

光电经纬仪姿态测量精度分析及室内评价方法

赵怀学¹, 田留德^{1,2}, 赵建科¹, 薛勋¹, 潘亮¹, 王涛¹

¹中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为了实现光电经纬仪姿态测量精度的室内测试和评价,介绍了光电经纬仪姿态测量方法,依据蒙特卡罗方法对测量站的姿态测量误差源进行了分析,得出姿态测量精度的主要影响因素,进而提出了一种室内姿态测量精度检测方法。基于外场理论弹道、目标姿态以及测量站站址,通过逆姿态测量理论计算得到姿态测量原始数据,再将姿态测量原始数据输入姿态测量设备,通过比较理论目标姿态和姿态测量设备给出的目标姿态,得到姿态测量设备的姿态测量精度。依据该方法,对某型号姿态测量设备进行了姿态测量精度检测。通过实验可得到该姿态测量设备的姿态测量精度,即航向角测量误差不大于 1.9° ,俯仰角测量误差不大于 0.4° 。

关键词 测量; 姿态测量精度; 光电经纬仪; 蒙特卡罗; 坐标变换

中图分类号 V19

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0112004

Analysis of Attitude Measurement Accuracy and Indoor Evaluation Method of Photoelectric Theodolite

Zhao Huaixue¹, Tian Liude^{1,2}, Zhao Jianke¹, Xue Xun¹, Pan Liang¹, Wang Tao¹

¹*Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China;*

²*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

Abstract In order to realize indoor test and evaluation of attitude measurement accuracy of photoelectric theodolite, an attitude measurement method of photoelectric theodolite is developed. Based on Monte Carlo method, the error sources are analyzed. Main influencing factors on attitude measurement accuracy are obtained, and a detection method for indoor attitude measurement accuracy is proposed. Based on outfield theoretical trajectory, target attitude and measuring station coordinates, the original data of attitude measurement is obtained by inverse attitude measurement theory. The original data is input into the photoelectric theodolite to obtain the test target attitude. The theoretical target attitude and the test target attitude are compared, and the attitude measurement accuracy of the attitude measurement equipment is obtained. According to this method, the attitude measurement accuracy of a certain type of attitude measurement equipment is tested. Attitude measurement accuracy of the attitude measurement equipment can be obtained by experiments. The heading angle measurement error is not larger than 1.9° , pitch angle measurement error is not larger than 0.4° .

Key words measurement; attitude measurement accuracy; photoelectric theodolite; Monte Carlo; coordinate transform

OCIS codes 120.6085; 120.1088

1 引 言

动态目标跟踪测量是国内外测试技术领域重点研究的前沿方向,主要应用于军事、航天、交通等领域。光电经纬仪作为靶场的主要光测设备,广泛用于火箭、导弹和航空炸弹等飞行目标的外弹道轨迹

参数测量及实况记录,并逐步兼顾目标姿态参数测量^[1-3]。

空间运动目标的姿态测量包括了目标整个运动过程,例如导弹发射时的起飞姿态、出水姿态、空中飞行的漂移、机动时的姿态以及击中目标时的姿态等,姿态是反映目标飞行状态的重要运动参数,获得

收稿日期: 2017-07-25; 收到修改稿日期: 2017-09-03

基金项目: 神光Ⅲ大科学工程(091212B0A)

作者简介: 赵怀学(1987—),男,硕士研究生,工程师,主要从事光学、靶场测量方面的研究。E-mail: zhaohuaixue@opt.ac.cn

这些参数对武器性能的实验鉴定、事故分析、工业设计等有着重要的应用价值^[4-5]。

传统的姿态测量方法采用陀螺遥测,陀螺装置不能重复使用,成本较高。近 10 年,随着靶场光学测量技术的快速发展,国内很多学者针对光电经纬仪影像的目标姿态测量方法进行了研究。文献[1]基于面面交会原理提出一种空间轴对称目标的俯仰角和偏航角的测试方法^[6]。文献[2]通过对测量站获得的图像进行目标图像分割,计算其惯量椭圆,并根据该惯量椭圆推算出目标的空间姿态角^[7]。文献[3]提出了用光电经纬仪单站空间余弦姿态测量方法及多站面面交汇测量方法来获得飞机姿态参数^[8]。目前国内目标姿态的研究更多关注于外场目标姿态的获取,且关于光电经纬仪目标姿态测量精度的检测也只能通过外场无人机模拟,成本较高,易受大气能见度、天气等因素的影响。

