

基于动态变权重的空战态势评估

杨爱武¹, 李战武¹, 李宝², 奚之飞¹, 高春庆¹

(1. 空军工程大学 航空工程学院, 陕西 西安 710038; 2. 94916 部队, 江苏 南京 211500)

摘要: 针对空战态势评估中以往态势评估模型对空战高动态性和博弈过程描述不充分, 以及常权重评估态势导致状态失衡的问题, 提出一种基于动态变权重的态势评估方法。根据空战特点建立机动强度和机动潜力模型来量化战术意图, 改进态势评估模型, 解决战术意图为固定值导致战斗机动态特性以及博弈过程描述不充分的问题; 基于层间相关性的重要性准则方法计算客观常权重向量, 根据空战评估指标影响因素分析构建均衡函数, 得到指标状态变权重向量, 通过常权重向量与状态变权重向量的 Hadamard 乘积计算指标变权重, 解决常权重评估态势状态失衡问题。仿真结果表明, 该态势评估方法的评估态势结果更为客观, 符合实际空战特点。

关键词: 空战态势评估; 机动强度; 机动潜力; 变权重; 评估模型

中图分类号: E844 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1093(2021)07-1553-11

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2021.07.023

Air Combat Situation Assessment Based on Dynamic Variable Weight

YANG Aiwu¹, LI Zhanwu¹, LI Bao², XI Zhifei¹, GAO Chunqing¹

(1. Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, Shaanxi, China;

2. Unit 94916 of PLA, Nanjing 211500, Jiangsu, China)

Abstract: In air combat situation assessment, the situation assessment model does not adequately describe the high dynamics and game process of air combat, and the constant weight assessment situation leads to "state imbalance". A situation assessment method based on dynamic variable weight is proposed. First, based on the characteristics of air combat, the maneuver strength and maneuver potential models are established to quantify the tactical intent and enrich the situation assessment model, and solve the problem of deviation between the situation assessment result and the actual air combat situation due to the fixed value of tactical intent. The objective constant weight vector is calculated based on the criteria importance through intercriteria correlation method, and the equilibrium function is constructed from the analysis of the air combat evaluation index influencing factors, and the indicator state variable weight vector is obtained. The variable weight of the indicator is calculated by the Hadamard product of the constant weight vector and the state variable weight vector, and solve the problem of "state imbalance" in the evaluation situation with constant weight. The simulated results show that the proposed method is more objective in situation assessment and conforms to the characteristics of actual air combat.

Keywords: air combat situation assessment; maneuver strength; maneuver potential; variable weight; evaluation model

收稿日期: 2020-08-20

作者简介: 杨爱武(1996—), 男, 博士研究生。E-mail: yawafeu@163.com

通信作者: 李战武(1978—), 男, 教授, 硕士生导师。E-mail: afeulzw@189.cn

0 引言

空战态势评估是指在高对抗性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,指导飞行员下一步决策占位。为了占据战场态势的优势、先于敌方形成观察、判断、决策、行动(OODA)环、达到先敌发射的效果,飞行员需要快速机动占位,如何量化描述飞行员快速占位的动态过程,以及占位过程中的态势动态变化情况,对于指导下一步决策具有十分重要的意义。

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求解。文献[1]提出了一种基于能力威胁、态势威胁和意图威胁的综合威胁评估模型,通过态势预测实现超视距目标威胁有效评估,丰富了态势评估模型。文献[2]提出一种基于导弹攻击区的态势评估模型,基于攻击区来构造态势优势函数,评估模型与实际空战特征贴合紧密。文献[3]提出一种基于前景理论和灰色关联分析-逼近理想点的权重优化方法,考虑飞行员主观因素以及指标之间的关联度,解决了态势值求解中指标的相关性问题。文献[4]提出一种基于改进层间相关性的重要性准则-线性回归分析的客观权重求解方法,减少主观因素的影响。文献[5]提出一种结合变权重理论来调整评估指标权重,进行近距空战态势评估的方法。文献[6]提出一种主成分分析法以及智能算法的威胁评估方

法,提高了评估模型的精度。上述态势评估方法均在不同程度上改进了态势评估模型以及优化指标权重,但也存在以下2点问题:一是在态势评估模型中没有体现出空战的高动态性,多为当前态势下的评估,没有考虑未来态势的影响;二是固定权重求解态势值将导致态势状态与实际情况不相符的问题。

本文针对传统态势评估优势函数描述战斗机动态特性的薄弱性以及求解态势值固定权重的不合理性,在传统态势优势函数的基础上优化态势优势函数,考虑机动强度和机动潜力对态势的影响,建立机动强度和机动潜力模型;进而建立变权重模型,解决固定权重求解态势状态失衡问题。

1 空战态势评估模型

空战态势评估是综合战场上空间态势、作战能力以及战术意图等相关因素,判断双方当前态势优劣性。空间态势包含战场态势的几何态势信息,分为角度、速度、距离和高度,用以表示状态信息的动态属性;作战能力包含战斗机的静态能力指标,可以分为机动能力、攻击能力、探测能力、操纵能力、生存能力、航程能力以及电子对抗能力,用以表示特征信息的静态属性;战术意图包含战斗机的行为动作,可以分为探测、突击、攻击、掩护、规避、干扰和逃逸,用以表示行为特征属性,用实现某种战术意图的机动强度和机动潜力来定量表示^[7]。空战态势关键因素模型如图1所示。

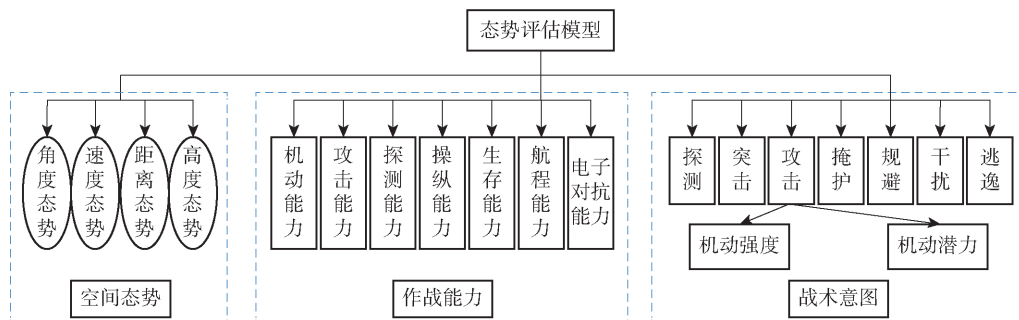


图1 空战态势评估关键因素模型

Fig.1 Key factor model of air combat situation assessment

1.1 空间态势函数

空间态势是指根据载机与目标之间的运动状态信息来判断优劣势。空战的关键在于让目标处于载机攻击区内而避免载机进入目标的攻击区,对于攻击区范围影响较大的有角度、速度、距离和高度4种影响因素,基于此建立空间态势优势函数。

