

# 基于分层策略的多无人机最优协同航路规划

苑 帅<sup>1</sup>, 李 飞<sup>1,2</sup>, 王 龙<sup>1</sup>, 张 誉<sup>1</sup>

(1.空军工程大学航空航天工程学院,西安,710038;2.空军西安飞行学院,西安,710032)

**摘要** 基于分层策略将多无人机协同航路规划分为航路规划层、协同控制层和航迹控制层进行研究。航路规划层采用基于  $K$  均值和遗传算法的航路规划方法,为每架无人机提供多条备选航路;针对传统协同控制算法在求解协同变量出现无解的情况,设计了新的协同变量求解步骤;航迹控制层基于无人机六自由度模型和协同变量建立了终端时间固定的最优航迹控制模型,并采用勒让德伪谱法将最优控制问题转化为非线性规划问题,并利用 CFSQP 对模型进行了求解,实现了对无人机航迹控制变量和姿态的规划。仿真结果表明,利用该方法得到的无人机协同航路具有较高的可操作性,且计算量较小,效率较高,得到的无人机控制指令平滑,易于操控。

**关键词** 分层策略;多无人机;协同航路规划;最优航迹控制

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2015.02.008

**中图分类号** V235;TP391.41 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2015)02-0033-05

## An Optimal Coordination Trajectory Planning Method of Multiple Unmanned Air Vehicles Based on Hierarchy Strategy

YUAN Shuai<sup>1</sup>, LI Fei<sup>1,2</sup>, WANG Long<sup>1</sup>, ZHANG Yu<sup>1</sup>

(1.Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;  
2.Xi'an Flight Academy of Air Force, Xi'an 710032, China)

**Abstract:** A coordination trajectory planning method of multiple unmanned air vehicles (UAV) based on hierarchy strategy is researched, the research is divided in three hierarchies, i.e. route planning, coordination control and trajectory control. Multiple routes for each UAV are given based on  $K$ -means clustering algorithm and genetic algorithm. A new method is proposed to solve the problem that the use of the traditional algorithm could not find out the result of coordination variable. According to the six degree of freedom model and the coordination variable, a fixed terminal time optimal trajectory control model is built up for each UAV, thus the optimal control problem is converted to NLP problem with the LPM, and the model is solved by using CFSQP method, and then the plan of control parameters and attitude is realized. The simulation shows that the coordination trajectory of UAV obtained by this method is better in operability, less in computational complexity and higher in computational efficiency, and simultaneously the control command obtained is smooth and easy to operate.

**Key words:** hierarchy strategy; multiple unmanned air vehicles; coordination trajectory planning; optimal trajectory control

无人机协同控制能力是无人机在高度危险的战场环境中顺利完成任务所必备的一项技能,而多机

收稿日期:2014-06-11

基金项目:陕西省科技新星基金资助项目(2013KJXX-82)

作者简介:苑 帅(1989-),男,上海人,硕士生,主要从事航空武器系统总体仿真与控制研究。

\* 通信作者:李 飞(1987-),男,博士生,主要从事航空武器系统总体仿真与控制研究,Email:lifei4975@163.com

引用格式:苑帅,李飞,王龙,等.基于分层策略的多无人机最优协同航路规划[J].空军工程大学学报:自然科学版,2015,16(2):33-37. YUAN Shuai LI Fei WANG Long ZHANG Yu. An Optimal Coordination Trajectory Planning Method of Multiple Unmanned Air Vehicles Based on Hierarchy Strategy[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2015, 16(2): 33-37.

协同航路规划技术是多无人机协同控制的关键技术之一<sup>[1]</sup>。

文献[2~3]研究了多无人机协同侦察路径规划问题;文献[4~5]注重于无人机航路规划算法研究;Inalham<sup>[6]</sup>采用连续局部最优的博弈法来产生近似全局最优解。Jonathan P.How 等人<sup>[7]</sup>应用混合整数规划法来解决有时间限制的紧密耦合问题,McLain<sup>[8]</sup>提出了一种多架无人机编队进行协同的分解策略,文献[9]运用 Voronoi 图和 Dijkstra 算法,较好地解决了多无人机协同航路规划问题。宋绍梅<sup>[10]</sup>将多无人机协同航路规划分为 3 个层次,航线规划层、协同规划层和航线平滑层,结果表明该方法有效可行。

