中国光学 Chinese Optics 核心期刊

空间光电跟瞄系统多光轴平行性标校研究

温中凯 张庆君 李爽 雷文平 杜国军

Multi-optical axis parallelism calibration of space photoelectric tracking and aiming system

WEN Zhong-kai, ZHANG Qing-jun, LI Shuang, LEI Wen-ping, DU Guo-jun

引用本文:
温中凯, 张庆君, 李爽, 雷文平, 杜国军. 空间光电跟瞄系统多光轴平行性标校研究[J]. 中国光学, 2021, 14(3): 625−633. doi: 10.37188/CO.2020−0133
WEN Zhong-kai, ZHANG Qing-jun, LI Shuang, LEI Wen-ping, DU Guo-jun. Multi-optical axis parallelism calibration of space photoelectric tracking and aiming system[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(3): 625-633. doi: 10.37188/CO.2020-0133

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/CO.2020−0133

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

移动地面站宽温度跟瞄系统信标接收镜头

Wide temperature range beacon receiver lens for tracking and aiming system of mobile ground station

中国光学. 2018, 11(5): 790 https://doi.org/10.3788/CO.20181105.0790

空间引力波探测任务的入轨误差分析

Injection error analysis of space gravitational wave detection

中国光学. 2019, 12(3): 493 https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0493

应用最小偏向角法的液体折射率精密测试

Precision test technology of liquid refractive index using the method of minimum deviation angle

中国光学. 2019, 12(4): 826 https://doi.org/10.3788/CO.20191204.0826

紫外双光栅光谱仪结构设计与波长精度分析

Structure design and wavelength accuracy analysis of ultraviolet double grating spectrometer

中国光学. 2018, 11(2): 219 https://doi.org/10.3788/CO.20181102.0219

基于光电探测的多光谱测温装置

Multi−spectral temperature measuring system based on photoelectric detection

中国光学. 2019, 12(2): 289 https://doi.org/10.3788/CO.20191202.0289

美军新型机载光电瞄准系统工作原理分析

The operational principle analysis of new airborne Electro−Optical Targeting System(EOTS) of US army

中国光学. 2017, 10(6): 777 https://doi.org/10.3788/CO.20171006.0777

文章编号 2095-1531(2021)03-0625-09

空间光电跟瞄系统多光轴平行性标校研究

温中凯[1,2], 张庆君[2*], 李 爽[1*], 雷文平[3], 杜国军[3]
(1. 南京航空航天大学 航天学院, 江苏 南京 211106;
2. 中国空间技术研究院遥感卫星总体部, 北京 100094;
3. 北京空间机电研究所, 北京 100094)

摘要: 为了解决空间光电跟瞄系统在真空环境下的多光轴标校问题, 本文首先根据空间光电跟瞄系统的多光轴一致性检测精度要求, 设计了一套多光轴标校系统。接着, 对多光轴标校系统各子系统进行了详尽的误差分析, 并给出了关键子系统的误差影响抑制方法。然后, 对通信技术试验卫星三号的空间光电跟瞄系统进行了实验室环境与真空环境下的技术测试, 分析了多光轴标校系统在两种测试环境下的误差来源以及测试精度, 并给出了测试结果。最后, 对多光轴标校系统进行了精度验证。最终结果表明: 本文设计的多光轴标校系统在实验室测试环境下的标校精度为 0.998″, 收发平行度标定误差为 1.165″; 在真空测试环境下的标校精度为 1.219″, 收发平行度标定误差为 1.359″, 完全满足空间光电跟瞄系统 1.5″的多光轴检测精度要求, 为相关工程应用提供了技术支持。

关 键 词: 空间光电跟瞄系统; 真空环境; 多光轴标校; 误差分析; 误差抑制; 测试分析
中图分类号: TN206 **文献标志码:** A **doi:** 10.37188/CO.2020-0133

Multi-optical axis parallelism calibration of space photoelectric tracking and aiming system

WEN Zhong-kai[1,2], ZHANG Qing-jun[2*], LI Shuang[1*], LEI Wen-ping[3], DU Guo-jun[3]
(1. *College of Astronautics*, *Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, *Nanjing* 211106, *China*;
2. *Institute of Remote Sensing Satellite*, *CAST*, *Beijing* 100094, *China*;
3. *Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity*, *Beijing* 100094, *China*)
* *Corresponding author*, *E-mail*: *ztzhangqj*@163.*com*; *lishuang@nuaa.edu.cn*

Abstract: To achieve multi-optical axis calibration of the space photoelectric tracking and aiming system in a vacuum, this paper first designed a set of multi-axis calibration systems according to the accuracy requirements for multi-axis consistency detection of the space photoelectric tracking and aiming system. Then, a detailed error analysis of each subsystem of the multi-axis calibration system was conducted, and the methods to restrain the influence of error in the key subsystem were given. After that, the technical tests of the space photoelectric tracking and aiming system of the Communications Technology Experiment Satellite 3 were implemented in laboratory and vacuum environments, and the error sources and test accuracy of the multi-axis calibration system in the two test environments were analyzed and the test results were given. Finally, the

