

文章编号:1002-2082 (2020) 06-1137-10

系留升空平台光电探测目标的坐标转换误差分析

刘 飞, 刘 宇, 茹志兵, 郭 佳, 陈 伟, 刘志东, 赵青林

(西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

摘要: 系留升空平台的目标定位技术在军民领域中具有广泛的应用, 定位精度的高低已成为评价无人机、系留升空平台综合性能的一项重要指标。开展了无人升空平台光电探测系统的精度测试研究, 对目标高精度定位误差进行分析, 推导出光电探测系统误差转换模型, 对误差转换坐标进行仿真验证。运用蒙特卡罗思想, 综合分析了升空载荷光电探测系统中各误差参数对定位精度的影响, 提出了提高目标高精度定位精度的改进方法, 为无人升空平台光电吊舱的目标定位精度、光电吊舱的高精密设计提供了理论基础。

关键词: 升空平台; 光电探测系统; 误差模型; 坐标转换; 光电吊舱; 目标定位

中图分类号: TN206

文献标志码: A

DOI: [10.5768/JAO202041.0601001](https://doi.org/10.5768/JAO202041.0601001)

Coordinate conversion error analysis of photoelectric detection targets on tethered lift-off platform

LIU Fei, LIU Yu, RU Zhibing, GUO Jia, CHEN Wei, LIU Zhidong, ZHAO Qinglin

(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: The target orientation technology of tethered lift-off platform has been widely used in the military and civil fields. The orientation performance has become an important index to evaluate the comprehensive performance of unmanned aerial vehicle (UAV) and tethered lift-off platform. The precision test research of photoelectric detection system was carried out, the emphasis was high precision orientation error analyses about the target, the photoelectric detection system error transformation model was deduced, and the error conversion coordinates were verified by simulation. By Monte Carlo thought, the influence of error parameters is analyzed to the orientation accuracy of the photoelectric detection system, and the method about target's high precision orientation is improved, which provides a theoretical basis for target orientation accuracy and high precision design about photoelectric pod of unmanned lift-off platform.

Key words: lift-off platform; photoelectric detection system; error model; coordinate transform; photoelectric pod; target orientation

引言

目前, 无人机平台、系留升空平台功率的费效比越来越低, 相当于未来无人升空平台对目标高精度定位的指标要求^[1-2]越来越高。光电探测系统是无人升空平台最基本的任务执行单元, 通过光电吊舱内部的光电探测系统可对周围的目标进行侦察、监视、跟踪及识别、测距等, 对各种地面对象、空中目标进行侦察定位, 给出侦察目标的相对位置和运动状态^[3]。

考虑到空中平台上惯导系统和 GPS 组合导航系统的误差相对确定, 升空平台自身的定位精度相对较高, 因此, 本文主要讨论光电探测系统对目标的定位精度以及误差的坐标转换过程, 选取对定位精度有较大影响的 28 个参数变量, 推导出升空平台坐标系下目标定位误差的数学模型, 结合 Monte Carlo 误差分析方法, 更直观地评价目标定位的误差因素影响程度。根据误差产生过程, 分析了各误差因素对升空平台下目标定位精度的影

收稿日期: 2020-07-21; 修回日期: 2020-09-18

基金项目: 中国兵器科学研究院联合基金项目 (6141B010275)

作者简介: 刘飞 (1978-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事光电设备的设计及研制工作。E-mail: nilin609@163.com

响,给出减小光电探测系统目标定位误差的措施。

1 光电吊舱的组成和定位误差

1.1 组成结构

光电吊舱主要由光电探测系统、机械系统和伺服控制系统组成。光电探测系统实现空间测量与成像,机械系统提供框架和结构支撑,伺服控制系统负责轴系控制。光电探测系统包括:红外传感器、CCD 相机、激光测距仪和光端机等,可以实现多光谱综合测量和传输。机械系统主要包括:光机座组件、方位测角组件和俯仰测角组件等。伺服控制系统主要包括:电源组件、伺服控制电路、方位电机和俯仰电机等。光电吊舱组成图如图 1 所示。

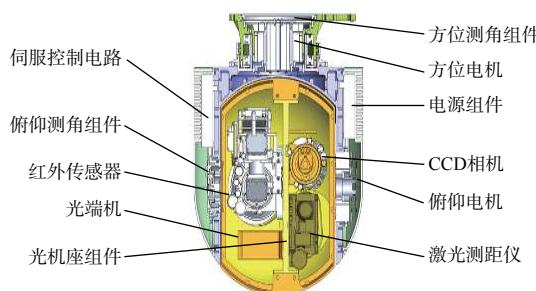


图 1 光电吊舱组成图

Fig. 1 Structure diagram of photoelectric pod

1.2 定位误差

定位误差一般是指被观测目标在大地坐标系下的理想坐标值与实际坐标值的偏差。目标定位功能是指系统平台探测系统和导航系统所提供目标大地坐标的能力,一般采用经度、纬度和高程差来表示^[4]。本文主要研究基于升空平台坐标系下光电探测系统对目标的定位精度问题^[5]。

基于系留升空平台下的光电吊舱的定位误差是指光电探测系统的指向误差和光电吊舱相对于升空平台的对准误差。

指向误差是指目标光轴的理想指向角与实际指向角之间的偏差值,我们把所有光轴轴系、俯仰轴系、方位轴系所引起的误差变化统称为指向误差。首先,把目标光轴在基座坐标系下的观测指向角设为 $(\hat{\alpha}, \hat{\beta})$, $\hat{\alpha}$ 为方位位置传感器测量值, $\hat{\beta}$ 为俯仰位置传感器测量值。由于设计加工、机械装配和框架运动等引起的轴系间的几何误差,造成目标光轴的实际指向角为 (α, β) ,如图 2 所示。那么,指向误差由方位指向误差 δ_{α} 和俯仰指向误差

δ_{β} 来表示,即 $\delta_{\alpha} = \hat{\alpha} - \alpha$ 和 $\delta_{\beta} = \hat{\beta} - \beta$,其中 δ_{α} 和 δ_{β} 包括误差均值和标准差。

