

文章编号 1004-924X(2016)04-0913-09

## 红外导引头注入式闭环试验的边界能力及一致性

李 慧\*, 吴军辉, 陈前荣, 许振领, 王 敏, 郭正红

(中国洛阳电子装备试验中心, 河南 洛阳 471003)

**摘要:**提出一种采用数字图像注入式方法进行红外成像导引头闭环仿真和性能测试的方法。由于注入式仿真试验时红外导引头的红外探测分系统被图像仿真和图像注入设备取代不参与工作,故导引头稳定跟踪回路性能会发生变化。为使注入式闭环仿真试验结果准确可信,建立了评价红外成像导引头仿真试验和实际工作两种情况下稳定跟踪回路性能一致性的指标体系,给出了一致性评估方法。最后,建立了红外成像导引头稳定跟踪回路仿真模型,开发了红外导引头数字图像注入式闭环半实物仿真试验系统并在一导引头实物平台上开展了实验。结合建模仿真与实验验证手段得到了红外导引头数字图像注入式闭环半实物仿真试验系统的边界能力。结果表明:在失调角延时小于 73 ms,失调角误差小于 0.18°,目标运动最大角速度小于 1(°)/Hz 时,导引头在注入式仿真试验和实际工作两种情况下的稳定跟踪性能可保持一致。实验结果为红外成像制导武器快速形成图像注入式闭环试验鉴定能力奠定了基础。

**关键词:**红外成像导引头;图像注入式闭环试验;边界能力;一致性评估

**中图分类号:** TN977; TN216 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162404.0913

### Limit capability and consistency of digital image injection test for IR imaging seeker

LI Hui\*, WU Jun-hui, CHEN Qian-rong, XU Zhen-ling, WANG Min, GUO Zheng-hong

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

\* Corresponding author, E-mail: lihuiwch@163.com

**Abstract:** A new method to simulate and test the closed-loop performance of an IR imaging seeker by using digital image injection was proposed. The detector of IR imaging seeker was replaced by image emulation and injection devices in the simulation condition, so the performance of tracking servo loop was likely to be different from that under the actual condition. To allow the results of the digital image injection to be close the simulation experiment, an evaluation index system and an evaluation method for the consistency capability of the tracking servo loop under the simulation test and an actual condition were established to improving the precision and reliability of simulation test result. Then, the accurate tracking servo system model of an actual IR imaging seeker was setup, and a hardware-in-the-loop simulation test system of digital image injection system was established. The experiments was performed on a seeker platform and the capability limits of the hardware-in-the-loop simulation test of digital image injection system was found by adopting the simulation and modeling combined

收稿日期: 2015-11-20; 修订日期: 2016-01-12.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 11504420); 总装备部重点课题资助项目(No. 2014SY3310403)

with the experimental test method. The result shows that the tracking performance of the seeker can be held in consistency under the above two conditions when the maximum random maladjustment angle error is  $0.18^\circ$ , the maladjustment angle delay and the maximum angle velocity of the target are smaller than 73 ms and  $1^\circ/\text{Hz}$ , respectively. These results provide a foundation for forming the capability of the digital image injection simulation test for infrared imaging guidance weapons.

**Key words:** IR imaging seeker; image injection closed loop simulation test; limit capability; consistency evaluation

## 1 引言

目前,国内在开展红外成像制导武器干扰试验和红外成像制导武器复杂光电环境适应性试验时,主要利用外场试验手段。现在复杂战场环境下装备作战试验的需求越来越强烈,单一依靠外场手段进行红外成像制导武器试验鉴定评估的局限性越来越突出。红外成像导引头是红外制导武器对抗时的重点考核对象,利用半实物仿真试验手段对红外成像导引头进行试验,可发挥其态势想定灵活、光电信号与气象环境构建多样、边界能力考核充分及试验消耗低等优势。红外成像导引头仿真试验包括辐射式和数字图像注入式两种实现方式。相比辐射式,注入式方法由于具有建设费用少、红外信号环境易于构建等优点,在某些条件下可有效评估设备性能<sup>[1-3]</sup>。因此开展红外成像导引头闭环注入式半实物仿真试验的研究具有重要应用价值。

数字图像注入式仿真测试时,红外成像导引头的红外探测系统被图像仿真计算机和图像注入接口卡代替,不参与工作,因此,导引头稳定跟踪回路的性能发生了改变,要完成红外成像导引头数字图像闭环注入式半实物仿真测试并使试验结果准确可信,需要解决数字图像注入式半实物仿真构建方案、仿真试验系统与实装导引头平台连接后系统性能的一致性、闭环注入式仿真的能力边界等诸多关键技术问题。

本文在分析红外成像导引头数字图像注入式闭环仿真试验工作原理的基础上,详细分析了实际工作和注入式仿真两种情况下导致红外成像导引头稳定跟踪回路性能不一致的失调角延时和失调角误差源,并给出了两种状态下性能一致性的指标体系以及一致性评估方法。本文利用某红外成像导引头稳定跟踪回路仿真模型,仿真分析了

