

红外成像导引头闭环注入式仿真试验系统设计及一致性分析

王 敏, 黄成功, 郭正红, 许振领, 齐凤杰, 李 华

(中国洛阳电子装备试验中心, 河南 洛阳 471003)

摘 要: 闭环注入式仿真是开展红外成像制导武器对抗及其复杂环境适应性试验的一种有效手段, 它在传感器被图像仿真计算机和图像注入接口设备取代的情况下, 采集导引头的框架角数据, 实时仿真生成红外数字图像, 并通过注入接口设备直接注入到导引头信息处理电路中进行试验。分析了闭环注入式仿真试验的工作原理, 设计了仿真试验系统的软硬件平台、工作时序, 理论计算了仿真试验系统产生的失调角延时和失调角误差, 并利用搭建的仿真试验与导引头实际工作一致性分析平台, 分析了因失调角延时和失调角误差导致导引头输出的偏航、俯仰角速度误差和制导精度误差。仿真结果表明: 仿真试验与导引头实际工作条件是一致性的, 设计的仿真试验系统较为科学合理, 该结论可为开展红外成像导引头闭环注入式仿真试验提供理论支撑。

关键词: 红外成像导引头; 闭环注入式仿真; 一致性; 时间延迟; 失调角误差

中图分类号: TN97 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)10-3211-06

Design and consistency analysis of IR imaging seeker closed-loop injection simulation experiment system

Wang Min, Huang Chenggong, Guo Zhenghong, Xu Zhenling, Qi Fengjie, Li Hua

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

Abstract: Closed-loop simulation based on digital image injection is an effective testing means of IR imaging guidance weapon countermeasure and complicated environment adaptability, it collects frame angle of seeker and real-time simulates to generate IR image when the detector of IR seeker is replaced by image simulation computer and injection device, the image is injected by injection device. The principle of closed-loop simulation test were analyzed, software, hardware platform and work scheduling of simulation test system were designed, miss distance time delay and miss distance error were calculated, consistency analysis platform of simulation test and actual work was built, yaw and pitching angle velocity error and homing precision were analyzed by miss distance time delay and miss distance error. The result shows that the condition of simulation test and actual work of seeker was consistent, simulation test system was scientific. The research results provide theoretical support for developing closed-loop injection simulation test.

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

收稿日期: 2014-02-18; 修订日期: 2014-03-20

基金项目: 总装重点课题

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

0 引言

红外成像导引头是红外成像制导武器的核心部件,其性能直接决定了导弹武器系统的作战效能。红外成像导引头除受种类繁多、复杂多变的自然环境干扰外,人为干扰手段也日趋成熟并广泛装备部队,使导引头面临的战场环境日趋复杂。因此,新一代红外成像导引头不仅要关注自身的探测跟踪性能,更需强调其复杂战场环境适应能力。

通过实弹打靶试验评估红外成像导引头的复杂环境适应能力存在试验周期长、成本高且样本不足、环境无法可知可控等问题,并且还须考虑参试人员和设备安全,难以全面地评估其复杂环境适应能力。而基于红外数字图像直接注入的闭环半实物仿真试验手段能够较好地解决这一难题,它是在导引头探测系统不工作的状态下,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,利用目标、背景、干扰等红外辐射特性模型,实时仿真生成导引头观测到的红外数字图像,并注入到导引头信息处理电路中进行试验^[1-2]。

文中根据导引头的工作原理和工作时序,设计了一种红外成像导引头闭环注入式仿真试验系统,给出了试验系统的工作原理、硬件组成、工作时序和软件设计,并基于导引头输出的角速率和导弹制导精度,理论分析了在仿真试验条件下,导引头伺服系统受仿真试验产生的失调角输出延时和失调角误差对角速率和制导精度的影响,完成了注入式仿真试验条件与导引头真实工作条件的一致性分析。

