

## 多无人机时序到达协同控制方法

关旭宁<sup>1</sup>, 魏瑞轩<sup>1</sup>, 郭庆<sup>1</sup>, 王树磊<sup>1</sup>, 李政阳<sup>2</sup>

(1. 空军工程大学航空航天工程学院, 西安 710038; 2. 中国人民解放军94314部队, 郑州 450000)

**摘要:** 时序到达控制是无人机协同控制方向新近产生的典型问题, 对异构无人机协同执行搜索、跟踪、打击、评估等任务具有重要潜在价值。引入计算几何学中的Laguerre图用于航路规划, 当两个威胁区域不相交时, Laguerre图生成的初始航路必然从它们之间的空隙内穿过。针对时序控制精度不高的问题, 采用周期性的速度修正方法, 有效提高了到达时间精度。仿真结果表明, 所提出的时序到达控制方法能够有效实现多无人机时序到达, 并且具有较高的鲁棒性和控制精度。

**关键词:** 无人机; 时序到达; Laguerre图; 速度闭环控制

**中图分类号:** V279

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-637X(2014)01-0018-05

## A Cooperative Control Method for Tight Sequencing Arrival of Multiple UAVs

GUAN Xu-ning<sup>1</sup>, WEI Rui-xuan<sup>1</sup>, GUO Qing<sup>1</sup>, WANG Shu-lei<sup>1</sup>, LI Zheng-yang<sup>2</sup>

(1. Engineering College of Aeronautics and Astronautics, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;  
2. No. 94314 Unit of PLA, Zhengzhou 450000, China)

**Abstract:** As a typical cooperative control problem, tight sequencing arrival of multiple unmanned aerial vehicles (UAVs) has great potential significance for the UAVs in cooperative searching, tracking, attacking and evaluation. Laguerre diagram was introduced from computation geometry for path planning. When any two closest threats do not intersect, the generated initial paths will pass through the interspaces between them. Velocity was periodically adjusted to improve the time precision of arrival. Simulation results show that the tight sequencing arrival of multiple UAVs can be realized with preferable robustness and precision by the proposed control method.

**Key words:** unmanned aerial vehicle; sequencing arrival; Laguerre diagram; velocity close-loop control

### 0 引言

由于任务载荷的功用不同和无人机有效载荷的限制, 需要多架无人机以一定时序到达既定目标以协同完成任务, 这对于完成侦察、跟踪、打击、评估一体化任务、减少暴露于敌防空火力的时间和几率、增加打击的连续性和突然性具有重要价值, 类似的需求在空中加油、协同侦察、协同监视等典型应用中也已经产生<sup>[1]</sup>。文献[2-6]针对无人机时序到达问题进行了研究, 但是, 对无人机时序到达的控制, 仅考虑路径规划会导致控制方法缺乏灵活性和可伸缩性, 而忽略路径规划仅考虑速度

控制则会严重受限于飞行包线和气动约束; 文献[7-8]结合Voronoi图和速度控制来处理同时到达问题, 但是将战场环境中的威胁、禁飞区等面状区域作点化处理, 另外在控制上采用开环控制, 对路径跟踪误差不具有鲁棒性。本文利用Laguerre图进行路径规划使得航路规划合理有效, 结合速度控制和路径规划的互补优势, 采用闭环控制来应对路径误差和突发威胁等不利因素的影响, 提高了多无人机时序到达协同控制精度。

### 1 问题描述

假设任务区域内分布着 $K$ 个目标和 $N$ 个已知威胁,  $M$ 架不同类型的无人机进入任务区域执行任务, 要求无人机遵循一定的时间间隔和顺序对各自既定的目标进行访问。如图1所示, 4架无人机以一定时序对2个目标进行访问。

收稿日期: 2012-10-15

修回日期: 2012-11-10

基金项目: 国家自然科学基金(61172083)

