

文章编号:1006-9941(2021)12-1144-08

五帧差分法提取实测红外烟幕图像的特征参数

郭爱强,高欣宝,李天鹏,戴俊杰,李笑楠

(陆军工程大学石家庄校区,河北石家庄 050003)

摘要: 为提取实测红外烟幕的效应特征量(烟幕宽度、烟幕高度、烟幕遮蔽面积、遮蔽时间)和运动特征量(垂直方向、水平方向的扩散速度)参数,设计了野外测量红外烟幕的试验场地布置方案,应用红外热像仪采集了红外烟幕弹在112 s内爆炸和扩散过程的视频数据,采用了五帧差分法对红外热像仪视频序列中的红外烟幕进行分割和提取,得到了红外烟幕的效应特征量区域和运动特征量区域,并根据场地布置的几何关系对试验结果进行了风向修正,以红外烟幕图像像素点为基本单元,对红外热像仪视频序列中每一帧烟幕的效应特征量区域和运动特征量区域中每一个像素点所代表的实际烟幕高度数值和宽度数值进行了求解,进而得到红外烟幕的效应特征量和运动特征量参数。经实测红外烟幕视频分析验证,该方法可以快速提取红外烟幕特征参数,其爆炸瞬间烟幕宽度、烟幕高度、烟幕遮蔽面积迅速增加至4.7 m,5.2 m,24.2 m²,水平沿风速方向的烟幕前沿扩散速度达到了126 m·s⁻¹,垂直方向烟幕前沿扩散的速度达到了146.3 m·s⁻¹。对研究红外烟幕扩散仿真方程的修正、作战效能评估、作战运用具有较高的实际应用价值。

关键词: 实测图像;红外烟幕;五帧差分法;效应特征量;运动特征量

中图分类号: O383; TJ5

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2021075

1 引言

随着电子对抗的升级,对电子对抗装备提出了更高的要求,不仅战术技术指标要过硬,而且要能够满足战时环境需要。红外烟幕弹具有优良的光电对抗效果、较强的战术应用机动性和较高的效费比,是应用最广泛的无源干扰手段,受到各国的青睐^[1]。通过向来袭精确制导武器发射红外烟幕弹,阻止精确制导武器正常的作战效能,以保护地面目标、部队行动掩护和支援、作战平台的自卫等重要目标或设施。红外烟幕弹爆炸形成的烟幕,其野外遮蔽性能更能真实反映红外烟幕弹的实战效能^[2]。红外烟幕弹所形成烟幕的作用空间和时间是评估发烟弹药的作战效能的指标之一,其作用空间有烟幕宽、烟幕长、烟幕高、烟幕遮蔽面积^[3-4]。目前,我国烟幕弹设计定型阶段主要是通过红

外热像仪等仪器采集烟幕弹的形成、扩散过程^[5-6]的视频,应用传统的图像处理方法,通过人工提取红外烟幕的特征参数,这样提取红外烟幕不仅耗时,而且不准确。如何在定型阶段、作战训练时快速准确的提取红外烟幕的这些参数是现阶段面临的一个难题。

随着数字图像处理技术的发展,图像预处理及分割^[7-8]、特征提取和判断匹配^[9],并衍生出多种应用,例如谷歌的智能医疗诊断^[10]、百度的无人驾驶汽车^[11]、高清监控高速普及,采集图像信息日益丰富,图像视频识别领域得到不断拓展与应用^[12],其中也给红外烟幕图像分割与提取带来了便利。运动目标检测常用的方法有帧间差分^[13]法,背景差分法^[14]、光流法等^[15]。刘敏杰^[16]使用了ViBe两帧差分方法提取了燃烧的火焰,熊昊等^[17-18]应用了SVM两帧差分方法提取了燃烧的火焰,但对火焰燃烧尺寸没有提取。为了提取和分割红外热像仪视频序列中的红外烟幕特征参数,其过程要克服靶场动态背景、日照等环境造成的干扰。两帧差分方法提取红外烟幕会导致靶场的场景过于复杂、烟幕扩散缓慢时,相邻图像帧中红外烟幕重叠区域大,导致像素值变化不明显,红外烟幕特征参数无法准确提取。

收稿日期:2021-04-07;修回日期:2021-09-13

网络出版日期:2021-10-21

作者简介:郭爱强(1993-),男,博士研究生,主要从事弹药系统设计与试验评估研究。e-mail:lfjgaq@126.com

通信联系人:高欣宝(1966-),男,博导,教授,主要从事弹药系统设计与试验评估研究。e-mail:xbgaotg@126.com

引用本文:郭爱强,高欣宝,李天鹏,等.五帧差分法提取实测红外烟幕图像的特征参数[J].含能材料,2021,29(12):1144-1151.

GUO Ai-qiang, GAO Xin-bao, LI Tian-peng, et al. Five-frame Difference Method for Extracting Characteristic Parameters from Measured Infrared Smoke Screen Images[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2021, 29(12):1144-1151.

