

文章编号 1004-924X(2025)10-1558-13

大量程平面二维时栅误差特性与实验研究

陈自然^{1,2}, 刘振越^{1,2}, 彭凯^{1,2*}, 欧阳辉^{1,2}, 郑永海^{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. 时栅传感及先进检测技术重庆市重点实验室, 重庆 400054)

摘要:针对传统平面二维光栅位移传感器在大量程平面位移测量中存在结构复杂、栅格刻划加工要求严格等问题,提出一种“维度分解+位移解耦”的平面二维位移组合测量方法。通过空间周期性传感结构构建了正交变化的磁场,建立平面二维位移与时间基准的映射关系。研究了传感器安装误差对二维位移测量精度的影响,通过建模仿真分析与实验验证重点分析了滚转姿态、俯仰姿态和偏摆姿态带来的二维位移测量误差。实验结果表明,安装误差会在二维位移测量中主要引入直流分量、2次和4次谐波误差。当动尺与定尺之间气隙高度为0.6 mm时,在240 mm×240 mm的测量范围内,X方向测量误差不超过±8.6 μm,Y方向测量误差不超过±8.8 μm,分辨力为0.15 μm。利用毫米级的传感单元在240 mm×240 mm测量范围内实现微米级测量精度的二维位移测量具有重要的理论研究价值和工程应用价值。

关键词:大量程;二维位移测量;时栅传感器;误差分析

中图分类号:TH7 **文献标识码:**A

doi:10.37188/OPE.20253310.1558

CSTR:32169.14.OPE.20253310.1558

Error characteristics and experiment study of a planar two-dimensional time-grating sensor with large measuring range

CHEN Ziran^{1,2}, LIU Zhenyue^{1,2}, PENG Kai^{1,2*}, OUYANG Hui^{1,2}, ZHENG Yonghai^{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 Testing Technology,
Chongqing 400054, China)

* Corresponding author, E-mail: pk@cqut.edu.cn

Abstract: For the traditional planar two-dimensional grating displacement sensors conducting large-area planar displacement measurements, there were some problems such as complex structure and strict grid processing requirements. A two-dimensional displacement measuring method of "dimension judgment + displacement decoupling" was proposed, which adopted a spatial periodic sensing structure to build the quadrature varying magnetic field mapping between the spatial two-dimensional displacements and time reference. The influences of measuring accuracy on two-dimensional displacements caused by installation errors of the moving scale were studied. Through modeling simulation analysis and experimental verifica-

收稿日期:2025-02-19;修订日期:2025-03-27.

基金项目:国家重点研发计划(No. 2023YFB3209400;国家自然科学基金(No. 52475549, No. 52175495);重庆市自然科学基金(No. CSTB2023NSCQ-LZX0088)

tion, the measuring errors of two-dimensional displacement caused by the rolling attitude, the pitch attitude, and the yaw attitude were deeply analyzed. The experimental results show that installation errors mainly introduce DC offset, 2nd and 4th harmonic errors into the two-dimension displacement measurement. When the air gap height between the moving scale and the fixed scale is 0.6 mm, the measuring error in the X direction is not more than $\pm 8.6 \mu\text{m}$, the measuring error in the Y direction is not more than $\pm 8.8 \mu\text{m}$, and the resolution is $0.15 \mu\text{m}$ within the $240 \text{ mm} \times 240 \text{ mm}$ measuring range. The micrometer-level two-dimensional displacement measurement is achieved with millimeter-level sensing units within the $240 \text{ mm} \times 240 \text{ mm}$ measuring range, which promises the significant academic value and engineering application value.

Key words: large measuring range; two-dimensional displacement measurement; time-grating sensors; error analysis

1 引言

随着纳米数控机床、高端光刻机、天文观测等超精密加工装备和检测仪器的快速发展,都对数百毫米平面范围内的微米甚至亚微米级定位提出了迫切要求^[1-3]。目前平面二维位移测量主要聚焦于二维光栅位移传感器研究,其原理采用等间距的微米级甚至亚微米级栅格作为测量基准。这种栅格通常采用机械刻划、投影光刻法以及激光干涉光刻法来制造。机械刻划的加工方法可实现 $400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ 的大面积栅格加工,但栅距普遍在 $10 \mu\text{m}$ 以上,加工时间长,精度易受刀具磨损和环境变化的影响。投影光刻法虽可以进行亚微米栅距的栅格加工,但加工难度大,价格昂贵,难以实现 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 以上尺寸的光刻加工。激光干涉法的刻划精度在现有加工方法中较为均衡,但加工光栅的面型误差和周期偏差控制难度高,同时受干涉光束的面积限制,难以实现 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 以上量程范围内微米级以上的测量精度^[4]。

德国 HEIDENHAIN PP281 平面二维光栅在 $68 \text{ mm} \times 68 \text{ mm}$ 的测量范围内精度可达 $\pm 2 \mu\text{m}$,分辨力 2 nm ^[5]。日本东北大学研制了栅格尺寸为 $0.57 \mu\text{m} \times 0.57 \mu\text{m}$ 二维光栅,在 $60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ 的测量范围内实现了精度 $\pm 0.1 \mu\text{m}$,分辨力 1 nm 的平面二维位移测量^[6]。合肥工业大学和哈尔滨工业大学研制的平面二维光栅分别在 $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ 和 $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 测量范围内精度达到了 $0.31 \mu\text{m}$ 和 $0.15 \mu\text{m}$,后者通过 8 192 倍栅距细分,分辨力达到了 0.12 nm ^[7-8]。综上所述,平面二维光栅虽然具有精度高,稳定性好等

优点,但超精密光刻和大量制造对加工设备和加工工艺都提出了苛刻要求,很难进一步提高。

因此,本研究提出了“维度分解+位移解耦”的平面二维位移组合测量方法,通过空间周期性传感结构构建了正交变化的磁场,建立平面二维位移与时间基准的映射关系。采用传感阵列的“栅面”获取位移信号、运动维度信息,通过组合测量方法,采用硬件解调,建立百毫米平面范围内微米级精度的二维位移测量新方法。

2 传感器结构与工作原理

2.1 二维位移传感结构

传感器由动尺和定尺构成,两者正对平行安装,并留有间隙 d ,如图 1 所示。定尺包含基体以及在空间中呈周期性排布的正弦和余弦激励绕组阵列。激励绕组阵列由边长为 L 的正方形绕组在二维平面等间隔距离 I 排列, W 为极距。动

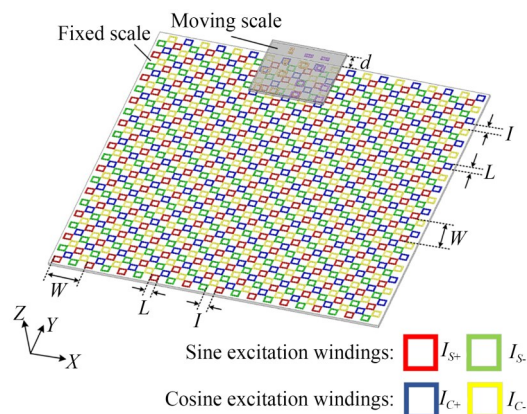


图 1 二维时栅传感器结构

Fig. 1 Structure of two-dimensional time-grating sensor

尺包含基体、维度判断感应绕组阵列和二维位移感应绕组阵列。同维度的感应绕组阵列串联绕制,箭头方向代表矩形线圈绕组绕制方向,如图2所示。动尺通过维度判断以及位移感应绕组阵列拾取平面变化的激励磁场强度分别得到运动维度信号和运动位移信号^[9]。

激励绕组阵列施加如式(1)的激励电流信号:

$$\begin{cases} I_{S+} = I_m \sin(\omega t) \\ I_{S-} = -I_m \sin(\omega t) \\ I_{C+} = I_m \cos(\omega t) \\ I_{C-} = -I_m \cos(\omega t) \end{cases}, \quad (1)$$

