

〈制导与对抗〉

## 红外空空导弹抗干扰性能评估指标体系研究

张喜涛<sup>1,2</sup>, 白晓东<sup>1,2</sup>, 闫琳<sup>1,2</sup>, 王炜强<sup>1,2</sup>

(1. 中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009; 2. 航空制导武器航空科技重点实验室, 河南 洛阳 471009)

**摘要:** 评估红外空空导弹抗干扰能力强弱的传统指标较为单一, 多是利用综合抗干扰概率进行判定。针对该问题, 建立了包含导弹总体、制导系统、导引头3个层次的抗干扰性能评估指标体系, 实现抗干扰性能评估指标的分解, 提高了对制导系统和导引头抗干扰性能的评估能力, 提升了利用导引头、制导系统评估结果对导弹总体抗干扰性能进行预估的能力。

**关键词:** 红外导弹; 抗干扰; 指标体系; 指标分解; 性能评估; 性能预估

中图分类号: TJ761.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2020)11-1089-06

### Anti-Jamming Performance Evaluation Index System for Infrared Air-to-Air Missiles

ZHANG Xitao<sup>1,2</sup>, BAI Xiaodong<sup>1,2</sup>, YAN Lin<sup>1,2</sup>, WANG Weiqiang<sup>1,2</sup>

(1. China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China;

2. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Airborne Guided Weapons, Luoyang 471009, China)

**Abstract:** The traditional index designed to evaluate infrared anti-jamming ability is relatively simple and is mostly determined by the comprehensive anti-jamming probability. To solve this problem, we establish an anti-jamming performance evaluation index system including three levels of missiles, guidance systems, and seekers; construct the anti-jamming performance evaluation function; decompose anti-jamming performance evaluation indexes; and improve the anti-jamming performance of the guidance system and seeker. The evaluation ability of the system improves the ability to use the evaluation results of the seeker and guidance system to predict the anti-jamming performance of the guidance system.

**Key words:** infrared missile, anti-jamming, index system, index refinement, performance evaluation, performance prediction

## 0 引言

现代战场环境中, 没有人工干扰的净空作战条件已经不复存在, 对敌方的红外制导武器实施人工干扰已经成为一种常规的作战手段, 为了能够适应现代化作战环境, 红外制导武器在研制过程中, 必须准确评估其在复杂战场环境中的抗干扰性能<sup>[1]</sup>。国内抗干扰性能评估主要集中在导弹总体层面, 往往以抗干扰概率来评估导弹总体、制导系统乃至导引头的抗干扰能力<sup>[2-3]</sup>, 对抗干扰评估指标体系缺乏系统研究, 从而无法在研制及鉴定过程中对抗干扰性能进行充分评估。由此, 一方面使得军方对导弹抗干扰能力认识不够充分, 影响导弹实际作战效能的发挥; 另一方面, 使研

制方对导弹的抗干扰性能掌控不深入, 严重制约了研制进度。

上海机电工程研究所唐善军等<sup>[4]</sup>, 提出识别概率、最大最小能量压制、视线角速度误差因子、干扰结束时间占比因子和干扰占空比等6项指标系统, 对抗干扰过程中目标的识别能力和跟踪能力进行评价, 但其无法区分导弹不同层次的评估。南京航空航天大学韩培骏等<sup>[5]</sup>, 详细分析了红外光学系统、调制器、探测器、图像处理系统、陀螺伺服系统的性能参数, 将指标设计为发射干扰时的弹目距离、抗干扰检测时间、抗干扰软件识别概率和干扰/目标能量比, 无法区分对抗条件与抗干扰性能之间的关系, 其采用层次分析法建立了红外成像导引系统抗干扰性能计算模型, 该模

型具有主观性, 导弹总体和制导系统无有效评估途径。南京航空航天大学许友平等<sup>[6]</sup>综合导引头固有性能指标和性能改善指标, 建立了导引头抗干扰评估指标集合, 无法对导弹抗干扰性能进行多层次的评估。

