

正交柱面镜像散位移测量方法的研究

韩庆^{1,2} 王健¹ 李灿¹ 刘英¹ 孙强¹

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为了实现物体位移测量的高精度,无损伤和简单化,对柱面镜像散效应进行了研究,利用正交柱面镜像散效应实现物体的位移测量。根据高斯光线追迹的矩阵方法,建立正交柱面镜的矩阵光线传播模型,并利用Zemax进行仿真验证;给出了正交柱面镜像散位移测量系统的矩阵传播模型,并具体分析了系统的量程和分辨率;进行实验验证,在5.6 μm量程范围内,实现了精度为200 nm的移位测量。该方法为位移测量提供了一种新的非接触、高精度的光学测量方式。

关键词 测量; 正交柱面镜; 像散原理; 矩阵光学

中图分类号 TP394.1; TH691.9

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0712005

Displacement Measuring Method Based on Astigmatism Effect of Crossed Cylindrical Lenses

Han Qing^{1,2} Wang Jian¹ Li Can¹ Liu Ying¹ Sun Qiang¹

¹Changchun Institute of Optic, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jinlin 130033, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Higher precision, non-destructive and handy are necessary to the displacement measurement. Astigmatism effect in orthogonal cylindrical lenses is utilized to measure object displacement. In paraxial approximation, matrix methods for Gaussian ray model are used to trace analysis. In addition, Zemax is adopted to simulate the behavior of the model. Then, the displacement measuring system is set up. At the same time, measuring range and resolution of the system are discussed briefly. The result of the experiment indicates an applicable measuring range of 5.6 m with a highly accuracy of 200 nm for displacement measurement. The technique provides a new noncontract, highly accuracy method for displacement measurement.

Key words measurement; orthogonal cylindrical; astigmatism effect; matrix optics

OCIS codes 120.3940; 080.1510; 080.2730

1 引言

在工业生产,工程应用与科学研究领域,物体位移的高精度实时测量得到了越来越多的关注。按照测量方式,物体位移测量可以分为两大类:接触式测量与非接触式测量。光学测量是一种十分重要的非接触测量方式,并因其自身的非接触、无损伤、高精度等优点得到了广泛应用^[1-5]。光学测量按照位移测量原理的不同也可以分为两种:干涉法位移测量和非干涉法位移测量。其中利用干涉法进行位移测量时,对光源波长的选择较为苛刻,测量位移精度依赖于整个测量系统的精度,成本较高,同时外界环境对该种测量方式的影响较大,目前该种测量方法多应用于实验室环境条件下。

基于柱面镜像散效应的测量属于非干涉法测量的一种,正交柱面镜的像散效应是指光束经过正交柱面镜

收稿日期: 2015-01-07; 收到修改稿日期: 2015-04-09

基金项目: 中国科学院三期创新基金(YYYJ-1122)、总装备部预研基金(51201060207)

作者简介: 韩庆(1990—),男,博士研究生,主要从事光学精密测量与检测技术方面的研究。E-mail: zheyuanhan@163.com

导师简介: 孙强(1972—),男,研究员,博士生导师,主要从事精密光电测量系统,红外成像系统技术方面的研究。

E-mail: sunqiang_sklao@yahoo.com.cn

系统成像后,在其子午焦点与弧矢焦点之间的不同位置产生不同形状的图形,利用成像图形与位置的对应关系便可以进行位移测量。近年来利用柱面镜的像散效应进行测量的研究越来越多^[6-12],其中贺锋涛等利用柱面镜的像散效应测量了压电陶瓷的微小位移与振动,丁瑞等利用柱面镜的像散效应实现了玻璃厚度的测量^[11]。目前该种测量方式主要应用于单模激光光束耦合,多轴线性位移测量,玻璃材料的厚度测量等方面^[12-16]。

