

红外对抗过程的效能评估方法研究

李建勋^{1,2}, 童中翔¹, 樊晓光¹, 吴利荣², 陈超², 王超哲¹, 贾林通¹

(1. 空军工程大学 航空航天工程学院, 陕西 西安 710038;

2. 空军装备研究院 复杂航空系统仿真重点实验室, 北京 100076)

摘要: 战斗机红外对抗效能评估是武器装备作战使用的关键, 传统效能评估方法主要针对简单红外环境、固定作战态势和单一组件开展研究, 不能充分反映红外对抗的真实性和全面性。基于此, 提出了战斗机红外对抗效能评估方法, 按照实战对抗过程, 分成探测目标、占位和杀伤目标三个阶段进行研究, 基于概率理论确定了不同阶段的概率权重, 并建立了基于红外对抗全过程的效能评估方法, 最终得到战斗机完成红外对抗任务的成功概率。对比分析结果表明了红外对抗效能评估方法的有效性和正确性, 为战斗机红外攻击策略和防御策略的制定提供了理论依据。

关键词: 战斗机; 红外对抗; 效能评估方法; 作战使用; 概率理论

中图分类号: VP271.4; E926 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0304008

Research of an effectiveness evaluation method of infrared countermeasure process

Li Jianxun^{1,2}, Tong Zhongxiang¹, Fan Xiaoguang¹, Wu Lirong², Chen Chao², Wang Chaozhe¹, Jia Lintong¹

(1. Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;

2. Science and Technology on Complex Aviation Systems Simulation Laboratory, Equipment Academy of Air Force, Beijing 100076, China)

Abstract: The effectiveness evaluation of fighter's infrared countermeasure is the key of operational use of weapon equipment. In allusion to simple infrared environment, fixed operational situation and single component, traditional effectiveness evaluation methods are researched, which can't fully reflect the authenticity and exhaustiveness of infrared countermeasure. So the effectiveness evaluation method of fighter's infrared countermeasure was put forward. The process of infrared countermeasure that was divided into three phases was studied in accordance with actual countermeasure process, such as detecting target phase, occupying phase, and killing target phase. The probability weights of different phases were confirmed based on probability methodology. And an effectiveness evaluation method based on infrared countermeasure whole process was proposed. At last, the success probabilities of accomplishing fighter's infrared countermeasure mission were obtained. Comparisons show that the effectiveness evaluation of

收稿日期: 2015-07-09; 修订日期: 2015-08-13

基金项目: 国家自然科学基金(61203134)

作者简介: 李建勋(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: jianxun-li@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

infrared countermeasure is valid and correct, which can provide theoretical basis for infrared attacking strategy and infrared defending strategy.

Key words: fighter; infrared countermeasure; effectiveness evaluation method; operational use; probability methodology

0 引言

红外对抗效能是指战斗机在执行作战任务时其红外对抗能力发挥的效果,是评估敌我双方红外对抗实力的主要指标。红外对抗能力是红外对抗效能发挥的基础,效能的发挥还受到战斗机飞行操纵、战术运用、攻防策略等“后天因素”的影响。

红外对抗是一个复杂的作战过程,内容十分丰富,方式多种多样,具有很强的随机性。红外对抗效能的衡量牵扯到许多参数,有些参数有确切的数据可以进行精确计算,但也有一些参数不能直接测量出来,只能进行估计。这样以来,所谓红外对抗效能“评估”就带有一定的经验判断的成分。红外对抗效能评估是武器装备作战使用的关键,评估的方法也是种类繁多,普遍具有综合性、概略性、相对性、层次性、时效性和局限性^[1]。针对简单光电环境、固定作战态势和单一组件进行红外对抗效能评估,传统的方法是行之有效的。然而,随着高新技术的快速发展和战斗形式的多元化,现代红外对抗的作战方式与传统红外对抗有了较大的差异。现代红外对抗效能评估过程中,部分传统效能评估方法不能充分反映红外对抗的真实性和全面性。

文中首先搭建战斗机红外对抗仿真平台,然后按照实战对抗过程,分成探测目标、占位和杀伤目标三个阶段进行研究,最后建立红外对抗效能评估指标体系,开展红外对抗效能评估。

1 红外对抗仿真平台

文中研究的战斗机红外对抗仿真属于半实物仿真,实物部分是参与红外对抗的敌我双方战斗机,软件部分包括战斗机红外辐射特性模块、红外干扰模块、环境及辐射传输模块、导弹模块以及效能评估模块。实物部分通过机载综合信息采集设备为软件部分提供数据支持。

战斗机红外对抗仿真平台框架如图 1 所示。它

主要包括数据库模块、战斗机红外辐射特性模块、红外干扰模块、大气红外辐射传输模块、导弹模块以及效能评估模块等六大部分。输入信息由机载综合信息采集设备提供,包括飞参、电抗、火控三类信息。输出信息为红外对抗效能评估结果。数据库模块是战斗机红外对抗仿真平台的基础,各模型的合理有效性很大程度上取决于数据库真实准确性。战斗机红外辐射特性、红外干扰以及导弹的模型已在前期进行研究^[2-4],文中着重研究红外对抗效能评估方法。

