

文章编号 1004-924X(2022)06-0667-11

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

陈自然^{1,2*}, 黎锡^{1,2}, 冯曦颖^{1,2}, 陈鸿友^{1,2}, 张桁潇^{1,2}, 余海游^{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:针对传统绝对式位移传感器复杂编码和严苛光刻加工的难题,提出了一种“精机定位+精机测量”的差极结构绝对式时栅位移测量新方法。传感器定尺分为两列对极数相差1的激励绕组,每列激励绕组由空间正交排布的正/余弦绕组构成。通过施加正交激励电流,采用动尺正弦形感应绕组拾取时变磁场,得到两路行波信号。通过信号解耦以精机定位和精机测量的组合测量方式实现绝对位移测量。重点开展了安装高度和安装误差对测量精度的影响分析。实验结果表明安装偏角会导致对极内直流电平和二次谐波误差明显增大,修正后传感器在量程90 mm的范围内,测量精度为 $\pm 1.2 \mu\text{m}$,分辨力为 $0.1 \mu\text{m}$ 。

关键词:绝对式位移测量;时栅传感器;差极结构;测量误差分析

中图分类号:TH711 文献标识码:A doi:10.37188/OPE.20223006.0667

Research on absolute linear time-grating displacement sensor with one-pole-difference structure and analysis of measurement error characteristics

CHEN Ziran^{1,2*}, LI Xi^{1,2}, FENG Xijie^{1,2}, CHEN Hongyou^{1,2}, ZHANG Hengxiao^{1,2}, YU Haiyou^{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: czr@cqut.edu.cn*

Abstract: Focusing on the problems of complex coding and strict lithography for absolute displacement sensors, a “precise number of pole + precise displacement within a pole” method of absolute displacement measurement using time-grating sensors with a one-pole-difference structure is proposed. The fixed ruler of the sensor comprises two rows of excitation windings with a one-pole-difference structure, which comprises cosine windings and sine windings arranged orthogonally in space. The orthogonal excitation current is applied to the excitation windings, and sinusoid induction windings in the moved ruler are employed to

收稿日期:2021-11-12;修订日期:2021-12-08.

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 52175495, No. 51775075);中国博士后科学基金项目(No. 2021M691392);重庆理工大学研究生创新项目(No. clgyx20202075)

induce a time-varying magnetic field. Then, the two traveling wave signals with one-pole-difference are obtained. After signal decoupling, the absolute displacement can be obtained using the “precise number of pole + precise displacement within pole” method. Measurement accuracy caused by installation height and installation error is analyzed. The results demonstrate that the deflection angles of installation led to an amplitude increases in DC and second harmonics, and after error correction, the measuring accuracy reached $\pm 1.2 \mu\text{m}$ within the range of 90 mm. Theoretically, the resolution reached $0.1 \mu\text{m}$.

Key words: absolute displacement measurement; time-grating sensor; one-pole-difference structure; measurement error analysis

1 引言

精密位移测量技术及器件是高端数控机床、科学仪器装置和国防军工系统等高精尖装备的核心技术和关键功能部件,其水平直接决定着系统的整体性能。工业的不断发展,迫切需求能够实现高精度、高分辨力的绝对式位移传感器。相比增量式位移传感器,绝对式位移传感器可有效消除累计误差,提高测量精度和加工效率,是现今位移传感器研究的热点^[1-3]。

绝对式光栅位移传感器是目前研究最多、应用最广的绝对式位移传感器,其测量原理是将不同宽度和不同间距的栅线以绝对位置数据编码的形式直接制作到标尺上用来确定绝对位置。目前主流的三种编码技术分别为单码道伪随机码编码方式、多轨二元伪随机码编码方式和多轨P元伪随机码编码方式。单码道伪随机码编码方式由增量编码与绝对编码相结合,围绕M-序列方式生成全程位置单值函数的伪随机码,绝对码道代表周期位置,增量码道代表周期内细分位置,组合后方得高分辨力的绝对位置值^[4-8]。多轨二元伪随机码编码方式在单码道基础上又多加了几道伪随机码道,上一条码道比下一条码道少一个周期^[9-11]。多轨P元伪随机码编码方式是在原有的单码道伪随机编码上多增加了几位编码,有效地降低了误码率^[12-14]。为降低读取编码的误码率,海德汉公司创新性地设计了一套冗余结构的光学系统,将照明系统发出的平行光源等分成两路,同时反射到光栅主尺的两条不同码道上,大大提高光栅尺读数系统的稳定性和可靠性^[15]。无论哪种编码都需要考虑在有限的空间范围内

布置大量无重复位置编码,并要考虑编码可扩展、易处理、容错、冗余等多方面因素,因而技术难度高^[16-17]。另外,易受光源和编码表面污染引起的散射影响等问题,使得图像采集耗时长,解码算法较复杂^[18-19]。西方发达国家将光栅绝对编码列为国家顶级战略技术和商业机密加以封锁。以上问题都严重制约着我国绝对式光栅的进一步发展。

针对上述问题,本文在前期原创成果增量式时栅位移传感器的基础上,提出一种“精机定位+精机测量”多尺度组合测量技术实现高精度绝对位移测量,可有效回避精密绝对式位移传感器对编码技术和超精密加工的过度依赖,实现精密绝对位移测量。

2 绝对位移传感器结构及测量原理

2.1 绝对位移传感器结构

绝对式时栅位移传感器的结构主要由动尺和定尺组成,如图1(a)所示。其中动尺包含两列感应绕组和导磁基体,定尺包含两列激励绕组和导磁基体。动尺的感应绕组由 n 个正弦形线圈首尾相接串联而成,如图1(b)所示。定尺的激励绕组由正弦绕组s和余弦绕组c按照“几”字形空间相差四分之一极距均匀排列,如图1(c)所示。单列激励绕组和感应绕组分解图如图1(d)所示。在量程 L 范围内,将具有 N 对极数的激励绕组命名为激励绕组1,其极距为 W_1 ,将具有 $N-1$ 对极数的激励绕组命名为激励绕组2,其极距为 W_2 。为增加信号强度,减少线圈匝数,将定尺和动尺均固定在导磁基体上。

