

基于空战评估的红外空空导弹功能仿真

黄鹤松, 童中翔, 李建勋, 王超哲, 柴世杰

(空军工程大学 航空航天工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要: 红外空空导弹是最有效的近距空战杀伤武器,但其工作机理复杂,干扰环境多变,仿真出来的导弹很难与真实导弹的性能相符。为了简化仿真过程、提高仿真结果的准确性,摒弃复杂的物理仿真从导弹的功能仿真切入,注重导弹的识别、导引、控制、运动过程。首先建立基于三自由度的导弹数学模型,简化导弹运动方程;其次将抗干扰方法分类,分析导引头进入抗干扰状态和没进入抗干扰状态抗干扰的不同机理;最后建立以导弹、诱饵、飞机为主体的仿真平台,以脱靶量、导弹轨迹、抗干扰概率做为仿真结果的评价标准。仿真结果表明,仿真的红外空空导弹模型简单、易于实现、抗干扰结果与真实导弹接近,能够满足空战评估的基本要求。

关键词: 红外空空导弹; 导引头; 空战评估; 抗干扰

中图分类号: TJ760.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)03-0803-07

Functional simulation of infrared air-to-air missiles based on combat assessment

Huang Hesong, Tong Zhongxiang, Li Jianxun, Wang Chaozhe, Chai Shijie

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

Abstract: Infrared air-to-air missiles are the most effective close combat destructive weapons, but their working mechanisms are complex, jamming environment are variable, so the simulation missiles are hard to match the real. To simplify the simulation process and improve the accuracy of the simulation results, start from missiles functional simulation and abandon the complicated physics simulation, only concentrate on identification, guidance, control and motion process. Firstly, missile mathematical models were established based on the three degrees of freedom to simplify missiles motion equations. Secondly, the anti-interference method was classified, analysed different anti-interference mechanisms between the seeker entered into anti-interference state and couldn't enter into. Lastly, the simulation platform to the missile models, bait models and aircraft models as the core were established and miss distance, missile trajectories, anti-interference probability were used as evaluation criteria of simulation results. The simulation results show, the simulation infrared air-to-air missile models are simple and easy to implement and anti-interference results are close to the real missiles, also can meet the requirements of combat assessment.

Key words: infrared air-to-air missile; seeker; combat assessment; anti-interference

收稿日期: 2014-07-11; 修订日期: 2014-08-14

基金项目: 国家自然科学基金(61203134)

作者简介: 黄鹤松(1989-),男,硕士生,研究方向为红外对抗。Email: huanghesonghhs@126.com

导师简介: 童中翔(1958-),男,博士生导师,教授,研究方向为飞行器红外对抗技术。Email: tzxkgy@163.com

0 引言

与雷达空空导弹相比,红外空空导弹抗干扰能力强、命中率高,被广泛应用于空战中。数据显示,半数的飞机在空战中由红外空空导弹击落,这个比例正随着时间不断提高,而近距空战几乎 90% 的飞机都是由红外导弹击落,红外空空导弹已逐步取代雷达导弹,占据其在空空导弹的霸主地位。对红外空空导弹进行仿真既可以拟定最优战法确定最佳攻击时机也可以寻求规避导弹最有效的方法,同时零损失,可以节约大量经费开支。但是红外空空导弹的仿真涉及多学科交叉理论,导弹的命中概率与天气、背景辐射、靶机机动规避、诱饵释放时机与遮蔽等都有关系,仿真难度可想而知。国内目前还没有成熟的导弹仿真系统,陈晓娟^[1]、胡朝晖^[2]对红外空空导弹抗干扰性能进行了研究;唐硕等^[3]研究了红外空空导弹制导控制;崔得东等^[4]研究了红外成像导弹导引头角跟踪系统。文中以国家自然科学基金无人战斗机红外攻防一体化设计方法研究为支撑对应用最为广泛的第三代红外空空导弹进行功能仿真,仿真中注重导弹攻击过程中的识别、导引、控制、运动四个过程,对这四个过程分别建立数学模型,忽略导弹从发射到爆炸过程中内部的复杂机理,从而大大简化导弹仿真的复杂程度,通过抗干扰结果与真实导弹进行比较,验证仿真结果的可信性。