本文通过对光电经纬仪姿态测量方法的研究,依据简化的传统弹道方程及目标姿态模型,模拟目标飞行过程,得到测量站目标姿态测量数据。依据蒙特卡罗方法对测量站姿态测量数据进行误差分析,得出姿态测量精度的主要影响因素,进而指导室内光电经纬仪姿态测量精度检测。基于对姿态测量精度的影响因素分析,提出了一种室内姿态测量精度检测方法,该方法可用于光电经纬仪姿态测量精度的室内评价。

2 姿态测量原理

空间运动目标的姿态主要包括偏航角、俯仰角和滚动角。导弹航天靶场的目标为轴对称目标,多为火箭弹和导弹等,因此外场更加关注目标偏航角和俯仰角的变化,获得这些参数对分析目标的运动状态以及气动参数辨识等有着重要意义^[5]。

2.1 测量坐标系下目标中轴线平面方程

如图 1 所示,在摄影坐标系下,根据法线式直线方程^[9]可得目标 M 的坐标 (x_M, y_M, z_M) 满足

$$y_M \sin \theta + x_M \cos \theta - z_M P / f = 0, \quad (1)$$

式中 θ 为法线倾斜角, P 为法线截距, f 为光学系统焦距。

如图 2 所示,将目标摄影坐标系 $o-xyz$ 下直线方程转化至测量站坐标系 $o-x_M y_M z_M$ 下,测量坐标系绕 y 轴(垂直轴)转动角度 A_0 , 然后绕 x 轴(视轴)转动 E_0 ^[1], 图中 M_M 为点 M 在像平面的投影点, P_M 为虚拟像平面, z_M' 为旋转后的视准轴。由右手定则可得摄影坐标系与测量坐标系的转换关系为

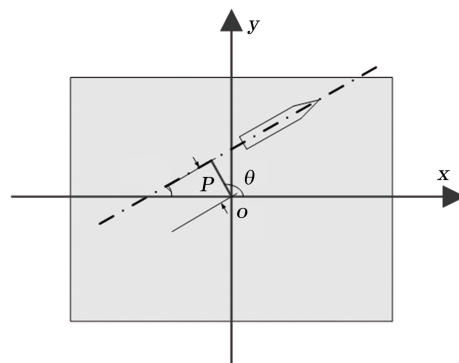


图 1 摄影坐标系下目标模型

Fig. 1 Target model in photography coordinate system

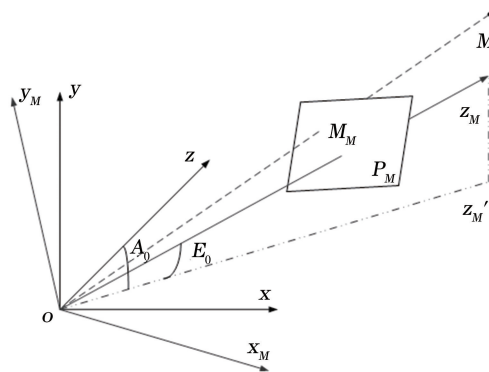


图 2 摄影坐标系与测量坐标系转换模型

Fig. 2 Conversion model of photographic coordinate system and measurement coordinate system

