红外制导半实物仿真系统误差分析

赵世明,孙致月

(中国人民解放军 91336 部队,河北 秦皇岛 066000)

摘　要:为提高红外制导半实物仿真试验精度和可信度,研究和分析了红外制导半实物仿真系统误差。详细分析了影响红外制导半实物仿真精度的主要误差源和产生机理,从仿真机理角度建立了半实物系统仿真模型和系统误差模型,通过仿真和分析比对在有无加载误差模型下的导弹弹道解算结果,定量分析各类误差源对仿真试验精度的影响。通过仿真分析表明,转台性能和机械误差对仿真试验精度影响很小并可忽略,而红外导引头轴向位置安装误差影响较明显,在仿真试验过程中需要重点考虑并保证在厘米级范围内。

关键词:系统误差分析;　红外制导;　半实物仿真

中图分类号:TP391.9　　**文献标志码**:A　　**DOI**:10.3788/IRLA201746.0804004

Error analysis of infrared guidance hardwave in loop simulation system

Zhao Shiming, Sun Zhiyue

(No.91336 Troop of PLA, Qinhuangdao 066000, China)

Abstract: To improve the precision and credibility of infrared guidance hardwave in loop (HWIL) simulation test, the system error of infrared guidance HWIL simulation was studied and analyzed. The main error source of infrared guidance HWIL simulation system and mechanism was analyzed in detail, the guidance HWIL simulation model and the system error model were established from the perspective of the simulation mechanism. Based on the comparison and analysis on the missile trajectory calculating result with or without the loading error model, the influence of various error sources on the simulation test accuracy was analyzed quantitatively. The simulation analysis shows that the error of turntable mechanical and performance have little impact on precision of simulation test and can be ignored, and the effect of infrared seeker axial position error is obvious, needs to be addressed in the process of simulation test and to ensure that within a certain error range.

Key words: system error analysis;　infrared guidance;　HWIL

收稿日期:2016-12-10;　**修订日期**:2017-01-20

作者简介:赵世明(1978-),男,工程师,硕士,主要从事精确制导半实物仿真技术方面的研究。Email: shmzhao@126.com

0 引 言

随着精确制导武器及其仿真技术的发展，导弹制导导引头试验与鉴定越来越依赖于半实物仿真技术。在仿真模拟环境下开展导弹导引头战技性能和作战适应性试验与评估工作，半实物仿真系统不可忽略的一个问题就是系统误差，本质上仿真是对现实连续系统的近似描述,因此,仿真系统必然存在系统误差，系统误差影响了仿真试验精度和结果可信度[1]。笔者所做的工作是在系统误差产生机理和定量分析基础上,利用有效措施降低系统误差,以保证仿真精度和可信度。

针对红外制导仿真试验与评估应用需求，文中首先概述了基于五轴转台和红外目标模拟技术构设的红外制导半实物仿真系统，分析半实物仿真系统主要误差源的产生机理，建立半实物系统模型和系统误差模型,通过仿真运算,定量分析系统误差对仿真试验精度的影响。

1 红外制导半实物仿真系统概述

红外制导半实物仿真系统主要为红外成像导引头提供近似实战过程的动态红外场景，通过作战想定和红外视景仿真技术，可模拟实现多种气象条件和光电干扰试验环境,开展全弹道闭环仿真试验,以检验红外成像导引头在复杂光电环境下的战技性能和作战适应性。

采用五轴转台和红外场景投射技术构设红外制导半实物仿真试验环境,总体设计框架如图 1 所示。红外导引头架设于五轴转台三轴台，模拟导弹飞行姿态运动;红外目标模拟器架设于五轴转台两轴台，模拟弹目视线角的变化并实现目标模拟器光学系统与导引头光学接收系统的光学匹配；红外视景仿真单元依据试验想定以及导引头视线位置实时模拟和渲染导引头所观察到的红外场景，并注入红外目标模拟器；弹道仿真解算单元实现导弹六自由度弹道模型和导弹控制模型的实时解算以及系统同步性控制，解算结果实时控制五轴转台和红外视景仿真单元,实现整个回路的闭环仿真;主控系统用于系统的控制、管理和集成,系统采用以太网络和实时网络双网络体系结构，系统管理和文件传输等非实时信息采用以太网络，闭环仿真实时数据传输采用实时网络[2]。

