

基于主客观综合赋权的 CGF 态势评估建模研究

张 媛¹, 刘文彪², 张立民³

(1. 海军航空工程学院 5 系, 山东 烟台 264001; 2. 海军航空工程学院 2 系, 山东 烟台 264001;
3. 海军航空工程学院科研部, 山东 烟台 264001)

摘 要: 超视距空战仿真中, 计算机生成兵力 (computer generated forces, CGF) 实体态势评估行为是一种综合反映决策者主观偏好和决策信息客观排序结果的理性行为。为了解决 CGF 实体态势评估行为建模过程中作战信息的客观模糊性与指挥员的思维主观性相结合的问题, 提出一种基于主客观综合赋权的 CGF 态势评估建模方法。该方法以对超视距空战中 CGF 实体态势评估行为产生机制的分析为基础, 以模糊多属性决策方法为工具, 根据主客观综合赋权的多属性决策方法, 计算出目标各威胁因素的权重, 得出当前空战态势中各 CGF 实体的威胁排序结果, 进而估计出目标可能的作战意图。实例验证表明, 基于主客观综合赋权的 CGF 态势评估仿真方法能有效地模拟实际兵力的态势评估行为, 提高超视距空战仿真中 CGF 实体行为决策的真实性。

关键词: 智能决策; 态势评估行为; 主客观综合赋权方法; 权重计算; 模糊多属性决策

中图分类号: TP391; O159

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.1001-506X.2013.01.14

Situation assessment modeling for CGF based on the subjective and objective integrated weight

ZHANG Yuan¹, LIU Wen-biao², ZHANG Li-min³

(1. Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China;

2. Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China;

3. The Research Department, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: The situation assessment behavior for computer generated forces (CGF) in the beyond-visual-range air combat is a sense reasoning process with the entity subjective and the situation information objective. In order to solve the combinational question for the information with ambiguous and the commander thinking with subjective in CGF simulation assessment behavior model, a modeling method for the CGF situation assessment based on the subjective and objective integrated weight is proposed. Based on the output mechanism analysis for the CGF situation assessment behavior in combat simulation, the weight coefficient for each CGF threat factor is calculated according to the fuzzy multi-attribute decision making technology and subjective and objective integrated weight calculation technology. And then the threat sequencing in the current situation is calculated, as well as the possible battle intention is gotten. The results show that the algorithm can realistically simulate the situation assessment process of real battle forces and improve the authenticity of CGF decision-making in the beyond-visual-range air combat simulation.

Keywords: intelligent decision-making; situation assessment behavior; subjective and objective integrated weight method; weight calculating; fuzzy multi-attribute decision making

0 引 言

在超视距空战仿真中, 对计算机生成兵力 (computer generated forces, CGF) 实体的态势进行评估就是模拟在一定的时间和空间范围内对虚拟战场环境中的各参战兵力的

威胁程度进行感知, 在一定时间内实现对目标 CGF 实体的状态变化及其可能采取作战计划的判断过程^[1]。CGF 实体一旦完成对当前战场态势的估计, 决策几乎可以根据态势自动生成^[2-3]。因此, CGF 实体态势评估行为是超视距空战仿真环境下, CGF 实体进行战术任务规划、武器目标

分配以及机动方式选择的前提^[4]。

战场环境是一个复杂的、具有不确定人为因素的综合环境^[5-7]。目前,用于处理战场态势评估的建模方法很多,典型的有模糊推理方法^[2,8]、区间数灰色关联分析法^[9]、D-S 证据理论法^[10-11]、贝叶斯网络方法^[12-15]、云模型^[16]、基于 Agent 的方法^[12,17]以及多种方法的结合与改进。这些方法虽然各有优缺点,分别适应不同的情形,但是它们或者计算复杂度较高,不适用于超视距空战仿真的需求;或者对当前战场仿真态势的综合评价不足,不能兼顾作战环境的客观因素与指挥员的主观因素,从而不能真实体现超视距空战中指挥实体的决策过程。

