

## 多无人机超视距空战博弈策略研究

赵明, 李彬, 王敏立

(中航工业洪都航空工业股份有限公司试飞站,南昌 330001)

**摘要:** 多无人机超视距空战决策问题是现代空战重要的研究课题,针对多无人机超视距空战博弈问题进行了研究。首先根据敌我双方作战态势参数信息,建立敌我双方对抗支付博弈模型,然后给出了基于量子粒子群算法的空战博弈混合策略纳什均衡的求解方法,最后通过仿真验证了该方法的可行性及有效性,为解决在超视距下多无人机空战策略问题提供了一种较科学的方法。

**关键词:** 无人机; 超视距; 态势评估; 空战博弈; 纳什均衡; 量子粒子群算法

中图分类号: V279; TP279 文献标志码: A 文章编号: 1671-637X(2015)04-0041-05

## On Game Strategy for Multi-UAV Beyond-Visual-Range Air Combat

ZHAO Ming-ming, LI Bin, WANG Min-li

(AVIC Jiangxi Hongdu Aviation Industry Company LTD, Nanchang 330001, China)

**Abstract:** Decision-making in multi-UAV beyond-visual-range air combat is an important research topic of modern air combat. According to the air combat situation and combat information, the revenue function of UAV air combat game and game payoff matrix under the information were established. Then, a mixed strategy Nash equilibrium method for air combat game was established based on Quantum Particle Swarm Optimization (QPSO). The simulation result validates the feasibility and effectiveness of the proposed method, which supplies a scientific method for solving the problem of decision-making in beyond-visual-range air combat of UAVs.

**Key words:** UAV; Beyond-View-Range (BVR); situation assessment; air combat game; Nash equilibrium; Quantum Particle Swarm Optimization (QPSO)

### 0 引言

近年来,作战需求的牵引和高新科学技术的涌现促进了军用作战飞机和精确制导武器的发展,“超视距空战,多目标攻击”已成为21世纪主要空战形式之一<sup>[1-2]</sup>。超视距是指超过人眼视力能观察到的距离,超视距空战是指敌我双方在超过10 km之外的距离上所进行的空战,作战双方都力求构成前向攻击态势,在超视距空战中消灭对方<sup>[3]</sup>,而对它的研究也越来越受到各个国家的高度重视。

文献[4]针对目前超视距协同空战态势评估非参量法模型的缺点,提出一种非参量法模型对空战威胁进行评估,分别建立了超视距攻击方式威胁函数、超视距时间威胁函数、超视距高度威胁函数和协同空

战能力威胁函数,并采用线性加权法将各种威胁函数进行综合,求得协同空战中的整体威胁态势,为战术选择、目标分配、火力分配做好基础。文献[5]提出了一种针对编队内飞机协同超视距空战的目标分配新模型。该模型忽略编队内飞机之间相对目标的距离差异,从武器类型的角度建立,从而减小问题解的规模,最后采用粒子群优化算法对某作战假想进行目标分配。文献[6]以多机超视距协同空战的目标分配问题为研究对象,依据协同空战攻击决策的度量指标,构建交战优势矩阵,建立整体优势函数,引入目标分配密集度和目标分配均匀度两个指标用于目标均衡和任务均衡分配,提出了一种改进的遗传算法用于解决多机超视距协同空战的目标分配。文献[7]针对超视距条件下多机协同空战中的威胁估计与多目标分配,提出了一种以参战双方飞机空战效能优势与当前态势优势的加权和为最终结果的超视距空战威胁估计非参量法模型;在威胁估计的基础上,探讨了一种以空战优势函

数为依据,多机之间相互配合、相互支援、协同作战过程的多目标分配算法。

但需要指出的是,目前虽然关于多无人机超视距空战决策的研究已经取得了一些研究成果,但在已有的文献中,还没有考虑敌方作战最优策略问题以达到一种作战均衡来符合实际空战情形。实现多无人机超视距多目标空战策略决策。故本文针对多无人机超视距空战博弈问题进行研究,提供了一种新的科学方法。