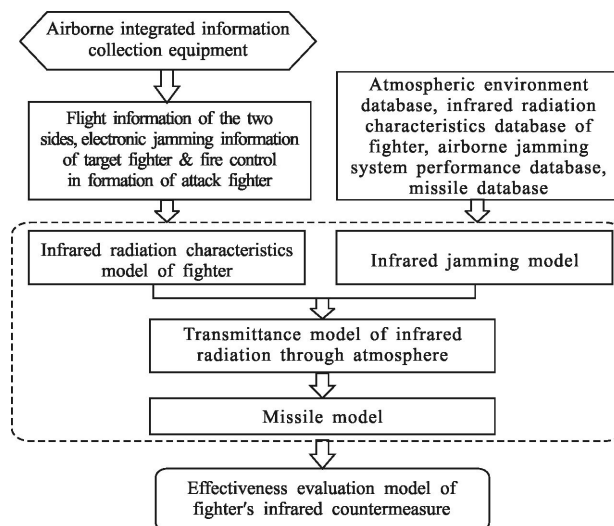


图 1 战斗机红外对抗仿真平台

Fig.1 Fighter's infrared countermeasure simulation platform

2 红外对抗效能评估特点

红外对抗效能评估主要内容:(1) 构建效能评估指标体系;(2) 根据给定条件,计算效能评估指标的值;(3) 求出红外对抗效能的综合评估值。

现代红外对抗过程具有以下显著特点:(1) 作战任务多样性;(2) 作战过程多样性;(3) 作战结果多样性。根据红外对抗效能评估的特点,红外对抗效能评估指标可分成两部分:局部指标与综合指标^[5]。(1) 局部指标是针对红外对抗过程中执行的阶段性任务提出的评估指标;(2) 综合指标是指对红外对抗

效能从总体给出量化评估指标。

3 红外对抗效能评估指标体系

建立科学合理、可行可信的指标体系是红外对抗效能评估的基础,各评价指标权重的确定是做好红外对抗效能评估工作的关键。

现代红外对抗大体可分为超视距(Beyond Visual Range, BVR)和视距内(Dog Fight, DF)两种模式。随着机载探测设备作用距离和导弹攻击距离的增大,红外对抗的作战范围不断扩大,逐步从视距内作战向超视距作战延伸。(1)超视距红外对抗是指红外对抗双方在飞行人员目视范围之外,通过机载探测设备搜索发现和截获敌方空中目标,并用导弹拦截攻击的一种红外对抗模式^[6]。(2)视距内红外对抗是指通过目视或其他机载探测设备探索目标,主要用导弹以空中格斗战术进行红外对抗^[7-8]。超视距红外对抗与视距内红外对抗相比具有特点:(1)以前半球攻击为主;(2)攻击范围扩大;(3)机动急剧程度减弱^[9];(4)攻防态势具有较大的相对性,态势转换隐蔽;(5)战场态势信息斗争变得异常激烈;(6)机载武器性能至关重要。

在超视距或是视距内红外对抗过程中,其主要目的就是击毁敌方目标,使其无法对战斗机构成威胁。红外对抗过程中,包括探测、发现、识别、跟踪、锁定、占位和攻击等诸多环节^[10-11],总的来看,整个红外对抗过程可分为三个阶段:探测目标阶段、占位阶段、杀伤目标阶段。将战斗机完成作战任务的成功概率 P_{suc} 作为评估战斗机红外对抗效能的综合指标,即:

$$P_{suc} = P_{det} \times P_{fir} \times P_{kr} \quad (1)$$

式中: P_{det} 为探测目标概率; P_{fir} 为占位成功概率; P_{kr} 为杀伤目标概率。 P_{det} 、 P_{fir} 、 P_{kr} 三个概率值为局部指标。

3.1 探测目标概率

红外对抗过程中,战斗机探测目标主要依靠机载雷达、机载红外探测装置和飞行员目视能力。对目标的探测性能可用探测目标概率来描述。探测目标概率相应地分为三类:机载雷达探测概率、机载红外探测概率和目视发现目标概率,其计算公式为:

$$P_{det} = 1 - (1 - P_{rad})(1 - P_{IR})(1 - P_{eye}) \quad (2)$$

式中: P_{rad} 为机载雷达探测概率; P_{IR} 为机载红外探测概率; P_{eye} 为目视发现目标概率。

3.1.1 机载雷达探测概率

现代红外对抗中机载雷达依然是及时、准确、全面获取战场各种目标信息的主要装备。目前而言,使用的机载雷达主要是机载火控雷达,机载火控雷达的探测作用无可替代。机载火控雷达主要负责对目标的探测、截获、跟踪和告警^[12],为导弹进攻提供发射条件。

当目标雷达散射截面一定时,机载雷达探测概率 P_{rad} 与目标信噪比成正比:

$$P_{rad} \sim (S/N) = \frac{C_s \sigma}{L_a R^4} F^4 \quad (3)$$

式中: σ 为迎头方向目标雷达散射截面; C_s 为雷达系统特征常数; F 为方向传播因子; R 为被探测目标的距离; L_a 为大气损耗因子。机载雷达搜索方位约为 $120^\circ \sim 140^\circ$,机载雷达探测概率主要与目标雷达散射截面及距离有关。

战斗机目标雷达散射截面为 5 m^2 时,不同战斗机的机载雷达探测概率参数如表1所示。

表1 机载雷达探测概率参数表

Tab.1 Detection probability parameter table of airborne radar

Fighter type	APQ-157	APQ-120	AWG-9	APG-63	APG-65	APG-66
Fighter	F-5E	F-4E	F-14A	F-15A	F/A-18A	F-16A
Detecting target distance (10^3 m)	37	80	160	100	120	74
Detecting target probability	0.85%	0.85%	0.85%	0.85%	0.85%	0.85%

