

引用格式:李聪,王勇,周欢,等.多无人机编队分组决策与一致性[J].电光与控制,2017,24(10):12-16. LI C, WANG Y, ZHOU H, et al. Grouping of multi-UAV formation and the consistency protocol [J]. Electronics Optics & Control, 2017, 24(10):12-16.

## 多无人机编队分组决策与一致性

李聪<sup>1</sup>, 王勇<sup>1</sup>, 周欢<sup>1</sup>, 黄汉桥<sup>1,2</sup>, 王骁飞<sup>1</sup>

(1. 空军工程大学航空航天工程学院, 西安 710038; 2. 光电控制技术重点实验室, 河南 洛阳 471023)

**摘要:**针对现阶段分组一致性协议应用的局限性,提出了模糊C-均值聚类算法和考虑子编队之间信息交互的分组一致性控制协议。首先,构建了包含多无人机编队作战关键因素的无人机向量,基于模糊C-均值聚类算法实现了贴合实战需求的编队拆分分组。其次,针对现有分组一致性算法的局限性,提出了一种考虑子编队之间信息交互的分组一致性控制协议,并利用稳定性理论和矩阵论知识推导了相应判据准则。仿真结果表明,所设计的编队分组决策方法和一致性协议可有效实现编队拆分分组和子编队状态的分组一致性,仿真实验验证了判据准则的正确性。

**关键词:**多无人机编队;队形拆分;分组一致性;模糊C-均值聚类

**中图分类号:** V279 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2017.10.003

## Grouping of Multi-UAV Formation and the Consistency Protocol

LI Cong<sup>1</sup>, WANG Yong<sup>1</sup>, ZHOU Huan<sup>1</sup>, HUANG Han-qiao<sup>1,2</sup>, WANG Xiao-fei<sup>1</sup>

(1. Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;

2. Science and Technology on Electro-Optic Control Laboratory, Luoyang 471023, China)

**Abstract:** Considering the application limitations of the current grouping consistency protocol, we proposed a fuzzy C-mean clustering algorithm and a new kind of grouping-consistency algorithm based on the information interaction between the groups. Firstly, the UAV vector composed of multiple combat factors is established, and separating/grouping of UAV formation is implemented based on the fuzzy C-mean clustering algorithm. Then, to overcome the deficiency of existing grouping-consistency algorithms, a new kind of grouping-consistency protocol considering the information interaction between groups is presented, and the corresponding criterion is proved based on the theory of stability and matrix. The simulation result proved the correctness of the criterion and indicated that the proposed grouping method and consistency protocol can effectively implement separating/grouping of the UAV formation and guarantee the grouping consistency.

**Key words:** multi-UAV formation; formation separation; grouping consensus; fuzzy C-mean clustering algorithm

### 0 引言

无人机面临的协同侦察、协同跟踪与协同打击等作战任务需求决定了其作战使用方式是多无人机编队作战<sup>[1]</sup>。多无人机编队在作战过程中,根据作战任务需把几何构型和组织结构上作为一个整体的大编队拆

分为若干个规模较小的子编队,以便于分别执行各自相应的任务,这个过程即为多无人机编队队形拆分。现阶段针对多无人机编队作战问题的研究主要集中于编队控制<sup>[2-3]</sup>、航迹规划<sup>[4-5]</sup>和队形重构<sup>[6-7]</sup>等方面,而针对多无人机编队拆分分组及编队拆分后子编队状态的一致性问题的,国内外则鲜有文献进行讨论研究。

关于多无人机编队拆分分组的问题,大多数文献采用社团划分的策略<sup>[8]</sup>,但此方法的本质仍仅是以无人机机间距离这个单一因素为划分依据,同战场复杂多变的动态环境不相符。故本文根据实际作战情况,分析和提炼影响多无人机编队作战的关键因素以构建

收稿日期:2017-05-14

修回日期:2017-06-05

基金项目:航空科学基金(20155196022);国家自然科学基金(61601505,71501184);陕西省自然科学基金(2016JQ6050)

作者简介:李聪(1992—),男,山东潍坊人,硕士生,研究方向为无人飞行器作战系统与技术。

无人机状态向量,并在此基础上借助模糊 C-均值聚类法对多无人机编队进行拆分分组决策。文献[8-11]针对多智能体系统分组一致和分组同步问题在理论上有所突破,但是上述研究内容都是基于入度平衡和同一个分组中每一节点到其他分组中所有节点的邻接权重和在任意时刻均为相同的常量这几种特殊的保守假设,忽略了子系统之间的交互作用,与多无人机编队在实际作战过程中各子编队之间需及时进行信息共享以协同作战的需求不符。本文则力求突破上述保守假设,在考虑子编队之间通信需求的基础上,提出了适应范围更加广泛、更加贴合实战需求新型分组一致性控制协议。