1.1.1 角度态势函数

角度态势函数的主要影响因素为目标方位角 φ 和目标进入角 q , $0 \text{ rad} \leq |\varphi| \leq \pi \text{ rad}$, $0 \text{ rad} \leq |q| \leq \pi \text{ rad}$ 。 $|\varphi|$ 越小、 $|q|$ 越大,空空导弹攻击区的范围越大,角度态势越好^[8]。角度态势函数可以表示为

$$T_{\varphi} = \begin{cases} 0.1 - \frac{|\varphi| - \varphi_{\text{rmax}}}{10(\pi - \varphi_{\text{rmax}})}, & \varphi_{\text{rmax}} < |\varphi| \leq \pi \text{ rad}; \\ 0.3 - \frac{|\varphi| - \varphi_{\text{mmax}}}{10(\varphi_{\text{rmax}} - \varphi_{\text{mmax}})}, & \varphi_{\text{mmax}} < |\varphi| \leq \varphi_{\text{rmax}}; \\ 0.8 - \frac{|\varphi| - \varphi_{\text{mkmax}}}{2(\varphi_{\text{mmax}} - \varphi_{\text{mkmax}})}, & \varphi_{\text{mkmax}} < |\varphi| \leq \varphi_{\text{mmax}}; \\ 1 - \frac{|\varphi|}{5\varphi_{\text{mkmax}}}, & 0 \text{ rad} \leq |\varphi| \leq \varphi_{\text{mkmax}}; \end{cases} \quad (1)$$

$$T_q = \begin{cases} e^{-\frac{\pi/2 - |q|}{\pi/3}}, & 0 \text{ rad} \leq |q| < \pi/3 \text{ rad}; \\ e^{\frac{|q| - \pi}{2\pi}}, & \pi/3 \text{ rad} \leq |q| < \pi \text{ rad}. \end{cases} \quad (2)$$

式中: T_{φ} 表示方位角优势; T_q 表示进入角优势; φ_{rmax} 表示最大搜索方位角, φ_{mmax} 表示最大离轴发射角, φ_{mkmax} 表示不可逃逸圆锥角, $0 \text{ rad} < \varphi_{\text{mkmax}} < \varphi_{\text{mmax}} < \varphi_{\text{rmax}} < \pi \text{ rad}$.

方位角和进入角之间对空战态势影响存在耦合关系, 角度态势函数可以表示为

$$T_a = T_{\varphi}^{\gamma_{\varphi}} T_q^{\gamma_q}, \quad (3)$$

式中: T_a 表示角度优势; γ_{φ} 、 γ_q 表示方位角和进入角的权重, $\gamma_{\varphi} + \gamma_q = 1$.

1.1.2 速度态势函数

空战中, 速度增加会缩短战斗机攻击占位的时间, 不可避免地带来战斗机能量消耗多、转弯占位能力差等问题, 因此, 文献[2]提出了我方最佳空战速度 v_0 , 基于最佳空战速度来建立速度态势函数。

当 $v_0 > 1.5v_t$ 时:

$$T_v = \begin{cases} e^{-\frac{v_m - v_0}{v_0}}, & v_0 < v_m; \\ 1, & 1.5v_t < v_m \leq v_0; \\ v_m/v_t - 0.5, & 0.6v_t < v_m \leq 1.5v_t; \\ 0.1, & v_m \leq 0.6v_t; \end{cases} \quad (4)$$

当 $v_0 \leq 1.5v_t$ 时:

$$T_v = \begin{cases} e^{-\frac{v_m - v_0}{v_0}}, & v_0 \leq v_m; \\ \frac{2}{5} \left(\frac{v_m}{v_0} + \frac{v_m}{v_t} \right), & 0.6v_t < v_m < v_0; \\ 0.1, & v_m \leq 0.6v_t. \end{cases} \quad (5)$$

式中: T_v 表示速度优势; v_m 表示载机速度; v_t 表示目标速度。

1.1.3 距离态势函数

根据导弹攻击范围以及雷达探测距离, 建立距

离态势函数如下:

$$T_d = \begin{cases} 0.18e^{-\frac{D - D_{\text{rmax}}}{D_{\text{rmax}}}}, & D_{\text{rmax}} \leq D; \\ 0.5e^{-\frac{D - D_{\text{mmax}}}{D_{\text{rmax}} - D_{\text{mmax}}}}, & D_{\text{mmax}} \leq D < D_{\text{rmax}}; \\ 2^{-\frac{D - D_{\text{mkmax}}}{D_{\text{mmax}} - D_{\text{mkmax}}}}, & D_{\text{mkmax}} \leq D < D_{\text{mmax}}; \\ 1, & D_{\text{mkmin}} \leq D < D_{\text{mkmax}}; \\ 2^{-\frac{D - D_{\text{mkmin}}}{D_{\text{mmin}} - D_{\text{mkmin}}}}, & D_{\text{mmin}} \leq D < D_{\text{mkmin}}. \end{cases} \quad (6)$$

式中: T_d 表示距离优势; D 表示载机与目标之间的距离; D_{rmax} 表示雷达最大探测距离, D_{mmax} 表示导弹最大攻击距离, D_{mkmax} 表示不可逃逸最大距离, D_{mkmin} 表示不可逃逸最小距离, D_{mmin} 表示导弹最小攻击距离, $D_{\text{mmin}} < D_{\text{mkmin}} < D_{\text{mkmax}} < D_{\text{mmax}} < D_{\text{rmax}}$.

1.1.4 高度态势函数

空战中, 载机与目标之间的高度差增加会增加导弹的攻击区范围, 不可避免地带来对载机性能、导弹性能以及攻击时垂直方向大过载等问题。因此, 文献[2]提出了我方最佳占位高度 h_{bh} , 基于最佳占位高度建立态势函数:

$$T_h = \begin{cases} e^{-\frac{h_m - h_{bh}}{h_{bh}}}, & h_{bh} \leq h_m; \\ e^{\frac{h_m - h_{bh}}{h_t}}, & h_t \leq h_m < h_{bh}; \\ \frac{h_m}{h_t} - 0.5, & 0.6h_t \leq h_m < h_t; \\ 0.1, & h_m < 0.6h_t. \end{cases} \quad (7)$$

式中: T_h 表示高度优势; h_m 表示载机高度; h_t 表示敌机高度。

1.2 作战能力函数

利用战斗机静态空战能力指标^[7]来评估其作战能力:

$$\vartheta = \left[\ln \lambda_m + \ln \left(\sum_{i=1}^m \lambda_w^i + 1 \right) + \ln \left(\sum_{j=1}^n \lambda_d^j \right) \right] \cdot \varepsilon_m \varepsilon_s \varepsilon_c \varepsilon_e, \quad (8)$$