在不同失调角延时、失调角误差和目标运动角速度情况下导引头稳定跟踪误差的变化情况,得出了注入式闭环仿真试验的能力边界。最后在红外成像导引头上进行边界能力验证实验。

## 2 红外成像导引头注入式闭环仿真试验和实际工作情况下稳定跟踪回路性能一致性分析

### 2.1 数字图像注入式闭环仿真试验工作原理

实际工作情况下,红外成像导引头要实现目标的高精度跟踪和弹目视线角速度测量,一般需采用速度稳定回路和跟踪回路组成的双闭环回路来完成,工作原理如图 1 所示。

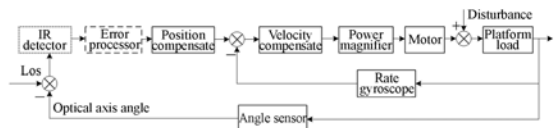


图 1 红外成像导引头实际情况下稳定跟踪回路原理框图

Fig. 1 Principle diagram of stable tracking loop of IR imaging seeker under actual condition

红外探测系统主要由光学系统、红外探测器组件、图像预处理电路等组成,其作用是探测并识别目标。目标图像处理系统主要用来输出目标误差信号,即失调角信号(光轴与弹目视线之间的夹角),以驱动稳定平台跟踪目标。稳定跟踪系统的主要功能是在红外探测系统和目标信号处理系统的参与、支持下,跟踪目标和实现红外探测系统光轴与弹轴的运动隔离,即空间稳定<sup>[4]</sup>。

红外成像导引头数字图像注入式闭环仿真试验工作原理如图 2 所示,虚线框中图像仿真计算机和图像注入卡等组成的仿真试验系统取代了红

外探测系统,完成数字图像的实时仿真生成和注入。

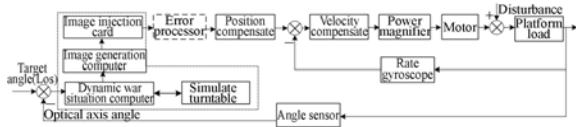


图2 红外成像导引头注入式闭环稳定跟踪回路原理框图

Fig. 2 Principle diagram of stable tracking closed loop of IR imaging seeker by using image injection method

为了实现跟踪闭环试验,需要实时获取导引头稳定平台测角传感器的角位置数据,用于生成数字图像,这样目标图像像素的位置(失调角)误差和失调角输出延迟都将发生改变,红外成像导引头注入式仿真试验和实际工作两种情况下的稳定跟踪回路性能也将发生改变,因此为使注入式仿真试验结果可信,在分析两种情况下影响红外成像导引头稳定跟踪回路性能不一致的失调角延时和失调角误差来源基础上,有必要进行注入式闭环试验边界能力分析以及两种情况下稳定跟踪回路性能一致性分析。

## 2.2 两种情况下失调角延时和失调角误差源分析

### 2.2.1 失调角延时分析

在实际工作情况下,红外成像导引头有其自身的工作时序与同步驱动机制<sup>[5]</sup>。红外探测器组件一般以固定频率  $T_1$  完成光积分、A/D 转换和预处理,其中预处理电路产生导引头正常工作所需的同步信号(频率也为  $T_1$ ),当同步信号产生时,预处理电路对图像进行预处理(非均匀性校正、滤波等),当下一个同步信号产生时,预处理电路将图像数据发送给信息处理电路。信息处理电路接收完图像数据后立即进行处理,并在下一个同步信号到达时输出失调角数据给伺服系统。

注入式仿真试验情况下,在仿真试验系统的时序确定后,失调角延时主要取决于完成图像仿真所需的时间,假定同步信号的传输延迟为  $t_1$ ;导引头测角传感器光轴指向数据的获取时间为  $t_2$ ;图像仿真生成时间为  $t_3$ ;图像写缓存时间为  $t_4$ ;则完成图像仿真的总时间  $T=t_1+t_2+t_3+t_4$ 。为保证在仿真和实际工作两种状态下,红外成像导引头伺服系统失调角的延时量一致,并且能实现闭

环,而且保证导引头信息处理电路接收到的数字图像不出现紊乱,需要严格控制数字图像开始注入时刻,即保证  $T \leq T_1$  时间内完成一帧图像的生成与写缓存。

### 2.2.2 失调角误差源分析

目标或干扰在仿真生成数字图像中的像素位置(失调角)计算方法为:实时采集红外成像导引头测角传感器输出的角位置数据及弹体姿态数据,计算光轴绝对指向,由动态战情中假定的目标航迹数据和导引头位置数据,计算弹目或弹干视线角,在解算得到弹目视线角与光轴绝对指向角后,可得到两者夹角。如果该夹角小于导引头的半视场角,则可根据红外导引头的视场、像元数、弹目视线角、光轴指向角等参数,确定目标中心点的图像像素位置坐标。

