



DOI: 10.12086/oe.2019.180219

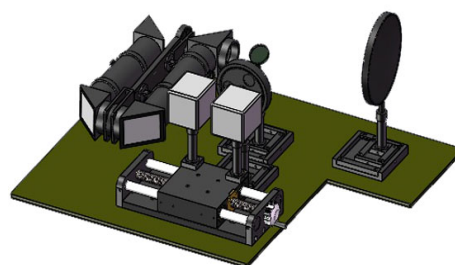
多光谱多光轴平行性检测方案设计 设计与误差分析

黄富瑜^{1*}, 李刚¹, 史云胜², 张晓良¹, 邹昌帆³,
禹 焯³

¹陆军工程大学石家庄校区电子与光学工程系, 河北 石家庄 050003;

²中国人民解放军 63936 部队, 北京 102202;

³南京军代局驻扬州地区军代室, 江苏 扬州 225009



摘要: 模块化设计、多通道集成已成为当前光电装备研制的主流思路,但多个探测单元的光轴一致性却直接影响着光电装备的使用效能。现有方法难以兼顾多光谱、多光轴、高精度、大轴系跨度等多种光轴平行性检测需求,为此,本文提出了一种基于“反射式结构+光轴平移”思想的多光谱多光轴平行性检测方案。采用“反射式结构”设计反射式平行光管,解决了多光谱范围内可见光、微光、激光、红外等不同波段光轴的平行性检测问题;利用“光轴平移”思想解决了大跨度范围内光轴间平行性检测问题。结果表明:本设计方案的平行性检测误差小于 0.134 mrad,可检测的轴系跨度可达 0.5 m,能够满足绝大多数光电装备的光轴平行性检测需求。

关键词: 平行性检测; 多光谱多光轴; 反射式结构; 光轴平移

中图分类号: O436.3

文献标志码: A

引用格式: 黄富瑜,李刚,史云胜,等. 多光谱多光轴平行性检测方案设计 with 误差分析[J]. 光电工程,2019,46(2): 180219

Design and error analysis of multi-spectral and multi-axis parallelism testing scheme

Huang Fuyu^{1*}, Li Gang¹, Shi Yunsheng², Zhang Xiaoliang¹, Zou Changfan³, Yu Ye³

¹Department of Electronic and Optics Engineering, Shijiazhuang Campus of Army Engineering University, Shijiazhuang, Hebei 050003, China;

²63936 Unit of PLA, Beijing 102202, China;

³Military Agency in Yangzhou Region, Yangzhou, Jiangsu 225009, China

Abstract: The modular design and multi-channel integration has become the main thought of developing the photoelectric equipment, and the multi-axis parallelism directly influences the equipment performance. The current methods cannot meet the actual testing needs of multi-spectral, multi-axis, high-precise and large axis space. Thus a multi-spectral and multi-axis parallelism testing scheme is put forward by adopting the designing thought of reflective type and optical axis translation. The reflective collimator is designed to solve the multi-spectral and multi-axis parallelism testing problems, and the optical axis translation design can increase the axis space of multi-axis parallelism test. The results show that the parallelism testing error is less than 0.134 mrad and the axis space can reach 0.5 m, which can satisfy parallelism testing needs of most photoelectric equipment.

收稿日期: 2018-04-15; 收到修改稿日期: 2018-07-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61801507); 军内科研项目(012016012600B12506)

作者简介: 黄富瑜(1985-), 男, 博士, 讲师, 主要从事计算机视觉与图像处理方面的研究。E-mail: hfyoptics@163.com

Keywords: parallelism testing; multi-spectral and multi-axis; reflective type; optical axis translation

Citation: Huang F Y, Li G, Shi Y S, *et al.* Design and error analysis of multi-spectral and multi-axis parallelism testing scheme[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(2): 180219

1 引言

随着武器装备现代化进程的加速推进，军用光电装备已从传统单光谱单光轴发展为集激光测距、激光制导、可见光观测和红外侦察等为一体的多光谱多光轴综合光电装备^[1-2]。这种综合光电装备多个光轴之间的平行性直接决定了整个系统的瞄准精度^[3-4]，只有确保各光轴平行度在一定范围内，才能保证对目标实施准确的测距、跟踪、瞄准和目标运动参数传递。目前，常用的多光轴平行性检测方法有^[4-7]投影靶板法、激光光轴仪法、五棱镜法、大口径平行光管法等。其中，投影靶板法通常在 100 m 左右的试验外场进行，通过光轴之间的间隔与靶板上光轴投影间隔的镜像关系来得到光轴平行度。该方法操作方便、成本低廉，但受环境因素影响大，精度低；激光光轴仪法是一种实验室检测法，对装备精度要求较高，主要用在一些专用检测场合；五棱镜法一般用于双目可见光光轴的检测与校准，其随机误差难以控制；大口径平行光管法通过检测同一目标像与各光轴中心的偏离程度实现多光轴的一致性检测，其优点是误差环节少、精度高，但测量成本相对较高。很显然，现有检测方法难以适应