收稿日期: 2020-07-28; **修订日期:** 2020-09-07
基金项目: 空间智能控制技术国防科技重点实验室 2019 年度开放基金(No. KGJZDSYS-2018-11)
Supported by Science and Technology on space Intelligent Control Laboratory (No. KGJZDSYS-2018-11)

accuracy of the multi-axis calibration system was verified. The final results show that the calibration accuracy of the multi-axis calibration system in this paper is 0.998" in the laboratory test environment, and the calibration error of the parallelism of transmitter and receiver is 1.165"; the calibration accuracy is 1.219" in the vacuum test environment, and the calibration error of parallelism of transmitter and receiver is 1.359". These results fully meet the 1.5" multi-optical axis detection accuracy requirements of the space photoelectric tracking system, and provide support for research in related engineering applications.

Key words: space photoelectric tracking and aiming system; vacuum environment; multi-axis calibration; error analysis; restrain errors; test analysis

1 引 言

天基空间目标监视系统是我国战略预警体系的重要组成部分[1], 而空间光电跟瞄系统作为其主要载荷之一, 具有在复杂天空背景下自动识别、捕获目标并进行高精度自闭环光学跟踪和高分辨率成像的能力[2]。由于空间光电跟瞄系统集高分辨率成像相机、宽视场搜索相机、激光测距发射机和激光测距接收机等多个光学子系统于一体, 必然会产生各子系统间的光轴平行性标校问题。而标校精度将直接影响空间光电跟瞄系统的瞄准精度, 是制约系统最终测量精度和跟瞄性能的关键。

目前国内外对多光轴平行性的研究多集中在实验室环境和外场环境两个方面。国内典型研究成果: 徐丹慧、谢国兵等人研究了适用于实验室环境的多光轴平行性检测方法[3-5]; 叶露、黄富瑜等人研究了适用于外场环境的多光轴标校系统[6-11]; 国外典型研究成果: 美国 AAI 公司研制的校轴设备 ABE-301A[12-13], 德国 Carl Zeiss 公司研制的武器装备校轴调整系统 WASVB[14], 瑞典 SCHILL 公司研制的舰船轴线检测系统 aligner-308[15], 挪威 METRONOR 公司研制的 HarmoLign 武器校准系统[16], 以色列 CI 公司研制的 AWBS 武器轴线检测系统[17-18] 等。然而, 以上研究均未涉及真空环境下多光轴平行性标校技术, 究其原因主要有三个方面: 一是太空环境下, 多光轴光电系统与观测目标的距离动辄数百公里, 常需要系统具有不同功率的激光稳定地追踪目标, 从而要求多光轴标校系统具有同时响应不同波长激光的能力, 对多光轴标校系统的设计要求较高; 二是在太空尺度下, 极小的多光轴标校误差也会放大到不能接受的地步, 从而要求空间多光轴光电系统具有极高的光轴一致性精度, 一般的标校设备无法满足; 三是真空环境不同于实验室环境和外场环境, 其对整个多光轴标校过程的环境要求极高, 不仅要求测试平台在整个测试期间保持仪器设备处在小于 1Hz 级别的检测环境中, 还要求真空度极高的真空空间来模拟空间环境。

本文基于空间光电跟瞄系统的多光轴一致性检测要求, 设计了一套多光轴标校系统。对该系统进行了详尽的误差分析, 并给出了去除核心分系统误差影响的方法。同时对通信技术试验卫星三号的光电跟瞄主机正样进行了实验室环境与真空环境下的技术测试, 给出了测试结果, 分析了多光轴标校系统在两种测试环境下的误差源与标校精度, 并对标校精度进行了验证。

2 多光轴标校系统设计

空间光电跟瞄系统的主要任务是实现对空间目标的跟踪成像与瞄准, 为减小噪声、提高系统性能, 其激光束散角和接收镜头视场角都很小。故为保证系统能够有效工作, 要求各单机光轴必须拥有极高的平行度装调一致性。通信技术试验卫星三号要求其空间光电跟瞄主机具有 1.5″的多光轴检测精度。

目前常用的多光轴平行性检测方法有投影靶法[19]、激光光轴仪法[20]、上转换板检测法[21]、惯性测量法[22]、五棱镜法[23]、相交校靶法、摄影测量法[24]、小口径平行光管法[25]、大口径平行光管法[26]等。投影靶法易受气候和场地条件限制, 自动化程度低且随机误差较大; 激光光轴仪法装配难度大且专用性强, 常用于检测望远镜两镜筒的光轴平行性; 上转换板检测法仅适用于特定波段的检

