

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311666

基于多频磁场耦合的平面二维位移传感器*

杨继森^{1,2,3}, 度万章^{1,3}, 张静⁴, 冯济琴^{1,3}, 卢渝^{1,3}

(1. 重庆理工大学机械检测技术与装备教育部工程研究中心 重庆 400054; 2. 重庆理工大学汽车零部件先进制造技术教育部重点实验室 重庆 400054; 3. 重庆理工大学时栅传感及先进检测技术重庆市重点实验室 重庆 400054; 4. 重庆理工大学电气与电子工程学院 重庆 400054)

摘要:针对目前光刻机、超精密数控机床等高端超精密装备对于精准平面定位的要求,提出了一种基于多频磁场耦合的平面二维位移传感器。传感器组成为定尺和动尺,其中定尺由导磁基体和X、Y方向励磁线圈构成,动尺由导磁基体和X、Y方向感应线圈构成。通过对X、Y方向励磁线圈通入正余弦励磁信号,在定尺上构建出多频磁场耦合的二维均匀磁场阵列,动尺感应出带有位移信息的电信号,经过理论推导和电磁仿真验证了多频磁场直接解耦差动结构和幅值调制解算方法的可行性,并对仿真误差进行分析,并优化了传感器结构。最后采用PCB工艺制作传感器样机并开展相关实验研究,实验结果表明:传感器在150 mm×150 mm的测量范围可对二维位移进行精确测量,其中X方向测量精度为 $\pm 33.08 \mu\text{m}$,Y方向测量精度为 $\pm 36.95 \mu\text{m}$,优化后的传感器样机X、Y方向原始对极内位移误差峰峰值在原有基础上降低了49.1%和50.7%。

关键词: 二维位移传感器; 平面二维位移测量; 多频磁场耦合

中图分类号: TH7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4030

Planar two-dimensional displacement sensor based on multi-frequency magnetic field coupling

Yang Jisen^{1,2,3}, Tuo Wanzhang^{1,3}, Zhang Jing⁴, Feng Jiqin^{1,3}, Lu Yu^{1,3}

(1. Engineering Research Center of Mechanical Testing Technology and Equipment, Ministry of Education, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China; 2. Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology for Automobile Parts, Ministry of Education, Chongqing 400054, China; 3. Chongqing Key Laboratory of Time-Grating Sensing and Advanced Testing Technology, Chongqing 400054, China; 4. School of Electrical and Electronic Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract: To meet the requirement of high-end ultra-precision equipment, such as photolithography machines and ultra-precision CNC machine tools for precise plane positioning, a planar two-dimensional displacement sensor based on multi-frequency magnetic field coupling is proposed. The sensor consists of a fixed length and a moving ruler. The fixed length is composed of a magnetically conductive substrate and an excitation coil in X- and Y-directions, and the moving ruler is composed of a magnetically conductive substrate and an induction coil in X- and Y-directions. By passing sine and cosine excitation signals to the excitation coils in X- and Y- direction, a two-dimensional uniform magnetic field array with multi-frequency magnetic field coupling is established on the fixed scale, and an electrical signal with displacement information is induced by the moving ruler. The feasibility of the multi-frequency magnetic field direct decoupling differential structure and amplitude modulation solution methods are evaluated through theoretical derivation and electromagnetic simulation. The simulation error is analyzed, and the sensor structure is optimized. Finally, the sensor prototype is manufactured by the PCB process and related experimental research is carried out. The experimental results show that the sensor can accurately measure the two-dimensional displacement in the measuring range of 150 mm×150 mm. The measurement accuracy of the X-direction is $\pm 33.08 \mu\text{m}$ and the

收稿日期: 2023-07-13 Received Date: 2023-07-13

* 基金项目: 国家自然科学基金(52175454)、重庆市自然科学基金面上项目(CSTB2023NSCQ-MSX0382, cstc2021jcyj-msxmX0512)、重庆市教委科学技术研究计划重点项目(KJZD-K202301106)、重庆理工大学研究生教育高质量发展行动计划资助成果(gzlcx20232136)资助

measurement accuracy in the Y -direction is $\pm 36.95 \mu\text{m}$. The peak-to-peak values of the original internal displacement errors in the X and Y directions of the optimized sensor prototype are reduced by 49.1% and 50.7% on the original basis.

Keywords: two-dimensional displacement sensor; planar two-dimensional displacement measurement; multi-frequency magnetic field coupling

0 引言

微位移测量技术对于高端光刻机、半导体行业、极大规模集成电路是关键技术之一^[1-2], 日益发展的高端制造业对平面精密位移的要求急剧提高, 要求满足高精度大量程的同时也需进行多维测量^[3-4]。现在常用的平面二维位移测量方式有图像式测量、电容式测量、光学式测量、电感式测量。

图像式测量是一种基于光学原理的测量方法, 武汉大学周国全等^[5]利用互补金属氧化物半导体图像传感器芯片 (complementary metal-oxide semiconductor, COMS) 替代传统的电耦合器件 (charge-coupled device, CCD) 实现光电转换, 该位移传感系统的测量精度可达 $0.1 \sim 1 \mu\text{m}$ 。该光学测量系统可以实现高精度二维位移测量, 虽然 COMS 图像传感器芯片成本比 CCD 低, 但 COMS 图像传感器芯片容易出现杂点, 图像质量比 CCD 低。并且图像式测量中使用的光学仪器对组装要求较高, 易造成阿贝误差^[6-7]。

电容式测量是一种利用电极板变面积效应的测量方法, Lee 等^[8]制造了一种用于微电机系统的电容式二维位移传感器, 在测量范围 $3.46 \text{ mm} \times 3.46 \text{ mm}$ 内, 分辨率为 0.2 nm 。苏州大学雷焱焱^[9]制造了二维定位平台的梳齿电容位移传感器, 该二维微位移定位平台系统在 $20 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ 的测量范围中, 其分辨率小于 10 nm 。电容式二维测量方法虽然成本较低, 非线性度小, 但该方法仍存在不足, 比如存在寄生电容, 抗干扰能力较弱等问题^[10-11]。

光学式测量是一种在精密微位移测量中最为常用的方法, 该测量方法基于光的衍射效应。Lin 等^[12]制造了一种具有纳米级分辨率的大范围三轴光栅编码器, 在 $130 \text{ mm} \times 130 \text{ mm} \times 68 \text{ mm}$ 内分辨率高达 4 nm 。Yin 等^[13]提出了一种高精度二维光栅位移测量系统, 在 $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 内, 测量分辨率在 3 nm 以内。华中科技大学王淑珍等^[14]研制了一种大行程纳米级共运动平面二维工作台, 在工作台移动范围为 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 内, 可实现 5 nm 的运动分辨率。Lin 等^[15]设计出一种基于对角线衍射光束的差分光栅干涉仪, 其与相位解耦相结合, 可获得高信号对比度和高信噪比, 实现 8 倍的光学细分, 理论位移测量分辨率可达 0.125 nm 。光学式测量二维位移的精度较高, 测量量程较大, 测量技术发展成熟。但其精密性与

光栅的刻线精度有关, 制作工艺难度较高, 量程和精度很难同时实现, 且其易受外界振动和粉尘的干扰^[16-17]。

电感式测量是基于激励和感应拾取并进行位移信息解算的测量方法。Horestani 等^[18]提出在 X 方向与 Y 方向同时布置一个 U 型结构差动电磁效应的测量单元实现二维位移测量, 其量程只有 10 mm 。电感式测量方法的精度较低但是其抗干扰能力较强且成本较低^[19]。

本文提出了一种基于多频磁场耦合的平面二维位移传感器, 以多频激励构建可直接解耦的正交驻波耦合磁场, 对感应电信号进行滤波等处理和位移解算。通过电磁仿真和制作样机并进行实验, 验证了该平面传感器对二维位移测量的可行性, 并优化了传感器结构, 实验结果表明, 在消除共模干扰后, 新结构能够降低传感器原始结构的误差峰峰值, 为平面二维位移测量提供了一种新的参考方式。

1 传感器结构及其工作原理

1.1 一维磁场式传感器测量原理

双层几字形单元耦合模型如图 1 所示, 其中包括激励线圈和感应线圈, 两者均采用双层互补式结构, 某时刻通入激励电流可生成沿 Z 轴正方向的均匀磁场, 感应线圈可拾取均匀磁场, 若使均匀磁感应强度发生变化或感应线圈相对激励线圈产生 X 方向位移, 则感应线圈磁通量会发生变化从而生成感应电动势。

