

## 点源红外诱饵干扰下环境复杂度量化建模

牛得清, 伍友利, 徐 洋, 许 瑞

(空军工程大学 航空工程学院, 陕西 西安 710038)

**摘要:** 为了测定红外空空导弹自身抗干扰性能, 需要对红外对抗环境进行定量评估。但是目前多数模型都是从终端脱靶量分析导弹抗干扰性能, 无法反映导弹在被干扰过程中各模块的响应情况。为此, 基于干扰过程中导弹导引头系统和制导控制系统角度提出了红外对抗环境量化建模方法。首先从场景构成和物理特性方面构建了红外对抗要素模型; 其次, 分析了对抗要素对导引头图像识别及制导控制系统的干扰影响, 抽象出相似度、遮蔽度、干扰时机、目标机动以及进入角影响度指标; 最后, 运用并联关系模型、几何均值合成模型及加权求和模型综合上述指标, 建立了总体环境复杂度量化模型。仿真结果表明: 典型对抗场景下, 该模型预测导弹命中率的误差在 $\pm 6\%$ 区间的概率为 95%。

**关键词:** 红外对抗; 对抗要素; 图像识别; 复杂度量化

**中图分类号:** TN216   **文献标志码:** A   **DOI:** 10.3788/IRLA202049.0204003

## Quantification modeling for environmental complexity under point source infrared decoy interference

Niu Deqing, Wu Youli, Xu Yang, Xu Rui

(School of Aeronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

**Abstract:** In order to identify anti-jamming performance of the infrared missile, the infrared countermeasure environment need to be quantitatively evaluated. However, most of the current models analyzed the missile's anti-jamming performance from the terminal miss distance, couldn't reflect the response of each module of the missile in the process of being interfered. Therefore, based on the missile seeker system and the guidance control system in the process of jamming, a quantitative modeling method of infrared countermeasure environment was proposed. Firstly, the infrared countermeasure elements model was constructed from the scene composition and physical characteristics. Secondly, based on the influence of the countermeasure elements on the image recognition and the guidance control system, the indicators of similarity, masking degree, jamming time, target maneuver and entry angle were proposed. Finally, by using parallel relation model, geometric mean synthesis model and weighted sum model, the total environmental complexity quantification model was established based on the above indicators. Simulation experiments show that the probability of the missile hit ratio error within  $\pm 6\%$  predicted by this model is 95% in typical countermeasure scenarios.

**Key words:** infrared countermeasure; confrontation elements; image recognition; complexity quantization

收稿日期: 2019-10-10; 修订日期: 2019-11-23

作者简介: 牛得清(1995-), 男, 硕士生, 主要从事红外对抗方面的研究。Email: wadebae@163.com

导师简介: 伍友利(1979-), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事导弹制导与控制方面的研究。Email: wuyouli@126.com

## 0 引言

当今空战环境日趋复杂,对抗手段越发先进,红外空空导弹命中目标难度大大提高<sup>[1-4]</sup>。为了解导弹抗干扰性能的不足之处,提高导弹性能,在定型过程中测试导弹的实际抗干扰能力就成了首要任务。其中合理设定试验过程中对抗环境复杂度则是一种高效的技术手段。因此,探究对抗环境复杂度、检验和评估诱饵的干扰效果就成了不可或缺的工作。

目前,针对诱饵干扰效能评估的方法有<sup>[5]</sup>:(1) 基于诱饵干扰成功概率的评估方法;(2) 基于导弹命中概率的评估方法;(3) 基于导弹杀伤概率的评估方法。

参考文献[6]从干扰成功率角度探究导弹战术参数对诱饵干扰效能的影响;参考文献[7]基于导弹命中率通过贝叶斯网络评估导弹抗干扰能力,给出抗干扰概率置信区间;参考文献[8]则依据导弹杀伤概率评估导弹的抗干扰能力。然而,上述方法均从终端结果量评估诱饵干扰效果,无法反应对抗过程中干扰效能的变化情况及导弹各模块对干扰的响应,导致无法指导研究人员对导弹总体性能进行改进,不利于从设计层面提高导弹抗干扰能力。

文中兼顾导引头及制导控制系统,构建了目标相似度、目标遮蔽度、投掷时机影响度、目标机动影响度及进入态势影响度,通过分析彼此影响机理,综合并联关系指标、几何均值合成指标及加权求和指标,建立了量化红外对抗环境复杂度数学模型,最后通过仿真验证了其有效性。

## 1 红外对抗原理

对于第四代红外空空导弹来说,成像导引头可依据目标与诱饵之间轮廓、亮度、运动以及光谱等特征,对目标进行有效识别,体现出很强的抗红外诱饵干扰能力。但当目标的红外图像被诱饵完全遮挡或两者图像在特征上极为相似时,导引头则因无法识别目标而跟踪能量中心,而这一过程越长,干扰场景则越复杂,诱饵干扰作用越明显。同时,除了在识别方面会体现出干扰场景的复杂度,对于制导控制系统的有效干扰同样会增加诱饵的干扰效能<sup>[9-10]</sup>。

