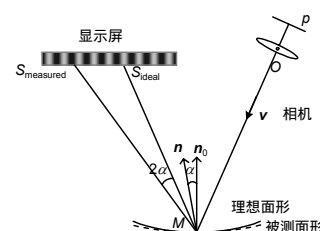


DOI: 10.12086/oe.2018.170663

离轴非球面的条纹反射检测技术

赵文川*, 周敏, 刘海涛, 肖向海, 宋伟红

中国科学院光电技术研究所先进光学研制中心, 四川 成都 610209



摘要: 条纹反射测量技术具有动态范围大、灵敏度高的特点, 通过高精度的系统标定可以获得很高的测量精度。本文研究将条纹反射测量技术应用于离轴非球面反射镜粗抛光阶段的面形检测, 使用激光跟踪仪建立检测系统坐标系, 然后将相机和显示屏的实测标定数据代入坐标系并在 Zemax 软件中建立测量装置的理想模型, 通过光线追迹得到理想的屏幕像素点位置, 采用相移技术可以得到实测时屏幕像素点位置, 从而计算得到被测镜面形的斜率误差, 最后积分得到检测结果。文中采用该方法对一块 SiC 离轴非球面镜进行了实测, 并与三坐标测量机的结果进行对比, 验证了方法的可行性, 可用于指导离轴非球面镜粗抛光阶段的加工。

关键词: 光学面形检测; 离轴非球面; 条纹反射测量技术; 光线追迹

中图分类号: TN247

文献标志码: A

引用格式: 赵文川, 周敏, 刘海涛, 等. 离轴非球面的条纹反射检测技术[J]. 光电工程, 2018, 45(7): 170663

The off-axis aspheric mirror testing based on the fringe reflection technique

Zhao Wenchuan*, Zhou Ming, Liu Haitao, Xiao Xianghai, Song Weihong

Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

Abstract: In this paper, the FRT (fringe reflection technique) is used for the off-axis aspheric surface measurement during the manufacture stage of the beginning of polish, due to its advantage of large dynamic range and high sensitivity. The measurement system coordinate and ray trace model are build using the laser tracker, and the calibration results of the camera calibration and screen calibration are introduced into the Zemax model and the ideal screen pixel point position can be got by ray tracing. The measurement of screen pixel point position is obtained by phase-shifting technique. The slope error of the surface is calculated and final results are got by integration. The measurement results of a SiC off-axis mirror obtained by the presented method and the CMM are compared and feasibility is verified. This method can be used to guide the manufacture of off-axis aspheric surface during the beginning of the polish.

Keywords: optical testing; off-axis aspheric mirror; fringe reflection technique; ray trace

Citation: Zhao W C, Zhou M, Liu H T, et al. The off-axis aspheric mirror testing based on the fringe reflection technique[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(7): 170663

1 引言

离轴非球面可以增加光学设计中像差校正的自由度, 具有增大视场、降低系统复杂性、简化结构、减

小尺寸和降低重量等优点, 同时又很好地解决了由中心遮挡导致系统成像质量下降问题, 在天文仪器、空间光学等现代光学系统中得到了非常广泛的应用^[1-2]。

收稿日期: 2017-12-04; 收到修改稿日期: 2018-03-01

基金项目: 四川省科技厅重点研发项目(2017GZ0367); 中国科学院青年创新促进会资助

作者简介: 赵文川(1983-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事光学加工检测的研究。E-mail: zhaowc168-98@163.com

然而,由于离轴非球面的几何轴与光学轴不重合,其旋转不对称性增加了加工检测难度,尤其是在加工过程中测量的难度。离轴非球面的加工过程主要包括铣磨成型、研磨及抛光三个阶段,在各个阶段都必须要有相应动态范围和精度的检测技术和仪器。每种测量仪器和测试技术都可以顺利过渡到后续交叉的检测仪器和技术的检测范围内,为光学元件的质量控制提供全流程的有力保障。铣磨加工后,面形误差较大,一般在数十微米量级。而精抛光阶段的材料去除量很小,为使面形误差均方根值(root mean square, RMS)达到 $\lambda/30 \sim \lambda/80$ ($\lambda=632.8 \text{ nm}$)的高精度要求,必须经过非球面面形快速修正的研磨与抛光过程,而该阶段的面形检测技术是影响面形误差收敛速度的关键所在。目前,在研磨向抛光的过渡,也就是粗抛光阶段,其表面面形粗糙,误差较大,通常在十多二十个微米。可见光干涉仪的检测动态范围一般在几个波长也就是两三个微米左右,这时显然无法采用可见光干涉仪进行测量。一般考虑的检测方法主要包括刀口阴影法、三坐标测量机、激光跟踪仪以及红外干涉仪。刀口阴影法结构简单,但通常只能定性而不能定量,要求检测者具有丰富的经验来判别局部以及整体的误差分布。另外,刀口阴影法用于检测离轴非球面时,需要制作相应的补偿镜,成本高^[3]。三坐标测量机和激光跟踪仪都属于接触式测量方法,优点是检测动态范围大、技术成熟、通用性强,检测非球面、离轴非球面时无需补偿器件。但是,接触式测量技术需要逐点检测,测量速度慢、耗时长、效率低,同时采样点密度有限,测量结果中无法反映中高频误差^[4-6]。另外,接触式测量方法还有划伤被测镜表面的风险。红外干涉仪可用于该阶段面形的测量,精度也比较高,缺点是由于红外光人眼不可见,光路调整困难,检测精度易受温度气流、振动的影响,对检测环境要求高,测量非球面及离轴非球面时也需要补偿器,成本较高。因此,通常离轴非球面在粗抛光阶段收敛速度慢、收敛过程中反复多,造成其加工效率低下的主要原因是缺少准确高效的定量检测手段。