为了克服以上缺点,本研究通过设计野外测量红外烟幕的试验场地布置方案,应用红外热像仪采集红外烟幕弹爆炸形成红外烟幕过程的视频,应用五帧差分法对红外热像仪成像视频序列中的红外烟幕进行分割,得到红外烟幕区域,定量提取红外烟幕效应和运动特征量参数,为红外烟幕弹的相关研究提供参考。

2 试验部分

2.1 试验仪器

制冷型慧眼8000红外热像仪;非制冷型SFJ-1型红外热像仪;气象仪,齐齐哈尔建华机械厂;Vertex Laser Geo激光超声波测高测距仪,品牌HAGLOF,瑞典。

2.2 场地布置

为了减少误差,红外热像仪光轴应尽量垂直于风向,红外烟幕弹与地面垂直。综合考虑红外烟幕弹爆炸形成的烟幕宽度、烟幕高度、红外热像仪等仪器视场角、测试距离等因素,估算红外烟幕弹到地面的高度,红外烟幕弹到红外热像仪之间的距离。应用激光测距仪测量红外烟幕弹起爆点到红外热像仪之间的距离 L_1, m ;两个参考架之间的距离 L_2, m ;按相关试验方法布设场地^[19-21],其布设场地如图1所示。

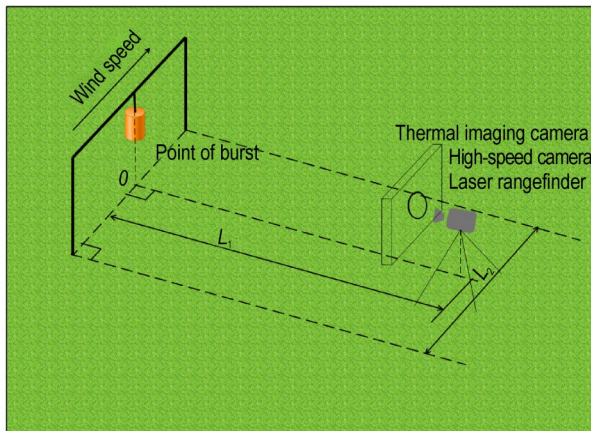


图1 红外烟幕测试系统布置示意图

Fig.1 Schematic diagram of smoke-screen test system layout

2.3 试验过程及结果

本研究选取的非制冷型SFJ-1型红外热像仪以 $25 \text{ 帧} \cdot \text{s}^{-1}$ 的频率进行采集。当地风速为 $1.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,红外热像仪的视场角为 23.4° ,风向与红外热像仪成像面的夹角为 4° ,红外热像仪到红外烟幕弹爆炸点的距离 L_1 为 503 m ,两个参考架之间的距离 L_2 为 6 m 。

当红外热像仪采集 $10 \sim 20 \text{ s}$ 后,起爆红外烟幕弹,当起爆红外烟幕弹后形成烟幕时,水平调整红外热像

仪视场。待红外烟幕占红外热像仪视场角的一半时,用激光测距仪测量红外烟幕几何中心位置到红外热像仪之间的距离 $L_5=512 \text{ m}$ 。需注意,红外烟幕弹持续发烟过程中不能调整摄红外热像仪采集方向,直至红外烟幕扩散超出红外热像仪视场,停止数据采集并保存红外烟幕弹作用过程的视频数据。本研究共采集了 112 s 内红外烟幕弹作用过程的视频,其视频第506帧、541帧、568帧如图2所示。



a. 506 frame



b. 541 frame



c. 568 frame

图2 红外烟幕弹实爆试验图

Fig.2 Explosion images of infrared smoke bomb

3 红外烟幕特征参数的提取方法

3.1 红外烟幕区域的分割和提取

红外烟幕区域的分割和提取是通过阈值 T 分割成二值图像。首先要计算出阈值 T ,由于红外烟幕视频中的最后一帧有烟幕的图片其烟幕浓度比较小,故选取红外烟幕视频中的最后一帧有烟幕的图片作为红外烟幕提取阈值的基准。通过提取烟幕图像中灰度的平均值,作为红外烟幕分割的阈值,这样提取的烟幕特征

参数更准确。接着从红外烟幕视频序列中读取连续的5帧图像, $g_{m-2}(x, y), g_{m-1}(x, y), g_m(x, y), g_{m+1}(x, y), g_{m+2}(x, y)$, m 表示红外烟幕图像序列中连续5帧图像中最中间的序号, (x, y) 代表红外烟幕图像的像素点。应用中帧烟幕图像 $g_m(x, y)$ 依次与另外4帧烟幕图像进行绝对值差分,并通过阈值 T 分割成二值图像,其计算见公式(1):

$$f_{m-2} = \begin{cases} 1 & |g_m(x, y) - g_{m-2}(x, y)| > T; \\ 0 & \text{other} \end{cases}$$

$$f_{m-1} = \begin{cases} 1 & |g_m(x, y) - g_{m-1}(x, y)| > T; \\ 0 & \text{other} \end{cases}$$

$$f_{m+1} = \begin{cases} 1 & |g_{m+1}(x, y) - g_m(x, y)| > T; \\ 0 & \text{other} \end{cases}$$

$$f_{m+2} = \begin{cases} 1 & |g_{m+2}(x, y) - g_m(x, y)| > T; \\ 0 & \text{other} \end{cases}$$

红外烟幕效应特征量提取是应用二值图像 $f_{m-2}, f_{m-1}, f_{m+1}, f_{m+2}$ 进行逻辑“与”运算得到红外烟幕效应特征量区域 D_m :

$$D_m = \begin{cases} 1 & f_{m-2} \cap f_{m-1} \cap f_{m+1} \cap f_{m+2} = 1 \\ 0 & \text{others} \end{cases}$$

