

文章编号:1002-2082(2021)02-0247-08

多基准轴透射式系统装调方法

杜国军, 王春雨, 欧宗耀, 王 聰, 胡 斌

(北京空间机电研究所, 北京 100194)

摘要: 星载光谱仪可获取空间连续分布的光谱数据, 广泛应用于陆地植被和海洋环境探测。为了校正系统的畸变, 采用离轴透射式成像透镜设计, 系统存在 3 个光轴, 光轴之间夹角达到 0.606° , 偏心量达到 0.279 mm , 传统的装调方法不能解决此问题。利用计算机辅助装调技术得出系统的敏感度分析结果, 提出了一种新型多基准轴定心装调方法。通过结构预置偏心和倾斜的方法构建基准轴, 采用光学平板实现基准轴引出, 将复杂的多光轴系统装调分解成单光轴子系统装调, 完成了光谱仪多光轴透射系统装调。测试结果表明: 透镜偏心误差小于 $25.4 \mu\text{m}$, 倾斜误差小于 $17.7''$, 畸变装调结果和理论值偏差小于 $0.32 \mu\text{m}$, 为离轴折射镜头的装调提供了一种新的思路。

关键词: 光谱; 透射; 离轴; 多基准; 装调

中图分类号: TN206; V44

文献标志码: A

DOI: [10.5768/JAO202142.0201007](https://doi.org/10.5768/JAO202142.0201007)

Assembly and adjustment method of multi-reference axis transmission optical system

DU Guojun, WANG Chunyu, OU Zongyao, WANG Cong, HU Bin

(Beijing Institute of Space Mechanics and Electricity, Beijing 100194, China)

Abstract: The spectral data of continuous spatial distribution can be obtained by the spaceborne spectrometer, which is widely applied in the detection of terrestrial vegetation and marine environment. In order to correct the distortion of the system, the imaging lens was designed as an off-axis transmission-type optical system. There were three optical axes in the system, the angle between the axes was 0.606° , and the eccentricity was 0.279 mm , which the traditional assembly and adjustment method could not solve this problem. The sensitivity analysis results of the system were obtained by using the computer-assisted assembly and adjustment technology, and a new assembly and adjustment method of multi-reference axis centring was proposed. The reference axis was constructed by presetting the eccentricity and tilt of the structure, and the reference axis was extracted by using an optical plate. The complex multi-axis system was decomposed into the single-axis subsystem, and the multi-axis transmission system assembly and adjustment of the spectrometer was accomplished. The test results show that the lens eccentricity error is less than $25.4 \mu\text{m}$, the tilt error is less than $17.7''$, and the distortion deviation between test results and theoretical results is less than $0.32 \mu\text{m}$, which provides a new way for assembly and adjustment of off-axis refraction lens.

Key words: spectrum; transmission; off-axis; multi-reference; assembly and adjustment

引言

某型号星载光谱仪聚焦于陆地生态系统植被和森林蓄积量探测, 利用 $670 \text{ nm} \sim 780 \text{ nm}$ 谱段的光谱获取空间连续分布的植被荧光信号, 得到太阳诱导植被荧光遥感数据, 从而准确绘制植被荧

光时空分布规律, 满足全球植被定量监测、森林植被生产力评估的需求。光谱仪采用光栅作为色散元件, 由于分光系统的存在, 系统会残余较大畸变, 导致数据处理困难, 星载光谱仪为了校正系统的畸变, 成像透镜设计为离轴透射式光学系统, 系

收稿日期: 2020-07-01; 修回日期: 2020-09-27

基金项目: 国家重大国防项目

作者简介: 杜国军 (1978-), 男, 副研究员, 主要从事空间光谱成像仪的研究。E-mail: jun432432@sina.com

统存在 3 个光轴, 光轴之间倾斜量达到 0.606° , 偏心量达到 0.279 mm , 增加了装调的难度。

光学系统的质量和光学元件的装调精度息息相关, 国内外调研结果表明, 透射式系统装调方法多为双光路定心法, 定心仪测试透镜表面球心的跳动量给出球心位置, 球心连线确定光轴, 装调时最小化不同透镜光轴的偏心和倾斜, 达到系统设计指标^[1-6]。双光路定心法只适用于同轴透射式系统, 对于离轴透射式系统的装调方法未见相关报道。光谱仪成像系统最大倾斜量超出了定心仪的装调范围, 无法应用双光路定心法。针对这个难题提出了一种多基准轴的定心装调方法(MAA), 通过结构预置偏心和倾斜的方法构建基准轴, 利用光学平板实现光轴引出, 将复杂的多光轴系统装调分解成单光轴系统装调, 实现了离轴透射式光学系统的高精度装调。实测结果验证了该方法的有效性, 为离轴透射式系统装调开拓了新的思路。