本文在对抗环境影响机理分析的基础上, 从红外成像空空导弹总体、制导系统、导引头3个层次详细分析了干扰的影响机理, 阐明了传统抗干扰性能评估指标的不足, 提出了导弹总体、制导系统和导引头3个层次的抗干扰性能评估指标体系, 描述了抗干扰性能评估指标的分解过程, 为研制过程中抗干扰改进设计及抗干扰性能快速评估提供指导。

## 1 红外对抗过程影响机理分析

红外制导空空导弹常用于近距离格斗, 其作战任务是对目标进行杀伤, 作战过程中面临人工干扰的对抗场景。目标与导弹博弈对抗过程中, 遵循以下干扰投放原则: 导弹未发射时, 干扰以预防为主进行稀疏投放, 主要影响导引头正确截获目标; 导弹发射后, 干扰以诱偏为目的进行密集投放, 主要影响导引头对目标的正确测量, 进而对导弹制导系统产生影响, 降低导弹的杀伤能力。干扰的两种投放策略分别影响导引头对目标的截获和测量, 作用机理差异较大。本文按照对抗环境、导弹总体、制导系统及导引头多个层次对红外对抗机理进行研究, 提出用于近距离格斗导弹截获目标后的红外空空导弹抗干扰性能评估指标体系。

### 1.1 复杂对抗环境影响分析

目标、干扰在导弹攻击过程中的相互关系构成了复杂多变的作战对抗环境。在导弹攻击目标过程中, 目标机动使得目标的辐射特性和运动特性发生持续改变, 在干扰的遮挡情况下, 导引头无法完成对目标的正确测量, 进而影响导弹的杀伤能力。干扰投放模式主要包含干扰投放方向、组数、组间隔、每组弹数、弹间隔等要素, 上述要素不仅能够影响干扰在空间维度上的分布, 同时也能够影响干扰在时间维度上的分布。不同的干扰投放时机对导弹的扰动效果不同, 近距离投放干扰, 对导弹跟踪造成的扰动更大, 更容易导致导弹丢失目标或脱靶。

对抗态势是对目标、干扰与导弹在相对位置、速度等方面的描述, 包含了对抗环境的当前状态以及过程发展趋势, 对抗态势的构成要素包括发射时刻的弹目距离、目标速度、导弹速度、进入角、离轴角、目标高度、导弹高度。发射时刻导弹和目标的相对位置、速度状态决定了导弹发射后攻击目标的动态变化过程, 也直接影响干扰和导弹的对抗效果。

依据空战复杂对抗环境的影响分析, 抽取作战环

境的重要影响因素, 将其定量化描述, 并形成若干实例样本, 是空空导弹抗干扰性能评估的输入和基础。实例样本由导弹发射条件、攻击目标机动方式、干扰投放模式3个维度确定。在设计样本时, 依据攻击目标和对抗态势, 确定导弹发射条件, 在发射条件上叠加干扰投放模式形成干扰对抗条件, 选取真实战场中发生概率较高的样本条件, 最终形成战术级红外对抗作战样本空间。

### 1.2 干扰对导弹总体性能影响分析

红外空空导弹的作战任务是对目标进行杀伤, 主要通过作战条件下的杀伤概率进行评估。按照全概率公式, 导弹的杀伤概率为<sup>[7]</sup>:

$$P = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(y, z) f_1(x|y, z) f_2(y, z) G(x, y, z) dx dy dz \quad (1)$$

式中:  $f(y, z)$ 为遇靶平面制导误差的分布;  $f_1(x|y, z)$ 为给定制导误差 $f(y, z)$ 时, 引信引爆点沿 $X$ 轴向上的分布,  $f_2(y, z)$ 为引信启动概率;  $G(x, y, z)$ 为战斗部在点 $(x, y, z)$ 起爆条件下的分布。

