

# 一种新的非球面零朗奇检测法

郭春风<sup>1</sup> 苏显渝<sup>1</sup> 陈文静<sup>1</sup> 雷柏平<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 四川大学光电科学技术系, 四川 成都 610064 )  
(<sup>2</sup> 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209 )

**摘要** 提出一种新的零朗奇检测法用于测量大口径非球面镜的面形。利用光线追迹和正弦条纹的相位信息设计补偿正弦光栅。使用透射液晶显示屏显示补偿正弦光栅并作为相移装置。一个离轴点光源发出的光被镜面反射后通过补偿正弦光栅, 摄像机记录携带镜面偏差信息的相移条纹图。通过对相移条纹图的分析确定被测镜面的实际横向像差以及对应的理想横向像差, 然后基于朗奇检测的几何原理得到被测镜面的偏差梯度, 对其积分获得被测镜面的偏差, 进而重建被测镜面的三维面形。与传统的零朗奇检测法相比, 这种方法可以消除补偿光栅上每个条纹带边缘的锯齿形状, 而且可以获得镜面上足够多的待测点信息。计算机模拟和初步实验验证了该方法的可行性。

**关键词** 测量; 三维面形测量; 零朗奇检测法; 非球面镜; 条纹分析

**中图分类号** O438; TM930.12<sup>+</sup>6 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0812002

## A New Null Ronchi Test for Aspheric Surfaces

Guo Chunfeng<sup>1</sup> Su Xianyu<sup>1</sup> Chen Wenjing<sup>1</sup> Lei Baiping<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Department of Opto-Electronics, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China )  
(<sup>2</sup> Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China )

**Abstract** A new null Ronchi test method is presented to measure the shape of a large-aperture aspheric mirror. Null sinusoidal gratings are designed by using ray tracing and phase information of sinusoidal fringes. A transmission type liquid crystal display (T-LCD) screen generates null sinusoidal gratings and controls phase shift. An off-axis point source illuminates the whole mirror surface and a camera captures the phase-shifted fringe patterns containing the information of deviations of the mirror. By analyzing these fringe patterns, the actual transverse aberration and the corresponding ideal one are obtained. Then, the slopes of the deviations of the mirror are determined based on the geometric principle of the Ronchi test. The shape of the mirror is reconstructed after restoring the deviations of the mirror by integrating. Compared with the traditional null Ronchi test, the method eliminates the jagged edge of bands on the null gratings, and acquires the information of enough tested point. Simulations and a preliminary experiment validate the feasibility of this method.

**Key words** measurement; 3D shape measurement; null Ronchi test; aspheric mirror; fringe analysis

**OCIS codes** 120.6650; 120.2650; 220.1250

## 1 引 言

非球面镜具有增加设计自由度、简化系统结构和改善成像质量等优点, 因而在军事、航天和气象等领域具有重要应用价值。然而, 相对于传统球面光学元件而言, 非球面镜的制造对光学加工与检测提

出了更高的要求。高精度的光学检测对于提高非球面镜的加工质量具有重要的意义<sup>[1]</sup>。非球面镜的检测有三坐标测量机、干涉法和朗奇法等多种手段。三坐标测量机<sup>[2]</sup>采用测量头直接作用在非球面镜表面上进行测量, 这种测量方法精度高, 但是测量效率

**收稿日期**: 2012-02-04; **收到修改稿日期**: 2012-03-22

**基金项目**: 国家自然科学基金(60838002, 61177010)资助课题。

**作者简介**: 郭春风(1982—), 女, 博士研究生, 主要从事光学三维传感技术方面的研究。E-mail: cfguocn@163.com

**导师简介**: 苏显渝(1944—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光学三维传感与机器视觉技术方面的研究。

E-mail: xysu@scu.edu.cn(中国光学学会会员号: 6100105)

较低,而且测量的口径也受到限制。补偿器测量法<sup>[3]</sup>是干涉法中比较常用的一种方法,具有很高的测量精度,但是仪器价格昂贵,而且对于每一个非球面镜都需要专门设计相应的补偿器。相对而言,朗奇法<sup>[4]</sup>具有结构简单、成本低和测量结果容易识别等优点,因此,可以应用于精磨和初抛光阶段对非球面镜的定性和定量检测。

