DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311068

基于组合测量方式的新型磁场式时栅位移传感器*

陈自然[1,2,3],张桁潇[1,3],刘小康[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. 重庆大学光电工程学院 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:针对数字化精密机械加工装备和测量仪器中的关键功能部件——位移传感器测量精度过分依赖高精度加工的难题,提出基于组合测量方式的新型位移传感新方法。利用在平面上均匀分布的激励绕组产生交变磁场,构建运动参考系,建立位移和时间基准之间的映射关系。通过控制感应绕组的形状实现磁场精确约束,从原理上抑制谐波误差。采用差分排布的感应绕组式及组合测量方式增强抗干扰性,提高位移测量精度。通过电磁仿真验证,进行测量误差分析,优化结构参数。研制了传感器样机并进行实验验证,结果表明在 144 mm 测量范围内,测量误差为±2.25 μm,分辨力为 0.15 μm。不同于传统高精度位移传感器严重依赖高精度光刻制造加工,此方法通过对磁场的精确约束和传感原理创新实现精密位移测量,具有结构简单,成本低等优势具有重要学术和工程应用价值。

关键词: 直线位移;组合测量;时栅传感器;交变磁场
中图分类号: TH7 **文献标识码**: A **国家标准学科分类代码**: 460.4030

Novel magnetic-field type time-gating displacement sensors based on a combined measurement method

Chen Ziran[1,2,3], Zhang Hengxiao[1,3], Liu Xiaokang[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. College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400039, China; 3. Chongqing Key Laboratory of Time-Grating Sensing and Advanced Testing Technology, Chongqing 400054, China*)

Abstract: The key functional units — displacement sensors of digital high-precision measuring instruments and equipment rely heavily on high-precision machining. To address this issue, a novel displacement sensing principle based on a combined measurement method is proposed. The alternating magnetic field produced using the uniform distribution of the excitation winding on the plane is utilized to establish a moving reference system. The mapping relation is obtained between the measured displacement and the time reference. Magnetic field is restricted by precisely controlling the shape of the induction winding to suppress harmonic errors in principle. The differential arrangement of the induction winding and a combined measurement method are employed to improve its anti-interference ability and the measurement precision. The measurement error is analyzed by using the electromagnetic simulation to optimize structural parameters. The sensor prototype is produced and tested in experiment. The results show that the error is ±2.25 μm within the range of 144 mm, and the resolution is 0.15 μm. Differing from traditional high-precision displacement sensors relying heavily on high-precision lithographic machining, the proposed method makes full use of precisely restricted and innovation in sensing principles to perform high-precision displacement measurement with the feature of simple in structure and low cost, which has the significant academic value and the high application value.

Keywords: linear displacement; combined measurement; time-gating sensors; alternating magnetic field

收稿日期:2023-02-20 Received Date: 2023-02-20
*基金项目:国家自然科学基金(52175495, 52125503)、重庆市自然科学基金(cstc2020 jcyj-msxmX0917)、重庆英才项目(cstc2022ycjh-bgzxm0098)资助

0 引 言

精密位移测量技术及器件是高档数控机床、高端仪器设备实现精密定位与控制的“眼睛”[1-3]。精密高端装备要求位移传感器能在百毫米级宏观测量范围内实现微纳级测量精度。高精密位移传感器仍是制约国产高端装备发展“卡脖子”的关键核心部件[4]。

光栅以其测量精度高、抗干扰性强等优点成为应用最广的位移传感器。光栅的测量精度取决于又精又密的等间距“栅线”的制造精度。栅距内栅线数量越多,要保证栅线刻划的均匀性和一致性就越困难。目前商用成像扫描型光栅位移传感器栅距通常在 20 μm 左右,干涉扫描型的栅距可以做到 4 μm[5-6]。为了能实现更高测量精度,有学者尝试采用 1 μm 栅距的全息光栅实现了在 32 mm 量程内短时稳定性为 5 nm 的测量精度[7]。由于受振动、污染、光衰等因素使得光栅信号波形和相位产生波动,影响测量精度和稳定性[8-11],常借助于谐波修正法[12-13]、卡尔曼滤波法[14-15]等复杂智能算法进一步提高信号质量。但受光波波长和光学衍射极限的制约,此类精密光刻线技术已逼近极限,很难再进一步提高。

本文提出基于磁场精密约束传感原理和组合测量方式的位移测量方法,利用多个激励绕组在空间平面产生交变磁场,建立位移与时间基准之间的关系。通过控制毫米级感应绕组的形状实现磁场精确约束,提高位移传感信号质量,实现微米级测量精度,摆脱传感器对高精度加工工艺的依赖,降低成本。

