

# 红外成像导引头抗干扰性能评价指标体系

闫舟, 杨望东

(空军驻西安地区军事代表室, 西安 710072)

**摘要:** 目前, 各类红外成像制导导弹面临的主要问题是抗干扰能力的强弱, 包括自然环境干扰和人工干扰两种; 因此红外导引头的抗干扰性能成为各类红外制导导弹的关键性能, 极大地影响到导弹的作战性能; 为了能够合理的评价红外成像导引头的抗干扰性能, 就必须制定合理的红外成像导引头抗干扰性能评价指标; 为此, 笔者根据红外成像导引头的抗干扰工作过程及其特点, 以及传统的评价指标, 并借鉴深度学习的评价指标, 提出了由截获能力、识别能力、跟踪能力和命中精度能力这四方面组成的抗干扰性能评价指标体系; 明确了四项指标下的二级指标内涵和计算方法, 根据红外仿真与数据处理结果表明, 这4种评价指标均可以有效地体现出导引头抗干扰性能的强弱, 而且识别能力和命中精度这两个指标更加突出, 故笔者所提出的红外成像导引头抗干扰性能指标体系及其计算方法, 均可成为红外成像制导导弹抗干扰性能评估的判断依据。

**关键词:** 红外导弹; 抗干扰性能; 截获能力; 识别能力; 跟踪能力; 命中精度; 评价指标

## Infrared Imaging Guide Head Anti-interference Performance Evaluation Index System

YAN Zhou, YANG Wangdong

(Air Force Military Representative Office in Xi'an, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** At present, the main problem facing various types of infrared imaging guided missiles is the strength of anti-jamming capabilities, including natural environmental interference and artificial interference. Therefore, the anti-jamming performance of the infrared seeker has become the key performance of various infrared guided missiles, which greatly affects the combat performance of the missile. In order to reasonably evaluate the anti-jamming performance of the infrared imaging seeker, it is necessary to formulate a reasonable evaluation index for the anti-jamming performance of the infrared imaging seeker; for this reason, the author based on the anti-jamming work process and characteristics of the infrared imaging seeker, As well as traditional evaluation indicators, and drawing on the evaluation indicators of deep learning, an anti-jamming performance evaluation index system composed of four aspects: interception ability, recognition ability, tracking ability and hit accuracy ability is proposed; the second level under the four indicators is clarified Index connotation and calculation method. According to the results of infrared simulation and data processing, these four evaluation indexes can effectively reflect the anti-jamming performance of the seeker, and the two indexes of recognition ability and hit accuracy are more prominent. The anti-jamming performance index system and calculation method of the infrared imaging seeker proposed by the author can be used as the basis for evaluating the anti-jamming performance of infrared imaging guided missiles.

**Keywords:** Infrared missile; anti-interference performance; interception capacity; recognition ability; tracking ability; hit accuracy; evaluation index

### 0 引言

红外制导是当代最重要的军事应用之一。由于红外制导导弹具有体积小、重量轻、分辨率高、隐蔽性好等一系列优点<sup>[1]</sup>, 因而得到了迅速的发展。

但随着红外制导技术的渐渐成熟, 红外对抗技术也受到了广泛关注和研究, 并大量投入战场, 导致对红外制导导弹来说良好的无人工干扰对战环境基本不会出现。为了应对这种情况, 红外制导导弹抗干扰问题自20世纪90年代开始成为研究热点<sup>[2-3]</sup>。

目前的各种红外制导导弹, 包括对空导弹、空地导弹、

地对地导弹, 面临的主要问题便是抗干扰, 包括抗自然环境干扰和抗人工干扰, 红外导引头的抗干扰性能成为各类红外制导导弹的关键性能, 极大地影响到导弹的作战性能, 故如何准确评价红外精确制导导弹的抗干扰性能, 事关导弹的定型和作战使用。

为了合理评价红外成像导引头的抗干扰性能, 首先需要制定合理的红外成像导引头抗干扰性能评价指标。当前, 我国对红外制导导弹抗干扰性能的评价指标较为单一化<sup>[4-5]</sup>, 多是经过如层次分析法<sup>[6-7]</sup>, 模糊评估法等评估方法得到综合抗干扰概率指标<sup>[8]</sup>, 并根据该指标对导弹抗干扰

收稿日期: 2021-06-19; 修回日期: 2021-08-19。

作者简介: 闫舟 (1982-), 男, 陕西西安人, 工程师, 主要从事质量管理以及无线电导航、卫星导航领域方向的研究。

引用格式: 闫舟, 杨望东. 红外成像导引头抗干扰性能评价指标体系[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(9): 268-273, 278.

