

## 导弹战术参数对面源红外诱饵干扰效能影响

李慎波, 李韬锐, 童中翔, 黄鹤松

(空军工程大学 航空航天工程学院, 陕西 西安 710038)

**摘要:** 面源红外诱饵作为对抗红外成像导弹的一种新型干扰器材, 其燃烧速率、扩散范围、干扰效能等性能, 比传统红外诱饵具有明显优势。深入研究红外成像导弹的抗干扰机理, 对于提升面源红外诱饵的干扰效能, 具有重要意义。首先, 介绍了导弹运动和导引头跟踪模型, 以及跟踪优化算法; 其次, 建立了目标机的运动和辐射模型, 面源红外诱饵运动扩散模型和红外图像模型; 最后, 选择导弹的战术参数, 制定干扰效能评估的指标, 通过算例仿真与实测数据进行对比, 验证仿真结果的可靠性。仿真结果表明, 导弹参数对于面源红外诱饵干扰效能影响的仿真结果与实测结果吻合, 效能评估的结果具有一定的参考价值。

**关键词:** 红外对抗; 面源红外诱饵; 导弹战术参数; 干扰效能; 算法优化

**中图分类号:** TN215      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0704004

## Influence of tactical parameters of missile on jamming effectiveness of surface source infrared decoy

Li Shenbo, Li Taorui, Tong Zhongxiang, Huang Hesong

(Aeronautics and Astronautics Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

**Abstract:** Surface source infrared decoy is regarded as the new type weapon to confront infrared guided missile. In comparison with traditional infrared decoy, it has obvious superiority in burning rate, diffusion range, jamming effectiveness and so on. It's of great significance to study the anti-interference mechanism of infrared guided missile for improving the jamming effectiveness. Firstly, the models of missile motion, seeker tracking and the optimization algorithm of tracking were introduced. Secondly, the models of flight motion and radiation were established, as well as models of surface source infrared decoy diffusion and infrared image. Finally, the tactical parameters of missile was selected and the indicator of effectiveness evaluation was formulated, based on which, comparing the simulation results with testing data to verify the reasonability of simulation result. It's concluded from simulation that the simulation results of the influence of tactical parameters of missile on jamming effectiveness of surface source infrared decoy match the testing data, being of great reference value.

**Key words:** infrared confrontation; surface source infrared decoy; tactical parameters of missile; jamming effectiveness; algorithm optimization

收稿日期: 2018-02-10; 修订日期: 2018-03-20

基金项目: 国家自然科学基金(61471390)

作者简介: 李慎波(1989-), 男, 博士生, 主要从事武器系统作战运用方面的研究。Email: muzixiaosi@163.com

导师简介: 童中翔(1958-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事飞行器设计、论证与红外对抗仿真方面的研究。Email: tzxkg@163.com

## 0 引言

随着红外对抗信息化水平的提升,红外导引头的目标识别跟踪、制导精度和抗干扰性能等得到大幅度提升,红外制导导弹在空战对抗中越来越发挥着主力军作用<sup>[1]</sup>。基于红外成像技术的成熟运用,红外制导导弹朝着“四高”的方向发展,使“不接触作战”打击成为可能<sup>[2]</sup>。面源红外诱饵作为一种效费比高的红外干扰手段,得到世界各国的陆续装备使用,成为替代传统点源红外诱饵弹的新型红外干扰器材,广泛应用于空战对抗中<sup>[3]</sup>。诱饵箔片表面可燃性金属燃点低,遇到空气后迅速扩散并自燃,在飞机尾部形成具有一定形状的红外辐射云团,能产生与目标机相近的辐射特性。

红外制导导弹作为面源红外诱饵的干扰对象,能够快速、准确地评估其在各种攻击态势下面源红外诱饵的干扰效能,对于提高飞机的生存力水平意义重大。美国爱德华空军基地飞行试验中心成立的 AFEWS 红外对抗仿真平台,由计算硬件、诱饵干扰模型、激光/红外干扰机模型、导弹攻击模型、飞机动态模型、效能评估模型等组成,其中红外导引头为实物安装,可全向跟踪,具备模拟真实战场条件下红外对抗系统的能力<sup>[4]</sup>;瑞典 Saab 公司开发的 GSIM 红外成像导引头仿真器和 TACSI 战术仿真系统,能够对红外成像导引头进行抗干扰性能测试<sup>[5]</sup>。但由于保密原因,国外的测试数据很难获得,参考文献价值不大。目前,国内的研究进展基本上处于理论探索阶段,对于红外对抗双方之间参数的相互影响研究较少,相关实验的开展与验证很少进行。童奇等<sup>[6]</sup>计算了面源红外诱饵不同释放距离和释放数量下,红外成像导弹的杀伤成功概率,并未考虑导弹参数的影响效果;张晓阳等<sup>[7]</sup>对诱饵不同释放条件下,导弹的抗干扰性能进行了仿真建模,进一步完善了抗干扰性能指标。

文中以国家自然科学基金“机载面源红外诱饵作用机理及干扰策略研究”为依托,在上述研究背景下,基于实战条件,开展导弹战术参数对面源红外诱饵干扰效能影响的仿真研究,并将仿真结果与测试实验数据进行对比,其中,测试的红外图像,部分条

