

## 舰载烟幕弹对抗红外成像型反舰导弹的仿真研究

邱继进<sup>1</sup>, 赵晓哲<sup>2</sup>

(1. 海军大连舰艇学院 研究生 1 队, 辽宁 大连 116018; 2. 海军大连舰艇学院 科研部, 辽宁 大连 116018)

**摘要:** 施放红外烟幕是一种有效地对抗红外成像型反舰导弹的方法之一, 为了研究烟幕对抗红外成像型反舰导弹的战术运用方法, 分别建立了舰艇、烟幕、导弹的运动模型, 并从烟幕浓度的变化引起导引头信噪比变化的角度, 建立了烟幕干扰效果的评判模型, 给出了烟幕干扰效果的一种判断方法。通过计算机仿真, 动态地模拟出了红外烟幕对抗红外成像型反舰导弹的态势, 得出了烟幕布放、舰艇规避机动战术决策的原则和方法, 仿真结果对烟幕对抗红外成像型反舰导弹的战术运用有重要的参考价值。

**关键词:** 烟幕干扰; 红外成像; 反舰导弹; 仿真

**中图分类号:** TN21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2005)06-0651-04

## Simulation research on the smoke bomb carried on the warship confronting the infrared imaging anti-ship missile

QIU Ji-jin<sup>1</sup>, ZHAO Xiao-zhe<sup>2</sup>

(1. Postgraduate Team 1, Dalian Navy Academy, Dalian 116018, China ;

2. Department of Sciences Research, Dalian Navy Academy, Dalian 116018, China)

**Abstract:** Infrared smoking screen is an effective way to confront the infrared imaging anti-ship missile, for researching on the theory of the smoke screen confronting the infrared imaging anti-ship missile, the motion models of the warship, screen smoke and missile are given, the judgement method of the smoke's interfere effectiveness is discussed from the point of SNR of missile influenced by smoking screen's thickness, the infrared smoking screen confronting the infrared imaging anti-ship missile is dynamically simulated and the principle and the means of the arrangement about the smoke and elusion of the warship are derived from simulation, the simulation conclusions are of great value to the tactics use of the screen smoke confronting the infrared imaging guided missile.

**Key words:** Smoke interfere; Infrared imaging; Anti-ship missile; Simulation

### 0 引言

随着制导技术的发展, 红外制导方式已由红外点源寻的制导发展到红外成像制导, 红外成像制导是制

导技术的突破性进步, 与热点式制导相比, 最突出的优点是抗干扰性能的提高, 其频谱分布识别和形状识别很容易抗掉点源欺骗式干扰, 使传统的红外诱饵弹不能对其实施有效的干扰<sup>[1,2]</sup>。红外成像制导可将系统

收稿日期: 2005-04-11; 修订日期: 2005-07-05

作者简介: 邱继进 (1979-), 男, 湖北孝感人, 硕士生, 研究方向为舰艇作战系统运筹分析。

的分辨率提高到 0.1 mrad, 可以识别前方十几千米远的目标, 有效地增强了抗背景噪声的能力, 提高了命中率<sup>[3]</sup>。因此, 有效地对抗红外成像制导武器威胁的措施和手段, 是急需研究的一个重要课题。

## 1 作用机理分析

红外烟幕对红外辐射的作用机制一般包括以下两个方面<sup>[4]</sup>: 一是干扰作用, 利用烟幕本身发射的更强的红外辐射, 将目标及背景的红外辐射遮盖, 干扰热成像或其他探测设备的正常显示, 结果呈现烟幕本身的一片模糊景象。二是消弱作用, 利用烟幕中多达  $10^9 \text{ g/cm}^3$  数量级的微粒对目标和背景的红外辐射产生吸收、散射和反射作用, 使进入红外探测器的红外辐射能低于分辨率, 起到保护目标不被发现的作用。烟幕粒子的直径等于或略大于入射波长时, 其消弱作用最强, 当烟幕浓度达到  $1.9 \text{ g/cm}^3$  时, 能消弱红外辐射 90% 以上, 浓度更高时, 烟幕甚至可以完全屏蔽掉目标发射和反射的红外信号。

