

基于斜率传感的平面元件面形检测技术研究

鄂可伟¹ 李大海¹ 李萌阳¹ 赵霖文¹ 李水艳¹ 张 充¹ 代贞强¹ 王琼华^{1,2}

(¹ 四川大学电子信息学院, 四川 成都 610065
² 视觉合成图形图像技术国家重点学科实验室, 四川 成都 610065)

摘要 斜率传感的平面元件面形检测是基于光线反射的几何原理和相位测量偏折术方法的光学面形检测技术,它能够快速、简便、准确地测量非球面面形及透射光学元件波前,也称偏折术或逆哈特曼测试系统。推导了平面元件斜率检测公式和面形恢复算法,使用可编码条纹的液晶显示器作为照明光源,四步相移法来识别显示器像素点坐标。针孔摄像机采集被测表面对条纹所成的像,将该系统用于有机玻璃板在加热条件下的面形测量,经计算机处理得到被测表面斜率数据。用方形域内标准正交矢量多项式拟合计算斜率数据得到有机玻璃板面形信息,对面形信息对比分析,然后对有机玻璃板在加压条件下的斜率变化进行了检测,与激光反射法计算的斜率变化结果进行对比。结果表明,该测试系统有动态范围大、装置简单、速度快、非接触、测试精度高等特点,为实际生产和应用提供了一种检测平面面形及动态变化过程监测的新手段。

关键词 测量;光学测试;面形;矢量多项式;偏折术;斜率

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.s112004

Study on the Surface Shape Measurement of Planar Element Based on Slope Sensor Method

E Kewei¹ Li Dahai¹ Li Mengyang¹ Zhao Jiwen¹ Li Shuiyan¹

Zhang Chong¹ Dai Zhenqiang Wang Qionghua^{1,2}

(¹ School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China)
(² State Key Laboratory of Fundamental Science on Synthetic Vision, Chengdu, Sichuan 610065, China)

Abstract Measurement of planar element using slope sensor method is based on the geometry of the fringe reflection and phase measuring deflectometry method which can be used to measure aspherical shapes and transmission optical element rapidly, simply and accurately. It can be called deflectometry or Hartmann test system in reverse. We go through the derivation of measurement equation of planar element slope and wavefront reconstruction algorithm. By using an LCD screen with programmable fringe as illumination source, phase shifting method of four step is used to recognize display pixel coordinates, and a camera with small aperture images the surface under test. We apply this system to the measurement of acrylic plastic plate surface under the condition of and heating. The slope data can be obtained after operating these pictures by computer, and we use orthonormal vector polynomials fitting in a square area to calculate the surface shape of mirror under test, then analyze the surface information. And we use this system to test the slope change of acrylic plastic plate surface under the condition of stressing, and compare with the result of the laser-reflection method. The results show that the test system has a large dynamic range and is simple, rapid, non-contacting, and high-precision. It can supply a new method to test the planar surface shape and the dynamic changes of the object surface shape in practical production and application.

Key words measurement; optical testing; surface shape; vector polynomials; deflectometry; slope

OCIS codes 120.3940; 120.2650; 120.5700

收稿日期: 2013-10-23; **收到修改稿日期**: 2013-11-13

基金项目: 国家 973 计划(2013CB328802)、国家自然科学基金(61377018)

作者简介: 鄂可伟(1991—),男,硕士研究生,主要从事波前检测方面的研究。E-mail: ekeweia121@sina.com

导师简介: 李大海(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事光学信息处理、波前传感、三维立体显示等方面的研究。

E-mail: lidahai@scu.edu.cn(通信联系人)

1 引言

镜面面形的高精度非接触测量一直以来主要是靠干涉仪来完成,其测量精度可达到 1% 波长,或者更高。但这种测量方法成本过高,受环境、温度、压力的影响较大,同时还受到测量范围等问题的限制。此外,非球面光学元件在细磨的过程中,由于其面形误差较大,也不适合用干涉计量等高精度的手段进行测量,可以说干涉测量在很多工程问题上难以在线使用。与相移技术相结合的偏折术是一种非接触高精度镜面面形检测技术,其测量精度可以与干涉测量媲美,已有十几年的研究历史^[1-3]。镜面由于形变而影响入射光线方向,这种检测技术就是通过检测光线的偏折量来获得表面信息。可以实现对微小面元或大尺寸平面甚至是有高斜率的自由曲面的测量,如眼镜、大尺寸反射镜、挡风玻璃、喷刷过的汽车车体^[3]等物体表面,其测量系统结构简单、灵敏度高,无需辅助光学元件,能一次完成全场测量,并且效率很高。与其相似的检测物体面形的技术有刀口检测术、哈特曼屏波前检测技术等。

