

DOI: 10.20189/j.cnki.CN/61-1527/E.202603010

# 基于离轴三反结构的多波段光轴一致性 原位测试系统

杨菲, 胡小英\*, 宋欣怡, 何禹呈, 杜文涛, 潘江帆, 雷绪恩

(西安工业大学 光电工程学院, 西安 710021)

**摘要:** 为解决多光谱光电装备在外场环境中快速、高精度标校的难题, 设计并验证了一款基于离轴三反结构的多波段光轴一致性原位测试系统。首先, 采用离轴抛物面主镜构成纯反射式平行光管, 覆盖 $0.4\sim 12\ \mu\text{m}$ 宽谱段, 以避免色差并实现无中心遮拦成像; 其次, 通过共口径设计与介质膜分光技术, 为可见光、激光及中波/长波红外通道提供统一的角度基准; 最后, 采用自校准相机和热补偿结构, 保障外场适用性。在光学设计层面, 借助Zemax软件进行全局优化, 同时引入自由曲面次镜及三重像差补偿机制, 使系统波前误差均方根值 (root mean square, RMS) 优于 $0.032\lambda$  ( $\lambda=632.8\text{ nm}$ ), 且全视场点列图RMS半径小于艾里斑半径, 满足衍射极限要求。仿真实验结果表明: 系统光轴平行度检测精度为 $4.8''$ , 扩展不确定度为 $5.6''$  ( $k=2$ ); 在 $-20\sim +55\text{ }^\circ\text{C}$ 宽温范围内, 光轴平行度变化小于 $6.83''$ ; 依据GJB 150.16A—2009标准进行振动试验后, 光轴变化小于 $5''$ ; 验证了该系统作为外场高精度标校工具的可行性与可靠性, 为光电装备的快速保障与效能评估提供了有效的技术手段。

**关键词:** 光轴一致性; 原位测试; 离轴三反系统; 多波段共口径

**中图分类号:** O436

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2097-2741(2026)03-0120-11

随着现代光电技术的快速发展, 集成可见光成像、激光测距/照射与红外探测的多波段光电系统, 在军事侦察、遥感探测与精确制导等领域的应用日益广泛<sup>[1-5]</sup>。这类系统的综合效能高度依赖于各传感器光轴在空间指向的高度一致性, 即光轴一致性<sup>[6-8]</sup>。因此, 发展高精度、高效率的光轴一致性检测技术, 对于保障装备性能、提升战技指标至关重要。

针对光轴一致性检测, 国内外学者已开展了大量研究并取得了一定成果, 主要可分为基于精密仪器的实验室检测法与面向特定环境的原位测试法两大类<sup>[9-11]</sup>。在实验室高精度检测方面, Wang等<sup>[12]</sup>提出了“基面校准—通道对准”两步法, 结合经纬仪与干涉仪, 成功将环形三通道系统平行

度测量精度提升至 $12.4''\sim 15''$ ; 张娟等<sup>[13]</sup>通过建立别汉棱镜角度误差的矢量模型, 将棱镜装调后的光轴一致性精度提升至 $24.57''$ 。这类方法虽然精度高, 但严重依赖大型固定设备 (如干涉仪、精密转台) 和恒温、隔振的实验环境, 无法适用于装备部署现场或野外阵地的快速检测与标校。为提升环境适应性, 部分研究转向了可移动或更具鲁棒性的测试系统。例如, 张磊等<sup>[14]</sup>研发了基于卡塞格林平行光管结构的多光轴测试系统, 通过热补偿设计将 $-40\sim +55\text{ }^\circ\text{C}$ 温区内平行偏差控制在 $4''$ 以内; Xie等<sup>[15]</sup>与Ma等<sup>[16]</sup>则分别利用摄影测量和激光校准技术, 实现了微角秒级至角秒级的校准和测量。这些方法在环境适应性或便携性上取得了进展, 但其工作波段往往较为单一, 或虽兼

收稿日期: 2026-01-08

修回日期: 2026-02-25

录用日期: 2026-04-16

基金项目: 偏振成像系统关键技术研究 (G2023041018L)

第一作者: 杨菲 (1983—), 女, 高级工程师, 主要从事高精密仪器光学设计及测量设备装配工艺研究。

\*通信作者: 胡小英 (1978—), 女, 副教授, 主要从事先进成像技术研究。

**引用格式:** 杨菲, 胡小英, 宋欣怡, 等. 基于离轴三反结构的多波段光轴一致性原位测试系统[J]. 火箭军工程大学学报, 2026, 40 (3): 120-130. YANG Fei, HU Xiaoying, SONG Xinyi, et al. Off-axis three-mirror structure-based in-situ testing system for multi-band optical axis consistency[J]. Journal of Rocket Force University of Engineering, 2026, 40 (3): 120-130.

容多波段却难以在宽谱段内同时保持高精度与高稳定性<sup>[17-21]</sup>。例如, 基于折射元件的系统易受色差影响, 难以覆盖可见光到长波红外的超宽光谱<sup>[4]</sup>; 而一些反射式系统又可能受中心遮拦影响<sup>[22-24]</sup>, 成像对比度与光斑定位精度偏低。

现有光轴一致性检测技术在外场复杂环境适应性、多波段同步兼容性及亚角秒级检测精度等方面难以同时兼顾。其根本原因在于, 传统方法或受限于透射式光学系统的色差与热差, 或受制于共轴反射系统的中心遮拦与杂散光<sup>[25-27]</sup>, 难以在宽温、振动等外场复杂条件下<sup>[28-29]</sup>, 为超宽谱段提供一个稳定、统一且无像质劣化的高准直度光学基准。

因此, 针对光电装备在外场复杂环境下多波段光轴一致性快速、高精度原位测试的迫切需求, 设计了一款基于离轴三反结构的多波段光轴一致性原位测试系统。首先, 采用无中心遮拦的离轴三反共口径光学系统作为核心, 从根本上避免色差与中心遮拦, 为实现可见光 ( $0.4\sim 0.7\ \mu\text{m}$ ) 至中波/长波红外 ( $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 、 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ ) 超宽谱段的高精度测试提供理想的光学基准; 其次, 通过集成自校准模块与热/振稳定性设计, 使系统在保持实验室级检测精度的同时, 具备在  $-20\sim +55\ ^\circ\text{C}$  宽温范围及振动环境的原位工作能力。

## 1 系统总体结构

本研究设计了一款多波段光轴一致性原位测试系统, 该系统主要由两部分组成, 分别是光轴观测系统和光轴一致性测试装置。前者主要是被测光电设备, 后者则包含光学测试系统、安装调试支架, 以及一些外围设备如计算机、图像采集卡和分析测试软件等。

光学测试系统的光轴一致性测试原理如图1所示, 以  $1.064\ \mu\text{m}$  激光为基准光轴, 采用有效口径为  $128\ \text{mm}$ 、焦距为  $1\ 100\ \text{mm}$  的离轴抛物面反射式平行光管, 并利用点孔型靶板和可见/红外复合光源, 以实现激光与红外光轴一致性的自校准和测试。