能力强弱进行判定。但导弹的抗干扰能力应是一个体系, 由各方面抗干扰能力综合而成, 综合抗干扰成功概率指标对评价各分系统的抗干扰能力缺乏直接指导意义, 一旦整弹的抗干扰指标不能满足要求, 很难确定具体设计的不足, 不利于提升导弹抗干扰能力。

本文对红外导弹抗干扰能力设计提出了一个描述红外制导弹抗干扰能力的指标体系, 根据红外成像导引头的抗干扰工作过程及其特点, 考虑到传统的评价指标, 并借鉴深度学习的评价指标, 提出了由截获能力、识别能力、跟踪能力和命中精度四方面能力组成的抗干扰性能评价指标体系, 明确了四项指标下的二级指标的内涵和计算方法。并分析了复杂干扰对抗干扰性能指标计算带来的影响。所提出的红外成像导引头抗干扰性能指标体系及其计算方法, 可以为各类红外成像制导弹抗干扰性能评估提供支撑。

### 1 抗干扰性能指标体系

红外制导弹抗干扰的最终目标是有效命中并毁伤目标。毁伤是在一定的命中精度基础上, 由战斗部特性和目标易损性特性决定的。本文只考虑命中精度问题, 不考虑毁伤特性, 命中精度与导引头、控制系统以及整弹密切相关。确保命中精度的前提是导引头能够正确截获目标、识别目标并跟踪目标<sup>[9]</sup>。可事实上, 红外制导弹并不能很轻易的命中毁伤目标, 各国的作战飞机会使用红外诱饵弹等方式规避红外制导弹的打击<sup>[10]</sup>。红外干扰弹被投射到空中后, 迅速燃烧放出大量的热量, 产生强烈的红外辐射, 在红外制导弹视场中形成多个红外辐射源, 若目标及诱饵图像在特征上极为相似, 导弹会难以分辨出真假目标, 最终导致识别时间过长甚至丢失目标。诱饵还可能会对目标图像造成部分遮挡或者完全遮挡, 出现目标干扰粘连状态或者看不见目标的状态, 使目标特征信息被破坏, 导致导引头无法识别目标<sup>[11-12]</sup>。目标飞机与红外干扰的导引头图像如图 1 所示 (图中的 \* 点表示红外诱饵弹投射时刻)。

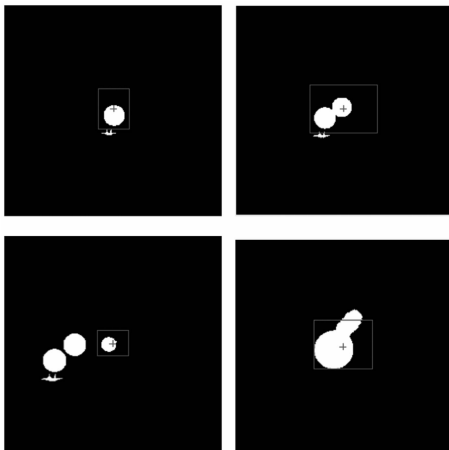


图 1 目标飞机与红外干扰的红外导引头图像

因此, 针对红外成像制导弹面临的抗干扰问题, 提出了红外导引头抗干扰性能评价指标, 对全面考核和评估

红外导引头的抗干扰性能具有重要理论指导和工程应用价值。

红外导引头抗干扰性能评价指标的具体分类如图 2 所示。

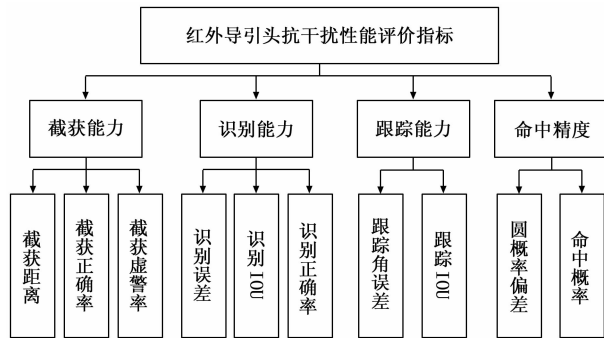


图 2 红外导引头抗干扰性能评价指标

本文提出从检测能力、识别能力、跟踪能力、命中精度四方面构建抗干扰性能指标体系。

红外导引头抗干扰性能指标中的截获能力指标可以分为截获距离、截获正确率和截获虚警率。识别能力指标可以分为识别误差、识别 IOU 和识别正确率, 跟踪能力指标可以分为跟踪角误差和跟踪 IOU, 命中精度指标可以分为圆概率偏差和命中概率。

