

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210360

基于正交双行波磁场的平面二维时栅位移传感器^{*}

武亮^{1,2}, 阿岩琛^{1,2}, 吴玉龙^{1,2}, 苏瑞^{1,2}, 鲁进^{1,2}

(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. 重庆理工大学时栅传感及先进检测技术重庆市重点实验室 重庆 400054)

摘要:针对半导体行业、航空航天等领域对于精密二维位移测量的迫切需求,提出了一种基于正交双行波磁场的平面二维时栅位移传感器。传感器由定尺和动尺组成,定尺由导磁基体和沿 x 、 y 方向排列的两励磁线圈组成,动尺由导磁基体和沿 x 、 y 方向排列的两层感应线圈组成。当励磁线圈通入正余弦励磁信号时,在定尺上方产生分别沿 x 和 y 方向运动的正交双行波磁场。通过对感应线圈输出的感应电信号进行解算得到 x 和 y 方向的位移值。首先介绍了传感器的结构和工作原理,对传感器模型进行了电磁场仿真;然后对仿真误差进行溯源分析,并优化传感器结构;最后采用印刷电路板技术制作了传感器样机,并设计相应的电气系统进行实验验证。实验结果表明该传感器在 $160\text{ mm}\times 160\text{ mm}$ 测量范围内能够实现平面二维位移测量, x 方向节距内位移误差峰峰值为 $32.8\text{ }\mu\text{m}$, y 方向节距内位移误差峰峰值为 $34.5\text{ }\mu\text{m}$ 。

关键词: 时栅;平面二维位移测量;正交双行波磁场

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 time grating based on the orthogonal dual traveling wave magnetic field displacement sensor

Wu Liang^{1,2}, A Yanchen^{1,2}, Wu Yulong^{1,2}, Su Rui^{1,2}, Lu Jin^{1,2}

(1. Engineering Research Center of Mechanical Testing Technology and Equipment, Ministry of Education, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Time grating Sensing and Advanced Detection Technology, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract: To meet the urgent demand for precise two-dimensional positioning technology in the fields of semiconductor industry and aerospace, a planar two-dimensional time grating displacement sensor based on the orthogonal double traveling wave magnetic field is proposed in this article. The sensor consists of a stationary part and a movable part. The stationary part is composed of a magnetic conductive base and the excitation coils arranged in the x and y directions. The movable part is composed of the magnetic conductive base and the induction coils arranged in the x and y directions. An orthogonal traveling wave magnetic field is generated when the sine and cosine excitation signals are applied to excitation coils. The displacement values in x and y directions are obtained by calculating the inductive electromotive force. In this article, the working principle and structure of the sensor is firstly introduced. Then, the electromagnetic field simulation of the sensor model is carried out. According to the simulation results, the error is traceability analyzed and the sensor structure is optimized. Finally, the sensor prototype is fabricated by the printed circuit board technology, and the corresponding electrical system is designed for experimental verification. Results show that the sensor can realize two-dimensional displacement measurement, and the measurement range is up to $160\text{ mm}\times 160\text{ mm}$. The peak to peak value of displacement error in the x -direction is $32.8\text{ }\mu\text{m}$, and the peak to peak value of displacement error in the y -direction is $34.5\text{ }\mu\text{m}$ within a pitch.

Keywords: time grating; planar two-dimensional displacement measurement; orthogonal dual travelling wave magnetic field

收稿日期: 2022-08-27 Received Date: 2022-08-27

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51875069)、重庆市自然科学基金面上项目(cstc2021jcyj-msxmX0375)、重庆市研究生科研创新项目(CYS22658)、重庆理工大学研究生创新项目(gzlcx20222052)资助

0 引言

平面位移测量技术是半导体加工、航空航天以及国防军事等领域的关键技术^[1-2]。随着高精度加工技术的快速发展,对于平面位移测量技术的要求与日俱增,迫切需要对平面二维位移量进行精密测量^[3-4]。目前应用于平面二维位移测量的主要有:光学式二维位移传感器、电容式二维位移传感器、二维复合测量系统和电感式二维位移传感器。

光学式二维位移传感器是高精度位移加工中使用最为广泛的位置传感器,通过衍射光栅的干涉系统对平面二维位移进行测量。Zhu等^[5]提出了一种实现单点二维位移测量的系统,在0.5 mm的测量范围内分辨率优于5 nm。Ishikawa等^[6]出了一种利用垂直腔面发射激光器发散的光束所研制的集成光学微位移传感器,该传感器在0.4 mm测量范围内分辨率可达20 nm。Lin等^[7]提出了一种由反射型平面光栅和光学读数头组成的三轴光栅编码器,该编码器可测 x 轴、 y 轴和 z 轴3个方向位移且 z 轴位移分辨率可达4 nm。光学式二维位移传感器测量精度高,测量范围大且技术成熟应用广泛,但是制造工艺复杂,其精度取决于等间距栅线刻划精密程度,量程取决于栅尺的长度,实际加工过程中两者难以同时兼顾。同时光强度易受到灰尘污染和机械振动的影响^[8-9]。

