



现代防御技术
Modern Defence Technology
ISSN 1009-086X, CN 11-3019/TJ

《现代防御技术》网络首发论文

题目: 一种基于安全飞行空间的 UAV 低空突防改进模型
作者: 杨萍, 闫少强, 汪江鹏, 吴丰轩, 阎哲, 燕松
收稿日期: 2022-03-01
网络首发日期: 2022-09-06
引用格式: 杨萍, 闫少强, 汪江鹏, 吴丰轩, 阎哲, 燕松. 一种基于安全飞行空间的 UAV 低空突防改进模型[J/OL]. 现代防御技术.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3019.TJ.20220906.1400.002.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式 (包括网络呈现版式) 排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊 (光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊 (网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊 (网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物 (ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

一种基于安全飞行空间的 UAV 低空突防改进模型

杨萍 闫少强 汪江鹏 吴丰轩 阎哲 燕松

(火箭军工程大学, 陕西 西安, 710025)

摘要：为解决对地形预处理后缺少与无人机(UAV)自身特性相结合的问题，在本文中提出了一种基于安全飞行空间的 UAV 低空突防改进模型。构建了一个可安全飞行空间，减少地形约束条件的同时保证无人机低空突防时的安全飞行。然后结合无人机自身特性对航迹规划模型进行了改进，增加无人机飞行过程稳定性和规划的航迹平滑性。最后通过粒子群(PSO)算法在复杂的高程地图中对改进前、后两种模型进行了仿真，验证了改进后模型的合理性和有效性。

关键词：低空突防、安全飞行空间、航迹规划、模型改进、平滑代价

doi: 10. 3969/j. issn.1009-086x. 2021. 05. 001

中图分类号：TP301.6 文献标志码：A

An improved UAV low altitude penetration model based on safe flight space

YANG Ping, YAN Shaoqiang, WANG Jiangpeng, WU Fengxuan, YAN Zhe, YAN Song

(Rocket Force University of Engineering, Xi'an, 710025, China)

Abstract: This paper presents an improved UAV low altitude penetration model based on safe flight space, which solves the problem of lack of combination with the characteristics of UAV after terrain preprocessing. A safe flight space is constructed to reduce terrain constraints and ensure the safe flight of UAV in low altitude penetration. Then, combined with the characteristics of UAV, the track planning model is improved to increase the stability of UAV flight process and the smoothness of planned track. Finally, PSO algorithm is used to simulate the two models before and after the improvement in complex elevation map to verify the rationality and effectiveness of the improved model.

Keywords: low altitude penetration, safe flight space, track planning, model improvement, smoothing cost

0 引言

无人机低空突防技术是无人机利用由于地形起伏和地球曲率而造成的低空雷达等防空体系的盲区，充分发挥飞行器的机动能力，利用地形做掩护，有效地回避各种威胁，进而提高飞行器的生存能力和突防成功率的一种技术^[1]。低空突防的难度与地形的复杂程度有很大的关系，且无人机在地形起伏变化较大的环境中很容易发生撞地事件^[2-3]。通过对地形进行预处理，减少无人机飞行性能的约束条件有助于快速生成满足安全性、可飞性要求的航迹^[4-6]。然而，随着地面雷达和防空体系武器性能的不断加强，无人机在空中受到的威胁日益加大，

低空突防航机规划已成为无人机安全飞行作战的关键技术^[7]。

大量学者对低空突防航迹规划进行了大量细致的研究。文献[8]利用坡度限制方法和双线性插值方法对地形进行处理得到了更安全和精确的地形，保证了飞机的突防安全性；文献[9]提出了一种改进型的曲率限制平滑算法，使得在平滑后的地形上可以得到安全可靠的航迹；文献[10]运用二维三次卷积插值法对地形进行插值处理，使得无人机能紧贴地面实现低突防。以上的研究在一定程度上解决了无人机的性能约束，但是对地形进行平滑处理会在理论上对原始地形模型造成一定破坏，导致在实际飞行中仍存在撞地的风险；并且没有结合地

收稿日期：2022-03-01 修回日期：2022-07-05

基金项目：国家自然科学基金项目(61703411)

第一作者简介：杨萍 (1968—)，四川绵阳，女，博士，教授。主要研究方向是作战任务规划、建模仿真。

通信地址：710025 陕西省西安市灞桥区洪庆街道同心路2号 E-mail: yyp_ing@163.com.