依照元件的理想面形参数可以指导加工,而相比于面形参数,斜率参数与光学性能联系更加紧密,斜率误差直接影响光组的成像质量。目前最为流行的直接测量斜率的方法是夏克-哈特曼法,它使用透镜阵列将物体发出的光会聚到探测器上,探测器得到的光斑的空间位置与透过透镜阵列的波前斜率成正比^[4]。该方法的一个缺点是:极限分辨率和透镜阵列的采样间隔直接相关。Peng 等^[5-10]通过对哈特曼波前检测技术的研究,提出了一种逆哈特曼光学测试系统(SCOTS)的非球面光学元件面形检测技术,又称逆哈特曼检测技术,属于偏折术中的一种,是一种非常简单的测试光学系统和测量非球面镜性能的方法,并采用了 CCD 像素分解光束的概念,利用 SCOTS 实现了 8.4 m 大口径麦哲伦望远镜主镜及太阳能聚光器面形的测试,测量精度已经获得接近于四维(4D)动态干涉仪的测量精度。

本文推导了平面元件斜率检测公式和面形恢复算法,并将该方法用于有机玻璃板在加热条件下的面形测量,对多种状态下测得的面形进行比较,然后又对有机玻璃板在加压条件下的斜率变化进行了测量,和激光反射测得的结果进行了对比。最后对影响实验结果的误差来源进行了分析。

2 基本原理

图 1 是所提出的基于斜率传感的平面元件面形检测光路图,其中,液晶显示器(LCD)、CCD 摄像机和有机玻璃板构成了主要装置。将世界坐标系原点建立在有机玻璃板上,通过系统标定,将液晶显示器和 CCD 摄像机统一到世界坐标系中。如果液晶显示器上某一像素点被点亮,如图中点 S,该像素点照亮反射镜上有特定斜率的区域,CCD 摄像机就能检测到光源通过该区域所成的像。运用摄像机针孔模型和反射定律,被测镜面上满足入射角和反射角相等的区域才会在 CCD 上成明亮像,入射光线和反射光线的角平分线就是该明亮区域的法线^[5]。为方便起见,将表面斜率方向分解为正交的 x 和 y 两个方向,图中 α_x 为表面斜率,是表面法线在 xoz 平面的投影与 z 轴的夹角, α_1 与 α_2 分别为入射、反射光线与 z 轴的夹角,由光线的反射定理可得

$$\alpha_x = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}, \quad (1)$$

则有

$$\tan \alpha_x = \tan \left(\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \right) = \frac{\sin \alpha_1 + \sin \alpha_2}{\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2} = \frac{\frac{x_s - x_m}{d_{m2s}} + \frac{x_c - x_m}{d_{m2c}}}{\frac{z_{m2s}}{d_{m2s}} + \frac{z_{m2c}}{d_{m2c}}}. \quad (2)$$

由(2)式将有机玻璃板斜率计算公式整理为

$$\begin{aligned} \tan \alpha_x(x_m, y_m) &= \frac{\frac{x_s - x_m}{d_{m2s}} + \frac{x_c - x_m}{d_{m2c}}}{\frac{z_{m2s}}{d_{m2s}} + \frac{z_{m2c}}{d_{m2c}}}, \\ \tan \alpha_y(x_m, y_m) &= \frac{\frac{y_s - y_m}{d_{m2s}} + \frac{y_c - y_m}{d_{m2c}}}{\frac{z_{m2s}}{d_{m2s}} + \frac{z_{m2c}}{d_{m2c}}}. \end{aligned} \quad (3)$$

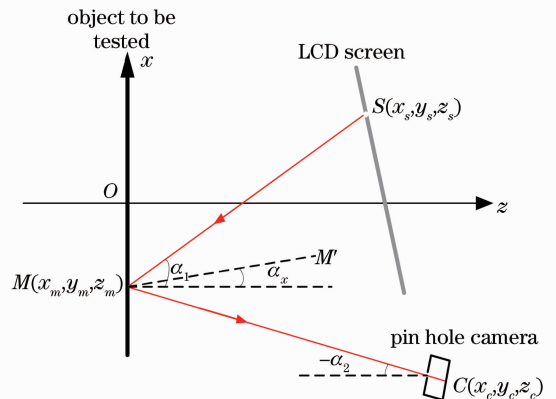


图 1 测量原理图

Fig. 1 Schematic of measurement principle

待测表面上被测点的位置未知,但与其相应的理想形状已知,并且实际表面与理想表面的偏差通常很小,所以通常用理想表面上某点的镜面位置 (x_m, y_m) 来进行斜率的计算。则被测面上斜率值可以将对应的反射镜上坐标 (x_m, y_m) ,显示器上被点亮像素的坐标 (x_s, y_s) ,以及 CCD 的坐标 (x_c, y_c) 代入(3)式求得。(3)式中 d_{m2s} 和 d_{m2c} 是被测面位置到对应显示器像素点和摄像机孔径的距离; z_{m2s} 和 z_{m2c} 是被测面顶点到光源和摄像机孔径的 z 方向距离。

