

# 有人/无人机协同作战系统 C2 结构和 行动计划适应性设计方法

钟 贇<sup>1</sup>, 姚佩阳<sup>1</sup>, 张杰勇<sup>1</sup>, 熊焯明<sup>2</sup>, 吴吉祥<sup>3</sup>

(1. 空军工程大学信息与导航学院, 西安, 710077; 2. 西安电子科技大学计划财务处, 西安, 710126;  
3. 空军通信士官学校, 辽宁大连, 116600)

**摘要** 针对有人/无人机协同作战系统指挥控制(C2)结构和行动计划设计问题,基于粒度计算思想,提出分层适应性设计方法。将C2结构和行动计划适应性设计问题分解为平台编组方案生成、任务调度方案生成、平台编组方案调整和任务调度方案调整4个子问题,从而有效降低问题求解规模。首先,建立适应性设计框架;其次,对关键元素属性进行形式化描述;然后,详细分析子问题耦合关系;最后,给出了4个子问题的适应性设计方法。

**关键词** 有人/无人机;指挥控制结构;行动计划;粒度计算;适应性设计

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2019.03.007

**中图分类号** E917 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2019)03-0038-08

## An Adaptive Design Method for C2 Structure and Action Plan in MAV/UAV Cooperative Engagement System

ZHONG Yun<sup>1</sup>, YAO Peiyang<sup>1</sup>, ZHANG Jieyong<sup>1</sup>, XIONG Yeming<sup>2</sup>, WU Jixiang<sup>3</sup>

(1. Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;  
2. Financial Department, Xidian University, Xi'an 710126, China;  
3. Air Force Communication Sergeant School, Dalian 116600, Liaoning, China)

**Abstract:** In view of the designing method for C2 structure and action plan in manned/unmanned aerial vehicle (MAV/UAV) cooperative engagement system based on the granular computation theory, a hierarchical adaptive design method is proposed. The plan is classified into four smaller sub-problems, i. e., platform marshalling scheme generation, task schedule scheme generation, platform marshalling scheme adjustment, and task schedule scheme adjustment, reducing the problem solving scale by so doing. Firstly, an adaptive design framework is established, and a formalized description to key element attributes is given. Secondly, the coupling relationship of sub-problems is analyzed in detail, and lastly, the corresponding adaptive design methods for four sub-problems are presented.

**Key words:** manned/unmanned aerial vehicle (MAV/UAV); command and control (C2) structure; action plan; granular computation; adaptive design method

**收稿日期:** 2018-05-30

**基金项目:** 国家自然科学基金(61573017);空军工程大学信息与导航学院博士生创新基金(KGD08101604)

**作者简介:** 钟 贇(1990—),男,江苏金坛人,博士生,主要从事有人/无人机协同作战研究。E-mail:718227697@qq.com

**引用格式:** 钟贇,姚佩阳,张杰勇,等. 有人/无人机协同作战系统 C2 结构和行动计划适应性设计方法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2019, 20(3): 38-45. ZHONG Yun, YAO Peiyang, ZHANG Jieyong, et al. An Adaptive Design Method for C2 Structure and Action Plan in MAV/UAV Cooperative Engagement System[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2019, 20(3): 38-45.

新军事变革背景下,未来战争形态将按照机械化战争→信息化战争→智能化战争的图景次第展开<sup>[1]</sup>。当前,空中作战装备仍然以有人机(Manned Aerial Vehicle, MAV)为主,随着“分布式作战”、“零伤亡战争”、“无人作战”等作战思想的兴起,以及态势感知技术<sup>[2]</sup>、智能决策技术<sup>[3-4]</sup>、协同控制技术<sup>[5-6]</sup>和通信网络技术<sup>[7]</sup>的不断成熟,未来空中联合作战体系将向“有人/无人机协同作战”、“全无人机协同作战”的方向发展<sup>[8-10]</sup>。

协同作战系统指挥控制(Command and Control, C2)结构和行动计划适应性设计问题,是指根据预先战场环境、任务需求和平台属性信息,科学合理地设计相适应的平台编组(C2 结构)和任务调度(行动计划)模型和方法,并根据战场环境、任务需求和平台属性的动态变化情况,适时适度地调整平台编组方案和任务调度方案<sup>[11]</sup>。对于这一问题,国内外研究人员对关键研究点开展了针对性研究,主要包括:基于编队层、编组层和平台层的 3 层有人/无人机指挥控制结构<sup>[14]</sup>,基于两阶段思想的有人/无人机平台编组方案生成方法<sup>[15]</sup>,基于贪心规划思想

的无人机任务调度方案生成方法<sup>[16]</sup>,基于扩展三阶段思想的无人机任务调度方案生成方法<sup>[17]</sup>。现有研究主要存在以下不足:研究系统性不足,未从系统角度对有人/无人机协同作战系统 C2 结构和行动计划进行一体化设计;研究成果多集中于预先设计方面,对 C2 结构的临机调整方面研究相对不足。

因此,针对当前研究不足,本文提出一种新的有人/无人机协同作战系统 C2 结构和行动计划适应性设计框架,分别给出平台编组方案和任务调度方案的预先和演化设计方法。

## 1 有人/无人机协同作战系统形式化描述

在协同作战系统对作战目标执行侦察、打击和评估任务过程中,借鉴分层递阶思想<sup>[17]</sup>和粒度计算思想<sup>[18]</sup>,生成和调整有人/无人机编组和无人机任务执行编队,从而实现从粗粒度到细粒度的作战使命分步完成,主要包括 6 个步骤,作战任务过程见图 1。