条纹反射技术结构简单、灵敏度高、动态范围大,进行非球面测量时,无需额外的补偿元件,成本低。通过高精度的系统标定可以获得很高的测量精度,完全可以满足粗抛光阶段的检测需求。同时,对环境的要求相对干涉方法要宽松得多,成为当前光学加工流程检测中的一个研究热点。国外的亚利桑那大学使用

该方法对 GMT 天文望远镜中 8.4 m 子镜的高频面形误差进行了测量,还对 DKST 太阳望远镜的 4.2 m 主镜进行了测量^[7-8]。国内的四川大学、中国科学院光电技术研究所以及中国科学院长春光学精密机械与物理研究所等都进行了相关的研究,完成了对光学反射镜以及太能聚光镜等光学元件的检测实验,并取得了部分进展^[9-12]。本文将条纹反射技术应用于离轴非球面粗抛光加工阶段的面形检测,介绍了基本原理、系统标定方法,并将实测结果与三坐标测量结果进行对比,验证了可行性,有效地衔接接触式坐标测量与干涉检测,大大提高加工效率。

2 基本原理

如图 1 所示,该测量系统包括 CCD 摄像机、条纹显示屏和被测镜三个部分。显示屏上显示标准正弦条纹图样,经被测镜反射后被 CCD 摄像机所拍摄。也就是,CCD 摄像机通过被测镜看显示屏上的条纹图样。显然,标准条纹图样经被测镜反射后就携带了被测镜的面形信息,会发生变形,其变形量取决于被测镜的面形。为方便说明,这里假设光线是从相机发出,经被测镜反射后相交于显示屏上某一点。图中,以相机靶面上的某一像素点 p 为例进行说明,设相机投影中心为 O 。假设被测镜是理想的,那么 p 点出射的光线经镜面上 M 点反射后与屏幕相交于点 S_{ideal} 。当被测镜存在着一定的面形误差,其在 M 点的法线方向 n 相对于理想面形的法线方向 n_0 偏转了 α 角,那么根据光线反射定律,其反射光线会偏转 2α 角。这时像素点 p 点出射的光线经镜面反射后与屏幕相交于点 S_{measured} 。

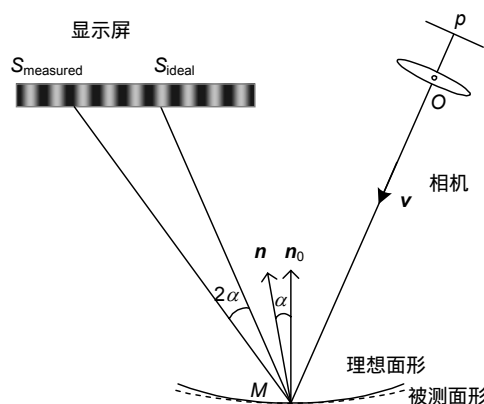


图 1 测量系统原理示意图

Fig. 1 Principle schematic of the measurement setup

这样, 被测面形误差的斜率分布也称为梯度, 可以表示为^[13-14]

$$\begin{cases} z_x = \tan \alpha \approx \frac{x_{\text{measured}} - x_{\text{ideal}}}{2z_{\text{measured}}} \\ z_y = \tan \beta \approx \frac{y_{\text{measured}} - y_{\text{ideal}}}{2z_{\text{measured}}} \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $(x_{\text{measured}}, y_{\text{measured}}, z_{\text{measured}})$ 是测量中光线与屏幕的交点坐标 S_{measured} , 可以通过采用相移技术结合显示屏标定数据获得。通过相机标定后, 就可以得到相机的光心 O 以及每个像素对应光线的出射光线 v , 通过光线追迹得到被测点 M 的坐标和经理想面形反射后与屏幕的交点 S_{ideal} 点的坐标。这样根据式(1)中获得的斜率分布, 通过积分就可以得到被测镜的面形误差。区域波前重构法不但对高频噪声有较强的抑制作用, 具有相当高的精度, 同时也可以处理复杂的联通区域和非等间距分布梯度数据的复杂情况, 具有更好的普适性, 因此非常适用于基于条纹反射术的面形重建计算^[15-16]。本文中采用区域波前重构法中的 Southwell 波前重建法恢复待测面形。