根据光栅上的条纹是否弯曲,朗奇检测法可以分为标准朗奇检测法<sup>[5~7]</sup>和零朗奇检测法<sup>[8~10]</sup>。与标准朗奇检测法相比,零朗奇检测法有许多优点。利用标准朗奇检测法测量镜面时,理想非球面上的条纹是弯曲的,而用零朗奇检测法测量镜面时,理想条纹是直的。因此,零朗奇检测法使技术人员更容易依据条纹的弯曲程度来定性判断镜面相对其理想面形的偏差。零朗奇检测法还可以避免衍射效应引起的条纹扩散,从而降低了测量的难度。然而,传统的零朗奇检测法不能提供足够的测量数据,这主要是因为得不到各条纹之间区域的信息,而且传统的补偿光栅上各个带的边缘有锯齿形状。此外,检测不同的镜面时,必须专门制作相应的补偿光栅,给实际检测带来不便。

针对传统零朗奇检测法的不足,本文提出一种新的零朗奇检测法用于测量大口径非球面镜。该方法利用光线追迹和正弦条纹的相位信息来设计补偿正弦光栅上的弯曲条纹。测量中,使用透射液晶显示屏显示补偿正弦光栅并作为相移装置。一个离轴点光源照明整个被测镜表面。摄像机透过补偿光栅记录携带被测镜面偏差信息的相移条纹图。通过分析相移条纹图,可以得到镜面相对其理想面形的偏差梯度,积分这些梯度可以恢复镜面偏差,从而重建镜面面形。

## 2 基本原理

测量装置如图 1 所示,主要由被测镜面、光纤、

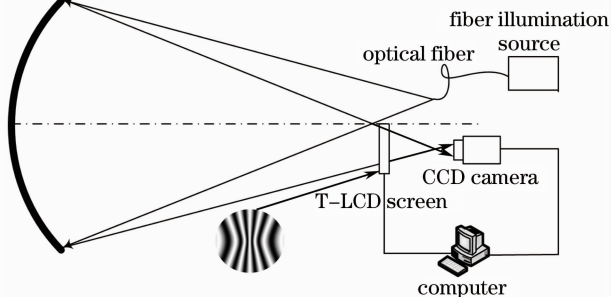


图 1 实验装置图  
Fig. 1 Experimental setup

光纤照明光源、CCD 摄像机、透射液晶显示 (T-LCD) 屏及计算机组成。其中透射液晶显示屏显示垂直和水平两个方向的补偿正弦光栅,并与被测镜面的光轴垂直。在测量过程中,光纤光源发出的光经过光纤传输到被测镜面顶点曲率中心的一侧,形成点光源,照明整个被测镜面,由调焦在镜面上的摄像机记录携带镜面偏差信息的条纹图。通过分析采集的条纹图可以重建被测镜面的三维面形。

### 2.1 补偿正弦光栅的设计

利用零朗奇检测法测量非球面镜首先需要计算补偿正弦光栅。在设计补偿正弦光栅时,先假定理想面形上有给定的直正弦条纹,利用光线追迹和条纹的相位信息来计算补偿光栅上的弯曲条纹。对于不同位置的补偿光栅,弯曲条纹的形状不同,因此必须对某一给定的位置设计相应的补偿光栅。补偿正弦光栅设计的原理如图 2 所示。在图 2 中以镜面的中心  $o$  为坐标原点建立了一个直角坐标系, $z$  轴与镜面的光轴重合。 $N$  为理想面形上的一点, $S$  为离轴点光源, $A$  为过点  $N$  的反射光线与显示屏的交点, $L$  为过镜面原点  $o$  的反射光线与显示屏的交点, $AL$  是横向像差。根据反射定律,可以得到过镜面上任意一点  $N$  的反射光线的单位矢量。假定过点  $N$  的法线单位矢量表示为  $\mathbf{n}^0$ ,那么反射定律可以表示为

$$\mathbf{r}_{NA} = \mathbf{r}_{SN} - 2(\mathbf{r}_{SN} \cdot \mathbf{n}^0)\mathbf{n}^0, \quad (1)$$

