

机载红外诱饵作战使用方法

童奇,李建勋,童中翔,徐安,贾林通,张志波,李慎波,崔超群

(空军工程大学 航空航天工程学院,陕西 西安 710038)

摘要: 红外诱饵弹是红外对抗中最常用的一种干扰装备,以“隐真”、“示假”为目的,起到迷惑和干扰的作用。通过分析红外诱饵弹干扰红外制导导弹的机理,建立了红外诱饵弹的运动模型和辐射模型。根据机载红外诱饵弹干扰存在的不足,综合干扰对象、诱饵投放时机、方向、齐射数量、时间间隔和飞机规避等因素,研究得到红外诱饵弹的作战使用方法。从而为飞机对抗红外制导导弹打击提供理论依据,有助于充分发挥机载红外诱饵弹的作战效能,增强飞机的战场生存力。

关键词: 作战使用; 红外诱饵; 红外辐射; 红外制导导弹; 脱靶量

中图分类号: TN72⁺.1; TN976 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)02-0419-09

Combat operational method of airborne infrared decoy

Tong Qi, Li Jianxun, Tong Zhongxiang, Xu An, Jia Lintong, Zhang Zhibo, Li Shenbo, Cui Chaoqun

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

Abstract: Infrared decoy is one of the most common interference equipment in infrared countermeasure, which intends to delude and interfere with infrared guided missile for hiding the truth and giving a false impression. The mechanisms of infrared decoy interfering with infrared guided missile were analyzed. The moving and radiation models of airborne infrared decoy were built. According to the interference shortage of airborne infrared decoy, a combat operational method of infrared decoy was obtained. The method was able to synthetically take into account many factors such as different interfered missiles, dispensing time, dispensing direction, dispensing number, dispensing interval time and fighter's elusion. The combat operational method provides a basis for fighter against infrared guided missile, so that to perform airborne infrared decoy's combat effectiveness completely and enhance fighter combat survivability.

Key words: combat operation; infrared decoy; infrared radiation; infrared guided missile; miss distance

收稿日期:2014-06-05; 修订日期:2014-07-10

基金项目:国家自然科学基金(61203134)

作者简介:童奇(1986-),男,博士生,主要从事飞行器作战使用与效能评估仿真等方面的研究。Email:15109288577@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、论证及红外对抗仿真等方面的研究。

Email:tzxkg@163.com

0 引言

近 40 年来,红外制导导弹一直是飞机的最大威胁。如何有效保护飞机免遭红外制导导弹攻击始终是各国面临的重大课题。针对红外导弹的威胁,为了提高飞机的生存力,国内外专家高度重视红外对抗措施的研究,各种对红外导弹实施有效干扰的技术、战术在不断发展。就目前而言,利用机载红外诱饵弹(简称诱饵弹)干扰来袭导弹,保护飞机的安全,仍是效费比最高、应用最广泛的对抗手段。国内外大多数战斗机都装备了相当数量的诱饵弹。诱饵弹价格低廉,使用方便,备受各国青睐。郭晓辉等^[1]研究了红外诱饵对导弹脱靶距离的影响,胡一繁等^[2]分析了不同辐射强度、不同发射间隔、不同发射速度下脱靶量与红外诱饵发射距离的关系。但是红外诱饵作战使用方法的研究相对较少。文中在研究诱饵弹干扰机理的基础上,建立了诱饵弹的运动模型和辐射模型,分析了诱饵弹干扰特点,从开始投放时机、停止投放时机、投放方向、齐射数量、时间间隔和飞机规避等方面探讨了诱饵弹的作战使用方法。

1 诱饵弹干扰机理

诱饵弹是一种用来诱骗敌方红外制导武器脱离真目标、具有较高温度的红外干扰弹。诱饵弹在燃烧时,可以产生强烈的红外辐射。当发现有导弹来袭时,将诱饵弹在飞机后半球投放,烟火剂经点燃后迅速燃烧,发出与飞机辐射特性相似的红外辐射,在导弹导引头视场角内形成假目标。红外诱饵弹采用的大多是质心式干扰机理^[1]。

当诱饵弹与飞机同时处于红外导引头视场中时,最初导引头跟踪诱饵弹与飞机的能量中心,随着诱饵弹与飞机的逐渐分离,由于诱饵弹的辐射强度大于目标的辐射强度,导弹偏向诱饵弹一边。随着目标与诱饵弹之间的距离拉开,导弹越来越偏离目标。而飞机逐步移出导引头视场,从而使导弹脱靶。在投放诱饵弹的牵引下,飞机移出导引头视场,导弹跟踪诱饵弹,保护飞机的安全。

为有效对抗红外导弹的攻击,诱饵必须具有:较高的辐射强度、较快的起燃时间、特定波段的光谱特性、一定的燃烧时间、投放速度和气动特性等技术特性^[2]。

(1) 辐射强度:在大多数情况下,诱饵弹必须在红外导弹工作的波段内超过所保护飞机的辐射强度^[3]。等效温度为:2000~2500 K;单枚红外诱饵辐射强度:静态时大于 20000 W/sr,动态时大于 2000 W/sr^[4]。

(2) 起燃时间:从点燃开始到辐射强度达到额定辐射强度值的 90%所需的时间。诱饵弹在离开导引头视场之前,必须达到其有效的辐射强度。起燃时间:0.3~0.5 cs。

