

DOI: 10.20189/j.cnki.CN/61-1527/E.202502007

高精度可调焦物镜精密装调技术研究

郑 珊, 张亚葛, 张 莉, 王 帅, 胡小英*

(西安工业大学 光电工程学院, 陕西 西安 710032)

摘 要: 针对高精度可调焦物镜装配过程中误差累积导致的成像质量下降问题, 提出一种基于量化装调工艺的精密装配方法, 通过优化装配流程与关键参数控制, 提升光学系统的装调精度与稳定性。基于 Zemax 仿真软件建立光学系统模型, 通过调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 灵敏度分析确定镜组偏心与倾斜对像质的敏感度。在工艺实施阶段, 采用定心车床完成光学元件的初始定心加工, 确保镜组一次装夹同轴度误差不大于 $10\ \mu\text{m}$; 结合中心偏测量仪对镜组姿态进行动态监测与定量反馈, 实现了光轴偏差的微米级调整, 使其偏心量不大于 $20\ \mu\text{m}$ 、倾斜角不大于 $30''$ 。结果表明: 所提方法通过标准化装调流程与量化评价体系的结合, 能够有效减小装配误差对光学系统成像质量的非线性干扰; 与传统粗装调工艺相比, 所提方法将可调焦物镜的波前像差由 $0.10\ \lambda$ ($\lambda=632.8\ \text{nm}$) 优化至 $0.06\ \lambda$ 以下, 在 1、2、3 m 三种物距下的 MTF 值 ($30\ \text{lp/mm}$) 分别达到 0.64、0.68 和 0.62, 较优化前提升 40% 以上。

关键词: 内调焦光学镜头; 高精度装配; 灵敏度分析; 光轴校准; 空间光学

中图分类号: O439

文献标志码: A

文章编号: 2097-2741(2025)02-059-11

Precision Assembly and Adjustment Technologies of High-precision Adjustable Focusing Objective Lens

ZHENG Shan, ZHANG Yage, ZHANG Li,

WANG Shuai, HU Xiaoying*

(School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China)

ABSTRACT: To address image quality degradation caused by error accumulation during the assembly of high-precision adjustable-focus objective lenses, a precision assembly method based on assembly and adjustment technology was proposed. The assembly accuracy and stability of the optical system were improved by optimizing the assembly process and controlling key parameters. First, an optical system model was established based on the Zemax simulation software, and the sensitivity of the lens eccentricity and tilt of the lens group to the image quality was determined by sensitivity analysis of the MTF (Modulation Transfer Function). During the implementation

收稿日期: 2025-02-02

基金项目: 科技部基金 (G2023041018L)

第一作者: 郑珊 (1996—), 女, 硕士研究生, 主要从事光学精密装调技术研究。E-mail: 2943901647@qq.com

***通信作者:** 胡小英 (1978—), 女, 副教授, 主要从事光电信息处理技术研究。E-mail: 490027874@qq.com

引用格式: 郑珊, 张亚葛, 张莉, 等. 高精度可调焦物镜精密装调技术研究[J]. 火箭军工程大学学报, 2025, 39 (2): 59-69.
ZHENG Shan, ZHANG Yage, ZHANG Li, et al. Precision assembly and adjustment technologies of high-precision adjustable focusing objective lens [J]. Journal of Rocket Force University of Engineering, 2025, 39 (2): 59-69.

phase, a centering lathe was used for the initial centering of optical components, ensuring that the coaxiality error of the lens group was $\leq 10 \mu\text{m}$ in a single clamping. The posture of the lens group was dynamically monitored and quantitative feedback was provided using a center deviation measurement instrument. Micron-level adjustment of the optical axis deviation was achieved, ensuring that the eccentricity was $\leq 20 \mu\text{m}$ and the tilt angle was $\leq 30''$. The results show that the proposed method significantly reduces the nonlinear interference of assembly errors on the imaging quality of optical systems by combining standardized assembly and adjustment processes with quantitative evaluation systems. Compared with traditional coarse adjustment methods, the proposed method reduces the wavefront aberration of the adjustable-focus objective lens from 0.10λ ($\lambda=632.8 \text{ nm}$) to below 0.06λ . The MTF values (at 30 lp/mm) at 3 object distances of 1, 2, and 3 m reach 0.64, 0.68, and 0.62, respectively, representing an improvement of over 40% compared to the pre-optimization levels.

KEYWORDS: internal focusing optical lens; high-precision assembly; sensitivity analysis; optical axis calibration; space optics

在现代光学工程领域,高精度可调焦物镜作为核心光学元件,被广泛应用于天文观测、生物医学成像、半导体光刻、高端显微镜以及激光加工等众多前沿科技领域。随着科技的飞速发展,对光学系统的成像质量和适应性提出了愈发严苛的要求,对物镜的精度和成像质量的要求也越来越高^[1]。

国外在高精度可调焦物镜精密装调技术方面起步较早,取得了一系列显著成果。一些知名的光学企业和研究机构,如德国的 Zeiss 在高端显微镜物镜的装调技术上,采用了先进的自动化装调设备和高精度的检测仪器,能够实现纳米级别的装调精度^[2]。德国 Fraunhofer 研究所提出的基于数字全息干涉的装调技术,通过波前反演实现了 $\pm 1.5 \mu\text{m}$ 的曲率中心定位精度^[3]。然而,这些技术都依赖于高成本的检测设备。美国斯坦福大学开发基于强化学习的装调参数优化框架,将装调效率提升至 1.8 小时/件,但未公开动态稳定性测试数据,其算法“黑箱”特性导致工艺可解释性不足,制约了其标准化推广^[4]。国内一些高校和科研机构对高精度可调焦物镜精密装调技术的研究也在不断深入,中国科学院光电技术研究所在大口径高精度物镜的装调技术方面取得了重要突破,开发了一系列具有自主知识产权的装调工艺和设备,提高了我国在大口径光学系统装调领域的技术水平^[5]。茂莱光学在光刻机曝光物镜超精密光学元件加工技术方面取得突破,成功为国产光刻机提供高质量光学元件,提升了物镜分辨率,推动了国产光刻机的发展^[6]。

