

基于滑动窗口 CRITIC-G1 的空战态势评估

张彦斌¹, 杨智慧², 王伟², 周向东¹, 王栋¹

(1. 空军工程大学航空工程学院, 西安, 710038; 2. 西安电子科技大学通信工程学院, 西安, 710071)

摘要 传统的指标重要性相关 (CRITIC) 方法进行态势评估不能实现变权重, 仅从数据本身属性出发进行赋权, 忽略了专家意见, 且 CRITIC 方法本身会使得图像抖动。针对以上问题, 提出一种基于滑动窗口 CRITIC-G1 的近距离空战态势评估方法, 将空战数据进行预处理, 得到根据时间变化的优势函数矩阵, 采用滑动窗口的方法将优势函数矩阵进行分解, 通过对滑动窗口中的优势函数矩阵进行 CRITIC-G1 赋权, 从而既实现变权重, 又完成重要性排序的权重优化; 同时引入变异系数降低综合优势函数图像抖动。最终输出飞机的综合优势函数值, 对于两飞机的综合优势函数值进行分析得到态势评估的结果。仿真结果表明, 滑动窗口 CRITIC-G1 法较传统 CRITIC 方法准确性提高了 22.75%。

关键词 空战态势评估; 滑动窗口; CRITIC-G1; 变权重

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2023.03.010

中图分类号 V271.4 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2023)03-0073-07

An Assessment of Situation in Air Combat Based on Sliding Window CRITIC-G1

ZHANG Yanbin¹, YANG Zhihui², WANG Wei², ZHOU Xiangdong¹, WANG Dong¹

(1. Aeronautics Engineering School, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;

2. School of Communication Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract Aimed at the problems that in the air combat, the traditional CRITIC (Criteria Importance Though Inter-criteria Correlation) method is hard put to assess situation to achieve variable weights, assigning weights are only begging from the attributes of the data itself, expert opinions are neglected, and the CRITIC method itself makes image jitter, a sliding window CRITIC-G1 based close air combat situational assessment method is proposed. The method is to pre-processes the air combat data to obtain a dominance function matrix with change according to time, decompose the dominance function matrix by adopting the sliding window method, and assign CRITIC-G1 weights to the dominance function matrix in the sliding window, achieving both variable weights and the importance ranking-based weighting optimization. Simultaneously, the coefficient of variation is introduced to reduce the combined dominance function image jitter. The final output is the combined dominance function values of the aircraft, and the results of the situational assessment are obtained by analyzing the combined dominance function values of the two aircraft. The experimental results show that the sliding-window CRITIC-G1 method is an accuracy increase of 22.75%.

Key words air combat situation assessment; sliding window; CRITIC-G1; variable weights introduction

收稿日期: 2022-11-03

基金项目: 国家自然科学基金(22021201)

作者简介: 张彦斌(1990-), 男, 甘肃定西人, 硕士生, 研究方向为智能空战。E-mail: zyb271006@163.com

引用格式: 张彦斌, 杨智慧, 王伟, 等. 基于滑动窗口 CRITIC-G1 的空战态势评估[J]. 空军工程大学学报, 2023, 24(3): 73-79. ZHANG Yanbin, YANG Zhihui, WANG Wei, et al. An Assessment of Situation in Air Combat Based on Sliding Window CRITIC-G1[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2023, 24(3): 73-79.

空战态势评估^[1]是指在高对抗环境下获取目标态势信息、综合处理动态信息并量化显示为态势优劣情况,辅助飞行员进行机动决策的方法。为了占据战场态势的优势、先于对方形成观察、判断、决策、行动 OODA(observe orient decide act)环,达到先发制人的效果,飞行员需要快速机动占位,研究如何定量描述空战中的飞行员快速占位的动态过程,以及占位过程中态势的变化情况,对于进行下一步决策具有十分重要的指导意义。