制导误差是在导弹外部和内部各种扰动作用下, 形成的导弹实际弹道相对于理想弹道的误差。导弹内部扰动是非均匀分布的, 制导误差的分布也具有一定的偏差; 在外部干扰的作用下, 制导误差被进一步放大, 该放大过程与干扰的投放模式有关, 是非线性的放大过程<sup>[8]</sup>。

引信的启动概率主要受引信的探测性能影响, 与引信的灵敏度和目标的有效投影面积有关, 因此, 引信的启动概率与目标的尺寸和目标的姿态关系密切相关, 此外, 干扰在引信工作范围内投放, 其核心区域也有一定的概率触发引信启动信号, 对引信的启动概率有一定的影响。在弹目交会阶段, 引信依据交会方向和交会速度输出引爆信号<sup>[9]</sup>, 以实现目标的最大杀伤。引信引爆点分布的主要影响因素为弹目交会方向和交会速度。

战斗部起爆后的分布与交会速度关系密切<sup>[10]</sup>, 交会速度越大, 破片动态飞散区越前倾; 交会速度与弹轴夹角越大, 破片动态飞散区不对称性越严重。

导弹的杀伤性能不仅与导弹性能有关, 也与飞机的易损性有关。空中目标往往有多个要害点, 各个要害点有不同的易损性。如果认为杀伤目标上任意要害部位是独立的, 都将以一定的概率构成对整体目标的杀伤, 则导弹的杀伤概率可改写为:

$$P_1 = 1 - \prod_{i=1}^k [1 - P(i) * P_0(i)] \quad (2)$$

式中:  $P(i)$ 为导弹对目标第 $i$ 个要害部位的杀伤概率;

$P_0(i)$ 为目标第  $i$  个要害部位被命中后的易损概率;  $k$  为目标的要害部位个数。

综上, 假设干扰触发引信启动的概率较小, 干扰主要通过放大制导误差的分布, 影响导弹的杀伤概率。假设制导误差均匀分布, 干扰对制导误差分布的放大系数为  $a$ , 则通过公式(1)、(2)可得干扰对导弹的杀伤概率为:

$$P_2 = a \cdot P_1 \quad (3)$$

如果考虑干扰对引起启动概率的影响及制导误差的非均匀分布, 则需要建立制导系统、引信、战斗部及目标的仿真模型, 利用对抗样本空间进行干扰对抗下的导弹杀伤概率仿真。

### 1.3 干扰对制导系统性能影响分析

制导系统主要由导引头和飞控系统组成。导引头负责测量导弹与目标之间的相对运动信息, 将视线角速度提供给飞控系统, 飞控系统按照一定的导引规律输出控制指令, 控制导弹修正偏差, 准确飞向目标。假设目标形心为唯一要害点, 则制导误差可以用脱靶量代替。

对于采用比例导引的制导系统, 导弹过载  $\ddot{y}$ 、视线角速度  $\dot{\lambda}$  和脱靶量  $y$  的关系为:

$$\begin{cases} \ddot{y} = -NV_c \dot{\lambda} \\ \dot{\lambda} = \frac{y}{V_c(t_F - t)} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $N$  为比例导引系数;  $V_c$  为弹目相对速度;  $\lambda$  为视线角;  $t_F$  为遇靶时刻;  $t$  为当前时间。

在不考虑导弹过载限制的条件下, 对导弹过载公式进行积分, 并将视线角  $\lambda$  代入, 可得脱靶量、比例导引系数及时间的关系为:

$$\begin{cases} y(t) = \frac{Ct_F}{N-1}(X - X^N) \\ X = 1 - \frac{t}{t_F} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $C$  为常数;  $X$  为中间变量。

