

## 多无人机任务集结合作博弈优化自组织协同控制

王 勃, 姚佩阳, 贾方超, 陈洁钰  
(空军工程大学信息与导航学院, 西安 710077)

**摘要:** 基于一致性理论的多无人机系统自组织协同作战是未来无人机应对突发任务的重要方式, 任务集结是协同作战的首要行动和自组织协同控制的重要内容。为优化集结行动中系统任务状态协调过程能量最优性、协同控制动态响应性和集结行动时效性3个性能指标, 采用基于快速一致性控制算法的协同控制结构, 在合作博弈框架下给出多无人机系统自组织协同与优化控制问题描述, 建立了优化控制输入的 Pareto 解集, 采用 Nash 讨价还价方法给出基本合作博弈优化一致性控制算法。在基本算法中引入过去状态差值, 并以优化目标构建适应度函数, 采用遗传算法优化代价函数的加权矩阵, 得到改进合作博弈优化一致性控制算法。理论分析和仿真实验验证了方法的可行性和有效性。

**关键词:** 多无人机; 协同控制; 任务集结; 合作博弈; 一致性理论

**中图分类号:** V279; TP273.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2014)11-0005-09

## Optimal Self-Organized Cooperative Control for Mission Rendezvous of Multiple UAVs

WANG Bo, YAO Pei-yang, JIA Fang-chao, CHEN Jie-yu  
(Information and Navigation Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** Multiple Unmanned Aerial Vehicle (UAV) system self-organization cooperative operation based on consensus theory has become an effective operational mode for dealing with sudden tasks, mission rendezvous is the first action and vital part of self-organized cooperative control. After giving the problem description of self-organization cooperative and optimal control under the cooperative game framework, and establishing Pareto Solution Set of optimal control input, the basic cooperative game optimal consensus control algorithm is presented by Nash Bargaining Solution under self-organization cooperative control structure based on fast consensus control algorithm, which can achieve optimal control objectives such as optimal energy cost in the coordination process of system task status, dynamic response of cooperative control, timeliness of rendezvous action. After introducing outdated status difference into the basic algorithm, and optimizing the weighted matrix of the cost function by genetic algorithm, which is based on the fitness function constructed of optimal control targets, the improved cooperative game optimal consensus control algorithm is presented. Theoretical analysis and simulation results verify the feasibility and effectiveness of the method.

**Key words:** multi-UAV; cooperative control; mission rendezvous; cooperative game; consensus theory

### 0 引言

有限通信条件和复杂多变的战场态势下, 多无人机系统 (Multiple Unmanned Aerial Vehicle System, Multi-UAV System) 自组织协同作战成为应对广域战场

空间中动态任务和时敏目标的有效作战方式<sup>[1]</sup>。系统状态的一致性是自组织协同作战的基础, 是发挥多无人机系统优势的关键。针对复杂多变战场环境下的动态任务和时敏目标, 多无人机如何在有限通信条件下就系统任务状态快速达成一致认识, 进而通过优化的自组织协同控制方法完成任务集结以实现协同作战意图, 是多无人机应用领域亟需解决的难点。

针对多无人机任务集结协同控制问题, 早期研究文献[2-4]提出基于协调变量和协调函数的协同控

收稿日期: 2013-12-10 修回日期: 2014-01-09

基金项目: 国家自然科学基金(61273048)

作者简介: 王 勃(1990—), 男, 甘肃庄浪人, 硕士生, 研究方向为无人机编队协同作战等。

制方法,降低了问题复杂性和编队整体通信代价,可得全局最优解,但本质上是集中式控制方法,动态环境下鲁棒性差;基于一致性理论的多无人机分布式协同控制方法可以克服单点故障,支持通信拓扑和系统规模动态变化,具有很强的鲁棒性、灵活性和可靠性;文献[5-6]基于平均一致性控制算法,实现了多 UAV 任务集结的分布式协同控制,对动态任务环境具有良好的适应性,但是该算法的协调结果是相互妥协的,不能获得优化的飞行控制序列;文献[7]改进了平均算法,分别提出了基于非合作优化一致性和基于合作博弈优化一致性的分布式协同控制方法,分别优化了无人机个体和系统整体控制能量,但是牺牲了系统的动态响应能力和行动时效性,且其控制能量仍有进一步优化的空间。

本文分析了多无人机自组织作战中同时到达任务集结行动协同与优化控制问题,提出了系统任务状态协调过程能量最优性、协同控制动态响应性和集结行动时效性3个优化控制目标;确立了基于协调变量和协调函数的问题分解策略和以飞行轨迹控制为主、航迹规划为辅的问题求解思路;研究了基于快速一致性控制算法的自组织协同控制结构,提出了实现优化目标的技术路线;设计了多无人机系统任务集结的合作博弈优化自组织协同控制方法,从理论方法和仿真应用两个层面展开系统研究。

## 1 问题描述及求解思路

### 1.1 问题描述

未来战场中,高智能性的无人机(战术编队)在广阔的战场空域巡航待战并自主进行态势感知、信息处理和任务决策。无人机平台的侦察探测和通信距离有限,当出现时间敏感任务或目标时,无人机可以组成具备有限机间通信能力的任务组以完成打击任务。任务组内的无人机可不依赖于地面系统的任务规划和信息支援,从不同空域向任务区集结,集结行动中可实时获得敌方威胁、禁飞区和自身飞行状态的信息,可独立地在线或离线规划航迹并根据当前平台速度和剩余路径长度计算自身的预计到达时间(Estimated Time of Arrival, ETA),且可以通过自动驾驶仪沿规划航迹飞行,为达成打击任务的突然性,要求组内的无人机同时到达集结位置。多无人机自组织协同作战任务集结行动的战斗态势如图1所示。

由于多 UAV 任务集结行动自组织协同控制面临环境复杂多变、时间敏感度高、平台及任务组能量消耗大、计算量大和通信保障困难等挑战,因此,集结问题的研究目标是寻找一种优化的控制方法实现同时到

达,并优化相关性能指标。可以通过自主调整 UAV 的航迹规划或飞行速度实现同时到达,对于单机来说,初始航迹规划时要确定最优的飞行航迹和速度以规避威胁和节约燃油。对于任务组而言,当集结过程中遇到突发威胁被迫重新规划航迹时,要协商并确定一致的 ETA,继而通过调整航迹规划或者飞行速度匹配 ETA。一般来讲,ETA 的值越大,同时到达的可能性越大,但是较大的 ETA 值对于各 UAV 来讲不一定是燃油最优的且会牺牲整个任务的时效性。此外,ETA 协调过程耗时越长,系统动态响应性、任务时效性和稳定性越差;协调过程的控制输入越大,系统能量消耗越大,影响平台持续作战能力。综上,需要探索一种优化控制方法使得多 UAV 协调出合适的一致 ETA 并通过调整航迹规划或飞行速度实现同时到达、同时改善系统任务状态协调过程能量最优性、协同控制动态响应性和任务集结行动时效性。

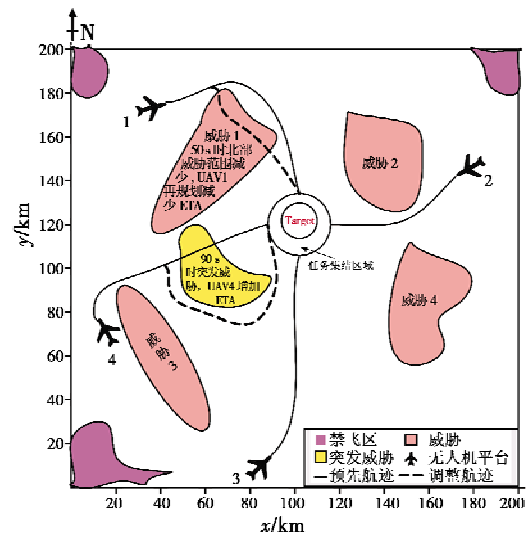


图1 多无人机自组织协同作战任务集结行动战场态势

Fig. 1 Mission rendezvous battlefield situation of multi-UAV self-organization cooperative operation