平行光管用来提供大口径平行光; 复合光源为平行光管提供照明; 靶板由点孔靶和激光转红外靶构成; 自检部件采用一个长焦距测量相机, 放置在平行光管出口, 可对性能测试设备自身光轴进行校准; 便携式控制组件可对激光能量、灵敏度进行实时采集, 并计算光轴测量精度。在探

测器端, 设置制冷型碲化钢焦平面阵列用于中波红外 ( $3\sim 5\ \mu\text{m}$ ) 波段探测; 非制冷型氧化钒微测辐射热计, 用于长波红外 ( $8\sim 12\ \mu\text{m}$ ) 波段探测<sup>[8]</sup>; 同时配备像元尺寸为  $5.5\ \mu\text{m}$ 、分辨率为  $2\ 048\times 2\ 048$  的可见光电荷耦合器件 (charge coupled device, CCD) 相机, 由上位机控制, 用来实时捕获视场中的光斑图像。

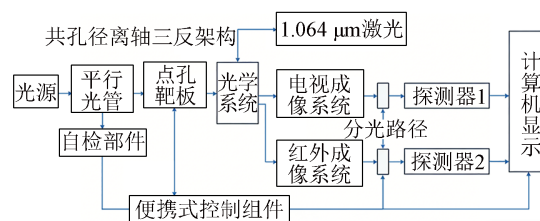


图1 光轴一致性测试原理

Fig. 1 The optical axis consistency test principle

光路采用共口径离轴三反结构, 并利用 Zeemax 光学设计软件进行全局优化, 同时引入自由曲面次镜及三重像差补偿机制, 使得全视场均方根 (root mean square, RMS) 波前误差控制在  $0.05\lambda$  ( $\lambda = 632.8\ \text{nm}$ ) 以内。分光路径采用宽带介质膜分光镜, 将入射光按照不同波段进行分离, 从而实现三波段同步独立检测。其中, 可见光经过分光棱镜进入 CCD 成像通道, 激光束由二向色镜单独引出并投射至位置敏感探测器, 红外光则透射至热成像仪探测面。为抑制杂散光所造成的干扰, 把所有非工作面进行消光黑化处理, 并在光路中加入可切换式衰减片组, 其光密度衰减范围为  $0.3\sim 3.0$ , 以此来适配不同动态范围信号的输入。数据采集系统由 PXI Express 标准的高速数据采集卡以及现场可编程门阵列实时处理模块组合而成, 支持四通道同步采样, 时间同步精度优于  $1\ \mu\text{s}$ , 可确保多波段光轴数据能在毫秒级时间内完成同步捕获和坐标解算。

## 2 平行光管设计和系统仿真分析

### 2.1 平行光管设计

传统卡塞格林等共轴反射系统存在次镜遮挡现象, 会降低系统调制传递函数值 (modulation transfer function, MTF)、引入衍射环, 干扰高精度光斑中心定位; 透射式系统则受限于透镜材料的透射波段和色差, 如单一透镜材料无法覆盖可见光到长波红外的超宽谱段, 组合不同材料会显著增加系统复杂度并引入热差, 而色差会导致不同波段的光线会聚于不同像面, 这在多波段光轴

一致性测量中会直接破坏统一的角度基准,导致测量失效。对此,本研究采用离轴抛物面主镜与折轴反射镜次镜组合的平行光管,以实现无中心遮拦的全口径利用,并结合纯反射特性,使其能够覆盖从可见光到红外宽谱段范围,且无材料色散影响,从根本上保证其作为多波段共同角度基准的普适性与稳定性。同时系统采用共口径设计,使不同波段光线在通过平行光管主镜前共享同一路径,确保可见光、激光与红外光束从源头上具有相同的空间基准,避免了采用多个独立平行光管时难以消除的装调对准误差。综上,离轴三反结构从无色差、无遮拦波前扰动、源头共口径3方面为构建多波段光轴一致性测试系统提供了优越条件。

平行光管作为测试系统的核心部件,负责生成高准直、高波前质量的基准平行光束,主要由主镜与次镜构成。其中,主镜为有效口径 $\Phi 135$  mm的离轴抛物面反射镜,次镜由3块有效口径分别为 $\Phi 110$  mm、 $\Phi 85$  mm和 $\Phi 50$  mm的折轴反射镜组成,且次镜属于平面反射镜。主次镜均采用微晶玻璃材料,以降低热变形所带来的影响,并在表面镀上宽谱段(350 nm~16  $\mu$ m)高反射膜层,以满足无遮拦和宽谱段成像要求。离轴无中心遮拦共口径平行光管结构如图2所示。

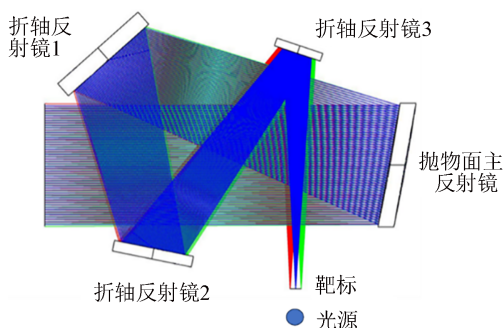


图2 离轴无中心遮拦共口径平行光管

Fig. 2 Off-axis common-aperture collimator without center obstruction

平行光管将位于其焦平面的点孔靶标成像到无穷远,为被测系统的各个波段提供了一个共同的、确定的空间角度参考。各波段探测器测量到的靶标像点位置差异,直接反映了它们光轴指向的相对偏差,即光轴不一致性。因此,平行光管自身光束的准直精度(波前质量)和指向稳定性直接决定了整个测试系统的精度上限。对此,本研究利用离轴三反结构进行像质优化,以保障平行光管自身光轴的一致性。

## 2.2 系统像差分析

利用光学设计软件Zemax构建系统模型,采用阻尼最小二乘法进行优化,对离轴抛物面主镜(曲率半径 $R = 2\,200$  mm,离轴量 $h = 300$  mm)与3块折轴反射镜进行光线追迹与像差优化,优化函数中重点控制不同视场、不同波长的波前误差和光斑尺寸。

### 2.2.1 点列图

由于系统存在剩余像差,物面上一点发出的光线经光学系统折射后,无法在像面上会聚于同一点,而是分散在一定范围内的弥散图形,即点列图。点列图上点的密集程度即为系统像质优劣的判断依据。平行光管不同视场点列图如图3所示。

由图3可知,轴上 $0^\circ$ 视场全波段内点列图RMS半径为 $0.018\ \mu\text{m}$ ,远小于艾里斑半径 $6.346\ \mu\text{m}$ ;轴外 $\pm 0.33^\circ$ 边缘视场光斑呈对称类圆形弥散,RMS半径分别为 $89.488\ \mu\text{m}$ 、 $86.556\ \mu\text{m}$ ,几何半径(geometric radius, GEO)分别为 $147.365\ \mu\text{m}$ 、 $139.310\ \mu\text{m}$ ,结合 $400\ \mu\text{m}$ 比例尺可直观判断光斑尺寸与能量分布;各波段光斑均呈对称的圆形或近圆形分布,无明显彗差、像散等不对称性弥散,表明系统成像质量均匀且清晰。

