

8-25-2023

## Attack Decision-making Model of Armed Helicopter Based on Multi-index Fuzzy Set

Chunyan Wang

*Software College, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China, wangchunyan@lntu.edu.cn*

Xiang Wang

*Software College, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China*

Minchi Kuang

*Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China*

Danfeng Wu

*Beijing Key Laboratory of Information Service Engineering, Beijing Union University, Beijing 100101, China; College of Robotics, Beijing Union University, Beijing 100027, China, dfwuby@163.com*

*See next page for additional authors*

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.

---

# Attack Decision-making Model of Armed Helicopter Based on Multi-index Fuzzy Set

## Abstract

**Abstract:** Aiming at the attack decision-making task requirements of armed helicopters in uncertain battlefield environment, *the constructed multi-index fuzzy set is quantitatively characterized by the improved Gaussian model. The strategic benefit value model is constructed by using the combat restraint relationship, and the target ranking set is obtained by dynamically assigning the weight factors of the threat value and the strategic benefit value to complete the attack decision-making.* The results show that the proposed method can better use the threat index data in modeling, and can provide theoretical guidance and modeling reference to improve the decision-making advantage of armed helicopters.

## Keywords

armed helicopter, attack decision-making, multi-index fuzzy set, threat value, strategic benefit value

## Authors

Chunyan Wang, Xiang Wang, Minchi Kuang, Danfeng Wu, and Zhengtong Li

## Recommended Citation

Wang Chunyan, Wang Xiang, Kuang Minchi, et al. Attack Decision-making Model of Armed Helicopter Based on Multi-index Fuzzy Set[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(8): 1661-1668.

# 基于多指标模糊集的武装直升机攻击决策模型

王春艳<sup>1</sup>, 王祥<sup>1</sup>, 匡敏驰<sup>2</sup>, 武丹凤<sup>3,4\*</sup>, 李政通<sup>1</sup>

(1. 辽宁工程技术大学 软件学院, 辽宁 葫芦岛 125105; 2. 清华大学 精密仪器系, 北京 100084;

3. 北京联合大学 北京市信息服务工程重点实验室, 北京 100101; 4. 北京联合大学 机器人学院, 北京 100027)

**摘要:** 为解决战场中不确定环境下武装直升机的攻击决策任务需求, 通过改进的高斯模型对构建的多指标模糊集进行量化表征。利用作战克制关系构建战略收益值模型, 通过动态分配威胁值和战略收益值的权重因子得到目标排序集合进而完成攻击决策。结果表明: 所提方法能较好地发挥威胁指标数据在建模中的作用, 为提升武装直升机执行任务的决策优势提供理论指导和建模参考。

**关键词:** 武装直升机; 攻击决策; 多指标模糊集; 威胁值; 战略收益值

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1004-731X(2023)08-1661-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-0401

**引用格式:** 王春艳, 王祥, 匡敏驰, 等. 基于多指标模糊集的武装直升机攻击决策模型[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(8): 1661-1668.

**Reference format:** Wang Chunyan, Wang Xiang, Kuang Minchi, et al. Attack Decision-making Model of Armed Helicopter Based on Multi-index Fuzzy Set[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(8): 1661-1668.

## Attack Decision-making Model of Armed Helicopter Based on Multi-index Fuzzy Set

Wang Chunyan<sup>1</sup>, Wang Xiang<sup>1</sup>, Kuang Minchi<sup>2</sup>, Wu Danfeng<sup>3,4\*</sup>, Li Zhengtong<sup>1</sup>

(1. Software College, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China; 2. Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Beijing Key Laboratory of Information Service Engineering, Beijing Union University, Beijing 100101, China; 4. College of Robotics, Beijing Union University, Beijing 100027, China)

**Abstract:** Aiming at the attack decision-making task requirements of armed helicopters in uncertain battlefield environment, the constructed multi-index fuzzy set is quantitatively characterized by the improved Gaussian model. The strategic benefit value model is constructed by using the combat restraint relationship, and the target ranking set is obtained by dynamically assigning the weight factors of the threat value and the strategic benefit value to complete the attack decision-making. The results show that the proposed method can better use the threat index data in modeling, and can provide theoretical guidance and modeling reference to improve the decision-making advantage of armed helicopters.

