

5-22-2023

An Algorithm for Obtaining Interception Guidance Routes Weighted by Threat Indexes

Shuyuan Liu

*Academy of Electronics & Information Technology, China Electronics Technology Group Corporation,
Beijing 100041, China; liushuyuan@cetc.com.cn*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

An Algorithm for Obtaining Interception Guidance Routes Weighted by Threat Indexes

Abstract

Abstract: Interception guidance and threat assessment are two inseparable parts of command and control. The former implements specific command and guidance through guidance solutions, and the latter provides basis for threat assessment and situation advantage to command and control. *Taking threat indexes as the weight, a kind of optimal interception route index is proposed to obtain the guidance solution with the least threat.* Simulation results show that the proposed algorithm can effectively provide routing solutions for interception with the least threat, and is reliable under different situations, or with different weights of threat indexes. The algorithm provides a new idea for obtaining route solutions in the field of command and guidance.

Keywords

command and control, command and guidance, guidance solution, threat assessment, threat index

Recommended Citation

Shuyuan Liu. An Algorithm for Obtaining Interception Guidance Routes Weighted by Threat Indexes[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(5): 971-978.

一种威胁指数加权的截击引导航线解算算法

刘书元

(中国电子科技集团有限公司 电子科学研究院, 北京 100041)

摘要: 截击引导和威胁评估是指挥控制中不可分割的两部分, 前者通过航线解算进而实施具体的指挥引导, 后者通过计算确定威胁程度高低进而取得态势优势为指挥控制提供依据。以威胁指数为权重, 将解算出的引导航线与之加权, 提出了一种最优截击指标用以确定威胁程度最小的引导航线解算算法。仿真结果表明: 该算法可有效解算出威胁最小的截击航线, 且在不同态势、不同威胁权重取值等情况下均可靠。该算法为指挥控制中引导解算方法提供了新思路。

关键词: 指挥控制; 指挥引导; 引导解算; 威胁评估; 威胁指数

中图分类号: V249; TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2023)05-0971-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-0004

引用格式: 刘书元. 一种威胁指数加权的截击引导航线解算算法[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(5): 971-978.

Reference format: Liu Shuyuan. An Algorithm for Obtaining Interception Guidance Routes Weighted by Threat Indexes [J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(5): 971-978.

An Algorithm for Obtaining Interception Guidance Routes Weighted by Threat Indexes

Liu Shuyuan

(Academy of Electronics & Information Technology, China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100041, China)

Abstract: Interception guidance and threat assessment are two inseparable parts of command and control. The former implements specific command and guidance through guidance solutions, and the latter provides basis for threat assessment and situation advantage to command and control. *Taking threat indexes as the weight, a kind of optimal interception route index is proposed to obtain the guidance solution with the least threat.* Simulation results show that the proposed algorithm can effectively provide routing solutions for interception with the least threat, and is reliable under different situations, or with different weights of threat indexes. The algorithm provides a new idea for obtaining route solutions in the field of command and guidance.

Keywords: command and control; command and guidance; guidance solution; threat assessment; threat index

0 引言

截击引导是指挥控制中重要的环节。随着指挥控制系统中预警探测、态势感知能力增强, 在超视距作战背景下, 引导战斗机在威胁最小的情况下, 以最有利态势截击目标机显得尤为关键。

在上述过程中, 矢量方法一直是截击引导解算的有效方法^[1-2]。基于该解算方法, 文献[3]提取

战法属性给出一种新的引导建模方法; 文献[4]以等航线角为基础提出了基于前置点滑动搜索的截击引导航线优化生成算法; 文献[5]根据矩心操作的占位决策结果求解攻击航线; 文献[6]介绍了一种“可能攻击扇形区”的概念; 还有文献建立了对海作战^[7]和试飞^[8]中的引导实现模型。但前人的研究中, 很少将威胁指数考虑在引导的解算中,

