

# 激光制导武器对抗半实物仿真弹干视线角模拟精度分析

李慧 甘霖 张文攀 梁巍巍

中国洛阳电子装备试验中心, 河南 洛阳 471003

**摘要** 研究了激光制导武器对抗半实物仿真系统高重频激光干扰试验中弹干视线角动态模拟过程,分析了弹干视线角模拟精度分析的完整过程。全面分析了影响弹干视线角模拟精度的几何误差、控制误差和光学系统误差源,并采用一种多体系统误差分析建模理论,建立了弹干视线角模拟误差模型。设计了弹干视线角模拟误差实验测试方法,通过误差建模和实验测试相结合可得到弹干视线角模拟误差模型中的误差项。提出了采用残差分析或蒙特卡罗仿真方法进行弹干视线角模拟精度分析,得到视线角模拟误差估计值及变化规律。

**关键词** 激光技术;高重频激光;激光干扰;弹干视线角;多体系统

**中图分类号** O436 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP52.011202

## Simulation Precision Analysis of Line of Sight Between Bomb and Target on Hardware in the Loop System for Laser Guided Weapon Countermeasure

Li Hui Gan Lin Zhang Wenpan Liang Weiwei

*Luoyang Electronic Equipment Test Center of China, Luoyang, Henan 471003, China*

**Abstract** Dynamic simulation process of line of sight between bomb and target in the high frequency laser jamming test on hardware in the loop system for laser guided weapon countermeasure is researched, and the whole process of simulation precision analysis of line of sight between bomb and target is proposed. Then the geometric error, control error and optical assembling error, which influence the simulation precision, are analyzed in total, the error model of line of sight between bomb and target is set up by adopting multi-body error analysis theory. Experimental testing method of simulation error of line of sight between bomb and target is designed, and the unknown error in the error model is identified by means of actual test combined with error modeling. The simulation accuracy analysis of line of sight between bomb and target is proposed using Monto-Carlo mothod or residual analysis, and the estimated value and its variation are calculated.

**Key words** laser technique; high frequency laser; laser jamming; line of sight between bomb and target; multi-body system

**OCIS codes** 120.4800; 120.4880; 230.0250; 140.3330

## 1 引言

激光角度欺骗干扰装备和激光高重频干扰装备是我军发展的重要光电对抗装备,其主要作战对象是敌方来袭的激光半主动制导武器,作战使命是诱偏敌方激光制导武器或使其丧失精确制导能力,以防护我方重点目标<sup>[1-2]</sup>。对激光干扰装备的技战术指标试验鉴定和干扰效果评估时,由于场地、经费等限制很少采用实弹对抗打靶方法,采用仿真建模技术构建激光制导武器对抗半实物仿真试验系统进行接近实战条件下的仿真试验是一种经济有效的手段<sup>[3]</sup>,而且激光干扰装备可直接介入仿真系统,可得到激光制导武器受到干扰

收稿日期: 2014-06-06; 收到修改稿日期: 2014-06-27; 网络出版日期: 2014-11-20

基金项目: 总装重大课题(2010SY3310002)

作者简介: 李慧(1980—),男,博士,助理研究员,主要从事光电对抗仿真技术方面的研究。E-mail: lihuiwch@163.com  
本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

前后的弹道变化和命中精度,实现闭环干扰效果评估<sup>[4]</sup>。国外的光电对抗装备经过几十年的发展,已经形成内场仿真试验和实弹对抗试验相结合并且互为补充、互相验证的试验鉴定模式<sup>[5-7]</sup>。

对于仿真系统和仿真试验,最引人关注的问题是系统的精度如何,以及基于系统开展仿真试验获得的试验数据和结果的精度或可信度如何<sup>[8]</sup>。为保证半实物仿真试验的精度和可信度,由仿真的相似关系,需要控制仿真环境下激光导引头和漫反射屏上(或五轴仿真转台外两轴库德镜上和光纤头出口处)的指示/干扰光斑之间的相对运动规律与实战情况下的弹目/弹干扰视线(LOS)运动规律一致<sup>[4,9]</sup>,从而为导引头提供等效的人射视线角。同时,影响弹干视线角模拟的误差因素很多(包括光学装调误差、变形误差、轴系误差和动态控制误差等),为保证半实物仿真试验系统得到有效的应用,需要事先分析确定在半实物仿真试验中不同战情条件下激光导引头入瞳处的弹目/弹干视线角模拟精度和模拟误差规律。本文仅对高重频激光干扰半实物仿真试验中的弹干视线角模拟误差进行了研究,确定了误差模型建立和弹干视线角模拟误差实验测试的方法,分析了弹干视线角模拟精度分析的完整过程。

