

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2007192

复杂低空环境下考虑区域风险评估的无人机航路规划*

张宏宏^{1,2}, 甘旭升^{1,2}, 李双峰^{1,2}, 冯政^{1,2}, 靳阳^{1,2}

(1. 空军工程大学空管领航学院 西安 710051; 2. 国家空管防相撞技术重点实验室 西安 710051)

摘要:为解决无人机在复杂低空环境内运行安全性较低现状,提出了考虑区域风险评估的无人机航路规划方法,可快速生成运行风险较低的航路。首先,对复杂低空环境进行模型简化和风险评估,得到低空三维风险图;再将路径风险值作为综合代价,利用改进蚁群算法对空间三维航路进行规划,有效降低了生成路径的冗余度;最后,用3次B样条对规划出的离散路径进行平滑处理,生成曲率与俯仰角连续的可飞路径。仿真与实验结果表明:本文提出的算法生成的路径能够以较小的路径代价,换取一条风险值较低的路径,同时路径冗余度较低,曲率与俯仰角连续变化,是满足无人机性能约束的可飞路径。

关键词: 无人机;低空空域;航路规划;风险评估;3次B样条

中图分类号: TP242 V279 TH-39 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8

UAV route planning considering regional risk assessment under complex low altitude environment

Zhang Honghong^{1,2}, Gan Xusheng^{1,2}, Li Shuangfeng^{1,2}, Feng Zheng^{1,2}, Jin Yang^{1,2}

(1. Air Traffic Control and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;
2. National Key Laboratory of Air Traffic Collision Prevention, Xi'an 710051, China)

Abstract: In order to solve the problem of low safety of unmanned aerial vehicles (UAVs) operating in complex low-altitude environment, a route planning method for UAVs with regional risk assessment was proposed, and it could quickly generate a route with low operational risk. Firstly, the complex low-altitude environment was simplified by model and risk assessment, and the low-altitude three-dimensional risk map was obtained. Taking the path risk value as the comprehensive cost, the improved ant colony algorithm was used to plan the three-dimensional space path, it effectively reduced the redundancy of the generated path. Finally, cubic B-spline is used to smooth the planned discrete path and generate a continuous flightable path with curvature and pitch angle. The simulation and experimental results show that the generated path can be exchanged for a path with a lower risk value at a lower path cost, and at the same time, the path redundancy is low, and the curvature and pitch Angle continuously change, so it is a flight-able path that meets the performance constraints of UAV.

Keywords: UAV; low-altitude airspace; route planning; risk assessment; cubic B-spline

0 引言

随着低空空域改革的推进,无人机离开隔离空域,进入低空融合空域制定多样化任务已成为当前发展趋势,而大量无序飞行的低空无人机运行会对地面设施、公共安全等带来危害^[1]。特别是随着小型无人机在城市空间的广泛使用,城市上空会有执行航拍、物流、安保、搜索、救援等作业的大量无人机,同时城市空间密

集的不规则障碍物形成的复杂低空环境给无人机安全运行带来了严峻挑战^[2]。同时无人机在城市低空运行,可能掉落并砸伤人员和车辆,增加无人机事故的风险^[3]。因此需要在复杂城市低空环境下为无人机规划一条安全、可飞的航路,为无人机低空空域中交通管理提供技术支撑。

