

Wolter I 型反射镜面形检测装置的改进

崔天刚^{1,2} 张宏吉¹ 马文生¹ 陈 波¹

(¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

²中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 研制出基于长程轮廓测量仪原理的 Wolter I 型反射镜面形检测装置。为提高该装置测量精度, 重点介绍在原有装置基础上所做的扫描光学系统结构和探测器两方面改进。利用五角棱镜的光学特性消除导轨运动误差; 用位置敏感探测器替代 CCD 探测器, 提高面形检测装置的理论测量分辨率。对改进后新面形检测装置进行定标和样品实测实验, 并与原实验数据进行比较。结果表明: 新面形检测装置倾斜度测量均方根误差为 $1.7 \mu\text{rad}$, 轮廓高度测量误差峰谷(PV)值为 56 nm, 测量精度明显提高。为下一步精细加工 Wolter I 型反射镜面形奠定了基础。

关键词 测量; Wolter I 型反射镜面形; 表面轮廓扫描; 倾斜度误差; 位置敏感探测器

中图分类号 TH741 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0412007

Improvements of Surface Profile Measuring Device for Wolter Type-I Mirror

Cui Tiangang^{1,2} Zhang Hongji¹ Ma Wensheng¹ Chen Bo¹

(¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract A surface profile measuring device, based on the principle of long trace profiler, is designed and established to measure the surface profile of Wolter type-I mirror. In order to obtain higher surface profile measuring accuracy, two particular improvements are made to the surface profile measuring device. The nonlinear error and the motion error of the translation slide can be eliminated by using a penta prism, which possesses an optical property all its own. The ideal measuring accuracy of the surface profile measuring device is improved by using position sensitive detector instead of CCD detector. The calibration and sample measurement experiments are done and the experimental data are compared with the old data. The result shows that the new measuring device can achieve an accuracy of $1.7 \mu\text{rad}$ for slope root-mean-square error and 56 nm for peak to valley height error. Its measuring accuracy has been significantly improved. This can meet further requirements of precision fabrication for Wolter type-I mirror.

Key words measurement; surface of Wolter type-I mirror; profile scanning; slope error; position sensitive detector

OCIS codes 120.3930; 120.6650; 220.4840

1 引 言

光学加工与光学检测相辅相成, 互相促进。精

密加工必须有精密的检测手段和检测装置作为基础和保证。Wolter I 型非球面反射镜由一个旋转抛物

收稿日期: 2010-09-16; **收到修改稿日期**: 2010-12-06

基金项目: 国家自然科学基金(10878004)资助课题。

作者简介: 崔天刚(1983—), 男, 博士研究生, 主要从事光学设计及非球面表面检测等方面的研究。

E-mail: foreverctg@163.com

导师简介: 陈 波(1961—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事软 X 射线极紫外波段光学和空间光学等方面的研究。

E-mail: chenb@ciomp.ac.cn(通信联系人)

面和旋转双曲面组成,常用非球面面形检测方法^[1~4]无法检测这种特殊结构反射镜。众所周知,光学表面各点法线矢量方向决定其反射光束方向,各点之间的表面倾斜度变化可通过对法线矢量的测量得到,对倾斜角度积分进而得到表面轮廓形貌。轮廓有线轮廓和面轮廓之分。长程轮廓测量仪正是基于此原理的线轮廓扫描测量装置,它通过顺序扫描被测面同方向若干条线轮廓,继而拼接出被测面的面轮廓。目前国际上长程轮廓测量仪在大尺度、非球面反射镜面形检测中得到越来越广泛的应用^[5~9]。

为满足实验室 Wolter I 型反射镜精密加工与面形在线检测的需要,根据长程轮廓测量仪原理,搭建了一套 Wolter 反射镜面形检测装置并进行了一系列实验,取得了不错的结果^[10]。但是仍有潜在误差源影响该装置的测量精度。本文重点介绍新的 Wolter I 型反射镜面形检测装置的系统结构、工作原理以及针对部分误差源的重要改进措施。