$$\begin{bmatrix} x_M \\ y_M \\ z_M \end{bmatrix} = k \mathbf{R}_x(E_0) \mathbf{R}_y(-A_0) \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 k 为比例系数, $\mathbf{R}_x(E_0)$ 代表测量坐标系统绕 x 轴旋转 E_0 的旋转矩阵, $\mathbf{R}_y(-A_0)$ 代表测量坐标系统绕 y 轴旋转 $-A_0$ 的旋转矩阵。展开并化简可得

$$\begin{bmatrix} x_M \\ y_M \\ z_M \end{bmatrix} = k \begin{bmatrix} \cos A_0 & 0 & -\sin A_0 \\ \sin E_0 \sin A_0 & \cos E_0 & \sin E_0 \cos A_0 \\ \cos E_0 \sin A_0 & -\sin E_0 & \cos E_0 \cos A_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}. \quad (3)$$

假设测量坐标系下目标所在平面为 $ax + by + cz = 0$, a, b, c 为系数。将(3)式代入(1)式,可得

$$\begin{cases} a = \cos A_0 \cos \theta - \sin E_0 \sin A_0 \sin \theta - \cos E_0 \sin A_0 P / f \\ b = \cos E_0 \sin \theta - \sin E_0 P / f \\ c = -\sin A_0 \cos \theta - \sin E_0 \cos A_0 \sin \theta - \cos E_0 \sin A_0 P / f \end{cases}. \quad (4)$$

2.2 面面交会姿态测量原理

由第 2.1 节可知,通过对摄影坐标系下目标特征的提取可以获得测量坐标系下的目标平面方程。如图 3 所示,两个测量站坐标系分别为 $o-xyz$ 和 $o'-x'y'z'$ 。在 $o-xyz$ 坐标系下,空间平面 oAB 和 $o'AB$ 分别可表示为

$$\begin{cases} a_1x + b_1y + c_1z = 0 \\ a_2(x - x_1) + b_2(y - y_1) + c_2(z - z_1) = 0 \end{cases}, \quad (5)$$

式中 $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2$ 为系数。空间直线 AB 的方向矢量为

$$s = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} b_1 & c_1 \\ b_2 & c_2 \end{vmatrix} \mathbf{i} - \begin{vmatrix} a_1 & c_1 \\ a_2 & c_2 \end{vmatrix} \mathbf{k} + \begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{vmatrix} \mathbf{j}. \quad (6)$$

令 $m = \begin{vmatrix} b_1 & c_1 \\ b_2 & c_2 \end{vmatrix}$, $n = -\begin{vmatrix} a_1 & c_1 \\ a_2 & c_2 \end{vmatrix}$, $l = \begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{vmatrix}$, 则目标的姿态可表示为航向角 $\varphi = a \tan l/m$, 俯仰角 $\gamma = a \tan n/\sqrt{m^2 + l^2}$ 。

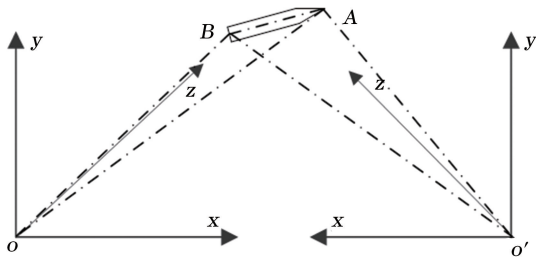


图 3 姿态测量原理

Fig. 3 Attitude measurement principle

3 蒙特卡罗法姿态测量精度分析

3.1 目标姿态测量误差分析

目标的姿态角误差主要受光电经纬仪轴系误差、编码器测角误差、判读误差、焦距误差、光学系统畸变、大气折射、地球曲率、两站同步误差、站址坐标以及大气抖动等因素的影响^[10]。根据姿态测量原理的数学模型进行分类,目标的姿态角误差主要分为光电经纬仪测角误差(方位角和俯仰角)、目标法线倾角提取误差、截距 P 提取误差和光学系统焦距测量误差。