1 装调原理

1.1 成像透镜系统参数

光谱仪采用光栅和棱镜作为色散元件, 成像组件采用离轴透射式系统, 补偿由光栅和棱镜引起的畸变, 可实现系统的畸变最小化。成像组件包含 3 个光轴, 光轴之间存在偏心和倾斜, 如图 1 所示。透镜 1 和透镜 2 组成光轴 1, 透镜 3 和透镜 4 组成光轴 2, 透镜 5 为光轴 3。光轴 1 和光轴 2 倾角为 0.262° , 偏心量为 0.279 mm , 光轴 3 相对于光轴 1 倾角为 0.606° , 参数如表 1 所示。

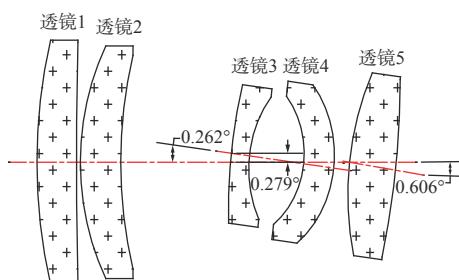


图 1 成像光学系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of imaging optical system

1.2 装调分析

畸变是实际像高和理想像高的偏差, 根据 δ 初级像差理论, 像差分为 5 种初级像差, 以 5 个塞得和数表示。畸变是主光线的垂轴像差, 表达式为

表 1 透镜的偏心和倾斜参数

Table 1 Parameters of lens eccentricity and tilt

透镜	偏心X	偏心Y/mm	倾斜X	倾斜Y/(°)
透镜1	0	0	0	0
透镜2	0	0	0	0
透镜3	0	-0.279	0	-0.262
透镜4	0	-0.279	0	-0.262
透镜5	0	0	0	-0.606

$$\delta Y' = -\frac{1}{2n'u'} \sum_{i=1}^k S_V \quad (1)$$

根据塞得和数表达式:

$$\sum_{i=1}^k S_I = \sum_{i=1}^k luni(i-i')(i'-u) \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^k S_{II} = \sum_{i=1}^k S_{II} \frac{i_z}{i} = S_{II} \frac{i_z^2}{i^2} \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^k S_{IV} = \sum_{i=1}^k J^2 \frac{n'-n}{n'n} \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^k S_V = \sum_{i=1}^k (S_{III} + S_{IV}) \frac{i_z}{i} \quad (5)$$

推导得出光学系统的畸变表达式:

$$\delta Y' = -\frac{1}{2n'u'} \sum_{i=1}^k \left(luni(i-i')(i'-u) \frac{i_z^2}{i^2} + nuy \frac{n'-n}{n'n} \right) i_z \quad (6)$$

简化后的畸变表达式为

$$\delta Y' = -\frac{1}{2n'u'} \sum_{i=1}^k \left(\frac{n(n'-n)(n-nr-n'r)lu}{n'^2(l-r)} i_z^3 + \frac{(n'-n)uy^2}{l-r} i_z \right) \quad (7)$$

式中: n 和 n' 为折射率; k 为光学元件的数量; r 为曲率半径; u 为数值孔径; y 为像高; i_z 为主光线和光轴的夹角。由公式(7)可知畸变与主光线和光轴的夹角以及像高正相关, 本系统中数值孔径和像高无法改变, 为了纠正畸变, 透镜系统设计为离轴透射式系统, 改变主光线和光轴的夹角。装调过程中精确控制离轴透镜组的倾角可有效控制畸变。

将实测的透镜曲率半径和中心厚度输入到光学系统优化设计软件中^[7-8], 重新对系统镜间距和偏心进行优化, 以光轴 1 为基准, 根据畸变计算光轴 2 和光轴 3 的失调量敏感度, 如图 2 所示。结果表明, 当畸变小于 $3 \mu\text{m}$ 时, 透镜偏心公差需小于

