

文章编号 1004-924X(2017)06-1458-06

可调焦离轴三反光学系统的装调

张学敏¹, 宋 兴^{1,2}, 侯晓华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. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:针对离轴反射光学系统的精密装调问题,提出了一种高精度空间交互测量以及基准传递系统,可实现调焦角度与系统光轴的高精度角度定位。该系统口径为 450 mm,可实现 0.5 km 至无穷远的调焦,调焦角度精确定位后,只需调整无穷远处离轴三反光学系统的波像差满足要求,即可保证系统各个调焦位置处的波像差均满足设计要求,大大提高了装调效率。装调实验结果表明,无穷远处系统的波像差结果为 0.09λ , 1.5 km 处系统的波像差为 0.1λ , 2.5 km 处系统的波像差为 0.11λ , 0.5 km 处系统的波像差为 0.2λ , 均优于设计要求。

关键词:离轴光学系统;反射式光学系统;光学装调;可调焦;基准传递

中图分类号:TH74;O435.2 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20172506.1458

Alignment of focus-adjustable off-axis reflective optical system

ZHANG Xue-min¹, SONG Xing^{1,2}, HOU Xiao-hua¹, LI Hua^{1*}

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: lihua@opt.ac.cn

Abstract: A space interactive measurement and datum transmission system with high accuracy was proposed, aiming at precise alignment problem of off-axis reflective optical system. Therefore the highly accurate angle location of focusing angle and systemic optical axis was realized. The diameter of the system was 450 mm, and focus-adjustable range was from 0.5 km to infinity. After accurate positioning of focusing angles, only wave aberration of off-axis three-mirror optical system in infinite position needed to be adjusted to satisfy requirements, and the wave aberrations of all focus position in the system could be guaranteed to accord with design requirements, thus improving adjustment efficiency greatly. The experimental results show that the wave aberrations of the system in infinite position, 1.5 km, 2.5 km and 0.5 km are 0.1λ , 0.11λ , 0.5km and 0.2λ respectively, which are all better than design requirements.

Key words: off-axis optical system; reflective optical system; optical alignment; focus-adjustable; datum transmission

收稿日期:2016-10-13;修订日期:2016-12-06.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 40805013)

1 引 言

随着空间分辨率需求的不断提高,光学系统从轴对称系统发展为离轴反射系统^[1-8],并且随着光学设计与制造技术的不断发展,离轴光学系统的成像质量也越来越好。目前,装调技术是限制离轴光学系统应用的主要瓶颈,从现有的文献资料可以看出,离轴光学系统的装调技术还不成熟,因此对于离轴光学系统装调技术的研究十分迫切。

可调焦式离轴光学系统通过移动次镜组件在光学系统中的位置实现系统焦距的调整,相比定焦离轴光学系统其装调难度更大。为了保证各个调焦位置的成像性能,本文提出了一种高精度空间交互测量以及基准传递系统,可实现调焦角度与系统光轴的高精度角度定位。调焦角度精确定位后,只需调整无穷远处离轴三反光学系统的波像差,即可保证系统各个调焦位置处的波像差均满足设计要求,从而大大提高了装调效率。

2 系统形式

如图 1 所示,离轴光学系统由主镜、次镜和折轴镜组成,系统口径为 450 mm,调焦范围为 0.5 km 到无穷远,2.5 km 轴上的系统波像差优于 $\lambda/9$ 、1.5 km 轴上的系统波像差优于 $\lambda/10$ 、0.5 km 轴上的系统波像差优于 $\lambda/5$ 。为了保证各个调焦位置的成像质量,调焦平台角度与系统光轴夹角的要求为 $(19.335 \pm 0.1)^\circ$ 。因此,如何正确

