

2 m量级SiC非球面反射镜的摆臂轮廓检测

熊 玲^{1,2} 罗 霄¹ 刘振宇¹ 郑立功¹ 张 峰¹ 张学军¹

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 提出采用摆臂式轮廓检测的方法,实现超大口径SiC反射镜面形的高精度轮廓检测。阐述了采用摆臂轮廓仪检测超大口径反射镜的基本原理和具体实施流程;介绍了基于扫描线交点高度一致性的特点进行面形重构的算法,以及针对离焦量测量不准的问题,采用激光跟踪仪对面形离焦量进行辅助测量的手段,建立了综合优化的检测模型;结合实例对口径为2040 mm的同轴抛物面SiC反射镜进行了摆臂轮廓检测,检测精度均方根(RMS)为0.46 μm ,与干涉仪检测结果对比偏差0.03 μm 。该技术与加工机床集成实现了反射镜的在位检测,以非球面的最接近球面为测量基准,提供了一种精确、高效地测量超大口径光学非球面面形的方法,满足了大口径SiC反射镜在研磨阶段的高精度轮廓检测需求。

关键词 测量; 摆臂轮廓检测; 大口径非球面; SiC; 最接近球面

中图分类号 O439;TH72

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1212002

Measurement of 2 m SiC Asphere Mirror Based on Swing Arm Profilometer

Xiong Ling^{1,2} Luo Xiao¹ Liu Zhenyu¹ Zheng Ligong¹ Zhang Feng¹ Zhang Xuejun¹

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 For the measurement of large SiC mirror before interferometry test, the method of swing arm profilometry (SAP) is introduced. The basic principle and flow chart of SAP are presented; with surface reconstructed based on consistency of surface height at scan crossings and defocusing amount of mirror surface measured with a laser tracker as supplementary, an optimized test model is built. As an example, a 2040 mm SiC mirror is tested by SAP, with accuracy of 0.46 μm root mean square (RMS), which is 0.04 μm deviation from interferometric test. As a best-fitting sphere being basement of the test, in situ metrology is implemented; this method provides an accurate and efficient way to measure a large mirror, and meet the need of high-accuracy measurement of large SiC mirrors during grinding.

Key words measurement; swing arm profilometer; large aperture asphere mirror; SiC; best-fitting sphere

OCIS codes 220.1250; 220.4610; 220.4840

1 引言

超大口径光学系统具有角分辨率高、能量收集能力强的特点,被广泛用于天文观测和空间对地观测,而大口径反射镜作为光学系统的关键元件,其加工工艺复杂、检测难度大、加工周期长,是各国投入大量资金和人力物力研发的关键技术之一。

由于SiC材料具有优越的性能,比如刚度大、热膨胀系数小、尺寸稳定性好等,SiC材料成为制作空间反

收稿日期: 2015-05-22; 收到修改稿日期: 2015-07-22

基金项目: 国家973计划(2011CB013205)、国家自然科学基金(61210015)

作者简介: 熊 玲(1991—),女,博士研究生,主要从事大口径光学检测方面的研究。E-mail:xyznpp@126.com

导师简介: 张 峰(1969—),男,博士,研究员,主要从事光学加工与检测等方面的研究。E-mail:zhangfjyz@sina.cn

射镜的理想材料之一^[1],近年来越来越受到人们的青睐。但是相比于传统的玻璃材料,SiC材料硬度更大,加工去除效率更低,这进一步加大了反射镜加工的难度。

光学反射镜的加工一般分为铣磨、研磨、抛光阶段^[2-4],相应的面形检测手段也不同:铣磨阶段采用机床自带测量装置^[5],对于超大口径光学元件加工至面形误差峰谷(PV)值为60~100 μm;抛光阶段采用干涉仪^[6-8],对于超大口径非球面形误差检测上限约为3 μm(PV值);而作为过渡阶段的研磨阶段则主要采用轮廓检测仪。传统的三坐标轮廓测量仪在中小口径反射镜的轮廓检测阶段得到广泛使用,但受机床精度的限制,其轮廓检测的精度随着反射镜口径的增大而降低。对于2 m量级反射镜检测精度PV值约为6 μm,对应的干涉仪的最大检测范围小于3 μm,三坐标机床的检测精度与干涉检测精度不能有效衔接,留下一段较大的模糊精度区域,直接影响加工精度和效率。另外,由于SiC材料硬度大的特点,材料去除效率低,而抛光阶段的材料去除效率又远低于研磨阶段;因此,提高研磨精度、缩短抛光时间是提高加工效率的有效手段;然而,限制研磨精度的因素主要来自于研磨阶段的面形检测精度,因此需要一种有效指导大口径反射镜研磨阶段面形加工的高精度面形检测手段。