作者简介: 关旭宁(1989—), 男, 河南偃师人, 硕士生, 研究方向为无人机作战指挥与战术引导。

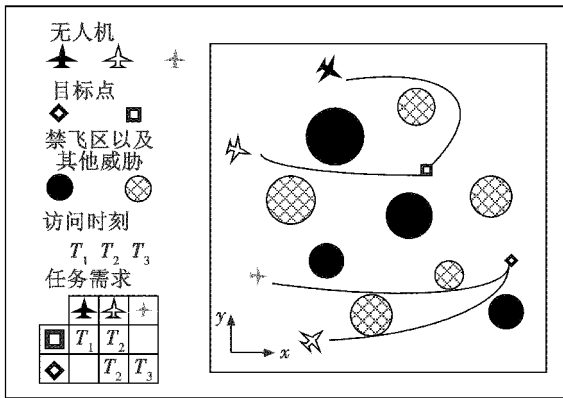


图 1 多无人机时序到达示意图

Fig.1 Sequencing arrival of multiple UAVs

整个任务过程中,无人机协同控制的目的是确定如何实施飞行任务,使无人机生存概率和作战效能达到最佳。无人机在飞行过程中受多种因素影响,各因素之间往往相互耦合,同时还必须满足各种约束条件,因此,在任务规划过程中需要协调各种因素之间的关系。具体来说,需要考虑以下因素:1) 航路的隐蔽性;2) 无人机的物理限制;3) 协作性要求,显示无人机编队涌现性的关键在于无人机之间的协作,体现在到达时间精度上,即准时性;4) 实时性要求,多无人机协同规划可分为离线预规划和在线重规划,由于任务的动态变化和环环境不确定性,需要考虑在线规划的实时性。

## 2 多无人机协同控制总体框架

多无人机时序到达控制的关键在于协调每架无人机的估计到达时间(Estimated Time of Arrival, ETA),使之趋近于团队的最优协同到达时间  $ETA^*$ 。

将时序到达问题描述为多架无人机按照指定时间间隔隔先后到达目标区域。采用分步求解的方法处理无人机时序到达问题,如图 2 所示。

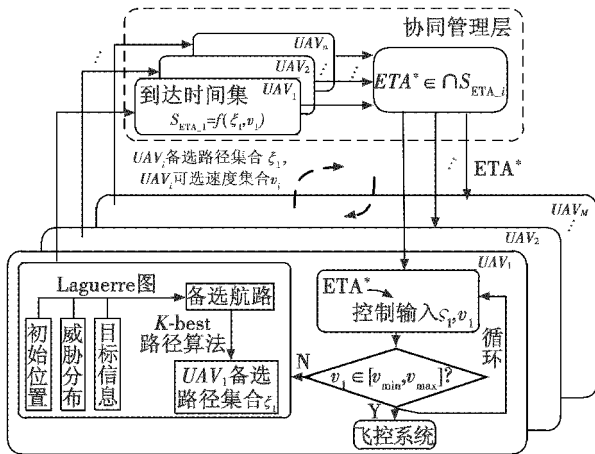


图 2 时序到达协同控制结构

Fig.2 Control framework for sequencing arrival

将整个规划过程分成协同路径规划和实时速度控制两个阶段,整个过程中,任务环境的描述、团队的协同管理和个体的实时决策在这两个阶段中分别得到体现。

## 3 面向时序到达的协同路径规划

### 3.1 基于 Laguerre 图的路径规划

基于 Voronoi 图的环境表示方法只能描述威胁等障碍物的大致位置,无法描述其作用范围的大小<sup>[6]</sup>,这是其用于航路规划时存在不足的主要原因。将 Voronoi 图中生成元由点换成圆,并将欧氏距离换成 Laguerre 距离,即可得到 Laguerre 图<sup>[9-11]</sup>。这样,规划问题由无限维的搜索问题转化为对有限维图形的搜索问题,使航迹规划的实时性更好。

