

文章编号 1004-924X(2023)19-2836-14

基于离散绕组的磁场式时栅位移传感器及误差特性

陈自然^{1,2,3}, 张析潇^{1,3}, 何智颖^{1,3*}, 陈鸿友^{1,3}, 余海游^{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)

摘要:针对高精度位移传感器难以加工的难题,提出一种基于离散绕组的磁场式时栅位移传感器。通过设计离散激励绕组排布方式与感应绕组的形状控制感应位移信号的变化规律,通过组合测量方式实现精密位移测量。通过理论建模、仿真分析与实验验证揭示了激励信号误差和安装偏差对传感器测量精度的影响规律。实验结果表明:两路激励信号的幅值不等和安装偏差都会在对极内测量精度中直接引入直流分量误差和2次谐波误差,其中2次谐波误差是误差的主要成分。安装偏差越大,2次谐波误差越大,动尺沿Z轴偏摆姿态对测量精度的影响最大,沿Y轴翻转姿态引入的误差次之,沿X轴俯仰姿态引入的误差最小。误差修正后传感器在144 mm的测量范围内,测量误差峰峰值为4.5 μm ,分辨力为0.15 μm 。通过毫米级尺寸的激励和感应绕组实现微米级精度测量,可显著降低传感器的制造难度,具有重要的工程应用价值。

关键词:直线位移;离散绕组;组合测量;时栅传感器;误差分析

中图分类号: TP212 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20233119.2836

Magnetic field time-gate displacement sensor based on discrete winding and its error characteristics

CHEN Ziran^{1,2,3}, ZHANG Hengxiao^{1,3}, HE Zhiying^{1,3*}, CHEN Hongyou^{1,3}, YU Haiyou^{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)

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

Abstract: Addressing the challenges in the manufacturing of high-precision displacement sensors, a magnetic-field time-gate displacement sensor based on discrete windings was proposed. Through a specific arrangement of discrete exciting windings and valid shape of the discrete inducing windings, the change law

收稿日期: 2023-03-30; 修订日期: 2023-04-20.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 52175495, No. 51935004); 重庆市自然科学基金面上项目(No. cstc2020jcyj-msxmX0917); 重庆市研究生科研创新项目(No. CYS22655)

of induced displacement signals was controlled. High-precision displacement was achieved using a combined measurement method. Furthermore, the influence of errors in exciting signals and the installation errors of the sensor on the measurement precision was analyzed via theoretical modeling, simulated analysis, and experimental verification. The experiment results showed that the DC error and 2nd harmonic error were introduced directly within the pitch by the amplitude errors between the two excitation signals and installation errors, with the 2nd harmonic error being the primary contributor to the measurement errors. As installation errors increased, the 2nd harmonic error also increased. The most significant impact on the measurement error was found to be the deflection error along the Z axis, followed by the flip error along the Y axis, and the least impactful was the tilt error along the X axis. After error correction was applied, the peak-to-peak value of the measurement error was found to be $4.5\ \mu\text{m}$ within $144\ \text{mm}$, and the resolution was determined to be $0.15\ \mu\text{m}$. The primary feature of the method proposed is that discrete exciting windings and inducing windings on a millimeter scale were used to achieve measurement precision on a micrometer scale. This approach was shown to significantly reduce the manufacturing challenges of the displacement sensor, providing academic value and practical value.

Key words: linear displacement; discrete windings; combined measurement; time-gating sensors; error analysis

1 引 言

精密位移测量技术及器件是高档数控机床、高端仪器设备等精密高端装备的核心技术和关键功能部件,是实现精密定位与控制的“眼睛”^[1-4],直接决定着系统的性能。光栅采用又精又密的栅线作为测量基准,其加工精度决定测量精度,其密度决定测量分辨力^[5-7]。目前,市场上高精度增量式直线光栅的栅距为 $20\ \mu\text{m}$,测量精度为 $\pm 3\ \mu\text{m}$ 。为提高测量精度和分辨力,世界领先的德国 HEIDENHAIN 公司生产的 LIP201 直线光栅^[8]的栅距提高到 $2.048\ \mu\text{m}$,测量精度达到 $\pm 1\ \mu\text{m}$ 。上海光学精密机械研究所为实现纳米级的测量精度,使用超精密激光设备研制了栅距为 $830\ \text{nm}$ 的光栅^[9],测量精度提高到 $50\ \text{nm}$ 。光栅的测量精度越高,对栅线刻划的均匀性和一致性要求越高,制造难度呈几何指数增长,此类精密光刻技术已逼近极限,很难再进一步提高。同时,光栅使用过程中易受到光电池安装位置、指示光栅与标尺光栅夹角误差和衍射光强等因素的影响^[10-11],导致信号质量不稳定,严重影响光栅的测量精度。因此,光刻精度和安装误差是影响光栅测量精度的两个重要因素。

针对上述问题,前期课题组提出利用时间提

高位移测量精度的方法,发明了时栅位移传感器^[12-17]。本文在此基础上提出了基于离散绕组的磁场式时栅位移传感器,通过设计毫米级尺寸的激励绕组和感应绕组的形状与排布输出位移感应信号,实现微米级测量精度,降低了传感器的制造难度。

2 工作原理

基于离散绕组的磁场式时栅位移传感器结构主要包含动尺和定尺,动尺和定尺在空间上正对平行安装,并保持一定的间隔距离 δ ,如图 1 所示。其中,动尺包含基体和正弦形感应绕组阵列,定尺包含基体和激励绕组阵列。定尺上均匀布置两行边长为 d 的离散矩形激励绕组,按间隔 d 等间距排布,其中第一行构成正弦激励绕组,第二行构成余弦激励绕组。同行相邻激励绕组依次施加相位相差 180° 的激励电流信号,如下:

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

其中: I_m 为激励交变电流的最大幅值, ω 为激励交变电流频率。

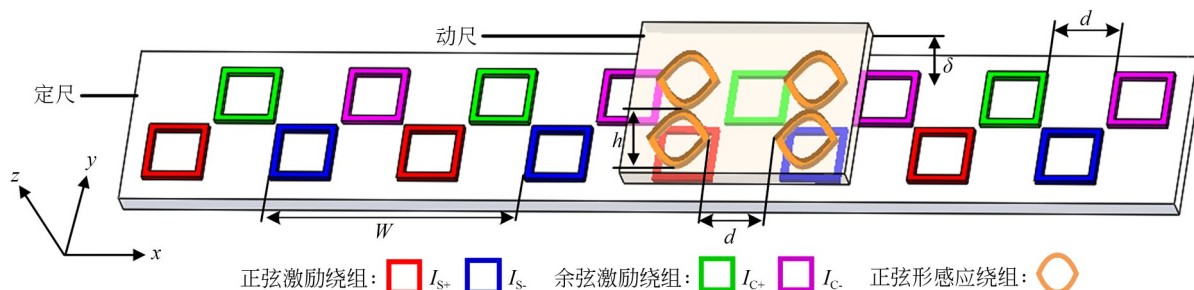


图1 磁场式时栅位移传感器总体结构

Fig. 1 Overall structure of magnetic-field type time-gating displacement sensor

动尺包含 4 组正弦形感应绕组, 记为 A, B, C, D, 其中正弦形感应绕组 A 和正弦形感应绕组 B 按相同绕向串联, 正弦形感应绕组 C 和正弦形感应绕组 D 按相同绕向串联, 如图 2 所示。

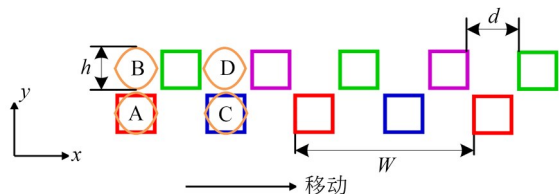


图2 感应绕组和激励绕组的位置示意图

Fig. 2 Position of induction winding and excitation winding

给定尺上的激励绕组通入正/余弦激励电流, 当动尺与定尺产生相对位移时, 根据电磁感应原理可得正弦形感应绕组 A, B 在一个激励绕组周期极距 W 内的感应电动势, 即:

$$\begin{cases} U_A = k\omega I_m h \frac{W}{4\pi} \cos(\omega t) \cos\left(\frac{4\pi}{W}x\right) \\ U_B = k\omega I_m h \frac{W}{4\pi} \sin(\omega t) \sin\left(\frac{4\pi}{W}x\right) \end{cases} \quad (2)$$

