

基于双五棱镜组件的大间距光轴平行性检测方法

张 磊¹, 邱 伟², 张 凯¹

(1. 长春理工大学 光电工程学院 光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室, 吉林 长春 130022;
2. 上海航天控制技术研究所, 上海 200000)

摘 要: 光轴平行性是多光轴光电设备的重要参数, 对其进行检测十分必要。随着光电设备复杂程度的逐步增加, 其光轴之间的距离不断增大, 传统的小口径检测手段已经不能满足现有光电设备的检测需求。针对大间距光轴之间的平行性的检测, 设计了一种基于双五棱镜结构的扩径组件, 实现了平行光管的出射光束的平移, 并利用双光楔结构对扩径组件进行修正, 将平行光管的有效口径由 300 mm 扩展至 1 200 mm。对扩径组件进行数学建模分析和实际装调, 并对检测系统进行整体精度测试。实验结果表明: 平行光管出射的光束经扩径组件后能够保持良好的平行性, 其平行误差在 11" 以内, 满足大间距光轴检测的精度要求。

关键词: 平行性检测; 光束平移; 动态光学; 光轴

中图分类号: TN206 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.0717005

Detection method of large space optical axis parallelism based on double pentaprism components

Zhang Lei¹, Qiu Wei², Zhang Kai¹

(1. Key Laboratory of Optoelectric Measurement and Optical Information Transmission Technology of Ministry of Education, School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
2. Shanghai Aerospace Control Technology Institute, Shanghai 200000, China)

Abstract: The optical axis parallelism was an important parameter for the multi optical axis optoelectronic device. It was very necessary to detect the parallelism. With the gradual increase in the complexity of optoelectronic devices, the distance between optical axes was increasing. The traditional small aperture detection methods could no longer meet the requirements of existing photoelectric devices. In order to detect the parallelism between large space optical axis, a expanding component based on double pentaprism structure was designed to realize the translation of the beam emitted from the collimator, and the error of the expanding component was modified by double wedge structure. The effective aperture of the collimator was extended from 300 mm to 1 200 mm. Mathematical modeling analysis and actual adjustment of the expanding component were carried out and the precision experiment was done. The experimental results of the detecting system show that the beam emitted by the collimator could maintain good parallelism after expanding. The parallelism deviation is within 11", which could meet the precision requirements of large space optical axis detection.

Key words: measurement of parallelism; beam translation; dynamic optics; optical axis

收稿日期: 2018-02-05; 修订日期: 2018-03-03

基金项目: 国家自然科学基金(11474037)

作者简介: 张磊(1981-), 男, 副教授, 博士, 主要从事光学测试方面的研究。Email: zhangl@cust.edu.cn

通讯作者: 邱伟(1983-), 男, 工程师, 博士, 主要从事光电探测与制导方面的研究。Email: wallenq@163.com

0 引言

搭载于现代武器平台上的光电设备一般集成了可见光观瞄、红外探测、激光测距和雷达监视等功能,用以提升武器在战场环境中的侦查和打击能力^[1-3]。对于这类多光轴光电设备,各光学子系统光轴之间的平行性是其重要指标,只有保证各光轴严格平行,设备的瞄准和探测才有意义^[4]。

国外针对光轴平行性的检测研究已经相对成熟,德国莱卡公司设计的针对不同波段的光轴检测设备,法国霍特导弹内安装的 VIVIANE 瞄准具等都能有效实现光轴平行性的检测与调校^[5-7]。国内在光轴平行性检测方面的研究也有了相应进展,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的施龙等提出了针对车载平台光路平行性的检测方法^[8],装甲兵工程学院的闫宗群利用平行光管的大跨度移动实现了分散光轴的平行性检测^[9],军械工程学院的陈志斌也针对野外光轴平行性的检测提出了相应方案^[10]。

