

# 基于狼群角色匹配-劳动分工机制的 无人机集群空战策略

张庆昌<sup>1,2</sup>, 梁晓龙<sup>1,2\*</sup>, 杨爱武<sup>1,2</sup>, 吴傲<sup>1,2</sup>, 王宁<sup>1,2</sup>

(1. 空军工程大学航空集群技术与作战应用实验室, 西安, 710051; 2. 陕西省电子信息系统综合集成重点实验室, 西安, 710051)

**摘要** 针对无人机集群在空战任务中的角色动态切换问题, 提出了受狼群启发的无人机集群空战角色匹配-任务分工方法, 提高了应对复杂空战环境的动态任务执行能力。首先, 通过分析狼群围捕行为特性, 得到三种狼群个体特性, 进而给出狼群角色匹配-劳动分工模型。然后, 基于无人机集群和狼群在行为机制上的相似性, 将狼群的分工机制映射到无人机集群中, 提出了无人机集群角色匹配-任务分工模型。最后, 针对不同任务分工下的目标分配问题, 分别建立了攻击和制导任务的目标分配模型。仿真表明所提出的角色匹配-任务分工方法能够有效解决空战角色动态切换问题, 提高了整体空战能力。

**关键词** 无人机集群; 空战策略; 狼群行为; 角色匹配-任务分工

**DOI** 10.3969/j.issn.2097-1915.2022.04.013

**中图分类号** V279 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2022)04-0081-08

## UAV Swarm Air Combat Strategy Based on Wolf Group Role Matching and Labor Division Mechanism

ZHANG Qingchang<sup>1,2</sup>, LIANG Xiaolong<sup>1,2\*</sup>, YANG Aiwu<sup>1,2</sup>, WU Ao<sup>1,2</sup>, WANG Ning<sup>1,2</sup>

(1. Aviation Swarm Technology and Operational Application Laboratory, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; 2. Shaanxi Province Lab of Meta-Synthesis for Electronic & Information System, Xi'an 710051, China)

**Abstract** In view of role dynamic switching of heterogeneous UAV swarm in air combat tasks, a wolf inspired role matching task division method of UAV swarm in air combat is proposed to improve the dynamic task execution ability to deal with complex air combat environment. Firstly, three individual characteristics of wolves are obtained by analyzing the hunting behavior characteristics of wolves, and the role matching labor division model of wolves is given. And then, based on the similarity of behavior mechanism between UAV swarm and wolf group, the division mechanism of wolf group is mapped to UAV swarm, and a role matching task division model of UAV swarm is proposed. Finally, in view of the target allocation problems under different task division, the target allocation models of attack and guidance tasks are established respectively. The simulation results show that the proposed role matching task division method can effectively solve the problem of dynamic role switching in air combat and improve the overall air combat capability.

**收稿日期**: 2022-02-21

**基金资助**: 国家自然科学基金(61703427)

**作者简介**: 张庆昌(1994—), 男, 山东菏泽人, 硕士生, 研究方向为群体智能。E-mail: david\_zhang@163.com

**通信作者**: 梁晓龙(1981—), 男, 江苏徐州人, 教授, 博士生导师, 研究方向为航空集群理论与技术、空管智能化等。E-mail: afeu\_lxl@sina.com

**引用格式**: 张庆昌, 梁晓龙, 杨爱武, 等. 基于狼群角色匹配-劳动分工机制的无人机集群空战策略[J]. 空军工程大学学报, 2022, 23(4): 81-88. ZHANG Qingchang, LIANG Xiaolong, YANG Aiwu, et al. UAV Swarm Air Combat Strategy Based on Wolf Group Role Matching and Labor Division Mechanism[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2022, 23(4): 81-88.

**Key words** UAV swarm; combat strategy; wolf pack behavior; role matching-task division

未来空战朝着无人化、网络化和多维化的方向发展,作战场景更加复杂,作战内涵更加丰富,作战方式更加多样<sup>[1]</sup>。单个无人机在执行任务时有鲁棒性差、效率不高和容错性不足等缺点。相比之下,无人机集群通过自组织协同机制,产生作战能力涌现,具有更高的鲁棒性和容错性。在集群空战任务中,合理的任务分工和目标分配机制能够使集群协调有序地完成作战任务,对作战效能的发挥具有重要作用。生物集群具有高度智能的任务分工和目标分配机制,能够为无人机集群空战策略提供借鉴和支撑。

狼群是靠团队合作捕食猎物的高级群体,具有严格的等级结构,是一种机会主义捕食群体<sup>[2-3]</sup>。文献[2]通过分析狼群跟踪和包围行为,研究了狼群的认知和协作特性,并将其应用到无人机集群对抗决策中,对提升无人机集群系统对抗机制具有重要意义。针对无人机集群在感知范围受限的协同控制问题,文献[3]通过分析围捕猎物时狼群的空间布局和交互行为特征,提出了分层结构的狼群交互动力学模型,映射到无人机集群,得到无人机集群异构包围控制策略,提高了集群包围控制的可靠性。针对无人机集群协同多目标攻防决策问题,文献[4]通过狼群算法建立了攻防决策模型,得到基于狼群算法的多目标攻防满意决策方法,通过仿真验证了其在空战中具有可行性。文献[5]提取狼群的游走、召唤和围攻行为,并结合狼群算法,对起始点和终点都已知的航迹进行规划。结果显示运用基于狼群的无人机航迹规划方法能够有效躲避威胁,航迹路程短,所用时间少。

