

文章编号 1004-924X(2024)17-2612-13

基于交变磁场的平面二维时栅位移传感机理及 测量模型

陈自然^{1,2,3,4}, 欧阳辉^{1,3}, 张桁潇^{1,3}, 彭 凯^{1,3*}, 王 伟^{1,3}, 崔南川^{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. 中煤科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400039;

3. 时栅传感及先进检测技术重庆市重点实验室, 重庆 400054;

4. 重庆大学光电工程学院, 重庆 400039)

摘要:针对传统的平面二维位移传感器在超精密光刻、大面积传感器制造中存在的技术瓶颈,提出一种基于空间交变磁场的平面二维位移测量方法。在定尺平面布置均匀等间距的正弦/余弦激励绕组,施加时间正交激励电流,构建空间二维交变磁场,建立空间二维位移和时间基准的映射关系。通过“维度判断+位移解耦”的组合测量模型实现平面二维位移测量,利用动尺维度判断感应绕组阵列输出信号经二值化后的组合逻辑来判断维度;利用动尺二维差动布置的位移感应绕组阵列拾取交变磁场,得到空间位移行波信号,通过比相实现二维位移解耦。通过电磁仿真,对平面二维时栅位移测量模型进行误差分析。研制样机并搭建了实验平台,实验结果表明,传感器在 120 mm×120 mm 的有效测量范围内,X 方向测量误差最大不超过±9.4 μm,Y 方向测量误差最大不超过±9.7 μm,两维度位移测量分辨力为 0.15 μm。利用毫米级尺寸的激励和感应绕组实现平面二维微米级测量精度,从原理上突破了传统平面二维位移传感器对超精密光刻的制约,降低了传感器加工难度,具有重要的理论研究意义和工程应用价值。

关键词:二维位移测量;交变磁场;时栅传感器;组合测量

中图分类号:TH711 文献标识码:A doi:10.37188/OPE.20243217.2612

Displacement sensing mechanism and measurement model of planar two-dimensional time-grating based on alternating magnetic field

CHEN Ziran^{1,2,3,4}, OUYang hui^{1,3}, ZHANG Hengxiao^{1,3}, PENG Kai^{1,3*}, WANG Wei^{1,3},
CUI Nanchuan^{1,3}

(1. Engineering Research Center of Mechanical Testing Technology and Equipment,
Ministry of Education, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;

2. CCTEG Chongqing Research Institute, Chongqing 400039, China;

3. Chongqing Key Laboratory of Time-Grating Sensing and Advanced Testing Technology,
Chongqing 400054, China;

收稿日期:2024-02-27;修订日期:2024-04-09.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 52175495);重庆市自然科学基金资助项目(No. CSTB2023NSCQ-LZX0088);重庆英才项目(No. cstc2022ycjh-bgzxm0098, No. cstc2022ycjh-bgzxm0146)

4. College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400039, China)

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

Abstract: To address the limitations of traditional planar two-dimensional displacement sensors in ultra-precision lithography and large-area sensor manufacturing, a new method using a spatial alternating magnetic field is proposed. This method involves arranging uniform sine/cosine excitation windings on a fixed ruler and applying time-quadrature electric current to these windings, creating a two-dimensional alternating magnetic field that links spatial displacement with a time reference. The method achieves spatial displacement measurement through a model of "dimension judgment + displacement decoupling." Dimension judgment is performed using the binary output signals from a dimension-judgment induction winding array. The alternating magnetic field is detected by a displacement-decoupling induction winding array arranged in two dimensions, producing spatial traveling-wave signals and enabling displacement decoupling via phase comparison. Error analysis of this two-dimensional time-grating displacement measurement model was conducted through electromagnetic simulation. A prototype and experimental platform were developed, demonstrating that within a $120\text{ mm} \times 120\text{ mm}$ range, the maximum measurement errors were $\pm 9.4\text{ }\mu\text{m}$ in the X direction and $\pm 9.7\text{ }\mu\text{m}$ in the Y direction, with a resolution of $0.15\text{ }\mu\text{m}$. This method achieves micron-level measurement accuracy using millimeter-sized excitation and induction windings, overcoming the limitations of traditional sensors in ultra-precision lithography and simplifying sensor manufacturing. The research holds significant theoretical and practical value.

Key words: two-dimensional displacement measurement; alternating magnetic field; time-grating sensors; combined measurement

1 引 言

精密位移测量技术及器件是高端数控机床、半导体加工以及国防军工等专用精密设备的核心技术和关键功能部件,也是衡量一个国家高精尖加工制造水平的一个重要标志^[1-3]。随着高端精密设备的不断发展,对大量程、高精度、高分辨力和多维度的位移传感器提出了迫切需求^[4-5]。传统方法是采用两套一维位移传感器安装于平面的 X 轴和 Y 轴上,通过组合测量的方式来实现二维位移测量。然而,这种测量方法对传感器安装要求极为苛刻,两个一维传感器在空间上要保证完全正交,否则会由安装误差引入阿贝误差,量程越大,误差越大^[6]。同时在单轴误差标定时,多轴累计误差很难消除,无法保证测量精度^[7]。

国内外二维平面位移传感器根据测量原理主要分为光栅位移传感器、容栅位移传感器和电

磁式位移传感器。Gao等^[8]研制了一种栅距为 $0.57\text{ }\mu\text{m}$ 、量程为 $60\text{ mm} \times 60\text{ mm}$ 的平面二维光栅尺,两个维度的测量精度达到了亚微米级,分辨力优于 2 nm 。Fan等^[9]研究了一种尺寸为 $55\text{ mm} \times 55\text{ mm}$ 、 1740 line/mm 的平面二维光栅尺,实验得出在 $25\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ 测量范围内,两维度测量精度为 $2.1\text{ }\mu\text{m}$,分辨率为 1 nm 。夏豪杰等^[10]以正交衍射光栅作为测量基准元件,研制了一款二维位移测量装置,在 $25\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ 测量范围内, X 、 Y 方向的测量精度分别为 0.27 、 $0.31\text{ }\mu\text{m}$ 。德国 HEIDENHAIN 公司研制的 PP281 型^[11]平面二维光栅,在 $68\text{ mm} \times 68\text{ mm}$ 的测量范围内,两维度测量精度为 $\pm 2\text{ }\mu\text{m}$,分辨力为 1 nm 。Bonse等^[12]研究了一种量程为 $85\text{ mm} \times 60\text{ mm}$ 的容栅二维位移传感器,两维度测量分辨力为 $0.1\text{ }\mu\text{m}$,重复性优于 $0.2\text{ }\mu\text{m}$ 。Hartwell等^[13]研制了一款量程为 $50\text{ }\mu\text{m} \times 50\text{ }\mu\text{m}$ 的平面电容位移传感器,分辨力可达 0.19 nm 。余建平^[14]研究了一

