

双目光轴平行性检校仪检测精度分析

应家驹, 陈玉丹, 武东生, 刘 杰

(陆军工程大学石家庄校区光学工程教研室, 河北 石家庄 050003)

摘 要:光电仪器的双目光轴平行度是仪器的重要指标,为实现双目光轴平行度的全天候定量测量,设计了双目光电仪器光轴平行性数字化检校仪。为满足仪器检测精度性能参数需求,根据检测原理,结合系统组成部件,分析影响系统检测精度的各种因素,建立检测精度综合不确定度分析模型。通过分析单一因素对系统综合测量不确定度的影响权重,针对重点误差因素,提出控制方法及措施。对所有影响因素进行合理的误差分配,优化双目光轴平行性检测仪的测量精度。

关键词:双目光轴;平行度;综合不确定度;误差分配

中图分类号:TH74 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2018.06.015

Precision analysis of the binocular optical axis parallelism calibration instrument

YING Jia-ju, CHEN Yu-dan, WU Dong-sheng, LIU Jie

(Army Engineering University Shijiazhuang Campus, Department of Optical Engineering, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: The binocular optical axis parallelism of photoelectric instrument is an important indicator. In order to achieve the all-weather quantitative measurement of the binocular optical axis parallelism, the optical axis parallelism digital calibration instrument for binocular photoelectric instrument was designed. To meet the precision demand of the instrument performance parameters, according to the measurement principle, combined with the system components, various factors that affect the measurement precision were analyzed. And a measurement precision comprehensive uncertainty model was established. By analyzing the influence weight of single factor on the comprehensive uncertainty, the methods and measures were put forward to control key error factors. A reasonable error distribution was carried out to optimize the measurement precision of the parallelism calibration instrument.

Key words: binocular optical axis; parallelism; comprehensive uncertainty; error distribution

1 引 言

微光夜视仪、红外热成像等双目光电仪器已经在夜间狩猎、夜间户外运动以及工业测温等领域广泛使用。由于工作在户外,在运输和使用过程中难免会造成光学系统之间的光轴平行度的降低。当双目光轴不平行度超出一定范围时,长期使用将引起

使用者产生头晕、恶心等症状,双目光轴平行性已经成为影响使用者观察舒适度的重要因素。军用标准规定双目仪器的光轴平行度中水平发散度、会聚度和垂直发散度必须控制在一定的标准范围内^[1-3]。双管光轴仪是检测双轴平行度的通常仪器,其优点是操作简单,可以根据分划板上的公差带定性判断

双轴平行性是否符合要求。缺点是需配合无穷远的合作目标,不可全天候工作,不能够定量测量光轴不平行偏差值^[4-5]。为克服双管光轴仪的缺点,研制双目光电仪器光轴平行性数字化检校仪,实现数字化定量测量光轴的不平行度,并可以根据被测仪器型号给出光轴调整方法及调整量。

做好和完善误差分析、误差分配和误差综合,成为研制更高性能的测量设备总体设计中的一个重要环节,贯穿于可行性论证、方案论证、方案设计、设计、制造、装调、直到试验整个研制过程^[6]。本文结合平行性检测原理,通过分析影响检测精度的各个因素,合理地误差分配,控制重点误差因素,确保检测精度达到指标要求。

2 检校仪工作原理

检测仪工作原理如图1所示。离轴反射式平行光管中,圆形目标分划板置于平行光管抛物面反射镜的焦点处,光源照亮分划板,经抛物面反射镜反射,出射平行光^[7]。平行光从被检测的光电仪器物镜入射,被检测仪器调焦到无穷远,圆形目标分划清晰成像,经过分光或分屏的方式送至左右目镜。将左右两个目镜视度调整为0,从目镜出射平行光。检测仪的CMOS成像模块安装于高精度平移导轨上,先将CMOS成像模块的物镜对准左目镜,圆形目标分划图像清晰成像于CMOS成像模块上,经图像采集,在计算机中进行图像处理,对圆形目标图像进行中心定位,实现左目镜光轴测量。再通过导轨平移CMOS成像模块,对准右目镜,实现右目镜的光轴测量。对前后测量左右目镜圆形目标分划图像中心的坐标进行作差,通过公式(1)计算出左右目镜光轴的不平行度。检测仪器采用高精度平移导轨,依次测量左右光轴的方法实现光轴平行度检测,避免了区分左右光轴的问题。