本测量系统结构简单, 主要包括三个部件, 分别是摄像机、显示屏以及待测件, 要实现高精度的测量, 必须对系统误差进行详细准确的标定与分析。下面对该系统中的关键技术, 主要包括显示屏平面度标定、相机标定以及屏幕点的计算, 进行详细介绍。

2.1 显示屏标定技术

理想情况下, 显示屏表面是理想的平面, 而实际情况下, 其表面肯定具有一定的平面度误差。同时, 显示器在工作时, 温度会升高, 由于热胀冷缩其像素

大小还会比其标称值稍大。所以, 必须对显示屏像素空间位置进行实测, 用标定去除其引起的测量误差, 提高检测精度。PSM(point source microscope)是一种光学显微镜^[17], 将其固定于三坐标测量臂上, 就成为了光学三坐标测头, 这样就可以作为工具用于对显示屏像素的测量^[7]。

如图 2 所示, 分别在显示屏像素的行列方向上一定的间隔点亮一个像素, 使用光学三坐标测头测量这些像素点的空间位置, 最后通过面形拟合可以得到整个像素面上的全部像素点的空间位置, 再计算就得到显示屏的平面度误差。

2.2 相机标定技术

显示屏像素空间位置测量完成后, 就可以用于对相机出射光线的标定。每个像素对应了一条光线, 根据两点确定一条直线的原理, 最少采用两点就可以描述一条光线在空间中的方向向量。相机镜头采用前置小孔光阑, 采用针孔相机模型, O 点表示小孔位置, 如图 3 所示, 以相机像素点 p 为例进行说明, 对应的光线方向向量以 v 表示。与显示屏的标定一样, 采用光学三坐标测头可以直接测量得到光心 O 点的空间位置。然后将标定好的显示屏分别放置于相机前方位置 1 处, 相机像素点 p 的出射光线与显示屏交于屏上点 A 。在显示屏已知像素位置显示特征标记点, 相机拍摄后进行特征点提取得到相机像素坐标与显示屏像素坐标的关系, 再根据显示屏的标定数据, 就可得到像素点 p 对应光线与屏的交点 A 的空间坐标。这样 A 点和 O 点就决定了该光线在空间中的出射方向向量 v , 完成相机标定工作。

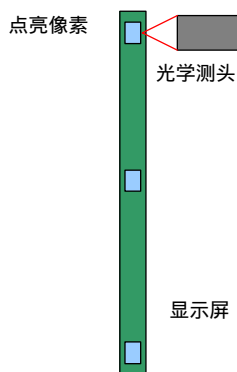


图 2 显示屏标定方法

Fig. 2 The calibration of display pre-calibration of the display

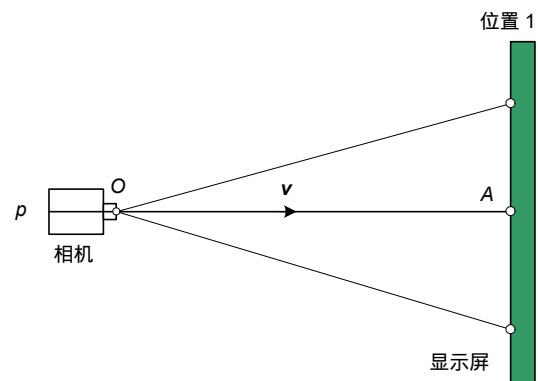


图 3 相机光线出射方向标定

Fig. 3 The calibration of CCD camera

2.3 显示屏点 S 的计算

相移技术具有速度快精度高的特点，这里采用相移技术结合显示屏标定数据来计算屏幕点 $S_{\text{measured}}(x_{\text{measured}}, y_{\text{measured}}, z_{\text{measured}})$ ，相关文献[17]已有很多介绍。显示屏上的像素坐标系包含了行坐标和列坐标，这里以行像素坐标方向为例进行说明，正弦条纹图表示为

$$I = a + b \cos(\varphi + \alpha) \quad (2)$$

式中： a 和 b 都为正常数，通常 $a = b$ ； $\varphi = 2\pi u / \tau$ 为相位分布， u 为显示屏行像素坐标； τ 为条纹周期； α 为附加位相调制。通过 N 帧相移方法以及相应的相位展开技术可计算出相位分布 φ 。由下式计算点 S 的行像素坐标：

$$u = \frac{\varphi}{2\pi} \tau \quad (3)$$

采用同样的方法，可以计算得到点 S 的列像素坐标表示为 v ，这样点 S 在显示屏的像素坐标中表示为 $S(u, v)$ 。

测量中，使用激光跟踪仪以镜子为基准建立测量坐标系。激光跟踪仪是一种基于球坐标原理的柔性空间坐标测量仪器。它使用内置的双频激光测距系统和高精度光电角度编码器，测量靶球中心在仪器坐标系中的坐标值。根据被测对象的特征及所使用靶球的大小，对测量坐标点进行半径补偿及几何量偏差计算得

