文章编号: 1006-9348(2016) 09-0123-04

复杂战场环境下 UCAV 低空突防航迹规划

周一叶 姚登凯 吴奇科

(空军工程大学空管领航学院 陕西 西安 710051)

摘要: 无人作战飞机(UCAV) 低空突防航迹规划是指利用地形和敌情信息,在满足 UCAV 各项约束条件的前提下设计出从起点至目标点的安全航线。传统的航迹规划方法将 UCAV 视为简单质点,对威胁空间采用大量简化处理,造成规划出的突防航迹安全性和可飞性不高,难以保证 UCAV 在复杂战场环境下完成预定作战任务。提出一种威胁空间综合量化的方法,考虑 UCAV 动态 RCS 和防空系统联网威胁,建立基于势函数的威胁空间概率分布模型,根据 UCAV 的最小转弯半径、最小直飞距离和最大航程等 UCAV 性能约束对传统稀疏 A* 算法进行改进,达到有效裁剪搜索空间,提高搜索效率的目的。仿真结果表明,上述模型能真实仿真复杂战场环境,在获得较高精度的低空突防航迹的前提下提高 UCAV 航迹规划效率。

关键词: 无人作战飞机; 航迹规划; 复杂战场环境; 改进稀疏 A* 算法

中图分类号: V271.4 文献标识码: B

Flight Path Planning for UCAV Low-Altitude Penetration under Complex Battlefield Environment

ZHOU Yi-ye ,YAO Deng-kai ,WU Qi-ke

(Air Traffic Control and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi' an Shanxi 710051, China)

ABSTRACT: Flight path planning for unmanned combat aerial vehicle (UCAV) low-altitude penetration under complex battlefield environment means designing a safe flight path from the starting point to the target one, under the constrains of terrain, enemy and UCAV. The traditional path planning methods take UCAV as a simple particle and simplify the threat space massively, which results in the flight path for UCAV low-altitude penetration out of safety and feasibility, and it is difficult for UCAV in complex battlefield environment to accomplish the combat mission. An integrated quantization way of threat modeling was proposed in the paper. A probability distribution model of threat space was proposed, combining the dynamic variation of UCAV radar cross-section (RCS) and threat netting of air defense system. Traditional sparse A-star (SAS) algorithm was improved according to the UCAV performance constrains such as minimum turning radius, minimum direct distance and ultimate range, achieving the purpose of effectively cutting the search space and improving the search efficiency. The simulation results show that the method can simulate the real complex battlefield and quickly program an optimal flight path for UCAV low-altitude penetration.

KEYWORDS: Unmanned combat aerial vehicle (UCAV); Flight path planning; Complex battlefield environment; Improved sparse A-star algorithm

1 引言

近二十年来的几次局部战争实践,证实了无人作战飞机 (UCAV) 在保持战场优势中的重要作用和地位,世界各军事大国也越来越重视对 UCAV 相关技术的研究[1]。其中, UCAV 低空突防作战航迹规划已成为提高 UCAV 在复杂战场环境下作战效能和作战自主性的关键技术,它的目的主要

基金项目: 国家空管科研课题(GKG201410005); 省部级自然科学基金(2015JM7364)

收稿日期: 2015-12-31 修回日期: 2016-01-27

是最大限度利用地形和敌情信息,综合考虑作战任务、威胁分布、机动性能、燃油限制等约束条件,为 UCAV 设计出从起始点到目标点的安全、可飞航路,达到突破敌方防空配系的目的[2]。

当前 国内外学者对低空突防航迹规划方法进行了大量研究 多集中在航迹规划算法优化^[3-5] 在线重规划^[6-7]或多无人机多目标点规划^[8-9]等方面 通常省略对 UCAV 的运动学分析 .也较少对 UCAV 遂行作战任务的复杂威胁空间进行精确描述 .或是在构建威胁空间的基础上所使用算法不能保证航迹规划算法的搜索效率^[10] .造成了复杂战场环境下物

— 123 —

理航迹的可飞性和快速性不理想。

本文针对复杂战场环境下 UCAV 低空突防作战航迹规划问题的实际 在综合考虑地形和敌情信息的基础上对威胁空间进行了精确建模。考虑 UCAV 动态 RCS 和防空系统联网威胁 引入物理学中的势场理论对威胁空间进行量化 构造了基于势函数的威胁概率分布模型 ,并将 UCAV 最小转弯半径、最小直飞距离和最大航程等飞行性能约束融入到算法中 提出一种改进稀疏 A* 算法 ,有效裁剪搜索空间 ,提高搜索效率 ,使得规划出的低空突防航迹能够满足复杂战场环境航迹规划的快速性和完备性要求 ,实现威胁回避、地形回避和地形跟随。