### 1.2 基本思路

鉴于航迹规划比飞行速度控制计算量大、协调复杂,本文以调整飞行速度为主,仅在遇到突发威胁、原有威胁消失或飞行速度达到约束边界时调整航迹规划,该方法侧重 UAV 的轨迹控制,弱化对航迹规划算法的要求。

根据上述基本求解思路并参考文献[7-10]的策略,本文采用基于协调函数和协调变量的分解策略,其中,协调函数为多 UAV 系统协同控制的代价函数,协调变量为协同所需要的最小信息量,具体思路如下:设第  $i$  架 UAV 的速度  $v_i(t)$  为平台状态变量,第  $i$  架 UAV 的速度调节指令  $v_i^*(t)$  为状态变量  $v_i(t)$  下可行决策集

合,以多 UAV 系统的预计到达时间  $\theta_{ETA}$  为协调变量,可建立状态变量、协调变量和决策变量之间的函数关系。协调变量和状态变量已知时,可唯一确定决策变量;对于可行的协调变量集合,通过状态变量和决策变量可构建协调函数,以确定最优的协调变量。当多 UAV 系统的 ETA 协调一致时,即  $\theta_{1,ETA}(t) = \theta_{2,ETA}(t) = \dots = \theta_{n,ETA}(t)$ ,每架 UAV 根据当前平台速度产生速度调节指令,实现同时到达,因此可取 UAV 的协调变量  $\theta_{ETA}$  为系统任务状态。

综上,在多 UAV 自组织作战任务集结行动协同控制中,首先通过有限通信网络进行局部协调变量交互,采用一致性控制算法协调得到合适的一致任务状态,并优化相关性能指标;其次,针对协调得到的一致任务

状态,各 UAV 根据当前平台状态变量确定决策变量,用于飞行速度控制,结合必要的航迹规划,实现同时到达。

### 1.3 协同控制结构

图 2 所示为基于一致性控制算法的多 UAV 集结问题自组织协同控制求解结构。受机间数据链通信能力和敌方电子侦察对抗力量部署限制,可假设系统通信网络拓扑如图 2 中有限通信网络所示。图中通信拓扑是含有向生成树的固定拓扑结构,多 UAV 系统任务状态可实现一致收敛<sup>[11]</sup>。需要说明的是,本文侧重寻找合适的 ETA,同时优化相关性能,有关复杂电磁环境、平台高速运动和平台战毁等对任务集结行动的影响可参考文献[7]。

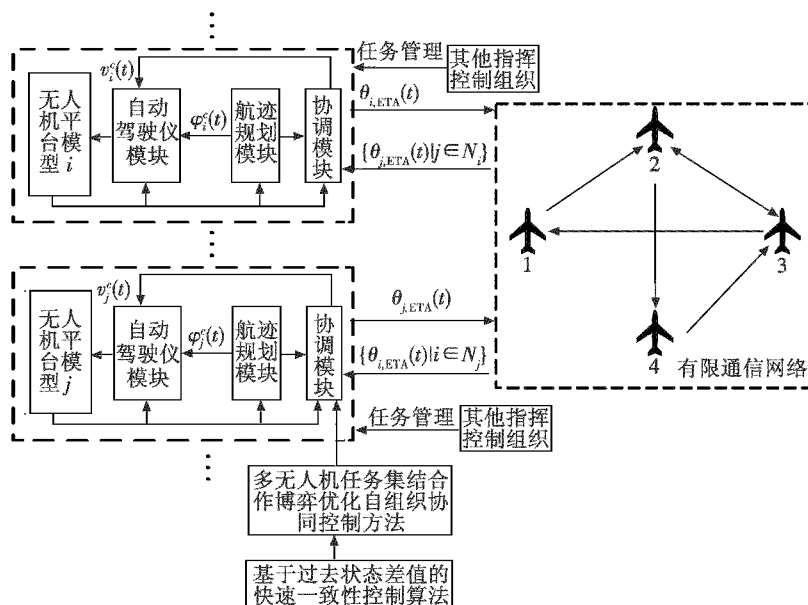


图 2 多 UAV 集结问题自组织协同控制求解结构

Fig. 2 Self-organization cooperative control structure of multi-UAV mission rendezvous

按照问题求解思路,假定航迹规划已经完成,各 UAV 只需沿规划航迹飞向目标位置,通过飞行轨迹控制实现同时到达,以第  $i$  个 UAV 为例说明各模块功能。

1) 无人机平台模型:运动学模型。

2) 自动驾驶仪模块:可根据速度调节指令和航向信息控制 UAV 运动。数学描述为

$$\begin{cases} \dot{v}_i(t) = \alpha_{i,v}(v_i^c(t) - v_i(t)) \\ \dot{\varphi}_i(t) = \alpha_{i,\varphi}(\varphi_i^c(t) - \varphi_i(t)) \end{cases} \quad (1)$$

3) 航迹规划模块:规划飞行航迹以规避威胁、节约燃油,并将剩余航程信息  $d_{i,ETA}(t)$  传递给协调模块,将飞行航向信息传递给自动驾驶仪模块。

4) 协调模块:从 UAV 平台和航迹规划模块获得速度信息和航程信息,给出预计到达时间  $\theta_{i,ETA}(t)$ ,即第  $i$  架 UAV 的协调变量;通过局部通信网络获得邻接 UAV 的协调变量  $\{\theta_{j,ETA}(t) | j \in N_i\}$ ,并采用一致性控

制算法实现协调变量演化一致;产生速度调节指令调整飞行速度,更新自身协调变量  $\theta_{i,ETA}(t)$ 。

显然,根据多 UAV 系统的协调变量信息并采用一致性控制算法产生速度调节指令是自组织求解结构的核心<sup>[7]</sup>。不失一般性,可记集结行动开始时刻为 0 时刻,以第  $i$  架 UAV 为例,根据  $t$  时刻的飞行速度  $v_i(t)$  得

$$\dot{d}_{i,ETA}(t) = -v_i(t) \quad (2)$$

预计到达时间为

$$\theta_{i,ETA}(t) = d_{i,ETA}(t)/v_i(t) \quad (3)$$

预计到达时刻为

$$T_{i,ETA}(t) = t + d_{i,ETA}(t)/v_i(t) \quad (4)$$

对式(4)进行微分运算,将式(1)~(3)代入得

$$\dot{T}_{i,ETA}(t) = 1 + \frac{v_i(t)\dot{d}_{i,ETA}(t) - d_{i,ETA}(t)\dot{v}_i(t)}{v_i^2(t)} =$$

$$-\frac{\theta_{i,ETA}(t)\alpha_{i,v}(v_i^c(t) - v_i(t))}{v_i(t)} \quad (5)$$

进一步得速度参考指令

$$v_i^c(t) = v_i(t) - \frac{v_i(t)\dot{T}_{i,ETA}(t)}{\alpha_{i,v}\theta_{i,ETA}(t)} \quad (6)$$

