

文章编号:1001-5078(2019)08-0978-05

· 光电技术与系统 ·

## 宽光谱光电系统多光轴平行性工程化测试方法研究

杨雪<sup>1</sup>, 陈文红<sup>1</sup>, 张玺<sup>1</sup>, 初华<sup>2</sup>, 钱琨<sup>1</sup>, 张珊<sup>1</sup>, 方洁<sup>1</sup>, 孙宁<sup>1</sup>, 张勇<sup>1</sup>, 郭延龙<sup>1</sup>, 欧阳艳蓉<sup>1</sup>

(1. 陆军工程大学军械士官学校光电火控系, 湖北武汉 430075; 2. 陆军工程大学军械士官光电技术研究所, 湖北武汉 430075)

**摘要:**针对宽光谱光电系统多光轴平行性的工程化测试要求,设计一套光轴平行性测试的系统和方法。该系统采用离轴非球面折叠光路,设计出口径120 mm,焦距720 mm的平行光管,实现了轻量便携。采用模块化设计、多靶标集成技术,实现在同一光学系统里对红外、可见光、激光的光轴平行性测试。采用图像处理和自动控制技术实现多光轴平行性的定量检测,测量误差控制在0.1 mrad以内。经与CI测试系统对比测试,结果表明:光轴平行性测试一致性好,准确度高,具有工程化应用价值。

**关键词:**多光轴平行性;工程化测试;离轴非球面;定量检测

中图分类号:TH745 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2019.08.012

### A method for multi-axial parallelism measurement of a multi-band optoelectronic system in engineering

YANG Xue<sup>1</sup>, CHEN Wen-hong<sup>1</sup>, ZHANG Xi<sup>1</sup>, CHU Hua<sup>2</sup>, QIAN Kun<sup>1</sup>, ZHANG Shan<sup>1</sup>,  
FANG Jie<sup>1</sup>, SUN Ning<sup>1</sup>, ZHANG Yong<sup>1</sup>, GUO Yan-long<sup>1</sup>, OUYANG Yan-rong<sup>1</sup>

(1. Department of Opto-Electronics and Fire-Control, Ordnance Non-Commissioned Officers Academy, Army Engineering University of PLA, Wuhan 430075, China; 2. Opto-Electronics Facility, Ordnance Non-Commissioned Officers Academy, Army Engineering University of PLA, Wuhan 430075, China)

**Abstract:** For the requirements of multi-axial parallelism measurement in engineering, a method and a system are proposed to test the multi-axial parallelism. This system adopts off-axis asphere two-double light route, and designs a collimator with aperture 120 mm and focus 720 mm, realizing light weight and portability. Modular design and multi-target integration are used to test the parallelism of infrared, visible and laser optical axis in the same system. Image processing and automatic control technology are used to realize quantitative measurement of multi-axial parallelism. The testing error is controlled within 0.1 mrad. Compared with the CI test system, the results show that the optical axis parallelism test has good consistency, high accuracy and engineering application value.

**Key words:** multi-axial parallelism; engineering test; off-axis asphere; quantitative testing

#### 1 引言

目前,宽光谱光电系统融合了激光测距制导、电视跟瞄、红外成像等技术,广泛集成在平台类武器装备中,如各型雷达、高炮、无人机等,能够完成对目标

的搜索、探测、识别、观察、瞄准以及激光照射等功能,具有抗电磁干扰能力强、低空探测性能好、精度高、目标识别能力强等优点,已成为武器系统的“信息感知器”和“效能倍增器”。这种集多种光学仪器

作者简介:杨雪(1983-),女,硕士研究生,研究方向为光电装备保障技术。E-mail:157035890@qq.com

通讯作者:初华(1985-),男,硕士研究生,研究方向为光电装备保障技术。E-mail:chuhua666@126.com

收稿日期:2018-11-23

于一体的光学系统,光谱几乎涵盖了可见光到红外的全部波段,必然会产生诸多光学仪器的光轴平行性问题,而光轴之间的平行性严重制约着目标探测定位的准确性和目标打击的精度。关于红外、白光和激光光轴平行性的测量,一般的检测方法有:五棱镜法、激光相纸检测法、激光光轴仪法、投影靶法、小口径平行光管法、大口径平行光管法等。五棱镜法和激光相纸检测法容易受人为主观因素影响,存在较大的随机误差,精度有限;而激光光轴仪法和投影靶法主要用于一些专用型设备,使用条件通常受限,通用性较差;小口径平行光管法误差环节较多,精度不高;大口径平行光管法常采用大口径离轴抛物面反射镜产生平行光束,优点较多:抛物面镜可有效消除球差,允许光源保持其波前特性;反射系统没有色差,受材料限制也比较小;离轴系统相对于传统抛物面,没有中心遮拦,视场大、像质好、透过率高。因此大口径平行光管法以其误差环节少、精度高等优势,广泛地应用于高精度的多光轴平行检测和校正系统中<sup>[1-8]</sup>。针对多光轴平行性的测试,实验室方法较多,并且有专用的检测设备,如美国的 SBIR、波兰的 Inframat、法国的 HGH、以色列 CI-Systems 等公司生产的光电性能测试系统,但大多测试系统体积重量过于庞大,测试时间较长,对于野外环境下的平台类光电系统不大适用。

