

机载面源红外诱饵及干扰效能研究

贾林通,童中翔,王超哲,马 榜,王 彪

(空军工程大学 航空航天工程学院,陕西 西安 710038)

摘 要: 红外制导导弹,特别是红外成像制导导弹的发展,给飞机造成了巨大的威胁。而面源红外诱饵是对抗红外成像制导武器的有效手段。首先,在分析红外成像制导的原理和弱点的基础上,探讨了机载面源红外诱饵的干扰机理和作战能力指标,并介绍了机载面源诱饵的装备现状。其次,概述了自燃箔片红外诱饵和自燃液体红外诱饵的装备现状和制备方法。然后,从试验研究、建模研究、图像生成、干扰策略研究等几个方面综述了机载面源红外诱饵干扰效能的研究现状。最后提出了一种基于探索性分析方法的机载面源红外诱饵干扰效能的仿真方案,能够综合多种因素分析诱饵的干扰策略。

关键词: 机载面源红外诱饵; 干扰机理; 干扰效能; 干扰策略; 探索性分析

中图分类号: TN21 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0904005

Survey on airborne surface-type infrared decoy

Jia Lintong, Tong Zhongxiang, Wang Chaozhe, Ma Bang, Wang Biao

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

Abstract: IR guidance weapons, especially IR imaging guidance weapons, has brought great threat to modern aircraft. Airborne surface-type IR decoy is an effective countermeasure to jamming IR imaging guidance weapons. By analyzing the principle and disadvantage of IR imaging guidance, the jamming mechanism and efficiency index of airborne surface-type IR decoy were researched. The active weapons of airborne surface-type IR decoys was summarized. The recent research and manufacturing technology of airborne surface-type IR decoys, including pyrophoric foil IR decoy and pyrophoric liquid IR decoy, were also introduced. The present research condition of IR decoys' jamming effectiveness was summarized in the respects of experimental research, simulation research, simulated images, jamming strategy and so on. Finally, a simulation project on the jamming effectiveness of the IR decoy based on exploratory analysis was brought out, which can give the jamming strategy with the integration of the different elements.

Key words: airborne surface-type IR decoy; jamming mechanism; jamming effectiveness; jamming strategy; exploratory analysis

收稿日期:2016-01-11; 修订日期:2016-02-20

基金项目:国家自然科学基金(61471390)

作者简介:贾林通(1988-),男,博士生,主要从事飞行器论证与设计方面的研究。Email:jjialintong406@163.com

导师简介:童中翔(1958-),男,教授,博士生导师,博士,主要从事飞行器论证、设计与仿真方面的研究。Email:tzxkgy@163.com

0 引言

统计数字表明, 近几年局部战争中损失的飞机有 90% 以上是被红外制导导弹击落的^[1]。红外制导导弹在实战中的辉煌成果, 引起了各国军方的高度关注。如何确保战斗机在威胁下的生存力和战斗力成为亟待解决的问题。

红外诱饵 (Infrared Decoy) 是最早投入实战使用的红外干扰器材之一^[2]。红外诱饵是投放到空中, 具有一定能量并有与真目标相似的红外频谱特性, 用以欺骗或诱惑敌方红外探测系统或红外制导系统的假目标。目前, 利用红外诱饵弹产生虚假目标将来袭导弹骗离飞机, 是效费比最高、应用最广泛的对抗手段, 备受各国青睐^[3]。目前已有超过 70 种此类装备服役^[4]。

随着红外成像及其探测技术的不断发展^[5], 其目标识别能力、抗干扰能力、全天候作战能力和制导精度等有了较大提高, 红外成像制导已经成为精确制导的重要发展方向^[6]。传统红外诱饵弹暴露出诸多不足, 通过上升速率判别、轨迹鉴别和光谱鉴别等手段, 红外探测系统可以分辨出真假目标^[7], 要求红外诱饵技术也要随之不断地改进并发展新型红外诱饵。例如, 美国政府自 911 事件后, 投入大量的资金研究红外诱饵, 并要求进行红外诱饵新配方的研究^[8]。

大面积、高效能和宽光谱的面源红外诱饵, 能够形成具有一定强度和面积的红外辐射场, 改变目标特性或背景达到干扰目的, 有效对抗红外成像制导导弹^[9]。经过多年发展, 国外的新型红外诱饵干扰技术已发展到相当高的水平^[7,9], 并不断装备军事平台, 已有效干扰红外成像制导导弹, 成为一种有效的机载自卫装备。

文中分析研究了机载面源红外诱饵的干扰机理和作战能力指标, 梳理介绍了机载面源诱饵的主要现役装备及其制备方法, 并从试验研究、建模研究、图像生成、干扰策略研究等几个方面综述了其干扰效能的研究, 最后提出了一种基于探索性分析方法的机载面源红外诱饵干扰效能研究的仿真方案, 并提出了仿真方案的分析方法。

1 干扰机理分析

1.1 威胁发展

红外成像探测技术已经走过了 40 多年的发展

历程, 先后经历了多次局部战争的实战考验^[5]。红外成像导引系统至少已经发展了 3 代, 目前正向第 4 代超大规模凝视焦平面系统发展^[6]。法国的 IIR MICA、英国的 ASRAAM、美国的 AIM-9X、德国的 IRIS-T 等红外成像制导空空导弹相继问世, 标志着空空导弹的更新换代^[10]。新型导弹的装备给飞机的生存力和战斗力构成了巨大的威胁。

早期的红外诱饵多由镁和聚四氟乙烯或者铝镁合金和聚四氟乙烯组成, 以燃烧的形式将能量以热的形式释放出来, 产生红外以及其他形式的电磁辐射。传统红外诱饵已经发展成多种型号, 对于部分红外制导导弹仍然有效, 对抗第 1 代红外制导导弹的有效率甚至达到 100%^[8]。由于传统红外诱饵弹与载机的运动特性和辐射特性差异明显, 随着红外探测技术和红外导引头的不断发展, 诱饵的干扰效能下降了, 对新一代红外制导导弹特别是成像导弹难以形成有效干扰^[12-13]。因此, 要求红外诱饵技术也要随之不断地改进并发展新型诱饵。

1.2 红外成像制导原理及弱点

红外成像制导导弹一般由红外摄像头、图像监视器、图像信号处理器和跟踪伺服系统等部分组成^[14]。红外摄像头的主要作用是对目标进行摄像; 图像监视器则用于目标和背景图像的显示; 图像信号处理器由预处理器、特征提取与选择和目标识别 3 个部分构成; 跟踪伺服系统由跟踪处理器和伺服机构两个部分组成。