3.1.2 机载红外探测概率

机载红外探测概率计算公式:

$$P_{IR} = (\omega_0 / 360^\circ) \times e^{(-0.1625R/R_0)} \quad (4)$$

式中: ω_0 为红外搜索方位角; R_0 为标准发现距离。敌我双方都以“标准发现距离”为准决定机载红外探测概率。

3.1.3 目视发现目标概率

敌我双方距离、战斗机尺寸系数等影响目视发现目标概率 P_{eye} 。在能见度条件良好时,典型战斗机尺寸系数与目视发现目标距离的关系曲线如图2所示。

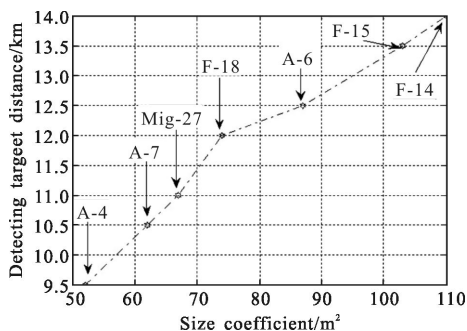


图 2 战斗机尺寸系数与目视发现目标距离的关系曲线

Fig.2 Relation curve of fighter's size coefficient and visual detecting target distance

图 2 中, 目视发现目标距离与目标尺寸系数并不是线性关系, 数据分析可知, 每增加 10 m² 尺寸系数, 近似认为平均目视发现距离增加 900~1 000 m。

战斗机尺寸系数为 60 m² 的目标, 在不同距离 (1 000, 2 000, 3 000, 4 000, 5 000, 6 000, 7 000, 8 000, 9 000, 10 000), 单位为 m, 被发现的概率 P_{eye} 为 (0.93, 0.85, 0.79, 0.74, 0.70, 0.65, 0.60, 0.56, 0.51, 0.47)。不同距离与目视发现目标概率的关系曲线如图 3 所示。

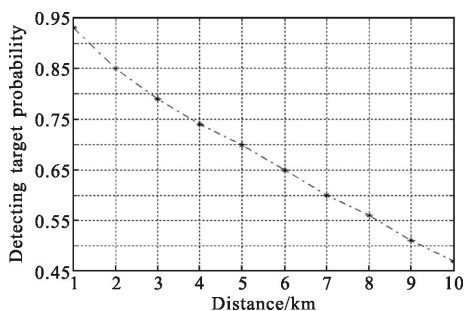


图 3 不同距离与目视发现目标概率的关系

Fig.3 Relation between different distances and visual detecting target probability

探测阶段发现目标的概率达到阈值 0.85 时, 探测目标阶段完成。

3.2 占位成功概率

一旦探测到目标, 战斗机即可进入占位阶段。在此阶段, 使用红外制导导弹攻击目标, 战斗机首先要设法运动到有利的可攻击位置, 创造导弹发射条件。占位成功的概率取决于战斗机的机动性和敏捷性。其次, 当锁定目标, 同时进入导弹有效射程之内, 即可发射导弹。红外对抗过程中, 不同作战距离使用不同的机载武器, 接下来针对超视距红外对抗、视距内

红外对抗阶段的占位成功概率 P_{fir} 进行研究。

3.2.1 超视距红外对抗占位成功概率

超视距红外对抗占位成功概率 $P_{\text{fir}}^{\text{BVR}}$ 的大小主要受导弹可攻击角度范围的影响:

$$P_{\text{fir}}^{\text{BVR}} = \omega / 360^\circ \quad (5)$$

式中: ω 为导弹可攻击角度范围。假设某型导弹可攻击角度范围约为 300°, 占位成功概率可认为等于 300°/360°, 即 0.83。

超视距红外对抗过程中, 机载探测系统越先进, 探测锁定目标到发射红外制导导弹时间越短, 在占位阶段优势越明显。鉴于此, 将公式(5)进一步修订:

$$P_{\text{fir}}^{\text{BVR}} = \begin{cases} (\omega / 360^\circ) e^{-(t-\tau)}, & t_{0.85} \leq t \leq \tau \\ \omega / 360^\circ, & t > \tau \end{cases} \quad (6)$$

式中: $t_{0.85}$ 为探测开始至探测目标概率为 0.85 时所经历的时间; t 为战斗机占位阶段所需时间; τ 为时间常数, 一般取参数 t_0 与 t_f 中最大的一个时间值:

$$\tau = \max(t_0, t_f) \quad (7)$$

式中: t_0 为战斗机锁定目标到红外制导导弹发射成功所需要的时间; t_f 为战斗机照射锁定目标后, 红外制导导弹所需要的飞行时间。

3.2.2 视距内红外对抗占位成功概率

视距内红外对抗过程中, 敌我双方距离相对于超视距红外对抗要近得多, 视距内红外对抗占位成功概率 $P_{\text{fir}}^{\text{DF}(0)}$ 主要受导弹可攻击范围、敌我双方的距离的影响, 则:

$$P_{\text{fir}}^{\text{DF}(0)} = \begin{cases} 0, & R \geq 20 \text{ km} \\ \frac{1}{3} \times \frac{\omega}{360^\circ}, & 6 \text{ km} < R < 20 \text{ km} \\ \omega / 360^\circ, & R \leq 6 \text{ km} \end{cases} \quad (8)$$