20世纪90年代,Anderson等^[9]提出一种采用特殊几何机构的摆臂式轮廓仪测量非球面的方法,其基本原理是:鉴于位移传感器精度和量程呈反比的特点,而测量非球面形所需的最小量程是非球面与其最接近球面的最大偏离量,因此,测量非球面与其最接近球心的距离变化,即以最接近球面作为测量基准,将量程减小了约两个数量级,从而实现非球面的高精度测量。

目前美国Arizona大学已经实现了基于该方法的超大口径非球面的高精度面形检测^[10]。然而,由于其主动光学技术的支撑,他们使用的摆臂轮廓检测技术侧重于面形中高频误差的检测。国内中国科学院长春光学精密机械与物理研究所近年来一直致力于大口径非球面反射镜的制造,初步实现了用于研磨阶段的摆臂轮廓检测^[11],采用摆臂式轮廓仪进行反射镜研磨阶段面形包括低阶项误差的检测,指导反射镜研磨阶段的面形加工至面形误差与干涉仪检测量程衔接。

本文介绍了摆臂轮廓检测的原理,阐述了大口径摆臂轮廓检测的测量模型和检测流程,基于面形重构算法,提出采用激光跟踪仪辅助测量面形离焦量;然后结合实例,对口径为2040 mm的SiC同轴抛物面反射镜进行检测,指导该反射镜研磨阶段的加工,由面形为PV值50 μm加工至PV值3 μm,成功与干涉检测量程对接,同一面形与干涉仪检测结果只相差0.4 μm(PV值),最终验证了摆臂轮廓仪指导大口径SiC反射镜研磨阶段加工的准确性。

2 检测原理

摆臂式轮廓仪通过精简的结构形式,将传统轮廓仪使用的平面测量基准变换为镜面最接近球面,减小了测头测量所需的量程,固可选用小量程高精度的位移传感器,实现高精度测量。

摆臂轮廓检测原理^[10]示意图如图1(a)所示,检测系统由一台倾斜放置的高精度气浮转台、刚性测量臂和位

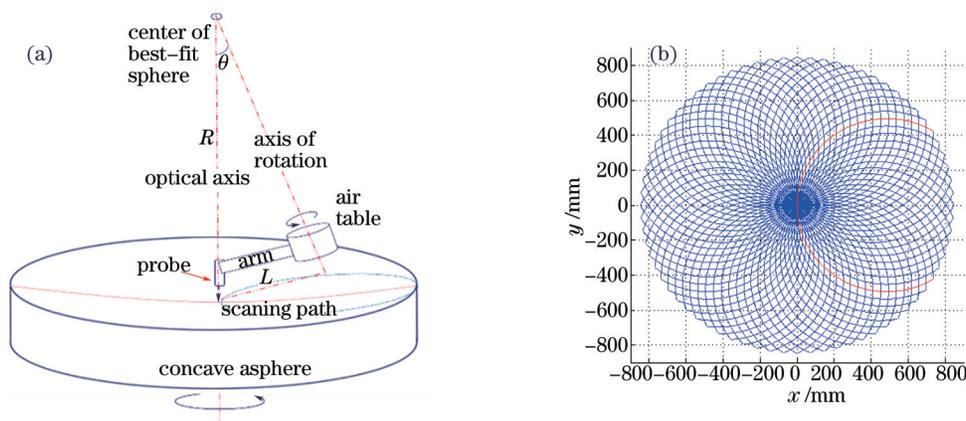


图1 (a) 摆臂轮廓检测原理示意图; (b) 72条弧线测量点分布图

Fig.1 (a) Principle of swing arm profilometer; (b) measuring points distribution of 72 scan arcs