1) 光电经纬仪测角误差。测角误差是光电经纬仪最主要的技术指标,影响光电经纬仪测角精度的

因素也比较复杂,主要包括轴系晃动、轴系误差、编码器测角误差、光学系统焦距测量误差等。关于光电经纬仪测角误差的影响因素分析及室内检测方法的研究文献较多,详见文献[11-12]。本文光电经纬仪测角精度来源于某型号姿态测量设备,水平轴和垂直轴测角精度取 $10''$ 。

2) 目标法线倾角提取误差。目标法线倾角提取误差与图像成像质量、目标特征、光学系统畸变以及程序算法有关。依据外场实验经验,目标法线倾角提取误差取 0.4° 。

3) 截距 P 提取误差。截距 P 提取误差与目标法线倾角提取误差类似,且受目标法线倾角提取误差的影响。依据外场实验经验,截距 P 提取误差取 5 个像元。

4) 光学系统焦距测量误差。现阶段光学系统焦距常采用精密测角法,详见文献[13],通过对某型号姿态测量设备光学系统的焦距测试结果进行分析,得到光学系统焦距测量误差为 1%。

3.2 模拟弹道方程及姿态曲线

如图 4 所示,测量站分别位于弹道两侧,线段 oo' 的长度为 1.7×10^4 m(以下单位均为 m),弹道曲线取二次抛物线,模拟目标姿态取弹道切线方向(目标飞行初始阶段的俯仰角逐渐减小,且偏航角固定),则空间曲线的参数方程可表示为

$$\begin{cases} x = -t + 10^3 \sqrt{10} \\ y = -10^{-3}t^2 + 2\sqrt{10}t, \\ z = 8.5 \times 10^3 \end{cases} \quad (7)$$

式中 $t \in (0, 10^3 \sqrt{10})$ 。目标姿态空间向量的三个分量分别为

$$\begin{cases} m = -1 \\ n = -2 \times 10^{-3}t + 2\sqrt{10}. \\ l = 0 \end{cases} \quad (8)$$

光电经纬仪光学系统来源于某型号姿态测量设备,焦距为 3000 mm,像元尺寸为 0.01 mm,像元数为 2560×1600 。已知弹道曲线、目标姿态和站址坐标,利用姿态方程逆运算得到测量站摄影坐标系下目标法线倾角和测量站坐标系下的方位角和俯仰角,其中截距 P 取 0。

3.3 蒙特卡罗法不确定度分析

由目标姿态测量误差分析可知,影响姿态测量精度的误差源主要有光电经纬仪测角误差 ΔA 和 ΔE 、目标法线倾角提取误差 $\Delta \theta$ 、截距 P 提取误差 ΔP 和焦距测量误差 Δf 。由于各误差源对姿态测

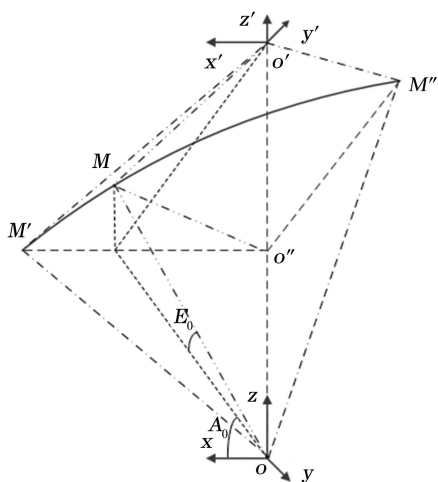


图 4 模拟弹道模型

Fig. 4 Simulated trajectory model

量具有相干性,且相干因子随弹道曲线和目标姿态的变化呈非线性变化,采用蒙特卡罗法和黑箱模型分析各误差源对目标姿态测量的影响。误差源误差模型如表 1 所示。

表 1 不确定度来源

Table 1 Uncertainty source

Order No.	Error source	Error distribution	Standard deviation
1	ΔA	Normal distribution	10''
2	ΔE	Normal distribution	10''
3	$\Delta \theta$	Normal distribution	0.4°
4	ΔP	Normal distribution	5 pixel
5	Δf	Normal distribution	30 mm