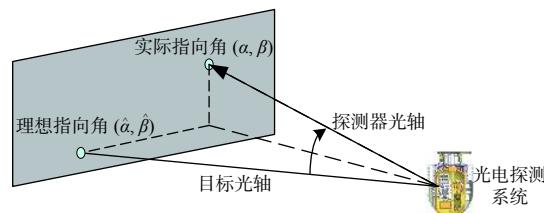


图 2 指向误差

Fig. 2 Pointing error

对准误差指光电吊舱平台与升空平台安装时存在的方位对准误差和水平调平误差,以及减震器的角振动误差。文中光电平台与升空平台之间为刚性连接,不考虑减震器的振动误差问题^[6]。

2 光电吊舱坐标系下目标定位误差分类

目标定位精度是评价光电探测系统性能的一项综合性技术指标,与指向精度的分项指标直接相关^[7]。作为复杂的光机电一体化装备,光电探测系统目标定位误差的来源众多,且误差性质和影响规律各异。按光电吊舱组成结构进行分析,影响目标定位精度的误差主要有光电探测系统的各种指向误差、光电探测系统与载体导航系统的对准误差、载体导航系统的测量误差,以及环境等因素引起的误差等。光电探测系统误差源统计如表 1 所示。通过对目标定位误差的分析和研究,可以从本质上解决光电探测系统的精度问题。

1) 光电吊舱内部探测系统主要误差。光学系统中 CCD 摄像机、IR 红外热像仪、LASER 激光测距机等探测器由于自身的光轴晃动或成像等造成的误差,以及各探测器之间由于光轴平行性差异造成的几何误差。机械框架中光轴、俯仰和方位轴系在设计、制造和装配过程中产生的几何误差,如轴系垂直度误差、回转误差。探测器测量中方位和俯仰等位置传感器的零位误差和测量误差,以及目标探测和跟踪过程中产生的脱靶量误差等。

2) 光电吊舱与升空平台之间的对准误差。主要包括方位对准误差和水平调平误差。由于光电吊舱和升空平台之间刚性连接几乎没有相对移动,除了固定的安装误差外,不存在因安装减震器引起的角振动误差问题。同时环境因素误差(如温度、重力、风力、大气、振动和冲击等因素)也会对上述误差有一定程度的影响^[8]。

表 1 光电探测系统误差源统计

Table 1 Error source statistics of photoelectric detection system

误差分类	误差名称	来源分析
光学误差	光轴晃动误差	CCD相机或IR等探测器的调焦透镜运动引起的光轴晃动、成像误差和热变形和重力形变引起的光轴误差。
	激光测距误差	LASER电子计数器计数误差、光速受介质、气压、温度、湿度的影响而变化、时标振荡器频率稳定性、以及激光脉冲宽度变化引起的测距误差。
	光轴平行性误差	CCD和热像仪的像元尺寸和探测器的分辨率、对十字分化板中心的瞄准误差, 以及激光光斑质心的读取准确度。
机械误差	轴系回转误差	动态误差。由于框架运动等因素引起的轴系回转误差。
	轴系垂直度误差	静态误差。由于设计、制造和装配等因素引起的轴系垂直度误差。
测量误差	角位置传感器误差	角度测量传感器的安装零位误差、数值截断偏差、分辨率偏差等引起的测角误差。
	脱靶量误差	目标在像面上的投影与像面中心点的偏差量。
对准误差	方位对准误差	光电探测系统初始安装时, 与升空平台间的对准误差。
	水平调平误差	指光电基座平台与升空平台的调平误差。

3 升空平台下光电吊舱目标定位误差的综合建模

本文根据误差源的作用方式进行分析, 建立了各探测器坐标系, 推导出各误差坐标系之间的齐次转换矩阵, 得到光电吊舱坐标系下目标定位误差模型, 并给出分项误差量化指标。

3.1 建立误差坐标系

根据光电吊舱探测器轴线和机械框架的组成结构建立探测器坐标系和框架坐标系。从目标坐标系(L系)到光电探测系统基座坐标系(B系)的两轴框架误差坐标系, 建立目标定位误差矩阵转换模型, 光电吊舱系统误差坐标系定义如图3所示。

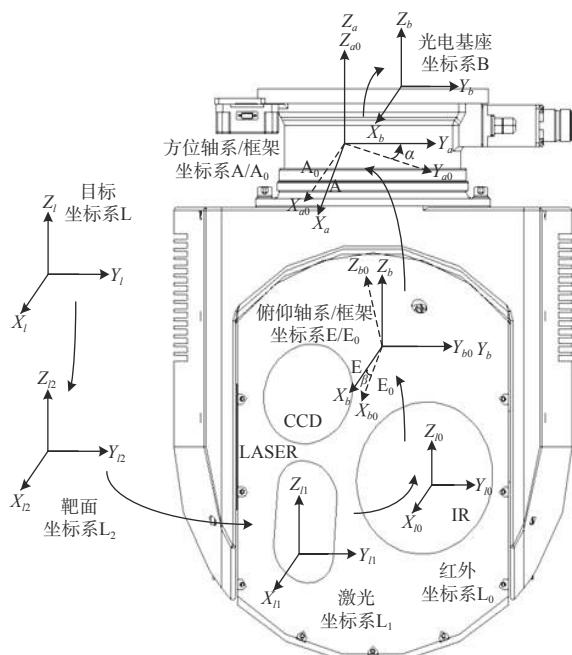


图 3 光电吊舱误差坐标系定义

Fig. 3 Error coordinate system definition of photoelectric pod

1) 像平面坐标系(L_2 系)

我们通过光轴调校, 针对远距离目标测距、成像可实现三光合一, 使目标成像聚焦在类似一个焦平面上。 L_2 系固联在光学成像探测器的焦平面上, 原点为目标在焦平面成像的形心位置, $O_{l2}X_{l2}$ 轴沿目标光轴方向指向目标。

2) 激光测距坐标系(L_1 系)