其中: I_m 为激励电流幅值, ω 为激励电流频率。

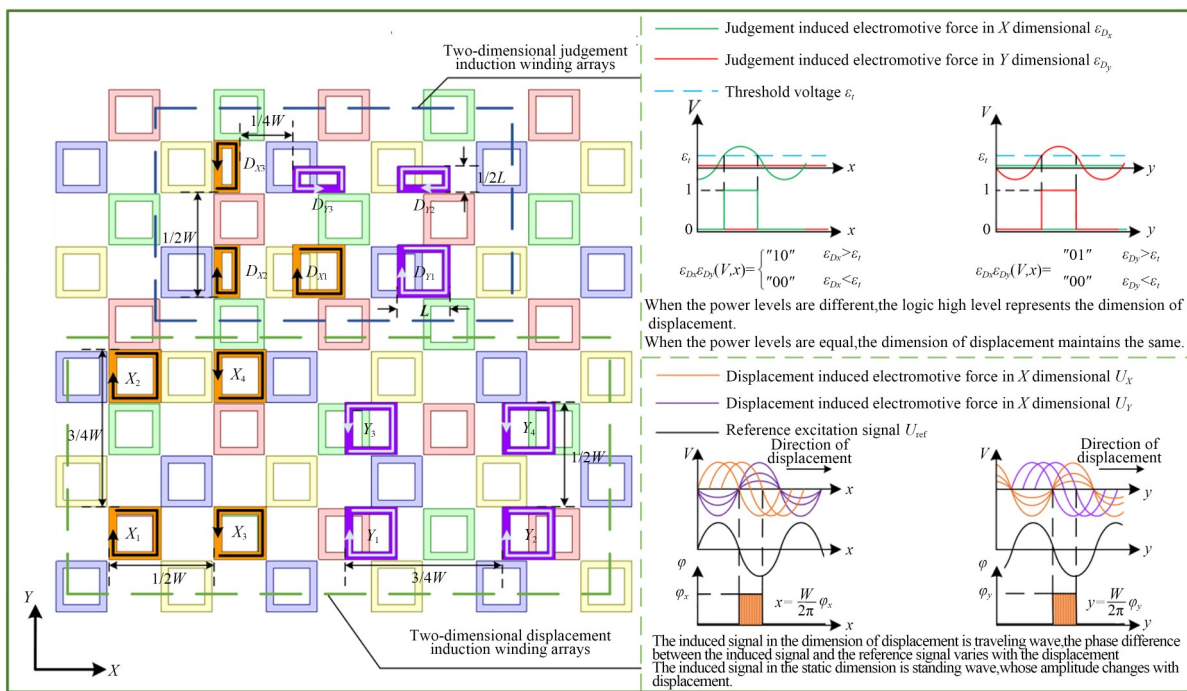


图2 动尺的维度判断绕组和位移感应绕组

Fig. 2 Dimension judgment windings and displacement sensing windings of the moving scale

2.2 二维位移组合测量方法

当动尺相对定尺运动时,图2中维度判断感应绕组阵列 D_x 以及 X 维度位移感应绕组的磁通量将随着时间与位移发生周期性变化。根据电磁感应原理,动尺向 X 维度运动一个极距 W 时, D_x 产生的感应信号为:

$$\epsilon_{D_x}(x) = \begin{cases} K \frac{W}{4} x, x \in \left[0, \frac{W}{8}\right] \\ K \frac{W}{4} \left(\frac{W}{4} - x\right), x \in \left[\frac{W}{8}, \frac{3W}{8}\right] \\ K \frac{W}{4} \left(x - \frac{W}{2}\right), x \in \left[\frac{3W}{8}, \frac{5W}{8}\right] \\ K \frac{W}{4} \left(\frac{3W}{4} - x\right), x \in \left[\frac{5W}{8}, \frac{7W}{8}\right] \\ K \frac{W}{4} (x - W), x \in \left[\frac{7W}{8}, W\right] \end{cases}, \quad (2)$$

其中: $K = -\omega k I_m \sin(\omega t)$, k 为比例系数,而 D_y 产生的感应信号为:

$$\epsilon_{D_y}(x) = 0, x \in [0, W]. \quad (3)$$

当动尺相对定尺在 X 维度相对运动时,动尺上 X 维度判断感应绕组阵列 D_x 产生的感应信号 ϵ_{D_x} 将随位移 x 在一个极距内周期性变化;而 Y 维度判断感应绕组阵列 D_y 产生的感应信号 ϵ_{D_y} 为0。同理,由于定尺激励绕组阵列排布的高度对称性,当动尺相对定尺在 Y 维度相对运动时, D_y 产生的感应信号将随着位移 y 的变化而周期性改变,而 D_x 产生的感应信号也为0。因此,通过比较电路将维度感应信号 ϵ_{D_x} 与 ϵ_{D_y} 转化为方波信号,利用方波信号的高低电平组合逻辑来进行维度判断。 ϵ_{D_x} 和 ϵ_{D_y} 表示为相反电平时,代表动尺向高电平维度运动; ϵ_{D_x} 和 ϵ_{D_y} 表示为相同电平时,代表动尺保持原运动维度不变。

根据傅里叶级数展开原理,动尺向 X 维度运

动时,位移感应绕组阵列串联后输出的周期性变化电信号可用一组正弦与余弦函数的加权和表示:

$$U_X = \epsilon_{X_1}(t, x) + \epsilon_{X_2}(t, x) - \epsilon_{X_3}(t, x) - \epsilon_{X_4}(t, x) = \sum_{K=1}^{+\infty} P_K \sin \left[\omega t + \frac{(-1)^{K-1}(2K-1)2\pi x}{W} \right] + A, \quad (4)$$

其中: $P_K = (-1)^{K-1} nk\omega I_m Q_{2K-1} \frac{W}{(2K-1)\pi}$, n 为感应绕组的匝数, Q_{2K-1} 为傅里叶级数系数, A 为直流分量。同理,当动尺向 Y 维度运动时, Y 方向位移感应绕组阵列输出的感应信号为:

$$U_Y = \sum_{K=1}^{+\infty} P_K \sin \left[\omega t + \frac{(-1)^{K-1}(2K-1)2\pi y}{W} \right] + A. \quad (5)$$

式(4)和式(5)即为传感器输出的相位随两维度位移发生周期性变化的行波信号,可见位移行波信号由 $K=1$ 时的基波和多个高次谐波叠加而成,两维度位移信息包含在行波信号的相位变

化中,将行波信号 U_X, U_Y 分别与参考信号 U_{ref} 比相得到相位差 φ_x, φ_y :

$$\begin{cases} \varphi_x = \sum_{K=1}^{+\infty} \frac{(-1)^{K-1}(2K-1)2\pi x}{W} \\ \varphi_y = \sum_{K=1}^{+\infty} \frac{(-1)^{K-1}(2K-1)2\pi y}{W} \end{cases} \quad (6)$$

信号中的基波成分用于位移测量,则解耦的二维位移可表示为:

$$\begin{cases} x = \frac{W}{2\pi} \varphi_x \\ y = \frac{W}{2\pi} \varphi_y \end{cases} \quad (7)$$

平面二维位移整体测量方案如图3所示,当动尺与定尺产生相对运动时,维度判断感应绕组阵列通过高低电平组合逻辑来判断 X 维度和 Y 维度,输出行波信号分别为 U_X 和 U_Y ,将 U_X 和 U_Y 经信号处理电路转化为方波信号,与同频率的激励参考信号 U_{ref} 进行比相,由高频时钟分别插补 U_X 和 U_Y 与参考信号的相位差,通过脉冲插补计数,则相位差 Δt 与完整周期的参考信号 T 可以表

