

诱饵参数对面源红外诱饵干扰效能的影响

李传良¹, 李韬锐^{1*}, 王超哲²

(1. 空军工程大学 航空机务士官学校, 河南 信阳 464000;
2. 空军工程大学 航空工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要: 面源红外诱饵作为一种主动干扰型的红外对抗装备, 与传统的红外诱饵弹相比, 在运动特性和干扰效能等方面有显著的优越性。综合考虑到试验的成本和干扰效能评估的效率, 文中提出了一种基于空战对抗仿真算例的效能评估思路: 首先, 建立了导弹运动模型、介绍了跟踪优化算法和抗干扰识别算法; 其次, 重点分析了飞机蒙皮红外辐射特性的求解过程; 然后, 分析了诱饵箔片的运动扩散模型以及燃烧优化算法; 最后, 改变面源诱饵的参数, 如发射角度、发射高度以及发射速度, 进行干扰成功率的仿真计算。将仿真结果与实测数据进行对比, 验证了效能评估思路的可行性, 基本满足干扰效能评估的要求。

关键词: 诱饵特性; 面源红外诱饵; 干扰效能; 仿真评估

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210006

Influence of parameters of decoy on jamming effectiveness of surface source infrared decoy

Li Chuanliang¹, Li Taorui^{1*}, Wang Chaozhe²

(1. Aviation Maintenance Sergeant School, Air Force Engineering University, Xinyang 464000, China;
2. Aeronautics Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: Surface source infrared decoy regarded as an active interference type infrared countermeasure equipment, compared with traditional infrared decoy, has obvious superiority in motion characteristics, jamming effectiveness and so on. Considering the economy of cost and evaluate efficiency, a kind thought which could simulate the testing work based on air confrontation examples was proposed. Firstly, the missile motion model, tracking optimization algorithm and anti-jamming recognition algorithm were established. Secondly, the infrared radiation characteristics of the aircraft skin was focused. Then the motion model of decoy foil was built and the combustion algorithm was optimized. Finally, through changing factors, such as the launch angle, height and speed of decoy, jamming effectiveness was tested. The simulated result is close to real data, verifying the effectiveness evaluation thought is feasible and basically meeting the demand of evaluating.

Key words: decoy factor; surface source infrared decoy; jamming effectiveness; simulation and evaluation

收稿日期: 2021-01-12; 修订日期: 2021-04-14

基金项目: 陕西省自然科学基金 (2019JQ-290)

作者简介: 李传良, 男, 讲师, 硕士, 主要从事飞行器设计、飞行器红外对抗仿真方面的研究。

通讯作者: 李韬锐, 男, 助教, 硕士, 主要从事红外对抗仿真等方面的研究工作。

0 引言

红外成像导弹作为目前红外对抗中主要的杀伤武器,具有抗干扰能力强、命中率高的优势特点,已经严重威胁到了现代战斗机的战场生存^[1]。

传统的红外诱饵弹属于点源形式,发射到空中后,会产生强烈的红外辐射,可以干扰能量质心式的红外导弹^[2]。在对抗红外成像导弹的过程中,大多采用齐发或连发等形式,诱饵扩散后与飞机的红外辐射相差较大,有效干扰时间不长,干扰效果并不理想,无法适应现代战争的实战需求。

随着主动红外干扰技术的日益成熟和广泛应用,面源红外诱饵逐步走向部队,得到了空军部队的广泛应用^[3]。面源红外诱饵的体积相对较大,由千余片很轻、很薄的诱饵箔片相互叠加压制而成。当诱饵发射出去后,诱饵箔片在空中自由扩散,表面的易燃金属会迅速燃烧,产生高辐射强度燃烧火焰,在飞机的后半球形成椭球状的箔片云团。箔片云团产生的红外辐射强度远高于目标机本身,相比于传统的红外诱饵弹来讲,能够形成更长时间地有效遮挡,延长了红外成像导弹跟踪、识别和锁定目标的时间,干扰成功率得到大幅提升。

