

目标机飞行参数对面源红外诱饵干扰效能影响

李传良¹, 童 奇², 王超哲², 许丹丹¹, 杨安元¹, 黄鹤松³, 尚海龙⁴, 李韬锐^{1*}

- (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;
3. 中国人民解放军 95840 部队, 河北 涿州 072750;
4. 中国人民解放军 95965 部队, 河北 衡水 253800)

摘要: 目标机作为红外对抗中面源红外诱饵的搭载平台, 其运动特性和辐射特性影响红外对抗的发展态势。在考虑到实验测试成本经济性的基础上, 利用算法优化了红外对抗的仿真模型, 分析了目标机飞行参数对面源红外诱饵干扰效能影响。首先, 提取了目标机的机动动作, 建立飞机红外辐射模型; 其次, 介绍了导弹跟踪优化算法和面源红外诱饵燃烧优化算法; 最后, 选择目标机的飞行参数和效能评估指标, 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。结果表明: 面源红外诱饵干扰效能的仿真结果与已完成实测数据吻合, 满足对面源诱饵干扰效能评估的要求。

关键词: 面源红外诱饵; 红外对抗; 飞行参数; 算法优化; 效能评估

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20200095

Influence of flight parameters of target aircraft on jamming effectiveness of surface source infrared decoy

Li Chuanliang¹, Tong Qi², Wang Chaozhe², Xu Dandan¹, Yang Anyuan¹, Huang Hesong³,
Shang Hailong⁴, Li Taorui^{1*}

- (1. Aviation Maintenance Sergeant School, Air Force Engineering University, Xinyang 464000, China;
2. Aeronautics Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;
3. The No.95840 Army of PLA, Zhuozhou 072750, China;
4. The No.95965 Army of PLA, Hengshui 253800, China)

Abstract: Target aircraft is regarded as the carrying platform of surface source infrared decoy, of which kinematic and radiation characteristics impact the development trend of infrared confrontation. Considering the economy of test cost, the algorithm was used to optimize simulation models of infrared decoy, and then the influence of flight parameters of target aircraft on jamming effectiveness of surface source infrared decoy was analyzed. Firstly, the target maneuver from database of maneuver was extracted, while the model of aircraft infrared radiation was established. Secondly, the optimization algorithm of missile tracking and anti-interference was introduced, and the solving procedures of combustion optimization algorithm in detail was analyzed. Finally, the flight parameters of target aircraft and the indicator of

收稿日期: 2020-03-01; 修订日期: 2020-04-14

基金项目: 陕西省自然科学基金(2019JQ-290)

作者简介: 李传良(1981-), 男, 讲师, 主要从事红外对抗仿真方面的研究。Email: 15596652671@163.com

通讯作者: 李韬锐(1993-), 男, 硕士生, 主要从事飞行器设计、论证与红外对抗仿真等方面的研究。Email: 514473003@qq.com

effectiveness evaluation were selected, based on which, the simulation results were compared with testing data to verify the reasonability of simulation result. It's concluded that the simulation results of jamming effectiveness of surface source infrared decoy match the testing data, satisfying the demand of jamming effectiveness evaluation.

Key words: surface source infrared decoy; infrared confrontation; flight parameters; optimization algorithm; effectiveness evaluation

0 引言

红外成像制导、复合制导等技术,已成为目前精确制导武器制导系统的主要发展方向,具有广泛的应用前景^[1]。随着复合探测,数据融合等高新技术的应用,红外预警探测系统的灵敏度、效能、定位精度将会更高,探测距离更远,探测精度更高,探测虚警率更低^[2]。传统的红外诱饵弹发射到空中后,迅速燃烧产生强烈的红外辐射,形成假目标。红外诱饵弹主要采用的是质心式干扰机理,干扰以能量质心为跟踪目标的二、三代导弹。对抗红外成像导弹时,大多采用多发或连发的形式进行发射,诱饵扩散后无法完全遮挡住飞机的红外辐射,干扰效果并不理想,无法适应红外对抗的实战需求。面源红外诱饵作为一种主动的红外干扰装备,已经逐步展现性能的优越性,在红外对抗中得到应用^[3]。在工艺设计方面,面源红外诱饵箔片体积更小,质量更轻,目前有圆形和方形两种形状,表面涂有一层易燃性金属,遇到空气后会迅速自燃,燃烧时的燃烧效率和辐射特性相比于传统的红外诱饵,得到了明显地提升,与目标机的辐射特征更为接近。一枚面源红外诱饵由千余片诱饵箔片组成,当千余片诱饵箔片抛撒至空中后,迅速扩散会形成具有强烈辐射的箔片云团,能够有效遮挡住飞机整体的红外辐射,使红外成像导弹的跟踪视场失去目标机的红外辐射特征,给飞机机动规避延长了时间,提高了飞机在红外对抗中的生存力。