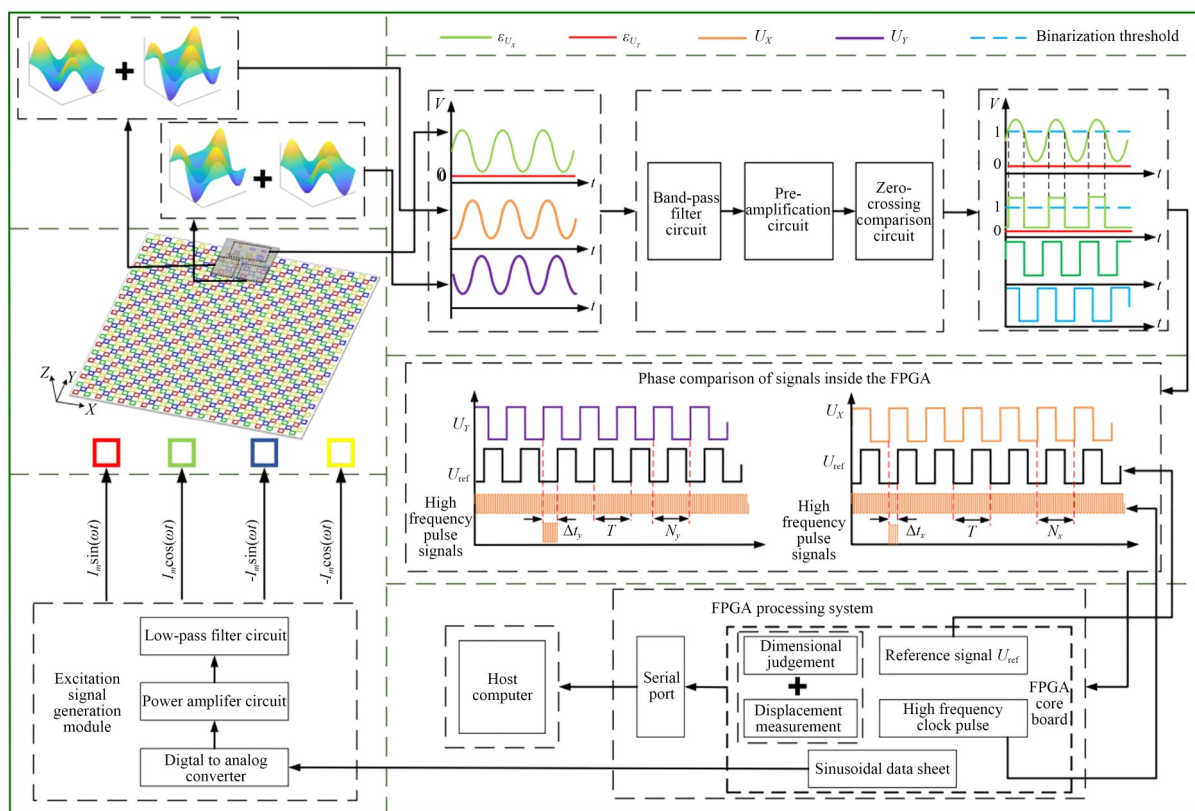


图3 二维位移测量方案

Fig. 3 Two-dimensional displacement measurement scheme

示为:

$$\begin{cases} \Delta t = n_c t_p \\ T = n_l t_p \end{cases}, \quad (8)$$

其中: n_c, n_l 为高频时钟插补的计数值, t_p 为 FPGA 芯片一个高频晶振时钟脉冲周期。经解算得到 X 维度和 Y 维度的位移测量值:

$$\begin{cases} x = \left(N_x + \frac{\Delta t_x}{T} \right) W \\ y = \left(N_y + \frac{\Delta t_y}{T} \right) W \end{cases}, \quad (9)$$

其中: N_x 和 N_y 分别为动尺 X, Y 维度上经过的完整对极数, Δt_x 和 Δt_y 分别为 X, Y 维度行波信号与参考信号比相得到的相位差。

传感器两维度测量分辨率可以表示为:

$$R = W \times \frac{f_e}{f_r}, \quad (10)$$

其中: f_e 为激励信号频率, f_r 为高频时钟频率。

3 安装误差对测量精度影响仿真分析

传感器的安装参数直接影响测量精度。传感器安装误差主要分为 4 种: 动尺相对定尺在 Z 轴发生偏移, 即动尺与定尺之间的不同气隙高度; 动尺相对定尺沿 X 轴、Y 轴、Z 轴发生偏转(通常分别称其为滚转、俯仰、偏摆), 如图 4 所示。

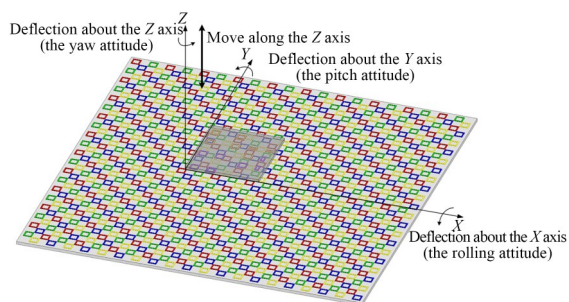


图 4 传感器动尺的不同安装姿态

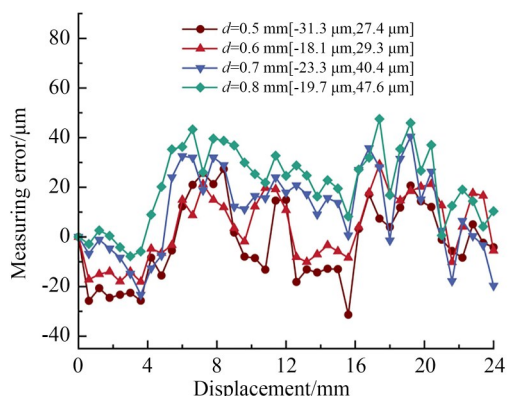
Fig. 4 Different installation attitudes of sensor moving scale

为分析传感器在不同安装姿态下的误差特性, 在电磁仿真软件中进行建模仿真, 模拟定尺上激励绕组生成的正交磁场强度变化, 以及动尺相对定尺运动过程中, 维度判断信号和位移感应信号。仿真参数为: 激励绕组尺寸为 $5.8 \text{ mm} \times$

5.8 mm , 直径为 0.2 mm ; 感应绕组尺寸为 $6 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$, 直径为 0.3 mm ; 极距 W 为 24 mm ; 感应绕组阻抗为 $1 \text{ M}\Omega$; 激励电流频率 10 kHz 、幅值 5 A 。

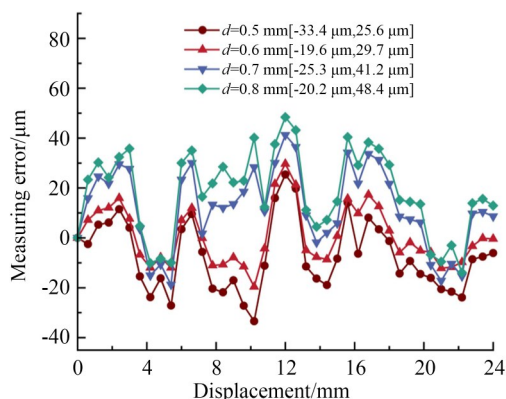
3.1 不同气隙高度对测量精度的影响

由于激励绕组正上方不同高度处产生的磁场具有非线性, 导致感应绕组耦合磁场产生非线性, 带来测量误差。结合实际实验, 将气隙高度 d 分别设置为 0.5 mm , 0.6 mm , 0.7 mm , 0.8 mm 共 4 组不同的仿真模型进行电磁场仿真。将仿真数据处理后得到 X, Y 方向的位移误差如图 5 所示。X 方向位移误差峰峰值分别为 $58.7 \text{ }\mu\text{m}$, $47.4 \text{ }\mu\text{m}$, $63.7 \text{ }\mu\text{m}$, $67.3 \text{ }\mu\text{m}$, Y 方向位移误差峰峰值分别为 $59 \text{ }\mu\text{m}$, $49.3 \text{ }\mu\text{m}$, $66.5 \text{ }\mu\text{m}$, $68.6 \text{ }\mu\text{m}$ 。当气隙高度为 0.6 mm 时, 测量误差最小, 因此后续仿真可将安装高度定为 0.6 mm 。



