

激光制导武器半实物仿真系统的设计与实现

范世鹏¹, 林德福¹, 路宇龙², 宗睿¹

(1. 北京理工大学 宇航学院, 北京 100081; 2. 北京电子工程总体研究所, 北京 100854)

摘要:首先,以某激光制导弹药为背景,提出了室内半实物仿真系统的总体设计方案,介绍了一种激光半主动导引头的工作原理。其次,在室内局限环境下,建立了弹目几何关系的数学模型,研究了导引头入瞳光学特性,并根据制导与控制系统的工作原理,设计了末制导段弹道的半实物仿真模型。最后,设置两种末端制导的初始条件,引入导引头和角速率陀螺等弹上部件进行多次弹道仿真试验。试验结果表明,基于该导引头和角速率陀螺的制导与控制系统设计合理,可以实现精确打击。

关键词:半实物仿真; 末制导武器; 激光半主动导引头; 光学特性

中图分类号: TJ765.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)02-0394-04

Design and achievement of hardware-in-the-loop simulation system for guided shell based on laser semi-active seeker

Fan Shipeng¹, Lin Defu¹, Lu Yulong², Zong Rui¹

(1. School of Aerospace Science, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Beijing Institute of Electronic System Engineering, Beijing 100854, China)

Abstract: With background of terminal guided weapon, at first, a scheme of hardware-in-the-loop simulation (HILS) was derived; and the principle of laser semi-active seeker was introduced in detail. Secondly, in the limited indoor environment, mathematical model of geometry between missile and target was established; subsequently the optical characteristics of the laser received by seeker were researched; the model of HILS in the terminal trajectory was designed for guidance and control system. In the end, seeker and gyro was introduced into the closed loop of simulation, simulations were repeated many times under two different conditions of the initial state. In conclusion, the results indicate that guidance and control system of the missile based on this seeker and gyro is achieved correctly and have the ability to hit the target precisely.

Key words: hardware-in-the-loop simulation(HILS); terminal guided weapon; laser semi-active seeker; optical characteristics

收稿日期: 2013-06-04; 修订日期: 2013-07-22

基金项目: 国家自然科学基金(61172182)

作者简介: 范世鹏(1986-), 男, 博士生, 主要从事飞行器制导与控制、半实物仿真的研究。Email: ztffanshipeng@sina.com

导师简介: 林德福(1971-), 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为飞行器总体设计。Email: lindf@bit.edu.cn

0 引言

半实物仿真是一种将弹上部件引入仿真回路, 并为其提供真实的工作环境, 实物以外采用数学仿真的仿真方法。由于具有“避免部件建模的困难, 仿真置信水平高, 为技术决策提供丰富的数据资源, 节省研制成本, 缩短研发周期”等诸多优点, 半实物仿真已经成为强有力的系统设计中的性能评价手段和必不可缺的工具, 广泛应用在诸多导弹型号的开发、研制和评估各阶段中^[1-2]。随着仿真技术的飞速发展, 目前各军事大国都在大力发展制导兵器仿真试验技术。因此, 建立末制导半实物仿真平台具有重要的科研意义和战略意义。

1 半实物仿真系统

根据仿真技术的相似性原理, 半实物仿真系统应实现以下功能:(1) 模拟真实弹体姿态运动;(2) 提供激光照射环境, 模拟目标运动;(3) 接收弹上计算机的指令, 完成六自由度弹道仿真。

如图1所示, 在半实物仿真系统中, dSPACE 仿真计算机(包含 A/D 模块、D/A 模块和串口通讯等)是综合各功能模块信息的核心, 通过控制柜与转台平台进行信息交互; 弹上部件所搭载的三轴转台平台, 负责模拟弹体姿态运动; 激光模拟器搭载于两轴转台, 负责控制激光光斑在幕布上的位置; 辅助计算机用于监测仿真并记录数据。