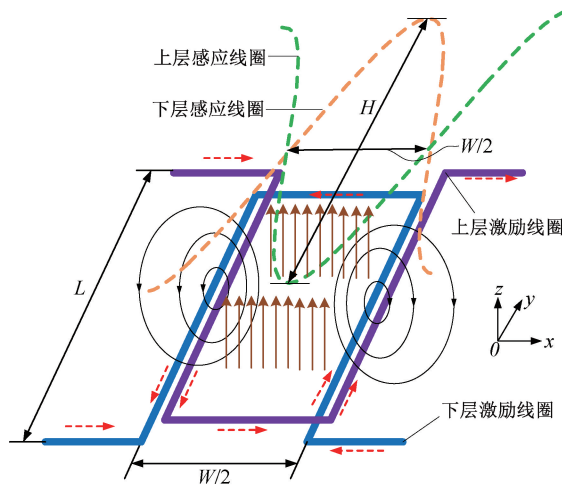


图1 双层几字形单元耦合模型

Fig. 1 Double-layer polygonal element coupling model

四边形线圈作为封闭线圈,其扩展性受到一定的限制,可在各四边形单元间利用过孔相连以满足扩展需求,但会引入大量过孔,过孔的电流流向垂直于激励线圈所在平面,励磁时这段电流也会产生磁场从而带来局部干扰。

对四边形线圈与图1所示的双层互补激励线圈开展磁场数值仿真如图2所示,一致取线圈 X 方向高度为2 mm, Y 方向高度为15 mm,通以电流0.1 A,求取线圈平面高度 $Z=0.5$ mm平面的磁场分布。四边形磁场仿真如图2(a),区域P1、P2为端部所在区域,该区域磁感应强度约为 3.93×10^{-8} T,破坏了均匀磁场。图2(b)中双层几字形线圈端部磁场近似均匀分布,磁感应强度约为 6.41×10^{-8} T,能抑制类似四边形线圈端部的非均匀磁场产生,且磁感应强度提升1倍左右,有利于提高感应信号的信噪比。

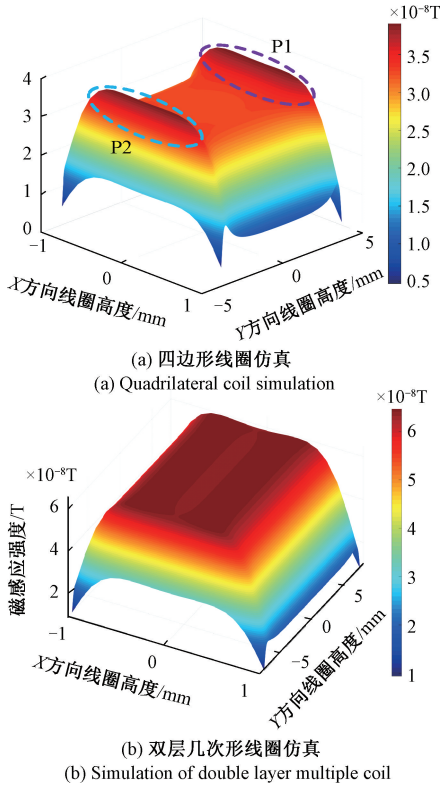


图2 四边形和双层几字形磁场仿真

Fig. 2 Simulation of quadrilateral and double-layer zigzag magnetic fields

一维磁场式传感器位移传感器结构如图3所示,传感器的构成为定尺和动尺,其中励磁线圈为单列式双层几字型结构,上下两层正对且方向相反,感应线圈结构为两个双层互补正弦线圈,两个感应线圈之间错开 $3/4W$ (W 为节距)以保证空间上位移相互正交。

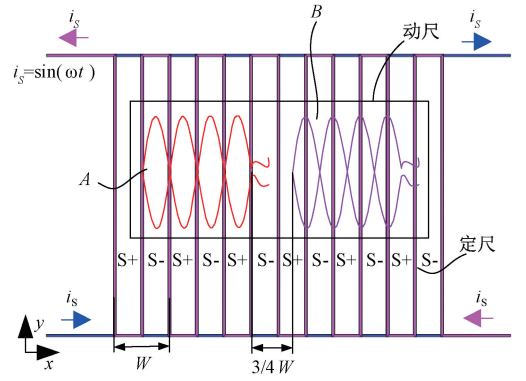


图3 一维磁场式位移传感器结构

Fig. 3 The one-dimensional magnetic field displacement sensor structure

对激励线圈通入正弦励磁信号 i_s ,在励磁线圈上会产生均匀磁场,当感应线圈移动时会产生感应电动势,其中 A 感应线圈的感应电动势 e_A 输出表达式为:

$$e_A(t, x) = k_1 \cos(\omega t) \cos \frac{2\pi x}{W} \quad (1)$$

其中, k_1 为传感器系数,与线圈互感系数、激励线圈阻抗等因素有关,仅作定性分析,假设为常数, ω 为励磁信号角频率。

B 感应线圈的感应电动势 e_B 与 A 感应线圈在空间上正交,其表达式为:

$$e_B(t, x) = k_1 \cos(\omega t) \sin \frac{2\pi x}{W} \quad (2)$$

以 A 感应线圈感应输出信号为例,将式(1)两边同乘载波信号 $\cos \omega t$,并作如下变换,可得 e_{A1} 为:

$$\begin{aligned} e_{A1}(t, x) &= k_1 \cos(\omega t) \cos \frac{2\pi x}{W} \cdot \cos(\omega t) = \\ &= \frac{1}{4} k_1 \left(2 \cos 2\omega t \cos \frac{2\pi x}{W} + 2 \cos \frac{2\pi x}{W} \right) = \\ &= \frac{1}{2} k_1 \cos(2\omega t) \cos \frac{2\pi x}{W} + \frac{1}{2} k_1 \cos \frac{2\pi x}{W} \end{aligned} \quad (3)$$

同理, B 感应线圈感应输出信号作同样的变换可得 e_{B1} 为:

$$e_{B1}(t, x) = \frac{1}{2} k_1 \cos(2\omega t) \sin \frac{2\pi x}{W} + \frac{1}{2} k_1 \sin \frac{2\pi x}{W} \quad (4)$$

式(3)和(4)所示的信号包含了高频和低频信号,使用低通滤波器滤除含有时间信号的高频成分后,获得如下只带有空间位移信息的低频信号。

$$e_{A2}(t, x) = \frac{1}{2} k_1 \cos \frac{2\pi x}{W} \quad (5)$$

$$e_{B2}(t, x) = \frac{1}{2} k_1 \sin \frac{2\pi x}{W} \quad (6)$$

将式(5)除以式(6)可得:

$$e = \frac{e_{B2}(t, x)}{e_{A2}(t, x)} = \frac{\frac{1}{2}k_1 \sin \frac{2\pi x}{W}}{\frac{1}{2}k_1 \cos \frac{2\pi x}{W}} = \tan\left(\frac{2\pi x}{W}\right) \quad (7)$$

对式(7)进行分析,只要对 e 的值进行实时读取,就能够实时求解出传感器感应线圈的位移值:

$$x = \frac{W}{2\pi} \arctan(e) \quad (8)$$

1.2 二维均匀磁场阵列形成机理

为获得新型磁场式二维位移传感器结构,参考如图3所示的一维磁场式传感器位移传感器,建立新型的二维位移传感器激励线圈结构如图4所示, X 方向上层激励线圈和 X 方向下层激励线圈以互补耦合的位置分层堆叠,构成 X 方向双层互补式激励线圈, X 方向上、下层激励线圈通入电流大小相等,方向相反, Y 方向双层互补式激励线圈构成与 X 方向激励线圈相同,位置相对于 X 方向激励线圈旋转 90° ,再将 X 、 Y 方向双层互补式激励线圈按图示堆叠,从而构造出双层互补型二维激励线圈模型。双层互补型二维激励线圈模型总共包含4层,从上至下包括 X 方向上层激励线圈、 X 方向下层激励线圈、 Y 方向上层激励线圈和 Y 方向下层激励线圈,励磁电流方向如图4所示。