令  $\dot{T}_{i,ETA}(t) = f(T_{i,ETA}(t), T_{j,ETA}(t))$ ,  $j \in N_i$ , 其中  $f$  为一致性控制算法, 则

$$v_i^c(t) = v_i(t) - \frac{v_i(t)f(T_{i,ETA}(t), T_{j,ETA}(t))}{\alpha_{i,v}\theta_{i,ETA}(t)} \quad (7)$$

5) 任务管理模型: 预留接口, 供其他指挥控制模块接入。

当任务组中 UAV 进行航迹重规划时, 航迹规划模块可给出剩余航程信息和航向指令, 根据式(3)计算出新的 ETA, 并由式(7)给出速度调节指令, 进而通过自动驾驶仪模块控制平台飞行, 完成集结行动。该结构具有通信代价小、协同简单、动态响应能力好、受复杂通信网络约束影响小的优点。

#### 1.4 优化控制技术路线

在图2中, 协调模块可采用一致性控制算法实现系统任务状态协调一致, 但该算法没有考虑状态协调过程的收敛速度对协同控制动态响应性和任务集结行动时效性的影响, 而且其协调结果一般是相互妥协的, 不能实现优化控制目标。为提高集结行动中多 UAV 系统任务状态演化到一致的速度, 论文将引入过去状态差值(Outdated State Difference)设计快速一致性控制算法; 进一步根据集结行动特征和协调模块采取的优化控制策略, 设计合作博弈优化自组织协同控制方法以优化相关性能指标, 相应技术路线如图3所示。

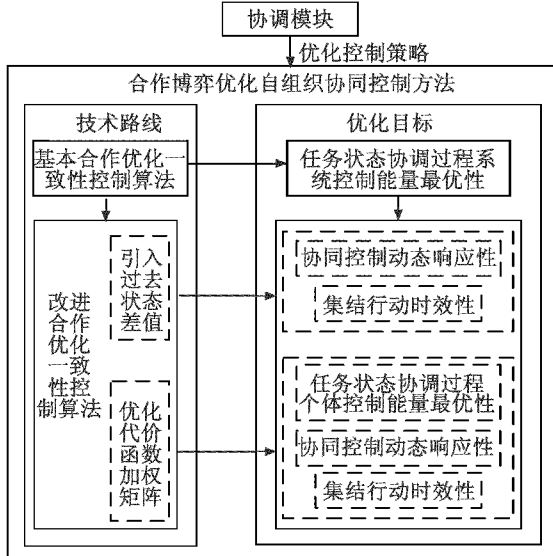


图3 多 UAV 集结问题的优化控制技术实现路线

Fig.3 Optimal control technology roadmap of multi-

UAV mission rendezvous

## 2 合作博弈优化自组织协同控制方法

### 2.1 合作博弈优化一致性问题描述

由合作博弈理论 (Cooperative Game Theory, CGT)<sup>[12]</sup>可知, 任务集结行动协同控制问题可在其框架下求解, 确保同时到达的基础上实现系统整体代价最小。首先, 求得基于非合作优化一致性的分布式协同控制方法下 UAV 个体的代价值, 即威胁点代价  $J_{tp,i}$ <sup>[7]</sup>; 其次, 将个体代价加权求和得系统代价函数  $J_{sys}$ ; 然后得到 Pareto 最优解集和 Nash 讨价还价解。

根据控制输入的线性可加性, 多 UAV 系统协调变量的动态方程可描述为

$$\dot{\theta}_{ETA}(t) = g(t, \theta_{ETA}, u^l) = U(\alpha, t) = U^E(\alpha, t) + B_{sys} U^l(\alpha, t) \quad (8)$$

式中:  $U^E(\alpha, t) = A_{sys} \theta_{ETA}$ , 为全局控制策略, 实现与紧邻平台集合交换协调变量的并协调演化一致;  $U^l(\alpha, t) = [u_1^l(\alpha, t), \dots, u_n^l(\alpha, t)]^T$ , 为局部控制策略, 生成自身最优控制输入, 保证个体能量消耗最小;  $B_{sys} = I$ 。不考虑协调变量终端约束, 合作策略下系统代价函数为

$$J_{sys} = \sum_{i=1}^n \alpha_i J_i(U^l(\alpha, t)) = \frac{1}{2} \int_0^T [\theta_{ETA}^T Q_{sys} \theta_{ETA} + U^l(\alpha, t)^T R_{sys} U^l(\alpha, t)] dt \quad (9)$$

式中:  $\alpha_i > 0$ ,  $i = 1, \dots, n$ , 且满足  $\sum \alpha_i = 1$ , 代表 UAV 代价权重;  $[0, T]$  是协调过程的时间区间。  $J_i$  是每架 UAV 的代价函数,  $J_i$  定义为

$$J_i = \frac{1}{2} \int_0^T \left\{ \sum_{j \in N_i} [\theta_{i,ETA}(t) - \theta_{j,ETA}(t)]^T Q_{ij} [\theta_{i,ETA}(t) - \theta_{j,ETA}(t)] + u_i^{lT}(t) R_i u_i^l(t) \right\} dt \quad i = 1, \dots, n \quad (10)$$

式中:  $Q_{ij}, R_i$  为  $m \times m$  维对称正定矩阵。

式(10)中系数矩阵分别定义为

$$\begin{cases} Q_{sys} = [Q_{ij}]_{n \times n} \\ R_{sys} = \text{diag}\{\alpha_1 R_1, \dots, \alpha_n R_n\} \end{cases} \quad (11)$$

$$Q_{ij} = \begin{cases} 0 & i \neq j \text{ 且 } j \notin N_i \\ -\alpha_i Q_{ij} - \alpha_j Q_{ji} & i \neq j \text{ 且 } j \in N_i \\ \sum_{j \in N_i} \alpha_j Q_{ji} + \sum_{k \in N_i} \alpha_i Q_{ik} & i = j \end{cases}$$

对于式(9), Pareto 有效策略集合可通过式(12)求得

$$U^*(\alpha) = \underset{U \in U}{\text{argmin}} \sum_{i=1}^n \alpha_i J_i(U(\alpha)) = \underset{U \in U}{\text{argmin}} J_{sys}(\alpha) \quad (12)$$

Nash 讨价还价解对应的最优系数向量  $\alpha^*$  为

$$\alpha^* = \underset{\alpha}{\text{argmax}} \prod_{i=1}^n [J_i(\alpha, U^*(\alpha)) - J_{tp,i}] \quad (13)$$

下文将讨论满足式(8)且使得整体代价式(9)最小的合作博弈优化自组织协同控制方法。

## 2.2 合作博弈优化自组织协同控制方法

### 2.2.1 基本合作博弈优化一致性控制算法

下文将参考文献[7]给出基本合作博弈优化一致性控制算法(Basic Cooperative Game Optimal Consensus Control Algorithm, BCGOCCA)。

#### 1) Pareto 有效策略集合。

对于式(9),其最优控制输入可由动态规划的最优性原理<sup>[13]</sup>给出。根据最优性原理,得 HJB 方程

$$-\frac{\partial J^*(t, \boldsymbol{\theta}_{\text{ETA}}(t))}{\partial t} = \min_{U^l(t)} \left[ \frac{\partial J^*(t, \boldsymbol{\theta}_{\text{ETA}}(t))}{\partial \boldsymbol{\theta}_{\text{ETA}}(t)} g(t, \boldsymbol{\theta}_{\text{ETA}}, U^l) + \frac{1}{2} \boldsymbol{\theta}_{\text{ETA}}^T \mathbf{Q}_{\text{sys}} \boldsymbol{\theta}_{\text{ETA}} + \frac{1}{2} U^l(\boldsymbol{\alpha}, t)^T \mathbf{R}_{\text{sys}} U^l(\boldsymbol{\alpha}, t) \right] \quad (14)$$

