2017 年 6 月 军事运筹与系统工程 Jun. 2017
第 31 卷第 2 期 Military Operations Research and Systems Engineering Vol.31 No.2

无人机集群作战指挥决策博弈分析

王宏[1,2] 李建华[1]

(1.空军工程大学 信息与导航学院,陕西 西安 710077; 2.西安通信学院,陕西 西安 710106)

摘　要: 无人机集群作战是未来空中战场的主要战术样式。通过分析无人机空战中对阵双方的攻防策略及其毁伤概率,建立无人机集群作战的完全信息博弈模型; 并对传统求解博弈模型的纳什均衡的粒子群算法进行了适应性改进,给出了此类博弈的纳什均衡求解步骤,得到了无人机集群作战指挥决策博弈的混合策略纳什均衡解; 通过算例验证了算法的可行性及适应性,并分析了混合纳什均衡在无人机集群作战中的具体意义。

关键词: 无人机; 博弈论; 粒子群算法; 纳什均衡

中图分类号: E911; O225　**文献标志码:** A　**文章编号:** 1672-8211(2017)02-0011-06

1 引言

无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)作战是空中作战的发展趋势之一。美国国防部将无人机技术作为一项可以改变“战场规则”的颠覆性技术加以大力发展,并列入美军“第三次抵消战略”发展规划。无人机集群作战是未来无人机作战的主要样式,它将生物群体运动理论应用于无人机集群的系统控制,对地、对海实施电子干扰或发起赛博攻击,为有人机提供目标识别或瞄准辅助,甚至直接攻击目标。现有的陆基、海基防空手段均无法有效遏制无人机集群攻击。无人机的作战高度通常位于地面高炮或舰载火炮有效射程范围以外; 使用防空导弹拦截,成本较高; 信号干扰阻断、无线电劫持控制等反无人机电子战技术必须事先侦察到无人机控制信号,否则无法实施。专家分析未来战争中最能有效应对无人机集群攻击的将是另外一群无人机[1]。

当前,有关无人机集群作战方面的研究,主要集中在无人机编队飞行[2,3]、航迹规划[4]和分布式协同控制[5]等几个方面,针对无人机集群作战的指挥决策方面的研究主要集中在无人机攻击策略研究[6—13],归纳起来有以下特点: ①飞行控制技术研究多,而战术指挥研究少; ②个体近距格斗研究多,而集群对抗研究少; ③集群仿真实验多,而数形结合的指挥决策研究少; ④单方策略优化研究多,而双方策略对抗博弈研究少。无人机集群作战是对阵双方的冲突型决策行为,利用博弈理论可以较好地进行作战指挥决策分析,并能将传统方法中最优研究从仅考虑“单边”发展为“双边”兼顾,使得决策更贴近现实。

2 问题分析

无人机集群作战是由多架具备部分自主能力的无人机,在高速机间链路和外部信息平台的情报支援下遂行共同战斗任务的过程[10]。红蓝双方对抗中,若蓝方无人机在预警机的指挥下编队对红方地面导弹阵地准备发起攻击。红方利用情报预警侦察系统获悉这一消息,决心采用无人机集群对其

收稿日期: 2017-01-05; 修回日期: 2017-04-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61401499,61174162); 国家社会科学基金资助项目(14GJ003-172,12GJ003-130)

作者简介: 王宏(1979—),男,讲师,博士研究生,主要研究方向为军用无人机自组网作战运用; 李建华(1965—),男,教授,博士,博士生导师,主要研究方向为空天信息网络系统规划建设、作战运用、效能评估。

进行拦截。指挥控制中心根据空情态势为己方无人机集群选择最优的对抗策略,无人机在指挥控制中心的辅助下,自主协同完成作战任务。此过程涉及三个方面的问题:

(1) 双方战场信息掌握。准确及时的空情态势分析是无人机集群作战指挥决策的前提。对抗双方首先侦察收集对方集群的经纬度、高度、移动速度、数量规模、编队结构以及无人机的机型、火力配备等参数,进行敌我力量对比分析。随着雷达、卫星等侦察技术的不断发展,无人机集群获取空情信息的手段愈来愈丰富。一方面,集群内部利用 ad-hoc 网络技术形成无人机自组织网络,将侦察无人机搜集并处理过的敌情信息进行全网共享;另一方面集群还可以在指通机、预警机等空中大型信息情报节点以及天基雷达卫星的辅助指挥下完成对集群目标的侦察、判断、跟踪、锁定攻击直至效果评估一系列战术动作。由于对抗双方的信息技术发展水平不平衡以及作战决心不同等主观因素,导致红蓝双方的战场态势掌握不对等,掌握信息少的一方行动处处落后于信息多的一方,战场对抗态势完全演化为信息掌握多的一方的“独角戏”。为了深入研究红蓝双方无人机集群对抗策略选择问题,本文假设交战双方战场态势感知能力对等,作战决心都很坚定,双方都为争得先机不遗余力地收集情报,在信息域上没有先后、多少等差异,几乎同时采取各自对抗策略。

(2) 双方对抗策略选择。无人机集群交战前对抗双方策略选择多样化。无人机集群作战是在侦察型无人机信息共享与天基、陆基、海基的远程信息支援下,采取“干扰+攻击”战术,主要由电子干扰型和攻击型无人机编队完成的联合作战行动。电子干扰型无人机用于对敌通信系统和攻击系统实施干扰,使其指挥、导弹系统失灵,降低对方攻击的命中率,最大限度地保存己方战斗实力;攻击型无人机既可以攻击对方的攻击型无人机,直接打击对方的反击力量,也可以选择攻击对方的干扰型无人机,以便消除对方雷达干扰型无人机对己方攻击导弹的干扰威胁。在红蓝双方具备相同的战场态势感知能力的条件下,双方均知道彼此的无人机数量以及机型,但并不知道对方攻击型无人机对己方哪些无人机(电子干扰型或攻击型无人机)实施攻击。如何决定对抗策略,即如何进行目标火力分配是战术决策的关键。因此,红蓝双方的每架攻击型无人机有两个可选攻击策略:一是攻击对方攻击型无人机,二是攻击对方电子干扰型无人机。无人机集群对抗战术决策主要根据对方无人机数量及自己的攻击能力,决定目标攻击的火力分配。

(3) 双方决策收益估计。对抗双方不同的策略选择对应着不同的战场收益。针对对抗双方选择的策略进行对应的收益值评估,然后双方根据收益值的大小比较判定所选策略的优劣,最终做出最优决策。攻击型无人机打击不同的目标有不同的命中率和命中收益。对方的电子干扰型和攻击型无人机构成攻防兼备的作战整体:电子干扰型无人机搭载大量昂贵的电子战装备,具有较强的反导干扰能力;攻击型无人机空中机动性强,配备小型、大威力的精确制导武器。因此针对两类不同的攻击目标,不同的火力分配会产生不同的战场收益。博弈论通常采用收入和支出的差值来表示收益函数,商战中此种方法无可厚非,而在军事战争中却不能简单地套用歼敌和自损的数量差值来衡量收益,“歼敌一千,自损八百”显然不同于“零伤亡,而歼敌二百”。战争中对阵双方在尽可能加剧对方战损程度的同时,总是想尽办法减少己方的伤亡,如果利用歼敌与自损的比值,即己方每损失一个单位的力量给敌人造成的损伤数量,更能客观地体现战争的“效费比”。

基于上述分析,无人机集群对抗中的红蓝两方就是战场博弈中的两个局中人,无人机集群对抗可以看成两个局中人同时采取策略进行博弈。

3 博弈模型

无人机集群协同对抗博弈可以表示为:

$$G\langle Uavs,\{S,S'\},\{\mu_r,\mu_b\}\rangle \quad (1)$$

式(1)中,$Uavs$ 表示局中人集合,即 $Uavs=\{$红方,蓝方$\}$;$\{S,S'\}$ 表示所有局中人纯策略的组合,其中 S 表示红方策略集合,$S=\{s_0,s_1,\cdots,s_N\}$,$s_0,s_1,\cdots,s_N$ 为红方所有的 $N+1$ 个策略,S' 表示蓝方策略集合,$S'=\{s'_0,s'_1,\cdots,s'_n\}$,$s'_0,s'_1,\cdots,s'_n$ 为蓝方所有的 $n+1$ 个策略 $\langle\mu_r,\mu_b\rangle$ 为所有局中人的收益函数集合,μ_r 为红方的收益函数 $\mu_r(s_i,s'_j)$,μ_b 为蓝方的收益函数 $\mu_b(s_i,s'_j)$,它们的自变量为对抗双方的策

