解石墨片在矢量方向  $x$ 、 $y$  方向上所受抗磁力合力为 0, $z$  方向上所受抗磁力与热解石墨片重力相平衡。

当永磁体阵列与水平面产生倾角  $\theta$  时,热解石墨片的重力势能和磁势能会发生相应变化,其总势能表达式为:

$$U_{\text{total}} = mg \left[ \left( \frac{a_s}{2} - d \right) \sin\theta + \left( h_f + \frac{h_s}{2} \right) \cos\theta - \frac{h_s}{2} \right] + \iiint_V - \frac{\chi_m}{2\mu_0} B^2 dv \quad (7)$$

式中:  $m$  为热解石墨片质量;  $g$  为引力常数;  $d$  为热解石墨片位移;  $h_f$  为热解石墨片悬浮高度。

当热解石墨片未处于势能极小点时,它会沿势能梯度进行位移,直至热解石墨片在磁场中的总势能重新达到极小值。当热解石墨片稳定悬浮时,其受力的情况如图 2 所示,图中  $G$  为热解石墨片自身重力。由此可得当传感器产生倾角  $\theta$  时,热解石墨片悬浮位置与传感器倾角  $\theta$  之间的关系为:

$$\begin{cases} f_1(d, h_f) = \frac{F_{\text{dia},x}}{G \sin\theta} \\ f_2(d, h_f) = \frac{F_{\text{dia},z}}{G \cos\theta} \end{cases} \quad (8)$$

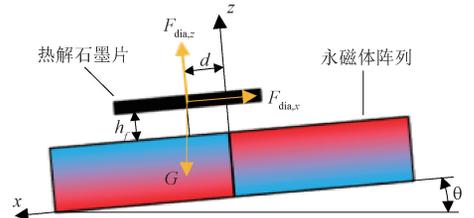


图 2 热解石墨片稳定悬浮受力

Fig. 2 Diagram of stable levitation of

由此可得到倾角与热解石墨片位移的关系式为:

$$\theta = \arctan \frac{F_{\text{dia},x} f_2(d, h_f)}{F_{\text{dia},z} f_1(d, h_f)} \quad (9)$$

### 1.3 传感器测量电路设计

传感器测量电路由测量单元和后处理电路组成,其中后处理电路包含基于并联谐振电路的调制电路以及对调制信号进一步处理的调理电路,其总体设计方案如图 3 所示。

激励信号部分,本传感器使用恒压源对传感器测量电路进行供电,采用频率为 5 MHz 的有源晶振提供高频初始信号,选用 SN74HC4040D 分频芯片将其所产生的

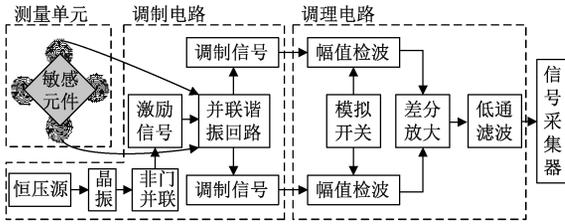


图3 传感器测量电路总体方案

Fig. 3 Overall scheme of sensor measurement circuit

信号进行四分频。输出占空比为50%的方波激励信号。利用74HC04集成电路进行非门并联,提高激励信号的带载和抗干扰能力。

传感器测量单元由两组打印在FPC电路板上的正交差动平面螺旋线圈组成,测量单元位于永磁体阵列和悬浮在其上的热解石墨片气隙之间,贴合在永磁体阵列上。

由于传感器测量单元中平面螺旋线圈电感是 $\mu\text{H}$ 级别,容易受到环境噪声干扰,采用传统的并联谐振回路作为调制电路时,谐振电路品质因数会下降<sup>[21]</sup>。为了使谐振效果可以达到测量需求,提出在并联谐振的线圈电感桥臂上串联附加电感以增大谐振回路总电感。此时,传感器平面测量线圈电感变化量相对于谐振总电感的比率会下降,但是由于并联谐振回路在串联附加电感后能有效提高品质因数,进而提升传感器灵敏度。传感器测量单元与调制电路具体排布如图4所示。

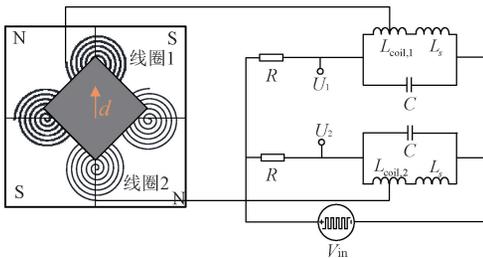


图4 传感器测量单元与调制电路

Fig. 4 Detect unit and modulation circuit of the sensor

图4中 $R$ 为采样电阻, $L_s$ 为附加电感, $C$ 为谐振电容。采用并联谐振回路进行信号转化,将石墨片位置和姿态改变引起测量单元平面螺旋线圈的等效电感变化转化为电压变化<sup>[22-23]</sup>。回路中同一支路电感、电容与采样电阻构成一个电桥电路, $U_1$ 为线圈1所在桥路的输出电压, $U_2$ 为线圈2所在桥路的输出电压。