1 闭环注入式仿真试验系统设计

闭环注入式仿真试验的工作原理(如图1所示)可简述为:根据红外成像制导武器作战使命和实际使用方式,想定仿真试验所需参数,并依据初始想定参数,由图像仿真生成软件生成导引头观测到的红外图像,经图像注入接口卡注入到导引头信息处理电路进行处理,对目标进行截获与跟踪,A/D数据采集卡以导引头工作帧频实时采集导引头框架角信号,串口卡实时采集导引头输出的框架角速率信号,并由运动控制模型解算得到导弹的弹道、姿态数据,图像仿真生成软件利用弹道、姿态数据以及实时采

集的框架角生成红外数字图像实现闭环。

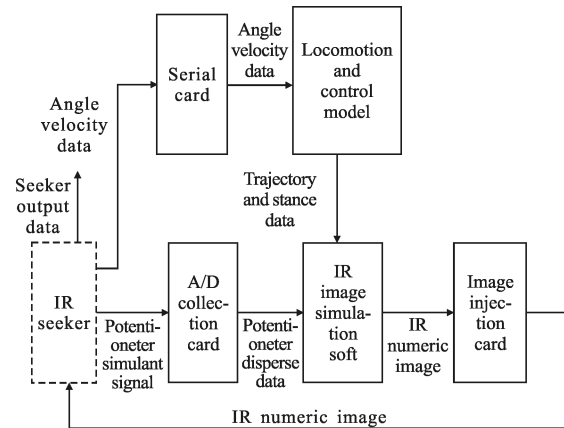


图1 闭环注入式仿真试验原理框图

Fig.1 Closed-loop injection principle

1.1 硬件设计

仿真试验系统(图2)主要由图像仿真计算机(含红外图像仿真生成软件)、图像注入接口卡、A/D数据采集卡、串口卡等接口设备及相应的驱动程序等组成。

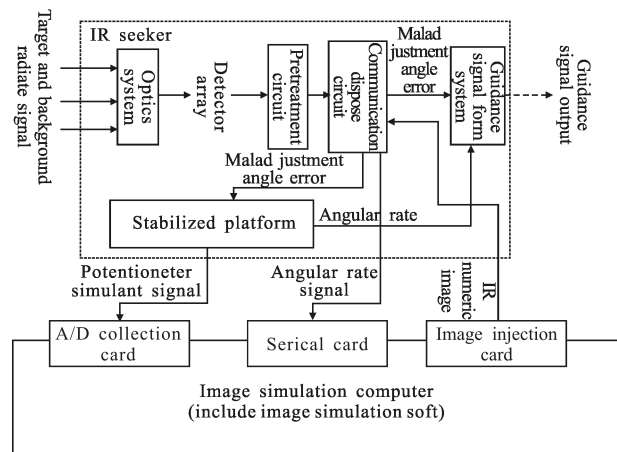


图2 仿真试验系统组成框图

Fig.2 Composition diagram of simulation experiment system

图像仿真计算机是仿真系统的核心,主要用于红外图像实时仿真生成,并将生成的数字图像写入图像注入接口卡缓存。图像仿真计算机采用工控机,并安装Windows XP+RTX实时系统;A/D数据采集卡主要用于以导引头的工作频率采集稳定跟踪平台在偏航、俯仰方向上的框架角信号,该数据作为图像仿真计算机图像仿真的触发信号以及图像仿真所需的相对光轴指向(相对于弹轴);串口卡用于实时采集图像信息处理电路输出的固定频率偏航、俯仰框架角速率信号,用于制导律与运动控制模型的输入