当 $D_m=1$ 时,为红外烟幕效应特征量的像素点;当 $D_m=0$ 时,为靶场背景图像的像素点。

红外烟幕运动特征量提取是应用二值图像 $f_{m-2}, f_{m-1}, f_{m+1}, f_{m+2}$ 进行逻辑“差”运算得到红外烟幕运动特征量区域 D_{yun} :

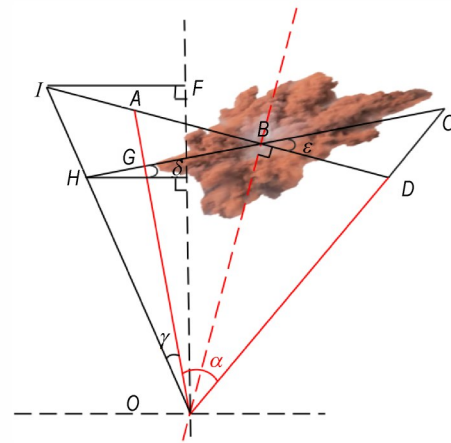
$$Q_{yun} = \begin{cases} 1 & f_m - (f_{m-2} \cap f_{m-1} \cap f_{m+1} \cap f_{m+2}) = 1 \\ 0 & \text{others} \end{cases}$$

当 $D_{yun}=1$ 时,为红外烟幕运动特征量的像素点;当 $D_{yun}=0$ 时,为靶场背景像素。

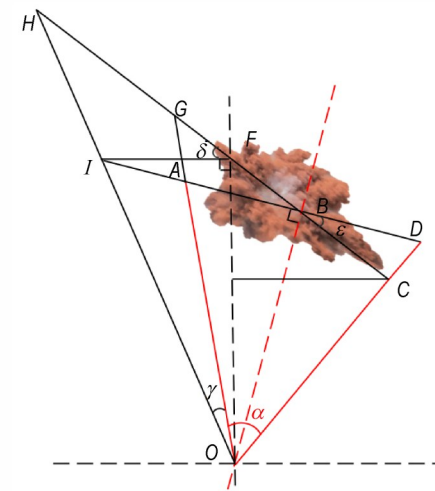
3.2 红外烟幕图像的风向修正

野外试验时,实际风向与理想风向的偏差是客观存在的,即实际风向要么偏离红外热像仪一侧,要么偏向红外热像仪一侧两种,其对应的几何关系如图3所示。考虑到试验场地地面风向对红外烟幕扩散的影响,减少计算过程中测试误差,按照视场布置的几何关系对试验结果进行风向修正,风向修正算法参照 GJB 5214.14-2003 特种弹效应试验方法^[21]。

图3中, ε 为该时刻实际风向与热像仪 CCD 成像面间的夹角的数值, $(^\circ)$; δ 为该时刻实际风向与红外烟幕预计扩散方向的夹角的数值, $(^\circ)$; α 为红外热像仪水平视场角, $(^\circ)$; HC 代表烟幕在水平面的实际扩散方



a. Actual wind direction deviates from the infrared camera



b. Actual wind is biased towards the infrared camera

图3 风向修正示意图

Fig.3 Sketch of wind direction correction

向, $(^\circ)$; IF 为激光测距机测量红外烟幕弹起爆点到红外热像仪之间的距离 L_1, m ; OF 为两个参考架之间距离的一半 L_2, m ; γ 为热像仪在初始位置偏离参考架的角度, $(^\circ)$ 。

从图3 a可知,实际风向导致烟幕扩散与预计扩散方向存在偏差,红外热像仪水平视场角中心线左侧红外烟幕到红外热像仪之间的距离比实际烟幕到红外热像仪之间的距离近,红外热像仪水平视场角中心线右侧烟幕到红外热像仪之间的距离比实际红外烟幕到红外热像仪之间的距离远,经过几何关系推导实际风向与红外热像仪成像面之间夹角 ε 按公式(4)计算。

$$\varepsilon = \delta + \frac{\alpha}{2} + \gamma - \arctan \frac{L_2}{2L_1}$$

图3b几何关系可知,红外热像仪水平视场角中心线左侧红外烟幕与红外热像仪之间的距离比实际红外

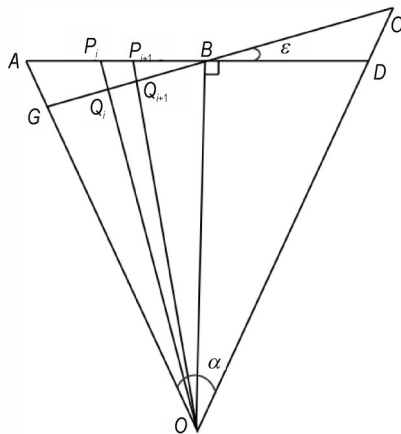
烟幕到红外热像仪之间的距离远,红外热像仪水平视角中心线右侧烟幕与红外热像仪之间的距离比实际红外烟幕到红外热像仪之间的距离近,经过几何关系推导实际风向与红外热像仪成像面之间夹角 ε 按公式(5)计算。

$$\varepsilon = -\delta - \frac{\alpha}{2} - \gamma + \arctan \frac{L_2}{2L_1} \quad (5)$$