为此,下文通过构建红外对抗环境要素,分别从

上述两个角度选取影响指标,对红外诱饵干扰环境下的复杂度进行量化评估,并分析所提影响因子对导弹各部分抗干扰性能的影响。

## 2 红外对抗环境要素构建

### 2.1 场景要素

在弹目的红外对抗过程中,主要要素包含目标、诱饵、导弹、环境以及弹目相对态势。为此,下文基于上述五点,构建了如图 1 所示的场景要素模型。

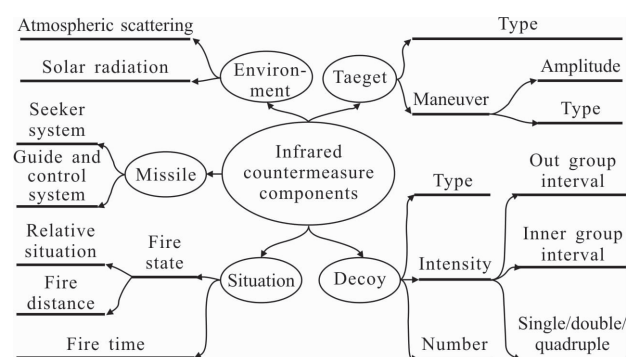


图 1 红外对抗场景构成要素

Fig.1 Infrared countermeasure components

图 1 中包含要素全面,但是其中某些并非文中研究重点,因此,下文量化红外对抗环境复杂度将从目标机动、诱饵投掷策略、弹目相对态势以及导弹导引识别、制导控制系统进行分析。

### 2.2 物理特性要素

成像导引头通过识别红外图像中物理特征(如形状特征、纹理特征、运动特征)来区分真实目标<sup>[11]</sup>。若目标及诱饵的物理特征都较为相似,则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。同时识别时间越长,意味着导弹后续调整姿态时间越短,打击难度也就越大,制导精度越差。因此,红外对抗环境的物理特性对导引头识别跟踪目标有很大的影响。考虑到导引头性能的限制,文中采用的标准弹模型的识别算法依据表 1 所述特征。

表 1 中  $m \times n$  为导引头图像像素; $E_{i,j}$  为像素点能量; $s$  为目标图像区域像素点个数; $l, w$  分别为目标图像区域外接矩形的长和宽。

表 1 图像特征定义

Tab.1 Definition of the image feature

Feature	Meaning	Definition
$c_1$	Energy	$c_1 = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n E_{i,j}$
$c_2$	Average gray	$c_2 = c_1 / s$
$c_3$	Length-width ratio	$c_3 = l/w$
$c_4$	Compactness	$c_4 = s/lw$

### 3 红外对抗环境复杂度量化模型构建

考虑到量化模型复杂度及可解性,下文在时间、空间以及辐射强度 3 个维度从导引头及制导控制系统角度抽象出 5 个主要指标,构建了红外对抗场景复杂度量化模型。

#### 3.1 指标筛选与建立

红外图像识别的难度主要源自于环境与目标的相似或遮蔽了目标。当诱饵与目标相似度过高或目标被遮蔽程度过高时,导引头无法识别目标,只能先跟踪能量中心,待诱饵与目标相似度或目标被遮蔽程度(遮蔽度)降低后,才能再次识别跟踪目标<sup>[12]</sup>。而制导控制系统则通过接收导引头指令控制导弹跟踪目标,其不仅受进入态势和目标机动影响,还与诱饵投掷时机关联密切。因此,结合红外目标识别原理以及对抗机理,文中将相似度、遮蔽度、干扰时机、目标机动、进入态势作为对抗环境复杂度指标。

##### 3.1.1 相似度

因导引头对目标的识别效率主要受目标与干扰的相似度影响<sup>[13-15]</sup>,为此文中从特征、干扰、瞬时视场以及对抗环境,自底向上进行计算,在综合考虑了干扰特征的相似性、干扰个数以及干扰时间影响的基础上,评估整个干扰过程中干扰与目标的相似度变化。其过程如下:

步骤 1:定义单个特征相似度

$$F_{\text{char}}(\text{tar}_j, c_i, t_k) = 1 - \frac{|F_i(\text{tar}_j, c_i, t_k) - F_m(c_i, t_k)|}{F_i(\text{tar}_j, c_i, t_k) + F_m(c_i, t_k)} \quad (1)$$

式中: $F_i(\text{tar}_j, c_i, t_k)$ 为第  $\text{tar}_j$  个干扰在  $t_k$  时刻的  $c_i$  特征值; $F_m(c_i, t_k)$ 为正确目标在最近一次被正确识别时的  $c_i$  特征值。该值反映了第  $\text{tar}_j$  个干扰与目标在  $t_k$  时刻的  $c_i$  特征的相似程度。

步骤 2:定义单个干扰相似度

$$F_{\text{tar}}(\text{tar}_j, t_k) = \sum_i \lambda(i) * F_{\text{char}}(\text{tar}_j, c_i, t_k) \quad (2)$$

式中: $\lambda(i)$ 为第  $\text{tar}_j$  个干扰的  $c_i$  特征的相似度权重大小。该式反映了在  $t_k$  时刻第  $\text{tar}_j$  个干扰与目标的相似程度,通过对第  $\text{tar}_j$  个干扰的 4 个特征相似度加权求和计算得到。

步骤 3:定义导引头瞬时视场内干扰与目标的总相似度

$$F_{\text{sce}}(t_k) = \sum_{j=1}^n F_{\text{tar}}(\text{tar}_j, t_k) \quad (3)$$