1 传感器结构及传感原理

传感器包含动尺和定尺,动尺是在基体上布置 4 组正弦型感应绕组,定尺是在基体上均匀布置 4 种激励绕组阵列,总体结构如图 1 所示。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。定尺上均匀布置两行边长为 d 的矩形激励绕组,按间隔 d 等间距排布。其中第 1 行构成正弦激励绕组,第 2 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,如式(1)所示。

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

其中,I_m 为交变电流的最大幅值,ω 为交变电流频率。

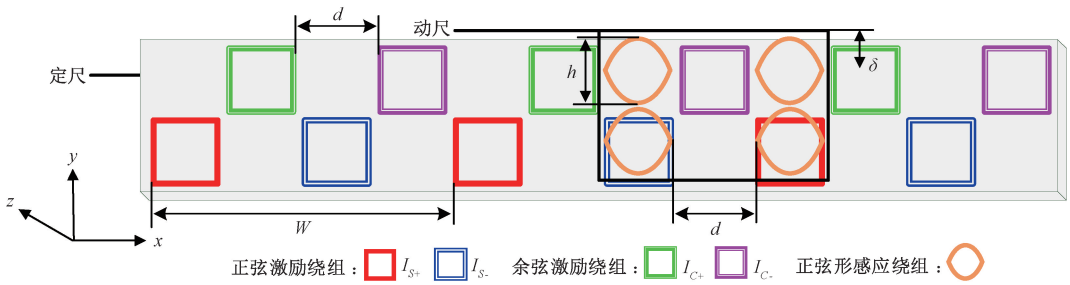

图 1 磁场式时栅位移传感器总体结构图

Fig. 1 Overall structure of the 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 和感应绕组 B 正向串联;正弦形感应绕组 C 和感应绕组 D 正向串联,如图 2 所示。

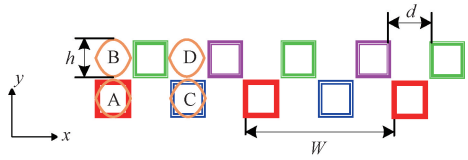

图 2 感应绕组与激励绕组的位置示意图

Fig. 2 Position diagram of induction winding and excitation winding

当给激励绕组通入正/余弦激励电流,如图 3 所示,根据电磁感应可得正弦形感应绕组 A、C 在一个正弦激励绕组周期极距 W 内的磁通量 $\Phi_A(t,x)$、$\Phi_C(t,x)$ 如式(2)所示。

$$\begin{cases} \Phi_A(t,x)=kI_mh\dfrac{W}{4\pi}\sin(\omega t)\cos\left(\dfrac{4\pi}{W}x\right) \\ \Phi_C(t,x)=-kI_mh\dfrac{W}{4\pi}\sin(\omega t)\cos\left(\dfrac{4\pi}{W}x\right) \end{cases} \tag{2}$$

其中,比例系数为 k,正弦形感应绕组峰谷高为 h,极距为 W,运动位移为 x。

正弦形感应绕组 B、D 在一个余弦激励绕组周期极距 W 内的磁通量 $\Phi_B(t,x)$、$\Phi_D(t,x)$ 如式(3)所示。

$$\begin{cases} \Phi_B(t,x)=-kI_mh\dfrac{W}{4\pi}\cos(\omega t)\sin\left(\dfrac{4\pi}{W}x\right) \\ \Phi_D(t,x)=kI_mh\dfrac{W}{4\pi}\cos(\omega t)\sin\left(\dfrac{4\pi}{W}x\right) \end{cases} \tag{3}$$

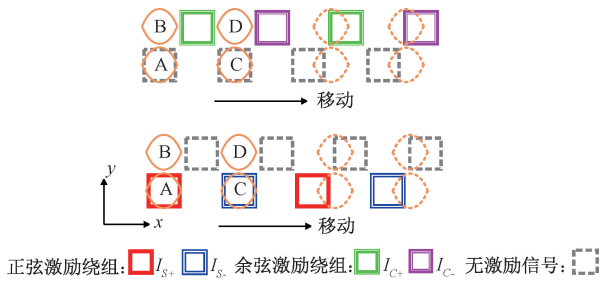

图 3　感应绕组在正弦/余弦激励绕组的组合感应方式

Fig. 3　Combined induction method of induction winding on sinusoidal/cosinoidal excitation winding

由叠加定理可得感应绕组 A、B 串联后的感应磁通量表达式如式(4)所示。

$$\Phi(t,x)=\Phi_A(t,x)+\Phi_B(t,x)=kI_m h\frac{W}{4\pi}\sin\left(\omega t-\frac{4\pi}{W}x\right) \tag{4}$$