由上式可知,  $y(t_F)$  为 0, 表示制导系统在机动能力足够, 信号无延时的理想状态时, 脱靶量必将衰减为零。

导弹引入延时和扰动<sup>[11]</sup>, 假设延时时间常数为  $T$ , 利用伴随分析方法<sup>[12]</sup>, 计算  $t$  时刻引入过载为  $n$  的扰动, 则脱靶量、飞行时间及时间常数的关系为:

$$\begin{cases} \frac{y(t)}{n} = t^{(N-2)} e^{-\frac{t}{T}} \left[ \frac{1}{(N-2)!} - \frac{t}{6T} \right] \\ n = -NV_c \dot{\lambda} \end{cases} \quad (6)$$

图 1 为比例导引系数等于 4 时, 扰动幅度相同, 时间常数不同时, 扰动时机与脱靶量的归一化曲线。

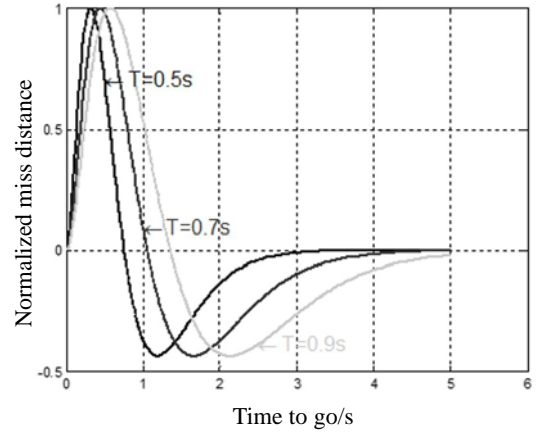


图 1 脱靶量归一化曲线

Fig.1 Diagram of miss distance normalization curves

从仿真曲线可以看出, 在剩余飞行时间是制导时间常数 5 倍以上进行扰动时, 脱靶量最终将收敛为 0; 制导系统时间常数越大, 脱靶量发散区间越大; 脱靶量对扰动的时机较为敏感, 当剩余飞行时间等于制导时间常数时进行扰动, 最终将产生最大的脱靶量。因此, 缩小制导系统时间常数, 可以在一定程度上降低脱靶量。

图 2 为比例导引系数等于 4 时, 时间常数相同, 扰动幅度  $n$  不同时, 扰动时机与脱靶量的归一化曲线。从仿真曲线可以看出, 扰动幅度越大, 脱靶量越大。

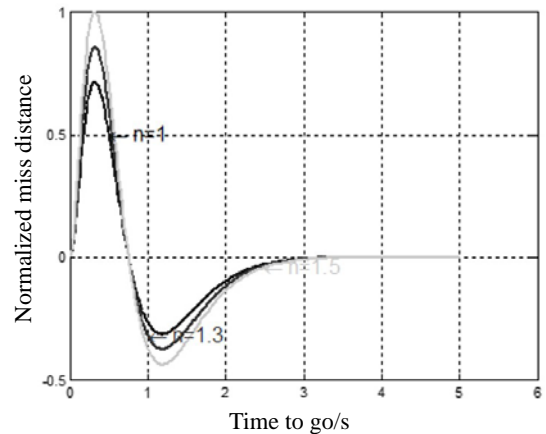


图 2 脱靶量归一化曲线

Fig.2 Diagram of miss distance normalization curves

考察  $t_0$  时刻扰动引起的脱靶量变化, 将公式(6)记作:

$$y(t_0) = G(t_0, T, N, \dot{\lambda}, V_c) \quad (7)$$

将上式进行泰勒展开, 得到:

$$\begin{cases} y(t_0) = G_0 + (\Delta t_0 G_{t_0} + \Delta T G_T + \Delta N G_N \\ \quad + \Delta \dot{\lambda} G_{\dot{\lambda}} + \Delta V_c G_{V_c}) G_0 \\ G_0 = G(t_0, T_0, N_0, \dot{\lambda}_0, V_{c0}) \\ G_x = \frac{\partial G}{\partial X} \end{cases} \quad (8)$$

