

# 便携式多光轴平行性检校系统的研制

李雅灿 邱丽荣 张鹏嵩 沙定国 赵维谦

(北京理工大学光电学院光学测量实验室, 北京 100081)

**摘要** 为满足野外检测多波段光电设备光轴平行性的检校需求, 研制了一套便携式多光轴平行性检校系统。系统采用反射式卡塞格林光学系统和 ZnS 晶体靶板, 为被校系统提供无穷远的十字分划目标并以此作为瞄准基准, 完成对被校系统电视轴和红外轴之间的平行性检校; 采用 CCD 系统完成分划板十字线和靶纸上激光光斑的采集, 并利用数据处理系统检测出分划板十字中心与激光光斑中心位置的偏差量, 完成对被校系统激光光轴与可见光轴之间的平行性检校。利用高精度光学角规对所研制的检校系统进行了标定, 精度可达亚秒级。实验结果表明, 该检校系统测量电视轴与红外轴之间平行性标准不确定度为  $2''$ , 检校激光瞄准轴与发射轴平行性标准不确定度为  $5''$ 。

**关键词** 测量; 多光轴平行性; 角规标定; 多光轴平行性检校系统

中图分类号 TN247 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201239.1008002

## Development of Portable Multi-Optical Axes Parallelism Calibration System

Li Yacan Qiu Lirong Zhang Pengsong Sha Dingguo Zhao Weiqian

(Optical Measurement Laboratory, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract** To satisfy the need of field measurement of the multi-optical axes parallelism of photoelectronic equipments, a portable axes parallelism calibration system is developed. The collimation of Cassegrain optical system and ZnS reticle is used in the system to create infinite reticle object and to provide aiming baseline for the original system and realising the parallelism calibration between television axis and infrared axis. A CCD system is adopted to collect crosswire on the reticle and laser facula on the target sheet. On the basis of the bias between the detected reticle centre and laser spot centre, parallelism calibration for laser axis and visible axis is achieved. An optical angle gauge is applied in this system to make calibration precision to approach angle second level. Experimental analytical results show that the standard uncertainty of this measurement for the parallelism between the TV-axis and the infrared-axis can reach  $2''$  and the standard uncertainty of this measurement for the parallelism between the sighting axis and the receiving axis of laser can reach  $5''$ .

**Key words** measurement; multi-optical axes parallelism; angle gauge calibration; multi-optical axes parallelism calibration system

**OCIS codes** 120.4630; 120.4640; 120.4800; 120.4880

## 1 引言

当今, 多波段多光电传感器系统广泛应用于直升机电吊舱、车载光电稳瞄装备、潜艇光电桅杆等武器装备平台, 大大提高了武器装备的功效和能力, 成为各国武器装备重点发展的技术之一<sup>[1]</sup>。其中,

多光轴平行性作为光电装备性能的一个重要参数, 在保证武器系统的命中概率和精度方面起着至关重要的作用<sup>[2]</sup>。

目前, 光轴平行性检测系统主要有两类应用: 实验室测量与野外测量。实验室测量方法包括投影靶

收稿日期: 2012-05-31; 收到修改稿日期: 2012-07-08

基金项目: 原国防科工委十一五基础科研计划(B2220061283)资助课题。

作者简介: 李雅灿(1988—), 女, 硕士研究生, 主要从事精密光电检测技术及仪器等方面的研究。

E-mail: yacan227@163.com

导师简介: 邱丽荣(1974—), 女, 副教授, 硕士生导师, 主要从事差动共焦理论及精密光学检测等方面的研究。

E-mail: qiugrass@126.com(通信联系人)

板法<sup>[3]</sup>、大口径平行光管法<sup>[3]</sup>、激光光轴仪法<sup>[4]</sup>、五棱镜法<sup>[3]</sup>、分光路投影法<sup>[4]</sup>和靶面扫描拟合法<sup>[5]</sup>等。实验室测量方法已经较为成熟,但其具有针对性强和主观性强两大特点,难以达到外场高温、振动等环境条件以满足测试与检测的需要。近年来以色列CI公司研制出了一些适合于野外测量的光轴平行性检测系统,如适用于检测直升机光电吊舱的多光轴平行性检测仪<sup>[6]</sup>以及检测枪轴与瞄具光轴一致性的视频检测系统<sup>[7]</sup>。但现有野外测量方法其测量精度不高<sup>[8]</sup>,难以适应部队的外场检测需要。因此,需要研究新的适于野外测试的多光轴平行性测试系统,使其具有适用性强、客观性强、结构简单、操作简单、能够提供高精度数据等特点。