当前综合光电装备的多光谱覆盖、大轴系跨度的多光轴高精度平行性检测需求，为此，本文采用“反射式结构+光轴平移”设计思想，提出了一种多光谱多光轴平行性检测设计方案，它可满足绝大多数光电装备的光轴平行性检测需求。

2 理论推导

2.1 方案设计

在进行多光谱多光轴平行性检测方案设计时，主要考虑以下三个因素：1) 宽光谱范围覆盖。覆盖紫外、可见光、1.06 μm 激光、1.54 μm 激光和红外波段的多个光谱范围。2) 多光轴平行性检测。可满足大跨度不同光轴之间的平行性检测。3) 色差因素影响小。鉴于上述因素，本方案采用了“反射式平行光管+光轴平移器”的设计方案，其光学原理图与结构设计图分别见图 1 和图 2。其中，离轴抛物面反射镜(主镜)、标准平面反射镜(次镜)、转盘式靶标构成离轴抛物面反射式平行光管；转盘式靶标上有透射式框型分划、透射式小孔分划和感光相纸组成，通过转盘转动实现不同靶标之间的互换。

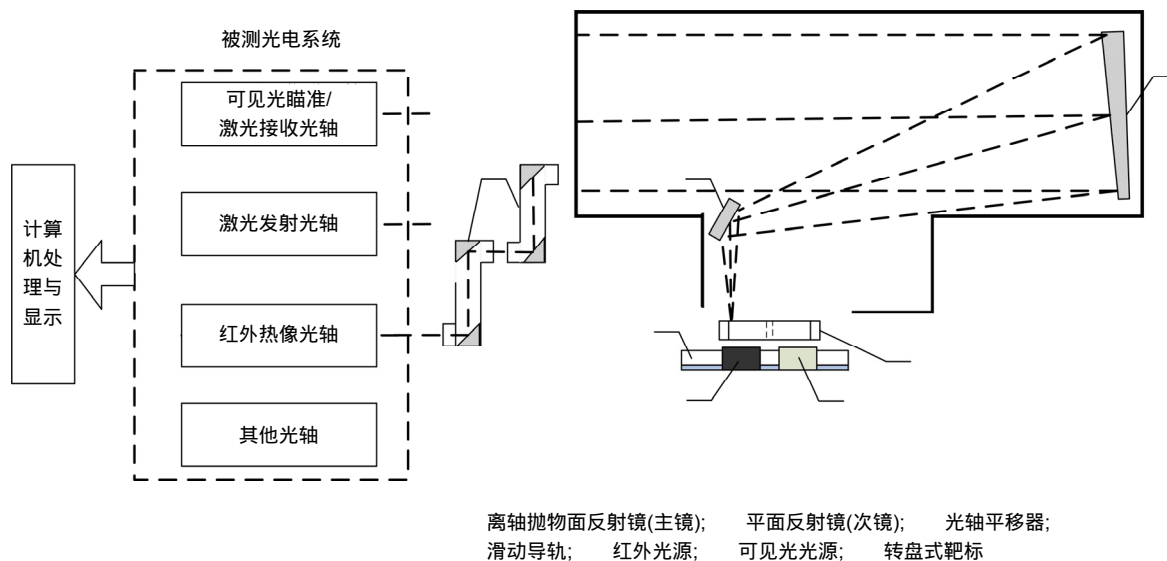


图 1 本文检测方案光学原理图

Fig. 1 Optical principle chart of proposed testing scheme

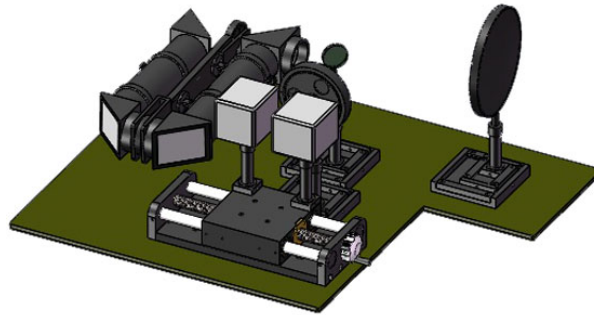


图 2 本方案结构设计图

Fig. 2 Structure design of proposed testing scheme

2.2 检测原理

以集红外、可见光、激光发射/接收光轴为一体的 X 型军用光电装备为检测对象, 对多光谱多光轴平行性检测仪检测原理阐述如下:

首先, 将被测系统架设在光轴平移器前的工作台上, 使可见光光轴大致对准平行光管, 利用外接设备将被检系统红外、可见光及其他视频信号送至计算机处理与显示单元。

然后, 以可见光瞄准/激光接收光轴为基准光轴, 将可见光光源移至转盘式框型分划板后面, 生成可见光靶标。将被检系统可见光十字分划中心调整至框型分划中心附近, 如图 3 所示。以框型分划为基准, 记录此时被测系统可见光分划中心在框型分划中的位置 (α_0, β_0) , 以及两个分划间的刻度格值比例系数 k 。