定义 记平面  $R^2$  上的  $n$  个圆构成的集合为  $S = \{C_1(P_1, r_1), C_2(P_2, r_2), \dots, C_n(P_n, r_n)\}$ ,  $P_i = (p_{ix}, p_{iy})$ , 为圆  $C_i$  的圆心位置,  $r_i$  为半径;在  $C_i$  的基础上定义  $LR(C_i, S) = \cap \{Q | d_L(Q, C_i) < d_L(Q, C_j), Q \in R^2, \forall C_j \neq C_i\}$  所确定的平面区域为圆  $C_i$  的 Laguerre 区域,这样的  $n$  个区域把平面划分成一个凸网,称为以  $S$  为生成元的 Laguerre 图,记为  $L(S)$ 。  $d_L(Q, C_i)$  为  $Q$  点到圆  $C_i$  的 Laguerre 距离,如图 3 所示,其几何意义为点  $Q$  到圆  $C_i$  的切线长度  $l$  的平方,当两个威胁源不相交时, Laguerre 图的边必然从它们之间的空隙内穿过。利用 Laguerre 图的上述性质,将任务区域内的  $N$  个已知威胁作为 Laguerre 图的生成元,就可以得到较 Voronoi 图更合理的、更优的待选航路。

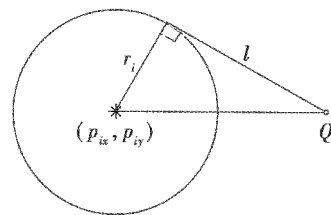


图 3 Laguerre 距离的几何意义

Fig.3 Geometry meaning of Laguerre diagram

### 3.2 路径集的产生

对任务环境的描述要考虑每条航路的燃油消耗和威胁代价。记  $E_k$  为 Laguerre 图中编号为  $k$  的边,  $l_k$  为  $E_k$  的长度,定义威胁  $m$  对  $E_k$  产生的威胁代价  $J'_{k,m}$  为

$$J'_{k,m} = \begin{cases} 0, & d_{k,m} > D_m \\ \frac{l_k}{d_{k,m}^4}, & d_{k,m} \leq D_m \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $D_m$  为威胁  $m$  的效能半径;  $d_{k,m}$  为威胁  $m$  到  $E_k$  的最短距离。在此基础上得到  $E_k$  的长度代价  $J'_k$  和所受威胁代价  $J'_k$  为

$$J_k^i = l_k \quad (2)$$

$$J_k^i = \sum_{m=1}^N J_{k,m}^i \quad (3)$$

式中,  $N$  为威胁区域的个数。则  $E_k$  的综合代价为

$$J_k = \alpha_1 J_k^i + \alpha_2 J_k^k \quad (4)$$

式中,  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  为综合加权系数。由于速度调整作用有限, 为确保所有无人机能够协同到达, 使用  $K$ -best 路径算法得到从无人机初始位置到目标的  $K$  条路径, 生成备选路径集合。

### 3.3 $ETA^*$ 的选取与路径寻优过程

由于协同时间要求苛刻, 无人机又有飞行包线限制, 在任务场景下为无人机团队确定最佳的  $ETA^*$  成为解决协同到达问题的关键。

定义  $UAV_i$  的  $K$  条备选路径的集合  $\xi_i$  为

$$\xi_i = \{S_{i,1}, S_{i,2}, \dots, S_{i,K}\} \quad (5)$$

取  $\xi_i$  中的一条备选路径为  $S_{i,j}$ , 结合式(2), 得到  $S_{i,j}$  的长度  $L_{i,j}$  为

$$L_{i,j} = \sum_{E_k \in S_{i,j}} l_k = \sum_{E_k \in S_{i,j}} J_k^i \quad (6)$$

记  $UAV_i$  的预设飞行速度为  $v_i$ , 则其对目标的访问时刻  $t_{ETA}$  即为路径  $S$  和速度  $v_i$  的函数

$$t_{ETA}(S_{i,j}, v_i) = \frac{L_{i,j}}{v_i} = \sum_{E_k \in S_{i,j}} \frac{J_k^i}{v_i} \quad (7)$$