## 1 多无人机超视距空战博弈模型

### 1.1 无人机超视距空战博弈策略集

在空战中,将敌方和我方无人机分别看作博弈的两个局中人<sup>[8-9]</sup>,多无人机超视距空战动态博弈模型可表述为  $G = \{N, S, U\}$ ,其中,  $N = \{1, 2\}$  为博弈中的 2 个参与人,1 代表我方无人机,2 代表敌方无人机;  $S = \{S_1, S_2\}$ ,  $S_1 = \{s_1, s_2, \dots, s_i\}$  为我方无人机策略集,  $S_2 = \{s_1, s_2, \dots, s_j\}$  为敌方无人机策略集;  $U = \{u_1(s_i), u_2(s_j)\}$  为对参与人选择行动策略的收益区间,  $u_1(s_i)$  为我方无人机选择策略集中第  $i$  种行动策略  $s_i$  的收益,  $u_2(s_j)$  为敌方无人机选择策略集中第  $j$  种行动策略  $s_j$  的收益。

### 1.2 无人机超视距空战支付函数

#### 1.2.1 超视距空战态势优势函数

超视距空战已成为现代空战主要研究对象之一,进行空战决策首先要对空战的实际战场环境空战态势进行确定<sup>[10-11]</sup>。在空战对峙中,由于我方无人作战机群内的每架飞机都能够通过自身机载目标探测传感器对敌方目标进行定位与识别,同时又能够通过数据传感器接收机群内其他飞机探测到的目标信息<sup>[12]</sup>。

设敌我两方进行对抗,当我方雷达发现  $M$  架敌方飞机来袭击时,我方派出  $N$  架进行拦截攻击。设我机机群为  $B$ ,  $B = \{B_1, B_2, \dots, B_N\}$ , 其中,  $B_i$  表示第  $i$  架我机; 敌机机群为  $R$ ,  $R = \{R_1, R_2, \dots, R_M\}$ , 其中,  $R_j$  表示第  $j$  架敌机。则  $B_i$  和  $R_j$  的空战态势如图 1 所示。

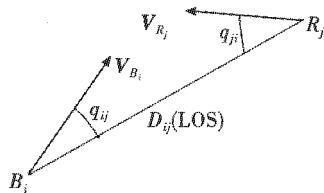


图 1 双方空战态势

Fig. 1 Air combat state of the two sides

在图 1 中: LOS 为两机的视线,即我机  $B_i$  与敌机的连线;  $D_{ij}$  为两机的距离;  $V_{B_i}$  与  $V_{R_j}$  分别为我机与敌机的速度矢量;  $q_{ji}$  为  $R_j$  相对于  $B_i$  的离轴角(目标方位角);  $q_{ij}$  为  $B_i$  相对于  $R_j$  的离轴角(目标进入角),并且规定目标方位角和目标进入角右偏为正,左偏为负。

角度优势函数为

$$W_a = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{|q_{ji}| - |q_{ij}|}{\pi} \right] \quad (1)$$

当  $q_{ij} = 0, q_{ji} = \pi$  时,我机具有攻击优势;当  $q_{ij} = \pi, q_{ji} = 0$  时,双方处于均势状态;当  $q_{ij} = 0, q_{ji} = 0$  时,两机处于双方不利状态;当  $q_{ij} = \pi, q_{ji} = 0$  时,敌机处于攻击优势。

速度优势函数为

$$W_v = \begin{cases} 0.1 & V_{B_i} \leq 0.6V_{R_j} \\ 0.5 + \frac{V_{B_i}}{V_{R_j}} & 0.6V_{R_j} < V_{B_i} < 1.5V_{R_j} \\ 1 & V_{B_i} \geq 1.5V_{R_j} \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $V_{B_i}, V_{R_j}$  分别为我机和敌机的速度矢量,当攻击机的速度越高时,攻击优势会越大。

距离优势函数为

$$W_r = e^{-(D_{ij} - R_0)/\sigma^2} \quad (3)$$

式中:  $D_{ij}$  为两机距离;  $\sigma = 2(R_{\max} - R_{\min})$ ;  $R_0 = \frac{R_{\max} + R_{\min}}{2}$ ,  $R_{\max}$  是导弹的最大发射距离,  $R_{\min}$  为导弹的最小发射距离。当  $D_{ij} > R_{\max}$  时认为距离优势为零,随着距离的减小,距离优势逐渐增大,  $D_{ij} = R_0$  时,距离优势达到最大,随着距离的进一步减小,距离优势又逐渐减小。