其中: k 为比例系数, h 为正弦形感应绕组的高度, W 为极距, x 为动尺的运动位移。

同理, 正弦形感应绕组 C, D 在一个激励绕组周期极距 W 内的感应电动势为:

$$\begin{cases} U_C = -k\omega I_m h \frac{W}{4\pi} \cos(\omega t) \cos\left(\frac{4\pi}{W}x\right) \\ U_D = -k\omega I_m h \frac{W}{4\pi} \sin(\omega t) \sin\left(\frac{4\pi}{W}x\right) \end{cases} \quad (3)$$

由叠加定理可得正弦形感应绕组 A、B 串联后的感应电动势以及正弦形感应绕组 C、D 串联

后的感应电动势, 如下:

$$\begin{cases} U_1 = U_A + U_B = K \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{W}x\right) \\ U_2 = U_C + U_D = -K \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{W}x\right) \end{cases} \quad (4)$$

其中: $K = k\omega I_m h \frac{W}{4\pi}$ 。

正弦形感应绕组 A 和正弦形感应绕组 C 构成差动传感结构, 正弦形感应绕组 B 和正弦形感应绕组 D 构成差动传感结构, 可有效消除共模信号干扰。因此, 正弦形感应绕组 A, C 与正弦形感应绕组 B, D 串联后的叠加信号为:

$$U_x = U_1 - U_2 = 2K \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{W}x\right) \quad (5)$$

式(5)即为传感器输出的携带位移信息的行波信号, 行波信号的相位变化反映动尺的运动状态, 并随运动位移发生周期变化, 与同频参考信号比相获得时间量 Δt , 进而获得测量位移量 Δx , 位移解算方案如图 3 所示。在动尺运动过程中, 感应绕组产生输出的感应信号 U_x , 经过滤波电路、放大电路的预处理后, 由整形电路整形形成方波信号, 之后输入 FPGA 模块与同频参考信号 U_f 进行比相, 由高频时钟脉冲插补计数求出相位差的时间量 Δt , 由此求得运动方向的位移量为:

$$\Delta x = \left(N + \frac{\Delta t}{T}\right)W, \quad (6)$$

其中: N 为动尺在运动方向上运动的完整对极数, T 为参考信号的时钟周期。

传感器的测量分辨率可以表示为:

$$R = \frac{L}{N} \cdot \frac{f_c}{f_r} \quad (7)$$

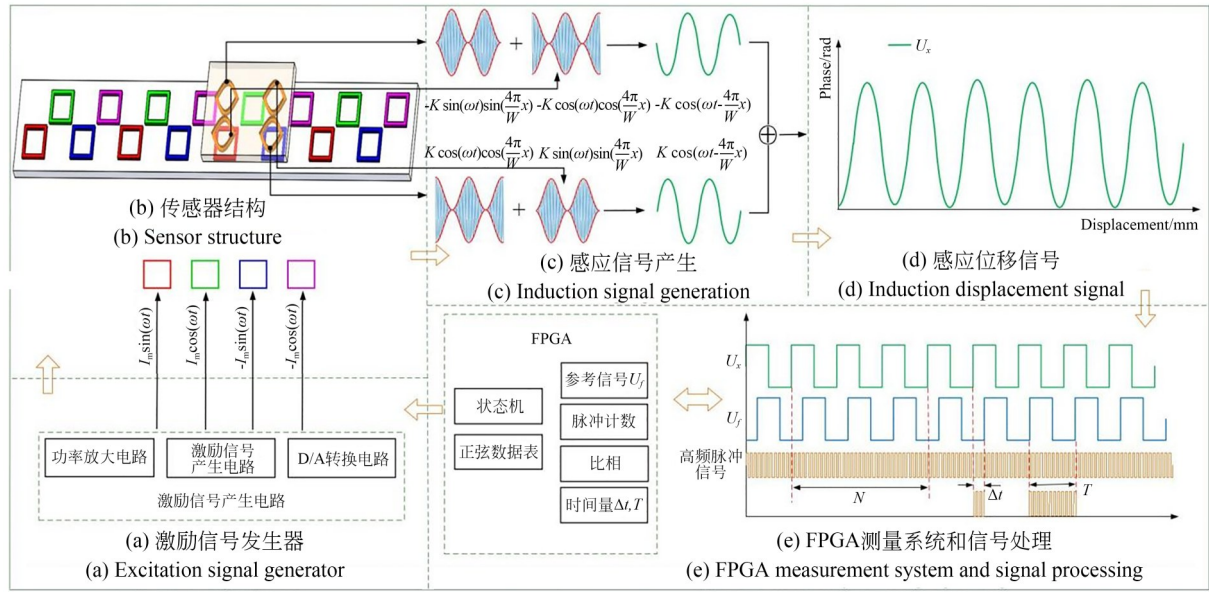


图 3 位移解算方案示意图

Fig. 3 Schematic diagram of displacement solution scheme

其中: L 为量程, N 为对极数, f_e 为激励信号频率, f_i 为用于插补相位差的高频时钟频率。

3 传感器误差分析

3.1 驻波信号幅值不等的误差分析

根据式(5)可知,被测位移主要体现为行波信号的相位变化,因此行波信号质量会直接影响传感器的测量精度。但加工误差与人为因素在测量过程中会导致测量误差,根据基于离散绕组的磁场式时栅位移传感器的结构和工作原理,这里对两路驻波信号的幅值不等、相位非正交造成行波信号发生的变化展开讨论。

磁场式时栅位移传感器在测量过程中,由于激励信号误差和安装误差的影响,合成行波信号的两路驻波信号幅值不等,使行波信号的相位与理论相位之间存在偏差。以正弦形感应绕组 A、B 为例,当感应绕组输出的信号幅值不等时,式(2)改写为:

$$\begin{cases} U_{A1} = K_A \cos(\omega t) \cos\left(\frac{4\pi}{W}x\right) \\ U_{B1} = K_B \sin(\omega t) \sin\left(\frac{4\pi}{W}x\right) \end{cases} \quad (8)$$

其中: K_A, K_B 分别为正弦形感应绕组 A、B 输出驻波信号的幅值。

三角函数辅助角公式如下:

$$a \sin(t) + b \cos(t) = \sqrt{a^2 + b^2} \sin\left(t + \arctan \frac{b}{a}\right). \quad (9)$$

根据式(9)对两路驻波信号进行叠加,得到的行波信号如下:

$$U_1' = U_{A1} + U_{B1} = \sqrt{K_A^2 \cos^2\left(\frac{4\pi}{W}x\right) + K_B^2 \sin^2\left(\frac{4\pi}{W}x\right)} \cdot \sin\left[\omega t + \arctan \frac{K_A \cos\left(\frac{4\pi}{W}x\right)}{K_B \sin\left(\frac{4\pi}{W}x\right)}\right]. \quad (10)$$

根据式(9)对式(4)进行变形,得到:

$$U_1 = K \sin\left[\omega t + \arctan \frac{\cos\left(\frac{4\pi}{W}x\right)}{\sin\left(\frac{4\pi}{W}x\right)}\right]. \quad (11)$$

将式(10)与式(11)的相位作差可得到由两路驻波信号幅值不等造成的误差,即:

$$e_1(x) = \frac{W}{2\pi} \left[\arctan \left(\frac{K_A \cos\left(\frac{4\pi}{W}x\right)}{K_B \sin\left(\frac{4\pi}{W}x\right)} \right) - \arctan \left(\frac{\cos\left(\frac{4\pi}{W}x\right)}{\sin\left(\frac{4\pi}{W}x\right)} \right) \right]. \quad (12)$$

