

## 直写式激光导引头标定系统误差分析

陈 阳<sup>1</sup>, 杨延丽<sup>2</sup>, 孙婷婷<sup>1</sup>, 储海荣<sup>1</sup>, 苗锡奎<sup>3</sup>

- (1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 长春科技学院, 吉林 长春 130600;
3. 中国洛阳电子装备试验中心 光电对抗测试评估技术重点实验室, 河南 洛阳 471000)

**摘 要:** 为提高激光导引头测角精度, 研究了激光导引头测角误差的来源, 并分析了直写式激光导引头标定系统误差。首先, 分析了激光导引头内光学系统和探测器安装误差对导引头测角的影响; 其次, 介绍直写式激光导引头标定系统的工作原理, 给出理想条件下转台转角和导引头测角关系; 再次, 为了提高标定后导引头测角精度, 分析了标定系统存在的安装误差; 最后, 针对一次实际的标定过程, 结合文中分析方法对标定系统误差进行了校正, 导引头零位误差由校正前的 2.5 mrad 降低到了 1 mrad 以内。文中结论为直写式激光导引头标定系统中的结构安装精度要求提供了分析方法, 进而提高了标定后激光导引头的测角精度。

**关键词:** 误差分析; 直写式激光目标模拟器; 半主动激光导引头; 齐次坐标变换

**中图分类号:** TJ765 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.1105007

## Error analysis of direct writing calibration system for laser seeker

Chen Yang<sup>1</sup>, Yang Yanli<sup>2</sup>, Sun Tingting<sup>1</sup>, Chu Hairong<sup>1</sup>, Miao Xikui<sup>3</sup>

- (1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. Changchun SCI-TECH University, Changchun 130600, China;
3. Key Laboratory of Electro-Optical Countermeasures Test & Evaluation Technology, Luoyang Electronic Equipment Test Center of China, Luoyang 471000, China)

**Abstract:** In order to improve the angle measurement accuracy of laser seeker, the source of angle measurement error of laser seeker was studied, and the error of direct writing laser seeker calibration system was analyzed. Firstly, the influence of the optical system in the laser seeker and the detector installation error on the angle of the seeker was analyzed. The relationship between the angle of turntable and the angle of seeker under idea conditions was given. Secondly, the working principle of the direct writing laser seeker calibration system was introduced. Thirdly, in order to improve the angle accuracy of the calibrated seeker, the installation error of the calibration system was analyzed. Finally, according the analysis method in this paper, the calibration system error was corrected, and the seeker zero error was reduced to within 1 mrad from 2.5 mrad before the calibration. The conclusions of this paper provides an analytical method for the precision requirement of the structure installation in the direct

收稿日期: 2019-07-11; 修订日期: 2019-08-21

基金项目: 吉林省优秀青年人才基金项目(20180520018JH); 中国洛阳电子装备试验中心光电对抗测试评估技术重点实验室开放课题(GKCP2017001, GKCP2017002)

作者简介: 陈阳(1988-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事导弹半实物仿真方面的研究。Email: chenyang4688@163.com

writing laser seeker calibration system, and thus improves the angular measurement accuracy of the laser seeker after calibration.

**Key words:** error analysis; direct writing laser target simulator; semi-active laser seeker; homogeneous coordinate transformation

## 0 引言

半主动激光制导技术具有命中精度高、技术成熟、制造成本低、无需对目标进行自动识别等特点,尤其适用于打击战场地面固定点目标和低速运动目标<sup>[1]</sup>。其原理是激光照射器发出的激光在目标上产生弥散光斑,弥散光斑经导引头光学系统作用于四象限探测器,形成响应电压信号,响应电压信号再经过调理电路处理得到视线与光轴夹角。激光导引头在设计制造后通常需要利用标定的方法来提高测角精度。激光导引头标定系统利用激光目标模拟器产生激光光斑,利用转台带动激光目标模拟器转动预设的角度实现标定过程。将该系统接入制导控制回路,并运行在实时环境下,即可作为激光制导武器半实物仿真系统的一部分,实现制导回路的半实物仿真。根据激光目标模拟器工作方式的不同,可采用两种方式建立激光导引头标定系统,两种方法分别为投影漫反射法和激光直写投射法<sup>[2-3]</sup>。参考文献[4-6]中采用投影漫反射法实现目标模拟,该方法将激光照射器发出的光束照射在二维定位反射镜,再投射到漫反射屏幕上,二维定位反射镜由一个小型二轴转台带动,通过控制二维转镜实现激光目标的运动控制。参考文献[7]采用激光直写法实现目标模拟,该方法将激光目标模拟器安装在五轴转台外框,将激光导引头安装在五轴转台内框,激光经过衰减和束散处理后由目标模拟器发出后直接照射在激光导引头上,通过五轴转台的运动实现弹体-目标角度模拟。