信号;图像注入接口卡用于将缓存中的图像数据按照红外成像导引头图像信息处理电路的数据接收协议和格式,注入到图像信息处理电路中^[3]。

1.2 工作时序设计

为保证在仿真试验条件下导引头的伺服系统与

真实工作条件一致,仿真试验系统的工作时序需要根据红外成像导引头真实的工作时序进行设计,设计的工作时序如图 3 所示。

图中, N 、 $N+1$ 、 $N+2$ 、 $N+3$ 为红外成像导引头图像仿真帧序列,以 A/D 数据采集卡输出 n 赫兹(即

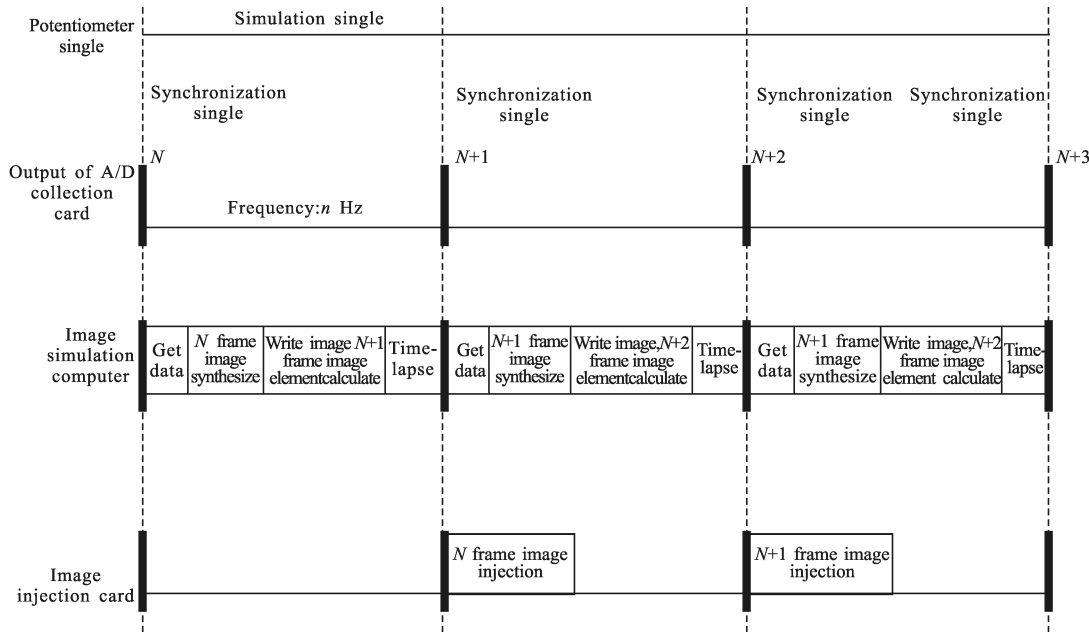


图 3 仿真试验系统时序设计图

Fig.3 Work schedule of simulation system

导引头帧频)的电位计信号刷新为翻帧引擎(采取中断工作方式),当同步信号产生时,图像仿真计算机开始获取电位计、弹道数据,并进行第 N 帧图像实时合成后,写入图像注入接口卡的缓存中,图像注入接口卡在下一个同步信号产生时,将缓存中的数字图像注入到信息处理电路中进行试验,并同时进行第 $N+1$ 帧图像要素的解算^[4]。

1.3 仿真软件设计

针对红外成像导引头闭环注入式仿真试验,图像仿真生成拟采用实时合成的仿真方法,其工作流程如图 4 所示。

图像仿真生成软件具体工作流程如下:

(1) 程序开始时,对程序进行初始化,主要进行背景、目标以及干扰内存的开辟,预先读取素材到计算机内存,并开辟 Windows 线程和 RTX 线程。

(2) RTX 线程被动响应 A/D 数据采集卡中断,获取方位、俯仰电位计数据,并写入共享内存,在写入完成后,给 Window 线程发送同步信息。

(3) Windows 线程接收到 RTX 线程发送的同步

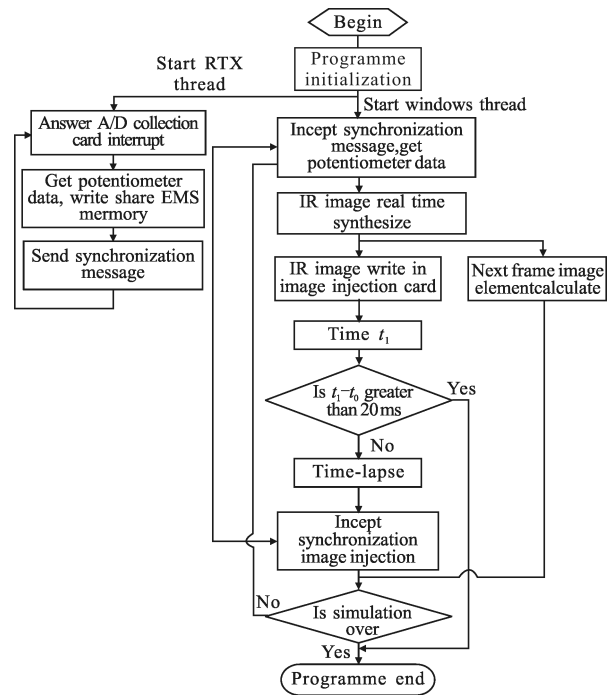


图 4 红外图像仿真软件流程

Fig.4 Flow chart of image simulation software

信号后,从共享内存中获取方位、俯仰电位计数据(计时 t_0),进行图像实时合成,并将其写入注入接口卡的缓存(计时 t_1),判断 t_1-t_0 是否大于导引头的工作帧周期,如果是,则程序报错退出,如果小于,则图像注入接口卡等待下一个同步信号产生,当同步信号产生时,图像注入接口卡开始注入数据,并判断程序是否结束,在图像写缓存的同时进行下一帧图像要素的解算。

2 仿真试验与实际工作的一致性分析

2.1 一致性分析方法

导致导引头在仿真试验条件与实际工作条件不一致的原因主要有两个方面:一是仿真试验产生的失调角输出延时,二是失调角误差,失调角输出延时会降低导引头伺服系统的带宽,增大其调节时间和超调量,失调角误差影响伺服系统的跟踪精度,二者最终均会对导弹的制导精度产生影响^[5]。

分析仿真试验与实际工作条件的一致性,其方法为搭建一致性分析平台(如图 5 所示),建立目标运动特性模型、弹目视线计算模型、探测器模型,导引头伺服系统模型、制导律模型、三通道驾驶仪模型以及弹体运动学和动力学模型等^[6-7],并引入失调角输出延时模块和失调角误差模块,仿真得到导弹因失调角输出延时和失调角误差产生的弹目视线角速率和制导精度误差^[8]。

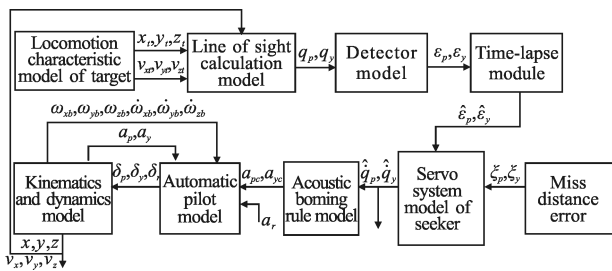


图 5 一致性分析平台组成框图

Fig.5 Composition diagram of consistency analysis platform

图中, x_t, y_t, z_t 为目标位置; v_{xt}, v_{yt}, v_{zt} 为目标速度; q_p, q_y 为弹目视线偏航角和俯仰角; $\varepsilon_p, \varepsilon_y$ 为经信息处理后输出的偏航、俯仰失调角; $\hat{\varepsilon}_p, \hat{\varepsilon}_y$ 为经仿真延时后的偏航、俯仰失调角; ξ_p, ξ_y 为仿真试验产生的偏航、俯仰失调角误差; \dot{q}_p, \dot{q}_y 为偏航、俯仰角速率; a_{pc}, a_{yc}, a_r 为偏航、俯仰、滚转通道驾驶仪指令; δ_{pc} 、