于测量臂末端的高精度非接触式位移传感器组成;气浮转台倾斜,转轴通过反射镜最接近球球心,倾角满足

$$\theta = a \sin\left(\frac{L}{R}\right), \quad (1)$$

式中 L 为镜面中心点到气浮转台转轴的距离, R 为反射镜最接近球半径。

位移传感器测头在图 1(a)所示位置装调至反射镜光轴位置。检测时测量臂与气浮转台固定在一起,携带位移传感器测头绕气浮转台旋转轴旋转,测头在镜面扫过一条弧线,测得轨迹位置处非球面与其最接近球面的偏离量。探测器测完一条弧线,反射镜绕镜面转台旋转一定角度,探测器继续测下一条弧线。反射镜旋转一周后,得到图 1(b)所示的位移传感器在镜面上的测量点分布图。误差面形为

$$\Delta S = S - S_0, \quad (2)$$

式中 S 为实测面形各点的非球面偏离量, S_0 为理想面形各点的非球面偏离量

这里采用非接触式位移传感器,实现匀速运动的连续测量,大大提高了测量效率,对于口径为 2 m 量级的反射镜,单次测量时间最快只需 2 h。

3 数学模型及算法

摆臂轮廓仪(SAP)检测的实施流程图如图 2 所示,在测头坐标系下得到的原始测量数据包括反射镜角度位置 i 、摆臂转角 β 、测头读数 s ,经过坐标变换至镜面坐标系下的测量点位置分布为 (X_{ij}, Y_{ij}, Z_{ij}) ;利用弧线相交点高度理论上相同为依据分离出系统误差;由于系统误差产生的离焦项误差与面形误差的离焦项相耦合,在面形重构时,面形离焦项误差难以被准确测得,采用激光跟踪仪辅助测得面形离焦项误差,得到最终面形误差检测结果。

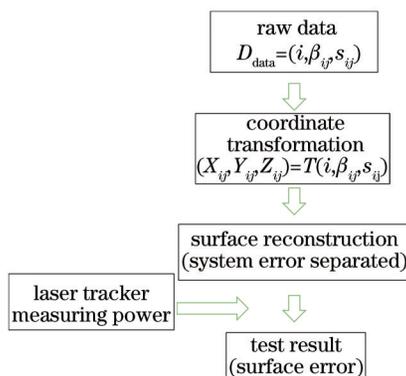


图 2 摆臂轮廓检测实施流程图

Fig.2 Flow chart of SAP test

i 为第 i 条弧线, $i \in (1, n)$, n 为母线总数。 β_{ij} 为第 i 条弧线上第 j 个测量点对应的气浮台转台角度。 s_{ij} 为第 i 条弧线上第 j 个测量点对应的位移传感器读数。 (X_{ij}, Y_{ij}, Z_{ij}) 为第 i 条弧线上第 j 个测量点在镜面坐标系下的坐标。 T 为由原始数据到镜面坐标的变换。

3.1 坐标系变换

摆臂轮廓仪检测几何关系如图 3 所示,测头在镜面上扫过一条弧线,同时记录下位移传感器的读数 s_{ij} 及对应的气浮转台转角 β_{ij} 。记摆臂检测的原始数据为

$$D_{\text{data}} = (i, \beta_{ij}, s_{ij}). \quad (3)$$

通过坐标变换,计算出镜面上被测量点在摆臂检测系统中的位置测量值

$$(X_{ij}, Y_{ij}, Z_{ij}) = T(i, \beta_{ij}, s_{ij}), \quad (4)$$

得到的 (X_{ij}, Y_{ij}, Z_{ij}) 满足

$$\begin{aligned} X_{ij} = & L \cos \alpha_i \cos \theta - L(\sin \alpha_i \sin \beta_{ij} + \cos \alpha_i \cos \beta_{ij} \cos \theta) + \\ & s_{ij} \cdot (\cos \alpha_i \cos \beta_{ij} \cos \theta \sin \theta + \sin \alpha_i \sin \beta_{ij} \sin \theta - \cos \alpha_i \cos \theta \cdot \sin \theta), \end{aligned} \quad (5)$$

$$Y_{ij} = -L(\cos \alpha_i \sin \beta_{ij} - \cos \beta_{ij} \sin \alpha_i \cos \theta) - L \sin \alpha_i \cos \theta - s_{ij}(\sin \alpha_i \cos \beta_{ij} \cos \theta \sin \theta - \cos \alpha_i \sin \beta_{ij} \sin \theta + \sin \alpha_i \cos \theta \sin \theta), \quad (6)$$

$$Z_{ij} = L \sin \theta - L \cos \beta_{ij} \sin \theta + s_{ij}(\cos \theta \sin \theta - \cos \beta_{ij} \sin \theta \sin \theta), \quad (7)$$