2 模型建立

2.1 UCAV 模型

为解决 UCAV 航迹控制问题 ,并简化计算 ,采用惯性坐标系 在不考虑风速沿坐标轴的分量对 UCAV 产生影响的情况下 建立 UCAV 三自由度运动学模型

$$\begin{cases} dx/dt = v\cos\gamma\cos\psi \\ dy/dt = v\cos\gamma\sin\psi \\ dh/dt = v\sin\gamma \end{cases}$$
 (1)

式中: (x,y,h) 表示 UCAV 在惯性坐标系中的位置; v 为 UCAV 速度; v 为航迹倾角; ψ 为航迹倾角。

UCAV 应时刻满足的机动性能约束条件为

$$\begin{cases} h_{min} \leq h(t) \leq h_{max} \ v_{min} \leq v(t) \leq v_{max} \\ \gamma_{min} \leq \gamma(t) \leq \gamma_{max} \ \psi_{min} \leq \psi(t) \leq \psi_{max} \\ \omega_{min} \leq \omega(t) \leq \omega_{max} \ n \leq n_{max} \end{cases}$$
(2)

式中: n 为 UCAV 承受的法向过载; ω 为 UCAV 滚转角。

2.2 威胁势函数模型

在物理学中,每个电荷会在周围空间形成一个电场,它是电荷间传递相互作用的媒介物质。从能量的角度描述电场,得到的物理量是一个只有大小、没有方向的标量场,这就是电势场。

借鉴上述概念,每一威胁源在其周围都可以产生一个威胁场,用威胁势函数 $p_i(x,y,h)$ 对威胁空间进行量化,即在空间某点(x,y,h),由第 i 个威胁源产生的威胁势为 $p_i(x,y,h)$,从而得到各威胁源的概率分布,且本文规定 $0 \le p_i(x,y,h) \le 1$ 。

2.1.1 雷达探测威胁

影响探测威胁势场强度的主要因素为警戒雷达的目标 发现概率。参考雷达方程 考虑动态 RCS 特性以及 UCAV 与 雷达距离的关系 ,设探测威胁势函数采用下式

$$p_{di} = 1 / [1 + (c_2 R_{di}^4 / \sigma_i)]^{c_1}$$
 (3)

式中: R_d 表示 UCAV 相对于雷达的径向距离; $c_1 \ c_2$ 为雷达模型参数; σ 为目标的雷达截面积(RCS)。

为方便描述无人作战飞机 RCS 特性 ,建立 UCAV 与敌方雷达的相对运动模型。如图 1 所示。

图中 (x_{di} y_{di} h_{di}) 表示敌方雷达在惯性坐标系中的位 — 124 —

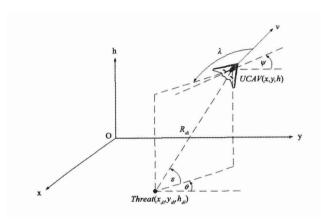


图 1 UCAV 与威胁源相对姿态示意图

置; $\theta \setminus \varepsilon \setminus \lambda$ 分别为雷达的方位角、俯仰角、视线角。 由图可知

$$\begin{cases} \triangle x = x - x_{di}, \triangle y = y - y_{di}, \triangle h = h - h_{di} \\ R_{di} = \sqrt{(\triangle x)^{2} + (\triangle y)^{2} + (\triangle h)^{2}} \\ \theta = \arctan(\triangle x/\triangle y) \\ \varepsilon = \arctan[\triangle h/\sqrt{(\triangle x)^{2} + (\triangle y)^{2}}] \\ \lambda = \theta - \psi + \pi \end{cases}$$
(4)

假定雷达频率固定不变,则在飞行过程中,随着 UCAV 与雷达相对姿态的改变 RCS 会呈现动态变化。依据文献,建立动态 RCS 模型如下

$$\begin{cases} \sigma(\lambda \varepsilon \omega) = \pi a^2 b^2 c^2 / A^2 \\ A = a^2 \sin^2 \lambda_e \cos^2 \omega_e + b^2 \sin^2 \lambda_e \sin^2 \omega_e + c^2 \cos^2 \lambda_e \\ \lambda_e = \arccos(\cos \varepsilon \cos \lambda) \\ \omega_e = \omega - \arctan(\tan \varepsilon / \sin \lambda) \end{cases}$$
 (5)

