

## 基于模糊动态博弈的多无人机空战策略研究

陈 侠, 赵明明, 徐光延  
(沈阳航空航天大学 沈阳 110136)

**摘 要:** 不确定环境下多无人机空战决策问题已成为无人机作战系统的一个重要研究课题。首先通过分析无人机空战态势信息的不确定性,建立模糊信息下的多无人机动态博弈的作战优势函数;将动态扩展式博弈转化成静态策略式博弈,构建基于模糊信息的双方博弈的支付矩阵。将模糊结构元方法和粒子群算法相结合,给出模糊信息下动态博弈的混合策略的纳什均衡求解方法。最后通过仿真实验验证了该方法的可行性和有效性。

**关键词:** 多无人机; 空战决策; 优势函数; 动态博弈; 纳什均衡

中图分类号: V279; TP279 文献标志码: A 文章编号: 1671-637X(2014)06-0019-05

## Fuzzy Dynamic Game Based Operation Strategy for Multiple UAVs

CHEN Xia, ZHAO Ming-ming, XU Guang-yan  
(Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

**Abstract:** The air combat decision making of multiple UAVs in uncertain environment has become an important research subject in UAV combat system. The uncertainty of UAV air combat situation information was analyzed, and the combat dominant function of UAVs was built up based on fuzzy information. The dynamic expansion game was transferred into a static strategy game, and the payoff matrix of the two sides of game was constructed based on the fuzzy information. A Nash equilibrium solution method of mixed strategy game strategy with fuzzy information was proposed by using the fuzzy structure element method together with particle swarm algorithm (PSO). Simulation results show the feasibility and effectiveness of the method.

**Key words:** multiple UAVs; air combat decision-making; dominant function; dynamic game; Nash equilibrium

### 0 引言

博弈论作为一门现代科学体系,源于20世纪初,在二战后发展成为一门完整而丰富的理论科学,将博弈论应用到军事作战中已成为国内外学者研究的热点<sup>[1-6]</sup>。文献[1-2]根据多机协同对抗多目标的空战特征,以敌我双方可能的相互攻击组合方式作为策略集,建立完全信息下博弈模型,确定双方的支付矩阵,利用scarf算法,给出了纳什均衡值的求解方法;文献[3]主要利用博弈论构建了导弹攻防技术的数学模型,描述了攻防双方的策略集,利用规划法,求解出了博弈双方的纳什均衡值;文献[4]针对不确定环境下

的军事指挥决策问题,提出了不确定影响因子概念,反映战场不确定环境对各参战单元产生的影响程度,建立了不确定环境下的对抗决策模型,并通过不确定模拟方法进行求解,结合双矩阵对策方法得到对策策略平衡点;文献[5]以不完全信息动态博弈理论为基础,以无人机攻防对抗问题为背景,建立无人机攻防对抗问题的不完全信息动态博弈模型,针对博弈树的求解问题,设计免疫进化算法,求解出贝叶斯纳什均衡值;文献[6]以博弈论为基础,以防空火力单元与攻击飞机多次对抗为作战背景,建立了基于动态博弈的防空火力单元目标分配模型,利用混合粒子群算法求解纳什均衡值;文献[7]介绍了一种多阶段影响图博弈的分析方法,建立一对一空战对抗博弈模型,文中提出的博弈模型提供了一种新的空战决策分析方法;文献[8]通过分析实际战场中的信息不确定性,提出了不确定信息条件下需要解决的多无人机任务分配问题,以目标价值收益、毁伤代价指标及航程代价指标的不

收稿日期: 2013-07-02

修回日期: 2013-08-26

基金项目: 国家自然科学基金(61074159); 辽宁省自然科学基金(20092053)

作者简介: 陈 侠(1962—),女,辽宁新民人,博士后,教授,研究方向为航空航天器协同任务规划。

确定信息为依据,建立基于区间信息环境下多无人机的任务分配模型,采用随机概率的多属性方案排序方法,给出不确定环境下多无人机动态任务分配求解方法;文献[9]通过分析实际战场中目标价值和毁伤概率信息的不确定性,将粒子群算法和区间数多属性方案排序方法相结合,给出基于不确定信息下博弈纳什均衡求解方法,为不确定环境下无人机攻防博弈实现最优策略提供了新方法。

