

文章编号 1004-924X(2024)02-0148-10

宽光谱多传感器轴一致性检测系统设计

邹 韵¹, 朱运东^{1,2*}, 王劲松^{1,2}

(1. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130012;

2. 长春理工大学中山研究院, 广东 中山 528437)

摘要: 光轴一致性是衡量多传感器光电系统工作性能的重要指标,为了解决多传感器轴一致性检测系统工作波段范围较窄、系统灵活性较低的问题,本文结合光路切换和光热转换的思想,设计了一套宽光谱多传感器轴一致性检测系统。该系统采用卡塞格林反射式光学系统作为从可见光到长波红外范围内的接收和发射系统;通过步进电机的驱动,带动导轨上方反光镜位置移动,实现系统光路的切换;采用镀有硫化铜的锗玻璃,作为光热转换靶材,将短波长的光斑转换为热斑,采用长波红外探测器实现对各波段激光光斑图像采集。系统能够实现 0.4~14 μm 波段光谱范围的检测;对光学系统进行像质评价分析,可以得到系统在不同波段下由像差引起的弥散斑(Root mean square, RMS)直径均在 9 μm 以下,能量集中度较好;对系统检测精度进行分析,最大测量误差为 0.1 mrad;通过导轨往返运动重复精度实验和系统测量准确度实验,对系统可靠性进行验证,结果表明检测系统满足仪表准确度 1.5 级的要求。该检测系统结构紧凑,适用波段范围广,能够实现对多传感器光电设备的轴一致性检测。

关键词: 宽光谱;轴一致性;光路切换;光热转换;硫化铜

中图分类号:TH741 文献标识码:A doi:10.37188/OPE.20243202.0148

Design of wide spectrum multi-sensor axis consistency detection system

ZOU Yun¹, ZHU Yundong^{1,2*}, WANG Jinsong^{1,2}

(1. College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun 130012, China;

2. Zhongshan Institute of Changchun University of Science and Technology, Zhongshan 528437, China)

* Corresponding author, E-mail: 865040845@qq.com

Abstract: Optical axis consistency is an important indicator for measuring the performance of multi-sensor optoelectronic systems. In order to address the issue of narrow working spectral range and limited system flexibility in the multi-sensor axis consistency detection system, this paper designed a board-spectrum multi-sensor axis consistency detection system. The system based on the concepts of optical path switching and opto-thermal conversion. The system used a Cassegrain reflective optical system as the receiving and transmitting system in the range from visible light to long-wave infrared. A stepper motor was used to move the reflective mirror above the guide rail, allowing for the switching of the system's optical path. The copper sulfide-coated germanium glass was used to convert the short-wavelength spot into a hot spot

收稿日期:2023-06-20;修订日期:2023-08-22.

基金项目:吉林省重点科技研发项目(No. 20180201025GX)

as the photothermal conversion target. The long-wave infrared detector was used to collect the laser spot images of various spectral bands. The system could detect the spectral range of 0.4 - 14 μm . The analysis of the optical system's image quality shows that the root mean square (RMS) diameter caused by aberrations is consistently below 9 μm across various wavelengths. The system also exhibits strong energy concentration. Detection accuracy of the system is analyzed, and the maximum measurement error is 0.1 mrad. Experiments on repetitive precision involving the guide rail's back-and-forth movement, and accuracy measurement experiments on the system, verify the reliability of the system. The results indicate that the detection system meets the requirement of instrument accuracy level 1.5. The detection system has a compact structure, a wide range of applicable spectral, and the ability to perform axis consistency testing for multi-sensor optoelectronic devices.

Key words: wide spectrum; axis consistency; optical switching; photothermal conversion; copper sulfide

1 引 言

随着光学成像技术的不断发展,光电系统的构成也逐步趋于多样化、复杂化^[1-2]。现今多传感器光电系统将激光测距、红外成像、电视跟瞄等技术相结合并快速发展,被广泛应用于军事领域,提升了武器装备在作战和生存方面的能力,在现代战场上扮演着必不可少的角色^[3]。多传感器光电系统光谱几乎覆盖了从可见光到红外波段的全部范围^[4],具有多谱段观瞄、跟踪、发射和接收多个光路子系统,这些光路的轴线要求保持一致,否则会严重影响目标探测和定位的准确性,进而降低目标打击的精度^[5]。因此保证多传感器光电系统内各子系统轴间一致性就显得尤其重要^[6-8]。在多传感器光电系统生产和使用过程中,必须对其进行光轴一致性检测和调校。

近年来,人们在多传感器光电系统光轴一致性方面展开了广泛研究。肖作江^[9]等人利用离轴抛物镜,对光学瞄具红外、白光瞄准轴以及激光发射轴三轴一致性检测问题进行了相关研究;贾文武^[10]等人针对经纬仪提出了一种能够满足靶场使用需求的光轴平行性检方法;黄富瑜^[11]等人采用光轴平移设计思想,实现大跨度范围内光轴平行性检测;张洋^[12]通过 CCD 相机对激光辐射光斑进行实时采集,针对机载光电观瞄系统中红外瞄准线与激光辐射轴的视轴偏差角进行测试;以色列 CI 公司^[13]的 O-AWBS 武器轴线检测系统采用相交校靶法实现大跨度检测,适用于野外检测。上述现有轴一致性检测方法,其检测