受自然界狼群生物学行为启发,本文建立了狼群的角色匹配-劳动分工模型,并结合空战中无人机集群分工机制,得到无人机集群角色匹配-任务分工模型。考虑到任务与目标的耦合关系,分别针对攻击和制导任务提出了目标分配模型,采用灰色关联分析法、专家评价法和匈牙利方法<sup>[6-9]</sup>求解目标分配方案。最后,通过仿真验证了所提出的角色匹配-任务分工和目标分配方法在无人机集群空战决策中的有效性和可行性。

## 1 狼群角色匹配-劳动分工机制

### 1.1 狼群协同围捕行为特性

狼群是有极强环境适应性和严格社会等级结构的强群。狼群围捕任务分工<sup>[10]</sup>如下:头狼是狼群首领,关系到狼群的生存和繁衍,负责组织和指挥猎捕

行动,为其他狼分配任务<sup>[11]</sup>。探狼仅次于头狼,是狼群精英,负责在某区域搜寻猎物,并将信息报告给头狼。猛狼具有较强攻击力,负责攻击猎物。巨狼充当随机因素,预先布设在逃跑路线上,负责袭扰猎物。基于不同角色匹配不同劳动的分工机制,不论是在强群攻击强群,如围捕力量强悍的牦牛群,还是强群攻击弱群,如猎捕机动性强的羚羊群时,均有较高的成功率。

通过对狼群围捕过程分析,可以总结出狼群个体具有专业性、均衡性和灵活性 3 种特性。

从个体的专业性来看,狼群个体自身特点不同,适合不同角色,承担不同任务。这有利于发挥每匹狼的优势,协作配合。也有利于强化某匹狼的学习能力。专业性使各个体趋于一种角色,有利于系统的稳定性,增强了整个团队的生存能力。

从个体承担任务的均衡性来看,在头狼分配任务时,会将任务分为若干个子任务,执行任务时每个狼都会承担适合自身的部分任务,且任务数量和难度相对均衡。任务的均衡性保证不会因为某一匹狼的受伤导致猎捕失败,同时也避免某匹狼的过度承担而造成损害。

从狼群个体的灵活性来看,随着围捕态势变化和外界任务需求改变,狼群个体会通过转变角色来满足需求变化。

### 1.2 狼群角色匹配-劳动分工原理

狼群在执行任务时多个任务既不交叉也不重合,彼此独立共同形成子任务集合。如图 1 所示,狼群个体进行角色匹配与任务分工的概念一致,由态势变化对角色进行调整是与任务需求变化一致,可以通过个体角色调整方案来反映狼群任务分工方案。在狼群个体获得任务后还需对相应任务的具体目标进行分配,进而狼群个体获得具体任务目标。

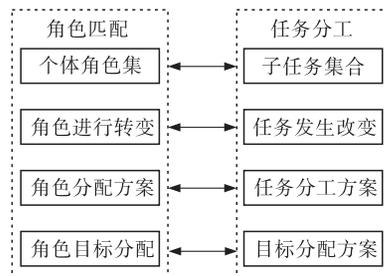


图 1 狼群角色匹配与任务分工的映射关系

具体过程以个体  $i$  进行说明,个体  $i$  初期角色为猛狼,个体变量  $x_i$  在区间  $(x_c \sim x_d)$  内。在围捕时,每个任务都会对个体  $i$  产生聚集作用  $\phi_g$  和分离作用  $\phi_s$ ,两者之比形成相对聚集作用  $\phi^A$ 。此时袭扰

任务的聚集作用  $\psi_k$  较大,分离作用  $\phi_s$  较小,其比值  $\psi^k$  是所有任务中最大的,达到触发条件后袭扰任务会形成调节量  $\Delta x_i$ ,改变个体变量  $x_i$  至区间  $(x_d \sim x_e)$  范围内,匹配巨狼角色,承担袭扰任务。转变为巨狼角色的数量根据羚羊群数量和队形而调整。

### 1.3 狼群角色匹配-劳动分工模型

假设狼群个体数量为  $N$ ,任务数量为  $M$ 。按任务流程排列任务,任务集合为  $A = [A_1, A_2, \dots, A_M]$ 。定义整个区间为  $(x_{0-1}, x_{M-M+1})$ ,并等分成  $M$  个区间,每个区间长度  $d$ :

$$d = \frac{x_{M-M+1} - x_{0-1}}{M} \quad (1)$$

根据前期经验对  $N$  匹狼进行初始化,初始化个体变量  $x_i(0) (i=1, 2, \dots, N)$ 。初始时刻任务分工的个体数量集合为  $N_A(0) = [N_A^1(0), N_A^2(0), \dots, N_A^M(0)]$ 。在执行任务过程中,任务  $A_k$  在时刻  $t$  对个体  $i$  的聚集作用为  $\Psi_{gi}^k(t)$ :

$$\Psi_{gi}^k(t) = \frac{\lambda_p V_T^k(t) d_{ai}^k(t)}{c_1 \overline{D_i^k(t)} + c_2 \overline{T_i^k(t)}} \quad (2)$$