发射导弹前, 飞机火控系统首先搜索、捕获要攻击的目标, 并引导红外制导导弹上的导引头跟踪锁定目标。导弹发射后, 红外摄像头开始工作, 摄取目标及背景的红外图像并进行预处理, 并通过图像处理和识别, 区分出目标、背景信息, 识别出要攻击的目标并抑制噪声信号。红外制导是一种“发射后不管”的制导方式, 随着导弹与目标之间距离的缩小, 目标在图像平面上的投影将扩大, 且变得越来越清晰。此时, 制导系统根据目标的形状识别出它的要害部位, 并选择目标要害部位的中心作为攻击点。

红外成像制导具有诸多的突出优点, 但是依然存在一定的缺点: (1) 红外图像是通过光电信号转换生成的, 是缺乏立体感的灰度图像, 分辨率较低; (2) 红外成像制导要求背景与目标之间具有一定的红外辐射对比度, 由于大气衰减和成像系统自身限制等

原因,红外图像的对比较低,与可见光相比,清晰度较低,视觉效果模糊;(3) 由于外界环境干扰和热像系统的不完善,红外成像导引头的作用距离一般在 15~20 km 左右。

1.3 干扰机理分析

红外成像制导导弹正常工作必须满足两个条件:(1) 足够强的辐射能量,使红外成像探测器接收;(2) 目标与背景之间具有一定的辐射对比度,若用辐射强度表示,则对比度为:

$$C = \frac{I_T - I_B}{I_T + I_B} \quad (1)$$

式中: C 为目标与背景之间的对比度; I_T 和 I_B 分别为

飞机和背景的辐射强度。

针对红外成像制导导弹的工作条件和弱点,采取有效的措施,可以有效干扰导引头的工作。一方面,可以降低飞机的辐射能量或辐射强度,减少进入导引头的辐射能量或辐射强度,干扰红外成像制导导弹工作。另一方面,通过改变飞机和背景之间的辐射对比度 C ,干扰红外成像制导导弹工作。

机载面源红外诱饵可以在布放路径上形成具有一定面积和强度的干扰云团,改变飞机和背景的红外辐射特性,达到干扰目的。面源诱饵在不同的阶段,可以采用不同的干扰方式干扰导引头工作,具体方法见表 1。

表 1 针对不同制导阶段面源红外诱饵的干扰机理及策略

Tab.1 Jamming mechanism and strategy of surface-type IR decoy in different guidance moments

| | Working of IR seeker | Jamming mechanism |
|----------------------|--|---|
| Identification stage | Withdraw the physical characteristic of target picture | Release the IR decoy continuously to form an IR radiation cloud and blend with true target, constitute the target information together |
| | Centroid tracking | Release the IR decoy quickly form an IR radiation cloud, leading the IR seeker to the radiation center |
| Track stage | Correlation tracking | Release the IR decoy to cover the whole or part of the target, making target information different from the matched model |
| | Forecast tracking | Release the IR decoy continuously to break the usual tracking into the forecast tracking, compelling the IR seeker to research the target again |

2 装备现状分析

2.1 作战能力指标需求

作战能力需求指标是武器装备作战能力需求的度量标准,是装备能力顺利发挥作战效能的保证。通过分析机载面源红外诱饵的干扰机理和载机红外辐射特性,为了确保诱饵能充分发挥作用,其典型作战能力指标需求为:

(1) 辐射波段:飞机蒙皮红外辐射的峰值波长在 3~5 μm ,排气系统辐射峰值波长在 8~14 μm ,诱饵的红外辐射应覆盖这两个波段;

(2) 辐射强度(单发):静态时最大辐射强度 20 kW/Sr,动态时中波段辐射强度 1~2.5 kW/Sr;

(3) 峰值强度:诱饵在全波段内能够提供超过目标飞机的辐射强度,具体数值由目标飞机的红外辐射强度决定;

(4) 起燃时间和燃烧时间:起燃时间定义为从开始到辐射强度达到额定辐射强度值的 90%时所需时间,通常在 0.5 s 以内;单发诱饵的燃烧持续时间一般应大于 4.0 s。

(5) 辐射面积:能够快速形成具有一定面积的红外辐射场,改变目标飞机在导引头内的红外辐射特征,大型飞机可以通过多发诱饵同时发射进行保护。

2.2 现役装备分析

为了有效对抗红外成像制导导弹,目前红外诱饵主要有两个发展方向:(1) 智慧型诱饵。利用新材料、新技术,有效弥补诱饵与目标在运动特性和辐射频谱特性上的差异,更为逼真地模拟目标的红外特征;(2) 压制型诱饵。利用新材料自燃或氧化,形成大面积、高能量的红外干扰云,覆盖目标和飞机以保护飞机。

机载面源红外诱饵属于智慧型诱饵,主要分为自燃箔片红外诱饵和自燃液体红外诱饵两种类型,通过制造假目标或模拟飞机的红外辐射特征来干扰

红外成像制导导弹。

自燃箔片红外诱饵采用表面多孔合金材料,通过暴露在空气中氧化产生红外辐射,能够逼真地模拟飞机的红外辐射特征以有效对抗红外成像制导导弹,该类诱饵还可以在材料中加入金属或金属氧化物来降低诱饵的热效应。

自燃液体红外诱饵采用三乙基铝材料,氧化后可以发出一种可控的双波段红外信号。诱饵发射后三乙基铝从喷嘴喷出,氧化反应产生的火焰与喷气式飞机羽烟的尺寸接近。

广义机载面源红外诱饵还包括点面源复合红外诱饵和红外伴飞面源诱饵。点面源复合红外诱饵具有两种干扰载荷,可以有效干扰点源型制导导弹和成像制导导弹,提高飞机的战场生存力。红外伴飞面源诱饵采用伴飞与面源诱饵复合,能够形成与飞机红外特征相似的红外辐射,且具有相似的速度和轨迹,可以有效干扰光谱鉴别和运动识别。

目前,成熟的机载面源红外诱饵多由欧美国家研制装备。其中,美军现役的部分机载面源红外诱饵如表 2 所示^[18]。

表 2 美军装备的机载面源红外诱饵

Tab.2 Active airborne surface-type IR decoy of American

| Name | Type | Size/mm | Mass | Dispenser | Equipped aircraft |
|---|------------|-----------|-------|--------------|-------------------|
| Pyrophoric foil IR decoy | MJU-50/B | 25×25×206 | 340 g | AN/ALE-40/47 | A-10,C-130,F-16 |
| | MJU-51/B | 25×52×206 | 730 g | | |
| Pyrophoric liquid IR decoy | MJU-5188 | Φ36×158 | 190 g | AN/ALE-39 | F-18,C-130 |
| | MJU-5130 | | | AN/ALE-47 | |
| Complex IR decoy of point source and surface-type | MJU-48/B | 25×52×206 | 585 g | ALE-47 | F-15,C-5,C-17 |
| Escort free-flight infrared decoy | MJU-39/40B | 52×65×260 | - | AN/ALE-52 | F/A-22 |

