

改进 BAS-TIMS 算法在空战机动决策中的应用*

嵇慧明^{1,2}, 余敏建², 乔新航¹, 杨海燕², 张帅文¹

(1. 中国人民解放军 94701 部队, 安徽 安庆 246000; 2. 空军工程大学 空管领航学院, 陕西 西安 710051)

摘要:针对当前空战机动决策精确度低、实时性差的缺点,对天牛须搜索-战术免疫机动系统(Beetle Antennae Search-Tactical Immune Maneuver System, BAS-TIMS)算法进行改进,并应用于空战机动决策中。增加左爬升、右爬升、左俯冲、右俯冲 4 种机动,对传统的机动策略库进行扩充,设计了 11 种基本机动策略并给出了相应的控制方法。基于距离、高度、速度、角度和战机性能优势函数,利用非参量法构造战机机动决策综合优势函数。针对天牛须搜索算法在全局搜索和收敛速度上存在的缺陷,引入蒙特卡洛概率迭代的方法对算法进行改进,并和战术免疫机动系统进行融合,将改进的 BAS-TIMS 算法用于空战机动决策。设计算例进行仿真分析,并将结果和博弈论法、改进共生生物免疫进化算法、传统 BAS 算法和传统 TIMS 模型的计算结果进行对比,验证所提算法的有效性。仿真结果表明:改进 BAS-TIMS 算法在空战机动决策的收敛精度、收敛速度和全局搜索能力上更加具有优势。

关键词:空战决策;机动策略;态势优势;天牛须搜索;战术免疫机动

中图分类号:V249.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2020)04-123-11

Application of the improved BAS-TIMS algorithm in air combat maneuver decision

Ji Huiming^{1,2}, Yu Minjian², Qiao Xinhang¹, Yang Haiyan², Zhang Shuaiwen¹

(1. The PLA Unit 94701, Anqing 246000, China;

2. Air Traffic Control and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: Owing to the low accuracy and poor real-time ability of modern air combat maneuver decision-making, the BAS-TIMS (beetle antennae search-tactical immune maneuver system) algorithm was improved and applied to air combat maneuver decision-making. The traditional maneuver inventory was enlarged by adding four maneuvers, left climbing, right climbing, left diving, right diving. Eleven basic maneuver tactics were designed, and a method was given to control them. Considering range, height, speed, angle and the superiority function of fighter performance, a comprehensive superiority function of fighter performance was built with the help of nonparametric model. Monte Carlo probability iteration was introduced into the beetle antennae search algorithm to improve its global search ability and convergence speed. This algorithm was combined with TIMS, and the improved BAS-TIMS algorithm was applied into modern air combat maneuver decision-making. An example was given to simulate and prove the effectiveness by comparing BAS-TIMS with game theory, the improved symbiotic immune evolutionary algorithm, the traditional BAS algorithm and the traditional TIMS model. The simulation results show that the improved BAS-TIMS algorithm has more advantages on convergence speed, accuracy and global search ability in air combat maneuver decision-making.

Keywords: air combat decision; maneuvering strategy; situation superiority; beetle antennae search; tactical immune maneuver system

随着技术的快速发展,战机性能逐步得到提升,空战对抗也变得异常激烈。空战机动是为了使我机取得最优空战态势,对目标机构成威胁并实施有效的攻击,甚至在我机处于劣势时,通过机动摆脱目标机的锁定,脱离危险^[1-3]。当前,空军航空兵在空战决策时,仍以飞行员的自主判断决策为主,在复杂多变的战场环境中,无疑造成飞行

员的精力分散,降低机动决策效率和精度。因此,对空战机动决策问题展开研究,实时生成合理、可靠、精确的机动策略则显得至关重要。

目前,用于空战机动决策的智能方法主要有影响图法^[4-5]、贝叶斯网络^[6-7]、专家系统法^[8]、强化学习^[9-11]、遗传算法^[12-14]及其改进算法^[15]等。利用影响图法对空战要素之间的关系进行分

* 收稿日期:2019-09-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61472441);国家部委基金资助项目(61403110304)

作者简介:嵇慧明(1994—),男,江苏淮安人,助理工程师,硕士,E-mail:jhm320826@163.com;

杨海燕(通信作者),女,副教授,博士,硕士生导师,E-mail:lwzy1008@163.com

析,结合博弈法生成空战机动对策,所得结果较为贴近空战实际,但计算时间长,难以满足空战实时性要求;将客观信息和专家知识融入贝叶斯算法中,可以更好地描述复杂空战环境,从而提高空战机动决策仿真效果,但是对提升空战决策效率没有明显改善;强化学习、遗传算法及其改进算法等进化算法稳定性不够,在应用中存在收敛性差、易陷入局部最优、实时性不够等缺点。

Kaneshige 等^[16]利用生物学中的免疫机制,将态势-机动视为免疫应答,建立了战术免疫机动系统(Tactical Immunized Maneuver System, TIMS),可有效提高决策精度和速度,但是在免疫搜索进化时效率较低;Jiang 等^[17]对自然界中天牛觅食现象进行模拟,建立了天牛须智能搜索(Beetle Antennae Search, BAS)算法,该算法具有良好的搜索适应性,但是搜索时间较长,且全局搜索能力有待进一步提升。若对 BAS 算法实施改进,并与 TIMS 进行融合,可以进一步提升算法的搜索收敛稳定性和搜索速度,在实际空战机动决策中更加具有实际应用意义。

本文基于改进 BAS-TIMS 算法对空战机动对策生成问题展开研究。对传统的机动动作库进行扩充并给出了机动动作控制模型,进一步贴近空战机动实际;利用非参量法对战机机动决策优势进行评估,弥补了参量法的参数多、模型复杂的缺陷;针对天牛须算法全局搜索能力低的缺点,引入了蒙特卡洛概率迭代方法,对 BAS 算法进行改进,并和战术免疫机动系统融合,使战机机动策略搜索具有一定的方向性,从而进一步提升空战机动决策效率,更好地解决空战机动决策问题。

1 空战机动策略模型

1.1 战机基本机动策略库

目前,空战机动策略集模型主要分成两类:第一类是基于典型空战战术的机动序列,如定常盘旋、蛇形机动、半筋斗、斜筋斗等;第二类是基于战机在三维空间中操纵方式的基本机动动作库,NASA 学者设计了 7 种基本机动动作库^[18]——减速前飞、匀速前飞、加速前飞、右转、左转、爬升和俯冲。本文在这 7 种基本机动动作的基础上,增加了左爬升、右爬升、左俯冲、右俯冲 4 种机动,对原机动动作库予以扩充,得到了 11 种基本机动策略,并给出了每种机动策略的控制方法,使得机动更加精细,能够更为全面地反映飞机在三维空间内的运动情况,如图 1 所示。