形预处理后对规划航迹的数学模型进行改进,与无人机自身结合不够紧密,仍然存在环境模型与规划航迹冲突的可能。

因此,在本文中提出了一种基于安全飞行空间的 UAV 低空突防改进模型,构建了一个可安全飞行空间,减少地形约束条件的同时保证无人机低空突防时的安全飞行。然后结合无人机自身特性对航迹规划模型进行了改进,利用偏转角约束代替最大爬升角和最大转弯角约束,并且加入了平滑代价和高度变化代价,以期增加无人机飞行过程稳定性和规划的航迹平滑性。最后通过 PSO 算法在复杂的高程地图对改进前、后两种模型进行了仿真,验证其改进后模型的合理性和有效性。

1 低空突防航迹规划建模

求解无人机的航迹规划问题需要建立合适的适应度函数以及考虑影响航迹质量各类约束^[1],静态全局三维航迹规划模型主要包含代价函数、UAV 本身性能约束。

1.1 飞行航迹代价

在实际作战任务中,UAV 携带的燃料是有限制的,航迹长度的大小可以反映燃油消耗大小,即 UAV 飞行油耗代价可用航迹长度表示为:

$$Cost_l = \sum_{i=1}^{N+1} L_i \quad (1)$$

式中, N 为航迹点个数(不包括起点和终点),则航迹段为 $N+1$, L_i 是第 i 段航迹长度。

1.2 飞行高度代价

低空飞行有利于发挥地形屏蔽的作用,减少被雷达探测的风险。所以要求 UAV 在执行任务过程中尽可能以低的高度飞行,则飞行高度代价可表示为:

$$Cost_h = \sum_{i=1}^N z_i \quad (2)$$

式中, z_i 是第 i 个航迹点对应的海拔高度。

1.3 综合威胁代价

UAV 在执行对地攻击任务时会遭遇敌方的防空系统,其中包括探测雷达、防空高炮、地空导弹等威胁,将上述威胁在三维平面上近似看作一个个圆柱体区域,探测范围或打击范围作为其半径。将当前航迹段 L_i 均分为五段, M 表示综合威胁, k_M 表

示当前第 k 个综合威胁, $d_{k,n}^i$ 表示当前威胁点分别到当前航迹段 L_i 划分的第 n 个均分航段的距离。当前综合威胁 k_M 对航迹段 L_i 的威胁代价可表示为:

$$Cost_{L_i,k_M} = \frac{(P_{L_i}(d_{k,1}^i) + P_{L_i}(d_{k,2}^i) + P_{L_i}(d_{k,3}^i) + P_{L_i}(d_{k,4}^i) + P_{L_i}(d_{k,5}^i))}{5} \quad (3)$$

$$其中 P_{L_i}(d_{k,n}^i) = \begin{cases} 0, d_{k,n}^i > R_k \\ \frac{R_k - d_{k,n}^i}{R_k} \cdot C, d_{k,n}^i \leq R_k \end{cases}, R_k \text{ 表示第 } k$$

个威胁区域的半径, C 为一个很大的常数(等于惩罚系数)。上式可以理解为软约束,是因为上述选取的航迹段为直线航迹段,而非平滑处理后的真实曲线航迹段,其划分 5 段后会出现进入威胁区域的现象。所以航迹的综合威胁代价 $Cost_M$ 可表示为:

$$Cost_M = \sum_{i=1}^{N+1} \sum_{k_M=1}^{n_M} f_{L_i,k_M}。其中 n_M \text{ 为综合威胁的总数。}$$

1.4 最大航迹约束

为确保 UAV 在执行完作战任务后,能够有足够燃油返回基地,假定 UAV 所携带燃油能飞行的最大航程为 L_{max} , 则最大飞行航迹约束为:

$$\sum_{i=1}^{N+1} L_i - L_{max} \leq 0 \quad (4)$$

1.5 最小航迹段约束

无人机在飞行过程中从一个姿态转变为另一个姿态,存在一个稳定的变化过程,这一段稳定的航迹称为最小直线航迹距离 L_{min} , 航迹中任意航迹段满足如下条件:

$$L_{min} - L_i \leq 0 \quad (5)$$

1.6 飞行高度约束

在 UAV 执行低空突防打击任务时,由于地形复杂容易发生飞机坠地的风险,因此需要设定一个最低飞行高度 H_{min} , 此时 UAV 的最低飞行高度为

$$H_{min}(i) = H_{min} + H(x_i + y_i)。无人机在飞行时,距离地$$

面的高度越高越容易被雷达发现,应当设定一个最高的飞行高度 H_{max} , 此时 UAV 的最高飞行高度为

$$H_{max}(i) = H_{max} + H(x_i + y_i)。H(x_i + y_i) \text{ 为第 } i \text{ 个航迹点}$$

横纵坐标对应的地形海拔高度,那么 UAV 飞过的每段飞行航迹高度 H_i 应满足如下约束:

$$\begin{aligned} H_{\min}(i) - z_i &< 0 \\ z_i - H_{\max}(i) &< 0 \end{aligned} \quad (6)$$

