

·测试、试验与仿真·

烟幕消光效能试验测量方法研究

陆 斌¹, 吕俊伟¹, 孙晓颖²

(1.海军航空工程学院, 山东 烟台 264001; 2.烟台警备区司令部, 山东 烟台 264001)

摘要:利用发烟罐结合外场运动目标,进行外场烟幕的消光和遮蔽效果试验,通过多光谱成像传感器采集数据,验证和修正烟幕的消光模型。得到的试验数据经过分析及与烟幕经典理论计算方法对比,得到了其消光效果规律,符合工程经验值。在外场试验过程中采集了包括可见光、红外中波和长波成像传感器和激光功率计相关测量数据,为烟幕的使用和对成像传感器影响效果提供了依据。

关键词:烟幕;消光;外场试验;多光谱

中图分类号:TN972⁺.4

文献标识码:A

文章编号:1673-1255-(2012)02-0070-04

Research on Measuring Method of Smoke Extinction Efficiency Test

LU Bin¹, LV Jun-wei¹, SUN Xiao-ying²

(1. Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China;

2. Yantai Region Guard Headquarter, Yantai 264001, China)

Abstract: Combining with the moving target in the field, the smoke pot is used for the efficiency test of the smoke extinction and screening in the field. The smoke extinction model is modified and verified by the data acquisition from the multi-spectra imaging sensor. The obtained experimental data are analyzed and compared with the calculation method of the smoke classical theory, and the experimental principle is obtained and proved to meet the engineering experience value. The measurement data about the visible sensor, mid-wave infrared sensor, long wave imaging sensor and laser power meter are collected during the field test, which provides the basis for the smoke application and the imaging sensor efficiency.

Key words: smoke; extinction; field test; multi-spectrum

烟幕是一种应用广泛的无源干扰手段,具有成本低、使用简易方便等特点。烟幕的消光效果直接影响到对成像跟踪、探测等装备的精度,由于外场烟幕试验代价大、投入高,同时受到多种不可控因素的影响^[1],容易产生导致试验效率不高的问题,因此,科学的选择典型发烟装备进行典型环境条件下的外场试验,并科学、合理地采集相关数据,可以达到事半功倍的效果。

介绍利用发烟罐结合外场运动目标,进行外场烟幕消光效果试验,通过多光谱成像传感器采集数据,验证和修正烟幕的消光模型,利用得到的试验数

据进行分析,以及与烟幕经典理论计算方法对比,得到了其消光效果规律,根据任务需要及各种方法的特点,在外场试验过程中采集了包括可见光、红外中波和长波成像传感器相关测量数据,修正典型的爆炸型、扩散型烟幕模型,通过对消光效果的结果分析,为烟幕的使用提供了依据。

1 烟幕消光机理与模型

各种烟幕之所以有不同的遮蔽或干扰效应,是由于构成烟幕的物质不同、粒子的形状不同、粒子按

质量(粒数)的分布不同,进而在自然环境下对光线的吸收、散射、折射的性能不同,对光辐射的消光效应不同,因此对可见光、红外等成像设备形成不同的遮蔽或干扰效果。

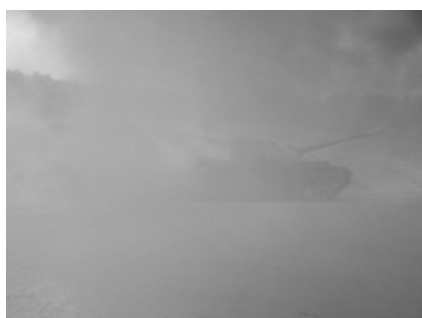


图1 烟幕对可见光的干扰效果

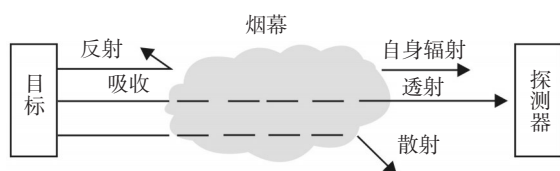


图2 烟幕对红外辐射的消光机理

烟幕对光辐射的衰减主要体现在散射方面,当目标与成像传感器间有烟幕介入时,由于它的散射作用而降低亮度对比度,总对比度用下式加以表达

$$C_L = \frac{I \cdot e^{-\alpha c L} - I' \cdot e^{-\alpha c L}}{I' \cdot e^{-\alpha c L} + G} = \frac{(I - I')e^{-\alpha c L}}{I' \cdot e^{-\alpha c L} + G} \quad (1)$$