本文根据正交柱面镜的像散原理对物体进行位移测量,利用高斯光线追迹的矩阵方法建立系统光线传播模型,并给出系统位移测量的理论公式,分析了位移系统的量程和分辨率,并搭建了相应的位移测量系统,进行实验验证,最后对影响系统的量程的主要因素进行了分析,并给出了提高系统测量精度的方法。

2 正交柱面镜像散原理

对于有像散效应的光学系,其在相互垂直的两个方向上焦距不等。由激光光源发出的光束,可以等效为无像散的单模高斯光束:出射光斑为圆形光斑,出射光波为球面波。由激光光源发出的高斯光束经过正交柱面镜后,在相互垂直的两个像面空间(子午面和弧矢面)内,传播光束由于正交柱面镜的像散效应形成不同的形状,如图1所示。在正交柱面镜的子午焦平面内,子午平面内的光线会聚于子午焦点 T 处,此时传播光束在弧矢平面内形成垂直于子午平面的横线 S 。同样在正交柱面镜的弧矢交平面内,弧矢平面内的光线会聚于弧矢交点处,此时传播光束在子午平面内形成垂直于弧矢平面的竖线。在两焦点之间,传播光束形状逐步演变:经历横线、椭圆、圆、椭圆、竖线的形状变化。利用正交柱面镜的这一像散特性进行位移测量的研究。

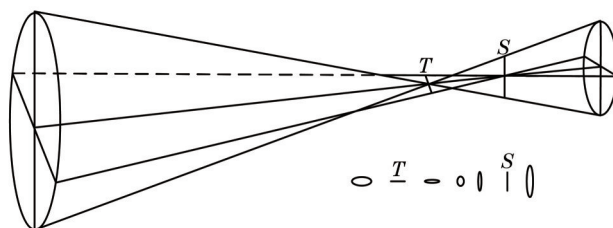


图1 像散原理示意图

Fig.1 Basic principle of astigmatism effect

3 光束传播模型的理论推导与仿真实验

3.1 矩阵光学传播模型

对于基模高斯光束在近轴光学系统中的传播可以利用矩阵光学进行描述。在图2中所示的正交柱面镜光学系统,可以等效为近轴光学系统,各个基本光学元件可以用相应的特征传递矩阵进行表示。高斯光束经过一焦距为 f_i 的薄透镜 L_i ,入射光 R_i 和出射光 R'_i 对应的空间坐标与位相信息可以分别用 x_i, y_i, u_i, v_i 和 x'_i, y'_i, u'_i, v'_i 来表示。在笛卡尔空间坐标系中,入射光 R_i 和出射光 R'_i 的数学关系如下^[1-21]:

$$\left\{ \begin{array}{l} R_i = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ u_i \\ v_i \end{bmatrix} \\ R'_i = \begin{bmatrix} x'_i \\ y'_i \\ u'_i \\ v'_i \end{bmatrix} \\ R'_i = L_i \cdot R_i \end{array} \right. , \quad (1)$$

焦距为 f_i 的薄透镜 L_i 的传输矩阵为^[13]

$$L_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{f_i} & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{f_i} & 0 & 1 \end{bmatrix} . \quad (2)$$

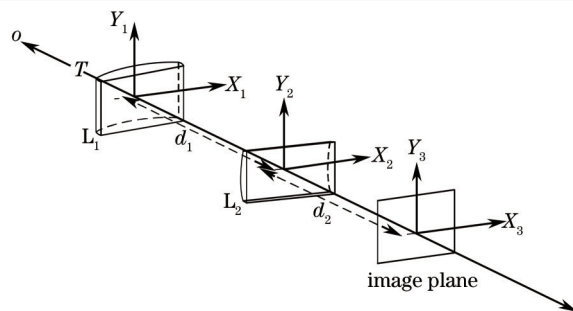


图2 矩阵光学传播模型

Fig.2 Propagation model of matrix optics

当焦距为 f_i 的柱面镜 L_i 轴向定位方向分别在 x 轴与 y 轴方向时,其对应的传输矩阵分别为^[1-3]