本文研制了一套满足野外测试要求的便携式多光轴平行性检校系统,主要用于完成可见光、红外和激光多光轴之间平行性的检测。系统利用 ZnS 玻璃全光谱透射波段的特性<sup>[9]</sup>,采用光刻技术,在 ZnS 玻璃基底上刻蚀不同的目标图案。该系统具有以下特点:1) 通过多光谱光源照射目标图案,产生红外目标的同时产生一个可见目标,可避免由于更换可见光分划板和红外分划板引入的误差,提高了检测精度;2) 利用 CCD 摄像机进行分划板目标图案和靶纸上激光光斑的图像采集,并设计了检校仪测量软件完成后期的数据处理,可提供高精度数据,避免

了人眼判读引起的主观误差。因此,研制的检校系统能实现野外作战条件下对多波段光电设备光轴平行性的高精度快速检校功能。

## 2 检校系统工作原理与组成

检校系统的多光轴平行性测试原理如图 1 所示。利用多光谱光源照射 ZnS 十字分划板,经卡塞格林光学系统准直后输出平行光,产生无穷远的多光谱十字分划目标,为被校系统提供瞄准基准,其中靶纸紧贴于十字分划板,且位于卡塞格林光学系统的焦平面上。在检测被校系统的可见光轴和红外光轴的平行性时,将检校系统放置在被校系统前方,以可见光设备作为瞄准基准,使检校系统的十字目标成像在可见光设备的探测器焦平面上,调整使可见光设备的十字丝中心和检校系统的十字分划目标像重合。对比可见光设备的光轴和红外设备的十字中心像,即可得到可见光与红外设备之间的光轴偏差量。在检测被校系统的可见光轴与激光发射轴的平行性时,将被校系统发射的激光会聚到靶纸上,并形成一激光光斑,该光斑通过采集系统成像于 CCD 上,利用数据处理系统得到激光光斑中心位置,将此位置与基准进行比对即可得到激光设备与可见设备之间的光轴偏差量。

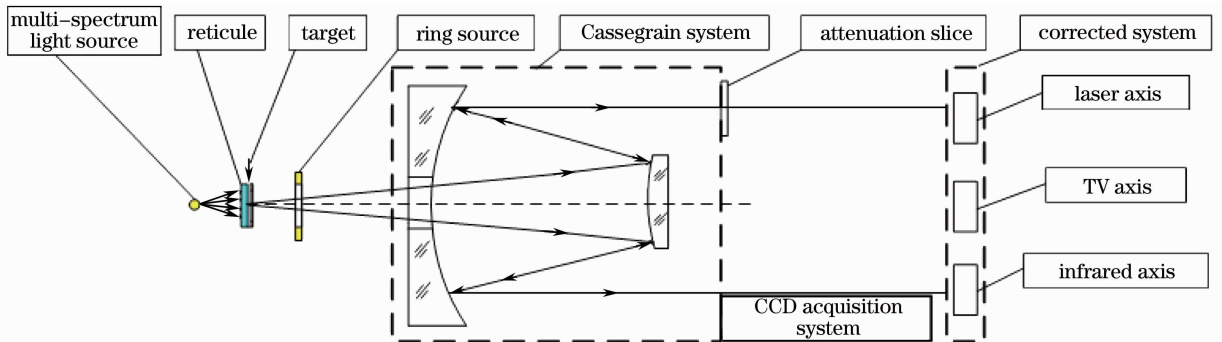


图 1 便携式多光轴平行性检校系统工作原理

Fig. 1 Principle of the portable multi optical axis parallelism calibration instrument

基于图 1 研制的便携式多光轴平行性检校系统如图 2 所示。系统主要由准直目标发生器、图像采集系统、数据处理系统和夹持三角支撑机构组成。

检校系统的准直目标发生器采用自主设计的卡塞格林折反射式准直光学系统,其中主镜口径为  $\Phi 250$  mm、次镜遮拦口径为  $\Phi 50$  mm、组合焦距为 1600 mm,其工作视场达  $\pm 6'$ 。该光学系统具有无色差、轴上无球差、无像面弯曲的优点,为被校系统提供清晰的多光谱十字分划目标。考虑到检校系统

