

采用低发射率红外材料对探测距离和概率的影响

斯 仁, 吉洪湖, 冯晓星, 黄 伟

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘 要: 为研究双机空战中目标机采用低发射率红外材料后对攻击机机载红外搜索跟踪系统探测距离和概率的影响, 建立了飞机运动过程和机载红外搜索跟踪系统探测距离计算模型, 得到了相向飞行、同向飞行和侧向飞行三种典型的双机空战过程中探测距离和概率随飞行时间、速度、轨迹的变化规律。计算中考虑了目标的光谱辐射特征、大气透过率和探测器性能等因素对探测距离和概率的影响。结果表明目标机采用低发射率红外材料抑制红外特征后, 在相同探测概率的情况下, 探测距离明显减小; 在攻击机与目标机相同距离的情况下, 探测概率明显下降。

关键词: 红外抑制; 隐身效果; 探测距离; 探测概率; 空战

中图分类号: V218 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)02-0442-07

Influence of low emissivity infrared materials on range and probability of detection

Si Ren, Ji Honghu, Feng Xiaoxing, Huang Wei

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to study of the influence of low emissivity infrared materials on the range and probability of detection of infrared search and track system for attack aircraft in air combat, aircraft flight process and infrared search and track system detection process model were established, the trend of the range and probability of detection with time, velocity and locus in three typical air combat process such as opposite, same and side direction were obtained. In the calculation, the influence for target spectral radiation characteristics, atmospheric transmittance, detector performance and other factors on the range and probability of detection were considered. The results show that after infrared suppression measure are taken by target aircraft, the range of detection is decreased significantly in the case of the same probability of detection, the probability of detection is decreased significantly in the case of the same distance of attack and target aircraft.

Key words: infrared suppression; stealth effect; probability range of detection; probability of detection; air combat

收稿日期: 2013-06-10; 修订日期: 2013-07-25

基金项目: 航空科学基金(2011ZB52028); 南京航空航天大学基本科研业务费专项科研项目(2011ZB52028)

作者简介: 斯仁(1984-), 男, 博士生, 主要从事飞行器红外隐身技术研究。Email: sbo_nuaa@qq.com

导师简介: 吉洪湖(1957-), 男, 博士生导师, 主要从事飞行器红外隐身及航空发动机传热技术研究。Email: jhhpe@nuaa.edu.cn

0 引言

在现代空战过程中,“先敌发现,先敌开火”的技术需求^[1]使飞行器必须具有良好的隐身性能及探测性能。飞行器的排气系统和蒙皮分别是3~5 μm及8~14 μm波段内的主要红外辐射源,采用低发射率红外材料涂层是抑制红外辐射信号的主要手段之一,如冯晓星等^[2]计算了战斗机蒙皮和排气系统壁面发射率变化对3~5 μm波段内红外抑制效果的影响;吕建伟等^[3]计算了飞行器蒙皮表面温度和发射率变化对8~14 μm波段内红外辐射特征分布的影响。

探测距离是评价飞行器红外辐射水平以及红外辐射抑制效果的一个重要指标。红外探测系统对飞行器的探测距离是指在一定大气条件和探测概率下能探测到目标信号的最大距离。Hudson^[4]从红外探测系统的角度论述了各部件间的基本关系式,并从工程综合的观点导出了探测距离方程式;过海峰等^[5]建立了红外有源和无源干扰条件下红外接收系统探测概率模型,分析了在有干扰情况下红外探测系统探测概率的变化;贾庆莲等^[6]提出了红外警戒系统的探测概率计算方法,研究了目标距离、搜索时间等对探测概率的影响;祁蒙^[7]研究了红外搜索跟踪系统中探测概率、虚警概率和信噪比三者之间的关系。

尽管目前对空中目标红外信号的抑制以及探测器探测距离的计算已进行了大量研究,但目标机采取红外抑制措施后,对双机飞行过程中的红外隐身效果影响方面的研究很少。文中通过对飞机运动过程和机载红外搜索跟踪系统IRST (Infrared Search and Tracking)探测距离计算进行建模,使用飞行航迹点模拟三种典型的双机空战过程,研究在双机运动过程中,攻击机机载IRST系统对目标机红外辐射信号的探测距离和概率随飞行时间、速度、轨迹的变化,反映目标机采用低发射率红外材料后的红外抑制效果。