式中, α 为烟幕的消光系数; c 为烟幕的浓度; L 为光线在烟幕中的传送距离; G 为烟幕的自身辐射亮度。

同时,烟幕作为一种空间扩散形式,其扩散模型具有粒子特性^[2],当光辐射被烟幕中的物质所吸收时介质的衰减系数 $\mu(\nu)$ 与浓度 c 成正比时

$$\mu(\nu) = \alpha_e \cdot (\nu)c \quad (2)$$

式中, α_e 为质量消光系数,其物理意义是光强约衰减到原来的36%时每克烟幕的截面积。 α_e 与粒子的种类、粒径大小分布、粒子的形状及取向、粒子的表面性质(粗糙度)、光的波长等因素有关。而当烟幕体系确定时,只与光的波长有关。因此,通常用该质量消光系数表示烟幕的消光特性。对于均匀烟幕,由 n 种不同微粒组成的烟幕在频率间隔为 $\Delta\nu$ 内的平均透过率为

$$\bar{\lambda}(\Delta\nu, L) = \frac{1}{\Delta\nu} \int_{\Delta\nu} \exp\left\{-\int_0^L \left[\sum_{i=1}^n a_{ei}(\nu, y) c_i(y)\right] dy\right\} d\nu =$$

$$\frac{1}{\Delta\nu} \int_{\Delta\nu} e^{-\int_0^L \left[\sum_{i=1}^n [\beta_i(\nu, y) + \delta_i(\nu, y) c_i(y)] dy\right]} d\nu =$$

$$\frac{1}{\Delta\nu} \int_{\Delta\nu} \exp\left\{-\int_0^L \left[\sum_{i=1}^n \alpha_i(\nu, y) + \gamma(\nu, y)\right] dy\right\} d\nu \quad (3)$$

式(3)使用的条件是烟幕粒子对光的吸收与散射不受周围粒子的影响(即不考虑多次散射,但当烟幕的光学厚度大到一定程度时,多次散射不能忽略)。这一条件只有当光谱透过率约大于等于5%时才成立。

外场烟幕系统受气象、地形、环境等因素影响较明显,一般模型的建立需采用典型的外部条件^[3]。例如假设地面无吸收和吸附作用,烟幕本身是无沉降的被动成分,地面对污染物的作用犹如一个全反射体,风速大于1 m/s,风向恒定,地面水平均匀,由“梯度传送理论”及“统计理论”推导出地面连续点源浓度高斯(正态)型浓度模式

$$C(x, y, z, H) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \left\{ \exp\left[-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} \quad (4)$$

式中, $C(x, y, z, H)$ 为点 (x, y, z) 处的烟幕浓度(g/m^3), Q 为烟幕的释放速率(g/s), u 为释放期间的平均速度(m/s), H 为烟流的有效高度(m), σ_y 、 σ_z 为 y 方向和 z 方向的大气扩散方差,其中

$$\begin{cases} \sigma_y = \gamma_1 x^{\alpha_1} \\ \sigma_z = \gamma_2 x^{\alpha_2} \end{cases} \quad (5)$$

式中, $\gamma_1, \gamma_2, \alpha_1, \alpha_2$ 是与大气稳定度及地形有关的参数。

2 基于发烟罐外场试验的消光与遮蔽效果测量

影响烟幕大气扩散及分布的主要气象因素是风向、风速、湍流强度、垂直温度梯度、混合层高度及空气湿度等。风向决定了烟幕流动的方位;风速表征了大气对烟幕的输送速率;湍流强度显示了大气的扩散能力;混合层高度决定了烟幕扩散空间大小;空气相对湿度影响烟幕的产率及浓度^[4]。而对于烟幕

干扰试验,更重要的是烟幕的浓度和烟流的形状,这与大气温度分布有着密切的关系。

大气温度随高度不同的分布有三种类型:一种是不稳定状态,即温度随高度的增加而降低;一种是中性平衡状态,此时温度随高度没有变化,称为等温;一种是平衡态,此时温度随高度的增加而增加,气温逆转,简称递增。

在晴朗无云的夜晚,当风比较小时,地面因强烈的有效辐射而很快冷却,近地面的气温也随之下降。离地面越近空气受地表的影响越大,因而降温越厉害,于是形成了自地面开始的逆温,如图3b所示。以后随地面辐射冷却的加剧,逆温逐渐向上扩展,黎明时达到最强,如图3c所示。日出以后,太阳辐射逐渐加强,地面很快增温,逆温自下而上地消失,如图3d、图3e所示(图中的横轴为绝对温度,纵轴为距地面的高度)。

