

文章编号 1004-924X(2015)03-0784-10

光强正交调制型位移传感器的 数学模型与误差分析

付 敏¹, 彭东林^{1,2*}, 朱 革², 陈锡侯², 昌 驰²

(1. 重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400044;

2. 重庆理工大学 机械检测技术与装备教育部工程中心, 重庆 400054)

摘要:针对传统光学位移测量方法对环境要求高和制造精度难以提高等问题,提出了一种以交变光场为测量媒介的新型线性位移检测方法。基于提出的方法,设计了一种光强正交调制型位移传感器。该方法采用基于光强正交变化的两路电驻波合成电行波信号,通过对行波信号时间先后的测量实现空间位移的测量。为了深入理解传感器的传感机理,推导了传感器的测量模型,分析了与传感机理相关的关键因素对测量误差的影响。根据测量原理和测量模型的理论分析,研制出传感器原理样机,通过实验测试了各种关键因素对测量误差的影响,并进一步优化设计了传感器结构与参数。实验显示,优化后的传感器在 108 mm 测量范围内的测量精度达到 $\pm 0.5 \mu\text{m}$,是一种新的无需精细刻划的位移检测方案。

关键词:光电位移传感器;交变光场;线性位移;驻波调制;电行波;误差分析

中图分类号: TP212.14 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152303.0784

Mathematical model and error analysis of light intensity orthogonal modulation type displacement sensor

FU Min¹, PENG Dong-lin^{1,2*}, ZHU Ge², CHEN Xi-hou², CHANG Chi²

(1. State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

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

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

Abstract: Traditional measurement methods for optical displacement have higher demands for the environment and it is difficult to improve the manufacturing precision of measuring devices. Therefore, a novel linear displacement measurement method was proposed by using the alternating light field as measuring medium. On the basis of the method, a light Intensity orthogonal modulation type displacement sensor was designed. The method combined two electrical standing waves with orthogonal changes into the electrical traveling wave signals, then, it measured the time sequence of traveling waves to achieve the spatial displacement measurement. In order to explore the sensing mechanism of the sensor, the actual measurement model of the sensor was derived, and the influence

收稿日期: 2014-07-14; 修订日期: 2014-09-04.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51127001); 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2012AA041202); 重庆市“两江学者”计划专项资助项目

of key factors associated with the sensing mechanism on the measurement error was analyzed in detail. According to the analysis of the measuring principle and model theory, a sensor prototype was developed and various critical factors effecting on measurement error levels were tested. Then, sensor structures and parameters were optimized. The experimental results show that measuring errors of the optimized sensor are controlled within $\pm 0.5 \mu\text{m}$ in the measuring range of 108 mm, which demonstrates that proposed method is a new displacement detection solution without demands for precise photolithographic processing.

Key words: photoelectric displacement sensor; orthogonal variable light field; linear displacement; standing wave modulation; electrical traveling wave; error analysis

1 引言

高精度位移测量是精密加工、数控系统、直线伺服电机、计量测量以及国防军工等众多工业应用领域中的一项非常重要的技术^[1-2]。工程实际中,常见的精密位移测量方式以激光干涉仪和光栅编码器为主。商业应用的典型激光干涉仪通常可以达到亚纳米级分辨率,但实际能达到的测量精度和精确度要远低于这个水平。其主要误差来源于外界环境的干扰,包括大气温度、压力、湿度和大气湍流等引起的光学和电气的非线性误差。上述误差因为激光干涉测量光路长且暴露于空气中而难以得到有效抑制,因此,激光干涉仪通常只适用于精度要求高且工作环境相对较好的场合^[3-6]。光栅编码器用于各种位置检测设备上已经有几十年的历史。它的测量基准是按空间均分的周期性光栅刻线,测量时先利用光电扫描原理对栅线进行检测,再对栅线计数得到位移量^[7-8]。相对激光干涉仪而言,光栅编码器最大的优势是采用短且恒定强度的光束穿过光栅和传感器,从而减少了大气对光路的影响,提高了测量的抗干扰能力^[9]。光栅编码器的测量精度取决于等间距栅线的制造精度,而制造精度又依赖于先进的光刻技术,由于光刻技术又受先进制造工艺以及光波波长和光学衍射极限的制约,故其测量精度很难提高^[10-11]。国内外研究人员已从光刻方法、电子细分方法和光学检测方法上对其开展了大量的研究工作^[12-15],但随着精度要求的进一步提高及光栅刻划精密度日益逼近极限,这种测量精度和制造精度相互制约的矛盾关系日趋突出^[16]。

考虑到激光干涉仪和光栅编码器存在的问题,本文采用正交变化的光强作为测量媒介,通过

对时间和空间调制而成的驻波光场信号合成光场电行波信号;利用精度更高、更容易获取的时间量对空间位移进行测量,以提高位移测量精度;用较大面积的“栅面”代替精细的“栅线”,以降低传感器的制造难度。通过构建传感器测量模型,结合测量误差理论分析和实验验证,优化了传感器的结构参数。

