

点面复合红外诱饵空中动态散布特性仿真及使用研究

赵非玉, 王亮*, 过凯, 张静元, 潘博臣, 郭树超

(中国电子科技集团公司光电研究院, 天津 300308)

摘要: 点面复合红外诱饵是国内外飞机平台使用的先进红外干扰装备之一, 具备较好的对抗红外制导导弹的能力。为获得点面复合红外诱饵空中动态散布特性, 为其使用提供理论基础, 提升点面复合红外诱饵使用效能, 对点面复合红外诱饵的点源诱饵和面源诱饵进行动力学和运动学分析, 联立方程组并进行求解, 获得了点源诱饵空中运动轨迹和面源诱饵在空中的散布情况, 然后改变飞机平台速度进行仿真, 获得了点源诱饵和面源诱饵的相对运动趋势和平台速度影响规律。基于点面复合红外诱饵空中动态散布特性仿真, 开展使用研究, 阐述了点面复合红外诱饵的干扰特性和干扰机理, 干扰特性主要包括辐射强度值、辐射强度变化率和辐射面积, 分析了点面复合红外诱饵在红外制导导弹导引头视场的形成特点, 并基于此开展干扰机理研究, 分析了点面复合红外诱饵在红外制导导弹的成像阶段和非成像阶段的干扰机理, 能够为诱饵使用策略的制定提供参考和借鉴, 提升飞机平台战场生存能力。

关键词: 点面复合; 动态散布; 干扰机理; 使用研究

中图分类号: TN972 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220476

0 引言

随着红外制导导弹的打击能力提升和制导技术革新, 飞机平台在空战中面临更大的威胁。红外诱饵作为传统红外制导导弹的干扰手段, 几乎装备于所有飞机平台, 其技术体制也随着导弹打击能力的提升而更新发展^[1]。我国最早发展的是点源红外诱饵, 主要依靠高能量^[2-4]对红外制导导弹实施干扰, 后来发展了面源红外诱饵^[5-7], 实现对飞机目标的遮蔽干扰, 目前较为先进的技术体制为点面复合红外诱饵, 综合点源诱饵和面源诱饵的技术优势, 实现更好的干扰效果, 提高干扰载荷空间利用效率。为进一步提升点面复合红外诱饵效能, 有必要对其空中动态散布特性进行仿真计算, 在仿真的基础上开展使用研究, 完善点面复合红外诱饵使用策略。

目前, 国内多家高校和院所对点源红外诱饵和面源红外诱饵的特性、使用和效能等开展了研究。西北工业大学的杨东升等^[8-9]研究了点源红外诱饵的运动特性和辐射特性, 建立了点源诱饵的运动模型, 考虑了空气阻力、重力、诱饵投射初速和方位等因素, 同时基于能量守恒定律、黑体辐射定律等推导了点源诱饵辐射计算模型。中国电子科技集团公司光电研究

院的过凯等^[10]通过仿真的手段研究了点源红外诱饵的运动特性, 获得了不同投放方式下飞机与点源诱饵的分离特性; 赵非玉^[1]、付晓红^[11]等建立了面源红外诱饵仿真模型, 实现了运动学仿真并生成了动态红外图像, 验证了面源红外诱饵的干扰特性。空军工程大学的邹涛等^[12]利用计算流体力学 (CFD) 方法得到单个箔片和两平行箔片在不同角度下的气动系数, 然后将其代入多个箔片运动学方程的求解中, 得到了扩散形状近似为前部稀疏后部密集的锥形云团; 李韬锐等^[13-14]通过求解箔片表面温度分布得到整体辐射特性, 并改变面源诱饵的角度和高度等参数进行干扰效能仿真, 结果表明仿真结果与实际测试很接近, 能够达到干扰效能评估的要求。

1 点面复合红外诱饵空中动态散布特性

点面复合红外诱饵由点源诱饵和面源诱饵组成, 二者复合装填、同时发射, 在空中呈现复杂散布状态。对于复合诱饵的空中动态散布特性仿真, 主要包括对点源诱饵和面源诱饵的运动仿真。

1.1 点源诱饵空中动态散布特性

点源诱饵被飞机投放后, 在空中受到重力和空气阻力的作用, 其运动轨迹逐渐落后于飞机, 具体运动

收稿日期: 2022-07-25; 修订日期: 2022-11-15

作者简介: 赵非玉, 男, 研究员, 主要从事无源干扰总体设计方面的研究。

通讯作者: 王亮, 男, 工程师, 硕士, 主要从事光电对抗仿真与战术使用方面的研究。

规律可参考文献 [10] 中点源红外诱饵运动特性仿真部分, 点源诱饵典型运动轨迹如图 1 所示, 图中 x 轴正向为飞机运动方向, z 轴为高度方向, 规定向上为正。