式中: $\lambda_p$  为任务  $A_k$  的优先级系数; $V_T^k(t)$  为任务  $A_k$  的价值量; $d_{ai}^k(t)$  为个体  $i$  对任务  $A_k$  的相对需求; $\overline{D_i^k(t)}$  为去量纲后个体  $i$  与任务  $A_k$  的距离; $\overline{T_i^k(t)}$  为去量纲后个体  $i$  到达任务  $A_k$  时间; $c_1$  和  $c_2$  分别为  $\overline{D_i^k(t)}$  和  $\overline{T_i^k(t)}$  的相关系数。

任务  $A_k$  在时刻  $t$  对个体  $i$  的分离作用  $\psi_{si}^k(t)$ :

$$\psi_{si}^k(t) = \frac{z_k N_p^k(t)}{C_i^k (1 - \rho^k(t))} \quad (3)$$

式中: $z_k$  为任务  $A_k$  的复杂程度; $N_p^k(t)$  为时刻  $t$  完成任务  $A_k$  的个体数量; $C_i^k$  为个体  $i$  完成任务  $A_k$  的能力; $\rho^k(t)$  为  $t$  时刻任务  $A_k$  的完成度:

$$\rho^k(t) = \frac{\sum_{i=1}^{N_i^k(t)} \xi_i(t-1)}{M_A^k(t-1)} \quad (4)$$

式中: $M_A^k$  为  $t-1$  时刻需要执行任务  $A_k$  的目标数量; $\sum \xi_i(t-1)$  在  $t-1 \sim t$  时刻被执行任务  $A_k$  的目标数量。

时刻  $t$  相对聚集作用  $\psi_{gi}^{k*}(t)$  和调节量  $\Delta x_i(t)$ :

$$\begin{cases} \psi_{gi}^{k*}(t) = \arg \max[\psi_{gi}^{k*}(t) / \psi_{si}^{k*}(t)] \\ \Delta x_i(t) = |k^* - k| \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\psi_{gi}^{k*} / \psi_{si}^{k*}$  为任务  $A_k$  对个体  $i$  的相对聚集作用。 $k^*$  为  $M$  个任务中产生最大相对聚集作用的任务序号;调节量为  $\Delta x_i(t)$ 。在  $t+1$  时刻更新个体变量  $x_i(t+1)$ :

$$x_i(t+1) = \begin{cases} x_i(t) + \Delta x_i(t), & \psi_{gi}^{k*} > \Omega \cap k^* > k \\ x_i(t) - \Delta x_i(t), & \psi_{gi}^{k*} > \Omega \cap k^* < k \\ x_i(t) + \lambda_i \Delta x_i(t) \text{rand}(-1, 1), & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\Delta x_i(t)$  为调节量; $k$  为当前个体  $i$  承担的任务

序号; $\Omega$  为临界值,判断相对聚集作用  $\psi_{gi}^{k*}$  是否满足触发条件。 $\psi_{gi}^{k*} > \Omega$  时,则按以下原则对角色变量进行调整; $k^* > k$  时,调整后的任务序号  $k^*$  大于当前任务序号  $k$ ,调整后变量区间大于当前变量区间,则  $x_i(t) + \Delta x_i(t)$ 。 $k^* < k$  时,调整后的任务序号  $k^*$  小于当前任务序号  $k$ ,调整后变量区间小于当前变量区间,则  $x_i(t) - \Delta x_i(t)$ 。 $\psi_{gi}^{k*} \leq \Omega$  时, $\psi_{gi}^{k*}$  未满足触发条件,引入随机函数随机来改变当前个体变量, $\lambda_i$  为相关系数。调整后个体  $i$  对应的新角色和新任务为:

$$A' = \begin{cases} A_{k+\Delta k}, & x_{k+\Delta k}^l < x_i < x_{k+\Delta k}^u \\ A_{k-\Delta k}, & x_{k-\Delta k}^l < x_i < x_{k-\Delta k}^u \\ A_k, & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\Delta k = |k^* - k|$ ,  $x_{k+\Delta k}^l, x_{k+\Delta k}^u$  为任务  $A_{k+\Delta k}$  下限值和上限值。根据变量  $x_i(t+1)$  来匹配对应的角色,分配相应的任务。 $t+1$  时刻承担任务的个体数量集合为  $N_A(t+1) = [N_A^1(t+1), N_A^2(t+1), \dots, N_A^m(t+1)]$ ,基本模型流程如图 2 所示。

