

基于相位测量偏折术的反射镜三维面形测量

袁 婷^{1,2} 张 峰¹ 陶小平¹ 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, 吉林 长春 130033

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 基于相位测量偏折术(PMD)测量原理,提出了一种简单、可靠、精度高的三维面形检测新方法,可以运用于非球面反射镜精磨与粗抛光阶段的面形检测。所提检测方法通过利用入射光线、小孔坐标,以及虚拟的辅助表面来得到待测反射镜面的绝对高度和梯度。测量时,在 CCD 相机前放置一个小孔光阑来实现小孔成像模型,并以该小孔的位置作为相机的位置,同时利用相移法并通过移动 LCD 显示屏一次,获得摄像机上每个像素点所对应的入射光线。该方法对实验设备的位置无特殊要求,不需要辅助器件,检测过程简单,检测结果可靠。而且,该检测方法采用虚拟的辅助表面对反射镜面进行检测而不是采用入射光线与反射光线的交点,不需要对相机光线进行标定,检测结果受标定误差的影响很小,所以该检测方法具有很高的检测精度。计算机仿真与初步实验验证了该方法的可行性。

关键词 测量; 光学检测; 高精度; 相位测量偏折术; 数字相移; 条纹反射

中图分类号 TH74

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0212004

Three-Dimensional Shape Measuring for Specular Surface Based on Phase Measuring Deflectometry

Yuan Ting^{1,2} Zhang Feng¹ Tao Xiaoping¹ Fu Jinjiang^{1,2}

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

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

Abstract A novel three-dimensional (3D) shape measuring method based on phase measuring deflectometry (PMD) is presented, which can be used to measure the aspheric mirror during the stages of fine grinding and the beginning of polish. The proposed method measures the absolute height and slope of the specular surface with incidence ray, camera pinhole and dummy assistant surfaces. During the measurement, a camera with an external stop is used to realize pinhole camera model. The external stop represents the position of the camera and the incidence ray corresponding to the pixels of the camera can be obtained by moving LCD screen once. The procedure of the test is simple and the result is believable because it has no restrict requirements for the experimental devices and no need of other auxiliary devices. What's more, this method measures the specular surface with dummy auxiliary surfaces instead of the intersection of the incidence ray and the camera ray. So there is no need to calibrate the camera ray. This method can be used to test the specular surface with high precision because the calibration error has little effect on the result of the testing. Computer simulation and experiment validate the feasibility of the proposed method.

Key words measurement; optical testing; high precision; phase measuring deflectometry(PMD); digital phase shift; fringe reflection

OCIS codes 120.6650; 150.1488; 120.4800; 120.5700

收稿日期: 2015-09-07; 收到修改稿日期: 2015-09-30

基金项目: 国家自然科学基金(61036015)

作者简介: 袁 婷(1987—),女,博士研究生,主要从事条纹反射检测方面的研究。E-mail:tingyuano@126.com

导师简介: 张 峰(1969—),男,研究员,博士生导师,主要从事先进光学制造技术等方面的研究。

E-mail:zhangfjyz@sina.cn

1 引 言

目前,国内外各个光学加工检测中心采用的反射镜面形的检测方法主要有轮廓测量法与干涉测量法,其中轮廓测量法存在采样密度低、检测用时较长等优点,不能满足工程需求;而干涉仪检测虽然具有很高的精度,但是该方法在测量过程中需要一块不小于被检元件尺寸的参考镜,而这样一个高精度参考镜的加工难度大,制造成本高。为了更加方便有效地测量反射镜面形,这里将相位测量偏折术(PMD)引入反射镜面形的测量中,对处于精磨与粗抛光加工制造阶段的反射镜面进行测量。

将相位测量偏折法和数字相移技术相结合,可以在无需干涉仪以及其他参考镜的情况下对波前变化范围较大的镜面物体的梯度和高度进行高精度测量。并且这种方法具有抗环境干扰能力强、动态范围大且精度较高的特点,可以指导光学元件加工过程中精磨和初抛光阶段的检测。国内四川大学^[1-2]、中国科学院光电技术研究所^[3]、中国科学院电工研究所^[4]和国外德国不莱梅光学应用研究所^[5-6]、美国亚利桑那大学^[7-9]都对该技术有一定研究,并且利用该方法测量了多种镜面物体的表面形状,例如,金属表面缺陷^[10]、类镜面^[11]、小口径镜面、太阳反射镜子镜(尺寸为2 m×3 m,离轴量为3 m, $f/0.5$)、以及直径为8.4 m的大麦哲伦望远镜(GMT)系统主镜等。虽然都获得了较好的结果,但是该类方法仍存在一些缺点,例如对测量设备的位置有特定的需求^[12],需要进行复杂的标定^[13]等。

