

基于规则的无人机集群飞行与规避协同控制

周欢, 赵辉, 韩统, 黄汉桥

(空军工程大学航空航天工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要: 针对已有方法在大规模集群系统控制方面的不足, 提出一种基于规则的无人机集群系统飞行与规避自主协同控制方法。受群智能思想启发, 定义集群内无人机成员的基本飞行规则, 实现无人机集群正常飞行和队形重构, 在此基础上, 将规避动作作为一种新的飞行规则, 通过设置相应的规则权重系数, 建立整体和成员两种规避控制机制, 最后基于线性反馈控制理论证明了无人机集群系统的稳定性。仿真结果表明, 所提方法能够控制集群正常飞行并有效处理规避问题, 同时具有良好的实时性。

关键词: 无人机; 集群系统; 群智能; 规避; 协同控制

中图分类号: V 249

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.1001-506X.2016.06.24

Cooperative flight and evasion control of UAV swarm based on rules

ZHOU Huan, ZHAO Hui, HAN Tong, HUANG Han-qiao

(Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: Aiming to deal with the shortage of existed methods used in the control of large-scale swarm systems, an autonomous cooperative flight and evasion control method of unmanned aerial vehicle (UAV) swarm systems is put forward for UAV swarms based on rules. Inspired by the swarm intelligence, the basic flight rules of members in the UAV swarm are defined to realize the normal flight and formation reconfiguration. Then, the evasion is viewed as a new flight rule, and the group evasion mechanism and member evasion mechanism are built by setting corresponding rule weights. Finally, the stability of the UAV swarm systems is proved based on the linear feedback control. Simulation results indicate that the proposed method could realize the normal flight of the UAV swarm and solve the evasion problem efficiently, and the real-time performance is very good.

Keywords: unmanned aerial vehicle (UAV); swarm system; swarm intelligence; evasion; cooperative control

0 引言

无人机自主协同面临的协同侦察、协同跟踪与协同打击等^[1-2]作战任务需求决定了其作战使用方式是多机集群系统。集群的运用使无人机在侦察、搜索和援救等任务中, 能以更少的时间覆盖较广的一片区域, 极大地提高了无人机的使用效率; 但与此同时, 空间无人机数量与密度的上升也给飞行安全带来了巨大的挑战^[3-4], 集群系统自主飞行与规避控制已经成为一个亟待解决的问题。

对于一个集群系统, 当前主要的控制方法有如下两种: 领航-跟随 (leader-follower)^[5-7] 和行为控制^[8-10]。leader-follower 方法的思想是引入一个 leader, 并采用分布式控制方法控制集群中的其他 follower, 使所有 follower 的状态 (如速度) 逐渐跟随 leader, 最终达成一致。其中, 文献[7]考虑系统噪声和时滞, 利用 $L_2 - L_\infty$ 控制理论研究了有

leader 的二阶定拓扑多智能体系统的协调一致问题。行为控制主要借鉴群智能思想, 基于进化机制设计集群系统的运动行为, 并通过一定的演化和发展, 具备自适应能力。其中, 文献[8]基于定速、倾斜转弯的无人机模型建立了二维平面内的集群算法, 算法包含两个基本规则: 同盟和内聚, 该论文一个较大的贡献在于证明了规则的权重将决定集群的飞行行为。

当前常用的集群系统规避控制方法主要有几何向量法^[11-13] (geometry vectors)、人工势场法^[14-16] (artificial potentials) 以及模型预测法^[17-19] (model predictive control, MPC)。几何向量法往往没有对集群系统内部成员的速度限制, 这是无人机所不允许的, 因此其主要应用于地面机器人控制; 人工势场法将无人机的运动看作是吸引力和排斥力相互作用的结果, 但该方法容易陷入局部最小点; 模型预测控制的一个主要优势在于, 其可以高效解决系统存在约

收稿日期: 2015-06-13; 修回日期: 2015-10-26; 网络优先出版日期: 2016-02-15。

网络优先出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2422.TN.20160215.1439.014.html>

基金项目: 中国航空科学基金(20105169016); 中国博士后科学基金(2012M521807)资助课题

束条件或维数高的问题,但是系统计算量随集群成员数量的上升而显著增大,难以满足实时性要求。

为克服上述方法的不足,受文献[8]群智能思想启发,本文基于规则研究无人机集群飞行与规避控制方法。首先定义集群内无人机成员的基本飞行规则,控制集群正常平飞,在此基础上将规避动作视为集群的另一飞行规则,通过设置相应的规则权重系数,建立整体和成员两种机制,进行集群规避制导与控制。仿真结果表明,本文所提方法能够有效实现集群飞行与规避,同时具有较好的实时性。

1 群智能与集群内部成员的基本飞行规则

为控制集群系统正常飞行和队形重构,借鉴群智能思想,将集群系统内部无人机成员的基本飞行规则抽象为:内聚、跟随、自导引、分散和同盟。

1.1 群智能

群智能是一种基于生物群体行为规律的计算技术。该理论研究领域主要有两种算法:蚁群算法^[20](ant colony algorithm, ACA)和粒子群算法^[21](particle swarm optimization, PSO)。在计算机科学与应用研究领域,蚁群算法是一种解决数学计算类问题的概率论方法,利用图论来寻找优化与最优路径。Dr. Kennedy 和 Dr. Eberhart 最初受鸟群和鱼群的捕食等社会性行为启发,于1995年提出了PSO。PSO算法在进化计算方面和遗传算法具有诸多类似,但与遗传算法不同的是,其并没有交叉和变异等进化机制。

目前,由于ACA和PSO具有诸多优势,其在研究和应用领域都得到广泛的应用,同时集群智能方法^[22]也逐渐兴起。该方法以传统群智能算法思想为借鉴,以实现多机器人、多代理人、多飞机平台的分布式智能协同控制为目的。集群智能算法将集群系统中每一个agent/member都看作生物系统中的某个个体,具有相同或者类似特征的个体再组成新的集群,集群个体之间或者集群之间的相互作用采取传统群智能算法影响机制。这样,集群智能算法将具有算法简单,易满足实时性,智能化程度高以及鲁棒性好等特点。