电容式二维位移传感器通过电极板的耦合面积变化引起输出电压变化,通常以1/4或半桥式电路的形式进行信号处理并运算得到位移值。Barker等^[10]提出了一种具有 x 、 y 方向和角位移输出的二维电容式位移传感器,在8.9 mm的测量范围内分辨率可达0.1 μm 。章烨辉^[11]提出了一种大量程的电容式二维位移传感器,该传感器在70 mm×70 mm量程内,分辨率达到0.4 μm 。电容式二维位移传感器灵敏度高,动态响应速度快但参数对环境条件非常敏感且解耦复杂,在恶劣环境下很少采用^[12]。

二维复合测量系统通过系统中装配标定仪器的方法来获取位移值^[13]。张芮等^[14]提出了一种工作台角度误差补偿的方法,经过补偿后工作台可在50 mm的直线位移测量范围内分辨率达0.8 nm。二维复合测量系统可以实现高精度、远距离测量但光学仪器对环境较为敏感,并且对安装要求过高,安装达不到要求容易引起阿贝误差^[15]。

电感式二维位移传感器通过拾取和计算磁电信号获得位移值。Zhao等^[16]提出了一种基于霍尔传感器组成的三自由度测量系统,可以实现 x 、 y 和 θ_z 方向位移测量。Hojjat等^[17]提出了一种基于电感法直接测量二维位移的

方法,测量分辨率为10 μm 。Babu等^[18]提出了一种分辨率为6.5 μm 的非接触式平面螺旋线圈式感应位移传感器。Anandan等^[19]提出了一种使用磁耦合无芯平面线圈通过测量静止线圈和运动线圈之间的互感来计算位移的传感器,测量范围56 mm时,分辨率为29 μm 。平面感应式传感器在测量精度和分辨力方面优势较小但成本低且对环境条件要求不高^[20]。

本文提出了一种基于电磁感应原理的二维时栅位移传感器,通过构建正交双行波磁场,将电磁信号转化为电信号进行处理并对位移进行解算,实现平面二维位移测量。首先介绍了传感器的结构与工作原理;其次对传感器建模并进行电磁场仿真,根据仿真结果优化传感器结构,设计传感器的电气系统;最后制作样机并通过实验测试了传感器性能。

1 传感器结构与工作原理

1.1 一维时栅位移传感器原理

一维磁场式时栅位移传感器^[21-22]的结构如图1所示,传感器由定尺和动尺组成。定尺上交错布置两组励磁线圈(正弦励磁线圈和余弦励磁线圈),且每组线圈正反串联绕制。相邻两个线圈的中心距为 $W/4$ (W 为空间节距)。感应线圈由正反串联的两个线圈组成,每个感应线圈沿测量方向覆盖2个励磁线圈,中心距为 $W/2$ 。

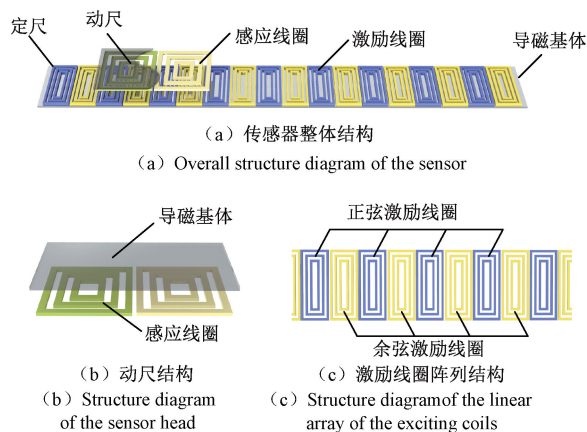


图1 一维时栅位移传感器结构

Fig. 1 The structure of the linear displacement sensor

当两组励磁线圈分别通入正余弦励磁信号,在定尺上方会产生行波磁场,表达式如式(1)所示。

$$B(t, x) = NB_1 \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{W}x + \varphi_1\right) \quad (1)$$

式中: N 为线圈匝数; B_1 为行波磁场基波分量振幅; ω 为励磁信号角频率; φ_1 为基波分量初相角。

当动尺相对于定尺发生移动时,感应线圈所产生的感应电信号 e_1 为:

$$e_1 = -\frac{2W^2 B_1 N}{\pi} \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{W}x + \varphi_1\right) \quad (2)$$

将电行波信号与标准信号的相位差利用高频时钟脉冲进行插补,通过脉冲计数可以将相位差转化为时间差,得到位移值如式(3)所示。

$$X = W\left(n + \frac{\omega \Delta t}{2\pi}\right) \quad (3)$$

式中: n 为动尺相对定尺移动过的节距数; Δt 为时间差。

1.2 二维时栅位移传感器原理与结构

基于一维磁场式时栅,提出了一种基于正交双行波磁场的二维时栅位移传感器,结构如图2所示。传感器主要由激励线圈和感应线圈组成。其中,激励线圈由沿 x 方向交替排列且通入正交信号的两组螺旋线圈阵列($X_{\sin}$ 和 $X_{\cos}$) 和沿 y 方向交替排列且通入正交信号的两组螺旋线圈阵列($Y_{\sin}$ 和 $Y_{\cos}$) 组成,两组线圈结构参数完全相同,相邻两线圈中心距为 $W/4$ 。感应线圈由沿 x 方向反向串联的两个螺旋线圈(I_{c_X}) 和沿 y 方向反向串联的两个螺旋线圈(I_{c_Y}) 组成,分别拾取各自维度上的磁通量,相邻两线圈中心距为 $W/2$ 。激励线圈与感应线圈间有微小间距 d 。