接着, 将红外光源滑动至转盘式框型分划板后面, 生成红外靶标, 利用光轴平移器, 将红外热像光轴引

入到检测光路中, 观察并记录被测系统红外分划中心在框型分划中的位置 (α_1, β_1) , 如图 4 所示。

由此解算可见光瞄准/激光接收光轴与红外热像光轴间的平行性差:

$$\begin{cases} \Delta X_{01} = \alpha_1 - \alpha_0 \\ \Delta Y_{01} = \beta_1 - \beta_0 \end{cases} \quad (1)$$

最后, 转动转盘式靶板, 将感光相纸引入到检测光路中, 并通过光轴平移器, 将被测系统激光发射光轴引入到检测光路中。发射激光在相纸上形成烧灼光斑, 观察并记录光斑中心在被测系统可见光分划板上对应的读数 (α_2, β_2) , 将其转化为框型分划刻度值 $(\alpha_2/k, \beta_2/k)$, 如图 5 所示。

由此解算可见光瞄准/激光接收光轴与激光发射光轴间的平行性差:

$$\begin{cases} \Delta X_{02} = \alpha_2/k - \alpha_0 \\ \Delta Y_{02} = \beta_2/k - \beta_0 \end{cases} \quad (2)$$

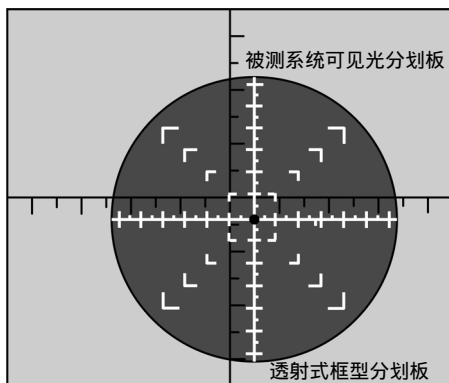


图 3 被测系统可见光光轴检测示意图

Fig. 3 The visible axis testing sketch map of photoelectric equipment

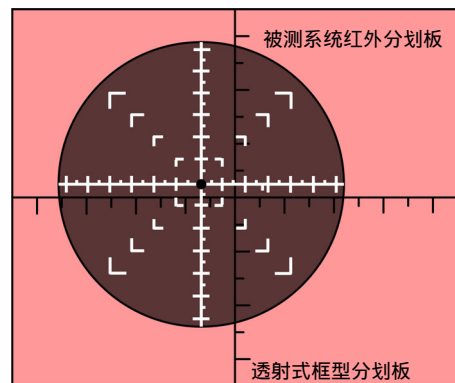


图 4 被测系统红外热像光轴检测示意图

Fig. 4 The infrared axis testing sketch map of photoelectric equipment

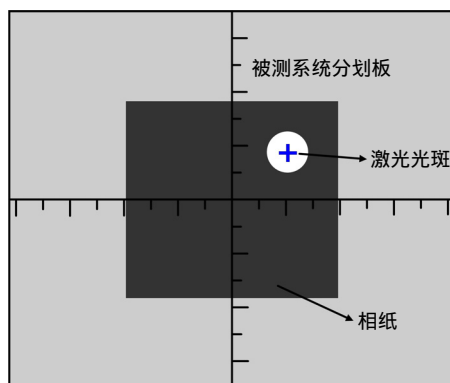


图 5 被测系统激光发射光轴检测示意图

Fig. 5 The laser emission axis testing sketch map of photoelectric equipment

同时，得到红外热像光轴与激光发射光轴间的平行性差为

$$\begin{cases} \Delta X_{03} = \alpha_2 / k - \alpha_1 \\ \Delta Y_{03} = \beta_2 / k - \beta_1 \end{cases} \quad (3)$$

3 指标论证与设计

3.1 离轴抛物面反射式平行光管

由于透射结构较难用于多光谱系统设计、共轴反射式结构存在中心遮挡等缺点^[8-9]，本文采用了反射式离轴抛物面结构来设计平行光管，这种结构能有效消除色彩，提供自紫外到红外的宽光谱无穷远目标。

3.1.1 有效孔径 D

离轴抛物面反射式平行光管的有效孔径大小应该与被测系统的孔径相匹配。当前绝大多数光电装备的单通道光学孔径不足 100 mm，为此确定离轴抛物面反射式平行光管有效孔径为 $D=100$ mm。

3.1.2 有效焦距 f'

有效焦距直接影响平行光管的准直精度。在实用

中，准直精度 $\varepsilon \leq 12''$ 便能满足多光轴平行性检测要求。假设平行光管物镜轴上安装误差为 δ ，根据光学成像理论，有效焦距 f' 、有效孔径 D 、准直精度 ε 和安装误差 δ 之间满足关系：

$$\frac{\varepsilon}{D} + \frac{1}{f' + \delta} = \frac{1}{f'} \quad (4)$$

通常情况下，安装误差 $\delta \leq 0.05$ mm，远小于焦距 f' ，将上式化简：

$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{1}{f'} - \frac{1}{f' + \delta} = \frac{\delta}{f'(f' + \delta)} \approx \frac{\delta}{f'^2} \quad (5)$$