这些研究都只是对无人机的航路进行规划,由于没有考虑到无人机自身的控制问题,需要在线实时计算操纵指令,增大了无人机和操纵员的计算负担。另外,在考虑协同变量的求解时,对于无解的情况没有很好的处理方法,这也限制了算法的可用性。

针对以上问题,本文在分层规划的思想基础上,提出协同变量无解时的解决方法,采用终端固定的最优控制方法建立无人机航迹控制模型,实现了对无人机关键航路段姿态和控制指令的规划。

## 1 多无人机协同航路规划框架

多无人机协同航路规划是一个高维、强耦合的优化问题,采用整体优化的方式很难得到有效解,因此采用层次分解的方法解决问题,图 1 为基于层次分解策略的多无人机协同航路规划求解框架,与文献[11]不同的是,本文在航迹控制层引入无人机六自由度模型建立最优航迹控制模型,从而实现对无人机最优航迹飞行姿态的规划,进一步提高了所规划航迹的可操纵性和可飞性。

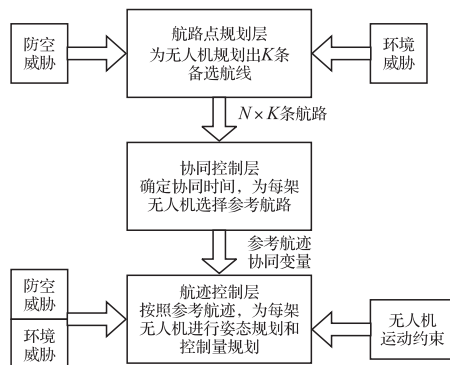


图 1 多无人机协同航路规划求解框架

Fig.1 The solve framework of multi-UAVs Coordination Trajectory Planning

## 2 基于 K 均值和遗传算法的无人机多航路规划

根据协同航迹规划层次分解策略,航路规划层应当给每架无人机生成  $K$  条备选航迹,以供协同控制层选择使用。目前,大多数航路规划算法都只能得到一个全局或者局部最优的航路,不能用来寻找多条航迹。文献[11]利用遗传算法航迹规划中有多个航迹个体的特性,通过  $K$  均值聚类将航迹分成多个子种群,分开进化,从而得到在空间中比较离散的多条航路,为多无人机的协同航路规划提供了有利工具,本文在航路规划层即采用文献[12]的方法对每架无人机进行多航路规划。

## 3 改进的协同控制算法与步骤

通过航路规划层中的聚类遗传算法,每架无人机都得到了独立的  $K$  条备选航路。多无人机协同航路规划中最重要的协同因素时间协同,协同控制层即是要从每架无人机的多条备选航路中选出能够时间协同且总体航路代价最小的航路。

### 3.1 协同变量与协同控制函数

协同时间的选择和协同控制函数的计算是协同控制算法中 2 个关键因素。最能够体现时间协同的因素是每架无人机的预计到达时间 (Estimated Time until Arrival, ETA),而协同控制函数是为了使得航路代价最小,因此可通过定义航路代价函数作为协同控制函数。航路代价的协同函数为:

$$C_i(p_j, t) = \omega C_i(p_j) + (1 - \omega)t_{i,j} \quad (1)$$

式中:  $0 \leq \omega \leq 1$ ;  $t_{i,j}$  为局部协同变量;  $C_i(p_j)$  为第  $i$  架无人机第  $j$  条航路代价。

对于确定的第  $i$  架无人机第  $j$  条航路,航路代价  $C_i(p_j)$  为固定值。显然,参数  $\omega$  确定后,协同代价  $C_i(p_j, t)$  随着  $t_{i,j}$  的增大而增大。

### 3.2 协同控制变量和参考航路的确定

假定第  $i$  架无人机选择的航路为  $p_i$ ,协同时间为  $t_i$ ,航路代价为  $C(p_i)$ ,第  $j$  条航路的总长度为  $L_{i,j}$ ,若飞行速度  $v_i \in [v_{i\min}, v_{i\max}]$ ,则到达目标的时间范围  $T^i \in [L_{i,j}/v_{i\max}, L_{i,j}/v_{i\min}] = [t_{i\min}^j, t_{i\max}^j]$ 。为了实现多无人机协同到达目标,预计到达时间  $T_e$  的变化范围应是各无人机的飞行时间范围  $T^i$  的交集。

多无人机协同航路代价函数为:

$$C_{all} = \sum_{i=1}^N C(p_i, t_i) = \sum_{i=1}^N [\omega C(p_i) + (1 - \omega)t_i] \quad (2)$$