光谱波段范围较为局限且检测波段不连续,或需要在特定条件下、针对特定类型的光电设备光轴进行检测,通用性不好。为解决此问题,本文设计一种基于光路切换和光热转换设计思想的宽光谱多传感器轴一致性检测系统。推导了光轴一致性检测模型,设计了系统结构,分析了检测系统精度,能够为多光谱多传感器光电系统的轴一致性检测提供通用的检测和调校手段。

2 轴一致性检测系统原理

2.1 系统检测原理

宽光谱多传感器轴一致性检测系统(以下简称为检测系统或系统)可以对具有可见光到红外波段的多光谱多传感器系统(以下简称为被测品)中的光路子系统进行光轴一致性检测,其系统组成如图1所示。

检测系统中包含反射式平行光管、光源及探测器组件以及被测品后方的可见光 CCD 相机,并由上位机对检测系统进行控制。其中反射式平行光管包含主镜及次镜两部分;光源及探测器组件中包含黑体和可见-近红外光源、可见-近红外靶标、光热转换靶材以及在不同波段下工作的探测器;被测品后方的可见光 CCD 相机用于观察被测品目视镜视场内的场景。

在主镜后方,通过分光镜及可移动的平面反射镜将主镜后的光路分成四个路径。其中,光路1由系统内置黑体提供红外光光源,光路4提供可见-近红外光源,两个光源均可将光源前置标

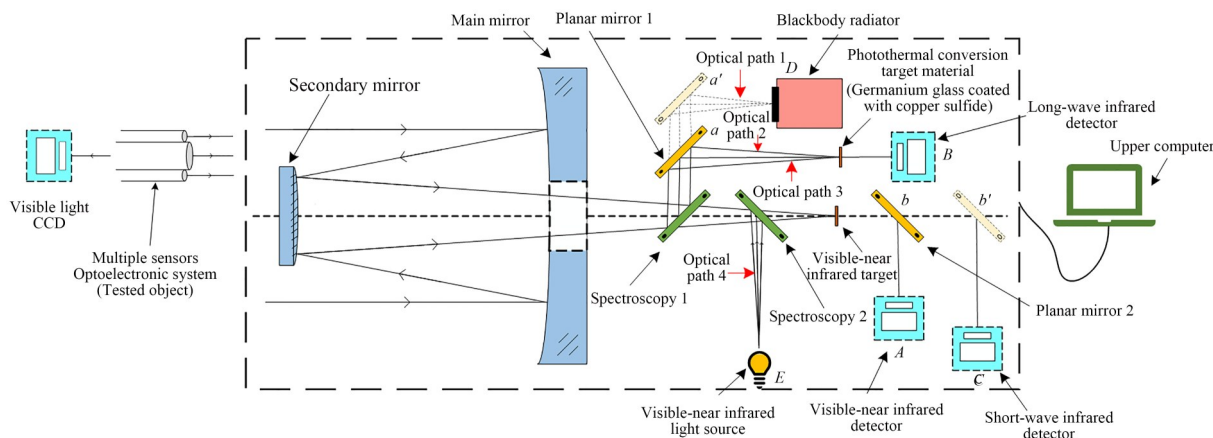


图1 系统检测原理图

Fig. 1 System detection schematic diagram

准靶标图像投射到被测品的光学成像系统中;光路2和光路3通过不同工作波段的探测器,采集被测品所发出的不同波段激光的光斑图像信息。平面反射镜的移动是通过上位机控制步进电机实现的,反射镜可以根据检测需要在导轨上进行位置移动,从而实现检测系统的光路切换。

由于长波红外探测器工作波段为 $8\sim 14\ \mu\text{m}$,无法直接采集其他波段范围内的激光,因此在像面处放置光热转换靶材,将短波长的光斑转换为热斑,使用长波红外探测器实现对各波段激光光斑图像采集。锗玻璃作为红外玻璃,具有折射率和色散变化小的特点,可以用作光热转换靶材的基体材料。硫化铜作为光热转换材料,在 $808\ \text{nm}$ 激光照射下,几秒内能够迅速升温至 $100\ ^\circ\text{C}$,具有明显的光热升温效果^[14]。因此,选择镀有硫化铜的锗玻璃作为光热转化靶材,能够有效地扩大系统光谱检测范围,实现单探测器的多谱段检测。

在对被测品进行检测之前,需要对系统进行初始标定,以某一光路为基准轴,对其他光路进行坐标标定,并将标定坐标记为系统基准轴坐标,完成对检测系统的初始标定。

检测系统可以对被测品中观瞄、跟踪光路子系统光轴进行检测,即模拟无穷远标准靶标图像信息的投射系统;同时也可对被测品所发出的激光光轴进行检测,即作为激光接收系统进行图像输出。

(1) 观瞄、跟踪光路子系统光轴检测

以红外光轴作为检测过程基准轴为例,首先将被

测品红外光轴对向平行光管焦面位置处的分划,使得被测品基准轴瞄准红外分划中心;然后将被测品切换到可见光观瞄状态,通过放置在被测品后方的可见光CCD相机拍摄目视镜视场内的景象,通过上位机对图像中被测品瞄准分划的坐标值进行判读;系统将所读取坐标与基准坐标进行对比,得出被测品红外光轴与可见光光轴的偏差。

(2) 激光光轴检测

将被测品放置好并固定,被测品向检测系统发射激光,通过主次镜照射到光热转化靶材上形成热斑,或照射到可见光-近红外靶标上,光斑可被长波红外探测器、可见-近红外探测器或短波红外探测器采集生成光斑图像,随后通过上位机对激光光斑位置进行判读,得到光斑灰度重心的坐标值;将所读取坐标与基准坐标进行对比,得出激光光轴的偏差。进而可以获取任意两光轴之间的夹角大小。

