

一种实现离轴非球面反射镜离轴量和离轴角精确测量的方法

张学敏^{1,2} 魏儒义^{1,2*} 于涛¹ 侯晓华¹ 段嘉友¹ 李华¹

(¹中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119; ²中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 离轴三反系统的装调主要采用初始定位与计算机辅助装调相结合的方法, 实际加工过程中由于检测手段的限制, 使得离轴量以及离轴角的控制精度较低, 根据加工提供的离轴量参数并以其背部平面为基准进行反射镜初始定位会引入较大的初始像差, 用计算机辅助装调无法收敛。基于自准直原理, 进行反射光路分析, 得出离轴反射镜位置与反射像位置的数学关系, 并基于以上数学关系提出一种可精确测量离轴反射镜离轴量以及离轴角的系统, 该系统包括高精度 90°直角弯板、高精度直线导轨、中心定位特种工装、内调焦望远镜以及测微光管, 其测量离轴量以及离轴角的精度分别为 ± 0.05 mm 和 $\pm 10''$ 。

关键词 遥感; 离轴非球面反射镜; 离轴量; 离轴角; 中心定位特种工装

中图分类号 TN206 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0416001

A Method to Measure Off-Axis Fabrication and Off-Axis Angle of Axis Aspheric Mirror Precisely

Zhang Xuemin^{1,2} Wei Ruyi^{1,2} Yu Tao¹ Hou Xiaohua¹ Duan Jiayou¹ Li Hua¹

(¹Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China)

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

Abstract The alignment method of off-axis three-mirror anastigmat combines initial positioning and computer-aided alignment. During manufacturing, due to the limit of testing methods, the off-axis fabrication and off-axis angle cannot be measured precisely. The initial positioning based on the manufacturing off-axis parameter can bring large initial aberration, which can not be converged when using computer-aided alignment. The optical path is analyzed based on the auto-collimation principle, and the mathematic relationship between the position of off-axis mirror and the reflected image is derived. A system based on the relationship is given to measure the off-axis fabrication and off-axis angle, it includes the right angle plate of high precision, linear guides of high precision, the special center orientation tool, internal focusing telescope and self-standardized micro-flat optical tube. The measurement accuracy of off-axis fabrication and off-axis angle is ± 0.05 mm and $\pm 10''$ respectively.

Key words remote sensing; off-axis aspheric mirror; off-axis fabrication; off-axis angle; special center orientation tool

OCIS codes 220.1140; 080.1010

1 引言

离轴三反系统^[1-7]因其无中心遮拦, 进入光学系统的光通量较大, 调制传递函数(MTF)较高, 可以获得较大视场以及接近理想的成像性能和效果, 是光学遥感器的发展方向之一。随着光学加工技术的发展, 可以实现各种面形离轴反射镜的高精度加工, 但是由于离轴三反系统各反射镜中心光轴部分

缺失, 给装调造成了困难, 如何实现离轴三反系统的高精度精密装调对于离轴三反系统的有效应用是至关重要的, 目前离轴三反系统的装调主要采用初始定位与计算机辅助装调^[8-10]相结合的方法。

加工过程中由于检测手段的限制, 使得离轴量以及离轴角的控制精度较低, 离轴量的控制精度大约为 0.5 mm, 离轴角的控制精度大约为 30''。实际

收稿日期: 2013-09-13; 收到修改稿日期: 2013-10-24

基金项目: 国家自然科学基金(40805013)

作者简介: 张学敏(1986-), 女, 硕士, 助理工程师, 主要从事光学装调及检测方面的研究。

E-mail: zhangxuemin0325@gmail.com

* 通信联系人。E-mail: ruyiwei@opt.ac.cn

装调过程是根据加工提供的离轴量参数并以其背部平面为基准进行反射镜初始定位,离轴量误差以及角度误差 $\Delta\alpha$ 引入较大的初始像差,此时使用计算机辅助装调是无法收敛的,因此如何精确测量离轴量以及离轴角并在装调中进行校正是实现离轴反射镜光学系统精密装调的关键。