将各参数值代入上式，求得平行光管有效焦距为 $f'=293.3$ mm，考虑 3% 左右的设计冗余量^[10]，并兼顾加工难度，平行光管有效焦距取值 $f'=300$ mm。

3.1.3 主次镜位置

主镜采用离轴抛物面结构设计，同时为尽量较少次镜对光线的遮挡，主镜相对垂直方向倾斜 $1^\circ \sim 3^\circ$ 放置，次镜相对水平方向倾斜 $45^\circ \sim 55^\circ$ 放置，通过微动机构调节主次镜位置，使入射光线折转 90° 后会聚到转盘式靶标上。如图 6 所示。

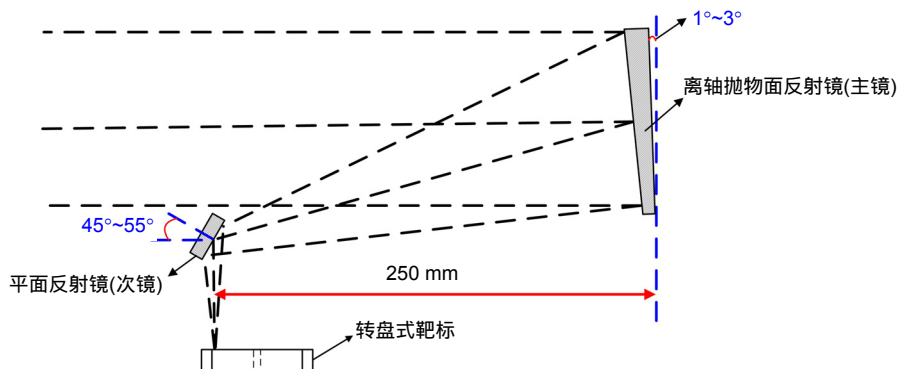


图 6 平行光管主次镜位置关系

Fig. 6 The position of primary and secondary mirror in collimator

将次镜远离主镜 $l=250$ mm 放置, 可利用下式求得次镜尺寸 D_p :

$$D_p = \frac{f' - l}{f'} \times D \times \frac{1}{\cos(45^\circ \sim 55^\circ)} \quad (6)$$

将各参数代入上式, 得次镜尺寸范围为 $D_p=12.89$ mm~15.85 mm, 考虑 3%左右的设计冗余量^[10], 并兼顾加工难度, 次镜尺寸取值 $D_p=17$ mm。

3.2 转盘式靶标

转盘式靶板上设计有透射式框型分划板、透射式十字分划板和感光相纸三个靶标, 如图 7 所示。

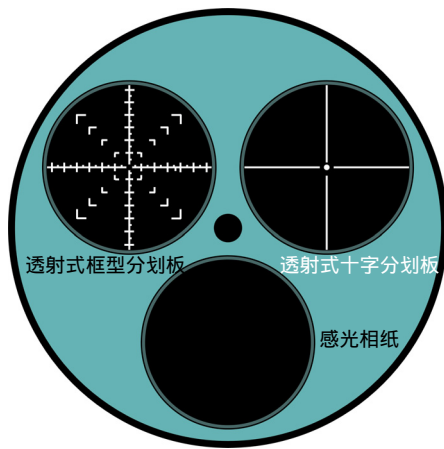


图 7 转盘式靶标示意图

Fig. 7 The sketch map of turntable target board

3.2.1 透射式框型分划板

为同时配合可见光光源和红外光源使用, 采用透射式结构设计框型分划板。透射式框型分划板最小格值读数设置为 $10'$, 每隔 $20'$ 设置一框型分划, 水平和垂直分划范围均为 $-120' \sim +120'$ 。对于焦距 $f'=300$ mm 的平行光管, $10'$ 格值对应的刻线间隔尺寸为

$$\Delta d = f' \tan 10' = 0.873 \text{ mm} \quad (7)$$

分划板直径为

$$D_f = 2 \times 12.5 \times \Delta d = 21.825 \text{ mm} \quad (8)$$

为保证刻线像与被测系统分划刻线或电子刻线宽度相当, 需对透射式框型分划板刻线宽度有一定限制。假设分划板刻线宽度为 d , 则刻线相对于被测系统的张角为

$$\theta_d = \frac{d}{f'} \quad (9)$$

假设被测系统物镜焦距为 f'_c , 则透射式框型分划板刻线在物镜焦平面上的成像宽度为

$$d' = f'_c \cdot \theta_d = f'_c \frac{d}{f'} \quad (10)$$

对于电子分划来说, 其分划宽度在 2~3 个像素大小便可满足观测要求, 单像素大小取 $6.5 \mu\text{m}$, 取分划宽度 2.5 个像素大小, 则电子分划几何尺寸为 $d'=16.25 \mu\text{m}$ 。考虑多型号被测系统检测需求, 物镜焦距取值 $f'_c=30$ mm~150 mm, 将上述数值代入式(10), 由此可得透射式框型分划板刻线 $d=0.032$ mm~0.162 mm, 取中间值 $d'=0.1$ mm 作为透射式框型分划板刻线宽度。