但需要指出的是,在实际战场环境中,由于机载传感器精度或环境中的各种干扰因素,往往不能精确地获得各种信息,常常在数学上描述为模糊信息。如何在模糊信息下进行敌我双方攻防博弈,求解纳什均衡值问题,是一个新的重要研究课题。目前,基于模糊信息的无人机空战攻防博弈的研究还没有文献报道。本文根据敌我双方作战参数的模糊信息,建立模糊信息下敌我双方攻防对抗的模糊支付博弈模型,给出动态博弈的多无人机空战最优的作战策略。

## 1 基于模糊信息的多无人机空战优势收益模型

### 1.1 模糊态势优势函数

在空战中,无人机空战一对一态势几何图如图1所示。

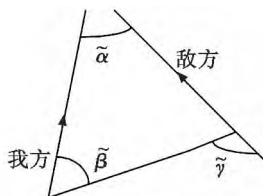


图1 空战一对一几何态势分析图

Fig.1 A geometric situation analysis chart for one-to-one air combat

图中: \$\tilde{\gamma}\$ 为敌方尾后视线角,单位为(\$^\circ\$), \$|\tilde{\gamma}| < 180^\circ\$; \$\tilde{\alpha}\$ 为头顶交叉角; \$\tilde{\beta}\$ 为我方视线角,单位为(\$^\circ\$), \$|\tilde{\beta}| < 180^\circ\$。

假设敌我双方无人机在水平方向速度固定,只考虑角度优势和距离优势,根据图1构建的模糊态势优势函数为

$$\tilde{S} = \left( \frac{[1 - \tilde{\gamma}/180] + [1 - \tilde{\beta}/180]}{2} \right) \times \exp \left( \frac{-|\tilde{R} - R_d|}{180k} \right) \quad (1)$$

式中: \$\tilde{R} = (l\_R, m\_R, \mu\_R)\$, 为两机之间的实际模糊距离; \$\tilde{\gamma} = (l\_\gamma, m\_\gamma, \mu\_\gamma)\$, 为敌方尾后模糊视线角; \$\tilde{\beta} = (l\_\beta, m\_\beta, \mu\_\beta)\$, 为我方模糊视线角; \$R\_d\$ 为两机之间的期望距离,即在雷达扫描范围内; \$k\$ 为常数,这里取 0.1,单位为 \$m/(\circ)\$,用来调整距离与角度的影响效果。

### 1.2 空战打击优势函数

在多无人机作战过程中,目标价值收益是需要考虑的一个重要指标。假设我方无人机集合为 \$N = \{1, 2, \dots, i, \dots, n\}\$, 其模糊价值集合为 \$\{\tilde{v}\_1^w, \dots, \tilde{v}\_i^w, \dots, \tilde{v}\_n^w\}\$, 其中, \$\tilde{v}\_i^w = (l\_{v\_i}^w, m\_{v\_i}^w, \mu\_{v\_i}^w)\$, 为敌方对我方的第 \$i\$ 架无人机的模糊价值,敌方无人机集合为 \$M = \{1, 2, \dots, j, \dots, m\}\$, 其模糊价值集合为 \$\{\tilde{v}\_1^d, \dots, \tilde{v}\_j^d, \dots, \tilde{v}\_m^d\}\$, \$\tilde{v}\_j^d = (l\_{v\_j}^d, m\_{v\_j}^d, \mu\_{v\_j}^d)\$, 为我方对敌方的第 \$j\$ 架的模糊价值,从双方无人机角度来看,其隶属度的含义为与对方无人机最高价值的隶属程度。

设我方第 \$i\$ 架无人机对敌方第 \$j\$ 架的命中概率为 \$p\_{ij}\$, 假设目标模糊价值集合为 \$\{\tilde{v}\_1^d, \tilde{v}\_2^d, \dots, \tilde{v}\_j^d, \dots, \tilde{v}\_m^d\}\$, \$\tilde{v}\_{\max}^d\$ 为对方价值集合中的最大目标价值,则我方第 \$i\$ 架无人机攻击敌方第 \$j\$ 架无人机的收益价值指标函数为

$$\tilde{R}_{ij}^1 = \frac{\tilde{v}_j^d}{\max \tilde{v}^d} \times p_{ij} \quad (2)$$

若 \$q\$ 架无人机合作同时攻击敌方第 \$j\$ 架无人机,则我方 \$q\$ 架无人机攻击敌方第 \$j\$ 架无人机的收益价值指标函数为

$$\tilde{R}_j^q = \frac{\tilde{v}_j^d}{\max \tilde{v}^d} \times [1 - \prod_{i=1}^q (1 - p_{ij})^r] \quad (3)$$