种容栅二维位移传感器,在 $46\text{ mm} \times 46\text{ mm}$ 测量范围内,两维度测量精度为 $34\text{ }\mu\text{m}$,分辨力为 $0.308\text{ }\mu\text{m}$ 。Hojjat 等^[15]研究了一种电磁式平面二维位移传感器,在 $50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 测量范围内,分辨力为 $10\text{ }\mu\text{m}$ 。

综上所述,目前的研究主要聚焦于二维光栅位移传感器,存在两个方面的技术难点:一方面二维光栅通常采用全息曝光法来制造,受干涉光束面积限制,导致平面二维光栅面积很难做大,难以实现 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 以上量程的微米级测量精度。另一方面,二维光栅采用等间距的微米甚至亚微米级方形栅格作为测量基准,这些对加工设备和加工工艺要求极为苛刻,严重制约二维位移测量技术发展。由于缺乏核心技术,我国二维位移传感器完全依赖进口,因此,开展二维位移传感技术研究具有重要的意义。

本文提出了一种基于交变磁场的平面二维位移测量方法,采用在定尺平面两维度空间均匀、等间隔离散排布激励绕组,构建 X 方向和 Y 方向测量所需的周期性交变磁场。通过“维度判断+位移解耦”的方式实现平面二维位移测量,利用动尺维度判断感应绕组阵列输出信号经二值化后的组合逻辑来实现测量维度判断,利用动尺平面 X 方向和 Y 方向差动排布的位移感应绕组阵列输出空间位移行波信号,通过与同频率参考信号比相实现位移解耦。在传感机理推导与仿真研究的基础上,研制了传感器样机,并开展了传感器稳定性与精度实验,验证了该传感结构及传感方法的可行性。

2 工作原理

2.1 传感器结构

传感器整体结构如图 1 所示,包含定尺和动尺两部分。定尺包含基体、按空间特殊排布的正弦/余弦激励绕组阵列。动尺包含基体、维度判断感应绕组阵列、 X 方向位移感应绕组阵列和 Y 方向位移感应绕组阵列。动尺与定尺正对平行

安装,并留有一定空气间隙 d 。

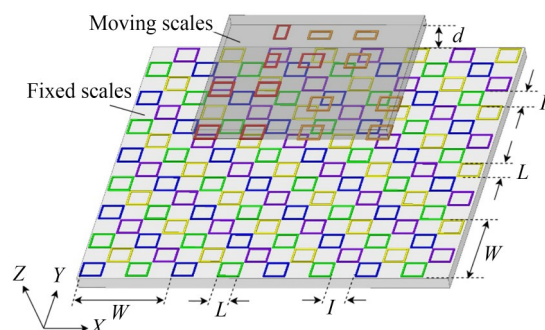


图 1 平面二维时栅位移传感器结构

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

如图 2 所示,激励绕组阵列由边长为 L 的方形绕组沿 X 轴和 Y 轴均匀、等间隔距离 I 排列构成, W 为传感器一个极距。处于同一行(或列)的相邻激励绕组分别施加同频等幅、相位相差 180° 的激励信号,如式(1)所示:

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

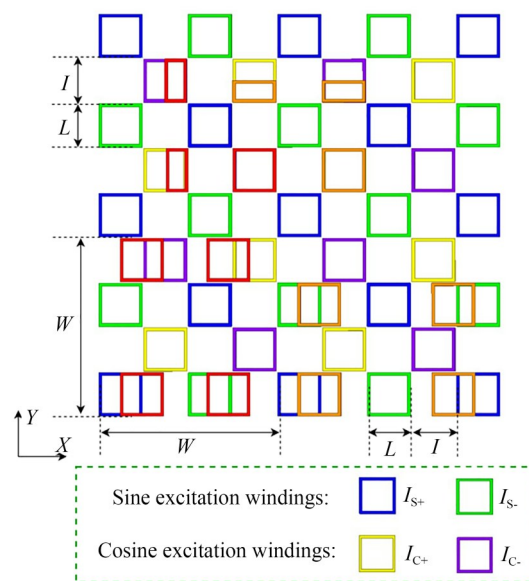


图 2 感应绕组与激励绕组平面示意图

Fig. 2 Planar diagram of induction and excitation windings

式中: I_m 为施加的交变电流幅值, ω 为交变电流频率。

传感器动尺感应绕组阵列主要分为三部分: 分别是维度判断感应绕组阵列、 X 方向位移感应绕组阵列和 Y 方向位移感应绕组阵列。如图 3 所示, 编号为 F_{X1}, F_{X2}, F_{X3} 的绕组构成阵列 F_X , 其中 F_{X2} 与 F_{X3} 沿 X 方向的边长为 F_{X1} 边长的一半, 沿 Y 方向的边长与 F_{X1} 边长相同; 编号为 F_{Y1}, F_{Y2}, F_{Y3} 的绕组构成阵列 F_Y , 其中 F_{Y2} 与 F_{Y3} 沿 Y 方向的边长为 F_{Y1} 边长的一半, 沿 X 方向的边长与 F_{Y1} 边长相同。 F_X 和 F_Y 的组合构成维度判断感应绕组阵列。编号为 X_1, X_2, X_3, X_4 的方形绕组构成 X 方向位移感应绕组阵列, 其中, X_1 与 X_3, X_2 与 X_4 起始位置相差 $0.5W$, 用于构成差动传感结构, 可以消除共模干扰并增大感应信号, X_1 与 X_2, X_3 与 X_4 起始位置相差 $0.75W$; 绕组 Y_1, Y_2, Y_3, Y_4 的排布细节与 X_1, X_2, X_3, X_4 的排布细节相同, 用于构成 Y 方向位移感应绕组阵列。

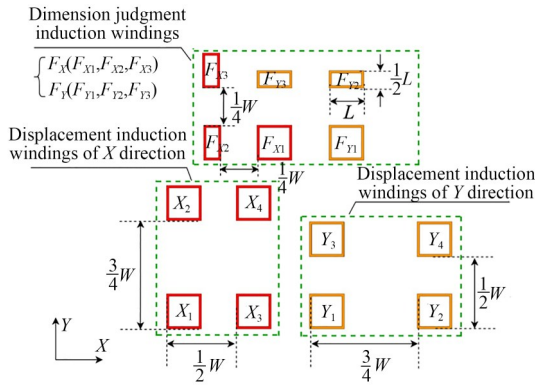


图 3 动尺感应绕组分布

Fig. 3 Distribution of induction winding of moving ruler

2.2 维度判断方法

如图 4 所示, F_{X1} 与 F_{X2} 按相同绕向串联、 F_{X2} 与 F_{X3} 按相反绕向串联构成阵列 F_X ; F_{Y1} 与 F_{Y2} 按相同绕向串联、 F_{Y2} 与 F_{Y3} 按相反绕向串联构成阵列 F_Y 。

则阵列 F_X, F_Y 产生的感应电势为:

$$\begin{cases} \epsilon_{F_X} = \epsilon_{F_{X1}} + \epsilon_{F_{X2}} - \epsilon_{F_{X3}} \\ \epsilon_{F_Y} = \epsilon_{F_{Y1}} + \epsilon_{F_{Y2}} - \epsilon_{F_{Y3}} \end{cases} \quad (2)$$