在高频交变激励信号作用下,平面螺旋线圈周围产生交变磁场,当传感器受到倾角 $\theta$ 而引起敏感元件与测量线圈之间产生相对位移 $d$ 时,敏感元件内部所产生的

涡流磁场会反作用于平面螺旋线圈,引起同组差动线圈1和2的等效阻抗发生不同程度的变化。由于位移较小,其等效电感变化可以近似线性化处理。平面螺旋线圈等效电感最终值 $L_{\text{coil}1,2}$ 可以近似表示为:

$$L_{\text{coil}1,2} = L_0(1 \pm k \cdot d) \quad (10)$$

式中: $k$ 为衰减系数,具体数值需通过实验进行辨识; $L_0$ 为平面螺旋线圈初始电感。

对于并联谐振回路一个分支,其总电感 $L_{1,2}$ 与总阻抗 $Z_{1,2}$ 随热解石墨片位移 $d$ 变化关系分别为:

$$L_{1,2} = L_s + L_{\text{coil}1,2} \quad (11)$$

$$Z_{1,2} = R + j\omega L_{1,2} + \frac{1}{j\omega C} \quad (12)$$

式中: $\omega$ 为谐振回路激励信号角频率。

由此可得差动回路等效阻抗 $Z_{\text{eq}}$ 为:

$$Z_{\text{eq}} = \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (13)$$

将倾角与位移关系式(9)带入式(13),可得并联谐振回路每一个支路电压,即调制信号 $U_{1,2}$ 随输入倾角 $\theta$ 关系:

$$U_{1,2}(\theta) = V_{\text{in}} \times \frac{Z_{1,2}(\theta)}{Z_{\text{eq}}(\theta)} \quad (14)$$

式中: $V_{\text{in}}$ 为传感器激励信号幅值。

由于在倾角量程变化范围内,调制信号对倾角变化响应较为微小,且包含外界噪声干扰,需要对其进行信号调理以达到对倾角的精确测量<sup>[24]</sup>。首先,利用模拟开关对调制信号进行幅值检波,提取信号幅值信息 $V_{1,2}(\theta)$ 。接着采用差分放大器对其进行差分放大处理,得到差分信号 $U(\theta)$ :

$$U(\theta) = K \cdot (V_1(\theta) - V_2(\theta)) \quad (15)$$

式中: $K$ 为差分放大器的放大倍数。

采用差动测量的手段能有效降低非线性误差以及环境共模噪声,提高传感器灵敏度<sup>[25-26]</sup>。此时差分信号仍包含外界高频噪声干扰,因此本传感器在后处理电路中增加了基于“电阻-电容”结构的低通滤波器对差分信号进行滤波,最终得到输出电压 $U_{\text{out}}$ 并使用信号采集器对其进行采集观测。

## 2 传感器系统参数辨识及量程分析

由于实际材料分布不均匀,加工误差等原因,倾角传感器系统理论模型参数与实际参数存在偏差,为获得准确的倾角传感系统模型,进行敏感元件悬浮稳定性及传感器测量量程分析,本文通过磁通密度模型参数辨识、抗磁力模型参数辨识、测量电路模型参数辨识实验,获得准确的倾角传感器系统模型。本文所采用的永磁体阵列及热解石墨片的主要参数如表1所示。

表 1 永磁体阵列及热解石墨片主要参数

Table 1 Main parameters of the permanent magnet array and pyrolytic graphite sheet (mm)

参数	数值
永磁体边长 $a$	10
永磁体高度 $h$	4
热解石墨片边长 $a_s$	10
热解石墨片厚度 $h_s$	0.5
热解石墨片悬浮高度 $h_f$	0.8

2.1 磁通密度模型参数辨识及悬浮稳定性分析

为了获得准确的永磁体磁化强度  $M_s$ , 需进行磁通密度测量实验。磁通密度测量装置结构图如图 5 所示, 磁通密度测量装置由底座, 托物台, 移动架和探测笔组成。其中垂直移动架可以沿  $z$  轴上下运动, 水平移动架可以实现  $xy$  平面上的平动, 实验中将永磁体阵列放在托物台上, 将探测笔固定在移动架上即可测量出探测笔尖处磁通密度的大小。

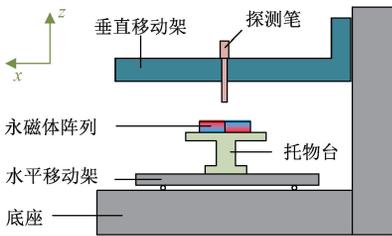


图 5 磁通密度测量装置

Fig. 5 Magnetic flux density measurement device

实验中, 探测笔测量距离永磁体阵列上方 0.8 mm, 此高度为本传感器所选择的热解石墨片在永磁体阵列上方稳定悬浮高度。以 0.1 mm 为步长, 对水平平面上以垂直磁通密度  $B_z$  进行测量,  $B_z$  随在悬浮平面的变化理论模型如图 6(a) 所示, 实验数据如图 6(b) 所示:

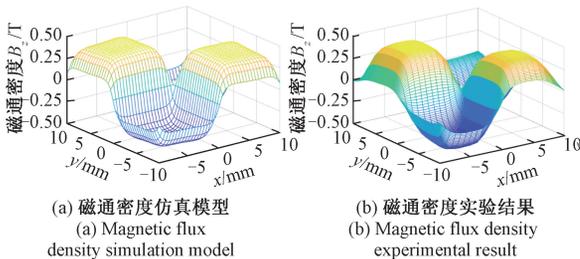


图 6 悬浮平面磁通密度  $B_z$  分布

Fig. 6 Magnetic flux density  $B_z$  distribution on levitation plane

由图 6 可知, 悬浮平面垂直方向磁通密度  $B_z$  理论模型与实验模型误差较小, 吻合较好, 验证了磁通密度理论

模型正确性与有效性。经实验精确辨识, 永磁体磁化强度  $M_s = 1.15 \times 10^{-6} \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ 。由此可得沿矢量方向  $x$  磁通密度及其沿坐标轴各分量分布, 如图 7 所示:

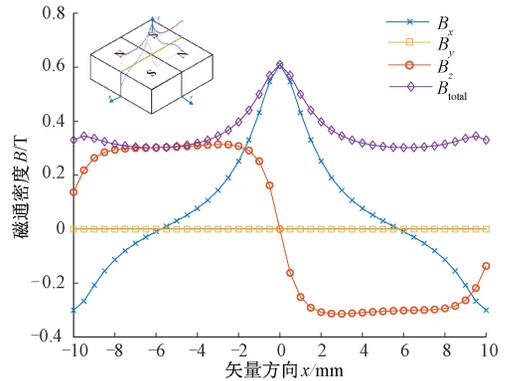


图 7 热解石墨片悬浮高度沿矢量方向  $x$  磁密分布

Fig. 7 Magnetic flux density distribution in the vector direction  $x$  of the pyrolytic graphite sheet levitation height

将磁通密度分布带入式 (3), 求得传感器水平放置时热解石墨片悬浮平面磁势能分布, 如图 8 所示。

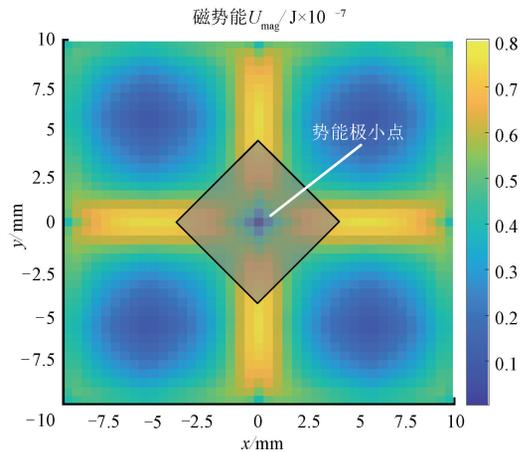


图 8 悬浮平面磁势能分布

Fig. 8 Magnetic potential energy distribution on the levitation plane

根据势能分布图可知, 传感器水平放置时, 在永磁体阵列中心位置处磁势能存在极小值, 即存在磁势阱, 此时抗磁性材料热解石墨片能够被动稳定悬浮在永磁体阵列中央。

如图 9 所示, 当传感器沿矢量方向  $x$  倾斜时, 热解石墨片势能极小点位置会发生变化, 热解石墨片会沿倾斜角度移动一定距离, 直至重新到达势能极小点。随着倾斜角度的不断增大, 热解石墨片重力势能的不断提升, 其在永磁体阵列中的总势能变化逐渐变大, 势能阱深度不断变小, 直至倾角为  $4.1^\circ$  时系统不存在满足敏感元件稳

定悬浮的势能极小点,热解石墨片发生失稳,反映传感器最大可测角度。势能极小点为确定传感器测量量程提供了参考。

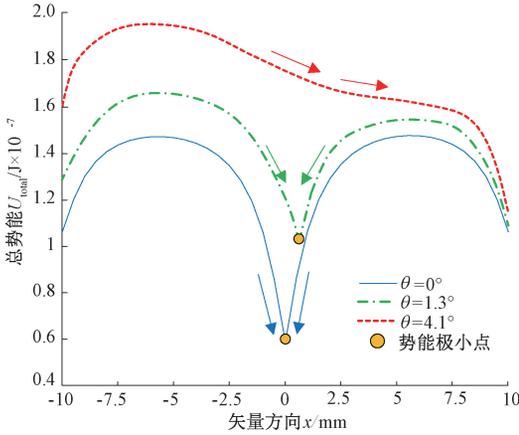


图9 不同倾角下热解石墨片总势能分布

Fig. 9 Total potential energy distribution of pyrolytic graphite sheet under different tilt angles

## 2.2 抗磁力模型参数辨识及理论测量量程分析

为了建立精确的热解石墨片倾角与位移对应关系,从而确定传感器理论测量量程。需对热解石墨片垂直磁化率 $\chi_{\perp}$ 与水平磁化率 $\chi_{\parallel}$ 进行参数辨识,通过测量热解石墨片所受抗磁力得到。抗磁力测量装置由托物台,精密天平,移动架组成。如图10所示,永磁体阵列和热解石墨片分别固定在连接精密天平和移动架的托物台上,热解石墨片通过石蜡与移动架上的托物台贴合。精密天平分辨率可达0.0001 g。抗磁力测量原理图如图11所示,通过精密天平测量出托物台及永磁体阵列的初始重量,当移动架移动时,精密天平的读数还额外受到来自热解石墨片的抗磁力,从而读数发生变化。