目前对于空战态势评估的研究主要分为态势评估模型优化与改进,以及态势影响指标客观权重的赋权。赋权法主要分为主观赋权法和客观赋权法两种,主观赋权法代表方法为层次分析法,客观赋权法代表方法为熵权法^[2]和指标重要性相关方法(criteria importance through intercriteria correlation, CRITIC)。这是 Diakoulaki 提出的一种指标权重的客观赋值法^[3],用于在多指标问题中确定指标的权重,可以较好地评估指标的信息量和指标之间的相关性。文献[4~8]提出了通过构建优势函数来评估双方态势的方法;文献[9]提出了一种基于动态变权重的空战态势评估方法,根据空战评估指标影响因素分析构建均衡函数,得到指标状态的变权向量,从而实现变权重^[10];文献[11~12]将 CRITIC 算法改进后引入空战态势评估中,用于解决多指标权重分配的问题;文献[13]提出了基于改进 CRITIC-G1 法组合赋权云模型的高阶段充填体稳定性分析。G1 法又称为序关系分析法,是一种改进的层次分析法。与层次分析法相比,G1 法不仅不需要进行一致性检验,而且计算更为简单。CRITIC-G1 同时综合了专家经验和 CRITIC 赋权结果,兼顾了主客观因素,使计算结果更为合理。因此,本文将 CRITIC-G1 迁移至近距空战态势问题研究中。

1 空战态势评估模型

在近距空战态势评估中,主要考虑双方的相对角度、速度、高度以及能量。

1.1 角度优势函数

在近距空战中占据有利的导弹发射角度,争取咬尾敌方,会使自身拥有打击敌方战机的先机,发射角度越小,自身存在的优势越大,选择典型参数,构建角度优势函数^[14-17]如下:

$$S_a = \begin{cases} \frac{2v}{600} e^{-\frac{2|\theta|}{\varphi_r}}, & |\theta| \leq \frac{\varphi_r}{2} \\ \frac{2v}{600} \left[0.36 - \frac{|\theta - \frac{\varphi_r}{2}|}{10(180 - \frac{\varphi_r}{2})} \right], & |\theta| > \frac{\varphi_r}{2} \end{cases} \quad (1)$$

式中: v 为本机当前的真实速度; θ 为敌机的方位角; φ_r 为雷达的最大探测角。可知当 θ 接近于 0 时,目标函数达到最大值。

1.2 速度优势函数

在近距空战中,占据速度优势有利于更快地改变空间位置,形成有利的态势,同时增大导弹发射包线,获得导弹发射的主动权。但是速度过大会导致负面问题,如转弯半径过大、油耗增加、飞行员转弯过载增大等。因此,载机的速度不是越大越好。选择典型参数,构建速度优势函数^[15]为:

$$S_v = \frac{v_p}{2v_t} e^{-\frac{|v_p - 2v_t|}{v_p}} \quad (2)$$

式中: v_p 为载机的速度; v_t 为敌机的速度; v_p 、 v_t 的取值范围为[200 m/s, 600 m/s]。

1.3 高度优势函数

在近距空战中,具备高度优势意味着载机拥有更大的重力势能,该能量可以转化为动能,为飞机机动占位提供支持,同时增大导弹发射包线。空战中高度差通常不大于 2 000 m。因此,高度差在一定范围内时,高度优势呈现上升趋势。基于上述分析,选择典型参数,构建高度优势函数为:

$$S_h = \begin{cases} 0.1, & \Delta_h < -2\,000 \\ 0.5 + \frac{\Delta_h}{5\,000}, & |\Delta_h| \leq 2\,000 \\ 0.9, & \Delta_h > 2\,000 \end{cases} \quad (3)$$

式中: Δ_h 为两机的实际高度差。

1.4 能量优势函数

能量是载机在空战中重力势能和动能的综合体现,能量的大小反映了载机重力势能与动能转换能力的大小,能量越大的载机,能量转换为快速机动的可能性越大,进行机动所消耗的油耗越低。基于上述分析,得到能量优势函数^[16-19]为:

$$E = H + \frac{v^2}{2g} \quad (4)$$

$$S_e = \begin{cases} 0.1, & \frac{E_p}{E_t} < 0.5 \\ 1 + \frac{0.9(E_p - 2E_t)}{1.5E_t}, & 0.5 \leq \frac{E_p}{E_t} \leq 2 \\ 1, & \frac{E_p}{E_t} > 2 \end{cases} \quad (5)$$