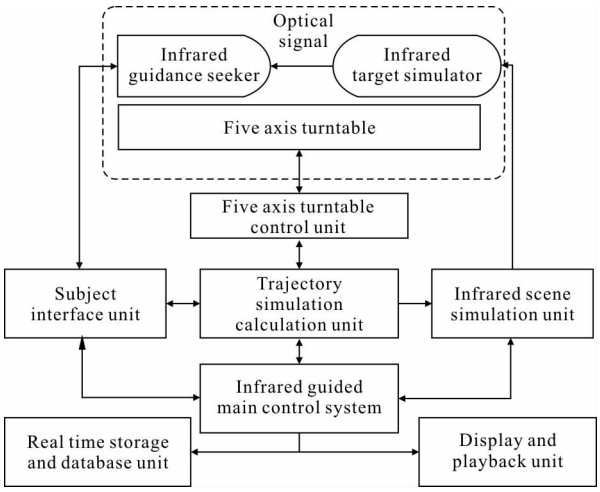

图 1 红外制导半实物仿真系统设计框图

Fig.1 Design diagram of infrared guidance HWIL system

系统误差和试验精度是半实物仿真系统构设过程中不可忽略的问题，下面针对上述红外制导半实物仿真系统分析系统误差的主要影响因素和产生机理,建立其仿真模型并进一步定量分析影响程度。

2 误差影响因素及仿真建模

2.1 系统误差主要影响因素分析

主要研究红外制导半实物仿真系统的设备误差,根据半实物仿真系统结构和仿真模式,对各类设备误差源分析如下[3]。

(1) 导弹姿态模拟误差

利用五轴转台三轴台模拟导弹姿态运动，三轴台各轴系实际位置输出与理想位置存在偏差，主要由转台自身误差和导引头初始安装误差所引起。图2为导弹姿态模拟误差示意图。在没有误差的情况下，

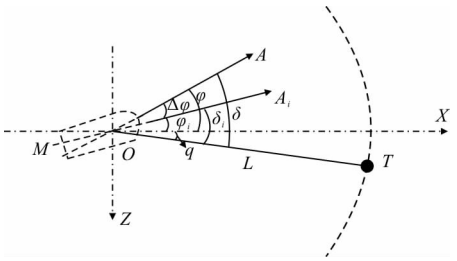

图 2 仿真系统导弹姿态模拟误差示意图

Fig.2 Missile attitude simulation error of simulation system

导引头模拟姿态角为 φ_i，弹轴指向矢量 OA_i 与目标矢量 OT 的夹角为 δ_i，存在误差时，导引头模拟姿态角为 φ，弹轴指向矢量 OA_i 与目标矢量 OT 的夹角为 δ，OA 和 OA_i 之间存在误差角 $\Delta\varphi$。可见，由于导弹姿态模拟误差的存在，弹目视线轴矢量角位置发生变化，从而使得导引头测量的目标位置与理想状态存在偏差，导致半实物仿真系统存在误差。

(2) 导弹位置模拟误差

导弹位置是通过求解六自由度弹道仿真模型所得，由于五轴转台三轴台误差和导引头安装误差的存在，在姿态模拟过程中会同时产生位置误差。图 3 为导弹位置模拟误差示意图，在无位置误差的情况下，导引头测角中心与实验室坐标系原点 O 重合，导引头模拟姿态角为 φ，弹轴指向矢量 OA_i 与目标矢量 OT 夹角为 δ_i。引入位置误差后，安装于转台的导引头测角中心从 O 点迁移到 O_r 点，矢量 e 为引入的位置误差矢量，导引头模拟姿态角为 φ，弹轴指向矢量 O_rA 与目标矢量 O_rT 的夹角为 δ。可见，由于导弹位置误差，弹目视线轴矢量的角位置发生变化，导致导引头测量目标位置产生偏差。