### 2 抗干扰性能指标内涵

#### 2.1 目标检测能力评价指标内涵

末制导阶段, 导引头需要锁定目标, 这主要依靠导引头的目标检测能力。在实际作战时, 对于目标截获而言, 希望能够远距离正确截获目标, 避免截获到虚假目标。因此使用截获距离、截获正确率、截获虚警率作为目标截获指标。

##### 2.1.1 目标截获距离

目标截获距离是指导引头稳定截获目标时的最远距离。目标截获距离与目标特性、背景特性、路径吸收特性等诸多因素有关。

目标截获主要是根据目标与背景的差异进行的。导引头观察到的目标与背景的差异还会受到探测路径透过率的影响。在实际战场上, 不同的目标、不同的背景、不同的时段, 不同的大气特性等因素, 都会影响到导引头观察到的目标与背景差异特性, 这会导致不同条件下的截获距离不同。

为了便于衡量截获距离, 建议在具体评价截获距离指标时, 明确目标、背景和探测路径的相关特性, 可以表述为针对特定目标、特定背景、特定路径特性的截获距离。

##### 2.1.2 目标截获正确率

目标截获正确率表征了导引头对各类目标正确截获的能力。目标截获正确率是指在满足截获距离要求的情况下, 正确截获到目标的比例。假设在  $M$  次截获中, 正确截获到目标的次数为  $m$ 。则目标截获正确率为:

$$P_i = \frac{m}{M} \quad (1)$$

目标截获正确率指标评价难度较大, 需要通过大量的挂飞试验, 针对不同类型的目标进行大量截获试验, 才能获得相关数据, 以便计算该指标。当然也可以利用仿真数据计算目标截获正确率, 但是这对仿真系统的可信度要求很高。

### 2.1.3 目标截获虚警率

目标截获虚警是指导引头错误将非目标识别为目标。目标截获虚警率是指在满足截获距离要求的情况下, 错误将非目标识别为目标的次数为  $k$ 。则目标截获虚警率为:

$$F_i = \frac{k}{M} \quad (2)$$

目标截获虚警率指标的评价与正确率类似, 在评价截获正确率的试验中, 记录相关错误识别的情况, 就可以评价虚警率。

## 2.2 目标识别能力评价指标内涵

目标识别能力是表征导引头正确截获目标以后, 在干扰环境下正确稳定识别目标的能力。目标识别是针对一个对抗序列中的每一帧图像的。目标识别能力可以用目标识别误差、目标识别 IOU、目标识别正确率表征。

### 2.2.1 目标识别误差

单帧图像的目标识别误差是指识别出的目标中心位置  $(x', y')$  与实际目标中心位置  $(x^r, y^r)$  的距离。对于一个对抗序列而言, 其中第  $i$  帧图像的识别误差可以表示为  $d_{ii}$ :

$$d_{ii} = \sqrt{(x'_i - x^r_i)^2 + (y'_i - y^r_i)^2} \quad (3)$$

对于一次对抗序列而言, 一般情况下, 随着导弹与目标的距离不断接近, 识别误差会逐渐增大。因此针对一次对抗, 采用平均误差的评价不够合理, 不建议使用, 只需要给出不同时间或者弹目距离对应的识别误差曲线即可。

### 2.2.2 目标识别 IOU (交并比)

考虑到识别误差的局限性, 建议采用深度学习的评价指标 IOU (交并比) 作为目标识别的评价指标。

单帧图像识别 IOU (交并比) 是指识别出来的目标框  $A_r$  与实际的目标框  $A_0$  的交集与其并集的比值。IOU 的取值范围是 0—1, 越接近于 1 则识别能力越强<sup>[13]</sup>。

IOU 可以用数学公式表达为:

$$IOU_r = \frac{A_r \cap A_0}{A_r \cup A_0} \quad (4)$$

对于一次对抗序列而言, 识别 IOU 同样需要面临远距到近距的大尺度变化, 在中近距目标尺度较大时, IOU 可以很好反映识别能力, 但是在远距离时, 目标实际区域较小, 有时只有几个像素, 此时的 IOU 值可能很小, 因此建议在远距离时, 适度放大目标框大小, 或者设定最小的目标框尺寸, 例如最小尺寸为 16 个像素。

对于一次对抗序列而言, 可以用平均 IOU 作为评价识别能力的指标, 平均 IOU 定义为:

$$IOU_{ave} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N IOU_i \quad (5)$$

