



中国科技期刊卓越行动计划项目入选期刊

控制与决策

CONTROL AND DECISION



基于模糊动态权重的近距离空战态势评估方法

马钧文, 毕文豪, 张安, 兰轶冰, 唐长红

引用本文:

马钧文, 毕文豪, 张安, 兰轶冰, 唐长红. 基于模糊动态权重的近距离空战态势评估方法[J]. *控制与决策*, 2024, 39(9): 2995–3005.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2023.0453>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

区间条件下基于GRA和TOPSIS的辐射源威胁评估

Combining TOPSIS and GRA for emitter threat evaluation with interval number

控制与决策. 2021, 36(6): 1516–1522 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1559>

基于策略权重的模糊多属性决策方法

Strategic weight manipulation in fuzzy multiple attribute decision making

控制与决策. 2021, 36(5): 1259–1267 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0542>

基于犹豫度和相似度的专家权重确定方法及其应用

Expert weights determination method and application based on hesitancy degree and similarity measure

控制与决策. 2021, 36(6): 1482–1488 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1382>

考虑时间序列的动态大群体应急决策方法

Dynamic large group emergency decision-making method considering time series

控制与决策. 2020, 35(11): 2609–2618 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0088>

基于无标签、不均衡、初值不确定数据的设备健康评估方法

Equipment health risk assessment based on unlabeled, unbalanced data under uncertain initial condition

控制与决策. 2020, 35(11): 2687–2695 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1493>

基于模糊动态权重的近距离空战态势评估方法

马钧文¹, 毕文豪^{1†}, 张安¹, 兰轶冰², 唐长红¹

(1. 西北工业大学 航空学院, 西安 710072; 2. 航空工业西安飞行自动控制研究所, 西安 710076)

摘要: 针对现有态势评估方法在高动态、强对抗的近距离空战环境下存在空战对抗特性指标考虑不充分、常值权重应用不合理的问题, 提出一种基于模糊动态权重的近距离空战态势评估方法. 首先, 根据近距离空战对抗特性研究导弹攻击、机动特征和能量状态对空战态势的影响机理, 从打击、占位、机动、能量态势和固有能力强角度构建态势评估指标体系并建立相应的指标评估模型; 然后, 设计基于态势分类的模糊权重动态适配方法, 利用区间二型模糊表征权重求解过程中的不确定性, 同时结合最优最劣法确定态势指标模糊权重, 根据态势典型样式进行权重适配与指标聚合; 最后, 基于空战对抗飞行数据进行仿真验证与对比分析, 仿真结果表明所提出方法能够更加合理、准确地呈现近距离空战过程中的态势变化情况.

关键词: 近距离空战; 态势评估; 区间二型模糊; 最优最劣法; 动态权重; 观察-判断-决策-行动

中图分类号: V271.4 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2023.0453

引用格式: 马钧文, 毕文豪, 张安, 等. 基于模糊动态权重的近距离空战态势评估方法[J]. 控制与决策, 2024, 39(9): 2995-3005.

Close-range air combat situation assessment based on fuzzy dynamic weight

MA Jun-wen¹, BI Wen-hao^{1†}, ZHANG An¹, LAN Yi-bing², TANG Chang-hong¹

(1. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. AVIC Xi'an Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an 710076, China)

Abstract: In the close-range air combat environment with high dynamicity and strong confrontation, the existing situation assessment methods have the problems of insufficient consideration of the indicators related to air combat confrontation characteristic and unreasonable application of constant indicator weights. To address the above problems, this paper proposes a close-range air combat situation assessment based on fuzzy dynamic weight. First, according to the characteristics of close-range air combat confrontation, the influence of missile attack, maneuver characteristics and energy state on air combat situation is explored. The situation assessment indicators system is constructed from multiple perspectives of attack, occupation, maneuver, energy situation and inherent capability, and the corresponding models of assessment indicators are established. Then, a dynamic adaptation method of fuzzy weight based on situation classification is designed. The interval type-2 fuzzy set is applied to represent the uncertainty during the weight determination process, and the fuzzy weights of situation indicators are calculated based on the best-worst method. On this basis, the weight adaptation and indicator aggregation are carried out according to the typical situation styles of the air combat. Finally, the proposed method is validated by experiment and comparative analysis based on air combat flight data. The results show that the proposed method can present the changes of the situation in the process of close-range air combat more reasonably and accurately.

Keywords: close-range air combat; situation assessment; IT2F; BWM; dynamic weight; OODA

0 引言

近距离空战态势评估是面向高动态、强对抗、多回合的近距离空战, 基于态势信息进行量化评估, 判断敌

我态势优劣的过程. 在近距离空战智能化的发展背景下, 态势评估结果将对空战“观察-判断-决策-行动”(observation-orientation-decision-action, OODA) 过程

收稿日期: 2023-04-10; 录用日期: 2023-09-21.

基金项目: 国家自然科学基金项目(62073267, 61903305); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(HXGJXM 202214).

责任编辑: 刘宝碇.

[†]通讯作者. E-mail: biwenhao@nwpu.edu.cn.

涉及的机动决策、攻击占位等产生直接影响. 实现实时、准确、合理的态势评估能够为后续决策提供有利的数据支撑, 从而帮助建立有效的空战对抗优势. 因此, 研究近距离空战态势评估问题具有重要的理论意义和军事价值.

作为战场OODA的重要环节, 态势评估概念源于美国国防部提出的JDL (joint directors of laboratories) 信息融合模型^[1]. 国外相关研究起步较早, 初步形成了包括模板匹配法、贝叶斯网络法、模糊推理法等理论方法. 近年来, 随着作战样式的更迭及军事技术的发展, 学者们对态势评估问题进行了更为深入的研究, 相继提出了证据理论法、机器学习法、多属性决策法等理论方法.

在上述理论方法中, 多属性决策法凭借空战场景适用性好、模型扩展灵活、结果可解释性强等优势成为解决空战态势评估问题的首选. 目前, 针对该方法的研究主要围绕空战态势指标模型的改进和指标权重的优化展开. 传统的态势指标建模主要考虑角度、速度、高度、距离等空间态势指标^[2-3]. 文献[4]基于能量机动特性和速度过载关系创新地引入了能量指标优势模型. 文献[5]面向超视距空战场景, 以导弹战术攻击区作为定量分析依据对传统态势指标模型进行了改进. 文献[6]在态势评估中考虑了敌机当前意图对作战进程的影响. 文献[7]同时对传统的距离和角度态势指标模型进行了细化和扩充, 从探测优势和威胁优势两方面对其进行讨论. 文献[8]综合武器交战区、作战几何和协同作战等因素, 构建了全新的态势评估指标模型. 上述态势指标模型改进提升了应用的真实性和解算的准确性, 但应用场景大多面向超视距空战, 而对于近距离空战条件下导弹攻击条件和范围高动态变化、战机机动对抗特性影响显著等关键问题考虑不足, 模型适用性难以满足近距离空战态势评估需求.

指标权重是态势指标聚合的关键, 在态势计算时通常基于经验知识设定相应的权重^[9-10]. 文献[11]针对权重确定过程中的不确定性, 基于决策矩阵的区间值直觉模糊熵确定态势指标权重. 文献[12]通过基于直觉模糊熵的客观权重和基于群层次分析法的主观权重综合确定态势指标权重. 文献[13]引入结构熵权法对德尔菲法获取的主观态势指标权重进行盲度分析并实施修正, 保证了态势指标聚合的合理性. 文献[14]通过构建状态变权重向量对CRITIC客观赋权得到的初始态势指标权重进行动态调整, 解决了态势评估过程中常值权重引发的状态失衡问题. 现有改进方法从不同角度优化了权重求解结果, 但多数方法仍将权重设为固定常值. 针对不同态势指标的影响作用随态势剧烈变化、近距离空战评估过程存在强不确定性的问题, 固定常值权重的使用与实际情况不符.