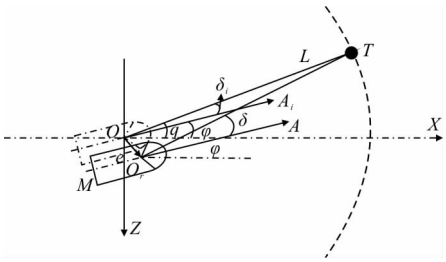

图 3 仿真系统导弹位置模拟误差示意图

Fig.3 Missile position simulation error of simulation system

(3) 目标位置模拟误差

红外目标位置模拟由五轴转台两轴台实现，位置模拟精度与红外目标模拟器位置精度相关，两轴台运动精度主要受转台技术性能和动态性能以及安装误差等因素影响。图 4 为目标模拟位置模拟误差示意图，OA 为导引头指向矢量，导引头模拟姿态角为 φ，理想红外目标 T_i 位置角坐标为 q_i，弧线 S_iR_i 为模拟目标曲线，此时目标矢量 OT_i 与导引头指向矢量 OA 夹角为 δ_i，半径为 L_i。由于角度误差的影响，红外目标 T_0 的角坐标为 q_0，空间平移矢量分量为 T_x 和 T_y，在空间平移和角度误差的综合作用下，红外目标 T 的角坐标为 q，距离坐标原点 L，位于模拟目标曲线 SR 上。此时，导引头指向矢量 OA 与模拟目标矢量 OT 的夹角为 δ，OT_i 与 OT 的夹角为 $\Delta\delta$。由于红外目标模拟位置存在误差，实际目标相对导引头指向矢量的角位置发生变化。

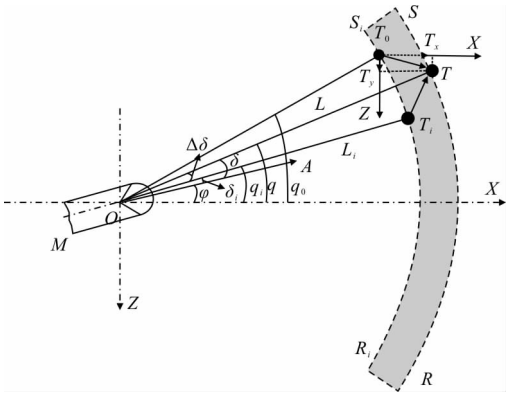

图 4 仿真系统目标位置模拟误差示意图

Fig.4 Target position simulation error of simulation system

2.2 系统误差模型建立

(1) 转台运动数学模型

五轴转台采用了同轴套装卧式结构，利用系统辨识方法建立转台各轴系运动模型，采用二阶系统描述转台运动模型，二阶系统传递函数为：

$$G(s)=\frac{\omega_n^2}{s^2+2\zeta\omega_n+\omega_n^2} \tag{1}$$

式中：ω_n 为自然频率；ζ 为阻尼比。二阶环节转台运动模型参数根据转台双十指标频率 ω_s 及阻尼比 ξ 确定，自然频率 ω_n 与双十指标频率 ω_s 关系为：$\frac{\omega_n}{\omega_s}=\max\left(\frac{\omega_n}{\omega_{s1}},\frac{\omega_n}{\omega_{s2}}\right)$，其中

$$\frac{\omega_{s1}}{\omega_n}=\sqrt{(2-4\zeta^2+\sqrt{(2-4\zeta^2)2+0.938\,4})/2} \tag{2}$$

$$\frac{\omega_{s2}}{\omega_n}=\frac{-\zeta+\sqrt{\zeta^2+\tan^2(0.174\,5)}}{\tan(0.174\,5)} \tag{3}$$

基于二阶系统的转台运动模型具有以下特点：一是对输入控制信号具有跟随性，以还原输入信号特征；二是认为对输入信号的增益为 1，转台输出幅值等于输入信号幅值，各轴系输出与输入信号具有同步性，即相位相同[4]。