略组合，每一个收益函数是由红蓝双方策略组合到实数集合的一个映射，即 μ_r: $S \times S' \to R$，μ_b: $S \times S' \to R$，“×”是指局中人策略集合的笛卡尔积。

3.1 假设条件

假设 1: 对抗双方的无人机能够完全根据指挥执行战术决策，将双方的无人机集群理解为完全理性的局中人，即局中人始终选取收益值较大的策略。

假设 2: 战场态势与对方的完全理性均为共同知识，即双方彼此了解对方实力及可能选取的所有策略集合(但不知道对方究竟选择哪个策略)，且彼此知道对方是完全理性的。

假设 3: 对抗双方的无人机性能及其所携带的导弹不存在“代差”，技术指标与作战能力相当，仅存在数量与使用策略上的区别。

3.2 策略集合

对于集合 $Uavs$ 的局中人 i($i = 1$ 为红方，$i = 2$ 为蓝方)，假设其拥有无人机的总数为 $N_i = T_i + D_i$，其中攻击型无人机有 T_i 架，干扰型无人机有 D_i 架; $T_i = A_{i1} + A_{i2}$，A_{i1} 为攻击对方攻击型无人机的己方无人机数量; A_{i2} 为攻击对方干扰型无人机的己方无人机数量。局中人 i($i = 1,2$) 的第 j 个策略为{以 A_{ij1} 架无人机攻击对方攻击型无人机，以 A_{ij2} 架无人机攻击对方干扰型无人机}。因此局中人 i 的策略总数为 $T_i + 1$ 个，两个局中人的策略组合共计 $(T_1 + 1) \times (T_2 + 1)$ 个。

3.3 收益函数

设双方的攻击型无人机在发射导弹时可能遭到对方导弹攻击造成毁伤，概率均记为 P_0，每个攻击型无人机被击落的损失为 a; 双方干扰型无人机实施雷达干扰时，也可能被击落，概率记为 P_1，每个干扰型无人机被击落的损失为 b。若编队中有无人机实施雷达干扰时，无人机毁伤概率有所降低，衰减函数[14]为 $K^{-\frac{N_{def}}{N_{all}}}$，其中 $K > 1$ 为干扰衰减常数，N_{def} 为防守者数量，N_{all} 为编组中无人机数量。则双方的收益函数计算如下:

记红方的歼敌为 u_r^2，

$$u_r^2 = u_{r_1}^2 + u_{r_2}^2 \tag{2}$$

式(2)中，$u_{r_1}^2$ 为击落对方攻击型无人机给对方造成的损失，$u_{r_2}^2$ 为击落对方干扰型无人机给对方造成的损失。

$$u_{r_1}^2 = T_2(1 - (1 - P_0 \cdot K^{-\frac{D_2}{N_2}})^{A_{11}}) \cdot a \tag{3}$$

$$u_{r_2}^2 = D_2(1 - (1 - P_1 \cdot K^{-\frac{D_2}{N_2}})^{A_{12}}) \cdot b \tag{4}$$

记蓝方的歼敌为 u_b^2，其中:

$$u_b^2 = u_{b_1}^2 + u_{b_2}^2 \tag{5}$$

式(5)中，$u_{b_1}^2$ 为击落对方攻击型无人机给对方造成的损失，$u_{b_2}^2$ 为击落对方干扰型无人机给对方造成的损失。

$$u_{b_1}^2 = T_1(1 - (1 - P_0 \cdot K^{-\frac{D_1}{N_1}})^{A_{21}}) \cdot a \tag{6}$$

$$u_{b_2}^2 = D_1(1 - (1 - P_1 \cdot K^{-\frac{D_1}{N_1}})^{A_{22}}) \cdot b \tag{7}$$