0.05 mm, 倾斜公差小于 $60''$, 镜间距公差小于 0.05 mm, 根据以往研究结果, 直接装配无法满足系统要求^[9-10]。

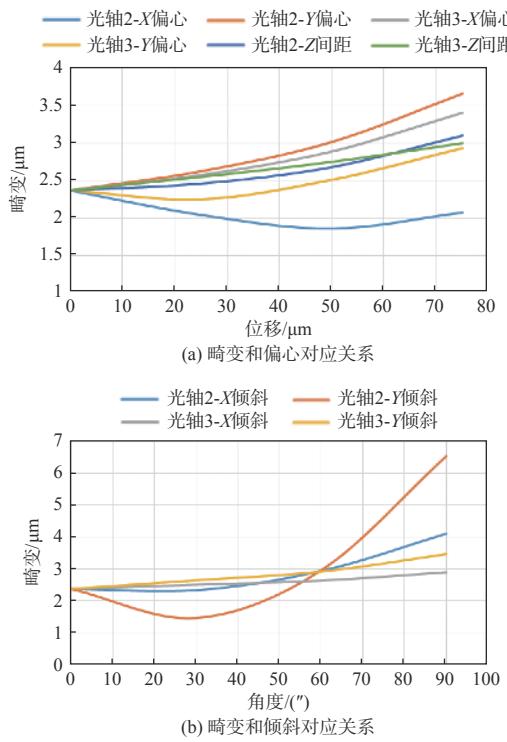


图 2 畸变和失调量对应关系

Fig. 2 Relationship between distortion and misadjustment

1.3 MAA 装调方法

系统装调过程为最小化偏心以及倾斜量误差最小的过程, 透镜组光轴偏差达到 0.606° , 超出了定心仪的测试范围, 需要在系统中引入新的装调基准。考虑到装调公差相对宽松, 提出了在透镜筒结构上一体化加工基准轴, 预置光轴的倾斜量和偏差量, 光学平板引出结构基准轴, 应用OptiCentric双光路定心仪在新的基准轴上装调, 将多光轴系统的装调分解成单光轴子系统装调, 系统的装调流程如图3所示。

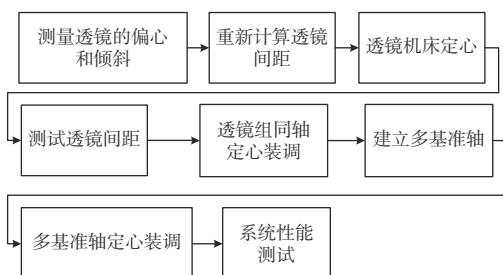


图 3 成像系统装调流程

Fig. 3 Assembly and adjustment process of imaging system

2 装调过程

2.1 机床定心

机床定心可去除光学件加工过程中产生的偏心和倾斜^[11], 将透镜框的安装端面和透镜框的外圆加工成和光轴一致, 如图4所示。固定透镜组件到机床上, 千分表测量透镜框外圈的圆跳动, 调整使其和机床同轴, 通过光学定心方法调整透镜的偏心和倾斜, 使其光轴和机床转轴重合, 加工透镜框的外圆和端面与透镜光轴重合。

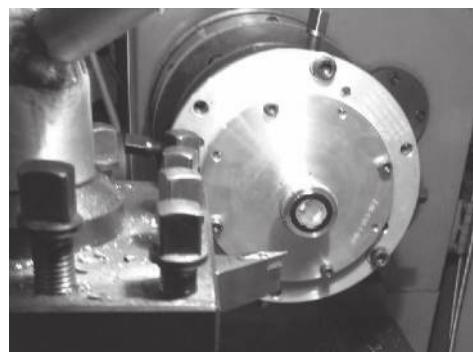


图 4 机床定心示意图

Fig. 4 Schematic diagram of machine tool centring

2.2 同轴系统装调

系统包含2个同轴透镜组, 单透镜机床定心完成后, 选用OptiCentric双光路定心仪进行定心装调^[12]。调整透镜1的光轴与定心仪的旋转轴一致, 安装透镜2, 通过垫片和侧面顶丝调整透镜2的光轴与定心仪的旋转轴一致, 如图5和图6所示。同理装调透镜3和透镜4组件。

