

# 有限干预下的 UAV 低空突防航迹规划

任 鹏, 高晓光

(西北工业大学电子信息学院, 陕西 西安 710072)

**摘 要:** 低空突防航迹规划是实现有人机和无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)编队协同作战的关键技术,针对目前智能算法在求解低空突防航迹规划问题中存在的不足,充分发挥人脑这个超级智能系统来引导飞行航迹求解过程,将基于角度量编码的小生境伪并行自适应遗传算法(niche adaptive pseudo parallel genetic algorithm, NAPPGA)和人有限干预情况下的智能决策结合起来,提出 UAV 低空突防航迹规划技术。通过大量仿真计算,结果表明,应用该技术预规划和重规划的三维航迹能够有效实现威胁回避、地形回避和地形跟随,满足 UAV 低空突防要求,具有一定的实用性。

**关键词:** 有限干预; 无人机; 低空突防; 航迹规划

**中图分类号:** V 249

**文献标志码:** A

**DOI:**10.3969/j.issn.1001-506X.2014.04.12

## Human intervention flight path planning for UAV low-altitude penetration

REN Peng, GAO Xiao-guang

(School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** The flight path planning for unmanned aerial vehicle (UAV) low-altitude penetration is a key technology for achieving manned and unmanned aerial vehicles cooperative combat. The technique of human intervention flight path planning for UAV low-altitude penetration against several limitations of the existing intelligent algorithms is proposed. It makes full use of the human brain to guide the solution procedures of the flight path planning, combining the niche adaptive pseudo parallel genetic algorithm (NAPPGA) based on angle codes and the intelligent decision with human intervention. A lot of simulation studies show that the solving off-line and on-line three-dimensional flight paths by this technique can meet the requirements for UAV low-altitude penetration to realize efficient implementation of threat avoidance, terrain avoidance and terrain following. This method has a certain practicality.

**Keywords:** human intervention; unmanned aerial vehicle (UAV); low-altitude penetration; flight path planning

## 0 引 言

在综合防空体系日益完善的现代战争中,战场环境异常复杂辽阔,有人飞机和无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)编队协同作战是能够实现有效突防的一种全新作战模式<sup>[1-6]</sup>,其核心是要充分利用人的智慧和综合判断能力指挥 UAV 深入敌方阵地执行高风险的侦察、监视和打击任务<sup>[7-10]</sup>。其中,UAV 低空突防航迹规划技术显得至关重要,但目前 UAV 智能化程度还不是很,尤其在利用地形遮挡和防空系统盲区作掩护进行低空突防时,搜索空间巨大、实时性强、复杂程度高、约束条件众多且模糊性大,应用现有的智能算法(如:遗传算法、蚁群算法、A\* 算法等)求解效率低下、实时性差、容易陷入局部最优解,无法保证飞行

航迹的最优性和可达性。目前,相关文献针对航迹规划问题采用了多种改进智能算法:文献[11]采用改进遗传算法,文献[12]采用基于小生境遗传算法,文献[13]采用基于小生境伪并行遗传算法等,但这些主要是针对二维航迹规划的;文献[14]将三维航路分解为水平方向和垂直方向的两个航路,并分别应用改进的遗传算法进行规划仿真;文献[15]采用改进遗传算法在安全飞行曲面上规划出三维飞行路径,用极坐标编码表示飞行航迹,需要另外考虑 UAV 飞行性能约束;文献[16]采用基于贝叶斯算法的三维飞行航迹规划方法,但航迹编码仅有 27 种组合。

本文针对目前改进智能算法在实际应用中的不足,结合协同作战的特点和 UAV 自身性能,综合地形、敌情等信息,充分利用人的智慧和经验,提出了 UAV 低空突防航迹

收稿日期:2013-07-15; 修回日期:2013-11-26; 网络优先出版日期:2014-03-12。

网络优先出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2422.TN.20140312.0950.012.html>

基金项目:国家自然科学基金青年项目(61305133);高等学校博士学科点专项科研基金(20116102110026)资助课题

规划技术,其本质是一个在有人有限干预情况下的智能决策过程,具有实时性、重规划和易操作等特点。该技术主要包括两个方面:

(1) 对现有智能算法进行改进,提出一种基于角度量编码的小生境伪并行自适应遗传算法(niche adaptive pseudo parallel genetic algorithm, NAPPGA),该算法利用角度量变长度基因编码表示飞行航迹,将 UAV 自身飞行性能约束融入到算法中加以解决,保证求解的物理航迹都是可飞的;综合利用多项改进措施提高遗传算法进化效率、防止“早熟”。通过大量仿真计算,结果表明,基于角度量编码的 NAPPGA 算法能够规划出从起点到终点 UAV 生存概率大、满足多种约束条件的三维飞行航迹,并且规划出的航迹能够实现威胁回避、地形回避和地形跟随。

(2) 人脑是一个超级智能系统,具有实时推理、决策、学习和记忆等功能,能够应对多种复杂环境,利用人的智慧和综合判断能力,可对规划出的航迹进行选择、判断,选出最切实可行的航迹;当发现突发威胁时,可人为设置重规划航迹的起始、终止点,通过仿真计算、分析,得出的重规划航迹能有效躲避威胁,具有一定的实时性,能够满足 UAV 低空突防要求。

## 1 UAV 低空突防航迹规划技术

### 1.1 飞行航迹表示方式的改进

本文利用基于角度量的变长度基因编码表示飞行航迹,航迹点序列中的第  $i$  段航迹点  $(x_i, y_i, z_i)$  可以用  $(l_i, \varphi_i, \mu_i)$  表示,  $l_i$  是第  $i$  段航迹段的长度,  $\mu_i, \varphi_i$  是第  $i$  段航迹倾角和偏航角,如图 1 所示,其中  $O$ -XYZ 为第  $i$  段航迹的机体坐标系,  $OY'$  为第  $i+1$  段航迹的机体纵轴。采用这种角度量表示飞行航迹的方式能够真实反映出求解问题的实质,相对于常用的直角坐标或极坐标表示飞行航迹具有以下优点:

(1) 能够将 UAV 自身飞行性能约束条件融入到算法中加以解决,生成的飞行航迹能较容易地满足 UAV 自身性能的机动性要求,不会出现难以飞行的路径;

(2) 表示飞行航迹的角度量都是 UAV 的飞行控制量,用它来表示航迹节点,便于飞控系统实现自动驾驶,获得所要求的最佳飞行性能。

(3) 能大大减少进化计算的搜索空间,提高进化效率。

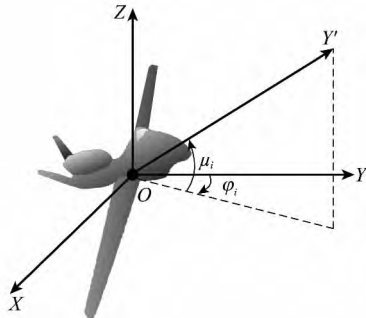


图 1 航迹倾角和偏航角示意图

将三维空间参数  $(l_i, \varphi_i, \mu_i)$  转换成由基因按一定结构组成的染色体,从起点到终点的飞行航迹用一条长度不定的基因染色体来表示,如下:  $g_1, g_2, \dots, g_{i-1}, g_i, \dots, g_{n-1}$  表示一条飞行航迹染色体的基因串,基因位  $g_i$  取  $[0, 127]$  之间的整数,用来表示在一个等间距航迹段  $\Delta l$  内  $(l_i = \Delta l)$ ,相邻航迹段航迹偏航角  $\varphi_i$  和俯仰角  $\mu_i$  变化情况的组合,整条飞行航迹共分成等间距的  $n$  段,  $n$  根据实际的飞行航迹节点数确定,不同的飞行航迹所表示的染色体基因串的位数  $n$  各不相同。根据 UAV 自身性能的约束,航迹偏航角和俯仰角的大小由 UAV 的过载来确定,  $\varphi_i \leq \pm 70^\circ$ ,  $\mu_i \leq \pm 30^\circ$ ,以  $10^\circ$  为一个间隔,  $\mu_i'$  的取值为  $\{0, \pm 1, \pm 2, \pm 3\}$ ,  $\varphi_i'$  的取值为  $\{0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm 7\}$ ,  $\mu_i', \varphi_i'$  分别用 3 位、4 位二进制表示,最高位为符号位,“1”为负,“0”为正,而  $[0, 127]$  之间的整数可以用一个 7 位二进制编码表示,所以  $g_i$  能够表示  $\mu_i', \varphi_i'$  的组合,进而能够表示出俯仰角  $\mu_i$  和偏航角  $\varphi_i$  变化情况的组合,如图 2 所示。