1)测角误差的影响

如图 5(a)所示,目标俯仰角测量误差随着目标投影距离的增加而增大。如图 5(b)所示,目标航向角误差随目标投影距离的增加呈非线性变化。测角误差对目标姿态测量精度影响较小,与光电经纬仪测角误差在同一量级。这主要是因为光电经纬仪测角单元的选型、轴系设计、轴系装配以及装配过程控制工艺都比较成熟。

2)目标法线倾角提取误差的影响

如图 6(a)所示,目标俯仰角测量误差随着目标

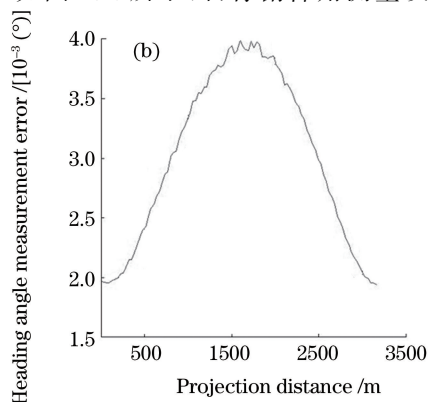
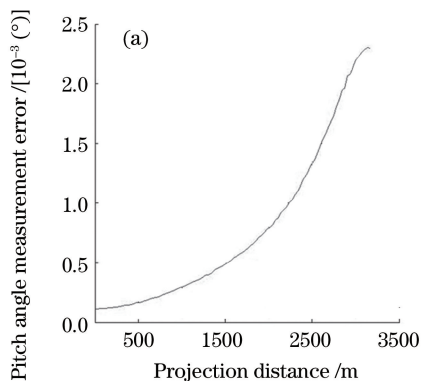


图 5 测角误差对姿态测量精度的影响。(a)俯仰角测量误差;(b)航向角测量误差

Fig. 5 Influence of angle error on attitude measurement accuracy.

(a) Pitch angle measurement error; (b) heading angle measurement error

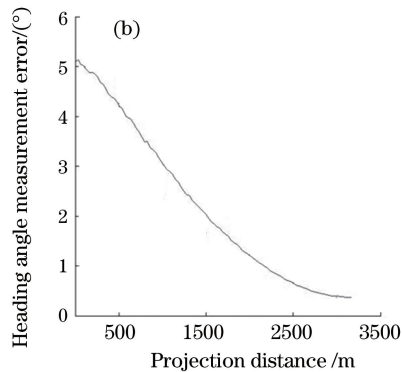
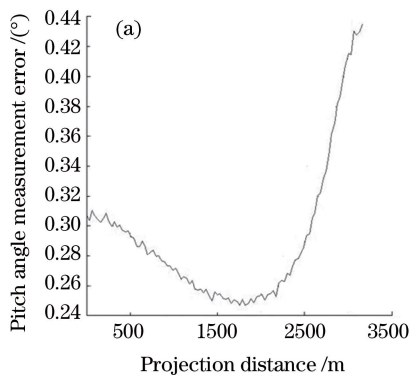


图 6 目标法线倾角提取误差对姿态测量精度的影响。(a)俯仰角测量误差;(b)航向角测量误差

Fig. 6 Influence of target normal inclination error on attitude measurement accuracy.

