

引用格式: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.

## 动态变权重的近距空战态势评估方法

姜龙亭<sup>1,2</sup>, 寇雅楠<sup>1</sup>, 王栋<sup>1</sup>, 张彬超<sup>3</sup>

(1. 空军工程大学航空工程学院,西安 710038; 2. 中国人民解放军95974部队,河北 沧州 061000;  
3. 中国人民解放军95356部队,湖南 耒阳 421800)

**摘要:**针对空战态势评估中,常权求和带来的信息动态性不够灵活的问题,提出了动态变权重的近距空战态势评估方法。该方法在优势函数的基础上,加入空战能力指标,改进了评估指标体系;并且依据贝叶斯理论实时确定态势类型,综合空战态势变化特点,根据变权理论,动态调整评估指标权重。通过真实的空战数据仿真实验,验证了该方法在空战态势评估中的可行性和有效性。仿真结果表明,动态变权重的评估方法能够有效改善常权求和引起的信息动态性差的问题。

**关键词:** 近距空战; 态势评估; 变权重; 贝叶斯理论; 优势函数

中图分类号: V271.4 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2019.04.001

## A Dynamic Variable Weight Method for Situation Assessment in Close-Range Air Combat

JIANG Long-ting<sup>1,2</sup>, KOU Ya-nan<sup>1</sup>, WANG Dong<sup>1</sup>, ZHANG Bin-chao<sup>3</sup>

(1. Institute of Aeronautical Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. No. 95974 Unit of PLA, Cangzhou 061000, China; 3. No. 95356 Unit of PLA, Leiyang 421800, China)

**Abstract:** To solve the problem that the information dynamics in constant weight summing is not flexible enough in air-combat situation assessment, a dynamic variable weight method is proposed for the situation assessment in close-range air combat. Based on the advantage function, the evaluation index system is improved by adding the air-combat capability index. Moreover, according to the Bayesian theory, the situation type is determined in real time, the characteristics of air-combat situation changes are integrated, and the weight of the evaluation index is dynamically adjusted according to the variable weight theory. The feasibility and effectiveness of this method in air-combat situation assessment are verified by the simulation experiments with real air combat data. Simulation results show that the dynamic variable weight evaluation method can effectively prevent the problem of poor information dynamics caused by constant weight summing.

**Key words:** close-range air combat; situation assessment; dynamic weight; Bayesian theory; advantage function

### 0 引言

随着航空装备智能化的发展,实现战机的态势评估以及提高态势评估的准确性成为空战智能决策<sup>[1]</sup>的关键环节。从目前的研究来看,大多数态势评估模型通过加权求和来表征,而权值通常以常权的形式给定。常权评估指标仅考虑某一时刻评估指标对空战态势的

影响,却忽略了指标值对综合态势的影响。不同类型的态势情形下,各指标值对态势的影响程度也不尽相同。因此,在瞬息万变的近距空战环境中,原有的常权重态势评估结果也有待商榷。为了更加客观地评价空战态势,提高态势评估系统的灵活性,在动态环境中需要根据态势类型动态确定指标权重。态势类型变化时,如何动态调整指标权重成为态势评估的难点。

### 1 态势评估研究现状

目前,专家学者对于空战态势评估的研究主要分为参量法和非参量法两类。基于非参量法的模型主要

收稿日期:2019-01-14 修回日期:2019-03-21

基金项目:航空科学基金(20141396012)

作者简介:姜龙亭(1991—),男,陕西渭南人,硕士生,研究方向为空战训练评估。

有贝叶斯网络评估法和 DS 证据<sup>[2]</sup>评估法。文献[3]采用模糊化的贝叶斯网络模型对态势问题进行了描述;文献[4]基于证据网络对战场的态势估计模型,设计了威胁等级评估推理方法。基于参量法的模型主要代表有优势函数法<sup>[5]</sup>、人工势场法<sup>[6]</sup>、层次分析法、模糊评价法等。文献[5]通过构建距离优势函数、角度优势函数、速度优势函数等对超视距空战的态势进行评估,但是未考虑空战双方的能力因素;文献[7]利用模糊层次分析法,对反映战场态势的元素常权求和,得到综合的态势评估函数,但是未能反映态势类型与指标权重的动态联系。