### 2.2.3 目标识别正确率

一次对抗过程中, 针对每一帧图像可能出现三种情况, 一是正确识别, 二是错误识别, 三是无法识别。因此提出正确识别率、错误识别率以及无法识别率 3 个相关指标。

目标识别正确率是指在一次对抗正确识别的帧数与总帧数的比值。

假设一次对抗总帧数为  $N$ , 识别正确帧数为  $k$ , 识别错误帧数为  $s$ , 无法识别帧数为  $N - k - s$ , 则正确识别率  $R_w$ 、错误识别率  $R_e$ 、无法识别率  $R_u$  可以表示为:

$$R_w = \frac{k}{N} \quad R_e = \frac{s}{N} \quad R_u = \frac{N - k - s}{N} \quad (6)$$

如何判断某一帧是否正确识别, 本文建议方法为如果识别目标中心落在真实目标框内则为正确识别。无法识别的信息一般由识别算法直接输出。

对于一次对抗序列而言, 正确识别率越接近 1, 识别效果越好。

对于正确识别率相同, 但是未能正确识别帧数分布形式不同, 其识别效果也不同。因此提出连续未正确识别帧数统计直方图的评价指标。

具体而言对于一次对抗序列, 假设其总帧数为  $N$ , 只有独立一帧为正确识别的总次数为  $m_1$ , 连续两帧未正确识别的总次数为  $m_2$ , 依次连续  $t$  帧未正确识别的总次数为  $m_t$ 。利用这些数据可以绘制相应的统计直方图。如图 3 所示, 给出一个未正确识别帧数直方图示意图。

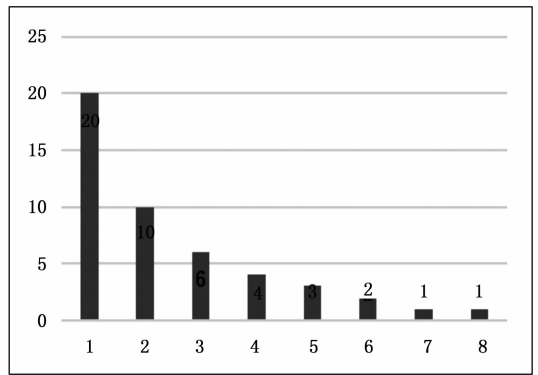


图 3 未正确识别帧数直方图示意图

## 2.3 目标跟踪评价指标

### 2.3.1 跟踪角度误差

跟踪角度误差需要根据跟踪像素误差以及系统焦距进行计算。

单帧图像的目标跟踪像素误差是指跟踪的目标中心位置  $(x', y')$  与实际目标中心位置  $(x^r, y^r)$  的距离。对于一个对抗序列而言, 其中第  $i$  帧图像的跟踪像素误差可以表示为  $d_{ii}$ :

$$d_{ii} = \sqrt{(x'_i - x^r_i)^2 + (y'_i - y^r_i)^2} \quad (7)$$

设导引头光学系统焦距为  $f$ , 探测系统像元尺寸为  $a$ ,

则第  $i$  帧的跟踪角度误差为:

$$\theta_{ii} = \arctan\left(\frac{d_{ii} \cdot a}{f}\right) \quad (8)$$

对于一次对抗序列而言, 一般情况下, 随着导弹与目标的距离不断接近, 跟踪角度误差会逐渐增大。因此针对一次对抗, 只需要给出不同弹目距离对应的根据角度误差曲线即可。

### 2.3.2 目标跟踪 IOU

考虑到跟踪角度误差的局限性, 建议采用深度学习的评价指标 IOU (交并比) 作为目标跟踪的评价指标。

单帧图像跟踪 IOU (交并比) 是指跟踪的目标框  $A_i$  与实际的目标框  $A_0$  的交集与其并集的比值。IOU 的取值范围是 0~1, 越接近于 1 则识别能力越强。

IOU 可以用数学公式表达为:

$$IOU_i = \frac{A_i \cap A_0}{A_i \cup A_0} \quad (9)$$

对于一次对抗序列而言, 建议采用类似方式处理尺度变化问题, 就是在远距离时, 适度放大跟踪目标框大小, 或者设定最小的目标框尺寸, 建议其最小尺寸应大于跟踪 IOU 对应的最小尺寸, 主要是因为远距离时, 即使跟踪中心与实际目标有一定距离, 系统仍然有较强的鲁棒性。

对于一次对抗序列而言, 可以用平均跟踪 IOU 作为评价跟踪能力的指标, 平均 IOU 定义为:

$$IOU_{ave} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N IOU_i \quad (10)$$

