

基于双层稳定匹配的异构无人机集群“分布式”协同算法

向竹, 杨志伟[†], 杨克巍, 夏博远

(国防科技大学 系统工程学院, 长沙 410073)

摘要: 异构无人机集群凭借其功能互补、能力协同的优势, 能够适应复杂多变的战场环境、提升协同作战效能, 而受到各军事强国的广泛关注并得到飞速发展. 如何对异构无人机集群进行有效编组以达到良好的协同作战效果成为异构无人机集群“分布式”协同研究的重点, 由此引出异构无人机集群“分布式”协同中针对异构无人机编组结构稳定性和能力协同性的优化问题. 面向该问题, 提出一种基于双层稳定匹配的异构无人机集群“分布式”协同算法. 首先, 对异构无人机集群“分布式”协同作战方式及匹配问题进行描述; 然后, 通过基于异构无人机之间的能力协同性构建偏好计算模型, 将 3 类(侦察、打击、指控)无人机的三边匹配问题转化为双层-双边稳定匹配问题并构建相应的线性整数规划模型; 最后, 通过 3 组实验, 验证了所提出模型与方法的有效性, 相较于基准算法效率更高、效果更好, 同时在大规模算例中也能实现良好的匹配效果.

关键词: 异构无人机集群; 匹配编组; 稳定匹配; 能力; 协同性; 线性整数规划模型

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2020.1285

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 向竹, 杨志伟, 杨克巍, 等. 基于双层稳定匹配的异构无人机集群“分布式”协同算法[J]. 控制与决策, 2022, 37(4): 871-880.

“Decentralized” collaborative algorithm for heterogeneous UAV swarm based on bi-level stable matching

XIANG Zhu, YANG Zhi-wei[†], YANG Ke-wei, XIA Bo-yuan

(College of Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: A heterogeneous UAVs swarm can adapt to the complex and changeable battlefield environment and improve the effectiveness of collaborative operations by virtue of their complementary functions and collaborative capabilities. Therefore, it has been widely concerned and developed rapidly by various military powers. How to effectively organize heterogeneous UAVs to achieve good cooperative effects has become the focus of the “decentralized” cooperative research of a heterogeneous UAVs swarm, which leads to the optimization problem of structural stability and capability coordination of heterogeneous UAVs grouping in “decentralized” cooperative research. To solve this problem, this paper proposes a “decentralized” collaborative algorithm for the heterogeneous UAV swarm based on bi-level stable matching. Firstly, the “distributed” cooperative operation mode and matching problem of the heterogeneous UAV swarm are described. Then, a preference computing model is constructed based on the capability cooperation among heterogeneous UAVs to transform the trilateral matching problem of three types (reconnaissance, offensive, command) UAVs into a bi-level stable matching problem and construct the corresponding linear integer programming model. Finally, through three groups of experiments, the effectiveness of the model and method proposed in this paper is verified. Compared with the benchmark algorithm, the model has higher efficiency and better effect, and it can also achieve good matching effect in large-scale examples.

Keywords: heterogeneous UAV swarm; formation by matching; stable matching; capability; synergy of capabilities; linear integer programming model

0 引言

无人机集群概念的提出和发展, 有效地解决了单个无人机作业时载荷相对有限、信息感知能力不

足等缺点, 从而得到各个大国的持续关注^[1]. 面对复杂多变的作战环境, 无人机集群可以利用内部的通信和信息共享优势, 突破单架无人机各方面的局限

收稿日期: 2020-09-14; 录用日期: 2021-02-10.

基金项目: 国家自然科学基金项目(72071206); 湖南省科技创新计划项目(2020RC4046).

责任编辑: 董久祥.

[†]通讯作者. E-mail: zhwyang88@126.com.

性,因此无人机集群作战已成为各军事强国的关注重点.美国空军在20世纪90年代末期最早提出无人机集群作战的构想,并一直致力于集群作战技术的研究.2015年4月,美国海军公布了低成本无人机集群技术(LOCUST)项目^[2],旨在连续快速发射大量具有自主控制能力的小型无人机,通过自组网技术实现无人机之间的信息共享和任务协同,应用集群战术对敌方进行压制.2016年11月,欧洲防务局正式启动“欧洲蜂群”项目,发展任务自主决策、协同导航等关键技术.紧接着,俄罗斯、韩国、芬兰等也开始展开无人机集群作战模式的研究^[3].2017年7月和2018年5月,中国电子科技集团有限公司分别实现了119架和200架固定翼无人机的飞行试验,成功演示了无人机编队弹射起飞、空中集结、多目标分组、编队合围等动作.

无人机集群作战主要依托无人机集群协同技术,目前无人机集群协同技术研究集中于信息感知、任务分配与调度、航迹规划、编队控制、通信组网和虚拟/实物验证实验等方面.例如卢布尔雅那大学研究团队^[4]基于强化学习研究了无人机集群任务调度算法优化任务调度;日本庆应大学研究团队^[5]采用分散式模型预测控制和基于一致性的控制,实现了多无人机具有防撞能力的协同编队飞行;瑞士联邦理工学院研究团队^[6]考虑集群中无人机的相对速度,针对飞行自组织网络提出基于预测的OLSR(P-OLSR)协议,以降低丢包率,提高吞吐量;英国贝尔法斯特女王大学研究团队^[7]针对多无人机任意队形设计问题,通过提出基于张拉整体结构队形建模方法,得到多种稳定队形,实现了队形适应外界环境的灵活调整.虽然上述研究推进了无人机集群协同技术的发展,但西班牙无人机系统专家奥列罗和马萨^[8]指出,众多的无人机集群研究工作仍致力于同构无人机系统,无人机被简单地视为同一类型,忽略了无人机的非同构性.

2006年以后,异构无人机集群的研究逐渐兴起,具有不同飞行指标、携带不同传感器的异构无人机之间可以功能上互补、能力上协同^[9],以应对复杂多变、险恶难测的实际作战环境.如Wu等^[10]针对具有不同能力的异构无人机集群,提出了多异构无人机协同任务规划的分布式任务分配方法;Yang等^[11]研究了异构无人机局部集中冲突解决问题,建立了两两冲突无人机安全分离的线性约束,实现无人机在高度拥挤的空中交通中的协调,满足机载冲突解决的要求.Chen等^[12]研究了多区域系统中异构无人机的覆盖路径规划问题,提出了一种适用于无人机区域分配和覆盖命令的有效启发式算法.然而,当前

的异构无人机集群研究没有考虑异构无人机之间的能力差距对协同效果的影响.如:飞行速度范围在[100 km/h, 300 km/h]内的侦察无人机和飞行速度范围在[350 km/h, 500 km/h]内的打击无人机实际上难以形成有效协同.由于异构无人机载荷有限,往往只能搭载具有特定功能的载荷模块,只能在某些能力上占据优势,这就导致具备不同功能的异构无人机之间在一些能力上存在“你优我差”的不平衡现象.由此引出本文要解决的关键问题和目的:如何对异构无人机之间进行匹配编组,以保证其能力协同的有效性,同时保证其编组结构的稳定性.