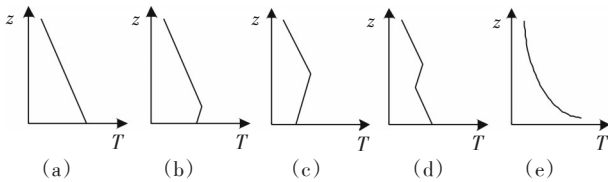


图3 辐射逆温生消过程

图4为烟幕施放过程中的几种基本情况,在试验过程中,为了能够与理论分析的条件配合,烟幕干扰试验应尽可能选择逆温状态^[5],对测量及遮蔽效果有较好的保证。

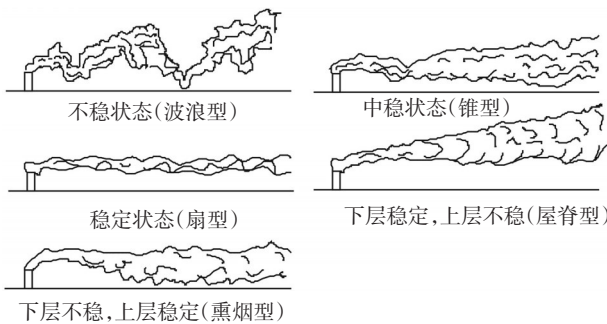


图4 烟幕的几种基本情况

在外场烟幕试验中,为了充分发挥试验的测量效率,应尽可能把各波段的成像探测器科学地规划和放置^[6],同时,利用激光器和激光功率计可以更准确地定量测量烟幕对相应波段光辐射的消光效果^[7],图5为外场烟幕试验的各个基本要素的组成。

试验的基本流程为:合理选择烟幕释放场地,规划各传感器相对位置关系;测量场地环境气象条件

测量,各相关仪器的校准;设计目标运动的路线,目标状态记录;设计烟幕源单个、多个的释放方案及效果检验;典型时机和典型条件的发烟试验;各波段成像的实时记录;对各仪器结果进行分析归纳,查找影响因素等。

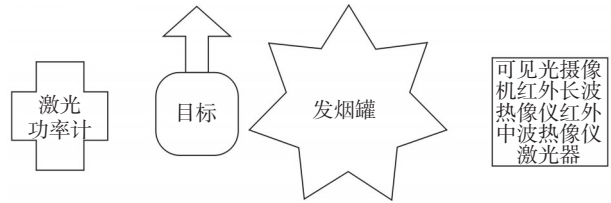


图5 外场试验中各试验要素的基本组成

3 试验结果及分析

通过改变发烟罐的数量及其相对位置,可以测量不同烟幕条件的消光效果^[5]。在测量过程中,有两个问题需要在烟幕施放之前解决:

一是激光器的准直,即激光器的光波束必须能够被激光功率计准确接收^[8],这在野外条件下非常重要,同时也需要反复细致的调试,并随时记录激光功率值和测试条件^[9];

二是成像传感器的校准^[10],包括可见光波段、红外波段,由于烟幕试验是典型的面源辐射,使用成像传感器可以更加客观地反映空间的消光效果^[11],这里测量的重要参数是光谱相对透过率,在一个相对稳定的状态下测量出一个参考值,以此作为对比值^[12],实现光谱相对透过率的测量,从而得到烟幕遮蔽和消光效果。

图6为不同烟幕浓度时各成像传感器得到的相对透过率。

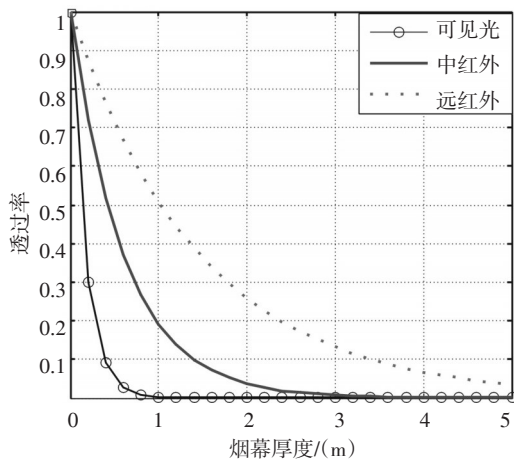
最后应对测量结果与理论计算进行对比分析,并查找影响试验结果的因素。

由于成像传感器测量反映出来的是灰度的变化,其变化可以反映相应的空间辐照度变化,并以此形成烟幕图像各像素的灰度关系,在图像的量化过程中采用均匀量化,辐照度与灰度呈线性关系。设烟幕辐照度的最大值和最小值分别用 E_{max} 和 E_{min} 表示,则每级灰度对应的辐射间隔为