式中： $G_0$ 为常数； $G_x$ 为函数  $G$  相对于变量  $X$  的导数，在导弹时间常数变化量  $\Delta T$ 、比例导引系数变化量  $\Delta N$ 、干扰投放时刻变化量  $\Delta t_0$  为 0，干扰投放时弹目接近速度变化量  $\Delta V_c$  不大的条件下，令  $\Delta t_0 = \Delta T = \Delta N = \Delta V_c = 0$ ，得到  $t$  时刻干扰引起视线角速度变化与脱靶量的关系为：

$$\begin{cases} y(t) = (1 + X)Y \\ X = \Delta \dot{\lambda} G_{\dot{\lambda}} \\ Y = G_0 \end{cases}$$

则公式(3)中的干扰对制导误差分布的放大系数  $a$  可表示为：

$$a = 1 + E(X)$$

$E(X)$ 为变量  $X$  的均值。假设脱靶量  $r$  服从瑞利分布，即：

$$\rho(r / \sigma^2) = \begin{cases} \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} & r > 0 \\ 0 & r \leq 0 \end{cases}$$

式中： $\sigma^2$ 为脱靶量的均方，当杀伤半径为  $R$ ，脱靶量满足杀伤半径要求的概率为：

$$P_3 = \int_0^R \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} dr = 1 - e^{-\frac{R^2}{2\sigma^2}}$$

综上，无干扰条件下，脱靶量满足杀伤半径要求的概率为：

$$P_4 = 1 - e^{-\frac{R^2}{2D(X)}}$$

$D(X)$ 为变量  $X$  的方差。干扰条件下，脱靶量满足杀伤半径要求的概率为：

$$P_5 = 1 - e^{-\frac{R^2}{2D(X(1+Y))}}$$

抗干扰成功概率为：

$$P_6 = P_5 / P_4$$

#### 1.4 干扰对导引头性能影响分析

导引头主要由探测系统、信息处理软件、控制与跟踪系统组成。探测系统接收来自外部的红外辐射，形成数字灰度图像，信息处理软件对图像进行处理，实现目标的检测、识别和跟踪，提取目标在视场中的位置信号给控制与跟踪系统，控制与跟踪系统利用该信号完成导引头的控制与跟踪功能，并输出视线角速度给飞控系统<sup>[13]</sup>。

导引头抗干扰性能传统指标为导引头抗干扰概

率<sup>[14]</sup>，该指标混淆了导引头和制导系统的功能要求，导引头无法输出脱靶量，无法形成抗干扰概率。导引头的功能是完成对目标的测量，形成视线角速度。导引头对目标的测量可以用识别概率进行评估，传统的识别概率常选择单帧识别概率或者片段识别概率<sup>[15]</sup>，在弹道过程中，存在干扰对目标遮挡，目标不存在的场景，且该场景随机出现，无法利用单帧识别概率进行评估，导引头的识别是一个连续判定过程，无法合理进行片段划分，因此，传统的识别概率不适用于导引头识别概率的评价。本文通过干扰对导引头的机理影响分析，提出导引头识别概率的评估指标。

导引头输出的视线角速度误差源主要有以下3种类型：

- 1) 跟踪点在目标本体上一点跳到另外一点，是非干扰条件下导引头跟踪目标的主要误差源；
- 2) 跟踪点被干扰诱偏，干扰与目标分离后识别出目标，跟踪点回到目标，是干扰条件下导引头跟踪目标的典型过程；
- 3) 跟踪点被干扰诱偏，干扰与目标分离后，跟踪点锁定在干扰上，是干扰条件下导引头跟踪干扰的典型过程。

类型1将导致视线角速度的一个跳动，类型2将导致视线角速度的两个跳动，第一个跳动为跟踪目标干扰重合体，第二个跳动为跳回目标，两个跳动的时间间隔为导引头识别目标的时间间隔。类型3将导致视线角速度的发散。因此，除了上文分析的扰动时机和扰动幅度，导引头识别时间对视线角速度误差也产生影响。如图3所示，同样扰动幅度和扰动时机下，识别时间越长，导引头视线角速度误差越大。