L_1 系原点定义为光具座中心, $O_{l1}X_{l1}$ 轴沿激光指示方向。采用激光测距机测量值 D 来表示目标相对光电探测系统的距离^[9]。

3) 成像探测器坐标系(L_0 系)

L_0 系原点定义为光具座中心, $O_{l0}X_{l0}$ 轴沿成像探测器CCD或IR的光轴方向。 L_0 系用来表示探测器光轴在惯性空间内的姿态, 是光电探测系统中始终需要稳定的坐标系。在理想条件下, L系、 L_2 系、 L_1 系、 L_0 系与E系的坐标轴是相互平行的, 但由于误差的作用, 这些坐标系之间存在着一定的变换关系。

4) 俯仰轴系坐标系(E系)

E系原点定义为两轴机构的中心, 随俯仰轴系运动。 O_eY_e 轴沿俯仰轴的实际转动方向, 采用俯仰位置传感器测量值 β 来表示E系与 E_0 系之间的旋转角度。

5) 俯仰框架坐标系(E_0 系)

E_0 系原点定义为两轴机构的中心, $O_{e0}Y_{e0}$ 轴沿俯仰位置传感器零位方向, $X_{e0}O_{e0}Z_{e0}$ 为俯仰框架安装平面。在理想条件下 E_0 系与A系是一致的。

6) 方位轴系坐标系(A系)

A系原点定义为两轴机构的中心, 可随方位轴系运动。 O_aZ_a 轴沿方位轴的实际转动方向, 采用方

位位置传感器测量值 α 表示 A 系与 A_0 系之间的旋转角度。

7) 方位框架坐标系(A_0 系)

A_0 系原点定义为两轴机构的中心, $O_{a0}X_{a0}$ 轴沿方位位置传感器零位方向, $X_{a0}O_{a0}Y_{a0}$ 为方位框架安装平面。理想条件下 A_0 系与 B 系是一致的。

8) 光电基座坐标系(B 系)

B 系原点定义为光电基座的中心, O_bX_b 轴沿方位位置传感器零位方向, $X_bO_bY_b$ 为光电基座平面。

9) 升空平台坐标系(S 系)

S 系原点定义为升空平台的三轴机构的中心, O_sX_s 轴与本地测姿坐标系的北向角重合, $X_sO_sY_s$ 为升空平台的水平安装面, 与本地测姿坐标系的北-东面平行。

3.2 误差坐标系转换矩阵

在误差分析的基础上, 详细推导各误差坐标系之间的误差转换矩阵^[10]。

1) 光轴轴系误差

光轴轴系误差为安装在光具座上的光学探测器彼此之间的误差, 主要包括: 激光测距误差和目标脱靶量误差、光轴晃动误差和平行性误差、光轴垂直接度误差等。

根据上述误差坐标系的定义, L_2 系的 $O_{l2}X_{l2}$ 轴沿目标光轴方向指向目标, 而 L_1 系的 $O_{l1}X_{l1}$ 轴沿激光指向, 如图 4 所示。

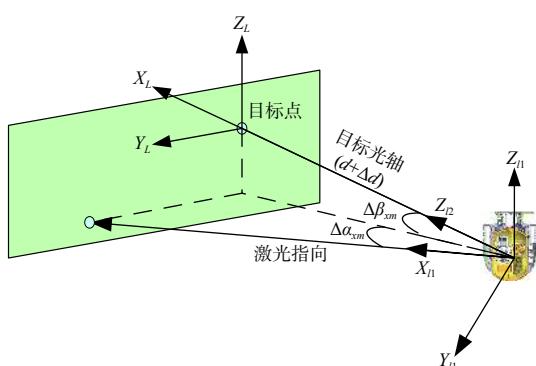


图 4 光轴脱靶量误差

Fig. 4 Optical axis miss distance error

从 L 系到 L_1 系的激光测距误差和目标脱靶量误差变换矩阵为

$$T_L^{L_1} = T_{L_2}^{L_1} T_L^{L_2} = \text{Rot}(z, \Delta\alpha_{xm}) \times \text{Rot}(y, \Delta\beta_{xm}) \text{Trans}(d + \Delta d, 0, 0) \quad (1)$$

即:

$$T_L^{L_1} = \begin{bmatrix} c(\Delta\alpha_{xm}) & s(\Delta\alpha_{xm}) & 0 & 0 \\ -s(\Delta\alpha_{xm}) & c(\Delta\alpha_{xm}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c(\Delta\beta_{xm}) & 0 & -s(\Delta\beta_{xm}) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ s(\Delta\beta_{xm}) & 0 & c(\Delta\beta_{xm}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d + \Delta d \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

设激光测距值和测距误差为 $d + \Delta d$; $\Delta\alpha_{xm}$ 和 $\Delta\beta_{xm}$ 为目标脱靶量 ΔX 和 ΔY 转换得到的角度值, 由图 4 可得脱靶量的反正切公式为

$$\begin{cases} \Delta\alpha_{xm} = \arctan(k\Delta X/f) \\ \Delta\beta_{xm} = \arctan(k\Delta Y/f) \end{cases}$$

式中: k 和 f 分别为成像探测器的像元尺寸和观测焦距值。 L 系沿 O_LX_L 轴平移 $d + \Delta d$ 得到 L_2 系, 再分别绕 Y 轴和 Z 轴旋转 $\Delta\beta_{xm}$ 和 $\Delta\alpha_{xm}$ 角度得到 L_1 系。由图 5 可知, L_1 系的 $O_{l1}X_{l1}$ 轴激光指向与 L_0 系的 $O_{l0}X_{l0}$ 轴成像探测器光轴指向之间存在着光轴晃动误差和平行性误差。那么两个坐标系之间的误差变换矩阵为

$$T_{L_1}^{L_0} = \text{Rot}(z, \Delta\alpha_{xc} + \Delta\alpha_{xd}) \text{Rot}(y, \Delta\beta_{xc} + \Delta\beta_{xd}) \quad (2)$$