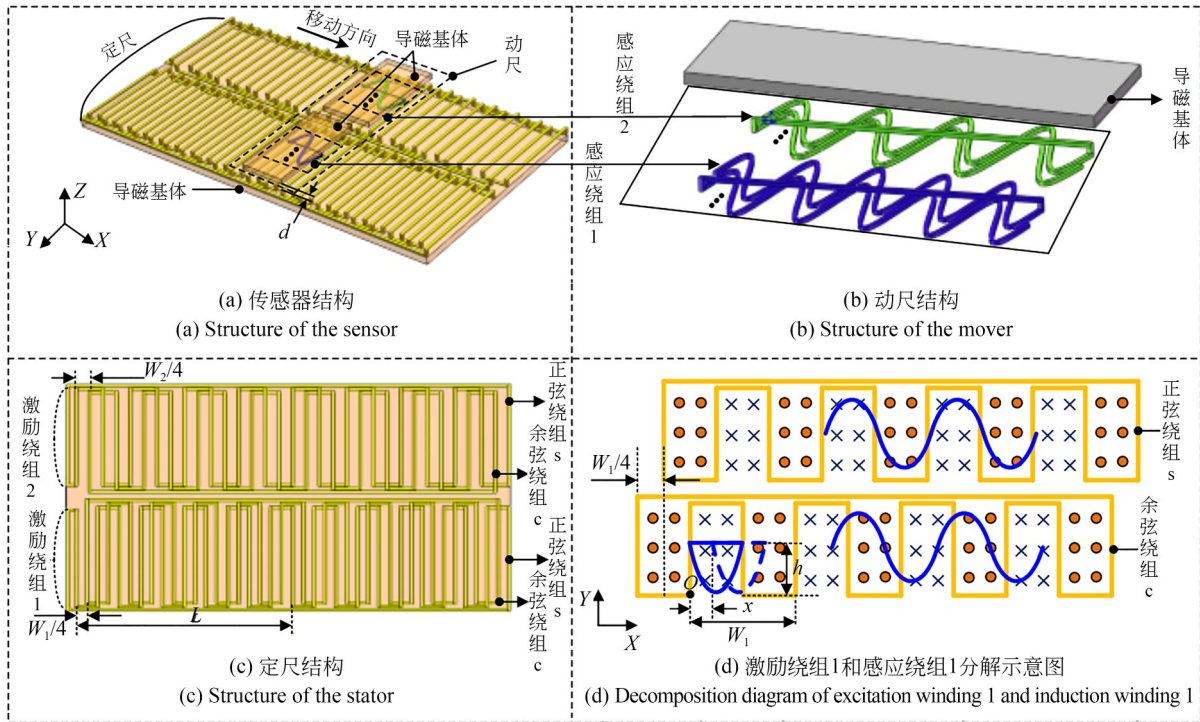


图 1 传感器结构示意图

Fig. 1 Diagram of sensor structure

2.2 位移传感原理

以激励绕组 1 和感应绕组 1 为例,对单列位移传感原理进行分析。当定尺激励绕组 1 中的正弦绕组 s 和余弦绕组 c 分别通入正弦交变电流 $i_s = I_m \sin(\omega t)$ 和余弦交变电流 $i_c = I_m \cos(\omega t)$ 时,产生的磁场磁感应强度分别为 B_s 和 B_c ,其表达式为:

$$\begin{cases} B_s = kI_m \sin(\omega t) \\ B_c = kI_m \cos(\omega t) \end{cases}, \quad (1)$$

其中: k 为比例系数, I_m 为交变电流的幅值, ω 为交变电流的频率。

在 B_s 和 B_c 的共同作用下,激励绕组 1 周围形成随时间均匀变化的时变磁场。根据法拉第电磁感应定律,动尺感应绕组 1 的半正弦形线圈沿 X 轴方向移动过程中拾取时变磁场,设半正弦线圈的数学模型为:

$$F(x) = h \sin\left(\frac{2\pi x}{W_1}\right). \quad (2)$$

图 1(d) 下半部分为余弦绕组 c 在交变电流 i_c 作用下,半正弦形线圈拾取磁场的示意图。设

半正弦线圈的高为 h , 宽为 $W_1/2$, O 为半正弦线圈的运动始点, x 为其位移量。余弦绕组 c 产生的磁感应强度在矩形范围内沿 X 轴方向呈正负交替变化。因此在极距 W_1 范围内,根据变上下限积分,可求得半正弦线圈在 $[0, W_1/2]$ 和 $[W_1/2, W_1]$ 两个区间的磁通量 $\Phi_1(t, x)$, 如式 (3) 所示:

$$\begin{aligned} \Phi_1(t, x) = & -kI_m h \frac{W_1}{\pi} \cos(\omega t) \sin\left(\frac{2\pi x}{W_1}\right), x \in [0, W_1]. \quad (3) \end{aligned}$$

同理,当半正弦线圈在通入正弦交流电流 i_s 时,其在极距 W_1 内产生的磁通量 $\Phi_2(t, x)$ 为:

$$\begin{aligned} \Phi_2(t, x) = & kI_m h \frac{W_1}{\pi} \sin(\omega t) \cos\left(\frac{2\pi x}{W_1}\right), x \in [0, W_1]. \quad (4) \end{aligned}$$

