

# 红外烟幕干扰效果评价方法

韩 洁, 张建奇, 何国经

(西安电子科技大学 技术物理学院, 陕西 西安 710071)

**摘要:** 讨论了红外成像制导的烟幕弹干扰手段, 介绍了国内外红外烟幕技术的发展状况。烟幕技术的研究首先应确定一种干扰效果的评价方法, 重点讨论了烟幕干扰效果的评价方法, 并对已有的方法进行总结, 将其分为实验测定法和理论计算法两大类, 分别进行了比较分析; 然后, 介绍一种能够评价烟幕对目标空间信息干扰效果的完整思路。

**关键词:** 红外烟幕; 透过率; 干扰效果; 信噪比

**中图分类号:** TN21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2004)01-0001-04

## Estimation technology of the infrared smoke interference effect

HAN Jie, ZHANG Jian-qi, HE Guo-jing

(School of Technical Physics, Xidian University, Xian 710071, China)

**Abstract:** Facing the serious threaten of IR imaging guided missile, infrared imaging guided countermeasures play a more and more important role nowadays. The domestic and international development of screen smoke technology are presented. To study smoke screen, it's necessary to confirm an estimation technology of it, which is the main content of this paper. At first, the existed countermeasure effect evaluations of smoke are summarized and classified into experimental measurement and theoretical calculation. In the end, a way for effect evaluation of smoke fading location information is presented.

**Keywords:** Infrared smoke; Transmissivity; Interference effect; SNR

### 0 引言

红外成像制导是一种使导弹威力倍增的高效费比技术, 不仅命中率高, 而且抗干扰能力强, 已是攻击海、陆、空各种目标的主战兵器和首要威胁。这对电子对抗提出了严峻的挑战, 急需尽快完善相应的干扰

措施, 以便对抗日益发展成熟的红外成像制导武器。

目前在红外成像制导对抗技术中, 施放烟幕是一种应用广泛、简便有效的无源干扰手段。烟幕剂扩散系数小, 所产生的烟幕对光信号有较大的吸收和散射作用, 对红外、可见光等均有强烈的消光效应, 能够大大衰减目标与背景各点的红外辐射能量, 使热成像系统的信噪比降低以致于得不到清晰的热图像, 从而起

收稿日期: 2002-07-10; 修订日期: 2003-09-08

作者简介: 韩洁(1977-), 女, 河南开封人, 硕士, 主要从事红外成像制导对抗的仿真研究。

到保护目标的目的。烟幕材料以及发射控制技术的研究应根据最佳干扰效果来进行,因此,干扰效果的定量评估可对烟幕的论证、研制、生产直至使用提供可靠的保障,也是衔接各阶段工作的软件接口。

## 1 烟幕弹的国内外发展状况

### 1.1 国外烟幕弹研究发展状况

国外大力发展全波段红外烟幕剂,使传统烟幕衰减的波长范围从可见光扩展到红外波段(0.38~14 μm)。美国的 XM76 烟幕弹能提供遮蔽可见光至中远红外频带辐射的极好烟幕;瑞典 FFV 军械公司研制的 155 mm 炮弹产生的红外烟幕可持续 180 s,120 mm 炮弹的烟幕可持续 150 s;法国已研究出一种燃烧时能产生大量直径为 1~14 μm 炭粒的发烟剂,可将目标及背景发射的波长为 0.4~14 μm 的可见光及红外辐射“切断”<sup>[1]</sup>。目前从国外烟幕材料来看,发烟剂主要为磷烟、油烟、HC 烟幕、CP 烟幕和恰负(CHAFF)烟幕<sup>[2]</sup>。国外不断改造无源干扰弹药装备,其速度之快、品种之多是令人惊叹的。

### 1.2 国内烟幕弹研究发展状况

我国在烟幕弹的研制方面起步较晚,目前国内研制的燃烧型抗红外烟幕对 3~5 μm 中红外波段的辐射有较好的消光作用,一般可遮蔽 90% 以上的红外光;对 8~14 μm 远红外波段的辐射,消光效果并不理想,透过率一般在 40% 以上<sup>[1]</sup>。就我国所处的国际地位和国防实力来说,现有的研究及装备与国外相比差距较大,深入开展我国的无源对抗技术研究,快速研制出新一代烟幕弹药更新现役装备是刻不容缓的<sup>[3]</sup>。