2 Wolter I 型反射镜面形检测装置

2.1 面形检测装置结构及工作原理

作为实验室研制的 Wolter I 型筒状非球面反射镜精密研抛设备的重要组成部分,新反射镜面形检测装置的工作原理与长程轮廓测量仪基本相同。图 1 是该装置光学系统示意图。

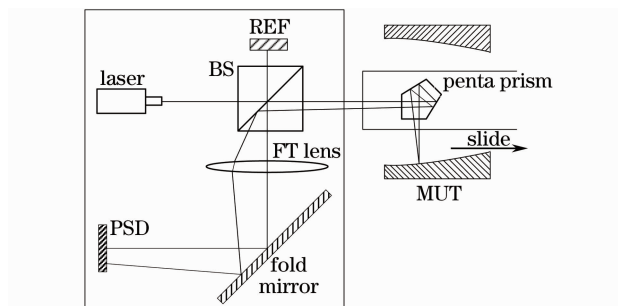


图 1 面形检测装置光学系统示意图

Fig. 1 Optical schematic of surface profile measuring device

一束准直激光射入分光棱镜(BS)被分成两束光,一束射向参考反射镜(REF),另一束经过五角棱镜折射射向被测反射镜(MUT)。反射后两束光再经过分光棱镜转折,最后通过傅里叶变换透镜(FT lens)会聚到位于透镜焦面的位置敏感探测器(PSD)上。折叠反射镜用来转折光路,使光学系统的结构更加紧凑。

此面形检测装置的光学系统本质上是一个角

度-位移变换系统(图 2),它利用傅里叶变换透镜将角度的变化,转换成位置的改变。通过对位置变化量的测量,经过计算公式转换,即可得到角度的变化值。

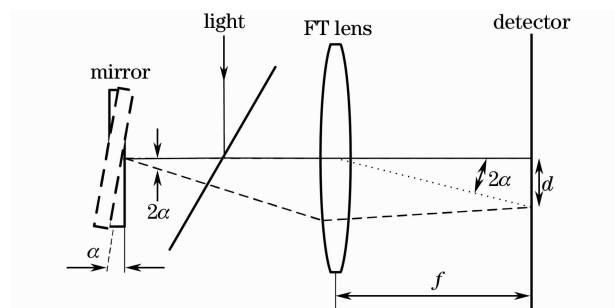


图 2 角度-位移变换系统基本原理

Fig. 2 Basic principle of angle-position translation system

假设反射镜的角度变化为 α ,探测器面上的位移为 d ,根据几何关系,有

$$d = \tan(2\alpha) \times f, \quad (1)$$

由于 α 很小,可近似认为 $\tan(2\alpha) \approx 2\alpha$,代入(1)式,即

$$d = 2\alpha f, \quad (2)$$

$$\alpha = d/(2f). \quad (3)$$

五角棱镜沿着被测反射镜的一条线轮廓顺序扫描,PSD 记录下每一点相对参考点的位移量,根据(3)式即可得到每一点相对于参考面的倾斜度值,应用多项式拟合求出其倾斜度曲线 $f_{\text{slope}}(x)$,再对该曲线进行积分

$$f_{\text{height}}(x') = \int f_{\text{slope}}(x) dx, \quad (4)$$

即可得到该条线轮廓高度曲线。然后分别对被测面同一方向若干条线轮廓进行扫描,用计算机程序进行数据拼接,便可获得被测面的整体面形轮廓。

2.2 改进措施

与改进前的检测装置^[10]相比,新 Wolter I 型反射镜面形检测装置主要有两方面的改进。一是扫描光学系统结构不同;二是接收光信号的探测器不同。

新反射镜面形检测装置改进了扫描光学系统结构,采用扫描光学系统(包括激光器、分光棱镜、参考反射镜、傅里叶变换透镜及探测器)与被测反射镜均保持不动,只有五角棱镜跟随导轨进行扫描的方式^[11](图 1)。

如图 3 所示的坐标系中,五角棱镜跟随导轨沿 Z 轴方向移动扫描。导轨的运动误差给五角棱镜,使其产生偏摆(绕 Y 轴转动)、俯仰(绕 X 轴转动)和滚动(绕 Z 轴转动)三种姿态误差。根据五角棱镜