总体空战态势优势函数为

$$W_s = k_1 W_a + k_2 W_r + k_3 W_v \quad (4)$$

式中,  $k_1, k_2$  和  $k_3$  为加权系数,且  $k_1 + k_2 + k_3 = 1$ 。

在超视距作战的条件下,角度优势与近距离格斗相比不明显,并且角度与距离优势的相关性减弱,故此处取  $k_1 = 0.2, k_2 = k_3 = 0.4$ 。

#### 1.2.2 超视距空战效能优势函数

空对空作战能力指数主要选用 7 个因素来衡量空对空作战能力<sup>[10]</sup>:机动性、火力、探测目标能力、操纵效能、生存力、航程、电子对抗能力,其计算式为

$$C = [\ln B + \ln(\sum A_1 + 1) + \ln(\sum A_2)] \varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_3 \varepsilon_4 \quad (5)$$

式中:  $B$  为机动性能参数;  $A_1$  为武器杀伤力参数;  $A_2$  为探测能力参数;  $\varepsilon_1$  为操纵效能系数;  $\varepsilon_2$  为生存力系数;  $\varepsilon_3$  为航程系数;  $\varepsilon_4$  为电子对抗系数。由式(5)计算的空战能力指数与空战态势指数差别较大,故做如下进一步处理,使其值处于区间  $[0, 1]$ ,得到攻击机相对于目标机的效能优势函数  $W_c$  为

$$W_c = \begin{cases} 0 & C_{B_i}/C_{R_j} < 0.3 \\ 0.25 & 0.3 \leq C_{B_i}/C_{R_j} < 1 \\ 0.5 & C_{B_i}/C_{R_j} = 1 \\ 0.75 & 1 \leq C_{B_i}/C_{R_j} < 1.5 \\ 1 & C_{B_i}/C_{R_j} \geq 1.5 \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $C_{B_i}$ ,  $C_{R_j}$  分别为我机和敌机的空对空作战能力指数。

### 1.2.3 多无人机超视距空战支付函数

综合上述多无人机空战态势优势函数和空战效能优势函数, 我方多无人机空战的总体优势函数为

$$u_1 = k_1 W_s + k_2 W_e \quad (7)$$

式中:  $W_s$  为式(4)确定的我方空战态势优势函数;  $W_e$  为我方无人机的打击优势函数;  $k_1$ ,  $k_2$  为加权系数, 且  $k_1 + k_2 = 1$ 。

同理, 交换双方态势信息参数, 可得多无人机空战的总体优势函数  $u_2$ 。

建立多无人机超视距空战博弈零和支付函数为

$$f_a = \sum_{i=1}^m x_{ij} u_1 - \sum_{j=1}^n y_{ji} u_2 \quad (8)$$

式中,  $x_{ij}$ ,  $y_{ji}$  分别为二值决策变量,  $x_{ij} = 1$  表示我方第  $i$  架无人机攻击敌方第  $j$  架无人机,  $x_{ij} = 0$  表示第  $i$  架无人机没有攻击敌方第  $j$  架无人机。同样,  $y_{ji} = 1$  表示敌方第  $j$  架无人机攻击我方第  $i$  架无人机,  $y_{ji} = 0$  表示敌方第  $j$  架无人机没有攻击我方第  $i$  架无人机。

无人机超视距空战博弈支付矩阵为

$$A_{f_a} = \begin{bmatrix} y_1 & y_2 & \cdots & y_n \\ x_1 & f_{a11} & f_{a12} & \cdots & f_{a1n} \\ x_2 & f_{a21} & f_{a22} & \cdots & f_{a2n} \\ \vdots & \vdots & & & \vdots \\ x_m & f_{am1} & f_{am2} & \cdots & f_{amn} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中:  $x_1, x_2, \dots, x_m$  分别为我方无人机所采取的策略;  $y_1, y_2, \dots, y_n$  分别为敌方无人机所采取的策略;  $f_{aj}$  为我方无人机采取第  $x_i$  种策略, 敌方无人机采取第  $y_j$  种策略时我方无人机的收益。