与实际工作情况相比,注入式闭环仿真试验下失调角的误差来源较多,主要有:光轴指向数据获取延时抖动导致的失调角误差、测角元件实际标定后残差导致的失调角误差、光学系统效应仿真导致的失调角误差和加工装配误差导致的失调角误差。

其中,光轴指向数据获取时间延时抖动导致的失调角误差可通过实际测试得到。设电位计数器获取的时间延时抖动量为  $\Delta T$ ,目标相对于导引头的角速率为  $\omega$ (以导引头最大跟踪角速度计算),则因延时抖动导致的失调角误差为  $\omega \times \Delta T$ 。

测角元件实际标定后存在的残差会导致失调角误差,这主要因为目前红外成像导引头测角元件普遍采用电位计,而电位计的实质是滑动变阻器,主要利用其两端电压的变化进行角度测量,而其电压与角度值之间的变化关系是非线性的<sup>[6]</sup>。因此,在实际工作过程中,需要利用标定方法对其进行修正,对于某一固定角度而言,修正残差为一定值,仿真试验条件下则没有考虑这个因素。

光学系统效应仿真主要包括采样和弥散效应仿真,仿真结果可能与实际情况存在误差,此误差的最大值为红外探测器的角度分辨率,分辨率误差主要由视场大小和像元数决定<sup>[7]</sup>。

加工装配误差主要由实际工作情况下的红外探测器产生,包括光学畸变、光电轴不重合和靶面坐标的倾斜误差(探测器安装误差)等。由于导引头跟踪视场较小,而在跟踪目标时,目标在视场中心附近运动,故光学畸变对目标像素位置的影响

较小。安装误差和轴系晃动误差等经过装配调整后一般在角秒级,可忽略。

### 2.3 评价红外成像导引头稳定跟踪回路性能一致性的指标体系

红外成像导引头进入图像自动跟踪状态之后,信息处理电路每处理完一帧失调角就将其送给稳定跟踪系统,稳定跟踪系统在实现光轴稳定的条件下,依靠稳定跟踪闭环回路完成角度跟踪和弹目视线角速度的测量任务。为了对红外成像导引头的真实稳定跟踪性能进行考核,理论上要求注入式闭环仿真试验时的失调角延时和误差要与实际工作时一致,但要保持完全一致是不可能的,也是不必要的。

在设计红外成像导引头稳定跟踪系统时,对失调角延时和误差都有一定的冗余度,而它们主要对系统的相位稳定裕度、稳定跟踪误差和系统响应时间(或超调量)产生影响,它们代表了伺服跟踪系统稳定、准确、快速跟踪的能力。为了分析仿真试验和实际工作两种情况下稳定跟踪回路的性能一致性,有必要建立考核一致性的评价指标体系,如图 3 所示。

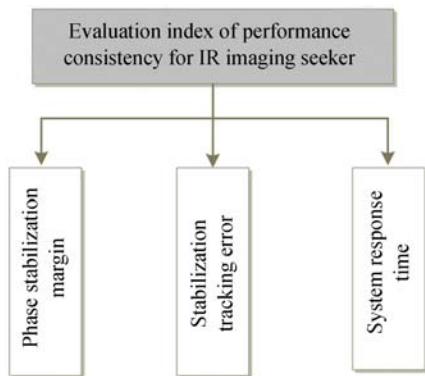


图 3 红外导引头稳定跟踪回路性能一致性评价指标  
Fig. 3 Consistency evaluation index of tracking loop of IR imaging seeker

相位稳定裕度为控制系统的频域性能指标,表征系统的相对稳定性。为了保证系统具有满意的稳定性储备,设计时一般要求红外导引头稳定跟踪系统的相位稳定裕度至少大于  $30^\circ$ 。相位稳定裕度主要受失调角延时的影响,失调角传输延时  $t$  对系统相位稳定裕度的影响由下式表示:

$$\varphi = \varphi_0 - \omega_c \cdot t, \quad (1)$$

式中:  $\varphi_0$  为系统设计的相位稳定裕量,  $\varphi$  为系统实际的相位稳定裕量,  $\omega_c$  为系统位置开环剪切频