式中: a、b、c 是特征参数。

2.1.2 地空导弹打击威胁

通过研究地空导弹杀伤区以及杀伤区内杀伤概率的变化规律 假设当 UCAV 距离导弹发射架小于导弹最小攻击距离 或者大于最大攻击距离时 威胁基本为零 故构建类似高斯分布的地空导弹打击威胁势函数

$$\begin{cases} p_{mi} = \exp\{-\Gamma(R_{mi} - R_0)/\delta 1^2\} \\ R_0 = (R_{\min} + R_{\max})/2 \\ \delta = 2(R_{\max} - R_{\min}) \end{cases}$$
 (6)

式中: R_{mi} 表示 UCAV 相对于导弹发射架的径向距离; δ 、 R_0 为中间变量; R_{max} 表示导弹发射架到杀伤区近边界的径向距离。 R_{min} 表示导弹发射架到杀伤区远边界的径向距离。

2.1.3 威胁综合

UCAV 突防过程中,受到来自地面雷达的探测威胁和地空导弹打击威胁。综合前文所述各威胁源的威胁概率分布,考虑防空系统从发现目标到打击目标的一系列作战过程,得到简化后的 UCAV 毁伤概率模型

$$p_{ki} = p_{di}p_{mi} \tag{7}$$

3 突防航迹规划

3.1 航迹约束条件

在低空突防作战中,综合地形跟随、地形回避、威胁回避 (*TF/TA*²) 策略的航迹规划技术,能够使 UCAV 利用雷达地 形遮蔽盲区穿越威胁空间,有效避免地面雷达火力威胁的探测打击。在这一过程中,UCAV 航迹规划面临的主要约束条件包括:

3.1.1 地形环境约束

本文基于数字地图建立地形模型 ,采用安全曲面技术,将数字地图曲面整体抬高 ,得到 UCAV 的安全飞行曲面 H。这就需要对 UCAV 的最小离地间隙 h_{\min} 进行限制。约束条件如下式

$$H \ge h(x, y) + h_{\min} \tag{8}$$

式中: h(x,y) 表示水平投影面上坐标(x,y) 处的高程值。

采用地形区率限制平滑算法。当 UCAV 速度一定时,由于最大法向过载 n_{\max} 的限制,从而限制了纵向地形曲率,提高了地形跟随飞行的安全性,同时也减小了航迹规划的计算发杂性。约束条件如下式

$$\rho \le (n_{\text{max}} - g) / v^2 \tag{9}$$

式中: ρ 为地形曲率限制;g 为重力加速度。

采用地形坡度限制算法,对山峰地形进行平滑处理,要求地形坡度不大于 UCAV 的最大爬升坡度 确保控制指令不超过 UCAV 的爬升性能限制。约束条件如下

$$\theta_{\text{max}} \ge \arctan\left[\left(h_1 - h_2\right)/d\right] \tag{10}$$

式中: θ_{\max} 为 UCAV 最大爬升角; $h_1 \ h_2$ 表示安全区面上相邻空间两点的地形高度 $d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$ 为这两点的水平距离。

3.1.2 防空威胁约束

随着通信技术和计算机技术的发展 ,防空作战指挥体制逐步纳入到联合作战指挥系统之中 ,并与之融合成为一个整体。UCAV 突防所面临的不再是孤立的雷达探测单元和防空火力单元 ,而是可进行目标信息交互与分享的一体化防空作战系统 称之为威胁联网。

在威胁联网情况下,雷达网对某一空间点的联合探测能力不能通过简单叠加各个雷达的探测概率来描述。雷达的联合探测概率与其融合模型有关。本文采用 OR 准则: 如果威胁网中的任意一个威胁源发现目标,则可以认为整个威胁网都感知到目标,使得整个威胁网中的防空武器可以提前进入战斗准备,预判突防 UCAV 航迹,增大了 UCAV 被毁伤的概率。综上,可得威胁网点迹信息融合联合杀伤概率,其计算公式设计为

$$p = 1 - \prod_{i=1}^{n} (1 - p_{ki}) \tag{11}$$

式中: P_{li} 表示第 i 套防空系统对 UCAV 的杀伤概率; n 为任务规划区域内防空系统数量。由上式可以看出,联网情况下的防空作战系统,其联合杀伤概率远远高于单套防空系统的杀伤概率。

