

离轴非球面反射镜的装调方法

韩娟^{1,2} 段嘉友¹ 陈建军^{1,3} 吴萌源¹

¹ 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119
² 西安电子科技大学物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071; ³ 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为了在光学装调中保证单件离轴非球面的精确定位, 需要对其 6 个自由度进行严格控制, 尤其要对影响离轴非球面装调最重要的离轴量和离轴角这两个自由度加以严格控制。现有离轴非球面加工和检测中, 对这两个特殊参数难以给出精确数值, 从而难以实现离轴非球面的精密光学装调。通过运用离轴反射镜的曲率半径中心像与工装基准光轴之间的变化规律, 采用精密测量法实现对离轴量和离轴角的精确测量。装调实验证明, 利用这一测量法, 光学装调出的离轴非球面可达到离轴量 0.05 mm 和离轴角 10" 级的精度, 检测出的镜面波像差均方根 (RMS) 为 0.02λ (λ = 632.8 nm), 使该离轴非球面获得了理想的像质, 实现了精确装调。

关键词 测量; 离轴非球面反射镜; 光学装调; 曲率半径中心像; 离轴量; 倾斜角

中图分类号 TH703 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.s122002

An Alignment Method of Off-Axis Aspheric Mirror

Han Juan^{1,2} Duan Jiayou¹ Chen Jianjun^{1,3} Wu Mengyuan¹

¹ Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China
² School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China
³ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In order to realize the accurate position of an off-axis aspheric surface in optical alignment, it is necessary to strictly control the six degrees of freedom, especially the two degrees of freedom that affect lateral displacement and tilts angle. But it's very difficult to obtain the above two accurate values using general off-axis aspheric surface measurement technique, so it's same difficult to realize its precise alignment. The article introduces a new method that applying the close relationship between the center image of radius of curvature and the optical axis of the self-regulating instrument, and by using the precise measurement, the purpose of measuring lateral displacement and tilts angle is achieved. Experiments show that the error of lateral displacement is less than 0.05 mm, the error of tilts angle is less than 10", and the wave aberration root mean square is equal to 0.02λ (λ = 632.8 nm). It can obtain the perfect image and realize the precise alignment of the off-axis aspheric mirror by using this method.

Key words measurement; off-axis aspheric mirror; optical alignment; center image of radius of curvature; lateral displacement; tilts angle

OCIS codes 220.1140; 220.1250; 120.4630; 100.2960

1 引 言

随着加工检测技术和装调技术不断进步, 离轴非球面元件在光学系统中的应用越来越广泛。它不但简化了光学系统、提高系统的成像质量还缩小了光学设备仪器的外形尺寸、减轻重量, 拓宽了视场覆盖面, 避免了光学系统的遮拦问题, 因此离轴非球面在天文仪器和空间探测光学系统中得到了广泛的应用^[1-4]。

在设计出高性能的离轴反射光学系统后, 光学系统的装调是实现系统高成像质量必不可少的环节^[5-6]。由于离轴非球面是非球对称和非旋转对称的^[7-8], 导致其光学装调难度比共轴系统大幅增加^[9-10]。为了提高装调精度, 需要对其定位严格控制, 特别是对于大型的离轴非球面和拼接镜面来说, 装调出高精度的离轴非球面镜更需要对离轴量和离轴角进行精确测量。针对这一问题, 本文通过搭建

收稿日期: 2013-09-01; 收到修改稿日期: 2013-10-01

基金项目: 国家 973 计划(2009CB724006)

作者简介: 韩娟(1977—), 女, 硕士研究生, 工程师, 主要从事光学仪器装调方面的研究。E-mail: hanjuan7927@sohu.com

导师简介: 段嘉友(1941—), 男, 研究员, 主要从事光学仪器装调方面的研究。E-mail: duanjy1224@sohu.com

精密装调平台,总结出离轴非球面反射镜的曲率半径中心像与工装基准光轴之间的变化规律,采用精密测量法实现了对其高轴角的实际测量。

2 对离轴非球面反射镜装调提出的新方法

2.1 现有离轴非球面反射镜加工数据对光学装调的局限性

离轴非球面在加工和检测中,关键在于其在保持很好的面形时,离轴量和离轴角值难以控制。而加工者提供的离轴量和离轴角一般分别在毫米级和角分级,对装调来说只能作为参考。若要作为装调数据精度不够,这就给实际装调带来了不小的位置不确定性。利用计算机辅助装调技术,通过采用干涉检验法检验离轴非球面反射镜面形的办法对光学件进行精确定位也是有局限性的。

