

无人机编队超视距空战决策及作战仿真

王晓光, 章卫国, 陈伟

(西北工业大学 自动化学院, 西安 710072)

摘要: 以无人机的超视距空战为研究背景, 建立一种综合态势评估、目标分配和损耗裁定的协同空战仿真模型. 首先, 综合友机位置和敌方战机威力对我机的态势影响, 提出一种基于人工势场的态势评估方法; 然后, 利用文化基因算法进行目标分配, 分别采用离散差分进化算法和邻域搜索算法作为其全局和局部搜索策略; 最后, 用两步裁定法模拟空战双方的相互攻击, 实现超视距空战中的损耗裁定. 仿真结果验证了所提出模型的合理性和算法的有效性.

关键词: 空战决策; 态势评估; 目标分配; 文化基因算法

中图分类号: V271.4; E844

文献标志码: A

BVR air combat decision making and simulation for UAV formation

WANG Xiao-guang, ZHANG Wei-guo, CHEN Wei

(School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China. Correspondent: WANG Xiao-guang, E-mail: wangxiaoguang@mail.nwpu.edu.cn)

Abstract: On the background of UAVs' air combat in the condition of the beyond visual range(BVR), the cooperative combat simulation model which integrates situation assessment, target allocation, and loss adjudication is established. Firstly, the situation assessment method based on the artificial potential field is proposed on the analysis of friendly aircrafts' locations and enemy combat power. Then, the memetic algorithm is applied with the purpose of solving the target allocation problem. In this algorithm, the discrete differential evolution algorithm is used to global search and the neighbor search algorithm is used to local search. Finally, to simulate the both sides' exchanging attacks and adjudge their losses, the two step adjudication is introduced to this air combat model. The simulation result shows the effectiveness and feasibility of the proposed model.

Keywords: air combat decision making; situation assessment; target allocation; memetic algorithm

0 引言

目前, 无人机作为新生的作战力量, 已逐步应用于战争中的侦察、评估、监听等各方面, 其在现代战争中的地位也日益提高^[1]. 随着军用飞机技术的不断发展, 无人机逐步向具有攻击和杀伤能力的方向转变, 并将取代有人飞机成为现代空战的中坚力量. 同时, 随着航空电子设备和空空导弹技术的发展, 超视距空战替代传统的空中近距离格斗空战已成为主要的空战模式^[2]. 在超视距空战模式下, 机群编队中的各参战飞机在指挥中心的统一指挥下互为犄角, 协同攻击, 共同完成作战任务.

目前, 超视距空战的研究重点集中在其攻击决策方面, 而研究攻击决策必须以态势评估和目标分配为基础. 相关学者已针对协同空战中的攻击决策问题进行了大量有价值的研究工作^[3-5], 其一般步骤是先对

双方的空战态势进行评估, 然后以此为基础完成作战目标的优化分配. 态势评估方法主要分为两类: 贝叶斯法和非参量法. 贝叶斯方法^[6-8]首先建立贝叶斯网络, 然后将影响空战态势的各个参数进行离散化处理, 输入到贝叶斯网络中, 得到空战态势评估结果. 非参量法^[9-11]综合空战双方的武器装备数据和战术几何信息等因素, 利用公式化的方法进行定量判断, 得到态势评估结果.

空战决策中的目标分配可以认为是在态势评估基础上的攻击目标排序, 是具有多目标攻击能力的战斗机群必须解决的问题, 其目的在于给需要攻击的目标分配合适数量的导弹. 目标分配是一个整数规划问题, 多采用粒子群算法、蚁群算法、拍卖算法^[3,12-13]等优化算法进行求解. 空战决策的研究已取得了一定成果, 但是从研究现状来看, 还存在以下不足:

收稿日期: 2013-12-16; 修回日期: 2014-02-28.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61374032); 国家 973 计划项目(20126131890302).

作者简介: 王晓光(1985—), 男, 博士生, 从事空战决策、无人机作战效能的研究; 章卫国(1956—), 男, 教授, 博士生导师, 从事飞行控制、无人机综合控制等研究.

