

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108022

基于分时方法的高精度反射绝对式 纳米时栅位移传感器设计^{*}

刘小康,梅现富,蒲红吉,彭 凯,于治成

(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)

摘 要:本文提出了一种反射绝对式纳米时栅位移传感器的传感方法。采用反射单列式传感器作为反射绝对式传感器的精密测量部分,记为传感器 A。为了实现绝对位移测量,设计了一个与传感器 A 相差一个周期的反射单列式传感器,记为传感器 B,利用传感器 A 与传感器 B 相位作差实现绝对位移测量。采用标准印刷电路板技术制作了传感器样机,搭建了实验平台,进行了实验测试。测试结果表明,激励电极引线方式对接收电极带来干扰,从而造成一次谐波误差。为了抑制误差,提出了交叉反射结构和分时方法,交叉反射结构将感应电极与另一端的反射电极引线相连,增大激励电极和接收电极的距离,分时方法通过不同时间段对传感器 A 和传感器 B 施加激励信号,并把不工作的电极接地。实验表明该结构和方法相互配合有效的抑制了干扰,最终在 400 mm 范围内,补偿后实现了 ± 300 nm 的测量精度。

关键词:绝对位移测量;纳米时栅;分时方法;位移传感器

中图分类号: TH712 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4030

Design of high-precision reflective absolute nanometer time-grating displacement sensor based on time-division method

Liu Xiaokang, Mei Xianfu, Pu Hongji, Peng Kai, Yu Zhicheng

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

Abstract: This article presents a sensing method of the reflective absolute nanometer time-grating displacement sensor. The reflective single-row sensor is used as the precision measurement part of the reflective absolute sensor, which is marked as sensor A. To achieve absolute displacement measurement, a reflective single-row sensor with a period of difference from sensor A is designed, which is marked as sensor B. The phase difference between sensor A and sensor B is utilized to achieve absolute displacement measurement. The sensor prototype is made by using standard printed circuit board technology. An experimental platform is established, and evaluation experiments are carried out. Results show that the lead method of the excitation electrode brings interference to the receiving electrode, which causes the first-order harmonic error. To suppress error, a cross-reflective structure and a time-division method are proposed. The cross-reflective structure connects the sensing electrode with the reflective electrode lead at the other end to increase the distance between the excitation electrode and the receiving electrode. The time-division method applies an excitation signal to sensor A and sensor B at different time. In addition, it connects the inoperative electrode to the ground. Experimental results show that the structure and method cooperate with each other to effectively suppress the interference. Finally, within the range of 400 mm, the measurement accuracy of ± 300 nm is achieved after compensation.

Keywords: absolute position measurement; nanometer time-grating; time division method; displacement sensor

收稿日期: 2021-05-31 Received Date: 2021-05-31

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金(51935004)、重庆理工大学科研启动基金(2020ZDZ031)、“成渝地区双城经济圈建设”科技创新项目(KJCX2020043)资助

0 引 言

高精度和大量程的位移传感器在精密设备中广泛应用,例如精密机床、军用武器、汽车、医疗和高精度工作台等领域,是这些设备的关键功能单元^[1-3]。采用绝对式传感器可以实现绝对位移测量,有效解决了掉电丢失位置数据的问题,避免了累积误差的产生,并且可以实现全闭环控制和反馈,减小温度等外界因素的干扰,提高传感器的测量精度,其应用范围更广。目前,主要使用的绝对位移传感器包括绝对式光栅尺^[4-5]和电容绝对式线性编码器^[6-7]。

绝对式光栅尺由于其高精度、高分辨率而被广泛地用作定位传感器^[8-9]。如今已经开发了具有高分辨率的绝对位移测量能力的相对紧凑的设备,如 Heidenhain (德国) 开发了一种紧凑的绝对式光栅尺,其长度为 4 240 mm,测量精度为 $\pm 5 \mu\text{m}$ 到 $\pm 3 \mu\text{m}$ 。绝对式光栅尺采用精密刻划栅线实现高精度测量,上电立即提供位置信息实现绝对定位^[10-11]。然而,绝对式光栅尺的精度严重依赖栅线均匀刻划的精密程度,这增加了制造的难度^[12-13]。另外,实现绝对位移测量功能需要光学成像技术和复杂的图像处理算法,这增加了编码和解码的复杂程度,这些综合因素制约了传感器制造工艺和测量精度的进一步提升^[14-15]。

电容绝对式线性编码器是另一种实现绝对定位测量的高精度位移传感器,因为它们易于制造且功耗极低,这些特性使得电容绝对式线性编码器具有极大应用价值^[16-18]。电容绝对式线性编码器采用电极平面作为传感单元,调制电场的强度由电极平面的重叠面积决定,而且重叠面积覆盖电容绝对式线性编码器的整个电极平面,更有助于输出更强、更大的信号。采用电容绝对式线性编码器的测量机制减小了易受机械震动和机械安装的影响,并且降低了制造精度的要求,这些特性可以支持高精度位移测量^[19]。然而,电容绝对式线性编码器会产生寄生电容和边缘效应,特别在体积减小时,寄生电容和边缘效应影响越大,传感器的非线性误差越大,这些因素限制了电容绝对式线性编码器测量精度的提高^[20-21]。