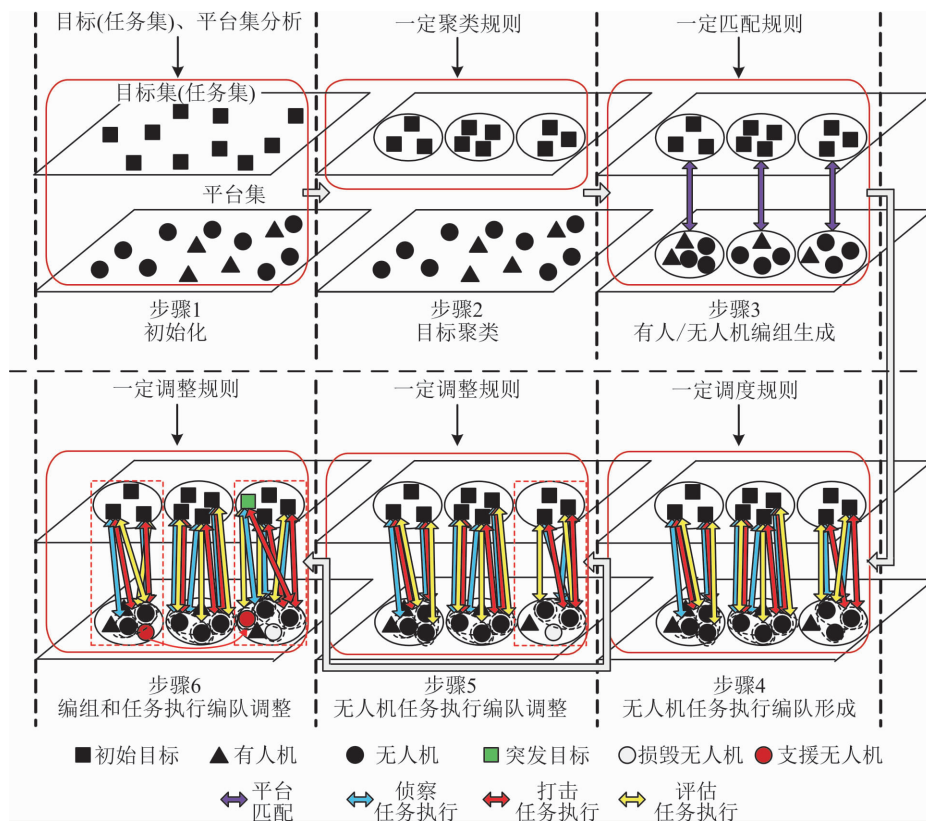


图 1 有人/无人机协同作战系统执行作战任务过程

步骤 1:对作战目标集(任务集)和作战平台集进行初始化;步骤 2:采用一定聚类算法,并依据一定聚类规则(目标间地理距离和资源距离),对目标进行聚类;步骤 3:依据一定匹配规则,进行有人机-

目标簇、无人机-目标簇匹配;步骤 4:依据一定调度规则,进行各目标簇内无人机-任务执行关系设计;步骤 5:对任务执行过程中的突发事件进行分析,区分情况,在只需调整任务调度方案时,依据一定调整

规则进行任务调度方案调整;步骤6:在需要对平台编组方案和任务调度方案均需进行调整时,依据一定调整规则进行相应调整。其中,步骤2和步骤3共同构成平台编组方案生成,步骤4为任务调度方案生成,步骤5为任务调度方案调整,步骤6为平台编组方案和任务调度方案同时调整。

有人/无人机协同作战系统形式化描述对象主要包括作战实体、实体关系和作战环境3类。下面,分别进行分析。

### 1.1 作战实体

1) 有人机(MAV, M),是有人/无人机协同作战系统的作战管理者,负责任务执行中的规划、监督和干预,并在必要时与无人机进行战术协同,从而共同完成作战任务<sup>[19]</sup>。有人机集合记为  $M = \{M_1, M_2, \dots, M_{|M|}\}$ ,其中,  $|M|$  为有人机数量。对于  $\forall M_i \in M$ ,其基本属性为:指控负载阈值  $CCM_i$ 。

2) 无人机(UAV, U),是有人/无人机协同作战系统的任务执行者,在战场前沿进行各类作战任务<sup>[20]</sup>。无人机集合记为  $U = \{U_1, U_2, \dots, U_{|U|}\}$ ,其中,  $|U|$  为无人机数量。对于  $\forall U_j \in U$ ,其基本属性为:①资源能力向量  $\mathbf{R}_j^u = [r_{j1}^u, r_{j2}^u, \dots, r_{j|R|}^u]$ ,  $|R|$  为资源种类;②位置  $Loc_j^u = (a_j^u, b_j^u)$ ;③平均航速  $\bar{v}_j$ ;④航迹  $Flight_j$ 。

3) 目标(Target, TAR),是有人/无人机协同作战系统的直接作战对象。目标集合记为  $TAR = \{TAR_1, TAR_2, \dots, TAR_{|TAR|}\}$ ,其中,  $|TAR|$  为目标数量。对于  $\forall TAR_k \in TAR$ ,其基本属性为:①资源需求向量  $\mathbf{R}_k^{tar} = [r_{k1}^{tar}, r_{k2}^{tar}, \dots, r_{k|R|}^{tar}]$ ;②位置  $Loc_k^{tar} = (a_k^{tar}, b_k^{tar})$ 。

4) 任务(Task, TAS),是有人/无人机协同作战系统对作战目标采取的作战行动。任务集合记为  $TAS = \{TAS_1, TAS_2, \dots, TAS_{|TAS|}\}$ ,其中,  $|TAS|$  为任务数量,一般对目标执行侦察、打击、评估任务,因此,有  $|TAS| = 3|TAR|$  成立。对于  $\forall TAS_l \in TAS$ ,其基本属性为:①资源需求向量  $\mathbf{R}_l^{tas} = [r_{l1}^{tas}, r_{l2}^{tas}, \dots, r_{l|R|}^{tas}]$ ;②任务开始时间  $sc_l^{tas}$ ;③任务完成时间  $fc_l^{tas}$ ;④任务处理时间  $dc_l^{tas}$ ;⑤位置  $Loc_l^{tas} = (a_l^{tas}, b_l^{tas})$ ;⑥任务执行开始点坐标  $SLoc_l^{tas} = (sa_l^{tas}, sb_l^{tas})$ ;⑦任务执行结束点坐标  $ELoc_l^{tas} = (ea_l^{tas}, eb_l^{tas})$ 。则有  $fc_l^{tas} = sc_l^{tas} + dc_l^{tas}$ ,且对  $\forall k (1 \leq k \leq |TAR|)$ ,  $\exists l = 3k$ ,有  $\mathbf{R}_k^{tar} = \mathbf{R}_{l-2}^{tas} + \mathbf{R}_{l-1}^{tas} + \mathbf{R}_l^{tas}$ 。

5) 目标簇(Target Cluster, TC),是按照一定聚类规则对目标聚类形成的目标分组。目标簇集合记为  $TC = \{TC_1, TC_2, \dots, TC_{|TC|}\}$ ,其中,  $|TC|$  为目标

簇数量。对于  $\forall TC_m \in TC$ ,其基本属性为:①簇内所含目标数量  $N_{TAR}^{TC}$ ;②中心点位置  $Loc_m^{tc} = k(a_m^{tc}, b_m^{tc})$  ( $\sum_{k=1}^{|TAR|} x_{km}^{TAR-TC} a_k^{tar} / \sum_{k=1}^{|TAR|} x_{km}^{TAR-TC}$ ,  $\sum_{k=1}^{|TAR|} x_{km}^{TAR-TC} b_k^{tar} / \sum_{k=1}^{|TAR|} x_{km}^{TAR-TC}$ );③资源需求向量  $\mathbf{R}_m^{tc} = [r_{m1}^{tc}, r_{m2}^{tc}, \dots, r_{m|R|}^{tc}]$ ,其中,  $r_{m1}^{tc} = \sum_{k=1}^{|TAR|} x_{km}^{TAR-TC} r_{k1}^{tar} / \sum_{k=1}^{|TAR|} x_{km}^{TAR-TC}$ 。 $x_{km}^{TAR-TC}$  表示目标  $TAR_k$  是否归属于目标簇  $TC_m$  的决策变量,具体定义见1.2节。

### 1.2 实体关系

有人/无人机协同作战系统作战实体间关系是构成有人/无人机协同作战系统C2结构和行动计划的核心要素,主要包括直接关系(关系1~5)、间接关系(关系6~7)和辅助关系(关系8)3大类,具体定义如下:

1) 目标-任务分解关系  $Rel_{TAR-TAS}$  由矩阵  $\mathbf{X}^{TAR-TAS} = (x_{kl}^{TAR-TAS})_{|TAR| \times |TAS|}$  表示,若任务  $TAS_l$  为目标  $TAR_k$  的分解任务,则  $x_{kl}^{TAR-TAS} = 1$ ,否则  $x_{kl}^{TAR-TAS} = 0$ 。 $\mathbf{X}^{TAR-TAS}$  为预先设定矩阵,无需设计。