式中反射光线  $\mathbf{r}_{NA}$  和入射光线  $\mathbf{r}_{SN}$  的大小分别为各自传播方向的单位矢量与所在介质折射率的乘积。由(1)式可以得到通过点  $N$  的反射光线的单位矢量。

已知理想面形上点  $N$  的坐标和过点  $N$  反射光线的单位矢量,可以确定过点  $N$  的反射光线,以及这条反射光线与显示屏的交点  $A$ 。设点  $L$  是显示屏的中心,那么根据点  $L$  的坐标和显示屏的像素尺寸,可以确定显示屏上每一个像素点的坐标。利用给定直正弦条纹图上的等网格点  $(N_x, N_y)$  和显示屏上的同名点  $(A_x, A_y)$ ,通过插值就可以找到显示屏上每一个像素点在给定直正弦条纹图上的同名点  $(x, y)$ ,显示屏上每个像素的相位就是在给定直正弦条纹图上同名点的相位。因此,显示屏上弯曲条纹图(补偿正弦光栅)的强度分布可以表示为

$$I_n(x, y) = a_1 + a_2 \cos[\varphi(x, y)], \quad (2)$$

式中  $a_1$  和  $a_2$  为常数, $\varphi(x, y)$  为相位。当理想面形上给定垂直条纹时, $\varphi(x, y) = 2\pi x/p_1$ ;当理想面形上给定水平条纹时, $\varphi(x, y) = 2\pi y/p_2$ 。 $p_1$  和  $p_2$  分别为镜面上垂直正弦条纹和水平正弦条纹的周期。

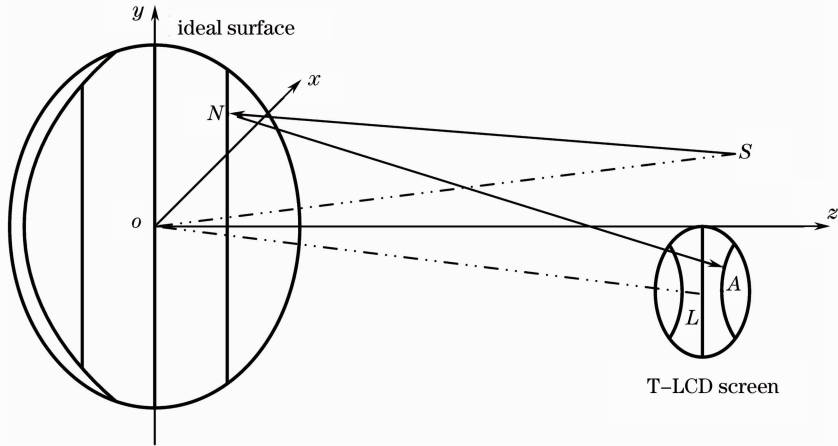


图2 补偿光栅设计的原理图

Fig. 2 Schematic of null gratings design

使用透射液晶显示屏有两个优点：一方面，可以很方便地改变补偿光栅的周期和方向，另一方面，液晶显示屏可以很方便地显示条纹弯曲程度不同的补偿光栅，这样避免了传统零朗奇检测法中，检测每一个镜面时必须专门刻画相应补偿光栅的麻烦。由于非球面性的补偿严重地依赖于补偿光栅设计的位置，因此必须将补偿光栅精确地放置在这个位置。为此，在显示光栅的屏上生成一个环形的标记，使该标记与被测镜面边缘在屏上的投影重合，来确保补偿正弦光栅放在设计的位置。

## 2.2 三维面形重建

测量前需要标定摄像机内、外参数。首先用相位标靶和傅里叶条纹分析技术标定摄像机内部参数<sup>[11]</sup>，然后在镜面中心放置一面垂直与光轴的棋盘格标定靶，标定摄像机外部参数<sup>[12]</sup>。标定时所选的世界坐标系与图2建立的笛卡儿坐标系相同， $z=0$ 的平面就是棋盘格标定靶面， $x$ 轴和 $y$ 轴分别平行与靶面上特征点的纵横方向。空间中的任意一点，在摄像机坐标系 $(o_c, x_c, y_c, z_c)$ 和世界坐标系 $(o, x, y, z)$ 下的坐标有如下关系：

