

# 防空导弹红外成像制导引信一体化应用研究\*

孙博<sup>1,2</sup>, 栗金平<sup>3</sup>, 郑建强<sup>3</sup>, 程冬<sup>3</sup>

(1 北京理工大学, 北京 100081; 2 63961 部队, 北京 100010; 3 中国兵器工业第 203 研究所, 西安 710065)

**摘要:**关于红外成像制导引信一体化技术已经有了一些理论研究,但对如何在工程上应用还没有结论。文中首先对红外成像引信和红外成像导引头的功能和组成进行了阐述,在此基础上对红外成像 GIF 进行了设计;然后推导给出了引战配合起爆控制算法;最后对起爆控制算法的实现进行了研究。

**关键词:**红外引信;成像导引头;GIF 技术;起爆控制;跟踪微分器

中图分类号:TJ765.331 文献标志码:A

## The Research on Infrared Imaging GIF Technology of Ground-to-air Missile

SUN Bo<sup>1,2</sup>, LI Jinping<sup>3</sup>, ZHENG Jianqiang<sup>3</sup>, CHENG Dong<sup>3</sup>

(1 Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2 No. 63961 Unit, Beijing 100010, China;

3 No. 203 Research Institute of China Ordnance Industries, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** There are some theories about infrared imaging GIF, but no conclusion on engineering application. First, the function and formation of the fuze and the seeker was expounded, and the infrared imaging GIF was designed based on the anterior information. Then, the burst control arithmetic of CFAW was given. At last, the tracking differentiator was used to get the information CFAW needed, and the way was proved to be right by simulation.

**Keywords:** infrared fuze; imaging seeker; GIF technology; burst control; tracking differentiator

## 0 引言

红外成像导引头可以获得目标的红外图像,还具有识别目标的能力,甚至还可以识别目标的薄弱部位,基于这些优点,国内外很多防空导弹都竞相采用红外成像技术。而随着作战空域及目标速度范围的不断扩大,要求现代防空导弹既能对付普通飞机,又能对付战术弹道导弹(TBM)等高速目标,导弹与目标交会条件的变化范围变得更宽,必须采取措施提高引战配合效率<sup>[1]</sup>。制导引信一体化(GIF)技术是为实现现代制导武器系统对目标的最大杀伤而产生的,它将武器系统的引信子系统和制导子系统协同起来,优化设计<sup>[2]</sup>。因此对采用红外成像导引头的防空导弹进行 GIF 技术研究很有意义。

GIF 技术一般可分为信息一体化和硬件一体化两种类型,文中主要对硬件一体化技术进行研究。红外成像引信通过共享红外成像导引头探测器的方式实现前视探测,进而可获取制导系统提供的弹目交会信息,实现最佳引战配合起爆控制,提高引战配合

效率。

为实现起爆控制算法,理论上可使用导引头的框架角计算出所需要的信息,但是框架角的测量值含有噪声,对需要的信息进行估算时会引入微分噪声。文中使用跟踪微分器提取起爆控制算法所需的信息,并通过仿真验证了该方法的正确性。

## 1 制导引信一体化设计

### 1.1 红外成像引信的功能与组成

普通的红外引信处于弹体的中部,采用环式探测,这种探测方式将信息处理时间限制在很短的范围内(一般小于 2ms),使得引信很难在这么短的时间内正确识别目标。红外成像引信使用红外成像探测器对目标进行成像探测,将能很容易识别目标,还能估计目标易损部位。而引信与导引头若能共享成像探测器,既可以实现前视探测,又可以节约成本、简化结构。图 1 给出了红外成像引信的组成图。

\* 收稿日期:2011-12-18

作者简介:孙博(1975-),女,辽宁铁岭人,工程师,博士研究生,研究方向:兵器科学与技术。

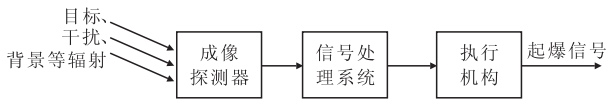


图 1 红外成像引信组成图

### 1.2 红外成像导引头的功能与组成

红外成像导引头位于导弹的头部,具有以下基本功能:成像、图像稳定、目标的检测与识别、目标跟踪、制导信息的生成以及与其它系统进行通信。它主要由以下部分组成:红外光学整流罩、光学系统、焦平面成像探测器、图像处理机、中央处理机、稳定系统、伺服机构等。典型组成如图 2 所示。

