

文章编号: 1002-1582(2026)04-0392-05

宽幅高清成像系统精准定心装配与像面调校技术

管伟, 王章利*, 刘伟光, 苏瑛, 王中强

(西安应用光学研究所 陕西 西安 710065)

摘 要: 宽幅高清成像系统一般由透射光学镜头与数亿级像素探测器组成, 视场大, 分辨率要求高, 对装调环节提出了极高的精度需求。针对宽幅高清成像系统制造需求, 提出了基于光定心加工的镜头装调方法, 通过分段定量胶合工艺, 保证光学镜片胶合前后面形变化量不超过5%; 通过基于回转定心原理的光轴找正方法, 实现光学镜片光轴角度校准精度达到6"; 通过基于测量反馈补偿的车校方法, 实现光学镜组间隔校准精度达到2 μm 。同时, 提出了宽幅高清成像系统探测器精准装调方法, 针对目前平行光管视场小、无法全视场评价的问题, 采用阵列式目标发生器, 通过量化解算全视场各处图像清晰度来评价装调精度, 保证探测器感光面与光学镜头像面高精度重合, 装调精度可达3 μm 。最后, 通过实物研制与外景试验, 成像系统全局与局部图像良好, 验证了方法的有效性。

关 键 词: 定心车校; 反馈补偿; 宽幅探测器装调; 图像清晰度计算

中图分类号: TH162+.1

文献标识码: A

Lens centering and sensor positioning for the wide-field high-definition camera

GUAN Wei, WANG Zhangli*, LIU Weiguang, SU Ying, WANG Zhongqiang

(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: A wide-field high-definition imaging system typically consists of a transmission optical lens and a detector with hundreds of millions of pixels. It features a large field of view and high-resolution requirements, imposing extremely stringent precision demands on the alignment process. To address the manufacturing needs of such systems, a lens alignment method based on light centering processing is proposed. Through a segmented quantitative bonding process, the surface shape variation of optical lens elements before and after bonding is controlled within 5%. Utilizing an optical axis alignment method based on the rotary centering principle, the angular calibration accuracy of the optical lens axis achieves 6 arcseconds (6"). Furthermore, a lathe-based alignment method with measurement feedback compensation enables the calibration accuracy of optical lens group spacing to reach 2 micrometers (2 μm). Simultaneously, a precision alignment method for the detector in wide-field high-definition imaging systems is presented. To overcome the limitation of small field-of-view in conventional collimators, which cannot evaluate full-field performance, an arrayed target generator is employed. This method quantitatively calculates the image sharpness across the entire field to evaluate alignment accuracy, ensuring the high-precision coincidence between the detector photosensitive surface and the optical lens image plane. The achieved alignment accuracy is 3 μm . Finally, physical prototype development and outdoor field tests demonstrate excellent global and local image quality of the imaging system, verifying the effectiveness of the proposed methods.

Keywords: centering turning and adjustment; feedback compensation; wide-field detector assembly; image sharpness calculation

收稿日期: 2026-03-25; 收到修改稿日期: 2026-05-11

基金项目: 兵器集团自主创新项目 (ZJ082025128)

作者简介: 管伟 (1990—), 男, 高级工程师, 硕士, 从事光机系统装调技术研究。623439578@qq.com

王章利 (1981—), 男, 研究员, 硕士, 从事光学系统制造工艺技术研究。

* 通讯作者: ewzl@163.com

0 引言

成像系统广泛应用在航天航空、道路监控、灾情预警等各个领域,一般来说,其成像范围与成像分辨率往往成反比。随着探测器制造及信号处理技术的更新,探测器感光面面积不断增大,像素数量不断增多,数亿级像素的成像探测器已经开始进入工程化应用,使得宽幅高清成像系统的研制成为可能。宽幅高清成像系统一般由前端透射光学镜头与数亿级像素探测器组成,其光学镜头视场极大且全视场传函需达到数百线对以上。极高的性能需求对装调环节提出了极为苛刻的要求,主要体现在:

(1) 光学镜片定心精度要求达到秒级。光学镜头装调的控制核心在光学镜片之间的光学间隔以及中心偏,这两个指标直接影响着成像质量,宽幅高清成像系统光学镜组中心偏一般需控制到6",光学间隔指标需控制到2 μm ,镜头装调难度极大;