该值反映  $t_k$  时刻导引头视场中所有干扰与目标的相似程度,是该时刻导引头视场中所有( $n$  个)干扰的单个干扰相似度的综合。

步骤 4:定义对抗环境相似度

$$F_s = \sum_t (F_{\text{sce}}(t_k) / n_k) / t \quad (4)$$

式中: $n_k$ 是  $t_k$  时刻导引头视场中干扰个数。对抗环境相似度是将整个对抗过程中导引头的瞬时视场相似度时间序列在个数和时间上进行平均,是归一化后整个对抗过程干扰与目标的相似度。同时,由公式(4)可知, $F_s \in [0, 1]$ ,并且  $F_s$  越趋近 1,干扰与目标越相似,对抗环境越复杂。 $F_s$  趋近于 0,导弹攻击过程中干扰越弱。

##### 3.1.2 遮蔽度

诱饵投放后会遮蔽目标,使导引头无法精确定位目标而被诱偏,而诱偏效果与遮蔽时间长度及遮蔽程度有关。为此,下文建立了遮蔽度量化模型用以反映干扰环境复杂度。其中,该模型的建立包含如下 3 个步骤。

步骤 1:定义面积遮蔽度

$$Z_{\text{cov}}(t_k) = s_1(t_k) / s \quad (5)$$

式中: $s_1(t_k)$ 为  $t_k$  时刻目标被遮挡区域面积; $s$ 表示目标区域总面积。

步骤 2:定义位置重合度

$$Z_{\text{deg}}(t_k) = 2\gamma(t_k) / \gamma_0 \quad (6)$$

式中: $\gamma(t_k)$ 为  $t_k$  时刻目标与干扰两个能量重心所对应的空间张角; $\gamma_0$ 为最大视场角。该指标反映了干扰遮蔽目标时对跟踪误差的影响。

步骤 3:定义遮蔽度

$$F_v = \sum_t (Z_{\text{deg}}(t_k) + Z_{\text{cov}}(t_k)) / 2t \quad (7)$$

遮蔽度考虑了定位难易程度和偏差大小两方面

因素,反映了干扰环境中干扰对目标的遮蔽程度。其中面积遮蔽比例越大、位置偏差越大、遮蔽时间越长,遮蔽度数值越大,诱偏效果越强。

### 3.1.3 干扰时机影响度

诱饵对红外空空导弹的干扰效果与其干扰时机有关,评估的是干扰投放时机对脱靶率的影响。由参考文献[9]分析的视线角速度跳变幅度及干扰时机情况可知,单个干扰在  $\varepsilon_1 \sim \varepsilon_2$  之间停留导引头视场时间越长,导引头跳变幅度越大,导弹转向调整所需性能越高,进而越可能导致脱靶。为此,建立与剩余时间及制导系统时间常数相关的干扰时机影响度函数,其表达式如下:

$$F_t = \begin{cases} 0 & \text{其他} \\ \frac{\sum_{i=1}^n T_{\text{stay}}^i (1 - e^{-T_{\text{stay}}^i})}{(\varepsilon_1 \sim \varepsilon_2) n T_0} & \varepsilon_1 \leq \frac{t_{\text{go}}}{T_0} \leq \varepsilon_2 \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $T_0$  为时间常数;  $t_{\text{go}}$  为剩余飞行时间;  $T_{\text{stay}}$  为干扰在  $\varepsilon_1 \leq t_{\text{go}}/T_0 \leq \varepsilon_2$  内存在的时间长度;  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  与制导控制系统有关,由系统收敛性决定,后续敏感时间段表示  $T_0 \varepsilon_1 \leq t \leq T_0 \varepsilon_2$  时间段。该时间段是红外空空导弹进入盲飞区之前的一段时间,在该时间段的干扰效能相对最佳。

### 3.1.4 目标机动影响度

目标机动作为一种有效对抗来袭导弹的手段,直接影响着导弹制导控制系统的性能。若目标在投放诱饵后,恰当时刻采取恰当机动,则会大大提高逃逸几率,因此定义目标机动影响度:

$$F_m = \sum_i (|\dot{q}_{t_k}| / \dot{q}_{\text{max}}) / t \quad (9)$$

式中:  $\dot{q}_{t_k}$  为  $t_k$  时刻导引头跟踪角速度;  $\dot{q}_{\text{max}}$  为最大跟踪角速度;  $t$  为目标机动时间段。

### 3.1.5 进入角影响度

由于空空导弹多是用于水平面内,故文中只考虑水平进入角,其正尾后及正迎头的水平进入角分别为  $0^\circ$  和  $180^\circ$ 。因进入角度越大,打击难度相对越大;而导引头离轴角越大,导弹脱靶概率越大。通过对诱偏机理的分析,定义发射时载机进入角  $\alpha$  和导引头离轴角  $\beta$  的影响度权重:

$$f_\alpha = \begin{cases} 1.8 & 120^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ \\ 1.4 & 60^\circ \leq \alpha \leq 120^\circ \\ 1.0 & 0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ \end{cases} \quad (10)$$

$$f_\beta = \begin{cases} 2.1 & 60^\circ \leq \beta \leq 180^\circ \\ 1.5 & 30^\circ \leq \beta \leq 60^\circ \\ 1.0 & 0^\circ \leq \beta \leq 30^\circ \end{cases} \quad (11)$$

