

一种光强正交调制的新型线性位移传感器研究

彭东林^{1,2} 付 敏¹ 朱 革² 郑方燕² 李 彦¹

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研究中心时栅传感及先进检测技术重庆市重点实验室, 重庆 400054

摘要 介绍了一种光强正交调制式新型线性位移检测方法。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, 将空间位移的变化调制到电行波信号相位差的变化上, 用鉴相的方法实现空间位移的测量。为了优化传感参数并提高测量精度, 对传感器不同参数条件下光场分布情况与误差特性进行了研究。根据其结构特征, 对光场分布引起的测量误差进行分析, 并利用 Tracepro 软件建立三维光场仿真模型, 对不同参数条件下光场分布进行分析; 再通过实验验证, 得到不同参数与误差特性之间的关系; 根据仿真和实验结果, 对传感器参数进行优化设计。初步实验表明: 在 108 mm 测量范围内, 传感器精度达到 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 。为此新型传感器优化设计和精度提高提供了可靠的理论依据和技术支持。

关键词 测量; 位移测量; 光强调制; 行波合成

中图分类号 O438 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.1212007

Study on a Novel Linear Displacement Sensor Based on the Orthogonal Modulating Light Intensity

Peng Donglin^{1,2} Fu Min¹ Zhu Ge² Zheng Fangyan² Li Yan¹

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

² Chongqing Key Laboratory of Time-Grating Sensing and Advanced Testing Technology, Engineering Research Center of Mechanical Testing Technology and Equipment, Ministry of Education, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China

Abstract A novel linear displacement detected method based on electrical travelling wave generation using alternating light field standing wave is proposed. By modulating the displacement values to the changes of phase difference of electrical travelling wave signal, the spatial displacement is measured by using the method of phase discrimination. In order to optimize the sensor parameters and improve the measurement precision, the error characteristics, caused by light scattering phenomenon, are studied under different parameter conditions. Firstly, according to the characteristics of the sensor structure, measurement error caused by light field distribution is theoretically analyzed and a three-dimensional simulation model is built using the Tracepro software to analyze the light field distribution under different parameter conditions. And then, the relationship between the light field distribution under different parameters and error characteristics is obtained by experimental verification. Finally, the sensing parameters can be optimized based on the simulation and experimental results. The preliminary experimental results prove that the measuring errors of the sensor are controlled within $\pm 0.5 \mu\text{m}$ for an effective measuring range of 108 mm. A reliable basis of theoretic and technical is provided for the further design optimization and precision improvement of sensor.

Key words measurement; displacement measurement; modulating light intensity; travelling wave synthesis

OCIS codes 120.4570; 120.5060; 130.6010; 350.2770

收稿日期: 2014-07-10; 收到修改稿日期: 2014-08-08

基金项目: 国家自然科学基金(51127001, 51305478)、国家 863 计划(2012AA041202)、重庆市“两江学者”计划专项经费

作者简介: 彭东林(1952—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事精密测试技术及仪器方面的研究。

E-mail: pdl@cqut.edu.cn

1 引言

光学位移测量,经过上百年的发展,在精密位移测量领域占据了绝对主导地位。实际工程中的常见光学位移测量方式以光栅传感器应用最为广泛。光栅测量基准是按空间均分的周期性光栅刻线,利用光电扫描原理对栅线进行检测,通过对栅线的计数而得到位移量^[1-2]。其测量精度取决于等间距栅线的制造精度,制造精度又依赖于精密的光刻技术。而光刻技术又受先进的制造工艺以及光波波长和光学衍射极限的制约^[3-5]。因此,光栅栅距往往只能达到微米量级,需要对叠栅条纹信号进行高倍数高精度的电子细分,才能实现更高精度和分辨力的测量^[6-10]。细分的精度受光栅信号的正弦性、正交性、一致性以及运动速度的波动性等因素直接影响^[11-12]。因此,精密光刻和高倍稳定的细分是光栅测量精度提高的两大技术难点。

针对光栅技术固有的症结问题,本文提出用正弦形“栅面”代替“栅线”,从原理上消除光电感应信号中各种谐波成分的影响,提高了光栅信号的正弦性,且降低了精密“栅线”制造的难度;用交变光场耦合合成光场电行波的方式,代替叠栅条纹幅值变化的

方式;用精度更高、更容易获取的时间量对空间位移进行测量,提高位移测量精度;并对不同参数条件下光场分布和误差特性进行仿真分析和实验验证,以优化传感器设计,实现高精度、高可靠的位移测量。

2 传感器结构设计

传感器结构如图 1 所示,由交变光源、定极板、动极板和光电测头组成,定极板设置上下两排空间正交“栅面”阵列结构,动极板上对应地设置四个用于透光面积调制的正弦形“栅面”结构。当动极板相对定极板沿左右方向作直线运动时,透过动极板四个正弦形“栅面”的透光面积将发生相应的周期性变化,其中“栅面”①透光面积之差的变化关系与“栅面”③和④透光面积之差的变化关系在空间上形成正交关系,于是“栅面”①和②透光面积之差与“栅面”③和④透光面积之差随空间位移变化产生空间交变且正交的两路光场信号,当两路光场信号同时又分别为时间正交的交变光场时,便可以获得两路时间和空间正交的光场驻波信号,并最终合成并转换为与位移相关的电行波信号。