测, 且上转换材料制备的不均匀性会产生附加误差; 惯性测量法对陀螺仪的安装精度要求很高, 校准过程不直观, 且整体校准精度不高; 五棱镜法中五棱镜的移动会导致其特征方向发生变化, 会对测量结果产生随机性的附加误差; 相交校靶法在进行光轴标校时容易受到环境的影响, 校准精度不高; 摄影测量法成本较高, 且多光轴检测精度不高; 小口径平行光管法结构复杂, 误差环节多, 整体精度较低。以上方法均无法满足空间光电跟瞄系统的高精度检测要求。

大口径平行光管法误差环节少、检测精度高, 可在全波段进行测试且没有色差。可为空间光电跟瞄系统建立一个既包含可见光又包含近红外激光的测量基准, 保证空间光电跟瞄系统可见光和近红外激光都能被探测器所接收。此外, 为去除传统抛物面系统中心遮拦的影响, 保证较高的像面照度, 本文选择大口径离轴反射式平行光管作为多光轴标校设备的主要部件设计了一套多光轴校准系统, 其结构如图 1 所示。

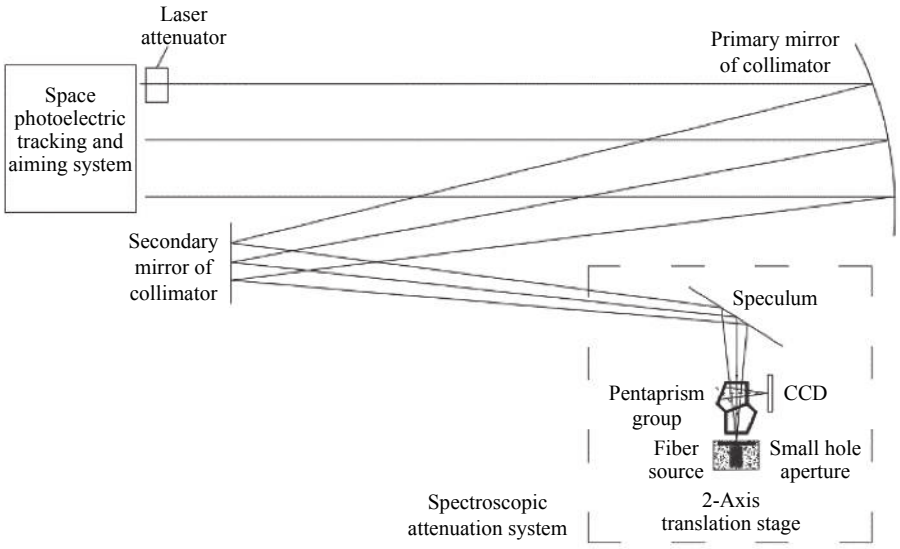

图 1　多光轴标校系统结构

Fig. 1　The structure of the multi-axis calibration system

该系统主要由大口径离轴反射式平行光管系统、分光衰减系统、激光衰减片、光电设备安装台等部件组成。

大口径离轴反射式平行光管系统主要由离轴抛物面主镜和次镜两个反射式光学元件构成, 其主要作用是为空间光电跟瞄系统提供无限远目标以及将激光成像在 CCD 探测器上。

分光衰减系统主要由 45°反射镜, 双五棱镜、CCD 探测器、小孔光阑、二维平移台、光纤光源以及支撑结构等部分组成。该系统是为了满足空间光电跟瞄系统的特殊应用环境而单独设计的, 主要用于校准卫星光电跟瞄设备在空间状态下激光测距仪的多光轴一致性。

激光衰减片主要用于衰减激光能量, 避免能量过高而损伤 CCD 探测器。

光电设备安装台主要由台面和通用螺孔等组成, 其主要用于固定空间光电跟瞄设备, 隔离外界环境振动, 以及对跟瞄设备进行俯仰角以及方位角调节。

在进行多光轴标校时, 首先将空间光电跟瞄设备固定于光电设备安装台上, 并对准平行光管的入瞳。将小孔光阑和 CCD 探测器分别定位在平行光管的焦面和共轭焦面处。小孔光阑由光源照明, 被接收系统接收, CCD 探测器用于接收激光发射端发射的激光。根据激光能量大小, 在激光发射机前添加透射式激光衰减片, 其衰减倍率需要在试验现场根据多光轴标校装置内部相机的图像响应来确定。此外, 激光发射端所发射的激光有 1 064 nm 和 635 nm 两种, 1 064 nm 激光能量密度较高, 635 nm 激光功率密度较低, 故本文在

分光衰减系统中设计了一个双五棱镜衰减装置，该装置不仅可将目标靶和 CCD 分别定位在平行光管的焦面和共轭焦面处，还能配合激光衰减片确保激光发射端的高强度激光和低功率激光都能在 CCD 动态范围内。

3 综合误差分析

任何一套测试系统都存在不可避免的测量误差，为提升本文所设计多光轴标校系统的标校精度，按照系统组成分别对平行光管系统、分光衰减系统、激光衰减片、光电设备安装台等部件进行了误差分析。