针对以上问题,受文献[12]加权平均一致性理论的启发,提出了涉及子编队之间信息交互的分组一致性理论。首先针对多无人机编队拆分分组决策问题,结合无人机向量概念,利用模糊 C-均值聚类算法实现了贴合作战需求的编队分组,并借助多智能体一致性理论对编队拆分后多个子编队的分组一致性问题进行研究,提出了一种一般情况下的分组一致性控制协议。仿真结果表明,本文所提出的模糊 C-均值聚类算法和一般情况下的分组一致性控制协议可有效实现多无人机编队的拆分分组和子编队的状态一致性。

### 1 多无人机编队分组决策

图论知识是研究多无人机编队的基础,为其提供了一种具体形象的描述工具<sup>[13]</sup>。利用图论知识可对多无人机编队队形拆分的动态变化进行如图 1 所示的形式化描述。

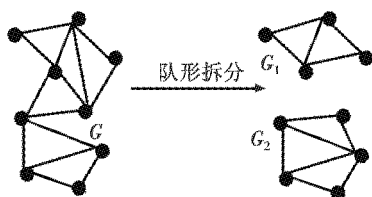


图 1 多无人机编队拆分分组

Fig. 1 Formal description of formation separation

**定义 1** 多无人机编队图定义为  $F = (G, X)$ ,  $F = (F_1, F_2, \dots, F_n)$ , 则子编队图分别为  $F_1 = (G_1, X_1)$ ,  $F_2 = (G_2, X_2), \dots, F_n = (G_n, X_n)$ , 其中  $X$  表示子编队中的一致性状态值。

假设多无人机编队内共有  $n$  个子编队,第  $n$  个子编队  $F_n$  包含  $N_n$  架无人机,可表示为  $V_1 = \{v_{11}, v_{12}, \dots, v_{1N_1}\}, V_2 = \{v_{21}, v_{22}, \dots, v_{2N_2}\}, \dots, V_n = \{v_{n1}, v_{n2}, \dots, v_{nN_n}\}$ 。子编队的一致性状态向量分别定义为  $X_1 = (x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1N_1})^T, X_2 = (x_{21}, x_{22}, \dots, x_{2N_2})^T, X_n = (x_{n1}, x_{n2}, \dots, x_{nN_n})^T$ 。

将包含有多无人机编队作战关键因素的无人机状

态向量定义为

$$X_i = [x_i, y_i, z_i, \alpha_i, v_i] \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

式中:  $(x_i, y_i, z_i)$  表示第  $i$  架无人机的三维位置;  $\alpha_i$  为第  $i$  架无人机的航向角;  $v_i$  为第  $i$  架无人机的速度。基于此,将第  $k$  个子编队的编队中心定义为

$$C_k = [x_k^0, y_k^0, z_k^0, \alpha_k^0, n_k^0] \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (2)$$

在考虑无人机状态向量元素的情况下,定义多无人机编队分组的目标函数为

$$J(X, U, C) = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K \mu_{ik} d_{ik}^2 \quad (3)$$

式中,  $U$  为隶属度矩阵,  $U = (\mu_{ik})_{n \times K}$  的元素  $\mu_{ik}$  表示第  $i$  架无人机属于第  $k$  个子编队的隶属度,且满足

$$\begin{cases} \mu_{ik} \in [0, 1] & \forall i, k \\ \sum_{k=1}^K \mu_{ik} = 1 & \forall i \end{cases} \quad (4)$$

$$d_{ik}^2 = k_d \cdot \sqrt{(x_i - x_k^0)^2 + (y_i - y_k^0)^2 + (z_i - z_k^0)^2} + k_\alpha \cdot \sqrt{(\alpha_i - \alpha_k^0)^2} + k_v \cdot \sqrt{(v_i - v_k^0)^2} \quad (5)$$

式中:  $d_{ik}^2$  表示第  $i$  架无人机到第  $k$  个子编队中心的欧氏距离的平方;  $k_d, k_\alpha$  和  $k_v$  分别是位置、航向角以及速度等因素的权重值。