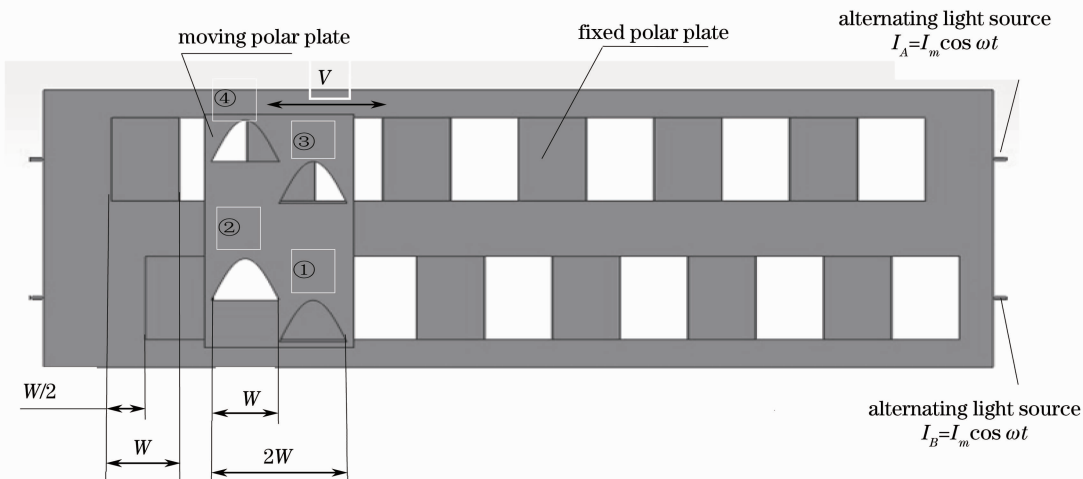


图 1 传感器结构原理图

Fig. 1 Structure principle of sensor

定极板和动极板的“栅面”为黑白阵列,均采用光刻、镀膜的加工工艺实现。加工过程中,借助集成电路图形设计软件 Tanner 生成相应的矩形“栅面”图形和正弦“栅面”图形,然后采用刻蚀镀膜制作工艺进行复制,制作过程根据图形形状一次成型,制作难度不会因为图形形状的不同而变得复杂。同时,由于光刻加工中,分辨率取决于最小图形特征尺寸大小,而采用较大特征尺寸的“栅面”形式,其中正弦

“栅面”为宽度 0.9 mm 高度 4.5 mm 的半正弦形,矩形“栅面”为 0.9 mm × 12 mm 的矩形形状,其制作难度要远低于常规光栅的精密栅线加工。

3 光强正交调制的理论分析

3.1 测量原理

图 1 所示传感器测量原理是:动极板在定极板上方的左右移动,造成动极板透光栅面的面积发生

周期性变化,配合光强的正交变化,将动极板的位移调制到电信号的相位变化上来,通过对相位大小的测量,实现空间位移的测量。先考虑图1中光强按正弦规律变化的“栅面”①和②的透光面积变化关系如图2所示。令“栅面”高度为 A ,则图2中“栅面”①和② y 方向的跨度与位移 x 的关系分别为 $y = A\left(\sin \frac{\pi}{W}x - 1\right)$ 与 $y = A\sin \frac{\pi}{W}x$, (W 为“栅面”宽度, x 为“栅面”移动的位移),当动极板相对定极板发生图2所示位移变化时,“栅面”①和②的透光面积之差的变化情况为

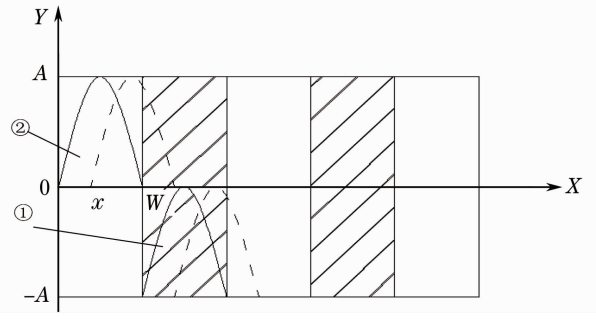


图2 “栅面”透光面积随位移的变化关系
Fig. 2 Relationship between transmission area of gate surface and displacement

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

同样的方法,可以求得“栅面”③和④透光面积之差与位移之间的变化关系为

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

当接收的光强信号分别作正弦和余弦规律变化时,(1)、(2)式反映光通量的变化关系分别为

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

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

式中 $K = -2A \frac{W}{\pi} \cdot I_m$ 。由以上分析可知,空间正交分布的正弦形“栅面”将透光面积随空间位移的变化关系调制成(1)式和(2)式所示的余弦与正弦三角关系,再对光强信号进行时间调制后,可以获得(3)式和(4)式所示驻波光场信号,将(3)式和(4)式合成,可得

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

不难看出,(5)式为一个调制了空间位移 x 的电行波信号,将该信号与一路相位固定的激励信号($I_A = I_m \cos \omega t$ 或 $I_B = I_m \sin \omega t$)分别整形后得到两路方波信号,对两路方波信号的上升沿时间差进行测量,便可以实现(5)式的相位差 $\Delta\varphi$ 测量,再由 $\Delta\varphi = -\frac{\pi}{W}x$ 得到被测直线位移 x 的大小。