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \mathbf{T}, \quad (3)$$

式中 $\mathbf{R}$ 为旋转矩阵， $\mathbf{T}$ 为平移向量。

图3显示了测量的几何原理。当一个离轴点光源 $S$ 发出的光入射镜面时，反射光和光轴不总在一个平面内，因此，实际反射光线和显示屏的交点 $A$ 必须投影在光轴和点 $M$ （实际反射光线和理想面形的交点）确定的平面内。如图3所示， $A'$ 是点 $A$ 在面 $Mo_z$ 上的投影点， $L'$ 是显示屏中心点 $L$ 在面 $Mo_z$ 上

的投影点。显示屏显示垂直和水平两个方向的补偿正弦光栅，这两个光栅分别对应理想面形上给定的垂直和水平正弦条纹。在测量中，从点光源发出的光被镜面反射后通过补偿光栅，由此携带镜面偏差信息的条纹图被摄像机记录。通过相移技术以及相应的相位展开技术可以计算出采集条纹图的连续相位分布 $\varphi$ <sup>[13, 14]</sup>，这个相位通常称为相对相位，它相对于相位展开的起始点。

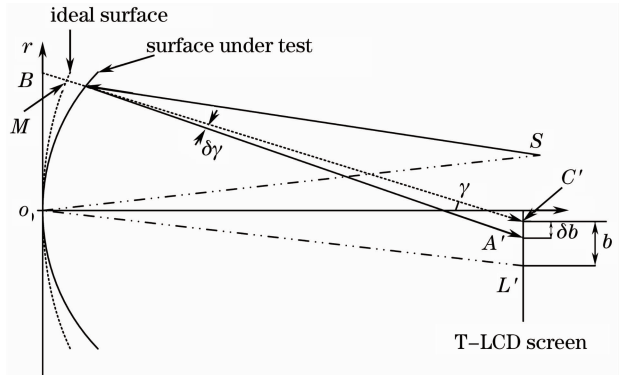


图3 测量原理图

Fig. 3 Schematic diagram of measurement principle

绝对相位是相对于预先定义的相位。在测量中，光栅的相位是预先定义的已知相位。为了得到采集条纹图的绝对相位，条纹图上至少有一点的相位应该与已知相位相联系，一个标记可以作为参考将相对相位转换为绝对相位。在本文中，以调制度的不同在每个光栅中添加一个方块标记，这些标记点可以从采集的条纹图中识别。因为标记点的相位是预先定义的，所以必须移动相对相位才能确保采集条纹图上标记的相位与预先定义的相位值相同。假定作为参考的一个标记点的绝对相位值为0，摄像机采集条纹图上的这个标记点的相对相位为 $\varphi_0$ ，

那么采集条纹图的绝对相位为

$$\varphi_a = \varphi - \varphi_0. \quad (4)$$

为了重建被测镜面面形,需要找到摄像机的每个像素点在光栅上的同名点。找同名点的过程可以分为两步,首先,利用同相位的信息,通过插值找到摄像机的每个像素点在给定直条纹图上的同名点  $N$ ,然后用光线追迹,找到点  $N$  在光栅上的同名点  $A$ ,因而确定了被测镜面的实际横向像差  $AL$ 。由(3)式可知摄像机坐标系已标定在世界坐标系中,因此可以找到摄像机的每个像素点在棋盘格标定靶面上的同名点  $B$ 。已知点  $A$  和点  $B$ ,可以确定实际反射光线  $BA$ 。