针对上述问题,本文提出利用稳定匹配的思想解决异构无人机集群协同中能力不匹配的问题.稳定匹配概念最早由Gale和Shapley提出,他们在大学录取问题和婚姻匹配问题研究中提出了双边匹配问题,并证明了稳定匹配的存在性、最优性和唯一性^[13].双边稳定匹配方法应用广泛,例如医院与实习生的稳定匹配问题^[14],大学录取稳定匹配问题^[15],电子中介中的买卖交易稳定匹配问题^[16],虚拟机迁移中的虚拟机和服务器的稳定匹配问题^[17]等.双边稳定匹配模型能够保证匹配对的稳定性和公平性^[18],因此,可以将稳定匹配的相关方法应用于异构无人机集群“分布式”协同问题中,以解决异构无人机编组的结构稳定与能力协同的问题.

本文的技术难点在于:1)异构无人机的能力类型较多,针对不同能力类型,需要分别构建无人机之间的偏好模型;2)现有的稳定匹配方法往往只针对两边主体,而本文考虑异构无人机集群存在侦察、打击、指控等3种类型的无人机,3类无人机的协同是一个多边匹配的问题,然而多边匹配的求解相对较难,且不能保证一定存在稳定解^[19];3)第2层稳定匹配问题为多对一双边稳定匹配问题,求解繁琐,且多对一匹配问题不一定存在稳定解^[20-21].

针对上述难点,本文采取如下措施:

1)梳理异构无人机的能力类型(如硬指标型、实数型、区间型等),针对每种类型的的能力协同性构建了相应的偏好计算模型;使得算法具有充分考虑异构无人机之间能力协同性的优势.

2)提出将异构无人机集群的“侦察-打击-指控”三边稳定匹配问题转化为“侦察机-打击机”和“察打小组-指控机”的双层-双边稳定匹配问题;现有的稳定匹配方法往往只针对双边主体,而本文提出的算法面向三边主体,具有实现3类异构无人机之间协同的优势.

3) 将“察打小组-指控机”多对一双边稳定匹配问题转换为“察打小组-指控机”一对一双边稳定匹配问题; 使得算法具有降低问题求解难度, 且可以保证存在稳定匹配解的优势。

1 异构无人机集群“分布式”协同问题描述与分析

本节首先阐述异构无人机集群“分布式”协同作战方式, 并对异构无人机集群及要解决的稳定匹配编组问题进行分析, 并对使用的变量进行符号定义。

在本文设定的异构无人机集群“分布式”协同作战中(见图1), 考虑侦察类、打击类和指控类3类无人机装备。参照OODA作战循环理论^[22], 异构无人机集群的协同作战方式如下: 首先, 用于监视敌军活动和收集情报的侦察类无人机(简称侦察机)将侦察信息实时上传给指控类无人机(简称指控机); 然后, 指控

机综合分析战场环境等作战要素, 判断是否执行打击任务以及打击方式, 并下达命令给战斗机、轰炸机等执行打击任务的打击类无人机(简称打击机); 最后由打击机执行具体打击任务。

由于指控机的通信带宽往往是有限的, 难以支撑庞大的无人机集群通信需求。因此, 在异构无人机集群“分布式”协同作战中, 指控类无人机通常分散到各作战区域, 分别与多组侦察机、打击机建立局域式通信, 实现目标-侦察-决策-打击的OODA作战环。

上述异构无人机集群“分布式”协同作战的问题, 本质上可以抽象为一个组合优化问题。针对 a 架侦察机、 b 架打击机、 c 架指控机, 假设考虑3类无人机的一对一组合, 则理论上存在 $a \times b \times c$ 种组合方式, 那么本文所研究的问题就是寻找能够最大化集群协同效能的最优组合方案。组合优化是一种寻找离散事件下的最优编排、分组、排序等, 以达到在某个优化准则下的极大解或极小解的问题。组合优化问题已被证明是一个NP-hard问题, 难以在多项式时间内求解最优解。针对上述问题, 本文采用稳定匹配思想, 将上述问题抽象为一种线性整数规划模型, 并利用分支定界法求解全局最优, 降低问题的求解难度。

其次, 异构无人机集群“分布式”协同作战问题涉及多种类型无人机, 而传统的多边匹配算法无法保证一定存在稳定匹配解^[23-24]。因此, 需要对多边匹配问题进行转化, 保证稳定匹配解的存在性。

文中使用变量的符号定义如表1所示。

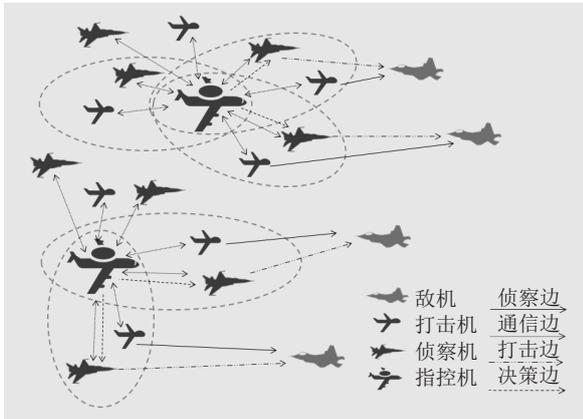


图1 异构无人机集群“分布式”作战示意

表1 主要变量符号定义

符号	说明
$A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$	侦察类无人机集合, $A_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 表示第 i 架侦察机
$B = \{B_1, B_2, \dots, B_n\}$	打击类无人机集合, $B_j (j = 1, 2, \dots, n)$ 表示第 j 架打击机
$C = \{C_1, C_2, \dots, C_u\}$	指控类无人机集合, $C_p (p = 1, 2, \dots, u)$ 表示第 p 架指控机
$\bar{D} = \{\bar{D}_1, \bar{D}_2, \dots, \bar{D}_o\}$	虚拟指控机集合, $\bar{D}_s (s = 1, 2, \dots, o)$ 表示第 s 个虚拟指控机
$d = \{2d_1, 2d_2, \dots, 2d_f\}$	侦察类无人机集合, $2d_q (q = 1, 2, \dots, f)$ 表示第 q 架侦察机的带宽
$T = \{T_1, T_2, \dots, T_t\}$	三边稳定匹配方案集合
$I = \{I_1, I_2, \dots, I_g\}$	异构无人机需要协同能力指标集合, $I_k (k = 1, 2, \dots, g)$ 表示第 k 项指标
$h_i^k, r_j^k, c_p^k, s_q^k$	在指标 I_k 下, A_i, B_j, C_p, D_q 的能力属性值
$\alpha_{ij}(k), \beta_{ij}(k), \lambda_{pq}(k), \gamma_{qp}(k)$	在指标 I_k 下, A_i 对 B_j, B_j 对 A_i, C_p 对 D_q, D_q 对 C_p 的协同性偏好
w^1, w^2, w^3, w^4	在指标 I_k 下, A_i 对 B_j, B_j 对 A_i, C_p 对 D_q, D_q 对 C_p 在采用TOPSIS方法聚合偏好时对考察指标赋予的权重
$T\alpha_{ij}(k)$	A_i 对 B_j 的综合协同性偏好
$T\beta_{ij}(k)$	B_j 对 A_i 的综合协同性偏好
$T\lambda_{pq}(k)$	C_p 对 D_q 的综合协同性偏好
$T\gamma_{qp}(k)$	D_q 对 C_p 的综合协同性偏好