航路规划作为无人机自主飞行的关键技术之一,当前已有较为成熟的传统方法,按照不同的路径规划框架架构可分为基于集中式与分布式的航路规划方法,集中

收稿日期:2020-12-02 Received Date: 2020-12-02

* 基金项目:国家自然科学基金(61601497)、空军工程大学校长基金(XZJ2020005)项目资助

式航路规划主要有:1)启发式优化算法,Luo等^[4]等利用蚁群算法具有正反馈、鲁棒性好的特点,将信息素按照优劣进行区分,强化效果好的信息素,提升了航路规划速度;Bao等^[5]针对无人机三维路径规划中蚁群算法的收敛速度慢的问题,提出了改进的带角度因子的蚁群算法的启发式函数和局部搜索策略,有效提高了蚁群算法的收敛速度和搜索效率。张启钱等^[6]结合无人机航空运输特色,采用A*算法动态加权法对函数赋权,提高算法解算效率与精度。2)数学优化方法,张启钱等^[7]针对复杂低空多机冲突问题,提出同时可以选择调速、调向与调高度的序列混合整数线性优化,生成解脱路径。Sarim等^[8]在航路预规划的前提下,利用混合整数线性规划方法,再进行精细规划,提升了路径的光滑性。分布式航路规划主要有:1)势场法,Fan等^[9]基于人工势场法提出了规则的六边形导引方法来改善局部极小问题。同时,针对动态环境提出了一种运动物体检测与回避的相对速度法,既适用于静态环境又适用于动态环境。2)几何法,Durand等^[10]在速度障碍法(VO)的基础上,提出最优互惠避碰(ORCA)算法,适用速度改变受限的飞行器,避免规划出平行不可飞的路径。另外,还有将机器学习^[11-12]、模型预测控制^[13-14]、博弈论^[15-16]应用在航路规划中,均有一定的特色与优势。

尽管当前航路规划方法已经较为成熟,但当前航路规划基本都将路径最短与威胁最小作为性能指标,生成无人机可飞路径。而无人机离开隔离空域,进入国家空域之后,三维空间内每个区域具有不同的风险值,需要对避障要求与安全风险管理综合考虑。若忽略空域本身的风险,生成的路径会对城市安全造成隐患,不利用无人机低空空域交通管理。

为确保低空空域的飞行安全,需要考虑城市低空空域风险评估,结合不同城市区域的风险图,规划出既满足避障要求,又将路径风险降到最低的路径。针对以上问题,本文研究了复杂低空环境下考虑区域风险评估的

无人机航路规划,根据城市不同区域建模,建立三维空域风险图,再结合无人机性能约束条件与避障要求,基于改进蚁群算法,生成考虑城市区域风险的规划路径,最后用3次B样条对规划路径进行平滑操作,生成曲率连续,平滑可飞的路径。

1 城市空域环境建模

城市环境中障碍物数量众多、种类多样,且分布不均,为简化空域运行环境,加快规划速度,利用十字型栅格将城市三维空域进行离散化处理,将栅格交叉点作为 $n \times m \times l$ 个航路关键节点,并按照从左至右,由后至前,由上到下的规则对三维空域进行编号,如图1所示,栅格化后的空域坐标位置与节点编号一一对应,可利用编码规则将空域坐标信息与节点编号相互转换。

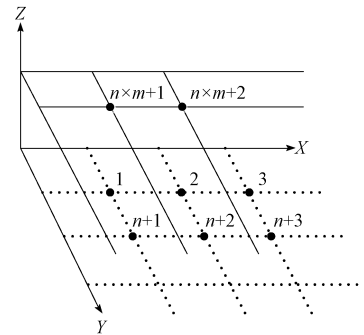


图1 城市三维空间栅格化

Fig. 1 Urban three-dimensional space rasterization

城市低空环境下的公园、街道、建筑、居民区等区域都视为无人机运行的静态障碍物,散落分布在城市的不同区域,对于高耸建筑物,无人机通过绕飞进行避障,对于低矮区域,进行跨越飞行。为降低空域结构复杂度,便于无人机进行有效避障,将各类障碍物简化为长方体,城市三维空间实景与建模图如图2所示。

