基于公共物品博弈的无人机集群弹药分配研究

刘学达[1] 何明[1†] 禹明刚[1,2] 陈国友[1] 张伟士[1]

（1.陆军工程大学 1 指挥控制工程学院,江苏 南京 210007；2.陆军工程大学 2 通信工程学院,江苏 南京 210007）

摘 要：自主协同是无人集群作战效能发挥的关键，针对无人机集群自主协同中的弹药分配问题，提出了一种基于公共品演化博弈模型的弹药分配方法。首先提炼无人机集群弹药分配的自主性需求，结合多主体间资源分配的对立统一关系，建立面向无人机集群弹药分配的公共物品博弈模型；在此基础上，理论推导出模型的合作策略占优条件；然后，通过仿真实验，研究各参数对集群自主协同及弹药分配效能的影响；最后，依据理论推导及仿真结果，给出无人机群弹药分配的合理化建议。

关键词：无人机集群；自主协同；资源分配；弹药分配；公共物品博弈；愿景驱动

中图分类号：TP273 **文献标志码：**A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.0483 **开放科学（资源服务）标识码（OSID）:**

Research on UAV Swarm Ammunition Distribution Based on Public Goods Game

LIU Xue-da[1] HE Ming[1†] YU Ming-gang[1,2] CHEN Guo-you[1] ZHANG Wei-shi[1]

（1.Institute of Command and Control Engineering, Army Engineering University, NanJing Jiangsu 210007, China; 2. Institute of Communication Engineering, Army Engineering University, NanJing Jiangsu 210007, China）

Abstract: Autonomous coordination is the key to the effectiveness of unmanned swarm. Aiming at the issue of ammunition allocation in autonomous coordination of UAV swarm, a method of ammunition allocation based on the evolutionary game model of public goods is proposed. Firstly, we refine the autonomous demand for UAV swarm ammunition distribution, and combine the unity of opposites in resource allocation among multiple agents to establish a public goods game model for UAV swarm ammunition distribution; on this basis, theoretically derive the model's cooperation strategy Dominant conditions; then, through simulation experiments, the influence of various parameters on swarm autonomous coordination and ammunition allocation efficiency is studied; finally, based on theoretical derivation and simulation results, a reasonable suggestion for the allocation of UAV swarm ammunition is given.

Keywords: UAV swarm; autonomous coordination; resource allocation; ammunition allocation; public goods game; Aspiration-dynamics

0 引 言

近年来，随着无人化、智能化作战概念及技术的不断成熟，无人机凭借其成本低廉、易于大规模部署、编组灵活等诸多优势，越来越多地走入了实际战场[1]。

然而，在瞬息万变的复杂战场环境下，对规模庞大的无人机集群预设任务和人为操控都存在先天不足。所以必须通过技术手段赋予无人机一定的智能性，使其具备感知交互和独立决策的能力，进而在集群层面涌现出强大的“群”的作战效能[2-5]，达到自主协同、集群攻防的目的。这非常类似于生物种群中的合作现象，如鸟群避敌、狼群围猎、蚁群搬家、人类团体分工合作等。核心都在于个体间通过沟通协调，达成合作共识，而后有效分工，最终使群体涌现出个体不具备的能力，完成更为复杂的任务[6]。

无人机集群的自主协同与分工合作涉及到情报共享、任务分配、编队重组、资源调整等多个方面[7]，通过优化资源配置达到提升整体作战能力的目的。然而，智能化背景下，作战单元（无人机）是具备一定自主决策能力的“理性”个体，个体的“偏私性”与集群的整体利益往往存在冲突关系。如图1所示：在无人机集群作战中，涉及对地攻击、电子对抗、情报侦察等多功能集群的协同。其中，攻击无人机集群对地攻击涉及弹药分配问题：挂载对地攻击武器会使攻击无人机个体的机动性降低且油耗增大。个体倾向于发射更多的弹药使自身获益，然而对于集群而言，过多发射弹药会损害持续作战能力。若令适量投入弹药为合作，超量投入弹药为非合作，极端假设下，攻击集群会面临首次攻

收稿日期:2021-03-22 ; **修回日期:**2021-06-18

基金项目：国家重点研发计划（2018YFC0806900）；军内科研项目（LJ20191A020107）；中国博士后科学基金资助项目（2019M663972）.

†通信作者.email:paper_review@126.com

击就发射全部弹药的非合作局面，这与演化博弈理论中的“公地悲剧”[8]极为相似。如何破解集群作战中“个体”与“集群”的矛盾冲突，解决自主协同中的弹药分配难题，已然成为极具时代背景的现实应用及技术难题。