1) 各光学元件的位置接近理论值时,是一同轴系统。装调后,不会由于光学元件大的失调量引起超常的初级像差。但在装调初期通常接近理论值比较困难,会出现超常的初级像差,造成面形检测困难^[11]。根据计算机辅助装调数学模型的矩阵形式得

$$A\Delta X = \Delta F, \quad (1)$$

式中 A 为灵敏度矩阵, ΔX 为失调量, ΔF 为校正对象测得的实际值与设计值之差。针对高成像质量的离轴光学系统的计算机辅助装调问题,许多学者都提出利用泽尼克系数建立灵敏矩阵求解失调量,但这种方法只有在泽尼克系数和失调量存在线性关系的前提下才能准确求解^[12]。超出近似线性区,用它来指导装调往往不能使 ΔF 有所降低,并且 A 条件

直接影响调整变量收敛性^[13]。若收敛慢或不收敛,就无法用计算机辅助装调给出指导性的值,装调将无法进行。

2) 一个系统各光学元件装调到接近理论值位置,各视场与相对视场中心的其对称点像质是相同的。即便是用计算机辅助装调对个别光学元件进行了补偿调整,也不会丧失对称视场具有像质对称这一特性。但如果各光学元件失调量较大,直接采用计算机辅助装调和像差补偿法,装调工作量大,且会产生中心视场或某一视场位置的像质得到了补偿,而视场其他位置与其对称位置的像质却是不相等的现象。这种系统装调是不成功的。

2.2 采用曲率半径中心像对离轴量和离轴角的装调新方法

单件离轴反射镜的装调中,需要确定它的 6 个自由度^[14-15],即沿 XYZ 轴的移动和绕 XYZ 轴的转动。如图 1 所示,沿 Z 轴移动影响各光学件的间隔,对于单个光学件不予考虑;沿 Z 轴转动为镜面旋转,产生的表象是其边缘高低点的变化;沿 Y 轴移动为镜面相对母镜高低方向的变化;沿 X 轴转动为子镜镜面相对母镜镜面前后的倾斜,这 4 个自由度很容易通过精密设备和工装加以调整。其余两个自由度即沿 Y 轴转动和沿 X 轴移动分别影响镜子的离轴角和离轴量。

鉴于离轴反射镜加工数据对光学装调的局限性,通过运用离轴非球面反射镜的曲率半径中心像与工装基准光轴的变化规律,就可以确定离轴量和离轴角这两个离轴二次曲面特殊参数。

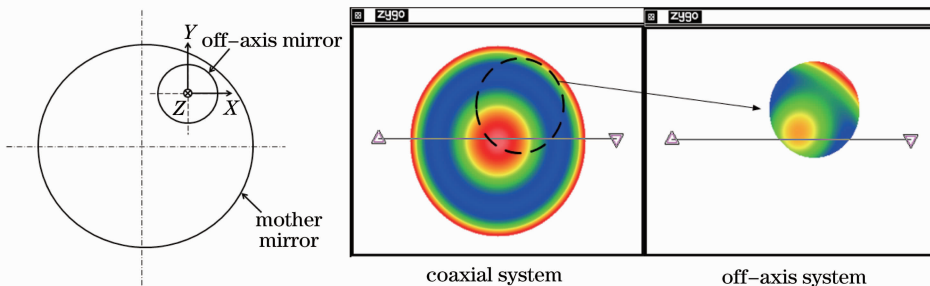


图 1 加工离轴非球面反射镜时母镜与离轴非球面镜的坐标示意图

Fig. 1 Coordinate picture between mother mirror and off-axis mirror while manufacturing off-axis aspheric mirror