1 飞机和诱饵模型

1.1 飞机总体红外辐射

飞机红外辐射的研究是导弹抗干扰的前提,决定着仿真结果的真实可信性,因此对红外空空导弹的仿真至关重要。

飞机总体的红外辐射主要由三部分组成,即:蒙皮辐射、尾焰辐射、尾喷口辐射。这其中尾喷口辐射强度最大,尾焰次之,蒙皮最弱。这方面的文献较多,因此文中对各部分辐射的具体算法不再详述,详细计算方法请见参考文献[5-8]。

1.2 红外诱饵模型

红外诱饵的分类较多但主要可分为以下几类:脱曳式诱饵^[9]、伴飞式诱饵、无源红外诱饵等。脱曳式诱饵和伴飞式诱饵可以模仿类似于靶机的运动轨

迹因此其干扰性能最好,但其建模复杂,成本昂贵,无源红外诱饵因其造价低廉、易于装载、可以多发连射,因此应用最广泛。文中以典型的无源诱饵为例进行建模仿真。

无源诱饵弹燃烧前,受到重力和气动阻力作用而运动,空气浮力可忽略不计。运动方程如下:

$$\begin{cases} m \frac{dV_{xDg}}{dt} = k \frac{1}{2} C_x \rho V_{xDg}^2 S \\ m \frac{dV_{yDg}}{dt} = k \frac{1}{2} C_y \rho V_{yDg}^2 S - mg \\ m \frac{dV_{zDg}}{dt} = k \frac{1}{2} C_z \rho V_{zDg}^2 S \\ \begin{cases} k=1(V_{Dg} \text{ 分速度} < 0) \\ k=-1(V_{Dg} \text{ 分速度} > 0) \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

式中: m 为诱饵弹的质量; C_x, C_y, C_z 分别为三个轴向阻力系数; ρ 为空气密度; g 为重力加速度; $V_{xDg}, V_{yDg}, V_{zDg}$ 为诱饵弹三轴分速度; S 为诱饵弹的迎风面积。

设诱饵弹相对于载机的发射速度为 V_{D1} ,发射仰角为 α ,偏角为 β ,在机体轴系中的速度为 $V_{xD1}, V_{yD1}, V_{zD1}$,在地轴系中的速度为 $V_{xDg}, V_{yDg}, V_{zDg}$,载机在地轴系中的速度为 $V_{xGg}, V_{yGg}, V_{zGg}$:

$$\begin{bmatrix} V_{xD1} \\ V_{yD1} \\ V_{zD1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{D1} \times \cos(\alpha) \times \cos(\beta) \\ V_{D1} \times \sin(\alpha) \\ V_{D1} \times \cos(\alpha) \times \sin(\beta) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} V_{xDg} \\ V_{yDg} \\ V_{zDg} \end{bmatrix} = L^{\#} \begin{bmatrix} V_{xD1} \\ V_{yD1} \\ V_{zD1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{xGg} \\ V_{yGg} \\ V_{zGg} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $L^{\#}$ 为飞机机体轴系到地轴系坐标转化矩阵。假设诱饵弹的燃烧是均匀燃烧,则其质量变化随时间的变化规律为:

$$m_t = m_0 - Kt \quad (4)$$

式中: m_t 为 t 时刻诱饵弹的质量; m_0 为诱饵弹初始质量; K 为比例系数。

诱饵弹起燃时间很短,基本上小于 $1s$,起燃后辐射强度急速上升如图1所示,其辐射强度与载机位置和速度有关^[10],见图2。

由图2诱饵的动态辐射强度随时间的变化关系,计算机可以模拟生成诱饵的灰度图像。图3为上升过程中诱饵灰度图像随时间的变化关系。

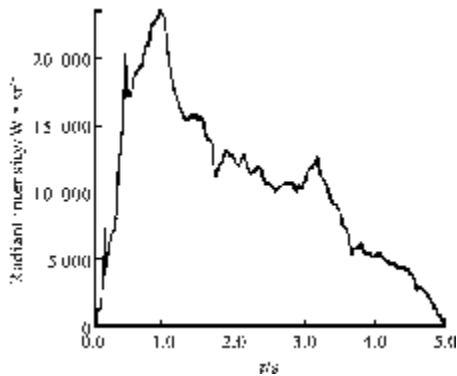


图 1 静态辐射强度

Fig.1 Static radiation intensity

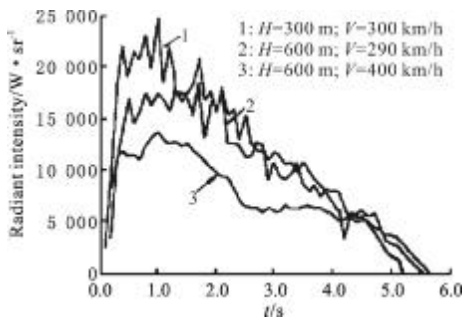


图 2 动态辐射强度

Fig.2 Dynamic radiation intensity

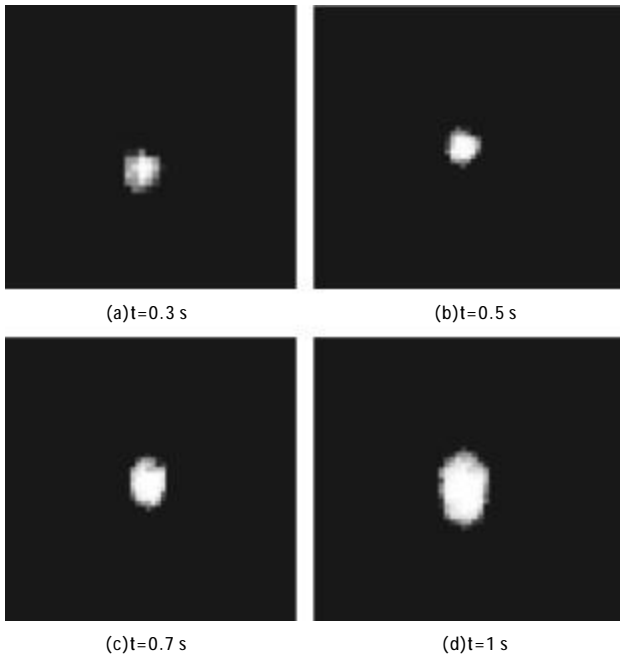


图 3 诱饵灰度图像随时间的变化关系

Fig.3 Relation of bait grayscale image to time changing

2 红外空空导弹数学模型

红外空空导弹的仿真总体框架如图 4 所示,其

主要由抗干扰算法、导引方程、控制方程、发动机推力方程、动力学方程、运动学方程以及过载对导弹运动的限制等组成。

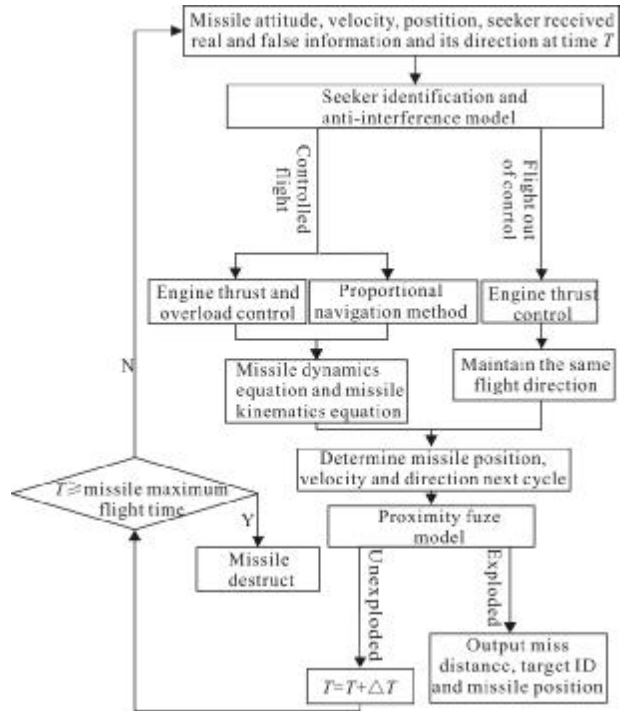


图 4 红外空空导弹总体框架

Fig.4 Infrared air-to-air missile overall framework

2.1 导引方程

比例导引法以其简单、易于控制、弹道轨迹易于追踪目标等诸多优点被红外空空导弹广泛采用,是红外空空导弹最主要的导引法。这种方法是指,导弹的俯仰偏航角与导引头偏离导弹轴线的角度成正比,其方程为:

$$\begin{cases} \dot{\theta} = N_1 \dot{q}_e \\ \dot{\varphi}_c = N_2 \dot{q}_e \cos q_e \\ \omega^2 = \theta^2 + \varphi_c^2 \\ \omega_{max} = n_{max} g / V \\ \omega \leq \omega_{max} \end{cases} \quad (5)$$

式中: q_e 为位标器离轴角与水平面的夹角; q_b 为位标器离轴角与铅垂面的夹角; θ 为航迹俯仰角; φ_c 为航向角; N_1 、 N_2 为比例系数; ω 为转弯角速度; n_{max} 为导弹最大过载。