光学导引头的标定是建模、测量、参数辨识、误差补偿等步骤的集成<sup>[8]</sup>,目的在于实现测量精度由高精度仪器(标定设备)向低精度仪器(被标定设备)进行传递。标定设备本身的精度决定了标定结果的精度上限,因此标定前必须对标定设备中存在的系统误差进行定量分析,以保证标定结果的有效性。参考文献[9]对投影漫反射法存在的安装误差进行了

分析,得到了误差参数的非线性方程组,并利用数值方法求得了误差参数数值解。参考文献[10]针对可旋转相机的参数标定问题提出了一种基于二维旋转平面的相机成像模型,并对标定设备中的经纬仪误差进行了分析。参考文献[11-12]对半实物仿真系统中目标模拟部分的模拟器误差、量化误差和计算误差进行了定量分析。由于直写式激光导引头标定系统中可以影响标定精度的因素较多,误差传递关系较复杂,一旦标定结果存在误差,难以直接定位误差来源。目前,针对直写式激光导引头标定系统,分析其由于目标模拟器误差、结构安装、转台制造等因素引起系统误差的研究较少。

文中对直写式激光导引头标定系统中存在的系统误差进行了分析,研究了激光导引头由于光学系统和探测器安装误差对激光导引头测角精度的影响,说明进行标定的必要性。在此基础上介绍直写式激光导引头标定系统,对激光目标模拟器安装误差、激光导引头安装误差、五轴转台零位误差、不相交度、不垂直度误差等影响标定系统精度的误差项进行了定量分析,得到了各项误差源到标定结果误差传递关系的解析表达式,并在直写式激光导引头标定系统上进行了实物验证。实验表明,基于文中提出的误差分析方法能够有效提高直写式激光导引头标定后的精度。另外,该分析方法同样适用于采用直写式激光目标模拟器的半实物仿真系统误差分析。

## 1 激光导引头测角误差来源分析

在研究导引头测角时,不考虑导引头框架运动,文中均假设导引头框架角保持为 $0^\circ$ 。根据导弹总体和制导要求,将导引头测角结果定义为体视线角,包括体视线高低角和体视线方位角。

体视线高低角 $\gamma_b$ :视线(弹目连线指向目标)与弹体水平对称面的夹角。当视线偏向上方时为正;体视线方位角 $\chi_b$ :视线在弹体水平对称面的投影与弹

体纵轴的夹角。当该投影线位于弹体纵轴右侧时为正。

影响导引头测角结果的因素包括导引头内部光学系统和四象限探测器的安装误差。图 1 给出了目标在导引头四象限探测器上投影的示意图,图中省略了导引头光学系统, $f$ 为光学系统等效焦距, $o_s, y_s, z_s$ 为四象限探测器平面。

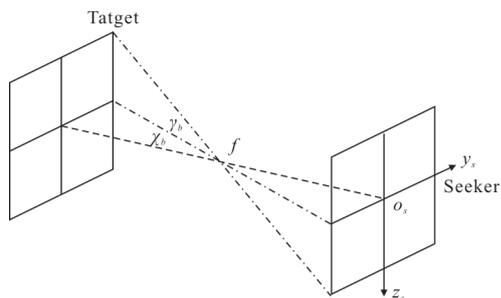


图 1 目标在导引头四象限探测器上的投影

Fig.1 Projection of the target on the four-quadrant probe of the seeker

根据激光导引头测角原理,求出目标在四象限探测器平面内的投影坐标,按照定义即可求出体视线角。记弹体坐标系下目标位置为 $[x_b \ y_b \ z_b]^T$ ,求其在四象限探测器上的投影。目标反射光经过导引头光学系统到达四象限探测器,根据导引头光学系统的设计原理和导引头结构设计方式可知,其安装位置误差不会影响平行光角度,但安装角度误差会影响光束离开光学系统的角度,而四象限探测器的安装位置误差和角度误差均会使得平行光在四象限探测器上的投影点产生偏移。