针对上述问题,本文提出一种基于主客观综合赋权的 CGF 态势评估建模方法。该方法以对 CGF 态势评估行为产生机制的分析为基础,以模糊多属性决策方法为工具,从指挥员的主观判断和战场环境的客观排序结果相结合的角度出发,通过主客观综合赋权法确定各目标的威胁因素权重,确立当前空战态势中各目标的威胁排序,进而估计出目标可能采取的作战行为,在一定程度上提高了 CGF 实体进行态势评估决策行为的真实性。

1 CGF 态势评估行为产生机制分析

超视距空战中,CGF 实体所进行的态势评估是模拟作战指挥员针对态势不同层面所采取的思维过程^[18],包含态势特征提取、态势理解和态势评估三部分内容,产生机制过程如图 1 所示。

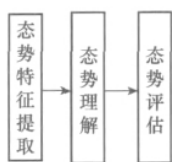


图 1 CGF 实体态势评估行为产生机制

态势特征提取的输入源为该时刻当前战场环境下诸威胁单元的信息(如歼击机、装甲车辆、水面舰艇等),态势特征提取的过程就是从态势信息空间中提取态势特征向量的过程,如目标位置的变化、目标航向信息等。

态势理解的过程就是根据生成的态势特征向量结合领域专家的知识对当前态势进行解释,用于判断敌方行动企图(穿插、迂回、逃跑等),进一步形成战场态势理解空间,并根据不断到来的态势特征向量修正态势理解空间。

态势评估过程是基于对当前态势的理解,评判当前态势对己方的威胁等级或对未来可能出现的态势情况进行预测。

由于战场环境中各作战信息是模糊不确定的,而且评估过程中还需要体现指挥员的主观思维活动特点^[19-20],因此,超视距空战仿真中,CGF 实体所进行的态势评估行为是一个集战场环境客观信息与参战人员主观反映的综合决策过程,如图 2 所示。

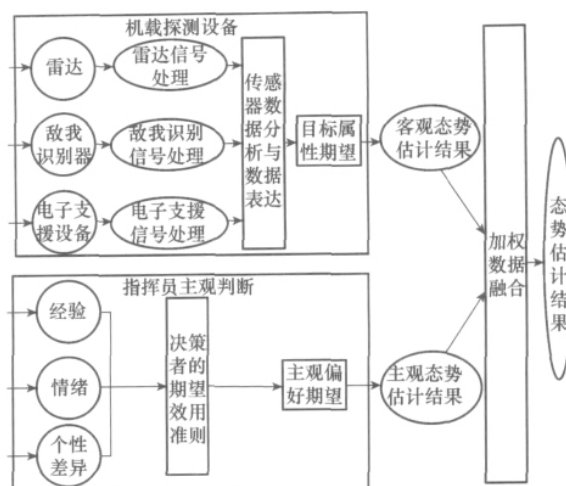


图 2 多机协同作战态势信息融合结构图

在图 2 中,CGF 实体在对当前战场态势情况进行评估的过程中,首先,对当前空战态势中的目标信息进行分析,获得当前态势下各目标的威胁期望值,此过程属于客观信息的一级融合过程;然后,CGF 实体利用其个体经验、情绪以及个体差异等形成的主观偏好,在获得客观信息的基础上,将主观判断与客观信息融合结果相结合,实现对 CGF 实体“理性”决策行为的模拟。

2 基于主客观综合评判的 CGF 态势评估仿真方法

超视距空战仿真过程中,由于作战环境是一个复杂的、具有多种不确定因素^[5-7]的环境,因此,指挥员在态势估计时很难准确得到一些目标的信息,进而对目标的态势信息估计就具有模糊性。为了体现真实作战过程中指挥员决策过程的模糊性特点及其主观思维判断能力,在对超视距空战仿真中 CGF 态势评估行为产生机制分析的基础上,提出一种基于主客观综合赋权的 CGF 态势评估仿真方法,具体仿真流程如图 3 所示。