式中 \$r\$ 为合作系数,且 \$r > 1\$,它取决于 \$q\$ 架无人机联盟作战能力和目标 \$j\$ 的性质。

### 1.3 基于模糊的多无人机空战优势支付函数

综合上述多无人机空战态势优势函数和打击优势函数,使其加权得到敌我双方模糊信息下的空战一对一总收益函数为

$$\tilde{U}^1 = k_1 \tilde{S} + k_2 \tilde{R}_{ij}^1 \quad (4)$$

式中 \$k\_1, k\_2\$ 为加权系数,且 \$k\_1 + k\_2 = 1\$。

双方模糊信息下的空战多对一总收益函数为

$$\tilde{U}^q = k_1 \tilde{S} + k_2 \tilde{R}_j^q \quad (5)$$

式中 \$k\_1, k\_2\$ 为加权系数,且 \$k\_1 + k\_2 = 1\$。

我方无人机空战优势支付函数为

$$\tilde{A}_w = \tilde{U}_w - \tilde{U}_d \quad (6)$$

式中: \$\tilde{U}\_w\$ 为我方空战模糊收益; \$\tilde{U}\_d\$ 为敌方空战模糊收益。由本文构建空战零和博弈,则敌方无人机空战优势支付函数为 \$-\tilde{A}\_w\$。

## 2 多无人机空战模糊动态博弈模型

### 2.1 模糊扩展式动态博弈的描述

在空战中,多无人机空战模糊动态博弈扩展式模型可表述为 \$\tilde{G} = \{N, S, \tilde{U}\}\$。其中: \$N = \{1, 2\}\$, \$N\$ 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; $S = \{s_{1i}^k, s_{2j}^k\}$ 为博弈中参与者行动空间(行动集), $s_{1i}^k$ 为我方无人机第 $k$ 阶段选择第 $i$ 种行动策略, $s_{2j}^k$ 为敌方无人机第 $k$ 阶段选择第 $j$ 种行动策略; $\tilde{U} = \{\tilde{u}_1(s^{k,i}), \tilde{u}_2(s^{k,j})\}$ 为对参与人可能选择的每一行动组合相对应的各参与人的模糊支付,如图2所示。

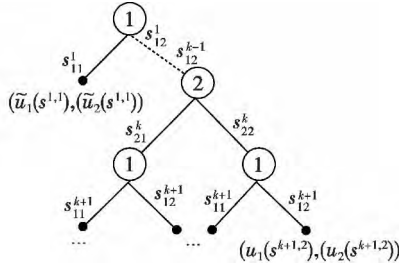


图2 敌我无人机攻防对抗 $k$ 阶段动态博弈扩展式

Fig.2 The UAV combat  $k$ -stage dynamic game expansion of the two sides

根据上述分析,当无人机 $i$ 执行完第 $k-1$ 阶段后,到第 $k$ 阶段时, $s^k$ 表示该阶段参与者 $i$ 执行的策略。此时,参与者 $i$ 选择策略 $s^k$ ,而前战场状态为 $\tilde{S}^{k-1}$ ,执行策略 $s^k$ 后预期战场状态为 $\tilde{S}^k$ 。随着时间的推移,当执行完策略 $s^k$ ,到达第 $k+1$ 阶段,则无人机 $i$ 的态势状态转移方程为

$$T_i(s^k) = T_i(s^{k-1}) + \Delta T_i(s^k) \quad (7)$$

$$D_i(s^k) = D_i(s^{k-1}) + \Delta D_i(s^k) \quad (8)$$

其中: $T_i(s^k)$ 表示无人机 $i$ 的角度状态; $D_i(s^k)$ 表示无人机 $i$ 的距离状态; $\Delta T_i(s^k)$ 和 $\Delta D_i(s^k)$ 分别表示角度状态和距离状态的变化量。

## 2.2 策略描述和模糊支付矩阵的建立

无人机的作战策略是指在空战博弈中敌我双方无人机的行动规则,它规定了无人机在每一轮应该采取的行动。图2中, $S_i$ 为无人机 $i$ 在行动集 $A_i(I_i)$ 上的策略组合,即 $S_i = \prod_{I_i \in H_i} A_i(I_i)$ 。