式中,  $J^*(t, \boldsymbol{\theta}_{\text{ETA}}(t))$  为最小目标值函数。

引入拉格朗日算子  $\lambda(t)$ , 由最优性原理知  $\lambda(t)$  是  $J^*(t, \boldsymbol{\theta}_{\text{ETA}}(t))$  在最优轨线上的梯度, 即

$$\lambda(t) = \frac{\partial J^*(t, \boldsymbol{\theta}_{\text{ETA}}(t))}{\partial \boldsymbol{\theta}_{\text{ETA}}(t)} \quad (15)$$

定义 Halmiton 函数为

$$H_{\text{sys}}(\boldsymbol{\theta}_{\text{ETA}}, \lambda, U^l) \triangleq \frac{1}{2} [\boldsymbol{\theta}_{\text{ETA}}^T \mathbf{Q}_{\text{sys}} \boldsymbol{\theta}_{\text{ETA}} + U^l{}^T \mathbf{R}_{\text{sys}} U^l] + \lambda^T(t) [\mathbf{A}_{\text{sys}} \boldsymbol{\theta}_{\text{ETA}} + \mathbf{B}_{\text{sys}} U^l] \quad (16)$$

设  $J^*(t, \boldsymbol{\theta}_{\text{ETA}}(t)) = \frac{1}{2} \boldsymbol{\theta}_{\text{ETA}}^T(t) P(t) \boldsymbol{\theta}_{\text{ETA}}(t)$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , 代入式(14)得

$$-\frac{1}{2} \boldsymbol{\theta}_{\text{ETA}}^T \dot{P}(t) \boldsymbol{\theta}_{\text{ETA}} = \min_{U^l(t) \in U} \left[ \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{\theta}_{\text{ETA}}} \left( \frac{1}{2} \boldsymbol{\theta}_{\text{ETA}}^T P(t) \boldsymbol{\theta}_{\text{ETA}} \right) \right]^T \cdot [\mathbf{A}_{\text{sys}} \boldsymbol{\theta}_{\text{ETA}} + \mathbf{B}_{\text{sys}} U^l(\boldsymbol{\alpha}, t)] + \frac{1}{2} \boldsymbol{\theta}_{\text{ETA}}^T \mathbf{Q}_{\text{sys}} \boldsymbol{\theta}_{\text{ETA}} + \frac{1}{2} U^l(\boldsymbol{\alpha}, t)^T \mathbf{R}_{\text{sys}} U^l(\boldsymbol{\alpha}, t) \Bigg\} = \min_{U^l(t) \in U} H_{\text{sys}}(\boldsymbol{\theta}_{\text{ETA}}, \lambda, U^l) \quad (17)$$

对于式(17),极值存在的必要条件为

$$\frac{\partial}{\partial U^l(\boldsymbol{\alpha}, t)} H_{\text{sys}}(\boldsymbol{\theta}_{\text{ETA}}, \lambda, U^l) = \mathbf{R}_{\text{sys}} U^l(\boldsymbol{\alpha}, t) + \mathbf{B}_{\text{sys}}^T P(t) \boldsymbol{\theta}_{\text{ETA}}(t) = 0 \quad (18)$$

可得最优局部控制策略

$$U^{l*}(\boldsymbol{\alpha}, t) = -\mathbf{R}_{\text{sys}}^{-1} \mathbf{B}_{\text{sys}}^T P(t) \boldsymbol{\theta}_{\text{ETA}}(t) \quad (19)$$

将式(19)代入式(17)中,分别比较  $\boldsymbol{\theta}_{\text{ETA}}^T(t)$  和  $\boldsymbol{\theta}_{\text{ETA}}(t)$  的系数得

$$\dot{P}(t) - P(t) \mathbf{B}_{\text{sys}} \mathbf{R}_{\text{sys}}^{-1} \mathbf{B}_{\text{sys}}^T P(t) + \mathbf{Q}_{\text{sys}} = 0 \quad (20)$$

$$-\mathbf{Q}_{\text{sys}} \boldsymbol{\theta}_{\text{ETA}}(t) + 2P(t) u^g = 0 \quad (21)$$

式(20)称为 Riccati 方程,当  $\dot{P}(t) = 0$  时,简化为

$$-P(t) \mathbf{B}_{\text{sys}} \mathbf{R}_{\text{sys}}^{-1} \mathbf{B}_{\text{sys}}^T P(t) + \mathbf{Q}_{\text{sys}} = 0 \quad (22)$$

解式(22)得  $P(t)$ 。由式(21)得全局控制策略为

$$u^g(\boldsymbol{\alpha}, t) = \frac{1}{2} P^{-1}(t) \mathbf{Q}_{\text{sys}} \boldsymbol{\theta}_{\text{ETA}}(t) \quad (23)$$

基本合作博弈优化一致性控制算法为

$$\dot{\boldsymbol{\theta}}_{\text{ETA}}(t) = \mathbf{U}(\boldsymbol{\alpha}, t) = \frac{1}{2} P^{-1}(t) \mathbf{Q}_{\text{sys}} \boldsymbol{\theta}_{\text{ETA}}(t) -$$

$$\mathbf{B}_{\text{sys}} \mathbf{R}_{\text{sys}}^{-1} \mathbf{B}_{\text{sys}}^T P(t) \boldsymbol{\theta}_{\text{ETA}}(t) \quad (24)$$

式(24)得到的 Pareto 有效策略是对应系数向量  $\boldsymbol{\alpha}$  的集合,为最小化系统整体代价函数,下文将给出 Nash 讨价还价解的求解过程。

#### 2) Nash 讨价还价解。

合作博弈优化一致性控制问题的 Nash 讨价还价解递推算法如下所述(算法 1)。

① 赋初值  $\boldsymbol{\alpha}^0 = \left[ \frac{1}{n}, \dots, \frac{1}{n} \right]$ 。

② 计算 Pareto 有效策略  $U^*(\boldsymbol{\alpha}^0)$ 。

③ 对于  $\forall i = 1, \dots, n$ , 判断  $J_i(U^*(\boldsymbol{\alpha}^0)) \leq J_{\text{tp},i}$  是否成立。如果不成立,假设存在  $k$  使得  $J_k(U^*(\boldsymbol{\alpha}^0)) > J_{\text{tp},k}$ ,按照下面规则更新  $\boldsymbol{\alpha}^0$  并跳转至②:  $\boldsymbol{\alpha}_k^0 = \boldsymbol{\alpha}_k^0 + 0.01$ ,  $\boldsymbol{\alpha}_i^0 = \boldsymbol{\alpha}_i^0 - \frac{0.01}{n-1}$ ,  $i = 1, \dots, n, i \neq k$ 。

若满足判断条件,继续执行④。

4) 按照  $\boldsymbol{\alpha}_j^* = \prod_{i \neq j} [J_i^*(\boldsymbol{\alpha}^*, U^*(\boldsymbol{\alpha}^*)) - J_{\text{tp},i}] /$

$\sum_{i=1}^n \prod_{k \neq i} [J_k^*(\boldsymbol{\alpha}^*, U^*(\boldsymbol{\alpha}^*)) - J_{\text{tp},k}]$ , 计算  $\boldsymbol{\alpha}_i^*$ ,  $i = 1, \dots, n$ 。其中,  $\boldsymbol{\alpha}^* = (\alpha_1^*, \dots, \alpha_n^*)$  为最优加权系数。