收稿日期: 2022-01-04

修回日期: 2022-01-18

第一作者: 刘书元(1995-), 男, 工程师, 博士, 研究方向为系统总体设计、仿真技术。E-mail: liushuyuan@cetc.com.cn

仅有部分研究在无人机^[9-10]、机器人^[11]的路径规划中考虑了威胁的影响。

威胁指数法是威胁评估的一种方法^[12]。威胁评估主要是确定敌方战机的威胁程度^[13]，对我方战机进行科学决策、提高生存几率、取得战场优势等^[14-16]影响深远，常用于空战多目标攻击与目标分配中。常用的方法包括：威胁指数法^[17-20]、多属性决策理论方法^[21-22]、模糊理论^[23-24]、熵权法^[25-26]、智能算法^[27-29]等。在上述研究中，威胁评估较多关注于威胁等级的排序，即：进行截击前某态势下的“瞬时”威胁，并没有对整个截击过程进行威胁评估，特别是受威胁较大的引导末端。由于威胁的实时性，有必要对整个引导过程考虑其带来的影响。

针对上述问题，本文提出了一种威胁指数加权的战机截击引导航线解算算法。以态势威胁指数为主的威胁指数作为权重，与矢量方法求解出的截击引导航线加权，计算整个截击过程中，威胁最小、态势最有利的截击航线，并通过仿真对该算法进行了有效性与可靠性分析。

1 引导解算模型

二次转弯模型是引导解算中的基础模型^[2]，本文将该模型作为截击过程中的出航摆位模型。

如图1所示，我方战机位于 W_0 点，速度 v_w ，航向 K_w ；敌方战机位于 M_0 点，速度 v_m ，航向 K_m 。假设引导解算的时间可以忽略不计，即：我机于 W_0 点时，立刻进行两次转弯(W_0-W_1 、 W_2-W_3 段)，并于 W_3 点经 t_s 时间的平飞后完成搜索、锁定目标，于 W_4 点发射导弹，此时敌机位于 M_1 点，发射导弹时我机与敌机航向的夹角(进入角)为 θ ，接敌距离为 $|\overrightarrow{W_4M_1}|$ 。 O_1 、 O_2 分别为我机两次转弯的圆心。

构建敌我位置的矢量方程和时间方程以求解该引导模型的解，即

$$\overrightarrow{W_0O_1} + \overrightarrow{O_1W_1} + \overrightarrow{W_1W_2} + \overrightarrow{W_2O_2} + \overrightarrow{O_2W_3} + \overrightarrow{W_3W_4} + \overrightarrow{W_4M_1} = \overrightarrow{W_0M_0} + \overrightarrow{M_0M_1} \quad (1)$$

$$t_{01} + t_{12} + t_{23} + t_s = t_m \quad (2)$$

式中： t_{01} 、 t_{12} 、 t_{23} 分别为我机 W_0-W_1 、 W_1-W_2 、 W_2-W_3 段的飞行时间； t_m 为敌机 M_0-M_1 段的飞行时间。

在对式(1)、(2)联立时，由于两次转弯的方向(右转或左转)均未知，取4种转弯方式组合中最快接敌截击的方式，即

$$(n_1, n_2) = \{n_i | \min[t_m(n_i)], i = 1, 2, 3, 4\} \quad (3)$$

式中： n_1 、 n_2 为 n_i 的两个元素分别表示第1、2次转弯的方向，1表示右转，-1表示左转； n_i 为转弯方式集合 n 的第 i 个元素， $n = \{(1, 1), (1, -1), (-1, 1), (-1, -1)\}$ 。因此，将式(1)写成复指数形式，并联立式(2)，在给定敌我初始位置、速度、航向，设定我机两次转弯坡度、平飞搜索时间、接敌距离，及特定的进入角下可求出该方程组的唯一解^[30]，即：该引导模型的唯一解。由于该方程组的复杂性，可使用牛顿迭代法可求得数值近似解，进而获得整个引导过程中任意时刻的敌我位置、航向。

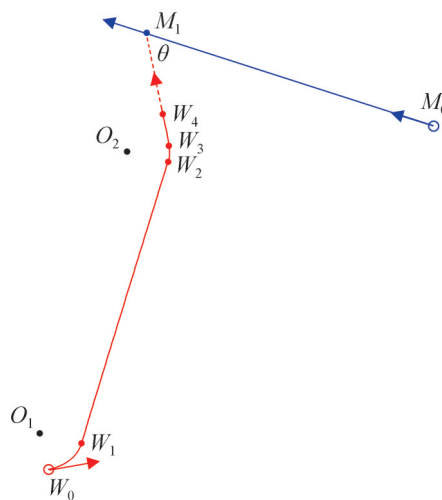


图1 二次转弯模型示意图

Fig. 1 Model of two turn

2 威胁指数

威胁指数主要考虑敌我机间的态势威胁。态势威胁指数由角度威胁指数、距离威胁指数、速度威胁指数构成。

2.1 角度威胁指数

以文献[16]中式(1)作为角度威胁指数(以下简称“角度威胁”)函数 T_a , 即:

$$T_a = \frac{|q_w| + |q_m|}{360^\circ} \quad (4)$$

式中: q_m 为敌我位置连线(目标线) $\overline{W'M'}$ 与敌速度矢量的夹角; q_w 为 $\overline{W'M'}$ 与我速度矢量的夹角。 $0^\circ \leq |q_m| \leq 180^\circ$, $0^\circ \leq |q_w| \leq 180^\circ$ 。如图2所示。

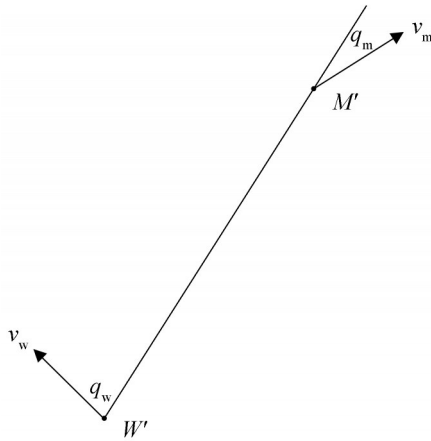


图2 角度威胁参数示意图
Fig. 2 Parameters of angular threat

q_m 的值由敌我位置决定, q_w 的值由我机接敌方式(迎头或尾后方式, 即: 进入角 θ)决定。二者共同决定了角度威胁 T_a 的值。

2.2 距离威胁指数

以文献[19]中式(4)作为距离威胁指数(以下简称“距离威胁”)函数 T_d , 即:

$$T_d = \begin{cases} \frac{1}{2e} e^{-\frac{d-d_R}{d_R}}, & d \geq d_R \\ \frac{1}{2} e^{-\frac{d-d_M}{d_R-d_M}}, & d_M \leq d < d_R \\ \frac{1}{2} e^{-\frac{d-d_{KMax}}{d_M-d_{KMax}}}, & d_{KMax} \leq d < d_M \\ 1, & d_{KMin} \leq d < d_{KMax} \end{cases} \quad (5)$$

式中: d 为敌我间距离; d_R 为敌雷达探测范围; d_M 为敌导弹最大攻击距离; d_{KMax} 、 d_{KMin} 分别为我

机对敌导弹的最大、最小不可逃逸距离。当 $d=d_R$ 时, $T_d \approx 0.18$ 。

2.3 速度威胁指数

速度威胁指数(以下简称“速度威胁”)函数 T_v ^[16]:

$$T_v = \begin{cases} 0.1, & v_m < 0.6v_w \\ -0.5 + \frac{v_m}{v_w}, & 0.6v_w \leq v_m \leq 1.5v_w \\ 1.0, & v_m > 1.5v_w \end{cases} \quad (6)$$

式中: v_w 、 v_m 分别为我机、敌机速度。当敌我速度不变时, T_v 也不变。

2.4 态势威胁指数

考虑到角度威胁、距离威胁、速度威胁三者间相对独立, 且当任意两威胁确定时, 余下的该威胁都能在其取值范围内尽可能的影响最终的态势威胁, 故态势威胁指数(以下简称“态势威胁”)函数 T_s 取三者的乘法^[19, 31], 即

$$T_s = T_a^{\alpha_a} \cdot T_d^{\alpha_d} \cdot T_v^{\alpha_v} \quad (7)$$

式中: α_a 、 α_d 、 α_v 分别为态势威胁中角度威胁、距离威胁和速度威胁的权重, $\alpha_a + \alpha_d + \alpha_v = 1$ 。

结合在不同敌我间距下 T_d 的取值可知, 角度威胁 T_a 、速度威胁 T_v 在较小间距时(即: 引导航线的末端)更容易影响态势威胁 T_s 值的大小。

3 威胁指数加权的引导航线解算

综合考虑威胁与截击航线长度, 我们以威胁指数与我机截击航线加权的积分值作为衡量最优截击航线的指标, 即

$$I = \int_0^t T_s \cdot dl \quad (8)$$

将式(8)写成时间 t 的微分形式, 将联立式(1), (2)求得的航线解算结果代入式(7), 可得到截击过程中任意时刻的态势威胁 $T_s(t)$, 对 $W_0 \sim W_4$ 逐段求积分后求和, 式(8)变为

$$I = \int_0^t T_s \cdot v_w \cdot dt = \sum_{i=0}^3 \int_{t_i}^{t_{i+1}} T_s(t) \cdot v_w \cdot dt \quad (9)$$

