

红外成像导引头闭环注入式仿真试验可行性分析

王 敏^{1,2}, 邹前进^{1,2}, 王彦斌^{1,2}, 黄成功^{1,2}, 李 慧^{1,2}

(中国洛阳电子装备试验中心, 河南 洛阳 471003)

摘 要: 针对红外成像导引头复杂战场环境适应性测试, 提出了一种采用数字图像注入式的闭环半实物仿真试验方法, 并分析了闭环注入式仿真试验系统的组成及工作原理。由于仿真测试时红外成像导引头的传感器被图像仿真计算机和图像注入接口设备取代, 导致数字图像生成及脱靶量计算环节存在延迟和误差, 使伺服控制系统的性能与实际工作情况可能不一致, 从而影响仿真试验结果精度和置信度, 因此, 在建立导引头伺服控制系统模型的基础上, 研究了仿真时间延迟、脱靶量误差对伺服控制系统的影响。研究表明: 由于脱靶量误差对跟踪精度的影响仅为 1.33%, 如果将时间延迟控制在 56.5 ms 之内, 开展闭环注入式仿真试验是可行的, 该结果可为下一步开展红外成像导引头闭环注入式仿真试验提供理论支持。

关键词: 红外成像导引头; 闭环注入式仿真; 时间延迟; 脱靶量误差

中图分类号: TN977 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)10-2614-06

Feasibility analysis of IR seeker closed-loop simulation based on digital image injection

Wang Min^{1,2}, Zou Qianjin^{1,2}, Wang Yanbin^{1,2}, Huang Chenggong^{1,2}, Li Hui^{1,2}

(Luoyang Electronic Equipment Test Center of China, Luoyang 471003, China)

Abstract: Focusing on the adaptability testing of IR seeker in complicated battlefield environment, a new closed-loop simulation test method of using digital image injection was proposed, the composing and principle of closed-loop simulation test system were analyzed. The detector of IR seeker was replaced by image simulation computer and injection device in the simulation condition, thus the performance of servo system was likely to differ from that under the actual conditions due to the image generation delay and miss distance error, which affected the precision and reliability of simulation test result. The influence of time delay and miss distance error on seeker's servo system by building servo system model was studied. The research result indicates that the influence of miss distance error on track precision is only 1.33%, the closed-loop simulation is feasible if time delay is less than 56.5 ms. The results of research provide theoretical support for actualizing closed-loop injection simulation test of IR imaging seeker.

Key words: IR imaging seeker; closed-loop injection simulation; time delay; miss distance error

收稿日期: 2013-02-05; 修订日期: 2013-03-03

基金项目: 总装重大课题资助(2013SY3310401)

作者简介: 王敏(1984-), 男, 工程师, 主要从事光电对抗仿真技术研究。Email: wangmin5886@aliyun.com

0 引 言

随着红外诱饵弹、红外干扰机、激光定向干扰等光电对抗装备的日趋成熟,如美国诺斯罗普·格鲁曼公司研制 AN/AAQ-24(V)复仇女神 DIRCM 系统、BAE 装备公司研制的 LAIRCM 系统等已部分装备部队,导致红外成像制导武器面临的战场环境日趋复杂^[1]。因此,新一代红外成像制导导弹必须具备良好的光电对抗手段、较强的复杂战场环境适应能力才具有存在的军事意义,提高复杂战场环境的适应能力已成为红外成像制导导弹发展的一个潮流。

半实物仿真试验具有信号环境构建灵活、试验条件可知可控、边界试验能力强、试验样本大等突出优点,是开展红外成像制导武器复杂战场环境适应性试验的重要手段。根据试验原理的不同,半实物仿真试验又可以采用注入式和辐射式两种手段,目前,受制于国内红外场景产生器技术水平的限制,其对比度、灰度等级、分辨率、帧频等重要指标难以满足辐射式仿真试验需求,且建设成本相对偏高,而注入式仿真试验不存在上述限制,因此是进行复杂战场环境适应性试验的一种有效手段。