即:

$$T_{L_1}^{L_0} = \begin{bmatrix} c(\Delta\alpha_{xc} + \Delta\alpha_{xd}) & s(\Delta\alpha_{xc} + \Delta\alpha_{xd}) & 0 & 0 \\ -s(\Delta\alpha_{xc} + \Delta\alpha_{xd}) & c(\Delta\alpha_{xc} + \Delta\alpha_{xd}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c(\Delta\beta_{xc} + \Delta\beta_{xd}) & 0 & -s(\Delta\beta_{xc} + \Delta\beta_{xd}) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ s(\Delta\beta_{xc} + \Delta\beta_{xd}) & 0 & c(\Delta\beta_{xc} + \Delta\beta_{xd}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

式中: $\Delta\alpha_{xc}$ 和 $\Delta\beta_{xc}$ 为多探测器之间的光轴平行性误差; $\Delta\alpha_{xd}$ 和 $\Delta\beta_{xd}$ 为成像探测器自身的光轴晃动误差。 L_1 系分别绕 Y 轴和 Z 轴旋转 $\Delta\alpha_{xc} + \Delta\alpha_{xd}$ 和 $\Delta\beta_{xc} + \Delta\beta_{xd}$ 角度得到 L_0 系。

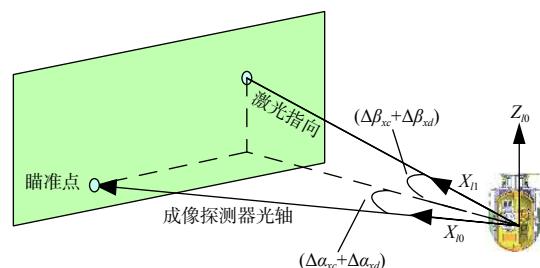


图 5 光轴平行性和晃动误差

Fig. 5 Optical axis parallelism and sloshing error

由于光电探测系统采用两轴框架, 光轴轴系相对俯仰轴系没有相对运动, 即不存在光轴回转误差。那么 L_0 系与 E 系之间只存在光轴垂直接度误差,

如图 6 所示。其误差转换矩阵为

$$T_{L_0}^E = \text{Rot}(z, \Delta\alpha_{xa}) \text{Rot}(y, \Delta\beta_{xa}) \quad (3)$$

即:

$$T_{L_0}^E = \begin{bmatrix} c(\Delta\alpha_{xa}) & s(\Delta\alpha_{xa}) & 0 & 0 \\ -s(\Delta\alpha_{xa}) & c(\Delta\alpha_{xa}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} c(\Delta\beta_{xa}) & 0 & -s(\Delta\beta_{xa}) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ s(\Delta\beta_{xa}) & 0 & c(\Delta\beta_{xa}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

式中: $\Delta\alpha_{xa}$ 和 $\Delta\beta_{xa}$ 为光轴垂直度误差。 L_0 系分别绕 Y 轴和 Z 轴旋转 $\Delta\beta_{xa}$ 和 $\Delta\alpha_{xa}$ 角度, 转换为俯仰轴系坐标系 E 。

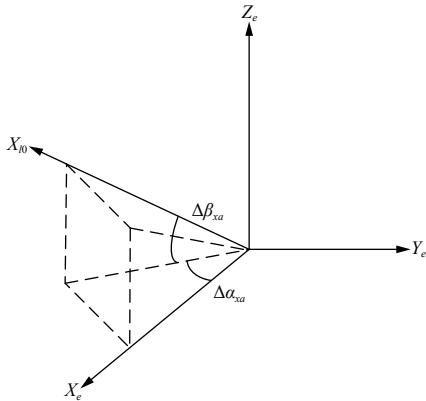


图 6 光轴垂直度误差

Fig. 6 Optical axis perpendicularity error

2) 俯仰轴系误差

俯仰和方位轴系误差为两轴框架在设计、制造和装配过程中产生的几何误差, 主要包括: 框架运动引起的回转误差和位置传感器误差, 以及框架装配引起的垂直度误差等, 如图 7 所示。当俯仰轴系坐标系 E 相对于俯仰框架坐标系 E_0 运动时, 其误差转换矩阵为

$$T_E^{E_0} = \text{Rot}(y, \hat{\beta}) \text{Rot}(x, \Delta\gamma_{yr}) \text{Rot}(z, \Delta\alpha_{yr}) \quad (4)$$

即:

$$T_E^{E_0} = \begin{bmatrix} c(\hat{\beta}) & 0 & -s(\hat{\beta}) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ s(\hat{\beta}) & 0 & c(\hat{\beta}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c(\Delta\gamma_{yr}) & s(\Delta\gamma_{yr}) & 0 \\ 0 & -s(\Delta\gamma_{yr}) & c(\Delta\gamma_{yr}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} c(\Delta\alpha_{yr}) & s(\Delta\alpha_{yr}) & 0 & 0 \\ -s(\Delta\alpha_{yr}) & c(\Delta\alpha_{yr}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

式中: $\Delta\alpha_{yr}$ 和 $\Delta\gamma_{yr}$ 为俯仰轴回转误差; $\hat{\beta} = \beta + \Delta\beta_e + \Delta\beta_m + \Delta\beta_c + \Delta\beta_z$ 为俯仰轴系位置传感器的测量值, 由多个

部分组成。其中 β 为两轴框架的理想俯仰角; $\Delta\beta_e$ 、 $\Delta\beta_m$ 、 $\Delta\beta_c$ 和 $\Delta\beta_z$ 分别为俯仰位置传感器的偏心误差、分辨率误差、截断误差和零位误差。那么, E 系分别绕 Z 轴、 X 轴和 Y 轴旋转 $\Delta\alpha_{yr}$ 、 $\Delta\gamma_{yr}$ 和 $\hat{\beta}$, 转换得到 E_0 系。