为了解决以上问题,本人所在团队提出了反射绝对式纳米时栅位移传感器。首先,该传感器通过构建匀速交变电场将空间位移变化转化为时间变化来实现位移测量,这样降低了制造的难度^[22-23]。然后,该传感器在两组测量周期分别为 N 和 $N-1$ 的单列式传感器的基础上增加了四片反射电极和接收电极,形成了两组反射单列式传感器,并将其分别记为传感器 A 和传感器 B,采用传感器 A 作为精密测量部分,利用传感器 A 和传感器 B 输出行波信号的相位作差实现绝对位移测量,其实现绝对位

移测量功能的编码和解码方式简单。再次,该传感器采用感应电极与另一端的反射电极引线相连实现交叉反射结构,并且在不同时间段对传感器 A 和传感器 B 施加激励信号实现分时方法,将交叉反射结构和分时方法相结合来增大激励电极与接收电极之间的距离,并且未连接到激励信号的激励电极接地,进而抑制激励电极与接收电极之间的串扰,保证测量精度。最后,该传感器中的传感器 A 和传感器 B 的信号通过反射电极传递到接收电极,实现信号输入输出集中在定尺上,避免了动定尺间引线问题的产生,并且交叉反射结构仅仅只改变了动尺的引线方式,有利于传感器的小型化设计,应用范围更广。

1 反射绝对式位移测量原理与结构设计

1.1 纳米时栅测量原理

为了分析反射绝对式纳米时栅位移传感器的测量原理,本文首先对传感器 A 进行了分析。如图 1(a)、(b) 所示,传感器 A 由动尺和定尺组成,上部分是带有一排双正弦形感应电极的动尺,下部分是带有 N 个周期的方形激励电极的定尺,其中 4 个相邻的蓝色、绿色、黄色和红色方形激励电极组成一个周期,周期长度为 $4W_1$ 。对于动尺和定尺,其导线布置方式是通过在感应电极上方沿其中间延伸的一根导线连接,在 4 组激励电极下方沿其中间延伸的 4 根导线连接。定尺的蓝色、绿色、黄色和红色激励电极分别输入 4 个正弦激励 AC 信号 U_{s+} , U_{c+} , U_{s-} 和 U_{c-} , 如下所述。

$$\begin{cases} U_{s+} = A_m \sin \omega t \\ U_{c+} = A_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = A_m \cos \omega t \\ U_{s-} = A_m \sin(\omega t + \pi) = -A_m \sin \omega t \\ U_{c-} = A_m \sin\left(\omega t + \frac{3\pi}{2}\right) = -A_m \cos \omega t \end{cases} \quad (1)$$

式中: A_m 是激励信号幅值; ω 是角频率; t 是时间变量。定尺激励电极宽度为 $W_1 - l_1$, 相邻两个激励电极之间的间距为 l_1 。动尺感应电极宽度和高度分别为 $2W_1$ 和 $2H$, 用于拾取耦合信号。动尺和定尺之间的间隙为 d , 其中动尺上的感应电极与定尺上的激励电极可以简化为耦合电容 C_1, C_2, C_3 和 C_4 。

对于理想的耦合电容,当 d 值和介电系数保持恒定时,输出信号是感应和激励电极之间重叠面积变化量 ΔS 的线性响应,那么输出信号可以表示为:

$$U_{o1+} = \frac{k_m (\Delta S_1 U_{s+} + \Delta S_2 U_{c+} + \Delta S_3 U_{s-} + \Delta S_4 U_{c-})}{2S_0} \quad (2)$$

式中: k_m 是感应电极和激励电极之间的电场耦合系数; $\Delta S_1, \Delta S_2, \Delta S_3$ 和 ΔS_4 分别表示为动尺和定尺发生相对运动时; C_1, C_2, C_3 和 C_4 重叠区域面积的变化; S_0 是感应电

极和激励电极之间的最大重叠面积,为常数。

重叠区域面积的变化如图 1(c) 所示,通过有限区域积分可以获得 $\Delta S_1, \Delta S_2, \Delta S_3$ 和 ΔS_4 的表达式,将其带入到式(2)中得到输出信号为:

$$U_{o1+} = k_m A_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi x_1}{2W_1}\right) = A_n \sin\left(\omega t + \frac{\pi x_1}{2W_1}\right) \quad (3)$$

式中: $A_n = k_m A_m$, x_1 是传感器 A 测量的单个周期内的位移值。

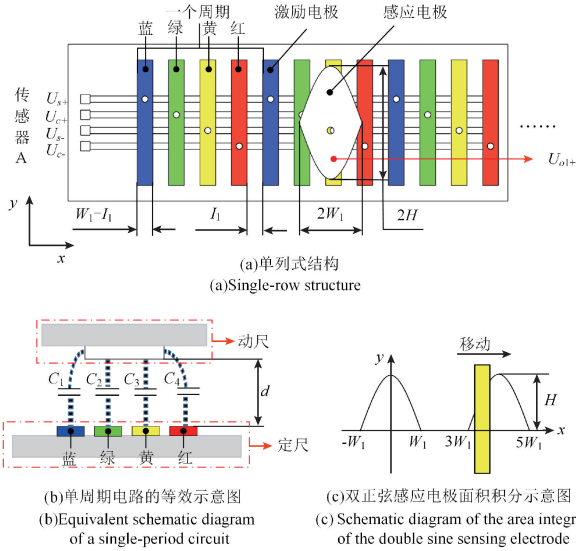


图1 单列式纳米时栅传感结构

Fig. 1 Single-row nano time-grating sensing structure

1.2 反射单列式结构设计

在单列式结构的基础上,本文提出了反射单列式结构,该结构在同一端增加一个反射和接收电极,其中反射电极与感应电极用引线直接相连,如图 2 所示,那么感应电极耦合产生行波信号后,反射电极有同样变化的行波信号。由于电容耦合原理,接收电极会产生与反射电极相位相等,幅值不等的行波信号,故接收电极输出的行波信号为 $U_{out1+} = k_n U_{o1+}$ 。 k_n 是反射电极与接收电极之间的电场耦合系数。