目标机作为面源红外诱饵的搭载平台,也是空战对抗中的防御者,目标机飞行状态的变化对于面源红外诱饵的干扰效能具有十分重要的影响。因此,深入研究目标机飞行参数的变化对面源红外诱饵干扰效能的影响,有十分重要的意义。王斯财^[4]等研究了导弹迎头攻击时载机的最佳防御策略,对比了机动规避与红外诱饵相结合的干扰结果,得到了飞机

做机动同时释放红外诱饵的干扰策略。李韬锐等^[5]建立了面源红外诱饵效能评估仿真系统,改变目标机、导弹和诱饵的参数,通过仿真算例验证了仿真系统建立的合理性;李慎波等^[6]分析了特定条件下导弹的攻击参数对面源红外诱饵干扰效能的影响,提出红外对抗的防御策略。国内外可以参考的文献相对较少,开展的相关研究也基本上处于保密状态,笔者所在的课题组在自然科学基金“机载吊挂抛撒式面源红外诱饵有效载荷扩散规律研究”的支持下,深入开展了目标机飞行参数对面源红外诱饵干扰效能影响的仿真研究,研究的思路框图如图 1 所示。

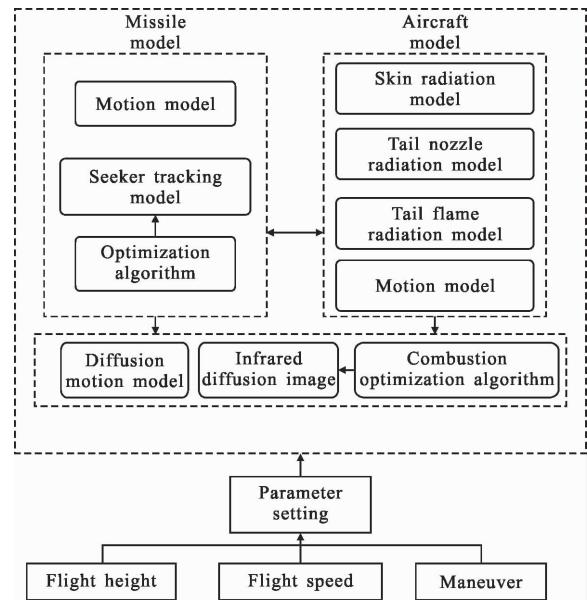


图 1 仿真思路框图

Fig.1 Thought diagram of simulation

1 目标机模型

为了解决飞机运动轨迹求解时的效率问题,根据飞机的飞参数据,从中进行机动轨迹的提取和还原。收集整理某型飞机的飞参数据,从中提取出几十余种机动动作,轨迹的真实性得到了保证,建立了机