## 2 烟幕干扰效果的测定和评价方法

目前虽然已有一些关于烟幕弹对红外成像制导干扰效果评估的探讨和研究,但是还没有一个统一成熟的评价方法,为了对烟幕材料的遮蔽特性做出客观的定量评价,有待于对已存在的各种方法进行比较,为选择一种切实可行的方法提供借鉴参考。

关于烟幕干扰效果的评价方法主要分为两类:实验测定法和理论计算法。

### 2.1 实验测定法

烟幕性能评价的实验测定法按试验环境条件分为实验室烟幕箱评价方法、中小型风洞评价方法和野外评价方法 3 种。在烟幕箱中进行烟幕性能测试,具有能人为控制环境条件、测试项目较多、方便重复测试的优点,所以被较多采用;风洞法模拟野外气象条件和地理条件,可测烟幕的流场等各种参数,较烟幕箱的实验方法复杂,但更接近实战情况;野外评价法把野外场地作为大实验室,现场摆放各种测试仪器,优点是与实际战技情况相符,缺点是由于测试时的环境条件(温度、湿度、风力、风向等)不能人为控制,而且使用的发烟剂量大,烟幕覆盖范围宽,扩散快,数据重复性差。

在实验室对烟幕性能的测量是定量评定烟幕干扰效果的初步依据,现在以烟幕箱测试为例,阐述实验测定方法的原理。

透过前光强为  $I_0$ ,透过后光强为  $I_t$ ,烟幕透过率为<sup>[4]</sup>:

$$\tau_\lambda = I_t / I_0 \times 100 \% \quad (1)$$

透射光经分光计变为单色光,被探测器接收并转化成电信号,通过多波段红外辐射计处理后,光能量被转化成电压值,并经放大,由晶体管毫伏表显示。此光度值和未经衰减的光度值相比较便可得到烟幕透过率。实验原理如图 1 所示。

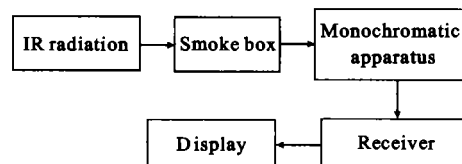


图 1 烟幕测试原理图

Fig. 1 Principle of smoke testing

消光系数表征烟幕对入射光辐射衰减的能力大小,可按式计算<sup>[5]</sup>:

$$\alpha(\lambda) = -\frac{1}{c_m L_t} \ln \left[ \frac{I_t(\lambda)}{I_0(\lambda)} \right] \quad (2)$$

式中  $c_m$  为烟幕的质量浓度, kg/m<sup>3</sup>;  $L_t$  为光源与探测器的距离, m。

实验测试烟幕的主要内容是烟幕的透过率、质量密度、烟幕的粒子大小和分布。使用的仪器主要有亮

度计、红外分光光度计、激光测距仪、热像仪、滤膜过滤器、尘埃质量浓度仪、分子撞击器、粒子计数器、粒子图像分析仪等。

综合评价烟幕的遮蔽效果,除了依据烟幕的透过率曲线外,还需要根据试验测得以下参数:(1)热像仪的工作波段;(2)烟幕尺寸;(3)烟幕粒子浓度(单位体积里布放烟幕剂的质量或单位体积的烟幕粒子数);(4)当时的环境条件(温度、湿度等)。在烟幕箱中进行烟幕性能试验,实验条件可以人为控制、测试项目多,是筛选和评价发烟剂非常重要的一步,设备一经建立,可以长期使用。根据系统的大量测量计算数据,可以进行经验总结,归纳出一定的数值评价标准。

## 2.2 理论计算法

理论推导烟幕红外光谱透过率或消光系数对光电辐射的遮蔽效果并进行运算,从理论上能够进行深入的研究。理论计算法根据不同层次的需要,可分为透过率级的计算法和反映在红外成像系统上信噪比级的计算法。

### 2.2.1 烟幕透过率等级法

对于烟幕,由于其颗粒较大,因此可用 Mie 理论解释其散射, Mie 散射理论对于平面电磁波照射下的各项同性均匀球形颗粒散射面的精确计算具有普遍意义,下面是理论公式。