3.2 新方法的原理优势

新的测量方法相比传统光栅测量方法有两个主要的不同点:1)用差动的正弦“栅面”进行空间调制;2)用交变光场进行时间调制。这两个差异带来的效果是多方面的。首先,利用正弦“栅面”的空间滤波效果,抑制高次谐波成分,从而获取更为纯净的正弦

电信号。文献[13-14]分别用正弦透光窗口和正弦微窗(正弦窗口宽为 $20 \mu\text{m}$ 高为 $100 \mu\text{m}$)证明了对高次谐波的良好抑制效果,在此基础上采用更大面积的正弦透光面,可降低制造难度;同时采取空间相位相差 180° 的正弦面透光面积求差的方式,将进一步减少因制造误差对空间调制电信号的影响。其次,采用交变光场的时间调制,将空间位移的变化调制到交变电信号的相位变化上,一方面减少传统方法中光强扰动对测量的影响,提高动态测量的分辨力和抗干扰能力;另一方面,获取与位置相关的电行波信号,无需额外细分电路,所得电信号直接参与测量,并且采用高精度时钟脉冲对空间位移的测量,可以极大提高测量的分辨率和精度。最后,采用正弦

透光面积的积分效果,相比传统矩形透光面积的积分,对由加工造成的透光面积误差变化更为缓慢,对最终测量精度的影响也更平滑,而不是一个阶跃突变的过程,其谐波成分少,更有利于对测量误差的修正。关于这一点,以一个实例进行说明。

图 3(a)中在 $x \in \left[-\frac{(4n-1)\pi}{2}, \frac{(4n+1)\pi}{2}\right]$, $n=0,1,2,\dots$ 的 x - y 平面空间内等间隔分布透光和不透光区域,一理想矩形透光面的 y 方向跨度与位

移 x 的关系为 $y = A \left(x \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]\right)$,但因加工误差导致实际 y 方向跨度与位移 x 的关系为 $y = A \left(x \in \left[-\frac{\pi}{2} + \delta, \frac{\pi}{2} - \delta\right]\right)$,该矩形面从图示位置开始沿 x 轴正向运动,则理想透光面积与实际透光面积之差随位移 x 的变化关系如图 3(c) 所示,从图中可以看出,矩形面由加工引起的透光面积误差是一个周期性突变过程,最大误差为 $\Delta S = 2\delta A$ 。

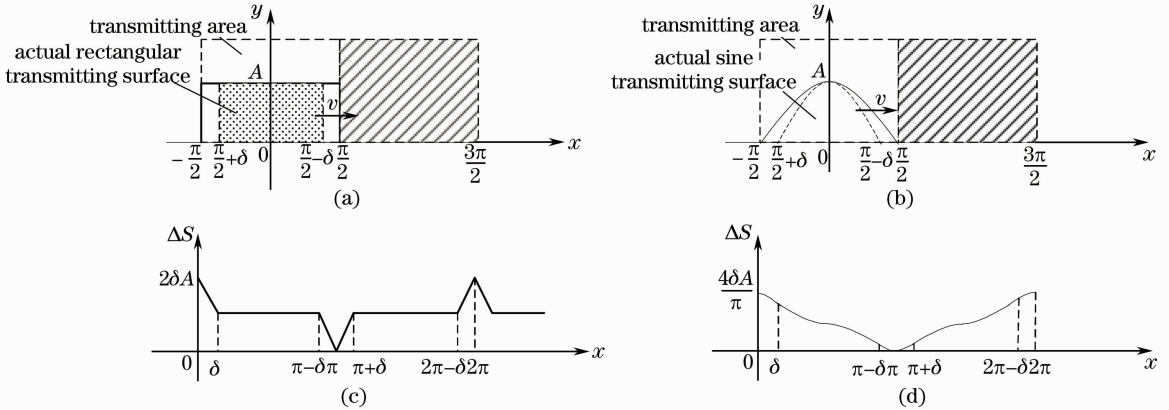


图 3 矩形面和正弦面的透光面积误差对比。(a) 有加工误差的矩形透光面;(b)有加工误差的正弦透光面;
(c) 矩形面透光面积误差与位移关系;(d)正弦面透光面积误差与位移关系

Fig. 3 Contrast of transparent area error between rectangular surface and sine surface. (a) A rectangular transmitting surface with machining error; (b) a sine transmitting surface with machining error; (c) relationship between transparent area of rectangular surface and displacement; (d) relationship between transparent area of sine surface and displacement

图 3 (b) 与图 3 (a) 一样,在 $x \in \left[-\frac{(4n-1)\pi}{2}, \frac{(4n+1)\pi}{2}\right]$, $n=0,1,2,\dots$ 的 x - y 平面空间内等间隔分布透光和不透光区域,一理想正弦透光面的 y 方向跨度与位移 x 的关系为 $y = A \cos x \left(x \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]\right)$,但因加工误差导致实际 y 方向跨度与位移 x 的关系为 $y = A \cos \frac{\pi}{\pi - 2\delta} x \left(x \in \left[-\frac{\pi}{2} + \delta, \frac{\pi}{2} - \delta\right]\right)$,同样,当该正弦面从图示位置开始沿 x 轴正向运动,则理想透光面积与实际透光面积之差随位移 x 的变化关系如图 3(d) 所示,从图中可以看出,正弦面由加工引起的透光面积误差是一个周期性渐变的一次误差成分,最大误差为 $\Delta S = \frac{4\delta A}{\pi} < 2\delta A$ 。