反三角函数的表达式如下:

$$\arctan(a) + \arctan(b) = \arctan\left(\frac{a+b}{1-ab}\right). \quad (13)$$

根据式(13)对误差表达式进行简化,得到:

$$e_1(x) \approx \frac{W(K_A - K_B)}{2\pi(K_A + K_B)} \sin\left(2 \cdot \frac{4\pi}{W}x\right). \quad (14)$$

由上述分析可知,当合成行波信号的两路驻波信号的幅值不等时,测量结果会引入 2 次谐波误差。

3.2 驻波信号相位非正交分析

两路驻波信号在空间上的相位非正交,使得行波信号中引入误差,主要因为传感器产生了安装误差。此刻设正弦形感应绕组 A、B 输出的驻波信号的幅值相等、初相位不相等,则表达式为:

$$\begin{cases} U_{A2} = K \cos(\omega t) \cos\left(\frac{4\pi}{W}x + \varphi\right) \\ U_{B2} = K \sin(\omega t) \sin\left(\frac{4\pi}{W}x\right) \end{cases}, \quad (15)$$

其中 φ 为两路驻波信号空间上的相位差值。

根据叠加定理,两路驻波信号叠加产生的行波信号为:

$$U_1'' = U_{A2} + U_{B2} = \sqrt{K^2 \cos^2\left(\frac{4\pi}{W}x + \varphi\right) + K^2 \sin^2\left(\frac{4\pi}{W}x\right)} \cdot \sin\left[\omega t + \arctan\left(\frac{\cos\left(\frac{4\pi}{W}x + \varphi\right)}{\sin\left(\frac{4\pi}{W}x\right)}\right)\right]. \quad (16)$$

根据式(11)和式(12)可得由两路驻波信号空间相位非正交造成的误差公式,即:

$$e_2(x) \approx \frac{W}{2\pi} \cos\left(2 \cdot \frac{4\pi}{W}x + \frac{\varphi}{2}\right) \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) - \frac{W}{4\pi} \sin(\varphi). \quad (17)$$

由式(17)可知,当两路空间相位非正交的驻

波信号合成行波信号时,误差主要含有 0 次谐波(直流分量)和 2 次谐波。

4 仿真与误差分析

为研究激励信号误差和动尺的安装误差对传感器输出的行波信号的影响,使用 Maxwell 电磁仿真软件进行有限元仿真。激励信号误差为激励信号幅值不相同,动尺的安装误差一般分为 3 种情况:动尺相对于定尺沿 X 轴、Y 轴和 Z 轴发生了旋转(分别称为俯仰、翻转和偏摆),如图 4 所示。传感器的基本仿真参数设置如下:运动方向极距 W 为 24 mm,激励绕组的高度和宽度均为 5.8 mm,直径为 0.2 mm,感应绕组高度和宽度均为 6 mm,直径为 0.3 mm,感应绕组阻抗为 1 M Ω ,感应绕组和激励绕组的气隙高度为 0.6 mm。

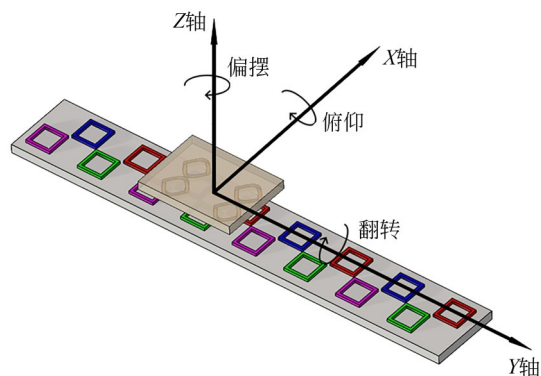


图 4 传感器动尺的不同安装姿态

Fig. 4 Different installation attitudes of sensor moving ruler

4.1 激励信号幅值不相同仿真

仿真中传感器的动尺移动 24 mm,感应信号刚好变化一个完整的周期。在正弦激励绕组和余弦激励绕组中通入设定好幅值的激励信号,得到在两路激励信号幅值不同的情况下仿真输出的行波信号,如图 5 所示。

计算图 5(a)~5(d)每条正弦曲线的初相位角,并与理论的初相位角相减,得到各空间位置的初相位误差,最后转换为对应的误差曲线,如图 6(a)所示,采用傅里叶变换分析误差曲线,结果如图 6(b)所示。

由图 6 可知:当两路激励信号的幅值为 1 A

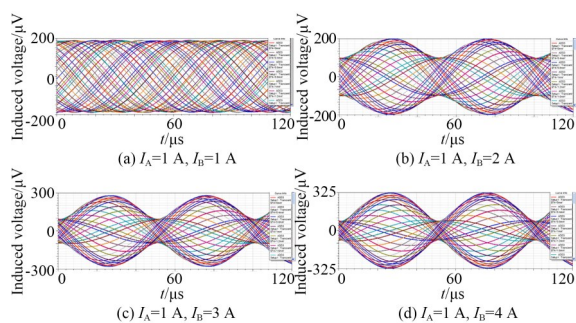


图5 对极内不同激励信号幅值下的仿真结果

Fig. 5 Simulation results under different excitation signal amplitudes within a pitch

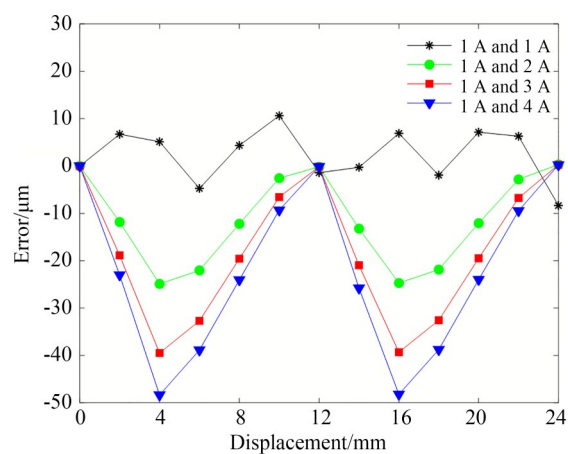
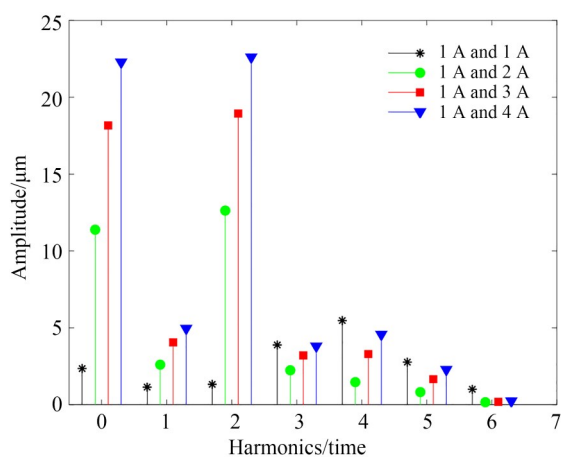
(a) 位移误差曲线
(a) Displacement error curves(b) 误差频谱
(b) Error spectra

图6 对极内不同激励信号幅值的误差曲线和误差频谱

Fig. 6 Displacement error curves and error spectra of different excitation signal amplitudes within a pitch

和 1 A, 位移误差的峰峰值为 $18.96 \mu\text{m}$; 当幅值为 1 A 和 2 A, 位移误差的峰峰值为 $25.21 \mu\text{m}$; 当

幅值为 1 A 和 3 A, 位移误差的峰峰值为 $39.77 \mu\text{m}$; 当幅值为 1 A 和 4 A, 位移误差的峰峰值为 $48.58 \mu\text{m}$ 。不同激励信号幅值对应的位移误差主要包含直流分量和 2 次谐波, 当两路激励信号的幅值差距逐渐变大, 直流分量和 2 次谐波的幅值明显增大。

4.2 沿 X 轴俯仰姿态的仿真

动尺相对于定尺绕 X 轴有一个俯仰角度 α , 如图 7 所示。在仿真模型中, 俯仰角度 α 分别设置为 $0^\circ, 1^\circ, 2^\circ$ 和 3° , 得到不同俯仰角度下仿真输出的行波信号, 如图 8 所示。