显然，红方的歼敌即是蓝方的自损，蓝方的歼敌即是红方的自损。记红方的自损为 u_r^1，则 $u_r^1 = u_b^2$; 记蓝方的自损为 u_b^1，则 $u_b^1 = u_r^2$。

红方的收益函数 μ_r 表示红方的“效费比”，即通过“歼敌”与“自损”的比值表示红方每付出一个单元的损失给蓝方造成的损失情况，因此红方的收益定义为:

$$\mu_r = \frac{u_r^2}{u_r^1} \tag{8}$$

同理可得蓝方收益函数:

$$\mu_b = \frac{u_b^2}{u_b^1} \tag{9}$$

因此，红蓝双方的收益矩阵为:

		蓝方		
		s_0'	s_1'	…
红方	s_0	(μ_{r00}, μ_{b00})	(μ_{r01}, μ_{b01})	…
	s_1	(μ_{r10}, μ_{b10})	(μ_{r11}, μ_{b11})	…
	…	…	…	…

注: μ_{r00} 和 μ_{b00} 分别表示博弈策略组合为 (s_0, s_0') 时红方和蓝方的收益。

4 模型的纳什均衡

博弈的纳什均衡(Nash Equilibrium)求解一直以来都是博弈论的研究热点问题。1951 年，纳什首次提出纳什均衡，并运用不动点原理证明了 n 个局中人的非合作博弈纳什均衡解的存在性[15,16]，但他并没有针对纳什均衡的求解方法做进一步研究。围绕纳什均衡求解出现了诸如上策均衡法、劣策剔除法、单纯型剖析法、牛顿算法等算法，但由于纳什均衡求解通常是一个 NP - Hard 问题[17]，普通

的最优化算法通常难以得到解。近些年,随着各种各样智能算法的提出和改进,人们发现使用粒子群优化(Particle Swarm Optimization,PSO)算法等智能算法往往能得出理想解,体现出较强的优越性[18]。本文利用改进的 PSO 算法求解无人机集群协同对抗博弈的纳什均衡。

4.1 混合策略纳什均衡

无人机集群协同对抗博弈一般不存在纯策略均衡解,博弈的纳什均衡分析通常采用混合策略均衡。博弈中红方的策略集合 $S=\{s_0,s_1,\cdots,s_N\}$,蓝方的策略集合 $S'=\{s'_0,s'_1,\cdots,s'_n\}$,设定义在 S 上的混合策略为 $x=\{(x_0,x_1,\cdots,x_N)\mid x_j\geqslant 0,\sum_{j=1}^{N}x_j=1\}$,即红方以概率 $x_0,x_1,\cdots,x_N$ 选择策略 $s_0,s_1,\cdots,s_N$;同理定义在 S' 上的混合策略为 $x'=\{(x'_0,x'_1,\cdots,x'_n)\mid x'_j\geqslant 0,\sum_{j=1}^{n}x'_j=1\}$,则博弈的一个混合策略组合可以记为 $X=\{x,x'\}$。此时红方的期望收益为 $\mu_r=xA_{N\times n}x'^{\mathrm{T}}$,$A_{N\times n}$ 为红方的纯策略收益矩阵;蓝方的期望收益为 $\mu_b=xB_{N\times n}x'^{\mathrm{T}}$,$B_{N\times n}$ 为蓝方的纯策略收益矩阵。

