

对抗红外成像制导反坦克导弹的一种伪装方法

刘建永,沈均平,胡江华,秦建飞

(解放军理工大学 工程兵工程学院,江苏 南京 210007)

摘要:通过分析坦克的生存概率因素,阐明了单纯依靠运动和加强坦克的装甲防护能力是难以对抗红外成像反坦克导弹的。提出红外伪装网、红外干扰弹被动伪装和主动伪装相结合的方法,并以 AGM-65D 导弹的战斗参数为例对该方法进行了初步分析、评估。结果表明:该方法能够使坦克目标的生存概率大大提高,对其他目标对抗红外成像制导武器有一定的借鉴作用。

关键词:红外成像制导; 红外伪装网; 红外干扰弹

中图分类号:E951.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-2276(2005)02-0183-05

Camouflage way of countering infrared imaging guided anti-tank missile

LIU Jian-yong, SHEN Jun-ping, HU Jiang-hua, QIN Jian-fei

(Engineering Institute of Engineering Corps, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract:Survivable rate factor of the tank is analyzed, on these bases, the tank with the reinforced armor, depending on zigzagging, is very difficult to evade attacking of infrared imaging guided anti-tank missile, therefore, a new camouflage way of combining IR camouflage net with interference is put forward. Taking the guided missile of AGM-65D as an example, the tank targets' survivable rate is increased. As well as, the method can be great use for other targets.

Key words: Infrared imaging guided; Infrared camouflage net; Infrared decoy

0 引言

红外成像制导系统是一种具有全向攻击、命中点选择能力的准全天候探测导引系统,它在军事领域的广泛应用,对包括坦克在内的各种军事目标构成了严重威胁,例如中东战争中,以色列用 58 枚 AGM-65D 导弹击毁了阿拉伯国家 52 辆坦克。在军事战争中,坦克凭借良好的防护能力和强劲的火力,成为我军登陆作战的主战武器之一,因此,针对红外成像反坦克导

弹的对抗技术极为重要。

1 坦克红外暴露征候

坦克是以发动机为驱动源的装甲目标,其红外辐射源主要包括:顶甲、履带、排气窗和喷口。以某型坦克为例,它在接近实战条件下高速行驶时,前甲和顶甲表面温度比环境高 5~6℃,履带比环境温度高 37~40℃,喷口温度较高,运动时达 350~400℃,假设坦克表面温度分布均匀,求得其平均温度约 310 K,其热

收稿日期:2004-04-26; 修订日期:2004-06-21

作者简介:刘建永(1961-),男,江苏南京人,教授,博士,主要研究方向为战场环境数字化、电磁伪装等。

图如图 1 所示^[1]。

根据维恩位移定律:

$$\lambda_m T = 2898 \mu\text{mK} \quad (1)$$

可以计算出坦克的红外辐射波段主要在 8~14 μm , 正好位于红外成像探测器工作波段(其中喷口辐射峰值位于近红外区,不在考虑范围内)。

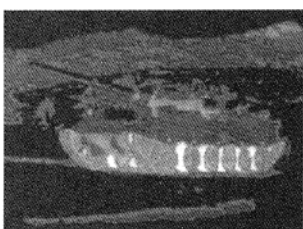


图 1 坦克目标的热图

Fig.1 Thermal image of the tank target

2 坦克目标生存概率模型

坦克目标的生存概率的总体评价模型为:

$$P_s = 1 - P_1(1 - P_2)P_3P_4 \quad (2)$$

式中 P_1 为坦克目标被发现识别的概率; P_2 为坦克机动概率; P_3 为坦克目标被跟踪概率; P_4 为坦克被击中后的毁伤概率。根据公式(2), 可通过降低 P_1 、 P_3 、 P_4 值和提高 P_2 值来共同提高坦克的生存概率。