为了描述方便,建立光学系统坐标系和四象限探测器坐标系。弹体坐标系经过转动 $T_{ob}$ 变换到光学系统坐标系,光学系统坐标系经过平动 $P_s$ 和转动 $T_{so}$ 变换到探测器坐标系,有如下变换关系:

$$\begin{bmatrix} x_o \\ y_o \\ z_o \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{ob} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \\ 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{so} & P_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_o \\ y_o \\ z_o \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $P_s = [-f + \delta_x \ \delta_y \ \delta_z]^T$ , $f$ 为导引头焦距, $\delta_x, \delta_y, \delta_z$ 为四象限探测器安装位置误差; $T_{so}$ 为四象限探测器安装角度误差引起的光学系统坐标系和四象限探测

器坐标系坐标转换矩阵; $T_{ob}$ 为光学系统安装角度误差引起的弹体坐标系和光学系统坐标系坐标转换矩阵,当安装误差角较小,且忽略高阶小量时,有:

$$T_{so} \approx \begin{bmatrix} 1 & \psi_s - \theta_s \\ -\psi_s & 1 & \phi_s \\ \theta_s & \phi_s & 1 \end{bmatrix}, T_{ob} \approx \begin{bmatrix} 1 & \psi_o - \theta_o \\ -\psi_o & 1 & \phi_o \\ \theta_o & \phi_o & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $\psi_o, \theta_o, \psi_s$ 和 $\phi_s, \theta_s, \psi_s$ 分别为导引头光学系统和四象限探测器的安装误差。整理并忽略高阶小量,得光束在四象限探测器平面上的坐标:

$$\begin{aligned} y &\approx \delta_y - x_b(\psi_o + \psi_s) + y_b + z_b(\phi_o + \phi_s) \\ z &\approx \delta_z - y_b(\phi_o + \phi_s) + x_b(\theta_o + \theta_s) + z_b \end{aligned} \quad (3)$$

根据图 2 中体视线角的定义,可以计算体视线角。

$$\begin{aligned} \gamma_b &= \arctan \frac{-z}{\sqrt{f^2 + y^2}} \\ \chi_b &= \arctan \frac{y}{f} \end{aligned} \quad (4)$$

考虑制造和安装工艺水平的限制,不可避免存在位置和角度误差。举例来说,当位置误差最大为 0.1 mm,设计等效焦距 $f=12$  mm,各方向安装角度误差为 7'时,根据公式计算导引头体视线高低角和体视线方位角测角误差分别为-8.33、8.33 mrad,再考虑到探测器噪声、光斑不均匀性等问题,这样的测角精度将无法使用。而导引头制造和安装过程产生的测角误差为随机的,这就需要对每一台激光导引头进行标定,利用外部高精度测试平台测量其各个角度下的测角误差,然后进行补偿才能将其测角精度提升至可接受的程度。这样,保证标定系统的精度就成了激光导引头研制过程中的重要问题。

## 2 直写式激光导引头标定系统

### 2.1 标定系统原理介绍

直写式激光目标模拟器直接将经过衰减和束散的激光投入被测激光导引头。相比于投影漫反射法,直写法不需要建立激光消光暗室<sup>[13]</sup>,对实验室条件无特殊要求,且可模拟的角度更大。直写式激光导引头标定系统框图如图 2 所示,图中对五轴转台内部三轴转台进行简化,用图中立方体进行示意。直写式激光导引头标定系统主要由直写式激光目标模拟器、激光器、五轴转台(包括外部二轴转台和内部三

轴转台两部分)和光纤组成。激光器发出的激光,经过光纤传导进入目标模拟器,目标模拟器安装在二轴转台内框基准面,当二轴转台内框和外框转动时,目标模拟器所发出的平行光束应始终通过五轴转台回转中心。待标定的激光导引头安装在三轴转台内框基准面,激光导引头头罩透镜中心应位于五轴转台回转中心。当转台各轴位于零位时,对应目标位于导引头正前方,此时导引头俯仰和偏航方向的理论测角值应均为 $0^\circ$ 。三轴转台处于零位,二轴转台运动时,导引头应输出激光光束与转台坐标系形成的角度。在不同角度下将导引头测角结果与理论值做差,制成插值表,利用该插值表对导引头测角结果进行补偿,即实现了导引头标定。

