

doi:10.3788/gzxb20154409.0912004

条纹反射法检测光学反射镜面形

袁婷^{1,2}, 张峰¹, 陶小平¹, 周润^{1,2}, 付锦江^{1,2}

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室, 长春 130033)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:针对光学反射镜在精磨向初抛光过渡阶段时面形与理想面形存在较大偏差的问题, 采用轮廓仪和普通干涉仪检测无法满足加工检测需求的问题, 提出采用动态范围大且准确度高的条纹反射法来检测光学反射镜. 研究分析了条纹反射检测系统的原理及系统误差, 运用光线追迹软件对条纹反射检测 100 mm 口径反射镜面形进行建模仿真, 并对已经加工完成的 100 mm 口径旋转对称球面反射镜进行了检测, 测量得到的面形误差峰谷值及均方根值分别为 0.523 μm 和 0.086 μm , 满足该过渡阶段的检测需求.

关键词:条纹反射; 光学检测; 光线追迹; 误差分析

中图分类号: TN247

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)09-0912004-6

Test of Optical Mirror Surface Using Fringe Reflection System

YUAN Ting^{1,2}, ZHANG Feng¹, TAO Xiao-ping¹, ZHOU Run^{1,2}, FU Jin-jiang^{1,2}

(1 Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

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

Abstract: Large shape errors can be found from the stage of fine grinding to the beginning of polish, it is proved that it can't satisfy the measuring requirements to test the mirrors with profilers or ordinary interferometer in that stage. To obtain the optical mirrors' shape error based on fringe reflection, the method of high precision and large dynamic is proposed. The principle and system errors of the testing system were analyzed. To verify the feasible of the testing system, the model of testing on a reflecting mirror (the aperture is 100 mm) was built and simulated by ray tracing. The preliminary testing data on rotational symmetry spherical mirror is: PV is 0.523 μm , RMS is 0.086 μm . The feasibility of the testing system based on fringe reflection used in this period is verified.

Key words: Fringe reflection; Optical testing; Ray tracing; Error analysis

OCIS Codes: 120.4630; 120.6650; 120.5700; 120.2650; 100.2000

0 引言

随着球面、非球面光学元件在民用、天文、航天等领域得到广泛应用, 不同种类的反射镜相继产生, 同时也增加了反射镜加工和检测的难度, 特别是加工制造过程中检测的难度. 光学反射镜的加工主要包括铣磨、研磨、抛光三个阶段. 面形检测技术主要有轮廓测量法和光学干涉测量法. 在研磨阶段采用轮廓测量仪, 在抛

光阶段采用干涉测量法. 但是在研磨向抛光过渡的阶段, 轮廓仪测量时采样密度低、对大口径反射镜检测用时较长, 不能满足加工要求, 且加工效率低; 而干涉仪动态范围小, 对于面形误差较大的过渡阶段, 很难覆盖全孔径检测; 由此该过渡阶段的面形检测技术还有待研究.

条纹反射测量法具有结构简单、动态范围大、测量准确度高、检测速度快、抗干扰性能好、成本低、易于操

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 61036015)资助

第一作者: 袁婷(1987—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为条纹反射检测. Email: tingyuano@126.com

导师(通讯作者): 张峰(1969—), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为先进光学制造技术. Email: zhangfjyz@sina.cn

收稿日期: 2015-03-24; 录用日期: 2015-06-16

<http://www.photon.ac.cn>

作等优点而得到普遍应用. 国内四川大学与成都光电所^[1-3]、中国科学院^[4]都对类似技术有一定研究, 并且对金属表面缺陷^[5]以及类镜面^[6]进行了检测; 德国不莱梅光学应用研究所^[7-8]已利用相关技术对小口径镜面面形进行了高精度检测; 而美国 Arizona^[9-11]大学已成功运用该项技术检测了尺寸为 2 m×3 m, 离轴量为 3 m, $f/0.5$ 的太阳反射镜子镜, 以及直径为 8.4 m 的巨型麦哲伦望远镜系统主镜的面形. 鉴于此, 本文提出采用条纹反射法对研磨向抛光过渡阶段的反射镜面进行非零位检测, 不但降低了对检测系统硬件的要求, 便于检测、提高效率, 还可以为该过渡阶段的加工与检测提供更多的依据.