3 方案设计

假设来袭导弹为 AGM-65D 导弹(又称“幼畜”, 为小牛导弹系列成员之一), 其飞行速度 $v \geq 300 \text{ m/s}$ (末端俯冲速度大于 300 m/s), 其惯性飞行在最后的 200~300 m 范围内; 设坦克目标的速度为 2 m/s, 尺寸为 3 m×9 m, 要使坦克机动成功, 其规避距离应大于 4.7 m。

$$(200 \sim 300) / v \times 2 \leq (4/3 \sim 2) < 4.7 \text{ m}$$

可见单纯的机动是行不通的。由于机械制造的局限性, 机动能力是难以在短时间内发生变化的, 即使有, 也很有限。现在先进的反坦克导弹的穿甲能力至少达到 0.5~0.6 m, 有的甚至达 1 m 以上, 单独依靠

增强坦克装甲的厚度是很难奏效的, 而且还会影响到坦克的作战性能。所以为提高坦克生存概率, 必须对坦克进行伪装。利用红外伪装网降低坦克目标被发现识别概率 P_1 , 投放红外干扰弹降低被跟踪概率 P_3 共同对抗 AGM-65D 导弹, 以提高坦克目标的生存概率。

3.1 红外伪装网

根据资料分析, 目前国际上普遍采用的红外伪装方法是在目标表面涂覆不同的低发射率涂料或披挂伪装网, 改变目标辐射温度, 从而在热像仪上形成亮暗不同的不规则斑点, 歪曲分割目标外形, 进而使目标和背景融合在一起, 达到伪装的目的。伪装网技术比较成熟, 波段的兼容性好。

红外伪装网的伪装机理可用红外探测方程来解释, 红外探测方程为^[2]:

$$L = \sqrt{I_1 / I_2} \beta \quad (3)$$

式中 L 为探测距离; $I_1 = K\varepsilon T^4 A$, 为目标辐射强度, 其中 K 为常数, ε 为目标发射率, T 为目标温度, A 为目标面积; I_2 为背景辐射强度; β 为红外探测系统的视场角。

无网坦克的发射率约为 0.9, 红外伪装网上斑点的平均发射率大约为 0.75, 考虑到有网坦克的降温, 根据公式(3)计算得到红外导引头的探测距离缩短为原来的 0.85 倍, 其相应识别距离也将缩短为 1.56 km, 取值 1.6 km。

3.2 红外干扰弹

以某型干扰弹为例, 它是由 1230 块左右的小干扰片组成, 干扰弹投放出去后, 像礼花一样爆炸, 如图 2、图 3 所示, 形成约为 200 m^2 干扰区(整个爆炸趋向

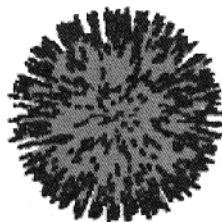


图 2 干扰弹的弹片飞散
轨迹图模拟

Fig.2 Simulation of the decoy's
blast

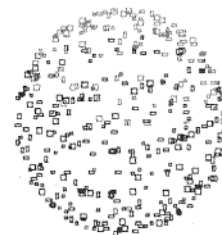


图 3 球形弹的弹片空间
散图

Fig.3 Image of the shrapnel's
diffusion

一个半径为 8 m 的球体),小干扰片是圆片,爆炸前半径 0.03 m,燃烧时温度为 1200 K,持续燃烧时间指标为 5~8 s^[3]。

AGM-65D 导弹对坦克目标的探测距离约为 5~6 km,识别距离约为 1.8 km,探测器尺寸为 50 μm×50 μm,工作波段为 8~14 μm,光学系统焦距约为 178 mm,所以瞬时视场为^[4]:

$$\alpha = \beta = \frac{0.05}{178} = 0.28 \text{ mrad}$$

干扰弹的爆炸区投影是圆形,为简化计算,这里假设干扰片在圆中均匀分布,可以计算出在投影圆中干扰片的密度为 6 块/m²,两片之间的相对距离约为 0.23 m(由于干扰弹爆炸燃烧,致使周围空气升温形成近似的等温区,干扰片的重叠情况可以忽略不计)。如果干扰片之间在探测器的像平面分离角度大于其最小分辨角,这时只是在图像中形成一些散粒噪声,采用一些滤除噪声的方法(如中值滤波)可以抑制干扰,干扰弹将起不到干扰作用。AGM-65D 导引头上探测器识别干扰片的距离为:

$$0.23/0.28 = 0.82 \text{ km}$$

实际上当干扰弹爆炸燃烧时,周围的空气温度也会上升,因此,相对每片的面积还会增大,探测器对干扰片的识别距离还将缩小 1~2 倍,即探测器的识别距离大约为 200~400 m(考虑到重新锁定目标所需的时间、导弹最小机动距离等因素,导弹即使在 400 m 处识别出坦克目标,也难以进行准确跟踪和打击)。