然而,注入式仿真试验是在导引头探测系统不工作状态下,实时采集伺服控制系统测角元件输出的光轴指向数据,结合弹目相对位置关系、姿态信息等参数,实时仿真生成导引头观测到的红外数字图像,并注入到信息处理电路中^[2],其间必然存在时间延迟和脱靶量误差,影响导引头伺服控制系统的动态性能,甚至导致系统发散而无法闭环。因此,开展时间延迟和脱靶量误差对伺服控制系统的影响研究,并在此基础上进行可行性分析是开展闭环注入式仿真试验的重要前提。

1 闭环注入式仿真试验的工作原理

闭环注入式仿真试验的原理框图如图 1 所示。红外成像导引头放置于三轴模拟飞行转台上,模拟导弹的运动姿态,试验过程可分为试验准备阶段和试验实施阶段。

试验准备阶段,由主控计算机完成战情的设计与规划,想定目标、背景、干扰等诸要素参数、气象参数等。对于烟幕干扰、伪装干扰以及各种自然干扰

等,事先获取干扰效应建模所需的参数数据,建立其数学模型;对于激光有源干扰和太阳光干扰,事先利用有源干扰效应测试设备进行干扰效应数据测试,获取不同情况下非饱和损伤干扰效应图像(有无干扰时的灰度差图像);并事先计算不同气象条件和路径长度下的大气透过率、路径辐射数据,并将上述数据存储于数据库服务器。

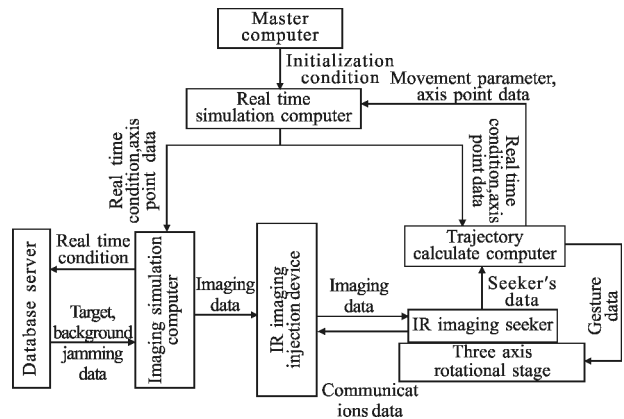


图 1 闭环注入式仿真试验原理框图

Fig.1 Principle of closed-loop injection simulation test

试验实施阶段,主控计算机将战情设计、规划和运行规则下发给实时仿真计算机,实时仿真计算机根据初始战情、弹道解算计算机反馈的制导武器运动参数数据、导引头光轴指向数据等,实时进行战情解算,并在其仿真时钟的控制下,将战情下发给图像实时仿真软硬件平台、弹道解算计算机。弹道解算计算机利用接收的实时战情数据和红外成像导引头上传的导引数据,进行弹道解算,并将解算获取的导引头姿态数据下发给三轴模拟飞行转台,模拟导弹的运动姿态。图像实时仿真软硬件平台接收战情数据后,调用典型目标、背景和干扰数据模型以及数据库服务器中的气象参数数据、典型目标、背景和干扰效应数据,实时仿真生成红外场景数字图像后发送给注入接口设备,数字图像注入接口设备在导引头帧同步信号的控制下将红外场景图像注入到信息处理电路中进行试验^[3]。