件下干扰成功率的相关数据均来自于合作的航天科工集团某研究所,数据真实可靠。通过实验结果和仿真结果对比,充分验证仿真结果的准确性和有效性,为进一步完善效能评估系统提供有力的支撑。

## 1 导弹模型

### 1.1 导弹运动模型

根据导弹飞行力学知识,在导弹的航迹坐标系中,导弹飞行中的运动求解可以分为求解导弹随质心的运动方程和绕质心的转动方程。在此将导弹运动视作刚体运动,在求解过程中导弹运动学方程简化为:

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

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

$$\begin{cases} \alpha = \omega_y \sin \gamma + \omega_z \cos \gamma \\ \varphi_c = (\omega_y \cos \gamma - \omega_z \sin \gamma) / \cos \alpha \\ \gamma = \omega_x - \tan \alpha (\omega_y \cos \gamma - \omega_z \sin \gamma) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\varphi_c$ 为导弹导引头的偏角; $\alpha$ 为导弹攻角; $\theta$ 为导弹弹道轨迹倾角; $\beta$ 为侧滑角; $\gamma$ 为导引头焦平面旋转角; $P$ 为导弹发动机的推力; $m$ 为导弹质量; $\omega_x$ 、 $\omega_y$ 、 $\omega_z$ 为三个坐标轴上导弹旋转角速度的分量; $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 为三个坐标轴上气动力的分量。

### 1.2 导引头跟踪模型

导引头的工作回路可以拆分为三个工作回路,分别为实现导弹末制导转换时视线引导的角预置工作回路;完成导引头目标检测识别时弹体扰动解耦,保持视线在惯性空间稳定的角稳定工作回路;完成对目标视线跟踪,同时测量目标视线角速率的角跟踪工作回路<sup>[8]</sup>。导引头跟踪模型如图 1 所示。

通过捷联安装方式,作为导引头角跟踪回路内回路的角预置回路,通过角度运算来实现角跟踪并

对角速度进行解耦。在捷联稳定状态,导引头接收机处的输出与目标视线角速率成正比,受到导弹弹体扰动的影响。为了解耦的目的,可以通过参数配置来降低扰动的影响<sup>[9]</sup>。

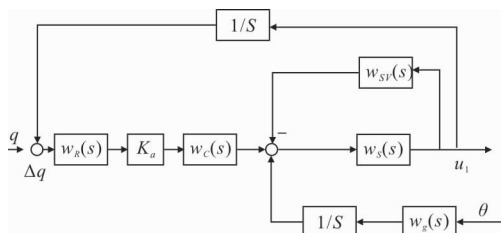


图 1 导引头跟踪框图

Fig.1 Tracking block diagram of seeker

图中, $q$  为视线角速率; $w_R(s)$  为导引头传感器模型; $w_c(s)$  为导引头伺服系统校正网络二维模型; $w_s(s)$  为导引头伺服系统二维模型; $w_{sv}(s)$  为导引头伺服系统二维负反馈模型; $w_g(s)$  为速率陀螺二维模型; $\theta$  为弹体扰动。

### 1.3 跟踪优化算法

在导引头识别记忆周期内,对已锁定的目标持续跟踪其红外辐射特征,过程中若锁定失败,导弹导引头即重新开启搜索目标模式,重新搜索与上周期最匹配的红外辐射特征。由于导引头核心的图像识别算法为保密资料,无法获得,在此仿真过程中,将迭代贪心算法引入导引头的再搜索过程,提高仿真过程中导引头的图像处理效率和识别精度,来搜寻视野范围内的最佳红外辐射特征<sup>[10]</sup>。

图 2 为算法优化前后的捕获时间,经过跟踪优化算法处理后,平均有效捕获时间缩短,在算法优化前的  $0.85 T$  的有效时间内,识别新目标,提升约 15% 的识别效率。

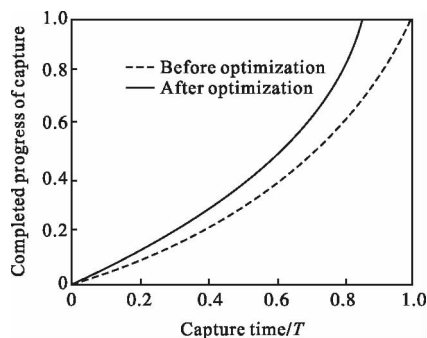


图 2 算法优化前后捕获时间

Fig.2 Time of capture before and after algorithm optimization

算法优化前后,导引头捕获目标概率的统计结果,如表 1 所示。搜索次数设置为 1500 次,捕获成功率提升 9.8%。

表 1 算法优化前后捕捉成功率

Tab.1 Successful capture rate before and after algorithm optimization

	Before optimization	After optimization
Search/times	1 500	1 500
Capture/times	1 134	1 281
Successful capture rate	75.6%	85.4%

虽然选取的优化算法在一定程度上弱化模型的现实指导意义,不具有一定的普适性,但通过上述的计算分析可知,该优化算法在某些特定场景下与导弹模型保持良好兼容性,同时也提升了导弹的跟踪性能。

## 2 目标机和面源红外诱饵模型

### 2.1 目标机模型

考虑到求解六自由度运动方程的复杂性和仿真效率,目标机的运动模型通过飞参数据分析提取。对典型的实际飞参数据进行插值拟合得到目标飞机的运动轨迹,既可以保证真实性,同时也提高了仿真效率<sup>[11]</sup>。