3 离轴非球面反射镜的装调原理

3.1 离轴非球面反射镜的曲率半径中心像点位置的确定

图 2 为一个离轴非球面反射镜,它的镜面曲线

与光轴焦点设为直角坐标原点, P 为其上一任意点, PC_y 为该点的法线, C_y 是法线与 X 轴的交点, C 是曲线顶点曲率中心。记做 $\overline{CC_y} = \Delta R$, 称为法线像差^[16],用解析几何方法求得

$$\Delta R = Xe^2, \quad (2)$$

式中 e^2 为非球面曲线的形状参数,非球面方程

$$y^2 = 2R^0X - (1 - e^2)X^2, \quad (3)$$

式中 R^0 为曲线定点的曲率中心,当离轴量 $H(y)$ 给定后,根据(2)、(3)式可以解出对应离轴量 H 的 X

值和 ΔR 值,从而得到不同的法线位置,也就是该离轴量时非球面和光轴的交点 $C_y = R^0 + \Delta R$ 。通过该交点可确定其曲率半径中心像位置,也可通过该点确定 Zygo 干涉仪检测反射镜面形的位置。

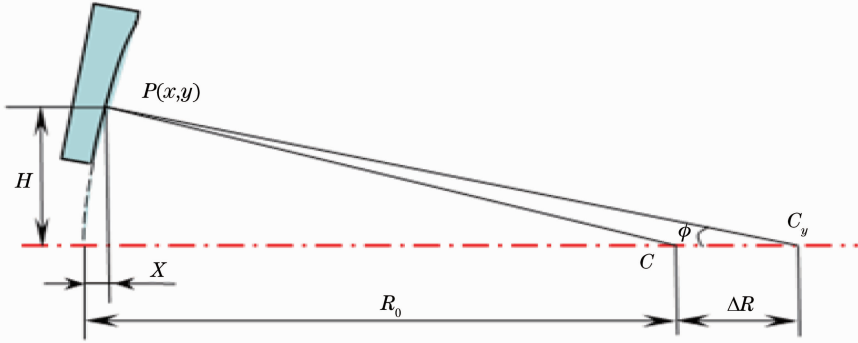


图2 离轴非球面反射镜参数示意图

Fig. 2 Parameter sketch map of an off-axis aspheric mirror

3.2 离轴非球面装调方法判断依据

分三种情况讨论,其中离轴非球面反射镜曲率半径为 R_0 , θ 角为离轴角的误差值,分划板 1 和分划板 2 中心连线规定为被测离轴非球面的理论光轴称为基准光轴。三种情况如图 3 所示。

1) 当离轴反射镜的实际光轴与基准光轴重合时,则分划板 1 十字丝的曲率半径中心像与分划板 1 自身中心重合,如图 3(a)所示。

2) 当离轴反射镜的实际光轴向上平移 Δ 值时,则分划板 1 十字丝中心的曲率半径中心像在 $1''$ 处,

如图 3(b)所示。其中分划板 1 十字中心到平移后的实际光轴 $1'$ 处的距离 $L_{11'} = \Delta$,分划板 1 十字丝中心到其曲率半径中心像的距离 $L_{11''} = 2\Delta$ 。

3) 当离轴反射镜实际光轴与基准光轴既有平移误差又有倾角误差 θ 时,实际光轴向上平移 Δ 时,则分划板 1 的曲率半径中心像在 $1''$ 处,如图 3(c)所示。其中分划板 1 十字中心到平移后的实际光轴 $1'$ 处距离 $L_{11'} = \Delta$,分划板 1 十字中心到曲率半径中心像距离 $L_{11''} = 2\Delta + 2R_0 \sin \theta$ 。

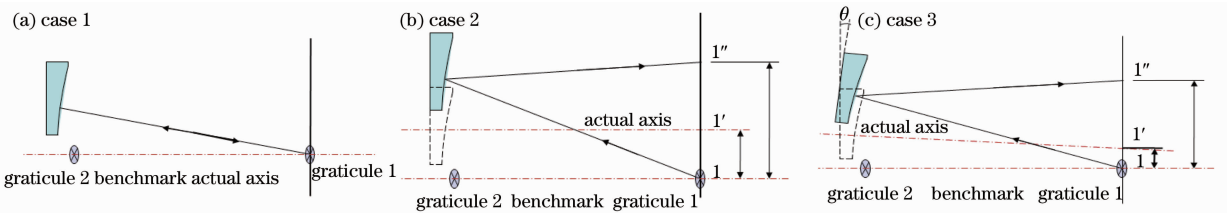


图3 曲率半径中心像与基准光轴的关系图

Fig. 3 Relationship between radius of curvature image and optical axis in the self-regulating instrument