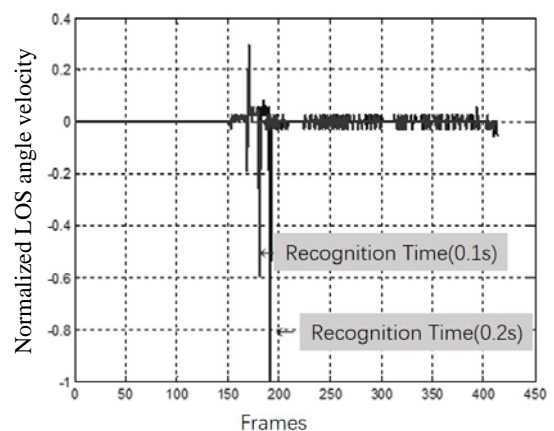


图3 不同识别时间的视线角速度精度归一化曲线

Fig.3 Diagram of accuracy normalization curves of LOS angle velocity at different recognition time

根据导引头跟踪目标的典型过程，假设导弹系统为线性系统，则视线角速度引起的两个跳动所导致的

脱靶量可以相加, 则将公式(4)更改为:

$$\begin{cases} \frac{y(t_1)}{n} = t^{(N-2)} e^{-\frac{t_1}{T}} \left[ \frac{1}{(N-2)!} - \frac{t_1}{6T} \right] \\ \frac{y(t_2)}{n} = t^{(N-2)} e^{-\frac{t_2}{T}} \left[ \frac{1}{(N-2)!} - \frac{t_2}{6T} \right] \\ y(t) = y(t_1) + y(t_2) \\ n = -NV_c \dot{\lambda} \end{cases}$$

由上式可以计算不同剩余飞行时间下脱靶量满足杀伤半径, 单颗干扰下对视线角速度的要求, 如图4所示。

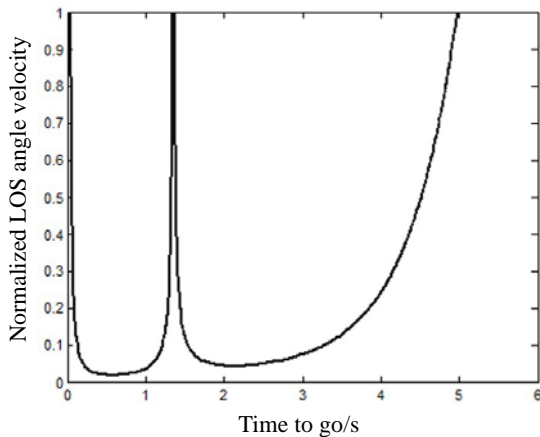


图4 要求视线角速度精度的归一化曲线

Fig.4 Diagram of accuracy normalization curves of required LOS angle velocity

图4以制导时间常数0.5s为例, 在剩余飞行时间大于5倍制导时间常数时, 主要考虑导弹的过载能力和导引头的识别能力, 视线角速度误差的要求较宽泛, 随着剩余飞行时间的缩小, 视线角速度误差的要求迅速提高, 幅度与弹目接近速度等弹道条件相关, 需要进行仿真确定; 剩余飞行时间在时间常数的2倍至3倍区间内, 允许视线角速度误差有一定偏差, 对脱靶量影响不大; 剩余飞行时间在1倍时间常数附近时, 视线角速度误差要求最严格, 此时的跟踪点跳动将导致脱靶量大幅提高; 剩余飞行时间常数小于0.5倍时间常数时, 则飞控系统不响应导引头信号, 视线角速度误差要求较为宽泛。

对于多颗干扰投放, 利用线性系统相加的方式简化计算多个扰动引起的总脱靶量, 在总脱靶量满足杀伤半径的前提下, 对视线角速度误差在整个弹道过程中进行分配。导引头在弹道过程中输出的视线角速度满足误差要求, 则认为导引头正确识别目标。