1 点源目标探测距离和探测概率计算

1.1 探测距离计算

对于不同的红外探测系统,其探测距离的计算

方法有较大区别。机载IRST系统能在相当大的空间范围内进行搜索、探测与背景对比度相差较大的目标,且不需要观察目标的形状,只要求给出目标的方位、运动方向和数量。一般使用如下方程计算此类点源探测系统的探测距离^[8]:

$$R = \left[\frac{\eta \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (I_{t\lambda} - I_{b\lambda}) \tau_a(\lambda) d\lambda}{NEI \cdot SNR} \right]^{1/2} \quad (1)$$

式中: $I_{t\lambda}$ 为目标的光谱红外辐射强度; $I_{b\lambda}$ 为背景的光谱红外辐射强度; $\tau_a(\lambda)$ 为目标与探测系统之间的大气光谱透过率; SNR 为红外探测系统的信噪比; EI 为等效噪声照度,也就是使探测系统产生单位信噪比的有效照度,其与探测器的各种性能参数有关; η 为目标辐射有效系数,其定义如公式(2)所示:

$$\eta = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{t\lambda} \tau_a(\lambda) \frac{D_{\lambda}^*}{D_{\lambda p}} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{t\lambda} \tau_a(\lambda) d\lambda} \quad (2)$$

式中: D_{λ}^* 为光谱比探测度; $D_{\lambda p}^*$ 为峰值比探测度。

当目标的辐射信号对红外接收系统形成足够的照度,使信噪比大于阈值信噪比,系统能够截获、跟踪目标并给出报警,这时红外探测系统与目标之间的距离即为探测距离。

1.2 探测概率计算

对于一个确定的探测系统,其性能参数是确定的,当目标进入视场,且目标的信号幅度足够大,探测系统就能可靠地截获目标。但是,当信噪比达到一定数值后,对于不同的信噪比,探测系统截获目标的概率会随之变化。红外探测系统的探测概率 P_d 是指在一定条件下,当目标处在系统视场范围内时,系统能够探测到目标的概率。祁蒙^[7]采用信噪比的正态分布函数来确定红外探测概率:

$$P_d = \Phi(SNR - TNR) \quad (3)$$

式中: $\Phi(x)$ 表示标准正态分布函数; SNR 为信噪比; TNR 为阈值信噪比。需要明确的是,信噪比中的噪声是指系统内部的噪声,是一个固定的值,但在设定阈值信噪比数值时不能定制的太低,应该考虑各种使用环境及背景引入的噪声。当有亮云、海天交界、地面以及太阳夹角较小而引入干扰的情况时,探测系统的探测距离会大大减少,探测概率会急剧

降低。

通常使系统可靠工作的阈值信噪比数约为 4~8 之间(背景很复杂时设为 8),系统截获目标或使系统正常工作的概率一般能达到 90%左右,如图 1 所示。阈值信噪比数值越高,探测距离越短,探测概率越高,虚警率越低。

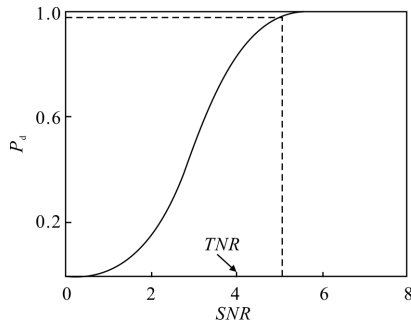


图 1 探测概率与信噪比的关系

Fig.1 Relationship between probability of detection and SNR

2 目标机红外特征与攻击机红外探测系统

2.1 目标机及其红外辐射特征

文中建立了典型单发战斗机的几何模型并计算了其红外辐射特征的分布,如图 2 所示。首先采用 FLUENT 商业软件数值模拟了战斗机在海拔 11 km,马赫数 0.85 飞行条件下的流场、固体表面温度场和燃气组分浓度场,然后采用本课题组自主开发的 NUAA-IRSE 软件计算出战斗机的红外辐射特征分布,具体计算参数见参考文献[2]。