根据上述分析, 在高动态、强对抗的近距离空战环境下, 现有态势评估方法在指标适用性、权重合理性方面仍存在一定不足. 对此, 本文提出基于模糊动态权重的近距离空战态势评估方法. 首先, 分析近距离空战对抗特性, 考虑导弹攻击范围、机动特征性能以及能量状态变化等影响要素, 构建涵盖打击、占位、机动、能量态势和固有能力的态势评估指标体系并建立相应模型; 然后, 提出基于态势分类的模糊权重动态适配方法, 利用区间二型模糊表征态势指标权重解算过程中的不确定性, 根据态势典型样式进行模糊权重适配与态势指标聚合; 最后, 结合空战对抗飞行数据验证所提出方法的有效性与合理性.

1 近距离空战态势评估模型

近距离空战态势评估是综合当前战场动态信息和武器装备作战固有能力, 分析对抗双方态势优势的实时评估过程. 本节基于近距离空战特性, 选取打击态势、

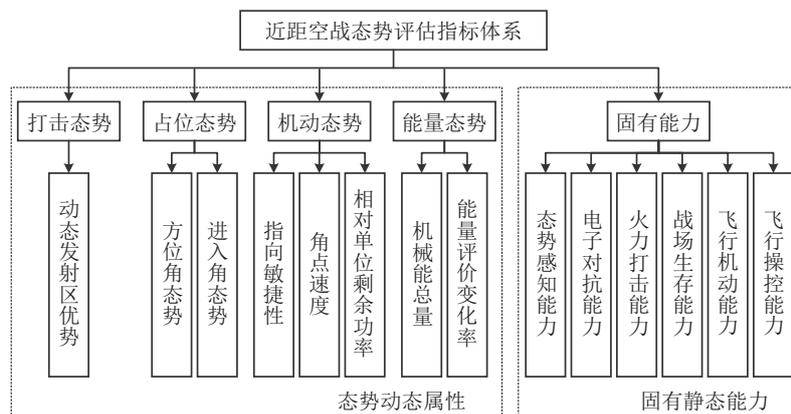


图1 近距离空战态势评估指标体系

占位态势、机动态势和能量态势共4类态势动态属性,表征攻击条件和实时对抗性能的变化对双方态势的影响.同时,采用涵盖态势感知能力、电子对抗能力、火力打击能力、战场生存能力、飞行机动能力和飞行操控能力的作战固有能能力反映静态性能指标对近距空战对抗的影响.近距空战态势评估的关键影响指标如图1所示.

1.1 打击态势模型

打击态势的优劣主要是根据目标机是否进入导弹可攻击范围以及所处具体位置而决定.本文采用动态发射区(dynamic launch zone, DLZ)表征导弹攻击区域,通过在线解算获取可攻击边界范围,动态呈现打击态势变化并进行打击态势的分析与评估.

1.1.1 动态发射区在线解算模型

考虑实际三维应用以及解算实时性需求,构建DLZ表征模型如图2所示.其中: \vec{coe} 是由速度指向 \vec{V}_p 、目标线向量 \vec{R} 和最大离轴发射角 φ_L 确定的DLZ表征区域的法向量,用于确定表征区域方程.

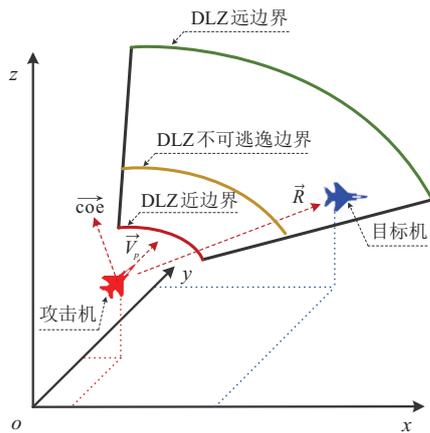


图2 导弹动态发射区表征模型

为实现DLZ的多攻击边界解算,需构建导弹运动、目标机动和制导跟踪模型.导弹运动模型在文献[15-16]中已有详细说明,在此不再赘述.对于目标机动模型,为规避来袭导弹,目标机通常会遵循距离脱离、能量消耗和末端优势原则,采用转向类机动、高程型机动或周期性机动对导弹可攻击范围进行压缩[17].基于上述原理分析空战对抗数据并结合专家经验,选定置尾机动、侧转机动、俯冲机动、斤斗机动和S型机动作为典型机动动作,根据文献[18]中的目标运动及航迹控制模型进行目标机动建模.

此外,本文采用广义比例导引律进行导弹的制导跟踪建模,其导引方程为

$$n_{my} = K_1 |\dot{R}| \theta_L, n_{mz} = K_2 |\dot{R}| \phi_L. \quad (1)$$

其中: K_1 和 K_2 分别为导弹在俯仰方向和偏航方向上

的比例系数, R 为弹目间的相对距离, θ_L 和 ϕ_L 分别为目标线的倾角和偏角.

根据上述模型,DLZ边界的在线解算过程如下:

step 1: 基于当前攻击机、目标机的速度位置信息,确定DLZ表征区域;

step 2: 针对目标保持平飞以及5种典型规避机动,在DLZ表征区域范围内基于黄金分割法[19]进行相应导弹可攻击远边界 $Dis_{F,k} (k = 1, 2, \dots, 6)$ 搜索;

step 3: 考虑目标保持平飞的情况,基于黄金分割法进行导弹可攻击近边界 Dis_N 搜索;

step 4: 输出 $Dis_{F,1}$ 、 Dis_N 作为DLZ的远、近边界,输出 $\min_k Dis_{F,k}$ 作为DLZ的不可逃逸边界.

1.1.2 打击态势函数

近距空战的打击态势与当前对抗双方的相对位置有关.当目标机位于DLZ范围内并处于不可逃逸区时,导弹将以极大概率截获目标并进行有效杀伤;若目标机处于不可逃逸区外,则距离攻击机越远,越容易规避导弹攻击.基于实时在线解算获取的DLZ远边界 Dis_F 、近边界 Dis_N 和不可逃逸边界 Dis_{NE} ,构建打击态势函数 S_{Attack} 为

$$S_{Attack} = \begin{cases} 0, & D < Dis_N; \\ 1, & Dis_N \leq D < Dis_{NE}; \\ 5^{-\frac{D-Dis_{NE}}{Dis_F-Dis_{NE}}}, & Dis_{NE} \leq D < Dis_F; \\ 0.2e^{-\frac{D-Dis_F}{Dis_D-Dis_F}}, & Dis_F \leq D < Dis_D; \\ 0, & D \geq Dis_D. \end{cases} \quad (2)$$

其中: D 为当前攻击机与目标机的相对距离, Dis_D 为当前导引头最远可探测距离.

1.2 占位态势模型

空战占位的目的是通过占据有利的几何战术位置,先于目标形成有利的攻击条件.占位态势建模考虑的影响因素包括目标方位角 φ 和目标进入角 q .