(3) 光谱特性:大多数诱饵是化学发热源,按黑体或灰体特性辐射,与目标光谱特性不太相同。可采取选择辐射材料作为诱饵的红外烟火剂,以便模拟目标的光谱辐射分布特征^[5]。诱饵弹燃烧时在 1~3 μm 和 3~5 μm 波段的辐射较强,8~14 μm 波段的辐射较弱。

(4) 燃烧时间:单枚诱饵弹的燃烧持续时间应大于目标摆脱红外导弹跟踪所需的时间。诱饵弹的燃烧持续时间一般大于 4.5 s。

(5) 投放速度:诱饵弹的投放,既要有一定的初速度,使其点燃时不危及飞机的安全,又不能与飞机分离太快,以便与飞机同时进入导引头视场内。诱饵投放速度为 25~40 m/s。投放时机和方式是影响其干扰效果的重要因素^[6]。

(6) 气动特性:主要是由诱饵的空气动力学特性及释放时的相对风速决定^[7]。

2 诱饵弹干扰模型

2.1 诱饵弹运动模型

诱饵弹被飞机投放后,主要受到重力和空气阻力。一般规定飞机向上飞行的速度 v_1 方向为正方向。假定飞机飞行方向与地面的夹角为 β ,诱饵弹初速 v_0 垂直飞机飞行方向投放。假设诱饵弹出膛后发生燃烧反应的质量为 m ,诱饵弹的受力情况如下:

当 $|v_1| \sin \beta - |v_0| \cos \beta \geq 0$ 时

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = -D \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 - mg \quad (1)$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{D}{m} \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 - g = \frac{D}{m} v^2 - g \quad (2)$$

当 $|v_0| \cos \beta - |v_1| \sin \beta > 0$ 时

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{D}{m} v^2 - g \quad (3)$$

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{v}_1 \quad (4)$$

式中: g 为重力加速度; D 为空气阻力系数。

公式(2)和公式(3)平行地面的方向速度变化为:

$$\frac{dv_h}{dt} = -\frac{D}{m} v_h^2 \quad (5)$$

公式(2)垂直地面的方向速度变化为:

$$\frac{dv_v}{dt} = -\frac{D}{m} v_v^2 - g \quad (6)$$

公式(3)垂直地面的方向速度变化为:

$$\frac{dv_v}{dt} = \frac{D}{m} v_v^2 - g \quad (7)$$

通过分离变量式(5)、(6)、(7)分别得到:

$$\frac{dv_h}{v_h^2} = -\frac{D}{m} dt \quad (8)$$

$$\frac{dv_v}{g + \frac{D}{m} v_v^2} = -dt \quad (9)$$

$$\frac{dv_v}{\frac{D}{m} v_v^2 - g} = dt \quad (10)$$

对公式(8)、(9)、(10)分别进行求解。

(1) 由公式(8)积分得到:

$$v_h = \frac{m}{Dt - C_1 m} \quad (11)$$

记出膛时 $t=0$, 当 $\beta \geq 0$ 时 $v_h = v_1 \cos \beta - v_0 \sin \beta$,

$$\text{则 } C_1 = \frac{1}{v_1 \cos \beta - v_0 \sin \beta}$$

当 $\beta < 0$ 时, $v_h = v_1 \cos \beta + v_0 \sin \beta$,

$$\text{则 } C_1 = \frac{1}{v_1 \cos \beta + v_0 \sin \beta}$$

(2) 当 $|v_1 \sin \beta - |v_0| \cos \beta| \geq 0$ 时, 诱饵弹飞行分为两个阶段: 上升段与下降段。

上升段: 由公式(9)推导可得

$$\arctan = \frac{v_0}{\sqrt{\frac{mg}{D}}} = -\sqrt{\frac{Dg}{m}} \cdot t + C_2$$

记出膛时令 $t=0$, 得到

$$C_2 = \arctan \left(\sqrt{\frac{D}{mg}} (v_1 \sin \beta - v_0 \cos \beta) \right)$$

当诱饵弹向上飞行到达最高点时, $v_v = 0$, 则

$$t = C_2 \sqrt{\frac{m}{Dg}}$$

所以, 当 $|v_1 \sin \beta - |v_0| \cos \beta| \geq 0$ 且 $t < C_2 \sqrt{\frac{m}{Dg}}$ 时

$$v_v = \sqrt{\frac{mg}{D}} \cdot \tan \left(-\sqrt{\frac{Dg}{m}} \cdot t + C_2 \right) \quad (12)$$

下降段: 当 $t \geq t_c = C_2 \sqrt{\frac{m}{Dg}}$ 时

设 $t' = t - t_c$, 下降过程中 $v_v = 0$, $t' = 0$ 。

由公式(10)得到 $\frac{dv_v}{v_v^2 - \left(\sqrt{\frac{mg}{D}} \right)^2} = \frac{D}{m} dt'$, 通过积

分计算可得

$$v_v = \frac{\sqrt{\frac{mg}{D}} \left(1 - e^{2\sqrt{\frac{Dg}{m}}(t-t_c)} \right)}{1 + e^{2\sqrt{\frac{Dg}{m}}(t-t_c)}} \quad (13)$$

