

高次离轴凸非球面反射镜组合加工 (特邀)

彭利荣^{1,2}, 程 强^{2*}, 曾雪锋², 周晓勤¹

- (1. 吉林大学 机械与航空航天工程学院, 吉林 长春 130025;
2. 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)

摘要: 为提高离轴三反消像散 (TMA) 光学系统中次镜的制造效率和精度, 开展了离轴凸非球面反射镜组合加工和零位检测的研究工作。首先, 介绍了方形 (298 mm×264 mm) 高次离轴凸非球面反射镜的光学参数、技术指标和总体加工路线; 其次, 提出了铣磨加工工艺策略以及基于气囊和沥青的小磨头组合加工工艺; 最后, 阐述了光学零件抛光阶段采用的背部透射零位补偿检测法和 Offner 型零位补偿器, 并采用光线追迹法对镜片的零位补偿检验面形畸变进行了矫正, 最终面形 RMS 值为 0.025λ ($\lambda=632.8$ nm), 满足技术指标要求。上述组合加工工艺和背部透射零位补偿检测方案可以显著提升高次离轴凸非球面反射镜的加工精度和效率。

关键词: 离轴凸非球面; 气囊抛光; 沥青平滑; 零位补偿; 畸变矫正

中图分类号: TH706 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220611

Combined fabrication of high order off-axis convex aspheric mirror (*invited*)

Peng Lirong^{1,2}, Cheng Qiang^{2*}, Zeng Xuefeng², Zhou Xiaoqin¹

- (1. School of Mechanical and Aerospace Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China;
2. Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to improve the manufacturing accuracy and efficiency of the secondary mirror in the off-axis three mirror anastigmatic (TMA), the combined fabrication and testing technologies of the off-axis convex aspheric mirror were studied. Firstly, the optical parameters, technical specifications and overall processing route of square (298 mm×264 mm) high order off-axis convex aspheric mirror were introduced. Then, the grinding processing strategy and the combined processing technology based on bonnet and pitch polishing were presented. At last, offner-type compensator was used to meet the back transmission null lens testing in the polishing stage, and then the surface distortion was corrected by ray tracing method, the final RMS value was 0.025λ ($\lambda=632.8$ nm), which meet the target requirements. The above combined processing technology and back transmission null lens testing detection scheme can significantly improve the processing accuracy and efficiency of off-axis convex aspheric mirror.

Key words: off-axis convex aspheric; bonnet polishing; pitch smoothing; null lens testing; distortion correction

收稿日期:2022-07-23; 修订日期:2022-08-25

基金项目:国家自然科学基金 (12003034, 11903035, 12103054, 61805243); 吉林省重点研发计划项目 (20200401065 GX)

作者简介:彭利荣,男,助理研究员,硕士,主要从事光学先进制造方面的研究。

通讯作者:程强,男,副研究员,博士,主要从事光学检测方面的研究。

0 引言

目前,空间光学系统正向着高度集成化的方向发展。现代空间光学领域常用的离轴三反消像散(TMA)中主要应用离轴凸非球面反射镜作为次镜,并且随着光学系统分辨率的增加,其口径也不断增大,对高精度高次离轴凸非球面的加工和检测带来前所未有的挑战。

离轴非球面制造是一个复杂的工艺过程,根据应用领域的不同其工艺也略有不同。应用于空间光学系统的光学零件材料多为碳化硅、微晶和石英等硬脆材料,在成型阶段很难采用模压、注塑和车削等成熟的加工技术;在抛光阶段,古典法修带技术适用于回转对称的非球面,无法加工离轴非球面,因此只能采用手修的方式^[1]。针对离轴非球面加工过程中面临的技术和效率问题,开展了基于计算机控制的确定性加工策略研究,具体包括采用高精度五轴数控加工中心对离轴非球面进行铣磨加工,结合计算机控制光学表面成型(Computer Controlled Optical Surfacing, CCOS)技术,基于气囊和沥青小磨头对光学表面进行组合抛光。

非球面的主要检测方法有:轮廓测量法、无像差点检测法、计算全息法、子孔径拼接法、零位补偿检测法^[2-6]等。轮廓测量法常用仪器为三坐标测量机、摆臂轮廓仪等,主要应用于铣磨阶段非球面的面形测