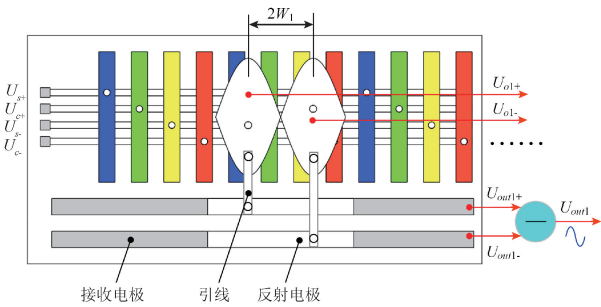


图2 反射单列式纳米时栅传感结构

Fig. 2 Reflective single-row nano time grating sensing structure

反射单列式结构避免了动定尺间的引线问题,降低了安装难度,然而该结构引入了反射电极和接收电极,增大了传感器内部的交叉串扰,本文提出差动结构来解决串扰问题,如图 2 所示。在之前的基础上增加一个感应电极、反射电极和接收电极,使得两个感应电极的空间距离相差 $2W_1$,即两个感应电极空间相差 π ,那么增加的接收电极输出的行波信号为 $U_{out1-} = k_n U_{o1-}$ 。 U_{o1-} 是增加的感应电极产生的行波信号。由于两个接收电极输出的行波信号相位相反,而受到的干扰信号却相同,通过减法器作差可以消除共模干扰信号,得到最终输出信号 U_{out1} 。在理想情况下传感器 A 的最终行波表达式可写成如下形式:

$$U_{out1} = U_{out1+} - U_{out1-} = A_1 \sin\left(\omega t + \frac{\pi x_1}{2W_1}\right) \quad (4)$$

式中: $A_1 = 2k_n A_n$ 。从式(4)中可以看出差动结构不仅可以减小共模干扰,而且可以使有效传感面积利用率增大,信号强度翻倍。

另外,信号 U_{out1} 和同频的参考信号 U_r 之间的相位差与位移 x_1 成比例关系。首先,使用过零比较器处理信号 U_{out1} 和 U_r ,将相位差转换为时间差;然后,通过高频脉冲插补测量每个方波信号的时间差来精确得到位移 x_1 [23]。

1.3 绝对式位移定位方法与结构设计

因为反射单列式结构的纳米时栅位移传感器是增量式传感器,不能实现绝对位移测量。因此,本文提出了将传感器 A 和相差一个周期的传感器 B 组合起来实现绝对位移测量功能的一种绝对位移定位方法,如图 3 所示。

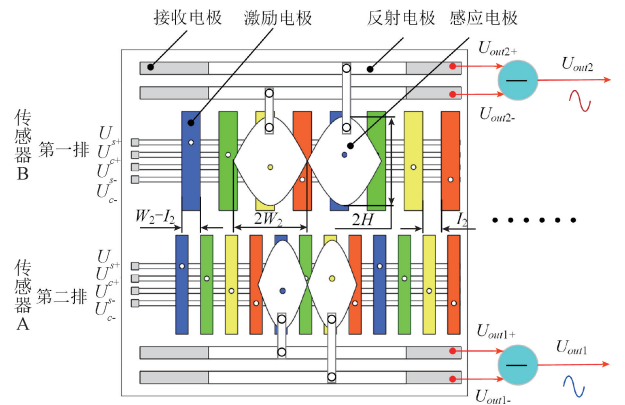


图3 直接反射绝对式传感结构

Fig. 3 Direct reflection absolute sensor structure

将传感器 A 和传感器 B 组合起来的传感器称为反射绝对式纳米时栅位移传感器。在动尺上,第一排感应电极通过导线连接至第一排反射电极上,第二排感应电极连接至第二排反射电极上,按照这种结构布置的传感

器称为直接反射绝对式纳米时栅位移传感器。传感器 B 的定尺激励电极宽度为 $W_2 - I_2$, 两激励电极之间的间隙为 I_2 , 周期数为 $N - 1$ 个周期, 那么同理得到传感器 B 的最终行波表达式为:

$$U_{out2} = A_2 \sin\left(\omega t + \frac{\pi x_2}{2W_2}\right) \quad (5)$$

式中: A_2 是行波信号幅值, x_2 是传感器 B 测量的单个周期内的位移值。将整个传感器的有效长度设为 L , 当前的绝对位移用 x_a 表示, φ_1 和 φ_2 分别表示 U_{out1} 和 U_r 之间的相位差, 以及 U_{out2} 和 U_r 之间的相位差。相位 φ_1 和 φ_2 在整个测量范围内呈锯齿状, 并且在单个测量周期内从 0 到 2π 线性变化, 如图 4 所示。 $\varphi_1 - \varphi_2$ 表示两个信号之间的相位差, 由于 $\varphi_1 - \varphi_2$ 在整个测量范围内不规则地变化。因此, 将 $\varphi_1 - \varphi_2$ 进行如下变换得到 $\Delta\varphi$ 。

$$\Delta\varphi = \begin{cases} \varphi_1 - \varphi_2, & \varphi_1 - \varphi_2 \geq 0 \\ \varphi_1 - \varphi_2 + 2\pi, & \varphi_1 - \varphi_2 < 0 \end{cases} \quad (6)$$