## 2 模型描述

由于导弹自导距离远大于飞行高度, 故可采用平面坐标系, 为便于计算, 设烟幕弹发射时刻舰艇位于坐标原点, 此时刻为仿真的初始时刻,  $x$  轴的正向向右,  $y$  轴正向向上, 真北向为  $x$  轴正向, 舰艇的初始航向亦为  $x$  轴正向。

### 2.1 舰艇的运动模型

设舰艇向右转向时角度为“-”, 向左转向时角度为“+”, 则任意时刻舰艇位置点的坐标方程如下:

$$\text{舰艇直航时: } \begin{cases} x_s = v_s t \\ y_s = 0 \end{cases}$$

舰艇转向时:

$$\begin{cases} x_s = (v_s 180/\omega\pi) \sin(\omega t\pi/180) \\ y_s = (v_s 180/\omega\pi) (1 - \cos(\omega t\pi/180)) \end{cases}$$

舰艇转过任意角度  $a$  后直航:

$$\begin{cases} x_s = (v_s 180/\omega\pi) \sin(a\pi/180) + \\ v_s \cos(a\pi/180) (t - |a/w|) \\ y_s = (v_s 180/\omega\pi) (1 - \cos(a\pi/180)) + \\ v_s \sin(a\pi/180) (t - |a/w|) \end{cases}$$

式中  $a$  为舰艇转向角度;  $\omega$  为舰艇转向时的角速度;  $v_s$  为舰艇航速。

### 2.2 烟幕的运动模型

烟幕头的运动坐标为:

$$\begin{cases} x_t = d + r_0 \cos(b\pi/180) + v_s t_s + v_w \cos((w-180)\pi/180) \times \\ (t - t_s) + L/2 \sin((w-180)\pi/180) \\ y_t = -r_0 \sin(b\pi/180) + v_w \sin((w-180)\pi/180) \times \\ (t - t_s) + L/2 \cos((w-180)\pi/180) \end{cases}$$

烟幕尾的运动坐标为:

$$\begin{cases} x_w = d + r_0 \cos(b\pi/180) + v_s t_s + v_w \cos((w-180)\pi/180) \times \\ (t - t_s) - L/2 \sin((w-180)\pi/180) \\ y_w = -r_0 \sin(b\pi/180) + v_w \sin((w-180)\pi/180) \times \\ (t - t_s) - L/2 \cos((w-180)\pi/180) \end{cases}$$

式中  $d$  为烟幕弹发射装置距离舰艇中心的距离;  $r_0$  为烟幕弹的发射距离;  $t_s$  为烟幕弹发射后形成烟幕的时间;  $b$  为烟幕弹的发射舷角;  $v_w$  为风速的大小;  $w$  为风向角;  $L$  为烟幕弹爆炸后形成的初始烟幕的长度。

### 2.3 导弹运动模型

模拟中, 设导弹的导引规律为比例导引法<sup>[5]</sup>, 将导弹视为质点, 导弹的高度恒定, 设仿真的初始时刻导弹看舰艇的方位为  $D_0$ , 与舰艇的初始距离为  $s_0$ , 导弹的初始舷角为  $Q_0$ , 则导弹的运动方程如下:

$$\begin{cases} x_m(t+1) = x_m(t) + v_m \sin(Hd(t)\pi/180) \\ y_m(t+1) = y_m(t) + v_m \cos(Hd(t)\pi/180) \end{cases}$$

式中  $x_m(t)$  为导弹  $t$  时刻的横坐标;  $x_m(t+1)$  为导弹下一时刻的横坐标;  $y_m(t)$  为导弹  $t$  时刻的纵坐标;  $y_m(t+1)$  为导弹下一时刻的纵坐标;  $Hd(t)$  为导弹  $t$  时刻的航向;  $v_m$  为导弹的速度。

导弹  $t$  时刻航向可由下式求得:

$$Hd(t+1) = Hd(t) + k(Q(t+1) - Q(t))$$

式中  $k$  为比例导引系数;  $Q(t)$  为导弹在  $t$  时刻的舷角;  $Q(t+1)$  为导弹下一时刻的舷角;