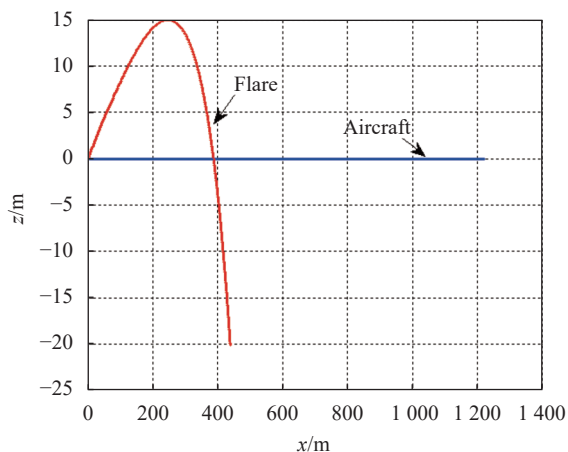


图 1 点源诱饵典型运动轨迹

Fig.1 Typical trajectory of point source flare

1.2 面源诱饵空中动态散布特性

1.2.1 气动特性

为获得面源诱饵气动特性, 对单个箔片进行流体力学仿真。将流体域单侧设为速度入口, 速度大小 $0.8 Ma$, 仿真得到典型压力分布云图如图 2 所示。

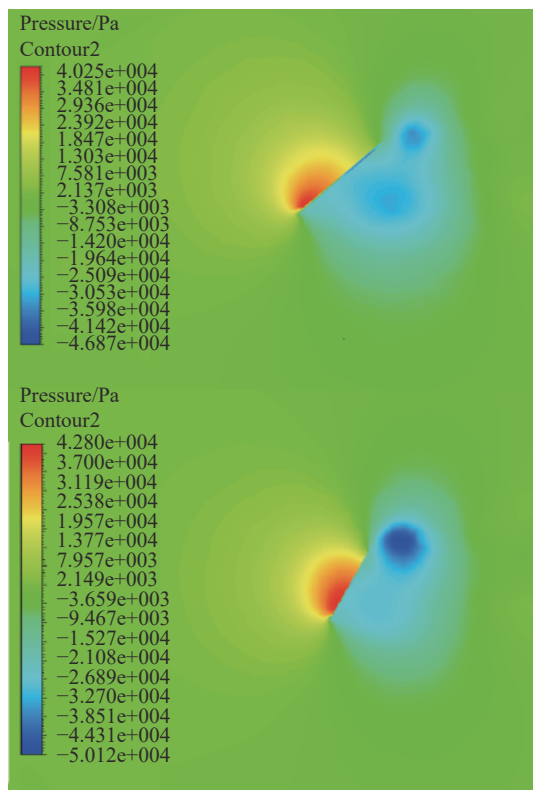


图 2 箔片典型压力分布

Fig.2 Typical foil pressure distribution

1.2.2 动态散布特性

面源诱饵由成百上千个箔片组成, 被飞机投放后箔片顺序出膛, 出膛后受到阻力和升力的作用, 并且随着箔片自身氧化还原反应的发生, 箔片姿态的改变具有一定的随机性, 面源诱饵在空中的散布形态均呈现差异特性, 但基本呈现类似“椭球”形状, 在空中形成红外辐射假目标信号, 诱骗红外制导导弹攻击。

为获得面源诱饵在空中的动态散布特性, 对单个面源箔片进行受力分析。将单个箔片视为质点, 并建立飞机航迹坐标系, 以飞机飞行方向作为 x 轴方向, 高度方向作为 z 轴方向, 垂直飞行方向作为 y 轴方向, 在该航迹坐标系下箔片的受力情况如图 3 所示。

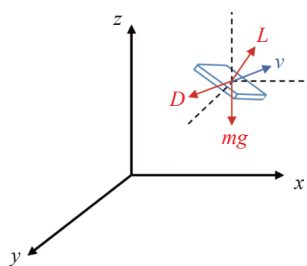


图 3 航迹坐标系下箔片受力情况

Fig.3 Force on foil in track coordinate system

箔片出膛后, 应满足牛顿第二定律的动力学方程^[12]:

$$\begin{cases} m \left(\frac{dV_x}{dt} + \omega_y V_z - \omega_z V_y \right) = F_x \\ m \left(\frac{dV_y}{dt} + \omega_z V_x - \omega_x V_z \right) = F_y \\ m \left(\frac{dV_z}{dt} + \omega_x V_y - \omega_y V_x \right) = F_z \end{cases} \quad (1)$$

式中: m 为箔片质量; V_x 、 V_y 和 V_z 为箔片在 x 、 y 和 z 三个坐标轴的速度分量; ω_x 、 ω_y 和 ω_z 分别为箔片沿 x 、 y 和 z 三个坐标轴的旋转角速度; F_x 、 F_y 和 F_z 分别为箔片在 x 、 y 和 z 三个坐标轴受到的合力。

根据航迹坐标系下箔片受力情况可获得质心动力学方程^[12]:

$$\begin{cases} m \frac{dV}{dt} = -D - mg \sin \theta \\ mV \frac{d\theta}{dt} = L \cos \gamma - mg \cos \theta \\ mV \cos \theta \frac{d\psi}{dt} = -L \sin \gamma \end{cases} \quad (2)$$

式中： θ 为箔片速度仰角； ψ 为箔片速度方位角； γ 为箔片速度滚转角； D 为阻力，其方向与速度矢量方向相反； L 为升力，其方向垂直于箔片平面； V 为箔片矢量速度； g 为当地重力加速度。

根据运动定律，列出箔片运动学方程^[12]：

$$\begin{bmatrix} dx/dt \\ dy/dt \\ dz/dt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V \cos \theta \cos \psi \\ V \sin \theta \\ -V \cos \theta \sin \psi \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中： x 为箔片在 x 轴的位移； y 为箔片在 y 轴的位移； z 为箔片在 z 轴的位移。其中 θ 、 ψ 和 γ 的初值受箔片初始运动和受力的随机性影响，采用正态分布的形式给出，联立公式 (2) 和公式 (3)，采用 Runge-Kutta 算法求解该方程组可得到面源箔片空中动态散布特性。