## 2 多层次评估指标体系及评估过程

红外空空导弹抗干扰评估指标体系包含了能够

反映导弹总体、制导系统及导引头抗干扰能力的指标, 如图5所示, 分别为所有要害部位的联合杀伤概率、满足制导误差要求的抗干扰概率和视线角速度误差要求的识别概率。

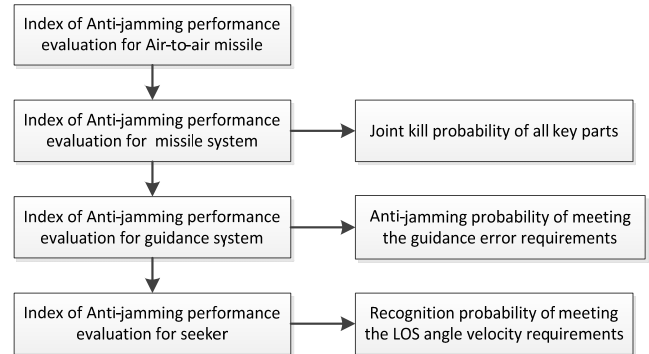


图5 抗干扰评估指标体系

Fig.5 Index system of anti-jamming performance evaluation

导弹总体的抗干扰性能评估指标为所有要害部位的联合杀伤概率, 以红外对抗作战样本空间为输入, 依据目标环境模型、制导系统模型、引信模型及战斗部模型进行联合仿真得到, 同时, 依据各样本条件下制导误差的分布, 给出满足杀伤概率要求的各样本制导误差要求, 为制导系统抗干扰性能评估奠定基础。

制导系统的抗干扰性能评估指标为满足制导误差要求的抗干扰概率, 以红外对抗作战样本空间为输入, 依据目标环境模型、导引头及飞控系统模型进行联合仿真得到, 同时, 依据导弹总体对制导误差的要求及制导时间常数的影响, 给出满足抗干扰概率要求的各样本视线角速度误差要求, 为导引头抗干扰性能评估奠定基础。

导引头的抗干扰性能评估指标为满足视线角速度误差要求的识别概率, 以红外对抗作战样本空间为输入, 依据目标环境模型、导引头及飞控系统模型进行联合仿真得到。

## 3 仿真分析

文献[16]以国外某型导弹为例, 模拟导弹相对飞机以不同的方位角 $\theta$ 和距离 $R$ 发射, 使用仿真评估干扰弹的影响, 图6为对抗态势示意图, 图7为对抗结果, 图中的每一个点表示从该位置处发射的一枚导弹, 干扰的投放策略是固定的, 如果对抗是有效的, 能够欺骗导弹远离飞行器, 脱靶距离很大, 如果导弹飞行过程中离飞行器很近, 飞行器就是易受攻击的, 图中浅色表示脱靶量小, 深色表示脱靶量大。



图6 文献[16]干扰对抗场景

Fig.6 Interference countermeasure situation of ref[16]

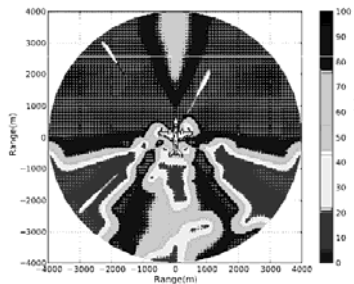


图7 文献[16]干扰对抗结果

Fig.7 Interference countermeasure result of ref[16]

从图7中可以看出,导弹尾后攻击较迎头攻击命中概率高,导弹远距离攻击较近距离攻击命中概率高。

从本文对制导系统的分析可以看出,干扰扰动时的剩余飞行时间对脱靶量的影响较大,由于尾后弹道时间长,同样干扰条件下,其剩余飞行时间较迎头要大,干扰对视线角速度的扰动小于制导系统的要求,制导系统的脱靶量小,导弹的命中概率高。同理,相对于近距离攻击,远距离攻击时,剩余飞行时间长,干扰对视线角速度的扰动小于制导系统的要求,制导系统的脱靶量小,导弹的命中概率高。