(2) 导弹姿态和位置误差模型

导弹姿态运动误差影响因素主要包括回转误差

和静态误差，回转误差有倾角和径向回转误差、回转精度等；静态误差主要指同轴度、相交度、垂直度等。转台运动误差对半实物仿真系统的影响可通过空间误差传递矩阵 T 描述，空间误差传递矩阵 T 采用多体运动学理论建立[5-6]，所建立的转台空间误差传递矩阵如下：

$$T=\prod_{0}^{3}T_{JK}=\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & p_x \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & p_y \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4}$$

式中：矩阵元素 $C^{ij}(i,j=1,2,3)$ 描述了转台误差对导引头空间指向角度的影响；p_x、p_y、p_z 描述了转台误差对导引头空间位置的影响，采用导引头指向误差和位置误差衡量导弹姿态运动误差对半实物仿真系统的影响。定义：

指向误差 Δ——安装于转台上的导引头实际指向 Δ_{act} 与理想指向 Δ_{ideal} 之间的角度偏差，$\Delta=\Delta_{act}-\Delta_{ideal}$。

位置误差 e——安装于转台上的导引头中心实际位置 e_{act} 与理想位置 e_{ideal} 之间的位置偏差，$e=e_{act}-e_{ideal}$。

指向误差 Δ 在三个欧拉角方向进行分解，姿态角误差为：

$$\Delta\varphi=\varphi_{act}-\varphi_{ideal}=\arctan\left(\frac{\sin\vartheta_{2act}}{\cos\varphi_{2act}\cos\vartheta_{2act}}\right)-\varphi_{ideal} \tag{5}$$

$$\Delta\theta=\theta_{act}-\theta_{ideal}=\arcsin(\sin\varphi_{2act}\cos\vartheta_{2act})-\theta_{ideal} \tag{6}$$

$$\Delta\gamma=\gamma_{act}-\gamma_{ideal}=\arccos\left(\frac{\sin\varphi_{2act}\sin\vartheta_{2act}\sin\gamma_{2act}+\cos\varphi_{2act}\cos\gamma_{2act}}{\cos\theta_{act}}\right)-\gamma_{ideal} \tag{7}$$

位置误差为：

$$e=P_{actual}-P_{ideal}=T\cdot[t^{T},1]^{T}-T_{ideal}\cdot[t^{T},1]^{T} \tag{8}$$

式中：φ_{act}、θ_{act}、γ_{act} 分别为转台实际姿态角；φ_{ideal}、θ_{ideal}、γ_{ideal} 为理想姿态角；φ_{2act}、θ_{2act}、γ_{2act} 为在考虑误差情况下的等效旋转角度；t 为导引头中心上一点坐标；T_{ideal} 为转台理想运动传递矩阵。

导引头安装误差也会影响导弹姿态，包括导引头相对内框的角度和位置误差，采用多体运动学理论建立模型，方法与导弹姿态和位置误差模型相同。

(3) 目标位置模拟误差模型

目标位置模拟误差由两轴台误差和目标模拟器安装误差引起。两轴台误差包括回转误差、同轴度、相交度、垂直度等；目标模拟器安装误差包括模拟器相对两轴内框的位置误差。采用多体运动学理论建立相关模型，将目标模拟器视为两轴台内框的高序体。空间误差传递公式具有与公式(4)相同的格式。

2.3 半实物系统仿真建模

根据上述分析，系统误差主要影响目标与导引头的相对关系，致以导引头对目标位置的测量误差，进而影响导弹命中精度及试验结果。系统误差分析思想是设计并建立红外制导仿真系统模型，通过分析仿真系统模型在有、无加载误差模型情况下的仿真运行结果，定量分析各类误差源对半实物仿真结果的影响。红外制导仿真系统模型结构如图 5 所示。