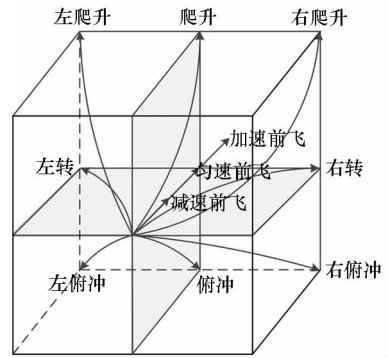


图 1 空战机动策略库

Fig. 1 Air combat maneuver strategy library

1.2 战机基本机动策略控制

为了对机动动作实现精确控制,现将 11 种基本策略分成 3 类来研究:平飞机动、俯仰机动和转弯机动。用三自由度的方式对上述 11 种指挥引导策略建立相应的模型,以 n_x 、 n_y 、 γ 作为控制变量, n_x 、 n_y 、 γ 分别表示切向过载、法向过载和转弯坡度,建立统一的战机机动策略控制模型。

$$\begin{cases} n_x = \frac{\dot{V}}{g} + \sin\beta \\ n_y = \frac{1}{\cos\gamma} \left(\frac{\dot{V}\dot{\beta}}{g} + \cos\beta \right) \\ \gamma = -\frac{V\dot{\alpha}\cos\beta}{gn_y} \end{cases} \quad (1)$$

其中: α 为战机的航向角; β 为战机的俯仰角; V 、 \dot{V} 分别为战机的速度和加速度; $\dot{\alpha}$ 为战机航向角随时间的变化率; $\dot{\beta}$ 为战机俯仰角随时间的变化率;重力加速度 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 。为了贴近空战实际,对 n_x 、 n_y 、 γ 的范围规定如下: $n_x \in [-2, 2]$, $n_y \in [-5, 7]$, $\gamma \in [-0.5\pi, 0.5\pi]$ 。

每种基本机动策略的控制量见表 1。

对式(1)实施变换,可以将战机控制量转换为更加直观的飞行姿态变化。

$$\begin{cases} \dot{\alpha} = -\frac{g}{V\cos\beta} \cdot n_y \cdot \gamma \\ \dot{V} = g \cdot (n_x - \sin\beta) \\ \dot{\beta} = \frac{n_y \cdot \cos\gamma - \cos\beta}{n_x - \sin\beta} \end{cases} \quad (2)$$

当明确控制量 n_x 、 n_y 、 γ 的大小以及初始飞行状态时,可对式(2)进行积分,得到控制后战机的新的姿态 α 、 β 、 V ,从而可得战机三维位置坐标的变化率。

$$\begin{cases} \dot{x} = V\cos\beta\cos\alpha \\ \dot{y} = -V\cos\beta\sin\alpha \\ \dot{z} = V\sin\beta \end{cases} \quad (3)$$

表1 11种基本机动策略控制量

Tab.1 Control quantities of 11 basic maneuvering strategies

机动策略	n_x	n_y	γ
匀速前飞	0	1	0
加速前飞	(0,2]	1	0
减速前飞	[-2,0)	1	0
左转	[-2,2]	$n_y = 1/\cos\gamma$	$[-0.5\pi, 0)$
右转	[-2,2]	$n_y = 1/\cos\gamma$	$(0, 0.5\pi]$
爬升	[-2,2]	(1,7]	0
俯冲	[-2,2]	$[-5, 1)$	0
左俯冲	[-2,2]	$n_y < 1/\cos\gamma$	$[-0.5\pi, 0)$
右俯冲	[-2,2]	$n_y < 1/\cos\gamma$	$(0, 0.5\pi]$
左爬升	[-2,2]	$n_y > 1/\cos\gamma$	$[-0.5\pi, 0)$
右爬升	[-2,2]	$n_y > 1/\cos\gamma$	$(0, 0.5\pi]$

根据初始时刻的坐标,对式(3)中 x, y, z 积分即可得到控制后战机的坐标 x', y', z' , 通过不断迭代,即可对我方战机轨迹实施预测。

2 战机机动决策优势评估

战机机动决策的根本目的是使我方战机的空战态势最优,且受到目标机的威胁最小。空战态势优势评估主要有参量法和非参量法两类,非参量法在实际应用中需要大量的参数,可行性不高,因此在传统的距离、高度、速度和角度等空战优势评估指标的基础上,增加了战机性能优势评估指标,用非参量法建立空战优势评价指标体系,如图2所示。

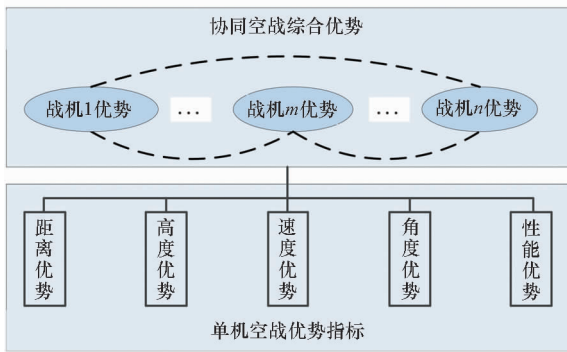


图2 空战优势评价指标体系

Fig.2 Evaluation index system of air combat superiority

2.1 距离优势^[19]

$$S_D = \begin{cases} 0.1839e^{-\frac{D-D_{Rmax}}{D_{Rmax}}} & D_{Rmax} \leq D \\ 0.5e^{-\frac{D-D_{Mmax}}{D_{Rmax}-D_{Mmax}}} & D_{Mmax} \leq D < D_{Rmax} \\ 2^{-\frac{D-D_{Mkmax}}{D_{Mmax}-D_{Mkmax}}} & D_{Mkmax} \leq D < D_{Mmax} \\ 1 & D_{Mkmin} \leq D < D_{Mkmax} \\ 2^{-\frac{D-D_{Mkmin}}{D_{Mmin}-D_{Mkmin}}} & D_{Mmin} \leq D < D_{Mkmin} \end{cases} \quad (4)$$

其中: D, D_{Rmax}, D_{Mmax} 分别为战机间相对距离、雷达最大探测距离和导弹最大攻击距离; D_{Mkmax}, D_{Mkmin} 分别为导弹最大、最小不可逃逸距离。

2.2 高度优势

$$S_H = \begin{cases} e^{-\frac{H_W-H_{best}}{H_{best}}} & H_{best} \leq H_W \\ 0.791 \cdot e^{\frac{H_{best}-H_W}{H_{best}}} & H_M \leq H_W < H_{best} \\ -2.2183 + e^{\frac{H_M-H_{best}}{H_W-H_{best}}} & H_W \leq H_M < H_{best} \end{cases} \quad (5)$$

其中: H_W, H_M 分别为我机与目标机的高度; H_{best} 为战机最佳空战高度,通常可根据战机的高度以查表的方式获得。

2.3 速度优势^[20]

$$S_V = \begin{cases} 1 & 1.5V_M < V_W \\ -0.5 + \frac{V_W}{V_M} & 0.6V_M < V_W \leq 1.5V_M \\ 0.1 & V_W \leq 0.6V_M \end{cases} \quad (6)$$

