

文章编号:1001-5078(2019)02-0217-05

· 光电对抗 ·

## 烟幕对红外导引头干扰效果仿真研究

花超<sup>1</sup>, 廖守亿<sup>1</sup>, 张作宇<sup>1</sup>, 李睿<sup>2</sup>, 陈海燕<sup>2</sup>

(1. 火箭军工程大学, 陕西 西安 710025; 2. 中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009)

**摘要:**烟幕作为一种重要的干扰手段,在对抗各类精确制导武器的过程中发挥了重要作用。本文从烟幕干扰对导引头的影响机理出发,从烟幕透过率、烟幕自身辐射、烟幕有效遮蔽时间和目标的面积遮挡比四个方面分析了烟幕对红外导引头的性能影响,并结合半实物仿真进行了定量测试,得出了科学合理的试验数据,实现烟幕干扰环境下红外导引头的抗干扰能力准确评估。

**关键词:**烟幕干扰;红外导引头;半实物仿真

**中图分类号:**TP391.9;TN976 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2019.02.016

## Simulation research on jamming efficiency about the smoke screen against infrared seeker

HUA Chao<sup>1</sup>, LIAO Shou-yi<sup>1</sup>, ZHANG Zuo-yu<sup>1</sup>, LI Rui<sup>2</sup>, CHEN Hai-yan<sup>2</sup>

(1. Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China; 2. China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China)

**Abstract:**As an important means of interference, the smoke screen played an important role in countering various types of precision guided weapons. In this paper, based on the influence mechanism of smoke screen interference on the seeker, the influence of the smoke screen on the performance of the infrared seeker is analyzed from four aspects: smoke screen transmittance, smoke screen radiation, smoke screen effective shielding time and target area shielding ratio. Combined with the semi-physical simulation, the quantitative test was carried out, and the scientific and reasonable test data were obtained. The accurate evaluation of the anti-jamming ability of the infrared seeker under the smoke screen interference environment was achieved.

**Key words:**the interference of smoke screen; infrared seeker; semi-physical simulation

### 1 引言

烟幕干扰作为一种重要的战场支援保障手段,在以往的历次战争中起到了非常重要的作用。它可以有效的降低目标区域的能见度,干扰精确制导武器的打击,从而掩护各类重要战略目标。

烟幕一般由烟和雾两种固、液微粒组成,属

于气溶胶体系的一种。烟幕施放时会在空气中形成大量的气溶胶微粒,光线在通过烟幕微粒时被吸收、散射衰减,从而改变其传输特性,进而影响红外导引头的探测和识别能力,达到保护目标的目的。

不同的烟幕干扰对光学成像导引头的影响程

**基金项目:**航空基金项目(No. 201601U8001)资助。

**作者简介:**花超(1993-),男,硕士研究生,研究方向为导航制导与控制。E-mail:huachao1993@foxmail.com

**导师简介:**廖守亿(1974-),男,教授,博士生导师,博士后,研究领域为飞行器系统建模与仿真,导航制导与控制。Email:lsy\_nudt@sohu.com

**收稿日期:**2018-05-23

度不尽相同,以红外导引头为例,烟幕对其影响机理主要是:①烟幕对目标红外辐射进行吸收、散射及反射,使目标到达导引头的辐射减少,进而影响导引头对目标的清晰成像;②烟幕自身红外辐射掩盖了目标辐射或降低了目标与背景的对比度,进而使导引头无法对目标进行成像;③烟幕将目标的部分面积遮蔽,进而影响了导引头探测识别目标的概率。

分析烟幕对红外导引头的干扰作用机理,可以得出表征烟幕干扰的主要要素为烟幕透过率、烟幕自身红外辐射、目标的面积遮挡比等<sup>[1]</sup>,考虑到烟幕遮蔽目标是一个动态变化的过程,烟幕有效形成时间,有效遮蔽时间与烟幕对目标的干扰效果密切相关,故烟幕有效遮蔽时间也是表征烟幕干扰效果的要素之一。