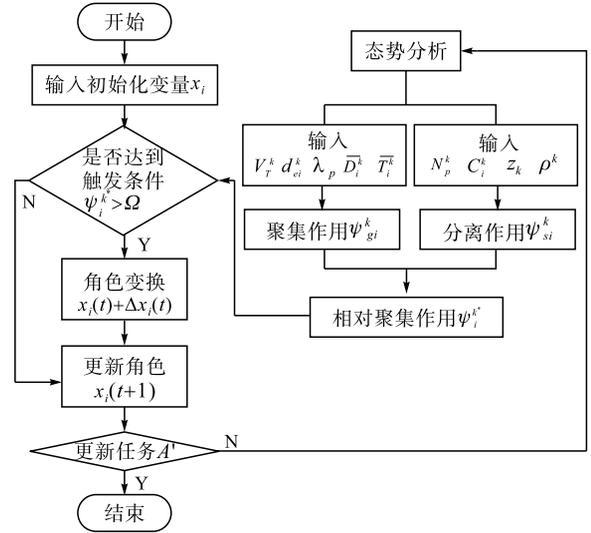


图2 基本模型流程图

## 2 狼群启发的无人机集群角色匹配-任务分工机制

### 2.1 狼群机制到无人机集群机制映射

在空战攻防演变中,根据各无人机任务流程,对应任务有指挥兼攻防、跟踪敌机、攻击敌机和导弹制导,然后根据自身性能将无人机集群角色分为指挥机、攻击无人机、制导无人机和跟踪无人机。将无人机设定为固定角色承担单一任务不利于战场态势的调整和无人机资源的有效利用。个体与个体特性相似,均具有专一性和灵活性;通过分析,狼群与无人机集群的行为相似,均是围捕攻击行为。通过狼群与无人机集群行为以及个体间相同特点建立映射关系,具体映射如图 3 所示。

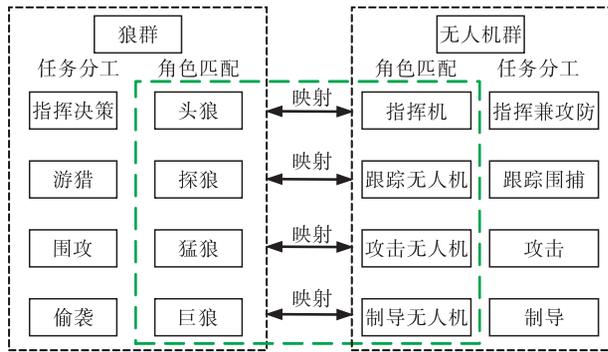


图3 狼群到无人机集群角色映射

### 2.2 无人机集群角色匹配-任务分工模型

在空战场演变过程中,如图4所示,首先获取环境信息和敌方信息,如战场位置,战场区域大小、敌方集群规模、飞机类型和飞机性能等。然后根据态势信息决策层会制定我方集群调整方案,更新任务层任务。无人机则根据需求变化和自身状况进行调整,在满足任务需求和调整到符合无人机自身状况的前提下,更新基于角色层的角色分配方案。

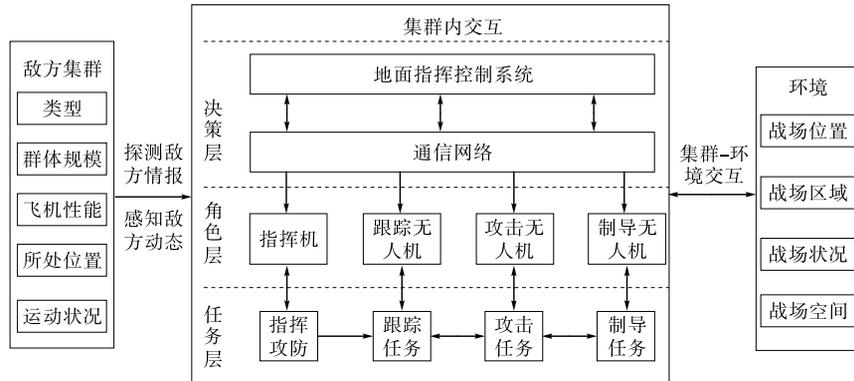


图4 无人机集群角色匹配-任务分工模型示意图

根据无人机集群角色匹配-任务分工模型有4类角色,指挥机角色的任务区间为(0~1);跟踪无人机任务区间为(1~2);攻击无人机角色任务区间为(2~3);制导无人机角色为对应的任务区间为(3~4)。假设在执行任务初始时刻,不同角色对应的数量为1,2,2,2。随着战场态势变化,敌我双方逐渐拉近,敌方无人机进入我方攻击区域,不同任务的需求量变为了1,1,4,1。之前匹配跟踪任务(跟踪无人机)和制导任务(制导无人机)的无人机转换为攻击无人机,承担需求大的攻击任务,从而对敌机进行攻击,示意图如图5所示。