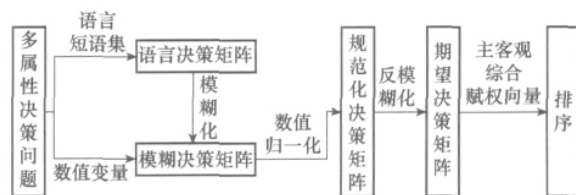


图 3 基于主客观综合赋权的 CGF 态势评估仿真流程

2.1 模糊决策属性的规范化处理

设超视距空战仿真中的 CGF 实体集合为 $X = \{X_1, X_2, \dots, X_m\}$, 其中, X_i 表示第 i 个 CGF 实体; CGF 实体的威胁因素集为 $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$, 其中, P_j 表示第 j 个威胁因素, 各威胁因素的权重向量为 $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$, 且满足 $\sum_{j=1}^n w_j = 1$; 威胁决策矩阵为 $A = [a_{ij}]_{m \times n}$, 其中, a_{ij} 表

示第 i 个 CGF 实体 X_i 对于第 j 个威胁因素 P_j 的一个估计。

为了消除不同物理量纲对决策结果的影响,令 $\bar{M} = (1, 2, \dots, m), N = (1, 2, \dots, n)$ 。根据文献[21]中给出的模糊决策矩阵规范化计算方法,将 $\hat{A} = [\hat{a}_{ij}]_{m \times n}$ 转变为规范化矩阵 $\hat{B} = [\hat{b}_{ij}]_{m \times n}$ 。

$$\hat{b}_{ij} = \hat{a}_{ij} / \|\hat{a}_{ij}\|, \quad j \in \Omega_1, i \in \bar{M} \quad (1)$$

$$\hat{b}_{ij} = \left(\frac{1}{\hat{a}_{ij}} \right) / \left\| \frac{1}{\hat{a}_{ij}} \right\|, \quad j \in \Omega_2, i \in \bar{M} \quad (2)$$

式中, $\hat{b}_{ij} = [b_{ij}^L, b_{ij}^M, b_{ij}^U]$, $\Omega_i (i=1, 2)$ 分别为效益型指标集和成本型指标集;

$$\|\hat{a}_{ij}\| = \sqrt{\sum_{i=1}^m \hat{a}_{ij}^2}, \quad \left\| \frac{1}{\hat{a}_{ij}} \right\| = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{1}{\hat{a}_{ij}} \right)^2}$$

根据三角模糊数的运算法则^[22-23],把式(1)和式(2)写为

$$\begin{cases} b_{ij}^L = a_{ij}^L / \sqrt{\sum_{i=1}^m (a_{ij}^U)^2} \\ b_{ij}^M = a_{ij}^M / \sqrt{\sum_{i=1}^m (a_{ij}^M)^2}, j \in \Omega_1, i \in \bar{M} \\ b_{ij}^U = a_{ij}^U / \sqrt{\sum_{i=1}^m (a_{ij}^L)^2} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} b_{ij}^L = \frac{1}{a_{ij}^U} / \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{1}{a_{ij}^L} \right)^2} \\ b_{ij}^M = \frac{1}{a_{ij}^M} / \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{1}{a_{ij}^M} \right)^2}, j \in \Omega_2, i \in \bar{M} \\ b_{ij}^U = \frac{1}{a_{ij}^L} / \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{1}{a_{ij}^U} \right)^2} \end{cases} \quad (4)$$

属性值 \hat{b}_{ij} 可以看成在数值型威胁因素 P_j 下,对 CGF 实体 X_i 的客观偏好值。

2.2 决策矩阵的期望值计算

决策矩阵的期望值计算就是将模糊化的属性值转化为数值型属性值的过程。

由于作战决策的制定过程因指挥员的经验以及主观意图不同而显现差异,假定决策者对威胁估计决策矩阵中各 CGF 目标实体的主观偏好值为三角模糊数 $\hat{v}_i = [v_i^L, v_i^M, v_i^U]$,分别计算三角模糊数形式的主观偏好值 $\hat{v}_i^{[24]}$ 以及规范化矩阵 \hat{B} 中元素 $\hat{b}_{ij} (i \in \bar{M}, j \in N)$ 的期望值^[25],即

$$\hat{v}_i^{(a)} = \frac{1}{2}[(1-\alpha)v_i^L + v_i^M + v_i^U], i \in \bar{M} \quad (5)$$

$$\hat{b}_{ij}^{(a)} = \frac{1}{2}[(1-\alpha)b_{ij}^L + b_{ij}^M + \alpha b_{ij}^U], i \in \bar{M}, j \in N \quad (6)$$