2.2 轴一致性夹角计算

轴一致性检测系统各部分组件安装调试完成后,将各子系统与上位机相连。系统各部分组件基本保持水平位置,保证各系统组件之间的中心高度一致,确保系统光束按照预定路线传输。当被测品位置固定好后,以红外光轴作为检测过程基准轴为例,按照2.1节中所描述的系统检测过程进行操作,可以依次得到被测品可见光光轴坐标、可见-近红外激光光斑坐标、短波红外激光光斑坐标以及长波红外激光光斑坐标。

如图2所示,展示了任意两光轴光斑在空

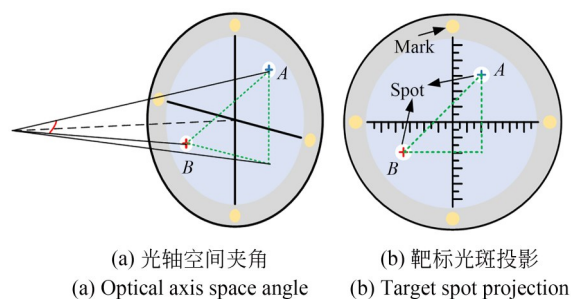


图2 激光光斑空间投影模型图

Fig. 2 Laser spot space projection model

间中的投影模型,图中 $A(x_a, y_a), B(x_b, y_b)$ 为任意两光轴光斑的坐标位置,根据光斑坐标位置信息可计算任意两光轴之间夹角 θ ,如式(1)所示:

$$\theta = \sqrt{(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2}. \quad (1)$$

3 系统设计

3.1 检测系统光学设计

宽光谱多传感器轴一致性检测系统的主要设计参数如表1所示。根据系统设计参数要求,确定合适的初始结构,并结合检测系统具有多个光路的特点,对光学系统进行具体设计及像质评价分析。

表1 光学系统设计参数

Tab. 1 Optical system design parameters

Parameter	System design parameters
System focal length	$f'_0 = 4\,800\text{ mm}$
Entrance pupil diameter	$D = 600\text{ mm}$
Secondary occlusion ratio	$\alpha = 0.34$
Wavelength range	$0.4 \sim 14\text{ }\mu\text{m}$

宽光谱轴一致性检测系统基于经典卡塞格林反射式系统,其主镜为抛物面,次镜为双曲面,能够完全校正球差。使用光学设计软件ZEMAX进行像差校正和系统优化,根据系统设计要求,设置相关系统参数,系统总焦距为4 800 mm,主镜焦距为1 200 mm,主镜直径考虑结构装夹因素而设定为610 mm,系统总光谱波段范围为0.4~

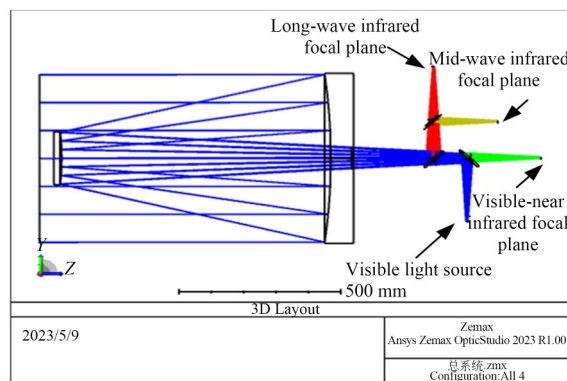


图3 轴一致性检测光学系统结构

Fig. 3 Structure of axis consistency detection optical system

14 μm ,主波长设为632.8 nm。

由于系统具有多个连续的工作波段,因此需要采用分光镜和反射镜进行光路结构组合,以实现不同波段范围的光学功能。根据系统设计要求,将系统光路结构细化为四种。图3展示了该系统的光学结构图,并使用不同颜色表示系统在不同工作波段下的光路结构(彩图见期刊电子版)。

在对光学系统的设计完成后,还需进一步对系统进行像质优化设计,以实现系统能量的最佳集中,确保系统结构紧凑、尺寸较小。图4~图6为系统在长波、中波、可见-近红外以及短波红外波段范围内的MTF图及点列图,图7为垂轴像差图,从这些图中可以看出,系统在不同波段下的RMS弥散斑直径均在9 μm 以下,表明该系统的能量集中度较好。

3.2 检测系统结构设计

在上述系统光学设计基础上,完成平行光管的整体结构设计,主要包括主次镜支撑结构设计,光源及探测器组件光学平台设计,并完成了系统的整体搭建。轴对准测试系统整体结构如图8所示。

3.2.1 主镜及支撑结构设计

选用微晶玻璃作为主镜设计材料,以满足机械加工强度和低热膨胀系数的需求。主镜为反射镜,放置于光轴水平位置,采用多点侧面支撑技术来提供机械支撑。这种支撑方式将支撑力作用于反射镜侧面下端,并通过侧支撑杆连接两