(2) 探测器像面装调精度要求达到微米级。以光学镜头F数为1.6的宽幅高清成像系统为例,其成像波段为可见光波段,根据焦深计算公式可知,焦深仅为 ± 2.8 微米,装调时必须保证探测器靶面各处均处于焦深内,全视场成像才能同时清晰,这就要求像面装调时既要达到微米级的轴向精度还要保证秒级的倾斜精度,系统装调难度极大。

现阶段,高品质光学镜头的定心装调方法主要为定心车削和定心装调。定心装调普遍采用手工方式,通过调整镜片位置或修研结构件来实现中心偏差秒级控制,但是光学间隔控制精度低(一般为0.01mm左右)、装调周期长且对人员技能水平依赖高;定心车削工艺方式质量一致性好、效率高,但是受限于零件形位精度,其中心偏差校准精度难以实现极高控制精度,定心精度一般在20"以上。

本文针对宽幅高清成像系统对装调精度的严苛要求,将光定心加工方法和定心装调方法相结合,通过光学镜组微应力胶合、基于回转定心的光轴精确找正、基于测量反馈补偿的间隔校正、基于中心偏差检测的光学镜组再定心来实现光学镜组高精度定心,从而保证光学镜头各镜组中心偏差和光学间隔;同时,采用阵列式目标发生器,通过量化解算全视场各处图像清晰度来评价装调精度,保证探测器感光面与光学镜头像面高精度重合。

1 宽幅高清成像系统装配误差分析

宽幅高清成像系统对装配误差极其敏感,对装调过程中的位置误差、角度误差以及应力带来的面形误差均提出了极高的要求。影响宽幅高清成像系统成像质量的主要装调误差如图1所示,对于光学镜头来说,主要需要控制光学镜片的位置和倾斜误差、镜框的形位误差以及胶接应力带来的面形误差;对于系统整机集成来说,主要需要控制探测器的位置和倾斜误差。

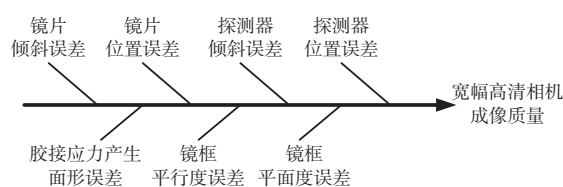


图1 宽幅高清相机装调误差构成示意图

2 光学镜组微应力胶合

光学镜头是由多片光学镜片及其固定结构件组合而成的,其中,镜片与镜框的粘接需要在不产生明显固化应力的前提下具有良好的粘接性能,否则会出现镜片面型变差或稳定性降低等问题。为此,本文通过对透射镜组粘接装配过程进行仿真,以镜面面型变化小与工艺可实现性强为约束条件,对粘接位置、粘接胶量、胶层厚度等进行了优化,形成了分段式定量粘接工艺方法,如图1所示,采用外圆多点粘接时,光学镜片最大位移处于中心处,数值为30.7nm,即面型变化量PV值仅为 $\frac{1}{12}\lambda$,能够满足系统成像需求。

3 基于回转定心模型的光轴秒级定心

光学系统装调的核心在于控制光学镜片的中心偏差以及光学间隔,即保证光学镜头中各个光学镜片的光轴一致且相隔距离满足设计要求。本文采用基于光定心车削的光机轴线校准方法,通过校准各个镜片与其镜框结构的光机同轴精度来保证集成精度。

要实现光机轴线精确定心的基础就是要准确获取光学镜片在空间中的位置和姿态。为此,本技术采用双光路回转定心原理来实现镜片精确找正。如图2所示, R_1 、 R_2 为光学镜片上下镜面曲率半径, h 为光学镜片中心厚度, X_1 、 X_2 、 Y_1 、 Y_2 为光学镜片球心在以回转中心为零点的坐标位置。光学镜片回转定心模型表示为

$$\Delta\alpha_x = \frac{X_1 - X_2}{R_1 + h + R_2} \quad (1)$$

$$\Delta\alpha_y = \frac{Y_1 - Y_2}{R_1 + h + R_2} \quad (2)$$

$$\Delta\partial_x = X_1 - R_1 \cdot \sin(\Delta\alpha_x) \quad (3)$$

$$\Delta\partial_y = Y_1 - R_1 \cdot \sin(\Delta\alpha_y) \quad (4)$$

式中 $\Delta\alpha_x$ 和 $\Delta\alpha_y$ 代表镜片与基准轴线的角度偏差； $\Delta\partial_x$ 和 $\Delta\partial_y$ 代表镜片与基准轴线的位置偏差。