公式(10)及公式(11)中,权值可依据不同仿真系统自行设定。

## 3.2 复杂度量化模型建模

外界复杂环境主要通过导弹导引环节和控制环节对制导精度产生影响。导引环节(识别影响度  $x_r$ )影响导弹能否正确识别目标,控制环节(控制影响度  $k_c$ )影响导弹能否精确跟踪打击目标,两者直接影响命中概率。因此下文首先对两者进行定义,而后综合得到量化模型。

### (1) 定义识别影响度

从相似度与遮蔽度定义可知,其对识别的影响是强烈相关的,并且任意值的上升都将极大影响识别影响度。而几何均值合成模型适用于各子指标强烈相关的情况且对各子指标的变化较敏感,因此,采用该模型描述识别影响度。

$$x_r = 1 - \sqrt{(1 - w_1 F_s) \times (1 - w_2 F_v)} \quad (12)$$

### (2) 定义控制影响度

干扰时机影响度是评价干扰时机对诱饵在敏感时间段内停留时间以及个数的指标;目标机动是评价目标采取机动能够引起导弹跟踪角速度变化快慢的指标。两者并无直接关联,且在大量仿真中发现:两者对控制影响度的作用是趋于线性的且较为平缓,因此,采用加权求和指标模型描述控制影响度。

$$k_c = w_3 F_t + w_4 F_m \quad (13)$$

控制影响度和识别影响度相互独立地影响导弹制导精度,其中任何一个指标较大时,都将直接影响导弹命中率。而并联关系模型适用于各指标具有并联关系,且任一子指标较高,其他子指标即使很低也不会使合成指标过低。进入态势影响度又与两者直接相关,故采用并联关系综合指标构建量化红外对抗环境复杂度的数学模型。

$$P_c = 1 - (1 - f_\alpha k_c)^{w_5} \times (1 - f_\beta x_r)^{w_6} \quad (14)$$

公式(12)~(14)中:  $w_1 \sim w_6$  为待定系数,根据仿真结果数据采用非线性回归方法进行回归求解。

## 4 仿真实验

为检验诱饵对红外制导武器系统的干扰效果,



文中基于 MATLAB 2018 及 Visual Studio 2010 联合开发了图 2 所示的红外对抗仿真系统。

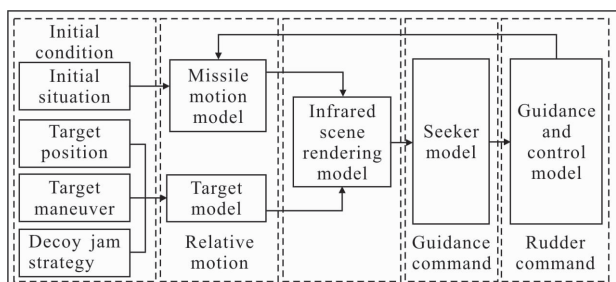


图 2 仿真系统示意图

Fig.2 Schematic of simulation system

### 4.1 场景仿真设置

仿真中标准弹导引头像素为  $256 \times 256$ ，瞬时视场角  $\gamma_0 = 3^\circ$ ，导引头时间常数  $T_0 = 0.02 \text{ s}$ ，制导控制系统的时间常数为  $T_1 = 0.1 \text{ s}$ ，其他参数  $\varepsilon_1 = 10, \varepsilon_2 = 23$ ， $\lambda_1 \sim \lambda_4$  分别为  $[0.4, 0.3, 0.15, 0.15]$ ， $\dot{q}_{\max} = 90^\circ/\text{s}$ ，导弹初速度为  $340 \text{ m/s}$ ，弹目距离为  $2.5 \text{ km}$ ，目标初速度  $270 \text{ m/s}$ 。评价标准为导弹命中概率。下面选取 7 种典型对抗场景加以分析，其中各场景的态势信息如表 2 所示。

表 2 对抗场景设置

Tab.2 Countermeasure scenario setting

Scene	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>
Maneuvering style	0	0	0	0	I	II	III
Time/s	0.5	1.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Total amount	24	24	12	24	24	24	24
Group amount	6	6	6	6	6	6	6
Group interval/s	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
In group interval/s	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Once amount	2	2	1	2	2	2	2
Horizontal approach angle/ $^\circ$	15	15	15	165	15	15	15
Vertical approach angle/ $^\circ$	5	5	5	5	5	5	5
Off-axis angle/ $^\circ$	0	0	0	0	0	0	0

表中机动样式 0、I、II、III 分别代表无机动、水平右转弯机动、俯冲机动、跃升机动(不加力)。将上述 7 种典型仿真场景分为 2 种想定，场景 *a*、*b*、*c*、*d* 为想定 1；*a*、*e*、*f*、*g* 为想定 2。

#### 4.1.1 想定 1——目标无机动

该想定下目标做匀速直线运动，高度为  $6 \text{ km}$ 。该想定用来比较诱饵投掷时机、投掷数量、以及导弹进入态势三者对红外对抗场景复杂度的影响，其对抗场景态势如图 3 所示。