从以上分析可看出,同样的制造误差,正弦形“栅面”相比矩形“栅面”对面积误差的影响要小,且是一个渐变的变化过程,更有利于测量误差的修正

和补偿。

4 光场分布误差分析与仿真

4.1 光场分布误差分析

由传感器测量原理可知,频率稳定、强度均匀、方向性好、且有较大出光面积的交变光场,是实现时间量测量空间量的关键。而实际上,因为平行光源散射光线无法保证与接收面绝对垂直,部分光线出现散射现象,导致光电接收面接收的光线数目与位移变化呈现非线性变化,如图 4(a)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,图 4(b)表示光源散射在光电接收面接收透光面积的差异。与图 4 所示相同的情形,设 B 为另外一组正弦透光面的高度,则这种因光源散射造成光敏接收单元接收透光面积的变化,导致实际两路交变光场下产生的透光面积与位移变化关系如下:

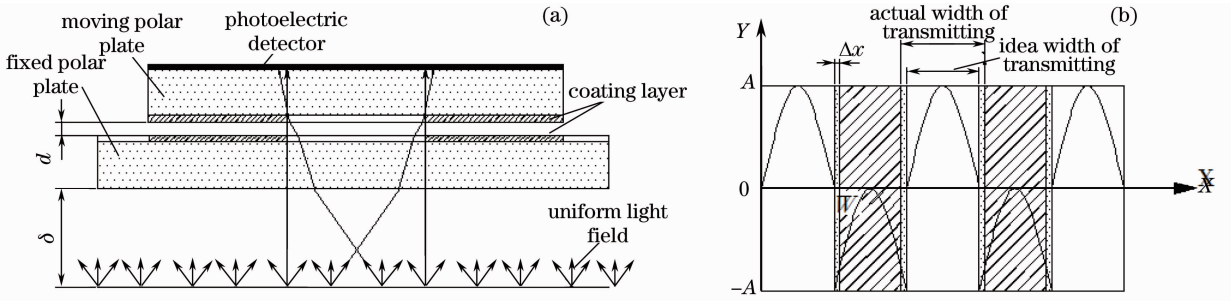


图 4 动定极板间的光场分布示意图。(a) 平行光源散射现象；(b) 实际透光面积与位移关系

Fig. 4 Schematic diagram of the light field distribution between the moving plate and fixed plate. (a) Parallel light scattering phenomenon; (b) Relationship between actual transmission area and displacement

$$S_1(x) = \int_0^{x+\Delta x} A \sin \frac{\pi}{W} x dx - \left[\int_0^W A \sin \frac{\pi}{W} x dx - \int_0^{x-\Delta x} A \sin \frac{\pi}{W} x dx \right] = -2A \frac{\pi}{W} \cos \frac{\pi}{W} \Delta x \cos \frac{\pi}{W} x = K_1 \cos \frac{\pi}{W} x, \quad (6)$$

$$S_2(x) = \int_{\frac{W}{2}-x+\Delta x}^{\frac{W}{2}+x+\Delta x} B \sin \frac{\pi}{W} x dx - \int_0^{\frac{W}{2}+x+\Delta x} B \sin \frac{\pi}{W} x dx = -2B \frac{\pi}{W} \cos \frac{\pi}{W} \Delta x' \sin \frac{\pi}{W} x = K_2 \sin \frac{\pi}{W} x. \quad (7)$$

最终合成电行波的表达式为

$$U' = S_1(x) \sin \omega t + S_2(x) \cos \omega t = K_1 \cos \frac{\pi}{W} x \sin \omega t + K_2 \sin \frac{\pi}{W} x \cos \omega t = \sqrt{\left(K_1 \cos \frac{\pi}{W} x\right)^2 + \left(K_2 \sin \frac{\pi}{W} x\right)^2} \sin \left[\omega t + \arctan \left(\frac{K_2}{K_1} \tan \frac{\pi}{W} x \right) \right] = \sqrt{\frac{K_1^2 + K_2^2}{2} + \frac{K_1^2 - K_2^2}{2} \cos \frac{2\pi}{W} x} \sin \left[\omega t + \arctan \left(\frac{K_2}{K_1} \tan \frac{\pi}{W} x \right) \right], \quad (8)$$

式中 $K_1 = -2A \frac{\pi}{W} \Delta x$, $K_2 = -2B \frac{\pi}{W} \Delta x'$ 。由(8)式可以看出, 所得电行波信号幅值部分引入了一个由 $\cos \frac{2\pi}{W} x$ 引起的随周期呈二次变化的量, 且波动峰峰值为

$$\left| \sqrt{\frac{K_1^2 + K_2^2}{2} + \frac{K_1^2 - K_2^2}{2}} - \sqrt{\frac{K_1^2 + K_2^2}{2} - \frac{K_1^2 - K_2^2}{2}} \right| = |K_1 - K_2|. \quad (9)$$

由(8)式和(9)式可知, 电行波信号幅值在一个周期内的二次变化, 会给测量结果引入一个二次误差, 同时可知通过改进两路交变光场分布均匀性、聚光特性和光照强度一致性, 可以减少该误差的影响。

4.2 光场分布仿真与分析

为验证光场的分布对透光面积非线性变化的影

响, 用光学仿真软件 tracepro 构建图 5 所示模型, 模型中采用 LED 点阵模块作为光源, 通过设置 LED 之间的间隔保证接收面上光照强度均匀分布, 设计定极板和动极板的基体为透光性好的石英玻璃, 一面分别采用光学镀膜生成不透光的矩形“栅面”阵列结构, 以其中一个交变光场对应的两组动极板“栅