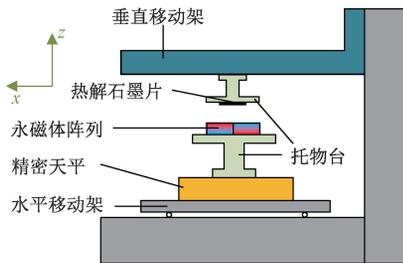


图10 抗磁力测量装置

Fig. 10 Diamagnetic force measurement device

实验中,保持托物台不动,通过调节移动架位置从而改变热解石墨片与永磁体阵列的相对位置,设定移动架沿矢量方向 $x$ 方向每次移动的步长为0.1 mm,记录精密天平读数的变化,其结果如图12、13所示。

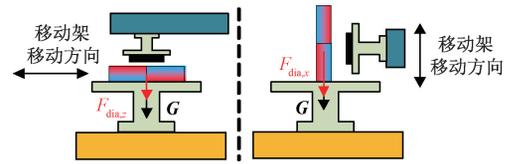


图11 抗磁力测量原理

Fig. 11 Principle of diamagnetic force measurement

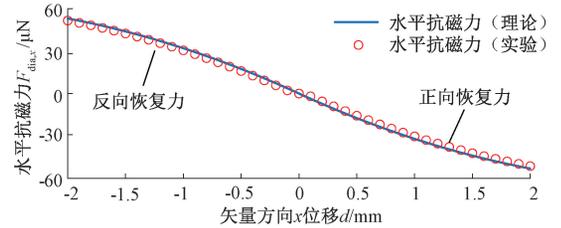


图12 石墨片位移时所受水平抗磁力 $F_{\text{dia},x}$

Fig. 12 Horizontal diamagnetic force  $F_{\text{dia},x}$  on the pyrolytic graphite sheet during displacement

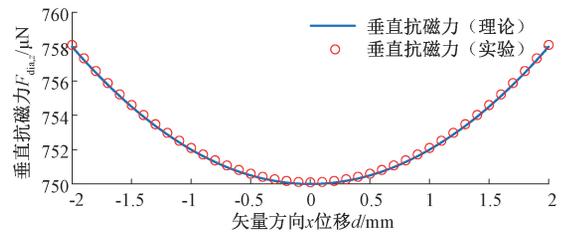


图13 石墨片位移时所受垂直抗磁力 $F_{\text{dia},z}$

Fig. 13 Vertical diamagnetic force  $F_{\text{dia},z}$  on the pyrolytic graphite sheet during displacement

由此可知,理论抗磁力 $F_{\text{dia},x}$ 与 $F_{\text{dia},z}$ 模型与实验所测得 $F_{\text{dia},x}$ 和 $F_{\text{dia},z}$ 相吻合,验证了热解石墨片所受抗磁力理论模型的正确性与有效性。同时在0~0.5 mm位移范围内,垂直方向抗磁力 $F_{\text{dia},z}$ 改变量远小于热解石墨片自身重力,表明其悬浮高度几乎不变。

通过实验辨识,得到热解石墨片垂直磁化率 $\chi_{\perp}$ 和水平磁化率 $\chi_{\parallel}$ ,其数值如表2所示。

表2 实验辨识所得热解石墨片磁化率

Table 2 Magnetic susceptibility of the pyrolytic graphite sheet from experimental identification

参数	数值
热解石墨片垂直磁化率 $\chi_{\perp}$	$-448 \times 10^{-6}$
热解石墨片水平磁化率 $\chi_{\parallel}$	$-86 \times 10^{-6}$

将辨识出热解石墨片磁化率代入式(9),得到了热解石墨片位移随倾角的变化关系,如图14所示。当传感

器所受倾角范围为  $0^\circ \sim 1.3^\circ$  时,热解石墨片位移随倾角变化关系曲线的线性度为 0.5%,具有良好的线性关系。初步确定传感器理论测量量程为  $0^\circ \sim 1.3^\circ$ 。

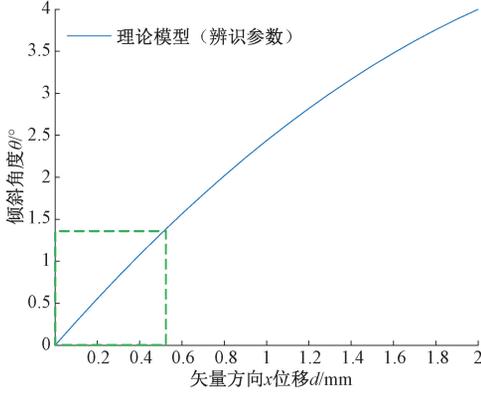


图 14 传感器倾角与热解石墨片位移变化关系

Fig. 14 Relationship between sensor tilt angle and pyrolytic graphite sheet displacement

### 2.3 测量电路模型参数辨识

本文所设计传感器测量电路中平面螺旋线圈与调制电路的主要参数如表 3 所示。

表 3 测量线圈及激励信号主要参数

Table 3 Main parameters of measurement coil and excitation signal

参数名	参数值
线圈材料	铜
平面线圈匝数 $N$	6
线圈外径 $D_{out}/\text{mm}$	9
线圈内径 $d_{in}/\text{mm}$	0.2
线距 $d_c/\text{mm}$	0.6
激励信号幅值 $V_{in}/\text{V}$	15
激励信号频率 $f/\text{MHz}$	1.25
激励信号类型	方波