(3) 当 $|v_0| \cos \beta - |v_1| \sin \beta > 0$ 时

由公式(10)可得 $\ln \left| \frac{v_v - \sqrt{\frac{mg}{D}}}{v_v + \sqrt{\frac{mg}{D}}} \right| = 2\sqrt{\frac{Dg}{m}} \cdot t + C'$

当 $v_v \geq \sqrt{\frac{mg}{D}}$ 时, 令 $C_3 = e^{C'}$, 推导可得

$$v_v = \frac{\sqrt{\frac{mg}{D}} \left(1 + C_3 \cdot e^{2\sqrt{\frac{Dg}{m}} \cdot t} \right)}{1 + C_3 \cdot e^{2\sqrt{\frac{Dg}{m}} \cdot t}} \quad (14)$$

令 $t=0$, 计算得 $C_3 = \frac{v_1 \sin \beta - v_0 \cos \beta - \sqrt{\frac{mg}{D}}}{v_1 \sin \beta - v_0 \cos \beta + \sqrt{\frac{mg}{D}}}$ 。

当 $0 < v_1 < \sqrt{\frac{mg}{D}}$ 时,

$$v_v = \frac{\sqrt{\frac{mg}{D}} \left(1 - C_3 \cdot e^{2\sqrt{\frac{Dg}{m}} \cdot t} \right)}{1 + C_3 \cdot e^{2\sqrt{\frac{Dg}{m}} \cdot t}} \quad (15)$$

通过公式(11)、(12)、(13)、(14)和(15)计算出诱饵弹在飞行过程中任意时刻的运动速度、坐标位置、诱饵弹与飞机之间的距离以及质心的坐标。

2.2 诱饵弹辐射模型

在诱饵弹的起燃时间内, 其辐射强度基本上是直线上升。诱饵弹辐射强度在实际使用中动态特性参数与地面静态特性参数有很大区别, 随着红外诱饵的投放环境的不同, 其特性参数有所不同, 由图1与图2某型诱饵弹在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段静态辐射强度^[8]与动态辐射强度分别随时间的变化曲线可以看出, 诱饵的静态辐射强度是动态辐射强度的十倍左右^[9], 随着红外诱饵的投放环境的不同, 其特性参数有所不同^[10]。因此, 在仿真中不能按照静态特性参数进行仿真, 在取得实测诱饵弹辐射特征数据后, 选取诱饵弹在不同高度和飞行速度下特征时间点的值, 用三

次样条函数进行插值,获得仿真中所用到的数据。图2显示不同高度和飞机速度条件下,实测辐射强度随时间变化的曲线。

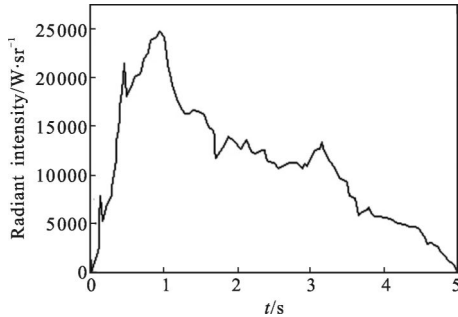


图1 静态辐射强度随时间变化曲线

Fig.1 Static radiant intensity curve varies with time

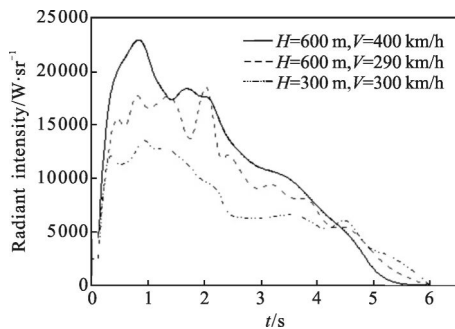


图2 动态辐射强度随时间变化曲线

Fig.2 Dynamic radiant intensity curve varies with time

3 红外诱饵作战使用方法仿真

影响诱饵作战效能的因素较多,对于确定的飞机,在同样的作战环境下,其所载诱饵作战效能主要与导弹抗干扰能力、诱饵投放方式和飞机规避方法有关。针对不同类型的导弹,可以通过诱饵使用方法的改进,如投放时机的把握、投放方向、齐射数量、间隔时间的优化,实现对红外导弹的有效干扰。

红外导弹的抗干扰能力选取以下两种具有代表性的导弹进行对比分析。

导弹 A:某型二代红外导弹,导引头采用调幅式调制盘,工作波段 $1.7\sim 3.2\ \mu\text{m}$,跟踪视场角 $\phi_1=50^\circ$,瞬时视场角 $\phi_2=2.5^\circ$,尾后攻击距离 $7.6\ \text{km}$ ($11\ 000\ \text{m}$ 高度),有效杀伤半径为 $11\ \text{m}$,工作时间为 $21\ \text{s}$ 。

导弹 B:某型三代红外导弹,导引头采用四元正交红外探测器,工作波段 $3.5\sim 4.8\ \mu\text{m}$,跟踪视场角 $\phi_1=80^\circ$,瞬时视场角 $\phi_2=1.5^\circ$,尾后攻击距离 $6\ \text{km}$ ($11\ 000\ \text{m}$ 高度),有效杀伤半径为 $13\ \text{m}$,工作时间为 $26\ \text{s}$ 。