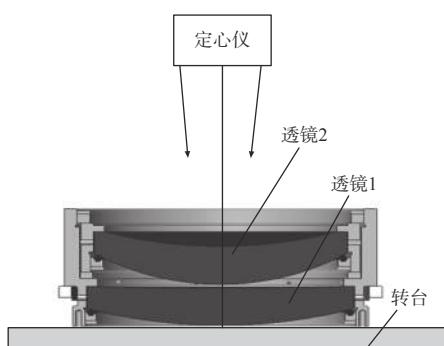


图 5 同轴装调方法

Fig. 5 Coaxial assembly and adjustment method

2.3 光轴引出

系统包含3个光轴, 最大偏差 0.606° , 镜筒一体化加工预置偏心和倾斜, 构建3个基准轴, 建立装调基准。如图7所示, 基准轴1和镜筒外径同

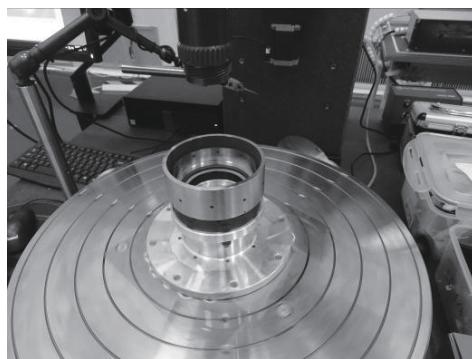


图 6 同轴装调实物图

Fig. 6 Diagram of coaxial assembly and adjustment

轴, 基准轴 2 相对于基准轴 1 的夹角为 0.262° , 偏心量为 0.279 mm , 基准轴 3 相对于基准轴 1 的夹角为 0.606° 。

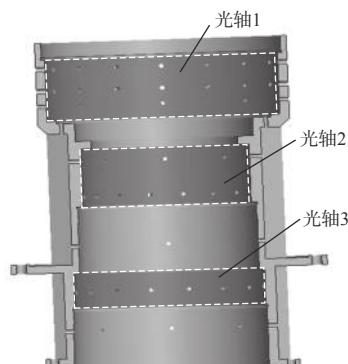


图 7 成像透镜框设计

Fig. 7 Design of imaging lens frame

基准轴的加工精度直接影响系统的装调精度, 基准轴偏差计算公式为

$$\alpha = \frac{h_1 - h_2}{D} \quad (8)$$

式中: α 为基准轴倾角; h_1 和 h_2 为基准轴两侧的高度; D 为基准内径。对公式(8)求导可得:

$$\delta\alpha = \frac{1}{D}(\delta h_1 - \delta h_2) - \frac{h_1 - h_2}{D^2}\delta D \quad (9)$$

其中内径 D 为 100 mm , 对应 0.606° 的倾角, 基准轴两侧的高度差为 1.06 mm , 公式(9)第 2 项相对于第 1 项可以忽略。提高基准轴精度的关键是控制 h_1 和 h_2 的加工精度, 加工过程中重点保证基准面的高度差, 加工完成后, 高精度三坐标测量机测试表明, 偏心公差优于 0.02 mm , 倾斜公差优于 $30''$, 能够满足基准轴引出精度要求。

2.4 系统装调

装调过程如图 8 和图 9 所示。将镜筒固定在双光路定心仪的转台上, 采用光学平板将光轴 1 引

出, 结合杠杆千分表调整光轴和定心仪同轴, 倾斜量小于 $10''$, 圆跳动量小于 0.015 mm , 作为光轴 1 的基准轴。安装透镜 1 和透镜 2 组件, 调整到倾斜偏差小于 $10''$, 偏心误差小于 0.015 mm 。将镜筒翻转 180° , 通过光学平板和杠杆千分表引出光轴 2, 作为透镜 3 和透镜 4 组件的安装基准。安装透镜 3 和透镜 4 组件时, 调整倾斜偏差小于 $10''$, 偏心小于 0.015 mm 。光学平板引出光轴 3, 安装透镜 5 组件, 调整到倾斜偏差小于 $10''$, 偏心误差小于 0.015 mm , 完成系统偏心和倾斜的装调。