2 导引头伺服控制系统建模

红外成像导引头伺服控制系统模型组成框图如图 2 所示,主要由时间延迟模块、采样保持模块、位置回路校正模块、速度回路校正模块、电机模块、框

架和负载模块、干扰力矩模块以及速率陀螺模块等部分组成^[4-5]。

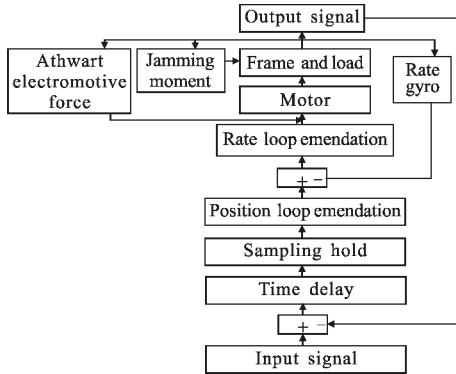


图 2 伺服系统模型组成框图
Fig.2 Composing of servo system model

各模块的传函如下。

时间延迟模块： $e^{-\tau s}$ ， τ 为图像仿真生成的时间延迟。

采样保持模块： $e^{-\tau_1 s/2}$ ， τ_1 为采样保持时间。

位置回路校正模块：

$$TF_1 = K_1 \times \frac{\beta_1(T_1 s + 1)}{\beta_1 T_1 s + 1} \quad (1)$$

式中： K_1 为增益系数； β_1 为校正分度系数； T_1 为时间常数。

速度回路校正模块：

$$TF_2 = K_2 \times \frac{\beta_2(T_2 s + 1)}{\beta_2 T_2 s + 1} \quad (2)$$

式中： K_2 为增益系数； β_2 为校正分度系数； T_2 为时间常数。

力矩电机模块：

$$TF_3 = \frac{1}{Ls + R} \quad (3)$$

式中： R 为电枢绕组电阻； L 为电枢绕组电感。

框架和负载模块：

$$TF_4 = \frac{K_T \times J_{11}}{J_{\varphi} s} \quad (4)$$

式中： K_T 为力矩系数； J_{11} 为框架转动惯量； J_{φ} 为负载转动惯量。

干扰力矩模块：干扰力矩一般包括库伦摩擦力矩、粘滞阻尼力矩以及弹簧力矩等，其传函分别为 K_k 、 K_{ω} 、 $\frac{K_{sp}}{s}$ 。

电机反电动势模块： $TF_5 = K_E$ ， K_E 为反电动势系数。

速率陀螺模块：

$$TF_6 = \frac{1}{\frac{s^2}{\omega_G} + 2 \frac{\xi_G}{\omega_G} s + 1} \quad (5)$$

式中： ω_G 为速率陀螺角频率； ξ_G 为速率陀螺阻尼系数。

在得到各个模块的传函后，可求得速度回路开环传递函数 TF_{VK} 、闭环传递函数 TF_{VB} 以及位置回路开环传递函数 TF_{PK} ：

$$TF_{VK} = TF_2 \times \frac{TF_5 \times TF_3 \times TF_4}{1 + TF_5 \times TF_3 \times TF_4}$$

$$TF_{VB} = \frac{TF_6 \times TF_{VK}}{1 + TF_6 \times TF_{VK}} \quad TF_{PK} = \frac{TF_{VB} \times TF_1}{s} e^{-(\tau + \frac{\tau_1}{2})s} \quad (6)$$

将导引头伺服控制系统的参数代入公式(6)，得到位置回路的开环波特图如图 3 所示，其相角裕度为 48.6° ，截至频率为 13.7 rad/s ，根据伺服系统稳定性判据，可知系统稳定，动态性能良好。

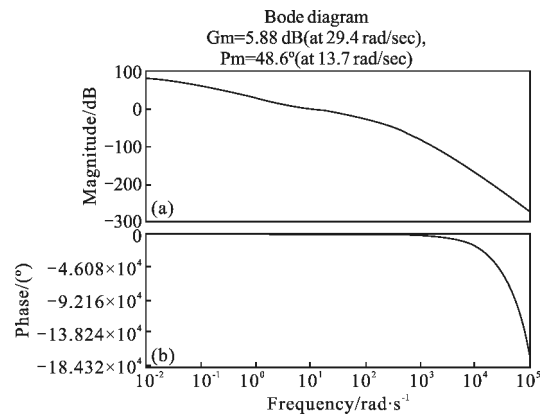


图 3 位置回路开环波特图

Fig.3 Opening bode of position loop

3 时间延迟对导引头伺服控制系统的影响分析

红外成像导引头在实际工作过程中，从帧周期开始(即探测器积分起始时刻)到输出方位、俯仰脱靶量信号所需要的时间包括探测器积分和采样保持时间为 T_1 图像传输时间为 T_2 ，图像处理时间为 T_3 ，总的时间延迟为： $T = T_1 + T_2 + T_3$ 。