模糊 C-均值聚类算法就是在满足式(4)约束条件的基础上,求取隶属度矩阵  $U$  和编队中心矩阵  $C$  使得目标函数  $J(X, U, C)$  最小化的迭代过程。通过不断迭代调整  $(U, C)$ , 使得目标函数  $J$  最小,具体流程如图 2 所示。

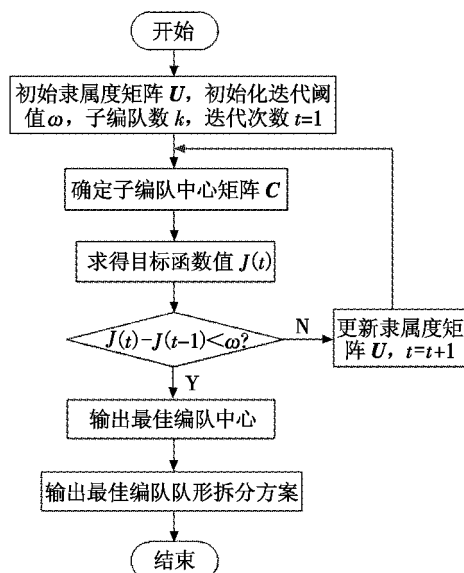


图 2 模糊 C-均值聚类算法流程图

Fig. 2 Flow chart of fuzzy C-mean clustering algorithm

### 2 多无人机编队分组一致性

本文以两个分组的一致性为研究对象,对于

多个分组的情况,可类比而得。假设多无人机编队内共有  $N+M$  架无人机,子编队  $F_1$  包含  $N$  架无人机,子编队  $F_2$  包含  $M$  架无人机。考虑一阶线性耦合的多无人机编队的动态方程为

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \boldsymbol{\mu}(t) \quad i=1,2,\dots,N+M \quad (6)$$

式中:  $\mathbf{x}(t) = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_{N+M}(t)\}^T$ ,  $x_i(t) \in \mathbf{R}$  为第  $i$  架无人机在  $t$  时刻的状态向量值,其含义可分别代表无人机状态向量中的  $x, y, z, \alpha, v$  值;  $\boldsymbol{\mu}(t) = \{\mu_1(t), \mu_2(t), \dots, \mu_{N+M}(t)\}^T$ ,  $\mu_i(t) \in \mathbf{R}$  为在  $t$  时刻对第  $i$  架无人机的控制输入。

本节针对以上一阶系统设计分组一致性协议,以实现多无人机编队拆分后各子编队状态的一致性。

## 2.1 分组一致性

分组一致性<sup>[14]</sup>是指在包含多个子编队的多无人机编队中,同一子编队中的无人机在一致性控制协议作用下各状态值可达到一致,而所属不同子编队的无人机状态则各有不同。

**定义 2** 由两个子编队构成的多无人机编队能够渐近实现分组一致,当且仅当如下所示条件同时满足

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} \|x_i(t) - x_j(t)\| = 0 & \forall i, j \in l_1 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \|x_i(t) - x_j(t)\| = 0 & \forall i, j \in l_2 \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $l_1 = \{1, 2, \dots, N\}$ ,  $l_2 = \{N+1, N+2, \dots, N+M\}$ , 分别为子编队中无人机编号的集合。

**定义 3** 在定义 2 的基础上,令  $x_i(0)$  为多无人机编队中第  $i$  架无人机的初始状态,当同时满足以下条件时,则称子编队实现渐近平均一致。

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} x_i(t) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_j(0) & \forall i \in l_1 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} x_i(t) = \frac{1}{M} \sum_{j=N+1}^{N+M} x_j(0) & \forall i \in l_2 \end{cases} \quad (8)$$

下文根据以上条件设计分组一致性协议。

## 2.2 分组一致性协议

目前的研究文献主要是基于式(9)所示的入度平衡条件和式(10)所示的同一个分组中每一个节点到其他分组中所有节点的邻接权重和在任意时刻均为相同的常量这几种特殊的保守假设,对式(11)分组控制协议进行讨论研究。

$$\begin{cases} \sum_{j=N+1}^{N+M} a_{ij} = 0 & i \in l_1 \\ \sum_{j=1}^N a_{ij} = 0 & i \in l_2 \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \sum_{j=N+1}^{N+M} a_{ij} = \alpha & i \in l_1 \\ \sum_{j=1}^N a_{ij} = \beta & i \in l_2 \end{cases} \quad (10)$$