2 传感器的结构设计与测量原理

2.1 结构设计

本文所设计的传感器结构如图1所示,其由交变光源、定极板、动极板和光电测头组成。其中,定极板上下两排空间错开半个“栅面”宽度的“栅面”阵列结构,相应地在动极板上设置4个用于调制透光面积的正弦形“栅面”结构。动、定极板间的“栅面”空间排列如图2所示,动极板“栅面”①~④将一个定极板“栅面”空间周期等分为4个空间相位。当动极板与定极板相对运动时,透过动极板4个“栅面”的光通量在空间相位上互相错开固定相位角。其中“栅面”①和②光通量空间相位相差 180° ，“栅面”③和④光通量空间相位相差 180° ,并且与“栅面”①和②在空间相位上分别相差 90° 。

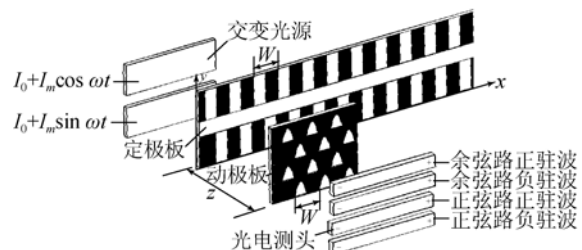


图1 传感器结构图

Fig. 1 Structure diagram of sensor

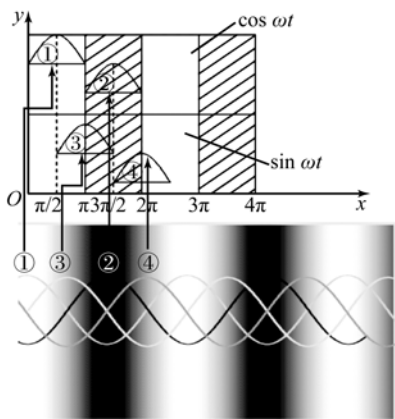


图 2 动极板“栅面”光通量变化的相互关系

Fig. 2 Relationship of luminous flux among the grating surfaces of moving plate

当“栅面”①和②的接收光强为呈余弦规律变化的交变光场时,通过光电转换可获得两路呈余弦规律交变的、空间相位相差为 180° 的调制驻波信号,将它们分别称作余弦路正驻波信号和余弦路负驻波信号;同样,当“栅面”③和④的接收光强为呈正弦规律变化的交变光场时,通过光电转换可获得两路呈正弦规律交变的、空间相位相差为 180° 的调制驻波信号,将它们分别称作正弦路正驻波信号和正弦路负驻波信号。将余弦路正驻波信号和余弦路负驻波信号求差,可以获得一个消除直流分量的余弦路驻波信号;将正弦路正驻波信号和正弦路负驻波信号求差,可以获得一个消除

$$S(x) = \left[\int_0^W A \sin \frac{\pi}{W} x dx - \int_0^x A \sin \frac{\pi}{W} x dx \right] - \int_0^x A \sin \frac{\pi}{W} x dx = -2 \int_0^x A \sin \frac{\pi}{W} x dx + \int_0^W A \sin \frac{\pi}{W} x dx = 2A \frac{W}{\pi} \cos \frac{\pi}{W} x, x \in [0, 2W]. \quad (1)$$

由式(1)可知,“栅面”①和②的透光面积之差随位移呈三角函数关系变化,采用同样方法,可以

$$S'(x) = \int_0^{\frac{W}{2}-x} A \sin \frac{\pi}{W} x dx - \int_0^{\frac{W}{2}+x} A \sin \frac{\pi}{W} x dx = -2A \frac{W}{\pi} \sin \frac{\pi}{W} x, x \in [0, 2W]. \quad (2)$$

当透过定极板的两组“栅面”的光强信号均为时间正交的交变信号时,则式(1)、式(2)中,反应

$$U_A = I_A S(x) = I_m \cos \omega t \left[2A \frac{W}{\pi} \cos \frac{\pi}{W} x \right] = K \cos \omega t \cdot \cos \frac{\pi}{W} x, \quad (3)$$

$$U_B = I_B S'(x) = I_m \sin \omega t \left[-2A \frac{W}{\pi} \sin \frac{\pi}{W} x \right] = -K \sin \omega t \cdot \sin \frac{\pi}{W} x. \quad (4)$$

由式(3)和式(4)可以看出,通过空间正交的“栅面”结构后,时间正交变化的光强信号形成了

直流分量的正弦路驻波信号;将余弦驻波信号和正弦驻波信号求和,将合成一路与位移相关的电行波信号。通过计算行波信号与固定相位的激励信号间的相位差,便可以实现对空间位移的测量。

2.2 测量原理理论推导

当动极板由图 1 的初始位置从左往右移动时,利用 4 个“栅面”透过面积变化与空间位移之间的关系,可以得到“栅面”①和②的透光面积变化情况,如图 3 所示。

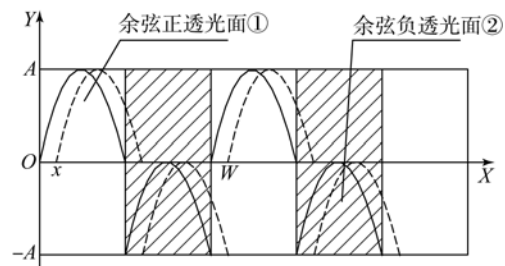


图 3 “栅面”透光面积随位移的变化关系

Fig. 3 Transmission area of gating surface varies with displacement

若“栅面”①与位移之间的关系为: $y = A \sin \frac{\pi}{W} x$, (W 为“栅面”宽度, x 为“栅面”移动的位移),则当动极板相对定极板发生图 3 所示的位移时,“栅面”①和②的透光面积之差为:

求得“栅面”③和④透光面积之差与位移的变化关系为:

“栅面”①和②与“栅面”③和④透光面积之差的光信号分别为:

具有“时空耦合”特性的光场驻波信号。最后,经过信号合成,即将式(3)、式(4)相加可得:

$$U = U_A + U_B = K \cos \omega t \cos \frac{\pi}{W} x - K \sin \omega t \cdot \sin \frac{\pi}{W} x = K \cos \left[\omega t + \frac{\pi}{W} x \right]. \quad (5)$$

式(5)即为所需的电行波信号,其与一路相位固定的同频参考余弦信号通过整形电路转换后,可形成同频的两路方波信号,并送入比相电路进行处理,如图4所示。利用高频时钟脉冲插补技术得到两路信号的相位差,经微处理器计算处理后即可得到传感器动极板与定极板之间的直线位移值。

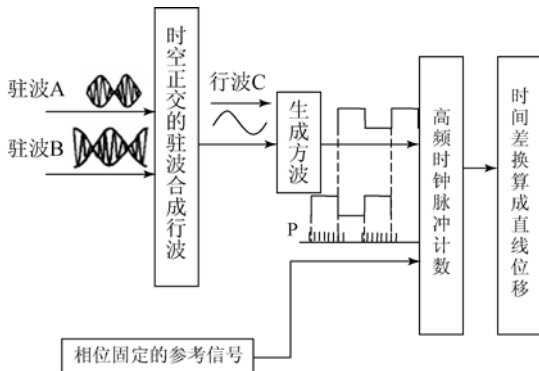


图4 传感器信号处理示意图

Fig. 4 Schematic diagram of sensor signal processing

3 数学模型与关键因素误差分析

3.1 数学模型

由式(5)可知,理论上传感器的测量精度仅与时钟脉冲插补精度有关,而实际上因为采用了光场驻波合成电行波的方式,故所有影响光场驻波信号质量的因素,如光场驻波幅值不相等、相位不正交、动极板和定极板安装不平行等都将给测量带来误差,而这些参数又与传感器的结构设计和工作条件密切相关。为了弄清楚传感器关键参数对测量精度的影响情况,本文从测量原理进行分析,建立了一个与四路输入驻波信号相关的数学模型。将动极板最终合成的行波信号做如下简化:

$$U = U_1 + U_2 = A \cos t \cos x - A \sin t \sin x. \quad (6)$$

将式(6)分成正弦路和余弦路信号分别考虑,若动极板的4个“栅面”的分布形式如图2所示,首先分析余弦路“栅面”①和②的电驻波信号情况。设经光电转换后,其电压幅值分别为 I_{a1} 和 I_{a2} ,借鉴前面对面积积分的分析方法,可得到随位移变化的“栅面”①和②的透光面积之差为:

$$S(x) = \left[\int_0^\pi I_{a1} \sin x dx - \int_0^x I_{a1} \sin x dx \right] - \int_0^x I_{a2} \sin x dx = (I_{a1} - I_{a2}) + (I_{a1} + I_{a2}) \cos x, x \in [0, 2\pi]. \quad (7)$$

这样正弦路的驻波就分解为:

$$U_A = (I_{a1} - I_{a2}) \cos t + (I_{a1} + I_{a2}) \cos t \cos x. \quad (8)$$

理想状态下同一正弦交变光场下,对应的光照强度幅值应为 $I_{a1} = I_{a2} = A/2$,则式(8)就变为标准的驻波表达式。正弦路相当于对余弦路做了 90° 的相移,设“栅面”③和④经光电转换后电压幅值分别为 I_{b1} 和 I_{b2} ,将 $x' = x + \pi/2$ 代入式(7),可得随位移变化“栅面”③和④透光面积之差为:

$$S'(x) = (I_{b1} - I_{b2}) - (I_{b1} + I_{b2}) \sin x, x \in [0, 2\pi]. \quad (9)$$

则正弦路驻波的表达式如下:

$$U_B = (I_{b1} - I_{b2}) \sin t - (I_{b1} + I_{b2}) \sin t \sin x. \quad (10)$$

将式(8)和式(10)相加,可得到分解后的行波表达式:

$$U = (I_{a1} - I_{a2}) \cos t + (I_{a1} + I_{a2}) \cos t \cos x + (I_{b1} - I_{b2}) \sin t - (I_{b1} + I_{b2}) \sin t \sin x. \quad (11)$$

这样,就将一个标准的行波表达式分解成了一个由四路不同位移信息调制的数学模型。

3.2 关键因素误差分析

由式(11)可知,实际获得的光场电行波信号因为受空间位置调制的四路电信号的影响,导致幅值或相位变化,进而影响行波质量,给测量带来误差。通过分析四路调制电信号的产生机理,可知影响行波信号质量的几个主要因素如下:

- (1) 两路正交交变光场的正交性以及幅值一致性;
- (2) 光场分布的均匀性以及光源出光的聚光性;
- (3) 动极板与定极板空间结构和安装引起的空间非正交性。

3.2.1 交变光场的一致性

当交变光场幅值不相等或相位不正交时,将直接影响两路驻波信号的幅值与相位。然而,由于交变光场时间正交性与光源激励电信号一致,

故可以通过现场可编程门阵列(FPGA)实现相位的精确控制。在此主要讨论光场幅值不一致时的误差影响。当两路驻波幅值不一致,但同一交变

光场下的两路电信号幅值相等时,令两驻波的幅值分别为 A_1 、 A_2 ,则式(11)可以写成以下驻波合成形式:

$$U = U_1 + U_2 = A_1 \sin t \cos x + A_2 \cos t \sin x = \sqrt{(A_1 \cos x)^2 + (A_2 \sin x)^2} \sin \left[t + \arctan \frac{A_2 \sin x}{A_1 \cos x} \right] = \sqrt{A_1^2 \frac{1 + \cos 2x}{2} + A_2^2 \frac{1 - \cos 2x}{2}} \sin \left[t + \arctan \frac{A_2 \sin x}{A_1 \cos x} \right] = \sqrt{\frac{A_1^2 + A_2^2}{2} + \frac{A_1^2 - A_2^2}{2} \cos 2x} \sin \left[t + \arctan \frac{A_2 \sin x}{A_1 \cos x} \right], \quad (12)$$

其中: $\arctan \frac{A_2 \sin x}{A_1 \cos x} = \arctan \left[\frac{A_2}{A_1} \tan x \right] = x'$ 。 $x \neq 0$, $\frac{\pi}{2}$, 且当 $x \rightarrow 0 \left(\frac{\pi}{2} \right)$ 时 $x' \rightarrow x$ 。当 $A_1 = A_2$ 时,两驻

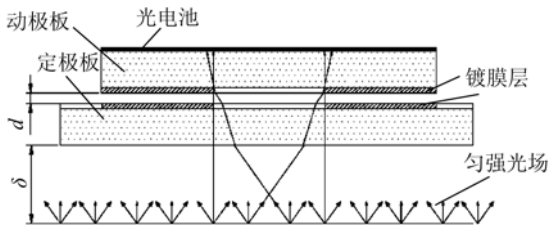
波合成一标准行波,而当 $A_1 \neq A_2$ 时,从式(12)可看出在行波的幅值部分引入了一个由 $\cos 2x$ 引起的随周期呈二次变化的量,且波动峰峰值为:

$$\left| \sqrt{\frac{A_1^2 + A_2^2}{2} + \frac{A_1^2 - A_2^2}{2}} - \sqrt{\frac{A_1^2 + A_2^2}{2} - \frac{A_1^2 - A_2^2}{2}} \right| = |A_1 - A_2|. \quad (13)$$

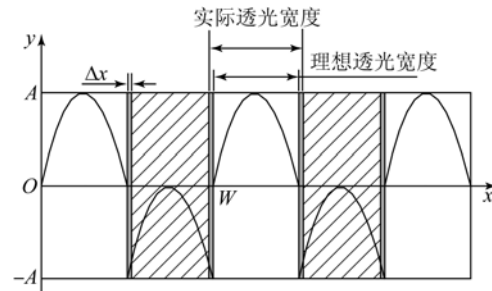
由式(12)、式(13)可知,两路交变光场幅值的差异会造成行波信号幅值在一个周期内有个二次的变化,这必然会给测量结果引入一个二次误差。

3.2.2 光场分布特性

除保证两路交变光场幅值一致和相位正交外,对每一路交变光场而言,具有强度均匀、方向性好、且出光面积较大的分布特征是保证每路交变光场下的两路驻波信号的幅值和相位相等的关键,其合成的驻波将影响光场电行波信号的幅值和相位。实际情况下,因为传感器的安装误差、平行光源的散射现象,无法保证光源出射光线全部与接收面绝对垂直,部分光线会出现散射现象,从而导致光电接收面接收的光线数目与位移呈现非线性变化关系。其中光场分布的散射现象对光电接收光信号的影响如图 5 所示。图中 d 表示动极板与定极板之间的间距, δ 表示光源与定极板之间的距离。



(a) 平行光源散射现象
(a) Scattering phenomenon of parallel light



(b) 实际透光面积与位移的关系
(b) Relationship between actual transmission area and displacement

图 5 动定极板间的光场分布示意图

Fig. 5 Schematic diagram of light field distributions between moving plate and fixed plate

从图 5 可以看出,因为光线的散射,经过折射透过定极板和动极板后,在光电接收端接收的光通量与真实的透光面积之间存在差异,这种差异会使每一路交变光场下的两路光信号的幅值不相等,也使得合成后的两路驻波信号的幅值相位不相等,其最终合成的电行波信号如式(11)所示。令 $k_1 = I_{a1} - I_{a2}$, $k_2 = I_{b1} - I_{b2}$, $k_3 = I_{a1} + I_{a2}$, $k_4 = I_{b1} + I_{b2}$,则式(11)可表示为:

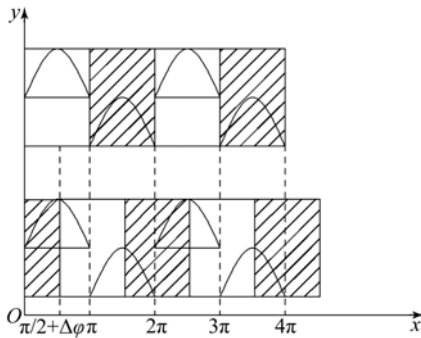
$$U = k_1 \cos t + k_2 \sin t + k_3 \cos t \cos x - k_4 \sin t \sin x = \sqrt{k_1^2 + k_2^2} \sin \left[t + \arctan \frac{k_2}{k_1} \right] - \sqrt{k_3^2 \cos^2 x + k_4^2 \sin^2 x} \sin \left[t - \arctan \frac{k_4 \sin x}{k_3 \cos x} \right]. \quad (14)$$

式(14)可分为两部分,当 $I_{a1} \neq I_{a2}$ 且 $I_{b1} \neq I_{b2}$ 时,减号前半部分为一次电信号量,减号后半部分

等效于式(12),故同样会引入一个二次误差。当 k_1, k_2, k_3, k_4 互不相等时,则行波会在式(12)的基础上再叠加一个一次电信号量,在测量结果中引入一次和二次误差。

3.2.3 传感器的空间结构特性

理想电行波信号是基于时间正交的交变光场和空间正交的调制光信号的合成效果,因此,传感器空间结构的透光面积和正交性同样对最终电行波信号的幅值与相位有影响。传感器空间结构的影响主要包括:由加工所造成的两路交变光场的透光面之间的实际空间相位差为 $\pi/2 + \Delta\varphi$,如图6(a)所示。



(a) 极板间“栅面”空间不正交

(a) Non-orthogonality of grating surfaces between fixed plates and moving plates

$$U' = K_3 \cos(x + \Delta\varphi) \cos t + K_4 \sin x \sin t = \sqrt{[K_3 \cos(x + \Delta\varphi)]^2 + (K_4 \sin x)^2} \sin \left[t + \arctan \frac{K_3 \cos(x + \Delta\varphi)}{K_4 \sin x} \right] = \sqrt{\frac{K_3^2 + K_4^2}{2} + \frac{[K_3^2 \cos 2(x + \Delta\varphi) - K_4^2 \cos 2x]}{2}} \sin \left[t + \arctan \frac{K_3 \cos(x + \Delta\varphi)}{K_4 \sin x} \right]. \quad (16)$$

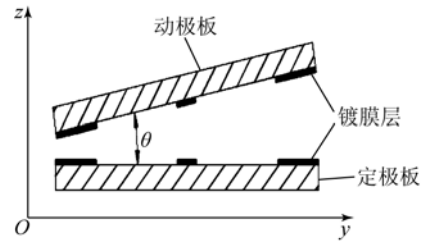
式(16)与式(12)类似,会给测量引入一个二次误差成分。因此,机械安装结构会给测量结果引入一个一次和二次相叠加的误差成分。

4 实验分析与优化

4.1 实验平台

为了验证理论分析的正确性,找出关键参数对测量误差的影响程度,实现传感器参数的优化设计,搭建了如图7所示实验系统。

实验采用发光二极管(LED)阵列加光学透镜的方式定制不同出光角度的条形面光源。利用FPGA产生两路频率为10 kHz、幅值相等、相位正交的激励信号来驱动LED阵列光源,从而获得



(b) 极板间安装误差

(b) Mechanical installation error between fixed plate and moving plate

图6 “栅面”加工误差与极板安装误差

Fig. 6 Machining error of grating surface and mechanical installation error of plates

这会使得最终合成的两路驻波信号空间不正交;其次,因为传感器为机械安装,其动极板和定极板之间存在一个倾角 θ ,如图6(b)所示,这会使两路交变光场透过动极板“栅面”阵列的透光面积一路大一路小,若相对面积小,感应到的信号幅值就小,其驻波信号就会表现为一路大一路小。在以上两个因素的影响下,式(14)合成电行波信号为:

$$U = k_1 \cos t + k_2 \sin t + k_3 \cos t \cos(x + \Delta\varphi) - k_4 \sin t \sin x. \quad (15)$$

式(15)前半部分与式(14)前半部分类似,会给测量引入一个一次测量误差,后半部分经进一步合成如下:

两路光强正交的交变光场。采用光学镀膜的方式加工传感器的定极板和动极板,如图7左图所示。所加工的“栅面”宽度为0.9 mm,定极板“栅面”阵列尺寸为108 mm × 12 mm。利用美国AEROTECH公司PRO225LM精密直线工作平台驱动动极板;用定制的相应尺寸的光电池作为光电接收器件,并将其固定于动极板背面,以接收光强信号。光强信号通过前置板处理后送入信号处理系统,同时通过示波器观察感应波形;信号处理系统将行波信号转换为位移数据,之后,送入计算机进行数据分析和处理。利用激光干涉仪RENISHAW ML10作为标准值,对传感器进行误差标定,得出误差曲线。最后分析波形与误差曲线的关系。