**Keywords:** armed helicopter; attack decision-making; multi-index fuzzy set; threat value; strategic benefit value

## 0 引言

由于武装直升机具有武器火力强、低空飞行、树梢攻击等优势, 广泛应用在现代战争中<sup>[1-2]</sup>。武

装直升机在复杂的战场环境执行攻击任务时, 有大量态势信息需要实时计算、判断和决策。攻击决策的过程是把所有待攻击目标在符合当前战场态势的情况下分配给直升机。影响决策过程的两

收稿日期: 2022-04-23

修回日期: 2022-07-05

基金项目: 国家自然科学基金(41801368); 辽宁省教育厅基本科研项目(LJKQZ2021154); 北京联合大学新进博士孵化项目(20202201)

第一作者: 王春艳(1981-), 女, 副教授, 博士, 研究方向为决策模型建模与分析。E-mail: wangchunyan@lntu.edu.cn

通讯作者: 武丹凤(1982-), 女, 副教授, 博士, 研究方向为多智能体任务分配与协作。E-mail: dfwuby@163.com

大要素分别为目标威胁值和战略收益值。为了更加精确地计算威胁值和战略收益值，首先利用多个威胁指标构建模糊集合，然后用改进的高斯模型判断目标隶属的威胁等级计算威胁值，再利用战场中的作战克制关系确定战略收益值。威胁值和战略收益值所组成的动态决策值是确定如何分配目标的重要依据。在已知的目标集合中，各个目标均有决策值，决策值的大小受战场态势变化的影响。武装直升机选定决策值最高的目标作为优先攻击对象。

文献[3]在武装直升机战术决策系统中利用线性函数根据方位角、俯仰角和武器性能进行威胁评估的方法不具备实时性。文献[4]利用遗传人工鱼群算法实现了武装直升机的火力分配决策，但人工鱼的随机移动性使得极值点出现严重聚集，收敛速度严重降低，最终导致迭代次数大大增加。文献[5]提出了一种基于免疫的蚁群优化算法来解决武器对目标分配的问题，但该算法中没有融入威胁评估模型，在复杂态势中较为单一的决策过程难以保障决策的准确性。文献[6]利用改进层次分析法主观性较强，由于不同研究者的主观意愿存在差异，导致决策结果不确定性增加。文献[7]将邻域合作、变异和自学习因子引入协同空战决策的模型具有实时性。由于上述研究仅停留在算法阶段，没有在高逼真的战场环境中得以验证<sup>[8]</sup>。鉴于此，本文基于Unity 3D的物理引擎搭建一套具有高仿真度的战场对抗环境，用于验证基于多指标模糊集的武装直升机攻击决策模型的准确性和可行性。

多指标模糊集可以实现对战场数据和目标不确定因素更加精确地表达，所以对武装直升机的攻击决策的研究具有重要参考意义。考虑武装直升机攻击决策的特点，利用攻击决策算法在规定时间内实现对威胁值大、战略价值高的目标进行火力打击以辅助火控系统快速攻击决策具有重要军事价值，对提高编队作战能力和生存能力极其重要<sup>[9]</sup>。

## 1 攻击决策算法

### 1.1 武装直升机状态集

根据武装直升机在战场上的作战要求，在仿真系统中采用人工控制和智能体控制2种方式，针对智能体控制的武装直升机设计了一套机动状态集。状态主要包括待命、巡逻、接近、躲避、攻击和逃离等。巡逻搜索状态下将本机扫描到的目标加入到数据链中，若数据链受到电磁干扰，则只能采用本机感知雷达系统进行目标获取。接近状态下，武装直升机在树梢高度飞行接近目标，若目标没有进入攻击范围，武装直升机将持续接近目标，若达到攻击距离，则进入攻击状态，调整武装直升机的角度，发射反坦克导弹，攻击最大决策值对应的目标。目标被击毁则返回巡逻状态继续搜索或待命，若目标没有被击毁则持续进行攻击。若决策值发生变化则重新获取目标进行状态切换。若导弹数量用尽或雷达功能受损则转换到逃离状态。

### 1.2 多指标模糊集

本文选取的目标威胁指标<sup>[10]</sup>主要有感知能力、毁伤能力、装甲能力、抗干扰能力、等效距离和士气值。武装直升机对目标威胁值指标体系如表1所示，其中， $p$ 表示雷达系统的目标识别和捕捉的能力； $d$ 表示目标配备的武器类型和命中概率； $a$ 表示装甲厚度，随着被攻击次数增多而下降； $h$ 表示等效距离； $e$ 表示在收到雷达等电子干扰时感知系统正常运行的概率； $s$ 表示对作战取得胜利的信心，为战前输入的一组值。

表1 威胁指标  
Table 1 Threat indicators

威胁指标	含义	取值范围
$p$	感知能力	[0, 100]
$d$	毁伤能力	[0, 100]
$a$	装甲能力	[0, 100]
$h$	等效距离	[0, 100]
$e$	抗干扰能力	[0, 100]
$s$	士气值	[0, 100]