## 2.4 目标命中精度评价指标

从实际作战的角度出发, 关于导弹命中精度主要关心的指标是导弹落点散布与目标位置的关系, 目前常用的评价指标有两种, 一是圆概率偏差 (CEP)<sup>[14-15]</sup> 或球概率偏差 (SEP)<sup>[16]</sup>, 二是命中概率。对于对空导弹, 一般使用命中概率, 对于空地 and 地地导弹而言一般采用圆概率偏差 (CEP) 或球概率偏差 (SEP)。

### 2.4.1 圆概率偏差 (CEP)

圆概率偏差 (CEP): 把瞄准点作为平均弹着点, 以瞄准点为中心, 包含 50% 弹着点的圆的增径就叫做这种导弹的圆概率偏差。可以用来衡量命中精度, 是落点系统误差和散布误差的总和。

假设导弹落点在  $(x, z)$  平面的两个方向, 服从正态分布, 则其联合概率密度函数如下:

$$f(x, z) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_z\sqrt{1-\rho^2}} \exp\left\{-\frac{\left[\frac{(x-\mu_x)^2}{\sigma_x} - \frac{2\rho(x-\mu_x)(x-\mu_z)}{\sigma_x\sigma_z} + \frac{(x-\mu_z)^2}{\sigma_x}\right]}{2(1-\rho^2)}\right\} \quad (11)$$

其中:  $\sigma_x, \sigma_z$  为  $x, z$  两个方向的标准差,  $\mu_x, \mu_z$  为  $x, z$  两个方向的均值,  $\rho$  为  $x, z$  两个方向落点的相关系数, 有  $0 \leq \rho \leq 1$ 。满足以下条件的  $R$  即为 CEP。

$$\frac{\iint_{x^2+y^2 \leq R^2} \exp\left\{-\frac{\left[\frac{(x-\mu_x)^2}{\sigma_x} - \frac{2\rho(x-\mu_x)(x-\mu_z)}{\sigma_x\sigma_z} + \frac{(x-\mu_z)^2}{\sigma_x}\right]}{2(1-\rho^2)}\right\}}{2\pi\sigma_x\sigma_z\sqrt{1-\rho^2}} = 0.5 \quad (12)$$

实际测试导弹 CEP 时, 我们都是需要通过内外场测试结果计算导弹的 CEP。设有样本量为  $n$  的精度评定样本  $(x_i, z_i)$ , 样本均值和样本标准差为:

$$\hat{\mu}_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \hat{\mu}_z = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i \quad (13)$$

$$\hat{\sigma}_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{\mu}_x)^2}$$

$$\hat{\sigma}_z = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (z_i - \hat{\mu}_z)^2} \quad (14)$$

样本相关系数为:

$$\hat{\rho} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{\mu}_x)(z_i - \hat{\mu}_z)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{\mu}_x)^2 \sum_{i=1}^n (z_i - \hat{\mu}_z)^2}} \quad (15)$$

在进行计算时, 若其中  $\mu_x, \mu_z, \sigma_x, \sigma_z$  未知, 则用  $\hat{\mu}_x, \hat{\mu}_z, \hat{\sigma}_x, \hat{\sigma}_z$  代替。

对于早期导弹而言, 其误差主要是由于导弹质量、传感器误差、惯导误差、外部随机扰动等随机因素扰动导致。这种分布假设是合理的、也是经过实践验证的。但是对于各种抗干扰情况, 导弹落点往往不在服从正态分布。因此直接使用上述方法计算圆概率偏差可能存在问题, 需要重新研究导弹落点的分布形式, 根据新的分布形式计算其 CEP<sup>[17-18]</sup>。

### 2.4.2 球概率偏差<sup>[19-20]</sup> (SEP)

球概率偏差 (SEP): 在导弹武器精度分析中, 对于三维精度问题, 需要采用球概率误差。球概率误差与圆概率偏差类似, 以目标点为中心, 包含 50% 弹着点的球域半径就叫做这种导弹的球概率偏差。

设导弹落点的坐标  $(x, y, z)$  为各自独立的随机变量, 服从正态分布, 则其联合概率密度函数为:

$$f(x, y, z) = \frac{\exp\left\{-\frac{1}{2} \left[ \frac{(x-\mu_1)^2}{\sigma_1^2} + \frac{(y-\mu_2)^2}{\sigma_2^2} + \frac{(z-\mu_3)^2}{\sigma_3^2} \right]\right\}}{(\sqrt{2\pi})^3 \sigma_1 \sigma_2 \sigma_3} \quad (16)$$