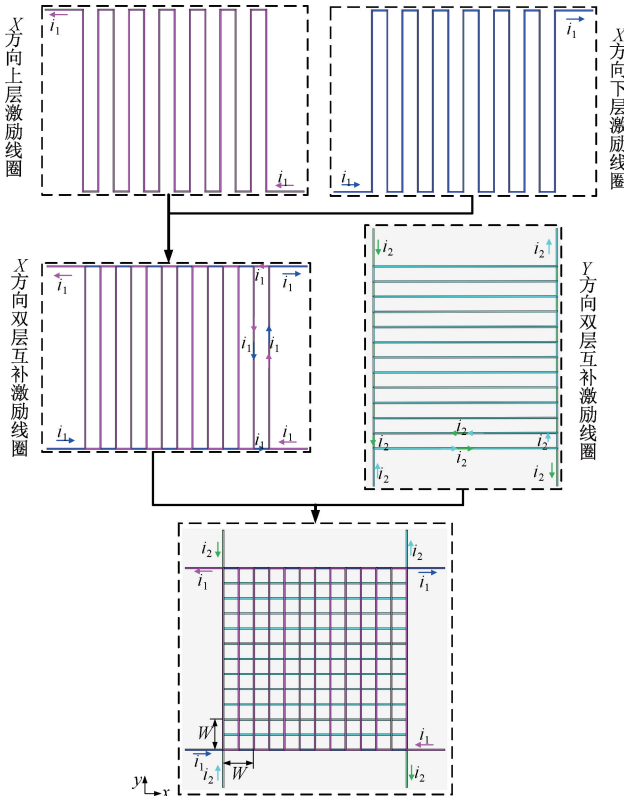
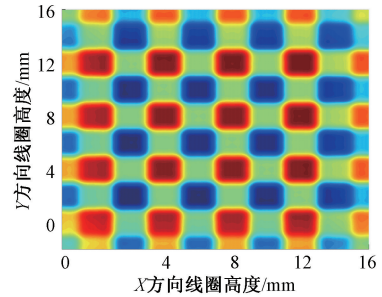


图4 二维激励线圈模型

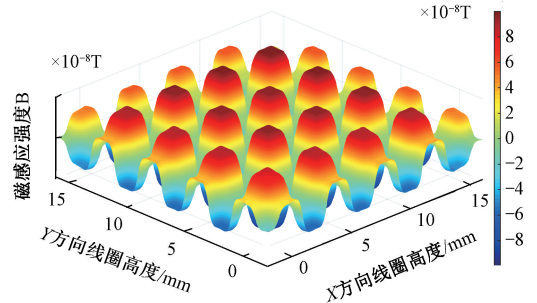
Fig. 4 Two-dimensional excitation coil model

为验证该绕线结构能否励磁产生二维均匀磁场阵列,基于毕奥-萨伐尔定律建立该绕线结构数学求解模型,利用 MATLAB 模拟绕线,取分析范围为 $4W$,令节距 $W=4$ mm,励磁电流为 0.1 A,求得 $Z=0.5$ mm 平面各方形单元对应区域磁场如图5所示。



(a) 二维均匀磁场分布俯视图

(a) Top view of two-dimensional uniform magnetic field distribution



(b) 二维均匀磁场分布三维图

(b) Three-dimensional map of two-dimensional uniform magnetic field distribution

图5 二维均匀磁场阵列

Fig. 5 Two-dimensional uniform magnetic field array

可见在 $16\text{ mm} \times 16\text{ mm}$ 范围内,方形单元内磁场朝向沿 X 、 Y 方向相间分布,从而构成平面二维均匀磁场阵列,且 X 、 Y 方向均匀磁场满足空间正交关系。

1.3 感应信号产生与解耦机理

采用多频激励的方法可以有效解耦空间耦合场,从而便于分离 X 、 Y 方向上产生的位移值, X 方向激励信号频率为 ω_1 , Y 方向激励信号频率为 ω_2 ,在多频激励信号的激励下,感应线圈所在平面将励磁产生二维时变磁场阵列,感应线圈切割该时变磁场阵列 X 、 Y 方向上产生的位移信息在感生电动势内分别是以频率 ω_1 、 ω_2 呈现,由此可通过滤波手段分别滤出 X 、 Y 方向不同频率的信号。

如图6所示, X 、 Y 方向测头平行置于激励线圈正上方,且位于同一高度。 Y 方向测头相较于 X 方向测头逆时针旋转 90° ,测头绕线沿双层互补式正弦绕制,此处 X 、 Y 方向测头绕线高度为 $2W$,周期为 $2W$,测头绕线取2个周期。

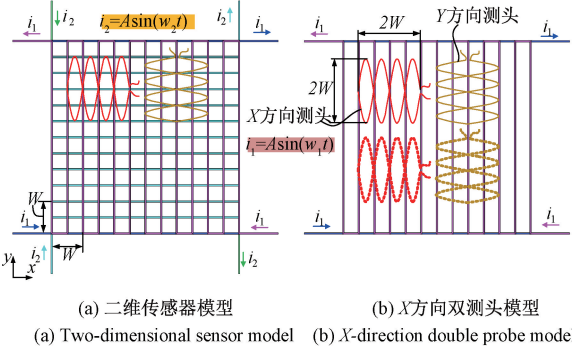


图6 二维磁场式传感器模型

Fig. 6 Two-dimensional magnetic field sensor model

图6(a)展示了平面二维激励线圈和X、Y测头的相对位置,为分析X、Y方向测头能否满足直接解耦条件,需讨论X方向测头分别沿X、Y方向移动而输出的感应电动势,Y方向测头分别沿X、Y方向移动产生的感应电动势,以及X、Y方向测头沿X、Y方向移动时分别拾取X、Y方向激励线圈产生磁场情况。

图6(b)为X方向激励线圈与双测头模型,可利用该模型分析X方向测头针对X方向激励线圈沿Y方向移动(Y方向测头针对Y方向激励线圈沿X方向移动同理)而输出的感应信号,以及分析Y方向测头针对X方向激励线圈沿Y方向移动(X方向测头针对Y方向激励线圈沿X方向移动同理)而输出的感应信号。

对X方向激励线圈通入励磁信号如式(9)所示,电流加载方向如图6所示。

$$i_1 = Q \sin(\omega_1 t) \quad (9)$$

其中, Q 表示励磁电流幅值。在励磁电流的作用下,X方向激励线圈层被激励产生均匀时变磁场 B_1 :

$$B_1 = K_1 \sin(\omega_1 t) \quad (10)$$

其中, K_1 为比例系数。如图6(b)所示,X、Y两方向测头沿Y方向从“实线”位置平移至“虚线”的位置。可知X方向测头在运动过程中穿过线圈的面积 S 未变化,故X方向测头输出感应信号仅与磁场强度 B_1 的变化率相关,故X方向测头输出感应信号 $U_{o_{X-X}}$ (表示X方向测头拾取X方向激励线圈)为:

$$U_{o_{X-X}} = -nS \frac{dB_1}{dt} = -nSK_1 \omega_1 \cos(\omega_1 t) \quad (11)$$

其中, n 表示线圈匝数, S 表示线圈有效面积,令 $K_X = -nSK_1 \omega_1$ (表示X方向测头传感系数),则:

$$U_{o_{X-X}} = K_X \cos(\omega_1 t) \quad (12)$$

对于Y方向测头,可见测头感应线圈高度为 $2W$,恰好覆盖X方向激励线圈2个周期,激励线圈相邻两个单元的磁场方向相反,大小相同,同时感应线圈所覆盖的正反磁场面积相等,且在平移过程当中面积并未发生变化,

因此Y方向测头感应线圈的磁通量 Φ 为0,即其输出的电压感应信号 $U_{o_{Y-X}}$ 亦等于0。

为分析Y方向测头针对X方向激励线圈沿X方向移动而产生的感应电动势,X方向测头针对Y方向激励线圈沿Y方向移动与前者同理,建立如图7所示的分析模型。

以“实线”线圈所在位置为初始位置,“虚线”线圈所在位置为终止位置,X、Y方向测头分别沿Y、X方向移动,由于两个运动等效,取任意一方进行分析。如图7(b)所示,Y方向激励线圈通以励磁电流 i_2 。励磁电流 i_2 及激励磁场分别为:

$$i_2 = Q \sin(\omega_2 t) \quad (13)$$

$$B_2 = K_2 \sin(\omega_2 t) \quad (14)$$

Y方向激励线圈在励磁电流 i_2 的激励下,各相邻均匀磁场阵列单元的磁场大小相等,方向相反,且磁场的变化规律如式(16)所示。由法拉第电磁感应定律可知,感应电动势与磁通的变化率成正比,如图7所示X方向测头输出感应电动势可用式(15)表示。

$$U_{o_{X-Y}} = -n \frac{d\Phi_2}{dt} = -nS_2 \frac{dB_2}{dt} \quad (15)$$

其中, $U_{o_{X-Y}}$ 表示X方向测头拾取Y方向感应线圈激励磁场所产生的感应电动势, S_2 表示磁感线穿过感应线圈的有效面积。图7(b)中“实线”所示X方向测头初始位置,X方向感应线圈跨过Y方向激励线圈2个周期($2W$),4个磁场阵列单元,且面积满足 $S_{2-1} = S_{2-4}, S_{2-2} = S_{2-3}$ 。此外,激励线圈相邻磁场阵列单元大小相等,方向相反,可得 $B_2 S_{2-1} = -B_2 S_{2-4}, B_2 S_{2-2} = -B_2 S_{2-3}$ 。因此,1~4面积区域总磁通量为零, $U_{o_{X-Y}}$ 在初始位置时值为零。当X方向测头按图示位置移动时,由于双层互补式激励线圈结构的磁场正负抵消效应,X方向测头输出感应电动势 $U_{o_{X-Y}}$ 等于零且保持不变。图7(a)与(b)所示模型等价,故Y方向测头相对X方向激励线圈向X方向移动时产生的输出电动势 $U_{o_{Y-X}}$ 等于0。