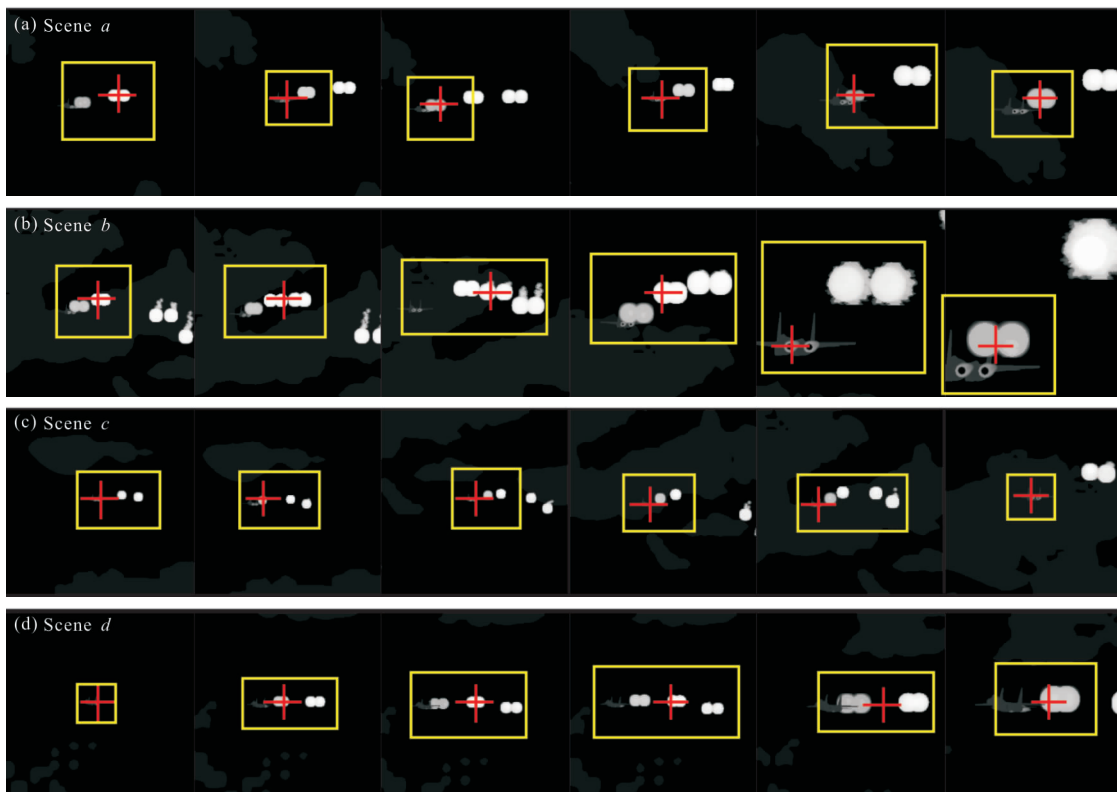


图 3 想定 1 对抗过程图

Fig.3 Scenario 1 countermeasure process image

由图 3 可知,场景 *a* 对抗初期导弹易被诱骗。但因弹目距离较远,导弹虽被诱偏,目标仍在视场范围内,易被导弹再次定位。而在对抗末期,导弹被诱偏则很容易丢失目标,其一,目标很容易逃出导引头视场,其二,导弹被诱偏后想要再次定位跟踪目标,对导弹制导控制性能要求很高。作为对比,场景 *a* 整体干扰效果一般。场景 *b* 相比于场景 *a*,诱饵在导引头视场停留时间变长,尾焰特征更明显,导弹识别目标难度加大。对抗场景末期,由于弹目距离已经非常近,但是还未进入盲飞区,此时诱饵对导弹诱偏能力很强,导弹容易丢失目标,整体干扰效果较强。场景 *c* 中,诱饵投掷数量减少,过程中对导弹的诱偏效果明显不如前两种,目标在整个过程中几乎始终处于导引头视场中心,干扰效果差。场景 *d* 中,导弹迎头打击目标,尾焰被机身蒙皮遮挡较严重,此时目标被诱偏后,再次定位需要较长时间,目标容易脱离导引头视场,整体干扰效果强。

上述对抗过程图较为抽象,而对应相似度、遮蔽度则能够从另一方面反映对抗过程环境复杂度,并且直观易理解,因此,下文从对应相似度、遮蔽度变化曲线分析上述场景复杂度,如图 4、图 5 所示(其中的曲线序号分别对应相应的场景序号)。

图 4 中,相似度曲线 *a* 四次大起伏,对应目标投掷的四组诱饵;而每次起伏顶端小幅度波动,反映每组中每次投放诱饵时相似度的波动;随着距离的不断减小,目标的特征越来越明显,所以第四次起伏幅度变小。相似度曲线 *b* 与曲线 *a* 最为相似,只是在时间上延迟了 1 s 左右。相似度曲线 *c* 由于诱饵的投掷数量减少,其相似度也明显减小。相似度曲线 *d* 由于目标尾焰被机身蒙皮遮挡使得导引头接收到的目标特征与诱饵有较大区别,使得其相似度较弱。

