

## 激光导引头跟踪回路的设计与半实物仿真

范世鹏<sup>1,2</sup>, 林德福<sup>1</sup>, 路宇龙<sup>3</sup>, 王广帅<sup>1</sup>, 臧路尧<sup>1</sup>

(1. 北京理工大学 宇航学院, 北京 100081; 2. 北京航天自动控制研究所, 北京 100854;  
3. 北京电子工程总体研究所, 北京 100854)

**摘要:** 首先,为实现激光半主动导引头光轴的快速跟踪目标,根据光轴与弹目视线的误差角大小,将光轴进动速率分为线性区、过渡区和非线性区。为解决角速率的不连续性问题,采用 Hermite 方法设计了有约束条件下的导引头跟踪回路的进动方案。其次,介绍了激光制导武器的半实物仿真平台,建立了室内环境下的几何数学模型。最后,将未解锁的导引头搭载于五轴转台,以五轴转台的两自由度模拟导引头光轴的进动,其余三自由度模拟弹体姿态运动,通过在远、近边界初始条件下,通过弹道的半实物仿真试验,可以验证,导引头跟踪回路的设计方案在末制导段飞行过程中安全可靠,可以实现精确命中目标。

**关键词:** 激光半主动导引头; Hermite 方法; 半实物仿真; 末制导武器

**中图分类号:** TJ765.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)11-3603-05

## Design and hardware-in-loop simulation of laser seeker's tracking loop

Fan Shipeng<sup>1,2</sup>, Lin Defu<sup>1</sup>, Lu Yulong<sup>3</sup>, Wang Guangshuai<sup>1</sup>, Zang Luyao<sup>1</sup>

(1. School of Aerospace Science, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;  
2. Beijing Aerospace Automatic Control Institute, Beijing 100854, China;  
3. Beijing Institute of Electronic System Engineering, Beijing 100854, China)

**Abstract:** Firstly, in order to make optical axis of laser semi-active seeker track target fast, precession was divided into linear zone, transition zone and nonlinear zone based on error angle between optical axis and line of sight (LOS). Under some constraint conditions, in response to the problem that precession rate of the seeker was discontinuous, precession scheme of seeker's tracking loop was designed with Hermite Method. Secondly, a hardware-in-the-loop simulation (HILS) system of laser guided weapon was introduced, and model of geometry was founded in indoor environment. Finally, the locked seeker was fixed on Five-Axis Turntable, which was used to simulate the precession of seeker and attitude movement of missile. In two initial conditions of handoff, the results of trajectory HILS prove that the designed scheme of seeker's tracking loop is feasible for terminal guided weapon, and is able to hit the target precisely.

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

收稿日期: 2014-03-05; 修订日期: 2014-04-12

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、半实物仿真方面的研究。Email: qqfanshipeng@163.com

导师简介: 林德福(1971-), 男, 博士生导师, 博士, 主要从事飞行器制导与控制、飞行器总体设计方面的研究。Email: lindf@bit.edu.cn

## 0 引言

工程上激光导引头常常采用动力陀螺式机械结构。光学探测器安装在陀螺万向支架内框上,跟踪回路不断消除光轴与弹目视线 (Line of Sight, LOS) 的误差角,使光轴快速跟踪目标<sup>[1]</sup>。

制导系统的精度以及弹体的运动特性均与导引头的进动方案密切相关。当光轴指向目标时,导引头进动速率近似等于 LOS 角速率,然而,导引头解锁时刻往往都存在一定的初始瞄准误差,则两者存在很大的差异。以“红土地”和“铜斑蛇”为代表的激光制导武器,都将导引头进动方案分为线性区和非线性区<sup>[2]</sup>。参考文献[3]通过一种多个控制器基于单参数系统频响特性对称调节方法,实现了捕获与跟踪的平滑转换。文中借助 Hermite 方法设计了一种切实可行的单控制器导引头进动方案,在保证目标跟踪的快速性的同时,使硬件实现更便捷且安全可靠,避免进动电流跳变。

为评价选定探测器下的导引头进动方案,建立了一种便于实现的末制导段弹道半实物仿真模型。将未解锁的导引头引入仿真回路来实时获取角误差信息,由五轴转台完成光轴进动及弹体姿态模拟。