目前,国内对于面源红外诱饵相关理论研究正处于起步发展的阶段,同时也只进行了某些特定条件下实验验证。童奇等^[4]结合特定的实战场景,计算了不同释放距离和投放数量下,面源红外诱饵的干扰成功率,并提出了相应条件下目标机红外对抗的防御策略;胡一樊等^[5]结合面源诱饵、目标机以及跟踪视线的相对位置关系,提出了一种诱饵效能的评估方法;李韬锐等^[6]结合红外对抗的对象,建立了效能评估仿真系统,通过改变目标机、导弹和诱饵的相关参数,进行算例仿真,来验证仿真系统建立的合理性。文中以自然科学基金机载吊挂抛撒式面源红外诱饵有效载荷扩散规律研究(2019JQ-290)为依托,开展了相关的理论研究,提出了一种效能评估仿真思路,诱饵干扰效能评估思路如图 1 所示。文中通过改变面源诱饵的发射角度、发射高度以及发射速度,统计干扰成功率,并与实际的测试结果进行对比,来验证仿真评估思路的可行性和正确性,并为下一步评估系统的完善,提供相关的理论支撑。

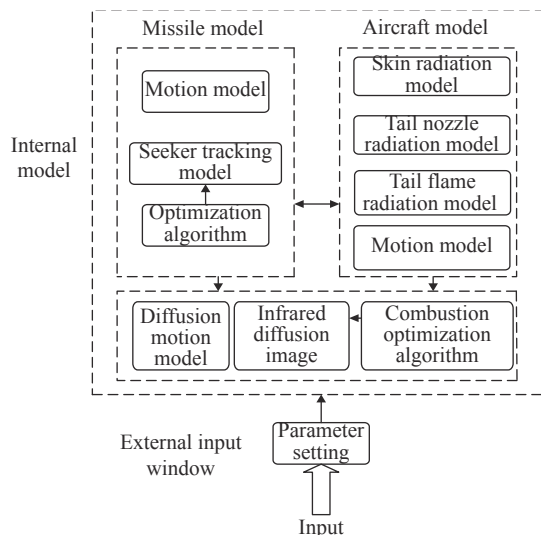


图 1 诱饵干扰效能评估思路

Fig.1 Thought of decoy jamming evaluation

1 导弹模型

1.1 运动模型

在建模过程中,将导弹视为刚体,不考虑其弹体的变形和旋转,在此基础上,建立导弹质心的动力学方程和运动学方程。

$$\begin{cases} m \frac{dV}{dt} = P \cos \alpha \cos \beta - X - G \sin \theta \\ mV \frac{d\theta}{dt} = P \sin \alpha + Y - G \cos \theta \\ mV \cos \theta \frac{d\psi_c}{dt} = P \cos \alpha \sin \beta - Z \end{cases} \quad (1)$$

式中: P 为飞机发动机推力; G 为导弹的重力; X 为气动阻力; Y 为升力; Z 为侧向力; α 为导弹攻角; θ 为导弹航迹俯仰角; β 为导弹侧滑角; ψ_c 为导弹航向角。

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = V \cos \theta \cos \psi_c \\ \frac{dy}{dt} = V \sin \theta \\ \frac{dz}{dt} = -V \cos \theta \sin \psi_c \end{cases} \quad (2)$$

气动阻力 X 、升力 Y 和侧向力 Z 都属于导弹的气动力,且可以由导弹的攻角 α 和侧滑角 β 的函数表示: $X = X(\alpha, \beta)$, $Y = Y(\alpha, \beta)$, $Z = Z(\alpha, \beta)$ 。导弹在飞行过程中,舵面会发生偏转,这将会改变 α 和 β 值,舵面的偏转程度用舵偏角表示。假设导弹运动“瞬时平衡”,它们的关系式表示如下:

$$\begin{cases} \alpha = -\frac{m_z^{\delta_z}}{m_z^a} \delta_{zb} \\ \beta = -\frac{m_y^{\delta_y}}{m_y^b} \delta_{yb} \end{cases} \quad (3)$$

导弹在理想弹道飞行时,航迹俯仰角为 θ 、航向角为 ϕ_c ,则导弹的操纵方程可表示为:

$$\begin{cases} \delta_{zb} = k_x(\theta_l - \theta) \\ \delta_{yb} = k_y(\psi_{c,l} - \psi_c) \end{cases} \quad (4)$$

1.2 跟踪优化算法

导弹在跟踪识别的过程中,存在记忆周期,若之前已经锁定目标,则持续跟踪;若失去已知目标,则导引头重新进入搜索状态。在导弹的再次搜索过程中,采用了迭代贪心算法,以此来快速搜寻最佳的红外辐射特征^[7]。如下是算法的伪代码的逻辑思路:

GREEDY-ACTIVITY-SELECTOR (x, B)