式中: ϑ 表示作战能力系数; λ_m 表示战斗机的机动能力参数; λ_w^i 表示战斗机第 i 种机载武器火力参数, $i = 1, 2, \dots, m$, m 为战斗机携带武器类型数量; λ_d^j 第 j 种探测设备探测能力参数, $j = 1, 2, \dots, n$, n 为战斗机携带探测设备类型数量; ε_m 、 ε_s 、 ε_c 、 ε_e 分别表示操纵能力参数、生存能力参数、航程能力参数和电子对抗能力参数。作战能力指标为战斗机空战能力静态值, 多为设计指标值, 因此将作战能力优势定义为

$$T_{\theta} = \begin{cases} 1, & \vartheta_m/\vartheta_t > 1.5; \\ 0.75, & 1 < \vartheta_m/\vartheta_t \leq 1.5; \\ 0.50, & \vartheta_m/\vartheta_t = 1; \\ 0.25, & 0.3 \leq \vartheta_m/\vartheta_t < 1; \\ 0, & 0 < \vartheta_m/\vartheta_t < 0.3. \end{cases} \quad (9)$$

式中: T_{θ} 表示作战能力优势; ϑ_m 表示载机空战能力; ϑ_t 表示目标空战能力。

1.3 战术意图函数

战斗机实现某种战术意图属于动态过程,对态势影响是动态变化的,意图实施初始阶段对我方威胁程度小,我方就可以在此阶段提前做出机动决策避免陷入被动。以往的态势函数将战术意图根据专家经验直接给出态势值,用具体数值直接表示一段时间的意图威胁,未考虑意图完成度、动态性,具有很强的主观性,限制了我方机动决策范围,从而导致空战被动局面。本文提出机动强度和机动潜力描述这一动态过程,以避免战术意图固定值所带来的限制问题。基于战术意图识别结果建立战术意图函数,通过机动强度和机动潜力量化战术意图态势。战术意图函数可以表示为

$$T_1 = \alpha \frac{MP}{(1+MP)} \frac{MS}{(1+MS)}, \quad (10)$$

式中: T_1 表示战术意图优势; α 表示战术意图威胁系数; MP 表示机动强度; MS 表示机动潜力。

综上所述,综合态势函数可以表示为

$$f(T_a, T_v, T_d, T_h, T_{\theta}, T_1) = \omega_a T_a + \omega_v T_v + \omega_d T_d + \omega_h T_h + \omega_{\theta} T_{\theta} + \omega_1 T_1, \quad (11)$$

式中: $\omega_a, \omega_v, \omega_d, \omega_h, \omega_{\theta}, \omega_1$ 为不同态势之间的权重, $\omega_a + \omega_v + \omega_d + \omega_h + \omega_{\theta} + \omega_1 = 1$ 。

2 机动强度和机动潜力模型

在高对抗性空战环境下,飞行员针对不同态势情况选择不同的机动方式,战斗机做出一系列机动动作带来的是态势的急剧变化,态势的相对变化情况可以用机动强度大小来描述。另一方面,战斗机在实施机动后,其剩余机动能力对未来态势的影响也是评估当前态势需要考虑的因素之一,剩余机动能力可以用机动潜力的大小来描述。下面从机动强度和机动潜力的定义出发,建立机动强度和机动潜力的模型来分析战斗机机动实施战术意图对态势的影响。

2.1 机动强度模型

机动强度可以定义为:机动强度主要用来描述空战双方对抗过程中一定时间内战场态势的相对变

化情况,其表征的是战斗机在实施某种作战意图时做出相应的机动动作带来的态势优劣性改变,即战斗机双方实现某种战术意图快速程度。相对态势值变化率越大,即战斗机所做出的空战机动动作导致态势的变化越剧烈,机动强度越大,表明战斗机实现某种战术意图的想法越强烈,对另一方威胁程度就越大。

在态势优势函数中空间态势函数和作战能力函数计算的是当前时刻瞬时相对态势,评估结果无法完全体现空战对抗过程的博弈过程。究其原因是没有考虑战斗机的动态特性,没能反映战斗机在一定时间段内的态势变化情况。因此,本文提出的机动强度从空间态势值的变化率来描述,量化体现空战对抗过程的动态特性。

在 Δt 时间段内,战斗机态势值的变化可以表示为

$$S_r = \frac{\Delta g(T_a(\varphi_t, q_t), T_v(v_t), T_d(D_t), T_h(h_t), \omega)}{\Delta t}, \quad (12)$$

式中: S_r 表示态势值变化率; Δg 表示综合空间态势函数变化量; $\varphi_t, q_t, v_t, D_t, h_t$ 分别表示 t 时刻的方位角、进入角、速度、距离、高度信息; ω 表示空间态势权重。

令 $\Delta t = 1$ s,可以得到战斗机的瞬时态势变化率 S_{r0} ,战斗机的瞬时态势变化率反映了当前时刻战斗机机动的剧烈程度。

空战中,通过态势函数计算得到的相同或者近似态势值的目标,其威胁程度在一定程度上不能视为相同,需要考虑目标此时的瞬时态势值变化率,若目标的瞬时态势值变化率大,则说明目标实现某种战术意图的机动越强烈,威胁程度更大。则机动强度可以用载机与目标之间的相对瞬时态势变化率表示为

$$MP = \frac{S_{rm0}}{S_{r0}}, \quad (13)$$

式中: S_{rm0}, S_{r0} 分别表示载机与目标的瞬时态势变化率。

由于载机与目标的瞬时态势变化率存在负值的情况, MP 可以表示为

$$MP = \begin{cases} \frac{|S_{rm0}|}{|S_{rm0}| + S_{r0} - S_{rm0}}, & S_{rm0} < S_{r0}; \\ 1, & S_{rm0} = S_{r0}; \\ \frac{S_{rm0} - S_{r0} + |S_{r0}|}{|S_{r0}|}, & S_{r0} < S_{rm0}. \end{cases} \quad (14)$$

2.2 机动潜力模型

战斗机在实施某种战术意图进行高强度机动占位后,其剩余机动能力会大幅度缩减,将会影响后续空战进程中态势占优。因此,在空战高对抗性过程中,既要合理安排占位的机动强度,也要保持一定的剩余机动能力,避免陷入被动局面。

为了描述战斗机的剩余机动能力,引入机动潜力的概念。机动潜力表征的是当前时刻空战双方相对潜在机动能力的物理量,其与飞机性能、当前时刻状态以及双方的相对位置关系相关^[9]。机动潜力描述的是一种敌我双方之间的相对关系,与态势评估的优势函数以及机动强度描述的当前时刻状况不同。机动潜力是对未来空战态势的可能性比较,与飞行员选择的机动方式相关。