本文基于自准直原理,进行反射光路分析,得出离轴反射镜位置与反射像位置的数学关系,并基于以上数学关系提出一种可精确测量离轴反射镜离轴量以及离轴角的系统,根据测量结果可实现离轴反射镜的精确定位,定位精度分别约为 $\pm 0.05\text{ mm}$ 和 $\pm 10''$ 。

2 离轴量与离轴角

离轴非球面镜区别于传统的轴对称非球面光学元件,其面形参数不仅有顶点曲率半径、二次非球面系数还有离轴量、离轴角,其中离轴量和离轴角是离轴非球面镜加工以及装调过程中一个很重要的控制参数,如图1所示,图中B为离轴反射镜的中心, d

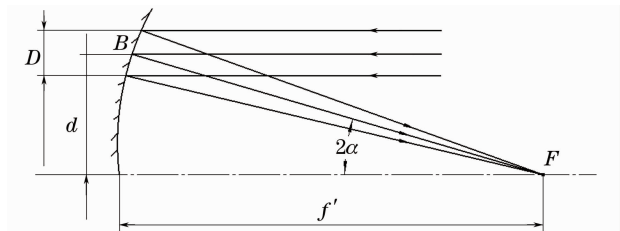


图1 离轴非球面镜参数示意图

Fig. 1 Parameter diagram of off-axis aspheric mirror

为B点到原光轴的距离,即离轴量, F 为焦点, 2α 为离轴角, f' 为母镜的焦距。

离轴反射镜的加工方法目前有两种,一种是从大的轴对称母镜中切出,一种是单件加工^[11]。离轴量误差引入的面形误差主要是像散和彗差,分别与离轴量呈线性和平方关系^[12]。此外,在实际光学加工中,由于离轴角误差 $\Delta\alpha$ 的存在,离轴非球面反射镜的背部平面与其自身光轴是不垂直的,即有一误差 $\Delta\alpha$ 存在,但结构设计以离轴非球面反射镜的背部平面为装配基准,以此基准装配完成的离轴反射镜组件光轴与系统光轴也存在角度误差 $\Delta\alpha$,使得离轴反射镜光轴与系统光轴存在相对倾斜,引起彗差和像散。

3 光路分析

根据离轴非球面反射镜的光学性质,反射镜每一环带的曲率半径 R 不同,可利用离轴反射镜中心部分环带进行光路分析。建立一基准轴,此基准轴由十字分划板目标1以及十字分划板目标2确定。分析理想情况下的光路走向,理想情况是指离轴非球面反射镜背部平面与基准轴垂直、反射镜理想光轴与基准轴重合且十字分划板中心与离轴反射镜中心点距离等于 R (R 为离轴反射镜中心环带曲率半径),此时十字分划板发出的光线经反射镜反射后原路返回,光路如图2所示,离轴非球面反射镜中心轴与基准轴的距离即为离轴反射镜的离轴量 d 。

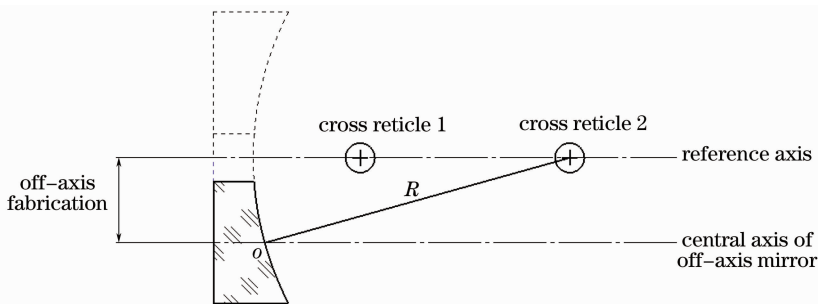


图2 理想光路图

Fig. 2 Ideal optical path

在实际光学加工中,离轴非球面反射镜的背部平面与其自身光轴是不垂直的,即有一个角度误差 $\Delta\alpha$ 存在。当离轴反射镜向下平移距离 x 且离轴反射镜光轴与基准轴夹角为 α 时, α 为正值(基准轴转向离轴反射镜光轴,逆时针为正,顺时针为负),作图分析得出其十字分划板目标2的反射像点变化量 $y=2(x+R\sin\alpha)$,光路如图3所示。