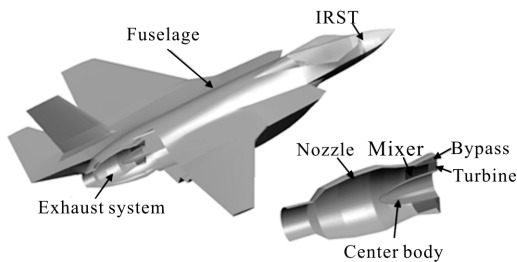


图 2 典型战斗机几何模型

Fig.2 Geometric model of typical fighter

针对蒙皮、涡轮、中心锥和喷管等红外辐射贡献较大的部件,将其表面的发射率由 0.9 降为 0.2 来进行红外抑制,降低目标机的红外信号。图 3 给出了水平探测面上,中波和长波在发射率为 0.9 和 0.2 时的红外积分辐射强度,其中 I_{\max} 为最大积分强度值。

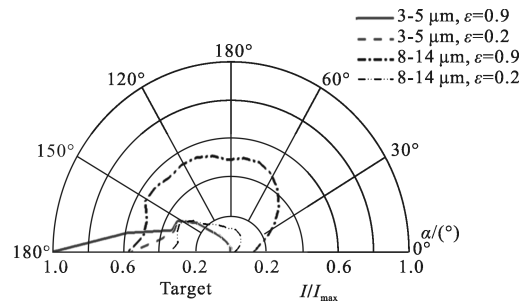


图 3 水平探测面上积分辐射强度对比

Fig.3 Contrast of integral radiation intensity in horizontal detection surface

从图 3 可以看出,采用低发射率红外材料后,在 3~5 μm 波段,红外辐射强度在机身后向降幅较大,其他方向降幅较小,最大降幅在机尾 180°方向,约为 45%;在 8~14 μm 波段,积分红外辐射强度在所有方向降幅都达到 40%以上,最大降幅在机头 0°方向,约为 78%。

机尾 180°方向上 3~5 μm 波段的红外光谱辐射强度对比如图 4 所示,其中 $I_{\lambda,\max}$ 为最大光谱强度值, $\Delta\lambda_{\text{midwave,detector}}$ 为中波探测器实际能够响应的波长范围。从图中可以看出,采用低发射率红外材料后,固体光谱辐射强度明显降低。另外,探测器能够响应的波长范围只占 3~5 μm 波段的一部分。

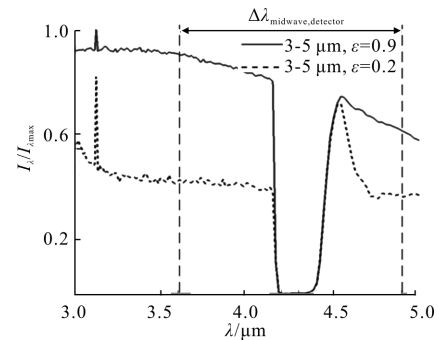


图 4 机尾方向上光谱辐射强度对比

Fig.4 Contrast of spectral radiation intensity in tail direction

2.2 攻击机及其红外搜索跟踪系统模型

在空战过程中,攻击机采用机载 IRST 系统来搜索、跟踪目标。文中假设攻击机以海拔 11 km,马赫数 1.3 的条件下飞行,其机载 IRST 系统的性能参数如下。

中波探测器:工作波段为 3.6~4.9 μm ,等效噪声照度为 $5.06 \times 10^{-14} \text{W}/\text{cm}^2$,水平/垂直扫描视场为 $\pm 75^\circ/\pm 45^\circ$,对目标辐射有效响应系数为 0.8。