红外导弹按照比例导引法飞向目标进行攻击。飞机通过合理投放诱饵和大过载规避机动尽快逃离导弹导引头的跟踪视场。诱饵弹采用的是质心式干扰机理,通过形成偏离飞机的能量质心来诱偏导弹。因此对于诱饵弹的作战效能,导弹抗干扰机理对其有很大影响,诱饵的投放方式也较重要。

诱饵弹的基本参数:起燃时间 $t_f=0.5\ \text{s}$,有效燃烧时间 $t_m=6\ \text{s}$,诱饵弹的质量 $m=500\ \text{g}$,诱饵弹的阻力系数 $C_x=0.005$,诱饵弹的迎风面积 $S=0.0005\ \text{m}^2$,相对飞机的投放速度 $v_f=30\ \text{m/s}$,燃烧率 $P_m=4\ 000\ \text{W}\cdot\text{sr}^{-1}/100\ \text{gs}^{-1}$,弹道系数为 $\sigma=400$ 。

3.1 诱饵弹干扰方法分析

3.1.1 干扰导弹分析

(1) 干扰导弹 A

导弹 A 采用调幅式调制盘,不能对多目标产生可区分的信号,控制系统将跟踪视场内所有辐射源的能量中心。因此应尽量使投放诱饵弹后视场内的能量中心偏离飞机,使诱饵弹在重力的作用下逐渐离开飞机,从而牵引着能量中心逐渐远离飞机。

(2) 干扰导弹 B

导弹 B 采用正交四元探测器,对视场内的各个辐射源辨别后确定出一个目标进行跟踪,而且采用轨迹记忆、视场电子选通等抗干扰技术,使诱饵弹对导弹 B 的干扰效能较低。但对诱饵弹的投放方式进行合理的设置后能增强干扰成功的概率。

由于导弹 B 有波门设置、幅值记忆功能,只有使某时刻在视场内飞机与诱饵弹的像点重合才能使导弹进入抗干扰状态,增强干扰成功的概率。因此诱饵弹的投放方向应为导弹来袭方向的偏上方,使诱饵弹相对于飞机先上升后下降,增大与飞机像点重合的可能。由于导弹记录进入抗干扰状态之前的幅值,而诱饵弹的辐射强度大于飞机的辐射强度,诱饵弹应控制投放数量,减小与飞机辐射的差别。而诱饵弹开始和停止投放的时机与对抗导弹 A 时的方法相似。

投放诱饵弹后,飞机作机动将有助于其快速逃离导弹的视场。由于诱饵弹受重力作用最终会下落,飞机应以最大过载向上偏离导弹速度方向。但考虑向上爬升要增大油门,会增大飞机的红外辐射,飞机可进行最大过载的侧向转弯。

3.1.2 诱饵弹投放分析

针对某一型号导弹开展诱饵弹投放分析。

(1) 诱饵弹开始投放时机

1) 时间分析

诱饵弹开始投放时机由飞行员把握, 一般在导弹逼近告警系统探测到导弹来袭或载机进入敌方导弹攻击区时投放, 开始投放时机由公式(16)决定:

$$T_b = t_1 \cup t_2 \cup t_3 \cup t_4 \quad (16)$$

式中: t_1 为载机被敌方雷达截获跟踪时刻; t_2 为发现敌方导弹发射时刻; t_3 为载机进入敌方导弹攻击区时刻; t_4 为飞机处于危险区域时刻。

2) 距离分析

诱饵弹辐射功率变化如图3所示^[11]。图中 t_f 是投放装置响应时间; t_g 是从投放至点火的时间; t_z 是从点火到达到额定功率 P_0 的时间; t_c 是持续时间。

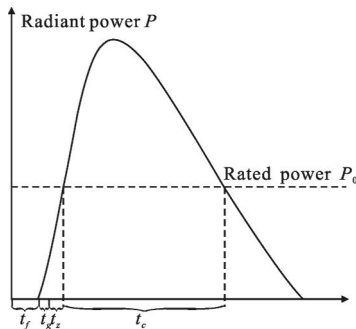


图3 诱饵弹辐射功率随时间变化曲线示意图

Fig.3 Sketch map of radiant power curve varies with time

假设红外导弹进行尾后攻击, 飞机进行红外干扰, 投放第一枚诱饵弹时飞机与红外导弹的最大距离应该满足:

$$[D_{\max} - (v_m - v_f)(t_f + t_g + t_z + t_c)] \tan \frac{\theta}{2} = L \cdot \frac{I_f}{I_f + I_j} \quad (17)$$

最小距离应该满足

$$[D_{\min} - (v_m - v_f)(t_f + t_g + t_z)] \tan \frac{\theta}{2} = l \cdot \frac{I_f}{I_f + I_j} \quad (18)$$

式中: L 和 l 为相应时间内诱饵离开飞机的距离; I_f 为飞机的红外辐射强度; I_j 为诱饵的红外辐射强度; v_m 导弹的速度; v_f 为飞机的速度; θ 为导引头的瞬间视场角。