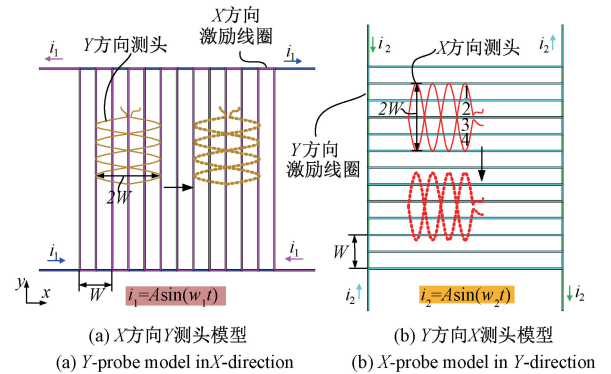


图7 X_Y和Y_X单测头模型

Fig. 7 X_Y and Y_X single probe model

建立如图 8 所示分析模型, 旨在分析 X 、 Y 方向测头分别相对 X 、 Y 方向激励线圈移动而输出的感应电动势。如图 8 所示, X 方向测头沿 $\vec{F}_1$ 移动, Y 方向测头沿 $\vec{F}_2$ 移动, 根据运动的合成规则, $\vec{F}_1$ 方向运动可以按照直角坐标系分为 $\vec{F}_{1_Y}$ 和 $\vec{F}_{1_X}$ 两个分运动, $\vec{F}_2$ 方向运动同理可分 $\vec{F}_{2_X}$ 和 $\vec{F}_{2_Y}$ 两个分运动, 因此可逐一分析各方向分运动, 从而简化分析过程。

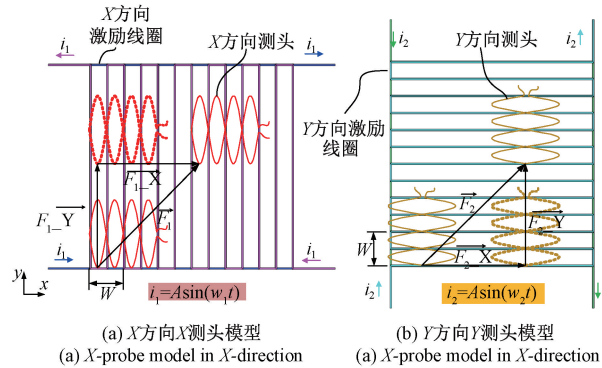


图 8 X _X 和 Y _Y 单测头模型

Fig. 8 X _X and Y _Y single probe models

如图 8(a), X 方向测头 $\vec{F}_{1_Y}$ 分运动与图 6(b) 所示 X 方向运动同理, X 方向激励线圈通入式(9)激励电流, X 方向测头输出感应电动势为:

$$U_{o1_Y} = K_X \cos(\omega_1 t) \quad (16)$$

X 方向测头 $\vec{F}_{1_Y}$ 分运动是在均匀磁场阵列单元内运动, 磁感线穿过感应线圈的有效面积并未发生改变, 输出感应电动势仅与时变均匀磁场的变化率相关。 X 方向测头 $\vec{F}_{1_X}$ 分运动过程当中, 感应线圈输出感应电动势与磁场变化率 dB_1/dt 和切割磁场时发生的位移值 Δx 相关, X 方向测头 $\vec{F}_{1_X}$ 分运动与图 3 所示 A 线圈输出感应电动势规律相同。

$$U_{o1_X} = K_X \cos(\omega_1 t) \cos \frac{2\pi x}{W} \quad (17)$$

其中, W 为激励线圈绕线节距。同理分析图 8(b) 所示 Y 方向测头输出感应电动势, $\vec{F}_{2_X}$ 输出感应电动势为:

$$U_{o2_X} = K_Y \cos(\omega_2 t) \quad (18)$$

$\vec{F}_{2_Y}$ 输出感应电动势为:

$$U_{o2_Y} = K_Y \cos(\omega_2 t) \cos \frac{2\pi y}{W} \quad (19)$$

综合上述分析, 将 X 方向测头分别沿 X 、 Y 方向移动而输出的感应电动势和 Y 方向测头分别沿 X 、 Y 方向移动产生的感应电动势汇总如表 1 所示。

从表 1 中可以得出以下结论: X 方向测头仅拾取 X 方向激励线圈产生磁场可输出感应电动势, 且仅沿 X 方

表 1 X 、 Y 方向测头各约束下输出信号

Table 1 The output signal under each constraint of the probe in X - and Y - direction

X 或 Y 方向 激励线圈	X 方向测头输出信号	Y 方向测头 输出信号
X 方向 激励线圈	X 方向移动: $K_X \cos(\omega_1 t) \cos \frac{2\pi x}{W}$	X 方向移动: 0
	Y 方向移动: $K_X \cos(\omega_1 t)$	Y 方向移动: 0
Y 方向 激励线圈	X 方向移动: 0	X 方向移动: $K_Y \cos(\omega_2 t)$
	Y 方向移动: 0	Y 方向移动: $K_Y \cos(\omega_2 t) \cos \frac{2\pi y}{W}$

向发生相对位移时输出感应电动势携带 X 方向空间位移信息; Y 方向测头仅拾取 Y 方向激励线圈产生磁场可输出感应电动势, 且仅沿 Y 方向发生相对位移时输出感应电动势携带 Y 方向空间位移信息, 可实现直接解耦。

1.4 传感器结构与二维位移解算

二维磁场时栅位移传感器结构如图 9 所示, 由定尺和动尺组成, 定尺由 X 、 Y 方向双层互补“几”字形线圈绕制而成, 动尺由 X 、 Y 两方向测头对组成, X 方向测头对包含余弦测头 $X_{\cos}$ 和正弦测头 $X_{\sin}$, Y 方向测头对同理包含 $Y_{\cos}$ 、 $Y_{\sin}$ 。动尺与定尺分别与 XY 平面平行, 且动尺和定尺之间留有气隙并相互正对平行。此外, 该模型 $X_{\cos}(Y_{\cos})$ 测头与 $X_{\sin}(Y_{\sin})$ 测头的距离为 $9/4W$ 。

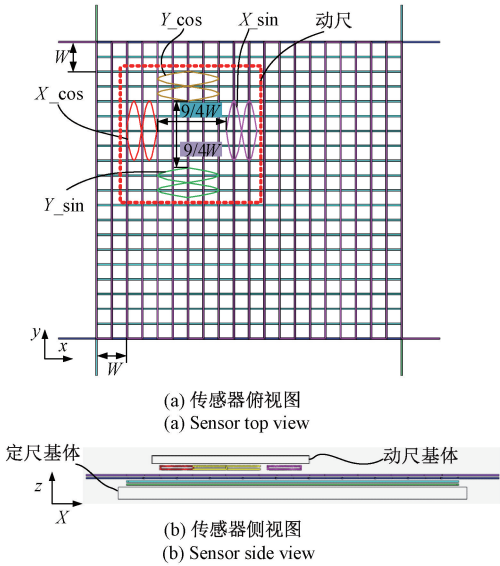


图 9 二维位移传感器结构

Fig. 9 Two-dimensional displacement sensor structure

动尺相对定尺向 X 方向移动时, X 方向测头对将产生感应电动势, Y 方向测头对输出信号理论上等于 0。当动尺相对定尺向 X 方向移动时, X 方向测头对将产生感应电动势, Y 方向测头对输出信号理论上等于 0。 X 方向余弦测头 $X_{\cos}$ 输出感应电动势为:

$$U_{X_{\cos}} = k_1 \cos(\omega_1 t) \cos \frac{2\pi x}{W} \quad (20)$$

X 方向正弦测头 $X_{\sin}$ 输出感应电动势为:

$$U_{X_{\sin}} = k_1 \cos(\omega_1 t) \sin \frac{2\pi x}{W} \quad (21)$$

同理可求得 Y 方向余弦测头 $Y_{\cos}$ 输出感应电动势为:

$$U_{Y_{\cos}} = k_2 \cos(\omega_2 t) \cos \frac{2\pi y}{W} \quad (22)$$

Y 方向正弦测头 $Y_{\sin}$ 输出感应电动势为:

$$U_{Y_{\sin}} = k_2 \cos(\omega_2 t) \sin \frac{2\pi y}{W} \quad (23)$$

对 X 、 Y 方向测头输出开展如图 10 所示的信号处理。

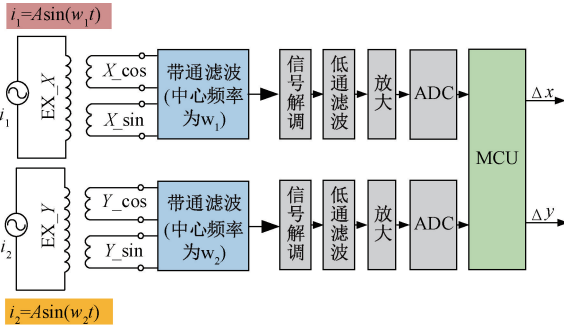


图 10 传感器信号处理

Fig. 10 Sensor signal processing

其中, X 方向两个测头输出感应电动势为载波频率为 ω_1 的调幅信号, Y 方向两个测头输出感应电动势为载波频率为 ω_2 的调幅信号, 为提高各测头信号的纯净性, 各测头输出感应电动势信号均先通过带通滤波处理, X 方向测头中心频率为 ω_1 , Y 方向测头中心频率为 ω_2 从而获得较纯净调制信号。参考一维位移传感器位移解调方案, 各调制信号可乘以载波信号进行解调, 解调后各测头信号变换为:

$$\begin{aligned} U_{X_{\cos}} &= \frac{1}{2} k_1 \cos(2\omega_1 t) \cos \frac{2\pi x}{W} + \frac{1}{2} k_1 \cos \frac{2\pi x}{W} \\ U_{X_{\sin}} &= \frac{1}{2} k_1 \cos(2\omega_1 t) \sin \frac{2\pi x}{W} + \frac{1}{2} k_1 \sin \frac{2\pi x}{W} \\ U_{Y_{\cos}} &= \frac{1}{2} k_2 \cos(2\omega_2 t) \cos \frac{2\pi y}{W} + \frac{1}{2} k_2 \cos \frac{2\pi y}{W} \\ U_{Y_{\sin}} &= \frac{1}{2} k_2 \cos(2\omega_2 t) \sin \frac{2\pi y}{W} + \frac{1}{2} k_2 \sin \frac{2\pi y}{W} \end{aligned} \quad (24)$$

解调后各测头信号包含高频和低频部分, 其中低频信号仅包含空间位移信息。采用低通滤波器滤除高频信号后得:

$$U_{X_{\cos}} = \frac{1}{2} k_1 \cos \frac{2\pi x}{W} \quad (25)$$

$$U_{X_{\sin}} = \frac{1}{2} k_1 \sin \frac{2\pi x}{W} \quad (26)$$

$$U_{Y_{\cos}} = \frac{1}{2} k_2 \cos \frac{2\pi y}{W} \quad (27)$$

$$U_{Y_{\sin}} = \frac{1}{2} k_2 \sin \frac{2\pi y}{W} \quad (28)$$

式(26)除以式(25), 式(28)除以式(27)得:

$$U_X = \frac{U_{X_{\sin}}}{U_{X_{\cos}}} = \tan \frac{2\pi x}{W} \quad (29)$$

$$U_Y = \frac{U_{Y_{\sin}}}{U_{Y_{\cos}}} = \tan \frac{2\pi y}{W} \quad (30)$$

通过模数转换器实时读取 U_X 、 U_Y 的值, 可通过微控制单元(microcontroller unit, MCU)计算出 X 、 Y 方向的位移值, 从而实现位移信号的解算。

$$\Delta x = \frac{W}{2\pi} \arctan(U_X) \quad (31)$$

$$\Delta y = \frac{W}{2\pi} \arctan(U_Y) \quad (32)$$

2 传感器仿真分析

2.1 传感器仿真与误差分析

根据图 9 的二维磁场式时栅位移传感器结构以及原理, 建立仿真模型。采用电磁仿真软件 ANSYS Maxwell, 构建电磁场有限元仿真模型并进行分析, 基本仿真模型参数如表 2 所示。

模型电磁仿真结果如图 11 所示, 其中每条曲线所对应的是动尺在不同位置的感应电动势, 每个测头的输出信号都为正弦或余弦型驻波信号, 在一个周期内, 驻波信号的相位与位移形成映射关系。

仿真误差分析如图 12 所示, 从可以图 12(a) 得出 X 方向测量误差峰峰值为 21.65 μm , Y 测量方向误差峰峰值为 43.27 μm , 并对误差曲线进行快速傅里叶分解, 得到的误差频次如图 12(b) 和(c) 所示, X 方向位移主要为 2 次谐波误差, Y 方向位移主要为 1 次和 2 次谐波误差。1 次和 2 次误差占据谐波误差主要成分, 其他误差幅值较小, 误差主要来源于结构本身, 接下来对传感器结构进行优化。

2.2 传感器结构优化

根据前文结构设计及直接解耦理论分析, 所设计二维位移传感器的测量原理如图 13 所示, 其中 X 、 Y 方

表 2 仿真模型参数表
Table 2 Simulation model parameters

参数名	参数值
激励电流幅值	0.1 A
X 方向励磁电流频率(ω_1)	10 kHz
Y 方向励磁电流频率(ω_2)	20 kHz
激励线圈匝数	1 匝
感应线圈匝数	1 匝
激励线圈间距	0.5 mm
感应线圈间距	0.2 mm
气隙间隙	0.5 mm
节距	4 mm
步距	0.2 mm
线圈宽度	2 mm
激励线圈长度	40 mm
感应线圈长度	8 mm
线圈直径	0.1 mm
线圈材料	Copper
导磁体材料	Steel_1008
行进方向	$Y=-X$
时长	100 μ s
时间间隔	2 μ s

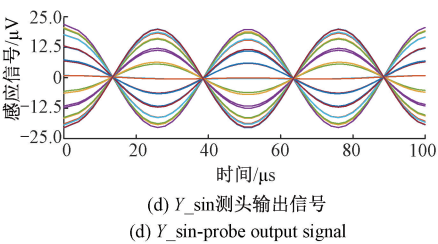
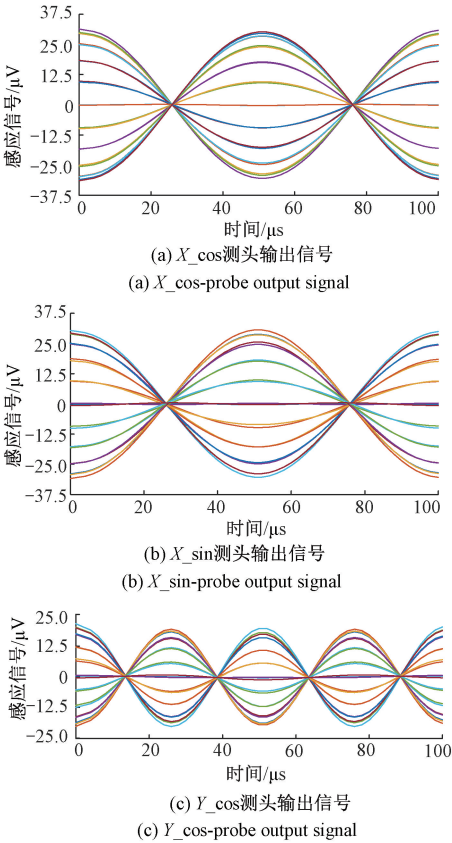


图 11 仿真感应电动势
Fig. 11 Simulation induced electromotive force

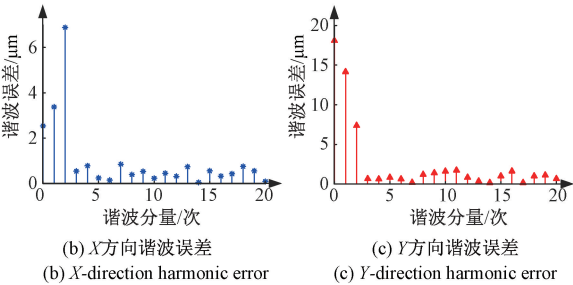
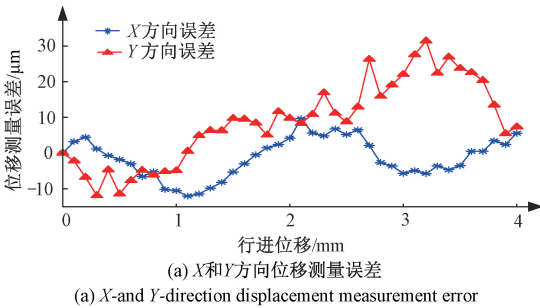