定义: 用  $V_{\text{threat}}$  表示目标的威胁值, 威胁等级一对应的  $V_{\text{threat}}$  为  $[0, 0.1)$ ; 威胁等级二对应的  $V_{\text{threat}}$  为  $[0.1, 0.2)$ ; 威胁等级  $m$  对应的  $V_{\text{threat}}$  为  $[v, v+0.1)$ , 威胁等级  $m+1$  对应的  $V_{\text{threat}}$  为  $[v+0.1, v+0.2)$ 。

定义一个目标  $TAR = \{tar_i, i = 1, 2, \dots, n\}$ , 其中,  $i$  为指标索引,  $tar_i$  表示第  $i$  个指标在当前时刻的取值, 每隔 0.02 s 指标值更新一次, 得到一个从发现目标到目标被击毁或者丢失时间段的数据集, 根据该数据集建立一个模糊集合  $\{X_{n \times m} | x_{ij} \in [0, 1]\}$ ,  $X$  表示  $n \times m$  矩阵,  $j = 1, 2, \dots, m$  表示威胁等级数量,  $x_{ij}$  为矩阵元素, 表示第  $i$  个指标属于第  $j$  个威胁等级的隶属度, 并满足如下条件:

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} = 1, \quad 0 \leq x_{ij} \leq 1 \quad (1)$$

### 1.3 目标威胁值模型

将高斯隶属函数模型作为目标隶属威胁等级模型:

$$x_{ij} = \lambda_j \times \exp\left[-\frac{(tar_i - \mu_j)^2}{2\sigma_j^2}\right], \quad 0 \leq \lambda_j \leq 1 \quad (2)$$

式中:  $\mu_j$  和  $\sigma_j$  分别为威胁指标的均值和标准差;  $\lambda_j$  为第  $j$  个威胁等级的模型系数。

最大隶属度对应的威胁等级即为该目标的威胁等级:

$$N_i = \arg\{\max\{x_{ij}\}\} \quad (3)$$

根据目标隶属威胁等级计算目标的最终威胁值:

$$V_{\text{threat}} = v + \delta P_{A-B}, \quad \delta \in [0, 1], \quad P_{A-B} \in [0, 100] \quad (4)$$

式中:  $P_{A-B}$  为目标对武装直升机的杀伤概率;  $\delta$  为权重因子。

### 1.4 战略收益模型

战略收益值指击毁目标对友方整体作战编队带来的整体性收益。由于战场存在克制关系<sup>[11]</sup>, 如表2所示, 反坦克导弹车克制装甲车, 武装直升机克制反坦克导弹车, 防空导弹车克制武装直升机等。例如, 敌方的防空导弹车会威胁到我方

的所有武装直升机, 如果优先把敌方的防空导弹车击毁, 在接下来的作战中, 就优先保证了我方直升机的安全, 再通过目标威胁我方作战单元的数量来计算收益值。击毁某个目标可以使编队发挥最大的战斗力, 除了要考虑威胁值还需要考虑目标战略收益值。战略收益值为

$$V_{\text{profit}} = V_{\text{basis}} + \sum_1^y \beta_u n_u, \quad V_{\text{basis}} \in [0, 10] \quad (5)$$

式中:  $V_{\text{basis}}$  为攻击目标所得的基础收益值, 基础收益值会根据战场态势而发生变化, 如表3所示;  $y$  为不同的作战单元型号的数量;  $u$  为作战单元类型;  $\beta_u \in [0, 1]$  为权重因子;  $n_u$  为目标克制我方作战单元的数量, 若目标为反坦克导弹发射车, 则它可以威胁到我方的防空导弹发射车、装甲坦克车和无人坦克车, 此时,  $n_u$  分别为防空导弹发射车、装甲坦克车的和无人坦克车的数量。

表2 作战克制关系

单元类型	被克制作战单元类型
无人坦克	反坦克车、防空导弹车
装甲坦克	防空导弹车、无人坦克车
武装直升机	装甲坦克、无人坦克、防空导弹车、反坦克车
防空导弹车	武装直升机
反坦克车	无人坦克、装甲坦克、防空导弹车

表3 基础收益值

目标型号	基础收益值	取值范围
无人坦克	$V_{\text{ut}}$	$[0, 10]$
装甲坦克	$V_{\text{art}}$	$[0, 10]$
武装直升机	$V_{\text{ah}}$	$[0, 10]$
防空导弹车	$V_{\text{am}}$	$[0, 10]$
反坦克车	$V_{\text{at}}$	$[0, 10]$