导弹在  $t$  时刻的舷角  $Q(t)$  可由下式求得。

当导弹来袭方向在舰艇左舷时:

$$Q(t) = \arctg[(y_m(t) - y_{sy}(t)) / (x_m(t) - x_{sy}(t))]$$

当导弹来袭方向在舰艇右舷时:

$$Q(t) = \pi - \arctg[(y_m(t) - y_{sy}(t)) / (x_m(t) - x_{sy}(t))]$$

当舰船被导引头捕捉到以后, 在导引头和舰艇之

间及时释放烟幕,导引头上会出现一片模糊,此时导引头跟踪模式由正常模式转为纯记忆跟踪模式<sup>[6]</sup>,导引头记忆状态下舰艇位置点的坐标为: $x_{sy}(t)=v_s t$ ;  $y_{sy}(t)=0$ 。

2.4 干扰效果模型

干扰效果的评价方法有两种:试验法和理论计算法,本文采用理论计算法。

(1) 烟幕浓度的扩散模型

发烟弹形成烟幕的扩散过程可由瞬时体源的扩散过程来推导,由拉赫特曼扩散理论可知,瞬时体源形成的烟云浓度表达式为:

$$C_{(x,y,z,\tau)} = \frac{Q \left( \frac{z_1^2}{k_1 n} \right)^{1/n} \tau^{-1-(1/n)}}{4\pi k_0 z_1 \Gamma[1+1/n]} e^{-\frac{(x-u_1)^2 + y^2}{4k_0 \tau} - \frac{z_1^2 (z/z_1)^n}{4k_1 n^2 \tau}}$$

式中  $C_{(x,y,z,\tau)}$  为点  $(x,y,z)$  处  $\tau$  时的浓度,  $g/m^3$ ;  $Q$  为瞬时进入大气的发烟剂量,  $g$ ;  $u_1$  为离地面  $z_1$  米高的风速,  $m/s$ ;  $k_1$  为  $z_1$  参考点的垂直扩散系数,  $m^2/s$ ;  $k_0$  为水平方向上的扩散系数,  $m^2/s$ ;  $n$  为大气稳定度,  $n=1$  时为等温,  $n>1$  时为逆温,  $n<1$  时为对流。

(2) 红外探测系统信噪比随烟幕浓度的变化模型  
计算理论依据是 Lambert-Beer 定律,即:

$$I = I_0 e^{-M_c S}$$

式中  $I$  为通过烟幕后的辐射强,  $W/cm^2$ ;  $I_0$  为通过烟幕前的辐射强度,  $W/cm^2$ ;  $C$  为烟幕浓度,  $g/m^3$ ;  $S$  为红外辐射通过浓度  $C$  的光程,  $m$ ;  $M_c$  为消光系数,  $m^2/g$ 。当由目标发出的红外能量通过烟幕衰减后,使导引头探测系统的信噪比下降,当信噪比的值下降到低于探测系统最低灵敏度时,探测系统将不能正常工作。导引头探测系统的信噪比与烟幕浓度的关系式为<sup>[7,8]</sup>:

$$SNR = \frac{\epsilon \Delta T \tau_{air} \exp(-k_c - Cl)}{NETD} \eta_e$$

式中  $\epsilon$  为目标的光谱发射率;  $\Delta T$  为目标与背景的温度差;  $\tau_{air}$  为红外信号的大气透过率;  $k_c$  为红外烟幕的消光系数;  $C$  为烟幕的瞬时浓度;  $l$  为烟幕的瞬时厚度;  $\eta_e$  为探测系统凝视效率;  $NETD$  为探测系统的最小噪声等效温差。

(3) 干扰效果分析<sup>[9,10]</sup>

当施放烟幕进行干扰后,计算烟幕各时刻的浓度

及信噪比的大小,在研究中假设敌方红外制导的导弹引信爆炸方式为近炸引信,其近炸距离为  $r$ ,导弹与舰艇之间的实时距离为  $R_t$ ,导引头探测系统能分辨的信噪比的最小阈值为  $\mu$ ,对于干扰效果有如下判据:

- (1)  $SNR > \mu$ , 干扰无效。
- (2)  $SNR \leq \mu$  &  $R_t \leq r$ , 干扰无效。
- (3)  $SNR \leq \mu$  &  $R_t > r$ , 干扰有效。