本文针对宽光谱光电系统多光轴平行性测试迫切的实际需求,设计并搭建了一套宽光谱、长焦距、小型轻量便携(单人可携)的离轴双非球面反射式平行光管系统,可实现野外作训等特殊环境的装备保障;采用模块化设计、多靶标集成技术,实现在同一光学系统里对红外、可见光、激光的光轴平行性测试;采用图像处理和自动控制技术实现了一种光轴平行性定量检测方法,测量误差控制在 0.1 mrad 以内,满足测试所需的精度和稳定度,对宽光谱多光轴平行性工程化测试具有较高的参考价值 and 实际意义。

## 2 系统总体结构

系统以离轴双非球面反射式平行光管为核心作为主光学系统,配置所需光谱的检测靶标和光源,实现在同一光学系统里对红外、可见光、激光的光轴平行性测试。主要包括离轴折叠非球面光学系统、CCD、精密二自由度平移台和双五棱镜扩径组件。

离轴折叠非球面光学系统构成准直平行光管,具有宽光谱特性,为测试系统提供无穷远目标或将入射激光汇聚至焦平面上;CCD 实时采集焦平面图像;精密二自由度平移台用于将焦平面十字分划对准红外/电视的视场中心,从而在焦平面上指示红外/电视的光轴位置;双五棱镜扩径组件实现光学系统通光口径的有效扩展;采用便携式工控机实现平移台的控制和 CCD 图像的采集,定量解算出多光轴平行性误差。其总体结构如图 1 所示。

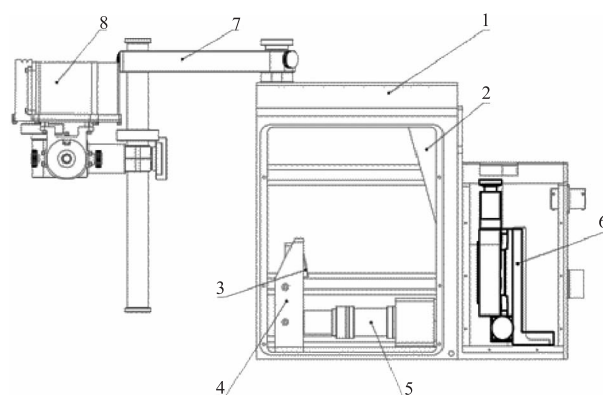


图1 多光轴平行性定量检测系统结构

Fig. 1 Multi-axial parallelism testing system structure

其中,壳体1、非球面主镜2、非球面次镜3组成离轴折叠非球面光学系统;二自由度平移台6安装在壳体1的后方,其十字分划面与离轴折叠非球面光学系统的焦平面重合,转折棱镜4安装在非球面次镜3的下方,CCD5安装于壳体1的底部,通过转折棱镜4实时采集二自由度平移台6十字分划面的图像;支架组7和五棱镜8构成五棱镜扩径组件,实现光学系统通光口径的有效扩展。

出于对安装、拆卸、便携性和仪器精度稳定性等几方面的考虑,采用了模块化结构设计,将多光轴平行性检测系统的结构设计成平行光管模块、多光轴平行性检测模块、工控机、架设机构和五棱镜组5部分组成,可随时、方便地组装拆卸。实物如图2所示。

## 3 离轴反射式光学系统

综合考虑系统成像质量和工程应用需求,本文设计的平行光管模块采用离轴两反折叠式非球面光学系统构成准直平行光管,为测试系统提供无穷远目标,并将入射激光汇聚至焦平面上。主要由主反射镜和次反射镜组成,主、次反射镜均采用离轴非球面镜。该光路相对于离轴式牛顿系统