与国外先进水平相比,国内在装调设备精度和自动化程度、装调工艺稳定性和可靠性等方面仍存在一定差距^[7]。但因高精度可调焦物镜精密装调技术对设备和工艺要求严苛,致使其成本一直居高不下,难以广泛推广。同时,知识产权壁垒也严重阻碍了技术的交流与共享^[8]。

综上所述,尽管已有研究在高精度调焦物镜精密装调技术上取得了一定成果,但在降低成本、提高技术通用性和稳定性等方面仍存在不足。本研究旨在开发一种高精度、低成本且通用性强的调焦物镜精密装调技术,以满足多领域对高精度光学系统的需求。本文运用 Zemax 软件对调焦物镜光学系统进行建模与仿真,通过灵敏度分析确定影响调焦精度的关键参数;搭建实验平台,采用中心偏测量仪对物镜进行初始装调获取数据,结合灵敏度分析结果进行二次调校,优化装调参数;对实验数据进行深入分析,建立装调参数与调焦精度的数学模型,进一步优化装调过程,实现高精度装调。所提出的基于数学模型的装调参数优化算法,摒弃传统经验调整模式,增强了装调过程的科学性与可控性,有效降低了成本,且研发的装调技术通用性强,适用于多种调焦物镜,拓宽了高精度调焦物镜的应用范围。

1 理论分析

1.1 可调焦物镜系统的光学结构

本文所述的可调焦物镜属于内调焦结构形式,不改变系统的外部尺寸,只通过移动内部光学元

件的位置实现调焦^[9], 系统结构如图 1 所示。该系统共有 7 片透镜, 前 5 片为固定组, 主要负责整体的成像质量以及光线的基本校正; 后 2 片为调焦组, 由物镜第六镜和第七镜组成, 可以根据目标物距的变化, 通过轴向移动, 动态调整光学系统的等效焦距和像面位置, 以确保成像始终清晰。

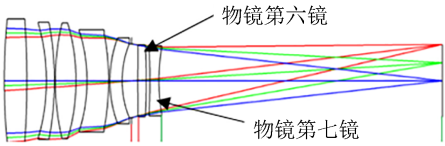


图 1 可调焦物镜光学结构
(f: 177.78-207.96 mm; 1-3 m 成像)
Fig. 1 Optical structure of the adjustable-focusing objective lens (f: 177.78-207.96 mm; 1-3 m imaging)

表 1 为其基本装调指标要求, 装调后要求其不同对焦位置 (1、2、3 m) 的波像差优于 $0.06 \lambda @ 632.8 \text{ nm}$, 全视场传函不低于 $0.6 @ 30 \text{ lp/mm}$, 各装配阶段面形均控制在 0.025λ 以内。

表 1 光学系统指标要求	
Table 1 Requirements for optical system indicators	
指标	参数
入瞳直径	40 mm
视场角	$3^\circ \times 3^\circ$
波像差	不同对焦位置均优于 $0.06 \lambda @ 632.8 \text{ nm}$
传函	中心视场不低于 $0.6 @ 30 \text{ lp/mm}$
标称焦距	200 mm
焦距调整范围	最近对焦位置小于 1 000 mm, 最远对焦位置大于 3 000 mm
透镜面形要求	定心后面形控制在 0.025λ 以内

1.2 装调误差理论

在高精度调焦物镜的装调过程中, 误差来源复杂多样, 对成像质量影响显著, 分析装调误差来源, 对于优化装调工艺、提高物镜性能至关重要。如图 2 所示, 装调误差主要包括光学元件制造误差、系统集成偏差和环境因素引起的误差^[10]。

镜头组的对准误差是常见的机械结构装配误差, 当镜头组之间的位置和角度对准不精确时, 成像质量会大幅下降^[11]。根据内调焦系统的工作原理可知, 影响系统成像质量的主要装调因素有透镜本身平移及倾斜误差和移动光学系统内部光学件时的光轴一致性误差。在光学系统中, 元件位置的微小偏差可能会导致成像效果和波像差发

生较大变化^[12], 对于可调焦光学系统而言, 这种影响更为关键^[13]。在光学元件装调过程中, 装调环境的精确控制对于确保装调精度和元件性能至关重要。本研究的装调环境设定在 $(20 \pm 2)^\circ \text{C}$ 的温度范围内, 湿度严格控制在 50% 以下, 以有效减少因环境因素导致的光学元件热胀冷缩以及受潮等问题, 从而保障装调的稳定性和准确性^[14]。

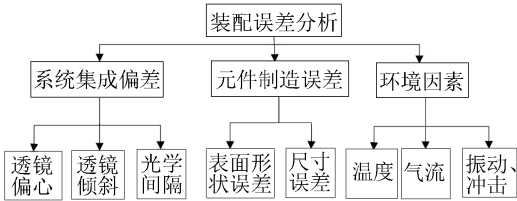


图 2 光学镜头误差来源分析
Fig. 2 Analysis of error sources of optical lenses

1.3 计算机辅助装调之光学灵敏度分析理论

在光学系统中, 光学灵敏度是衡量系统性能对各种参数变化敏感程度的重要指标。从物理意义上讲, 光学灵敏度反映了光学系统的输出特性 (如成像质量、光强分布、波像差等) 随输入参数 (如光学元件的位置、角度、折射率、曲率半径等) 的微小改变而发生变化的程度^[15]。

以成像质量为例, 当光学系统中某个透镜的位置发生微小偏移时, 图像可能会出现模糊、畸变等现象, 成像质量的变化程度就体现了其对透镜位置参数的灵敏度^[16]。若透镜位置的微小变化导致成像质量发生显著恶化, 说明该光学系统成像质量对透镜位置的灵敏度较高; 反之, 则说明其灵敏度较低。