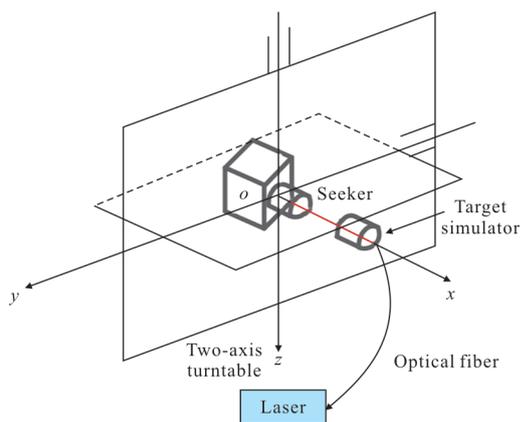


图 2 直写式激光导引头标定系统示意图

Fig.2 Layout of direct writing laser seeker calibration system

## 2.2 理想条件转台转角与导引头测角关系分析

进行导引头标定时仅考虑角度关系,故将坐标系原点 $O$ 定义在五轴转台回转中心,同时也为导引头透镜中心。按参考文献[14]中的定义建立导弹飞行力学中常用的惯性坐标系 $Ox_i y_i z_i$ 、弹体坐标系 $Ox_b y_b z_b$ 和视线坐标系 $Ox_L y_L z_L$ ,姿态角、视线角具体定义不再赘述。不考虑导引头框架转动,认为视线与导引头光轴之间的角度即为导引头测角输出,称为体视线角,体视线角定义如下:

建立分别与三轴转台和二轴转台固联的三轴转台坐标系 $Ox_3 y_3 z_3$ 和二轴转台坐标系 $Ox_2 y_2 z_2$ 。当无安装误差时,三轴转台坐标系和二轴转台坐标系原点重合,导引头坐标系与三轴转台系重合,视线坐标系与二轴转台系重合。二轴转台外框为偏航框,内框

为俯仰框,当二轴转台内框和外框转动时,可实现对视线高低角和视线方位角的模拟。二轴转台相对于惯性坐标系运动时,绕偏航轴转动, $\chi_t$ 再绕俯仰轴转动 $\gamma_t$ ,从惯性坐标系到二轴转台坐标系转换矩阵为:

$$T_{2i} = \begin{bmatrix} \cos\gamma_t & 0 & -\sin\gamma_t \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\gamma_t & 0 & \cos\gamma_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\chi_t & \sin\chi_t & 0 \\ -\sin\chi_t & \cos\chi_t & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\gamma_t \cos\chi_t & \cos\gamma_t \sin\chi_t & -\sin\gamma_t \\ -\sin\chi_t & \cos\chi_t & 0 \\ \sin\gamma_t \cos\chi_t & \sin\gamma_t \sin\chi_t & \cos\gamma_t \end{bmatrix} \quad (5)$$

无安装误差情况下,二轴转台系内目标模拟器发出的光束单位矢量可用 $n_2=[1 \ 0 \ 0]^T$ 表示,则单位长度的光束在惯性坐标系下可表示为:

$$n_i = T_{2i} n_2 = \begin{bmatrix} \cos\gamma_t \cos\chi_t \\ \cos\gamma_t \sin\chi_t \\ -\sin\gamma_t \end{bmatrix} \quad (6)$$

若三轴转台位于零位且无安装误差,即三轴转台坐标系、弹体坐标系和惯性坐标系重合,则惯性坐标系到三轴转台坐标系转换矩阵 $T_{3i}$ 和三轴转台坐标系到弹体坐标系转换矩阵 $T_{b3}$ 均为单位阵,单位长度的光束在弹体坐标系下表示为:

$$n_b = T_{b3} T_{3i} n_i \quad (7)$$

记 $n_b=[n_{bx} \ n_{by} \ n_{bz}]^T$ ,根据体视线角的定义可以得到导引头测角理论值。

对于理想的仿真系统,为了模拟导引头测角,应满足以下基本假设:

- (1) 二轴转台与三轴转台的转轴和回转中心重合,且激光导引头的透镜光心与回转中心重合;
- (2) 转台不存在相交度和垂直度误差,五轴转台位于零位时,二轴转台坐标系、三轴转台坐标系、弹体坐标系、视线坐标系相应的坐标轴重合;
- (3) 目标模拟器发出的平行光束与二轴转台系 $Ox_2$ 轴重合;
- (4) 激光导引头的光轴与三轴转台系 $Ox_3$ 轴重合。

而在实际系统中,导引头与三轴转台,目标模拟器与二轴转台都可能存在安装误差,转台本身也会存在制造误差。下面对标定系统存在的误差进行分析。

### 3 标定系统误差分析

首先考虑角度误差,即二轴转台坐标系、三轴转台坐标系、弹体坐标系、视线坐标系的坐标原点重合,仅考虑安装角误差。标定系统各部分产生的对标定结果产生的误差可由图 3 表示。