2009年唐燕等^[14]运用虚拟抛物面的概念,提出了一种无需复杂标定并能同时测得梯度与高度的方法。但是这种方法在测量中运用了近似,不能测量偏离抛物面较大的表面。而且在实际测量中很难实现相机沿着光轴的准确移动。除此之外,分光镜的使用会带来像差以及限制被检镜的尺寸大小。之后该课题组提出利用反射光线与虚拟抛物面来检测反射面^[12],并且没有利用近似与分光镜,但是却对显示屏的位置有特定的要求,且需要通过一维移动平台让它沿着光轴移动,这给实际操作带来很大的困难。

基于以上分析,本文提出了一种新的反射镜面形检测方法:利用条纹反射和数字相移技术,并运用入射光线、小孔坐标,以及虚拟的辅助表面计算得到待测表面各点的梯度与坐标信息。该方法不需要干涉仪与其他辅助器件,在测量中仅需要一个LCD显示屏和一个小孔相机,而且不需对相机的内外部参数进行标定,有效降低测量成本,简化系统结构。所提方法的入射光线方向通过移动显示屏求得。小孔成像模型则通过在CCD相机前加入一个小孔光阑来实现,以小孔的位置作为相机的位置,而且该小孔的坐标可以运用坐标测量仪器测得。该方法相比传统的相位偏折术以及其他的反射面测量方法,无需复杂标定,对测量设备的位置也无特定需求,在获得被测镜梯度的同时还能得到待测镜面点的高度信息,不存在不确定性问题,可以方便有效地测量被检镜。计算机仿真与初步实验验证了所提方法的可行性。

2 检测原理

测量系统由LCD屏、被检镜,以及前置小孔的CCD摄像机组成,测量装置如图1所示。显示屏和小孔相机都放置在被检镜的曲率中心附近,LCD显示屏显示正弦条纹,小孔相机拍摄经被测面反射产生的变形条纹图。测量过程中,先保持显示屏不动,相机拍摄一组图后,再将显示屏沿显示屏近似法线方向移动一段距离后,相机再拍摄一组变形条纹图。图1中用虚线框描述了显示屏移动后的位置。

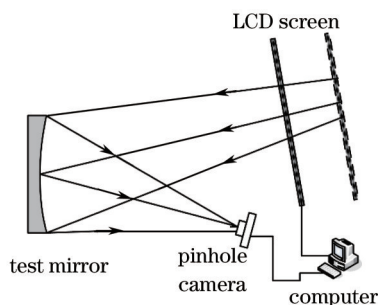


图1 条纹反射测量梯度的几何原理

Fig.1 Basic geometry for slope calculation in fringe reflection measurement

测量原理如图2所示。以待测镜面光心为坐标原点建立直角坐标系,坐标系Z轴与镜面光轴重合。由于孔径成像像差的存在,相机不再满足小孔成像模型,这里通过在摄像机前加一个小孔光阑来克服孔径成像像差,

使 CCD 相机满足针孔相机模型,即小孔 C 的位置即可代表相机的位置,而且 C 的坐标可以用坐标测量仪器测得。利用相移算法^[15]可以精确获得相机像素所对应的 LCD 显示屏各个点的相位与自身坐标系下的像素坐标信息,而 LCD 显示屏上各个像素点在建立的直角坐标系下的几何坐标值可通过标定的方法获得,实验中采用的标定工具是点源显微放大镜^[6]。移动屏幕一次,便可获得每个相机像素所对应的入射光线^[12]。根据针孔相机模型和反射定律可知,来自屏幕的入射光线 I 经镜面反射点 M 反射后必定会形成一条经过小孔 C 的反射光线 R 。而反射光线与光轴的夹角是待测镜上反射点高度与梯度的函数。根据这个函数关系式便可求得被检镜的面形。

