

## 基于多agent系统的大规模无人机集群对抗

罗德林<sup>†</sup>, 张海洋, 谢荣增, 吴顺祥

(厦门大学 航空航天学院, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 本文将多agent系统引入到大规模无人机集群对抗决策系统中, 给出了基于多agent系统的大规模无人机集群对抗决策方法. 将机群中的每个无人机视为一个独立agent, 建立了无人机运动模型, 为无人机设计了独立的个体行为集, 并针对每种行为给出了决策方法. 通过每个个体无人机对其邻域环境的作用, 涌现出宏观的集群对抗(作战)效果. 使用MATLAB仿真软件对所设计的大规模无人机集群对抗方法进行了仿真, 验证了所设计的基于多agent系统的大规模无人机集群对抗决策方法的有效性.

**关键词:** 多agent系统; 无人机; 集群对抗; 决策

**中图分类号:** TP237      **文献标识码:** A

## Unmanned aerial vehicles swarm conflict based on multi-agent system

LUO De-lin<sup>†</sup>, ZHANG Hai-yang, XIE Rong-zeng, WU Shun-xiang

(School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen Fujian 361005, China)

**Abstract:** The multi-agent system theory is employed to build the maneuvering decision-making model for large-scale unmanned aerial vehicle (UAV) swarm conflict. In this model, each UAV in the swarm is regarded as one independent agent. With the establishment of UAV motion equation, individual behavior set and action criterion, each UAV keeps on interacting with its neighboring environment and the UAV swarm conflict outcome emerges eventually from such a process. Simulation experiments are conducted using MATLAB and the results demonstrate the effectiveness of the built decision-making model for UAV swarm conflict.

**Key words:** multi-agent system; unmanned aerial vehicles; swarm conflict; decision making

### 1 引言(Introduction)

随着航空技术的发展, 无人机 (unmanned aerial vehicle, UAV) 凭借成本低廉、机动灵活以及隐蔽性强、不会造成飞行员伤亡等特点, 被越来越广泛用于代替有人驾驶飞机执行侦查、监控、目标打击等军事任务. 但由于单架无人机执行任务和作战能力的局限性, 空战对抗中其生存能力受到的挑战也越来越大. 多无人机协同集群对抗是以具有社会属性的生物群体自组织机制(如对鸟群、蚁群、鱼群等生物行为的模拟)为基础的自主作战系统. 集群中的无人机依靠局部感知和对环境的相互作用决定单机运动状态, 使多个无人机对象构成集合以形成协调行动和互补能力, 故单机的局部行为就构成了多机全局行为的集群协同. 无人机集群可扩展单机作战任务能力以及提高多无人机集群的整体作战效能, 在其任务区域内飞行过程中的信息相互交汇帮助实现高程度的协作对抗, 避免和友机敌机发生碰撞, 从而在少量人员干预情况下完

成预期的任务目标. 多机协同空战的研究主要包括无人机空中协作、多无人机空-地协同作战等. 迄今, 研究人员进行了大量关于态势评估、目标分配等方面的研究: 通过层次分析和灰色关联法评估空战威胁指标权重<sup>[1]</sup>, 基于人工势场的态势评估方法以及不确定环境下的无人机空战态势的任务分配模型<sup>[2-3]</sup>. 无人机协同空战是作战双方策略的对抗、竞争, 或是面对局势的一种对策选择<sup>[4]</sup>, 所以决策方法的选择对空战的结果有重要的影响. 在不确定环境下, 影响图对策理论可解决一对一空战问题, 进一步而言利用多级影响图的决策建模可将一对一空战引申为多对一空战<sup>[5-6]</sup>. 但是目前这些方法一般适合于小规模无人机之间的作战或静态的目标分配, 而难以处理大规模无人机机群间的动态对抗.

多agent系统是一种大型协同工作系统, 其不同的agent分布在网络上且松散耦合, 这样可解决单个agent无法处理的问题. 实际中也有鱼群活动、雁群迁

移和蚁群觅食等类似多agent系统的例子. 大规模无人机的集群对抗可借鉴多agent系统的工作形式, 将无人机抽象为一个独立的agent, 给无人机集群飞行中最优编队算法的自动生成、有障碍和无障碍环境下的队形保持提供了方向<sup>[7-8]</sup>. 与此同时, 在多智能体系统框架下可以根据UAV、目标和战场信息解决多UAV协同任务分配下的实时性需求问题, 实现多智能体间的知识共享、计划和行动协调等通信行为<sup>[9-10]</sup>. 多agent技术具有的自组织能力、学习能力和推理能力, 为无人机集群间的对抗控制与决策提供了有效途径.