1) 贝叶斯方法和非参量法在态势评估过程中只简单考虑敌我之间的相互作用, 没有考虑友机之间的相互作用、无人机的作战队形和编队外友机对超视距空战态势的影响;

2) 超视距空战是一个作战双方相互攻击的过程, 部分文献只是分析攻击方的空战决策, 没有考虑被攻击方的反击, 在超视距空战仿真中, 不应只考虑优势方对劣势方的攻击, 还应考虑劣势方的反击。

针对以上问题, 本文首先借鉴路径规划和飞机编队引导控制中的人工势场理论处理编队队形和友机活动半径等因素对无人机空战态势的影响, 完善超视距空战的态势评估, 并采用文化基因算法进行目标分配; 然后用两步裁定法模拟作战双方的相互攻击和损耗裁定。与传统方法相比, 所提出的方法增加了被攻击方的反击环节, 从而完成对整个超视距空战过程的模拟。

1 基于人工势场的态势评估

1.1 作战飞机的人工势场

人工势场^[14-15]是一种关于虚拟场的方法, 其基本思想是: 在一定区域内建立引力场与斥力场同时作用的虚拟势场, 通过搜索其势函数的梯度方向寻找无碰撞路径。人工势场已大量应用于路径规划和飞机编队的引导控制中。

目前超视距空战的态势评估往往只考虑敌机对我机空战态势的影响, 没有考虑队内和队外友机之间的相互作用。为了反映出队内和队外友机对飞机态势的影响, 本文将人工势场引入到超视距空战的态势评估领域, 将空战中的无人机看作是在空间中受到敌我双方各种人工势力作用的个体, 通过分析无人机在空战中受到的人工势力, 得到空战态势评估结果。

常见的人工势场包括队形势(飞行编队内的位置约束)、斥力势(友机之间活动半径的重叠)和威力势(敌方飞机的威胁作用), 如图 1 所示。

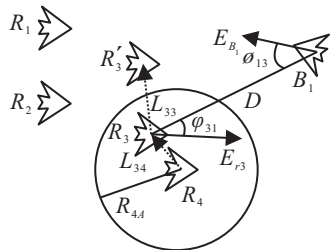


图 1 作战飞机人工势场

图 1 中: R_1 、 R_2 和 R_3 组成一个飞行编队, R_4 为编队外友机, R_3' 为 R_3 的指定位置, B_1 为敌方战机。以 R_3 为例对人工势场中的各种势力进行说明。首先, R_3 飞离编队内指定位置, 受到队形势的作用, 同时 R_3 进入 R_4 的活动半径, 还受到 R_4 的斥力势作用; 由于

敌方飞机 B_1 的存在, R_3 受到 B_1 威力势的作用。下面分别给出队形势、斥力势和威力势的定义和计算方法。

1.2 队形势和斥力势

队形势是由于作战飞机脱离空战编队的指定位置而产生的一种虚拟力场; 队形力沿飞机位置与指定位置的连线, 指向其空战编队中的指定位置, 计算方法为

$$F_{F3} = \begin{cases} \frac{L_{33}^2}{R_{3C}^2}, & L_{33} < R_{3C}; \\ 1, & L_{33} \geq R_{3C}. \end{cases} \quad (1)$$

其中: L_{33} 为 R_3 偏移指定位置的距离, R_{3C} 为飞行编队中 R_3 的最大允许偏移距离。

斥力势是指无人机进入到编队外友机的活动半径, 影响友机正常作战而产生的一种虚拟力场; 斥力沿友机与本机的连线, 指向友机的活动范围之外。图 1 中, R_3 受到 R_4 的斥力作用, 斥力 F_{REP34} 的计算方法为

$$F_{REP34} = \begin{cases} \exp\left(-\frac{L_{34}^2}{R_{3A}R_{4A}}\right), & L_{34} < \max(R_{3A}, R_{4A}); \\ 0, & L_{34} \geq \max(R_{3A}, R_{4A}). \end{cases} \quad (2)$$

其中 R_{3A} 和 R_{4A} 分别为 R_3 和 R_4 空战所需的活动半径。

1.3 队形力和斥力的分解

设飞机 R_3 同时受到队形力和友机 R_4 、 R_5 的斥力, 其受力情况如图 2 所示。

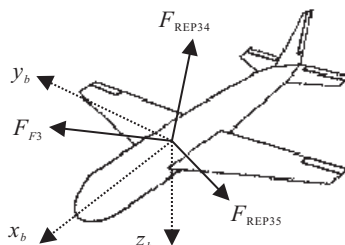


图 2 机体坐标系下受到的虚拟力

将无人机 R_3 受到的人工势场虚拟力分解到机体坐标系三轴, 得到虚拟力矩阵为

$$F_3 = \begin{bmatrix} F_{F3x} & F_{F3y} & F_{F3z} \\ F_{REP34x} & F_{REP34y} & F_{REP34z} \\ F_{REP35x} & F_{REP35y} & F_{REP35z} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