根据上述箔片动力学及运动学方程，对面源诱饵动态扩散过程进行仿真，仿真条件为平台速度为 $0.8 Ma$ ，投放速度在 $25 \sim 35 \text{ m/s}$ 之间，投放点位于原点 $(0, 0, 0)$ ，得到不同时刻面源诱饵散布情况如图 4 所示。

在 0.8 s 时刻不同视角下面源诱饵散布情况如图 5 所示。

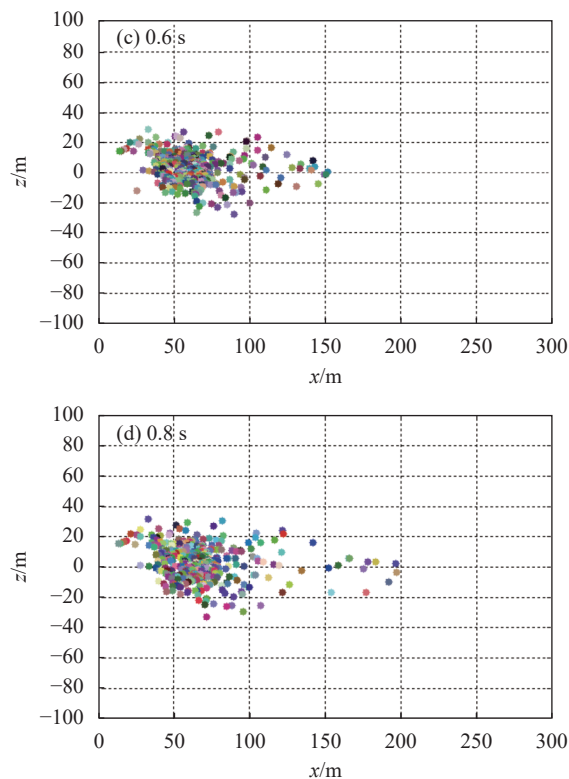
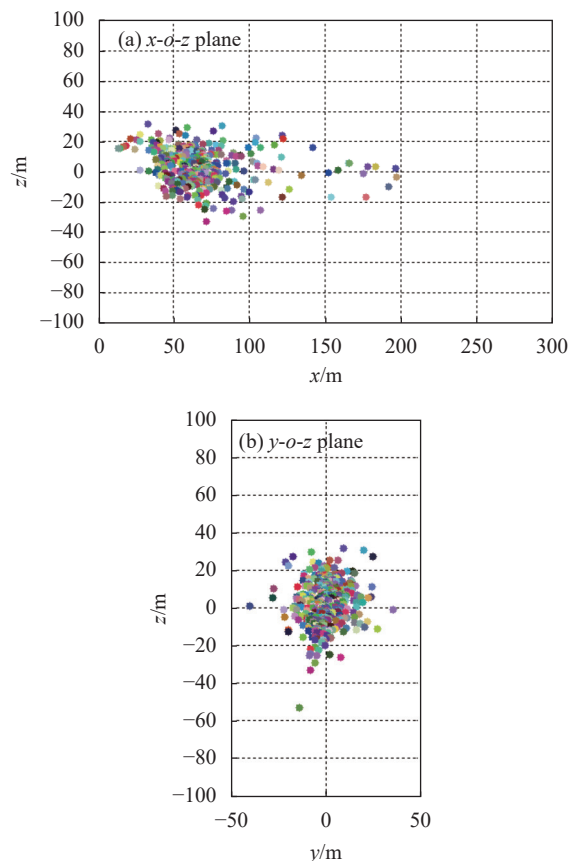
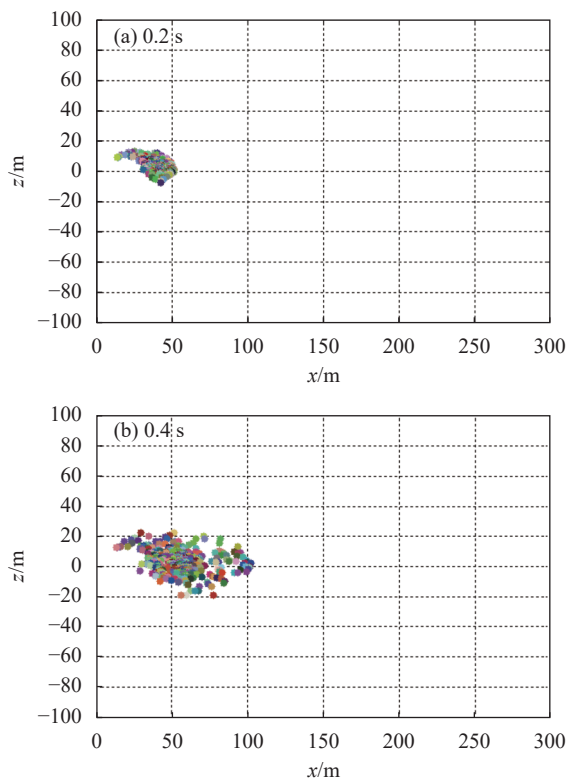