到测量值。测量坐标系的建立可以根据离轴非球面镜的形状特征，利用基准点或外圆及上、下端平面以及离轴量标记位置等特征要素来建立^[6]。测量坐标系建好后，再使用激光跟踪仪测量得到相机和显示屏的位置，并代入相机和显示器的实测标定数据，就可以在 Zemax 中建立测量装置的理想模型。这样根据模型参数可从显示屏点 S 的像素坐标 $S(u, v)$ 计算得到其空间坐标 $S_{\text{measured}}(x_{\text{measured}}, y_{\text{measured}}, z_{\text{measured}})$ 。同时，结合相机标定的光线出射光线向量进行光线追迹，就可以得到屏幕点 $S_{\text{ideal}}(x_{\text{ideal}}, y_{\text{ideal}}, z_{\text{ideal}})$ 。最后将 S 点的实测值与理想值坐标代入式(1)，就得到被测镜的面形误差斜率分布，最后积分就得到了被测镜的面形误差。

3 实验结果

3.1 测量装置参数

实验装置包括 CCD 摄像机、被测镜和条纹显示屏。CCD 摄像机和条纹显示屏的主要型号参数如表 1 所示。按上文中所述的标定方法分别对显示屏和摄像机进行了标定。图 4 为通过光学三坐标测头标定得到的显示屏的平面度误差，从图中可以看出，屏幕具有一个凹面的误差。被测镜是一块 SiC 离轴非球面反射镜，如图 5 所示，口径 240 mm×300 mm，非球面方程为

表 1 实验装置部件主要参数
Table 1 Specification of the test setup

项目	品牌	型号	主要参数
CCD 相机	Point Grey	GS3-U3-28S5M	靶面大小：2/3 英寸，分辨率：1440 pixels×1920 pixels
条纹显示屏	Liliput	UM-70	7 英寸显示屏，分辨率：600 pixels×480 pixels

1 英寸=25.4 mm

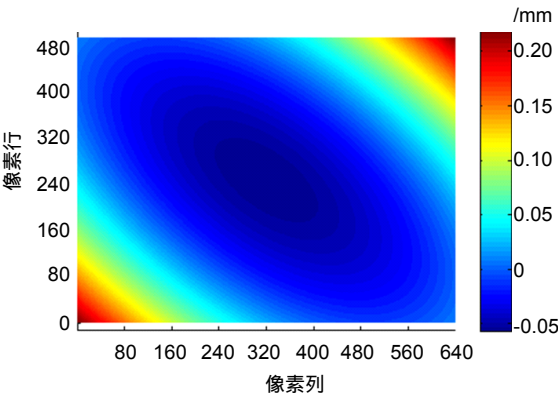


图 4 显示器平面度误差
Fig. 4 The shape error of the screen

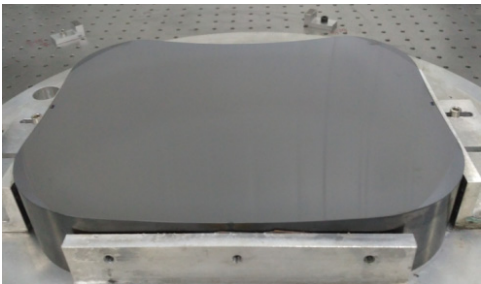


图 5 SiC 离轴非球面镜
Fig. 5 The SiC off-axis mirror under tested

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}},$$

其中： $r^2 = x^2 + y^2$ ，二次项系数 $k=0.194$ ，顶点曲率半径 $R=1/c=803.2$ mm，离轴量 95.5 mm。

3.2 测量过程

本实验采用的是立式检测结构，图 6 为检测现场，被测镜置于光学平台上，CCD 摄像机和显示屏放置于其上方顶点曲率中心附近。采用激光跟踪仪以被测镜为基准建立坐标系，测量得到摄像机与显示屏的空间位置，然后代入相机和显示屏的实测标定数据在 Zemax 中建立该测量装置的理想模型，如图 7 所示。在该理想模型中，采用光线追迹得到理想屏幕点