动动作数据库,包括平飞、桶滚、蛇形机动等。图 2 为飞机机动动作数据库中的部分数据。

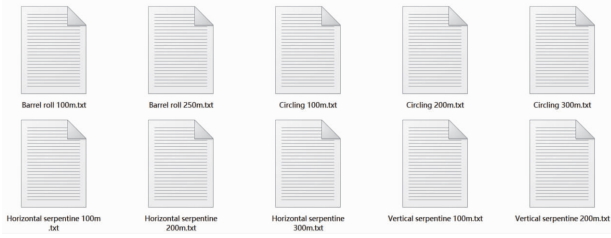


图 2 机动动作数据库
Fig.2 Database of maneuver

参考文献[7]中对目标机的辐射特性进行了仿真建模,通过仿真分析,验证了模型建立的可靠性。不同高度和不同速度下飞机的红外辐射如图 3 所示。

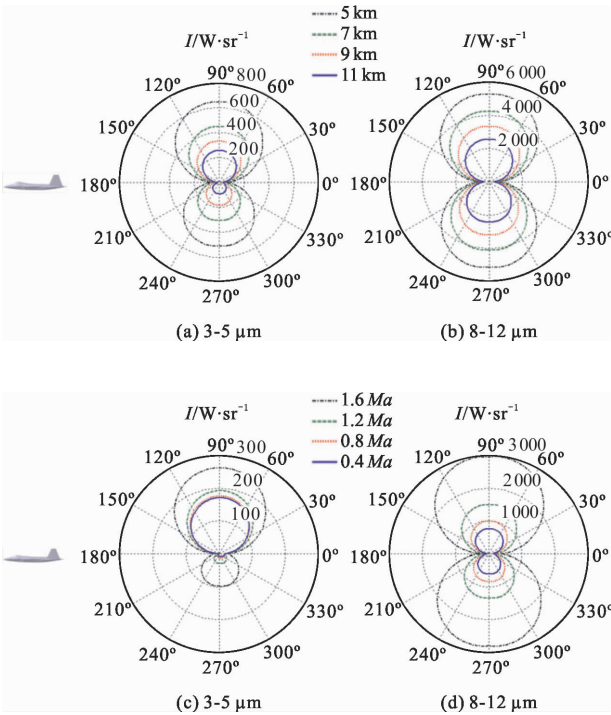


图 3 飞机红外辐射
Fig.3 Flight infrared radiation

2 导弹和面源红外诱饵模型

导弹模型、面源红外诱饵模型在参考文献中[5]有充分地仿真验证,这里不再进行说明。这里主要介绍采用的优化算法。

2.1 跟踪优化算法

导弹锁定目标后,根据目标的红外辐射特征持

续跟踪,直至击中;若在跟踪的过程中失去了目标,就会再次进入搜索模式,寻找视场范围内与上周期最相近的红外辐射特征。为提高搜索效率,将贪心算法引入再搜索过程^[8]。伪代码如下所示:

```
GREEDY-ACTIVITY-SELECTOR (s,A)
n=s.length
A={a1}
k=1
for m=2 to n
    if abs(am-a1)=min{abs(s[m]-a1)}
        A=A ∪ {am}
        k=m
return A
```

选择跟踪的目标 a_1 ; A 的初值为目标机的红外辐射特性。for 循环中 n 为搜索循环的次数; $s[m]$ 为循环周期内,导弹视场范围中红外辐射特征的数字集合。每循环一次,筛选出循环中的,即每次循环中的最佳值,依次存入 A 中,直至循环结束。变量 k 是集合 A 中最佳辐射目标的下标;最终,返回导弹每一周期锁定的最佳红外辐射特征。

2.2 燃烧优化算法

采用由下向上的动态规划法来求解面源红外诱饵整体的红外辐射强度,来提高面源诱饵整体辐射强度的求解效率^[8-12]。求解流程如图 4 所示。

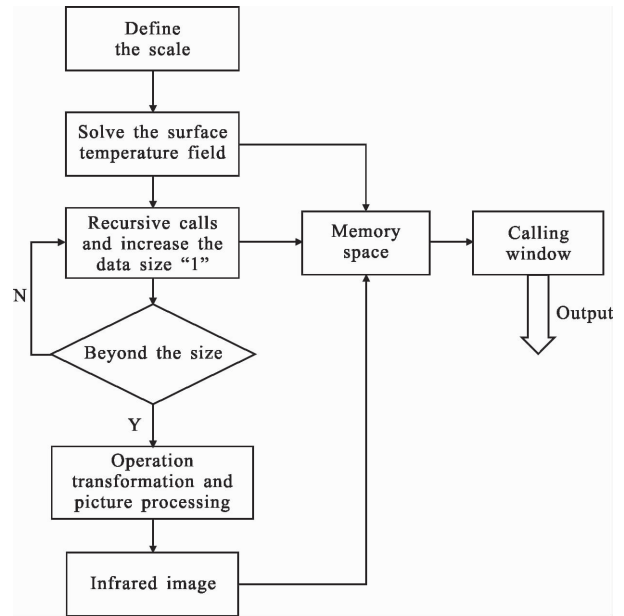


图 4 燃烧优化算法求解流程
Fig.4 Solving process of combustion optimization algorithm

根据实际情况设置诱饵箔片的数量和形状。建立燃烧模型,求解诱饵箔片表面的温度场分布情况,并将结果保存在特定的位置,可直接调用。每次增加 1 个规模,相应的温度场被记录下来,相同类型的温度场只需求解一次。当数据规模达到实际规模时,递归调用终止,保存最终的温度场分布。通过后期的处理,输出面源诱饵在空间分布的红外扩散图像。

3 目标机飞行参数和效能评估指标选择

3.1 目标机飞行参数的选择

3.1.1 飞行高度

随着飞行高度的改变,大气密度会发生变化。由于诱饵箔片体积较小,质量轻,在扩散过程中的运动轨迹容易受到气流冲击的影响^[13]。同时高度的改变,大气温度也不相同,影响诱饵箔片的燃烧效率。

3.1.2 飞行速度

目标机飞行速度的改变^[5],对目标机蒙皮的热辐射影响较大。飞行速度越快,飞机蒙皮与大气间热交换的程度越剧烈,飞机表面的温度越高。

3.1.3 机动动作

飞机通过机动动作的调整,使自身不断向优势方向发展^[14]。导弹不同来袭态势下,采取不同机动动作,同时释放面源红外诱饵,能争取更多生存时间。

3.2 干扰效能评估指标的选择

导弹的制导误差通常通过脱靶量来进行描述,忽略掉系统误差的影响,干扰误差和随机误差的代数和就是脱靶量^[15]。脱靶量关系示意图,如图 5 所示。将脱靶量作为干扰效能评估的参数指标,与导弹的杀伤半径进行比较,来判断是否干扰成功。多次仿