## 2 高重频干扰试验中弹干视线角模拟的动态过程

激光高重频干扰作为对抗激光半主动制导武器的有效手段,已经应用在多种光电对抗装备上。根据工作原理不同一般有以下3种模式:干扰装备具有固定大发散角,无需引导直接干扰激光导引头;采用红外侦察告警设备的目标指示信息来引导干扰激光直射到激光导引头处;利用共载车平台的红外捕获跟踪设备对来袭导弹进行跟踪瞄准,使干扰激光始终能够精确照射到激光导引头处。由于高重频直射方式降低了激光能量,提高了激光重频,能达到较好的干扰效果。在高重频激光对激光制导武器干扰半实物仿真试验中,激光导引头模拟器安装于五轴仿真转台滚转框内,五轴仿真转台外两轴转动模拟弹干干扰视线的角运动。被试装备的干扰激光可经过两种模式导入,一种通过平行光导光镜组(即5面平面反射镜组成的库德光路组)导入并进行光路转折后,始终指向激光导引头入瞳处,另一种通过光纤导入到五轴仿真转台俯仰回转臂末端的光纤头处,然后直射指向激光导引头入瞳处。其中,库德光路是一种能够将光束折转到随轴系旋转的导光光路,在激光跟踪和对抗领域得到广泛应用<sup>[10]</sup>,如某激光发射系统中库德光路与水平式两轴跟瞄转台组合使用,可以使发射激光束随经轴和纬轴一起转动,实现激光束覆盖全天域的照射,作用距离为几百千米<sup>[11]</sup>。文中采用的库德光路也是一种典型的全反射光路,可以使高重频干扰激光随五轴台的外两轴台俯仰轴和方位轴一起转动,当俯仰轴和方位轴旋转时,出射激光光束始终照射在导引头的接受面处,但光束指向随两个轴的转动变化,从而实现弹与干扰目标之间视线的模拟。

两种模式激光高重频干扰情况下,弹干视线角模拟误差的动态过程如图1所示。被试装备的干扰激光经过能量变换后导入五轴仿真转台外两轴,最后直射进入五轴仿真转台回转中心激光导引头处,激光导引头模

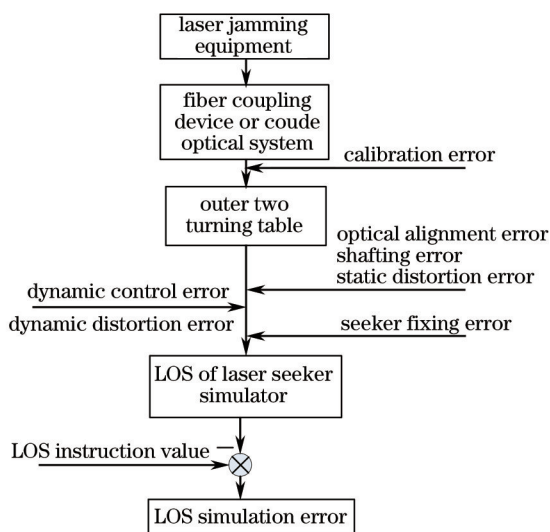


图1 弹干视线角模拟误差的动态过程

Fig.1 Dynamic process of LOS between bomb and target simulation error

拟器感受到的弹干视线角由五轴台的外两轴来模拟。弹干视线角模拟误差指的是制导武器仿真计算机动态战情解算得到的弹干视线角映射到在内场映射坐标系中的弹干视线角与干扰激光经过五轴仿真转台的动态控制转换后,在考虑各种静、动态误差因素下得到的激光导引头处的弹干视线角之间的一次差。其中,仿真计算机动态战情解算得到的弹干视线角经过映射得到在内场映射坐标系中的弹干视线角为指令真值。

### 3 弹干视线角模拟误差建模

高重频激光干扰半实物仿真试验中弹干视线角模拟精度与组成仿真系统的各仿真设备的精度密切相关,若进行精度分析,需要分析系统的主要误差源,对各仿真设备误差进行研究,并建立误差数学模型。

#### 3.1 误差源分析

由图1所示弹干视线角模拟误差的动态变化过程可知,影响弹干视线角模拟误差的误差源由光学系统装调误差、机械框架误差、动态控制误差、动态变形误差和设备方位参数标定误差组成。

高重频干扰库德光路的装调基准是利用自准直平行光管建立的,自准直平行光管的指向误差和安放误差会影响到装调基准的建立,库德光路装调基准建立后,采用五角棱镜法对各块库德镜顺序装调。因此,这里影响指向精度的光学系统装调误差包括自准直平行光管的指向精度、自准直平行光管的安放精度、五角棱镜的定角转向精度以及五角棱镜的定位精度。