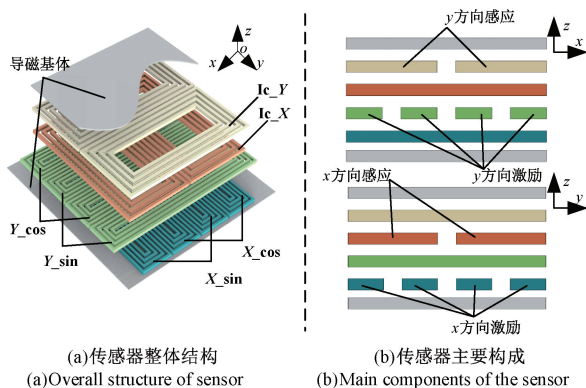


图2 二维时栅位移传感器结构

Fig. 2 Two-dimensional time grating displacement sensor structure

当激励线圈通入 $i_1 = \sin\omega t$ 和 $i_2 = \cos\omega t$ 的交变励磁信号之后,传感器激励线圈产生包含时间变量 t 与空间变量 x 、 y 的2个混叠的行波磁场,其基波磁场强度表达式如下:

$$B(t, x, y) = NB_1 \left[\sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{W}x + \varphi_1\right) + \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{W}y + \varphi_1\right) \right] \quad (4)$$

当感应线圈在混叠的行波磁场中移动时,激励线圈和感应线圈之间的耦合面积随感应线圈的运动而周期性变化,感应线圈内会产生周期性电信号。为了将混叠的

x 和 y 方向位移信息分离,采用结构上动尺与定尺之间覆盖面积差异的方法,将 x 方向感应线圈覆盖 x 方向激励线圈 $W/2$,覆盖 y 方向激励线圈 W ,以此抵消沿 y 方向运动的行波磁场。同理, y 方向感应线圈覆盖 y 方向激励线圈 $W/2$,覆盖 x 方向激励线圈 W ,以此抵消沿 x 方向运动的行波磁场。 x 和 y 方向感应线圈磁通量变化如下:

$$\begin{cases} \phi_{xx}(x) = \sqrt{2}NB_1 \int_{y-\frac{W}{2}}^{y+\frac{W}{2}} \int_x^{x+\frac{W}{2}} \cos\left(\frac{2\pi}{W}x + \varphi_1\right) dx dy = \\ -\frac{2W^2}{\pi} \sin\left(\frac{2\pi}{W}x + \varphi_1\right) \\ \phi_{xy}(y) = \sqrt{2}NB_1 \int_x^{x+\frac{W}{2}} \int_{y-\frac{W}{2}}^{y+\frac{W}{2}} \cos\left(\frac{2\pi}{W}y + \varphi_1\right) dx dy = 0 \\ \phi_{yy}(y) = \sqrt{2}NB_1 \int_{x-\frac{W}{2}}^{x+\frac{W}{2}} \int_y^{y+\frac{W}{2}} \cos\left(\frac{2\pi}{W}y + \varphi_1\right) dy dx = \\ -\frac{2W^2}{\pi} \sin\left(\frac{2\pi}{W}y + \varphi_1\right) \\ \phi_{yx}(x) = \sqrt{2}NB_1 \int_y^{y+\frac{W}{2}} \int_{x-\frac{W}{2}}^{x+\frac{W}{2}} \cos\left(\frac{2\pi}{W}y + \varphi_1\right) dx dy = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: ϕ_{xx} 为 x 方向激励线圈产生磁场强度通过 x 方向感应线圈产生的磁通量; ϕ_{xy} 为 x 方向激励线圈产生磁场强度通过 y 方向感应线圈产生的磁通量; ϕ_{yy} 为 y 方向激励线圈产生磁场强度通过 y 方向感应线圈产生的磁通量; ϕ_{yx} 为 y 方向激励线圈产生磁场强度通过 x 方向感应线圈产生的磁通量。

由式(5)可以看出, x 方向感应线圈抵消了 y 方向激励线圈产生的磁通量,只对 x 方向激励线圈产生的磁通量敏感, y 方向同理。将磁通量对时间 t 求导,得到感应电信号变化如下:

$$\begin{cases} e_x(t, x) = \frac{d(\phi_{xx})}{dt} = \\ -\frac{2W^2 B_1 N}{\pi} \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{W}x + \varphi_1\right) \\ e_y(t, y) = \frac{d(\phi_{yy})}{dt} = \\ -\frac{2W^2 B_1 N}{\pi} \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{W}y + \varphi_1\right) \end{cases} \quad (6)$$