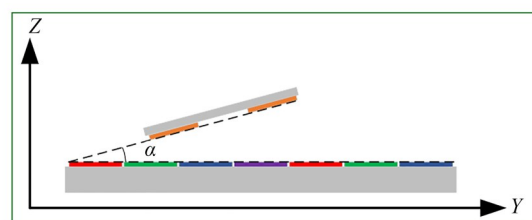


图7 动尺的俯仰示意图

Fig. 7 Tilting diagram of moving ruler

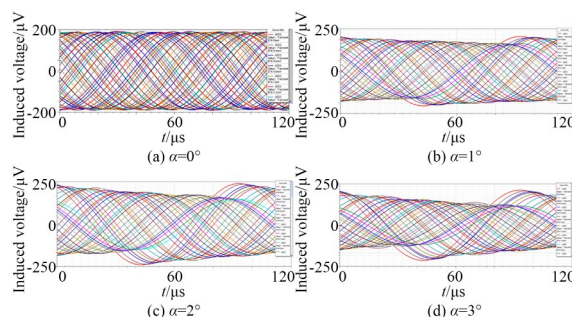
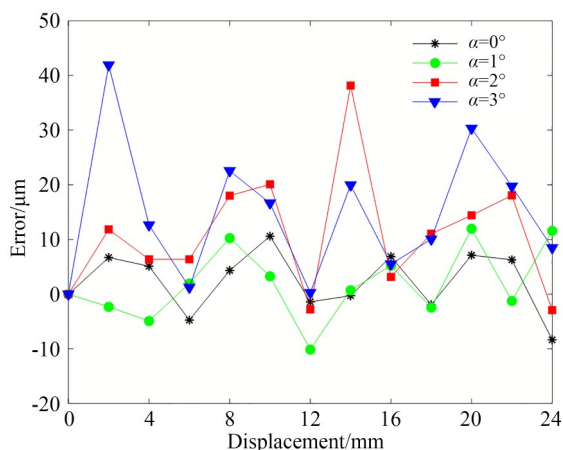


图8 对极内不同俯仰角度下的仿真结果

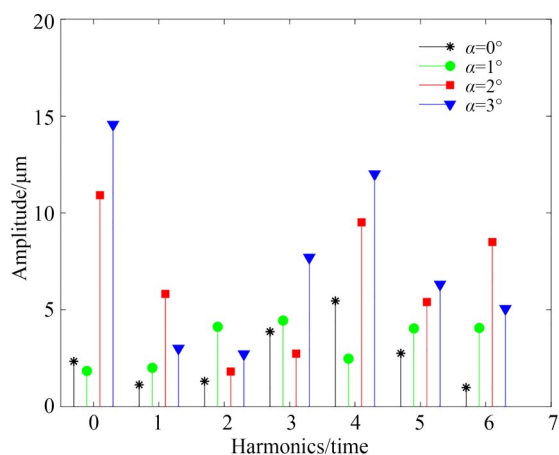
Fig. 8 Simulation results under different tilt angles within a pitch

计算图 8(a)~8(d) 中行波信号的初相位和理论初相位的误差, 得到不同俯仰角度的误差曲线, 如图 9(a) 所示, 采用傅里叶变换分析误差曲线, 结果如图 9(b) 所示。

由图 9 可知: α 为 0° 时, 位移误差的峰峰值为 $18.96 \mu\text{m}$; 当 α 为 1° 时, 位移误差的峰峰值为 $22.11 \mu\text{m}$; 当 α 为 2° 时, 位移误差的峰峰值为 $41.08 \mu\text{m}$; 当 α 为 3° 时, 位移误差的峰峰值为 $41.91 \mu\text{m}$ 。不同俯仰角度下对应的位移误差主要包含直流分量和 4 次谐波, 在 α 从 0° 增大到 1°



(a) 位移误差曲线
(a) Displacement error curves



(b) 误差频谱
(b) Error spectra

图 9 对极内不同俯仰角度的位移误差曲线和误差频谱
Fig. 9 Displacement error curves and error spectra for different tilt angles within a pitch

的过程中,直流分量和 4 次谐波的幅值减小,而在 α 从 1° 增大到 3° 的过程中,直流分量和 4 次谐波的幅值逐渐增大。

4.3 沿 Y 轴翻转姿态的仿真

动尺相对于定尺绕 Y 轴有一个翻转角度 β ,如图 10 所示。在仿真模型中,偏转角度 β 分别设置为 $0^\circ, 1^\circ, 2^\circ$ 和 3° ,得到不同翻转角度下仿真输出的行波信号,如图 11 所示。

计算图 11(a)~11(d)中行波信号的初相角和理论初相角的误差,得到不同翻转角度下的误差曲线,如图 12(a)所示,采用傅里叶变换分析误差曲线,结果如图 12(b)所示。

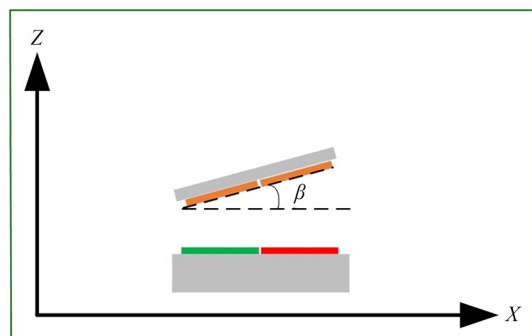


图 10 动尺的翻转示意图

Fig. 10 Flipping diagram of moving ruler

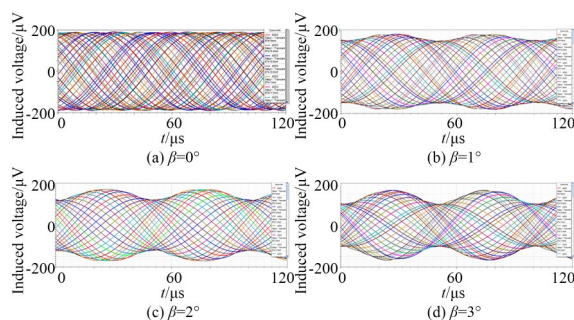
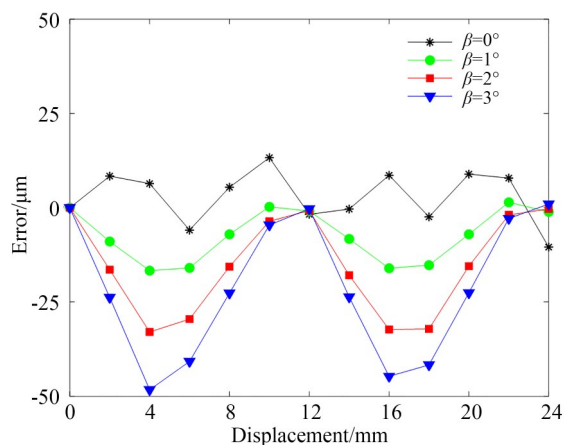


图 11 对极内不同翻转角度下的仿真结果

Fig. 11 Simulation results under different flip angles within a pitch

由图 12 可知:当 β 为 0° 时,位移误差的峰峰值为 $18.96 \mu\text{m}$;当 β 为 1° 时,位移误差的峰峰值为 $20.58 \mu\text{m}$;当 β 为 2° 时,位移误差的峰峰值为 $32.95 \mu\text{m}$;当 β 为 3° 时,位移误差的峰峰值为 $49.26 \mu\text{m}$ 。不同翻转角度下对应的位移误差主要包含直流分量和 2 次谐波,并随翻转角度的增大,直流分量和 2 次谐波的幅值也逐渐增大。