2 基于能力协同性的偏好计算模型

2.1 异构无人机协同能力指标分析

根据无人机相关研究资料以及对无人机作战过程的分析^[25-26], 结合专家经验, 梳理异构无人机考虑协同的能力指标集合, 并给出双方在每个指标上的

相互偏好计算依据, 如表2所示。表2中, $A_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 表示第 i 架侦察机, $B_j (j = 1, 2, \dots, n)$ 表示第 j 架打击机, $C_p (p = 1, 2, \dots, u)$ 表示第 p 个察-打稳定匹配小组, $D_q (q = 1, 2, \dots, f)$ 表示第 q 架指控机。硬指标是指要求无人机必须满足的那些能力指标, 当满

表2 异构无人机考虑协同的部分基本能力指标及偏好计算依据

编号	指标	类型	A_i 对 B_j	B_j 对 A_i	C_p 对 D_q	D_q 对 C_p
$k = 1$	通信能力	硬指标	B_j 能否通信	A_i 能否通信	D_q 能否通信	C_p 是否均能通信
$k = 2$	响应效率	实数型	B_j 响应速度	A_i 响应速度	D_q 响应速度	C_p 最小响应速度
$k = 3$	带宽	实数型	—	—	D_q 带宽大小	—
$k = 4$	距离	实数型	B_j 与 A_i 距离	A_i 与 B_j 距离	D_q 与 C_p 平均距离	C_p 与 D_q 最大距离
$k = 5$	巡航速度	区间性	B_j 速度区间	A_i 速度区间	D_q 速度区间	C_p 速度重叠区间
$k = 6$	察/打半径	实数型	B_j 打击半径	A_i 侦察半径	—	C_p 察打最小半径
$k = 7$	续航时长	实数型	B_j 续航时长	A_i 续航时长	D_q 续航时长	C_p 最短续航时长

足时数值化为1,否则为0;实数值指标直接表示为实数,区间指标则用区间数值表示即可。

2.2 异构无人机的协同性偏好计算

协同性依赖于异构无人机在各项能力上的匹配程度,下面分别构建各指标下的协同性偏好计算规则,然后通过TOPSIS综合评价方法对所有指标下的协同性偏好进行聚合,形成综合协同性偏好.具体计算模型如下:

1) 对于硬指标:当满足时,协同性偏好值为1,否则为0.

$$\alpha_{ij}(k) = \begin{cases} 1, & B_j \text{ 满足 } A_i \text{ 对 } I_k \text{ 的要求;} \\ 0, & \text{otherwise;} \end{cases}$$

$$\beta_{ji}(k) = \begin{cases} 1, & A_i \text{ 满足 } B_j \text{ 对 } I_k \text{ 的要求;} \\ 0, & \text{otherwise;} \end{cases}$$

$$\lambda_{pq}(k) = \begin{cases} 1, & D_q \text{ 满足 } C_p \text{ 对 } I_k \text{ 的要求;} \\ 0, & \text{otherwise;} \end{cases}$$

$$\gamma_{qp}(k) = \begin{cases} 1, & C_p \text{ 满足 } D_q \text{ 对 } I_k \text{ 的要求;} \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (1)$$

2) 对于实数值指标:通过将对方的属性值与自身属性值相比方式测度协同性偏好值.

$$\alpha_{ij}(k) = \frac{r_j^k}{h_i^k}, \beta_{ji}(k) = \frac{h_i^k}{r_j^k},$$

$$\lambda_{pq}(k) = \frac{s_q^k}{d_p^k}, \gamma_{qp}(k) = \frac{d_p^k}{s_q^k}. \quad (2)$$

3) 对于区间指标:通过区间相对长度计算无人机能力属性值之间的协同度.图2分别展示了效用区间 h_i^k 与效用区间 r_j^k 相交、包含和相离的关系.

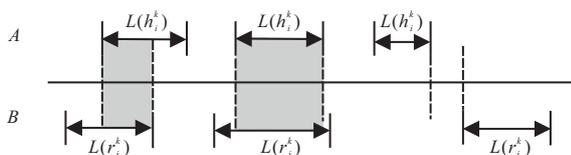


图2 效用区间的3种关系

具体方法是通过计算对方能力值区间长度相对于自身能力值区间长度的重叠率来衡量偏好值.

$$\alpha_{ij}(k) = \frac{L(h_i^k) \cap L(r_j^k)}{L(h_i^k)},$$

$$\beta_{ji}(k) = \frac{L(h_i^k) \cap L(r_j^k)}{L(r_j^k)},$$

$$\lambda_{pq}(k) = \frac{L(s_q^k) \cap L(d_p^k)}{L(s_q^k)},$$

$$\gamma_{qp}(k) = \frac{L(s_q^k) \cap L(d_p^k)}{L(d_p^k)}. \quad (3)$$

通过对 g 个指标下的协同性进行评价,得到 A_i 对 B_j 的协同性偏好矩阵 α_i , B_j 对 A_i 的协同性偏好矩阵 β_j , C_p 对 D_q 的协同性偏好矩阵 λ_p , D_q 对 C_p 的协同性偏好矩阵 γ_p .

$$\alpha_i = \begin{bmatrix} \alpha_{i1}(1) & \dots & \alpha_{i1}(g) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{in}(1) & \dots & \alpha_{in}(g) \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2, \dots, m;$$

$$\beta_j = \begin{bmatrix} \beta_{j1}(1) & \dots & \beta_{j1}(g) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \beta_{jm}(1) & \dots & \beta_{jm}(g) \end{bmatrix}, \quad j = 1, 2, \dots, n;$$

$$\lambda_p = \begin{bmatrix} \lambda_{p1}(1) & \dots & \lambda_{p1}(g) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda_{pq}(1) & \dots & \lambda_{pq}(g) \end{bmatrix}, \quad p = 1, 2, \dots, u;$$

$$\gamma_q = \begin{bmatrix} \gamma_{q1}(1) & \dots & \gamma_{q1}(g) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma_{qp}(1) & \dots & \gamma_{qp}(g) \end{bmatrix}, \quad q = 1, 2, \dots, f. \quad (4)$$

TOPSIS法是一种常用的综合评价方法,能充分反映各评价方案之间的优劣排序.其原理在于分别计算各评价对象与最优方案的相对接近程度,并以此作为评价优劣的依据^[27-28].通过对 g 个指标下的协同性偏好进行TOPSIS聚合后,得到 A_i 对 B_j 的综合协同性偏好矩阵 $T\alpha_i$,其中 $T\alpha_{ij}$ 表示 A_i 对 B_j 的综合协同性偏好.同时得到其他3个综合协同性偏好矩阵.

$$T\alpha_i = [T\alpha_{i1}, \dots, T\alpha_{in}]^T, \quad i = 1, 2, \dots, m;$$

$$T\beta_j = [T\beta_{j1}, \dots, T\beta_{jm}]^T, \quad j = 1, 2, \dots, n;$$

$$T\lambda_p = [T\lambda_{p1}, \dots, T\lambda_{pf}]^T, \quad p = 1, 2, \dots, u;$$

$$T\gamma_q = [T\gamma_{q1}, \dots, T\gamma_{qu}]^T, \quad q = 1, 2, \dots, f. \quad (5)$$