以图 4 所示位置向 X 轴运动一个极距为例,

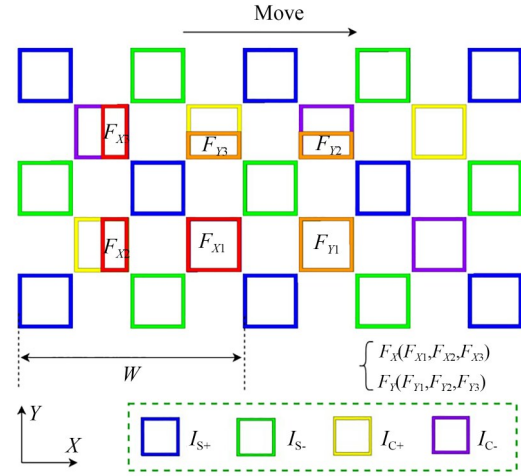


图 4 维度判断感应绕组分布

Fig. 4 Distribution of induction windings judged by dimension

此时 F_X 产生的感应信号为:

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

式中: $K = -\omega k I_m L \sin(\omega t)$, k 为磁场比例系数。

F_Y 产生的感应信号具体表达式为:

$$\epsilon_{F_Y}(x) = 0, x \in [0, W]. \quad (4)$$

同理, 当动尺向 Y 轴运动一个极距时, F_Y 产生的感应信号为:

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

F_X 产生的感应信号为:

$$\epsilon_{F_X}(y) = 0, y \in [0, W]. \quad (6)$$

因此,动尺向 $X(Y)$ 轴运动时,通过阵列 $F_X(F_Y)$ 的有效磁通量不为零,进而输出的感应信号不为零,而通过阵列 $F_Y(F_X)$ 的有效磁通量为零,即输出的感应信号为零。通过比较电路对感应

信号进行二值化,输出方波信号,然后通过方波信号的高低电平组合逻辑来判断维度,如图 5 所示。二值化后 ϵ_{F_X} 和 ϵ_{F_Y} 表示为“10”时,代表动尺向 X 轴移动; ϵ_{F_X} 和 ϵ_{F_Y} 表示为“01”时,代表动尺的测量维度发生改变,向 Y 轴移动; ϵ_{F_X} 和 ϵ_{F_Y} 表示为“00”或“11”时,代表动尺保持原测量维度不变。

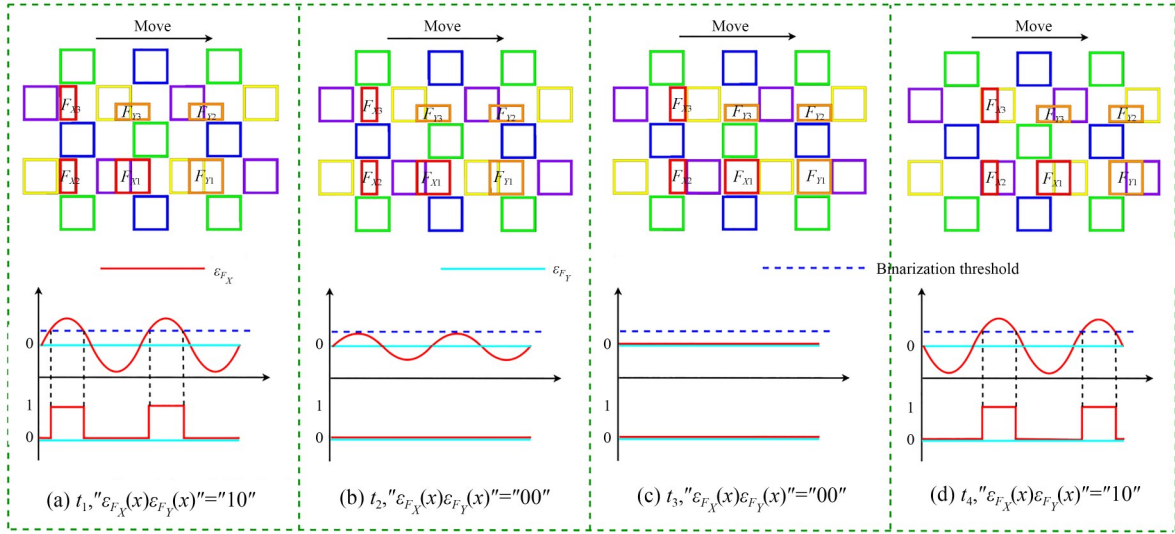


图 5 维度判断感应信号二值化示意图

Fig. 5 Schematic diagram of binarization of dimensional judgment induced signals

2.3 位移感应信号产生原理

以 X 方向位移感应绕组阵列为例,具体分析运动过程中产生的位移感应信号。如图 6 所示,当动尺向 X 轴运动时,通过感应绕组的磁通量随着时间与位移发生周期性变化,当位移区间为 $[0, W]$ 时,感应绕组 X_1, X_2, X_3, X_4 的磁通量如下:

$$\begin{cases} \phi_{X_1}(t, x) = kI_m L \frac{W}{4\pi} \sin(\omega t) \cos\left(\frac{4\pi}{W}x\right) \\ \phi_{X_2}(t, x) = -kI_m L \frac{W}{4\pi} \cos(\omega t) \sin\left(\frac{4\pi}{W}x\right) \\ \phi_{X_3}(t, x) = -kI_m L \frac{W}{4\pi} \sin(\omega t) \cos\left(\frac{4\pi}{W}x\right) \\ \phi_{X_4}(t, x) = kI_m L \frac{W}{4\pi} \cos(\omega t) \sin\left(\frac{4\pi}{W}x\right) \end{cases} \quad (7)$$

根据法拉第电磁感应定律,感应绕组中产生的感应电势为:

$$\begin{cases} \epsilon_{X_1}(t, x) = \omega kI_m L \frac{W}{4\pi} \cos(\omega t) \cos\left(\frac{4\pi}{W}x\right) \\ \epsilon_{X_2}(t, x) = \omega kI_m L \frac{W}{4\pi} \sin(\omega t) \sin\left(\frac{4\pi}{W}x\right) \\ \epsilon_{X_3}(t, x) = -\omega kI_m L \frac{W}{4\pi} \cos(\omega t) \cos\left(\frac{4\pi}{W}x\right) \\ \epsilon_{X_4}(t, x) = -\omega kI_m L \frac{W}{4\pi} \sin(\omega t) \sin\left(\frac{4\pi}{W}x\right) \end{cases} \quad (8)$$

将感应绕组 X_1 与 X_2 输出的信号叠加后形成行波信号 U_1 , 感应绕组 X_3 与 X_4 输出的信号叠加后形成行波信号 U_2 , 其表达式分别为:

$$\begin{cases} U_1 = \omega kI_m L \frac{W}{4\pi} \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{W}x\right) \\ U_2 = -\omega kI_m L \frac{W}{4\pi} \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{W}x\right) \end{cases} \quad (9)$$