## 2 多无人机超视距空战博弈求解

### 2.1 混合策略纳什均衡

**定义1**<sup>[13]</sup> 设  $N$  为参与博弈局中人的集合, 对每一个  $i \in N$ , 局中人  $i$  的纯策略集为  $S_i = \{s_1^{(i)}, s_2^{(i)}, \dots, s_{m_i}^{(i)}\}$ 。若局中人  $i$  对每一个纯策略  $s_k^{(i)}$  以概率  $x_k^{(i)}$  进行选择, 则  $x_i = (x_1^{(i)}, x_2^{(i)}, \dots, x_{m_i}^{(i)})$  被称为局中人  $i$  的一个混合策略。其中,  $x_k^{(i)} \geq 0$ ,  $\sum_{k=1}^{m_i} x_k^{(i)} = 1$ ,  $k = 1, 2, \dots, m_i$ 。

**定义2** 设  $x^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$  是非合作博弈  $G$  的一个混合策略局势。如果对于每一个  $i \in N$  和每个  $x_i \in X_i$ , 有

$$E_i(x^* \| x_i) \leq E_i(x^*) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

则称  $x^*$  是  $G$ (在混合策略下)的一个混合策略纳什均衡点,  $\{E_i(x^*)\}$  为对应的博弈支付矩阵的纳什均衡值。

### 2.2 基于量子粒子群算法的博弈纳什均衡值求解

设局中人 1 的混合策略为  $x = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ , 可得纳什均衡值为

$$v_1 = \max_{x \in X_1} \min_{1 \leq j \leq n} \sum_{i=1}^n A_{ij} x_i \quad (11)$$

令  $u(x) = \min_{1 \leq j \leq n} \sum_{i=1}^n A_{ij} x_i$ , 将式(11) 转换为下列数学规划问题

$$v = \max u(x) \quad (12)$$

$$\text{s. t. } \sum_{i=1}^n A_{ij} x_i > u(x), i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, n, \\ x_i > 0, x_1 + x_2 + \dots + x_n = 1.$$

求解单矩阵的纳什均衡问题就是求解线性规划式(12)的最优解。本文利用具有量子行为的粒子群(QPSO)算法求解博弈支付矩阵的混合策略纳什均衡值。QPSO 算法是 2004 年文献[14]在研究了文献[15~16]关于粒子收敛行为的研究成果后, 从量子力学的角度出发, 提出了一种新的 PSO 算法模型, 其实验结果证明 QPSO 算法具有容易实现和更强的全局优化能力。在 QPSO 算法中, 粒子能够以某一确定的概率出现在整个可行的搜索空间中任意一个位置, 而此位置可能比当前群体中的  $p_{gd}$  具有更好的适应度值<sup>[17~21]</sup>。其算法原理为

$$m_{best} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M P_i = \left( \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M P_{i1}, \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M P_{i2}, \dots, \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M P_{id} \right) \quad (13)$$

$$p_{id} = RP_{id} + (1-R)P_{gd} \quad (14)$$

$$x_{id} = p_{id} \pm \alpha |m_{bestd} - x_{id}| \ln(1/R) \quad (15)$$

式中:  $m_{best}$  为粒子群的中间位置;  $R$  为 0 到 1 之间的随机数;  $p_{id}$  为  $P_{id}$  和  $P_{gd}$  之间的随机点;  $\alpha$  为 QPSO 的收敛系数;  $M$  为群体的大小。

利用 QPSO 算法求解博弈支付矩阵的纳什均衡值流程步骤为:

- 1) 初始化粒子的位置向量, 确定种群规模  $M$  和粒子维数  $D$ ;
- 2) 根据式(13)计算粒子群的中间位置  $m_{best}$  的值;
- 3) 以当前粒子为个体最优, 求出每个粒子的适应度, 求得个体最优粒子  $p_{id}$ ;
- 4) 对求出的每个粒子适应度进行比较, 得到新的个体最优粒子  $p_{id}$ , 将所有的个体最优粒子进行比较得到新的全局最优粒子  $p_{gd}$ ;
- 5) 重复 3), 4), 更新全局最优粒子  $p_{gd}$ ;
- 6) 对于粒子的每一维, 根据式(14), 在  $p_{id}$  和  $p_{gd}$  之间取得一个随机点;
- 7) 由式(15)获得一个新的位置;
- 8) 重复 2)~7) 直至达到最大迭代次数, 循环结