为了解决上述问题,本文依据变权理论<sup>[8-10]</sup>,从态势评估指标体系的建立和指标权重的确定方法两方面对近距态势评估方法进行了改进。

## 2 态势评估体系的建立

在空战对抗中,红蓝双方的能力参数和占位信息是进行态势评估的重要依据,能力参数主要由装备的性能决定。双方几何占位态势如图 1 所示。图中, OXYZ 为红方机体坐标系,  $p$  为目标的方位角,  $q$  为目标的进入角,  $V_R$  为红方的速度,  $V_B$  为蓝方的速度,  $R$  为两机的相对距离,  $\Delta h$  为两机的相对高度。

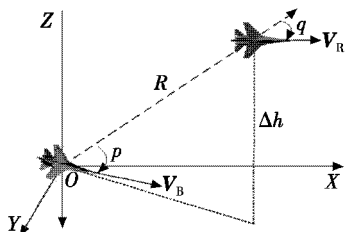


图 1 双方几何占位态势

Fig. 1 Occupation situation for both parties

根据系统效用理论<sup>[11]</sup>可知,评估指标应当满足完备性、独立性和最小性的要求。因此,态势评估指标体系的建立应当既包括空战能力评估,又包括空战过程的动态评估。具体如图 2 所示。

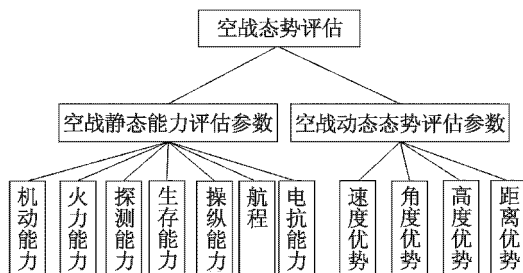


图 2 态势评估指标体系

Fig. 2 Situation assessment indicator system

### 2.1 空战能力评估

态势能力评估<sup>[12]</sup>在实际空战中涉及很多因素,本

文选取与空战能力有关的 7 个因素来衡量飞机对空作战能力。基于空战能力的优势函数为

$$\begin{cases} C = [\ln B + \ln(\sum A_1 + 1) + \ln(\sum A_2)] \varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_3 \varepsilon_4 & (1) \\ T_C = C / \max(C) \end{cases}$$

式中:  $C$  为作战能力;  $B$  为机动参数;  $A_1$  为火力参数;  $A_2$  为探测参数;  $\varepsilon_1$  为操纵能力系数;  $\varepsilon_2$  为生存系数;  $\varepsilon_3$  为航程系数;  $\varepsilon_4$  为电子对抗系数;  $T_C$  为作战能力优势函数。

### 2.2 空战过程的动态态势评估

依据攻击区<sup>[13]</sup>理论分析,空战过程的动态态势评估主要包括速度、角度、距离、高度 4 个方面的优势。

空战过程中,具有速度优势可以快速进入导弹射程,也可以迅速退出战斗,但会导致目标跟踪困难、转弯半径大等问题,因此,根据双方距离设计动态的最优空速为

$$V_0 = \begin{cases} \left(\frac{d}{D_{Mmax}}\right)^3 V_R & D_{Mmax} \leq d \\ \left(1 - \left(\frac{D_{MTmax} - d}{D_{Mmax}}\right)^3\right) V_R & D_{MTmax} \leq d < D_{Mmax} \\ \left(\frac{D_{MTmax}}{d}\right)^2 V_R & d < D_{MTmax} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $D_{Mmax}$  为导弹的最大发射距离;  $D_{MTmax}$  为最大不可逃逸距离。

速度优势函数构造为

$$T_v = \begin{cases} \left(\frac{V_R}{V_B}\right)^2 e^{-\frac{V_R - V_B}{V_0}} & 0 \leq V_R/V_B < 0.5, V_R > V_0 \\ \left(\frac{V_R}{V_B}\right)^2 e^{-\frac{V_B - V_R}{V_0}} & 0 \leq V_R/V_B < 0.5, V_R \leq V_0 \\ \left(\frac{(V_R/V_B - 0.5)^2}{4(1.0 - 0.5)^2} + 0.25\right) e^{-\frac{V_R - V_B}{V_0}} & 0.5 \leq V_R/V_B < 1.0, V_R > V_0 \\ \left(\frac{(V_R/V_B - 0.5)^2}{4(1.0 - 0.5)^2} + 0.25\right) e^{-\frac{V_B - V_R}{V_0}} & 0.5 \leq V_R/V_B < 1.0, V_R \leq V_0 \\ \left(\frac{(V_R/V_B - 1.0)^2}{2(2.0 - 1.0)^2} + 0.5\right) e^{-\frac{V_R - V_B}{V_0}} & 1.0 \leq V_R/V_B < 2.0, V_R > V_0 \\ \left(\frac{(V_R/V_B - 1.0)^2}{2(2.0 - 1.0)^2} + 0.5\right) e^{-\frac{V_B - V_R}{V_0}} & 1.0 \leq V_R/V_B < 2.0, V_R \leq V_0 \\ e^{-\frac{V_R - V_B}{V_0}} & 2.0 \leq V_R/V_B, V_R > V_0 \\ e^{-\frac{V_B - V_R}{V_0}} & 2.0 \leq V_R/V_B, V_R \leq V_0 \end{cases} \quad (3)$$