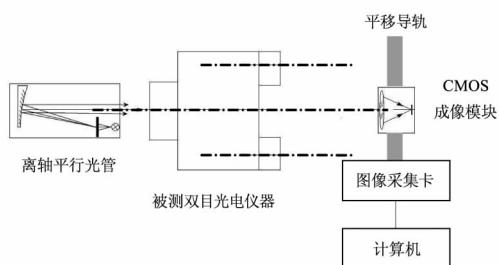


图1 双目光轴平行性检测原理

Fig.1 The principle of parallelism measurement of binocular optical axis

双目光轴平行度计算公式:

$$\begin{cases} \theta_x = \frac{(x_L - x_R) \cdot d}{f_w} = \frac{x \cdot d}{f_w} \\ \theta_y = \frac{(y_L - y_R) \cdot d}{f_w} = \frac{y \cdot d}{f_w} \end{cases} \quad (1)$$

式中, θ_x 为光轴水平平行度; θ_y 为光轴垂直平行度; d 为单像元尺寸; f_w 为 CMOS 成像模块物镜焦距; x_L 为左目镜光轴水平像素坐标; x_R 为右目镜光轴水平像素坐标; x 为左右目镜光轴水平像素坐标差; y_L 为左目镜光轴垂直像素坐标; y_R 为右目镜光轴垂直像素坐标; y 为左右目镜光轴垂直像素坐标差。

3 误差因素分析

不确定度是用来描述测量结果分散性的物理量,它通过被测量的标准差予以量化。不确定度定义了一个置信区间,测量真值以一定的置信概率落在该区间中^[8-9]。对被测仪器左右目镜光轴测量进行不确定度评估,可以定量地评价光轴测量精度。检校仪光轴测量的合成标准不确定度 $\delta\theta_x$ 、 $\delta\theta_y$ 可以由变量的标准不确定度合成得到。根据光轴平行度测量公式(1),得到测量合成不确定度,如公式(2):

$$\begin{cases} \delta\theta_x^2 = \left(\frac{\partial\theta_x}{\partial d}\right)^2 \cdot \delta d^2 + \left(\frac{\partial\theta_x}{\partial f_w}\right)^2 \cdot \delta f_w^2 + \left(\frac{\partial\theta_x}{\partial x}\right)^2 \cdot \delta x^2 \\ \delta\theta_y^2 = \left(\frac{\partial\theta_y}{\partial d}\right)^2 \cdot \delta d^2 + \left(\frac{\partial\theta_y}{\partial f_w}\right)^2 \cdot \delta f_w^2 + \left(\frac{\partial\theta_y}{\partial y}\right)^2 \cdot \delta y^2 \end{cases} \quad (2)$$

偏导数为灵敏度系数,表示变量变化单位量时,引起的合成不确定度的变化值。整理得合成不确定度,如公式(3):

$$\begin{cases} \delta\theta_x^2 = \left(\frac{x}{f_w}\right)^2 \cdot \delta d^2 + \left(-\frac{xd}{f_w^2}\right)^2 \cdot \delta f_w^2 + \left(\frac{d}{f_w}\right)^2 \cdot \delta x^2 \\ \delta\theta_y^2 = \left(\frac{y}{f_w}\right)^2 \cdot \delta d^2 + \left(-\frac{yd}{f_w^2}\right)^2 \cdot \delta f_w^2 + \left(\frac{d}{f_w}\right)^2 \cdot \delta y^2 \end{cases} \quad (3)$$