式中,  $\mu_1, \mu_2, \mu_3$  分别为  $x, y, z$  的均值, 是导弹的系统误差;  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  分别为  $x, y, z$  的标准差, 是导弹精度的随机误差。

以目标点为中心, 以  $R$  为半径作一球体, 导弹落入该球体内的概率为 50%,  $R$  可以根据如下公式计算获得:

$$\iiint_{x^2+y^2+z^2 \leq R^2} \exp\left\{-\frac{\left[\frac{(x-\mu_1)^2}{\sigma_1^2} + \frac{(y-\mu_2)^2}{\sigma_2^2} + \frac{(z-\mu_3)^2}{\sigma_3^2}\right]}{2}\right\} dx dy dz = 0.5 \quad (17)$$

为了方便表示 SEP 与其他精度指标间的关系,引入球坐标。令  $x = r\sin\theta\cos\varphi, z = r\cos\theta, y = r\sin\theta\sin\varphi$ , 其中  $0 \leq \theta \leq \pi, 0 \leq \varphi \leq 2\pi$ , 则式 (17) 可以转化为:

$$c \iiint r^2 \sin\theta \exp\left[-\frac{(ar^2 - 2br)}{2}\right] d\varphi d\theta dr = 0.5 \quad (18)$$

式中,  $a = \frac{1}{\sigma^3} + \sin^2\theta \left[ \sin^2\varphi \left( \frac{1}{\sigma_2^2} - \frac{1}{\sigma_1^2} \right) + \left( \frac{1}{\sigma_1^2} - \frac{1}{\sigma_3^2} \right) \right]$

$$b = \frac{\mu_1}{\sigma_1} \sin\theta\cos\varphi + \frac{\mu_2}{\sigma_2} \sin\theta\sin\varphi + \frac{\mu_3}{\sigma_3} \cos\theta$$

$$c = \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^3 \sigma_1 \sigma_2 \sigma_3} \exp\left\{-\frac{1}{2} \left[ \frac{(\mu_1)^2}{\sigma_1^2} + \frac{(\mu_2)^2}{\sigma_2^2} + \frac{(\mu_3)^2}{\sigma_3^2} \right]\right\}$$

实际测试导弹 SEP 时, 我们还是需要通过内外场测试结果计算导弹的 SEP。此时需要将分布均值与标准差替换为样本均值和样本标准差。

与圆概率偏差 CEP 类似, 计算球概率偏差 SEP 时同样需要考虑抗干扰引起的分布形式变化, 需要根据新的概率分布形式计算 SEP。

### 2.4.3 命中概率

命中概率与圆概率偏差类似, 是针对多次对抗的统计结果。命中概率就是指导弹命中次数占总攻击次数的比值。

一般认为导弹命中概率服从二项分布。如果随机变量  $X$  服从参数为  $n$  和  $p$  的二项分布, 记为  $X \sim B(n, p)$ 。  $n$  次试验中正好得到  $k$  次成功的概率由概率分布函数给出:

$$P\{X = k\} = C_n^k p^k (1 - p)^{n-k} \quad (19)$$

式中,  $k=0, 1, 2, \dots, n$ 。其中  $C_n^k$  为:

$$C_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!} \quad (20)$$

在复杂干扰对抗环境下, 导弹命中概率往往不再服从二项分布, 具体分布于所选择的试验条件密切相关。这种分布形成上的差异会影响到的评估结论的置信区间和置信度。

## 3 实验测试与结果分析

### 3.1 仿真测试

本文以命中精度实验为例, 在仿真开始前, 首先需要确定仿真初始条件, 包括目标、导弹的初始位置及运动条件, 目标的飞行路径、干扰弹投放策略和机动模式等。

表 1 实验测试条件

因素名称	单弹道据
目标高度	1 km, 3 km, 6 km, 9 km, 12 km, 15 km
目标、载机速度	0.8 Ma
载机高度	1~15 km
水平进入角	(0 度, 10 度, 45 度, 85 度, 135 度, 165 度, 180 度)
发射距离	2~12 km
目标机动	无机动、左转、右转、跃升、滚转
组投放间隔	0.5 秒
投射组数	2 组、4 组、8 组