由导引方程解算出来的航迹俯仰角 θ 、航向角 φ_c 必须满足最大过载的限制。

2.2 导弹运动模型^[11]

导弹在飞行中可看做刚体,建立刚体的运动模型如下:

$$\begin{cases} m \frac{dV}{dt} = P \cos \alpha \cos \beta - X - G \sin \theta \\ mV \frac{d\theta}{dt} = P \sin \alpha + Y - G \cos \theta \\ mV \cos \theta \frac{d\varphi_c}{dt} = P \cos \alpha \sin \beta - Z \\ \frac{dx}{dt} = V \cos \theta \cos \varphi_c, \frac{dy}{dt} = V \sin \theta \\ \frac{dz}{dt} = -V \cos \theta \sin \varphi_c \end{cases} \quad (6)$$

式中: X 、 Y 、 Z 分别为三个方向的气动力; G 为导弹自身重力; φ_c 为弹道偏角; θ 为弹道倾角; α 为攻角; P 为发动机的推力; β 为侧滑角。

2.3 导弹推力与质量的变化关系

红外空空导弹采用固体火箭发动机,发动机工作时间很短,质量随燃料的减少逐渐下降。

$$\begin{cases} P = K_1 t & t \leq t_1 \\ P = P_{\max} & t_1 < t \leq t_2 \\ P = P_{\max} - K_2(t - t_2) & t_2 < t \leq t_3 \\ P = 0 & t > t_3 \\ dm/dt = -K \end{cases} \quad (7)$$

2.4 导弹的控制规律

$$\begin{cases} \delta_{zb} = k_x(\theta_1 - \theta), \delta_{yb} = k_y(\varphi_{c,1} - \varphi_c) \\ \alpha = -\frac{m_z^{\delta_z}}{m_z^{\alpha}} \delta_{zb}, \beta = -\frac{m_y^{\delta_y}}{m_y^{\beta}} \delta_{yb} \end{cases} \quad (8)$$

由导引方程可以得到导弹理性弹道参数 θ_1 、 $\varphi_{c,1}$, δ_{zb} 和 δ_{yb} 分别为 z 轴和 y 轴的舵偏角,联立可以求得导弹的运动轨迹。