从数学模型的角度, 假设光学系统的性能指标用函数 P 来表示, 该函数依赖于一系列的光学参数 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 即 $P = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 。那么, 对于某个参数 x_i 的光学灵敏度 S_i 可以定义为

$$S_i = \frac{\partial P}{\partial x_i} \tag{1}$$

式中: S_i 表示在其他参数保持不变的情况下, 性能指标 P 对参数 x_i 的偏导数。灵敏度 S_i 的绝对值越大, 说明性能指标 P 对参数 x_i 的变化越敏感。通过灵敏度分析, 可以直观地了解到每个性能指标对各个参数的敏感程度, 为光学系统的设计、装调以及优化提供重要依据。在光学系统装调过程中, 通过灵敏度分析, 装调人员可以重点关注对关键性能指标灵敏度较高的参数, 优先对其进行精确调整, 以达到更好的装调效果, 提高光学系统的

性能。

2 装调实验与仿真分析

传统光学镜头装调步骤为镜片密封胶嵌入镜框, 用定心车床定心加工, 将定心镜片组件装镜筒, 配置隔圈保证光学间隔, 通过观测星点和鉴别率衡量成像质量^[17]。车床定心加工能满足普通镜头精度要求, 但对有运动部件的调焦镜头还不够; 传统装调方式对人员经验要求高, 主观因素影响较大, 导致装配精度难达高标准, 一次装配合格率低, 精度、稳定性与一致性均较差, 影响产品质量和生产效率。本文在保证使用定心车床进行光学第一次定心精度的基础上, 利用计算机辅助装调技术, 对光学系统进行灵敏度分析, 确定出敏感度透镜, 并借助精密测量仪器中心偏测量仪(型号为 opti-centric 300dual)和 ZYGO 干涉仪(型号为 Verifire XPZ 6inch), 指定各透镜调整的平移、倾斜以及偏心量, 对此光学系统透镜位姿进行精调, 以提高该可调焦物镜装配精度, 并搭建实验平台, 验证该装调方法的可行性, 装调方案流程如图 3 所示。

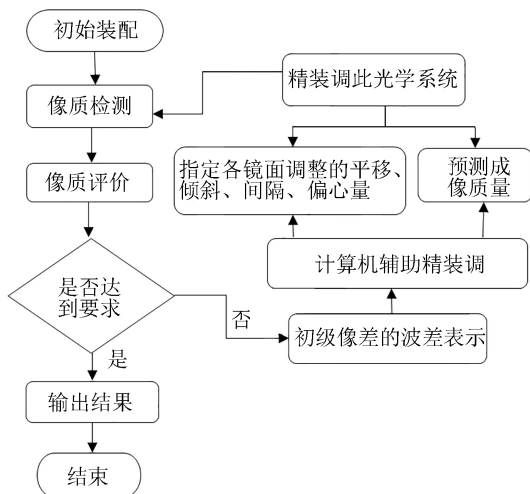


图 3 装调方案流程

Fig. 3 Process of assembly and adjustment scheme

2.1 透镜定心与装配

在高精度可调焦物镜的装调过程中, 透镜定心与装配是至关重要的环节, 其精度直接影响物镜的成像质量, 透镜的精确同心是保证光学系统成像质量的重要条件, 如果基准轴没有与光轴对准, 则存在中心误差, 若不加以保证则会严重影响装配后的成像质量^[18]。为确保该光学透镜在定

心后具备较高精度, 满足精密光学系统的严格要求, 选择自准直球心定心方式。利用自准直原理, 通过精确测量和调整, 使透镜的光轴与机械轴实现高度重合, 从而确保透镜在装配和使用过程中的光学性能和稳定性。

球心自准反射像法定心原理^[19]如图 4 所示。从十字分划 A 发出的光线, 由垂直放大率为 β 的光学系统对透镜的表面曲率中心成像, 经被检面球心反射回来的十字像位于分划板上 A' 处^[7]。若透镜的球心偏为 c , 转动透镜, 十字像 A' 亦随之跳动, 像的跳动量为 $4c\beta$ 。若分划板的分划值为 b , 则允许像 A' 的跳动格数为

$$m = (4c\beta) / b \quad (2)$$

式中: m 为像的跳动格数; c 为透镜的球心偏; β 为光学系统的垂直放大率; b 为分划板的分划值。如果像的跳动格数超过范围 m , 必须移动透镜, 直至十字像不跳动或在允许范围内跳动。

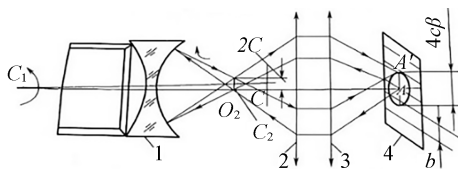


图 4 球心自准反射像法定心原理

Fig. 4 Centering principle of self-collimated reflection image of sphere center

针对该可调焦物镜的应用要求, 确定了同轴度, 中心偏差和面形精度 3 个关键的定心精度衡量指标。卧式定心机床加工精度为 0.003 mm, 将装好的镜组(镜 1、2、3、4、5、6、7)分别安装在车床的对心卡盘上, 对卡盘之 xy 方向的平移及球面转动进行调整, 2 个自准直像在使旋转车床主轴时径向及端面跳动量均不大于 0.005 mm。经过严格的加工和检测, 该高精度可调焦物镜的定心精度检测结果显示, 同轴度偏差控制在 ± 0.004 mm 以内, 中心偏差不超过 ± 0.005 mm, 2 项指标均达到预期要求。

定心加工切断时会对镜子产生应力, 衡量应力大小需要定心加工后用 ZYGO 干涉仪对透镜的面形进行检测。干涉仪作为一种常用的高精度检测仪器, 在光学定心精度检测中发挥着重要作用, 通过分析干涉条纹的形状、间距和对比度等信息, 可以准确地计算出被测光学元件表面的形貌状态。波像差均方根(Root Mean Square, RMS)常被用于衡量光学系统的性能、描述波面误差等, 反

映了实际波面相对于理想波面的整体偏离程度, 是波前所有点误差平方的平均值的平方根, 衡量的是波前误差的平均偏离程度, 对于随机误差具有更好的描述能力, 能够更全面反映整体波前质

量, 更好地预测成像性能。波像差均方根越小, 说明实际波面越接近理想波面, 光学系统的成像质量越好^[20], 表 2 为高精度可调焦物镜各装调阶段面形检测数据统计表。