通过红外仿真平台, 建立红外制导的弹道轨迹仿真模

型, 根据击中比率和偏差误差研究干扰弹投放的干扰机理可靠性, 即干扰评价体系的性能。

如图 4 所示为导弹发射 1 到 4 秒内的导引头红外视场, 红外图像仿真平台的信息输入为初始的弹道数据, 输出为导弹与目标的运动轨迹和击中目标的时刻。

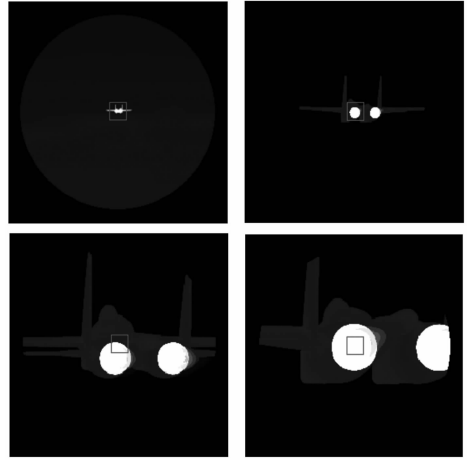


图 4 导弹从发射到击中目标的红外视场图

从红外图像可以看出, 在没有释放诱饵弹之前, 导引头的红外视场只识别了飞机尾焰的红外辐射特征; 当诱饵弹释放之后形成成对的白色圆形状, 组间隔为 0.5 秒, 释放诱饵弹的同时, 目标会作出相应的左转, 右转、横滚、跃升等机动方式, 红外仿真图如图 5 所示。

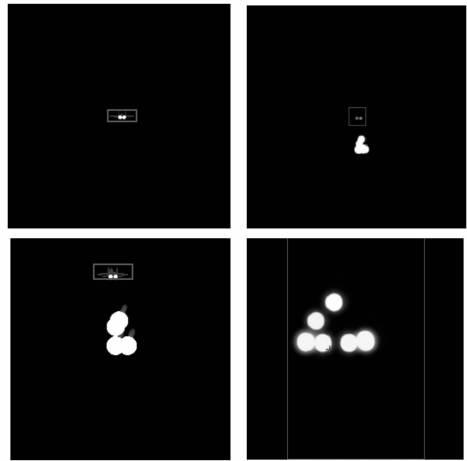


图 5 抗干扰跟踪失败

从图 5 诱饵弹干扰下的红外视场图, 可以较为清楚地发现, 诱饵弹干扰下的红外市视场图中干扰弹的红外特征与目标的红外特征较为相似, 所以目标检测框较大, 对识别精度造成了干扰。