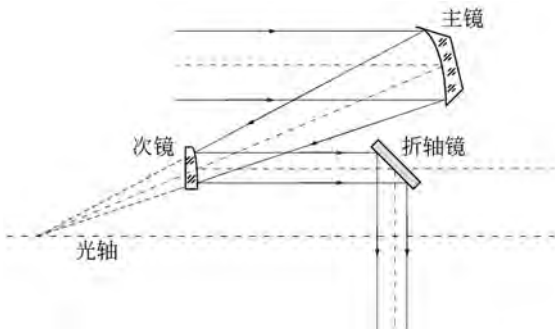


图 1 离轴系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of off-axis optical system

确定调焦平台的运行角度并正确实现主次镜的空间原位调整是该系统装调的两大要点。

3 原位装调实现

3.1 系统光轴指向确定

本文提出基于平面镜自准直的共基准调整方法来确定系统的光轴指向,并基于此进行其他反射镜的原位调整。基于平面镜自准直的共基准调整是指通过平面镜进行空间基准转换从而实现离轴光学系统各个反射镜的共基准调整。该调整技术基于两个条件:第一,主反射镜采用无像差点法检测,利用平面反射镜实现无像差点法检测,从而将主反射镜的光轴基准传递到平面反射镜上;第二,光学系统其他反射镜通过测量量子系统波像差的方法进行调整,例如一次像面、二次像面等。

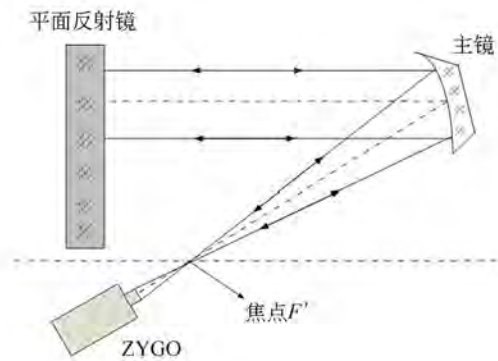


图 2 离轴抛物面镜的无像差点检测

Fig. 2 Surface shape test of off-axis parabolic mirror using aberration-free point principle

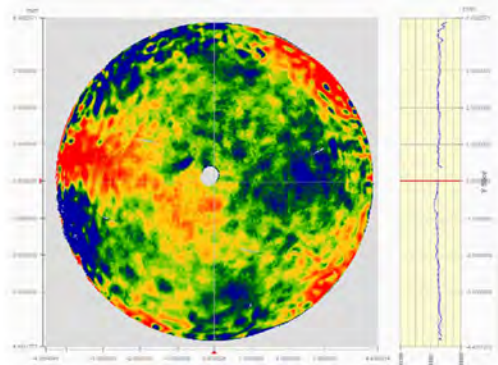


图 3 主镜面形(RMS=0.03λ)

Fig. 3 Surface shape of primary mirror(RMS=0.03λ)

该系统的主反射镜为离轴抛物面反射镜, 曲率半径为 2 978 mm, 离轴量为 471 mm, 采用无像差点法检测, 其面形检测光路如图 2 所示。主镜装配完成后的面形为 $RMS=0.03\lambda$, 如图 3 所示。此时主镜面形最佳, 根据检测光路的特点, 此时平面反射镜与主镜的光轴重合。由此, 将系统光轴传递到平面反射镜上。

3.2 调焦平台运行角度确定

本文设计一分划板工装, 如图 4 所示, 该分划板工装安装在调焦平台上。通过调整分划板工装的左右偏摆以及高低俯仰, 使得自准直经纬仪与它自准直穿心。在调焦导轨调焦的过程中, 如果自准穿心发生变化, 基于光学原理说明此时经纬仪的光轴与调焦平台的调焦运行角度不一致。通过调整调焦平台的调焦角度最终使得自准直分划板在调焦平台运行的过程中始终自准直穿心, 即经纬仪光轴与调焦平台的运行角度保持一致。该步骤的测量精度取决于经纬仪的自准直及穿心精度, 选用 Leika 6000 型号经纬仪进行工作, 其自准精度为 $0.5''$ 、穿心精度为 0.01 mm , 光学系统设计时调焦平台角度与系统光轴的夹角误差为 $\pm 0.1^\circ$, 根据该方法确定的调焦平台角度精度可以满足设计公差要求。