式中: t_i 为我机位于 W_i 点的时刻, $i=0, 1, \dots, 4$ 。
 $t \in [t_0, t_4]$ 。

为得到最优截击航线指标, 考虑到进入角 $\theta \in [0^\circ, 180^\circ]$, 可令 $\Delta\theta=1^\circ$, 从 $\theta=0^\circ$ 开始至 180° 结束, 对式(9)遍历 θ 求值, 取 $I(\theta)$ 最小时的 θ_0 , 即

$$\theta_0 = \{\theta \mid \min[I(\theta)]\} \quad (10)$$

将 $\theta=\theta_0$ 时式(1), (2)的解作为最优截击引导航线解算结果。

4 仿真

4.1 算例及有效性分析

取 $W_0=(0, 0)$ km, $v_w=1\ 400$ km/h, $K_w=80^\circ$ (从正北起顺时针为正。下同), 我机两次转弯坡度 γ_1 、 γ_2 均为 30° , 此时转弯半径 $R=27$ km, $M_0=(250, 250)$ km, $v_m=1\ 000$ km/h, $K_m=290^\circ$ 。我机平飞搜索目标时间 $t_s=60$ s, 接敌距离 $|\overrightarrow{W_4M_1}|=60$ km。

考虑在超视距作战的情况下, 对式(5)中距离威胁 T_d , 取 $d_R=120$ km, $d_M=80$ km, $d_{KMax}=50$ km, $d_{KMin}=10$ km^[32]; 对式(7)中态势威胁 T_s , 角度和距离的权重应较大, 取 $\alpha_a=0.4$, $\alpha_d=0.4$, $\alpha_v=0.2$ 。

在上述取值下, 给出我机引导航线总长度为

$$L = |\overrightarrow{W_0W_1}| + |\overrightarrow{W_1W_2}| + |\overrightarrow{W_2W_3}| + |\overrightarrow{W_3W_4}| \quad (11)$$

图3所示为引导航线长度 L 及最优截击航线指标 I 随进入角 θ 的变化散点图。

从图3可以看出, 我机截击航线的总长度 L 随 θ 的增大而先减小后增大, 这是在当前敌我位置、航向形成的态势下, 为构成 θ 的进入角导致, L 最小时, $L=277$ km, $\theta=81^\circ$ 。 I 随 θ 呈先增大后减小, 再迅速增大的趋势, 当 $\theta=61^\circ$ 时, I 最小, 故 θ_0 为 61° , 此时 $I(\theta_0)=46$ km。从整体上看, 无论是 L 还是 I , 当 θ 为钝角时的值均大于 θ 为锐角的, 这是由于要与敌机形成迎头攻击的态势, 我机需更长的截击航线, 且迎头攻击下角度威胁 T_a 更大, 因此 I 也更大。但对比 L 与 I 可看出, 不同于 L 在 θ 较小时($0^\circ \sim 20^\circ$)仍能达到较大值, 在此攻击方式下,

I 在整个锐角范围内均较小, 表明以锐角截击威胁一直较低。这是因为尽管较小的进入角会导致更长的截击飞行航线, 但此时角度威胁 T_a 很小, 因此 I 仍可以较小。

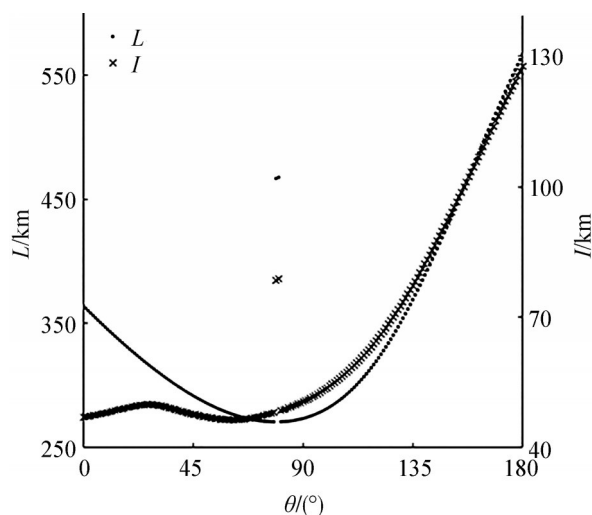


图3 L 和 I 随 θ 变化的散点图

Fig. 3 Variation of length of route L and optimal interception route index I with angle θ