的光学特性,在主截面内(X-Z面)出射光线方向始终与入射光线相垂直,即保持 90° 不变^[12~14]。这样导轨运动误差引起五角棱镜的偏摆误差可忽略不计。五角棱镜的俯仰和滚动误差会导致出射光垂直扫描方向的位置改变,影响扫描方向的直线性。如图4所示。假设五角棱镜俯仰滚动误差使扫描光束与X-Z面的夹角为 α ,在距离五角棱镜 L 的定标平面上,扫描光束在Y方向(垂直扫描方向)有小偏移量 h 。经过光学系统后,这一偏移会在像面上产生同方向的偏移 d 。根据图4中的几何关系有

$$\begin{aligned} \tan \alpha &= d/f, \\ h &= L \times \tan \alpha = L \times \frac{d}{f}, \end{aligned} \quad (5)$$

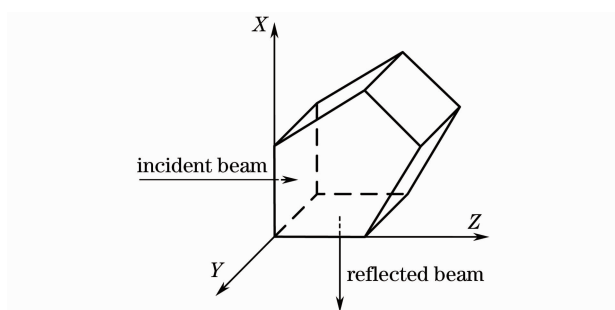


图3 以五角棱镜三条直角边建立空间坐标系
Fig. 3 Orthogonal coordinates of penta prism

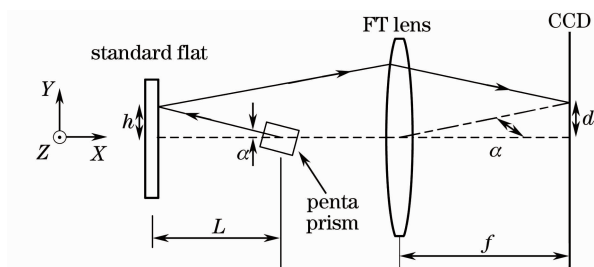


图4 X-Y面内扫描光束反射光路示意图
Fig. 4 Schematic diagram of scanning beam reflection in X-Y plane

经过实验测定,在该装置测量量程(100 mm)范围内,光束在像平面上垂直于测量方向的位置变化 $d < 200 \mu\text{m}$ (图5)。五角棱镜与定标平面距离 $L = 81 \text{ mm}$ (此数值为Wolter反射镜径向截面最大半径),透镜焦距 $f = 500 \text{ mm}$ 。根据(5)式计算,可以得出五角棱镜俯仰和滚动误差产生的垂直扫描方向的角度偏差 $\alpha \approx 0.023^\circ$,扫描光束在定标面上Y方向的偏移 $h < 33 \mu\text{m}$ 。对于直径为2 mm的扫描光束,其Y方向中心偏移量仅为光斑大小的1.6%,测量时此偏移可忽略。

另一方面,Wolter反射镜筒径向截面形状是圆(X-Y面内),而轴向则是离轴抛物线(X-Z面内)。

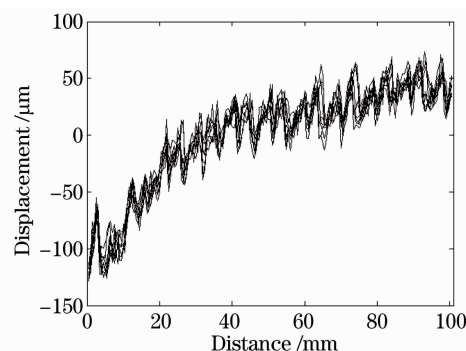


图5 像面上垂直测量方向的光束偏移
Fig. 5 Light displacement perpendicular to measurement line in the image plan