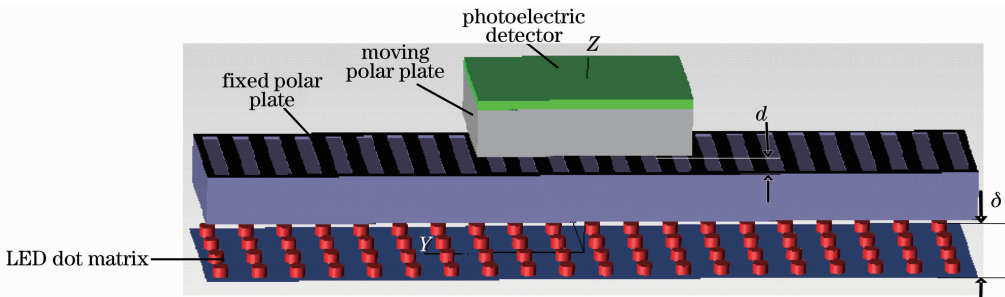


图 5 传感单元三维仿真模型

Fig. 5 Three-dimensional simulation model of the sensing unit

面”阵列为研究对象,对引起透光面积非线性变化的光线散射角度、光源与定极板之间安装距离、以及动极板和定极板之间的距离几个因素进行仿真分析。

4.2.1 不同光源散射角度

光源散射角度无法保证绝对垂直,是造成光电接收面光场分布不均匀的主要因素之一,为了了解不同出光角度对光场分布的影响,通过仿真比较出光角度为 $\alpha = \pm 5^\circ$ 和 $\alpha = \pm 10^\circ$ 的光场分布情况如

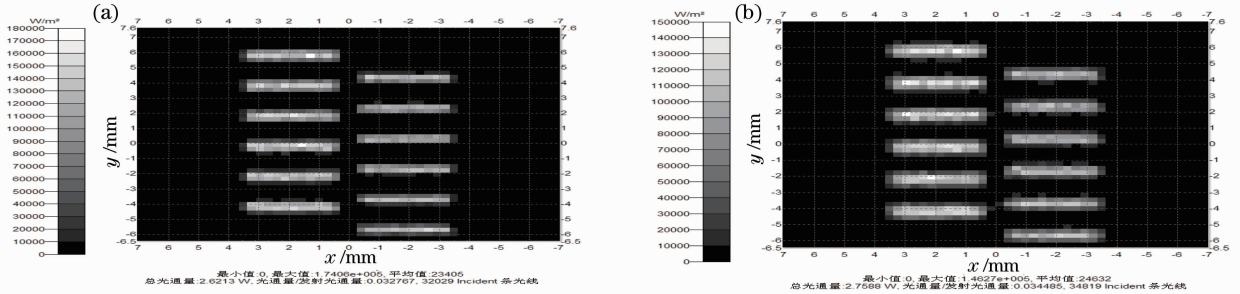


图 6 光源不同散射角度时光电接收面的光场分布图。(a) $\alpha = \pm 5^\circ$, $d = 0.2$ mm, $\delta = 2$ mm; (b) $\alpha = \pm 10^\circ$, $d = 0.2$ mm, $\delta = 2$ mm

Fig. 6 Diagram of the light field type distribution of the photoelectric receiver surface for different light scattering angles.

(a) $\alpha = \pm 5^\circ$, $d = 0.2$ mm, $\delta = 2$ mm; (b) $\alpha = \pm 10^\circ$, $d = 0.2$ mm, $\delta = 2$ mm

4.2.2 不同间距 d

当光源散射角度为 $\alpha = \pm 10^\circ$, 光源安装间距 $\delta =$

2 mm, 改变动定极板间距 d 分别为 1 mm 和 0.04 mm 时, 光电接收面的光场分布情况如图 7 所示。

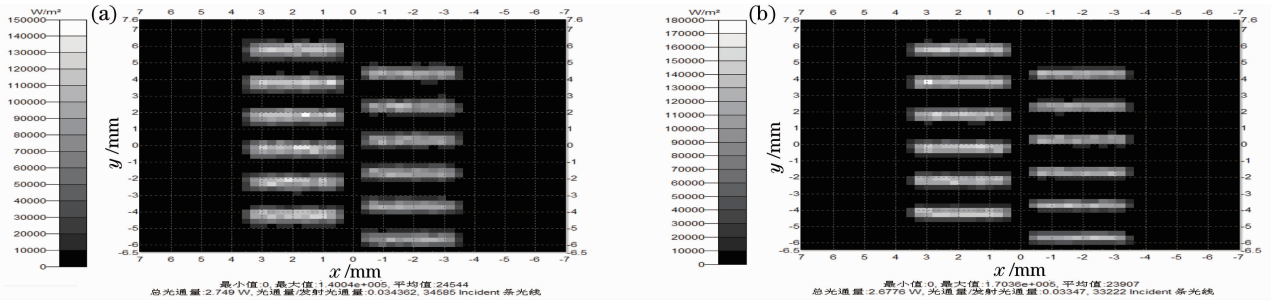


图 7 不同间距 d 光电接收面的光场分布情况。(a) $\alpha = \pm 10^\circ$, $\delta = 2$ mm, $d = 1$ mm; (b) $\alpha = \pm 10^\circ$, $\delta = 2$ mm, $d = 0.04$ mm