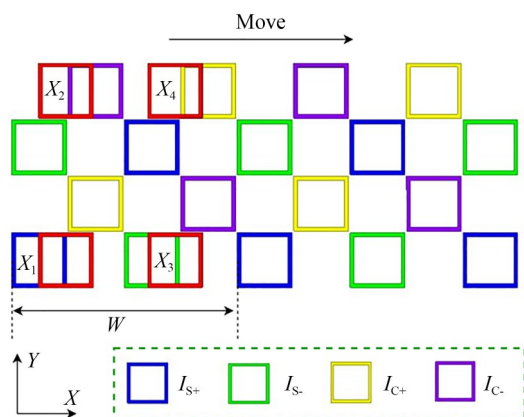


图6 X方向感应绕组分布

Fig. 6 Distribution of induction windings in X direction

感应绕组 X_1 与 X_3 , X_2 与 X_4 构成了差动传感结构, 因此, X 方向位移感应绕组阵列最终输出的感应信号为:

$$U_x = U_1 - U_2 = 2\omega k I_m L \frac{W}{4\pi} \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{W} x\right) = A \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{W} x\right). \quad (10)$$

同理,当动尺向 Y 方向运动时,Y 方向位移感应绕组阵列输出的感应信号为:

$$U_Y = A \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{W} y\right). \quad (11)$$

从推导过程中可以看出,将感应绕组输出的两路时间与空间正交的驻波信号叠加,即可得到相位随运动位移发生周期性变化的行波信号,待测位移体现在行波信号相位上,因此只要求得信号的相位,即可求得待测位移。

2.4 二维位移测量方案

二维位移测量方案如图7所示。给传感器激励绕组阵列施加激励信号后,当动尺与定尺产生相对运动时,维度判断感应绕组阵列输出两路不同信号 ϵ_{F_x} 和 ϵ_{F_y} ,经二值化变为高低电平信号,利用 ϵ_{F_x} 和 ϵ_{F_y} 的高低电平组合逻辑来判断维度;X方向和Y方向位移感应绕组阵列分别输出行波信号 U_x 和 U_y ,将 U_x 和 U_y 经带通滤波电路、放大电路、过零比较电路处理为方波信号,再输入FPGA系统,与同频率的参考信号 U_{ref} 进行比相,相位差由高频时钟脉冲插补来计数,经解算得到X

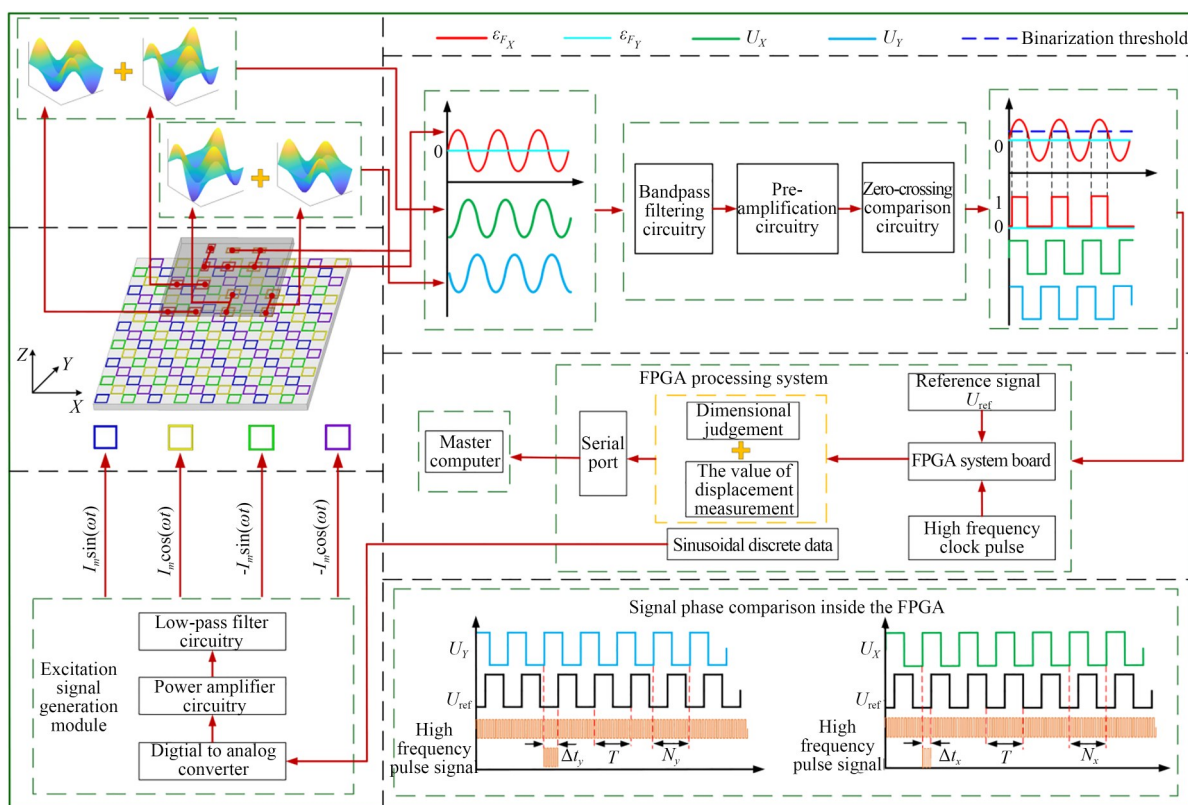


图7 二维位移测量方案

Fig. 7 Two-dimensional displacement measurement scheme

方向和 Y 方向的位移表达式为:

$$\begin{cases} x = \left(N_x + \frac{\Delta t_x}{T} \right) W \\ y = \left(N_y + \frac{\Delta t_y}{T} \right) W \end{cases}, \quad (12)$$

其中: N_x 和 N_y 分别为传感器动尺向 X 方向和 Y 方向移动的完整对极数; Δt_x 和 Δt_y 分别为 X 方向和 Y 方向行波信号比相得到的相位差, 其值为高频时钟插补计数值与高频时钟周期的乘积; T 为参考信号时钟周期。

传感器的两维度测量分辨力可以表示为:

$$R = \frac{l}{N} \cdot \frac{f_e}{f_r}, \quad (13)$$

式中: l 为量程, N 为对极数, f_e 为激励信号频率, f_r 为高频时钟脉冲频率。

3 仿真分析

3.1 电磁场仿真

在电磁场仿真软件中建立传感器模型并进行仿真实验, 建模参数如表 1 所示。传感器的极距 W 为 24 mm, 动尺分别向 X 方向和 Y 方向运动 5 个对极, 移动步距设为 0.6 mm, 则 5 个对极 (120 mm) 共仿真 200 处感应电势信息, 动尺每运动到一个位置, 感应绕组输出一组感应信号。所用激励信号频率为 $f=10$ kHz, 因此仿真时长为 100 μ s, 仿真模型的磁场强度云图如图 8 所示。可以看出, 激励绕组产生的磁场沿平面两维度呈