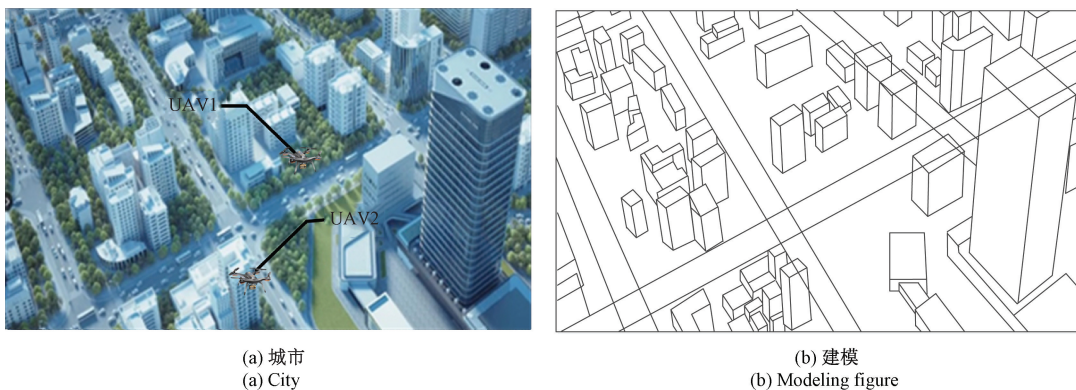


图2 城市三维空间

Fig. 2 Urban three-dimensional space

对于高耸建筑物,威胁模型如图 3 所示。

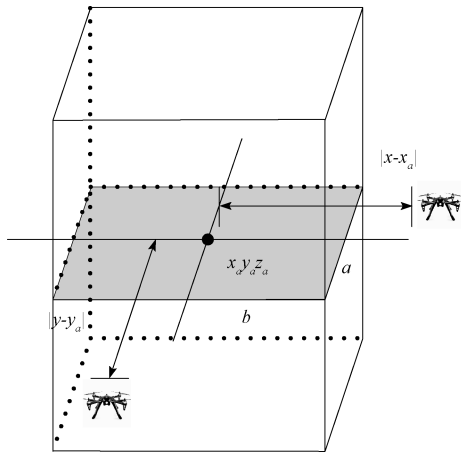


图 3 高耸建筑物威胁模型

Fig. 3 Threat model of high-rise buildings

高耸建筑物威胁代价表示为:

$$J_s = f_1 / \min_{x,y,z \in p} \left\{ \max \left[|y - y_a|, \frac{a}{b} |x - x_a| \right] \right\} \quad (1)$$

式中: f_1 为常数; (x_a, y_a) 为建筑物中心坐标点; (x, y, z) 为无人机三维中心坐标点; p 为某条路径点的集合; a, b 分别为建筑物竖边与横边长度的一半。

若考虑路径最短原则,需要定义航程威胁:

$$J_l = \sum_{i \in p} \sqrt{(x_{p_{i+1}} - x_{p_i})^2 + (y_{p_{i+1}} - y_{p_i})^2 + (z_{p_{i+1}} - z_{p_i})^2} \quad (2)$$

2 区域风险评估

城市低空复杂环境中,由于无人机运行各区域人口密度、飞行高度、地面遮蔽等参数的不同,运行风险也存在较大差异。因此需要对每个栅格区域进行离散风险评估,对风险进行量化,每个位置对应一个风险值^[17]。构建 $n \times m \times l$ 的三维风险评估矩阵 \mathbf{R} ,其中第 $k(k = 1, 2, \dots, l)$ 个高度层的风险矩阵 \mathbf{R}_k 表示为:

$$\mathbf{R}_k = \begin{bmatrix} r(p_{1,1,k}) & r(p_{1,2,k}) & \cdots & r(p_{1,m,k}) \\ r(p_{2,1,k}) & r(p_{2,2,k}) & \cdots & r(p_{2,m,k}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r(p_{n,1,k}) & r(p_{n,2,k}) & \cdots & r(p_{n,m,k}) \end{bmatrix}_{n \times m}$$

其中, $r(p_{i,j,k})$ ($i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m, k = 1, 2, \dots, l$) 表示三维空间内每块栅格区域内的风险评估值, (i, j, k) 表示为三维空间内坐标值。

三维城市空域中,可构建 $n \times m \times l$ 的无人机运行路径矩阵 \mathbf{M} ,其中第 $k(k = 1, 2, \dots, l)$ 个高度层的路径矩阵 \mathbf{M}_k 可表示为:

$$\mathbf{M}_k = \begin{bmatrix} m(p_{1,1,k}) & m(p_{1,2,k}) & \cdots & m(p_{1,m,k}) \\ m(p_{2,1,k}) & m(p_{2,2,k}) & \cdots & m(p_{2,m,k}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ m(p_{n,1,k}) & m(p_{n,2,k}) & \cdots & m(p_{n,m,k}) \end{bmatrix}_{n \times m}$$

其中, $m(p_{i,j,k})$ ($i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m, k = 1, 2, \dots, l$) 表示三维空间内每块栅格区域内的是否被无人机飞越,记作:

$$m(p_{i,j,k}) = \begin{cases} 1, & \text{无人机飞越该栅格区域} \\ 0, & \text{无人机绕过该栅格区域} \end{cases}$$