图 4 不同时刻面源诱饵散布情况

Fig.4 Dispersion of surface source flare at different times



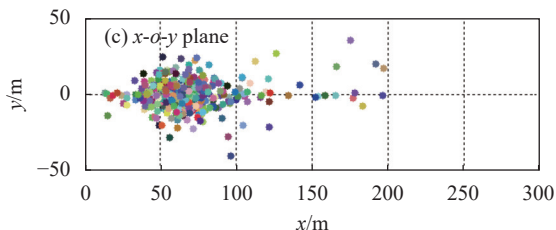


图 5 不同视角面源诱饵散布情况

Fig.5 Dispersion of surface source flare with different viewing angles

1.3 平台速度对点面复合红外诱饵空中动态散布影响

当飞机平台投放点面复合红外诱饵时,平台速度决定了诱饵沿航向的初始速度,对诱饵后续运动和空中动态散布特性有较大影响,因此对不同平台速度下点面复合红外诱饵的运动进行仿真,平台速度选取 $0.2 Ma$ 、 $0.6 Ma$ 和 $1 Ma$,仿真结果如图 6~图 8 所示,其中红外曲线为点源诱饵运动轨迹,曲线端点为当前时刻点源诱饵的位置。

由图 6~图 8 可知,飞机平台投放点面复合红外诱饵的动态散布趋势为点源诱饵逐渐从面源诱饵中分离,且平台速度影响点源诱饵和面源诱饵的相对运动趋势,平台速度越快,点源诱饵从面源诱饵中分离出来的相对速度越快,面源诱饵的扩散速度也越来越快,主要是因为面源诱饵在投放初期会迅速减速,平台速度直接影响其在水平方向的速度。

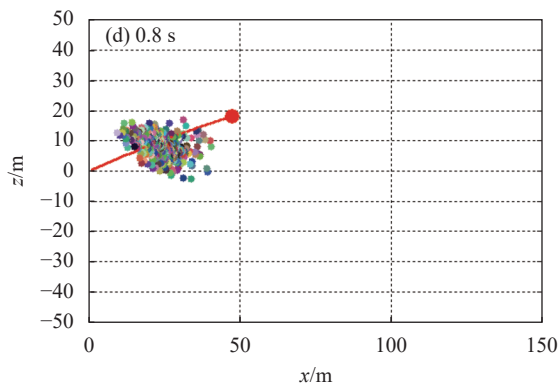
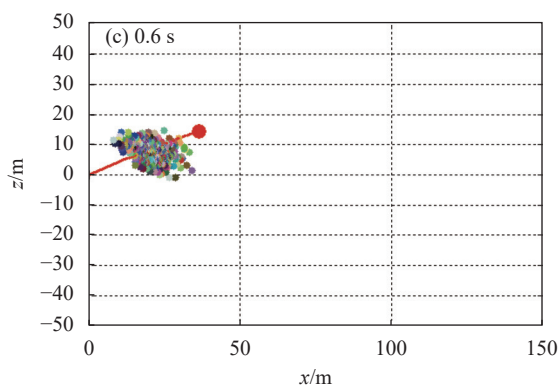
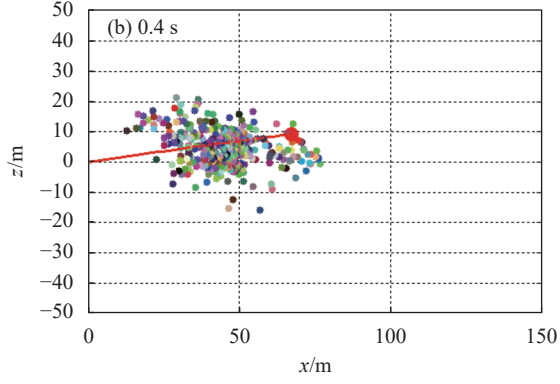
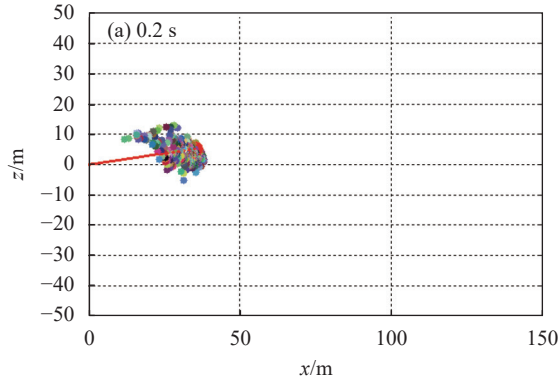
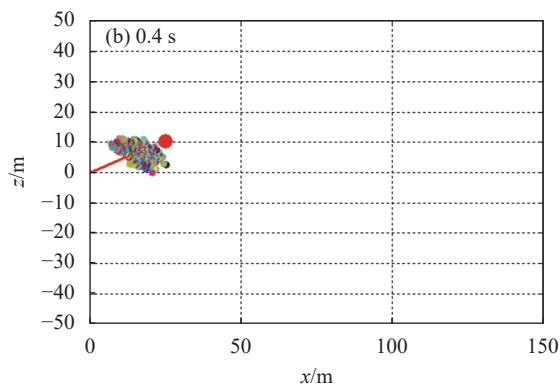
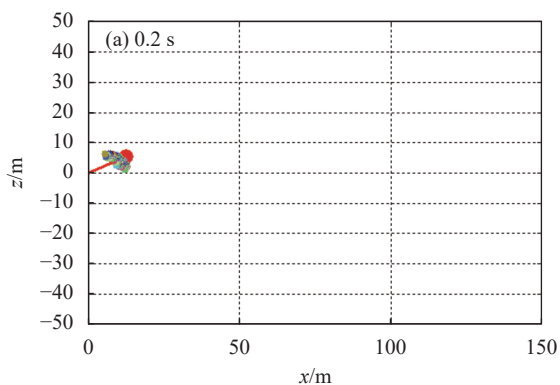