式中 α_i 为第 i 条弧线对应的反射镜机床转台转角, $\alpha_i = \frac{2\pi}{i}$ 。

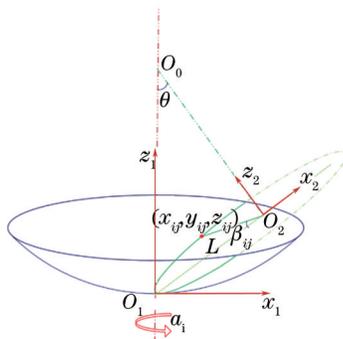


图3 摆臂轮廓仪检测几何关系图

Fig.3 Geometry of SAP system

3.2 面形重构算法

由摆臂轮廓仪检测原理,检测得到多条圆弧形轮廓线覆盖整个镜面,得到测量点分布。然而,受系统误差的影响,各条弧线与镜面之间的相对位置有微小的变化,系统误差主要来源于:1)检测过程中支撑镜面的转台转动引入的最接近球心位置的变化;2)摆臂装调时气浮转台转轴与镜面支撑转台轴交点与最接近球心的偏差。

镜面旋转不同角度测量的扫描线中,必然存在交点,即镜面上某一点被多条弧线扫过,而该点的实际高度应该相等;根据不同扫描线在交点处测量值的差异即分离出摆臂检测的系统误差^[11],重构出镜面的二维面形。这些系统误差对面形测量引入的误差主要为离焦、倾斜和平移三类。

3.3 面形离焦量测量

由于系统误差包含的离焦与面形误差离焦项耦合,面形重构得到的离焦量不准确。由于在反射镜的加工过程中,离焦量是一个重要指标,在实际工程应用中,采用激光跟踪仪^[12-14]辅助摆臂检测系统对镜面面形的离焦量进行测量。

激光跟踪仪是一种便携式的位置测量仪,测量原理是:跟踪仪发出一束激光经过球式反射镜(SMR)角反射球后原路返回,由内置的两个旋转角编码器和激光测距系统测得角反射球的位置。

激光跟踪仪测量非球面反射镜面形离焦的示意图如图4所示,使用SMR球在镜面上测量均匀分布的若干个点 (x_i, y_i, z_i) ,与理想面形分布 (x_i, y_i, z_{i0}) 作差得到当前面形误差,用 Zernike 多项式对面形误差分布 $(x_i, y_i, z_i - z_{i0})$ 进行面形拟合,得到面形离焦量。激光跟踪仪测得的离焦量与摆臂轮廓仪重构算法得到的面形组合,即为反射镜的面形检测结果,用于指导反射镜的加工。

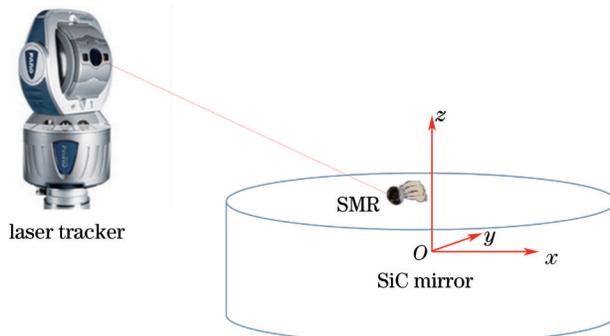


图4 激光跟踪仪测量非球面面形离焦的示意图

Fig.4 Measurement of defocusing on an asphere with a laser tracker (SMR on the surface)