因此,考虑区域风险评估的代价 C 表示为:

$$C = \sum_{i,j,k} r(p_{i,j,k}) m(p_{i,j,k}) \quad (3)$$

风险评估代价值越低,路径造成的安全威胁就越小。

当前通常将死亡率作为衡量无人机运行风险评估的方法^[18-20]。下面对每块栅格区域内的风险评估值 $r(p_{i,j,k})$ 的计算流程进行说明。

2.1 无人机对人撞击风险评估

城市空间内人员密度高,地面财产价值高,无人机发生坠落事故往往造成更高的人员与财产损失,因此,考虑区域风险评估的城市航路规划为无人机规划出一条风险值较低的路径,在一定程度上可以降低运行风险。城市空间内运行的无人机由于自身可靠性与运行区域的差异,对地面人员造成一定威胁,当前主要用无人机系统事故致死率 P_1 表示^[21]:

$$P_1 = f_c N_{\text{exp}} P(f) \quad (4)$$

式中: f_c 表征无人机可靠性指标,表示系统由于自身故障坠落事故率; N_{exp} 表示暴露在无人机地面撞击事故中的人数; $P(f)$ 表示系统撞击死亡率。 N_{exp} 可由城市人口密度 ρ 与无人机地面撞击杀伤面积 A_{exp} 表示:

$$N_{\text{exp}} = A_{\text{exp}} \rho \quad (5)$$

式中: ρ 表示人口密度; A_{exp} 表示无人机系统坠落发生地面相撞的杀伤面积,结合文献[22], A_{exp} 与无人机自身物理性质、下滑参数与地面人员相关,如图 4 所示,表示为:

$$A_{\text{exp}} = 2(r_p + R_{\text{uav}})d + \pi(r_p + R_{\text{uav}})^2 \quad (6)$$

式中: r_p 表示地面人员半径; R_{uav} 表示无人机最大半径; 根据图 4 中几何关系,得 $d = h_p \cot \theta$,其中 θ 表示无人机下滑坠落角度,可由以下公式确定:

$$\begin{cases} \theta = \arctan\left(\frac{V_y}{V_{\text{max}}}\right) \\ a = \frac{mg - F_d}{m} = g - \frac{R_l A_p v_{\text{rel}}^2}{2m} \\ V_y = \int_0^t a dt = \sqrt{\frac{2mg}{R_l A_p} \left(1 - e^{-\frac{h R_l A_p}{2m}}\right)} \end{cases} \quad (7)$$

式中: V_y, V_{max} 分别表示无人机坠落时的垂直速度与自身运行最大速度; F_d 表示无人机下落过程中所受的阻力; R_l

表示无人机阻力相关系数,与自身物理特性有关; A 表示无人机面积; ρ_A 表示空气密度; v_{rel} 表示为无人机坠落时的实际空速。

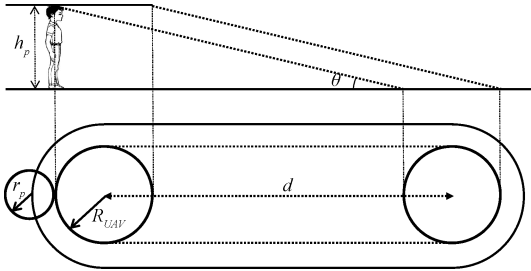


图4 无人机坠落杀伤区域示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the killing area of falling UAV

无人机撞击致死率 $P(f)$ 可表示为:

$$P(f) = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{\beta}{E_{imp}} \right)^{\frac{1}{4p_s}}} \quad (8)$$

式中: E_{imp} 表示撞击动能,用 $E_{imp} = \frac{1}{2}m(V_{imp})^2$ 计算,其中, $V_{imp} = \sqrt{V_{max}^2 + V_y^2}$, α 定义为 p 取 0.5 时死亡率达到 50% 时需要的撞击能力, β 定义为 p 取 0 时发生死亡事件时撞击能力的临界值。遮蔽参数 p 表示无人机系统地面撞击事件对城市地面人员的影响程度,取值为 $[0, 1]$ 之间,值越大,代表地面遮蔽效果越好,根据城市地面遮蔽效果实际情况,各类型区域遮蔽参数设置如表 1 所示。