在满足导弹离轴发射角约束的情况下, $|\varphi|$ 越小,导弹DLZ区域范围越大,占位态势优势越明显.因此,构建目标方位角态势优势函数为

$$S_\varphi = \begin{cases} 0, & |\varphi| > \pi/2; \\ 0.45 - \frac{9(|\varphi| - \varphi_S)}{20(\pi/2 - |\varphi_S|)}, & \varphi_S \leq |\varphi| < \pi/2; \\ 0.85 - \frac{2(|\varphi| - \varphi_L)}{5(\varphi_S - \varphi_L)}, & \varphi_L \leq |\varphi| < \varphi_S; \\ 1 - \frac{3|\varphi|}{20\varphi_L}, & 0^\circ \leq |\varphi| < \varphi_L. \end{cases} \quad (3)$$

其中 φ_S 为最大搜索方位角。

随着 $|q|$ 不断增大, 导弹 DLZ 区域范围的变化整体呈上升趋势, 同时考虑文献[20]中的杀伤概率因素影响, 构建目标进入角态势优势函数为

$$S_q = \begin{cases} 2^{\frac{|q|-K_{q,1}}{K_1}}, & 0^\circ \leq |q| < Q_1; \\ 2^{-\frac{|q|+K_{q,2}}{\pi}}, & Q_1 \leq |q| < \pi. \end{cases} \quad (4)$$

其中: Q_1 为进入角态势优势极值角, $K_{q,1}$ 和 $K_{q,2}$ 为优势控制参数. 以上参数根据导弹武器性能进行调节.

由于目标方位角和目标进入角对占位态势的影响存在耦合关系, 构建占位态势优势函数为

$$S_{\text{Place}} = S_{\varphi}^{\omega_{\varphi}} S_q^{\omega_q}. \quad (5)$$

其中: ω_{φ} 和 ω_q 分别为目标方位角、进入角的态势优势权重, 且满足 $\omega_{\varphi} + \omega_q = 1$.

1.3 机动态势模型

飞机机动性能表现为改变自身指向、速度和高度的能力. 在强对抗的近距离空战过程中, 飞机当前的机动性能将对后续的攻击赋能、防御脱离和攻防转换等方面产生直接影响, 从而改变双方的空战态势. 因此, 机动态势主要考虑指向敏捷性、角点速度和单位剩余功率等因素的影响, 其态势函数为

$$S_{\text{MVR}} = \omega_{\text{Agility}} S_{\text{Agility}} + \omega_{\text{CS}} S_{\text{CS}} + \omega_{\text{CEP}} S_{\text{CEP}}. \quad (6)$$

其中: ω_{Agility} 、 ω_{CS} 和 ω_{CEP} 分别为指向敏捷性优势 S_{Agility} 、角点速度优势 S_{CS} 和单位剩余功率优势 S_{CEP} 的对应权重.

1.3.1 指向敏捷性优势

指向敏捷性是衡量攻击机机头指向目标机快慢程度的重要指标, 可采用飞机以当前速度转向目标线方向所需时间进行表征. 作为影响近距离空战实现武器先敌发射的关键因素^[21], 指向敏捷性的优势将帮助战机更快地形成导弹发射条件, 为其赢得更加充足的打击决策时间. 攻击机与目标机两者间的相对指向敏捷性 R_{Agility} 可表示为

$$R_{\text{Agility}} = \omega_p(\pi - |q|)/(|\varphi|\omega_t), \quad (7)$$

其中 ω_p 和 ω_t 分别为当前速度下攻击机和目标机对应的角速度. 根据两机间的相对指向敏捷性, 构建指向敏捷性优势函数为

$$S_{\text{Agility}} = \begin{cases} 0, & R_{\text{Agility}} < 1; \\ \frac{e^{2(R_{\text{Agility}}-1)} - 1}{e^{2(R_{\text{Agility}}-1)} + 1}, & R_{\text{Agility}} \geq 1. \end{cases} \quad (8)$$

1.3.2 角点速度优势

角点速度是飞机升力边界与结构边界交点处对应的飞行速度, 在该速度下飞机可获得最大的转弯速

率并且拥有最小的转弯半径^[4]. 在近距离空战对抗过程中, 若处于对抗劣势, 则可通过靠近角点速度飞行以获取高转弯速率用于破坏敌方攻击条件的形成, 或最大限度压缩敌方导弹动态发射区范围; 若处于对抗优势, 则可依靠角点速度保持良好的转弯盘旋性能, 从而保持当前优势并先敌形成导弹发射条件. 因此, 从机点速度控制维度, 采用空战对抗双方的角点速度接近率比值 S_{CS} 表征角点速度优势, 构建角点速度优势函数为

$$S_{\text{CS}} = \begin{cases} 1, & P_{\text{CS}} < 1/K_{\text{CS}}; \\ -\log_{K_{\text{CS}}} P_{\text{CS}}, & K_{\text{CS}} \leq P_{\text{CS}} < 1; \\ 0, & P_{\text{CS}} \geq 1. \end{cases} \quad (9)$$

其中: P_{CS} 由攻击机和目标机的当前速度 V_p 和 V_t 以及角点速度 $V_{\text{CS}-p}$ 和 $V_{\text{CS}-t}$ 决定, $P_{\text{CS}} = |V_p - V_{\text{CS}-p}|/|V_t - V_{\text{CS}-t}|$; K_{CS} 表示角点速度接近率比值的控制系数.

1.3.3 单位剩余功率优势

单位剩余功率 (specific excess power, SEP) 源于军事理论家 John Boyd 著名的能量机动理论, 其变化能够动态地反映飞机未来具备的垂直机动占位能力^[22]. 在空战对抗过程中, SEP 占优有利于机动后的能量补充与占位, 这使得 SEP 优势方能够更为灵活地选择机动动作, 从而更容易获得导弹攻击机会或摆脱对手. 对抗双方的相对 SEP 可表示为

$$\text{SEP}_R = \frac{a_p V_p - a_t V_t}{gK_{\Delta}}. \quad (10)$$

其中: a_p 和 a_t 分别为攻击机和目标机的当前加速度, K_{Δ} 为 SEP 基准优势参考因子. 根据 SEP_R 差异, 构建单位剩余功率优势函数为

$$S_{\text{SEP}} = \begin{cases} 0, & \text{SEP}_R \leq 0; \\ \frac{e^{\text{SEP}_R} - e^{-\text{SEP}_R}}{e^{\text{SEP}_R} + e^{-\text{SEP}_R}}, & \text{SEP}_R \geq 0. \end{cases} \quad (11)$$

1.4 能量态势模型

空战对抗过程中, 飞机机械能总量表现为动能与势能之和, 具有能量优势的一方更易占据主动, 主要表现^[23]为: 作为进攻方, 导弹发射能够具有更大的初始能量, 有效扩大导弹动态发射区范围; 作为防御方, 飞机具备更多的能量余量用于完成复杂机动动作, 从而摆脱攻击方或规避来袭导弹.

为呈现能量态势变化对近距离空战的影响, 基于当前机械能总量 E_{CT} 和能量平均变化率 $\overline{\text{ROC}}$ 预测未来能量情况, 其计算公式为

$$E_{\text{FCT}} = E_{\text{CT}} \cdot \overline{\text{ROC}} =$$

$$\left(\frac{1}{2}mV^2 + mgH\right) \left(\frac{\sum_{i=t_1}^{t_{CT}} E_i - \sum_{i=t_2}^{t_3} E_i}{\sum_{i=t_2}^{t_3} E_i} \right). \quad (12)$$

其中: m 为飞机质量, V 和 H 分别为飞机当前速度和高度. 为保证ROC的适用性和更新效率, 采用时间滑窗^[24]对能量数据进行采样. 根据预测的未来时刻对抗双方的能量情况, 构建能量态势函数为

$$S_E = \begin{cases} 0, & E_R \leq 1; \\ \frac{E_R - 1}{E_k - 1}, & 1 < E_R \leq E_k; \\ 1, & E_R \geq E_k. \end{cases} \quad (13)$$

1.5 固有能力强模型

根据飞机作战能力的静态性能指标, 基于对数法^[14]进行其固有能力的评估, 即

$$\text{Cap} = c_e c_s c_o \left[\ln \left(\sum_{j=1}^q c_{j,f} + 1 \right) + \ln \left(\sum_{i=1}^p c_{i,d} \right) + \ln c_m \right]. \quad (14)$$