机动潜力包含敌我双方之间的相对机械能、相对单位剩余功率(SEP)以及指向速率比:

$$MP = Re \cdot Rs \cdot Rv, \quad (15)$$

式中: Re 表示相对机械能; Rs 表示相对 SEP; Rv 表示指向速率比。

2.2.1 相对机械能

战斗机所蕴含的机械能为动能和势能之和,战斗机的机械能越高,飞行员的可操作性能越强,空战优势越明显。

$$Re = \frac{E_m}{E_t} = \frac{m_m v_m^2 + 2m_m g h_m}{m_t v_t^2 + 2m_t g h_t}, \quad (16)$$

式中: E_m 、 E_t 分别表示载机与目标的机械能; m_m 、 m_t 分别表示载机与目标的质量。

2.2.2 相对 SEP

战斗机在对抗过程中,尽可能占据最佳高度,原因在于可以通过降低自身的高度减少部分势能来占据有利态势位置。SEP^[10-11]用来表示战斗机的爬升性能以及加速性能,是指在一定的发动机推力和阻力下战斗机能量高度随时间变化的过程,其计算公式如下:

$$SEP = \left[\frac{P-f}{G} \right] v, \quad (17)$$

式中: P 和 f 表示战斗机瞬时推力和阻力; G 表示战斗机重力; v 表示瞬时速度。载机与目标之间的相对 SEP 可以表示为

$$Rs = \frac{a_m v_m}{a_t v_t}, \quad (18)$$

式中: a_m 、 a_t 分别表示载机、目标瞬时加速度。

由于载机和目标的加速度存在负值情况,相对

SEP 可以表示为

$$Rs = \begin{cases} \frac{a_m v_m - a_t v_t + |a_t v_t|}{|a_t v_t|}, & SEP_m > SEP_t; \\ 1, & SEP_m = SEP_t; \\ \frac{|a_m v_m|}{a_t v_t - a_m v_m + |a_m v_m|}, & SEP_m < SEP_t. \end{cases} \quad (19)$$

2.2.3 指向速率比

战斗机空战过程中,角度态势对于综合态势的影响较大,仅从机械能角度难以全面地描述机动占位后的机动潜力。同时,角度优势中也蕴含着能量关系,具有角度优势的战斗机能够减少机动量,即减小能量的消耗。下面参考文献[9]提出的指向速率比来描述在角度上的机动潜力。

指向裕度用来评估战斗机机头方向指向目标的快慢程度,是一种空战敏捷性指标,表示为战斗机速度方向指向线与瞄准线之间的夹角。如图2所示,载机速度指向敌机,目标需要转动角度才能指向载机。借用指向裕度概念来表示指向速率比,载机与目标都是指向对方的侧向而避免被对方指向侧向,用指向速率比来描述指向对方的快慢程度。如图3所示,方位角和进入角的变化速率分别表示载机和目标的指向速率,则指向速率比可以表示为

$$Rv = \frac{\varphi/\omega(v_m)}{(\pi - q)/\omega(v_t)}, \quad (20)$$

式中: $\omega(v_m)$ 、 $\omega(v_t)$ 分别表示载机与目标在当前速度下的转弯速率。

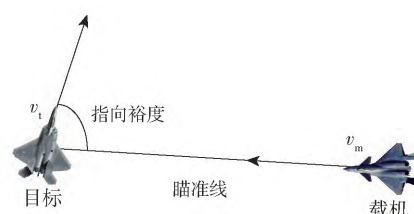


图2 指向裕度示意图

Fig. 2 Schematic diagram of pointing margin

3 基于 CRITIC-变权重理论的动态变权重

常权重考虑指标之间的相对重要度而被广泛应用,变权重理论则还要考虑对状态均衡性的偏好^[12],是在常权重基础上根据指标属性进行惩罚性变权重和激励性变权重。变权重理论首先需要确定指标之间的初始常权重,CRITIC法^[13-14]是由 Diakoulaki 提出的客观赋权方法,通过结合指标间的冲

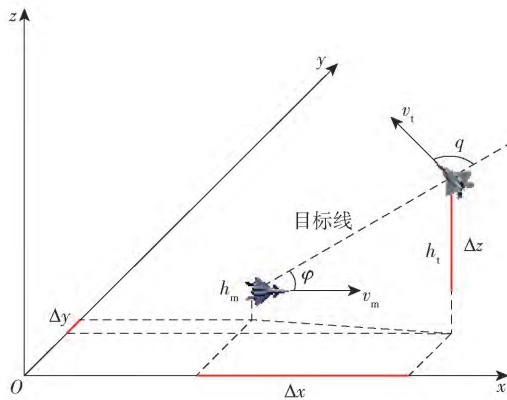


图 3 空战角度关系

Fig. 3 Air combat angle relationship

突性和数据变异对指标权重影响来确定权重^[7]。本文基于 CRITIC 法确定初始权重,结合变权重理论构建变权重向量确定动态变权重。

CRITIC 法确定态势初始权重步骤如下:

步骤 1 构建态势评估矩阵。

态势评估矩阵由 t 个时刻构成实时评估状态信息集 $Q = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_t\}$ 和 p 个态势评估指标构成指标集 $N = \{N_1, N_2, \dots, N_p\}$ 组成,第 i 时刻的第 j 项指标值为 u_{ij} ,则态势评估矩阵表示为

$$U_{t \times p} = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{1p} \\ u_{21} & u_{22} & \cdots & u_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{t1} & u_{t2} & \cdots & u_{tp} \end{bmatrix}. \quad (21)$$

步骤 2 规范化评估矩阵。

对于效益型、成本型和固定型指标进行规范化处理,以消除指标类型以及量纲的影响:

1) 效益型指标

$$z_{ij} = \frac{u_{ij} - \min_i u_{ij}}{\max_i u_{ij} - \min_i u_{ij}}; \quad (22)$$

2) 成本型指标

$$z_{ij} = \frac{\max_i u_{ij} - u_{ij}}{\max_i u_{ij} - \min_i u_{ij}}; \quad (23)$$

3) 固定型指标

$$z_{ij} = 1 - \frac{|u_{ij} - \theta|}{\max_i |u_{ij} - \theta|}, \quad (24)$$

式中: θ 为固定型指标最佳取值。经过规范化处理后得到态势矩阵为 $Z = [z_{ij}]_{t \times p}$ 。

步骤 3 计算评估指标之间综合信息量。

指标之间冲突性和数据间的对比强度由相关系数 r_{kj} 和标准差 s_j 来表示,评估指标之间的综合信息

量为

$$G_j = s_j \sum_{k=1}^p (1 - r_{kj}), \quad (25)$$

式中:

$$s_j = \sqrt{\frac{1}{t} \sum_{i=1}^t (z_{ij} - \bar{z}_j)^2}, \quad (26)$$

\bar{z}_j 为第 j 项指标平均值;

$$r_{kj} = \text{cov}(N_k, N_j) / (s_k s_j), \quad (27)$$

N_k 为第 k 项指标, N_j 为第 j 项指标。

步骤 4 确定评估指标常权重。

通过评估指标的综合信息量可以确定指标之间的常权重向量为

$$w = (w_1, w_2, \dots, w_j, \dots, w_p), \quad (28)$$

$$\text{式中: } w_j = \frac{G_j}{\sum_{k=1}^p G_k}.$$

相应的变权重向量 $W(X)$ 可以表示为

$$W(X) = [w_1(X), w_2(X), \dots, w_j(X), \dots, w_p(X)] = W(x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_p), \quad (29)$$