3.1 平行光管系统

大口径离轴反射式平行光管系统的主要误差源有 3 个，分别为面形误差、彗差与像散、焦距加工误差。

3.1.1 面形误差

平行光管面形误差主要是指抛物面的面形误差，当使用波像差对平行光管进行光学质量评价时，可推导出如下平行差计算公式：

$$\theta = \arctan\frac{4\Delta\omega}{D}\quad , \tag{1}$$

其中，$\Delta\omega$ 为抛物面的加工允差，D 为抛物面口径。

3.1.2 彗差与像散

CCD 探测器接收的激光光斑相当于轴外物点的像点，存在着彗差和像散。当孔径光阑位于焦平面上时，主要产生的是弧矢彗差角弥散，其大小为：

$$\theta = \frac{0.062\,5\times\omega\times(F/\#)^{-2}\times 180}{\pi}\times 3\,600'' \quad , \tag{2}$$

其中，$(F/\#)$ 是 F 数，即 f/D，ω 为半视场角，且有 $\omega = d/f$，其中 d 为目标点源半径。

3.1.3 焦距加工误差

平行光管实际焦距与理想值之间有一定的误差，若将小孔光阑与 CCD 直接定位在平行光管的理想焦面与共轭焦面处会产生光线准直误差。本文使用干涉仪将小孔光阑与 CCD 分别定位在平行光管的实际焦面与相应共轭焦面处，此时焦距误差对于准直目标点源光线与入射光线汇聚而言不产生多余误差，从而可消除平行光管焦距加工误差带来的测试误差。

3.2 分光衰减系统

分光衰减系统的主要误差源是其各个部件的定位误差，定位不准会导致整体校准精度降低。本文采用“标定+角镜准直”方法来消除分光衰减系统整体的标定误差。

3.2.1 标定

本文标定示意图和标定设备参数分别如图 2 和表 1 所示。

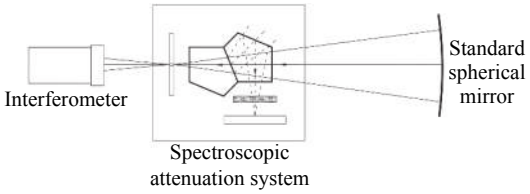

图 2 标定系统原理图

Fig. 2 Principle diagram of the calibration system

表 1 分光衰减系统的测试设备

Tab. 1 Test equipment of the spectroscopic attenuation system

仪器	指标要求
干涉仪	PV测量精度优于λ/30(@632.8 nm)
标准球面镜	Φ100 mm口径, F#7和F#11标准头
调整机构	可实现平移和倾斜调整

标定流程如下：

(1)将装配后的分光衰减系统置于干涉仪前，并搭建干涉测量光路，球面反射镜安装于测量光路中；

(2)粗调干涉仪使其聚焦点对准小孔光阑，调整标准球面镜，使干涉仪经过分光衰减系统共轭光路后被球面反射镜返回的光自准直，并调整标准球面镜使干涉条纹数少于 3 条，固定标准镜；

(3)调整小孔光阑，使其位于干涉仪的聚焦点位置，通过观察光焦度(Power)判断是否为焦面，观察能透光的两侧极限位置确定中心，并将固定小孔光阑的二维导轨清零；

(4)采用可见光照明小孔光阑，在共轭光路安装激光专用 CCD 探测器，调整 CCD 前后位置，使 CCD 上小孔光阑像的大小和小孔尺寸一致，调整 CCD 位置，使小孔光阑像位于 CCD 中心像元上，将 CCD 位置固定，记录小孔光阑像在 CCD 中的位置坐标和小孔光阑像的大小。

3.2.2　标定精度

本文标定所采用的标准球面镜的口径 D 为 100 mm, 根据公式$\alpha = \lambda/30D$可得, 测量精度所对应的角度偏差为 $\alpha = 0.04''$, 完全满足多光轴标校系统的标定精度要求。

3.2.3　角镜准直

在标定后的测试过程中, 可将角镜放置于接收系统旁, 根据角镜自准直的特点, 测试小孔光阑在 CCD 上的像元位置, 则最终可消除分光衰减系统共轭光路的标定误差。

3.3　激光衰减片

激光衰减片的主要误差源有 2 个, 分别是制造误差和热变形。

3.3.1　制造误差

激光衰减片因制造误差而产生的楔角 α 会引起光线平行差, 从而影响质心的提取误差。实际测试中激光垂直衰减片入射, 故激光衰减片制造误差所产生的标校误差为:

$$\theta = (n-1)\alpha \quad . \tag{3}$$

显然激光衰减片制造误差的影响具有对称性, 故本文采取旋转衰减片的方式来去除该误差的影响。分别测试衰减片处于 0°和 180°的位置, 并对 100 次测量结果取平均值, 则可认为完全消去了制造误差的影响。