3.2.2 透射式十字分划板

透射式十字分划板主要用于提供十字和中心小孔像, 刻线宽度同透射式框型分划刻线宽度, 为 0.1 mm, 中心小孔直径为 $\phi=0.15$ mm, 分划板直径为 $\phi=21.825$ mm。

3.2.3 感光相纸

在检测激光光轴平行性时, 通过转动转盘方式将感光相纸旋至平行光管焦平面上, 发射激光, 在感光相纸上烧蚀出激光光斑, 通过检测并定位激光光斑中心, 确定激光发射光轴的方向。

3.3 光轴平移器

考虑多个光轴大跨度检测需求, 光轴平移器采用两组斜方反射镜来实现, 其实现原理如图 8 所示。采用两块相互平行的平面反射镜实现光轴平移, 单个光轴平移器跨度为 200 mm, 两个光轴平移器与 100 mm 孔径的平行光管配合, 能够实现 0 mm~ 500 mm 范围内任意距离的光轴平移。根据斜方棱镜性质^[5], 将斜方反射镜用于平行光路中光轴的垂直方向平移, 其整

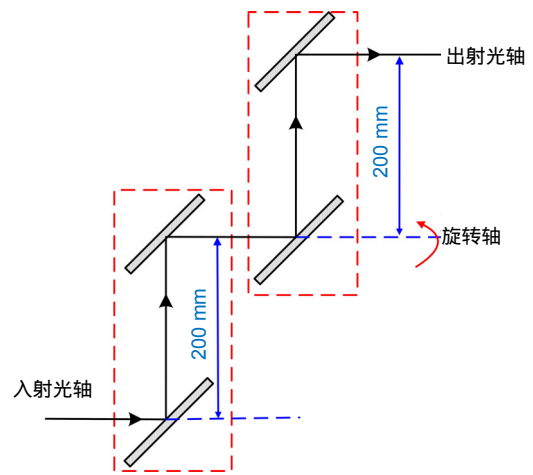


图 8 光轴平移器示意图

Fig. 8 The sketch map of optical-axis translation device

体安装误差不会影响出射光的平行性。而且,反射式光轴平移器的引入,不仅能够保证宽光谱范围光线的传输,而且有效避免了大口径平行光管带来的笨重及成本问题。

3.4 照明光源

本设计采用透射式靶标与不同光源相配合来产生多个光谱波段的分划板。根据 3.2 节设计的分划板直径大小,照明光源要选用面阵不小于 230 mm×230 mm 的面型背光源。其中,可见光光源种类较多,可选用高密度 LED 光源,如图 9(a)所示。考虑性价比问题,红外照明光源可采用功率可控的白炽钨丝灯,如图 9(b)所示。白炽钨丝灯位于聚光镜前焦点附近,聚光镜直径大于 230 mm,钨丝灯发出的光经聚光镜反射后转换为平行光,提供红外照明。在白炽钨丝灯后面设置一挡板,以避免照明光源出现中间亮边缘暗的现象。

4 实验与误差分析

4.1 典型装备光轴平行性检测

为检验本方案性能,课题组根据图 2 设计初步搭建了实验系统,并利用实验系统对双目可见光望远镜、双目微光观察镜和双目红外热像仪等典型光电装备的双光轴平行性进行了检测,其中可见光双目望远镜 1、

双目微光观察镜、双目红外热像仪为教学中拆解演示所用的光电装备,光轴平行性较差,在此称之为“故障装备”;可见光双目望远镜 2 为性能优良的刚出厂装备,在此称之为“新品装备”。本方案实验系统对上述“故障装备”和“新品装备”的性能检测结果如表 1 所示。

根据国军标 GJB 1240-1991^[11]、GJB 5695-2006^[12]和 GJB 369A-98^[13],双目望远镜、双目微光观察镜、双目红外热像仪三种装备在水平方向的光轴平行性最小允许误差是 20',在垂直方向的光轴平行性最小允许误差是 15'、30'、20'。对比表 1 检测结果可以看出,利用本实验系统检测出的故障装备平行性误差远超出了允许误差范围,而新品装备平行性误差在允许误差范围内,符合国家军用标准要求。在装备使用过程中,较大的平行性误差导致故障装备产生了“双像”、“像倾斜”等问题,而新品装备观察状况正常,问题产生的原因与表 1 检测结果相一致。

4.2 平行性检测误差分析

平行性检测误差是多光谱多光轴平行性检测仪最重要的指标。在本方案设计中,影响平行性检测误差的因素主要包括:平行光管准直误差、光轴平移器误差、分划板误差、激光光轴平行性误差等。