(a) X 方向位移曲线误差

(a) Displacement error curves of X direction



(b) Y 方向位移曲线误差

(b) Displacement error curves of Y direction

图 5 对极内不同气隙高度对测量精度的影响

Fig. 5 Influence of different air gaps on measurement accuracy within a cycle of sensing units

3.2 滚转姿态对测量精度的影响

传感器动尺相对定尺沿 X 轴有一个滚转角 θ ,如图 6 所示。

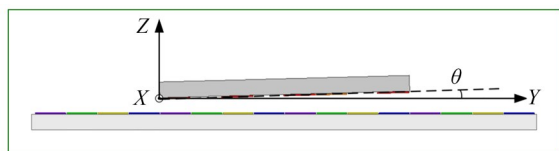
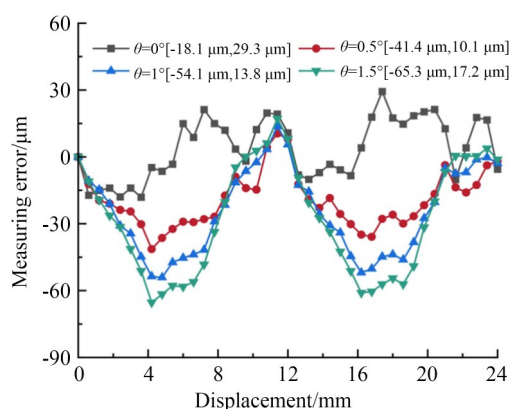


图 6 动尺滚转示意图

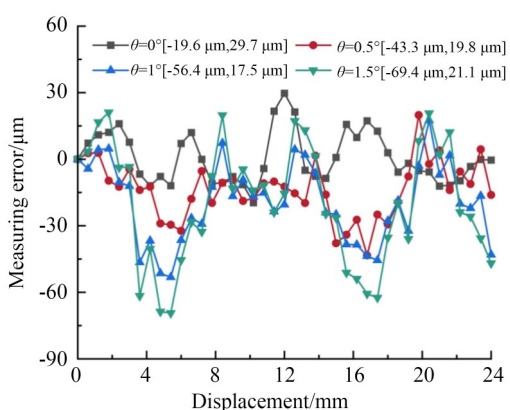
Fig. 6 Rolling diagram of moving scale

将滚转角 θ 分别设为 $0^\circ, 0.5^\circ, 1^\circ, 1.5^\circ$, 进行不同滚转角仿真实验。将仿真数据进行处理后,得到 X, Y 方向的位移误差曲线如图 7 所示。X 方向位移误差峰峰值分别为 $47.4 \mu\text{m}, 51.5 \mu\text{m}$,



(a) X 方向位移曲线误差

(a) Displacement error curves of X direction



(b) Y 方向位移曲线误差

(b) Displacement error curves of Y direction

图 7 对极内不同滚转角对测量精度的影响

Fig. 7 Influence of different rolling angles on measuring accuracy within a cycle of sensing units

$67.9 \mu\text{m}, 82.5 \mu\text{m}$, Y 方向位移误差峰峰值分别为 $49.3 \mu\text{m}, 63.1 \mu\text{m}, 73.9 \mu\text{m}, 90.5 \mu\text{m}$ 。

3.3 俯仰姿态对测量精度的影响

传感器动尺相对定尺沿 Y 轴有一个俯仰角 α ,如图 8 所示。将俯仰角 α 分别设为 $0^\circ, 0.5^\circ, 1^\circ, 1.5^\circ$ 共 4 组仿真模型,进行不同俯仰角仿真实验。将仿真数据进行处理后,得到 X, Y 方向的位移误差曲线如图 9 所示。X 方向位移误差峰峰值分别

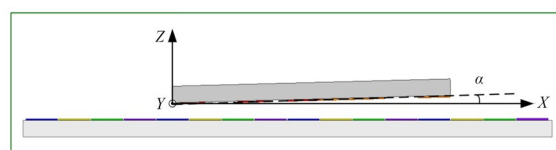
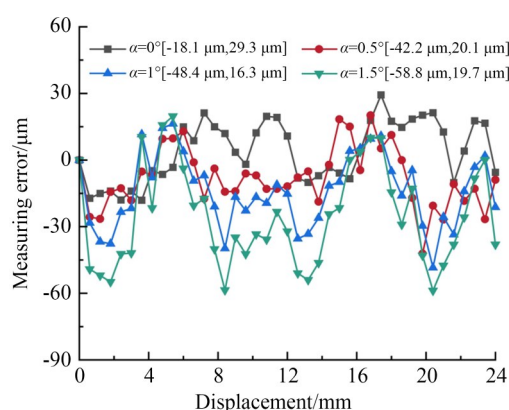


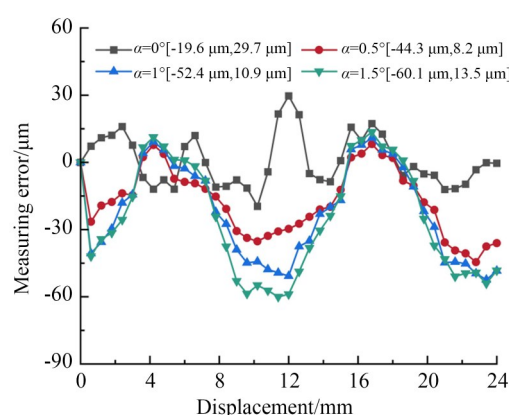
图 8 动尺俯仰示意图

Fig. 8 Pitch diagram of moving scale



(a) X 方向位移曲线误差

(a) Displacement error curves of X direction



(b) Y 方向位移曲线误差

(b) Displacement error curves of Y direction

图 9 对极内不同俯仰角对测量精度的影响

Fig. 9 Influence of different pitch angles on measuring accuracy within a cycle of sensing units

为 $47.4\ \mu\text{m}$, $62.3\ \mu\text{m}$, $64.7\ \mu\text{m}$, $78.5\ \mu\text{m}$, Y 方向位移误差峰峰值分别为 $49.3\ \mu\text{m}$, $52.5\ \mu\text{m}$, $63.3\ \mu\text{m}$, $73.6\ \mu\text{m}$ 。

3.4 偏摆姿态对测量精度的影响

传感器动尺相对定尺沿 Z 轴有一个偏摆角 β , 如图 10 所示。将偏摆角 β 分别设为 0° , 0.5° , 1° , 1.5° 共 4 组仿真模型, 进行不同偏摆角度仿真实验。将仿真数据进行处理后, 得到 X , Y 方向的位移误差曲线如图 11 所示。 X 方向位移误差峰峰值分别为 $47.4\ \mu\text{m}$, $56.1\ \mu\text{m}$, $66.3\ \mu\text{m}$, $77.3\ \mu\text{m}$, Y 方向位移误差峰峰值分别为 $49.3\ \mu\text{m}$, $65.8\ \mu\text{m}$, $72.7\ \mu\text{m}$, $81.7\ \mu\text{m}$ 。