用实际反射光线  $BA$  和理想面形的表达式,可以计算出它们的交点  $M$ 。利用光线追迹,可以算出通过点  $M$  的理想反射光线,以及这条理想反射光线与显示屏的交点  $C$ ,因此可以确定理想横向像差  $CL$ 。点  $C$  在平面  $Mo_z$  上的投影点为  $C'$ ,点  $C'$  的径向分量为

$$C'_r = (C_x x + C_y y)/r, \quad (5)$$

式中  $C_x, C_y$  分别是点  $C$  在  $x, y$  方向的分量,  $x, y$  是点  $M$  的坐标,  $r = (x^2 + y^2)^{1/2}$ 。同理,点  $A'$  的径向分量为  $A'_r = (A_x x + A_y y)/r$ 。那么,可以得到点  $A'$  和点  $C'$  之间的距离  $\delta b$ ,  $\delta b = A'_r - C'_r$ ,这个差值与被测镜面相对其理想面形的偏差有关。

假定被测镜面的偏差是小的,基于朗奇检测的几何原理<sup>[15]</sup>从镜面的法线方向测量镜面的偏差,进而重建镜面的面形。假设理想非球面的面形为  $f(r)$ ,那么理想面形的梯度为  $\tan \beta = df(r)/dr$ 。如果镜面相对其理想面形的偏差为  $\delta f(r)$ ,则镜面面形为  $f(r) + \delta f(r)$ ,其梯度为

$$\tan(\beta + \delta\beta) = \frac{d[f(r) + \delta f(r)]}{dr}, \quad (6)$$

(6)式可以化简为

$$\delta \tan \beta = \tan(\beta + \delta\beta) - \tan \beta = \frac{d[\delta f(r)]}{dr}. \quad (7)$$

沿法线方向的镜面偏差  $g(r)$  为

$$g(r) = \delta f(r) \cos \beta, \quad (8)$$

将(8)式代入(7)式,并且偏微分  $\tan \beta$ , (7)式可以化简为

$$\delta\beta = \frac{\cos \beta dg(r)}{dr}. \quad (9)$$

从图 3 可以得到,

$$\tan \gamma = (r - L'_r - b)/[D - f(r)], \quad (10)$$

式中  $\gamma$  是理想反射光线和光轴的夹角,  $D$  为显示屏与镜面中心之间的距离。对(10)式两边求偏微分:

$$\delta\gamma = -\cos^2 \gamma \frac{\delta b}{D - f(r)}. \quad (11)$$

由反射定律可知,  $\delta\gamma = 2\delta\beta$ 。因此沿法线方向镜面偏差的梯度为

$$\frac{dg(r)}{dr} = \frac{-[D - f(r)]\delta b}{2\cos\beta\{(r - C'_r)^2 + [D - f(r)]^2\}}. \quad (12)$$

从(12)式可以推导出镜面  $x, y$  两个方向的梯度,积分这两个方向的梯度,可以恢复沿法线方向的镜面偏差  $g(x, y)$ ,由(8)式可得沿  $z$  轴方向的镜面偏差  $\delta f(r)$  为  $g(r)/\cos \beta$ ,进而重建镜面面形。

### 3 计算机模拟

为了验证本文方法的可行性,使用计算机模拟测量如图 4 所示的一个非球面镜,镜面顶点的曲率半径为 1500 mm,偏心率的二次方为 1.4。本文所提方法是通过镜面偏差的梯度来测量镜面面形,因此镜面和它的理想面形之间一定要存在偏差。假定镜面的理想面形的口径为 500 mm,顶点的曲率半径仍为 1500 mm,偏心率的二次方为 1.5。