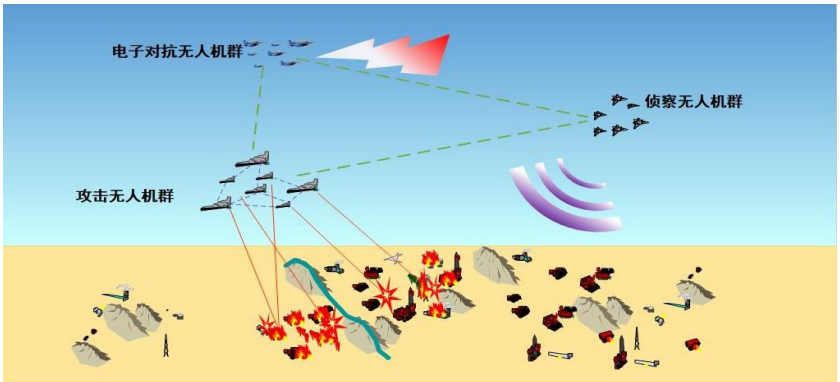

图 1 无人机集群对地攻击示意图

本文以攻击集群弹药分配问题为应用背景，提出了集群弹药分配模型，其中的模型及方法可推广至集群资源配置的其它领域，对于无人机集群作战这一新型作战样式的战斗力形成和效能发挥具有理论价值和现实意义。

演化博弈（Evolutionary game）[9-10]刻画了在信息不完全、不完美的情况下，智能体通过连续迭代的博弈尝试更新策略，进而不断适应外部环境的过程，是目前研究合作问题的有力工具。演化博弈构成了一个具有微观基础的宏观模型，能够更真实地反映群体行为的多样性和复杂性. 其中公共物品博弈（Public good game）[8]描述了有限理性下的个体在多轮迭代的博弈过程中不断调整策略以适应环境，最终达到演化稳定[10]的过程，为研究集群内部合作困境，解决“公地悲剧”问题提供了研究框架。该模型对于微观个体与宏观集群矛盾冲突的刻画及消解为解决无人机群弹药分配问题提供了一种可行思路。

当前，演化博弈理论在解决分工合作问题上的应用涉及经济贸易[11-14]、环境治理[15-20]、社会和企业管理[21-26]等众多方面。根据研究主体的规模结构不同，理论研究又分为混合均匀群体下的演化博弈和空间结构群体下的演化博弈。目的在于探求演化稳定状态下的合作占优条件、合作产生的机理及影响因素，进而为实际问题提出合理化建议。极具代表性的学者团队在国内有武汉大学王先甲教授团队[8]和北京大学杜金铭教授团队[27-29]，国外有哈弗大学 Nowak 教授团队[10·35]和 Traulsen[31-32]教授团队等。他们的许多开创性工作具有很高的理论和应用价值。

然而，目前关于演化博弈理论的研究成果在解决无人机集群合作问题上仍有不足：一是由于军事领域的特殊性，应用演化博弈解决具体军事问题的研究非常少见；二是大多数研究聚焦于合作策略占优的临界条件，而非如何进一步提高合作水平和集群收益，为具体问题提出合理化建议；三是现阶段主要通过强化学习和算法优化实现集群的任务需求，这种方式泛化能力弱且难以适应瞬息万变的复杂环境。

本研究基于公共品演化博弈模型，采用愿景驱动机制[33]对无人集群自主协同中的弹药分配问题进行建模。通过理论推导得出合作策略占优的一般条件。在此基础上运用Netlogo进行实验仿真，验证理论结果并研究关键参数对无人机集群自主协同中弹药分配效能的影响。最后结合研究背景给出无人机集群在弹药分配中的合理化建议。

1 模型假设

规则图下的无人机集群弹药分配，是一个多主体参与并多轮迭代的演化博弈过程。公共物品演化博弈（Public Goods Game, PGG）以投资公共物品为背景，刻画了合作者与非合作者基于成本、收益系数、愿景水平和选择强度等参数随时间进行博弈，使集群中合作者与非合作者之间的占比发生变化，并最终趋于演化稳定状态。其落脚点在于如何解决“公地悲剧”并促进合作，最终优化集群整体效用。

1.1 映射关系

首先，给出无人机集群弹药分配问题与公共物品演化博弈相关概念之间的映射关系。如表 1 所示：

表 1 概念映射关系

无人机集群弹药分配	公共物品演化博弈
集群 （攻击无人机组成的集群）	结构种群 （structured populations）
公共资源 （攻击无人机挂载的弹药）	公共品 (Public goods)
参与自主协同的多个 无人机平台	多元 (Multi-player)
单个无人机平台	个体 (Individuals)
作为研究对象的单个 无人机平台	焦点个体 (Focal individual)
个体向集群贡献适量资源 的合作行为	策略 A (Strategy A)
个体向集群贡献超量资源 的非合作行为	策略 B (Strategy B)
不同策略下，集群回馈给个体 的利益	收益 (Pay-off)
无人机之间基于收益的策略转换	博弈 (Game)
多轮博弈中，采用不同策略的个体 在集群中占比动态变化	演化 (Evolutionary)
多轮博弈后，占比趋于稳定， 博弈终止	演化稳定 (Evolutionary stable state)

1.2 公共物品博弈框架

无人机个体作为博弈参与者，其行为方式可分为合作与非合作，分别对应 A 、 B 两种博弈策略。个体与其“邻居”（存在信息交互的其它个体）进行博弈，依据自身及每个“邻居”的策略，获得一定的收益。智能化的无人机个体根据收益按照一定的动力学规律更新策略，经过反复迭代，集群不断演化，最终达到对临机目标合理投入弹药的目的。此过程中的集群的空间结构、策略更新机制、博弈的收益矩阵是影响演化结果的关键因素。