图 6 平台速度 $0.2 Ma$ 时诱饵运动情况

Fig.6 Flare movement at platform speed $0.2 Ma$



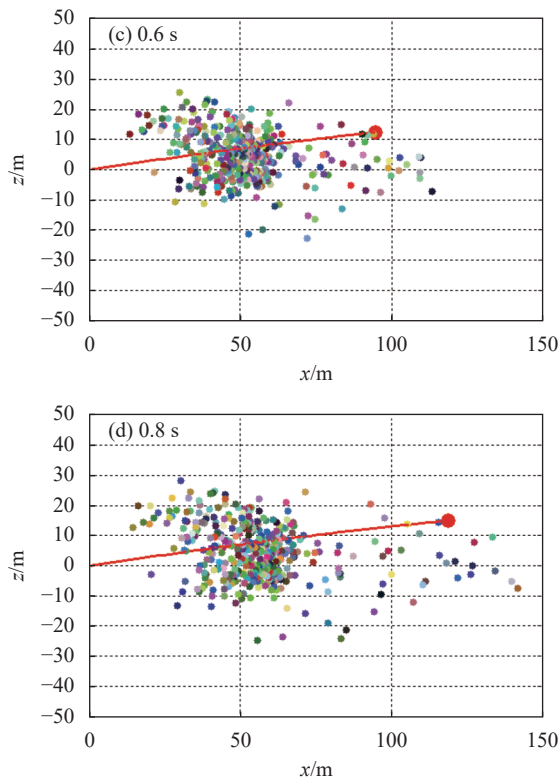


图 7 平台速度 0.6 Ma 时诱饵运动情况

Fig.7 Flare movement at platform speed 0.6 Ma

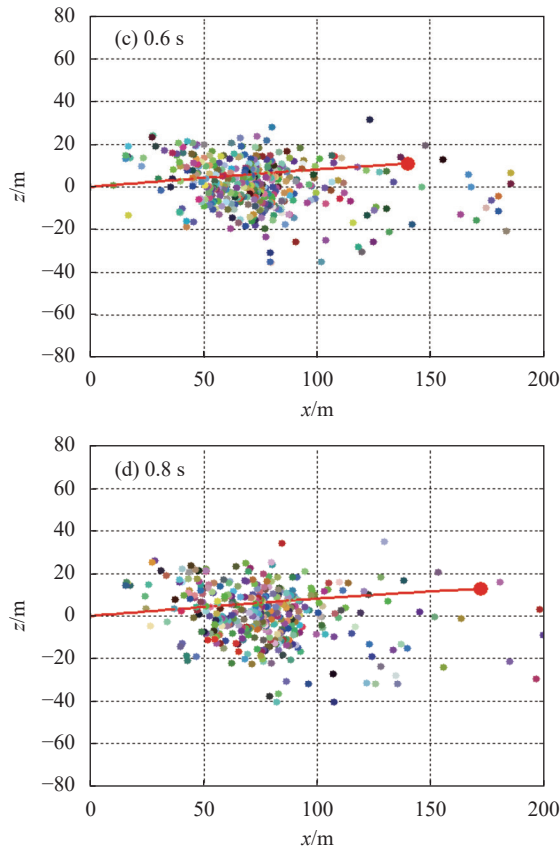
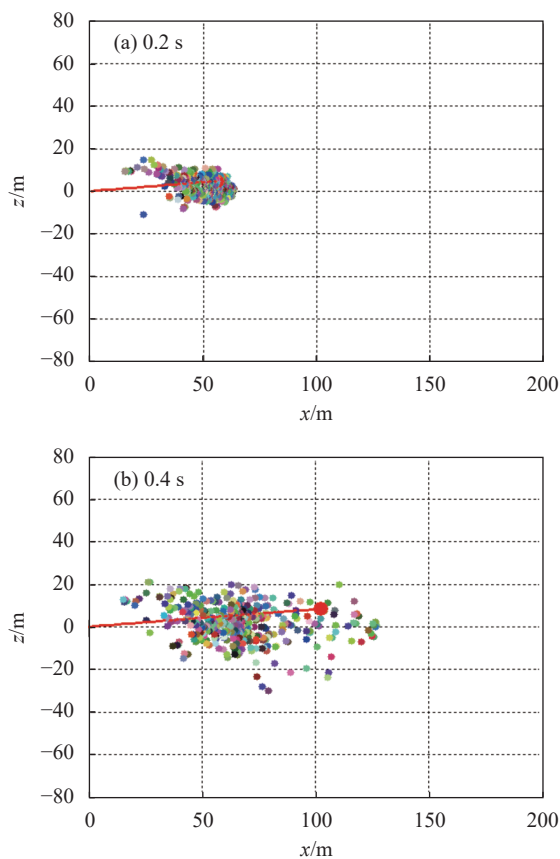


图 8 平台速度 1 Ma 时诱饵运动情况

Fig.8 Flare movement at platform speed 1 Ma



2 点面复合红外诱饵使用研究

2.1 点面复合红外诱饵干扰特性

2.1.1 辐射强度值

红外成像导引头探测器接收视场内跟踪目标和干扰的红外辐射能量, 能根据辐射强度大小进行抗干扰识别。点面复合红外诱饵辐射强度特性具有点源和面源的两种特性。点源红外诱饵为 MTV 药柱载荷, 其峰值火焰温度可达 2 000~2 300 K^[15], 具有较高的辐射强度; 面源红外诱饵为特种自燃材料, 遇氧气发生氧化还原反应, 放出大量的热量, 相对点源红外诱饵辐射强度较低。当载机连续投放点面复合红外诱饵, 能在导引头视场形成高低搭配的辐射强度连续变化的效果, 提升对导引头的干扰能力, 如图 9 所示。