量。无像差点法主要利用二次曲面有两个焦点的特性实现其面形检测,测量凸二次曲面时辅助镜的尺寸一般要比被检凸非球面尺寸大得多。计算全息图(Computer Generated Hologram, CGH)可以根据非球面参数设计精确地提供非球面检测所需的“标准零位补偿样板”,但是检测凸非球面的 CGH 尺寸要大于被检镜的口径,这给 CGH 制作带来很大困难。子孔径拼接法通过对子孔径进行面形测量,然后通过算法重构非球面全口径面形分布,这种方法对调整机构精度和拼接算法要求较高。零位补偿检测法中凸非球面检测补偿器的口径要大于被检凸非球面的口径,为了能用小口径光学补偿器检测大口径非球面,可以采用背部透射零位补偿检测法。文中采用背部透射零位补偿检测法对离轴凸非球面进行检测。

1 离轴非球面设计指标与总体工艺路线

常用非球面方程如下:

$$Z(y) = \frac{y^2/R}{1 + \sqrt{1 - (1+K) \cdot \frac{y^2}{R^2}}} + \sum_{i=1}^n A_{2(i+1)} y^{2(i+1)} \quad (1)$$

式中: R 为顶点曲率半径; K 为二次曲面常数; $A_{2(i+1)}$ 为高次项系数。文中加工的离轴凸非球面反射镜为高次离轴曲面,其主要技术参数如表 1 所示。

表 1 主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters

Material	D/mm	R/mm	K	Off axis/mm	A_6	A_8	A_{10}	RMS/nm
Fused quartz	298×264	3 662.528	-9.75	196.45	3.055E-18	-2.658E-23	5.813 6E-29	1/40λ

基于表 1 所示的高次离轴凸非球面的相关技术参数,分析其非球面度和非球面梯度等关键指标,用以评估其加工难度。选择镜面顶点和边缘相接的球面作为最佳拟合球面对其非球面度和非球面梯度进行计算,其最大非球面度为 0.09 mm,最大非球面梯度为 2.18 μm/mm,如图 1 和图 2 所示。

基于计算机控制的离轴非球面加工方法与传统加工工艺有明显的不同。基于数控的多工艺组合加工充分发挥了各个加工手段的特点,实现优势组合后的高效高精度加工。在铣磨阶段,基于高精度数控五轴加工中心实现高面形精度、低亚表面损伤的高质量