$S_{\text{ideal}}(x_{\text{ideal}}, y_{\text{ideal}}, z_{\text{ideal}})$ 。然后，在显示屏上分别显示横条纹和竖条纹，经被测镜反射后，被 CCD 拍摄记录，如图 8 所示，采用相移技术结合显示屏标定数据得到实际测量中的屏幕点 $S_{\text{measured}}(x_{\text{measured}}, y_{\text{measured}}, z_{\text{measured}})$ ，将 S_{ideal} 和 S_{measured} 的值代入式(1)，得到被测镜面误差的斜率分布，如图 9 所示。最后采用 Southwell 法对斜率进行积分重建，从而得到被测镜面形误差，如图 10 所示。

3.3 结果对比

为了与不同的检测方法进行交叉对比，使用三坐标测量机进行了测量，其检测结果如图 11 所示。条纹反射测量结果 $\text{RMS}=0.774 \mu\text{m}$ ，三坐标测量机测量结

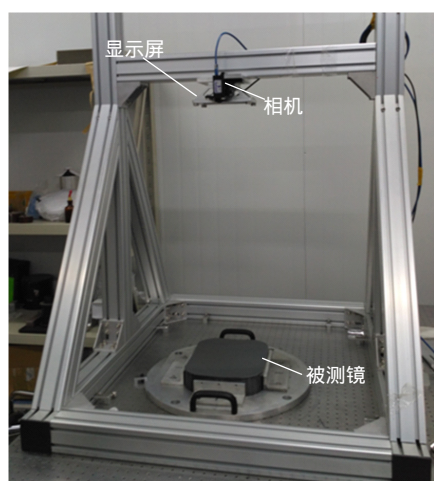


图 6 检测装置

Fig. 6 The measurement setup

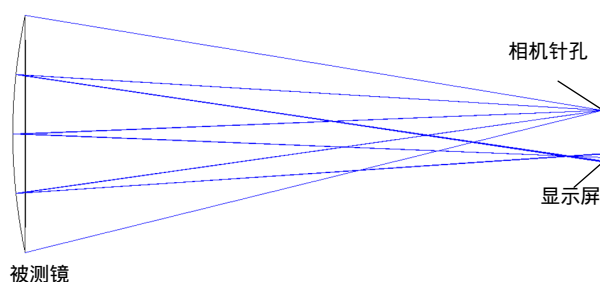


图 7 检测系统理论模型

Fig. 7 The principle model of the measurement system

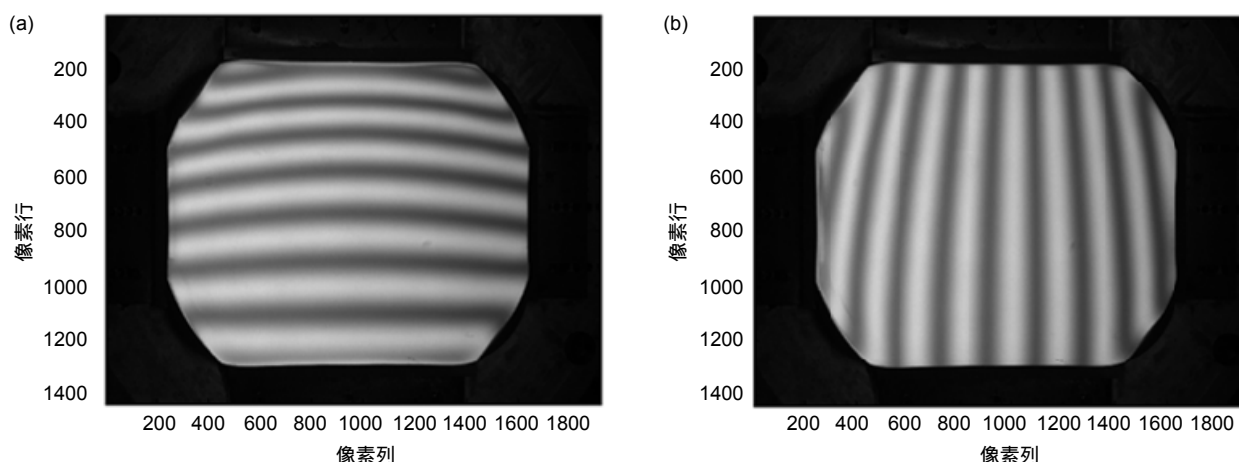


图 8 相机记录条纹光强图。(a) X 方向；(b) Y 方向

Fig. 8 The recorded fringe intensity image by CCD camera. (a) X direction; (b) Y direction