实际应用中简单便携的需求,其镜筒筒长设计为焦距的  $1/3$ ,结构采用线切割一体化加工,有利于提高主镜与次镜相对位置的稳定,并长时间保证检校系统的精度。焦面上采用透射波长为  $0.4 \sim 0.9$ 、 $1.06, 3 \sim 5, 8 \sim 12 \mu\text{m}$  的 ZnS 晶体靶板作为十字分划板,将可见分划板和红外分划板合二为一,消除了由更换可见光分划板和红外分划板可能引入的失调,从而提高了检校精度。

检校系统采用 MC PY6NHAP 8/500 mm

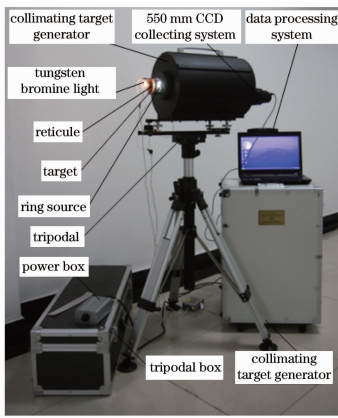


图2 便携式检校系统

Fig. 2 Picture of the portable axis-calibration system

MAKPO 镜头和加拿大 Pointgrey 公司研发 USB2.0 数字相机构成的采集系统完成对十字分划目标和激光光斑的图像采集,利用本文设计的软件实现激光光轴与可见光轴之间平行性检校的数据处理。其中十字分划目标中心位置是通过图像预处理,去除噪声干扰后,利用重心算法对十字分划上、下、左、右四部分细化拟合两条相互垂直的直线,两直线的交点表示十字分划中心位置,并用绿色(彩图请见网络电子版)小圆圈表示;激光光斑中心位置是通过灰度二值化、反色处理,采用重心算法,获得激光光斑的中心位置,并用绿色小圆圈表示;获取十字分划目标中心位置<sup>[10]</sup>和激光光斑中心位置<sup>[11]</sup>后,将两幅图重叠显示并将检校数据结果显示。其测量软件界面检校结果如图3所示。

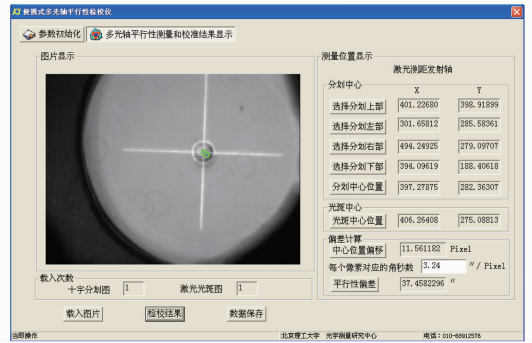


图3 数据处理界面

Fig. 3 Software interface window of data processing

### 3 实 验

标定检校系统光轴平行性的最简单最有效的方式是采用亚秒级精度的标准光学角规,其偏向角值可按需要选择,通常可选 2'、5'和 10'。

#### 3.1 标定 CCD 采集系统的像素间隔角秒值

将镜头焦距为 500 mm 相机正对在准直仪出瞳处前方,采集并记录其十字分划中心位置。在光路中放入如偏向角为 121.48"的角规,再次采集并记录其十字分划中心位置。由记录的分划中心坐标值  $(X_1, Y_1)$  和  $(X_2, Y_2)$  的偏差值,计算出 CCD 光敏面上单像素间隔对应的角秒值。表 1 为 8 次实验数据,所得检校系统的角秒/像素值为 3.24"/pixel,其引入的标准不确定度分量为 0.008"/pixel。实验结果表明,该检校系统 CCD 采集系统的像素间隔角秒值可精确到亚秒级以下。

表 1 CCD 像素间隔角秒值的标定

Table 1 Angle second calibration of CCD pixel interval

$X_1 / (")$	$Y_1 / (")$	$X_2 / (")$	$Y_2 / (")$	Offset / pixel	CCD pixel interval / [(")/pixel]
244.550	242.297	243.465	204.873	37.43972	3.239340
244.572	242.309	243.538	204.745	37.57823	3.227401
244.574	242.174	243.578	204.822	37.36528	3.245794
244.641	242.307	243.530	204.873	37.45048	3.238410
244.563	242.184	243.597	204.816	37.38048	3.244474
244.669	242.185	243.574	204.908	37.29308	3.252078
244.754	242.356	243.616	204.853	37.52026	3.232387
244.646	242.163	243.489	204.765	37.41589	3.241403