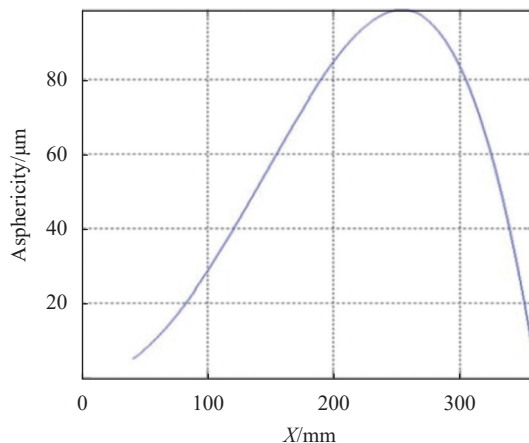


图 1 非球面度

Fig.1 Aspheric departure

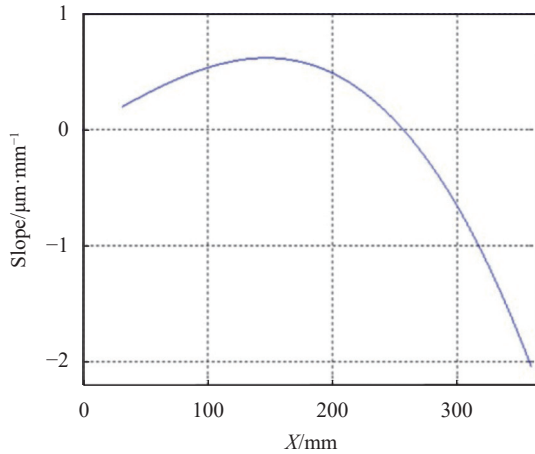


图 2 非球面梯度
Fig.2 Aspheric slope

磨削表面。抛光阶段利用气囊小磨头的高确定性和沥青抛光的平滑特性实现全频段收敛。整个工艺流程各个阶段的预期加工指标如图 3 所示。

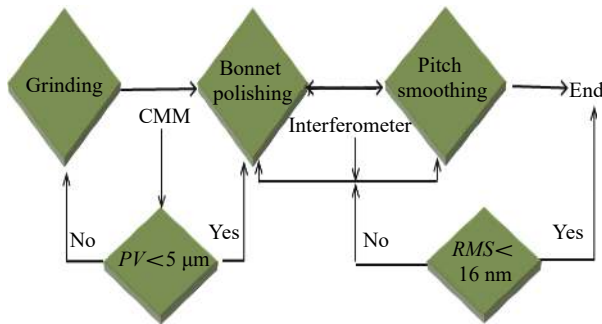


图 3 组合加工工艺流程
Fig.3 Process flow of combined processing

2 离轴凸非球面加工

2.1 离轴凸非球面铣磨加工

为实现低亚表面损伤、高面形精度的超精密磨削表面,将铣磨分为粗磨和精磨两个阶段。粗磨阶段主要实现光学零件的快速成型,采用大粒度固着磨粒砂轮、大进给量、大切削深度的加工策略完成材料的快速去除^[7]。精磨阶段主要实现高质量磨削表面的创成,采用小粒度固着磨粒砂轮、小进给量、小切深的加工策略,最终可获得亚表面损伤 10 μm 左右、面形精度小于 5 μm 的磨削表面。加工参数如表 2 所示。

加工实验基于劳尔 G1-2P 五轴联动铣磨加工中心完成,该机床直线轴运动定位精度可达±1 μm,具备

表 2 加工参数

Tab.2 Processing parameters

Step	Size/μm	Speed/m·s ⁻¹	Depth/μm	Feed/m·min ⁻¹
1	91	18	100	300
2	18	18	10	150

回转口径 500 mm、面形精度微米量级光学零件的加工能力。加工过程和加工结果分别如图 4 和图 5 所示。

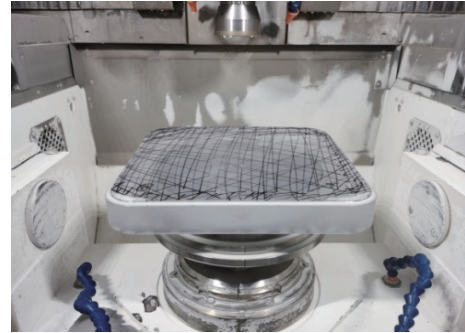


图 4 光学零件铣磨加工过程

Fig.4 Mill-grinding process of optical parts

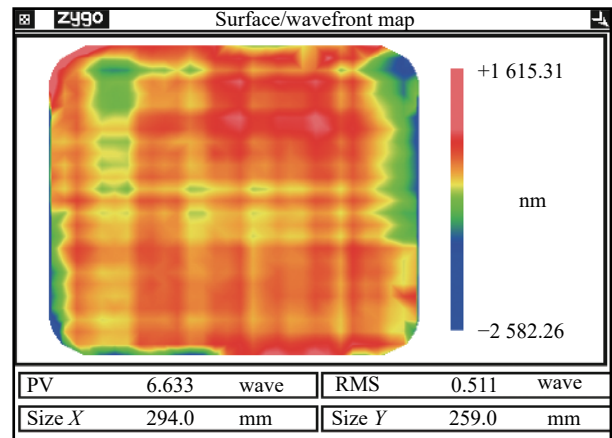


图 5 磨削结果

Fig.5 Results of grinding

2.2 离轴凸非球面抛光加工

离轴非球面沿母线方向上曲率各不相同,目前较为成熟的加工技术是 CCOS 技术,其加工原理是以去除函数为基础,表面定量的检测数据为依据,在特定工艺条件下通过对三维形貌误差进行算法解算,并据此控制小磨头在非球面表面不同位置的驻留时间,实现对非球面表面误差的修正^[8]。文中采用这种技术来实现对离轴凸非球面反射镜的加工。

气囊抛光是目前比较成熟的一种小磨头加工方

式。通常情况下,采用合适硬度的橡胶制作球形柔性体作为抛光膜的支撑体,在充气情况下气囊具备稳定的保形能力,其结构示意图如图 6 所示。气囊抛光膜可以选择聚氨酯、抛光布等多种抛光膜材料,再配合不同气压的调节可获得不同大小的去除函数,有效适应不同面形输入条件下的确定性加工。此外,气囊磨头为小曲率凸球面,可以实现磨头与工件接触区域的良好吻合,基于高精度、多自由度执行机构可以完成各种大偏离量自由曲面的加工^[9]。文中基于奥普泰克五轴加工中心完成抛光,加工过程如图 7 所示。

