

## 激光车载平台光路平行性检测方法

施 龙, 陈 宁, 王 兵, 邵 帅, 杨词银, 董宇星, 郭汝海

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘 要:** 军用光电仪器由于移动灵活的需要, 通常采用车载平台, 车载平台又会承载发射和接受光路, 因此会包含多个激光器和光学元件。这就造成以往固定平台的光路平行性检测方法需要进行一定的升级以适应车载平台的需要。为了实现光电干扰功能, 车载平台同时配备了对应谱段的多台激光器, 还有多谱段的成像系统以及测距装置, 对于发射光路和接收光路的平行性要求就更为复杂, 因此本文根据车载光电平台的特点, 提出了一整套的光路平行性检测方法。检测结果表明, 此套方法简单实用, 检测精度可达  $15 \mu\text{rad}$  以内。

**关键词:** 车载平台; 激光; 平行性测量; 光轴

**中图分类号:** TN247 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.S117002

## Measurement methods for parallelism of optical paths for vehicle-based laser platform

Shi Long, Chen Ning, Wang Bing, Shao Shuai, Yang Ciyin, Dong Yuxing, Guo Ruhai

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, 130033, China)

**Abstract:** For the flexible requirement to the photoelectric instrument, the vehicle platform is needed to load the transmitting light path and receiving light path, often including several lasers and many mirrors. There have been some methods to measure the parallelism of optical paths for the fixed platform which is not suitable for the vehicle platform. Therefore, a certain improvement should be made to the measurement methods for parallelism of optical paths for the vehicle-based photoelectric system. In our system, the optical paths of four laser systems and three imaging system need to be adjusted into the same line or paralleling each other. Therefore, the requirements for the vehicle platform are more complicated for the parallel test. According to the feature of the platform based on the vehicle, a systemic method was presented for the parallel test. The measurement results show that these methods are simple and practical for the measurement of parallelism in vehicle-based photoelectric devices and the measurement errors between each light path are all less than  $15 \mu\text{rad}$ .

**Key words:** vehicle-based platform; laser; measurement of parallelism; optical axis

收稿日期: 2016-02-09; 修订日期: 2016-03-14

基金项目: “十二五”装备预先研究项目(41101050302)

作者简介: 施龙(1978-), 男, 助理研究员, 硕士, 主要研究方向为光电仪器设备的设计与研究。Email: shilong2005@sina.com

通讯作者: 郭汝海(1976-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事激光光学设计及光束控制方面的研究。Email: hitgrh@163.com

## 0 引言

军用的光电系统通常包括观测设备、火控设备和激光对抗设备等,特别是大功率级别的激光对抗设备,往往装载多种波段的激光器以达到打击和干扰敌方多种谱段探测器的目的<sup>[1-4]</sup>。

在强激光对抗装备上,通常都同时配有短波、中波和长波激光器及激光测距、照明等多个光学系统,目的是使设备具备多谱段的光电对抗以及探测能力,在一台设备上具有更加完备的功能。这就需要对三种及以上波段的激光进行有效的光束控制,目的是使多束激光能够精确、集中、稳定地集中目标上的瞄准点,即激光以最小光斑、最大功率密度、最大能量集中度会聚到瞄准点上<sup>[5-7]</sup>。所以对多束激光在导光光路中实现快速的平行度检测是整个光电系统必须共同面对的首要问题,必须要下大力气加以解决。

针对光电对抗系统的平行性测试方法较多,比如:投影靶板法、大口径平行光管法、激光光轴仪法和五棱镜法<sup>[8-9]</sup>,这些方法用于光轴平行性检测的系统多为单一光谱波段的测试系统,且系统较为复杂且不适用于移动平台车载的检测需要<sup>[10-11]</sup>,因此基于此种实际需要,提出一种多谱段适用于对激光车载平台平行性进行检测的方法,它将合理可行的测量原理和数字化成像系统进行了较好的结合,提高了测试效率和通用性。