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{ix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{f_i} & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ L_{iy} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{f_i} & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (3)$$

高斯光束在自由空间中传输矩阵为^[17]

$$T_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & d_i & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_i \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

由光源发出的准直光束 $R_{source} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$, 由(1)~(4)式可得光束在像空间的像矩阵为

$$R_{image} = T_2^{d_2} \cdot L_{iy} \cdot T_1^{d_1} \cdot L_{ix} \cdot R_{source} \quad (5)$$

经过计算可得

$$R_{image} = \begin{bmatrix} x_{image} \\ y_{image} \\ u_{image} \\ v_{image} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \left(1 - \frac{d_2}{f_2} \right) \\ y_0 \left(1 - \frac{d_1 + d_2}{f_1} \right) \\ -\frac{x_0}{f_2} \\ -\frac{y_0}{f_1} \end{bmatrix} \quad (6)$$

由(6)式可以看出,当高斯光束经过正交柱面镜系统后,在像方空间,沿 x 轴和 y 轴方向的高斯光束独立传输,互不影响,光束到达子午焦点时,子午方向的光束会聚于子午焦点,此时弧矢方向光束形成沿 x 轴方向的横线,同样在光束到达弧矢焦点时,光束会形成沿 y 轴方向的竖线。横线和竖线对应的像面位置分别为 $f_1 - d_1$ 和 f_2 。由横线到竖线的轴向间隔 Δd 即为系统的等效焦深 Δ_{depth} , 由(6)式可得等效焦深公式为

$$\Delta = |f_1 - d_1 - f_2| \quad (7)$$

系统的等效焦深范围为像面空间的线性区域,即在该区域内,轴向的每一位置都对应像面上唯一形状的光斑,等效焦深的大小即为位移系统的量程。

3.2 仿真实验

针对图2中正交柱面镜传输模型,利用光学软件进行仿真实验分析,在近轴条件下,两柱面镜焦距为

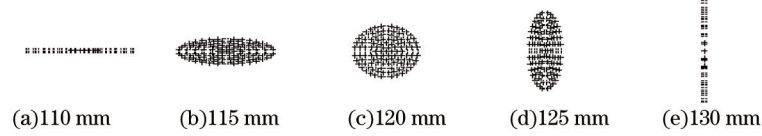


图3 像面不同位置处的光斑形状

Fig.3 Spot in different positions of imaging plane

$f_1 = f_2 = 150 \text{ mm}$, 两柱面镜间隔 $d_1 = 20 \text{ mm}$, 利用(6)式可得子午焦点和弧矢焦点对应的像面位置分别为 110 mm 和 130 mm 。等效焦深为 $\Delta = 20 \text{ mm}$, 仿真结果图形如图3所示

4 位移测量系统

4.1 系统光学矩阵传播模型

由矩阵光学传播模型和仿真验证结果可知, 在正交柱面镜测量系统中, 利用等效焦深范围内轴向位置与光斑形状的一一对应关系便可以进行轴向位移测量, 但轴向位移测量精度较低。为了提高轴向测量精度, 需在正交柱面镜后放置数值孔径较大的物镜, 系统测量原理图如图4所示, 图中 L_1, L_2 为正交柱面镜, L_3 为等效聚焦物镜, 待测样品在物镜之后。