机械框架误差包括框架之间的垂直度误差和框架轴自身的回转误差,会导致出射光束的角位置变化从而带来指向误差<sup>[2]</sup>。理想条件下,五轴仿真转台各个框架轴应保持两两互相垂直,但由于加工、装配和调校等因素限制,各轴线不可能完全满足正交条件,定义两轴线夹角与 $90^\circ$ 之间的偏差为垂直度误差。用回转误差来表征轴系回转精度,它是因框架旋转引起的随机误差。理想情况下,框架轴线只有一个旋转运动的自由度,其他几个自由度方向被完全约束,而在实际情况的任一瞬间,一方面框架主轴会绕瞬时回转轴线旋转,另一方面瞬时回转轴线连同主轴一起相对转轴平均轴线做轴向 $\Delta s$ 、径向 $\Delta c$ 和倾角 $\Delta\gamma$ 运动,如图2所示。

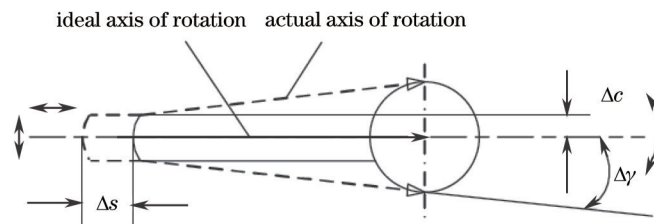


图2 轴系回转误差

Fig.2 Rotary error of shafting

动态控制误差为五轴仿真转台在一定角速度和角加速度运动过程中,由于随机噪声、摩擦力矩等非线性因素影响,必然存在的幅值衰减与相位滞后,导致跟随引导指令运动控制不精确产生。

动态变形误差是影响弹干视线角模拟误差的重要误差源,由于外两轴台在俯仰和方位方向运动时都可能产生加速度,而回转臂在加速运动时由于惯性力作用会产生变形从而导致第3、4、5面库德镜的法线变化,从而导致光束指向误差。

另外,导引头在滚转框(中空环形结构)上安装理想情况下,导引头光学系统中心(与探测器中心有一固定差值)应与五轴仿真转台的回转中心重合,由于安装误差的存在,两者是不重合的,从而导致导引头视线角测量出现偏差,因此必须考虑导引头安装误差对仿真结果的影响。

#### 3.2 弹干视线角模拟误差模型

##### 3.2.1 多体系统误差建模理论

多体系统运动学误差分析建模理论是贯穿误差研究的理论基础<sup>[3]</sup>,从相邻体几何关系的描述方法入手,研究了多体系统中激光干扰信号模拟系统和弹体姿态模拟系统的典型体与其相邻体之间的位置关系,并引入了相邻体坐标变换矩阵,分别推导了有误差和理想(无误差)情况下,多体系统中典型体上任一点在基准参考坐标系中的位置和运动矢量。

在误差情况下,任意体上给定点在惯性参考坐标系中的位置矢量 $r_0$ 可表示为

$$\begin{bmatrix} r_0 \\ 1 \end{bmatrix} = \left[ \prod_u^0 A_{JK} \right] \begin{bmatrix} r_m \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中  $r_m$  为典型体  $m$  上给定点在典型体坐标系中的矢量,  $K$  为典型体,  $J$  为其相邻低序体,  $A_{JK}$  为典型体与其相邻低序体之间的坐标转换矩阵,  $u$  为典型体达到惯性参考坐标系时低序体算子的阶数, 须满足  $L^u(m)=0$ , 其中  $L$  为低序体算子, 当  $J$  为  $K$  的相邻低序体时,  $L'(K)=L(K)=J$ 。

如果定义  $r_0^0$  为给定点在惯性参考坐标系中的理想位置, 则该点在参考坐标系中的实际位置和理想位置间的误差矢量可表示为

$$\begin{bmatrix} e \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_0 \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} r_0^0 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

从(1)式和(2)式可以看出, 通过这种变换, 任意体上任意点的位置和运动情况, 以及体与体间、点与点间的相对位置和运动信息都可以得到清晰表达; 系统中的任何一项综合误差都可以在各体间找到来源, 可以看作是多项误差因素的耦合, 在综合误差不易测量时, 这种先将总误差分离为多个可测、易测误差因素而后再通过一定关系耦合的方法就显得非常有效和灵活<sup>[14]</sup>; 而且只要保证各个误差分量可测或易测, 它可以根据实际多体系统的结构特点和模型精度的具体要求精简相邻体间变换矩阵的个数, 而不必追溯每个个体对该项综合误差的贡献大小, 最终达到简化模型的目的。

### 3.2.2 多体系统描述

高重频激光干扰半实物仿真试验系统可以抽象、提炼为一个典型的多体系统, 即由多个刚体或柔体通过某种方式连接而成的复杂机械系统。根据多体系统理论, 体与体间大多都通过运动副连接在一起, 各体间的运动关系可用坐标变换矩阵描述, 将实际条件下任意两相邻体固定连接时产生的误差称为静止误差, 而相对运动时产生的误差为运动误差。静止误差与固定连接过程的精确与否有关, 而运动误差则取决于运动过程的精确性, 并与运动量有关。