结合上述,可得到战略式零和模糊支付矩阵为

$$\tilde{A} = \begin{matrix} & \begin{matrix} y_1 & y_2 & \cdots & y_n \end{matrix} \\ \begin{matrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} \tilde{u}_{11} & \tilde{u}_{12} & \cdots & \tilde{u}_{1n} \\ \tilde{u}_{21} & \tilde{u}_{22} & \cdots & \tilde{u}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{u}_{n1} & \tilde{u}_{n2} & \cdots & \tilde{u}_{nn} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (9)$$

式中: $x_1, x_2, \dots, x_n$ 分别为我方无人机采取的策略; $y_1, y_2, \dots, y_n$ 分别为敌方无人机采取的策略; $\tilde{u}_{ij}$ 为我方采取策略 $x_i$ 种策略,同时敌方无人机采取 $y_j$ 种策略时我方的模糊支付。

## 3 基于群算法的模糊博弈纳什均衡求解

### 3.1 模糊结构元的基本定义

定义1<sup>[10]</sup> 设存在实数域 $R$ 上的模糊集 $E$ ,如果 $E$ 的隶属函数 $E(x)$ 满足如下3条性质:1)  $E(0) = 1$ ; 2) 在 $[-1, 0]$ 上 $E(x)$ 单增右连续,在 $(0, 1]$ 上单降左连续;3) 当 $x \notin (-1, 1)$ 时 $E(x) = 0$ ,则称模糊集 $E$ 为模糊结构元。

设模糊集 $E$ 具有如下隶属函数

$$E(x) = \begin{cases} 1+x, & x \in [-1, 0] \\ 1-x, & x \in (0, 1] \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad \text{则称其为三角结构元。}$$

定理1<sup>[10]</sup> 对于给定的模糊结构元 $E$ 和任意的有界闭模糊数 $\tilde{P}$ ,总存在 $[-1, 1]$ 上的一个单调有界函数 $f$ ,使得 $\tilde{A} = f(E)$ 。

设 $E$ 是 $R$ 上任意的对称模糊结构元, $f_1$ 和 $f_2$ 是区间 $[-1, 1]$ 上的具有相同单调性的函数类, $\tilde{P}_1$ 和 $\tilde{P}_2$ 是由模糊结构元 $E$ 生成的模糊数,即 $\tilde{P}_1 = f_1(E)$ , $\tilde{P}_2 = f_2(E)$ 。则有: $\tilde{P}_1 + \tilde{P}_2 = f_1(E) + f_2(E)$ , $\tilde{P}_1 - \tilde{P}_2 = f_1(E) - f_2(E)$ 。 $f^\tau(E) = \begin{cases} kf(E), & k \geq 0 \\ |k|f^\tau(E), & k < 0 \end{cases}$ 。其中 $f^\tau(x) = -f(-x)$ 。

### 3.2 模糊战略式博弈的纳什均衡

定义2<sup>[11]</sup> 设 $\tilde{A} = (\tilde{a}_{ij})_{m \times n}$ 为零和模糊支付矩阵,其中, $\tilde{a}_{ij}$ 是模糊数, $G = (S^m, S^n, \tilde{A}_{m \times n})$ 为一个模糊矩阵博弈,如果满足

$$x^T \tilde{A}_{m \times n} y \leq x^{*T} \tilde{A}_{m \times n} y^*, \forall x \in S^m, x \geq 0^m \quad (10)$$

则称 $(x^*, y^*)$ 为纳什均衡, $x^{*T} \tilde{A}_{m \times n} y^*$ 为博弈收益值,其中 $(x^*, y^*) \in S^m \times S^n$ 。

根据经典矩阵博弈转化线性规划方法,模糊矩阵博弈同样可以转化为模糊线性规划进行求解,令 $\tilde{u}(x) = \min_{1 \leq j \leq n} \sum_{i=1}^m \tilde{c}_{ij} x_i$ ,则模糊矩阵博弈求解转换为数学规划为

$$\begin{aligned} & \max \tilde{u} \\ \text{s. t. } & \sum_{j=1}^n \tilde{\alpha}_{ij} x_i \geq \tilde{\beta}_{ij}, i = 1, \dots, m, x_i \geq 0, j = 1, \dots, n \end{aligned} \quad (11)$$

其中: $\tilde{\alpha}_{ij}, \tilde{\beta}_{ij}, \tilde{c}_{ij}$ 均为模糊数; $x_i$ 为实数。

求解上述模糊线性规划问题是求解模糊矩阵博弈的核心工作,下面给出求解模糊线性规划的结构元方法。

### 3.3 基于模糊结构元方法的模糊博弈纳什均衡求解

定理2<sup>[10]</sup> 设模糊数 $\tilde{\alpha}_{ij}, \tilde{\beta}_{ij}, \tilde{c}_{ij}$ 均可由正则对称