3.3.2　热变形

激光衰减片在工作时会吸收激光能量而产生热变形, 主要引起质心的提取误差。

目前尚未发现合适的抑制激光衰减片热变形影响的方法, 但通过实测发现, 激光在衰减片上的热变形量随时间增长而增大, 在 3 min 后保持平衡, 最大变形量小于 0.05λ, 而且通过旋转衰减片也不能去除此项偏差。经 Zemax 仿真分析表明, 此项误差为 0.1″。

3.4　光电设备安装台

可通过调节光电设备安装台的俯仰角与方位角使空间光电跟瞄系统的某分系统接收器中心与平行光管焦线对准, 从而确定基准光电系统的光轴。若存在调整误差, 则无限远目标点源便无法精确成像在基准光电系统的焦点处。

本文利用基准光电系统探测器的读数来确定基准光轴与平行光管焦线的空间相对位置, 该方法可去除光电设备安装台所产生的光轴标校误差。

4　测量实验与结果

本文以通信技术试验卫星 3 号的光电跟瞄主机正样为测试对象, 进行了实验室环境和真空环境下的激光测量分系统收发平行度测试, 以验证多光轴标校系统的精度和可行性。

4.1　实验室环境测试

4.1.1　测试流程

根据型号测试要求, 对空间光电跟瞄主机正样进行实验室环境测试, 测试图如图 1 所示, 测试流程如下。

(1)将空间光电跟瞄主机正样安装在光电设备安装台上, 对准平行光管入瞳, 并将小孔光阑和 CCD 探测器分别定位在平行光管的焦面和共轭焦面处;

(2)利用经纬仪找到小孔光阑代表的视轴, 调整激光测量分系统使其 0°视场和小孔光阑一致, 使测试系统和被测试系统对准, 并在激光发射机前加衰减片;

(3)利用可见光源照明小孔光阑, 通过在激光发射机和宽视场相机中间放置角镜, 测试返回光在 CCD 上的质心位置, 角镜旋转 180°, 记录光斑位置, 两个位置取平均值消除角镜误差的影响;

(4)激光发射机发射激光, 观察激光在标校装置 CCD 上的位置, 调整使其位于中心, 调整 CCD 的增益, 暗噪声, 去除本底噪声, 测试激光发射机在标校装置 CCD 上的质心位置, 记录采样区域起始点位置, 激光聚焦点质心位置;

(5)分别测试衰减片 0°和 180°位置, 取 100 次测量的平均值;

(6)通过照明小孔光阑, 使 APD 感光, 通过二维平移台扫描小孔光阑, 得出平移量和 APD 信号的对应关系, 拟合得到接收系统的视轴, 最终完成测试, 测试结果如表 2 所示。

表 2　实验室环境下的测试结果

Tab. 2　Test results in a laboratory environment (″)

测试环境	测试结果	
	水平方向	竖直方向
实验室环境	43.68	37.41

4.1.2 多光轴标校系统测试精度分析

在收发平行度标定过程中，主要存在系统误差和随机误差。

4.1.2.1 系统误差

采用本文给出的抑制误差影响措施后仍有较大的残留误差项。

(1) 平行光管面形误差：本文使用的平行光管口径为 600 mm，焦距为 12000 mm，视场角小于 0.1°，波前 RMS 优于 1/15λ，经计算面形误差对光轴对准带来的影响小于 0.14″，故令 $\theta_1 = 0.14''$；

(2) 平行光管定焦面误差：本文定焦面方法的定焦误差为 1.07 mm，接收系统和激光发射机的距离为 534 mm，经计算离焦对光轴对准带来的影响为 0.822″，故令 $\theta_2 = 0.822''$；

(3) CCD 光斑定位误差：对于激光发射器，CCD 像元尺寸为 9 μm，本文采用了 1/10 像元细分技术，经计算，激光发射器光轴对准精度优于 0.015″，故令 $\theta_3 = 0.015''$；

(4) CCD 焦面倾斜：对于多光轴标校系统，其 CCD 焦面倾斜主要通过自准直来调整，本文所采用自准直调整的整体误差小于 0.2°，而整个焦面的长度为 36 mm，经软件计算知，在整个长度范围内因焦面倾斜引起的光轴偏差为 0.023″，故令 $\theta_4 = 0.023''$；

(5) 激光衰减片热变形：激光衰减片热变形产生的误差为 0.1″，故令 $\theta_5 = 0.1''$；

(6) 接收系统光阑中心扫描误差：接收系统视场光阑中心是通过多光轴标校装置的小孔光阑平移扫描的，而小孔光阑的扫描精度为 0.03 mm，对应接收视场光阑的扫描精度为 0.003 mm，焦距为 1300 mm，经计算，接收系统光轴对准精度优于 0.516″，故令 $\theta_6 = 0.516''$；