式中, δd 为 CMOS 成像模块单像元尺寸加工不确定度,由生产工艺加工精度决定; δf_w 为检测系统成像物镜焦距不确定度,受物镜加工焦距误差和调焦误差的影响。物镜加工焦距误差 δf_{w1} , 由物镜加工装配过程决定;调焦误差 δf_{w2} , CMOS 成像模块感光面与物镜焦平面不重合误差。

合成焦距不确定度为:

$$\delta f_w^2 = \delta f_{w1}^2 + \delta f_{w2}^2 \quad (4)$$

圆形目标分划中心定位水平、垂直的像素坐标不确定度 δx 、 δy 。影响因素主要可以归为以下3类:1)圆形目标分划图像中心定位计算误差引入的不确定度 δx_1 、 δy_1 ;2)成像模块在导轨上平移产生角度误差引入的不确定度 δx_2 、 δy_2 ;3)测量时被测仪器目镜视度归零误差及对准误差引入的不确定度 δx_3 、 δy_3 。合成圆形目标分划中心定位不确定度为:

$$\begin{cases} \delta x^2 = \delta x_1^2 + \delta x_2^2 + \delta x_3^2 \\ \delta y^2 = \delta y_1^2 + \delta y_2^2 + \delta y_3^2 \end{cases} \quad (5)$$

1)圆形目标分划图像中心定位计算误差引入的不确定度 δx_1 、 δy_1

CMOS 成像模块对圆形目标分划成像,经图像采集,然后计算分划中心,误差存在于成像物镜畸变、中心定位算法、噪声等因素^[10]:

①成像物镜畸变

镜头设计及安装的不完善,引起成像畸变,用公式(6)表示:

$$\begin{cases} x' = x + \delta x_{11}(x, y) \\ y' = y + \delta y_{11}(x, y) \end{cases} \quad (6)$$

式中, x , y 是不可观测的无畸变图像坐标; x' , y' 是畸变后的相应坐标; $\delta x_{11}(x, y)$, $\delta y_{11}(x, y)$ 表示每个坐标点的位置误差量。

②圆形中心定位算法对圆形目标分划图像中心定位的误差 δx_{12} , δy_{12} ;

③图像成像、采集过程中的随机噪声参与中心定位计算,引入误差 δx_{13} , δy_{13} ;

④在检测过程中,需要人为调整被测仪器焦距,使圆形目标分划图像在 CMOS 成像模块上清晰成像。圆形目标的成像清晰度影响后续图像处理定位误差 δx_{14} , δy_{14} 。

综合以上4小点,得出合成圆形分划中心定位计算不确定度 δx_1 , δy_1 , 如公式(7):

$$\begin{cases} \delta x_1^2 = \delta x_{11}^2 + \delta x_{12}^2 + \delta x_{13}^2 + \delta x_{14}^2 \\ \delta y_1^2 = \delta y_{11}^2 + \delta y_{12}^2 + \delta y_{13}^2 + \delta y_{14}^2 \end{cases} \quad (7)$$

2)成像模块在导轨上平移产生角度误差引入的不确定度 δx_2 、 δy_2 。

COMS 成像模块先对准左目镜测量左目镜光轴,再通过精密导轨平移,对准右目镜测量右目镜光

轴。COMS 成像模块在导轨上平移产生成像模块的位置跳动及角度偏摆,包含以下6种:水平跳动、垂直跳动、前后跳动、水平偏摆、俯仰偏摆、水平滚转。水平、俯仰偏摆及水平滚转直接影响角度测量,这些角度误差引起成像系统光斑中心定位不确定度 δx_2 , δy_2 :

①偏摆:成像模块在导轨上移动产生水平偏摆角度 $\delta\theta_{gx}$, 俯仰偏摆角度 $\delta\theta_{gy}$, 引入水平分划中心定位误差 δx_{21} 、 δy_{21} , 如公式(8):

$$\begin{cases} \delta x_{21} = \frac{f_w \cdot \delta\theta_{gx}}{d} \\ \delta y_{21} = \frac{f_w \cdot \delta\theta_{gy}}{d} \end{cases} \quad (8)$$