然而,随着光电设备集成功能的复杂化,其光轴之间的距离逐渐增大,大间距光轴之间平行性的检测成为亟待解决的问题。目前的检测方法中,投影靶板法可以实现大间距检测,但其检测精度有限,且要求检测距离足够远,不易实现;平行光管法是检测光轴平行性的常用方法,但是由于平行光管受到口径限制,无法检测较大距离光轴之间的平行性;利用多个经纬仪互瞄进行基准转移的方法适用于大间距检测,但操作繁琐,且对环境的稳定性要求高。文中就大间距光轴平行性检测问题提出了行之有效的解决方案,利用扩径组件将平行光管的有效口径进行大范围扩展,并能够有效保证扩展光束与基准光束的平行性。

1 系统总体方案

某些武器火控装置中的可见光成像、红外热成像和激光测距子系统各光轴之间的距离相对较近,其整体口径在 300 mm 以内,火控系统所配置的校炮镜位于武器炮口处,

校炮镜子系统光轴与前述子系统光轴的间距可达到 1 100 mm。为满足瞄准与打击的一致性,火炮炮口机械轴线与光学子系统光轴的平行度偏差一般要

小于 1'。

为检测上述各子系统光轴之间的平行性,提出如图 1 所示的多光轴平行性检测方案。检测系统由平行光管主体与扩径组件构成。考虑检测系统多光谱、重量、体积、精度以及装调困难程度等问题,平行光管采用较为紧凑的共轭卡塞格林结构,在光管主镜后方利用分束镜将光线分为三路,其中 F_1' 、 F_2' 和 F_3' 为 3 个共轭焦点,分别对应可见光与红外光源发射支路、激光接收与可见光自准支路以及激光光源导出光纤及扫描分划板支路。所设计的平行光管的焦距为 2 500 mm,有效口径为 300 mm。

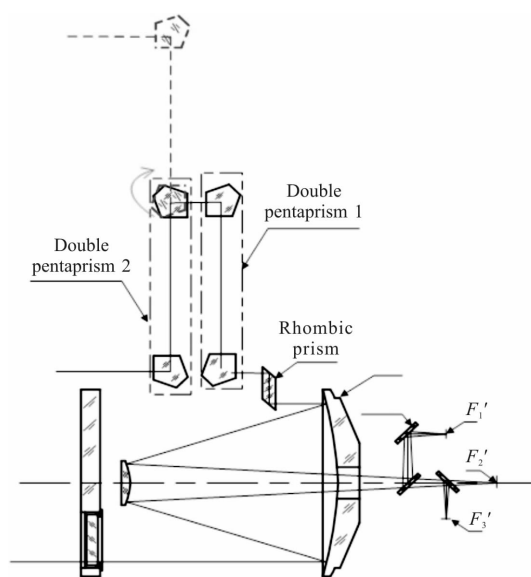


图 1 系统结构原理图

Fig.1 Schematic diagram of the system structure

扩径组件用于检测横向距离较远的光轴。在平行光管中设置一个斜方棱镜,将平行光管出射光束的边缘传递给扩径组件,光束经扩径组件后出射,由被检的光学子系统接收。扩径组件由两组双五棱镜结构构成,两组双五棱镜结构采用转动副连接,可以使出射光束进行空间二维扫描。为满足检测距离要求,同时避免机械结构过长影响组件刚度,两组双五棱镜结构的有效长度为 600 mm,从而实现将平行光管的有效口径从 300 mm 扩展至 1 200 mm。

扩径组件的作用是将平行光管的出射光束导出,导出光束与平行光管的出射光束需保证良好的平行性。目前,平行光管出射光束的平行性可达到 1",对于被检系统,出射光束可视作平行,因此检测

系统的精度主要取决于扩径组件的光束平移精度。

2 扩径组件的数学模型

双五棱镜结构可以实现斜方棱镜的功能，完成对光束的平移，并保证扩展光束与基准光束的平行性。在实际使用的过程中，无论是装调产生的误差，或是机械结构的微量形变，都会导致两个五棱镜的相对姿态与理想情况有所偏差，使扩展光束的出射方向发生变化，如图 2 所示。