式中: H 为载机的实际高度; g 为重力加速度, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$; E_p 为载机的能量; E_t 为敌机的能量。

2 基于滑动窗口 CRITIC-G1 的动态变权重

本文基于滑动窗口 CRITIC-G1 方法流程见图 1。

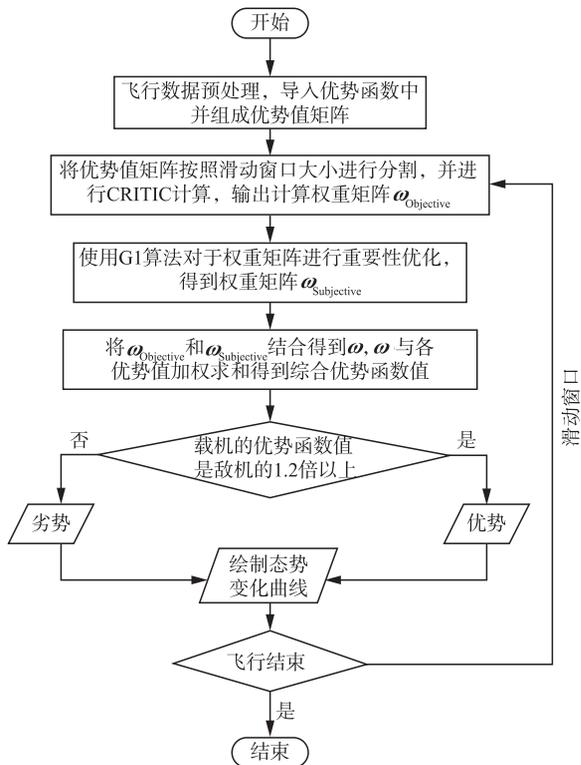


图 1 流程图

首先通过固定时序区间内的指标变化, 进行权重的动态调整, 从而实现从空战数据的客观角度出发, 由数据本身决定权重的变化, 实现变权重; 然后加入 G1 算法, 依据重要性排序, 对于改进 CRITIC 方法计算出的权重矩阵进行优化, 并通过加权求和计算出综合优势值。最后将各时序下敌我飞机的优势值进行比较, 得出态势结果。

2.1 建立评估矩阵并标准化

假设多属性决策问题有 n 个评估方案 $G = (g_1, g_2, \dots, g_i, \dots, g_n)$, m 个评估指标 $U = (u_1, u_2, \dots, u_j, \dots, u_m)$, 则 n 个评估方案对于 m 个评估指标的评估矩阵为 $Y = (y_{ij})_{m \times n}$, y_{ij} 表示评估方案 g_i 中指标 u_j 的值。

由于所选的评估指标类型和量纲各不相同, 需要对指标值进行标准化处理, 得到标准化评估矩阵 $X = (x_{ij})_{m \times n}$, 标准化处理方法如下:

效益型指标:

$$x_{ij} = \frac{y_{ij} - \min_i y_{ij}}{\max_i y_{ij} - \min_i y_{ij}} \quad (6)$$

成本型指标:

$$x_{ij} = \frac{\max_i y_{ij} - y_{ij}}{\max_i y_{ij} - \min_i y_{ij}} \quad (7)$$

固定型指标:

$$x_{ij} = 1 - \frac{|y_{ij} - \delta_{ij}|}{\max_i |y_{ij} - \delta_{ij}|} \quad (8)$$

式中: δ_j 为固定型指标 u_j 的最优取值。

2.2 基于滑动窗口 CRITIC-G1 确定指标权重

CRITIC 法^[20]是一种用于多属性决策问题中确定指标权重的客观赋值法, 其基本思想是以各评价指标之间的冲突性和评价指标的对比强度来综合衡量指标的客观权重。对比强度是指同一指标在不同评价方案之间的取值差异性大小。冲突性是以各指标之间的相关系数来衡量各指标之间相关性的大小。