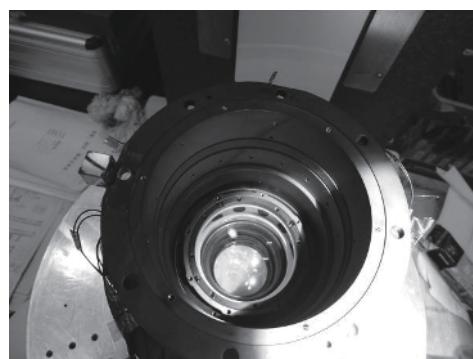


图 8 成像镜头装调过程

Fig. 8 Assembly and adjustment process of imaging lens

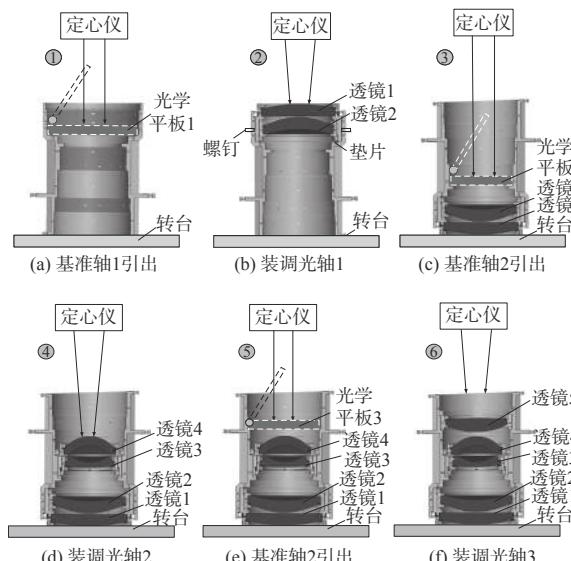


图 9 多基准轴装调过程

Fig. 9 Assembly and adjustment process of multi-reference axis

装调误差分布如图 10 所示。从图 10 可知, 基准轴的引出误差为主要因素, 通过进一步提高镜筒的加工精度可提高系统的装调精度。

1) 镜筒同轴度误差。镜筒的同轴度为 $15 \mu\text{m}$,

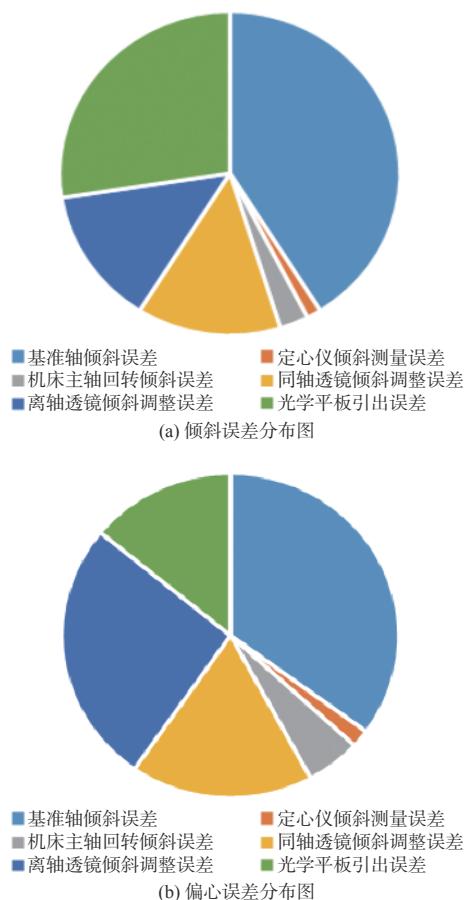


图 10 偏心和倾斜误差分布图

Fig. 10 Distribution diagram of eccentricity and tilt errors

千分尺的测量误差为 $1 \mu\text{m}$, 引起的镜头偏心误差为 $8 \mu\text{m}$ 。

2) 镜筒基准轴偏心、倾斜误差。三坐标测量结果表明, 镜筒偏心误差优于 $20 \mu\text{m}$, 倾斜误差优于 $30''$ 。

3) 机床主轴回转误差。机床主轴引起的倾斜误差为 $2''$, 偏心误差为 $3 \mu\text{m}$ 。

4) 定心仪测量误差。双光路定心仪倾斜测量误差为 $1''$, 偏心测量误差为 $1 \mu\text{m}$ 。

表 2 镜间距和测试距离对应表

Table 2 Corresponding lens distance and test distance

Item	Lens1 & Lens2	Lens2 & Lens3	Lens3 & Lens4	Lens4 & Lens5
Distance between vertex of lens/mm	1.800	50.765	25.248	6.928
Distance between lens/mm	1.800	50.763	25.248	6.923
Difference/mm	0	0.002	0	0.005