目前主要的策略更新机制有复制动态[34]、模仿机制[9]、费米规则[35]、莫兰过程[36]等，其中愿景驱动机制属于费米规则的一种。该机制中焦点个体 i 将自身的平均收益 $\pi(i)$ 与愿景水平 α 作比较，来决定是否转换策略，不需要了解邻居个体的收益情况，因此受策略环境影响较小，更加符合复杂战场环境中的现实需求。在此策略更新机制下， A 策略转换为 B 策略的概率可以表示为：

$$P_{A\to B}=\frac{1}{1+e^{\omega(\pi_A(i)-\alpha)}} \qquad (1)$$

其中 $\omega\in[0,1]$ 为选择强度，其大小可以影响收益与愿景水平的差值对转移概率的影响程度。由于现实中可能存在其它影响策略选择的因素并未在模型中体现，一般研究者更倾向于令 $\omega\ll 1$，即弱选择条件。若忽略其它外部影响因素，令 $\omega\to 1$（强选择条件）同样具有研究意义。不难看出，在愿景驱动机制下，即使集群中策略完全一致，个体也可能以一定概率转向另一种策略，所以不考虑突变因素集群也容易逃离吸收状态。同理， B 策略转换为 A 策略的概率可以表示为：

$$P_{B\to A}=\frac{1}{1+e^{\omega(\pi_B(i)-\alpha)}} \qquad (2)$$

双策略公共物品博弈中，无人机数量为 N ，策略集为 $\{A,B\}$ 。在每一轮中，个体与其所有邻居分别博弈，采取 A 策略的个体向资源池投入成本 c ，采取 B 策略的个体不投入。总收益即为总的投入乘以收益系数 r ，并被博弈双方均分。若博弈双方均不投入，则无所得，为了使博弈更有利于合作，将此时收益设为 $d(d<0)$ 。则收益矩阵如下所示：

$$\begin{array}{cc} & \begin{array}{cc} A & B \end{array} \\ \begin{array}{c} A \\ B \end{array} & \begin{pmatrix} rc-c & rc/2-c \\ rc/2 & d \end{pmatrix} \end{array} \qquad (3)$$

2 理论推导

定义 1：平均丰度。设集群中集群中 A 策略的个体 j 个，占集群的比例 j/N 为随机变量，设 $v(j)$ 为该随机变量的概率分布，则集群中 A 策略个体比例的期望值为集群中 A 策略的平均丰度。平均丰度 $<X_A(j)>$ 定义式可表示为：

$$<X_A(j)>=\sum_{j=0}^{N}\frac{j}{N}v(j) \qquad (4)$$

为便于推导，令：

$R=rc-c$ (5) $S=rc/2-c$ (6)

$T=rc/2$ (7) $P=d$ (8)

下面的分析，推导在规则图中，基于偶对近似和扰动理论，愿景水平 α 作为全局变量（个体间并无差异）无论其如何变化，只要满足 $R+S>T+P$ ，即可实现合作策略在集群中占优，从而使集群避免陷入“公地悲剧”而有效分配弹药提供指导。

定义 p_{A} 和 p_B 分别表示采取 A 、 B 策略的个体在集群中的占比， p_{AA} 、 p_{AB} 、 p_{BA} 、 p_{BB} 分别表示相邻个体形成的策略对 AA 、 AB 、 BA 、 BB 在集群中所有策略对的占比。 $q_{Y/X}$ $(X,Y\in\{A,B\})$ 为给定的一个采取 X 策略个体，在其邻居中找到一个采取 Y 策略个体的条件概率。显然有以下各式成立：

$$\begin{cases} P_A+P_B=1 \\ q_{A/X}+q_{B/X}=1 \\ P_{XY}=q_{Y/X}\times P_X \\ P_{AB}=P_{BA} \end{cases} \qquad (9)$$

不难看出，在偶对近似下，集群的策略组成只由 p_{AA} 和 p_{A} 就可以描述。

设焦点个体的邻居中采取A、B策略数目分别是k_A、k_B，则有$k_A+k_B=k$。则焦点个体i采取不同策略时的平均收益为：

$$\pi_A(i)=\frac{k_A\cdot R+k_B\cdot S}{k}=q_{A/A}\cdot R+q_{B/A}\cdot S \tag{10}$$

$$\pi_B(i)=\frac{k_A\cdot T+k_B\cdot P}{k}=q_{A/B}\cdot T+q_{B/B}\cdot P \tag{11}$$

下面计算p_A和p_{AA}在一轮博弈中发生变化的概率。首先计算一个B策略个体转换为A策略的概率：

$$\mathrm{Prob}(\triangle_{P_A}=\frac{1}{N})=P_B\cdot\sum_{k_A+k_B=k}C_k^{k_A}q_{A/B}^{k_A}q_{B/B}^{k_B}\cdot\frac{1}{1+e^{\omega(\alpha-\pi_B)}} \tag{12}$$