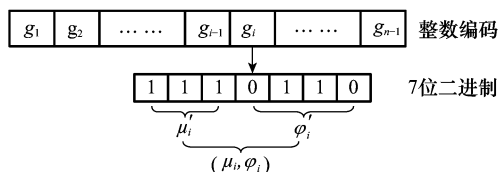


图 2 染色体基因编码

例如,当  $g_i = 118$ ,转换成二进制编码为“1110110”,分解后,  $\mu_i' = 111$ ,  $\varphi_i' = 0110$ ,可得  $\mu_i = -30^\circ$ ,  $\varphi_i = 60^\circ$ ,表示第  $i$  段飞行航迹向下倾斜  $30^\circ$ ,逆时针方向偏转  $60^\circ$ 。

### 1.2 NAPPGA 算法

遗传算法(genetic algorithm, GA)本身不受结构模型、约束条件、参数初值等因素限制,使用方便,但搜索空间大,其单一的群体更新方式很难保证进化过程中种群的多样性和收敛性,其运行过程和实现方法在本质上是串行的,群体的局部搜索能力有限,容易造成早熟,并不适用于实时航迹规划。而目前的改进遗传算法多是针对遗传操作算子、编码方式或适应度函数进行的某一项改进,或是利用量子、混沌等理论及小生境技术与遗传算法相结合来提高算法的全局搜索能力,采取综合多样化改进措施的方法较少,本文基于进化算法原理,应用多项改进措施,具体如下:

(1) 利用多种群方式增加种群的多样性,并通过伪并行计算提高算法的运行速度。

应用该算法求解航迹时,在解空间中用多个子种群代替单一一种群进行搜索,子种群按照设定的模式分别进行独立进化,各自探询不同的解域,由于并行进化操作是在单台计算机上执行,所以是伪并行的。在适当的时候,种群之间按照一定的迁移策略交换子种群中的个体,然后汇集在一起寻求整体最优解,这样,种群的多样性得以丰富和保持,还能提高算法的运算速度。

(2) 采用小生境技术防止种群收敛于局部最优解,并利用自适应遗传算子产生新的种群。

为进一步抑制早熟收敛,提高算法的搜索效率,在伪并行遗传算法划分的子种群中,引入小生境自适应遗传机理,将其中每一代个体划分为若干类,每类中选出适应度较大的个体作为一个类的优秀代表组成新种群,再在新种群

中以及不同种群之间利用自适应交叉和变异算子产生新一代子种群,通过搜索产生更优的个体,引导种群新一轮进化,实现在解空间内对尽可能多的最优解的寻优<sup>[13]</sup>,NAPPGA算法流程如图3所示。