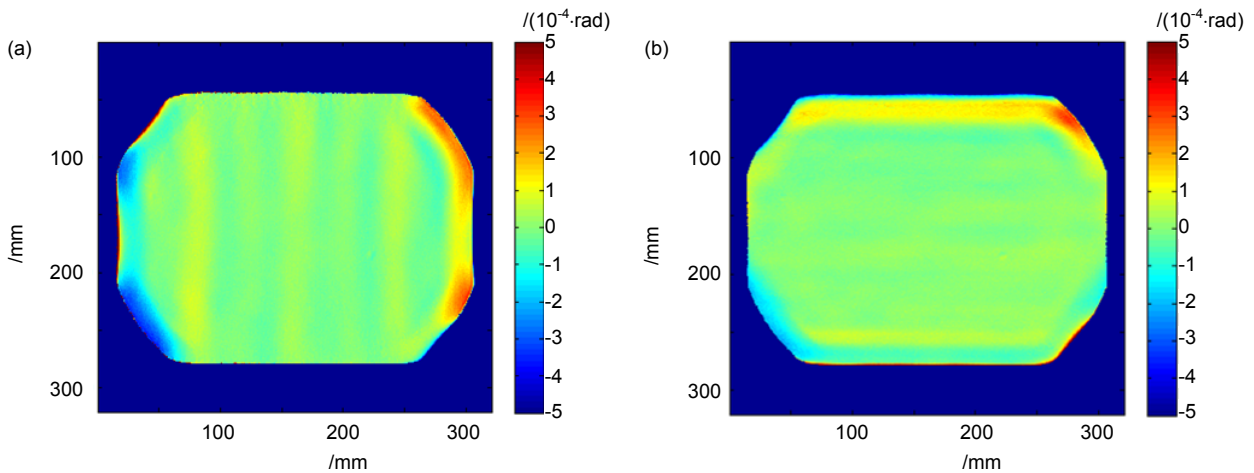


图 9 面形误差斜率分布。(a) X 方向; (b) Y 方向

Fig. 9 The slope map of the surface error. (a) X direction; (b) Y direction

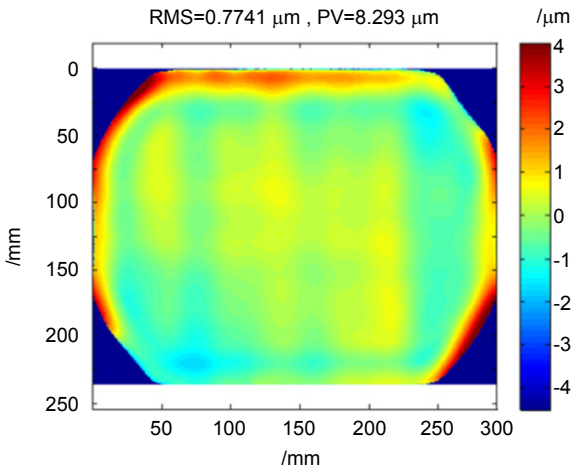


图 10 条纹反射测量结果

Fig. 10 The measurement results by FRT

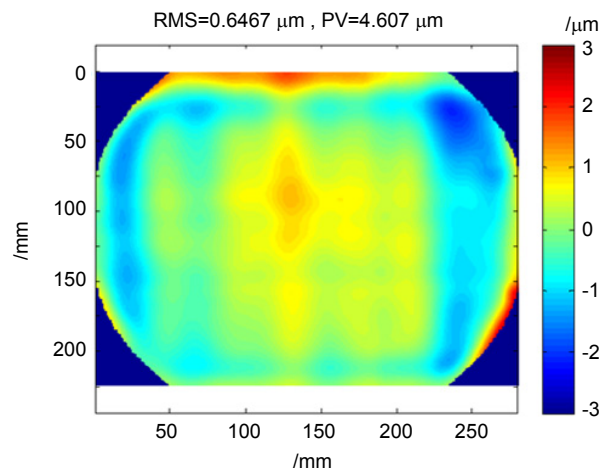


图 11 三坐标测量机测量结果图

Fig. 11 The measurement results by CMM

果 $RMS=0.6467\ \mu m$ ，从两者的分布来看也是一致的。

图 12 是将两者数据进行坐标统一后点对点相减得到的差值图，其 $RMS=0.4194\ \mu m$ ，优于 $0.5\ \mu m$ ，验证了本方法的可行性。本文采用光学法，得到全口径数据，而三坐标测量中，由于探针存在着一定的大小，非常靠近镜子边缘的区域无法完成测量，检测口径要小一些。而从条纹反射测量结果中可以看出，镜子边缘是一个塌边，这对加工来说是非常重要的信息。检测区域大小不一样，这也是两种方法 RMS 值相当，而 PV 值相差一倍的原因。另外，三坐标测量的测量结果是对测量点进行插值拟合得到的，相比于本文的方法，采样点数据密度较小，本文的方法采样数据密度更大，细节更丰富，局部区域过渡更为自然。下一步研究工作是如何进一步提高系统标定精度，以提升测量精度达到波长甚至亚波长量级。