对于  $UAV_i$  来说, 整个任务过程中威胁代价  $J_{uv,j}$  也是路径  $S_{i,j}$  和无人机速度  $v_i$  的函数。直观上, 暴露于威胁的时间增长会导致威胁代价的增大, 为了将暴露于威胁的时间考虑在内, 在 3.2 小节中威胁代价  $J_k^i$  和式(7)的基础上定义

$$J_{uv,j} = \sum_{E_k \in S_{i,j}} J_k^i \cdot t_{ETA}(S_{i,j}, v_i) \quad (8)$$

另外, 由于无人机具有相应的飞行包线, 在不同高度处都有速度限制, 即

$$\begin{cases} S_{i,j} \in \xi_i \\ v_i \in V_i \end{cases} \quad (9)$$

$UAV_i$  的到达时间  $t_{ETA}$  集是备选路径集  $\xi_i$  和无人机的速度范围  $V_i$  的函数, 通过计算可以得到其取值范围为

$$S_{ETA,j} = f(\xi_i, V_i) = \left[ \frac{L_{i,1}}{v_{\max}}, \frac{L_{i,1}}{v_{\min}} \right] \cup \left[ \frac{L_{i,2}}{v_{\max}}, \frac{L_{i,2}}{v_{\min}} \right] \cup \dots \cup \left[ \frac{L_{i,K}}{v_{\max}}, \frac{L_{i,K}}{v_{\min}} \right] \quad (10)$$

由式(7)、式(8)可知,  $t_{ETA}$  与  $J_{uv,j}$  都是  $S_{i,j}$  和  $v_i$  的函数, 所以两者之间必然存在一定的函数关系

$$J_{uv,j} = h(t_{ETA}), t_{ETA} \in S_{ETA,j} \quad (11)$$

$M$  架无人机的到达时序问题就简化成寻找最优协同时间  $t_{ETA}^*$  使团队代价最小的规划问题

$$t_{ETA}^* = \operatorname{argmin} \sum_{j=1}^M J_{uv,j} \quad (12)$$

$$\text{s. t. } t_{ETA}^* \in \bigcap_{i=1}^M S_{ETA,j}$$

以两架无人机协同到达为例, 协同时间  $t_{ETA}$  与路径代价  $J_{uv,j}$  的函数关系如图 4 所示。每一路径都对应图 4 中的一条线段, 不同的飞行速度导致了不同的  $t_{ETA}$  和威胁代价。经计算得到  $t_{ETA}^*$ , 如图 4 中点划线所示。

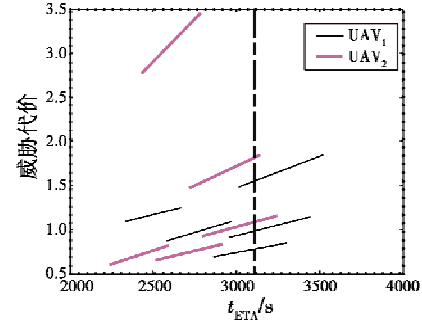


图 4 协同时间与路径代价函数关系图

Fig. 4 Relationship between ETA and threat cost

对于  $UAV_i$  来说, 一旦  $t_{ETA}^*$  确定之后, 需要决定从其备选路径集  $\xi_i$  中选取路径并选取合适的速度, 使个体代价  $J_{uv,j}$  最小。综合式(9)和式(11), 有

$$\begin{aligned} [S_i, v_i] &= \operatorname{argmin} J_{uv,j} \\ \text{s. t. } S_i &\in \xi_i, v_i \in V_i, J_{uv,j} = h(t_{ETA}^*) \end{aligned} \quad (13)$$

## 4 速度闭环控制

文献[7-8]所采用的控制方法是开环的, 而实际情况下, 由于飞行过程中, 无人机在转弯时的路径跟踪误差以及风的影响都会使得到达的时间精度急剧下降, 因此, 考虑引入反馈形成闭环系统来改善协同控制的稳定性和控制精度, 如图 5 所示, 导航系统以一定的时间周期对航路信息和无人机的位置信息解算之后, 结合  $ETA$  对飞行速度进行修正。飞行速度修正的周期需要考虑速度控制的调节时间, 周期过长会影响系统性能, 周期过短则会过多占用系统带宽, 并且无人机会频繁调整速度和姿态以致燃油浪费。当战场不确定和动态性较显著时, 无人机、目标或威胁将会急剧变化, 从而使重规划的频率增大, 这可能使规划的实时性变差。