而在闭环注入式仿真试验中，从采集测角元件输出的光轴指向信息到输出方位、俯仰脱靶量信号所需时间主要包括图像实时仿真时间 T_{1s} (含测角元件数据采集、战情解算和图像实时生成时间等)、图像注入时间 T_{2s} 和图像处理时间 T_{3s} ，总的时间延迟为： $T_s = T_{1s} + T_{2s} + T_{3s}$ 。

对于同一红外成像导引头,可以认为 $T_2=T_{2s}$ 、 $T_3=T_{3s}$,然而,由于探测器积分和采样保持通常在一帧之内完成,而图像实时仿真难以实现,导致闭环注入式仿真试验相比导引头的实际工作过程,存在额外的时间延迟,该时间延迟将导致伺服系统的相角裕度降低,动态性能下降,甚至无法闭环。

利用位置回路的开环传递函数表达式,可以计算得到不同时间延迟下的波特图(见图 4)和时间延迟与相角裕度的关系曲线(见图 5)。

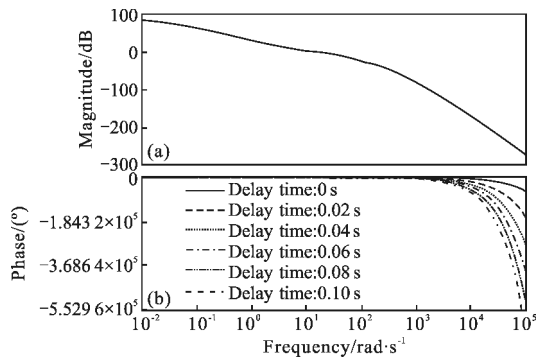


图 4 不同时间延迟下位置回路开环波特图

Fig.4 Opening bode of position loop in different delay time

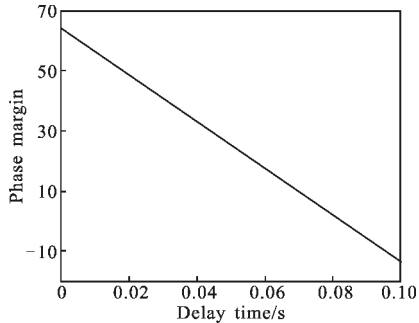


图 5 相角裕度与时间延迟的关系曲线

Fig.5 Relation between phase margin and delay time

根据控制系统稳定性的判断准则,如果相角裕度大于 0° ,即时间延迟小于 81.5 ms 时,系统是稳定的。图 6 为延迟 80 ms 时,系统在单位阶跃信号激励

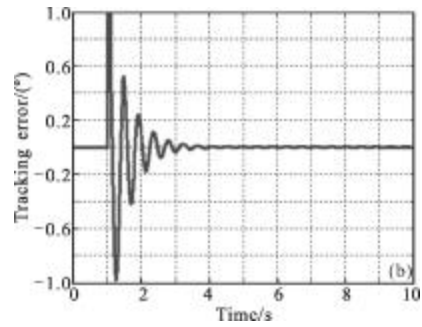
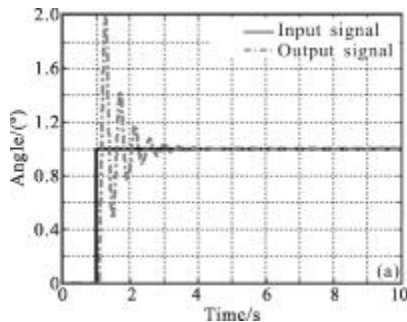


图 6 延迟 80 ms 时跟踪误差与阶跃响应输出

Fig.6 Tracking error and output signal(delay time:80 ms)

下的阶跃输出和跟踪误差曲线,从图中可以看出,虽然系统能够稳定跟踪,但此时的超调量为 98.1% ,超调时间达到了 3.26 s 。而根据工程实践经验一般要求其相角裕度大于 20° ,即如果图像实时仿真时间小于 56.5 ms 时,闭环注入式仿真试验是可行的,且延时并不影响伺服系统最终的跟踪精度。