1.7 最大水平转弯角和约束

UAV 在实际飞行过程中, 由于其本身机动性能的限制, 要求相邻航迹段间转弯角 φ_i 不能超过最大转弯角 φ_{\max} , 爬升角 θ_i 不能超过最大转弯角 θ_{\max} 。 d_{i-1} , d_i , d_{i+1} 为无人机的飞行轨迹点。记 d'_{i-1} , d'_i , d'_{i+1} 分别是 d_{i-1} , d_i , d_{i+1} 的水平投影点。其约束表达式如下:

$$\begin{aligned} \varphi_i &= \arccos \left(\frac{\overrightarrow{d'_{i-1}d'_i} \cdot \overrightarrow{d'_id'_{i+1}}}{|\overrightarrow{d'_{i-1}d'_i}| \cdot |\overrightarrow{d'_id'_{i+1}}|} \right) & \theta_i &= \arccos \left(\frac{|\overrightarrow{d'_id'_{i+1}}|}{|\overrightarrow{d'_id'_{i+1}}|} \right) \\ |\varphi_i| - \varphi_{\max} &< 0 & |\theta_i| - \theta_{\max} &< 0 \end{aligned} \quad (7)$$

综上所述, 本文中所用的航迹规划目标函数为:
 $\min(fitness) = \omega_1 \cdot Cost_l + \omega_2 \cdot Cost_h + \omega_3 \cdot Cost_M + \eta \cdot Constraint$

$\omega_i (i=1,2,3)$ 表示第 i 个代价函数的权重大小, η 为惩罚因子, $Constraint$ 表示总的约束条件情况, 且

$$Constraint = \sum_{l=1}^5 \sum_{i=1}^{N+1} g_{i,l} + g_{L_{\max}} \quad g_{i,l} \text{ 表示第 } i \text{ 个航迹段关于第 } l \text{ 个约束条件的满足情况, 即 } g_{i,l} = \begin{cases} 0, & \text{满足约束} \\ 1, & \text{不满足约束} \end{cases}$$

同理且表示最大航迹约束条件满足情况, 由于 $g_{L_{\max}}$ 是关于航迹段总和的约束并不是某一航迹段的约束, 此处单独列出。

2 基于的低空突防航迹规划改进建模

2.1 安全飞行空间

无人机的飞行高度受到雷达等威胁和撞地概率的约束, 即地形和最低/最高飞行高度的约束, 本文中提出了构建一种满足上述高度约束条件的可飞行空间, 即由最低飞行高度构成的曲面和最高飞行高度构成的曲面之间的空间, 使得无人机可以在两个曲面之间进行安全飞行, 此时飞行高度满足 $H_{\min}(i) < z_i < H_{\max}(i)$, 如图 1 所示。该安全飞行空间下可以减少受到威胁和撞地的概率以及约束条件的运算, 加快航迹规划的运算速度。

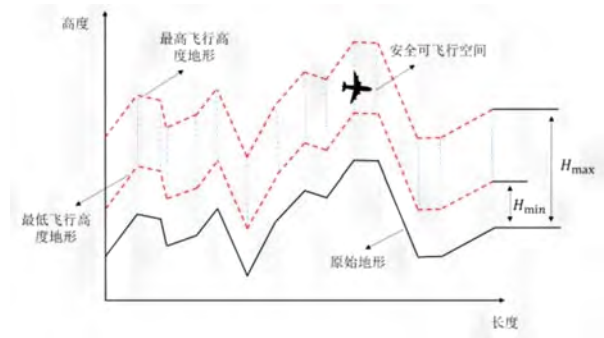


图 1.安全可飞行空间

Fig.1 Safe flying space

2.2 飞行高度变化代价

为躲避雷达搜索同时防止与山体或其他障碍物发生碰撞, 无人机必须升高或降低高度, 但是反复升降也可能危及无人机的安全。航迹高度变化的方差可以描述飞行高度的稳定性, 将其作为高度变化的代价可表示为:

$$Cost_{\Delta h} = \frac{\sum_{i=1}^N \left(z_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i \right)^2}{N} \quad (8)$$

2.3 偏转角约束

三维空间中曲线的偏转角可以用来表示无人机飞行姿态的变化, 无人机任意航迹如图所示, 偏转角计算公式如下:

$$\delta = \arccos \left(\frac{\overrightarrow{d_{i-1}d_i} \cdot \overrightarrow{d_id_{i+1}}}{|\overrightarrow{d_{i-1}d_i}| \cdot |\overrightarrow{d_id_{i+1}}|} \right) \quad (9)$$