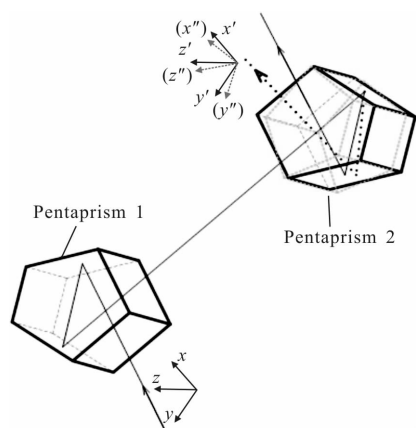


图 2 双五棱镜

Fig.2 Double pentaprism

组成扩径组件的两组双五棱镜结构相同，在此只分析一组，由于两个五棱镜的姿态相对应，因此将五棱镜 1 作为参考，分析五棱镜 2 相对于五棱镜 1 的偏差即可。双五棱镜结构在平行光路中使用，两个五棱镜的相对位移误差并不影响光束的平行性，只对光束的平移距离有微小影响，因此只需要考虑五棱镜 2 的旋转误差即可。将五棱镜的特征方向规定为 z 轴，入射光束的光轴规定为 x 轴，根据右手定则得到 y 轴。五棱镜绕其特征方向旋转不改变出射光束的方向，所以五棱镜 2 的任意旋转误差可以视为绕 x 轴的旋转误差与绕 y 轴的旋转误差的合成。

若五棱镜 2 绕 x 轴转动 α ，绕 y 轴转动 β ，则转动后的基底转换矩阵为：

$$R_0 = S_y S_x R S_x^{-1} S_y^{-1} = \begin{pmatrix} 0 & -1 & \beta - \alpha \\ 1 & 0 & -\alpha - \beta \\ \alpha + \beta & \beta - \alpha & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中： S_x 为五棱镜绕 x 轴旋转时的旋转矩阵； S_y 为五棱镜绕 y 轴旋转时的旋转矩阵； R 为五棱镜的坐标

基底转换矩阵^[11]。双五棱镜结构的基底转换矩阵为：

$$R_L = R_1 R_0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -\alpha - \beta \\ 0 & 1 & -\beta + \alpha \\ \alpha + \beta & \beta - \alpha & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中： R_1 为五棱镜 1 的坐标基底转换矩阵； R_0 为五棱镜 2 相对五棱镜 1 旋转后的基底转换矩阵。

根据公式(2)可知五棱镜绕任意轴转动后的物像坐标基底向量的关系为：

$$\begin{cases} i' = i + (\alpha + \beta)k \\ j' = j + (\beta - \alpha)k \\ k' = (-\alpha - \beta)i + (-\beta + \alpha)j + k \end{cases} \quad (3)$$

图 2 中，入射光束的方向可用向量 $A=(1,0,0)$ 表示，则光束经过双五棱镜结构后，出射方向可表示为 $A'=(1,0,\alpha+\beta)$ 。即当五棱镜的姿态改变时，出射光束较之入射光束偏转角度 $(\alpha+\beta)$ 。如图 3 为出射光束的偏差示意图。