1 条纹反射系统工作原理

1.1 条纹反射工作原理

条纹反射法类似于传统的哈特曼^[12]检测, 只是前者是光逆向穿过系统, 而且相比于哈特曼检测, 条纹反射法具有采样密度大和动态范围大的特点. 它的测量几何原理如图 1, 系统由 LCD 屏、被检镜以及前置小孔的 CCD 摄像机组成. 在黑色 LCD 屏幕上显示一个亮点, CCD 相机所获取的反射镜的像将显示一块亮斑, 根据针孔相机模型和反射定律可知, 在这块亮斑区域,

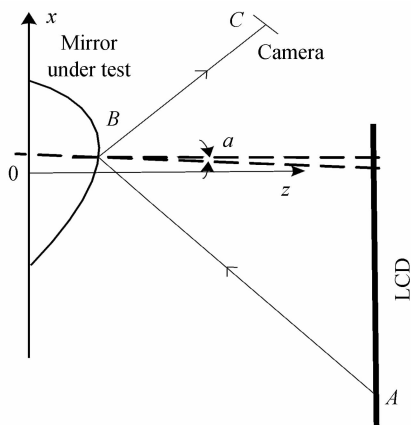


图 1 条纹反射测量斜率的几何原理

Fig. 1 Principle of slope calculation in fringe reflection measurement

来自屏幕的入射光线与反射回到相机的反射光线的角平分线方向便是和 LCD 亮点对应的镜面点的法线方向. 换句话说, 只要知道亮点在 LCD 显示屏幕上的位置、相机小孔位置以及与 LCD 亮点所对应的反射镜面点的位置, 那么该点的镜面斜率(ω_x 和 ω_y)就能根据式(1)计算出来. 最后通过多项式拟合或者带状积分法^[13]等便可求出与斜率相应的表面形状(ω).

$$\omega_x(x_m, y_m) = \frac{\frac{x_m - x_{\text{screen}}}{d_{m2\text{screen}}} + \frac{x_m - x_{\text{camera}}}{d_{m2\text{camera}}}}{\frac{z_{m2\text{screen}} - \omega(x_m, y_m)}{d_{m2\text{screen}}} + \frac{z_{m2\text{camera}} - \omega(x_m, y_m)}{d_{m2\text{camera}}}}$$

$$\omega_y(x_m, y_m) = \frac{\frac{y_m - y_{\text{screen}}}{d_{m2\text{screen}}} + \frac{y_m - y_{\text{camera}}}{d_{m2\text{camera}}}}{\frac{z_{m2\text{screen}} - \omega(x_m, y_m)}{d_{m2\text{screen}}} + \frac{z_{m2\text{camera}} - \omega(x_m, y_m)}{d_{m2\text{camera}}}} \quad (1)$$

式中, x_m 和 y_m 是待测表面的坐标; x_{camera} 和 y_{camera} 是相机坐标; x_{screen} 和 y_{screen} 是屏幕亮点的坐标; $z_{m2\text{screen}}$ 和 $z_{m2\text{camera}}$ 分别是反射镜和屏幕、反射镜和相机之间的 z 坐标差值; $d_{m2\text{screen}}$ 和 $d_{m2\text{camera}}$ 分别是反射镜和屏幕、反射镜和相机之间的距离.

在式(1)中, 斜率 $\omega_x(x_m, y_m)$ 、 $\omega_y(x_m, y_m)$ 是表面形状 $\omega(x_m, y_m)$ 的函数, 因此在计算斜率时需要提供一个较好的初始值, 对于许多光学应用来说, 一个理想的表面形状模型或者使用其他检测方法得到的面形能提供一个较好的初始面形估计, 记为 $\omega_0(x_m, y_m)$, 将 $\omega_0(x_m, y_m)$ 代替式(1)中的 $\omega(x_m, y_m)$ 便可得到 (x_m, y_m) 处的 X、Y 向斜率数据, 再将斜率计算得到的面形 $\omega_1(x_m, y_m)$ 代替式(1)中的 $\omega(x_m, y_m)$, 进而得到另外一组斜率, 依此类推, 通过反复迭代计算斜率与面形, 从而可得到被检面形.

条纹反射法按光源的种类可分为: 点对点检测、线扫描检测、正弦条纹反射检测, 三者的不同之处仅在于光源点数及点分布形式的不同. 由于点对点检测与线扫描检测速度慢, 效率较低, 本文将采用不同强度编码的正弦条纹作为光源来进行检测.