模糊结构元  $E$  表示为:  $\tilde{\alpha}_{ij} = f_{ij}(E)$ ,  $\tilde{\beta}_{ij} = g_{ij}(E)$ ,  $\tilde{c}_{ij} = h_{ij}(E)$ 。其中,  $f_{ij}(x)$ ,  $g_{ij}(x)$ ,  $h_{ij}(x)$  均为  $[-1, 1]$  上单增函数, 则  $\tilde{M} = \min_{1 \leq j \leq n} \sum_{i=1}^n \int_{-1}^1 E(x) x_i h_{ij}(x) dx$ , 且模型 (11) 等价于模型

$$\max \tilde{M} \tag{12}$$

s. t.

$\sum_j \int_{-1}^1 E(x) x_j f_{ij}(x) dx \geq \int_{-1}^1 E(x) g_{ij}(x) dx \quad i = 1, \dots, m;$   
 $x_i \geq 0, j = 1, \dots, n, f'_{ij}(x) \geq 0, g'_{ij}(x) \geq 0, h'_{ij}(x) \geq 0.$   
进一步可得到满足等价模糊矩阵的博弈纳什均衡解公式为

$$x^T \left( \int_{-1}^1 E(x) f_{ij}(x) dx \right)_{m \times n} y \leq x^{*T} \left( \int_{-1}^1 E(x) f_{ij}(x) dx \right)_{m \times n} y^* \tag{13}$$

当  $\tilde{a}_{ij}, \tilde{b}_{ij}$  为三角模糊数时, 设  $E$  是三角模糊结构元, 并且  $\tilde{a}_{ij} = f_{ij}(E)$ ,  $\tilde{b}_{ij} = g_{ij}(E)$  均为三角模糊数。

定义 3 若  $\tilde{a}_{ij} = (a_{ij}, \alpha_{ij}, \beta_{ij})$  和  $\tilde{b}_{ij} = (b_{ij}, \mu_{ij}, \nu_{ij})$  为三角模糊数, 则与式 (11) 的模糊矩阵博弈纳什均衡解成立的等价公式为

$$x^T \left( -\frac{1}{6} \alpha_{ij} + \frac{1}{6} \beta_{ij} + a_{ij} \right)_{m \times n} y \leq x^{*T} \left( -\frac{1}{6} \alpha_{ij} + \frac{1}{6} \beta_{ij} + a_{ij} \right)_{m \times n} y^* \tag{14}$$

则称  $(x^*, y^*)$  为模糊线性规划下的近似纳什均衡,  $x^{*T} \tilde{A}_{m \times n} y^*$  为此时博弈近似收益值, 其中  $(x^*, y^*) \in S^m \times S^n$ 。

### 3.4 基于粒子群算法的混合战略纳什均衡值求解

根据式 (10) ~ 式 (12), 采用模糊结构元方法给出了模糊博弈矩阵的求解过程, 下面采用粒子群算法, 给出模糊信息下动态博弈的纳什均衡求解方法。

设参与人的混合战略为  $x = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ , 纳什均衡值  $\tilde{v}$ , 设模糊支付零和矩阵  $\tilde{A} = (\tilde{a}_{ij})_{m \times n}$ , 其中, 元素  $\tilde{a}_{ij} = (a_{ij}, \alpha_{ij}, \beta_{ij})$ , 为三角模糊数, 由定理 3 结合式 (12) 将式 (9) 转换为数学规划问题, 为

表 2 敌我双方两阶段态势三角模糊参数

Table 2 The two-stage situation triangular fuzzy parameters of the two sides

	$\tilde{\beta} / (^\circ)$		$\tilde{\gamma} / (^\circ)$		$\tilde{R} / \text{km}$	
	第 1 阶段	第 2 阶段	第 1 阶段	第 2 阶段	第 1 阶段	第 2 阶段
$U_1$ 对 $U_3$	(-20, -15, -10)	(45, 50, 55)	(-50, -45, -40)	(40, 45, 50)	(0.75, 0.78, 0.80)	(0.90, 0.11, 0.13)
$U_2$ 对 $U_3$	(20, 25, 30)	(-65, -60, -55)	(25, 30, 35)	(70, 75, 80)	(0.78, 0.80, 0.82)	(0.80, 0.82, 0.84)