通过上述模型,可以得到双方相互之间的协同性偏好,用于异构无人机集群“分布式”协同中的稳定匹配的计算。

3 异构无人机集群“分布式”协同算法

3.1 异构无人机的协同偏好计算

根据第1部分描述的场景,本文要解决的问题是在异构无人机集群“分布式”协同作战中,考虑无人机

的能力协同性,将指控机、侦察机、打击机3类无人机进行有效编组,以实现结构稳定性、能力协同性的问题。多边匹配的问题不一定存在稳定匹配解,而双边一对一匹配问题已被证明一定存在稳定匹配解。因此,本文提出一种基于能力协同性的双层-双边的稳定匹配模型,一方面保证稳定匹配方案的存在性,一方面可以最大化能力协同性,具体流程如图3所示。

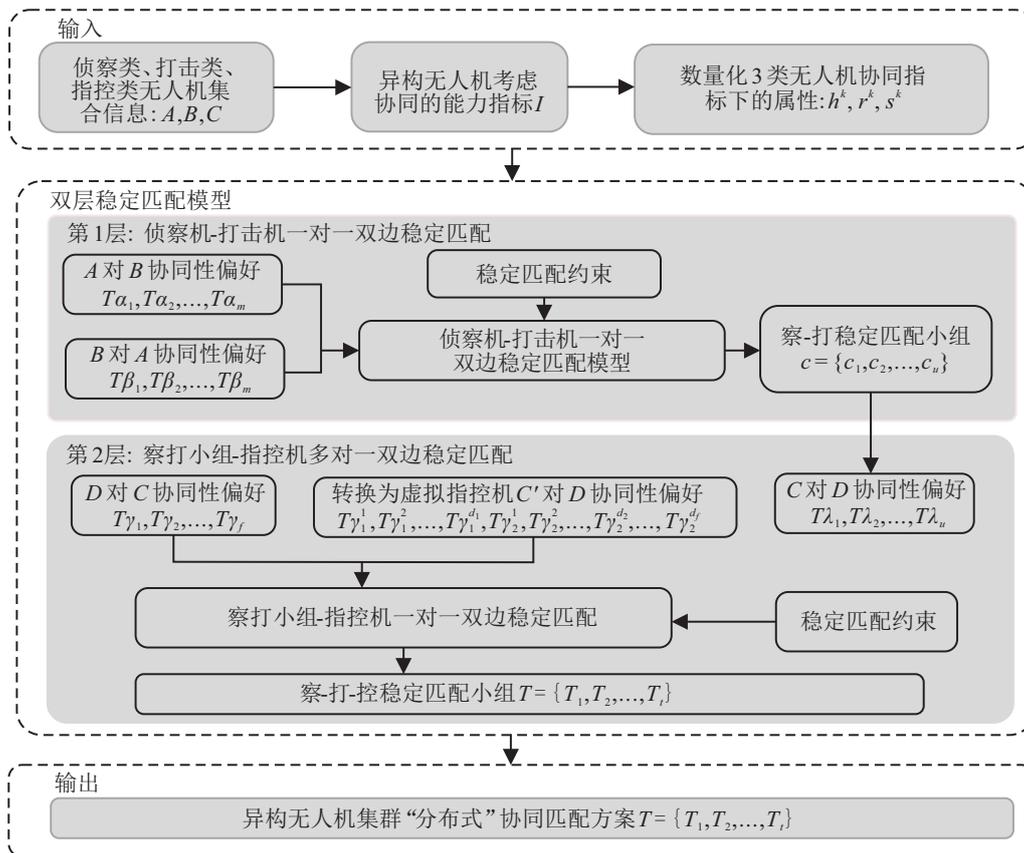


图3 异构无人机集群“分布式”协同算法流程

1) 信息收集: 协同作战前,收集我方指控类、侦察类和打击类无人机的编号等基本信息,以及协同能力指标集合 I ,并经过分析和量化处理得到侦察机 A_i 、打击机 B_j 和指控机 D_q 在能力指标 I_k 上的能力属性值 h_i^k 、 r_j^k 和 s_q^k 。

2) 侦察机-打击机稳定匹配: 第1层稳定匹配为侦察机和打击机的一对一双边稳定匹配模型,以集群中侦察机和打击机协同度最大为计算目标,得到侦察机和打击机的察-打稳定匹配小组集合 $C = \{C_1, C_2, \dots, C_u\}$,其中 C_p 表示第 p 个察-打稳定匹配小组,由一架侦察机和一架与之形成稳定匹配的打击机构成,在能力指标 I_k 上的能力属性值表示为 c_p^k 。

3) 察打小组-指控机稳定匹配: 第2层为察-打稳定匹配小组与指控机的多对一双边稳定模型,将第1层得到的稳定匹配方案集合 $C = \{C_1, C_2, \dots, C_u\}$

和指控机集合 $D = \{D_1, D_2, \dots, D_f\}$ 作为稳定匹配双方,指控机 D_q 通信载荷为 $2d_q$,最多同时与 $2d_q$ 架无人机(即 d_q 个察-打小组)构成稳定匹配,而每个察-打小组最多只能与一个指控机匹配。本文通过一定的方法将该多对一稳定匹配问题转化为一对一稳定匹配问题^[20]。

4) 问题输出: 以集群中察-打稳定匹配小组和指控机集群协同性最大为计算目标,最终得到3边协同稳定匹配方案集合 $T = \{T_1, T_2, \dots, T_o\}$,每个稳定匹配方案分别由指控机、侦察机、打击机各一架构成。

3.2 侦察机-打击机的一对一双边稳定匹配

首先,对侦察类和打击类无人机一对一双边稳定匹配进行定义^[10,21],用 $\mu = (A_i, B_j)$ 表示侦察机 A_i 和打击机 B_j 构成的匹配对,每架侦察机最多与一架打击机进行匹配,同时,每架打击机最多与一架侦察机

进行匹配。

定义侦察类和打击类无人机装备一对一阻塞匹配, 设一对一双边匹配 μ : 对于任意的侦察类无人机 $A_i, A_k \in A; B_j, B_h \in B; i \neq k, j \neq h$, 如果满足如下条件之一: 1) $\mu(A_i) = A_i, \mu(B_j) = B_j$; 2) $\mu(A_i) = B_h, \mu(B_j) = B_j$ 且 $T\alpha_{ij} > T\alpha_{ih}$; 3) $\mu(A_i) = A_i, \mu(B_j) = B_k$ 且 $T\beta_{ji} > T\alpha_{jk}$; 4) $\mu(A_i) = B_h, \mu(B_j) = B_k$ 且 $T\alpha_{ij} > T\alpha_{ih}, T\beta_{ji} > T\alpha_{jk}$. 则称匹配对 $\mu = (A_i, B_j)$ 是匹配 μ 的一个阻塞匹配对. 如果 μ 中不存在阻塞匹配对, 则称 μ 为关于集合 A 和集合 B 的一个稳定匹配方案; 否则, 称为不稳定匹配方案.