1.2 集群系统内部成员的基本飞行规则

集群系统内部单个和两个无人机成员的几何参数分别如图1和图2所示。

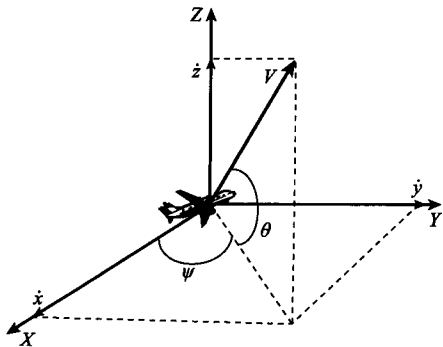


图1 单个无人机成员的几何参数

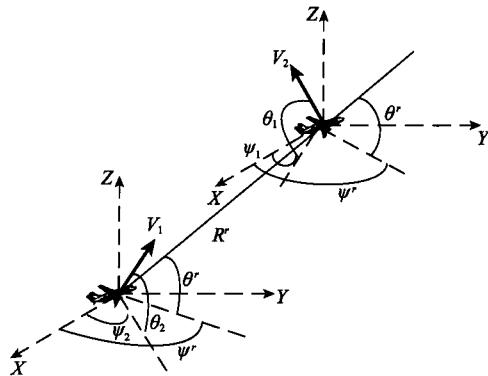


图2 两个无人机成员的相对几何参数

根据无人机六自由度运动方程组^[23],令集群系统内部每一个成员在地理坐标系中3个轴向的分速度分别为 $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$:

$$\dot{x} = V \cos \theta \cos \psi \quad (1)$$

$$\dot{y} = V \cos \theta \sin \psi \quad (2)$$

$$\dot{z} = V \sin \theta \quad (3)$$

式中, x, y, z 分别为无人机的三轴坐标; ψ, θ 分别为无人机的航迹偏角和航迹倾角; V 为无人机的飞行速度标量,无人机的两个角速度 $\dot{\psi}, \dot{\theta}$ 可表示为

$$\dot{\psi} = \frac{\kappa_{\psi}}{V \cos \theta} \quad (4)$$

$$\dot{\theta} = \frac{\kappa_{\theta}}{V} \quad (5)$$

式中, $\kappa_{\psi}, \kappa_{\theta}$ 为角速度加速项系数。

在图2中, ψ_r, θ_r, R_r 分别为两个无人机成员视距上的相对航迹偏角、相对航迹倾角及相对距离大小。令集群内部无人机的角速度 $\dot{\psi}, \dot{\theta}$ 均正比于期望姿态角与当前姿态角的偏差:

$$\kappa_{\psi} = k_1 \Delta \psi_d \quad (6)$$

$$\kappa_{\theta} = k_2 \Delta \theta_d \quad (7)$$

$$\Delta \psi_d = \psi_d - \psi \quad (8)$$

$$\Delta \theta_d = \theta_d - \theta \quad (9)$$

式中, k_1, k_2 为比例常数; ψ_d, θ_d 分别为期望航迹偏角和期望航迹倾角; ψ, θ 分别为当前航迹偏角和当前航迹倾角; $\Delta \psi_d, \Delta \theta_d$ 则分别为期望航迹偏角与当前航迹偏角的偏差和期望航迹倾角与当前航迹倾角的偏差。其中,无人机的期望姿态角是通过无人机集群的飞行规则计算得到的。当无人机有效飞行规则的数目大于1时,期望姿态角偏差可由下式得出:

$$\Delta \psi_d = \tau_1 (\psi_{d_1} - \psi) + \tau_2 (\psi_{d_2} - \psi) + \cdots + \tau_n (\psi_{d_n} - \psi) \quad (10)$$

$$\Delta \theta_d = \tau_1 (\theta_{d_1} - \theta) + \tau_2 (\theta_{d_2} - \theta) + \cdots + \tau_n (\theta_{d_n} - \theta) \quad (11)$$

式中, $\psi_{d_1}, \psi_{d_2}, \cdots, \psi_{d_n}$ 与 $\theta_{d_1}, \theta_{d_2}, \cdots, \theta_{d_n}$ 分别为第1到第n种飞行规则作用下的期望航迹偏角与期望航迹倾角; $\tau_1, \tau_2, \cdots, \tau_n$ 为对应于第1到第n种飞行规则的权重。

对于集群系统内部第 i 个无人机成员,基本飞行规则抽象为

(1) 内聚:内聚特性可以使集群系统内部成员相互靠拢,以保持集群队形。集群内部每一个无人机成员都向处于其探测距离内的无人机靠拢,即无人机期望速度矢量指向处于其探测距离 ρ 内的几个无人机成员的质心。设集群内第 i 个无人机成员能探测到 n_i 个无人机成员,且 $(X_{i_M}, Y_{i_M}, Z_{i_M})$ 为 n_i 个无人机成员的平均质心坐标, (X_i, Y_i, Z_i) 为第 i 个无人机成员的质心坐标,则在此飞行规则下,第 i 个无人机成员的期望航迹偏角 ψ_{di_M} 和期望航迹倾角 θ_{di_M} 分别为

$$\psi_{di_M} = \arctan\left(\frac{Y_{i_M} - Y_i}{X_{i_M} - X_i}\right) \quad (12)$$

$$\theta_{di_M} = \arctan\left(\frac{Z_{i_M} - Z_i}{\sqrt{(X_{i_M} - X_i)^2 + (Y_{i_M} - Y_i)^2}}\right) \quad (13)$$

(2) 跟随:跟随特性可以使集群系统内部每个成员跟随内部另两个成员。其中一个成员离该无人机成员距离最近,另一个成员为系统内部随机选择。设 $(X_{i_L}, Y_{i_L}, Z_{i_L})$ 为离该无人机成员最近的无人机的质心坐标, $(X_{i_R}, Y_{i_R}, Z_{i_R})$ 为随机选择的无人机的质心坐标,则在此飞行规则下,第 i 个无人机成员的期望航迹偏角 ψ_{di_F} 和期望航迹倾角 θ_{di_F} 可由下式得出:

$$\psi_{di_L} = \arctan\left(\frac{Y_{i_L} - Y_i}{X_{i_L} - X_i}\right) \quad (14)$$

$$\theta_{di_L} = \arctan\left(\frac{Z_{i_L} - Z_i}{\sqrt{(X_{i_L} - X_i)^2 + (Y_{i_L} - Y_i)^2}}\right) \quad (15)$$

$$\psi_{di_R} = \arctan\left(\frac{Y_{i_R} - Y_i}{X_{i_R} - X_i}\right) \quad (16)$$

$$\theta_{di_R} = \arctan\left(\frac{Z_{i_R} - Z_i}{\sqrt{(X_{i_R} - X_i)^2 + (Y_{i_R} - Y_i)^2}}\right) \quad (17)$$

$$\psi_{di_F} = \frac{\psi_{di_L} + \psi_{di_R}}{2} \quad (18)$$

$$\theta_{di_F} = \frac{\theta_{di_L} + \theta_{di_R}}{2} \quad (19)$$

(3) 自导引:自导引特性可以使集群系统成员跟踪特定的信号,以飞向指定区域。设 $(X_{i_t}, Y_{i_t}, Z_{i_t})$ 为跟踪信号所处的坐标,则在此飞行规则下,第 i 个无人机成员的期望航迹偏角 ψ_{di_t} 和期望航迹倾角 θ_{di_t} 分别为

$$\psi_{di_t} = \arctan\left(\frac{Y_{i_t} - Y_i}{X_{i_t} - X_i}\right) \quad (20)$$

$$\theta_{di_t} = \arctan\left(\frac{Z_{i_t} - Z_i}{\sqrt{(X_{i_t} - X_i)^2 + (Y_{i_t} - Y_i)^2}}\right) \quad (21)$$