(a) 位移误差曲线
(a) Displacement error curves

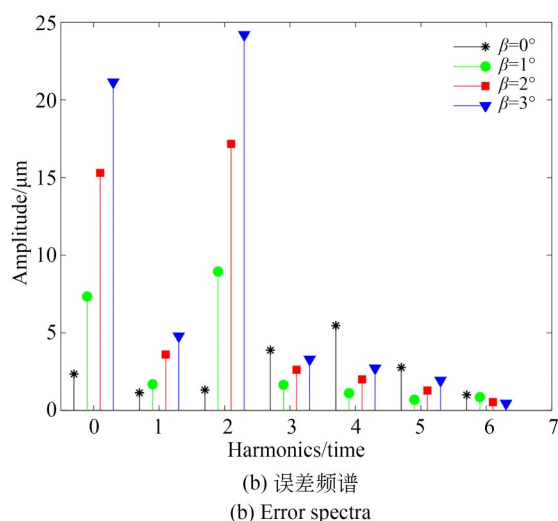


图 12 对极内不同翻转角度的位移误差曲线和误差频谱
Fig. 12 Displacement error curves and error spectra for different flip angles within a pitch

4.4 沿 Z 轴偏摆姿态的仿真

动尺相对于定尺绕 Z 轴有一个偏摆角度 θ , 如图 13 所示。在仿真模型中, 设置偏摆角度 θ 分别为 0° , 1° , 2° 和 3° , 得到不同偏摆角度下仿真输出的行波信号, 如图 14 所示。

计算图 14(a)~14(d) 中行波信号的初相角和理论初相角的误差, 得到不同偏摆角度下的误

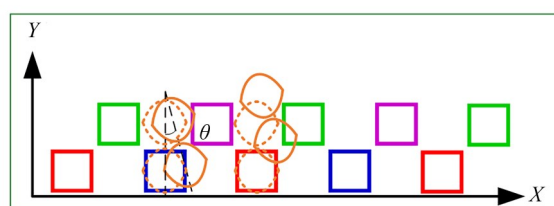


图 13 动尺的偏摆示意图
Fig. 13 Deflection of moving ruler

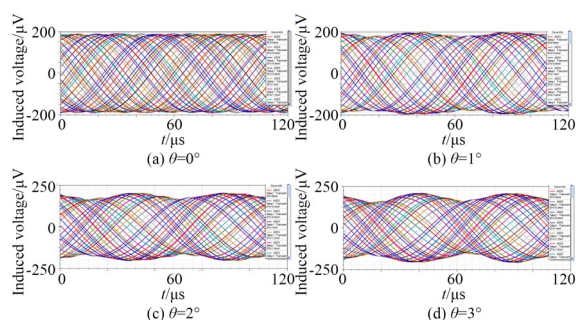


图 14 对极内不同偏摆角度下的仿真结果
Fig. 14 Simulation results under different deflection angles within a pitch

差曲线, 如图 15(a) 所示, 采用傅里叶变换分析误差曲线, 结果如图 15(b) 所示。

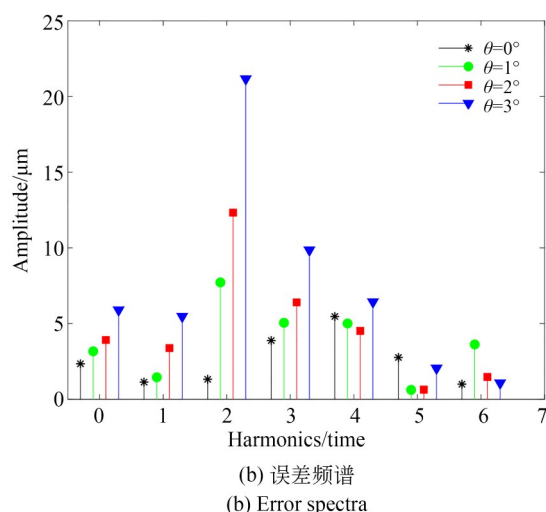
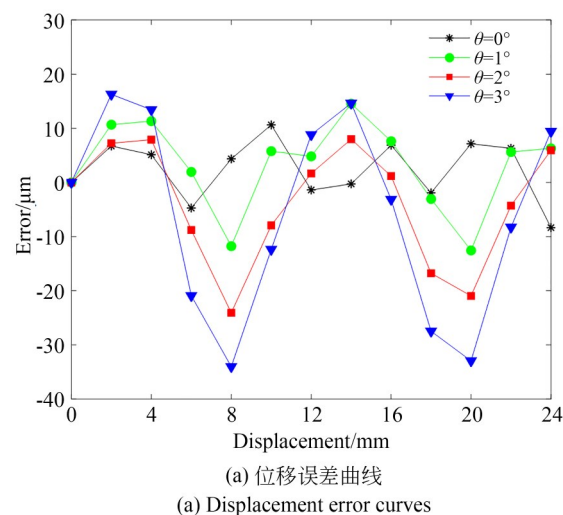


图 15 对极内不同偏摆角度的位移误差曲线和误差频谱
Fig. 15 Displacement error curves and error spectra for different deflection angles within a pitch

由图 15 可知: 当 θ 为 0° 时, 位移误差的峰峰值为 $18.96 \mu\text{m}$; 当 θ 为 1° 时, 位移误差的峰峰值为 $27.11 \mu\text{m}$; 当 θ 为 2° 时, 位移误差的峰峰值为 $32.07 \mu\text{m}$; 当 θ 为 3° 时, 位移误差的峰峰值为 $50.3 \mu\text{m}$ 。不同偏摆角度下对应的位移误差主要包含 2 次谐波, 且随着偏摆角度的增大, 2 次谐波的幅值也逐渐增大。

综上所述, 仿真结果与理论推导基本相同, 两路激励信号的幅值不相同、动尺沿 X 轴俯仰姿态、沿 Y 轴翻转姿态和沿 Z 轴偏摆姿态在测量精

度中主要引入直流分量误差和 2 次谐波误差。经分析,动尺沿 Z 轴偏摆姿态误差对测量精度的影响最大,沿 Y 轴翻转姿态误差影响次之,沿 X 轴俯仰姿态对测量精度的影响最小。

5 实 验

采用工艺成熟、价格相对低的印制电路板技术制作传感器样机,如图 16 所示。激励绕组在空间上间隔 1/4 极距等间隔、均匀排布。激励绕组分别通入频率为 10 kHz 的正/余弦激励信号,通入同相的激励信号的激励绕组按相反绕向串联。



图 16 传感器的定尺与动尺

Fig. 16 Fixed and moving scales of sensors

采用美国 AEROTECH 公司制造的直线电机模组 PRO190LM-0500-T1-E3-MS1F-PL2-TAS, 配置高性能驱动器 BLMC-192-A, 搭建如图 17 所示的实验平台,整个系统的重复精度为 $\pm 0.5 \mu\text{m}$, 系统的整体定位精度为 $\pm 1 \mu\text{m}$,分辨率为 10 nm。



图 17 时栅位移传感器误差特性实验平台

Fig. 17 Experimental platform for error characteristics of time-gate displacement sensor

实验中,动尺与定尺分别固定在导磁基体上,气隙高度为 0.6 mm,由直线电机带动传感器的动尺沿导轨做直线运动。在运动过程中,传感器动尺的感应绕组通过与定尺产生的空间磁场耦合,感应得到直线电机运动平台的位移信号。感应信号在放大、滤波并整形形成方波信号后,与 FPGA 内部的参考信号进行比相,通过高频时钟脉冲进行计数得到位移测量值。实验采用 Renishaw 激光干涉仪 XL-80 作为测量基准标定传感器的测量精度,得到传感器的位移测量误差,整个实验平台结构如图 18 所示。