### 1.5 攻击决策模型

对多个目标进行攻击决策的过程, 可转化为对目标威胁值和目标战略收益值进行权重分配和按降序排列的过程。

根据决策值  $V_{\text{tar}}$  的排序完成目标分配:

$$V_{\text{tar}} = \begin{cases} k_1 V_{\text{threat}} P_{A-B} + k_2 V_{\text{profit}} P_{B-A}, & V_{\text{threat}} > 0 \\ k_3 V_{\text{profit}}, & V_{\text{threat}} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$P_{A-B} \in [0, 1), \quad P_{B-A} \in [0, 1)$$

式中： $k_1$ 和 $k_2$ 为威胁值和战略收益值的权重因子， $k_1$ 越大表示防守能力越强， $k_2$ 越大表示进攻能力越强，当接受指令强行进攻某一区域或目标时， $k_1 \in [0.1, 0.5]$ 、 $k_2 \in [0.6, 1]$ ，当编队或单一作战单元处于保护状态或防守某一区域时， $k_1 \in [0.6, 1]$ 、 $k_2 \in [0.1, 0.5]$ ； $k_3$ 为目标对武装直升机不造成直接威胁时的战略收益值权重因子， $k_3 \in [0.6, 1]$ ； $P_{B-A}$ 为武装直升机对目标的杀伤概率； $P_{A-B}$ 为目标对友方作战单元的杀伤概率。武装直升机配备可以同时攻击多个目标，将 $V_{\text{tar}}$ 排序，选择最大的 $V_{\text{tar}}$ 进行目标分配实现攻击决策。

## 2 仿真实验

### 2.1 仿真系统构建

仿真结果的准确性与真实的仿真战场环境因素息息相关，构建高逼真度的仿真系统尤为重要。如图1所示，仿真系统主要由3部分组成，其中武装直升机配备动力学模型，可以模拟直升机的飞行姿态，雷达感知系统用于搜索敌人，反坦克导弹系统用于远程攻击目标。

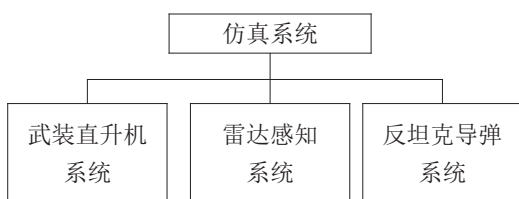


图1 仿真系统组成  
Fig. 1 Simulation system composition

#### 2.1.1 武装直升机仿真系统

基于Unity 3D物理引擎并融入空气动力学模型所构建的整机模型原理组成如图2所示。武装直升机采用四叶片旋翼、双发动机、后三点轮式起落架等构型。机首下方装有一门M-203E-1 30 mm单管链炮，能挂载M-261型火箭发射器、AGM-114反

坦克导弹发射架并配备长弓雷达<sup>[12-13]</sup>。

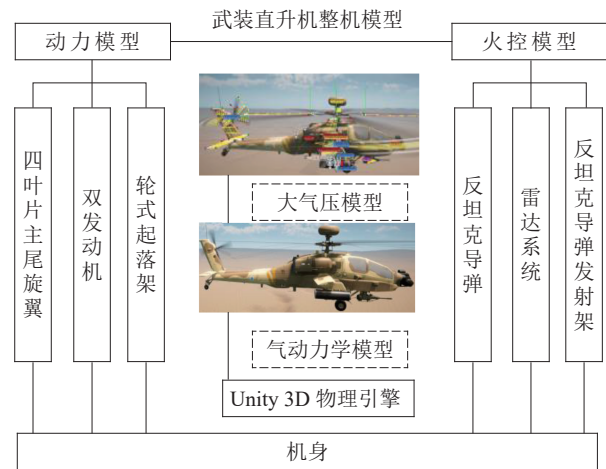


图2 武装直升机模型组成

Fig. 2 Principle composition of armed helicopter model

取旋翼桨叶上一个长度为 $dL$ 的微分段，则 $y$ 和 $x$ 方向的升力为

$$dy_N = \lambda_y \rho v_{xy} h dL \quad (7)$$

$$dx_N = \lambda_x \rho v_{xy} h dL \quad (8)$$

式中： $v_{xy}$ 为合速度； $h dL$ 为面积； $d$ 为微分段的弦长； $\lambda_y$ 和 $\lambda_x$ 为螺旋桨叶 $y$ 轴和 $x$ 轴切面的升力系数， $\lambda_y = 0.7RC_{y7}/L$ ，其中， $C_{y7}$ 为常值升力系数； $dy_N$ 和 $dx_N$ 为 $y$ 轴和 $x$ 轴的分力，其合力 $dRSE_N$ 为总空气动力。