3 红外空空导弹抗干扰算法分析

抗干扰算法决定导弹在复杂的环境中能否命中目标,其同样也决定着仿真的导弹是否准确可靠。红外空空导弹常用的抗干扰算法有:缩小识别范围、像点辐射特征的识别、像点运动特征的识别。

3.1 缩小识别范围

缩小识别范围是最简单也是最有效的抗干扰算法,主要包括:视场角收缩、设置波门。

3.1.1 视场角收缩

当导引头锁定目标后会对视场角进行收缩,导引头只对视场角范围内的辐射信号进行处理识别,对处于视场角之外的信号予以忽略。红外空空导弹静态视场角一般不大于 5° ,收缩后的视场一般不会大于 1° 。当目标丢失后导引头释放收缩后的视场,扫描整个静态视场角。

3.1.2 设置波门

导弹锁定目标后还会在目标处设置波门,波门尺寸略大于目标在导引头焦平面的成像尺寸,导引头只处理波门以内的信号,过滤了大部分波门以外的信号。这样即使干扰出现在收缩后的视场之内只要其在波门之外就不会予以处理,因此这样大大提高了识别抗干扰的效率。

3.2 像点辐射特征的识别

3.2.1 幅值记忆

幅值记忆主要依靠导引头对上周期目标像点的记忆功能。在导弹追踪目标过程中导引头会储存上几个周期目标像点在焦平面上的辐射强度值。某个周期靶机开始投放干扰,则目标像点的幅值会突然增大,此时导引头进入抗干扰模式同时记忆幅值增大前的波形。当目标与干扰分离时,导引头通过对比目标和诱饵辐射强度的差异选择与抗干扰状态前幅值相近的为目标同时退出抗干扰模式,继续跟踪目标。

3.2.2 辐射宽度

辐射宽度记忆主要依靠导引头对入射目标的辐射特征进行波长宽度的选择,只有入射的红外辐射波长在导引头波长范围内才将其作为感性目标进行处理,否则予以忽略。由于背景环境温度较低,因此其辐射的波长较长不在导引头识别的波长范围之内,这种抗干扰算法可以有效的降低环境辐射对导引头的干扰。

3.3 像点运动特征的识别

导引头在识别过程中存储上周期目标像点的位置,当视场内突然出现多个像点时,在这过程中目标保持原有航向基本不变,导引头选择与存储的目标位置最近的辐射点为目标,排除其他像点的干扰。

3.4 红外空空导弹抗干扰算法流程

导引头的抗干扰识别^[12]首先要考虑环境的影

响,最主要的是太阳的干扰(以国外某型红外空空导弹为例其整个抗干扰流程见图5。)。在太阳进入视场时导引头的抗干扰会受到很大影响。在目标像点的辐射值突然增大时(目标开加力状态或释放诱饵)导引头进入抗干扰状态,同时记忆变化前的幅值和位置,当诱饵与目标分离时导引头通过辐射特征将目

标与诱饵区分开来,若像点没有分离则可以判断是由发动机加力引起的幅值变化,导引头退出干扰状态。若本周周期视场角内突然出现多个像点,导引头根据运动特征选择目标继续跟踪。当导引头接收到的目标辐射过值域时,开启多普勒测距,计数器开始计数,当导弹飞到目标要害位置时近炸引信引爆导弹。