Fig. 7 Diagram of the light field distribution of the photoelectric receiver surface for different spatial intervals d . (a) $\alpha = \pm 10^\circ$, $\delta = 2$ mm, $d = 1$ mm; (b) $\alpha = \pm 10^\circ$, $\delta = 2$ mm, $d = 0.04$ mm

由图 7 可知,当 $d = 1$ mm 时,光电接收面上光场分布在“栅面”边缘呈现明显的不均匀分布,当安装距离减少到 $d = 0.04$ mm 时,光电接收面获得的光场分布均匀性得到明显改善。说明随着安装距离 d 的增大,透过动极板“栅面”光场分布的非线性变化关系越明显,且透光面积的差值会越来越小,与图 6 一样将给测量结果带来周期性的二次测量误差,同时安装距离增大会使接收面光场强度和均匀性发生变化,这将给测量结果带来测量范围内的非线性误差。

4.2.3 不同间距 δ

当光源散射角度为 $\alpha = \pm 10^\circ$, $d = 0.1$ mm, 改变光源距离 δ 分别为 0.5 mm 和 10 mm 时,光电接收面上的光场分布如图 8 所示。

由图 8 可知,在间距 d 相同且很小时,光电接收面接收的光场分布情况反映定极板散射光场分布情况,而定极板出光面的镀膜层对光场分布有很好的空间分割效果,虽然随着光源距离的增大,会导致散射光的发散程度和光照强度的不同,但在保证光场分布均匀的情况下,在定极板出光面附近光场分布的变化随光源安装距离的变化影响不大。

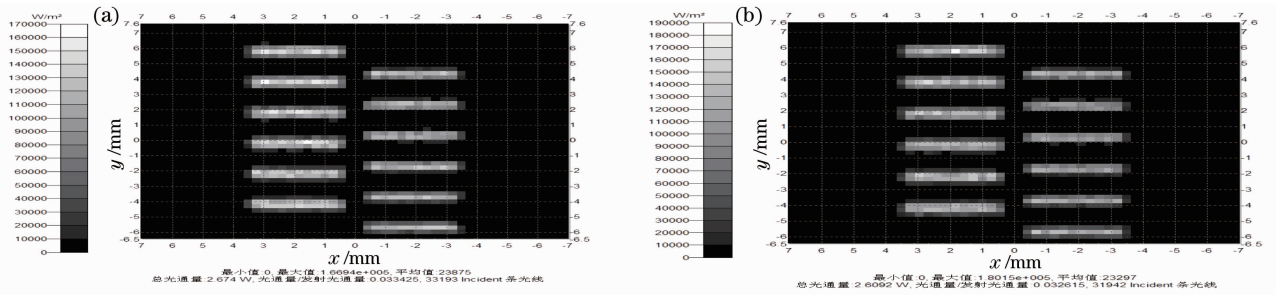


图 8 不同间距 δ 光电接收面的光场分布情况。(a) $\alpha = \pm 10^\circ$, $d = 0.1 \text{ mm}$, $\delta = 0.5 \text{ mm}$;

(b) $\alpha = \pm 10^\circ$, $d = 0.1 \text{ mm}$, $\delta = 10 \text{ mm}$

Fig. 8 Diagram of the light field distribution of the photoelectric receiver surface for different spatial intervals δ .

(a) $\alpha = \pm 10^\circ$, $d = 0.1 \text{ mm}$, $\delta = 0.5 \text{ mm}$; (b) $\alpha = \pm 10^\circ$, $d = 0.1 \text{ mm}$, $\delta = 10 \text{ mm}$

5 实验与误差分析

根据仿真分析,搭建实验平台,对传感器在不同安装距离 d 、间距 δ 和光源出光角度 α 条件下的误差特性进行实验验证。

5.1 实验平台

所搭建的实验平台如图 9 所示。图中标号①~⑥分别为 RENISHAW 测量系统、直线导轨、传感器基体结构、电气控制箱、干涉仪界面和传感器控制界面。实验用现场可编程门阵列(FPGA)产生两路交变光场的激励信号,用 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;用光学镀膜的方式加工光电传感器的定极板和动极板,“栅面”宽度为 0.9 mm,半正弦形“栅面”(宽度为 0.9 mm 高度为 4.5 mm)取点数为 500 个,利用美国 AEROTECH 公司 PRO225LM 精密直线工作平台带动动极板移动。将精度的 RENISHAW ML10 激光干涉仪作为标准值,对光电式传感器进行误差标定。

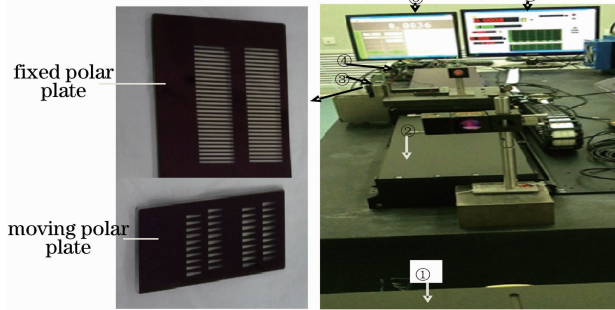


图 9 传感器基体结构与实验平台

Fig. 9 Base structure of sensor and experimental platform

5.2 实验结果分析

5.2.1 光源不同出光角度

因为平行光源的出光角度无法进行自由调节,

为了对比不同出光角度的测试效果,实验中采用功率相同的散射角度不同的 LED 面光源进行对比实验。极板之间安装距离 d 为 0.2 mm,光源与定极板之间安装距离 δ 为 2 mm,分别用这两个光源进行对比实验,误差曲线如图 10 所示。