表 2 某高精度可调焦物镜各装调阶段面形检测数据

Table 2 Data of surface shape detection for different assembly and adjustment stages of a high-precision adjustable focusing objective lens

λ

透镜状态	镜 1	镜 2	镜 3	镜 4	镜 5	镜 6	镜 7
裸镜	0.014	0.01	0.012	0.009	0.012	0.012	0.013
入框	0.017	0.015	0.015	0.012	0.015	0.016	0.015
入框固化	0.017	0.018	0.017	0.018	0.013	0.015	0.016
注胶固化	0.016	0.016	0.016	0.019	0.016	0.016	0.016
定心后	0.018	0.016	0.015	0.019	0.017	0.018	0.019
均值	0.016 4	0.015	0.015	0.015 4	0.014 6	0.015 4	0.015 8
标准差	0.001 35	0.002 68	0.001 67	0.004 12	0.001 85	0.001 95	0.001 93

高精度可调焦物镜面形变化数据如图 5 所示。可以看出, 透镜随着装配过程的进行, 受外界装配因素的影响会越来越大, 其面形变化值总体都比裸镜大。对比入框固化后的面形数据与定心加工后的面形检测数据, 可以明确看出, 透镜的面形精度均稳定地保持在 $0.020 \lambda@632.8 \text{ nm}$ 的范围内, 能够满足装调指标中面形控制在 0.025λ 以内的要求。

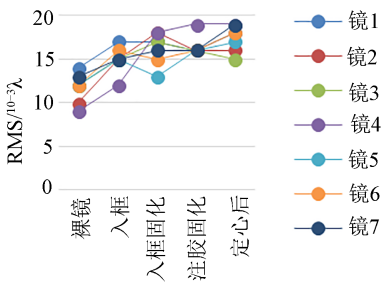


图 5 某高精度调焦物镜面形变化数据

Fig. 5 Data of surface shape changes of a high-precision adjustable focusing objective lens

2.2 光学系统灵敏度分析

由于光学仪器的特点, 光学系统初始装配完成后, 并不能满足技术指标要求, 需要对各光学元件进行精密的调整与修配, 将光学元件按照设计的理论位置进行布置, 提高光学系统的成像质量, 从而使光学系统性能满足设计要求。通过干涉仪测量光学系统的波前信息即可直观地反映系统的装调精度, 借助 Zemax 光学软件进行光学灵

敏度分析, 帮助识别出对装配顺序较为敏感的环节。基于灵敏度分析结果, 能够定位敏感度透镜, 从而在装配过程中优化装配顺序, 提高装配质量^[21]。

从公差分析看, 调焦物镜的倾斜与偏心等参数变化对像差的影响最为敏感, 输入参数为光学元件的位置 (倾斜和偏心), 输出变量是成像质量指标、波前像差等。本文选用调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 为输出变量, 利用光学设计软件 Zemax 可以方便地分析失调透镜组的像差特性, 表 3 为物镜中心偏误差设置数据^[22]。

对每一个透镜分别建立中心偏误差模型, 每片透镜平移量分别为 0.003 、 0.013 、 0.023 、 0.033 、 0.043 mm , 每片透镜的倾斜量分别为 0.01° 、 0.02° 、 0.03° 、 0.04° 、 0.05° 。对光学系统进行多次实验, 分别对其不同平移和不同倾斜下的光学系统进行像质分析, 并测量相应的输出变量 MTF。

在光学成像过程中, 由于衍射和像差的存在, 物体经过透镜后, 像的对比度会下降, 导致像质变模糊, MTF 就是描述这一对比度下降程度的函数, 其综合反映了镜头的分辨率和对像对比度的衰减程度^[23]。

表 4 为物镜平移误差灵敏度, 对表中数据进行处理与拟合, 将实验测量得到的数据进行整理和分析。

表 3 物镜中心偏误差设置
Table 3 Setting of objective lens centering errors (mm, °)

序号	镜 1	镜 2	镜 3	镜 4	镜 5	镜 6	镜 7
1	(0.003,0.01)	(0.003,0.01)	(0.003,0.01)	(0.003,0.01)	(0.003,0.01)	(0.003,0.01)	(0.003,0.01)
2	(0.013,0.02)	(0.013,0.02)	(0.013,0.02)	(0.013,0.02)	(0.013,0.02)	(0.013,0.02)	(0.013,0.02)
3	(0.023,0.03)	(0.023,0.03)	(0.023,0.03)	(0.023,0.03)	(0.023,0.03)	(0.023,0.03)	(0.023,0.03)
4	(0.033,0.04)	(0.033,0.04)	(0.033,0.04)	(0.033,0.04)	(0.033,0.04)	(0.033,0.04)	(0.033,0.04)
5	(0.043,0.05)	(0.043,0.05)	(0.043,0.05)	(0.043,0.05)	(0.043,0.05)	(0.043,0.05)	(0.043,0.05)

表 4 物镜平移误差灵敏度分析
Table 4 Sensitivity analysis of objective lens translation errors (mm, MTF)

序号	镜 1	镜 2	镜 3	镜 4	镜 5	镜 6	镜 7
1	(0.003,0.777)	(0.003,0.777)	(0.003,0.776)	(0.003,0.776)	(0.003,0.777)	(0.003,0.777)	(0.003,0.777)
2	(0.013,0.777)	(0.013,0.772)	(0.013,0.748)	(0.013,0.747)	(0.013,0.777)	(0.013,0.777)	(0.013,0.777)
3	(0.023,0.777)	(0.023,0.731)	(0.023,0.696)	(0.023,0.692)	(0.023,0.776)	(0.023,0.776)	(0.023,0.776)
4	(0.033,0.775)	(0.033,0.745)	(0.033,0.634)	(0.033,0.625)	(0.033,0.625)	(0.033,0.755)	(0.033,0.774)
5	(0.043,0.774)	(0.043,0.724)	(0.043,0.569)	(0.043,0.553)	(0.043,0.762)	(0.043,0.772)	(0.043,0.772)