束后,输出全局最优粒子。

### 3 空战仿真研究

假设以敌我双方3对2超视距空战为例,即我方有3架无人机(U1,U2,U3),速度均为 $v=220\text{ m/s}$ ,各携带2枚空空导弹,作战能力指数均为0.75。敌方有2架无人机(U4,U5),各携带3枚空空导弹,作战能力指数均为0.80。双方都在彼此火控雷达跟踪范围内,雷达最大跟踪距离 $R_{\text{att}}=70\text{ km}$ ,空空导弹最大射程 $R_{\text{max}}=60\text{ km}$ ,进行超视距空战博弈。则敌我双方无人机空战超视距空战态势由表1给出,双方无人机对抗纯策略集由表2给出。

表1 空战双方态势表

Table 1 The predominance value of two sides

UAV	Target	$q_{ij}$	$q_{ji}$	$D_{ij}/\text{km}$	$v_j/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
U1	U4	15	45	50	200
	U5	45	90	70	225
U2	U4	45	60	60	200
	U5	60	100	65	225
U3	U4	0	30	60	200
	U5	15	60	65	225

表2 双方无人机空战纯策略集

Table 2 The confrontation strategy sets of the two sides

我方无人机进攻策略	敌方无人机进攻策略
U1 和 U2 攻击 U4, U3 攻击 U5	U4 攻击 U1, U5 攻击 U2
U1 和 U2 攻击 U5, U3 攻击 U4	U4 攻击 U1, U5 攻击 U3
U1 和 U3 攻击 U4, U2 攻击 U5	U4 攻击 U2, U5 攻击 U1
U1 和 U3 攻击 U5, U2 攻击 U4	U4 攻击 U2, U5 攻击 U3
U2 和 U3 攻击 U4, U1 攻击 U5	U4 攻击 U3, U5 攻击 U1
U2 和 U3 攻击 U5, U1 攻击 U4	U4 攻击 U3, U5 攻击 U2
U1, U2 和 U3 同时攻击 U4	U4 和 U5 同时攻击 U1
U1, U2 和 U3 同时攻击 U5	U4 和 U5 同时攻击 U2
	U4 和 U5 同时攻击 U3

由式(1)~(9)可得,敌我双方无人机超视距空战零和 $8 \times 9$ 博弈支付矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} \beta_1 & \beta_2 & \beta_3 & \beta_4 & \beta_5 & \beta_6 & \beta_7 & \beta_8 & \beta_9 \\ \alpha_1 & 0.1682 & 0.2470 & 0.1751 & 0.1245 & 0.2435 & 0.1476 & -0.064 & 0.1653 & -0.4207 \\ \alpha_2 & 0.0410 & -0.0308 & 0.0749 & -0.0732 & 0.5765 & 0.0345 & 0.4512 & 0.2365 & 0.2377 \\ \alpha_3 & 0.0034 & 0.1227 & 0.0253 & -0.0256 & 0.3346 & 0.3654 & 0.3021 & -0.2130 & 0.3746 \\ \alpha_4 & 0.0568 & 0.1256 & 0.0256 & 0.1247 & 0.3468 & -0.3620 & 0.2790 & 0.0061 & -0.2368 \\ \alpha_5 & -0.0512 & 0.3521 & -0.1345 & 0.3358 & -0.7943 & 0.3466 & 0.5621 & 0.0846 & 0.1381 \\ \alpha_6 & 0.1321 & -0.1556 & 0.0865 & 0.0867 & 0.0879 & 0.1796 & 0.2702 & 0.1954 & -0.1056 \\ \alpha_7 & 0.3810 & 0.0641 & 0.0857 & 0.3267 & 0.1623 & -0.1035 & -0.074 & 0.0321 & 0.0328 \\ \alpha_8 & -0.1455 & 0.1754 & 0.1277 & -0.0422 & 0.3427 & 0.5274 & 0.1427 & -0.0724 & 0.1053 \end{bmatrix}.$$