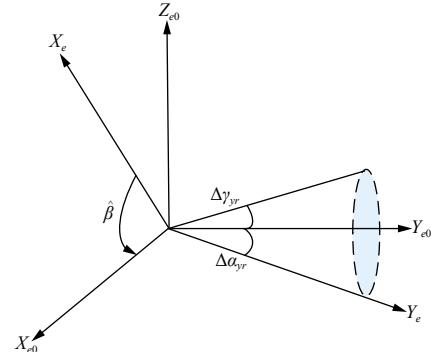


图 7 俯仰轴回转误差和位置传感器误差

Fig. 7 Pitch axis rotation and position sensor error

E_0 系与 A 系之间存在着俯仰轴的垂直度误差, 如图 8 所示。其误差转换矩阵为

$$T_A^{E_0} = \text{Rot}(x, \Delta\gamma_{ya}) \text{Rot}(z, \Delta\alpha_{ya}) \quad (5)$$

即:

$$T_A^{E_0} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c(\Delta\gamma_{ya}) & s(\Delta\gamma_{ya}) & 0 \\ 0 & -s(\Delta\gamma_{ya}) & c(\Delta\gamma_{ya}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} c(\Delta\alpha_{ya}) & s(\Delta\alpha_{ya}) & 0 & 0 \\ -s(\Delta\alpha_{ya}) & c(\Delta\alpha_{ya}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

式中: $\Delta\alpha_{ya}$ 和 $\Delta\gamma_{ya}$ 为俯仰轴垂直度误差。 E_0 系分别绕 Z 轴和 X 轴旋转角度 $\Delta\alpha_{ya}$ 和 $\Delta\gamma_{ya}$, 转换得到 A 系。

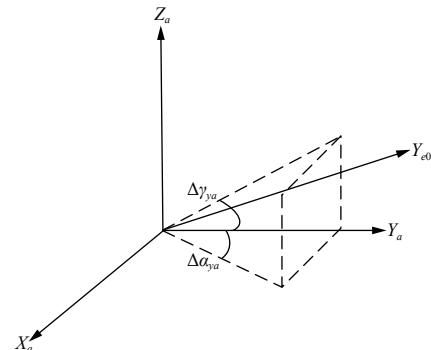


图 8 俯仰轴垂直度误差

Fig. 8 Pitch axis perpendicularity error

3) 方位轴系误差

方位轴系误差与俯仰轴系的误差类似, 当方位轴系坐标系 A 相对于方位框架坐标系 A_0 运动时, 如图 9 所示, 其误差转换矩阵为

$$T_A^{A_0} = \text{Rot}(z, \hat{\alpha}) \text{Rot}(y, \Delta\beta_{zr}) \text{Rot}(x, \Delta\gamma_{zr}) \quad (6)$$

即:

$$T_A^{A_0} = \begin{bmatrix} c(\widehat{\alpha}) & s(\widehat{\alpha}) & 0 & 0 \\ -s(\widehat{\alpha}) & c(\widehat{\alpha}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c(\Delta\beta_{zr}) & 0 & -s(\Delta\beta_{zr}) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ s(\Delta\beta_{zr}) & 0 & c(\Delta\beta_{zr}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c(\Delta\gamma_{zr}) & s(\Delta\gamma_{zr}) & 0 \\ 0 & -s(\Delta\gamma_{zr}) & c(\Delta\gamma_{zr}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

式中: $\Delta\gamma_{zr}$ 和 $\Delta\beta_{zr}$ 为方位轴回转误差; $\widehat{\alpha} = \alpha + \Delta\alpha_e + \Delta\alpha_m + \Delta\alpha_z$ 为方位轴系位置传感器的测量值, 由多个部分组成。其中, α 为两轴框架的理想方位角, $\Delta\alpha_e$ 、 $\Delta\alpha_m$ 、 $\Delta\alpha_c$ 和 $\Delta\alpha_z$ 分别为方位位置传感器的偏心误差、分辨率误差、截断误差和零位误差。A 系分别绕 X 轴、Y 轴和 Z 轴旋转 $\Delta\gamma_{zr}$ 、 $\Delta\beta_{zr}$ 和 $\widehat{\alpha}$ 得到 A₀ 系。

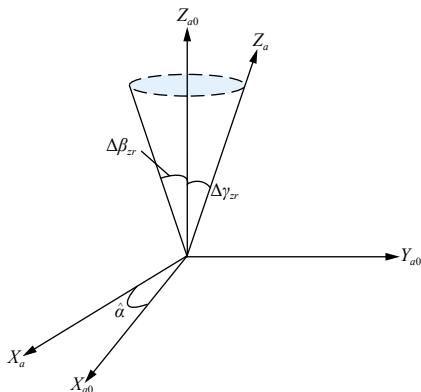


图 9 方位轴回转误差和方位编码器误差

Fig. 9 Azimuth axis rotation and azimuth encoder error

A₀ 系与光电探测系统基座坐标系 B 之间存在着方位轴垂直度误差, 如图 10 所示。其误差转换矩阵为

$$T_{A_0}^B = \text{Rot}(y, \Delta\beta_{za}) \text{Rot}(x, \Delta\gamma_{za}) \quad (7)$$

即:

$$T_{A_0}^B = \begin{bmatrix} c(\Delta\beta_{za}) & 0 & -s(\Delta\beta_{za}) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ s(\Delta\beta_{za}) & 0 & c(\Delta\beta_{za}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c(\Delta\gamma_{za}) & s(\Delta\gamma_{za}) & 0 \\ 0 & -s(\Delta\gamma_{za}) & c(\Delta\gamma_{za}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

式中: $\Delta\gamma_{za}$ 和 $\Delta\beta_{za}$ 为方位轴垂直度误差。A₀ 系分别绕 X 轴和 Y 轴旋转角度 $\Delta\gamma_{za}$ 和 $\Delta\beta_{za}$, 转换得到 B 系。