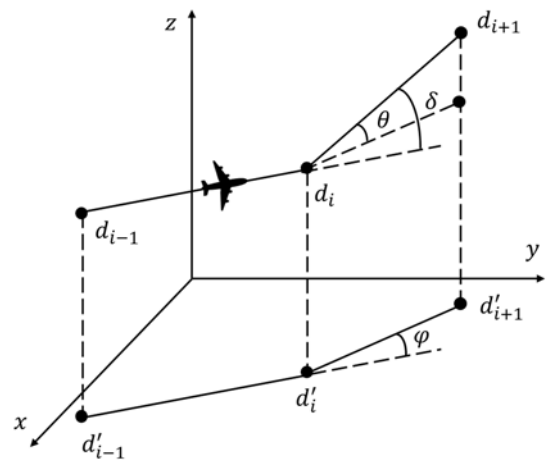


图 2.航迹段三维图

Fig.2 3D map of track segment

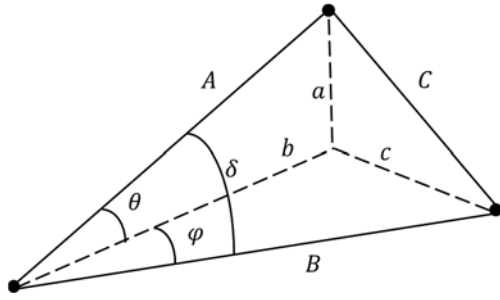


图 3. 平移变化后直角三角锥

Fig.3 Right angle triangular cone after translation change

定理 1. 偏转角 δ 要大于等于爬升角 φ 和偏转角 θ 。

证明: 为更直观地观察三个角的关系, 本文中图 2 通过平移变化得到图 3 的直角三角锥。可得:

$$\begin{aligned}\varphi &= \arccos\left(\frac{b}{\sqrt{b^2+c^2}}\right), \quad \theta = \arccos\left(\frac{b}{\sqrt{a^2+b^2}}\right), \\ \delta &= \arccos\left(\frac{A^2+B^2-C^2}{2AC}\right) \\ &= \arccos\left(\frac{(a^2+b^2)+(b^2+c^2)-(a^2+c^2)}{2\sqrt{a^2+b^2}\sqrt{b^2+c^2}}\right) \\ &= \arccos\left(\frac{b^2}{\sqrt{a^2+b^2}\sqrt{b^2+c^2}}\right)\end{aligned}\quad (10)$$

$$\text{显然 } \frac{b}{\sqrt{a^2+b^2}} \leq 1, \text{ 则 } \frac{b^2}{\sqrt{a^2+b^2}\sqrt{b^2+c^2}} \leq \frac{b}{\sqrt{b^2+c^2}},$$

同理 $\frac{b^2}{\sqrt{a^2+b^2}\sqrt{b^2+c^2}} \leq \frac{b}{\sqrt{a^2+b^2}}$, 同时根据反余弦函数的特性可得 $\delta \geq \varphi, \delta \geq \theta$, 证明到此结束。

根据定理 1 可知, 偏转角大于等于爬升角和水平转弯角。因此本文中利用偏转角统一对爬升角和水平转弯角进行约束, 减少约束条件和运算量, 设最大偏转角为 δ_{\max} , 其偏转角约束表示为:

$$\text{Constraint}'_{\varphi} = \sum_{i=1}^N \max(\delta_i - \delta_{\max}, 0) \quad (11)$$

2.4 平滑代价

在飞行过程中爬升角和转弯角越大, 无人机的飞行状态就越不稳定, 飞行航迹越不平滑, 因此本文中加入了平滑代价来增加无人机航迹的稳定性和平滑性, 并用上述偏转角的变化程度来表示平滑代价, 函数设置如下:

$$\text{Cost}_{\text{smooth}} = \sum_{i=1}^N |\delta_i - \delta_{i-1}| \quad (12)$$

本文中将威胁代价函数转变为约束函数, 同样选取将每一航迹段进行均分为 5 段。其威胁约束函

数, 最大、小航迹段约束分别如下:

$$\text{Constraint}'_R = \sum_{i=1}^{N+1} \sum_{k_M=1}^{n_M} \sum_{n=1}^5 \max\left(\frac{R_k - d_{k,n}^i}{R_k}, 0\right)$$

$$\text{Constraint}'_{L_{\max}} = \max\left(\sum_{i=1}^{N+1} L_i - L_{\max}, 0\right)$$

$$\text{Constraint}'_{L_{\min}} = \sum_{i=1}^{N+1} \max(L_i - L_{\min}, 0) \quad (13)$$