当基准轴向上平移距离 x 且与离轴反射镜光

轴夹角为 α 时, α 角为正值,作图分析得出十字分划板目标2的反射像点变化量 $y=2(x-R\sin\alpha)$,光路如图4所示。

4 离轴量测量系统

基于以上数学关系提出一种可精确测量离轴反射镜离轴量以及离轴角的系统。该系统包括:1)高精度 90° 直角弯板;2)高精度直线导轨;3)离轴反

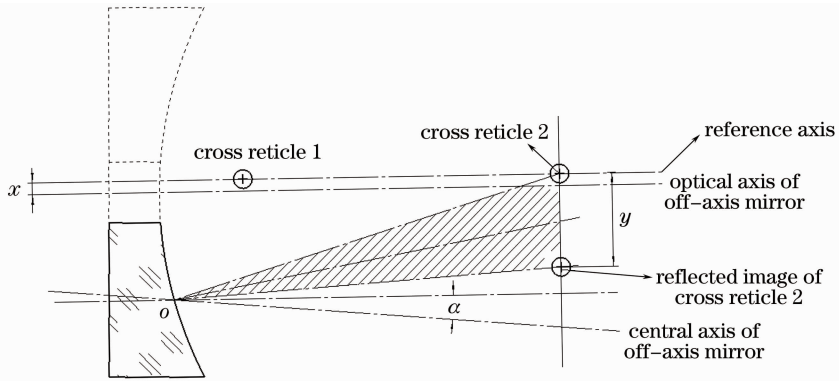


图 3 离轴反射镜光轴与基准轴夹角 α 为负时的光路图

Fig. 3 Optical path when the axis of off-axis mirror and reference axis has a negative angle

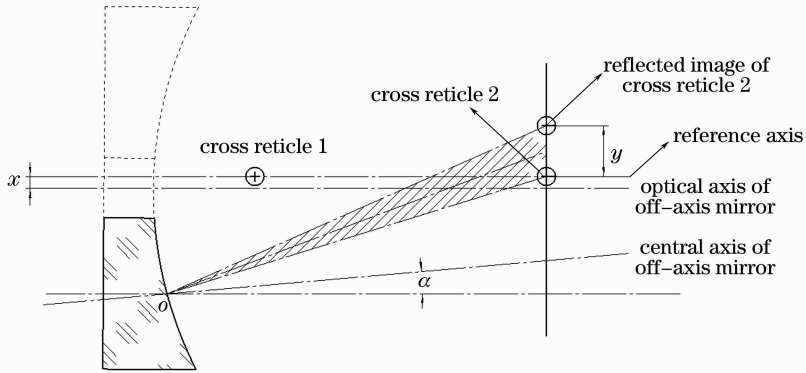


图 4 离轴反射镜光轴与基准轴夹角 α 为正时的光路图

Fig. 4 Optical path when the axis of off-axis mirror and reference axis has a positive angle

射镜；4)中心定位特种工装 1；5)中心定位特种工装 2；6)内调焦望远镜；7)自准直测微平行光管。如图 5 所示。

4.1 中心定位特种工装

图 6 为中心定位辅助工装的总体示意图，该辅

助工装由底座、转轴支架、连接板、分划板框构成。底座的外圆与平板上的内孔高精度研磨配合，保证配合间隙小于 0.01 mm，并通过螺孔与平板连接。转轴支架与连接板为过渡工装，转轴支架的外圆与底座上的内孔高精度研磨配合，保证配合间隙小于