3.2 改进稀疏 A* 算法

传统 A* 算法设计简单、容易实现,具有良好的收敛性和时效性。已经成熟运用于二维图形搜索领域。但在解决大范围复杂三维空间航迹规划问题时,随着规划空间增大,节点扩展方向会出现"指数膨胀"现象。目前,国内外研究人员已对 A* 算法做了诸多优化设计。如 Szczerba 等人提出的一种改进 A* 算法,即稀疏 A* 搜索算法(SAS),通过在搜索算法中加入约束条件,避免遍历规划空间中的每个单元,达到有效裁剪搜索空间的目的。

本文借鉴稀疏 A* 搜索算法思想 ,考虑到最小直飞距离、最大航迹偏角和最大航程等 UCAV 性能约束以及飞行的方向性 .在扩展节点时裁剪掉与飞行方向相反或垂直的扩展节点 .既有效较少了搜索空间 ,也提高了规划速度。可搜索空间如图 2 所示。

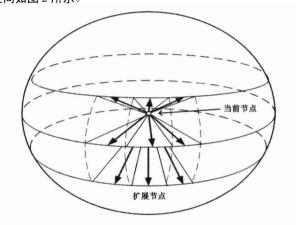


图 2 节点扩展示意图

为解决稀疏 A* 算法在三维空间搜索效率不高的问题,引入前文所述的安全飞行曲面,并通过地形区率限制、地形坡度限制进行平滑处理,以此作为本文三维航迹规划的基础。结合数字地图精度和 UCAV 最小直飞距离,采用自适应变步长技术,以平衡搜索速度与搜索精度,当 UCAV 在无威胁且开阔地带飞行时,选择较大的搜索步长以保证搜索速度,当 UCAV 靠近威胁和目标或者进入复杂地形时,选择较小的搜索步长以提高搜索精度。同时,为简化计算,提高搜索效率 将三维航迹规划分解为水平航迹规划和垂直航迹规划。

3.2.1 水平航迹规划

在满足 UCAV 机动性能约束的情况下 JUCAV 从当前节点到扩展节点的局部可达区域大小通常与搜索步长 l 有关。具体为: 由于最小转弯半径 R_{\min} 的限制 l 越小 ,搜索的节点越多 ,得到航迹的精度越高,但时间和内存消耗较大。当 2/5 $\sqrt{2}R_{\min} < l < 2R_{\min}$ 时,扩展的节点最少,裁剪搜索空间的效果最好,也最有利于提高算法搜索效率。据此,可得到水平航迹节点的搜索策略 如图 3 所示。

其中 最小转弯半径的计算公式为

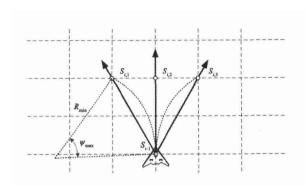


图 3 水平航迹点扩展策略

$$R_{\min} = v^2 / g \sqrt{n_{\max}^2 - 1} \tag{12}$$

最大航迹偏角为

$$\psi_{\text{max}} = 2\arcsin(l/2R_{\text{min}}) \tag{13}$$

3.2.2 垂直航迹规划

垂直航迹规划可以视为水平航迹规划在经过平滑处理后的安全飞行曲面上的投影计算。把上文生成的水平面上的扩展节点 S_i 包括 $S_{i,1}$ $S_{i,2}$ $S_{i,3}$) 投影到安全飞行曲面上得到 S_i 包括 $S_{i,1}$ $S_{i,2}$ $S_{i,3}$) 再通过插值计算得到其高程值。最后以 $S_{i,1}$ $S_{i,2}$ $S_{i,3}$ 作为三维航迹规划的扩展节点进行航迹代价计算 取其中代价最小的点作为后续扩展节点。

3.2.3 UCAV 最大航程

UCAV 的最大航程 L_{\max} 限制了规划航迹的最大允许长度 这是符合实际战场环境的。同时,加入最大航程约束可以有效减少航迹规划中转弯的次数 带约了时间和 UCAV 油耗。最大航程约束如图所示。对当前节点 S_{i-1} 进行扩展得到节点 S_i D_i 是起点 S_0 到扩展点 S_i 的实际航程 L_i 是扩展点 S_i 到目标点 S_g 的直线距离。当且仅当 D_i + L_i \leq L_{\max} 满足时,才能对扩展点 S_i 进行代价计算。