#### 3.2 电视轴平行性模拟测试

在检校某试样电视轴测试光路中放入角规和移去角规,先后采得十字分划中心数据,计算两者的偏差值。表 2 为两个电视轴之间的平行性测试结果,10 次重复测试的数据统计角秒偏差的平均值为 1.4",标准差为 0.44"。实验验证该检校系统测量电视轴平行性标准不确定度能控制在 2"内。

#### 3.3 激光测距机发射轴与瞄准轴平行性测试

对某具激光测距机(KRL LRH 786P, No:2047)的发射轴和瞄准轴进行了平行性测试,结果如表 3 所示,8 次重复测试的数据统计角秒偏差的平均值为 1.4",标准差为 13"。由于该激光测距机每次发射的脉冲激光光斑分布形态显著不一导致每次光斑中心位置的定位不一致,因此所测得的激光轴平行性标

准不确定度不如电视轴平行性的精确度高。

表 2 两个电视轴之间的平行性测试  
Table 2 Parallelism test between two TV-axis

$X_1/(\prime)$	$Y_1/(\prime)$	$X_2/(\prime)$	$Y_2/(\prime)$	Offset /pixel	Arcsec /(\prime)	Arcsec offset /(\prime)
344.10	231.28	341.64	176.38	54.95	300.60	1.79
343.88	231.21	341.71	176.49	54.77	299.58	0.78
344.09	231.34	341.65	176.37	55.03	301.02	2.22
344.05	231.21	341.60	176.38	54.88	300.22	1.41
344.15	231.28	341.70	176.47	54.87	300.13	1.32
344.01	231.33	341.59	176.61	54.78	299.63	0.83
343.97	231.13	341.70	176.32	54.85	300.02	1.22
344.08	231.30	341.67	176.42	54.94	300.51	1.70
343.98	231.39	341.55	176.62	54.83	299.90	1.10
343.86	231.38	341.61	176.56	54.87	300.12	1.32

表 3 激光测距机发射轴与瞄准轴平行性测试  
Table 3 Parallelism test between the sighting axis and the receiving axis of laser range finder

$X_1/(\prime)$	$Y_1/(\prime)$	$X_2/(\prime)$	$Y_2/(\prime)$	Offset /pixel	Arcsec /(\prime)	Arcsec offset /(\prime)
385.64	297.11	299.07	303.80	86.83	283.06	-18.78
391.67	296.19	299.90	313.51	93.39	304.45	2.61
390.60	298.05	295.11	309.97	96.23	313.71	11.87
394.52	303.36	298.94	311.71	95.94	312.78	10.94
392.60	300.27	295.49	315.01	98.22	320.20	18.36
386.58	302.21	298.31	310.61	88.67	289.06	-12.78
385.12	300.48	291.82	313.90	94.26	307.29	5.45
387.83	300.42	297.76	310.31	90.62	295.39	-6.44

#### 4 检校系统的不确定度评定

检校系统的测量不确定度源至少有 10 项,如表 4 所示。其中主要的测量不确定度源大致有 6 项。

表 4 检校系统的测量不确定度源  
Table 4 Measurement uncertainty source of axis-calibration instrument

Parameters	Value
Use the calibration uncertainty of arcsec of per pixel of 550-mm CCD collecting system to measurement laser axis $u_1$	0.01"
The uncertainty of the reticle center of calibration system is determined by data processing system, estimated according to 1/3 pixel $u_2$	1"
Analysis and measure the aiming uncertainty of calibrated system by the visual targeting calibration system on the laser rangefinder $u_3$	4"
The uncertainty caused by the estimation of the position of the laser spot center, estimated according to 1/3 pixel $u_4$	1"
The TV axis' target uncertainty $u_5$	1"
The infrared axis' target uncertainty $u_6$	1"
Offset of the objective from reticle cross center which estimates clarity affected by the parallel to the beam (partition defocus) and the wave aberration of collimator, and the lighting brightness and uniformity of bromine tungsten lamp; or offset of the light spot which estimates clarity affected by the parallel to the beam (partition defocus) and the wave aberration of collimator, and the lighting brightness and uniformity of ring LED source $u_7$	0.5"
The influence introduced by the short-time instability of tripod support body $u_8$	Can be ignored
Significant change in the position of laser spot center introduced by the change of spot distribution of morphological caused by the instability of calibrated object emitting laser spot $u_9$	>10"
The influence introduced by environment vibration and airflow $u_{10}$	Can be ignored