传统的 CRITIC 方法中, 设 C_j 表示指标 u_j 所包含的信息量为:

$$C_j = \sigma_j \sum_{i=1}^n (1 - \zeta_{ij}) \quad (9)$$

式中: σ_j 为指标 u_j 的标准差, 用来表征对比强度; ζ_{ij} 为指标之间的相关系数, 式(8)表征指标之间的冲突性。则指标的权重为:

$$\omega_j = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^n C_j} \quad (10)$$

式中: ω_j 为指标的 u_j 指标权重。

但是传统的 CRITIC 法的计算公式存在以下 3 个问题:

1) CRITIC 法进行赋权时可能会引起数据图像的抖动, 这种抖动在赋权过程中会影响态势评估的准确性。

2) 标准差存在量纲。由于各评价指标的量纲不同, 导致标准差并不能反映评价指标的对比强度。

3) 在态势评估的过程中, 单从数据本身出发, 不能表示出各参数的重要性程度, 导致在态势评估的过程中, 关键结果的评估会因为某些情况下特定参数值的畸变而造成态势的虚高或者虚低。

针对以上问题, 本文提出了一种改进的 CRITIC 方法, 主要从 3 个方面进行改进:

1) 为改善 CRITIC 赋权时出现的图像抖动, 在进行权值计算时, 引入变异系数对权重进行更正:

$$C_j = \frac{\sigma_j}{E_j} \sum_{i=1}^n (1 - \zeta_{ij}) \quad (11)$$

式中: E_j 为指标 u_j 的均值。

2) 将各个优势函数的值归一化, 设定其为分数, 避免标准差不能反映量纲的问题。

3)采用滑动窗口 CRITIC-G1 结合的方式,设定态势评估中各参数的重要性排序,对于占据重要地位的参数进行增强,影响小的参数进行削弱,保证结果的准确度。态势评估中参数重要性排序为角度>速度>能量>高度,设定其权重增益矩阵为:

$$\mathbf{r}_{\text{Subjective}} = [r_{\text{Angle}} \quad r_{\text{Velocity}} \quad r_{\text{Energy}} \quad r_{\text{Height}}] \quad (12)$$

$$\omega_{\text{Subjective-g1}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^4 \prod_i r_{\text{Subjective}}[i]} \quad (13)$$

$$\omega_{\text{Subjective}} = \omega_{\text{Subjective-g1}} * \mathbf{r}_{\text{Subjective}} \quad (14)$$

$$\omega_{\text{Objective}} = [\omega_{\text{Angle}} \quad \omega_{\text{Velocity}} \quad \omega_{\text{Energy}} \quad \omega_{\text{Height}}] \quad (15)$$

$$\omega = \frac{\omega_{\text{Objective}} \times \omega_{\text{Subjective}}}{\omega_{\text{Objective}} * \omega_{\text{Subjective}}} \quad (16)$$

式中: ω_{Angle} 为角度权重; ω_{Velocity} 为速度权重; ω_{Energy} 为能量权重; ω_{Height} 为高度权重; ω 为最终计算出的权重矩阵。

3 仿真案例与分析

本文采用的飞行数据均为 DCS World(digital combat simulator world)^[21] 中的飞行模拟数据,DCS World 是由俄罗斯 Eagle Dynamics 公司开发的空战模拟平台,该平台具有空战拟真度高、数据接口丰富等特点。

设红色方为 1 号机,蓝色方为 2 号机,两飞机性能和武器装备完全一致,进行近距离空战。现在用 DCS World 中 2 架飞机的飞行数据进行验证,图 2 是空战飞行轨迹。