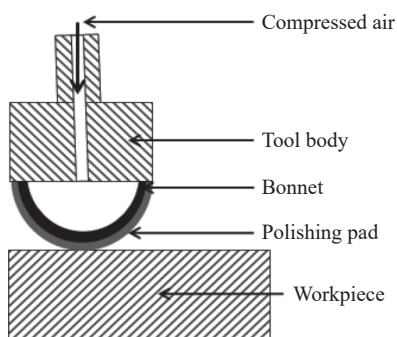


图 6 气囊抛光示意图

Fig.6 Schematic diagram of bonnet polishing

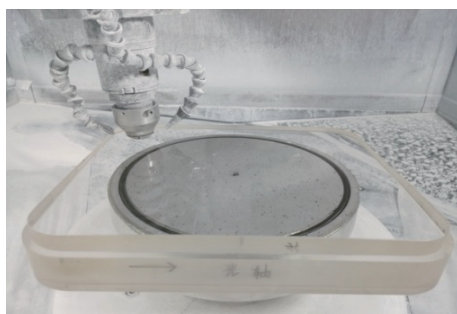


图 7 气囊抛光

Fig.7 Bonnet polishing

光学零件精密磨削和气囊抛光在加工过程中往往会残留周期性的轨迹误差,这些中高频误差很大程度上制约表面面形向更高精度收敛,因此在加工过程需要通过平滑的方式将中频降低到一定幅值。光学表面平滑的难点是如何选择能与非球面表面高度贴合且硬度适中的磨头,通常情况下半柔性磨头能有效去除光学表面的高点和低点,且高点的去除率大于低点去除率,达到修正中高频误差的目的。其加工示意图如图 8 所示。

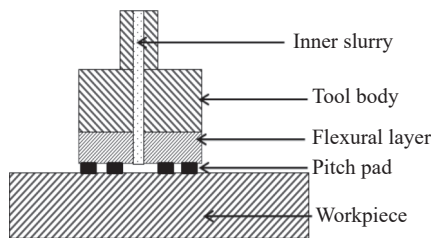


图 8 沥青平滑示意图

Fig.8 Schematic diagram of pitch smoothing

2.3 全频段误差收敛结果分析

气囊抛光的主要目的是快速去除磨削残留的亚表面损伤并根据面形结果修正低频面形误差,预抛光后直接进行沥青小磨头平滑加工,作为首轮组合加工,非球面面形误差如图 9 所示。

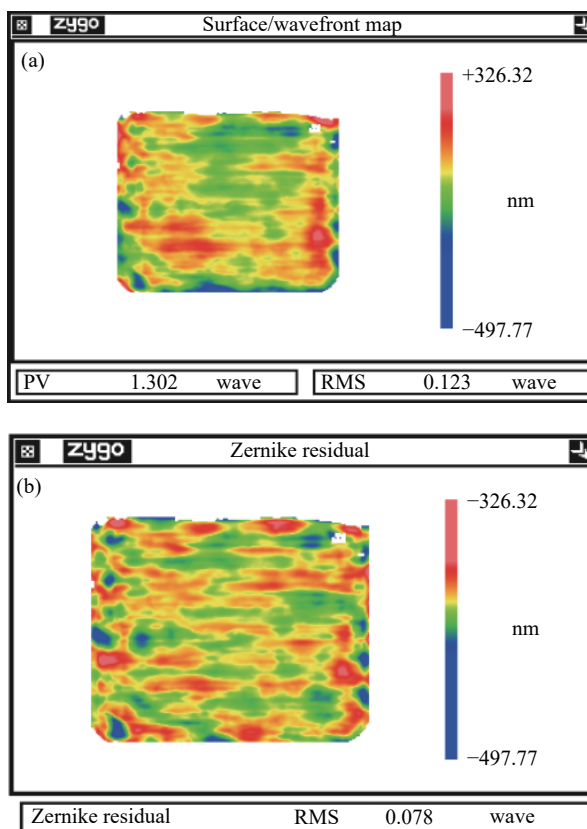


图 9 第一轮组合加工结果。(a) 面形误差;(b) Zernike 残差

Fig.9 Results after first combined process. (a) Surface error; (b) Zernike residual