其中: F_3 的第 1 行为队形力, 第 2、3 行为斥力, 第 1、2、3 列分别为各力在 x 、 y 、 z 三轴的分量。同理, 若 R_3 受到友机 R_4 、 R_5 、 \dots 、 R_n 的斥力, 则得到 $(n-2) \times 3$ 的虚拟力矩阵为

$$F_3 = \begin{bmatrix} F_{F3x} & F_{F3y} & F_{F3z} \\ F_{\text{REP}34x} & F_{\text{REP}34y} & F_{\text{REP}34z} \\ F_{\text{REP}35x} & F_{\text{REP}35y} & F_{\text{REP}35z} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ F_{\text{REP}3nx} & F_{\text{REP}3ny} & F_{\text{REP}3nz} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

其中: 第 1 行元素为 R_3 受到的队形力分量, 其余各行为 R_3 受到的友机斥力在机体三轴的分量. 令

$$\begin{cases} F_{3X} = \sum_{i=1}^{n-2} |F_3(i, 1)|, \\ F_{3Y} = \sum_{i=1}^{n-2} |F_3(i, 2)|, \\ F_{3Z} = \sum_{i=1}^{n-2} |F_3(i, 3)|. \end{cases} \quad (5)$$

队形势和斥力势对无人机作用效果为

$$\text{TH}_3 = \frac{F_{3X} + F_{3Y} + F_{3Z}}{(n-2) \times 3}. \quad (6)$$

显然, $0 \leq \text{TH}_3 \leq 1$, 且 TH_3 越小, R_3 态势越优.

1.4 威力势

威力势反映我方战机与敌方战机在当前时刻的作战能力差距, 是双方飞机空战性能和运动状态(能量)的集中体现. 飞机的空战性能和能量分别定义^[16]为

$$E_C = \text{火力} \times \text{态势感知能力} + \text{生存能力} + \text{机动能力} \times \text{操纵能力} + \text{作战半径系数}, \quad (7)$$

$$E_E = H + \frac{v^2}{2g}. \quad (8)$$

其中: H 为飞行高度, v 为飞行速度, g 为重力加速度.

飞机的威力矢量为

$$E = E_E + E_C, \quad (9)$$

其方向始终与机头指向一致, 如图 1 中 E_{R_3} 和 E_{B_1} 所示. 图 1 中 ψ_{31} 和 ϕ_{13} 是 R_3 和 B_1 的目标方位角, 是飞机航向与目标线 D 的夹角. R_3 和 B_1 的威力矢量在目标线上的分量为

$$\begin{cases} F_{E_{R_3}} = E_{R_3} \cos \psi_{31}, \\ F_{E_{B_1}} = E_{B_1} \cos \phi_{13}. \end{cases} \quad (10)$$

R_3 受到 B_1 的威力势作用为

$$\text{TH}_{F31} =$$

$$\begin{cases} 0, & \psi_{31} < \psi_{R_3 \max}, \phi_{13} \geq \phi_{B_1 \max}; \\ \frac{F_{E_{B_1}}}{F_{E_{B_1}} + F_{E_{R_3}}}, & \psi_{31} < \psi_{R_3 \max}, \phi_{13} < \phi_{B_1 \max}; \\ \frac{E_{E_{B_1}}}{E_{E_{B_1}} + E_{E_{R_3}}}, & \psi_{31} \geq \psi_{R_3 \max}, \phi_{13} \geq \phi_{B_1 \max}; \\ 1, & \psi_{31} \geq \psi_{R_3 \max}, \phi_{13} < \phi_{B_1 \max}. \end{cases} \quad (11)$$

其中: $\psi_{R_3 \max}$ 和 $\phi_{B_1 \max}$ 分别为 R_3 和 B_1 的雷达最大搜索方位角. 在空战中, 当 $\psi_{31} < \psi_{R_3 \max}$, $\phi_{13} \geq \phi_{B_1 \max}$ 时, R_3 能够探测到 B_1 , B_1 不能探测到 R_3 , 在这种情况下, 认为 B_1 对 R_3 的威胁为零; 当 $\psi_{31} < \psi_{R_3 \max}$, $\phi_{13} < \phi_{B_1 \max}$ 时, 两机迎头飞行, 彼此均能探测到对方, 此时根据敌我双方空战态势和空战能力进行威胁判断; 当 $\psi_{31} \geq \psi_{R_3 \max}$, $\phi_{13} \geq \phi_{B_1 \max}$ 时, 两机均在对方的雷达探测范围之外, 通过比较双方威力矢量的大小进行评估; 当 $\psi_{31} \geq \psi_{R_3 \max}$, $\phi_{13} < \phi_{B_1 \max}$ 时, R_3 处于被攻击状态, 此时受到的威力势为 1.