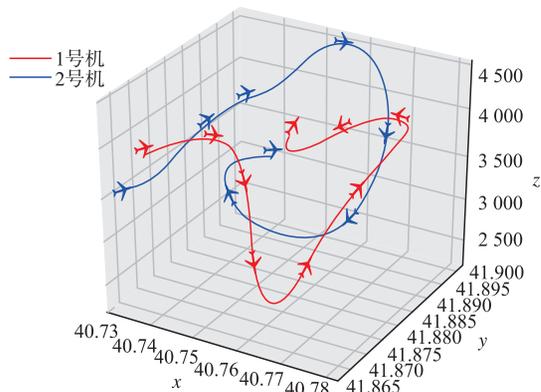


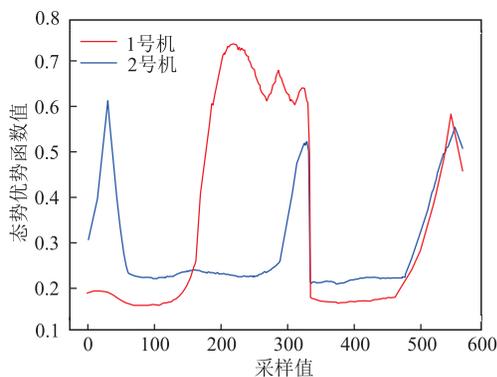
图 2 飞行轨迹图

飞机从图中的左侧出发,进行了如上的飞行过程:①第 1 阶段:在刚开始飞行时,2 号机在 1 号机的尾后,占据有利的位置;②第 2 阶段:1 号机开始摆脱,通过拉升高度之后的向下急转摆脱了 2 号机的追击,态势由优势向均势转变;③第 3 阶段:双方调整位置,2 号机俯冲向 1 号机,双方在交叉之后再回旋寻找发射机会;④第 4 阶段:2 号机做大幅度

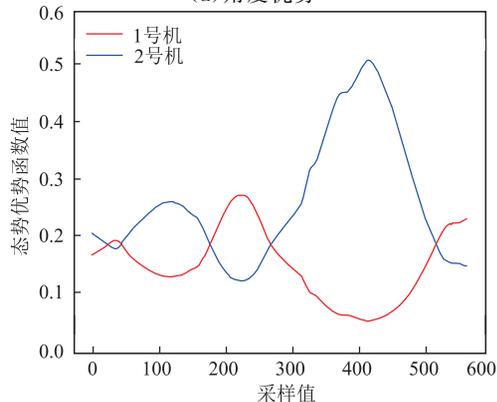
拉升回转,1 号机小幅度拉升回转,1 号机率先达到有利发射条件,最终将 2 号机击落。

由图 3(a)可见,在 0~150 采样间隔内 2 号机由极大的角度优势向均势转变,1 号机的角度优势呈现上升趋势,但 2 号机仍具备角度优势;在 150~320 采样间隔内,1 号机的角度优势急剧上升,2 号机在角度上处于劣势;在 320~480 采样间隔内,由于两飞机交叉飞行之后,都处于对方的尾部,双方均不存在角度优势;从第 480 采样间隔到结束,双方逐渐进入对方的攻击区内,角度优势函数值都在上升,呈现均势。

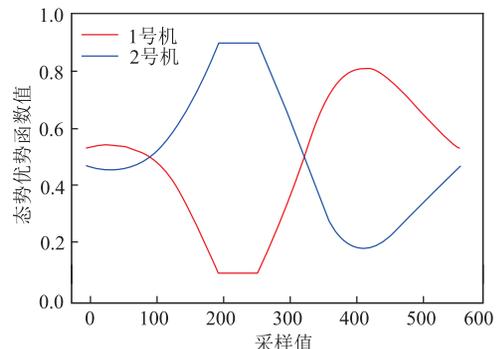
由图 3(b)可见,在前 170 个采样间隔中,2 号机占据较为微弱的速度优势,在第 170~260 个采样间隔内,1 号机占据较为微弱的速度优势,在第 260~510 个采样间隔内,蓝色方占据绝对的速度优势,在第 510 个采样间隔到结束,1 号机占据微弱的速度优势。



(a) 角度优势



(b) 速度优势



(c) 高度优势

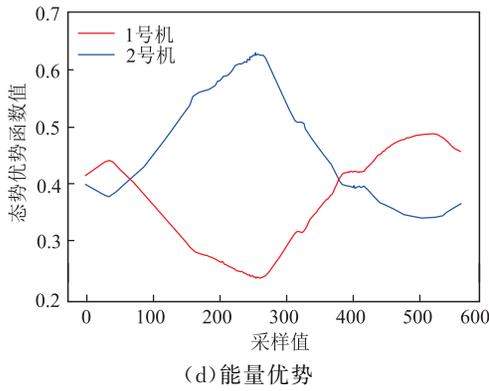


图 3 优势函数曲线图

由图 3(c)可见,在 0~100 采样间隔内,1 号机占据微弱的高度优势并向劣势过渡,2 号机的高度优势逐渐增大;在 100~260 采样间隔内,1 号机高度优势持续下降,在高度上处于劣势,2 号机高度优势持续上升,处于优势;在 260~310 采样间隔内,1 号机高度优势由劣势向均势转变,2 号机高度优势由优势向均势转变;在第 310 个采样间隔至结束,1 号机在高度上都具有优势,2 号机在高度上处于劣势。