综合考虑以下条件:干扰弹的时间指标 t 为 5~8 s,坦克目标经红外伪装网伪装后,AGM-65D 导弹的识别距离 S 为 1.6 km,速度 $v \geq 300$ m/s,导弹的惯性飞行距离 s 为 200~300 m 等因素,可得:

$$(S-s)/v < t$$

所以设计在导弹距坦克目标 1700 m 时,干扰弹对 AGM-65D 导弹进行干扰。

4 效果评估

4.1 红外伪装网效果评估

坦克车体的热图像已具备热迷彩所必需的温度起伏,只是这种温度起伏较大,且存在明显的特征边界。热成像系统就是依靠探测这些特征来发现、识别坦克目标的。坦克披挂红外伪装网后,不但改变了坦克表面热惯量的分布,部分遮挡了阳光对坦克的直接照射,从而减弱和改变车体对太阳辐射的吸收和储存,阻碍了车体的散热;而且伪装网上不同发射率的热斑点形成不规则的“热彩分割”,降低了坦克本身各部分之间和坦克与背景之间的对比度,将坦克车体温度的鲜明起伏改变为自然起伏,温度起伏的平均水平接近于地物背景,歪曲分割坦克目标外形,进而使坦克目标和背景融合在一起。

坦克冷静态抑制试验结果证明:坦克外表面披挂伪装网,削弱了坦克本身以及其与地物背景热惯量悬殊差异所形成的显著形体特征,如图 4 所示。

热动态条件下,无网坦克炮塔红外形体特征十分突出,动力舱尾部、行动装置等部位的红外辐射特征显著,往往成为红外成像导引头发现、识别和跟踪的重要依据。

红外动态试验:无网时,动力舱尾部在正反差前、中、后期和地物背景的温差分别为 10.4、10.6 和 7.8 °C(定义坦克红外辐射温度高于地物背景红外辐射温度时称为正反差,反之为负反差)。有网时,相应的温差变为 2.6、3.4 和 1.6 °C;无裙板坦克的行动装置是一强红外辐射源,设置普通的橡胶裙板,虽可遮挡住行动装置的强红外辐射,但薄橡胶板材自身的升温或降温过快,又成为新的具有显著性的标志。无网时,正反差时段的前、中和后期,行动装置和地物背景的温差为 7.5、7.7 和 6.6 °C。披挂伪装网后,有效地抑制行动装置部分的红外辐射。行动装置部位和地物背景之温差降至 2.6、3.4 和 1.4 °C,如图 5 所示^[5]。

实验证明:披挂伪装网后,坦克目标和地物背景的温差总是低于无网坦克,有效减弱和抑制了其红外辐射,明显降低了其形体特征的显著性,降低了坦克被

发现和跟踪的概率,达到了较高的红外伪装指标——目标的热部位同背景的温度减少到 $\pm 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内(美军把这一温度范围作为红外伪装指标之一)。

从野外实验的观测结果看,披挂伪装网方法对付单一波段的中波或长波红外成像系统的观察都比较有效。根据经验,经良好的伪装网伪装,机动目标的发现概率大约降低 50%左右。