式中: ω 为导弹可攻击角度范围; R 为战斗机与目标机之间的距离。

攻击开加力目标的 $P_{\text{fir}}^{\text{DF}(1)}$ 可近似为:

$$P_{\text{fir}}^{\text{DF}(1)} = \begin{cases} 0, & R \geq 50 \text{ km} \\ (1 - R/60)(\omega / 360^\circ), & 10 \text{ km} < R < 50 \text{ km} \\ \omega / 360^\circ, & R \leq 10 \text{ km} \end{cases} \quad (9)$$

由公式(8)和(9)比较可知, 攻击开加力目标的可攻击距离明显增大。

3.3 杀伤目标概率

在建立目标模型和导弹模型的基础上, 计算导弹的运动轨迹, 最终计算得到导弹脱靶量。导弹是红

外对抗过程中主要战斗火力,一旦目标进入导弹攻击区,立即发射导弹,实现对目标的杀伤。导弹对目标的杀伤属于近炸杀伤类型,即不仅依靠碰撞命中目标,而且在目标附近爆炸也能杀伤目标。由导弹脱靶量来计算杀伤结果。导弹脱靶量是导弹进入目标为中心的有效杀伤半径范围内与目标交会时的最近距离。导弹脱靶量作为评估导弹作战效能的一个重要指标,主要用来表征导弹的攻击精度,为红外对抗效能评估提供直接依据。

(1) 导弹脱靶量计算

设导弹爆炸时的质心坐标为 (x_m, y_m, z_m) ,目标的质心坐标为 (x_r, y_r, z_r) ,则导弹脱靶量为:

$$D = \sqrt{(x_r - x_m)^2 + (y_r - y_m)^2 + (z_r - z_m)^2} \quad (10)$$

(2) 单枚导弹杀伤目标概率

由导弹的运动轨迹和目标运动轨迹,可获得导弹脱靶量。再考虑到导弹攻击轨迹计算的理想化因素,最后的攻击效果可用对目标的杀伤概率来描述。

经典的导弹对目标杀伤概率计算模型为^[13]:

$$P_{kr} = \frac{R_m^2}{\left(R_m^2 + \frac{CEP^2}{1.386}\right)} \exp\left[\frac{-D^2}{R_m^2 + \frac{CEP^2}{1.386}}\right] \quad (11)$$

式中: P_{kr} 为导弹对目标的杀伤概率; R_m 为导弹杀伤

半径; D 为导弹脱靶量; CEP 为导弹的圆概率误差(Circular Error Probable)。

公式(11)计算模型对于迎击面积及生存力系数对杀伤概率的影响未做深入研究,计算的结果与实际红外对抗结果存在一定的误差,经反复修改、验证,得到单枚导弹对目标的杀伤概率计算模型:

$$P_{kr} = \frac{\alpha R_m^2}{\beta \left(R_m^2 + \frac{CEP^2}{1.386}\right)} \exp\left[\frac{-D^2}{R_m^2 + \frac{CEP^2}{1.386}}\right] \quad (12)$$

式中: α 为迎击有效面积系数; β 为生存力系数。

(3) 多枚导弹杀伤目标概率

战斗机挂载不同型号的多枚红外制导导弹,杀伤目标概率分别为 $P_{kr1}, P_{kr2}, \dots, P_{kri}$,发射数量分别为 n_1, n_2, \dots, n_i ,共发射 $n_1 + n_2 + \dots + n_i = N$ 枚,则导弹杀伤目标概率 P_{kr} 为:

$$P_{kr} = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_{kri})^{n_i} \quad (13)$$

式中: P_{kri} 为导弹单发命中目标概率, $i=1, 2, \dots, n$ 。

4 红外对抗效能评估算例

4.1 作战初始条件

战斗机 A、B 和 C 的初始化条件如表 2 所示。

表 2 战斗机初始化条件

Tab.2 Initial condition of fighter

Fighter	Flying speed	Yawing angle	Stealth	Supersonic cruise	RCS	Weapon mount	Initial position
A	510 m/s	270°	Yes	Yes	0.1 m ²	Internal weapon bays, two medium-range infrared guided missiles, and two near infrared guided missiles	(0m, 9000m, 0m)
B	292 m/s	90°	No	No	12.7 m ²	Two medium-range infrared guided missiles, and four near infrared guided missiles	(0m, 9000m, 25000m)
C	292 m/s	270°	No	No	4.9 m ²	Two medium-range infrared guided missiles, and four near infrared guided missiles	(0m, 9000m, 0m)

4.2 红外对抗能力计算

参照参考文献[14]中战斗机红外对抗能力评估

模型^[14],计算可得仿真算例中战斗机红外对抗能力评估结果,如表 3 所示。

表 3 战斗机红外对抗能力评估结果

Tab.3 Evaluation result of fighter's infrared countermeasure capacity

Infrared countermeasure capacity	A	B	C
Infrared countermeasure capacity of dog fight	0.197	0.176	0.175
Infrared countermeasure capacity of BVR	0.537	0.456	0.374
Infrared countermeasure capacity of mounting medium-range infrared guided missiles	0.090	0.071	0.058
Infrared countermeasure capacity of mounting near infrared guided missiles	0.010	0.021	0.032
Infrared countermeasure capacity of fighter	0.834	0.724	0.639