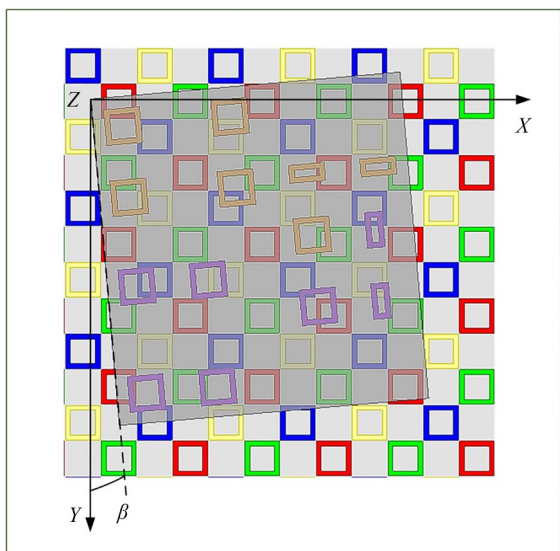
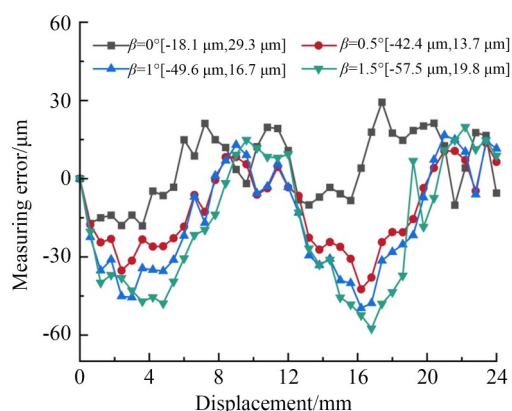


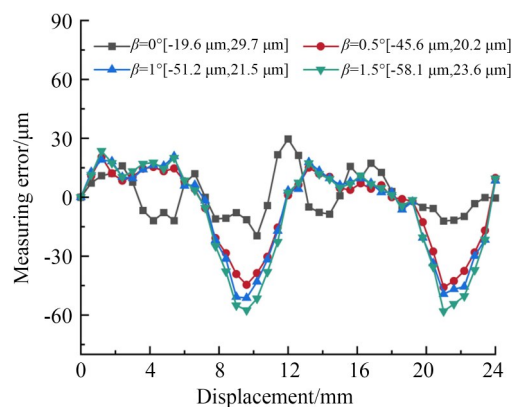
图 10 动尺偏摆示意图

Fig. 10 Yaw diagram of moving scale

综上所述表明, 当动尺与定尺之间气隙高度为 $0.6\ \text{mm}$ 时, 对极内二维位移测量误差最小, X , Y 方向测量误差分别不超过 $\pm 29.3\ \mu\text{m}$, $\pm 29.7\ \mu\text{m}$; 动尺不同偏转姿态在二维位移测量误差中主要引入直流分量、2 次、4 次谐波误差。其中, 当滚转、俯仰、偏摆角度不超过 1.5° 时, X/Y 两维度测量误差峰峰值随安装姿态误差角度的增大而增大, X/Y 两维度最大测量误差峰峰值分别达 $82.5\ \mu\text{m}/90.5\ \mu\text{m}$, $78.5\ \mu\text{m}/73.6\ \mu\text{m}$ 和 $77.3\ \mu\text{m}/81.7\ \mu\text{m}$, 对测量误差均有较大影响, 而滚转姿态对测量误差的影响在三种安装姿态误差中相对较大。



(a) Displacement error curves of X direction



(b) Displacement error curves of Y direction

图 11 对极内不同偏摆角对测量精度的影响

Fig. 11 Influence of different yaw angles on measurement accuracy within a cycle of sensing units

4 实验及结果分析

研制出传感器样机如图 12 所示, 激励绕组尺寸为 $5.8\ \text{mm} \times 5.8\ \text{mm}$, 导线直径为 $0.2\ \text{mm}$, 激励绕组阵列的极距为 $24\ \text{mm}$, 整个定尺的有效测量尺寸为 $240\ \text{mm} \times 240\ \text{mm}$; 动尺上位移感应绕组尺寸为 $6\ \text{mm} \times 6\ \text{mm}$, 方形维度判断感应绕组尺寸为 $6\ \text{mm} \times 6\ \text{mm}$, 矩形绕组尺寸为 $6\ \text{mm} \times 3\ \text{mm}$, 所有感应绕组导线直径为 $0.2\ \text{mm}$ 。

搭建如图 13 所示的实验平台, 将定尺及基体固定在美国 AEROTECH Planer-300XY 二维移动平台, X , Y 方向行程均为 $300\ \text{mm}$, 定位精度为 $\pm 0.75\ \mu\text{m}$; 将动尺及基体固定在德国 PI H-825 六自由度微移动平台, 以便调整动尺与定尺之间的安装参数, 该系统重复定位精度为 $\pm 0.1\ \mu\text{m}$,

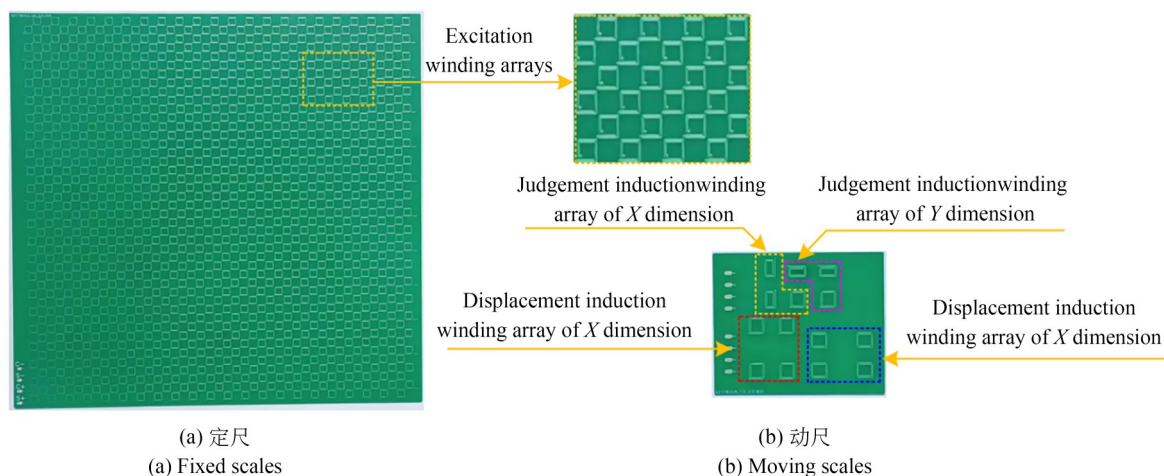


图 12 传感器样机

Fig. 12 Prototype of sensor

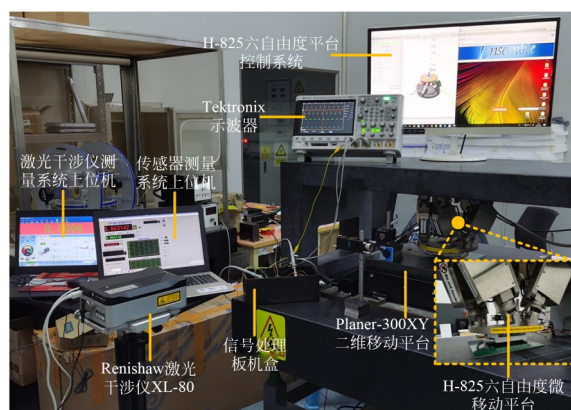


图 13 实验平台

Fig. 13 Experimental platform

在空间 X, Y, Z 三轴上的最小位移为 $0.3 \mu\text{m}$, 绕三轴最小旋转度数为 $3.5 \mu\text{rads}$ 。由二维移动平台带动定尺移动。以精度为 $\pm 0.5 \text{ ppm}$ 的 Renishaw XL-80 激光干涉仪作为基准标定传感器样机。传感器样机的定尺正弦/余弦激励绕组分别施加频率为 10 kHz 、幅值为 5 A 的正弦/余弦激励电流信号。