4 脱靶量误差对导引头伺服控制系统的影响分析

4.1 输入信号模拟

在分析脱靶量误差对伺服控制系统的影响时,首先需要对导弹攻击目标过程中的弹目视线角信号进行模拟。由于任何运动轨迹都可以用傅里叶分析分解成若干个正弦曲线,因此可以用一个正弦运动代替实际攻击过程中的弹目视线运动,即输入信号用等效正弦信号来模拟,其表达式为^[6]:

$$\theta_1(t) = \theta_{\max} \sin \omega_1 t \tag{7}$$

$$\text{其等效正弦振幅为: } \theta_{\max} = \dot{\theta}_{\max} / \ddot{\theta}_{\max} \tag{8}$$

$$\text{等效正弦角频率为: } \omega_1 = \ddot{\theta}_{\max} / \dot{\theta}_{\max} \tag{9}$$

式中: $\dot{\theta}_{\max}$ 为导弹最大角速度; $\ddot{\theta}_{\max}$ 为导弹最大角加速度。

图 7、图 8 为在等效正弦信号的激励下,伺服控

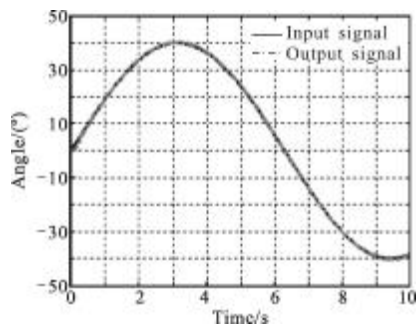


图 7 伺服控制系统的响应输出曲线图

Fig.7 Output signal of servosystem

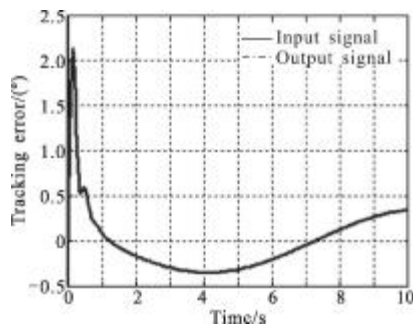


图 8 伺服控制系统的跟踪误差曲线图

Fig.8 Tracking error of servo system

制系统在延时 56.5 ms 时的响应输出和跟踪误差曲线,此时跟踪误差的平方根值为 0.3688° 。

4.2 脱靶量误差产生的原因及对伺服控制系统的影响

闭环注入式仿真试验与导引头真实工作过程相比,导致额外产生脱靶量误差的原因主要有以下几个方面。

(1) 测角元件的测角误差 θ_1 : 红外成像导引头普遍采用电位器作为测角元件,其实质是一个可变电阻器,通过获取输出的电阻值得到旋转角度。

(2) 脱靶量延时导致的延时误差 θ_2 : 由于测角元件获取数据时刻与图像仿真生成时刻存在时间差,而弹目处于相对运动状态,导致获取的脱靶量产生误差,该误差与弹目距离 R 、目标在导引头内框坐标系下的俯仰偏航速度 V 以及延迟时间 T 有关:

$$\theta_2 = \arctan\left(\frac{VT}{R}\right) \quad (10)$$

(3) 图像生成误差 θ_3 : 在闭环注入式仿真试验中,需要将目标和背景图像合成,从而会产生图像生成误差,该误差的最大值为导引头的角度分辨率,由导引头的视场和像元数决定。

在上述产生脱靶量误差的因素中,延时误差的影响最为严重,但可以根据弹目相对位置关系予以修正,而测角误差和图像生成误差无法避免,因此,下面重点分析这两个误差对伺服控制系统的影响^[7-8]。

在延时 56.5 ms,且考虑存在脱靶量误差的情况下,伺服系统的等效正弦信号响应输出和跟踪误差曲线如图 9 所示,此时跟踪误差的平方根值为 0.3737° ,对比图 7、图 8 可以发现,其影响仅为 1.33%,因此,采集测角元件输出的光轴指向数据开展闭环注入式仿真试验是可行的。