⑤ 按照  $\alpha_i = 0.8\alpha_i^0 + 0.2\alpha_i^*$  规则更新参数。如果  $|\alpha_i^* - \alpha_i| < 0.01$ ,  $i = 1, \dots, n$ , 算法终止,并令  $\boldsymbol{\alpha} = \boldsymbol{\alpha}^*$ , 否则跳转至②。将  $\boldsymbol{\alpha}^*$  代入式(24)得基本合作博弈优化的最优控制策略。

### 2.2.2 改进合作博弈优化一致性控制算法

下文将通过引入过去状态差值和优化代价函数的加权矩阵设计改进合作博弈优化一致性控制算法(Improved Cooperative Game Optimal Consensus Control Algorithm, ICGOCCA)以改善状态协调过程和任务集结行动的各项性能。

#### 1) 基于过去状态差值的改进算法。

为了加快 UAV 系统协调变量演化到一致状态的速度,提高协同控制的动态响应性和行动时效性,在基本算法中引入系统过去状态差值<sup>[14]</sup>,获得效率更高的控制算法为

$$\dot{\boldsymbol{\theta}}_{\text{ETA}}(t) = \mathbf{U}(\boldsymbol{\alpha}, t) = \left[ \frac{1}{2} P^{-1}(t) \mathbf{Q}_{\text{sys}} - \mathbf{B}_{\text{sys}} \mathbf{R}_{\text{sys}}^{-1} \mathbf{B}_{\text{sys}}^T P(t) \right] \cdot$$

$$\boldsymbol{\theta}_{\text{ETA}}(t) + \boldsymbol{\theta}_{\text{ETA}}(t) - \boldsymbol{\theta}_{\text{ETA}}(t - \tau(\boldsymbol{\alpha})) \quad (25)$$

式中:  $\tau(\boldsymbol{\alpha})$  为过去状态差值时刻;  $\boldsymbol{\theta}_{\text{ETA}}(t) = \boldsymbol{\theta}_{\text{ETA}}(0)$ , 当  $t \in [-\tau(\boldsymbol{\alpha}), 0)$ 。

参考文献[15]中算法收敛性和快速性分析可知,

式(25)可实现多 UAV 系统协调变量演化一致,并给出式(25)加快收敛速度的过去状态时间范围为  $\tau(\alpha) \in (0, \sigma(\alpha))$ ,  $\sigma(\alpha)$  满足

$$\sigma(\alpha) = \min_{i \in N, \lambda_i(\alpha) \neq 0} \left\{ \sigma(\alpha) \mid \sigma(\alpha) = \frac{\arccos e^{-\operatorname{Re}(\lambda_i(\alpha))\sigma(\alpha)}}{\pm \sqrt{e^{2\operatorname{Re}(\lambda_i(\alpha))\sigma(\alpha)} - 1} - \operatorname{Im}(\lambda_i(\alpha))} \right\} \quad (26)$$

式中,  $\lambda_i(\alpha)$ ,  $i = 1, \dots, n$ , 是矩阵  $1/2 \cdot P^{-1}(t) \mathbf{Q}_{\text{sys}} - \mathbf{B}_{\text{sys}} \mathbf{R}_{\text{sys}}^{-1} \mathbf{B}_{\text{sys}}^T P(t)$  的特征值。对于式(25), 采取算法1解得最优加权系数  $\alpha^*$ , 由式(26)解得加快收敛速度的过去状态区间  $(0, \sigma(\alpha^*))$ , 一般取  $\tau(\alpha^*) = 0.5\sigma(\alpha^*)$  为过去状态差值时刻。

2) 优化代价函数加权矩阵的改进算法。

将加权矩阵初值  $\mathbf{Q}_i^0$  和  $\mathbf{R}_i^0$  编码为

$$\mathbf{A} = \{ Q_{12}^0, \dots, Q_{1n}^0, \dots, Q_{i1}^0, \dots, Q_{ij}^0, \dots, Q_{in}^0, Q_{n1}^0, \dots, Q_{nn-1}^0, R_1^0, \dots, R_i^0, \dots, R_n^0 \mid i \neq j \} \quad (27)$$

定义遗传算法的适应度函数为

$$g = \beta_1 \frac{t_{\text{ICGOCCA}}}{t_{\text{BCGOCCA}}} + \beta_2 \frac{T_{\text{ICGOCCA}}}{T_{\text{BCGOCCA}}} + \beta_3 \frac{J_{\text{ICGOCCA}}}{J_{\text{BCGOCCA}}} \quad (28)$$

式中: 权重系数  $\beta$  满足  $\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 = 1$ ;  $t_{\text{ICGOCCA}}$  和  $J_{\text{ICGOCCA}}$  分别为改进算法下协调变量演化一致的收敛时间和控制能量;  $T_{\text{ICGOCCA}}$  为任务集结行动完成时间。其中, 控制能量为

$$\begin{aligned} J_{\text{ICGOCCA}}(\mathbf{Q}, \mathbf{R}, \alpha) &= \sum_{i=1}^n J_{\text{ICGOCCA},i}(\mathbf{Q}, \mathbf{R}, \alpha) = \\ & \frac{1}{2} m_{\text{UAV},i} [v_{\text{ICGOCCA},i}^2(t_{\text{ICGOCCA}}) - v_{\text{ICGOCCA},i}^2(t_0)] + \\ & \sum_{i=1}^n \int_0^{t_{\text{ICGOCCA}}} W_f(t) dt = \frac{1}{2} m_{\text{UAV},i} [v_{\text{ICGOCCA},i}^2(t_{\text{ICGOCCA}}) - \\ & v_{\text{ICGOCCA},i}^2(t_0)] + \sum_{i=1}^n \int_0^{t_{\text{ICGOCCA}}} F_f(t) v_{\text{ICGOCCA},i}(t) dt = \\ & \frac{1}{2} m_{\text{UAV},i} [v_{\text{IneOCCA},i}^2(t_{\text{IneOCCA}}) - v_{\text{IneOCCA},i}^2(t_0)] + \\ & \sum_{i=1}^n \int_0^{t_{\text{IneOCCA}}} c v_{\text{IneOCCA},i}^3(t) dt \end{aligned} \quad (29)$$

式中:  $m_{\text{UAV},i}$  为平台的质量;  $W_f(t)$  为克服空气阻力做功的功率;  $F_f(t)$  为空气阻力;  $v_{\text{IneOCCA},i}(t)$  为速度变量; 经过遗传算法优化, 可得优化的  $\mathbf{Q}^*$  和  $\mathbf{R}^*$ , 将其代入式(22)、(25), 得改进合作博弈优化一致性控制算法为

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_{\text{ETA}}(t) &= \mathbf{U}(t) = \left[ \frac{1}{2} P^{*-1}(t) \mathbf{Q}_{\text{sys}}^* - \mathbf{B}_{\text{sys}} \mathbf{R}_{\text{sys}}^{*-1} \mathbf{B}_{\text{sys}}^T P^*(t) \right] \cdot \\ & \theta_{\text{ETA}}(t) + \theta_{\text{ETA}}(t) - \theta_{\text{ETA}}(t - \tau^*(\alpha^*)) \end{aligned} \quad (30)$$

式中,  $P^*(t)$  为 Riccati 方程  $-P(t) \mathbf{B}_{\text{sys}} \mathbf{R}_{\text{sys}}^{*-1} \mathbf{B}_{\text{sys}}^T P(t) + \mathbf{Q}_{\text{sys}}^* = 0$  的解。