通过建立机体蒙皮、发动机尾喷口和尾焰的红外辐射模型,分析目标机的红外辐射特性。同时考虑红外辐射大气传输,尤其是传输过程中的衰减作用,建立目标机的红外辐射模型。具体内容及结果参见参考文献[12]。

### 2.2 面源红外诱饵模型

#### 2.2.1 运动扩散模型

诱饵箔片质心运动方程的形式与所取的坐标系有很大的关系,为更准确描述诱饵箔片的运动规律,建立如图 3 所示的坐标系,并进行相应的坐标转换。

由于箔片的几何形状是对称的,在空中的扩散过程中箔片受重力和空气动力的影响,其中气动侧力可忽略不计。

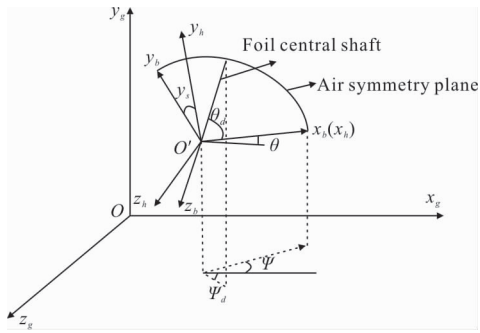


图 3 坐标系建立示意图

Fig.3 Schematic diagram of coordinate system

在航迹坐标系下建立诱饵箔片的动力学方程：

$$\begin{cases} m \frac{dV}{dt} = -X - mg \sin \theta \\ mV \frac{d\theta}{dt} = Y \cos \gamma_s - mg \cos \theta \\ mV \cos \theta \frac{d\psi_s}{dt} = -Y \sin \gamma_s \end{cases} \quad (4)$$

式中： $m$  为诱饵箔片的质量； $X$  为箔片受到的气动阻力； $Y$  为箔片受到的气动升力。

由空间几何知识可知，诱饵箔片的速度滚转角  $\gamma_s$  可以由箔片的速度方向和箔片姿态推导得出。箔片的速度方向由速度俯仰角  $\theta$  和速度偏转角  $\psi$  确定，箔片姿态由中心轴俯仰角  $\theta_d$  和中心轴偏转角  $\psi_d$  确定，由此可以求出  $\gamma_s$ 。

$$n_v = (\cos \theta \cos \psi, \sin \theta, -\cos \theta \sin \psi) \quad (5)$$

$$n_d = (\cos \theta_d \cos \psi_d, \sin \theta_d, -\cos \theta_d \sin \psi_d) \quad (6)$$

式中： $n_v$  为  $x_h O_h y_h$  平面的单位法向量； $n_d$  为气流对称面  $x_b O_b y_b$  平面的单位法向量。

$$\gamma_s = \arccos \left[ \frac{(n_v \times n_d) \cdot (n_v \times O_y)}{|n_v \times n_d| |n_v \times O_y|} \right] \quad (7)$$

诱饵箔片质心的运动学方程可以表示为：

$$\begin{cases} \frac{dx_g}{dt} = V \cos \theta \cos \psi \\ \frac{dy_g}{dt} = V \sin \theta \\ \frac{dz_g}{dt} = -V \cos \theta \sin \psi \end{cases} \quad (8)$$

给出箔片初始位置。

设置诱饵箔片初始时刻的位置，速度(大小  $V_0$ ，方向  $\theta_0$  和  $\psi_0$ )，以及姿态  $\theta_d$  和  $\psi_d$  之后，对方程组(4)、

(8)进行积分，可以得到完全燃烧前的诱饵箔片空间位置随时间的变化规律。

考虑到诱饵箔片表面燃烧力和气动力作用的不均匀性，箔片会发生翻转，因此具有一个旋转角速度。箔片的转动可分解为中心轴两个姿态角的转动：

$$\begin{cases} \frac{d\theta_d}{dt} = \omega_{\theta_d} \\ \frac{d\psi_d}{dt} = \omega_{\psi_d} \end{cases} \quad (9)$$

式中： $\omega_{\theta_d}$  为中心轴俯仰角的旋转角速度； $\omega_{\psi_d}$  为中心轴偏转角的旋转角速度。为简化计算分析，假设  $\omega_{\theta_d}$  和  $\omega_{\psi_d}$  不随时间变化。

设置诱饵箔片在初始分离阶段最后时刻的位置、速度大小和方向，以及箔片的姿态之后，对方程组(4)、(8)和(9)进行积分运算，可以得到完全燃烧后的诱饵箔片空间位置随时间的变化规律。

设置上千个箔片初始姿态、速度和旋转角速度的概率分布情况<sup>[13]</sup>，同时对上千个箔片求解运动方程，即可得到整个面源诱饵的空间运动扩散规律。

### 2.2.2 红外图像模型

求解完诱饵箔片表面的温度场和辐射亮度后<sup>[14-15]</sup>，选取动态规划法中的自底向上法求解思路，来解决面源诱饵整体辐射强度综合的优化问题<sup>[10]</sup>。

初始条件：设一枚面源红外诱饵包含 1 000 个箔片，单箔片质量为 0.65 g，直径 25.4 mm，初始分离时刻为 0.36 s。箔片以与水平呈 75°的发射角度在速度为 0.6 Ma 的发射平台发射，发射点高度为 3.5 m。图 4~6 分别为面源红外诱饵在 0.5、1.0、1.5 s 时的仿真图像和实测的红外图像的对比序列。