设置空间频率为 30 lp/mm，在 Zemax 中计算出每组误差对应的 MTF 值，利用 Matble 软件将数据点拟合成曲线，可以得到每片透镜平移误差的灵敏度曲线。透镜平移灵敏度分析结果如图 6 所示。可以看出，随着透镜平移量的增大，MTF 值越来越小，而透镜 3、4、5 的 MTF 值变化量最大，说明透镜 3、4、5 的平移量对系统的像质影响最大。因此，在装调过程中要重点控制透镜 3、4、5 的平移。

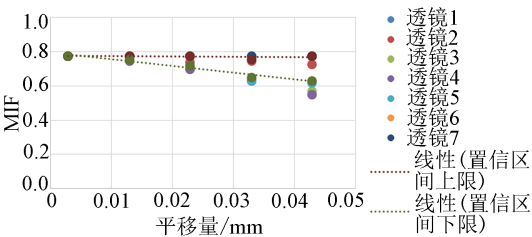


图 6 透镜平移灵敏度分析
Fig. 6 Sensitivity analysis of lens translation

表 5 为物镜倾斜误差灵敏度分析，对数据进行处理与拟合，将实验测量得到的数据进行整理和分析。

设置空间频率为 30 lp/mm，在 Zemax 中计算出每组误差对应的 MTF 值，利用 Matble 软件将数据点拟合成曲线，得到每片透镜倾斜误差的灵敏度曲线。透镜倾斜灵敏度分析结果如图 7 所示。可以看出，随着倾斜量增大，系统 MTF 值越来越小；透镜 3、4 的 MTF 值变化量最大，说明这 2 片透镜的倾斜对系统 MTF 值影响最大，在装调的过程中要重点控制透镜 3、4 的倾斜。综合分析所有透镜平移和倾斜灵敏度数据，透镜 3、4 对误差最敏感。

光学系统失调量所带来的主要影响表现为初级像差，高级像差的变化与初级像差相比较小，因此装调时把初级像差作为校正对象，装调过程中只控制初级球差、彗差和像散^[24]。图 8 是可调

表 5 物镜倾斜误差灵敏度分析
Table 5 Sensitivity analysis of objective lens tilt errors (°, MTF)

序号	镜 1	镜 2	镜 3	镜 4	镜 5	镜 6	镜 7
1	(0.01,0.777)	(0.01,0.777)	(0.01,0.776)	(0.01,0.776)	(0.01,0.777)	(0.01,0.777)	(0.01,0.777)
2	(0.02,0.777)	(0.02,0.756)	(0.02,0.570)	(0.02,0.656)	(0.02,0.775)	(0.02,0.777)	(0.02,0.777)
3	(0.03,0.777)	(0.03,0.732)	(0.03,0.427)	(0.03,0.555)	(0.03,0.772)	(0.03,0.776)	(0.03,0.776)
4	(0.04,0.777)	(0.04,0.701)	(0.04,0.323)	(0.04,0.455)	(0.04,0.768)	(0.04,0.775)	(0.04,0.774)
5	(0.05,0.777)	(0.05,0.666)	(0.05,0.240)	(0.05,0.376)	(0.05,0.774)	(0.05,0.774)	(0.05,0.774)

焦物镜波像差检测光路, 该物镜是有限远成像, 需要选用球面镜进行补偿, 转动调焦凸轮组件, 移动动组的轴向位置, 分别测量其在 1、2、3 m 处的波像差。检测温度控制在 $(20\pm2)^{\circ}\text{C}$, 湿度控制在 50% 以下, 振动抑制措施选用有气浮的光学平台进行测量。

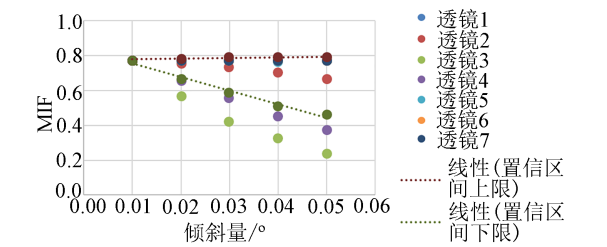


图 7 透镜倾斜灵敏度分析
Fig. 7 Sensitivity analysis of lens tilt

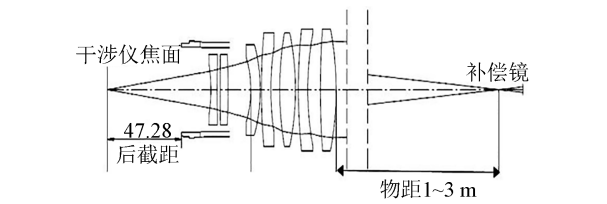


图 8 可调焦物镜波像差检测光路
Fig. 8 Optical path for wave aberration detection of adjustable focusing objective lens

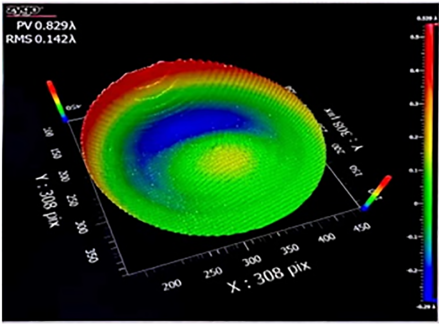
使用 ZYGO 干涉仪先对粗装调后的光学镜头进行波像差检测, 传统粗装调波像差检测结果如图 9 所示。竖条状颜色区间沿着波前图水平方向分布, 不同颜色代表不同的波前误差范围, 红色代表高点, 蓝色代表低点, 绿色和黄色表示面形比较均匀。通常情况下, 主要参考均方根值 RMS^[25]。传统粗装调后测量波像差, 1、2、3 m 处的 RMS 分别为 0.142λ 、 0.132λ 、 0.103λ , 其不同物距下的波像差均大于装调指标要求的 0.06λ 。对于不含调焦机构的镜头来说, 一般第一次定心就能满足其精度要求。然而, 对于含有调焦机构的系统来说, 由于动组和定组之间还需要进行配合, 而配合的精度与机械结构设计和零件加工精度都有密切的联系, 仅通过一次定心加工远远不能满足可调焦物镜的装配精度, 因此需要进一步精细调整。