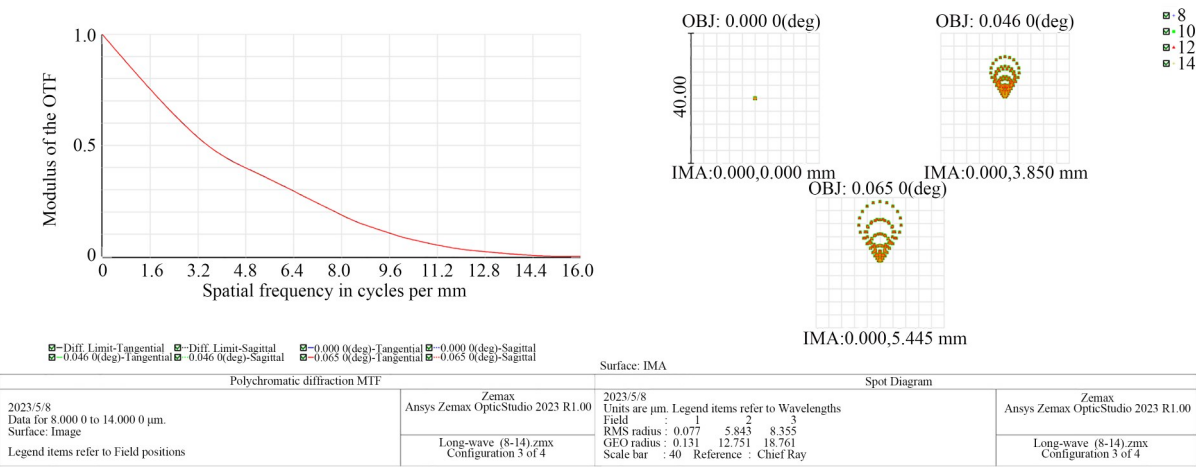


图 4 长波红外的 MTF 和点列图
Fig. 4 MTF and spot diagram of long-wave infrared

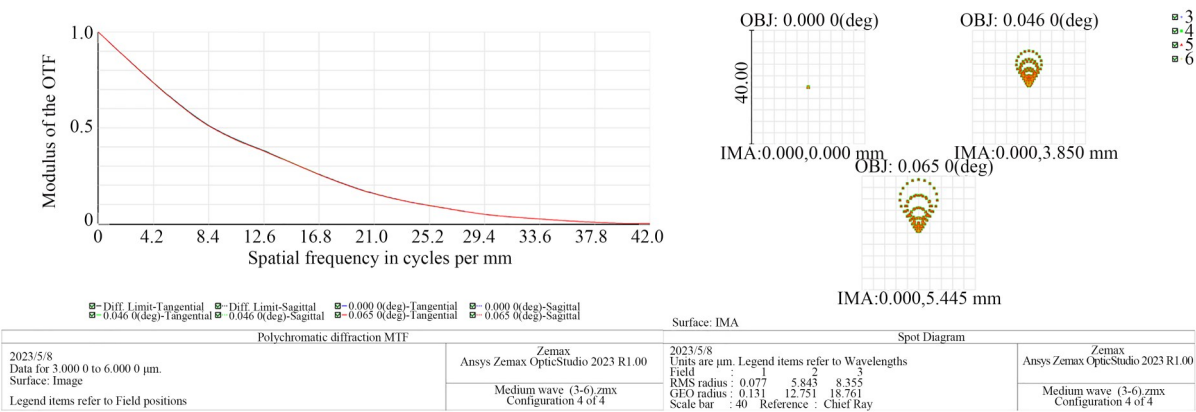


图 5 中波红外的 MTF 和点列图
Fig. 5 MTF and spot diagram of mid-wave infrared

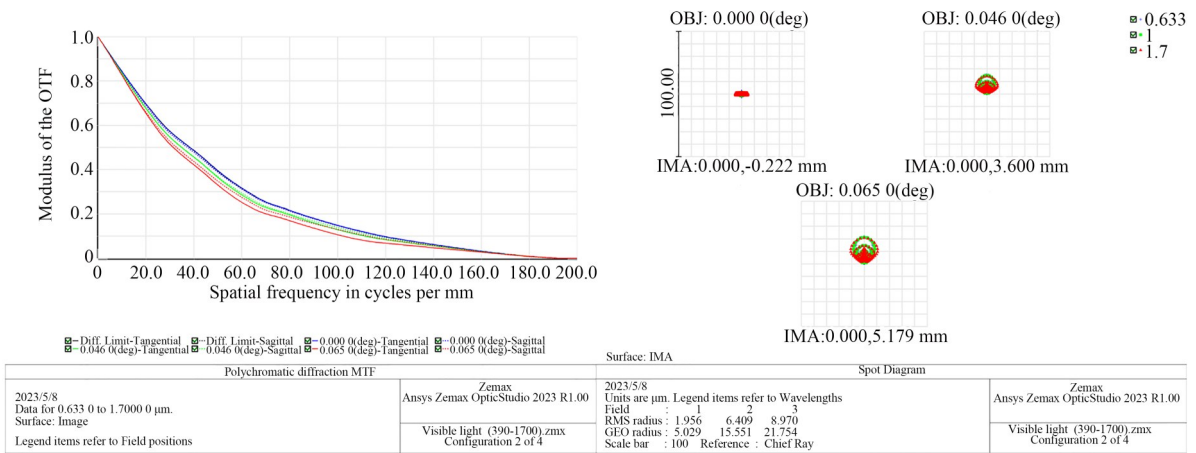


图 6 可见-近红外及短波红外的 MTF 和点列图
Fig. 6 MTF and spot diagram of visible-near infrared and shortwave infrared