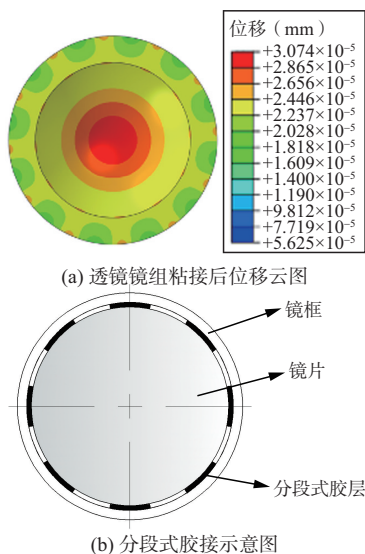


图 2 微应力胶合示意图

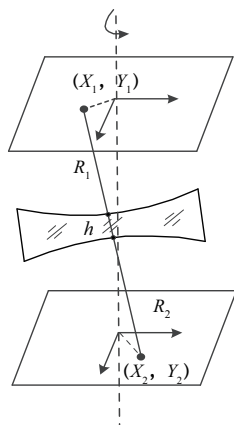


图 3 回转定心模型示意图

根据回转定心模型可知，只要能够准确得到光学镜片球心与回转基准轴线的二维坐标值，即可求解出镜片的空间位姿。

如图 4 所示，根据回转定心模型，通过高分辨率双光路自准直式定心方法，探测镜片球心像相对回转轴的跳动量，实现光学镜片的光轴位置姿态的准确评价；其中微动结构采用长半径球头结构，可以实现多自由度精确微动，调整完成后利用电磁铁磁力可变的特性，保证调整过程中的轻便性以及加工过程中的牢固性。在镜组轴线设备主轴回转轴线重合的基础上，以镜组光轴为基准，进行精确定心车削工作，实现镜组光学轴线与机械轴线精确校准，中心偏校准误差控制在 6" 以内。

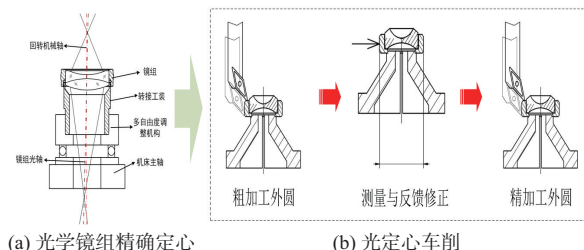


图 4 镜组精确定心示意图

4 基于测量反馈补偿的光学间隔精确校准

光学镜组端面定心车校时，由于上端面开阔，可以实时测量镜片到结构端面的距离，从而不断优化和修正加工参数，保证微米级加工精度，而下端面无法直接测量，加工精度只能到 15μm 左右，无法达到微米级的精度要求，导致镜头的光学间隔校准精度难以满足系统要求。为此，如图 5 所示，本文采用系统最优的思维方式，在设计端，相互接触的镜组均采用首尾配合方式，即前一片镜组的下端面与后一片镜组的上端面相接触；在制造端，前一片镜组定心车校完成后，采用高精度三坐标测量仪对下端面镜片到结构端面距离进行精确测量，以满足最终两镜片光学间隔为目标，将测量结果带入计算并修正下一片镜组的工艺参数，从而相互补偿，实现 2μm 的光学间隔校准精度。

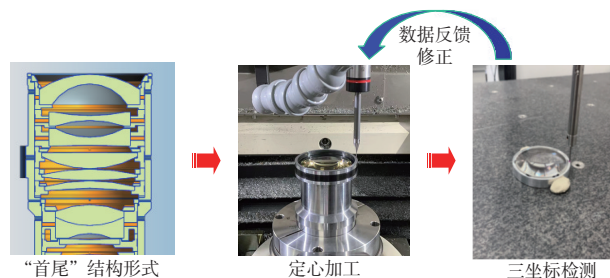


图 5 测量反馈补偿示意图

5 基于中心偏差指标光学镜组再定心装调

光学镜头的装调核心就是保证各个镜片之间的光轴一致性。通过定心车校工艺方法，光学镜组中的机械轴与光轴已经高度重合，光学间隔也达到微米级精度。但是，车削加工过程中必然存在微米级的形位误差，对于常规口径的光学镜头来说，微米级的形位会带来 10" 以上的中心偏误差，无法满足精度要求。为此，本项目在光学镜组装入镜筒前，采用双光路中心偏测量仪进行再定心装调，确保秒级定心精度。首先，依次将各个光学镜组装配在中心偏仪上，通过旋转各个镜组的方式，将各透镜光轴至与机械回转轴一致，并在镜组外侧做标记，之后，将各个镜组按照确定好