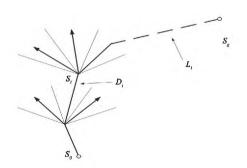


图 4 最大航程约束

4 仿真与分析

为验证威胁空间模型和改进 A* 算法的有效性 ,对 UCAV 低空突防作战航迹规划进行仿真分析。 实验使用 Matlab V8.0 开发 实验 PC 机硬件环境为 CPU: Intel Xeon E5 -2620 ,处理器 ,主频为 2GHz; 内存: DDR3 8GB; 显卡: NVIDIA Quadro 2000。

设置作战区域为边长 200km 的正方形。初始速度 $v_0 =$

240 m/s ,航迹角 $\gamma_0 = 0^\circ$,航向角 $\psi_0 = 50^\circ$; UCAV 机动性能约束: 最小转弯半径 $R_{\text{min}} = 3km$,最小离地高度 $h_{\text{min}} = 50m$,最大航向角 $\psi_{\text{max}} = 70^\circ$,航迹倾角限制 $-30^\circ \le \gamma \le 60^\circ$; 作战区域内共有 5 个敌方防空作战阵地 ,且武器装备型号相同; 雷达模型参数 $c_1 = 1.01$ $c_2 = 1.25 \times 10^{-18}$,理想条件下 RCS模型经验参数与(a b c) = (0.317 0.178 ,1.003)。

采用传统稀疏 A^* 算法和本文改进稀疏 A^* 算法进行仿真对比 设置相同的仿真参数和条件 且都考虑动态 RCS。

结果表明,两种算法都能使 UCAV 在满足自身机动性能约束的情况下有效规避或穿越威胁空间,实现了 UCAV 低空突防的地形跟随策略 到达目标点。

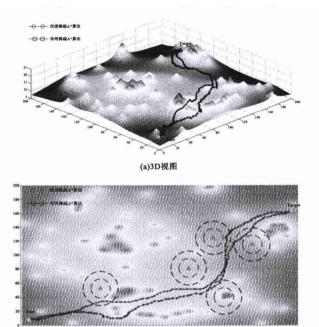


图 5 突防航迹 3D 视图和俯视图

(b)俯视图

但从图中发现,传统稀疏 A* 算法得到的航迹有少量的 冗余度,影响了 UCAV 飞行的稳定性,而经过改进稀疏 A* 算法得到的航迹直线飞行距离较长,且转弯处更为平滑,使得总的航迹长度较短。在航迹规划时间方面,改进稀疏 A* 算法通过更为合理有效地裁剪搜索空间,减少扩展点,提高了搜索效率。

表1 仿真结果比较

 启发因子类型	路径长度(km)	规划时间(s)
传统稀疏 A* 算法	396.7855	87.5613
改进稀疏 A* 算法	377.6951	62.4552

5 结论

本文所得结论如下:

(下转第146页)

— 126 —

的强大模糊描述能力与规则推理能力,并结合神经网络的学习能力建立空战战术决策模型,而且推理出的结果正确率能达到实际使用的预期要求,决策系统能够处理较多的空战态势的决策输入信息。同时具有一定的联想记忆功能和容错能力,提高了战术决策过程中的智能化程度,基本达到了设计效果。在实际操作建模过程中,专家战术决策样本十分重要,一方面需要大量的训练样本,另一方面选取的训练样本结果要覆盖各个战术,才能以较少的样本达到比较好的结果,减少训练的时间提高效率。

下一步研究可以放在飞行训练结束后,通过战术决策系统结合飞行员关键决策点对飞行员在空战过程中所选择的空战战术进行评估,将飞行员所选择的战术与智能化决策系统的战术进行对比,对飞行员战术选择与完成情况可以进行评估。

参考文献:

- [1] 史志富 涨安. 基于模糊 Petri 网的空战战术决策研究 [J]. 系统仿真学报,2007,19(1):63-66.
- [2] 陈军 高晓光. 基于粗糙集理论与贝叶斯网络的超视距空战战 术决策[J]. 系统仿真学报,2009,21(6):1739-1747.
- [3] 黎明 姜长生. 歼击机空战占位的模糊神经网络方法[J]. 火力与指挥控制,2002,27(3):18-20.
- [4] 龚雷 筹. 基于模糊数学和神经网络的目标选择模型研究[J]. 计算机仿真 ,2009 26(6):5-9.