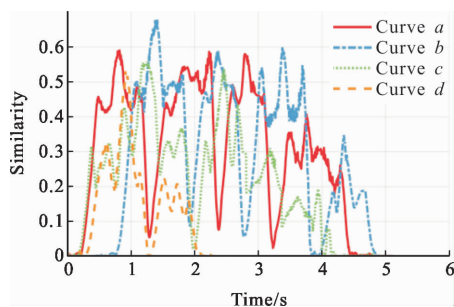


图 4 想定 1 过程相似度

Fig.4 Similarity of scenario 1

图 5 中,遮蔽度曲线 *a* 前 4 次起伏基本分别对应目标投放的 4 组诱饵,对抗末端还有一个小的起伏,这是因为最后两枚齐头诱饵在敏感时间段内,干扰效果极强,几乎可以和第一组中 6 枚诱饵效果齐平,使得导弹诱偏较明显。遮蔽度曲线 *b*,因其第 4 组诱饵在敏感时间段投掷,遮蔽度极强,此刻导弹很容易脱靶。遮蔽度曲线 *c* 整体遮蔽度弱于前面两组,此刻导弹不容易脱靶。遮蔽度曲线 *d* 随着弹目距离的不断缩小,目标红外特征越来越明显,导弹被诱偏后再次定位到目标所需时间逐渐减少,遮蔽度越来越弱。

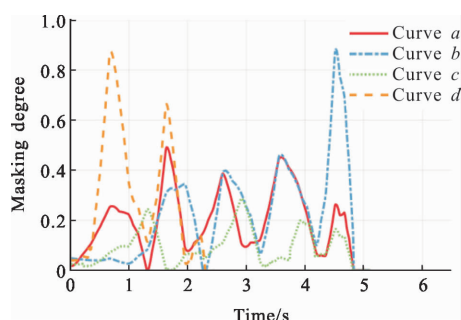


图 5 想定 1 过程遮蔽度

Fig.5 Masking degree of scenario 1

综合上述分析,发现想定 1 中场景 *a* 作为参照,干扰效果一般;而场景 *b* 则随着剩余时间的减小,丢失目标可能性越来越大,干扰效果较强;场景 *c* 整体不易丢失目标,干扰效果差;场景 *d* 初始时间段很容易丢失目标,干扰效果强。

#### 4.1.2 想定 2——目标机动

该想定下目标做不同的机动,初始高度为 6 km。想定 2 用以比较不同机动对红外对抗场景复杂度的影响,其中场景 *a* 为对照参考组,其对抗场景态势如图 6 所示。

图 6 中,场景 *e* 中目标水平右机动逃逸,对抗前期目标滚转同时投掷诱饵,因无法对目标尾焰形成遮挡,导引头始终锁定目标;对抗中后期,因诱饵处于弹目连线之间,对目标形成了有效遮蔽。由于三者几乎一直处于同一直线,导弹只被诱偏很小的角度;而诱饵下落后目标仍位于导引头视场内,故干扰效果较差。场景 *f* 中目标俯冲逃逸同时投掷诱饵后,并没对尾焰形成遮挡,对抗中后期目标向下俯冲,诱饵被投掷后急速从弹目连线上方脱离导引头视场,干扰效果很差。场景 *g* 中目标跃升机动逃逸,整个对抗

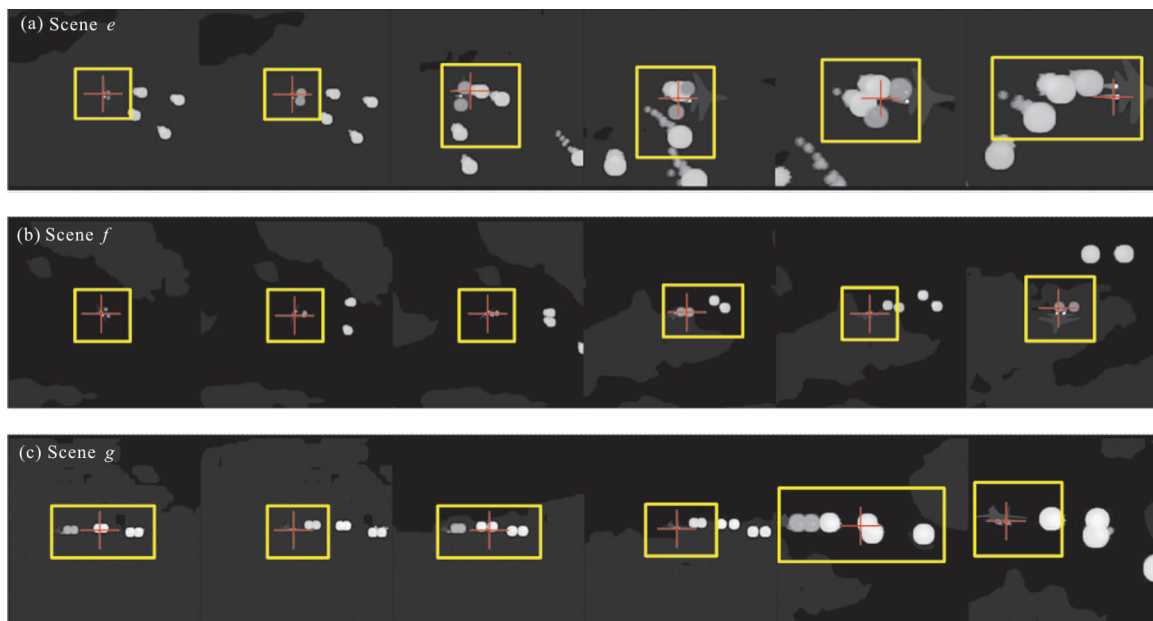


图 6 想定 2 对抗过程图

Fig.6 Scenario 2 countermeasure process image

过程中,诱饵在导引头视场内停留时间较长,并且随着弹目距离的减小齐投的两枚诱饵逐渐分开,成直线分布,目标几乎一直处于被遮挡状态,对抗环境极其复杂,导弹极易丢失目标,整体干扰效果很强。