率。实际上若红外探测系统(或注入式仿真试验情况下)失调角延时较大,采样频率较低时,在位置环设计带宽一定的情况下,将会产生较大的相位损失,严重影响系统的稳定性。在时域上则表现为阶跃响应时超调增大,振荡次数增多,动态性能变差;而降低位置环带宽又会增大系统的响应时间,使得系统响应输入信号的快速性变差。假设导引头控制系统位置环开环剪切频率为  $13 \text{ rad/s}$ ,设计要求相位稳定裕度为  $60^\circ$ ,实际失调角延时为  $40 \text{ ms}$ ,则实际相位稳定裕度为  $30.2^\circ$ ,当失调角延时增加为  $48 \text{ ms}$ ,为满足最小相位稳定裕度条件,则要求相位稳定裕度要增大至  $66^\circ$ 。这对于系统来说是可以接受的,只要对带宽和控制参数进行必要的优选即可。但是若继续增大稳定性储备,则可能需要重新选择电机、传感器等元器件,并进行机械结构和控制系统的优化设计。因此,若相位稳定裕度相差不超过  $10\%$ ,则认为注入式仿真试验和实际工作两种情况下的系统稳定性能是一致的。

稳定跟踪误差为控制系统的稳态性能指标,表征系统的稳态精度,对稳定跟踪误差影响较大的因素主要为失调角误差。红外成像制导武器设计和仿真总体单位对导引头研制单位一般会提出稳定跟踪误差这一指标要求(当目标角运动小于  $\omega'$  时,红外导引头的稳态误差不超过  $\omega_1$ ,目标运动速度大于  $\omega'$  时,稳定跟踪的弹目视线角速率稳态误差不超过  $\omega_2$ ,动态误差不超过  $\omega_3$ )。又根据红外成像制导武器制导律的要求,需要提取与弹目视线旋转角速度成比例的信号作为制导指令,而由于红外成像导引头输出的弹目视线角速度信号含有噪声(主要与速率陀螺等传感器噪声有关,与弹目距离关系不大),在考核稳定跟踪误差这个总体指标时,需要将其进行低通滤波后再进行检测评估。因此,可利用注入式闭环仿真试验和实际工作两种情况下红外成像导引头输出弹目视线角速度指令信号的一致性来评价系统稳态性能的一致性。

系统响应时间为控制系统的时域动态性能指标,用以表征系统对输入信号响应的快速性。它指的是给定一单位阶跃视线角或视线角速度输入时,跟踪角度或跟踪角速度输出达到  $90\%$  时的时间。对系统响应时间影响较大的因素主要为失调角延时,随着延时的增大,控制系统动态性能会变差,从而降低快速性能。因此,可利用注入式闭环

仿真试验和实际工作两种情况下红外导引头系统响应时间一致性来评价系统动态性能的一致性。

而要准确评价注入式仿真试验和实际工作两种情况下红外成像导引头稳定跟踪回路性能的一致性,需要在分析相位稳定裕度、稳定跟踪误差和系统响应时间这3个指标一致性的基础上,再综合考虑注入式仿真试验系统的设计需求,最终给出一致性结论。

### 3 某红外导引头稳定跟踪回路建模

对红外成像导引头稳定跟踪系统进行准确建

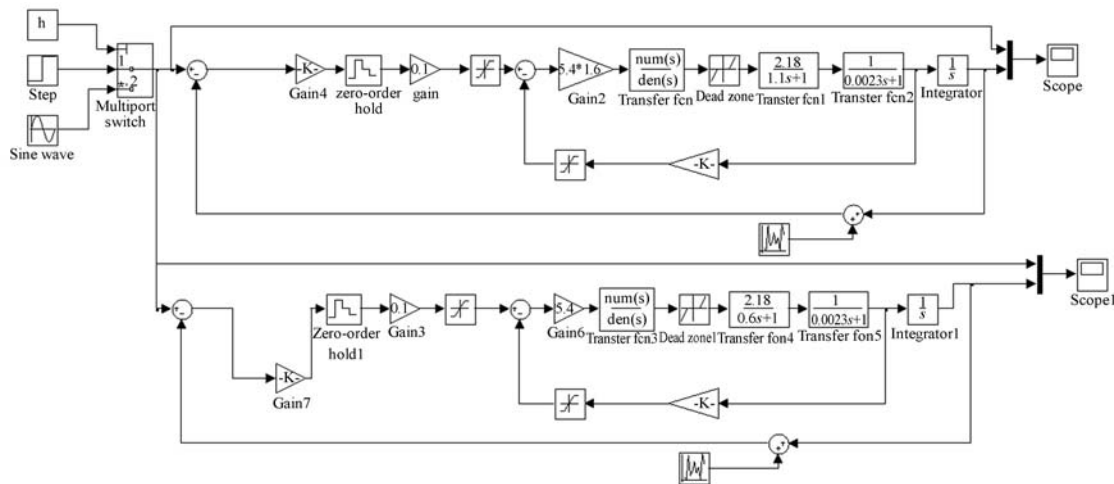


图4 红外成像导引头稳定跟踪回路仿真模型

Fig. 4 Simulation model of stable tracking closed-loop of IR imaging seeker

### 4 数字图像注入式闭环仿真试验的边界能力分析

通过上面的分析可知,由于注入式闭环仿真试验会带来失调角延时和失调角误差,它们会降低伺服系统的跟踪精度和带宽,甚至导致系统发散而不能闭环;输入信号不同也会对伺服系统的跟踪性能产生影响,因此需要研究注入式闭环仿真试验系统能够容忍的最大失调角延时、失调角误差和目标运动角速度。