②水平滚转:成像模块在导轨上移动产生绕光轴方向滚转角度 $\delta\theta_{gz}$ 。当圆形目标分划成像不在视场中心(0,0)时,则会造成分划中心的位移。位移量 δx_{22} , δy_{22} , 与圆形目标分划中心位置坐标 (x, y) 有关,如图2所示。

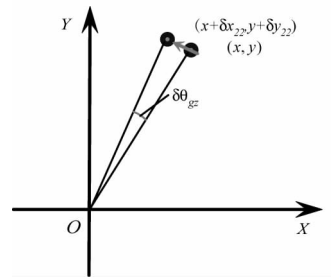


图2 成像模块绕光轴方向滚转引起坐标位移

Fig. 2 The coordinate displacement caused by imaging module rolls around the optical axis

滚转角度 $\delta\theta_{gz}$ 非常小,引起的位移近似为公式(9):

$$\begin{cases} \delta x_{22} = \delta\theta_{gz} \cdot y \\ \delta y_{22} = \delta\theta_{gz} \cdot x \end{cases} \quad (9)$$

综合以上2小点,由导轨平移引入的综合不确定度 δx_2 , δy_2 , 如公式(10):

$$\begin{cases} \delta x_2^2 = \delta x_{21}^2 + \delta x_{22}^2 = \left(\frac{f_w \cdot \delta\theta_{gx}}{d}\right)^2 + (\delta\theta_{gz} \cdot y)^2 \\ \delta y_2^2 = \delta y_{21}^2 + \delta y_{22}^2 = \left(\frac{f_w \cdot \delta\theta_{gy}}{d}\right)^2 + (\delta\theta_{gz} \cdot x)^2 \end{cases} \quad (10)$$

3)目镜视度归零误差及对准误差引入的不确定度 δx_3 、 δy_3

当被测仪器目镜视度为 0 时,目镜出射平行光,圆形目标分划像处于无穷远处,被测目镜与 CMOS 成像物镜的对准误差,不影响圆形目标分划的成像位置。当被测目镜视度不等于 0 时,目镜出射汇聚或发散光束,分划目标像不在无穷远处,被测目镜与 CMOS 成像物镜的对准误差会造成圆形目标分划的成像位置误差。如图 3 所示,被测目镜视度不为 0,而是 δSD ,分划图像不在目镜焦平面,而是位于 A 位置,通过目镜成像于 A' 位置。当 COMS 成像物镜与目镜光轴存在对准误差 δh 时,则分划像 A' 像高为 δh ,通过 COMS 成像物镜成像于 A'' 像高为 $\delta h'$ 。

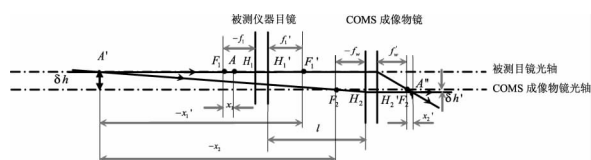


图3 目镜视度和测量对准误差原理图

Fig. 3 Principle diagram of eyepiece diopter error and measurement alignment error

目镜视度归零误差为 δSD 时,对准误差产生的像移用公式(11)计算:

$$\begin{cases} x_1 = -\frac{f_1'^2 \cdot \delta SD}{1000} \\ x_1 \cdot x_1' = f_1 \cdot f_1' \\ -x_2 = (-x_1') + [l - (-f_w) - f_1'] \\ \beta = -\frac{f_w}{x_2} \\ \delta h' = \beta \cdot \delta h \end{cases} \quad (11)$$