(2) 诱饵弹停止投放时机

当敌机雷达由跟踪转为搜索状态, 且飞机不在导弹发射区或距离敌方导弹太近时, 停止投放诱饵弹。

$$T_s = t_5 \cap t_6 \cup t_7 \quad (19)$$

式中: t_5 为敌方雷达由跟踪转为搜索状态时刻; t_6 为飞机远离红外导弹发射区时刻; t_7 为导弹发射距离

过近时刻。

(3) 诱饵弹齐射数量

计算诱饵弹齐射数量时, 要先根据干扰概率求得飞机和诱饵弹的辐射强度比, 再依据诱饵弹辐射强度计算齐射数量。

诱饵弹的红外辐射强度在前面已经进行了计算分析, 飞机的红外辐射可根据参考文献[12]计算得到。在此基础上进行诱饵弹齐射数量的计算。

诱饵弹和飞机红外辐射强度比等于诱饵弹和导弹追踪飞机的概率比。即:

$$\frac{P_j}{1 - P_j} = \frac{n \cdot I_j}{K_j \cdot I_f} \quad (20)$$

式中: n 为一次齐射所需的诱饵弹数量; K_j 为导引头的抗干扰系数; I_j 导引头接收到的诱饵弹的辐射强度; P_j 为将导弹引到诱饵弹的干扰概率; I_f 是导引头接收到的飞机的红外辐射强度。

当干扰概率 P_j 确定后, 可根据公式(20)计算出一次齐射投放数量为:

$$n = \left\lceil \frac{K_j - P_j}{1 - P_j} \cdot \frac{I_f}{I_j} \right\rceil \quad (21)$$

(4) 诱饵弹投放时间间隔

诱饵弹的投放时间间隔与飞机速度、敌方导弹速度及导引头等多个因素有关。在诱饵弹进行质心干扰时, 诱饵弹投放时间间隔为飞机位于导引头视场的边缘时再次投放诱饵弹, 这个时间间隔很难进行精确计算。文中根据飞机、敌方导弹和诱饵弹的运动和红外辐射特征近似计算诱饵弹投放间隔时间。

诱饵弹最佳投放时间间隔是前一枚诱饵弹投放时刻到其使飞机即将移出导引头视场时刻的时间间隔, 由图4可以看出: 导弹在 p_0 时飞机投放第一枚诱

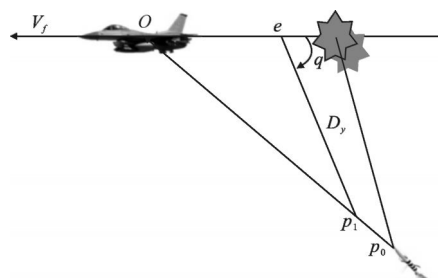


图4 诱饵弹投放时间间隔计算示意图

Fig.4 Calculating schematic of dispensing interval time

饵弹, 到达 p_1 时飞机和诱饵弹的质心位于导引头视场中心, 如果此时飞机位于视场边缘, 则从三角形

Oep_1 可得:

$$\phi = \frac{Oe \cdot \sin q}{D_y} \quad (22)$$

式中: ϕ 为导引头视场角; q 为敌方导弹来袭方位角; Oe 为飞机到质心的距离; D_y 为导弹攻击距离。

由公式(22)计算可得诱饵弹最佳投放时间间隔:

$$\Delta t = \frac{D_y \phi (I_f + I_j)}{v_f I_j \sin q} \quad (23)$$

式中: v_f 为飞机速度。当诱饵弹投放时间间隔小于公式(23)的最小时间间隔时,有可能破坏前一枚诱饵弹形成的质心干扰。当投放间隔大于 Δt 时,不会破坏质心干扰,但诱饵弹干扰效率会降低。带入公式(21)可得投放时间间隔与干扰概率 P_j 的关系:

$$\Delta t = \frac{D_y \phi}{v_f \sin q} \left[\frac{n(1-P_j)}{P_j \cdot K_j} + 1 \right] \quad (24)$$

3.2 红外诱饵投放控制参数计算

通过公式(21)、(23)和(24)可以计算诱饵弹投放控制参数,以此研究控制参数变化对飞机干扰效率的影响。

假设:红外导引头的抗干扰系数 $K_j=0.45$,导引头接收到的诱饵弹的辐射强度 $I_j=4\ 100.0\ \text{W/sr}$,导引头接收到的飞机的辐射强度 $I_f=2\ 720.0\ \text{W/sr}$,飞机速度 $v_f=400\ \text{m/s}$,飞机过载 $n=3\ \text{g}$ 。干扰概率 P_j 与诱饵弹齐射数 n 之间的关系曲线如图5所示。

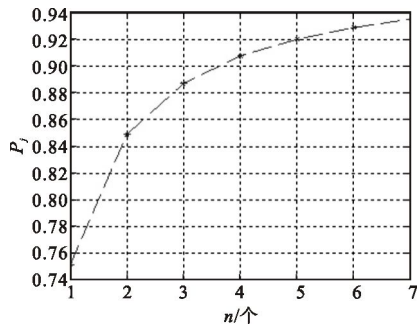


图5 诱饵弹齐射数量与干扰概率的关系曲线

Fig.5 Relationship between dispensing number and interfering probability

由图5可知:随着诱饵弹齐射数量的增加,将导弹诱偏的干扰概率逐渐增大。当诱饵弹的齐射数量增加到一定程度后,干扰概率不再增大,而是逐渐趋于一个定值。

假设:导弹攻击距离 $D_y=906\ \text{m}$,导弹来袭方位角 $q=21^\circ$,导引头视场角 $\phi=2.5^\circ$,诱饵弹齐射数量 $n=4$,