$n=x.length$

$B=\{a_1\}$

$k=1$

for $m=2$ to n

if $abs(a_m - a_1) = \min\{abs(x[m] - a_1)\}$

$B=B \cup \{a_m\}$

$k=m$

return B

1.3 抗干扰识别算法

算法在开始时,将 T 时刻,导引头视场范围内目标的红外辐射特征记忆下来,同时将环境因素的干扰考虑在内。导弹在锁定目标之后,通过收缩视场角,判别波门阈值,最终将目标锁定,进行追踪。如果在追踪的过程中,视场范围内的红外辐射强度急剧改变,原因可能有两种:一种是目标机进入了加力状态,另一种则是目标机释放了诱饵。当感受到辐射强度急剧变化时,导引头迅速进入抗干扰状态,采取抗干扰措施,同时将之前已经记忆的红外辐射特征进行储存。当跟踪目标的像点发生分离时,导引头通过跟踪优化算法进行解算,选择与记忆的红外辐射特征吻合度最高的目标。如果跟踪的目标像点没有发生分离,则判定为发动机进入了加力状态,导引头退出抗干扰识别状态,继续跟踪之前周期内锁定的目标特征。如果导引头在跟踪的过程中,丢失了目标辐射特征,导引头便放大跟踪视场角,重新进入搜索状态^[8]。抗干扰识别算法的流程框图如图 2 所示。

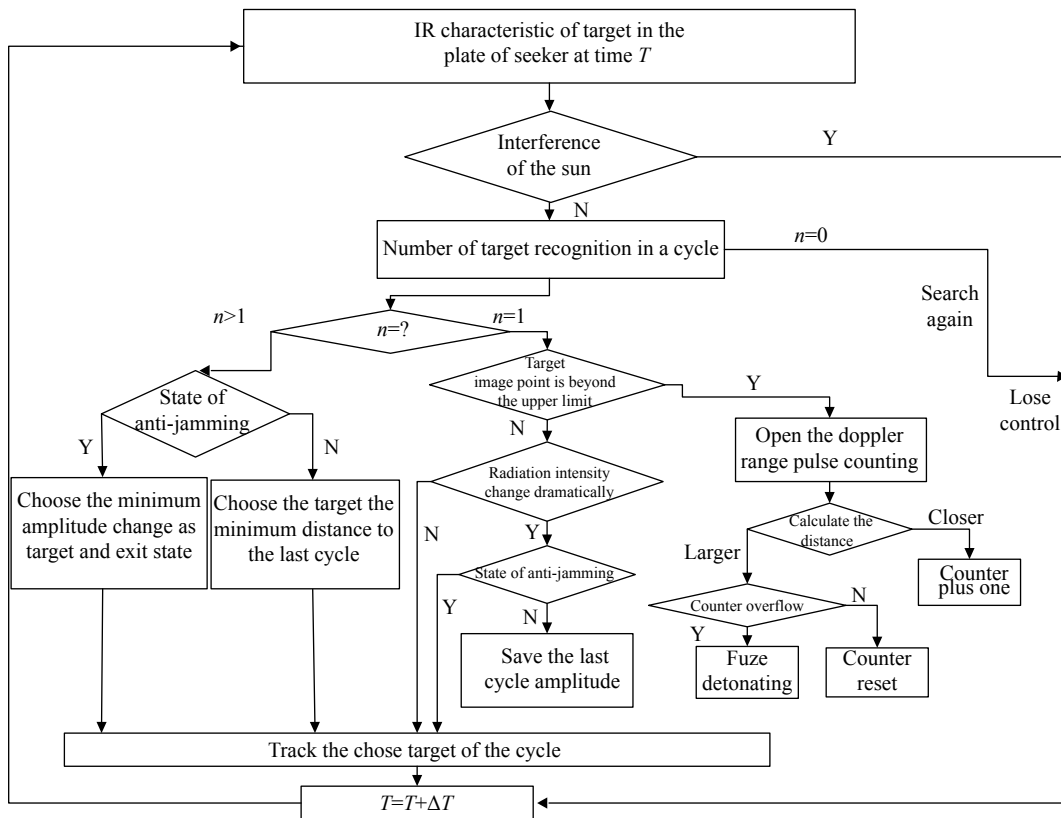


图 2 抗干扰识别优化算法

Fig.2 Optimization algorithm of anti-interference recognition

2 飞机红外辐射模型

飞机的运动模型在参考文献 [9] 中有具体的说明, 这里不再做详细的说明。

飞机的红外辐射主要来自于自身的排气系统和机体的热辐射。排气系统的红外辐射在参考文献 [2] 中有详细讲解, 该节重点分析飞机机体的红外辐射。机体辐射部分包含两部分: 一部分是机体自身发射的红外辐射, 另一部分是机体反射的外界红外辐射。