本文提出的方法与传统的哈特曼测试原理类似,只是将通过哈特曼系统中的光线反向,假设光线从 CCD 摄像机出发,经被测镜反射后入射到液晶显示器上^[6],本质上是一种变形的 SCOTS 测试系统。此外,图 1 检测过程中 CCD 摄像机拍摄了被测面的像,可以提供被测面上点的位置坐标。每一个 CCD 摄像机像素对应着反射镜上某一特定的区域,称之为镜面像素,为准确找到镜面像素和显示器像素的对应关系,对光源进行编码,在显示器上显示一系列相位不同的正弦条纹,用这些正弦条纹来照明待测表面,将 CCD 摄像机调焦,使其对被测面成清晰像,采集反射镜反射的条纹图。采集到的图像强度的变化反应的是相位的变化,通过分析多幅图像强度的差异,就可以得到相应于特定镜面像素的显示屏像素的相位值。

从显示器发出,最终进入 CCD 摄像机的光强为

$$I = I_0 + A \cos(2\pi r/p + \delta), \quad (4)$$

式中 I_0 和 A 分别为背景光强和振幅调制, r 为屏幕像素坐标, p 为正弦条纹周期, $2\pi r/p$ 是需要求出的相位, δ 为附加相移,这里采用四步相移法, δ 分别为 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$,采集 4 幅反射镜镜面的像,每一个镜面像素对应的光强分别表示为 I_1, I_2, I_3, I_4 ,可得相位值:

$$2\pi r/p = \arctan\left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3}\right). \quad (5)$$

(5)式是在 CCD 上的每一个像素点上计算,通过相减运算,条纹的固有噪声被去除,除法运算使得摄像机灵敏度的变化和显示器发出的光强的微弱变化对结果不产生影响。当多个显示器屏幕像素照射同一个镜面像素时,因为 I_1, I_2, I_3, I_4 表示的是这些显示器像素的总光强,由(4)式和(5)式所得到的是屏幕像素的平均相位。

使用反正切运算,相位被截断在 $-\pi \sim \pi$ 之间。假设任何两个相邻像素点的非截断相位变化小于 π ,满足抽样定理的要求,每个条纹至少有两个抽样

点,抽样频率大于最高频率的 2 倍。如果发现差值大于 π ,就要在某个像素点的相位值上加或减去 2π 。二维的相位展开原理与此类似,要注意的是相位展开最好找到信噪比较高的像素点进行^[11]。二维的相位展开后,可以求得显示器像素在世界坐标系中的相对位置,进而通过显示器上一点的坐标位置,屏幕像素在世界坐标系的坐标可全部得出,该坐标包含了物体的斜率信息,与初始坐标相比发生了变化。

通过正弦条纹的强度编码,就可以确定显示器像素和 CCD 像素之间的对应关系,由(3)式可看出,为求出待测镜面的斜率值,还要求出 CCD 摄像机的像素与显示器像素的对应关系,这样就转化为要求出 CCD 像素与镜面像素的映射关系。在显示器上显示条纹之前,先对 CCD 摄像机进行标定。在该系统中,将世界坐标系原点建立在平面光学元件上,所以镜面上的点在世界坐标系下 $z_m = 0$,则由摄像机针孔模型可知

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & t \end{bmatrix} \mathbf{H} \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中 x_m, y_m 为镜面像素在的坐标, s 为一任意的比例因子, u, v 为 CCD 摄像机像素坐标, \mathbf{A} 只与摄像机内部参数有关,称为摄像机内部参数矩阵, \mathbf{A} 和 $\begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & t \end{bmatrix}$ 由 CCD 摄像机相对于被测表面的空间位置决定,称为摄像机外部参数矩阵, \mathbf{H} 称为投影矩阵^[12]。首先将摄像机进行标定,得到摄像机畸变系数和内参数。然后建立实验系统,标定各元件的坐标位置,这样就得到了投影矩阵 \mathbf{H} ,再通过某一点在镜面和 CCD 摄像机像素上的坐标,就可以求出 CCD 像素与镜面像素的映射关系。