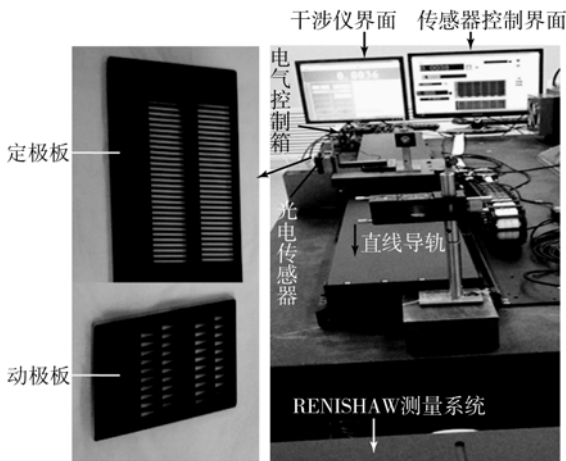


图 7 传感器极板结构及实验工作台

Fig. 7 Structure of sensor electrode and experimental platform

4.2 实验分析

为方便分析误差成分,每次在一个对极 1.8 mm 内,每隔 0.06 mm 采集一组数据,共采集 32 组数据值进行分析。

实验中将采集数据分成 3 组进行分析,以激光干涉仪的测量值为真值,根据真值由公式(5)计算出传感器理论值和时栅实际测量值,然后分别计算实际测量值与真值的差,将其作为实际误差,将测量值与理论值的差作为理论误差,并绘制误差曲线。表 1 中列出了初始实验的部分数据,通过计算实际测量误差和理论误差,绘制误差曲线如图 8(彩图见期刊电子版)中黑线和蓝线所示。从图中可以看出理论误差和实际误差的误差曲线变化规律是完全一致的,这说明理论计算误差和

实际测量误差相同,因此,为了方便分析,后续实验中以实际测量误差为准进行分析。下面针对主要测量误差,结合前面产生误差的主要因素进行分析和优化。

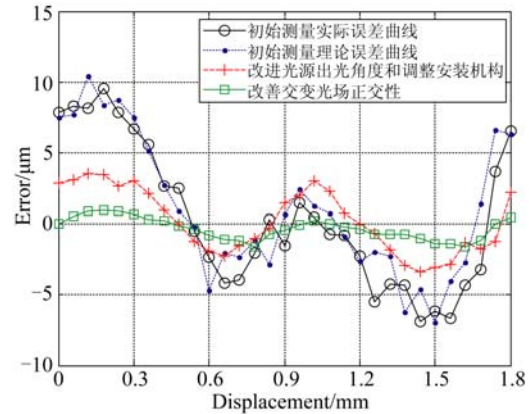


图 8 误差曲线图

Fig. 8 Diagram of error curves

图 8 中黑色曲线为初始误差曲线,峰峰值在 17 μm 左右,以一次和二次误差为主。根据前面分析可知,一次误差主要是由单路驻波的正负信号幅值不相等造成的,通过示波器观察单路驻波信号最大幅值之间的差值,如图 9 所示。图中 1~4 分别为:参考波形、余弦路正驻波最大幅值、余弦路负驻波最大幅值、正弦路正驻波波形。从图 9 中可以看出,余弦路正驻波的最大幅值为 2.68 V,余弦路负驻波的最大幅值为 2.80 V,它们的幅值相差 120 mV。

表 1 初始实验测量的部分数据对比

Tab. 1 Comparison of partial measured data in initial experiment

(μm)

序号	标准值	测量值	理论值	序号	标准值	测量值	理论值
1	0.66	8.06	0.66	9	961.23	962.68	960.27
2	121.36	131.69	121.24	10	1 081.46	1 081.11	1 080.38
3	241.33	249.82	241.09	11	1 213.0	1 209.22	1 211.87
4	361.06	365.82	360.70	12	1 381.21	1 373.61	1 379.83
5	481.13	481.56	480.65	13	1 443.54	1 437.47	1 442.10
6	600.23	594.94	599.63	14	1 561.03	1 555.42	1 559.47
7	721.1	718.07	720.38	15	1 681.32	1 681.05	1 679.64
8	841.56	837.86	840.72	16	1 802.46	1 807.00	1 800.66