$$\mu_i(t) = \begin{cases} \sum_{j \in l_1} a_{ij}(x_j(t) - x_i(t)) + \sum_{j \in l_2} a_{ij}x_j(t) & \forall i \in l_1 \\ \sum_{j \in l_1} a_{ij}x_j(t) + \sum_{j \in l_2} a_{ij}(x_j(t) - x_i(t)) & \forall i \in l_2 \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $\alpha, \beta$  为常量;  $l_1 = \{1, 2, \dots, N\}$  以及  $l_2 = \{N+1, N+2, \dots, N+M\}$  为子编队中无人机的编号集合。

上述假设条件均过于特殊,据此设计的分组一致性控制协议的应用便具有很大的局限性。为贴合实战需求,本文在固定拓扑结构下提出了一种一般情况下的子编队分组一致性控制协议,加强了子编队之间的信息传递,从而使得多无人机编队在执行任务的过程中,可以及时获得其他子编队的态势状况进行评估以相互掩护或支援。

$$\mu_i(t) = \sum_{j=1, j \neq i}^N a_{ij}(x_j(t) - x_i(t)) + \sum_{j=1}^N l_{ij}x_{\sigma_j} \quad (12)$$

式中:  $a_{ij}$  为邻接矩阵  $\mathbf{A} \in \mathbf{R}^{N \times N}$  的第  $(i, j)$  个元素值,且  $a_{ii} = 0$ ;  $l_{ij}$  为 Laplacian 矩阵的第  $(i, j)$  个元素值。子编队中多架无人机在式(12)的控制下即可实现分组一致。

下文给出一般情况下多无人机编队可以实现渐近分组一致的判据和相应证明。

**定理 1** 对于式(6)具有一般连通拓扑结构的多无人机编队系统,当编队拓扑结构的 Laplacian 矩阵有单一零根且其他特征值具有正实部时,多无人机编队系统能够实现渐近分组一致。

**证明** 在式(12)控制协议的作用下,系统方程式(6)可写成线性系统

$$\dot{\mathbf{x}}_i(t) = \sum_{j=1, j \neq i}^N a_{ij}(x_j(t) - x_i(t)) + \sum_{j=1}^N l_{ij}x_{\sigma_j} \quad (13)$$

定义误差为

$$e_i(t) = x_i(t) - x_{\sigma_i} \quad i=1, 2, \dots, N \quad (14)$$

式中,  $1 \leq \sigma_i \leq K$ 。

式(12)系统渐近分组一致性的实现等价于以下条件的成立。

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |e_i(t)| = 0 \quad i=1, 2, \dots, N \quad (15)$$

式(15)说明同一子编队中的所有无人机状态可达到渐近一致,而不同子编队中的无人机则不能达到一致。

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_i(t) &= \sum_{j=1, j \neq i}^N a_{ij}(x_j(t) - x_i(t)) + \sum_{j=1}^N l_{ij}x_{\sigma_j} = \\ &= - \sum_{j=1}^N l_{ij}(x_j(t) - x_{\sigma_i}) \quad i=1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (16)$$

定义  $\mathbf{e}(t) = (e_1(t), e_2(t), \dots, e_N(t))^T$ , 根据式(14)误差系统,式(13)系统可写成

$$\dot{\mathbf{e}}(t) = -\mathbf{L}\mathbf{e}(t) \quad (17)$$

选取 Lyapunov 函数为

$$V(t) = \frac{1}{2} \mathbf{e}^T(t) \mathbf{e}(t) \quad (18)$$

将式(18)求导可得  $\dot{V}(t) = \mathbf{e}^T(t) \dot{\mathbf{e}}(t)$ , 将  $\dot{\mathbf{e}}(t) = -\mathbf{L}\mathbf{e}(t)$

代入后可得

$$\dot{V}(t) = e^T(t) [-L]e(t) \quad (19)$$

若要实现误差系统渐近稳定,则要求 $V(t) \geq 0$ 且 $\dot{V}(t) \leq 0$ 。由式(18)易知 $V(t) \geq 0$ ,接下来证明 $\dot{V}(t) \leq 0$ 。