由仿真的导引头红外场景图可以发现, 导弹的截获能力、识别能力、跟踪能力和命中精度这 4 个方面对于红外成像导引系统的抗干扰性能均可作为有效的抗干扰评价指标。

### 3.2 数据结果分析

根据上述红外仿真实验, 本文对四种抗干扰指标的仿

真数据进行处理分析, 可得到如图 6~9 所示的方差与均值的比较结果。

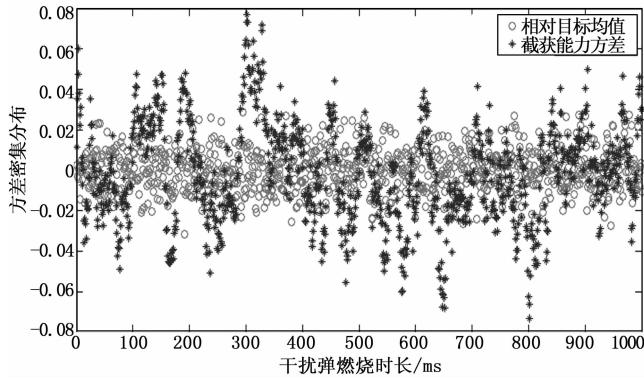


图 6 截获能力抗干扰指标的强弱

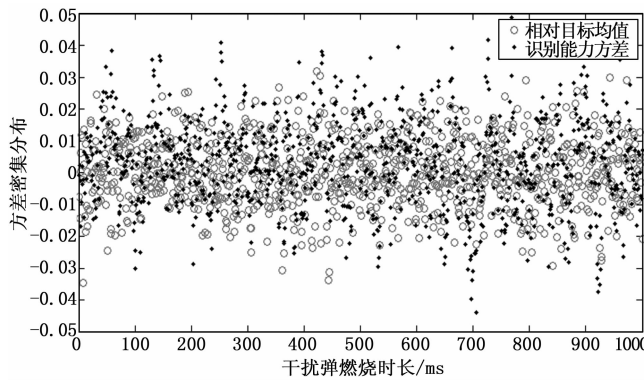


图 7 识别能力抗干扰指标的强弱

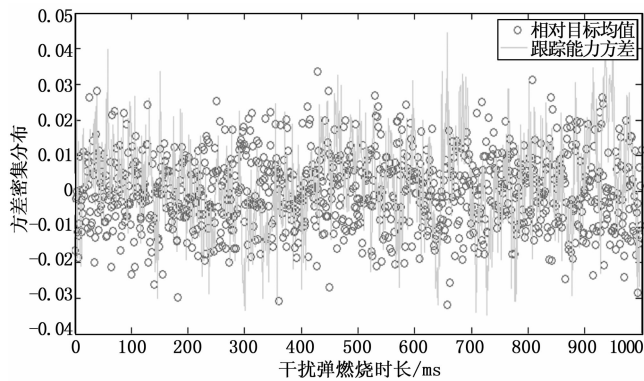


图 8 跟踪能力抗干扰指标的强弱

以上 4 幅图像是分别对应截获能力、识别能力、跟踪能力和命中精度 4 个抗干扰指标所作出的导弹在飞行 1 秒内各指标方差与目标均值的比较, 从图 7 和图 9 可以看出识别能力和命中精度这两个抗干扰指标的体现性能较强, 可成为红外成像制导导弹抗干扰性能评估的有力判断依据。

#### 4 结束语

为了合理评价红外成像导引头的抗干扰性能, 本文根据红外成像导引头的抗干扰工作过程及其特点, 考虑到传

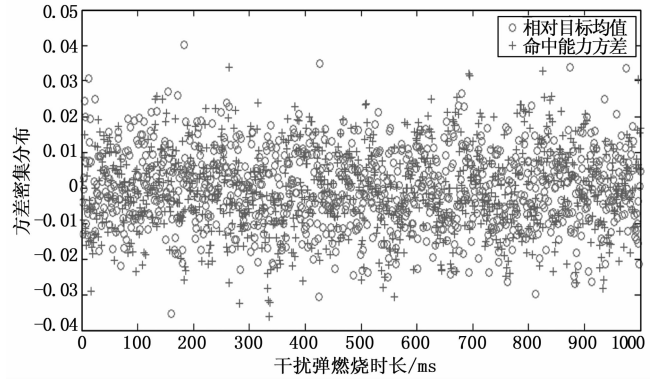


图 9 命中精度抗干扰指标的强弱

统的评价指标, 并借鉴深度学习的评价指标, 提出了由截获能力、识别能力、跟踪能力和命中精度四方面能力组成的抗干扰性能评价指标体系, 明确了四项指标下的二级指标的内涵和计算方法, 并进一步分析在复杂环境下指标的计算方法。所提出的红外成像导引头抗干扰性能指标体系及其计算方法, 4 种指标均可作为各类红外成像制导导弹抗干扰性能评估提供支撑。而且识别能力和命中精度的抗干扰指标的性能更加突出。

#### 参考文献:

- [1] 刘 珂, 李丽娟. 空空导弹与红外导引系统发展评述 [J]. 激光与红外, 2016, 46 (1): 5-10.
- [2] 孙 伟, 林 木. 典型干扰样式下反舰导弹捕捉概率评估方法研究 [J]. 上海航天, 2016, 33 (5): 114-118.
- [3] 李 奇, 李 凡, 唐善军, 等. 红外导引头抗干扰性能仿真试验与评估技术研究 [J]. 空天防御, 2020, 3 (4): 127-133.
- [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.
- [5] 牛得清, 伍友利, 徐 洋, 等. 点源红外诱饵干扰下环境复杂度量化建模 [J]. 红外与激光工程, 2020, 49 (2): 211-219.
- [6] 庞艳静. 基于层次分析法的某红外导弹的抗干扰性能评估 [J]. 红外技术, 2014, 36 (3): 234-237.
- [7] 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, 35 (3): 16-19.
- [8] 李 凡, 耿 旭, 董效杰. 多层次模糊算法在光电抗干扰性能综合评估中的应用 [J]. 系统仿真学报 2015, 27 (9): 2176-2180.
- [9] 宁立跃, 胡仕友. 导弹导引头智能感知抗干扰性能评估方法研究 [J]. 战术导弹技术, 2020 (4): 119-124.
- [10] 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, 35 (3): 16-19.
- [11] 张喜涛, 白晓东, 闫 琳, 等. 红外空空导弹抗干扰性能评估指标体系研究 [J]. 红外技术, 2020, 42 (11): 1089-1094.
- [12] 方 丹, 周永恒, 崔少辉, 等. 红外成像导引头抗干扰性能评估方法 [J]. 火力与指挥控制, 2020, 45 (6): 141-144.

(下转第 278 页)