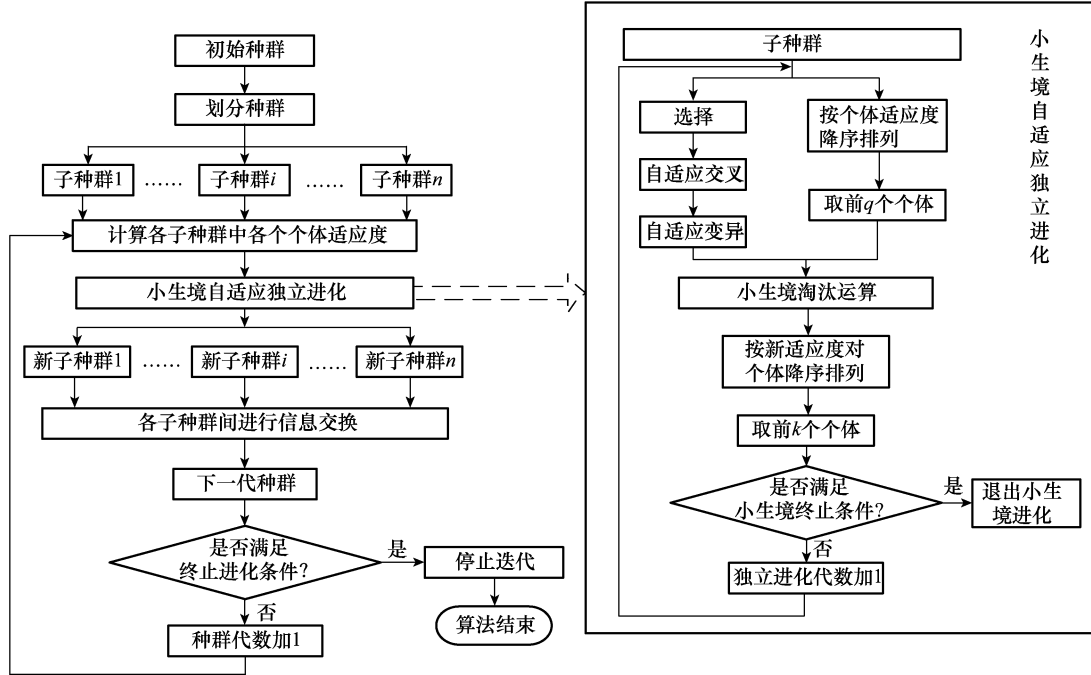


图3 NAPPGA算法流程

### (3) 利用先验信息产生初始种群。

初始种群的构造与收敛速度关系很大,本文由于采用了基于角度的编码方式,因此能够根据UAV的飞行性能约束和已知地形信息,利用先验知识产生初始种群,再考虑起点和终点的相对位置,将初始种群限定在一定合理范围内,从而避免产生大量环路,减少进化计算的搜索空间,提高进化效率,使算法更为有效、快速地规划出满足要求的可行路径。

### 1.3 有限干预情况下的智能决策过程

目前UAV智能化程度并不是很高,低空突防航迹规划问题实时性强、复杂程度高、约束条件众多且模糊性大,一般无法获得精确的数学模型,求解的复杂性及难度都非常高,全部依赖智能算法自动求解,很难快速高效获得贴近实际的满意解,且无法应对突发情况。因此,在综合应用改进智能算法的基础上,可利用人的智慧和经验来引导UAV在不同情况下航迹规划的求解过程,具体体现在以下两个方面:

(1) 对应用改进智能算法预规划出三维飞行航迹进行选择、判断,结合实际情况,选出最切实可行的飞行航迹;同时,为提高预规划航迹的求解速度,可根据飞行航迹的计算规模和时间要求,利用人的智慧和经验设置少量导航点,利用改进智能算法分段并行计算,求解出贴近实际、切实可行的飞行航迹。

(2) 当面对突发威胁时,利用人的智慧和经验快速设置重规划航迹的起始、终止点,保证UAV及时、有效地躲避威胁;当重规划航迹点较多、计算时间较长,难以满足在线规划的实时性和可行性时,在起始、终止点之间设置少量导航点,利用改进智能算法分段并行快速计算重规划航迹,也可以根据飞行的实际情况和实时探测的威胁信息,在能够有效躲避威胁的前提下,分段串行计算重规划可行航迹。

## 2 综合防空系统的威胁描述

UAV进行低空突防,必须有效躲避敌方综合防空系统(integrated air defense system, IADS)威胁。对于多雷达、多武器联网分布的IADS,量化计算是非常复杂的,一般很难求得解析解<sup>[17]</sup>。本文在不影响航迹规划算法的前提下,做了一些必要简化,UAV在空间第*i*段航迹处受到的威胁指数 $f_{TAi-k}$ 主要与UAV离各个威胁源间的距离密切相关, $f_{TAi-k}$ 为第*k*个威胁源对第*i*段航迹的威胁指数,计算如下:

$$f_{TAi-k} = \begin{cases} 0, & d_{i-k}^1 > d_{Rmax-k} \\ \frac{\alpha_k \cdot d_{Rmax-k}^4}{d_{i-k}^4 + d_{Rmax-k}^4}, & d_{i-k}^1 \leq d_{Rmax-k} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $d_{Rmax-k}$ 为第*k*个威胁源的最大作用距离; $d_{i-k}^1$ 为UAV

在空间中第  $i$  段航迹与第  $k$  个威胁源之间的距离;  $\alpha_k$  为一乘数因子, 当第  $k$  个威胁源没有收到预警信息时,  $\alpha_k = 1$ , 否则,  $\alpha_k > 1$ 。假设共有  $m$  个威胁源,  $f_{TAi}$  的具体计算如下:

$$f_{TAi} = \sum_{k=1}^m f_{TAi,k} \quad (2)$$

这种简化并不影响航迹规划算法本身的研究, 且对航迹规划问题来说便于计算, 具有一定的实际意义。

### 3 航迹评价

UAV 航迹规划的目的是在满足飞机自身性能约束(已在航迹编码中设计)和执行具体飞行任务约束的前提下能够有效避开敌方探测攻击及影响飞行的险要地形等不利因素, 生成经济可行的飞行航迹。