3 计算机仿真

根据以上给定的数学模型,在计算机上用 Matlab 编制仿真程序,图 1 为仿真流程图。

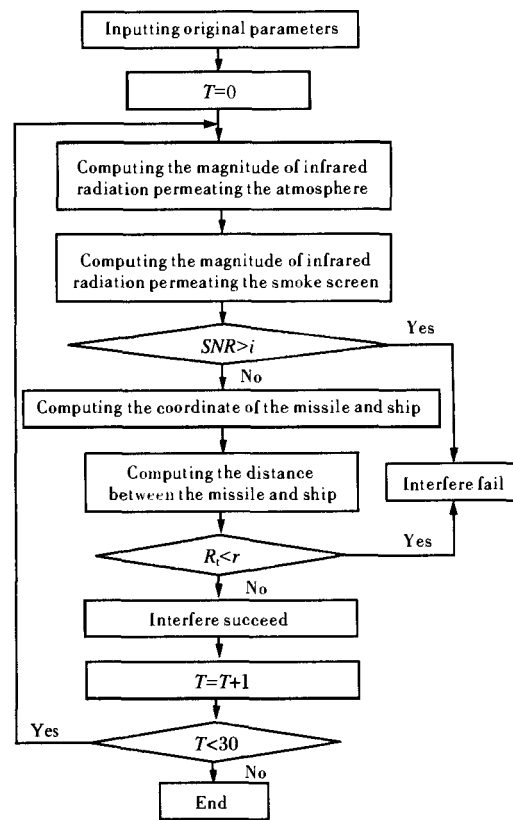


图 1 仿真流程图

Fig.1 Chart of simulation flow

在实际计算红外辐射大气透过率时可采用 LOW TRAN7 软件,本课题的研究中忽略红外辐射的大气透过率,假设其为常值。

仿真初始参数的选择如下。

- (1) 导弹  $V=0.8 Ma$ , 来袭方向为左舷  $120^\circ$ , 未制导开机距离为  $8 km$ , 爆距为  $80 m$ , 导引头的信噪比最小阈值为  $6$ 。

(2) 舰艇  $V=15\text{ m/s}$ , 初始航向为  $90^\circ$ 。

(3) 烟幕 烟幕弹发射舷角为左舷  $120^\circ$ , 发射距离为  $1000\text{ m}$ , 烟幕微粒的红外消光系数为  $0.3$ 。

(4) 气象条件 风速  $2\text{ m/s}$ , 大气垂直稳定性为等温;

(5) 其他条件 红外辐射的大气透过率为  $0.9$ , 舰艇的光谱发射率为  $1$ , 舰艇与背景温差为  $10\text{ }^\circ\text{C}$ , 探测系统的凝视效率为  $0.9$ , 探测系统的 NETD 为  $0.1\text{ K}$ 。

用 Matlab 编制仿真程序, 得出的仿真结果如图 2 所示。图 2 示出了烟幕浓度、信噪比、导弹与舰艇之间的距离随时间变化、信噪比随烟幕浓度变化的四个过程。由图 2 可知, 随着烟幕浓度的逐渐升高, 在第  $6\text{ s}$  以后, 信噪比小于  $6$ , 导引头此时距离舰艇  $7.1\text{ km}$ , 远远大于导弹的爆距, 干扰成功。