## 1 导引头跟踪回路设计

对于发射后解锁的激光导引头,在解锁时刻往往存在一定的初始瞄准误差  $\Delta q_0$ ,导引头跟踪回路的数学模型如图 1 所示。

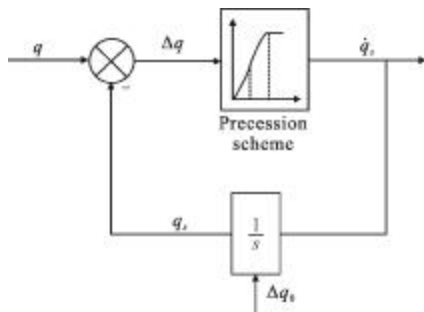


图 1 激光导引头跟踪回路数学模型

Fig.1 Laser seeker's tracking loop mathematical model

类似于“红土地”和“铜斑蛇”,文中将光轴进动过程划分为线性区、过渡区和非线性区,不同的是,需要设计过渡区,使进动角速率由非线性区平滑过

渡到线性区,如图 2 所示。

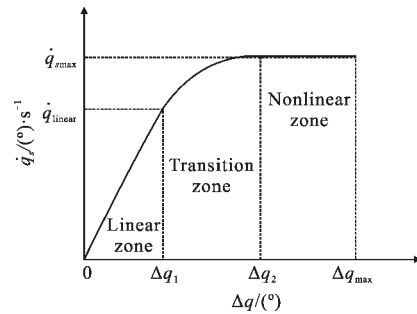


图 2 进动角速率与误差角的函数关系

Fig.2 Functional of precession rate and error angle

为使光轴快速跟踪目标,当瞄准误差较大时,在非线性区光轴以较大常值速率,迅速减小误差角;在线性区,光轴进动角速率与误差角成正比。当线性区的比例系数和非线性区的进动角速率确定后,进动方案可唯一确定。

非线性区进动角速率  $\dot{q}_{\max}$  的确定,要综合考虑末制导飞行的初始状态、弹体动态特性、最大视场角  $\Delta q_{\max}$  及导引头跟踪系统的功率等因素。在跟踪过程中,须避免导引头动力陀螺碰框。

导引头光轴跟踪速率远大于弹体姿态角速率,为保证在任意捕获条件下动力陀螺不碰框,考虑末制导初始点处光轴与 LOS 之间的误差达到最大时的情况,假设弹体动态过程的超调不超过 20%,则  $\dot{q}_{\max}$  必须满足以下不等式约束:

$$(\dot{q}_{\max} - 0.8k_{\theta} \cdot \delta_{\max}) \cdot \left( \frac{\Delta q_{\max} - \Delta q_2}{\dot{q}_{\max}} + \frac{\Delta q_2 - \Delta q'}{\dot{q}_{\text{sTra}}} \right) < \varphi_{\max} \quad (1)$$

式中:  $k_{\theta}$  为弹体增益;  $\delta_{\max}$  为最大舵转角;  $\varphi_{\max}$  为导引头视场角,当误差角等于  $\Delta q'$  时,导引头进动角速率等于弹体最大姿态角速率  $k_{\theta} \cdot \delta_{\max}$ ,  $\dot{q}_{\text{sTra}}$  为过渡区误差角减小到  $\Delta q'$  的平均进动速率:

$$\dot{q}_{\text{sTra}} = \frac{\int_{\Delta q'}^{\Delta q_2} \dot{q}_{\text{sTra}} \cdot d\Delta q}{\Delta q_2 - \Delta q'} \quad (2)$$

线性区内导引头动力学,即由进动角速率到误差角的闭环传递函数为:

$$G_s(s) = \frac{\dot{q}_{\text{linear}} s}{\Delta q_1 s + \dot{q}_{\text{linear}}} \quad (3)$$

一般而言,制导回路特征穿越频率范围为 3.2~5 rad/s<sup>[1]</sup>,参数  $\Delta q_1/\dot{q}_{\text{linear}}$  的设计值与导引头动力学的

快速性相关,应保证导引头引起的相位滞后较小,以增大制导回路的相位裕度。

为实现进动角速率的平滑过渡,避免导引头进动电流跳变,过渡区角速率 $\dot{q}_{sTra}$ 与误差角之间的函数关系必须一阶可微,因此,存在以下约束条件:

$$\begin{aligned} \dot{q}_s(\Delta q_1) &= \dot{q}_{linear}, \dot{q}(\Delta q_2) = \dot{q}_{max} \\ \ddot{q}_s(\Delta q_1) &= \dot{q}_{linear} / \Delta q_1, \ddot{q}(\Delta q_2) = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

不难证明,使用 Hermite 方法构造过渡区两者之间的三次函数关系,可满足以上所有约束条件。

$$\dot{q}_{sTra}(t) = h_1 \cdot \dot{q}_{linear} + h_2 \cdot \dot{q}_{max} + H_1 \cdot \ddot{q}_{linear} \quad (5)$$