特征值具有正实部时, $L \geq 0$ ,则由式(19)可知 $\dot{V}(t) \leq 0$ 。当且仅当 $e(t) = 0$ 时, $\dot{V}(t) = 0$ 。由 Lyapunov 全局稳定性理论可知误差系统稳定,  $\|e_i(t)\| \rightarrow 0$ ,即 $x_i(t) - x_{\sigma_i} = 0$ 为编队的一个平衡点,所有无人机状态值均收敛于这个点。因此,上文证明了在式(12)分组一致性控制协议的作用下,多无人机编队可实现渐近分组一致。证明完毕。

### 3 仿真验证

考虑含有 5 架无人机的多无人机编队,多无人机编队各机状态向量值如表 1 所示,编队拓扑结构如图 3 所示。

表 1 多无人机编队各机状态向量值  
Table 1 Initial values of UCAV state vector

	无人机编号				
	1	2	3	4	5
$x/\text{km}$	399	409	390	400	410
$y/\text{km}$	600	610	580	420	530
$z/\text{km}$	3.1	2.9	3.1	3.0	2.8
$\alpha/(\circ)$	60	45	30	59	44
$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	500	400	600	499	601

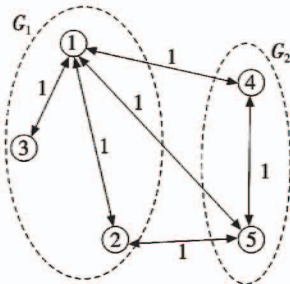


图 3 多无人机编队通信拓扑图  
Fig. 3 Communication topology graph

#### 3.1 多无人机编队拆分分组

设定战术背景如下:多无人机编队遭遇前方 2 个待搜索区域之后,需拆分为 2 个子编队分别完成搜索任务。借助模糊 C-均值算法,结合表 1 中无人机状态向量值,多无人机编队分组结果如表 2 所示,三维坐标下的仿真结果如图 4 所示。

表 2 多无人机编队拆分分组结果

Table 2 The result of formation separation

编队拆分结果	编队中心 $C$ ( $x_0, y_0, z_0, \alpha_0, v_0$ )	各无人机隶属度 $U$				
		1	2	3	4	5
子编队 $F_1$	(396.3, 533.3, 3.609, 33.5, 425.25)	0.99	0.05	0.97	0.98	0.01
子编队 $F_2$	(409.3, 570.2, 2.853, 52.449.5)	0.01	0.95	0.03	0.02	0.99

由图 4 可以直观地判定利用模糊 C-均值聚类算法将多无人机编队成功地拆分为 2 个子编队,由表 2 中分析可知,第 1,3 和 4 号无人机属于第 1 子编队  $F_1$ ,第 2,5 号无人机属于第 2 子编队  $F_2$ 。

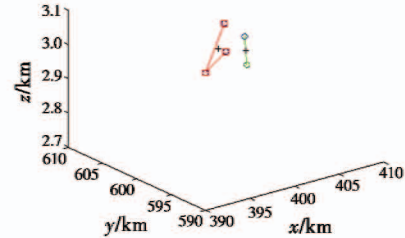


图 4 多无人机编队拆分分组

Fig. 4 Multi-UCAV formation separation

#### 3.2 无人机状态向量值的分组一致性

编队内各无人机之间耦合的权重如拓扑图 3 中标注所示。基于矩阵论知识和图论知识,以多无人机编队基于模糊 C-均值聚类算法拆分分组后所得的子编队为研究对象,验证式(12)所提出的一般情况下的分组一致性控制协议。

由图 3 可知多无人机编队的邻接矩阵  $A$ 、入度矩阵

$D$  和 Laplacian 矩阵  $L$  分别为  $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$ ,

$D = \begin{bmatrix} 4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3 \end{bmatrix}$ ,  $L = D - A = \begin{bmatrix} 4 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 0 & -1 & 3 \end{bmatrix}$ 。

经计算可得, Laplacian 矩阵的特征值分别为  $\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 1, \lambda_3 = 2, \lambda_4 = 4, \lambda_5 = 5$ 。因为编队 Laplacian 矩阵具有单一零根而且其他所有的特征值均为正实部,根据定理 1 可知,编队可实现渐近分组一致。下文基于 Matlab 对理论上得出的结论进行仿真验证。

以无人机向量中横坐标状态值为例,由表 1 可知,多架无人机初始状态为  $x^T(0) = [399, 409, 390, 400, 410]^T$ ,则据式(8)可知,2 个子编队渐近平均一致的状态值为  $x_{\sigma_i} = \begin{cases} 396.3 & i = 1, 3, 4 \\ 409.3 & i = 2, 5 \end{cases}$ 。