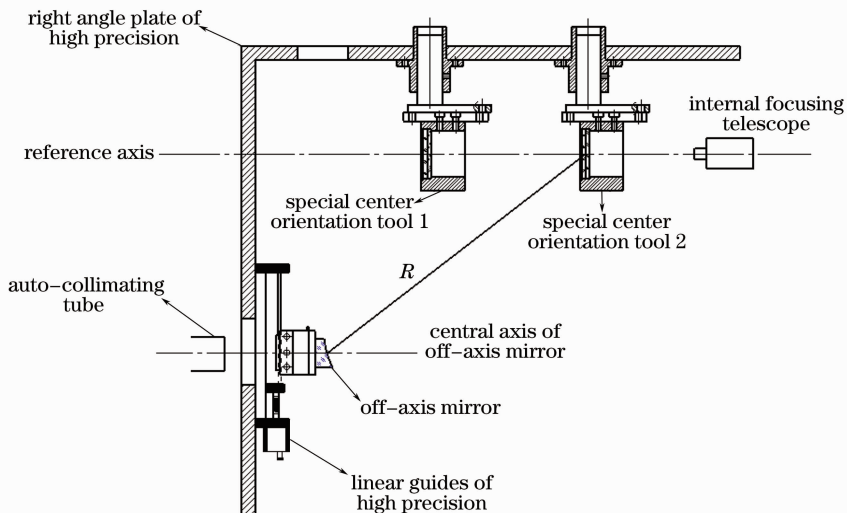


图 5 离轴量测量系统原理图

Fig. 5 Principle diagram of off-axis fabrication measuring system

0.01 mm, 并与连接板通过螺孔进行连接定位, 且连接平板相对于转轴支架在 x 、 y 方向有 0.5 mm 的平移调整余量。分划板框中装有分划板, 并通过螺孔

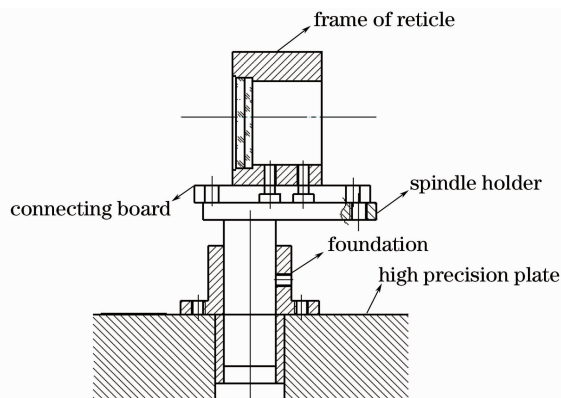


图 6 中心定位特种工装总体示意图

Fig. 6 Diagram of special center orientation tool

与连接平板连接定位。曲率半径中心定位特种工装通过保证分划板十字丝中心与平板内孔中心的高精度重合, 得到各个反射镜的可见球心, 因此如何实现十字分划板十字丝中心与平板内孔中心的高精度重合是至关重要的。

为了精确实现分划板十字丝中心与平板内孔中心的高精度重合, 采取旋转找中心的方法进行调整, 图 7 为中心调整原理示意图, 若分划板十字丝中心与转轴中心重合, 那么当十字分划板旋转 180° , 此时的十字分划板在显微镜中的成像清晰度应与旋转前一致。自准直光管的作用是监视十字分划板旋转角度是否为精确的 180° , 若十字分划板未准确旋转 180° , 那么十字分划板旋转前后在自准直光管中的自准像将不重合。

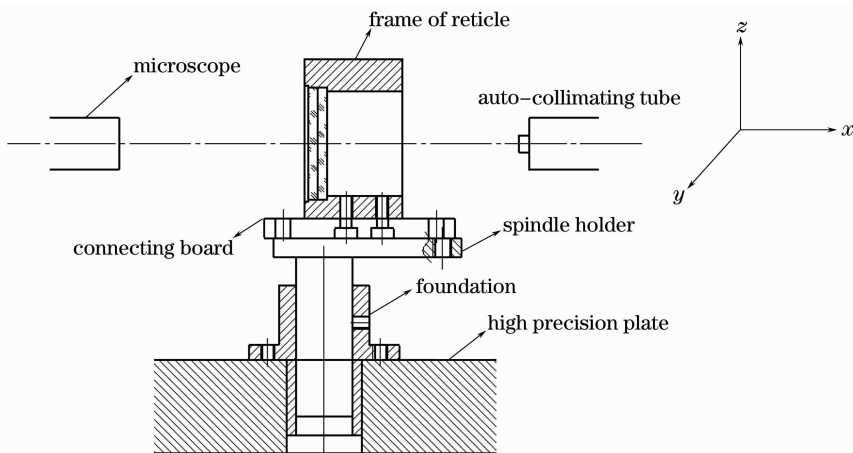


图 7 中心调整原理示意图

Fig. 7 Principle diagram of centering adjustment

具体调整步骤为:

- 1) 十字分划板光轴朝向 x 轴, 调整高精度显微镜的位置, 使得显微镜视场中心瞄准分划板中心;
- 2) 调整自准直测微平行光管的位置, 使得自准直平行光管与分划板自准直;
- 3) 分划板旋转 180° , 通过自准直平行光管监视分划板 180° 精确旋转, 测量分划板旋转 180° 后其中心在显微镜中的调焦变化量 Δ_1 , 将十字分划板向 x 方向调整 $\Delta_1/2$, 反复几次, 调整至分划板旋转其 x 方向的中心变化量小于 0.01 mm;
- 4) 分划板旋转 90° , 十字分划板光轴朝向 y 轴, 调整高精度显微镜的位置, 使得显微镜视场中心瞄准分划板中心;
- 5) 调整自准直平行光管的位置, 使得自准直平行光管与分划板自准直;
- 6) 分划板旋转 180° , 通过自准直平行光管监视

分划板 180° 精确旋转, 测量分划板旋转 180° 后其中心在显微镜中的调焦变化量 Δ_2 , 将十字分划板向 x 方向调整 $\Delta_2/2$, 反复几次, 调整至分划板旋转其 y 方向的中心变化量小于 0.01 mm;

通过上述调整步骤可实现中心定位工装中心的精确定位, 定位精度可达 0.01 mm。在调整过程中, 由于单个十字分划板[图 8(a)]在旋转 180° 后会

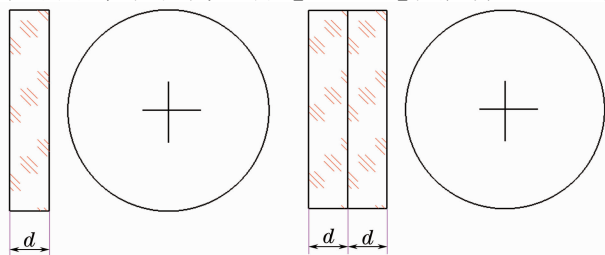


图 8 (a) 单个分划板; (b) 组合分划板

Fig. 8 (a) Single reticle; (b) assembly reticle

产生一定的光程差,光程差大小等于分划板的厚度,使得分划板旋转 180° 后其中心在显微镜中的变化量为光程差与中心偏移量的和,不能有效确定中心偏移量。为了解决这一问题,设计了组合分划板[图8(b)]。该组合分划板由单个分划板及同等大小的平板玻璃构成,从而将十字丝放置在组合分划板的中心,在旋转 180° 后不存在光程差。

4.2 测量过程介绍

1) 将离轴反射镜安装在高精度直线导轨1上,离轴反射镜背面贴十字分划板,十字分划板光轴代表离轴反射镜光轴,在此定义为反射镜替代光轴;

2) 调节测微光管,使得测微光管与反射镜替代光轴自准直,将此时的光管读数设置为零;

3) 调节十字分划板目标2使得十字分划板目标2距离离轴反射镜中心距离为 R , R 为离轴反射镜中心环带的半径值;

4) 将离轴反射镜向远离基准轴方向平移距离 x ,移动内调焦望远镜找到十字分划板经过离轴反射镜的反射像,测出此时内调焦望远镜的移动量 y ;

5) 计算出离轴反射镜光轴与基准轴的夹角 α ;

6) 在测微光管的监视下,将离轴反射镜旋转 α 角;

7) 调节测微光管,使得测微光管与反射镜替代光轴自准直;

8) 重复步骤4)、5)、6)、7),直到 $\alpha=0$;

9) 读取此时测微光管的读数值,此数值即为离轴角的角度差值 α ;

10) 平移离轴反射镜的位置使得十字分划板目标经过离轴反射镜反射后原路返回,即在内调焦望远镜视场中能同时观察到十字分划板目标以及十字分划板目标经过离轴反射镜反射的像,测量此时基准轴距离离轴反射镜端面的距离 d_1 ;