### 2.2.2 波前误差

在光学系统中,理想情况下从点光源发出的光经过光学系统后,波前应该是一个理想的球面(对于会聚光束)或平面(对于平行光束),并且会聚在一个理想的像点上。然而,由于光学系统存在像差、制造误差、装调误差、材料不均匀等因素,实际波前会偏离理想状态,这个偏离量就是波前误差。 $632.8\ \text{nm}$ 波长下平行光管不同视场波前误差如图4所示,图中 $P_x$ 、 $P_y$ 分别为光瞳面上水平、垂直方向空间位置的归一化值。

通过Zemax软件读取波前误差图像数据可知,图4(a) $0^\circ$ 视场下波前误差RMS值为 $0.032\lambda$ ( $\lambda = 632.8\ \text{nm}$ ),峰谷值为 $0.156\lambda$ ,远优于 $0.1\lambda$ 和 $0.33\lambda$ 的工程设计标准<sup>[30]</sup>;从图4(b)~(d)可以看出,随着视场增大至 $0.33^\circ$ ,RMS虽略有增加,但仍被控制在 $0.05\lambda$ 内,光轴方向发生偏移较小,成像质量均匀且清晰。

### 2.2.3 垂轴像差曲线

垂轴像差曲线量化了光线在像平面上的偏离程度,如果曲线较为平坦,说明像差较小,成像质量相对较高;如果曲线起伏较大,则表示像差严重,成像会变得模糊。平行光管不同视场的垂

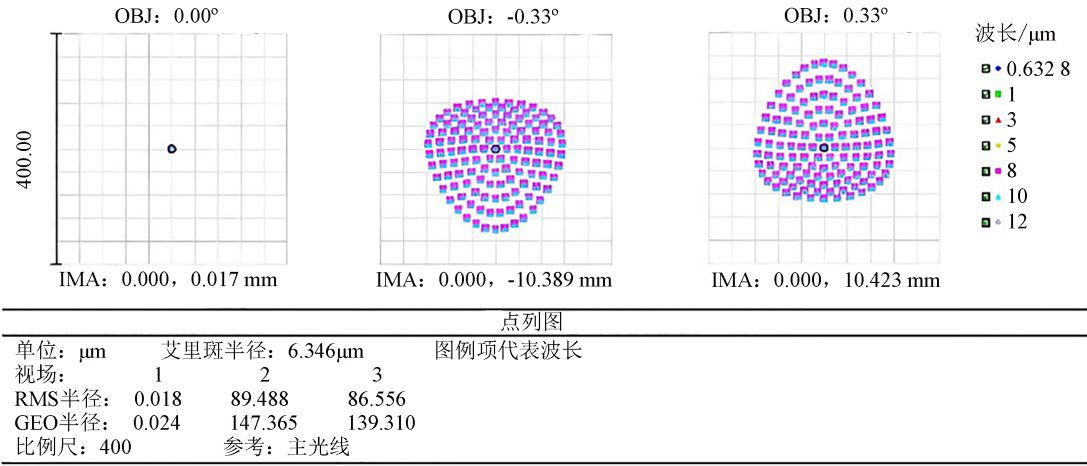


图 3 不同视场的点列图

Fig. 3 Spot diagrams at different fields of view

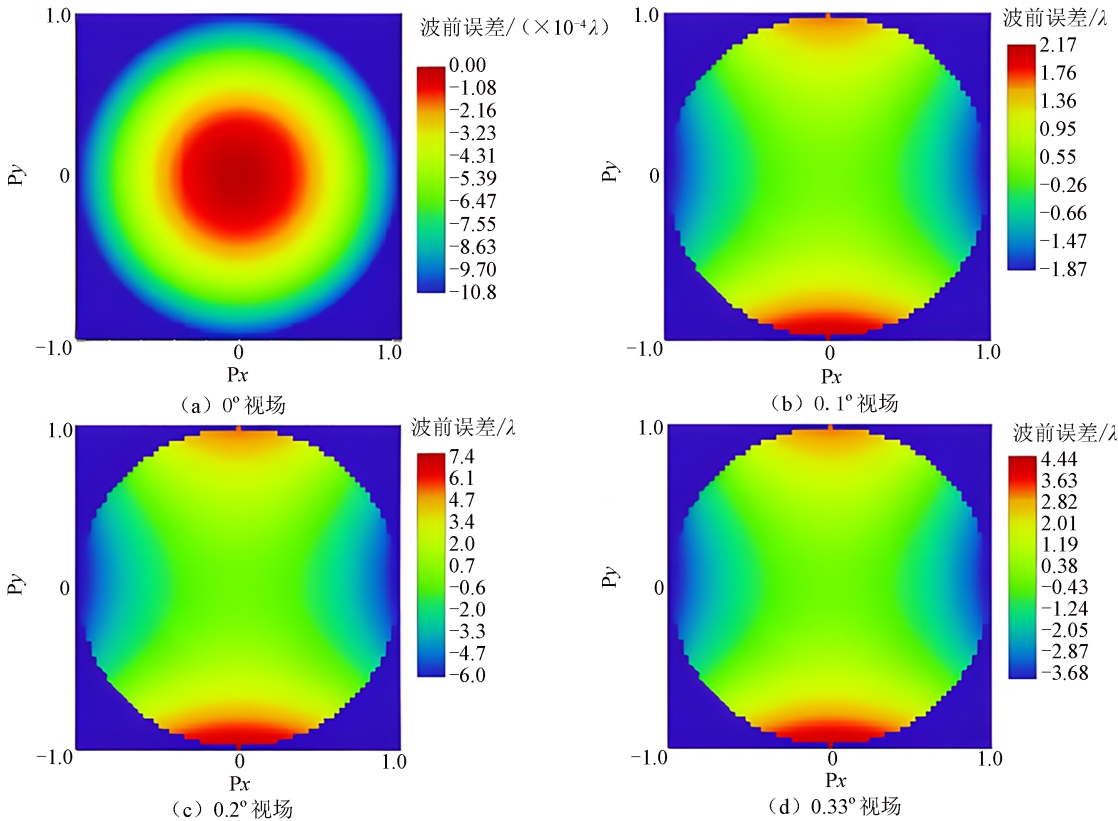


图 4 不同视场的波前误差

Fig. 4 Wave front errors at different fields of view

轴像差曲线如图 5 所示。

在全视场范围内, 系统的垂轴像差随视场的变化曲线在不同波长下高度重合, 表明倍率色差已得到彻底校正。在 0° 视场, 曲线整体贴近零轴, 无明显波动, 说明轴上光线高度会聚; 在  $\pm 0.33^\circ$  视场, 曲线微小倾斜, 存在微量彗差, 垂轴像差略有增大, 但整体仍控制在最大刻度  $\pm 200\mu\text{m}$  范围内, 满足宽视场测试需求。综上可得, 光线在像面上会聚位置偏差极小, 系统像差得到了

有效控制, 成像质量优异。

2.2.4 光程差曲线

理想光学系统的光程差曲线应该是一条相对平稳的直线, 其光程差几乎为零, 意味着不同波长的光线能够很好地会聚, 成像质量高。如果曲线出现明显波动和起伏, 说明存在像差, 波动越大, 像差越严重。球差会使光程差曲线在轴上点和边缘点呈现不同变化趋势, 而色差则会导致不同波长的光对应的光程差曲线分离。平行光管不