其中: V_W, V_M 分别为我机与目标机的速度; V_{best} 为我机最佳空战速度。

2.4 角度优势^[21]

$$S_A = S_\varphi^{A_1} \cdot S_q^{A_2} \quad (7)$$

其中: S_φ, S_q 分别为方位角优势和进入角优势; λ_1, λ_2 为权重系数; $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$,具体取值通常由专家打分给出,本文中取 $\lambda_1 = \lambda_2 = 0.5$ 。

$$S_\varphi = \begin{cases} 0.1 - \frac{|\varphi| - 85^\circ}{10 \times (180^\circ - 85^\circ)} & 85^\circ \leq |\varphi| \\ 0.2 - \frac{|\varphi| - \varphi_{Rmax}}{10 \times (85^\circ - \varphi_{Rmax})} & \varphi_{Rmax} \leq |\varphi| \leq 85^\circ \\ 0.3 - \frac{|\varphi| - \varphi_{Mmax}}{10 \times (\varphi_{Rmax} - \varphi_{Mmax})} & \varphi_{Mmax} \leq |\varphi| \leq \varphi_{Rmax} \\ 0.8 - \frac{|\varphi| - \varphi_{Mkmax}}{2(\varphi_{Mmax} - \varphi_{Mkmax})} & \varphi_{Mkmax} \leq |\varphi| \leq \varphi_{Mmax} \\ 1 - \frac{|\varphi|}{5\varphi_{Mkmax}} & 0^\circ \leq |\varphi| \leq \varphi_{Mkmax} \end{cases} \quad (8)$$

其中: φ, q 分别为目标方位角和我机进入角; φ_{Rmax} 为雷达最大搜索方位角; φ_{Mmax} 为空空导弹最大离轴发射角; φ_{Mkmax} 为空空导弹不可逃逸区最大偏角。

$$S_q = \begin{cases} e^{-\frac{|\varphi' - 180^\circ - q|}{180^\circ/\pi}} & 0 \leq \varphi' \\ e^{-\frac{|\varphi' - 180^\circ + q|}{180^\circ/\pi}} & \varphi' < 0 \end{cases} \quad (9)$$

当 $\varphi > 90^\circ$ 时,令 $\varphi' = 180^\circ - \varphi$;当 $\varphi < -90^\circ$ 时,令 $\varphi' = -180^\circ - \varphi$,并以 φ' 替代原式中的 φ 。

当 $q < \varphi \leq 0$ 时,令 $q' = q + 360^\circ$;当 $q > -\varphi > 0$ 时,令 $q' = q - 360^\circ$,并以 q' 替代原式中的 q 。

2.5 性能优势

战机的空战性能通常用对数公式表示。

$$C = [\ln B + \ln(\sum A_1 + 1) + \ln(\sum A_2 + 1)] \varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_3 \varepsilon_4 \tag{10}$$

式中: B, A_1, A_2 分别为战机的机动性参数、火力打击能力参数和探测能力参数; $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ 和 ε_4 分别为战机的操纵效能系数、生存能力系数、航程性能系数和电抗能力系数,且 $\varepsilon_i \neq 0 (i = 1, 2, 3, 4)$ 。这 7 个参数可以根据飞机的相关性能参数获得,具体计算方式参考文献[22-23],对于典型的作战飞机型号,可通过查表的方式获取。此处不再详述。

根据式(10)可建立战机性能优势函数:

$$S_p = \begin{cases} \frac{1}{2} \cdot e^{1-\frac{C_M}{C_W}} & C_W \leq C_M \\ 0.5 + \frac{1}{2(e-1)} \cdot (e^{1-\frac{C_M}{C_W}} - 1) & C_W > C_M \end{cases} \tag{11}$$

其中: C_W, C_M 分别为我机与目标机的空战性能, $S_p \in (0, 1)$ 。

2.6 战机综合优势

$$S_{SC} = \omega_D S_D + \omega_H S_H + \omega_V S_V + \omega_A S_A + \omega_P S_P \tag{12}$$

式中, $\omega_D, \omega_H, \omega_V, \omega_A, \omega_P$ 分别为各项指标对应的权重。传统的权重值通常由专家打分法求取,有着较强的人为主观性。为了提高信息处理的客观性,本文采用文献[24-25]中的改进粗糙集理论方法求取指标对应的权重。

$$\omega_{(i)} = \frac{\phi(i)}{\sum \phi(i)} \quad i = D, H, V, A, P \tag{13}$$

式中, $\phi(i)$ 为单个属性 i 的重要度表示,具体计算步骤可参考文献[24-25]。

3 基于改进 BAS-TIMS 的空战机动对策生成

3.1 天牛须搜索算法

天牛须搜索算法是在 2017 年提出的一种新的智能搜索算法,其生物学原理是对自然界中天牛觅食现象的模拟。天牛觅食时,在不知道食物位置的情况下,会通过左右两只触角对食物的气味强度进行比较,从而确定下一步的飞行方向,直至找到食物的位置,如图 3 所示。

在对天牛觅食过程模拟时,食物的气味强度可以作为待优化问题的适应度函数,前进方向作为搜

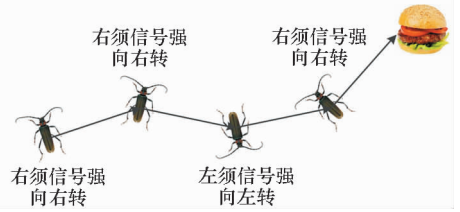


图 3 天牛觅食示意图

Fig. 3 Schematic diagram of beetle finding food

索的选择结果,前进距离作为仿真步长,则天牛的觅食过程可以抽象成相应的算法模型,描述如下:

- 1) 天牛是在三维空间内移动,为了提升模型的适用度,现将其范围扩展到任意维空间,假设天牛可以在一个任意维度的空间内搜索;
- 2) 为了更好地描述天牛的觅食搜索过程,现将天牛的身体视为一个质点,天牛须位于两侧,且以质点为中心对称,则左右两侧天牛须的长度之和即为天牛的身体宽度;
- 3) 天牛每一次搜索后的前进距离和身体宽度成一定的比例;
- 4) 假设天牛在每次前进后头的朝向随机,则天牛须的方向也随之成为随机变量;
- 5) 气味在整个空间里分布是连续变化的。

3.2 BAS 算法搜索策略及改进

运用 BAS 算法对目标实施搜索时,首先需要初始化参数并随机生成天牛方向,然后计算天牛的左右须位置及其适应度值,接着通过适应度函数值判断前进方向,满足结束条件后输出最优值。具体如图 4 所示。

步骤 1:初始化相关参数。对于 k 维空间内的最优化搜索问题,设天牛的质心为 x ,左须向量为 x_l ,右须向量为 x_r , x, x_l 和 x_r 均为 k 维向量。

步骤 2:对天牛的方向向量予以定义:

$$b = \frac{\mathit{rand}(k, 1)}{\|\mathit{rand}(k, 1)\|} \tag{14}$$

式中, $\mathit{rand}(k, 1)$ 为天牛左、右须构成的 k 维随机向量, $\|\mathit{rand}(k, 1)\|$ 为向量 $\mathit{rand}(k, 1)$ 的模。故左、右须的坐标表示为:

$$\begin{cases} x_l = x' + \frac{1}{2}d'b \\ x_r = x' - \frac{1}{2}d'b \end{cases} \tag{15}$$