4 实验验证

实验采用的摆臂检测系统主要由一台高精度直驱式气浮转台和一台高精度的非接触式位移传感器组成。气浮转台定位精度为 $1''$ ；位移传感器分辨率为 30 nm ，重复精度为 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ ，采样频率为 2000 Hz ；实际检测装置如图5所示，摆臂气浮转台悬挂在机床测量主轴上，测量臂固定在气浮转台下方，绕转台轴旋转一周在镜面上采样测量。该方法可对反射镜进行在位检测，节省了反射镜的拆卸、搬运和装调时间，极大地提高了检测效率。

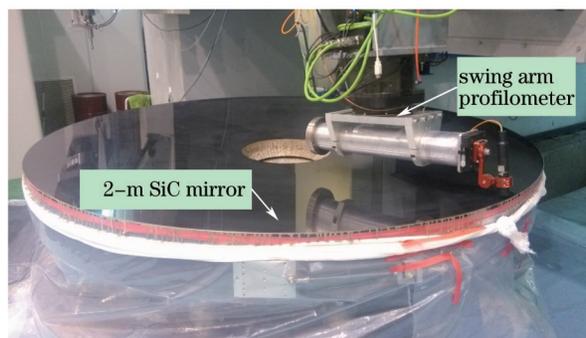


图5 摆臂轮廓仪在位检测2 m同轴凹面抛物面SiC反射镜装置图

Fig.5 SAP in situ measuring a 2- m concave parabolic SiC mirror

实验测量的光学元件是内径为 400 mm 、外径为 2040 mm 、顶点曲率半径为 6000 mm 的抛物面反射镜，扫描弧线72条，扫描速率为 100 mm/s ，平均采样点间隔为 0.5 mm ，全程测量时间为 2.5 h 。

最初的粗研磨阶段的镜面检测结果如图6所示，图6(a)为激光跟踪仪检测面形的结果，面形误差PV值约为 $50.7\text{ }\mu\text{m}$ ，RMS值约为 $13.1\text{ }\mu\text{m}$ ，其Zernike拟合面形得power项系数为 $9.1\text{ }\mu\text{m}$ ；图6(b)为相应的摆臂检测结果加上激光跟踪仪测得的面形power项误差后的整体面形误差，面形误差PV值约为 $49.3\text{ }\mu\text{m}$ ，RMS值约为 $8.5\text{ }\mu\text{m}$ 。图6(a)中激光跟踪仪采样点数为370个，采样间隔为 $50\sim 100\text{ mm}$ ，测量时间约 40 min ，受采样密度的限制，激光跟踪仪面形检测结果细节不明朗，但是整体轮廓能与摆臂检测结果相互对应，验证了摆臂检测的准确性。

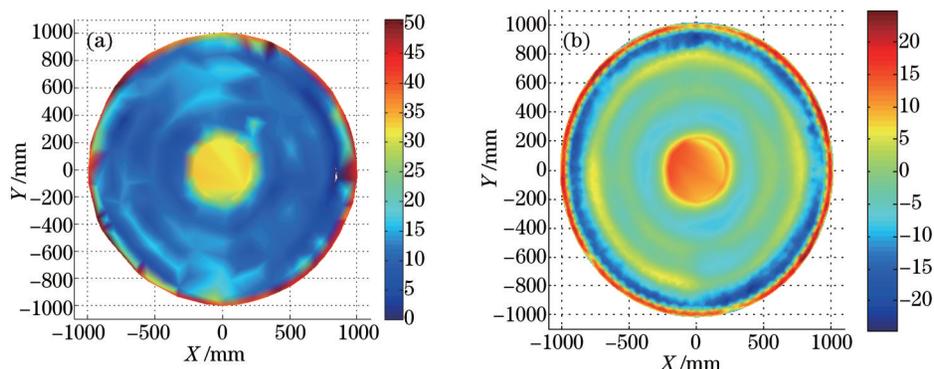


图6 粗研磨初始阶段反射镜面形检测结果。(a) 激光跟踪仪；(b) 激光跟踪仪与SAP

Fig.6 Testing result of parabolic SiC mirror at the beginning of grinding process.(a) Laser tracker; (b) laser tracker and SAP

在反射镜研磨过程中，采用激光跟踪仪测量反射镜面形，一方面通过获得拟合的power项误差及最接近球半径监控反射镜加工的收敛效果；另一方面，激光跟踪仪检测面形的轮廓与摆臂轮廓仪检测结果相对比，验证摆臂检测结果是否正确；二者相互结合，指导反射镜面形收敛加工。实践证明，当反射镜面形误差收敛至PV值 $6\text{ }\mu\text{m}$ 及更小时，离焦量误差降低至约 $1\text{ }\mu\text{m}$ 及更小时，激光跟踪仪面形检测结果重复性较差，检测power能力受限。