对于烟幕的消光,最重要的是衰减效率因子  $Q_c$ 、散射效率因子  $Q_s$ 、吸收效率因子  $Q_a$ <sup>[5]</sup>:

$$Q = \frac{2}{X^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \operatorname{Re}(a_n + b_n) \quad (3)$$

$$Q_s = \frac{2}{X^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (|a_n|^2 + |b_n|^2) \quad (4)$$

$$Q_a = Q - Q_s \quad (5)$$

式中  $X = \frac{2\pi r}{\lambda}$ ,  $r$  为颗粒半径,  $\lambda$  为入射光波长;  $a_n$  和  $b_n$  都是负函数,由 Bessel 函数决定。用下式可计算单位体积粒子群的总消光系数、散射系数和吸收系数:

$$K_i = N\sigma_i = N\pi r^2 Q_i \quad (i = a, s) \quad (6)$$

式中  $N$  为粒子浓度。如果知道烟幕的浓度分布  $c(l)$ ,由朗伯-比尔定律可以求得光的透过率为:

$$\tau = e^{-kL} = \exp \left[ - \int \frac{c(l)}{\frac{4}{3}\pi r^3 \rho} \pi r^2 Q_c dl \right] = \exp \left[ - \int \frac{3c(l)Q_c}{4r\rho} dl \right] \quad (7)$$

式中  $\rho$  为烟幕颗粒的密度;  $L$  为传输距离。

利用 Mie 散射理论的消光模型,按照烟幕对工作波段的透过率值可以将遮蔽效果分为 4 个等级,即很好(目标、背景无区别),好(目标、背景分辨不清),中等(目标模糊可见),不好(目标清楚可见)<sup>[6]</sup>。另外,还可以确定干扰烟幕在不同条件下的最佳干扰粒径、烟幕浓度分布、最小光程等参数。与实验测定方法相比,理论计算方法相对较灵活,计算不同参数控制下的烟幕遮蔽效果是非常简便的。但是这种计算烟幕透过率的方法还有一定的局限性,它只表示了衰减的强弱,对不同的探测系统没有针对性。

### 2.2.2 信噪比评价方法

透过率等级评价方法在一定程度上反映了烟幕遮蔽效果的好坏,但是,对有烟幕时热像图的像质评价不应局限于这个阶段。考虑到导引系统的信噪比(SNR)是一个关键参数,因此还存在另一种评价模型,即采用信噪比与最小等效温差(NETD)的关系来评价烟幕的干扰效果。

对于凝视制导系统,设目标为灰体,发射率为  $\epsilon$ ,  $\Delta T$  为目标背景温差,  $\eta_c$  为凝视系统的凝视效率, SNR 为<sup>[7]</sup>:

$$\text{SNR} = \frac{\epsilon \Delta T \tau_a \eta_c}{\text{NETD}} \quad (8)$$

式中  $\tau_a = \tau_{\text{air}} \tau_{\text{fog}}$ ,  $\tau_{\text{air}}$  是大气透过率,可参照典型的大气模型,采用 LOWTRAN7 软件计算,  $\tau_{\text{fog}}$  是计算所得的烟幕透过率; NETD 是成像系统的噪声等效温差。在计算信噪比时,透过率采用的是大气和烟幕共同作用的结果,因此,需要考虑探测器与目标的距离和烟幕厚度。

对于制导系统,不同的导引系统有不同的信噪比阈值,在红外烟幕形成干扰后,若小于某阈值,则导引头就失去了对目标的探测,干扰达到了应有的效果。这种理论计算方法继承了透过率计算方法的优点,并且针对探测成像系统进行了干扰效果的进一步研究,

相对以上实验测定法和烟幕透过率等级法,更加实用。

### 3 理论计算干扰评估方法的思路<sup>[8~11]</sup>

根据以上的介绍,实验测定法比较直接,是定量评价烟幕质量的重要依据,而烟幕在使用中性能究竟如何,尚需进行野外测试才能给出全面的评价,但是受自然条件的限制,任务量十分可观。理论计算法相对于实验室测量法对客观条件的要求少,充分体现出其灵活性。透过率级的评价比较合理地表述了烟幕对目标辐射的衰减作用。凝视成像导引头上信噪比级的计算模型,对军事光电对抗的研究工作有重大意义。

在具体运用某一种方法时可以根据要求有所变通(例如,可以将烟幕干扰的一些效果参数代入制导弹探测的作用距离方程,随着烟幕衰减作用的增加,会造成探测距离的减少),以多方探讨评价方式、准则来增强烟幕干扰效果评价方法的适用性。