高重频干扰试验典型体如图3所示, 根据系统中各体之间的位置和运动关系给各体编号, 并建立各体相应坐标系。定义五轴仿真转台基座为0体, 三轴台的方位框架为1体, 俯仰框为2体, 滚转框为3体, 激光导引头模拟器为4体, 外两轴台的俯仰框为5体, 第3面库德镜为6体, 方位轴系为7体, 库德光路第4面平面镜为8体, 第5面平面镜为9体。设置惯性坐标系原点  $o$  为五轴仿真转台方位轴线与地基基座法兰平面的交点,  $ox$  轴与漫反射屏法线重合且指向漫反射屏为正向,  $oy$  轴与外框轴线重合, 指向上为正,  $oz$  轴与  $ox$ 、 $oy$  构成右手直角坐标系。在每个体上均建立其体坐标系和运动参考坐标系, 可分别得出各体之间的误差特征矩阵。

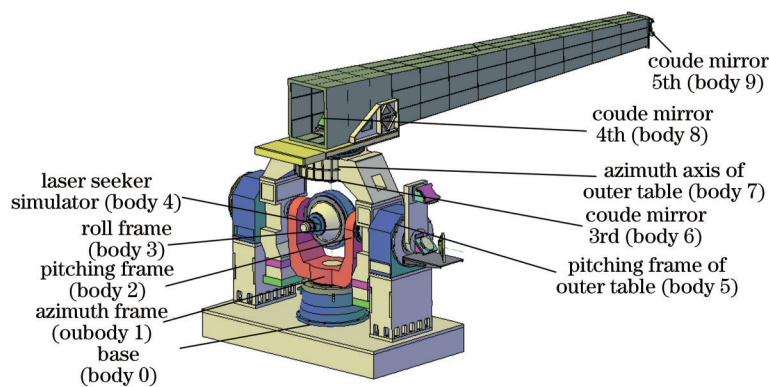


图3 高重频干扰试验典型体

Fig.3 Typical body of high frequency jamming test

0体与1体体间理想静止、运动特征矩阵和静止、运动误差特征矩阵可表示为

$$\left. \begin{aligned}
 L_{01p} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 L_{01pc} &= \begin{bmatrix} 1 & -\Delta\gamma_{01} & 0 & \Delta x_{01} \\ \Delta\gamma_{01} & 1 & -\Delta\alpha_{01} & \Delta y_{01} \\ 0 & \Delta\alpha_{01} & 1 & \Delta z_{01} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 L_{01s} &= \begin{bmatrix} \cos\psi & 0 & \sin\psi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\psi & 0 & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 L_{01sc} &= \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_z(\psi) & \Delta\psi & \delta_x(\psi) \\ \varepsilon_z(\psi) & 1 & -\varepsilon_x(\psi) & \delta_y(\psi) \\ -\Delta\psi & \varepsilon_x(\psi) & 1 & \delta_z(\psi) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

式中0和1体之间的误差项如表1所示,  $\Psi$  为转台方位轴转动的方位角, 则0和1体之间的误差特征矩阵为

$$L_{01} = L_{01p} L_{01pc} L_{01s} L_{01sc}. \quad (4)$$

其他各体之间的误差特征矩阵  $L_{mn}$  ( $m, n$  分别表示各体编号) 可依次写出, 这里不再重复。

表1 相邻体0体与1体之间的误差项

Table 1 Error item of adjacent two body 0 and 1

Error item	Error type	Error signal
Azimuth frame error of five axis turning table	Azimuth perpendicularity	$\Delta\alpha_{01}, \Delta\gamma_{01}$
	Azimuth intersection	$\varepsilon_x(\psi), \varepsilon_z(\psi)$
	Azimuth servo control	$\Delta\psi$
	Azimuth radial intersection	$\delta_x(\psi), \delta_z(\psi)$
	Azimuth axial excursion	$\delta_y(\psi)$
	Azimuth rotary center position error	$\Delta x_{01}, \Delta y_{01}, \Delta z_{01}$

### 3.2.3 弹干视线角线性误差模型建立

高重频干扰激光通过平行光导光镜组导入时, 由于第1面库德镜和第2面库德镜和外两轴俯仰框固连, 不考虑相对运动和变形。则考虑外两轴台俯仰框误差情况下, 第3面反射镜的入射光线在惯性坐标系0体中可表示为

$$\begin{cases} x = r_{05x} + n_{5x} t \\ y = r_{05y} + n_{5y} t \\ z = r_{05z} + n_{5z} t \end{cases}, \quad (5)$$

式中  $\mathbf{n}_5 = [n_{5x} \ n_{5y} \ n_{5z}]^T$  为入射光线矢量,  $\mathbf{r}_5 = [r_{05x} \ r_{05y} \ r_{05z}]^T$  为第2面反射镜原点坐标,  $t$  为空间直线参数方程中的参数。