由图 9(a)可知,首轮组合加工后的面形 RMS 值为 0.123%; Zernike 残差如图 9(b)所示,其 RMS 值约为 0.078%。从面形图和残差图中都可以看到类似光栅轨迹的条状痕迹,这主要是由铣磨和预抛光阶段的

轨迹残留所致,随着面形的进一步收敛,这些小周期误差将成为中频误差的主要成份。在后续的加工过程中需要对这些中频进行有效抑制,使全频段误差按照相近的收敛率达到目标精度。以图 9 的面形结果作为输入,继续进行两轮的气囊磨头和沥青小磨头组合加工,结果分别如图 10 和图 11 所示。

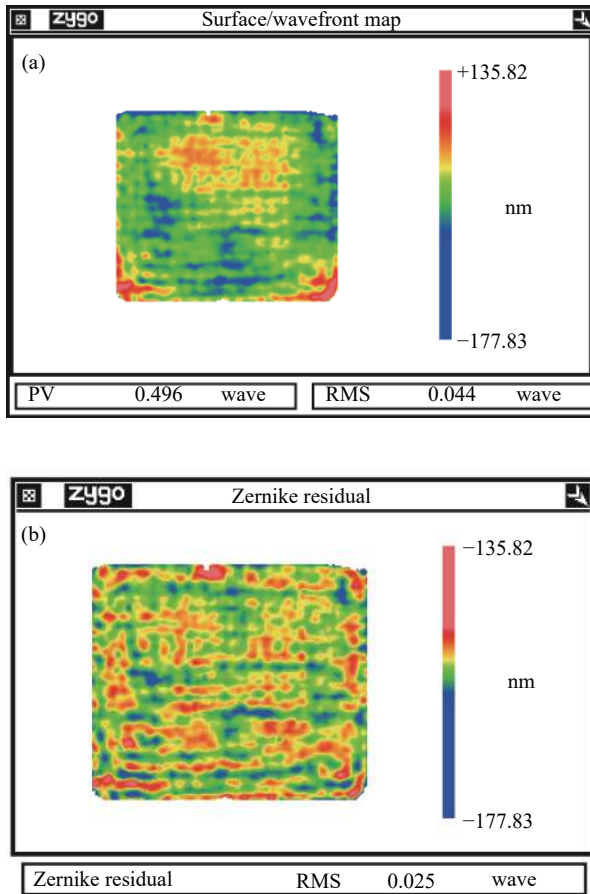


图 10 第二轮组合加工结果。(a) 面形误差;(b) Zernike 残差
Fig.10 Results after second combined process. (a) Surface error;
(b) Zernike residual

由图 10(a) 可知,经过第二轮组合抛光,面形 RMS 值为 0.044λ; Zernike 残差如图 10(b) 所示,其 RMS 值约为 0.025λ。通过图 10(a) 与图 9(a)、图 10(b) 与图 9(b) 的对比可知,其收敛率分别为 2.8 和 3.1。

由图 11(a) 可知,经过第三轮组合抛光,面形 RMS 值为 0.025λ; Zernike 残差如图 11(b) 所示,其 RMS 值约为 0.017λ。通过图 11(a) 与图 10(a)、图 11(b) 与图 10(b) 的对比可知,其收敛率分别为 1.8 和 1.5,整体面形达到指标要求。综合对比三轮组合加工结果可