中国在红外诱饵领域进行了大量的研究,但主要以点源诱饵弹为主,面源诱饵还处在研究和探索阶段。

3 面源红外诱饵制备

面源新型红外诱饵的研究目前已成为热点,各国都进行了大量的研究和探索。诱饵的制备是诱饵能够发挥其干扰效能的基础。以自燃箔片诱饵为例,对面源诱饵的制备进行研究,并对自燃液体诱饵进行简要分析。

3.1 自燃箔片诱饵

点源红外诱饵的配方主要包括氧化剂、可燃剂和粘合剂。例如,传统的 MTV 诱饵剂,以镁/聚四氟乙烯/氟橡胶为基本配方。在基本配方的基础上加入不同材料可以取得相应的效果。例如,在镁/聚四氟乙烯烟火药中加入硼粉,可以有效改善热分解和燃烧性能,降低高温放热峰值温度^[15]。四氯化钛的加入则可以扩展诱饵的辐射波长到 8~12 μm,提升诱饵的干扰效能^[16]。

自燃箔片红外诱饵的组成为两部分:干扰载

荷和金属箔片。干扰载荷通常选择表面多孔合金材料,通过氧化反应产生红外辐射。金属箔片的选择不仅要考虑导电性能和机械强度,同时要具备一定的工艺可行性,并保证金属箔片具备较高的燃点,通常的选择是不锈钢或铜箔片^[17]。

参考文献[18]介绍了一种以镀锡马口铁为基、表面镀覆活性金属涂层的复合材料,隔氧条件下加热可形成一种可自燃复合材料。

Campbell 等人对常规红外诱饵剂配方中粘合剂进行了研究,分析了热塑性粘合剂作为粘合剂对诱饵剂光谱特征的影响,得出了热塑性粘合剂能够降低光谱辐射亮度,消耗比率较高的结论^[19]。

王馨等通过两种国外的典型面源红外诱饵,分析了面源红外诱饵的技术特性和红外辐射特性,探讨了烟火剂类和凝固油料类诱饵的化学组分及燃烧辐射特性^[20]。

李敏等介绍了面源红外诱饵的国内外研究现状和诱饵的设计理论,重点分析了配方中粘合剂复配设计以及配方选择,通过试验研究了诱饵的红外辐射特性^[21]。

王海琦等提出了一种基于金属箔片、可遇空气自燃的新型复合诱饵材料,研究了箔片的制备工艺和诱饵的红外辐射性能,并研究了可燃剂的配方优化方案^[17]。

自燃箔片的制备有高温扩散法、自燃金属粉法和涂覆活化法 3 种制备工艺方案^[17]。高温扩散法是将微细金属粉末涂覆在金属材料表面,进行高温扩散形成金属涂层,通过热的 NaOH 溶液活化,得到自燃涂层。自燃金属粉法是通过化学方法制备活性较强的金属粉末,附着在金属箔片表面形成自燃涂层。涂覆活化法是将高活性 TZ 粉与粘合剂涂覆在金属箔片表面,经过特殊活化处理形成自燃涂层。

综合而言,涂覆活化法得到的箔片表现特性好,活化前后不影响涂层的稳定性,能够快速自燃,提供足够的红外辐射能量。总体而言,涂覆活化法可操作性强、实用性强,是理想的箔片制备工艺。一种典型自燃箔片的表面特征如图 1 所示。

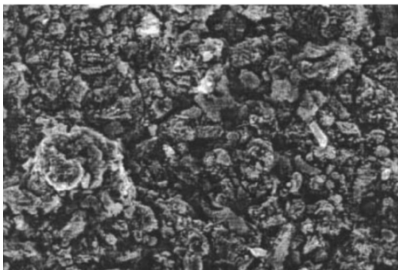


图 1 自燃箔片的表面形貌(5 μm)

Fig.1 Surface topography of pyrophoric foils (5 μm)

3.2 自燃液体诱饵

液体自燃材料与空气接触后,可以产生较大的羽烟,美、德、加拿大等国家在 20 世纪 70 年代就进行过研究。研究材料包括航空煤油、二乙基氢铝、氯化二甲基铝、三甲基铝($(\text{CH}_3)_3\text{Al}$)、三乙基铝($\text{Al}(\text{C}_2\text{H}_5)_3$)等,研究表明,三乙基铝性能最好。

三乙基铝 (Aluminium Triethyllic), 分子式为 $\text{Al}(\text{C}_2\text{H}_5)_3$, 无色透明,接触空气后会发生剧烈的自燃反应。通常有两种方法制备^[22]:(1) Al 粉和 H_2 在一定温度、压力下反应生成氯化铝,与乙烯加成反应;(2) 粗倍半乙基氯化铝与金属钠反应。

目前,现役的是自燃液体诱饵只有 MJU-5188 和 MJU-5130。通过材料改进,其红外辐射与发动机羽烟相似,自燃时间更长,能够有效保护载机。但自燃液体红外诱饵存在高空不易点燃问题、自燃液体

安全性和诱饵结构复杂性问题,影响了其研究和使用的。文中的研究集中在自燃箔片红外诱饵。

4 诱饵干扰效能

机载面源红外诱饵的性能并不能确保诱饵的干扰有效性,只有与合理的干扰策略结合才能充分发挥诱饵的干扰效能,因此,干扰效能的研究是必要的。

当前,诱饵干扰效能的评估方法主要有专家分析法、实弹打靶(试验)法和建模仿真法。建模仿真法成本低,可具体量化各种干扰条件并对红外对抗过程仿真,已得到了广泛应用。

4.1 试验

国外对目标红外辐射特性的研究起步较早,建立了大量的目标红外辐射特性试验场。如荷兰建立的 Physics and Electronics Laboratory TNO 光学测试系统^[23-24],美国空军、陆军导弹司令和海军的光电仿真测试系统^[25],美国海军的机载转塔式红外测量系统,法国航空空间研究院设计的机载红外测量系统等,这些场地和系统可以为机载面源诱饵的红外测试提供有效支撑。美国海军研究院通过试验研究表明:在 $t=0\text{ s}$ 、 0.5 s 、 1 s 、 1.5 s 的时间间隔内投放 4 枚自燃箔片诱饵时,能够形成与飞机红外图像相似的红外效果,有效掩护飞机突防^[26]。

半实物仿真是测试红外诱饵性能的有效手段,能够有效降低成本,提高测试的灵活性^[10]。目前,美国、西欧、日本等国建造了一批半实物仿真系统,美国陆海空军,建立了多个半实物仿真中心^[27-29]。美国军方的 AIISPES 系统^[29]、密歇根大学的 PRISM 软件^[30]、英国 Chemring 公司的 COUNTERSIM 仿真软件^[31]都得到了应用。法国、以色列也进行了红外半实物仿真系统的研制^[32]。这些可以为机载面源诱饵的对抗测试提供有效支撑。

中国自 20 世纪 80 年代以来引进和研制了大量先进的测试设备,中国航天 207 研究所、中国科学院、中国飞行试验研究所等单位建立了测试系统,为面源红外诱饵的辐射特性研究提供了有效手段和技术支撑。