机体表面的结点 i 处的红外辐射亮度 L_i 的计算公式为:

$$L_i = L_i^{(1)} + L_i^{(2)} \quad (5)$$

式中: $L_i^{(1)}$ 为结点 i 处的自身辐射; $L_i^{(2)}$ 为结点 i 处的机体反射辐射。计算公式分别为:

$$L_i^{(1)} = \frac{\varepsilon_i}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5 [e^{c_2/(\lambda T_{sur})} - 1]} d\lambda \quad (6)$$

$$L_i^{(2)} = \frac{1 - \alpha_i}{\pi} L_{sun, \lambda_1, \lambda_2} \cos \theta_D \cos \theta_S \quad (7)$$

式中: θ_D 和 θ_S 分别为结点 i 处的外法向与视线方向和太阳直射光线的夹角。对于视场角为 $\theta_1 \times \theta_2$ 、像素数 $PIX_1 \times PIX_2$ 的红外探测器, 不考虑其光学系统的畸变效应的影响, 结点 i 的视场面积 A_i 为:

$$A_i = \frac{[2d \tan(\theta_1/2)][2d \tan(\theta_2/2)]}{PIX_1 PIX_2} \quad (8)$$

式中: d 为距离。 I_i 的计算公式为:

$$I_i = \sum_{i=1}^{PIX_1 PIX_2} C_i L_i A_i \quad (9)$$

式中: L_i 为第 i 个结点的辐射亮度; C_i 为标识符, $C_i = 1$ 表示第 i 个结点属于目标, 否则, $C_i = 0$ 。

设置飞行速度 $1.6 Ma$, 飞行高度 11 km , 迎角为 0° , 不同平面机体辐射的计算结果如图 3~5 所示, 假设发动机喷管中的热气体处于完全膨胀状态。

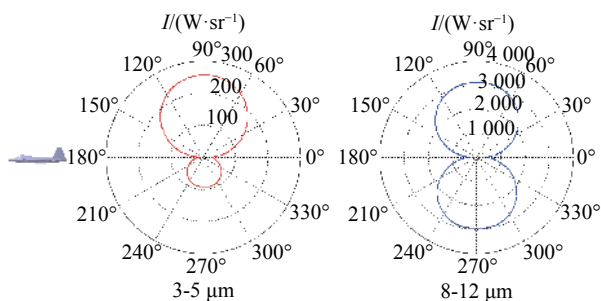


图 3 xOy 平面的红外辐射强度

Fig.3 Infrared radiation intensity of xOy plane

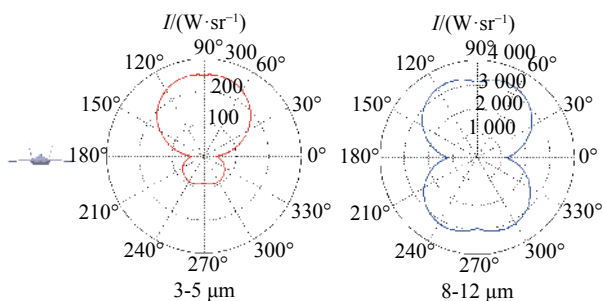


图 4 yOz 平面的红外辐射强度

Fig.4 Infrared radiation intensity of yOz plane

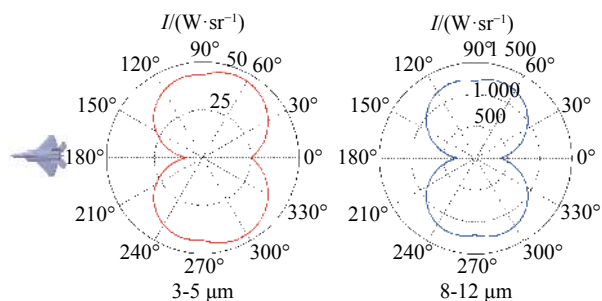


图 5 xOz 平面内的红外辐射强度

Fig.5 Infrared radiation intensity of xOz plane

3 面源诱饵模型

3.1 运动模型

由于面源诱饵包括众多的诱饵箔片, 运动模型建模时, 先从单个箔片的运动入手, 待求解完成之后, 再通过设置诱饵箔片的初始姿态角和旋转角速度的概率分布情况, 就可得到空间扩散运动的图像^[10]。在航迹坐标系中建立单个箔片的动力学方程:

$$\begin{cases} m \frac{dV}{dt} = -X - mg \sin \theta \\ mV \frac{d\theta}{dt} = Y \cos \gamma_s - mg \cos \theta \\ mV \cos \theta \frac{d\psi_s}{dt} = -Y \sin \gamma_s \end{cases} \quad (10)$$