(4) 分散:分散特性可以使集群内部成员之间保持足够的安全距离,即保证任意两个成员的飞行间隔不超过 s_{\min} 。因此,每一个无人机成员都向集群内其他无人机的相反方向飞行,以防止无人机靠得太近。设 $(X_{i_s}, Y_{i_s}, Z_{i_s})$ 为与第 i 个无人机成员间隔小于 s_{\min} 的无人机的平均质心坐标,则在此飞行规则下,第 i 个无人机成员的期望航迹偏角 ψ_{di_s} 和期望航迹倾角 θ_{di_s} 分别为

$$\psi_{di_s} = -\arctan\left(\frac{Y_{i_s} - Y_i}{X_{i_s} - X_i}\right) \quad (22)$$

$$\theta_{di_s} = -\arctan\left(\frac{Z_{i_s} - Z_i}{\sqrt{(X_{i_s} - X_i)^2 + (Y_{i_s} - Y_i)^2}}\right) \quad (23)$$

(5) 同盟:同盟特性可以使集群系统内部成员保持一定的秩序,保证集群系统作为一个整体进行飞行。每一个无人机成员都向处于其探测距离内的无人机的平均速度矢量方向飞行,则在此飞行规则下,第 i 个无人机成员的期望航迹偏角 ψ_{di_A} 和期望航迹倾角 θ_{di_A} 分别为

$$\psi_{di_A} = (1/n_i) \sum_{j=1}^{n_i} (\psi_{di_j}) \quad (24)$$

$$\theta_{di_A} = (1/n_i) \sum_{j=1}^{n_i} (\theta_{di_j}) \quad (25)$$

2 无人机集群系统规避协同控制

集群协同采用分布式机构,系统内部每一个成员均利用机载传感器对未知环境进行探测,成员之间基于全局完全连通的拓扑进行通信以实现信息共享,当感知障碍物威胁时进行实时自主规避,在规避协同控制中,假设对传感器数据进行融合滤波后已获取精确的环境状态信息。在集群系统内部成员基本飞行规则的基础上,将集群规避动作也视为集群内部成员的飞行规则,类似地,在规避飞行规则下,第 i 个无人机成员的期望航迹偏角和期望航迹倾角分别为 ψ_{di_E} 和 θ_{di_E} 。为此,集群系统规避协同控制可描述如下。

通过计算这样一个期望航迹偏角 ψ_{di} 和期望航迹倾角 θ_{di} (对于某一集群内的第 i 个无人机成员),从而得到 $\Delta\psi_{di}$ 和 $\Delta\theta_{di}$,将该制导指令传递给相应无人机的自动驾驶仪,在飞行控制系统的作用下,即可保证集群系统内部任一成员均不与群内其他成员或者群外其他威胁发生碰撞,从而实现安全飞行。 $\Delta\psi_{di}$ 、 $\Delta\theta_{di}$ 的计算公式如下:

$$\Delta\psi_{di} = \tau_{i_M}(\psi_{di_M} - \psi) + \tau_{i_F}(\psi_{di_F} - \psi) + \tau_{i_t}(\psi_{di_t} - \psi) + \tau_{i_s}(\psi_{di_s} - \psi) + \tau_{i_A}(\psi_{di_A} - \psi) + \tau_{i_E}(\psi_{di_E} - \psi) \quad (26)$$

$$\Delta\theta_{di} = \tau_{i_M}(\theta_{di_M} - \theta) + \tau_{i_F}(\theta_{di_F} - \theta) + \tau_{i_t}(\theta_{di_t} - \theta) + \tau_{i_s}(\theta_{di_s} - \theta) + \tau_{i_A}(\theta_{di_A} - \theta) + \tau_{i_E}(\theta_{di_E} - \theta) \quad (27)$$

通过设置不同的飞行规则权重,将集群规避协同控制分为两种决策机制:整体规避机制、成员规避机制。在第一种机制中,无人机集群作为一个整体完成与碰撞威胁之间的规避;而在第二种机制中,无人机集群具体通过每一个成员的飞行行为完成与碰撞威胁之间的规避。

2.1 整体规避机制

在整体规避机制中,无人机集群作为一个整体,为保证规避过程中集群内部成员不发生脱离,无人机集群的内聚飞行规则权重较大。在规避飞行规则作用下,令集群内第 i 个无人机成员的期望航迹偏角为

$$\psi_{di_E} = f_1(\pi/2) + \psi_i \quad (28)$$

式中, f_1 是为完成规避而设定的水平面内航迹偏角方向的变换函数。设 $(X_{i_T}, Y_{i_T}, Z_{i_T})$ 为处于第 i 个无人机成员探测距离并位于该集群外的所有碰撞威胁的平均质心坐标,则 $f_1(x)$ 表示为

$$f_1(x) =$$

$$\begin{cases} -x, \pi/4 < \psi_i \leq 3\pi/4 \text{ 且 } X_i \geq X_{i_T} \\ x, \pi/4 \leq \psi_i < 3\pi/4 \text{ 且 } X_i < X_{i_T} \\ x, 5\pi/4 < \psi_i \leq 7\pi/4 \text{ 且 } X_i \geq X_{i_T} \\ -x, 5\pi/4 \leq \psi_i < 7\pi/4 \text{ 且 } X_i < X_{i_T} \\ -x, 3\pi/4 < \psi_i \leq 5\pi/4 \text{ 且 } Y_i \geq Y_{i_T} \\ x, 3\pi/4 \leq \psi_i < 5\pi/4 \text{ 且 } Y_i < Y_{i_T} \\ x, (7\pi/4 < \psi_i \leq 2\pi \text{ 或 } 0 < \psi_i \leq \pi/4) \text{ 且 } Y_i \geq Y_{i_T} \\ -x, (7\pi/4 \leq \psi_i < 2\pi \text{ 或 } 0 \leq \psi_i < \pi/4) \text{ 且 } Y_i < Y_{i_T} \end{cases} \quad (29)$$

根据式(29),整体规避机制可解释为:当集群与碰撞威胁之间的距离逐渐增加时,集群沿预规划航迹飞行,而当集群与碰撞威胁逐渐靠近并且它们之间的距离小于一定值时,根据式(28),集群系统作为整体进行规避协同控制,且每个无人机成员航迹偏角的变换取决于该无人机与碰撞威胁之间的位置坐标关系。