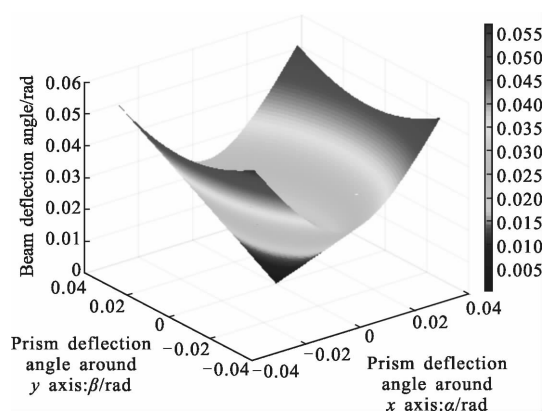


图 3 出射光束偏差

Fig.3 Deviation of the emitted light

可知，当五棱镜不发生偏转时，其出射光束才没有偏差。当五棱镜的姿态发生微小改变时，其对出射光束的方向影响明显，在实际调整五棱镜时，残余误差必然存在。

为此，在双五棱镜结构中加入双光楔结构，两个光楔绕光轴相对旋转，实现对光束出射方向的微量调整，其工作原理如图 4 所示。

两个光楔的折射角均为 γ ，相隔微小间隙，当两光楔绕光轴相对旋转角度为 φ 时，对光束产生的偏向角为：

$$\xi = 2(n-1)\gamma \cos \varphi \quad (4)$$

当出射光束的偏向角为 $(\alpha+\beta)$ 时，令

$$\cos\varphi = \frac{\alpha + \beta}{2(n-1)\gamma} \quad (5)$$

可将五棱镜装调后的残余误差消除。

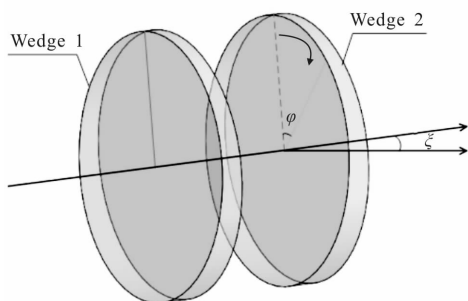


图 4 双光楔工作原理

Fig.4 Working principle of double wedge

3 实验、检测和结果

用 800 mm 大口径平面反射镜和高精度电子自准直仪对扩径组件进行装调,如图 5 所示。

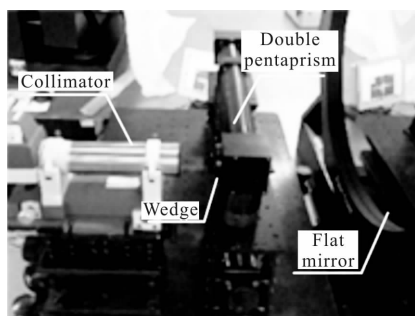


图 5 扩径组件调整

Fig.5 Adjustment of expanding component

首先,对电子自准直仪与平面反射镜进行零位标定,将电子自准直仪对准平面反射镜,观察屏幕上的十字像,将十字像调整至中心位置,固定自准直仪。然后,将双五棱镜结构放置在自准直仪与平面反射镜之间,自准直仪发出的平行光通过双五棱镜结构入射到大口径平面反射镜上,经平面镜反射后再经过双五棱镜由电子自准直仪接收,若返回的十字像与标定的零位重合,则说明双五棱镜结构的精度良好。若十字像偏离零位,通过观察屏上的读数,可以读取光束偏转的角度,通过修切垫片等方式调整两个五棱镜的姿态,将十字像尽可能调整至零位。最后,利用一对折射角为 15"的光楔对五棱镜调整后的偏差进行补偿,旋转单片光楔,实时观测自准直仪数

值,最终完成双五棱镜结构的调整。

将调整完好的两段双五棱镜结构通过转动副连接组成扩径组件,两段双五棱镜结构在绕转动副相对旋转时,由于刚度影响,机械结构会发生微量形变,导致出射光束产生微小误差,通过电子自准直仪测得两端五棱镜结构在不同夹角下的平行光出射偏差,如表 1 所示。

表 1 双五棱镜出射偏角

Tab.1 Deviation angle of double pentaprism

Angle/(°)	XI(/")	YI(/")	ZI(/")
0	0.73	0.63	0.96
45	4.31	4.73	6.40
90	5.58	7.35	9.23
135	4.58	4.42	6.36
180	1.04	0.71	1.25

通过多次测量,装调后扩径组件的光束出射偏差小于 10"。

4 多轴检测系统整机测试

利用大口径长焦距平行光管对多轴平行性检测系统发出的平行光进行接收测试。将检测系统的发射口径对准大口径平行光管的接收口径,检测系统发出的基准光束与扩展光束分别被大口径平行光管接收,并且成像在大口径平行光管内的 CCD 上,如图 6 所示。