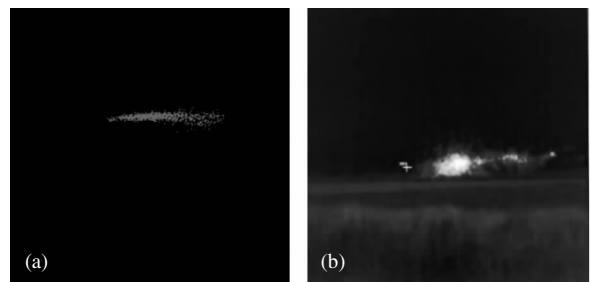


图 4 0.5 s 时面源红外诱饵红外扩散仿真与实测图像  
Fig.4 Infrared image of simulation and experiment on surface source infrared decoy at 0.5 s



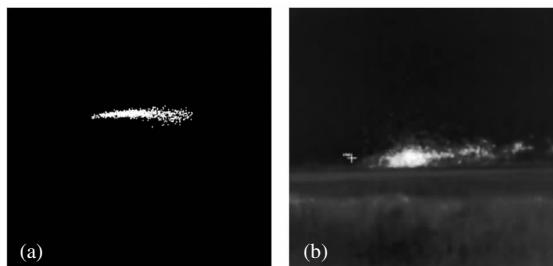


图 5 1.0 s 时面源红外诱饵红外扩散仿真与实测图像

Fig.5 Infrared image of simulation and experiment on surface source infrared decoy at 1.0 s

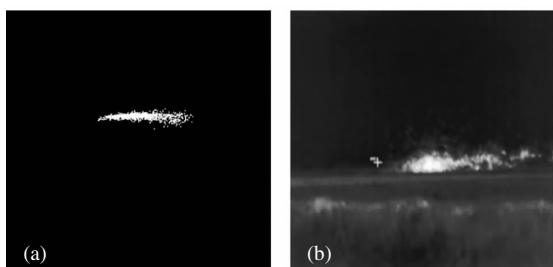


图 6 1.5 s 时面源红外诱饵红外扩散仿真与实测图像

Fig.6 Infrared image of simulation and experiment on surface source infrared decoy at 1.5 s

从图像序列中可看出仿真所得的面源红外诱饵的扩散图像与实际测试图像，在扩散形状和辐射亮度等方面是基本吻合的，同时也反映了红外图像模型中优化算法的正确性。

### 3 导弹战术参数和效能评估指标选择

#### 3.1 导弹战术参数的选择

##### (1) 弹目距离

弹目距离是导弹和目标机之间的直线距离。弹目距离的不同，目标机在导引头焦平面中的成像也不相同。弹目距离一般通过高度差和方位角进行确定。

##### (2) 来袭方位

飞机的红外辐射特征具有典型的方位特性，导弹的来袭方位不同，导引头视场范围内捕捉到的目标机的红外辐射特征也不相同。导弹的来袭方位一般通过飞机上的告警系统进行感知。

##### (3) 杀伤能力

随着红外成像技术的发展，导弹的识别能力和抗干扰能力得到了显著提升。导弹的杀伤能力在相关文献中有具体的介绍，这里不作详细地分析。

#### 3.2 干扰效能评估指标的选择

每次红外对抗仿真中面源诱饵的干扰效果通过导弹的脱靶量来表征，导弹脱靶量关系示意图如图 7 所示。脱靶量小于导弹有效杀伤距离，导弹命中目标，诱饵干扰失败，反之则诱饵干扰成功。仿真中统计诱饵干扰成功的次数，计算面源红外诱饵的干扰成功概率。

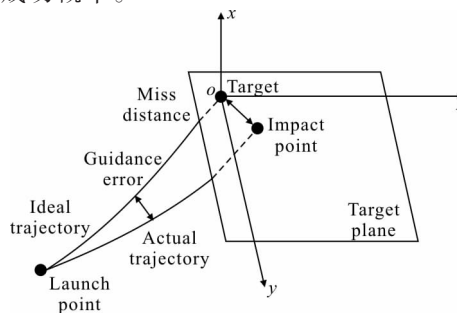


图 7 脱靶量关系示意图

Fig.7 Schematic diagram of miss distance

### 4 仿真分析

通过查阅文献和专家评判，将仿真计算与实验结果的误差控制在 20% 以内，即认为合理。

#### 4.1 弹目距离影响仿真分析

设置初始条件为：飞行高度 9.1 km，飞行速度 0.7 Ma，沿 X 轴正方向平飞；导弹为三代弹，导引头采用四元正交红外探测器，跟踪视场角  $\phi_1=80^\circ$ ，瞬时视场角  $\phi_2=3^\circ$ ，飞行高度 9.1 km，飞行速度 1.2 Ma；导弹锁定目标机后，目标机发射一枚面源红外诱饵，发射角度  $80^\circ$ ，发射速度 30 m/s。仿真中选取 5、7、8、9 km 的弹目距离，仿真次数 3 000 次，计算面源红外诱饵的干扰成功率，进一步统计得到弹目距离与面源红外诱饵干扰效能的关系。