(7) 软件质心计算误差：本文计算质心采用的是 Spiricon 公司的软件，该软件的测量精度优于一个像元，对应偏差为 0.155″，故令 $\theta_7 = 0.155''$；

(8) 激光光斑不均匀性误差：本文所采用激光器的光斑近似高斯分布，其对质心计算的影响很小，可认为优于 0.002″，故令 $\theta_8 = 0.002''$。

4.1.2.2 随机误差

随机误差主要有两项，分别为激光发射机的指向抖动误差和能量分布误差。根据白俄测量结果，这两项误差综合预估值优于 0.6″，故令 $\theta_9 = 0.6''$。

综上，实验室环境下多光轴标校系统的随机误差 θ 为：

$$\theta = \sqrt{\theta_1^2+\theta_2^2+\theta_3^2+\theta_4^2+\theta_5^2+\theta_6^2+\theta_7^2+\theta_8^2} = 0.998'' \quad , \tag{4}$$

收发平行度标定误差 δ 为：

$$\delta = \sqrt{\theta^2+\theta_9^2} = 1.165'' \quad . \tag{5}$$

4.2 真空环境测试

空间光电跟瞄主机正样的真空环境测试流程与实验室环境测试流程大致相同，不同点在于真空测试环境下，平行光管系统位于真空罐内，而分光衰减系统位于真空罐外。由于实际测试需要，真空罐内平行光管的焦距是 10500 mm，而不是 12000 mm，测试设备和测试结果分别如图 3 和表 3 所示。

图 3 真空环境测试设备

Fig. 3 Test equipment under vacuum environment

表 3 空间光电跟瞄系统的真空环境测试结果

Tab. 3 Test results of space photoelectric tracking and aiming system in a vacuum environment (″)

测试环境	测试结果	
	水平方向	竖直方向
真空环境	48.37	36.26

相对于实验室环境，真空环境的多光轴标校不确定性增量主要由平行光管面形变化、焦距变化以及真空罐内振动所引起。在这 3 种因素影响下，真空环境相对于实验室环境有不同的误差源，如下：

(1) 平行光管面形误差：根据工程经验，波前 RMS 优于 1/15λ 的平行光管在真空影响下的波前 RMS 仍优于 1/10λ，经计算面形误差对光轴对准带来的影响小于 0.2″，故令 $\theta_1' = 0.2''$；

(2) 平行光管定焦面误差: 真空环境所采用的平行光管焦距为 10 500 mm, 经计算在此变化下离焦对光轴对准带来的影响为 1.07″, 故令 $\theta_2' = 1.07''$;

(3) CCD 光斑定位误差: 将平行光管焦距从 12 000 mm 变为 10 500 mm 后, 激光发射器光轴对准精度优于 0.017″, 故令 $\theta_3' = 0.017''$;

(4) 随机误差: 多光轴标校中由振动带来的随机误差主要影响各器件入射光线的变化, 这些变化的影响可由本文提出的各项措施抑制或消除, 故仍可认为随机误差预估值优于 0.6″, 即令 $\theta_9' = 0.6''$。

真空环境下其余误差的影响相较于实验室环境变化不大, 故可认为真空环境下多光轴标校系统的随机误差 θ'为:

$$\theta' = \sqrt{\begin{matrix}\theta_1'^2 + \theta_2'^2 + \theta_3'^2 + \theta_4'^2 \\ +\theta_5'^2 + \theta_6'^2 + \theta_7'^2 + \theta_8'^2\end{matrix}} = 1.219'' \quad , \qquad (6)$$

收发平行度标定误差 δ'为:

$$\delta' = \sqrt{\theta'^2 + \theta_9'^2} = 1.359'' \quad . \qquad (7)$$

4.3　多光轴标校精度验证

对多光轴标校系统的误差分析结果表明, 该系统同时满足实验室环境和真空环境下 1.5″的多光轴标校精度要求。为验证该分析结果的正确性, 将图 1 与图 3 中的空间光电跟瞄系统反转放置后再进行测试。反置后的跟瞄主机各光轴位置颠倒, 则在平行度测试中, 系统误差方向改变。反置后的跟瞄系统收发平行度测试数据如表 4 所示。

表 4　反置后的跟瞄系统实验室环境与真空环境收发平行度测试数据对比

Tab. 4　Comparison of parallelism test results of reversed placed tracking and aiming system in the laboratory environment and the vacuum environment (Unit: ″)

测试环境	测试结果	
	水平方向	竖直方向
实验室环境	−43.12	−36.98
真空环境	−47.96	−36.12

由表 2、表 3 和表 4 可知, 本文误差分析结果正确, 即本文设计的多光轴标校系统完全满足 1.5″的多光轴标校精度要求。

4.4　相似系统精度统计

目前公开的涉及真空环境下多光轴平行性标校的设备较少, 本文将几款同样以离轴反射式平行光管作为主要部件的多光轴标校系统的测试精度统计如表 5。

表 5　同类多光轴平行性标校设备的标校精度统计表

Tab. 5　Calibration accuracy statistics of similar multi-axis parallelism calibration equipment (Unit: ″)