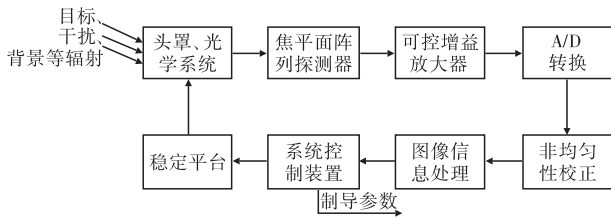


图 2 典型成像导引头组成图

### 1.3 红外成像 GIF 设计

红外引信采用传统的环视探测方式探测高速交会目标可能造成炸点滞后,以致战斗部破片落在目标的后面,影响对目标的毁伤效果。为改善引信的探测能力,可采用减小探测倾角的方法,但引信探测器的设计难度增加了。为了改变这种情况,红外成像引信通过共享红外成像导引头的部分资源实现前视探测,其组成如图 3 所示。

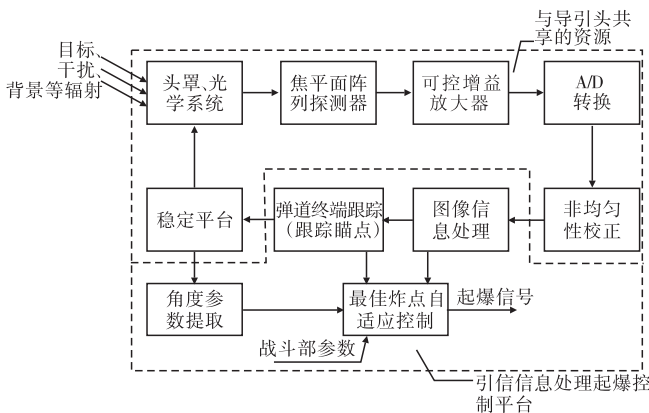


图 3 红外成像 GIF 引信组成图

红外成像 GIF 引信共享了导引头的许多部件,与传统的红外引信相比,具有组成机构相对简单、探测灵敏度高、空间分辨率高等优点。由于实现了前视探测,红外成像 GIF 引信的探测距离要比环式探测方式远得多,这样就大大延长了引信的信息处理时间,使得复杂的信息处理算法可以在引信系统中得到应用。

导引头的视场角和最大跟踪角速度是受限制的,因此存在盲区,盲区内成像探测器无法探测到目标。

红外成像探测器的盲区一般为 50 ~ 80m,这么大的探测盲区将影响防空导弹对目标的毁伤概率。为了解决这个问题,成像导引头在弹道终端可以切换到大视场对目标进行跟踪,并且要从型心跟踪转到局部特征点跟踪,这样就可最大限度的减小成像引信的探测盲区。

利用红外成像导引头的弹目交会信息,可以实时计算飞行剩余时间和目标脱靶方位,在最佳时刻引爆定向战斗部,达到对目标的最佳杀伤效果。

## 2 引战配合起爆控制算法

导弹在弹道终端的飞行剩余时间很短,其和目标的机动性可以不考虑,故可假定目标在弹体坐标系内作匀速直线运动。

图 4 为弹目交会示意图。 $OXYZ$  为弹体坐标系; $\bar{V}_r$  为弹目相对运动速度; $T$  为弹道终端目标的局部跟踪点; $C$  点为相对运动速度与  $OYZ$  平面的交点; $OD$  为脱靶距离; $\theta$  为目标视线与弹轴之间的夹角; $\varphi$  为目标在弹体坐标系下的方位角; $\varphi_r$  为脱靶方位角。