方向和角度装配至主镜筒中,完成光学镜头装配;最后,复测中心偏指标,保证装配精度。

6 宽幅高清成像系统探测器精准装调

宽幅高清成像系统视场大,但焦深极小,以F1.6可见光宽幅高清成像系统为例,焦深仅为 $\pm 2.8\mu\text{m}$,对像面的轴向位置、倾斜装调精度要求高。目前,普通的中长焦平行光管视场小,只有 $2^\circ, 3^\circ$,无法满足全视场下对像面装调精度的评价。图像的不清晰主要是理想焦面与实际焦面的位置偏差导致,因此要获得高清晰度的图像,必须将理想焦面与实际焦面的位置偏差降到最小。由于当前成像系统均配备了调焦光学镜组,为此,装调的核心就在于保证成像系统各处清晰度一致即可。为此,本文采用阵列式平行光管为成像系统提供目标,平行光管靶标选用十字靶标,通过解算十字靶标边缘处灰度梯度即可判断探测器是否装配到位。如图6所示,其中阵列式目标发生器由5个相同口径、相同焦距的平行光管组成。通过该装置能够同时监控视场各处的成像清晰度,当阵列式目标发生器所发出的平行光束经过光学镜头后均能清晰成像与探测器感光面时,即完成装调。

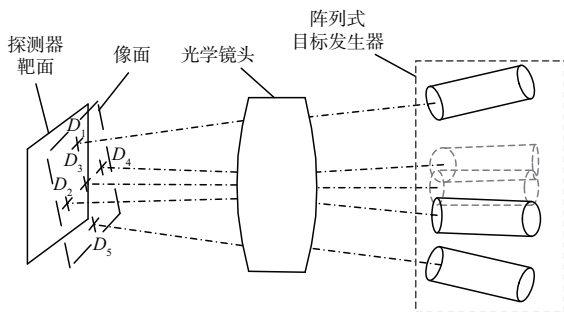


图6 基于阵列式平行光管的探测器精准装调示意图

由上文可知,如何判断探测器不同区域成像清晰度是否一致成为实现探测器精准装调的关键。本文构建了基于灰度能量分布函数的清晰度评价模型,通过客观量化数值表征来取代传统人工经验判别,模型表示为

$$D = \sum_x \sum_y \left\{ \begin{aligned} &[f(x+1, y) - f(x, y)]^2 \\ &+ [f(x, y+1) - f(x, y)]^2 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$f(x, y) = p(x, y) / \sum_x \sum_y p(x, y) \quad (6)$$

式中, x, y 代表探测器的像素坐标; p 代表像素亮度; D 代表区域成像清晰度

为此,当探测器不同区域内成像清晰度一致时,即 $D_1 = D_2 = D_3 = D_4 = D_5$ 时,表明探测器感光面与光学镜头像面重合,则探测器装调完毕。

7 外景验证

根据本文提出的装调方法,针对某型宽幅高清成像系统,开展了实物研制工作。在实验室环境下装调完成后,对外景进行实测工作。如图7所示,无论全景图还是局部放大图,该系统全视场各处成像一致且效果良好,验证了本文装调方法的有效性。

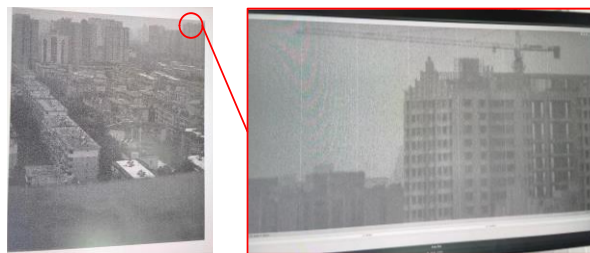


图7 外景验证示意图

8 结论

宽幅高清成像系统对装调精度的要求极高,本文针对光学镜头对中心偏差、光学间隔的高精度要求,建立了基于测量反馈补偿的高精度定心车校技术方案以及光学镜组再定心技术方案,实现了秒级光学定心精度以及微米级像面装调精度;针对传统平行光管视场小、测试范围不足的问题,创新性地采用多个平行光管自主构建大视场测试设备,开展全视场下成像清晰度评价与装调,建立了大视场小焦深高清成像电视像面装调方法,实现了微米级焦深电视像面装调;通过实物研制与外景验证,证明了本文方法的有效性。