## 1 检测装置的组成与原理

检测装置结构如图 1 所示,主要由大口径的平行光管、CCD、半反半透镜、星点孔、中波红外发射

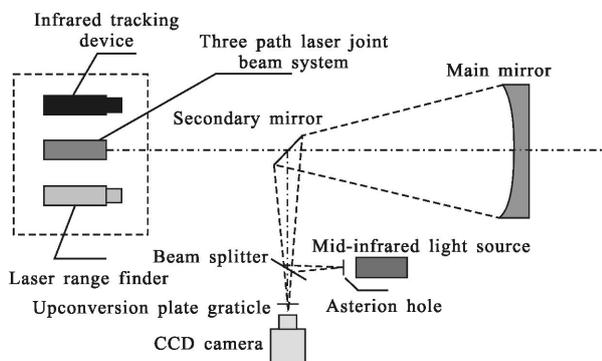


图 1 仪器结构原理图

Fig.1 Structural principle of device

源、上转换分划板以及被检的三波段激光器及红外跟踪设备组成,图 1 左侧为稳定跟瞄转台上三个被检光学系统即红外跟踪设备、三路激光合束系统、激光测距仪。右测为大口径、长焦距的平行光管,平行光管焦距为 14 000 mm,有效通光口径 1 000 mm。在平行光管焦面处安放上转换分划板和可见光 CCD 接收器,另一焦面处安放星点孔和中波红外发射源。

由于车载的需求,所有被测设备都安装在减振基准惯导平台上,图 2 为减振基准平台的有限元分析示意图,减振平台实际尺寸为:1 300 mm×1 000 mm×110 mm。外框采用刚性强的,变形小,焊接性能好的优质中碳钢板;隔振层利用固有频率低,阻振性能强的蜂窝结构材料,能最大限度控制振动的响应;面板采用高导磁不锈钢板,精磨后具有实用,美观和耐磨等特点。粗糙度为 0.8~1.6 μm,不平度 0.015~0.02 mm/m<sup>2</sup>。

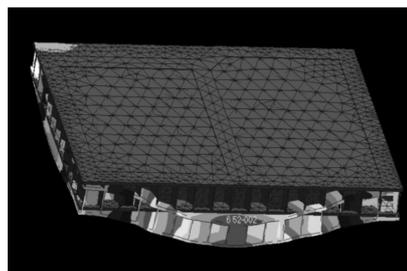


图 2 减振基准平台变形的有限元分析

Fig.2 Finite analysis of vibration isolation plate deformation

在得到有限元分析结果之前,要明确有限元的边界条件,把上述材料的属性输入到有限元分析软件 Ansys 中,变形量只考虑自重的影响,基准平台四周没有约束。在这样条件下,图 2 给出了减振基准平台有限元分析的结果,最大变形 0.652 μm,可以看出采用上述材料和结构后,基准平台变形量很小,达到激光波长量级,完全可以满足平行性检测中对基准平台的变形量要求。

除被动减振措施以外,整个三路激光通过基准平台安装到稳定平台上,而稳定平台是实现多路激光发射在动态条件下保持稳定的关键。

稳定平台系统通过姿态控制为多路激光发射光路提供稳定的惯性坐标基准,消除载车行进时车体振动带来的影响,保证负载设备对目标的捕获、跟踪和瞄准,以实现激光束光精度的对准发射。

此系统的稳定平台采用的是两轴框架式结构形

式,稳定平台的纵摇、横摇运动由伺服控制单元控制力矩电机的转动完成。陀螺仪、测角单元与伺服控制单元连接,陀螺仪将运动载体的运动姿态数据,如纵摇、横摇、角加速度等数据传给伺服控制单元,测角单元也将角度、位置的数据传给伺服控制单元,伺服控制单元根据接收到的数据控制纵摇轴系组件、横摇轴系组件的力矩电机运动,以达到稳定平台的稳定精度。稳定平台结构如图 3 所示。