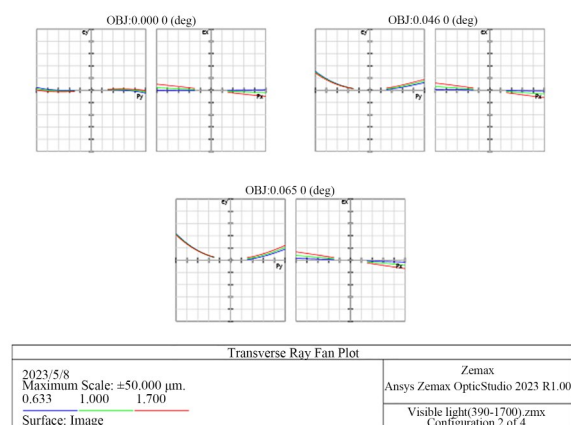


图 7 垂轴像差图

Fig. 7 Vertical axis aberration diagram

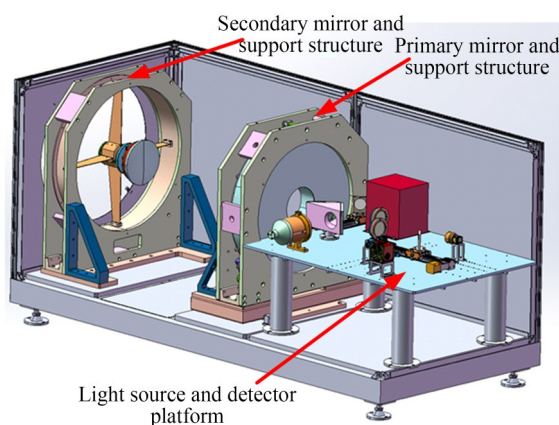


图 8 轴对准测试系统整体结构

Fig. 8 Overall structure of the axis alignment test system

个保护托块,起到托举主镜的作用。保护托块与主镜之间使用软垫片,以确保两者不直接接触。在此基础上,反射镜顶端增加了一个顶支撑,由支撑杆连接支撑背板,并与固定在主镜室上的支撑座相连。同时,在主镜正反两面均有均布的六个支撑点,用于轴向支撑并提供辅助支撑。主镜的支撑结构如图 9 所示。

3.2.2 次镜及支撑结构设计

次镜为“蘑菇型反射镜”,通过四翼梁将次镜座与次镜室外框连接固定,使用聚氨酯橡胶黏合剂将次镜镜片与次镜座相连。与机械紧固方式相比,该结构应力分布更均匀,具有一定的柔性。因检测系统的工作环境为室内,聚氨酯橡胶黏合剂是较为适宜的选择。次镜座中配备有三维位移台,可实现对次镜的三维调节。次镜支撑的三维结构图如图 10 所示。

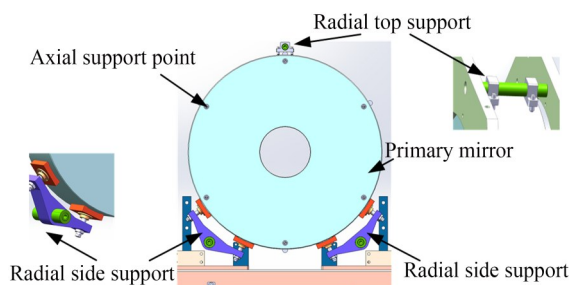


图 9 主镜支撑三维结构图

Fig. 9 Three-dimensional structure of primary mirror support

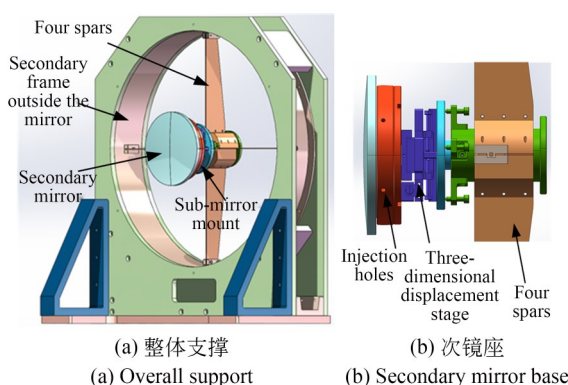


图 10 次镜支撑三维结构图

Fig. 10 Three-dimensional structure of mirror support

3.2.3 光源及探测器组件

在轴一致性检测系统中,探测器组件作为实现检测功能的重要组成,其主要由光源组件(包含黑体及可见光光源)、可见-近红外探测器、短波红外探测器、长波红外探测器构成。图 11 展示了光源及探测器组件光学平台结构分布情况。从图中可以看出,两个平面反射镜分别固定在导轨上,并可通过上位机控制步进电机进行位置移动,实现检测系统的光路切换,满足系统在不同波段范围下的检测要求。

系统采用溴钨灯作为可见光光源,用于照亮分划板,溴钨灯波长范围相对较广,约为 $320 \sim 2500 \text{ nm}$,能够满足系统需求。可见光光源模块及分划板整体支撑结构如图 12 所示。光源模块中含有能够沿光轴方向移动的透镜组,通过凸透镜实现对光线的聚焦,从而增强照明效果。