结合 Cosine 相似度概念, 同时考虑匹配双方的能力大小以及相对彼此的能力协同性偏好, 将双方对彼此的综合协同性偏好值相乘得到集群协同性. 两个能力值越大、越接近, 集群协同性越高. 首先定义决策变量

$$\alpha_{ij}(k) = \begin{cases} 1, & A_i \text{ 与 } B_j \text{ 构成匹配对;} \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (6)$$

根据前文关于问题的描述和异构无人机之间的协同性综合评价, 建立异构无人机一对一双边稳定匹配模型如下:

$$\max \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} \times T\alpha_{ij} \times T\beta_{ji}. \quad (7)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^m x_{ij} \leq 1, \quad j = 1, 2, \dots, n; \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq 1, \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad (9)$$

$$\alpha_{ij}(5) > 0, \quad \beta_{ji}(5) > 0; \quad (10)$$

$$x_{ij} + \sum_{\alpha_{ij} > \alpha_{ih}} x_{ih} + \sum_{\beta_{ji} > \beta_{jk}} x_{kj} \leq 1,$$

$$i, k = 1, 2, \dots, m, i \neq k, \\ j, h = 1, 2, \dots, n, j \neq h. \quad (11)$$

其中式(7)表示模型的目标函数即最大化集群协同度; 式(8)表示限制每架侦察机最多只能与一架打击机匹配; 式(9)表示限制每架打击机最多只能与一架侦察机匹配; 式(10)要求 A_i 和 B_j 的能力指标 I_5 属性值即巡航速度必须为相交或包含关系, 否则不能构成匹配对; 式(11)为一对一稳定匹配约束条件.

3.3 察打小组-指控机的多对一双边稳定匹配

将第1层稳定匹配得到的察打稳定匹配小组视为若干主体, 与指控机建立多对一双边稳定匹配模型. 然而针对多对一稳定匹配解的存在性, 许多文献^[26-27]提出稳定匹配的可替代性是存在稳定匹配解

决方案的关键因素, 即其中一方对另一方的偏好存在互补性, 例如团队要求运动员在技能和角色方面相互补充. 本文根据多对一双边匹配决策方法^[29], 将察打小组与指控机多对一稳定匹配问题转化为一对一稳定匹配问题, 可以保证本问题得到有效的解. 具体方法如下: 对于指控机 D_q , 最多同时与 $2d_q$ 架无人机, 即 d_q 个察打小组建立通信, 故可将 D_q 视为与其具有同样偏好的 d_q 个虚拟指控机, 记为 $D_q^1, D_q^2, \dots, D_q^{d_q}$, 他们对于察打小组 C_p 的综合协同性偏好均为 $T\gamma_{qp}$, 而察打小组 C_p 对他们的综合协同性偏好均为 $T\lambda_{pq}$, 且每个虚拟指控机最多只能匹配一个察打小组, 每个察打小组最多匹配一架虚拟指控机.

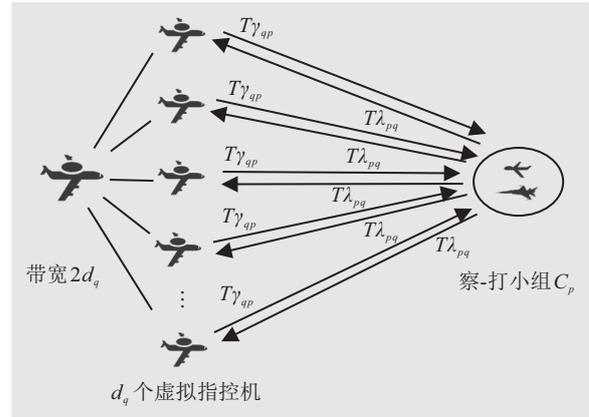


图4 多对一匹配转换为一对一匹配示意

虚拟指控机集合可以表示为 $\tilde{D} = \{\tilde{D}_1^1, \tilde{D}_1^2, \dots, \tilde{D}_1^{d_1}; \tilde{D}_2^1, \tilde{D}_2^2, \dots, \tilde{D}_2^{d_2}; \dots; \tilde{D}_f^1, \tilde{D}_f^2, \dots, \tilde{D}_f^{d_f}\}$, 为便于分析, 将集合为 \tilde{D} 表示为 $\tilde{D} = \{\tilde{D}_1, \tilde{D}_2, \dots, \tilde{D}_o\}$, 其中 $\sum_{k=1}^f d_k = o$.

用 $\mu = (C_p, \tilde{D}_s)$ 表示察打小组 C_p 和指控机 \tilde{D}_s 构成的匹配对, 若 μ 中不存在阻塞匹配对, 则称 μ 为关于集合 C 和集合 \tilde{D} 的一个稳定匹配方案; 否则, 称为不稳定匹配方案.

首先定义决策变量

$$x_{ps} = \begin{cases} 1, & C_p \text{ 与 } \tilde{D}_s \text{ 构成匹配对;} \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (12)$$

依据察打小组和指控机之间的综合协同性偏好, 建立察打小组与指控机改进的一对一双边稳定匹配模型如下:

$$\max \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ps} \times T\lambda_{ps} \times T\gamma_{sp}; \quad (13)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{s=1}^o x_{ps} \leq 1, \quad p = 1, 2, \dots, u; \quad (14)$$

$$\sum_{p=1}^u x_{ps} \leq 1, \quad s = 1, 2, \dots, o; \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \lambda_{ps}(5) > 0, \gamma_{sp}(5) > 0; & (16) \\ x_{ps} + \sum_{\lambda_{ps} > \lambda_{pe}} x_{pe} + \sum_{\gamma_{sp} > \beta_{sa}} x_{as} \leq 1; & \\ a, p = 1, 2, \dots, u, a \neq p, & \\ e, s = 1, 2, \dots, f, e \neq s. & (17) \end{aligned}$$

其中:式(13)表示模型的目标函数即最大化集群协同度;式(14)表示限制每架虚拟指控机最多只能与一个察-打小组匹配;式(15)表示限制每个察-打小组匹配最多只能与一架虚拟指控机匹配;式(16)要求 C_p 和 \widetilde{D}_s 的能力指标 I_5 属性值即巡航速度必须为相交或包含关系,否则不能构成匹配对;式(17)为一对一稳定匹配约束条件.

本文通过调用Cplex优化器的分支定界整数规划方法^[30]分别对以上两层模型进行求解,得到察-打一一对双边稳定小组 $C = C_1, C_2, \dots, C_u$ 及最终的指控、侦察、打击类无人机3边稳定匹配组合.分支定界法是求解整数规划问题最常用的算法.全部可行解空间反复地分割为越来越小的子集,称为分支;对每个子集内的解集计算一个目标下界/上界,称为定界.在每次分枝后,凡是界限超出已知可行解集目标值的那些子集不再进一步分枝,继而许多子集便可排除考虑,称为剪枝.现有分支定界法的研究已较为成熟,因此本文不再赘述.

4 异构无人机集群“分布式”协同算法

上节中的协同性评价计算过程虽然涉及匹配双方,但均是从各自角度出发考虑对方能力相对于自身的匹配程度.为了对匹配结果进行客观的评价,本节对于计算得到的匹配对 $\mu = (A_i, B_j)$ 和 $\mu = (C_p, \widetilde{D}_s)$,针对各个能力指标进行协同效果评价.