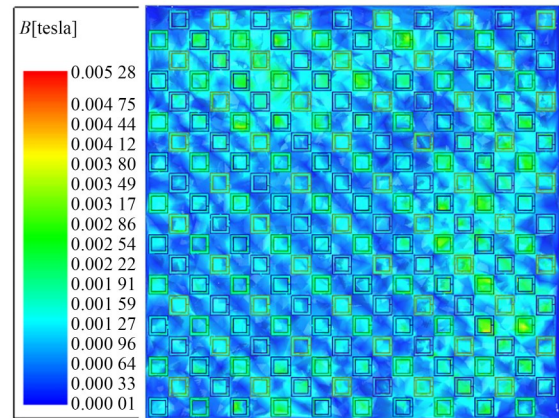


图 8 仿真模型磁场分布云图

Fig. 8 Cloud map of magnetic field distribution in simulation model

周期性分布。

电磁仿真得到的感应电势信号如图 9 所示, 每条曲线为动尺运动到不同位置所产生的感应信号, 形式上表现为行波信号, 且相位变化比较均匀。

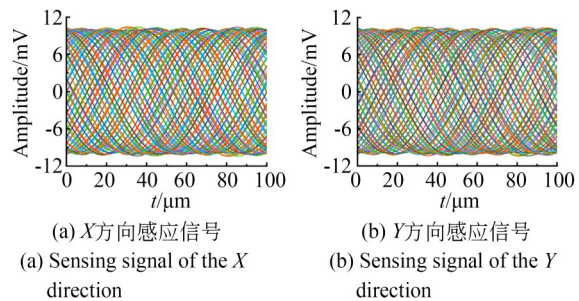


图 9 不同位置感应绕组的感应信号

Fig. 9 Induction signals of induction windings at different positions

3.2 数据分析

为分析测量误差, 对图 9 中的每组数据进行快速傅里叶变换, 取其基波幅值和相位, 根据式 (10) 和式 (11) 中位移与相位的关系, 经换算可得对应的位移, 再将仿真解算位移与理论位移相减得到测量误差曲线, 如图 10 和图 11 所示。可以看出, X 方向测量误差为 $-26.3 \sim 24.6 \mu\text{m}$, Y 方向测量误差为 $-29.2 \sim 25.1 \mu\text{m}$ 。

对误差进行傅里叶分解得到误差频谱, 如图 12 和表 2 所示。可以看出, 两方向误差谐波成分主要为 10 次和 20 次, 其中 20 次误差最大, 主要原

表 1 部分仿真参数

Tab. 1 Part of simulation parameters

模型参数	参数值
激励绕组尺寸	5.8 mm × 5.8 mm
激励绕组匝数	2
感应绕组尺寸	6 mm × 6 mm
感应绕组匝数	2
感应绕组阻抗	1 M Ω
感应与激励绕组气隙高度	0.4 mm
X(Y)方向极距 W	24 mm
激励绕组结构周期数	5
激励信号幅值	5 A
激励信号频率	10 kHz
移动步距	0.6 mm

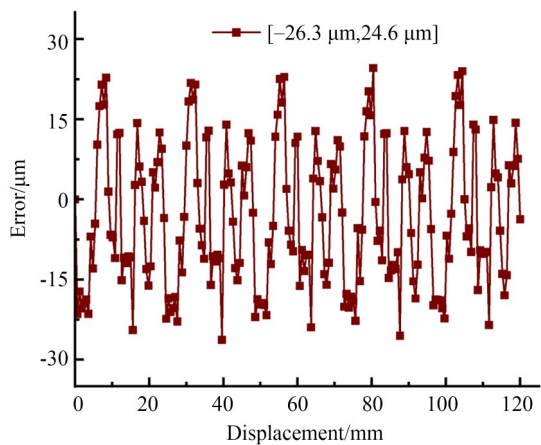


图 10 X方向大量程测量误差
Fig. 10 Wide-range measurement error of X direction

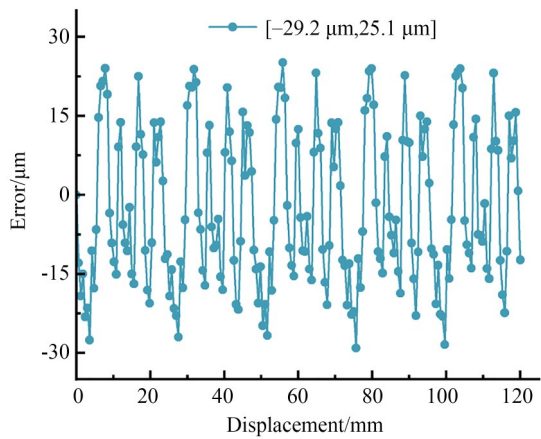


图 11 Y方向大量程测量误差
Fig. 11 Wide-range measurement error of Y direction

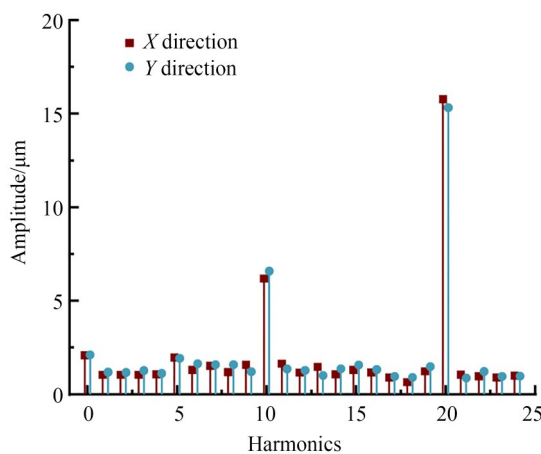


图 12 大量程误差频谱
Fig. 12 Wide-range error spectrum

表 2 X和Y方向的主要谐波分量			
Tab. 2 Main harmonic component in X and Y direction			
X方向		Y方向	
谐波频次	幅值/μm	谐波频次	幅值/μm
0	2.28	0	2.31
5	2.04	5	1.97
10	6.18	10	6.58
20	15.77	20	15.31

因在于测量两维度位移的感应绕组分别有 4 个,经叠加后磁场呈现 4 次变化,在一个对极内产生 4 次误差,经 5 个周期累积所致。10 次误差产生的主要原因在于,每行正弦/余弦激励绕组在一个极距内包含的 2 个激励绕组产生的磁场不均匀。

4 实验结果

为验证该传感结构与测量方法的可行性,研制了传感器样机并搭建实验平台。采用印刷电路板(Print Curcuit Board, PCB)加工技术研制传感器样机,同一行相邻的正弦/余弦激励绕组反向串联。样机定尺与动尺分别如图 13(a)和 13(b)所示。其中,激励和感应绕组形状均设置为方形结构,定尺激励绕组尺寸为 5.8 mm×5.8 mm,沿 X,Y 方向分别布置 6 个结构周期,定尺的 PCB 尺寸为 155 mm×150 mm;动尺的感应绕组尺寸为 6 mm×6 mm,PCB 尺寸为 65 mm×55 mm。