主要设计者	设计年份	标校精度
徐丹慧	2020	5
黄富瑜	2019	27.68
杨雪	2019	8.87
王若帆	2018	6.19
谢国兵	2018	5
纪小辉	2018	10.31
易琼	2018	2.92

此外, 本文还调研了传统的以离轴反射式平行光管作为主要部件的多光轴标校系统。如 2015 年由刘亚辰、张新磊等[27] 人研制的多光轴标校系统, 其标校精度如下: 方位方向为 2.8″、俯仰方向为 4.4″; 2007 年由黄静、刘朝晖等人研制的多光轴标校系统的标校精度为 4.05″[28]。而空间光电跟瞄系统要求多光轴标校系统满足 1.5″的多光轴一致性检测精度要求。在此要求下, 本文设计的多光轴标校系统最佳。

5　结　论

本文针对空间光电跟瞄系统在真空环境下的多光轴平行性测量问题, 设计了一套多光轴标校系统。然后对该系统进行了详细的误差分析, 并给出了相应抑制误差影响的方法。最后对通信技术试验卫星 3 号的光电跟瞄主机正样进行了实验室环境和真空环境下的技术测试, 给出了多光轴标校系统在两种测试环境下的测试结果、误差源以及标校精度, 并对标校精度进行了验证。最终结果表明: 本文设计的多光轴标校系统在实验室环境下的标校精度为 0.998″, 收发平行度标定误差为 1.165″; 在真空环境下的标校精度为 1.219″, 收发平行度标定误差为 1.359″。完全满足空间光电跟瞄系统 1.5″的多光轴检测精度要求。

参考文献：

[1] 王卫兵, 王挺峰, 郭劲. 基于星载光电成像跟踪测距的空间目标定轨[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(2): 528-539.
WANG W B, WANG T F, GUO J. Orbit determination for space target based on opto-electrical imaging, tracking and ranging on satellite[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(2): 528-539. (in Chinese)

[2] 李治国, 高立民, 张博妮, 等. 空间光电跟踪系统动量平衡设计与试验[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(1): 62-68.
LI ZH G, GAO L M, ZHANG B N, *et al*.. Design and experiment of momentum balance wheels for optoelectric tracking gimbals[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(1): 62-68. (in Chinese)

[3] 徐丹慧, 唐霞辉, 方国明, 等. 基于干涉条纹的光轴平行性校准方法[J]. 光学学报, 2020, 40(17): 1712005.
XU D H, TANG X H, FANG G M, *et al*.. Method for calibration of optical axis parallelism based on interference fringes[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(17): 1712005. (in Chinese)

[4] 谢国兵, 薛永刚, 晁格平, 等. 基于LABVIEW的多光轴平行性测试方法[J]. 应用光学, 2018, 39(6): 856-861.
XIE G B, XUE Y G, CHAO G P, *et al*.. Test method of multi-axis parallelism based on LABVIEW[J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(6): 856-861. (in Chinese)

[5] 宋俊儒, 邢辉, 穆生博, 等. 航空红外相机的装调[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(8): 2125-2133.
SONG J R, XING H, MU SH B, *et al*.. Alignment of aerial multi-angle infrared camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(8): 2125-2133. (in Chinese)

[6] 叶露, 武晓阳, 聂真威. 强激光与红外传感器光轴平行性测量仪器的研制[J]. 中国光学与应用光学, 2008, 1(1): 100-104.
YE L, WU X Y, NIE ZH W. Development of measuring instrument of optical-axis parallelism for strong laser and infrared sensor[J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2008, 1(1): 100-104. (in Chinese)

[7] 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): 9-17.
HUANG F Y, LI G, SHI Y SH, *et al*.. Design and error analysis of multi-spectral and multi-axis parallelism testing scheme[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(2): 9-17. (in Chinese)

[8] 纪小辉, 孔巍. 多光谱共孔径无穷远目标器设计[J]. 应用光学, 2018, 39(3): 339-342.
JI X H, KONG W. Design of multi-spectral common aperture infinity collimator[J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(3): 339-342. (in Chinese)

[9] 易琼, 王林森, 杨建昌, 等. 观瞄系统光轴平行性原位检测的光学系统设计[J]. 光学技术, 2018, 44(1): 113-116.
YI Q, WANG L S, YANG J CH, *et al*.. Design of parallelism of optical axis in-situ detection's optical system of observing and aiming system[J]. *Optical Technique*, 2018, 44(1): 113-116. (in Chinese)

[10] 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)

[11] 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 ZH, TANG Z L, *et al*.. Detection method for optical-axis parallelism of photoelectric theodolite in range[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(8): 1670-1677. (in Chinese)

[12] JAKLITSCH J J, EHART A F, JONES D A, et al.. Gyroscopic system for boresighting equipment: USA, 7065888B2[P]. 2006-06-27.