类似地,在整体规避机制中,集群内部第 i 个无人机成员的期望航迹倾角为

$$\theta_{AVi} = f_2(\pi/2) + \theta_i \quad (30)$$

式中, f_2 是为完成规避而设定的垂直平面内航迹倾角方向的变换函数,且 $f_2(x)$ 表示为

$$f_2(x) = \begin{cases} x, Z_i \geq Z_{i_T} \\ -x, Z_i < Z_{i_T} \end{cases} \quad (31)$$

对于第 i 个无人机成员,规避规则的权重定义如下:

$$\tau_{iE} = \begin{cases} 1, \| \mathbf{P}_i - \mathbf{P}_{\mu} \| \leq \rho_c \\ 0, \| \mathbf{P}_i - \mathbf{P}_{\mu} \| > \rho_c \end{cases} \quad (32)$$

式中, $\mathbf{P}_i = (X_i, Y_i, Z_i)$; $\mathbf{P}_{\mu} = (X_{i_T}, Y_{i_T}, Z_{i_T})$; ρ_c 定义为无人机成员的规避距离,即只有当两个质点间距离小于 ρ_c 时,才进行规避控制。

2.2 成员规避机制

在成员规避机制中,控制方法类似于整体规避机制,不同之处在于飞行规则的权重,同时,在传感器可用探测距离 ρ 和规避距离 ρ_c 的基础上定义了扩展距离 ρ_e ,本文所定义的3个距离具有如下关系: $\rho_c < \rho_e < \rho$ 。

将同一集群内的任意两个无人机成员的最小间隔 s'_{\min} 设置为

$$s'_{\min} = \begin{cases} s_1, \| \mathbf{P}_i - \mathbf{P}_{\mu} \| \leq \rho_e \\ s_2, \| \mathbf{P}_i - \mathbf{P}_{\mu} \| > \rho_e \end{cases} \quad (33)$$

式中, $s_1 > s_2$ 。

则成员规避机制可解释为:当碰撞威胁处于集群系统内部任一无人机成员扩展距离 ρ_e 以内时, s'_{\min} 的值从 s_2 增大到 s_1 ,使得集群系统在规避过程中可以容许碰撞威胁从集群内部通过,当碰撞威胁进入集群并处于其内部成员的规避距离 ρ_c 以内时,将进行规避决策,规则权重、期望航

迹偏角与期望航迹倾角均可由式(28)~式(32)得到。在该机制下,内聚权重 τ_{iM} 减小,使集群系统内部成员之间的距离扩展能较好地实现。

3 无人机集群系统稳定性分析

本节基于线性反馈控制理论,分析集群系统稳定性。以内聚规则为例,证明了集群系统内部每个无人机成员均跟随群内其他无人机的质心方向飞行,集群系统最终将达到一个稳定的平衡状态。

3.1 两个无人机成员的稳定性分析

两个无人机成员的相对位置关系如图2所示,将无人机的速度矢量 V_1 、 V_2 沿两个无人机成员的视距线和垂直于视距线的方向进行正交分解,可得:

$$\begin{aligned} \dot{R}^r &= V_2 \cos \theta_2 \cos \theta^r \cos(\psi_2 - \psi^r) + V_2 \sin \theta_2 \sin \theta^r - \\ &V_1 \cos \theta_1 \cos \theta^r \cos(\psi_1 - \psi^r) - V_1 \sin \theta_1 \sin \theta^r \end{aligned} \quad (34)$$

$$\dot{\psi}^r = \frac{V_2 \cos \theta_2 \sin(\psi_2 - \psi^r) - V_1 \cos \theta_1 \sin(\psi_1 - \psi^r)}{R^r \cos \theta^r} \quad (35)$$

$$\begin{aligned} \dot{\theta}^r &= \frac{-V_2 \cos \theta_2 \sin \theta^r \cos(\psi_2 - \psi^r) + V_2 \sin \theta_2 \cos \theta^r + \\ &V_1 \cos \theta_1 \sin \theta^r \cos(\psi_1 - \psi^r) - V_1 \sin \theta_1 \cos \theta^r}{R^r} \end{aligned} \quad (36)$$

$$\dot{\psi}_1 = \frac{-k_1(\psi_1 - \psi^r)}{V_1 \cos \theta_1} \quad (37)$$

$$\dot{\theta}_1 = \frac{-k_2(\theta_1 - \theta^r)}{V_1} \quad (38)$$

$$\dot{\psi}_2 = \frac{k_1[\pi - (\psi_2 - \psi^r)]}{V_2 \cos \theta_2} \quad (39)$$

$$\dot{\theta}_2 = \frac{k_2(-\theta_2 - \theta^r)}{V_1} \quad (40)$$

令 $\delta\psi_1 = (\psi_1 - \psi^r)$ 、 $\delta\psi_2 = (\psi_2 - \psi^r)$,选取6个状态变量分别为: R^r 、 $\delta\psi_1$ 、 $\delta\psi_2$ 、 θ^r 、 θ_1 、 θ_2 ,将上述方程组进行线性化,得到如下状态方程:

$$\begin{bmatrix} \dot{R}^r \\ \delta\psi_1 \\ \delta\psi_2 \\ \dot{\theta}^r \\ \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -V_1 & -V_2 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{V_1+V_2}{R^{r^2}} & \frac{-k_1}{V_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{V_1+V_2}{R^{r^2}} & 0 & \frac{-k_1}{V_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-V_1}{R^r} & \frac{V_2}{R^r} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-k_2}{V_1} & \frac{k_2}{V_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-k_2}{V_2} & 0 & \frac{-k_2}{V_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R^r \\ \delta\psi_1 \\ \delta\psi_2 \\ \theta^r \\ \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} \quad (41)$$

为简化计算,令 $V_1 = V_2 = V$, $k_1 = k_2 = k$,根据拉普拉斯变换及最值理论,可得平衡点的状态为

$$\begin{aligned} R^r &= 2V^2/(k\pi/2), \delta\psi_1 = -\pi/2, \\ \delta\psi_2 &= \pi/2, \theta^r = 0, \theta_1 = 0, \theta_2 = 0 \end{aligned} \quad (42)$$

令 $V = x_1$, $2V/R^r = x_2$, $k/V = x_3$, $V/R^r = x_4$,则特征方程

$$\det(\lambda I - A) = 0 \quad (43)$$

求得特征值分别为

$$\lambda = -x_3, -x_3, -\frac{1}{2}x_3 \pm \sqrt{x_3^2 - 8x_1x_2},$$

$$-\frac{1}{2}x_3 \pm \sqrt{x_3^2 - 8x_3x_4} \quad (44)$$

又因为: $x_1, x_2, x_3, x_4 > 0, x_3^2 = (k/V)^2, 8x_1x_2 = \pi^2(k/V)^2, 8x_3x_4 = 2\pi(k/V)^2$, 所以有: $8x_1x_2 > x_3^2, 8x_3x_4 > x_3^2$, 则特征方程的特征值均为负实数, 由此可知, $\forall k, V$, 两个无人成员组成的双机系统是稳定的。