因此当感应绕组 A、B 串联后沿 X 方向移动 1 个极距,其中产生的感应电动势如式(5)所示。

$$U_1=\frac{\mathrm{d}\Phi(t,x)}{\mathrm{d}t}=K\cos\left(\omega t-\frac{4\pi}{W}x\right) \tag{5}$$

其中,$K=k\omega I_m h\dfrac{W}{4\pi}$。

感应绕组 A 和感应绕组 C 构成差动传感结构,感应绕组 B 和感应绕组 D 构成差动传感结构,可有效消除共模干扰。因此感应绕组 B 和感应绕组 D 沿 X 方向移动 1 个极距,产生的感应电动势如式(6)所示。

$$U_2=-K\cos\left(\omega t-\frac{4\pi}{W}x\right) \tag{6}$$

感应绕组 A、C 与感应绕组 B、D 反向串联后的叠加信号如式(7)所示。

$$U_x=U_1-U_2=2K\cos\left(\omega t-\frac{4\pi}{W}x\right) \tag{7}$$

感应信号相位随运动位移 x 发生周期变化,行波的相位变化反应动尺的运动状态,与同频参考信号比相获得时间变化量 Δt,进而获得动尺位移量 Δx,位移解算方案如图 4 所示。在动尺运动过程中,感应绕组输出一路行波信号 U_x,采用带通滤波器和放大电路对这路信号进行预处理,再将处理后的信号整形为方波后输入 FPGA 模块,与同频的参考信号方波 U_f 进行比相,采用时钟脉冲个数表示相位差,由此可求得运动方向的位移量,如式(8)所示。

$$\Delta x=\left(N+\frac{\Delta t}{T}\right)W \tag{8}$$

其中,N 为动尺在运动方向上运动的对极整数;T 为参考信号的时钟周期。

传感器的测量分辨力可以表示为:

$$R=\frac{L}{N}\times\frac{f_e}{f_r} \tag{9}$$

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高频时钟频率。

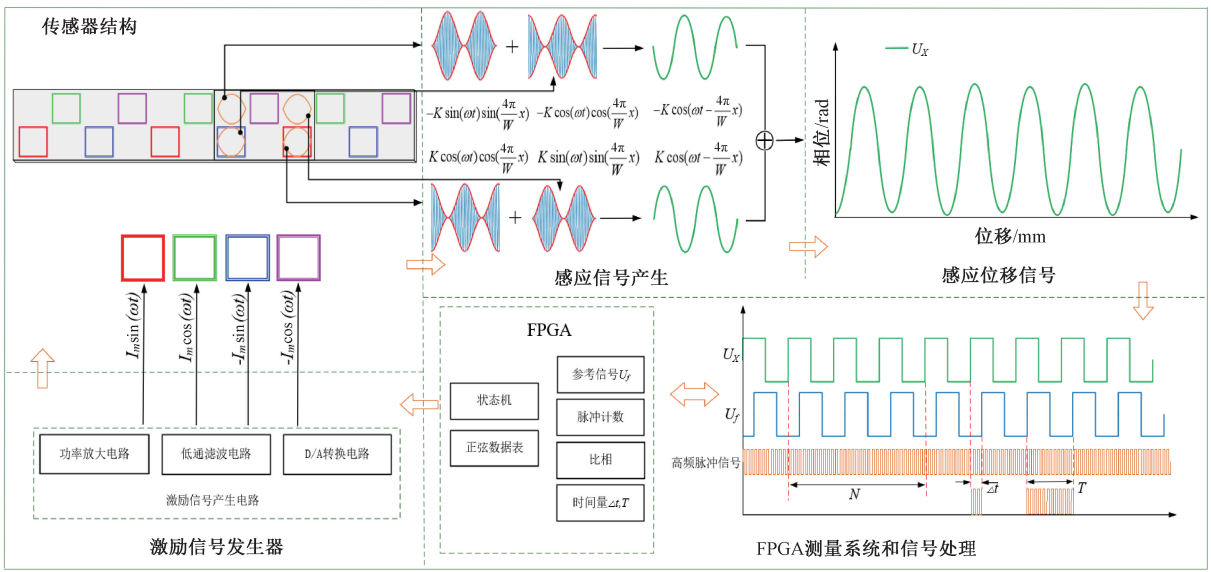

图 4　位移解算方案示意图

Fig. 4　Diagram of displacement solution scheme

2 建模仿真及数据分析

2.1 建模仿真

建立传感器模型进行电磁仿真实验,结合传感器实际电气参数和尺寸参数,设置仿真模型求解参数如表 1 所示。

表 1 传感器模型参数

Table 1 Sensor model parameters

建模参数	参数值
激励信号幅值/A	0.1
激励信号频率/kHz	10
激励绕组宽度/mm	5.8
激励绕组高度/mm	5.8
激励绕组直径/mm	0.2
激励绕组匝数	20
感应绕组宽度/mm	6
感应绕组高度/mm	6
感应绕组直径/mm	0.3
感应绕组匝数	20
感应绕组阻抗/MΩ	1
运动方向极距 W/mm	24
激励导磁体/(mm×mm×mm)	12×48×1.1
感应导磁体/(mm×mm×mm)	12.2×9.2×1.1
激励绕组与导磁体间隙/mm	0.1
感应绕组与导磁体间隙/mm	0.1
感应激励层间隙/mm	0.6
线圈材料	Copper