1.5 综合态势评估结果

结合队形势、斥力势和威力势, 得到 R_3 在 B_1 威胁下的态势评估结果为

$$\text{TH}_{31}^{RB} = \omega_1 \text{TH}_3 + \omega_2 \text{TH}_{F31}. \quad (12)$$

其中: ω_1 为己方飞机队形势和斥力势的综合权重系数; ω_2 为敌方飞机威力势的权重系数; $0 \leq \omega_1, \omega_2 \leq 1$, 且 $\omega_1 + \omega_2 = 1$. 同理, 根据式 (6)、(11)、(12) 可以得到 R 方任意第 i 架飞机在 B 方第 j 架飞机威胁下的态势评估结果 TH_{ij}^{RB} . 进而可以得到 R 方机群受到的平均威胁

$$\text{TH}_{RB} = \frac{\sum_i^m \sum_j^n \text{TH}_{ij}^{RB}}{m}. \quad (13)$$

其中: m 为 R 方无人机数量, n 为 B 方无人机数量. 同理, 得到 B 方受到的平均威胁为

$$\text{TH}_{BR} = \frac{\sum_i^m \sum_j^n \text{TH}_{ji}^{BR}}{n}, \quad (14)$$

其中 TH_{ji}^{BR} 为 B 方第 j 架飞机在 R 方第 i 架飞机威胁下的态势评估结果.

2 空战决策

2.1 空战决策的目标函数

设 R 方空战编队的每架无人机挂载 N_R 枚导弹, 则 R 方共有 mN_R 枚导弹; B 方每架无人机挂载 N_B 枚导弹, 则 B 方共有 nN_B 枚导弹. 空战决策的目的是通过合理的目标分配, 在有限资源下对敌方造成杀伤, 从而使敌方剩余战机对我方的优势最小. 由此, 得到 R 方的目标函数为

$$\min E_R = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n ((1 - P_{Bj}) \text{TH}_{ji}^{BR}), \quad (15)$$

B 方的目标函数为

$$\min E_B = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n ((1 - P_{Ri}) \text{TH}_{ij}^{RB}), \quad (16)$$

其中 P_{Bj} 和 P_{Ri} 分别为 B_j 和 R_i 的生存概率.

若双方每架战机在第 s 个空战回合能发射 N_{Rs} 、

N_{Bs} 枚导弹, 则得到输入的约束条件为

$$\text{s.t.} \sum_{s=1}^S N_{Bs} \leq N_B, \sum_{s=1}^S N_{Rs} \leq N_R. \quad (17)$$

约束条件的意义是空战双方每架飞机发射的导弹数量不超过其最大携弹量。

2.2 空战决策中的目标分配算法

无人机的超视距空战决策问题多用启发式算法对其进行求解。文化基因算法^[17-19]是一种基于种群全局搜索和个体局部搜索的混合算法, 全局搜索在整个解空间内进行搜索, 局部搜索在全局搜索的基础上进行最优个体的局部搜索。文化基因算法可以认为是一种搜索框架, 采用不同的全局和局部搜索策略, 可以构成不同的文化基因算法。本文分别采用离散差分进化 (DDE) 算法和邻域搜索 (NS) 算法作为全局搜索算法和局部搜索算法, 以构成文化基因算法。

2.2.1 全局搜索操作——DDE 算法

DDE 算法是一种基于群体进化的优化算法, 通过种群内个体间的竞争和合作实现对问题的求解^[20-21]。算法的基本流程如下。

Step 1: 在问题的解空间随机初始化种群 $x_1^0, x_2^0, \dots, x_N^0$, 每个个体的维数为 D 维, 即 $x_i^0 = [x_{i,1}^0, x_{i,2}^0, \dots, x_{i,D}^0]$, $x_1^0, x_2^0, \dots, x_N^0$ 的元素均为整数。初始化交叉概率因子 $CR (0 \leq CR \leq 1)$, 设定种群的最大进化代数 K 。

Step 2: 假设当前种群为第 k 代, 对于该种群内每个个体 $x_i^k (1 \leq i \leq N)$, 根据如下规则产生下一代个体 x_i^{k+1} :

1) 变异操作。选取种群中适应值最好的个体 x_{best}^k , 然后在当前种群中随机选取 $x_b^k, x_c^k, x_d^k, x_e^k$, 使其与 x_i^k, x_{best}^k 互不相同, 并按下式生成对应的变异个体 v_i^k :

$$v_i^k = \lambda x_i^k + (1 - \lambda)x_{\text{best}}^k + F(x_b^k - x_c^k + x_d^k - x_e^k), \quad (18)$$

其中 $0 \leq F \leq 2$, $\lambda = (K - k)/K$ 。由于缩放因子 F 的存在, 变异个体 v_i^k 可能为小数, 可对 v_i^k 进行四舍五入取整。