摆臂轮廓仪作为反射镜研磨阶段的检测手段，指导反射镜面形加工至粗抛光阶段，与干涉检测衔接。图7为反射镜精研磨至粗抛光阶段某一次加工后，摆臂轮廓仪的两次检测结果。其中图7(a)中PV值为 $3.05\text{ }\mu\text{m}$ ，RMS值为 $0.46\text{ }\mu\text{m}$ ，图7(b)中PV值为 $3.12\text{ }\mu\text{m}$ ，RMS值为 $0.47\text{ }\mu\text{m}$ 。由检测结果可以看出，摆臂轮廓检测 2 m 量级反射镜重复精度优于PV值 $0.2\text{ }\mu\text{m}$ ，验证了摆臂检测的稳定性。

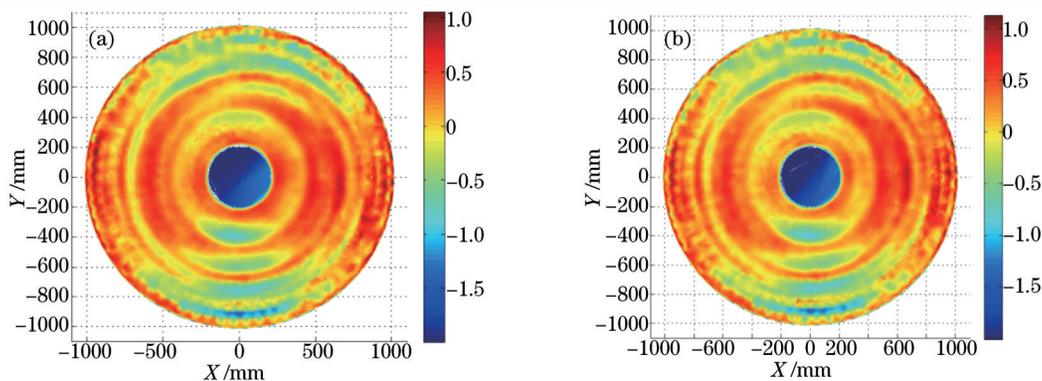


图7 口径2040 mm抛物面反射摆臂轮廓仪检测面形结果

Fig.7 SAP testing result of 2040 mm parabolic SiC mirror

图8为4D动态干涉仪相应的检测结果,其中PV值为 $2.65\ \mu\text{m}$,RMS值为 $0.44\ \mu\text{m}$ 。将摆臂检测结果与干涉仪的检测结果对比,二者PV值只相差 $0.5\ \mu\text{m}$,RMS值相差 $0.03\ \mu\text{m}$,验证了摆臂轮廓检测的精度。

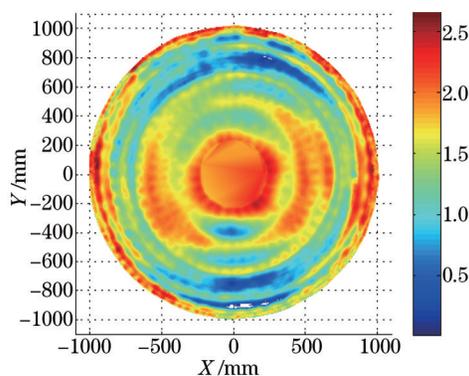


图8 口径2040 mm抛物面反射镜干涉仪检测面形结果

Fig.8 Interferometric testing result of 2040 mm parabolic SiC mirror

5 结 论

本文针对大口径非球面SiC反射镜研磨阶段难以实现高精度检测的问题,提出了摆臂式轮廓检测方法。基于摆臂轮廓检测的原理,利用几何关系变换,建立了大口径非球面检测数据的处理模型;针对面形重构算法丢失面形离焦量信息的问题,提出采用激光跟踪仪辅助测量面形离焦项误差;最终建立了大口径非球面反射镜的实施流程。以2 m口径SiC非球面反射镜为例,初始的面形误差为PV值 $50\ \mu\text{m}$,采用摆臂轮廓检测指导加工至面形误差PV值 $3\ \mu\text{m}$,与干涉检测量程完好衔接,检测结果对比PV值相差 $0.5\ \mu\text{m}$,具有很好的 consistency;且两次摆臂轮廓检测结果显示,重复精度优于PV值 $0.2\ \mu\text{m}$,证明摆臂轮廓检测系统具有很好的稳定性。摆臂检测模型的可行性得以验证,为大口径及超大口径反射镜的高精度检测提供了可靠保障。