1) 对于硬指标,有

$$\begin{aligned} Y_{ij}(k) &= x_{ij} \times \alpha_{ij}(k) \times \beta_{ji}(k), \\ Y_{pq}(k) &= x_{ij} \times \alpha_{pq}(k) \times \beta_{qp}(k). \end{aligned} \quad (18)$$

仅当双方都满足彼此的硬指标需求时, $Y_{ij}(k) = 1$,否则, $Y_{ij}(k) = 0$.

2) 对于实数值指标 k ,认为匹配双方在能力 k 方面的表现越接近,协同效果越好,即

$$\begin{aligned} Y_{ij}(k) &= \frac{\min\{\alpha_{ij}(k), \beta_{ji}(k)\}}{\max\{\alpha_{ij}(k), \beta_{ji}(k)\}}, \\ Y_{pq}(k) &= \frac{\min\{\lambda_{pq}(k), \gamma_{qp}(k)\}}{\max\{\lambda_{pq}(k), \gamma_{qp}(k)\}}. \end{aligned} \quad (19)$$

3) 对于区间指标,有

$$Y_{pq}(k) = \frac{L(h_i^k \cap r_j^k)}{L(h_i^k) + L(r_j^k) - L(h_i^k \cap r_j^k)},$$

$$Y_{pq}(k) = \frac{L(c_p^k \cap s_q^k)}{L(c_p^k) + L(s_q^k) - L(c_p^k \cap s_q^k)}. \quad (20)$$

5 算例分析

依据一定的规则生成某次无人机集群作战中1000架侦察类无人机、1000架打击类无人机和50架指控类无人机的能力属性值信息,数据生成规则如下:1)对于响应效率,3类无人属性值均在[2,9]内取随机整数;2)对于巡航速度区间,侦察机最小速度在[80,120]内取随机整数,打击机和指控机的最小速度在[80,150]内取随机整数,每架无人机的最大巡航速度在其最小速度基础上随机加上[20,150]内的整数值取得;3)侦察机的侦察半径均在[80,100]内取随机整数;4)打击机的打击半径均在[80,120]内取随机整数;5)3类无人机的续航时长均在区间[5,8]内取随机整数.需要考虑协同的能力指标及各方对协同性的评价依据如2.1节中表2所示.每次实验中随机选择相应数量的无人机及其信息数据.规定所有的无人机都具备通信能力,因此利用TOPSIS方法进行偏好聚合时考虑通信能力以外的其他5个指标,并认为 $\omega_1 = \omega_2 = \{0.1, 0.6, 0.1, 0.1, 0.1\}$, $\omega_3 = \omega_4 = \{0.3, 0.2, 0.3, 0.1, 0.1\}$.

5.1 小规模异构无人机集群“分布式”协同稳定匹配问题分析

为了验证异构无人机集群“分布式”协同算法的有效性,首先利用本文方法进行小规模匹配实验,随机抽取侦察机、打击机各20架,指控机4架.

第1层稳定匹配用时0.94s,得到的20组侦察/打击机匹配方案,集群协同性为9.65;第2层稳定匹配用时1.57s,集群协同性为5.92,得到最终的20组侦察/打击/指控机编组匹配方案如图5所示.

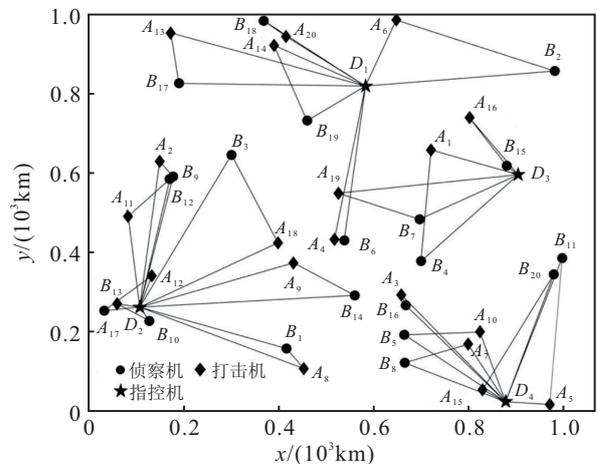


图5 小规模匹配最终方案

将各匹配对中侦察机、指控机和打击机的巡航速度区间、响应效率、续航时长属性值绘制为条形图

进行对比,如图6~图8条形图所示;图9条形图表示侦察/打击无人机匹配对的侦察/打击半径协同效果评价.对于第1层和第2层稳定匹配得到的方案,利用第4节中的方法,分别对察/打无人机、察打小组与指控无人机的能力进行协同性评价.

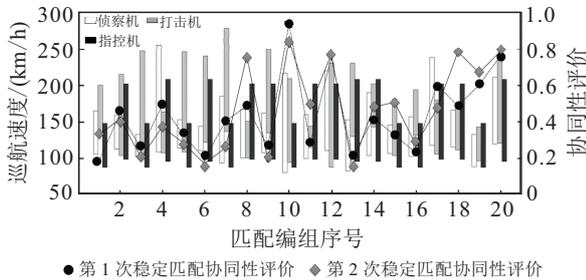


图6 速度及协同性评价

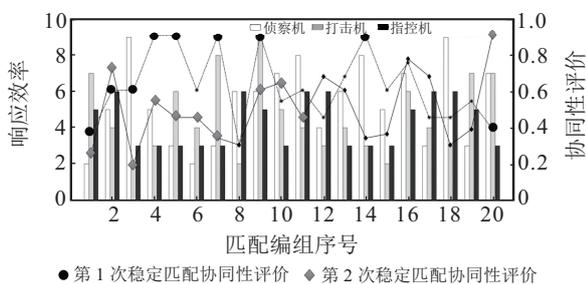


图7 响应效率及协同性评价

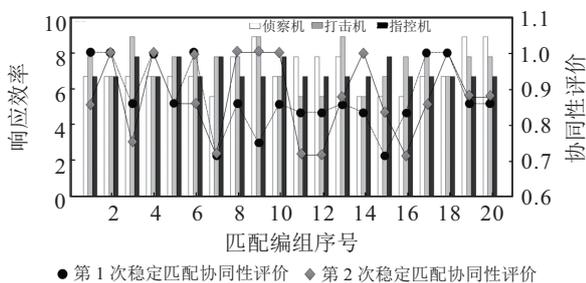


图8 续航时间及协同性评价

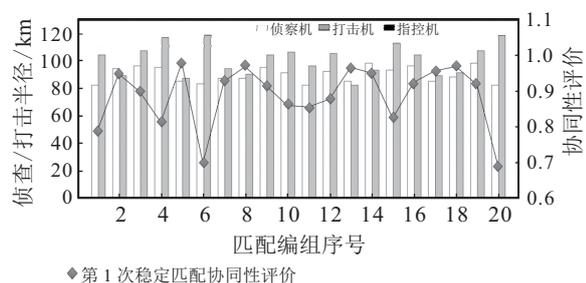


图9 侦察/打击半径及协同性评价

5.2 与基准算法对比

为了验证基于协同度的无人机稳定匹配方法的计算效率,将其与差分进化算法进行求解对比,主要比较其求解速度和求解方案的最大全局协同度.