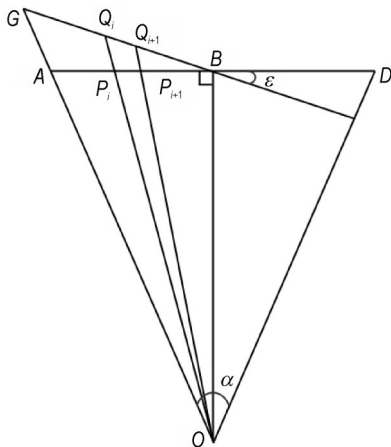
综上公式(4)和公式(5)分析, ε 为正值时,表示实际风向偏离红外热像仪; ε 为负值时,实际风向偏向红外热像仪。

3.3 烟幕特征参数的提取

分析发现,红外烟幕图像的每一个像素点与实际红外烟幕图像的每一个像素点高度和宽度均不相同,故需要对红外烟幕图像每一个像素点的高度和宽度进行提取,其红外烟幕像素点参数提取的几何关系如图4所示。



a. Smoke screen pixels deviate to the infrared camera



b. Smoke screen pixels deviate from the infrared camera

图4 烟幕像素点参数提取示意图

Fig.4 The diagram of extracting smoke screen pixel parameters

图中, GC 为实际风向, $(^\circ)$; OB 为红外热像仪到红外烟幕的实际距离 L_5, m ; AD 平行于红外热像仪与实际风向相交于 B ; P_i 为红外烟幕图像水平中心线左侧任意一个像素点, Q_i 为 P_i 点对应的红外烟幕像素点位置; P_{i+1} 为 P_i 点右侧的相邻像素点, Q_{i+1} 为 P_{i+1} 点对应的红外烟幕像素点位置。

通过几何关系,在图4a中,当红外烟幕图像的像素点位于热像仪图像水平中心线左侧时;在图4b中,当红外烟幕图像的像素点位于热像仪图像水平中心线右侧时, $BP_i, OQ_i, BP_{i+1}, OQ_{i+1}$ 的值,见公式(6)。进而求出任意一个热像仪图像像素点所代表的烟幕高度和宽度,见公式(7)。

$$\left\{ \begin{aligned} OQ_i &= \frac{L_5}{\sin\left(90^\circ + \varepsilon - \arctan\left(\frac{2n_i \tan \frac{\alpha}{2}}{N_w}\right)\right)} \sin(90^\circ - \varepsilon) \\ BP_i &= \frac{2n_i L_5 \tan \frac{\alpha}{2}}{N_w}; \quad BP_{i+1} = \frac{2n_{i+1} L_5 \tan \frac{\alpha}{2}}{N_w} \\ OQ_{i+1} &= \frac{L_5}{\sin\left(90^\circ + \varepsilon - \arctan\left(\frac{2n_{i+1} \tan \frac{\alpha}{2}}{N_w}\right)\right)} \sin(90^\circ - \varepsilon) \\ BQ_i &= \frac{OQ_i \sin\left(\arctan\left(\frac{2n_i \tan \frac{\alpha}{2}}{N_w}\right)\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \varepsilon\right)} \\ BQ_{i+1} &= \frac{OQ_{i+1} \sin\left(\arctan\left(\frac{2n_{i+1} \tan \frac{\alpha}{2}}{N_w}\right)\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \varepsilon\right)} \\ L_i &= OQ_i \cos\left(\arctan\left(\frac{2n_i \tan \frac{\alpha}{2}}{N_w}\right)\right) \\ W_{P_i} &= |BQ_{i+1} - BQ_i|; \quad H_{P_i} = \frac{L_i \tan \frac{\beta}{2}}{N_h} \end{aligned} \right. \quad (6)$$

$$\left\{ \begin{aligned} BQ_i &= \frac{OQ_i \sin\left(\arctan\left(\frac{2n_i \tan \frac{\alpha}{2}}{N_w}\right)\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \varepsilon\right)} \\ BQ_{i+1} &= \frac{OQ_{i+1} \sin\left(\arctan\left(\frac{2n_{i+1} \tan \frac{\alpha}{2}}{N_w}\right)\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \varepsilon\right)} \\ L_i &= OQ_i \cos\left(\arctan\left(\frac{2n_i \tan \frac{\alpha}{2}}{N_w}\right)\right) \\ W_{P_i} &= |BQ_{i+1} - BQ_i|; \quad H_{P_i} = \frac{L_i \tan \frac{\beta}{2}}{N_h} \end{aligned} \right. \quad (7)$$

式中, n_i 为红外烟幕图像中 P_i 像素点到热像仪图像水平中心线的像素点数量; n_{i+1} 为红外烟幕图像中 P_{i+1} 像素点到热像仪图像水平中心线的像素点数量; N_w 为公式(2)求解出红外烟幕区域 D_m 在水平方向的像素点数量; N_h 为公式(2)求解出红外烟幕区域 D_m 在垂直方向的像素点数量; W_{P_i} 是任意一个热像仪图像像素点所代表的烟幕宽度, m ; H_{P_i} 是任意一个热像仪图像像素