由于式 (3)、式 (4) 是感应绕组 1 半正弦形线圈在激励绕组 1 的余弦绕组 c 和正弦绕组 s 沿 X 轴方向运动一个极距的磁通量。所以 n 个半正弦形线圈串联的感应绕组 1 沿 X 轴在整量程内运动 N 个极距,磁通量包络线以极距为单元周期性变化 N 次,其感应电动势为:

$$\begin{cases} \epsilon_1 = n \frac{d\Phi_1(t, x)}{dt} = nk\omega \frac{W_1}{\pi} I_m h \sin(\omega t) \sin\left(N \frac{2\pi x}{L}\right) \\ \epsilon_2 = n \frac{d\Phi_2(t, x)}{dt} = nk\omega \frac{W_1}{\pi} I_m h \cos(\omega t) \cos\left(N \frac{2\pi x}{L}\right) \end{cases} \quad (5)$$

感应绕组 1 则可得到感应电动势 ϵ_1, ϵ_2 的叠加信号 U_1 :

$$U_1 = \epsilon_1 + \epsilon_2 = K \cos\left(\omega t - N \frac{2\pi x}{L}\right), \quad (6)$$

其中, $K = nk\omega \frac{W_1}{\pi} I_m h$ 。

同理, 感应绕组 2 在运动 $N-1$ 个极距范围内, 感应信号为:

$$U_2 = K \cos\left(\omega t - (N-1) \frac{2\pi x}{L}\right). \quad (7)$$

2.3 绝对位移信号解耦模型

感应信号 U_1, U_2 都包含了绝对位移信息 x , 由于两列周期性传感结构对极数相差为 1, 在整个测量范围内, 两列感应信号相差一个周期, 因而可以采用“精机定位+精机测量”进行绝对位移信息解耦。

将感应绕组的输出信号通入信号处理电路进行信号处理, 得到整形后的方波信号, 并将其传入 FPGA 芯片中, 与其内部产生的同频、相位固定的参考信号 U_i 进行比相, 采用高频时钟插补技术进行计数得到 U_1, U_2 信号对极内的相位差 φ_1, φ_2 。而将两路感应信号互相比相得到的相位差为 $\Delta\varphi$ 。当传感器动尺相对于定尺沿 X 轴方向距离为 x 时, 则动尺相对于定尺移动的位移 x 与移动的对极数 n_1, n_2 及对极内相位差 φ_1, φ_2 之间的关系为:

$$x = n_1 W_1 + \frac{\varphi_1}{2\pi} W_1 = n_2 W_2 + \frac{\varphi_2}{2\pi} W_2, \quad (8)$$

其中, 对极数 n_1, n_2 可由下式求得:

$$\begin{aligned} n_1 &= \text{ent} \left[\frac{\Delta\varphi L}{2\pi W_1} \right] \\ n_2 &= \text{ent} \left[\frac{\Delta\varphi L}{2\pi W_2} \right] \end{aligned} \quad (9)$$

传感器的测量分辨力可以表示为:

$$R = \frac{L}{N} \cdot \frac{f_e}{f_r}, \quad (10)$$

其中: L 是量程, N 是对极数, f_e 是激励信号频率, f_r 是用于插补相位差的时钟频率。

传感器的线性度可表示为:

$$\gamma_L = \pm \frac{e(x)_{\max}}{L} \cdot 100\%, \quad (11)$$

其中: $e(x)_{\max}$ 是非线性最大偏差, L 是满量程输出。

图 2 为绝对位移测量原理图, 包含激励信号的产生、感应信号处理和位移信号解算三大部分。其中激励信号 i_s, i_c 是由 FPGA 产生的, 如图 2(a) 所示。通过 D/A 转换和功率放大后将产生的激励信号 i_s, i_c 分别通入正弦、余弦激励绕组, 如图 2(b) 所示。采用动尺上的感应绕组感应磁场, 得到两路行波信号 U_1, U_2 , 如图 2(c) 所示。经过放大、滤波、过零比较等电路处理后得到两路整形后的方波信号, 分别与参考信号 U_i 比相得相位差为 φ_1, φ_2 , 并将两方波信号比相得到相位差 $\Delta\varphi$, 通过高频时钟脉冲插补计数转换得到位移量, 如图 2(e) 所示。图 2(f)、(g) 分别为传感器精机定位与精机测量的示意图。图 2(g) 中, n_1 是精机定位中动尺移动的对极数, 由式 (9) 可计算得到。精机测量是对极内的位移值进行精确测量, 如图 2(g) 中的 x_1 表示的位移。最后将精机定位测量结果与精机对极内测量结果如式 (8) 相加, 可得到最后绝对式位移测量值。

3 测量误差和精度分析

3.1 安装高度对测量精度影响分析

激励电流产生的感应磁场强度在不同气隙高度的磁场分布不同, 为了分析传感器不同气隙高度对测量精度的影响, 通过 Solidworks 建立三维仿真模型, 设置不同的气隙高度, 在 Ansoft Maxwell 中进行有限元电磁场仿真^[20]。在一个对极 18 mm 范围内, 5 种不同气隙高度所感应的位移信号的测量误差如图 3 所示。