式中: θ 为俯仰角; γ_s 为速度滚转角; ψ_s 为航向角; X 、 Y 为 X 和 Y 方向的气动力。图 6 为诱饵箔片的受力示意图。

箔片在旋转过程中, 旋转力矩是由升力产生。力矩方程在速度坐标系中可以表示为:

$$\begin{cases} J \dot{\omega} = Y_a x_F \cos \alpha - M_d \\ J = mR^2/4 \end{cases} \quad (11)$$

式中: ω 为角速度; J 为转动惯量; Y_a 为升力; M_d 为阻尼力矩; x_F 为气动中心与重心之间的距离。

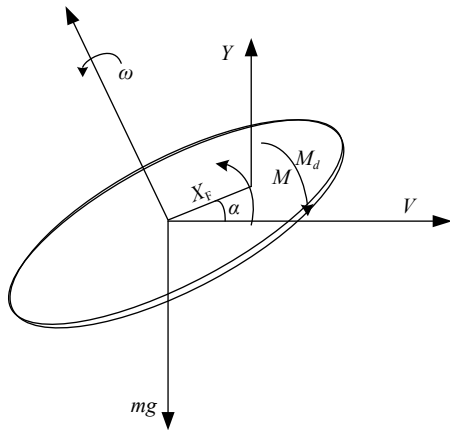


图 6 箔片受力示意图

Fig.6 Force schematic diagram of foil

3.2 燃烧优化算法

诱饵箔片的辐射强度是在温度场的基础上进行求解的^[6,11]。求解完成后,再采用动态规划法,来解决整体的辐射强度。求解思路如下^[7]:

- (1) 设定面源诱饵的数量规模。一般根据实际数量来定义,设为 1000;
- (2) 将单片诱饵箔片作为最小的求解单元,进行辐射强度的计算;
- (3) 通过递归运算,增加求解规模。求解出来的结果均被保存下来,可直接调用。当到达定义的数学规模时,递归调用终止,输出数据。

(4) 通过运算转换,图像处理,空间分布的灰度图像。图 7 为燃烧优化算法求解流程。

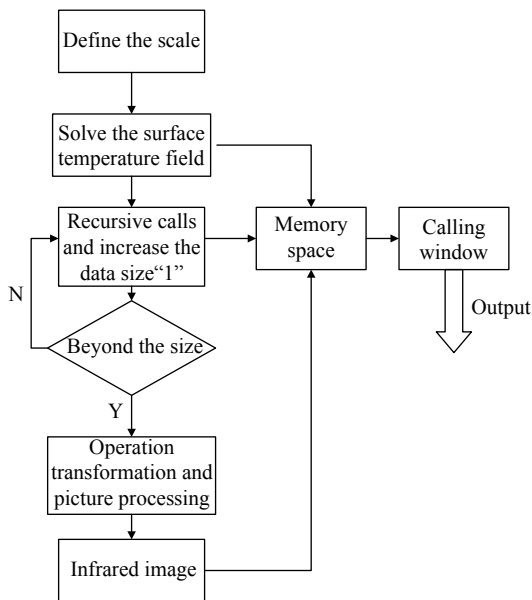


图 7 燃烧优化算法

Fig.7 Combustion optimization algorithm

4 面源诱饵干扰效能仿真分析

在模型的基础上,重点分析了诱饵发射角度、发射高度和发射初速度三个诱饵参数,对面源红外诱饵干扰效能的影响。将导弹的脱靶量作为干扰效能评估的指标,统计诱饵释放后干扰成功的概率。

某些特定条件下的仿真结果与实测数据比对,进行验证。实测数据的实验条件与仿真条件相同。

4.1 面源诱饵发射的角度特性

初始条件:飞机飞行高度为 9000 m,飞行速度为 0.75 Ma,平飞;导弹距目标机 5000 m;以 30 m/s 的速度发射面源诱饵,数量 2 枚,改变诱饵的发射角度,仿真 3000 次。