由 3.2 节所述, 结合表 1, 可知敌我双方进行对抗的零和博弈支付矩阵为  $3 \times 3$  维, 如果是两阶段攻防对抗,

$$\begin{aligned} \tilde{v} &= \max \tilde{u}(x) \\ \text{s. t. } &\left( -\frac{1}{6} \alpha_{ij} + \frac{1}{6} \beta_{ij} + a_{ij} \right)_{m \times n} x_i \geq \tilde{u}(x), x_1 + x_2 + \dots + x_n = 1, x_i > 0. \end{aligned} \tag{15}$$

本文采用 PSO 算法实现个体在可行解空间中的寻优问题<sup>[12-15]</sup>。每个粒子代表化简后非合作模糊博弈中的一个混合局势, 在混合策略组合的空间内不断搜索最优位置。在该算法的不断迭代中, 粒子会根据观察到的博弈结果向个体自身的最优解学习, 且向群体中表现更优的粒子学习。粒子之间通过不断学习来调整自己的策略, 并且在博弈的混合策略组合的空间内不断发生移动, 最终趋向博弈的均衡点。

## 4 无人机空战博弈仿真研究

假设以敌我双方 2 对 1 空战为例, 即我方有两架无人战斗机, 敌方有一架无人战斗机, 并且双方都在彼此火控雷达跟踪范围内, 进行两阶段动态空战博弈。设我方无人机三角模糊价值为  $\tilde{v}_w = [(65, 68, 71), (63, 66, 69)]$ , 其每架飞机作战攻击命中概率集合为  $p_{ij} = [0.80, 0.82]$ , 作战期望作战距离集合为  $R = [0.90, 0.85]$ ; 敌方无人机三角模糊价值为  $\tilde{v}_d = [69, 72, 75]$ , 其每架飞机命中概率集合为  $p_{ij} = [0.83]$ , 作战期望作战距离集合为  $R = [0.92]$ 。敌我双方两阶段无人机对抗策略集由表 1 给出, 两阶段敌我双方态势三角模糊参数由表 2 给出。

表 1 敌我双方两阶段无人机对抗策略集

Table 1 The two-stage UAV confrontation strategy sets of the two sides

阶段	我方无人机进攻策略	敌方无人机进攻策略
1	我方 $U_1$ 攻击敌方 $U_3$	敌方 $U_3$ 攻击我方 $U_1$
	我方 $U_2$ 进行迂回掩护(c)	
	我方 $U_1$ 进行迂回掩护(c)	敌方 $U_3$ 攻击我方 $U_2$
	我方 $U_2$ 攻击敌方 $U_3$	
	我方 $U_1$ 攻击敌方 $U_3$	敌方 $U_3$ 选择迂回逃跑(r)
	我方 $U_2$ 攻击敌方 $U_3$	
2	敌我双方在第 2 阶段的进攻策略与第 1 阶段相同	

则为  $9 \times 9$  维矩阵。结合表 2, 由式 (1) ~ 式 (10), 可计算得博弈敌我两阶段攻防对抗的  $9 \times 9$  维博弈支付矩阵为

	(1; 1)	(2; 1)	(r; 1)	(1; 2)	(2; 2)	(r; 2)	(1; r)	(2; r)	(r; r)
(3; 3; 3; 3)	1.0797	-0.1193	1.7649	-1.4134	1.4560	1.6285	1.6602	-1.4441	1.5439
(3; c; 3; 3)	1.6398	1.7285	-0.1093	-0.1426	1.5339	1.6003	-1.0098	-0.9727	1.4338
(c; 3; 3; 3)	1.6737	-0.6307	1.6713	1.6609	1.7031	1.7505	-0.9501	-1.3074	1.3882
(3; 3; 3; c)	1.6505	1.6918	1.3674	1.3859	-0.0786	-0.0193	1.4458	1.5629	-0.9158
$A = (3; c; 3; c)$	-1.0728	1.4394	1.6760	1.3377	1.3868	-0.7709	-1.1078	1.7506	1.8511
(c; 3; 3; c)	1.3075	1.3884	-0.1227	-0.1493	1.4265	1.5887	1.4669	1.3821	1.6705
(3; 3; c; 3)	1.7171	1.5349	1.6013	1.6288	1.6507	1.6914	1.6327	1.6613	-0.1103
(3; c; c; 3)	-0.1416	1.4534	1.4460	1.3173	1.3872	1.4438	1.6757	-0.6297	1.7295
(c; 3; c; 3)	1.7639	1.8010	1.7545	-1.1501	-0.9095	-0.9627	1.5441	1.6439	1.8207

