

红外成像导引头弹道终端跟踪能力研究*

王宏波¹, 庄志洪¹, 朱自强², 赵惠昌¹, 丁 雪¹

(1 南京理工大学电子工程与光电技术学院, 南京 210094; 2 71781 部队, 河南洛阳 471100)

摘要:分析了弹道终端红外成像导引头跟踪盲区形成的原因, 提出了采用局部图像跟踪算法减小跟踪盲区的思想, 讨论了飞机目标局部图像跟踪部位的选取原则。通过分析弹目平行交会模型, 对影响弹道终端导引头跟踪能力的诸要素进行了定量研究, 并结合某型红外成像导引头的技术参数, 对其终端跟踪能力进行了计算, 计算结果表明, 导引头的最大跟踪角速度、导引头图像探测器的帧频、弹目相对速度是影响导引头终端跟踪能力的主要因素。最后, 提出了提高图像导引头弹道终端跟踪能力的几点措施。

关键词:红外成像导引头; 弹道终端; 跟踪能力; 局部图像跟踪

中图分类号: TJ765.333 文献标志码: A

The Investigation of Tracking Ability for Infrared Imaging Seeker during Endgame

WANG Hongbo¹, ZHUANG Zhihong¹, ZHU Ziqiang², ZHAO Huichang¹, DING Xue¹

(1 School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology, NUST, Nanjing 210094, China;
2 No. 71781 Unit, Henan Luoyang 471100, China)

Abstract: The reason of blind area generation during endgame was analyzed and the approach of blind area reduction through partial image tracking algorithm was proposed, the principle of tracking position selection for aircraft was discussed. The factors that affect the tracking ability of infrared imaging seeker during endgame were quantitatively studied through analysis of the model of parallel encounter of missile and target. Based on the above analysis and the technical parameters of a certain type of infrared imaging seeker, the tracking ability of this seeker was calculated. The result of calculation show that the maximum tracking angular velocity, the frame rate of image sensor and relative velocity were the main factors that affect tracking ability of infrared imaging seeker during endgame. Finally, some suggestions for improving the tracking ability of imaging seeker were proposed.

Keywords: infrared imaging seeker; endgame; tracking ability; partial image tracking

0 引言

红外成像导引头的光学系统是个定焦系统, 所成的像具有近大远小的特点。根据红外成像制导过程中导引头视场内目标图像的大小, 可以把红外成像制导型空空导弹的作战过程分为三个阶段: 点目标阶段、成像目标阶段和目标图像溢出视场阶段^[1]。无论导弹从何阶段进入, 目标图像溢出视场是红外成像制导过程中不可避免的一个阶段。

在常规的图像跟踪算法中, 当目标图像逐渐充满导引头视场时, 导引头将无法确定目标在导

引头视场内的精确位置和移动情况, 因而也无法输出误差信号控制目标跟踪和导弹飞行, 导弹只能按照目标图像充满视场前的控制参数依惯性飞行, 此时距脱靶点还有几百米的距离, 剩余飞行时间还有几十毫秒到几百毫秒, 目标也有可能进行机动, 所以由此引起的制导误差是不容忽视的。此外, 基于 GIF(guidance integrated fuzing) 技术的成像引信还要利用导引头失控前提供的目标测量信息进行炸点控制, 如果导引头在距离目标几百米时就已经进入跟踪盲区, 那么, 利用在此之前导引头提供的目标信息进行炸点控制的精度也必定是很不理想的。为满足现代空战的要

* 收稿日期: 2008-10-28

作者简介: 王宏波(1974-), 男, 河南孟津人, 讲师, 博士, 研究方向: 制导引信一体化(GIF)技术。

求,第四代先进空空导弹必须具备在弹目接近过程中目标图像充满视场时的跟踪点选择能力和继续跟踪能力^[2],以尽量减小盲区距离,提高制导精度和炸点控制精度,最大程度的毁伤目标。

导引头的盲区距离越小,相应的对弹目遭遇点的位置估计就越准确,未制导和炸点控制的精度就越高。但是,导引头的盲区距离受多种因素制约,并不是可以无限制的减小的。

文中首先对弹道终端图像跟踪过程中盲区形成的原因进行了分析,提出了一种局部图像跟踪算法,然后对局部图像跟踪部位的选择原则进行了探讨。通过建立弹目遭遇模型,文中对影响红外成像导引头跟踪盲区的各种因素进行了分析,并以某型成像导引头为例,对其弹道终端跟踪能力进行了分析和计算。最后,提出了几点提高图像导引头跟踪能力,减小跟踪盲区的措施。