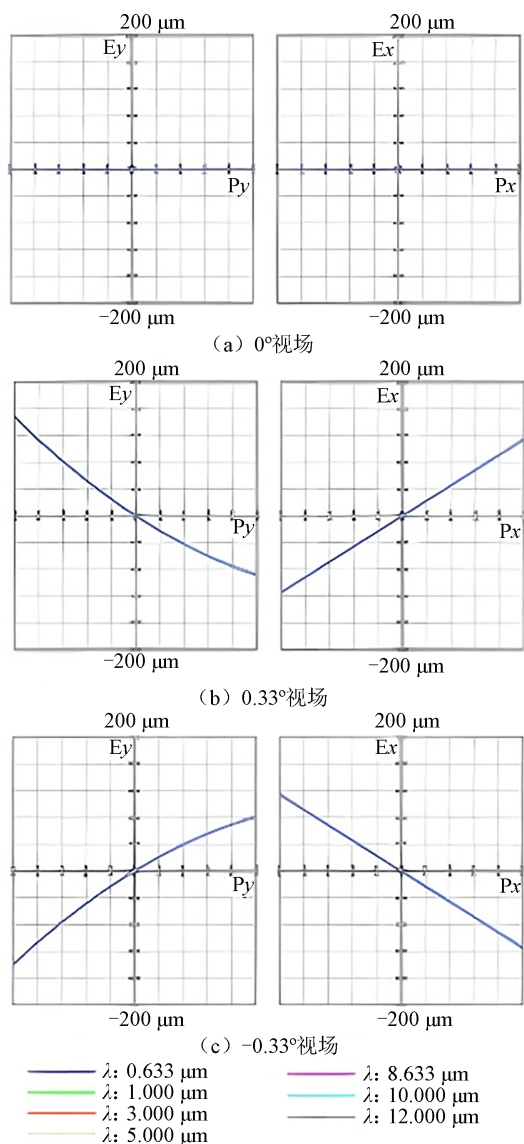


图 5 不同视场的垂轴像差曲线

Fig. 5 Vertical-axis aberration curves at different fields of view

同视场的光程差曲线如图 6 所示。

从图 6 可见, 各波长对应的曲线均紧贴零轴, 仅在边缘处有轻微起伏, 且最大波动范围未超过最大刻度  $\pm 10.000\lambda$  (以  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$  为基准), 表明系统波前质量优异, 球差和色差得到了良好校正, 成像质量较高。

### 2.2.5 场曲/畸变曲线

场曲/畸变曲线反映了不同视场下成像形状的弯曲和失真程度。场曲是指平面物体通过透镜后呈现出弯曲的像面, 这种弯曲是由于视场变化引起的。畸变是由于局部放大率不等而使物体的像产生变形, 分为正畸变 (桶形畸变) 和负畸变 (枕形畸变)。畸变只影响成像后的形状, 而不影响清晰度。0.33° 视场下平行光管的场曲/畸变曲线

如图 7 所示。

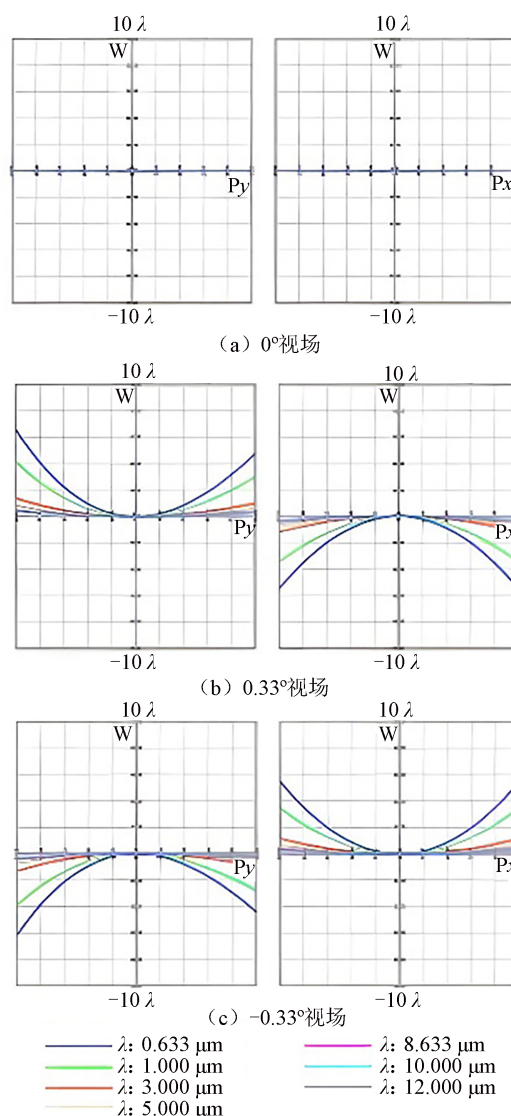


图 6 不同视场的光程差曲线

Fig. 6 Optical path difference curves at different fields of view

由图 7 (a) 可知, 在 0.33° 全视场内像面弯曲量小于 2 mm; 图 7 (b) 显示, 最大畸变量小于 0.005%, 表明系统像面平坦, 成像形状保真度高, 满足高精度测量对像面一致性的要求。

## 2.3 光轴一致性检测理论模型与分析

光轴一致性检测的核心是精确测量并比较不同波段光学系统视轴在无穷远处的空间指向角偏差。本系统采用基准光轴比较法, 其理论模型基于几何光学与坐标变换。

### 2.3.1 光学对准与测量模型

系统以平行光管出射准直光束作为空间角度基准, 设被测光电系统第  $i$  个波段 (如可见光、红外、激光) 的焦平面探测器像元尺寸为  $p_i$ , 系统焦距为  $f_i$ ; 通过图像处理算法提取的靶标像点中心

在探测器像面坐标系的像素坐标为 $(x_i, y_i)$ 。则该波段光轴相对于系统机械基准轴的视场角 $(\theta_{x_i}, \theta_{y_i})$ 可表示为

$$\theta_{x_i} = \arctan\left(\frac{x_i \cdot p_i}{f_i}\right), \theta_{y_i} = \arctan\left(\frac{y_i \cdot p_i}{f_i}\right) \quad (1)$$

对于小角度近似, 上式可简化为

$$\theta \approx d/f \quad (2)$$

式中:  $d = x_i \cdot p_i$  或  $d = y_i \cdot p_i$ ,  $f$  为焦距。多波段光轴平行度则为两者视场角矢量之差, 可表示为

$$\Delta\theta_{ij} = \sqrt{(\theta_{x_i} - \theta_{x_j})^2 + (\theta_{y_i} - \theta_{y_j})^2} \quad (3)$$