式中, $0 \leq \alpha \leq 1$, 且 α 值的选择取决于决策者的风险态度。当 $\alpha > 0.5$ 时,称决策者是追求风险的;当 $\alpha = 0.5$ 时,表示决策者是风险中立的;当 $\alpha < 0.5$ 时,表示决策者是厌恶风险的,从而得到期望决策矩阵 $\hat{B}^{(a)} = [\hat{b}_{ij}^{(a)}]_{m \times n}$ 。

2.3 主客观综合权重的确定

为了使各威胁因素的权向量 w 可以同时反映主观程度和客观程度,将主观赋权法^[26]和客观赋权法^[27]进行集成或综合,参照文献[28]中提出的基于主客观综合赋权的决策分析方法,构造双目标决策矩阵模型为

$$\begin{aligned} \min Z_1 &= \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n (v_{kj}^{(a)} w_j - w_k)^2 \\ \min Z_2 &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (b_j^* - b_{ij}^{(a)})^2 w_j^2 \\ \text{s. t. } &\sum_{j=1}^n w_j = 1, w_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (7)$$

式中, $b_j^* = \max \{b_{ij}^{(a)} \mid i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n\}$, 为期望决策矩阵 $\hat{B}^{(a)} = [\hat{b}_{ij}^{(a)}]_{m \times n}$ 中第 j 个属性 P_j 的理想值。

为了求解模型式(7),可以采用多目标决策分析中的线性加权和法,该模型转化成最优化模型为

$$\begin{aligned} \min Z &= \alpha \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n (v_{kj}^{(a)} w_j - w_k)^2 + \beta \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (b_j^* - b_{ij}^{(a)})^2 w_j^2 \\ \text{s. t. } &\sum_{j=1}^n w_j = 1, w_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (8)$$

式中, α 和 β 分别表示主观赋权法和客观赋权法的重要程度, $0 < \alpha, \beta < 1$, 且 $\alpha + \beta = 1$ 。

可以看出,式(8)是一个非线性(二次)规划问题,求解此问题所得到的最优解 $w^* = (w_1^*, w_2^*, \dots, w_n^*)^T$, 可以认为是由主客观综合方法确定的属性权向量。因此构造矩阵 $Q = [q_{ij}]_{n \times n}$, 根据 Q 阵中的元素,计算出指标权向量 w^* 为

$$w^* = \frac{Q^{-1} e}{e^T Q^{-1} e} \quad (9)$$

式中

$$q_{ii} = \alpha \left[\sum_{k=1}^n d_{kj}^2 + (n-2) \right] + \beta \sum_{k=1}^n (b_i^* - b_{ki}^{(a)})^2, j = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

$$q_{ij} = -\alpha (d_{ij} + d_{ji}), i, j = 1, 2, \dots, n, i \neq j \quad (11)$$

综上所述,基于主客观综合评判的 CGF 态势评估仿真步骤如下:

步骤 1 输入当前态势中各 CGF 目标实体的性能参数及其当前态势信息,构建目标态势综合模糊决策矩阵 $\hat{A} = [\hat{a}_{ij}]_{m \times n}$;

步骤 2 由式(1)~式(4)完成综合模糊决策矩阵 \hat{A} 为 $[\hat{a}_{ij}]_{m \times n}$ 的规范化处理,形成规范化决策矩阵 $\hat{B} = [\hat{b}_{ij}]_{m \times n}$;

步骤 3 分别根据式(5)和式(6)计算决策矩阵中各属性的主观偏好值和客观偏好值的期望决策矩阵 $\hat{B}^{(a)} = [\hat{b}_{ij}^{(a)}]_{m \times n}$;