#### 3.1 代价函数

对于表示航迹的第  $j$  条染色体, 代价函数为

$$C_j = \sum_{i=1}^n (\omega_L \cdot l_i + \omega_H \cdot h_i + \omega_{TA} \cdot f_{TAi}) + \omega_d \cdot d(n) \quad (3)$$

式中,  $l_i$  为第  $i$  段航迹段的长度, 主要用于控制航迹长度, 以减少 UAV 在敌控区的飞行时间, 降低其危险程度;  $h_i$  为第  $i$  段航迹段的海拔高度, 通过降低航迹的平均高度, 可以进行有效的地形跟随, 以减少被敌方发现和摧毁的概率;  $f_{TAi}$  为第  $i$  段航迹段的威胁指数, 用来限制 UAV 与地面威胁的距离, 使得 UAV 尽量在威胁区域外飞行;  $n$  为第  $j$  条染色体的长度;  $\omega_L$ 、 $\omega_H$ 、 $\omega_{TA}$  和  $\omega_d$  分别为航迹长度、飞行高度、威胁程度及 UAV 距目标点距离的权值;  $d(n)$  为启发函数, 通过它引导算法向着终点搜索。

#### 3.2 航迹任务约束

##### (1) 航迹距离约束

设最大航程为  $L_{\max}$ , 则该约束可写成

$$\sum_{i=1}^N l_i \leq L_{\max} \quad (4)$$

##### (2) 飞行高度限制

要使 UAV 在避免碰撞的前提下, 实现地形跟随。飞行航迹上任意一点飞行高度  $z_i$  与该点飞行航迹相对应地形高度为  $H_i(x_i, y_i)$ , 离地面最低安全飞行高度为  $H_0$ 、最大安全飞行高度为  $H_{\max}$ , 则该约束可表示为

$$H_i(x_i, y_i) + H_{\max} \geq z_i \geq H_i(x_i, y_i) + H_0 \quad (5)$$

#### 3.3 评价函数

航迹评价函数要综合考虑航迹代价及其约束, 即在满足航迹任务约束式(4)和式(5)的同时, 将式(3)进行归一化处理, 取其最小值。

### 4 仿真计算

利用地形高程数据, 生成  $80 \text{ km} \times 80 \text{ km}$  的三维地形, 在该区域内, UAV 从起点  $S(x_0, y_0, z_0) = (0 \text{ m}, 0 \text{ m}, 250 \text{ m})$  处

飞到终点  $G(x_{\text{goal}}, y_{\text{goal}}, z_{\text{goal}}) = (76 \text{ 000 m}, 76 \text{ 000 m}, 250 \text{ m})$  处, 6 个已知威胁源, 威胁作用距离  $d_{R\max} = 12 \text{ 000 m}$ , 1 个突发威胁源, 威胁作用距离  $d_{iR\max} = 6 \text{ 000 m}$ , 地形信息已知。飞行速度  $v = 50 \text{ m/s}$  (保持恒定), 最小航迹长度  $l_{\min} = 400 \text{ m}$ , 航迹最大偏航角  $\varphi = \pm 70^\circ$ 、航迹最大倾角  $\mu = \pm 30^\circ$ , 最大航迹长度  $L_{\max} = 200 \text{ km}$ , 最低安全飞行高度  $H_0 = 20 \text{ m}$ , 最大安全飞行高度  $H_{\max} = 100 \text{ m}$ , 种群大小为 80, 预规划最大进化迭代次数为 300, 重规划最大进化迭代次数为 50。

通过大量仿真, 统计实验数据, 得到不同算法的性能对比, 如表 1 所示。采用基于角度量编码的 NAPPGA 算法收敛到全局最优解和次优解所需平均收敛代数分别为 87 代和 158 代, 平均耗时分别为 51.4 s 和 92.7 s, 较其他算法性能有较大改进。

表 1 不同算法的性能对比

算法	平均收敛代数	平均耗时/s	备注
基本遗传算法			无解
小生境自适应遗传算法	1 136	912	最优解
小生境伪并行遗传算法	725	556	最优解
基于角度量编码的 NAPPGA 算法	87	51.4	最优解
	158	92.7	次优解