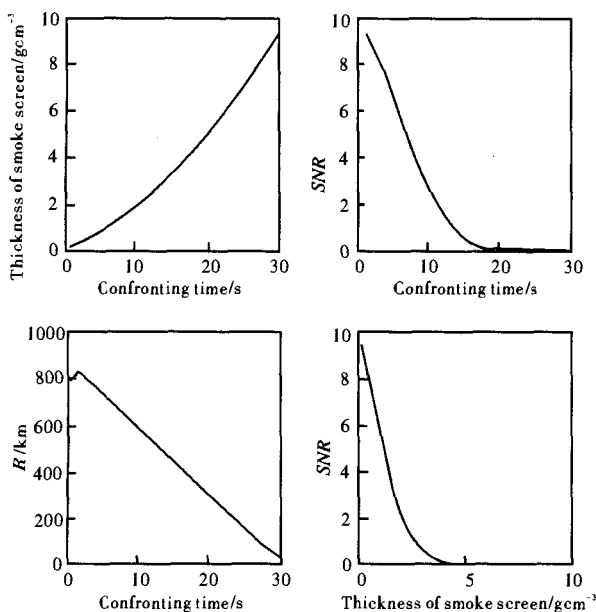


图 2 仿真结果

Fig.2 Chart of simulation result

## 4 仿真结论

通过大量的仿真试验, 得出以下结论。

(1) 烟幕弹投放时机对干扰效果的影响

仿真表明, 烟幕形成最佳的遮蔽浓度(导引头的信噪比下降到小于其阈值)的时间一般为  $4\sim 8\text{ s}$ , 因此烟幕施放太迟, 则遮蔽效果达不到最佳状态, 舰艇有可能被导引头捕捉到; 施放太早, 由于受烟幕对抗时间的限制, 会使烟幕对导引头还没有来得及形成有效

干扰, 其对抗时间就结束了。

(2) 舰艇转向角度对干扰效果的影响

舰艇转向时应尽可能转动至顺风方向, 与风向平行机动, 舰艇转向后的角度与风向的夹角越大, 遮蔽时间越短, 夹角越小, 烟幕的遮蔽时间越长。

(3) 舰艇航速对干扰效果的影响

舰艇的航速适宜采取常速机动, 速度太大, 烟幕的遮蔽时间缩短; 速度太小, 舰艇很难机动出导弹的视场角, 且仿真终止时刻舰艇与导弹的距离很近, 增大了舰艇处于导弹爆距之内的概率。

(4) 烟幕弹施放舷角对干扰效果的影响

当导弹来袭方向为右舷时, 则应该向右舷施放烟幕弹, 左舷来袭导弹时, 应在左舷施放烟幕弹, 且施放舷角与导弹来袭的初始舷角相当时烟幕的遮蔽效果最好。

(5) 烟幕弹施放距离对干扰效果的影响

从仿真结果看烟幕弹的施放距离越小遮蔽效果越好, 但是实际操作过程中, 施放距离小, 容易使舰艇穿过烟幕屏障从而使舰艇过早暴露。

(6) 风速大小及风向对干扰效果的影响

风速较大则遮蔽时间明显缩短, 风速在一定适宜范围内对干扰效果影响不大。风向对干扰效果的影响较大, 风向和航向平行时干扰效果较好, 其中顺风航向比逆风航向干扰效果好, 正横来风时干扰效果最差。

## 参考文献:

- [1] Schleher D C. Electronic Warfare in the Information Age[M]. Boston: Artech House Radar Library, 1999.
- [2] DING Nan, ZHANG Qi-tu, WANG Ting-wei. Preparation and properties of IR aerosol material[J]. Optical Technique(丁楠, 张其土, 王庭慰. 红外烟幕干扰材料的制备与性能研究. 光学技术), 2005, 31(3): 452-453.
- [3] LENG Feng, WANG Jia-yin. Application and developing trends of the technology in electro-optical countermeasure[J]. Electro-optics & Passive Countermeasures(冷锋, 王甲寅. 烟幕技术在光电对抗中的应用及发展趋势. 光电对抗与无源干扰), 2004, 19(2): 28-31.
- [4] QIU Ji-jin, MEI Jian-ting. Modern smoke screen countering accurate guidance weapons[J]. Journal of Dalian Naval Academy(邱继

(下转第 659 页)

气流或平台高频线性力等影响,需要采取稳定闭环控制,运用系统控制理论建模,分析系统稳定性能。其控制原理方框图如图4所示(采用方位和俯仰两轴稳定),依此建立传递函数方框图编写稳定控制模块,并根据系统控制原理按照实际参数来仿真<sup>[9]</sup>。

### 3 结束语

本文设计的激光成像雷达制导仿真系统具有较强的可操作性,为实物设计中出现的问题提供了前期预见能力,为实物系统的有效性提供测评标准,具有十分重要的意义。该仿真系统整体已经构架完毕,并可完成阶段性初步仿真。接下来的工作是要进一步增加仿真功能,提供交互式的图形显示功能;通过选用不同环境、不同元件的大量实验,修正完善通用资源库(大气模型、噪声模型目标模型);研究新的图像处理和目标识别算法,提高信号处理速度等。