3.2 n 个无人成员的稳定分析

在内聚规则作用下, 集群系统内部第 i 个无人成员跟随其余 $(n-1)$ 个无人成员的质心运动。在此, 将这 $(n-1)$ 个无人成员的平均质心视为一个虚拟的无人成员, 其航迹偏角与航迹倾角表示为

$$\psi_{i-1} = \left(\frac{1}{n-1}\right) \sum_{j=1, j \neq i}^n (\psi_j) \quad (45)$$

$$\theta_{i-1} = \left(\frac{1}{n-1}\right) \sum_{j=1, j \neq i}^n (\theta_j) \quad (46)$$

此时, 视距矢量 R_{i-1}^r 、期望航迹偏角 ψ_{i-1}^r 与航迹倾角 θ_{i-1}^r 分别为

$$\sum_{j=1, j \neq i}^n \psi_{ji-1}^r = (\psi_{1i-1}^r + \psi_{2i-1}^r + \cdots + \psi_{(i-1)(i-1)-1}^r + \psi_{(i+1)(i+1)-1}^r + \cdots + \psi_{ni-1}^r) = \left(\frac{1}{n-1}\right) ((\psi_{12}^r + \psi_{13}^r + \cdots + \psi_{1n}^r) +$$

$$(\psi_{21}^r + \psi_{23}^r + \cdots + \psi_{2n}^r) + \cdots + (\psi_{(i-1)1}^r + \psi_{(i-1)2}^r + \cdots + \psi_{(i-1)(i-2)}^r + \psi_{(i-1)i}^r + \cdots + \psi_{(i-1)n}^r) + \cdots +$$

$$(\psi_{(i+1)1}^r + \psi_{(i+1)2}^r + \cdots + \psi_{(i+1)i}^r + \psi_{(i+1)(i+2)}^r + \cdots + \psi_{(i+1)n}^r) + \cdots + (\psi_{n1}^r + \psi_{n2}^r + \cdots + \psi_{n(n-1)}^r)) \quad (55)$$

根据无人机的相对位置关系, 可知: $\psi_{ij}^r = \pi - \psi_{ji}^r$, 则

$$\sum_{j=1, j \neq i}^n \psi_{ji-1}^r = \pi(n-1) + \sum_{j=1, j \neq i}^n \psi_{ij}^r \quad (56)$$

将式(56)代入式(54)得

$$\kappa_{\psi_{i-1}} = k \left\{ \pi - \left(\frac{1}{n-1} \sum_{j=1, j \neq i}^n \psi_j - \frac{1}{n-1} \sum_{j=1, j \neq i}^n \psi_{ij}^r \right) \right\} \quad (57)$$

由式(45)和式(48)可得

$$\kappa_{\psi_{i-1}} = k(\pi - (\psi_{i-1} - \psi_{i-1}^r)) \quad (58)$$

联立式(56)与式(4)得

$$\sum_{j=1, j \neq i}^n \theta_{ji-1}^r = (\theta_{1i-1}^r + \theta_{2i-1}^r + \cdots + \theta_{(i-1)(i-1)-1}^r + \theta_{(i+1)(i+1)-1}^r + \cdots + \theta_{ni-1}^r) = \left(\frac{1}{n-1}\right) ((\theta_{12}^r + \theta_{13}^r + \cdots + \theta_{1n}^r) +$$

$$(\theta_{21}^r + \theta_{23}^r + \cdots + \theta_{2n}^r) + \cdots + (\theta_{(i-1)1}^r + \theta_{(i-1)2}^r + \cdots + \theta_{(i-1)(i-2)}^r + \theta_{(i-1)i}^r + \cdots + \theta_{(i-1)n}^r) + \cdots +$$

$$(\theta_{(i+1)1}^r + \theta_{(i+1)2}^r + \cdots + \theta_{(i+1)i}^r + \theta_{(i+1)(i+2)}^r + \cdots + \theta_{(i+1)n}^r) + \cdots + (\theta_{n1}^r + \theta_{n2}^r + \cdots + \theta_{n(n-1)}^r)) \quad (61)$$

根据无人机的相对位置关系, 可知: $\theta_{ij}^r = -\theta_{ji}^r$, 则

$$\sum_{j=1, j \neq i}^n \theta_{ji-1}^r = - \sum_{j=1, j \neq i}^n \theta_{ij}^r \quad (62)$$

将式(62)代入式(60)得

$$\kappa_{\theta_{i-1}} = \frac{k}{n-1} \left(- \sum_{j=1, j \neq i}^n \theta_j - \sum_{j=1, j \neq i}^n \theta_{ij}^r \right) \quad (63)$$

由式(46)和式(49)可得

$$\kappa_{\theta_{i-1}} = -k(\theta_{i-1} + \theta_{i-1}^r) \quad (64)$$

$$R_{i-1}^r = \left(\frac{1}{n-1}\right) \sum_{j=1, j \neq i}^n (R_{ij}^r) \quad (47)$$

$$\psi_{i-1}^r = \left(\frac{1}{n-1}\right) \sum_{j=1, j \neq i}^n (\psi_{ij}^r) \quad (48)$$

$$\theta_{i-1}^r = \left(\frac{1}{n-1}\right) \sum_{j=1, j \neq i}^n (\theta_{ij}^r) \quad (49)$$

则速度加速项为

$$\kappa_{\psi_i} = -k(\psi_i - \psi_{i-1}^r) \quad (50)$$

$$\kappa_{\theta_i} = -k(\theta_i - \theta_{i-1}^r) \quad (51)$$

将式(50)和式(51)分别联立式(4)和式(5)可得

$$\dot{\psi}_i = \frac{-k(\psi_i - \psi_{i-1}^r)}{V \cos \theta_i} \quad (52)$$

$$\dot{\theta}_i = \frac{-k(\theta_i - \theta_{i-1}^r)}{V} \quad (53)$$

同理, 可以认为 $(n-1)$ 个无人成员虚拟点跟随第 i 个无人成员飞行, 则其航迹偏角速度加速项表示为

$$\kappa_{\psi_{i-1}} = \left(\frac{1}{n-1}\right) \sum_{j=1, j \neq i}^n \kappa_{\psi_j} = \left(\frac{1}{n-1}\right) \sum_{j=1, j \neq i}^n -k(\psi_j - \psi_{ji-1}^r) =$$

$$\left(\frac{k}{n-1}\right) \left(- \sum_{j=1, j \neq i}^n \psi_j + \sum_{j=1, j \neq i}^n \psi_{ji-1}^r \right) \quad (54)$$