式中, δSD 为目镜的视度归零误差; f_1' 为目镜像方焦距; x_1 为目镜物方焦点 F_1 到圆形目标分划像 A 的距离; f_1 为目镜物方焦距; x_1' 为目镜像方焦点 F_1' 到圆形目标分划像经过目镜二次成像 A' 距离; l 为目镜像方主平面 H_1 到 CMOS 成像物镜物方主平面 H_2 的距离; f_w 为 CMOS 成像物镜物方焦距; x_2 为 CMOS 成像物镜物方焦点 F_2 到 A' 距离, β 为 A' 经过 CMOS 物镜再次成像 A'' 的垂轴放大率; δh 为 COMS 成像物镜光轴与目镜光轴对准误差; $\delta h'$ 为光轴对准误差产生的像移。

化简公式(11),得:

$$\delta h' = -\frac{f_w \cdot \delta h}{f_1' + 1000/\delta SD - l - f_w} \quad (12)$$

假设在测量时, COMS 成像物镜与目镜光轴不重合,存在误差 δh_x 、 δh_y ,则产生定位像素误差为 δx_3 、 δy_3 ,如公式(13):

$$\begin{cases} \delta x_3 = \frac{\delta h'_x}{d} = -\frac{f_w \cdot \delta h_x}{(f_1' + 1000/\delta SD - l - f_w) \cdot d} \\ \delta y_3 = \frac{\delta h'_y}{d} = -\frac{f_w \cdot \delta h_y}{(f_1' + 1000/\delta SD - l - f_w) \cdot d} \end{cases} \quad (13)$$

军用标准规定视度零位误差 δSD 允许的范围为 $\pm 0.25SD^{[10]}$, f_1' 、 l 和 f_w 的数值大小相对于 $1000/\delta SD$ 可以忽略,公式(13)可化简为:

$$\begin{cases} \delta x_3 = -\frac{f_w \cdot \delta h_x \cdot \delta SD}{1000d} \\ \delta y_3 = -\frac{f_w \cdot \delta h_y \cdot \delta SD}{1000d} \end{cases} \quad (14)$$

综合公式(3)、(4)、(5)、(7)、(10)、(14),得光轴角度测量综合不确定度为公式(15):

$$\begin{cases} \delta \theta_x^2 = \left(\frac{x}{f_w}\right)^2 \delta d^2 + \left(-\frac{xd}{f_w^2}\right)^2 (\delta f_{w1}^2 + \delta f_{w2}^2) + \left(\frac{d}{f_w}\right)^2 [\delta x_{11}^2 + \delta x_{12}^2 + \delta x_{13}^2 + \delta x_{14}^2 + \left(\frac{f_w \cdot \delta \theta_{gx}}{d}\right)^2 + (\delta \theta_{gz} \cdot y)^2 + \left(-\frac{f_w \cdot \delta h_x \cdot \delta SD}{100d}\right)^2] \\ \delta \theta_y^2 = \left(\frac{y}{f_w}\right)^2 \delta d^2 + \left(-\frac{yd}{f_w^2}\right)^2 (\delta f_{w1}^2 + \delta f_{w2}^2) + \left(\frac{d}{f_w}\right)^2 [\delta y_{11}^2 + \delta y_{12}^2 + \delta y_{13}^2 + \delta y_{14}^2 + \left(\frac{f_w \cdot \delta \theta_{gy}}{d}\right)^2 + (\delta \theta_{gz} \cdot y)^2 + \left(-\frac{f_w \cdot \delta h_y \cdot \delta SD}{100d}\right)^2] \end{cases} \quad (15)$$

4 影响权重分析及误差分配

保证平行度测量精度的关键是合理的误差分配,误差分配的重要依据是分析单项误差因素对综合不确定度的影响。依据综合不确定度公式(15),结合样机系统部件参数,计算分析单项误差因素对综合不确定度的影响。