传感器输出两路感应电信号,将两路电信号与标准信号进行比相,利用高频脉冲插补,将相位差转化为时间差,经过式(7)得出 x 方向和 y 方向位移值。

$$\begin{cases} X = V\Delta t = W\left(n_x + \frac{\Delta t}{T}\right) = W\left(n_x + \frac{\omega \Delta t}{2\pi}\right) \\ Y = V\Delta t = W\left(n_y + \frac{\Delta t}{T}\right) = W\left(n_y + \frac{\omega \Delta t}{2\pi}\right) \end{cases} \quad (7)$$

式中: n_x 、 n_y 为感应线圈在 x 和 y 方向上经过的节距数。

1.3 传感器信号处理方法

传感器主要采用基于鉴相原理的信号处理方法，如图 3 所示。利用 MCU(型号:STM32F405) 主控芯片自带的 DAC 模块输出交变正余弦信号作为激励信号，

由感应线圈感应后得到两路电行波信号,经低通滤波器、运算放大器和过零比较器处理之后通过高频脉冲插补算法进行位移解算。测量数据通过 RS422 串口传输至上位机。

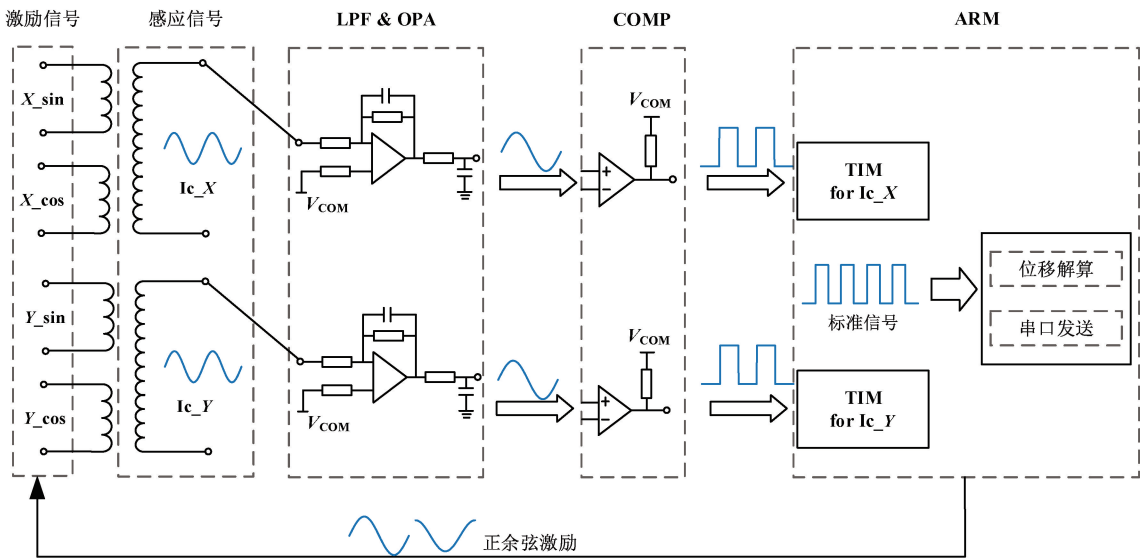


图 3 信号处理电路框图
Fig. 3 Signal processing circuit block diagram

2 传感器模型仿真验证

根据传感器测量原理,在仿真软件 ANSYS Maxwell 中建立电磁场有限元仿真模型进行分析,基本仿真模型参数如表 1 所示。

模拟感应线圈沿 $y=x$ 方向移动一个节距,感应信号如图 4 所示。图 4 中每条曲线是在预设位置随时间变化输出的电动势,感应线圈移动后,将位移值和设定理论位移值进行比较得到误差。

表 1 仿真模型参数表

Table 1 Parameters of the simulation model

线圈参数	参数值
激励线圈匝数	5
感应线圈匝数	10
激励线圈中心距/mm	5
感应线圈中心距/mm	10
传感器节距(W)/mm	20
激励、感应线圈间隙(d)/mm	0.1
线圈材料	Copper
导磁基体材料	Steel_1045
激励信号幅值/A	0.1
激励信号角频率/kHz	40
空间运动范围/mm	0~30
步距/mm	1
运动方向	$y=x$

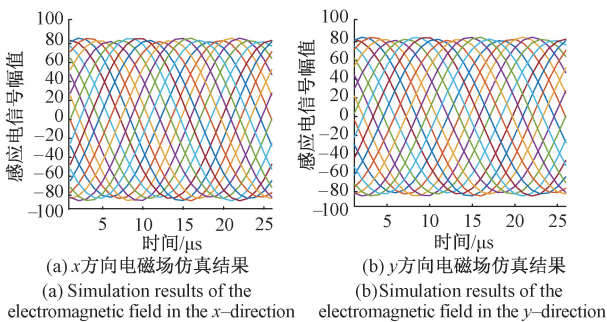


图 4 电磁场仿真结果
Fig. 4 Electromagnetic field simulation result diagram

对传感器进行仿真所得误差曲线如图 5(a) 所示。将误差曲线进行傅里叶分解得到误差频谱图如图 5(b) 所示。由图 5 可知,该传感器模型主要存在 4 次误差,由于仿真是在理想条件下进行,所以 4 次误差出现是由传感器结构造成。随后将通过误差分析,对传感器结构进一步进行优化。