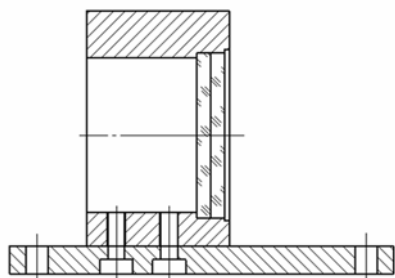


图 4 十字分划板工装示意图

Fig. 4 Cross-sectional diagram of cross-reticle tool

图 5 所示为调焦导轨运行角度调整原理示意图, 经纬仪 1 与平面反射镜自准直, 此时经纬仪 1 的光轴可以代表系统共轴; 经纬仪 2 与调焦平台上安装的十字分划板工装自准直穿心, 并且保证调焦平台在调焦过程中十字分划板工装始终与经纬仪 2 自准直穿心, 此时经纬仪 2 的光轴与调焦导轨运行轴线重合; 通过经纬仪 1、经纬仪 2 以及经纬仪 3 的空间交互测量即可求出次镜调焦平台运行与系统光轴之间的夹角, 通过调整保证该角

度为 $(19.335 \pm 0.1)^\circ$, 从而可以确定调焦平台的运行角度。

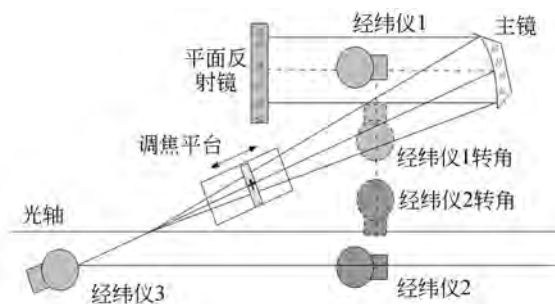


图 5 调焦平台运行角度调整原理示意图

Fig. 5 Schematic diagram of adjustment of platform focusing angle

3.3 次镜高精度初始定位

在精确确定调焦平台的运行角度后, 只需要调整无穷远处主次镜的系统波像差满足要求, 即可确保其他调焦位置处的波像差均符合设计要求。

次镜口径为 $\Phi 100\text{ mm}$, 采用轴对称母镜加工后进行离轴子镜切割加工。在加工过程中, 根据工艺要求对反射镜背面进行高精度的研磨, 保证背面具有良好的平面度, 并可在加工过程中以背面为基准加工次镜, 从而保证次镜的光轴与各自反射镜背面垂直。根据系统的调整原理, 平面反射镜代表了整个系统的光轴, 主镜、次镜的调整都基于将各自的光轴调整至与平面反射镜光轴一致的原则。在次镜装入箱体后, 通过空间基准转换的方法将次镜背面基准与平面反射镜基准联系起来, 如图 6 所示。经纬仪 1 与经纬仪 2 均调整至与大地水平, 经纬仪 1 与平面反射镜自准直, 此时

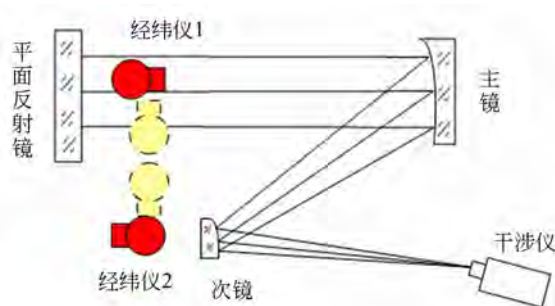


图 6 空间基准转换确定次镜方位以及偏摆

Fig. 6 Determination of pitch and yaw freedoms by spatial datum transformation

经纬仪 1 的光轴与平面反射镜平行,自准直后转 90°与经纬仪 2 对镜,即经纬仪 1 与经纬仪 2 相互自准直穿心,从而保证经纬仪 2 的光轴与经纬仪 1 重合。再按图中光路将经纬仪 2 转 90°与次镜背部自准直,根据空间基准转换可知,此时经纬仪 2 的光轴与平面反射镜的光轴平行,此时只需要调整次镜的方位及偏摆使得次镜背部与经纬仪 2 自准直,即可保证次镜光轴与平面反射镜平行,从而确定了次镜的两个自由度。