从图 8 的图像序列中可以看出，当导弹侧后方来袭时，面源红外诱饵的释放对导弹的跟踪轨迹影响不大，干扰效果不好。由于飞机侧后方的红外辐射强度较大，导引头能捕捉的目标机的红外辐射特征信息较为充分，释放面源红外诱饵能干扰导引头焦平面内的红外辐射特征，但有效干扰的时间较短。导弹侧后方来袭，相同条件下仿真 3 000 次，得到 5、7、8、9 km 弹目距离下面源红外诱饵的干扰成功率，如表 2 所示。其中，实验统计结果均为航天科工集团某研究所提供的统计数据。仿真结果与实验统

计结果对比误差保持在 10% 之内, 仿真结果可信。

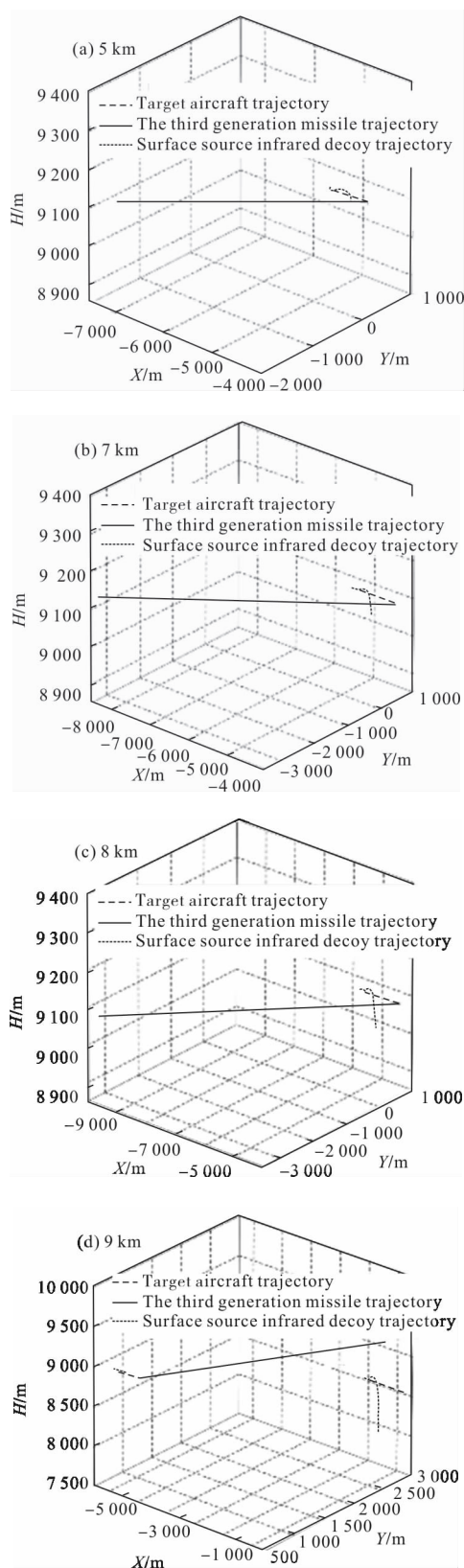


图 8 导弹侧后方 45° 来袭

Fig.8 Posterolateral incoming at 45° by missile

表 2 仿真所得干扰成功率

Tab.2 Successful interference rate of simulation

Missile-target distance/km	Simulation / times	Successful interference / times	Successful rate of simulation	Successful rate of experiment
5	3 000	912	30.4%	≤ 35%
7	3 000	1 239	41.3%	≤ 45%
8	3 000	1 320	44%	≤ 50%
9	3 000	1 536	51.2%	≤ 60%

采用相同的仿真方法, 对不同弹目距离下, 面源红外诱饵的干扰成功率进行仿真分析, 对所统计出来的干扰成功率进行数据拟合, 得到关系图, 如图 9 所示。可以看出随着弹目距离的增加, 面源红外诱饵的干扰成功率逐渐增大, 5 km 之后干扰成功率的增长幅度降低, 主要是 5 km 为仿真中所采用的某型三代弹的有效成像识别距离, 当大于 5 km 时, 仅考虑距离因素的影响, 当小于 5 km 时, 要同时兼顾目标像点中所包含的红外图像信息, 考虑两者之间的相互影响。

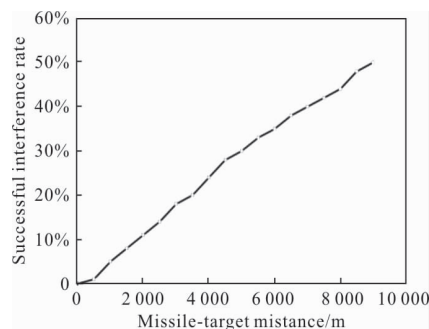


图 9 干扰成功率与弹目距离的关系图

Fig.9 Relation graph of successful interference rate and missile-target distance

#### 4.2 来袭方位影响仿真分析

设置初始条件为: 飞行高度 9.1 km, 飞行速度 0.7 Ma, 平飞; 导弹为三代弹, 导引头采用四元正交红外探测器, 跟踪视场角  $\phi_1=80^\circ$ , 瞬时视场角  $\phi_2=3^\circ$ , 飞行速度 1.2 Ma, 弹目距离 5 km; 导弹锁定目标机后, 目标机发射一枚面源红外诱饵, 发射角度 80°, 发射速度 30 m/s; 选择正后方 0°、侧后方 45°、正侧方 90°、侧前方 135° 等典型来袭方位, 仿真次数 3000 次, 计算面源红外诱饵的干扰成功率, 进一步统计得