3.3 离轴非球面反射镜装调方法

实践中采用了一块离轴非球面反射镜,通过测量法标定离轴量 H 和离轴角 φ 的真实值。据此建立了一个离轴装调平台,方法原理如图 4 所示。

根据离轴非球面反射镜装调的测量法原理,得到了离轴反射镜实际光轴相对装调基准光轴倾斜方向、离轴角和离轴量的判断依据。在离轴装调时,要先消除离轴角误差,使实际光轴与装调基准光轴平行后,再消除平移误差,使实际光轴与装调基准光轴重合。

1) 倾斜方向

若离轴反射镜实际光轴处于逆时针旋转与基准光轴平行的状态时,将离轴反射镜实际光轴向上(向下)移动 Δ 值,曲率半径中心像就会远离基准光轴上的分划板 1 中心;若离轴反射镜实际光轴处于顺时针旋转与基准光轴平行的状态时,将离轴反射镜实际光轴向上(向下)移动 Δ 值,曲率半径中心像就会靠近基准光轴上分划板 1 的中心。这样就确定了两光轴的位置关系。

2) 离轴角误差

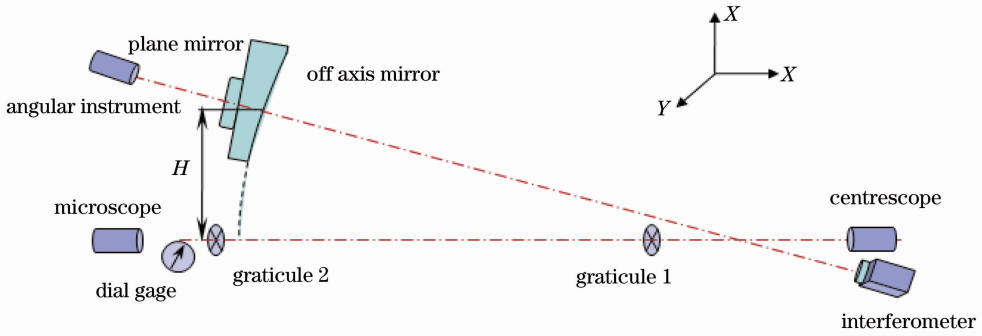


图 4 离轴非球面反射镜装调平台示意图

Fig. 4 Adjusting plat form of an off-axis aspheric mirror

完成步骤 1)后,将离轴反射镜的实际光轴向上(向下)移动 Δ 值时,曲率半径中心像就向上(向下)移动 L 值,根据 $L = 2\Delta + 2R_0 \sin \theta$,当 $L > 2\Delta$ 时,说明离轴反射镜实际光轴与装调基准光轴有夹角 θ 。若 $L = 2\Delta$ 时,说明两光轴平行,但不一定重合。根据倾斜方向和离轴角误差 θ 值,就可以确定离轴角的准确值。据此调整离轴反射镜位置,消除离轴角误差,使二光轴平行。

3) 离轴量的确定

离轴角消除后,二光轴平行但不重合。假设分划板 1 的十字中心到其曲率半径中心像的距离为 h 时(如图 4 所示坐标方向),若曲率半径中心像在装调基准光轴正方向(X 正向)或负方向(X 负向)时,

则可将离轴反射镜向负方向或正方向平移 $h/2$ 值,就可以将二光轴重合,此时离轴非球面装调到设计理想位置。

步骤 2)和步骤 3)要求反复调整,尽量提高精度,最终调到曲率半径中心像上下变化的拐点,即是实际光轴与装调基准光轴重合处。根据以上判断依据,反之也可以通过装调出现的现象判断离轴非球面实际光轴的方向。