及卡塞格林系统,将次镜平面反射镜改为双曲面镜,在焦距一定的前提下可以进一步减小系统体积;其次,将主镜、次镜进行离轴设计,可以解决光场中心遮拦的问题,从而实现平行光管的小型化及轻量化。为满足绝大多数光电装备的测试需求和系统的检测精度,主镜的通光口径设计为120 mm,次镜的通光口径为43 mm,考虑到大多数红外热像仪的口径 $D$ 在120 mm左右,本文设计红外模拟器焦距 $f = f^* \times D = 720$  mm,其中 $f^*$ 为系统的光阑指数,取为6。



图2 系统结构实物图

Fig. 2 Real graph of system structure

在此系统中,主镜采用抛物面镜,次反射镜为偶次离轴非球面,主镜与次镜优化组合以对球差进行较好的校正,但残余彗差、像散较大,因此对次镜面型进行4次、6次、8次、10次修剪,在优化之初,先把主抛物面镜顶点曲率半径、主次镜间距、次镜高次系数作为变量,多次优化后使像质改善,对4次、6次、8次、10次系数进行人为的微调找到平衡点,再次进行优化。运用点列图、传递函数、波前误差对可见光波段像差和红外波段像差进行评价和优化设计,使其满足光学性能检测的要求。优化所得的准直光学系统如图3所示。

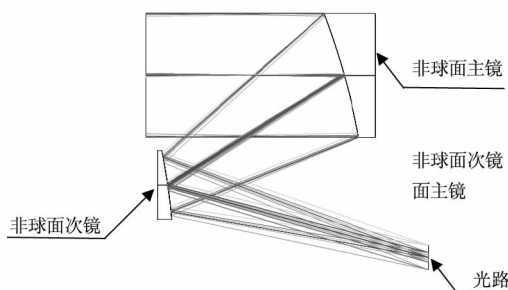


图3 平行光管光学系统

Fig. 3 Optical system of collimator

#### 4 多光轴平行性测试模块

光轴平行性检测模块原理如图4所示。

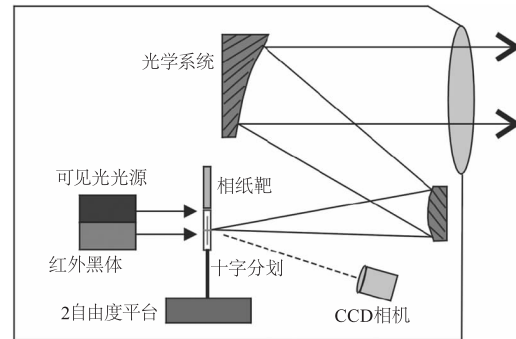


图4 光轴平行性检测模块原理图

Fig. 4 Graph of optical axis parallelism testing module

该模块由十字分划板、相纸靶、靶轮、2自由度的精密平移台、卤素灯光源、CCD摄像机等组成。CCD摄像机采用像素130万的京航JHSM130B相机,安装在平行光管内部,用于实时采集焦平面的十字分划图像和激光光斑图像。十字分划板和自动相纸安装在靶轮上,可由工控机根据测试需要进行自由切换。二自由度平移台采用精密的滚珠丝杠,可实现十字分划板在水平和垂直方向上的精密移动控制。根据摄像机前透镜的物镜关系(如图5所示)可知,当相机相面任意两像素点距离为 $a$ 时,二自由度移动平台近似移动 $3a$ 距离。相机像素为130万,受工控机屏幕尺寸限制,屏幕上相机显示界面尺寸为 $640 \times 480$ ,故像素为30.7万,近似于屏幕1个像素点对应相机2个像元,相机像元尺寸为 $5.2 \mu\text{m}$ ,即屏幕1个像素点对应实际相机像元尺寸为 $10.4 \mu\text{m}$ ,对应相机能识别的二自由度平移台移动最小移动距离为 $31.2 \mu\text{m}$ 。滚珠丝杠的丝距为1 mm,步进电机单步为 $1.8^\circ$ ,控制器采用4细分,因此步进电机的单步实际角度为 $0.45^\circ$ ,这样平移台单轴的单步步进距离为 $1000 / (360 / 0.45) = 1.25 \mu\text{m}$ 。相机能识别的最小像素点需要步进电机运动 $31.2 \mu\text{m} / 1.25 \mu\text{m} = 24.96$ 步 $\approx 25$ 步。

计算光轴平行性离轴度精度为:

$$\theta = \frac{3a}{f} = \frac{31.2 \mu\text{m}}{720 \text{ mm}} = 0.043 \text{ mrad}$$