到来袭方位与面源红外诱饵干扰效能的关系。

从图 10 的红外对抗图像序列中可以看出,释放一枚面源红外诱饵对导弹轨迹影响较小。由于导弹与目标机之间没有高度差,且 5 km 为导弹的临界成像距离,目标机的红外辐射特征信息易于捕获,释放一枚面源红外诱饵干扰效果一般。相同条件下仿真 3 000 次,得到导弹正后方 0°、侧后方 45°、正侧方 90°、侧前方 135°、正前方 180°来袭时的面源红外诱饵的干扰成功率,为无高度差情况下的干扰成功率,如表 3 所示。其中,实验统计结果均为中国航天科工集团某研究所提供的统计数据。仿真结果与实验统计结果对比在误差保持在 10%之内,仿真结果可信。

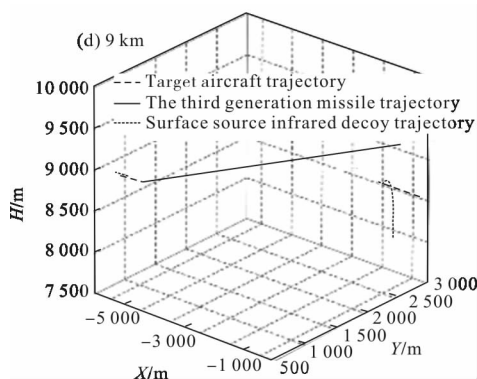


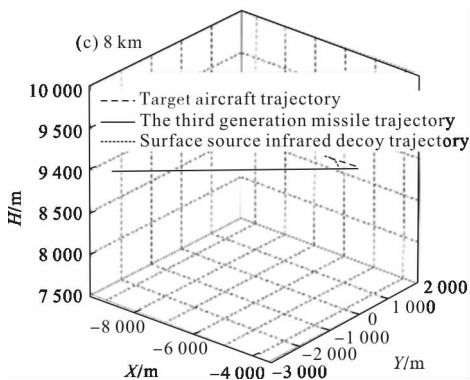
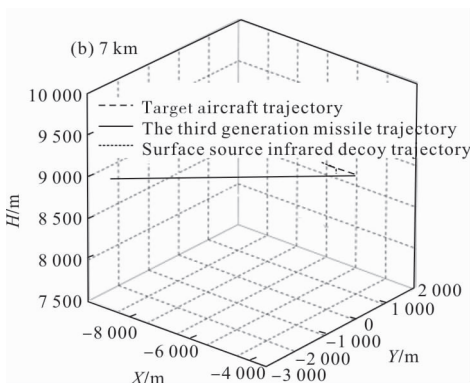
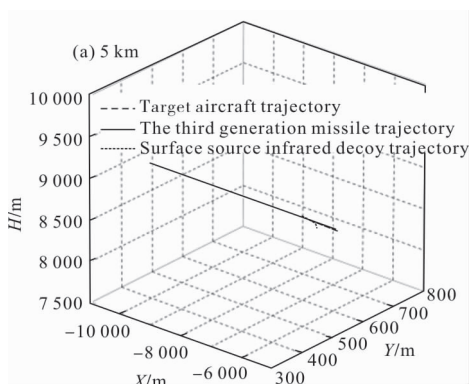
图 10 高度差 0 m

Fig.10 No difference in height

表 3 仿真所得干扰成功率

Tab.3 Successful interference rate of simulation

Incoming bearing/(°)	Simulation/times	Successful interference/times	Successful rate of simulation	Successful rate of experiment
0	3 000	1 248	41.6	≤50
45	3 000	912	30.4	≤40
90	3 000	1 026	34.2	≤40
135	3 000	1 395	46.5	-
180	3 000	1 278	42.6	≤50



采用相同的仿真方法,对不同来袭方位下,面源红外诱饵的干扰成功率进行仿真分析,对所统计出来的干扰成功率进行数据拟合,得到关系图,如图11所示。从图中可以看出导弹从飞机后半球来袭时,面源红外诱饵的干扰成功率明显较低,因为后半球排气系统的辐射强度占主导地位,使后半球的辐射强

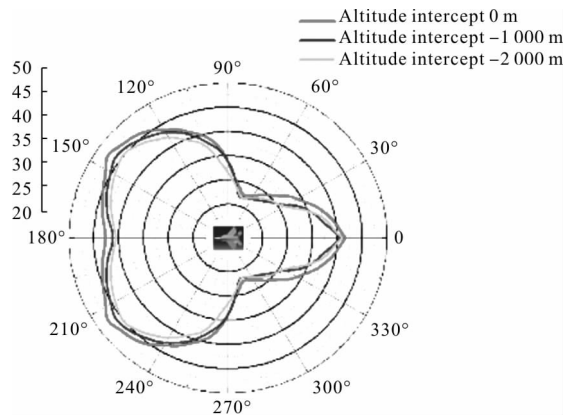


图 11 干扰成功率与来袭方位的关系图

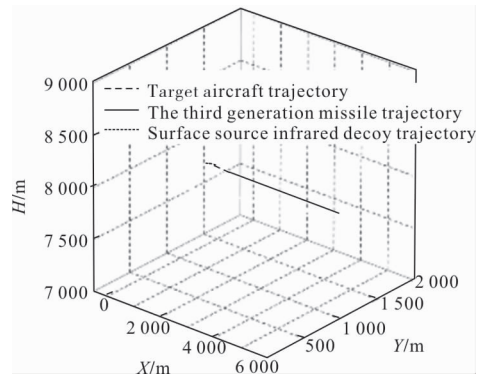
Fig.11 Relation graph of successful interference rate and incoming bearing