(a) Pitch angle measurement error; (b) heading angle measurement error

投影距离的变化呈非线性变化,与目标法线倾角提取误差在同一量级。如图 6(b)所示,目标航向角误差随目标投影距离的增加而减小。目标航向角测量误差随着经纬仪交互角的增加而逐渐减小,且受目标法线倾角提取误差和目标自身航向角的影响较大,这主要是由于目标航向角测量误差受到光学系统成像质量、外场目标特征以及目标轴线提取算法的影响。

3) 截距 P 提取误差的影响

如图 7 所示,目标俯仰角和航向角随目标投影距离的增大而呈现非线性变化。与截距 P 提取误

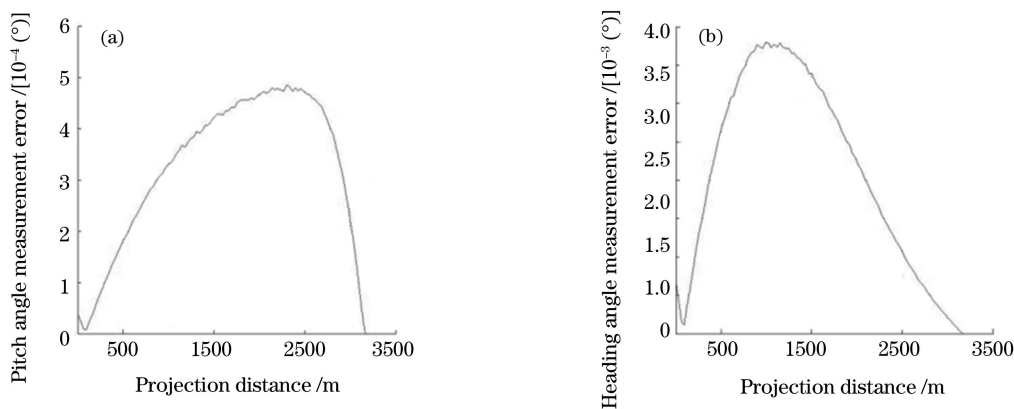


图 7 截距 P 提取误差对姿态测量精度影响曲线。(a)俯仰角测量误差;(b)航向角测量误差

Fig. 7 Influence of interception P extraction error on attitude measurement accuracy.

(a) Pitch angle measurement error; (b) heading angle measurement error

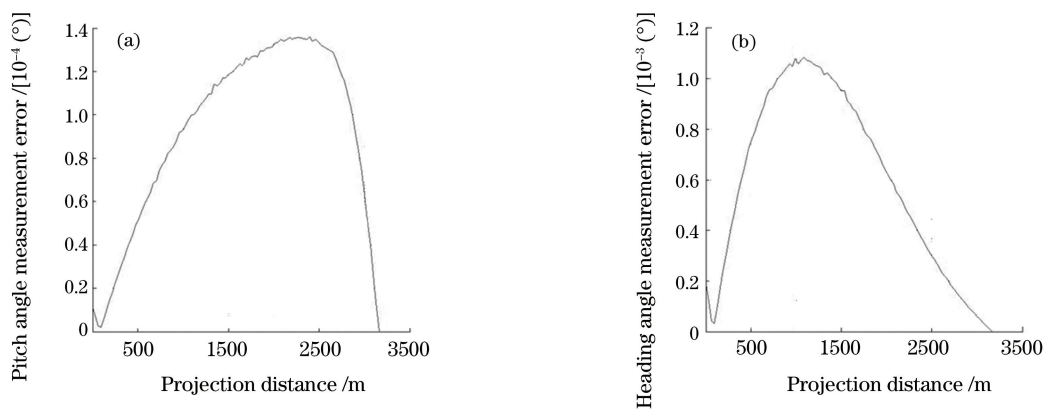


图 8 光学系统焦距测量误差对姿态测量精度影响曲线。(a)俯仰角测量误差;(b)航向角测量误差

Fig. 8 Influence of optical system focal length measurement error on attitude measurement accuracy.