采用阻抗分析仪测量传感器工作状态下差动回路总电感,从而对谐振电路谐振电容进行调配,当激励信号频率为 1.25 MHz 时,差动回路每一支路总电感  $L_{1,2} = L_s + L_{coil1,2} = 5.9 \mu\text{H}$ ,由根据谐振频率计算公式,求得谐振电容  $C = 2.5 \text{ nF}$ 。经实验验证,此时电路谐振效果良好。采用阻抗分析仪观察测量线圈等效电感  $L_{coil1,2}$  随传感器倾角的变化情况,结果如图 15 所示。

均方根误差 (root mean square error, RMSE) 用于衡量直线与数据点的偏差,RMES 越小,线性度越好。当传

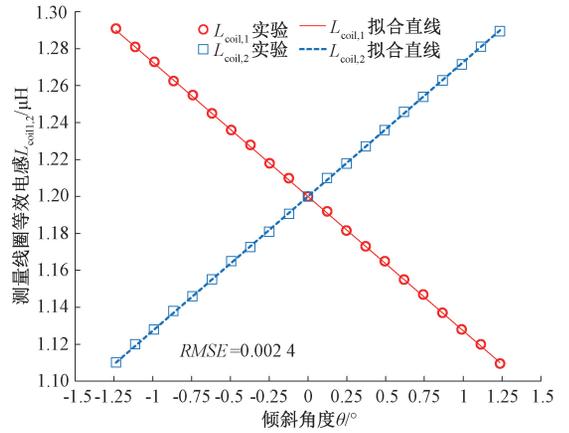


图 15 测量线圈等效电感随倾角变化关系

Fig. 15 Relationship between equivalent inductance of measurement coil and tilt angles

感器倾斜角度区间为  $-1.3^\circ \sim 1.3^\circ$  时, RMSE 为 0.0024,测量单元线圈等效电感与传感器倾角之间具有良好的线性关系,将实验结果代入式(14)。辨识出衰减系数  $k$  为 0.15。

### 3 传感器性能实验

传感器性能测试平台结构如图 16 所示,由倾斜平板、隔振平台、深度千分尺组成。倾斜平板的一端与隔振平台通过铰链相连,另一端为旋转端,在距离旋转铰链中心  $l_d = 600 \text{ mm}$  处由深度千分尺支撑。平板可绕旋转铰链中心自由转动。在实验过程中,通过调节旋转端处深度千分尺提升高度,从而改变放置在倾斜平板上的传感器所受倾角大小。

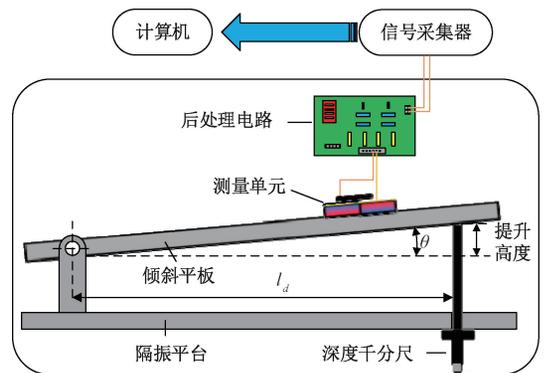


图 16 传感器性能测试平台

Fig. 16 Sensor performance test platform

感器输出电压由示波器采集并通过计算机处理。实验装置实物如图 17 所示。实验中深度千分尺以 0.053 mm 为步长提升,对应倾角增长步长为  $0.005^\circ$ 。

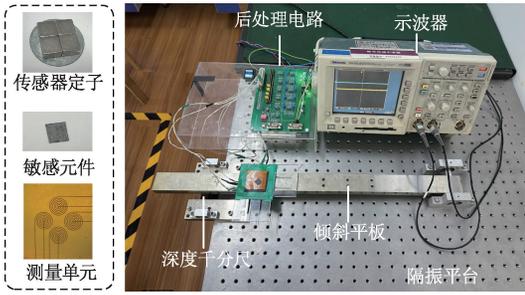


图 17 倾角实验装置

Fig. 17 Image of inclinometer experiment device

### 3.1 倾角传感器灵敏度及线性度实验

图 18 为倾角传感器随倾角输入的输出信号实验数据及拟合直线,传感器的灵敏度为拟合直线的斜率,即  $2.50 \text{ V}/^\circ$ ,实验数据点和拟合直线最大偏差  $\Delta L_{\max}$  为  $0.006 \text{ V}$ ,传感器满量程输出值  $U_{FS}$  为  $3.26 \text{ V}$ ,均方根误差  $RMSE$  为  $0.045$ 。传感器线性度为:

$$e_L = \pm \frac{\Delta L_{\max}}{U_{FS}} \times 100\% = \pm \frac{0.006}{3.260} \times 100\% = \pm 0.18\% \quad (16)$$