飞机到能量中心的距离 $Oe=100\ \text{m}$,飞机过载 $n=3\ \text{g}$,飞机速度 $v_f=400\ \text{m/s}$,红外导引头的抗干扰系数 $K_j=0.45$ 。干扰概率 P_j 随着诱饵弹投放时间间隔 Δt 的变化曲线如图6所示。

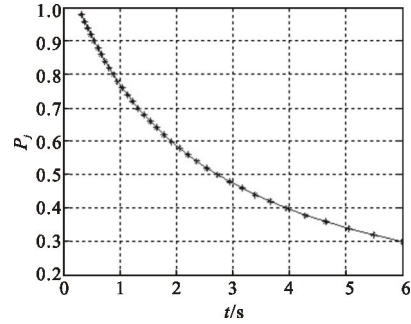


图6 诱饵弹投放时间间隔与干扰概率的关系曲线

Fig.6 Relationship between dispensing interval time and interfering probability

由图6可知:随着诱饵弹投放时间间隔的增大,干扰概率逐渐降低。在时间间隔 Δt 较小时 P_j 变化急剧,随着时间间隔 Δt 增加 P_j 趋缓,干扰概率 P_j 呈现非线性变化规律。

假设:导弹攻击距离 $D_y=906\ \text{m}$,诱饵弹干扰概率 $P_j=0.8$,诱饵弹齐射数量 $n=4$,飞机速度 $v_f=400\ \text{m/s}$,飞机过载 $n=3\ \text{g}$,导引头视场角 $\phi=2.5^\circ$,红外导引头的抗干扰系数 $K_j=0.45$ 。诱饵弹投放时间间隔随着导弹来袭方位角的变化曲线如图7所示。

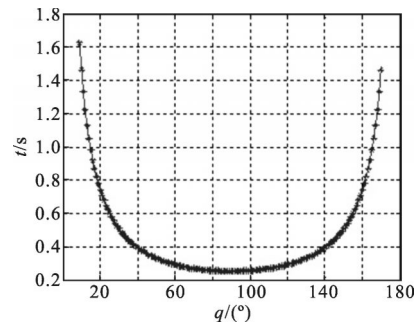


图7 诱饵弹投放时间间隔与导弹来袭方位角的关系曲线

Fig.7 Relationship between dispensing interval time and missile attack angle

由图7可知:红外导弹尾后攻击时,弹机接近速度较慢,以第一枚诱饵弹作为零时,在相同的投放时间间隔内,弹机距离较远,导弹红外导引头在飞机位置截取的横向距离较大,飞机逃离导弹视场角所用

时间相对长些,因此,诱饵弹的投放时间间隔就相对较长。而迎头攻击时,弹机接近速度最快,在相同的诱饵弹投放时间间隔内,导弹红外导引头在飞机位置截取的距离较尾后情况要短些,飞机逃离导弹视场角所用的时间相对短点,因此,诱饵弹的投放时间间隔略短。侧向攻击时,弹机接近速度虽然比迎头攻击飞机时慢些,但是飞机的飞行方向与红外导引头的扫描方向基本垂直,在相同的诱饵弹投放时间间隔内,诱饵弹与飞机对导弹导引头的张角最大,因此飞机逃离导弹视场角的速度最快,诱饵弹的投放时间间隔最小。

3.3 仿真算例

对于设置的初始态势和给定的诱饵弹参数,可得到采用不同干扰策略的导弹脱靶量。

3.3.1 干扰导弹 A 仿真算例

(1) 运动分析

假设:加力状态下飞机尾部的总辐射强度为 $I=2\ 720.0\ \text{W/sr}$, 制导末端导弹对飞机采用尾后攻击方式。计算并分析以 0.2 s、0.5 s 和 1.5 s 为时间间隔投放 4 枚、5 枚和 6 枚诱饵弹的质心运动与干扰效果。

以 0.5 s 的时间间隔投放 4 枚诱饵弹后,飞机与诱饵弹的质心运动轨迹如图 8 所示。从图 8 可知,在前半段的时间里,诱饵弹迅速燃烧,红外辐射强度达到最大值,至少是飞机红外辐射强度的 2~3 倍,质心位置主要取决于诱饵弹的位置;在后半段由于诱饵弹即将燃烧完毕,其红外辐射对质心位置的影响逐渐减弱,飞机的红外辐射逐渐占据主导地位,质心位置开始飞机方向靠拢。

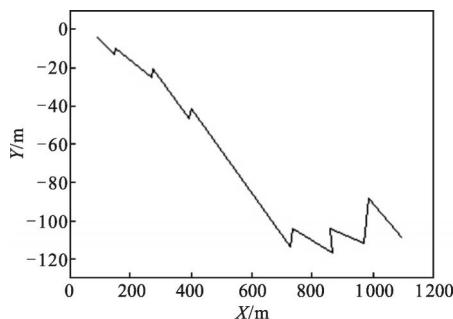


图 8 飞机与诱饵弹的质心运动轨迹

Fig.8 Centroid motion trajectory of fighter and infrared decoy

以 0.5 s 的时间间隔投放 4 枚诱饵弹后,飞机与质心的距离随时间的变化曲线如图 9 所示。在图 9

前端,投放的诱饵弹迅速燃烧,诱饵弹的红外辐射占主导地位,诱饵弹的位置决定质心位置,飞机与质心的距离逐渐增大;随着时间的推移,诱饵弹燃烧后期由于其辐射强度的逐渐减弱,质心位置向飞机靠拢,飞机与质心的距离有减小的趋势。