$dRSE_N$ 与旋转平面垂直的分力即为螺旋桨叶的拉力为：

$$dP_N = dy_N \cos \alpha - dx_N \sin \alpha \quad (9)$$

式中： $\alpha$ 为来流角，取 $\alpha=0$ ，所以 $dP_N = dy_N$ 。具有 $M$ 片矩形桨叶旋翼的拉力为

$$P_{OA} = 0.7MRC_{y7} \frac{1}{2} \rho \omega^2 b \int_0^R L dL = \frac{7}{40} C_{y7} \frac{Mb}{\pi R} (R\omega)^2 (\pi R)^2 \quad (10)$$

#### 2.1.2 雷达感知仿真系统

雷达对运动目标和静止目标的作用距离分别为8 km和6 km，可以进行360°的全方位连续扫描，也可以对某个区域进行180°、90°和30°扇区进行重点扫描，且能够同时跟踪多个目标，并将

其中最危险的10个目标按威胁程度排序后从数据链上传发送给其他作战单元,在30 s内发起第一次精确打击。

武装直升机在任何状态下均可开启雷达感知系统。如图3所示,若目标被感知区域扫描到则将其加入数据链,如果目标丢失则将目标丢失前最后一刻的信息发送到数据链,该目标的信息暂停更新,直至有己方作战单元再次发现该目标。为方便了解战场态势变化和作战资源共享,己方作战单元发现的目标均可加入到数据链共享目标信息,如果目标丢失或者死亡则将其从数据链中移除。如果数据链受到干扰,直升机只能通过本机雷达搜索目标,数据链读取与发送信息功能停用直至干扰解除。



图3 雷达系统  
Fig. 3 Radar system

### 2.1.3 AGM-114反坦克导弹仿真系统

武装直升机配备的反坦克导弹模块开启制导飞向目标,飞行过程中根据导弹发动机总冲、质量、升阻比等气动数据,由动力学模块计算出推力,模拟真实导弹飞行轨迹<sup>[14]</sup>。在击中目标后将通过装甲毁伤系统计算是否能够击毁当前目标。推力与燃料的消耗的关系为

$$\int m dt = \mu \int F dt \quad (11)$$

已知质量 $m$ 变化和导弹发动机总冲 $F$ 求解参数 $\mu$ ,进而实时解算质量的变化。质量变化会引起导弹转动惯量的变化,从而影响导弹飞行性能。确定导弹未点火和发动机关机之后的转动惯量,并假设在发动机工作期间的转动惯量呈线性变化,

转动惯量实时计算表达式为

$$K = t_b \frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{t_a} \quad (12)$$

式中: $Q_{\max}$ 为导弹未点火状态转动惯量; $Q_{\min}$ 为导弹发动机关机转动惯量; $t_a$ 为发动机设计工作时间; $t_b$ 为发动机当前工作时间。

## 2.2 实验条件

红蓝双方分别设置3架武装直升机,标号为a1~a3;3辆防空导弹发射车,标号为b1~b3;1辆反坦克导弹车,标号为c1;1辆装甲坦克车,标号为d1;1辆无人坦克车,标号为e1。在威胁值的计算过程中设定威胁等级数量为10。仿真平台为Unity 3D,实验设置了3种决策条件。

A: 红方采用基于多指标模糊集的决策方式,蓝方采用单机决策方式<sup>[15]</sup>;

B: 红方采用基于多指标模糊集的决策方式,蓝方采用仅根据威胁值的决策方式<sup>[16]</sup>;

C: 红方和蓝方均采用基于多指标模糊集的决策方式。

胜利条件: ①一方歼灭另一方全部作战单元; ②在对局15 min后战场上剩余作战单元数量多的一方获胜。

平局条件: ①在红(蓝)方全部被歼灭5 s内,蓝(红)方也被全部歼灭; ②在对局15 min后双方存在的作战单元均不具备作战能力导致战局无法结束。

为了保证对局的公平性,除了决策方式不同,每场实验的双方坦克数量、作战单元类型和所携带武器型号、武器数量均相同。进行100场对抗实验以避免偶然性。

## 2.3 实验结果与分析

取条件A中的一场对局分别在4 min和8 min时目标的威胁指标值、战略收益值和决策值,如表4~5所示,威胁指标和威胁值均为0,攻击此类目标会给整体作战编队带来战略收益值。

表4 4 min时目标的威胁指标值和决策值  
Table 4 Threat indicators and decision values of target at 4 min