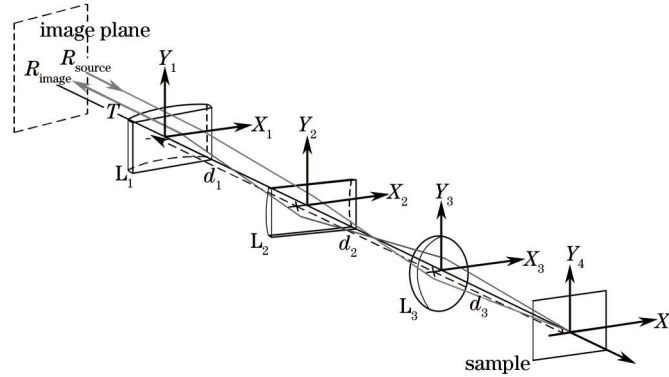


图4 像散位移测量光线传播示意图

Fig.4 Propagation of ray based on astigmatism effect

由(1)~(5)式可得光束在系统像空间的等效成像矩阵为

$$R_{\text{image}} = T_3^{d_3} \cdot L_{\text{focus}} \cdot T_2^{d_2} \cdot L_{iy} \cdot T_1^{d_1} \cdot L_{ix} \cdot R_{\text{source}} = \begin{bmatrix} x_{\text{image}} \\ y_{\text{image}} \\ u_{\text{image}} \\ v_{\text{image}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \left[1 - \frac{d_2(f' - d_3) + (f + f')}{f_2 f'} \right] \\ y_0 \left[1 - \frac{(d_1 + d_2)(f' - d_3) + d_3(f + f')}{f_1 f'} \right] \\ x_0 \left(\frac{d_2 - f - f'}{f_2 f'} \right) \\ y_0 \left(\frac{d_1 + d_2 - f - f'}{f_1 f'} \right) \end{bmatrix} \quad (8)$$

系统像面子午焦线和弧矢焦线的轴向位置分别为

$$\begin{cases} d_{3|x_{\text{image}}=0} = \frac{f'(f_2 - d_2)}{f_2 + f' - d_2} \\ d_{3|y_{\text{image}}=0} = \frac{f'(f_1 - d_1 - d_2)}{f_1 + f' - d_1 - d_2} \end{cases} \quad (9)$$

4.2 系统量程与精度

由(7)式和(9)式可得系统等效焦深即系统量程为

$$\Delta(d_2, f') = \left| d_{3|x_{\text{image}}=0} - d_{3|y_{\text{image}}=0} \right| = \frac{|f_1 - d_1 - f_2| f'}{(f_2 + f' - d_2)(f_1 + f' - d_1 - d_2)} \quad (10)$$

位移测量系统示意图如图5所示,由图可知,系统由照明光源,准直镜,分束镜,正交柱面镜,聚焦物镜,位移平台,以及电荷耦合器件(CCD)探测器等组成。

系统分辨率:由矩阵光学传播模型可知,在该位移测量系统中,准直镜,正交柱面镜以及成像物镜被简化为薄透镜,不影响系统的分辨率,系统分辨率主要取决于聚焦物镜的分辨率,在不考虑轴外像差的理想条件下,聚焦物镜的分辨率为

$$R_{\text{object}} = \frac{0.61\lambda}{NA} \quad (11)$$

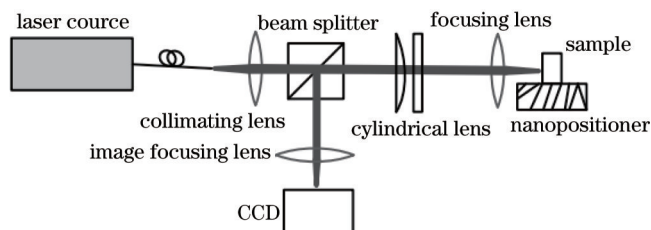


图5 正交柱面镜位移测量系统

Fig.5 Measuring system of displacement based on orthogonal cylindrical lenses

由(11)式可知,对于大数值孔径(NA值为0.8~1)的聚焦物镜,其分辨率在亚微米量级。当待测样品位移的变化量可被聚焦物镜分辨时,即CCD探测器上光斑形状变化量刚好可被识别时,此时待测样品的位移量即为系统分辨率。

理论上在系统量程范围内,系统的分辨率即为系统的测量精度,但对于实际的测量系统,受限于系统中位移平台步长精度的影响,实际的待测样品位移精度只能达到位移平台的步长精度。即实际系统的测量精度小于系统分辨率。