由图 3(d)可见,在 0~70 采样间隔内,1 号机具有微弱的能量优势,并向劣势开始过渡;在 70~260 采样间隔内,2 号机能量优势逐渐增大,在能量上占据较大优势,1 号机处于劣势;在 260~390 采样间隔内,2 号机能量优势降低,向劣势过渡,但仍然具有一定的能量优势;在第 390 采样间隔到结束,1 号机能量优势逐渐增大,最终在导弹发射时占据能量优势。

图 4 是 CRITIC 方法的态势变化曲线,图中的纵向红色虚线表示红色方发射导弹的时刻。

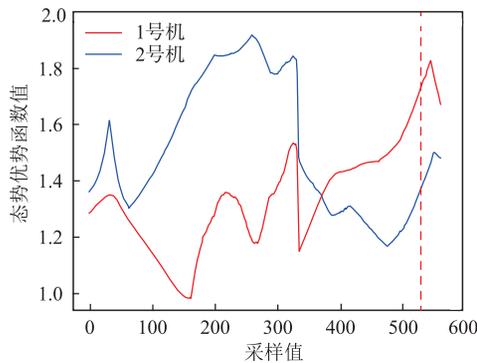


图 4 优势曲线图(CRITIC)

在 CRITIC 方法下,优势曲线和角度优势曲线相似度极高,其他 3 个参数仅仅是对最终的优势曲线进行了微调,在飞行的第 2 阶段,应当是 1 号机与 2 号机都处于均势,而 CRITIC 方法错误地将 2 号机评定为优势。其余部分表现良好,则 CRITIC 方

法下该组数据态势正确率为 75%。

滑动窗口 CRITIC 方法在飞行的第 2 阶段也将本应当处于均势的情况错误判断为 2 号机优势、1 号机劣势,并且在整个过程中,优势曲线存在较大幅度的波动,影响实际结果的判断,见图 5。

在滑动窗口 CRITIC-G1 算法中,增强了角度优势函数的重要性,同时也对其他 3 个权重进行了相应的调整,在之前两种方法中都出现错误的第二阶段飞行过程中,1 号机态势由优势向均势转变,且最终结果和仿真结果一致,在 1 号机占据优势时,将 2 号机击落,则滑动窗口 CRITIC-G1 方法下该组数据的态势评估正确率为 100%。通过计算 20 组数据在 CRITIC 方法和滑动窗口 CRITIC-G1 方法下的态势分布,与专家评判的 20 组数据态势分布结果对照,CRITIC 方法的准确率为 49.03%,滑动窗口 CRITIC-G1 方法的准确率为 71.78%,滑动窗口 CRITIC-G1 方法比 CRITIC 方法准确率提高 22.75%。

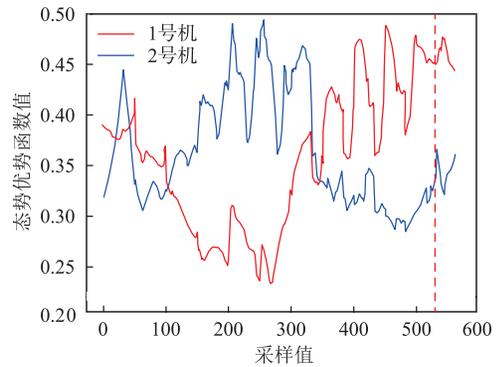


图 5 优势曲线图(滑动窗口 CRITIC)