1 跟踪盲区与局部图像跟踪

导弹作为一个受控对象具有惯性,当导弹距离目标的飞行时间小于惯性时间常量时,制导系统即便接收到指令,也不能完成对制导误差的修正,主要依靠惯性飞行^[3],如果此时导弹的飞行方向正好指向碰撞点,且弹目均可近似为匀速直线运动,则导弹可以直接命中目标,否则就可能脱靶。在导弹进入惯性飞行后,虽然导引头已不能对导弹的飞行进行修正,但是,只要导引头能够对目标进行继续跟踪,就可以为基于 GIF 技术的炸点控制算法提供越来越精确的目标位置及变化信息。

在弹道终端,缩短跟踪盲区、实现导引头对目标的持续跟踪,对于提高导弹的制导精度(在导弹机动能力允许的范围内)、为炸点控制提供更精确的目标测量参数进而提高导弹对目标的打击精度都是非常有利的。减小跟踪盲区的主要措施是在导弹即将充满导引头视场的时候改变跟踪模式,采用基于目标局部图像的跟踪方式,局部图像跟踪点可选择机头、尾喷口等部位,以尽量减小跟踪盲区^[4]。易损部位可由局部图像跟踪点以及目标类型、飞行姿态等参数进行估计,并适时起爆战斗部,此时的目标易损部位可能在视场内,也可能在视场外,而且跟踪点不一

定是目标的易损部位。

图 1 和图 2 以跟踪机头为例,分脱靶和直接命中两种情况,说明了一种通过局部图像跟踪减小跟踪盲区的方法。图 1(a) 和图 2(a) 为常规跟踪模式,在②处因目标图像溢出视场而进入跟踪盲区;图 1(b) 和图 2(b) 为局部图像跟踪模式,在目标图像溢出视场之前将跟踪点转为机头,实现导引头的持续跟踪。

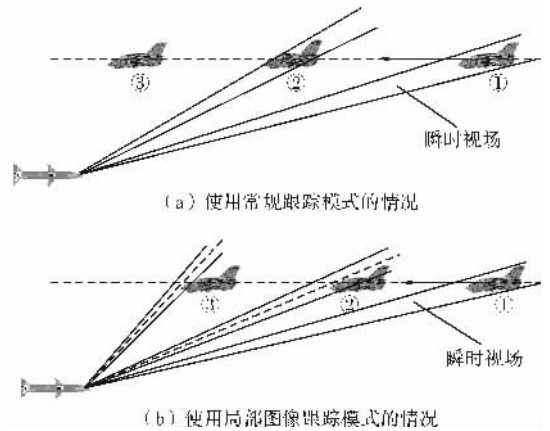


图 1 脱靶情况下对目标的跟踪图示

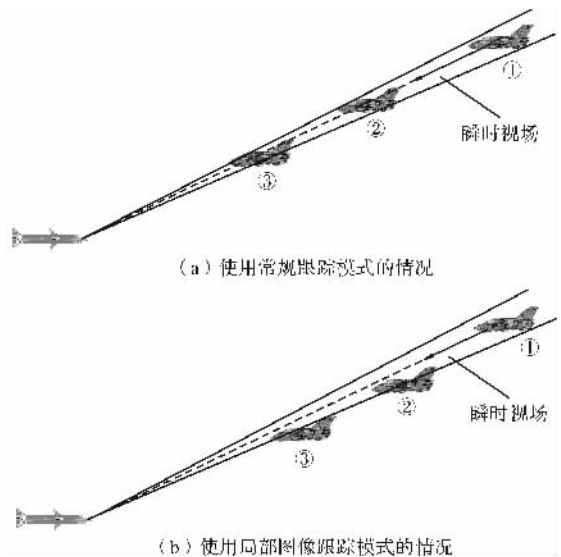


图 2 命中情况下对目标的跟踪图示

2 局部图像跟踪部位的选择

减小盲区距离实现弹道终端精确跟踪的关键在于局部图像跟踪过程中的跟踪点选择。跟踪点的选择正确与否不仅影响到导弹的制导精度,而且还影响到对目标运动信息求取的精度以及最后的炸点控制的精度。此外,跟踪点的选择还要考虑到以高速 DSP、CPLD 等芯片为中心的弹载计算机图像处理的实时性要求,选择的跟踪