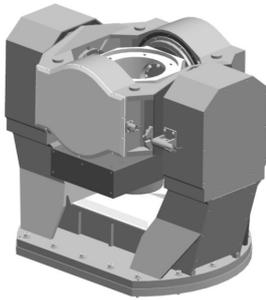


图 3 稳定平台结构

Fig.3 Structure of stable platform

## 2 检测过程

(1) 将三路激光合束系统中短波段(808nm/915nm)激光的指示光(半导体激光器,  $\lambda=650\text{ nm}$ )作为基准,当该指示光通过光管主镜、光管次镜、透过半反半透镜,照射到光管焦面上的上转换十字分划板,微调跟瞄转台的高低、方位,使得指示光的光点落在上转换分划板十字丝中心上,通过可见光接收器接收。

(2) 激光测距仪( $\lambda=1.064\ \mu\text{m}$ )激光束进入检测系统后,通过光管主镜、光管次镜、透过分束镜,照射到光管焦面上的上转换十字分划板,在分划板上被转换成可见的光点,通过可见光接收器接收,并计算出与十字丝中心的偏移量。

(3) 打开中波红外发射源,照射到星点孔,经分束片反射、到光管次镜、光管主镜进入稳定跟瞄转台上红外跟踪器系统,星点孔成像在红外跟踪器系统的焦面上,通过红外跟踪器系统显示器,计算出与接收器靶面中心的偏移量。

上述过程所使用的检测工具包括大口径平行光管、上转换分划板、可见 CCD 接收器、中波红外发射源、星点孔及焦面系统工装。

检测过程中,采用自准直的方法找到平行光管

准直物镜的后焦面,把 CCD 探测器放置在此位置,然后调整光学折转系统,使 CCD 探测器与准直系统以及三路激光系统,还包括激光测距机同轴;最后打开图像采集系统,对激光光斑和瞄准系统上十字分划线进行采集和处理。

由于激光光斑本身的不均匀性,及通过的光学系统的影响,传统的光斑中心检测算法如重心法、中值法及 Hough 变换法,都存在一定的不足。前两种算法要求光斑图像分布比较均匀,否则会产生较大的误差。后一种算法需逐点投票、记录,所用时间较多,而且精度不够高。文中采用基于圆拟合的激光光斑中心检测算法,具有亚像素的定位精度,具有很快的计算速度,可适用于实时的激光光斑监测测量中。

## 3 基于圆拟合的检测算法原理

基于圆拟合的激光光斑中心检测算法,根据最小二乘原理(残差平方和最小)用圆来逼近激光光斑轮廓。圆的方程为:

$$(x-a)^2+(y-b)^2=r^2 \quad (1)$$

在此,取残差为:

$$\varepsilon_i=(x_i-a)^2+(y_i-b)^2-r^2 \quad (2)$$

式中:  $i \in E$ ,  $E$  表示所有边界的集合;  $(x_i, y_i)$  为图像边界点坐标。

残差平方和函数为:

$$Q=\sum_{i \in E} \varepsilon_i^2 \quad (3)$$

根据最小二乘原理,应有:

$$\frac{\partial Q}{\partial a}=\frac{\partial Q}{\partial b}=\frac{\partial Q}{\partial r}=0 \quad (4)$$

即:

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial a}=2 \sum_{i \in E} [(x_i-a)^2+(y_i-b)^2-r^2](-2)(x_i-a)=0 \\ \frac{\partial Q}{\partial b}=2 \sum_{i \in E} [(x_i-a)^2+(y_i-b)^2-r^2](-2)(y_i-b)=0 \\ \frac{\partial Q}{\partial r}=2 \sum_{i \in E} [(x_i-a)^2+(y_i-b)^2-r^2](-2)r=0 \end{cases} \quad (5)$$