#### 4.1 预规划航迹仿真计算

预规划航迹仿真计算结果如下列图形所示: 图 4 为规划航迹最优解和次优解进化过程中航迹代价变化, 从图 4 可以看出, 应用 NAPPGA 算法能够保证种群在进化过程中的多样性和收敛性, 实现在解空间内对可行解的寻优; 图 5 是飞行航迹的高程图, 图 5 中 6 个形状和大小相等的空心圆表示 6 个威胁源的作用范围, 两条航迹交汇处的实心圆点为目标点, 从图 5 中可以看出, NAPPGA 算法充分利用了各个威胁源之间的盲区, 使得预规划航迹成功地回避了威胁; 图 6 是飞行航迹剖面图, 横坐标  $d_{xy}$  为飞行航迹在水平面内的投影,  $Z$  为飞行高度, 从图 6 中可以看出, 预规划的飞行航迹实现了地形回避和地形跟随; 图 7 是飞行航迹三维图, 从图 7 中可以更加全面、清晰地看出飞行航迹能够实现地形回避和地形跟随。同时, 该算法本身通过最大航迹倾角和偏航角的限制满足了 UAV 自身飞行性能的要求, 通过航迹距离和飞行高度的约束使 UAV 完成飞行任务成为可能, UAV 按此航线飞行能够有效地利用地形掩护避开各种威胁。因此, 应用基于角度量编码的 NAPPGA 算法在已知地形和威胁信息的情况下, 预规划的三维飞行航迹能够满足 UAV 低空突防的要求, 是具有可飞性和可操作性的, 是完全可行和有效的。然后, 再利用人的智慧和综合判断能力, 根据实际作战任务需求, 对规划出的航迹进行选择、判断, 选出一条最切实可行的航迹作为最终的实际飞行规划航迹。

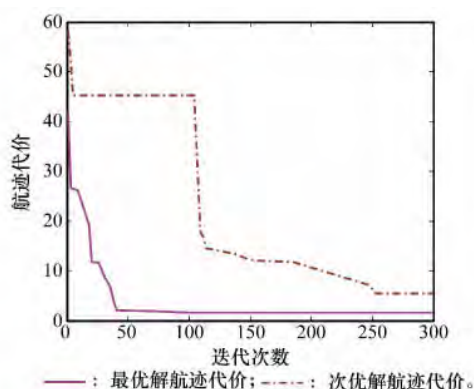


图4 种群进化过程中航迹代价的变化

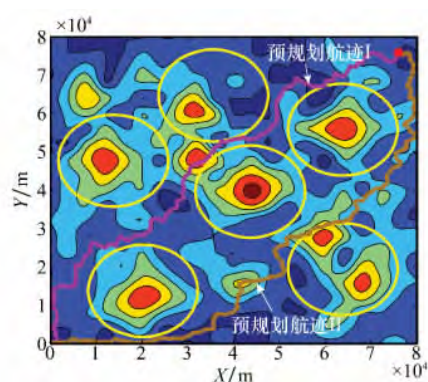


图5 预规划航迹高程图

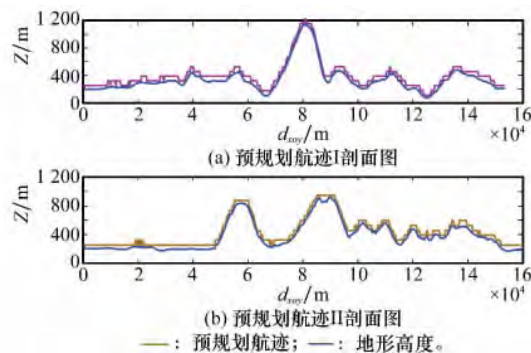


图6 预规划航迹剖面图

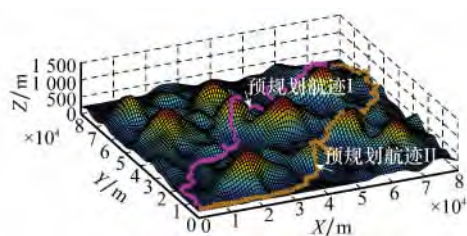


图7 预规划航迹三维图

#### 4.2 有限干预下重规划航迹仿真计算

选择预规划航迹 I 作为飞行航迹。图 8 为重规划航迹高程图,由于战场环境的动态不确定性,当 UAV 沿着预规划航迹 I 前进到一定距离时,发现前方航迹被突发威胁所