其中,  $h_1$ 、 $h_2$ 、 $H_1$  为构造的插值基函数,其表达式分别为:

$$\begin{aligned} h_1 &= \left( 1 + 2 \frac{\Delta q(t) - \Delta q_1}{\Delta q_2 - \Delta q_1} \right) \left( \frac{\Delta q(t) - \Delta q_2}{\Delta q_1 - \Delta q_2} \right)^2 \\ h_2 &= \left( 1 + 2 \frac{\Delta q(t) - \Delta q_2}{\Delta q_1 - \Delta q_2} \right) \left( \frac{\Delta q(t) - \Delta q_1}{\Delta q_2 - \Delta q_1} \right)^2 \\ H_1 &= (\Delta q(t) - \Delta q_1) \left( \frac{\Delta q(t) - \Delta q_2}{\Delta q_1 - \Delta q_2} \right)^2 \end{aligned} \quad (6)$$

光轴进动角速率与误差角  $\Delta q$  的分段函数关系如下所示:

$$\dot{q}_s(t) = \begin{cases} \dot{q}_{linear} \cdot \Delta q / \Delta q_1 & |\Delta q| \leq \Delta q_1 \\ \dot{q}_{sTra}(t) \cdot \text{sign}(\Delta q) & \Delta q_1 < |\Delta q| < \Delta q_2 \\ \dot{q}_{max} \cdot \text{sign}(\Delta q) & |\Delta q| \geq \Delta q_2 \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $\text{sign}(\Delta q)$  为关于  $\Delta q$  的符号函数。

## 2 半实物仿真系统

随着仿真技术的飞速发展,半实物仿真已经广泛应用在诸多导弹型号的研制当中。半实物仿真将弹上部件引入仿真回路,避免了建模困难,在节省研制成本、缩短研发周期的同时,可以大大提高器件的置信水平和系统可靠性<sup>[3-4]</sup>。

激光末制导武器半实物仿真系统的硬件主要由 dSPACE 仿真计算机、辅助计算机、激光目标模拟器、转台控制机、五轴转台、两轴转台、弹上部件(导引头、角速率陀螺、弹上计算机等)组成,如图 3 所示。各功能模块通过串口实现实时通讯,软件平台基于 MATLAB/SIMULINK,需完成模型的数学仿真部分、各个仿真器的接口和信号采集接口等功能,通过 ControlDesk 实时控制仿真、采集并记录实验各项数

据,包括各级信号和弹道数据。

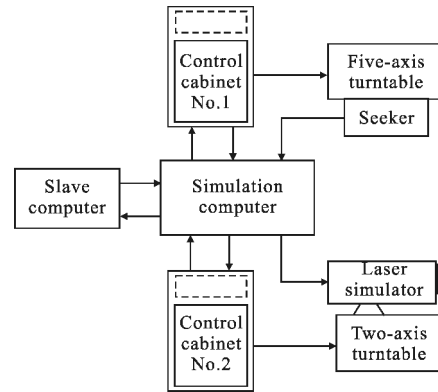


图 3 半实物仿真系统功能组成示意图  
Fig.3 Diagram of the HILS system

对于采用反射式光路模式的仿真系统,布局如图 4 所示<sup>[5]</sup>。搭设的幕布为铅垂平面且与  $Ox$  轴平行,两转台回转中心与反射幕之间的距离均为  $l_{50}$ ,转台回转中心之间距离为  $l_{52}$ 。地面坐标系  $Oxyz$  以导引头光轴中心为原点,  $Ox$  轴在水平面内垂直于幕布,  $Oy$  轴为铅垂方向,  $Oz$  轴与上述的连个坐标轴构成右手坐标系。

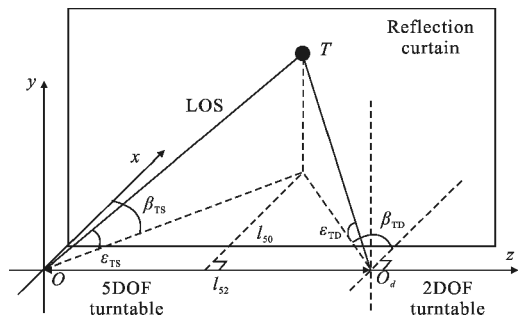


图 4 仿真系统的几何布局示意图  
Fig.4 Geometric diagram of system layout

半实物仿真基于相似原理,半实物仿真中的弹目视线方位角、高低角与理论视线方位角、高低角对应相等<sup>[6]</sup>。由数学仿真可知,末制导段视线高低角在  $-30^\circ \sim -45^\circ$  范围内,受室内尺寸条件限制,俯仰方向可用范围为  $\vartheta_G \sim \vartheta_C$ ,光斑将落在地面,如图 5 所示。