将公式(5)简化整理得:

$$\begin{cases} a^2-2\bar{x}a+b^2-2\bar{y}b-r^2+\bar{x}^2+\bar{y}^2=0 \\ \bar{x}a^2-2\bar{x}^2 a+\bar{x}b^2-2\bar{x}\bar{y}-\bar{x}r^2+\bar{x}^3+\bar{x}\bar{y}^2=0 \\ \bar{y}a^2-2\bar{x}\bar{y}+\bar{y}b^2-2\bar{y}^2-\bar{y}r^2+\bar{x}^2\bar{y}+\bar{y}^3=0 \end{cases} \quad (6)$$

其中各参数可用下式表示:

$$\overline{x^m y^n} = \sum_{i \in E} x_i^m y_i^n / \sum_{i \in E} 1 \quad (7)$$

对公式(6)消掉二次项后整理为:

$$\begin{cases} (\overline{x^2 - x^2})a + (\overline{xy - xy})b = \frac{1}{2}(\overline{x^2 x + xy^2 - x^3 - xy^2}) \\ (\overline{y^2 - y^2})b + (\overline{xy - xy})a = \frac{1}{2}(\overline{x^2 y + yy^2 - y^3 - x^2 y}) \end{cases} \quad (8)$$

由上式便可推出参数  $a, b$  的表达式, 结合公式(6)得圆参数为:

$$\begin{cases} a = \frac{(\overline{x^2 x + xy^2 - x^3 - xy^2})(\overline{y^2 - y^2}) - (\overline{x^2 y + yy^2 - x^2 y - y^3})(\overline{xy - xy})}{2(\overline{x^2 - x^2})(\overline{y^2 - y^2}) - 2(\overline{xy - xy})^2} \\ b = \frac{(\overline{x^2 y + yy^2 - y^3 - x^2 y})(\overline{x^2 - x^2}) - (\overline{x^2 x + xy^2 - x^3 - xy^2})(\overline{xy - xy})}{2(\overline{x^2 - x^2})(\overline{y^2 - y^2}) - 2(\overline{xy - xy})^2} \\ r = \sqrt{a^2 - 2xa + b^2 - 2yb + \overline{x^2} + \overline{y^2}} \end{cases} \quad (9)$$

由公式(9)可以看出, 根据最小二乘原理的圆拟合推导出的光斑中心(及半径)检测算法虽然形式复杂, 但仅对边界点循环一次就可计算出各参数, 时间复杂度  $O(n)$ , 较为复杂的根方运算只是计算出中心参数  $a, b$  后半径时计算一次, 因此整个算法的计算速度将会很快。

由公式(9)获得光斑参数后, 代入公式(2)、(3)便可得到各边界残差及残差平方和, 也可计算出平均残差平方和, 记为:

$$\overline{Q} = Q / \sum_{i \in E} 1 \quad (10)$$

进而可滤掉一些残差较大的点, 然后再利用公式(9)获取光斑参数, 经多次迭代可进一步提高检测精度。

### 4 结果与讨论

通过以上算法对三路激光及激光测距机的光斑进行提取, 提取的光斑中心如图 4 所示, 这里提取激光光斑边缘的阈值采用灰度值的 86.5%。

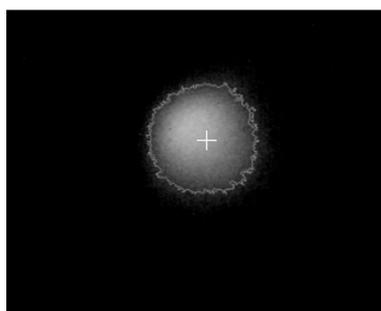


图 4 CCD 探测器提取光斑中心

Fig.4 Spot center collected by CCD detector

在工程型号系统中, 要求光斑的指向监测精度要小于  $5''$ , CCD 相机的分辨率精度可以达到  $2.85''$  (像元大小  $5.4 \mu\text{m}$ , 镜头焦距  $300 \text{ mm}$ ), 而基于圆拟合算法得到的光斑中心的误差不超过一个像素分辨率, 因此综合指向监测精度应该为  $\sqrt{2.85^2 + 2.85^2} = 4.03''$ 。满足指标要求。