2) 目标-目标簇聚类关系  $Rel_{TAR-TC}$  由矩阵  $\mathbf{X}^{TAR-TC} = (x_{km}^{TAR-TC})_{|TAR| \times |TC|}$  表示,若目标  $TAR_k$  归属于目标簇  $TC_m$ ,则  $x_{km}^{TAR-TC} = 1$ ,否则  $x_{km}^{TAR-TC} = 0$ 。

3) 有人机-目标簇匹配关系  $Rel_{M-TC}$  由矩阵  $\mathbf{X}^{M-TC} = (x_{im}^{M-TC})_{|M| \times |TC|}$  表示,若有人机  $M_i$  指挥无人机执行目标簇  $TC_m$  内任务,则  $x_{im}^{M-TC} = 1$ ,否则  $x_{im}^{M-TC} = 0$ 。

4) 无人机-目标簇匹配关系  $Rel_{U-TC}$  由矩阵  $\mathbf{X}^{U-TC} = (x_{jm}^{U-TC})_{|U| \times |TC|}$  表示,若无人机  $U_j$  执行目标簇  $TC_m$  内任务,则  $x_{jm}^{U-TC} = 1$ ,否则  $x_{jm}^{U-TC} = 0$ 。

5) 无人机-任务执行关系  $Rel_{U-TAS}$  由矩阵  $\mathbf{X}^{U-TAS} = (x_{jl}^{U-TAS})_{|U| \times |TAS|}$  表示,若无人机  $U_j$  执行任务  $TAS_l$ ,则  $x_{jl}^{U-TAS} = 1$ ,否则  $x_{jl}^{U-TAS} = 0$ 。

6) 有人机-无人机指控关系  $Rel_{M-U}$  由矩阵  $\mathbf{X}^{M-U} = (x_{ij}^{M-U})_{|M| \times |U|} = \mathbf{X}^{M-TX} (\mathbf{X}^{U-TC})^T$  表示,若有人机  $M_i$  指挥无人机  $U_j$  执行某一目标簇内任务,则  $x_{ij}^{M-U} = 1$ ,否则  $x_{ij}^{M-U} = 0$ 。

7) 任务-目标簇归属关系  $Rel_{TAS-TC}$  由矩阵  $\mathbf{X}^{TAS-TC} = (x_{lm}^{TAS-TC})_{|TAS| \times |TC|} = (\mathbf{X}^{TAR-TAS})^T \mathbf{X}^{TAR-TC}$  表示,若任务  $TAS_l$  归属于目标簇  $TC_m$ ,则  $x_{lm}^{TAS-TC} = 1$ ,否则  $x_{lm}^{TAS-TC} = 0$ 。

8) 任务-任务执行转移关系  $Rel_{U-TAS-TAS}$  由三维矩阵  $\mathbf{Y}^{U-TAS-TAS} = (y_{j'l'}^{U-TAS-TAS})_{|U| \times |TAS| \times |TAS|}$  表示,若无人机  $U_j$  执行完任务  $TAS_{l'}$  后执行  $TAS_l$ ,则  $y_{j'l'}^{U-TAS-TAS} = 1$ ,否则  $y_{j'l'}^{U-TAS-TAS} = 0$ 。特别地,若  $l = l'$ ,则  $y_{j'l}^{U-TAS-TAS} = 0$ 。 $y_{j'l'}^{U-TAS-TAS} = 1$  的必要条件为

$$x_{jl}^{U-TAS} = x_{jl}^{U-TAS} = 1.$$

### 1.3 作战环境

1) 敌方威胁区(Threaten Zone, TZ),是敌方雷达、高炮和地导阵地等威胁源对我方无人机执行作战任务航行过程中所造成的威胁作用区域。敌方威胁区集合记为  $TZ = \{TZ_1, TZ_2, \dots, TZ_{|TZ|}\}$ , 其中,  $|TZ|$  为敌方威胁区数量。对于  $\forall TZ_o \in TZ$ , 其基本属性为: ① 威胁源坐标  $Loc_o^{tz} = (a_o^{tz}, b_o^{tz})$ ; ② 威胁区半径  $radius_o^{tz}$ 。

2) 禁飞区(No-fly zone, NFZ),是由于气象、地理、电磁、政治原因设置的绝对禁止飞行区域。禁飞区集合记为  $NFZ = \{NFZ_1, NFZ_2, \dots, NFZ_{|NFZ|}\}$ , 其中,  $|NFZ|$  为禁飞区数量。对于  $\forall NFZ_p \in NFZ$ , 其基本属性为: ① 禁飞区顶点数量  $|NFZ_p^v|$ ; ② 第  $q$  个顶点坐标  $Loc_{pq}^{nfz} = (a_{pq}^{nfz}, b_{pq}^{nfz})$ 。

## 2 C2结构和行动计划适应性设计方法

### 2.1 平台编组方案生成

平台编组方案可以形式化表征为  $PMS = (\mathbf{X}^{TAR-TC}, \mathbf{X}^{M-U}, \mathbf{X}^{TAS-TC}, \mathbf{X}^{M-TC}, \mathbf{X}^{U-TC})$ , 以  $M, U, TAR, TAS, TC, TZ, NFZ$  和  $\mathbf{X}^{TAR-TAS}$  为输入设计  $PMS$ , 其具体过程可划分为 2 个步骤: 步骤 1 为目标聚类; 步骤 2 为有人机-无人机-任务簇匹配。

1) 对于步骤 1, 需将距离(地理距离、资源距离)较近的任务归为一类, 这样可以有效节约平台资源, 提高目标执行效率。

首先, 分别定义目标地理距离和资源距离为:

$$d_1(TAR_k, TAR_{k'}) =$$

$$\sqrt{(a_k^{tar} - a_{k'}^{tar})^2 + (b_k^{tar} - b_{k'}^{tar})^2}, 1 \leq k, k' \leq |TAR| \quad (1)$$

$$d_2(TAR_k, TAR_{k'}) =$$

$$\sqrt{\sum_{n=1}^{|R|} (r_{kn}^{tar} - r_{k'n}^{tar})^2}, 1 \leq k, k' \leq |TAR| \quad (2)$$