程永分析了利用热像仪进行面源红外假目标辐射面积测试和辐射亮度估计,并进行了误差分析^[33];王继光等在分析红外面源诱饵干扰机理的基础上,研究了红外面源诱饵的试验方法^[34];刘静梅等基于热像仪研究了面源红外诱饵面积的测试方法、数据

处理方法及误差影响因素^[35]。

需要指出的是,目前的面源诱饵测试研究仅限于地面模拟实验,较少考虑到机载情况下的高空高速影响,具有一定的局限性。

4.2 诱饵建模

机载面源红外诱饵的特性通常是指诱饵的运动特性和辐射特性,其建模仿真研究是干扰效能评估的基础。

James J.Maier 和 David P. Forrai 提出了诱饵弹运动的简化模型和单波段红外辐射型^[36]。KrzysztofSibilski 和 Janusz B. Aszczyk 等建立了直升机和机载诱饵等在天空背景下的红外辐射模型^[37]。赵非玉等研究并基于软件实现了面源红外诱饵的运动特性仿真和动态红外图像生成,并验证了诱饵的干扰特性^[38];林涛等研究了面源型红外诱饵载荷单元的空中分布和辐射特性,并建立了仿真模型^[39];田晓飞等通过简化方法建立了面源红外诱饵模拟的运动模型和辐射模型,模拟生成了诱饵的红外图像^[40]。

面源红外诱饵的运动特性可以通过质心的运动规律和有效载荷的空间扩散规律来描述。辐射特性包括诱饵的辐射亮度和辐射光谱的时变规律。

将面源红外诱饵看成一个整体,受重力和气动阻力影响。建立地面坐标系($Ox_cY_cZ_c$),原点为地面上一点,面源红外诱饵发射瞬间的坐标为(x, y, z);平行坐标系(O, X, Y, Z)通过平移变换定义,如图 2 所示,轴方向与地面坐标系相同,原点为(x, y, z)。OX 轴与地球表面相切;OY 轴铅锤向上;OZ 轴垂直于 OXY 平面,构成笛卡尔坐标系。设点 P 为面源红外诱饵的质心,点 Q 为点 P 在水平面内投影, α 是 OQ 与 OP 的夹角, β 是 OQ 与 OX 轴正向的夹角。

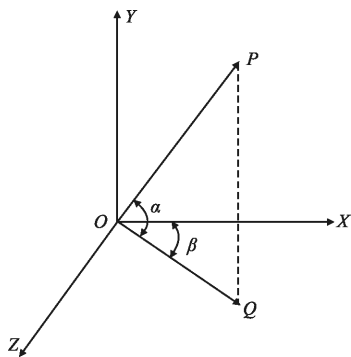


图 2 地面坐标系示意图

Fig.2 Diagrammatic sketch of earth coordinate system

面源红外诱饵的质心运动方程可以描述为:

$$\begin{pmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix} \times \Delta t \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{x0} \\ v_{y0} \\ v_{z0} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix} \times \Delta t \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F \cos \alpha \cos \beta \\ -g \pm F \sin \alpha \\ F \cos \alpha \sin \beta \end{pmatrix} \times \frac{1}{m(t)} \quad (4)$$

式中: Δt 为时间间隔;(x_0, y_0, z_0)为上一个时刻质心坐标;(x, y, z)为初始位置;(x_t, y_t, z_t)^T和(a_x, a_y, a_z)^T分别为速度 v 和加速度 a 在对应坐标轴上的分量; F 是面源诱饵受到的气动阻力; m 是面源诱饵的质量。其中

$$F = -0.5 \times C_d \times \rho \times S \times v^2 \quad (5)$$

$$m(t) = m_0 - m_1 / T \times t \quad (6)$$

式中: F 为气动阻力; ρ 为空气密度; v 为燃烧箔片的瞬时速度; S 为箔片燃烧时有效阻力面积; C_d 为阻力系数; m_0 为诱饵弹起始质量; T 为诱饵弹全部燃烧时间; m_1 为诱饵弹装药质量。

考虑到阻力系数不易获得,气动阻力 F 可以采用下式表示^[41]:

$$F = -kv^2 \quad (7)$$

式中: k 为阻尼系数。

由于诱饵箔片受到气动阻力较大,其速度会迅速地减小到匀降速度 u , 此时重力和气动阻力大小相等方向相反,满足等式

$$mg - F = mg - ku^2 = 0 \quad (8)$$

联立公式求解,得:

$$C_d S = 2k / \rho \quad (9)$$

相比阻力系数,匀降速度可以通过诱饵的低空投放试验实测得到,更易获得,可以间接求得阻尼系数。大气密度 ρ 采用标准大气密度。

面源红外诱饵的空间扩散受到多种因素的影响,除了重力、气动阻力等外,还会受到随机扰动的影响,难以通过单个箔片的运动分析面源诱饵的扩散。

试验研究表明:大数量箔片的抛撒散布会经历直线形箔片集束,S形箔片集束,圆锥形箔片云团和沉降的过程^[42-44]。机载面源红外诱饵自燃的作用时间主要集中在箔片抛撒过程的早期,箔片集束呈直

线形分布。通常情况下,干扰弹的投放速度为20~40 m/s,方向垂直向上。建立面源红外诱饵的仿真模型,结合试验,诱饵散布的空间包围面是圆柱体,正侧向看基本呈矩形分布。尺寸随载机的速度而变,在亚音速平飞时,长度约20~40 m,宽约1~2 m。

面源红外诱饵的红外辐射是由单个箔片红外辐射合成的,单个箔片的红外辐射受到多种因素的影响,通常采用实测数据进行差值获得,单枚面源红外诱饵中波段红外辐射强度约为1 000~2 500 W/sr。在某一状态下,某型诱饵的动态红外辐射强度变化拟合曲线如图3所示。

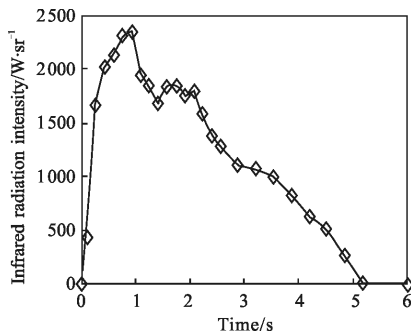


图3 面源红外诱饵动态辐射强度变化曲线

Fig.3 Dynamic radiation intensity change curves of surface-type IR decoy

4.3 效能评估系统

效能评估系统既要能够提供诱饵干扰效能的总体评价,还要提供诱饵干扰效能的影响因素以便提高诱饵的干扰效能。一个合理的评估系统的搭建能够有效满足需求。

孔晓玲等建立了面源红外干扰弹对抗红外成像制导导弹的对空仿真系统并实现了动态仿真^[45];张阳等建立了红外成像导弹抗干扰测试的仿真模型,构建了诱饵干扰条件下的测试评估环境,分析了诱饵投放对导弹性能的影响^[46];付晓红等建立了飞机、红外成像制导导弹、机载面源红外诱饵的运动和红外辐射模型,实现了诱饵的对抗仿真^[47]。