表 1 遮蔽参数

Table 1 Masking parameters

系数	遮蔽参数
0	无遮蔽物
0.25	稀疏树木
0.50	树丛或低矮的建筑物
0.75	高耸建筑物
1	工业区

2.2 无人机对车撞击风险评估

无人机城市运行时,由于高耸建筑物林立,规划出的可飞路径往往在道路上空,无人机系统由于发生故障坠落,与地面车辆相撞,造成交通事故,会引发人员受伤。因此在城市三维路径规划过程中,需要考虑无人机对车撞击风险评估。

无人机撞击地面车辆的预期死亡率可以定义为无人机坠落每小时造成的死亡人数,表示为:

$$P_2 = f_c CT \quad (9)$$

式中: T 表示平均每场车祸造成的死亡人数, C 表示无人机发生对车撞击的概率,可通过投影的所有车辆总面积与覆盖的道路总面积的比值来定义:

$$C = \frac{\overline{S_{car}} N}{S_{road}} \quad (10)$$

式中: $\overline{S_{car}}$ 表示车辆在地面的投影面积, N 表示车辆数量,可由 $N = KL$ 计算, K 为交通密度(单位长度道路上的车辆数量), L 为道路长度, S_{road} 表示道路面积,由 $S_{road} = D_{road} L$ 计算, D_{road} 表示道路宽度。

2.3 考虑区域风险评估的性能指标

若不考虑区域风险,城市空域航路规划的性质指标表示为 $J_0 = \omega_1 J_1 + \omega_2 J_s$;若考虑区域风险,城市空域航路规划的性质指标表示为 $J_0 = P_1 + P_2$ 。

3 基于改进蚁群的三维路径规划算法

蚁群算法(ant colony optimization)是模拟蚂蚁觅食的一种寻求优化路径的启发式算法,具有信息正反馈和启发式搜索的特征,全局优化性强^[23]。本文需要对经典蚁群算法进行改进,便于在复杂三维低空环境下规划出考虑区域风险评估的无人机航路。

3.1 加入高度层引导的启发式因子

经典蚁群算法一般将启发信息设置为节点与目标点之间的距离的倒数,如式所示:

$$\eta_d = 1/d_n \quad (11)$$

式中: η_d 表示节点 n 的能见度, d_n 表示节点 n 到目标点的距离。经典启发信息公式在二维路径规划领域应用广泛,但在三维路径规划中,未能与空域特点结合,启发效果不明显。因此,为降低蚁群寻优的盲目性,可将高度层引导因子加入启发式信息中,有效缩短路径搜索时间,提高路径规划质量。

$$\eta_d = 1/(d_n + \Delta l) \quad (12)$$

$$\Delta l = |l_g - l_j| \quad (13)$$

式中: l_g 为目标点的高度层; l_j 为节点 j 所在高度层。

3.2 无人机状态转移规则

三维空域路径规划中,蚁群在相邻的栅格化空间内进行转移,所有经过的节点被加入到禁忌表中,避免规划路径冗余。蚂蚁在选取下一个路径点时,要考虑无人机转弯率的限制,本文采取得蚁群每次转移状态时航向改变量不超过 $\pi/3$,节点选择策略根据可转移范围内节点的信息素浓度与能见度的数值,用轮盘赌的方式确定。

蚂蚁状态转移概率公式表示为:

$$P_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_j(t)]^\alpha \times \eta_j^\beta}{\sum_{s \in allowed_k} [\tau_s(t)]^\alpha \times \eta_s^\beta}, & \text{if } j \in allowed_k \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

式中: $P_{ij}^k(t)$ 表示 t 时刻蚂蚁 k 从节点 i 转移至 j 的概率; $\tau_j(t)$ 表示 t 时刻节点 j 的信息素浓度; η_j 表示节点 j 的能见度; $allowed_k$ 表示蚂蚁下一步可选转移节点集合; α, β 分别为常数; 表示信息素浓度 τ 与能见度 η 的作用程度。

3.3 信息素更新规则

当蚁群完成一次路径规划时,信息素浓度进行迭代更新,经典蚁群算法信息素更新规则表示为:

$$\begin{cases} \tau_j(t+1) = (1-\rho)\tau_j(t) + \Delta\tau_j(t) \\ \Delta\tau_j(t) = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_j^k(t) \end{cases} \quad (15)$$

$$\Delta\tau_j^k = \begin{cases} \frac{Q}{L_k}, & \text{if } j \in p^k \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (16)$$