其中: x' 为迭代 t 次后天牛的质心位置, d' 为迭代 t 次后左、右须之间的距离。

步骤 3:判断前进方向。分别计算天牛左须 x_l 和右须 x_r 的适应度函数值 f_l 和 f_r ,故天牛的前进方向为:

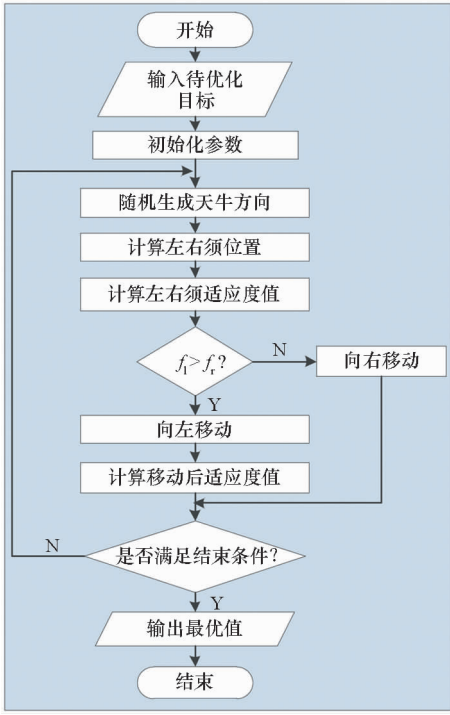


图4 天牛须搜索算法流程

Fig. 4 Flow of BAS algorithm

$$x_t = x_{t-1} - b\delta^t \text{sgn}(f_l - f_r) \quad (16)$$

式中: δ^t 为第 t 步时天牛的移动步长。 $\text{sgn}(C)$ 为符号函数, 当 $C < 0$ 时, $\text{sgn}(C) = -1$; 当 $C > 0$ 时, $\text{sgn}(C) = 1$; 当 $C = 0$ 时, $\text{sgn}(C) = 0$ 。

步骤4: 计算天牛移动后新的适应度函数值, 并对天牛的步长和左右须之间的距离进行更新。

$$\begin{cases} d^t = att_d \cdot d^{t-1} \\ \delta^t = att_\delta \cdot \delta^{t-1} \end{cases} \quad (17)$$

其中: att_d 为距离衰减系数, att_δ 为步长衰减系数。一般情况下, 初始时刻天牛的搜索步长大, 随着距离气味的距离拉近, 搜索步长逐渐减小。

步骤5: 判断过程是否满足终止条件, 若满足, 则输出对应的选择方案, 否则返回步骤二, 直至满足结束条件。

BAS 算法在搜索时具有很强的适应性, 每次迭代后, 将进化个体视为正在觅食的天牛, 计算算法在移动后的适应度函数值, 并与移动前的算法适应度函数值进行对比, 若移动后的适应度函数值更优, 则予以移动, 否则不移动。具体搜索模型为:

$$\begin{cases} x_i^{t+1} = x_i^t + Levy(x_i^t - x_{best}^t) \\ x_{il}^{t+1} = x_i^{t+1} + d^{t+1}b \\ x_{ir}^{t+1} = x_i^{t+1} - d^{t+1}b \\ x_{itemp}^{t+1} = x_i^{t+1} - \delta^{t+1}b \text{sgn}[f(x_{il}^{t+1}) - f(x_{ir}^{t+1})] \\ x_i^{t+1} = x_{itemp}^{t+1} & f(x_{itemp}^{t+1}) < f(x_i^{t+1}) \end{cases} \quad (18)$$

其中: x_i^t, x_i^{t+1} 分别为 x_i 迭代 t 次和 $t+1$ 次后的解空间; x_{best}^t 表示当前状态的最优解; x_{itemp}^{t+1} 表示 x_i^{t+1} 按照上述 BAS 搜索算法移动后的解空间。

利用 BAS 算法对问题的最优解实施搜索, 具有搜索速度快等优点, 但是在迭代过程中容易陷入局部最优。为了提高 BAS 算法的全局搜索能力, 引入模拟退火算法中的蒙特卡洛准则, 对 BAS 算法进行改进。图 5 为搜索选择概率图, 在每次搜索选择时, 以概率 p 接受较差解, 从而提升 BAS 的全局搜索能力。且有:

$$p = \begin{cases} 1 & f(x^t) < f(x^{t-1}) \\ e^{-\frac{f(x^t) - f(x^{t-1})}{k \cdot e^{-t}}} & f(x^t) > f(x^{t-1}) \end{cases} \quad (19)$$

其中: $f(x^t)$ 表示第 t 次迭代后预计适应度函数值; $f(x^{t-1})$ 表示第 $t-1$ 次迭代后的适应度函数值; k 为衰减系数。

由计算公式可以看出, 随着迭代次数的不断增加, 选择较差解的概率值 p 将越来越小。

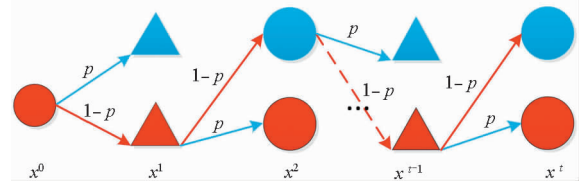


图5 搜索选择概率图

Fig. 5 Search selection probability

3.3 战术免疫机动系统模型

免疫是一种科学的内建防御体系, 存在于所有的生物中, 以减弱外部攻击。生物免疫系统在免疫应答产生的过程中, 接收来自抗原-抗体复合物的连续反馈, 从而产生越来越特异的抗体应答。它可以记住先前的遭遇是如何被击败的, 从而在后期发生类似的遭遇时能够快速做出反应, 这是一个学习范式, 能够开发解决方案, 并不断增加系统的精度。

对生物免疫系统进行数学化描述, 在人工免疫算法的基础上, 建立了战术免疫机动系统, 该系统良好的自学习能力与实时性能, 能够较好地克服空战中影响战机决策的不确定因素, 从而对求解空战对策的实时生成问题有着良好的适配性。系统主要由以下几个部分组成。

3.3.1 机动动作库的构建

在第1节中, 建立了11种基本指挥引导策略, 并对其控制方法加以描述。基于控制变量 n_x, n_y, γ 及其范围, 可以构建战机的机动动作库:

$$M_k = [n_x, n_y, \gamma] \in [-2, 2; -5, 7; -0.5\pi, 0.5\pi] \quad (20)$$

在三自由度控制模型中,当控制变量的值确定时,战机的机动动作也唯一确定。例如,当 $(n_x, n_y, \gamma) = (0, 1, 0)$ 时,战机做匀速前飞机动。

3.3.2 机动策略编码

将战机的机动策略存于 24 位二进制字符串中,该字符串被分成四个部分:6 位(1~6)代表战机识别码,6 位(7~12)代表控制变量 n_x ,6 位(13~18)代表控制变量 n_y ,6 位(19~24)代表控制变量 γ 。具体如图 6 所示。