真模拟,得到了面源红外诱饵干扰成功的次数,计算得到干扰成功率。

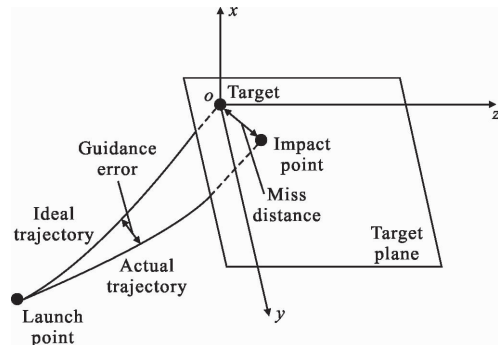


图 5 脱靶量关系示意图

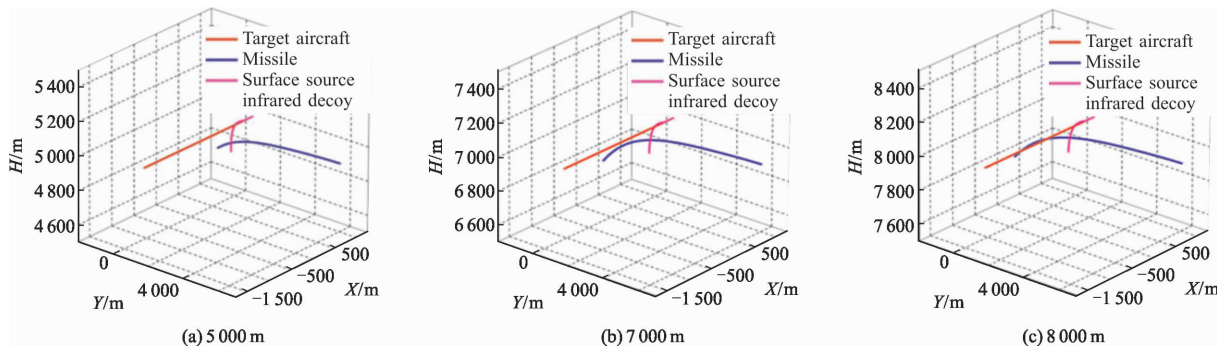
Fig.5 Schematic diagram of miss distance

4 仿真分析

在目标机飞行高度和飞行速度影响的仿真分析中,某些特定条件下面源红外诱饵的干扰成功率与实测数据进行了比对。飞机机动条件下的实试验证目前尚未进行,文中的仿真计算是在已有仿真系统的基础上进行的。

4.1 飞行高度对干扰效能影响

仿真条件:目标机飞行速度 0.85 Ma,水平飞行;导弹为三代弹,飞行速度 1.4 Ma,弹目距离 6 000 m;红外探测器报警后,目标机发射一枚面源红外诱饵,垂直向上发射,发射速度 30 m/s;改变目标机的飞行高度,选择 5 000,7 000,8 000,9 000,10 000,11 000 m,计算面源红外诱饵的干扰成功率,分析飞行高度与干扰效能的关系。图 6 为目标机不同飞行高度下的红外对抗图像序列。



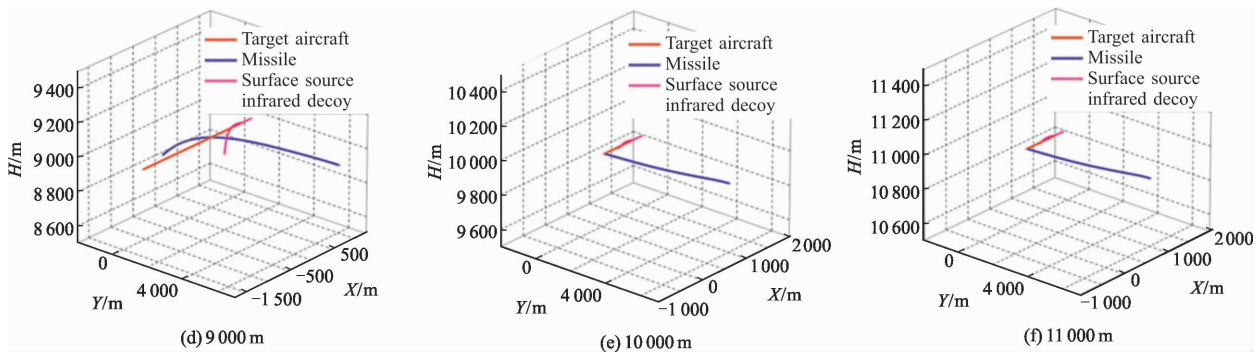


图 6 不同飞行高度下的红外对抗序列

Fig.6 Infrared countermeasures sequence of different heights

仿真 5 000 次,得到不同飞行高度下的面源红外诱饵的干扰成功率,如表 1 所示。部分实测数据与仿真结果吻合,在误差范围之内。

表 1 干扰成功率

Tab.1 Interference successful rate

Flight height/km	4.5	5	7	9	10	11
Simulation/time	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000
Successful interference/time	1 860	1 975	2 185	2 095	1 815	1 575
Successful rate of simulation	37.2%	39.5%	43.7%	41.9%	36.3%	31.5%
Successful rate of experiment	-	≤45%	-	≤50%	≤40%	-