值得注意的是, 这里将所有的约束条件由原来的“0-1”硬约束进行了修改, 可以根据约束函数值的变化借助算法进行梯度下降, 有助于快速摆脱约束和提升算法寻优质量。当约束函数的值为极小值时, 由于惩罚系数较大, 影响可忽略不计。其中 $\frac{R_k - d_{k,n}^i}{R_k}$ 并没有乘以常数 C , 是因为后面会乘以惩罚系数, 所以改进后的航迹规划目标函数为:

$$\min(\text{fitness}) = \alpha_1 \cdot \text{Cost}_1 + \alpha_2 \cdot \text{Cost}_{\text{th}} + \alpha_3 \cdot \text{Cost}_{\text{smooth}} + \eta \cdot \text{Constraint}' \quad (14)$$

其中, $\text{Constraint}'$ 为改进后约束函数的总和, 如下:

$$\begin{aligned}\text{Constraint}' &= \text{Constraint}'_{\varphi} + \text{Constraint}'_R + \\ &\quad \text{Constraint}'_{L_{\max}} + \text{Constraint}'_{L_{\min}}\end{aligned} \quad (15)$$

3 仿真计算与验证

3.1 航迹编码

本文中利用 PSO 算法对模型进行仿真实验, 定义种群中的一个个体 S_i 即为一条由多个航迹点连接而成的路径, 其中每 3 个构成一个航迹点的三维坐标, 即 $S_i = [s_{x1}, s_{y1}, s_{z1}, s_{x2}, \dots, s_{xi}, s_{yi}, s_{zi}, \dots, s_{xN}, s_{yN}, s_{zN}]$, 共有 N 个航迹点, 则每个个体的维度为 $3*N$ 。

设起点坐标 S 为 (x_s, y_s, z_s) , 终点坐标 E 为 (x_E, y_E, z_E) , 则航迹点 d_i 的三维坐标 $(x_{d_i}, y_{d_i}, z_{d_i})$ 为:

$$\begin{aligned}x_{d_i} &= x_s + s_{xi} \cdot (x_s - x_E) \\ y_{d_i} &= y_s + s_{yi} \cdot (y_s - y_E) \\ z_{d_i} &= z_{d_i}^* + s_{zi} \cdot (z_{\max} - z_{d_i}^*)\end{aligned} \quad (16)$$

其中, s_{xi}, s_{yi}, s_{zi} 分别是 (x_s, y_s, z_s) 在 PSO 算法中对应的编码, $z_{d_i}^*$ 可根据 x_{d_i} 和 y_{d_i} 在高程地图

中得到, z_{\max} 是指高程地图中关于坐标 z 的上界

3.2 算法流程

基于 PSO 算法的低空突防模型算法流程如下:

(1) 设置种群规模 M 、维度 D 、最大迭代次数 T 。初始化粒子速度、位置和参数。

(2) 根据编码 $S_i = [s_{x1}, s_{y1}, s_{z1}, s_{x2}, \dots, s_{xi}, s_{yi}, s_{zi}, \dots, s_{xm}, s_{ym}, s_{zm}]$ 和式 (16) 得到各航迹点相应三维空间中的位置。

(3) 根据式 (14) 计算粒子的适应度值, 根据算法的评价机制, 得到粒子历史最佳位置 P_{best} 和全局最佳位置 G_{best} 。

(4) 更新粒子速度和位置, 并更新粒子历史最佳位置 P_{best} 和全局最佳位置 G_{best} 。

(5) 判断是否达到最大迭代次数, 满足则停止迭代, 输出最优解 G_{best} 。否则, 回到 (2)。

3.3 综合威胁约束三维地形图

本文中使用 $100\text{km} \times 150\text{km} \times 3\text{km}$ 数字高程地图建立三维山地地形, 并使用三次 B 样条方法确保无人机航迹平滑具有更好的曲线平滑性。共设置两个案例进行验证, 案例一设有四处综合威胁不可飞行区域, 中心点坐标分别为: (30,65), (60,40), (80,70), (100,30), 半径分别为 15,10,10,10; 案例二在案例一的基础上又增加了五处综合威胁不可飞行区域, 中心点坐标分别为: (20,30), (40,65), (50,60), (70,20), (90,50), 半径分别为 15, 10, 10, 10, 10。起点和终点坐标为 (10,90,1.1), (130,10,1.1)。且设置 $\varphi_{\max} = \theta_{\max} = \delta_{\max} = 60^\circ$, $L_{\max} = 200\text{km}$, $L_{\min} = 5\text{km}$, $H_{\min} = 0.1\text{km}$, $H_{\max} = 0.5\text{km}$, $\eta = 10^4$, $\omega_1 = 0.5$, $\omega_2 = 0.3$, $\omega_3 = 0.2$ 。