式中:  $d_1(\cdot)$  和  $d_2(\cdot)$  算子可推广到目标和目标簇间距离计算。

为保证各编组目标负载相对均衡, 设定各目标簇内目标数量为常量  $N_{TAR}^{TC}$  或  $N_{TAR}^{TC} + 1$ , 其中,  $N_{TAR}^{TC} = \lfloor |TAR| / |TC| \rfloor$ 。设包含目标数量为  $N_{TAR}^{TC}$  或  $N_{TAR}^{TC} + 1$  的目标簇数量分别为  $A_1$  和  $A_2$ , 则有:

$$A_1 + A_2 = |TC| \quad (3)$$

$$A_1 N_{TAR}^{TC} + A_2 (N_{TAR}^{TC} + 1) = |TAR| \quad (4)$$

可解得  $A_1 = N_{TAR}^{TC} |TC| + |TC| - |TAR|$ ,  $A_2 = |TAR| - N_{TAR}^{TC} |TC|$ 。

因此, 可建立目标聚类数学模型为:

$$\begin{aligned} & \min \left( \sum_{k=1}^{|TAR|} \sum_{m=1}^{|TC|} x_{km}^{TAR-TC} \underline{d}_1(TAR_k, TC_m), \right. \\ & \left. \sum_{k=1}^{|TAR|} \sum_{m=1}^{|TC|} x_{km}^{TAR-TC} \underline{d}_2(TAR_k, TC_m) \right) \\ & \text{s. t.} \begin{cases} \sum_{m=1}^{|TC|} x_{km}^{TAR-TC} = 1, 1 \leq k \leq |TAR| \\ \sum_{k=1}^{|TAR|} \sum_{m=1}^{|TC|} x_{km}^{TAR-TC} = |TAR| \\ \sum_{k=1}^{|TAR|} x_{km}^{TAR-TC} = N_{TAR}^{TC} \text{ or } N_{TAR}^{TC} + 1, 1 \leq m \leq |TC| \\ x_{km}^{TAR-TC} \in \{0, 1\}, 1 \leq k \leq |TAR|, 1 \leq m \leq |TC| \end{cases} \quad (5) \end{aligned}$$

式中:  $\underline{d}_1(TAR_k, TC_m)$  和  $\underline{d}_2(TAR_k, TC_m)$  为  $d_1(TAR_k, TC_m)$  和  $d_2(TAR_k, TC_m)$  的归一化值; 第 1 个约束表示任一目标只能归属于一个目标簇; 第 2 个约束表示所有目标均需归属某一目标簇; 第 3 个约束保证各编组目标负载相对均衡; 第 4 个约束表示  $x_{km}^{TAR-TC}$  取值为 0 或 1。

2) 对于步骤 2, 需在目标聚类后进行有人机-目标簇的匹配、无人机-目标簇, 从而实现平台编组方案的最终生成。在此平台匹配过程中, 为了保证目标执行指控能力和资源能力需求, 需采取一定的冗余机制<sup>[21]</sup>, 同时又需控制合理的冗余量, 实现能力利用效率最大化, 即有:

编组层指控能力平均冗余代价  $\bar{\eta}_{cc}$  最小, 保证指控能力配置高效性:

$$\min \bar{\eta}_{cc} = \frac{1}{|TC|} \sum_{m=1}^{|TC|} \left( \frac{\sum_{i=1}^{|M|} x_{im}^{M-TC} CCM_i}{\sum_{j=1}^{|U|} x_{jm}^{U-TC}} - 1 \right) \quad (6)$$

编组层指控能力冗余代价方差  $\tilde{\eta}_{cc}$  最小, 保证指控能力配置均衡性:

$$\min \tilde{\eta}_{cc} = \frac{1}{|TC| - 1} \sum_{m=1}^{|TC|} \left( \frac{\sum_{i=1}^{|M|} x_{im}^{M-TC} CCM_i}{\sum_{j=1}^{|U|} x_{jm}^{U-TC}} - \bar{\eta}_{cc} \right)^2 \quad (7)$$

编组层资源能力平均冗余代价  $\bar{\eta}_R$  最小, 保证资源能力配置高效性:

$$\min \bar{\eta}_R = \frac{1}{|TC|} \sum_{m=1}^{|TC|} \left( \frac{1}{|R|} \sum_{n=1}^{|R|} \left( \frac{\sum_{j=1}^{|U|} x_{jm}^{U-TC} r_{jn}^u}{\sum_{k=1}^{|TAR|} x_{km}^{TAR-TC} r_{kn}^{tar}} - 1 \right) \right) \quad (8)$$

编组层资源能力冗余代价方差  $\tilde{\eta}_R$  最小, 保证资源能力配置均衡性:

$$\begin{aligned} & \min \tilde{\eta}_R = \\ & \frac{1}{|TC| - 1} \sum_{m=1}^{|TC|} \left( \frac{1}{|R|} \sum_{n=1}^{|R|} \left( \frac{\sum_{j=1}^{|U|} x_{jm}^{U-TC} r_{jn}^u}{\sum_{k=1}^{|TAR|} x_{km}^{TAR-TC} r_{kn}^{tar}} - 1 \right) - \bar{\eta}_R \right)^2 \quad (9) \end{aligned}$$

因此,可建立平台匹配数学模型为:

$$\min(\bar{\eta}_{CC}, \tilde{\eta}_{CC}, \bar{\eta}_R, \tilde{\eta}_R)$$

$$\text{s. t.} \begin{cases} \sum_{i=1}^{|M|} x_{im}^{M-TC} CCM_i / \sum_{j=1}^{|U|} x_{jm}^{U-TC} \geq \eta_0, & 1 \leq m \leq |TC| \\ \sum_{j=1}^{|U|} x_{jm}^{U-TC} r_{jn}^u / \sum_{k=1}^{|TAR|} x_{km}^{TAR-TC} r_{kn}^{tar} \geq \eta_1, & 1 \leq m \leq |TC|, 1 \leq n \leq |R| \\ x_{im}^{M-TC} \in \{0, 1\}, & 1 \leq i \leq |M|, 1 \leq m \leq |TC| \\ x_{jm}^{U-TC} \in \{0, 1\}, & 1 \leq j \leq |U|, 1 \leq m \leq |TC| \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\eta_0$  为每个目标簇内有人机指控能力最低冗余量; $\eta_1$  为每个目标簇内各项资源能力最低冗余量;第 1 个约束表示每个目标簇内有人机指控能力必须满足最低冗余量;第 2 个约束表示每个目标簇内各资源能力必须满足最低冗余量;第 3 个约束表示  $x_{im}^{M-TC}$  取值为 0 或 1;第 4 个约束表示  $x_{jm}^{U-TC}$  取值为 0 或 1。对模型(5)和(10)的求解,可参考文献[15]。

### 2.2 任务调度方案生成

对  $TC_m$  而言,簇内有人机数量为  $\sum_{i=1}^{|M|} x_{im}^{M-TC}$ ,无人机数量为  $\sum_{j=1}^{|U|} x_{jm}^{U-TC}$ ,目标数量为  $\sum_{k=1}^{|TAR|} x_{km}^{TAR-TC}$ ,任务数量为  $\sum_{l=1}^{|TAS|} x_{lm}^{TAS-TC} = 3 \sum_{k=1}^{|TAR|} x_{km}^{TAR-TC}$ 。在矩阵  $\mathbf{X}^{U-TAS}$  和  $\mathbf{Y}^{U-TAS-TAS}$  设计过程中,各目标簇通过设计与自身相关部分决策变量,从而共同完成  $\mathbf{X}^{U-TAS}$  和  $\mathbf{Y}^{U-TAS-TAS}$  的设计。

为了研究方便,需对有人机、无人机、目标、任务编号进行相应处理。以有人机为例, $TC_m$  中编号为  $i_m (1 \leq i_m \leq \sum_{i=1}^{|M|} x_{im}^{M-TC})$  的有人机,在有人机集中的编号为  $\Phi(i_m)$ ,其中, $\Phi(\cdot)$  为从  $TC_m$  内属性编号映射到  $TC$  全局属性编号的映射函数,对无人机、目标、任务编号均采用相同处理方式。

在  $TC_m$  部分,目标函数主要包括:

1) 为保证任务完成时效性,需使得所有任务的完成时间最短:

$$\min FC^m = \max(f_{\Phi(1)}^{tas}, f_{\Phi(2)}^{tas}, \dots, f_{\Phi(\sum_{l=1}^{|TAS|} x_{lm}^{TAS-TC})}^{tas}) \quad (11)$$

式中: $f_{\Phi(l_m)}^{tas}$  为  $TC_m$  内第  $l_m$  个任务,即任务集中第  $\Phi(l_m)$  个任务的完成时间。

2) 由于敌方目标在我方侦察后可能会采取隐蔽方式规避我方打击,为有效缩短从侦察目标到摧毁目标的时间,需使得所有目标的侦察任务和打击任务平均间隔时间  $IT^m$  最短:

$$\min IT^m = \frac{1}{\sum_{k=1}^{|TAR|} x_{km}^{TAR-TC}} \sum_{k=1}^{|TAR|} x_{km}^{TAR-TC} IT_{k_m}^m \quad (12)$$

式中: $IT_{k_m}^m$  为  $TC_m$  内第  $k_m$  个目标,即目标集中第  $\Phi(k_m)$  个目标的侦察任务和打击任务间隔时间,定义为:

$$IT_{k_m}^m = sc_{3\Phi(k_m)-1}^{tas} - f_{3\Phi(k_m)-2}^{tas}, \quad 1 \leq k_m \leq \sum_{k=1}^{|TAR|} x_{km}^{TAR-TC} \quad (13)$$

因此,矩阵  $\mathbf{X}^{U-TAS}$  和  $\mathbf{Y}^{U-TAS-TAS}$  的  $TC_m$  部分设计模型为:

$$\min(FC^m, \bar{IT}^m)$$

$$\text{s. t.} \begin{cases} \sum_{l'=1}^{|TAS|} x_{l'm}^{TAS-TC} \sum_{l=1}^{|TAS|} x_{lm}^{TAS-TC} \mathcal{Y}_{\Phi(j_m)\Phi(l'_m)\Phi(l_m)}^{U-TAS-TAS} - x_{\Phi(j_m)\Phi(l_m)}^{U-TAS} = 0, & 1 \leq j_m \leq \sum_{j=1}^{|U|} x_{jm}^{U-TC} \\ \sum_{l'=1}^{|TAS|} x_{l'm}^{TAS-TC} \sum_{l=1}^{|TAS|} x_{lm}^{TAS-TC} \mathcal{Y}_{\Phi(j_m)\Phi(l'_m)\Phi(l_m)}^{U-TAS-TAS} \leq 1, & 1 \leq j_m \leq \sum_{j=1}^{|U|} x_{jm}^{U-TC} \\ \sum_{j=1}^{|U|} x_{jm}^{U-TC} x_{\Phi(j_m)\Phi(l_m)}^{U-TAS} r_{\Phi(j_m)n}^u \geq r_{\Phi(l_m)n}^{tas}, & 1 \leq n \leq |R| \\ sc_{\Phi(l_m)}^{tas} \geq f_{\Phi(l'_m)}^{tas} + \mathcal{Y}_{\Phi(j_m)\Phi(l'_m)\Phi(l_m)}^{U-TAS-TAS} d_3(TAS_{\Phi(l_m)}, TAS_{\Phi(l'_m)}) / \bar{v}_{\Phi(j_m)} + B(\mathcal{Y}_{\Phi(j_m)\Phi(l'_m)\Phi(l_m)}^{U-TAS-TAS} - 1), & \begin{cases} 1 \leq l_m, l'_m \leq \sum_{l=1}^{|TAS|} x_{lm}^{TAS-TC} \\ 1 \leq j_m \leq \sum_{j=1}^{|U|} x_{jm}^{U-TC} \end{cases} \\ Flight_{\Phi(j_m)} \cap TA = \emptyset, Flight_{\Phi(j_m)} \cap NFZ = \emptyset, & 1 \leq j_m \leq \sum_{j=1}^{|U|} x_{jm}^{U-TC} \\ sc_{\Phi(l_m)}^{tas} > f_{\Phi(l_m-1)}^{tas}, sc_{\Phi(l_m-1)}^{tas} > f_{\Phi(l_m-2)}^{tas}, & \begin{cases} 1 \leq l_m \leq \sum_{l=1}^{|TAS|} x_{lm}^{TAS-TC} \\ \text{if mod}(l_m, 3) = 0 \end{cases} \\ x_{\Phi(j_m)\Phi(l_m)}^{U-TAS} \in \{0, 1\}, & \begin{cases} 1 \leq j_m \leq \sum_{j=1}^{|U|} x_{jm}^{U-TC} \\ 1 \leq l_m \leq \sum_{l=1}^{|TAS|} x_{lm}^{TAS-TC} \end{cases} \\ \mathcal{Y}_{\Phi(j_m)\Phi(l'_m)\Phi(l_m)}^{U-TAS-TAS} \in \{0, 1\}, & \begin{cases} 1 \leq j_m \leq \sum_{j=1}^{|U|} x_{jm}^{U-TC} \\ 1 \leq l_m, l'_m \leq \sum_{l=1}^{|TAS|} x_{lm}^{TAS-TC} \end{cases} \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $d_3 (TAS_{\Phi(l_m)}, TAS_{\Phi(l'_m)}) = \sqrt{(sd_{\Phi(l_m)}^{as} - ed_{\Phi(l'_m)}^{as})^2 + (sb_{\Phi(l_m)}^{as} - eb_{\Phi(l'_m)}^{as})^2}$  为任务集中第  $\Phi(l_m)$  个任务执行开始点和第  $\Phi(l'_m)$  个任务执行结束点的距离;  $B$  为一极大常量;  $Flight_{\Phi(j_m)}$  为无人机集合中第  $\Phi(j_m)$  个无人机的航迹; 第 1 个约束为  $x_{j_l}^{U-TAS}$  和  $y_{j_l}^{U-TAS-TAS}$  之间关系约束; 第 2 个约束表示各无人机最多只能同时加入一个任务执行编队进行任务执行; 第 3 个约束表示无人机任务执行编队的各项资源能力需满足任务执行需求; 第 4 个约束表示先到达任务区域的无人机需等待任务执行编队中其他无人机到达共同完成任务; 第 5 个约束表示所有无人机不能飞越敌方威胁区和禁飞区<sup>[22]</sup>; 第 6 个约束表示  $TC_m$  内所有目标的侦察、打击和评估任务需依次执行; 第 7 个约束表示  $x_{j_l}^{U-TAS}$  取值为 0 或 1; 第 8 个约束表示  $y_{j_l}^{U-TAS-TAS}$  取值为 0 或 1。记模型(14)的所有约束为  $Con^m$ , 对其求解可以参考文献[16]。

### 2.3 平台编组方案和任务调度方案调整

在出现突发事件时, 同样以目标簇  $TC_m$  为例, 需要进行下述调整策略: 首先, 判断是否为目标新增, 若是, 则对新增目标采用模型(5)进行聚类, 并假设存在新增目标并入目标簇  $TC_m$ , 即对  $\mathbf{X}^{TAR-TC}$  调整得到新的  $\mathbf{X}^{CTAR-TC}$ , 其中,  $CTAR$  为目标新增后的目标集合; 然后, 对  $TC_m$  内由于目标新增、参数变化造成的任务资源需求变化和平台损毁、参数变化造成的无人机资源能力变化进行分析, 若变化后的任务资源需求超出目标簇内所有无人机资源能力, 则对平台编组方案和任务调度方案均需进行调整, 反之, 则只需进行任务调度方案调整。其中, 对平台编组方案和任务调度方案调整是指簇内无人机资源能力不能满足任务资源需求的  $TC_m$ , 需要首先向其他目标簇内有人/无人机编组申请无人机平台支援, 然后整合自有无人机和支援无人机 2 类无人机平台, 进行任务调度计划的重新设计。