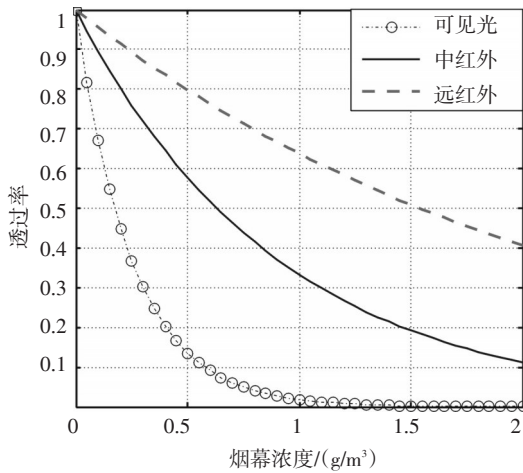
$$n = \frac{E_{max} - E_{min}}{G_r} \tag{5}$$

图像对应的点的灰度值为

$$G(x, y) = \text{int} \left(\frac{E_{\max} - E_{\min}}{n} \right) \quad (6)$$



(a) 烟幕浓度为 1.5 g/m³ 时的透过率



(b) 烟幕厚度为 1 m 时的透过率

图6 不同烟幕浓度的光谱透过率

4 结 论

通过对发烟罐的多种施放条件下的野外试验测

量,得到了其可见光、中远红外的消光效果和遮蔽规律,通过各试验条件的变化和组合,得到其透过率与烟幕浓度的关系,与工程经验值基本符合。同时,利用激光器和功率计测量了烟幕消光的绝对数值变化及其规律。以上的测量结果,为烟幕的施放以及成像探测、跟踪等方面的研究提供了依据。

参考文献

- [1] 焦清介,霸书红. 烟火辐射学 [M]. 北京:国防工业出版社,2009.
- [2] 姚禄玖,高钧麟,肖凯涛,等. 烟幕理论与测试技术 [M]. 北京:国防工业出版社,2004.
- [3] 杜石明,曾凯. 对红外烟幕消光机理及性能的研究 [J]. 电光与控制,2011, 18(1):90-93.
- [4] 程翔,汪伟. 多频谱红外烟幕干扰弹的反制方法[J]. 激光与红外,2008, 38(11):1110-1113.
- [5] 程文,李俊山. 红外辐射在烟幕中的蒙特卡洛模拟[J]. 红外技术,2010,32(11):672-675.
- [6] 贺剑锋. 红外干扰弹干扰性能测试系统[J]. 兵工自动化,2011,30(6):84-87.
- [7] 徐先云. 红外烟幕干扰多威胁目标研究[J]. 舰船科学技术,2009, 31(11):76-79.
- [8] 王继光. 红外烟幕干扰效果的测试与评估[J]. 舰船电子对抗,2007,30(1):60-63.
- [9] 程文. 基于RPPM的烟幕透过率计算方法[J]. 激光与红外,2010,40(9):985-988.
- [10] 李毅. 非球形微粒及其形成烟幕的消光机理研究 [D]. 南京:南京理工大学,2001.
- [11] 沈涛. 动态烟幕透过率测试方法研究[J]. 电光与控制,2007,14(5):124-126.
- [12] 梁阔,冯源. 激光精确制导技术及其干扰技术分析[J]. 飞航导弹,2011(2):80-83.

欢迎利用期刊网站浏览本刊已发表文章

为了满足读者对《光电技术应用》期刊文章的快速、方便、阅读需求,《光电技术应用》期刊网站(网址为:<http://www.gdjsyy.com>),为读者提供了《光电技术应用》期刊2009~2011年已发表文章的在线浏览。读者可在过刊目录下,查阅2009~2010年期刊各期目录,点击文章题目或摘要,阅读文章全文。欢迎广大读者登陆期刊网站,及时了解《光电技术应用》期刊已发表文章的最新信息。

《光电技术应用》编辑部