由分析可知,检校系统检校电视轴/红外轴平行性测量的不确定度源主要有  $u_5$ 、 $u_6$ 、 $u_7$ ,其合成不确定度为  $u_{c1} = \sqrt{u_5^2 + u_6^2 + u_7^2} \approx 1.7''$ ,其中  $u_5$ 、 $u_6$  与被校对象有关,若不计被校对象的不确定度,则检校系统检校电视轴/红外轴平行性测量的标准不确定度在  $1''$  以内;检校系统检校激光发射轴/瞄准轴平行性测量的不确定度源主要有  $u_1$ 、 $u_2$ 、 $u_3$ 、 $u_4$ 、 $u_7$ 、 $u_9$ ,其合成不确定度为  $u_{c2} = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_7^2 + u_9^2} \approx 10.87''$ ,其中  $u_9$  与被校对象的发射激光光斑不稳定有关,若不计被校对象的不确定度影响,则该检校系统检校激光发射轴与瞄准轴平行性的测量标准不确定度在  $5''$  以内,与实验验证结果基本相符。

## 5 结 论

检校系统采用反射式卡塞格林光学系统和 ZnS 晶体靶板,为被校系统提供无穷远的十字分划目标并以此作为瞄准基准,采用 CCD 系统实现了多波段、自动化的多光轴平行性外场高精度检校功能。实验表明,研制的系统可满足可见光和红外光光轴之间光轴平行性的  $10 \mu\text{rad}$  级的检校要求,可为多波段多光电成像传感器装备中提供重要的技术保障。

### 参 考 文 献

- 1 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  
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
- 2 K. Bates, F. Kearns. Tactical laser system testing: evolution and challenges[C]. Proceedings of the IEEE Autotestcon, 2002.

212~216

- 3 Ling Jun, Liu Bingqi, Zhao Xilin. The comparison and discussion of several testing methods about optical-axis parallelism [J]. *Journal of Applied Optics*, 2003, **24**(1): 43~45  
凌军,刘秉琦,赵熙林.几种光轴平行性测试方法的比较与探讨[J].*应用光学*, 2003, **24**(1): 43~45
- 4 Ge Bin, Liu Zhaohui, Hou Nianchang. Calculation of the inconsistent optics axis for several optics-measurement instrument [J]. *Science Technology and Engineering*, 2007, **7**(21): 5539~5543  
葛滨,刘朝晖,侯年仓.多光学测试设备光轴不一致性测量计算的研究[J].*科学技术与工程*, 2007, **7**(21): 5539~5543
- 5 Zeng Chang'e, Zhang Junsheng, Sha Dingguo *et al.*. Novel method in alignment of the pulse laser range finder's aim axis and receiving axis[J]. *Optical Technology*, 2005, **31**(s): 112~117  
曾嫦娥,张俊生,沙定国等.脉冲激光测距机接收轴与瞄准轴平行性测试方法研究[J].*光学技术*, 2005, **31**(s): 112~117
- 6 CI systems. Depot & Field Level Laser Tester[OL]. <http://www.ci-systems.com/htmls/article.aspx?C2004=12975&BSP=12533>. [2012-8-24]
- 7 CI systems. Airborne Multi-sensor Boresight Systems [OL]. <http://www.ci-systems.com/htmls/article.aspx?C2004=12750&BSP=12539>. [2012-8-24]
- 8 D. Cabib, A. Segal, J. Dolev. Electro-optical systems to accurately align (bore sight) laser designator, FLIR and CCD on the ground before the mission[C]. *SPIE*, 2008, **7113**: 711305
- 9 Zhu Huaxin, Feng Xiaoguo, Zhao Jingli *et al.*. Design of antireflection and band-pass frequency selective surface combining coatings for ZnS optical window[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2766~2770  
朱华新,冯晓国,赵晶丽等. ZnS 光窗上增透与带通频率选择表面组合膜设计[J].*光学学报*, 2010, **30**(9): 2766~2770
- 10 Liu Danping, Zhang Lei, Guo Xiaoliang *et al.*. Novel approach for tracking accuracy enhancement in infrared spot image [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 186~189  
刘丹平,张磊,郭晓亮等.提高红外光斑图像跟踪定位精度的新方法[J].*中国激光*, 2010, **37**(1): 186~189
- 11 Chen Zhibin, Xue Mingxi, Hou Zhangya *et al.*. Testing method of laser equipment based on multi-wavelength simulated laser source technique[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 804~808  
陈志斌,薛明晰,侯章亚等.基于多波段模拟激光光源技术的激光设备检测方法[J].*中国激光*, 2010, **37**(3): 804~808

栏目编辑:何卓铭