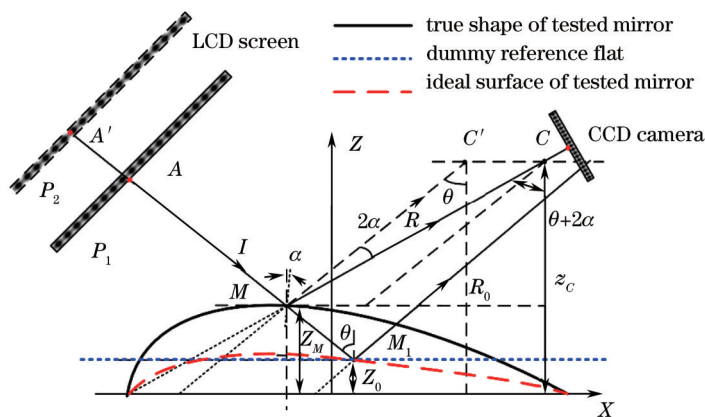


图 2 测量原理图

Fig.2 Schematic of measurement principle

如图 2 所示,由 A 和 A' 点发出的入射光线经过反射点 M 反射后,经过小孔 C 后进入相机。求得 C 点的坐标与入射光线 I 后仍然无法获得被测点的面形,因此这里再在反射点处引入虚拟的参考平面 $z=z_M$,该参考平面的法线与 Z 轴平行。由图可知,反射光线 R 与光轴的夹角 $\theta + 2\alpha$ 可以表示为

$$\tan(\theta + 2\alpha) = \frac{z_C \tan \theta + x_{C2C'} - z_M \tan \theta}{z_C - z_M}, \quad (1)$$

式中 z_C 是小孔 C 的 Z 坐标,可用坐标测量仪器测得; θ 是入射光线与光轴的夹角,入射光线与 Z 轴已知,该角便可求得; α 是反射点处面形的法线与光轴的夹角; $x_{C2C'}$ 是 C 点与 C' 在 X 方向上的坐标差; C' 是反射角为 θ 的虚拟反射光线与 $z=z_C$ 平面的交点; z_M 是反射点 M 处的 Z 坐标。

在(1)式中,梯度 $\tan \alpha$ 是表面形状 Z_M 自身的函数,因此在计算梯度时需要提供一个较好的初始值使得隐函数收敛,而一个理想的表面形状能够提供一个较好的初始面形估计,因此这里引入虚拟的理想表面,并将入射光线与这个理想虚拟面形交点的 Z 坐标作为初始的面形,记为 $z_M^{(0)}$,将 $z_M^{(0)}$ 代替(1)式中的 z_M 便可得到 M 点处的梯度数据,再将由梯度计算得到的面形 $z_M^{(1)}$ 代替(1)式中的 z_M ,进而得到另外一组梯度,依此类推,通过反复迭代计算梯度与面形,从而可以得到被检面形。

以上得到的 $\tan \alpha$ 是被测面上反射点 M 处 X 方向的梯度,它可以写成 w_x ,而 Y 方向的梯度 w_y ,求解方法与上述方法类似。因此被测面 X 、 Y 方向的梯度分别可以表示为

$$\begin{cases} w_x(x_M, y_M) = \tan \alpha_x = \frac{-1 \pm \sqrt{1+b^2}}{b}, \\ b = \frac{a - \tan \theta_x}{1 + a \tan \theta_x}, \\ a = \frac{z_C \tan \theta_x + x_{C2C'} - z_M \tan \theta_x}{z_C - z_M} \end{cases}, \quad (2)$$

$$\begin{cases} w_y(x_M, y_M) = \tan \alpha_y = \frac{-1 \pm \sqrt{1+d^2}}{d} \\ d = \frac{c - \tan \theta_y}{1 + c \tan \theta_y} \\ c = \frac{z_C \tan \theta_y + y_{C2C'} - z_M \tan \theta_y}{z_C - z_M} \end{cases}. \quad (3)$$

面形可以将梯度通过积分法或模式法^[17]求得。在(2)式或(3)式中,存在两个变量 z_M 与 α_x , 或者 z_M 与 α_y 。因此需要运用迭代法来求面形与梯度。 $z_M^{(m)}$ 是 m 次迭代的结果, $m=1,2,\dots,M$, M 由终止条件决定。使用这种方法可以求得相机像素所对应的被检镜上反射点的梯度与坐标信息,再通过运用模式迭代法,便可得到被检镜的面形。