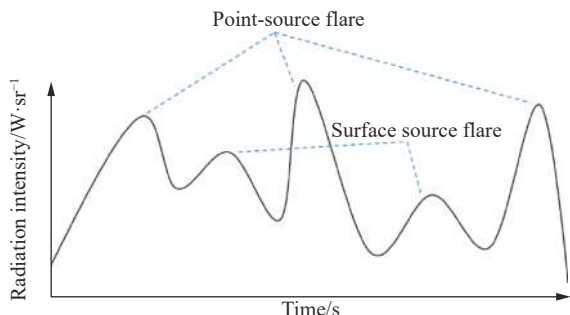


图 9 点面复合红外诱饵辐射强度值变化特点

Fig.9 Radiation intensity change characteristics of point-surface composite infrared decoy

2.1.2 辐射强度变化率

先进红外成像导引头能够根据视场内目标和干扰的辐射强度变化率进行抗干扰识别,如图 10 所示。红色曲线为诱饵辐射强度,绿色曲线为飞机辐射强度,红色直线为诱饵辐射强度变化率,蓝色直线为导引头对目标变化率识别设定的阈值,当检测到视场内跟踪目标变化率超过该阈值,则判定为干扰,实际阈值的大小要根据飞机自身加力等动作导致辐射强度变化和诱饵实际的辐射强度变化率进行设定。

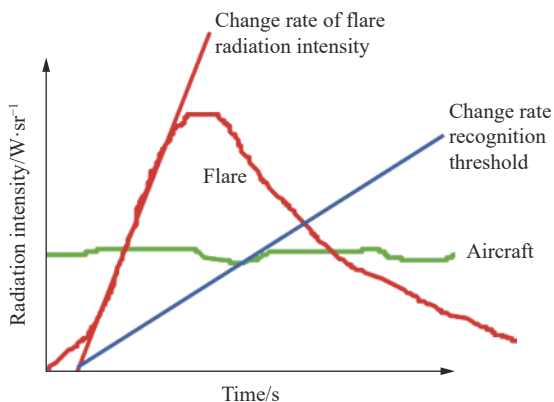


图 10 导引头辐射强度变化率识别原理

Fig.10 Recognition principle of seeker radiation intensity change rate

点面复合红外诱饵辐射强度变化率通常较大,即辐射强度迅速上升,在红外导引头视场中诱饵还未与飞机完全分离时其辐射强度便达到较高的水平,使导引头无法根据辐射强度变化率进行抗干扰识别,提升点面复合红外诱饵干扰效能。

2.1.3 辐射面积

点面复合红外诱饵中的面源诱饵主要通过遮蔽覆盖飞机目标的方式对成像导引头实施干扰,辐射面

积是面源诱饵的关键指标之一,直接决定了对飞机的遮蔽覆盖效果,辐射面积越大,掩护飞机逃逸机动的能力越强,干扰效果越好。点面复合红外诱饵中的面源诱饵由数百个金属箔片组成,暴露于空气后发生自燃反应放出热量,由于箔片本身体积小、质量轻,在高速气流的作用下很快散开,基本呈现“椭圆状”的分布形式,如图 11 所示。

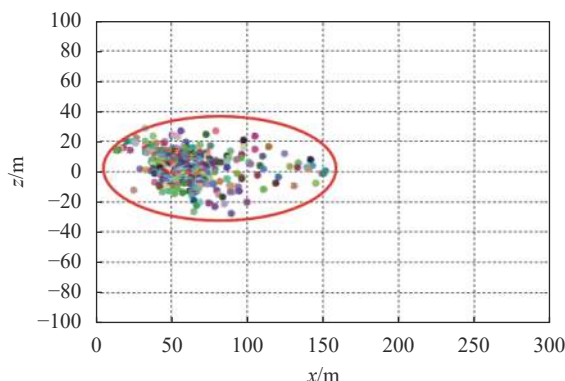


图 11 面源诱饵扩散分布形式

Fig.11 Diffusion distribution form of surface source flare

2.2 点面复合红外诱饵干扰机理

根据飞机目标在红外成像制导导弹视场中呈现的轮廓形态,可将导弹制导阶段划分为成像阶段和非成像阶段。在成像阶段,飞机目标能够在导引头视场呈现清晰的轮廓,导引头能够识别其形状特征;在非成像阶段,飞机目标在导引头视场呈现为点源等不具有轮廓特征的形态分布,导引头已无法对其形状进行识别。

点面复合红外诱饵具备“全距离”对抗红外成像制导导弹的能力。在红外成像制导导弹距离飞机较远时的非成像阶段,飞机目标不具备轮廓特征,点面复合红外诱饵中的点源诱饵和面源诱饵在导引头视场均呈现“点源”的形态特征,且二者辐射特征、运动特征不同,按特定的策略投放点面复合红外诱饵,点源诱饵和面源诱饵按序分离,在导引头视场形成多个假目标分布。在投放点面复合红外诱饵的同时,飞机进行逃逸机动,混淆于多个点源目标中,大大提高干扰成功概率。

在成像制导阶段,飞机在导引头视场呈现清晰的轮廓特征,导弹能够识别飞机关键部位特征及整体形

状进行跟踪和抗干扰,此时投放点面复合红外诱饵,主要利用面源诱饵的扩散分布对飞机目标形成遮蔽和掩盖,使飞机不能在导引头视场形成完整的轮廓特征,破坏导引头对飞机的跟踪。为形成面源诱饵遮蔽和掩盖的效果,飞机应尽可能的进行机动使导弹处于飞机的后方,也更利于飞机的逃逸。