图 12 仿真误差分析
Fig. 12 Simulation error analysis

向两测头相距 $9/4W$, 并通过仿真初步验证了结构正确性。

以图 13 所示的测量原理图作为参考模型并使用印刷电路板 (printed circuit board, PCB) 工艺制作传感器样机如图 14 所示, 用以开展后续结构优化对比实验。

理论上仅在 X 方向激励线圈通入产生磁场的情况下, Y 方向测头沿 X 和 Y 方向行进输出感应电动势应为零, 但仿真结果与理论并不完全相符, 如图 15 所示, Y 方向测头沿 X 方向行进输出感应电动势并未严格等于 $0 \mu\text{V}$, 而是以 X 轴为中心线上下振荡的曲线, 振幅约为 $0.8 \mu\text{V}$, 约占输出信号幅值的 1.06% 。

同理, 在其余测头上也存在此现象, 所以此类信号作为输出噪声会影响传感器的测量精度, 因此提出了一种多测头差动模型, 如图 16 所示, 相较于图 13 所示的多测头直接解耦非差动模型, X 、 Y 各方向正、余弦线圈分别布置两个感应测头, 两个测头位于一根直线上且相距 $W/2$, 以相反方向绕制串联, 从而构成差动结构。

此时各组内两测头输出信号方向相反, 但受到的内

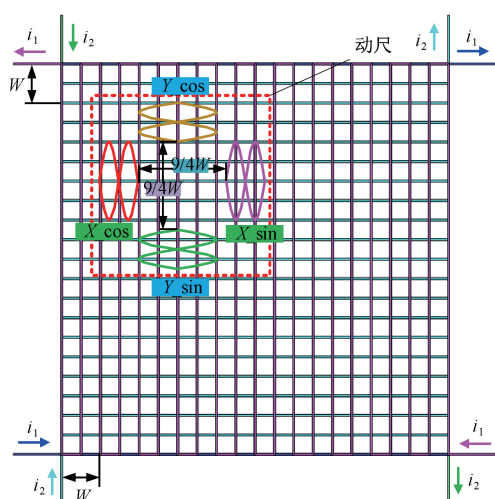


图 13 传感器测量原理

Fig. 13 Sensor measurement principle

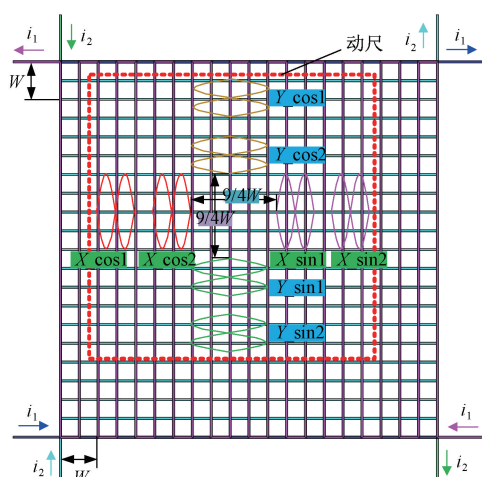


图 16 多测头差动模型

Fig. 16 Multiple probe differential model

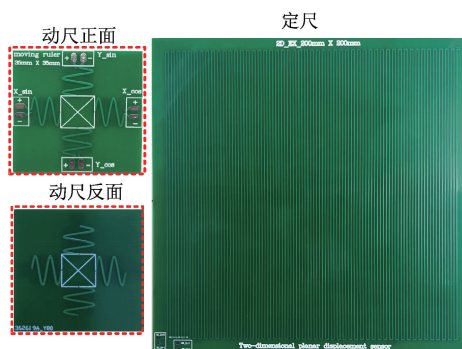


图 14 传感器样机

Fig. 14 Sensor prototype

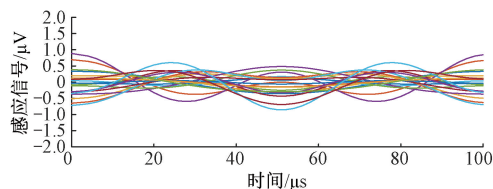
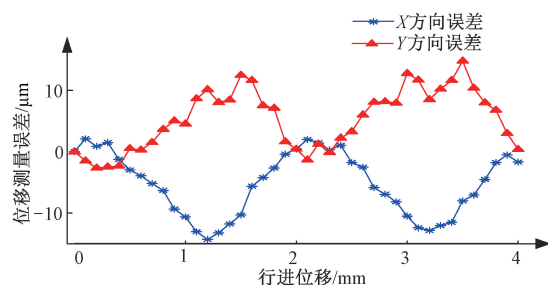


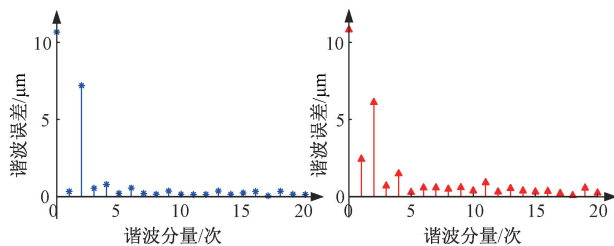
图 15 Y 方向测头感应信号

Fig. 15 Y-direction probe sensing signal



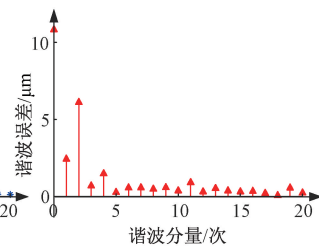
(a) X 和 Y 方向位移测量误差

(a) X-and Y-direction displacement measurement error



(b) X 方向谐波误差

(b) X-direction harmonic error



(c) Y 方向谐波误差

(c) Y-direction harmonic error

图 17 优化后仿真误差分析

Fig. 17 Simulation error analysis after optimization

3 实验验证与分析

根据电磁仿真模型,研制出结构优化后 PCB 样机如图 18 所示,并搭建实验平台以及展开测试。

搭建精密二维测量实验系统如图 19,在二维运动平台的 X、Y 方向上使用两套精度为 $\pm 1 \mu\text{m}$ 的 RENISHAW 光栅尺用于组成二维误差标定系统。在测试中对激励线圈通入激励信号,再控制二维位移平台驱使动尺与定尺产生相对运动,将动尺上产生的感应电信号进行滤波放大等处理后解算出测量位移值,然后二维误差标定系统

外部干扰信号却相同,因此,二者相减后可以消除共模干扰,且可将输出感应信号强度提升 1 倍,进一步提升传感器的信噪比。

对优化后的传感器结构进行电磁场有限元仿真,优化结构后的仿真结果如图 17 所示。从图 17 中得出消除共模干扰后,X 方向仿真误差峰峰值下降至 $15.19 \mu\text{m}$,Y 方向仿真误差峰峰值下降至 $21.65 \mu\text{m}$,提高了传感器的测量精度。

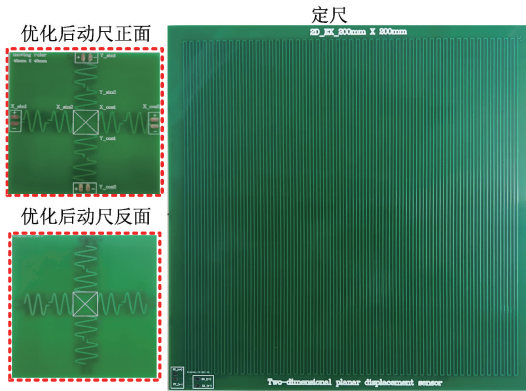


图 18 结构优化后传感器样机

Fig. 18 Sensor prototype after structure optimization

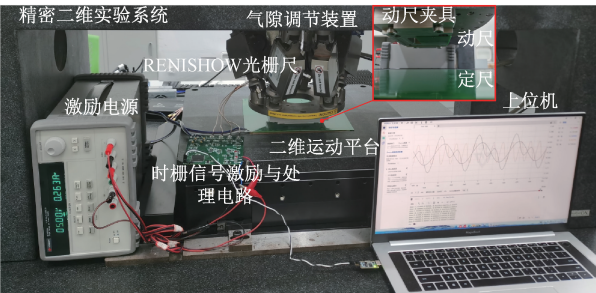


图 19 精密二维实验系统

Fig. 19 Precise two-dimensional measurement system

通过实时采集样机和光栅的测量数据,计算出测量误差。

为验证结构优化后实际效果,分别测试直接解耦非差动结构和直接解耦差动结构的误差。控制二维运动平台沿 $Y=-X$ 方向行进一个对极,测得直接解耦非差动结构和直接解耦差动结构的误差曲线和谐波误差频次分析如图 20 和 21 所示。