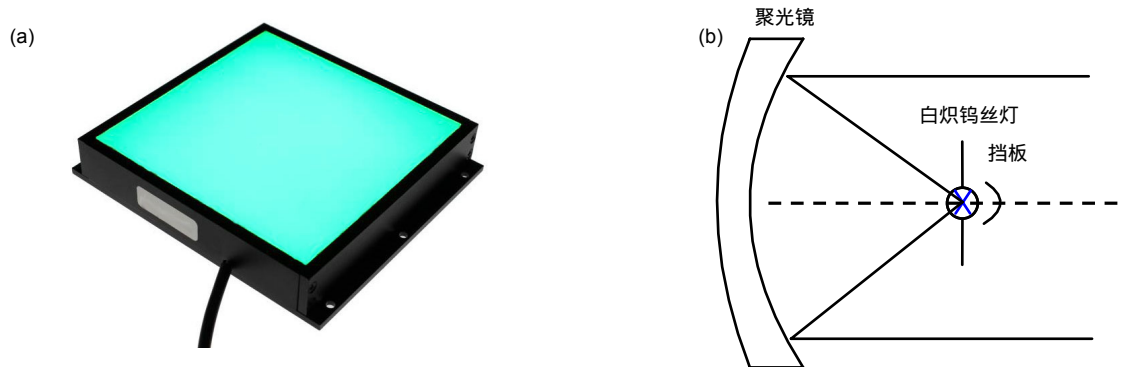


图 9 照明光源。(a) 可见光光源; (b) 红外光源

Fig. 9 The lighting source in collimator. (a) Visible source; (b) Infrared source

表 1 典型光电装备的光轴平行性检测结果

Table 1 The test results of optical axis parallelism of typical photoelectric equipment

	水平平行性误差/(')	垂轴平行性误差/(')
可见光双目望远镜 1(故障装备)	180.62	86.82
可见光双目望远镜 2(新品装备)	4.02	6.57
双目微光观察镜(故障装备)	197.95	162.02
双目红外热像仪(故障装备)	79.13	51.94

理想情况下, 转盘式靶标分划板应位于离轴抛物面反射式平行光管的焦平面上, 若分划板与平行光管焦平面之间存在离焦量 δ , 则将影响出射光束的平行性。本文设计的平行光管焦距为 300 mm, 口径为 100 mm, 离焦量通常在 $\delta \leq 0.05$ mm 范围, 代入式(4), 可得平行光管准直误差为

$$\Delta\epsilon_1 \leq \frac{D}{f'} - \frac{D}{f'+\delta} = 11.46'' \quad (11)$$

光轴平移器误差主要是指多个斜方反射镜之间的不平行性引起的误差。按照现有工艺水平, 两个平面镜间的平行性误差可控制在 10'' 以内, 则两组斜方反射镜的平行性传递误差为

$$\Delta\epsilon_2 \leq \sqrt{10^2 + 10^2 + 10^2} = 17.32'' \quad (12)$$

分划板误差又分为刻线误差和读数误差。其中, 刻线误差取分划板刻线宽度的 1/10, 由式(9)可得刻线误差为 6.8''; 读数误差取决于人眼分辨率, 取值 10''。则分划板误差为

$$\Delta\epsilon_3 \leq \sqrt{6.8^2 + 10^2} = 12.09'' \quad (13)$$

激光光轴平行性误差主要取决于激光光斑的定位精度, 采用亚像素光斑定位方法, 可将定位精度限制在 $\Delta\delta = 0.02$ mm 以内, 对应角度误差为

$$\Delta\epsilon_4 \leq \frac{\Delta\delta}{f'} = 13.75'' \quad (14)$$

通过对上述误差来源于误差大小的分析, 可求得所设计的多光谱多光轴平行性检测仪的总误差为

$$\begin{aligned} \Delta\epsilon_z &\leq \sqrt{\Delta\epsilon_1^2 + \Delta\epsilon_2^2 + \Delta\epsilon_3^2 + \Delta\epsilon_4^2} \\ &= 27.68'' = 0.134 \text{ mrad} \end{aligned} \quad (15)$$

根据国军标对光电装备光轴平行性的要求^[11-15], 侦察、测角类光电装备对光轴平行性误差的最高要求是 15', 即 4.36 mrad, 而本方案最大平行性检测误差

为 0.134 mrad, 不足最高要求的 1/30, 因此本设计方案完全可满足侦察、测角类军用光电装备的光轴平行性检测要求。对于激光指示类光电装备, 其光轴平行性检测精度通常在 0.3 mrad 以内, 因此, 对本方案继续优化, 将其最大误差控制在 0.1 mrad 范围内, 则优化后方案还可用于激光指示类光电装备的光轴平行性检测。

5 与同类方案对比

与现有平行性检测方案相比, 本文基于“反射式结构+光轴平移”思想的多光谱多光轴平行性检测方案具有如下优势:

1) 多光谱覆盖, 突破单一波段平行性检测方案的光谱局限。本设计方案采用反射式结构, 使可见光、微光、激光、红外等多光谱光轴同时检测成为可能。

2) 大轴系跨度覆盖, 在一定程度上弥补了体积重量与光轴大跨度检测的矛盾。光轴平移设计思想的采用不仅降低了检测系统对大口径物镜的依赖, 而且使大间距、多轴系平行性的检测调节更加灵活。