实验中,液晶显示器作为光源,交替显示 8 幅正弦条纹,针孔摄像机采集被测表面对条纹所成的像。用标定所得的畸变系数来校正所采集图像的镜头畸变^[13],由摄像机内参数和被测面与摄像机的相对位置关系求出 CCD 摄像机的像素与镜面像素的映射关系,再通过四步相移法得到显示器像素坐标,将这些坐标值代入(3)式即可求出被测平面的表面斜率。

由于光学系统的不同光瞳形状需要不同的正交矢量多项式,所以文中采用一组在方形域内正交的矢量多项式集(表示为 \mathbf{R})作为斜率数据拟合的基函

数由该矢量函数拟合被测波前斜率,拟合系数经过简单的线性变换就可以直接得到用 Zernike 多项式描述的波前,获得被测波前的相位信息。 R 多项式是由 Zernike 梯度多项式 ∇Z 线性变换得到的,二者有如下关系:

$$\mathbf{R} = \nabla \mathbf{Z} \cdot \boldsymbol{\beta}, \quad (7)$$

式中 $\boldsymbol{\beta}$ 为变换系数。测量得到的斜率分布 $\mathbf{V}(x, y)$ 可以用 \mathbf{R} 矢量多项式进行分解,写成矩阵形式有

$$\mathbf{V} = \mathbf{R} \cdot \boldsymbol{\alpha}, \quad (8)$$

式中 $\boldsymbol{\alpha}$ 为拟合系数,因为 Zernike 梯度多项式与 Zernike 多项式之间也是线性关系,这样就可以通过线性变换

$$\boldsymbol{\gamma} = \boldsymbol{\beta} \cdot \boldsymbol{\alpha} \quad (9)$$

得到 Zernike 多项式分解波前的系数 $\boldsymbol{\gamma}$,然后将测得的斜率数据转换为 Zernike 多项式表示的波前图,得到被测表面面形。

3 实验研究

为了验证所提出算法的正确性,对有机玻璃平板在不同条件下的面形进行了测量,其中被测有机玻璃板的另一面被涂黑,不发生镜面反射。在实验中尽量使 CCD 靶面与显示器通过玻璃板所成的像平行,以得到高质量的图像。显示器为商用 19 inch (1 inch=2.54 cm)液晶屏,产生正弦条纹,相机为普通工业相机,记录镜面反射后的条纹。完成了下面两个实验来验证该方法。

3.1 温度变化造成有机玻璃板表面形变的测量

实验装置按图 2 所示的光路布置,被测区域约 15 cm×20 cm。高功率灯丝产生的热使有机玻璃板变形,激光器照射形变位置,监测该处的法线方向变化。

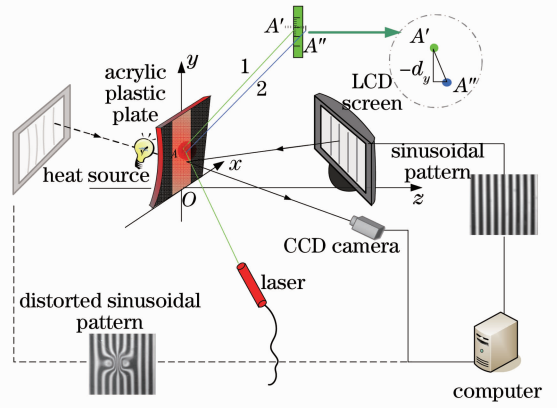


图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Schematic of the experimental setup

未加热时,计算机生成正弦条纹图,并输出在显示器上,显示器发出的光线经有机玻璃板反射后入射到 CCD 上,CCD 采集有机玻璃板反射的 8 幅条纹图,采集到的图像可看做由正弦条纹的虚像发出的光而形成,此时未发现明显的条纹变形。与此同时,激光器发出一束光线(图 2 中光线 1),照射到被测面 A 点,由 A 点反射到较远的 A' ,此时记录 A' 点坐标以及 A 到 A' 的距离 AA' ,然后用一定距离的高功率灯对有机玻璃板加热 10 min,再重复上述过程采集条纹的像,并记录反射光线(图 2 中光线 2)的投射位置坐标 A'' ,此时 CCD 采集到的条纹图发生了明显变形, A'' 与 A' 之间也存在明显的位置偏离。