建立红外制导导弹与点面复合红外诱饵对抗仿真平台,验证诱饵在导弹成像阶段和非成像阶段的干扰机理。初始弹目距离选定为 2 km 和 6 km,飞机速度 272 m/s,诱饵投放速度 30 m/s。

当弹目距离为 6 km 时,导弹处于非成像阶段,飞机在导引头视场呈现点目标形态(如图 12(a)所示),通过投放多枚点面复合红外诱饵,在导引头视场形成多个点目标(如图 12(b)所示),导引头抓取其中一个点源诱饵进行跟踪,点面复合红外诱饵对红外制导导弹干扰成功(如图 12(c)、图 12(d)所示)。

当弹目距离为 2 km 时,导弹处于成像阶段,飞机在导引头视场呈现出较为清晰的形状特征(如图 13(a)所示),通过投放多枚点面复合红外诱饵,使面源诱饵对飞机形成遮蔽的效果(如图 13(b)、图 13(c)所示),导引头丢失飞机目标信息,锁定面源诱饵进行跟踪,点面复合红外诱饵对红外制导导弹干扰成功(如图 13(d)所示)。

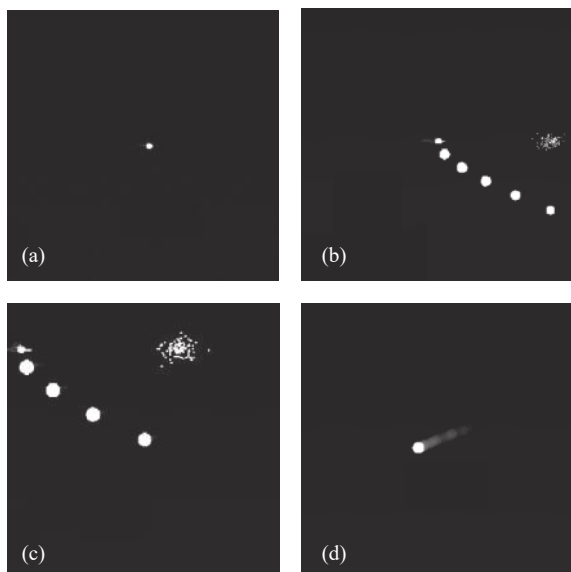


图 12 初始弹目距离 6 km 时导引头跟踪过程图像

Fig.12 Seeker tracking process image when the initial missile target distance is 6 km

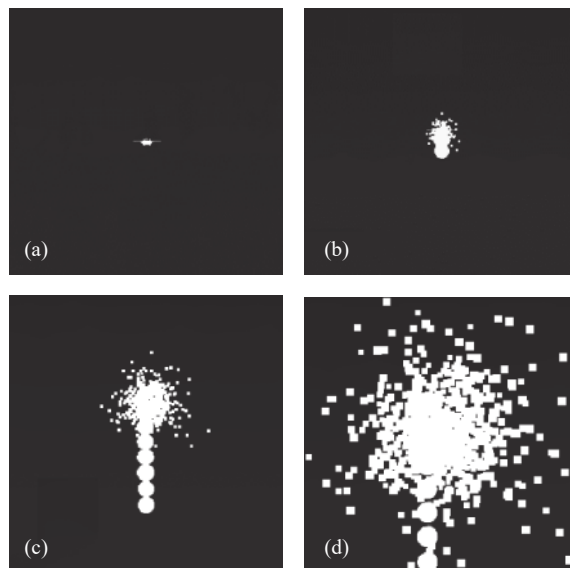


图 13 初始弹目距离 2 km 时导引头跟踪过程图像

Fig.13 Seeker tracking process image when the initial missile target distance is 2 km

3 结 论

文中从基本物理规律出发,研究了点面复合红外诱饵的空中动态散布特性,并仿真了平台速度对点面复合红外诱饵空中动态散布的影响,结果表明平台速度越快,点源诱饵相对面源诱饵的相对分离速度越小,且面源诱饵的扩散速度也越大。对点面复合红外诱饵使用过程中的干扰特性和干扰机理进行分析,其辐射强度值、辐射强度变化率和辐射面积等关键特性具有对红外制导导弹干扰的能力,阐述了在红外成像制导导弹的成像阶段与非成像阶段点面复合红外诱饵的干扰机理,并结合仿真结果进行了对抗过程描述。文中开展的点面复合红外诱饵空中动态散布特性仿真及使用研究主要基于诱饵自身特性和基本干扰原理,实际的使用策略还要结合导弹、飞机目标、机动策略等多种因素进行综合研判、制定。

参考文献:

[1] Zhao Feiyu, Lu Shan, Jiang Chong, et al. Research on the modeling method of surface-type infrared decoy [J]. *Electro-optic Technology Application*, 2012, 27123(2): 66-69. (in Chinese)

[2] Zhao Feiyu, Xie Jie, Guo Yongli, et al. Research on the IR emission features of Magnesium/Teflon/Viton (MTV) decoy flare [J]. *Electro-optic Technology Application*, 2007, 92(1): 34-