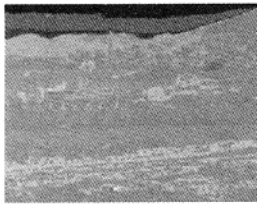


图 4 静态负反差时段坦克有网和无网热图

Fig.4 Thermal images of tanks with and without net in static negative contrast

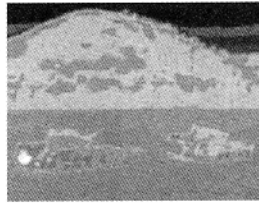


图 5 动态正反差时段坦克有网和无网热图

Fig.5 Thermal images of tanks with and without net in dynamic positive contrast

4.2 红外干扰弹干扰效果评估

红外成像制导常用的两种跟踪算法——形心(质心)法和相关法,其中质心跟踪方式计算量较小,适用于成像质量较好的情况;相关跟踪方式对成像质量要求相对较低,虽然计算量较大,但可有效地排除杂散红外光的干扰,能在低信噪比条件下提供最好的跟踪性能,跟踪距离远,可靠性高。AGM-65D 导弹采用多元红外探测器线阵扫描成像导引头,相继使用形心和相关跟踪方式^[1]。

(1) 形心干扰

加入干扰物后,跟踪波门随干扰物的运动,不断扩大直至最后向全视场开放,跟踪系统重新进行搜索,对目标进行捕获;或者波门内的目标和干扰物的质心漂离原来的跟踪点,且漂离距离达到干扰成功的像素要求时,均认为干扰成功。

(2) 相关干扰

如果一开始目标与干扰物同时存在于相关区,或者预测事件结束后,目标和干扰物还同时存在于相关区,无论是与目标融合还是分离,对于相关跟踪模式,都不能去除干扰而只对目标进行计算,当误差积累达

到一定值时,导弹偏离目标,跟踪干扰源。

通常,导弹预测时间较短,大约为 1~2 s,如果预测时间结束后,目标与干扰物仍然没有分开,这时系统将会开放全视场,对全视场进行重新搜索,而且捕获概率将大大降低,也可以认为干扰成功。

4.2.1 形心干扰效果评估

形心跟踪的计算颇为简便,能提供恒增益,不受线性跟踪视频限制,设导弹跟踪的目标图像面积为 A ,灰度函数为 $g(x,y)$,成像跟踪的质心 (x_c, y_c) 表达式为^[6]:

$$x_c = \frac{\int_A xg(x,y)dA}{\int_A g(x,y)dA} \quad (4)$$

$$y_c = \frac{\int_A yg(x,y)dA}{\int_A g(x,y)dA} \quad (5)$$

可计算得到干扰弹和坦克目标的灰度比为 1.57,考虑到干扰弹周围空气的升温,两者的灰度比约为 2。如果干扰弹和坦克目标分离,因干扰弹温度过高容易被过滤,所以利用干扰弹对坦克目标进行遮蔽。施放红外干扰弹后,目标和干扰源融合时,红外成像系统不能区分目标和干扰物,只能当作一个大目标看待。大目标的形心漂离原跟踪点(即坦克目标的形心),使成像跟踪系统产生跟踪误差,计算得到干扰源实际面积(投影面积更大)和坦克目标的面积比约为 14:1,根据概率计算得到导弹的准确跟踪概率下降至原来的 0.15 倍。

4.2.2 相关跟踪效果评估

设成像系统在视场 R 内景物的实时图像亮度为 $r(u,v)$,对同一景物在不同时间预先摄取和储存的图像,其视场为 S ,图像亮度为 $s(u,v)$,如图 6 所示。其相关函数 $c(x,y)$ 为:

$$c(x,y) = \iint s(u,v)r(u+x,v+y)dudv \quad (6)$$

若用离散量表示,则有:

$$c(x,y) = \sum \sum s(u,v)r(u+x,v+y) \quad (7)$$

当前后两幅图像相同时,即 $c(x,y)=c_{\max}$,两幅图像完全配准(重合),即使对于伪装很好的静止目标, $c(x,y)$ 也能达到 0.9 以上,因此,其伪装一旦被揭露,则伪装器材本身将成为新的打击目标,不具备对抗成像制导打击的能力,这也证明仅依靠红外伪装网伪装是不行的。发射干扰弹后,两者失配,则产生两个点,该点与配准点之间的距离称为失配距离,失配距离值决定相关跟踪器输出误差信号的大小,此误差信号驱动伺服机构,使实时摄像系统的光轴向预存图像中心靠拢以实现配准,但当 $c(x,y)$ 小于一定值时,导弹将无法跟踪目标。