此外, 在 $\theta=79^\circ$ 、 80° 时, L 与 I 均出现“不连续”的散点。此时 L 位于最小值附近, 我机第2次转弯的转弯方向发生了变化(即: n_2 从-1变为1), 解算出现“不连续”使第1次转弯方向反向, 整个航线变长导致。

最终 $\theta=\theta_0$ 时的引导解算结果如表1所示。

表1 引导解算结果

Table 1 Guidance solutions

参数	数值	参数	数值
$\theta_0/(^\circ)$	61	$ \overrightarrow{w_1w_2} /\text{km}$	212
(n_1, n_2)	(-1, -1)	$I(\theta_0)/\text{km}$	46
$(\varphi_1, \varphi_2)/(^\circ)$	(65, 24)	L/km	277

注: φ_1 、 φ_2 分别表示我机第1、2次转弯的角度, 下同。

在超视距作战情况下, 当我机速度值相对敌机没有绝对优势, 且有足够的出航摆位时间, 我机应以尾后攻击的方式开展截击。本小节的仿真结果与该结论一致。该算法在综合考虑威胁指数、截击航线长度的情况下, 合理的推荐了最优引导的方案, 展示了有效性。

4.2 可靠性分析

为了验证该算法的可靠性, 我们分别考虑不同态势、不同威胁权重、不同距离威胁参数对算法的影响。

针对态势差异, 我机初始位置、速度、航向与4.1节中的一致时, 考虑敌机具有不同的初始取值, 构成的空战态势如表2所示。相比于4.1节的态势, 态势1主要设计为不同的敌航向, 态势2为不同的敌我方位, 态势3为不同的敌我间距, 态势4、5分别设计为较高、较低的敌机速度。

表2 敌态势信息表

态势	$M_0=(x, y)$ km	$v_m/(km/h)$	$K_m/(^\circ)$
1	(200, 250)	960	120
2	(250, -250)	1 000	20
3	(150, 150)	1 200	220
4	(-250, 250)	2 200	160
5	(-250, 200)	700	160

对于表2中的态势, 分别进行威胁因子加权的引导航线解算, 计算出相应的解算结果如表3所示。从表3可看出, 当有足够出航摆位时间且态势允许时, 在不同敌航向、不同敌我方位下计算出 θ_0 的值表明均为尾后截击, 该接敌方式与4.1节中的结果一致。对于敌我间距较小的态势3, 我机没有足够的出航摆位时间, $\theta_0=174^\circ$ 表示我机将直接迎头截击。在态势4、5中, 敌机分别以较高速度(2 200 km/h)、较低速度(700 km/h)出现, 此时该算法亦能解算出较为合理的结果。此外, 上述5类态势中, θ_0 的值均与 L 最小时的 θ 不同, 体现了

威胁因子加权的含义。

表3 不同态势下引导解算结果

$\theta_0/(^\circ)$	(n_1, n_2)	$(\varphi_1, \varphi_2)/(^\circ)$	$ \vec{w_1 w_2} /km$	$I(\theta_0)/km$	L/km
21	(-1, 1)	(10, 29)	360	59	401
66	(1, -1)	(29, 23)	221	46	269
174	(-1, 1)	(35, 1)	42	22	83
52	(-1, -1)	(184, 44)	72	46	202
111	(-1, -1)	(153, 16)	129	37	231

该算法在不同的敌我间距、方位, 不同的敌机速度、航向下, 均具有可靠性。

此外, 针对态势威胁 T_s 中角度威胁、距离威胁、速度威胁的权重差异对算法的影响, 本文在敌我态势取值与4.1节中不变的情况下, 只改变三者的权重值, 计算出引导解算结果如表4所示。结合 $(\alpha_a, \alpha_d, \alpha_v)=(0.4, 0.4, 0.2)$ 取值下中的解算结果(表1)可以看出, 随着角度威胁权重的增加, θ_0 逐渐减小, 表示应以更小的进入角截击。值得注意的是, 航线总长度 L 随着进入角的减小只有小幅增加, 但最优截击指标 $I(\theta_0)$ 却增加较大(可结合表3及表5中的 $I(\theta_0)$ 进行对比)。这体现了截击航线长度相近时, 较大的角度威胁权重意味着整个截击航线(特别是引导航线的末端)面临更高的威胁, 该特点与超视距作战背景下, 战机应以最有利占位截击的对策思想一致。