#### 4.1 边界能力分析

采用建模仿真与实验验证相结合的方法来分析注入式仿真试验的能力边界。首先在上节建立的稳定跟踪回路模型基础上,增加失调角延时和失调角误差模块,输入信号采用不同幅度不同频

率,将失调角计算误差和失调角时间延迟等分别作为输入条件,通过分析实际工作和注入式闭环仿真试验情况下,输入条件改变所带来的稳定跟踪性能的一致性问题。

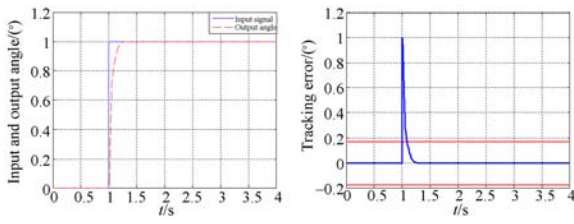
某红外成像导引头稳定跟踪回路的结构组成及工作原理如图1所示。在导引头跟踪伺服系统的建模分析领域,基于经典控制理论的对数频率综合法仍然是最成熟的控制方法。采用机理建模和实际测试相结合的手段<sup>[8-9]</sup>,分别建立了红外成像导引头俯仰框和偏航框的稳定跟踪回路伺服控制模型,如图4所示。

率的等效正弦信号,并结合导引头采用的图像处理算法(目前国内外红外成像导引头普遍采用模板匹配算法,它通过比较搜索匹配模板与装订模板的像素大小,当跟踪伺服系统的跟踪误差超过某角度值 $\theta$ 时,则判定导引头将无法跟踪上目标)进行仿真分析。然后对上述理论分析结果进行验证,利用自行开发的红外成像制导武器数字图像注入式闭环半实物仿真试验原理验证系统性能。最后,在某红外成像导引头上开展了实验验证,找出了注入式仿真试验的能力边界。

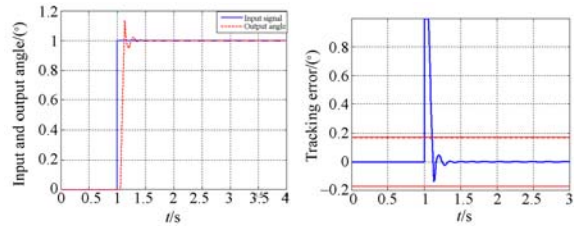
#### 4.2 最大失调角延时理论分析及实验验证

##### 4.2.1 最大失调角延时理论分析

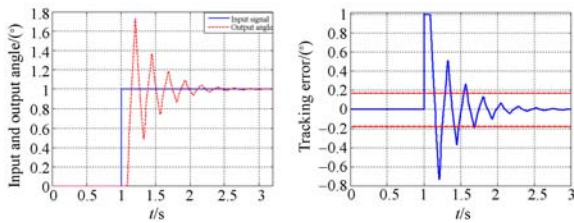
设定失调角初始误差为零,不断增大失调角延时的情况下,稳定跟踪系统模型的输入输出信号和跟踪误差曲线如图5所示(彩图见期刊电子版)。



(a) 40 ms



(b) 75 ms



(c) 120 ms

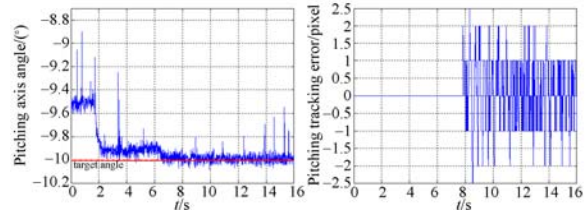
图 5 不同失调角延时情况下输入输出信号和跟踪误差  
Fig. 5 In-out signals and tracking errors under different maladjustment angle delays

从上图可以看出,当失调角延时小于 120 ms 时,稳定跟踪系统的振荡次数明显增多,但还能对目标进行跟踪;由于受导引头图像处理算法的限制,当延时大于 75 ms 时,跟踪误差大于  $\theta$ (这里  $\theta$  为  $0.1725^\circ$ ,为右侧图中红色实线所示),目标将偏离导引头的搜索区域,导致导引头无法稳定跟踪目标。