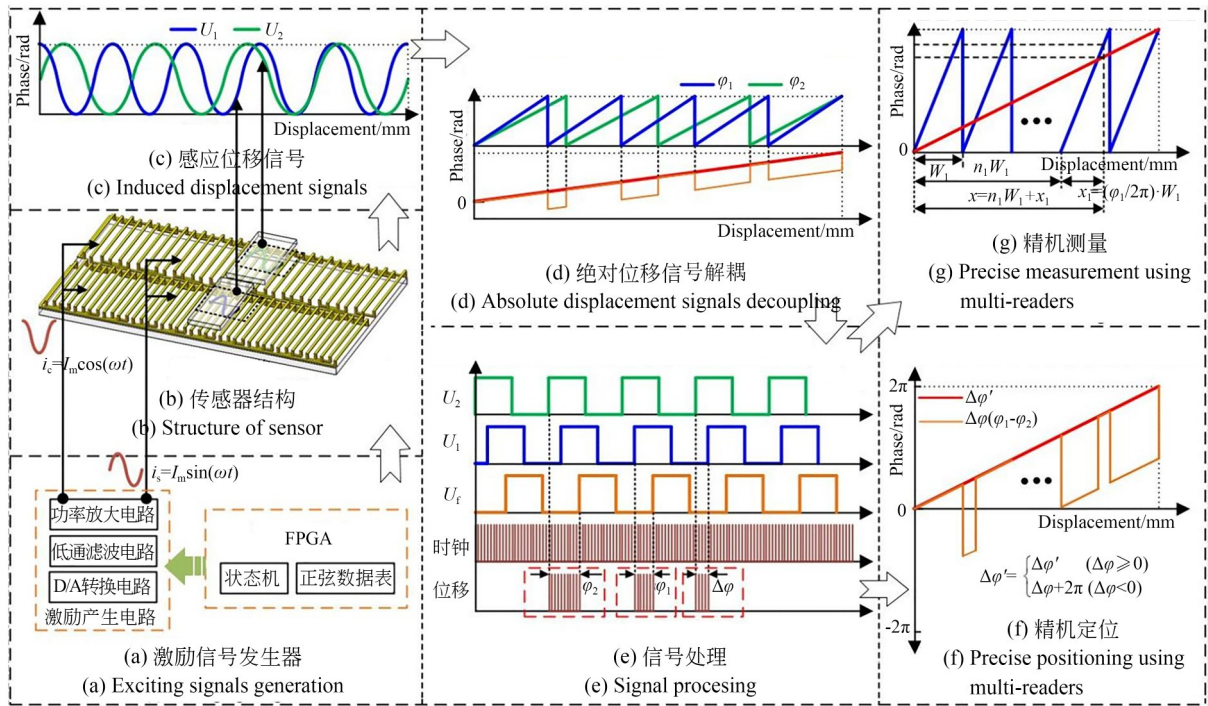


图 2 绝对位移测量原理图

Fig. 2 Schematic diagram of absolute displacement measurements

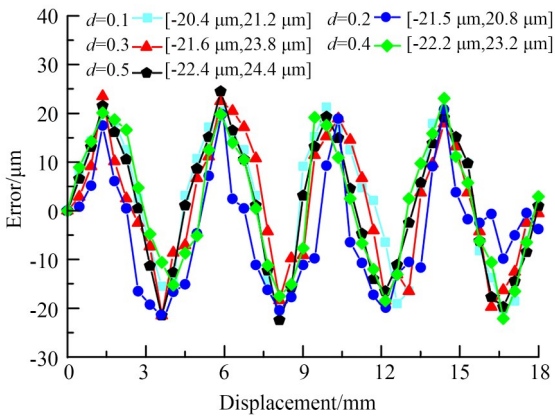


图 3 传感器不同气隙对极内的测量误差曲线

Fig. 3 Measurement error curves in different air gaps of the sensor

对感应绕组 1 在一个对极内不同气隙高度的位移测量误差进行傅立叶变换分析,得到如图 4 所示的测量误差谐波频谱图。分析结果表明在对极内不同气隙高度对应的位移测量误差主要包含直流分量、一次谐波和四次谐波。当气隙高度 d 大于 0.2 mm 时,随着气隙 d 逐渐增大,直流分量和一次谐波呈增大趋势,四次谐波则呈现不断减小趋势。而当气隙高度 d 小于 0.2 mm 时,

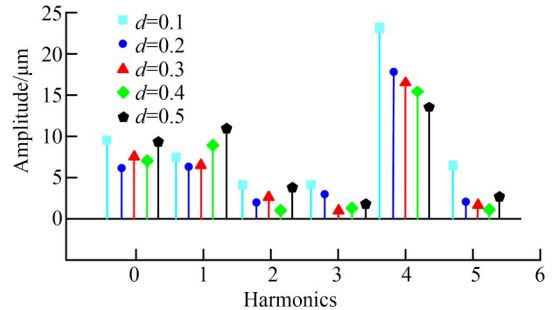


图 4 不同气隙高度对应极内测量误差频谱图

Fig. 4 Spectrogram of measurement error for different heights of air gap

由于受正、余弦交变电流较大的影响,二次、三次和五次谐波误差有明显增加。究其原因在于气隙高度越低,磁感应强度越强,各谐波成分幅值也明显较大。随着气隙高度不断增加,高次谐波幅值衰减明显。综合考虑感应信号幅值、测量误差及谐波成分等因素,采用气隙高度 d 为 0.2 mm。

3.2 安装偏转角对测量精度影响分析

针对传感器安装偏转角导致的空间相位非正交误差进行讨论,如图 5 所示。安装时左边的

感应半正弦线圈中心点相对于原有的位置沿X轴负方向产生了一 Δx 偏差,而右边的半正弦则相反,这种安装偏差会导致两正弦形线圈感应的两路驻波的空间相位非正交。

以激励绕组1为例,由于相位偏差是对应关系,设正弦路为基准,余弦路驻波信号在空间上相对于正弦路偏差的角度为 α ,此时传感器感应

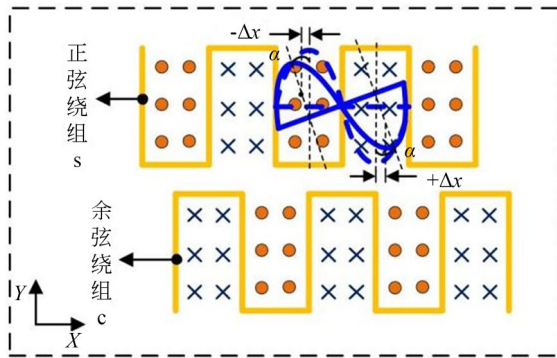


图5 传感器安装偏转

Fig. 5 Sensor installation with a deflection angle

信号 U_1 为:

$$U_1 = K \sin(\omega t) \sin\left(\frac{2\pi x}{W_1}\right) + K \cos(\omega t) \cos\left(\frac{2\pi x}{W_1} + \alpha\right). \quad (12)$$