从局部看,径向反射面倾斜度变化比轴向反射面倾斜度变化大得多。扫描光束沿X轴入射到Wolter反射镜面待测母线上一点(更准确地说应该是一个小区域,如图6所示,轴向X-Z面内光线反射未画出),反射后光束在X-Y面比X-Z面发散得更厉害,原来的圆形光斑变成了条状细光线(图7)。采用一维线阵PSD作为探测器接收光信号,其测量方向(Z轴方向)与细光线方向正交。当扫描光束在Y方向有微小偏移时,像面上的反射细光线也会有相应偏移,这个偏移与要测量的光信号的位移方向正交,不会对测量值产生影响。

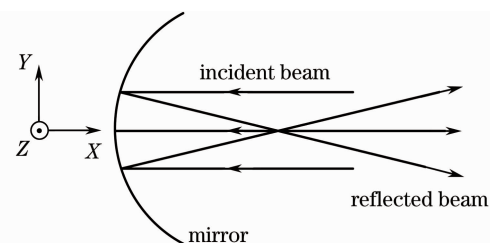


图6 X-Y面内Wolter反射镜面反射光路示意图
Fig. 6 Optical schematic of radial reflection from Wolter mirror in X-Y plane

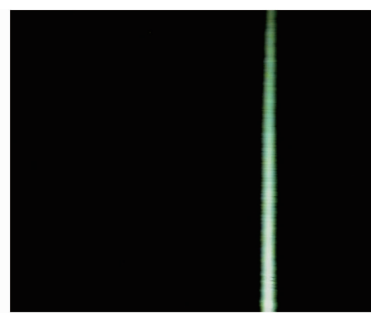


图7 CCD拍摄的Wolter镜反射后在像面上形成的细光线
Fig. 7 A beam of light reflected from Wolter mirror in the image plane captured by CCD

新反射镜面形检测装置采用 PSD 取代 CCD 作为探测器接收光信号。PSD 是一种利用半导体的“横向光电效应”制成的光电探测器,具有很高的灵敏度、良好的瞬态效应特性和很快的响应速度,广泛应用于激光测距、光学远程控制设备、距离传感器以及光学开关等^[15~18]领域。PSD 由 PIN 光电二极管和信号处理电路组成(图 8)。

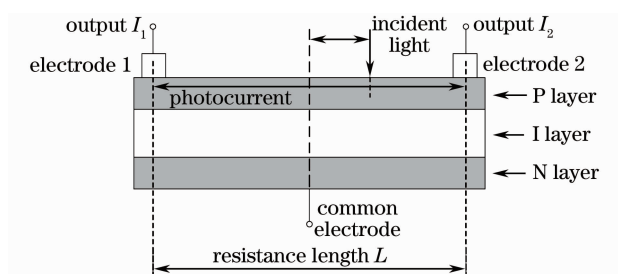


图 8 PSD 的结构示意图

Fig. 8 Schematic of the structure of PSD

入射光点照射在光电二极管的光敏面上,产生向两侧电极流动的光电流。由两极输出的电流分别与光点到两极的距离成反比。设两极间有效距离为 L , 两极流出电流分别为 I_1 和 I_2 , 入射光点距光敏面中心位置为 X , 则

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{L + 2X}{L - 2X}, \quad (6)$$

$$X = \frac{I_2 - I_1}{I_2 + I_1} \cdot \frac{L}{2}. \quad (7)$$

基于上述原理, PSD 可以探测光信号的微小位移变化, 而 CCD 测量的最小位移量则受像素尺寸的限制。采用的是日本滨松公司 S3932 型一维线阵 PSD, 位置分辨率为 $0.3 \mu\text{m}$ 。比之前采用 CCD 探测器(像素尺寸 $6.5 \mu\text{m}$)位置分辨率提高了一个量级。为保证光学系统结构紧凑, 减小空气扰动影响, 换用 $f=500 \text{ mm}$ 的短焦距傅里叶变换透镜。新面形检测装置的倾斜度分辨率为

$$\delta s = \Delta s / 2f = 0.3 \mu\text{rad}. \quad (8)$$

3 实 验

3.1 稳定性测试

作为衡量检测仪器性能的一种有效方法, 稳定性测试能够反映仪器结构设计的合理性和测量数据的可靠性。工作时间内仪器的稳定性越高, 测量结果重复性和可信度越高。新面形检测装置完成一次全程扫描需要 60 min。图 9 给出了该装置单点稳定性测试结果: 在 60 min 内倾斜度变化为 $0.85 \mu\text{rad/h}$ (均方根值)。