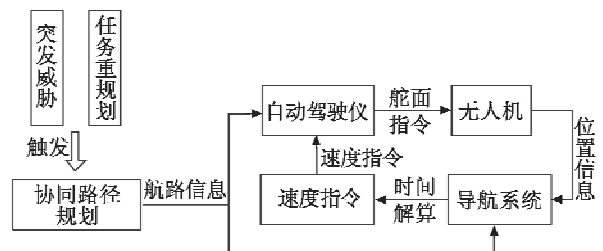


图 5 协同控制闭环结构

Fig. 5 Close-loop framework for cooperative control

对于上述反馈系统,形成闭环的关键在于速度指令的准确结算,而这种结算必须考虑无人机在转弯与平时的不同特点。

#### 4.1 转弯时间估计

在航线切换时按提前转弯量过线切换,提前转弯量将根据两段航路的夹角而定,根据无人机的飞行速度和滚转角,可以得到飞机的协调转弯半径  $R$  为

$$R = \frac{V^2}{\tan \phi \cdot g} \quad (14)$$

无人机的协调转弯控制律取为

$$\phi_g = K(\psi - \psi_g) \quad (15)$$

$$\delta_a = I_\phi(\phi - \phi_g) + I_p p \quad (16)$$

$$\delta_r = K_r r \quad (17)$$

取  $K=0.8, I_\phi=0.3, I_p=0.2, K_r=0.3$ 。实际系统中  $\phi_g$  限幅器允许的最大滚转角  $\phi_{\max} = 20^\circ$ ,反映到式(15)中,允许的  $\Delta\psi = (\psi_g - \psi)$  不超过  $25^\circ$ ,即

$$\Delta\psi = \begin{cases} -25^\circ, & \psi - \psi_g \leq -25^\circ \\ \psi - \psi_g, & |\psi - \psi_g| \leq 25^\circ \\ 25^\circ, & \psi - \psi_g \geq 25^\circ \end{cases} \quad (18)$$

分析加入制导控制系统的等效无人机,转弯指令  $\psi_g$  到航向角速度  $\psi$  的传递函数为

$$\frac{\psi}{\psi_g} = \frac{-1.2(s-12.86)(s+2)(s^2+12.39s+93.52)}{(s+94.24)(s+6.034)(s^2+0.8666s+0.1955)(s^2+9.379s+25.98)} \quad (19)$$

当  $|\psi - \psi_g| < 25^\circ$  时,无人机的转弯时间即为上述系统的调节时间,对于该六阶系统,其调节时间为  $T_s = 12.62$  s;当  $|\psi - \psi_g| > 25^\circ$  时,由于气动约束,无人机最大只能以转弯角速率  $r_{\max}$  进行协调转弯。分析无人机在协调转弯时的受力,得

$$r_{\max} = \frac{g \cdot \tan \phi_{\max}}{V} \quad (20)$$

综合式(18)~式(20),则无人机转弯所用时间  $T_{\text{turn}}$  为

$$T_{\text{turn}} = \begin{cases} T_s, & |\psi - \psi_g| \leq 25^\circ \\ T_s + \frac{|\psi - \psi_g| - 25^\circ}{r_{\max}}, & |\psi - \psi_g| \geq 25^\circ \end{cases} \quad (21)$$

#### 4.2 剩余路径计算与速度指令输出

无人机在航线切换时的提前转弯量  $L_{\text{length2turn}}$  为

$$L_{\text{length2turn}} = \tan \frac{|\psi - \psi_g|}{2} \cdot R \quad (22)$$

则应飞速度  $v_i$  为

$$v_i = \frac{L_{i,\text{left}} - 2 \cdot \sum \tan \frac{|\psi - \psi_g|}{2} \cdot R}{T_{i,\text{left}} - \sum T_{\text{turn}}} \quad (23)$$