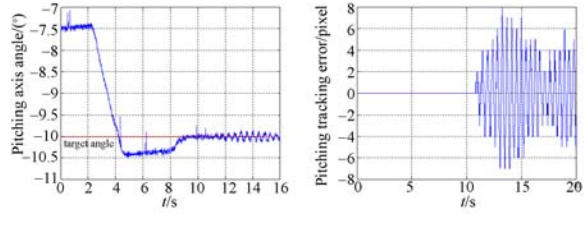
#### 4.2.2 最大失调角延时实验验证

实验时目标静止,初始位置为  $(-10^\circ, -10^\circ)$ ,如图 6 中红色点化线所示,目标大小为  $5 \text{ pixel} \times 5 \text{ pixel}$ ,逐渐将失调角延时由 10 ms 增大到 90 ms,先通过单杆将目标引导到导引头的搜索区域,观测导引头能否截获目标并稳定跟踪,实验结果如图 6 所示。

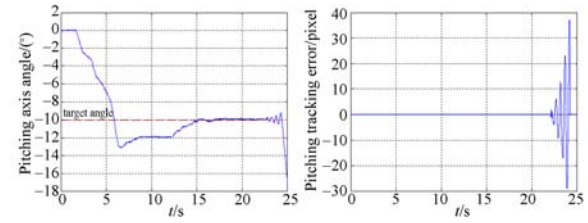
由图 6 所示,随着失调角延时的增加,导引头在俯仰方向上的误差明显增加,失调角延时大于 73 ms 时系统发散,导引头无法稳定跟踪目标,不能实现闭环。



(a) 10 ms



(b) 73 ms



(c) 74 ms

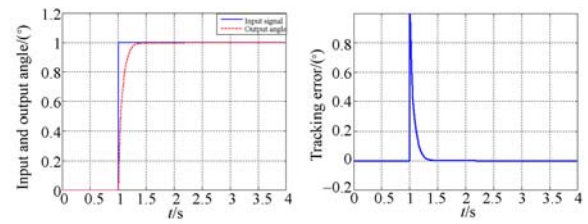
图 6 不同失调角延时情况下的俯仰角和俯仰跟踪误差  
Fig. 6 Pitching angles and tracking errors under different maladjustment angle delays

### 4.3 最大失调角误差理论分析及实验验证

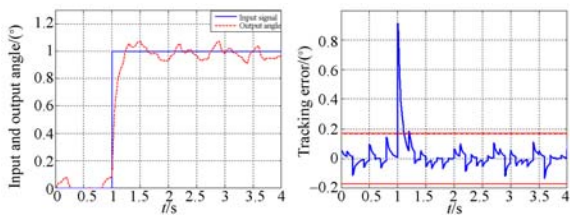
#### 4.3.1 最大失调角误差理论分析

保持失调角延迟量为零,将失调角随机误差由 0 一直增大到  $0.2^\circ$ ,稳定跟踪回路的输入输出信号和跟踪误差曲线如图 7 所示(彩图见期刊电子版)。

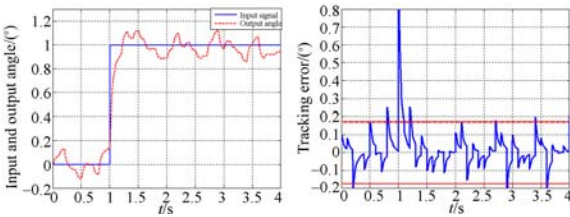
从图中可以得出:随着失调角误差的增大,系统稳定跟踪误差不断增大,当失调角误差大于  $0.18^\circ$  时,跟踪误差大于  $0.1725^\circ$ (如右侧图中红色实线所示),目标将偏离导引头搜索区域,导致导引头无法稳定跟踪目标。



(a)  $0^\circ$



(b) 0.1°



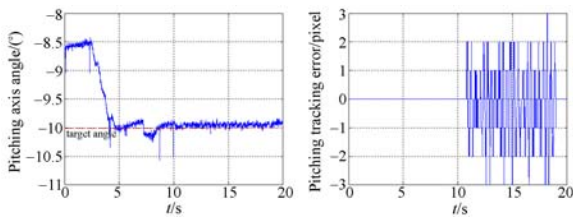
(c) 0.18°

图 7 不同失调角误差时的输入输出信号和跟踪误差  
Fig.7 In-out signals and tracking errors under different maladjustment angle errors

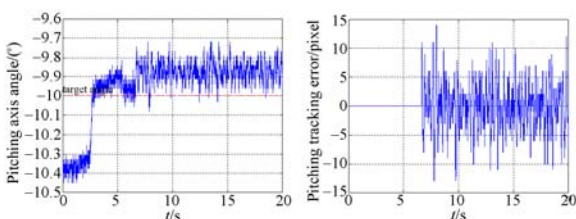
4.3.2 最大失调角误差实验验证

将失调角延时设置为 16 ms,目标静止,初始位置为(-10°, -10°),如图 8 中红色点化线所示,大小为 5 pixel×5 pixel,方位和俯仰方向上失调角误差同时变化。实验时通过单杆将目标引导到导引头搜索区域,以观测导引头能否截获目标并进行稳定跟踪,试验结果如图 8 所示。