(a) Pitch angle measurement error; (b) heading angle measurement error

3.4 蒙特卡罗模拟实验结果分析

由对目标姿态测量精度影响因素的分析可知,姿态测量精度不仅受自身测角精度、截距 P 提取误差和目标法线式倾角提取误差的影响,而且还受到外场大气折射、地球曲率、大气抖动、站址坐标和目标自身姿态的影响。采用蒙特卡罗法对影响姿态测量精度的室内因素进行了分析,得出以下结论:1)测

差在同一量级。截距 P 提取误差主要受光学系统成像质量、外场目标特征以及目标截距 P 提取算法的影响。由于光电经纬仪焦距较长,像元尺寸分辨率较小,截距 P 提取误差影响较小。

4) 光学系统焦距测量误差

如图 8 所示,光学系统焦距测量误差对目标姿态测量精度的影响与截距 P 提取的误差影响曲线极为类似。通过理论分析可知,光学系统焦距测量误差和截距 P 提取误差对目标姿态测量精度的影响类似。现阶段光电经纬仪跟踪误差要求在 $3'$ 以内,焦距测量误差对目标姿态测量精度的影响较小。

角精度和截距 P 提取误差对姿态测量精度的影响较小;2)目标法线倾角提取误差是影响姿态测量精度的主要因素。

4 实验结果分析

通过对姿态测量精度的室内影响因素进行分析,可得室内姿态测量精度的检测方法应更加关注

目标法线倾角的提取误差的结论。基于上述分析,提出姿态测量精度室内检测方法:基于外场理论弹道、目标姿态以及测量站站址,通过逆姿态测量理论计算得到测量站角度信息和摄影坐标系下的目标倾斜角,结合目标尺寸并通过图像模拟生成测量站摄影坐标系下目标图像。将测量站站址和目标图像输入姿态测量设备,则姿态测量设备可给出目标姿态。通过比较理论目标姿态和姿态测量设备给出的目标姿态,得到姿态测量设备的姿态测量精度。

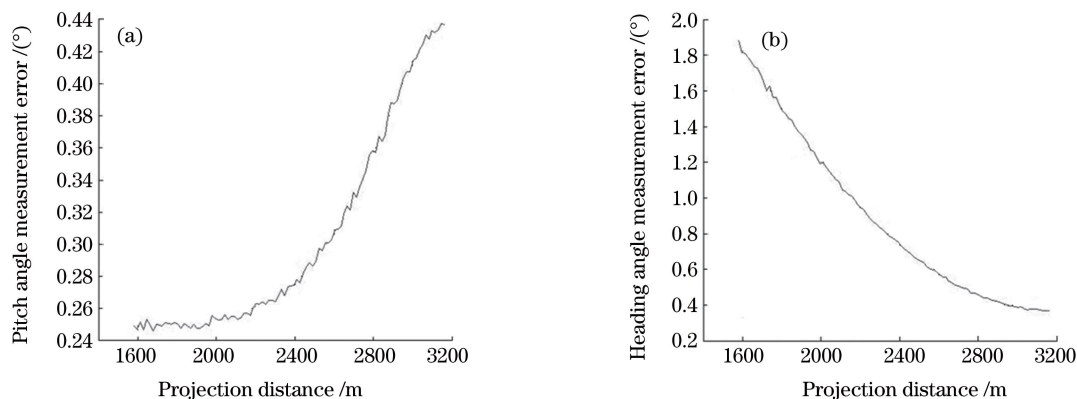


图9 某型号姿态测量设备室内姿态测量精度检测结果。(a)俯仰角测量误差;(b)航向角测量误差

Fig. 9 Measurement results of indoor attitude measurement accuracy in a certain attitude measuring equipment.

(a) Pitch angle measurement error; (b) heading angle measurement error

5 结 论

研究了光电经纬仪姿态测量方法,依据蒙特卡罗方法对测量站姿态测量误差源进行了分析,得出姿态测量精度的主要影响因素,进而提出了一种室内姿态测量精度检测方法。基于外场理论弹道、目标姿态以及测量站站址,通过逆姿态测量理论计算得到姿态测量的原始数据,再将姿态测量原始数据输入姿态测量设备,通过比较理论目标姿态和姿态测量设备给出的目标姿态,得到姿态测量设备的姿态测量精度。