第3面库德镜中心的单位法线矢量的表达式为

$$[\mathbf{n}_6 \ 0]^T = L'_{06} [0 \ \sqrt{2}/2 \ \sqrt{2}/2 \ 0]^T, \quad (6)$$

$$L'_{06} = L_{05} L_{56}. \quad (7)$$

第3面库德镜中心A的实际位置矢量为

$$[\mathbf{r}'_{06} \ 1]^T = L'_{06} [0 \ 0 \ 0 \ 1]^T. \quad (8)$$

则第3面库德镜的平面方程为

$$(x - r_{06x})n_{6x} + (y - r_{06y})n_{6y} + (z - r_{06z})n_{6z} = 0. \quad (9)$$

由(5)式和(9)式可得到有误差条件下第3面库德镜上实际入射点A'的位置矢量为

$$[\mathbf{x}_{rs} \ y_{rs} \ z_{rs}]^T = [\mathbf{r}_{05x} \ r_{05y} \ r_{05z}]^T + t' [\mathbf{n}_{5x} \ n_{5y} \ n_{5z}]^T, \quad (10)$$

$$l' = \frac{n_{6x}(r_{06x} - r_{05x}) + n_{6y}(r_{06y} - r_{05y}) + n_{6z}(r_{06z} - r_{05z})}{n_{6x}n_{5x} + n_{6y}n_{5y} + n_{6z}n_{5z}}. \quad (11)$$

设第2面库德镜中心  $M$  在反射光线上的对称点  $N$  的位置坐标为  $[x_{fs} \ y_{fs} \ z_{fs}]^T$ , 由于同一平面上单位法线矢量的平移不变性, 过  $A'$  点的法线方程为

$$\frac{x - x_{fs}}{n_{6x}} = \frac{y - y_{fs}}{n_{6y}} = \frac{z - z_{fs}}{n_{6z}}. \quad (12)$$

线段  $MN$  的中点位于过点  $A'$  的法线上, 并且与法线相垂直, 则有以下方程组成立:

$$\begin{cases} \frac{(x_{fs} + r_{05x})/2 - x_{fs}}{n_{6x}} = \frac{(y_{fs} + r_{05y})/2 - y_{fs}}{n_{6y}} = \frac{(z_{fs} + r_{05z})/2 - z_{fs}}{n_{6z}} = t_2, \\ (x_{fs} - r_{05x})n_{6x} + (y_{fs} - r_{05y})n_{6y} + (z_{fs} - r_{05z})n_{6z} = 0 \end{cases}, \quad (13)$$

$$t_2 = (r_{05x} - x_{fs})n_{6x} + (r_{05y} - y_{fs})n_{6y} + (r_{05z} - z_{fs})n_{6z}. \quad (14)$$

求解(13)式, 得出入射到第4面库德镜光线上一点  $N$  的位置坐标, 则进一步可得到反射光线的方程为

$$\frac{x - x_{rs}}{x_{fs} - x_{rs}} = \frac{y - y_{rs}}{y_{fs} - y_{rs}} = \frac{z - z_{rs}}{z_{fs} - z_{rs}}. \quad (15)$$

同理可依次最终得到入射到第5面库德镜上的实际光斑点的矢量坐标  $r_p$  和激光导引头模拟器4体中心的矢量坐标  $r_B$ , 那么弹干视线矢量可表示为

$$r_c = r_p - r_B, \quad (16)$$

则弹目视线角模型为

$$\begin{cases} \theta_p = \arcsin \frac{y_c}{\sqrt{x_c^2 + z_c^2}}, \\ \theta_a = \arctan \frac{z_c}{x_c}. \end{cases} \quad (17)$$

将上述各式分别代入(17)式, 可得到其具体表达式, 由于该式非常冗长, 在此不列出。

高重频干扰激光通过光纤导入时, 得出各体之间包含误差因素在内的误差转换矩阵后, 对于有误差情况下, 弹干视线可描述为第5面库德镜的体坐标系原点与激光导引头模拟器4体的体坐标系原点之间的连线, 则由(1)式可得到, 第5面库德镜原点在惯性参考坐标系0体中的矢量为

$$[r_0 \ 1]^T = L_{09}[0 \ 0 \ 0 \ 1]^T, \quad (18)$$

$$L_{09} = L_{05}L_{56}L_{67}L_{78}L_{89}. \quad (19)$$

激光导引头模拟器任意一点在惯性参考坐标系0体中的矢量为

$$[r'_0 \ 1]^T = L_{04}[r_4 \ 1]^T, \quad (20)$$

$$L_{04} = L_{01}L_{12}L_{23}L_{34}. \quad (21)$$

则第5面库德镜原点在导引头模拟器4体体坐标系中的位置可表示为

$$[r_4 \ 1]^T = L_{04}^{-1}L_{09}[0 \ 0 \ 0 \ 1]^T. \quad (22)$$

由弹干视线角模拟误差的定义, 同样可得到弹干视线角模拟误差模型如(17)式所示。

将(17)式表示为最小二乘格式

$$\delta_i = b_i x + \varepsilon_i, \quad (23)$$

式中  $\delta_i = [\delta\alpha_i \ \delta\beta_i]^T$  为实验测试的弹干视线角数据,  $x$  为各个误差项组成的列向量, 也为待辨识的参数。  $b_i$  是各个误差项的线性系数,  $\varepsilon_i$  为独立同分布的随机测量误差。