3) 轻巧便携, 可满足大多数光电装备检测需求。近年来, 集侦察、瞄准、测距、制导为一体的综合光电装备大量装备部队, 使得与之配套的便携式光电检测设备成为急需。相比传统方案, 本设计方案体积更小、质量更轻, 且检测精度可满足部队现有大多数光电装备平行性检测需求。

表 2 将本文方案与同类方案进行了对比。可以看出, 本文方案在可检测的光谱范围、检测精度、检测轴距、环境要求等方面, 均有明显优势, 但由于本方案孤立元件较多, 所以装调难度较大, 可以在后续方案优化中设置自检模块来降低装调难度。

表 2 本文方案与同类方案对比

Table 2 Performance comparison of different scheme

	投影靶板法	激光光轴仪法	五棱镜法	大口径平行光管法	本文方法
光谱范围	多光谱	以可见光为主	以可见光为主	透射式: 可见光 反射式: 多光谱	多光谱
检测精度	较高	决定于光轴仪精度	存在随机误差	较高	较高
可检测轴距	较大	较小	较大	较小	较大
环境要求	实验距离 > 100 m	室内环境	室内环境	室内环境	室内、室外
不足之处	只能在夜晚或阴天进行	装调难度较大	棱镜平移时精度难以保证	大口径平行光管制作难度大	装调难度较大

6 结论

针对当前光电装备的多光谱、多光轴、高精度、大轴系跨度等多种平行性检测需求,本文运用“反射结构+光轴平移”思想设计了一种多光谱多光轴平行性检测仪。首先,进行了检测仪总体方案的设计,阐述了平行性检测原理;接着,对离轴抛物面反射式平行光管、转盘式靶标、光轴平仪器、照明光源等关键部件的指标进行了论证,确定了检测仪各部件参数;最后,从平行光管准直误差、光轴平移器度误差、分划板误差、激光光轴平行性误差等多个角度分析了本检测方案的平行性检测误差。论证与分析结果表明:本文所设计多光谱多光轴平行性检测仪的检测误差小于 0.134 mrad,可检测轴系跨度达 0.5 m,能够满足绝大多数光电装备的光轴平行性检测需求。

参考文献

- [1] Chen Z 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): 112006.
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): 112006.
- [2] Ji S P. Equipment development of airborne electro-optic payload and its key technologies[J]. *Aero Weaponry*, 2017(6): 3-12.
吉书鹏. 机载光电载荷装备发展与关键技术[J]. *航空兵器*, 2017(6): 3-12.
- [3] He H H, Ye L, Zhou X Y, et al. Theory and precision analysis of testing apparatus of parallel depth[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(5): 52-56.
贺和好, 叶露, 周兴义, 等. 平行度测试仪原理及其测量精度分析[J]. *光电工程*, 2007, **34**(5): 52-56.
- [4] Wang X, Bai S P, Xu T H. A method for large distance multi-optical axis parallelism measurement[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2017, **40**(6): 48-51.
王鑫, 白素平, 许庭赫. 远距多光轴平行度检测方法研究[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2017, **40**(6): 48-51.
- [5] Xiao Z J, Guo X X, Xia Y, et al. Research on detection system of optical sights triaxial parallelism[J]. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 2014, **125**(16): 4427-4430.
- [6] Li J R, Wang Z Q, Wang C X, et al. Sight axis measuring of the single axis photoelectric measuring system[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2015, **42**(11): 8-12.
李建荣, 王志乾, 王春霞, 等. 单轴光电系统视轴测量方法研究[J]. *光电工程*, 2015, **42**(11): 8-12.
- [7] Wang Y, Huang Y, Li Z F, et al. Calibration of optical axis parallelism by using star for astronomical observation system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, **46**(5): 124-129.
王阳, 黄煜, 李占峰, 等. 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): 124-129.
- [8] Yan Z Q, Yang J C, Xie Z H, et al. Optical axis parallelism calibration system of large-scale multi-spectral multi-optical axis[J]. *Journal of Applied Optics*, 2016, **37**(6): 823-828.
闫宗群, 杨建昌, 谢志宏, 等. 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.
- [9] Zuo X Z, Shen L J, Yang H C, et al. Alignment technology of catadioptric linear array LWIR sensor[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2016, **43**(5): 82-87.
左晓舟, 沈良吉, 杨海成, 等. 折反式长波线阵红外传感器装调技术[J]. *光电工程*, 2016, **43**(5): 82-87.
- [10] 王永仲. 鱼眼镜头光学[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [11] Tang J, Wang W H, Hong S X, et al. General specification for telescope: GJB 1240-1991[S]. Beijing: Commission on Science, Technology and Industry for National Defense, 1992.
唐捷, 王文华, 洪善贤, 等. 望远镜通用规范: GJB 1240-1991[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 1992.
- [12] Li X R, Zhang Z M, Li Y F, et al. General specification for low light level observation scope: GJB 5695-2006[S]. Beijing: The General Armament Department of the PLA, 2006.
李兴荣, 张志明, 李延峰, 等. 微光夜视观察镜通用规范: GJB 5695-2006[S]. 北京: 中国人民解放军总装备部, 2006.
- [13] Shi T H, Ren X M, Zhang L S, et al. General specification for military optical instruments: GJB 369A-1998[S]. Beijing: Commission on Science, Technology and Industry for National Defense, 1998.
施亭侯, 任曦明, 张连顺, 等. 军用光学仪器通用规范: GJB 369A-1998[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 1998.
- [14] Yang D Z, Liu Q X, Zhao C X, et al. General specifications for optical reconnaissance equipment tactical and technical performance: GJBz 20420.2-97[S]. Beijing: The General Staff of the Chinese People's Liberation Army, 1997.
杨达钊, 刘庆新, 赵长祥, 等. 光学侦察装备通用规范 战术技术性能要求: GJBz 20420.2-97[S]. 北京: 中国人民解放军总参谋部, 1997.
- [15] Jiang Z H, Wu X D, Xu R, et al. General specification for military photoelectric goniometer: GJB 5231-2004[S]. Beijing: The General Armament Department of the PLA, 2005.
蒋增红, 吴轩东, 徐榕, 等. 军用光电测角仪通用规范: GJB 5231-2004[S]. 北京: 中国人民解放军总装备部, 2005.