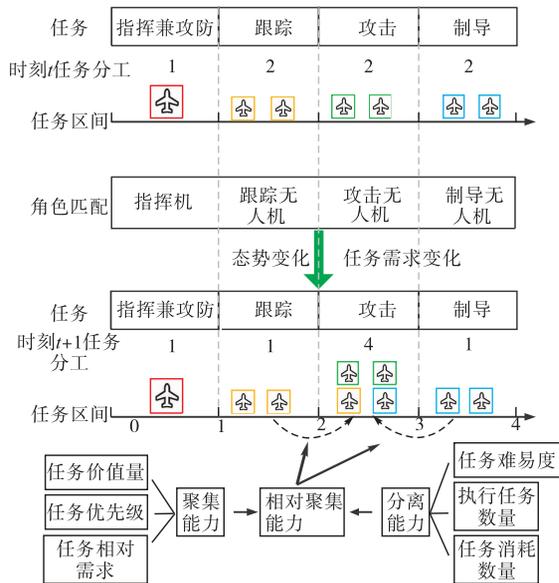


图5 任务变化和角色转变示意图

角色转变原理:根据任务的价值、优先级和相对需求等影响因素得到聚集作用  $\psi_k$ 。根据任务的难易程度、承担任务的无人机数量和任务消耗量等影响因素得到分离作用  $\psi_s$ 。 $\psi_k$  与  $\psi_s$  之比为相对聚集作用  $\psi^k$ , 相对聚集作用达到触发条件  $\psi_i^k > \Omega$  会产生调节量  $\Delta x_i(t)$ 。 $\Delta x_i(t)$  改变个体变量  $x_i(t)$ , 使下一时刻  $x_i(t+1)$  增加、减少或不变。个体变量  $x_i(t+1)$  在任务区间发生变化则匹配新角色, 承担新任务。角色转换分两种情况, 一种是当前角色完成了对应任务, 则转换为其他角色; 一种为在执行当前角色时, 其他角色需求增大, 满足两个条件即当其他角色大于当前角色相对吸引力和达到触发条件后, 进行角色转换, 上一未完成的任务根据分配方案重新进行分配。

### 3 无人机集群目标分配机制

通过借鉴狼群角色匹配-劳动分工机制, 提出了无人机集群空战角色匹配-任务分工模型, 能够根据战场态势变化实时调整集群个体的任务分工。在空战中, 针对具体目标进行有效打击对空战态势朝着有利于我方局势的方向发展具有重要意义。对于担负攻击和制导任务的无人机, 需要根据敌我态势进行合理的目标分配, 本节分别给出攻击和制导的目标分配策略。

### 3.1 攻击无人机目标分配策略

攻击无人机协同执行任务时,对攻击目标实时分配是有效攻击的前提。对空战场敌我双方对峙优势进行评估,包括空战态势优势和空战能力优势两个方面<sup>[12]</sup>。

图 6 为空战态势对比。从角度、高度差、相对距离和速度等方面来分析空战态势,构建效益值函数得到效益值。

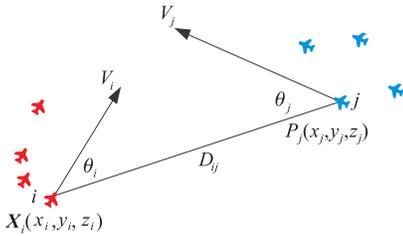


图 6 敌我态势分析图

1) 相对角度优势函数:

$$y_{\text{angl}} = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{\theta_j - \theta_i}{\pi} \right) \quad (8)$$

式中: $\theta_j$  为敌机  $j$  速度方向与两机连线的夹角; $\theta_i$  为我机  $i$  速度方向与两机连线的夹角。

2) 高度优势函数:

$$y_z = \begin{cases} 0.1, & z_{ij} \leq -5 \text{ km} \\ 0.55 + 0.09z_{ij}, & -5 \text{ km} < z_{ij} < 5 \text{ km} \\ 1, & z_{ij} \geq 5 \text{ km} \end{cases} \quad (9)$$

式中, $z_{ij} = z_i - z_j$ , 为我机与敌机的高度差。

3) 距离优势函数:

$$y_{\text{dis}} = e^{-((D_{ij}-d_0)/\tau)^2} \quad (10)$$

式中: $\tau = 2(R_{\text{max}} - R_{\text{min}})$ ,  $d_0 = \frac{1}{2}(R_{\text{max}} + R_{\text{min}})$ ,  $R_{\text{max}}$  为导弹最大射程,  $R_{\text{min}}$  为导弹最小射程;  $D_{ij}$  为敌机  $j$  与我机  $i$  之间的距离。

4) 速度优势函数:

$$y_{\text{vol}} = \begin{cases} 0.1, & V_i \leq 0.6V_j \\ \frac{V_i}{V_j} - 0.5, & 0.6V_j < V_i < 1.5V_j \\ 1, & V_j \geq 1.5V_i \end{cases} \quad (11)$$

式中: $V_i$  为我机  $i$  的速度;  $V_j$  为敌机  $j$  的速度。

5) 飞机类型效益值:

$$y_t = \begin{cases} p_1, & j \neq 0 \\ p_2, & j = 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中: $j=0$  为有人机,  $j \neq 0$  为无人机。空战态势效益函数  $y_{ij}^1$ :

$$\begin{cases} y_{ij}^1 = y_t(\omega_1^a y_{\text{dis}} + \omega_2^a y_z + \omega_3^a y_{\text{vol}} + \omega_4^a y_{\text{angl}}) \\ \omega_1^a + \omega_2^a + \omega_3^a + \omega_4^a = 1 \end{cases} \quad (13)$$

式中: $\omega_i^a (i=1, 2, 3, 4)$  为相关系数。

评估空战能力得到空战能力优势,主要由机动能力、攻击能力和探测能力等组成。空战能力优势函数  $y_{ij}^2$ :

$$\begin{cases} y_{ij}^2 = C/\max(C) \\ C = \epsilon_1 \epsilon_2 [\ln B + \ln(\sum A_1 + 1) + \ln(\sum A_2)] \end{cases} \quad (14)$$