在多基准轴装调过程中, 通过接触式方法测量镜间距^[14-15], 如图 12 所示。首先测量透镜 1 和透

5) 同轴透镜调整误差。透镜 1 和透镜 2 组件, 透镜 3 和透镜 4 组件为同轴系统, 调整误差较小, 偏心可控制在 $10 \mu\text{m}$, 倾斜控制在 $10''$ 。

6) 离轴透镜调整误差。透镜倾斜调整误差为 $10''$, 偏心调整误差为 $15 \mu\text{m}$ 。

7) 光学平板接触误差。光学平板平面度优于 10 nm , 光学平板和结构面接触误差优于 $10 \mu\text{m}$, 镜筒的内径为 100 mm , 引起镜头倾斜偏差为 $20.6''$ 。

综合以上误差, 可计算得出透镜组的倾斜误差优于 $38.8''$, 偏心误差优于 $28.3 \mu\text{m}$, 满足系统的指标要求。

2.5 镜间距控制

同轴透射式系统的镜间距通过测试球面顶点得到^[13], 球面顶点同时也是透镜的最高点或者最低点, 对于离轴系统, 透镜表面的最高点和最低点不再位于球面顶点, 偏差量和倾斜偏心量相关, 如图 11 所示。球面顶点 A 和表面最高点 A' 之间距离 X 如下式所示:

$$X = R - R \times \cos a \quad (10)$$

式中: a 为透镜的倾角; R 为球面曲率半径。

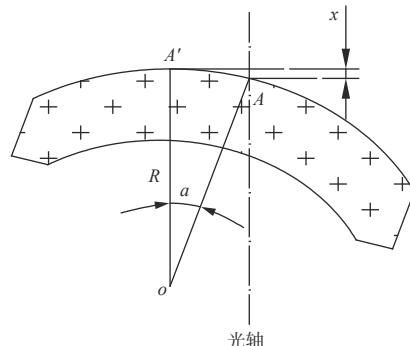


图 11 镜间距测试原理

Fig. 11 Schematic diagram of lens distance test

根据公式(10)计算得出透镜最高点距离和透镜间距的差值如表 2 所示。

镜 2 之间的镜间距以及透镜 3 和透镜 4 之间的镜间距, 将透镜 2 的光轴调整到和双光路定心仪的转

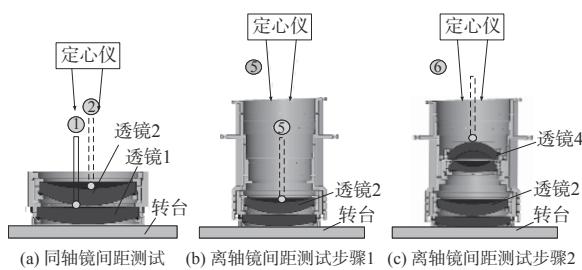


图 12 镜间距测试过程

Fig. 12 Test process of lens distance

台同轴,通过探针分别测量透镜 1 和透镜 2 上表面的顶点高度 d_1 和 d_2 。透镜 1 和透镜 2 的镜间距计算方法如下式:

$$D_{12} = d_2 - d_1 - D_2 \quad (11)$$

式中: D_2 为透镜 2 的中心厚度; D_3 为透镜 3 的中心厚度。同理测量透镜 3 和透镜 4 镜间距 D_{34} 。

透镜 1 和透镜 2 组件安装到镜筒中, 测量透镜 2 的上表面最高点 H_2 , 安装透镜 3 和透镜 4 组件, 测量透镜 4 上表面最高点 H_4 , 透镜 2 和透镜 3 的镜间距 D_{23} 如下式:

$$D_{23} = H_4 - H_2 - D_{34} - D_3 - D_4 \quad (12)$$

同理测量透镜 4 和透镜 5 镜间距 D_{45} 。系统装调后实物图如图 13 所示。

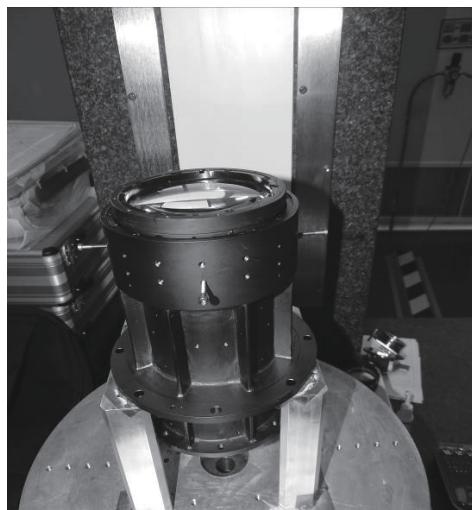


图 13 成像镜头实物图

Fig. 13 Diagram of imaging lens

镜间距测量误差如表 3 所示。探针 2 次测量得出镜间距, 系统装调倾斜误差优于 $38.8''$, 偏心误差优于 $28.3 \mu\text{m}$, 引起的镜间距测量误差 $\leq 1 \mu\text{m}$, 综合两种测量误差, 镜间距测量误差 $\leq 14.2 \mu\text{m}$, 满足系统指标要求。

表 3 镜间距测量误差

Table 3 Measurement error of lens distance

误差源	探针单点测量	偏心倾斜引起的	镜间距
	误差/ μm	误差/ μm	误差/ μm
数值	10	1	14.2

3 装调结果

系统装调完成后, 分别测试光轴 1, 光轴 2 和光轴 3, 因为光轴 1 和光轴 3 的夹角为 0.606° , 超出了定心仪的测量范围, 采用分段测试的方式, 分别测试光轴 1 和光轴 2 的偏差, 光轴 2 和光轴 3 的偏差, 测试结果如表 4 和表 5 所示, 与设计结果的偏差如表 6 所示。最大偏心误差为 $25.4 \mu\text{m}$, 最大倾斜误差为 $17.7''$, 实际畸变和理论畸变对比如图 14

表 4 透镜 1 和透镜 2 组件以及透镜 3 和透镜 4 组件的偏心倾斜

Table 4 Eccentricity and tilt of lens 1, 2 and lens 3, 4

Parameters	Decenter X/ μm	Decenter Y/ μm	Tilt X/''	Tilt Y/''
Axis1	0	0	0	0
Axis2	-10.4	-297.5	-3.3	-960.9

表 5 透镜 3 和透镜 4 组件以及透镜 5 组件的偏心倾斜

Table 5 Eccentricity and tilt of lens 3, 4 and lens 5

	Decenter X/ μm	Decenter Y/ μm	Tilt X/''	Tilt Y/''
Axis2	0	0	0	0
Axis3	-9.1	-253.5	-17.6	-1232.1

表 6 透镜组的偏心倾斜偏差

Table 6 Eccentricity and tilt deviation of lens

Difference	Decenter X/ μm	Decenter Y/ μm	Tilt X/''	Tilt Y/''
Axis1	0	0	0	0
Axis2	-10.4	-18.5	-3.3	-17.7
Axis3	1.3	25.4	-14.3	6.3

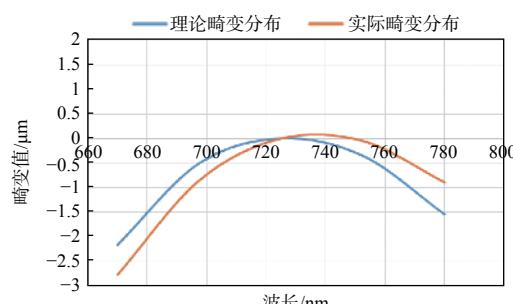


图 14 理论畸变和实际畸变对比图

Fig. 14 Comparison of theoretical and actual distortion

所示。从图14可看出,最大畸变为 $2.77\text{ }\mu\text{m}$,平均偏差 $0.32\text{ }\mu\text{m}$,系统装调结果满足指标要求。

4 结论

本文提出了一种新的离轴透射式系统的装调方法——多基准轴定心装调方法(MAA),克服传统的同轴透射系统定心装调缺陷,通过结构预置偏心和倾斜的方法构建基准轴,并辅助光学平板将复杂的多光轴系统装调分解成单光轴系统装调,利用此方法装调了光谱仪多光轴成像系统。装调结果表明,透镜偏心误差小于 $25.4\text{ }\mu\text{m}$,倾斜误差小于 $17.7''$,实现了系统的高精度装调。本装调方法不受定心仪测量范围的限制,可针对任意光轴的透射系统进行装调,突破了传统透射式装调方法的边界,为离轴透射式系统装调开拓了新的思路。

参考文献:

- [1] HUANG C Y, HO C F, WANG J H., et al. Alignment turning system for precision lens cells[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 100(5): 1383-1392.
- [2] LAMONTAGNE F, FUCHS U, TRABERT M. Aspheric lens mounting[J]. *Optical Engineering*, 2018, 57(10): 101708-1-15.
- [3] MU Shengbo, SONG Junru, LI Yang, et al. High accuracy alignment of beam expander of a space-borne laser range finder[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(3): 113-117.
穆生博, 宋俊儒, 李洋, 等. 星载激光测距仪扩束系统的高精度装调[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(3): 113-117.
- [4] LI Bin, CHEN Jiayi, WANG Haichao, et al. Accuracy angular measurement method in alignment process for Cassegrain telescope[J]. *Journal of Applied Optics*, 2017, 38(6): 958-962.
李斌, 陈佳夷, 王海超, 等. 卡塞格林系统装调过程中高精度测角方法[J]. 应用光学, 2017, 38(6): 958-962.
- [5] MU Shengbo, SONG Junru, LI Yang, et al. High accuracy alignment of beam expander of a space-borne laser range finder[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(3): 0306006-1-5.
穆生博, 宋俊儒, 李洋, 等. 星载激光测距仪扩束系统的高精度装调[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(3): 0306006-1-5.
- [6] YUAN Qun, JI Wen, GAO Zhishan. Geometric characteristics and error analysis of standard spherical lens[J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(4): 858-868.
袁群, 季文, 高志山. 标准球面透镜的几何特性与误差分析[J]. 应用光学, 2020, 41(4): 858-868.
- [7] LIU Bo, LIU Jun, GAO Ming, et al. Optical design of image telecentric lens for optical field multispectral camera[J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(3): 603-610.
刘博, 刘钧, 高明, 等. 光场多光谱相机像方远心镜头光学设计[J]. 应用光学, 2020, 41(3): 603-610.
- [8] HAO Renjie, WANG Zhongyu, LI Yaru. Error analysis method for monocular vision pose measurement system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2019, 40(1): 79-85.
郝仁杰, 王中宇, 李亚茹. 一种单目视觉位姿测量系统的误差分析方法[J]. 应用光学, 2019, 40(1): 79-85.
- [9] HUANG Yang, WANG Chunyu, NIU Jinchuan, et al. High-precision measurement of focal length for long-focus infrared optical system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2017, 38(6): 995-998.
黄阳, 王春雨, 牛锦川, 等. 长焦红外光学系统焦距的高精度测量技术[J]. 应用光学, 2017, 38(6): 995-998.
- [10] LIU Xiangyi, ZHANG Jingxu, QIAO Bin. Research on supporting technology of lens applied in cold optics assembly[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017(7): 1850-1857.
- [11] LIAO Zhibo, WANG Chunyu, LI Mengjuan. Research on computer-aided alignment based on refract optical system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(9): 2453-2456.
廖志波, 王春雨, 栗孟娟, 等. 透镜式光学系统计算机辅助装校技术初步研究[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(9): 2453-2456.
- [12] CHEN Xiaoli, YANG Bingxin, WANG Yonghui, et al. Segmentation of primary mirror for the space deployable optical system[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2008, 29(1): 28-33.
陈晓丽, 杨秉新, 王永辉, 等. 空间可展开光学系统主镜分块方案研究[J]. 航天返回与遥感, 2008, 29(1): 28-33.
- [13] CHEN Xiaoli, LI Bo, WANG Yonghui, et al. Technical ways for the space deployable primary mirror[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2008, 29(1): 23-27.
陈晓丽, 李博, 王永辉, 等. 空间可展开主镜技术途径研究[J]. 航天返回与遥感, 2008, 29(1): 23-27.

- [14] TIAN Haixia, YANG Jianfeng, MA Xiaolong. Design for visible video zoom optical system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(9): 1797–1799.
田海霞, 杨建峰, 马小龙. 可见光变焦距电视光学系统设计[J]. 光子学报, 2008, 37(9): 1797-1799.
- [15] ZHAO Yang, GONG Yan, HU Yining. Method of tolerance sensitivity reduction of zoom optical system[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, 36(7): 121-125.
赵阳, 巩岩, 胡宜宁. 变焦距光学系统降低公差灵敏度的方法[J]. 光电工程, 2009, 36(7): 121-125.