博弈支付矩阵中的每行元素表示我方 UAV 作战策略,其中(3; 3; 3; 3)表示在第1阶段,我方  $U_1$  攻击敌方  $U_3$ 、我方  $U_2$  攻击敌方  $U_3$ ; 在第2阶段,我方  $U_1$  攻击敌方  $U_3$ 、我方  $U_2$  攻击敌方  $U_3$ 。每列元素表示敌方 UAV 的攻击策略,其表示法和我方战略相同。

利用粒子群算法得到博弈适应度值的变化曲线见图3、图4。

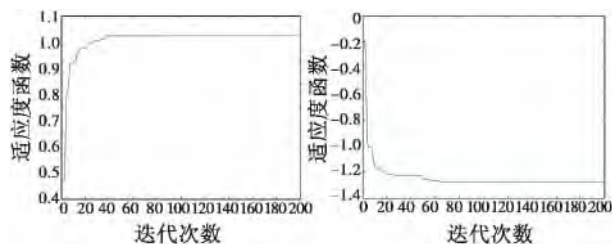


图3 我方适应度值变化曲线

Fig. 3 Fitness change curve of our side

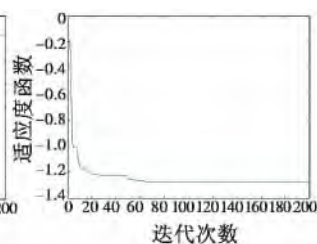


图4 敌方适应度值变化曲线

Fig. 4 Fitness change curve of the enemy side

从仿真中可得我方两阶段混合策略纳什均为:  $x^* = (0.09, 0.09, 0.13, 0.19, 0.52, 0.16)$ , 期望收益值  $v = 1.0151$ , 即我方选择第5种策略、第6种策略、第7种策略和第9种策略的概率分别为0.13、0.19、0.52和0.16。

敌方两阶段博弈混合策略纳什均衡为:  $y^* = (0.63, 0.09, 0.19, 0.18, 0.09, 0.09)$ , 期望收益值  $v = -1.2789$ , 即敌方选择第1个策略、第3个策略和第5个策略的概率分别为0.63、0.19、0.18。

该敌我双方两阶段混合策略纳什均衡值的含义是敌我双方分别以概率  $x^*$ 、 $y^*$  进行战略选择,这样,敌我双方可以达到一种均衡状态,敌我双方的均衡都是自己的最优选择,如果任何一方破坏这种均衡状态,自己的收益都会减小。

## 5 结束语

本文针对模糊信息环境下的无人机攻防对抗动态博弈问题给出了一种方法。运用模糊结构元和博弈分析方法,为研究复杂环境下无人机空战策略问题提供了

一种可行的解决方法。通过粒子群算法,给出了模糊信息下动态博弈的混合策略的纳什均衡求解方法,并验证了方法的可行性及有效性。需要指出的是,模糊信息环境下的无人机攻防对抗动态博弈问题是一个新的研究课题,还会有更多其他分析方法出现。

## 参考文献

- [1] 姚宗信,李明,陈宗基. 基于博弈论模型的多级协同对抗多目标任务决策方法[J]. 航空计算技术, 2007, 37(3): 7-11.  
YAO Z X, LI M, CHEN Z J. Mission decision-making method of multi-aircraft cooperative attack multi-object based on game theory model[J]. Aeronautical Computing Technique, 2007, 37(3): 7-11.
- [2] 阮铨巍,寇英信,徐安,等. 基于二元模糊比较法的单步空战机动决策研究[J]. 指挥控制与仿真, 2012, 34(5): 10-13.  
RUAN C W, KOU Y X, XU A, et al. Research on single step maneuvering decision in air combat based on binary fuzzy comparison method[J]. Command Control & Simulation, 2012, 34(5): 10-13.
- [3] 鲜勇,斯文辉,王剑. 基于博弈论的弹道导弹攻防技术研究[J]. 电光与控制, 2010, 17(3): 48-50.  
XIAN Y, SI W H, WANG J. Offensive/defensive technique of ballistic missiles based on game theory [J]. Electronics Optics & Control, 2010, 17(3): 48-50.
- [4] 张莉,张安. 不确定环境下编队对地攻防对抗决策方法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(2): 411-415.  
ZHANG L, ZHANG A. Study on air formation to ground attack-defends decision-making in uncertainty [J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(2): 411-415.
- [5] 惠一楠,朱华勇,沈林成. 无人机攻防对抗不完全信息动态博弈方法研究[J]. 兵工自动化, 2009, 28(1): 4-7.  
HUI Y N, ZHU H Y, SHEN L C. Study on dynamic game method with incomplete information in UAV attack-defends campaign [J]. Ordnance Industry Automation, 2009, 28(1): 4-7.