1.2 正弦条纹检测系统工作原理

屏幕上分别显示水平和垂直两个方向正交的正弦条纹, 并用来照明待测反射面, 用 CCD 相机记录经被测面反射的正弦条纹像, 通过数字相移技术便可得到两个正交方向的相位分布, 利用相移技术和相位展开算法计算得到位相分布, 以相位为载体对光线进行追迹, 从而得到屏幕 LCD 上的像素点坐标, 再根据式(1)求得面形的梯度分布, 最后通过模式迭代重建面形分布.

1.2.1 数字相移技术

从屏幕进入相机光瞳的光强为

$$I = a + b \cos\left(\frac{2\pi r}{p} + t\right) \quad (2)$$

式中, a 为背景光强度; b 为振幅调制; r 为屏幕像素坐标; p 为正弦条纹的周期; $2\pi r/p$ 为需要得到的相位值; t 为附加相移.

假定使用 N 步相移 ($N \geq 3$), 那么 LCD 显示屏显示 N 幅正弦条纹图, t 分别取 $(n-1) \times 2\pi/N$, $n=1, 2, \dots, N$, 即通过调整 t 来控制屏幕图案的光强 I . t 每取一个值时, 相机拍一幅经被检镜反射后的条纹图, 直到采集到 N 幅正弦条纹图像. 如果把相机采集到的 LCD 像素处的光强度分别称作 I_1, I_2, \dots, I_N , 那么相位值 $\varphi = 2\pi r/p$ 就可以由式(3)^[14] 计算得出

$$\varphi = \frac{2\pi r}{p} = -\arctan \left[\frac{\sum_{n=1}^N I_n(x, y) \sin [2\pi(n-1)/N]}{\sum_{n=1}^N I_n(x, y) \cos [2\pi(n-1)/N]} \right] \quad (3)$$

使用式(2)和(3),可以得到和反射镜上某一点相对应的屏上位置 r ,当有多个屏幕像素照射同一个反射镜像素时,结合式(2)和(3)求得的便是平均位相。

1.2.2 位相展开技术

位相展开的目的是为了寻找反射镜上点和相应屏幕像素点之间的映射关系.如果每次用一条线照射待测镜,并且待测镜上被照亮的位置也已确定,那么映射关系就可以唯一确定.进行位相展开之前先要进行模 2π 处理,模 2π 处理的目的是将由反正切求得的分布在 $[-\pi/2, \pi/2]$ 的值扩展到 $[0, 2\pi]$ 或 $[-\pi, \pi]$. 整个位相展开的过程分为^[15]

- 将反正切获得的位相做模 2π 处理.
- 相邻两像素的位相差小于 π .
- 沿着轨迹追击.
- 当位相差大于 π 时,需要加或减 $2n\pi$ 使其满足要求.

1.2.3 重建法

从离散的梯度到面形高度可通过十字路径(cross-path)积分技术、带状波前重构算法以及基于 Zernike 多项式的模式(Modal)重构法^[13].由于基于十字路径法测得的梯度与选择的积分路径有关,而且积分路径方向也是误差增长方向;带状波前重构算法准确度虽高,但却受被测面大小的限制;因此本文将采用基于 Zernike 多项式的模式法来重构面形.

被测光学表面总是光滑和连续的,波面拟合通常选用 Zernike 多项式进行波面拟合.因此,被测波面通常用 $n+1$ 项 Zernike 多项式表示,即

$$\omega(x, y) = a_0 Z_0(x, y) + a_1 Z_1(x, y) + \dots + a_n Z_n(x, y) = \sum_{k=0}^n a_k Z_k \quad (4)$$

将式(4)分别对 x, y 求导可得

$$\omega^x(x, y) = a_0 Z_0^x(x, y) + a_1 Z_1^x(x, y) + \dots + a_n Z_n^x(x, y) = \sum_{k=0}^n a_k Z_k^x = \sum_{k=0}^n a_k \frac{\partial Z_k(x, y)}{\partial x} \quad (5)$$

$$\omega^y(x, y) = a_0 Z_0^y(x, y) + a_1 Z_1^y(x, y) + \dots + a_n Z_n^y(x, y) = \sum_{k=0}^n a_k Z_k^y = \sum_{k=0}^n a_k \frac{\partial Z_k(x, y)}{\partial y} \quad (6)$$