参考文献:

- [1] 史冬冬, 黄富瑜, 杨军, 等. 超大视场红外凝视成像系统内外参数的标定与评价[J]. 陆军工程大学学报, 2024, 3(5): 33—39.
Shi Dongdong, Huang Fuyu, Yang Jun, et al. Calibration and evaluation of internal and external parameters of super-wide field-of-view infrared gaze imaging system[J]. Journal of Army Engineering University of PLA, 2024, 3(5): 33—39.
- [2] 鲍猛, 张馨瀚, 郑继红, 等. 基于波前编码的大像面荧光显微成像系统景深延拓研究[J]. 光学技术, 2024, 50(4): 411—418.
Bao Meng, Zhang Qinhan, Zheng Jihong, et al. Research on depth of field extension of large image area fluorescence microscopy imaging system based on wavefront coding[J]. Optical Technique, 2024, 50(4): 411—418.
- [3] 赵岳, 郭惠楠. 空间折返式光学系统反射镜组件胶层粘接设计与精密测量[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(8): 218—226.
Zhao Yue, Guo Huinan. Design and precision measurement of adhesive layer bonding of mirror assembly in space reentry optical system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(8): 218—226.

- [4] 于潇. 机载双谱段共口径红外双共轭变焦光学系统及微应力支撑技术研究[D]. 长春: 中国科学院大学, 2023.
- Yuxiao. Research on airborne bispectral coaperture infrared double conjugate zoom optical system and microstress support technology[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2023.
- [5] 董时. 光定心加工及装配技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2012.
- Dong Shi. Optical centering processing and assembly technology assearch[D]. Changchun: Changchun University of Science and technology.
- [6] 管伟, 王章利, 王中强, 等. 光学镜头轴线精确定心校准技术[J]. 应用光学, 2018, 39(2): 252—256.
- Guan Wei, Wang Zhangli, Wang Zhongqiang, et al. Precise optical centering calibration technology for optical lens[J]. Journal of Applied Optics, 2018, 32(2): 252—256.
- [7] 黄阳, 张超, 张祝伟, 等. 批产化空间透镜自动装调系统的设计和验证[J]. 光子学报, 2023, 52(11): 1122002.
- Huang. Yang, Zhang. Chao, Zhang Zhuowei, et al. Design and verification of automatic alignment system for batch space refractive lenses[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(11): 1122002.
- [8] 韩颖, 项建胜. 基于OptiCentric中心偏测量仪的红外光学镜组装调方法[J]. 应用光学, 2022, 43(4): 726—731.
- Han Ying, Xiang Jiansheng. Assembly and adjustment method of infrared optical lens group based on OptiCentric center-deviation measuring instrument[J]. Journal of Applied Optics, 2022, 43(2): 726—731.
- [9] 陈丽煊. 智能空间相机自动对焦算法研究[D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2020.
- Chen Lixuan. Research on autofocus algorithm of smart space camera[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, 2020.
- [10] 李森. 一种基于能量-灰度分布的图像清晰度评价方法[J]. 宇航计测技术, 2014, 34(2): 78—82.
- Li Miao. An evaluation algorithm for image sharpness based on energy-grayscale distribution[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2014, 34(2): 78—82.
- [11] Latyev S M, Burbaev A M, Beloivan P A, et al. Adjusting and monitoring the height and centering of microscope objectives[J]. Journal of Optical Technology, 2013, 80(12): 778—781.
- [12] 旷风. 大倍率相机自动聚焦算法研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2023.
- Kuang Feng. Research on autofocus algorithm for large magnification cameras[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2023.
- [13] Islam Helmy, Wooyeol Choi. Machine learning-based automatic focusing for high magnification systems[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2023, 118: 1—12.
- [14] Meini Lv, Hui Gan, Xin Liu, et al. Selection of optimal focusing evaluation function based on sparse microscopic images[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2356(1): 012030.
- [15] 郁张超. 无参考图像清晰度评价算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2023.
- Yu Zhangchao. Research on no-reference image sharpness evaluation algorithm[D]. Xi'an: Xidian University, 2023.
- [16] 牛盛光. 大规模焦平面拼接关键技术研究[D]. 长春: 中国科学院大学, 2023.
- NIU Shengguang. Research on key techniques of large-scale focal plane splicing[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2023.