## 2 烟幕透过率

烟幕透过率用来表征烟幕干扰前后辐射衰减情况,能够综合反映烟幕对目标辐射的吸收、反射、散射作用。根据 Lambert-Beer 定律,烟幕对辐射的衰减能力可以表示为:

$$\tau_{\text{smoke}} = \frac{I}{I_0} = \exp(-\alpha_e CL) \quad (1)$$

式中,  $\tau_{\text{smoke}}$  为烟幕透射率,无量纲;  $I$  为透过烟幕的光辐射或强度,单位为  $\text{W}/\text{cm}^2$ ;  $I_0$  为入射烟幕的光辐射或强度,单位为  $\text{W}/\text{cm}^2$ ;  $\alpha_e$  为烟幕质量消光系数,单位为  $\text{m}^2/\text{g}$ ;  $C$  为烟幕质量浓度,单位为  $\text{g}/\text{m}^3$ ;  $L$  为光波在烟幕中的光程,单位为  $\text{m}$ 。

烟幕材料的质量浓度和消光系数等参数决定了烟幕在某一波段的透过率,透过率的大小又影响着导引头的探测距离的远近。当烟幕透过率降低到一定程度时,能够到达导引头的辐射量大大减小,导引头对目标的成像质量将严重下降,当到达导引头的辐射能量低于导引头的灵敏度阈值时,则认为目标已经被烟幕遮蔽。红外成像导引头作用距离计算公式为<sup>[2]</sup>:

$$R = (J\tau_a)^{1/2} \left( \frac{\pi}{2} D_0 \cdot \text{NA} \cdot \eta_r \right)^{1/2} \cdot (D^*)^{1/2} \cdot \left[ \frac{1}{(\omega \cdot \Delta f)^{1/2} (V_s/V_n)} \right]^{1/2} \quad (2)$$

式中,  $J$  为目标辐射强度,单位为  $\text{W}/\text{sr}$ ;  $\tau_a$  为大气透射率,量纲一;  $D_0$  为导引头有效接收口径,单位为  $\text{mm}$ ;  $\text{NA}$  为导引头光学系统数值孔径;  $\eta_r$  为光学

系统接收效率,量纲一;  $D^*$  为平均探测率,单位为  $\text{cm} \cdot \text{Hz} \cdot \text{W}^{-1}$ ;  $\omega$  为瞬时视场,单位为  $\text{rad}$ ;  $\Delta f$  为系统带宽,单位为  $\text{Hz}$ ;  $V_s/V_n$  为系统信噪比,量纲一。

当存在烟幕干扰时,需修正大气透过率参数,即:

$$\tau'_a = \tau_a \cdot \tau_{\text{jamming}} \quad (3)$$

以红外成像导引头为例,设定红外导引头各项参数和环境参数,烟幕干扰透过率和红外导引头作用距离的关系如图 1 所示,图中横坐标为烟幕干扰透过率,纵坐标为红外导引头作用距离。

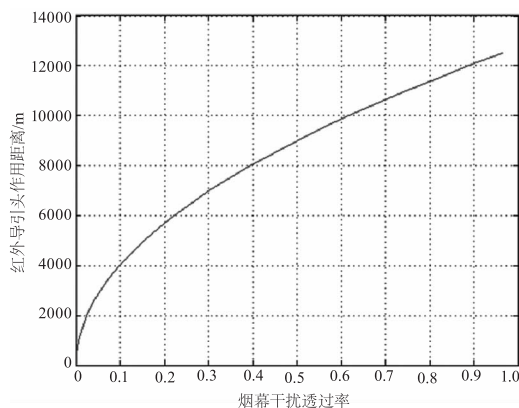


图1 导引头作用距离与烟幕干扰透过率关系图

Fig. 1 The relation of the distance of seeker to smoke transmittance

从图中可以看出,当烟幕透过率降低到一定程度时,红外导引头的作用距离将大幅度下降,说明了此时的烟幕干扰严重影响了红外导引头的图像生成质量,大大降低了该距离下对目标的识别概率。

## 3 烟幕自身辐射

从烟幕干扰对导引头的机理主要作用机理来看,烟幕自身辐射对红外导引头的成像质量也有较大影响。大部分热烟幕在刚形成时温度较高,自身红外辐射较强,烟幕自身红外辐射掩盖了目标辐射或降低了目标与背景的对比度,进而使导引头无法对目标进行清晰成像。