此时,当路径偏差过大,结合无人机的飞行包线,  $v_i \notin [v_{\min}, v_{\max}]$  时,为了满足任务需求,则需要重新进行一次路径规划,保证时序到达。

## 5 仿真验证

将上述算法在 Matlab 环境中实现,计算机配置为: Intel 酷睿 i3 处理器,主频 3.1 GHz,内存 2 G。通过仿真验证上述原理和算法的有效性,实验参数设置为:坐标范围为  $90 \text{ km} \times 70 \text{ km}$ ;威胁源如图 6 中灰色的圆所示,数量  $N=17$ ,杀伤半径从 1 km 至 12 km 不等,“■”表示无人机位置,“◆”表示目标点位置。要求  $UAV_1$  和  $UAV_2$  选择合适的路径规避威胁,先后以 100 s 的时间间隔顺序到达目标。无人机的特征参数如表 1 所示。

表 1 某型无人机的特征参数

Table 1 Characteristic parameters of a certain type of UAV

参数	取值
最大飞行速度 $V_{\max}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	40
最小飞行速度 $V_{\min}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	28
最大滚转角 $\phi_{\max}/(^{\circ})$	20

首先,对 Laguerre 图用于生成初始航路的有效性进行检验。用所述算法生成 Laguerre 图,仅耗时 8 ms,结果如图 6b 所示。图 6a、图 6b 中的虚线分别为 Voronoi 图和 Laguerre 图生成的备选航路。可以看出, Voronoi 图中会产生穿过威胁区的边;而 Laguerre 图生成的初始航路能够避开威胁区,更为合理。证明所提基于 Laguerre 图的环境描述算法能够产生较 Voronoi 图代价更小、更合理的路径,继而到达时间的可选范围更大,因此,控制结果也会使团队的威胁代价更小。

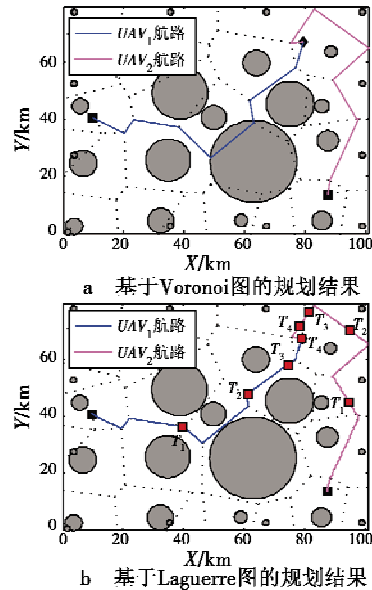


图 6 基于 Laguerre 图的初始航路有效性检验

Fig. 6 Validity verification of Laguerre diagram

其次,对协同控制的效果进行检验。把  $UAV_2$  的  $S_{\text{ETA}_2}$  在坐标轴上向左平移 100 s,将时序到达问题转换

为相对  $UAV_1$  的同时到达问题。速度修正以  $T = 100$  s 为周期,闭环前后速度变化曲线如图 7 所示。在实时航迹中,分别筛选两架无人机在  $T_1 = 1216$  s,  $T_2 = 2220$  s,  $T_3 = 3020$  s,  $T_4 = 3389$  s 4 个时刻的位置并加以标注,如图 6b 中“■”所示。

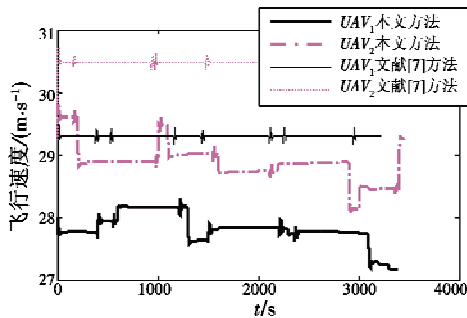


图 7 速度变化曲线

Fig. 7 Curve of velocity change

加入速度闭环控制前后的控制精度对比,如表 2 所示。图 8 为距目标的直线距离随时间的变化曲线。

表 2 协同控制精度对比

Table 2 Precision comparison of cooperative control

无人机	路径长度/km	预置速度/(m · s <sup>-1</sup> )	$t_{EFA}$ /s
$UAV_1$	94.91	28.00	3389.0
$UAV_2$	102.03	29.24	3489.0