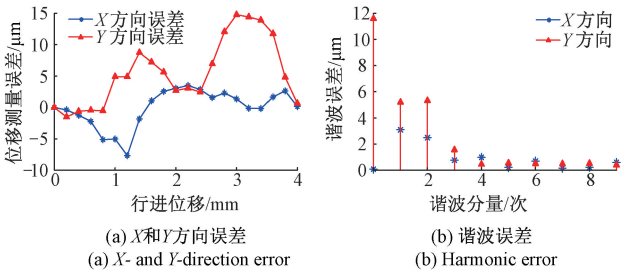


图 20 结构优化前对极内行进实验结果

Fig. 20 Experimental results of in-polar travel before structural optimization

从图 20 和 21 可知,直接解耦非差动结构 X 、 Y 方向对极内位移误差峰峰值分别为 $21.66\text{ }\mu\text{m}$ 和 $24.41\text{ }\mu\text{m}$ 。直接解耦差动结构 X 、 Y 方向对极内位移误差峰峰值分别为 $11.01\text{ }\mu\text{m}$ 和 $12.03\text{ }\mu\text{m}$,验证了多频磁场直接解耦

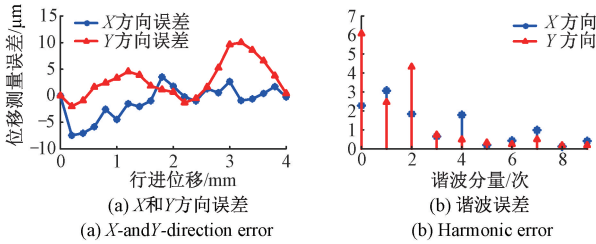


图 21 结构优化后对极内行进实验结果

Fig. 21 Experimental results of in-polar travel after structural optimization

差动结构的准确性。优化前和优化后的谐波误差主要表现为 1 次误差和 2 次误差,这是由传感器制造和安装误差引起,同时激励信号的相位和幅值不等也会引起 2 次误差。

对二维传感器开展不同应用场景应用实验,在动尺与定尺安装气隙为 $d=0.2$ 、 0.5 、 0.8 mm 时开展二维测量,不同气隙测量误差如图 22 所示。

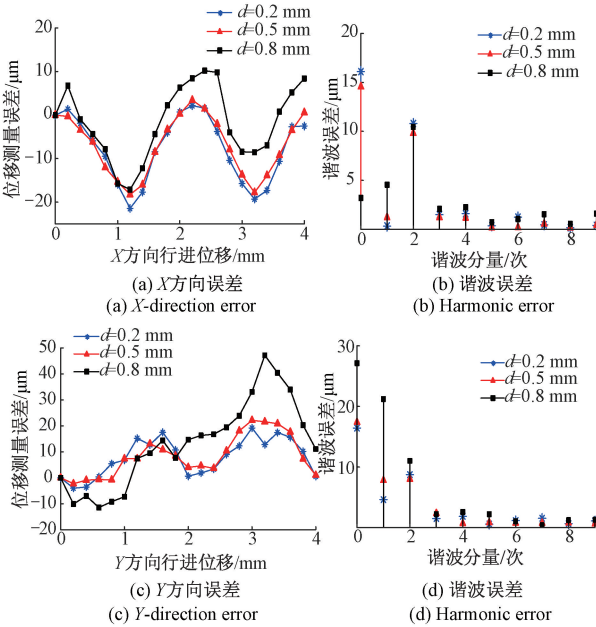


图 22 不同安装气隙实验

Fig. 22 Different installation air gap test

在安装气隙 $d=0.2$ 、 0.5 、 0.8 mm 情况下,从图 22(a)、(b)可知 X 测量方向误差峰峰值从 $21.66\text{ }\mu\text{m}$ 增加至 $27.3\text{ }\mu\text{m}$,此外 X 方向测量误差主要包含 0 次、1 次和 2 次谐波,从图 22(c)、(d)可得 Y 方向测量误差主要包含 0 次、1 次和 2 次谐波, Y 方向测量误差峰峰值从 $21.49\text{ }\mu\text{m}$ 增加至 $58.57\text{ }\mu\text{m}$ 。

对不同气隙误差进行统计如表 3 所示,表 3 中安装气隙实验数据可得气隙间距在 $0.2\sim0.5\text{ mm}$ 时 X 、 Y 方向

误差峰峰值相近,表明在此安装气隙范围内传感器对气隙的敏感程度不高,有益于传感器的实际使用。

表 3 安装气隙实验数据
Table 3 Installation air gap test data

气隙间距 /mm	X 方向误差 峰峰值/ μm	Y 方向误差 峰峰值/ μm	X 方向 谐波频次	Y 方向 谐波频次
0.2	23.6	21.49	0 次、2 次	0 次、1 次、2 次
0.5	21.66	24.41	0 次、2 次	0 次、1 次、2 次
0.8	27.3	58.57	0 次、1 次、 2 次	0 次、1 次、 2 次

对传感器开展满量程精度测试,在 150 mm×150 mm 的测量范围内,令动尺步距为 1.2 mm,采集 125 个位移点,误差曲线如图 23 所示。由测试结果可知 X、Y 测量原始精度分别为 $\pm 33.08\ \mu\text{m}$ 和 $\pm 36.95\ \mu\text{m}$,非线性度为 0.022% 和 0.025%。

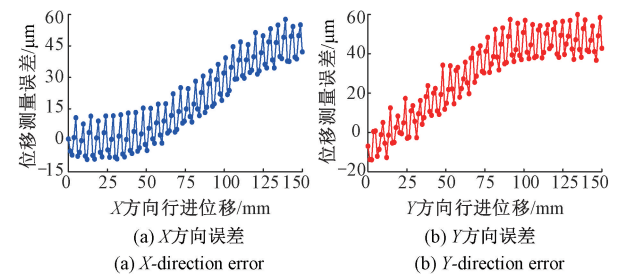


图 23 X、Y 方向测量原始精度

Fig. 23 X, Y measurement direction full scale error curve

对传感器开展稳定性测试,动尺运动到一定位置保持静止,每隔 10 s 进行信号采集以及位移解算,共采样 10 000 个点,通过读取位移测量值的波动情况进行稳定性判断。X、Y 方向稳定性曲线如图 24 所示。由图可知,X 方向波动幅值仅为 $10\ \mu\text{m}$,Y 方向波动幅值为仅 $7\ \mu\text{m}$ 。

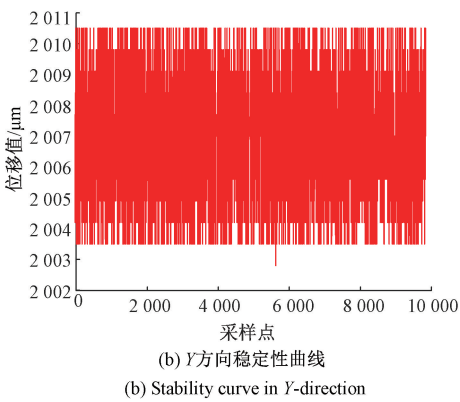
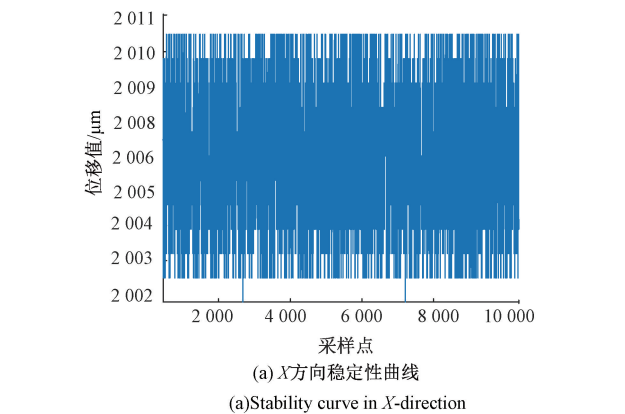


图 24 传感器稳定性测试
Fig. 24 Sensor stability test

对传感器进行对极内精度测试,将定尺阵面测量区域划分为如图 25 所示 5 个区域,对动尺阵面的 5 个测量区域展开对极内二维行进误差测试实验,令动尺步距为 0.2 mm,最终误差曲线如图 26 所示。由测试结果可知 X、Y 测量对极内平均测量精度分别为 $9.87\ \mu\text{m}$ 和 $12.05\ \mu\text{m}$,非线性度为 0.25% 和 0.3%。