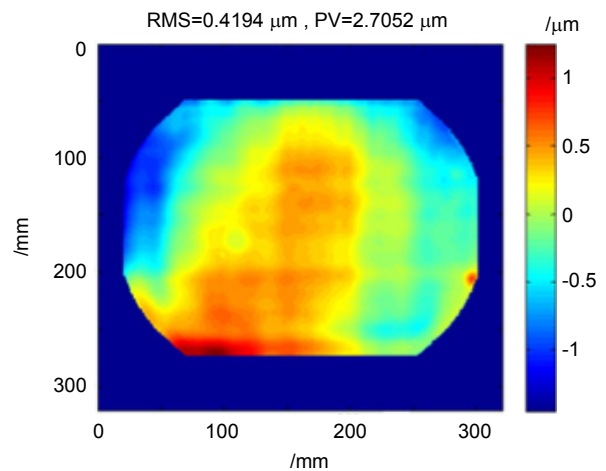


图 12 两种测量方法的差值

Fig. 12 The difference between the CMM and FRT

4 结 论

本文将条纹反射测量技术应用于离轴非球面镜检测,介绍了基本原理和系统标定方法,进行了实测实验,并与三坐标测量结果进行了对比,验证了方法的可行性。该技术可应用于离轴非球面粗抛光阶段的过程面形检测,有效地衔接了接触式测量与干涉测量,提高了加工检测效率。

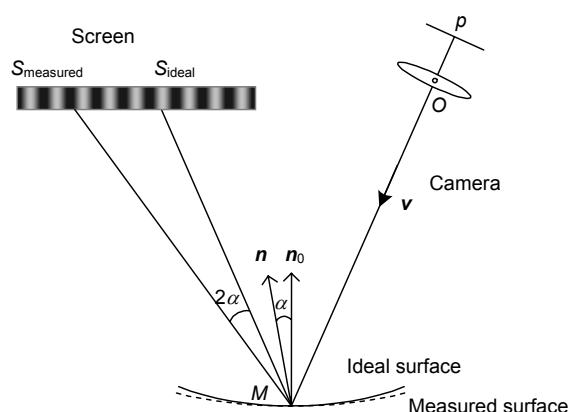
参考文献

- [1] Pan J H. *The Design, Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surfaces*[M]. Beijing: Science Press, 1994: 145–152.
潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 145–152.
- [2] Lin J, Cui Q F, Zhu H. Research of broad width off-axis three mirror optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(7): 0722002.
林晶, 崔庆丰, 朱浩. 宽幅离轴三反光学系统研究[J]. 光学学报, 2013, **33**(7): 0722002.
- [3] Wu Z H, Yuan L J, Zhu Y T, et al. Technology of wavefront retrieval for off-axis aspheric surface in the stage of fine-grinding and rough-polishing[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(3): 123–129.
武中华, 袁吕军, 朱永田, 等. 离轴非球面在细磨与粗抛阶段的波面再现技术[J]. 光子学报, 2017, **46**(3): 123–129.
- [4] Cheng H B. Touch trigger probe measurement accuracy of aspheric mirror during fine lapping process[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2005, **41**(8): 228–232.
程灏波. 精研磨阶段非球面面形接触式测量误差补偿技术[J]. 机械工程学报, 2005, **41**(8): 228–232.
- [5] Lin C Q, Jing H W, Kuang L, et al. Measuring technique for off-axis aspherical mirror in fine grinding process using coordinate measurement machine[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, **24**(11): 2665–2668.
林长青, 景洪伟, 匡龙, 等. 离轴非球面镜精磨阶段的三坐标检测技术[J]. 强激光与离子束, 2012, **24**(11): 2665–2668.
- [6] Li J, Wu F, Wu S B, et al. Using a laser tracker to measure the surface of off-axis aspheric mirror during grinding[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1): 0112002.
李杰, 伍凡, 吴时彬, 等. 使用激光跟踪仪测量研磨阶段离轴非球面面形[J]. 光学学报, 2012, **32**(1): 0112002.
- [7] Su P, Parks R E, Wang L R, et al. Software configurable optical test system: a computerized reverse Hartmann test[J]. *Applied Optics*, 2010, **49**(23): 4404–4412.
- [8] Huang R, Su P, Burge J H. Deflectometry measurement of Daniel K. Inouye solar telescope primary mirror[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2015, **9575**: 957515.
- [9] Yuan T, Zhang F, Tao X P, et al. Test of optical mirror surface using fringe reflection system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(9): 0912004.
袁婷, 张峰, 陶小平, 等. 条纹反射法检测光学反射镜面形[J]. 光学学报, 2015, **44**(9): 0912004.
- [10] Yang L J, Li D H, E K W, et al. Surface measurement of optical element based on the pre-calibrating camera[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2016, **14**(3): 42–48.
杨丽杰, 李大海, 鄂可伟, 等. 基于空间直线预标定检测光学元件面形的研究[J]. 光学与光电技术, 2016, **14**(3): 42–48.
- [11] Xiao J, Wei X D, Lu Z W. A fast surface shape measurement method for the parabolic trough solar concentrator based on deflectometry[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, **40**(12): 1208006.
肖君, 魏秀东, 卢振武. 基于偏折原理的太阳能槽式聚光器面形快速检测方法[J]. 中国激光, 2013, **40**(12): 1208006.
- [12] Zhao W C, Fan B, Wu F, et al. Experimental analysis of reflector test based on phase measuring deflectometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(1): 0112002.
赵文川, 范斌, 伍凡, 等. 基于 PMD 的反射镜面检测实验分析[J]. 光学学报, 2013, **33**(1): 0112002.
- [13] Liu Y K, Su X Y, Wu Q Y. 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.
- [14] Huang R, Su P, Burge J H, et al. High-accuracy aspheric x-ray mirror metrology using software configurable optical test system/deflectometry[J]. *Optical Engineering*, 2015, **54**(8): 084103.
- [15] Jing H L, Su X Y, Liu Y K. Shape reconstruction methods from gradient field[J]. *Laser Journal*, 2007, **28**(6): 41–43.
荆海龙, 苏显渝, 刘元坤. 基于梯度数据的三维面形重建方法[J]. 激光杂志, 2007, **28**(6): 41–43.
- [16] Jing H L, Su X Y, Liu Y K. Specular surface measurement based on fringe reflection and analysis of 3D shape reconstruction technique[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, **35**(10): 37–42.
荆海龙, 苏显渝, 刘元坤. 基于条纹反射的镜面测量及三维重建算法分析[J]. 光电工程, 2008, **35**(10): 37–42.
- [17] Parks R E, Kuhn W P. Optical alignment using the point source microscope[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, **5877**: 102–116.
- [18] Su X Y, Chen W J. Reliability-guided phase unwrapping algorithm: a review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2004, **42**(3): 245–261.