2) 交叉操作。为了提高种群的多样性, 按下式生成对应个体 u_i^k 的第 j 维:

$$u_{i,j}^k = \begin{cases} v_{i,j}^k, & \text{rand}(j) \leq CR; \\ x_{i,j}^k, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (19)$$

其中: $1 \leq j \leq D$, $\text{rand}(j)$ 为 $[0,1]$ 之间均匀分布的随机数。

3) 选择操作。利用式 (20) 对实验个体 u_i^k 和原种群个体 x_i^k 的目标函数进行比较, 选择目标函数小的

作为新种群的个体 x_i^{k+1} , 有

$$x_i^{k+1} = \begin{cases} u_i^k, & f(u_i^k) < f(x_i^k); \\ x_i^k, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (20)$$

Step 3: 如果满足算法终止条件或达到最大进化代数 K , 则算法停止, 否则, 返回 Step 2。

2.2.2 局部搜索操作——NS 算法

NS 算法从一个当前解开始, 在其邻域中搜寻比其更好的解^[22], 若其邻域内存在更好的解, 则以更好的解代替此解称为当前解, 重新搜索; 否则结束搜索过程, 并以此解作为当前代数的最终解。将所有交换任意两个位置产生的新解集合称为其交换邻域, 如图 3 所示。

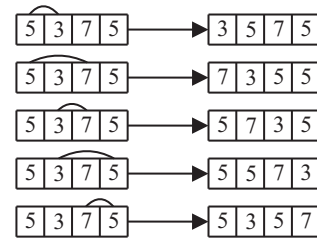


图 3 交换邻域生成规则

2.2.3 文化基因算法流程

文化基因算法是一种算法框架, 选取不同的全局搜索策略和局部搜索策略将组成不同的文化基因算法。本文采用的文化基因算法的具体算法流程用伪码的方式表述如下:

```

Begin Procedure
k = 1;
Pop(k) = initPop(N × D); //初始化种群
while (k ≤ K)
    Pop'(k) = variation(Pop(k)); //变异操作
    Pop''(k) = crossover(Pop(k), Pop'(k)); //交叉操作
    Pop'''(k) = choosen(Pop'(k), Pop''(k)); //选择产生新种群
    Bpop = best(Pop'''(k)); //选择新种群中最优个体
    for i = 1 : 1 : D - 1
        for j = i + 1 : 1 : D
            Bpop = exchange(Bpop(i, j)); //邻域交换
            evaluatefitness(Bpop); //计算适应度
        Pop(k + 1) = NewPop(Bpop; Pop'''(k)); //产生下一代种群
    end
end
k + +;

```

end
end procedure

3 空战裁定模型

两步裁定法^[23]是美国兰德公司提出的一种超视距空战仿真方法,它根据先敌发射率判断双方的开火顺序,进而进行损耗裁定.相比传统方法,两步裁定法与空战决策的结合增加了敌方反击环节,可以实现空战双方的相互攻击,能够更加逼真地模拟超视距空战.

3.1 先敌发射率

先敌发射率是指空战一方先于另一方发射导弹进行攻击的概率,在超视距空战中,可根据态势评估结果计算先敌发射率.若 $TH_{BR} \leq TH_{RB}$, 则先敌发射率为

$$\begin{cases} \beta^{BR} = 0.5 + 0.5 \left(\frac{TH_{RB} - TH_{BR}}{TH_{RB}} \right)^{0.2}, \\ \beta^{RB} = 1 - \beta^{BR}. \end{cases} \quad (21)$$

其中: β^{BR} 为 B 方先敌发射率, β^{RB} 为 R 方先敌发射率.当 $TH_{BR} > TH_{RB}$ 时,先敌发射率为

$$\begin{cases} \beta^{RB} = 0.5 + 0.5 \left(\frac{TH_{BR} - TH_{RB}}{TH_{BR}} \right)^{0.2}, \\ \beta^{BR} = 1 - \beta^{RB}. \end{cases} \quad (22)$$

在超视距空战中,先敌发射率高的一方被判定为首先开火.

3.2 超视距空战的损耗模型

基于两步裁定法的损耗计算过程如下:

1) 第 1 步裁定. 首先,先敌发射率高的一方向对方战机发射导弹,然后对方存活下来的战机向其发射导弹,予以还击.

2) 第 2 步裁定. 先敌发射率低的一方向对方发射导弹进行攻击,然后对方存活下来的战机再还击.