度大于前半圆,飞机的红外辐射具有典型的方位特性,在侧后方 70°左右,飞机的红外辐射强度达到最大,更容易被导引头捕获,面源红外诱饵的干扰成功率最低。

4.3 杀伤能力影响仿真分析

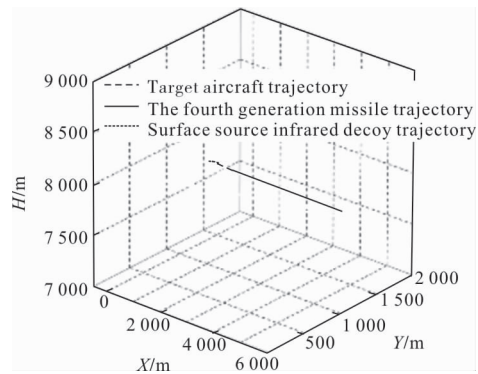
设置初始条件为:目标机飞行高度 8 km,飞行速度 0.7 Ma,沿 X 轴正方向平飞;弹目距离 5 km,导弹锁定目标机后,目标机发射一枚面源红外诱饵,发射角度 80°,发射速度 30 m/s;导弹与目标机高度差 0 m,正后方 0°、正前方 180°来袭,改变导弹的杀伤能力,仿真次数 3 000 次,计算面源红外诱饵的干扰成功率,进一步统计得到杀伤能力与面源红外诱饵干扰效能的关系。

图 12 为导弹与目标机高度差 0 m 正前方 180°来袭时的红外对抗图像序列。从图中可以看出,当导弹正前方来袭时,释放面源红外诱饵能有效干扰二代弹,且干扰成功率很高,同时也有很大的几率干扰三代弹。因为导弹正向来袭时,飞机辐射主要以蒙皮辐射为主,由于机身的遮挡作用,排气系统的辐射强度可忽略,释放面源红外诱饵时,二代弹的跟踪轨迹



(b) 三代弹

(b) The third generation missile

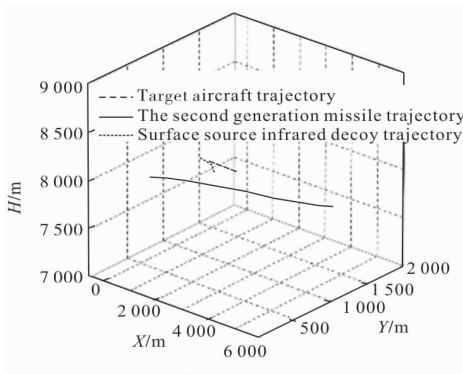


(c) 四代弹

(c) The fourth generation missile

图 12 高度差 0 m 正前方来袭

Fig.12 No difference in height and dead ahead incoming



(a) 二代弹

(a) The second generation missile

偏向面源红外诱饵,最终偏离目标机,未能击中目标,对于三代弹、四代弹也能形成有效的干扰,但干扰成功率相对于二代弹来说较低。相同条件下仿真 3 000 次所得到正后方 0°、侧后方 45°、正侧方 90°、侧前方 135°、正前方 180°的面源红外诱饵的干扰成功率,为无高度差情况下的干扰成功率,如表 4 所示。

表 4 仿真所得干扰成功率

Tab.4 Successful interference rate of simulation

Incoming bearing/(°)	Simulation/times	Successful interfere the second generation/times	Successful rate of simulation	Successful interfere the third generation/times	Successful rate of simulation/%	Successful interference the third generation/times	Successful rate of simulation
0	3 000	2 463	82.1%	1 248	41.6	956	31.9%
45	3 000	2 294	76.5%	912	30.4	678	22.6%
90	3 000	2 409	80.3%	1 026	34.2	882	29.4%
135	3 000	2 634	87.8%	1 395	46.5	1 148	38.3%
180	3 000	2 551	85%	1 278	42.6	1 008	33.6%



由于不同杀伤能力面源红外诱饵干扰效能的测试成本太高,因此实验统计数据只有三代弹条件下的干扰成功率,四代弹条件下的干扰成功率的测试正处于论证准备阶段,目前分析判断一般来源于专家评判。

采用相同的仿真方法,对不同类型导弹,不同来袭方位下,面源红外诱饵的干扰成功率进行仿真分析,对所统计出来的干扰成功率进行数据拟合,得到关系图,如图 13 所示。可以看出释放一枚面源红外诱饵,能有效干扰二代弹,干扰成功率保持在 85%左右;对三代弹干扰成功率接近 40%,主要由于三代导引头可根据目标的运动特征来区分真假目标,如不采取相应的机动动作或增加面源红外诱饵的释放数量,干扰成功率较低;对于四代弹来说,干扰成功率更低,在 30%左右。