分析表 3 可知, 四代机 A 除装备近距红外制导导弹的作战能力低于战斗机 B 外, 其余几个方面的红外对抗能力均高于战斗机 B。这是因为战斗机 A 为提高超音速巡航能力和隐身性能, 采用内置武器舱, 使得迎面平均雷达散射截面变得很小, 超音速飞行能力增强。战斗机 B 与战斗机 C 同为三代机, 其红外对抗能力相差不大。挂载导弹的性能差别由红外对抗能力评估结果给出定量的反映。

4.3 红外对抗效能计算

4.3.1 探测目标阶段

根据收集到的基本性能参数, 利用公式(2)计算, 可以得到战斗机 A、战斗机 B 和战斗机 C 探测目标概率随时间的变化曲线如图 4 所示。图 4 中, 曲线 1 代表战斗机 A 探测到战斗机 B 的概率; 曲线 2 代表战斗机 C 探测到战斗机 B 的概率; 曲线 3 代表战斗机 B 探测到战斗机 A 的概率; 曲线 4 代表战斗机 B 探测到战斗机 C 的概率; 曲线 5 代表探测目标概率为 0.85。

战斗机 C 与战斗机 B 的机载雷达探测性能差不多, 由于战斗机 C 的迎面平均雷达散射截面比战斗机 B 要小得多, 所以战斗机 C 锁定战斗机 B 要比战斗机 B 锁定战斗机 C 提前 82.5 s, 先敌发现目标, 占据探测优势, 掌握战场主动权。

超音速巡航能力在超视距红外对抗过程中的作用是“快速反应快速机动”, 提高战斗机战场生存力。三种型号的战斗机中只有战斗机 A 具有超音速巡航能力, 使战斗机 A 对抗战斗机 B 的过程中占尽速度优势。从图 4 分析可知, 战斗机 B 锁定战斗机 A 的时间比其锁定战斗机 C 的时间提前 10 s, 原因在于战斗机 A 飞行速度大约是战斗机 C 飞行速度的 1.75 倍。

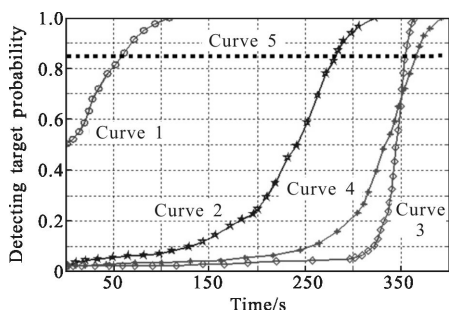


图 4 探测目标概率随时间的变化曲线
Fig.4 Detecting target probability vs time

通过分析可知, 战斗机超音速飞行在增大红外

制导导弹射程的同时也使战斗机更快地落入敌方战斗机的攻击范围。从这个方面来分析, 超音速飞行对于战斗机的生存力是把“双刃剑”, 不仅是速度保障还存在着安全隐患。

4.3.2 占位阶段

根据战斗机 A、B 和 C 初始化条件, 利用公式(6)、(8)及(9), 计算可得到 B 与 A、B 与 C 之间占位成功概率。

战斗机 A 攻击战斗机 B 时, 探测目标阶段用时 58 s, 此时战斗机 A 与战斗机 B 相距 203 000 m, 尚未进入战斗机 A 挂载导弹的有效射程, 战斗机 A 在占位阶段消耗 142 s 时间。战斗机 B 攻击战斗机 A 时, 因为战斗机 B 的机载探测系统性能弱于战斗机 A 的机载探测系统, 所以战斗机 B 对战斗机 A 的探测阶段耗时较长, 导致战斗机 B 对战斗机 A 的占位阶段处于战斗机 A 挂载导弹的允许攻击范围之内。战斗机 B 与 A 之间占位成功概率随时间的变化曲线如图 5 所示。其中, 曲线 1 是战斗机 A 攻击战斗机 B 时占位成功概率, 曲线 2 是战斗机 B 攻击战斗机 A 时的占位成功概率。

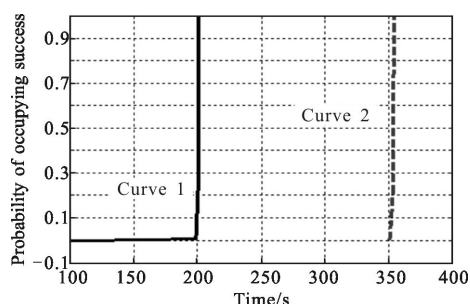


图 5 战斗机 B 与 A 之间占位成功概率随时间的变化曲线
Fig.5 Probability of occupying success vs time between fighter A and B

战斗机 C 攻击战斗机 B 时, 探测目标阶段用时 282 s, 占位时间从 282~377 s。战斗机 B 攻击战斗机 C 时, 探测目标时间用时 365 s, 占位时间从 365~377 s。战斗机 C 的机载探测系统比战斗机 B 的性能优越, 其所用的探测时间远少于战斗机 B 的探测时间, 然而战斗机 C 的占位时间大于战斗机 B, 但是战斗机 C 与战斗机 B 在对目标的攻击时间上大体相同。在 $t=377$ s 时, 交战双方同时进入导弹杀伤目标阶段, 只是此时战斗机 C 锁定目标的概率为 1, 战斗机 B 锁定目标的概率为 0.93。战斗机 B 与 C 之间占位成功