但是,目前多数效能评估系统都集中在飞机、导弹、诱饵的运动和红外辐射建模上,多以导弹的性能作为评价指标,没有考虑到外界因素的影响和具体的作战想定,建立了如图4所示的效能评估系统。

该效能评估系统包含7大模块(模型)。数据库模块用于提供其他模块运行所需的所有初始数据;

作战想定模块用来设定战场态势、环境参数和干扰控制参数,完成红外对抗仿真的初始化;飞机平台模块包括飞机运动模型和飞机辐射特性模型;面源红外诱饵模块包括诱饵运动模型和诱饵辐射模型;大气环境及红外辐射传输模块包括大气静态模型、大气动态模型、辐射传输模型,反映红外辐射在大气传输路径上的衰减;红外制导弹模型中的关键是目标识别机理仿真;干扰效能评估模块用于评估不同作战想定下的诱饵干扰效能,进一步得出诱饵的最佳干扰策略。

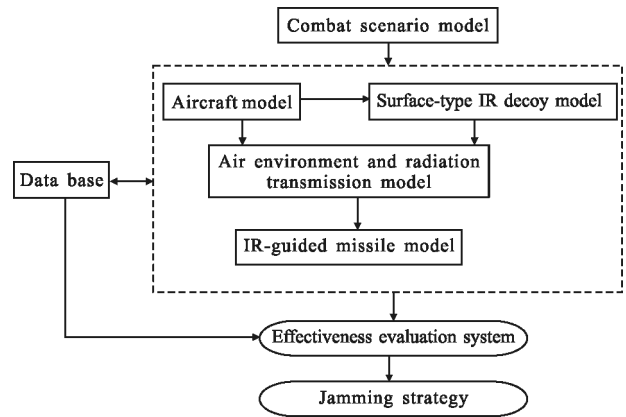


图4 面源红外诱饵效能评估系统

Fig.4 Effectiveness evaluation system of surface-type IR decoy

4.4 红外图像生成

面源红外诱饵是对抗红外成像制导导弹的有效手段,通过红外景象生成方式,在半实物仿真中生成逼真的动态面源红外诱饵干扰图像,对于检验红外制导导弹的抗干扰作战性能具有重要意义。

田晓飞等研究了面源红外诱饵的计算机图像生成研究^[48];郭亚峰等利用粒子系统模拟红外诱饵弹,仿真干扰条件下目标的红外图像^[49];赵非玉等在诱饵运动分析的基础上,建立了诱饵的随机分布模型,基于距离变化生成了不同观察方位的诱饵图像^[38]。

在导弹逐渐接近目标的过程中,导引头中的诱饵的图像面积在不断的变化。初始阶段,随着诱饵的自然反应和距离的缩短,诱饵的图像面积会不断增大,但是随着时间的推移,自然反应终止,温度不断降低,诱饵的图像面积会不断减小。同时,在不同的方位上,诱饵的图像也会不同。面源红外诱饵的动态红外图像生成最常用的是OpenGL技术,通过诱饵的辐射强度确定诱饵的辐射亮度,将辐射亮度值转

化为对应的灰度值。设选取辐射亮度的上限为 L_{\max} ，下限为 L_{\min} 。当辐射亮度大于 L_{\max} 时，灰度取最大值 G_{\max} ，而在辐射亮度小于 L_{\min} 时，灰度取最小值 G_{\min} 。辐射亮度在两者之间时，线性量化，即：

$$G = \frac{L - L_{\min}}{L_{\max} - L_{\min}} (G_{\max} - G_{\min}) + G_{\min} \quad (10)$$

将计算得到的灰度赋给目标对应的面元即可获得目标的红外辐射图像。

4.5 干扰策略

机载面源红外诱饵的技术指标和战术应用的合理结合才能充分发挥诱饵的干扰效能。诱饵的战术应用即诱饵的干扰策略，不是简单的诱饵的施放，而是针对使用环境、来袭导弹的诱饵发射时机、发射方向、发射间隔和发射数量的有机结合。广义上的诱饵的干扰策略包括载机的机动规避。

C.R. Viau 提出通过蒙特卡洛仿真方法研究面源诱饵对抗红外制导导弹的效果，方法和思路具有可借鉴性^[50]。Ernst-Christian Koch, M. A. Richardson, J. Berggren R. Kihlén 等人也分别从不同方面进行了研究，基于导弹、目标和诱饵红外特性和运动特性等建立了红外对抗评估仿真系统，可以用来评估不同干扰策略的效能^[51-55]。由于保密等原因，相关文献仍然较少，特别是对新型的机载面源红外诱饵干扰策略的研究尚不多见。

目前，国内对于机载面源诱饵的研究主要集中在诱饵的模型仿真上，对于干扰策略的研究较少。许海龙等针对弹目距离的变化，研究了不同阶段舰载面源红外诱饵对抗成像制导反舰导弹的干扰方法^[6]；刘建永等以 AGM-65D 导弹为例，提出了利用面源红外诱饵对抗红外成像反坦克导弹的方法，并进行了初步分析、评估^[56]。研究可以为机载面源红外诱饵的研究提供了一定的借鉴。

探索性分析方法是美国兰德公司提出的，用于对不确定性要素所产生的结果进行整体研究，能够分析不同参数对结果的影响并进行敏感性分析^[57]。面源红外诱饵干扰效能评估是一个复杂体系，探索性分析是一种有效的方法。

5 探索性分析仿真

机载面源诱饵的干扰效果受到多种因素的影响。考虑一种典型的红外对抗场景进行仿真分析。A、

B 两架飞机，A 飞机携带面源红外诱饵，B 飞机携带红外制导导弹尾向追击 A 飞机。仿真过程中的基本数据设置如下：

(1) 机载面源红外诱饵：尺寸 25 mm×25 mm×206 mm，质量 340 g，投放速度 20~40 m/s，投放方向垂直于目标飞机向上，投放间隔 0.1 s，起燃时间 0.4 s、0.5 s 达到最大辐射强度，强度 2 200 W/sr，作用时间 3 s；

(2) 红外制导导弹：坐标(10 000, 0, 0)(单位:m)，速度 500 m/s，爆炸半径为 11 m，工作波段 3~5 μm，视场角为 3°×3°，偏航角 0°，俯仰角 0°，尾向追击目标飞机；

(3) 载机：坐标(100 00, 10 000, 0)(单位:m)，速度 200 m/s，水平直线飞行，方向 X_G 轴正向，红外辐射强度 1 050 W/sr(正后方)。