式中: $C$  为作战效能;  $\epsilon_1, \epsilon_2$  为操纵效能系数和生存能力系数;  $B$  为机动参数;  $A_1$  为火力参数;  $A_2$  为探测能力参数。

总体效益函数  $Y_{ij}^1$ :

$$\begin{cases} Y_{ij}^1 = \omega_5 y_{ij}^1 + \omega_6 y_{ij}^2 \\ \omega_5^a + \omega_6^a = 1 \end{cases} \quad (15)$$

式中: $\omega_5^a, \omega_6^a$  为相关系数。

不同系数对效益函数的影响不同,通过采用客观评价和主观分析相结合的方式,即通过灰色关联度分析和专家评价结合得到客观实际的数据,结果如表 1。

表 1 攻击无人机目标分配相关系数

| 系数 | $\omega_1^a$ | $\omega_2^a$ | $\omega_3^a$ | $\omega_4^a$ | $\omega_5^a$ | $\omega_6^a$ |
|----|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 数值 | 0.3          | 0.35         | 0.15         | 0.2          | 0.285 7      | 0.714 3      |

得到相关系数后,计算得到攻击无人机目标分配效益函数值  $Y_{ij}^1$ , 并组成攻击目标分配矩阵  $\mathbf{Y} = (Y_{ij}^1)_{N_1 \times N'_1} (i=1, 2, \dots, N_1; j=1, 2, \dots, N'_1)$ 。  $N$  和  $N'_1$  分别为攻击无人机数量、攻击目标数量。通过匈牙利算法可以得到最优攻击目标分配方案,使攻击效益最大。

### 3.2 制导无人机目标分配策略

主动式雷达寻的制导的过程为飞机锁定目标,导弹发射后飞机照射目标进行制导,导弹进入末制导阶段自主制导,制导结束。这增加了我机受敌机威胁的危险,应用载机发射他机协同制导方法降低威胁。

协同制导优势包含相对威胁机  $j$  态势优势、相对制导导弹态势优势和制导机自身综合性能三方面。首先是敌我态势优势,应考虑相对距离、相对速度和相对夹角三方面<sup>[13]</sup>。相对距离优势函数:

$$y'_{\text{dis}} = e^{-3d/D_{\text{max}}} \quad (16)$$

式中: $d$  为载机与威胁机的距离;  $D_{\text{max}}$  为两机最大距离。由式(8)、式(11)和式(16),制导任务相对态势优势函数  $y_{ij}^3$ :

$$\begin{cases} y_{ij}^3 = \omega_1^s y'_{\text{dis}} + \omega_2^s y_{\text{vol}} + \omega_3^s y'_{\text{angl}} \\ \omega_1^s + \omega_2^s + \omega_3^s = 1 \end{cases} \quad (17)$$

式中: $\omega_1^s, \omega_2^s, \omega_3^s$  为相对系数。相对导弹优势函数:

$$y_m = \begin{cases} \frac{1}{2} \left( \frac{|\theta|}{180^\circ} + 1 - \frac{|\varphi|}{90^\circ} \right), & 0 \leq |\varphi| \leq 90^\circ \\ \frac{1}{2} \left( \frac{|\theta|}{180^\circ} + \frac{|\varphi|}{90^\circ} - 1 \right), & 90^\circ \leq |\varphi| \leq 180^\circ \end{cases} \quad (18)$$

式中: $\theta$ 为导弹与制导无人机连线的夹角; $\varphi$ 为制导无人机与导弹速度方向轴线的夹角。制导机自身综合性能函数:

$$y_{\text{self}} = y'_i u_i \quad (19)$$

式中: $y'_i$ 为制导飞机类型系数; $u_i$ 为制导飞机弹药量系数。制导优势函数为 $Y_{ij}^2$ :

$$\begin{cases} Y_{ij}^2 = \omega_1^g y_{ij}^2 + \omega_2^g y_m + \omega_3^g y_{\text{self}} \\ \omega_1^g + \omega_2^g + \omega_3^g = 1 \end{cases} \quad (20)$$

式中: $\omega_1^g$ 、 $\omega_2^g$ 、 $\omega_3^g$ 为相关系数。

与攻击目标函数系数求取和分配方法一致,得到 $\omega_i^g$  ( $i=1,2,\dots,6$ )数据,如表2所示。

表2 制导无人机目标分配相关系数

| 系数 | $\omega_1^g$ | $\omega_2^g$ | $\omega_3^g$ | $\omega_4^g$ | $\omega_5^g$ | $\omega_6^g$ |
|----|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 数值 | 0.3          | 0.4          | 0.3          | 0.46         | 0.23         | 0.31         |

获得制导目标效益值并组成制导目标分配矩阵 $\mathbf{Y}=(Y_{ij}^2)_{N_2 \times N'_2}$  ( $i=1,2,\dots,N_2; j=1,2,\dots,N'_2$ )。  $N_2, N'_2$ 分别为制导无人机数量和制导目标数量。通过匈牙利算法可以得到最优目标分配方案,使总体态势效益最大。