在长波红外像面放置镀有硫化铜的锗玻璃基体作为光热转换靶材,能够满足宽光谱工作需要,激光等光斑照射到靶材上以热斑的形式展现,便于长波红外探测器准确读取光斑位置坐

标。光热转化靶材支撑固定结构如图 13 所示。

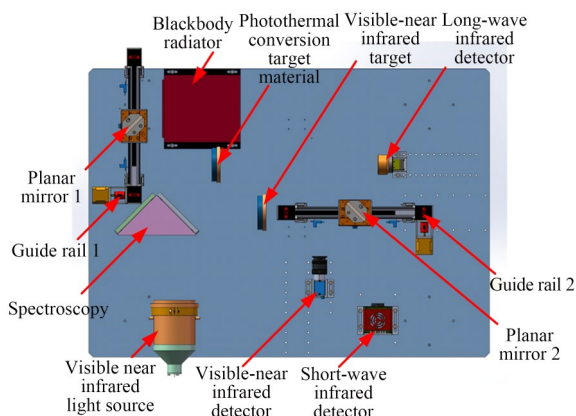
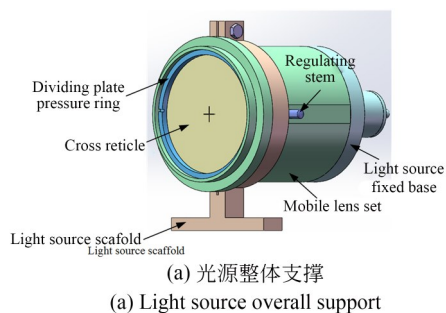
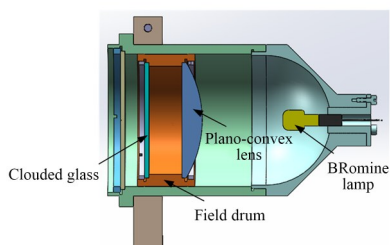


图 11 光源及探测器组件光学平台分布

Fig. 11 Optical platform distribution of light source and detector



(a) 光源整体支撑
(a) Light source overall support



(b) 移动透镜组
(b) Moving lens group

图 12 可见光光源模块三维模型

Fig. 12 Three-dimensional model of visible light source module

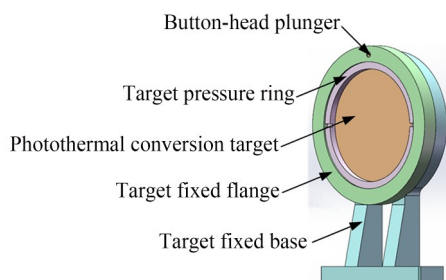


图 13 光热转化靶材支撑结构

Fig. 13 Supporting structure of photothermal conversion target

4 系统精度分析

精度是精密测量仪器最为关键的技术指标之一,在对轴一致性检测系统的总体精度分析时,主要从以下几个方面进行:

4.1 角度测量误差

根据实验,可利用提取激光光斑中心位置的方法来计算角度测量误差。根据光轴偏角计算公式,结合光斑中心提取误差 σ_θ (约 ± 2 pixel),即可得到由光斑中心提取引起的角度测量误差值:

$$\delta_1 \leq \arctan\left(\frac{\sigma_\theta}{f'_0}\right) \approx 1.7'' \quad (2)$$

4.2 反射镜平行性误差

检测系统中存在平面反射镜,由于工艺水平限制,分光镜与平面反射镜之间存在平行性误差,但可将其控制在 $10''$ 之内,即 $u_{21} = 10''$ 。平面反射镜安装在导轨上,由于导轨的平行度为 $0.1/3000$ mm,即导轨平行度 $u_{22} \approx 6.84''$,因此反射镜平行性误差为:

$$\delta_2 \leq \sqrt{u_{21}^2 + u_{22}^2} \approx 12.12'' \quad (3)$$

4.3 对准误差

轴一致性检测系统中。针对可见光源目标的对准方式采用目视瞄准,但该方式会引入对准部分对准误差。由于人眼进行交叉对准时的极限分辨角为 $\theta' = 60''$,瞄准系统放大倍率为 Γ ,当 $\Gamma = 8$ 时瞄准轴的对准误差为:

$$\delta_3 \leq \frac{\theta'}{\Gamma} = 7.5'' \quad (4)$$

4.4 焦距误差

通常情况下,对于焦距较长的光学系统,可选用精密测角法对系统焦距进行测量,使用经纬仪对系统焦距进行测量。如图 14 所示在测量系统焦距时,在主镜前方放置玻罗板,通过次镜后

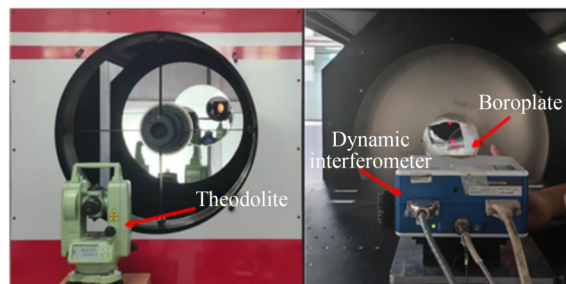


图 14 系统焦距测量实物图

Fig. 14 Physical image of system focal length measurement

方放置的经纬仪对系统焦距进行测量,实验测量数据如表 2 所示。

表 2 焦距测试结果

Tab. 2 Focal length test results

	Group 1	Group 2	Group 3	Group 4	Average value
Scale spacing L/mm	16	16	16	16	/
Indication 1	$0^{\circ}0'0''$	$0^{\circ}0'1''$	$0^{\circ}0'0''$	$0^{\circ}0'0''$	/
Indication 2	$0^{\circ}11'28''$	$0^{\circ}11'31''$	$0^{\circ}11'27''$	$0^{\circ}11'28''$	/
θ	$0^{\circ}11'28''$	$0^{\circ}11'20''$	$0^{\circ}11'27''$	$0^{\circ}11'28''$	/
Focal length f/mm	4 797	4 776	4 804	4 797	4 793

由表 2 可以看出系统焦距测量平均值(近似取整)为 $\bar{f}=4\,793\text{ mm}$,根据焦距平均值,利用贝塞尔(Bessel)公式进而得到焦距的标准差:

$$\sigma_f=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n(f_i-\bar{f})^2}{n-1}}=14.259\text{ mm.}\tag{5}$$