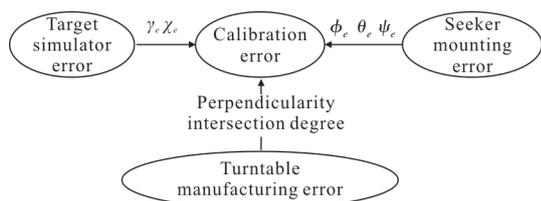


图 3 误差源与标定结果误差关系

Fig.3 Relationship between error source and calibration result

$$T_{b3} = \begin{bmatrix} \cos\theta_e \cos\psi_e & \cos\theta_e \sin\psi_e & \sin\theta_e \\ \sin\phi_e \sin\theta_e \cos\psi_e - \cos\phi_e \sin\psi_e & \sin\phi_e \sin\theta_e \sin\psi_e + \cos\phi_e \cos\psi_e & \sin\phi_e \cos\theta_e \\ \cos\phi_e \sin\theta_e \cos\psi_e + \sin\phi_e \sin\psi_e & \cos\phi_e \sin\theta_e \sin\psi_e - \sin\phi_e \cos\psi_e & \cos\phi_e \cos\theta_e \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中： $\phi_e$ 、 $\theta_e$  和  $\psi_e$  分别为导引头所在的弹体系与三轴转台坐标系之间的滚转方向、俯仰方向和偏航方向安装误差角。

若不考虑滚转方向的安装误差角  $\phi_e$ ，并认为其余的安装误差角很小，有：

$$\begin{aligned} \cos\gamma_e &\approx \cos\chi_e \approx \cos\theta_e \approx \cos\psi_e \approx 1 \\ \sin\gamma_e &\approx \gamma_e \\ \sin\chi_e &\approx \chi_e \\ \sin\theta_e &\approx \theta_e \\ \sin\psi_e &\approx \psi_e \end{aligned} \quad (10)$$

并忽略高阶小量,在这种情况下,

$$n_i = T_{i2} n_2 \approx \begin{bmatrix} \cos\gamma_i \cos\chi_i & -\sin\chi_i & \sin\gamma_i \cos\chi_i \\ \cos\gamma_i \sin\chi_i & \cos\chi_i & \sin\gamma_i \sin\chi_i \\ -\sin\gamma_i & 0 & \cos\gamma_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \chi_e \\ \gamma_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\gamma_i \cos\chi_i - \chi_e \sin\chi_i + \gamma_e \sin\gamma_i \cos\chi_i \\ \cos\gamma_i \sin\chi_i + \chi_e \cos\chi_i + \gamma_e \sin\gamma_i \sin\chi_i \\ -\sin\gamma_i + \gamma_e \cos\gamma_i \end{bmatrix} \quad (11)$$

当三轴转台转角为 0 时,得平行光束在弹体系下的分量为:

$$n_b = T_{bi} n_i \approx \begin{bmatrix} 1 & \psi_e & \theta_e \\ -\psi_e & 1 & 0 \\ \theta_e & 0 & 1 \end{bmatrix} n_i =$$

若目标模拟器发出的平行光束与二轴转台坐标轴产生对准误差角  $\gamma_e$  和  $\chi_e$ ,则由之前的分析结论可知,目标模拟器发出光线的单位矢量在二轴转台系表示为:

$$n_2 = \begin{bmatrix} \cos\gamma_e \cos\chi_e \\ \cos\gamma_e \sin\chi_e \\ -\sin\gamma_e \end{bmatrix} \quad (8)$$

考虑安装误差使激光导引头与三轴转台坐标系产生对准误差,则三轴坐标系到弹体系的坐标转换矩阵  $T_{b3}$  不再为单位阵,类似于惯性坐标系到三轴坐标系转换矩阵  $T_{3i}$  的形式,采用偏航-俯仰-滚转转序,得到:

$$\begin{bmatrix} \cos\gamma_i \cos\chi_i + \psi_e \cos\gamma_i \sin\chi_i - \chi_e \sin\chi_i - \gamma_e \sin\gamma_i \cos\chi_i \\ -\psi_e \cos\gamma_i \cos\chi_i + \cos\gamma_i \sin\chi_i + \chi_e \cos\chi_i - \gamma_e \sin\gamma_i \cos\chi_i \\ \theta_e \cos\gamma_i \cos\chi_i - \sin\gamma_i - \gamma_e \cos\gamma_i \end{bmatrix} \quad (12)$$