以复杂自适应系统理论和多agent建模仿真技术为基础的大规模作战对抗系统, 可通过智能体的交互描述战斗过程并灵活地构建一体化的信息网络, 这为大规模无人机的集群空战对抗研究开辟了一种有效的研究途径<sup>[11-12]</sup>. 本文引入了多agent系统的理论、空战态势评估方法和空战对抗理念, 将个体无人机视为独立的agent, 并设计了相应的行为集和决策方法, 以此建立大规模无人机对抗模型, 自适应地完成无人机集群之间的协同对抗过程. 对比参考文献<sup>[12]</sup>中基于单机攻击代价实现固定多对一目标的协同对抗, 本文给出的多agent系统的大规模无人机集群对抗方法可以规避不利目标、支援劣势的友机和巡航时寻找有利目标, 更有效地完成无人机集群的协同对抗, 涌现出宏观的集群对抗效果, 提升大规模无人机集群对抗作战效率, 仿真结果表明了该方法的有效性.

## 2 基于多agent系统的大规模无人机集群对抗决策总体框架 (The overall framework of UAV swarm conflict based on multi-agent system)

基于多个agent的系统可视为一种从底向上的系统, 其主要研究agent间的协同和相互操作性, 包括协调知识、目标、意图和规划等智能行为. 单个agent一般用于模拟单个生物智能行为, 只有较小的知识库, 故处理问题的能力较弱, 在处理复杂问题时往往求解困难甚至无法求解. 如果借鉴生物集群行为实现高智能社会的行为, 则可利用多个agent间的通信构建一个多agent体系统. 这样不仅能够克服单个agent的局限性, 而且交互通信可以确保所有agent获得关键信息和服务, 此外彼此相互依存和相互组织的关系能使该系统灵活地求解复杂问题.

本文采用基于多agent系统的方法, 实现了分布式的集群对抗决策控制. 基于多agent系统的无人机集群对抗决策总体框架如图1所示. 无人机集群对抗决策总体框架中, 多agent系统分为两层结构: 上层为multi-agents层, 由多个相互联系的个体agent构成, 主要实现个体agent之间的信息交互; 下层为个体agent的决策层, 无人机对采集当前的环境信息以及态势信

息进行综合评估, 根据评估结果选择作战行为集, 决策方法集从而进行机动的行为决策, 实现单机的对抗效果. 由于多agent系统上层结构中个体agent之间的信息交互作用, 友机能够根据实时态势支援处于不利态势的无人机, 则可涌现出宏观的集群对抗效果.

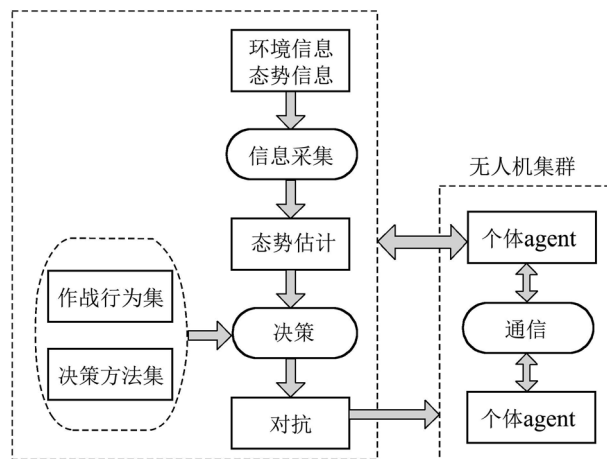


图 1 多agent系统集群对抗总体框架

Fig. 1 The overall framework of UAV swarm conflict based on multi-agent system

## 3 无人机集群的多agent设计 (Multi-agent design for UAV swarm)

### 3.1 个体agent运动模型 (Individual agent motion model)

无人机的运动状态可用如图2所示的位置与速度表示.

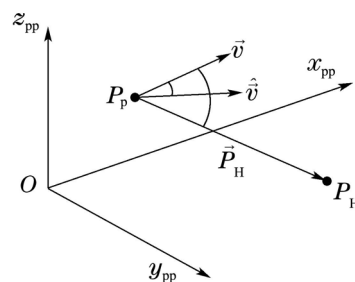


图 2 无人机agent运动状态示意图

Fig. 2 Motion state diagram for UAV agent

则3维空间中的无人机瞬时状态可表示为

$$Q = \begin{bmatrix} P_p \\ \vec{v} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中:  $P_p = [x_{pp} \ y_{pp} \ z_{pp}]$ 表示位置信息,  $\vec{v}$ 表示速度矢量. 若用 $\hat{Q}$ 表示下一时刻的无人机状态, 则

$$\hat{Q} = \begin{bmatrix} \hat{P}_p \\ \hat{\vec{v}} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

与2维平面相比, 无人机在3维空间中的运动方程更复杂, 可先将3维空间问题转化为2维平面问题.

由图2可见,在无人机下一时刻要到达的目标位置 $\vec{P}_H$ 已知的情况下,在3维空间中的运动实际上是 $\vec{v}$ 在与 $\vec{P}_H$ 构成的2维平面内飞行并做出速度大小与方向的调整.因此无人机在3维空间的运动可以转化成在2维平面 $Ox_a y_a$ 上的导引问题,如图3所示.