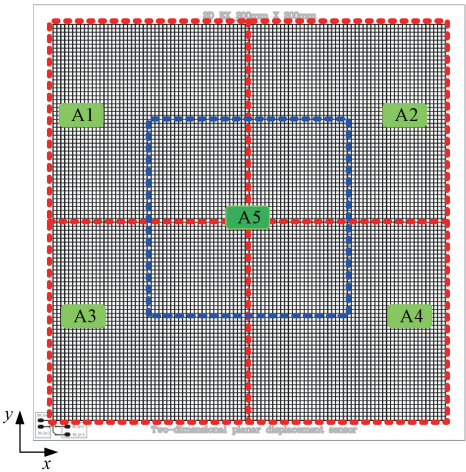
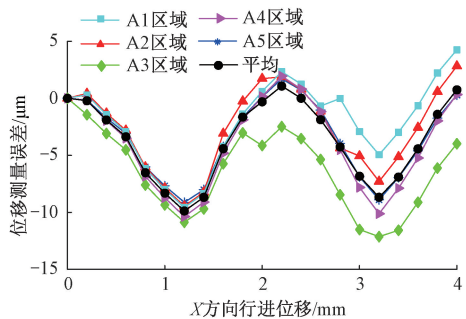


图 25 测量区域划分
Fig. 25 Measurement area division



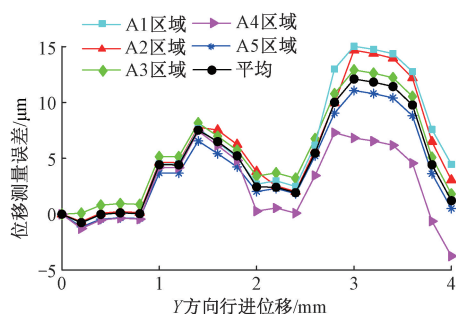


图 26 X和Y方向对极内测量原始精度

Fig. 26 X-and Y-direction antipolar intragrand measurement original accuracy curve

4 结 论

本文根据一维电磁式位移传感器的原理,研制了一种多频磁场耦合的磁场式平面二维位移传感器,通过多频激励产生均匀耦合磁场,并对感应线圈产生的电信号进行位移解算,从而实现二维微位移的测量。首先介绍了传感器的结构和原理,构建了可直接解耦的驻波磁场;其次通过理论推导和电磁仿真验证了多频磁场直接解耦和幅值调制解算位移的可行性,分析出测量误差主要为1次和2次误差,并对传感器结构进行了优化;最终采用PCB制作工艺加工了传感器的样机,并搭建了实验平台进行验证,实验结果表明,结构优化后的新型磁场式平面二维位移传感器在150 mm×150 mm的测量范围内,X、Y方向对极内位移误差峰峰值分别为11.01 μm和12.03 μm,对比结构优化前误差峰峰值分别降低49.1%和50.7%。并对传感器进行稳定性实验和满量程以及对极内精度实验,经测试X和Y方向波动幅值仅为10 μm和7 μm。X方向满量程精度为±33.08 μm,Y方向满量程精度为±36.95 μm,非线性度为0.022%和0.025%,X方向对极内精度为9.87 μm,Y方向满量程精度为12.05 μm,非线性度为0.25%和0.3%。在以后的研究中,将对传感器进行优化,探索节距线宽等结构参数对测量误差的影响,并总结其影响规律,提高传感器的精度,对高精度二维位移传感器的研究具有一定的指导意义。

参考文献

[1] LV Z, LI X, SU Z, et al. A Novel 2D micro-displacement measurement method based on the elliptical paraboloid[J]. Applied Sciences, 2019, 9(12): 2517.

[2] HUNG S K, CHUNG Y H, CHEN C L, et al. Optoelectronic angular displacement measurement technology for 2-dimensional mirror galvanometer [J]. Sensors, 2022, 22(3): 872.

[3] 武亮,阿岩琛,吴玉龙,等.基于正交双行波磁场的平面二维时栅位移传感器[J].仪器仪表学报,2022,

43(12):58-65.

WU L, A Y C, WU Y L, et al. Planar two-dimensional time grating based on the orthogonal dual traveling wave magnetic field displacement sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(12): 58-65.

[4] 杨继森,牟智铭,李路建,等.差动结构的平面二维时栅位移传感器[J].中国机械工程,2020,31(12):1444-1451.

YANG J S, MOU Z M, LI L J, et al. Planar two-dimensional time grating displacement sensor with differential structure[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(12): 1444-1451.

[5] 周国全,周一博.基于CMOS图像传感技术和等倾干涉的改进的二维微位移传感系统[J].武汉大学学报(工学版),2017,50(2):301-306.

ZHOU G Q, ZHOU Y B. An improved two-dimensional micro-displacement sensing system based on techniques of CMOS image sensor and equal-inclination interference[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2017, 50(2): 301-306.

[6] LI X, GAO W, MUTO H, et al. A six-degree-of-freedom surface encoder for precision positioning of a planar motion stage [J]. Precision Engineering, 2013, 37(3): 771-781.

[7] KIMURA A, GAO W, KIM W, et al. A subnanometric three-axis surface encoder with short-period planar gratings for stage motion measurement [J]. Precision Engineering, 2012, 36(4): 576-585.

[8] LEE J I, HUANG X, CHU P B. Nanoprecision MEMS capacitive sensor for linear and rotational positioning [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2009, 18(3): 660-670.

[9] 雷焱焱.集成MEMS电容位移传感器的二维微位移定位平台系统的研究[D].苏州:苏州大学,2013.

LEI Y Y. Research on two-dimensional micro-displacement positioning platform system integrated with MEMS capacitive displacement sensor [D]. Suzhou: Suzhou University, 2013.

[10] PENG K, LIU X K, CHEN Z R, et al. Sensing mechanism and error analysis of a capacitive long-range displacement nanometer sensor based on time grating [J]. Sensors Journal IEEE, 2017, 17(6): 1596-1607.

[11] 王合文,彭凯,刘小康,等.一种离散阵列的平面二维电场式时栅位移传感器[J].仪器仪表学报,2021,42(3):88-96.

WANG H W, PENG K, LIU X K, et al. Planar two-dimensional electric field time-grating displacement sensor with discrete array [J]. Chinese Journal of

- Scientific Instrument, 2021, 42(3): 88-96.
- [12] LIN J, GUAN J, WEN F, et al. High-resolution and wide range displacement measurement based on planar grating[J]. Optics Communications, 2017, 404: 132-138.
- [13] YIN Y, LIU Z, JIANG S, et al. High-precision 2D grating displacement measurement system based on double-spatial heterodyne optical path interleaving[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2022, 158: 107167.
- [14] 王淑珍, 常素萍, 谢铁邦. 大行程纳米级共平面二维精密工作台的研究[J]. 机械科学与技术, 2010, 29(8): 981-985.
- WANG S Z, CHANG S P, XIE T B, A Coplanar 2D Precision Stage with Large Travel and Nanopositioning Resolution[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2010, 29(8): 981-985.
- [15] LIN C B, YAN SH H, DING D, et al. Two-dimensional diagonal-based heterodyne grating interferometer with enhanced signal-to-noise ratio and optical subdivision[J]. Optical Engineering, 2018, 57(6): 064102.
- [16] 钱国林, 吴建宏, 李朝明. 米级光栅全息曝光拼接系统像差分析[J]. 激光杂志, 2013, 34(5): 16-18.
- QIAN G L, WU J H, LI CH M. The analysis of wave aberration of meter-sized mosaic-grating made in holographic exposure system[J]. Laser Journal, 2013, 34(5): 16-18.
- [17] ZENG L, LI L. Fabrication of square-lattice crossed gratings based on diffraction of a reference grating[C]. 2013 7th International Workshop on Advanced Optical Imaging and Metrology, 2014: 827-830.
- [18] HORESTANI A K, NAQUI J, SHATERIAN Z, et al. Two-dimensional alignment and displacement sensor

based on movable broadside-coupled split ring resonators[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2014, 210: 18-24.

- [19] RANA S, GEORGE B, JAGADEESH K V, Self-balancing signal conditioning circuit for a novel noncontact inductive displacement sensor [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2017, 66(5): 985-991.

作者简介



杨继森 (通信作者), 2001 年于湖北汽车工业学院获得学士学位, 2003 年于重庆大学获得硕士学位, 2007 年于重庆大学获得博士学位, 现为重庆理工大学教授, 主要研究方向为精密测量与智能传感器。

E-mail: yangjs@cqut.edu.cn

Yang Jisen (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Hubei University of Automotive Technology in 2001, M. Sc. degree from Chongqing University in 2003, and Ph. D. degree from Chongqing University in 2007. He is currently a professor at Chongqing University of Technology. His main research interests include precision measurement and intelligence sensor.



虞万章, 2021 年于重庆理工大学获得学士学位, 现为重庆理工大学硕士研究生, 主要研究方向为智能仪器与传感器。

E-mail: tuowanzhang@stu.cqut.edu.cn

Tuo Wanzhang received his B. Sc. degree from Chongqing University of Technology in 2021. He is currently a master student at Chongqing University of Technology. His main research interests include intelligent instruments and sensors.