式中: ρ 表示信息素挥发因子; $\Delta\tau_j^k(t)$ 表示 t 时刻蚂蚁 k 在节点 j 释放的信息素量; $\Delta\tau_j(t)$ 表示 t 时刻节点 j 增加的信息素量; m 为经过节点 j 的蚂蚁数量; Q 为常数; L_k 表示为第 k 只蚂蚁的路径长度。

由于蚁群算法具有正反馈机制,可能导致蚂蚁向局部最优解汇聚,错过全局最优,因此可引入最大最小蚂蚁法(max-min ant system, MMAS)法,对原算法的正反馈作用进行调节,避免局部早熟收敛。限制条件表示为:

$$\tau_j(t) = \begin{cases} \tau_{\min}, & \tau_j(t) < \tau_{\min} \\ \tau_{\max}, & \tau_j(t) > \tau_{\max} \\ \tau_j(t), & \tau_{\min} < \tau_j(t) < \tau_{\max} \end{cases} \quad (17)$$

3.4 基于空间分割的路径规划算法

城市三维空间内障碍物种类繁多、分布不均,空间结构复杂,搜索规模较大,算法的寻优效果随着空间结构的复杂度上升而变大,造成路径冗余度增加^[24]。因此可通过区域分割的方式降低规划空域规模,提高规划精度,减少冗余路径。首先对全空域进行路径预规划,生成一条冗余度较高的初始路径;再从初始路径中选取中间节点作为整个空间的分割点,将空间分割为两段;最后针对两段路径分别进行精细化规划,最后进行连接,形成最终的优质路径。基于空间分割的路径规划算法原理如图 5 所示。

3.5 三次 B 样条平滑路径

经过改进蚁群算法得到的城市空间三维航路规划后,基本满足无人机约束条件,但实际飞行过程中,常常

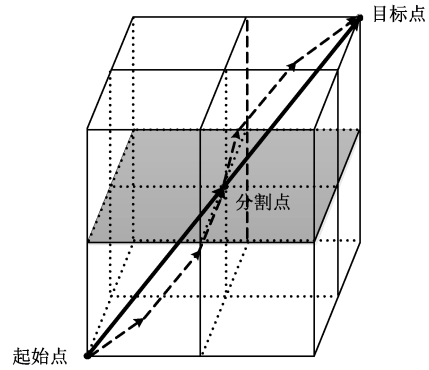


图 5 基于空间分割的路径规划算法原理

Fig. 5 Principle of path planning algorithm based on spatial segmentation

规划的航迹存在尖角,曲率不连续,因此需要对航迹进行平滑处理,生成光滑可飞的三维路径。B 样条是 Bezier 曲线的一种特例,通过对多边形进行逼近,获取光滑曲线,因其具有 C_2 连续性,并且在改变控制点位置时,不会对全局产生影响,在航迹平滑上得到广泛应用^[25]。

给定 $n+1$ 个控制点 $P_i (i=0, 1, \dots, n)$, 则 n 次均匀 B 样条曲线可表示为:

$$Qn(t) = \sum_{i=0}^n B_{i,n}(t)P_i \quad (18)$$

式中: $B_{i,n}(t)$ 为 n 阶 $n-1$ 次 B 样条曲线基函数,形成的 B 样条曲线由曲线段组成,相邻曲线拥有相同的控制点。为便于曲线局部控制,选择三次 B 样条曲线对无人机航迹进行平滑处理,矩阵可表示为:

$$S_i(t) = \frac{1}{6} [t^3 \quad t^2 \quad t \quad 1] \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 0 & 3 & 0 \\ 1 & 4 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix} \quad (19)$$