搭建的实验平台如图 14 所示:(1)测量精度为 $\pm 0.5\times 10^{-6}$ 的英国 Renishaw 公司 XL-80 激光干涉仪;(2)激光干涉仪测量系统上位机;(3)传

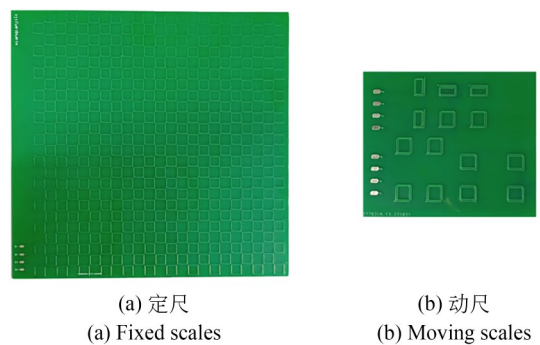


图 13 传感器的定尺与动尺
Fig. 13 Fixed and moving scales of sensors

传感器测量系统上位机;(4)信号处理板机盒;(5)美国 AEROTECH 公司制造的 Planer-300XY 二维移动平台, X, Y 方向行程均为 300 mm,定位精度为 $\pm 0.75 \mu\text{m}$,重复定位精度为 $\pm 0.1 \mu\text{m}$,分辨力为 3 nm, XY 的正交性为 $1''$;(6)重复定位精度为 $\pm 0.1 \mu\text{m}$ 的德国 PI 公司 H-825 六自由度微移动平台;(7)KEYSIGHT 公司的 DSOX3014T 示波器;(8)H-825 六自由度平台控制系统。将定尺固定在二维运动平台上,动尺固定在六自由度平台上,以便调整动尺与定尺之间的间隙和平行度。以激光干涉仪的测量值为基准标定本文传感器测量值。对定尺正弦/余弦激励绕组分别施加频率为 10 kHz、幅值为 5 A 的正弦/余弦激励信号。调整动尺与定尺之间的间隙高度为 0.4 mm,由二维移动平台带动定尺移动。

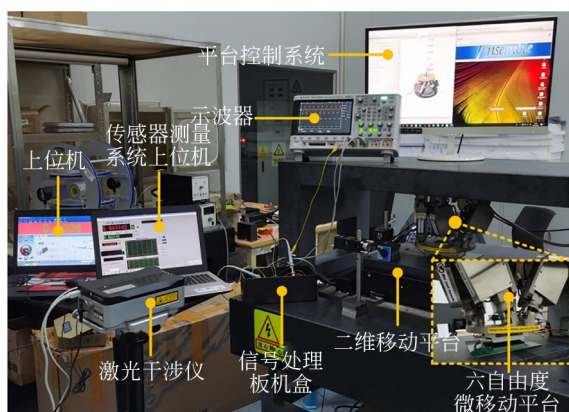


图 14 平面二维时栅位移测量实验平台

Fig. 14 Experimental platform for planar two-dimensional time grating displacement measurement

4.1 传感器稳定性实验

实验时位移台采用反馈定位模式,通过二维移动平台带动定尺朝 $X=Y$ 方向匀速运动一个极距,随后停止运动,每隔 2 s 采集一次 X 方向和 Y 方向的测量数据,两方向各采集 400 个数据,通过这 400 个数据的波动情况分析传感器的稳定性。数据曲线如图 15 和 16 所示,可以看出, X 方向和 Y 方向的稳定性误差均不超过 $\pm 1.5 \mu\text{m}$,稳定性较好。

4.2 二维大量程精度实验

为测试该传感器两维度整体性能,在平面 $120 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$ 的有效测量范围内开展大量程精度实验,二维移动平台以 $1/2W$ (12 mm) 为移动步距,实验结果如图 17 所示。

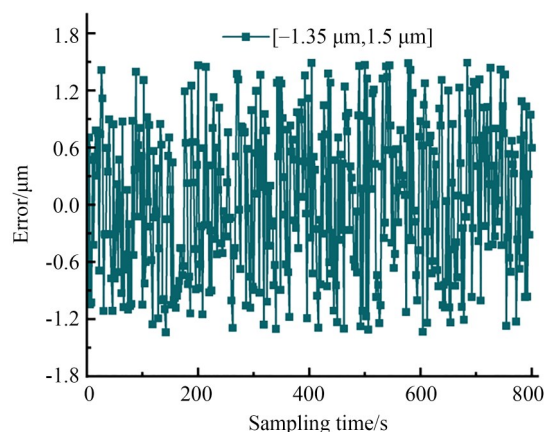


图 15 X 方向稳定性误差曲线

Fig. 15 Stability error curve of X direction

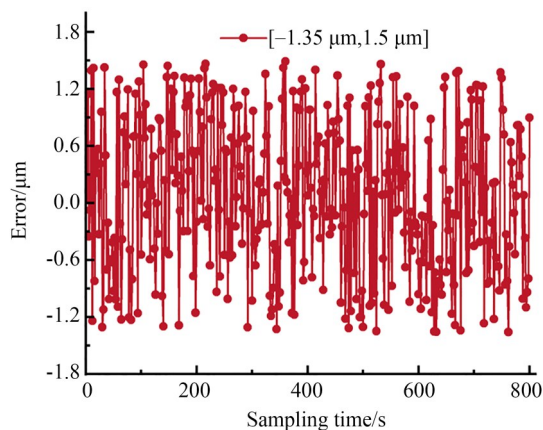


图 16 Y 方向稳定性误差曲线

Fig. 16 Stability error curve of Y direction

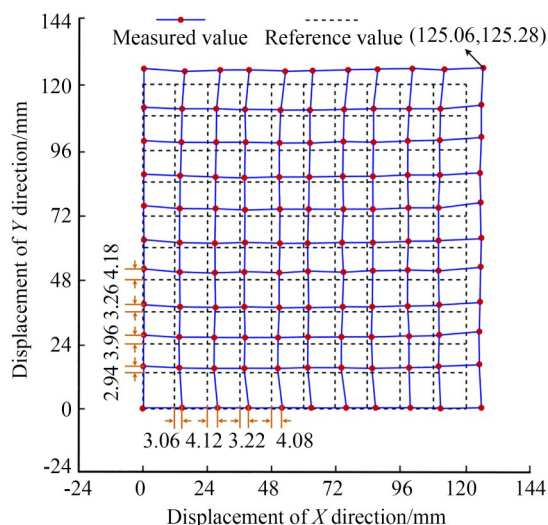


图 17 $120 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$ 测量值

Fig. 17 Measurement value within $120 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$

图 17 中,虚线交点为以激光干涉仪标定二维移动平台在两维度移动的标准值,将其作为参考值;实线相互连接的红点为传感器在 X 、 Y 方向的测量值。由于误差值量级与测量值量级相差较大,直接将测量值与参考值比较很难看出其误差特性,因此,将误差值经 200 倍折算后,再加上参考值得到的测量值如图 17 所示。