## 4 仿真分析

开展空战仿真验证,作战场地为 $300 \text{ km} \times 300 \text{ km}$ 的区域,战场中心为坐标原点,向右为 $x$ 轴正半轴,向上为 $y$ 轴正半轴。作战想定:红蓝双方均出动1架有人机和4架无人机,有人机与有人机、无人机与无人机的机动性能相同。共携有12枚空空导弹,其中有人机4枚,无人机各2枚。首先红蓝双方进行初始化,5 s后初始化结束,双方在战场空域内开始空战,敌我双方都可获得所有飞机数据。获胜规则为敌方有人机被击落或到达规定时间(20 min)我方战机损失少。设飞机初始高度 $9\ 000 \sim 10\ 000 \text{ m}$ ,速度 $0.9 \text{ Ma}$ 。

仿真实验为红方飞机在数量、载荷、雷达性能和机动性能均相同的情况下采用不同策略与蓝方进行对战。方案1采取无人机集群角色匹配-任务分工方法,方案2采取基于规则的固定角色方法。

基于无人机集群角色匹配-任务分工机制的红方对战蓝方时,角色匹配图见图7。

在空战过程中,令式(6)中 $\lambda_i=0$ ,使个体变量相对稳定,根据角色匹配-任务分工模型不断转变角色,更新任务。初始化根据前期经验,进行角色匹配,即有人机,无人机1和2为跟踪无人机,无人机3为攻击无人机,无人机4为制导无人机。转变角色过程以无人机3为例说明,初始化个体变量 $x_3 \in$

(2~3),匹配跟攻击无人机角色,承担攻击任务,目标设置为敌有人机。进入战场5 s后获取敌方信息,根据式(2)和(3)进行角色转变,各任务都会产生聚集作用和吸引作用。根据式(5)跟踪任务产生相对聚集作用 $\psi_i^k$ 最大,调节量为 $\Delta x$ 。根据式(6)判断是否 $\psi_i^k > \Omega$ ,触发后调整个体变量 $x_3, x_3 \in (1 \sim 2)$ ,转变为跟踪无人机角色,承担跟踪任务,根据目标分配方案得到跟踪目标为敌无人机1。同样,在345 s时,根据角色转变模型匹配到攻击无人机角色,承担攻击任务,目标为敌无人机4。在432 s和482 s时角色转变为制导无人机,目标为敌无人机2。在562 s时角色转变为攻击无人机,承担攻击任务,目标为敌有人机。670 s任务结束后,由式(2)中的相对任务需求 $d_{ei}^k$ 使无人机3返回初始角色,目标为敌有人机。

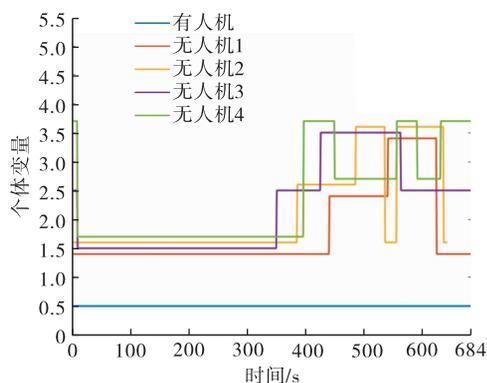


图7 角色匹配变换图

由角色匹配与任务分工的对应关系得到无人机集群任务分工,如图8所示。

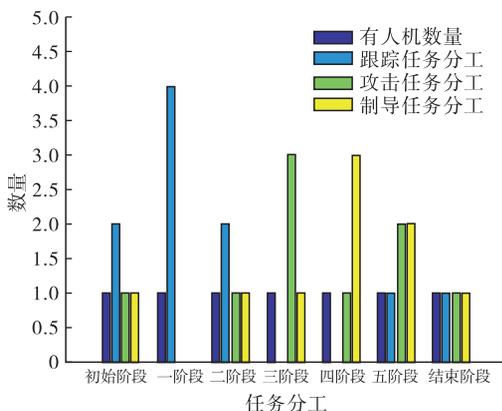
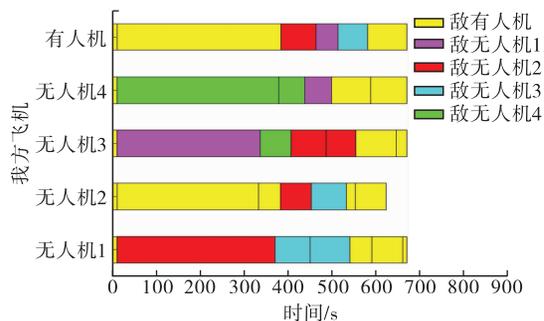


图8 任务分工图

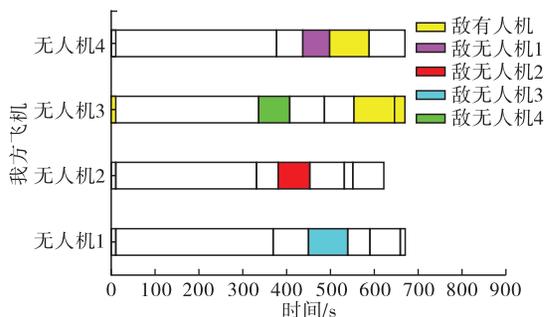
因为任务阶段的交叉以及角色与态势转变较快,取具有代表性的某一时刻的任务分工来说明此阶段的任务分工状况。初始阶段,在2 s时各角色数量为1,2,1,1。如图13和14所示,第一阶段,在200 s时无人机全部转变为跟踪无人机,任务分工为1,4,0,0。第二阶段,在365 s时前方飞机相遇,攻击任务需求增加,任务分工为1,2,1,1。分工有人