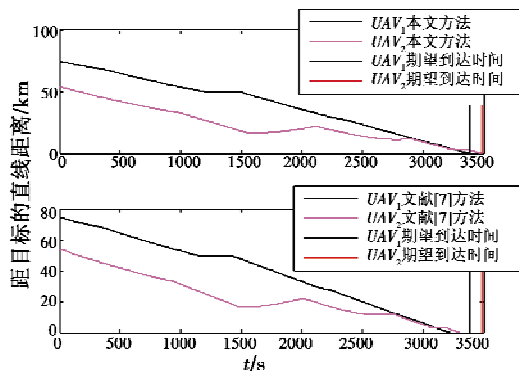


图 8 协同控制精度对比

Fig. 8 Precision comparison of cooperative control

## 6 结论

本文以协同路径规划和实时速度决策两个阶段有效实现了面向协同作战的多无人机时序到达。该方法具有以下特点:1) 利用 Laguerre 图对面状区域处理的优势对任务环境进行了分析和处理;2) 采用闭环控制来应对路径误差和突发威胁等不利因素的影响,提高了多无人机时序到达协同控制精度。

## 参考文献

[1] 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 UAVs [J]. ACTA Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(4): 797-805.

[2] 曾佳,申功璋,杨凌宇.无人机在线协同航迹规划时序问题[J].南京航空航天大学学报,2009,41(3):334-338.

ZENG J, SHEN G Z, YANG L Y. Timing problem for UAV online cooperated trajectory planning[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2009, 41(3): 334-338.

[3] DAI R, JR COCHRAN J E. Path planning for multiple unmanned aerial vehicles by parameterized cornu-spirals [C]//American Control Conference, Hyatt Regency Riverfront, St. Louis, MO, USA, 2009:2391-2396.

[4] MCLAIN T W, BEARD R W. Trajectory planning for coordinated rendezvous of unmanned air vehicles [C]//Proceedings of AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, Denver, USA, 2000:1247-1254.

[5] 张同法,于雷,鲁艺.多架无人机协同作战的路径规划[J].火力与指挥控制,2009,34(2):143-145.

ZHANG T F, YU L, LU Y. Trajectory planning for coordinated rendezvous of unmanned air vehicles[J]. Fire Control & Command Control, 2009, 34(2):143-145.

[6] BEARD R W, MCLAIN T W, GOODRICH M A. Coordinated target assignment and intercept for unmanned air vehicles [J]. IEEE Transactions Robotics and Automation, 2002, 18(6):911-922.

[7] MCLAIN T W, CHANDLER R R, RASMUSSEN S, et al. Cooperative control of UAV rendezvous [C]//American Control Conference, Arlington, VA, 2001:2309-2314.

[8] 袁利平,夏洁,陈宗基.多无人机协同路径规划研究综述[J].飞行力学,2009,27(5):1-5.

YUAN L P, XIA J, CHEN Z J. Survey of cooperative path planning for multiple UAVs[J]. Flight Dynamics, 2009, 27(5):1-5.

[9] BERG M D, CHEONG O, KREVELD M V, et al. Computation geometry algorithms and application [M]. 3rd ed. Berlin:Springer-Verlag, 2008:1-276.

[10] SUGIHARA K. Laguerre voronoi diagram on the sphere [J]. Journal for Geometry and Graphics, 2002, 6(1): 69-81.

[11] IMAI H, LRI M, MUROTA K. Voronoi diagram in the Laguerre geometry and its applications[J]. Siam J Comput, 1985, 14(1):93-105.