角度优势函数建模为

$$T_a = \begin{cases} \left(1 - \frac{|p|}{4p}\right) e^{-\frac{|q|}{180}} & |p| \leq \lambda_{Rmax}, q \in [-180^\circ, 180^\circ] \\ \left(1 - \frac{|p| - \lambda_{Rmax}}{2 \times (\lambda_{Mmax} - \lambda_{Rmax})}\right) e^{-\frac{|q|}{180}} & \lambda_{Rmax} < |p| \leq \lambda_{Mmax}, q \in [-180^\circ, 180^\circ] \\ \left(1 - \frac{|p| - \lambda_{Mmax}}{4 \times (180 - \lambda_{Mmax})}\right) e^{-\frac{|q|}{180}} & \lambda_{Mmax} < |p| \leq 180^\circ, q \in [-180^\circ, 180^\circ] \end{cases} \quad (4)$$

式中： $p$  是攻击机速度矢量与目标线的夹角； $q$  为目标机速度矢量与目标线的夹角。

距离优势模型构建为

$$T_d = \begin{cases} 0 & D > D_{Mmax} \\ \left(1 - \frac{(D - D_{MTmax})^2}{(D_{Mmax} - D_{MTmax})^2}\right) & D_{MTmax} \leq D < D_{Mmax} \\ 1 & D_{MTmin} \leq D < D_{MTmax} \\ \frac{(D - D_{Mmin})^3}{(D_{MTmin} - D_{Mmin})^3} & D_{Mmin} \leq D < D_{MTmin} \\ 0 & D < D_{Mmin} \end{cases} \quad (5)$$

式中： $D$  为双方距离； $D_{Mmin}$  为最小发射距离。

高度优势函数构造为

$$T_h = \begin{cases} 0.5 - \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta h}{2000}\right)^2 e^{\frac{h_r - h_0}{h_r}} & \Delta h < 0, h_r \leq h_0 \\ 0.5 - \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta h}{2000}\right)^2 e^{\frac{h_r - h_0}{h_r}} & \Delta h < 0, h_r > h_0 \\ 1 - \frac{1}{2} \sqrt{\left|\frac{2000 - \Delta h}{2000}\right|} e^{\frac{h_r - h_0}{h_r}} & \Delta h \geq 0, h_r \leq h_0 \\ 1 - \frac{1}{2} \sqrt{\left|\frac{2000 - \Delta h}{2000}\right|} e^{\frac{h_r - h_0}{h_r}} & \Delta h \geq 0, h_r > h_0 \end{cases} \quad (6)$$

式中： $h_r$  为红方飞机的飞行高度； $h_0$  为最大导弹发射区的攻击机高度。

### 3 态势评估模型的建立

精确的态势评估模型是机动决策的重要依据。综合考虑静态能力和动态态势评估，建立态势评估模型为

$$\begin{cases} T = k_1 T_C + k_2 T_a + k_3 T_d + k_4 T_v + k_5 T_h \\ \sum_{i=1}^5 k_i = 1 \end{cases} \quad (7)$$

常权评估模型仅考虑某一时刻评估指标对空战态势的影响，却忽略了指标值对综合态势的影响。不同类型的态势情形，各指标值对态势的影响程度也不尽相同，因此，权重的调整与双方的态势类型密切相关。态势评估的流程如图3所示。