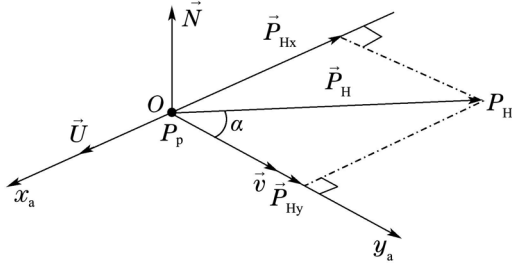


图3 无人机在2维平面中的运动

Fig. 3 The movement of UAV in two-dimensional plane

在图3中,以无人机位置为原点,以速度 $\vec{v}$ 方向为 $y_a$ 轴,以 $\vec{U}$ 为 $x_a$ 轴.其中 $\vec{U} = \vec{v} \times \vec{N}$ ,  $\vec{N} = \vec{v} \times \vec{P}_H$ ,  $\vec{P}_H$ 为无人机在下一时刻要到达的目标位置,  $\vec{P}_{Hx}$ ,  $\vec{P}_{Hy}$ 分别是 $\vec{P}_H$ 在 $x_a$ 轴,  $y_a$ 轴方向上的投影,  $\alpha$ 为 $\vec{v}$ 与 $\vec{P}_H$ 的夹角.则

$$\cos \alpha = \frac{\vec{P}_H \cdot \vec{v}}{|\vec{P}_H| \cdot |\vec{v}|}, \quad (3)$$

那么 $\vec{P}_H$ 在 $y_a$ 轴方向上的投影为

$$|\vec{P}_{Hy}| = |\vec{P}_H| \cos \alpha \frac{|\vec{v}|}{|\vec{v}|} = \frac{\vec{v} \cdot \vec{P}_H}{|\vec{v}|}. \quad (4)$$

同理可得,  $\vec{P}_H$ 在 $x_a$ 轴方向上的投影为

$$|\vec{P}_{Hx}| = |\vec{P}_H| \cos \alpha \frac{|\vec{U}|}{|\vec{U}|} = \frac{\vec{U} \cdot \vec{P}_H}{|\vec{U}|}, \quad (5)$$

则在2维平面 $Ox_a y_a$ 中,  $\vec{P}_H$ 的坐标表示为

$$P_{Ha} = \begin{bmatrix} |\vec{P}_{Hx}| \\ |\vec{P}_{Hy}| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\vec{U} \cdot \vec{P}_H}{|\vec{U}|} \\ \frac{\vec{v} \cdot \vec{P}_H}{|\vec{v}|} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

夹角 $\alpha$ 为

$$\alpha = \text{atan2}(|\vec{P}_{Hx}|, |\vec{P}_{Hy}|) - \text{atan2}(|\vec{v}_{ax}|, |\vec{v}_{ay}|), \quad (7)$$

其中 $\vec{v}_{ax}$ ,  $\vec{v}_{ay}$ 分别为速度矢量 $\vec{v}_a$ 的两个分量,则偏转角为

$$\alpha_T = \text{sgn} \alpha \min(|\alpha|, \alpha_{\max}), \quad (8)$$

其中 $\alpha_{\max}$ 为一个决策步长内的最大偏转角.

根据2维平面 $Ox_a y_a$ 与3维坐标系 $Ox_{pp} y_{pp} z_{pp}$ 的关系可得

$$\hat{P}_p = P_p + \vec{v}_N \cdot |\vec{v}| \cos \alpha_T + \vec{U}_N \cdot |\vec{v}| \sin \alpha_T, \quad (9)$$

其中 $\vec{v}_N$ ,  $\vec{U}_N$ 分别是 $\vec{v}$ 和 $\vec{U}$ 的标准化向量,则无人机飞

行方向偏转后新的速度方向为

$$\vec{v} = \hat{P}_p - P_p. \quad (10)$$

此外,无人机的速度大小控制用无人机的加速度 $a_{\text{up}}$ 和减速系数 $a_{\text{down}}$ 表示如下:

无人机加速情况下的速度控制为

$$\hat{\vec{v}} = \begin{cases} a_{\text{up}} \cdot \vec{v}, & |\vec{v}| < v_{\max}, \\ a_{\text{down}} \cdot \vec{v}, & |\vec{v}| \geq v_{\max}. \end{cases} \quad (11)$$

无人机减速情况下的速度控制为

$$\hat{\vec{v}} = \begin{cases} a_{\text{up}} \cdot \vec{v}, & |\vec{v}| < v_{\min}, \\ a_{\text{down}} \cdot \vec{v}, & |\vec{v}| \geq v_{\min}, \end{cases} \quad (12)$$

其中 $v_{\max}$ 和 $v_{\min}$ 分别为系统设置的无人机最大速度和最小速度.

### 3.2 Agent协作(Agent collaboration)

多agent系统作为一种典型的采用分布式控制的复杂系统,其构成要素没有受到统一的外部控制.各agent间的交互仅依赖其局部观测信息,而不依赖全局模式. Agent个体间通过通信与协作,从而实现系统层的整体功能.在大规模无人机集群对抗中的集群涌现行为包括无人机的聚集和分离.