本文中分别运行了 50 次, 航迹节点数为 10, 维度 D 为 30, 最大迭代次数 T 为 200, PSO 种群个数 M 为 100, 实验结果如下表。由于两者的适应度函数并不相同, 本文中选取了两者的最小适应度值的飞行航迹, 其三维地形图如图 4 所示, 俯视图和等高线图 5、6 如下。为了更好的了解两种模型下的收敛情况, 计算了 PSO 运行 50 次的平均适应度, 如图 7 所示。为了更好的观察改进前后的无人机航迹高度变化, 本文中将航迹均分为 100 段, 并记录每一段其飞行高度与所在地形的高度差, 如图 8 所示。最后本文中将改进前的爬升角和转弯角与改进后的转弯角进行了对比, 同上也是划分为 100 段, 如图 9 所示。

案例一:

表 1. 威胁环境下改进前后对比

Table 1 Comparison before and after improvement in threat environment

	算法平均 耗时/s	航迹长度 /km	平均适应 值	最小适应 度值	成功 率
改进 前	43.87	196.42	900018.95	81.54	0.578
改进 后	26.98	154.80	78.60	73.23	1

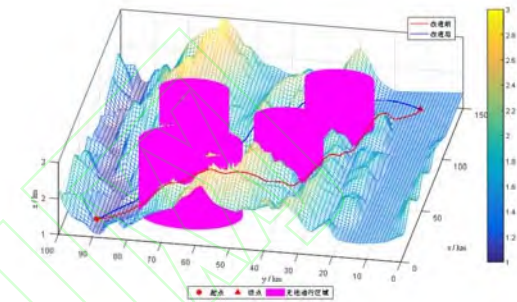


图 4. 三维航迹图

Fig.4 Three dimensional track map

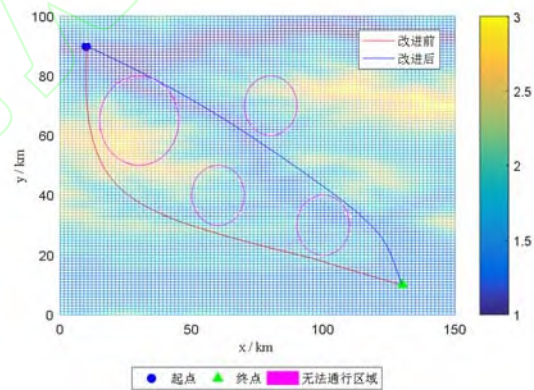


图 5. 俯视图

Fig.5 Vertical view

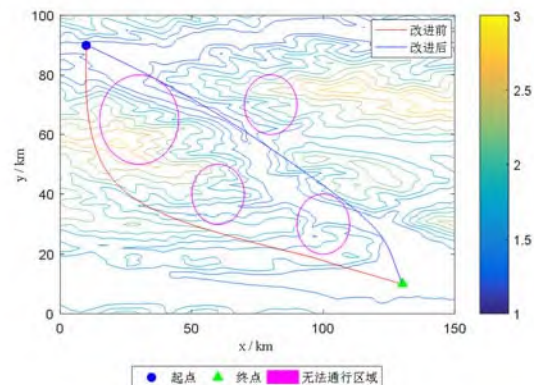


图 6.等高线图
Fig.6 Contour map

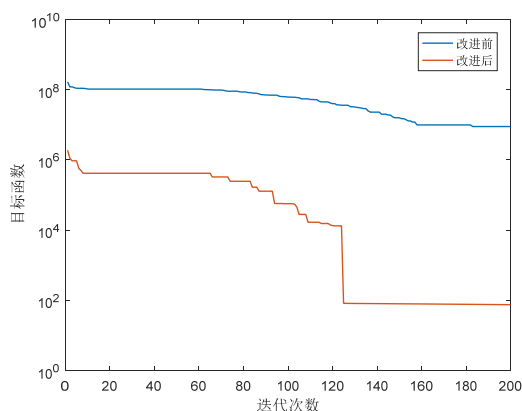


图 7.平均迭代次数图
Fig.7 Average number of iterations

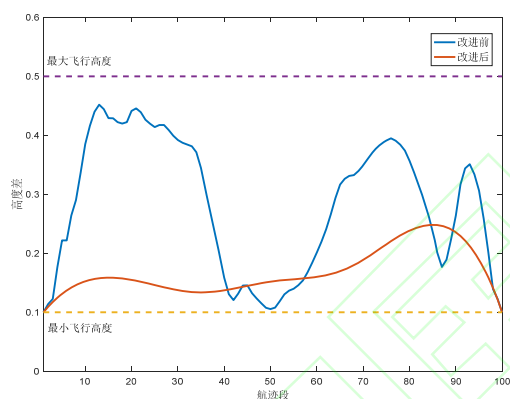


图 8.高度差图
Fig.8 Height difference diagram

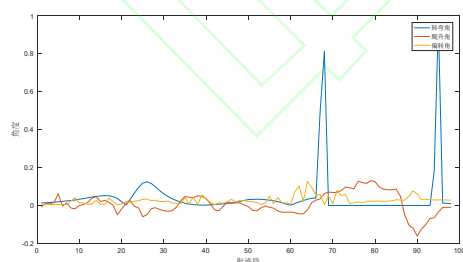


图 9.改进前转弯角和爬升角与改进后偏转角对比图

Fig.9 Comparison of turning angle and climbing angle