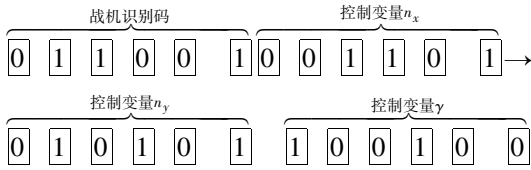


图 6 机动策略编码示意图

Fig. 6 Schematic diagram of maneuver strategy coding

n_x 的数值精度为 $1/16$, n_y 的数值精度为 $3/16$, γ 的数值精度为 $\pi/64$ 。

3.3.3 机动策略评估

建立机动动作库后,可以对后续的机动策略充分预测,并构造亲和度函数对机动策略实施评估。基于式(12),机动策略评估的亲和度函数为:

$$f_k(C) = \alpha \cdot S'_k(G) + (1 - \alpha) \cdot [1 - T'_k(G)] \quad (21)$$

式中, $f_k(C)$ 表示战机做机动 k 时的亲和度函数值, $S'_k(G)$ 表示战机做机动 k 时的态势优势值, $T'_k(G)$ 表示战机做机动 k 时受到目标机的态势威胁值, α 为态势优势重要度系数。

3.3.4 空战态势编码

空战态势主要包括目标机和我方战机的位置信息、航向、高度、速度等,在战术免疫机动系统中,为了实现机动策略与空战态势间的免疫操作,需要对空战态势进行编码,选取以下 6 个特征进行编码:战机间距离、相对高度、目标方位角、航向交叉角、我方战机速度、目标机速度。

考量空战态势对机动策略选择的影响时,主要是对中近距空战展开研究,故战机间的距离选择在 $[0 \text{ km}, 100 \text{ km}]$ 范围内。使用 5 位二进制字符串对其编码,精度为 3 km,例如我机和目标机距离为 60 km 时,编码为 $\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ 。

相对高度的范围为 $[0 \text{ m}, 4800 \text{ m}]$,精度为 150 m;目标方位角范围为 $[0^\circ, 360^\circ]$,精度为 6° ;航向交叉角的范围为 $[0^\circ, 360^\circ]$,精度为 6° ;我方战机和目标机的速度范围为 $[0 \text{ m/s}, 400 \text{ m/s}]$,精度为 12.5 m/s。利用上述方法对其进行编码操作。

3.3.5 机动策略选择

将战机当前的机动状态作为初始状态,利用相应的算子对机动策略进行选择,最终将亲和度函数值最大的机动策略作为最优选择。当发现成功的机动动作时,将其机动策略以及相应的空战态势特征放入相应的数据库中,为后续模型进化提供依据。

3.3.6 机动策略解码

首先根据选择的机动策略的编码,计算出控制变量 n_x, n_y, γ 的值,然后由表 1 中的 11 种指挥引导策略控制量范围得出我方战机的基本机动策略,接着根据式(2)、式(3)计算机动后我方战机的位置和机动后的航向、速度和高度。

3.4 改进 BAS 算法与 TIMS 模型的融合

改进的天牛须搜索算法虽然具备良好的全局搜索能力,但是在每次搜索时,计算复杂度是相同的,若对机动动作进行精确化搜索,则计算量十分庞大,影响收敛速度;TIMS 模型能够随着迭代次数的增加对机动策略选择库进行扩充,在后续选择中降低计算复杂度,但是对于之前未出现的态势,进化搜索时收敛速度较慢。将改进 BAS 算法和 TIMS 模型进行融合,并在仿真实验中对融合算法的优越性进行检验,具体过程如图 7 所示。

3.5 空战机动对策生成

空战时,敌我双方都在试图通过机动使目标机对己方的威胁最小,同时尽量使己方获得最优空战态势,构成攻击条件对目标实施打击。因此,需要根据敌我双方的空战态势实时生成机动决策方案,基于上述的改进 BAS-TIMS,生成我方战机的机动对策,其过程如图 8 所示。

步骤 1: 获取我方战机和目标机的空战态势数据,并做格式化处理。

步骤 2: 对空空导弹弹道进行仿真,并计算出实时攻击线的距离,判断是否构成攻击条件,若满足则对目标机实施攻击,否则转入下一步机动。

步骤 3: 对我方战机的空战态势和受到目标机的威胁实施评估,并在此基础上利用改进的 BAS-TIMS 算法求解下一步的机动策略。

步骤 4: 机动完成后,转入步骤 1,反复迭代生成机动策略,直至我方战机对敌方构成攻击条件并发射导弹。

4 算例仿真分析

4.1 算例仿真

为了验证本文算法在空战机动决策中的有效

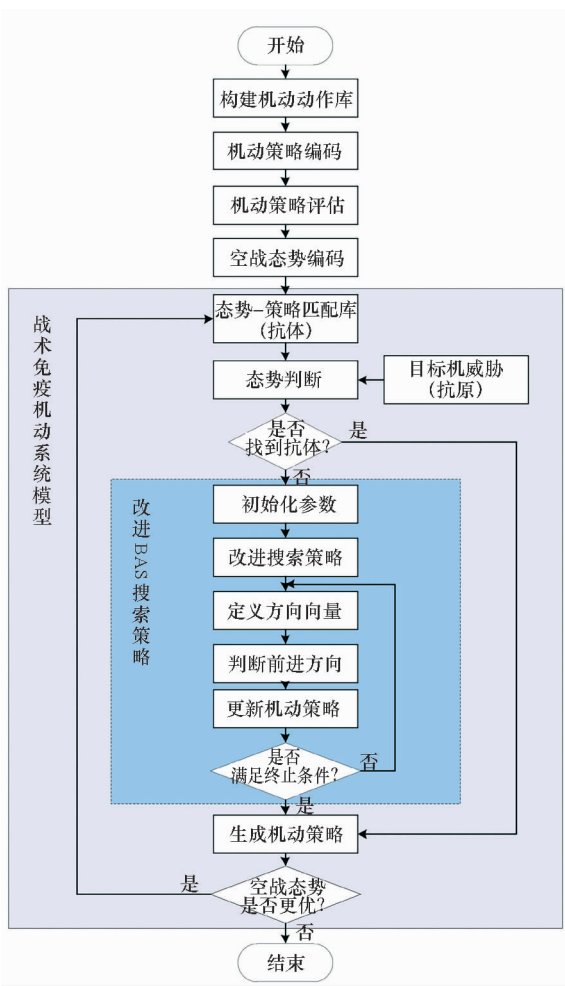


图7 改进 BAS 算法和 TIMS 模型融合

Fig.7 Fusion of improved BAS algorithm and TIMS model

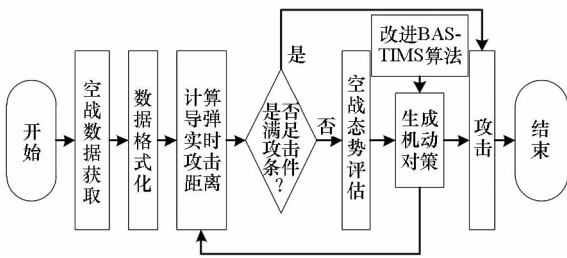


图8 空战机动对策生成

Fig.8 Generation of air combat maneuver countermeasures

性,现以敌我一对一空战对抗为背景设计算例进行仿真。初始条件:我机初始位置坐标为(0 km, 40 km, 6200 m),航向 135°,速度 900 km/h;目标机初始位置坐标为(70 km, 30 km, 6000 m),航向 330°,速度 800 km/h。假设敌我双方战机选择同一型号战机,经计算,战机综合优势的各项指标对应权重 $\omega_D, \omega_H, \omega_V, \omega_A, \omega_P$ 分别为 0.181, 0.181, 0.189 7, 0.212 7, 0.235 6。该型战机的性能优势为 0.680 9,雷达最大搜索角 $\varphi_{Rmax} = 80^\circ$,空空导