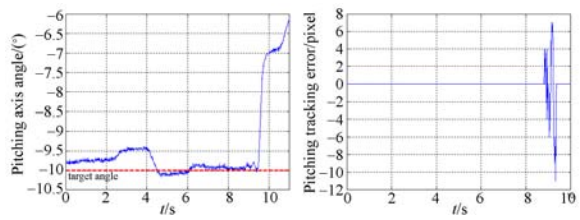
由图 8 可见,随着失调角误差的增加,导引头在俯仰方向上的误差明显增大,当失调角误差大于 0.18°时,导引头无法稳定跟踪目标,不能实现闭环。导引头方位方向上的变化趋势与此相同。



(a) 0.0143°



(b) 0.18°



(c) 0.19°

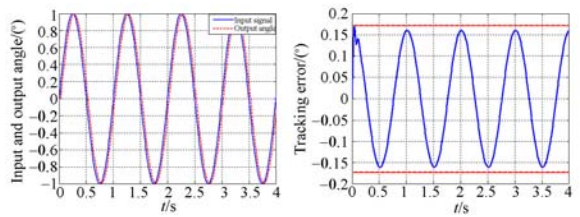
图 8 不同失调角误差情况下俯仰角和俯仰跟踪误差  
Fig.8 Pitching angles and tracking errors under different maladjustment angle errors

4.4 目标最大角速度理论分析及实验验证

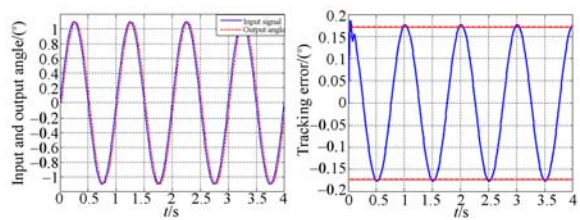
4.4.1 目标最大角速度理论分析

在失调角延时和误差均为零,输入不同频率幅值的等效正弦信号的,稳定跟踪回路方位轴模型的输入输出信号和跟踪误差如图 9 所示。

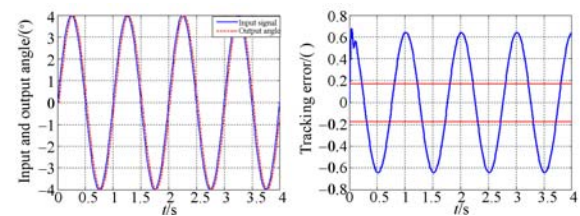
从图 9 可以得出,虽然在 4°/1Hz 的情况下,导引头仍然能够对目标进行稳定跟踪,但跟踪误差较大;当目标运动角速度大于 1.1°/1Hz 时,跟



(a) 1°/1 Hz



(b) 1.1°/1 Hz



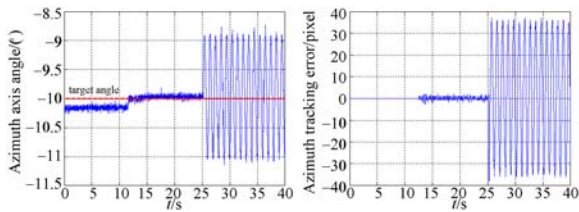
(c) 4°/1 Hz

图 9 不同目标角速度情况下输入输出信号和跟踪误差  
Fig.9 In-out signals and tracking errors under different target angle velocities

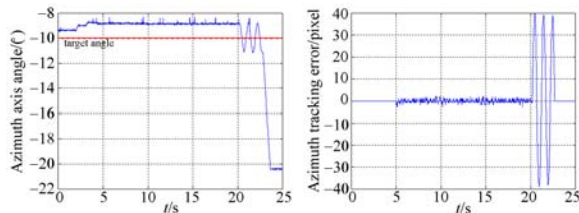
跟踪误差大于  $0.1725^\circ$ , 目标将偏离导引头的搜索区域, 导致导引头无法稳定跟踪目标。

#### 4.4.2 目标最大角速度实验验证

设失调角延时为 16 ms, 失调角误差为  $0.0143^\circ$ , 目标初始位置为  $(-10^\circ, -10^\circ)$ , 如图 10 中红色点化线所示, 大小为  $5 \text{ pixel} \times 5 \text{ pixel}$ 。实验时先通过单杆将目标引导到导引头的搜索区域, 对目标稳定截获后, 让目标作频率为 1 Hz 正弦运动, 观测导引头能否能稳定跟踪目标。结果如图 10 所示。



(a)  $1^\circ/1\text{Hz}$



(b)  $1.1^\circ/1\text{Hz}$

图 10 不同目标角速度情况下的方位角和方位跟踪误差

Fig. 10 Azimuth angles and tracking errors under different target angle velocities