为了得到本文纳什均衡求解的充分必要条件,首先给出下面定义及定理,最后得到本文博弈纳什均衡的充分必要条件。

定义 混合策略纳什均衡 设一个有 n 个局中人参与的非合作博弈,局中人 $i(1\leqslant i\leqslant n)$ 的纯策略记为 $s^i=\{s_1^i,s_2^i,\cdots,s_{m_i}^i\}$,$i$ 的混合策略定义为 $x_i=\{(x_{i1},x_{i2},\cdots,x_{im_i})\mid x_{ij}\geqslant 0,\sum_{j=1}^{m_i}x_{ij}=1\}$,即局中人以 x_{ij} 的概率选取纯策略 s_j^i,$1\leqslant j\leqslant m_i$。混合策略组合 $X^*=\{x_1^*,x_2^*,\cdots,x_n^*\}$ 是 n 个局中人非合作博弈的纳什均衡,如果 X^* 满足 $\mu_i(X^*)\geqslant\mu_i(x_i,X_{-i}^*)$ $(i=1,2,\cdots,n)$,其中 μ_i 表示 i 的收益函数,$X_{-i}^*=\{x_1^*,\cdots,x_{i-1}^*,x_{i+1}^*,\cdots,x_n^*\}$,即单个局中人改变策略,其收益不会增加[17]。

定理 混合策略纳什均衡的充要条件 混合策略 $X^*=\{x_1^*,x_2^*,\cdots,x_n^*\}$ 是 n 个人非合作博弈的纳什均衡的充分必要条件是:对于任意局中人 $i(1\leqslant i\leqslant n)$ 的每一个纯策略 $s_j^i(1\leqslant j\leqslant m_i)$,$\mu_i(X^*)\geqslant\mu_i(s_j^i,X_{-i}^*)$ $(1\leqslant j\leqslant m_i)$[18]。

推论 无人机集群博弈纳什均衡的充要条件 $X^*=\{x^*,x'^*\}$ 是本文无人机集群作战指挥决策博弈的纳什均衡的充分必要条件是:

$$\begin{cases}x^*A_{N\times n}x'^{*\mathrm{T}}\geqslant A_{i\cdot}x'^{*\mathrm{T}} & 1\leqslant i\leqslant N\\ x^*B_{N\times n}x'^{*\mathrm{T}}\geqslant x^*B_{\cdot j} & 1\leqslant j\leqslant n\end{cases}\tag{10}$$

式(10)中,$A_{i\cdot}$ 表示红方收益矩阵 A 的第 i 个行向量,$B_{\cdot j}$ 表示蓝方收益矩阵 B 的第 j 个列向量。

4.2 PSO 算法

PSO 算法最早于 1995 年由 Eberhart 和 Kennedy 率先提出,它源于鸟群搜索觅食[17]的基本思想。在 n 维空间中,每个粒子的位置和速度可以看作 n 维向量,粒子 i 的位置 $X_i=\{x_1,x_2,\cdots,x_n\}$,速度 $V_i=\{v_1,v_2,\cdots,v_n\}$。根据目标函数定义一个适应值函数,每个粒子都有一个适应值,并且知道自己目前的位置 X_i 和自己所经历过的最好的位置,记为 p_{best}(对应最好适应值),此外每个粒子还知道到目前为止整个粒子群找到的最好位置,记为 g_{best}(对应 p_{best} 中最好适应值)。算法首先初始化一群粒子的位置 X_0,通过不断改变 V_i,在迭代中比较 (p_{best},g_{best}) 来更新自己位置 X_i。每次迭代依据下列公式进行。

$$V_i^{k+1}=V_i^k+c_1r_1(p_{best}^k(i)-X_i^k)+c_2r_2(g_{best}^k-X_i^k)\tag{11}$$

$$X_i^{k+1}=X_i^k+V_i^{k+1}\tag{12}$$

式(11)中,c_1 和 c_2 为学习因子,用来调节个体位置最好粒子和全局位置最好粒子移动方向的最大步长,是将粒子搜索区域推向 p_{best} 和 g_{best} 的加速选项。c_1 代表粒子的自身认知能力,若 $c_1=0$,模型仅保留社会属性,粒子的收敛速度或许会加快,但因为缺乏自身局部的搜索,对于较为复杂的问题,容易陷入局部最优的陷阱;c_2 代表粒子的社会认知能力,若 $c_2=0$,模型仅保留自身认知能力,缺失社会认知能力。粒子之间缺乏交互信息的机制,搜索必然是盲目的、随机的,算法的收敛速度会很慢,很难得到满意的最优解。通常取 $c_1=c_2=2$,r_1 和 r_2 为 $(0,1)$ 之间服从均匀分布的随机数。