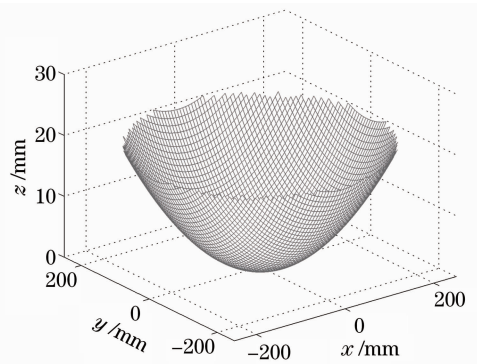


图 4 模拟的非球面面形

Fig. 4 Simulated aspheric surface

在模拟中点光源位于点  $(0, 30, 1500)$ ,按照光线追迹及镜面上给定直正弦条纹的相位信息计算了如图 5 所示的两个补偿光栅,补偿光栅的中心周期为 3 mm,它距离镜面中心 1480 mm。从图 5 可以看出,设计的补偿光栅有效地避免了传统补偿光栅<sup>[8,9]</sup>上每个带边缘的锯齿形状。考虑到实际检测中存在随机噪声,在模拟条纹图上添加幅度为 5% 的随机噪声,通过分析添加噪声的模拟条纹图,重建了镜面面形。图 6 给出了重建面形误差  $\Delta z$ ,它为重建镜面面形和被测镜面面形之差。重建面形误差低于  $1.0277 \times 10^{-4}$  mm,误差的均方根为  $1.3490 \times 10^{-5}$  mm,这说明了用本文的方法可以较好地测量非球面镜。

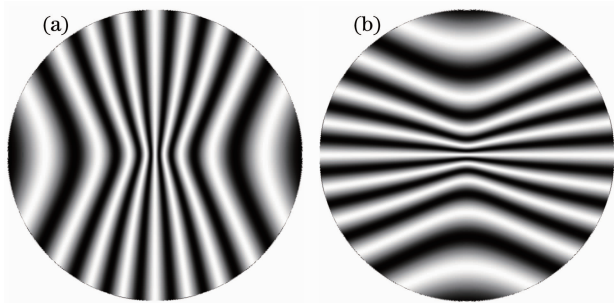


图 5 模拟中的补偿正弦光栅

Fig. 5 Null sinusoidal grating in simulation

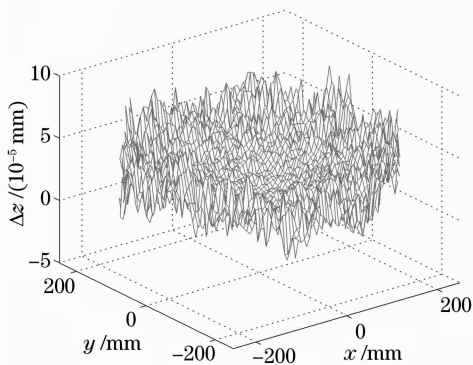


图 6 重建面形误差

Fig. 6 Errors of the reconstructed surface

## 4 实验验证

被测物体是一个口径大约为 425 mm 的凹面镜。镜面的理想面形是一个非球面面形,它的顶点曲率半径为 1048.81 mm,偏心率为 0.1。实验中,点光源是由单模光纤形成,为了确保全口径测量,光纤的相对口径必须不小于被测镜面的相对口径,亮度由直流调压光纤光源控制。点光源沿  $x$  方向偏离被测镜面顶点曲率中心 39 mm,0.9 inch(1 inch=25.4 mm)的透射液晶显示屏位于点光源和被测镜面之间,距离点光源 30 mm,它的分辨率为 1024 pixel $\times$ 768 pixel,中心在过镜面中心的反射光线上。根据补偿正弦光栅的设计原理,计算了如图 7 所示的两个补偿正弦光栅。摄像机采集了携带镜面偏差信息的相移条纹图,其中两幅如图 8 所示。

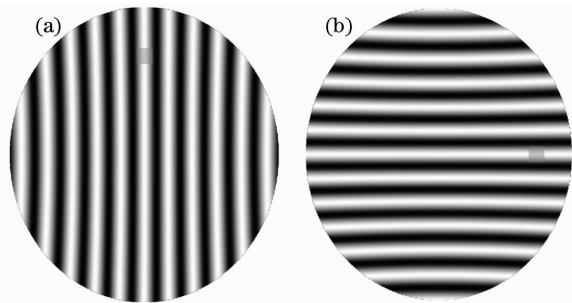


图 7 实验中的补偿光栅

Fig. 7 Null gratings in experiment

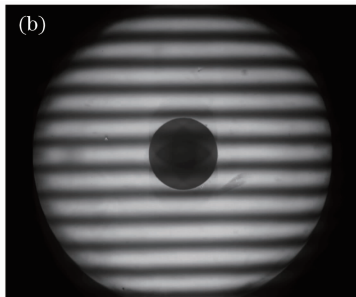
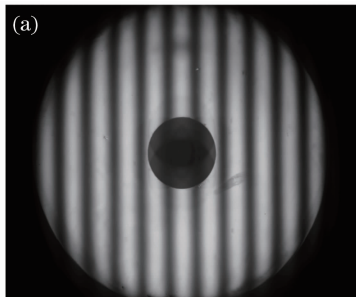