### 参考文献:

- [1] SUN Xiao-quan, LV Yue-guang. The Principle and Technology of Laser Countermeasure[M]. Beijing: China PLA Press(孙晓泉,吕越广.激光对抗原理与技术.北京:解放军出版社),2000.73-83.
- [2] NI Shu-xin, LI Yi-fei. Trend of laser radar for military[J]. Infrared and Laser Engineering(倪树新,李一飞.军用激光雷达的发展趋势.红外与激光工程),2003,32(2):111-114.
- [3] ZHOU Li-wei. Target Detection and Identification[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press(周立伟.目标探测与识别.北京:北京理工大学出版社),2002.225-229.
- [4] ZUO Bao-jun, ZHANG Ai-hong. Determination of optical parameters for laser heterodyne detecting system[J]. Journal of Harbin Institute of Technology(左保军,张爱红.激光外差探测系统光学参量的确定.哈尔滨工业大学学报),2001,33(5):656-657.
- [5] WU Bei-ying. Practical Algorithm for Radiation Propagation in the Atmosphere[M]. Beijing: China Meteorological Press(吴北婴.大气辐射传输实用算法.北京:气象出版社),1998.2-9.
- [6] Tuer T W, Mudar J, Freeling J R, et al. Atmospheric Effects on Low-power Laser Beam Radiation Portion[R]. USA: AD-A095383, 1980.
- [7] WANG Guang-jun, TIAN Jin-wen, LIU Jian. The front-view imaging simulation of imaging laser radar and the obstacles identification approach[J]. Infrared and Laser Engineering(王广君,田金文,柳健.激光成像雷达前视成像仿真及障碍物识别方法研究.红外与激光工程),2001,30(6):463-465.
- [8] XU Chuan-gang, SONG Li-quan. Design and realization of infrared complicated scene simulation system[J]. Infrared and Laser Engineering(徐传刚,宋利权.红外复杂场景仿真系统的设计与实现.红外与激光工程),2005,34(2):242-243.
- [9] ZHANG Bing-hua, ZHANG Shou-hui. Electro-optical imaging tracking system[M]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China Press(张秉华,张守辉.光电成像跟踪系统.成都:电子科技大学出版社),2003.131-141.
- [10] ZHANG Xiao-hong, JIANG Jun. Mathematical modeling on detective ability of IR seeker[J]. Optical Technique(张晓宏,姜军.红外导引头探测能力的数学建模.光学技术),2000,26(5):388.
- [11] HAN Jie, ZHANG Jian-qi, HE Guo-jing. Estimation technology of the infrared smoke interference effect[J]. Infrared and Laser Engineering(韩洁,张建奇,何国经.红外烟幕干扰效果评价方法.红外与激光工程),2004,33(1):1-4.
- [12] XU Dai-sheng, LI Zhong-min, YANG Ying-ke. Field study of IR smoke's screening performance using imaging IR technique[J]. Infrared and Laser Engineering(徐代升,李仲敏,杨英科.用红外成像技术外场研究红外烟幕的遮蔽性能.红外与激光工程),2000,29(1):69-72.

(上接第654页)

进,梅建庭.现代烟幕对抗精确制导武器.海军大连舰艇学院学报),2005,28(2):44-46.

[5] CNENG Guo-cai. Tactical Missiles Guidance Method[M]. Beijing: National Defense Industry Press(程国采.战术导弹导引方法.北京:国防工业出版社),1996.

[6] LIU Long-he. Guidance Technology of Multi-mode Seeker[M]. Beijing: National Defense Industry Press(刘隆和.多模复合寻的制导技术.北京:国防工业出版社),1998.

[7] XIONG Xiao-wei, LIU Shang-qian. Effect evaluation on infrared aerosol screening smoke[J]. Systems Engineering and Electronics(熊晓伟,刘上乾.红外气溶胶烟幕干扰效果的定量评估.系统工程与电子技术),2001,23(2):38-39.