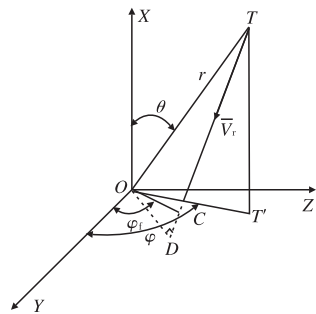


图 4 弹目交会示意图

### 2.1 剩余飞行时间算法

假定导弹静止不动,目标以相对运动速度在弹体坐标系内运动,并设  $r = |\overrightarrow{OT}|$ ,  $t_f$  为目标从  $T$  点飞到  $D$  点的时间,  $t_{go}$  为目标从  $T$  点飞到  $C$  点的时间,则由图 4 可得:

$$\rho = |\overrightarrow{OD}| = \frac{r^2}{V_r} \sqrt{\dot{\theta}^2 + \dot{\varphi}^2 \sin^2 \theta} \quad (1)$$

$$r^2 = \rho^2 + V_r^2 t_f^2 \quad (2)$$

由式(2)得:

$$\frac{\rho V_r}{r^2} = \frac{\rho V_r}{\rho^2 + V_r^2 t_f^2} = \frac{1}{1/\xi + \xi t_f^2} \quad (3)$$

式中  $\xi = V_r/\rho$ 。把式(3)代入式(1)得:

$$\frac{1}{\xi} + \xi t_f^2 = \frac{1}{\sqrt{\dot{\theta}^2 + \dot{\varphi}^2 \sin^2 \theta}} \quad (4)$$

设从开始观测点到  $D$  的总时间为  $\Gamma$ ,  $t$  为目标的已飞行时间,则:

$$t_f = \Gamma - t \quad (5)$$

令:

$$q = \frac{1}{\xi} + \xi t_f^2 \quad (6)$$

把式(5)代入式(6)得:

$$q = \frac{1}{\xi} + \xi(\Gamma - t)^2 \quad (7)$$

对式(7)两边微分得:

$$\dot{q} = -2\xi(\Gamma - t) = -2\xi t_f \quad (8)$$

对式(8)两边进行微分得:

$$\ddot{q} = 2\xi \quad (9)$$

于是有:

$$\xi = 0.5\ddot{q} \quad (10)$$

由式(8)和式(9)联合得:

$$t_f = -\dot{q}/\ddot{q} \quad (11)$$

又因为:

$$\dot{r} = -V_r \cos \angle OTD = -V_r \frac{V_r t_f}{r} \quad (12)$$

$$r = \sqrt{\rho^2 + V_r^2 t_f^2} \quad (13)$$

于是,由式(12)和式(13)联合得:

$$\frac{r}{\dot{r}} = -\frac{r^2}{V_r^2 t_f} = -\frac{\rho^2 + V_r^2 t_f^2}{V_r^2 t_f} = -\frac{\frac{1}{\xi^2} + t_f^2}{t_f} = \frac{2q}{\dot{q}} \quad (14)$$

又因为剩余飞行时间为:

$$t_{go} = \frac{r \cos \theta}{r \dot{\theta} \sin \theta - \dot{r} \cos \theta} = \frac{1}{\dot{\theta} \tan \theta - \dot{r}/r} \quad (15)$$

所以,将式(14)代入式(15)得:

$$t_{go} = \frac{1}{\dot{\theta} \tan \theta - \frac{\dot{q}}{2q}} \quad (16)$$

### 2.2 起爆延迟时间算法

设战斗部破片静态飞散中心角为 90°,且探测器中心与战斗部中心重合,则最佳起爆延时时间可以由下式给出:

$$\tau = t_{go} - \frac{|\overrightarrow{OC}|}{V_f} \quad (17)$$

式中:  $V_f$  为静态破片飞行速度;且

$$|\overrightarrow{OC}| = \sqrt{\rho^2 + V_r^2 (t_f - t_{go})^2} = \rho \sqrt{1 + \xi^2 (t_f - t_{go})^2} \quad (18)$$

式(18)中,  $\rho$  是未知的,可用圆概率误差 CEP 代入计算.于是起爆延迟时间的最终表达式为:

$$\tau = t_{go} - CEP \sqrt{1 + \xi^2 (t_f - t_{go})^2} / V_f \quad (19)$$

### 2.3 起爆方位角算法

起爆方位角与目标的脱靶方位角是等价的,如图 4 中的  $\varphi_f$  所示,它可由  $\theta, \dot{\theta}, \dot{\varphi}$  来预测。