步骤 4 由主客观综合赋权法中非线性规划模型的计

算公式(式 8),依据式(9)~式(11)计算出各指标的综合权重向量 $w^* = (w_1^*, w_2^*, \dots, w_n^*)^T$;

步骤 5 采用文献[29]中建立的超视距威胁函数计算公式,得出每个决策方案的目标综合评估价值(或给出评价价值) T_{total} ,得出相应的目标威胁排序结果。

3 算例分析

假设当前空战态势信息为:参战红方为 2 架 R 型歼击机(带两枚可全向攻击的某型中程空空导弹,射程为 90 km,使用高度为 22 km,最大速度为 $Ma=4$),飞机使用高度为 22 km,飞机雷达最大探测距离为 120 km,此时红方飞机位置为 $R_1(-20,190,10)$ 、 $R_2(-10,200,12)$ 。蓝方为 2 架飞

机,其中 1 架 F 型歼击机(带两枚可全向攻击的某型中程空空导弹,射程为 85 km,使用高度为 18 km,最大速度为 $Ma=3$),飞机使用高度为 18 km,飞机雷达最大探测距离为 130 km;1 架 H 型歼击机(带两枚可迎头攻击的某型中程空空导弹,射程为 100 km,使用高度为 20 km,最大速度为 $Ma=4$),飞机使用高度为 20.5 km,飞机雷达最大探测距离为 140 km。蓝方飞机位置为 $B_1(-15,290,9)$ 、 $B_2(15,290,9)$ 。参战的 CGF 飞机实体对 (A_1, B_1) 、 (A_2, B_1) 、 (A_1, B_2) 、 (A_2, B_2) 共同组成决策方案集 $X = \{X_1, X_2, X_3, X_4\}$,根据文献[19]中建立的超视距协同空战威胁函数计算公式,计算出决策方案集 X 中,蓝方 CGF 实体相对红方 CGF 实体的威胁值,其属性值均以三角模糊数形式给出,具体如表 1 所示。

表 1 每个 CGF 目标实体在各威胁因素下的威胁值

威胁属性	目标实体			
	X_1	X_2	X_3	X_4
攻击模式威胁	[0.60, 0.67, 0.70]	[0.60, 0.67, 0.70]	[0.60, 0.67, 0.70]	[0.60, 0.67, 0.70]
导弹速度威胁	[0.80, 0.85, 0.90]	[0.83, 0.85, 0.89]	[0.88, 0.90, 0.93]	[0.81, 0.83, 0.89]
飞机速度威胁	[0.47, 0.49, 0.52]	[0.70, 0.77, 0.78]	[0.63, 0.70, 0.75]	[0.58, 0.63, 0.72]
距离威胁	[0.77, 0.79, 0.82]	[0.78, 0.79, 0.81]	[0.72, 0.76, 0.80]	[0.72, 0.76, 0.80]
高度威胁	[0.67, 0.77, 0.83]	[0.62, 0.65, 0.68]	[0.81, 0.83, 0.88]	[0.77, 0.78, 0.80]
空战能力	[0.65, 0.69, 0.72]	[0.69, 0.72, 0.75]	[0.65, 0.69, 0.72]	[0.66, 0.78, 0.84]

试确定最佳方案,利用本文的方法对 4 个方案进行排序,具体步骤如下:

步骤 1 根据表 1 中数据建立模糊决策矩阵 $\hat{A} =$

$[\hat{a}_{ij}]_{4 \times 6}$;

步骤 2 由于各项指标均为效益型指标,故可由式(4),将模糊决策矩阵 \hat{A} 转化为规范化决策矩阵 \hat{B} ;