其中, $a$ 为1个像素点对应的像元尺寸; $f$ 为平行光管的焦距。光轴平行性的理论测量精度为0.043 mrad,小于一般的工程需求0.1 mrad。

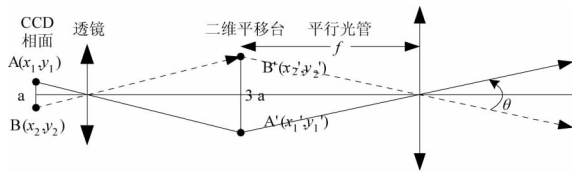


图5 像元距离与光轴平行性关系示意图

Fig. 5 Graph of relation between distance of pixels and optical axis parallelism

### 5 光轴平行性的测试

光轴平行性的测试方法和流程如下:工控机软件在屏幕的视频成像区域中心标注有红色的十字标志,用于对准。首先将待测设备的红外系统对准平行光管,将光源切换至红外,使光管产生一个红外目标(红外十字分划),然后使待测设备测试该目标,并通过工控机将观测到的红外十字分划图像采集到屏幕上,然后通过软件控制二自由度平移台的移动,使得红外十字分划中心与视频成像区域十字标志重合,此时控制摄像机记录一张图片。同理,将光源切换至白光,然后将待测装备测试的白光十字分划与屏幕成像区域十字标志重合,通过摄像机再记录一张图片。用工控机控制将靶轮切换至相纸,使待测激光设备在相纸上打上光斑,然后通过二自由度平移台使得激光光斑中心与成像区域十字标志重合,通过摄像机又记录一张图片。分别求取三张图片中十字分划中心的坐标和激光光斑中心的坐标,设白光十字分划中心像素点坐标  $A(x_1, y_1)$ , 激光中心坐标为  $B(x_2, y_2)$ , 红外中心坐标  $C(x_3, y_3)$ , 三个坐标中心在同一坐标系下位置如图6所示。

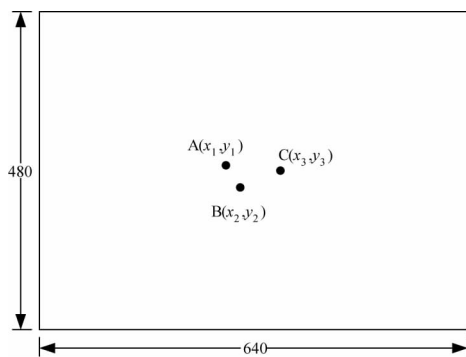


图6 十字分划中心坐标示意图

Fig. 6 Graph of cross partition centre coordinate

任意两点之间距离可以表示为:

$$a_1 = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}, \text{或者:}$$

$$a_2 = \sqrt{(x_1 - x_3)^2 + (y_1 - y_3)^2}, \text{或者:}$$

$$a_3 = \sqrt{(x_2 - x_3)^2 + (y_2 - y_3)^2}。$$

通过摄像机分时采集图像进行运算,计算出焦平面上激光光斑与红外、白光十字分划中心的距离值,再通过焦平面上三个十字分划的距离值,定量解算出红外、白光和激光两两之间的光轴平行性。由于系统采用计算机自动处理,相对于传统的手动更换光源,切换相纸等方法,本系统在测试速度、测试效率、测试准确度方面,均具有较大优势。此外,本文还设计了扩径组件,可对光束进行平移,实现光学系统通光口径的有效扩展,进一步拓展其工程应用价值,具有光谱范围宽、测量精度高,小型便携等特点,有效解决了多光谱光电设备测量基准难确定、测量口径不能覆盖多光轴、测量误差难提取的难题。

### 6 测试结果及结论

本文以实验室现有的某型号激光测距机为被测对象,通过本文搭建的测试系统与以色列 CI 检测系统(如图7所示)在同样的测试条件下进行测试并将结果进行对比,如表1所示。从表中可以看出,测量结果与 CI 测试结果基本一致,且稳定性好,虽然整体精度比以色列进口的 CI 系统略低,但也满足了一般装备的测试精度要求。

表1 多光轴平行性测试结果对比

Tab. 1 Contrast result of multi-axis parallelism test

测试项目	白光-激光 $\theta_2/\text{mrad}$	
	CI 系统	本系统
测试 1	0.162	0.18
测试 2	0.158	0.16
测试 3	0.163	0.19
测试 4	0.160	0.15
测试 5	0.156	0.17
平均值	0.160	0.17

由于以色列 CI 检测系统体积庞大,重量达到数吨,虽然检测精度较高,但一般仅适用于实验室、工厂或基地检测,对于作战和训练保障难以适应,并且价格昂贵。而本系统在实现宽光谱多光轴平行性测试精度一般要求的基础上,实现了轻便便携(单兵徒手可携带),测试方法简便,测试速度快,非常适合野外装备系统的测试保障。由于该系统的绝大多数零部件采用国产器件,因此系统成本大幅降低。并且该测试系统人机交互设计简便,对测试人员要