由图 10 可知, 当目标运动角速度大于  $1^\circ/1\text{Hz}$  时, 导引头无法稳定跟踪目标, 不能实现闭环。

#### 4.5 边界能力分析结果

数字图像注入式闭环半实物仿真试验系统的边界能力分析结果如表 1 所示。

#### 参考文献:

- [1] BUFORD J A, KING D E, BOWDEN M H. Low-cost real-time infrared scene generation for image projection and signal injection[J]. *Proceedings of SPIE*. 1998, 3368, 290-299.
- [2] SHIM H S, OH K H, MIN H K. Synthetic infrared image injection apparatus, US:8848060[P]. 2014.
- [3] 于劲松, 郝王松, 万九卿, 等. 基于直接信号注入的导引头仿真技术[J]. *兵工学报*, 2006, 27(5): 928-

表 1 边界能力分析结果

Tab. 1 Analysis results of limit capability

Item	Simulation	Experiment
	result	result
Maladjustment angle delay/ms	$\leq 75$	$\leq 73$
Maladjustment angle error/ $^\circ$	$\leq 0.18$	$\leq 0.18$
Target angle velocity	$\leq 1.1^\circ/1\text{Hz}$	$\leq 1^\circ/1\text{Hz}$

由表 1 可知, 仿真分析结果与实验验证结果较为接近, 这说明本文建立的某红外成像导引头可较为准确地稳定跟踪回路仿真模型, 而且, 同时也得出了所开发数字图像注入式闭环仿真试验原理验证系统进行注入式仿真试验所容许的最大失调角延时、失调角误差和目标运动角速度。

## 5 结 论

通过分析实际工作和数字图像注入式仿真两种情况下导致红外成像导引头稳定跟踪回路性能不一致的失调角延时和失调角误差源, 本文总结得出了包括相位稳定裕度、稳定跟踪误差和系统响应时间 3 种指标在内的红外成像导引头稳定跟踪回路性能一致性评价体系, 并给出了一致性评估方法。

本文还对某红外成像导引头稳定跟踪回路建立了准确的伺服控制模型, 设计了实验验证方案。最后, 采用建模仿真与实验验证相结合的方法得到了红外成像导引头数字图像注入式闭环半实物仿真试验系统的能力边界: 失调角延时应小于 73ms, 失调角误差应小于  $0.18^\circ$ , 目标运动的最大角速度应小于  $1^\circ/1\text{Hz}$ 。本文所做的研究将为红外成像制导武器快速形成数字图像注入式闭环试验鉴定能力打下了坚实基础。

931.

YU J S, HAO W S, WAN J Q, *et al.*. Hardware-in-the-loop simulation of infrared seeker based on direct signal injection [J]. *Acta Armamentarii*, 2006, 27(5): 928-931. (in Chinese)

- [4] 赵明, 朱明起, 白杨, 等. 应用 LPOE 公式与遗传算法标定导引头运动学参数[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(3): 687-694.

ZHAO M, ZHU M CH, BAI Y, *et al.*. Calibration

- of kinematic parameters of seekers by LPOE formula and genetic algorithm[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014,22(3):687-694. (in Chinese)
- [5] 王敏,黄成功,郭正红,等. 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[J]. *红外与激光工程*,2014,43(10):3211-3216.
- WANG M, HUANG CH G, GUO ZH H, *et al.*. Design and consistency analysis of IR imaging seeker closed-loop injection simulation experiment system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(10):3211-3216. (in Chinese)
- [6] 李桦,汤心溢,施家明. 红外动态景象仿真中探测器效应的研究 [J]. *量子电子学报*,2001,18(2):20-26.
- LI H, TANG X Y, SHI J M. Research on detector effect in infrared scene simulation [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2001, 18(2): 20-26. (in Chinese)
- [7] 吴军辉,李慧,许振领,等. 红外捕获跟踪设备闭环注入式仿真试验的理论研究[J]. *红外与激光工程*, 2012,41(12):3166-3171.
- WU J H, LI H, XU ZH L, *et al.*. 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)
- [8] 李慧. 红外成像对抗中导引头伺服系统建模与分析 [J]. *红外与激光工程*,2013,42(10):2603-2607.
- LI H. Modeling and analysis of servo system on the countermeasure of IR imaging seeker[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013,42(10):2603-2607. (in Chinese)
- [9] 廖洪波,范世珣,黑墨,等. 光电稳定平台伺服系统动力学建模与参数辨识[J]. *光学精密工程*,2015, 23(2):477-484.
- LIAO H B, FAN SH X, HEI M, *et al.*. Modeling and parameter identification for electro-optical stabilized platform servo systems [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015,23(2):477-484. (in Chinese)

#### 作者简介:



李 慧(1980—),男,山东聊城人,博士,2008年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光电对抗仿真试验技术的研究。  
E-mail:lihuiwch@163.com



吴军辉(1968—),男,江西分宜人,研究员,1994年于国防科技大学获得硕士学位,主要从事光电对抗仿真总体技术研究。E-mail:wujhui@sina.com