目标编号	$p$	$d$	$a$	$h$	$e$	$s$	$V_{threat}$	$V_{profit}$	$V_{tar}$
a1	97	95	87	74	87	98	0.85	0.89	0.87
a2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
a3	98	97	67	84	89	97	0.93	0.89	0.91
b1	/	/	/	/	/	/	/	/	/
b2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
b3	91	85	96	84	92	96	0.86	0.82	0.75
c1	*	*	*	*	*	*	*	0.84	0.59
d1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
e1	/	/	/	/	/	/	/	/	/

注：“-”表示未发现目标；“/”表示目标已经被击毁；“\*”表示已发现目标但不会对武装直升机造成威胁。

表5 8 min时目标的威胁指标值和决策值  
Table 5 Threat indicators and decision values of target at 8 min

目标编号	$p$	$d$	$a$	$h$	$e$	$s$	$V_{threat}$	$V_{profit}$	$V_{tar}$
a1	94	92	67	87	76	95	0.82	0.85	0.84
a2	98	94	78	89	67	97	0.92	0.85	0.89
a3	/	/	/	/	/	/	/	/	/
b1	/	/	/	/	/	/	/	/	/
b2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
b3	90	83	84	93	92	94	0.85	0.74	0.80
c1	*	*	*	*	*	*	*	0.76	0.53
d1	*	*	*	*	*	*	*	0.63	0.44
e1	/	/	/	/	/	/	/	/	/

根据表4中记录的对战数据，在4 min之前b1和e1已经被击毁，在4 min时红方共享数据链内包含4个目标包括蓝方的2架直升机、1辆防空导弹车和1辆反坦克导弹车，蓝方的武装直升机会威胁到红方所有作战单元，所以，此时蓝方的武装直升机的基础收益值 $V_{ah}=8$ ， $V_{profit}=0.89$ ，在所有目标中收益值最大。蓝方的防空导弹车会对红方的武装直升机造成直接威胁，不会对红方地面作战单元造成实质性威胁，此时红方攻击蓝方的防空导弹发射车的收益值低于武装直升机。

蓝方的反坦克车会直接威胁到红方地面作战单元，此时反坦克车的战略收益值为0.84，仅低于武装直升机的战略收益值0.89，而反坦克导弹车对直升机的威胁值为0。在4 min时由于各作战

单元装甲、雷达良好和弹药充足，红方调高了战略收益值权重，取 $k_1=0.4$ 、 $k_2=0.6$ 、 $k_3=0.7$ 。在已发现目标中威胁值从大到小排序为 $a_3>b_3>a_1$ ，战略收益值从大到小排序为 $a_1=a_3>c_1>b_3$ ，决策值从大到小排序为 $a_3>a_1>b_3>c_1$ ，在红方直升机进入攻击状态后的30 s内优先攻击蓝方的a3。

根据表5中记录的对战数据，在8 min时由于雷达受到一定影响，为持续保持作战能力，此时威胁权重和收益权重一致，红方取 $k_1=0.5$ 、 $k_2=0.5$ 、 $k_3=0.7$ 。在4 min时a3的决策值最大，经过红方打击后在8 min时直升机已经被击毁，只有b2未被雷达发现。在已发现目标中，地面目标除了防空导弹车外都不会对直升机造成威胁，所以反坦克车、无人坦克车和装甲坦克车的威胁值为0。已发现目标的威胁值从大到小排序为 $a_2>b_3>a_1$ ，战略收益值从大到小排序为 $a_1=a_2>c_1>b_3>d_1$ ，决策值从大到小排序为 $a_2>a_1>b_3>c_1>d_1$ 。在8 min时优先攻击蓝方代号为a2的武装直升机。

随着作战时间的进行，战场中红方不断有目标被摧毁导致决策值受战略收益值的影响逐渐减小，威胁值的影响逐步增加，但是在对局过程中仅考虑单一威胁值并不能使编队作战能力和防守能力最大化，所以战略收益值是武装直升机在攻击决策中的一个重要因素。

取一场作战的对战轨迹如图4所示，绿色线为直升机巡逻路径线，武装直升机根据该线进行巡逻侦察；红色线为机载导弹轨迹线，可以实时观察导弹的飞行轨迹；粉色线为直升机机动轨迹线，可以掌握直升机的飞行高度和飞行角度。

根据表6可知，在除去平局的情况下，本文方法比单机决策模型和仅考虑威胁值的胜率分别提高了16%和8%。当决策条件为A时，红方胜利场数比蓝方多16场。蓝方在采用单机决策的条件下，单机决策模型忽略了收益值，在超过40%的对局中会优先攻击红方的地面目标，忽略了威胁值更大的空中目标，在对局前期导弹消耗过多，对局进行过半时没有足够的导弹攻击空中目标导