式中:  $\Delta\theta_{ij}$  表示波段  $i$  与波段  $j$  的光轴偏差。

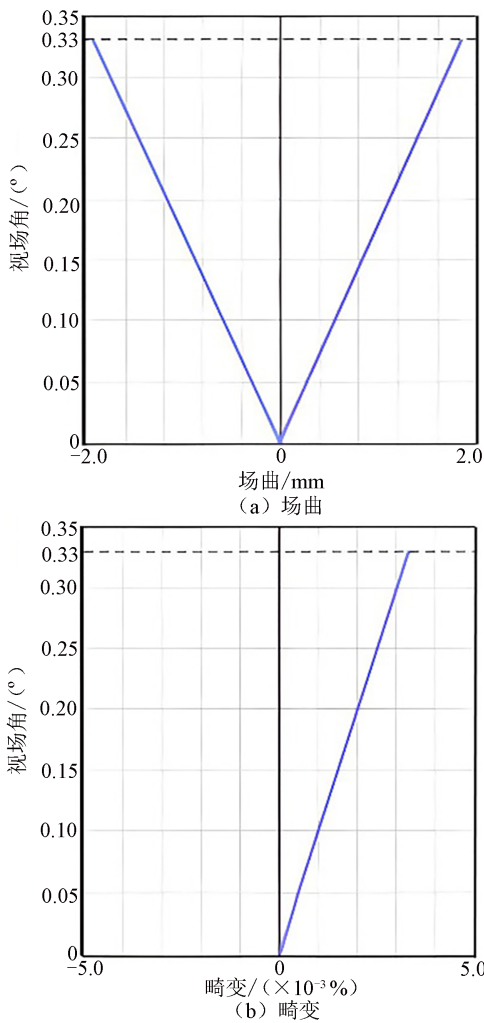


图 7 0.33° 视场的场曲/畸变曲线

Fig. 7 Field curvature/distortion curves of 0.33° field of view

本系统通过高精度二维转台控制基准靶标的角度 $(\theta_x, \theta_y)$ , 同时记录各波段测得实际角度 $(\theta_{x_i}^m, \theta_{y_i}^m)$ , 其中上标  $m$  表示实际测量值; 实际角度与理论值的残差即反映了该波段光轴的指向精度, 而不同波段残差的差异即为光轴平行度偏差。

安装在平行光管焦平面上的靶标经光源照射后, 靶标目标被准直到无穷远; 该准直光束被待测光电系统接收, 并分别在其激光通道与红外通道的焦平面上成像。通过计算机精确提取两个通道中靶标像点的中心位置, 其像素偏差量结合系统焦距即可计算出两光轴的角偏差, 即平行度。

### 2.3.2 主要误差源及传递分析

系统检测精度受到多种误差因素影响, 主要包括 4 种误差。

1) 基准误差  $E_b$ : 由平行光管自身出射波前非理想 (波前误差 RMS 值) 及装调残余误差共同导致的角度基准不确定性, 其影响可表示为  $E_b \propto \text{RMS}/D$ , 其中  $D$  为通光口径。本文系统通过 Ze-max 优化将 RMS 控制在  $0.032 \lambda$  以内, 并采用自校准相机对基准进行原位监测与修正。

2) 探测与处理误差  $E_d$ : 包含探测器像元响应非均匀性、图像处理算法中心定位误差 (亚像素精度) 等。  $E_d$  引起的角度误差为  $\Delta\theta_d \approx E_d/f$ 。本系统采用高分辨率探测器及精确定位算法, 将此误差控制在角秒量级。

3) 环境与结构误差  $E_s$ : 主要包括温度变化导致光学元件面形变化、支撑结构热变形以及振动引起的微位移。这些因素会改变光学元件相对位置 (如偏心、倾斜), 进而通过光线追迹模型引起光轴漂移  $\Delta\theta_s$ , 即  $E_s$  最终体现为光轴的漂移。通过引入热补偿设计, 并在公差分析中量化其影响, 确保在宽温范围内  $\Delta\theta_s$  满足指标, 此时  $E_s$  则被控制在允许范围内。

4) 多波段共光路误差  $E_c$ : 分光镜的装配误差 (俯仰、偏摆) 会导致不同波段光线发生微小偏移。设分光镜角度偏差为  $\beta$ , 其在第  $i$  个波段引起的附加光路偏差为  $E_{c,i} \approx 2n_i\beta$ , 其中  $n$  表示折射率。本系统通过精密装调与校准, 将此系统误差作为常数项在初始标定中扣除。

系统的总测量不确定度是上述各独立误差源的合成。

### 2.4 系统公差分析

平行光管一般采用波前误差或调制传递函数来评价, 此处选取  $632.8 \text{ nm}$  波长进行波前评价。该波长处于可见光波段, 便于使用常规 CCD 相机进行高精度干涉测量, 避免红外探测器带来的非均匀性响应误差。系统波前误差如图 8 所示。

系统公差主要由各元件自身的偏心量和倾斜量导致, 因此设置元件自身偏心量小于  $0.02 \text{ mm}$ ,

各元件间的倾斜量小于 $0.01^{\circ}$ 。采用蒙特卡洛方法对平行光管进行公差分析,结果如表1所示。

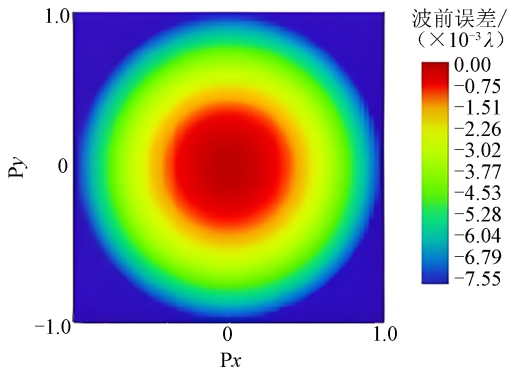


图 8 平行光管波前误差图

Fig. 8 Wave front error map of the collimator

表 1 公差分析结果统计

Table 1 Statistics of tolerance analysis results

| 统计项目   | 波前误差<br>RMS/nm  | 光轴平行度<br>变化/( $''$ ) | 占比/% |
|--------|-----------------|----------------------|------|
| 最佳情况   | $0.025\lambda$  | 4.2                  | 8    |
| 90% 系统 | $<0.045\lambda$ | $<6.5$               | 90   |
| 最坏情况   | $0.051\lambda$  | 7.8                  | 2    |

蒙特卡洛模拟显示,90%系统实例的波前误差RMS劣化量小于 $0.045\lambda$ ,光轴平行度变化小于 $6.5''$ 。这表明系统性能有90%概率保持在较高水平,制定的装调公差是合理且可实现的,能够确保批量化生产,或在装调后使大多数系统实例的光轴检测精度仍能满足优于 $10''$ 的设计目标。

3 系统实验测试与分析

3.1 成像质量测试

初始标定以某一光路为基准轴,对其他光路进行坐标标定。光轴检测以红外光轴为基准轴,通过CCD相机拍摄目视镜视场景象,判读图像中瞄准分划坐标值,与基准坐标对比得出偏差。实测系统在不同波段间的光轴一致性测试精度分别为:可见光与红外光轴平行度偏差为 $4.01''$ ,可见光与激光光轴平行度偏差为 $2.37''$ ,红外与激光光轴平行度偏差为 $4.05''$ 。在 $-20\sim+55^{\circ}\text{C}$ 的宽温范围内,系统整体平行度偏差小于 $8''$ 。

系统成像质量测试与仿真结果如表2所示,其中“设计要求”是根据本系统的核心功能需求(光轴检测精度优于 $5''$ )进行计算得到的理论极限。在 $(20\pm 1)^{\circ}\text{C}$ 恒温实验室,使用4D动态干涉仪对系统出射波前进行检测。由表2可得,实测中