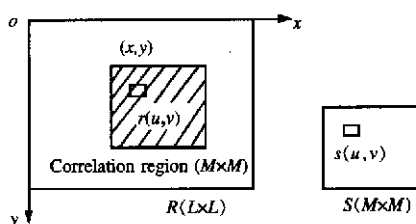


图6 基准图像和实时图像

Fig.6 Correlation region

干扰源与目标之间的相对速度决定了实时图与参考图之间的差异,相对速度为零时(匹配位置不变),不但不能起干扰作用,反而由于干扰源的存在,使跟踪系统获得的信息更多,匹配概率有较大的增加。但是,相对运动速度较大时,两帧间要达到最大匹配误差,对干扰源的灰度、面积要求也相对较高。相对速度为 1~2 个像素较好,这样不需对干扰源其他条件要求过高,而且能持续一定时间,产生较大的误差。由于目标和干扰弹片同时存在于相关区,而且在 7 s 内不变,超过红外成像导引头的预测时间,误差的积累使得导弹不能正常跟踪坦克目标。根据模拟试验,如果不加入干扰源,两幅图像的匹配率达到 89.1%,可以保证稳定跟踪。加入干扰后,两幅图像的匹配概率低于 20%,导弹无法跟踪坦克目标。

也可从坦克的规避运动的角度来解析坦克已摆脱来袭导弹跟踪,导弹在最后 200~300 m 做惯性运动,假设 AGM-65D 导弹的末端俯冲速度为 500 m/s (实际速度小于此值),此时坦克的规避距离可达:

$$2 \times (1700 - 200) / 500 = 6 > 4.7 \text{ m}$$

可见干扰弹提高了坦克目标的机动规避概率(这还没考虑导弹向干扰源方向产生的偏移量),使得坦克的机动规避概率 P_2 接近 1。

4.2.3 综合效果评估

由公式(2)得出伪装后,坦克目标的生存概率为:

$$P_s = 1 - 0.5P_1(1 - P_2)0.15P_3P_4 = 1 - 0.075P_1(1 - P_2)P_3P_4 \quad (8)$$

假设没有伪装前坦克遭袭后生存概率为 50%,根据公式(8)计算得到伪装后坦克的生存概率提高到 96%(在此还没有考虑对坦克进行伪装后,坦克目标的机动规避概率 P_2 也得到迅速提高)。

5 结束语

上述分析表明,红外伪装网缩短了导引头的发现、识别距离,降低了坦克被侦察、发现、跟踪的概率。结合红外干扰弹的主动干扰,能极大地提高坦克目标对抗红外成像制导反坦克导弹的生存概率。由于干扰弹是由金属干扰片组成以及爆炸时产生的烟尘,所以对可见光、雷达制导方式也能起到一定的干扰作用。在今后的工作中,可以采用全波段伪装网,提高坦克目标伪装波段的兼容性;更深入地分析干扰弹发射方向、速度、时机及坦克目标的机动方法等问题,可进一步提高目标对抗红外成像导弹袭击的生存概率。

参考文献:

- [1] 朱寿远,魏德孟,姚军田,等.主战坦克与地物背景红外辐射特性研究[J].红外技术,2000,22(5):45-50.
- [2] 武凤臣.两栖装甲车辆红外辐射特征抑制技术研究[D].北京:北京理工大学,2002.15-27,64-65.
- [3] 熊晓伟.光电干扰效果(定量)评估的研究[D].西安:西安电子科技大学,1995.6-7.
- [4] 林涛.红外成像制导系统干扰方法的研究[D].西安:西安电子科技大学,1994.26-27.
- [5] 徐南荣,卞南华.红外辐射与制导[M].北京:国防工业出版社,1997.422-428.
- [6] 熊晓伟,刘上乾.光电干扰效果评估[J].江西科学,1999,17(3):120-122.