覆盖(图中粗空心圆表示突发威胁源的作用范围),造成预规划航迹 I 不可飞,需要对预规划航迹 I 进行重规划。此时,利用人的智慧和经验,根据实际情况,快速设置重规划航迹的起始点(预规划航迹 I 上且 UAV 尚未到达的点)和终止点(分别在预规划航迹 I 或 II 上且在突发威胁覆盖外的点),应用改进智能算法重规划飞行航迹。从图 8 中可以看出,重规划的两条飞行航迹都能够成功躲避突发威胁,然后再根据实际作战任务需求,对规划出的航迹进行选择、判断,人为选择出实际飞行航迹。如果发现威胁较晚,且对航迹计算时间要求苛刻的情况下,人为设置少量导航点,应用改进智能算法分段并行快速计算重规划航迹,保证 UAV 能及时、有效地躲避威胁。图 9 和图 10 分别为重规划航迹的剖面图和三维图,从图中可以看出重规划出的分段航迹能够实现地形回避和地形跟随,满足 UAV 低空突防要求。

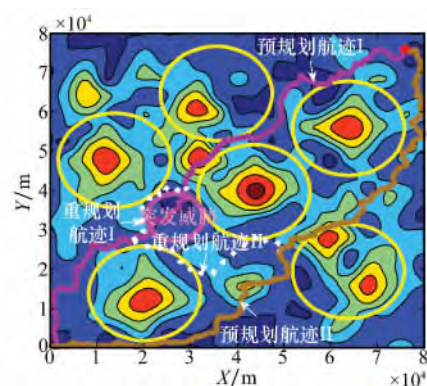


图8 重规划航迹高程图

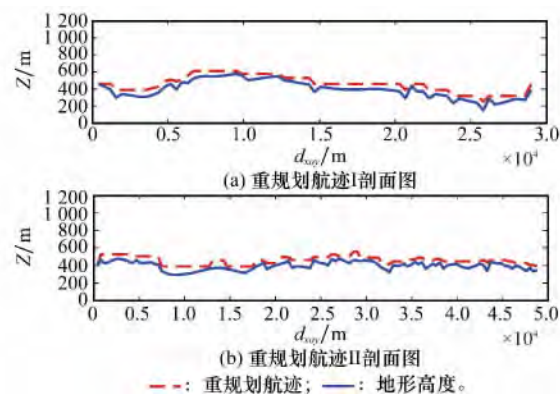


图9 重规划航迹剖面图

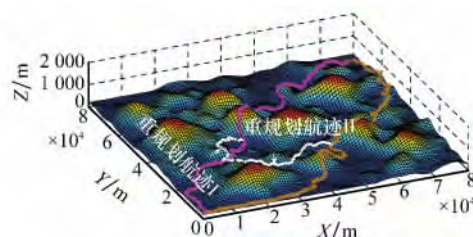


图10 重规划航迹三维图

## 5 结 论

UAV 低空突防的首要环节是在复杂环境中搜索出能够满足其飞行性能和约束条件的三维航迹,本文针对 UAV 低空突防航迹规划问题,在有人机和 UAV 编队协同作战的大背景下,提出了有限干预下的 UAV 低空突防航迹规划技术和实现方法,并通过大量仿真计算得出以下结论:

(1) 基于 NAPPGA 改进智能算法在已知地形和威胁信息的情况下,预规划的三维飞行航迹能够满足 UAV 低空突防的要求。

(2) 在 NAPPGA 算法中提出的基于角度量的变长度基因编码方式,能够将 UAV 自身飞行性能约束条件融入到算法中加以解决,生成的飞行航迹能较容易地满足 UAV 机动性要求,不会出现难以飞行的路径,便于飞控系统实现自动驾驶。

(3) 有限干预情况下的智能决策,能够充分发挥人脑这个超级智能系统来引导航迹求解过程,而且重规划航迹能够满足求解的实时性和可行性要求,快速高效地获得切实可行的飞行航迹。

综上,有限干预下的 UAV 低空突防航迹规划技术是可行的和有效的,而且非常贴近实战,易操作,具有一定的实用性。可见,在目前综合防空体系日益完善,UAV 智能化程度还不是很高的情况下,有人机和 UAV 编队协同作战是能够实现有效突防的一种全新的、可行的作战模式,是值得深入研究和推广应用的。