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} [0.60, 0.67, 0.70] & [0.60, 0.67, 0.70] & [0.60, 0.67, 0.70] & [0.60, 0.67, 0.70] \\ [0.80, 0.85, 0.90] & [0.83, 0.85, 0.89] & [0.88, 0.90, 0.93] & [0.81, 0.83, 0.89] \\ [0.47, 0.49, 0.52] & [0.70, 0.77, 0.78] & [0.63, 0.70, 0.75] & [0.58, 0.63, 0.72] \\ [0.77, 0.79, 0.82] & [0.78, 0.79, 0.81] & [0.72, 0.76, 0.80] & [0.72, 0.76, 0.80] \\ [0.67, 0.77, 0.83] & [0.62, 0.65, 0.68] & [0.81, 0.83, 0.88] & [0.77, 0.78, 0.80] \\ [0.65, 0.69, 0.72] & [0.69, 0.72, 0.75] & [0.65, 0.69, 0.72] & [0.66, 0.78, 0.84] \end{bmatrix}^T$$

$$\hat{B} = \begin{bmatrix} [0.429, 0.5, 0.539] & [0.429, 0.5, 0.539] & [0.429, 0.5, 0.539] & [0.429, 0.5, 0.539] \\ [0.443, 0.495, 0.542] & [0.46, 0.495, 0.536] & [0.488, 0.525, 0.56] & [0.449, 0.484, 0.536] \\ [0.336, 0.374, 0.436] & [0.5, 0.587, 0.649] & [0.45, 0.534, 0.624] & [0.414, 0.48, 0.599] \\ [0.477, 0.51, 0.548] & [0.483, 0.51, 0.541] & [0.446, 0.49, 0.535] & [0.446, 0.49, 0.535] \\ [0.418, 0.506, 0.575] & [0.387, 0.427, 0.471] & [0.506, 0.546, 0.61] & [0.481, 0.513, 0.554] \\ [0.428, 0.479, 0.543] & [0.455, 0.499, 0.566] & [0.428, 0.479, 0.543] & [0.435, 0.541, 0.634] \end{bmatrix}^T$$

步骤 3 假设决策者对 4 个方案 $x_i (i=1, 2, 3, 4)$ 的主观偏好值分别为

$$\begin{aligned} \hat{v}_1 &= [0.50, 0.55, 0.60] \\ \hat{v}_2 &= [0.40, 0.45, 0.50] \\ \hat{v}_3 &= [0.35, 0.40, 0.50] \\ \hat{v}_4 &= [0.55, 0.57, 0.60] \end{aligned}$$

步骤 4 利用式(5)和式(6)分别计算主观偏好值 \hat{v}_i 的期望值 $\hat{v}_i^{(a)}$ 以及规范化矩阵 \hat{R} 的期望决策矩阵 $\hat{R}^{(a)}$ 为

$$\begin{aligned} \hat{v}_1^{(a)} &= 0.525 + 0.05\alpha \\ \hat{v}_2^{(a)} &= 0.425 + 0.05\alpha \\ \hat{v}_3^{(a)} &= 0.365 + 0.07\alpha \\ \hat{v}_4^{(a)} &= 0.560 + 0.025\alpha \end{aligned}$$

$$\hat{\mathbf{R}}^{(a)} = \begin{bmatrix} 0.734 - 0.22\alpha & 0.734 - 0.22\alpha & 0.734 - 0.22\alpha & 0.734 - 0.22\alpha \\ 0.74 - 0.22\alpha & 0.746 - 0.23\alpha & 0.787 - 0.24\alpha & 0.725 - 0.22\alpha \\ 0.573 - 0.17\alpha & 0.868 - 0.26\alpha & 0.804 - 0.23\alpha & 0.747 - 0.21\alpha \\ 0.768 - 0.24\alpha & 0.745 - 0.24\alpha & 0.736 - 0.22\alpha & 0.736 - 0.22\alpha \\ 0.8 - 0.21\alpha & 0.643 - 0.19\alpha & 0.831 - 0.25\alpha & 0.774 - 0.24\alpha \\ 0.725 - 0.21\alpha & 0.76 - 0.23\alpha & 0.725 - 0.22\alpha & 0.805 - 0.22\alpha \end{bmatrix}^T$$

步骤 5 依据式(8)~式(11)计算出各指标的综合权向量 $\mathbf{w}^* = (0.254\ 1, 0.132\ 1, 0.032\ 8, 0.116\ 6)$, 利用第 2.3 节的步骤 5 求得 4 个 CGF 实体相互之间的综合威胁值 T_{total} , 如表 2 所示。