3 计算机仿真

为了验证该方法的可行性,这里进行了计算机模拟仿真。模拟时以口径 φ 为 100 mm、顶点曲率半径为 -1000 mm 的同轴球面反射镜为例,对该方法检测单镜面形进行了光线追迹仿真分析,仿真光路如图 3 所示。光线追迹利用了 CodeV 光线追迹功能,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。这里提出的方法仅仅需要 LCD 位于位置 1 与位置 2 时 LCD 的像素坐标,以及小孔的坐标便可求出待测面的面形信息,因此运用 Matlab 获取光线在位置 1、位置 2 处 LCD 面的坐标,以及位于小孔处的坐标。由于在实验检测过程中,它们的几何位置标定必定会存在一定量的误差,于是在仿真分析中,先在它们的理想坐标中引入 1 mm 的位置误差,然后再利用这些带有误差的坐标值进行梯度求解与面形重构,理想面形与仿真检测得到的面形如图 4 所示。而仿真检测得到的面形与理想面形的残差,以及去掉平移、倾斜、离焦三项后(由于这三者为调整量,在面形误差分析时常常去除)的面形误差分布如图 5 所示,仿真检测面形残差的峰谷(PV)值 53.790 μm 。均方根(RMS)值为 10.968 μm 。去低阶项后的面形残差的峰谷值约为 0.303 μm ,均方根值约为 0.050 μm 。

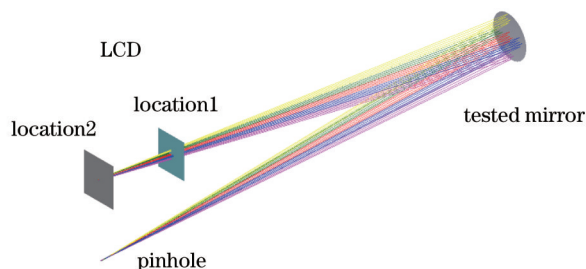


图 3 仿真光路

Fig.3 Measurement model in Code V

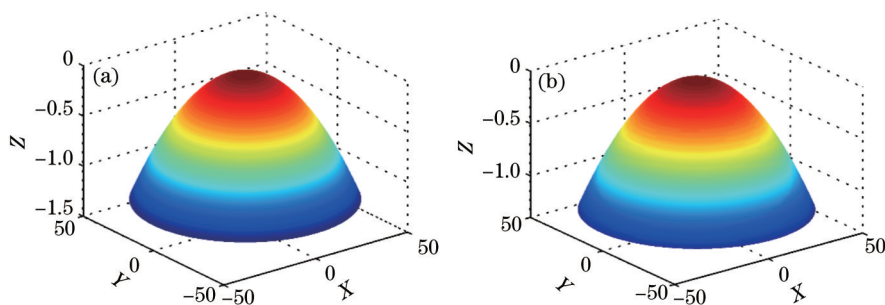


图 4 待测面形。(a) 理想面形; (b) 检测面形

Fig.4 Surface shape of tested mirror. (a) Ideal surface shape; (b) surface shape measured by proposed method

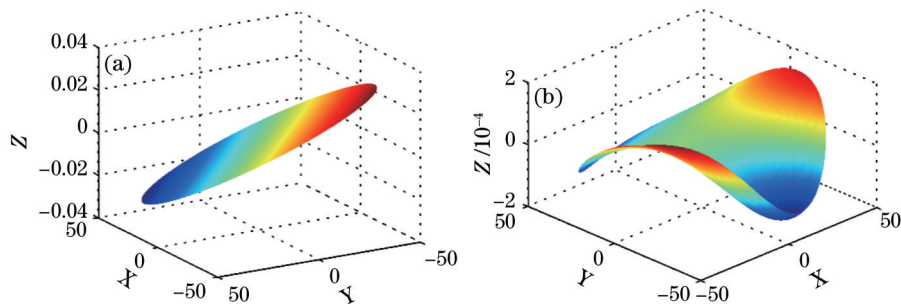


图 5 (a) 仿真检测面形残差; (b) 去低阶项后的面形残差

Fig.5 (a) Map errors based on Code V model; (b) map errors after removing low-order terms