将地面坐标系、水平面、弹体以及弹目视线均绕  $Oz$  轴顺时针旋转常值角度  $\lambda$ ,使仿真的目标位置落在反射幕上。设某时刻真实目标在地面坐标系下的坐标为  $(x_r, y_r, z_r)$ ,则在新坐标系下的坐标为:

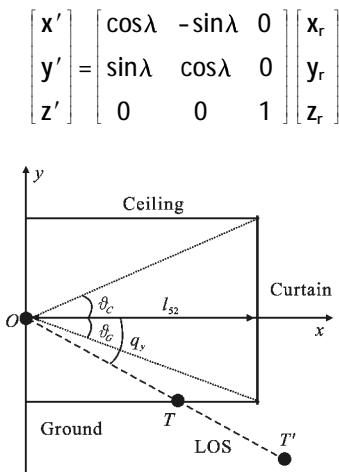


图 5 布局平面左视图

Fig.5 Diagram of platform's lateral view

则在坐标系  $Ox'y'z'$  里, LOS 所在的直线方程表达式为:

$$\frac{x}{x_r \cos\lambda - y_r \sin\lambda} = \frac{y}{x_r \cos\lambda + y_r \sin\lambda} = \frac{z}{z_r} \quad (8)$$

从而可以计算出光斑的位置:

$$x_{spot} = l_{50}, y_{spot} = \frac{x_r \cos\lambda + y_r \sin\lambda}{x_r \cos\lambda - y_r \sin\lambda} l_{50}, z_{spot} = \frac{z_r \cdot l_{50}}{x_r \cos\lambda - y_r \sin\lambda}$$

由此可得, 两轴转台高低、方位指令为:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{TD} &= \arctan \frac{y_{spot}}{\sqrt{x_{spot}^2 + (l_{50} - z_{spot})^2}} \\ \beta_{TD} &= \arctan \frac{l_{50} - z_{spot}}{x_{spot}} \end{aligned} \quad (9)$$

### 3 半实物仿真模型

设计完进动方案的各项参数之后, 由于闭环模型中引入了非线性环节, 对设计方案进行理论分析较为困难。因此, 在型号设计与导引头研制阶段, 半实物仿真试验成为一种重要评估手段<sup>[4]</sup>。设计相应的半实物仿真模型, 以期验证设计方案的可行性。

激光光斑被投射于漫反射幕布的指定位置上, 未解锁的导引头接收到光斑能量后, 获取光轴与弹目视线之间的误差角信息, 由五轴转台的 2 个自由度采用设计的进动方案完成光轴进动, 以五轴转台的剩余 3 个自由度来提供弹体姿态运动环境。仿真机实时解算弹道, 并根据几何关系模型得到两轴转台角度指令, 构造弹目相对关系; 并根据能量链关系再现真实环境中的激光目标特性<sup>[4,7]</sup>。图 6 给出了激光末制导武器半实物仿真模型的基本结构。

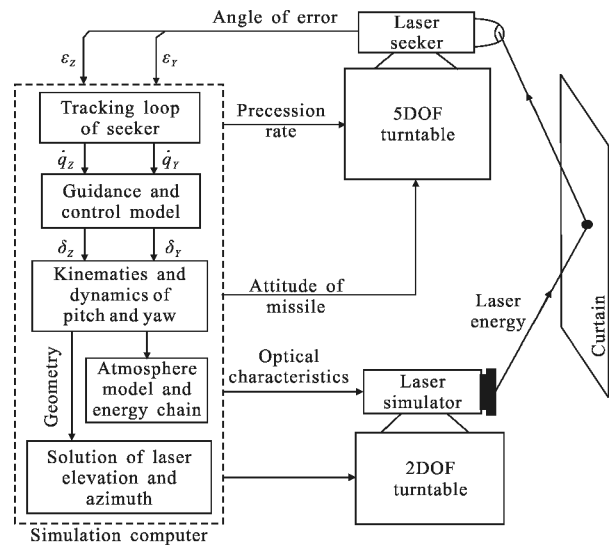


图 6 半实物仿真结构示意图

Fig.6 Diagram of HILS model

将末制导段弹道分别设定为远、近边界两种初始条件, 末制导段初始攻角为  $3^\circ$ , 如图 7 所示。在模型中数学仿真部分引入高斯分布的质量偏心、初始发射干扰以及风扰动等误差因素, 运行 100 次末制导段弹道半实物仿真。