式中: x_j 为第 j 项态势评估指标变权重。

变权重的主要方法为构造状态变权重向量实现对状态的加权调整,避免状态不均衡。状态变权重向量可以表示为映射关系^[12]:

$$\begin{aligned} S_x: [0, 1]^p &\rightarrow [0, 1]^p, X \rightarrow S_x(X) = S_x \cdot X = \\ &[S_1(X), S_2(X), \dots, S_j(X), \dots, S_p(X)] \cdot \\ &(x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_p) = \\ &[S_1(X) \cdot x_1, S_2(X) \cdot x_2, \dots, S_j(X) \cdot x_j, \dots, S_p(X) \cdot x_p]. \end{aligned} \quad (30)$$

变权重向量 $W(X)$ 可以通过状态变权重向量 S_x 与常权重向量 w 的 Hadamard 乘积得到:

$$W(X) = \frac{w \cdot S_x}{\sum_{j=1}^p w_j S_j} = \frac{[w_1 S_1, w_2 S_2, \dots, w_j S_j, \dots, w_p S_p]}{\sum_{j=1}^p w_j S_j}. \quad (31)$$

变权重求解的核心在于根据角度、速度、距离、高度、作战能力,以及战术意图指标对空战态势影响程度构建均衡函数,通过均衡函数求导来计算状态变权重向量。其计算公式如下:

$$S_j(X) = S(x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_p) = \frac{\partial B(x)}{\partial x_j}, \quad (32)$$

式中: $B(x)$ 表示态势评估指标 x 的均衡函数。

随着双方交战距离的靠近,角度、速度、高度指标对态势的影响程度越来越大,双方从中距再到近

距都处于对方的探测范围之内,需要战斗机机动占位构成攻击条件,用正相关非线性函数进行激励性变权重,均衡函数^[15]表示为

$$B_j = x_j + \frac{1}{2}\beta_j x_j^2 \quad j=1, 2, 4, \quad (33)$$

式中: β_j 为变权重因子 $j=1, 2, \dots, 5$ $\beta_j > 0$ 为激励性变权重 $\beta_j < 0$ 为惩罚性变权重。

另一方面,距离、作战能力指标对态势的影响程度随着距离缩进越来越小,影响空战胜负主要在于优先构成攻击条件,用非线性函数进行惩罚性变权重,均衡函数表示为

$$B_j = x_j + \beta_j \ln x_j \quad j=3, 5. \quad (34)$$

战术意图态势属于动态的过程,体现了战斗机的占位过程和潜力趋势,在空战的每一个阶段都很重要,用1阶线性函数表示为

$$B_j = x_j \quad j=6. \quad (35)$$

基于此分析,综合均衡函数表示为

$$B(x) = x_1 + \frac{1}{2}\beta_1 x_1^2 + x_2 + \frac{1}{2}\beta_2 x_2^2 + x_3 + \frac{1}{2}\beta_3 \ln x_3 + x_4 + \frac{1}{2}\beta_4 x_4^2 + x_5 + \frac{1}{2}\beta_5 \ln x_5 + x_6. \quad (36)$$

各指标的状态变权重向量表示为

$$S_j(x) = \frac{\partial B(x)}{\partial x_j} = \begin{cases} 1 + \beta_j x_j, & j=1, 2, 4; \\ 1 + \beta_j / x_j, & j=3, 5; \\ 1, & j=6. \end{cases} \quad (37)$$

综上所述,各指标的变权重表示为

$$W(x) = \begin{cases} \frac{w_j(1 + \beta_j x_j)}{\sum_{k=1}^p w_k S_k}, & j=1, 2, 4; \\ \frac{w_j(1 + \beta_j / x_j)}{\sum_{k=1}^p w_k S_k}, & j=3, 5; \\ \frac{w_j}{\sum_{k=1}^p w_k S_k}, & j=6. \end{cases} \quad (38)$$

4 仿真算例与分析

选取空战对抗仿真中记录的部分数据作为数据样本进行态势评估,空战双方对抗轨迹如图4所示。选取45 s空战对抗数据进行算例分析,共90组数据,数据间隔为0.5 s,战场初始信息表示如表1所示。

表1 空战初始信息表

Tab. 1 Air combat initial information table

敌我属性	数据采集时刻	目标空间位置/km	特征事件	武器配置	状态信息				
					方位角/rad	进入角/rad	速度/(m·s ⁻¹)	距离/km	高度/km
载机	10 h55 min59 s	(9.31, 2.79, 9.18)	雷达探测	两发中距弹	2.31	1.51	242	82.1	9.18
目标	10 h55 min59 s	(-71.7, -10.6, 9.4)	雷达探测	两发中距弹	1.63	0.83	208	82.1	9.40

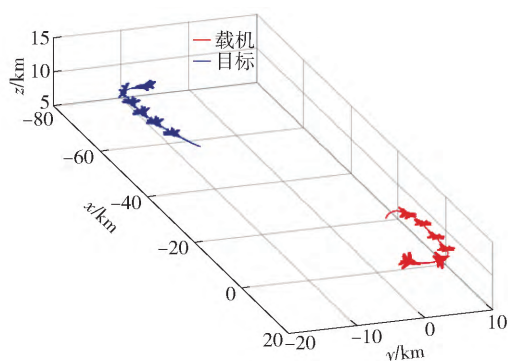


图4 空战对抗轨迹

Fig. 4 Air combat trajectory

4.1 态势评估指标值求解

根据文献[16]提出的战术意图识别方法,识别出目标的战术意图为攻击,根据专家经验知识确定不同战术意图威胁系数取战术意图威胁系数为

0.9。在作战能力上,双方战斗机的作战能力相当,作战能力态势值 $T_\theta = 0.5$ 。结合机动强度和机动潜力的态势评估模型,计算出双方态势指标值如图5所示。

从图5中可以看出:此阶段空战对抗过程,载机占据速度优势,目标占据高度优势;在初始阶段和末尾阶段,从机动强度和机动潜力体现出载机实现攻击战术意图想法较目标更加强烈,载机战术意图优势更大;中间阶段目标表现出的战术意图优势更加明显;战术意图态势体现了空战对抗过程的博弈性和高对抗性。