式中

$$\dot{\psi}_{i-1} = \frac{k(\pi - (\psi_{i-1} - \psi_{i-1}^r))}{V \cos \theta_{i-1}} \quad (59)$$

同理, 航迹倾角速度加速项表示为

$$\kappa_{\theta_{i-1}} = \left(\frac{1}{n-1}\right) \sum_{j=1, j \neq i}^n \kappa_{\theta_j} = \left(\frac{1}{n-1}\right) \sum_{j=1, j \neq i}^n -k(\theta_j - \theta_{ji-1}^r) =$$

$$\left(\frac{k}{n-1}\right) \left(- \sum_{j=1, j \neq i}^n \theta_j + \sum_{j=1, j \neq i}^n \theta_{ji-1}^r \right) \quad (60)$$

式中

联立式(64)与式(5)得

$$\dot{\theta}_{i-1} = \frac{-k(\theta_{i-1} + \theta_{i-1}^r)}{V} \quad (65)$$

根据式(34)~式(40), 将 $(n-1)$ 个无人成员虚拟点看作是二个无人成员中的第二个成员, 即 ψ_2, θ_2 分别替换为 ψ_{i-1}, θ_{i-1} , 视距矢量 R^r 和期望航迹偏角与航迹倾角 ψ^r, θ^r 分别替换为 R_{i-1}^r 和 $\psi_{i-1}^r, \theta_{i-1}^r$, 式(52)、式(53)、式(59)、式(65)的形式类似于二个无人成员在视距方向

建立的方程组式(37)~式(40)。因此,集群系统 n 个无人机成员的稳定性可以运用两个无人机成员的稳定性进行分析证明,则根据第3.1节可知, n 个无人机成员组成的集群系统具有稳定的平衡状态,即集群系统是稳定的。

4 仿真验证

为方便进行结果分析和讨论,主要对二维平面内无人机集群飞行与协同规避进行仿真验证。不失一般性,将仿真场景设置为两个集群系统之间的规避,则对于其中某个集群,另外一个集群就是碰撞威胁,两个集群系统均采用本文提出的飞行与规避自主协同控制方法。在该场景下,进行如下3个仿真实验。

仿真1 集群系统规避过程

分别运用整体规避机制和成员规避机制,对二维空间中两个无人机集群系统规避过程进行仿真。集群均在二维水平面内,规避决策则主要依靠无人机成员航迹偏角的变化。无人机成员的速度恒定为 20 m/s , $s_{\min} = 60 \text{ m}$, $s_1 = 150 \text{ m}$, $s_2 = 60 \text{ m}$,机载传感器可用探测距离设置为固定值 $\rho = 600 \text{ m}$,

其他两个为 $\rho_c = 400 \text{ m}$, $\rho_e = 600 \text{ m}$ 。两个集群系统的初始航迹偏角分别为: $\psi_1 = 0^\circ$, $\psi_2 = 180^\circ$ 。无人机的动态特性约束条件为:滚转角 $-20^\circ \leq \varphi_c \leq 20^\circ$,俯仰平面内过载 $n_y \leq 2g$,偏航平面内过载 $n_z \leq 4g$,转弯半径 $r_d \geq 200 \text{ m}$ 。集群系统正常飞行时,各飞行规则所对应权重的初始值为

$$\tau_{i_M} = 0.55, \tau_{i_F} = 0.22, \tau_{i_I} = 0.78$$

$$\tau_{i_S} = 0.55, \tau_{i_A} = 0.42, \tau_{i_E} = 0$$

若集群系统探测到外部的无人机成员,在整体和成员规避机制下,权重分别变化为

$$\tau'_{i_M} = 0.55, \tau'_{i_F} = 0.22, \tau'_{i_I} = 0.38$$

$$\tau'_{i_S} = 0.55, \tau'_{i_A} = 0.42, \tau'_{i_E} = 0.55$$

$$\tau''_{i_M} = 0.30, \tau''_{i_F} = 0.30, \tau''_{i_I} = 0.38$$

$$\tau''_{i_S} = 0.55, \tau''_{i_A} = 0.42, \tau''_{i_E} = 0.55$$

则无人机集群的规避过程如图3和图4所示,集群1飞行轨迹用蓝色线表示,集群2飞行轨迹用红色线表示。集群系统规避过程中,无人机成员之间的最小距离 R_{\min} 和所有无人机成员离集群质心距离的最大值 d_{\max} 变化曲线分别如图5(a)、图5(b)所示。

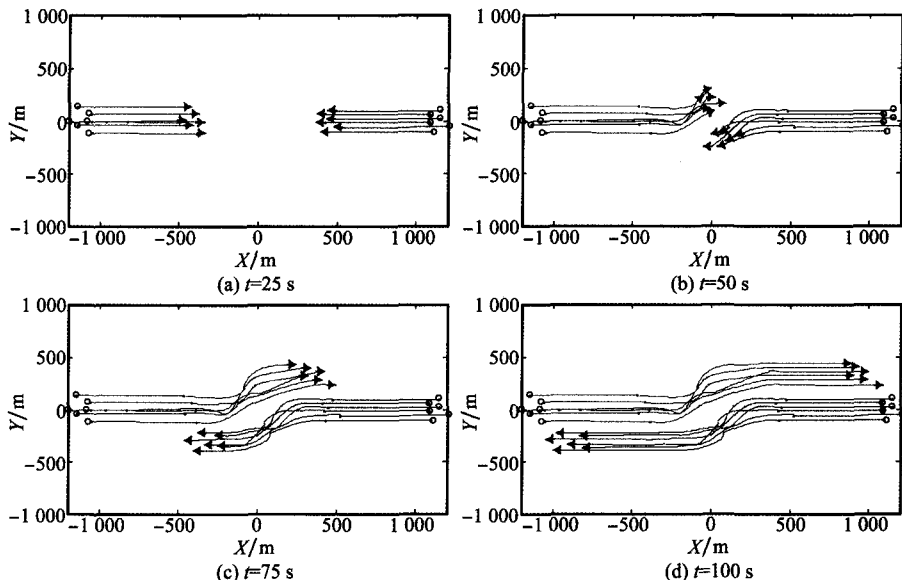


图3 整体机制下的集群规避过程

从仿真1实验结果可以看出,在基本飞行规则作用下,无人机集群能以一定队形保持平稳飞行,同时在完成规避之后,能实现队形重构;在整体规避机制和成员规避机制作用下,集群系统均可以完成规避,实现安全飞行。两种机制的不同之处在于:在整体机制中,无人机航迹偏角相对于初始飞行方向的变化量相对较大,即总体航迹代价较高;而在成员机制中,无人机的航迹偏角总体变化量较小,但是变化率较大,规避过程更为复杂。