δ_{yc}, δ_r 为偏航、俯仰、滚转通道等效舵偏角; x, y, z, v_x, v_y, v_z 分别为导弹的位置和速度; a_p, a_y 为导弹的偏航、俯仰法向过载; $\omega_{xb}, \omega_{yb}, \omega_{zb}, \dot{\omega}_{xb}, \dot{\omega}_{yb}, \dot{\omega}_{zb}$ 分别为弹体的角速度和角加速度。

2.2 一致性分析

为进行一致性分析,首先以发射瞬时导弹质心在地面上的投影为坐标原点 o ,以弹道面与水平面的交线为 x 轴,指向目标为正,以竖直向上为 y 轴, z 轴与 x 轴、 y 轴构成右手坐标系建立地面坐标系。

2.2.1 失调角延时对一致性的影响

根据设计的仿真试验系统工作时序,由于图像仿真时间能够在一帧时间内完成,且图像注入接口卡根据导引头信息处理电路接收时序注入数据,因此,产生失调角延时的唯一因素为 A/D 数据采集卡接收数据的延迟,经 RTX 实时系统测试(如图 6 所示),该延时小于 1.5 ms ,延时抖动量的方差为 $9.79 \times 10^{-5} \text{ ms}$ 。

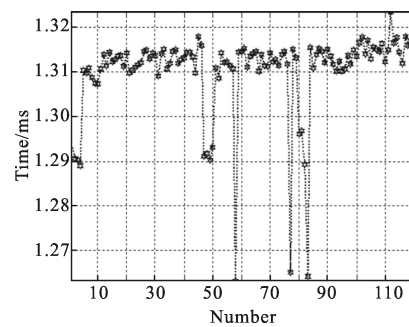


图 6 数据传输延迟时间

Fig.6 Time delay of date transmission

在未延时和延时 1.5 ms 条件下,由一致性分析平台得到的弹目视线偏航、俯仰角速率变化曲线及误差曲线分别如图 7 和图 8 所示,弹道曲线和 X, Y 方向的跟踪误差曲线分别如图 9 和图 10 所示。