#### 4 弹干视线角模拟误差的实验测试与验证

得出描述综合误差影响的弹干视线角误差模型后, 对于其中的一些误差项可通过测量得到, 对于不能直接测量得到的误差项需要利用实测的数据进行参数辨识获得; 同时为验证弹干视线角模拟误差模型, 需要设计实验对高重频干扰过程中的弹干视线角进行测试。

激光高重频干扰半实物仿真试验中,弹干扰视线角是重要的模拟参量,影响其模拟精度的误差因素众多,实验测试时也需要考虑多种测量设备误差、测量方法误差等因素的影响。这里选取了实践中广泛采用的 CCD 非接触外部检测的方法进行弹干扰视线角模拟误差的实验测试<sup>[15-17]</sup>。高重频干扰激光通过光纤导入时实验测试方案如图 4 所示。五轴仿真转台控制计算机下发指定曲线的运行驱动数据驱动外两轴台转动,同时产生激光触发脉冲触发激光器发出一定频率的脉冲激光,通过设置精确延时器的延时量消除激光器出光延时等同步误差因素,保证运行驱动数据下发时刻与激光器出光时刻相同。脉冲激光进入光纤,再经过自准直经纬仪后产生带有十字叉丝的平行光导入库德光路组中,CCD 相机长时间曝光将光信号转为图像数据保存在图像处理计算机中。通过对每个脉冲激光图像数据进行事后图像处理得到光束实时指向位置,此光束指向数据与同时刻下发的运行驱动数据进行比较即可得到光束实时指向误差。

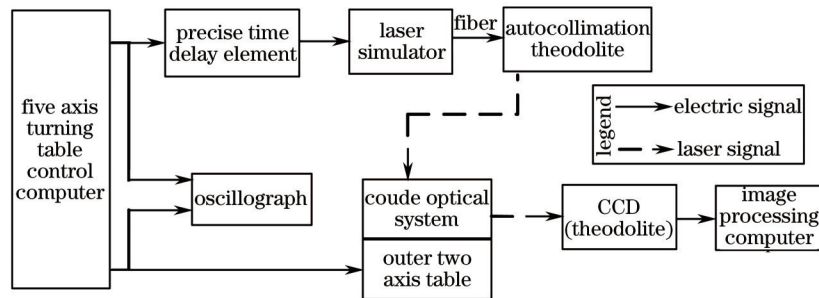


图 4 弹干视线角试验测试方案

Fig.4 Test project of line of sight between bomb an target experiment

具体步骤如下:

1) 标定 CCD 相机光斑像素位置和库德镜 5 上的光斑空间位置的函数关系。在外两轴运动范围内任取  $n$  个位置,在每个位置激光器发射脉冲激光到 CCD 形成图像数据,在图像中提取光斑中心的像元位置,得到 CCD 像元位置和库德镜 5 上的实际光斑位置对应关系,标定完成后保持 CCD 相机位置固定不变,直到测试结束。

2) 测量控制计算机下发数据时刻与激光器出光时刻的时差。精确延时器延时设为零,在五轴仿真转台中心处放置快速响应探测器接受脉冲激光,利用示波器监测快速响应探测器输出时刻和控制计算机下发数据时刻的时差,获得精确延时器应设置的延时量。

3) 控制计算机按照要求的控制曲线开始引导外两轴运动,同时经过精确延时器触发激光器在下发数据时刻发出脉冲激光,发出触发脉冲前 CCD 开始曝光,记录脉冲激光发出时刻的位置图像,直到转台运动完毕。

4) 事后处理图像,利用 CCD 相机像素位置和库德镜 5 上的光斑位置标定关系,解算每个激光脉冲对应的实时角度位置,与同时刻外两轴的引导角度位置比较得到实时指向误差(即弹干视线角模拟误差)。

该测试方案的主要测量误差包括时间同步误差、CCD 的标定误差和光斑图像处理误差。经过初步的误差分析,测量误差不超过实时指向误差指标的 1/3,可采用该方法进行测试。得到实际测试数据之后,可对(23)式中的未知参数进行辨识,然后可对同一输入条件下模型的仿真输出结果与实际测试的结果进行比较,从而对弹干视线角模拟误差模型的准确性进行验证。