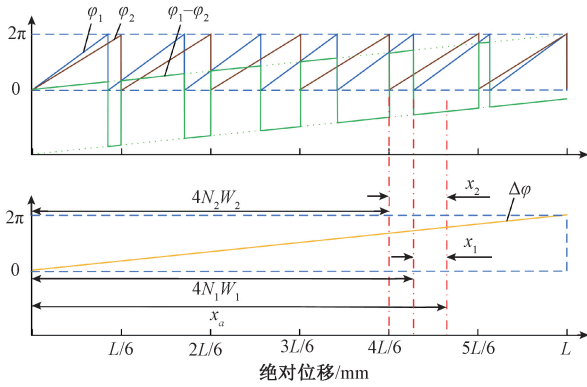


图 4 绝对位移定位方法

Fig. 4 Absolute displacement positioning method

显然, 绝对位移 x_a 和相位差 $\Delta\varphi$ 之间的关系是线性的。因此, 采用 $\Delta\varphi$ 可以实现传感器的绝对定位。首先, 可以通过向下取整函数得到上电后传感器 A 和传感器 B 的当前绝对位移所包含的最大周期数 N_1 和 N_2 的值为:

$$\begin{cases} N_1 = \left\lfloor \frac{\Delta\varphi L}{8\pi W_1} \right\rfloor \\ N_2 = \left\lfloor \frac{\Delta\varphi L}{8\pi W_2} \right\rfloor \end{cases} \quad (7)$$

最后, 绝对位移可以被表示为:

$$x_a = 4N_1 W_1 + x_1 \quad (8)$$

此处, x_1 为精测量分量, 而 $4N_1 W_1$ 为粗测量分量, 精测量分量和粗测量分量的组合可测量绝对位移 x_a 。绝对式纳米时栅位移传感器实际信号处理流程图如图 5 所示。

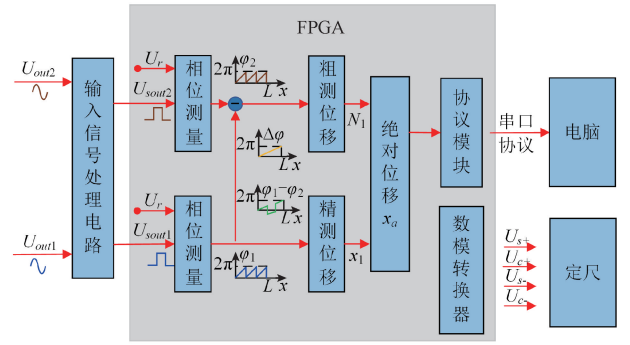


图 5 信号处理流程

Fig. 5 Flowchart of signal processing

2 实验平台和测量系统

为了测试传感器样机的性能, 构建了图 6 所示的实验平台。传感器样机的定尺安装在 Aerotech ABL2000 直线气浮导轨上, 如图 6 中①所示。传感器样机的动尺安装在 Physik Instrumente H-824 六自由度微动平台上, 如图 6 中②所示。使用雷尼绍 XL80 激光干涉仪作为传感器的测量基准, 其测量精度为 $\pm 0.5 \times 10^{-6}$, 如图 6 中③所示。激励信号产生电路和行波信号处理电路都被集成到信号处理系统中, 激励信号产生电路通过使用现场可编程逻辑门阵列 (field programmable gate array, FPGA) 和数模转换器 (digital to analog converter, DAC) 生成 4 个频率为 20 kHz 的正弦交流激励信号, 行波信号处理电路完成行波信号拾取、滤波、放大和整形处理后送入到 FPGA 计算得到绝对位移数据, 如图 6 中④所示。本文设计的传感器样机是通过印制电路板 (printed circuit board, PCB) 多层工艺制造的, 传感器样机如图 6 中⑤、⑥所示。传感器样机中传感器 A 和传感器 B 分别采用 150 和 149 周期, 总长度 $L = 600$ mm。

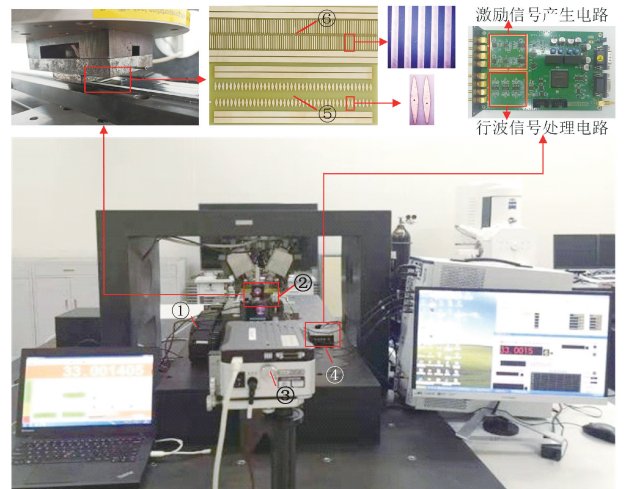


图 6 实验平台

Fig. 6 Experimental platform

3 实验结果和优化

3.1 串扰误差分析

由于传感器样机中传感器 A 和传感器 B 的测量误差机制是一致的。因此,只对传感器 A 的测量误差分析。将安装间隙调整为 0.35 mm,以步长为 0.2 mm,对传感器 A 使用静态采集连续采集 20 个点的位置数据。那么,传感器 A 的测量误差如图 7(a)所示。