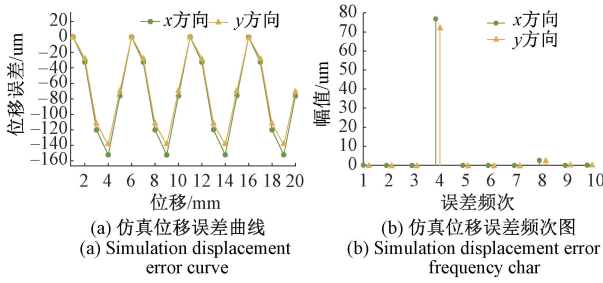


图5 仿真结果

Fig. 5 Simulation result diagram

3 传感器误差分析与结构优化

当激励线圈中施加励磁信号时,由于激励线圈和感应线圈之间的间隙以及磁场边缘效应等因素的影响,产生的驻波磁场中包含空间量的高频谐波成分,利用传感器感应线圈差动结构,可抵消驻波磁场偶次谐波分量。谐波频次越高,谐波分量幅值越小。此处只分析基波和三次谐波成分。感应线圈电动势如下:

$$e(t, x) = \lambda \sqrt{\left[a_1 \sin\left(\frac{2\pi}{W}x + \varphi_1\right) - a_3 \sin\left(3 \cdot \frac{2\pi}{W}x + \varphi_3\right) \right]^2 + \left[a_1 \cos\left(\frac{2\pi}{W}x + \varphi_1\right) + a_3 \cos\left(3 \cdot \frac{2\pi}{W}x + \varphi_3\right) \right]^2} \cdot \sin\left[\omega t + \frac{2\pi}{W}x + \arctan \frac{a_1 \sin\left(\frac{2\pi}{W}x + \varphi_1\right) - a_3 \sin\left(3 \cdot \frac{2\pi}{W}x + \varphi_3\right)}{a_1 \cos\left(\frac{2\pi}{W}x + \varphi_1\right) + a_3 \cos\left(3 \cdot \frac{2\pi}{W}x + \varphi_3\right)} \right] \quad (8)$$

式中: $\lambda = -\frac{2W^2 B_1 N}{\pi}$; a_1 、 a_3 为基波和三次谐波的幅值;

φ_1 、 φ_3 为基波和三次谐波的相位角。

根据时栅高频脉冲插补的计算原理,理论位移误差如下:

$$\begin{aligned} error_4(x) = & \frac{W}{2\pi} \left[\arctan \frac{a_1 \sin\left(\frac{2\pi}{W}x + \varphi_1\right) - a_3 \sin\left(3 \cdot \frac{2\pi}{W}x + \varphi_3\right)}{a_1 \cos\left(\frac{2\pi}{W}x + \varphi_1\right) + a_3 \cos\left(3 \cdot \frac{2\pi}{W}x + \varphi_3\right)} - \right. \\ & \left. \arctan \frac{\sin\left(\frac{2\pi}{W}x\right)}{\cos\left(\frac{2\pi}{W}x\right)} \right] = \frac{W}{2\pi} a_3 \sin\left(4 \cdot \frac{2\pi}{W}x + \varphi_3\right) \quad (9) \end{aligned}$$

由式(9)可知,4次误差主要由谐波电动势三次谐波分量引起,与传感器结构有关,考虑通过优化传感器结构实现对4次谐波成分的抑制。感应电动势的4次误差通常可以利用空间移相的方法解决,将单层感应线圈由两个参数完全相同的矩形线圈变为同面积的4个正方形线圈,4个正方形线圈一分为二沿测量方向错开 $W/6$ 。仅考虑基波和三次谐波分量时,感应线圈上半部分感应电动势如下:

$$e_{upper}(t, x) = a_1 \cos\left(\frac{2\pi}{W}x + \varphi_1\right) + a_3 \cos\left(3 \cdot \frac{2\pi}{W}x + \varphi_3\right) \quad (10)$$

错开 $W/6$ 之后,感应线圈下半部分感应电动势

如下:

$$\begin{aligned} e_{lower}(t, x) = & a_1 \cos\left(\frac{2\pi}{W}x + \frac{\pi}{3} + \varphi_1\right) - \\ & a_3 \cos\left(3 \cdot \frac{2\pi}{W}x + \varphi_3\right) \end{aligned} \quad (11)$$

叠加之后为 x 方向输出的感应电动势为:

$$e_{xx}(t, x) = \sqrt{3} a_1 \cos\left(\frac{2\pi}{W}x + \frac{\pi}{6} + \varphi_1\right) \quad (12)$$