以右上角测量值(125.06,125.28)为例,其参考值为(120,120),将测量值与参考值相减,再经过 200 倍折算,得到 X 、 Y 方向的实际误差值分别为 25.3、26.4 μm 。由图 17 可知,传感器在平面两维度的大量程误差以“一小一大”按对极数周期性出现,如图中 X 方向第一个对极的两个误差值分别为 3.06 和 4.12,第二个对极的两个误差值分别为 3.22 和 4.08; Y 方向第一个对极的两个误差值分别为 2.94 和 3.96,第二个对极的两个误差值分别为 3.26 和 4.18。其原因为样机加工误差导致同行相邻激励绕组大小不一致。此外,传感器边缘位置误差值较大,原因在于直线位移传感器为非圆周封闭性结构,会产生磁场边缘效应。

由于图 17 中 X 、 Y 方向的测量数据均是以半个极距(12 mm)为移动步距测得,一个对极仅测量两个点,并不能很好反映对极内其他位置的误差,现以传感器误差较大的边缘位置进行单维度大量程实验。由二维移动平台带动定尺沿 X 、 Y 方向分别移动 120 mm,移动步距为 0.6 mm,同时采集传感器上位机与激光干涉仪上位机的测量数据,将数据比对计算后得到单维度大量程原始测量误差。如图 18 和 19 所示(彩图见期刊电子版), X 方向的原始误差为 $-35.1 \sim 26.2 \mu\text{m}$, Y 方向的原始误差为 $-35.5 \sim 27.7 \mu\text{m}$ 。

为分析误差谐波成分,对误差进行傅里叶分解得到误差频谱,如图 20 和表 3 所示。由此可知,原始测量误差谐波成分与仿真分析基本一致,主要包含直流电平、5 次谐波、10 次谐波和 20 次谐波。但实验中直流电平误差、5 次谐波误差、10 次谐波误差幅值与仿真比较有所增加,主要原因在于:样机加工误差造成相邻行正弦激励绕组与余弦激励绕组并非严格空间正交,导致感应绕组产生的驻波信号空间非正交,致使直流电平误

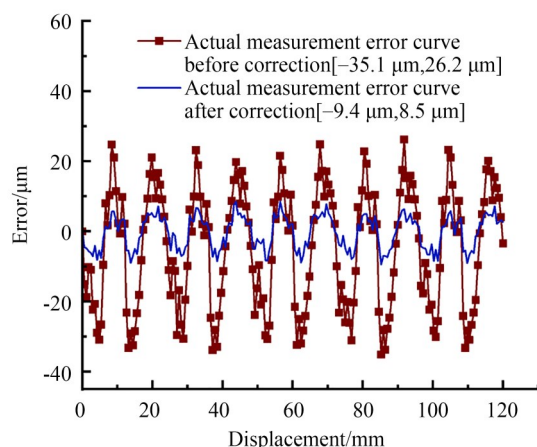


图 18 X 方向整量程的测量误差

Fig. 18 Measurement errors within full range of X direction

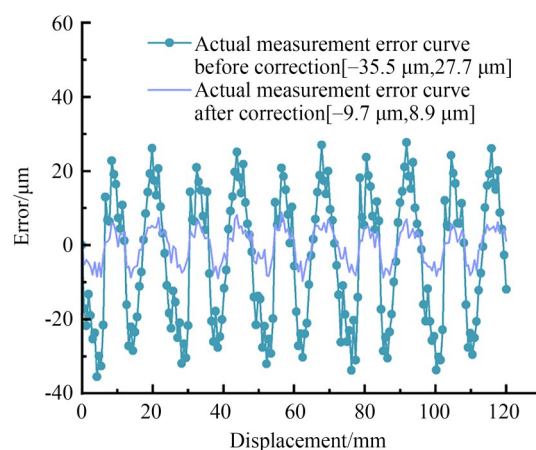


图 19 Y 方向整量程的测量误差

Fig. 19 Measurement errors within full range of Y direction

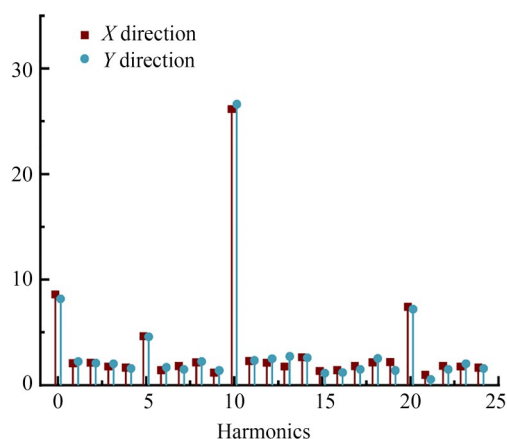


图 20 整量程原始测量误差频谱

Fig. 20 Harmonic spectrum of original measurement errors within full range

差和 10 次谐波误差的幅值增大。样机加工相邻激励绕组尺寸不一致,导致 5 次谐波误差幅值增大。感应绕组所拾取的交变磁场在对极内不均匀产生 4 次谐波误差,在 5 个对极叠加产生了 20 次谐波误差。

图 18 中,红色曲线为 X 方向修正前的实测误差曲线,采用谐波修正法^[16]对两维度原始测量误差进行修正,将表 3 中原始误差的主要谐波分量写入 FPGA 软核,测量时由软核中的软件修正程序根据各谐波误差自动进行误差修正。蓝色曲线为修正后的实测误差曲线,实测误差不超过 $\pm 9.4\text{ }\mu\text{m}$ 。同理,图 19 中青色曲线为 Y 方向修正前的实测误差曲线,紫色曲线为修正后的实测误差曲线,修正后的实测误差不超过 $\pm 9.7\text{ }\mu\text{m}$ 。用于插补计数的高频时钟频率为 1.6 GHz ,根据式(13)计算得出该传感器理论上两维度测量分辨力为 $0.15\text{ }\mu\text{m}$ 。

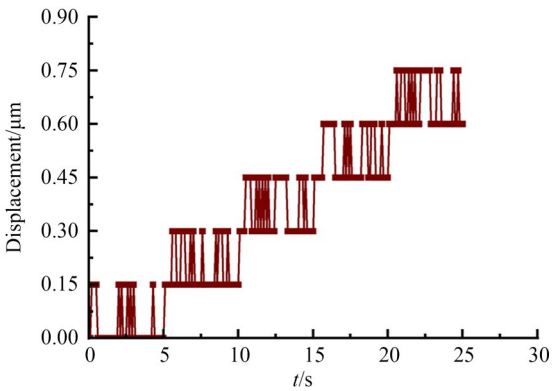
由二维移动平台带动定尺朝 X 轴移动,单步

表 3 整量程误差的主要谐波分量

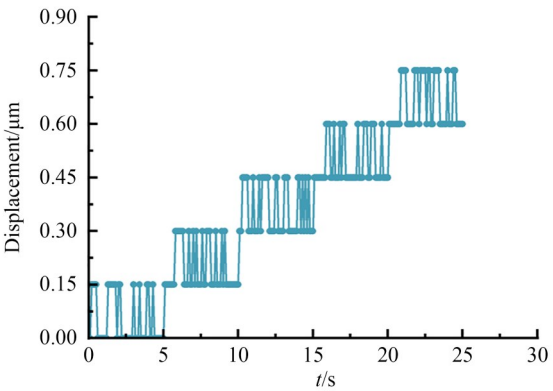
Tab. 3 Main harmonic components of measurement errors within full range