利用三次 B 样条曲线公式,生成一条曲率连续,满足无人机性能约束的光滑航迹曲线,如图 6 所示,虚线为三次 B 样条曲线平滑处理后得航迹。

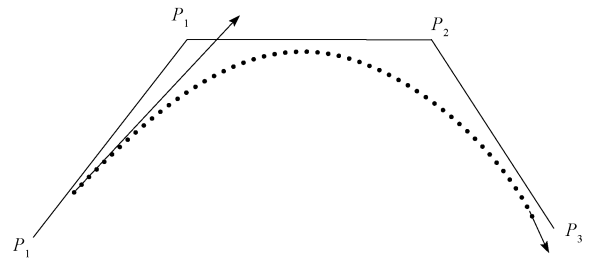


图 6 三次 B 样条曲线平滑处理

Fig. 6 Cubic B-spline curve smoothing processing

4 仿真分析

为验证本文提出的考虑区域风险评估的城市低空无



(a) 卫星图
(a) Satellite image



(b) 示意图
(b) Schematic diagram

图7 西北工业大学友谊校区地图

Fig. 7 Map of YOUYI Campus of Northwestern Polytechnical University

考虑区域风险评估的航路规划方法基本步骤如下：

- 1) 获取城市低空环境数据,并对环境进行风险评估,得到三维风险图;
- 2) 给定无人机起点和终点,将路径风险值最为性质指标函数,并利用改进蚁群算法进行寻优,找到一条风险值较低的安全路径;
- 3) 若找到的路径符合无人机安全规定,则可行,否则,将选取路径中间节点作为空间分割点,重新设定起点与终点,再利用2)中蚁群算法进行寻优,直至满足需求。

由于同一区域在不同时间段内参数差异也较大,因此在仿真过程时,参数选取参照路径规划场景某一具体时刻的瞬间值,具体可由历史数据进行估算。本文规划场景中风险评估所需参数与蚁群算法所需参数分别如表2、3所示。

表2 区域风险评估参数取值

Table 2 Values of regional risk assessment parameters

参数	取值	参数	取值	参数	取值
f_c	$6.4 \times 10^{-5} / h$	v_{max}	16 m/s	\bar{S}_{car}	8.4 m^2
m	1.38 kg	g	9.8 m/s^2	K	0.1
ρ	$30\,000 / \text{km}^2$	A	0.0188 m^2	D_{road}	3 m
r_p	0.25 m	ρ_A	1.225 kg/m^3	T	3
h_p	1.65 m	β	34 J		
R_{uav}	0.2 m	R_l	0.3		

表3 蚁群算法所需参数

Table 3 Parameters required by ant colony algorithm

参数	取值	参数	取值
NC_{max}	50	ω_2	0.2
m	10	ρ	0.8
α	0.5	Q	100
β	80	τ_{min}	0
ω_1	0.5	τ_{max}	15

按照本文提出的规划方法,对低空空域内风险值进行评估,再综合考虑无人机航路规划所需要的综合代价值,生成离散路径点,最后利用三次B样条曲线对路径进行平滑操作,得到无人机可飞路径,如图8所示。

为了验证空间曲线是否满足无人机机动性能约束,将平滑后得空间航迹分为水平和垂直方向,分别通过计算曲线的导数判断是否满足无人机最大爬升角和无人机的最小转弯半径。如图9、10所示,步长为1个编码计数单位,空间航迹曲率连续,且曲率值均 <1 ,空间航迹俯仰角均在 $\pi/3$ 以内,符合无人机性能约束,因此经过平滑处理后得路径可供无人机实际飞行。