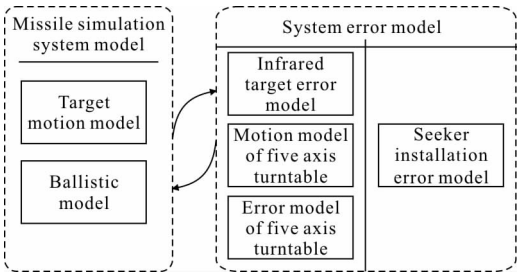

图 5 红外制导仿真系统模型结构图

Fig.5 Model structure of infrared guidance simulation system

红外制导仿真系统模型主要由数字化半实物仿真系统模型及系统误差模型两部分组成。数字化半实物仿真系统模型包括目标运动模型和弹道仿真模型，用于模拟导弹制导控制工作过程及弹体动力学特性；系统误差模型用于半实物仿真系统误差源的模拟，包括目标误差模型、转台误差模型和导引头安装误差模型，基于 Matlab/Simulink 仿真建模平台建立，采用S-Function 函数实现各模型算法。

3 半实物仿真系统误差分析

在红外制导仿真系统模型中，通过逐项引入各误差源，定量分析各误差源和综合系统误差对仿真试验结果的影响[7-8]，模型中设定舰船目标距离为 20 km，航速 30 节(1 节=1.852 km/h)。

3.1 导弹姿态模拟误差分析

根据五轴转台三轴台机械指标和公式 (5)~(8)，求取导弹姿态模拟指向误差为：$\Delta\varphi=76.50''$、$\Delta\theta=68.76''$、$\Delta\gamma=66.31''$，位置误差 $e=0.99$ mm。引入红外制导仿真系统模型并进行弹道仿真，仿真结果为：视线角误差 0.525 mrad，脱靶量误差 0.036 m。根据仿

真解算,五轴转台三轴台空间误差对半实物仿真试验结果影响较小。

3.2 导引头安装误差分析

导引头安装误差包括轴向、高低、侧向位置误差,以及水平、垂直、轴向安装角误差。导引头高低、侧向位置安装误差和安装角误差是由夹具、转台、导引头上各安装面的形位公差和配合关系决定，一般误差量值很小。通过仿真试验也表明:针对单平面控制反舰导弹导引头,导引头高低、侧向安装位置误差和垂直、轴向安装角误差对试验过程和结果的影响很小。导引头轴向安装位置误差和水平安装角误差对试验影响仿真结果见表 1 和表 2。

表 1 红外导引头轴向安装位置误差影响仿真结果

Tab.1 Simulation results of infrared seeker axis installation position error

No.	Axial position error/mm	LOS angle error/mrad	Miss distance deviation/m
1	50	26.4	1.53
2	100	58.7	3.54
3	150	98.1	6.02

表 2 红外导引头水平安装角误差影响仿真结果

Tab.2 Simulation results of infrared seeker horizontal installation angle error

No.	Horizontal installation angle error/(°)	LOS angle error/mrad	Miss distance deviation/m
1	1	9.8	1.33
2	2	19.8	−0.64
3	4	44.2	0.18

由仿真结果可见,相对于水平安装角误差,导引头轴向位置误差对试验过程和结果影响比较显著,导引头测得的目标方位误差随安装误差的增大而显著增大，当导引头轴向位置误差达到 150 mm 时脱靶量误差为 6.02 m,一定程度上影响了导弹命中与否的判断。

3.3 目标模拟位置误差分析

两轴台机械误差引入红外制导仿真系统模型,仿真结果为：视线角误差 0.68 mrad，脱靶量误差 0.016 7 m。仿真试验数据表明:两轴台空间误差对仿真试验过程和结果影响较小，与导引头安装误差产生的影响相比，红外目标模拟位置误差对仿真试验的影响较小。

3.4 系统误差综合影响分析

在红外制导仿真系统模型软件中加入上述各类误差,分析综合系统误差对仿真试验的影响。图 6 为无误差和引入误差两种情况下，导引头输出目标方位角随仿真时间的变化曲线。可以看出,自控飞行结束时刻,有误差时导引头目标方位角存在 0.2 rad 的偏差，导引飞行阶段导弹跟踪目标，方位角偏差值减小，方位角误差均值为 33.5 mrad，脱靶量偏差为 2.11 m。由仿真结果可见,综合考虑系统误差因素,系统误差对弹道仿真结果影响很小。