The off-axis aspheric mirror testing based on the fringe reflection technique

Zhao Wenchuan*, Zhou Ming, Liu Haitao, Xiao Xianghai, Song Weihong

Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China



Principle schematic of the measurement setup

Overview: Generally, manufacture of off aspheric surfaces is divided into three stages: milling stage, fine grinding and rough polishing stage, and fine polishing stage. During the rough polishing, the scale of the shape error is large and the interferometer cannot be used for testing due to its limited dynamic range. FRT (fringe reflection technique) is a non-contact profilometry for the measurement of specular optical surfaces. In this paper, FRT is used for the off-axis aspheric surface measurement during the manufacture stage of the beginning of polish with its advantage of large dynamic range and high sensitivity. The basic principle is to project sinusoidal fringe patterns onto a screen located remotely from the surface under test, and the reflected fringe patterns via the surface are captured by the digital camera. The recorded pattern image by the CCD will be distorted and the distortion depends on the reflecting surface. The surface slope variation of the surface can be calculated accurately according to distortions of the patterns and the surface error map is integrated from the slope errors. This method is able to achieve high dynamic range slope measurement by using computer-controlled large displays as light source without requiring specially designed null optics. Also, this technique is completely incoherent which avoids the coherent noise in interferometry test. To reach the high accuracy of measurement, the system calibration is required. Here, the optical CMM, which is a modified CMM using a point source microscope (PSM) as the probing arm, is used for the calibration. The screen pixel position and shape bending are calibrated by the optical CMM. The CCD pinhole position and the ray direction of each camera pixel are calibrated by the optical CMM and pattern images. In the test, the measurement system coordinate and ray trace model are build using the laser tracker, and then the calibration results of the camera calibration and screen calibration are introduced into the Zemax model to establish a virtual null test model and the ideal screen pixel point position can be got by ray tracing. The measurement screen pixel point position is obtained by phase-shifting technique. The slope error of the surface is calculated and final results are got by integration. The measurement results of a SiC off-axis mirror by both the presented method and the CMM are compared. The difference is below $0.5 \mu\text{m}$ RMS. The feasibility is verified and this method can be used to guide the manufacture of off-axis aspheric surface during the beginning of the polish.

Citation: Zhao W C, Zhou M, Liu H T, *et al.* The off-axis aspheric mirror testing based on the fringe reflection technique[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(7): 170663

Supported by the Key Research Project Science & Technology Department of Sichuan Province (2017GZ0367) and the Youth Innovation Promotion Association, Chinese Academy of Sciences

* E-mail: zhaowc168-98@163.com