测量结果表明,传感器 A 的测量误差峰峰值为 7.93 μm 。如图 7(b)中通过傅立叶变换获得相应幅值频谱表明:单周期测量范围内的测量误差主要由一次和四次谐波误差组成。其中四次谐波误差是由于非线性电场分布和边缘效应影响的主要结果^[23]。另外,单周期剩余测量误差存在较大的一次谐波误差,以下将重点分析一次谐波误差产生的原因。

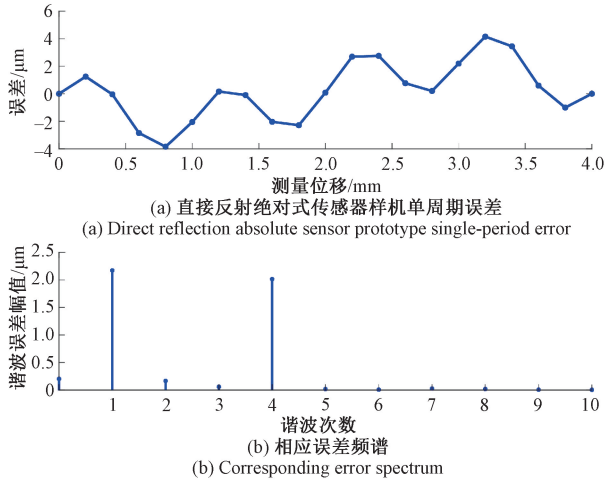


图7 传感器样机测量误差

Fig. 7 Measurement error of the sensor prototype

由于传感器 A 的两个接收电极距离信号 U_{c-} 的激励电极较近,那么耦合到的干扰信号包含较大的 $-\cos(\omega t)$ 成分,通过更改传感器 A 的四个激励信号连接顺序可以确认这个结果,即按照定尺激励电极从左到右依次通入的顺序为 U_{s+}, U_{c+}, U_{s-} 和 U_{c-} 更改为 U_{c+}, U_{s-}, U_{c-} 和 U_{s+} ,并使用示波器测量这两种状态下接收电极上耦合到的干扰信号。因此,传感器 A 的两个接收电极获得的耦合干扰信号分别为 $E_1 = -e_1 \cos(\omega t)$ 和 $E_2 = -e_2 \cos(\omega t)$,其中 e_1 和 e_2 是干扰信号幅值,且 $e_1 > e_2$,如图 8 所示。使用示波器得到两个接收电极耦合到的干扰信号幅值之间的差值,如表 1 所示。结果表明,采用差动结构无法完全消除两个接收电极上受到的干扰信号,通过信号作差仍然会有一定残留的干扰信号。以下将重点分析残留的干扰信号带来的影响。

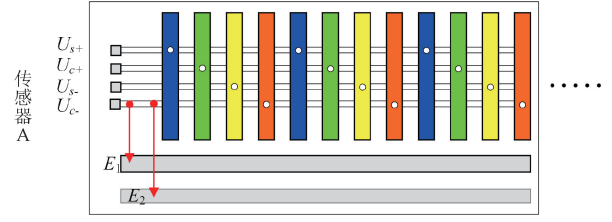


图8 直接反射结构串扰分析图

Fig. 8 Diagram of direct reflection structure interference analysis

表1 串扰实验表

Table 1 Interference experiment table

mV

接收电极	优化前串扰幅值 $\Delta e = e_1 - e_2$	优化后串扰幅值 $\Delta e = e_1 - e_2$
传感器 A	0.56	0

将耦合干扰信号 E_1 和 E_2 添加到耦合信号 U_{out1+} , U_{out1-} 中,可以得到更真实的 U_{rou1+} , U_{rou1-} 表达式:

$$\begin{cases} U_{rou1+} = k_n A_n \sin\left(\omega t + \frac{\pi x}{2W_1}\right) - e_1 \cos(\omega t) \\ U_{rou1-} = -k_n A_n \sin\left(\omega t + \frac{\pi x}{2W_1}\right) - e_2 \cos(\omega t) \end{cases} \quad (9)$$

两个接收电极输出的行波信号 U_{rou1+} 和 U_{rou1-} 通过减法器作差,得到最终输出信号 U_{rou1} :

$$U_{rou1} = U_{rou1+} - U_{rou1-} =$$

$$\left\{ \sqrt{\left(A_1 \sin \frac{\pi x}{2W_1} + e_2 - e_1\right)^2 + \left(A_1 \cos \frac{\pi x}{2W_1}\right)^2} \right. \\ \left. \sin\left(\omega t + \arctan \frac{A_1 \sin \frac{\pi x}{2W_1} + e_2 - e_1}{A_1 \cos \frac{\pi x}{2W_1}}\right) \right\} \quad (10)$$

将该相位与标准相位作差可得测量误差 E_{rou1} 为:

$$E_{rou1} = \left\{ \frac{2W_1}{\pi} \left[\arctan \frac{A_1 \sin \frac{\pi x}{2W_1} + e_2 - e_1}{A_1 \cos \frac{\pi x}{2W_1}} - \arctan\left(\tan \frac{\pi x}{2W_1}\right) \right] \right\} \quad (11)$$