因此,协同变量  $T_{\infty}$  和最优参考航路的求解可以表示为:

$$[T_{co}, p_{i, best}] = \arg \min C_{all} \quad (3)$$

协同控制算法的具体步骤为:

**步骤 1** 依据小中取大原则,从每架无人机  $K$  条备选航路飞行时间的最小值中选择最大的一个,作为协同变量  $T_{co}$ ,即:

$$T_{co} = \max(t_{i, min}^j) \quad i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, K \quad (4)$$

**步骤 2** 对第  $i$  架无人机的第  $j$  条航路进行判断,若满足  $T_{co} \in [t_{i, min}^j, t_{i, max}^j]$  则该航路为可选航路之一,否则转步骤 4。

**步骤 3** 从第  $i$  架无人机的  $m$  条可选航路中,选取威胁代价最小的一条航路作为协同航路。即:

$$p_{i, best} = \operatorname{argmin}(C_i(p_j)), i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

**步骤 4** 对于没有可选航路的无人机,计算其每条航路与协同变量  $T_{co}$  的差值,并记为:

$$\Delta t_i^j = T_{co} - t_{i, max}^j \quad (6)$$

**步骤 5** 对于没有可选航路的无人机,按照下式选择最佳航路:

$$p_{i, best} = \operatorname{argmin}(C_i(p_j, \Delta t_i^j)) \quad (7)$$

$$C_i(p_j, \Delta t_i^j) = \omega C(p_j) + (1 - \omega) \Delta t_i^j$$

经过上述步骤,即可得到最优的协同时间变量,并可为每架无人机选择最佳的协同参考航路。

## 4 最优航迹控制模型及求解

协同控制层为多无人机确定了协同时间,并为每架无人机确立了参考航路,最优航迹控制层通过综合考虑无人机的飞行控制和运动特性,并结合战场威胁环境和航路约束,为每架无人机构建最优航迹控制模型。

### 4.1 无人机六自由度运动模型

无人机运动学方程为:

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos \gamma \cos \chi + W_x \\ \dot{y} = v \cos \gamma \sin \chi + W_y \\ \dot{z} = v \sin \gamma + W_z \end{cases} \quad (8)$$

式中: $v$  为战机相对于风的速度; $\gamma$  为航迹倾角; $\chi$  为航迹方位角; $(W_x, W_y, W_z)$  惯性坐标系中风速在 3 个坐标轴方向的分量; $(x, y, z)$  为战机位置坐标。

无人机的动力学方程为:

$$\begin{cases} \dot{v} = (T \cos \alpha - D) / m - g \sin \gamma - \dot{W}_x \cos \gamma \cos \chi - \dot{W}_y \cos \gamma \sin \chi - \dot{W}_z \sin \gamma \\ \dot{\chi} = \frac{[L + T \sin \alpha] \sin \mu}{m v \cos \gamma} + \frac{\dot{W}_x \sin \chi - \dot{W}_y \cos \chi}{v \cos \gamma} \\ \dot{\gamma} = \frac{[L + T \sin \alpha] \cos \mu}{m v} - \frac{g \cos \gamma - \dot{W}_x \sin \gamma \cos \chi - (\dot{W}_y \sin \gamma \sin \chi + \dot{W}_z \cos \gamma / v)}{v} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\alpha$  为攻角; $\mu$  为横滚角; $\eta$  为推力系数; $m$  为战机

质量;发动机推力  $T = \eta T_{max}$ ,  $T_{max}$  为发动机最大推力;阻力  $D = q S C_D$ ;  $g$  重力加速度;升力  $L = q S C_L$ , 动压  $q = \rho v^2 / 2$ ,  $\rho$  为海拔高度为  $z$  上的空气密度,  $S$  为战斗机翼面积。

### 4.2 模型的无量纲化处理

#### 4.2.1 求导变量的选择

为采用勒让德伪谱法(LPM)算法进行最优航迹控制模型的求解,考虑到无人机的地形跟随、地形规避和威胁规避能力,可任选  $x, y$  或  $z$  中的任一个作为求导变量,本文以  $z$  作为求导变量为例进行说明,同时将  $(\eta, \alpha, \mu)$  作为控制变量,  $(x, y, t, v, \gamma, \chi)$  作为状态变量。