[13] JAKLITSCH J J, PATURZO V A. Non line of sight boresight based on inertial measurement technology[C]. *Proceedings of 2003 IEEE Systems Readiness Technology Conference*, IEEE, 2003: 527-533.

[14] CARL ZEISS. Calibration and alignment[EB/OL].[2018-08-01]. www.zeiss.com/optronics.

[15] SCHILL REGLERTEKNIK. Aligner 308 ship alignment system[EB/OL].[2018-08-01]. www.schill.se.

[16] METRONOR. Next generation boresight system[EB/OL].[2018-08-01]. www.metronor.com/military/.

[17] CI SYSTEMS. Advanced Weapon Boresight System (AWBS)[EB/OL].[2020-05-18]. https://www.ci-systems.com/awbs.

[18] CABIB D, RAHAV A, BARAK T. Broad-band optical test bench (OPTISHOP) to measure MTF and transmittance of visible and IR optical components[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6543: 654311.

[19] 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): 73-81.
ZHANG Y, WU H, MA S S. Development and analysis of large spacing axis consistency detection technology[J].

Opto-Electronic Engineering, 2019, 46(2): 73-81. (in Chinese)

[20] 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.
LING J, LIU B Q, ZHAO X L. The comparison and discussion of several testing methods about optical-axis parallelism[J]. *Journal of Applied Optics*, 2003, 24(1): 43-45. (in Chinese)

[21] 陈志斌, 李义照, 王呈阳, 等. 激光测距机光斑及其光轴平行性检测方法研究[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(S1): 529-532.
CHEN ZH B, LI Y ZH, WANG CH Y, *et al*.. Laser spot and it's optic axis collimation detection method for laser range finder[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(S1): 529-532. (in Chinese)

[22] 陈志斌, 肖文健, 马东玺, 等. 大间距多光轴一致性野外在线检测方法[J]. 光学学报, 2017, 37(1): 0112006.
CHEN ZH B, XIAO W J, MA D X, *et al*.. A method for large distance multi-optical axis parallelism online detection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(1): 0112006. (in Chinese)

[23] 张磊, 邱伟, 张凯. 基于双五棱镜组件的大间距光轴平行性检测方法[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(7): 0717005.
ZHANG L, QIU W, ZHANG K. Detection method of large space optical axis parallelism based on double pentaprism components[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(7): 0717005. (in Chinese)

[24] 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)

[25] 王春艳, 姜会林, 王陆, 等. 用于火控动态性能测试的多光轴光学系统[J]. 兵工学报, 2011, 32(6): 746-751.
WANG CH Y, JIANG H L, WANG L, *et al*.. The multi-axial optical system study for fire control dynamic performance testing[J]. *Acta Armamentarii*, 2011, 32(6): 746-751. (in Chinese)

[26] 王若帆, 张国玉, 曹秒, 等. 红外脉冲激光测距仪发收光轴一致性测试方法研究[J]. 长春理工大学学报 (自然科学版), 2018, 41(1): 60-62.
WANG R F, ZHANG G Y, CAO M, *et al*.. Research on measurement method of optical coherence of transmitting and receiving infrared pulse laser range finder[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology* (*Natural Science Edition*), 2018, 41(1): 60-62. (in Chinese)

[27] 刘亚辰, 张新磊, 高扬, 等. 光电跟踪瞄准系统的多光轴平行度校准方法研究[J]. 宇航计测技术, 2015, 35(4): 5-8, 23.
LIU Y CH, ZHANG X L, GAO Y, *et al*.. Study for multi-spectral axes parallelism calibration of photoelectric tracking and aiming system[J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2015, 35(4): 5-8, 23. (in Chinese)

[28] 黄静, 刘朝晖, 折文集, 等. 室内多波段光轴一致性测试系统的设计[J]. 应用光学, 2007, 28(5): 663-666.
HUANG J, LIU ZH H, SHE W J, *et al*.. Design of lab test system for boresight of multi-channel optical axes[J]. *Journal of Applied Optics*, 2007, 28(5): 663-666. (in Chinese)

作者简介:

温中凯(1993—), 男, 山东菏泽人, 博士研究生, 中国空间技术研究院遥感卫星总体部与南京航空航天大学联合培养博士, 主要从事海洋遥感卫星、航天器总体设计、空间光学遥感器设计等方面的研究。E-mail: wenzhongkai_cast@163.com

张庆君(1969—), 男, 江苏徐州人, 博士生导师, 研究员, 遥感卫星总指挥、设计师, 主要从事航天器总体设计方面的研究。E-mail: ztzhangqj@163.com

李　爽(1978—), 男, 博士生导师, 教授, 主要从事航天器动力学与控制、航天任务智能规划与博弈、在轨服务与操控、深空探测技术和航天技术新概念等方面的研究。E-mail: lishuang@nuaa.edu.cn