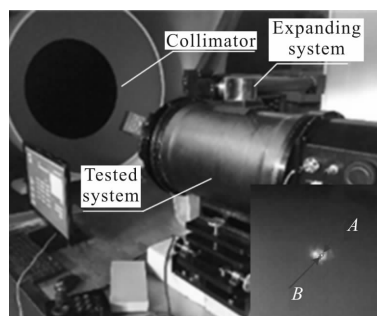


图 6 多轴系统检测

Fig.6 Testing of detecting system

光斑 A 为基准光束形成的像点,光斑 B 为扩径光束形成的像点,对两个光斑提取质心确定其在 CCD 上的位置,可根据公式(6)计算两光束的偏差角度为:

$$\theta = \frac{d}{f} \quad (6)$$

式中： d 为两光斑质心距离； f 为大口径平行光管焦距。测得不同扩展距离下扩展光束与基准光束的偏差，如表 2 所示。

表 2 系统整机角度偏差

Tab.2 Angle deviation of the whole system

Distance/mm	Deviation/(")
300	6.7
450	7.5
600	8.8
750	10.4
900	9.9
1 050	8.7
1 200	7.3

对试验数据求取平均值，得到扩展光束与基准光束的角度偏差为 $\bar{\theta}=0.5''$ ，满足检测需求。

5 结 论

随着光电设备的复杂化，设备各子系统间光轴距离越来越大，对大间距光轴的平行性检测问题亟待解决。文中提出了一种基于双五棱镜结构的扩径组件，扩展了平行光管的有效口径，实现 1 200 mm 范围内光电设备光学子系统间光轴平行性的检测。通过矩阵变换建立双五棱镜结构的数学模型，分析了扩展光束的偏差特性。扩径组件的装调测试和整个多轴检测系统的检测结果表明，系统的光轴平行性检测精度在 11" 以内，满足大间距光轴平行性检测的需求，该系统在大间距光轴检测领域具有一定的指导意义。

致谢：

该研究工作受自然科学基金项目 (11474037) 资助完成。同时得到高等学校学科创新引智计划 (111 计划) 的支持，以及光电工程国家级实验教学示范中

心的协助。

参考文献：

- [1] 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)
- [2] Liu B Q, Zhao C. Design and realization of a collimator for checking the multi-spectral and multi-axis parallelism [J]. *Instrumentation Technology*, 2015(5): 5–7.
- [3] Liu Yachen, Zhang Xinlei, Gao Yang. Study for multi-spectral axes parallelism calibration of photoelectric tracking and aiming system[J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2015(4): 5–8. (in Chinese)
- [4] Xu Haiyan, Su Shibin, Zhang Min, et al. Design and research on detection system for multi-optical axes consistency [J]. *Journal of Gun Launch & Control*, 2013 (4): 78–81. (in Chinese)
- [5] Xiao Z, Guo X, Xia Y, et al. Research on detection system of optical sights triaxial parallelism [J]. *Optik*, 2014, 125 (16): 4427–4430.
- [6] 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. (in Chinese)
- [7] Zhou Zinan, Ma Jun, Yu Pei. Laser/infrared optical system design of common optical path and athermalization[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(1): 12202. (in Chinese)
- [8] Shi Long, Chen Ning, Wang Bing, et al. Measurement methods for parallelism of optical paths for vehicle-based laser platform[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45 (S1): S117002. (in Chinese)
- [9] 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)
- [10] Chen Zhibin, Xiao Wenjian, Ma Dongxi. A method for large distance multi-optical axis parallelism online detection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(1): 112006. (in Chinese)
- [11] Li Zhengyang, Fu Yuegang. Optical characteristics of right-angle roof prism and corner-cube prism [J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, 29(5): 833–836. (in Chinese)