致对局失败。当决策条件为B时, 红方胜场数比蓝方多8场。在超过25%的对局中, 红蓝双方根据决策值和威胁值进行排序结果相似, 战略收益值的影响较小, 都优先攻击决策值高与威胁值大的目标, 但是在双方作战单元初始距离比较近(小于防空导弹车雷达距离)和雷达能力损坏的情况下, 仅考虑威胁值的蓝方会取得获胜, 其他作战情况下均为红方获胜。当决策条件为C时, 红蓝双方的胜场数相近。在第35场对局中, 在作战15 min后场景中红方地面目标还存在1辆无人坦克, 蓝方地面目标存在1辆装甲坦克车且都没有炮弹剩余, 所以该场被认定为平局。在第47场对局中, 在场景中红方和蓝方均剩余1辆防空导弹车导致无法结束对局, 最终被认定为平局。实验结果表明: 多指标模糊集决策模型的胜率大于单机决策模型。仅考虑威胁值的决策模型, 虽然在一些对局中可以快速取得胜利, 但优先攻击的是对本机威胁最大的目标, 没有考虑目标对作战编队的威胁, 所以胜率较低。

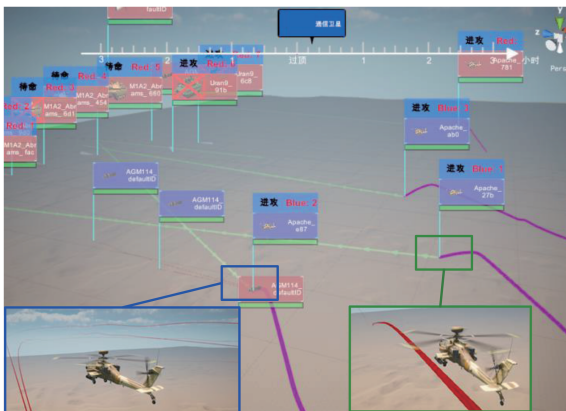


图4 战场对战轨迹(局部)

Fig. 4 Battlefield battle track(part)

表6 实验结果

Table 6 Experimental results

条件	红方 胜场	蓝方 胜场	平局	红方 胜率/%	蓝方 胜率/%
A	58	42	0	58.0	42.0
B	54	46	0	54.0	46.0
C	51	47	2	52.1	47.9

### 3 结论

本文提出了基于多指标模糊集的目标威胁值模型对战场中多种不确定性进行量化表征实现对目标威胁值的计算, 根据威胁值和战略收益值完成攻击决策。一方面多指标模糊集表征各指标的不确定性可以更加全面、综合地做出符合当前战场态势的攻击决策, 另一方面决策模型可以动态地调整威胁值和战略收益值的权重因子, 解决了传统算法主观性强和模型精度低等问题。在高逼真度的场景中得到的决策结果可以对指挥官和研究者提供一定的参考价值, 为提高武装直升机在执行任务时的决策提供了理论指导。在接下来的研究中, 我们将结合深度学习进一步研究威胁值和战略收益值的权值自适应确定以实现模型在线训练。

### 参考文献:

- [1] 陈智谦, 宋俊斌, 杨春信. 武装直升机作战效能评估综述[J]. 兵工自动化, 2016, 35(1): 12-14.  
Chen Zhiqian, Song Junxiao, Yang Chunxin. Review of Combat Effectiveness for Armed Helicopter[J]. Ordnance Industry Automation, 2016, 35(1): 12-14.
- [2] 邹汝平, 陈韵, 陈士超. 武装直升机与空地导弹系统相容性分析[J]. 兵工学报, 2021, 42(12): 2531-2542.  
Zou Ruping, Chen Yun, Chen Shichao. Comprehensive Analysis for Compatibility of Armed Helicopter and Air-to-ground Missile[J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(12): 2531-2542.
- [3] Lee Z J, Su Shunfeng, Lee C Y. Efficiently Solving General Weapon-target Assignment Problem by Genetic Algorithms With Greedy Eugenics[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics), 2003, 33(1): 113-121.
- [4] 赵振锋, 吴庆宪, 姜长生. 基于遗传的人工鱼群优化之武装直升机对地攻击火力分配决策[J]. 电光与控制, 2011, 18(3): 31-33, 38.  
Zhao Zhenfeng, Wu Qingxian, Jiang Changsheng. A Firepower Allocation Method for Armed Helicopter in Ground Attacking Using GA Based AFSA[J]. Electronics Optics & Control, 2011, 18(3): 31-33, 38.
- [5] 赵振锋, 吴庆宪, 姜长生. 武装直升机群对地攻击智能战术决策系统[J]. 航空兵器, 2010(6): 16-19.  
Zhao Zhenfeng, Wu Qingxian, Jiang Changsheng.