无人机的聚集行为是指无人机在运动过程中,会自发朝友机方向靠拢的行为.本文将除本机外的所有无人机的相对机群中心设置为所有友机位置的平均值.用数学公式表示如下:

$$P_{ci} = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1 \text{ and } j \neq i}^n P_{pj}, \quad (13)$$

其中 $P_{ci}$ 表示相对于第 $i$ 架无人机的友机群中心点,  $n$ 表示无人机总数,  $P_{pj}$ 表示除第 $i$ 架无人机外的其他友机的位置坐标.

无人机的分离行为是指在无人机自发聚集过程中为避免部分友机间的距离太小甚至相撞而采取的一种保护措施,可以采用人工势场法实现.

## 4 大规模无人机集群对抗决策 (Decision making for large-scale UAV swarm conflict)

### 4.1 空战态势估计 (Air combat situation assessment)

由于本文讨论的大规模无人机集群对抗双方的无人机性能均完全一样,故可采用角度优势函数<sup>[13]</sup>对空战威胁态势做出估计.态势估计函数如下:

$$K_{ij} = 1 - \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{\pi}, \quad (14)$$

其中:  $K_{ij}$ 表示第 $i$ 架无人机与第 $j$ 架目标无人机的威胁态势估计值,  $\alpha_1$ 是第 $i$ 架无人机滞后角,  $\alpha_2$ 是第 $j$ 架目标无人机的超前角.

此外,对无人机的空战环境的态势判定分为优势

和劣势两种情况, 判定依据如下:

$$\text{Situation} = \begin{cases} \text{advantage,} & K_{ij} \geq K_{\text{Threshold}}, \\ \text{disadvantage,} & K_{ij} < K_{\text{Threshold}}, \end{cases} \quad (15)$$

其中  $K_{\text{Threshold}}$  表示威胁态势估计判定阈值。

## 4.2 作战行为集设计 (The design of combat behavior-set)

在基于多agent系统的大规模集群对抗中, 无人机个体依据任务和环境信息进行独立的决策. 因此在多无人机协同空战决策时, 必须为所有无人机设计一个属于自己的行为集, 且无人机个体的行为需满足如下要求:

- 无人机能够完成对特定目的地的巡航任务;
- 无人机与友机能够保持安全距离, 不掉队, 不相撞;
- 攻击目标无人机, 必要时能够支援友方无人机. 本文无人机的作战行为集设计如下:

$$\text{Action}_i = \{A_1, A_2, A_3, A_4, A_5\},$$

其中:  $A_1$  代表巡航,  $A_2$  代表接近目标,  $A_3$  代表远离目标,  $A_4$  代表攻击目标,  $A_5$  代表支援友机.

## 4.3 Agent 行为决策方法 (Agent behavioral decision methods)

无人机个体行为集 Action 中的 5 种行为的决策方法设计如下:

- $A_1$ —巡航.

若无人机飞行过程中未发现任何敌方目标, 此时无人机的行为设置为朝预设目的地飞行, 则巡航模式下无人机目标位置矢量为

$$P_H = P_{\text{presupposed destination}}. \quad (16)$$

- $A_2$ —接近目标.

若无人机巡航过程中探测到敌方目标, 但该目标仍处于自身火力攻击距离之外, 无人机需对目标敌机进行态势估计. 若态势估计的结果为优势, 则做出接近目标的决策.

当无人机同时探测到多个目标时, 需对所有的目标进行态势估计. 根据态势估计值确定各个目标的权重, 然后依据式(17)确定本次决策值  $P_{Hi}$ .

$$P_{Hi} = \sum_{j=1}^n K_w^j W_j P_{ij}, \quad (17)$$

其中:  $P_{Hi}$  表示无人机  $i$  经过决策后的目标位置,  $n$  表示无人机  $i$  探测到的多目标数量,  $W_j$  表示目标  $j$  的权重因子,  $P_{ij}$  表示探测到的目标  $j$  与无人机  $i$  的位置矢量之差,  $K_w^j$  表示矢量方向,  $K_w^j$  的计算公式如下:

$$K_w^j = \begin{cases} 1, & \text{Situation}_{ij} \text{ is advantage,} \\ -1, & \text{Situation}_{ij} \text{ is disadvantage,} \end{cases} \quad (18)$$

则目标  $j$  的权重因子  $W_j$  计算公式如下:

$$W_j = \frac{|K_{ij}|}{\sum_{k=1}^n |K_{ik}|}. \quad (19)$$

- $A_3$ —远离目标.

若无人机巡航过程中探测到敌方目标, 且态势估计的结果为劣势, 无论敌方目标是否已进入无人机的攻击范围, 都必须做出远离目标的决策. 与接近目标的决策过程相同, 当探测到的目标有多个时, 需对所有目标进行威胁态势估计, 计算各个目标权重因子, 然后确定本次决策值  $P_H$ .

- $A_4$ —攻击目标.