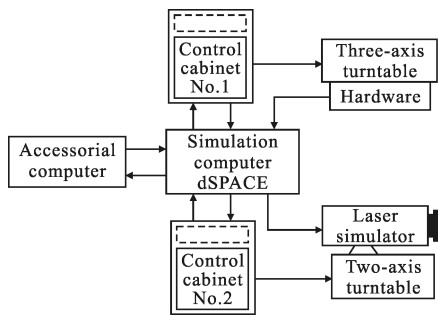


图1 半实物仿真系统功能组成示意图
Fig.1 Framework of HIL simulation system

2 激光半主动导引头

激光末制导武器常常采用动力陀螺式导引头, 其光学探测器广泛采用四象限阵列, 如图2所示^[3]。

探测器通过综合处理四个象限各自接收的激光能量, 获取两个通道的角误差信号, 从而输出相应的制导指令。

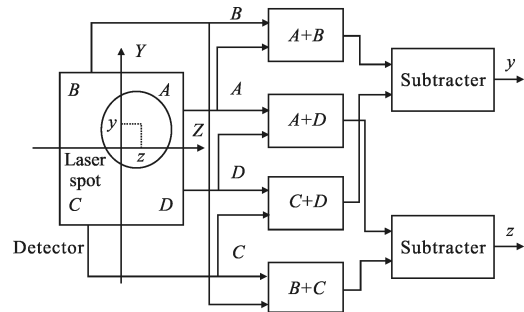


图2 四象限探测器工作原理
Fig.2 Principle of quadrant laser detector

光学探测器安装在陀螺万向支架内框上, 通过陀螺转子轴高速旋转保持光轴空间稳定。光轴与弹目视线(Line of Sight, LOS)的误差角经信号处理电路驱动进动线圈产生进动力矩, 使导引头跟踪目标^[4]。根据导引头的工作原理, 其模型如图3所示。

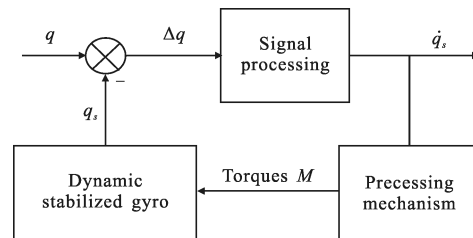


图3 导引头跟踪回路模型
Fig.3 Tracking loop of seeker

制导系统以光轴进动角速率来代替弹目视线角速率, 生成比例导引律下的制导指令。因此, 导引头的进动特性直接影响到导弹的动态过程和制导精度, 而半实物仿真试验可以综合考核制导系统设计的合理性、激光导引头的可靠性以及抗干扰能力。

3 半实物仿真模型

为综合评估末制导飞行中某激光半主动弹药的制导与控制部件的品质与性能, 将导引头、角速率陀螺和弹上计算机等器件引入仿真回路, 设计制导与控制系统的半实物仿真方案, 模型结构及信号流如图4所示。

该仿真模型采用模块化设计思想, 可以通过设置大气环境参数、末制导段弹道初始条件、激光模拟

器相关参数、风干扰模型以及运动目标模型参数等,考察多种边界条件下制导与控制系统的性能指标。在仿真模型中,由数学仿真完成以下计算任务:风干扰下的六自由度有控弹道动力学与运动学微分方程组^[5-6],室内弹目视线模型,目标运动模型以及大气模型。

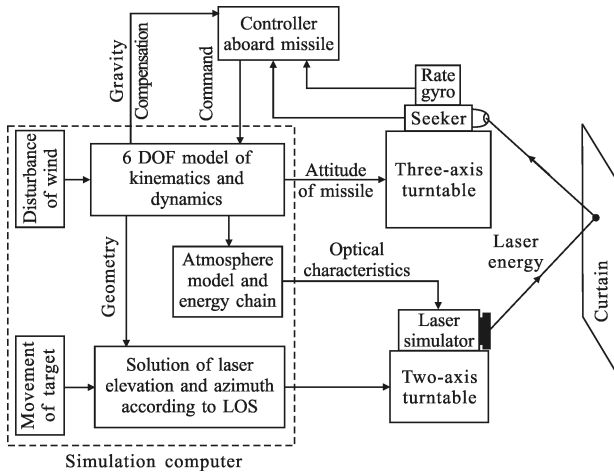


图 4 半实物仿真系统框图

Fig.4 Diagram of HIL simulation system

在试验过程中,两轴转台使激光模拟器将激光光斑照射在正确的漫反射幕布位置,导引头接收到漫反射的光斑能量,产生制导指令,由弹上计算机综合角速率陀螺信号,生成最终的控制指令,传输到仿真机,完成弹道方程计算,为三轴转台提供弹体姿态,并根据弹目相对关系,为两轴转台生成角度指令,模拟真实的 LOS,为角速率陀螺提供真实的弹体姿态运动。