概率随时间的变化曲线如图 6 所示。其中,曲线 1 是战斗机 C 攻击战斗机 B 时占位成功概率,曲线 2 是战斗机 B 攻击战斗机 C 时的占位成功概率。

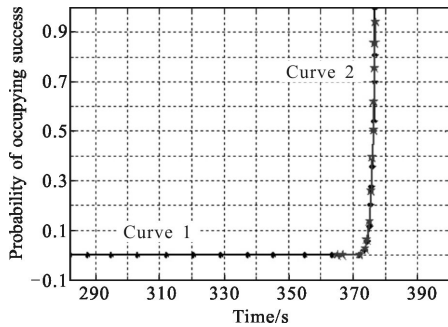


图 6 战斗机 B 与 C 之间占位成功概率随时间的变化曲线

Fig.6 Probability of occupying success vs time between fighter B and C

4.3.3 杀伤目标阶段

进入杀伤目标阶段对目标机进行攻击,计算战斗机杀伤目标概率的前提是战斗机占位成功并且发射红外制导导弹。

在可攻击范围内,红外制导导弹发射遵循以下原则:(1)当未发射时,采取“先敌发射”的原则,一旦战斗机进入导弹攻击范围,只要满足发射条件就发射红外制导导弹,形成对目标机的有效攻击;(2)当已发射红外制导导弹对目标机威胁很低时,如果满足导弹发射条件则建议再次发射红外制导导弹,保证对目标机的有效攻击^[15];(3)当已发射红外制导导弹对目标机形成一定的威胁时,如果再次发射红外制导导弹对目标机的威胁显著提升,则再发射一枚红外制导导弹,否则不发射;(4)已发射红外制导导弹对目标机具有很高威胁,则不再发射导弹^[16]。

发射红外制导导弹攻击目标机后,根据红外制导导弹攻击情况,按照 3.3 节方法计算杀伤目标概率。

4.4 效能评估结果分析

4.4.1 战斗机 A 与战斗机 B 的红外对抗效能评估

为准确进行效能评估,采用仿真的方法模拟红外对抗过程 2 000 次,统计红外对抗效能评估结果。表 4 为战斗机 A 与战斗机 B 三个阶段的红外对抗效能评估结果。

由表 4 可知,战斗机 A 对战斗机 B 进行探测用时 58 s、占位用时 142 s,发射中距红外制导导弹 1 枚用时 6 s,战斗机 A 攻击战斗机 B 完成红外对抗任务

的成功率达到 0.90,约用时 206 s,此时战斗机 B 处于对战斗机 A 的探测目标阶段,发现战斗机 A 的概率仅为 0.041。

表 4 战斗机 A 与战斗机 B 各阶段红外对抗效能评估结果

Tab.4 Different phases' infrared countermeasure effectiveness evaluation results of fighter A and B

Infrared countermeasure phase	Quantify index	A	B
Detecting target phase	$P_{det}=0.85$	58 s	354 s
Occupying phase	Occupying time τ	$t_f=142$ s	$t_0=3$ s
Occupying phase	Probability of occupying success P_{fir}	1.00	0.89
Killing target phase	Probability of killing target P_{kr}	0.90	-
Total time of infrared countermeasure		206 s	-
Success probability of infrared countermeasure P_{suc}		0.90	0.920 7

红外对抗过程中,分析原因可知:(1)战斗机 A 机载探测能力比战斗机 B 机载探测能力高出 2~3 倍,探测能力的差距造成战斗机 B 在探测目标阶段处于明显劣势;(2)战斗机 A 的超音速飞行能力使其接敌时间大大缩短,使战斗机 B 的探测成功概率、占位成功概率更低,从而在红外对抗过程中获得速度优势;(3)战斗机 A 具有隐身性能,迎面平均雷达散射截面只有 0.1 m²;而战斗机 B 的迎面平均雷达散射截面达到了 12.7 m²,战斗机本身设计差异使得战斗机 B 在探测目标阶段毫无优势。

4.4.2 战斗机 C 与战斗机 B 的红外对抗效能评估

由图 6 可知,红外对抗双方占位结束,同时进入杀伤目标阶段。为提高红外对抗效能评估准确性,模拟双方红外对抗过程 2 000 次,统计红外对抗效能评估结果。表 5 为战斗机 C 与战斗机 B 在三个阶段的红外对抗效能评估结果。

表 5 战斗机 C 与战斗机 B 各阶段红外对抗效能评估结果

Tab.5 Different phases' infrared countermeasure effectiveness evaluation results of fighter C and B

Infrared countermeasure phase	Quantify index	A	B
Detecting target phase	$P_{det}=0.85$	282 s	365 s
	Occupying time τ	$t_f=95$ s	$t_0=12$ s
Occupying phase	Probability of occupying success P_{ir}	1.00	0.93
Killing target phase	Probability of killing target P_{kr}	0.83	0.99
Total time of infrared countermeasure		388 s	383
Success probability of infrared countermeasure P_{suc}		0.83	0.920 7

分析整个红外对抗过程如下:

(1) 战斗机 B 挂载的导弹最大发射距离比战斗机 C 挂载的导弹最大发射距离大 3 000 m 左右,使得进入导弹攻击阶段后,战斗机 B 发射导弹的时间比战斗机 C 发射导弹的时间提前 5 s,在两机不躲避的情况下战斗机 B 发射的导弹将先击中战斗机 C。战斗机 B 发射导弹时刻,战斗机的坐标位置为(0, 9 000, 139 916),单位为 m,战斗机的初始速度为 292 m/s。战斗机 B 发射的导弹攻击战斗机 C 时,战斗机 C 与导弹的运动轨迹如图 7 所示。其中,“下三角”线是战斗机 C 平飞轨迹,“*”线是战斗机 B 发射导弹的运动轨迹。