去除高功率灯,在温度下降过程中重复如上测试,共记录了 4 次测量数据,可表示为初始、最高温度、降温、较低。数据处理过程和结果如下:

1) 通过(5)式,并进行相位展开后得到的两个方向的相位值如图 3 所示(以下只给出状态 1 下的数据)。

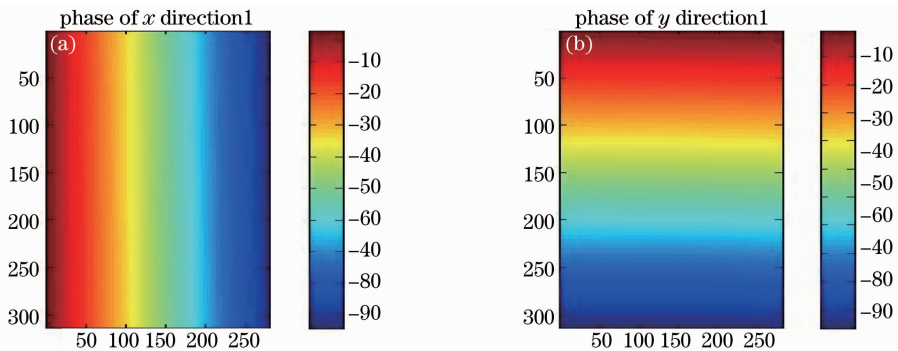


图 3 相位展开后得到的相位图。(a) x 方向相位; (b) y 方向相位

Fig. 3 Phase map after phase unwrapping. (a) Phase of x direction; (b) phase of y direction

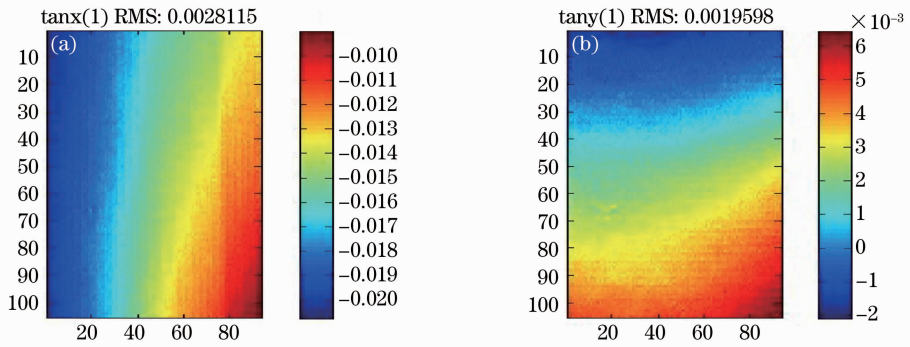


图 4 采样后的有机玻璃板斜率。(a) x 方向斜率；(b) y 方向斜率

Fig. 4 Slope map of perspex plate after sampling. (a) Slope of x direction; (b) slope of y direction

2) 计算得到的被测面上各点的斜率值,为提高运算速度,节省内存,将斜率数据进行间隔为 2 的采样如图 4 所示,图中 $\tan x(1)$, $\tan y(1)$ 分别和(3)式中的 $\tan \alpha_x(x_m, y_m)$, $\tan \alpha_y(x_m, y_m)$ 对应。

3) 用方域内的正交 \mathbf{R} 矢量多项式对采样后的斜率数据进行拟合,得到拟合结果如图 5 所示。

4) 始斜率数据经采样后和 \mathbf{R} 矢量多项式拟合

结果相减,得到拟合残差如图 6 所示。其中 x 方向斜率拟合残差的均方根 (RMS) 值为 0.00020, y 方向斜率拟合残差 RMS 值为 0.00017,与原始斜率数据的 RMS 值相比,拟合残差小于原始数据的 1/10,并且 \mathbf{R} 多项式拟合后数据的 RMS 值与原始数据的也非常接近。

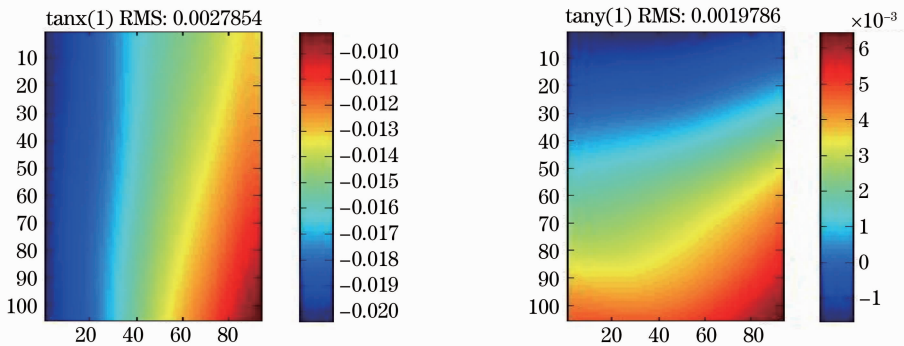


图 5 用 \mathbf{R} 矢量多项式拟合得到的斜率图。(a) x 方向斜率；(b) y 方向斜率

Fig. 5 Reconstructed slope map using \mathbf{R} vector polynomials fitting. (a) Slope of x direction; (b) slope of y direction