4 装调主要过程

根据实验装调的关键环节,制定了离轴非球面反射镜的装调方案,流程框图如图 5 所示。

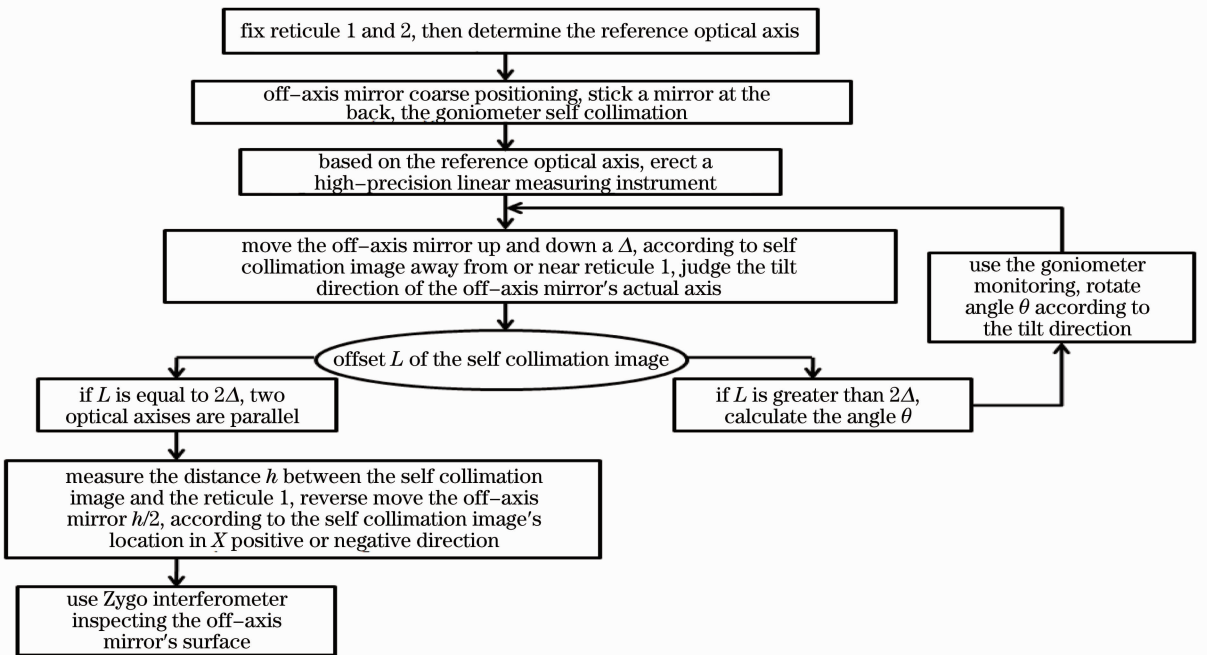


图 5 装调流程图

Fig. 5 Assembling flow chart

5 实 验

为了验证该测量法的可行性和精度,这里通过一块离轴非球面反射镜进行了实验。表 1 是该离轴非球面反射镜参数。离轴非球面反射镜实物如图 6

表 1 离轴非球面反射镜参数表

Table 1 Parameters of the off-axis aspheric mirror

R_0 /mm	Equation for a surface	Coefficient K of curved surface	Lateral displacement /mm
1566.47	$Z = \frac{Y^2}{R[1 + \sqrt{1 - (1+K)Y^2/R^2}]}$	-3.056	95.26

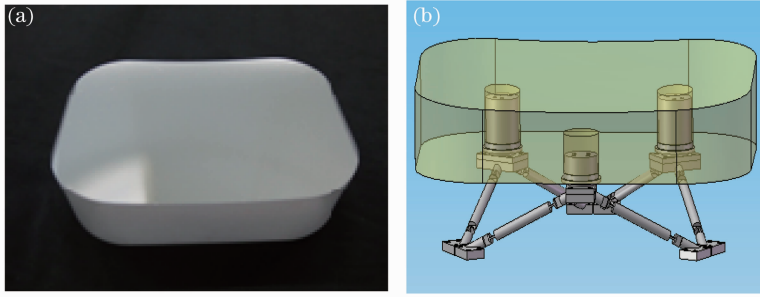


图 6 (a)离轴非球面镜实物图; (b)光机结构图

Fig. 6 (a) Picture of the off-axis aspheric mirror; (b) construction plan

表 2 装调过程部分数据表

Table 2 Part of the alignment process data

Δ /mm	Direction	Direction	Movement of image /mm	Error θ of tilts angle /(")
0.01	+X	Counterclockwise	0.25	14.68
0.02	+X	Counterclockwise	0.18	8.94
0.01	+X	Counterclockwise	0.10	5.1
0.01	+X	Counterclockwise	0.09	4.5