对不同飞行高度下面源红外诱饵的干扰成功率进行数据拟合,得到关系图,如图 7 所示。从曲线的变化趋势中可以看出,随着飞行高度的增加,面源红外诱饵的干扰成功率逐渐增大,在 8 000 m 左右达到最大值,随后迅速减小,下降较快。原因是随着飞行高度的增加,大气密度、压力和温度减小,诱饵箔片运动过程中受到的气流冲击力发生了改变。飞行高度较低时,诱饵箔片扩散较为充分,但气动阻力较大,沉降较快,有效持续时间短;当飞行高度较高时,箔片受到气动阻力较小,沉降缓慢,但箔片云团扩散不完全,不能形成有效地遮挡,干扰效果不好。当飞行高度在 8 000 m 左右时,诱饵箔片扩散充分,在飞机尾部能形成有效地遮挡,同时沉降速度适中,持续

时间较长,干扰效果较好。

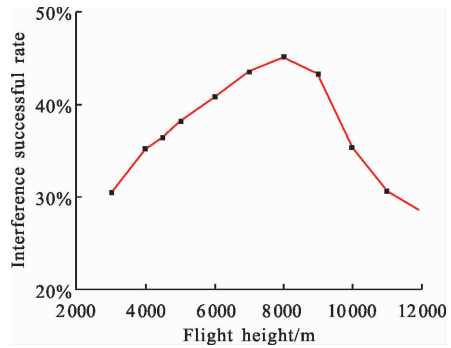


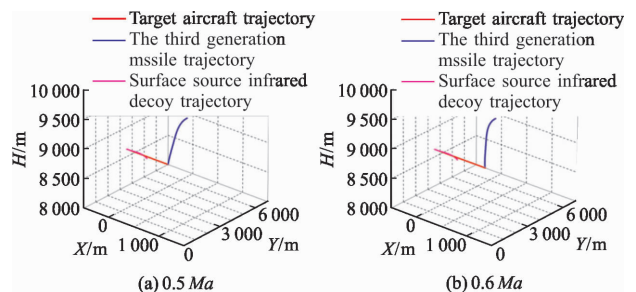
图 7 干扰成功率与飞行高度的关系图

Fig.7 Relation graph of interference successful rate and flight height

4.2 飞行速度对干扰效能影响

仿真条件:目标机飞行高度 9 000 m,水平飞行;导弹为三代弹,飞行速度 1.4 Ma,弹目距离 6 000 m;红外探测器报警后,目标机发射一枚面源红外诱饵,垂直向上发射,发射速度 30 m/s;改变目标机的飞行速度,选择 0.5、0.6、0.75、0.9 Ma,计算面源红外诱饵的干扰成功率,分析飞行速度与干扰效能的关系。

图 8 为目标机不同飞行速度下的红外对抗示意图。



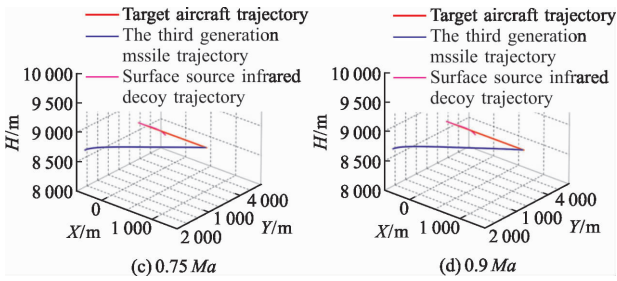


图 8 不同飞行速度下的红外对抗轨迹图

Fig.8 Infrared countermeasures sequence of different speeds

仿真 5 000 次,得到不同飞行速度下的面源红外诱饵的干扰成功率,如表 2 所示。部分实测数据与仿真结果吻合,在误差范围之内。

表 2 干扰成功率

Tab.2 Interference successful rate

Maneuver radius/m	125	200	300	400	500
Simulation/time	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000
Successful interference/time	4 055	3 760	3 615	3 530	3 415
Successful rate of simulation	81.1%	75.2%	72.3%	70.6%	68.3%

对不同飞行速度下的面源红外诱饵的干扰成功率进行数据拟合,得到关系图,如图 9 所示。从曲线的变化趋势中可以看出,随着飞行速度的增加,面源红外诱饵的干扰成功率逐渐增大,在 0.75 Ma 左右达到最大值,随后开始下降。原因是随着飞行速度的