从式(12)可以看出,将螺旋线圈一分为二并错开 $W/6$ 后将三次谐波成分抵消了。

为了进一步提高传感器分辨率,考虑到传感器制造工艺限制,将激励线圈优化为键型结构。键型结构前端用于布置通孔,防止因线圈中部打孔造成的磁场分布不均,中后端工作区域螺旋线圈较优化前节距减小,提高了磁场密度。

优化后结构如图6所示,将模型在进行仿真分析,激励线圈节距为 10 mm,激励线圈中心距 2.5 mm,步距设置为 0.5 mm,其他参数与表1相同。

仿真结果如图7所示,将感应线圈沿 $y=x$ 方向移动单个节距,可以看到感应电信号幅值没有太大变化,曲线更加平滑。仿真数据与理论数据比较得到位移误差曲线如图8(a)所示,对误差曲线进行傅里叶分解得到误差频次图如图8(b)所示。

由图8可得,优化后传感器4次误差明显减小。误差幅值在 x 方向减小 53 μm , y 方向减小 49 μm 。由此可证,该结构优化方法可行。但激励线圈与感应线圈的多匝结构在增强磁场强度的同时也会引入许多谐波分量导致电气系统方面的误差,因此四次误差依然存在。

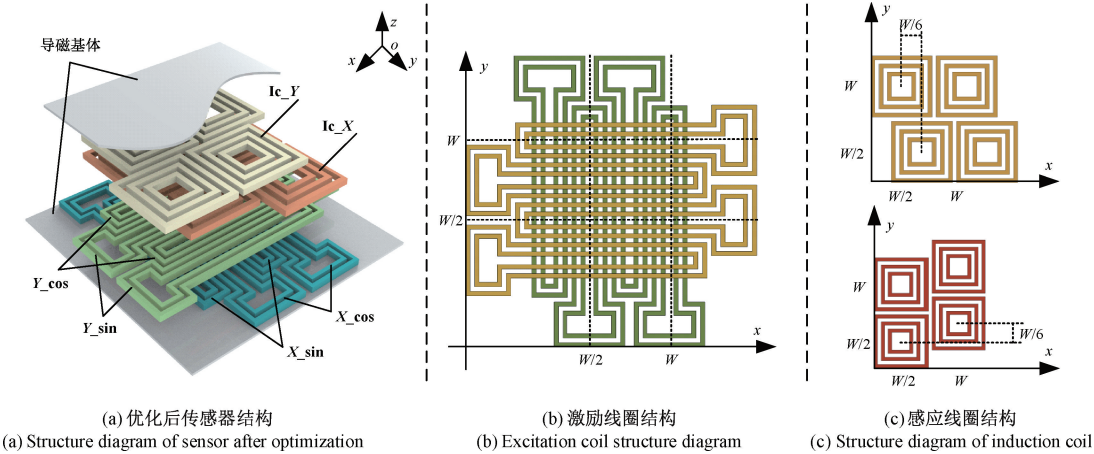


图 6 优化后传感器结构

Fig. 6 Structure diagram of sensor after optimization

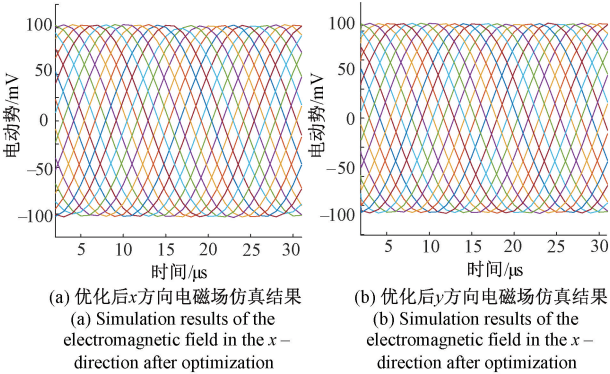


图 7 优化后电磁场仿真结果

Fig. 7 Electromagnetic field simulation results after optimization

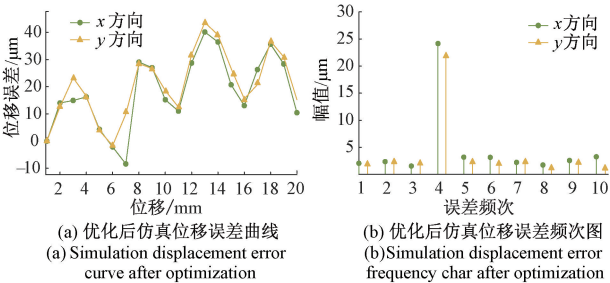


图 8 优化后仿真结果

Fig. 8 Simulation results after optimization

4 实 验

采用优化后传感器模型,将模型利用印刷电路板 (printed circuit board,PCB) 技术制作,制作后激励线圈如图 9(a) 所示,感应线圈如图 9(b) 所示。搭建实验平台如图 9(c) 所示,定尺与动尺固定在导磁基体上。定尺面

积 175 mm×175 mm,有效测量面积 160 mm×160 mm,动尺面积 20 mm×20 mm。实验采用精密二维运动平台,平台两侧安装雷尼绍光栅尺作为运动反馈和数据标定,光栅尺精度为±1 μm。系统使用 RS422 串行端口将测量数据传输至计算机。