3.4 系统精密调整

在确定次镜的俯仰以及偏摆两个空间自由度后,还需确定次镜沿 X 轴、Y 轴的平移以及沿 Z 轴的旋转这 3 个自由度。

失调离轴光学系统的像散^[9-13]为:

$$W = B^3 \left[\underbrace{\frac{1}{2} \sum W_{222} H^2}_{\text{Quadratic}} - \underbrace{\sum W_{222} H \sigma}_{\text{Linear}} + \sum W_{131} H P \right] + \underbrace{\frac{1}{2} \sum W_{222} \sigma^2}_{\text{Constant}} - \underbrace{\sum W_{131} \sigma P}_{\text{Constant}} + 2 \sum W_{040} P^2 \cdot \rho^2 \quad (1)$$

失调离轴光学系统的像散由二次项像散、线性像散和常数项像散组成。其中,线性像散包括二次项像散失调产生的线性像散和系统彗差产生的线性像散;常数项像散包括二次项像散失调产生的常数项像散、系统失调彗差产生的常数项像散及球差产生的常数项像散。

由此可知,如果离轴光学系统在装调过程中将像散调整至最小值,那么就消除了由失调像散、失调彗差以及失调球差引起的像散值,从而在消除像散的同时消除了彗差以及球差,从而实现了全系统的失调调整。基于此结论将像散作为系统调整过程中的唯一变量。

调整次镜的空间位置使得系统像质满足设计要求。次镜沿 Z 轴方向的位移 (D_{Z2}, D_{Z3}) 引起离焦,离焦可以通过像面的移动进行补偿,因此在系统调整过程中不考虑 D_{Z2}, D_{Z3} 。次镜有 4 个调整自变量,分别为次镜沿 X 轴的位移 D_X 以及沿 Y 轴的位移 D_Y ;次镜沿 X 轴的旋转 D_A 以及沿 Y 轴的旋转 D_B 。

以像散 (Z_5, Z_6) 为系统调整变量, D_X, D_Y, D_A, D_B 作为调整自变量,建立系统调整的灵敏度矩阵^[14-21]如表 1 所示,该矩阵为 4×6 矩阵。

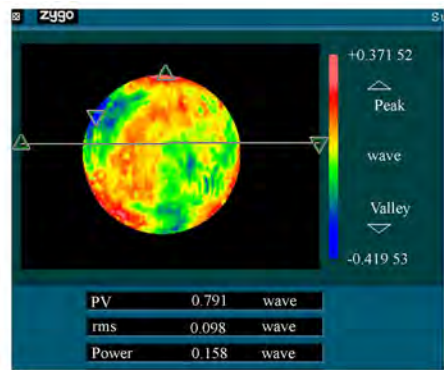
表 1 灵敏度矩阵

Tab. 1 Sensitivity matrix

		D_{X2}	D_{Y2}	D_{A2}	D_{B2}
Field1	Z_5	-0.003 8	0.000 0	0.004 7	0.000 0
	Z_6	0.000 0	0.003 8	0.000 0	-0.004 7
Field2	Z_5	-0.005 7	0.000 0	0.006 2	0.000 0
	Z_6	0.000 0	0.005 7	0.000 0	-0.006 2
Field3	Z_5	-0.005 7	0.000 0	0.006 2	0.000 0
	Z_6	0.000 0	0.005 7	0.000 0	-0.006 2