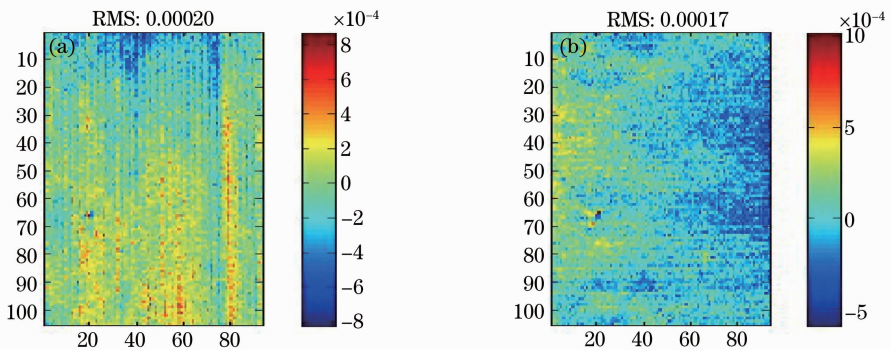


图 6 原始斜率数据与 \mathbf{R} 多项式拟合所得残差。(a) x 方向斜率拟合残差；(b) y 方向斜率拟合残差

Fig. 6 Residual of slope after \mathbf{R} vector polynomials fitting. (a) Residual slope of x direction; (b) residual slope of y direction

5) 使用(7)~(9)式得到 Zernike 多项式分解波前的系数 γ , 然后将测得的斜率数据转换为 Zernike 多项式表示的波前图, 得到有机玻璃板面形, 如图 7 所示(含各时间点上 4 个温度变化的表面形状, 左图含被测区域, 右图只给出局部面形)。图 7 中, 1 对应初始状态面形, 2 代表温度最高的状态, 3 代表降温状态, 4 代表较低温度时的状态, 由图可以看出,

温度最高时, 表面发生了明显变形, 与初始状态面形有较大差距, 随着温度的降低, 各状态下的面形又存在复原的趋势, 说明所提出的方法检测出了温度效应造成的有机玻璃板形状变化。