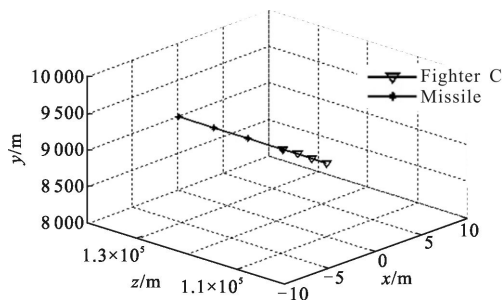


图 7 战斗机 B 发射导弹与战斗机 C 平飞轨迹

Fig.7 Fighter B launching missile and fighter C parallel track

(2) 战斗机 B 发射导弹时刻,战斗机 B 的坐标位置为(0, 9 000, 117 220),单位为 m,战斗机 B 的飞行速度为 292 m/s。战斗机 C 机载导弹逼近告警系统发出导弹来袭告警,战斗机 C 急拉规避,准备在规避过程中抢占有利的位置发射导弹进行反击。但是还没有来得及发射导弹,就被战斗机 B 发射的导弹击中。战斗机 B 发射导弹与战斗机 C 急拉规避运动轨迹如图 8 所示。其中,“上三角”线是战斗机 C 的运动轨迹,“右三角”线是战斗机 B 的运动轨迹,实线是战斗机 B 发射导弹的运动轨迹。

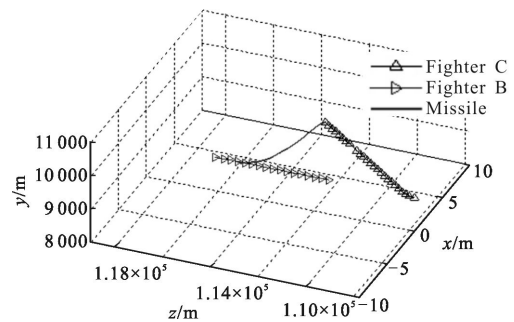


图 8 战斗机 B 发射导弹与战斗机 C 急拉规避运动轨迹

Fig.8 Fighter B launching missile and fighter C climbing elusion movement track

(3) 战斗机 B 发射导弹时刻,战斗机 B 的坐标位置为(0, 9 000, 118 210),单位为 m,战斗机 B 的飞行速度为 292 m/s。导弹来袭时战斗机 C 快速俯冲,进行战术规避,试图摆脱战斗机 B 发射导弹的跟踪,但是依然没有脱离到导弹的导引头视场,最终被导弹击中。战斗机 B 发射导弹与战斗机 C 快速俯冲运动轨迹如图 9 所示。其中,“*”线是战斗机 C 的运动轨迹,“右三角”线是战斗机 B 的运动轨迹,实线是战斗机 B 发射导弹的运动轨迹。

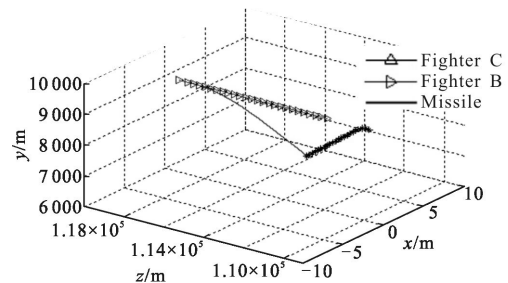


图 9 战斗机 B 发射导弹与战斗机 C 快速俯冲运动轨迹

Fig.9 Fighter B launching missile and fighter C rapid diving maneuver track

(4) 战斗机 B 发射导弹时刻, 战斗机 B 的坐标位置为(0, 9 000, 120 061), 单位为 m, 战斗机 B 的飞行速度为 292 m/s。导弹来袭时, 战斗机 C 迅速做出反应, 减慢飞行速度实施桶滚机动, 一方面拉杆作俯仰机动飞行, 一方面绕轴作 360 滚转。战斗机通过桶滚机动, 逃离导弹视场, 成功摆脱战斗机 B 发射导弹的攻击。战斗机 B 发射导弹与战斗机 C 桶滚机动运动轨迹如图 10 所示。其中, 点划线是战斗机 C 的运动轨迹, “右三角” 线是战斗机 B 的运动轨迹, 实线是战斗机 B 发射导弹的运动轨迹。

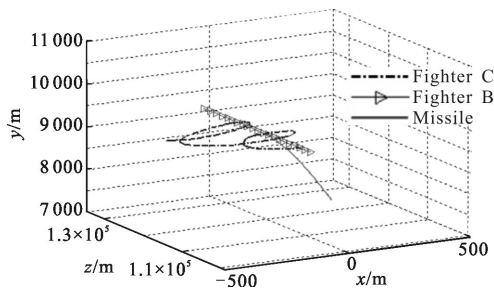


图 10 战斗机 B 发射导弹与战斗机 C 桶滚机动轨迹

Fig.10 Fighter B launching missile and fighter C barrel roll maneuver track

5 结束语

文中研究红外对抗过程的效能评估方法, 通过算例仿真分析, 可得出以下结论:

(1) 将红外对抗分成探测目标、占位和杀伤目标三个阶段进行研究, 基于概率理论确定了不同阶段的概率权重, 并建立了红外对抗全过程的效能评估方法, 最终得到战斗机完成红外对抗任务的成功概率。分析可知, 红外对抗效能评估结果与红外对抗能力评估结果基本一致。