传感器的一个极距 $W=24$ mm,激励信号频率为 10 kHz,动尺运动一个极距,感应信号刚好变化一个完整的周期。仿真步距为 0.4 mm,在一个信号周期内取点 60 个,整个模型的磁感应强度云图如图 5 所示。

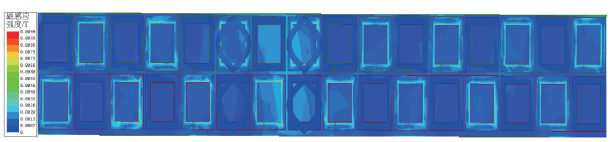

图 5 仿真模型磁场分布云图

Fig. 5 Cloud diagram of magnetic field distribution for the simulation model

动尺在仿真时移动的空间步距是 0.4 mm,在不同空间位置对应的感应绕组感应电动势曲线通过电磁仿真计算如图 6 所示。感应绕组输出位移信号频率为 10 kHz,相位随位移均匀变化,并且在不同相位感应信号最大幅值基本不变,信号质量很好。

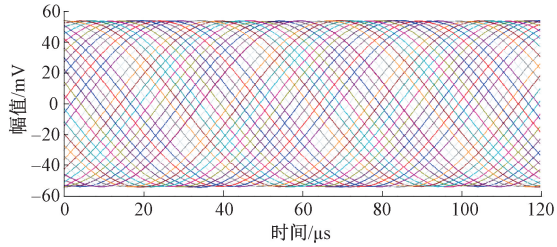

图 6 感应绕组在不同空间位置的感应信号

Fig. 6 Induction signals outputted from induction winding at the different spatial positions

2.2 数据分析

将图 6 中的感应信号进行傅里叶变换分析,得到基波幅值和相位,可计算出运动位移。设 α_F 是基波仿真初相位,α_L 是理论初相位,采用式(11)可得仿真实验中的位移测量误差:

$$x=\frac{W}{2\pi}\alpha \tag{10}$$

$$\delta=x_F-x_L=\frac{W}{2\pi}(\alpha_F-\alpha_L) \tag{11}$$

图 7 为理论位移量与仿真位移量的测量误差曲线,误差范围为−25.79~26.78 μm。

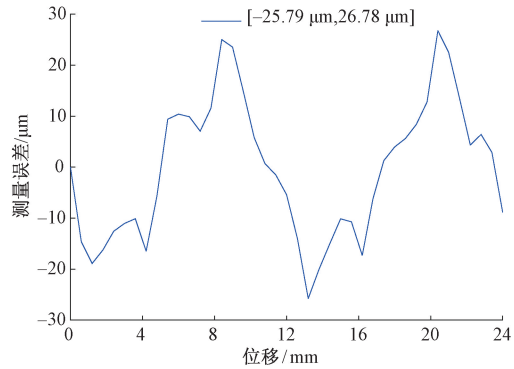

图 7 对极内位移测量误差曲线

Fig. 7 Displacement measurement error curve within a pitch

对极内位移测量误差采用傅立叶变换分析得到误差频谱图,主要谐波成分是 2 次谐波,4 次谐波和 8 次谐波,其中 2 次谐波误差最大,原因在于每行激励绕组在对极内含有的 2 个激励绕组产生磁场不均匀所致。4 次谐波产生原因在于每组正弦/余弦激励绕组尺寸不合理产生了边缘效应导致引入误差。实验结果如图 8 所示。