基于式(12)一致性控制协议的仿真结果如图 5 所示。图 5a 为多无人机编队  $x$  值的状态轨迹,可知 2 个子编队的  $x$  值分别收敛至各自的一致性值。图 5b 为 2 个子编队中各架无人机的  $x$  值与相应子编队的平均一致性值  $x_{\sigma_i}$  的误差演化情况。随着时间推移,误差最终为 0,即实现了平均分组一致。

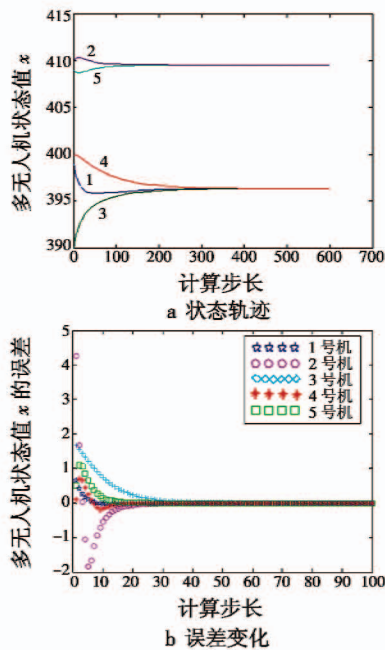


图5 各子编队  $x$  值的状态轨迹及误差变化

Fig. 5 Time evolution and error variation of  $x$  from two groups

#### 4 结论

本文通过设计贴合实战需求的无人机状态向量,利用模糊 C-均值聚类算法实现了多无人机编队拆分分组决策。在此基础上,利用一般情况下的分组一致性协议使子编队内无人机的各状态向量值实现了渐近分组一致,从而使多架无人机可作为一个整体执行作战任务。本文所研究的分组决策策略和分组一致性控制协议为无人机在协同作战中的底层控制提供了指导。

#### 参考文献

- [1] 李相民,颜骥,刘波,等. 多无人机编队自主协同控制架构[J]. 电光与控制,2015,22(3):1-6.
- [2] 梅权,姚佩阳. 一致性 Multi-Agent 编队控制综述[J]. 电光与控制,2017,24(1):54-57.
- [3] SABOORI I, KHORASANI K.  $H_\infty$  consensus achievement of multi-agent systems with directed and switching topology

- networks [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2014, 59(11):3104-3109.
- [4] SCHUMACHER C J, KUMAR R. Adaptive control of UAV in close-coupled formation flight[C]//Proceedings of IEEE American Control Conference, Chicago, Illinois, 2000:849-853.
- [5] MELLINGER D, MICHAEL N, KUMAR V. Trajectory generation and control for precise aggressive maneuvers with quadrotors[J]. International Journal of Robotics Research, 2012, 31(5):664-674.
- [6] KAN Z, DANI A P, SHEA J M, et al. Information flow based connectivity maintenance of a multi-agent system during formation control[C]//IEEE Conference on Decision and Control, 2011:2375-2380.
- [7] 王建宏,朱永红,许莹,等. 多无人机编队自主重构的内点算法[J]. 电光与控制,2017,24(3):1-6.
- [8] 陈世明,李慧敏,谢竟,等. 基于社团划分的多智能体蜂拥控制算法[J]. 信息与控制,2013,42(5):536-541.
- [9] 郭盈盈,韦巍,李国阳,等. 基于社团划分的复杂网络牵制控制策略[J]. 浙江大学学报:工学版,2011,45(3):495-502.
- [10] YU J Y, WANG L. Group consensus of multi-agent systems with undirected communication graphs[C]//Proceedings of the 7th Asian Control Conference, 2009:105-110.
- [11] YI J, WANG Y, XIAO J. Reaching cluster consensus in multi-agent systems[C]//The 2nd International Conference on Intelligent Control and Information Processing, 2011:569-573.
- [12] TAN C, LIU G P, DUAN G R. Group consensus of networked multi-agent systems with directed topology[C]//The 18th IFAC World Congress, 2011:8878-8883.
- [13] TOLGA E, BRIAN D O A, STEPHEN M A, et al. Operations on rigid formations of autonomous agents[J]. Communications in Information and Systems, 2004, 34(10):223-258.
- [14] 王娜,王健,曹智明,等. 加权平均预测的一阶多智能体系统一致性的采样控制[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2017,18(1):105-110.