同样, 保持4.1节中的其他取值不变, 只改变距离威胁 T_d 中敌雷达探测范围 d_R 、敌导弹攻击距离 d_M 、对敌最大不可逃逸距离 d_{KMax} 的取值, 以检验距离威胁的参数取值对算法的影响, 结果见表5。

表4 不同威胁权重下引导解算结果

$(\alpha_a, \alpha_d, \alpha_v)$	$\theta_0/(^\circ)$	(n_1, n_2)	$(\varphi_1, \varphi_2)/(^\circ)$	$ \vec{w_1 w_2} /km$	$I(\theta_0)/km$	L/km
(0.2, 0.6, 0.2)	68	(-1, -1)	(67, 15)	212	38	273
(0.6, 0.2, 0.2)	56	(-1, -1)	(64, 30)	214	58	281

表5 不同距离威胁参数下引导解算结果

$(d_R, d_M, d_{KMax})/km$	$\theta_0/(^\circ)$	(n_1, n_2)	$(\varphi_1, \varphi_2)/(^\circ)$	$ \vec{w_1 w_2} /km$	$I(\theta_0)/km$	L/km
(140, 90, 60)	56	(-1, -1)	(64, 30)	214	48	281
(100, 70, 40)	64	(-1, -1)	(66, 20)	212	44	275

结合 $(d_R, d_M, d_{KMax})=(120, 80, 50)$ 取值(表1)的结果可知, θ_0 随上述参数的减小而增大。这些参数的减小意味着距离威胁 T_d 在末端拥有较高的值, 此时角度威胁 T_a 在整个态势威胁 T_s 中占有较低的比重, 因此 θ_0 会减小。

综合上述情况, 该算法在不同态势、威胁权重、距离威胁参数取值下均具备较高的可靠性。

5 结论

本文通过将威胁指数与引导航线加权, 提出了最优截击航线的指标, 并进一步发展了该指标下的截击引导航线解算算法。

仿真实验结果表明, 该算法能较为有效的给出威胁最小且态势最有利的截击引导航线, 且在不同态势、不同威胁权重取值等的情况下, 均表现出较高的可靠性。

参考文献:

- [1] 丁指南. 指挥引导学(上册)[M]. 西安: 空军第二飞行学院, 2006.
Ding Zhinan. Command and Guidance (Volume one)[M]. Xi'an: The Second Flying Academy of Air Force, 2006.
- [2] 丁指南. 指挥引导学(下册)[M]. 西安: 空军第二飞行学院, 2006.
Ding Zhinan. Command and Guidance (Volume two)[M]. Xi'an: The Second Flying Academy of Air Force, 2006.
- [3] 李峰, 王瑾, 戴苏榕. 指挥引导模型的自动生成[J]. 火力与指挥控制, 2007, 32(1): 108-110.
Li Feng, Wang Jin, Dai Surong. Generating Command and Guide Model Automatically[J]. Fire Control and Command Control, 2007, 32(1): 108-110.
- [4] 王宏强, 王文潇, 张雷, 等. 空战截击引导航线自动生成算法研究[J]. 指挥控制与仿真, 2012, 34(1): 44-47, 60.
Wang Hongqiang, Wang Wenxiao, Zhang Lei, et al. Research on Automatic Generation Algorithm of Air-combat Intercept Guide Airline[J]. Command Control & Simulation, 2012, 34(1): 44-47, 60.
- [5] 许锡锴, 徐磊, 陈辉. 预警机引导单机多目标攻击方案决策研究[J]. 电光与控制, 2019, 26(7): 46-50.
Xu Xikai, Xu Lei, Chen Hui. On Decision-making for Single-to-multiple Attack Guided by AWACS[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(7): 46-50.
- [6] 蓝伟华. 空对空多目标攻击载机攻击航线求解逻辑[J]. 电光与控制, 2007, 14(3): 16-18.
Lan Weihua. Attack Course Determination of Fighter in Air-to-Air Multi-target Attacking[J]. Electronics Optics & Control, 2007, 14(3): 16-18.
- [7] 张安, 孙海洋, 张艳霞. 预警机指挥引导编队协同对海作战系统建模与仿真[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(1): 90-95.
Zhang An, Sun Haiyang, Zhang Yanxia. Research on Modeling and Simulation of Formation Cooperation under Air Early Warning Command and Guidance on the Sea Battles[J]. Systems Engineering and Electronics, 2016, 38(1): 90-95.
- [8] 卫卫群, 张安, 曹拴劳, 等. 机载雷达目标编队试飞指挥引导自动化方法与实现[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(4): 821-824, 828.
Ti Weiqun, Zhang An, Cao Shuanlao, et al. Method and Realization of Automatical Command Guidance of Target Formation Flight Test for Airborne Radar[J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(4): 821-824, 828.
- [9] 吴华兴, 黄伟, 康凤举, 等. 基于前置攻击瞄准的UCAV自主拦截方法研究[J]. 系统仿真学报, 2016, 28(9): 2246-2253.
Wu Huaxing, Huang Wei, Kang Fengju, et al. Research on Autonomous Intercept Method for UCAV Based on Lead Attack Aiming[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(9): 2246-2253.
- [10] 任鹏, 高晓光. 人机协同智能航迹规划算法[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(2): 313-319.
Ren Peng, Gao Xiaoguang. Man-Machine Coordinated Intelligent Flight Path Planning Algorithm[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(2): 313-319.
- [11] 林彬, 韩光辉, 宋晨晨, 等. 基于辐射扫描算法的机器人路径规划与仿真[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(1): 84-90.
Lin Bin, Han Guanghui, Song Chenchen, et al. Traversal Path Planning and Simulation of Robot Based on Radiation Scanning[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(1): 84-90.
- [12] 张涛, 周中良, 苟新禹, 等. 基于信息熵和TOPSIS法的目标威胁评估及排序[J]. 电光与控制, 2012, 19(11): 16-19.
Zhang Tao, Zhou Zhongliang, Gou Xinyu, et al. Threat Assessment and Sorting of Aerial Targets Based on Information Entropy and TOPSIS Method[J]. Electronics Optics & Control, 2012, 19(11): 16-19.
- [13] 张银燕. 基于云模型理论的空中目标威胁评估方法[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2013.
Zhang Yinyan. Methods of Threat Assessment for Aerial Targets Based on Cloud Model Theory[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2013.