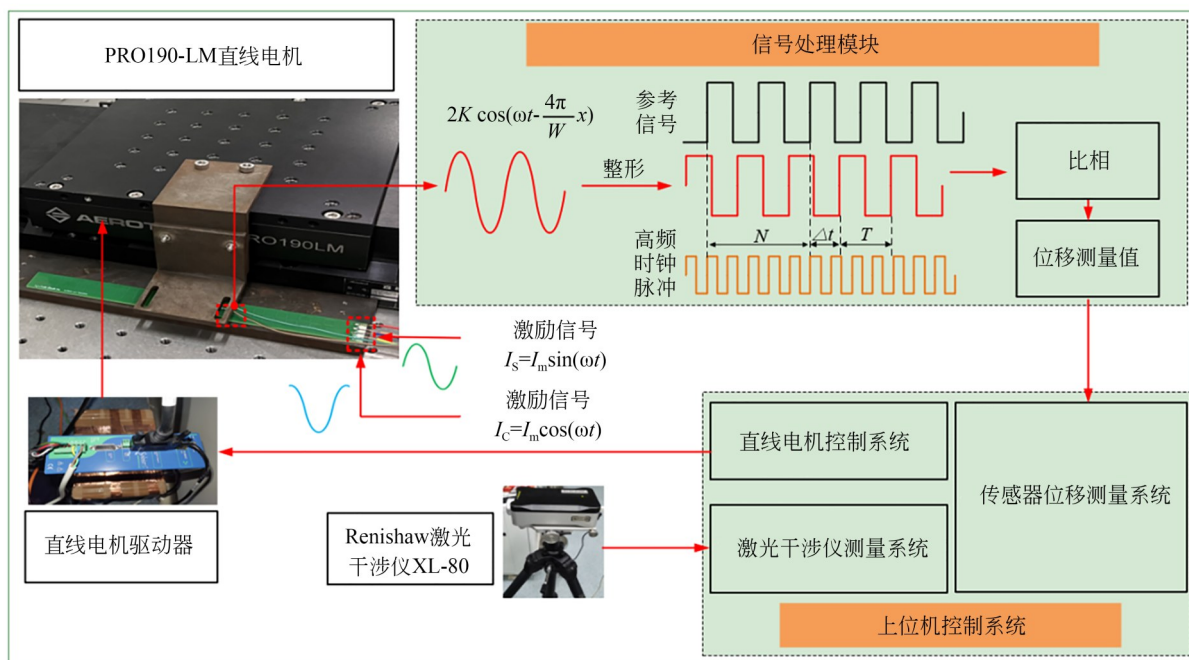


图 18 时栅位移传感器样机

Fig. 18 Prototype of time-gate displacement sensor

图 18 为传感器样机,直线电机带动动尺匀速运动 24 mm,即 1 个对极,每运动 1 mm 信号处理电路的 FPGA 芯片同步采集激光干涉仪数据和传感器运动位移数据。传感器安装较为理

想,通过设置两路激励信号的幅值不同,进行对极内精度实验,获得如图 19(a)和 19(b)所示的对极内不同激励信号幅值的测量误差曲线和误差频谱。

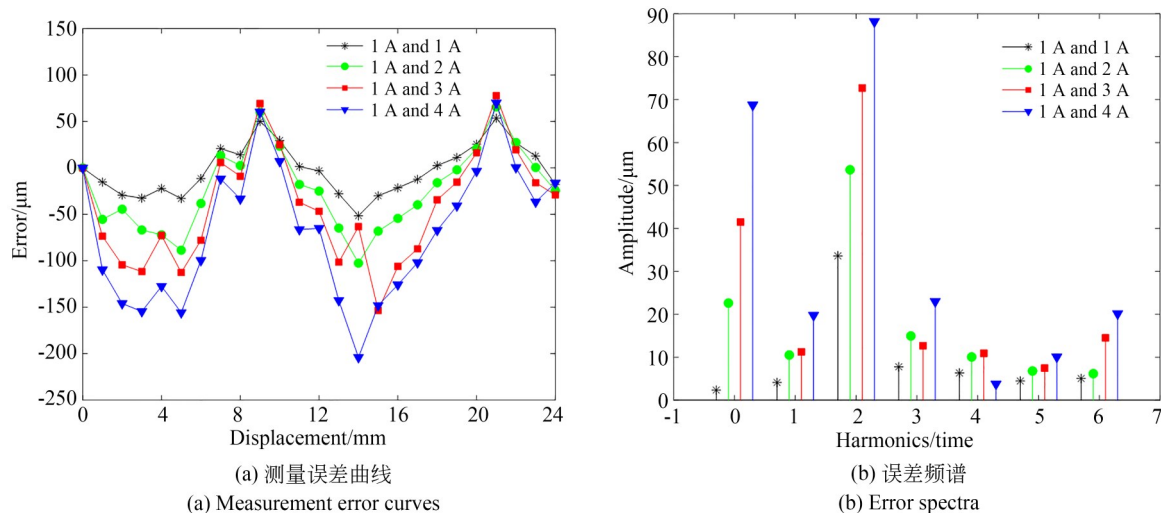


图 19 对极内不同激励信号幅值的测量误差曲线和误差频谱

Fig. 19 Measurement error curves and error spectra of different excitation signal amplitudes within a pitch

然后,在两路激励信号的幅值为 1 A 和 1 A 的条件下,对动尺在不同轴上发生安装偏差产生的测量误差进行实验。动尺沿 X 轴的俯仰角度 α 分别为 0° , 1° , 2° 和 3° 时得到的测量误差曲线如图 20(a)所示,采用傅里叶变换进行分析,得到如图

20(b)所示的误差频谱。

重新安装动尺,沿 Y 轴的翻转角度 β 分别为 0° , 1° , 2° 和 3° 时所得到的测量误差曲线如图 21(a)所示,采用傅里叶变换进行分析,得到如图 21(b)所示的误差频谱。

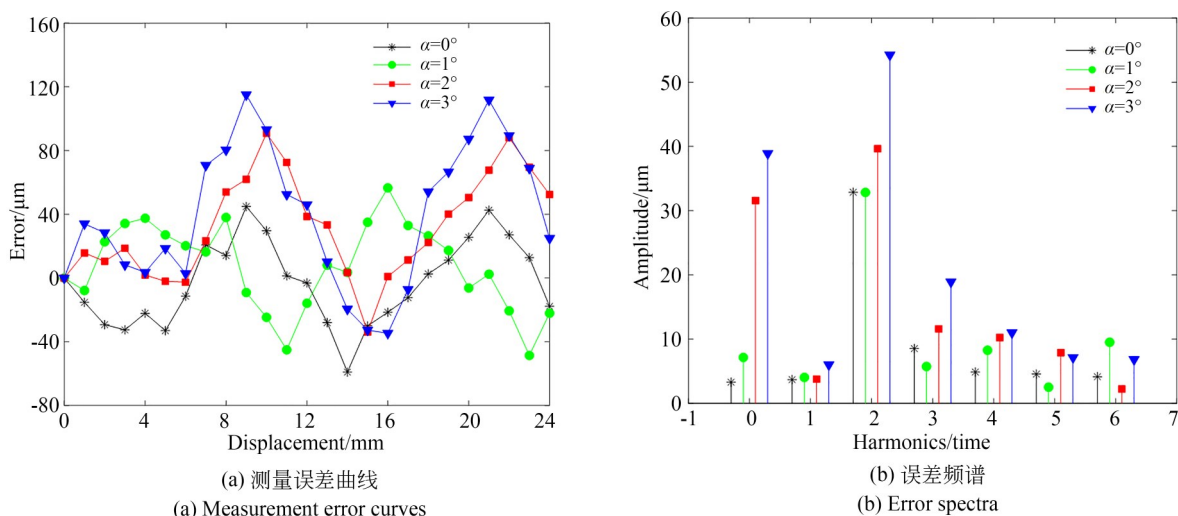


图 20 对极内不同俯仰角度的测量误差曲线和误差频谱

Fig. 20 Measurement error curves and errors spectra for different tilt angles within a pitch