差分进化算法采用实数编码,0表示未匹配,1表示构成匹配对,随机生成初始解为匹配矩阵.不同匹配规模下稳定匹配方法随机计算一次,差分进化算法随机计算次数和迭代次数设置,两种方法的求解用时如表3所示.其中规模由3边匹配主体即该次实验中侦察机、打击机、指控机的数量组成,例如 $10 \times 10 \times 2$ 表示10架侦察机、10架打击机和2架指控机构成了异构无人机集群,针对该集群运用本文算法求解最优侦察-打击-指控稳定匹配方案.

表3 双层匹配模型中求解用时及集群协同性

规模	第1层匹配模型		第2层匹配模型	
	用时/s	集群协同性	用时/s	集群协同性
$10 \times 10 \times 2$	0.55	4.87	0.43	2.45
$20 \times 20 \times 4$	1.12	8.46	1.44	5.52
$30 \times 30 \times 6$	2.17	13.41	3.34	8.71
$40 \times 40 \times 8$	3.91	16.62	9.63	12.53
$50 \times 50 \times 10$	6.42	19.41	17.67	16.53
$60 \times 60 \times 12$	9.01	23.22	41.90	20.47
$70 \times 70 \times 14$	13.07	27.84	143.84	21.30
$80 \times 80 \times 16$	17.78	33.72	378.53	30.85
$90 \times 90 \times 18$	22.63	33.65	1518.09	32.95
$100 \times 100 \times 20$	28.33	38.64	2940.08	34.33

由表3可以看出,随着匹配规模在较小程度上增加,差分进化算法相对于本文提出的协同算法,在耗时和求得的集群协同性方面均已经表现出明显劣势.本节在 $30 \times 30 \times 6$ 以上规模亦进行了实验,但差分进化算法耗时过长且迭代次数超过10000次,也难以求解.这表明本文稳定匹配方法相对于差分进化算法在求解质量和求解速度方面具有显著的优势.

5.3 大规模优化能力验证

为了验证基于协同度的无人机稳定匹配方法在大规模无人机匹配问题中的应用效果,将本问题匹配规模从 $10 \times 10 \times 2$ 逐次增至 $100 \times 100 \times 20$.每个规模下随机运算20次,取得平均用时和评价集群协同性如表4所示.平均集群协同性和平均求解用时随着匹配规模的增大呈现出明显的增长趋势.当匹配规

表4 双层匹配模型中求解用时及集群协同性

匹配模型	规模	随机次数	迭代次数	本文算法		差分进化算法	
				用时/s	集群协同性	用时/s	集群协同性
第1层	$10 \times 10 \times 2$	10	1000	1.24	3.99	40.12	3.26
	$20 \times 20 \times 4$	10	2000	1.87	7.83	418.44	2.58
	$30 \times 30 \times 6$	10	3000	2.90	10.51	1111.73	2.38
第2层	$10 \times 10 \times 2$	10	1000	0.48	3.02	6.71	3.47
	$20 \times 20 \times 4$	10	2000	1.50	6.53	17.42	1.43
	$30 \times 30 \times 6$	10	10000	3.06	7.84	124.5	1.77

模在 $70 \times 70 \times 14$ 以下时, 本文提出的初步方法基本能在 40 s 内求解出 3 边稳定的匹配方案。

根据第 4 节介绍的评价方法, 对每个规模下的 20 次随机运算得到的匹配结果进行协同效果评价, 取每个规模下的 20 次结果的匹配程度的平均值进行分析, 得到察打小组与指控机巡航速度、响应效率、续航时间的协同效果评价, 及察打小组内侦察机的侦察半径与打击机的打击半径的协同效果评价, 如图 10 和图 11 所示。其中为了便于对比, 用 (距离值/1 000) 来度量匹配对之间的评价距离, 用 I_4 表示。

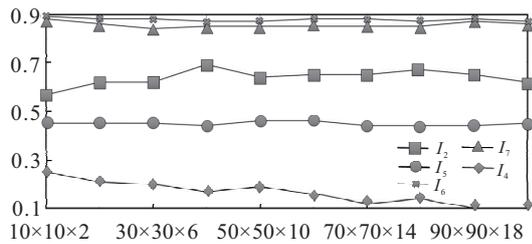


图 10 速度及协同性评价

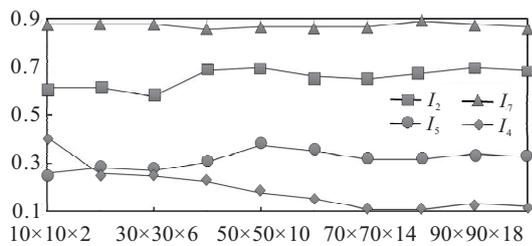


图 11 响应效率及协同性评价

由图 10、图 11 可以看出, 第 1 层匹配模型中侦察/打击半径的协同性评价价值 (I_6) 保持在 0.85~0.9 之间, 续航时间的协同性评价价值 (I_7) 在 0.85 左右, 巡航速度 (I_5) 和响应效率 (I_2) 也呈现较好的匹配效果。第 2 层匹配模型中, 巡航速度续航时间的匹配程度在 0.85 左右, 响应效率也呈现较好的匹配效果。需要说明的是, 本节用 I_4 (距离值/1 000) 来度量匹配对之间的评价距离, 随着匹配规模增大, 两层匹配模型中的 I_4 值均在缩小, 意味着匹配对的平均距离在减小。这是因为本算例中将匹配对之间的距离赋予了较大的权重, 当匹配规模对增多, 距离的影响对于全局协同度的影响也在逐渐增大。

实验 3 说明了本文的稳定匹配方法应用于大规模稳定匹配时, 能以较高的效率得到优良的结果, 并且这种优良性随着匹配规模的增大有增强趋势。

6 结论

本文重点面向异构无人机集群“分布式”协同作战场景, 研究了异构无人机集群编组问题, 提出基于双层稳定匹配的异构无人机集群“分布式”协同算法, 解决如何对异构无人机之间进行匹配编组, 以保证其

能力协同的有效性, 同时保证其编组结构的稳定性。

本文首先说明了研究异构无人机集群编组结构稳定和协同的重要性, 对异构无人机集群“分布式”协同问题进行了描述和分析; 然后分析了异构无人机协同能力指标并对其进行分类, 针对不同类型的指标构建了基于能力协同性的偏好计算模型。基于能力协同性偏好, 研究了异构无人机集群“分布式”协同算法, 并重点阐述了算法中的双层稳定匹配模型: 第 1 层为侦察机-打击机的一对一双边稳定匹配模型, 第 2 层为察打小组-指控机的多对一双边稳定匹配模型, 通过两次双边稳定匹配求解 3 边异构无人机匹配方案。其中, 针对察打小组-指控机的多对一双边稳定匹配模型, 将其转换为一对一双边稳定匹配, 保证稳定解的存在。本文针对匹配方案设计了协同性评价的方法, 并给出了具体的算例, 分别进行了 3 组实验, 能较好地说明本文提出的算法在求解质量和求解速度方面都表现出优良的效果, 相对于基准算法也得到了很好的表现, 能适用于一定范围内的大规模无人机匹配问题。