令 $W_1 = 1, A_1 = 1, e_2 - e_1 = -0.002$ 时,对式(11)进行误差仿真分析,结果如图 9 所示。仿真验证得到,直接反射结构中激励电极引线方式对接收电极的交叉串扰会引入一次谐波误差。

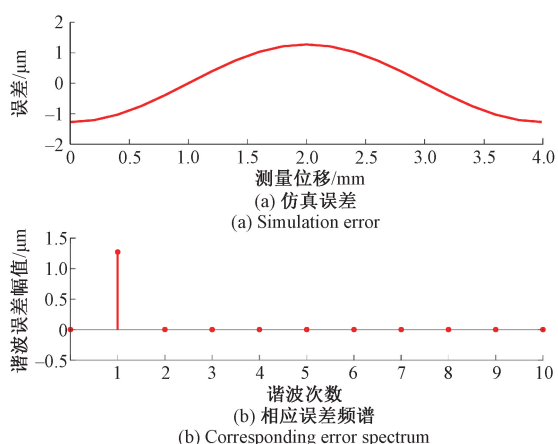


图9 误差仿真
Fig. 9 Error simulation

3.2 结构优化

为了减小直接反射绝对式结构中激励电极引线方式对接收电极的干扰,抑制一次谐波误差的产生,并且不改变该传感器的整体结构尺寸,实现小型化设计,提出了交叉反射结构,如图10所示。与直接反射结构相比,交叉反射结构仅仅只改变了动尺的引线方式,其他参数保持一致。交叉反射结构中第一排的感应电极通过交叉引线,与第二排的反射电极连接,第二排的感应电极与第一排的反射电极连接,按照这种结构布置的传感器称为交叉反射绝对式纳米时栅位移传感器。根据之前分析,同样将交叉反射绝对式纳米时栅位移传感器看成单独的传感器A和传感器B组合,把第二排的激励、感应电极和第一排的反射、接收电极组合称为传感器A,把第一排的激励、感应电极和第二排的反射、接收电极组合称为传感器B。

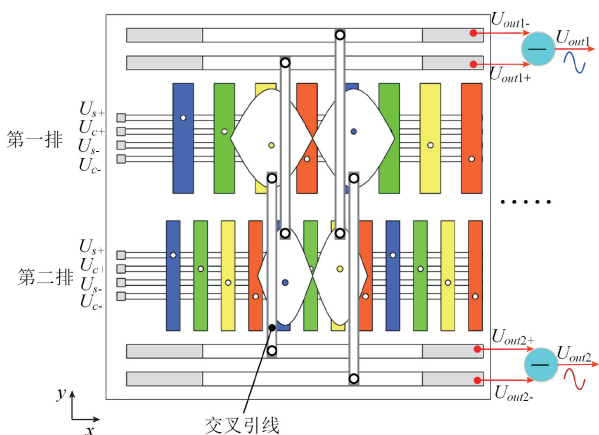


图10 交叉反射绝对式结构
Fig. 10 Absolute structure of cross reflection

传感器A和传感器B单独分析,交叉反射结构增大了激励电极和接收电极之间的距离,降低了激励电极对接收电极的电场强度,从而减小了干扰信号。然而,交叉反射结构并没有改变定尺的结构,从整体分析,交叉反射结构没有减小干扰信号,传感器A和传感器B同时施加激励信号时对同排的接收电极仍然存在耦合干扰信号。为了有效减小干扰信号,本文提出了分时方法。

为了实现分时方法,在硬件上切换继电器实现在不同时间段给传感器A和传感器B的激励电极通入激励信号,并且未连接到激励信号的电极接地来进一步抑制干扰信号。通过图11所示的过程,首先,等待多个时钟周期来判断数据状态是否稳定,若数据稳定,则将激励信号切换至传感器A的激励电极,得到传感器A的相位值 φ_1 。然后,再等待相同时钟周期,再次数据稳定之后,切换至传感器B的激励电极以获得传感器B的相位值 φ_2 。最后,通过绝对式位移定位方法计算获得绝对位移 x_a 。

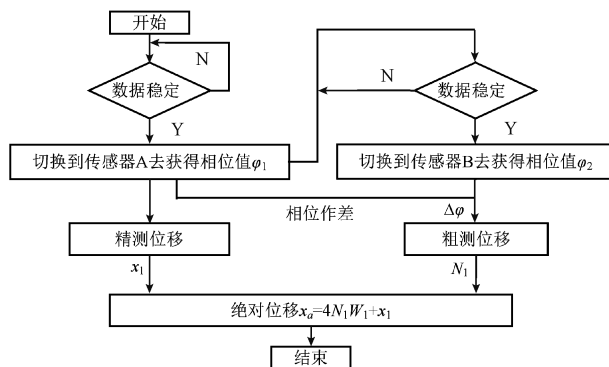


图11 分时流程图

Fig. 11 Flowchart of time-division

3.3 优化结构测试

为了验证分时交叉反射绝对式纳米时栅位移传感器样机的抗干扰能力,用示波器分析了两个接收电极之间干扰信号幅值的差值,实验结果列于表1中。

结果表明分时交叉反射绝对式传感器样机的干扰信号基本上被完全抑制,两个接收电极上的干扰信号幅值作差基本上为0。因此,交叉反射结构和分时方法相结合能够极大抑制交叉串扰。