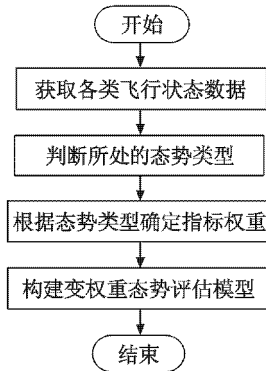


图3 空战态势评估流程图

Fig.3 Flow chart of air combat situation assessment

### 3.1 态势类型的确定

空战的态势类型<sup>[14]</sup>  $\Gamma$  定义为：空战优势取1，劣势取2，互为均势取3，互为劣势取4。在近距空战过程中，红蓝双方的高度在短时间内受过载限制，变化量较小。为了简化模型，提高计算效率，在态势评估模型中忽略相对高度和相对速度两个因素，空战态势类型主要由状态变量  $C = [p \ q \ D]$  决定。

以贝叶斯理论为基础建立态势分类概率模型，每一时刻的态势分类模型为

$$P(\Gamma_k^r = j | C = c_k^r) \quad (8)$$

式中， $j = 1, 2, 3, 4$ ，分别代表4种不同的态势，条件概率满足  $\sum_j P(\Gamma_k^r = j | C = c_k^r) = 1$ 。根据贝叶斯理论可知

$$P(\Gamma_k^r = j | C = c_k^r) = \frac{P(\Gamma_k^r = j)P(C = c_k^r | \Gamma_k^r = j)}{\sum_{l=1}^4 P(\Gamma_k^r = l)P(C = c_k^r | \Gamma_k^r = l)} \quad (9)$$

由于空战是一个动态变化的过程，态势评估的过程可以近似认为是一个马尔可夫过程<sup>[15]</sup>。因此，态势评估的结果中仅与当前时刻的状态相关，先验概率  $P(\Gamma_k^r = j)$  相互独立，并且满足  $P(\Gamma_k^r = j) = 0.25$ 。式(9)可以简化为

$$P(\Gamma_k^r = j | C = c_k^r) = \frac{P(C = c_k^r | \Gamma_k^r = j)}{\sum_{l=1}^4 P(C = c_k^r | \Gamma_k^r = l)} \quad (10)$$

由于状态变量  $C$  中的元素  $p, q$  和  $D$  相互独立，则联合条件概率密度为

$$P(C = c_k^r | \Gamma_k^r = j) =$$

$$P^p(p_k^r | \Gamma_k^r = j) \cdot P^q(q_k^r | \Gamma_k^r = j) \cdot P^D(D_k | \Gamma_k^r = j) \quad (11)$$

式中：条件概率函数  $P^p(\cdot), P^q(\cdot), P^D(\cdot)$  定义见表1； $p_k^r$  表示  $k$  时刻红方的目标方位角值； $q_k^r$  表示  $k$  时刻红方的目标进入角值； $D_k$  表示  $k$  时刻红方与目标的距离值。因此，可由式(10)确定状态  $c_k^r$  下的态势类型。

### 3.2 动态变权重的确定

当红方处于优势态势时，应缩短双方距离，使蓝方处于不可逃逸区，并且保持角度优势，扩大高度优势和速度优势。因此，优势态势下，距离因子的权重最大，其次是角度因子，最后是高度因子和速度因子。当红方处于劣势时，应加大双方距离，增加蓝方飞机的提前角，逃离蓝方飞机的攻击区域。因此，劣势下的距离因子和角度因子占主要因素。互为均势时，红方飞机应该增大角度，尽快占据优势位置，其次是增大高度因子和速度，以获得较大的能量优势。互为劣势时，红方飞机应增大角度因子、高度因子和速度因子，以获得较大的能量优势和战场主动性。