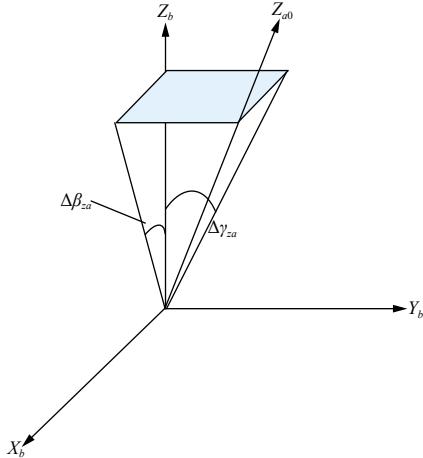


图 10 方位轴垂直度误差

Fig. 10 Azimuth axis perpendicularity error

4) 对准误差

光电探测系统与升空平台之间的对准误差, 主要指初始安装时两者之间的安装对准误差, 如图 11 所示。当载体处于运动状态时, 基座坐标系 B 相对于升空平台坐标系 S 的误差转换矩阵为

$$T_B^S = \text{Rot}(z, \Delta\psi_s) \text{Rot}(y, \Delta\theta_s) \text{Rot}(x, \Delta\varphi_s) \quad (8)$$

即:

$$T_B^S = \begin{bmatrix} c(\Delta\psi_s) & s(\Delta\psi_s) & 0 & 0 \\ -s(\Delta\psi_s) & c(\Delta\psi_s) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c(\Delta\theta_s) & 0 & -s(\Delta\theta_s) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ s(\Delta\theta_s) & 0 & c(\Delta\theta_s) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c(\Delta\varphi_s) & s(\Delta\varphi_s) & 0 \\ 0 & -s(\Delta\varphi_s) & c(\Delta\varphi_s) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

式中: $\Delta\psi_s$ 为初始安装时的方位对准误差; $\Delta\varphi_s$ 、 $\Delta\theta_s$ 分别为滚动和俯仰方向的调平误差。

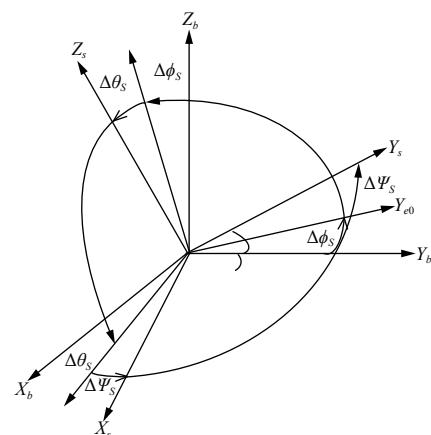


图 11 安装对准误差

Fig. 11 Installation alignment error

3.3 光电吊舱目标定位误差综合模型(不包括升空平台导航系统模型)

当综合考虑各分项误差影响时, 通过坐标转换流程, 如图 12 所示, 建立目标定位误差综合模型。目

标在光电坐标系 B 的直角坐标 $x_B = [x_b, y_b, z_b, 1]^T$ 为

$$\chi_s = T_B^S T_{A_0}^B T_A^{A_0} T_{E_0}^{E_0} T_E^E T_{L_0}^{L_0} T_{L_1}^{L_1} T_{L_2}^{L_2} \chi_L \quad (9)$$

式中: $\chi_L = [0 \ 0 \ 0 \ 1]^T$ 为目标在目标坐标系 L 的直角坐标; T_j^i 为误差转换矩阵。

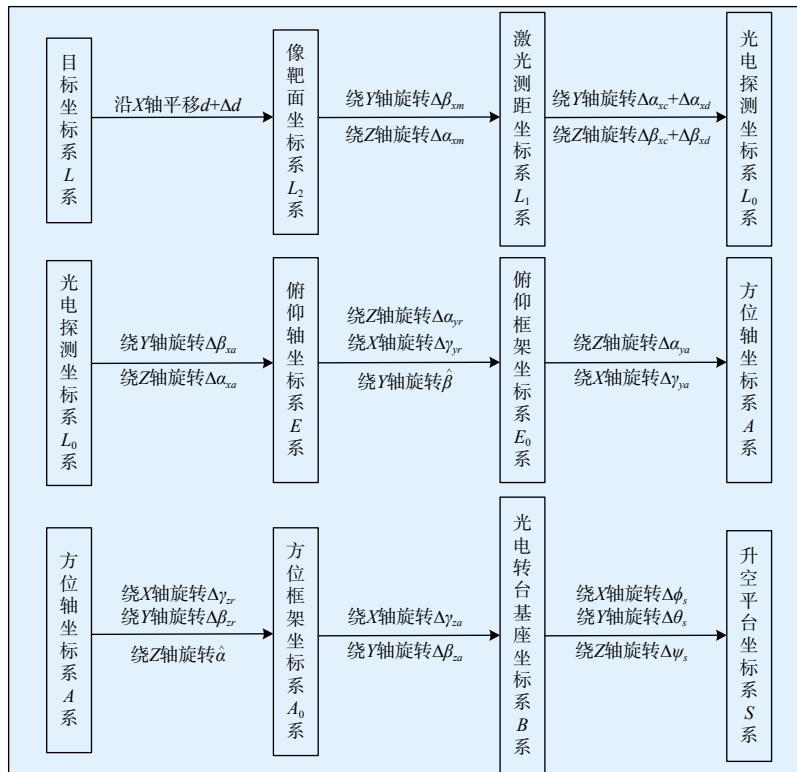


图 12 光电吊舱坐标系下目标定位误差的坐标转换流程图

Fig. 12 Coordinate transformation flow chart of target position error in photoelectric pod coordinate system

将目标定位过程中涉及到的各分项误差因素的来源、名称、符号、分布, 以及典型的误差参数值统一列于表 2 中。

4 目标定位误差模型仿真及分析

光电测量系统坐标在转换的过程中, 各个参数测量值、测量误差将会对结果产生影响。通过 Monte

表 2 光电转台坐标系下典型误差值统计

Table 2 Statistics of typical error values in coordinate system of photoelectric turntable