点所代表的烟幕高度, m ; L_i 为红外热像仪到烟幕上任意位置 Q 点在烟幕投影面的距离, m ; β 是热像仪垂直视角的数值, $(^\circ)$ 。

通过公式(6)和公式(7)整理可得,任意一个热像仪图像像素点所代表的烟幕宽度 W_{pi} 和高度 H_{pi} 可用公式(8)来计算。

$$\left. \begin{aligned}
 H_{pi} &= \frac{2L_3 \tan \frac{\beta}{2} \cos \varepsilon \cos \left(\tan \left(\frac{2n_i \tan \frac{\alpha}{2}}{N_w} \right) \right)}{N_h \cos \left(\varepsilon - \arctan \left(\frac{2n_i \tan \frac{\alpha}{2}}{N_w} \right) \right)} \\
 W_{pi} &= L_5 \left[\frac{\sin \left(\arctan \left(\frac{2n_{i+1} \tan \frac{\alpha}{2}}{N_w} \right) \right) - \sin \left(\arctan \left(\frac{2n_i \tan \frac{\alpha}{2}}{N_w} \right) \right)}{\cos \left(\varepsilon - \arctan \left(\frac{2n_{i+1} \tan \frac{\alpha}{2}}{N_w} \right) \right) - \cos \left(\varepsilon - \arctan \left(\frac{2n_i \tan \frac{\alpha}{2}}{N_w} \right) \right)} \right]
 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

同理,在图 4a 中,当红外烟幕图像的像素点的位置于热像仪图像水平中心线右侧时;在图 4b 中,当红外烟幕图像的像素点的位置于热像仪图像水平中心线左侧时,任意一个热像仪图像像素点所代表的烟幕宽度 W_{pi} 和高度 H_{pi} 可用公式(9)来计算。

$$\left. \begin{aligned}
 H_{pi} &= \frac{2L_3 \tan \frac{\beta}{2} \cos \varepsilon \cos \left(\arctan \left(\frac{2n_i \tan \frac{\alpha}{2}}{N_w} \right) \right)}{N_h \cos \left(\varepsilon + \arctan \left(\frac{2n_i \tan \frac{\alpha}{2}}{N_w} \right) \right)} \\
 W_{pi} &= L_5 \left[\frac{\sin \left(\arctan \left(\frac{2n_{i+1} \tan \frac{\alpha}{2}}{N_w} \right) \right) - \sin \left(\arctan \left(\frac{2n_i \tan \frac{\alpha}{2}}{N_w} \right) \right)}{\cos \left(\varepsilon + \arctan \left(\frac{2n_{i+1} \tan \frac{\alpha}{2}}{N_w} \right) \right) - \cos \left(\varepsilon + \arctan \left(\frac{2n_i \tan \frac{\alpha}{2}}{N_w} \right) \right)} \right]
 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

3.3.1 红外烟幕效应特征量

某一时刻烟幕对红外遮蔽宽度按公式(10)计算:

$$W_t = \sum_{i=a}^b W_{pi} \quad (10)$$

式中, W_t 是该时刻烟幕对红外遮蔽宽度的数值, m ; a 、 b 是该时刻遮蔽烟幕左、右边界在热像仪图像中的像素列号。

某一时刻烟幕对红外遮蔽高度按公式(11)计算:

$$H_t = (d - c + 1)H_{pa} \quad (11)$$

式中, H_t 是该时刻烟幕对红外遮蔽高度的数值, m ; d 、 c 是该时刻遮蔽烟幕底部、顶部在热像仪图像中的像素行号。

某一时刻烟幕对红外遮蔽面积按公式(12)计算:

$$S_t = \sum_{i=a}^b N_i W_{pi} H_{pi} \quad (12)$$

式中, S_t 是该时刻烟幕对红外遮蔽面积的数值, m^2 ; a 、 b 是该时刻遮蔽烟幕左、右边界在热像仪图像中的像素列号; N_i 是遮蔽烟幕在热像仪图像上第 i 列所占像素个数; W_{pi} 是该时刻热像仪图像中第 i 列像素所代表的实际烟幕宽度的数值, m ; H_{pi} 是该时刻遮蔽烟幕在热像仪图像中第 i 列一个像素所代表的实际烟幕高度的数值, m 。

3.3.2 红外烟幕效应特征量

同理,通过公式(3)求解出红外烟幕运动特征区域 Q_{yun} ,按照视场布置的几何关系对试验结果进行风向修正。在此基础上,应用公式(8)和公式(9)得到红外烟幕运动特征区域像素点所代表的烟幕宽度和高度。最后判断 Q_{yun} 中距离爆炸中心距离最远的水平像素点和垂直方向的像素点数,提取红外烟幕运动特征区域中该列有 m 个像素点,该行 n 个像素点的像素点,进而可计算出垂直方向、水平方向的扩散速度,其计算如公式(13)所述。

$$\left\{ \begin{aligned}
 V_x &= \frac{Z_s}{5} \sum_{i=1}^m W_{pi} \\
 V_y &= \frac{Z_s}{5} \sum_{i=1}^n H_{pi}
 \end{aligned} \right. \quad (13)$$

式中, V_x 为红外烟幕在水平方向的扩散速度, $m \cdot s^{-1}$; V_y 为红外烟幕在垂直方向的扩散速度, $m \cdot s^{-1}$; Z_s 表示 1s 内烟幕视频中的帧数。