心视场波前误差RMS值、点列图半径、MTF值均满足设计要求,保障了系统成像质量。

表 2 成像质量测试与仿真结果

Table 2 Imaging quality test and simulation results

| 性能指标                 | 仿真结果           | 实测结果           | 设计要求              |
|----------------------|----------------|----------------|-------------------|
| 波前误差RMS/nm           | $0.025\lambda$ | $0.035\lambda$ | $\leq 0.1\lambda$ |
| 点列图半径/ $\mu\text{m}$ | 0.892          | 1.023          | $<6.346$          |
| MTF@50 lp/mm         | 0.68           | 0.63           | $\geq 0.6$        |

3.2 平行性测试结果与分析

实验测试在自主搭建的基于离轴三反结构的多波段光轴一致性原位测试平台上进行。采用精密二维转台控制目标模拟器的输出角度,使理论俯仰角和方位角从 $1^{\circ}\sim 6^{\circ}$ 逐渐递增,利用高分辨率四象限探测器并结合图像识别算法提取各个波段的实际光轴指向情况。表3为白光、长波红外、激光模块在不同理论角度下的平行性测试结果,表中平行性偏差为俯仰角和方位角误差的合成量。

当白光模块的理论角度处于 $1^{\circ}0'0''$ 时,实测值仅存在 $4''$ 偏差,6组测试中,最大偏差为 $5''$ ,均方根误差为 $3.76''$ ,精度明显优于文献[12,15]中所得到的多光谱系统光轴平行性检测精度(其上限是小于 $10''$ ),由此也验证了离轴三反结构在削减中心遮拦及杂散光干扰方面的优势,进而使可见波段的指向稳定性得到提升。

测试编号7表明,当理论输入角度为 $1^{\circ}0'0''$ 时,长波红外模块的实测平行性偏差为 $6''$ ;在 $4^{\circ}$ 及 $6^{\circ}$ 时,偏差达到了 $7''$ ,但整体波动幅度控制在 $10''$ 之内,属于稳定区间内的合理波动。红外探测器冷屏边缘存在衍射效应,同时制冷组件也会出现热变形现象,这些因素都会对光轴漂移产生一定影响。通过采取非均匀性校正及热平衡预调的相关机制,系统在连续工作30 min之后便逐渐趋于稳定状态。

激光模块测试结果和长波红外模块高度相似,从编号13至18数据来看,最大偏差同样是出现在 $4^{\circ}$ 和 $6^{\circ}$ 这两种工况之下,达到了 $7''$ ,这说明在低照度条件下,像增强器与CCD耦合界面发生的微小形变是有可能引入额外误差的。

对比实际测量角度与理论角度可知,系统存在稳定的系统性偏差,在小角度范围内表现为实际测量结果单向偏小。将三波段的数据进行对比之后可发现,系统在跨波段条件下依然能够维持亚角秒级的检测分辨率,完全能够满足高精度遥感载荷对于多光轴对准的要求。

表 3 平行性测试结果

Table 3 Parallelism test results

| 测试编号 | 波段类型   | 理论角度(俯仰角/方位角) | 实际测量角度(俯仰角/方位角)   | 平行性偏差   |
|------|--------|---------------|-------------------|---------|
| 1    | 白光模块   | 1°0'0"/1°0'0" | 0°59'56"/0°59'57" | 0°0'04" |
| 2    | 白光模块   | 2°0'0"/2°0'0" | 1°59'57"/1°59'56" | 0°0'03" |
| 3    | 白光模块   | 3°0'0"/3°0'0" | 2°59'57"/2°59'56" | 0°0'01" |
| 4    | 白光模块   | 4°0'0"/4°0'0" | 3°59'55"/3°59'55" | 0°0'05" |
| 5    | 白光模块   | 5°0'0"/5°0'0" | 4°59'55"/4°59'56" | 0°0'05" |
| 6    | 白光模块   | 6°0'0"/6°0'0" | 5°59'55"/5°59'57" | 0°0'03" |
| 7    | 长波红外模块 | 1°0'0"/1°0'0" | 0°59'54"/0°59'55" | 0°0'06" |
| 8    | 长波红外模块 | 2°0'0"/2°0'0" | 1°59'57"/1°59'55" | 0°0'03" |
| 9    | 长波红外模块 | 3°0'0"/3°0'0" | 2°59'55"/2°59'52" | 0°0'03" |
| 10   | 长波红外模块 | 4°0'0"/4°0'0" | 3°59'53"/3°59'54" | 0°0'07" |
| 11   | 长波红外模块 | 5°0'0"/5°0'0" | 4°59'55"/4°59'55" | 0°0'05" |
| 12   | 长波红外模块 | 6°0'0"/6°0'0" | 5°59'54"/5°59'53" | 0°0'07" |
| 13   | 激光模块   | 1°0'0"/1°0'0" | 0°59'54"/0°59'55" | 0°0'06" |
| 14   | 激光模块   | 2°0'0"/2°0'0" | 1°59'57"/1°59'55" | 0°0'03" |
| 15   | 激光模块   | 3°0'0"/3°0'0" | 2°59'55"/2°59'52" | 0°0'03" |
| 16   | 激光模块   | 4°0'0"/4°0'0" | 3°59'53"/3°59'54" | 0°0'07" |
| 17   | 激光模块   | 5°0'0"/5°0'0" | 4°59'55"/4°59'55" | 0°0'05" |
| 18   | 激光模块   | 6°0'0"/6°0'0" | 5°59'54"/5°59'53" | 0°0'07" |

针对环境适应性评估,在温控箱中把系统从-20℃逐步升温至+55℃,每隔10℃记录一次光轴偏移量,并在55℃再记录一次。测试结果显示,白光模块的最大漂移量为8.3",且主要是在低温启动阶段发生的,这是因为反射镜支撑结构所使用的材料存在热膨胀系数失配的问题。振动试验依照国家军用装备环境适应性试验标准GJB 150.16A—2009执行,在5~500 Hz频率范围内施加大小为0.04 g<sup>2</sup>/Hz的随机振动谱密度,持续时间15 min。结果显示,测试前后光轴变化幅度小于5",符合航空机载设备稳定性要求。综合多轮重复性实验情况,系统连续进行10次测量所得标准差优于2.1"。通过对故障率统计发现,在累计运行200 h中并未出现硬件失效或者软件异常情况,也证实了该系统具备在工程化应用中得以可靠运行的特性。

在-20~+55℃宽温范围内,平行度变化量最大为6.83"(-20℃),满足小于10"技术要求。根据典型光电装备标校需求,本系统核心性能指标与测试结果如表4所示,其中“设计目标”是基于外场光电装备标校的实际工程需求、理论极限分析及技术可实现性确定的量化指标。

3.3 不确定度测量分析

为定量评估系统光轴平行度检测结果可靠性

与精度范围,依据国家计量技术规范JJF1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》,对系统测量不确定度进行详细评定。