在初始时刻,  $TC_m$  内原任务集合为  $TAS^m = \{TAS_{\Phi(l_m)} \mid x_{\Phi(l_m)m}^{TAS-TC} = 1, 1 \leq l_m \leq \sum_{l=1}^{|TAS|} x_{lm}^{TAS-TC}\}$ , 可用

$$\min(CFC^m, C\bar{IT}^m)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} Con^m \\ x_{\Phi(j_m)\Phi(l_m)}^{CU-CTAS} = x_{\Phi(j_m)\Phi(l_m)}^{U-TAS}, \begin{cases} 1 \leq j_m \leq \sum_{j=1}^{|CU|} x_{j_m}^{CU-TC}, 1 \leq l_m \leq \sum_{l=1}^{|CTAS|} x_{l_m}^{CTAS-TC}, TAS_{\Phi(l_m)} \in \diamond TAS^m \\ 1 \leq j_m \leq \sum_{j=1}^{|U|} x_{j_m}^{U-TC}, 1 \leq l_m \leq \sum_{l=1}^{|TAS|} x_{l_m}^{TAS-TC} \end{cases} \\ x_{\Phi(j_m)\Phi(l_m)}^{CU-CTAS} \in \{0, 1\} \begin{cases} 1 \leq j_m \leq \sum_{j=1}^{|CU|} x_{j_m}^{CU-TC} \\ 1 \leq l_m \leq \sum_{l=1}^{|CTAS|} x_{l_m}^{CTAS-TC}, TAS_{\Phi(l_m)} \in \Delta TAS^m \cup \nabla TAS^m \end{cases} \end{cases} \quad (15)$$

无人机集合为  $U^m = \{U_{\Phi(j_m)} \mid x_{\Phi(j_m)m}^{U-TC} = 1, 1 \leq j_m \leq \sum_{j=1}^{|TAS|} x_{j_m}^{U-TC}\}$ ; 若在某时刻出现一系列突发事件, 系统需执行任务集合变更为  $CTAS = \{CTAS_1, CTAS_2, \dots, CTAS_{|CTAS|}\}$ , 无人机集合变更为  $CU = \{CU_1, CU_2, \dots, CU_{|CU|}\}$ , 需对涉及相关决策矩阵进行相应调整, 得到新的  $\mathbf{X}^{CTAS-TC}$  和  $\mathbf{X}^{CU-TC}$ 。对  $TC_m$  而言, 任务和无人机集合分别变更为  $CTAS^m = \{CTAS_{\Phi(l_m)} \mid x_{\Phi(l_m)m}^{CTAS-TC} = 1, 1 \leq l_m \leq \sum_{l=1}^{|CTAS|} x_{l_m}^{CTAS-TC}\}$  和  $CU^m = \{CU_{\Phi(j_m)} \mid x_{\Phi(j_m)m}^{CU-TC} = 1, 1 \leq j_m \leq \sum_{j=1}^{|CU|} x_{j_m}^{CU-TC}\}$ 。需要说明的是, 这里的任务集合变更不仅包括目标新增、平台损毁、参数变化造成任务无法完成等情况, 都属于任务集合变更, 即  $\forall l_m (1 \leq l_m \leq \sum_{l=1}^{|TAS|} x_{l_m}^{TAS-TC}), \exists l_m (1 \leq l_m \leq \sum_{l=1}^{|CTAS|} x_{l_m}^{CTAS-TC})$ ,  $TAS_{\Phi(l_m)}$  和  $CTAS_{\Phi(l_m)}$  为对同一目标执行的同一任务, 只是由于平台损毁或者参数变化, 该任务已无法正常完成。则在初始时刻, 对任务集合中每个任务  $TAS_{\Phi(l_m)}$  写入标签  $flag_{\Phi(l_m)}^{\nabla TAS} = 0$ , 一旦出现上述情况使得  $TAS_{\Phi(l_m)}$  无法正常完成, 则令  $flag_{\Phi(l_m)}^{\nabla TAS} = 1$ 。

考虑到平台编组方案和任务调度方案调整的时效性要求较高, 且对原方案进行大规模调整, 可能造成系统结构稳定性不足。因此, 基于最小变更原则对原方案进行调整<sup>[23]</sup>, 对于目标簇  $TC_m$ , 其主要为 2 类任务进行任务调度: 第 1 类为新增任务, 即  $\Delta TAS^m = CTAS^m \setminus TAS^m$ ; 第 2 类为平台损毁、参数变化造成无法正常完成的任务, 即  $\nabla TAS^m = \{TAS_{\Phi(l_m)} \mid TAS_{\Phi(l_m)} = CTAS_{\Phi(l_m)}, flag_{\Phi(l_m)}^{\nabla TAS} = 1\}$ 。则不需进行调整执行计划的任务为  $\diamond TAS^m = TAS^m \setminus \nabla TAS^m$ 。

#### 2.3.1 仅调整任务调度方案

任务调度方案调整目标函数与任务调度方案生成目标函数相同, 记  $TC_m$  内所有目标的任务完成时间为  $CFC^m$ , 所有目标的侦察任务和打击任务平均间隔时间  $C\bar{IT}^m$ 。由此, 建立数学模型为:

式中:第1个约束表示  $TC_m$  内任务调度方案调整需满足任务调度方案生成各项约束;第2个约束表示对不需变更执行计划的任务仍然采取原执行方案;第3个约束表示  $x_{ji}^{CU-CTAS}$  取值为0或1。对模型(15)的求解,见文献[24]。