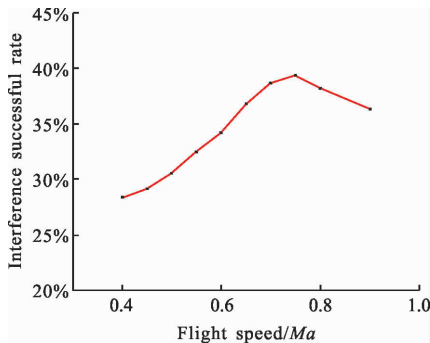


图 9 飞行速度与干扰成功率的关系图

Fig.9 Relation graph of interference successful rate and flight speed

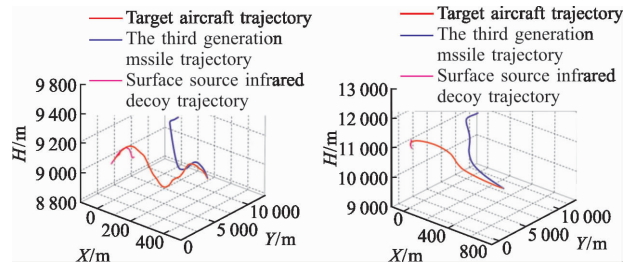
增加,机体表面与空气间摩擦更加剧烈,机体表面的温度升高,红外辐射强度增大。当飞行速度达到 0.7~0.8 Ma 时,飞机蒙皮的辐射强度与面源红外诱饵达

到同样的数量级水平,增大了目标的识别难度,在一定程度上提升了面源红外诱饵的干扰成功率。随着飞行速度的改变,蒙皮表面的温度发生变化,辐射强度也发生改变,导引头容易区分箔片云团和目标机的红外辐射图像。

4.3 机动动作对干扰效能影响

初始条件:导弹为三代弹,正侧方来袭,飞行速度 1.4 Ma;红外探测器报警后,目标机发射一枚面源红外诱饵,垂直向上发射,发射速度 30 m/s;目标机做不同的机动动作:垂直和水平蛇形机动,机动半径为 125 m 和 300 m;桶滚机动,机动半径 150 m 和 250 m,计算面源红外诱饵的干扰成功率,分析机动动作与干扰效能的关系。

图 10 为目标机做垂直方向的蛇形机动,机动半径为 125 m 和 300 m 时的红外对抗示意图。



(a) 机动半径 125 m

(b) 机动半径 300 m

(a) Maneuver radius 125 m

(b) Maneuver radius 300 m

图 10 垂直蛇形机动

Fig.10 Vertical S-shaped maneuver

仿真 5 000 次,得到不同机动半径下的面源红外诱饵的干扰成功率,如表 3 所示。

表 3 干扰成功率

Tab.3 Interference successful rate

Maneuver radius/m	125	200	300	400	500
Simulation/time	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000
Successful interference/time	4 055	3 760	3 615	3 530	3 415
Successful rate of simulation	81.1%	75.2%	72.3%	70.6%	68.3%

对不同机动半径下的面源红外诱饵的干扰成功率进行数据拟合,得到关系图,如图 11 所示。从曲线的变化趋势中可以看出,后半圆面源红外诱饵的干扰成功率要稍大于前半圆,原因在于当导弹后半圆

来袭时,排气系统的辐射强度占主导地位,当目标机进行垂直蛇形机动时,能有效减小排气系统的有效辐射面积,同时释放面源红外诱饵,能形成长时间的有效遮挡,干扰成功率提升。当导弹前半球来袭时,垂直蛇形机动增大了排气系统的辐射面积,干扰成功率下降。垂直蛇形机动半径越小,脱离导弹跟踪视场时间越短,干扰成功率越高。

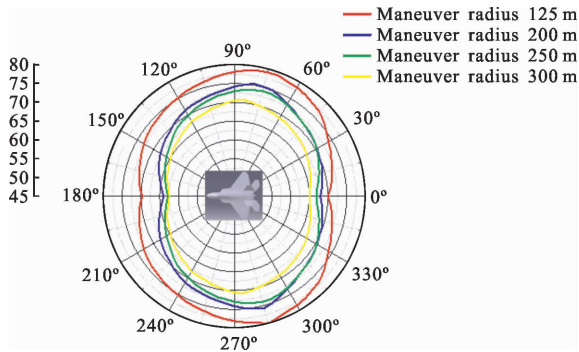
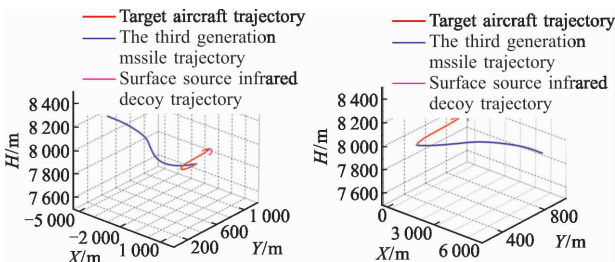