上述理论计算烟幕透过率以及导引头信噪比均局限于静态,没有反映图像空间信息的实时衰减情况。因此提出烟幕在空中的扩散受各种条件的制约,实际上,烟幕的浓度是不确定的,对成像系统来说不同方位所受干扰的程度也不一样。要想确定烟幕对目标空间信息干扰的程度,首先要建立烟幕扩散的数学模型,根据连续方程和梯度-输送理论,烟幕扩散应遵循方程<sup>[12]</sup>:

$$\frac{dc}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial c}{\partial z} \right)$$

$$\frac{dc}{dt} = \frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z}$$

式中  $c$  为平均浓度; $K_x$ 、 $K_y$ 、 $K_z$  分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的扩散系数; $u$ 、 $v$ 、 $w$  分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的平均风速。

当确定参数和初始条件以及边界条件后,就可以计算任意时刻 $(x, y, z)$ 坐标位置处烟幕的浓度 $c$ <sup>[13]</sup>。目标和背景图像在探测器视场内需转化为二维空间图像,此时,将二维空间坐标 $(x, y)$ 处的浓度表示为 $c_{xy}(z)$ , $z$ 是三维空间中垂直于视场的坐标轴,表现在透过率计算公式中就是浓度表达式 $c(L)$ 中的光程 $L$ ,将 $c_{xy}(z)$ 沿 $z$ 方向的浓度进行积分,然后代入透过率公式(7),得出视场内某一点 $(x_0, y_0)$ 处的透过率,进而可以得到视场内全部像素点的透过率,最终可以

描述目标和背景的红外图像在任意时刻通过烟幕之后在探测器上所呈现的图像信息。根据人眼观察或者跟踪系统图像预处理中的图像分割算法,均能评价出烟幕干扰之后是否还能分辨出目标和背景。这种做法不仅定量描述了烟幕对目标图像辐射的衰减作用,而且可以很好地反映对图像空间信息的破坏作用,当确定一种成像制导系统的识别跟踪算法之后,此方法是一种值得进一步研究和探讨的烟幕干扰评价方法。实现步骤为:给定初始浓度分布及风速 $\rightarrow$ 计算时间 $t$ 时 $(x_0, y_0, z)$ 点浓度 $c_t \rightarrow c_t$ 对 $z$ 积分,得出 $(x_0, y_0)$ 处浓度 $c_{x,y}(l) \rightarrow c(l)$ 代入公式(7),求此点 $\tau_{x_0, y_0} \rightarrow$ 得到探测器上整幅图像的透过率值,可以映射到灰度值,观察干扰前后效果。

### 4 结束语

总结了烟幕对红外成像干扰效果的评价方法,并且进行了比较,分别给出各种方法的优缺点。可以根据具体的要求和具备的客观条件,选择相应的评估方法进行评价。提出了一种详细的评价思路,计算烟幕的扩散模型,并进一步实时计算出透过烟幕之后在红外制导系统上的像质情况,计算的基本原理已经给出,在具体应用时还需要进行更为详尽的细节研究。

### 参考文献:

- [1] 周刚,马颖. 红外成像制导与多功能烟幕[J]. 舰船电子对抗, 1997, 20(1): 4-9.
- [2] 罗雄文. 烟幕干扰技术的现状与发展趋势[J]. 光电对抗与无源干扰, 2001, (4): 15-19.
- [3] 刘非玉,李宁. 附加物对燃烧性抗红外烟幕性能的影响[J]. 光电对抗与无源干扰, 2001, (2): 11-16.
- [4] 钟志农. 烟幕消光的数值模拟[J]. 光电对抗与无源干扰, 1999, (1): 14-19.
- [5] 熊晓伟. 红外气溶胶烟幕干扰效果的定量评估[J]. 系统工程与电子技术, 2001, 23(2): 39-41.
- [6] 周刚. 红外成像系统对目标的发现和识别概率[J]. 红外技术, 2001, 23(3): 16-18.
- [7] 高建明,凌永顺,时家明,等. 干扰烟幕中最佳消光参数的定量分析与研究[J]. 光电对抗与无源干扰, 1997, (3): 1-6.