6) 4 个温度上的重建面形比较, 将加热后的各状态面形与初始状态相减得到图 8。

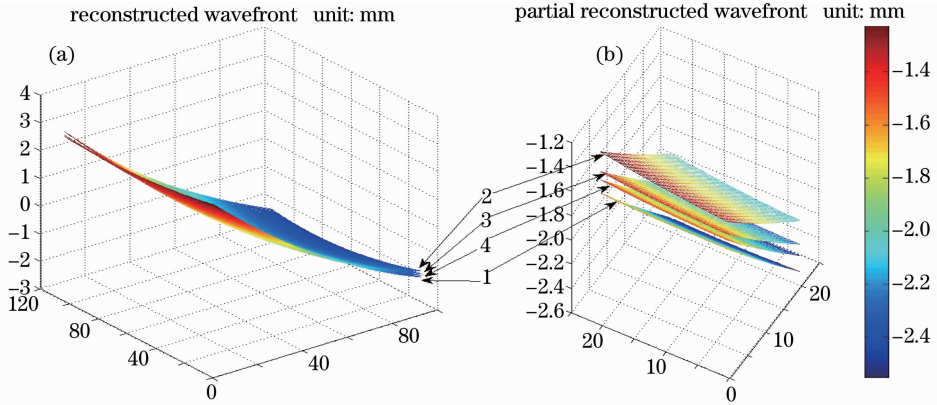


图 7 4 个温度上的重建波前图

Fig. 7 Reconstructed wavefront at 4 different states

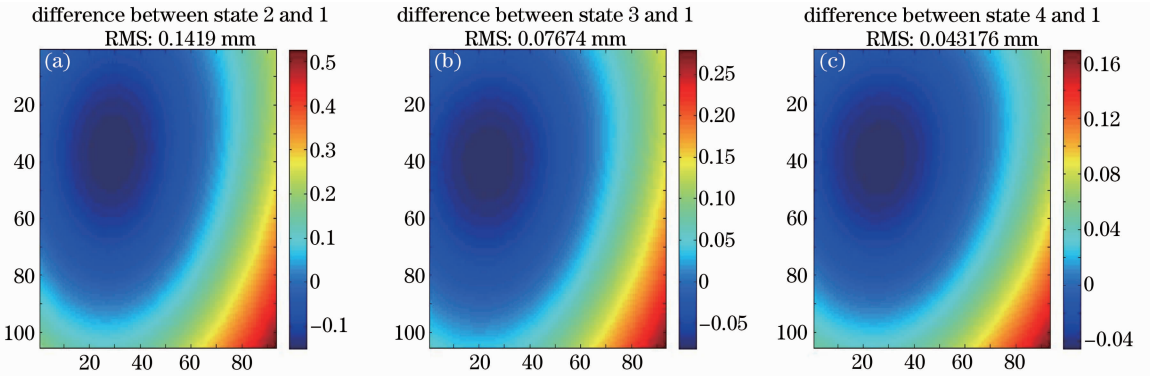


图 8 各状态下的面形与初始状态时的比较。(a) 状态 2 和状态 1 的比较; (b) 状态 3 和状态 1 的比较; (c) 状态 4 和状态 1 的比较

Fig. 8 Comparison of surface shape with initial state. (a) Comparison of state 2 and 1; (b) comparison of state 3 and 1; (c) comparison of state 4 and 1

图 8 反映的现象和图 7 是一致的, 随着温度的降低, 各状态和初始状态的差值的 RMS 值逐渐减小, 各状态面形的变化量在 0.01~0.1 mm 量级, 同时反映该方法可以检测出 0.01 mm 量级的面形变化量。

3.2 压力变化造成有机玻璃板表面斜率变化的测量

为了验证实验中计算得到的斜率数据的可靠性, 将图 2 中的高功率灯替换为一螺旋测微器加压装置(两实验中各元件的相对位置关系也发生了改变), 在离有机玻璃板较远处的平面上记录激光经有机玻璃板反射后的位置坐标, 该平面与 yoz 平面平

行。实验中对有机玻璃板进行三次压力, 螺旋测微器旋进 0.23 mm 来实现每一次加压, 在每一次加压过后, 显示器对有机玻璃板投射 8 幅正弦条纹, CCD 采集图像, 然后打开激光器记录激光斑点反射在坐标纸上的位置, 关闭激光器, 进行下一次加压。重复以上操作, 直到完成三次加压实验。

在用(3)式计算斜率变化时, 选用投射在有机玻璃板上的激光斑点中心位置进行计算。在图 2 中激光反射后在坐标纸上的位置由 A' 变化到 A'' 的位置, 在 y 方向上变化了 $-d_y$, 可得在激光投射的有机玻璃板上 y 方向斜率变化为

$$\Delta \tan y \approx \frac{d_y}{2 \times |AA'|}, \quad (10)$$

式中 $|AA'|$ 为激光投射在有机玻璃板上的位置与坐标纸上位置的距离,系数2是由于光线方向的变化量是法线方向变化量的2倍。

在进行了三次加压之后,用(3)式求出各状态下

表1 两种方法得出的斜率变化值对比

Table 1 Comparison of slope change for laser-reflection and the algorithm in this paper

Method	Slope difference					
	tany41	tany42	tany43	tany31	tany32	tany21
Laser-reflection Eq. 10	-0.00122951	-8.19672×10^{-4}	-4.09836×10^{-4}	-8.19672×10^{-4}	-4.09836×10^{-4}	-4.09834×10^{-4}
This paper Eq. 3	-0.00143261	-7.59678×10^{-4}	-6.58149×10^{-4}	-7.74463×10^{-4}	-1.01529×10^{-4}	-6.72934×10^{-4}

表1中,tany41 = tany4 - tany1,即为激光斑点所在位置的第四种状态和初始状态的y方向的斜率改变量,表中其他符号有类似的含义。

在测量中,反射点位置距记录位置2500 mm,测量误差为0.1 mm。每次加压时反射点在记录位置上的位移约1 mm,记录误差为0.01 mm。则用激光反射法测得的斜率变化量的不确定度约为 4×10^{-6} ,对照表1,可以看出该不确定度是原始斜率变化量的0.01倍。