若通过条纹反射法分别获得 m 个离散的 x, y 向梯度值,即 $\omega^x(x_i, y_i), \omega^y(x_i, y_i), i=1, 2, \dots, m$. 那么将式(5)、(6)写成矩阵形式,可得

$$\mathbf{S} = \mathbf{A} \mathbf{a} \quad (7)$$

其中 $\mathbf{S} = [\omega^x, \omega^y]'$, 为 $2m \times 1$ 矩阵, $\mathbf{A} = \left[\frac{\partial Z_k(x, y)}{\partial x}, \frac{\partial Z_k(x, y)}{\partial y} \right]'$, 为 $2m \times n$ 矩阵, \mathbf{a} 为需要求解的泽尼克多

项式系数,且 $\mathbf{a} = [a_1, a_2, \dots, a_n]'$.

由上可知,这种方法无法获得平移项系数 a_0 ,但是该项并不影响整个波面的形状,所以不需要考虑 a_0 项.最后运用最小二乘法求 \mathbf{a} ,即

$$\mathbf{a} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} (\mathbf{A}^T \mathbf{S}) \quad (8)$$

2 正弦条纹检测系统误差分析

正弦条纹检测原理是通过测量或标定获取 LCD 显示屏、被检镜面、小孔相机在相应采样点处的几何位置,再运用式(1)求解被检面上采样点处的斜率,因此,正弦条纹检测系统的检测准确度直接由 LCD 显示屏、被检镜、小孔相机三者几何位置的标定准确度决定.本文通过利用 CODEV 建立光线追迹模型,将复杂的光学检测系统简化为简单的数学计算,进而完成对正弦条纹检测系统的误差分析.

2.1 光线追迹模型

以口径 Φ 为 100 mm、顶点曲率半径 1 000 mm 的同轴凹球面反射镜为例,对条纹反射法检测单镜进行了光线追迹仿真分析,仿真光路如图 2,根据理想的仿真光路所获得的被检面形与理想面形的残差如图 3.从面形残差图可以看出,理想检测模型检测到的面形残差(Root Mean Square, RMS)约为 $9.4 \times$

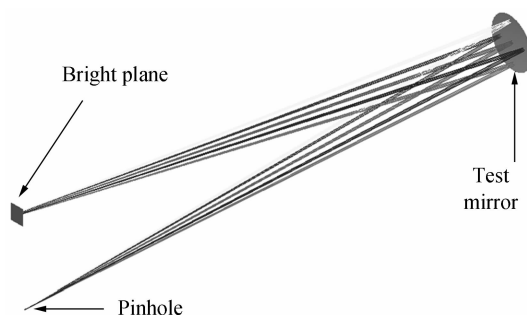


图 2 条纹反射检测仿真光路

Fig. 2 Simulation of the testing based on fringe reflection

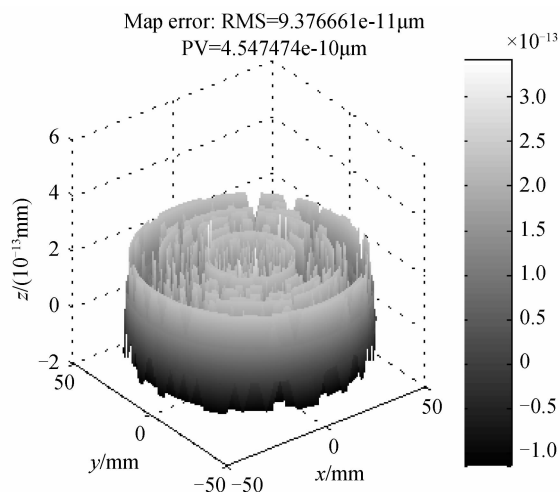


图 3 仿真面形残差

Fig. 3 Map errors of the simulation

10^{-11} μm , 完全可以忽略, 即从仿真的角度验证了条纹反射检测的原理, 也说明条纹反射法准确度高。

光线追迹法利用了 CODEV 光线追迹功能, 避免了几何光学中的复杂计算, 完全按照光线行进的过程进行精确追迹, 实现了对条纹反射检测系统工作。过程中的光线运行轨迹跟踪, 为分析系统工作准确度提供了理论模型及计算依据。