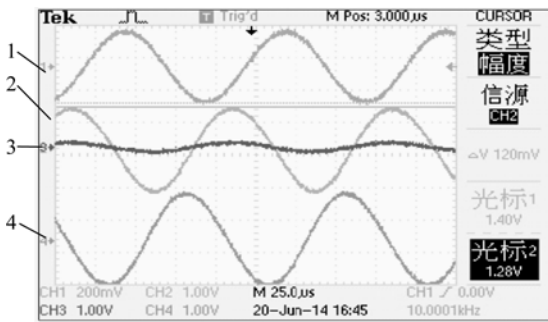


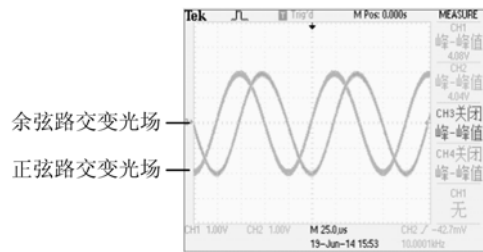
图 9 余弦路正负驻波波形

Fig. 9 Positive and negative standing waveforms of cosine road

由式(14)和式(15)可知,单路驻波幅值的差异主要是由光场分布存在发散现象和机械安装误差造成的。对于因光源发散现象造成的误差,由图 5 可知,可通过减少光源出射角度,即保证光线尽可能垂直于极板间的“栅面”透射出去,以及减少极板之间的安装距离,即减少散射光线经折射后对透光面积的影响,可以减少光源发散的误差影响;同时,由式(14)可知,通过改善光源的光强均匀性,减少同一交变光场下正驻波和负驻波信号幅值的差值,可以有效消除一次测量误差的影响;其次,针对如式(15)和式(16)所示的由于机械安装工艺和极板加工精度造成一次和二次测量误差,在改善交变光场的分布特性后,通过调整极板间的安装距离,调整极板之间的平行度、平面正对性、减少极板之间的倾角,可使单路驻波信号幅值之差降至最小。通过以上关于光场分布特性和机械安装的改善后,得到的误差曲线如图 8 中红线所示。可以看出,误差峰峰值在 $7\mu\text{m}$ 左右,测量结果中的一次误差成分已基本消除,二次误差虽有所减少,但依然很明显。

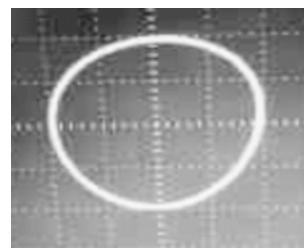
进一步分析二次误差的产生原因,由式(12)可知,除光场分布特性和机械安装结构以外,交变光场的正交性和幅值一致性是产生二次测量误差的另一主要因素。为此,将两路交变光场作为测试对象,用同一型号的光电池对产生的交变光场进行测试,测试效果如图 10 所示。图 10(a)为经光电转换后得到的两路交变光场的电信号,分别为余弦路交变光场和正弦路交变光场;图 10(b)为两路电信号的李沙育图。从图 10(a)可以看出,余弦路交变光场的峰峰值为 4.08 V ,正弦路

交变光场的峰峰值为 4.04 V ,它们的幅值相差 40 mV ,从图 10(b)可以看出,两路信号的李沙育图接近一个圆,说明相位正交性较好。通过调节两路交变光场的激励信号幅值,直到观测到的李沙育图为一个标准的圆时,再进行一次误差测试,得到如图 8 中绿线所示的误差曲线。可以看出,此时误差峰峰值降低至 $2\mu\text{m}$ 左右,误差成分中的二次误差得到较明显的抑制,与理论分析相吻合。剩下的误差主要为由传感器极板加工误差带来一次和二次误差成分,这部分误差属于固定误差,可以通过误差补偿进行优化。



(a) 交变光场电信号波形

(a) Signal waveform of alternating light field



(b) 交变光场李沙育图

(b) Lissajous figure

图 10 交变光场的正交性

Fig. 10 Orthogonality of alternating light field

4.3 传感器优化设计

根据以上理论分析和实验验证可知,传感器安装结构、光场分布特性以及光场正交性为传感器测量误差的主要来源,因此,在保证测量精度的同时,兼顾便于安装的原则,对传感器进行以下优化设计:(1)选取出光角度为 $\pm 5^\circ$ 的平行面光源,以获得较好的光场分布特性,从而减少式(14)的误差影响;(2)反复调整传感器极板之间的机械安装结构及间隙,减少因极板安装带来的误差;(3)调整两路交变光场的正交性和幅值一致性,以减少式(12)带来的误差;(4)用傅里叶谐波修正

方法对最终残余的二次误差进行实时修正^[17]。

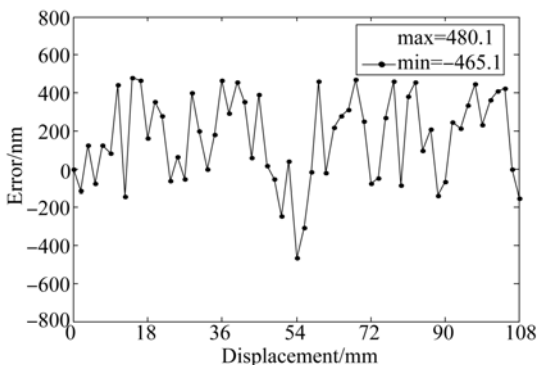


图 11 传感器误差曲线

Fig. 11 Sensor error curve

利用图 7 所示实验台进行实验。实验表明：优化设计后，在 108 mm 测量范围内，通过误差补偿，传感器测量精度可以达到 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ ，如图 11 所示。从图中可以看出，极内的一次和二次误差已基本消除，这也验证了前文误差分析的正确性。