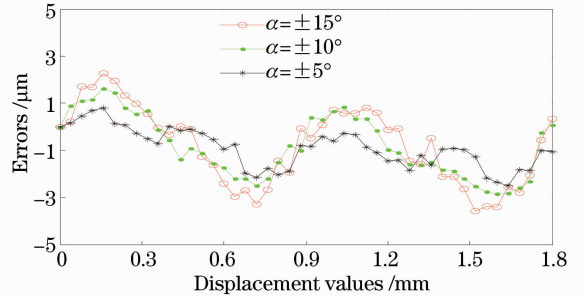


图 10 不同光源散射角度时的误差曲线

Fig. 10 Error curves for different light scattering angles

由图 10 可知,在不同光源出光角度 α 时,传感器误差特性不同;角度 α 越大,二次误差越明显,与仿真分析结果一致。

5.2.2 不同间距 d

当采用出光角度 α 为 $\pm 5^\circ$ 的面光源,光源安装距离 δ 为 2 mm 时,改变动定极板安装距离 d 对传感器分别进行精度实验,其误差曲线如图 11 所示。由图 11 可知,当光源出光角度 α 和安装距离均不变时,动极板和定极板之间间距 d 越大,传感器所得测量误差曲线中一次和二次误差越明显;且距离越小,传感器的误差越小,与仿真分析相吻合。另外从图中也可以看出,当光源出光角度小,即聚光性较好时,达到同样的测量精度,极板之间的安装距离可以更大。

5.2.3 不同间距 δ

实验中,对同一光源,固定安装距离 d 为 0.1 mm,改变光源与定极板间距 δ 分别为 10、5、1 mm,进行精度对比实验,其误差曲线如图 12 所示。

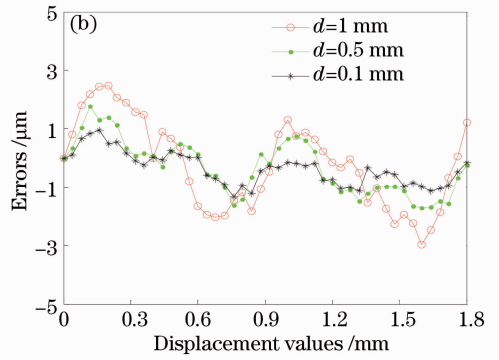
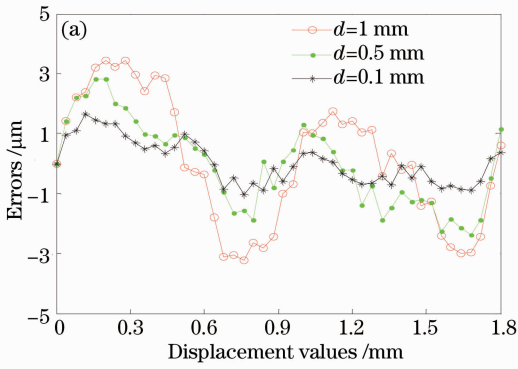


图 11 不同间距 d 时的误差曲线。(a) $\alpha = \pm 10^\circ$, $\delta = 2$ mm; (b) $\alpha = \pm 5^\circ$, $\delta = 2$ mm

Fig. 11 Error curves for different spatial intervals d . (a) $\alpha = \pm 10^\circ$, $\delta = 2$ mm; (b) $\alpha = \pm 5^\circ$, $\delta = 2$ mm

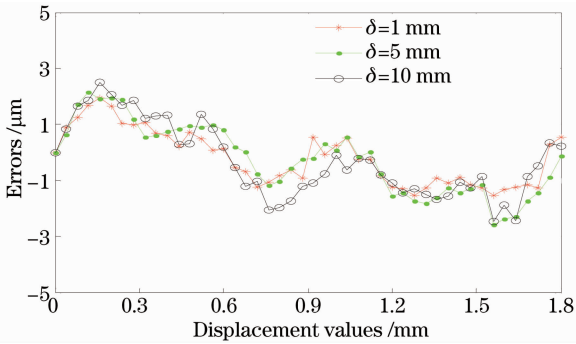


图 12 不同间距 δ 时的误差曲线

Fig. 12 Error curves for different spatial intervals δ

由图 12 可知,当光源出光角度和间距 d 一定时,光源安装距离发生变化时,传感器所得误差曲线变化规律基本一致,与仿真分析一致。但当安装距离过远,光源散射角度过大时,传感器一次误差和线性误差增大,原因是距离过大时同一交变光场的驻波信号差异增大,同时光场分布的均匀性发生变化,将导致感应信号不稳定。