#### 4.2.2 参数无量纲化

由于各参数间量级差别较大,在优化过程中易丢失最优值,需进行无量纲化处理,以提高计算精度和速度。无量纲化转换公式为:

$$\begin{cases} \bar{v} = v / v_s \\ \bar{x} = gx / v_s^2, \bar{y} = gy / v_s^2, \bar{z} = gz / v_s^2 \\ \bar{t} = t / t_c \\ \bar{\gamma} = \gamma / \pi, \bar{\chi} = \chi / \pi, \bar{\alpha} = \alpha / \frac{\pi}{2}, \bar{\mu} = \mu / \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $v_s$  为海平面音速; $t_c = 500$  s, 为时间常量。

$$\begin{cases} \frac{d\bar{x}}{d\bar{z}} = \operatorname{ctg}(\bar{\gamma}\pi) \cos(\bar{\chi}\pi) \\ \frac{d\bar{y}}{d\bar{z}} = \operatorname{ctg}(\bar{\gamma}\pi) \sin(\bar{\chi}\pi) \\ \frac{d\bar{t}}{d\bar{z}} = \frac{v_s}{g t_c v \sin(\bar{\gamma}\pi)} \\ \frac{d\bar{v}}{d\bar{z}} = \frac{\eta T_{max} \cos(\bar{\alpha}\pi/2) - D - mg \sin(\bar{\gamma}\pi)}{mg v \sin(\bar{\gamma}\pi)} \\ \frac{d\bar{\gamma}}{d\bar{z}} = \frac{(L + \eta T_{max} \sin(\bar{\alpha}\pi/2)) \cos(\bar{\mu}\pi/2) - mg \cos(\bar{\gamma}\pi)}{mg \pi v^2 \sin(\bar{\gamma}\pi)} \\ \frac{d\bar{\chi}}{d\bar{z}} = \frac{(L + \eta T_{max} \sin(\bar{\alpha}\pi/2)) \sin(\bar{\mu}\pi/2)}{mg \pi v^2 \sin(\bar{\gamma}\pi) \cos(\bar{\gamma}\pi)} \end{cases} \quad (11)$$

#### 4.2.3 无人机运动无量纲化模型

无人机的无量纲化运动模型见式(11)。此外,为保证无人机正常控制,控制量需满足如下条件:

$$\alpha_{min} \leq \alpha \leq \alpha_{max}, 0 \leq \eta \leq 1, \mu_{min} \leq \mu \leq \mu_{max} \quad (12)$$

部分状态量需满足需满足如下约束:

$$v_{min} \leq v \leq v_{max}, \gamma_{min} \leq \gamma \leq \gamma_{max}, \chi_{min} \leq \chi \leq \chi_{max} \quad (13)$$

### 4.3 环境约束与雷达威胁模型

在无人机航路规划时,环境约束和雷达威胁是必须考虑的 2 种约束,本文采用文献[12]中的环境

约束和雷达探测威胁建模方法。

#### 4.4 目标函数模型

无人机在战场环境中所处的时间应越短越好,同时考虑到无人机的易操作性航迹的平滑性,建立无量纲化目标函数如下:

$$\min J = \frac{v_s^2}{g} \int_{z_0}^{\bar{z}_f} (W_1 \bar{t}' + W_2 \bar{\gamma}'^2 + W_3 \bar{\chi}'^2 + W_4 (\bar{z} - gh(x, y)/v_s^2)^2) d\bar{z} \quad (14)$$

式中第 1 项表无人机在作战区域中所处时间因素,第 2、3 项保证了规划航迹的平滑特性,第 4 项是对无人机飞行高度的考虑。 $W_1, W_2, W_3, W_4$  为各个因素的权重,本文假设各个因素的权重相同,故可取  $W_1 = W_2 = W_3 = W_4 = 1/4$ ;  $\bar{z}_0$  和  $\bar{z}_f$  为无量纲化之后初、末态高度,其计算公式分别为:  $\bar{z}_0 = z_0 g / v_s^2$  和  $\bar{z}_f = z_f g / v_s^2$ 。

#### 4.5 模型求解

根据以上所建模型,选取控制向量  $u(t) \in \mathbf{R}^{N_u}$ , 状态向量为  $x(t) \in \mathbf{R}^{N_x}$ , 结合式(11)~(14), 可得单架无人机航迹最优控制模型如下:

$$\begin{aligned} \min J(x, u) &= \frac{v_s^2}{g} \int_{z_0}^{\bar{z}_f} g(x(\bar{z}), u(\bar{z}), \bar{z}) d\bar{z} \\ \text{s.t. } \dot{x}(\bar{z}) &= f[x(\bar{z}), u(\bar{z}), \bar{z}] \\ x(\bar{z}_0) &= x_0, \quad x(\bar{z}_f) = x_f \\ s_j(x(t), u(t), t) &\leq 0, (j = 1, 2, \dots, l) \\ \bar{z} &\in [\bar{z}_0, \bar{z}_f] \quad t \in [t_0, t_f] \end{aligned} \quad (16)$$