点要具有可实现性,易于通过图像处理的方法进行快速准确的提取,而且要保证相邻两帧图像中提取出的特征点能够一一对应^[5]。

导弹在跟踪目标至弹道终端时,目标图像已部分溢出导引头视场,此时,图像导引头的主要任务已不是根据目标图像区分真假目标或识别目标类型,而是如何保持对已确认的目标的连续跟踪。由于导引头瞬时视场很小,再加上导弹飞行过程中的冲击、振动和摆动所引起的导引头瞬时视场的抖动,过大的跟踪部位(如发动机尾焰等)很容易再次溢出导引头视场,因此,局部图像跟踪点的选择必须从易于识别和有利于缩短跟踪盲区两个方面综合考虑。

给定一组红外成像导引头的技术参数:焦平面元数 128×128 ,空间分辨率 0.4 mrad ,稳像精度 1 像素(积分时间内),得到跟踪部位尺寸 L 与其充满视场时的弹目距离 R_F 之间的关系如图 3 所示。由图中曲线可知,对于长度超过 1 m 的特征部位(如发动机尾焰等),在弹目距离为 25 m 左右时将再次充满视场,从而引起导引头失控(即便此时的视线角速度还远小于导引头跟踪角速度),因此,在有利于跟踪点识别的前提下,尺寸较小的特征点更适合作为局部图像跟踪时的跟踪点。

对不同种类的飞机目标来说,机头形状具有相似性和轴对称性是其共有的重要特征,该特征受飞机飞行姿态以及机载武器变化情况的影响较小,易于实现快速自动识别

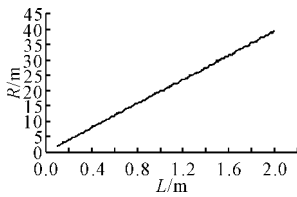


图 3 跟踪部位大小与充满视场时弹目距离之间的关系

和在相邻帧机头特征点之间建立对应。此外,红外图像中机头这类圆锥形特征的提取相对于机尾、发动机尾焰、目标形心、机翼翼尖等特征而言具有更高的识别精度和可实现性,只需通过简单的图像处理方法就可以将其位置精确地提取出来^[6]。

3 弹目交会及导引头跟踪能力分析

以弹目迎头平行交会为例,如图 4, $OXYZ$ 为

弹体坐标系^[7], OX 轴沿弹的纵轴并指向弹头方向,导引头最大离轴角为 ψ ,最大跟踪角速度为 \dot{q} ,导引头瞬时视场角为 γ 。目标在弹体坐标系中的脱靶量为 M , A 和 B 两点分别为目标局部跟踪点在导引头图像序列中 t 和 $t + 1$ 时刻时所处的空间位置, ϑ 为 A 、 B 两点的视线夹角, θ 、 φ 为 B 点在弹体坐标系中的极角和方位角,弹目距离为 R ,导引头图像探测器的帧频为 f 。

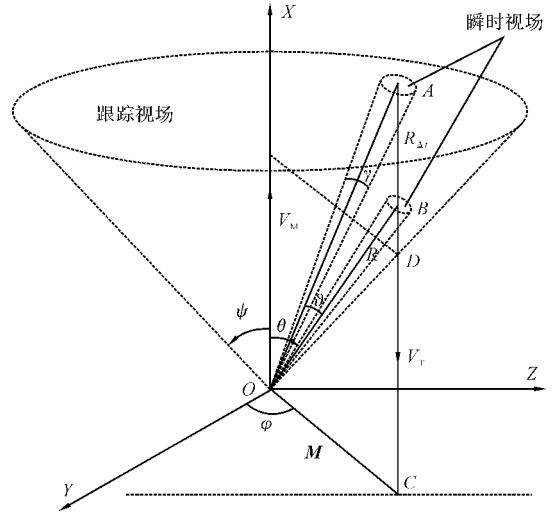


图 4 弹目平行交会示意图

跟踪点由 A 点运动到 B 点的时间间隔(帧间隔) Δt 为:

$$\Delta t = \frac{1}{f} \tag{1}$$

在局部图像跟踪过程中,假设弹目均做匀速直线运动,相对速度为 V_R ,则帧间隔 Δt 内弹目相对运动的距离 $R_{\Delta t}$ 为:

$$R_{\Delta t} = V_R \cdot \Delta t \tag{2}$$

假设在跟踪点运动至 B 点处导引头丢失目标,则 B 点到脱靶平面的距离为:

$$BC = V_R \cdot t_{go} \tag{3}$$

式中, t_{go} 为导弹的剩余飞行时间。

B 点在弹体坐标系中的极角为:

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{BC}{M}\right) \tag{4}$$

此时导引头的跟踪角速度表示为:

$$\dot{q} = \frac{\vartheta}{\Delta t} =$$

$$\frac{\arctan\left(\frac{V_R(t_{go} + \Delta t)}{M}\right) - \arctan^{-1}\left(\frac{V_R \cdot t_{go}}{M}\right)}{\Delta t} \tag{5}$$

取初始条件 $V_R = 1500 \text{ m/s}$, $M = 6 \text{ m}$, $f =$

100Hz,得到跟踪盲区与跟踪角速度之间的关系如图 5 所示。由图中曲线可知,要想把跟踪盲区减小为 50m,导引头的跟踪角速度 \dot{q} 必须大于 $156.9^\circ/\text{s}$;如果导引头的跟踪角速度 \dot{q} 能够达到 $1000^\circ/\text{s}$,则有望把导引头的跟踪盲区减小到 15 m 左右,在比较有利的交会条件下,这个距离还可以更小。

跟踪盲区 $R_B = 50\text{m}$ 时,帧频分别取 50Hz、100Hz 和 200Hz,得到导引头的跟踪角速度 \dot{q} 随相对速度 V_R 的变化曲线如图 6 所示。由图中曲线

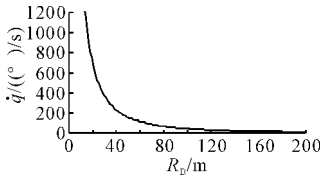


图 5 $V_R = 1500\text{m/s}$ 时跟踪盲区与跟踪角速度之间的关系

可以看出,相对速度越大,则达到相同盲区距离所需的导引头的跟踪角速度 \dot{q} 也越大;在相对速度相等的情况下,若提高帧频,则可以相应的降低对导引头跟踪角速度 \dot{q} 的要求。

此外,跟踪场(圆锥形)的大小也可能影响到图像导引头的盲区距离。如果:

$$\theta + \frac{\gamma}{2} > \psi \quad (6)$$

则此时导引头的盲区距离为:

$$R_B = \frac{M}{\tan \psi} \quad (7)$$

以某型红外凝视焦平面成像导引头为例,其相关的技术指标为:帧频 $f = 100\text{Hz}$,瞬时视场取 $3^\circ \times 3^\circ$ 或 $5^\circ \times 5^\circ$,最大离轴角 $\psi = 80^\circ$,最大跟踪角速度 $\dot{q} = 100^\circ/\text{s}$,得到其在不同相对速度、不同脱靶量和瞬时视场下的极角及跟踪盲区如表 1 所示。

由表 1 可以看出,相对速度的变化可以显著的影响导引头的盲区距离,相对速度减小,图像导引头的跟踪盲区也相应减小;在同一相对速度下,脱靶量变小时,将更有利于导引头的终端跟踪;导引头瞬时视场增大时,跟踪盲区也会减小,减小的幅度随相对速度的增加而增大。此外,在

导引头跟踪至盲区距离时的极角远小于导引头的最大离轴角,这表明制约成像导引头跟踪能力的主要因素在于导引头的最大跟踪角速度。

表 1 某型成像导引头弹道终端跟踪能力

相对速度 $V_R/(\text{m/s})$	脱靶量 M/m	视场角 $\gamma/(\text{°})$	极角 $\theta/(\text{°})$	盲区距离 R_B/m	
1500	6	5	5.39	63.56	
		3	5.36	63.92	
	3	5	3.98	43.12	
		3	3.96	43.36	
	1000	6	5	6.48	52.82
			3	6.45	53.10
3		5	4.74	36.14	
		3	4.72	36.34	
500		6	5	8.95	38.08
			3	8.91	38.28
	3	5	6.48	26.40	
		3	6.45	26.55	
	300	6	5	11.43	29.69
			3	11.37	29.84
3		5	8.22	20.78	
		3	8.17	20.89	

4 结束语

提高图像导引头的弹道终端跟踪能力对于制导和炸点控制而言都是非常关键的。文中以弹目迎头平行交会为例,对图像导引头的弹道终端跟踪能力进行了分析,并计算了某型红外成像导引头的跟踪能力。分析和计算的结果表明:导引头的最大跟踪角速度、导引头图像探测器的帧频、弹目相对速度是影响导引头终端跟踪能力的主要因素,此外,脱靶量、导引头的视场大小对其终端跟踪能力也有影响。针对上述因素,提出提高导引头终端跟踪能力的措施如下:

- 1) 优选局部图像跟踪点,在易于识别、易于建立帧间对应的前提下,跟踪点要尽可能的小;
- 2) 提高图像导引头的跟踪角速度和角加速度;
- 3) 采用可变帧频图像探测器,在点目标阶段和成像目标阶段采用低帧频以提高系统灵敏度,在局部图像跟踪阶段采用高帧频以提高弹道终端导引头的跟踪能力;

4) 优化弹道终端制导信息处理算法,图像处

获目标和正确选择目标的概率随转弯角的增大而增大。对特定交接班距离,转弯角越大交接班成功概率越高,而转弯角受导弹横向机动能力约束,因此最大交接班成功概率限制于导弹的机动能力。

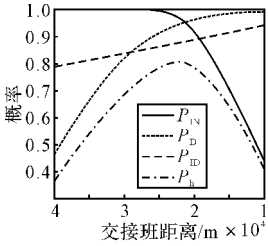


图 3 不同交接班距离下的 PSH($\alpha=25^\circ$)

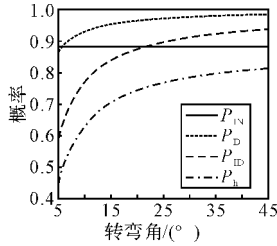


图 4 不同转弯角下的 PSH($R_h=19\text{km}$)

5 总结

文中通过定量描述 INS/宽带被动/SAR 复合导引头成功交接班需要满足的条件,建立了交接班成功概率的数学模型,进而将正常交接班和非正常交接班问题转化为非线性方程组的求解和非线性最优化问题。

需要指出的是,文中重点是针对交接班过程建立通用的描述模型,为简化叙述在多处采用了近似,导致模型不够精确,而这些模型都可以也应该针对特定系统进行进一步精确。

参考文献:

[1] 贺志毅. 合成宽带毫米波雷达导引头的理论及实现[D]. 北京:航天科工集团第二研究院,2002.

(上接第 14 页)

理、跟踪点提取、易损部位估计要在帧周期内完成。

参考文献:

[1] 何启予. 红外导引技术的发展与新趋势[J]. 红外与激光工程,1996, 25(3): 41-53.
 [2] Terzian John. Method of guiding missiles: United States, 4,898,341[P]. Feb 2000.
 [3] Richard M Lloyd. Conventional warhead systems physics and engineering design[M]. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 1998.

[2] 李为民,赵宏钟,石志广,等. 水面舰队目标的探测与识别技术研究[J]. 现代防御技术,2004,32(3): 58-63.
 [3] 李少洪,毛士艺,屈剑明. 雷达导引头交班与弹目几何位置关系研究[J]. 北京航空航天大学学报,2000,26(3): 274-277.
 [4] 罗喜霜,张天桥. 多用途导弹中末段交班研究[J]. 弹道学报,2001,13(4): 47-50.
 [5] Weiss M, Bucco D. Handover analysis for tactical guided weapons using the adjoint method[C]// AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, 2005.
 [6] 刘海军,王丽娜. 复合制导防空导弹中末制导交班问题研究[J]. 现代防御技术,2006,34(2): 29-33.
 [7] 张科,王延. 近距离空空导弹中末制导导引头交接班策略及截获概率研究[J]. 弹箭与制导学报,2006,26(1): 513-517.
 [8] 姬厚磊,王军,卢福刚. 小视场导弹弹道中末交接班问题分析[J]. 弹箭与制导学报,2007,27(2): 239-241.
 [9] Hamilton P C, Acton. Autonomous system for initializing synthetic aperture radar seeker acquisition [P]. USA: 5232182, 1993-8-3.
 [10] 数学手册编写组. 数学手册[M]. 北京:人民教育出版社,1979.
 [11] 单月晖. 空中观测平台对海面慢速目标单站无源定位跟踪及其关键技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2002.
 [12] 粟塔山. 最优化计算原理与算法程序设计[M]. 长沙:国防科技大学出版社,2002.

[4] Steven Hacker, Guillermo Sapiro, Allen Tannenbaum, et al. Missile tracking using knowledge-based adaptive thresholding [C]// International Conference on Image Processing (ICIP01-Image segmentation II), 2001: 786-789.
 [5] 吴立德. 计算机视觉[M]. 上海:复旦大学出版社,1993.
 [6] 张清泰. 无线电引信总体设计原理[M]. 北京:国防工业出版社,1985.
 [7] 王宏波,庄志洪,张清泰. 基于动态红外图像的飞机姿态识别方法研究[J]. 红外与激光工程,2003, 32(1):8-12.