参 考 文 献

- 1 Kang Jian, Xuan Bin, Xie Jingjiang. Manufacture technology status of surface modified silicon carbide mirrors[J]. Chinese Optics, 2013, 6(6): 824-833.
康 健, 宣 斌, 谢京江. 表面改性碳化硅基底反射镜加工技术现状[J]. 中国光学, 2013, 6(6): 824-833.
- 2 Zhang Feng. Fabrication of large off-axis asphere silicon carbide mirror[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(s2): s222001.
张 峰. 大口径离轴非球面碳化硅反射镜的加工[J]. 光学学报, 2013, 33(s2): s222001.
- 3 Li Ruigang, Zheng Ligong, Zhang Feng, et al... Computer controlled manufacturing during fine grinding stage of highly steep off-axis asphere with large aperture[J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(5): 633-639.
李锐钢, 郑立功, 张 峰, 等. 大口径高陡度离轴非球面精磨阶段的数控加工[J]. 光学精密工程, 2007, 15(5): 633-639.
- 4 Zhang Feng. Fabrication of optical flat mirror with nanometer surface error[J]. Chinese Optics, 2014, 7(4): 616-621.
张 峰. 纳米级面形精度光学平面镜加工[J]. 中国光学, 2014, 7(4): 616-621.

- 5 Zhang Zhiyu, Li Ruigang, Zheng Ligong, *et al.*. Precision grinding technology for the off-axis aspherical silicon carbide mirror blank[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(17): 39-45.
张志宇, 李锐钢, 郑立功, 等. 离轴非球面 SiC 反射镜的精密铣磨加工技术[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(17): 39-45.
- 6 Wang Xiaokun. Fabrication and testing of large aperture off-axis SiC aspheric mirror[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(1): 011201.
王孝坤. 大口径离轴碳化硅非球面反射镜加工与检测技术研究[J]. *激光与光电子进展*, 2012, 49(1): 011201.
- 7 Wang Xiaokun. Testing large SiC mirror by subaperture stitching interferometry[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(5): 051202.
王孝坤. 大口径碳化硅反射镜面形子孔径拼接干涉检测[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(5): 051202.
- 8 Xue Donglin. Manufacture and application of large aperture standard transmission spheres[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(6): 0616001.
薛栋林. 大口径标准球面镜组研制与应用[J]. *中国激光*, 2014, 41(6): 0616001.
- 9 Anderson D S, Parks R E, T Shao. A versatile profilometer for the measurement of aspherics[C]. *Proc OF&T Workshop Technical Digest*, 1990, 11: 119-122.
- 10 Su P, Oh C J, Parks R E, *et al.*. Swing arm optical CMM for aspherics[C]. *SPIE*, 2009, 7426: 74260J.
- 11 Luo Xiao. Fabrication of Large Aspherics Using Stressed Lap with Orbital Tool Motion [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2011: 67-86.
罗霄. 采用平转动应力盘技术加工超大口径非球面的研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2011: 67-86.
- 12 Burge J H, Su P, Zhao C, *et al.*. Use of a commercial laser tracker for optical alignment[C]. *SPIE*, 2007, 6676: 66760E.
- 13 Zobrist T L, Burge J H, Davison W B, *et al.*. Measurements of large optical surfaces with a laser tracker[C]. *SPIE*, 2008, 7018: 70183U.
- 14 Chen Xindong, Li Ruigang. Research on geometric parameter measurement method using laser tracker in null lens asphere testing[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(5): 0508007.
陈新东, 李锐钢. 非球面 Null Lens 补偿检测中采用激光跟踪仪测量几何参数方法研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(5): 0508007.

栏目编辑: 何卓铭