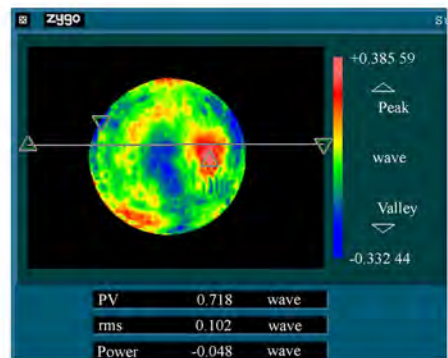
将干涉测量数据代入灵敏度矩阵方程(表 1)进行计算,经过 3 次迭代调整,最终系统波像差 $RMS=0.098\lambda$,如图 7(a)所示,优于设计要求。

通过次镜离焦测量系统在 0.5, 1.5, 2.5 km 处的系统波像差,测量结果分别如图 7(b)、7(c)、7(d)所示,均优于设计要求,从而验证了整个装配工艺方法的正确性。



(a) 无穷远

(a) Infinity



(b) 1.5 km

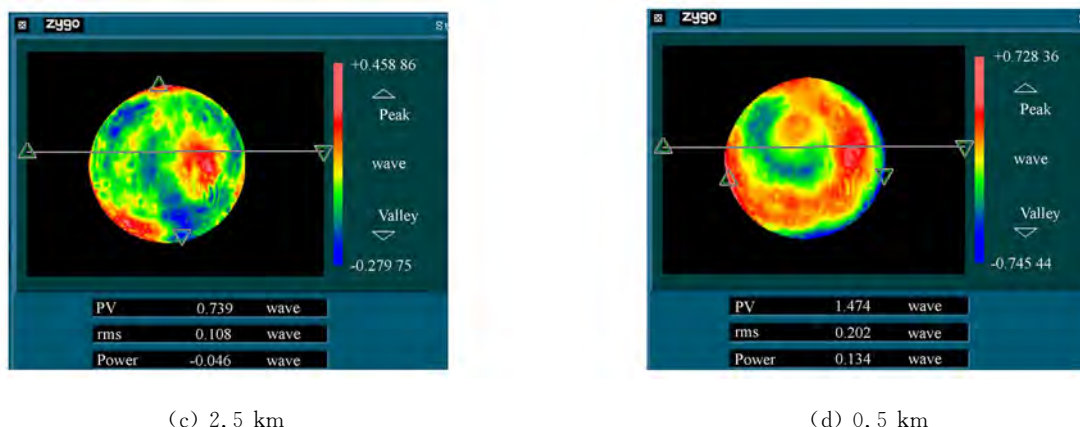


图 7 离轴系统的波像差

Fig. 7 Wavefront aberrations of off-axis optical system

4 结 论

本文提出了一种高精度空间交互测量以及基准传递系统,可实现调焦角度与系统光轴的高精

度角度定位。使用该方法进行可调焦离轴光学系统装调时,只需调整无穷远处离轴三反光学系统的波像差满足要求,即可保证系统各个调焦位置处的波像差均满足设计要求,大大提高了装调效率。

参考文献:

- [1] 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.
ZHANG B, HAN CH Y. 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. (in Chinese)
- [2] 杨晓飞. 三反射镜光学系统的计算机辅助装调技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2005.
YANG X F. *Study on the Computer-aided Alignment of Three-mirror Optical System*[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2005. (in Chinese)
- [3] 杨晓飞, 张晓辉, 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.
YANG X F, ZHANG X H, HAN CH Y. Application of Zemax software in alignment of three-mirror off-axis aspherical optical system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(3): 270-274. (in Chinese)
- [4] 杨晓飞, 张晓辉, 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.
YANG X F, ZHANG X H, HAN CH Y. Alignment of a three-mirror off-axis aspherical optical system by using gradual aberration optimization[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(1): 115-120. (in Chinese)
- [5] 杨晓飞, 韩昌元. 利用离轴三反射镜光学系统确定各镜的装调公差[J]. 光学技术, 2005, 31(2): 173-176.
YANG X F, HAN CH Y. 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. (in Chinese)
- [6] 刘剑峰, 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): 571-573, 576.
LIU J F, LONG F N, ZHANG W. Study on computer-aided alignment method of off-axis three-mirror system[J]. *Optical Technique*, 2004, 30(5): 571-573, 576. (in Chinese)
- [7] 张伟, 刘剑峰, 龙夫年. 离轴三镜系统光学元件间补偿关系研究[J]. 光子学报, 2005, 34(8): 1160-1164.
ZHANG W, LIU J F, LONG F N. Study on compensation relationships among the elements in off-axis three-mirror system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(8): 1160-1164. (in Chinese)