图 8 采集的条纹图

Fig. 8 Captured fringe patterns

利用本文方法重建了如图 9 所示的被测镜面面形。为了验证恢复面形的结果,用三坐标测量机测量了同一镜面,以图 10 中三坐标测量机测量的结果作为标准来评价。两种方法的测量结果之差如图 11 所示。由图 11 可以看出利用本文方法与三坐标机测量结果基本吻合,两种方法的差值都在微米量级,达到了细磨阶段测量精度不大于 0.005 mm 的要求<sup>[16]</sup>,而且三坐标测量机测量非球面是目前市场上比较成熟的、精度达到微米量级的一种方法,因此本文所提的零朗奇检测法可以成功地重建被测镜面面形。

## 5 结 论

提出了一种新的零朗奇检测法测量非球面镜,该方法根据光线追迹和条纹的相位信息来设计补偿正弦光栅,从而消除了传统补偿光栅上每个带边缘的锯齿形状,提高了检测的精度。测量中,将补偿正弦光栅显示在透射液晶显示屏上,这可以方便地改变光栅的条纹数和方向,精密地控制了光栅的相移,更避免了测量不同的镜面时多次刻画补偿光栅的麻烦。与传统的零朗奇检测法相比,本文通过镜面相对其理想面形的偏差梯度来测量镜面面形,而且,利

## 参 考 文 献

- 1 Tang Yan, Su Xianyu, Liu Yuankun *et al.*. Three-dimensional shape measurement of aspheric mirror based on fringe reflection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 965~969  
唐 燕, 苏显渝, 刘元坤 等. 基于条纹反射的非球面镜三维面形测量[J]. *光学学报*, 2009, **29**(4): 965~969
- 2 Zhao Wenchuan, Fan Bin, Wu Fan *et al.*. Testing of aspheric surface normal vector based on phase measuring deflectometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(6): 133~138  
赵文川, 范 斌, 伍 凡 等. 基于相位测量偏折术的非球面法线向量测量[J]. *光学学报*, 2011, **31**(6): 133~138
- 3 Ming Ming, Yang Fei, Chen Baogang *et al.*. The mistake during the process of testing aspheric mirror using compensator [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, **37**(10): 116~121  
明 名, 杨 飞, 陈宝刚 等. 补偿器法检测非球面过程中易出现的误区[J]. *光电工程*, 2010, **37**(10): 116~121
- 4 D. Malacara. *Optical Shop Testing*[M]. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2007. 317~360
- 5 Guo Chunfeng, Su Xianyu, Dou Yunfu *et al.*. Large-aperture aspheric surfaces testing by using sinusoidal grating based on Ronchi method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 261~265  
郭春风, 苏显渝, 窦蕴甫 等. 用正弦光栅的朗奇法检验大口径非球面面形[J]. *光学学报*, 2011, **31**(4): 261~265
- 6 H. Lee, S. Kim. Precision profile measurement of aspheric surfaces by improved Ronchi test [J]. *Opt. Engng.*, 1998, **38**(6): 1041~1047
- 7 K. Hassani, H. H. Ziafi. Modified matching Ronchi test to visualize lens aberrations[J]. *European J. Phys.*, 2011, **32**(5): 1385~1390
- 8 D. Malacara, A. Cornejo. Null Ronchi test for aspherical surfaces[J]. *Appl. Opt.*, 1974, **13**(8): 1778~1780
- 9 Lei Baiping, Wu Fan, Zhou Chenbo. Application of Ronchi grating to the quantitative measurement of large-aperture aspheric surfaces[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2441~2446  
雷柏平, 伍 凡, 周晨波. 龙基光栅在大口径非球面定量测量中的应用[J]. *光学学报*, 2009, **29**(9): 2441~2446
- 10 Guo Chunfeng, Su Xianyu, Lei Baiping *et al.*. Error analysis of Ronchi test for aspherical mirrors [J]. *J. Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2011, **43**(4): 149~153  
郭春风, 苏显渝, 雷柏平等. 非球面 Ronchi 检测的误差分析 [J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2011, **43**(4): 149~153
- 11 Liu Yuankun, Su Xianyu. A new camera calibration technique using FTP method [J]. *J. Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2007, **39**(6): 149~153  
刘元坤, 苏显渝. 基于傅里叶条纹分析的摄像机标定[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2007, **39**(6): 149~153
- 12 Z. Y. Zheng. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 2000, **22**(11): 1330~1334
- 13 Su Xianyu, Li Jitao. *Information Optics*[M]. Beijing: Science Press, 1999. 321~325  
苏显渝, 李继陶. *信息光学*[M]. 北京: 科学出版社, 1999. 321~325
- 14 X. Y. Su, W. J. Chen. Reliability-guided phase unwrapping algorithm: a review [J]. *Opt. & Lasers in Engng.*, 2004, **42**(3): 245~261
- 15 D. Malacara. Geometrical Ronchi test of aspherical mirrors[J]. *Appl. Opt.*, 1965, **4**(11): 1371~1374
- 16 Pan Junhua. The guiding idea in optical inspection [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2004, **2**(6): 1~3  
潘君骅. 谈谈光学检测的指导思想[J]. *光学与光电技术*, 2004, **2**(6): 1~3