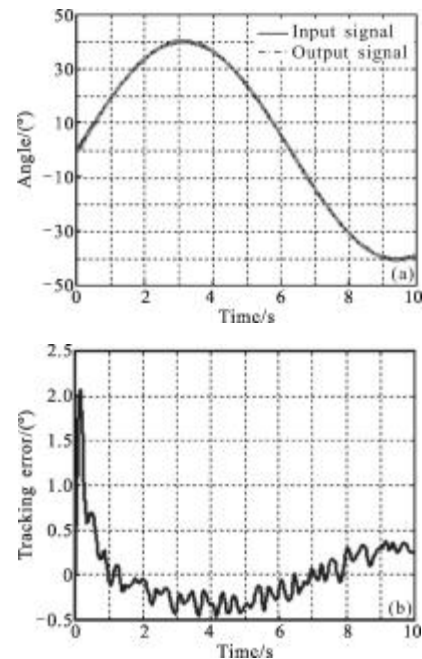


图 9 存在脱靶量误差情况下的响应输出和跟踪误差

Fig.9 Output signal and tracking error with miss distance error

5 结论

建立了红外成像导引头伺服控制系统模型,分析了闭环注入式仿真试验时间延迟和脱靶量误差产生的原因,以及它们对伺服控制系统稳定裕度和跟踪精度的影响,得出了以下两个结论:一是如果能将时间延迟控制在 56.5 ms 之内,伺服控制系统具有足够的稳定裕度,且不影响最终的跟踪精度;二是脱靶量误差不影响伺服系统的稳定裕度,对跟踪精度的影响仅为 1.33%。也就是说如果将时间延迟控制在 56.5 ms 之内,采集测角元件输出的光轴指向数据开展闭环注入式仿真试验是可行的,该结论对下一步开展红外成像制导武器闭环注入式仿真试验具有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] Bai Lin. Means and the development trend of the interference infrared imaging guided weapons[J]. Ship Electronic Engineering, 2009, 29(4): 34-38. (in Chinese)
白林. 干扰红外成像制导武器的手段与发展动向[J]. 舰船电子工程, 2009, 29(4): 34-38.
- [2] Wu Junhui, Zhu Zhen, Xue Fangxia, et al. Study on loop-locked IR capturing and tracking simulation based on digital image injection [J]. Journal of System Simulation, 2004,

- 16(9): 2067-2070. (in Chinese)
- 吴军辉, 朱震, 薛芳侠, 等. 数字图像注入式红外捕获跟踪闭环仿真试验探讨 [J]. 系统仿真学报, 2004, 16(9): 2067-2070.
- [3] Wang Xuewei, Shen Tongsheng, Zhou Xiaodong. Infrared image generation system based on signal injection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, 32(6): 568-571. (in Chinese)
- 王学伟, 沈同圣, 周晓东. 基于信号注入的红外热成像生成系统[J]. 红外与激光工程, 2003, 32(6): 568-571.
- [4] Zhang Zhiyong, Zhou Xiaoyao, Fan Dapeng, et al. Design and analysis of control system for seeker servo mechanism [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 1494-1499. (in Chinese)
- 张智永, 周晓尧, 范大鹏, 等. 导引头伺服机构的控制系统分析与设计[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(2): 1494-1499.
- [5] Yang Xiaoying, Cui Dedong. Simulation analysis of the angle tracing system for infrared imaging seeker [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(1): 39-51. (in Chinese)
- 杨晓英, 崔得东. 红外成像导引头角跟踪系统仿真分析 [J]. 红外与激光工程, 2007, 36(1): 39-51.
- [6] Ma Jianguang. The basic technologies of the acquisition tracking and pointing systems [J]. *Optics Engineering*, 1989, 81(3): 31-42. (in Chinese)
- 马佳光. 捕获跟踪与瞄准系统的基本技术问题[J]. 光学工程, 1989, 81(3): 31-42.
- [7] Zhao Chao. Effects of time delay and its compensation algorithm in a seeker's servo system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(6): 1066-1069. (in Chinese)
- 赵超. 导引头随动系统中信号处理延迟的影响及其补偿算法[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(6): 1066-1069.
- [8] Wang Lianming, Ge Wenqi, Xie Mujun. Influences of sample frequency and delays on tracking system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, 8(4): 369-372. (in Chinese)
- 王连明, 葛文奇, 谢慕君. 采样频率、系统延迟对跟踪系统稳定性能的影响[J]. 光学精密工程, 2000, 8(4): 369-372.