图 11 干扰成功率与机动半径的关系

Fig.11 Relation of interference successful rate and maneuver radius

图 12 为目标机做水平方向蛇形机动,机动半径为 125 m 和 300 m 时的红外对抗示意图。



(a) 机动半径 125 m

(b) 机动半径 300 m

(a) Maneuver radius 125 m

(b) Maneuver radius 300 m

图 12 水平蛇形机动

Fig.12 Horizontal S-shaped maneuver

仿真 5 000 次,得到不同机动半径下的面源红外诱饵的干扰成功率,如表 4 所示。

表 4 干扰成功率

Tab.4 Interference successful rate

Maneuver radius/m	125	200	300	400
Simulation/time	5 000	5 000	5 000	5 000
Successful interference/time	3 185	3 240	3 085	2 920
Successful rate of simulation	63.7%	64.8%	61.7%	58.4%

对不同机动半径下的面源红外诱饵的干扰成功率进行数据拟合,得到关系图,如图 13 所示。从曲线的变化趋势中可以看出,后半球面源红外诱饵的干扰成功率要稍小于前半球。原因是当导弹后半球来袭,目标机进行水平蛇形机动时,机动方向分为两种情况:一种向远离导弹方向做蛇形机动,增大了排气系统的有效辐射面积;另一种向靠近导弹方向做水平蛇形机动,缩短了导引头跟踪视场的调整时间。当水平蛇形机动半径为 200 m 时,面源红外诱饵的干扰成功率较高。因为机动半径过小时,释放面源红外诱饵有效遮挡时间较短;机动半径过大时,导弹能及时调整跟踪视场角,进行目标跟踪。

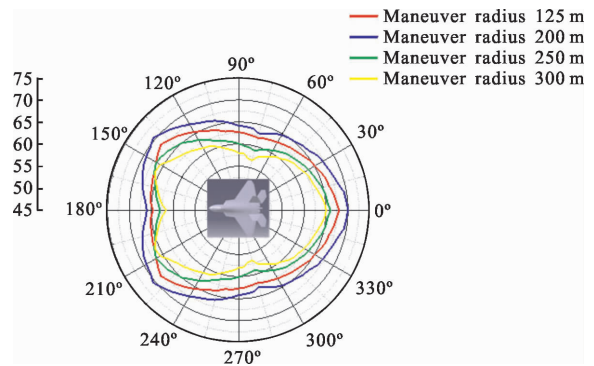
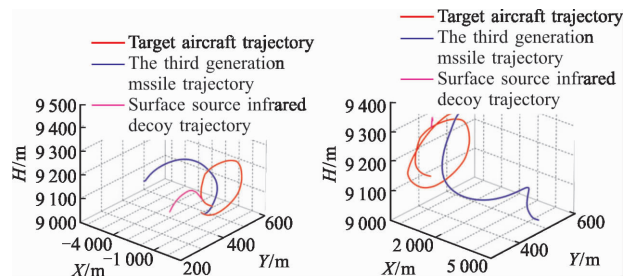


图 13 干扰成功率与机动半径的关系

Fig.13 Relation of interference successful rate and maneuver radius

图 14 为目标机做桶滚机动,机动半径为 125 m 和 300 m 时的红外对抗示意图。



(a) 机动半径 125 m

(b) 机动半径 300 m

(a) Maneuver radius 125 m

(b) Maneuver radius 300 m

图 14 桶滚机动

Fig.14 Barrel-roll maneuver

仿真 5 000 次,得到不同机动半径下的面源红外诱饵的干扰成功率,如表 5 所示。

表 5 干扰成功率

Tab.5 Interference successful rate

Maneuver radius/m	125	200	250	300	350
Simulation/time	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000
Successful interference/time	3 420	3 225	3 480	3 245	3 170
Successful rate of simulation	68.4%	64.5%	69.6%	64.9%	63.4%

对不同机动半径下的面源红外诱饵的干扰成功率进行数据拟合,得到关系图,如图 15 所示。从曲线的变化趋势中可以看出,后半圆面源红外诱饵的干扰成功率要高于前半圆,尤其是在正后方,面源红外诱饵的干扰成功率最高。原因在于当导弹正后方附近来袭时,排气系统的红外辐射占据主导地位,是导引头跟踪的辐射源。当目标机做桶滚机动,迅速减小了排气系统的辐射面积,同时发射面源红外诱饵,形成有效遮挡。导引头在跟踪搜索的过程中,极大可能将释放出来的箔片云团作为新目标进行锁定跟踪,从而增大了目标机机动逃生的机率。当桶滚机动半径为 250 m 时,面源红外诱饵的干扰成功率较高,机动半径过小时,目标机不能尽快有效脱离导引头的跟踪视场,容易被重新锁定;机动半径过大时,面源红外诱饵有效遮挡时间较短,效果不好。