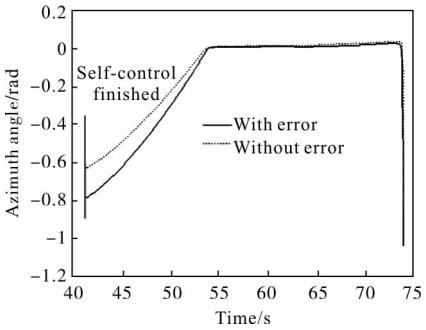

图 6 红外导引头目标方位角对比图

Fig.6 Contrast figure of infrared seeker target azimuth

由于转台精度可通过结构设计、加工及装配工艺来保证，其空间精度误差一般在毫米和角秒量级以内,对试验过程和结果基本没有影响。而导引头轴向位置误差则主要决定于导引头测角中心位置的确定，在安装过程中导引头测角中心空间位置很难把握,容易带来较大的轴向位置误差,在试验过程中需要重点考虑。根据仿真试验结果,导引头轴向位置安装误差如果控制在厘米级内，可保证脱靶量偏差在 4.0 m 范围内,对仿真试验结果评判不会产生影响。

4 结 论

半实物仿真系统误差源主要是由各物理效应、设备自身性能以及导引头安装误差所引入,误差传递分析表明各误差源最终影响导引头测角误差,进而影响仿真试验精度。通过仿真分析表明,红外制导半实物仿真系统中转台自身性能和误差对仿真试验结果影响很小,而导引头安装误差对仿真试验

结果影响较明显,在仿真试验实施过程中应重点考虑。

参考文献:

[1] 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.

[2] Dong Rui, Dong Guocai, Shen Meng. Research of infrared imaging guidance hardware-in-the-loop simulation system [J]. ***Journal of System Simulation***, 2008, 20(8): 2027-2029. (in Chinese)
东瑞, 董国才, 沈猛. 红外成像制导半实物仿真系统研究 [J]. 系统仿真学报, 2008, 20(8): 2027-2029.

[3] 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.

[4] Wang Wenpan, Zhao Yongzhi, Cao Yuyan, et al. Error modeling and analysis of photo-electricity telescope based on multi-system theory[J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2016, 45(8): 176-181. (in Chinese)
王文攀, 赵勇志, 曹玉岩, 等. 基于多体系统理论的光电望远镜误差建模分析 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(8): 176-181.

[5] Xu Zhenling, Yang Miaomiao, Wang Min, et al. Radiation simulation technology for IR capture and tracking device[J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2016, 45 (s1): 11-16. (in Chinese)
许振领, 杨淼淼, 王敏, 等. 红外捕获跟踪设备辐射式仿真试验技术研究[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(s1): 11-16.

[6] Zhang Enzhong, Zhao Ji, Ji Shijun, et al. Comprehensive error modeling and compensation for optical free-form surface polishing machine toll [J]. ***Optics and Precsion Engineering***, 2015, 23(6): 1587-1597. (in Chinese)
张恩忠, 赵继, 冀世军, 等. 光学自由曲面研抛机床的综合误差建模与补偿[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(6): 1587-1597.

[7] Yu Guoquan, Guo Jin, Li Yan, et al. Precision analysis of indoor simulation system for laser angle deception jam[J]. ***Optics and Precsion Engineering*** 2013, 21(10): 2610-2616. (in Chinese)
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.

[8] Li Zhenwei, Yang Wenbo, Zhang Nan. Static pointing error of level mounting optoelectronic telescope [J]. ***Chinese Optics***, 2015, 8(2): 263-269. (in Chinese)
李振伟, 杨文波, 张楠. 水平式光电望远镜静态指向误差的修正[J]. 中国光学, 2015, 8(2): 263-269.