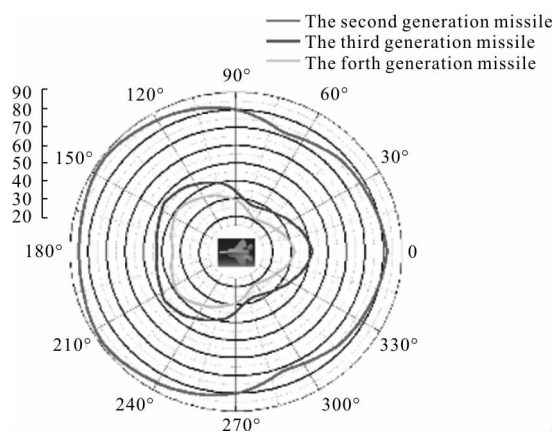


图 13 干扰成功率与杀伤能力的关系图

Fig.13 Relation graph of successful interference rate and kill capability

## 5 结 论

红外成像导弹作为面源红外诱饵的主要干扰对象,文中通过建立导弹、飞机和面源红外诱饵的模型,选择合适的导弹的战术参数和效能评估指标,仿真分析了特定条件下导弹战术参数对面源红外诱饵干扰效能的影响,仿真结果与和项目合作的航天科工集团某研究所的实验测试图像和统计数据进行比较、验证。得到的结论主要有:

(1) 迭代贪心算法和动态规划算法与模型有良好的兼容性,同时能提升导引头跟踪和面源红外诱饵红外图像的求解效率。

(2) 随着弹目距离的增加,面源红外诱饵的干

扰成功率逐渐增大,当距离超过有效成像识别距离后,干扰成功率的增长幅度降低;

(3) 导弹从后半球来袭时,面源红外诱饵的干扰成功率明显降低,在侧后方 70°左右,面源红外诱饵的干扰成功率最低;

(4) 面源红外诱饵能有效干扰二代弹,干扰成功率保持在 85%左右,若目标机不采取机动,对三代弹干扰成功率较低,在 40%左右,对四代弹干扰成功率更低,在 30%左右。

## 参 考 文 献:

- [1] Luo Haibo, Shi Zelin. Status and prospect of infrared imaging guidance technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(4): 565-573. (in Chinese)  
罗海波, 史泽林. 红外成像制导技术发展现状与展望[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(4): 565-573.
- [2] Gu Lu. Development of the infrared guidance technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(6): 686-690. (in Chinese)  
辜璐. 发展中的红外成像制导技术 [J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(6): 686-690.
- [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: 15-17. (in Chinese)
- [4] Seth D Shepherd. Air Force Electronic Warfare Evaluation Simulator (AFEWES) infrared test and evaluation capabilities [C]//Proceedings of SPIE, 2001, 4366: 41-44.
- [5] Engvall Asa. Evaluation of GSIM, a simulator for missile seekers [C]//Proceedings of SPIE, Electro Optical and Infrared Systems: Technology and Applications HI, 2006, 6395: 609-639.
- [6] Tong Qi, Li Jianxu, 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)  
童奇, 李建勋, 方洋旺, 等. 面源红外诱饵对抗成像制导导弹的仿真研究[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(4): 1150-1157.
- [7] Zhang Xiaoyang, Meng Weihua, Fu Kuisheng, et al. Simulation model for countermeasure test of IR imaging missile [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(4): 569-572. (in Chinese)  
张晓阳, 孟卫华, 付奎生, 等. 用于红外成像导弹抗干扰测

- 试的仿真模型[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(4): 569-572.
- [8] He Guojing, Zhang Jianqi. Virtual IR imaging guiding system model[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(4): 338-342. (in Chinese)  
何国经, 张建奇. 红外成像制导系统虚拟样机 [J]. 红外与激光工程, 2004, 33(4): 338-342.
- [9] Chen Cheng, Shi Jing, Fei Jindong. Mathematics modeling and simulation technology for staring IR imaging guiding system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(1): 18-22. (in Chinese)  
陈澄, 石静, 费锦东. 凝视红外成像制导系统数学建模与仿真技术[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(1): 18-22.
- [10] Cormen T H, Leiserson C E, Rivest R L, et al. Introduction to Algorithm [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2015: 239-241. (in Chinese)  
科尔曼, 雷瑟尔森. 算法导论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015: 239-241.
- [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)  
李韬锐, 童中翔, 黄鹤松, 等. 空战对抗中面源红外诱饵干扰效能仿真[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(9): 0904002.
- [12] 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)  
李韬锐, 童中翔, 黄鹤松, 等. 飞机红外辐射特征仿真研究 [J]. 激光与红外, 2017, 47(2): 189-194.
- [13] Zou Tao, Tong Zhongxiang, Wang Chaozhe, et al. Diffusion regularity study of foil-surface-type infrared decoy[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2016, 37(9): 2634-2645. (in Chinese)  
邹涛, 童中翔, 王超哲, 等. 箔片型红外面源诱饵扩散规律 [J]. 航空学报, 2016, 37(9): 2634-2645.
- [14] Mokry M. Numerical simulation of aircraft trailing vortices interacting with ambient shear or ground [J]. *Journal of Aircraft*, 2001, 38(4): 636-643.
- [15] Caroline K. Wilhram. Combustion model for pyrophoric metal foils[J]. *Propellants Explosives Pyrotechnics*, 2003, 28(6): 296-300.