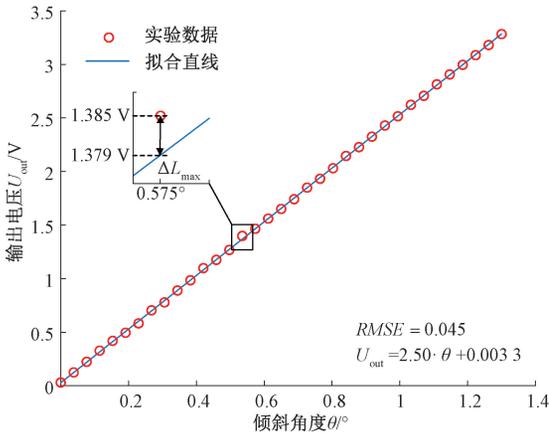


图 18 传感器灵敏度及线性度实验

Fig. 18 Sensor sensitivity and linearity experiment

对于用于精密测量的倾角传感器,要求其线性度在  $\pm 0.5\%$  以内。实验结果表明,传感器符合精密测量标准。同时验证了传感器测量量程为  $0^\circ \sim 1.3^\circ$ 。

### 3.2 倾角传感器分辨率及响应时间实验

本文所设计传感器分辨率及相应时间通过实验确定。在实验过程中,倾角每次变化的步长为  $0.005^\circ$ ,持续时间为  $10 \text{ s}$ ,持续记录传感器的输出电压。实验结果如图 19 所示,每当倾角变化  $0.005^\circ$  时,传感器的输出电压均出现明显的阶跃变化,通过均值处理滤除实验中存在的噪声振动信号,实验结果可知平均电压阶跃值与倾角变化变化量呈线性关系。此外,在每次倾角提升阶跃信号

输入后,传感器信号的输出信号达到稳定时所需响应时间为  $0.25 \text{ s}$ ,表明其能够在较短时间内准确响应倾角变化。

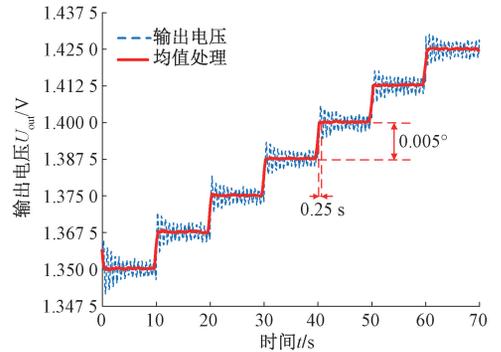


图 19 传感器分辨率和响应时间实验

Fig. 19 Sensor resolution and corresponding time experiment

### 3.3 倾角传感器可靠性实验

由于传感器在输出信号采集过程中存在自身系统性误差,为了评价传感器输出信号的可靠性,在固定角度对传感器输出信号每隔  $1 \text{ h}$  进行采样,输出信号情况如图 20 所示。

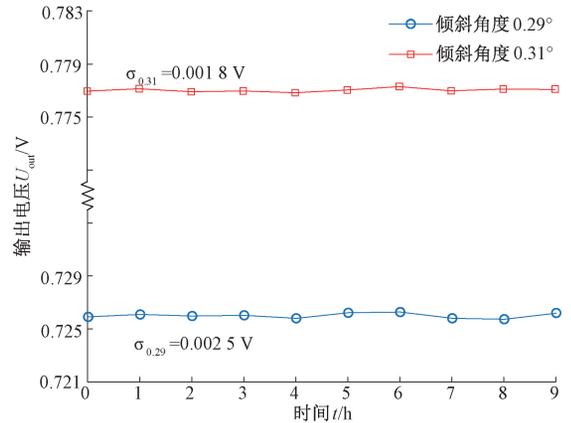


图 20 传感器稳定性实验

Fig. 20 Sensor stability experiment

当倾斜角度为  $0.29^\circ$  时,所采集的传感器输出信号的标准偏差最大,为  $0.0025 \text{ V}$ 。与传感器分辨率对应的输出电压变化量  $0.0125 \text{ V}$  相比较小,验证了传感器输出信号的稳定性。

同时,对传感器进行开机复现性和长期稳定性实验,实验结果表明,传感器平均零点漂移为  $-0.0003 \text{ V}$ ,最大零点漂移为  $0.0031 \text{ V}$ ,表明传感器系统性误差较小,折算角度漂移为  $0.00038^\circ/\text{a}$ ,占倾角传感器分辨率的  $7.6\%$ 。进一步表明传感器具有良好的可靠性。

为了评价所设计倾角传感器性能,本文列举了近年来在非接触角度测量领域倾角传感器主要性能。如表 4

所示,相较于其他倾角传感器,本文所设计传感器具有更高的分辨率和更好的线性度,拥有双轴测量维度。因此该传感器满足倾角测量面向更高精度精密测量的发展需求。

表4 倾角传感器性能对比

Table 4 Comparison of inclinometers' performance

传感器类型	测量维度	分辨率/(°)	线性度/%
光栅式倾角传感器 <sup>[8]</sup>	单轴	0.1	2
电感式倾角传感器 <sup>[9]</sup>	单轴	0.09	0.3
磁阻式倾角传感器 <sup>[10]</sup>	单轴	0.08	0.23
本文	双轴	0.005	0.18