其中p_B表示随机选择一个个体为B策略的概率，$\sum_{k_A+k_B=k}C_k^{k_A}q_{A/B}^{k_A}q_{B/B}^{k_B}$为此个体所有邻居构成的概率，$\frac{1}{1+e^{\omega(\alpha-\pi_B)}}$为$B\rightarrow A$的转移概率。

当策略发生转换后，集群中的策略对相应发生变化。在规则图中策略对的规模为$kN/2$，则策略对AA增加k_A的概率为：

$$\mathrm{Prob}(\triangle_{P_{AA}}=\frac{2k_A}{kN})=P_B\cdot C_k^{k_A}q_{A/B}^{k_A}q_{B/B}^{k_B}\cdot\frac{1}{1+e^{\omega(\alpha-\pi_B)}} \tag{13}$$

同理一个A策略个体转换为B策略的概率为：

$$\mathrm{Prob}(\triangle_{P_A}=-\frac{1}{N})=P_A\cdot\sum_{k_A+k_B=k}C_k^{k_A}q_{A/A}^{k_A}q_{B/A}^{k_B}\cdot\frac{1}{1+e^{\omega(\alpha-\pi_A)}} \tag{14}$$

策略对AA减少k_A的概率为：

$$\mathrm{Prob}(\triangle_{P_{AA}}=-\frac{2k_A}{kN})=P_A\cdot C_k^{k_A}q_{A/A}^{k_A}q_{B/A}^{k_B}\cdot\frac{1}{1+e^{\omega(\alpha-\pi_A)}} \tag{15}$$

当$\omega\ll 1$且$k\ll N$时，可由偶对近似得出p_A和p_{AA}关于时间的导数：

$$\begin{aligned}P_A'&=\frac{1}{N}\cdot\mathrm{Prob}(\triangle_{P_A}=\frac{1}{N})+(\frac{-1}{N})\cdot\mathrm{Prob}(\triangle_{P_A}=\frac{-1}{N})\\&=P_A'(\omega=0)+\omega\times\frac{\partial P_A'}{\partial\omega}\Big|_{\omega=0}+o(\omega^2)\\&=\frac{\omega}{4N}[\alpha(P_B-P_A)-TP_{AB}-PP_{BB}+RP_{AA}+SP_{BA}]\\&\quad+\frac{P_B-P_A}{2N}+o(\omega^2)\end{aligned} \tag{16}$$

$$\begin{aligned}P_{AA}'&=\sum_{k_A=0}^{k}\frac{2k_A}{kN}\mathrm{Prob}(\triangle_{P_{AA}}=\frac{2k_A}{kN})+\sum_{k_A=0}^{k}\frac{-2k_A}{kN}\mathrm{Prob}(\triangle_{P_{AA}}=\frac{-2k_A}{kN})\\&=P_{AA}'(\omega=0)+\omega\times\frac{\partial P_{AA}'}{\partial\omega}\Big|_{\omega=0}+o(\omega^2)\\&=\frac{P_{AB}-P_{AA}}{N}+\omega\times\frac{\partial P_{AA}'}{\partial\omega}\Big|_{\omega=0}+o(\omega^2)\end{aligned} \tag{17}$$

其中：

$$\begin{aligned}\frac{\partial P_{AA}'}{\partial\omega}\Big|_{\omega=0}=\frac{1}{2N}[&\alpha(P_{AB}-P_{AA})-T\cdot P_{AB}\cdot q_{A/B}\frac{k-1}{k}\\&-T\cdot P_{AB}\frac{1}{k}-P\cdot P_{AB}\cdot q_{B/B}\frac{k-1}{k}+\\&R\cdot P_{AA}\cdot q_{A/A}\frac{k-1}{k}+R\cdot P_{AA}\frac{1}{k}+\\&S\cdot P_{AA}\cdot q_{B/A}\frac{k-1}{k}]\end{aligned} \tag{18}$$

分别令$p_A'=0$、$p_{AA}'=0$，当$\omega=0$时求得演化稳定均衡解：

$$\begin{cases}P_A^*=P_B^*=1/2\\P_{AA}^*=P_{AB}^*=P_{BA}^*=P_{BB}^*=1/4\end{cases} \tag{19}$$

当在弱选择条件下，基于扰动理论，此均衡点依然存在，需加入扰动项$f_{XY}(X,Y\in\{A,B\})$，得出：

$$\begin{cases}P_{AA}^*=1/4+\omega\times f_{AA},\ P_{AB}^*=1/4+\omega\times f_{AB}\\P_{BA}^*=1/4+\omega\times f_{BA},\ P_{BB}^*=1/4+\omega\times f_{BB}\end{cases} \tag{20}$$

将(16)带入(12)，得到：

$$P_A'=\frac{P_B-P_A}{2N}+\frac{\omega}{4N}[\alpha(P_B-P_A)-\frac{1}{4}(R+S-T-P)]+o(\omega^2) \tag{21}$$

令$P_A'=0$，忽略高阶项$o(\omega^2)$，可得：

$$P_A^*(\omega)=\frac{1}{2}+\frac{\omega(R+S-T-P)}{8(2+\omega\alpha)} \tag{22}$$

若使合作策略占优（$p_A>1/2$），则需在$\omega>0$时满足$R+S>T+P$。这就意味着弱选择条件下，平均丰度只与收益矩阵有关，与规则图的平均度和愿景水平无关。文献[32]通过仿真将此结论推广至强选择条件仍然成立。