在有烟幕干扰的情况下,由光学成像探测器输出的图像中,目标与背景的差异(即对比度)小于图像灰度分辨率,导引头难以检测、识别出目标;当目标与背景的差异大于该分辨率时,则可以提取出目标特征,从而对目标进行识别。

对比度的表达式为:

$$C_0 = \frac{I - I'}{I'} \quad (4)$$

式中,  $I$  为目标的亮度或色度;  $I'$  为背景的亮度或色度。

从烟幕干扰导引头的作用机理看, 烟幕自身辐射和透过率决定了红外导引头接收到的视在能量与视在背景的大小, 根据斯蒂藩—波尔兹曼定律, 可以得出烟幕自身辐射能量为:

$$W_{\text{smoke}} = \varepsilon_{\text{smoke}} \times \sigma \times T_{\text{smoke}}^4 \quad (5)$$

式中,  $\varepsilon_{\text{smoke}}$  为烟幕辐射率, 介于 0 ~ 1 之间;  $T_{\text{smoke}}$  为烟幕浓度。

同理, 可以得出目标的辐射能量为:

$$W_{\text{obj}} = \varepsilon_{\text{obj}} \times \sigma \times T_{\text{obj}}^4 \quad (6)$$

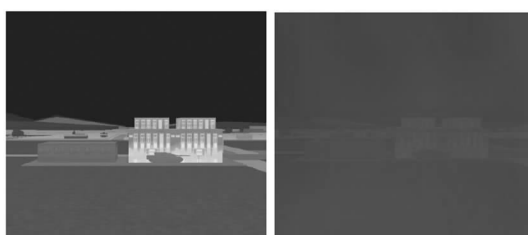
式中,  $\varepsilon_{\text{obj}}$  为目标辐射系数, 数值介于 0 ~ 1 之间;  $T_{\text{obj}}$  为目标温度。

参考对比度的定义, 可以得出在烟幕干扰情况下目标的视在对比度为:

$$\begin{aligned} C_{\text{smoke}} &= \frac{W_{\text{vis}} - W_{\text{b-v}}}{W_{\text{b-v}}} \\ &= \frac{W_{\text{obj}} \times \tau \times \tau_{\text{smoke}} - W_{\text{smoke}} \times \tau}{W_{\text{smoke}} \times \tau} \\ &= \frac{W_{\text{obj}} \times \tau_{\text{smoke}} - W_{\text{smoke}}}{W_{\text{smoke}}} \end{aligned} \quad (7)$$

式中,  $\tau$  为大气透过率;  $\tau_{\text{smoke}}$  为烟幕透过率;  $W_{\text{b-v}}$  为到达导引头的烟幕背景辐射;  $W_{\text{vis}}$  为到达导引头的目标辐射能量。

从公式中可以看出, 在烟幕完全遮蔽目标的条件下, 烟幕透过率和烟幕自身辐射反映了烟幕的干扰程度, 直接影响了导引头的探测性能。图 2 为没有烟幕干扰情况下目标和背景的红外图像和有烟幕干扰时目标和背景的红外图像。



(a) 没有烟幕干扰时的红外图像 (b) 被烟幕干扰时的红外图像

图 2 烟幕干扰前后目标红外图像对比

Fig. 2 The contrast of target infrared image before and after smoke screen interference

#### 4 烟幕遮蔽有效时间

烟幕形成后会受到环境风速及风向的影响, 烟幕的浓度及透过率会随着时间不断的变化, 从而影

响烟幕的干扰效果。烟幕从形成到失效的持续时间是表征烟幕干扰效果的重要因素之一。持续时间越长, 则烟幕的干扰效果越明显。

烟幕的扩散分为连续点源扩散(发烟罐等)和瞬时体源扩散(发烟炮弹等)两种情形。以发烟炮弹为例, 它借助炸药的爆炸作用, 将烟幕粒子快速抛向四周, 形成烟幕云团; 之后, 在湍流扩散的作用下, 烟幕继续扩大, 故其表达式可由瞬时点源表达式推出<sup>[3]</sup>:

$$C(x, y, z, t) = \frac{QK_u \exp\left[-\frac{(x - u_1 t)^2 + y^2}{4K_0 t + r_0^2} - \frac{z^n}{K_1 n^2 z_0^{n-2} + h_0^n}\right]}{\pi(4K_0 t + r_0^2)(K_1 n^2 z_1^{n-2} t + h_0^n)^{1/n} \Gamma(1 + 1/n)} \quad (8)$$

$$K_0 = K_1 \times 13.5^{2-n} \quad (9)$$

等温时:

$$K_1 = \frac{u_1 k^2 z_1}{\ln(z_1/z_{00})} \quad (10)$$

非等温时:

$$K_1 = \frac{u_1 k^2 (n-1) z_0^{2(n-1)} z_1^{2-n}}{(z_1^{n-1} - z_0^{n-1})(2-n)^2} \quad (11)$$

式中,  $Q$  为弹内的发烟剂质量, 单位为 g;  $K_u$  为发烟剂的利用率;  $t$  为发烟剂发烟时间, 单位为 s;  $K_0$  为水平方向湍流扩散系数, 单位为 m;  $K_1$  为  $z_1$  高度处的垂直方向扩散系数, 单位为 m;  $n$  为大气垂直稳定度, 量纲一;  $u_1$  为 1 m 高度处的平均风速, 单位为 m/s;  $K$  为卡门常数, 取 0.4;  $z_{00}$  及  $z_0$  分别为等温及逆温时的地面粗糙度, 单位为 m;  $z_1$  为参考点高度, 取 1 m;  $r_0$  为烟幕团的起始半径, 单位为 m;  $h_0$  为烟幕团的起始高度, 单位为 m。

在实际计算时, 需对烟幕浓度扩散方程进行简化, 设在地面附近 ( $z = 0$ ),  $\Gamma(1 + 1/n) = 1$  和  $z_1 = 1$  时, 烟幕浓度扩散方程变为<sup>[4]</sup>:

$$C(x, y, z, t) = \frac{QK_u \exp\left[-\frac{(x - u_1 t)^2 + y^2}{4K_0 t + r_0^2}\right]}{\pi(4K_0 t + r_0^2)(K_1 n^2 z_1^{n-2} t + h_0^n)^{1/n}} \quad (12)$$

仿真时, 设定烟幕的起始半径为 10 m, 高度为 4 m, 1 m 高处的平均风速为  $u_1 = 3$  m/s,  $u_2 = 1.5$  m/s, 环境条件为等温,  $n = 1$ , 地面粗糙度为 0.015, 发烟剂质量为 1000 g,  $K_u$  取 70%, 质量消光系数由工程经验值可得  $\alpha_{3 \sim 5 \mu\text{m}} = 1.3$  m<sup>2</sup>/g, 则烟幕浓度及透过率随时间变化如图 3 所示。