- [14] 高阳阳, 余敏建, 王子博琳. 基于云模型和改进熵权的空战多目标威胁等级评估[J]. 火力与指挥控制, 2018, 43(9): 35-39.
Gao Yangyang, Yu Minjian, Wang Zibolin. Target Threat Assessment Technology for UAV Air Combat Based on Cloud Model and Improved Entropy Weight[J]. Fire Control & Command Control, 2018, 43(9): 35-39.
- [15] 奚之飞, 徐安, 寇英信, 等. 基于PCA-MPSO-ELM的空战目标威胁评估[J]. 航空学报, 2020, 41(9): 216-231.
Xi Zhifei, Xu An, Kou Yingxin, et al. Target Threat Assessment in Air Combat Based on PC-MPSO-ELM Algorithm[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(9): 216-231.
- [16] 杨爱武, 李战武, 徐安, 等. 基于RS-CRITIC的空战目标威胁评估[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(12): 2357-2365.
Yang Aiwu, Li Zhanwu, Xu An, et al. Threat Assessment of Air Combat Target Based on RS-CRITIC[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 46(12): 2357-2365.
- [17] 董彦非, 冯惊雷, 张恒喜. 多机空战仿真协同战术决策方法[J]. 系统仿真学报, 2002, 14(6): 723-725.
Dong Yanfei, Feng Jinglei, Zhang Hengxi. Cooperative Tactical Decision Methods for Multi-aircraft Air Combat Simulation[J]. Journal of System Simulation, 2002, 14(6): 723-725.
- [18] 董彦非, 郭基联, 张恒喜. 多机空战目标威胁评估算法[J]. 火力与指挥控制, 2002(4): 73-76.
Dong Yanfei, Guo Jilian, Zhang Hengxi. Threat Assessment for Multi-aircraft-Air Combat[J]. Fire Control and Command Control, 2002(4): 73-76.
- [19] 高永, 向锦武. 一种新的超视距空战威胁估计非参量法模型[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(9): 2570-2572.
Gao Yong, Xiang Jingwu. New Threat Assessment Non-Parameter Modeling Beyond-Visual-Range Air Combat[J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(9): 2570-2572.
- [20] 肖冰松, 方洋旺, 胡诗国, 等. 一种新的超视距空战威胁评估方法[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(9): 2163-2166.
Xiao Bingsong, Fang Yangwang, Hu Shiguo, et al. New Threat Assessment Method in Beyond-the-horizon Range Air Combat[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(9): 2163-2166.
- [21] 魏世孝, 周献中. 多属性决策理论方法及其在C3I系统中的应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
Wei Shixiao, Zhou Xianzhong. Multi-attribute Decision Making: Theories, Methods, and Their Applications in C3I System[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998.
- [22] Hwang C L, Yoon K. Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1981.
- [23] Chen S J, Hwang C L. Fuzzy Multiply Attribute Decision Making: Methods and Applications[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1992.
- [24] Azimirad, E, Haddadnia, J. Target Threat Assessment Using Fuzzy Sets Theory[J]. International Journal of Advances in Intelligent Informatics (S2442-6571). 2015, 1(2): 57-74.
- [25] 王佩, 李言俊, 张科. 多机空战多目标威胁评估和分配算法[J]. 火力与指挥控制, 2008, 33(5): 14-17.
Wang Pei, Li Yanjun, Zhang Ke. Multi-target Threat Assessment and Assignment Algorithm for Multi-aircraft Air Combat Simulation[J]. Fire Control & Command Control, 2008, 33(5): 14-17.
- [26] 孔尚萍, 张海瑞, 廖选平, 等. 基于AHP与熵权法的空中目标威胁评估方法[J]. 战术导弹技术, 2018(1): 79-84.
Kong Shangping, Zhang Hairui, Liao Xuanping, et al. Aerial Targets Threat Assessment Based on AHP and Entropy Weight Method[J]. Tactical Missile Technology, 2018(1): 79-84.
- [27] 赵磊, 李仁松, 常国任. 预警机引导战斗机空战目标分配模型[J]. 指挥控制与仿真, 2008(5): 34-36.
Zhao Lei, Li Rensong, Chang Guoren. Model of Target Assignment of the Early Warning Aircraft Steering the Fighter Plane for Airfight[J]. Command Control & Simulation, 2008(5): 34-36.
- [28] 郭辉, 徐浩军, 刘凌. 基于回归型支持向量机的空战目标威胁评估[J]. 北京航空航天大学学报, 2010, 36(1): 123-126.
Guo Hui, Xu Haojun, Liu Ling. Target Threat Assessment of Air Combat Based on Support Vector Machines for Regression[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 36(1): 123-126.
- [29] 王改革, 郭立红, 段红, 等. 基于萤火虫算法优化BP神经网络的目标威胁估计[J]. 吉林大学学报(工学版), 2013, 43(4): 1064-1069.
Wang Gaige, Guo Lihong, Duan Hong, et al. Target Threat Assessment Using Glowworm Swarm Optimization and BP Neural Network[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2013, 43(4): 1064-1069.
- [30] 袁姗姗. 舰载机截击引导仿真研究[J]. 现代计算机, 2019(3): 33-36.
Yuan Shanshan. Simulation Research on Carrier-Borne Aircraft Intercepting Guidance[J]. Modern Computer, 2019(3): 33-36.

- [31] 于英男, 陈小银, 谢兵. 舰载机目标分配及兵力引导仿真建模研究[J]. 舰船电子工程, 2011, 31(1): 100-103, 127.
Yu Yingnan, Chen Xiaoyin, Xie Bing. Research on Simulation Modeling of Multi-targets Assignment and Aircraft Guiding of Aircraft Carrier[J]. Ship Electronic Engineering, 2011, 31(1): 100-103, 127.
- [32] 谢邦荣, 杨剑影, 尹健, 等. 导弹单发杀伤概率影响因素分析[J]. 火力与指挥控制, 2004, 29(2): 60-64.
Xie Bangrong, Yang Jianying, Yin Jian, et al. Analysis of the Influencing Factors Upon Kill Probability for Single Missile[J]. Fire Control & Command Control, 2004, 29 (2): 60-64.