最终的损耗为两步损耗之和,表示为

$$\begin{aligned} P_{R_i,1} &= \prod_{j=1}^{J_{i,1}} (1 - \beta_{ji}^{BR} P_{KR}), \\ P_{B_j,1} &= \prod_{i=1}^{I_{j,1}} (1 - \beta_{ij}^{RB} P_{R_i,1} P_{KB}). \end{aligned} \quad (23)$$

其中: $P_{R_i,1}$ 为红机 R_i 在第 1 步裁定中的存活概率, $P_{B_j,1}$ 为蓝机 B_j 在第 1 步裁定中的存活概率; $J_{i,1}$ 为攻击 R_i 的导弹数量, $I_{j,1}$ 为攻击 B_j 的导弹总数量; β_{ji}^{BR} 为 B_j 相对于 R_i 的先敌发射率, β_{ij}^{RB} 为 R_i 相对于 B_j 的先敌发射率; P_{KB} 和 P_{KR} 为导弹对 B 和 R 的杀伤概率.

同理,第 2 步裁定中,飞机的存活概率为

$$P_{B_j,2} = P_{B_j,1} \prod_{i=1}^{I_{j,2}} (1 - (1 - \beta_{ij}^{RB}) P_{R_i,1} P_{KB}),$$

$$P_{R_i,2} = P_{R_i,1} \prod_{j=1}^{J_{i,2}} (1 - (1 - \beta_{ji}^{BR}) P_{B_j,1} P_{KR}), \quad (24)$$

其中各符号的含义与第 1 步裁定相似.

4 算例分析

设 B 方空战编队有 5 架无人机, R 方空战编队有 6 架无人机,双方每架战机挂载 4 枚超视距导弹,每架飞机在一个空战回合中最多只能发射 2 枚导弹.设导弹杀伤概率分别为 $P_{KB} = 0.79$, $P_{KR} = 0.71$, 无人机在受到攻击前的存活概率均为 1. 当其存活概率小于 0.1 时,将其存活概率置零,认为该无人机被击毁.空战开始时刻,双方的空战态势如表 1 和表 2 所示.

表 1 R 方在 B 方威胁下的空战态势

R 方飞机	B 方飞机				
	1	2	3	4	5
1	0.63	0.65	0.72	0.41	0.64
2	0.65	0.66	0.50	0.73	0.56
3	0.68	0.69	0.41	0.72	0.63
4	0.47	0.58	0.72	0.51	0.58
5	0.43	0.66	0.67	0.62	0.71
6	0.73	0.74	0.73	0.58	0.68

表 2 B 方在 R 方威胁下的空战态势

R 方飞机	B 方飞机				
	1	2	3	4	5
1	0.34	0.43	0.72	0.38	0.39
2	0.70	0.42	0.49	0.46	0.48
3	0.48	0.69	0.51	0.49	0.51
4	0.35	0.63	0.45	0.41	0.44
5	0.56	0.62	0.59	0.78	0.57
6	0.37	0.47	0.43	0.44	0.59

通过计算得到 $TH_{BR} = 15.19$, $TH_{RB} = 18.69$, $TH_{BR} < TH_{RB}$, 故 B 方的先敌发射率高, 首先发起攻击. DDE 算法和文化基因算法最优适应度值随时间变化的曲线如图 4 和图 5 所示, 实线为 DDE 算法, 虚线为 Memetic 算法. 由图 4 和图 5 可见, 相比 DDE 算法, 文化基因算法能够得到质量更好的解, 寻优能力明显更高, 充分表明了文化基因算法的有效性, 且能够更好地从目标分配层面实现无人机编队超视距空战效能的优化.

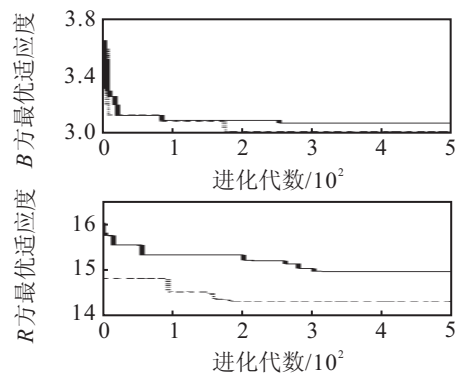


图 4 第 1 步决策中两种算法收敛曲线

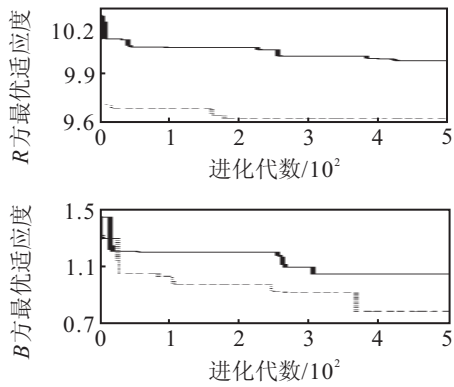


图5 第2步决策中两种算法收敛曲线

作战仿真中的目标分配结果和各无人机的存活概率如表3和表4所示。

表3 B方无人机的目标分配结果和存活概率

无人机编号		1	2	3	4	5
第1步	攻击目标	1,3	2,6	6,4	3,2	5,5
	存活概率	0.85	0.60	0.62	0.80	0.97
第2步	攻击目标	2,5	4,5	1,3	4,1	4,4
	存活概率	0.52	0.50	0.46	0.60	0.49