3.1 弹目相对几何关系

仿真布局如图 5 所示。以导引头光轴中心为原点建立右手地面坐标系 $Oxyz$,幕布为铅垂平面且与 Ox 轴平行。设三(两)轴转台回转中心与反射幕之间的距离为 l ,转台回转中心之间距离为 l_{32} 。

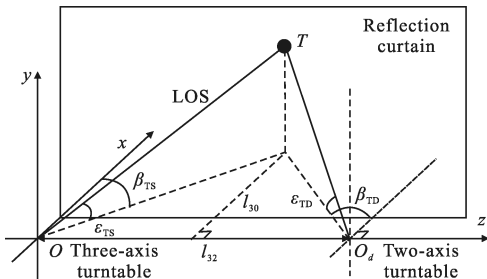


图 5 仿真系统几何布局示意图

Fig.5 Geometric diagram of system layout

根据仿真理论的几何相似原理,仿真的弹目视线

方位角、高低角与理论弹道的视线方位角、高低角对应相等。室内环境几何示意图如图 6 所示。受室内尺寸条件限制,末制导段视线高低角在 $-30^\circ \sim -45^\circ$ 范围内,超出了俯仰方向可用范围为 $\vartheta_G \sim \vartheta_C$,光斑将落在地面。

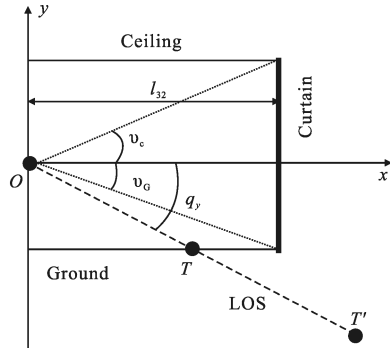


图 6 室内环境几何示意图

Fig.6 Diagram of platform's lateral view

将地面坐标系绕 Oz 轴顺时针旋转常值角度 $Ox'y'z'$,得到新坐标系,使仿真的弹目视线落在幕布上。根据弹目相对位置关系,在地面坐标系下某时刻真实目标相对导弹的坐标为 (x_r, y_r, z_r) ,在新坐标系下其坐标为:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\lambda & -\sin\lambda & 0 \\ \sin\lambda & \cos\lambda & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \end{bmatrix}$$

则在坐标系 $Ox'y'z'$ 里,LOS 所在的直线方程解析式:

$$\frac{x}{x_r \cos\lambda - y_r \sin\lambda} = \frac{y}{x_r \cos\lambda + y_r \sin\lambda} = \frac{z}{z_r} \tag{1}$$

从而可以计算出光斑的位置坐标:

$$\begin{aligned} x_{spot} &= l_{30} \\ y_{spot} &= \frac{x_r \cos\lambda + y_r \sin\lambda}{x_r \cos\lambda - y_r \sin\lambda} l_{30} \\ z_{spot} &= \frac{z_r \cdot l_{30}}{x_r \cos\lambda - y_r \sin\lambda} \end{aligned}$$

由此可得,两轴转台高低、方位指令:

$$\begin{aligned} \epsilon_{TD} &= \arctan \frac{y_{spot}}{\sqrt{x_{spot}^2 + (l_{32} - z_{spot})^2}} \\ \beta_{TD} &= \arctan \frac{l_{32} - z_{spot}}{x_{spot}} \end{aligned} \tag{2}$$

3.2 激光入瞳光学特性

在实际飞行过程中,导引头捕获的激光功率密度随弹目距离的减小而增大,光斑大小也随之而增大。因此,激光模拟器必须具有能量可调和光斑大小可调的功能,并能满足最大照射功率的要求,为导引

头提供逼真的照射环境。

由大气光学的基本知识可知, 导引头接收到的功率 P_s 与激光模拟器发射的激光功率 P_L 之间的关系^[1]可以表示为:

$$P_s = P_L \cdot \frac{A_r \sigma \rho}{\pi L_{MT}^2} T_a \quad (3)$$

式中: A_r 为导引头接收面积; σ 为目标散射面积与照射光斑面积之比; ρ 为目标反射率; L_{MT} 为弹目距离; T_a 为大气透过率。

激光光斑大小随弹目距离而线性变化, 设目标尺寸为 $D_T \times D_T$, 则光斑大小 r_{spot} :

$$r_{spot} = \frac{l_{32}}{L_{MT}} \cdot \frac{D_T}{2} \quad (4)$$

由此可知, P_s 与弹目距离 L_{MT} 的平方成反比, r_{spot} 与弹目距离成反比。在仿真过程中, 模型需根据当前弹目距离实时更新激光模拟器的发射能量以及光斑大小。