其中: $c_{j,f}$ 为配备的第 j 枚导弹的火力打击能力参数, $c_{i,d}$ 为挂载的第 i 类探测设备的态势感知能力参数; c_e 、 c_s 、 c_o 、 c_m 分别为飞机的电子对抗能力参数、战场生存能力参数、飞行操控能力参数和飞行机动能力参数. 根据空战对抗双方的固有静态能力评估比值 $\text{Cap}_P/\text{Cap}_T$, 构建固有能力强函数为

$$S_{\text{Cap}} = \begin{cases} 1, & \text{Cap}_P/\text{Cap}_T \geq 1.5; \\ 0.75, & 1 < \text{Cap}_P/\text{Cap}_T < 1.5; \\ 0.5, & \text{Cap}_P/\text{Cap}_T = 1; \\ 0.25, & 0.3 < \text{Cap}_P/\text{Cap}_T < 1; \\ 0, & 0 < \text{Cap}_P/\text{Cap}_T \leq 0.3. \end{cases} \quad (15)$$

2 基于态势分类的模糊权重动态适配方法

在高动态、强对抗的近距空战过程中, 不同态势指标对综合态势的重要性影响将随着空战对抗态势样式的变化而发生改变. 例如: 在尾追情况下, 占据打击态势和占位态势优势更有利于先敌攻击, 从而在综合态势上压制敌方; 而在被尾追情况下, 为有效摆脱敌方追击, 机动态势的优劣将更为显著地影响综合态势. 因此, 为实现近距空战的准确评估, 需要确定不同空战对抗态势样式下相应的态势指标权重, 并在综合态势求解过程中完成指标权重的动态适配.

2.1 空战对抗态势典型样式分类

在空战过程中, 根据双方相对位置和速度方向, 通常将空战对抗态势分为以下4类典型样式^[25]: 尾追、被尾追、迎头和背离. 本文进一步考虑双方相对角度差异, 将上述典型样式扩展为8类. 针对各类典型样式, 采用包括目标方位角 φ 、目标进入角 q 和偏向标志位flag的三元组对其进行描述, 即

$$S = \{S_i | S_i = f(\varphi, q, \text{flag})\}, \quad (16)$$

其中 $\text{flag} = \text{sign}(\varphi)\text{sign}(q)$. 态势典型样式示意图以及相应的参数特征如表1所示.

表1 空战对抗态势典型样式

态势典型样式示意图	典型样式 S_1	典型样式 S_2	典型样式 S_3	典型样式 S_4
参数特征	$0 \leq \varphi < \pi/2, 0 \leq q < \pi/2$		$0 \leq \varphi < \pi/2, \pi/2 \leq q \leq \pi$	
	flag < 0		flag >= 0	
态势典型样式示意图	典型样式 S_5	典型样式 S_6	典型样式 S_7	典型样式 S_8
参数特征	$\pi/2 \leq \varphi \leq \pi, 0 \leq q < \pi/2$		$\pi/2 \leq \varphi \leq \pi, \pi/2 \leq q \leq \pi$	
	flag < 0		flag >= 0	

2.2 基于IT2FBWM的态势指标模糊权重确定

本节提出基于区间二型模糊最优最劣法(interval type-2 fuzzy best-worst method, IT2FBWM)的态势指标模糊权重确定方法, 用于确定不同空战对抗态势典型样式下相应的态势指标权重. 作为常用一型模糊集和犹豫模糊集的扩展, 区间二型模糊

集(interval type-2 fuzzy set, IT2FS)凭借双隶属度函数结构可同时描述个体内不确定性和个体间不确定性, 具有强大的不确定性建模能力^[26-27]. 因此, 针对复杂多样的空战对抗态势典型样式, IT2FS能够更为灵活地表达不同样式下态势指标间相对重要性的不确定性. 最优最劣法(best-worst method, BWM)是由

Rezaei^[28]提出的一种基于最优、最劣比较向量和最优化模型的属性权重确定方法.该方法仅考虑涉及最优和最劣属性的参考比较(reference comparison),将成对比较次数从 $n(n-1)$ 降至 $2n-3$,从而简化了权重的确定过程,在减少因过程繁琐而可能导致的主观错误的同时提升了比较结果的一致性,使得权重结果的可靠性得到保证^[29].凭借上述特性,BWM在具有不确定性的权重求解背景下能够保证态势指标权重的可靠性.

基于区间二型模糊最优最劣法的态势指标模糊权重计算步骤如下:

step 1: 基于空战对抗数据分析和专家经验,确定在第 m 种空战对抗态势典型样式下的 n 种指标中对态势影响最显著的指标 A_B^m 和最微弱的指标 A_W^m .

step 2: 根据文献[30]中的指标相对重要性和区间二型模糊转换标准,确定指标 A_B^m 相较于其他指标的重要程度,构建比较向量

$$BtOV = (\tilde{P}_{m,B1}, \tilde{P}_{m,B2}, \dots, \tilde{P}_{m,Bn}). \quad (17)$$

step 3: 确定其他指标相较于指标 A_W^m 的重要程度,构建比较向量

$$OtWV = (\tilde{P}_{m,1W}, \tilde{P}_{m,2W}, \dots, \tilde{P}_{m,nW})^T. \quad (18)$$

step 4: 构建指标权重的约束优化模型.

假定第 m 种空战对抗态势典型样式下各态势指标的最优区间二型模糊权重结果为

$$\tilde{\omega}_{m,i} = [(\omega_{m,i1}^L, \omega_{m,i2}^L, \omega_{m,i3}^L, \omega_{m,i4}^L; H_{m,i,1}^L, H_{m,i,2}^L), (\omega_{m,i1}^U, \omega_{m,i2}^U, \omega_{m,i3}^U, \omega_{m,i4}^U; H_{m,i,1}^U, H_{m,i,2}^U)], \quad (19)$$

其中 $i = 1, 2, \dots, n$.同时,令态势指标 A_B^m 和 A_W^m 的权重分别为 $\tilde{\omega}_{m,B}$ 和 $\tilde{\omega}_{m,W}$.

为保证权重结果一致性,态势指标最优权重的求解问题可视为^[30]:最小化 $|\tilde{\omega}_{m,B} - \tilde{\omega}_{m,i}\tilde{P}_{m,Bi}|$ 和 $|\tilde{\omega}_{m,i} - \tilde{\omega}_{m,W}\tilde{P}_{m,iW}|$ 中的最大绝对差值 $\tilde{\delta}_m^*$.由此,建立态势指标权重求解约束优化模型如下式所示:

$$\begin{aligned} & \min \delta_m^*; \\ & \text{s.t. } |\omega_{m,B1}^L - \omega_{m,i1}^L\omega_{m,Bi1}^L| \leq \delta_m^*, \\ & \quad |\omega_{m,B2}^L - \omega_{m,i2}^L\omega_{m,Bi2}^L| \leq \delta_m^*, \\ & \quad |\omega_{m,B3}^L - \omega_{m,i3}^L\omega_{m,Bi3}^L| \leq \delta_m^*, \\ & \quad |\omega_{m,B4}^L - \omega_{m,i4}^L\omega_{m,Bi4}^L| \leq \delta_m^*; \\ & \quad |\omega_{m,B1}^U - \omega_{m,i1}^U\omega_{m,Bi1}^U| \leq \delta_m^*, \\ & \quad |\omega_{m,B2}^U - \omega_{m,i2}^U\omega_{m,Bi2}^U| \leq \delta_m^*, \\ & \quad |\omega_{m,B3}^U - \omega_{m,i3}^U\omega_{m,Bi3}^U| \leq \delta_m^*, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & |\omega_{m,B4}^U - \omega_{m,i4}^U\omega_{m,Bi4}^U| \leq \delta_m^*; \\ & |\omega_{m,i1}^L - \omega_{m,W1}^L\omega_{m,iW1}^L| \leq \delta_m^*, \\ & |\omega_{m,i2}^L - \omega_{m,W2}^L\omega_{m,iW2}^L| \leq \delta_m^*, \\ & |\omega_{m,i3}^L - \omega_{m,W3}^L\omega_{m,iW3}^L| \leq \delta_m^*, \\ & |\omega_{m,i4}^L - \omega_{m,W4}^L\omega_{m,iW4}^L| \leq \delta_m^*; \\ & |\omega_{m,i1}^U - \omega_{m,W1}^U\omega_{m,iW1}^U| \leq \delta_m^*, \\ & |\omega_{m,i2}^U - \omega_{m,W2}^U\omega_{m,iW2}^U| \leq \delta_m^*, \\ & |\omega_{m,i3}^U - \omega_{m,W3}^U\omega_{m,iW3}^U| \leq \delta_m^*, \\ & |\omega_{m,i4}^U - \omega_{m,W4}^U\omega_{m,iW4}^U| \leq \delta_m^*; \\ & \sum_{i=1}^n D(\tilde{\omega}_{m,i}) = 1, \\ & \omega_{m,i1}^U \leq \omega_{m,i1}^L, \omega_{m,i4}^L \leq \omega_{m,i4}^U, \\ & \omega_{m,i1}^L \leq \omega_{m,i2}^L \leq \omega_{m,i3}^L \leq \omega_{m,i4}^L, \\ & \omega_{m,i1}^U \leq \omega_{m,i2}^U \leq \omega_{m,i3}^U \leq \omega_{m,i4}^U, \\ & \omega_{m,i1}^U \geq 0, i = 1, 2, \dots, n. \quad (20) \end{aligned}$$

step 5: 根据式(20)解算得到态势评估指标的区间二型模糊权重后,采用下式对模糊权重结果进行去模糊化处理,得到最终权重结果:

$$\begin{aligned} D(\tilde{\omega}_{m,i}) = & \frac{(\omega_{m,i4}^L - \omega_{m,i1}^L) + (H_{m,i,1}^L\omega_{m,i2}^L - \omega_{m,i1}^L)}{8} + \\ & \frac{(H_{m,i,2}^L\omega_{m,i3}^L - \omega_{m,i1}^L)}{8} + \frac{\omega_{m,i1}^L + \omega_{m,i1}^U}{2} + \\ & \frac{(\omega_{m,i4}^U - \omega_{m,i1}^U) + (H_{m,i,1}^U\omega_{m,i2}^U - \omega_{m,i1}^U)}{8} + \\ & \frac{(H_{m,i,2}^U\omega_{m,i3}^U - \omega_{m,i1}^U)}{8}. \quad (21) \end{aligned}$$

2.3 权重动态适配和综合态势评估

针对划分的8种空战对抗态势典型样式,按照态势指标模糊权重计算步骤,确定“态势典型样式-态势指标权重”映射关系 $f: S_i \rightarrow \omega_{i,j}$,如表2所示.

表2 “态势典型样式-态势指标权重”映射关系

态势典型样式 S_i	态势指标权重				
	打击态势 $\omega_{i,1}$	占位态势 $\omega_{i,2}$	机动态势 $\omega_{i,3}$	能量态势 $\omega_{i,4}$	固有能势 $\omega_{i,5}$
S_1	0.334	0.167	0.249	0.083	0.167
S_2	0.377	0.149	0.196	0.082	0.196
S_3	0.187	0.367	0.187	0.112	0.147
S_4	0.162	0.396	0.202	0.078	0.162
S_5	0.065	0.127	0.349	0.171	0.288
S_6	0.074	0.145 f	0.376	0.201	0.204
S_7	0.057	0.109	0.346	0.212	0.276
S_8	0.055	0.091	0.316	0.241	0.297

在综合态势评估过程中,首先根据当前飞行数据进行态势典型样式实时分类判断;然后按照表2的映射关系进行态势指标权重匹配;最后利用下式对各态势指标进行聚合,动态呈现各项态势指标对综合态势的影响变化:

$$S = \omega_{i,1}S_{Attack} + \omega_{i,2}S_{Place} + \omega_{i,3}S_{MVR} + \omega_{i,4}S_E + \omega_{i,5}S_{Cap}, \quad (22)$$

其中 $\omega_{i,j}(i = 1, 2, \dots, 8; j = 1, 2, \dots, 5)$ 表示第*i*类态势典型样式下的第*j*项态势指标的权重。

综上,基于权重动态适配的综合态势评估过程的伪代码如表3所示。

3 仿真案例

本节基于空战仿真平台记录的近距空战对抗飞行数据开展态势评估,验证所提出方法的可行性和有效性。空战对抗飞行数据共包含800组数据,数据采样间隔100 ms,在空战对抗过程中采用近距空空导弹作为主要攻击武器。

3.1 近距空战态势指标评估

针对战场动态信息,实时在线解算当前时刻态势

表3 基于权重动态适配的综合态势评估伪代码

基于权重动态适配的综合态势评估算法。

- 输入: 当前时刻己方位置 \vec{pos}_P , 目标位置 \vec{pos}_T , 己方速度 \vec{V}_P , 目标速度 \vec{V}_T ;
- 输出: 当前时刻综合态势值*S*。
- 1: $\vec{R} = \vec{pos}_T - \vec{pos}_P$;
 - 2: $\varphi = \text{angle}(\vec{R}, \vec{V}_P)$; // $\text{angle}(\cdot)$ 为向量夹角求解函数;
 - 3: $q = \text{angle}(\vec{R}, \vec{V}_T)$;
 - 4: $\text{flag} = \text{sign}(\varphi)\text{sign}(q)$;
 - 5: 确定态势典型样式 $S_i = f(\varphi, q, \text{flag})$;
 - 6: 根据 $f : S_i \rightarrow \omega_{i,j}$ 确定态势指标权重 $[\omega_{i,1}, \omega_{i,2}, \omega_{i,3}, \omega_{i,4}, \omega_{i,5}]$;
 - 7: 根据式(22)计算综合态势值*S*;
 - 8: return *S*。

条件下的导弹动态发射区,同时结合当前机动参数和能量状态,根据态势指标评估模型确定双方战场态势动态属性的优势变化,如图3所示。在固有能力强方面,因选用同代战机进行对战,双方作战能力相当,故双方静态能力优势均为 $S_{Cap} = 0.5$ 。