5.1 方案设计

对机载面源红外诱饵干扰效能的分析主要考虑诱饵投放速度、诱饵投放数量、诱饵投放时机、诱饵施放距离、导弹来袭方向、导弹发射时弹目距离等。一种可行的实验因子设计见表 3。广义的干扰策略还包括载机的机动规避。考虑到不同机动的规避效果，给出方案以蛇形机动进行分析^[58]，分别以载机平飞、半径 300 m 蛇形机动、半径 500 m 蛇形机动为规避方案。

表 3 仿真方案的实验因子

Tab.3 Experimental factors of simulation

| Simulation factors | Values | Unit | No. of factors |
|--------------------------------|--|------|----------------|
| Release velocity | 20,25,30,35,40 | m/s | 5 |
| Release numbers | 1,2,3,4 | | 4 |
| Release times | 0,0.5,1,1.5,2 | s | 5 |
| Distance of missile and target | 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15 | km | 15 |
| Attack direction | 0,15,30,45,60,75,90,105,120,135,150,175, | (°) | 13 |
| Manoeuvre elusion | 300,500,∞ | m | 3 |

对表中的仿真因子进行组合，生成 5×4×5×15×13×3=58 500 个仿真方案。

5.2 方案分析

对仿真方案的分析包含两个层面：单次干扰的

分析和总体分析。

单次干扰的效果评估用于分析特定条件下面源红外诱饵的干扰效能,用脱靶量表征。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。导弹爆炸时,飞机质心位置为 (X, Y, Z) ,导弹质心位置为 (x, y, z) ,则脱靶量为:

$$R' = \sqrt{(X-x)^2 + (Y-y)^2 + (Z-z)^2} \quad (11)$$

考虑飞机的外形尺寸,修正后的脱靶量 R 为:

$$R = R' - d \quad (12)$$

$$d = \sqrt[3]{3L \times H \times W / 4\pi} \quad (13)$$

式中: (L, H, W) 分别为飞机的长度、飞行高度和翼展。

实际情况中,面源红外诱饵干扰效能的影响因素很多,具有随机性。总体分析因素变化及其交互对干扰效能的影响。可以用一定条件下诱饵的干扰成功率 P 来表示:

$$P = \left(1 - \frac{N_{\text{hit}}}{N_{\text{Lau}}}\right) \times 100\% \quad (14)$$

式中: P 为干扰成功率; N_{hit} 为命中目标导弹数; N_{Lau} 为正常发射导弹数,即仿真次数。

为了分析不同因素对干扰效能的影响,还可以进行敏感性分析。设 S_{ij} 为第 i 个实验因子取第 j 个水平值的仿真方案, s_{ij} 和 f_{ij} 分别为 S_{ij} 干扰成功和失败的次数,定义 $r_{ij} = s_{ij} / (s_{ij} + f_{ij})$,则第 i 个实验因子的敏感程度为:

$$s_i = \frac{\max\{r_{ij}\} - \min\{r_{ij}\}}{\max\{r_{ij}\}} \quad (j=1, 2, 3, \dots, n_i) \quad (15)$$

式中: n_i 为第 i 个实验因子的水平数。 S_i 越大,说明第 i 个实验因子的影响越大,敏感程度越高。

通过对单次仿真结果的分析,通过脱靶量可以具体分析诱饵干扰失败的原因;通过对多次仿真结果的分析,可以分析不同干扰策略的干扰效果,确定最优干扰策略;敏感性分析可以提供不同因素作用下的干扰效果,不仅可以为面源红外诱饵的改进提供依据,还可以作为导弹抗干扰算法的改进依据。

6 结 论

红外成像技术的不断发展及其在红外制导导弹上的应用,给飞机带来了极大的威胁。机载面源红外诱饵能够形成具有一定强度和面积的红外辐射场,有效对抗红外成像制导导弹,成为一种有效的机载自卫装备。文中分析研究了机载面源红外诱饵的干

扰机理及作战能力指标,梳理介绍了机载面源诱饵的主要装备和两种典型面源诱饵的制备方法。在分析面源诱饵干扰效能和干扰策略研究现状的基础上,通过建立的面源红外诱饵效能评估系统,提出了一种基于探索性分析的诱饵干扰效能的仿真方案,通过不同层次的方案分析,能够确定最优干扰策略,同时不仅可以为面源红外诱饵的改进提供依据,还可以作为导弹抗干扰算法的改进依据。由于篇幅的限制,文章没有进行详细的建模和数值分析。

参 考 文 献:

- [1] Huang Changqiang, Zhao Hui, Du Haiwen, et al. The Precision Guidance Theory of Airborne Munition [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011. (in Chinese) 黄长强, 赵辉, 杜海文, 等. 机载弹药精确制导原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [2] Xu Bo, Shi Jiaming, Wang Jiachun, et al. The jamming technology and development tendency of IR guided weapons [J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2002 (6): 29-32. (in Chinese) 许波, 时家明, 汪家春, 等. 红外制导武器的干扰技术及发展趋势[J]. 航天电子对抗, 2002(6): 29-32.
- [3] Li Weiheng, Wang Qinglin, Yang Chengzhi, et al. Study of airborne infrared bait and countermeasures to Air-to-Air missile simulation [J]. *Microcomputer Information*, 2007, 23 (10): 196-197. (in Chinese) 李蔚恒, 王庆林, 杨承志, 等. 红外诱饵及其对抗空空红外导弹仿真研究[J]. 微计算机信息. 2007, 23(10): 196-197.
- [4] Hong Yang, Zhang Ke, Li Yanjun. Simulation and jamming model of infrared bait [J]. *Journal of System Simulation*, 2006, 18(2): 463-466. (in Chinese) 洪洋, 张科, 李言俊. 红外诱饵的干扰模型与仿真[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(2): 463-466.
- [5] Fan Jinxiang, Yang Jianyu. Development trends of infrared imaging detecting technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(12): 3145-3153. (in Chinese) 范晋祥, 杨建宇. 红外成像探测技术发展趋势分析[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(12): 3145-3153.
- [6] Xu Hailong, Wang Jun, Wu Xuefeng. Research into the jamming of distributed surface type infrared decoy to infrared imaging guidance anti-missile [J]. *Shipboard Electronic Countermeasure*, 2013, 36(1): 43-46. (in Chinese) 许海龙, 王隼, 吴雪峰. 面源型红外干扰诱饵干扰红外成像