装调过程中发现装调量无法达到期望值。根据方法原理和误差理论,对误差来源做以下分析。首先对离轴量来说,装调过程中两分划板中心确定基准光轴采用内调焦望远镜进行穿心,对于 $R_0 = 1566.47$ mm 的离轴镜,穿心精度大约为 0.03 mm;进行直线测量的百分表精度为 0.01 mm;在测量离轴量时采用分划板中心代替离轴镜中心,离轴镜中心的定位偏差引起分划板中心的误差大约 0.03 mm 以及显微镜读数误差等。综合起来,该镜离轴量的

精度约为 0.05 mm。再对离轴角误差来源分析,对相距 1 m 的分划板 1、2 穿心定基准轴时,由于穿心精度约为 0.03 mm,对应角度误差能带来 $6'' \sim 7''$ 的误差;通过经纬仪旋转定测角仪位置带来约 $2''$ 误差;测角仪的精度为 $1''$;离轴镜在旋转角度时采用的旋转支架的旋转误差等,综合得到该镜的离轴角误差约为 $10''$ 。通过误差分析,发现现有搭建设备平台适于 $R_0 = 1000$ mm 左右的离轴镜,若要满足其他不同 R_0 要求,离轴镜需要选择不同的装调设备

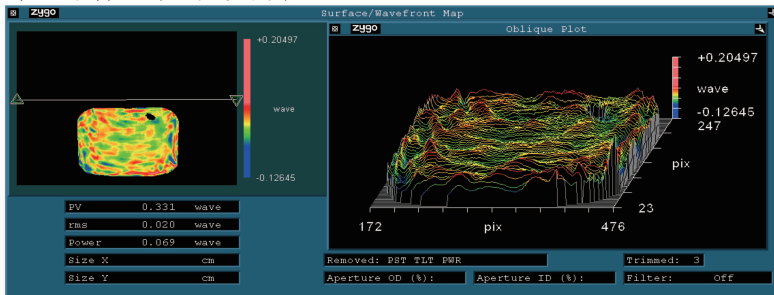


图 7 装调后离轴非球面反射镜面形图

Fig. 7 Morphology pictures of the off-axis aspheric mirror after alignment

平台。

使用上面描述的测量法,经过反复装调最终得到该离轴非球面的面形干涉结果,如图 7 所示。检测出的镜面均方根(RMS)为 0.02λ ($\lambda=632.8\text{ nm}$)。对于单块离轴非球面反射镜可以通过这一测试法得到离轴量和离轴角的较高精度真值。

6 结 论

在离轴非球面反射镜装调中,该方法在实际装调中不但可以指出初装时离轴非球面实际光轴与理论光轴的位置关系,还可以得到离轴量和离轴角这两个离轴二次曲面的特殊参数,并据此对单个离轴非球面进行高精度定位,证明了该方法的可行性和精确性。通过本方法完成单个离轴反射镜装调后,可以利用干涉仪检验反射镜面型数据。了解装调后的镜面质量,提高离轴非球面反射镜的装调效率,为下一步离轴系统的装调或大口径子孔径拼接等作好准备。