由于三角函数公式为:

$$a \sin \theta + b \cos \theta = \sqrt{a^2 + b^2} \sin\left(\theta + \arctan \frac{b}{a}\right). \quad (13)$$

则由式(12)、(13)可得:

$$U_1 = \sqrt{K^2 \cos^2\left(\frac{2\pi}{W_1} x + \alpha\right) + K^2 \sin^2\left(\frac{2\pi}{W_1} x\right)} \cdot \sin\left(\omega t + \arctan \frac{\cos\left(\frac{2\pi}{W_1} x + \alpha\right)}{\sin\left(\frac{2\pi}{W_1} x\right)}\right). \quad (14)$$

由式(14)可得测量误差 $e(x)$ 为:

$$e(x) = \frac{W_1}{2\pi} \left(\arctan \frac{\cos\left(\frac{2\pi}{W_1} x + \alpha\right)}{\sin\left(\frac{2\pi}{W_1} x\right)} - \arctan \frac{\cos\left(\frac{2\pi}{W_1} x\right)}{\sin\left(\frac{2\pi}{W_1} x\right)} \right) = \frac{W_1}{2\pi} \cos\left(2 \frac{2\pi}{W_1} x + \frac{\alpha}{2}\right) \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) - \frac{W_1}{4\pi} \sin \alpha. \quad (15)$$

因此,当传感器安装偏转角度误差导致的两路驻波信号在空间上非正交时,其引入的测量误差 $e(x)$ 在对极内表现为直流误差和二次谐波误差。

采用空气气隙高度 d 为0.2 mm进行仿真,反偏转方式如图5所示,将感应绕组1的线圈按正、反方向分别偏转 0.5° 、 1° 进行仿真,仿真结果显示当偏转角度增大,对极内测量误差呈现明显增加趋势,如图6所示。采用傅立叶变换对测量误差进行分析,得到如图7所示的测量误差频谱图。分析结果表明对极内的测量误差主要集中在直流分量、二次谐波和四次谐波,其中直流分量和二次谐波误差在前六次谐波分量中占比分别为24.7%和39.2%。结合上述理论分析可知

感应绕组1的线圈偏转会引入直流误差和二次谐波误差分量,与仿真结果相吻合,仿真证明了理论分析的正确性。

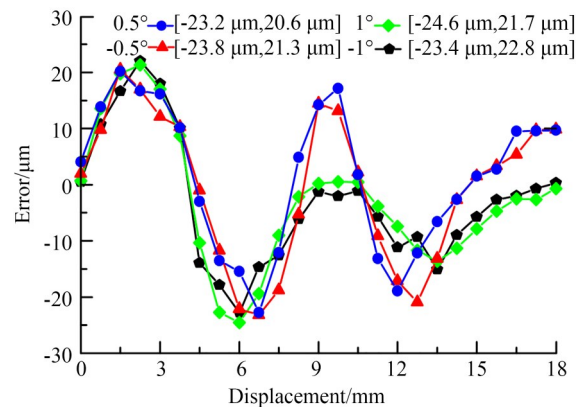


图6 不同偏转角的对极内测量误差

Fig. 6 Measurement errors within a pole for different deflection angles

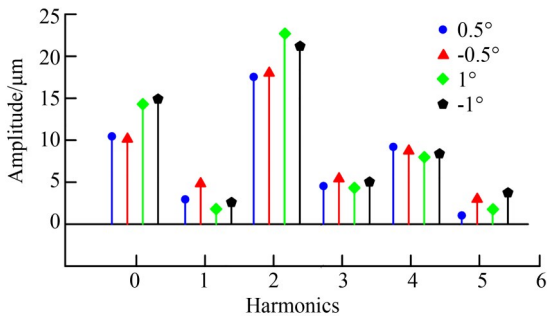


图 7 不同偏转角对极内的测量误差频谱图

Fig. 7 Spectrogram of measurement error within a pole for different deflection angles

4 实验研究

为了检测基于差极结构的绝对式直线位移传感器的测量精度,搭建了如图 8 所示的实验平台,其中:①为激光干涉仪上位机,②为直线电机控制系统,③为传感器精度检测上位机,④为电源模块,⑤为信号处理电路板,⑥为 Tektronix 示波器,⑦为传感器样机,⑧为直线电机,⑨为 Renishaw 激光干涉仪 XL-80。直线电机采用美国 AEROTECH 公司的制造的直线电机模组 PRO190LM-0500-TT1-E3-CMS1-LF-PL2-TAS,配置高性能驱动器 BLMC-192-A,系统重复精度为 $\pm 0.5 \mu\text{m}$,系统整体定位精度 $\pm 1 \mu\text{m}$,分辨力为 10 nm 。传感器采用 PCB 工艺加工而成。实验中将传感器动尺和定尺分别固定于导磁钢基体上,通过直线电机运动平台带动传感器的感应绕组沿导轨做直线移动。感应的两路行波信号经过信号处理转换成两路方波,其相位之