5 结 论

本文通过分析以光强正交变化调制的线性位移传感器结构和测量原理，以及研究传感器测量模型和关键参数误差特性，得出以下结论：

参考文献：

- [1] 袁巨龙, 张飞虎, 戴一帆, 等. 超精密加工领域科学技术发展研究 [J]. 机械工程学报, 2010, 46(15): 161-177.
YUAN J L, ZHANG F H, DAI Y F, et al.. Development research of science and technologies in ultra-precision machining field [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(15): 161-177. (in chinese)
- [2] 裘祖荣, 石照耀, 李岩. 机械制造领域测量技术的发展研究 [J]. 机械工程学报, 2010, 46(14): 1-11.
QIU Z R, SHI ZH Y, LI Y. Research on the development of measurement technology in mechanical manufacture [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(14): 1-11. (in chinese)
- [3] WOOD T, LE ROUZOU J, FLORY F, et al.. Study of the influence of temperature on the optical response of

(1) 用较大面积的“栅面”代替传统光栅的“栅线”形式，可以有效降低传感器基体加工制造难度，(本研究中设计“栅面”宽度为 0.9 mm，远大于光栅“栅线”的栅距。(2) 用光强正交调制的交变光场，透过空间正交的“栅面”结构，可以合成一路高质量的，反应空间位移变化的电行波信号，通过测量所获得的电行波信号与参考信号过零点的时间差值，可以实现高精度时间测量空间的目标(本项研究的初步测量精度为 $\pm 0.5 \mu\text{m}$)。(3) 通过对交变光场的正交性、幅值一致性和光场分布特性的研究，对以交变光场为测量媒介的新型位移传感器中光源的选取以及光源对测量精度的影响提供了理论和实践依据。(4) 通过建立测量模型，对测量误差的主要成分进行了详细的理论分析和实验验证，为深入理解传感器测量机理和深入研究测量精度提供了较为系统的理论依据和可靠的实践依据。

以上研究工作证明了用光强正交调制方式实现高精度位移测量的可行性，为光电位移传感器摆脱精密制造与精密测量之间的矛盾关系提供了有效的解决方案；同时，传感器理论模型的建立和关键参数的分析研究，也为这种新型光电位移传感器的进一步优化设计打下了坚实的研究基础，为下一步研究指明了方向。

- interferometric detector systems [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2013, 203: 37-46.
- [4] FLEMING A J. A review of nanometer resolution position sensors: operation and performance [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2013, 190: 106-126.
- [5] KARRAI K, BRAUN P. Miniature long-range laser displacement sensor [J]. *Proc. Actuator, Bremen, Germany*, 2010: 285-288.
- [6] WANG B, WANG X, LI Z, et al.. Sinusoidal phase-modulating laser diode interferometer insensitive to intensity modulation for real-time displacement measurement with feedback control system [J]. *Optics Communications*, 2012, 285(18): 3827-3831.
- [7] DR. JOHANNES HEIDENHAIN GmbH. Exposed linear encoder [J]. *Germany*, 2012.
- [8] DR. JOHANNES HEIDENHAIN GmbH. Angle encoder with integral bearing [J]. *Germany*, 2010.

- [9] YUAN B, YAN H M, CAO X Q. A new subdivision method for grating-based displacement sensor using imaging array [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2009, 47(1): 90-95.
- [10] ZHENG C. Nanofabrication: principle, capabilities and limits [J]. *Springer, Germany*, 2008.
- [11] GROTHJOHANN T, TESTA L, LEUTENEGGER M, *et al.*. Diffraction-unlimited all-optical imaging and writing with a photochromic GFP [J]. *Nature*, 2011, 478: 204-208.
- [12] JAMS BAXTER. Super-resolution imaging: beyond the limit [J]. *Nature Photonics*, 2012, 6: 342.
- [13] MERINO S, RETOLAZA A, JUARROS A, *et al.*. A new way of manufacturing high resolution optical encoders by nanoimprint lithography [J]. *Microelectronic Engineering*, 2007, 84(5): 848-852.
- [14] U C C, LIAO C H, CHEN Y Z, *et al.*. Common-path laser encoder with Littrow configuration [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2013, 193: 69-78.
- [15] CARR J, DESMULLIEZ M Y P, WESTON N, *et al.*. Miniaturised optical encoder for ultra precision metrology systems [J]. *Precision Engineering*, 2009, 33(3): 263-267.
- [16] 国家自然科学基金委工程与材料科学学部. 机械工程学科发展战略报告(2011-2020) [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
National Natural Science Foundation of Engineering and Materials Science Division. *Mechanical Engineering Discipline Development Strategy Report (2011-2020)* [M]. Beijing: Science Press, 2010. (in chinese)
- [17] 彭东林, 刘小康, 张兴红, 等. 基于谐波修正法的高精度时栅位移传感器 [J]. *仪器仪表学报*, 2006, 27(1): 31-33.
PENG D L, LIU X K, ZHANG X H, *et al.*. High-precision time-grating displacement sensor based on harmonic wave correcting method [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, 27(1): 31-33. (in chinese)

作者简介:



付敏(1981—),男,湖南娄底人,2004年于桂林电子工业学院本科毕业,2009年于西华大学获得硕士学位,2014年于重庆大学获得博士学位,主要研究方向为智能仪器与传感器。E-mail: fum_0@sina.com

导师简介:



彭东林(1952—),男,重庆人,教授,博士生导师,1988年、1992年于重庆大学获得硕士、博士学位。重庆市首批学术学科带头人、重庆市“两江学者”,主要研究方向为计算机辅助测试技术与仪器、智能传感器。E-mail: pdl@cqut.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)