表 4 系统核心性能指标与测试结果

Table 4 Core performance indicators and test results of the system

| 性能类别  | 指标项目                | 设计目标              | 测试结果            |
|-------|---------------------|-------------------|-----------------|
| 光学性能  | 工作波段/ $\mu\text{m}$ | 0.4~12            | 0.4~12          |
|       | 有效通光口径/mm           | $\leq 130$        | 128             |
|       | 系统焦距/mm             | 1 100             | 1 095           |
|       | 波前误差RMS/nm          | $\leq 0.1\lambda$ | 0.035 $\lambda$ |
| 检测性能  | 光轴平行度检测精度           | $\leq 10''$       | 4.8"            |
|       | 系统自校准精度             | $\leq 5''$        | 4.2"            |
|       | 平行度变化量              | $\leq 10''$       | 6.83"(-20℃)     |
| 环境适应性 | 工作温度范围              | -20~+55℃          | -20~+55℃        |
|       | 振动稳定性               | $\leq 5''$        | 3.2"            |

1) A类不确定度。由测量结果重复性引入,通过对白光模块在2°方位角条件下进行10次独立重复测量,采用贝塞尔公式计算实验标准偏差,可得A类不确定度为

$$u_A = 1.22'' \tag{4}$$

2) B类不确定度。由各测量设备及环节系统

误差引入, 主要包括 3 类误差。

二维转台角度定位误差  $u_{B1}$ 。根据转台校准证书, 其最大允许误差为  $\pm 3.0''$ , 均匀分布处理可得

$$u_{B1} = 1.73'' \quad (5)$$

图像处理算法中心定位误差  $u_{B2}$ 。经测试, 不同信噪比下, 靶标像点中心提取误差不超过  $\pm 1.5$  像素, 对应角度值约为  $\pm 2.0''$ , 均匀分布处理可得

$$u_{B2} = 1.15'' \quad (6)$$

系统自身装调残余误差  $u_{B3}$ 。作为基准平行光管自身存在残余光轴误差, 经评估, 其最大值为  $1.5''$ , 按均匀分布处理可得

$$u_{B3} = 0.87'' \quad (7)$$

以上各不确定度分量互不相关, 合成标准不确定度  $u_c$  按方和根法计算, 可表示为

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + u_{B3}^2} = 2.8'' \quad (8)$$

取包含因子  $k = 2$  (对应约 95% 置信概率), 则扩展测量不确定度为

$$U = k \times u_c = 5.6'' \quad (9)$$

因此, 本系统光轴平行度检测的测量精度 (以实验标准偏差计) 为  $1.22''$ , 优于国家计量技术规范的  $2.1''$ , 其扩展测量不确定度  $U = 5.6''$  ( $k = 2$ )。该不确定度评估结果与表 4 中检测精度测试结果  $4.8''$  相匹配, 表明测量结果具有可信性。

## 4 结论

本文通过光学设计、系统集成和环境验证提出一款基于离轴三反结构的多波段光轴一致性原位测试系统, 解决了传统检测方法无法在外场复杂环境下实现高精度、多波段同步原位测试的技术难题, 为光电装备实战化维护保障提供了有效的技术支撑。

1) 该系统采用有效口径 128 mm、焦距 1 100 mm 的离轴抛物面主镜, 结合共口径与介质膜分光技术, 构建覆盖  $0.4 \sim 12 \mu\text{m}$  波段的纯反射式、无中心遮拦平行光管, 为多波段提供统一高质量光学基准。为保障外场适用性, 系统还集成了自校准模块, 并采用了热补偿结构设计。

2) 系统在可见光、激光与红外波段间的光轴平行度检测精度达到  $4.8''$ ; Zemax 全局优化后波前误差 RMS 值优于  $0.032\lambda$ , 证明了其在宽谱段下保持精度的能力。

3) 在外场环境适应性方面, 通过主动与被动相结合的热稳定性设计, 使系统在  $-20 \sim +55^\circ\text{C}$  宽温范围内光轴平行度变化不大于  $6.83''$ , 振动试验

光轴变化小于  $5''$ , 在振动环境下性能稳定。

## 参考文献

- [1] Kang Chanchan, Fang Yao, Wang Huawei, et al. Online optical axis parallelism measurement method for continuous zoom camera based on high-precision spot center positioning algorithm[J]. Photonics, 2024, 11(11): 1017.
- [2] Zhang Shaojie, Wang Yang, Zhang Lei. Noise-robust alignment method of wide field freeform off-axis three-mirror optical systems based on self-attention mechanism[J]. Optics Express, 2025, 33(24): 50188-50200.
- [3] Ma Shaohua, Li Ruijun, Jiang Kai, et al. Optical axis calibration method using a 4-DOFM system for linear guide detection[J]. Optics Letters, 2025, 50(6): 1977-1980.
- [4] Lu Yatao, Sun Bin, Mei Gui, et al. Integrated analysis of line-of-sight stability of off-axis three-mirror optical system[J]. Photonics, 2024, 11(5): 461.
- [5] 薛栋林, 郑立功, 张峰. 基于光学自由曲面的离轴三反光学系统[J]. 光学精密工程, 2011, 19(12): 2813-2820.  
Xue Donglin, Zheng Ligong, Zhang Feng. Off-axis three-mirror system based on freeform mirror[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(12): 2813-2820.
- [6] Yan Aqi, Chen Weining, Wang Hao, et al. Optical design of a laser/infrared common-aperture optical system with high optical axis pointing consistency and high sensitivity[J]. Optical Engineering, 2025, 64(11): 115103.
- [7] Yeh F, Chiang C, Lee C, et al. Innovative optical axis adjustment method for reflective beam expander[J]. Sensors and Materials, 2024, 36(11): 4939-4950.
- [8] 金伟其, 王霞, 张其扬, 等. 多光轴一致性检测技术进展及其分析[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(3): 526-531.  
Jin Weiqi, Wang Xia, Zhang Qiyang, et al. Technical progress and its analysis in detecting of multi-axes parallelism system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(3): 526-531.
- [9] 易琼, 王林森, 杨建昌, 等. 观瞄系统光轴平行性原位检测的光学系统设计[J]. 光学技术, 2018, 44(1): 27-32.  
Yi Quan, Wang Linsen, Yang Jianchang, et al. Design of parallelism of optical axis in-situ detection's optical system of observing and aiming sys-