3 仿真实验

本节在环状规则图的拓扑结构下，基于公共物品演化博弈框架及愿景驱动机制动力学过程进行仿真。实验中注重不同参数下的对比实验，在证明理论推导结果的同时，进一步研究不同选择强度下相关变量对平均丰度的影响，并对如何提高平均丰度做出积极探索。

3.1 仿真条件

结合无人机集群对地攻击的军事背景，网络拓扑采取图2所示，度为4的环状结构。

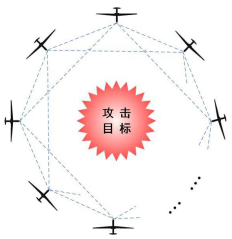

图 2 攻击机群网络拓扑示意图

仿真中关键变量为收益矩阵，通过(4)式不难看出：d 取负值时能够抑制 BB 策略对的数量，一定程度上促进演化向合作的转变。投入成本 c 对演化没有影响（可化简消除），收益系数 r 是矩阵中的关键参数。

本文用 Netlogo 软件进行模型搭建和实验仿真，该软件主要用于对自然和社会现象进行仿真，由于能够控制成千上万个体，所以它既能很好地模拟微观个体的行为和宏观模式的涌现及其两者之间的联系，又非常适合模拟随时间发展的复杂系统，与演化博弈理论和本文研究背景完美契合。如图 3 所示，调整各参数滑块后可以进行初始化和演化（蓝色无人机代表 A 策略，红色无人机代表 B 策略）。演化结束后，数据以表格形式保存，经 Matlab 处理后生成图像。

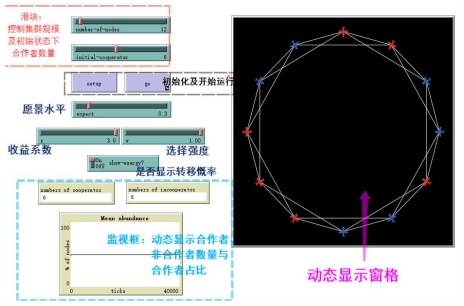

图 3 Netlogo 软件运行界面

3.2 仿真实验及结果

将集群中攻击无人机数量设为 100 架，其中采取 A、B 策略的无人机各 50 架，且位置随机分布。为保证实验数据尽可能排除偶然因素影响，设定在系统运行 4 万次后开始取值，每次取值为 1000 时间步的均值，在遍历变量的所有取值后，再进行 10 次独立重复实验，最后求 10 次实验的均值并绘成图像。

3.2.1 收益系数对平均丰度的影响

令 $c=1$、$d=-1$，$r\in[1,3]$，使得收益矩阵满足 $R+S>T+P$。在 α=0.3，ω 分别为 0.1、0.5、1 时，平均丰度随 r 的变化如图 4 所示：

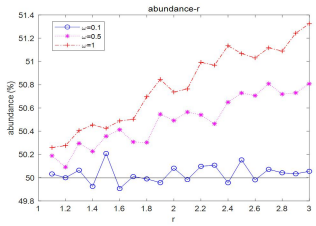

图 4 平均丰度随 r 的变化曲线

由图可见：随着 r 的增大，除蓝色曲线无明显趋势外，其他两条曲线都有明显的上升趋势，且选择强度越大，上升趋势越快。

为进一步探索不同选择强度下收益系数对平均丰度的影响，分别在 $r=1.5$ 和 $r=3$ 时进行仿真，结果如图 5 所示：

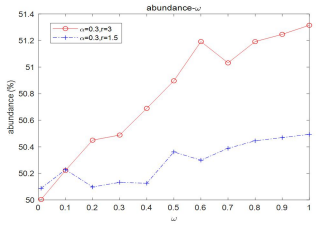

图 5 平均丰度随 ω 的变化曲线

由图可见：在不同的收益系数 r 下，平均丰度曲线均随选择强度 ω 的增大而趋势向上，并且收益系数越大，曲线向上越快。

结论 1：

1.在 $\omega=0.1$ 的弱选择条件下，合作策略整体占优，即平均丰度大于 50%，印证了理论推导结论。

2.在 r 固定时，平均丰度随 ω 的增大而增大，即相同条件下提高选择强度会提高平均丰度。

3.选择强度越大，平均丰度对 r 的增大越敏感，即理论推导的结果适用于其它选择强度，并且强选择、高收益更有利于合作行为的涌现。

对上述结果进行初步分析：

1.蓝色曲线中个别点在 50%以下为演化过程中的偶然情况，而结论源于对平均水平和整体趋势的把握。

2.选择强度越大，个体的策略转换越依赖于自身平均收益与愿景水平的差值，即“赢定输移”（满足期望保留原策略，不满足则改变策略）。

3.收益系数 r 是影响博弈的关键变量，其值越大代表合作后的回报越大，直接影响个体的策略选择，而选择强度的提高放大 r 的影响。

根据结论及原因分析，在实际的弹药分配中可重点注意以下调控措施：

1.若不依靠调整其它参数来增大平均丰度，首

要考虑强选择条件。即依照愿景驱动机制进行策略更新，尽量排除其它影响合作水平的因素，如“直接、间接互惠”、“亲缘选择”、“空间选择”等。

2.提高收益系数意味着合作能够带来更多“好处”，可以对合作策略的无人机在油料补给、情报资源等方面给予优先权。

3.2.2 愿景水平对平均丰度的影响

愿景水平 α 虽然不是合作占优的影响条件，但是会影响平均丰度大小。下面研究强选择和弱选择条件下，r 分别取 1.5 和 3 时，平均丰度随 α 的变化。结果如图 6 所示：