从面形残差图可以看出,在该检测系统中,LCD位于位置1与位置2处时的像素坐标标定误差,以及小孔的测量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该方法对投影显示屏与小孔相机的全局位置误差要求较为宽松,无需进行高精度复杂标定,仍可获得较高的检测精度,可以满足高精度光学表面检测的需求。

4 实验验证

实验中被检镜是一个凹球面镜,口径为100 mm,顶点曲率半径为1000 mm,干涉检测结果如图6所示。由检测结果可知凹球面反射镜的面形误差小:均方根值约为 $\lambda/50$ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$),近似理想的球面。实验装置如图7所示,LCD显示屏用来显示正弦条纹图,CCD相机用于拍摄被待测镜反射后形成的变形条纹。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,对位置没有太多需求,只需要轻微调节待测镜的倾斜扭摆等使小孔相机能够拍摄到来自显示屏的条纹图。

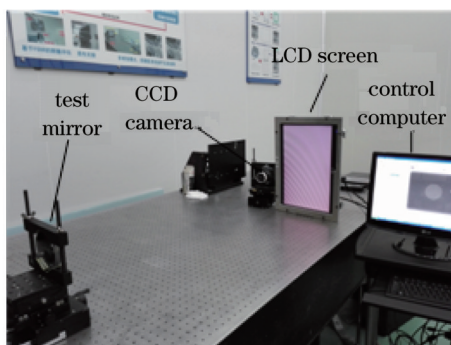


图6 检测实验装置

Fig.6 Hardware setup used to perform measurement

整个检测过程分两部分,第一部分是几何测量与标定,第二部分是数据采集。几何测量与标定包括直角坐标系的建立、小孔的测量、屏幕像素的标定。其中坐标的建立与小孔的测量可以使用Laser Traker^[18]来完成,而屏幕像素坐标的标定则用点源显微放大镜头完成。数据的采集是指由相机拍摄所需的图片,它主要分为三步。1) LCD先保持不动,用计算机控制LCD屏显示全黑、全白、一个交叉点像素坐标为(1000,450)十字形图案、(4×2)幅周期为18个像素的 x,y 向正弦条纹,并通过数据采集卡获取从被检镜面反射回来的图形;2)图片采集完后,将LCD显示屏再往后移动一段距离,位置也没有太多的需求,仅需保证LCD上的条纹能够完覆盖被检镜,并完全进入相机。3)重复步骤1),完成整个数据的采集。通过对这些图形进行相位展开、质心计算等处理来求解相机像素所对应的LCD像素坐标。从而得到每个相机像素所对应的入射光线、以及小孔相机的全局坐标。然后计算入射光线与光轴的夹角 θ ,以及与理想被检面的交点坐标,再将初始面形 $z_w^{(0)}$ 代入到(2)、(3)式中,结合基于Zernike多项式的模式法^[17]并反复运用迭代求得被检面的面形。将该方法检测面形与干涉仪检测面形的残差再做圆域Zernike拟合^[19]分析,拟合后去掉前4项低阶项的面形残差分布如图8所示,峰谷值约为 $0.684 \mu\text{m}$,均方根值约为 $0.076 \mu\text{m}$,因此验证了该方法的可行性,也验证该方法具有高精度检测的特点。除此之外,该方

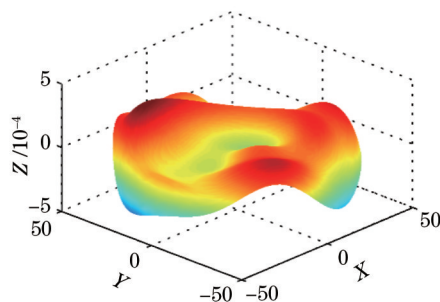


图7 检测面形误差(去低阶项)

Fig.7 Measurement of shape errors (low-order terms removed)

法的检测精度满足过渡阶段峰谷值小于 $2\ \mu\text{m}$ 、均方根值小于 $0.6328\ \mu\text{m}(1\lambda)$ 的需求,可以应用于过渡阶段的检测,为镜子精磨和粗抛光加工阶段提供指导。