- 35, 40. (in Chinese)
- [3] Chen Minghua, Jiao Qingjie, Wen Yuquan. Calculation of the combustion characteristics for MTV pyrotechnics [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2002(3): 75-78. (in Chinese)
- [4] Zhang Jinghui. Improvement and application of MTV IR decoy composition [J]. *Ship Electronic Engineering*, 2014, 34(4): 19-23. (in Chinese)
- [5] 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)
- [6] Sun Wei, Wang Biao, Huang Jinke, et al. Research on jamming strategy of surface-type infrared decoy against infrared guided missile [J]. *Laser & Infrared*, 2019, 49(6): 706-713. (in Chinese)
- [7] Jia Lintong, Tong Zhongxiang, Wang Chaozhe, et al. Survey on airborne surface-type infrared decoy [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(9): 92-103. (in Chinese)
- [8] Yang Dongsheng, Mu Dejun, Dai Guanzhong. Kinetic simulation of the characteristics of airborne infrared flares [J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2009, 27(6): 781-785. (in Chinese)
- [9] Yang Dongsheng, Dai Guangzhong. Radiation simulation of the characteristics of infrared flares [J]. *Science Technology and Engineering*, 2011, 11(21): 5104-5110. (in Chinese)
- [10] Guo Kai, Wu Yue, Wang Liang, et al. Simulation research on motion characteristics of airborne point source infrared decoy [J]. *Electro-optic Technology Application*, 2021, 36(3): 53-61. (in Chinese)
- [11] 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)
- [12] Zou Tao, Wang Chaozhe, Tong Zhongxiang, et al. Diffusion rule of foil-surface-type infrared decoy [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2016, 37(9): 2634-2645. (in Chinese)
- [13] 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)
- [14] 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)
- [15] Duan Guowen, Wu Gang, Zhang Jingyuan, et al. Research on impact of dynamic environment on radiation of MTV infrared decoy [J]. *Electro-optic Technology Application*, 2018, 33(6): 71-74. (in Chinese)

Simulation of airborne dynamic dispersion characteristics and application of point-surface composite infrared decoy

Zhao Feiyu, Wang Liang*, Guo Kai, Zhang Jingyuan, Pan Bochen, Guo Shuchao

(Academy of Opto-Electronic, China Electronic Technology Group Corporation (AOE CETC), Tianjin 300308, China)

Abstract:

Objective Point-surface composite infrared decoy is one of the advanced infrared jamming equipment used in aircraft platforms at home and abroad, which has a good capability against infrared guided missiles. For aircraft platforms, it is important to master the use strategy of point-surface composite infrared decoy. It determines the aircraft's survivability during terminal defense. Currently, the use of infrared decoy lacks simulation analysis support, and there is a certain degree of blindness. With the improvement of counter-countermeasure ability of infrared guided missiles, it brings higher requirements for the development and use of infrared decoy. Besides, there is a lack of simulation and research related to point-surface composite infrared decoy. So the airborne dynamic dispersion characteristics and application of point-surface composite infrared decoy is studied.

Methods To obtain the dynamic walk characteristics of point-surface infrared decoy in the air, theoretical basis for its use is provided, and the effectiveness of point-surface infrared decoy is improved, dynamic and kinematic

analysis of point source decoy and surface source decoy of point-surface infrared decoy (Fig.3) is performed, the simultaneous equations are solved, so the trajectory of point source decoy and dispersion of surface source decoy in the air were obtained. Then by changing the aircraft platform speed, the relative motion trend of the point source decoy and surface source decoy, and the influence law of the platform speed are obtained. Based on the simulation of airborne dynamic dispersion characteristics of point-surface infrared decoy, the use research is conducted, and the jamming characteristics and mechanism of the point-surface infrared decoy are described. Jamming characteristics mainly include radiation intensity value, rate of radiation intensity change and radiation area. The formation characteristics of point-surface infrared decoy in the field of view of infrared guided missiles are analyzed. And based on this, the mechanism research is carried out.

Results and Discussions Through simulation analysis, airborne dynamic dispersion characteristics are acquired (Fig.6). It provides a good foundation for the use of point-surface composite infrared decoy. At the same time, the infrared radiation characteristics of point-surface composite infrared decoy are acquired (Fig.9). For infrared guidance seeker, it is sensitive for radiation intensity change rate (Fig.10) and radiation area (Fig.11) of infrared decoy. The jamming mechanism of the point-surface infrared decoy in the imaging phase (Fig.13) and the non-imaging phase (Fig.12) of the infrared guided missile is analyzed, which can provide reference for the formulation of decoy use strategy and improve the battlefield survivability of aircraft platforms.

Conclusions In this study, starting from the basic physical laws, the dynamic dispersion characteristics of point surface composite infrared decoys in the air are studied, and the impact of platform speed on the dynamic dispersion of point-surface composite infrared decoys in the air is simulated. The results show that the faster the platform speed is, the smaller the relative separation speed of point-surface composite infrared decoy relative to area source decoys is, and the greater the diffusion speed of area source decoys is. The interference characteristics and mechanism of point-surface composite infrared decoy during use are analyzed. Its key characteristics such as radiation intensity value, radiation intensity change rate, and radiation area have the ability to interfere with infrared guided missiles. The interference mechanism of point-surface composite infrared decoy in the imaging and non-imaging stages of infrared imaging guided missiles is described, and the confrontation process is described based on simulation results. The research on the dynamic dispersion characteristics simulation and use of point-surface composite infrared decoy in the air conducted in this paper is mainly based on the characteristics of the decoy itself and the basic interference principles. The actual use strategy should be comprehensively studied and determined in combination with multiple factors such as missiles, aircraft targets, and maneuver strategies.

Key words: point-surface composite; dynamic dispersion; jamming mechanism; application research