博弈支付矩阵中每行的元素表示我方无人机作战策略,每列元素表示敌方无人机的攻击策略。其中, $(\alpha_i, \beta_j)$ 表示我方无人机1和无人机2攻击敌方无人机4,我方无人机3攻击敌方无人机5,敌方无人机4攻击我方无人机1,敌方无人机5攻击我方无人机2时,我方获得的收益。

在仿真中利用QPSO算法对博弈支付矩阵进行求解,可得我方无人机作战混合策略纳什均为: $x=(0,0,0,0.32,0,0.28,0.16,0.24)$ ,期望收益值 $v=0.9762$ ,即我方选择第4个策略、第6个策略、第7个策略和第8个策略的概率分别为0.32,0.28,0.16和0.24。也就是以0.32的概率我方无人机1和无人机3攻击敌方无人机5,我方无人机2攻击敌方无人机4。以0.28的概率我方无人机2和无人机3攻击敌方无人机5,我方无人机1攻击敌方无人机4。以0.16的概率我方无人机1、无人机2和无人机3同时攻击敌方无人机4。以0.24的概率我方无人机1、无人机2和无人机3同时攻击敌方无人机5。

敌方无人机作战博弈混合策略纳什均衡为: $y=(0,0,0.13,0,0.22,0,0,0.41,0.24)$ ,期望收益值 $v=-1.1035$ ,即敌方选择第3个策略、第5个策略、第8个策略和第9个策略的概率分别为0.13,0.22,0.41和0.24。也就是以0.13的概率敌方无人机4攻击我方无人机2,敌方无人机5攻击我方无人机1。以0.22的概率敌方无人机4攻击我方无人机3,敌方无人机5攻击我方无人机1。以0.41的概率敌方无人机4和无人机5同时攻击我方无人机2。以0.24的概率敌方无人机4和无人机5同时攻击我方无人机3。

从仿真结果可以看出,利用QPSO算法能够得到双方作战混合策略纳什均衡,敌我双方分别以概率 $x$ 和 $y$ 进行战略选择,这样敌我双方可以达到一种均衡状态,如果任何一方破坏这种均衡状态,自己的收益都会减小。在双方彼此考虑对方作战最优策略时能够找到一种对于己方最优的作战策略,实现多无人机超视距多目标空战策略决策,符合实际空战情形。

### 4 结束语

本文针对多无人机超视距空战博弈问题进行研究。根据敌我双方作战态势参数信息,建立敌我双方对抗支付博弈模型,给出了基于量子粒子群算法的混合策略的求解方法,在双方彼此考虑对方作战最优策略时能够找到一种对于己方最优的作战策略,实现多无人机超视距多目标空战策略决策,符合实际空战情形,最后通过仿真验证了该方法的可行性和有效性,为解决在超视距下多无人机空战策略问题提供了一种较科学的方法。

### 参 考 文 献

- [1] LUO D L, YANG Z, DUAN H B, et al. Heuristic particle swarm optimization algorithm for air combat decision-making on CMTA [J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2006, 23(1):20-26.