求不高,只需要通过简单培训,可以由非专业人士完成测试过程。

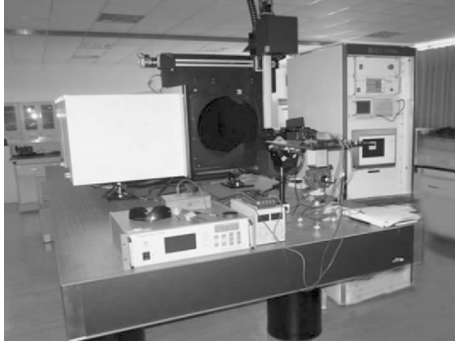


图7 以色列 CI 系统公司的光电测试系统

Fig. 7 Photoelectric testing system of CI-Systems, Israel

## 7 小结

本文以宽光谱多光轴平行性的工程化测试为研究目标,对系统光路、光轴平行性检测模块及测试方法进行了阐述,最后与 CI 测试系统的测试结果进行了对比。从测试结果可以看出,本文设计的光轴平行性测试方法测试精度和测试效率较高,测试结果重复性好,适用范围广,能够满足工程化测试需要。与 CI 测试系统相比,该系统体积小,重量轻,便于携带,可以应用于野外测量,在保证所需的测试准确度的前提下,采用了计算机自动处理,在测试速度和测试效率方面,具有较大优势和实际的应用价值。

## 参考文献:

- [1] ZHAO Wenfeng, JI Ming, LIU Tao. Design of portable multi-band and multi-axis parallel detector[J]. Journal of Applied Optics, 2013, 34(2): 319 - 324. (in Chinese)  
赵文峰, 纪明, 刘涛. 便携式多波段多光轴平行性检测仪设计[J]. 应用光学, 2013, 34(2): 319 - 324.
- [2] HUANG Xin, SHEN Xiangheng, Ye Lu. Development of testing instrument of optical-axial parallelism for multi-axial systems[J]. Journal of Applied Optics, 2015, 36(1): 19 - 23. (in Chinese)  
黄欣, 沈湘衡, 叶露. 多光轴光学系统光轴间平行性检测仪的研制[J]. 应用光学, 2015, 36(1): 19 - 23.
- [3] DING Zhenyong, YE Lu, SHEN Xiangheng. Detection method of between laser and parallelism of optic axes visible optical systems[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(5): 890 - 8933. (in Chinese)  
丁振勇, 叶露, 沈湘衡. 激光与可见光系统光轴平行性检测[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(5): 890 - 893.
- [4] YAN Zongqun, YANG Jianchang, XIE Zhihong. Optical axis parallelism calibration system of large-scale multi-spectral multi-optical axis[J]. Journal of Applied Optics, 2016, 37(6): 823 - 828. (in Chinese)  
闫宗群, 杨建昌, 谢志宏. 大尺度多光谱多光轴平行性检校系统[J]. 应用光学, 2016, 37(6): 823 - 828.
- [5] WANG Yang, HUANG Yu, LI Zhanfeng. Calibration of optical axis parallelism by using star for astronomical observation system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(5): 0517003. (in Chinese)  
王阳, 黄煜, 李占峰. 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): 0517003.
- [6] HUANG Zhanhua, LIAO Ke, ZHU Meng. Design of a detection system for multiple optical-axis parallelism in an electro-optical sighting telescope [J]. Laser Technology, 2013, 36(5): 571 - 576. (in Chinese)  
黄战华, 廖可, 朱猛. 光电瞄具多光轴平行性检测系统的设计与研究[J]. 激光技术, 2013, 36(5): 571 - 576.
- [7] GAO Ming, FENG Xiaoli, ZHAO Wencai. Design of optical system for measuring the optical axis parallelism of multi axial system in field[J]. Optical Technique, 2017, 37(1): 114 - 119. (in Chinese)  
高明, 冯小利, 赵文才. 外场多光轴平行性测试的光学系统设计[J]. 光学技术, 2017, 37(1): 114 - 119.
- [8] LI Sizhong, YU Yunqi, CHEN Jing. System for parallelism detection of multi-spectrum optical axes [J]. Journal of Applied Optics, 2013, 34(4): 644 - 647. (in Chinese)  
李思众, 鱼云岐, 陈静. 一种多光路光轴平行性检测系统[J]. 应用光学, 2013, 34(4): 644 - 647.