图 6 是滑动窗口 CRITIC-G1 的态势变化曲线。

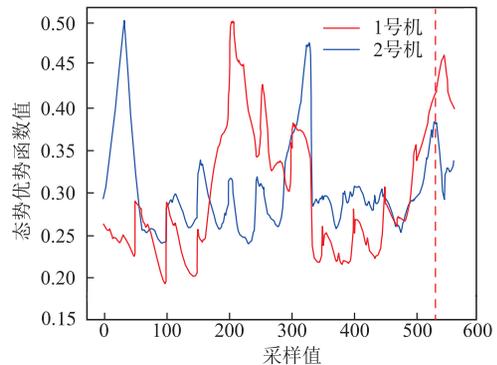


图 6 优势曲线图(滑动窗口 CRITIC-G1)

各个阶段用 P_N 表示,将专家判定结果,CRITIC 方法判定结果和滑动窗口 CRITIC-G1 方法判定结果按照左中右的顺序填写在实验结果表格中,结果中 T 表示优势,A 表示均势,F 表示劣势,则 20 组仿真实验结果见表 1。

表 1 实验结果

| 序号 | P_1 | P_2 | P_3 | P_4 | P_5 | P_6 | P_7 | P_8 | P_9 | P_{10} | P_{11} | P_{12} | CRITIC 准确度 | CRITIC-G1 准确度 |
|-----|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|---------------|------------------|
| 1 | FFF | AFA | ATA | TTT | | | | | | | | | 50% | 100% |
| 2 | TTT | ATT | ATT | FTT | | | | | | | | | 50% | 50% |
| 3 | FFF | AAA | FFF | AAA | FFF | TFA | FFF | FFF | AFF | FFF | | | 80% | 90% |
| 4 | TAT | ATA | FAF | FAA | AAA | AAA | TAA | ATT | ATT | ATT | AAA | ATA | 33.3% | 58.30% |
| 5 | AAA | ATA | ATT | TTT | TTT | | | | | | | | 60% | 80% |
| 6 | AAA | ATA | ATT | TTT | TTT | | | | | | | | 60% | 80% |
| 7 | AFA | TFT | AFA | AFF | FFF | | | | | | | | 20% | 80% |
| 8 | AAA | AFF | FFF | FFA | FFF | AFF | AAA | FFF | FFF | TTT | ATA | ATA | 66.6% | 75% |
| 9 | FAA | ATA | ATT | TTT | TTA | FAF | | | | | | | 33.3% | 50% |
| 10 | FFF | FFF | FAF | AAA | AAA | TAT | | | | | | | 66.6% | 100% |
| 11 | AAT | TTT | TAT | AAA | FTA | | | | | | | | 60% | 60% |
| 12 | TTT | AFT | TAT | AAA | FAF | ATA | AFA | AAA | TTT | | | | 44.4% | 88.8% |
| 13 | AAT | TAT | TAA | TTT | | | | | | | | | 50% | 50% |
| 14 | AAA | TAA | ATT | ATT | ATT | AAA | ATA | | | | | | 28.5% | 42.8% |
| 15 | AFA | ATT | TTT | ATA | ATT | | | | | | | | 20% | 60% |
| 16 | ATA | FAF | AFF | FFF | TFA | | | | | | | | 20% | 60% |
| 17 | AFF | AAA | ATA | ATF | | | | | | | | | 25% | 50% |
| 18 | FFF | FAF | FFF | | | | | | | | | | 66.6% | 100% |
| 19 | TTT | TTT | ATA | AAA | AAA | FAA | FFF | | | | | | 71.4% | 85.7% |
| 20 | TTT | TTT | ATA | TTA | | | | | | | | | 75% | 75% |
| 平均 | CRITIC 方法 | | | | | | | | | 49.03% | | | | |
| 准确度 | 滑动窗口 CRITIC-G1 | | | | | | | | | 71.78% | | | | |