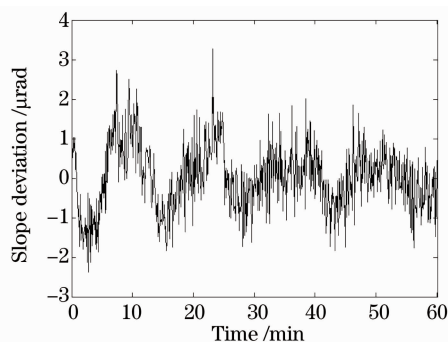


图 9 新检测装置单点稳定性测试

Fig. 9 Result of stability measurement on new measuring device

3.2 检测装置定标

采用定标原检测装置用过的同一块标准平面镜, 选取平面镜上同一条直径作为基准线, 来标定改进后的反射镜面形检测装置(图 10)。此标准平面镜(口径 $\Phi=100 \text{ mm}$)由 ZYGO 公司制造, 所选基准线轮廓高度曲线峰谷(PV)值为 $\lambda/30$ ($\lambda=632.8 \text{ nm}$)。

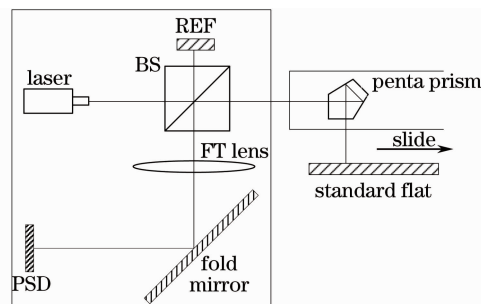


图 10 新检测装置定标示意图

Fig. 10 Schematic of new measuring device calibration

对基准线进行 10 次重复扫描, 其平均倾斜度曲线如图 11(a) (实线) 所示。虚线是基准线的标准倾斜度曲线, 根据其轮廓高度曲线经过微分和多项式拟合得到。图 11(b) 给出原有检测装置基准线倾斜度测量结果。通过两图对比可看出, 新检测装置的倾斜度测量误差比原有装置大大减小(图 12)。经过计算, 新检测装置的全程倾斜度测量误差为 $1.7 \mu\text{rad}$ (均方根值), 结果优于原有装置的 $6.7 \mu\text{rad}$ (均方根值)。

将测得的倾斜度曲线按照(4)式积分, 得到轮廓高度曲线。再减去基准线的标准轮廓曲线, 即可得到基准线的残余高度曲线。如图 13 所示, 经过计算新面形检测装置轮廓测量误差 PV 值为 56 nm (实线); 原有装置轮廓测量误差 PV 值为 150 nm (虚线)。通过对比可知新检测装置轮廓测量精度高于原有装置。