参 考 文 献

- 1 Chen Haobo, Wang Yingwei, Feng Zhijing. Optical system design of space camera with large F number and long focal length [J]. *Optical Technique*, 2004, 30(3): 311–314.
程灏波, 王英伟, 冯之敬. 光学非球面二次曲面常数及顶点曲率的研究 [J]. *光学技术*, 2004, 30(3): 311–314.
- 2 Zhou Yang, Li Xinnan. A lgorithm for the measurement of the parameters of off-axis conic surface [J]. *Astronomical Research & Technology*, 2008, 5(3): 307–311.
周 洋, 李新南. 离轴二次曲面面型参数测量归算方法的研究 [J]. *天文研究与技术*, 2008, 5(3): 307–311.
- 3 Zheng Ligong, Xue Donglin, Zhang Xuejun. Computer aided alignment for off-axis asphere nulltest [C]. *SPIE*, 2005, 5638: 319–323.
- 4 Liu Xiaomei, Xiang Yang. Research and design of telecentric off-axis three-mirror system with real entrance pupil [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(11): 1122002.
刘晓梅, 向 阳. 具有实入瞳的远心离轴三反系统研究与设计 [J]. *光学学报*, 2011, 31(11): 1122002.
- 5 Yang Xiaofeng, Zhang Xiaohui, Han Changyuan. 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, 张小辉, 韩昌元. 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.
- 6 Han Juan, Duan Jiayou, Chen Jianjun, *et al.*. An alignment of

- primary and secondary mirrors for optical system in large telescopic [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(7): 0716001.
韩 娟, 段嘉友, 陈建军, 等. 大口径望远镜系统中主次镜系统的装调方法 [J]. *中国激光*, 2012, 39(7): 0716001.
- 7 Li Junfeng, Song Shumei. Influence of adjustment error on wavefront aberration in off-axis paraboloid test [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(8): 1763–1770.
李俊峰, 宋淑梅. 离轴抛物镜检测中调整误差对波前畸变的影响 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(8): 1763–1770.
 - 8 Li Jie, Wu Fan, Wu Shibing, *et al.*. Using a laser tracker to measure the surface of off-axis aspheric mirror during grinding [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 0112002.
李 杰, 伍 凡, 吴时彬, 等. 使用激光跟踪仪测量研磨阶段离轴非球面面形 [J]. *光学学报*, 2012, 32(1): 0112002.
 - 9 Zhang Bin, Han Changyuan. Study on optimization of computer-aided alignment of a three-mirror off-axis aspherical optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 21(1): 54–58.
张 斌, 韩昌元. 离轴非球面三反射镜光学系统装调中计算机优化方法的研究 [J]. *光学学报*, 2001, 21(1): 54–58.
 - 10 Yang Xiaofeng, Zhang Xiaohui, Han Changyuan. Alignment of a three-mirror off-axis aspherical optical system by using gradual aberration optimization [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(1): 115–120.
杨晓飞, 张小辉, 韩昌元. 用像差逐项优化法装调离轴三反射镜光学系统 [J]. *光学学报*, 2004, 24(1): 115–120.
 - 11 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.
陈钦芳, 李英才, 马 臻, 等. 离轴二次非球面反射镜无像差点法检测的误差分离技术 [J]. *光学学报*, 2011, 31(2): 0222001.
 - 12 Luo Miao, Zhu Yongtian. Application of computer-aided alignment to off-axis cassegrain system [J]. *Optical Technique*, 2008, 34(4): 514–517.
罗 淼, 朱永田. 计算机辅助装调方法在离轴卡塞格林系统中的应用 [J]. *光学技术*, 2008, 34(4): 514–517.
 - 13 Liu Jianfeng, Long Funian, Zhang Wei. 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, 张 伟. 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.
 - 14 Chen Qinfang. Study on the Technique of Off-Axis Mirrors Test [D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2011.
陈钦芳. 离轴非球面反射镜检测技术研究 [D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2011.
 - 15 Yang Xiaofei, Han Changyuan. Study on decision of alignment priority using mirror tolerance in a three mirror off-axis optical system [J]. *Optical Technique*, 2005, 31(2): 173–176.
杨晓飞, 韩昌元. 利用离轴三反镜光学系统确定各镜的装调公差 [J]. *光学技术*, 2005, 31(2): 173–176.
 - 16 Pan Junhua. The Design, Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surfaces [M]. Suzhou: Soochow University Press, 2004. 5–6.
潘君骥. 光学非球面的设计、加工及检验 [M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004. 5–6.

栏目编辑: 韩 峰