根据上述分析，不同的空战态势下，各指标对态势值的影响不同。评估指标的权重应当随态势类型动态

调整。由于飞机的性能属于飞机的固有属性,不会因为态势的变化而变化,因此,4 种情形下的  $k_1$  均相等。

依据所处的态势类型,给出态势评估的动态权重,见表 2。

表 1 条件概率函数表  
Table 1 Conditional probability function

态势类型	条件概率函数	条件	态势图
优势态势 $\Gamma=1$	$P^p(p_k^r   \Gamma_k^r = j) = (90^\circ - p_k^r) / 90^\circ$	$p_k^r \in [0^\circ, 90^\circ)$	
	$P^p(p_k^r   \Gamma_k^r = j) = 0$	$p_k^r \in [90^\circ, 180^\circ]$	
	$P^q(q_k^r   \Gamma_k^r = j) = -(q_k^r - 90^\circ) / 90^\circ$	$q_k^r \in [0^\circ, 90^\circ)$	
	$P^q(q_k^r   \Gamma_k^r = j) = 0$	$q_k^r \in [90^\circ, 180^\circ]$	
	$P^D(D_k   \Gamma_k^r = j) = 1 - D_k / D_{adv}$	$D_k \in [0, D_{adv})$	
	$P^D(D_k   \Gamma_k^r = j) = 0$	$D_k \in [D_{adv}, \infty)$	
劣势态势 $\Gamma=2$	$P^p(p_k^r   \Gamma_k^r = j) = 0$	$p_k^r \in [0^\circ, 90^\circ)$	
	$P^p(p_k^r   \Gamma_k^r = j) = -(p_k^r - 90^\circ) / 90^\circ$	$p_k^r \in [90^\circ, 180^\circ]$	
	$P^q(q_k^r   \Gamma_k^r = j) = (90^\circ - q_k^r) / 90^\circ$	$q_k^r \in [0^\circ, 90^\circ)$	
	$P^q(q_k^r   \Gamma_k^r = j) = 0$	$q_k^r \in [90^\circ, 180^\circ]$	
	$P^D(D_k   \Gamma_k^r = j) = 1 - D_k / D_{adv}$	$D_k \in [0, D_{adv})$	
	$P^D(D_k   \Gamma_k^r = j) = 0$	$D_k \in [D_{adv}, \infty)$	
互为均势 $\Gamma=3$	$P^p(p_k^r   \Gamma_k^r = j) = -(p_k^r - 90^\circ) / 90^\circ$	$p_k^r \in [0^\circ, 90^\circ)$	
	$P^p(p_k^r   \Gamma_k^r = j) = 0$	$p_k^r \in [90^\circ, 180^\circ]$	
	$P^q(q_k^r   \Gamma_k^r = j) = 0$	$q_k^r \in [0^\circ, 90^\circ)$	
	$P^q(q_k^r   \Gamma_k^r = j) = (p_k^r - 90^\circ) / 90^\circ$	$q_k^r \in [90^\circ, 180^\circ]$	
	$P^D(D_k   \Gamma_k^r = j) = D_k / D_{adv}$	$D_k \in [0, D_{adv})$	
	$P^D(D_k   \Gamma_k^r = j) = 1$	$D_k \in [D_{adv}, \infty)$	
互为劣势 $\Gamma=4$	$P^p(p_k^r   \Gamma_k^r = j) = (90^\circ - p_k^r) / 90^\circ$	$p_k^r \in [0^\circ, 90^\circ)$	
	$P^p(p_k^r   \Gamma_k^r = j) = 0$	$p_k^r \in [90^\circ, 180^\circ]$	
	$P^q(q_k^r   \Gamma_k^r = j) = (90^\circ - q_k^r) / 90^\circ$	$q_k^r \in [0^\circ, 90^\circ)$	
	$P^q(q_k^r   \Gamma_k^r = j) = (q_k^r - 90^\circ) / 90^\circ$	$q_k^r \in [90^\circ, 180^\circ]$	
	$P^D(D_k   \Gamma_k^r = j) = D_k / D_{adv}$	$D_k \in [0, D_{adv})$	
	$P^D(D_k   \Gamma_k^r = j) = 0$	$D_k \in [D_{adv}, \infty)$	

表 2 动态权重表

Table 2 The dynamic weight

态势类型	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$	$k_5$
优势态势	0.3	0.25	0.10	0.25	0.10
劣势态势	0.3	0.25	0.00	0.35	0.10
互为均势	0.3	0.35	0.15	0.05	0.15
互为劣势	0.3	0.30	0.20	0.00	0.20

### 4 仿真分析

本文选取某空战训练的飞参记录数据进行仿真分析,参训双方飞机机型一致。仿真结果如图 4、图 5 所示。

从图 4 和图 5 可以看出,初始位置时,双方背向飞行,互为均势,因此态势值基本相等。在初始飞行阶段,由于红方一直处于相对较高的位置,因此红方的态势值略高于蓝方。当双方继续飞行,虽然红方处于较高的位置,但是蓝方处于红方的尾后位置,形成置尾态势,蓝方态势值高于红方。当处于最后阶段时,红方高度降低,蓝方对红方形成尾追态势,因此,图 5 中最后阶段蓝方态势值高于红方。