仿真2 飞行规则权重对集群系统稳定规模的影响

研究几个飞行规则权重系数 τ_M, τ_I, τ_S 对集群系统稳定规模的影响。首先令自导引规则权重为恒定值 $\tau_I =$

0.6,分散规则权重分别取值 $\tau_S = 0.2, \tau_S = 0.4, \tau_S = 0.6$,内聚规则权重 τ_M 从0.1开始变化到1.0,集群系统稳定时的规模随内聚规则权重变化如图6(a)所示。再令分散规则权重为恒定值 $\tau_S = 0.4$,自导引规则权重分别取值 $\tau_I = 0.3, \tau_I = 0.5, \tau_I = 0.7$,内聚规则权重 τ_M 从0.1开始变化到1.0,集群系统稳定时的规模随内聚规则权重变化如图6(b)所示。

从仿真2实验结果6(a)可以看出,集群系统规模的变化趋势是:先随内聚规则权重 τ_M 增大而减小,然后随 τ_M 增大而增大,这是因为刚开始集群系统内部的内聚作用比较明显,而随 τ_M 的继续增大,集群系统稳定性逐渐下降。从

图 6(b)可以看出,集群系统规模有相似的变化趋势,同时随自导引规则权重 τ_I 增大而增大,这是因为随着 τ_I 的增

大,内聚作用逐渐减弱。由此可知, τ_M 取值 0.2~0.4 之间对于系统小规模 and 稳定性是比较合适的。

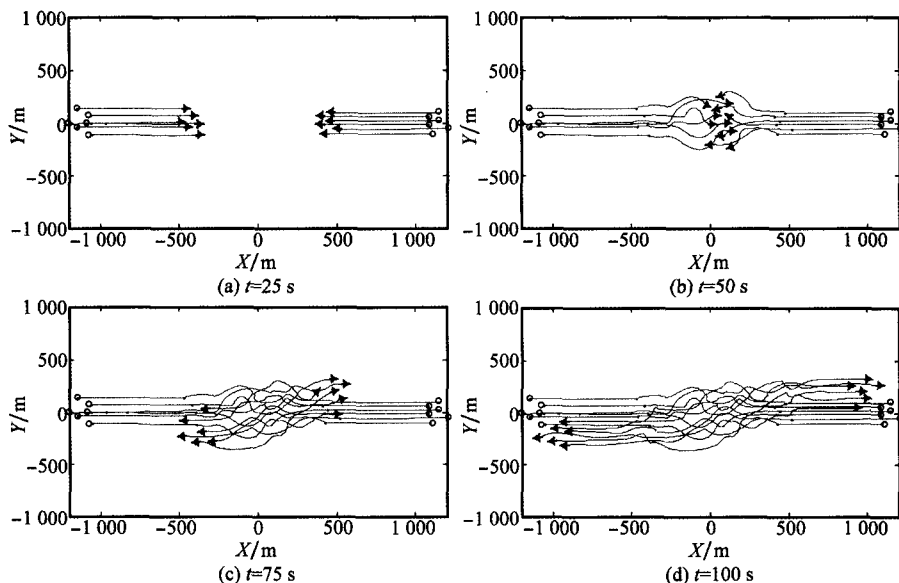


图 4 成员机制下的集群规避过程

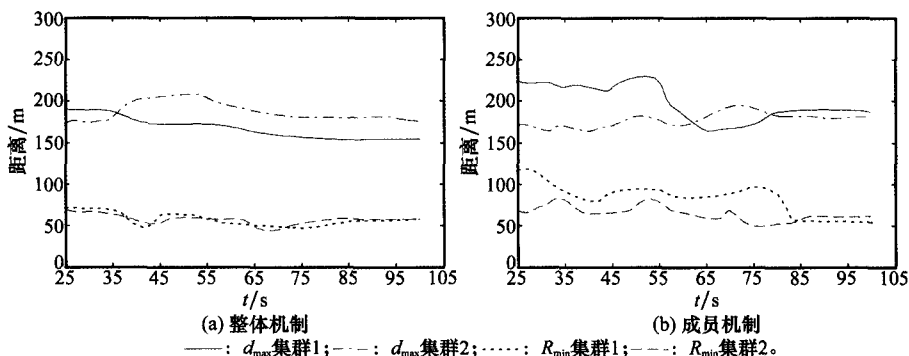


图 5 R_{\min} 和 d_{\max} 的变化曲线

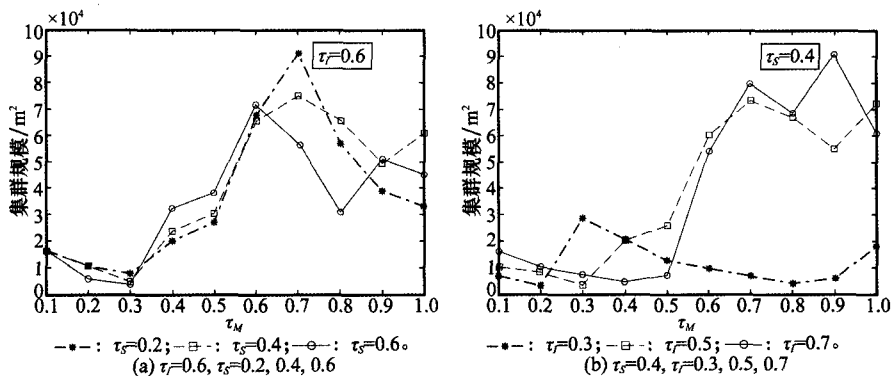


图 6 飞行规则权重变化对系统规模的影响

仿真 3 规避控制实时性

探讨本文集群系统规避控制方法的实时性问题,与 MPC 算法进行对比,其中 MPC 算法如文献[17]所提。在两种算法中,仿真场景设置相同,且均在 Visual C++6.0、Matlab R2013a 环境中实现,计算机配置为: Intel 酷睿 i5 处