2.2 误差仿真分析

通过运用 CODE V 与 MATLAB 分别对凹面反射镜检测系统中的全局坐标误差对拟合面形的影响进行模拟仿真, 并运用泽尼克多项式^[16]拟合分析各个误差

对测量结果的影响, 分别得到各个全局坐标误差对检测结果的影响, 如表 1。由表 1 可知, 在条纹反射检测系统工作过程中, 低阶检测对系统的全局坐标误差很灵敏, 即大多数全局位置误差对被检面形引入的残差主要是倾斜和离焦等低阶项, 由于倾斜和离焦像差被大多数光学检测视为可调整的量, 因此实验结果分析时将去除前四项后的检测结果进行对比分析; 除此之外还可以看出条纹反射法对投影显示屏、小孔相机和被测镜的全局位置误差要求较为宽松, 经过高准确度系统标定之后, 波前重构误差较小, 可以满足高准确度光学表面检测的需求。

表 1 凹球面反射镜误差分析
Table 1 Error analysis of concave mirror

Categories	Power	Principal map errors/(rms $\cdot \mu\text{m}^{-1}$)	
		Astigmatism	Coma
Mirror (Δx)1 mm		2.994757380229973e-04	0.004498827046270
Mirror (Δy)1 mm	8.945368009133074e-04	8.925469969726337e-05	0.004971169104854
Mirror (Δz)1 mm	0.386908159494050	0.003180311246242	3.242280370790528e-05
Camera (Δx)1 mm	5.414006822828277e-05	0.018091130383394	0.001083791418619
Camera (Δy)1 mm	0.017632197432815	0.018115397610493	8.434407895130837e-04
Camera (Δz)1 mm	0.199837079296897	0.002405801918910	2.605318072686858e-04
1°Screen x tilt	0.017774510825789	0.294104803093098	0.015818083925728
1°Screen y tilt	0.013982341697963	0.305954881171960	0.020850304910344
1°Screen rotation	0.001893011141428	0.079820550302591	0.0017205944404933

3 实验

实验中被检镜是一个加工好的凹球面反射镜, 口径为 $\Phi 100$ mm, 顶点曲率半径为 1 000 mm, CCD 相机的分辨率为 $1024 \text{ pixel} \times 1280 \text{ pixel}$, 镜头焦距为 50 mm。检测时将 CCD 相机和显示屏放置于被检凹面的顶点曲率中心附近, 实验装置如图 4。

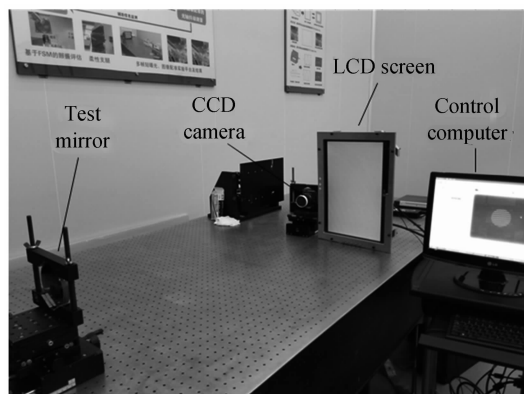


图 4 条纹反射检测实验装置
Fig. 4 The setup used to perform fringe reflection measurement

检测时, 用电脑控制 LCD 屏显示周期为 14 个像素的水平和垂直两个方向正交的正弦条纹, 并通过数据采集卡获取从被检镜面反射回来的图形, 运用数字

相移技术, 并通过对采集到的图形进行位相展开、质心计算等处理来求解相机像素点对应的 LCD 像素坐标以及镜面采样点坐标。运用 Laser Traker 建立基准坐标系并进行几何测量以及标定^[17], 得到 LCD 像素点、镜面点以及小孔相机的全局坐标, 将标定得到的结果代入到式 (1) 中, 结合基于 Zernike 多项式的模式法^[13]并反复运用迭代求得被检面的面形。CCD 相机采集到的条纹分布如图 5。由相机采集的图片计算得到的 x 、 y 向展开位相如图 6。将检测面形与理想面形的残差再做圆域泽尼克拟合^[18]分析, 拟合后去掉前 4 项低阶项(前四项为可调整的量, 分析时通常将其去除)的面形残差分布如图 7, 峰谷值(Peak Valley, PV)约为 $0.523 \mu\text{m}$, 均方根值(RMS)约为 $0.086 \mu\text{m}$, 满足过渡