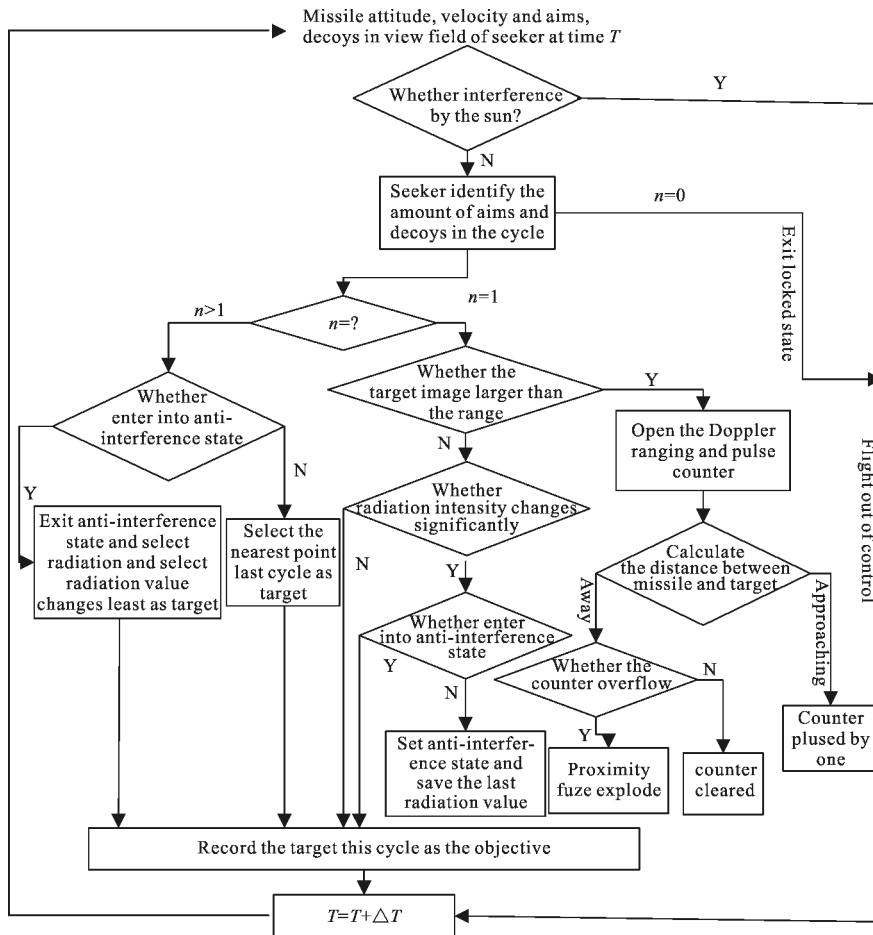


图 5 红外空空导弹抗干扰流程

Fig.5 Infrared air-to-air missile anti-interference process

4 仿真结果

以国外某型红外空空导弹为例根据其具体参数对其进行功能仿真。分别建立目标机、诱饵的模型,整个流程见图 6。对比有诱饵干扰和无干扰状态下导弹的脱靶量、运动轨迹以及抗干扰结果,从而验证仿真结果的可信性。

4.1 诱饵对导弹的脱靶量、弹道轨迹的影响

靶机和导弹都在高度为 9 000 m 的水平面上,靶机不做机动动作,分别不释放诱饵、释放一枚、

两枚、四枚诱饵,导弹发射位置为与靶机飞行方向呈夹角 60°迎头攻击,距离为 8 484 m,仿真结果如下。

图 7 靶机不释放诱饵,此时没有外界干扰,导弹可以很准确的命中目标,仿真脱靶量为 4.319 m;图 8 靶机在受到导弹攻击后发射一枚诱饵,但是诱饵的运动特征与靶机不同、辐射强度也明显不同,导弹可以很容易加以区分不会影响命中结果,仿真脱靶量为 6.813 m;图 9 靶机连续发射两枚诱饵弹,对导弹造成一定干扰,导弹在诱饵发射后进入抗干扰状