- 制导反舰导弹研究[J]. 舰船电子对抗, 2013, 36(1): 43-46.
- [7] Zhao Feiyu, Ma Chunxiao, Lu Shan, et al. Development of the airborne IR decoy technology [J]. *Ship Electronic Engineering*, 2012, 32(3): 20-22. (in Chinese)
赵非玉, 马春孝, 卢山, 等. 机载红外诱饵技术的发展[J]. 舰船电子工程, 2012, 32(3): 20-22.
- [8] John Fleitz, Neal Brune. The US IR decoy industry: planning for a viable future[J]. *Journal of Electronic Defense*, 2011, 4(34): 35-37.
- [9] Li Baoning, Xie Jipeng, Li Chaorong. Development analysis of the US surface-type infrared decoy [J]. *Ship Electronic Engineering*, 2009, 29(7): 33-35. (in Chinese)
李宝宁, 谢吉鹏, 李朝荣. 美国面源型红外诱饵弹的发展分析[J]. 舰船电子工程, 2009, 29(07): 33-35.
- [10] Wu Tao, Chen Lei. Development trend of the image type infrared decoy technology [J]. *Ship Electronic Engineering*, 2010, 30(5): 31-34. (in Chinese)
吴涛, 陈磊. 成像式红外诱饵弹技术的发展 [J]. 舰船电子工程, 2010, 30(5): 31-34.
- [11] Huang Shike, Zhang Tianxu, Li Lijuan, et al. IR guiding technology based on multispectral imaging for air to air missile [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(1): 16-20. (in Chinese)
黄土科, 张天序, 李丽娟, 等. 空空导弹多光谱红外成像制导技术研究[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(1): 16-20.
- [12] 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.
- [13] Wang Chaozhe, Tong Zhongxiang, Li Lin, et al. Simulation of towed infrared decoy interfering and its operational method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 446-451. (in Chinese)
王超哲, 童中翔, 李琳, 等. 拖曳式红外诱饵干扰仿真与使用方法[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(2): 446-451.
- [14] Fang Youpei, Qian Jianping. Jamming technology research to the imaging IR guidance missile [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2000, 29(3): 7-14. (in Chinese)
方有培, 钱建平. 对红外成像制导导弹的干扰技术研究[J]. 红外与激光工程, 2000, 29(3): 7-14.
- [15] Wei Yongqi, Chen Xin, Xu Huixiang. Application of different particle sizes of boron in Mg/PTFE pyrotechnic compositions [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2013, 36(4): 83-86. (in Chinese)
魏永奇, 陈昕, 胥会祥, 等. 不同粒度硼粉在 Mg/PTFE 烟火药中的应用[J]. 火炸药学报, 2013, 36(4): 83-86.
- [16] Zhao Feiyu, Xie Jin, Guo Yongli, et al. Research on the IR emission features of Magnesium/Teflon/Viton (MTV) decoy flare [J]. *Lectro-Optic Technology Application*, 2007, 22(1): 34-35. (in Chinese)
赵非玉, 解锦, 郭永利, 等. 镁/聚四氟乙烯/氟橡胶(MTV)红外诱饵的红外辐射特性研究 [J]. 光电技术应用, 2007, 22(1): 34-35.
- [17] Wang Haiqi. Research on preparation technology of combustible foil and IR/MMW character [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2013. (in Chinese)
王海琦. 可燃箔片材料制备及红外毫米波特特性研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
- [18] Alexander Kit Lay. Decoy countermeasures: US, 2014037398 [P]. 2014-12-25.
- [19] Ernst-Christian Koch. Annual review on aerial infrared decoy flares[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2009, 34(1): 2-4.
- [20] Wang Xin. Study of technique characteristics of array IR decoy and composition of the materials [J]. *Electro-Optic Technology Application*. 2007, 22(3): 11-13. (in Chinese)
王馨. 面源红外诱饵技术特性及材料组分研究[J]. 光电技术应用, 2007, 22(3): 11-13.
- [21] Li Min. Study of adhesive composite of array infrared decoy and infrared performance[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2013. (in Chinese)
李敏. 面源红外诱饵中粘合剂复配及其性能研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
- [22] Lu Yemin. Design and realization of Aluminium Triethyllic produce equipment control system based on CAN bus [D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2010. (in Chinese)
吕业民. 基于 CAN 总线的三乙基铝生产装置控制系统的设计与实现[D]. 大连: 大连交通大学, 2010.
- [23] Wang Xiaopeng. Study on the test of IR radiation characteristics of typical military target[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2004. (in Chinese)
王小鹏. 典型军用目标红外辐射特性测试研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2004.
- [24] Schutte K. Fusion of IR and visual images [R]. The Hague: Physics and Electronics Lab, 1997.
- [25] Zhang Jiyong. Photoelectric countermeasure simulation test system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(6): 1124-1128. (in Chinese)