本文对于后续研究工作的展望主要分为两部分: 一是对于问题本身还需要进一步考虑现实因素, 异构无人机集群“分布式”协同作战或将面临更多类型之间的匹配编组问题; 二是对于算法本身还需要进行优化, 提高求解速度和求解质量, 以确保在更大规模中快速得到稳定匹配方案。

参考文献 (References)

- [1] 罗德林, 徐扬, 张金鹏. 无人机集群对抗技术新进展[J]. 科技导报, 2017, 35(7): 26-31.
(Luo D L, Xu Y, Zhang J P. New progresses on UAV swarm confrontation[J]. Science & Technology Review, 2017, 35(7): 26-31.)
- [2] 美国海军研究局. LOCUST: Autonomous, swarming UAVs fly into the future [EB/OL]. (2015-04-14). <http://www.onr.navy.mil/Media-Center/Press-Releases/2015/LOCUST-low-cost-UAV-swarm-ONR.2015-04-14>.
- [3] 贾永楠, 田似营, 李擎. 无人机集群研究进展综述[J]. 航空学报, 2020, 41(S1): 4-14.
(Jia Y N, Tian S Y, Li Q. Recent development of unmanned aerial vehicle swarms[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(S1): 4-14.)
- [4] Yang J, You X H, Wu G X, et al. Application of reinforcement learning in UAV cluster task scheduling[J]. Future Generation Computer Systems, 2019, 95: 140-148.
- [5] Kuriki Y, Namerikawa T. Consensus-based cooperative formation control with collision avoidance for a multi-UAV system[C]. 2014 American Control Conference. Portland: IEEE Press, 2014: 2077-2082.
- [6] Rosati S, Kruelecki K, Heitz G, et al. Dynamic routing

- for flying ad hoc networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(3): 1690-1700.
- [7] Lau S Y, Naeem W. Co-operative tensegrity-based formation control algorithm for a multi-aircraft system[C]. 2015 American Control Conference (ACC). Chicago, 2015: 750-756.
- [8] 列罗, 马萨. 异构多无人机[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 32.
(Anibal Ollero, Iván Maza. Multiple heterogeneous unmanned aerial vehicles[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012: 32.)
- [9] 孙一杰, 张国良, 张胜修, 等. 一类异构多智能体系统一致性协议的收敛性分析[J]. 控制理论与应用, 2014, 31(11): 1524-1529.
(Sun Y J, Zhang G L, Zhang S X, et al. Convergence analysis for consensus protocol of heterogeneous multi-agent systems[J]. Control Theory & Applications, 2014, 31(11): 1524-1529.)
- [10] Wu W N, Cui N G, Shan W Z, et al. Distributed task allocation for multiple heterogeneous UAVs based on consensus algorithm and online cooperative strategy[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2018, 90(9): 1464-1473.
- [11] Yang J, Xu X, Yin D, et al. A space mapping based 0-1 linear model for onboard conflict resolution of heterogeneous unmanned aerial vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(8): 7455-7465.
- [12] Chen J C, Du C L, Lu X, et al. Multi-region coverage path planning for heterogeneous unmanned aerial vehicles systems[C]. 2019 IEEE International Conference on Service-Oriented System Engineering (SOSE). San Francisco, 2019: 356-365.
- [13] Gale D, Shapley L S. College admissions and the stability of marriage[J]. The American Mathematical Monthly, 2013, 120(5): 386-391.
- [14] Manlove D F, O'Malley G, Prosser P, et al. A constraint programming approach to the hospitals/residents problem[C]. Integration of AI and OR Techniques in Constraint Programming for Combinatorial Optimization Problems, 2007: 155-170.
- [15] Eirinakis P, Magos D, Mourtos I, et al. Hyperarc consistency for the stable admissions problem[C]. The 19th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI 2007). Patras, 2007: 239-242.
- [16] Jiang Z Z, Zhang R Y, Fan Z P, et al. A fuzzy matching model with Hurwicz criteria for one-shot multi-attribute exchanges in E-brokerage[J]. Fuzzy Optimization and Decision Making, 2015, 14(1): 77-96.
- [17] Xu H, Li B C. Egalitarian stable matching for VM migration in cloud computing[C]. 2011 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS). Shanghai, 2011: 631-636.
- [18] bdukkadiroglu A, SSnmez T. Matching markets: Theory and practice[J]. Advances in Economics and Econometrics, 2013, 1: 3-47.
- [19] Hatfield J W, Kominers S D. Multilateral matching[J]. Journal of Economic Theory, 2015, 156: 175-206.
- [20] Kadam S V. Unilateral substitutability implies substitutable completability in many-to-one matching with contracts[J]. Games and Economic Behavior, 2017, 102: 56-68.
- [21] Ackermann H, Goldberg P W, Mirrokni V S, et al. Uncoordinated two-sided matching markets[J]. SIAM Journal on Computing, 2011, 40(1): 92-106.
- [22] Bazin A A. Boyd's OODA loop and the infantry company commander[J]. Infantry, 2005, 18(1): 17-19.
- [23] Alkan A. Nonexistence of stable threesome matchings[J]. Mathematical Social Sciences, 1988, 16(2): 207-209.
- [24] Hatfield J W, Kominers S D. Multilateral matching[J]. Journal of Economic Theory, 2015, 156: 175-206.
- [25] 汪浩洋, 杨梅枝. 美军无人机发展现状及趋势[J]. 飞航导弹, 2020(2): 46-50.
(Wang H Y, Yang M Z. Development status and trend of American UAV[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2020(2): 46-50.)
- [26] 于力, 马振利, 江宝城. 外军军用无人机体系现状及发展趋势[J]. 飞航导弹, 2020(5): 34-39.
(Yu L, Ma Z L, Jiang B C. Current status and development trend of foreign military UAV systems[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2020(5): 34-39.)
- [27] 邱苑华. 管理决策与应用熵学[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001: 193-196.
(Qiu W H. Management decision entropy and its application[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2001: 193-196.)
- [28] Hwang C L, Yoon K, Hwang C L, et al. Multiple attribute decision making[J]. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, 1981, 404(4): 287-288.
- [29] 李铭洋, 樊治平, 乐琦. 考虑稳定匹配条件的一对多双边匹配决策方法[J]. 系统工程学报, 2013, 28(4): 454-463.
(Li M Y, Fan Z P, Yue Q. Decision analysis method for one-to-many two-sided matching considering stable matching condition[J]. Journal of Systems Engineering, 2013, 28(4): 454-463.)
- [30] Cadarso L, Marín Á. Robust rolling stock in rapid transit networks[J]. Computers & Operations Research, 2011, 38(8): 1131-1142.

作者简介

向竹(1997-), 女, 硕士生, 从事体系建模与分析的研究, E-mail: xiangzhu_xz@163.com;

杨志伟(1988-), 男, 副教授, 博士, 从事系统优化、供应链优化等研究, E-mail: zhwyang88@126.com;

杨克巍(1977-), 男, 教授, 博士生导师, 从事体系需求建模、体系结构设计与优化等研究, E-mail: kayyang27@nudt.edu.cn;

夏博远(1994-), 男, 博士生, 从事国防采办、复杂系统及系统组合选择与优化的研究, E-mail: xiaboyuan@nudt.edu.cn.