X 方向		Y 方向	
谐波频次	幅值/ μm	谐波频次	幅值/ μm
0	8.61	0	8.18
5	4.74	5	4.62
10	26.16	10	26.51
20	7.42	20	7.16

移动步长为 $0.15\text{ }\mu\text{m}$,每步保持 5 s,采集传感器上位机测量数据,得到 X 方向测试数据结果,如图 21(a)所示。同理,按相同实验条件控制二维移动平台带动定尺朝 Y 轴移动,得到 Y 方向测试数据结果,如图 21(b)所示。由图 21 可知,传感器两维度测量值以 $0.15\text{ }\mu\text{m}$ 进行跳变,验证了研制的平面二维位移传感器的测量分辨力为 $0.15\text{ }\mu\text{m}$ 。



(a) X 方向分辨力测试数据
(a) Resolution test data of X direction



(b) Y 方向分辨力测试数据
(b) Resolution test data of Y direction

图 21 传感器分辨力测试数据
Fig. 21 Sensor resolution test data

5 结 论

本文提出了一种基于交变磁场的平面二维位移测量方法,通过“维度判断+位移解耦”的方式实现平面二维位移测量。在理论与仿真研究的基础上,研制了传感器样机并进行实验研究。实验结果表明:传感器在二维平面 $120\text{ mm}\times 120\text{ mm}$ 的有效测量范围内,X 方向的测量误差为

$\pm 9.4\text{ }\mu\text{m}$;Y 方向的测量误差为 $\pm 9.7\text{ }\mu\text{m}$,测量分辨力为 $0.15\text{ }\mu\text{m}$ 。激励和感应绕组均采用立创 EDA 软件进行 PCB 设计,绕线宽度为 0.3 mm 。采用高精度 PCB 加工绕组,线宽加工精度为 $\pm 7\%$,即实际加工出的线宽为 $(0.3\pm 0.021)\text{ mm}$,故相邻激励绕组以及相邻感应绕组位置的最大误差为 $\pm 21\text{ }\mu\text{m}$ 。下一步将采用高精度微纳加工工艺提高传感器的加工精度,开展传感器测

量误差溯源分析和安装误差对测量精度的影响分析,以保证传感器的测量精度。

本研究采用毫米级尺寸的激励和感应绕组进行精确磁场约束,实现大量程微米级测

量精度,从传感原理上突破加工设备和加工工艺对大量程高精度二维位移传感器的制约,显著降低了加工难度,具有重要的工程应用价值。

参考文献:

- [1] WEI P P, LU X, QIAO D C, *et al.* Two-dimensional displacement measurement based on two parallel gratings[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2018, 89(6): 065105.
- [2] YU H, WAN Q H, MU Z Y, *et al.* Novel nanoscale absolute linear displacement measurement based on grating projection imaging[J]. *Measurement*, 2021, 182: 109738.
- [3] 姜志峰, 张汉平, 周竞杰, 等. 二维线性模组空间运动误差实时测量[J]. *光学精密工程*, 2023, 31(21): 3111-3124.
LOU ZH F, ZHANG H P, ZHOU J J, *et al.* Real-time spatial error measurement of two-dimensional linear module[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(21): 3111-3124. (in Chinese)
- [4] 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.
- [5] 尹云飞, 刘兆武, 吉日嘎兰图, 等. 二维光栅位移测量技术综述[J]. *中国光学*, 2020, 13(6): 1224-1238.
YIN Y F, LIU ZH W, JI R, *et al.* Overview of 2D grating displacement measurement technology[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(6): 1224-1238. (in Chinese)
- [6] 石照耀, 张斌, 费业泰. 阿贝原则再认识[J]. *仪器仪表学报*, 2012, 33(5): 1128-1133.
SHI ZH Y, ZHANG B, FEI Y T. Re-visit to the abbe principle[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(5): 1128-1133. (in Chinese)
- [7] 高旭, 李舒航, 马庆林, 等. 光栅精密位移测量技术发展综述[J]. *中国光学*, 2019, 12(4): 741.
GAO X, LI SH H, MA Q L, *et al.* Development of grating-based precise displacement measurement technology[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(4): 741. (in Chinese)
- [8] 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.
- [9] FAN K C, LIAO B H, CHUNG Y C, *et al.* Displacement measurement of planar stage by diffraction planar encoder in nanometer resolution[C]. *2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*. May 13-16, 2012. Graz, Austria. IEEE, 2012, 8443(8): 894-897.
- [10] 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 ZH, *et al.* 2D nanodisplacement measurement with diffraction grating[J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2007(4): 311-314. (in Chinese)
- [11] Heidenhain PP281 datasheet [EB/OL]. https://www.heidenhain.com/fileadmin/pdf/en/01_Products/Prospekte/PREExposed_Linear_Encoders_ID208960_en.pdf.
- [12] BONSE M, ZHU F, SPRONCK A J. A new two-dimensional capacitive position transducer[J]. *Sensors and Actuator A: Physical*, 1994, 41-42: 29-32.
- [13] HARTWELL P G, WALMSLEY R G, FASEN D J, *et al.* Integrated position sensing for control of XY actuator[C]. *Proceedings of IEEE Sensors*, 2004. Vienna, Austria. IEEE, 2004(3): 1407-1410.
- [14] YU J P, WANG W, LU K Q, *et al.* A planar capacitive sensor for 2D long-range displacement measurement[J]. *Journal of Zhejiang University Science C*, 2013, 14(4): 252-257.
- [15] HOJJAT Y, KARAFI M R, GHANBARI M, *et al.* Development of an inductive encoder for simultaneous measurement of two-dimensional displacement[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, 53(5): 681-688.

- [16] 陈自然, 黎锡, 冯曦颖, 等. 基于差极结构的绝对式直线时栅位移传感器研究及测量误差特性分析[J]. 光学精密工程, 2022, 30(6): 667-677.
CHEN Z R, LI X, FENG X J, *et al.* Research on

absolute linear time-grating displacement sensor with one-pole-difference structure and analysis of measurement error characteristics[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(6): 667-677. (in Chinese)

作者简介:



陈自然(1980—),男,湖北广水人,博士,研究员,硕士生导师,2004年于中国地质大学获得学士学位,2009年于重庆理工大学获得硕士学位,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。
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,硕士生导师,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.cn