上述精度指标也通过室外的投影靶板法进行了验证, 为了保证检测精度, 把靶板放置在  $400 \text{ m}$  的位置处, 利用靶板接收主镜发射的激光束, 即将各光轴投影到靶板上。各光轴的相互间隔就是在靶板上投影的相互间隔, 通过比较间隔的差异来验证各光轴的平行性。实验中以瞄准光学系统瞄准其中一路激光光斑中心作为基准, 计算其他各路激光的间隔, 实验中的图像如图 5 所示。



图 5 靶板投影法

Fig.5 Projection method of target panel

实验处理结果如表 1 所示。

从实际测量结果来看, 三路激光光路、激光测距机、可见光跟瞄系统以及红外跟瞄系统的测试结果均在系统光轴上, 上表的平行性检测在外场  $400 \text{ m}$  测试结果表明平行性误差在 1 个像素大小左右, 和

室内检测的结果相吻合, 其中超过 1 个像素的偏差主要是由于外场大气湍流的影响。

表 1 靶板法处理结果

Tab.1 Target plate processing results

No.	Optical axis	Spot centroid distance/Pixel numbers
1	Azimuth	1.065
	Pitch	0.749
2	Azimuth	0.616
	Pitch	0.651
3	Azimuth	1.121
	Pitch	1.162
4	Azimuth	1.158
	Pitch	0.998
5	Azimuth	0.822
	Pitch	0.749
6	Azimuth	0.750
	Pitch	0.729

## 5 结论

车载光电设备由于其灵活性已经广泛的应用于各种军用场合, 而对车载光电设备光轴的平行性检测已经成为一个重要的关键技术。文中提出一种基于稳定平台的方法, 采用图像处理算法实现多路激光光轴与光电跟瞄光轴的平行性检测与标定, 从室内和室外的实验结果来看, 能够实现车载光轴平行性检测误差控制在 5" 以内, 满足大多数车载军用光电设备的作战使用需求。

## 参考文献:

- [1] Liu Songtao, Gao Donghua. Opto-electronic countermeasure technologies and their development [J]. *Electro-optic Technology Application*, 2012, 27(3): 1-9. (in Chinese)
- [2] Wang Hengkun, Zhang Guoyu, Guo Lihong, et al. Angle displacement measurement device for fast-steering mirror in vehicular laser system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(7): 1517-1524. (in Chinese)
- [3] Zhao Wenfeng, Ji Ming, Liu Tao, et al. Design of portable multi-band and multi-axis parallel detector [J]. *Journal of Applied Optics*, 2013, 34(2): 319-324. (in Chinese)
- [4] Guo Ruhai, Zhao Xinyu, Ma Jun. Technical review for lasers used in optical countermeasure [J]. *OME Information*, 2011, 28(11): 1-7. (in Chinese)
- [5] Tan Kun, Shao Shisheng. A self-alignment system of a mobile lidar[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2008, 3(5): 344-348. (in Chinese)
- [6] Ye Lu, Zhao Jianchun. Development of measuring optical-axis parallelism instrument for multispectral and multi axial facility[J]. *OME Information*, 2011, 28(12): 32-36. (in Chinese)
- [7] Luo Xinxin, Liu Bingqi, Sun Dongping, et al. Improvement of optical axis parallelism correction for laser rangefinder[J]. *Journal of Applied Optics*, 2009, 30(3): 519-522. (in Chinese)
- [8] Mu Yining, Wang He, Li Ping, et al. Spot size on the optical axis detection of constraint analysis and verification tests [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44 (3): 1061-1067. (in Chinese)
- [9] Zhou Leigang, Liang Ting, Gao Licong. Analysis of influencing factors for precision of all-weather optical axis parallelism detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(11): 3413-3417. (in Chinese)
- [10] 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*, 2011, 37(1): 114-119. (in Chinese)
- [11] Liu Bingqi, Liu Guoping, Zhang Chu, et al. Intelligent method for parallelism calibration of three-optic-axes of laser range finder[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2012, 33(3): 434-436. (in Chinese)