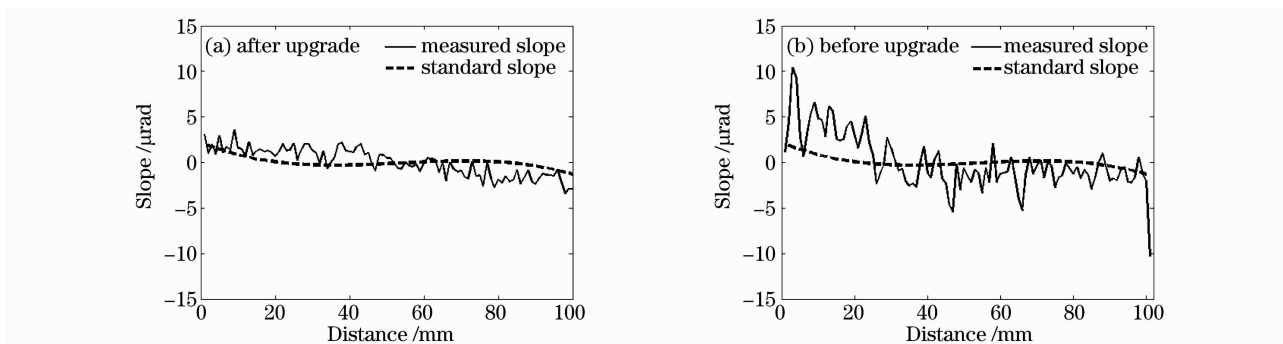


图 11 基准线倾斜度测量结果

Fig. 11 Results of measuring slope of datum line

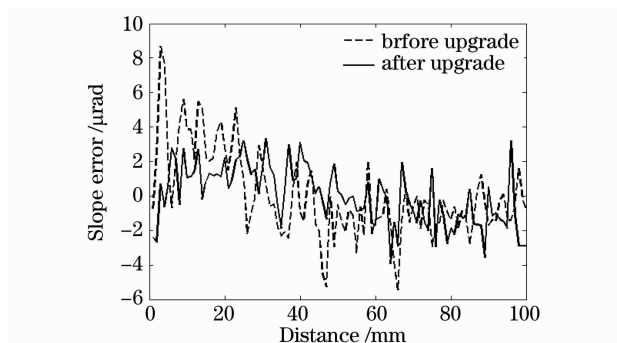


图 12 检测装置改进前后倾斜度测量误差对比

Fig. 12 Comparison of measuring slope error between before and after upgrade

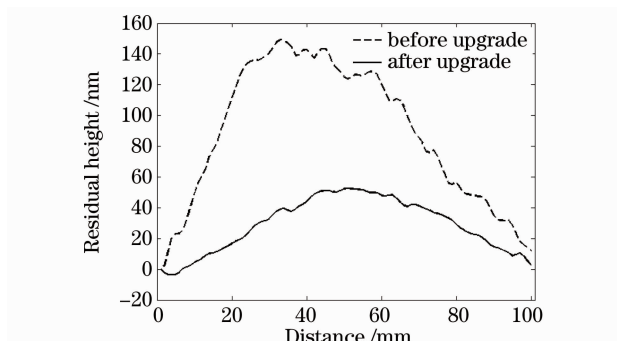


图 13 残余高度轮廓曲线

Fig. 13 Profile of residual height

3.3 Wolter 反射镜实测

为验证改进后新面形检测装置性能的提升,测量了实验室的 Wolter I型反射镜样品(图 14),并与之前的测量结果进行比较。此次测量仍选取抛物

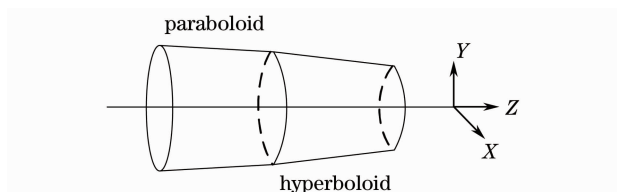


图 14 Wolter I型反射镜结构示意图

Fig. 14 Framework of Wolter type-I mirror

面,每条母线上(Z 轴方向)连续采样点间隔 0.5 mm , X - Y 面圆周每隔 15° 扫描一条母线,共 24 line。图 15 给出同一条母线的倾斜度对比测量结果。从图中可看出,装置改进前后测得的倾斜度曲线形状相似,但改进后测得曲线更接近理想抛物线倾斜度曲线。经计算,改进后测量抛物线倾斜度相对理想值的偏差为 $48.6\ \mu\text{rad}$ (均方根值),比改进前测量结果 $59.1\ \mu\text{rad}$ (均方根值)有所减小。