图 8~9 为 45°和 75°时的灰度图像序列。从灰度

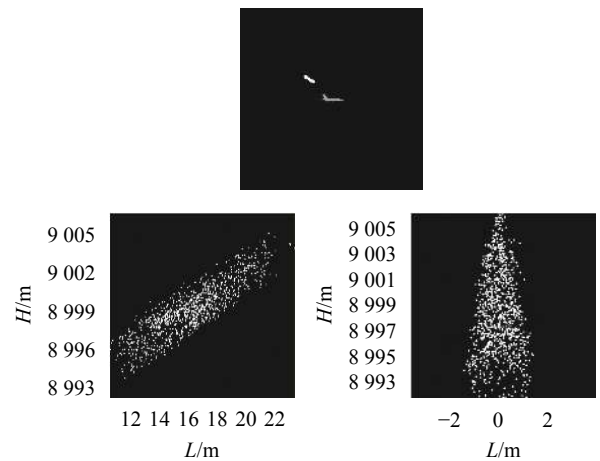


图 8 45°灰度图像序列

Fig.8 45°sequency gray image

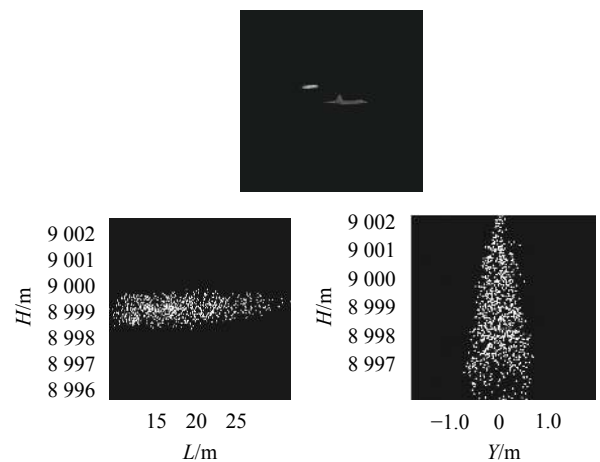


图 9 75°灰度图像序列

Fig.9 75°sequency gray image

图像的分布可以看出,箔片云团最终的扩散形状呈椭圆形,能够充分遮挡住飞机尾部的辐射区域,极大地影响红外成像导弹对目标的识别,达到了预期的遮挡目的,可以提高目标机的生存能力。

面源诱饵角度特性曲线如图 10 所示,通过仿真曲线可知,在发射角度增大的过程中,导弹未击中目标的概率是先增大再逐渐减小的,在 60~75°附近干扰效果最佳。原因主要在于,当发射角度处于最佳的发射区间时,诱饵箔片充分扩散后,在导引头视场内的辐射亮度是均匀分布的,能形成长时间的有效干扰区域。当发射角度较大或较小时,会受到飞机尾流气流扰动的影响,有效干扰时间较短,干扰效果不好。

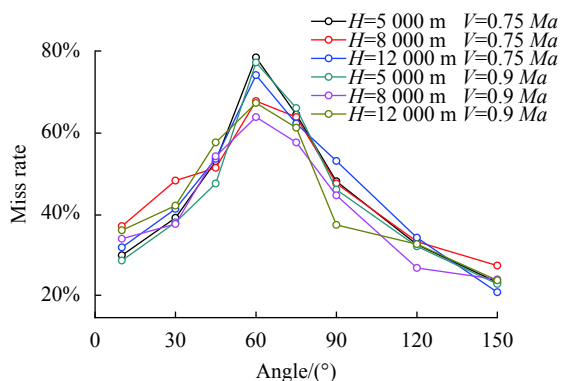


图 10 面源诱饵角度特性曲线

Fig.10 Angle characteristics curve of surface source decoy

4.2 面源诱饵发射的高度和速度特性

初始条件:发射高度为 5000 m、8000 m 和 11000 m;飞行速度为 0.75 Ma 和 0.9 Ma,平飞;发射角度选择为 25°、45°、75°、90°,发射数量 1 枚,其余条件不变,仿真 3000 次。

图 11 是不同高度下的红外对抗序列,表 1 统计了同一速度,不同高度下,面源红外诱饵的干扰成功率。仿真统计的数据将结果与实际的情况进行了对比,在误差范围之类,所得的数据和结论具有一定的可信性。

从红外对抗序列和统计的数据表中可以看出,随着诱饵发射高度的增加,干扰成功率先下降,再逐渐增加,总体上变化的幅度不大。原因在于在低空时,空气密度相对较大,面源诱饵箔片在扩散过程中,受气流扰动的影响较为明显;相反在高空时,空气密度相对较小,箔片的扩散并不充分。当发射高度发生变化时,要结合具体情形,及时调整发射的角度,并结合实际的飞行场景,采用合理的机动动作,进而保证面源诱饵的最佳干扰效能。

图 12 是不同发射速度下的红外对抗序列,表 2 统计了同一高度,不同速度下面源红外诱饵的干扰成功率。仿真统计的数据将结果与实际的情况进行了对比,在误差范围之类,所得的数据和结论具有一定的可信性。