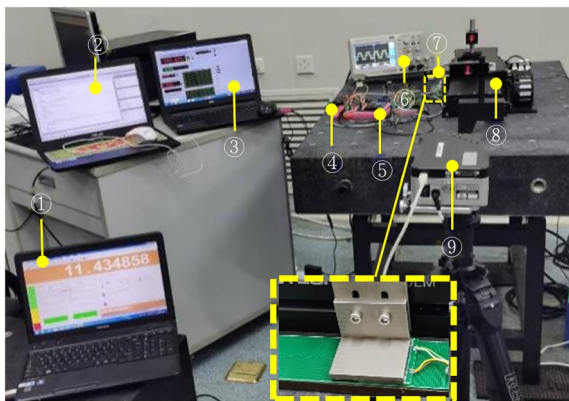


图 8 实验平台

Fig. 8 Platform of the experiment

差作为精机定位,定位动尺运动位移对应的对极数。感应绕组 1 的行波信号作为精机测量,测量对极内的位移量,两者组合实现绝对位移测量。

实验采用精度为 $\pm 0.5 \times 10^{-6}$ 的 Renishaw 激光干涉仪 XL-80 作为测量基准标定传感器。图 9 所示为传感器精机一个对极 18 mm,气隙高度分别为 0.1 mm、0.2 mm、0.3 mm 的测量误差曲线,采用傅里叶变换进行分析,得到如图 10 所示的误差频谱图。实验数据表明:在对极内不同气隙高度对应的位移测量误差主要包含直流分量、一次谐波和四次谐波。当气隙高度 d 大于或小于 0.2 mm 时,直流分量和一次谐波呈增大趋势,而四次谐波则随气隙增大呈现不断减小趋势。实验结果与仿真结果相吻合,因此,采用气隙高度 d 为 0.2 mm 较合理。

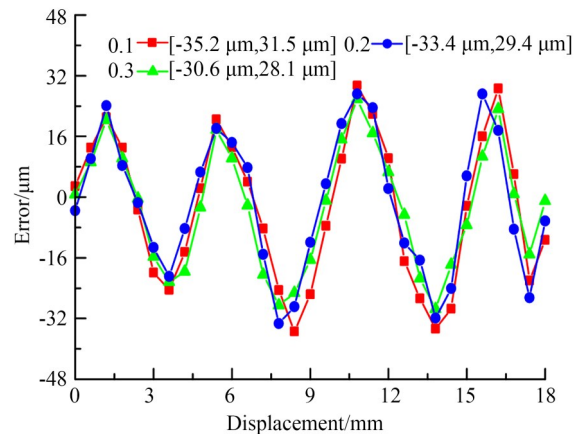


图 9 传感器不同气隙对极内的实测误差曲线

Fig. 9 Actual measurement error curves within a pole for different air gaps of the sensor

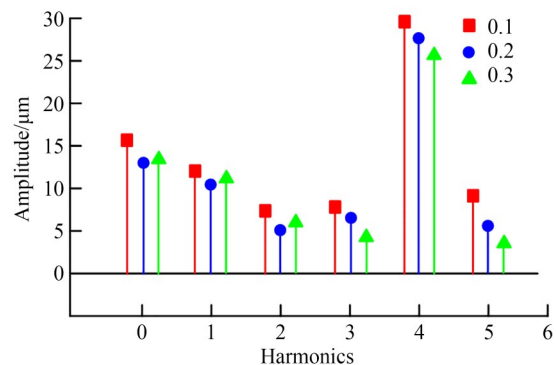


图 10 不同气隙高度对应极内实测误差频谱图

Fig. 10 Actual spectrogram of measurement error within a pole for different heights of air gap

图 11 所示为传感器精机一个对极 18 mm 内的测量误差曲线,分别对应感应绕组 1 沿正方向分别偏转 0° 、 0.5° 、 1° 时所得到的测量误差曲线。采用傅里叶变换进行分析,得到如图 12 所示的误差频谱图。实验数据表明:在无偏转时,测量误差谐波成分主要为四次谐波,偏转 0.5° 和 1° 时的谐波分量主要为直流分量和二次谐波,且幅值随偏转的角度增大而增大。在谐波分量中,四次谐波主要是由定尺绕组中正弦绕组和余弦绕组制造误差所引起的,而直流分量和二次谐波则是由于感应绕组安装时发生偏转引入的。

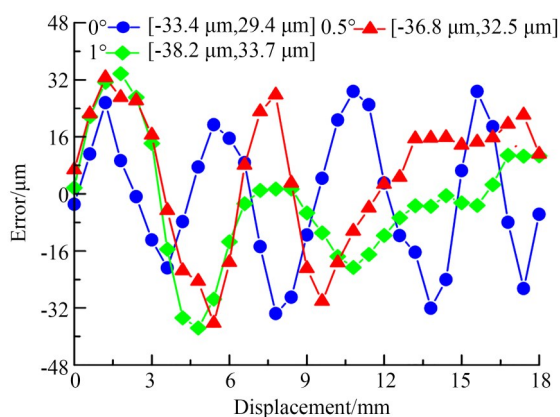


图 11 精机极距内的测量误差

Fig. 11 Measurement error within a pole using multi-readers

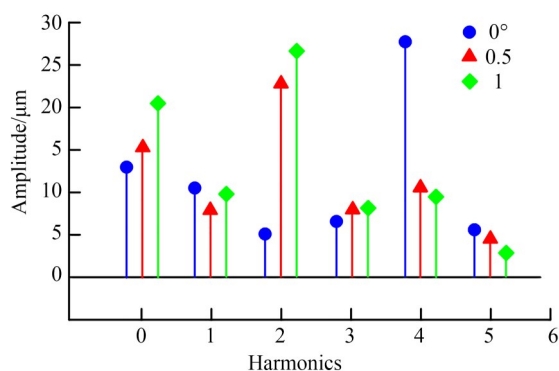


图 12 精机极距内的误差频谱图

Fig. 12 Spectrogram of measurement error within a pole using multi-readers

整量程 90 mm 范围内,感应绕组 1 信号和感应绕组 2 信号组合后的精机定位误差如图 13 所示,修正前测量误差峰峰值为 $81.4 \mu\text{m}$,通过对对

极内的测量误差曲线采用傅里叶谐波修正方法进行拟合修正^[3],修正后的测量误差峰峰值为 $5.7 \mu\text{m}$ 。由于感应绕组 1 对应的对极极距为 18 mm,无论是原始测量误差还是修正后的测量误差都远小于对极极距,所以可以在量程范围内实现精机定位运动位移对极数。