弹最大离轴发射角 $\varphi_{Mmax} = 50^\circ$,空空导弹不可逃逸区最大偏角 $\varphi_{Mkmax} = 30^\circ$,雷达最大探测距离 $D_{Rmax} = 120$ km,导弹最大攻击距离 $D_{Mmax} = 60$ km,导弹最大、最小不可逃逸距离分别为 $D_{Mkmax} = 30$ km、 $D_{Mkmin} = 5$ km。态势优势重要度系数 α 取 0.7,设仿真步长为 5 s,仿真时长为 300 s。初始时刻,TIMS 模型库中置入 1000 条实际空战训练的机动序列。当敌我双方均采用本文改进算法策略实施机动时,仿真结果如图 9 所示。

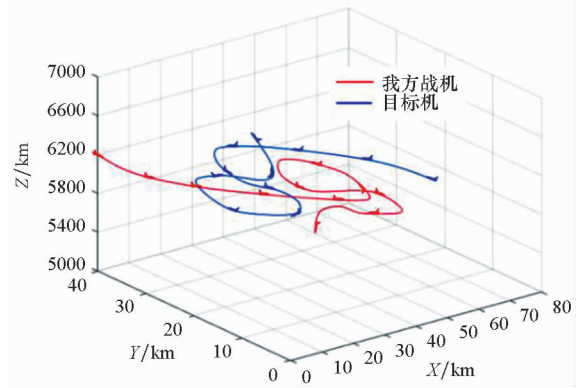


图9 空战对抗三维轨迹

Fig.9 Three-dimensional trajectory of air combat

图9 在水平面上的投影如图 10 所示。

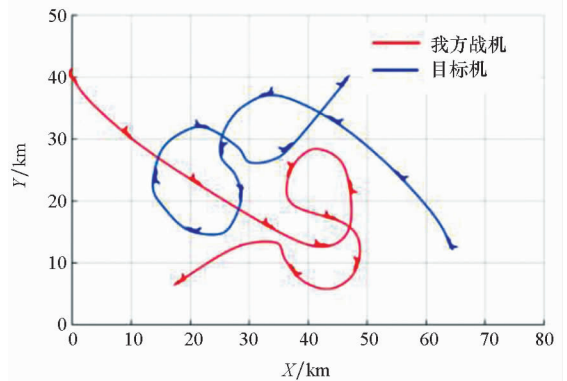


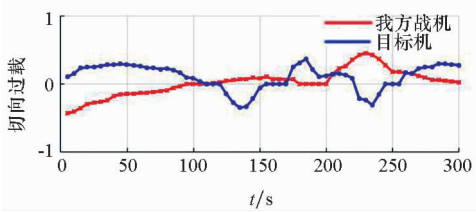
图10 敌我双方空战对抗轨迹水平面投影

Fig.10 Plane projection of air combat trajectory

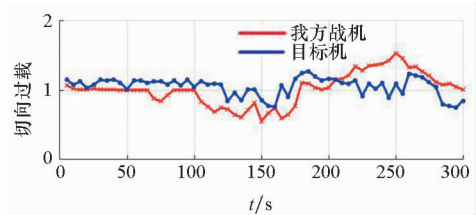
我方战机与目标机对应的机动策略切向过载 n_x 、法向过载 n_y 、转弯坡度 γ 的变化分别如图 11 所示,高度和速度变化如图 12 所示。

图 9 ~ 12 对敌我双方的空战轨迹和机动策略参数进行了描述。初始阶段,我方战机相对目标机在高度和速度上具有一定的优势,角度上处于劣势,通过左转机动,试图化解角度劣势;在一段时间的调整后,我机通过左转机动,对目标进行攻击,并不断调整高度和速度以保持自身优势,目标机也实施大坡度转弯机动,试图摆脱我机的攻击,第一次攻击占位完毕后,我方战机迅速左转回撤,为下一波次的攻击做准备,目标机也积极实施机

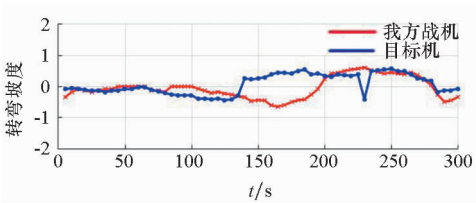
动,试图在摆脱我方战机的攻击后,通过机动对我方战机构成威胁。综上所述,我方战机和目标机都在积极机动占位,试图使己方保持空战态势优势,并对目标构成威胁。敌我方战机空战态势优势随时间的变化如图 13 所示。



(a) 切向过载
(a) Tangential overload

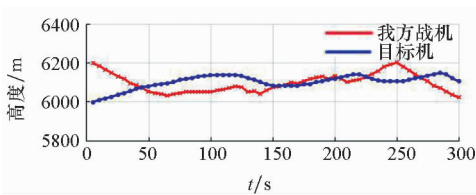


(b) 法向过载
(b) Normal overload

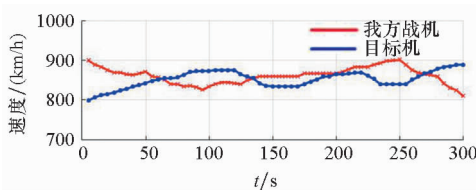


(c) 转弯坡度
(c) Turning slope

图 11 切向过载、法向过载和转弯坡度随时间的变化
Fig. 11 Changes of tangential overload, normal overload and turning slope with time



(a) 高度
(a) Attitude



(b) 速度
(b) Velocity

图 12 高度和速度随时间的变化
Fig. 12 Changes of a titude and velocity with time

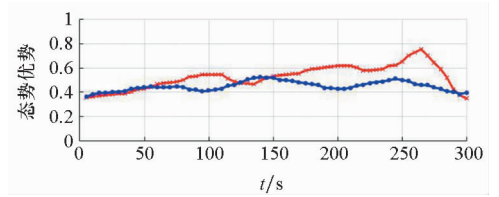


图 13 空战态势优势随时间的变化
Fig. 13 Changes of air combat situation superiority with time

由图 13 可以看出,初始阶段,我方战机相对处于劣势,通过合理的机动决策,不断增大态势优势;目标机在态势变弱后,也开始实施机动来增强自己的空战态势。证明了改进 BAS-TIMS 算法生成的空战机动决策能够将己方的劣势地位转化成优势地位。