4.3 算法改进

为增强算法的收敛性,通常采用惯性因子调节的方式[19],将迭代公式中 V_i^k 乘动态惯性因子 ω,具体公式如下:

$$V_i^{k+1}=\omega V_i^k+c_1r_1(p_{best}^k(i)-X_i^k)+c_2r_2(g_{best}^k-X_i^k)\tag{13}$$

$$X_i^{k+1}=X_i^k+V_i^{k+1}\tag{14}$$

$$\omega = \omega_{max} - k\frac{\omega_{max} - \omega_{min}}{k_{max}} \tag{15}$$

式(13)—(15)中,ω 为惯性权重,ω_{max} 表示最大惯性权重,ω_{min} 表示最小惯性权重,k_{max} 表示最大迭代次数,k 表示当前迭代次数,ω 是 k 的动态线性递减函数。

4.3.1 惯性因子的调整

惯性因子的主要作用是使粒子保持运动惯性,使迭代具有搜索空间的扩展能力。在迭代初期,扩展能力要求较强,可以采用较大的惯性因子,随着迭代的继续,对扩展能力的要求逐步降低,可以采用较小的惯性因子,因而惯性因子应为当前迭代次数 k 的减函数,经比较发现线性函数好于凸函数,但差于凹函数,因此对 ω 进行如下微调:

$$\omega = \omega_{max} - \sqrt{\frac{k}{k_{max}}}(\omega_{max} - \omega_{min}) \tag{16}$$

4.3.2 学习因子的调整

c_1 体现粒子自身认知能力,c_2 代表粒子的社会认知能力,根据鸟群觅食特点分析知 c_1 取值可以先大后小,c_2 取值先小后大,开始阶段每个小鸟需要更多的主动意识,应设置较大的 c_1,整个群体社会属性要求较小,可以采用较小 c_2,觅食过程中逐步减小 c_1,逐渐增大 c_2。

$$c_1 = 2 - \frac{k}{k_{max}}, c_2 = 2 + \frac{k}{k_{max}}, c_1 + c_2 = 4 \tag{17}$$

根据式(10),算法中适应度函数定义如下:

$$\begin{aligned} f(X) = &\max\{\max_{1\leqslant i\leqslant N}\{A_i.x^{\mathrm{T}} - xA_{N\times n}x^{\mathrm{T}}\},0\} \\ &+ \max\{\max_{1\leqslant j\leqslant n}\{xB_{.j} - xB_{N\times n}x^{\mathrm{T}}\},0\} \end{aligned} \tag{18}$$

根据上文推论可得,混合策略 $X^* = \{x^*, x'^*\}$ 是红蓝双方博弈的纳什均衡的充分必要条件是:$\exists X^* = \{x^*, x'^*\}$,使得 $f(X^*) = 0$,而对于 $\forall X \neq X^*$,$f(X) > 0$。

4.4 算法步骤

(1) 初始化算法的参数值。包括最大惯性权重 ω_{max}、最小惯性权重 ω_{min}、最大迭代次数 k_{max}、粒子规模 N 以及 $f(X)$ 的收敛精度 ε。

(2) 随机生成局中人的初始化混合策略组合 X_0 及速度 V_0。

(3) 根据式(18)计算粒子的适应度,将当前的每个粒子的适应值与其经过的最好位置 p_{best} 作比较,如果较好,则替换 p_{best},并将 p_{best} 对应的位置信息保存。

(4) 将 p_{best} 与全体粒子的适应度最小值 g_{best} 比较,如果较好,则替换 g_{best},保存当前 g_{best} 对应位置。

(5) 根据式(16)计算惯性权重 ω。

(6) 根据式(13)、(14)、(16)、(17)调整粒子的速度 V_i 和位置 X_i。

(7) 检验精度 ε 和最大迭代次数 k_{max} 是否满足,不满足则转步骤(3),满足便退出执行。

5 算例分析

设红方侦察到蓝方发射了 5 架无人机准备发动集群攻击,其中 3 架攻击型无人机、2 架干扰型无人机。目前红方可投入战斗的无人机总数为 5 架,其中 2 架攻击型无人机、3 架干扰型无人机。为方便说明问题,假设红蓝双方无人机性能基本相同,几乎没有差别。