### 2.3.2 同时调整平台编组方案和任务调度方案

平台编组方案和任务调度方案同时调整过程具体可分为2个步骤:步骤1为确定支援无人机集合;步骤2为整合2类无人机平台,进行任务调度方案调整。

1)对于步骤1,以  $TC_{m'}$  ( $m' \neq m$ ) 为例,令  $TC_{m'}$  所匹配有人/无人机编组能够派出的支援无人机

$$\min(\Delta CFT^{m'}, \Delta C\bar{IT}^{m'})$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} \text{Con}^{m'} \\ \sum_{i=1}^{|M|} x_{m'}^{M-TC} CCM_i / \sum_{j'=1}^{|CU|} x_{j'}^{CU-TC} \cdot x_{\Phi(j')\Phi(l_{m'})}^{CU-CTAS} \geq 1, 1 \leq l_m \leq \sum_{l=1}^{|CTAS|} x_{l_m}^{CTAS-TC} \\ \sum_{j_m=1}^{|CU|} x_{j_m}^{CU-TC} \cdot x_{\Phi(j_m)\Phi(l_{m'})}^{CU-CTAS} r_{\Phi(j_m)n}^u \geq r_{\Phi(l_{m'})}^{tas} n, 1 \leq l_m \leq \sum_{l=1}^{|CTAS|} x_{l_m}^{CTAS-TC}, 1 \leq n \leq |R| \\ x_{\Phi(j_{m'})\Phi(l_{m'})}^{CU-CTAS} = x_{\Phi(j_{m'})\Phi(l_{m'})}^{U-TAS}, \begin{cases} 1 \leq j_{m'} \leq \sum_{j=1}^{|CU|} x_{j_{m'}}^{CU-TC}, 1 \leq l_{m'} \leq \sum_{l=1}^{|CTAS|} x_{l_{m'}}^{CTAS-TC}, TAS_{\Phi(l_{m'})} \in \diamond TAS^{m'} \\ 1 \leq j_{m'} \leq \sum_{j=1}^{|U|} x_{j_{m'}}^{U-TC}, 1 \leq l_{m'} \leq \sum_{l=1}^{|TAS|} x_{l_{m'}}^{TAS-TC} \end{cases} \\ x_{\Phi(j_{m'})\Phi(l_{m'})}^{CU-CTAS} = \{0,1\} \begin{cases} 1 \leq j_{m'} \leq \sum_{j=1}^{|CU|} x_{j_{m'}}^{CU-TC} \\ 1 \leq l_{m'} \leq \sum_{l=1}^{|CTAS|} x_{l_{m'}}^{CTAS-TC}, TAS_{\Phi(l_{m'})} \in \Delta TAS^{m'} \cup \nabla TAS^{m'} \end{cases} \end{cases} \quad (16)$$

式中:第1个约束表示  $TC_{m'}$  内任务调度方案调整需满足任务调度方案生成各项约束;第2个约束表示支援编组有人机指控能力需满足要求;第3个表示受援编组在支援无人机支援下满足完成作战任务的资源需求;第4个约束表示  $TC_{m'}$  匹配有人/无人机编组内可用无人机对不需变更执行计划的任务仍然采取原执行方案;第5个约束表示  $x_{ji}^{CU-CTAS}$  取值为0或1。若模型(16)无解,则  $BU^{m'}$

$$\min(\dot{C}FC^m, \dot{C}\bar{IT}^m, |BU_{use}^m|)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} \text{Con}^m \\ \sum_{i=1}^{|M|} x_{im}^{M-TC} CCM_i / \sum_{j_m=1}^{|CU|} x_{j_m}^{CU-TC} \cdot x_{\Phi(j_m)\Phi(l_m)}^{CU-CTAS} \geq 1, 1 \leq l_m \leq \sum_{l=1}^{|CTAS|} x_{l_m}^{CTAS-TC} \\ x_{\Phi(j_m)\Phi(l_m)}^{CU-CTAS} = x_{\Phi(j_m)\Phi(l_m)}^{U-TAS}, \begin{cases} 1 \leq j_m \leq \sum_{j=1}^{|CU|} x_{j_m}^{CU-TC}, 1 \leq l_m \leq \sum_{l=1}^{|CTAS|} x_{l_m}^{CTAS-TC}, TAS_{\Phi(l_m)} \in \diamond TAS^m \\ 1 \leq j_m \leq \sum_{j=1}^{|U|} x_{j_m}^{U-TC}, 1 \leq l_m \leq \sum_{l=1}^{|TAS|} x_{l_m}^{TAS-TC} \end{cases} \\ x_{\Phi(j_m)\Phi(l_m)}^{CU-CTAS} = 0, \begin{cases} 1 \leq j_m \leq \sum_{j=1}^{|CU|} x_{j_m}^{CTAS-TC}, CU_{\Phi(j_m)} \in \diamond BU^m \\ 1 \leq l_m \leq \sum_{l=1}^{|CTAS|} x_{l_m}^{CATS-TC}, TAS_{\Phi(l_m)} \in \diamond TAS^m \end{cases} \\ x_{\Phi(j_m)\Phi(l_m)}^{CU-CTAS} = \{0,1\}, \begin{cases} 1 \leq j_m \leq \sum_{j=1}^{|CU|} x_{j_m}^{CU-TC} \\ 1 \leq l_m \leq \sum_{l=1}^{|CTAS|} x_{l_m}^{CATS-TC}, TAS_{\Phi(l_m)} \in \Delta TAS^m \cup \nabla TAS^m \end{cases} \end{cases} \quad (17)$$

集合为  $BU^{m'}$ , 则派出支援无人机后,该编组可用无人机集合为  $CU^{m'} = CU^m \setminus BU^{m'}$ ;整合各编组支援无人机,受援编组的可用支援无人机集合为  $BU^m = BU^1 \cup BU^2 \cup \dots \cup BU^{m'} \cup \dots \cup BU^{|TC|-1}$ , 该编组可用无人机集合为  $CU^m = CU^m \cup BU^m$ 。在确定  $BU^{m'}$  过程中,需保证对支援有人/无人机编组任务执行影响最小,记支援有人/无人机编组派出支援无人机前后,  $TC_{m'}$  内所有目标的任务完成时间变化量为  $\Delta CFT^{m'}$ , 所有目标的侦察任务和打击任务平均间隔时间变化量为  $\Delta C\bar{IT}^{m'}$ 。由此,建立数学模型为:

2)对于步骤2,在整合2类无人机平台进行任务调度方案调整过程中,目标函数是使得  $TC_m$  内所有目标的任务完成时间  $\dot{C}FC^m$  最小,所有目标的侦察任务和打击任务平均间隔时间  $\dot{C}\bar{IT}^m$  最小,最终所需支援无人机数量  $|BU_{use}^m|$  最少。由此,建立数学模型为:

式中:第1个约束表示任务调度方案调整需满足调度方案生成各项约束;第2项约束表示对不需变更执行计划的任务仍然采取原执行方案;第3个约束表示支援无人机不执行不需变更执行计划的任务;第4个约束表示  $x_{ji}^{CU-CTAS}$  取值为0或1。对模型(16)和(17)的求解,当存在多个编组内需要同时进行平台编组方案和任务调度方案调整时,问题较为复杂,可由地面指挥中心指定各编组优先级进行求解,求解方法可见文献[24]。

### 3 结语

本文研究了有人/无人机协同作战系统 C2 结构和行动计划适应性设计问题,在构建适应性框架基础上,对其中的平台编组方案生成、任务调度方案生成、平台编组方案调整、任务调度方案调整等4个子问题提出了相应适应性设计方法。本文提出的框架、模型和方法对于有人/无人机完成包含大量作战目标的作战使命具有一定借鉴意义。

#### 参考文献(References):

- [1] 蔡明春,吕寿坤. 智能化战争形态及其支撑技术体系[J]. 国防科技,2017,38(1):94-98.  
CAI M C,LYU S K. Preliminary Probing into Intelligent Warfare and It Supporting Technology System[J]. National Defense Science & Technology,2017,38(1):94-98. (in Chinese)
- [2] CHRISTOPHE D W,MULDER J A. Towards Vision-Based UAV Situation Awareness[C]// Proceedings of AIAA Guidance, Navigation, Control Conference and Exhibit. San Francisco:AIAA,2005:15-18.
- [3] 万路军,姚佩阳,周翔翔,等. 多编组协同任务分配模型及 DLS-QGA 算法求解[J]. 控制与决策,2014,29(9):1562-1568.  
WAN L J,YAO P Y,ZHOU X X,et al. Cooperative task Allocation Methods in Multiple Groups Using DLS-QGA[J]. Control and Decision,2014,29(9):1562-1568. (in Chinese)
- [4] CHEN J,XU J,ZHONG L H. Limited Intervention Collaborative Decision Making of MAV-UAV Team based on VFCM[C]// Proceedings of 2016 IEEE International Conference on Services Computing. Hongkong,China:IEEE,2016:876-879.
- [5] CAMPBELL S,NAEEM W,IRWIN G W. A Review on Improving the Autonomy of Unmanned Surface Vehicles through Intelligent Collision Avoidance Manoeu-

vres[J]. Annual Reviews in Control,2012,36(2):267-283.