同样将安装间隙调整为0.35 mm,以步长为0.2 mm,使用静态采集连续采集20个点,那么优化后传感器A的测量误差如图12(a)所示。

测量结果表明,在单个测量周期内,传感器A的误差峰峰值从7.93 μm减小到4.11 μm。图12(b)所示的误差频谱分析表明:与图7(b)所示频谱图相比,单周期测量范围内的一次谐波误差已得到明显减小,然而误差曲线中还剩下较大的四次谐波误差,其抑制方法将在之后的论文中进行详细分析。

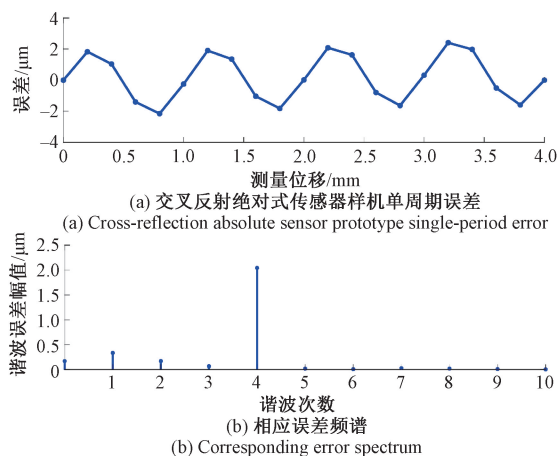


图12 传感器样机测量误差

Fig. 12 Measurement error of the sensor prototype

最后,将步长设置为 5 mm,连续采集 80 个点,得到分时交叉反射绝对式纳米时栅位移传感器样机的位移误差数据,将误差数据补偿到该传感器里,再次采集得到误差曲线如图 13 所示。结果表明,该传感器经过补偿后在 400 mm 范围内实现 ± 300 nm 的测量误差。

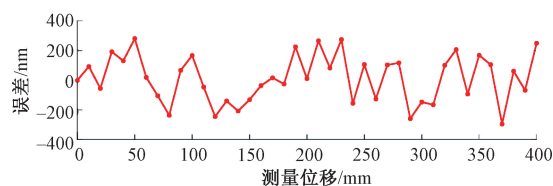


图13 传感器样机大量程测量误差

Fig. 13 Large range measurement error of the sensor prototype

4 结 论

本文提出了一种基于分时方法的高精度反射绝对式纳米时栅位移传感器。一方面,该传感器以反射单列式传感器为基础,将 N 周期的传感器 A 和 $N-1$ 周期的传感器 B 结合实现了绝对位移测量;另一方面,采用交叉反射结构和分时方法相结合的方式抑制交叉串扰。通过 PCB 工艺制造了传感器样机,搭建了实验平台,对反射绝对式纳米时栅位移传感器进行测试,得出以下结论:

1) 四路激励电极的引线方式对两个接收电极的影响不一致,采用差动结构只能消除共模干扰的部分,而残留的干扰信号会导致周期内出现一次谐波误差;

2) 将交叉反射结构和分时方法相结合可以增大激励电极与接收电极之间的距离,降低激励电极对接收电

极的电场强度,有效抑制了干扰信号;

3) 采用分时方法可以将未连接到激励信号的激励电极接地,进一步屏蔽传感器内部的交叉串扰,提高传感器的测量精度。

综上,交叉反射绝对式纳米时栅位移传感器既实现绝对位移测量,又只需要在定尺上引线,有利于小型化设计,便于实际安装,因此更具应用前景。

参考文献

- [1] 赵飞,梅雪松,李光东,等. 数控成型磨齿机加工误差在线监测及补偿[J]. 机械工程学报, 2013, 49(1): 171-177.
ZHAO F, MEI X S, LI G D, et al. Machining error online monitoring and compensation of numerical control forming gear grinding machine[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(1): 171-177.
- [2] 王可,董祉序,孙兴伟,等. 石油钻杆螺纹廓形参数在机测量系统研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(7): 1618-1625.
WANG K, DONG ZH X, SUN X W, et al. Study on on-machine measurement system for contour parameters of petroleum drill pipe thread [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(7): 1618-1625.
- [3] 林伟青,傅建中,许亚洲,等. 基于 LS-SVM 与遗传算法的数控机床热误差辨识温度传感器优化策略[J]. 光学 精密工程, 2008(9): 1682-1687.
LIN W Q, FU J ZH, XU Y ZH, et al. Optimal sensor placement for thermal error identification of NC machine tool based on LS-SVM and genetic algorithm[J]. Optics and Precision Engineering, 2008(9): 1682-1687.
- [4] GAO X, LI S, MA Q. Subdivided error correction method for photoelectric axis angular displacement encoder based on particle swarm optimization[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(10): 8372-8382.
- [5] 乔栋,续志军,吴宏圣,等. 绝对式光栅尺细分误差补偿方法[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 220-225.
QIAO D, XU ZH J, WU H SH, et al. A method for compensating interpolation error of absolute linear encoder[J]. Acta Optics, 2015, 35(1): 220-225.
- [6] HOU B, LI C, GAO Z, et al. Design, optimization, and compensation of a high-precision single-excitation