(2) 采用分阶段建模后综合的效能评估方法, 既可以对红外对抗过程进行综合的评估, 又可以分析各阶段的效能指标对红外对抗效能评估的影响。经过实际算例的仿真分析验证了方法的准确性和有效性。

(3) 在导弹杀伤概率相差不大的情况下, 最先完成占位, 进入导弹攻击发射范围的一方, 占据战场主动权, 杀伤对方的概率较大。分析仿真结果可知, 当导弹来袭, 目标机采用常规战术机动动作进行规避, 急拉规避与快速俯冲没能摆脱导弹的攻击, 最终被导弹击毁; 目标机实施桶滚机动规避相对较为有效,

顺利脱离导弹视场, 摆脱了导弹的攻击。

参考文献:

- [1] Zhu Baoliu, Zhu Rongchang, Xiong Xiaofei. Effectiveness Evaluation of Combat Aircraft[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1993. (in Chinese)
朱宝鏊, 朱荣昌, 熊笑非. 作战飞机效能评估 [M]. 北京: 航空工业出版社, 1993.
- [2] 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.
- [3] Li Jianxun, Tong Zhongxiang, Wang Chaozhe, et al. Calculation and simulation on infrared radiation of hot jet from engine [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(1): 7-13. (in Chinese)
李建勋, 童中翔, 王超哲, 等. 发动机热喷流红外辐射计算与仿真[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(1): 7-13.
- [4] Chai Shijie, Li Jianxun, Tong Zhongxiang, et al. Research on modeling of IR seeker for air-to-air missile and anti-interference simulation [J]. *Acta Armamentarii*, 2014, 35(5): 681-690. (in Chinese)
柴世杰, 李建勋, 童中翔, 等. 空空导弹红外导引头的建模与抗干扰仿真[J]. 兵工学报, 2014, 35(5): 681-690.
- [5] Jin Lei, Zhang Shuguang, Sun Jinbiao. Analysis and evaluation of air-combat effectiveness based on simulation [J]. *Flight Dynamics*, 2012, 30(1): 87-91. (in Chinese)
金镭, 张曙光, 孙金标. 基于仿真的空战效能评估分析研究[J]. 飞行力学, 2012, 30(1): 87-91.
- [6] Yang Enrong. Research on Beyond-Visual-Range Air Combat [M]. Beijing: Air Force Command College, 2000. (in Chinese)
杨恩荣. 超视距空战研究[M]. 北京: 空军指挥学院, 2000.
- [7] Dong Xiaolong, Sun Jinbiao, Yan Bin. Dynamic evaluation of fighter aircraft effectiveness in air-combat based on HLA simulation [J]. *Electronics Optics & Control*, 2009, 16(3): 17-20. (in Chinese)
董小龙, 孙金标, 焉彬. 基于 HLA 仿真的空战动态效能评估研究[J]. 光电与控制, 2009, 16(3): 17-20.
- [8] Przemieniecki J S. Mathematical Methods in Defense Analyses [M]. Washington D C: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2000.
- [9] Zhao Wei. Research on the coordinated two-fighter attack

- decision-making technique based on expert system [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007. (in Chinese)
- 赵威. 基于专家系统的双机协同攻击决策技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2007.
- [10] Wang Liyuan, Zhang Hengxi, Xu Haojun. Multi-index synthesize evaluation model based on rough set theory for air combat efficiency [J]. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 2008, 29(4): 880-885.
- [11] Dong Yanfei, Wang Liyuan, Wang Zhuojian, et al. Air combat effectiveness assessment model based on operational pattern and analytic hierarchy process[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2006, 28(6): 885-888. (in Chinese)
- 董彦非, 王礼沅, 王卓建, 等. 基于空战模式和 AHP 法的空战效能评估模型[J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(6): 885-888.
- [12] Shao Yongsong, Zhai Wenjun. Development of fire control system onboard the next generation fighters [J]. *Electronics Optics & Control*, 2011, 18(7): 60-63. (in Chinese)
- 邵咏松, 翟文军. 新一代战斗机综合火控系统的发展[J]. 电光与控制, 2011, 18(7): 60-63
- [13] Lu Yanlong. Research on battleplane's IR countermeasure technique-tactics fusion simulation [D]. Xi'an: Air Force Engineering University, 2011. (in Chinese)
- 芦艳龙. 飞行器红外对抗技战融合仿真研究[D]. 西安: 空军工程大学, 2011.
- [14] Jin Lei, Zhang Shuguang, Sun Jinbiao. Air-combat ability and sensitivity analysis of modern fighter aircraft[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2009, 35(1): 82-86. (in Chinese)
- 金镛, 张曙光, 孙金标. 现代战斗机空战能力评估及敏感性分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(1): 82-86.
- [15] Qiao Xin, Kong Fan'e, Feng Xing. An intelligent decision-making method used in beyond-visual-range Air combat[J]. *Electronics Optics & Control*, 2011, 18 (6): 9-15. (in Chinese)
- 乔鑫, 孔繁峨, 冯星, 等. 单机超视距空战智能辅助决策方法[J]. 电光与控制, 2011, 18(6): 9-15.
- [16] Tu Jianping, Peng Yingning. Air-air missile IR imaging fuze and its fuzing control algorithm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2002, 31(3): 244-248. (in Chinese)
- 涂建平, 彭英宁. 空空导弹红外成像引信及其起爆控制算法[J]. 红外与激光工程, 2002, 31(3): 244-248.