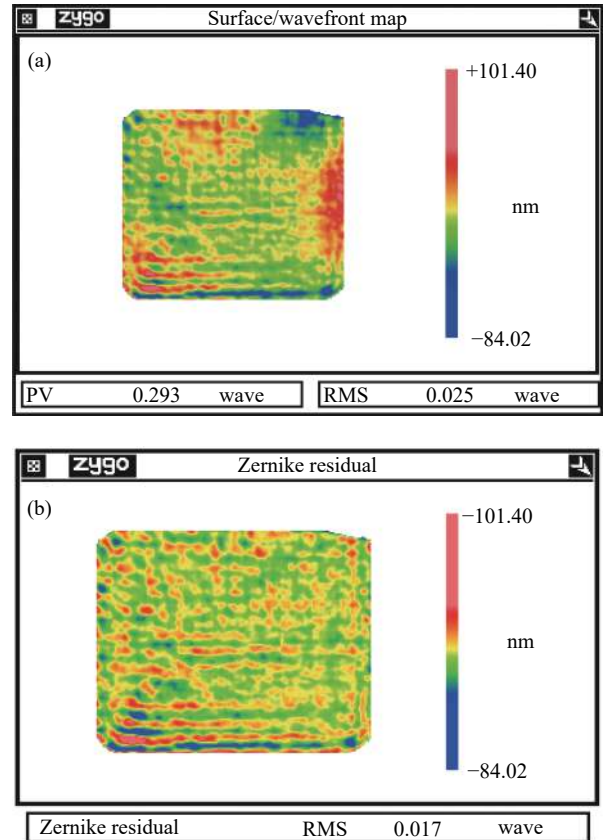


图 11 第三轮组合加工结果。(a) 面形误差;(b) Zernike 残差
Fig.11 Results after third combined process. (a) Surface error;
(b) Zernike residual

以看出,该组合加工方式可以实现全频段的面形收敛,但每轮各个频段的收敛率存在差异,且随着组合加工轮数的增加,其收敛率也有所降低。

为了更加准确地评价组合加工对空间各个频段的影响,将过程中三轮组合加工的结果使用功率谱密度 (PSD) 进行分析,如图 12 所示。由图可知,PSD 曲

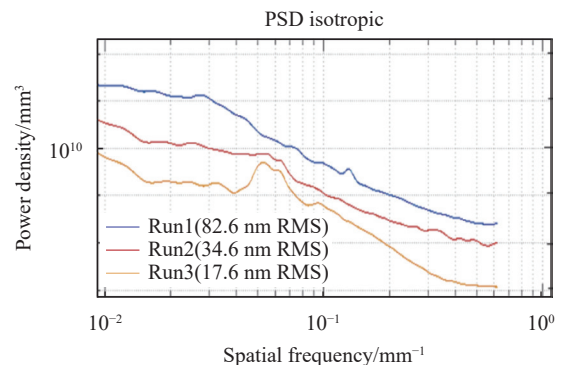


图 12 PSD 曲线比较

Fig.12 Comparison of PSD curves

线稳定下降,但是不同周期的误差收敛率略有不同,需要进一步调整优化半柔性平滑磨头的结构设计和加工工艺参数,实现表面目标误差频段的稳定收敛。

3 面形检测技术

零位补偿检测法的原理是通过特定的非球面光学补偿器将干涉仪发出的平面波或球面波转换成非球面波,经被检非球面反射后再次通过光学补偿器与干涉仪参考光干涉,从而获取被检非球面面形误差及其分布。文中选择背部透射 Offner 补偿器将凸面转换为凹面检测,补偿器设计、制造、优化后检测精度达到 $RMS\ 0.0041\lambda$, 满足检测精度要求。

根据检测光路设计,光路采用 Zygo 干涉仪,标准镜采用 4 in (1 in=2.54 cm) 平面标准镜,光路采用无限共轭光路,补偿器朝干涉仪的一端设置有对准圆环,与平面镜发出的平面波自准,当调整至零条纹时,实现干涉仪和补偿器的对准。检测光路如图 13 所示。

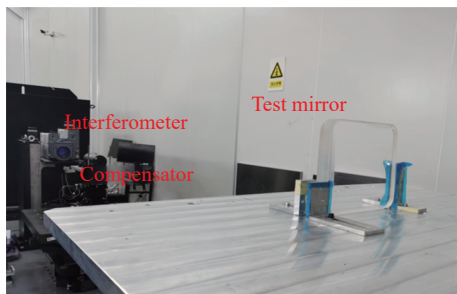


图 13 检测光路

Fig.13 Actual detection optical path

零位补偿检验中被检非球面镜面坐标系与干涉仪的测量坐标系之间存在非线性投影畸变,导致面形误差位置信息之间存在相对位置偏差^[10]。文中采用基于检测模型的光线追迹法对检测畸变进行矫正,还原误差真实位置信息。畸变矫正示意图如图 14 所示。