(下转第 13 页)

### 3 偏振转换集成光学多功能器件原理及制作

偏振转换集成光学多功能器件的原理如图4所示,其中 $g_1$ 和 $g_2$ 端的位相调制器部分采用退火质子交换波导(APE),实现天然的高偏振特性,PM<sub>1</sub>、PM<sub>2</sub>为两个电光调制器;其他波导部分为钛扩散波导,以支持两个偏振模;PS采用双模耦合方式实现偏振模分离,使TE模直通, TM模直通;PT采用声光模转换器,实现TE和TM偏振模的相互转换,目前制作的PS偏振模分离比达到20 dB;PT模转换效率达到99%以上,声波功率小于20 mW。

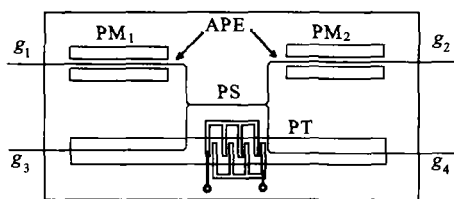


图4 TMIOC原理

Fig. 4 Principle of TMIOC

使用器件时用与位相调制相同的时钟脉冲来调制PT的驱动射频信号,通过延时位相和脉冲周期的调整,实现位相调制信号的输入和第M阶再入信号的同步输出,由于目前使用的声光模转换器PT的响应速度为 $\mu\text{s}$ 量级,因此为减小低阶再入信号偏振模的再转换输出率,所使用的光纤长度一般以200 m为宜,相应M数约为10,与前述无SOA陀螺系统的要求一致,适合于高精度光纤陀螺系统(光纤传播距离2 000 m)的制作。

当改善PT的响应速度后,可减小光纤的长度,同时改善信号处理的质量,这可通过电光效应型器件的使用,或组合串联型声光模转换器的使用达到目的。

### 4 结 论

根据以上讨论,给出了一种改进型的再入式集成光学光纤陀螺方案,通过偏振转换集成光学多功能器件的使用,有望消除光纤环多次再入的本征损耗,减小总光损耗,提高信噪比,并可实现无光放大器的高灵敏度光纤陀螺系统。TMIOC器件的主要元件已制作完成,性能指标达到了国际先进水平,目前的器件指标适合较长的光纤长度和较少的再入次数,满足高灵敏度光纤陀螺系统的要求;通过提高器件指标,如进一步提高响应速度,降低插入损耗,可实现较短的光纤长度和较多的再入次数的小型化、高灵敏度、低成本的第二代光纤陀螺系统的制作。

#### 参考文献:

- [1] Hotate K. Future evolution of fiber optic gyros[A]. SPIE[C], 1996, 2837, 33.
- [2] Lefevre H C, Vntoux S, Papuchon M, et al. Integrated optics: a practical solution for the fiber optic gyroscope[A]. SPIE[C], 1986, 719, 101-112.
- [3] 张桂才, 杨清生. 采用双Y型LiNbO<sub>3</sub>集成光路的闭环光纤陀螺研究[J]. 红外与激光工程, 2000, 29(1):57-61.
- [4] Kung A, Thevenaz L, Robert P A. Polarization analysis of Brillouin scattering in a circularly birefringent fiber ring resonator [J]. J Lightwave Technol, 1997, 15(6):977-982.
- [5] Feced R, Parker T R, Farhadiroushan M, et al. Power measurement of noise-initiated Brillouin applications[J]. Opt Lett, 1998, 23(1):79-81.
- [6] 高峰, 赵林, 田伟, 等. 再入式集成光学陀螺原理研究[J]. 红外与激光工程, 2001, 30(3):198-201.

(上接第4页)

- [8] 刘正云. 红外烟幕遮蔽效果的评价[J]. 光电对抗与无源干扰, 1996, (2):9-12.
- [9] 李瑾. 国外红外干扰技术现状及发展趋势[J]. 飞航导弹, 1995, (4):25-29.
- [10] 徐代升, 李钟敏, 杨英科. 用红外成像技术外场研究红外烟幕的遮蔽性能[J]. 红外与激光工程, 2000, 29(1):69-72.

- [11] 熊晓伟. 光电干扰评价的研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 1996.
- [12] 桑建国, 温市耕. 大气扩散的数值计算[M]. 北京:高等教育出版社, 1990.
- [13] 钟志农, 黎全. 烟幕扩散的计算机模拟[J]. 光电对抗与无源干扰, 1999, (3):18-23.