3.4 烟幕特征参数提取验证

为了实时地提取红外烟幕效应特征量(烟幕遮蔽面积、烟幕宽度、烟幕高度、遮蔽时间),红外烟幕运动特征量(烟幕在垂直方向、水平方向的扩散速度)。本研究应用了采集的 112 s 内红外烟幕弹作用过程视频,通过公式(1)~公式(3)得到红外烟幕区域,再按照视场布置的几何关系对试验结果进行风向修正,以红外烟幕图像像素为基本单元,得到红外热像仪图像序列中每一张图片中每一个像素点所代表的实际红外烟幕高度数值与宽度数值,进而定量提取红外烟幕特征量。应用了 MATLAB 开发了实测图像的红外烟幕特征参数实时提取软件,其运行界面如图 5 所示。通过软件对红外烟幕效应特征量、运动特征量进行了数据分析和提取,其红外烟幕效应特征量随时间的变化曲线如图 6 所示,红外烟幕运动特征量随时间的变化曲线如图 7 所示。



图5 347帧的烟幕特征提取界面图
Fig.5 Feature extraction interface diagram for the 347 frame of smoke screen

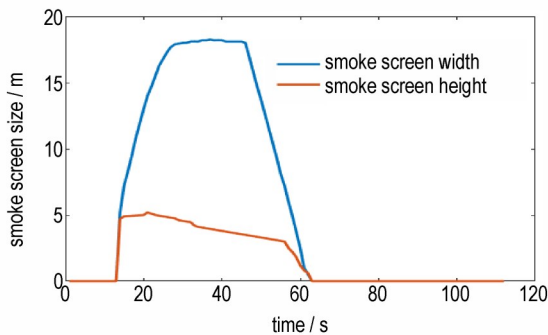
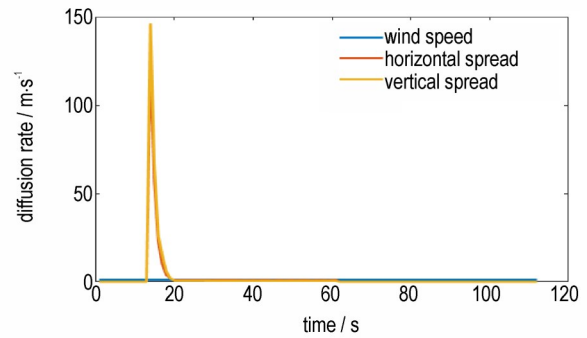
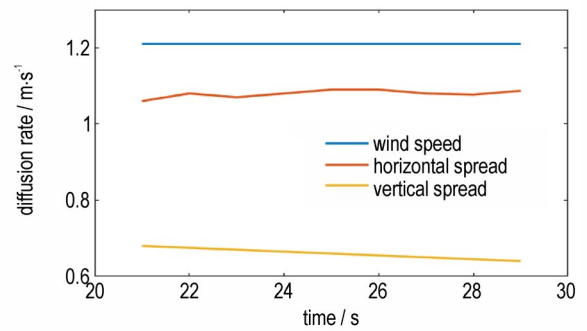


图6 红外烟幕效应特征量随时间的变化曲线
Fig.6 Curves of teffect characteristic parametersof the infra-red smoke screen varying with time

从图5第347帧的烟幕特征提取界面图可知,当烟幕序列从346帧到347帧间隔内红外烟幕弹开始爆炸,由于红外热像仪开始采集视频10~20s后,才起爆红外烟幕弹。其爆炸瞬间烟幕宽度、烟幕高度、烟幕遮蔽面积迅速增加至4.7 m,5.2 m,24.2 m²,水平沿风速方向的烟幕前沿扩散速度达到了126 m·s⁻¹,垂直方向烟幕前沿扩散的速度达到了146.3 m·s⁻¹。从图6红外烟幕效应特征量随时间的变化曲线和图7a红外烟幕运动特征量随时间的变化曲线可知,前346帧时间内烟幕高度、宽度烟幕在垂直方向、水平方向的扩散速度一直为零。当实测图像的红外烟幕特征参数实时提取软件中读取烟幕序列为346帧到347帧之间时,红外烟幕弹借助炸药的爆炸作用开始起爆,爆炸产生爆轰波同时伴随着能量的产生^[22],烟幕弹迅速形成烟幕,在垂直方向、水平方向的扩散速度瞬间飙升^[23],烟幕高度和宽度瞬间增加,此阶段爆轰波起主导作用,随着烟幕距离爆炸点距离增加,爆轰波和能量对烟幕扩散



a. Diffusion velocity of infrared smoke during 0-112 s



b. Diffusion velocity of infrared smoke during 21-29 s

图7 红外烟幕运动特征量随时间的变化曲线
Fig.7 Curves of motion characteristic parameters of the infra-red smoke screen varying with time