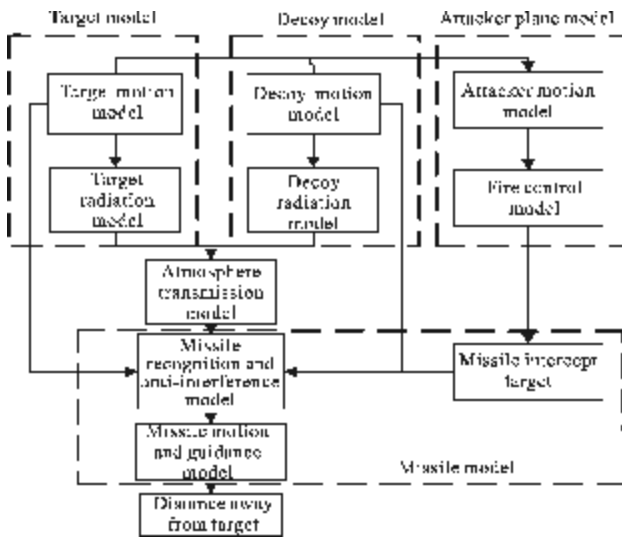


图 6 仿真流程
Fig.6 Simulation process

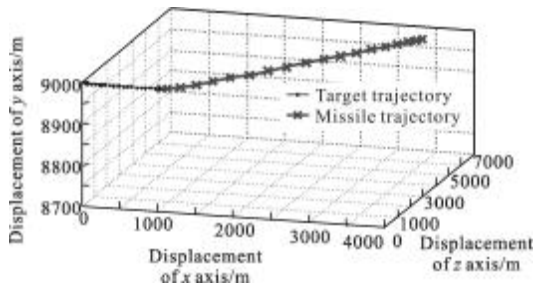


图 7 靶机不释放诱饵
Fig.7 Target doesn't release baits

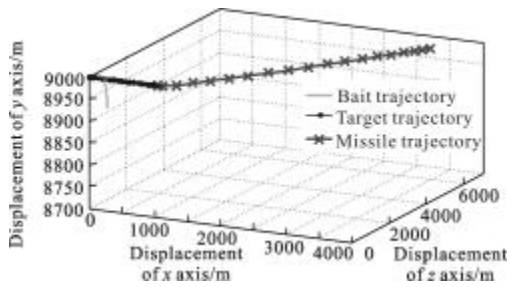


图 8 靶机释放一枚诱饵
Fig.8 Target releases one bait

态，从轨迹可以看出在弹道末端导弹才识别出真目标排除干扰，仿真脱靶量为 10.911 m；图 10 载机连续发射四枚诱饵弹，诱饵弹在空中近似形成一个椭圆形的面源干扰，与载机的辐射特征更加相似，导弹在发射诱饵后进入抗干扰状态，在退出抗干扰状态导引头难以分辨真假目标，跟踪诱饵干扰成功，仿真的脱靶量为 883.215 m。

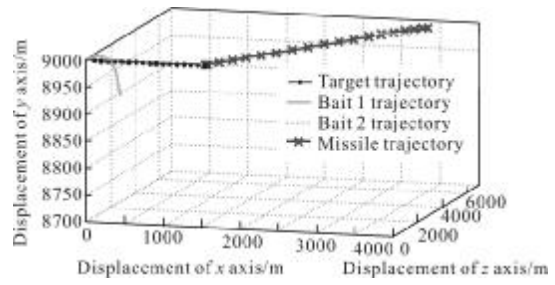


图 9 靶机释放两枚诱饵
Fig.9 Target releases tow baits

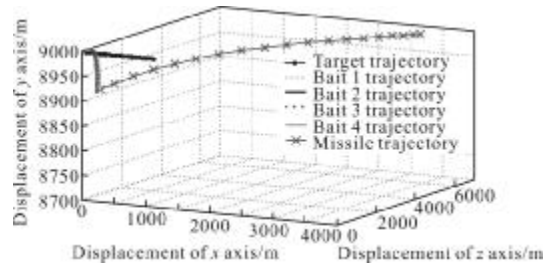


图 10 靶机释放四枚诱饵
Fig.10 Target releases four baits

由仿真结果可以看出，连续发射多枚诱饵比单独发射一枚诱饵干扰效果好，多枚诱饵形成的面源干扰干扰效果明显强于点源^[13]。仿真的结果与导弹性能基本吻合，作战中飞行员需要多枚诱饵连续发射干扰来袭导弹。