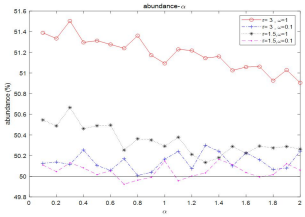

图 6 平均丰度随 α 的变化曲线

由图可见：随 α 的增大，红色与黑色两条曲线趋势向下，而蓝色与粉色两条曲线无明显趋势。

结论 2：

1.强选择（$\omega = 1$）下，平均丰度随 α 的增大而减小；弱选择（$\omega = 0.1$）下，α 对平均丰度无明显影响。

2.收益系数一定时，强选择会促使合作水平更高，进一步印证了图 4、图 5 的结论。

3.在强选择条件下，$\alpha \approx 0.3$ 时平均丰度最大。

对上述结果进行初步分析：

1.强选择相比于弱选择，个体的策略转换更加依赖于平均收益与愿景水平的差值。改变愿景水平，一定程度上等效于改变了收益系数而影响了平均收益。

2.愿景水平代表着个体的“贪婪”程度，太容易被满足和从来不满足都不利于提高合作水平。因此恰当选取愿景水平有利于增大平均丰度。

根据结论及原因分析，在实际的弹药分配中可重点注意以下调控措施：

愿景水平代表了个体对博弈结果的期望，实验证明过高的期望不利于合作策略的发展。应用中可将集群博弈开始前的初始值设置成较低水平，即使在演化过程中个体依据博弈“经验”调整了愿景水平，也不会造成期望过高的局面。

3.2.3 收益系数差别化对平均丰度的影响

为提高集群的任务完成效果，必须研究如何进一步促进合作涌现，增大集群的平均丰度。考虑到合作占优的条件及影响平均丰度的关键变量，下面探究区分合作者与非合作者的收益系数对平均丰度的影响。

首先区分强选择与弱选择，研究在 $r_A \geq r_B$ 的不同组合条件下，平均丰度随愿景水平的变化。如图 7 所示：

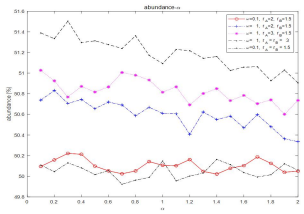

图 7 不同收益系数下平均丰度随 α 的变化曲线

由图可见：两条黑色不同样式曲线作为参考线分别代表不同选择强度下 $r_A = r_B$ 时平均丰度随 α 的变化。其余三条线分别取不同选择强度下且 $r_A \geq r_B$ 时平均丰度随 α 的变化。

图 7 表明弱选择条件下单独提升 r_A 或者单独降低 r_B 均可以增大平均丰度。但强选择条件下呈现出不同的趋势。下面对强选择条件，以 $r_A = r_B$ 为参考，分别以 r_A、r_B 为自变量进行仿真，结果如图 8、图 9 所示：

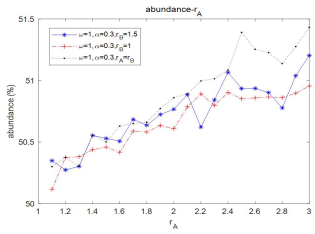

图 8 平均丰度随 r_A 收益系数的变化曲线

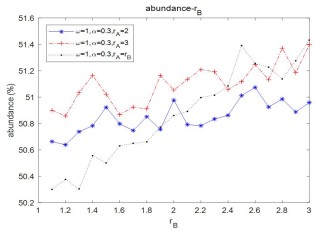

图 9 平均丰度随 r_B 的变化曲线

由图 8 可见：强选择条件下，平均丰度的曲线随 r_A 的增大呈明显上升趋势，且同时提升 r_A、r_B（黑色曲线）上升最快。由图 9 可见：强选择条件下，单独降低 r_B 会减小平均丰度，但同时降低 r_A、r_B 效果更明显。

收益矩阵中 d 作为 BB 策略对独有的收益系数，直接关系到非合作策略对在集群中的占比，研

究其对平均丰度的影响，对增大平均丰度有重要意义。下面仿真在强选择和弱选择的条件下，平均丰度随 d 的变化。如图 10 所示：

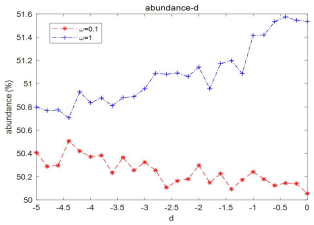

图 10 平均丰度随 d 的变化曲线

由图 10 可见：在强选择与弱选择条件下，平均丰度随 d 值的变化呈现截然相反的趋势：强选择条件下，平均丰度随 d 的减小而减小。弱选择条件下，平均丰度随 d 的减小而增大。