若目标进入无人机火力攻击距离之内, 且无人机与目标敌机进行态势评估的结果为优势, 则需对该目标无人机进行火力打击. 若满足该条件的有多个目标, 选取优势程度最大的目标.

- $A_5$ —支援友机.

当无人机探测到多个目标, 优先攻击对友机构成极大威胁的目标. 具体做法是根据行为 a) 至 d) 的决策方法, 完成所有无人机的行为决策后, 检查所有无人机的最低威胁态势估计值, 设置危险警报值  $K_{\text{dangerous}}$ . 若某架无人机相较于某个敌方目标的威胁态势估计值低于  $K_{\text{dangerous}}$ , 则针对该危险目标, 查找能够探测到该危险目标且对该目标威胁态势为优势的所有友机. 根据查找结果列表, 修改列表中无人机的行为决策为接近或攻击该危险目标.

## 5 仿真实例 (Simulation example)

为验证该决策模型的有效性, 本文利用 MATLAB 对多无人机协同空战决策模型进行了仿真验证.

### 5.1 初始条件 (Initial condition)

空战场景设置为红方无人机机群意图攻击蓝方基地. 蓝方探测到红方机群动向, 出动无人机机群进行拦截. 双方各 30 架无人机在  $10 \text{ km} \times 18 \text{ km} \times 10 \text{ km}$  的战场空间对抗, 每架无人机的参数设置如表 1 所示.

表 1 无人机参数设置

参数	描述	数值/单位
$v_{\text{max}}$	无人机最大速度	150 m/s
$v_{\text{min}}$	无人机最小速度	80 m/s
$a_{\text{up}}$	加速系数	1.1
$a_{\text{down}}$	减速系数	0.9
$\alpha_{\text{max}}$	最大转向角速度	0.1 rad/s
$d_{\text{min}}$	无人机最小间距	100 m
Attack <sub>distance</sub>	火力攻击距离	2000 m
$W_{\text{max}}$	无人机有效射程	1500 m
$K_{\text{Threshold}}$	态势估计阈值	0.5

### 5.2 仿真结果(Simulation result)

为了验证本文方法的有效性,在对抗中红蓝双方采取相同的策略.以蓝方采取的策略为例,蓝方每架无人机对探测到的红方无人机进行空战态势估计.根据态势评估的结果以及红方是否在火力攻击距离范围,参考综合因素,选择作战行为集中的决策方案,动态的做出以下几种机动:巡航、接近目标、远离目标、攻击目标或者是支援友机.对双方的无人机集群协同对抗过程进行仿真,可得某次随机试验的对抗轨迹如图4所示.

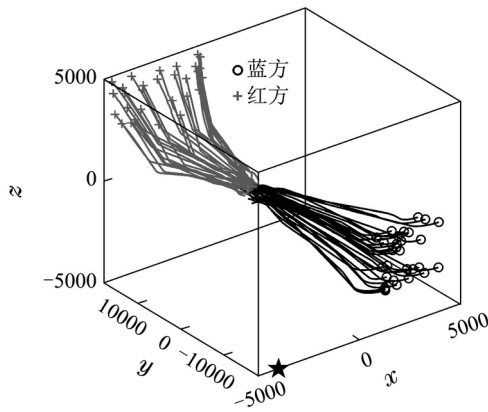


图4 集群对抗无人机轨迹图

Fig. 4 Trajectory of UAV swarm conflict

从图4可以看出,红方在朝蓝方基地(星形位置)逼近时,同时探测到蓝方无人机机群,因此改变攻击目标为蓝方无人机机群.最终双方在空中相遇,对抗之后双方无人机的存活数量如图5所示.

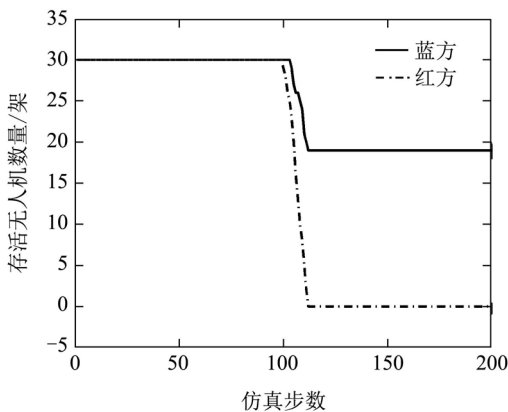


图5 双方存活无人机数量变化

Fig. 5 The evolution of survival numbers for both sides of UAV swarm

由图5的无人机存活数量图可知,在该大规模无人机集群对抗仿真中,红方无人机全部被歼灭,蓝方无人机获得了最终胜利.为了更直观分析无人机集群对抗过程中个体无人机的决策情况,以蓝方1号和2号无人机,以及红方1号无人机为对象,分析3架无人机在

对抗过程中的存活情况,如图6所示.其纵坐标值为1表示无人机存活,值为0则表示无人机已被击落.