## 4 结 论

本文基于电磁感应效应提出并设计了一种结合抗磁悬浮技术的倾角传感器,该传感器具有以下特点:

1) 该倾角传感器可以实时测量双轴测量维度下 $\pm 1.3^\circ$ 范围内的角度,传感器分辨率可达 $0.005^\circ$ ,灵敏度为 $2.50\text{ V}/^\circ$ ,线性度为 $0.18\%$ ,且拥有较短的响应时间。相比于其他类型倾角传感器,其具有高灵敏度,高分辨率,高线性度的特点。

2) 基于并联谐振电路的后处理电路可以通过差分放大,低通滤波等功能,对传感器输出信号进行滤波与放大,有效降低传感器非线性误差和环境干扰,进而提高传感器的灵敏度和分辨率。

3) 结合抗磁悬浮技术,使倾角传感器摆脱了传统倾角传感器敏感元件和定子之间摩擦带来的负面影响,对提高传感器的使用精度及使用寿命提供了一种新的思路,在精密角度测量领域具有广阔的应用前景。

## 参考文献

[1] LUCZAK S, EKWINSKA M. Electric-contact tilt sensors: A review[J]. *Sensors*, 2021, 21(4): 1097.

[2] 党帅军, 陈广东, 廖俊杰, 等. 机载多电磁矢量传感器的飞行器姿态优化估计[J]. *电子测量技术*, 2022, 45(14): 78-84.

DANG SH J, CHEN G D, LIAO J J, et al. Aircraft attitude optimization estimation based on airborne multiple electromagnetic vector sensors[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2022, 45(14): 78-84.

[3] 顾雯雯, 王丹. 基于嵌入式系统的起重机倾角检测装置[J]. *起重运输机械*, 2021(13): 68-71.

GU W W, WANG D. Crane inclination detection device

based on embedded system[J]. *Hoisting and Conveying Machinery*, 2021(13): 68-71.

[4] 常瑞丽, 崔国玮. 基于无传感器信息的数控机床导轨水平倾角测量方法研究[J]. *机床与液压*, 2016, 44(8): 137-138, 144.

CHANG R L, CUI G W. Research on testing method NC machine tool slideway inclination angular based on built-in sensors information[J]. *Machine Tool and Hydraulics*, 2016, 44(8): 137-138, 144.

[5] LEE C L, ZENG R CH, YANG CH R, et al. Tapered polymer fiber inclinometers[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(3): 1-10.

[6] 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 magnetic fluid inclination sensor with high sensitivity[J]. *Chinese Journal of Science Instrument*, 2022, 43(2): 10-16.

[7] RAO K, LIU H F, WEI X L, et al. A high resolution area-change-based capacitive MEMS tilt sensor[J]. *Sensors and Actuators, A. Physical*, 2020, 313: 112191.

[8] WANG SH X, WU ZH Y, PENG D L, et al. Sensing mechanism of a rotary magnetic encoder based on time grating[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(9): 3677-3683.

[9] LI ZH P, ZHANG CH, SHI S ZH, et al. Design and parameter optimization of contactless vertical inductive angle sensor[J]. *Vacuum*, 2019, 169: 108865.

[10] KUMAR A S A, GEORGE B, MUKHOPADHYAY S C. Technologies and applications of angle sensors: A review[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 21(6): 7195-7206.

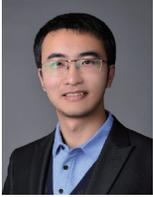
[11] 徐园平, 周瑾, 金超武, 等. 抗磁悬浮研究综述[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(2): 214-222.

XU Y P, ZHOU J, JIN CH W, et al. Diamagnetic levitation: A review[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(2): 214-222.

[12] BARROT F. Acceleration and inclination sensors based on magnetic levitation: Application in the particular case of structural health monitoring in civil engineering[J]. *British Journal of Occupational Therapy*, 2008.