2.3 基于中心偏误差分析的光轴二次校调

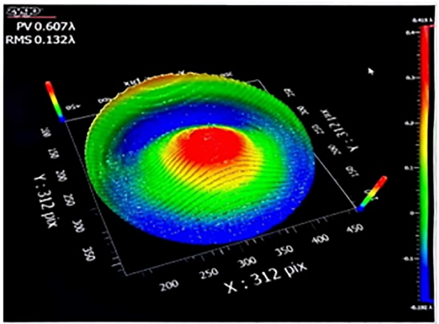
球面玻璃表面存在中心偏, 如图 10 所示, R 为球面曲率半径, a 为球面曲率中心到参考轴的距离。将球面与参考轴的交点和球面的曲率中心相连接, 得到一条直线, 此直线与参考轴存在一个

夹角, 称为面倾角 (Surface Tilt Error)^[9]。面倾角大小可用公式表示为

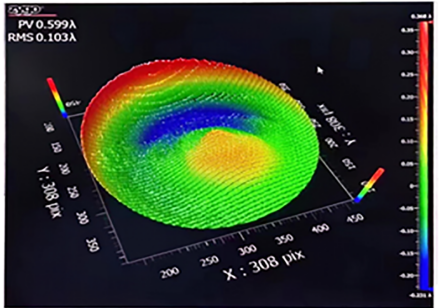
$$E_{st} = \arctan (a/R) \tag{3}$$



(a) 在 1 m 处的波像差



(b) 在 2 m 处的波像差



(c) 在 3 m 处的波像差

图 9 传统粗装调波像差检测结果
Fig. 9 Detection results of wave aberration in traditional rough assembly

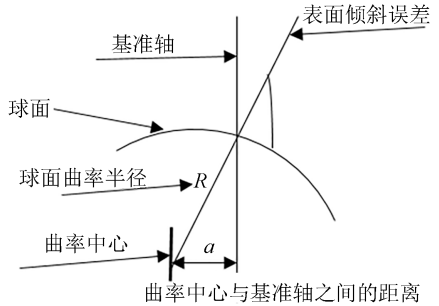


图 10 球面透镜中心偏
Fig. 10 Central deviation of spherical lens

中心偏测量具体操作就是通过光学中心偏测量仪把指标像投影到被测面的曲率中心附近的位

置上，然后测量经系统出射后指标自准像的偏移量，可以通过精确测定所有各面指标自准像的偏移量，计算出各面的球心偏差^[26]。

第一次定心加工后将定心镜片组件装镜筒后的中心偏测量数据如表 6 所示。可以看出，透镜 2、3、4 的平移和透镜 2、3、6 的倾斜都比较大，需要根据中心偏测量出来的各透镜的平移和倾斜量进行精调，表 7 为中心偏调校后各透镜平移和倾斜数据。

表 6 中心偏调校前各透镜平移和倾斜数据
Table 6 Translation and tilt data of different lens before centering deviation

透镜	平移/ μm	倾斜/ $(^{\circ})$
镜 1	73.505	45.9
镜 2	96.694	149.9
镜 3	87.518	163.9
镜 4	98.917	63.2
镜 5	70.423	29.053
镜 6	37.281	100.6
镜 7	20.388	20.7
均值	69.246	81.893
标准差	27.764	53.293

表 7 中心偏调校后各透镜平移和倾斜数据
Table 7 Translation and tilt data of each lens after centering deviation

透镜	平移/ μm	倾斜/ $(^{\circ})$
镜 1	7.796	23.21
镜 2	8.94	24.05
镜 3	5.396	17.68
镜 4	9.412	16.71
镜 5	13.556	21.25
镜 6	10.265	20.72
镜 7	13.125	27.96
均值	9.784	21.654
标准差	2.664	3.569

通过精调使得所有透镜的平移量在 $20\text{ }\mu\text{m}$ 以内，倾斜量在 30° 以内，使用 ZYGO 干涉仪对精细调整后的系统波像差进行检测。

2.4 实验结果分析

由于实际装调环境影响，激光干涉仪在采集

数据时会带入一些扰乱因素（如温度、气流、振动等）产生的误差，从而导致数据采集得到的波像差存在一定误差，调整机构的精度也会影响装调精度，故在装调过程中须经过几次迭代精调，才能使得检测数据在公差允许范围之内。

系统迭代精调后的波像差检测结果如图 11 所示，在 1 m 处的 RMS 为 $0.045\text{ }\lambda@632.8\text{ nm}$ ，在 2 m 处的 RMS 为 $0.054\text{ }\lambda@632.8\text{ nm}$ ，在 3 m 处的 RMS 为 $0.056\text{ }\lambda@632.8\text{ nm}$ ，满足装调指标光学系统波像差低于 $0.06\text{ }\lambda@632.8\text{ nm}$ 的要求，不同物距下精调后系统波像差统计表如表 8 所示。