从红外对抗序列和统计的数据表中可以看出,当发射速度增加时,面源诱饵的干扰成功率先上升,再缓慢下降。主要原因在于目标机的飞行速度很大,相对于面源诱饵箔片的扩散速率来说是很大的。因此,在诱饵发射出去后,目标机必须根据诱饵箔片的扩散情况和燃烧程度,采取必要的机动飞行。这样才能最大限度地发挥面源红外诱饵的干扰效果,遮挡了导弹的识别区域,形成了有效干扰,提升了干扰的成功率。但是如果目标机飞行速度过大,也有可能超出面源诱饵的有效干扰区域。

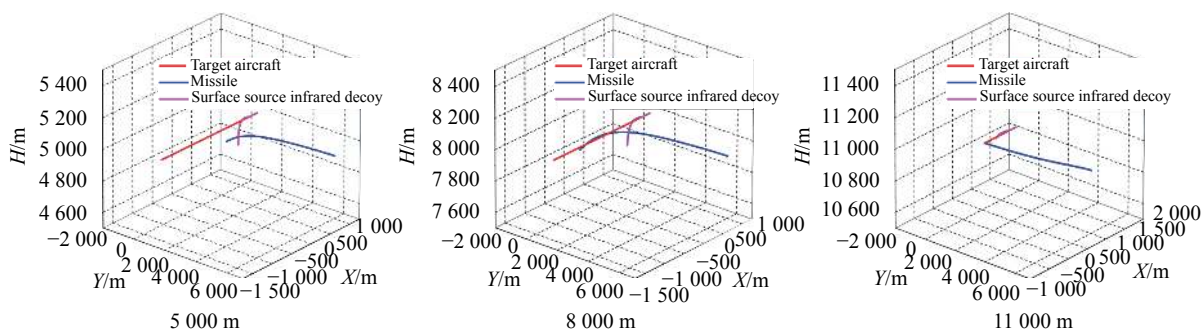


图 11 不同高度下的红外对抗序列

Fig.11 Infrared countermeasure sequences at different altitudes

表 1 同一速度 (0.75 Ma), 不同高度下的干扰成功率

Tab.1 Interference success rate at different height and the speed of 0.75 Ma

| Launch angle/(°) | 25 | 45 | 75 | 90 |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Miss target/time 5 000 m | 1 206 | 1 644 | 2 328 | 1 506 |
| Miss probability in simulation | 40.2% | 54.8% | 77.6% | 50.2% |
| Miss probability in reality | - | - | ≥75% | ≥45% |
| Error | - | - | 3.5% | 11.6% |
| Miss target/time 8 000 m | 1 464 | 1 545 | 2 037 | 1 431 |
| Miss probability in simulation | 48.8% | 51.5% | 67.9% | 47.7% |
| Miss probability in reality | - | - | ≥62% | ≥45% |
| Error | - | - | 9.0% | 4.3% |
| Miss target/time 11 000 m | 1 308 | 1 575 | 2 217 | 1 596 |
| Miss probability in simulation | 43.6% | 52.5% | 73.9% | 53.2% |
| Miss probability in reality | - | - | ≥70% | ≥50% |
| Error | - | - | 5.6% | 6.4% |