- [13] XU Y P, JIANG Q Q, YANG K, et al. A novel ultra-high-resolution inclination sensor based on diamagnetic levitation [J]. *Sensors and Actuators, A. Physical*, 2022, 343: 113686.
- [14] 管乐诗, 肖扬云, 王懿杰, 等. 一种基于 PCB 平面螺旋线圈的自补偿多中继无线电能传输系统设计[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(24): 8984-8995.  
GUAN Y SH, XIAO Y Y, WANG Y J, et al. Design of a self-compensating multi-relay wireless power transmission system based on PCB planar spiral coil [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(24): 8984-8995.
- [15] GAO Q H, YAN H X, ZOU H X, et al. Magnetic levitation using diamagnetism: Mechanism, applications and prospects[J]. *Science China Technological Sciences*, 2020, 64(1): 44-58.
- [16] 陆子渊, 何勇, 卞雷祥, 等. 基于一发多收线圈阵列的频域电磁法未爆弹探测技术[J]. *电子测量与仪器学报*, 2023, 37(5): 79-87.  
LU Z Y, HE Y, BIAN L X, et al. Frequency domain electromagnetic method based on the configuration of single transmitting and array receiving coils for unexploded ordnance detection[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2023, 37(5): 79-87.
- [17] 瞿金晨, 郭赫男, 李杰, 等. 基于电涡流的多周期双极直线位移传感器[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(5): 260-266.  
QU J CH, GUO H N, LI J, et al. Multicycle bipolar linear displacement sensor based on eddy current [J]. *Chinese Journal of Science Instrument*, 2023, 44(5): 260-266.
- [18] GRONER C, MINTEER T M, MCDONALD K T. A magnetic field based on Ampère's force law[J]. *American Journal of Physics*, 2023, 91(10): 783-791.
- [19] 徐园平, 凌日旺, 周瑾, 等. 抗磁悬浮静电电机悬浮与驱动特性研究[J]. *机械工程学报*, 2022, 58(19): 104-114.  
XU Y P, LING R W, ZHOU J, et al. Research on levitation and driven characteristics of diamagnetic levitation electrostatic motor [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(19): 104-114.
- [20] LIU R Z, YANG W J, XIANG H J, et al. Pyrolytic graphite for an in-plane force study of diamagnetic levitation: A potential microdetector of cracks in magnetic material[J]. *Micromachines*, 2023, 14(6): 1242.
- [21] HUANG H, HE SH ZH, XIE X P, et al. Research on the influence of coil LC parallel resonance on detection effect of inductive wear debris sensor [J]. *Sensors*, 2022, 22(19): 7493.
- [22] 金超武, 叶周斌, 周瑾, 等. 磁悬浮轴承横向磁通传感器设计与分析[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(9): 228-238.  
JIN CH W, YE ZH CH, ZHOU J, et al. Design and analysis of the transverse flux sensor of active magnetic bearing [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(9): 228-238.
- [23] 孙建超, 周强, 韦甜柳, 等. 基于垂直运动磁体的高效振动-电磁能量采集器研究与设计[J]. *国外电子测量技术*, 2022, 41(11): 78-87.  
SUN J CH, ZHOU Q, WEI T L, et al. Research and design of an efficient electromagnetic energy collector based on vertically moving magnets [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2022, 41(11): 78-87.
- [24] 万真志, 王衍学, 陈志刚. 基于径向交变磁场的油液磨粒传感器设计[J]. *电子测量与仪器学报*, 2023, 37(3): 238-245.  
WAN ZH ZH, WANG Y X, CHEN ZH G. Design of oil debris sensor based on radial alternating magnetic field [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2023, 37(3): 238-245.
- [25] 唐洪洲, 周瑾, 金超武, 等. 基于 LC 并联谐振的轴向自感式位移传感器设计[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2024, 58(5): 1072-1079.  
TANG H ZH, ZHOU J, JIN CH W, et al. Design of axial self-inductive displacement sensor based on LC parallel resonance [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineer Science)*, 2024, 58(5): 1072-1079.
- [26] 张龙赐, 金忠, 曾庆平. 压阻式微差压传感器倾角误差分析与研究[J]. *电子测量技术*, 2023, 46(17): 175-179.  
ZHANG L C, JIN ZH, ZENG Q P. Analysis and research on inclination error of piezoresistive micro differential pressure sensor [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2023, 46(17): 175-179.

## 作者简介



**徐园平** (通信作者), 2012 年于南京航空航天大学获得学士学位, 2018 年于南京航空航天大学获得博士学位, 现为南京航空航天大学副教授, 博士生导师。主要研究方向为磁悬浮技术、智能传感与驱动、转子动力学。

E-mail: ypxu@nuaa.edu.cn

**Xu Yuanping** (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2012, and received his Ph. D. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2018. He is currently an associate professor and a Ph. D. advisor at Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. His main research interests include magnetic levitation technology, intelligent sensing and actuation, rotor dynamics.



**袁高展**, 2022 年于武汉理工大学获得学士学位, 现为南京航空航天大学硕士研究生, 主要研究方向为磁悬浮技术、传感器技术与应用。

E-mail: yuangaozhanwut@nuaa.edu.cn

**Yuan Gaozhan** received his B. Sc. degree from Wuhan University of Technology in 2022. He is currently a master student at Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. His main research interests include magnetic levitation technology, sensor technology and its applications.



**周瑾**, 1995 年于中国矿业大学获得学士学位, 1998 年于中国矿业大学获得硕士学位, 2001 年于中国矿业大学获得博士学位, 现为南京航空航天大学教授, 博士生导师。主要研究方向为磁悬浮技术、旋转机械、振动控制。

E-mail: meeizhou@nuaa.edu.cn

**Zhou Jin** received her B. Sc. degree from China University of Mining and Technology in 1995, received her M. Sc. degree from China University of Mining and Technology in 1998, and received her Ph. D. degree from China University of Mining and Technology in 2001. She is currently a professor and a Ph. D. advisor at Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. Her main research interests include magnetic levitation technology, rotary machine, and vibration control.



**于敏**, 1994 年于重庆大学获得学士学位, 1997 年于重庆大学获得硕士学位, 2008 年于南京航空航天大学获得博士学位, 现为南京航空航天大学教授, 博士生导师。主要研究方向为智能驱动技术、仿生结构与材料。

E-mail: yumin@nuaa.edu.cn

**Yu Min** received her B. Sc. degree from Chongqing University in 1994, received her M. Sc. degree from Chongqing University in 1997, and received her Ph. D. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2008. She is currently a professor and a Ph. D. advisor at Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. Her main research interests include intelligent actuation technology, biomimetic structure and material.