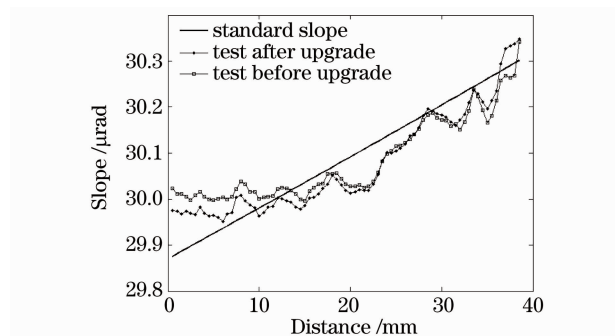


图 15 抛物面同一母线倾斜度测量对比

Fig. 15 Comparison of measuring results of the same generatrix of paraboloid

将所有测得的倾斜度曲线积分,再减去标准抛物线即得到抛物面面形结果。经计算,改进前测量的面形误差 PV 值为 $1.66\ \mu\text{m}$,而改进后测量的面形误差 PV 值为 $1.51\ \mu\text{m}$ 。图 16(a)和(b)分别是装置改进前后测量的抛物面表面面形,虽然表面轮廓形状相似,但改进后测量误差减小,数据更加接近真实值(反射镜初加工设备面形加工精度在 $1\ \mu\text{m}$ 左右),为面形精细加工提供了更可靠的初始参数。

4 结 论

在实验室原有面形检测装置基础上经过优化结构、改进部件,消除部分系统误差,增强光学系统稳定性,研制出新 Wolter I型反射镜面形检测装置。

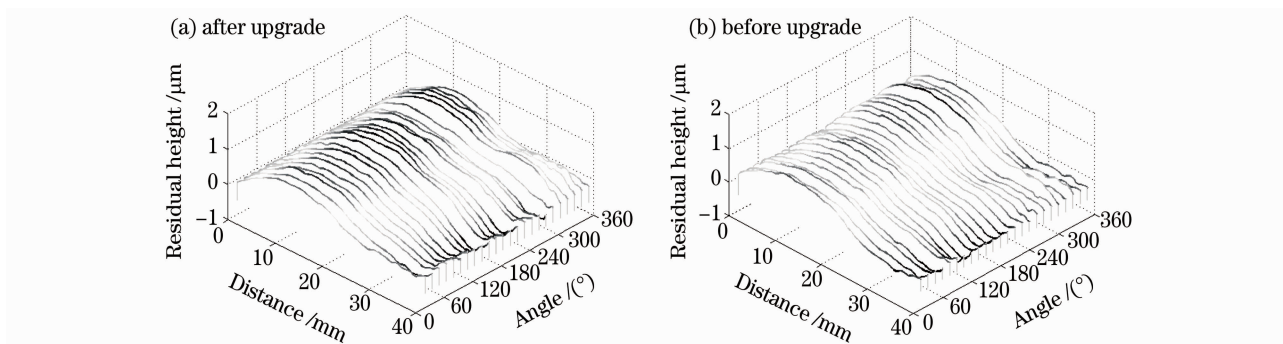


图 16 Wolter 反射镜抛物面部分面形对比

Fig. 16 Comparison of measured surface profile of paraboloidal segment of Wolter mirror

通过定标和样品实测且与原有数据对比分析可知,新面形检测装置倾斜度测量误差为 $1.7 \mu\text{rad}$ (均方根值),轮廓测量误差 PV 值为 56 nm ,测量精度比原有装置明显提高,为下一步精细加工 Wolter I 型反射镜面形奠定了基础。