4 结语

本文针对现有空战态势评估方法实时态势评估方面的不足,提出了一种基于滑动窗口 CRITIC-G1 的空战态势评估方法。该方法通过滑动窗口 CRITIC 方法进行变权重确定权值,满足各参数之间的均衡性,实时输出态势值;使用 G1 算法对建立增益权重矩阵,将态势评估中参数重要性排序为:角度>速度>能量>高度,此顺序反应出参数的重要性程度,以防特定参数值的畸变而导致态势的虚高或虚低;通过引入变异系数,改善了态势评估曲线图像抖动的问题,相较于传统 CRITIC 方法准确性提高了 22.75%,能够有效的反应空战态势的变化趋势。在未来发展中可以将空战态势评估精确量化后加入强化学习中构造稠密奖励,引导强化学习智能体根据自身态势进行空战机动决策。

参考文献

- [1] 胡涛,王栋,姜龙亭,等.空战智能态势评估技术与展望[J].军事文摘,2020(5):19-22.
[2] 孙学安,王寅,周齐贤.基于综合赋权的目标可攻击价

值综合评估排序[J/OL].北京航空航天大学学报:1-12[2023-05-26].

- [3] DIAKOULAKI D, MAVROTAS G, PAPAYANNAKIS L. Determining Objective Weights in Multiple Criteria Problems: The CRITIC Method[J]. Computers & Operations Research, 1995, 22(7): 763-770.
[4] 胡涛,王栋,黄震宇,等.基于前景理论和 VIKOR 法的空战威胁评估[J].空军工程大学学报(自然科学版),2020,21(5):62-68.
[5] LI S, WU Q, CHEN M, et al. Air Combat Situation Assessment of Multiple UCAVs with Incomplete Information[C]//Proceedings of 2020 Chinese Intelligent Systems Conference. Singapore: Springer, 2021: 18-26.
[6] YOU H, YU M, HAN Q. Air Combat Command and Guidance Situation Assessment Based on Attack Area[J]. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2019, 1302(2): 022040.
[7] 华家辉,孙鑫,陈晓东等.基于集群分析的空中作战目标威胁评估技术研究[J].战术导弹技术,2023,218(2):96-104,121.
[8] 杨振华.基于多属性决策的空战仿真目标分配算法研究[D].西安:西安电子科技大学,2022.
[9] 杨爱武,李战武,李宝,等.基于动态变权重的空战态势评估[J].兵工学报,2021,42(7):1553-1563.

- [10] 张堃,张振冲,刘泽坤,等. 基于 FD-TODIM 的混杂空战多目标动态威胁评估[J]. 系统工程与电子技术, 2023,45(1):148-154.
- [11] 胡涛,王栋,孙曜,等. 基于改进 CRITIC-LRA 和灰色逼近理想解排序法的空战威胁评估[J]. 兵工学报, 2020,41(12):2561-2569.
- [12] 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.
- [13] 王石,魏美亮,宋学朋,等. 基于改进 CRITIC-G1 法组合赋权云模型的高阶段充填体稳定性分析[J]. 重庆大学学报, 2022,45(2):68-80.
- [14] TANG R, ZHUO Z, ZHANG C, et al. The Applications of Artificial Intelligence in Situation Assessment and Game Countermeasure During Unmanned Air Combat[C]//2019 IEEE International Conference on Unmanned Systems (ICUS). [S. l.]: IEEE, 2019: 909-913.
- [15] 胡涛,王栋,姜龙亭,等. 基于改进 MGM(1,N) 轨迹预测的空战态势评估[J]. 电光与控制, 2020,27(11): 39-44,96.
- [16] 张立鹏,相猛. 基于 MADM 的多UCAV 空战态势威胁评估[J]. 工业仪表与自动化装置, 2014(2): 109-112.
- [17] 姜燕,王道波,林飞等. 基于匈牙利融合遗传算法的多无人机不平衡目标分配[J]. 电光与控制, 2023, 30(5):6-10,22.
- [18] 徐安,陈星,李战武,等. 基于战术攻击区的超视距空战态势评估方法[J]. 火力与指挥控制, 2020, 45(9): 97-102.
- [19] 李银通,韩统,孙楚,等. 基于逆强化学习的空战态势评估函数优化方法[J]. 火力与指挥控制, 2019, 44(8):101-106.
- [20] 王伟明,徐海燕,张发明. 基于 CRITIC-G1 和 Bonferroni 算子的学术期刊综合评价研究[J]. 情报理论与实践, 2020,43(5):104-109.

(编辑:徐敏)