由表1可以看出不同状态下两种测试方法测出玻璃板上某位置的斜率变化在数量级上一致,整体变化趋势吻合较好,每次加压造成的斜率变化约为 -4×10^{-4} ,加压三次过后总的斜率改变量约为 -0.001 。由于实验中存在着较多因素的影响,以及记录的激光斑点位置与实际位置有误差,使二者在数值存在着一定差异。

4 结 论

推导了平面元件斜率检测公式和面形恢复算法,将该检测方法用于有机玻璃板在加热条件下的面形检测,采用四步相移算法,利用斜率检测公式计算出有机玻璃板在4种状态下的斜率值,用方形域内标准正交矢量多项式拟合计算斜率数据得到有机玻璃板面形信息,对面形信息进行了对比分析,然后给出激光照射有机玻璃板的情况下,有机玻璃板斜率变化的计算公式,用平面元件斜率检测法和激光反射法对有机玻璃板在加压条件下的斜率变化进行了检测,将两者结果进行了对比。结果表明方域内的标准正交R矢量多项式可以准确地拟合斜率数据,该矢量拟合重构方法能获得很好的被测波前,同时表明该方法可以准确地检测出有机玻璃板面形的变化和表面的斜率变化,是一种硬件结构简单、成本

的斜率值,计算激光斑点投射在有机玻璃板中心得斜率变化。为叙述方便,将根据激光反射位置来计算斜率变化的方法称为激光反射法。将激光反射法与所提算法计算得出的斜率变化进行对比,如表1所示。

较低、方便快捷的非接触测量方法。测量过程中,系统的误差主要是显示器的平面性、显示器正弦条纹的畸变、相机噪声和实验装置中各元件坐标的测量误差。显示器的非平面性和显示问题及光学元件坐标的测量误差都可以通过系统的仔细标定来校准。实验中所选用的相机的针孔模型与实际相机的差异也对测量有一定影响,所以在后续工作中也要进一步标定摄像机,以获得较高的测量精度。重新设计光学系统可以满足大尺寸镜面检测需求,可为加工过程中波前变化范围较大的反射镜精磨和初抛光阶段的检验提供一种新方法。

参 考 文 献

- 1 O Kafri, A Livnat. Reflective surface analysis using moiré deflectometry [J]. *Appl Opt*, 1981, 20(18): 3098-3100.
- 2 Yan Tang, Xianyu Su, Yuankun Liu, *et al.*. 3D shape measurement of the aspheric mirror by advanced phase measuring deflectometry [J]. *Opt Express*, 2008, 16(19): 15090-15096.
- 3 J Balzer, S Werling. Principles of shape from specular reflection [J]. *Measurement*, 2010, 43(10): 1305-1317.
- 4 Daniel R Neal, James Copland, David Neal. Shack-Hartmann wavefront sensor precision and accuracy [C]. *SPIE*, 2002, 4779: 148-160.
- 5 Peng Su, Yuhao Wang, James H Burge, *et al.*. Non-null full field X-ray mirror metrology using SCOTS: a reflection deflectometry approach [J]. *Opt Express*, 2012, 20(11): 12393-12406.
- 6 Lirong Wang, Peng Su, Robert Parks, *et al.*. A low-cost, flexible, high dynamic range test for free-form illumination optics [C]. *SPIE*, 2010, 7652: 76521H.
- 7 Margaret Z Dominguez, John Armstrong, Peng Su, *et al.*. SCOTS: a useful tool for specifying and testing optics in slope space [C]. *SPIE*, 2012, 8493: 84931D.
- 8 P Su, R E Parks, L Wang, *et al.*. Software configurable optical test system-computerized reverse Hartmann test [J]. *Appl Opt*, 2010, 49(23): 4405-4412.
- 9 M Knauer, J Kaminski, G Hausler. Phase measuring deflectometry: a new approach to measure specular free form surfaces [C]. *SPIE*, 2004, 5457: 366-376.
- 10 Tianquan Su, Won Hyun Park, Robert E Parks, *et al.*. Scanning long-wave optical test system-a new ground optical surface slope test system [C]. *SPIE*, 2011, 8126: 81260E.

- 11 Su Xianyu, Li Jitao. Information Optics [M]. Beijing: Science Press, 2011. 317–318.
苏显渝, 李继陶. 信息光学[M]. 北京: 科学出版社, 2011. 317–318.
- 12 Zhengyou Zhang. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1331–1334.
- 13 Liu Xi, Li Dahai, Wang Qionghua, *et al.*. Research on key techniques for depth information extraction based on desktop vision system [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(12): 121501.
刘 曦, 李大海, 王琼华, 等. 采用桌面视觉系统实现深度测量的方法[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(12): 121501.

栏目编辑: 何卓铭