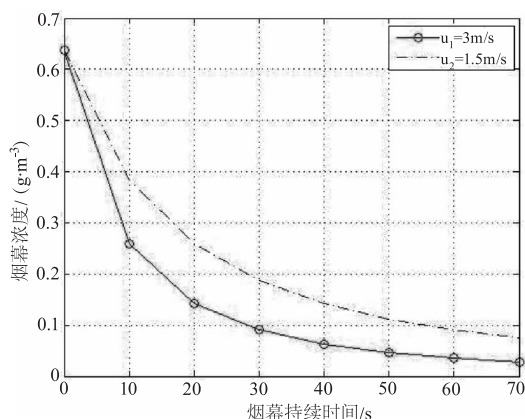


图3 烟幕浓度随时间变化曲线

Fig. 3 The curve of smoke concentration over time

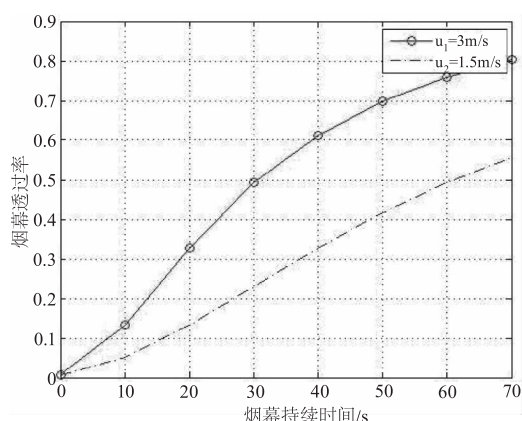


图4 烟幕透过率随时间变化曲线

Fig. 4 The curve of smoke transmittance over time

从图4 烟幕变化曲线图中可以发现,随着持续时间增加,烟幕浓度逐渐降低,透过率不断增大,且在烟幕刚形成阶段烟幕浓度下降较快。

对比不同风速下烟幕的浓度及透过率变化曲线可以发现,风速较大时烟幕浓度下降较快,透过率增加迅速。考虑在现实风速较大时,烟幕粒子消散较快,浓度不断下降,透过率不断提高,故仿真模型符合实际情况。

## 5 目标的面积遮挡比

目标的面积遮挡比反映了目标被烟幕遮挡的程度,可以用被烟幕遮蔽目标的面积与无烟幕干扰时目标的面积的比值进行度量。定义烟幕干扰度为 $D$ ,则:

$$D = S/S_0 \quad (13)$$

式中, $S$  为目标被烟幕遮挡的面积; $S_0$  为没有烟幕干扰情况下目标的面积。

当烟幕对目标部分遮蔽时,光学成像导引头可以结合先验知识,根据目标未被遮挡的部分,利用相

应算法对目标进行探测和识别。目标被遮挡的面积越大,则探测器识别目标的概率越低。以某型号导引头为例,当烟幕对目标的遮挡面积比大于探测器使用阈值时,探测器对目标的识别概率会因探测器自动识别算法的不同而有所差异,但当遮蔽面积比低于探测器阈值时,烟幕干扰面积比的变化大小就不在需要考虑。

利用红外导引头识别算法对目标不同面积遮挡比下的红外图像数据进行开环半实物仿真,统计其识别结果,分析不同面积遮挡比对红外导引头探测识别目标的影响<sup>[5]</sup>,半实物仿真过程如图5所示。

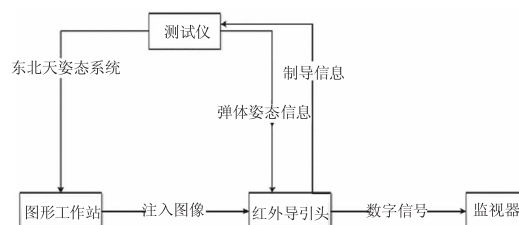


图5 注入式导引头半实物仿真试验图

Fig. 5 Semi-physical simulation test chart of injection seeker

如图5所示,测试仪读取导引头弹道信息,同时向导引头电子舱和图形工作站发送姿态信息。图形工作站根据姿态信息生成场景图,并将视场图像注入导引头电子舱;导引头图像处理板收到图像后进行目标识别和跟踪,计算目标在弹体系下的高低角和方位角,并将导引头的状态及测量信息返回给测试仪进行记录。

以某红外图像地标为例<sup>[6]</sup>,对场景图像进行红外烟幕干扰,试验仿真实例如图6所示。

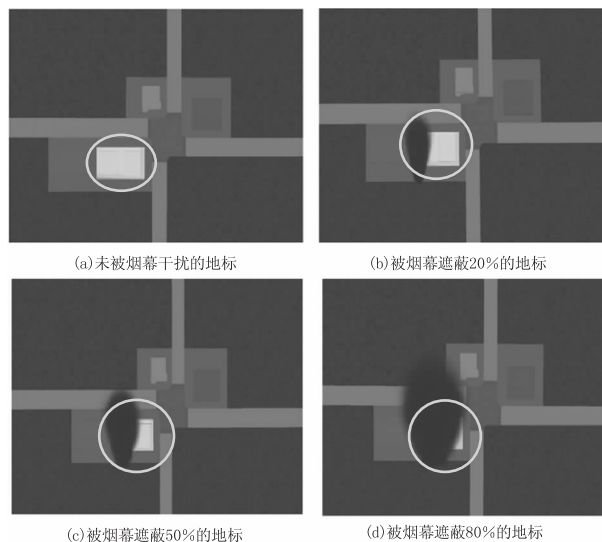


图6 不同面积遮挡比下的目标红外图像

Fig. 6 Target infrared images with different area occlusion ratios

采用经典自动识别算法分析烟幕对目标面积遮挡比对红外导引头探测识别目标的影响。当烟幕对目标的面积遮挡比发生变化时,导引头对目标的识别准确度也随之变化<sup>[7]</sup>。表1为不同面积遮挡比下导引头对某地标的识别概率。