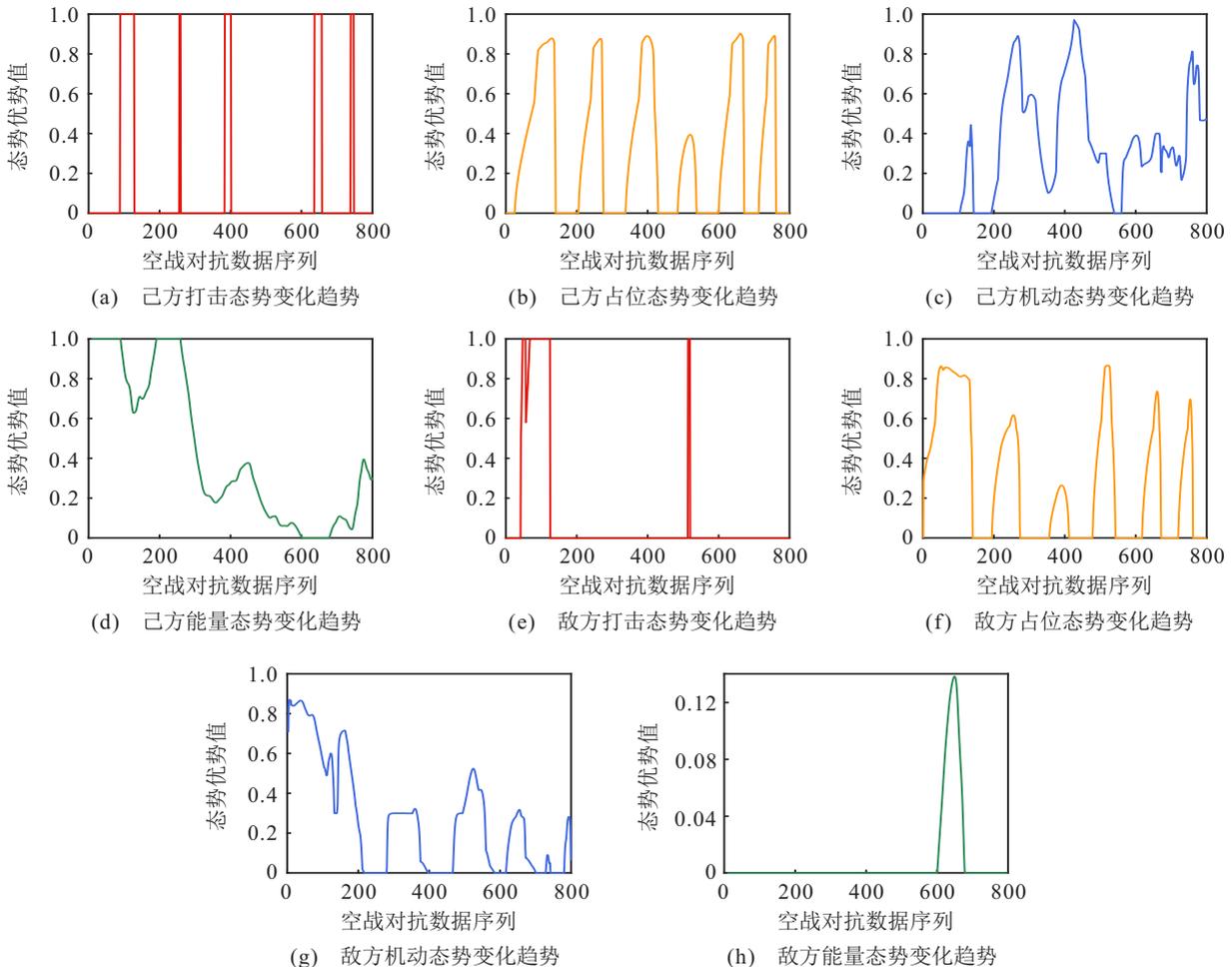


图3 己方(红方)、敌方(蓝方)态势指标值变化

通过对比图3中双方各类态势指标优势的变化情况可以发现:在初期阶段,敌方在打击、占位和机动态势上占据主动,己方则是在能量上积累了显著优势;随着交战进程的推进,结合双方对抗飞行轨迹可知双方进入滚转剪式缠斗,占位态势优势均呈现周期性变化;与此同时,己方凭借更好的速度控制、角点速度利用以及能量管理,扭转了初期阶段的机动劣势,从而更容易抢占有利攻击位置并创造了更多的导弹攻击机会,建立了打击态势优势;敌方尽管在中段的短暂时间内夺回打击、占位和机动态势优势,但在中后阶段的态势指标整体优势上被己方压制。

3.2 综合态势评估与分析

根据各个态势指标评估值的变化情况和指标模糊权重的动态适配,得到空战综合态势变化如图4所示。结合双方对抗飞行轨迹及图3中态势指标值变化情况进行分析,空战综合态势变化可分为5个阶段。

阶段1:敌机率先调转机头并指向己方,在打击、占位和机动态势上建立优势,在综合态势上占据上风,但敌我双方的综合态势差距随时间逐渐缩小。

阶段2:初期双方迎头飞行,综合态势呈胶着状态,期间己方率先拉起飞机抢占有利高度,消耗敌方

的机动态势优势,同时通过能量优势的积累实现综合态势的超越,从初始落后最多0.43到目前最多领先0.26。

阶段3:双方进入滚转剪式缠斗,在该过程中己方凭借更加优秀的角点速度控制和能量管理,在机动、能量态势上保持较为明显的优势,并且创造了两次导弹攻击机会,分别持续了2.6s和3.5s。在上述攻击时间窗口内,己方综合态势分别达到了高出敌方148.4%和354.7%的局部最大值,在近距离空战对抗中占据显著优势。

阶段4:敌方利用己方冲前的失误,迅速获得占位、机动态势优势,优势领先值达到0.3~0.4。与此同时,导弹攻击机会的创造使得己方落入导弹的不可逃逸范围,敌方综合态势值实现大幅超越,峰值能够超出己方一倍有余。此后,己方采用斜斤斗实现摆脱,重新夺回了机动态势优势并缩小综合态势值差距。

阶段5:敌方采用防御性螺旋下降,己方则利用其机动优势再次占位创造了两次时长分别为3.2s和2.2s的导弹攻击机会,使得在该阶段的综合态势值保持着对敌方的压制,最多时能够达到敌方综合态势值的3倍。

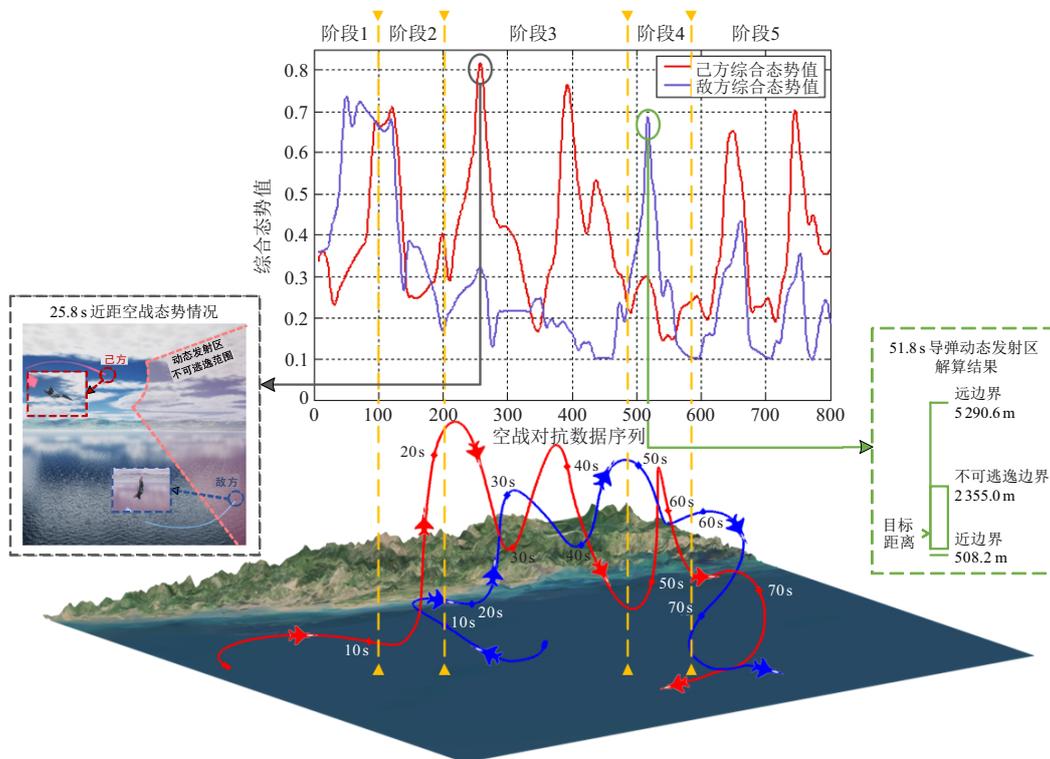


图4 近距离空战对抗综合态势值变化

由上述分析可知,本文方法通过引入机动态势、能量态势相关指标,针对近距离空战过程中战机的瞬时转向、速度控制、能量管理等动态对抗特征进行了

捕获,相较于传统几何态势指标的选取,更为全面地考虑了整体态势的影响因素,提升了态势评估结果的准确性。与此同时,基于动态发射区实时呈现了打击

态势的变化情况,通过导弹攻击机会的出现以及持续时间长短反映了近距空战态势变化的高动态性. 结合双方综合态势值的整体变化情况能够发现: 机动、能量态势的优势将帮助战机建立占位态势优势从而促成攻击条件的形成,使得综合态势值得到显著提升并占据近距空战对抗优势. 在空战各阶段内,对抗双方综合态势值的波动变化情况符合实际飞行对抗过程,评估结果能够实时、准确地量化双方态势的优劣程度,从而验证了本文方法的有效性.