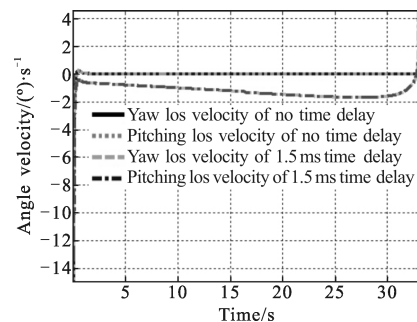


图 7 有无延时情况下偏航、俯仰角速率变化曲线图

Fig.7 Curves graph of yaw and pitching los velocity with and without time delay

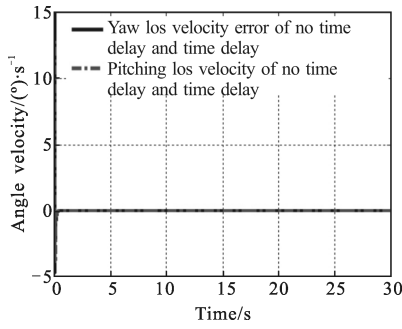


图 8 偏航、俯仰角速率误差曲线图

Fig.8 Error curves graph of yaw and pitching los velocity

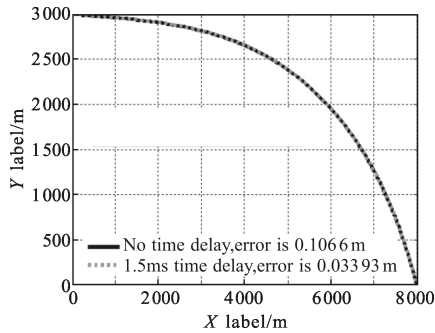


图 9 有无延时情况下的弹道曲线图

Fig.9 Trajectory curves graph with and without time delay

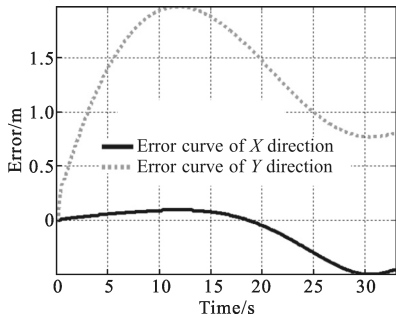


图 10 X、Y 方向的跟踪误差曲线图

Fig.10 Scout error curves graph of X and Y direction

从图 7 和图 8 可以得出: 导弹制导时间长度为 33.441 s, 在整个制导阶段, 偏航、俯仰方向上的角速度误差最大值为 14.95(°)/s、12.74(°)/s, 但在 0.5 s 之后, 该误差基本为 0(小于 10⁻⁵(°)/s); 从图 9 和图 10 可以得出: 在有失失调角延时条件下, 两者的弹道基本重合, 在 X、Y 方向上的最大误差分别为 0.096 m、1.973 m, 最终的制导精度误差为 0.072 m。因此, 失失调角延时对仿真试验的一致性没有影响。

2.2.2 失失调角误差对一致性的影响

根据仿真试验系统的软件设计, 失失调角产生的原因有三个方面的: 一是测角元件的测角误差 θ_1 , 二是

失失调角延时抖动导致的失失调角误差 θ_2 ; 三是图像合成误差 θ_3 , 最终导致的失失调角误差 $\theta = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3$ 。

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, 在导引头实际跟踪阶段, 框架角信息并不进入跟踪回路, 但仿真试验需要框架角作为光轴的相对指向, 因此, 测角元件的测角误差直接影响失失调角误差。电位计经校正后, 其测角误差可以控制在 0.1° 以内。

脱靶量延时抖动导致的失失调角误差 θ_2 : 脱靶量延时产生的失失调角误差是系统误差, 在导引头对目标稳定跟踪后, 该误差能够被导引头修正, 但延时抖动产生的误差无法修正, 该误差与弹目距离 R 、目标在导引头内框坐标系下的偏航、俯仰速度 V 以及延迟抖动时间 T 有关:

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

以导引头的最大跟踪角速度计算, 该误差小于 $1.96 \times 10^{-6}^\circ$ 。

图像合成误差 θ_3 是目标与背景合成时产生的, 该误差与导引头的视场 ϑ 和像元数 N 决定:

$$\theta_3 = \frac{\vartheta}{2N}$$

根据导引头的参数, 该误差一般小于 0.01°。

通过对各种误差的分析可以得出: 测角元件的测角误差是失失调角误差的主要来源, 且总的失失调角误差小于 0.12°。在无失失调角误差以及失失调角误差为 0.12° 情况下, 由一致性分析平台得到的弹目视线偏航、俯仰角速率变化曲线及误差曲线分别如图 11 和图 12 所示, 弹道曲线和 X、Y 方向的跟踪误差曲线分别如图 13 和图 14 所示。从图 11、图 12 可以得出: 在有失失调角误差条件下, 导引头输出的弹目视线偏航、俯仰方向上的角速度误差最大值分别为 0.8(°)/s、