表1 不同面积遮挡比下某地标的识别概率

Tab.1 The recognition probability of different area occlusion ratio to a certain landmark

| 序号 | 遮挡率/% | 某地标识别概率/% |
|----|-------|-----------|
| 1  | 10    | 100       |
| 2  | 20    | 100       |
| 3  | 30    | 100       |
| 4  | 40    | 100       |
| 5  | 50    | 100       |
| 6  | 60    | 99.74     |
| 7  | 70    | 93.06     |
| 8  | 80    |           |

从表1中可以看出,该地标被烟幕遮挡面积比小于70%时,目标具备抗烟幕干扰能力,且随着遮挡面积比的增加,识别概率不断下降,当遮挡面积比大于导引头灵敏度阈值时,导引头无法识别该地标。

## 6 结 论

烟幕干扰是红外导引头面临的主要干扰形式之一,本文从烟幕干扰对红外导引头的影响机理出发,得出表征烟幕干扰对红外导引头影响性能的四个因素,即烟幕透过率、烟幕自身辐射、烟幕遮蔽有效时间和目标的面积遮挡比,并结合仿真实例对其干扰效果进行了定量分析,仿真所得数据与实际情况相吻合。但由于烟幕干扰存在复杂性和不确定性,在今后的试验中需考虑更多的因素,并结合外场试验进行验证。

## 参考文献:

- [1] SUI Qisheng, SHI Zelin, RAO Ruizhong, et al. The simulation technology of Optical-guided missile in battlefield environment [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016. (in Chinese)
- [2] XU Jing, LIU Bin, YANG Junyan, et al. Anti-jamming strategy for smoke-screen jamming and composite seeker [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 448(2): 1-6. (in Chinese)  
许敬, 刘滨, 杨俊彦, 等. 烟幕干扰与复合导引头对抗策略研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 448(2): 1-6.
- [3] YU Ning, LI Junshan, CHEN Wen, et al. Jamming efficiency simulation of smoke screen based on SNR [J]. Modern Defence Technology, 2011, 39(5): 171-174. (in Chinese)  
余宁, 李俊山, 程文, 等. 基于 SNR 的烟幕干扰效果仿真[J]. 现代防御技术, 2011, 39(5): 171-174.
- [4] WANG Yuxuan. Pyrotechnics foundation [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2017. (in Chinese)  
王玉玄. 烟火技术基础 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2017.
- [5] JIN Wenping, FU Wenxing, XIAO Kun, et al. Design of infrared image injector system in infrared seeker semi-physical simulation [J]. Electronic Design Engineering, 2014, 22(2): 159-164. (in Chinese)  
靳文平, 符文星, 肖堃, 等. 红外导引头半实物仿真中红外图像注入器设计 [J]. 电子设计工程, 2014, 22(2): 159-164.
- [6] WANG Zhigang, FU Xin, SHANG Jubang, et al. Simulation research on IR target imaging based on Vega [J]. Electro-Optic Technology Application, 2013, 28(3): 73-76. (in Chinese)  
王志刚, 付欣, 尚举邦, 等. 基于 Vega 的红外目标成像仿真研究 [J]. 光电技术应用, 2013, 28(3): 73-76.
- [7] HU Xiaojia, CHEN Zhanhui, BAI Yun, et al. Design of dynamic performance test system for infrared imaging seeker [J]. Infrared Technology, 2017, 39(12): 1078-1082. (in Chinese)  
胡小江, 陈战辉, 白云, 等. 红外成像导引头动态性能测试系统设计 [J]. 红外技术, 2017, 39(12): 1078-1082.