(下转第34页)

- SHI Y K, GAO X G. Application of hierarchical task network planning to uninhabited combat aerial vehicles planning [J]. Fire Control and Command Control, 2007, 33(1): 125-131.
- [8] 史建国, 高晓光. 动态贝叶斯网络及其在自主智能作战中的应用 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 2008.
- SHI J G, GAO X G. Dynamic Bayesian network and its application in autoumous intelligence operations [M]. Beijing: The Pulishing House of Ordnance Industry, 2008.
- [9] 马巧云, 洪流, 陈学广. 多 Agent 系统中任务分配问题的分析与建模 [J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2007, 33(1): 125-131.
- MA Q Y, HONG L, CHEN X G. Analysis and modeling of task allocation problem in MAS [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2007, 33(1): 125-131.
- [10] 寇力. 基于案例的空中进攻作战计划生成技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2005.
- KOU L. Research on case-based planning technology of air offensive campaign [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005.
- [11] ALIFERIS C F, COOPER G F. A structurally and temporally extended Bayesian belief network model: Definitions, properties and modeling techniques [C]//Proceedings of the 12th Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence, Morgan Kaufmann, San Francisco, CA, 1996: 28-39.
- [12] 卓金武, 魏永生, 秦健, 等. Matlab 在数字建模中的应用 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011.
- ZHUO J W, WEI Y S, QIN J, et al. The application of Matlab in mathematics [M]. Beijing: Beihang University Press, 2011.
- [13] 阳东升, 张维明, 刘忠, 等. 指控组织设计方法 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- YANG D S, ZHANG W M, LIU Z, et al. Designing of command and control organization [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010.
- (上接第 23 页)
- [6] 曾松林, 王文恽, 丁大春, 等. 基于动态博弈的目标分配方法研究 [J]. 电光与控制, 2011, 18(2): 26-29, 72.
- ZENG S L, WANG W Y, DING D C, et al. Target allocation method based on dynamic game [J]. Electronics Optics & Control, 2011, 18(2): 26-29, 72.
- [7] GALATI D G. Game theoretic target assignment strategies in competitive multi-team systems [D]. Pittsburgh: University of Pittsburgh, 2004.
- [8] 陈侠, 唐婷. 不确定环境下多无人机动态任务分配方法 [J]. 火力与指挥控制, 2013, 38(1): 45-49, 53.
- CHEN X, TANG T. Study on the dynamic task assignment of multi-UCAV under dynamic uncertain environment [J]. Fire Control & Command Control, 2013, 38(1): 45-49, 53.
- [9] 陈侠, 刘敏, 胡永新. 基于不确定信息的无人机攻防博弈策略研究 [J]. 兵工学报, 2012, 33(12): 1510-1515.
- CHEN X, LIU M, HU Y X. Study on UAV offensive/defensive game strategy based on uncertain information [J]. Acta Armamentarii, 2012, 33(12): 1510-1515.
- [10] 郭嗣琮. 基于结构元理论的模糊数学分析原理 [M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2004.
- GUO S C. Fuzzy structured element theory based on the principle of fuzzy mathematical analysis [M]. Shenyang: Northeastern University Press, 2004.
- [11] 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.
- [12] EBERHART R C, SHI Y. Particle swarm optimization: Developments, applications and resources [C]//Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation, 2001: 81-86.
- [13] CRUZ J, CHEN G S, LI D X, et al. Particle swarm optimization for resource allocation in UAV cooperative control [C]//AIAA Guidance Navigation, and Control Conference and Exhibit, 2004: AIAA2004-5250.
- [14] 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): 29-31.
- 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): 29-31.
- [15] 瞿勇, 张建军, 宋业新. 多重纳什均衡解的粒子群优化算法 [J]. 运筹与管理, 2010, 19(2): 52-55.
- QU Y, ZHANG J J, SONG Y X. Particle swarm optimization algorithm for solving multiple Nash equilibrium solutions [J]. Operations Research and Management Science, 2010, 19(2): 52-55.