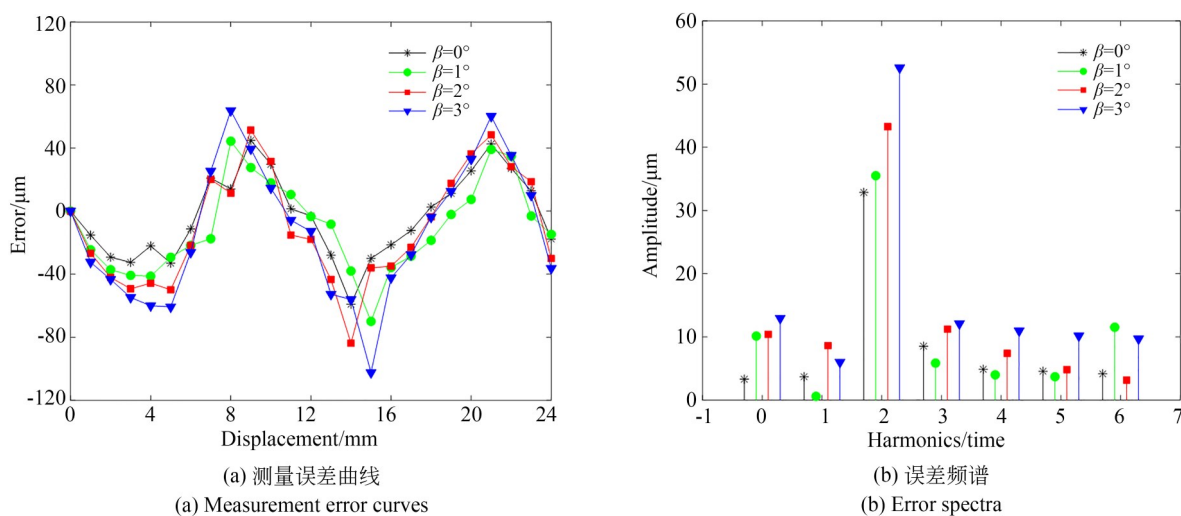


图 21 对极内不同翻转角度的测量误差曲线和误差频谱

Fig. 21 Measurement error curves and error spectra for different flip angles within a pitch

再次安装动尺,沿 Z 轴的偏摆角度 θ 为 0° , 1° , 2° 和 3° 时得到的测量误差曲线如图 22(a) 所示,进行傅里叶变换得到如图 22(b) 所示的误差频谱。

整理实验数据可知:(1)对极内不同激励信号幅值为 1 A 和 1 A, 1 A 和 2 A, 1 A 和 3 A, 1 A 和 4 A 时,测量误差的峰峰值分别为 103.95, 168.23, 231.31 和 274.22 μm 。当激励信号相同时,测量误差中包含的主要误差成分为 2 次谐波;当激励信号不同时,测量误差中包含的主要误差

成分为直流分量和 2 次谐波,且随两路激励信号的幅值之差越大,直流分量和 2 次谐波的幅值也越大。

(2)动尺的俯仰角度 α 为 0° , 1° , 2° 和 3° 时,测量误差的峰峰值分别为 103.95, 104.63, 124.72, 149.67 μm 。当俯仰角度 α 为 0° 时,测量误差的主要成分为 2 次谐波;当俯仰角度从 1° 开始增大时,测量误差的主要成分为直流分量和 2 次谐波,且随俯仰角度的增大,直流分量和 2 次谐波的幅值也增大。

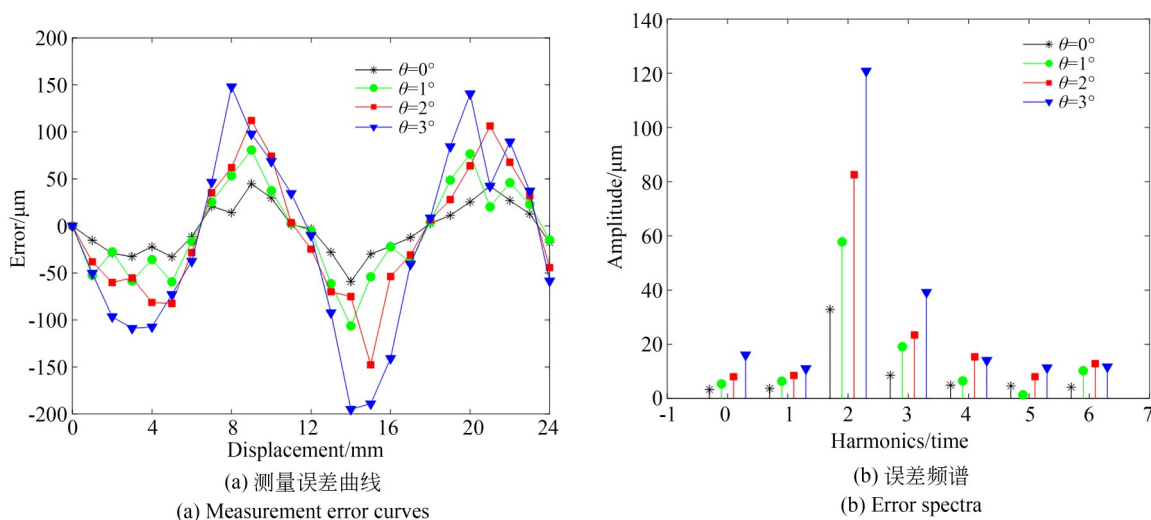


图 22 对极内不同偏摆角度的测量误差曲线和误差频谱

Fig. 22 Measurement error curves and error spectra for different deflection angles within a pitch

(3)动尺的翻转角度 β 为 $0^\circ, 1^\circ, 2^\circ$ 和 3° 时,测量误差的峰峰值分别为103.95,114.32,135.12,166.29 μm 。不同翻转角度下测量误差的主要成分相同,为2次谐波,且随偏转角度的增大,2次谐波的幅值也增大。

(4)动尺的偏摆角度 θ 为 $0^\circ, 1^\circ, 2^\circ$ 和 3° 时,测量误差的峰峰值分别为103.95,187.07,259.82,342.97 μm 。不同偏摆角度下测量误差的主要成分相同,为2次谐波,且随偏摆角度的增大,2次谐波的幅值也增大。

在整量程144 mm内,传感器安装较为理想、激励信号幅值为1 A和1 A,得到的原始测量误差曲线如图23所示,测量误差为 $-59.1\sim 44.85\ \mu\text{m}$,测量误差的峰峰值为103.95 μm 。采用谐波修正法^[18]对原始测量误差进行修正,修正后测量误差为 $-2.85\sim 1.65\ \mu\text{m}$,测量误差的峰峰值为4.5 μm 。表1为激励信号误差和安装误差对整量程内测量精度的影响。

由于传感器的量程 L 为144 mm,激励绕组和感应绕组的对极数为6,激励信号频率为10 kHz,FPGA中进行插补的高频时钟脉冲频率为1.6 GHz,由式(7)计算得到该传感器的测量分辨力理论上可以达到0.15 μm 。

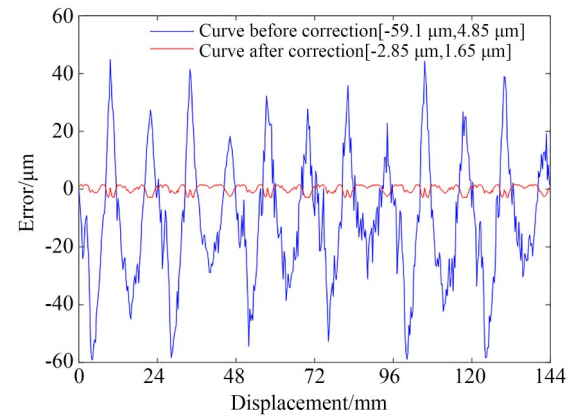


图23 整量程内谐波修正前后的测量误差曲线
Fig. 23 Measurement error curves before and after harmonic correction within full-range

表1 激励信号误差和安装误差对整量程内测量精度的影响

Tab. 1 Influence of excitation signal error and mounting error on measurement accuracy over entire scale (μm)