结论 3：

1.弱选择条件下使 $r_A \geq r_B$，能够小幅度提升平均丰度，总体是利于合作涌现的。

2.强选择下，在 r_B 一定时单独提高 r_A，平均丰度会随之增大；而在 r_A 一定时单独减小 r_B，平均丰度会随之减小。

3.改变非合作策略对的收益系数 d 能够明显影响平均丰度，但是选择强度不同可能呈现不同的结果。

对上述结果进行初步分析：

1.弱选择条件下使得 $r_A \geq r_B$ 能够增大平均丰度，原因在于整体提高了选择合作策略的回报，所以个体更倾向于合作。

2.强选择条件下以增大 r_A 的方式能够增大平均丰度，原因也在于提高了选择合作策略的回报，$P_{A\to B}$ 进一步变小；而减小 r_B 的方式虽然表面上类似于减小了非合作策略的回报，但实际上强选择的条件使得概率 $P_{B\to A}$ 进一步减小，抑制了非合作策略向合作策略的转换。

3. d 值代表非合作策略对的收益系数，其大小变化对平均丰度的影响与 r_A 不变时调整 r_B 的原理相同，所以其影响效果也相同。

根据结论及原因分析，在实际的弹药分配中可重点注意以下调控措施：

1.增大 r_A 可视为对合作行为的“奖励”，而减小 r_B 与减小 d 均可视为对非合作行为的“惩罚”。实际应用中，可增加博弈过程中的“奖惩机制”，促使合作行为进一步涌现。

2.值得注意的是，在收益矩阵中若消除成本 c，意味着此时的 d 应为 d/c，所以在弱选择条件下减小合作成本，强选择条件下增大合作成本同样可以增大平均丰度。

4 结论

本文以无人机集群弹药分配问题为着眼点。首先基于公共物品演化博弈理论构建模型；而后理论推导出愿景驱动机制下的合作占优条件；在此基础上进行大量仿真实验，印证了理论推导的正确性，并得出相关参数对平均丰度的影响关系；最后结合应用背景提出了合理化建议，为相关理论研究做出了有意义的探索。

本文模型是固定拓扑结构下的双策略演化博弈，在实际问题中，动态拓扑下的多策略演化博弈更加贴近现实情况，具有重大理论意义和应用价值。所以，如何对动态拓扑下的多策略演化博弈进行有效研究是下步工作的重要方向。

参考文献 (References)

[1] Burmaoglu S, Sarıtas O. Changing characteristics of warfare and the future of Military R&D[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2017, 116: 151-161.

[2] Giles K, Giammarco K. A mission - based architecture for swarm unmanned systems[J]. Systems Engineering, 2019, 22(3): 271-281.

[3] Khawaja W, Guvenc I, Matolak D W, et al. A Survey of Air-to-Ground Propagation Channel Modeling for Unmanned Aerial Vehicles[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2019, 21(3): 2361-2391.

[4] Shakeri R, Algaradi M A, Badawy A, et al. Design Challenges of Multi-UAV Systems in Cyber-Physical Applications: A Comprehensive Survey and Future Directions[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2019, 21(4): 3340-3385.

[5] Dolicanin E, Fetahovic I, Tuba E, et al. Unmanned combat aerial vehicle path planning by brain storm optimization algorithm[J]. Studies in Informatics and Control, 2018, 27(1): 15-24.

[6] 段海滨，张岱峰，范彦铭，邓亦敏．从狼群智能到无人机集群协同决策．中国科学：信息科学，2019, 49(01): 112-118.
(Duan H B, Zhang D F, Fan Y M. From wolf pack intelligence to UAV swarm cooperative decisionmaking[J]. Scientia Sinica(Informationis) , 2019, 49(01): 112-118.)

[7] 杨晨，张少卿，孟光磊．多无人机协同任务规划研究[J]. 指挥与控制学报，2018, 4(3): 234-248.
(YANG C， ZHANG S Q， MENG G L. Multi-UAV Cooperative Mission Planning. Journal of Command and Control, 2018, 4(3): 234-248.)

[8] 全吉，储育青，王先甲．具有惩罚策略的公共物品博弈与合作演化[J]．系统工程理论与实践，2019, 39(1): 141-149.
(QUAN J, CHU Y Q, WANG X J. Public goods with punishment and the evolution of cooperation[J]. Systems Engineering—Theory &Practice, 2019, 39(1): 141-149.)

[9] SMITH J M, PRICE G R. The logic of animal conflict[J]. Nature,1973, 246(5427):15-18.

[10] NOWAK M A, Sigmund K. Evolution of indirect reciprocity[J]. Nature, 2005, 437(6685): 1291-1298.

[11] Lightner Aaron D,Barclay Pat,Hagen Edward H. Radical framing effects in the ultimatum game: the impact of explicit culturally transmitted frames on economic decision-making[J]. Royal Society open science,2017,4(12).

[12] Weimin Ma, Chenrui Zhao, Hua Ke et al. Retailer's return policy in the presence of P2P secondary market[J]. Electronic Commerce Research and Applications, 2020, 39.