- Intelligent Tactical Decision-making System of Attacking Ground by Armed Helicopters[J]. *Aero Weaponry*, 2010 (6): 16-19.
- [6] 杨州, 袁卫卫, 王明利. 基于改进层次分析法的对地攻击方案优选决策[J]. *火力与指挥控制*, 2011, 36(1): 111-113.  
Yang Zhou, Yuan Weiwei, Wang Mingli. Research on Optimum Decision-making of Air-to-land Attacking Schemes Based on Improved AHP[J]. *Fire Control & Command Control*, 2011, 36(1): 111-113.
- [7] 付跃文, 王元诚, 陈珍, 等. 基于多智能体粒子群的协同空战目标决策研究[J]. *系统仿真学报*, 2018, 30(11): 4151-4157.  
Fu Yuewen, Wang Yuancheng, Chen Zhen, et al. Target Decision in Collaborative Air Combats Using Multi-agent Particle Swarm Optimization[J]. *Journal of System Simulation*, 2018, 30(11): 4151-4157.
- [8] 王春艳, 任浩, 匡敏驰, 等. 基于军事规则的无人坦克集群协同作战仿真[J]. *系统仿真学报*, 2022, 34(8): 1691-1696.  
Wang Chunyan, Ren Hao, Kuang Minchi, et al. Simulation of Unmanned Tank Clusters Cooperative Combat Based on Military Rules[J]. *Journal of System Simulation*, 2022, 34(8): 1691-1696.
- [9] 雷英杰, 王宝树, 王毅. 基于直觉模糊决策的战场态势评估方法[J]. *电子学报*, 2006, 34(12): 2175-2179.  
Lei Yingjie, Wang Baoshu, Wang Yi. Techniques for Battlefield Situation Assessment Based on Intuitionistic Fuzzy Decision[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2006, 34(12): 2175-2179.
- [10] 韩伟, 刘敏, 何文龚, 等. 基于在线支持向量机的空对地攻击决策算法[J]. *吉林大学学报(信息科学版)*, 2013, 31(1): 73-82.  
Han Wei, Liu Min, He Wengong, et al. Air-to-ground Attack Decision-making Technology Based on Online Support Vector Machine[J]. *Journal of Jilin University (Information Science Edition)*, 2013, 31(1): 73-82.
- [11] 李智宇, 陶钢, 李召. 反坦克部队与坦克部队在丘陵地区的作战效能分析[J]. *兵器装备工程学报*, 2019, 40(12): 45-49.  
Li Zhiyu, Tao Gang, Li Zhao. Operational Effectiveness Analysis of Anti-tank Company Against Tank Forces in Hilly Areas[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2019, 40(12): 45-49.
- [12] 张志鹏, 苏中. 拦截低慢小目标的指控系统建模与仿真[J]. *系统仿真学报*, 2018, 30(11): 4340-4347, 4358.  
Zhang Zhipeng, Su Zhong. Modeling and Simulation of C2 System for Intercepting LSS Targets[J]. *Journal of System Simulation*, 2018, 30(11): 4340-4347, 4358.
- [13] 李宝宁, 李永, 李朝荣. 武装直升机技术的发展动向与分析[J]. *舰船电子工程*, 2014, 34(6): 23-26, 67.  
Li Baoning, Li Yong, Li Chaorong. Development Trend and Analysis of Armed Helicopter Technology[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2014, 34(6): 23-26, 67.
- [14] 徐宝宇, 张宏军, 郝凯强, 等. 嵌入式武装直升机火力攻防对抗训练仿真器研制[J]. *系统仿真学报*, 2013, 25(8): 1841-1845, 1850.  
Xu Baoyu, Zhang Hongjun, Hao Kaiqiang, et al. Design of Embedded Firepower Attacking and Defending Confrontation Training Simulator of Gunship[J]. *Journal of System Simulation*, 2013, 25(8): 1841-1845, 1850.
- [15] 高晓光, 胡明, 郑景嵩. 突防任务中的单机对多目标干扰决策[J]. *系统工程与电子技术*, 2010, 32(6): 1239-1243.  
Gao Xiaoguang, Hu Ming, Zheng Jingsong. Jamming Strategy for Single Plane to Multi-target in Task of Penetration[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2010, 32(6): 1239-1243.
- [16] 毋嘉纬, 周林, 金勇, 等. 基于主客观相结合的空中目标威胁评估[J]. *指挥信息系统与技术*, 2022, 13(1): 22-29.  
Wu Jiawei, Zhou Lin, Jin Yong, et al. Air Target Threat Assessment Based on Subjective and Objective Combination[J]. *Command Information System and Technology*, 2022, 13(1): 22-29.