机,无人机 1 和无人机 2 跟踪任务,无人机 3 攻击任务,无人机 4 跟踪任务。第三和第四阶段,分别在 460 s 和 550 s 时,任务分工为 1,0,3,1 和 1,0,1,3。分别是分工有人机,无人机 1、无人机 2 和无人机 4 攻击任务,无人机 3 制导任务和分工有人机,无人机 4 攻击任务,无人机 1、无人机 2 和无人机 3 制导任务。第五阶段,在 600 s 时为交战后期阶段,任务分工为 1,0,2,2,为分工有人机,无人机 3 和无人机 4 攻击任务,无人机 1 和无人机 2 制导任务。结束阶段为作战结束后回到初始角色,因为无人机 2 被摧毁,任务分工为 1,1,1,1。

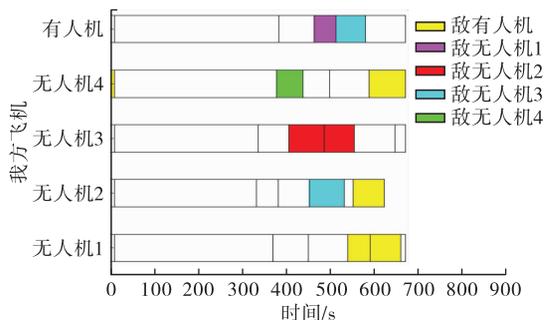
当无人机的任务分工发生变化时,需要更新分配目标,应用目标分配模型得到空战过程中目标分配方案,如图 9 所示。



(a) 目标分配方案



(b) 攻击无人机目标分配图



(c) 制导无人机目标分配图

图 9 目标分配图

在初始阶段,任务分配根据前期经验得来,目标为高价值的有人机。在空战开始后,以第一阶段为例,任务分工为 1,4,0,0,通过目标分配矩阵和匈牙利算法求解得到目标分配方案。即无人机

1 跟踪敌无人机 2,无人机 2 跟踪敌有人机,无人机 3 跟踪敌无人机 1,无人机 4 跟踪敌无人机 4,攻击无人机和制导无人机具体目标分配如图 9(b)和(c)所示。

对照组为基于规则的固定角色方案,是按照跟踪、攻击和制导规则依次进行,通过距离和流程取最近的 1 架飞机承担相应任务,固定角色在对战过程中未进行角色转变。图 15 为固定角色匹配图,每个角色都是固定不变的,通过规则实现对敌打击。

因为系统中存在随机变量,如导弹命中率,飞机随机运动,弹药消耗等。故每一局的战果有一定的随机性。为验证无人机集群角色匹配-任务分工模型的普适性,两种方案均进行了 300 次蒙特卡洛实验,统计数据如图 10 所示,为平均值数据统计图。

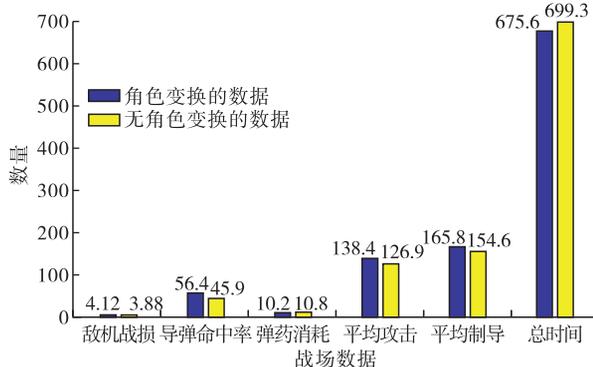


图 10 作战数据对比图

角色匹配-任务分工是基于战场需求匹配的,无人机快速转变角色更有利于提高作战效率。应用角色匹配策略的平均敌机战损量为 4.12 架,而无角色匹配的平均敌机战损量为 3.88 架,作战效率提高了 6.19%。在基于角色的聚集作用和分离作用下,剩余导弹量作为相关因素得到应用,统计数据中平均导弹命中率为 56.4%,而无角色匹配则为 45.9%,说明添加该因素使导弹能够得到充分利用。导弹消耗量为 10.2 和 10.8,基于角色匹配-任务分工模型的无人机集群角色使用导弹利用效率更高,提高了 5.56%。任务具有一定的连续性,而且前后任务之间具有关联性,单架机攻击任务所用平均时间分别为 138.4 s 和 126.9 s,导弹发出后单架机制导任务所用平均时间分别为 165.8 s 和 154.6 s,基于角色匹配-任务分工模型的无人机能够快速转变,满足相应需求,故所需时间更短且时间分配更加合理。进行角色匹配作战时间为 675.6 s,无角色变换的作战时间为 699.3 s,基于角色匹配-任务分工策略所用的时间更短。可以看出,基于角色匹配-任务分工模型的无人机集群作战导弹命中率较高,攻击、制导时间较短,消耗弹药较少,在战场中具有较好的效果。