- [6] RAHIMI R,ABDOLLAHI F,NAQSHI K. Time-Varying Formation Control of a Collaborative Heterogeneous Multi-Agent System[J]. Robotics and Autonomous Systems,2014,62(12):1799-1805.
- [7] 徐赞新,袁坚,王钺,等. 一种支持移动自组网通信的多无人机中继网络[J]. 清华大学学报(自然科学版),2011,51(2):150-155.  
XU Z X,YUAN J,WANG Y,et al. UAV Relay Network to Provide Communications in Mobile Ad Hoc Networks[J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology),2011,51(2):150-155. (in Chinese)
- [8] SCHOUWENAARS T,KUWATA Y,FERON E,et al. Linear Programming and Language Processing for Human/ Unmanned Aerial Vehicle Team Missions[J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics,2006,29(2):303-313.
- [9] RICHARD D G,LAURA B,MARYANNE F. Unmanned Aircrafts Systems as Wingmen[J]. Journal of Defense Modeling and Simulation: Applications, Methodology, Technology,2012,9(1):5-15.
- [10] CHASE C M,WOJIN P. Incorporating Human Factor Consideration in Unmanned Aerial Vehicle Routing[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics: Systems,2013,43(4):860-874.
- [11] 钟赞,张杰勇,邓长来. 有人/无人机协同作战问题[J]. 指挥信息系统与技术,2017,8(4):19-25.  
ZHONG Y,ZHANG J Y,DENG C L. Cooperative Engagement Problems About Manned/Unmanned Aerial Vehicles[J]. Command Information System and Technology,2017,8(4):19-25. (in Chinese)
- [12] 李相民,薄宁,代进进,等. 有/无人机编队协同作战指挥控制关键技术综述[J]. 飞航导弹,2017(9):29-35,87.  
LI X M,BO N,DAI J J,et al. A Review on Key Technologies in Collaborative Operational Command and Control of MAV/UAV Formation[J]. Aerodynamic Missile Journal,2017(9):29-35,87. (in Chinese)
- [13] 钟赞,姚佩阳,孙昱,等. 有人/无人机任务联盟分阶段形成方法研究[J]. 系统工程与电子技术,2017,39(9):2031-2038.  
ZHONG Y,YAO P Y,SUN Y,et al. Phased-Forming Method of Manned/Unmanned Aerial Vehicle Task Coalition [J]. Systems Engineering and Electronics,2017,39(9):2031-2038. (in Chinese)



(5):34-38.

SHU Y X, YANG L, JIN S L, et al. DOA Estimation Method of Strong and Weak Adjacent Signals Based on Pseudo Covariance Matrix [J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2015, 38(5):34-38. (in Chinese)

- [18] 杨金金, 刘洛琨, 张剑, 等. 基于干扰矩阵重构的稳健自适应波束形成算法[J]. 信息工程大学学报, 2014, 15(3):286-292.

YANG J J, LIU L K, ZHANG J, et al. Robust Adaptive Beamforming Algorithm Based on Interference Covariance Matrix Reconstruction [J]. Journal of Information Engineering University, 2014, 15(3):286-292. (in Chinese)

- [19] 潘帅, 张永顺. 基于先验信息的协方差矩阵重构抗干扰算法[J]. 火力与指挥控制, 2018, 43(9):61-65.

PAN S, ZHANG Y S. Anti-interference Algorithm Based on Covariance Matrix Reconstruction via Prior Information [J]. Fire Control & Command Control, 2018, 43(9):61-65 (in Chinese)

- [20] 潘帅, 张永顺, 葛启超, 等. 基于特征投影矩阵的自适应方向图改善方法研究[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2019, 20(2):51-56.

PAN S, ZHANG Y S, GE Q C, et al. Research on Improvement of Adaptive Pattern Based on Eigen-projection Matrix [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition). 2019, 20(2):51-56. (in Chinese)

(编辑: 徐敏)

\*\*\*\*\*

### (上接第 45 页)

- [14] 钟赞, 姚佩阳, 万路军, 等. 多任务执行中无人机行动联盟形成模型及算法[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(10):2248-2254.

ZHONG Y, YAO P Y, WAN L J, et al. UAV Action Coalition Formation Model and Algorithm in Multi-Task Execution [J]. Systems Engineering and Electronics, 2017, 39(10):2248-2254. (in Chinese)

- [15] HU X X, MA H W, YE Q S. Hierarchical Method of Task Assignment for Multiple Cooperating UAV Teams [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2015, 26(5):1000-1009.

- [16] 修保新. C2 组织结构设计及鲁棒性、适应性分析[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.

XIU B X. Design Methodology of C2 Organizational Structure and Its Analysis of Robustness and Adaptivity [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006. (in Chinese)

- [17] 钟赞, 姚佩阳, 孙昱. 有人机/UCAV 编队协同作战决策分配方法[J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36(11):2984-2992.

ZHONG Y, YAO P Y, SUN Y. Decision-Making Allocation Method in Manned/Unmanned Combat Aerial Vehicle Cooperative Engagement [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2016, 36(11):2984-2992. (in Chinese)

- [18] DAVID M J, CRAIG P L. Application of an Automated Aircraft Architecture Generation and Analysis Tool to Unmanned Aerial Vehicle Subsystem Design [J].

Journal of Aerospace Engineering, 2015, 29(9):1690-1708.

- [19] 万路军, 姚佩阳, 孙鹏, 等. 有人-无人作战智能体任务联盟形成策略方法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2013, 14(3):10-14.

WAN L J, YAO P Y, SUN P, et al. Strategy of Manned/ Unmanned Combat Agents Task Coalition Formation [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2013, 14(3):10-14. (in Chinese)

- [20] 林林, 孙其博, 王尚广, 等. 多无人机协同航路规划研究[J]. 北京邮电大学学报, 2013, 36(5):36-40.

LIN L, SUN Q B, WANG S G, et al. Research on Multi-UAV Cooperative Trajectory Planning [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2013, 36(5):36-40. (in Chinese)

- [21] 孙昱, 姚佩阳, 孙鹏, 等. 兵力组织适应性设计问题研究[J]. 火力与指挥控制, 2017, 18(3):104-110.

SUN Y, YAO P Y, SUN P, et al. Review of Adaptive Design Problem of Army Organization [J]. Fire Control & Command Control, 2017, 18(3):104-110. (in Chinese)

- [22] ZHONG Y, YAO P Y, ZHANG J Y, et al. Formation and Adjustment of Manned/Unmanned Combat Aerial Vehicle Cooperative Engagement System [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2018, 29(4):756-767.

(编辑: 徐楠楠)