before improvement and deflection angle after improvement

仿真结果表明,改进后的模型在相同的条件下能比原有模型的规划出更优的航迹。从案例一中的表 1 可以看出,由于约束条件的减少,运行时间较原有模型缩短了 38.50%,并且改进后的模型具有更稳定的结果和更高的成功率。结合表 1 和图 1、2 可以看出,改进前后都能绕开威胁区域低空飞行,

但是改进前拥有更长的航迹路线,说明 PSO 算法在改进后的模型下拥有更强的寻优能力。从图 7 可以看出,由于本文中构建了一个安全飞行空间使得约束条件减少,减少了大量由于不满足的约束条件的无效运算,使得算法能够在更少的迭代次数下寻找到满足约束条件的路径并且快速收敛到最优路径。从图 8 可以看出,加入 UAV 高度变化的代价函数后,规划的无人机航迹更加平滑而且稳定。从图 9 可以看出,加入平滑代价后,改进后的偏转角的变化程度比原先的转弯角和爬升角更加稳定,并没有存在突变或者变化较大的情况,进而使得 UAV 的飞行更加稳定。

案例二:

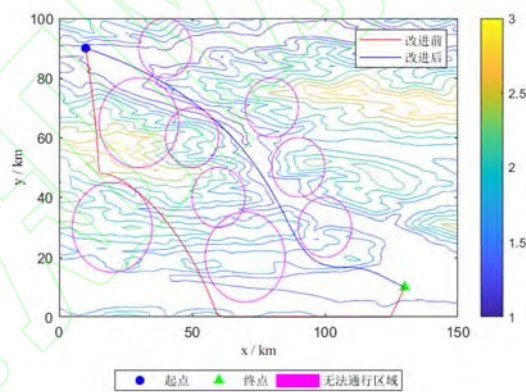


图 10.多威胁下的等高线图

Fig.10 Contour map under multiple threats

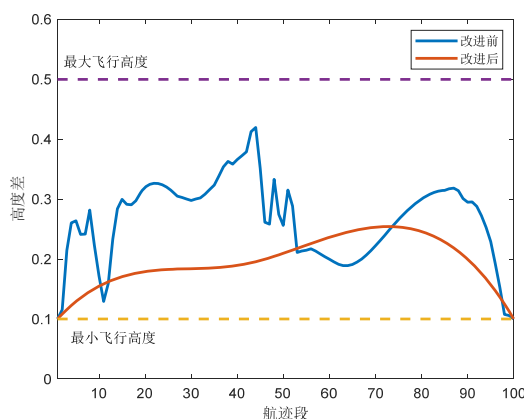


图 11.多威胁下的高度差图

Fig.11 Altitude difference map under multiple threats

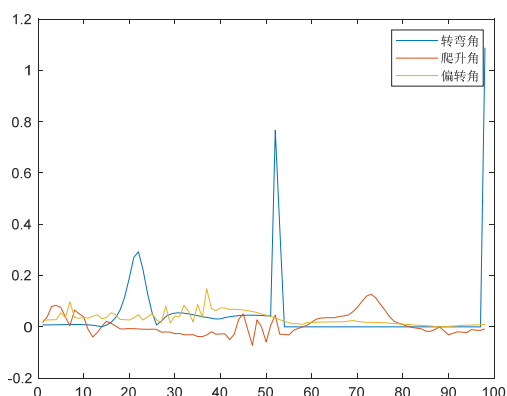


图 12.多威胁下的改进前转弯角和爬升角与改进后偏转角对比图

Fig.12 Comparison of turning angle and climbing angle before improvement and deflection angle after improvement under multiple threats

在案例二中综合威胁增加到了 9 处,突防难度更加复杂。从图 10 可以看出,改进前尽管能顺利进行到达终点,但是 UAV 却沿着边界飞行,这显然不是较好的方案。但改进后的模型依然具有更佳的路线规划,这是由于加入可飞行空间后约束条件的减少使得算法具有更高效的搜索效率。从图 11, 12 可以看出,综合威胁的增加并没有影响到 UAV 飞行的性能,相较于改进前仍具有更好的稳定性和平滑性。