表 2 红蓝双方 CGF 实体的威胁估计值

红方 CGF 实体	蓝方 CGF 实体	
	B_1	B_2
R_1	0.398 82	0.587 77
R_2	0.373 83	0.652 64

从表 2 中所列的蓝方飞机对红方飞机的威胁值以及文献[19]中关于 T_{total} 的定义可得, 蓝机 2 对红机 1 和红机 2 均具有较大的威胁, 红方实体处于作战劣势状态; 而红方实体相对于蓝机 1 处于优势地位, 因此, 为了减少红方实体的损失, 红方 CGF 实体 2 可以担任红方 CGF 实体 1 的掩护任务, 与红方 CGF 实体 1 进行协同作战。这样, 在整个空中编队 CGF 实体态势评估行为仿真中, 随着战场态势的变化, CGF 实体态势评估行为模型可以根据当前敌情动态, 更新对参战目标 CGF 实体作战意图的估计结果, 并且其态势估计结果和根据军事经验定性判断的结果是一致的。

4 结束语

在超视距空战仿真中, 对 CGF 飞机实体所进行的态势评估决策行为是 CGF 实体进行战术任务规划、武器目标分配以及机动方式选择等其他决策行为的基础, 是一个综合反映指挥员主观偏好和决策信息客观排序结果的理性行为。本文在全面分析空战仿真中 CGF 实体态势评估决策行为产生机制的基础上, 针对超视距空战仿真中, CGF 实体作战意图估计的特点, 提出了一种比较实用的基于主客观综合评判的 CGF 态势评估仿真方法, 最后通过给定的决策实例, 对所提方法进行验证, 在一定程度上提高了超视距空战仿真中 CGF 实体行为决策的真实性, 实现了对 CGF 实体“理性”决策行为的模拟。

参考文献:

- [1] Vakas D, Prince J, Blacksten R H, et al. Commander behavior and course of action selection in JWARS[C]// *Proc. of the Winter Simulation Conference*, 2001: 697-705.
- [2] Klein G A, Calderwood R, MacGregor D. Critical decision method for eliciting knowledge[J]. *IEEE Trans. on System, Man, and*

Cybernetics, 2010, 19(3): 462-472.

- [3] Hinman M L. Some computational approaches for situation assessment and impact assessment[C]// *Proc. of the 5th International Conference on Information Fusion*, 2002: 687-693.
- [4] Emrah G. Dynamic weapon-target assignment problem[D]. Florida: Middle East Technical University, 2011: 2-4.
- [5] 杨建池. Agent 建模理论在信息化联合作战仿真中的应用研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2007. (Yang J C. The application research of agent theory in the information joint operation simulation[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007.)
- [6] Rönquist R, Lucas A, Howden N. The simulation agent infrastructure(SAI)-incorporating intelligent agents into the CAEN close action simulator[C]// *Proc. of the SimTecT Conference*, 2010: 1301-1312.
- [7] Shakir A. Assessment of models of human decision-making for air combat analysis[EB/OL]. [2009-04-21]. <http://acs.ist.psu.edu/papers/shakir02-abstract.pdf>.
- [8] 付昭旺, 寇英信, 王琳, 等. 基于模糊综合评判法的空战多目标威胁评估[J]. *电光与控制*, 2009, 16(9): 29-32. (Fu Z W, Kou Y X, Wang L, et al. Multi-target threat assessment of air combat based on synthesis fuzzy assessment method[J]. *Electronics Optics & Control*, 2009, 16(9): 29-32.)
- [9] 张肃, 程启月, 解瑶, 等. 不确定空情信息条件下的意图识别方法[J]. *空军工程大学学报(自然科学版)*, 2008, 9(3): 50-53. (Zhang S, Cheng Q Y, Xie Y, et al. A method of inference intention with uncertain aerial information[J]. *Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition)*, 2008, 9(3): 50-53)
- [10] 李瑛, 刘卫东. 一种新的证据表示模型及其在敌作战意图识别中的应用[J]. *指挥控制与仿真*, 2006, 28(6): 9-13. (Li Y, Liu W D. A new evidence model and its application for discriminating enemy's attacking intention[J]. *Command Control & Simulation*, 2006, 28(6): 9-13.)
- [11] 李伟生, 王宝树. 基于模糊逻辑和 D-S 证据推理的一种态势估计方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2003, 25(10): 1278-1280. (Li W S, Wang B S. The situation assessment method based on fuzzy sets and D-S evidence theory[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2003, 25(10): 1278-1280.)
- [12] Holmes D E, Jain C L. Innovations in Bayesian networks[M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.
- [13] Suzic R. Representation and recognition of uncertain enemy policies using statistical models[C]// *Proc. of the NATO/Research and Technology Organisation (RTO) Conference on Military Data and Information Fusion*, 2003: 176-192.
- [14] Suzic R. A generic model of tactical plan recognition for threat assessment[J]. *Multi-sensor, Multi-source Information Fu-*