11) 离轴反射镜的实际离轴量 $d = d_1 + D/2$ (D 为离轴反射镜口径),实际光轴与反射镜背面十字分划板夹角为 α 。

通过离轴量测量系统可以实现离轴量以及离轴角的精确测量,测量精度分别为 $\pm 0.05\text{ mm}$ 和 $\pm 10''$ 。此外,对于装配完成的离轴反射镜组件,也可按照上述方法进行离轴反射镜光轴与镜框机械轴之间相对位置关系及角度关系的精确测量。

5 结 论

基于自准直原理,进行反射光路分析,推导出离轴反射镜位置与反射像位置的数学关系,并基于以上数学关系提出了一种可精确测量离轴反射镜离轴

量以及离轴角的系统,根据测量得到的离轴量以及离轴角可实现离轴反射镜的精确初始定位,为采用计算机辅助进行精调打下良好基础,可有效实现离轴非球面反射系统的装调。

参 考 文 献

- 1 Ma Hongtao, Han Bing. Design of heper long focal length in the short structure optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(12): 3503-3505.
马洪涛,韩冰.超长焦距短结构光学系统设计[J].光学学报,2009,29(12):3503-3505.
- 2 Ding Xuezhuan, Wang Xin. Design of four-mirror reflective anastigmat optic system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(2): 319-321.
丁学专,王欣.离轴四反射镜光学系统设计[J].红外与激光工程,2008,37(2):319-321.
- 3 Liang Baowen, Wu Hanping. Design of off-axial TMA infrared optical system for space camera[J]. Infrared Technology, 2013, 4(35): 217-222.
梁宝雯,吴晗平.空间相机离轴三反红外光学系统设计[J].红外技术,2013,35(4):217-222.
- 4 Zhang Xiaofei, Chen Lizi, Du Shaojun. Optical system design of off-axis three-mirror camera with resolution of 1 m[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(6): 134-140.
张晓飞,陈力子,杜少军.1 m分辨率离轴三反相机光学系统设计[J].激光与光电子学进展,2013,50(6):134-140.
- 5 Liang Shitong, Yang Jianfeng. Aberration analysis and design of four-mirror reflective optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(11): 3301-3305.
梁士通,杨建峰.四反射镜光学系统像差分析与设计[J].光学学报,2010,30(11):3301-3305.
- 6 Shigeo Irie, Takeo Watanabe, Hiro Kinoshita, et al.. Development for the alignment procedure of three-aspherical-mirror optics[C]. SPIE, 2000, 3997: 807-813
- 7 Katsumi Sugisaki, Tetsuya Oshino, Katsuhiko Murakami, et al.. Assembly and alignment of three aspherical mirror optics for extreme ultraviolet projection lithography [C]. SPIE, 2000, 3997:751-758.
- 8 Yang Xiaofei, Zhang Xiaohui. Application of Zemax software in alignment of three-mirror off-axis aspherical optical system[J]. Optics and Precision Engineering, 2004, 12(3): 270-274.
杨晓飞,张晓辉.ZEMAX软件在离轴三反射镜系统计算机辅助装调中的应用[J].光学精密工程,2004,12(3):270-274.
- 9 Liu Jianfeng, Long Funian. Study on computer-aided alignment method of off-axis three-mirror system[J]. Optical Technique, 2004, 30(5): 571-576.
刘剑锋,龙夫年.离轴三镜系统计算机辅助装调方法研究[J].光学技术,2004,30(5):571-576.
- 10 Gong Dun, Tian Tieyin. Computer aided alignment of off-axis three-mirror system by using Zernike coefficients[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(8): 1754-1759.
巩盾,田铁印.利用Zernike系数对离轴三反射系统进行计算机辅助装调[J].光学精密工程,2010,18(8):1754-1759.
- 11 Pan Junhua. The Design, Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surfaces[M]. Suzhou: Soochow University Press, 2004.
潘君骅.光学非球面的设计、加工与检验[M].苏州:苏州大学出版社,2004
- 12 Chen Qinfang. Study on the Technique of Off-Axis Mirrors Test [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2011. 8-20.
陈钦芳.离轴非球面反射镜检测技术的研究[D].北京:中国科学院研究生院,2011.8-20.