#### 4 结论

本文在对抗环境影响机理分析的基础上,提出红外对抗作战样本空间,是抗干扰性能评估的基础。通过干扰对红外成像空空导弹总体、制导系统及导引头本质能力影响机理的分析,阐述了传统抗干扰性能评估指标的不足,并建立了包含导弹总体、制导系统和导引头3个层次的抗干扰性能评估指标体系,分别为所有要害部位的联合杀伤概率、满足制导误差要求的抗干扰概率和满足视线角速度误差要求的识别概率。仿真结果与本文分析结果一致,说明本文提出的指标体系具有一定的合理性。多层次的评估指标体系能够提高对制导系统和导引头的抗干扰性能的评估能力,提升利用导引头、制导系统评估结果对导弹总体抗干扰性能进行预估的能力。

#### 参考文献:

- [1] 王炜强,贾晓洪,杨东升,等.制导武器效能评估试验设计方法综述与应用探讨[J].航空兵器,2015(6):46-48.  
WANG Weiqiang, JIA Xiaohong, YANG Dongsheng, et al. An Overview and Application of DOE for Guided Weapon Performance Evaluation[J]. *Aero Weaponry*, 2015(6): 46-48.
- [2] 张凯,张邵宇,杨东升.红外制导导弹抗干扰能力仿真鉴定评估技术[J].上海航天,2019,36(4):83-89.  
ZHANG Kai, ZHANG Shaoyu, YANG Dongsheng. Simulation Test and Evaluation of Anti-Jamming Capability of Infrared Guided Missile[J]. *Aerospace Shanghai*, 2019, 36(4): 83-89.
- [3] 王泉,董维浩,刘新爱,等.新型红外空空导弹抗干扰能力评估分析[J].航天电子对抗,2019(3):16-19.  
WANG Quan, DONG Weihao, LIU Xin'ai, et al. Analysis of evaluation for new infrared air-to-air missile countermeasures performance[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2019(3): 16-19.
- [4] 唐善军,王枫,陈晓东.红外导弹抗干扰能力指标体系和评估研究[J].上海航天,2017,34(4):144-149.  
TANG Shanjun, WANG Feng, CHEN Xiaodong. Anti-Jamming Performance Index System and Evaluation of Infrared Missile[J]. *Aerospace Shanghai*, 2017, 34(4): 144-149.
- [5] 韩培骏,姜长生,许友平.红外成像导引系统抗干扰性能评估研究[J].电光与控制,2012,19(5):82-86.  
HAN Peijun, JIANG Changsheng, XU Youping. Anti-Jamming Performance Evaluation of Infrared Imaging Guidance Systems[J]. *Electronics Optics & Control*, 2012, 19(5): 82-86.
- [6] 许友平,吴庆宪,姜长生,等.基于支持向量机的红外成像导引头抗干扰性能评估方法[J].电光与控制,2013,20(12):6-9.  
XU Youping, WU Qingxian, JIANG Changsheng, et al. SVM Based Evaluation on Anti-Jamming Performance of Infrared Imaging Seekers[J]. *Electronics Optics & Control*, 2013, 20(12): 6-9.
- [7] 朱逸冰.防空导弹武器系统射击效能分析[J].舰船电子工程,2019,39(7):154-156.  
ZHU Yibing. Analysis of Firing Efficiency of Antiaircraft Missile System[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2019, 39(7): 154-156.
- [8] 李权成,朱传祥,凡永华,等.复杂环境对红外空空导弹制导误差影响规律研究[J].西北工业大学学报,2019,37(3):457-464.  
LI Quancheng, ZHU Chuanxiang, FAN Yonghua, et al. Study on Infrared Air-to-Air Missile Guidance Accuracy Affected by Complicated Environment[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2019, 37(3): 457-464.

(下转第1102页)