来源	序号	误差名称	误差符号	误差分布	典型值
光电探测系统指向误差	1	激光测距误差	Δd	均匀分布	$(\Delta d)_{\max}=5 \text{ m}$
	2	方位脱靶量误差	ΔX	正态分布	$\sigma(\Delta X)=20 \text{ pixel}$
	3	俯仰脱靶量误差	ΔY	正态分布	$\sigma(\Delta Y)=20 \text{ pixel}$
	4	光轴方位向晃动误差	$\Delta\alpha_{xd}$	正态分布	$\sigma(\Delta\alpha_{xd})=35''$
	5	光轴俯仰向晃动	$\Delta\beta_{xd}$	正态分布	$\sigma(\Delta\beta_{xd})=35''$
	6	误差光轴方位向平行性误差	$\Delta\alpha_{xc}$	均匀分布	$(\Delta\alpha_{xc})_{\max}=20''$
	7	光轴俯仰向平行性误差	$\Delta\beta_{xc}$	均匀分布	$(\Delta\beta_{xc})_{\max}=20''$
	8	光轴方位向垂直度误差	$\Delta\alpha_{xa}$	正态分布	$\sigma(\Delta\alpha_{xa})=25''$
	9	光轴俯仰向垂直度误差	$\Delta\beta_{xa}$	正态分布	$\sigma(\Delta\beta_{xa})=25''$

表 2 (续)

来源	序号	误差名称	误差符号	误差分布	典型值
对准误差	10	俯仰轴方位向回转误差	$\Delta\alpha_{yr}$	均匀/正态分布	$(\Delta\alpha_{rs})_{\max}=6 \sigma(\Delta\alpha_{rr})=2''$
	11	俯仰轴滚动向回转误差	$\Delta\gamma_{yr}$	均匀/正态分布	$(\Delta\gamma_{rs})_{\max}=6 \sigma(\Delta\gamma_{rr})=2''$
	12	俯仰编码器偏心误差	$\Delta\beta_e$	周期性分布	$\Delta\beta_e=2'' \sin\theta$
	13	俯仰编码器分辨率误差	$\Delta\beta_m$	正态分布	$\sigma(\Delta\beta_m)=(2.47)^2/12''$
	14	俯仰编码器截断误差	$\Delta\beta_c$	均匀分布	$(\Delta\beta_c)_{\max}=0.005 5^\circ$
	15	俯仰编码器零位误差	$\Delta\beta_z$	均匀分布	$(\Delta\beta_z)_{\max}=60''$
	16	俯仰轴方位向垂直度误差	$\Delta\alpha_{ya}$	正态分布	$\sigma(\Delta\alpha_{ya})=25''$
	17	俯仰轴滚动向垂直度误差	$\Delta\gamma_{ya}$	正态分布	$\sigma(\Delta\gamma_{ya})=25''$
	18	方位轴滚动向回转误差	$\Delta\gamma_{zr}$	均匀/正态分布	$(\Delta\gamma_{rs})_{\max}=6 \sigma(\Delta\gamma_{rr})=2''$
	19	方位轴俯仰向回转误差	$\Delta\beta_{zr}$	均匀/正态分布	$(\Delta\beta_{rs})_{\max}=6 \sigma(\Delta\beta_{rr})=2''$
	20	方位编码器偏心误差	$\Delta\alpha_e$	周期性分布	$\Delta\alpha_e = 2'' \sin\theta$
	21	方位编码器分辨率误差	$\Delta\alpha_m$	正态分布	$\sigma(\Delta\alpha_m)=(2.47)^2/12''$
	22	方位编码器截断误差	$\Delta\alpha_c$	均匀分布	$(\Delta\alpha_c)_{\max}=20''$
	23	方位编码器零位误差	$\Delta\alpha_z$	均匀分布	$(\Delta\alpha_z)_{\max}=60''$
	24	方位轴滚动向垂直度误差	$\Delta\gamma_{za}$	正态分布	$\sigma(\Delta\gamma_{za})=25''$
	25	方位轴俯仰向垂直度误差	$\Delta\beta_{za}$	正态分布	$\sigma(\Delta\beta_{za})=25''$
	26	滚动调平误差	$\Delta\phi_s$	正态分布	$\sigma(\Delta\phi_s)=80''$
	27	俯仰调平误差	$\Delta\theta_s$	正态分布	$\sigma(\Delta\theta_s)=18''$
	28	方位对准误差	$\Delta\psi_s$	正态分布	$\sigma(\Delta\psi_s)=18''$

Carlo 方法对目标定位基本参数模型进行全微分, 得到光电探测系统目标定位误差传递系数模型:

$$\varepsilon_{3 \times 1} = J_{3 \times 28} \varepsilon_{p_{28 \times 1}}$$

式中: ε_p 为各分项误差源; ε 为系统目标定位误差; J 为分项误差源与目标定位误差之间的映射关系矩阵^[11]。假设各分项误差相互之间独立且各分项误差均值为零, 即 $E(\varepsilon_p) = 0$, 则 $E(\varepsilon) = 0$, 目标定位误差的方差 $D(\varepsilon) = E(\varepsilon^2)$ 。由于各分项误差相互独立, 则由 $E(\varepsilon_p(i)J(k,i)J(k,j)\varepsilon_p(j)) = 0$ 可以得到 $D(\varepsilon)$ 。

$$\varepsilon^2 = \varepsilon_p^T J^T J \varepsilon_p = \left[\sum_{i=1}^{28} \varepsilon_p(i) J(1,i) \sum_{i=1}^{28} \varepsilon_p(i) J(2,i) \times \right. \\ \left. \sum_{i=1}^{28} \varepsilon_p(i) J(3,i) \right] \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{28} J(1,i) \varepsilon_p(i) \\ \sum_{i=1}^{28} J(2,i) \varepsilon_p(i) \\ \sum_{i=1}^{28} J(3,i) \varepsilon_p(i) \end{bmatrix} \quad (10)$$

则目标定位误差的标准差与各分项误差标准差的关系可表示为

$$\sigma(\varepsilon) = \sqrt{\sum_{i=1}^{28} \sum_{j=1}^3 J(j,i)^2 E(\varepsilon_p^2(i))} = \\ \sqrt{\sum_{i=1}^{28} \sum_{j=1}^3 J(j,i)^2 \sigma^2(\varepsilon_p(i))} = \\ \sqrt{\sum_{i=1}^{28} \mu_i^2 \sigma^2(\varepsilon_p(i))} \quad (11)$$