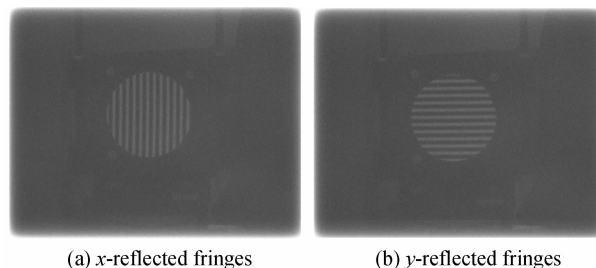


图 5 条纹分布
Fig. 5 Image of the reflection fringe on the CCD

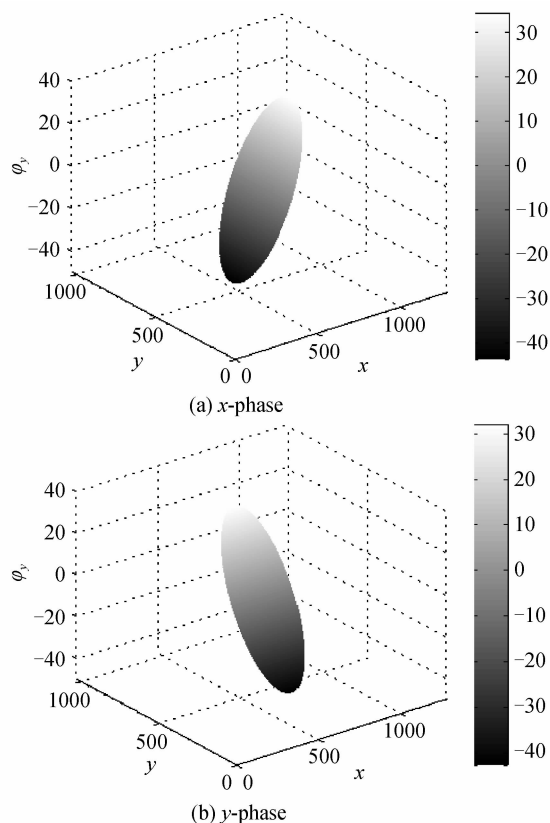


图6 展开位相

Fig. 6 Unwrapping phase

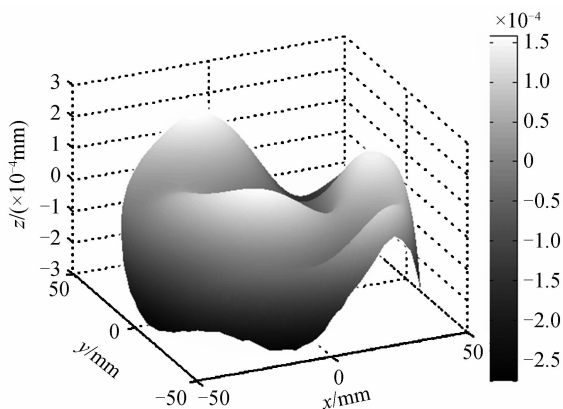


图7 条纹反射检测面形误差

Fig. 7 Map errors of fringe reflection measurement

阶段PV小于 $2\ \mu\text{m}$ 、RMS小于 $0.6328\ \mu\text{m}$ (1个波长)的需求,从而验证了条纹反射法应用于粗抛光向精磨过渡阶段检测的可行性,为了使该方法与干涉仪互检,下一步将从提高标定准确度来提高检测准确度。

4 结论

本文提出应用条纹反射法对光学反射镜进行非零位检测的方法,对 $\Phi 100\ \text{mm}$ 旋转对称球面反射镜进行了仿真与实验检测,结果验证该方法对大口径非球面反射镜的面形进行非零位检测的可行性,该方法适用于精磨向粗抛光过渡阶段时的面形检测,解决了此阶