### 2.2.3 算法流程

合作博弈优化自组织协同控制方法的算法流程所

下所述(算法2)。

1) 每架 UAV 自主进行航迹规划, 给出航迹点序列<sup>[16]</sup>  $\mathbf{W}_{i,\text{ETA}} = \{ \mathbf{W}_{i,\text{ETA}}^0, \mathbf{W}_{i,\text{ETA}}^1, \dots, \mathbf{W}_{i,\text{ETA}}^f \}$ 。

2) 每架 UAV 计算航路长度, 给出 ETA 的范围, 记为  $\Phi_{i,\text{ETA}} = \left\{ \frac{d_{i,\text{ETA}}(0)}{v_{i\max}}, \frac{d_{i,\text{ETA}}(0)}{v_{i\min}} \right\}$ 。系统交换集合, 若  $\Phi_{1,\text{ETA}} \cap \Phi_{2,\text{ETA}} \cap \dots \cap \Phi_{n,\text{ETA}} \neq \emptyset$ , 执行3); 否则跳转至1)。

3) 多 UAV 系统利用有限通信网络交换协调变量, 即  $\theta_{i,\text{ETA}}(t)$ 。

4) 赋初值  $\mathbf{Q}^0$ 、 $\mathbf{R}^0$  和  $\alpha^0$ 。

5) 根据基本合作博弈优化一致性控制算法计算 Pareto 有效策略  $U^*(\mathbf{Q}^0, \mathbf{R}^0, \alpha^0)$ 。

6) 根据式(26)确定过去状态差值时刻  $\tau(\mathbf{Q}^0, \mathbf{R}^0, \alpha^0)$ 。  $\dot{\theta}_{\text{ETA}}(t) = U(\mathbf{Q}^0, \mathbf{R}^0, \alpha^0, t) = \left[ \frac{1}{2} P^{-1}(\mathbf{Q}^0, \mathbf{R}^0, \alpha^0, t) \cdot \mathbf{Q}_{\text{sys}}^0(\mathbf{Q}^0, \alpha^0) - \mathbf{B}_{\text{sys}} \mathbf{R}_{\text{sys}}^0{}^{-1}(\mathbf{R}^0, \alpha^0) \mathbf{B}_{\text{sys}}^T P(\mathbf{Q}^0, \mathbf{R}^0, \alpha^0, t) \right] \cdot \theta_{\text{ETA}}(t) + \theta_{\text{ETA}}(t) - \theta_{\text{ETA}}(t - \tau(\mathbf{Q}^0, \mathbf{R}^0, \alpha^0))$ 。

7) 采用算法1的①~⑤得  $\alpha^*(\mathbf{Q}^0, \mathbf{R}^0)$ , 进而得对应  $\mathbf{Q}^0$ 、 $\mathbf{R}^0$  和  $\alpha^*(\mathbf{Q}^0, \mathbf{R}^0)$  的最优策略:  $\dot{\theta}_{\text{ETA}}(t) = U(\mathbf{Q}^0, \mathbf{R}^0, \alpha^*(\mathbf{Q}^0, \mathbf{R}^0), t) = \left[ \frac{1}{2} P^{-1}(\mathbf{Q}^0, \mathbf{R}^0, \alpha^*, t) \mathbf{Q}_{\text{sys}}^0(\mathbf{Q}^0, \alpha^*) - \mathbf{B}_{\text{sys}} \mathbf{R}_{\text{sys}}^0{}^{-1}(\mathbf{R}^0, \alpha^*) \mathbf{B}_{\text{sys}}^T P(\mathbf{Q}^0, \mathbf{R}^0, \alpha^*, t) \right] \theta_{\text{ETA}}(t) + \theta_{\text{ETA}}(t) - \theta_{\text{ETA}}(t - \tau(\mathbf{Q}^0, \mathbf{R}^0, \alpha^*))$ 。

8) 采用遗传算法, 构建适应度函数式(28), 优化得加权矩阵  $\mathbf{Q}^*$  和  $\mathbf{R}^*$ , 同7)可得对应  $\mathbf{Q}^*$ 、 $\mathbf{R}^*$  和  $\alpha^*(\mathbf{Q}^*, \mathbf{R}^*)$  的最优控制策略:  $\dot{\theta}_{\text{ETA}}(t) = U(\mathbf{Q}^*, \mathbf{R}^*, \alpha^*(\mathbf{Q}^*, \mathbf{R}^*), t) = \left[ \frac{1}{2} P^{*-1}(\mathbf{Q}^*, \mathbf{R}^*, \alpha^*, t) \mathbf{Q}_{\text{sys}}^*(\mathbf{Q}^*, \alpha^*) - \mathbf{B}_{\text{sys}} \mathbf{R}_{\text{sys}}^0{}^{-1}(\mathbf{R}^*, \alpha^*) \mathbf{B}_{\text{sys}}^T P^*(\mathbf{Q}^*, \mathbf{R}^*, \alpha^*, t) \right] \theta_{\text{ETA}}(t) + \theta_{\text{ETA}}(t) - \theta_{\text{ETA}}(t - \tau^*(\mathbf{Q}^*, \mathbf{R}^*, \alpha^*))$ 。

9) 将8)中最优控制策略算式代入式(7)中, 得速度参考指令为:  $v^c(t) = v^T(t) - v^T(t) \left[ \left( \frac{1}{2} P^{*-1} \mathbf{Q}_{\text{sys}}^* - \mathbf{B}_{\text{sys}} \cdot \mathbf{R}_{\text{sys}}^{*-1} \mathbf{B}_{\text{sys}}^T P^* \right) \theta_{\text{ETA}}(t) + \theta_{\text{ETA}}(t) - \theta_{\text{ETA}}(t - \tau^*) \right] / \alpha_v^T \theta_{\text{ETA}}(t)$ 。

10) 航迹规划模块根据航路点信息, 计算出航向参考指令  $\varphi^c(t)$ 。

11) 将  $\varphi^c(t)$  和  $v^c(t)$  发给自动驾驶仪系统, 控制平台沿规划航迹飞行。

当进行航迹规划调整时, 系统就 ETA 进行新的协调并调整平台速度满足同时到达的集结行动要求, 因

此需要在相应时刻跳转至 1)。

### 3 仿真结果与分析

战场环境如图 1 所示,200 km × 200 km 的战场区域中,4 架 UAV 分别从 (39 km,174 km), (180 km,146 km), (86 km,12 km), (17 km,72 km) 坐标位置出发,沿预先规划的轨迹飞向目标(Target)位置;目标的中心位置是(102 km,122 km);4 架 UAV 的集结位置分别为(102 km,129 km), (109 km,122 km), (102 km,115 km), (95 km,122 km);航程为 115.68 km,91.58 km,121.60 km,104.8 km;初始速度为 220 m/s,225 m/s,192 m/s,246 m/s;ETA 为 525 s,407 s,633 s,426 s。假定所有 UAV 型号相同,不失一般性,取平台的质量  $m_{UAV,i}$  为单位量 1,其飞行性能约束参数为  $\alpha_v = 0.2$ ,  $\alpha_p = 0.2$ ,  $v_{min} = 100$  m/s,  $v_{max} = 300$  m/s,  $a_{min} = -100$  m/s<sup>2</sup>,  $a_{max} = 100$  m/s<sup>2</sup>,空气阻力系数  $c = 0.2$ 。