理器,主频 3.10 GHz,内存 8 GB,32 位操作系统。进行多次仿真,算法的平均运行时间如图 7 所示。

由仿真 3 实验结果可以看出, MPC 方法的运行时间随编队无人机数量增大而呈指数上升趋势,当无人机数量较大时,计算效率大大降低,算法运行时间长;而集群算法中

整体机制、成员机制的运行时间均随集群内无人机数量增大而缓慢增长,当集群内无人机数量不大于10时,算法的执行时间在25 ms以内,能够满足在线实时控制的需要。

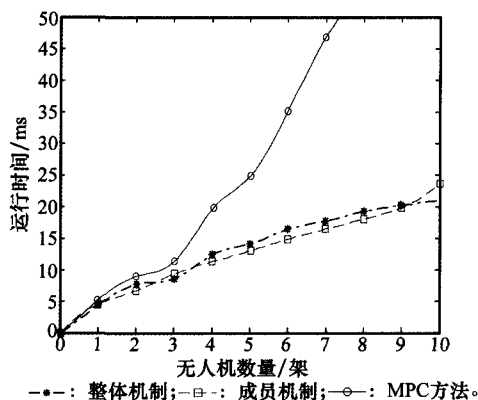


图7 算法平均运行时间对比

5 结论

本文受群智能启发,基于规则研究了集群系统飞行与规避自主协同控制问题,并应用此方法对无人机集群间的规避过程进行仿真,主要有以下结论:

(1) 在基本飞行规则的作用下,无人机集群可实现正常飞行和队形重构,同时集群系统具有较好的稳定性;

(2) 基于规则的无人机集群规避控制方法可分为整体和成员机制,两种机制均能有效处理集群规避问题,且各有优劣;

(3) 飞行规则权重系数影响集群系统的稳定规模, τ_m 取值0.2~0.4之间对于系统小规模 and 稳定性是比较合适的;

(4) 相比于传统MPC方法,基于规则的集群控制方法更为简单,计算效率更高,能够更好地满足系统实时性需求。

参考文献:

- [1] Niu Y F, Xiao X J, Ke G Y. Operation concept and key techniques of unmanned aerial vehicle swarms[J]. *National Defense Science & Technology*, 2013, 34(5): 37-43. (牛铁峰, 肖湘江, 柯冠岩. 无人机集群作战概念及关键技术分析[J]. 国防科技, 2013, 34(5): 37-43.)
- [2] Dydek Z T, Annaswamy A M, Lavretsky E. Adaptive configuration control of multiple UAVs[J]. *Control Engineering Practice*, 2013, 21: 1043-1052.
- [3] Leven S, Zufferey J C, Floreano D. Dealing with midair collisions in dense collective aerial systems[J]. *Journal of Field Robotics*, 2011, 28(3): 405-423.
- [4] Rahimi R, Abdollahi F, Naqshi K. Time-varying formation control of a collaborative heterogeneous multi-agent system[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2014, 62: 1799-1805.
- [5] Li W X, Chen Z Q. Leader-following consensus of second-order time-delay multi-agent system with and without nonlinear dynamics[J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2012, 42(5): 415-422.
- [6] Xie Y Y, Wang Y, Ma Z J. Delay consensus of leader-following multi-agent systems[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(4): 040202_1-040202_5. (谢媛艳, 王毅, 马忠军. 领导-跟随多智能体系统的滞后一致性[J]. 物理学报, 2014, 63(4): 040202_1-040202_5.)
- [7] Li H, Lin P, Zhang C X. L_2-L_∞ control for leader-following coordination of second-order multi-agent systems[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(1): 158-164. (李慧, 林鹏, 张春熹. 有Leader的二阶动态多智能体网络的 L_2-L_∞ 控制[J]. 物理学报, 2009, 58(1): 158-164.)
- [8] Crowther B. Rule-based guidance for flight vehicle flocking[C]// *Proc. of the Institute of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2004: 111-124.
- [9] Duan M, Gao H, Song Y D. Distributed encirclement control of multi-agent systems[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(14): 140204_1-140204_9. (段敏, 高辉, 宋永端. 智能群体环绕运动控制[J]. 物理学报, 2014, 63(14): 140204_1-140204_9.)
- [10] Nowak D J. Exploitation of self organization in UAV swarms for optimization in combat environments[D]. Ohio: Air Force Institute of Technology, 2008.
- [11] Folton N L. Airspace design: towards a rigorous specification of conflict complexity based on computational geometry[J]. *The Aeronautical Journal*, 1999, 2(3): 584-592.
- [12] Su H S, Wang X F, Lin Z L. Flocking of multi-Agents with a virtual leader[J]. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 2009, 54(2): 293-307.
- [13] Campbell S, Naeem W, Irwin G W. A review on improving the autonomy of unmanned surface vehicles through intelligent collision avoidance manoeuvres[J]. *Annual Reviews in Control*, 2012, 36: 267-283.
- [14] Massoud A A. Managing the dynamics of a harmonic potential field-guided robotic in a cluttered environment [J]. *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 2009, 56(2): 488-496.
- [15] Chou F Y, Yang C Y, Yang J S. Support vector machine based artificial potential field for autonomous guided vehicle[C]// *Proc. of the 4th International Symposium on Precision Mechanical Measurements*, 2008: 71304J. 1-71304J. 6.
- [16] Xie L J, Xie G R, Chen H W, et al. Solution to reinforcement learning problems with artificial field[J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2008, 15: 552-557.
- [17] Izadi H A, Gordon B W, Zhang Y M. Rule-based cooperative collision avoidance using decentralized model predictive control[C]// *Proc. of the AIAA Infotech@Aerospace*, 2011: 1-14.
- [18] Keviczky T, Vanek B, Borrelli F, et al. Hybrid decentralized receding horizon control of vehicle formations[C]// *Proc. of the IEEE American Control Conference*, 2006: 3358-3363.
- [19] Richards A, How J. Decentralized model predictive control of cooperating UAVs[C]// *Proc. of the 43rd IEEE Conference on Decision and Control*, 2004: 14-17.
- [20] Dorigo M, Gambardella L M. Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem[J]. *IEEE Trans. on Evolutionary Computation*, 1997, 1(1): 1-24.
- [21] Kennedy J, Eberhart R C. Particle swarm optimization[C]//

Proc. of the IEEE International Conference on Neural Networks, 1995: 1942 – 1948.

- [22] Bonbeau E, Dorigo M, Theraulaz G. *Swarm intelligence from natural to artificial systems*[M]. New York: Oxford University Press, 1999.

- [23] Oktay E, Akay H U, Sehitoglu O T. Three-dimensional structural topology optimization of aerial vehicles under aerodynamic loads[J]. *Computers and Fluids*, 2014, 92: 225 – 232.

作者简介:

周 欢(1989 –),男,博士研究生,主要研究方向为无人机导航/制导

与控制、多无人机协同控制技术。

E-mail: zd578500633@126.com

赵 辉(1973 –),男,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为无人飞行器作战系统与技术。

E-mail: 578500633@qq.com

韩 统(1980 –),男,讲师,博士,主要研究方向为多无人机航迹规划、机载制导武器控制。

E-mail: kgy_zhouh@163.com

黄汉桥(1982 –),男,讲师,博士后,主要研究方向为无人作战飞机自主攻击协同轨迹规划。

E-mail: kgy_zhaoh@163.com