4.2 指标变权重求解

根据CRITIC法,确定载机与目标各项态势影响因素的客观常权重分别为 $w_m = (0.1543, 0.1074, 0.3150, 0.0976, 0.1057, 0.2201)$, $w_t = (0.1421, 0.1543, 0.2528, 0.1610, 0.1267, 0.1630)$ 。

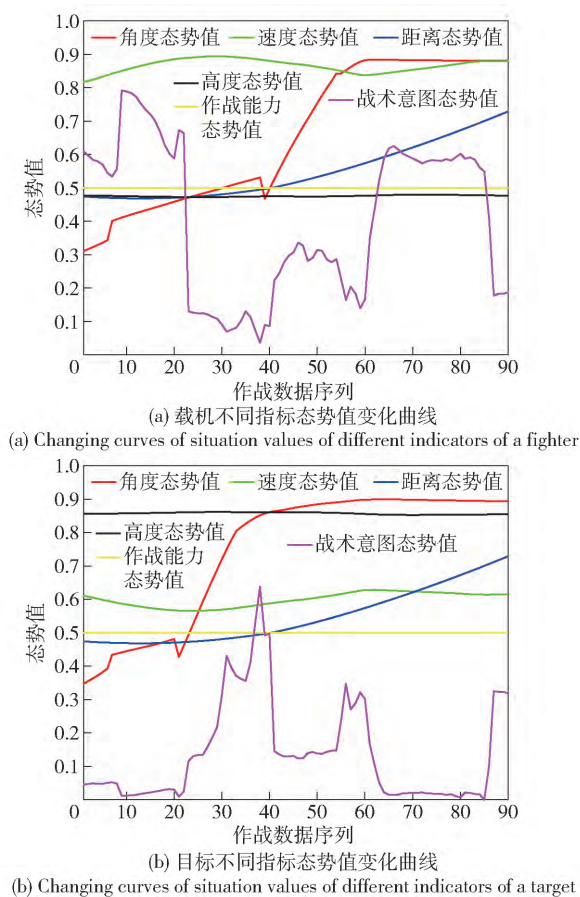


图 5 各项态势指标变化曲线

Fig. 5 Changing curves of various situation indicators

通过对态势指标影响程度分析建立均衡函数,结合变权重理论确定载机与目标各项态势指标客观变权重变化曲线,如图 6 所示。从图 4、图 6 中可以看出,载机与目标均采取侧向接敌的策略,双方的作战距离先增加、后减小,由此可以得到态势指标权重的变化趋势,即随着双方作战距离的变化,角度、速度、高度态势权重先减小后增加,距离、作战能力、战术意图态势权重先增加后减小。

4.3 综合态势值求解

通过常权重和变权重求解的综合态势值如图 7 所示。从图 6、图 7 中可以看出:各项指标对态势的影响程度随着作战距离变化,最终会影响综合态势值;在初始阶段,载机与目标侧向接敌,距离变化范围较小,常权重与变权重综合态势值基本保持一致,但随着作战距离的减小,载机与目标迎头接敌,载机保持较高的角度、速度优势,目标则是较高的角度、高度优势,且角度、速度、高度影响权重变大。另一方面,距离权重减小带来的变化不足以抵消角度态势增加的变化,且作战能力和战术意图整体上保持相对较小的态势,因此态势值均有所提高,相比于常

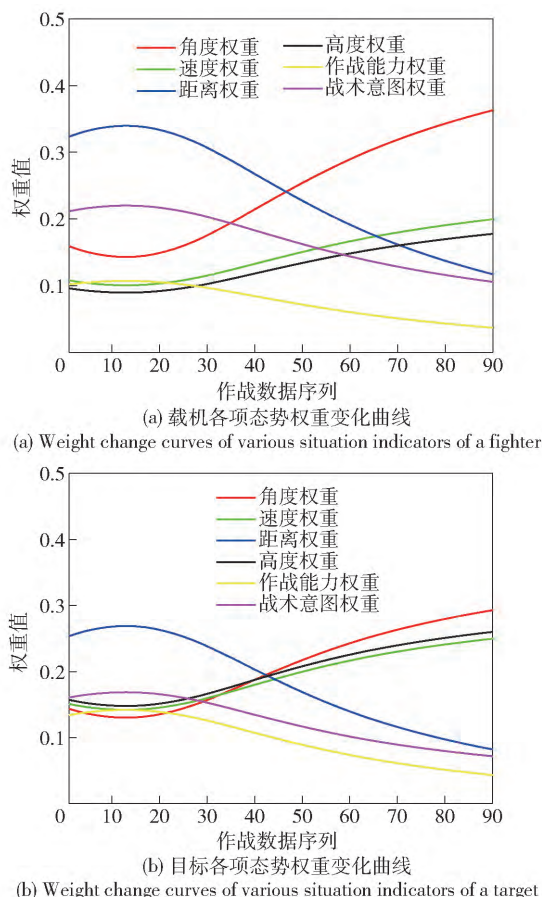
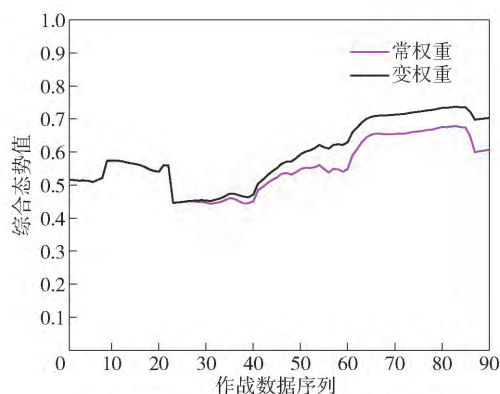


图 6 权重变化曲线

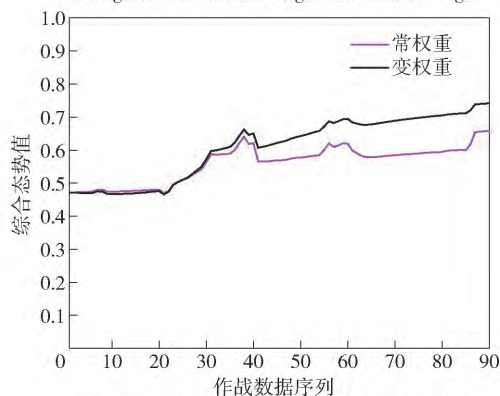
Fig. 6 Weight change curve

权重,变权重符合实际对抗过程,所评估出的态势值更加合理,验证了变权重求解的合理性。当战术意图为动态值时,通过常权重和变权重求解的综合态势值如图 8 所示。

从图 8 中可以看出,在末尾阶段,常权重求解态势值载机的优势保持在 0.08,变权重求解态势值载机的优势保持在 0.02。从图 5 的实际各项指标态势值来看,载机与目标都保持相对较高的角度态势值 0.9,载机速度优势值 0.85 高于目标速度优势值 0.62,载机高度优势值 0.48 低于目标高度优势值 0.85,双方的距离优势值 0.65 相当,作战能力优势值 0.5 相当,载机的作战意图优势 0.58 高于目标作战意图优势 0.02,载机占据态势上的优势。从图 6 的权重变化曲线来看,在末尾阶段,载机角度权重增大范围大于目标,但是目标高度、速度增大范围大于载机,且载机距离减小范围大于目标,作战能力与战术意图权重变化范围相当。实际上,载机存在态势优势,但优势并没有常权重计算得到的那么明显,表明变权重求解能够解决态势评估中的状态失衡问题。