激励信号幅值 /角度	谐波频次的幅值						
	直流分量	6次谐波	12次谐波	18次谐波	24次谐波	30次谐波	36次谐波
1 A和1 A	3.41	2.85	34.09	5.25	5.28	4.08	2.03
1 A和2 A	23.41	8.35	55.80	9.74	9.73	8.42	1.07
1 A和3 A	42.93	7.73	90.69	14.57	8.25	4.47	13.37
1 A和4 A	71.11	14.53	90.69	14.57	8.25	4.47	13.37
$\alpha=1^\circ$	7.39	2.79	33.39	3.61	9.75	5.43	6.19
$\alpha=2^\circ$	32.66	3.28	40.82	7.81	7.73	6.87	1.26
$\alpha=3^\circ$	40.23	9.82	54.72	12.77	8.70	6.07	5.10
$\beta=1^\circ$	10.49	1.19	36.42	2.83	3.35	6.39	8.18
$\beta=2^\circ$	10.76	7.32	45.15	6.77	7.16	3.62	1.04
$\beta=3^\circ$	13.40	4.74	55.48	6.07	8.20	12.64	4.53
$\theta=1^\circ$	5.56	5.11	59.80	13.97	6.84	1.91	11.05
$\theta=2^\circ$	8.27	7.05	85.74	14.77	13.62	11.73	9.25
$\theta=3^\circ$	16.63	11.74	125.45	26.96	10.87	13.59	9.83

6 结 论

针对高精度位移传感器难以加工的难题,本文利用组合测量原理,通过设计毫米级激励绕组和感应绕组的排布方式与形状实现微米级测量

精度,研制了一种基于离散绕组的磁场式时栅位移传感器。对磁场式时栅位移传感器在激励信号幅值不等和动尺沿X轴俯仰姿态、Y轴翻转姿态和Z轴偏摆姿态下的误差特性进行了仿真和实验验证。仿真与实验结果表明:在对极内,两

路激励信号幅值不等和动尺沿 X 轴俯仰姿态对测量误差中的直流分量和 2 次谐波分量的影响较大,对其他频次谐波的影响较小;而动尺沿 Y 轴翻转姿态和沿 Z 轴偏摆姿态对测量误差中的 2 次谐波分量的影响较大,对其他频次谐波的影响较小。因此,激励信号误差和安装误差在测量精度中引入直流分量误差和 2 次谐波误差,其中 2 次谐波误差为主要误差成分,仿真结果与实验结果基本相同。

在对极内和整量程中,两路激励信号幅值不等和不同的安装误差对测量精度均有较大影响。安装误差中,动尺沿 Z 轴偏摆姿态对测量精度的影响最大,动尺沿 Y 轴翻转姿态对测量精度的影

响次之,动尺沿 X 轴俯仰姿态对测量精度的影响最小。因此,在基于离散绕组的磁场式时栅位移传感器的安装过程中,应着重避免动尺沿 Y 轴发生翻转和动尺沿 Z 轴发生偏摆,确保两路激励信号的幅值相同,以保证传感器的测量精度。

最后进行整量程精度实验,在 144 mm 量程内,传感器原始误差的峰峰值为 103.95 μm ,经谐波修正后测量误差的峰峰值为 4.5 μm ,传感器的分辨力为 0.15 μm 。综上表明,通过毫米级尺寸的激励和感应绕组实现微米级测量精度,可显著降低传感器的制造难度,具有重要的工程应用价值。

参考文献:

- [1] YU H, WAN Q, MU Z, *et al.* Novel nano-scale absolute linear displacement measurement based on grating projection imaging[J]. *Measurement*, 2021, 182: 109738.
- [2] GAO W, KIM S W, BOSSE H, *et al.* Measurement technologies for precision positioning [J]. *CIRP Annals*, 2015, 64(2): 773-796.
- [3] KUMAR A S A, GEORGE B, MUKHOPADHYAY S C. Technologies and applications of angle sensors: a review[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(6): 7195-7206.
- [4] 王磊, 卢秉恒. 中国工作母机产业发展研究[J]. *中国工程科学*, 2020, 22(2): 29-37.
WANG L, LU B H. Research on the development of machine tool industry in China [J]. *Strategic Study of CAE*, 2020, 22(2): 29-37. (in Chinese)
- [5] 王国超, 颜树华, 高雷, 等. 光栅干涉位移测量技术发展综述[J]. *激光技术*, 2010, 34(5): 661-664, 716.
WANG G CH, YAN SH H, GAO L, *et al.* Development of displacement measurement technologies based on grating interferometry[J]. *Laser Technology*, 2010, 34(5): 661-664, 716. (in Chinese)
- [6] 蔡崇文, 叶国永, 刘红忠. 基于 Vold-Kalman 滤波的光栅谐波动态抑制方法[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(3): 17-24.
CAI CH W, YE G Y, LIU H ZH. Dynamic suppression of harmonic distortion for optical encoders via Vold-Kalman filtering[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(3): 17-24. (in Chinese)
- [7] 于连栋, 鲍文慧, 赵会宁, 等. 新型圆光栅测角误差补偿方法及其应用[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(8): 1719-1726.
YU L D, BAO W H, ZHAO H N, *et al.* Application and novel angle measurement error compensation method of circular gratings[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(8): 1719-1726. (in Chinese)
- [8] Heidenhain LIP201 datasheet [EB/OL]. https://www.heidenhain.com.cn/fileadmin/pdb/media/img/208960-ZH_Exposed_Linear_Encoders_zh_WEB.pdf.
- [9] 李民康, 向显嵩, 周常河, 等. 基于超精密激光直写系统制作二维光栅[J]. *光学学报*, 2019, 39(9): 0905001.
LI M K, XIANG X S, ZHOU CH H, *et al.* Fabrication of two-dimensional grating based on ultra-precision laser direct writing system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(9): 0905001. (in Chinese)
- [10] 刘正坤, 谭鑫, 徐向东, 等. 变栅距光栅光谱分辨研究[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(7): 1153-1157.
LIU ZH K, TAN X, XU X D, *et al.* Study on resolving power of varied line-space grating[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(7): 1153-1157. (in Chinese)
- [11] 王笑一, 卢璐卿, 雷贤卿, 等. 透射光栅位移传感器中光栅副 Yaw 向夹角误差的影响和监测[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(10): 2154-2164.
WANG X Y, HU L Q, LEI X Q, *et al.* Influence and monitoring of yaw angle error of grating pair in

- transmission grating displacement sensor[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(10): 2154-2164. (in Chinese)
- [12] 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]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(6): 667-677. (in Chinese)
- [13] 武亮,彭东林,汤其富,等. 寄生式时栅位移传感器测量原理与结构优化[J]. 仪器仪表学报, 2016, 17(5):976-984.
WU L, PENG D L, TANG Q F, *et al.* Measurement principle and structure optimization of parasitic time grating displacement sensor[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 17(5):976-984. (in Chinese)
- [14] 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. (in Chinese)
- [15] 杨洪涛,章刘沙,周姣,等. 寄生式时栅安装误差对传感器测量精度的影响[J]. 光学精密工程, 2016, 24(2), 319-326.
YANG H T, ZHANG L SH, ZHOU J, *et al.* Effect of installation error of parasitic time grating on sensor measuring accuracy[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(2) 319-326.
- [16] 鲁进,陈锡侯,汤其富,等. 变耦型时栅传感器及测头姿态对测量误差的影响[J]. 光学精密工程, 2016, 24(9):2271-2282.
LU J, CHEN X H, TANG Q F, *et al.* Variable coupling time grating sensor and effects of sensor-head attitudes on measuring errors[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(9): 2271-2282. (in Chinese)
- [17] 孙世政,周清松,韩宇,等. 不同安装模态对嵌入式时栅测量误差的影响[J]. 光学精密工程, 2020, 28(10):2290-2300.
SUN S ZH, ZHOU Q S, HAN Y, *et al.* Effect of different mounting modes on embedded time grating measuring errors[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(10):2290-2300. (in Chinese)
- [18] 陈自然,赵有祥,刘小康,等. 基于检测单元的永磁同步直线电机位置检测新技术[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(12): 48-55.
CHEN Z R, ZHAO Y X, LIU X K, *et al.* A novel position detection technique for the permanent magnet synchronous linear motor using position detection units[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(12): 48-55. (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:



何智颖(1993—),男,重庆黔江人,博士,助理研究员,2016年、2022年于西南交通大学分别获得学士、博士学位,主要从事信号分析、数值仿真与自动化控制的研究。E-mail: he_zhiying@cqut.edu.cn