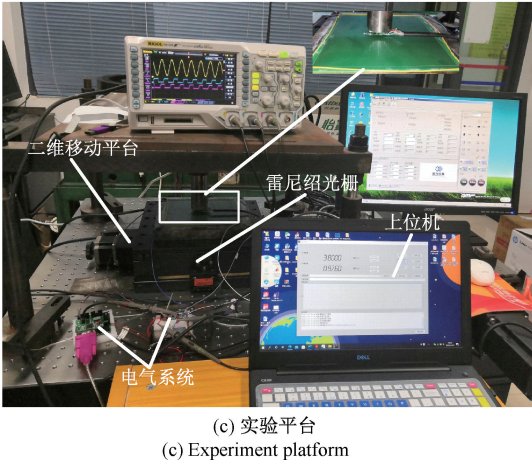
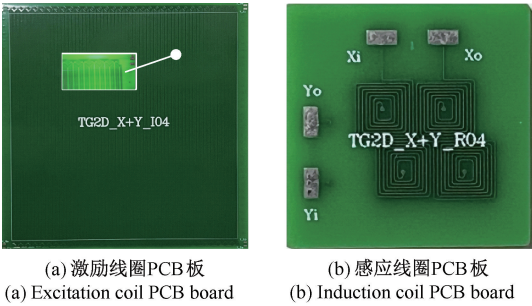


图 9 传感器样机与实验装置

Fig. 9 Sensor prototype and experimental setup

为了验证传感器采用的解耦方法性能,将感应线圈在 x 方向上移动一个节距,与光栅尺测量结果比对得到 x

方向和 y 方向测量误差。误差曲线如图 10 所示,可以看出非运动方向的位移误差约为 $\pm 1 \mu\text{m}$, 包含因安装和制造引起的非正交误差,可以证明该解耦方法可行。

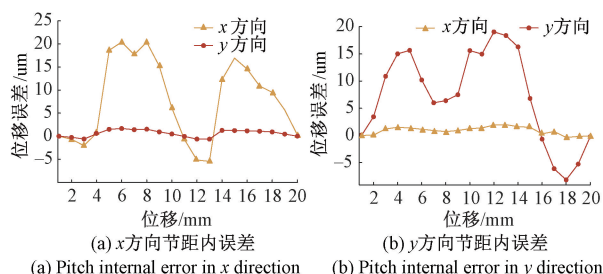


图 10 节距内单方向测量误差

Fig. 10 Single direction measurement error within pitch

将感应线圈沿 $y=x$ 方向以 0.5 mm 的步长进行节距内实验,位移误差曲线如图 11(a) 所示,经傅里叶分解后得位移误差频次图如图 11(b) 所示。该传感器节距内测量误差峰峰值 x 方向为 $32.8 \mu\text{m}$, y 方向为 $34.5 \mu\text{m}$,分辨率 $0.2 \mu\text{m}$ 。将实验误差频次图与仿真误差频次图比较可得实验过程中引入了一次与二次误差,这主要由制造和安装误差引起。同时,输入激励信号的幅值不相等,相位不正交也会引起传感器二次误差。

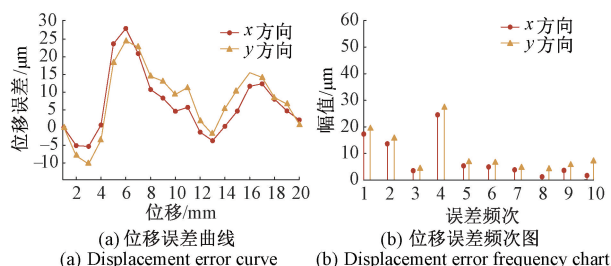


图 11 实验结果

Fig. 11 Diagram of experimental results

5 结 论

本文基于一维磁场式时栅的测量原理,提出了一种基于正交双行波磁场的平面二维时栅位移传感器。利用励磁线圈通入交变电流产生正交的双行波磁场,感应线圈获取感应电信号后进行位移解算。首先介绍了传感器的结构和测量原理,然后通过电磁场仿真验证了测量原理。根据仿真结果分析,该传感器主要包含 4 次误差,采用感应线圈空间移相的方式对传感器进行结构优化,减少了 4 次误差。最后利用 PCB 技术制作了传感器样机并搭建实验平台进行实验验证。实验结果表明,传感器在节距内 x 方向位移误差峰峰值为 $32.8 \mu\text{m}$, y 方向位移误差峰峰值为 $34.5 \mu\text{m}$,分辨率为 $0.2 \mu\text{m}$ 。在接下来的

工作中,将对传感器的结构优化、误差溯源分析和误差补偿机制进行研究以提高传感器测量精度和分辨率。本文对于进一步研究高精度平面二维位移传感器具有重要的理论和实践指导意义。