(a) 载机常权重与变权重综合态势值变化曲线
(a) Changing curves of comprehensive situation values of a fighter with constant weight and variable weight



(b) 目标常权重与变权重综合态势值变化曲线
(b) Changing curves of comprehensive situation values of a target with constant weight and variable weight

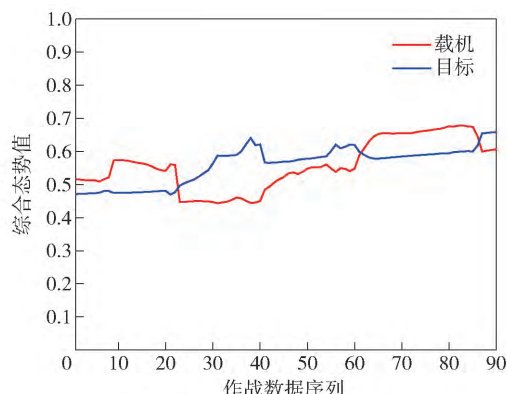
图7 常权重与变权重综合态势值变化曲线

Fig. 7 Changing curves of comprehensive situation values with constant weight and variable weight

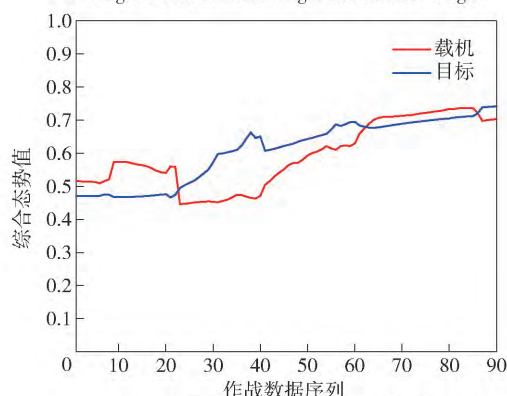
4.4 战术意图动态性对比分析

当战术意图为固定值时,通过常权重和变权重求解的综合态势值如图9所示。载机和目标的机动强度和机动潜力如图10所示。

从图8、图9中可以看出,当将战术意图态势值设置为固定值时,不考虑战术意图的完成性和动态性,与考虑机动强度和机动潜力的战术意图动态值对比,无论是常权重求解还是变权重求解,载机在大部分时间处于态势的劣势,且初始阶段和末尾阶段的优势没有体现出来,原因是被战术意图固定值所限制,这与实际情况不符。从图10中可以看出,在初始阶段和末尾阶段,载机的速度、角度一直处于优势,态势变化更加剧烈,机动强度高于目标,并且载机存在一定程度上的机动潜力优势,在中间阶段,目标的机动强度与机动潜力相比于载机存在优势,因此将战术意图设置为专家经验的固定值,不考虑其动态变化对空战实际态势的评估存在一定程度的影响。



(a) 载机与目标常权重综合态势值对比图
(a) Comparison of comprehensive situation values of a fighter with constant weight and variable weight



(b) 载机与目标变权重综合态势值对比图
(b) Comparison of comprehensive situation values of a target with constant weight and variable weight

图8 战术意图为动态值综合态势值对比图

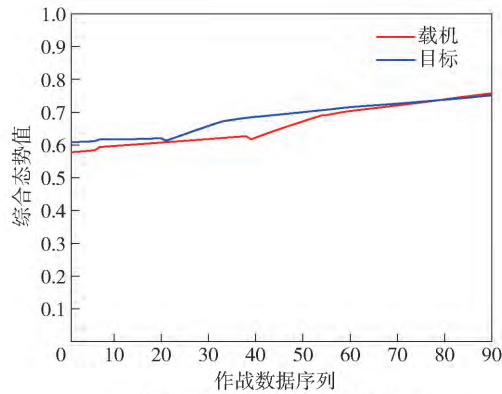
Fig. 8 Comparison of comprehensive situation values when the tactical intent is a dynamic value

综上所述,本文所提结合机动强度和机动潜力的变权重态势评估方法能够较为客观地评估空战对抗实际过程中的态势变化情况,为下一步飞行员的机动决策打下基础。

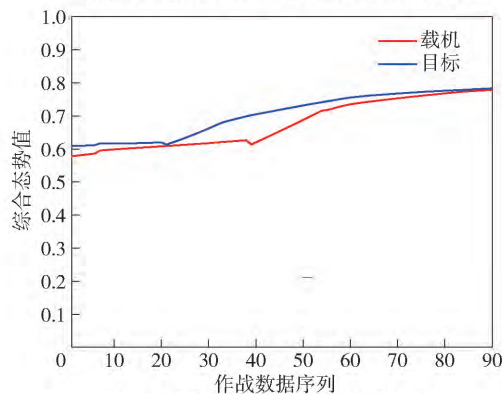
5 结论

本文针对空战态势评估中的战术意图为固定值时对战斗机动态特性以及博弈过程描述不充分,导致评估结果与实际态势不相符问题,以及常权重求解态势值导致的状态失衡问题,提出一种动态变权重的空战态势评估方法。得出主要结论如下:

1) 针对空战动态性问题,在现有研究基础上建立了包含空间态势、作战能力以及战术意图态势评估模型,提出了机动强度以及机动潜力的概念,并建立了机动强度和机动潜力模型,用瞬态态势变化率来量化机动强度以及用相对机械能、相对单位剩余功率SEP、指向速率比来量化机动潜力,综合成新的战术意图态势函数,改进了态势评估模型,解决战术



(a) 载机与目标常权重综合态势值对比
(a) Comparison of comprehensive situation values of a fighter with constant weight and variable weight



(b) 载机与目标变权重综合态势值对比
(b) Comparison of comprehensive situation values of a target with constant weight and variable weight

图 9 战术意图为固定值综合态势值对比

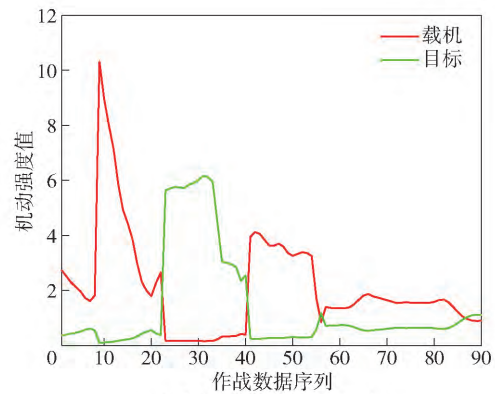
Fig. 9 Comparison of comprehensive situation values when the tactical intent is a fixed value