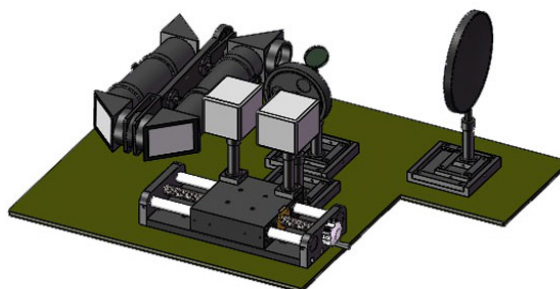
Design and error analysis of multi-spectral and multi-axis parallelism testing scheme

Huang Fuyu^{1*}, Li Gang¹, Shi Yunsheng², Zhang Xiaoliang¹, Zou Changfan³, Yu Ye³

¹Department of Electronic and Optics Engineering, Shijiazhuang Campus of Army Engineering University, Shijiazhuang, Hebei 050003, China;

²63936 Unit of PLA, Beijing 102202, China;

³Military Agency in Yangzhou Region, Yangzhou, Jiangsu 225009, China



Structure design of proposed testing scheme

Overview: With the modernization of weapons and equipment, the military photoelectric equipment has been developed from traditional single-spectral and single-axis equipment to integrated photoelectric equipment with multi-spectral and multi-axis structure, which consists of laser ranging, laser guidance, photoelectric reconnaissance, and so on. The optical axis parallelism among multiple detection channels directly determines the precision of the integrated photoelectric equipment, and the target can be effectively located and tracked as long as each optical axis is parallel to each other. Nowadays, the common optical axis parallelism test methods include projection target plate method, laser collimator method, five prism method, large-diameter collimator method, and so on. However, the current methods cannot meet the actual testing needs of multi-spectral, multi-axis, high-precise and large axis space, and thus a parallelism testing scheme is put forward by adopting the designing thought of reflective type and optical axis translation. The proposed multi-spectral and multi-axis parallelism testing scheme is composed of off-axis parabolic reflective collimator, turntable target board, optical-axis translation device and lighting source. Since the transmission structure is different to be used to design the multi-spectral optical system and the problem of center occlusion exists in the coaxial reflective type, the off-axis parabolic reflective collimator is adopted to satisfy the multi-spectral parallelism tests, and the effective aperture and focal length of the designed collimator are 100 mm and 300 mm, respectively. The transmission hole structure is adopted in the design of the frame-type reticle and the cross reticle which can be used in infrared and visible light path, and the sensitive paper is selected to record the optical axis of laser channel. The optical-axis translation device is designed with two pairs of rhombic reflectors which can obtain higher translation precision, and this structure can also meet the test need of large axis space. Then, the axis parallelism tests are carried out aiming at several typical equipment including two visible binoculars, one binocular night vision viewer and one binocular infrared thermal imager. The validity of proposed scheme is proved through testing the above equipment status. Besides, the error analysis of parallelism test is carried out in detail from four aspects, including the collimator collimation error, optical-axis translation error, reticle error and laser axis error. The results show that the parallelism testing error is less than 0.134 mrad, and the axis space can reach 0.5 m, which can satisfy parallelism testing needs of most photoelectric equipment. At last, the performance comparison among the proposed scheme and other schemes is made from five aspects which are spectral region, testing precision, detectable distance, test environment and main shortcomings.

Citation: Huang F Y, Li G, Shi Y S, *et al.* Design and error analysis of multi-spectral and multi-axis parallelism testing scheme[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, **46**(2): 180219

Supported by National Natural Science Foundation of China (61801507) and Military Research Projects (012016012600B12506)

* E-mail: hfyoptics@163.com