想定 2 对抗场景对应相似度、遮蔽度变化曲线如图 7、图 8 所示(其中的曲线序号分别对应相应的场景序号)。

图 7 中,相似度曲线 *e* 整体复杂度弱于相似度曲线 *a*, 其幅值最大的一次起伏是由于目标被遮挡且此时导引头视场内存在较多分离开的诱饵,后期诱饵聚集到一块波动幅值减小;相似度曲线 *f*, 导弹几乎始终定位在目标尾焰,最后阶段,目标尾焰被遮挡,相似度稍微提高;相似度曲线 *g*, 随着时间增加,诱饵逐渐分离,诱饵干扰效果越来越强,相似度越来越大。

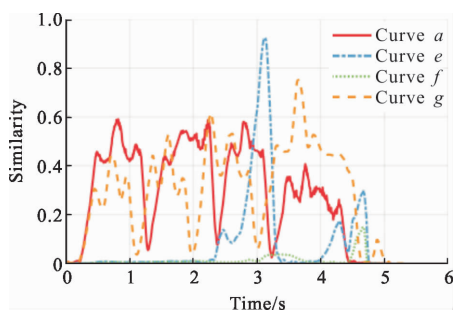


图 7 想定 2 过程相似度

Fig.7 Similarity of scenario 2

图 8 中, 遮蔽度曲线 *e* 中反映后期一段时间内, 目标尾焰被遮挡较长时间, 但由于弹目相对运动效果影响, 最大遮蔽度幅值只有 0.52; 遮蔽度曲线 *f* 整个对抗过程目标几乎未被遮挡, 所以整个曲线只有末端有幅值为 0.2 的较小幅度起伏; 遮蔽度曲线 *g* 导弹随着弹目距离不断减小, 被诱偏程度越来越严重, 并且遮蔽度最大达到 0.9, 此种场景导弹很容易丢失目标。

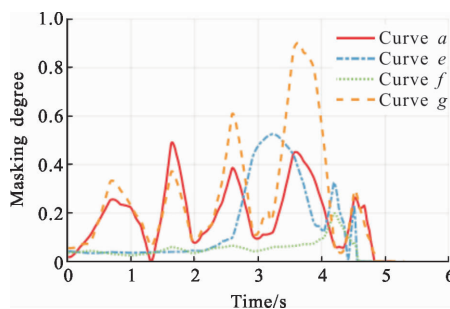


图 8 想定 2 过程遮蔽度

Fig.8 Masking degree of scenario 2

综合上述分析, 发现想定 2 目标在 3 种机动下, 场景 *e* 水平右转弯机动整体效果对比场景 *a* 较差; 场景 *f* 俯冲机动逃逸效果最差; 场景 *g* 跃升机动逃逸效果最佳。

#### 4.2 量化模型求解及验证

运用蒙特卡洛法将上述 7 种仿真场景分别仿真 300 次, 计算每种仿真场景命中率(大于 10m 为脱靶),

将其等效为量化模型复杂度指标。结合每组仿真数据,通过回归得到量化模型参数: $w_1=0.216, w_2=1.823, w_3=1.694, w_4=2.06, w_5=0.094, w_6=3.2815$ 。然后从这 7 种仿真场景结果中分别随机抽取 100 组,用量化模型预测命中率以验证文中所建立的红外导弹对抗环境复杂度量化表征模型的有效性。最终,对预测结果运用 2 准则进行准确度评估,其结果如图 9 所示。

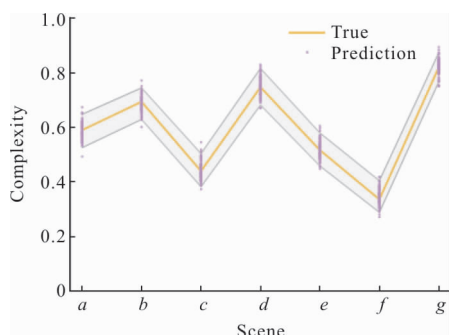


图 9 复杂度预测

Fig.9 Prediction of complexity

可以看出:文中提出的复杂度量化模型预测结果中,误差范围在 $\pm 6\%$ 区间的概率为 95%,能够较好地反映出对抗环境的复杂度。

### 4.3 量化模型分析

回归参数  $w_2/w_1=8.4, w_4/w_3=1.21, w_6/w_5=34.9$ ,在一定程度上反映出遮蔽度相对相似度方面,前者对导弹命中概率影响更大,从逃逸方来考虑,采用使遮蔽度更大的投掷、机动策略,能够大大增加逃逸概率;在干扰时机和目标机动方面,合适的干扰时机和目标机动都能够增加目标在整个过程的遮蔽度,还能够大幅提高诱饵在敏感时间段内的个数和时长,对导弹形成更强的诱偏效果;导引头识别性能对导弹命中率的影响比导引控制系统性能要大很多,也反映出要提高导弹命中率,导引头识别性能方面的改进是最有效的。