- 张继勇. 光电对抗装备仿真测试系统 [J]. 红外与激光工程. 2010, 39(6): 1124-1128.
- [26] Wang Ying. Review of the development of the MJU series airborne IR decoy [J]. *Abroad Electrooptical Countermeasures*, 2007(2): 21-27. (in Chinese)
王莹. 美军 MJU 系列机载红外诱饵发展综述 [J]. 国外光电对抗, 2007(2): 21-27.
- [27] Zeng Chang'e, Yu Mingzhe, Shan Changsheng, et al. HWIL simulation technology for guided weapons experiment at the US navy and air force [J]. *Journal of Spacecraft TI & C Technology*, 2005, 24(5): 63-69. (in Chinese)
曾嫦娥, 鱼明哲, 单长胜, 等. 美国海空军制导武器试验的半实物仿真技术[J]. 飞行器测控学报, 2005, 24(5): 63-69.
- [28] Zeng Change, Yu Mingzhe, Shan Changsheng, et al. Evaluation of HWIL simulation technology for guided weapons of the US army [J]. *Journal of Spacecraft TI & C Technology*, 2005, 24(3): 75-83. (in Chinese)
曾嫦娥, 鱼明哲, 单长胜, 等. 美陆军制导武器试验半实物仿真技术综述[J]. 飞行器测控学报, 2005, 24(3): 75-83.
- [29] Beasley D, Saylor D. Overview of dynamic scene projectors at the US army aviation and missile command [C]//SPIE, 2009, 4469: 147-156.
- [30] Chen Yu. Design of infrared decoy HIL simulation system based on finite element module [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012. (in Chinese)
陈宇. 基于有限元模型的红外诱饵弹半实物仿真系统设计 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [31] James Jackman. Countermeasure effectiveness against a man-portable air-defense system containing a two-color spinescan infrared seeker[J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(12): 401-409.
- [32] Han C J, Sawyer B, Stockbrieg R, et al. Cryovacuum resistor infrared scene projector[C]//SPIE, 2009, 4469: 157-167.
- [33] Cheng Yong. Analysis on characteristic parameters of surface-type infrared decoy [J]. *Mine Warfare & Ship Self-Defense*, 2012, 20(1): 72-73. (in Chinese)
程永. 面源红外假目标特征参数分析[J]. 水雷战与舰船防护, 2012, 20(1): 72-73.
- [34] Wang Jiguang, Wang Minshuai, Zang Shouhong. Development of surface-type infrared decoys at home and abroad and study of testing methods [J]. *Infrared*, 2011, 32(10): 17-20. (in Chinese)
王继光, 王敏帅, 臧寿洪. 国内外红外面源诱饵弹的发展和试验方法研究[J]. 红外, 2011, 32(10): 17-20.
- [35] Liu Jingmei, Gong Fu'an. Method for testing surface-type infrared decoy area by thermography and its error analysis [J]. *Infrared*, 2009, 30(8): 32-35. (in Chinese)
刘静梅, 宫伏安. 用热像仪测试面源红外诱饵面积的方法及误差分析[J]. 红外, 2009, 30(8): 32-35.
- [36] Forrai David P, Maier James J. Generic models in the advanced IRCM assessment model [C]//WSC, 2011: 789-796.
- [37] Krzysztof Sibilski, Janusz B Aszczyk. Modeling of helicopter self-defense dystem[C]//AIAA, 2010(36): 474-479.
- [38] Zhao Feiyu, Lu Shan, Jiang Chong, et al. Research on the modeling method of surface-type infrared decoy [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2012, 27(2): 66-69. (in Chinese)
赵非玉, 卢山, 蒋冲, 等. 面源红外诱饵仿真建模方法研究 [J]. 光电技术应用, 2012, 27(2): 66-69.
- [39] Lin Tao, Li Kuo. Research on a model of distributed surface type infrared decoy [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2007, 22(1): 72-74. (in Chinese)
林涛, 李阔. 分布式面源型红外诱饵建模研究 [J]. 光电技术应用, 2007, 22(1): 72-74.
- [40] Tian Xiaofei, Ma Lihua, Hong Hua, et al. Study on jamming characteristic and simulation of surface-type infrared decoy [J]. *Laser & Infrared*, 2012, 42(2): 165-169. (in Chinese)
田晓飞, 马丽华, 洪华, 等. 面源红外诱饵的干扰特性分析及模拟研究[J]. 激光与红外, 2012, 42(2): 165-169.
- [41] Chen Naiguang. Moving characters simulation of foils cloud used inoptics-electronic countermeasure [J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2008, 24(5): 20-23. (in Chinese)
陈乃光. 光电干扰箔片云团运动规律的仿真研究[J]. 航天电子对抗, 2008, 24(5): 20-23.
- [42] Huang Bei, Wang Hao, Wang Shuai, et al. Dispersing experiment for separation and dispersion of multi-plates [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2012, 20(5): 605-609. (in Chinese)
黄蓓, 王浩, 王帅, 等. 光电干扰箔片抛撒与扩散试验研究 [J]. 含能材料, 2012, 20(5): 605-609.
- [43] Huang Bei, Wang Hao, Tao Ruyi, et al. Numerical study of multi-plates separating flow and characteristics [J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2013, 31(2): 213-218. (in Chinese)
黄蓓, 王浩, 陶如意, 等. 薄片分离过程流场特性的数值仿真研究[J]. 空气动力学学报, 2013, 31(2): 213-218.
- [44] Huang Bei, Wang Hao, Zhang Dingshan, et al. Study on interior ballistics and numerical simulation of jammer with foils[J]. *Journal of Ballistics*, 2010, 22(4): 73-77. (in Chinese)

- 黄蓓, 王浩, 张丁山, 等. 光电干扰箔片抛撒内弹道研究与数值仿真[J]. 弹道学报, 2010, 22(4): 73-77.
- [45] Kong Xiaoling, Ma Shengxian, Du Yuping, et al. Simulation research on surface-type infrared decoy for jamming infrared imaging guided missile [J]. *Command Control & Simulation*, 2011, 33(1): 78-81. (in Chinese)
孔晓玲, 马胜贤, 杜玉萍, 等. 面源红外干扰弹对抗红外成像制导导弹的仿真研究[J]. 指挥控制与仿真, 2011, 33(1): 78-81.
- [46] 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.
- [47] Fu Xiaohong, Fan Qiulin. Research on modeling and simulation of special material decoy [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2013, 28(6): 81-86. (in Chinese)
付晓红, 樊秋林. 面源红外诱饵的建模与仿真研究 [J]. 光电技术应用, 2013, 28(6): 81-86.
- [48] Tian Xiaofei, Ma Lihua, Li Fengjing, et al. The study on computer image generation of surface-type infrared decoy [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2012, 32(3): 205-208. (in Chinese)
田晓飞, 马丽华, 李冯敬, 等. 面源红外诱饵的计算机图像生成研究[J]. 弹箭与制导学报, 2012, 32(3): 205-208.
- [49] Guo Yafeng, Wu Qingxian, Jiang Changsheng. Visual simulation of infrared decoy [J]. *Electronics Optics & Control*, 2012, 19(7): 41-43. (in Chinese)
郭亚峰, 吴庆宪, 姜长生. 红外诱饵弹的视景仿真[J]. 电光与控制, 2012, 19(7): 41-43.
- [50] Viau C R. Expendable countermeasure effectiveness against imaging infrared guided threats [C]//ECWI, Second International Conference on Electronic Warfare, 2012.
- [51] Ernst-Christian Koch. Pyrotechnic countermeasures: II. advanced aerial infrared countermeasures [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2006, 31(1): 3-19.
- [52] Ernst-Christian Koch. 2006-2008 annual review on aerial infrared decoy flares [J]. *Propellants Explos Pyrotech*, 2009 (34): 6-12.
- [53] Richardson M A, Tranquillino-Minerva N, Butters B, et al. Modeling the improved protection of fast jets from the IR MANPADS threat [C]//Proceedings of SPIE, 2006, 6397: 63970F1-63970F12.
- [54] Kihlén Berggren J R. Model for simulation of IR countermeasure effect on IR-seeker/missile [C]//Proceedings of SPIE, 2004, 5615: 72-83.
- [55] Forrai D P, Maier J J. Generic models in the advanced IRCM assessment model [C]//Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference, 2001: 789-796.
- [56] Liu Jianyong, Shen Junping, Hu Jianghua, et al. Camouflage way of countering infrared imaging guided antitank missile [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34 (2): 183-187. (in Chinese)
刘建永, 沈均平, 胡江华, 等. 对抗红外成像制导反坦克导弹的一种伪装方法 [J]. 红外与激光工程, 2005, 34(2): 183-187.
- [57] Liu Ling, Xu Haojun, Hua Yuguang, et al. Research on effectiveness space modeling for air power system of systems based on exploratory analysis [J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(18): 5878-5881. (in Chinese)
刘凌, 徐浩军, 华玉光, 等. 基于探索性分析的空中力量体系效能空间建模研究 [J]. 系统仿真学报, 2009, 21(18): 5878-5881.
- [58] Wu Huanhuan, Nan Ying, Peng Yun. Study of penetration maneuver of fighter confronted with ground-to-air missile simulation [J]. *System Simulation Technology*, 2008, 4(4): 256-259. (in Chinese)
吴欢欢, 南英, 彭云. 战机对抗地空导弹的突防策略仿真研究[J]. 系统仿真技术, 2008, 4(4): 256-259.