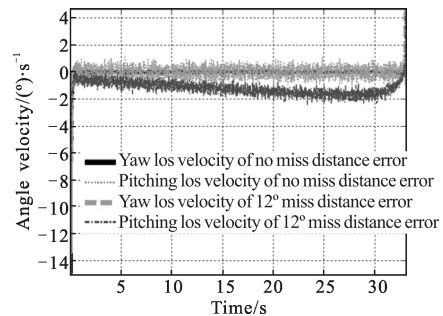


图 11 偏航、俯仰角速率变化曲线图

Fig.11 Curves graph of yaw and pitching los velocity

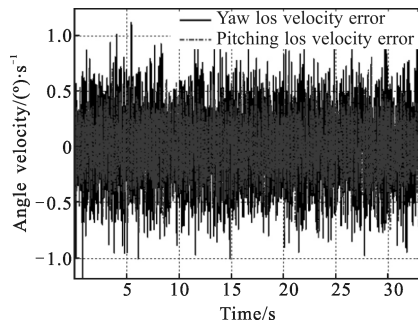


图 12 偏航、俯仰角速率误差曲线图

Fig.12 Error curves graph of yaw and pitching los velocity

1.25(°)/s;从图 13、图 14 可以得出:在有无失调角误差条件下,两者的弹道基本重合,在 X 方向上的最大误差为 0.068 m,在 Y 方向上的最大误差为 0.235 m,而最终的制导精度误差为 0.056 6 m。因此,可以得出如下结论:虽然失调角误差对导引头输出的角速率会产生一定的影响,但不影响最终的制导精度,也就是说失调角误差对仿真试验的一致性没有影响。

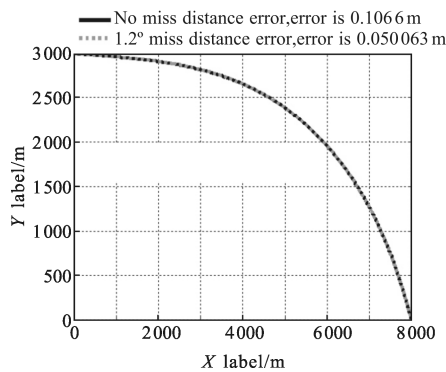
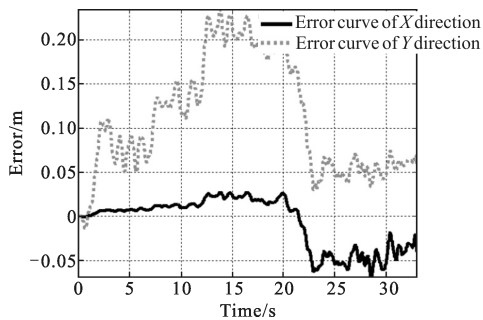


图 13 有无失调角误差情况下的弹道曲线图

Fig.13 Trajectory curves graph with and without miss distance error

图 14 X 、 Y 方向的跟踪误差曲线图Fig.14 Scout error curves graph of X and Y direction

3 结论

根据设计的闭环注入式仿真试验系统,理论分

析失调角延时和失调角误差产生的主要原因,定量计算得到失调角延时小于 1.5 ms、失调角误差小于 0.12°,并利用搭建的一致性分析平台,仿真分析得到失调角延时为 1.5 ms 时导致的导引头偏航、俯仰角速度误差基本为 0,最终的制导精度误差为 0.072 m;失调角误差为 0.12°时虽然导致的导引头偏航、俯仰角速度最大误差较大(分别为 0.8(°)/s、1.25(°)/s),但最终的制导精度误差仅为 0.056 6 m。因此,可以得出如下结论:设计的闭环注入式仿真试验系统较为科学、合理,产生的失调角延时与失调角误差对仿真试验的一致性没有影响,该结论可为开展红外成像制导武器闭环注入式仿真试验提供理论支撑。

参考文献:

- [1] Yu Jinsong, Hao Wangsong, Wan Jiuqing. Sardware-in-the-loop simulation of infrared seeker based on direct signal injection[J]. *Acta ArmamentarII*, 2006, 27(5): 928-931. (in Chinese)
- [2] 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)
- [3] Wu Junhui, Zhu Zhen, Xue Fangxia. 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)
- [4] Wu Junhui, Li Hui, Xu zhenling. Theoretical research on IR capturing and tracking device simulation based on digital image injection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(12): 3166-3171. (in Chinese)
- [5] Wang Min, Zou Qianjin, Wang Yanbin. Feasibility analysis of IR seeker closed-loop simulation based on digital image injection[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(10): 2614-2619. (in Chinese)
- [6] Li Hui. Modeling and analysis of servo system on countermeasure of IR imaging seeker[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(10): 2603-2607. (in Chinese)
- [7] 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): 494-1499. (in Chinese)
- [8] 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)