长波探测器:工作波段为 7.7~10.3 μm ,等效噪声照度为 $1.32 \times 10^{-13} \text{W/cm}^2$,水平/垂直扫描视场为 $\pm 75^\circ/\pm 45^\circ$,对目标辐射有效响应系数为 0.8。

文中只考虑在理想情况下背景辐射对探测距离和探测概率的影响。由于天空背景的红外辐射与战斗机的红外辐射特征相比较弱,在计算探测距离时忽略公式(1)中的 I_b ,在计算探测概率时探测器的阈值信噪比取为较小的数值(设为 4)。在一定条件下,当探测概率达到 90%时,认为红外探测系统能够截获目标,此时目标与探测系统的相对距离即为截获距离。

3 空战过程模拟

3.1 飞机运动过程

建立飞机运动过程是实现空战模拟的基础,通常选用三自由度质点运动方程。研究空战模拟通常是以评估某种飞机的空战效能为目的,其模拟对象在多数情况下是处于方案设计阶段的新型号,或者是国外的某型飞机。在这两种情况下,一般都没有能满足解算飞机刚体运动方程所需的大量详细数据。

文中重点关注的是空战模拟过程中攻击机对目标机的探测行为,所以简化了飞机的机动问题,其飞行动作是按照一定序列的地球经纬度航迹点来计算的。

对于目标机,只需通过飞行控制模型来按照一定的航迹点进行飞行;对于攻击机,还需在飞行过程中完成对目标机的探测工作。

3.2 大气透过率计算

从公式(1)中可以看出,大气透过率是探测距离计算的一个重要参数。由于空战中双机距离的变化,使得大气透过率的计算条件不断改变,所以在每一次的迭代过程中,都需要重复计算大气透过率。文中采用国外发展的 MODTRAN^[9]软件计算不同大气模型、传输方向和距离条件下的大气透过率。

中波和长波探测器响应波段内不同距离的大气透过率如图 5 和图 6 所示。其中 H 为海拔高度, R 为水平距离。从图中可以看出,在 11 km 高空,随着水平距离的增大,大气透过率急剧减小。这是由于空气中 CO_2 和 H_2O 的吸收作用随着距离的增大变强,吸收带变宽。

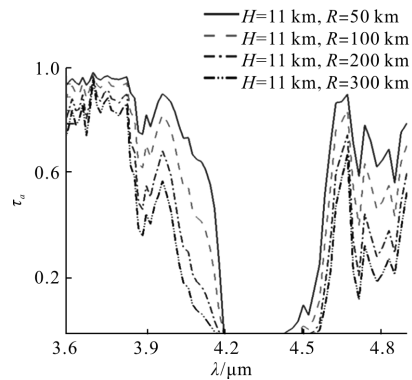


图 5 中波探测器响应波段内不同距离的大气透过率
Fig.5 Atmospheric transmittance of different distances in range of middle wavelength

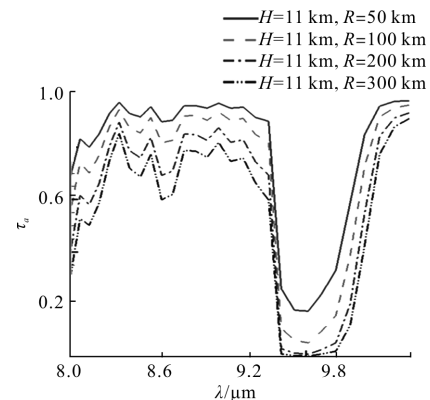


图 6 长波探测器响应波段内不同距离的大气透过率
Fig.6 Atmospheric transmittance of different distances in range of long wavelength

3.3 空战中探测距离和概率计算流程

当目标机处于攻击机机载IRST系统的视场中时,即可根据图7给出的计算流程计算探测距离和概率。

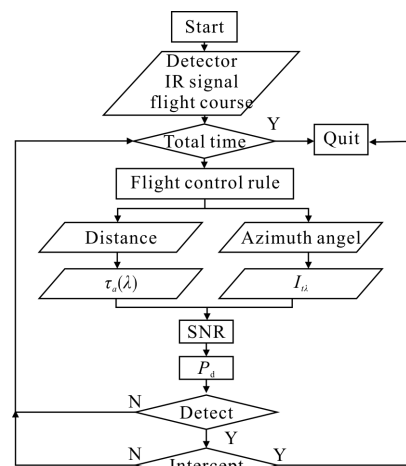


图 7 空战中探测概率的计算流程
Fig.7 Process of detection probability in air combat

空战中探测概率的计算过程如下:

- (1) 输入目标机的红外特征分布、设定攻击机的机载IRST系统参数以及飞行轨迹;
- (2) 根据当前时间步长上攻击机和目标机的空间位置关系,确定目标机是否处在攻击机的探测视场内;
- (3) 通过目标机与攻击机的距离来确定大气透过率;
- (4) 通过目标机与攻击机的相对方位来确定攻击机接收到的目标机红外辐射信号;
- (5) 计算对应距离上的信噪比;
- (6) 通过信噪比计算对应的探测概率;
- (7) 当攻击机的机载IRST系统对目标机红外信号的探测概率达到相应的数值时,即可认为发现目标或截获目标。

4 目标机与攻击机三种典型飞行状态下探测距离和概率计算分析

4.1 目标机与攻击机相向飞行

设定目标机以 0.85 马赫数从经度 0° 、纬度 0° 向经度 0° 、纬度 1° 方向飞行,海拔 11 km;攻击机以 1.3 马赫数从经度 0° 、纬度向经度 1° 、纬度 0° 方向飞行,海拔 11 km;时间步长 1 s。探测距离和概率计算结果如图 8 所示。

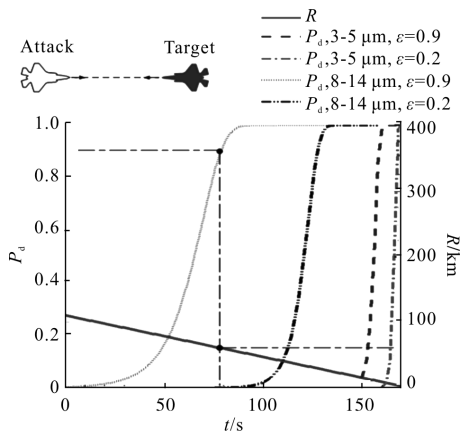


图 8 相向飞行时探测距离和概率随飞行时间的变化
Fig.8 Change of detection range and probability over time in opposite direction

从图中可以看出,随着飞行时间的增加,双机之间的距离 R 逐渐减小,攻击机机载IRST系统对目标机红外信号的探测概率 P_d 逐渐增大。目标机采用

$\varepsilon=0.2$ 的低发射率红外材料后,其红外特征减小,使探测概率的增大速度变得更缓慢,要达到相同探测概率的情况下,探测距离就要变小,飞行时间变长;当双机处于同一距离 R 时,探测概率就要下降。

在目标机的正前方向,其红外特征以 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 的辐射为主, $P_{d,8-14\ \mu\text{m}}$ 的增大速度快于 $P_{d,3-5\ \mu\text{m}}$ 。目标机采用低发射率红外材料抑制红外特征前后,在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段内,目标机红外特征降低 77%(机头方向中波红外辐射强度量值很小)。其被攻击机机载IRST系统截获的时间和距离分别是 158 s、11.1 km 和 168 s、5.5 km,截获时间增幅为 6.3%,截获距离降幅为 50.5%;当双机距离为 11.1 km 时,探测概率分别是 90% 和 0.34%。

在 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 波段内,目标机红外特征降低 78%,截获时间和距离分别是 79 s、61.7 km 和 127 s、30.9 km,截获时间增幅为 60.8%,截获距离降幅为 49.9%;当双机距离为 61.7 km 时,探测概率分别是 90% 和 0.26%。

4.2 目标机与攻击机同向飞行

设定目标机以 0.85 马赫数从经度 0° 、纬度 0° 向经度 0° 、纬度 1° 方向飞行,海拔 11 km;攻击机以 1.3 马赫数从经度 0° 、纬度 -1° 向经度 0° 、纬度 1° 方向飞行,海拔 11 km;时间步长 1 s。探测距离和概率计算结果如图 9 所示。