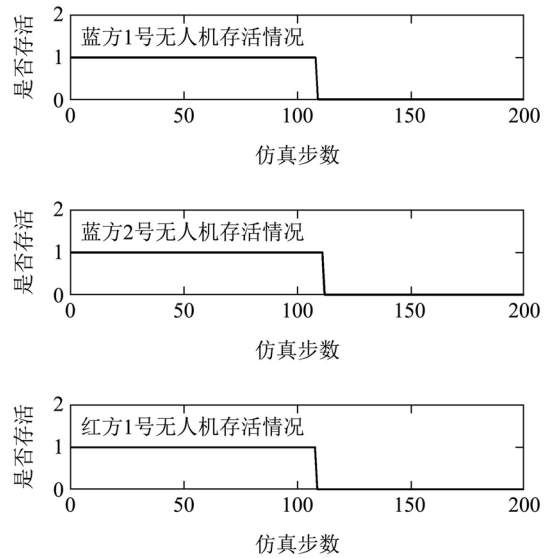


图6 无人机存活情况

Fig. 6 The survival situation of the UAVs

以上3架无人机在对抗过程中的行为决策过程如图7所示.

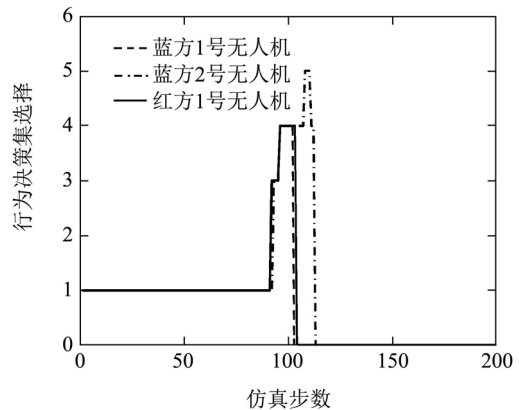


图7 无人机行为决策过程

Fig. 7 The behavior decision-making process of the UAVs

图7中纵坐标1, 2, 3, 4, 5分别对应行为决策Action中的 $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5$ ,纵坐标值为0则表明该无人机已被击落.由图7分析可知,红方1号和蓝方2号机动过程中采取的策略如下:

红方1号无人机:首先行为决策选择值设定为1:巡航模式,寻找可探测目标.巡航过程探测到目标但态势估计处于劣势,则行为决策值设定为3:远离目标,寻找新目标.探测到态势评估为优势且在火力攻击距离范围的目标,行为决策值设定为4:攻击目标,对该蓝方无人机进行攻击.

蓝方2号无人机:首先行为决策选择值设定为1:巡航模式,寻找可探测目标.巡航过程探测到目标但态势估计处于劣势,则行为决策值设定为3:远离目

标, 寻找新目标. 探测到多个目标且态势评估为优势, 但其中有使友机发出危险警报行为的目标, 决策值设定为5: 支援友机, 选择接近或攻击该红方无人机.

此外, 为了验证无人机模型是否符合空中对抗的要求, 本文定义了一个无人机平均空间占用值的概念. 它表示能够覆盖所有无人机的空间球形与机群中无人机个数的比值. 由图8的平均空间占用值曲线可以看出在无人机聚集过程中, 无人机平均空间占用值平滑下降, 聚集效果显著, 并且在仿真最后阶段达到稳定, 即无人机机群没有出现过密集.

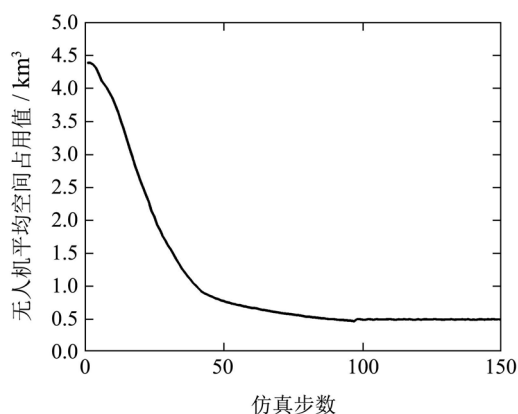


图 8 无人机平均空间占用值曲线

Fig. 8 Curve of average UAV space occupation value

图9表示在无人机分离行为的作用下, 无人机机群中距离最近的两个无人机的距离大小变化曲线. 可以看出在无人机聚集的同时, 无人机间的距离依旧能够保持在安全距离之内.

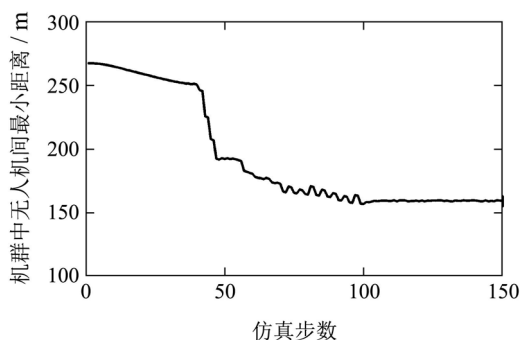


图 9 机群中无人机间最小距离变化曲线

Fig. 9 Curve of the shortest distance between any two UAVs in the swarm

为了验证双方采取相同协同决策方案时的大规模无人机集群对抗结果, 对多无人机协同空战对抗进行1500次仿真试验的统计结果如图10所示.