式中:系统状态方程为式(12);边值条件为无人机的初始状态和航迹终止条件;不等式表示战场威胁约束;终端时间  $t_f = t_0 + T_{co}$ 。

对于该最优控制问题,很难获得其解,本文首先采用 LPM 对模型离散化<sup>[13]</sup>,将最优控制问题转化为 NLP 问题,再采用 CFSQP(C- Feasible Sequential Quadratic Programming)算法进行求解。

### 5 仿真分析

为验证算法的可行性,本文选取 3 架无人机分别从不同的机场起飞,同时到达目标区域。首先利用 MAPINFO 地图工具构建战场环境地形,并编写雷达探测模型和基于 K 均值和遗传算法的无人机多路径规划算法。在此,为每架无人机规划 2 条航路,结果见图 2。每架无人机每条航路的航路代价和飞行时间区间(设无人机的速度  $V \in$

[200, 400] (m/s)) 见表 1。各条航路的飞行时间的交集不是空集,可得到协调变量  $T_f = 280$  s。因此,可根据式(5)为每架无人机确定最优参考航路。

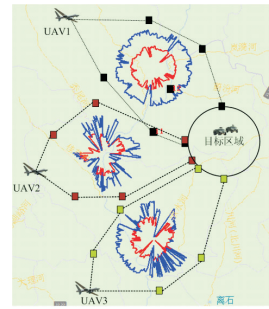


图 2 多无人多航路规划结果

Fig.2 The multi-trajectory planning result of multi-UAVs

表 1 航路信息

Tab.1 Trajectory information

无人机	航路组	航路代价	时间区间/s	最优航路
UAV1	航路 1	128.3	[280, 400]	航路 2
	航路 2	119.2	[270, 390]	
UAV2	航路 1	112.3	[240, 350]	航路 2
	航路 2	103.8	[215, 325]	
UAV3	航路 1	106.7	[245, 360]	航路 1
	航路 2	118.4	[270, 390]	

在确定了最优参考航路和协同变量  $T_f$  后,即可按照式(15)为每架无人机构建终端时间固定的最优航迹控制模型,继而采取 LPM-CFSQP 方法求解。限于篇幅,本文选取 UAV2 的其中一段航路进行航迹控制仿真解算。取节点数  $N = 20$ ,通过仿真计算,所得其航迹的控制指令见图 3~4。

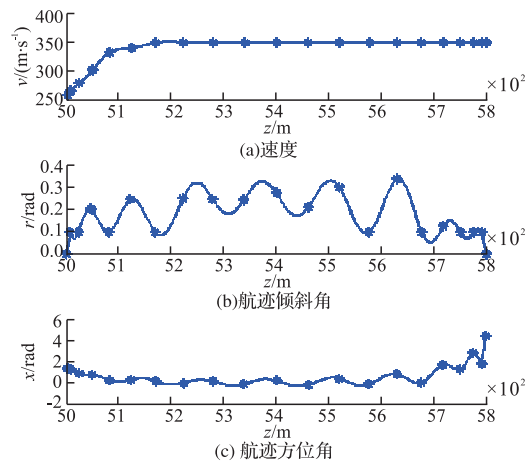


图 3 UAV2 最优控制航路状态量变化情况

Fig.3 The optimal control route states history of UAV2

从图 3 的仿真结果可以看出,通过航路最优控制模型解算得到的无人机的状态量变化平稳,满足无人机的性能约束。图 4 给出了无人机在最优航路上的控制量,可以看出,控制量的变化曲线较为平缓,易于操控,可以由地面站来手动操控,也可以预