激光导引头瞬时视场较小,标定角度范围内有  $\cos\gamma_i \approx \cos\chi_i \approx 1$ ,  $\sin\gamma_i = \gamma_i$ ,  $\sin\chi_i = \chi_i$ ,且忽略高阶小量,有:

$$n_b \approx \begin{bmatrix} 1 \\ \chi_i - \psi_e + \chi_e \\ \gamma_i - \theta_e + \gamma_e \end{bmatrix} \quad (13)$$

进而有:

$$\begin{aligned} \gamma_b &\approx \gamma_i - \theta_e + \gamma_e \\ \chi_b &\approx \chi_i - \psi_e + \chi_e \end{aligned} \quad (14)$$

可以看出,在假定误差角很小且忽略高阶小量的情况下,激光目标模拟器在二轴转台的安装误差角和导引头在三轴转台的安装误差角与测角理论值求和(做差)即为标定结果。

转台的垂直度和相交度误差使得坐标系坐标轴不满足正交条件,给分析带来了困难。由于转台垂直度和相交度误差通常较小,可近似将其转化为目标模拟器和导引头安装角度误差进行分析。

除安装角误差外,标定系统还同时存在位置误差,包括:

- (1) 二轴转台与三轴转台回转中心位置偏差;
- (2) 目标模拟器安装位置误差;
- (3) 导引头安装位置误差。

激光目标模拟器发出平行光束,模拟无穷远处目标,当存在上述三种安装位置误差时,导引头头罩始终覆盖在平行光束内,因此这三种误差不会影响导引头测角结果。

#### 4 标定实验分析

建立直写式激光导引头标定系统,其中五轴转台采用立式结构,目标模拟器采用折射式设计,实拍照片如图 4 所示。

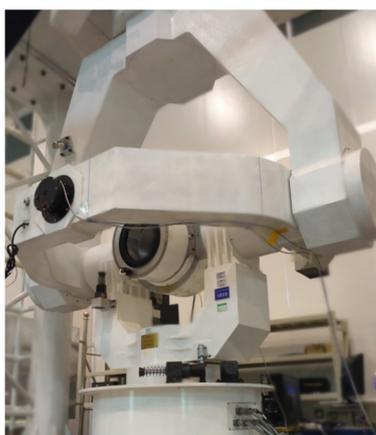


图 4 直写式激光导引头标定系统

Fig.4 Direct writing laser seeker calibration system

设计工装,将导引头安装在三轴转台内框基准面,然后操作五轴转台归零,使目标模拟器位于导引头正前方,此时导引头输出的角度即为标定前的零位误差。消去零位后,操作二轴转台转到标定角度下,利用导引头输出与转台基准角做差建立误差表,再利用合适的方法将误差进行补偿即完成标定。

在五轴转台归零状态下,操作三轴转台滚转框使其旋转 180°,可以得到导引头标定后的零位精度,实验后导引头体视线高低角和体视线方位角随三轴转台滚转角变化关系如图 5 所示。

若标定系统无误差,则导引头输出体视线高低角和体视线方位角均应始终为 0。可以看出,滚转角变化时导引头测角误差最大超过 2.5 mrad,需要对标定系统进行误差分析,并对其进行调整。

通过之前的分析可知,标定系统误差来源包括

五轴转台、激光目标模拟器和导引头工装三部分。

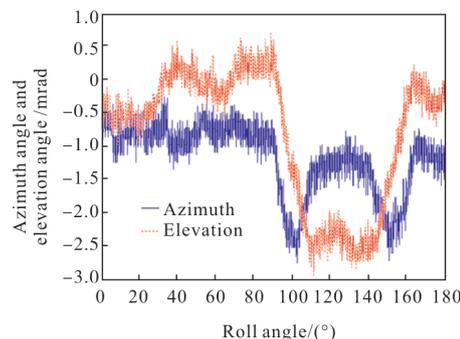


图 5 导引头测角随滚转角变化关系

Fig.5 Angle of seeker changes with roll angle

首先对五轴转台进行测试,保证其垂直度、相交度和对准误差。考虑到各项误差在空间中近似正交,仅考虑最大误差项。按照参考文献[15]给出的五轴转台误差测试方法,得到 12 项误差及其不确定度。实测三轴转台与二轴转台高度差 0.310 mm,为最大的相交度误差,标定系统中目标模拟器距离转台回转中心 915 mm,计算近似认为该项误差造成转台转角误差为:

$$\arctan \frac{0.31}{915} = 0.34 \text{ mrad}$$

实测垂直度误差最大项为二轴转台偏航与俯仰轴线垂直度误差,为 -11.6",单位换算为 -0.056 2 mrad。

导引头通过工装安装在三轴转台内框基准面,利用千分尺测量基准面平整度,发现千分尺跳动 0.02 mm,工装直径为 138 mm,计算得到导引头安装角误差为:

$$\arctan \frac{0.02}{138} = 0.14 \text{ mrad}$$

由于转台和导引头安装引起的极限误差仍小于实测误差,因此认为标定系统误差主要来源于目标模拟器。当转台各轴位于零位,激光光斑理论上应位于 CCD 相机成像中心,实测发现激光光斑与成像中心存在偏移,可以推断这引起了标定零位误差。调整目标模拟器的安装顶丝后,CCD 相机捕获的光斑如图 6 所示,图中红点为目标模拟器发出的激光光斑,两条红色细线交汇点为图像中心。目标模拟器角度偏差造成的光斑偏移小于 1 pixel,1 pixel 对应位移为 0.152 7 mm,对应角度误差为:

$$\arctan \frac{0.1527}{915} = 0.17 \text{ mrad}$$

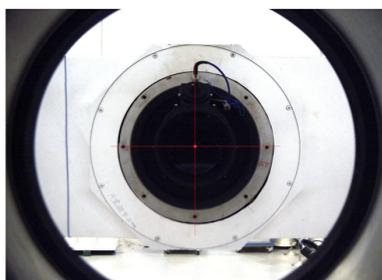


图 6 目标模拟器调整后 CCD 相机捕获的光斑图

Fig.6 Target spot captured by the CCD camera after adjusting the target simulator

通过对转台、导引头安装和目标模拟器误差的分析,可以保证标定系统存在的极限误差为 0.71 mrad,满足导引头测角精度要求。利用校正后的系统完成导引头标定,重复进行滚转框旋转 180°的测角实验,得到导引头体视线高低角和体视线方位角随三轴转台滚转角变化关系如图 7 所示。可以看出,调整后导引头零位误差小于 1 mrad。实测误差来源于标定系统,这部分小于 0.71 mrad,其余部分主要来源于探测器和处理电路噪声。

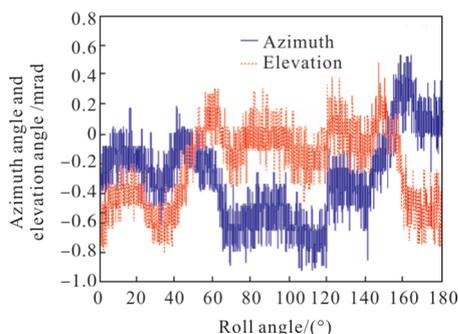


图 7 调整后导引头测角随滚转角变化关系

Fig.7 Angle of seeker changes with roll angle after adjusting the target simulator

## 5 结论

文中分析了直写式激光导引头标定系统中存在的各项误差对激光导引头测角的影响,定量得到了误差源与测角结果之间的关系。由于难以从设计上消除激光导引头制造和安装误差引起的测角误差,因此必须对其进行误差标定。文中对目标模拟器误差、导引头安装误差、五轴转台制造误差引起的角度误差进行分析,进行小角度线性化和忽略高阶小量处理后得到了直观的误差传递关

系。为了减小标定系统误差对标定结果的影响,结合一次标定过程,通过分析和调整标定系统各环节的安装,将标定零位误差由 2.5 mrad 减小至 1 mrad 以内。文中的结论能够为直写式激光导引头标定系统的误差分析提出依据,提高标定精度。文中相关结论也适用于采用相同目标模拟方法的半实物仿真系统。