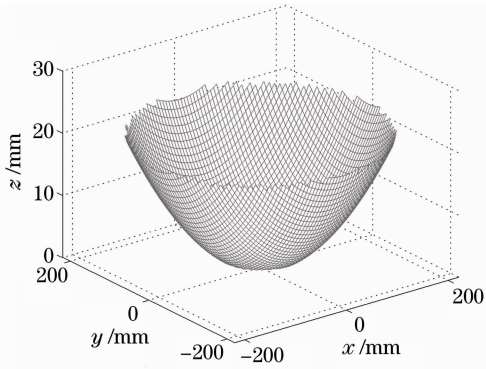


图 9 本文方法重建面形

Fig. 9 Reconstructed surface using the presented method

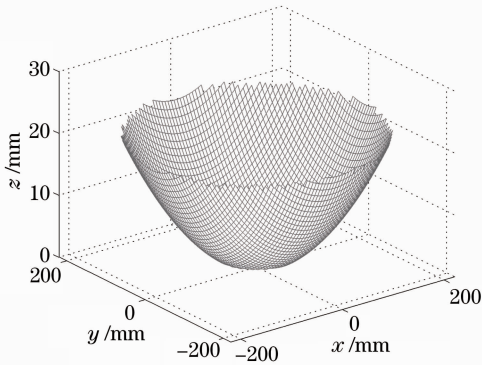


图 10 三坐标测量机测量结果

Fig. 10 Measurement results using three-coordinate measuring machine

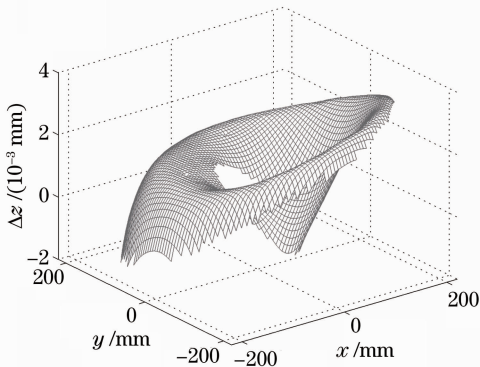


图 11 本文方法和三坐标测量机测量结果之差

Fig. 11 Differences between measurement results by the proposed method and three-coordinate measuring machine

用补偿正弦光栅使该方法可以得到足够多的测量数据。计算机模拟和初步实验验证了该方法的可行性。虽然朗奇检测法的测量精度低于干涉检验,但是它能适应面形较大的变化范围,可用于非球面镜在细磨和初抛光加工过程中的面形检测。