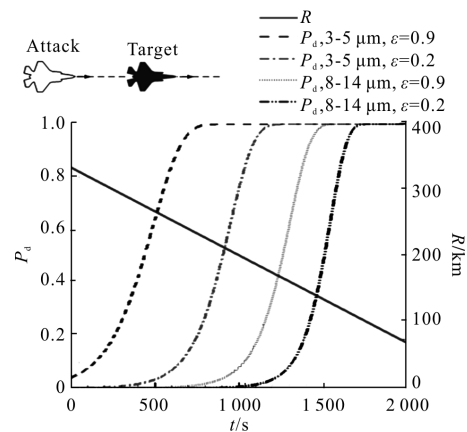


图 9 同向飞行时探测距离和概率随飞行时间的变化
Fig.9 Change of detection range and probability over time in same direction

在目标机的正后方向,其红外特征以 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 的辐射为主, $P_{d,3-5\ \mu\text{m}}$ 的增大速度快于 $P_{d,8-14\ \mu\text{m}}$ 。目标机采用低发射率红外材料抑制红外特征前后,在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$

波段内,目标机红外特征降低 45%,其被攻击机机载IRST系统截获的时间和距离分别是 637 s、250.2 km 和 1 068 s、193 km,截获时间增幅为 67.7%,截获距离降幅为 22.9%;当双机距离为 250.2 km 时,探测概率分别是 90%和 9.1%。

在 8~14 μm 波段内,目标机红外特征降低 42%,截获时间和距离分别是 1407 s、148.1 km 和 1 623 s、119.6 km,截获时间增幅为 15.4%,截获距离降幅为 18.9%;当双机距离为 250.2 km 时,探测概率分别是 90%和 22.5%。

4.3 目标机与攻击机侧向飞行

设定目标机以 0.85 马赫数从经度 0° 、纬度 0° 向经度 0° 、纬度 1° 方向飞行,海拔 11 km;攻击机以 1.3 马赫数从经度 0.5° 、纬度 -2° 向经度 0° 、纬度 1° 方向飞行,海拔 11 km;时间步长 1 s。探测距离和概率计算结果如图 10 所示。

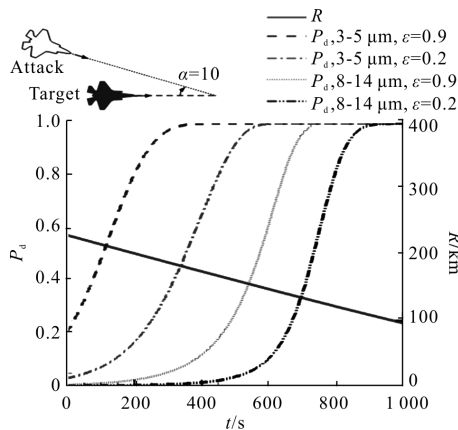


图 10 侧向飞行时探测距离和概率随飞行时间的变化

Fig.10 Change of detection range and probability over time in side direction

在目标机的侧后方向,随着时间变化,攻击机位于目标机的 $165^\circ\sim 180^\circ$ 方向上,目标机的红外特征以 3~5 μm 的辐射为主, $P_{d,3-5\mu\text{m}}$ 的增大速度快于 $P_{d,8-14\mu\text{m}}$ 。目标机采用低发射率红外材料抑制红外特征前后,在 3~5 μm 波段内,目标机红外特征降低 17%~45%,其被攻击机机载IRST系统截获的时间和距离分别是 240 s、196.7 km 和 488 s、162.9 km,截获时间增幅为 103.3%,截获距离降幅为 17.2%;当双机距离为 196.7 km 时,探测概率分别是 90%和 23.2%。

在 8~14 μm 波段内,目标机红外特征降低 37%~42%,截获时间和距离分别是 671 s、138.3 km 和 824 s、

118.3 km,截获时间增幅为 22.8%,截获距离降幅为 14.5%;当双机距离为 138.3 km 时,探测概率分别是 90%和 26.1%。

5 结论

通过文中关于目标机采用低发射率红外抑制对空战中探测距离和概率影响的研究,可以得出以下结论:

(1) 目标机采用低发射率红外材料抑制红外特征后,在相同探测概率的情况下,探测距离明显减小;在攻击机与目标机相同距离的情况下,探测概率明显下降。

(2) 目标机与攻击机相向飞行时,在 3~5 μm 波段内,目标机红外特征降低 77%,截获时间增幅为 6.3%,截获距离降幅为 50.5%;在 8~14 μm 波段内,目标机红外特征降低 78%,截获时间增幅为 60.8%,截获距离降幅为 49.9%。

(3) 目标机与攻击机同向飞行时,在 3~5 μm 波段内,目标机红外特征降低 45%,截获时间增幅为 66.7%,截获距离降幅为 22.9%;在 8~14 μm 波段内,目标机红外特征降低 42%,截获时间增幅为 15.4%,截获距离降幅为 18.9%。

(4) 目标机与攻击机侧向飞行时,在 3~5 μm 波段内,目标机红外特征降低 17%~45%,截获时间增幅为 103.3%,截获距离降幅为 17.2%;在 8~14 μm 波段内,目标机红外特征降低,截获时间增幅为 22.8%,截获距离降幅为 14.5%。

参考文献:

- [1] Zhu Baoliu, Zhu Rongchang, Xiong Xiaofei. Combat Aircraft Performance Evaluation [M]. 2nd ed. Beijing: Aviation Industry Press, 2006. (in Chinese)
朱宝莲,朱荣昌,熊笑非.作战飞机效能评估[M].第2版.北京:航空工业出版社,2006.
- [2] Feng Xiaoxing, Ji Honghu, Si Ren, et al. Numerical study on spatial numerical study on spatial distribution 3-5 μm infrared signature and stealth effect of low emissivity material for fighter aircraft [J]. *Infrared Technology*, 2011, 33(07): 389-394,405. (in Chinese)
冯晓星,吉洪湖,斯仁,等.战斗机 3~5 μm 波段红外特征空间分布及低发射率材料隐身效果分析 [J]. 红外技术,

- 2011, 33(07): 389–394, 405.
- [3] Lü Jianwei, Wang Qiang. Effect of temperature and emissivity of aircraft skin on infrared radiation characteristics [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009(02): 50–54. (in Chinese)
吕建伟, 王强. 飞行器表面温度和发射率分布对红外辐射特征的影响[J]. 光电工程, 2009(02): 50–54.
- [4] Hudson R D. Infrared System Engineering [M]. US: John Wiley & Sons, Inc, 1969.
- [5] Guo Haifeng, Jiang Ning, Lü Mingshan. Detection probability model of infrared receiver system based on infrared detection mechanism [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(S2): 476–477. (in Chinese)
过海峰, 姜宁, 吕明山. 基于红外探测机理红外接收系统探测概率模型[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(S2): 476–477.
- [6] Jia Qinglian, Deng Wenyuan. Detection probability calculation of infrared warning system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(10): 1856–1861. (in Chinese)
贾庆莲, 邓文渊. 红外警戒系统的探测概率计算 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(10): 1856–1861.
- [7] Qi Meng. Detection probability of IR search and track system [J]. *Laser & Infrared*, 2004, 34(04): 269–271. (in Chinese)
祁蒙. 红外搜索跟踪系统的探测概率研究[J]. 激光与红外, 2004, 34(04): 269–271.
- [8] Wu Hanping, Yi Xinjian, Yang Kuntao. Distance of infrared search and track system and its equivalent examination [J]. *Infrared Technology*, 2004, 26(4): 1–5. (in Chinese)
吴哈平, 易新建, 杨坤涛. 红外搜索系统的作用距离及其等效检验[J]. 红外技术, 2004, 26(4): 1–5.
- [9] Zhang Jianqi. Infrared Physics [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2004. (in Chinese)
张建奇. 红外物理 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004.