4.1 动尺不同安装姿态实验

动尺不同气隙高度实验。通过 H-825 六自由度微移动平台调整动尺与定尺之间气隙高度 d 分别为 $0.5 \text{ mm}, 0.6 \text{ mm}, 0.7 \text{ mm}, 0.8 \text{ mm}$, 由二维移动平台带动定尺分别向 X, Y 方向移动一个极距 ($W = 24 \text{ mm}$), 移动步距 0.6 mm , 每运动一步, 同时采集传感器上位机与激光干涉仪上位机数据, 经比对后得到 X, Y 方向位移测量误差曲线如图 14 所示, X 方向测量误差峰峰值分别为

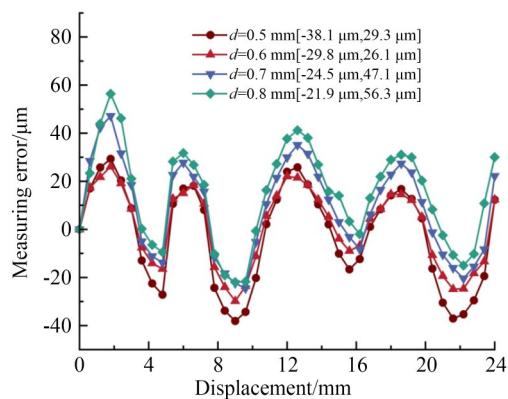
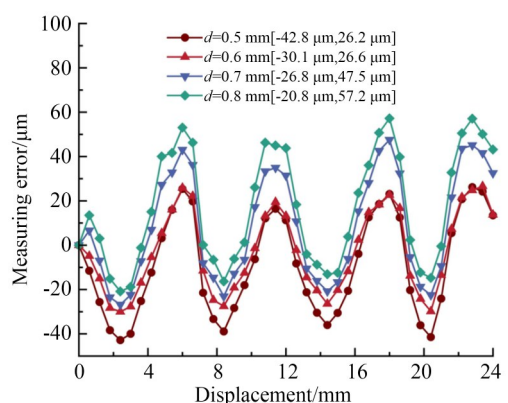
(a) X 方向位移曲线误差(a) Displacement error curves of X direction(b) Y 方向位移曲线误差(b) Displacement error curves of Y direction

图 14 对极内 X 和 Y 方向不同气隙高度的测量误差
Fig. 14 Measuring errors of different air gaps in X and Y directions within a cycle of sensing units

$67.4 \mu\text{m}, 55.9 \mu\text{m}, 71.6 \mu\text{m}, 78.2 \mu\text{m}$, Y 方向测量误差峰峰值分别为 $69 \mu\text{m}, 56.7 \mu\text{m}, 74.3 \mu\text{m}$,

78 μm 。可见气隙高度 d 为 0.6 mm 时,二维位移测量误差值最小,实验以 0.6 mm 作为最佳安装高度。

动尺不同滚转角实验。保持动尺与定尺之间气隙高度为 0.6 mm,通过 H-825 六自由度微移动平台调整动尺沿 X 轴的滚转角 θ 分别为 0° , 0.5° , 1° , 1.5° 。将传感器上位机数据与激光干涉仪上位机数据比对后,误差曲线如图 15 所示, X 方向测量误差峰峰值分别为 55.9 μm , 59.9 μm , 77.8 μm , 91.8 μm , Y 方向测量误差峰峰值分别为 56.7 μm , 72.5 μm , 78.3 μm , 96.5 μm 。

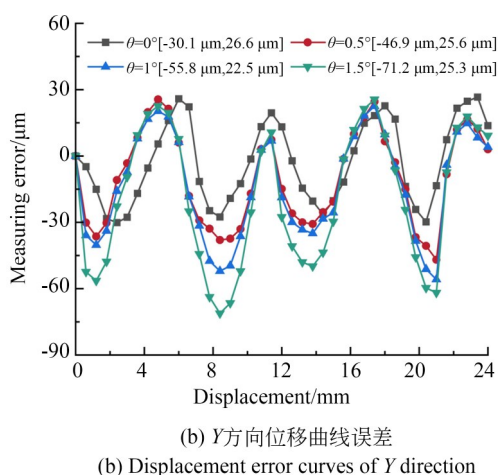
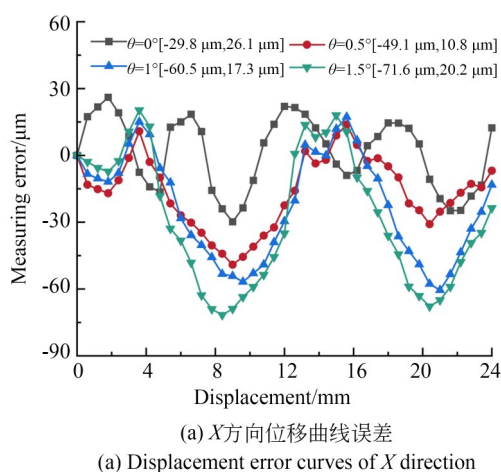


图 15 对极内 X 和 Y 方向不同滚转角的测量误差
Fig. 15 Measuring errors of different rolling angles in X and Y directions within a cycle of sensing units

动尺不同俯仰角实验。通过 H-825 六自由度微移动平台调整动尺沿 Y 轴的俯仰角 α 分别

为 0° , 0.5° , 1° , 1.5° 。将传感器上位机数据与激光干涉仪上位机数据比对后,得到测量误差曲线如图 16 所示, X 方向测量误差峰峰值分别为 55.9, 72.1 μm , 79 μm , 1, 88.5 μm , Y 方向测量误差峰峰值分别为 56.7 μm , 61.7 μm , 79.3 μm , 87 μm 。

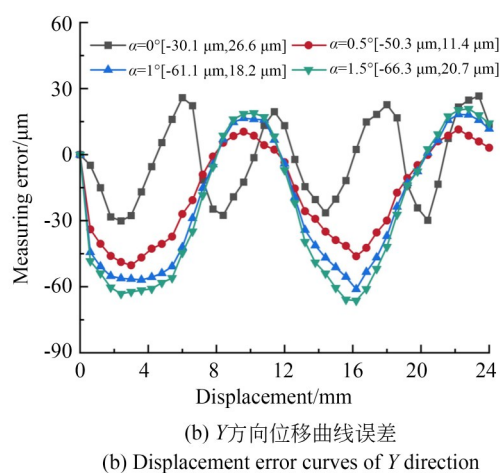
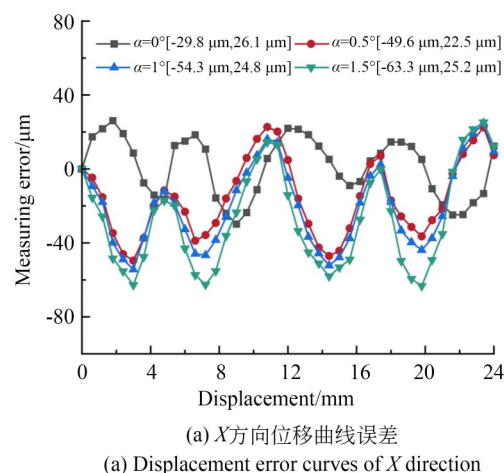


图 16 对极内 X 和 Y 方向不同俯仰角的测量误差
Fig. 16 Measuring errors of different pitch angles in X and Y directions within a cycle of sensing units

动尺不同偏摆角实验。通过 H-825 六自由度微移动平台调整动尺沿 Z 轴的偏摆角 β 分别为 0° , 0.5° , 1° , 1.5° 。将传感器上位机数据与激光干涉仪数据比对后,得到测量误差曲线如图 17 所示, X 方向测量误差峰峰值分别为 55.9 μm , 66.3 μm , 72.6 μm , 83.9 μm , Y 方向测量误差峰峰值分别为 56.7 μm , 74.5 μm , 78 μm , 85.5 μm 。