## 5 弹干视线角模拟精度分析与估计

通过实验测试和建立弹干视线角模拟误差模型相结合的方法,可得到误差模型中各个误差项,接着对误差模型计算的和实验测试获得的弹干视线角进行残差分析,从而可掌握弹干视线角模拟误差模型的精度,获得不同战情下弹干视线角模拟误差的变化规律。

为使半实物仿真试验系统得到有效应用,需要掌握视线角模拟误差的大小和模拟精度的具体参考值。由建立的误差模型,可根据系统的设计方案中机械、控制系统和光学等的技术指标要求或者经过实际测试获得的各个几何误差和控制误差项,求解系统能达到的总视线角模拟精度。

由于误差的随机性,需要首先分析各个误差的分布特征,得到所有误差源分布类型及误差取值后,需要建立  $r_e$  的概率统计模型,对于误差模型中的各项误差源,分别产生对应的正态分布或均匀分布的伪随机数,运用蒙特卡罗统计试验的方法进行误差估计<sup>[18]</sup>。对于不同分布的误差,其均方差  $\sigma$  与极限误差  $\delta$  之间满足

$$\sigma = \delta/c, \quad (24)$$

式中  $c$  为一常数, 如对于正态分布的误差,  $c=3$ , 对于均匀分布,  $c=\sqrt{3}$ 。

图5和图6是通过10000次的蒙特卡罗仿真得到的弹干视线方位角和俯仰角模拟误差。

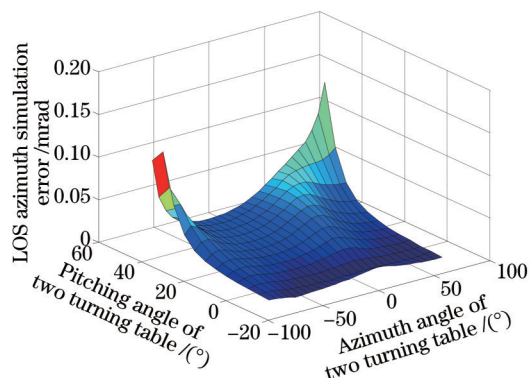


图5 弹干视线方位角模拟误差

Fig.5 LOS azimuth simulation error

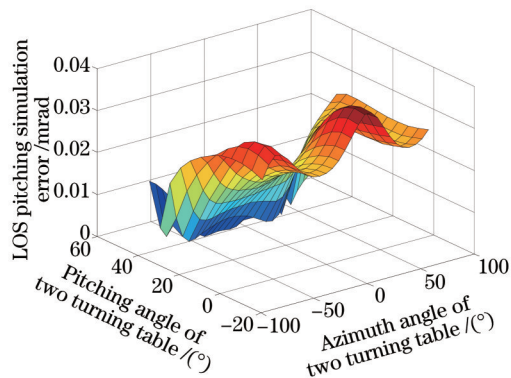


图6 弹干视线俯仰角模拟误差

Fig.6 LOS pitching simulation error

从图中可知, 由于进行了模型简化后考虑的误差源较少, 模拟误差相对其指标来说还是比较小的, 也可能与误差源分布或取值不准确有关。而且当外两轴台方位转角与俯仰转角越大时, 相应位置处的弹干扰视线角模拟误差增大, 精度明显降低, 外两轴台方位角从  $0^\circ$  增大到  $50^\circ$  时, 相应的弹干扰视线方位角模拟误差由  $5.1''$  增大到  $26.8''$ , 并且不同位置处弹干扰视线角模拟误差变化规律复杂。

## 6 结 论

仿真系统的建立过程, 从某种意义上讲就是系统精度分析的过程。对激光高重频干扰半实物仿真试验中的弹干视线角模拟过程进行了分析概括, 分析了影响弹干视线角模拟误差的各种误差源。采用多系统误差理论建立了具有明确物理意义的弹干视线角模拟误差模型, 并分析了弹干视线角模拟精度分析的完整过程。所述方法可运用到激光制导武器对抗半实物仿真试验精度分析中, 为其研究提供理论和模型支持。