式中: $\mu_i = \sqrt{\sum_{j=1}^3 J(j,i)^2}$ 为分项误差 $\varepsilon_p(i)$ 的灵敏度系数; v 为光电探测系统光轴整体工作空间。对工作空间内所有误差项灵敏度系数进行归一化处理, 得到统计意义上各分项误差灵敏度系数为

$$\bar{\mu}_i = \frac{\int_v \mu_i dv}{\sum_{j=1}^{28} \mu_j} \quad (12)$$

按照表 2 所示, 根据(1)式~(8)式的误差坐标转化公式计算出各误差源产生的误差值, 代入(9)式, 可以得出光电吊舱相对于升空平台坐标系下

的误差值, 使用 Monte Carlo 方法求得统计意义下目标误差传递系数模型, 代入灵敏度系数可得灵敏度评价指标, 如图 13 所示(纵坐标为各误差因素导致的误差占空比)。

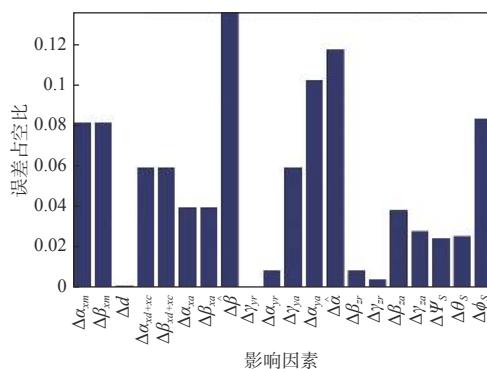


图 13 光电探测系统的误差因素灵敏度比较

Fig. 13 Comparison of sensitivity of error factors in photoelectric detection system

通过对光电探测系统各项误差因素的灵敏度进行比较, 我们可以得出以下判断:

1) 影响目标定位精度的主要因素有方位和俯仰脱靶量误差(各占 8%)、方位和俯仰编码器截断和零位误差(分别为 16% 和 12%)、光电吊舱滚动调平误差(8%)和俯仰轴方位向垂直度误差(10%);

2) 影响目标定位精度的次要因素为光电探测系统的光轴晃动误差和平行性误差(方位向和俯仰向各占 6%)、光轴方位向和俯仰向垂直度误差(各占 4%)和俯仰轴滚动向垂直度误差(6%)、方位轴俯仰向垂直度误差(4%);

3) 其他误差因素, 如激光测距误差、方位和俯仰轴系回转误差, 位置传感器偏心和分辨率误差等以及机械形变等因素, 对目标定位精度的影响相对较小。

5 结论

基于升空平台光电吊舱的目标定位误差分析, 结合上节计算结果可以得到减小光电探测目标定位误差的有效方法是:

1) 在升空平台上安装光电吊舱的过程中, 尽量保证升空平台与光电吊舱之间的初始安装对准精度;

2) 减小光电探测器的指向误差。在装配过程中, 对角位置传感器的安装零位、机械框架的回转和垂直度、多光学探测器之间的光轴一致性进行

机械调校。在电气调试过程中, 对光电吊舱的指向误差进行硬件调校或软件修正。

参考文献:

- [1] LEE T Y. Geometric controls for a tethered quadrotor UAV//2015 54th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)[C]. USA: IEEE, 2015: 2749-2751.
- [2] NICOTRA M M, NALDI R, GARONE E. Taut cable control of a tethered UAV[J]. IFAC, 2014, 47(3): 3190-3195.
- [3] LI Wenku, JIN Zhihua. Development status and counter measures about helicopter airborne optoelectronic pod[J]. Chinese Journal of Inertial Technology, 2004, 12(5): 76-77.
李文魁, 金志华. 直升机机载光电吊舱的发展现状及对策[J]. 中国惯性技术学报, 2004, 12(5): 76-77.
- [4] FU Yi, KONG Xingwei, DONG Xinmin. Adaptive square-root unscented Kalman filter for position and pose prediction of UAV[J]. Journal of Applied Optics, 2019, 40(1): 21-24.
符毅, 孔星炜, 董新民. 基于自适应DEFGH的无人机位姿预测方法[J]. 应用光学, 2019, 40(1): 21-24.
- [5] WANG Jianfeng, LU Libin, JIN Guodong. Land localization of UAV[J]. Tactical Missile Technology, 2005(1): 37-40.
王剑锋, 卢利斌, 金国栋. 无人机对目标的大地定位[J]. 战术导弹技术, 2005(1): 37-40.
- [6] ZHENG Fengzhu, NING Fei, WANG Peiqun, et al. Design of vibration damping system for airborne optoelectronic equipment and research on stability accuracy test[J]. Journal of Applied Optics, 2018, 39(4): 453-456.
郑凤翥, 宁飞, 王培群, 等. 一种机载光电设备减振系统设计及稳定精度试验研究[J]. 应用光学, 2018, 39(4): 453-456.
- [7] JIN Guang. Target positioning error analysis and research of airborne photoelectric tracking measurement[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2001.
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: 中科院长春光学精密机械与物理研究所, 2001.
- [8] 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): 106-108.

- 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): 106-108.
- [9] CAI Mingwei. Pulsed laser positioning system design[D]. Wuhan: College of Physical Science & Technology Central China Normal University, 2014.
- 蔡明威. 脉冲激光定位系统设计[D]. 武汉: 华中师范大学物理科学与技术学院, 2014.
- [10] ZHANG Zhiyong, ZHOU Xiaoyao, FAN Dapeng. Pointing error analysis, modeling and correction of photoelectric detection system[J]. Acta Aeronauticaet Astronautica Sinica, 2011, 32(11): 2042-2045.
- 张智永, 周晓尧, 范大鹏. 光电探测系统指向误差分析、建模与修正[J]. 航空学报, 2011, 32(11): 2042-2045.
- [11] JIN Zhaofei, LEI Zhongkui, XU Ying. Target orientation accuracy analysis based on UAV photoelectric imaging platform[J]. Optical Instruments, 2014, 36(4): 347-348.
- 金兆飞, 雷仲魁, 许莺. 基于无人机光电成像平台的目標定位精度分析[J]. 光学仪器, 2014, 36(4): 347-348.