参 考 文 献

- [1] Wang F, Jia T, Zhang C L. Dynamic correction of target deviations for photoelectric theodolites by coordinate transform[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(12): 2939-2945.
王芳, 贾涛, 张春林. 应用坐标变换动态修正光电经纬仪脱靶量[J]. 光学精密工程, 2009, 17(12): 2939-2945.
- [2] Cui Y P. Theoretical and experimental research on measuring attitude and velocity of moving target[D]. Tianjin: Tianjin University, 2006: 1-13.
崔彦平. 运动目标姿态与速度测量的理论及实验研究[D]. 天津: 天津大学, 2006: 1-13.
- [3] Jin G. Studying and analyzing on the error of positioning in airborne photo-electricity tracking survey equipment[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2001: 1-3.
金光. 机载光电跟踪测量的目标定位误差分析和研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2001: 1-3.
- [4] Li X Y. Study on attitude feature extraction of test range and correction of measurement error[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005: 1-2.
李昕彦. 靶场目标姿态特征提取及测量误差修正方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2005: 1-2.
- [5] Zhang Y, Wang Z Q, Qiao Y F, et al. Attitude measurement method research for missile launch[J]. Chinese Optics, 2015, 8(6): 997-1003.
张原, 王志乾, 乔彦峰, 等. 导弹发射姿态测量方法研究[J]. 中国光学, 2015, 8(6): 997-1003.
- [6] Yu Q F, Sun X Y, Chen G J. A new method of measure the pitching and yaw of the axes symmetry object through the optical image[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2000, 22(2): 15-19.

- 于起峰, 孙祥一, 陈国军. 用光测图像确定空间目标俯仰角和偏航角的中轴线法[J]. 国防科技大学学报, 2000, 22(2): 15-19.
- [7] Peng X D, Zhou S Z, Liu B, *et al.* Application of ellipse of inertia in measuring the object's 3D pose from mono-view[J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(3): 568-573.
- 彭晓东, 周泗忠, 刘波, 等. 惯量椭圆法在单站光测目标三维姿态测量中的应用[J]. 光子学报, 2007, 36(3): 568-573.
- [8] Zhao L R, Liu Y H, Zhu W, *et al.* Measurement of aircraft attitude by spatial cosine relationship in single-station and planes to intersection in multi-station of electro-optical theodolite[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(11): 2786-2793.
- 赵立荣, 柳玉晗, 朱玮, 等. 光电经纬仪单站空间余弦及多站面面交汇的飞机姿态测量[J]. 光学精密工程, 2009, 17(11): 2786-2793.
- [9] Wang K P. Researches on auto target detection, tracking and 3-D pose measurement for imagery of shooting range[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010: 89-93.
- 王鲲鹏. 靶场图像目标检测跟踪与定姿技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010: 89-93.
- [10] Li Q A. Research on technology of measuring the attitude angles of the aerial target and its relative simulation experiment[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2006: 49-53.
- 李清安. 空中目标姿态测量技术及其仿真实验研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2006: 49-53.
- [11] Zhao X Y, Li Y C. Optical measurement in shooting range[M]. Beijing: Institute of Equipment Command and Technology, 2000: 334-339.
- 赵学颜, 李迎春. 靶场光学测量[M]. 北京: 装备指挥技术学院, 2000: 334-339.
- [12] Zhang Y, Tian S W, Zheng Z L, *et al.* Indoor examination and error sources analysis of angle measurement accuracy of CCD television and theodolite system[J]. Acta Photonica Sinica, 1998, 27(11): 1050-1053.
- 张云, 田少文, 郑中林, 等. CCD电视经纬仪测角精度的室内检测及其误差源分析[J]. 光子学报, 1998, 27(11): 1050-1053.
- [13] Sha D G. Optical testing technology[M]. 2nd ed. Beijing: Beijing institute of technology press, 2010: 57-61.
- 沙定国. 光学测试技术[M]. 2版. 北京: 北京理工大学出版社, 2010: 57-61.