5 实验验证与分析

图6为CCD光斑形状与样品相对位置的对应关系分别为(a)0 μm;(b)0.8 μm;(c)1.6 μm;(d)2.4 μm;(e)3.2 μm;(f)4.0 μm;(g)4.8 μm;(h)5.6 μm。利用图5所示的位移测量系统进行实验,实验器材规格如下:光源为632.8nm的He-Ne激光器;扩束镜为5×扩束,NA=0.15;分束镜的透射波段为400~800 nm;两个柱面镜为平凸柱面镜,焦距 $f_1=f_2=150$ mm,口径 $\Phi=25.3$ mm,柱面镜间距 $d_1=20$ mm;物镜放大倍率为100×,焦距 $f=1$ mm,NA=0.8,柱面镜2与物镜间隔 $d_2=90$ mm;位移平台选用ThorlabsNano-Max-TS,量程为12 μm,步长为0.2 μm;成像透镜焦距为 $f=200$ mm;探测器采用320 pixel×256 pixel的CCD,像元大小为10 μm。待测样品为铝反射镜。

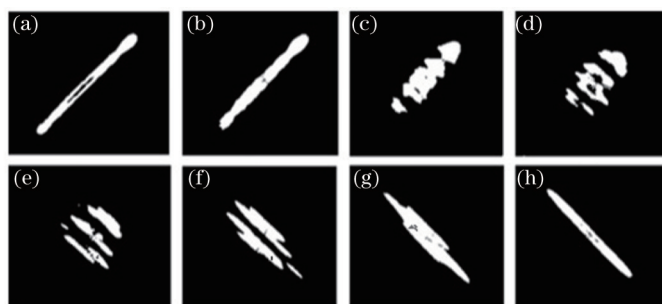


图6 样品不同位置对应的光斑形状

Fig.6 Laser spots corresponding to samples with relative displacements

利用上述位移测量系统,得到的实验结果如图6所示。选取子午像点为物体位移的起始点,得出样品在5.6 μm的测量范围内,待测物体不同位置都有对应形状的光斑,即光斑形状变化与待测物体位移呈线性关系。该段线性测量范围5.6 μm即为系统的量程。实验中选用的定位仪步长为200 nm,待测样品每移动一个步长,光斑形状随之变化,证明该系统可实现在5.6 μm量程范围内,精度为200 nm的位移测量。

将实验透镜参数代入理论(10)式可得系统的量程为7.9 μm,通过实验得出的系统量程为5.6 μm。该偏差主要来源:理论推导的矩阵光学传播模型是建立在近轴条件下的理想光线传播模型,实际光学系统中,受

轴外光线的影响,系统的量程变小。同时,在搭建实际光路中,正交柱面镜的位置误差以及安装误差也会使系统的量程变小。由4.2节可知,该系统的测量精度受限于位移平台的步长精度,目前只能实现200 nm的测量精度。当待测样品的位移读取量精度达到纳米量级时,该系统的测量精度也能够达到纳米量级。

6 结 论

利用正交柱面镜像散原理进行位移测量,根据高斯光线追迹方法建立了像散位移测量的矩阵传播模型,推导出系统量程公式,并对系统测量精度进行了具体分析;实验证明系统能够实现在5.6 μm 量程范围内,精度为200 nm的位移测量。然后结合理论模型与实验系统得出:当待测样品位移读取精度达到纳米量级时,系统的测量精度能够达到纳米量级。为工业生产和工程应用提供了一种简便、非接触、高精度的位移测量方法。