对于本问题,红方共有 3 种策略:$S = \{s_0, s_1, s_2\}$,其中 $s_0 = \{0,2\}$,$s_1 = \{1,1\}$,$s_2 = \{2,0\}$。蓝方共有 4 种策略:$S' = \{s_0', s_1', s_2', s_3'\}$,其中 $s_0' = \{0,3\}$,$s_1' = \{1,2\}$,$s_2' = \{2,1\}$,$s_3' = \{3,0\}$。双方策略组合共有 12 个。

令攻击型无人机被击毁概率 $P_0 = 60\%$,干扰型无人机被击毁的概率为 $P_1 = 50\%$,干扰衰减常数 $K = \mathrm{e}$,攻击型无人机价值 $a = 1$,干扰型无人机价值 $b = 1.5$,则双方的收益值见表 1,表 1 中策略交叉处的元素,前者表示红方收益,后者表示蓝方收益。表 1 中带有下划线元素表示当对方采取固定策略时己方变化策略所能获得的最大收益值,在本文的双方收益矩阵中,没有一个收益向量的两个分量下面都有画线,因此本问题没有纯策略纳什均衡解。

表 1 红蓝双方收益矩阵

	S_0'	S_1'	S_2'	S_3'
s_0	0.6019,<u>1.6613</u>	<u>0.8001</u>,1.2498	0.7169,<u>1.3950</u>	1.1986,0.8343
s_1	<u>0.7954</u>,1.2572	0.7930,<u>1.2610</u>	<u>0.9473</u>,1.0556	<u>1.5839</u>,0.6313
s_2	0.6932,1.4425	0.6911,<u>1.4469</u>	0.8256,1.2112	1.3805,<u>0.7244</u>

红方的纯策略收益矩阵是:

$$A = \begin{bmatrix} 0.6019 & 0.8001 & 0.7169 & 1.1986 \\ 0.7954 & 0.7930 & 0.9473 & 1.5839 \\ 0.6932 & 0.6911 & 0.8256 & 1.3805 \end{bmatrix}$$

蓝方的纯策略收益矩阵是:

$$B = \begin{bmatrix} 1.6613 & 1.2498 & 1.3950 & 0.8343 \\ 1.2572 & 1.2610 & 1.0556 & 0.6313 \\ 1.4425 & 1.4469 & 1.2112 & 0.7244 \end{bmatrix}$$

以 $x = \{x_0, x_1, x_2\}$ 表示红方混合策略，以 $x' = \{x'_0, x'_1, x'_2, x'_3\}$ 表示蓝方混合策略，则由式(18)得适应度函数为：

$$f(X) = \max\{\max_{1\leq i\leq 3}\{A_{i\cdot}x'^{\mathrm{T}} - xA_{3\times4}x'^{\mathrm{T}}\}, 0\} + \max\{\max_{1\leq j\leq 4}\{xB_{\cdot j} - xB_{3\times4}x'^{\mathrm{T}}\}, 0\}$$

使用本文改进的 PSO 算法求解，其中粒子规模 $Num = 10$，最大迭代次数 $k_{max} = 300$，最大惯性权重 $\omega_{max} = 0.9$，最小惯性权重 $\omega_{min} = 0.4$，精度 $\varepsilon = 10^{-1}$，计算结果见表 2。表 2 中数据的意义是：如果红蓝双方多次重复对阵，则 $\{x_0, x_1, x_2\}$ 和 $\{x'_0, x'_1, x'_2, x'_3\}$ 分别表示红、蓝方选取策略 $\{s_0, s_1, s_2\}$ 与 $\{s'_0, s'_1, s'_2, s'_3\}$ 的频率。如果红、蓝双方一次对阵，则 $\{x_0, x_1, x_2\}$ 和 $\{x'_0, x'_1, x'_2, x'_3\}$ 分别表示红、蓝方选取策略 $\{s_0, s_1, s_2\}$ 与 $\{s'_0, s'_1, s'_2, s'_3\}$ 的偏好程度。