4 半实物弹道仿真试验

末制导段最大弹目距离: $L=3\ 500\text{ m}$, 初始弹目视角: $q_0=-30^\circ$ 。在两种弹道初始状态下进行多次半实物仿真试验。Case1: $\varphi_0=-25^\circ$ 、 $\theta_0=-28^\circ$; Case2: $\varphi_0=-32^\circ$ 、 $\theta_0=-35^\circ$ 。如图7所示。

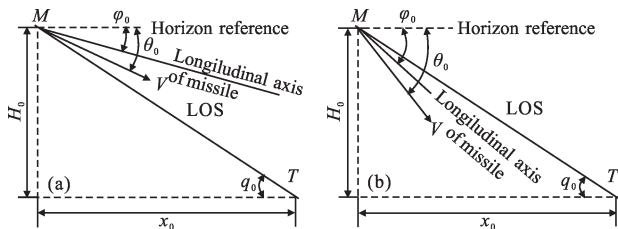


图7 末制导段弹道的两种初始条件

Fig.7 Different initial conditions of terminal guided trajectory

在两种初始条件下, 100次仿真试验的脱靶量分别如图8所示。多次试验统计数据如表1所示。

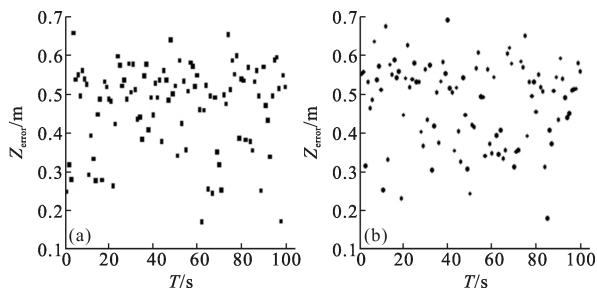


图8 两种初始条件下100次试验脱靶量

Fig.8 Miss distance of simulations under different conditions

表1 多次试验统计数据

Tab.1 Statistics for two initial conditions

Initial condition	Mean/m	Standard deviation	Median/m
Case 1	0.467	0.110	0.495
Case 2	0.475	0.107	0.507

由试验统计结果可以看出, 该制导系统的脱靶量水平在 0.8 m 以内, 可以实现精确打击 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 的目标, 这与真实的飞行试验统计量有较好的一致性。另外, 脱靶量样本的标准差较小, 可以验证, 半实物仿真置信度较高, 重复性较好。

5 结论

文中从实际的仿真任务和功能需求出发, 搭建了某激光末制导导弹半实物仿真平台, 并设计了末制导段弹道半实物仿真模型。建立室内弹目几何关系, 通过研究导引头入瞳光学特性, 实时更新照射环境特性, 使半实物仿真环境更接近于飞行试验, 符合仿真技术相似原理的要求。

通过半实物样本试验的仿真结果可以验证, 该型号的制导与控制系统能够精确打击目标, 仿真试验具有较好的重复性。

参考文献:

- [1] Wang Jiang, Lin Wei, Wang Peng, et al. Analysis of laser energy chain in the hardware-in-the-loop simulation system of semi-active laser guidance [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(7): 1230-1233. (in Chinese)
- [2] Su Jiangang. Design of hardware-in-the-loop simulation system for laser end-guided shell [J]. *Journal of System Simulation*, 2006(18): 9. (in Chinese)
- [3] Meng Xiuyun. Theory of the Missile's Guidance and Control System[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2007. (in Chinese)
- [4] Li Hui. Dynamic modeling and simulation of dynamic-gyro laser homing head [J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41: 7. (in Chinese)
- [5] Garnell P. Guided Weapon Control Systems [M]. Beijing: Institute of Technology, 2004.
- [6] Mou Yu, Lin Defu, Qi Zaikang, et al. Performance of proportional navigation law for terminal laser-guided projectile [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(2): 250-255. (in Chinese)