意图态势为固定值带来的评估结果偏差,进而导致机动决策范围受到限制问题;

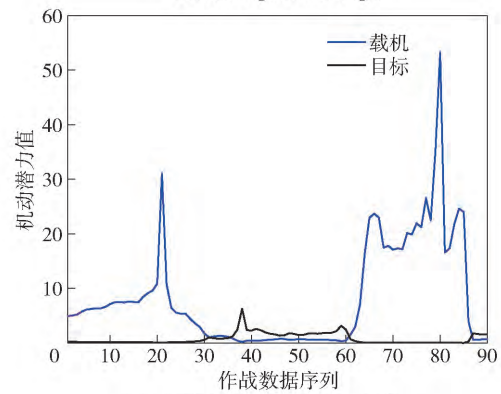
2) 针对状态失衡问题,提出了基于 CRITIC 法计算客观权重,通过空战态势指标在对抗过程中对态势的影响程度分析,构建符合实际空战特点的均衡函数以及状态变权重向量,基于变权重理论得到空战态势指标变权重,仿真得出态势评估值更加贴合实际态势状态,所提方法能够解决态势中的状态失衡问题。

参考文献(References)

- [1] 胡朝晖,吕跃,徐安. 基于态势预测的超视距目标威胁评估方法[J]. 电光与控制, 2020, 27(3): 8-12, 26.
HU Z H, LÜ Y, XU A. A threat assessment method for beyond-visual-range air combat based on situation prediction[J]. Electronics Optics & Control, 2020, 27(3): 8-12, 26. (in Chinese)
- [2] 吴文海,周思羽,高丽,等. 基于导弹攻击区的超视距空战态势评估改进[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(12): 2679-



(a) 载机与目标机动强度对比
(a) Comparison of maneuver strength between fighter and target



(b) 载机与目标机动潜力对比
(b) Comparison of maneuver potential between fighter and target

图 10 战术意图动态性对比

Fig. 10 Comparison chart of tactical intention dynamics

2685.

- WU W H, ZHOU S Y, GAO L, et al. Improvements of situation assessment for beyond-visual-range air combat based on missile launching envelope analysis [J]. Systems Engineering and Electronics, 2011, 33(12): 2679-2685. (in Chinese)
- [3] 奚之飞,徐安,寇英信,等. 基于前景理论的空战目标威胁评估[J]. 兵工学报, 2020, 41(6): 1236-1248.
XI Z F, XU A, KOU Y X, et al. Air combat target threat assessment based on prospect theory [J]. Acta Armamentarii, 2020, 41(6): 1236-1248. (in Chinese)
- [4] 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.
HU T, WANG D, SUN Y, et al. Air combat threat assessment of improved CRITIC-LRA and grey TOPSIS [J]. Acta Armamentarii, 2020, 41(12): 2561-2569. (in Chinese)
- [5] 姜龙亭,寇雅楠,王栋,等. 动态变权重的近距空战态势评估方法[J]. 电光与控制, 2019, 26(4): 1-5.
JIANG L T, KOU Y N, WANG D, et al. A dynamic variable weight method for situation assessment in close-range air combat [J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(4): 1-5. (in Chinese)

- [6] 奚之飞,徐安,寇英信,等.基于主成分分析及MPSO-ELM的空战目标威胁评估[J].航空学报,2020,41(10):323895.
XI Z F, XU A, KOU Y X, et al. Target threat assessment in air combat based on principal component analysis and MPSO-ELM algorithm[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(10): 323895. (in Chinese)
- [7] 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 A W, LI Z W, XU A, 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. (in Chinese)
- [8] 游航航,余敏建,韩其松,等.基于攻击区的空战指挥引导态势评估[J].兵器装备工程学报,2019,40(12):29-34.
YOU H H, YU M J, HAN Q S, et al. Air combat command and guidance situation assessment based on attack area[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(12): 29-34. (in Chinese)
- [9] 孙庆鹏,李战武,寇英信.能量理论在空空导弹攻击效果评价中的应用[J].火力与指挥控制,2019,44(10):89-94,100.
SUN Q P, LI Z W, KOU Y X. The application of energy theory in the evaluation of air-to-air missile attack effect[J]. Fire Control & Command Control, 2019, 44(10): 89-94, 100. (in Chinese)
- [10] TAKAHASHI T T. Optimal climb trajectories through explicit simulation[C]//Proceedings of Aviation Technology, Integration, & Operations Conference. Dallas, TX, US: AIAA, 2015: 168-169.
- [11] 董新民,陈勇.飞机等表速运动方程与稳态爬升参数计算[J].飞行力学,2017,35(1):11-15.
DONG X M, CHEN Y. Aircraft equation of motion and stable climb parameters calculation with constant indicated airspeed [J]. Flight Dynamics, 2017, 35(1): 11-15. (in Chinese)
- [12] 张钦礼,赵宇飞,荣帅,等.基于变权重理论和TOPSIS的缓倾斜薄矿脉采矿方法优选[J].黄金科学技术,2019,27(6):844-850.
ZHANG Q L, ZHAO Y F, RONG S, et al. Optimization of gently inclined thin vein mining method based on variable weight theory and TOPSIS[J]. Gold Science and Technology, 2019, 27(6): 844-850. (in Chinese)
- [13] DIAKOULAKI D, MAVROTS G, PAPAYANNAKIS L. Determining objective weights in multiple criteria problems the critic method[J]. Computers and Operations Research, 1995, 22(7): 763-770.
- [14] 宋冬梅,刘春晓,沈晨,等.基于主客观赋权法的多目标多属性决策方法[J].山东大学学报(工学版),2015,45(4):1-9.
SONG D M, LIU C X, SHEN C, et al. Multiple objective and attribute decision making based on the subjective and objective weighting[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2015, 45(4): 1-9. (in Chinese)
- [15] 孙庆鹏,李战武,常一哲.基于威力势场的多机种威胁评估方法[J].系统工程与电子技术,2018,40(9):1993-1999.
SUN Q P, LI Z W, CHANG Y Z. Multi-types airplane threat assessment based on combat power field[J]. Systems Engineering and Electronics, 2018, 40(9): 1993-1999. (in Chinese)
- [16] 夏鹏程.多机协同任务规划与非完备信息下攻击决策技术[D].南京:南京航空航天大学,2018.
XIA P C. Research on mission planning and attack decision-making under incomplete information for multi-UAVs[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018. (in Chinese)