表 2　红蓝双方无人机集群对抗博弈计算结果

序号	迭代次数	红方混合策略	蓝方混合策略	适应度函数
1	21	(0.10,0.59,0.31)	(0.06,0.37,0.29,0.28)	0.0312
2	18	(0.09,0.68,0.23)	(0.11,0.35,0.31,0.22)	0.0485
3	19	(0.21,0.49,0.30)	(0.07,0.42,0.38,0.13)	0.0611
4	26	(0.13,0.51,0.36)	(0.08,0.44,0.39,0.09)	0.0398
5	22	(0.08,0.71,0.21)	(0.10,0.45,0.35,0.10)	0.0460

若红方采用 $x = \{x_0, x_1, x_2\} = (0.10, 0.59, 0.31)$，蓝方选择 $x' = \{x'_0, x'_1, x'_2, x'_3\} = (0.06, 0.37, 0.29, 0.28)$，此时红方的期望收益 $\mu_r = xA_{N\times n}x'^{\mathrm{T}} = 0.9988$。观察表 1 发现，仅从红方单边利益出发，选择策略 s_1，因为此时红方收益为 1.5839，但此时蓝方不会选择 s'_3，而会选择 s'_1(因为当红方选择策略 s_1 时，蓝方选择 s'_1 的收益为最大值 1.2610)，使得红方的最终收益只有 0.7930，差于红方混合策略时的 0.9988。同理，蓝方混合策略的意义可以得到类似的结论。

6　结束语

无人机集群作战指挥决策问题涉及飞行控制、信息支援、战术决策等领域内容，具有复杂度高、综合性强的特征。本文基于博弈论在对抗双方战场信息对等的条件下构建了无人机集群对抗毁伤模型，分析了对抗双方的攻击目标分配策略，给出了模型纳什均衡求解的步骤。下一步，将在构建对抗双方掌握信息能力不对等条件下就无人机集群作战指挥决策问题做更深入的研究。

参考文献

[1] 张洋. 美军研究小型无人机集群攻击作战方式[N]. 中国航空报，2016-5-14(A02).

[2] 夏庆军，张安，张耀中. 大规模编队空战队形优化算法[J]. 控制理论与应用，2010，27(10)：1418-1424.

[3] 王晓光，章卫国，陈伟. 无人机编队超视距空战决策及作战仿真[J]. 控制与决策，2015，30(2)：328-336.

[4] 杨少环，高晓光，符小卫. 基于博弈论的无人机搜索路径规划[J]. 系统工程与电子技术，2011，33(10)：2254-2259.

[5] 周欢，赵辉，韩统. 基于规则的无人机集群飞行与规避协同控制[J]. 系统工程与电子技术，2016，38(6)：1374-1380.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 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)：26-30.

[10] 罗德林，张海洋，谢荣增，等. 基于多 Agent 系统的大规模无人机集群对抗[J]. 控制理论与应用，2015，32(11)：1495-1503.

[11] 陈侠，魏晓明，徐光延. 多无人机模糊态势的分布式协同空战决策[J]. 上海交通大学学报，2014，48(7)：907-915.

[12] 颜骥，李相民，刘立佳，等. 基于 Memetic 算法的超视距协同空战火力分配[J]. 北京航空航天大学学报，2014，40(10)：1425-1430.

[13] 傅莉，王晓光. 无人战机近距空战微分对策建模研究[J]. 兵工学报，2012，33(10)：1210-1217.

[14] 薛羽，庄毅，张友益，等. 基于启发式自适应离散差分进化算法的多 UCAV 协同干扰空战决策[J]. 航空学报，2013，34(2)：343-351.

[15] NASH J. Non cooperative games[J]. Annals of Mathematics，1951，54(2)：286-295.

[16] 马洪宽. 博弈论[M]. 上海：同济大学出版社，2015.

[17] 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.

[18] JAISWAL N K. Military operations research：quantitative decision making[M]. Netherlands：Kluwer Academic Publishers，2015.

[19] 黄席樾，向长城，殷礼胜. 现代智能算法理论及应用[M]. 北京：科学出版社，2009.