图10的结果表明, 大规模无人机集群协同对抗的空战决策时, 在同等空战环境下, 当决策参数设置完全相同时, 即当双方都采用完全相同的协同策略时, 进行1500次空战模拟, 蓝方获胜738次, 红方获胜762次, 结果符合双方获胜次数比例约为1:1的预期.

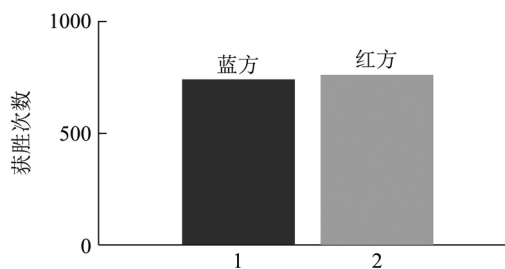


图 10 1500 次仿真试验结果统计

Fig. 10 The experiment statistic result from 1500 simulations

由此可知, 对于无人机集群协同对抗的空战决策, 在双方规模相同、无人机性能以及双方协同策略一致的情况下, 单次试验红蓝双方的获胜情况存在随机性, 多次独立重复试验红蓝双方获胜次数的统计比例趋于1:1. 改变其中某一方的协同策略, 如果统计结果是另一方的获胜次数明显较多, 那么就能体现出其协同策略的优势及有效性.

为了验证上述预期, 将红方的协同策略改为文献[12]提到的代价函数比较法: 设定多个红方无人机能同时攻击一个目标的数目上限, 比较每架红方无人机对蓝方无人机及其基地的攻击代价, 攻击代价较小的就设定其为该架红方无人机的攻击目标. 分别独立进行了100次、500次、1000次、1500次的试验, 其统计结果如图11所示.

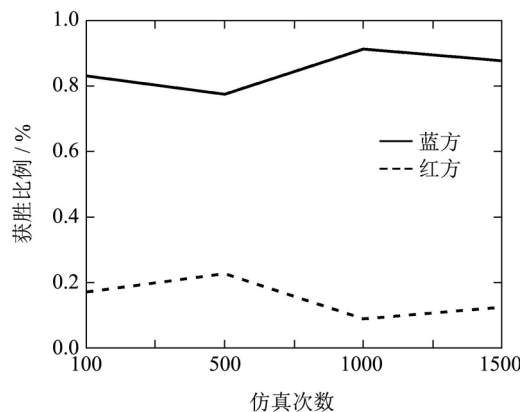


图 11 仿真100, 500, 1000和1500次的试验结果统计

Fig. 11 The experiment statistic result by conducting 100, 500, 1000 and 1500 runs of simulations

大规模无人机集群协同对抗的空战决策中, 在同等空战环境下, 当无人机性能相同时, 蓝方采取本文的方法, 红方采用文献[12]的方法, 100次空战模拟, 蓝方获胜83次, 红方获胜17次, 500次空战模拟, 蓝方获胜387次, 红方获胜113次, 1000次空战模拟, 蓝方获胜912次, 红方获胜88次, 1500次空战模拟, 蓝方获胜1314次, 红方获胜186次. 由图11可知, 蓝方的获胜比例在80%左右, 远大于红方的20%. 该统计结果说明: 与文献[12]相比, 本文设计的基于多agent系统的大规模无人机集群对抗决策方法具有明显的优势和有效性.

## 6 结论(Conclusions)

本文建立的基于多agent的空战对抗决策模型,能够有效地在大规模无人机集群对抗中做出协同空战决策. 无人机集群中的无人机个体能够根据实时的空战态势,进行空战态势估计,并进行对应的行为决策. 运用该决策方法能够使无人机集群在空战对抗过程中涌现出强大的对抗能力,仿真实验表明了该方法的可行性和有效性.