的影响越来越小,烟幕扩散速度也随之减慢,并形成红外烟幕云团,之后,在湍流扩散的作用下,红外烟幕继续扩大^[5-6]。但当爆轰波消失时,由于烟幕扩散还受风速的影响,红外烟幕继续扩大风速开始占据主导因素,烟幕宽度受风速的影响还继续增加,当达到一定宽度以后烟幕浓度减小,烟幕粒子飘散,烟幕宽度开始减小;又红外热像仪的视场角的小,烟幕扩散到视场角外时,烟幕的宽度也随之减少。烟幕高度在爆轰波消失以后,烟幕粒子受重力的影响和大气对烟幕粒子浮力的作用,烟幕扩散垂直的速度趋于定值,烟幕的高度也开始减小,当烟幕扩散到红外热像仪的视场角外时,烟幕高度迅速减小到0^[24]。从图7b红外烟幕运动特征量在21s到29s内风速对烟幕水平扩散的影响,发现烟幕水平扩散的速度与风速基本成正相关,烟幕垂直扩散速度一直在减小的原因是随着烟幕粒径大的受重力影响比较严重,沉降速度快,当烟幕扩散后期,烟幕大粒子扩散到地面,而小粒径烟幕在垂直方向的扩散速度与之减小。

4 结论

为了快速提取红外烟幕的特征参数,提出了五帧

差分法提取实测红外烟幕图像特征参数研究,得到结论如下:

(1)采用五帧差分法对红外热像仪成像视频序列中的红外烟幕进行分割和提取,可得到红外烟幕效应特征量和运动特征量区域。

(2)在设计了野外测量红外烟幕的试验场地布置方案的基础上,按照场地布置的几何关系对试验结果进行了风向修正。以红外烟幕图像像素为基本单元,可计算得到红外热像仪图像红外烟幕效应特征量和运动特征量区域中每一个像素点所代表的实际烟幕高度数值与宽度数值,进而提取烟幕的效应特征量和运动特征量参数。

(3)通过实测红外烟幕视频分析验证,该方法可以快速提取红外烟幕特征参数,其红外烟幕弹爆炸瞬间烟幕宽度、烟幕高度、烟幕遮蔽面积迅速增加至4.7 m,5.2 m,24.2 m²,水平沿风速方向的烟幕前沿扩散速度达到了126 m·s⁻¹,垂直方向烟幕前沿扩散的速度达到了146.3 m·s⁻¹。

参考文献:

- [1] 陈浩,高欣宝,李天鹏,等.国外烟幕干扰弹发展及关键技术研究[J].飞航导弹,2017(12):71-74.
CHEN Hao, GAO Xin-bao, LI Tian-peng, et al. The Development and key technology research of foreign smoke jamming bomb[J]. *Flying Missile*, 2017(12):71-74.
- [2] 徐路程,郝雪颖,肖凯涛,等.爆炸型烟幕弹遮蔽效能仿真研究[J].兵工学报,2020,41(7):1299-1306.
XU Dao, HAO Xue-ying, XIAO Kai-tao, et al. Simulation Research on Shielding Effectiveness of Explosive Smoke Screen[J]. *Acta Armamentarii*, 2020,41(7):1299-1306.
- [3] 李一.红外烟幕遮蔽效应测试方法研究[D].长春:长春理工大学,2020.
LI Yi. Research on Testing Method of Infrared Smoke Screen's Shadowing Effect[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2020.
- [4] 郭仙永.干扰烟幕野外扩散特性的数值研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.
GUO Xian-yong. Numerical Study on the Field Diffusion Characteristics of Interference Smoke Screen[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [5] 陈浩,高欣宝,李天鹏,等.烟幕初始云团爆炸分散模型建立及计算方法[J].兵器装备工程学报,2019,40(4):147-151.
CHEN Hao, GAO Xin-bao, Li Tian-peng, et al. The establishment and calculation method of the initial cloud cluster explosion dispersion model of the smoke screen [J]. *Ordnance Equipment Engineering Journal*, 2019, 40(4): 147-151.
- [6] 陈浩,高欣宝,李天鹏,等.烟幕初始云团最大半径数值模拟[J].含能材料,2018,26(10):820-827.
CHEN Hao, GAO Xin-bao, Li Tian-peng, et al. Numerical simulation of the maximum radius of the initial cloud cluster of the smoke screen [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2018, 26(10): 820-827.
- [7] 雍玉洁,顾华.基于空间聚类和边缘梯度的图像分割算法[J].计算机与现代化,2021(2):13-17.
YONG Yu-jie, GU Hua. Image segmentation algorithm based on spatial clustering and edge gradient[J]. *Computer and Modernization*, 2021(2): 13-17.
- [8] LIU Cai-xia, PANG Ming-yong, ZHAO Rui-bin. Novel super-pixel-based algorithm for segmenting lung images via convolutional neural network and random forest[J]. *IET Image Processing*, 2020,14(3):1-20.
- [9] PENG Cheng-wei, YANG Zou. Image Feature Extraction and Object Recognition Based on Vision Neural Mechanism[J]. *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2020,34(6):1-16.
- [10] HE Ying, Camacho Ruben Suxo, Soygazi Hasan, et al. Attacking and defence pathways for Intelligent Medical Diagnosis System (IMDS)[J]. *International Journal of Medical Informatics*, 2021,148(prepublish).
- [11] 胡晔.无人驾驶领域中人工智能技术的应用[J].河南科技,2020,39(35):27-29.
HU Ye. The application of artificial intelligence technology in the field of unmanned driving[J]. *Henan Science and Technology*, 2020,39(35):27-29.
- [12] 郑凯辉,黄培建.基于卷积神经网络的监控图像智能分析系统[J].广播与电视技术,2021,48(1):136-142.
ZHENG Kai-hui, HUANG Pei-jian. Monitoring image intelligent analysis system based on convolutional neural network [J]. *Radio and Television Technology*, 2021,48(1):136-142.
- [13] LIPTON A J, FUJIIYOSHI H, PATIL R S. Moving target classification and tracking from real-time video [C]//The Proceedings Fourth IEEE Workshop on Applications of Computer Vision WACV 98(Cat No98EX201), 1998.
- [14] KARMANN K P. Moving object recognition using an adaptive background memory [J]. *Time Varying Image Processing & Moving Object Recognition*, 1990.
- [15] GIBSON J. The perception of the visual world[M]. Houghton Mifflin, 1950.
- [16] 刘敏杰.基于视频的火灾烟雾检测的设计与实现[D].南京:南京邮电大学,2019.
LIU Min-jie. Design and implementation of video-based fire smoke detection [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2019.
- [17] 熊昊,李伟.基于SVM的视频火焰检测算法[J].传感器与微系统,2020,39(1):143-145+149.
XIONG Hao, LI Wei. Video flame detection algorithm based on SVM [J]. *Sensors and Microsystems*, 2020, 39(1): 143-145+149.
- [18] 蔡春兵,吴翠平,徐鲲鹏.基于深度学习的视频火焰识别方法[J].信息技术与网络安全,2020,39(12):44-51.
CAI Chun-bing, WU Cui-ping, XU Kun-peng. Video flame recognition method based on deep learning [J]. *Information Technology and Network Security*, 2020, 39(12): 44-51.
- [19] 王子昂,黄富瑜,刘秉琦,等.大视场摄像机标定方法研究进展[J].半导体光电,2019,40(3):303-308.
WANG Zi-ang, HUANG Fu-yu, LIU Bing-qi, et al. Research progress in calibration methods of large field of view cameras [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2019,40(3):303-308.
- [20] 杨景豪.大视场视觉测量系统标定方法研究[D].大连:大连理工大学,2018.