样机系统选择部件的参数: CMOS 成像物镜焦距 f_w 为 50 mm, CMOS 成像器件分辨率 1024×576 , 单单元尺寸 d 为 $6.5 \mu\text{m}$ 。设定圆形分划中心坐标为军用标准要求的水平发散平行度 60 对应的像素坐标 134,代入公式(15),分别计算单项误差因素变化对综合不确定度的影响。计算结果如图 4 所示。

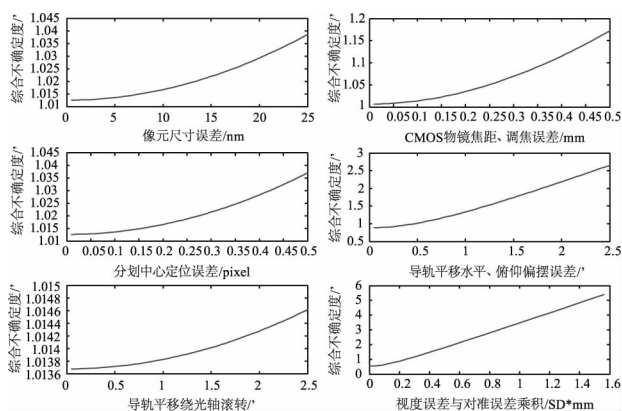


图 4 单一误差因素变化对综合不确定度的影响

Fig. 4 Influence of single factor on the comprehensive uncertainty

由图 4 对单一误差因素变化对综合不确定度的影响分析可知,对综合不确定度有重度影响的因素为导轨平移 x 轴、 y 轴偏摆误差,被测仪器目镜视度归零误差与对准误差乘积;对综合不确定度有中度影响的因素为 CMOS 物镜焦距及调焦误差;对综合不确定度有轻度影响的因素有像元尺寸误差,分划中心定位误差,导轨平移绕 z 轴滚转误差。

对于综合不确定度的控制重点采取以下措施:

(1) 严格控制水平和俯仰偏摆的角度,选择高精度平移导轨;

(2) 控制测目镜视度误差与对准误差乘积,采取以下措施:在检测前,先使用视度镜将被测仪器的左右目镜的视度调整到 0,减小目镜视度零位偏差;设置对准刻线,提高 CMOS 成像物镜与被测目镜对准精度。

结合以上分析在系统样机研制设计、器件选择、生产加工及调校过程中,进行合理的误差分配,如表 1 所示,可以保证综合不确定度控制在 $1'$ 以内。

表 1 双目光轴平行性检校仪误差分配

Tab. 1 Error distribution of optical axis parallelism digital calibration instrument

序号	影响因素	误差分配	对综合不确定度贡献/ $'$
1	单像元尺寸加工误差 δd	5nm	0.0462
2	CMOS 成像物镜加工焦距误差 δf_{w1}	0.2mm	0.2400
3	CMOS 成像物镜调焦误差 δf_{w2}	0.2mm	0.2400
4	成像物镜畸变 δx_{11} 、 δy_{11}	0.2 pixel	0.0894
5	圆形中心定位算法误差 δx_{12} 、 δy_{12}	0.2 pixel	0.0894
6	随机噪声引入定位 δx_{13} 、 δy_{13}	0.2 pixel	0.0894
7	被测仪器调焦误差造成图像模糊 δx_{14} 、 δy_{14}	0.2 pixel	0.0894

(续表)

序号	影响因素	误差分配	对综合不确定度贡献/ $'$
8	导轨平移产生偏摆:水平偏摆 $\delta\theta_{gx}$,俯仰偏摆 $\delta\theta_{gy}$	30"	0.5000
9	导轨平移产生绕光轴滚转 $\delta\theta_{gz}$	30"	0.0087
10	目镜视度归零误差和对准误差乘积:水平方向 $\delta SD \cdot \delta h_x$,垂直方向 $\delta SD \cdot \delta h_y$	$0.25SD \times 0.9mm$	0.7735
	综合不确定度		0.9988