激励绕组产生的交变磁场在 Z 轴方向的不同位置存在磁场强度和均匀性的非线性的情况,导致感应绕组与

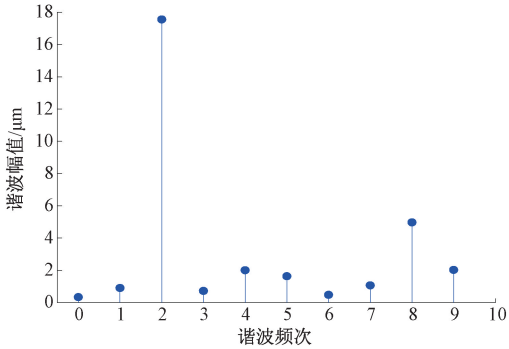

图 8　对极内测量误差频谱图

Fig. 8　Spectrum diagram of measurement error within a pitch

激励绕组之间空间磁场耦合引入谐波误差,从而直接影响行波的幅值和相位均匀性。因此需要单独分析传感器动尺、定尺安装的气隙高度对测量误差的影响。

以 0.1 mm 气隙高度为步距,从 0.2~0.7 mm 设计了 6 组不同气隙高度进行多次不同气隙对传感器测量误差的仿真实验,相应的误差曲线如图 9 所示。通过傅立叶变换分析得到不同气隙高度下测量误差频谱图。如图 10 所示,在不同气隙高度的条件下测量误差曲线主要包含直流分量、2 次谐波和 8 次谐波。当气隙高度大于 0.4 mm 时,随着气隙高度的逐渐增大,0 次谐波有明显地减小,1 次谐波、4 次谐波和 6 次谐波都有小幅度的降低。综合考虑感应信号幅值、测量误差等因素,选择传感气隙高度为 0.6 mm。

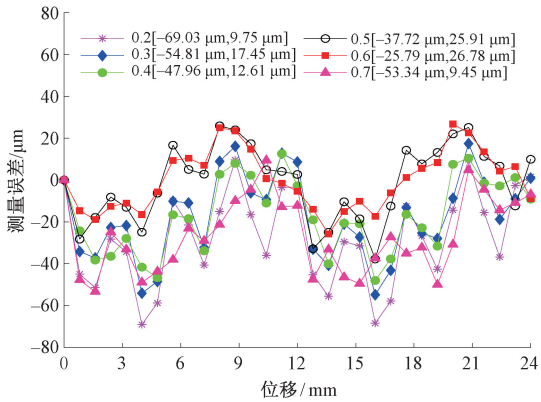

图 9　不同气隙高度的测量误差曲线

Fig. 9　Measurement error curves with different air gap heights

3　实验验证及误差分析

3.1　实验验证

在理论和仿真研究的基础上,采用工艺简单而成熟、价格相对低的印制电路板工艺研制出了如图 11 所示的传感器样机。在结构上间隔 1/4 极距均匀布置空间激励

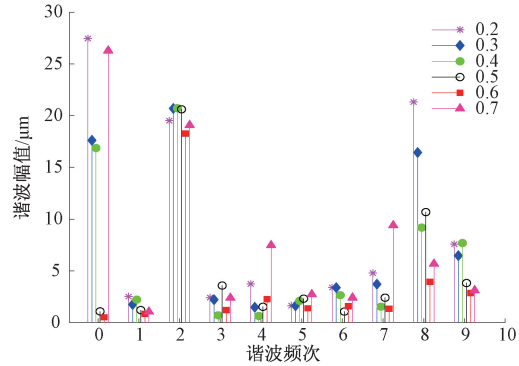

图 10　不同气隙高度的测量误差频谱图

Fig. 10　Error spectrum of measurement error curves with different air gap heights

绕组,且同行相邻激励绕组反向串联。电气上向两行激励绕组分别施加频率为 10 kHz、幅值为 5 A 的正/余弦激励信号。

图 11　传感器的定尺和动尺

Fig. 11　The fixed ruler and the moving ruler of the sensor

采用美国 AEROTECH 公司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,搭建图 12 所示的实验平台。

图 12　实验平台

Fig. 12　The experimental setup

通过激光干涉仪标定实验台重复定位精度 ±0.5 μm,整体定位精度 ±1 μm,分辨力为 10 nm。整个实验平台结构如图 13 所示,动尺与定尺分别固定在导磁基体上,其中定尺基体固定于实验平台,动尺基体刚性固定在直线电机运动部件上,两者平行安装,气隙高度 0.6 mm。运动过程中,传感器动尺的感应绕组感应定尺绕组产生的空间磁场得到动尺的运动位移信号,再进行信号放大、滤波、整形成方波信号后,与参考信号 U_f 进行