取平台代价权重系数初值、适应度函数权重系数和代价函数加权矩阵初值分别为:  $\alpha^0 = [\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4}]$ ,  $\beta_1 = 0.25, \beta_2 = 0.25, \beta_3 = 0.5, Q_{ij}^0 = 1, i \neq j, R_i^0 = 1$ 。采用基本算法,由算法 1 求得最优的平台代价权重系数为  $\alpha^* = [0.1706, 0.1619, 0.4418, 0.2256]$ ,采用改进算法 2,优化加权矩阵得

$$Q^* = [Q_{ij}^*] = \begin{bmatrix} 0 & 1.9040 & 1.3388 & 0.8916 \\ 0.4461 & 0 & 1.5541 & 0.7095 \\ 1.0016 & 0.5049 & 0 & 1.1436 \\ 0.7174 & 2.1792 & 1.1282 & 0 \end{bmatrix},$$

$$R^* = \text{diag}(R_i^*) = \begin{bmatrix} 0.6892 & & & \\ & 1.2683 & & \\ & & 1.1861 & \\ & & & 0.8097 \end{bmatrix}。$$

对应的差值时刻和平台代价系数为  $\tau^* = 0.23$  s,  $\alpha^* = [0.1965, 0.4362, 0.0717, 0.2956]$ 。分别对采用基本合作算法的文献[7]方法和本文方法进行仿真,得出两种方法的收敛时间和控制能量、收敛一致的 ETA 和行动完成时间,并与采用平均一致性控制算法的文献[5]方法以及采用基本非合作优化一致性控制算法的文献[7]方法进行对比,几种方法的性能如表 1 所示。

表 1 不同方法性能比较

Table 1 Performance comparison of different methods

方法	收敛时间/s	一致 ETA/s	集结完成时间/s	控制能量/ 10 <sup>4</sup> J
文献[5]方法	3.97	497.75	501.72	11.19
文献[7]非合作方法	4.13	501.56	505.69	8.21
文献[7]合作博弈方法	4.01	504.82	508.83	7.17
本文合作博弈方法	2.23	495.61	497.84	4.02

由表 1 可知,文献[7]合作博弈方法较文献[7]非合作方法协调变量收敛速度略有提高,控制能量一定程度上减少,但是协调得到的 ETA 变长,行动耗时略有增加;文献[7]合作博弈方法较文献[5]方法收敛速度略有降低,控制能量得到了极大改善,但是集结行动耗时更长;本文合作博弈方法较文献[7]合作博弈方法在收敛时间、集结行动耗时和控制能量 3 个方面都得到了不同程度的改善,尤其是收敛时间和控制能量分别减少 43.4% 和 43.93%。对比合作博弈方法和非合作方法可知,通过合作系统的能量最优性和动态响应性均得到了改善,但是行动时效性略有降低。

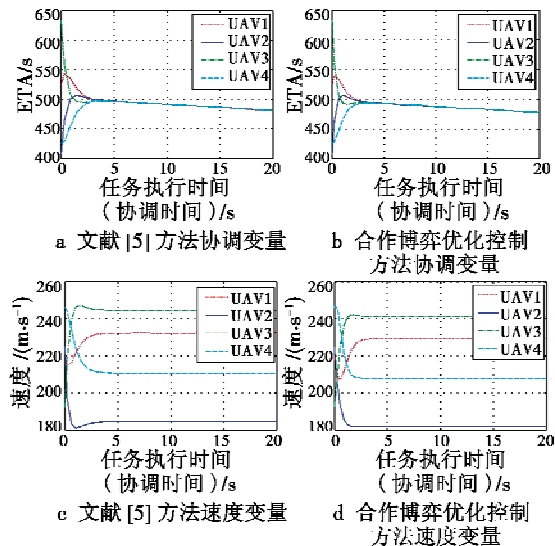
针对上述方法,分别计算每架 UAV 协调过程中的能量消耗,如表 2 所示。

表 2 不同方法下各无人机控制能量  
Table 2 Control energy for each UAV with different methods

方法	UAV1	UAV2	UAV3	UAV4	$\sum_{i=1}^4$ UAV
文献[5]方法	0.56	3.88	6.46	0.29	11.19
文献[7]非合作方法	0.50	2.82	4.61	0.28	8.21
文献[7]合作博弈方法	0.42	2.18	4.30	0.27	7.17
本文合作博弈方法	1.41	0.63	1.61	0.37	4.02

由表 2 知,相比于文献[5]方法,文献[7]非合作方法策略下对每架 UAV 控制能量都进行了不同程度的优化;文献[7]合作博弈方法较文献[7]非合作方法系统整体能量减少 12.67%,其中,每架 UAV 控制能量分别减少 16.0%、22.7%、6.52%、6.90%。以单架 UAV 为例分析可知,本文方法通过优化加权矩阵 Q 和 R 使得各 UAV 控制能量变化较大。

合作博弈优化自组织协同控制方法下的协调变量、速度变量和控制输入的动态变化过程如图 4 所示。



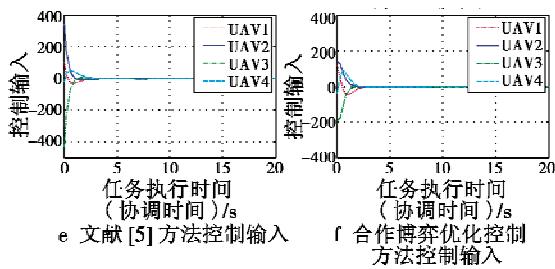


图4 两种方法演化过程

Fig.4 Evolution process of two methods

图4中,本文方法与文献[5]方法相比,协调初始阶段控制输入较小,控制能量得到优化,控制输入持续时间略短,系统动态性能得到一定程度改善,协调变量收敛值变小,行动时效性得到改善,满足相关优化指标。

为验证本文方法在动态战场环境下的适用性,假设行动过程中威胁1的威胁范围在50s时缩小,UAV1及时规划新的航迹,航程减少8.1km;行动执行的第90s出现突发威胁,UAV4航程增加16.8km。本文方法下协调变量收敛和速度变量变化过程如图5所示。

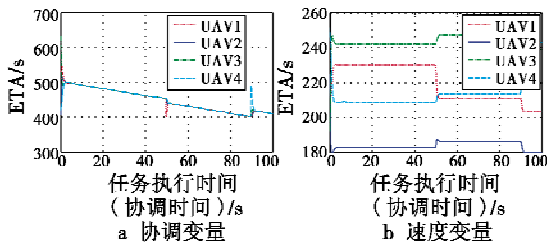
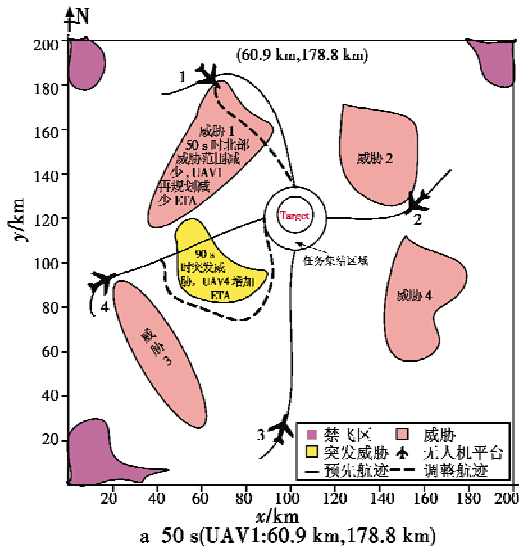