3.3 仿真对比分析

为进一步分析本文在模型改进和权重求解方面对近距空战态势评估结果的影响,将本文方法与文献[7]的基于改进态势指标模型的评估方法、文献[9]的固定态势指标权重求解方法和文献[14]的动态变权重态势评估方法进行对比. 上述方法的对比情况如图5所示. 由图5(a)和5(b)可知,4种方法在近距空战综合态势评估结果的整体变化趋势上基本一致,但是在部分对抗阶段的态势评估结果区别较大.

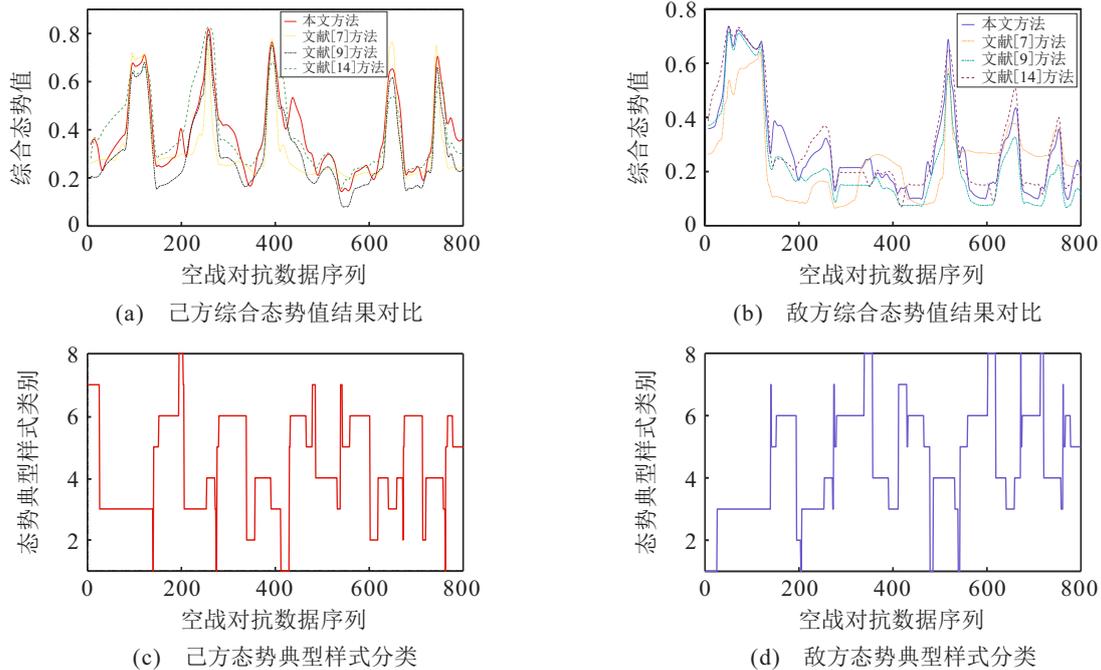


图5 综合态势值结果对比和态势典型样式分类对比

对比本文方法与文献[7]方法,前者在传统模型基础上建立了基于动态发射区的打击态势模型,并引入了机动态势模型;后者则从探测和识别两个角度对已有模型进行了丰富. 通过上述改进,双方均能有效地呈现近距空战过程中敌我态势的变化情况. 然而,由于文献[7]未考虑近距空战过程中关键的机动因素的影响,并且在距离优势模型中雷达锁定判断和攻击区解算过程涉及的发射条件判断存在冗余,使得该方法在部分阶段的评估结果受到影响. 例如: 对应空战对抗数据序列400~600阶段,己方综合态势经历了优势→劣势→优势的变化;而文献[7]结果显示,己方在处于态势劣势后未能扭转局势. 相较而言,本文从打击、占位、机动、能量和固有能力的多个角度对态势变化进行综合考虑,能够更加准确地反映近距空战对抗过程中的态势优劣变化过程.

对于本文方法与文献[9]方法,由于态势指标权重动态性上的差异,两者在综合态势值的差别

较为明显,平均偏差达到了19.77%. 其中,在己方综合态势值和敌方综合态势值上的最大偏差分别达到48.30%(对应图5(a)中的数据序列548)和51.52%(对应图5(b)中的数据序列611). 结合图5(c)和5(d)中各时刻对应的态势典型样式,综合态势值偏差较大的部分主要集中于态势典型样式 $S_5 \sim S_8$,即战机处于被尾追或双方正在疏离的状态. 在上述态势情况下,本文方法更加关注机动、能量以及固有能力的优势对整体态势的影响;而文献[9]的固定权重则将各指标对整体态势的影响视为恒定,未能挖掘态势指标影响随近距空战对抗进程的变化,从而导致了权重失衡现象且无法准确评估态势. 因此,相较于固定权重,采用动态权重评估近距空战态势更符合作战实际.

对于本文方法与文献[14]方法,前者根据态势典型样式对指标权重进行动态调整,后者则是基于对抗双方的距离变化设计变权重向量,两者均能根据空

战对抗实时变化情况进行动态权重求解,综合态势解算结果接近.但是,在近距离空战场景下,敌我双方距离较近且距离变化剧烈,使得文献[14]根据距离变化进行激励性或惩罚性赋权的方法存在部分不合理的情况.例如,在空战对抗数据序列286~338过程中,双方处于态势典型样式 S_6 ,两者疏离、距离增大且均不在对方导弹动态发射区内,文献[14]方法给予攻击态势激励性变权重、占位态势惩罚性变权重;但实际对抗中,由于暂未形成攻击条件,打击态势对整体态势影响较弱,其权重应相对降低,而占位优势的积累将有助于占据有利攻击位置,态势影响更加显著,相应权重应予以提升.由此可知,本文基于态势典型样式的模糊权重动态适配更适用于态势变化剧烈、对抗样式复杂的近距离空战态势评估场景.

综上所述,本文提出的基于模糊动态权重的近距离空战态势评估方法能够实时、有效地评估近距离空战过程中双方综合态势的优劣,态势评估结果具有更好的合理性和准确性.

4 结论

本文面向高动态、强对抗的近距离空战环境,针对当前态势评估指标选取和建模的适用性不佳、常值指标权重应用合理性不足等问题,提出了一种基于模糊动态权重的近距离空战态势评估方法.本文的主要结论如下:1)根据近距离空战对抗特性,从打击、占位、机动、能量和固有多个角度选取了涵盖动态、静态形式的态势评估指标,同时基于导弹动态发射区、机动特征性能和能量状态变化进行了指标的分析建模,使得评估模型的适用性更符合近距离空战场景的评估需求;2)提出了基于IT2FBWM的态势指标模糊权重确定方法,不仅提高了权重确定过程中的不确定性信息的建模能力,还保证了权重结果的可靠性,为准确评估空战态势奠定了基础;3)提出了基于态势分类的模糊权重动态适配方法,将空战态势细分为8种典型样式并确定了对应的态势指标权重,通过与作战进程的实时适配实现了指标的变权聚合和态势的动态求解,有效提升了评估结果的合理性和准确性.