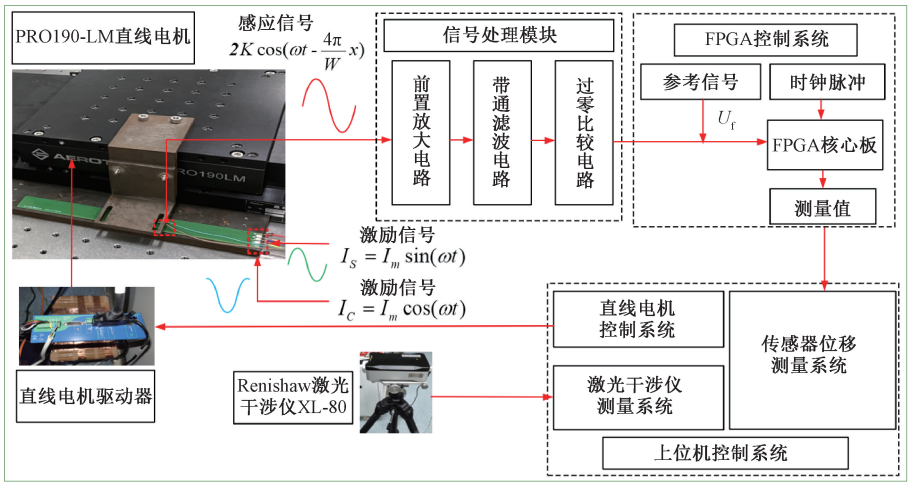

图 13 实验平台结构图

Fig. 13 The structure chart of the experimental setup

比相,采用时钟脉冲计数得到位移值。实验采用精度为 $\pm0.5\times10^{6}$ 的 Renishaw XL-80 激光干涉仪标定传感器测量误差。

3.2 误差分析

以图 12 所示的实验平台开展传感器样机的对极内实验,设置在气隙高度分别为 0.2、0.4、0.6 和 0.8 mm 的条件下,直线电机带动动尺匀速运动 24 mm,即 1 个对极,每运动 0.3 mm 的位移,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。进行多次对比实验后,不同气隙高度下的原始测量误差曲线如图 14 所示。

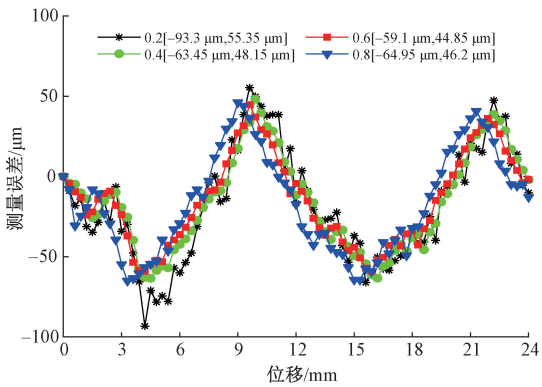

图 14 对极内不同气隙高度的原始测量误差曲线

Fig. 14 Original measurement error curve of different air gap height within a pitch

对多组实验中的误差数据进行傅立叶变换计算,得到测量误差频谱图。如图 15 所示不同气隙高度的条件下测量误差的主要谐波误差成分的频次基本相同,但各频次误差成分的幅值有一定的变化。当气隙高度低于 0.6 mm 时,气隙高度越低,测量误差曲线幅值越大,相应的各频次误差成分的幅值也较大。当气隙高度高于 0.6 mm 时,当气隙高度越高,由于空间磁场强度非线性影响,误差曲线幅值也越大,各频次误差成分的幅值也相应较大。因此在实验中采用的气隙高度为 0.6 mm 较合理。

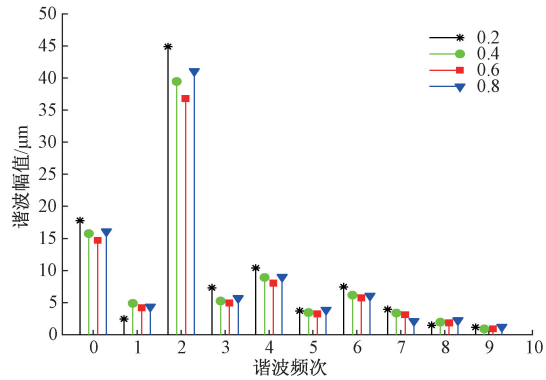

图 15 对极内不同气隙高度的原始测量误差频谱图

Fig. 15 Error spectrum of measurement of different air gap height within a pitch

在进行稳定性实验时,通过直线电机模组控制系统驱动电机运动,同步带动动尺定点定位,然后保持静止不动。上位机每隔 2 s 保存一次位置信息,共采集 200 个数据,通过分析这 200 个数据的波动情况进行稳定性分析,如图 16 所示,波动在 0.6 μm 的范围内,稳定性较好。

传感器样机的整量程精度实验中,动尺每运动 0.3 mm 的位移,FPGA 芯片进行一次数据采集,整个实验中动尺运动位移为 144 mm,即 6 个对极,位移的修正前测量误差曲线如图 17 所示,测量误差范围为-59.1~44.85 μm。采用傅立叶变换进行误差频谱分析得到如图 18 所示的误