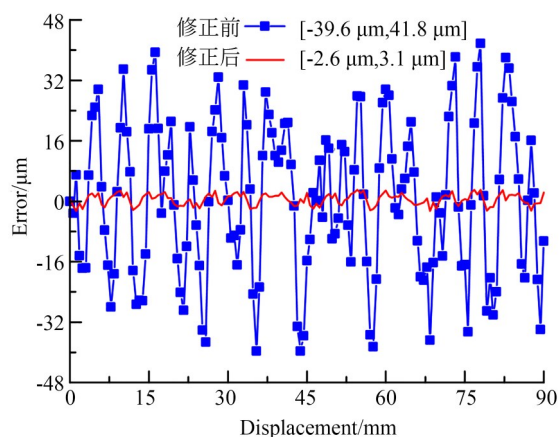


图 13 修正前后精机定位误差

Fig. 13 Positioning errors using multi-readers before and after compensation

整量程修正前后系统测量误差数据如图 14 所示,修正前原始测量误差的峰峰值为 $58.6 \mu\text{m}$,修正后的峰峰值为 $2.3 \mu\text{m}$ 。精机定位误差和精机测量误差主要由多对极绕组整量程的制造误差和传感器安装误差引起的,磁场互扰会引入一些高频谐波误差,后期可通过接地和屏蔽的方式

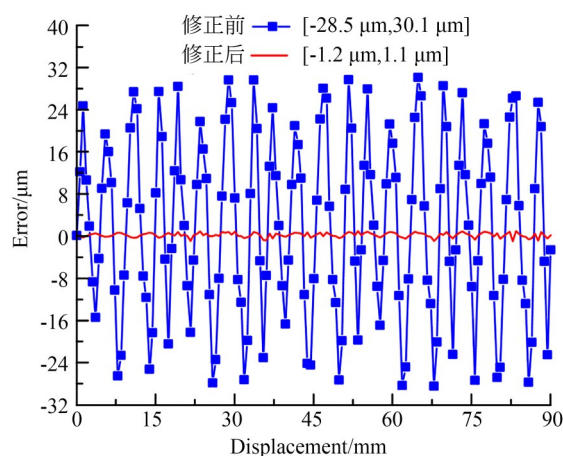


图 14 修正前后系统测量误差

Fig. 14 System measurement errors before and after error correction

加以改善。

绝对式时栅位移传感器的量程 L 为 90 mm, 由于激励绕组 1 和感应绕组 1 的对极数为 5, 激励信号频率为 10 kHz, 而 FPGA 中进行插补的高频时钟脉冲频率为 1.6 GHz, 由式(10)计算得到该传感器的测量分辨力理论上可以达到 $0.1 \mu\text{m}$ 。并且, 传感器精机测量的非线性最大偏差为 $30.1 \mu\text{m}$, 满量程输出为 90 mm, 由式(11)计算整量程的原始测量线性度为 0.033%。

实验采用精度为 $\pm 0.5 \times 10^{-6}$ 的 Renishaw 激光干涉仪 XL-80 作为测量基准标定传感器测量精度对传感器进行了三次重复定位精度实验, 实验得到的测量误差如图 15 所示。实验结果表明: 传感器在量程 90 mm 内的重复定位精度为 $\pm 1.1 \mu\text{m}$ 。

5 结 论

针对传统绝对式位移传感器复杂编码和严苛光刻加工的难题, 本文提出了一种基于“精机定位+精机测量”技术的绝对式时栅位移测量新方法。利用“感应绕组面”实现对测量位移信号的精度调控。采用“精机定位+精机测量”多尺度组合测量技术构建大量程范围内的绝对位移

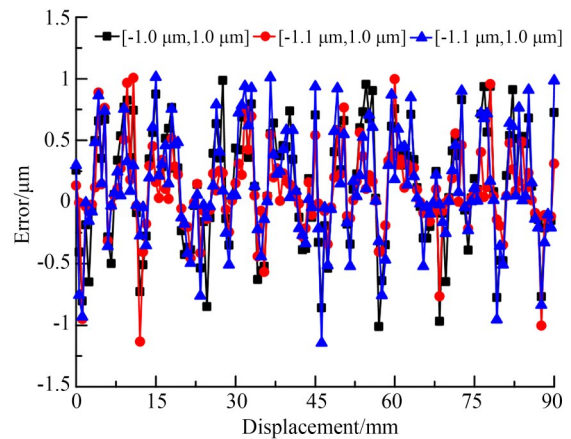


图 15 传感器重复定位精度测量误差

Fig. 15 Measurement errors of sensor repeated positioning accuracy

测量模型。搭建实验平台进行精度实验, 得出以下结论:

(1) 传感器样机在 90 mm 范围内修正后的测量精度达到了 $\pm 1.2 \mu\text{m}$, 分辨力理论上可以达到 $0.1 \mu\text{m}$, 重复定位精度达到了 $\pm 1.1 \mu\text{m}$ 。研制的绝对式传感器与德国 Heidenhain LC400 系列和英国 Renishaw FORTiS-N 系列绝对式光栅技术指标对比如表 1 所示, 研制的传感器不仅结构简单, 还具有高精度、高分辨力的绝对位移测量优势。

表 1 典型传感器技术指标对比

Tab. 1 Comparisons of technical indicators among different typical sensors

传感器类型	测量范围	精度	分辨力
Heidenhain LC400 系列 ^[21]	70 mm~2 040 mm	$\pm 3 \mu\text{m}, \pm 5 \mu\text{m}$	1 nm(20 000 细分)
Renishaw FORTiS-N 系列 ^[22]	70 mm~2 040 mm	$\pm 3 \mu\text{m}, \pm 5 \mu\text{m}$	12.5 nm(1 600 细分)
本文传感器	90 mm	$\pm 1.2 \mu\text{m}$	$0.1 \mu\text{m}$ (无需细分)