表4 R方无人机的目标分配结果和存活概率

无人机编号		1	2	3	4	5	6
第1步	攻击目标	3,3	1,1	3,3	2,2	4,4	5,5
	存活概率	0.34	0.13	0.13	0.35	0.15	0.12
第2步	攻击目标	1,5	4,4	4,1	5,3	2,5	2,1
	存活概率	0.22	0	0	0	0	0.12

由仿真结果可见, B方在飞机数量和导弹的杀伤率上均处劣势, 但是由于其空战态势占优, 能抢先发射导弹进行攻击, 并对R方造成严重杀伤; 其后R方虽然进行了还击, 但其无人机受损严重, 无法对B方进行有效杀伤, 最终R方被击毁4架战机, B方没有战机被击毁, 空战损失比0:4, 充分体现了本文所述决策方法的可行性. 此外, 在现代空战中, 若作战双方能力相差不大, 则仅依靠超视距空战很难完全歼灭对方, 剩余的战机将转入近距空战或脱离战斗, 这与本文的仿真结果相符, 同时也充分表明了仿真的真实性.

5 结 论

以人工势场为基础, 综合考虑敌我双方作战编队对空战态势的影响, 提出了一套新的涵盖队形势、斥力势和威力势的超视距空战态势评估方法, 分析了编队队形、友机活动半径和敌方威胁对我方态势的影响. 相比传统的贝叶斯法和非参量法, 人工势场法考虑因素更多, 能够得到更加全面的态势评估结果. 利用DDE算法和NS算法组成的文化基因算法对空战决策中的目标分配问题进行处理, 相对于单纯的DDE算法而言, 文化基因算法提高了搜索过程中算法的寻优精度和收敛速度, 从而能够得到更优的决策结

果. 对无人机的超视距空战过程进行模拟, 在前人工作的基础上, 增加了敌方反击环节, 并采用两步裁定法评估双方损耗, 实现了态势评估、目标分配和损耗裁定3者的融合. 通过对空战过程的模拟, 可以进一步分析态势评估和目标分配对无人机作战效能的影响.

参考文献(References)

- [1] 黄长强, 翁兴伟, 王勇, 等. 多无人机协同作战技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 1-2. (Huang C Q, Weng X W, Wang Y, et al. Cooperative combat technology for multi-uavs[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012: 1-2.)
- [2] 罗德林, 王彪, 龚华军, 等. 基于SAGA的协同多目标攻击决策[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(7): 1154-1158. (Luo D L, Wang B, Gong H J, et al. Air combat decision making for coordinated multiple target attack based on SAGA[J]. J of Harbin Institute of Technology, 2007, 39(7): 1154-1158.)
- [3] 刘波, 张选平, 王瑞, 等. 基于组合拍卖的协同多目标攻击空战决策算法[J]. 航空学报, 2010, 31(7): 1433-1444. (Liu B, Zhang X P, Wang R, et al. Air combat decision making for coordinated multiple target attack using combinatorial auction[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(7): 1433-1444.)
- [4] Cummings M L, Mitchell P J. Automated scheduling decision support for supervisory control of multiple UAVs[J]. J of Aerospace Computing Information and Communication, 2006, 3(6): 294-308.
- [5] 刘波, 覃征, 邵利平, 等. 基于群集智能的协同多目标攻击空战决策[J]. 航空学报, 2009, 30(9): 1127-1139. (Liu B, Tan Z, Shao L P, et al. Air combat decision making for coordinated multiple target attack using collective intelligence[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(9): 1127-1139.)
- [6] Narayana R P, Sudesh K K, Giriya G. Situation and threat assessment in bvr combat[C]. AIAA Guidance, Navigation and Control Conference. Portland: AIAA Press, 2011: 1-6.
- [7] Nickens O, Gavin T. Threat assessment using bayesian networks[C]. Proc of the 6th Int Conf of Information Fusion. Queensland, 2003: 1102-1109.
- [8] 胡云安, 刘振, 史建国. 态势评估的变结构区间概率动态贝叶斯网络方法[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(9): 1891-1897. (Hu Y N, Liu Z, Shi J G. Air combat situation assessment using variable structure interval probability dynamic Bayesian network[J]. Systems Engineering and Electronics, 2013, 35(9): 1891-1897.)