- sion: Architectures, Algorithms and Applications, 2012, 5 (13):105-116.
- [15] Johansson F, Falkman G. Implementation and integration of a Bayesian network for prediction of tactical intention into a ground target simulator[C]// *Proc. of the 9th International Conference on Information Fusion*, 2008:1-8.
- [16] 麻士东, 韩亮, 龚光红, 等. 基于云模型的目标威胁等级评估[J]. 北京航空航天大学学报, 2010, 36(2):150-153. (Ma S D, Han L, Gong G H, et al. Target threat assessment technology based on cloud model[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2010, 36(2):150-153.)
- [17] Palmer D, Kirschenbaum M, Murton J, et al. Decentralized cooperative auction for multiple agent task allocation using synchronized random number generation[C]// *Proc. of the International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2012:1963-1968.
- [18] Ercetin A. Operational-level naval planning using agent-based simulation[D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2011.
- [19] Taliaferro J W. *Balancing risks: great power intervention in the periphery*[M]. Ithaca: Cornell University Press, 2004.
- [20] Ganderton P T, Brookshire D S, McKee M, et al. Buying insurance for disaster-type risks: experimental evidence[J]. *Journal of Risk and Uncertainty*, 2010, 20(3):271-283.
- [21] Witold P, Fernando G. An introduction to fuzzy sets analysis and design[M]. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 2008.
- [22] Kao C, Liu S T. Fractional programming approach to fuzzy weighted average[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2010, 120(3):435-444.
- [23] Lee D H, Park D. An efficient algorithm for fuzzy weighted average[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2007, 87(9):39-45.
- [24] Liou T S, Wang M J. Ranking fuzzy numbers with integral value[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1992, 50(3):247-255.
- [25] Hwang C L, Yoon K. *Multiple attribute decision making: methods and applications*[M]. New York: Springer-Verlag, 2011.
- [26] Saaty T L. *The analytic hierarchy process*[M]. New York: McGraw-Hill, 1980.
- [27] Zhang Y, Fan Z P. An approach for multiple attribute group decision making with incomplete information[C]// *Proc. of the 13th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, 2011: 2934-2938.
- [28] Ma J, Fan Z P, Huang L H. A subjective and objective integrated approach to determine attribute weights[J]. *European Journal of Operational Research*, 2009, 112(2):397-404.
- [29] 滕鹏, 刘栋, 张斌, 等. 超视距协同空战态势估计方法研究[J]. 电光与控制, 2008, 15(10):47-50. (Teng P, Liu D, Zang B, et al. On situation assessment method in beyond-visual-range coordinated air combat [J]. *Electronics Optics & Control*, 2008, 15(10):47-50.)

作者简介:

张 媛(1982-),女,讲师,博士,主要研究方向为智能决策、计算机生成兵力、仿真系统集成与设计。

E-mail:zy_lwb@sina.com

刘文彪(1980-),男,讲师,博士,主要研究方向为系统优化与仿真。

E-mail:lwb80314@sohu.com

张立民(1966-),男,教授,博士,主要研究方向为仿真系统优化设计、复杂作战环境建模、智能决策建模。

E-mail:iamzlm@163.com