## 参 考 文 献

- 1 Bai Feng, Wei Wenjian, Man Guangzhi. The status quo and developing trend of laser deceiving jamming techniques[J]. National Defence Science, 2009, 30(6): 5-9.  
白 峰, 魏文俭, 满广志. 激光有源欺骗式干扰技术现状与发展[J]. 国防科技, 2009, 30(6): 5-9.
- 2 Hua Lei, Zhuang Yongfeng, Zhu Guoli. Analysis of high repetition frequency laser jamming technology[J]. Infrared, 2014, 35(2): 21-25.  
华 磊, 庄永峰, 朱国利. 高重频激光干扰机理分析[J]. 红外, 2014, 35(2): 21-25.
- 3 Yu Guoquan, Guo Jin, Li Yan, *et al.*. Precision analysis of indoor simulation system for laser angle deception jam[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(10): 2610-2616.  
于国权, 郭 劲, 李 岩, 等. 激光角度欺骗干扰内场仿真系统精度分析[J]. 光学精密工程, 2013, 21(10): 2610-2616.
- 4 Li Hui, Li Yan, Liu Bingfeng, *et al.*. Status, development and key technique analysis of laser jamming technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(8): 081407.  
李 慧, 李 岩, 刘冰峰, 等. 激光干扰技术现状与发展及关键技术分析[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(8): 081407.
- 5 Scott B Mobley, John S Cole. Hardware in the loop simulation of dual-mode common aperture seekers at the US Army Aviation and Missile Command[C]. SPIE, 1999, 3697: 72-82.
- 6 Scott B Mobley, Jeff G. Hardware in the loop (HWIL) simulation facility for development, test, and evaluation of multi-spectral missile systems[C]. SPIE, 2000, 4027: 11-22.
- 7 Yi Ming, Wang Xiao, Wang long. Status quo and trend of American army of electro-optic countermeasure technology and equipment[J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(5): 601-607.  
易 明, 王 晓, 王 龙. 美军光电对抗技术装备现状与发展趋势初探[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(5): 601-607.
- 8 Ding Changming. Accuracy analysis of HWIL simulation system via parameter identification[J]. Systems Engineering



- and Electronics, 2001, 23(3): 79-81.
- 丁长明. 用参数辨识法对半实物仿真系统进行精度分析[J]. 系统工程与电子技术, 2001, 23(3): 79-81.
- 9 Zhang Jinsheng, Wang Shicheng, Gao Zhijie, *et al.*. Research on accurate control of angle of sight in laser guided weapon simulation system[J]. Electronics Optics & Control, 2005, 12(4): 19-23.
- 张金生, 王仕成, 高智杰, 等. 激光制导武器仿真系统视线角精确控制研究[J]. 电光与控制, 2005, 12(4): 19-23.
- 10 Wei Qun, Ai Xingqiao, Jia Hongguang. Development of small-scale and dual-field visible light optical system[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 20(4): 739-744.
- 魏 群, 艾兴乔, 贾宏光. 小型可见光双视场光学系统的研制[J]. 光学精密工程, 2013, 20(4): 739-744.
- 11 Wang Hengkun, Zhang Guoyu, Guo Lihong, *et al.*. High performance fast-steering mirror for beam control of vehicular high energy laser system[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(2): 336-341.
- 王恒坤, 张国玉, 郭立红, 等. 高精度动载体激光发射系统光束控制反射镜[J]. 光学精密工程, 2013, 21(2): 336-341.
- 12 Zhang Zhiyong, Zhou Xiaoyao, Fan Dapeng. Analysis, modeling and correction of pointing errors for electro-optical detection system[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(25): 1-12.
- 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(25): 1-12.
- 13 Liu Youwu. Multi-Body Dynamics[M]. Tianjing: Tianjing University Press, 1991.
- 刘又午. 多体系统动力学[M]. 天津: 天津大学出版社, 1991.
- 14 Huo Ju, Zhong Xiaoqing, Yang Ming, *et al.*. Orientation error compensation of turntable for calibration of a non-contact measurement system[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2010, 42(1): 100-105.
- 霍 炬, 仲小清, 杨 明, 等. 某姿态测量系统标定用转台指向误差补偿[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, 42(1): 100-105.
- 15 Huang Jipeng, Wang Yanjie, Sun Honghai, *et al.*. Precise position measuring system for laser spots[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(4): 841-848.
- 黄继鹏, 王延杰, 孙宏海, 等. 激光光斑位置精确测量系统[J]. 光学精密工程, 2013, 21(4): 841-848.
- 16 Xu Wenyu, Bai Tingzhu, Liu Yang, *et al.*. Real-time laser facula detection based on top-three-neighborhood-region continuous-pixels numbering[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(12): 1212002.
- 徐文宇, 白廷柱, 刘 洋, 等. 基于上三邻域连续点计数的激光光斑实时检测[J]. 光学学报, 2013, 33(12): 1212002.
- 17 Wang Yang, Yan Changxiang, Hu Chunhui. Non-contact rotation angle measurement system for scanning mirrors[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(4): 850-855.
- 王 洋, 颜昌翔, 胡春晖. 非接触式扫描反射镜转角测量系统[J]. 光学精密工程, 2014, 22(4): 850-855.
- 18 Tan Ligang, Dai Ming, Liu Jinghong, *et al.*. Error analysis of target automatic positioning for airborne photo-electric measuring device[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(12): 3133-3140.
- 檀立刚, 戴 明, 刘晶红, 等. 机载光电测量设备目标自主定位误差分析[J]. 光学精密工程, 2013, 21(12): 3133-3140.