$\overrightarrow{OC}$  在弹体坐标系中的表达式为:

$$\overrightarrow{OC} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{r^2 \dot{\theta} \cos \varphi - r^2 \dot{\varphi} \sin \theta \cos \theta \sin \varphi}{r \dot{\theta} \sin \theta - \dot{r} \cos \theta} \\ \frac{r^2 \dot{\varphi} \sin \theta \cos \theta \cos \varphi + r^2 \dot{\theta} \sin \varphi}{r \dot{\theta} \sin \theta - \dot{r} \cos \theta} \end{bmatrix} \quad (20)$$

则其在弹体系  $y$  轴和  $z$  轴的坐标分别为:

$$\begin{aligned} A_y &= \frac{r^2 \dot{\theta} \cos \varphi - r^2 \dot{\varphi} \sin \theta \cos \theta \sin \varphi}{r \dot{\theta} \sin \theta - \dot{r} \cos \theta} \\ A_z &= \frac{r^2 \dot{\varphi} \sin \theta \cos \theta \cos \varphi + r^2 \dot{\theta} \sin \varphi}{r \dot{\theta} \sin \theta - \dot{r} \cos \theta} \end{aligned} \quad (21)$$

由式(21)可得:

$$\begin{aligned} \varphi_f &= \arccos\left(\frac{A_y}{\sqrt{A_y^2 + A_z^2}}\right) = \\ &\frac{\dot{\theta} \cos \varphi - \dot{\varphi} \sin \theta \cos \theta \sin \varphi}{\sqrt{\dot{\theta}^2 + \dot{\varphi}^2 \sin^2 \theta \cos^2 \theta}} \end{aligned} \quad (22)$$

定义  $\varphi_f$  逆时针旋转为正,范围为  $[0, 2\pi]$ , 于是:

$$\varphi_f = \begin{cases} \varphi_f & A_z \geq 0 \\ 2\pi - \varphi_f & A_z < 0 \end{cases} \quad (23)$$

## 3 引战配合信息提取

由第 2 节可知,只要得到  $\theta, \dot{\theta}, \varphi, \dot{\varphi}$ ,即可算出最佳起爆延迟时间和起爆方位角.红外成像导引头系统可通过旋转变压器解算出位标器的框架角信息,GIF 引信系统对此信息进行坐标转换得出  $\theta, \varphi$ ,一般通过旋转变解出的框架角信息含有较大的测量噪声,如果对其直接进行数值微分获取  $\dot{\theta}, \dot{\varphi}$ ,将引进很大的微分噪声,文中使用跟踪微分器实现对  $\dot{\theta}, \dot{\varphi}$  的提取及对  $\theta, \varphi$  的滤波。

### 3.1 跟踪微分器

跟踪微分器是由韩京清提出的,用于解决实际工程中由不连续或带随机噪声的量测信号合理提取连续信号及微分信号的问题.跟踪微分器利用了数值积分优于数值微分的事实,将给定信号的微分问题转化为对一组微分方程的积分问题,可以很好的实现对信号的跟踪滤波和微分<sup>[3]</sup>。

跟踪微分器的原理如图 5 所示,  $v(t)$  为输入信号,  $x_1(t)$  和  $x_2(t)$  为两个输出信号.其中,



图 5 跟踪微分器原理图

$x_1(t)$  跟踪输入信号  $v(t)$ ,  $x_2(t)$  是  $x_1(t)$  的微分,可以 作为输入信号  $v(t)$  的微分。

实际中使用的为跟踪器的离散形式,表达式为:

$$\begin{cases} x_1(k+1) = x_1(k) + hx_2(k) \\ x_2(k+1) = x_2(k) + hf_h \\ fh = fhan(x_1(k) - v(k), x_2(k), r, h_0) \end{cases} \quad (24)$$

式中,  $fhan$  为最速控制综合函数, 其算法公式如下:

$$\begin{cases} d = rh_0^2 \\ a_0 = h_0x_2 \\ y = x_1 - v_1 + a_0 \\ a_1 = \sqrt{d(d + 8|y|)} \\ a_2 = a_0 + \text{sign}(y)(a_1 - d)/2 \\ a = (a_0 + y)\text{fsg}(y, d) + a_2(1 - \text{fsg}(y, d)) \\ fhan = -r\left(\frac{a}{d}\right)\text{fsg}(a, d) - r\text{sign}(a)(1 - \text{fsg}(a, d)) \end{cases} \quad (25)$$