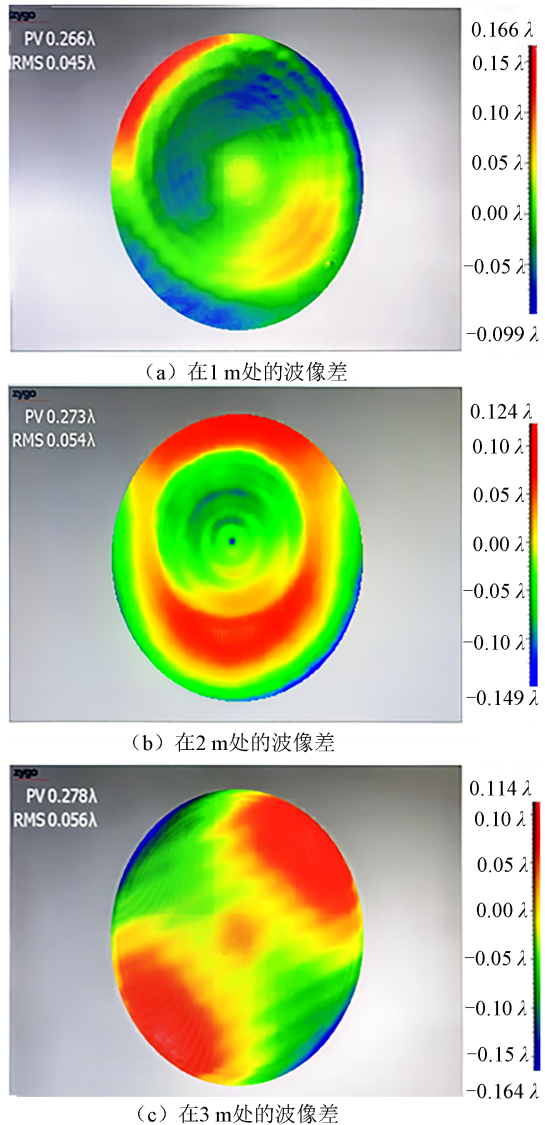


图 11 系统精调后的波像差检测结果
Fig. 11 Detection results of wave aberration after system fine-tuning

MTF 表示各不同频率的正弦强度分布函数经光学系统成像后对比度的衰减程度。空间频率越

高，成像后的对比度下降越严重。通常情况下，MTF 越高，系统的像越清晰。MTF=1 表示像包含了物的全部信息，没有失真。但由于光波在光学系统孔径上发生的衍射以及像差（包括光学元件设计中的余留像差及装调中的误差），信息在传递过程中不可避免会出现失真。总的来讲，空间频率越高，传递性能越差，该可调焦物镜在不同空间频率和物距下传函值如表 9 所示。

表 8 不同物距下精调后系统波像差信息
Table 8 Data of system wave aberration after fine-tuning at different object distances

不同物距/m	粗装调后的波像差/ λ	中心偏精调后的波像差/ λ
1	0.142	0.045
2	0.132	0.054
3	0.103	0.056

表 9 不同空间频率和物距下传函值
Table 9 Transfer function values at different spatial frequencies and object distances

空间频率/ $\text{lp}\cdot\text{mm}^{-1}$	1 m 处子午 方向传函	1 m 处弧矢 方向传函	2 m 处子午 方向传函	2 m 处弧矢 方向传函	3 m 处子午 方向传函	3 m 处弧矢 方向传函
10	0.88	0.87	0.90	0.86	0.85	0.85
20	0.75	0.75	0.79	0.75	0.71	0.72
30	0.64	0.63	0.68	0.65	0.60	0.61
40	0.54	0.52	0.57	0.55	0.51	0.52
50	0.45	0.43	0.48	0.47	0.44	0.46
60	0.40	0.38	0.40	0.40	0.40	0.40
70	0.33	0.31	0.32	0.32	0.35	0.36
80	0.30	0.28	0.28	0.28	0.31	0.31
90	0.28	0.24	0.24	0.24	0.29	0.29

可以直观地看出，随着空间频率越来越高，MTF 值越来越低，装调指标要求 30 线对数下 MTF 值要优于 0.6。在 30 线对数下，全视场范围内 1 m 处的传函子午方向 0.64，弧矢方向 0.63；全视场范围内 2 m 处的传函子午方向 0.68，弧矢方向 0.65；全视场范围内 3 m 处的传函子午方向 0.60，弧矢方向 0.61。在这 3 个物距下传函值都在 0.6 以上，满足装调指标光学系统传函优于 0.6@30 lp/mm 的要求。

3 结论

本研究通过理论建模、仿真分析与实验验证，系统提出了高精度可调焦物镜的精密装调技术方案，该方法装配精度高、应力小，将系统波像差从 0.10 λ 优化到了 0.06 λ 以内，与传统粗装调相比，波像差降低 40%，且传函值在 3 个物距下都在 0.6 以上，可以保证内调焦光学结构的精确性和稳定性。针对可调焦物镜提出的基于灵敏度分析与光轴二次校准的装调参数动态匹配模型，解决了传统经验调校中的人为误差问题。开发了一种光

学精密装调用定位架，提高了对光学玻璃装夹的稳定性。通过建立物镜偏心量与传递函数的定量关系，为光学系统公差分析提供了新依据。该装调工艺已成功应用于某航天领域高精度可调焦物镜的装调，且装调后的指标满足要求。

可调焦物镜精密装调技术作为光学领域的关键研究方向，其未来突破需聚焦以下核心挑战。

- 1) 超精密加工技术：发展离子束/飞秒激光纳米加工工艺，提升镜片曲率与厚度的亚纳米级控制能力，降低制造误差对焦距精度的影响；
- 2) 动态自适应调控：集成自适应光学技术，实现环境扰动（温度、振动）的实时补偿与观测目标的智能匹配；
- 3) 虚拟装调技术：利用计算机模拟和虚拟现实技术，进行物镜的虚拟装调，提前预测和优化装调方案，减少实际装调中的误差和风险。

参考文献

[1] 苏云，葛婧菁，王业超，等. 航天高分辨率对地光学遥感载荷研究进展[J]. 中国光学，2023，16(2)：258-282.