## 参考文献(References):

- [1] 王网琴,姚敏,赵敏. 多无人机协同攻击目标决策 [J]. 指挥控制与仿真, 2015, 36(2): 9 – 13.  
(WANG Wangqin, YAO Min, ZHAO Min. Research on cooperative attack decision of unmanned aerial vehicles for air combat [J]. *Command Control & Simulation*, 2015, 36(2): 9 – 13.)
- [2] 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 – 334.  
(WANG Xiaoguang, ZHANG Weiguo, CHEN Wei. BVR air combat decision making and simulation for UAV formation [J]. *Control and Decision*, 2015, 30(2): 328 – 334.)
- [3] 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 – 913.  
(CHEN Xia, WEI Xiaoming, XU Guangyan. Multiple unmanned aerial vehicle decentralized cooperative air combat decision making with fuzzy situation [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2014, 48(7): 907 – 913.)
- [4] 王昱,章卫国,傅莉,等. 基于精英改选机制的粒子群算法的空战纳什均衡策略逼近 [J]. 控制理论与应用, 2015, 32(7): 857 – 865.  
(WANG Yu, ZHANG Weiguo, FU Li, et al. Nash equilibrium strategies approach for aerial combat based on elite re-election particle swarm [J]. *Control Theory & Applications*, 2015, 32(7): 857 – 865.)
- [5] 钟麟,佟明安,钟卫. 影响图对策在 multi 协同空战中的应用 [J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(4): 450 – 453.  
(ZHONG Lin, TONG Ming'an, ZHONG Wei. Application of multi stage influence diagram game theory for multiple cooperative air combat [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2007, 33(4): 450 – 453.)
- [6] 刘正敏,昂亮,姜长生. 多级影响图在无人机群协同空战机动决策中的应用 [J]. 电光与控制, 2010, 17(10): 10 – 13.  
(LIU Zhengmin, ANG Liang, JIANG Changsheng. Application of multistage influence diagram in maneuver decision-making of ucav cooperative combat [J]. *Electronics Optics & Control*, 2010, 17(10): 10 – 13.)
- [7] 罗小元,邵士凯,关新平,等. 多智能体系统最优持久编队自动生成 [J]. 控制理论与应用, 2013, 30(2): 163 – 170.  
(LUO Xiaoyuan, SHAO Shikai, GUAN Xinping, et al. Automatic generation of optimal persistent formation for multi-agent systems [J]. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(2): 163 – 170.)
- [8] 肖刘. 基于多智能体的多无人机编队算法 [J]. 航空电子技术, 2014, 45(2): 4 – 7.  
(XIAO Liu. Multiple UAV formation arithmetic based on multi-agent [J]. *Avionics Technology*, 2014, 45(2): 4 – 7.)
- [9] 廖沫,陈宗基,周锐. 基于MAS的多UAV协同任务分配设计与仿真 [J]. 系统仿真学报, 2007, 19(10): 2313 – 2317.  
(LIAO Mo, CHEN Zongji, ZHOU Rui. Design and simulation of multi-UAV coordinated task allocation based on mas [J]. *Journal of System Simulation*, 2007, 19(10): 2313 – 2317.)
- [10] 柳玉,文家焱. 基于多智能体的战术仿真系统体系结构设计方法 [J]. 兵工自动化, 2014, 33(6): 22 – 26.  
(LIU Yu, WEN Jiayan. Architecture design of tactics simulating system based on multi-agents [J]. *Ordnance Industry Automation*, 2014, 33(6): 22 – 26.)
- [11] ANDREW I. *Multi-agent Based Simulation of Combat* [M]. Singapore: World Scientific Press, 2003.
- [12] UWEGAERTNER. *UAV swarm tactics: an agent-based simulation and Markov process analysis* [D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2013.
- [13] 姜长生,王建刚,王俊. 多机协同空战中的威胁评估与目标分配 [J]. 火力与指挥控制, 2008, 33(11): 8 – 12.  
(JIANG Changsheng, WANG Jiangan, WANG Jun. Research on threat assessment and target distribution for multi-aircraft cooperative air combat [J]. *Fire Control and Command Control*, 2008, 33(11): 8 – 12.)
- [14] 刁兴华,方洋旺,肖冰松,等. 基于多智能体联盟的多机协同空战任务分配 [J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(9): 1268 – 1275.  
(DIAO Xinghua, FANG Yangwang, XIAO Bingsong, et al. Task allocation in cooperative air combat based on multi-agent coalition [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2014, 40(9): 1268 – 1275.)
- [15] 姚敏,王绪芝,赵敏. 无人机群协同作战任务分配方法研究 [J]. 电子科技大学学报, 2013, 42(5): 723 – 727.  
(YAO Min, WANG Xuzhi, ZHAO Min. Cooperative combat task assignment optimization design for unmanned aerial vehicles cluster [J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2013, 42(5): 723 – 727.)
- [16] HU J W, ZHAO X. Distributed cooperative control for deployment and task allocation of unmanned aerial vehicle networks [J]. *IET Control Theory & Applications*, 2013, 7(11): 1574 – 1582.
- [17] 杨斯博,李敏强. 一个基于自组织多agent系统的智能控制与决策模型 [J]. 天津大学学报, 2012, 45(10): 903 – 911.  
(YANG Sibao, LI Minqiang. An intelligent control and decision making model based on self-organizing multi-agent system [J]. *Journal of Tianjin University*, 2012, 45(10): 903 – 911.)

## 作者简介:

**罗德林** (1968–), 男, 博士, 副教授, 研究方向为飞行器制导与控制、无人机协同控制和计算智能方法, E-mail: luodelin1204@xmu.edu.cn;

**张海洋** (1991–), 男, 硕士研究生, 研究方向为飞行器制导与控制, E-mail: zhanghaiyang91@163.com;

**谢荣增** (1988–), 男, 硕士研究生, 研究方向为飞行器制导与控制, E-mail: xierongzeng2013@163.com;

**吴顺祥** (1967–), 男, 博士, 教授, 研究方向为灰色系统、模式识别和智能决策系统, E-mail: wsx1009@163.com.