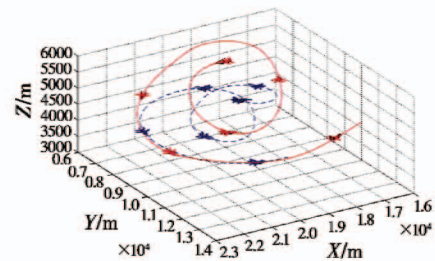


图 4 空战双方航迹图

Fig. 4 Track chart of both sides in air combat

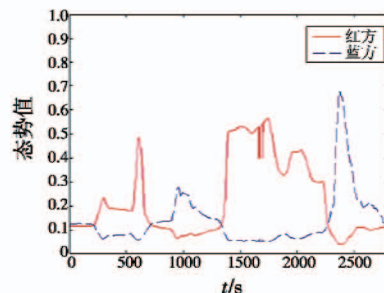


图 5 红蓝双方对抗仿真结果

Fig. 5 Simulation results of air combat

由仿真分析可知,基于动态变权重法的态势评估结果与真实的空战吻合。依据态势类型动态调整权重,突出了在不同态势下态势评估指标对态势值的重要程度,体现了各指标与态势类型的密切联系。

## 5 结束语

空战态势评估是空战智能决策的关键环节。针对常权重指标体系的缺点,建立动态变权重的近距离空战态势评估模型,仿真结果证明了动态变权重评估模型的合理性。同时,动态赋权法的提出,突显出不同情形下的态势评估的关键要素,也为飞行员简明直观地提供了生死攸关的态势信息。该研究对开展空战训练评估具有重要的理论价值和现实意义,也为后续开展战机的辅助决策研究提供依据,不足之处在于对空战类型的划分还不够细致,与实际空战还有一定差距。后续将针对态势连续变化对态势值的影响展开进一步的研究。

## 参考文献

- [1] 郭昊,周德云,张堃. 无人作战飞机空战自主机动决策研究[J]. 电光与控制,2010,17(8):28-32.
- [2] 王琳,寇英信. Dempster-Shafer 证据理论在空战态势评估方面的应用[J]. 电光与控制,2007,14(6):155-157.
- [3] 王三民,王宝树. 贝叶斯网络在战术态势评估中的应用[J]. 系统工程与电子技术,2004,26(11):1620-1623.
- [4] 王昱,章卫国,傅莉,等. 基于改进证据网络的空战动态态势估计方法[J]. 航空学报,2015,36(12):3896-3909.
- [5] 顾佼佼,赵建军,徐海峰,等. 基于 SPA 及 PSO 的超视距空战态势评估[J]. 系统工程与电子技术,2014,36(4):691-696.
- [6] 常一哲,李战武,孙源源,等. 基于威力场的超视距协同空战态势评估方法[J]. 火力与指挥控制,2015,40(10):40-45.
- [7] LI G, XU L W, WANG Y L, et al. An evaluation method of combat service operation performance for surface-to-air missile based on FAHP [C]//IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering (CSAE), 2012: 643-647.
- [8] 张淘沙,鲁艺. 强生存条件下的飞行器变权重航迹规划研究[J]. 电光与控制,2015,22(1):54-58.
- [9] CLARK R A, MCGOUGH R, PATERSON K. Reliability of an inexpensive and portable dynamic weight bearing asymmetry assessment system incorporating dual Nintendo Wii Balance Boards [J]. Gait & Posture, 2011, 34(2):288-291.
- [10] 吴舒然,刘昌云,高嘉乐,等. 双层动态变权的弹道目标威胁评估算法研究[J]. 战术导弹技术,2018(3):60-66.
- [11] 黄国庆,王国良,臧青松. 参数可调的战斗机空战效能评估系统研究[J]. 电光与控制,2013,20(2):33-36.
- [12] 王青,端木京顺,轩永波,等. 考虑气象因素的飞机空战能力评估模型[J]. 电光与控制,2012,19(8):23-27.
- [13] 史振庆,梁晓龙,张佳强,等. 基于导弹攻击区的空战态势评估[J]. 火力与指挥控制,2018,43(9):89-93,98.
- [14] HUANG C Q, DONG K S, HUANG H Q, et al. Autonomous air combat maneuver decision using Bayesian inference and moving horizon optimization [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2018, 29(1):86-97.
- [15] 徐西蒙,杨任农,符颖,等. 基于 ELM\_AdaBoost 强预测器的空战目标威胁评估[J]. 系统工程与电子技术,2018,40(8):1760-1768.



请扫描二维码关注我刊