参 考 文 献

- 1 Wang Yutian, Yang Ni. Glass thickness measuring technology of two-beam path of compensation[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007, 20(6): 1428-1431.
王玉田, 杨 妮. 双路补偿法的玻璃厚度测量技术[J]. 传感技术学报, 2007, 20(6): 1428-1431.
- 2 Liu Lishuang, Zhang Yao, Lu Huiqin, *et al.*. Online measurement system for glass thickness based on CCD[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2006, 19(3): 652-654.
刘力双, 张 铤, 卢慧卿, 等. 基于 CCD 的玻璃厚度在线测量系统[J]. 传感技术学报, 2006, 19(3): 652-654.
- 3 Liu Qiang, Wang Ming, Xia Wei, *et al.*. Implementation of real-time displacement precision measurement technology for sinusoidal phase-shifting laser self-mixing interferometer[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6): 0612011.
刘 强, 王 鸣, 夏 巍, 等. 正弦相位调制型激光自混合干涉仪的实时位移测量技术[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0612011.
- 4 Li Jinpeng, Chen Lei, Wulan Tuya, *et al.*. A method based on phase shifting algorithm for fast measurement of stress retardation of optical glass[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 0612005.
李金鹏, 陈 磊, 乌兰图雅, 等. 基于移相算法的玻璃应力延迟量快速测量方法[J]. 光学学报, 2013, 33(6): 0612005.
- 5 Zhang Qican, Su Xianyu. Research progress of dynamic three-dimensional shape measurement[J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2013, 50(1): 010001.
张启灿, 苏显渝. 动态三维面形测量的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(1): 010001.
- 6 L Li, C F Kuang, D Luo, *et al.*. Axial nano-displacement measurement based on astigmatism effect of crossed cylindrical lenses[J]. Appl Opt, 2012, 51(13): 2379-2387.
- 7 C H Liu, Z H Li. Application of the astigmatic method to the thickness measurement of glass substrates[J]. Appl Opt, 2008, 47(21): 3968-3972.
- 8 A E Attard. Matrix optical analysis of skew rays in mixed systems of spherical and orthogonal cylindrical lenses[J]. Appl Opt, 1984, 23(16): 2706-2709.
- 9 J A Arnaud, H. Kogelnik. Gaussian light beams with general astigmatism[J]. Appl Opt, 1969, 8(8): 1687-1693.
- 10 L S Pedrotti, F L Pedrotti. Optics and Vision[M]. New Jersey: Prentice Hall, 1998.
- 11 L Pang, U Levy, K Campbell, *et al.*. Set of two orthogonal adaptive cylindrical lenses in a monolith elastomer device[J]. Opt Express, 2005, 13(22): 9003-9013.
- 12 A J Makynen, J T Kostamovaara, R A Myllyla. A high-resolution lateral displacement sensing method using active illumination of a cooperative target and a focused four-quadrant position-sensitive detector[J]. Instrumentation & Measurement, 1995, 44(1): 46-52.
- 13 J C Zhang, R Ding, X Yan, *et al.*. Application of the astigmatic method to the thickness measurement of glass substrates[C]. SPIE, 2011, 8192: 819245.
- 14 Li Yanchao, Zhang Liang, Yang Yanling, *et al.*. The method for multi-beam laser heterodyne high-precision measurement of the glass thickness[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 52(8): 5473-5478.
李彦超, 章 亮, 杨彦玲, 等. 多光束激光外差高精度测量玻璃厚度的方法[J]. 物理学报, 2009, 58(8): 5473-5478.
- 15 Song Cheng, Lü Cen, Guo Qi. One method for measuring thickness of glass by using laser heterodyne and Doppler[J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(8): 1635-1638.
宋 晨, 吕 岑, 郭 琪. 一种激光外差多普勒玻璃厚度测量方法[J]. 光子学报, 2008, 37(8): 1635-1638.
- 16 Wang Wei, Wang Zhaoba. Capability research of glass thickness detection based on CCD displacement sensor[J]. Instrument Technique and Sensor, 2006, (9): 44-45.
王 伟, 王召巴. 基于 CCD 位移传感器在玻璃厚度测量时的性能研究[J]. 仪表技术与传感器, 2006, (9): 44-45.
- 17 K Chen, H Yang, G Jin. Generalized method for calculating astigmatism of the unit-magnification multi-pass system[J]. Appl Opt, 2010, 49(10): 1964-1971.

栏目编辑: 何卓铭