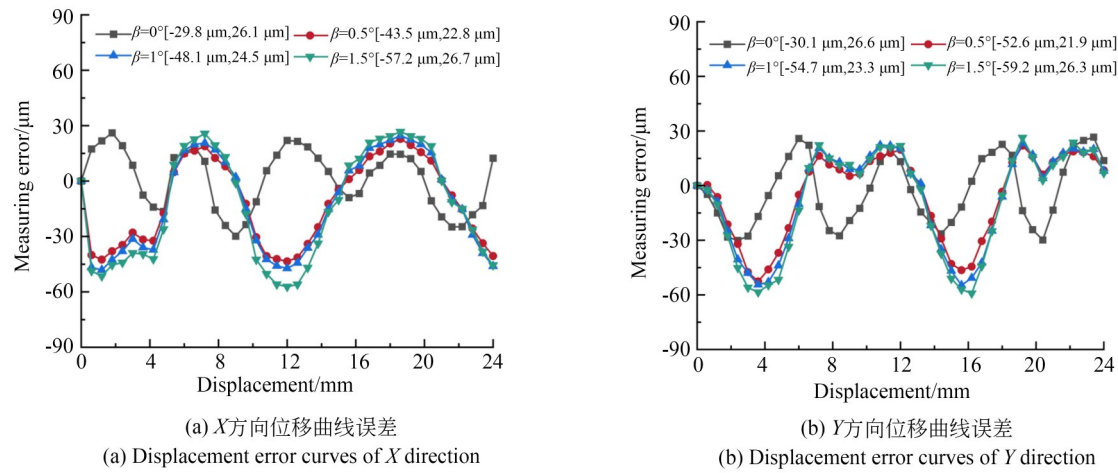


图 17 对极内 X 和 Y 方向不同偏摆角的测量误差

Fig. 17 Measuring errors of different yaw angles in X and Y directions within a cycle of sensing units

4.2 实验数据分析

将样机不同安装姿态实验下所得的测量误差经傅里叶变化分解后,得到的测量误差频谱如表 1 所示。

(1)动尺不同气隙高度情况下,X 和 Y 方向的误差谐波分量主要包含直流分量、2 次和 4 次谐波,当高度变化范围为 0.5 mm~0.8 mm 时,直流分量和 2 次谐波随着高度增加,先减小再增

表 1 安装误差引起对极内测量误差分析

Tab. 1 Measuring error analysis within a cycle of sensing units caused by the different mounting errors

气隙高度/ 角度	谐波频次与幅值/ μm															
	X方向								Y方向							
	0次	1次	2次	3次	4次	5次	6次	7次	0次	1次	2次	3次	4次	5次	6次	7次
$d=0.5\text{ mm}$	7.9	1.2	14.1	3.2	22.4	3.0	3.5	3.1	8.3	2.5	13.1	3.6	25.3	3.8	2.7	1.1
$d=0.6\text{ mm}$	5.5	1.3	10.8	2.4	19.3	2.6	2.2	2.8	5.3	2.1	11.1	2.8	19.3	2.7	2.1	1.7
$d=0.7\text{ mm}$	15.3	0.3	12.7	3.3	15.4	3.9	3.7	2.8	12.3	1.6	15.3	2.2	16.3	3.1	2.3	2.1
$d=0.8\text{ mm}$	23.4	2.1	13.2	3.7	11.6	4.5	4.2	4.1	18.3	2.4	17.2	3.1	13.3	4.1	2.9	2.6
$\theta=0.5^\circ$	16.7	2.6	26.4	2.5	3.9	2.9	2.4	1.5	20.6	3.4	12.9	2.1	23.1	3.6	2.2	2.9
$\theta=1^\circ$	21.6	2.7	31.4	3.9	2.6	2.1	2.5	0.4	26.1	3.9	15.4	3.6	29.6	3.7	2.1	3.0
$\theta=1.5^\circ$	31.8	2.2	39.1	2.1	4.6	1.7	2.6	1.6	33.6	3.1	17.4	4.1	40.7	3.8	2.4	2.1
$\alpha=0.5^\circ$	11.8	2.1	13.5	2.2	21.4	2.0	2.7	2.6	13.3	4.9	23.9	3.9	3.5	2.5	2.9	1.7
$\alpha=1^\circ$	24.7	2.6	16.9	2.0	23.3	3.6	2.3	1.6	23.7	2.7	32.1	3.1	3.0	2.0	2.1	2.8
$\alpha=1.5^\circ$	31.9	2.9	18.5	2.7	26.5	3.6	3.7	2.4	32.2	2.4	38.9	3.6	4.1	2.5	2.8	2.7
$\beta=0.5^\circ$	15.4	2.9	16.2	3.9	2.5	3.4	3.2	3.1	13.1	3.4	16.9	3.0	10.3	3.2	2.7	2.1
$\beta=1^\circ$	20.1	2.8	23.7	3.3	3.5	3.0	3.1	3.5	23.0	4.4	20.9	4.1	13.3	3.7	2.3	2.6
$\beta=1.5^\circ$	28.8	3.5	32.1	4.3	3.8	3.2	3.9	3.3	29.4	4.7	28.5	2.9	18.2	2.7	2.4	2.8

大,4次谐波随着高度增加而减小。

(2)动尺不同滚转角度情况下,X方向误差谐波成分主要包含直流分量和2次谐波,随着滚转角度不断增大,直流分量和2次谐波幅值也逐渐增大;Y方向误差谐波成分主要包含直流分量、2次和4次谐波,随着滚转角度不断增大,直流分量、2次和4次谐波幅值也逐渐增大,其中,直流分量和4次谐波幅值增幅较大。

(3)动尺不同俯仰角度情况下,X方向误差谐波成分主要包含直流分量、2次和4次谐波,且随着俯仰角度增大,直流分量、2次和4次谐波幅值也逐渐增大;Y方向误差谐波成分主要包含直流分量和2次谐波,且随着俯仰角度增大,直流分量和2次谐波幅值也逐渐增大。

(4)动尺不同偏摆角度情况下,X方向误差谐波成分主要包含直流分量和2次谐波,且随着偏摆角度增大,直流分量和2次谐波幅值也逐渐增大;Y方向误差谐波成分主要包含直流分量、2次和4次谐波,且随着偏摆角度不断增大,直流分量、2次和4次谐波幅值也逐渐增大。

4.3 全量程测试和验证

为了评估传感器整体性能,进行了全量程精度实验。由二维移动平台带动定尺沿X,Y方向以 $1/2W$ (12 mm)为移动步距,从测量原点开始以“S”状运动,图18为测量运动轨迹路线图。

最终测量实验结果如图19所示(彩图见期刊电子版)。虚线交点为激光干涉仪标定二维移动平台在两维度移动的参考点;蓝色实线相互连接

的红点为传感器在X,Y方向的测量值。由于测量值量级与误差值量级差距过大,因此将误差值经过150倍折算后取绝对值,再加上参考值得到的测量值即为图中红点坐标值。以右上角测量值(245.30,245.39)为例,其参考点坐标为(240,240),将测量值与参考点坐标相减,再经过150倍折算得到该点在X和Y方向上的误差值分别为 $35.3\text{ }\mu\text{m}$ 和 $35.9\text{ }\mu\text{m}$ 。