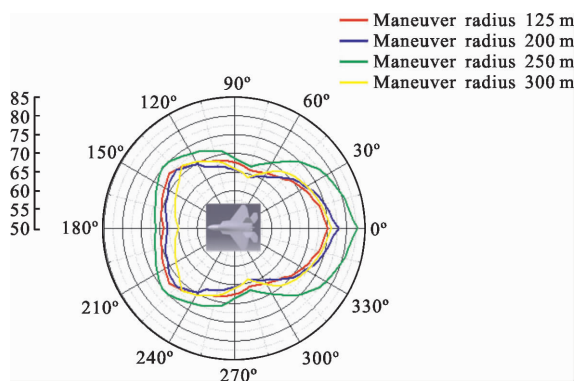


图 15 干扰成功率与机动半径的关系

Fig.15 Relation of interference successful rate and maneuver radius

5 结论

文中通过建立面源红外诱饵的效能评估模型,分析了目标机飞行参数对面源红外诱饵干扰效能的影响。部分实测数据与仿真结果基本吻合,在误差范围

之内,所得到的结果是可信有效。得到的结论主要有:

(1) 随着飞行高度的增加,面源红外诱饵的干扰成功率逐渐增大,在 8 000 m 左右达到最大值,随后迅速减小,下降较快。

(2) 随着飞行速度的增加,面源红外诱饵的干扰成功率逐渐增大,在 0.75 Ma 左右达到最大值,随后开始下降。

(3) 目标机进行机动规避能提高面源红外诱饵的干扰成功率,垂直蛇形机动半径为 125 m,水平蛇形机动半径为 200 m,桶滚机动半径为 250 m 时,面源红外诱饵的干扰成功率较高。

参考文献:

- Li Chuanliang, Tong Zhongxiang, Zhao Daowen. Research on methods of countermining infrared imaging air-to-air missile [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 41 (12): 1355-1359. (in Chinese)
李传良, 童中翔, 赵道文. 对抗红外成像空空制导导弹的措施研究[J]. *激光与红外*, 2011, 41(12): 1355-1359.
- Ye Benzhi, Cai Xichang, Qiu Na, et al. Development of the infrared guidance technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(S2): 39-42. (in Chinese)
叶本志, 蔡希昌, 邱娜, 等. 红外制导技术的发展[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(S2): 39-42.
- Li Bingrong, Liu Feng, Wang Xinxin. The image simulation of the IR decoy countering IR guidance missile [J]. *Electroptic Warfare & Radar Passive Countermeasures*, 2003(2): 15-17. (in Chinese)
李炳荣, 刘锋, 王欣欣. 红外诱饵对抗红外制导导弹的成像仿真[J]. *光电对抗与无源干扰*, 2003(2): 15-17.
- Wang Sicai, Nan Ying, Liu Jingwei. Optimal escape strategy of fighter against oncoming missiles [J]. *Aero Weaponry*, 2009, 4: 28-32. (in Chinese)
王斯财, 南英, 刘经纬. 导弹迎击时飞机的最佳逃逸策略研究[J]. *航空兵器*, 2009, 4: 28-32.
- 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)
李韬锐, 童中翔, 李慎波, 等. 面源红外诱饵干扰效能评估系统仿真研究[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(3): 0304001.
- 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)
- 李慎波, 李韬锐, 童中翔, 等. 导弹战术参数对面源红外诱饵干扰效能影响 [J]. 红外与激光工程, 2018, 47(7): 0704004.
- [7] 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.
- [8] Cormen T H, Leiserson C E, Rivest R L, et al. Introduction to Algorithm[M]. Massachusetts: MIT Press, 2005.
- [9] 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.
- [10] Mokry M. Numerical simulation of aircraft trailing vortices interacting with ambient shear or ground [J]. *Journal of Aircraft*, 2001, 38(4): 636–643.
- [11] Caroline K Wilhram. Combustion model for pyrophoric metal foils [J]. *Propellants Explosives Pyrotechnics*, 2003, 28(6): 296–300.
- [12] 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.
- [13] Yang Ming, Xie Yutong, Wang Hui, et al. Research on relationship between rockets flight velocity and jet impact effect [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2016(3): 27–30. (in Chinese)
- 杨鸣, 谢雨彤, 王辉, 等. 火箭飞行速度与射流冲击作用关系研究[J]. 兵器装备工程学报, 2016(3): 27–30.
- [14] Zhong Youwu, Liu Jiarun, Yang Lingyu, et al. Maneuver library and integrated control system for autonomous close in air Combat [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2008, 29(5): 114–121. (in Chinese)
- 钟友武, 柳嘉润, 杨凌云, 等. 自主近距空战中机动动作库及其综合控制系统[J]. 宇航学报, 2008, 29(5): 114–121.
- [15] Tong Zhongxiang, Li Chuanliang, Yao Benjun. Combat effectiveness simulation of infrared jam projected by fighter plane [J]. *Journal of System Simulation*, 2008, 20(11): 2868–2871. (in Chinese)
- 童中翔, 李传良, 姚本君. 红外诱饵干扰下的导弹作战效能仿真[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(11): 2868–2871.