5.3 传感器优化设计

根据以上仿真和实验结论,在保证测量精度的同时,兼顾便于安装的原则,对传感器进行了优化设计:调整“栅面”宽度为 0.9 mm 的定极板和动极板

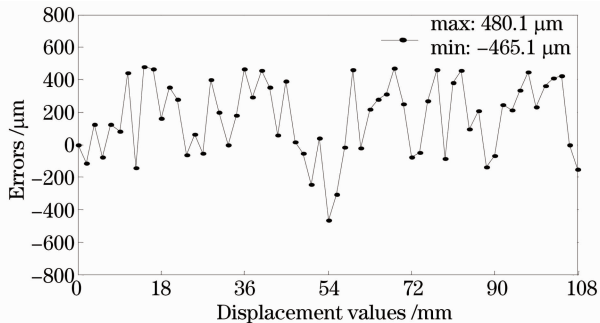


图 13 传感器误差曲线

Fig. 13 Sensor error curve

的安装间距为 0.4 mm,选定出光角度为 $\pm 5^\circ$ 的面光源,调整光源与定极板间距为 2 mm,利用图 8 所示实验平台进行实验。实验表明,优化设计后,在 108 mm 测量范围内,通过误差补偿,传感器精度达到 $\pm 0.5 \mu\text{m}$,如图 13 所示。

6 结 论

通过对光强正交调制的位移传感器测量方法和光场分布误差特性的研究,得出以下结论:

1) 用较大面积的“栅面”代替传统光栅的“栅线”形式,可以有效降低加工制造难度,(研究中设计“栅面”宽度为 0.9 mm,远大于光栅“栅线”的栅距,而较大面积的正弦“栅面”采用光刻成像方法,其制作难度也相比“精”、“细”、“密”的栅线加工要容易);同时,采用正弦形“栅面”形式从原理上更容易消除电信号中的谐波成分,为获取高质量电信号提供保证;

2) 无需细分电路,采用高精度时钟脉冲对电信号相位差进行测量,经适当转换,便可以实现对空间位移的测量,为光电式位移测量提供了一种用时钟脉冲高倍细分空间的解决方案;

3) 利用光的直线传播特性,通过改善光源出光角度,可以有效减少因透光面积非线性变化造成的二次误差的影响,同时可以在较大安装距离(在动极板和定极板安装距离为 0.4 mm 时,实现了 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 的测量精度)下实现高精度测量;而在保证光电接收面光照强度均匀的条件下,光源与定极板的安装距离对光场分布的误差特性影响较小。

以上研究结论很好地反映了用高精度时钟脉冲细分空间的研究方法的可行性,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,也很好地反映了光场分布误差

特性与传感器参数之间的关系,为此种新型光电传感器进一步优化设计和提高精度提供了可靠的理论依据,为下一步研究指明了方向。

参 考 文 献

- 1 HEIDENHAIN. Exposed Linear Encoder [OL]. www.heidenhain.com/en_us/products-and-applications/linear-encoders/exposed-linear-encoders/. [2014-10-09].
- 2 HEIDENHAIN. Angle Encoder with Integral Bearing [OL]. www.heidenhain.de/de-EN/documentation-information/brochures/popup/media/file/view/file-0023/file.pdf. [2014-10-09].
- 3 Zheng Cui. Nanofabrication: Principle, Capabilities and Limits [M]. Heidelberg: Springer, 2008.
- 4 T Grotjohann, I Testa, M Leutenegger, *et al.*. Diffraction-unlimited all-optical imaging and writing with a photochromic GFP [J]. *Nature*, 2011, 478(7368): 204—208.
- 5 Jams Baxter. Super-resolution imaging: beyond the limit [J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(6): 342.
- 6 P Konkola, C Chen, R K Heilmann, *et al.*. Nanometer-level repeatable metrology using the nanoruler [J]. *Journal of Vacuum Science and Technology B*, 2003, 21(6): 3097—3101.
- 7 Fang Cheng, Yetai Fei, Kuangchao Fan. New method on real-time signal correction and subdivision for grating-based nanometrology [C]. SPIE, 2009, 7284: 728403.
- 9 Ma Xiushui, Fei Yetai, Chen Xiaohuai, *et al.*. Theory study of a new nanometrology grating [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, 27(2): 159—164.
- 马修水, 费业泰, 陈晓怀, 等. 一种新型纳米光栅传感器的理论研究[J]. *仪器仪表学报*, 2006, 27(2): 159—164.
- 10 Feng Yingqiao, Wan Qihua, Sun Ying, *et al.*. Interpolation error correction of moire fringe photoelectric signals in the approximate from of triangle wave [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(8): 0812001.
- 冯英翘, 万秋华, 孙莹, 等. 近似三角波叠栅条纹光电信号的细分误差修正[J]. *光学学报*, 2013, 33(8): 0812001.
- 11 Piao Weiyang, Yuan Yibao. Dynamic compensation for interpolation error of moire fringe signals [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(7): 1301—1306.
- 朴伟英, 袁怡宝. 叠栅条纹信号细分误差的一种动态补偿方法[J]. *光学学报*, 2008, 28(7): 1301—1306.
- 12 Ming-Shyan Wang, Ying-Shieh Kung, Yi-Ming Tu, *et al.*. Novel interpolation method for quadrature encoder square signals [C]. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2009, 333—338.
- 13 Wang Chunhai, Zhang Guoxiong, Guo Shangqi, *et al.*. A displacement encoder using sine micro-window grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, 19(9): 1153—1157.
- 王春海, 张国雄, 郭尚旗, 等. 采用正弦微窗光栅的位移传感器[J]. *光学学报*, 1999, 19(9): 1153—1157.
- 14 G Zhang, C Wang. Improving the accuracy of angle measurement system with optical gratings [J]. *Annals of the CIRP*, 1994, 43(1): 457—460.

栏目编辑: 何卓铭