装订在无人机上,实现自主飞行。相对于文献[11]航迹平滑算法,本文得到了无人机的姿态控制量,使得规划的航路更具有操作性。

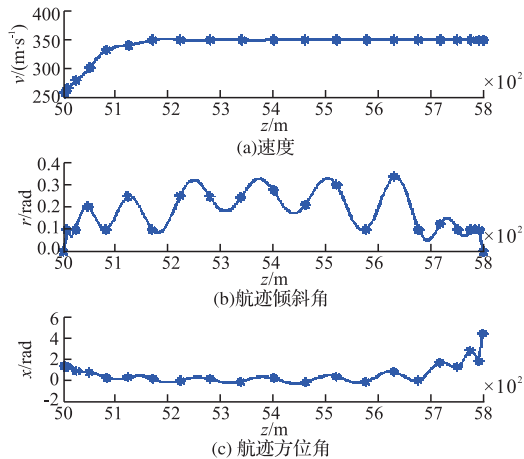


图 4 UAV2 航路最优控制指令

Fig.4 The optimal route control command of UAV2

## 6 结语

本文基于分层思想将多无人机协同航路规划的复杂耦合问题转化为对单架无人机的航路规划和航路控制问题,降低了问题求解的难度;设计了新的协同变量和参考航路选择算法,保证了协同航路规划问题有解;采用无人机六自由度模型建立了无人机终端时间固定的最优航路控制模型,实现了对无人机姿态的规划,发挥了无人机自主控制的特性。但该算法需要计算机具有较大的存储空间和计算能力,因此仅适合离线规划,下一步将对在线规划问题进行深入研究。

### 参考文献 (References):

[1] 黄长强,翁兴伟,王勇,等.多无人机协同作战技术[M].北京:国防工业出版社,2012.  
HUANG Changqiang, WENG Xingwei, WANG Yong, et al. The Cooperative Engagement Technology of Multi-UAVs [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2012. (in Chinese)

[2] 闵昌万.飞行器航路规划与轨迹控制研究[D].西安:西北工业大学,1999.  
YAN Changwan. The Research of Aircraft Route Planning and Trajectory Control[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 1999. (in Chinese)

[3] 李璠.无人机航路规划算法研究[D].大连:大连理工大学,2011.  
LI Fan. The Research on Route Planning Algorithm of UAV [D]. DaLian: Dalian University of Technology, 2011. (in Chinese)

[4] Fasano G, Accardo D, Moccia A, et al. Multisensor Based Fully Autonomous Non-Cooperative Collision Avoidance System for UAVs[R]. AIAA 2007-2847.

[5] 毛云云.多飞行器协同航路规划算法[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.  
MAO Yunyun. The Coordination Route Planning Algorithm of Multi-Aircrafts[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese)

[6] Gokham Inalham, Stipanovic Dusan M, Tomlin Claire J. Decentralized Optimization with Application to Multiple Aircraft Coordination[C]//In the Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control, Las Vegas, NV: IEEE, 2002: 258-263.

[7] Arthur Richards, How Jonathan P. Aircraft Trajectory Planning with Collision Avoidance using Mixed Integer Linear Programming[R]. ACC 02-AIAA1057.

[8] McLain Timothy W, A Decomposition Strategy for Optimal Coordination of Unmanned Air Vehicle[C]//Proceedings of the American Control Conference London: ACC press, 2000: 357-365.

[9] 安柏义.多无人机系统协同航路规划研究[D].南京:南京航空航天大学,2008.  
AN Baiyi. The Research on Coordination Route Planning Algorithm of Multi-UAVs[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008. (in Chinese)

[10] 宋绍梅,张克,关世义.基于层次分解策略的无人机多机协同航线规划方法研究[J].战术导弹技术,2004,(1):44-48.  
SONG Shaomei, ZHANG Ke, GUAN Shiyi. A Trajectory Planning Method Based on Hierarchy Decomposition Strategy for Coordination of Multiple Unmanned Air Vehicles [J]. Tactical Missile Technology, 2004, (1): 44-48. (in Chinese)

[10] 严江江,丁明跃,周成平.基于K均值聚类和遗传算法的多航迹规划方法[J].火力与指挥控制,2010,35(3):147-150.  
YAN Jiangjiang, DING Mingyue, ZHOU Chengping. Multiple Routes Planning Method Based on K-Means Clustering and Genetic Algorithm [J]. Fire Control & Command Control, 2010, 35(3): 147-150. (in Chinese)

[12] 陈中起,于雷,周中良.雷达威胁下战斗机突防安全高度范围计算[J].电光与控制,2012,19(1):5-8.  
CHEN Zhongqi, YU Lei, ZHOU Zhongliang. Calculation of Safe-Height-Range for Fighter Aircraft Penetration Under Radar threat [J]. Electronics Optics & Control, 2012, 19 (1): 5-8. (in Chinese)

[13] Paul W. Real-time Computation of Optimal Three-Dimensional Aircraft Trajectories Including Terrain Following[R]. AIAA 2006-6603.

(编辑:徐敏)