- SU Y, GE J J, WANG Y C, et al. Research progress on high-resolution imaging system for optical remote sensing in aerospace[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(2): 258-282.
- [2] 陈华, 沈建新, 姚凤莹. 基于裂隙灯转鼓的数字化装校技术研究[J]. *应用光学*, 2019, 40(1): 127-131.
- CHEN H, SHEN J X, YAO F Y. Research on digital alignment technology based on rotating drum of slit-lamp[J]. *Applied Optics*, 2019, 40(1): 127-131.
- [3] 张悦萌, 蔡萍, 隆军, 等. 多波长数字全息计量技术综述[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(10): 24-35.
- ZHANG Y M, CAI P, LONG J, et al. Review of multi-wavelength digital holography metrology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(10): 24-35.
- [4] 宋莉, 李大字, 徐昕. 逆强化学习算法、理论与应用研究综述[J]. *自动化学报*, 2024, 50(9): 1704-1723.
- SONG L, LI D Z, XU X. A survey of inverse reinforcement learning algorithms, theory and applications[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2024, 50(9): 1704-1723.
- [5] 姜晰文, 赵金字, 吕天宇, 等. 大口径主焦点式光学系统的设计与装调[J]. *光学精密工程*, 2022, 30(23): 2987-2994.
- JIANG X W, ZHAO J Y, LYU T Y, et al. Design and alignment of large-aperture prime focus optical systems[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(23): 2987-2994.
- [6] 何乐. 茂莱光学: 加速高端工业级精密光学国产化[J]. *经理人*, 2023(7): 32-34.
- [7] 刘检华, 夏焕雄, 巩浩, 等. 精密装配的内涵、技术体系和发展趋势[J]. *机械工程学报*, 2023, 59(20): 436-450.
- LIU J H, XIA H X, GONG H, et al. Connotation, technical system and development trends of precision assembly[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59(20): 436-450.
- [8] 张壮壮. 航空相机光机关键技术研究与分析[D]. 长春: 长春工业大学, 2023: 9-10.
- ZHANG Z Z. Research and analysis of the aerial camera optical machine's key technology[D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2023: 9-10.
- [9] LYU T, RUAN P, LI C, et al. Modeling and experimental validation of a focusing system based on fixed-clamped compliant mechanism[J]. *Measurement*, 2025, 246: 116625.
- [10] XIONG Z, WANG H, CAO T, et al. Error analysis on assembly and alignment of laser optical unit[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2015, 7(7): 1-10.
- [11] ZENG Z H, ZHOU T F, YU Q, et al. Alignment error modeling and control of a double-sided microlens array during precision glass molding[J]. *Microsystems & Nanoengineering*, 2024, 10: 48.
- [12] 周双, 刘子建. 光学系统装配误差分析及装调路径优选[J]. *机械设计与制造*, 2022(1): 159-163, 167.
- ZHOU S, LIU Z J. The assembly error analysis of optical system and path optimization of alignment[J]. *Mechanical Design & Manufacturing*, 2022(1): 159-163, 167.
- [13] SÁNCHEZ-GONZÁLEZ A, YELLOWHAIR J. Reflections between heliostats: model to detect alignment errors[J]. *Solar Energy*, 2020, 201: 373-386.
- [14] 张长帅, 张雷, 丛杉珊. 空间相机焦面分光镜高精度装调技术[J]. *计量与测试技术*, 2024, 51(8): 105-108, 112.
- ZHANG C S, ZHANG L, CONG S S. High-precision installation and adjustment of focal plane spectroscopy of space camera[J]. *Metrology & Measurement Techniques*, 2024, 51(8): 105-108, 112.
- [15] SANGHYUK K. Sensitivity analysis of the optical system for UV-IR space telescope[J]. *The Bulletin of The Korean Astronomical Society*, 2015, 40(2): 56-57.
- [16] 吴慎将, 孙奕晗, 荆宇强, 等. 光子多普勒测速仪多目标点探头光学设计[J]. *火箭军工程大学学报*, 2024, 38(5): 81-87, 118.
- WU S J, SUN Y H, JING Y Q, et al. Optical design of a probe for multipoints photon Doppler velocimetry[J]. *Journal of Rocket Force University of Engineering*, 2024, 38(5): 81-87, 118.
- [17] 李星, 阚博涵, 尤宏波, 等. 小口径反射式光学系统装调方法研究分析[J]. *激光与红外*, 2023, 53(6): 933-938.
- LI X, KAN B H, YOU H B, et al. Research and analysis of assembly and adjustment methods for small aperture mirror[J]. *Laser & Infrared*, 2023, 53(6): 933-938.
- [18] LEI Y, FU X, KANG S F, et al. Calculation of verticality in large-aperture optical centering machinery turning[J]. *AOPC 2020: Optics Ultra Pre-*

- cision Manufacturing and Testing, 2020: 11568.
- [19] 左晓舟, 姜峰, 张燕, 等. 高精密标准镜头定心装调技术研究[J]. 应用光学, 2014, 35(6): 1035-1039.
- ZUO X Z, JIANG F, ZHANG Y, et al. Centering and alignment technology of high-precision standard lens[J]. Journal of Applied Optics, 2014, 35(6): 1035-1039.
- [20] LUO Y. Analysis and optimization of image quality evaluation function in computer-aided alignment of precision optical system[J]. Modern Applied Science, 2020, 14(6): 29.
- [21] 钱峰. 高精复杂光学系统装配与调试关键技术研究[J]. 中文科技期刊数据库(全文版)工程技术, 2024(7): 0175-0180.
- QIAN F. Research on key technologies for assembly and debugging of high-precision complex optical systems[J]. Chinese Science and Technology Journal Database (Full Text Edition) Engineering Technology, 2024(7): 0175-0180.
- [22] BAUMGART M, HOFBAUER A, HENNECKE M, et al. Detailed study of laser diode array collimation based on a tolerancing analysis[J]. Optics Express, 2025, 33(2): 1791.
- [23] 邱震, 陈伟豪, 雷亮. 基于倾斜狭缝法的光学镜头MTF测量研究[J]. 光学与光电技术, 2024, 22(6): 44-50.
- QIU Z, CHEN W H, LEI L. Research on optical lens MTF measurement based on improved inclined slit method[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2024, 22(6): 44-50.
- [24] 张峰干, 何芳, 肖磊, 等. 基于拉普拉斯矩阵图的高光谱图像异常目标检测方法[J]. 火箭军工程大学学报, 2025, 39(1): 1-12.
- ZHANG F G, HE F, XIAO L, et al. Laplacian matrix graph-based anomaly target detection method for hyperspectral graphs[J]. Journal of Rocket Force University of Engineering, 2025, 39(1): 1-12.
- [25] LIU X, HUANG Y, YAN X, et al. The correction method for wavefront aberration caused by spectrum-splitting filters in multi-modal optical imaging system[J]. Photonics, 2024, 11(9): 876.
- [26] 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 Y, XIANG J S. Assembly and adjustment methods for infrared optical mirrors based on Opti-Centric center-deviation measuring instrument[J]. Journal of Applied Optics, 2022, 43(4): 726-731.
- (编辑: 于福兴)