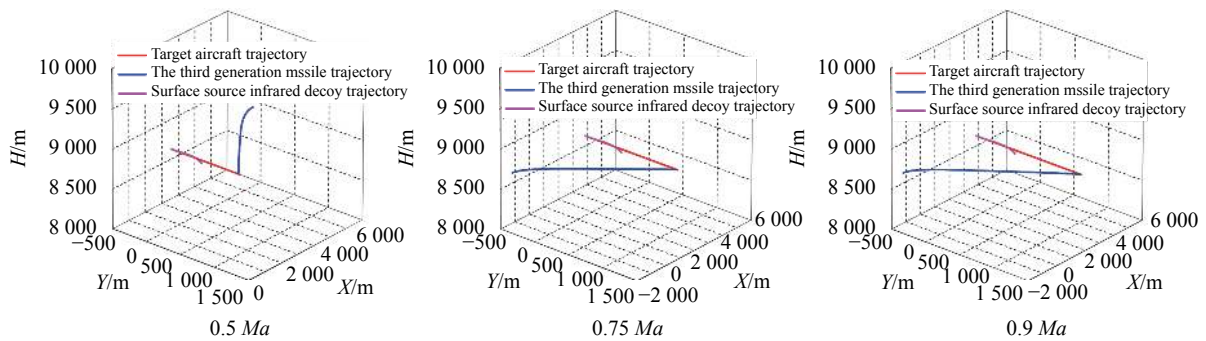


图 12 不同速度下的红外对抗序列

Fig.12 Infrared countermeasure sequences at different speeds

表 2 同一高度 (8000 m), 不同速度下的干扰成功率

Tab.2 Interference success rate at different speed and the height of 8000 m

| Launch angle/(°) | 25 | 45 | 75 | 90 |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Miss target/time 0.5 Ma | 1 158 | 1 629 | 1 962 | 1 314 |
| Miss probability in simulation | 38.6% | 54.3% | 65.4% | 43.8% |
| Miss probability in reality | - | - | ≥60% | ≥42% |
| Error | - | - | 4.0% | 4.7% |
| Miss target/time 0.75 Ma | 1 122 | 1 455 | 2 340 | 1 413 |
| Miss probability in simulation | 37.4% | 48.5% | 78.0% | 47.1% |
| Miss probability in reality | - | - | ≥75% | ≥45% |
| Error | - | - | 4.3% | 4.6% |
| Miss target/time 0.9 Ma | 1 245 | 1 776 | 2 001 | 1 158 |
| Miss probability in simulation | 41.5% | 59.2% | 66.7% | 38.6% |
| Miss probability in reality | - | - | ≥65% | ≥35% |
| Error | - | - | 2.6% | 10.3% |

5 结 论

从实战对抗的角度出发,结合场景算例,提出了一种基于红外对抗仿真算例的干扰效能评估思路:建立了导弹的运动、导引头跟踪及抗干扰识别模型,将飞机的红外辐射特性进行重点分析。从单个箔片入手,建立面源诱饵运动扩散及红外辐射模型。通过改变面源诱饵的发射参数,进行干扰效能的分析。结果表明:发射角度在 $60^{\circ}\sim 75^{\circ}$ 区间内干扰效果最佳,而且对干扰效能影响较为显著;发射高度和发射速度对干扰效能影响较小,要结合必要的机动飞行进行分析计算,但高度和速度的影响,在真实的场景中又不可忽视,必须考虑在内。

参考文献:

- [1] Li Chuanliang, Tong Zhongxiang, Zhao Daowen. Research on methods of countermining infrared imaging air-to-air missile [J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(12): 1355-1359. (in Chinese)
- [2] Li Taorui, Tong Zhongxiang, Huang Hesong, et al. Study on infrared radiation characteristic of aircraft [J]. *Laser & Infrared*, 2017, 47(2): 189-194. (in Chinese)
- [3] Li Bingrong, Liu Feng, Wang Xinxin. The image simulation of the IR decoy countermeasuring IR guidance missile [J]. *Electro-optic Warfare & Radar Passive Countermeasures*, 2003, 2(5): 15-17. (in Chinese)
- [4] Tong Qi, Li Jianxun, Fang Yangwang, et al. Simulation research on surface-type infrared decoy for jamming infrared imaging guided missile [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(4): 1150-1157. (in Chinese)
- [5] Hu Yifan, Song Bifeng, Wang Xu, et al. Method of evaluating the effect of airborne infrared decoy [J]. *Infrared Technology*, 2009, 31(3): 136-140. (in Chinese)
- [6] Li Taorui, Tong Zhongxiang, Li Shenbo, et al. Simulation study of jamming effectiveness evaluation system of surface source infrared decoy [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(3): 0304001. (in Chinese)
- [7] Cormen T H, Leiserson C E, Rivest R L, et al. Introduction to Algorithm[M]. Massachusetts: MIT Press, 2005.
- [8] Huang Hesong, Tong Zhongxiang, Li Jianxun, et al. Functional simulation of infrared air-to-air missiles based on combat assessment [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(3): 803-809. (in Chinese)
- [9] Li Shenbo, Li Taorui, Tong Zhongxiang, et al. Influence of tactical parameters of missile on jamming effectiveness of surface source infrared decoy [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(7): 0704004. (in Chinese)
- [10] Zou Tao, Tong Zhongxiang, Wang Chaozhe, et al. Diffusion regularity study of foil surface-type infrared decoy [J]. *Acta Aeronauticae Astronautica Sinica*, 2016, 37(9): 2634-2645. (in Chinese)
- [11] Li Taorui, Tong Zhongxiang, Huang Hesong, et al. Jamming effectiveness simulation of surface source infrared decoy in air confrontation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(9): 0904002. (in Chinese)