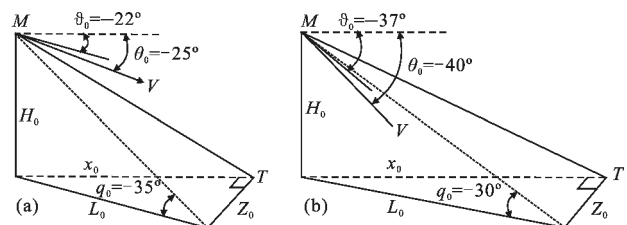


图 7 末制导段弹道的两种初始条件

Fig.7 Initial conditions of terminal trajectory

在以上两种末制导初始条件下, 100 次半实物仿真的脱靶量结果如图 8 所示。

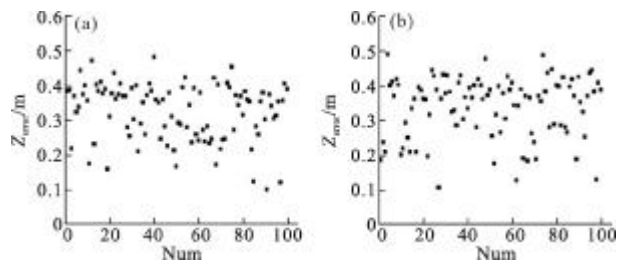


图 8 脱靶量仿真结果

Fig. 8 Result of the CEP in HILS

某激光导引头最大允许框架角为  $\pm 10^\circ$ , 两种初

始条件下的导引头框架角在无误差因素条件下的仿真结果如图 9 所示。由此可见,设计方案可以保证,在仿真过程中导引头不碰框。

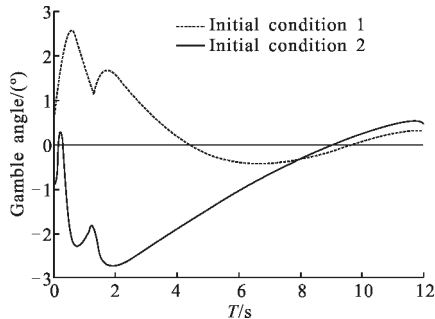


图 9 导引头框架角

Fig.9 Gamble angle of the seeker in HILS

## 4 结 论

根据激光导引头的工作原理,在多种约束条件下,通过 Hermite 方法所设计的光轴进动方案,能使导引头进动角速度的函数一阶可微,从而很好地解决了角速率突变带来的硬件电流跳变问题,使导引头跟踪系统的硬件设计更合理。

所建立的激光制导武器半实物仿真模型将导引头引入末制导段弹道的仿真回路,通过运行不同误差因素下的仿真试验,有效地验证了导引头光轴进动方案的可行性,保证在末制导过程中导引头光轴不碰框,并可以实现精确打击目标。该半实物仿真试验切实可行,易于实现,能为这类导引头跟踪回路的设计提供有力的参考依据,提高了制导系统的可靠性,大大缩短该导引头的研制周期。

## 参考文献:

- [1] Garnell P. Guided Weapon Control Systems [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2004.
- [2] 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)  
牟宇, 林德福, 祁载康. 激光末制导炮弹比例导引律性能研究[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(2): 250-255.
- [3] Ma Dongxi, Fan Dapeng, Zhu Huazheng. Smooth adaptation for transition of acquisition and tracking switching of electro-optical tracking system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(6): 1129-1133. (in Chinese)  
马东玺, 范大鹏, 朱华征. 光电跟踪系统捕获跟踪切换的平滑调节方[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(6): 1129-1133.
- [4] 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)  
王江, 林蔚, 王鹏, 等. 激光半主动制导武器半实物仿真系统能量链研究[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(7): 1230-1233.
- [5] 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.
- [6] Shan Jiayuan, Meng Xiuyun, Ding Yan. Hardware-in-the-loop Simulation [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2008. (in Chinese)  
单家元, 孟秀云, 丁艳. 半实物仿真[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [7] Wang Peng. Overall design of laser guided munitions hardware-in-the-loop simulation system [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2010: 37-39. (in Chinese)  
王鹏. 激光制导弹药半实物仿真系统总体方案设计[D]. 北京: 北京理工大学, 2010: 37-39.