参 考 文 献

- 1 D. T. Luraev. Optical Aspheric Testing[M]. Yang Li Transl.. Beijing: Science Press, 1982. 9~19
D. T. Luraev. 光学非球面检测[M]. 杨力译. 北京: 科学出版社, 1982. 9~19
- 2 Xie Yi, Chen Qiang, Wu Fan *et al.*. Concave aspherical surface testing with twin computer-generated holograms[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1313~1317
谢意, 陈强, 伍凡等. 用双计算全息图检测凹非球面[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1313~1317
- 3 Wang Xiaokun, Zheng Ligong, Zhang Xuejun. Testing convex aspheres by subaperture stitching interferometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 2022~2026
王孝坤, 郑立功, 张学军. 子孔径拼接干涉检测凸非球面的研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(7): 2022~2026
- 4 Zhao Wenchuan, Su Xianyu, Liu Yuankun *et al.*. Testing an aspheric mirror based on phase measuring deflectometry[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1338~1341
赵文川, 苏显渝, 刘元坤等. 基于相位偏折术的非球面镜检测方法[J]. *中国激光*, 2010, **37**(5): 1338~1341
- 5 Qian Shinan, Peter Z. Takacs. Equal optical path beamsplitter for a pencil beam interferometer and shearing interferometer[J]. *Optical Engineering*, 2003, **42**(4): 929~934
- 6 D. Cocco, A. Bianco, G. Sostero. A second optic head for the ELETTRA long trace profiler[C]. *SPIE*, 2005, **5921**: 59210L-1
- 7 Qian Jun, Lahsen Assoufid, Albert Macrander. Comparison of slope and height profiles for flat synchrotron X-ray mirrors measured with a long trace profiler and a PMI Fizeau interferometer[C]. *SPIE*, 2007, **6704**: 67040C-1
- 8 Liu Bin, Wang Qiuping, Fu Shaojun. Investigation of long trace profiler for aspherical optics[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, **43**(2): 46~53
刘斌, 王秋平, 傅绍军. 长程大型非球面轮廓测量仪的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2006, **43**(2): 46~53
- 9 Li Zhi, Zhao Yang, Li Dacheng *et al.*. A diffractive long trace profiler for large aspherical optics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(10): 1224~1228
李志, 赵洋, 李达成等. 衍射型长程大型非球面轮廓测量仪[J]. *光学学报*, 2002, **22**(10): 1224~1228
- 10 Cui Tiangang, Wang Yonggang, Ma Dongmei *et al.*. Design of surface profile online measuring device used for Wolter Type I mirror[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(8): 1801~1806
崔天刚, 王永刚, 马冬梅等. Wolter I型反射镜面形在线检测装置设计[J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(8): 1801~1806
- 11 Qian Shinan, Peter Z. Takacs. The penta-prism LTP: A long-trace-profiler with stationary optical head and moving penta prism[J]. *Rev. Sci. Instrum*, 1995, **66**(3): 2562~2569
- 12 Ma Dongmei, Han Changyuan. System design of large flat mirror measurement based on pentagon prism scanning technique[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2007, **30**(11): 90~95
马冬梅, 韩昌元. 基于五棱镜扫描技术测试大口径平面镜的系统设计[J]. *电子测量技术*, 2007, **30**(11): 90~95
- 13 Kuang Cui Fang, Feng Qibo, Liu Bin *et al.*. Influences on the deflection angle of the pentagonal prism due to dithering and fabrication angle error[J]. *Optical Technique*, 2004, **30**(5): 616~622
匡萃方, 冯其波, 刘斌等. 五角棱镜制造角差及抖动对其转向角的影响[J]. *光学技术*, 2004, **30**(5): 616~622
- 14 Ma Dongmei, Liu Zhixiang, Ma Lei *et al.*. Influences of alignment error in pentaprism scanning system and fabrication angle error on measuring accuracy of optical surface[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(12): 2517~2523
马冬梅, 刘志祥, 马磊等. 五角棱镜扫描系统中调整误差及制造角差的影响分析[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(12): 2517~2523
- 15 Duan Jie, Sun Xiangyang, Cai Jinghai *et al.*. Applications research to PSD in the laser displacement detecting system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(z1): 281~284
段洁, 孙向阳, 蔡敬海等. PSD在激光位移检测系统中的应用研究[J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(z1): 281~284
- 16 Defeng Zheng, Xiangzhao Wang, Feng Tang. An improved method of angle measurement with a position sensitive detector[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(7): 403~406
- 17 Wang Heng, Li Jie, Kou Lili *et al.*. New method of projectile muzzle posture testing based on PSD[J]. *Electronic Design Engineering*, 2010, **18**(4): 26~27
王恒, 李杰, 寇丽丽等. 一种基于 PSD 的弹丸炮口姿态测试新方法[J]. *电子设计工程*, 2010, **18**(4): 26~27
- 18 Fang Guanming, Cao Yiping, Zhou Liping. Analysis on the position sensitive detector positioning error caused by laser spot using new three-ray model[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(4): 954~958
方关明, 曹益平, 周力萍. 采用三线位置敏感探测器定位模型分析光斑对定位精度的影响[J]. *中国激光*, 2009, **36**(4): 954~958