(2) 传感器动尺与定尺之间气隙高度越低, 磁感应强度越强, 各谐波成分幅值也有明显增加。随着气隙高度不断增加, 高次谐波幅值衰减明显; 直流分量、一次谐波和四次谐波是测量误差的主要成分。

(3) 动尺感应绕组安装偏转角会引入直流误

差分量和二次谐波误差分量, 且偏转角越大误差分量越大。

本文研究的绝对式时栅位移传感器结构简单、成本低, 可应用于复杂机电系统精密绝对位置反馈, 具有重要的工程应用价值。

参考文献:

- [1] YU H, WAN Q H, MU Z Y, *et al.* Novel nano-scale absolute linear displacement measurement based on grating projection imaging [J]. *Measurement*, 2021, 182: 109738.
- [2] 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.
- [3] 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)
- [4] 王磊杰, 张鸣, 朱煜, 等. 面向浸没式光刻机的超精密光学干涉式光栅编码器位移测量技术综述 [J]. *光学精密工程*, 2019, 27(9): 1909-1918.
WANG L J, ZHANG M, ZHU Y, *et al.* Review of ultra-precision optical interferential grating encoder displacement measurement technology for immersion lithography scanner [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(9): 1909-1918. (in Chinese)
- [5] 夏豪杰, 吴晓婷, 张海斌. 基于伪随机编码的绝对式平面位移测量方法研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(12): 39-46.
XIA H J, WU X T, ZHANG H C. Absolute displacement measurement method with pseudo-random code [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(12): 39-46. (in Chinese)
- [6] 于海, 万秋华, 卢新然, 等. 光电编码器误差检测转台的动态精度标定 [J]. *光学精密工程*, 2016, 24(11): 2699-2704.
YU H, WAN Q H, LU X R, *et al.* Calibration of dynamic precision for measurement platform of photoelectric encoder [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(11): 2699-2704. (in Chinese)
- [7] SHI Y P, ZHOU Q, LI X H, *et al.* Design and testing of a linear encoder capable of measuring absolute distance [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2020, 308: 111935.
- [8] WAN Q H, WANG Y Y, SUN Y, *et al.* A novel miniature absolute metal rotary encoder based on single-track periodic gray code [C]. 2012 *Second International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control*. December 8-10, 2012, Harbin, China. *IEEE*, 2012: 399-402.
- [9] MATSUZOE Y, TSUJI N, NAKAYAMA T, *et al.* High-performance absolute rotary encoder using multitrack and M-code [J]. *Optical Engineering*, 2003, 42: 124-131.
- [10] YAN Y J, LIAO C C, WANG T F, *et al.* Optimizing the de-bruijn code of rotary optical encoders preventing from the photocurrent blooming [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(2): 1493-1503.
- [11] ISHIMURA S, KIKUCHI K. Eight-state trellis-coded optical modulation with signal constellations of four-dimensional M-ary quadrature-amplitude modulation [J]. *Optics Express*, 2015, 23(5): 6692-6704.
- [12] LEVITON D B, GARZA M S. Recent advances and applications of NASA's new ultrahigh-sensitivity absolute optical pattern recognition encoders [C]. *SPIE Proceedings*, "Imaging Technology and Telescopes. San Diego, CA. SPIE", 2000, 4091: 375-384.
- [13] 陈新, 王晗, 陈新度, 等. 一种绝对光栅尺的多轨道编码方法 [P]. 中国专利, 201610293695.6, 2016-09-28.
CHEN X, WANG H, CHEN X D, *et al.* A multitrack encoding method for absolute grating scale [P]. Chinese Patent, 201610293695.6, 2016-09-28. (in Chinese)
- [14] NIHTIANOV S, TAN Z, GEORGE B. New trends in smart sensors for industrial applications-part I [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(9): 7281-7283.
- [15] BASILE G, BECKER P, BERGAMIN A, *et al.* Combined optical and X-ray interferometry for high-precision dimensional metrology [J]. *Proceedings of the Royal Society of London Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2000, 456(1995): 701-729.
- [16] 刘华, 卢振武, 熊峥, 等. 绝对式光栅尺母尺刻划曝光系统 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(7): 1814-1819.
LIU H, LU Z W, XIONG Z, *et al.* Exposure optical system in lithographic main scale of absolute optical encoder [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(7): 1814-1819. (in Chinese)

- [17] 于海, 万秋华, 赵长海, 等. 基于后验误差拟合的角位移测量误差补偿[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(1): 51-57.
YU H, WAN Q H, ZHAO C H, *et al.* Error-compensation of angular displacement measurement based on posteriori error fitting[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(1): 51-57. (in Chinese)
- [18] HU F, CHEN X, CAI N, *et al.* Error analysis and compensation of an optical linear encoder[J]. *IET Science, Measurement & Technology*, 2018, 12(4): 561-566.
- [19] CAI N, XIE W, PENG H X, *et al.* A novel error compensation method for an absolute optical encoder based on empirical mode decomposition[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, 88: 81-88.
- [20] 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 Z, ZHOU Q S, HAN Y, *et al.* Effect of different mounting modes on embedded time grating measuring errors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(10): 2290-2300. (in Chinese)
- [21] Heidenhain. LC400 datasheet [EB/OL]. (2019-06-06) [2021-11-12]. http://www.Heidenhain.com/fileadmin/pdf/en/01_Products/Prospekte/PR_Linear_Encoders_for_Numerically_Controlled_Machine_Tools_ID571470_en.pdf.
- [22] Renishaw. FORTiS™ datasheet [EB/OL] (2021-12-01) [2021-11-12]. <https://www.renishaw.com/en/fortis-downloads--45815>.

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研究。E-mail: czr@cqut.edu.cn