[13] Aleksandra Komorowska, Pablo Benalcazar, Przemysław Kaszy ń ski et al. Economic consequences of a capacity market implementation: The case of Poland[J]. Energy Policy, 2020, 144.

[14] Istemi Berk, Eren Çam The shift in global crude oil market structure: A model-based analysis of the period 2013–2017[J]. Energy Policy, 2020, 142.

[15] David Schönheit, Richard Weinhold, Constantin Dierstein The impact of different strategies for generation shift keys (GSKs) on the flow-based market coupling domain: A model-based analysis of Central Western Europe[J]. Applied Energy, 2020, 258.

[16] Antoci, A., Borghesi, S., Iannucci, G. et al. Emission permits, innovation and sanction in an evolutionary game. Econ Polit 37, 525–546 (2020).

[17] Ma L, Zhang L. Evolutionary game analysis of construction waste recycling management in China[J]. Resources, Conservation & Recycling,2020,161.

[18] Tu Yu, Peng B H,Guo W, Wu W K. EPR System Participants' Behavior: Evolutionary Game and Strategy Simulation[J]. Journal of Cleaner Production,2020.

[19] Su Y. Multi-agent evolutionary game in the recycling utilization of construction waste[J]. Science of the Total Environment,2020,738.

[20] Jiang B, Wang X Q, Xue H L, Li J, Gong Y. An evolutionary game model analysis on emission control areas in China[J]. Marine Policy,2020,118.

[21] Deka Aniruddha,Bhattacharyya Samit. Game dynamic model of optimal budget allocation under individual vaccination choice.[J]. Journal of theoretical biology,2019,470.

[22] Evandro Luquini, Guido Montagna, Nizam Omar Fusing non-conservative kinetic market models and evolutionary computing[J] Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2020, 537.

[23] Diego B. Carvalho, Bárbara L. Pinto, Eduardo C. Guardia et al. Economic impact of anticipations or delays in the completion of power generation projects in the Brazilian energy market[J] Renewable Energy, 2020, 147(Pt 1).

[24] Fan K,Eddie C.M. Hui. Evolutionary game theory analysis for understanding the decision-making mechanisms of governments and developers on green building incentives[J]. Building and Environment,2020,179.

[25] You Meng J, Li S, Li D W, Cao Q R, Xu F. Evolutionary game analysis of coal-mine enterprise internal safety inspection system in China based on system dynamics[J]. Resources Policy,2020,67.

[26] Babu R. Dawadi,Danda B. Rawat,Shashidhar R. Joshi,Pietro Manzoni. Evolutionary gaming approach for decision making of Tier - 3 Internet service provider networks migration to SoDIP6 networks[J]. International Journal of Communication Systems,2020,33(11).

[27] Du J M, Wu B, Wang L. Aspiration dynamics in structured population acts as if in a well-mixed one[J]. Scientific reports, 2015, 5: 8014.

[28] Du J M, Wu B, Altrock P M, et al. Aspiration dynamics of multi-player games in finite populations[J]. Journal of the Royal Society Interface, 2014, 11(94): 20140077.

[29] Du J M, Wu B, Wang L. Corrigendum to "Aspiration dynamics and the sustainability of resources in the public goods dilemma" [Phys. Lett. A 380 (2016) 1432 - 1436][J]. Physics Letters A,2017,381(5).

[30] Altrock P M,Traulsen A,Nowak M A. Evolutionary games on cycles with strong selection.[J]. Physical review. E,2017,95(2-1).

[31] Gokhale C S, Traulsen A. Evolutionary games in the multiverse[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2010, 107(12): 5500-5504.

[32] Hindersin L, Wu B, Traulsen A, et al. Computation and simulation of evolutionary Game Dynamics in Finite populations[J]. Scientific reports, 2019, 9(1): 6946.

[33] XU K, LI K, CONG R, et al. Cooperation guided by the coexistence of imitation dynamics and aspiration dynamics in structured populations[J]. EPL (Europhysics Letters), 2017, 117(4): 48002.

[34] TAYLOR P D, JONKRT L B. Evolutionary stable strategies and game dynamics[J]. Mathematical Biosciences, 1978, 40(1-2): 145-156.

[35] SZABOG, TOKE C. Evolutionary prisoner's dilemma game on a square lattice[J]. Physical Review E, 1998, 58:

69-73.
[36] NOWAK M A, SIGMUND K. Evolitionary dynamics of biologival games[J]. science, 2004, 303(5659): 793-799

作者简介

刘学达（1990-），男，硕士，从事无人机指控和演化博弈等研究，E-mail:834732360@qq.com；

何　明（1978-），男，教授，博士研究生导师，从事智联网和无人机指控等研究，E-mail:paper_review@126.com；

禹明刚（1986-），男，副教授，博士，从事军事需求工程、体系工程和无人集群合作演化等研究，E-mail:yuminggang8989@163.com；

陈国友（1973-），男，副教授，硕士，从事通信工程等研究，E-mail:49862832@qq.com；

张伟士（1989-），男，硕士，从事无人机指控等研究，E-mail:13813831817@163.com。