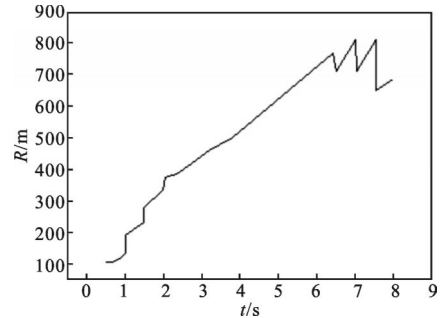


图 9 飞机与质心的距离变化曲线

Fig.9 Distance curve of fighter and centroid

(2) 飞机被击中概率分析

当红外导弹逼近飞机时,飞机被击中概率 P 的经验计算公式为:

$$P \approx \frac{A_p}{2\pi D^2 + A_p} \quad (25)$$

式中: D 为导弹脱靶量; A_p 为飞机的暴露面积。

忽略红外导弹的制导误差,认为红外导弹的跟踪误差只取决于诱饵弹的质心干扰,那么用飞机与质心的距离 R 即可表示跟踪误差,即 $R=D$ 。表 1 表示在诱饵弹的辐射峰值为 $4\ 100\ \text{W/sr}$ 、 $A_p=30\ \text{m}^2$ 时,诱饵弹的投放时间间隔和齐射数目对导弹脱靶量和飞机被击中概率的影响。

表 1 不同条件下的导弹 A 的脱靶量 D 和击中概率 P

Dispensing number	Dispensing interval time					
	0.2 s		0.5 s		1.5 s	
	D/m	P	D/m	P	D/m	P
4	483	0.002 0%	562	0.001 5%	946	0.000 53%
5	514	0.001 8%	645	0.001 1%	834	0.000 69%
6	548	0.001 6%	696	0.000 98%	798	0.000 75%

通过仿真算例分析可知,在投放 4 枚、5 枚、6 枚诱饵弹时,总体而言飞机被击中的概率较低,干扰效果较好。在相同的投放间隔条件下,投放 4 枚诱饵弹

之后,飞机被击中概率不再随着诱饵弹投放数量的增加而显著降低,其原因是在实施质心干扰时前 3 枚诱饵弹起主要干扰作用,它们与飞机的距离较近,干扰效果明显。当诱饵弹投放间隔为 1.5 s 时,随着诱饵弹投放数量的增加,飞机被击中概率有增大的趋势。究其原因,文中诱饵弹的有效燃烧时间为 6 s,如果诱饵弹投放时间间隔为 1.5 s,当诱饵弹投放数量超过 4 枚,则会出现每投放一枚新诱饵弹就有一枚先前投放的诱饵弹熄灭的现象,而新投放的诱饵弹离飞机较近,红外辐射剧烈,新投放诱饵对质心位置的影响占据主导地位,质心位置向飞机方向靠拢。在空战过程中,飞机速度、导弹速度、导弹导引头以及机载诱饵弹的性能指标等因素都会影响飞机被击中的概率。

3.3.2 干扰导弹 B 仿真算例

诱饵弹干扰导弹 B 的主要原则:(1) 在导弹导引头瞬时视场尽可能多地存在多个诱饵弹;(2) 投放多枚诱饵弹的时间间隔要适当,使导弹导引头瞬时视场内始终存在诱饵弹,使之始终处于抗干扰模式;(3) 飞机在投放诱饵弹实施干扰的同时必须进行大过载机动规避。

如何才能使红外导弹视场内存在足够多的、持续的诱饵弹呢?这就需要短间隔持续投放诱饵弹。下面以导弹 B 与飞机距离 2 000 m、导弹的瞬时视场 1.5°、红外诱饵的初速为 30 m/s 为例,计算投放间隔时间。

由导弹 B 的瞬时视场 1.5°可计算出,飞机与红外诱饵相距 6 m 后,导引头即可分辨 2 个目标,因此,投放间隔时间最短 0.2 s。

导弹 B 与飞机距离 2 000 m 时,导引头半视场距离为 26.18 m,诱饵弹在视场内的运动是飞机运动惯性、红外诱饵初始速度、自由落体及空气阻力等运动的矢量合成运动,红外诱饵逃离导弹视场的时间约为 0.6~0.8 s,因此投放时间间隔最长为 0.5 s。由上述计算结果分析可知,按照 0.2~0.5 s 的投放时间间隔持续投放 4~6 枚诱饵弹,可对导弹 B 形成有效干扰。飞机投放完诱饵弹后以最大过载转弯规避,可使诱饵弹作战效能有所提高。表 2 表示诱饵弹的投放时间间隔、齐射数量和飞机规避对导弹脱靶量的影响。

表 2 不同条件下的导弹 B 的脱靶量 D

Tab.2 Miss distance D of B missile under different conditions

Dispensing number	D/m			
	Dispensing interval time			
	0.2 s		0.5 s	
Whether to evade	No	Yes	No	Yes
4	54	151	139	301
5	61	234	185	396
6	80	289	203	481