- [9] Austin F, Carbone G, Michael F, et al. Game theory for automated maneuvering during air-to-air combat[J]. *J of Guidance*, 1990, 13(6): 1143-1147.
- [10] 张媛, 刘文彪, 张立民. 基于主客观综合赋权的 CGF 态势评估建模研究[J]. *系统工程与电子技术*, 2013, 35(1): 85-90.
(Zhang Y, Liu W B, Zhang L M. Situation assessment modeling for CGF based on the subjective and objective integrated weight[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2013, 35(1): 85-90.)
- [11] 周思羽, 吴文海, 曲志刚, 等. 基于非参量法的空战态势评估分析[J]. *航空计算技术*, 2011, 41(4): 11-15.
(Zhou S Y, Wu W H, Qu Z G, et al. Analysis of air combat situation assessment based on nonparametric methods[J]. *Aeronautical Computing Technique*, 2011, 41(4): 11-15.)
- [12] 罗德林, 段海滨, 吴顺详, 等. 基于启发式蚁群算法的协同多目标攻击空战决策研究[J]. *航空学报*, 2006, 27(6): 1166-1170.
(Luo D L, Duan H B, Wu S X, et al. Research on air combat decision-making for cooperative multiple target attack using heuristic ant colony algorithm[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2006, 27(6): 1166-1170.)
- [13] 郭辉, 徐浩军, 刘殿玉, 等. 基于自适应混合粒子群算法的协同多目标攻击空战决策[J]. *空军工程大学学报: 自然科学版*, 2010, 11(2): 16-20.
(Guo H, Xu H J, Liu D Y, et al. Air combat decision-making for cooperative multiple target attack based on adaptive hybrid particle swarm algorithm[J]. *J of Air Force Engineering University: Natural Science Edition*, 2010, 11(2): 16-20.)
- [14] Khatib O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots[J]. *Int J of Robotics Research*, 1986, 5(1): 90-98.
- [15] 魏贤智, 庞春雨, 孙亮, 等. 战斗机人工势场在主从编队引导控制中的应用[J]. *电光与控制*, 2010, 17(3): 51-56.
(Wei X Z, Pang C Y, Sun L, et al. Application of fighter artificial potential field in leader-follower formation guidance control[J]. *Electronics Optics & Control*, 2010, 17(3): 51-56.)
- [16] 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 B S, Fang Y W, Hu S G, et al. New threat assessment method in beyond-the-horizon range air combat[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2009, 31(9): 2163-2166.)
- [17] Moscato P. On evolution, search, optimization, genetic algorithms and martial arts: Towards memetic algorithms[R]. Pasadena: California Institute of Technology, 1989.
- [18] Ellabaan M. Discovering unique, low-energy transition states using evolutionary molecular memetic computing[J]. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 2013, 8(3): 54-63.
- [19] Calian D. Integrating memetic search into the BioHEL evolutionary learning system for large-scale datasets[J]. *Memetic Computing*, 2013, 5(2): 95-130.
- [20] 刘俊梅, 高岳林. 非线性混合整数规划问题的改进差分进化算法[J]. *工程数学学报*, 2010, 27(6): 967-974.
(Liu J M, Gao Y L. Improved differential evolution algorithm for nonlinear mixed-integer programming problems[J]. *Chinese J of Engineering Mathematics*, 2010, 27(6): 967-974.)
- [21] 吴亮红, 王耀南, 袁小芳, 等. 基于快速自适应差分进化算法的电力系统经济负荷分配[J]. *控制与决策*, 2013, 28(4): 557-562.
(Wu L H, Wang Y N, Yuan X F, et al. Fast self-adaptive differential evolution algorithm for power economic load dispatch[J]. *Control and Decision*, 2013, 28(4): 557-562.)
- [22] 王一川, 单甘霖, 童俊. 基于协同 memetic PSO 算法的传感器-目标分配问题求解[J]. *系统工程与电子技术*, 2013, 35(5): 1000-1006.
(Wang Y C, Shan G L, Tong J. Solving sensor-target assignment problem based on cooperative memetic PSO algorithm[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2013, 35(5): 1000-1006.)
- [23] Shlapak D A, Orletsky D T, Wilson B A. Dire strait military aspects of the China-Taiwan confrontation and options for US policy[R]. Santa Monica: Rand Corporation, 2000.

(责任编辑: 郑晓蕾)