- [5] 林剑,雷英杰.基于直觉模糊神经网络的机动事件检测方法 [J]. 计算机工程与设计,2009,30(6).1458-1460.
- [6] 李锋 孙隆和. 基于模糊神经网络的超视距空战战术决策研究 [J]. 西北工业大学学报 ,2001 ,19(2):317-322.
- [7] K Atanassov. New operations defined over the intuitionistic fuzzy sets [J] . Fuzzy Sets and systems ,1994 61(1):137-142.
- [8] 雷英杰,王宝树. 直觉模糊关系及其合成运算[J]. 系统工程理论与实践,2005 2(2):113-118.
- [9] 路艳丽. 直觉模糊粗糙集理论及其在态势评估中的应用研究 [D]. 空军工程大学,2007.
- [10] 王立新. 模糊系统与模糊控制教程[M]. 北京: 清华大学出版 社,2003.
- [11] 张建民 汪涛. 智能控制原理及应用[M]. 北京: 冶金工业出版社,2003.

[作者简介]

张 戈(1991-) 男(汉族) 山东济南人 硕士研究 生 研究方向为作战训练和效能评估;

寇雅楠(1964-),女(汉族),北京人,副教授,硕士 生导师,研究方向为计算机网络、作战训练和效能评估;

张彬超(1993-) ,男(汉族) ,陕西西安人 ,硕士研究生 ,研究方向为作战训练和效能评估;

张 强(1994-) 男(汉族),河北邯郸人,本科生,研究方向为计算机应用。

(上接第126页)

- 1) 以隐身 UCAV 为研究对象 ,考虑 UCAV 动态 RCS 对 航迹规划的影响 ,建立 UCAV 与敌方雷达的相对运动模型 ,为低空突防航迹规划中 UCAV 面临的雷达探测威胁提供了较为精确的计算方法。
- 2) 对战场环境进行了仿真。所建立的威胁空间综合量 化模型分析了敌方防空系统对突防航迹规划的影响 进而改 进了复杂战场环境下的威胁代价函数。
- 3) 基于对战场环境的仿真分析和 UCAV 飞行性能约束 提出一种改进稀疏 A* 算法用以完成低空突防航迹规划 ,为复杂战场环境下的航迹规划提供了新思路。

仿真结果表明 模型能真实仿真复杂战场环境 在获得较高精度的低空突防航迹的前提下提高 UCAV 航迹规划效率。

参考文献:

- [1] 郑昌文 ,严平 ,丁明跃. 飞行器航迹规划[M]. 北京: 国防工业 出版社 2008.
- [2] 张考,马东立. 军用飞机生存力与隐身设计[M]. 北京: 国防工业出版社 2002.
- [3] 王强 涨安 吴忠杰. 改进人工势场法与模拟退火算法的无人机航路规划[J]. 火力与指挥控制 2014 39(8):70-73.

- [4] M DORIGO. Special section on ant colony optimization [J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation , 2002 6(4):317-319.
- [5] 熊瑜,饶跃东. 基于改进蚁群算法的无人飞行器航迹规划 [J]. 计算机与数字工程,2010,37(7):41-44.
- [6] 税薇 葛艳 韩玉. 基于混合蚁群算法的无人机航路规划[J]. 系统仿真学报,2011 23(3): 574-597.
- [7] 姚远 周兴社 涨凯龙. 基于稀疏 A* 搜索和改进人工势场的 无人机动态航迹规划[J]. 控制理论与应用,2010 27(7):953 -959.
- [8] 孟祥恒 汪社伟 陶军. 基于改进蚁群算法的多无人机航路规划研究[J]. 计算机仿真 ,2008 25(11):56-59.
- [9] 皓晨 甄子洋 龚华军. 雷达威胁环境下的多机协同航迹规划 [J]. 应用科学学报,2014,32(3):287-292.
- [10] 孙静 吴碧 许玉堂. 复杂环境下无人机三维航迹规划方法研究[J]. 弹箭与制导学报 ,2014 ,34(3):170-174.

「作者简介]



周一叶(1991-) 男(汉族) 重庆江津人 硕士研究 生 主要研究领域为空域规划与空中交通管理;

姚登凯(1966-),男(汉族),安徽阜阳人,教授,硕士生导师,主要研究领域为空域管理;

吴奇科(1990-) 男(汉族) 山东烟台人 硕士研究

生 注要研究领域为空域规划与空中流量管理。

— 146 **—**