为了进一步验证改进 BAS-TIMS 算法的可靠性和有效性,现选取文献[26]中的博弈论方法和文献[27]中的改进共生生物免疫进化算法进行比较。选取上述算例中第 250 s 处的空战态势作为输入,对 3 种算法分别迭代 50 次后,其收敛精度对比如图 14 所示。

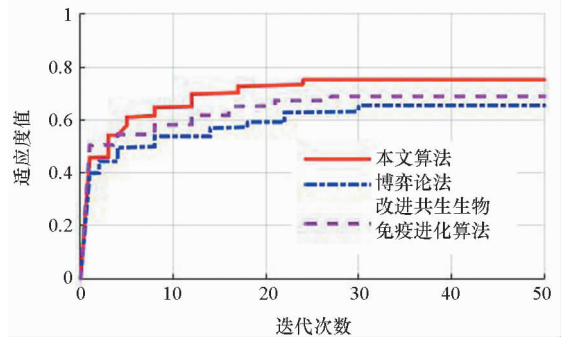


图 14 3 种算法收敛过程对比
Fig. 14 Comparison of convergence processes of 3 algorithms

将 3 种算法分别计算 50 次,算法最优值和收敛时间对比见表 2。

表 2 3 种算法最优值和收敛时间
Tab. 2 Optimal value and convergence time of 3 algorithms

	本文算法	博弈论法	改进共生生物免疫进化算法
平均最优值	0.752 9	0.653 9	0.684 1
平均收敛时间/s	3.142 9	4.527 6	3.964 3
最短收敛时间/s	3.038 8	4.296 1	3.785 2

综合图 14 和表 2 可知,本文算法收敛速度明

显快于博弈论法和改进共生生物免疫进化算法,且收敛时适应度值也高于其他两种算法。验证了本文所提改进 BAS-TIMS 算法能够更好地解决空战机动决策问题。

4.2 算例对比分析

为了检验改进算法的优越性,现选取一静态飞行数据作为目标机的机动轨迹,分别用改进 BAS-TIMS 算法、传统 BAS 算法和传统 TIMS 算法的计算结果与目标机展开对抗。初始时刻,我机位置坐标为(92 km, 27 km, 5800 m),航向 270°,速度 900 km/h;目标机位置坐标为(2 km, 26 km, 5400 m),航向 90°,速度 800 km/h。静态仿真条件同上。仿真结果如图 15 所示。

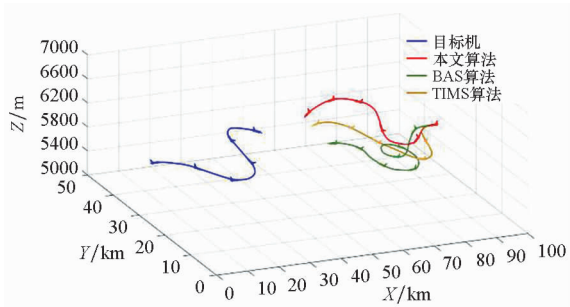


图 15 3 种算法空战对抗三维轨迹对比

Fig. 15 Comparison of 3D trajectories of air combat confrontation with three algorithms

图 15 在水平面上的投影如图 16 所示。

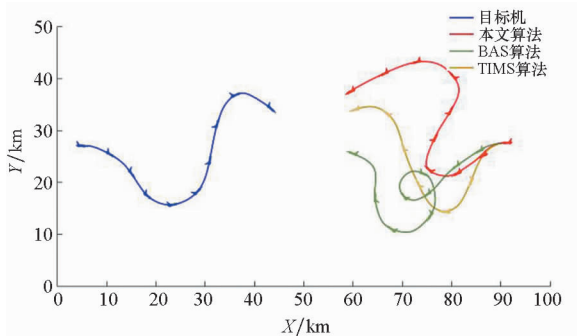


图 16 3 种算法空战对抗轨迹水平面投影

Fig. 16 Plane projection of air combat trajectory with three algorithms

3 种算法的空战态势优势随时间变化的对比结果如图 17 所示,3 种算法每次迭代的收敛时间对比结果如表 3 所示。

结合图 17 及表 3,可以得出本文 BAS 算法计算的机动策略明显优于传统的 BAS 和 TIMS 算法,且收敛速度也明显得到提升,进一步证明了本文算法的优越性。

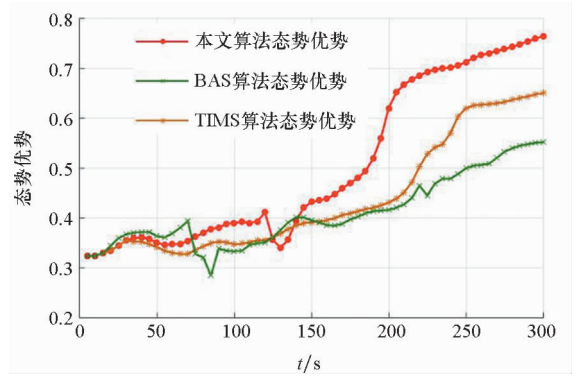


图 17 3 种算法战机空战态势优势随时间的变化
Fig. 17 Changes of air combat situation superiority with time based on three algorithms

表 3 3 种算法最优值和收敛时间

Tab. 3 Optimal value and convergence time of 3 algorithms

	本文算法	传统 BAS 算法	传统 TIMS 算法
平均最优值	0.765 3	0.552 2	0.651 1
平均收敛时间/s	2.938 5	4.217 4	4.427 6
最短收敛时间/s	2.854 9	4.139 3	4.351 7

5 结论

本文主要对空战机动决策问题展开研究,对天牛须搜索算法进行改进,并与战术免疫机动系统融合,采用改进的 BAS-TIMS 算法对空战机动策略进行解算,对我方战机的机动进行优化决策。

1) 通过算例仿真,发现战机能够在自身处于劣势时,及时实施机动,增大空战优势,并减弱目标对自身的威胁,验证了改进 BAS-TIMS 算法的有效性。

2) 通过与博弈论方法、改进共生生物免疫进化算法、传统 BAS 算法和 TIMS 模型算法结果对比,验证本文算法在适应度最优值、收敛速度以及运行时间上都具有一定的优势。

着眼于未来多机型、多机种、多批次的编队协同作战发展趋势,下一步将在主要工作的基础上,重点研究战机间的战术协同机动,为多机协同空战机动对策生成问题提供理论依据。

参考文献 (References)

[1] 黄长强,唐上钦. 从“阿法狗”到“阿法鹰”——论无人作战飞机智能自主空战技术[J]. 指挥与控制学报, 2016, 2(3): 261-264.
HUANG Changqiang, TANG Shangqin. From Alphago to Alphaeagle: on the intelligent autonomous air combat