- absolute capacitance angular encoder up to $\pm 4''$ [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(10): 8161-8171.
- [7] ZHENG D, ZHANG S, WANG S, et al. A capacitive rotary encoder based on quadrature modulation and demodulation[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2015, 64(1): 143-153.
- [8] 李文昊, 张成山, 巴音贺希格, 等. 莫尔条纹法精确控制全息光栅光栅常数的研究[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(12): 2867-2873.
- LI W H, ZHANG CH SH, BA Y H X G, et al. Study on precisely controlling the grating constant of holographic grating with Moire pattern method[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(12): 2867-2873.
- [9] 乔栋, 续志军, 吴宏圣, 等. 基于回归分析的绝对式光栅尺精度提高方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(1): 21-23.
- QIAO D, XU ZH J, WU H SH, et al. Method of improving the accuracy of absolute linear encoder using regression analysis[J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2015, 43(1): 21-23.
- [10] PERRY M, ORR P, NIEWCZAS P, et al. High-speed interferometric FBG interrogator with dynamic and absolute wavelength measurement capability[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(17): 2897-2903.
- [11] SAEZ-LANDETE J, SALCEDO-SANZ S, ROSA-ZURERA M, et al. Generation of optical reference signals robust to diffractive effects[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(15): 1133-1135.
- [12] ZHANG Y, CAO W, QIAN Z, et al. Low grating lobe array antenna with electrically large property based on TM50 mode[J]. IEEE Access, 2019, 7: 32897-32906.
- [13] WEIWEN L, HUI Z, HONGLI Q. Research on novel grating eddy-current absolute-position sensor[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(10): 3678-3683.
- [14] JANG J, PARK J, LEE S. In-plane deformation measurement of thin packages using an atomic force microscope moiré method with a pseudo-phase-shifting technique [J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2012, 2(12): 1992-2000.
- [15] RAMALLI A, BONI E, SAVOIA A S, et al. Density-tapered spiral arrays for ultrasound 3-D imaging [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2015, 62(8): 1580-1588.
- [16] 张德福, 葛川, 李显凌, 等. 高精度位移传感器线性度标定方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(5): 982-988.
- ZHANG D F, GE CH, LI X L, et al. Linearity calibration method of the high-precision displacement sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(5): 982-988.
- [17] 王睿, 李新娥, 马铁华, 等. 基于容栅传感器的二维微小位移测量方法研究 [J]. 兵工学报, 2020, 41(7): 1441-1448.
- WANG R, LI X E, MA T H, et al. Two-dimensional small displacement measurement method based on capacitive grating sensor [J]. Acta Armamentarius, 2020, 41(7): 1441-1448.
- [18] ZANGL H, BRANDSTATTER B, CERMAK S P, et al. Simulation and robustness analysis for a novel capacitive/magnetic full-turn absolute angular position sensor [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2005, 54(1): 436-441.
- [19] GEORGE B, TAN Z, NIHTIANOV S. Advances in capacitive, eddy current, and magnetic displacement sensors and corresponding interfaces [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(12): 9595-9607.
- [20] AHN H J, JEON S. Error analysis of a new cylindrical capacitive sensor (CCS) for measuring five-dimensional motions of a rotor [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2012, 29: 148-163.
- [21] BAI Y, LU Y, HU P, et al. Absolute position sensing based on a robust differential capacitive sensor with a grounded shield window [J]. Sensors, 2016, 16(5): 680.
- [22] 彭凯, 于治成, 刘小康, 等. 单排差动结构的新型纳米时栅位移传感器 [J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(3): 734-740.

PENG K, YU ZH CH, LIU X K, et al. Novel nanometer time-grating displacement sensor with single row differential structure [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38 (3): 734-740.

- [23] PENG K, LIU X, CHEN Z, et al. Sensing mechanism and error analysis of a capacitive long-range displacement nanometer sensor based on time grating [J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(6): 1596-1607.

作者简介



刘小康, 1999、2002 和 2005 年于重庆大学分别获得学士、硕士、博士学位, 2008 年于合肥工业大学仪器科学与技术博士后流动站出站, 现为重庆理工大学教授、北京理工大学博士生导师, 主要研究方向为智能仪器与传感器。

E-mail: lxx@cqut.edu.cn

Liu Xiaokang received his B. Sc. degree, M. Sc. Degree and Ph. D. degree all from Chongqing University in 1999, 2002 and 2005, respectively. He finished his postdoctoral research at Hefei University of Technology in 2008. He is currently a professor at Chongqing University of Technology and doctoral supervisor at Beijing Institute of Technology. His main research interests include intelligent instruments and sensors.



梅现富, 2018 年于重庆人文科技学院获得学士学位, 现为重庆理工大学硕士研究生, 主要研究方向为智能仪器与传感器。

E-mail: meixianfu126@126.com

Mei Xianfu received his B. Sc. degree from Chongqing College of Humanities, Science & Technology in 2018. He is currently pursuing his M. Sc. degree at Chongqing University of Technology. His main research interests include intelligent instruments and sensors.



蒲红吉 (通信作者), 2011 年于重庆理工大学获得学士学位, 2014 年于重庆理工大学获得硕士学位, 2020 年于西安交通大学获得博士学位, 现为重庆理工大学助理研究员, 主要研究方向为嵌入技术与智能仪器。

E-mail: phongji@126.com

Pu Hongji (Corresponding author) received his B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Chongqing University of Technology in 2011 and 2014, and received his Ph. D. degree from Xi'an Jiaotong University in 2020. He is currently an assistant research fellow at Chongqing University of Technology. His main research interests include embedded technology and intelligent instrumentation.