- [2] 郑江安. 超视距空战领先能力研究[J]. 电光与控制, 2011, 18(3):9-12,17. ( ZHENG J A. Study on first ability in beyond visual range air combat [J]. Electronics Optics & Control, 2011, 18(3):9-12,17. )
- [3] AVSTIN F, CARBONE G, FALCO M, et al. Automated maneuvering decision for air-to-air combat[ R ]. AIAA-87-2393:659-669.
- [4] 滕鹏,刘栋,张斌,等. 超视距协同空战态势评估方法研究[J]. 电光与控制,2008,15(10):47-50. ( TENG P, LIU D, ZHANG B, et al. On situation assessment method in beyond-visual-range coordinated air combat [J]. Electronics Optics & Control, 2008, 15(10):47-50. )
- [5] 肖冰松,方洋旺,许蕴山,等. 编队内协同超视距空战目标分配模型研究[J]. 系统工程与电子技术,2010, 32(7):1476-1479. ( XIAO B S, FANG Y W, XU Y S, et al. Research on coordinated formation target assignment model for beyond visual range air combat [J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 32(7):1476-1479. )
- [6] 张林,马良,万新龙. 改进遗传算法的多机超视距协同空战目标分配方法[J]. 四川兵工学报,2013,34(10):20-24. ( ZHANG L, MA L, WAN X L. Improved genetic algorithm of multiple aircraft over-the-horizon cooperative air combat target allocation methods [J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2013, 34(10):20-24. )
- [7] 高永,向锦武. 超视距多机协同空战目标分配算法[J]. 北京航空航天大学学报,2007, 33(3):286-289. ( GAO Y, XIANG J W. Target assignment in BVR air combat [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(3):286-289. )
- [8] CHEN X, ZHAO M M. The decision method research on air combat game based on uncertain interval information [C]//The 5th International Symposium on Computational Intelligence and Design(ISCID), 2012(1):456-459.
- [9] CHEN X, ZHAO M M. Multi-UAV air-combat strategy research based on the incomplete information dynamic game in uncertain environment [C]//International Conference on Systems Control, Simulation and Modeling (ICSCSM'13), 2013:1755-1759.
- [10] 兰俊龙,赵思宏,寇英信,等. 多机协同多目标攻击空战战术决策[J]. 电光与控制,2010, 17(12):17-19. ( LAN J L, ZHAO S H, KOU Y X, et al. Tactical decision making in multi-aircraft cooperative combat for multi-target attacking [J]. Electronics Optics & Control, 2010, 17(12):17-19. )
- [11] 陈闽. 编队协同作战目标分配建模综述[J]. 电光与控制, 2013, 20 (9): 53-58. ( CHEN M. A survey on modeling of target allocation for formation cooperative combat [J]. Electronics Optics & Control, 2013, 20(9): 53-58. )
- [12] PERRY W, SIGNORI D, BOON J. Exploring information superiority a methodology for measuring the quality of information and its impact on shared awareness [R]. RAND-MR, 2003.
- [13] 汪贤裕,肖玉明. 博弈论及其应用[M]. 北京:科学出版社,2011. ( WANG X Y, XIAO Y M. Game theory and its applications [M]. Beijing: Science Press, 2011. )
- [14] SUN J, FENG B, XU W B. Particle swarm optimization with particles having quantum behavior [DB/OL]. [2014-04-22]. <http://wenku.baidu.com/view/994637of76c66137ee0619b0.html>.
- [15] CLERC M, KENNEDY J. The particle swarm: Explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(1):58-73.
- [16] EBERHART R C, SHI Y H. Particle swarm optimization: Developments, applications and resources [C]//Proceedings of IEEE 2001 Congress on Evolutionary Computation, Seoul, Korea, 2001:81-86.
- [17] JR CRUZ J B, CHEN G S, LI D X, et al. Particle swarm optimization for resource allocation in UAV cooperative control [DB/OL]. [2014-04-20]. <http://www.docin.com/p-709435722.html>.
- [18] 贾文生,向淑文,杨剑锋,等. 基于免疫粒子群算法的非合作博弈 Nash 均衡问题求解[J]. 计算机应用研究,2012,29(1):28-31. ( JIA W S, XIANG S W, YANG J F, et al. Solving Nash equilibrium for N-persons' non-cooperative game based on immune particle swarm algorithm [J]. Application Research of Computers, 2012, 29(1):28-31. )
- [19] 马金玲,唐普英. 一种基于量子行为的改进粒子群算法[J]. 计算机工程与应用,2007,43(36):89-90. ( MA J L, TANG P Y. Modified particle swarm optimization with particles having quantum behavior [J]. Computer Engineering and Applications, 2007, 43(36):89-90. )
- [20] 李红梅,孙俊,须文波. 基于量子行为粒子群优化方法的随机规划算法[J]. 计算机工程与应用,2007,43(24):185-188. ( LI H M, SUN J, XU W B. Empirical study based on quant um-behaved particle swarm optimization stochastic programming algorithm [J]. Computer Engineering and Applications, 2007, 43(24):185-188. )
- [21] 于敏,须文波,孙俊. 纳什均衡解及其 QPSO 算法求解[J]. 计算机工程与应用,2007,43(10):48-51. ( YU M, XU W B, SUN J. Nash equilibrium and quantum-behaved particle swarm optimization [J]. Computer Engineering and Applications, 2007, 43(10):48-51. )