5 结 论

本文在相位测量偏折的基础上,提出了一种反射表面三维形状检测新方法。该方法设备简单,成本低,检测方便,且不需要任何辅助装置,可以完成对镜面的整体面形的检测。相对其他的反射面测量方法,该方法对实验设备的位置无特定要求,不需要进行复杂的标定,在获得待测点梯度的同时,得到了位置的坐标信息,使测量结果精度大大提高。除此之外,计算机仿真与实验结果表明,该方法具有较高的精度,在未经过精确标定的情况下,均方根值可达几十纳米。下一步将分析系统标定误差,进一步提高检测精度。

致谢 感谢中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室提供的设备支持,同时也感谢实验室主任李锐刚研究员和师兄师弟们的帮助。

参 考 文 献

- 1 Liu Yuankun, Evelyn Olesch, Yang Zheng, *et al.*. A one-dimensional phase-shift technique based on dual-frequency crossed fringe for phase measuring deflectometry[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(3): 0308005.
刘元坤, Olesch E, 杨 征, 等. 基于双频正交光栅一维相移的相位测量偏折术研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(3): 0308005.
- 2 Tian Zixia, Chen Wenjing, Su Xianyu. Method for improving accuracy and measurement speed of PMP using error diffusion binary encoded sinusoidal grating[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(12): 121201.
田紫霞, 陈文静, 苏显渝. 采用二元编码的正弦光栅提高 PMP 测量速度和精度的方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(12): 121201.
- 3 Zhao Wenchuan, Zhong Xianyun, Liu Bin. The surface flaws inspection of optical components based on the fringe reflection[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(9): 0912007.
赵文川, 钟显云, 刘 彬. 基于条纹反射的光学表面疵病检测法[J]. *光子学报*, 2014, 43(9): 0912007.
- 4 Wang Huarong, Li Bin, Wang Zhifeng, *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 Li W, Huke P, Burke J, *et al.*. Measuring deformations with deflectometry[C]. *SPIE*, 2014, 9203: 92030F.
- 6 Bothe T, Li W, von Kopylow C, *et al.*. High-resolution 3D shape measurement on specular surfaces by fringe reflection[C]. *SPIE*, 2004, 5457: 411-422.
- 7 Su P, Khreishi M A H, Su T, *et al.*. Aspheric and freeform surfaces metrology with software configurable optical test system: a computerized reverse Hartmann test[J]. *Opt Eng*, 2014, 53(3): 031305.
- 8 Huang R, Su P, Horne T, *et al.*. Optical metrology of a large deformable aspherical mirror using software configurable optical test system [J]. *Opt Eng*, 2014, 53(8): 085106.
- 9 Su P, Parks R E, Wang L, *et al.*. Software configurable optical test system: a computerized reverse Hartmann test[J]. *Appl Opt*, 2010, 49(23): 4404-4412.
- 10 Zhang Yubei, Tang Jia, Yang Danggang. Detection of defects on a shining-metal surface using reflective fringe pattern[J]. *Measuring Technology*, 2013, 33(s): 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(s): 100-102.
- 11 Liu Yuankun, Su Xianyu, Wu Qingyang. 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.
- 12 Tang Y, Su X, Wu F, *et al.*. A novel phase measuring deflectometry for aspheric mirror test[J]. *Opt Express*, 2009, 17(22): 19778-19784.
- 13 Knauer M C, Kaminski J, Hausler G. Phase measuring deflectometry: a new approach to measure specular free-form surfaces[C]. *SPIE*, 2004, 5457: 366-376.
- 14 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.
- 15 E Hu, Y He, Y Chen. Study on a novel phase-recovering algorithm for partial intensity saturation in digital projection grating phase-shifting profilometry[J]. Optik, 2010, 121(1): 23-28.
- 16 Parks RE, Kuhn WP. Optical alignment using the point source microscope[C]. SPIE, 2005, 5877: 58770B.
- 17 Southwell W H. Wave-front estimation from wave-front slope measurements[J]. J Opt Soc Am A, 1980, 70(8): 998-1006.
- 18 Burge J H, Su P, Zhao C, *et al.*. Use of a commercial laser tracker for optical alignment[C]. SPIE, 2007, 6676: 66760E.
- 19 Albanese M, Wirth A, Jankevics A. Verification of the James Webb Space Telescope coarse phase sensor using the Keck Telescope[C]. SPIE, 2006, 6265: 62650Z.

栏目编辑: 何卓铭