由此可得,由于焦距测量误差所引起的测量角度误差大小为:

$$\delta_4\leqslant\Delta\theta=\frac{h}{f'\beta}-\frac{h}{(f'+\sigma_f)\beta}\approx9.55''.\tag{6}$$

4.5 检测系统测量误差

由于上述误差之间相互独立,因此可以计算出检测系统的测量总误差为:

$$\delta\leqslant\sqrt{\delta_1^2+\delta_2^2+\delta_3^2+\delta_4^2}\approx17.24''\approx0.1\text{ mrad,}\tag{7}$$

根据国军标要求,对于测角类光电装备,其光轴平行性误差的最高要求是 $15'^{[15]}$,本系统最大测量误差为 $17.24''$,因此该系统具有较高的检测精度。

5 实验结果与分析

5.1 导轨往返运动对坐标判读的影响

为了判断导轨运行过程对系统坐标读取准确度的影响,如图 15 所示,通过控制步进电机使得导轨在可见光及短波红外探测器之间(即 A,B 位置间)往返运动,依次读取光斑位置坐标信息,进行多组实验,每组往返十次。表 3 展示出一组光斑坐标数据信息,并求得坐标位置标准差,标准差均小于 0.01 mrad,因此导轨运行过程中对系统精度影响可以忽略不计。

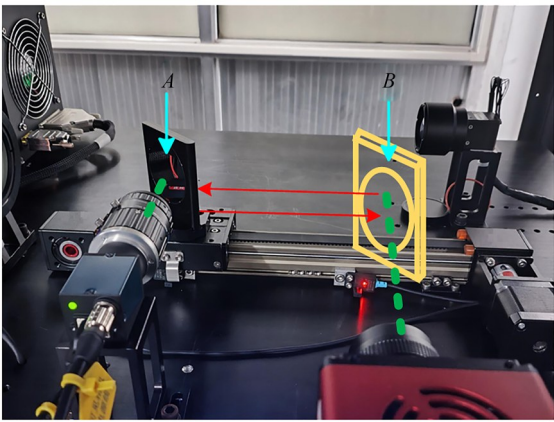


图 15 导轨往返运动位置图

Fig. 15 Diagram of reciprocating motion positions of the guide rail

表 3 导轨往返运动坐标

Tab. 3 Coordinates of reciprocating motion of the guide rail

Experiment number	Coordinate of position A/mrad		Coordinate of position B/mrad	
	X	Y	X	Y
1	-0.784	-0.027	-0.769	-0.028
2	-0.784	-0.027	-0.773	-0.029
3	-0.786	-0.029	-0.773	-0.029
4	-0.787	-0.025	-0.773	-0.018
5	-0.785	-0.027	-0.777	-0.018
6	-0.784	-0.023	-0.771	-0.027
7	-0.786	-0.033	-0.773	-0.034
8	-0.784	-0.038	-0.772	-0.033
9	-0.786	-0.035	-0.775	-0.036
10	-0.790	-0.038	-0.777	-0.032
Standard deviation	0.001 897	0.005 412	0.002 497	0.006 168

5.2 系统测量准确度

将指示激光器位置固定,在其前方放置光楔,如图 16 所示,通过上位机读取放置光楔后的光斑坐标,与未放置光楔时的光斑坐标对比计算坐标移动量,并将移动量与光楔偏光角相对比计算相对误差。

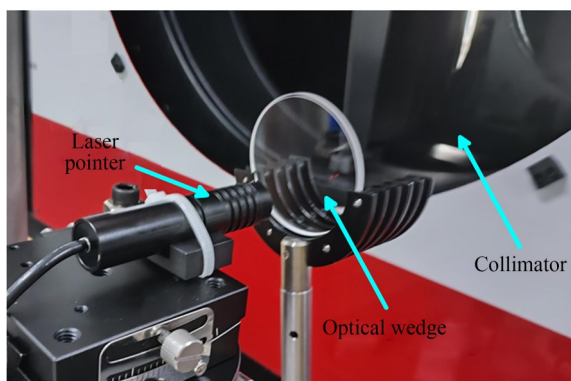


图 16 测量准确度检测实验

Fig. 16 Experimental measurement accuracy detection

实验数据如表 4 所示,其中光楔 1 的楔角为 0.083° ,光楔 2 楔角为 0.333° 。

通过计算可以得出,光楔 1 与光楔 2 的坐标移动

表 4 测量准确度实验坐标值

Tab. 4 Experimental coordinate values of measurement accuracy

Status of wedge placement	Coordinate position/mrad
No wedge	(-0.400, -0.425)
Wedge 1	(0.073, -1.007)
Wedge 2	(1.576, 1.719)

量与光楔偏光角的相对误差分别为 1.30%, 0.96%, 均小于 1.5%, 满足仪表精度 1.5 级的要求^[16]。

6 结 论

本文设计了一套宽光谱多传感器轴一致性检测系统,该检测系统能够实现 $0.4\sim 14\ \mu\text{m}$ 波段光谱范围的检测;通过光热转换元件和光路切换机构可实现单探测器的多谱段检测,避免工作波段发生变化时更换探测器的复杂步骤,提高系统检测灵活性的同时大幅降低系统成本。经过系统误差分析,最大测量误差为 0.1 mrad,精度可满足当前绝大部分光电装备的轴一致性检测要求,并通过实验验证了检测系统的可靠性。

参考文献:

- [1] 张丽芳,王劲松,陈雅鑫,等. 大间距多轴一致性检测方法研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2022, 45(2): 35-40.
ZHANG L F, WANG J S, CHEN Y X, et al. Large spacing multi-axis consistency detection method[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2022, 45(2): 35-40. (in Chinese)
- [2] 陈雅鑫,王劲松,马泽同,等. 焦斑投影法检测发射轴和瞄准轴一致性[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2022, 45(2): 28-34.
CHEN Y X, WANG J S, MA Z T, et al. Focal spot projection method was used to detect the consistency of firing axis and aiming axis[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2022, 45(2): 28-34. (in Chinese)
- [3] 王阳,黄煜,李占峰,等. 利用恒星对天文观测系统光轴平行性检校[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(5): 517003.
WANG Y, HUANG Y, LI Z F, et al. Calibration of optical axis parallelism by using star for astronomical observation system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(5): 517003. (in Chinese)
- [4] 张勇,吴浩,牛刚. 基于非合作目标图像处理技术的大间距轴线一致性检测方法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(5): 051203.
ZHANG Y, WU H, NIU G. Consistency detection method for large spacing axis based on non-cooperative target image processing technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(5): 051203. (in Chinese)
- [5] SUN L, CUI Q F. Optical-digital joint design method for Cassegrain optical system with large FOV[J]. *Optoelectronics Letters*, 2022, 18(9): 525-529.
- [6] 温中凯,张庆君,李爽,等. 空间光电跟踪系统多光轴平行性标校研究[J]. 中国光学, 2021, 14(3): 625-633.
WEN Z K, ZHANG Q J, LI S, et al. Multi-optical

- axis parallelism calibration of space photoelectric tracking and aiming system [J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(3): 625-633. (in Chinese)
- [7] 杨雪, 陈文红, 张玺, 等. 宽光谱光电系统多光轴平行性工程化测试方法研究[J]. *激光与红外*, 2019, 49(8): 978-982.
- YANG X, CHEN W H, ZHANG X, *et al.* A method for multi-axial parallelism measurement of a multi-band optoelectronic system in engineering[J]. *Laser & Infrared*, 2019, 49(8): 978-982. (in Chinese)
- [8] GAO D X, YANG R, GU C G, *et al.* Conformal Cassegrain reflecting systems using meta-surfaces [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2019, 52(23): 235301.
- [9] 肖作江, 夏洋, 朱海滨, 等. 光学瞄具三轴一致性检测系统研究[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2014, 37(1): 21-24.
- XIAO Z J, XIA Y, ZHU H B, *et al.* Research on the detection system of optical sights triaxial parallelism[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2014, 37(1): 21-24. (in Chinese)
- [10] 贾文武, 刘培正, 唐自力, 等. 靶场适用的光电经纬仪光轴平行性检测[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(8): 1670-1677.
- JIA W W, LIU P Z, TANG Z L, *et al.* Detection method for optical-axis parallelism of photoelectric theodolite in range [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(8): 1670-1677. (in Chinese)
- [11] 黄富瑜, 李刚, 史云胜, 等. 多光谱多光轴平行性检测方案设计与误差分析[J]. *光电工程*, 2019, 46(2): 180219.
- HUANG F Y, LI G, SHI Y S, *et al.* Design and error analysis of multi-spectral and multi-axis parallelism testing scheme [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(2): 180219. (in Chinese)
- [12] 张洋. 多光谱光电观瞄系统视轴一致性测试技术[J]. *国外电子测量技术*, 2020, 39(6): 60-64.
- ZHANG Y. Technology for testing sight-axis consistency of multi-spectral electro-optical system [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2020, 39(6): 60-64. (in Chinese)
- [13] 张勇, 吴浩, 马飒飒. 大间距轴线一致性检测技术进展与分析[J]. *光电工程*, 2019, 46(2): 180409.
- ZHANG Y, WU H, MA S S. Development and analysis of large spacing axis consistency detection technology [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(2): 180409. (in Chinese)
- [14] 陈超, 王乡儿, 仇昀, 等. 纳米硫化铜载药红细胞靶向蓄积及提高肿瘤光热治疗效果研究[J]. *中国生物医学工程学报*, 2021, 40(2): 210-217.
- CHEN C, WANG X E, QIU Y, *et al.* A tumor targeted controlled-release nano-CuS loaded erythrocytes for tumor photothermal therapy [J]. *Chinese Journal of Biomedical Engineering*, 2021, 40(2): 210-217. (in Chinese)
- [15] 唐捷, 王文华, 洪善贤, 等. 望远镜通用规范: GJB1240-1991[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 1992.
- TANG J, WANG W H, HONG S X, *et al.* General specification for telescope: GJB 1240-1991 [S]. Beijing: Commission on Science, Technology and Industry for National Defense, 1992. (in Chinese)
- [16] 柴春吉. 测量系统中仪表的精度分析与确定[J]. *计量与测试技术*, 2003(6): 33-41.
- CHAI C J. The confirming and analysing of the accuracy's instruments in detecting system [J]. *Metrology & Measurement Technique*, 2003(6): 33-41. (in Chinese)

作者简介:



邹 韵(1998—),女,山东威海人,硕士研究生,主要从事精密测量及光机结构设计等方面的研究。E-mail: 1477803373@qq.com

通讯作者:



朱运东(1974—),男,吉林长春人,硕士,副教授,硕士生导师,1999年于长春光学精密机械学院获得学士学位,2007年于长春理工大学获得硕士学位,主要从事精密测量与数字化检测等方面的研究。E-mail: 865040845@qq.com