段轮廓仪测量准确度不足、效率低及干涉仪无法进行全口径检测的问题,提高了此阶段的加工效率。

参考文献

- [1] SU Li-kun, SU Xian-yu, LI Wan-song, *et al.* Application of modulation measurement profilometry to objects with surface holes[J]. *Applied Optics*, 1999, **38**(7): 1153-1158.
- [2] LI Wan-song, SU Xian-yu, LIU Zhong-bao. Large scale three dimensional object measurement: a practical coordinate mapping and image data-patching method[J]. *Applied Optics*, 2001, **40**(20): 3326-3333.
- [3] ZHAO Wen-chuan, FAN Bing, WU Fan, *et al.* Experimental analysis of reflector test based on phase measuring deflectometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(1): 0112001.
赵文川, 范斌, 伍凡, 苏显渝, 等. 基于PMD的反射镜面检测实验分析[J]. *光学学报*, 2013, **33**(1): 0112001.
- [4] WANG Hua-rong, LI Bin, WANG Zhi-feng, *et al.* Surface measurement of parabolic trough unit mirror based on fringe reflection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(1): 0112007.
王华荣, 李彬, 王志峰, 等. 基于条纹反射术的槽式抛物面单元镜面形测量[J]. *光学学报*, 2013, **33**(1): 0112007.
- [5] ZHANG Yu-bei, TANG Jia, YANG Dang-gang. Detection of defects on a shining-metal surface using reflective fringe pattern[J]. *Measuring Technology*, 2013, **33**: 100-102.
张于北, 唐佳, 杨党纲. 对某金属件反光表面缺陷的反射条纹检测[J]. *计测技术*, 2013, **33**: 100-102.
- [6] LIU Yuan-kun, SU Xian-yu, WU Qing-yang. Three-dimensional shape measurement for specular surface based on fringe reflection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(11): 1636-1640.
刘元坤, 苏显渝, 吴庆阳. 基于条纹反射的类镜面三维面形测量方法[J]. *光学学报*, 2006, **26**(11): 1636-1640.
- [7] LI W, HUKE P, BURKE J, VON K C, *et al.* Measuring deformations with deflectometry [C]. SPIE, 2014, **9203**: 92030F.
- [8] BOTHE T, LI W, VON K C, *et al.* High-resolution 3D shape measurement on specular surfaces by fringe reflection [C]. SPIE, 2004, **5457**: 411-422.
- [9] SU P, SU T, HUANG R, *et al.* Aspheric and freeform surfaces metrology with software configurable optical test system: a computerized reverse Hartmann test[J]. *Optical Engineering*, 2014, **53**(3): 031305.
- [10] HUANG R, SU P, HOME T, BRUSA G, *et al.* Optical metrology of a large deformable aspherical mirror using software configurable optical test system [J]. *Optical Engineering*, 2014, **53**(8): 085106.
- [11] SU P, PARKS R E, WANG L, *et al.* Software configurable optical test system: a computerized reverse Hartmann test [J]. *Applied Optics*, 2010, **49**(23): 4404-4412.
- [12] ZHANG Jin-ping, ZHANG Xue-jun, ZHANG Zhong-yu, *et al.* Test of rotationally symmetric aspheric surface using Shack-Hartmann wavefront sensor[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, **20**(3): 492-499.
张金平, 张学军, 张忠玉, 等. Shack-Hartmann波前传感器检测大口径圆对称非球面反射镜[J]. *光学精密工程*, 2012, **20**(3): 492-499.
- [13] SOUTHWELL W H. Wave-front estimation from wave-front slope measurements [J]. *the Optical Society of America*, 1980, **70**(8): 998-1006.
- [14] HU E, HE Y M, CHEN Y M. Study on a novel phase-recovering algorithm for partial intensity saturation in digital

- projection grating phase-shifting profilometry [J]. *Optik*, 2008, **121**: 23-28.
- [15] MALACARA D. Optical shop testing[M]. New York: John Wiley & Sons, 2007.
- [16] NOLL R J. Zernike polynomials and atmospheric turbulence [J]. *the Optical Society of America*, 1976, **66**(3): 207-211.
- [17] BURGE J H, SU P, ZHAO C, *et al.* Use of a commercial laser tracker for optical alignment[C]. SPIE, 2007, **6676**: 66760E.
- [18] ZHAO C Y, BURGE J H. Orthonormal vector polynomials in a unit circle, Part I basis set derived from gradients of Zernike polynomials [J]. *Optics Express*, 2007, **15**(26): 18014-18024.