首先在镜面上做物理标记(图 14(a)),并通过三坐标检测获得实际物理坐标;其次进行干涉检验(图 14(b))并提取标记点在干涉仪 CCD 中的位置坐标(图 14(c));最后基于镜面物理坐标和 CCD 位置坐标,采用非线性拟合对面形数据进行重构,拟合精度优于 0.3 mm 便可用于指导加工。

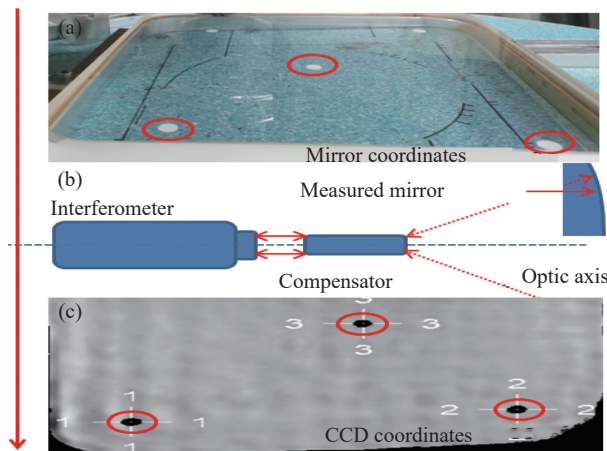


图 14 畸变矫正示意图。(a) 物理坐标; (b) 零位补偿检验; (c) CCD 坐标

Fig.14 Schematic diagram of distortion correction. (a) Physical coordinates; (b) Null lens testing; (c) CCD coordinates

4 结论

文中针对高精度高次离轴凸非球面加工与检测过程中的效率和精度问题,提出了基于数控的组合加工工艺路线,并介绍了零位补偿检测和面形畸变校正。在加工方面,结合劳尔五轴加工中心高精度的特点完成离轴非球面精密磨削;基于气囊小磨头的高确定性和沥青磨头的平滑特性形成高效组合抛光工艺。在检测方面,阐述了背部透射零位补偿检测法和 Offner 型零位补偿器,并采用光线追迹法对镜片的零位补偿检验面形畸变进行校正。

将上述工艺路线应用于方形高次离轴凸非球面加工中,最终面形 RMS 值达到 0.025λ , 满足技术指标要求。上述组合加工工艺单轮收敛率较高,整体加工周期明显缩短;检测畸变矫正精度优于 0.3 mm,有效支撑高确定性加工。上述组合加工和背部透射零位补偿检测方案可以显著提升石英材料高次离轴凸非球面反射镜的加工精度和效率。

参考文献:

[1] Zhang Feng. Fabrication and testing of precise off-axis convex aspheric mirror [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(12): 2557-2563. (in Chinese)
 [2] Xiong Ling, Luo Xiao, Qi Erhui, et al. Sensitivity analysis of different scan arcs for swing arm profilometer test [J]. *Infrared*

- and Laser Engineering*, 2018, 47(2): 0217003. (in Chinese)
- [3] Chen Qinfang, Li Yingcai, Ma Zhen, et al. Alignment of off-axis conic aspheric mirrors in stigmatic null test [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(2): 0222001. (in Chinese)
- [4] Gao Songtao, Sui Yongxing, Yang Huaijiang. High precise testing of asphere with computer-generated hologram and error evaluation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(6): 0612003. (in Chinese)
- [5] Cai Zhihua, Wang Xiaokun, Hu Haixiang, et al. Non-null stitching test convex aspheric metal mirror [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(11): 20210061. (in Chinese)
- [6] Zhou Hao, Wang Xing, Liu Qiang, et al. Optical system design of Offner compensator with infinity object distance applied on aspheric mirror testing [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(19): 190801. (in Chinese)
- [7] Lin B, Li S P, Cao Z H, et al. Theoretical modeling and experimental analysis of single-grain scratching mechanism of fused quartz glass [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2021, 293: 117090.
- [8] Wang Peng, Chen Ya, Xuan Bin, et al. Polishing large aperture mirrors by manipulator [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(5): 1077-1085. (in Chinese)
- [9] Wang Fei, Zhang Jian, Peng Lirong, et al. Motion precision control in bonnet polishing [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(8): 2220-2228. (in Chinese)
- [10] Zeng Xuefeng, Yan Feng, Xue Donglin, et al. Distortion correction in testing of off-axis asphere with computer generated hologram [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(11): 1109003. (in Chinese)