4 结束语

本文中在无人机低空突防的模型上,结合地形约束,提出了一种安全飞行的空间的地形预处理方法,保证了无人机的飞行过程中的安全性;同时结合无人机动力学特性,在可飞行空间的基础上加入了高度变化代价,利用偏转角减少约束并加入平滑代价,进一步改进航迹的代价函数和约束函数,提高了无人机航迹规划的运算效率以及无人机的稳定性。

PSO 算法在复杂的带威胁区域的三维高程地图中的仿真结果表明,PSO 算法在改进后的模型具有 100%的成功率,并且具有更快的计算速度和摆脱约束的能力,同时 UAV 飞行过程中更稳定且航迹更光滑。

参考文献:

[1] 熊自明,万刚,吴本材.基于改进蚁群算法的无人机低空突防三维航迹规划[J].电光与控制,2011,18(12):44-48.
Xiong Z M, Wan G, Wu B C. Three dimensional path

planning of UAV low altitude penetration based on improved ant colony algorithm [J]. Electro optic and control, 2011,18 (12): 44-48.

- [2] 翁兴伟,董康生,陈诚,等.无人机地形预处理低空突防轨迹规划技术[J].现代防御技术,2015,43(4):19-24+98.
Weng X W, Dong K S, Chen C, et al. Low altitude penetration trajectory planning technology for UAV terrain preprocessing [J]. Modern defense technology, 2015,43 (4): 19-24 + 98.
- [3] 武虎子,王瑾,齐万涛,等.飞机低空突防模式机动舵面最优配置建模仿真[J].系统仿真学,2021,33(9):2180-2190.DOI:10.16182/j.issn1004731x.joss.20-0381.
Wu H Z, Wang J, Qi W T, et al. Modeling and Simulation of optimal configuration of aircraft rudder in low altitude penetration mode [J]. Journal of system simulation, 2021,33 (9): 2180-2190. Doi: 10.16182/j.issn1004731x.joss.20-0381.
- [4] 唐强,张新国,刘锡成.一种用于低空飞行的在线航迹重规划方法[J].西北工业大学学报,2005(2):271-275.
Tang Q, Zhang X G, Liu X C. An online path re planning method for low altitude flight [J]. Journal of Northwest University of technology, 2005 (2): 271-275.
- [5] 白晓利,韩亮.基于数字地图预处理的低空突防飞行路线规划[J].北京航空航天大学学报,2005(8):853-857.DOI:10.13700/j.bh.1001-5965.2005.08.006.
Bai X L, Han L. Low altitude penetration flight route planning based on digital map preprocessing [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005 (8): 853-857. Doi: 10.13700/j.bh.1001-5965.2005.08.006.
- [6] 陈侠,鹿振宇.基于不同地形的低空安全突防曲面处理算法[J].电光与控制,2013,20(5):1-5.
Chen X, Lu Z Y. Low altitude safe penetration surface processing algorithm based on different terrain [J]. Electro optic and control, 2013,20 (5): 1-5.
- [7] Phung M D, Ha Q P. Safety-enhanced UAV path planning with spherical vector-based particle swarm optimization[J]. Applied Soft Computing, 2021, 107: 107376.
- [8] 刘凌宇,彭靖.低空突防仿真用数字地形模型的建立[J].中国电视学与图像分析,2010,15(3):245-250.DOI:10.13505/j.1007-1482.2010

- .03.018.
- Liu L Y, Peng J. Establishment of digital terrain model for low altitude penetration simulation [J]. China stereology and image analysis, 2010,15 (3): 245-250. Doi: 10.13505/j.1007-1482.2010.03.018.
- [9] 胡志忠,徐克虎,沈春林.低空突防用数字地形的平滑处理[J].南京航空航天大学学报,2000(5):493-498.
- Hu Z Z, Xu K H, Shen C L. Smoothing of digital terrain for low altitude penetration [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2000 (5): 493-498.
- [10] 樊旭东,阮玉晗,黄康强,等.面向无人机低空突防的轨迹规划技术[J].计算机仿真,2020,37(12):25-30+66.
- Fan X D, Ruan Y H, Huang K Q, et al. Trajectory planning technology for UAV low altitude penetration [J]. Computer simulation, 2020,37 (12): 25-30 + 66.
- [11] 唐汇禹,彭世葵,孙经蛟,等.基于混沌 DESAPSO 算法的无人机三维航迹规划[J].兵器装备工程学报,2017,38(2):5.
- Tang H Y, Peng S R, Sun J J, et al. UAV 3D path planning based on chaotic desapso algorithm [J]. Journal of ordnance and equipment engineering, 2017, 38 (2): 5.