- technology for UCAV[J]. *Journal of Command and Control*, 2016, 2(3): 261–264. (in Chinese)
- [2] Ha J S, Chae H J, Choi H L. A stochastic game-based approach for multiple beyond-visual-range air combat[J]. *Unmanned Systems*, 2018, 6(1): 67–79.
- [3] 李世豪, 丁勇, 高振龙. 基于直觉模糊博弈的无人机空战机动决策[J]. *系统工程与电子技术*, 2019, 41(5): 1063–1070.
LI Shihao, DING Yong, GAO Zhenlong. UAV air combat maneuvering decision based on intuitionistic fuzzy game theory[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2019, 41(5): 1063–1070. (in Chinese)
- [4] 周思羽, 吴文海, 孔繁峨, 等. 基于随机决策准则的改进多级影响图机动决策方法[J]. *北京理工大学学报*, 2013, 33(3): 296–301.
ZHOU Siyu, WU Wenhai, KONG Fane, et al. Improved multistage influence diagram maneuvering decision method based on stochastic decision criteria[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2013, 33(3): 296–301. (in Chinese)
- [5] Virtanen K, Karelaiti J, Raivio T. Modeling air combat by a moving horizon influence diagram game[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2006, 29(5): 1080–1091.
- [6] 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*, 2008, 29(1): 86–97.
- [7] Xuan Y B, Huang C Q, Li W X. Air combat situation assessment by gray fuzzy Bayesian network[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2011, 69: 114–119.
- [8] 傅莉, 谢福怀, 孟光磊, 等. 基于滚动时域的无人机空战决策专家系统[J]. *北京航空航天大学学报*, 2015, 41(11): 1994–1999.
FU Li, XIE Fuhuai, MENG Guanglei, et al. An UAV air-combat decision expert system based on receding horizon control[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2015, 41(11): 1994–1999. (in Chinese)
- [9] 杜海文, 崔明朗, 韩统, 等. 基于多目标优化与强化学习的空战机动决策[J]. *北京航空航天大学学报*, 2018, 44(11): 2247–2256.
DU Haiwen, CUI Minglang, HAN Tong, et al. Maneuvering decision in air combat based on multi-objective optimization and reinforcement learning[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2018, 44(11): 2247–2256. (in Chinese)
- [10] 左家亮, 杨任农, 张滢, 等. 基于启发式强化学习的空战机动智能决策[J]. *航空学报*, 2017, 38(10): 217–230.
ZUO Jialiang, YANG Rennong, ZHANG Ying, et al. Intelligent decision-making in air combat maneuvering based on heuristic reinforcement learning[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2017, 38(10): 217–230. (in Chinese)
- [11] Zhou Y N, Ma Y F, Song X, et al. Hierarchical fuzzy ART for Q-learning and its application in air combat simulation[J]. *International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing*, 2017, 8(4): 19.
- [12] 张涛, 于雷, 周中良, 等. 基于变权重伪并行遗传算法的空战机动决策[J]. *飞行力学*, 2012, 30(5): 470–474.
ZHANG Tao, YU Lei, ZHOU Zhongliang, et al. Decision-making for air combat maneuvering based on variable weight pseudo-parallel genetical algorithm[J]. *Flight Dynamics*, 2012, 30(5): 470–474. (in Chinese)
- [13] Luo D L, Shen C L, Wang B, et al. Air combat decision-making for cooperative multiple target attack using heuristic adaptive genetic algorithm[C]//*Proceedings of International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, 2005.
- [14] Kong H, Li N. Heuristic quantum genetic algorithm for air combat decision making on cooperative multiple target attack[J]. *International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing*, 2013, 4(4): 18.
- [15] 宋遐澹, 江驹, 徐海燕. 改进模拟退火遗传算法在协同空战中的应用[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2017, 38(11): 1762–1768.
SONG Xiagan, JIANG Ju, XU Haiyan. Application of improved simulated annealing genetic algorithm in cooperative air combat[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2017, 38(11): 1762–1768. (in Chinese)
- [16] Kaneshige J, Krishnakumar K. Artificial immune system approach for air combat maneuvering[C]//*Proceedings of Intelligent Computing: Theory and Applications*, 2007.
- [17] Jiang X Y, Li S. BAS: beetle antennae search algorithm for optimization problems[J]. *International Journal of Robotics and Control*, 2018, 1(1): 1–5.
- [18] Austin F, Carbone G, Falco M, et al. Automated maneuvering decisions for air-to-air combat[C]//*Proceedings of Guidance, Navigation and Control Conference*, 1987.
- [19] 肖冰松, 方洋旺, 胡诗国, 等. 一种新的超视距空战威胁评估方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2009, 31(9): 2163–2166.
XIAO Bingsong, FANG Yangwang, HU Shiguo, et al. New threat assessment method in beyond-the-horizon range air combat[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2009, 31(9): 2163–2166. (in Chinese)
- [20] 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): 97–105.
XU Ximeng, YANG Rennong, FU Ying, et al. Target threat assessment in air combat based on ELM_AdaBoost strong predictor[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2018, 40(8): 97–105. (in Chinese)
- [21] 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.
SHI Zhenqing, LIANG Xiaolong, ZHANG Jiaqiang, et al. Situation assessment for air combat based on missile attack zone[J]. *Fire Control & Command Control*, 2018, 43(9): 89–93, 98. (in Chinese)
- [22] Qian Y H, Liang X Y, Wang Q, et al. Local rough set; a solution to rough data analysis in big data[J]. *International Journal of Approximate Reasoning*, 2018, 97: 38–63.

- [23] 朱宝璠,朱荣昌,熊笑非. 作战飞机效能评估[M]. 2版. 北京:航空工业出版社,2006.
ZHU Baoliu, ZHU Rongchang, XIONG Xiaofei. Effectiveness evaluation of combat aircraft [M]. 2nd ed. Beijing: Aviation Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [24] Ugajin T. Mutual information of excited states and relative entropy of two disjoint subsystems in CFT [J]. Journal of High Energy Physics, 2017, 2017(10): 1-14.
- [25] 嵇慧明,于昊,宋帅,等. 基于改进粗糙集-云模型理论的空战态势评估[J]. 战术导弹技术, 2019(4): 20-27.
JI Huiming, YU Hao, SONG Shuai, et al. Air combat situation assessment based on improved rough set-cloud model theory [J]. Tactical Missile Technology, 2019(4): 20-27. (in Chinese)
- [26] 董肖杰,余敏建. 基于博弈论的自由空战指挥引导对策问题研究[J]. 航空计算技术, 2017, 47(2): 80-84, 88.
DONG Xiaojie, YU Minjian. Study on countermeasure of free air combat command and guide based on game theory [J]. Aeronautical Computing Technique, 2017, 47(2): 80-84, 88. (in Chinese)
- [27] 高阳阳,余敏建,韩其松,等. 基于改进共生生物搜索算法的空战机动决策[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(3): 429-436.
GAO Yangyang, YU Minjian, HAN Qisong, et al. Air combat maneuver decision-making based on improved symbiotic organisms search algorithm [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(3): 429-436. (in Chinese)