## 5 结论

文中提出的基于导引头图像处理和制导控制系统的点源红外诱饵干扰下环境复杂度量化模型,能较好地反应对抗场景的复杂度以及导弹各模块对干扰的响应情况,为综合分析导弹抗干扰性能以及合理设置考核环境提供了参考依据。可得出以下结论:

(1) 在导弹尾后打击目标情况下,弹目距离越

远,投放诱饵弹干扰效果越差;诱饵弹在敏感时间段内停留时间越长,干扰效果越强;

(2) 上述 5 个指标中,遮蔽度指标对环境复杂度贡献最为显著,相似度次之;

(3) 在上述 4 种机动范围内,当导弹从目标尾后偏下攻击目标时,目标投诱饵弹同时做跃升机动逃逸效果最好。

### 参考文献:

- [1] Li Hui, Wu Junhui, Chen Qianrong, et al. Limit capability and consistency of digital image injection test for IR imaging seeker [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(4): 913-921. (in Chinese)  
李慧, 吴军辉, 陈前荣, 等. 红外导引头注入式闭环试验的边界能力及一致性[J]. 光学精密工程, 2016, 24(4): 913-921.
- [2] Wang Rui. Compound guided system with active laser imaging and passive infrared imaging [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(4): 536-542. (in Chinese)  
王锐. 激光红外主被动复合导引系统[J]. 中国光学, 2013, 6(4): 536-542.
- [3] Zheng Chao, Chen Jie, Tao Huifeng, et al. Pedestrian tracking in FLIR imagery based on modified intensity variation function [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(10): 2980-2988. (in Chinese)  
郑超, 陈杰, 陶会峰, 等. 基于改进亮度变化函数实现红外图像中行人跟踪[J]. 光学精密工程, 2015, 23(10): 2980-2988.
- [4] Li Ni, Huai Wenqing, Wang Shaodan, et al. A real-time infrared imaging simulation method with physical effects modeling of infrared sensors [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016, 78: 45-57.
- [5] Gao Wei, Sun Yifan. Test and Evaluation of Electronic Interference Effects of Precision Guided Weapon Systems [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2018: 119-123. (in Chinese)  
高卫, 孙奕帆. 精确制导武器系统电子干扰效果试验与评估[M]. 北京: 国防工业出版社, 2018: 119-123.
- [6] Li Shenbo, Li Taorui, Tong Zhongxiang, et al. Influence of tactical parameters of missile on jamming effectiveness of surface source infrared decoy [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(7): 0704004. (in Chinese)  
李慎波, 李韬锐, 童中翔, 等. 导弹战术参数对面源红外诱饵干扰效能影响[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(7): 0704004.
- [7] Hu Zhaohui, Yan Jie. Evaluation method of infrared missile countermeasures performance [J]. *Journal of Air Force*



- Engineering University (Natural Science Edition)*, 2008, 9 (4): 44–49. (in Chinese)
- 胡朝晖, 闫杰. 红外空空导弹抗干扰性能评估方法研究 [J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2008, 9(4): 44–49.
- [8] Li Jianxun, Tong Zhongxiang, Fan Xiaoguang, et al. Research of an effectiveness evaluation method of infrared countermeasure process [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(3): 0304008. (in Chinese)
- 李建勋, 童中翔, 樊晓光, 等. 红外对抗过程的效能评估方法研究 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(3): 0304008.
- [9] Xu Yang, Fang Yangwang, Wu Youli, et al. LOS-rate of seeker jump characteristic modelling under IR flare countermeasure [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 48(5): 0504001. (in Chinese)
- 徐洋, 方洋汪, 伍友利, 等. 红外诱饵干扰下导引头视线角速度跳变特征建模 [J]. 红外与激光工程, 2018, 48(5): 0504001.
- [10] Wim D J, Frans A M, Gerard J K, et al. IR seeker simulator and IR scene generation to evaluate IR decoy effectiveness [C]//Technologies for Optical Countermeasures, 2004: 100–111.
- [11] Schachter B J. Automatic Target Recognition [M]. 2nd ed. Washington: SPIE Press, 2017: 132–143.
- [12] Xin Yunhong, Zhou Jiao, Chen Yishuan. Dual multiscale filter with SSS and GW for infrared small target detection [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, 81: 97–108.
- [13] Li Shenbo, Wang Chaozhe, Huang Hesong. Infrared imaging guidance missile's target recognition simulation based on air-to-air combat [J]. *Optical Sensing and Imaging Technologies and Applications*, 2018: 108462.
- [14] Liu Yi. Review of infrared image complexity evaluation method [J]. *Aero Weaponry*, 2014(3): 51–54. (in Chinese)
- 刘毅. 红外图像复杂度评估方法综述 [J]. 航空兵器, 2014 (3): 51–54.
- [15] Xu Yang, Fang Yangwang, Wu Youli, et al. Association rule mining for the infrared countermeasure by the pf-growth algorithm [C]//Proceedings of the 37th China Control Conference, 2018: 8043–8048.