5 结 论

双目光电器光轴平行性检测精度分析方法结合双目光轴平行性检测原理,分析误差因素,建立综合不确定度模型,并对单项误差因素的影响权重进行分析。按照综合不确定度指标要求,结合各部件性能参数,进行合理误差分配,并采取重点控制措施优化系统检测精度。通过对系统检测不确定度的综合分析,为后续标定提供理论参考依据,对综合不确定度有重度影响的误差因素,应作为后续标定的重点。

参考文献:

- [1] SHI Tinghou, REN Ximing, ZHANG Lianshun, et al. General specification for military optical instruments (GJB369A-98) [S]. Commission of Science, Technology and Industry for National Defense, 1998. (in Chinese)
施亭侯, 任曦明, 张连顺, 等. 军用光学仪器通用规范 (GJB369A-98) [S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 1998.
- [2] LI Jingsheng, CHEN Wei, LIU Weina, et al. General specification for low light Vision goggles (GJB5477-2005) [S]. Commission of Science, Technology and Industry for National Defense, 2006. (in Chinese)
李景生, 陈伟, 刘维娜, 等. 微光夜视眼镜通用规范 (GJB5477-2005) [S]. 国防科学技术工业委员会, 2006.
- [3] HUANG Xin, SHEN Xiangheng, YE Lu, et al. Development of testing instrument of optical-axial parallelism for multi-axial systems [J]. Journal of Applied Optics, 2015, 36(1): 19-23. (in Chinese)
黄欣, 沈湘衡, 叶露, 等. 多光轴光学系统光轴间平行性检测仪的研制 [J]. 应用光学, 2015, 36(1): 19-23.
- [4] MEI Jianhua, LI Xinzhang, GUO Huqin, et al. General specification for optical observation instruments (GJB1323-91) [S]. Commission of Science, Technology and Industry for National Defense, 1992. (in Chinese)

- 梅建华,黎新章,郭虎秦,等. 光学观测仪器通用规范(GJB1323-91)[S]. 国防科学技术工业委员会,1992.
- [5] JIN Xuyang,GAO Yunguo,YU Ping, et al. Research on the all-sky detection method of the laser beam optical-axis parallelism[J]. Laser & Infrared,2015,45(2):176-180. (in Chinese)
- 金旭阳,高云国,于萍,等. 全天域激光发射光轴平行度检测方法研究[J]. 激光与红外,2015,45(2):176-180.
- [6] WANG Jiaqi,JIN Guang,YAN Changxiang. Orientation error analysis of airborne opto-electric tracking and measuring device[J]. Optics and Precision Engineering,2005,13(2):106-116. (in Chinese)
- 王家骐,金光,颜昌翔. 机载光电跟踪测量设备的目标定位误差分析[J]. 光学精密工程,2005,13(2):106-116.
- [7] YAN Zongqun,YANG Jianchang,XIE Zhihong, 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. (in Chinese)
- 闫宗群,杨建昌,谢志宏. 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.
- [8] JIN Zhangjun,LI Jiangxiong,YU Cijun, et al. Registration error analysis and evaluation in large-volume metrology system[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science,2015,49(4):655-661. (in Chinese)
- 金涨军,李江雄,俞慈君,等. 大尺寸空间测量中转站误差分析与估计[J]. 浙江大学学报:工学版,2015,49(4):655-661.
- [9] LIU Xiaowei. The technology of the digitalized detecting for optic-axis[D]. Nanjing:Nanjing University of Science and Technology,2007. (in Chinese)
- 刘晓伟. 光轴误差的数字化检测技术研究[D]. 南京:南京理工大学,2007.
- [10] ZHANG Pengwei,JIANG Xiaoyu,LÜ Jianguo, et al. 3D reconstruction algorithm based on Euclidean distance for binocular vision[J]. Laser & Infrared,2013,43(10):1166-1170. (in Chinese)
- 张鹏伟,蒋晓瑜,吕家国,等. 一种基于欧氏距离的双目视觉三维重建算法[J]. 激光与红外,2013,43(10):1166-1170.