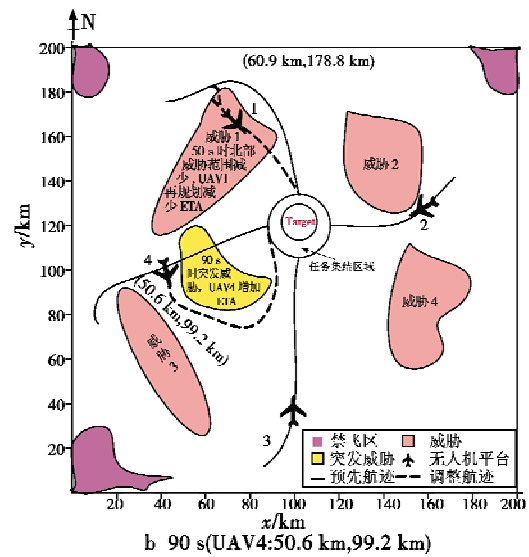
图5 动态战场环境和突发威胁下协调变量和速度变量演化过程

Fig.5 Coordinate variables and speed evolution process under the dynamic battlefield and emergent threats

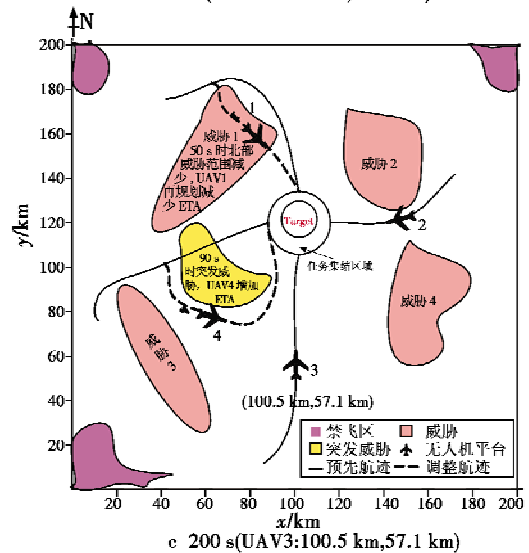
图6给出本文方法下任务集结行动的动态过程,可看出在动态战场环境和突发威胁情况下,本文方法可完成集结行动,验证了方法的适用性和有效性。图中坐标点表示UAV在集结行动对应时刻的坐标位置。



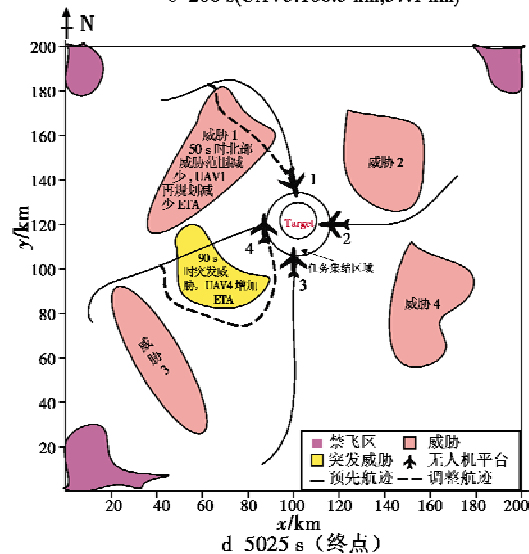
a 50 s(UAV1:60.9 km,178.8 km)



b 90 s(UAV4:50.6 km,99.2 km)



c 200 s(UAV3:100.5 km,57.1 km)



d 5025 s(终点)

图6 任务集结动态仿真过程

Fig.6 Dynamic simulation process of mission rendezvous

### 4 结论

本文分析多UAV自组织作战中同时到达任务集



结行动协同与优化控制问题,提出了优化控制目标,确立了问题分解策略和求解思路。研究了基于快速一致性控制算法的自组织协同控制结构,提出了实现优化目标的技术路线,设计了合作博弈优化自组织协同控制方法,通过仿真验证了方法的可行性和有效性。

### 参 考 文 献

- [1] Uumanned Aerial Vehicle(UAV) roadmap 2005-2030[R]. Washington:Office of the Secretary of Defense, 2005.
- [2] BEARD R W, MCLAIN T W, GOODRICH M A, et al. Coordinated target assignment and intercept for unmanned air vehicles[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2002, 18(6):911-922.
- [3] MCLAIN T W, BEARD R W. Coordination variables, coordination functions and cooperative-timing missions[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2005, 28(1):150-161.
- [4] NELSON D R, MCLAIN T W. Experiments in cooperative timing for miniature air vehicles[J]. Journal of Aerospace Computing, Information and Communication, 2007, 4(8):956-967.
- [5] 袁利平,陈宗基,周锐,等. 多无人机同时到达的分散化控制方法[J]. 航空学报, 2010, 31(4):797-805.  
YUAN L P, CHEN Z J, ZHOU R, et al. Decentralized control for simultaneous arrival of multiple UAV [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(4):797-805.
- [6] ZHAO S Y, ZHOU R. Cooperative guidance for multi-missile salvo attack [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2008, 21(6):533-539.
- [7] 张庆杰. 基于一致性理论的多 UAV 分布式协同控制与状态估计方法[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2011.  
ZHANG Q J. Distributed cooperative control and state estimation for networked multiple UAVs based on consensus theory[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011.
- [8] MCLAIN T W, BEARD R W. Coordination variables, coordination functions and cooperative - timing missions [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2005, 28(1):150-161.
- [9] NELSON D R, MCLAIN T W, BEARD R W. Experiments in cooperative timing for miniature air vehicles [J]. Journal of Aerospace Computing, Information and Communication, 2007, 4(8):956-967.
- [10] BEARD R W, MCLAIN T W, NELSON D R, et al. Decentralized cooperative aerial surveillance using fixed wing miniature UAVs [J]. Proceedings of the IEEE, 2006, 94(7):1306-1324.
- [11] SABER R O, MURRAY R M. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2004, 49(9):1520-1533.
- [12] JACOB E. LQ dynamic optimization and differential games [M]. Hoboken:John Wiley & Sons, 2005.
- [13] 杨军,朱学平,朱苏朋,等. 飞行器最优控制[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2011.  
YANG J, ZHU X P, ZHU S P, et al. Optimal control of aircraft[M]. Xi'an:Northwestern Polytechnical University Press, 2011.
- [14] 冯新磊. 符号矩阵和多智能体系统一致性研究[D]. 成都:电子科技大学, 2011.  
FENG X L. Study of sign pattern matrix and consensus of multi-agent systems [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2011.
- [15] 余莹莹,方华京. 基于有向网络的多智能体系统快速一致性[J]. 控制与决策, 2010, 25(7):1026-1030.  
SHE Y Y, FANG H J. Fast consensus for multi-agent systems in directed networks [J]. Control and Decision, 2010, 25(7):1026-1030.
- [16] 陈岩,苏菲,沈林成. 概率地图 UAV 航线规划的改进型蚁群算法[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(6):1658-1666.  
CHEN Y, SU F, SHEN L C. Improved ant colony algorithm based on PRM for UAV route planning[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(6):1658-1666.

## 下 期 要 目

舰艇编队航渡中多机伴随反潜研究  
一种空域和变换域相结合的图像增强算法  
机载定向红外对抗系统的最新进展  
长波红外连续变焦光学系统设计

基于 Weibull 分布的航空装备部件寿命预测研究  
FC-AE-1553 在飞机/悬挂物通用接口中的应用  
多无人机编队保持轨迹的对偶优化设计  
舵机电动加载系统的最优控制设计与仿真