## 参考文献:

- [1] Cai Yi. Photoelectric Precision Guided Weapons [M]. Beijing: Weapons Industry Press, 2011. (in Chinese)  
蔡毅. 光电精确制导武器 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 2011.
- [2] Meng Xiuyun, Ding Yan, Jia Qingzhong. Hardware-in-the-loop Simulation [M]. 2nd ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2013. (in Chinese)  
孟秀云, 丁艳, 贾庆忠. 半实物仿真[M]. 第 2 版. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- [3] Deng Fanglin, Liu Zhiguo, Wang Shicheng. Design and development of the hardware-in-the-loop simulation system for laser seeker [J]. *Acta Simulata Systematica Sinica*, 2004, 16(2): 255-257. (in Chinese)  
邓方林, 刘志国, 王仕成. 激光导引头半实物仿真系统的设计与研制[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(2): 255-257.
- [4] Fan Shipeng, Lin Defu, Lu Yulong, et al. Design and achievement of hardware-in-the-loop simulation system for guided shell based on laser semi-active seeker[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 394-397. (in Chinese)  
范世鹏, 林德福, 路宇龙, 等. 激光制导武器半实物仿真系统的设计与实现[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(2): 394-397.
- [5] Liang Weiwei, Zhao Hongpeng, Yin Ruiguang, et al. Study of time delay characteristic of HITL simulation system for laser angle deception jamming [J], *Acta Armamentarii*, 2018, 39(6): 1178-1185. (in Chinese)  
梁巍巍, 赵宏鹏, 殷瑞光, 等. 激光角度欺骗干扰半实物仿真时间延迟特性研究[J]. 兵工学报, 2018, 39(6): 1178-1185.
- [6] Wang Yunping, Zhao Changming, Li Yan, et al. Hardware-in-the-loop simulation system for laser-angle-deception jamming [J]. *Infrared and Laser*

- Engineering*, 2012, 41(5):1217-1222. (in Chinese)  
王云萍, 赵长明, 李岩, 等. 激光角度欺骗干扰半实物仿真试验系统[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(5): 1217-1222.
- [7] Shan Jiayuan, Liu Zaozhen, Li Zhongwu, et al. The hardware -in -the -loop simulation system for the guidance system laser guided weapon [J]. *Computer Simulation*, 2002, 19(2): 15-17. (in Chinese)  
单家元, 刘藻珍, 李钟武, 等. 激光制导武器半实物仿真试验系统[J]. 计算机仿真, 2002, 19(2): 15-17.
- [8] Sun Hui, Liu Hui, Luo Anzhi, et al. Calibration of seeker's pointing error based on model linearization and least square estimation [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(7): 2060-2068. (in Chinese)  
孙辉, 刘慧, 罗安治, 等. 应用模型线性化和最小二乘估计的导引头指向精度标定 [J]. 光学 精密工程, 2015, 23(7): 2060-2068.
- [9] Fan Shipeng, Lin Defu, Wang Jinran, et al. Error analysis and correction for hardware -in -the -loop simulation system of laser guidance weapon [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(4): 904-908. (in Chinese)  
范世鹏, 林德福, 王靳然, 等. 激光制导武器半实物仿真的误差分析与校正[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(4): 904-908.
- [10] Gu Guohua, Wang Jiajie, Chen Qian, et al. Camera parameter calibration based on two -dimensional rotating platform[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(7): 1890-1899. (in Chinese)  
顾国华, 王佳节, 陈钱, 等. 二维旋转平台下的相机参数标定[J]. 光学 精密工程, 2017, 25(7): 1890-1899.
- [11] Xiao Weiguo, Hao Chong'en. Research on error for a three-axis flight simulation turntable[J]. *Acta Simulata Systematica Sinica*, 2001, 13(5): 678-680. (in Chinese)  
肖卫国, 郝崇恩. 三轴飞行模拟转台误差研究 [J]. 系统仿真学报, 2001, 13(5): 678-680.
- [12] Xiao Weiguo, Er Lianjie. Error analysis of radar guidance hardware-in-the-loop simulation [J]. *Journal of System Simulation*, 2007, 19(11): 2461-2463. (in Chinese)  
肖卫国, 尔联洁. 雷达制导半实物仿真误差分析 [J]. 系统仿真学报, 2007, 19(11): 2461-2463.
- [13] Zhang Jinsheng, Wang Shicheng, Xu Ping, et al. Development and demarcating of diffuse reflector of laser guided weapon simulation system [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2005, 16(4): 421-424.(in Chinese)  
张金生, 王仕成, 徐萍, 等. 激光制导武器仿真系统漫反射屏研制及标定[J]. 光电子·激光, 2005, 16(4): 421-424.
- [14] Xiao Yelun. Modeling of Spacecraft Motion: the Theoretical Basis of Flight Dynamics [M]. Beijing: Beihang University Press, 2003. (in Chinese)  
肖业伦. 航空航天器运动的建模: 飞行动力学的理论基础 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003.
- [15] Ren Shunqing, Gao Kang, Zhao Hongbo. Measurement method of perpendicularity, axis intersection, alignment error of five-axis simulator [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2015, 47(10): 1-6. (in Chinese)  
任顺清, 高亢, 赵洪波. 五轴台垂直度、相交度、对准误差的测试方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(10): 1-6.