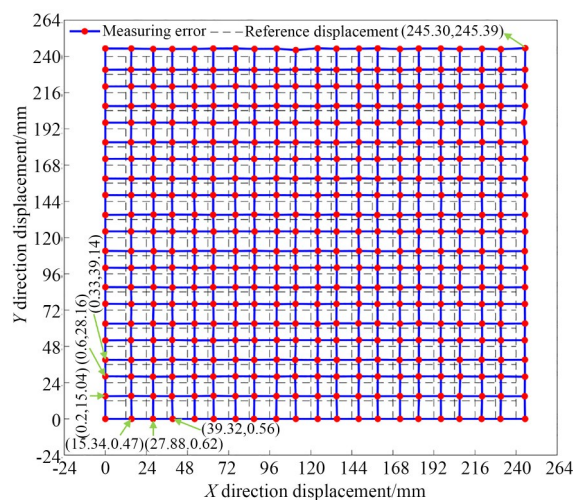


图19 240 mm×240 mm范围测量结果

Fig. 19 Measuring values within 240 mm×240 mm

现以传感器的边缘位置进行单维度全量程测试实验验证。实验结果如图20和图21所示,采用谐波修正法对两维度原始误差进行修正,X方向误差修正后大小不超过 $\pm 8.6\text{ }\mu\text{m}$;Y方向误差修正后大小不超过 $\pm 8.8\text{ }\mu\text{m}$ 。用于插补计数

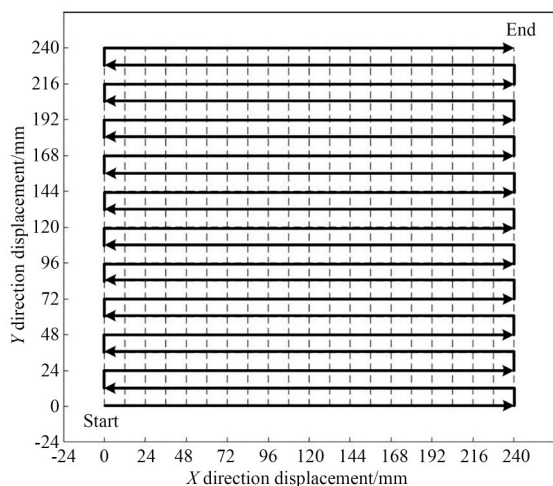


图18 测量运动轨迹示意图

Fig. 18 Measuring route diagram

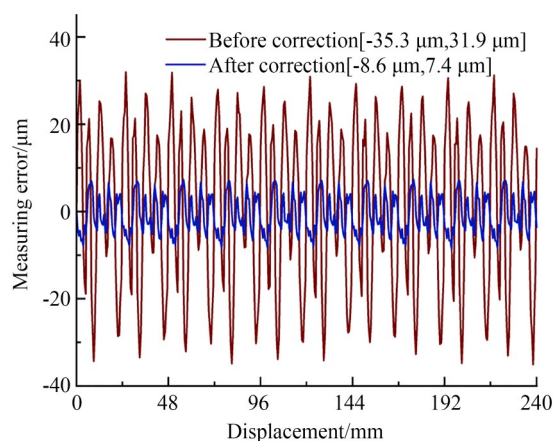


图20 X方向全量程测量误差

Fig. 20 Full-range measuring errors of X direction

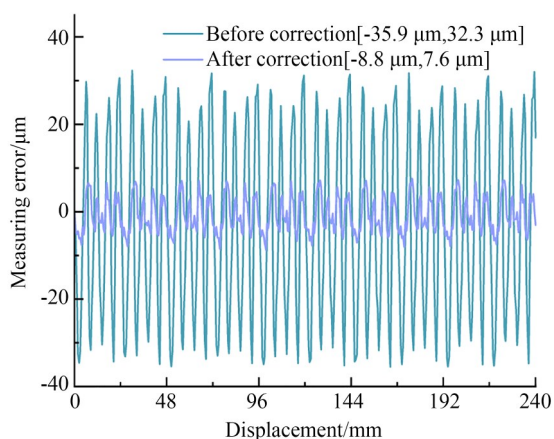


图 21 Y 方向全量程测量误差

Fig. 21 Full-range measuring errors of Y direction

的高频时钟频率为 1.6 GHz, 根据式(10)计算得出传感器二维度的测量分辨力为 $0.15 \mu\text{m}$ 。

5 结 论

传统光栅式平面二维位移传感器采用高精

密加工设备刻划精细栅格实现高精度、高分辨力的位移测量, 受加工设备和加工工艺的制约, 光栅式平面二维位移传感器难以实现 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 以上量程的微米级测量精度。针对此现状, 本文提出一种“维度判断+位移解耦”平面二维位移测量新方法, 采用毫米级的传感单元实现了微米级测量精度的二维位移测量, 大大降低了传感器的加工难度与制造成本。通过建模仿真与实验验证重点分析了滚转姿态、俯仰和偏摆姿态带来的二维位移测量误差, 以此优化传感参数。实验结果表明, 在 $240 \text{ mm} \times 240 \text{ mm}$ 大量程范围内 X 方向测量误差不超过 $\pm 8.6 \mu\text{m}$; Y 方向测量误差不超过 $\pm 8.8 \mu\text{m}$; 测量分辨力为 $0.15 \mu\text{m}$ 。

作者贡献声明:

陈自然: 方案设计、测量方法的提出;
刘振越: 论文撰写、数据整理和分析;
彭凯: 论文构思、论文审核;
欧阳辉: 测量实验数据分析;
郑永海: 测量实验的设计。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] XU Z L, WANG Z H, CHEN L Y, *et al.* Two-dimensional displacement sensor based on a dual-cavity Fabry-Perot interferometer [J]. *Journal of Light-wave Technology*, 2022, 40(4): 1195-1201.
- [3] CASTENMILLER T, VAN DE MAST F, DE KORT T, *et al.* Towards Ultimate Optical Lithography with NXT: 1950i Dual Stage Immersion Platform [C]. *Optical Microlithography XXIII*. San Jose, California. SPIE, 2010.
- [4] ZENG L J, LI L F. *Fabrication of Square-Lattice Crossed Gratings based on Diffraction of A Reference Grating* [M]. *Fringe 2013*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014: 827-830.
- [5] Heidenhain PP281 datasheet [EB/OL]. https://www.heidenhain.com/fileadmin/pdf/en/01_Products/Prospekte/PRExposed_Linear_Encoders_ID208960_en.pdf.
- [6] LI X H, 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] 夏豪杰, 费业泰, 范光照, 等. 基于衍射光栅的二维纳米位移测量技术 [J]. *纳米技术与精密工程*, 2007(4): 311-314.
- XIA H J, FEI Y T, FAN G Z, *et al.* 2D nano-displacement measurement with diffraction grating [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2007(4): 311-314. (in Chinese)
- [8] 邢旭, 常笛, 胡鹏程, 等. 空间分离式外差二自由度平面光栅干涉仪 [J]. *光学精密工程*, 2019, 27(8): 1727.
- XING X, CHANG D, HU P C, *et al.* Spatially separated heterodyne grating interferometer for in-plane displacement measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(8): 1727. (in Chinese)
- [9] 陈自然, 欧阳辉, 张衍潇, 等. 基于交变磁场的平面二维时栅位移传感机理及测量模型 [J]. *光学精密工程*, 2024, 32(17): 2612-2624.
- CHEN Z R, OUYANG H, ZHANG H X, *et al.*

Displacement sensing mechanism and measurement model of planar two-dimensional time-grating based

on alternating magnetic field [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(17): 2612-2624. (in Chinese)

作者简介:



陈自然(1980—),男,湖北广水人,博士,研究员,博士生导师,2004年于中国地质大学获得学士学位,2012年于合肥工业大学获得博士学位,主要从事精密位移测量及智能仪器设计的研究。E-mail:czr@cqut.edu.cn

通讯作者:



彭 凯(1987—),男,四川乐山人,博士,副研究员,博士生导师,2010年于重庆大学获得学士学位,2013年于重庆理工大学获得硕士学位,2016年于重庆大学获得博士学位,主要从事微纳传感理论与技术的研究。E-mail:pk@cqut.edu