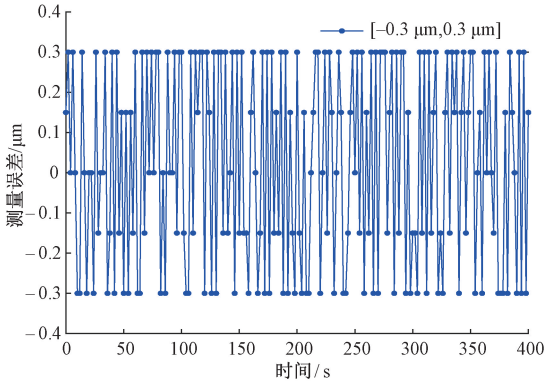

图 16　稳定性误差曲线

Fig. 16　Stability error curve

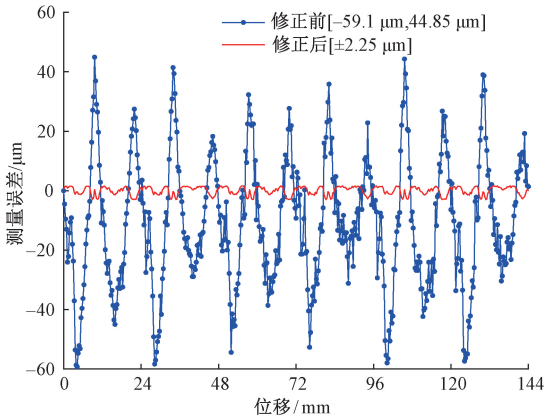

图 17　谐波修正前后的测量误差曲线

Fig. 17　Measurement error curves before and after harmonic correction

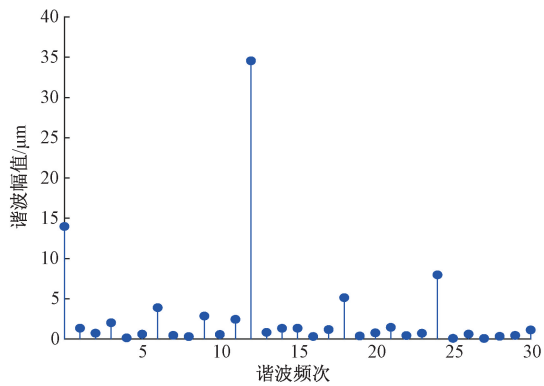

图 18　整量程原始测量误差频谱图

Fig. 18　Original measurement harmonic spectrum diagram within full-range

差频谱图和表 2 所示的主要谐波分量。

实验数据表明,原始测量误差主要包含直流分量、12 次谐波误差、18 次谐波误差和 24 次谐波误差等。其

表 2　整量程测量的主要谐波分量

Table 2　Main harmonic component of full range measurement

谐波频次	幅值/μm	谐波频次	幅值/μm
12 次	34. 56	9 次	3. 56
直流分量	13. 99	11 次	2. 45
24 次	7. 98	3 次	2. 03
18 次	6. 14	21 次	1. 46
6 次	3. 90	1 次	1. 35

中最大谐波误差为 12 次谐波误差,幅值为 34. 56 μm。其次是直流分量误差为 13. 99 μm。12 次谐波误差和直流分量误差产生的主要原因是每行激励绕组在对极内含有 2 个激励绕组,由于激励绕组加工导致的激励绕组产生的激励磁场不均匀,或者由于感应绕组的加工误差导致的感应信号幅值不对称产生的。24 次谐波产生原因在于每组正弦/余弦激励绕组在对极内因边缘效应使磁场不均匀所致。

采用谐波修正法[16]对原始测量误差进行修正,修正后误差曲线如图 17 所示,修正后测量误差为±2. 25 μm。由于量程 L=144 mm,传感器对极数为 6,激励信号频率为 10 kHz,高频脉冲插补频率 1. 6 GHz,由式(9)计算得到该传感器的测量分辨力理论上可以达到 0. 15 μm。本研究成果与同类型德国 Heidenhain 光栅、英国 Renishaw 光栅的技术参数对比如表 3。

表 3　典型传感器技术指标对比

Table 3　Comparison of technical indicators among different typical sensors

传感器类型	测量范围	精度	分辨力
Heidenhain LIDA400 系列	240~3 040 mm	±3 μm, ±5 μm	0. 2 μm (100 细分)
Renishaw RKLC 系列	20 mm~20 m	±5 μm, ±15 μm	1 nm (20 000 细分)
本文传感器	144 mm	±2. 25 μm	0. 15 μm (无需细分)

4　结　　论

高精密位移传感器仍是制约国产高端装备发展“卡脖子”的关键核心部件,但受光波波长和光学衍射极限的制约,传统精密光栅刻线技术已逼近极限,很难再进一步提高。本文研制出了一种基于组合测量方式的磁场式时栅位移传感器,在 144 mm 测量范围中,原始误差不超过

±52 μm,修正后的误差为±2.25 μm,传感器分辨力为0.15 μm,具有以下优势:

1)研究通过控制感应绕组中线圈的形状及排布方式抑制误差。通过控制毫米级感应绕组的形状实现磁场精确约束,提高位移传感信号质量,实现微米级测量精度,摆脱传统高精度传感器对高精度光刻加工工艺的依赖,降低成本。

2)为了提高测量分辨力,光栅等传统位移传感器常借助于细分技术。细分倍数越高,对传感器原始信号质量要求越高,由于原始信号中常含有直流电平、谐波误差以及各类噪声,因而细分倍数越大,细分误差就越大。本文的传感器的测量分辨力无需依赖细分技术,测量分辨力可以达到0.15 μm,避免在提高分辨力的时候带来较大的细分误差。

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-manufacturing Technology, 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]. China Engineering Sciences, 2020, 22(2): 29-37.

[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.

[6] 陈自然, 黎锡, 冯曦颉,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. Analysis of measurement error characteristics of absolute linear time-grating displacement sensor with one-pole-difference structure[J]. Optics and Precision Engineering, 2022, 30(6): 667-677.

[7] 魏正杰, 张迪, 吴冠豪. 用于精密位移测量的微型光栅传感器开发[J]. 光子学报, 2021, 50(9): 0912001.
WEI ZH J, ZHANG D, WU G H. Development of miniature optical encoder for precise displacement measurement[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(9): 0912001.

[8] CHEN Z R, LIU X K, PENG K. et al. A self-adaptive interpolation method for sinusoidal sensors [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(10): 7675-7682.

[9] HOANG H V, JEON J W. An efficient approach to correct the signals and generate high-resolution quadrature pulses for magnetic encoders [J]. IEEE Trans. Ind. Electron., 2011, 58(8): 3634-3646.

[10] YE G, WU Z, XU Z, et al. Development of a digital interpolation module for high-resolution sinusoidal encoders[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2019, 285: 501-510.

[11] 杨光华, 王宇, 李璟, 等. 相位光栅非对称性对位置测量精度的影响[J]. 光学学报, 2021, 41(19): 60-71.
YANG G H, WANG Y, LI J, et al. Effect of phase grating asymmetry on position measurement accuracy[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(19): 60-71.

[12] 王笑一, 王永军, 雷贤卿, 等. 非对径安装双读数头圆光栅偏心测角误差修正[J].光学 精密工程, 2021, 29(5): 1103-1114.
WANG X Y, WANG Y J, LEI X Q, et al. Correction method for angle measurement error of eccentric encoder with double read-heads installed non-diametrically opposite[J]. Optics and Precision Engineering, 2021, 29(5): 1103-1114.

[13] 李尕丽, 薛梓, 黄垚,等. 圆光栅测角系统示值误差分析与补偿[J]. 仪器仪表学报,2021,42(5):59-65.
LI G L, XUE Z, HUANG Y, et al. Indication error analysis and compensation of circular grating angle measurement system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(5): 59-65.

[14] 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.

[15] 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 grating[J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(8): 1719-1726.

[16] 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. Novel position detecting technology for a permanent magnet synchronous linear motor using position detecting units[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(12): 48-55.

作者简介

陈自然,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,现为重庆理工大学教授,主要研究方向为精密位移测量及智能仪器设计。
E-mail: czr@ cqut. edu. cn

Chen Ziran received his B. Sc. degree from China University of Geosciences in 2004, received his M. Sc. degree from Chongqing University of Technology in 2009, and received his Ph. D. degree from Hefei University of Technology in 2012. He is currently a professor at Chongqing University of Technology. His main research interests include high precision displacement measurement and intelligent instrument.

张桁潇,2020 年于重庆理工大学获得学士学位,现为重庆理工大学机械检测技术与装备教育部工程研究生,主要研究方向为智能传感器。
E-mail: zhx584634227@ 163. com

Zhang Hengxiao received his B. Sc. degree from Chongqing University of Technology in 2020. He is currently a graduate student in the Engineering Research Center of Mechanical Testing Technology and Equipment, Ministry of Education, Chongqing University of Technology. His main research interests include intelligent sensors.

刘小康(通信作者),1999 年于重庆大学获得学士学位,2002 年于重庆大学获得硕士学位,2005 年于重庆大学获得博士学位,现为重庆理工大学教授、重庆理工大学副校长、重庆大学博士生导师,主要研究方向为智能仪器与传感器。
E-mail: lxk@ cqut. edu. cn

Liu Xiaokang (Corresponding author) received his B. Sc., M. Sc. and Ph. D. degree all from Chongqing University in 1999, 2002, and 2005, respectively. He is currently a professor and a vice principal at Chongqing University of Technology and a Ph. D. advisor at Chongqing University. His main research interests include intelligent instruments and sensor.