式(25)中,  $\text{fsg}$  为一个符号函数, 记为:

$$\text{fsg}(x, d) = (\text{sign}(x + d) - \text{sign}(x - d))/2 \quad (26)$$

在跟踪微分器中, 需要设计的参数有 3 个, 积分步长  $h$ , 滤波因子  $h_0$  和快速因子  $r$ , 它们分别决定了微分精度、滤波效果和跟踪速度。

### 3.2 仿真验证

仿真条件: 假设  $\dot{\theta}$  的初值为  $20^\circ/\text{s}$ , 变化率为  $150^\circ/\text{s}^2$ ,  $\theta$  的初值为  $10^\circ$ , 测量噪声等效成均方差为  $0.5^\circ$  的白噪声。仿真步长设为  $0.0001\text{s}$ , 滤波因子为  $0.001$ , 快速因子为  $100000$ , 仿真结果如图 6 ~ 图 8 所示。

从仿真结果可以看出, 使用的跟踪微分器较好的实现了对  $\theta$  的滤波, 且得到了  $\dot{\theta}$ , 经统计, 跟踪微分器得到的  $\dot{\theta}$  与其真实值之差的均方差小于  $1.5^\circ/\text{s}$ 。

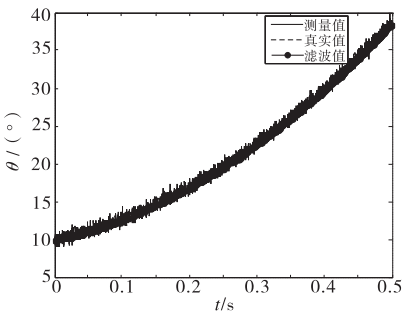


图 6  $\theta$  的滤波值

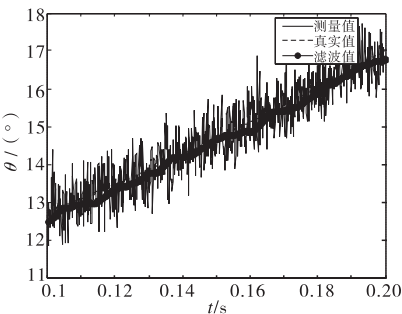


图 7  $\theta$  的滤波值局部放大图

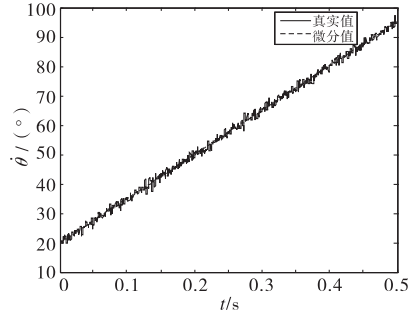


图 8 跟踪微分器得到的  $\dot{\theta}$

## 4 结论

文中首先对红外成像引信和红外成像导引头的功能和组成进行了阐述, 在此基础上对红外成像 GIF 硬件一体化进行了设计; 然后推导给出了引战配合起爆控制算法; 最后提出使用跟踪微分器对引战配合信息进行提取, 即对角度测量值进行滤波和获取角速度值, 且通过仿真验证了提取方法的正确性。

### 参考文献:

- [1] 简金蕾, 李静, 任宏斌, 等. 基于相控阵天线的引信与导引头一体化设计[J]. 引战系统, 2011(1): 85 - 89.
- [2] 吴珊珊. 制导引信一体化起爆算法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
- [3] 赵刚, 郭华, 杨树兴, 等. 基于跟踪微分器的导引头半捷联稳定系统半实物仿真研究[J]. 北京工商大学学报, 2009, 27(2): 25 - 28.
- [4] 刘斌, 涂建平, 庄志洪, 等. 红外成像 GIF 引信起爆控制算法研究[J]. 探测与控制学报, 2005, 27(5): 22 - 25.
- [5] 涂建平, 彭应宁, 袁正, 等. 一种新型空空导弹红外成像引信[J]. 红外技术, 2002, 24(1): 17 - 22.
- [6] 刘斌, 樊养余. 制导引信一体化技术及其典型应用[J]. 航空兵器, 2006(3): 33 - 36.