## 参考文献:

- [1] Cummings M, Rzezinski A B. Global vs. local decision support for multiple independent UAV schedule management[J]. *International Journal of Applied Decision*, 2010, 3(3): 188-205.
- [2] Savla K, Temple T, Frazzoli E. Human-in-the-loop vehicle routing policies for dynamic environments[C]// *Proc. of the 47th IEEE Conference on Decision Control*, 2008: 1145-1150.
- [3] Donald W. Manned/unmanned common architecture program (MCAP): a review [C]// *Proc. of the 22nd Digital Avionics Systems Conference*, 2003: 1-7.
- [4] Valenti M, Schouwenaars T, Kuwata Y, et al. Implementation of a manned vehicle-UAV mission system[C]// *Proc. of the AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit*, 2004.
- [5] Schouwenaars T, Valenti M, Feron E, et al. Linear programming and language processing for human/unmanned aerial vehicle team missions[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2006, 29(2): 303-313.
- [6] Royce L. Mission battle management system fighter engagement manager concept[C]// *Proc. of the AIAA International Air and Space Symposium and Exposition: the Next 100 Years*, 2003.
- [7] Murray C C, Park W. Incorporating human factor considerations in unmanned aerial vehicle routing[J]. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Systems*, 2013, 43(4): 860-874.
- [8] Myung H, James K, Takeo K. Efficient two-phase 3D motion planning for small fixed wing UAVs[C]// *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2007: 1035-1041.
- [9] Chingtham T S, Sahoo G, Ghose M K. An unmanned aerial vehicle as human-assistant robotics system[C]// *Proc. of the IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research*, 2010: 1-6.
- [10] Ren P, Gao X G. Operational effectiveness analyses of AH/UAV cooperative surveillance against mission[J]. *Flight Dynamics*, 2011, 29(3): 92-96. (任鹏, 高晓光. 基于 AH/UAV 编队协同侦察打击的作战效能研究[J]. 飞行力学, 2011, 29(3): 92-96.)
- [11] Zheng R, Feng Z M, Lu M Q. Application of particle genetic algorithm to path planning of unmanned aerial vehicle[J]. *Computer Simulation*, 2011, 28(6): 88-91, 152. (郑锐, 冯振明, 陆明泉. 基于遗传算法的无人机航路规划优化研究[J]. 计算机仿真, 2011, 28(6): 88-91, 152.)
- [12] Fu X W, Gao X G, Kuang A X. Flight path planning based on niche genetic algorithm[J]. *Journal of System Simulation*, 2008, 20(21): 5940-5943, 5952.
- [13] Shen Z H, Zhao Y K, Wang X R. Niche pseudo-parallel genetic algorithms for path optimization of autonomous robot[J]. *Modern Electronics Technique*, 2005, 206(15): 85-87, 90. (沈志华, 赵英凯, 王晓荣. 基于小生境伪并行遗传算法的自主机器人路径优化[J]. 现代电子技术, 2005, 206(15): 85-87, 90.)
- [14] Fan H D, Ye W, Ma X L. 3-D route planning simulation oriented to low altitude penetration[J]. *Computer Simulation*, 2004, 21(2): 35-37. (范洪达, 叶文, 马向玲. 面向低空突防的三维航路规划仿真研究[J]. 计算机仿真, 2004, 21(2): 35-37.)
- [15] Li X, Wei R X, Zhou J, et al. A three dimensional path planning for unmanned air vehicle based on improved genetic algorithm[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2010, 28(3): 343-348. (李霞, 魏瑞轩, 周军, 等. 基于改进遗传算法的无人飞行器三维路径规划[J]. 西北工业大学学报, 2010, 28(3): 343-348.)
- [16] Fu X W, Gao X G. 3D flight path planning based on Bayesian optimization algorithm[J]. *Acta Armamentarii*, 2007, 28(11): 1340-1345. (符小卫, 高晓光. 基于贝叶斯优化的三维飞行航迹规划[J]. 兵工学报, 2007, 28(11): 1340-1345.)
- [17] Novy M C. Air vehicle optimal trajectory for minimization of radar exposure, ADA390154[R]. Wright-Patterson Air Force Base: Air Force Institute of Technology, 2001.

## 作者简介:

任 鹏(1979-),男,讲师,博士研究生,主要研究方向为有/无人机协同任务/路径规划。

E-mail: r122p@163.com

高晓光(1957-),女,教授,博士,主要研究方向为航空武器系统效能分析与智能信息处理。

E-mail: xggao@nwpu.edu.cn