参考文献

- [1] LIU C H, JYWE W Y, JENG W Y, et al. Design and control of a long-traveling nano-positioning stage [J]. *Precis*, 2010, 34(3): 497-506.
- [2] GAO W, KIM S W, BOSSE H, et al. Measurement technologies for precision positioning [J]. *CIRP Annals*, 2015, 64(2): 773-796.
- [3] 武亮,王鑫达,童鹏,等. 基于平面驻波磁场的二维位移传感器测量原理与结构优化 [J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(9): 225-235.
- [4] 朱革,余小雨,付敏,等. 高精度自适应数字移相方法研究 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2020, 34(2): 107-114.
- [5] ZHU G, YU X Y, FU M, et al. Research on high precision adaptive digital phase shift method [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2020, 34(2): 107-114.
- [6] ZHU K Y, GUO B, LU Y Y, et al. Single-spot two-dimensional displacement measurement based on self-mixing interferometry [J]. *Optica*, 2017, 4(7): 729-735.
- [7] ISHIKAWA I, SAWADA R, HIGURASHI E, et al. Integrated micro-displacement sensor that measures tilting angle and linear movement of an external mirror [J]. *Sensors & Actuators A: Physical*, 2007, 138(2): 269-275.
- [8] 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.
- [9] LU Z, WEI P, WANG C, et al. Two-degree-of-freedom displacement measurement system based on double diffraction gratings [J]. *Measurement Science and Technology*, 2016, 27(7): 074012.
- [10] 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.
- [11] QIAN G L, WU J H, LI C H M. The analysis of wave aberration of meter-sized mosaic-grating made in holographic exposure system [J]. *Laser Magazine*, 2013, 34(5): 16-18.

- [10] BARKER M J, COLCLOUGH M S. A two-dimensional capacitive position transducer with rotation output [J]. Review of Scientific Instruments, 1997, 68 (8): 3238-3240.
- [11] 章烨辉. 基于平面电容传感器的大量程、高精度二维位移直接解耦测量方法和系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
ZHANG Y H. Study on 2D wide-range high-precision displacement measuring method and system based on planar capacitive sensor with direct decoupling effect[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [12] VAN DE VEN O S, VOGEL J G, XIA S, et al. Self-aligning and self-calibrating capacitive sensor system for displacement measurement in inaccessible industrial environments[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2018, 67(2): 350-358.
- [13] 程知己. 二维工作台多自由度测量系统优化及测试[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.
CHENG ZH J. Optimization and testing of multi-degree-of-freedom measurement system with two-dimensional workbench[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020.
- [14] 张芮, 黄强先, 伍婷婷, 等. 二维工作台角度误差实时补偿研究[J]. 中国测试, 2018, 44(8): 102-106.
ZHANG R, HUANG Q X, WU T T, et al. Research of compensating angle error to the 2D stage in real time[J]. China Measurement&Test, 2018, 44(8): 102-106.
- [15] WU L, TANG Q, CHEN X, et al. A novel two dimensional sensor with inductive spiral coils[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(1): 4857-4865.
- [16] ZHAO B, WANG L, TAN J B. Design and realization of a three degrees of freedom displacement measurement system composed of hall sensors based on magnetic field fitting by an elliptic function [J]. Sensors (Basel), 2015, 15(9): 22530-22546.
- [17] HOJJAT Y, KARAFI M R, GHANBARI M, et al. Development of an inductive encoder for simultaneous measurement of two-dimensional displacement [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 53(5-8): 681-688.
- [18] BABU A, GEORGE B. Design and development of a new on-contact inductive displacement sensor [J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 18(3): 976-984.
- [19] ANANDAN N, GEORGE B. Design and development of a planar linear variable differential transformer for

displacement sensing[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(1): 5298-5305.

- [20] RANA S, GEORGE B, JAGADEESH KUMAR 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.
- [21] 武亮, 彭东林, 鲁进, 等. 基于平面线圈线阵的直线时栅位移传感器 [J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(1): 83-90.
WU L, PENG D L, LU J, et al. Linear time grating displacement sensor based on linear array of planar coils[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(1): 83-90.
- [22] WU L, TONG P, WANG X D, et al. An absolute linear displacement sensor based on orthogonal dual traveling wave magnetic field [J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(6): 6019-6026.

作者简介



武亮 (通信作者), 分别在 2008 年和 2011 年于重庆理工大学获得学士学位和硕士学位, 2017 年于重庆大学获得博士学位, 现为重庆理工大学机械检测技术与装备教育部工程研究中心副研究员, 主要研究方向为精密测试技术及仪器。

E-mail: ant56@126.com

Wu Liang (Corresponding author) received his B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Chongqing University of Technology in 2008 and 2011, and Ph. D. degree from Chongqing University in 2017, respectively. He is currently an associate research fellow with the Engineering Research Center of Mechanical Testing Technology and Equipment, Ministry of Education, Chongqing University of Technology. His main research interests include precision testing technique and instrument.



阿岩琛, 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: ant56@126.com

A Yanchen received her B. Sc. degree from Chongqing University of Technology in 2021. She is currently a M. Sc. candidate at Chongqing University of Technology. Her main research interests include intelligent instruments and sensor.