4.2 抗干扰概率对比

分别对比在高度为 5 000 m、速度为 0.8 Ma 和高度为 10 000 m，速度为 1 Ma 压制系数为 3 和 9 的情况下，分别仿真 2 000 次，统计导弹的命中次数，计算仿真导弹的抗干扰概率，结果见表 1~2。

从表中可以看出，仿真的导弹抗干扰概率与真实的概率误差控制在了 20% 以内，仿真结果真实可信。

表 1 初始条件为高度 5 000 m，速度 0.8 Ma
Tab.1 Initial conditions for the height of 5 000 m, the speed of 0.8 Ma

	No bait interference	Ratio of end interference to target radiation intensity is 3	Ratio of end interference to target radiation intensity is 8
Specified anti-interference probability in performance specification	90%	Average ≥ 70%	Average ≥ 60%
Simulation result	98%	78%	71%
Simulation error	8.9%	11.4%	18.3%

表 2 初始条件为高度 10 000 m,速度 1 Ma

Tab.2 Initial conditions for the height of 10 000 m, the speed of 1 Ma

	No bait interference	Ratio of end interference to target radiation intensity is 3	Ratio of end interference to target radiation intensity is 8
Specified anti-interference probability in performance specification	90%	Average \geq 75%	Average \geq 65%
Simulation result	98%	81%	73%
Simulation error	8.9%	8%	12.3%

5 结 论

文中以导弹的识别、导引、控制、运动为主,注重导弹的功能仿真,忽略了导弹攻击过程中复杂的工作流程,使仿真简单易于实现。多次仿真结果表明:连续释放诱饵比单独释放诱饵干扰效果好,释放诱饵比不释放诱饵脱靶量要大,与导弹的真实性能基本相符,抗干扰概率与真实导弹的基本吻合,仿真的导弹性能与真实导弹基本一致,解决了空战评估中红外空空导弹仿真的难题。

参考文献:

- [1] Chen Xiaojuan. Verification method for anti-jamming performance of infrared air-to-air missile[J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(7): 425-429. (in Chinese)
- [2] Hu Zhaohui, Luo Jixun, Wang Yi, et al. Evaluation and testing method for infrared air-to-air missile countermeasure performance [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41 (11): 2891-2897. (in Chinese)
- [3] Jia Xiaohong, Liang Xiaogeng, Tang Shuo. Research of dynamic test technique for infrared air-to-air missile in guidance and control system[J]. *Journal of System Simulation*, 2004, 16(2): 242-246.
- [4] Yang Xiaoying, Cui Dedong. Simulation analysis of the angle tracing system for infrared imaging seeker [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(1): 39-51. (in Chinese)
- [5] Wang Chaozhe, Tong Zhongxiang, Liu Yongzhi, et al. Evaluation method of stealth aircraft's infrared radiation measurement [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41 (11): 2891-2897. (in Chinese)
- [6] Liu Fan, Xiao Shuchen, Chen Xiujian, et al. Plane trail flame IR simulation based on vega particle system [J]. *Infrared Technology*, 2011, 33(10): 606-609. (in Chinese)
- [7] Wang Chaozhe, Tong Zhongxiang, Lu Yanlong, et al. Study on the airplane's infrared radiation characteristics [J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(9): 996-1001. (in Chinese)
- [8] Zong Jingguo, Zhang Jianqi, Liu Delian. Infrared radiation characteristics of the stealth aircraft[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(2): 289-294. (in Chinese)
- [9] 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)
- [10] 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)
- [11] Huang Jiacheng, Zhang Yingchun, Luo Jixun. Fast simulation of air-to-air missile launch area [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2003, 23(4): 132-134. (in Chinese)
- [12] Yu Jinsong, Hao Wangsong, Fei Yuhua, et al. Implementation of simulated signal source for four element infrared seeker [J]. *Acta Armamentar II*, 2007, 28 (1): 111-114. (in Chinese)
- [13] 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)