参考文献(References)

[1] Steinberg A N, Bowman C L. Revisions to the JDL data fusion model[M]. Netherlands: CRC Press, 2017: 65-88.
 [2] 周攀, 黄江涛, 章胜, 等. 基于深度强化学习的智能空战决策与仿真[J]. 航空学报, 2023, 44(4): 94-107. (Zhou P, Huang J T, Zhang S, et al. Intelligent air combat decision making and simulation based on deep reinforcement learning[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(4): 94-107.)

[3] Li S Y, Chen M, Wang Y H, et al. Air combat decision-making of multiple UCAVs based on constraint strategy games[J]. Defence Technology, 2022, 18(3): 368-383.
 [4] Shin H, Lee J, Kim H, et al. An autonomous aerial combat framework for two-on-two engagements based on basic fighter maneuvers[J]. Aerospace Science and Technology, 2018, 72: 305-315.
 [5] 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. (Xu A, Chen X, Li Z W, et al. A method of situation assessment for beyond-visual-range air combat based on tactical attack area[J]. Fire Control & Command Control, 2020, 45(9): 97-102.)
 [6] Meng G L, Zhao R N, Wang B, et al. Target tactical intention recognition in multi-aircraft cooperative air combat[J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2021, 2021: 1-18.
 [7] Hu D Y, Yang R N, Zhang Y, et al. Aerial combat maneuvering policy learning based on confrontation demonstrations and dynamic quality replay[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2022, 111: 104767.
 [8] Li W H, Shi J P, Wu Y Y, et al. A multi-UCAV cooperative occupation method based on weapon engagement zones for beyond-visual-range air combat[J]. Defence Technology, 2022, 18(6): 1006-1022.
 [9] Li Y F, Shi J P, Jiang W, et al. Autonomous maneuver decision-making for a UCAV in short-range aerial combat based on an MS-DDQN algorithm[J]. Defence Technology, 2022, 18(9): 1697-1714.
 [10] 章胜, 周攀, 何扬, 等. 基于深度强化学习的空战机动决策试验[J]. 航空学报, 2023, 44(10): 117-130. (Zhang S, Zhou P, He Y, et al. Air combat maneuver decision-making test based on deep reinforcement learning[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(10): 117-130.)
 [11] Kong D P, Chang T Q, Wang Q D, et al. A threat assessment method of group targets based on interval-valued intuitionistic fuzzy multi-attribute group decision-making[J]. Applied Soft Computing, 2018, 67: 350-369.
 [12] Zhang Q, Hu J H, Feng J F, et al. Air multi-target threat assessment method based on improved GGIFSS[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2019, 36(5): 4127-4139.
 [13] 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): 211-226. (Xi Z F, Xu A, Kou Y X, et al. Target threat assessment in air combat based on PCA-MPSO-ELM algorithm[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(9): 211-226.)
 [14] 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.
(Yang A W, Li Z W, Li B, et al. Air combat situation assessment based on dynamic variable weight[J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(7): 1553-1563.)
- [15] 胡东愿, 杨任农, 闫孟达, 等. 基于自编码网络的导弹攻击区实时计算方法[J]. 航空学报, 2020, 41(4): 226-242.
(Hu D Y, Yang R N, Yan M D, et al. Real-time calculation of missile launch envelope based on auto-encoder network[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(4): 226-242.)
- [16] 胡东愿, 刘会亮, 岳龙飞, 等. 导弹发射包线指数优化搜索仿真分析[J]. 宇航学报, 2020, 41(10): 1350-1360.
(Hu D Y, Liu H L, Yue L F, et al. Simulation analysis of missile launching envelope with exponential optimization search[J]. Journal of Astronautics, 2020, 41(10): 1350-1360.)
- [17] Yang Z, Zhou D Y, Piao H Y, et al. Evasive maneuver strategy for UCAV in beyond-visual-range air combat based on hierarchical multi-objective evolutionary algorithm[J]. IEEE Access, 2020, 8: 46605-46623.
- [18] Xu J W, Zhang J, Yang L Y, et al. Autonomous decision-making for dogfights based on a tactical pursuit point approach[J]. Aerospace Science and Technology, 2022, 129: 107857.
- [19] Cuevas E, Enríquez L, Zaldívar D, et al. A selection method for evolutionary algorithms based on the golden section[J]. Expert Systems with Applications, 2018, 106: 183-196.
- [20] 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 B R, Yang J Y, Yin J, et al. Analysis of the influencing factors upon kill probability for single missile[J]. Fire Control & Command Control, 2004, 29(2): 60-64.)
- [21] 孙聪. 从空战制胜机理演变看未来战斗机发展趋势[J]. 航空学报, 2021, 42(8): 1-13.
(Sun C. Development trend of future fighter: A review of evolution of winning mechanism in air combat[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(8): 1-13.)
- [22] Schuck T M, Blasch E, Gagne O B. Information maneuverability and the transformation of the warfighting environment[C]. 2021 IEEE Aerospace Conference (50100). Big Sky, 2021: 1-7.
- [23] 樊会涛, 闫俊. 空战体系的演变及发展趋势[J]. 航空学报, 2022, 43(10): 288-297.
(Fan H T, Yan J. Evolution and development trend of air combat system[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(10): 288-297.)
- [24] Qin Y H, Yan Y Y, Ji H Q, et al. Recursive correlative statistical analysis method with sliding windows for incipient fault detection[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(4): 4185-4194.
- [25] 欧洋, 徐扬, 张金鹏, 等. 无人机空战的竞争与双重深度强化学习机动对抗决策[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2022, 61(6): 975-985.
(Ou Y, Xu Y, Zhang J P, et al. UAV air combat dueling and double deep reinforcement learning maneuver adversarial decision making[J]. Journal of Xiamen University: Natural Science, 2022, 61(6): 975-985.)
- [26] 伍冬睿, 曾志刚, 莫红, 等. 区间二型模糊集和模糊系统: 综述与展望[J]. 自动化学报, 2020, 46(8): 1539-1556.
(Wu D R, Zeng Z G, Mo H, et al. Interval type-2 fuzzy sets and systems: Overview and outlook[J]. Acta Automatica Sinica, 2020, 46(8): 1539-1556.)
- [27] 汤国林, 杨文栋, 刘培德. 基于区间二型模糊决策粗糙集的三支决策方法[J]. 控制与决策, 2022, 37(5): 1347-1356.
(Tang G L, Yang W D, Liu P D. Three-way decisions based on decision-theoretic rough sets with interval type-2 fuzzy information[J]. Control and Decision, 2022, 37(5): 1347-1356.)
- [28] Rezaei J. Best-worst multi-criteria decision-making method[J]. Omega, 2015, 53: 49-57.
- [29] Dong J Y, Wan S P, Chen S M. Fuzzy best-worst method based on triangular fuzzy numbers for multi-criteria decision-making[J]. Information Sciences, 2021, 547: 1080-1104.
- [30] Celik E, Yucesan M, Gul M. Green supplier selection for textile industry: A case study using BWM-TODIM integration under interval type-2 fuzzy sets[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(45): 64793-64817.

作者简介

马钧文(1995—), 男, 博士生, 从事体系评估、多属性决策等研究, E-mail: kyle-ma@outlook.com;

毕文豪(1986—), 男, 副研究员, 博士, 从事效能评估、任务分配等研究, E-mail: biwenhao@nwpu.edu.cn;

张安(1966—), 男, 教授, 博士, 从事效能评估、航空武器火力控制等研究, E-mail: zhangan@nwpu.edu.cn;

兰轶冰(1994—), 男, 工程师, 硕士, 从事智能空战决策的研究, E-mail: lanyb13@tsinghua.org.cn;

唐长红(1959—), 男, 研究员, 博士, 从事飞行器总体设计、结构强度等研究, E-mail: chtang_npu@foxmail.com.