- [8] 罗森,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.
LUO M, ZHU Y T. Application of computer-aided alignment to off-axis Cassegrain system[J]. *Optical Technique*, 2008, 34(4): 514-517. (in Chinese)
- [9] 车驰骋,李英才,樊学武,等. 基于矢量波像差理论的计算机辅助装调技术研究[J]. 光子学报, 2008, 37(8): 1630-1634.
CHE CH CH, LI Y C, FAN X W, *et al.*. Research on computer-aided alignment based on vector aberration theory [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(8): 1630-1634. (in Chinese)
- [10] 孔小辉,樊学武. 基于矢量波像差理论的两镜系统装调技术研究[J]. 激光与光电子进展, 2010, 47(8): 082202.
KONG X H, FAN X W. Alignment of two-mirror aspherical optical system based on vector aberration theory[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(8): 082202. (in Chinese)
- [11] 孔小辉. 两镜系统计算机辅助装调研究[D]. 西安:中国科学院西安光学精密机械研究所, 2010.
KONG X H. *Study on Computer-aided Alignment for Two Mirror Reflect Optical System*[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2010. (in Chinese)
- [12] 史广维. 基于矢量波像差理论的反射望远系统装调研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2011.
SHI G W. *Study of Reflective Telescope Alignment Based on Vector Wavefront Aberration*[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2011. (in Chinese)
- [13] 任百川. 偏轴光学系统矢量像差理论研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2012.
REN B CH. *The Study on Vector Aberration Theory for Off-axis Optical System*[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2012. (in Chinese)
- [14] ZHAO X T, JIAO W C, LIAO Z B, *et al.*. Study on computer-aided alignment method of a three-mirror off-axis aspherical optical system [J]. *SPIE*, 2010, 7656: 76566M.
- [15] WANG B, JIANG S L, QIU T. Study on computer-aided alignment method of Cassegrain system [J]. *SPIE*, 2010, 7654: 765405.
- [16] HUANG Y F, LI L, CAO Y H. Computer-aided alignment for space telescope optical system[J]. *SPIE*, 2006, 6149: 61490P.
- [17] LIU J F, LONG F N, ZHANG W. Study on computer-aided alignment method[J]. *SPIE*, 2005, 5638: 674-682.
- [18] HUANG Y F, LI L. Novel method of computer-aided alignment for large aperture space systems [J]. *SPIE*, 2010, 7655: 76550T.
- [19] HUANG Y F, LI L. Computer-aided alignment for the segmented mirrors of three-mirror optical system[J]. *SPIE*, 2008, 6624: 66241V.
- [20] CAO Y H, LI L. Novel computer-aided alignment method of optical systems based on genetic algorithm[J]. *SPIE*, 2006, 6034: 60340L.
- [21] 顾志远,颜昌翔,李晓冰,等. 改进的灵敏度矩阵法在离轴望远镜装调中的应用[J]. 光学精密工程, 2015, 23(9): 2595-2604.
GU ZH Y, YAN CH X, LI X B, *et al.*. Application of modified sensitivity matrix method in alignment of off-axis telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(9): 2595-2604. (in Chinese)

作者简介:



张学敏(1986—),女,山西阳泉人,博士,高级工程师,2009年于天津大学获得硕士学位,2016年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事光学系统精密装调与检测方面的研究。E-mail: zhangxuemin0325@sina.com