- YANG Jing-hao. Research on calibration method of large field of view vision measurement system[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.
- [21] GJB 5214.14-2003 特种弹效应试验方法:发烟弹有效烟幕宽度,有效烟幕高度测定,摄像法[S].
GJB 5214.14-2003 Special bomb effect test method: effective smoke width of smoke bomb, effective smoke height measurement, video method[S].
- [22] 朱晨光,潘功配,关华,等.烟幕云团形成初期的流动规律研究[J].含能材料,2007,15(5):540-543.
ZHU Chen-guang, PAN Gong-pei, GUAN Hua, et al. Initial flow ability of smoke cloud forming[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2007, 15(5): 540-543.
- [23] 许兴春,高欣宝,李天鹏,等.烟幕初始云团半径变化规律理论模型及实验研究[J].爆炸与冲击,2016,36(2):183-187.
XU Xing-chun, GAO Xin-bao, LI Tian-peng, et al. Theoretical model and experiment of radius variation of initial smoke cloud[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2016, 36(2): 183-187.
- [24] 蒋云,徐毅,代晓东,等.膨胀石墨粒子浓度及粒径分布测量试验研究[J].火工品,2019(4):32-35.
JIANG Yun, XU Yi, DAI Xiao-dong, et al. Experimental research on measurement of expanded graphite particle concentration and size distribution[J]. *Fire Industrial Products*, 2019 (4):32-35.

Five-frame Difference Method for Extracting Characteristic Parameters from Measured Infrared Smoke Screen Images

GUO Ai-qiang, GAO Xin-bao, LI Tian-peng, DAI Jun-jie, LI Xiao-nan

(Shijiazhuang Campus, Army Engineering University of PLA, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: In order to extract the effect characteristic parameters (smoke screen width, smoke screen height, smoke screen coverage area, masking time) and motion characteristic parameters (vertical and horizontal diffusion speed) from measured infrared smoke screens and, the layout of the test site for field measurement of infrared smoke screens was designed. The infrared thermal imager was used to collect the video data of the explosion and diffusion process of the infrared smoke bomb in 112 secs, and the five-frame difference method was used to segment and extract the infrared smoke screen from the video sequence of the infrared thermal imager, then the effect characteristic parameter area and motion characteristic parameter area of the infrared smoke screen were obtained. According to the geometric relationship of the site layout, the test results have been corrected for wind direction. The pixel points of the infrared smoke screen image were used as the basic unit that the actual smoke screen height and width values represented by each pixel in each frame of the video sequence were solved, and then the effect characteristic parameters and motion characteristic parameters of the infrared smoke screen were obtained. It was verified by the analysis of actually measured infrared smoke screen videos that this method can quickly extract the characteristic parameters of infrared smoke screen. At the moment of explosion, the width, height, and area of the smoke screen rapidly increase to 4.7 m, 5.2 m, and 24.2 m², respectively, and the front diffusion speeds along the wind direction reached 126 m·s⁻¹ horizontally and 146.3 m·s⁻¹ vertically. It has highly practical application value for the research on infrared smoke screens, including the correction of diffusion simulation equation, the combat effectiveness evaluation, and on the combat operation.

Key words: Measured image; infrared smoke screen; five-frame difference method; effect characteristic parameter; motion characteristic parameter

CLC number: O383; Tj5

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2021075

(责编:高毅)