- tem[J]. *Optical Technique*, 2018, 44(1): 27-32.
- [10] 谷茜茜. 基于自由曲面的离轴反射式光学系统设计技术研究[D]. 成都: 中国科学院大学(中国科学院光电技术研究所), 2020: 1-12.
- Gu Xixi. Research on design technology of off-axis reflective optical system with freeform surface[D]. Chengdu: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences), 2020: 1-12.
- [11] 操超, 廖志远, 白瑜, 等. 基于矢量像差理论的离轴反射光学系统初始结构设计[J]. *物理学报*, 2019, 68(13): 134201.
- Cao Chao, Liao Zhiyuan, Bai Yu, et al. Initial configuration design of off-axis reflective optical system based on vector aberration theory[J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(13): 134201.
- [12] Wang Shurong, Li Zhanfeng, Huang Yu, et al. Alignment of optical axis parallelism in multi-axis system[J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(S1): S11202.
- [13] 张娟, 杨加强, 彭晴晴, 等. 别汉棱镜角度误差对光轴一致性影响的研究[J]. *激光与红外*, 2021, 51(8): 1031-1037.
- Zhang Juan, Yang Jiaqiang, Peng Qingqing, et al. Research on the influence of the angle error of Pechan prism on optical axis consistency[J]. *Laser & Infrared*, 2021, 51(8): 1031-1037.
- [14] 张磊, 崔启胤, 张凯. 适应大温差变化的多光轴一致性测试系统[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2017, 40(4): 10-13.
- Zhang Lei, Cui Qiyin, Zhang Kai. Multi-axis parallelism measuring system with temperature insensitivity[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2017, 40(4): 10-13.
- [15] Xie Xiaoguang, Hu Yuan, Feng Jun, et al. A reflective method for the optical axis calibration of high-power lasers[J]. *Measurement*, 2025, 246: 116714.
- [16] Ma Shaohua, Jiang Kai, Cheng Zhenying, et al. Multifunctional laser calibrator for multiparameters measurement in motion axis assembly[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2025, 74: 7510208.
- [17] Miao Li, Liu Kun, Liu Xianlei, et al. Multimodal adaptive alignment technology for off-axis optical systems based on interferogram guidance[J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 180: 111514.
- [18] Kong Fanzi, Wang Huawei, Fang Yao, et al. Measurement method of optical axis parallelism of continuous zoom camera based on skeleton thinning algorithm[C]//AOPC 2023: Optical Sensing, Imaging, and Display Technology and Applications; and Biomedical Optics. Beijing, China: SPIE, 2023: 1296304.
- [19] Nishimura Y, Chujo W, Kobayashi K. High-precision automatic optical axis alignment of LED backhaul in lighting surroundings based on object detection[J]. *IEICE Communications Express*, 2024, 13(5): 151-155.
- [20] 张奇, 陆庆华, 郭骞, 等. 多波段图像融合系统光轴平行性装调技术研究[J]. *红外技术*, 2023, 45(12): 1294-1298.
- Zhang Qi, Lu Qinghua, Guo Qian, et al. Research on optical axis parallelism adjustment technology for multi band image fusion system[J]. *Infrared Technology*, 2023, 45(12): 1294-1298.
- [21] 缪麟. 基于自由曲面的离轴三反成像光学系统设计[D]. 成都: 四川大学, 2022: 2-9.
- Miu Lin. Design of off-axis three-mirror imaging optical system based on freeform surfaces[D]. Chengdu: Sichuan University, 2022: 2-9.
- [22] 王兆明, 栗孟娟, 于秋跃, 等. 两面共体非球面反射镜光轴一致性高精度测量方法研究(特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2023, 52(9): 39-46.
- Wang Zhaoming, Li Mengjuan, Yu Qiuyue, et al. Research on high precision testing method for mirror optical axis of two-sided community aspheric mirror (invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(9): 39-46.
- [23] 刘政麟, 汪逸群. 星间激光通信机光轴指向误差源分析与补偿控制[J]. *宇航学报*, 2023, 44(3): 454-464.
- Liu Zhenglin, Wang Yiqun. Analysis and compensation of optical axis pointing error source of inter-satellite laser communicator[J]. *Journal of Astronautics*, 2023, 44(3): 454-464.
- [24] 赵宏达, 李顺合, 江涛, 等. 离散式光学系统光轴指向误差建模与数字化标校[J]. *光学学报*, 2023, 43(18): 313-322.
- Zhao Hongda, Li Shunhe, Jiang Tao, et al. Modeling and digital correction of optical axis pointing error for discrete optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(18): 313-322.
- [25] 王皓, 王田野, 宋宵含, 等. 太阳观测系统二维指向机构变形误差在轨辨识方法[J]. *航天器工程*, 2025, 34(2): 75-81.
- Wang Hao, Wang Tianye, Song Xiaohan, et al. On-orbit identification method of deformation error for two-dimensional pointing mechanism of solar observation system[J]. *Spacecraft Engineering*, 2025,

- 34(2): 75-81.
- [26] 马浚轩, 李红, 张旭, 等. 面向光轴指向测量系统的光斑质心高精度实时解算方法[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(6): 266-273.
- Ma Junxuan, Li Hong, Zhang Xu, et al. High-precision real-time algorithm for spot centroid determination in optical axis pointing measurement system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(6): 266-273.
- [27] 王燕清, 杜伟峰, 吴永康, 等. 微型星敏感器热稳定性设计与试验验证[J]. 中国激光, 2024, 51(13): 132-140.
- Wang Yanqing, Du Weifeng, Wu Yongkang, et al. Design and experimental verification of thermal stability for micro star sensors[J]. Chinese Journal of Lasers, 2024, 51(13): 132-140.
- [28] Strojnik M, Medina B B, Gonzalez B A, et al. Off-axis three-mirror optical system designs: from cooke's triplet to remote sensing and surveying instruments[J]. Applied Sciences, 2023, 13(15): 8866.
- [29] Ushiki T, Imazawa R, Sugie T, et al. Development and demonstration of an active optical axis alignment method for divertor infrared thermography system in ITER[J]. Review of Scientific Instruments, 2025, 96(8): 083505.
- [30] 舒朝濂, 田爱玲, 杭凌侠, 等. 现代光学制造技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 21-79.
- Shu Chaolian, Tian Ailing, Hang Lingxia, et al. Modern optical manufacturing technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 21-79.

## Off-Axis Three-Mirror Structure-Based In-Situ Testing System for Multi-Band Optical Axis Consistency

YANG Fei, HU Xiaoying\*, SONG Xinyi, HE Yucheng,  
DU Wentao, PAN Jiangfan, LEI Xuken

(School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

**ABSTRACT:** To address the challenge of rapid and high-precision calibration for multispectral electro-optical equipment in field environments, an off-axis three-mirror structure-based multi-band optical axis consistency in-situ testing system was proposed. First, the system employed an off-axis parabolic primary mirror to form a pure reflective collimator, covering a broad spectral range of 0.4-12  $\mu\text{m}$ . This design fundamentally eliminated chromatic aberration and achieved center-obstruction-free imaging. Second, by utilizing a common-aperture configuration and dielectric film beam-splitting technology, a unified angular reference was established for visible light, laser, and mid-wave/long-wave infrared channels. Finally, the use of self-calibrating cameras and thermal compensation structures effectively ensured field applicability. At the optical design level, optimization using Zemax software achieved a system wave front error with a root mean square value better than  $0.032\lambda$  ( $\lambda = 632.8\text{ nm}$ ). The full-field spot diagram radius remained smaller than the Airy disk radius, thereby meeting diffraction-limited requirements. The results demonstrate that the system achieves an optical axis parallelism detection accuracy of  $4.8''$ , with an expanded uncertainty of  $5.6''$  ( $k=2$ ). Within a wide temperature range of  $-20$ – $+55\text{ }^{\circ}\text{C}$ , the variation in optical axis parallelism remains less than  $6.83''$ . Following vibration tests conducted in accordance with GJB 150.16A—2009 standard, the optical axis variation is less than  $5''$ . The system is successfully applied to the in-situ testing of the multi-band optical axis alignment for a specific electro-optical system. The feasibility and reliability of the system as a high-precision field calibration tool were validated, providing an effective technical means for rapid support and performance evaluation of electro-optical equipment.

**KEYWORDS:** optical axis consistency; in-situ testing; off-axis three-mirror system; multi-band common aperture

(编辑: 吴文冬)