对比表 1 和表 2 可知,诱饵弹干扰导弹 B 的干扰效果相比干扰导弹 A 要低的多,导弹的脱靶量相对比较小。这是由于诱饵弹的干扰机理是质心式干扰,而导弹 B 并不跟踪能量质心。飞机进行机动规避可使导弹脱靶量明显增大。

利用已搜集到的实弹打靶数据对表 1、表 2 中的部分仿真数据进行了检验,吻合程度在 80%以上,表明了仿真的可信性。

4 结论

文中研究了机载红外诱饵作战使用方法,综合干扰对象、诱饵弹投放时机、投放方向、投放时间间隔、齐射数量和飞机规避方法等因素对诱饵作战效能的影响,由分析研究与仿真计算表明:

(1) 不同的投放时间间隔,投放 4 枚以上诱饵弹,飞机被击中的概率较低,红外干扰效果良好。在相同的投放间隔条件下,投放 4 枚诱饵弹之后,飞机被击中概率不再随着诱饵弹投放数量的增加而显著降低。

(2) 飞机在使用诱饵弹时短时间间隔投放 4 枚以上,干扰效果良好。诱饵投放完成后,飞机以最大过载机动规避,干扰成功概率增大。

(3) 质心干扰时,干扰概率随着投放时间间隔的增长而降低,但是干扰概率并不随投放时间间隔线性变化。尾后攻击时,飞机逃离导弹视场角所用时间长些,诱饵弹投放时间间隔相对较长;迎头攻击时,飞机逃离导弹视场角所用的时间相对短点,诱饵弹投放时间间隔略短;侧向攻击时,诱饵弹投放时间间隔最小。

参考文献:

- [1] Guo Xiaohui, Song Bifeng, Wang Xu. Miss distance of infrared guidance missile under infrared decoy influence [J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2005, 21(5): 20-22. (in Chinese)
郭晓辉, 宋笔锋, 王旭. 红外诱饵弹对红外制导导弹脱靶距离影响[J]. 航天电子对抗, 2005, 21(5): 20-22.
- [2] Li Lijuan, Huang Shike, Chen Baoguo. Dual band IR imaging counter-countermeasures technology [J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36(2): 141-143. (in Chinese)
李丽娟, 黄土科, 陈宝国. 双色红外成像抗干扰技术[J]. 激光与红外, 2006, 36(2): 141-143.
- [3] 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)
胡一繁, 宋笔锋, 王旭, 等. 机载红外诱饵弹干扰效果评估方法[J]. 红外技术, 2009, 31(3): 136-140.
- [4] Tong Zhongxiang, Liu Pengfei, Wang Xiaodong, et al. Research optimal jamming method of IR decoy [J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(1): 69-72. (in Chinese)
童中翔, 刘鹏飞, 王晓东, 等. 红外诱饵弹最佳干扰方法研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(1): 69-72.
- [5] Wang Jun, Gao Jiaobo, Ma Ling, et al. The radiation characteristics of infrared decoy and the action in electro-optical countermeasure systems [J]. *Journal of Applied Optics*, 2002, 23(4): 15-20. (in Chinese)
王军, 高教波, 马玲, 等. 红外诱饵的辐射特性及在光电对抗系统中的作用[J]. 应用光学, 2002, 23(4): 15-20.
- [6] Zhang Haoyue, Wei Hongjian. Talking about enhancing infrared decoy jamming effectiveness [J]. *Aerodynamic Missile Journal*, 2012(8): 30-32. (in Chinese)
张昊越, 蔚红建. 浅谈增强红外诱饵弹的干扰效能 [J]. 飞航导弹, 2012(8): 30-32.
- [7] Jin Yong, Li Xinguo, Zeng Yingchao. The counterwork between IR decoy and infrared air-to-air missile [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2005, 25(2): 330-332. (in Chinese)
晋永, 李新国, 曾颖超. 红外诱饵弹对抗红外空空导弹[J]. 火箭与制导学报, 2005, 25(2): 330-332.
- [8] 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.
- [9] Wang Chaoqun. Some characteristics of infrared jam and its simulation technique on infrared guided missile [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2001, 30(4): 241-269. (in Chinese)
汪朝群. 红外诱饵对红外制导导弹的干扰特性及仿真[J]. 红外与激光工程, 2001, 30(4): 241-269.
- [10] Jin Zhengzhi, Du Wenhong, Wang Xing, et al. The research of infrared decoy modeling and visual simulation [J]. *Journal of Projectiles, Rockets Missiles and Guidance*, 2010, 30(6): 33-38. (in Chinese)
金政芝, 杜文红, 王星, 等. 红外诱饵弹建模与视景仿真实现研究[J]. 火箭与制导学报, 2010, 30(6): 33-38.
- [11] Hu Zhaozhui, Chen Kai, Yan Jie. Operational parameters of airborne infrared decoy aerial-launched set [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(3): 396-399. (in Chinese)
胡朝辉, 陈凯, 闫杰. 红外诱饵弹投放装置控制参数研究[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(3): 396-399.
- [12] Li Jianxun, Tong Zhongxiang, Wang Chaozhe, et al. Calculation and image simulation of aircraft infrared radiation characteristic [J]. *Acta Armamentarii*, 2012, 33(11): 1310-1318. (in Chinese)
李建勋, 童中翔, 王超哲, 等. 飞机目标红外特性计算与图像仿真[J]. 兵工学报, 2012, 33(11): 1310-1318.