为验证本文提出的改进蚁群算法的优越性,将标准蚁群算法与改进蚁群算法分别规划后的路径进行对比,结果如图11所示,具体数据如表4所示,在同样风险代

人机航迹规划的有效性,选择西北工业大学友谊校区作为无人机航迹规划背景,卫星图与示意图如图7所示,起点与终点位置均在图中标注。

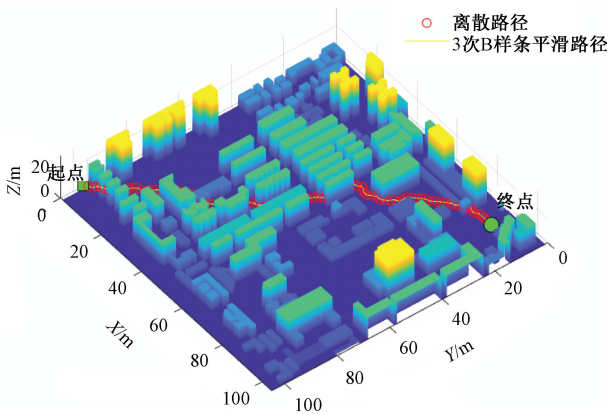


图 8 低空空域航路规划

Fig. 8 Low-altitude airspace airway planning

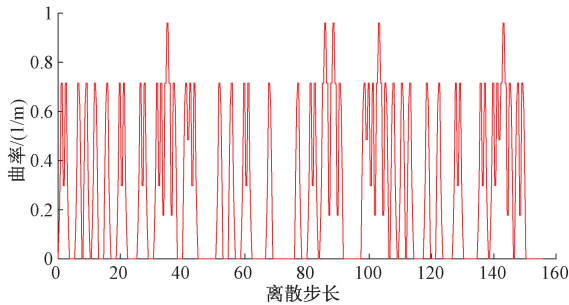


图 9 空间航迹曲率变化

Fig. 9 Curvature change of space track

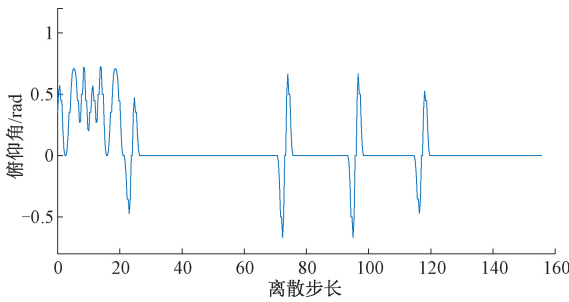


图 10 空间航迹俯仰角变化

Fig. 10 Spatial track elevation Angle variation

价条件下,标准蚁群算法规划出的路径冗余度高,经过改进后,规划出的路径可以有效减少冗余度,风险代价值降低,提升规划效果。

为进一步说明基于分割的改进方法对航路规划精细度的影响,分别选取 0~10 个分割点进行仿真,路径风险代价值随分割点数量变化的趋势如图 12 所示,随着分割点数量的增加,规划时间不断增加,路径风险值不断减小。基于空间分割的改进蚁群算法本质上是利用规划时间换取规划路径质量,以此达到路径精细规划的目的。

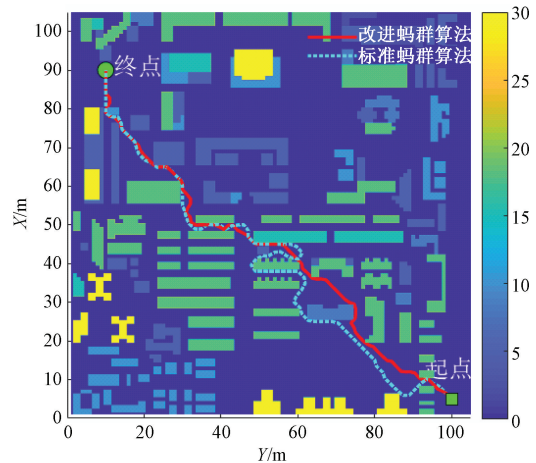


图 11 标准蚁群算法与改进蚁群算法对比

Fig. 11 Comparison of standard ant colony algorithm and traditional improved ant colony algorithm

表 4 改进算法数据对比

Table 4 Traditional improved algorithm data comparison

算法类型	风险代价值	规划时间/s
基本蚁群算法	6.12×10^{-6}	8.12
改进蚁群算法	4.82×10^{-6}	7.67

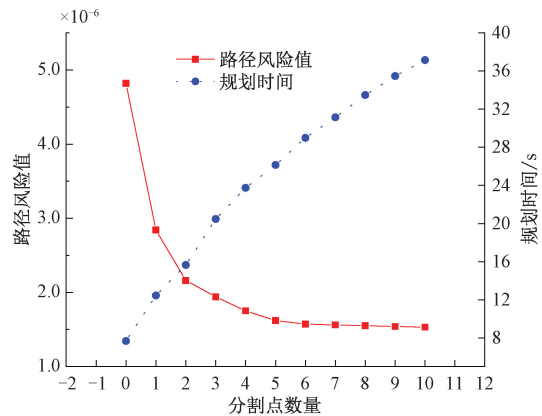


图 12 不同分割点下的性能参数变化趋势

Fig. 12 Variation trend of performance parameters at different segmentation points

将考虑风险评估的规划方法与不考虑风险评估的规划方法两种规划方法的路径风险值与路径长度进行对比,结果如表 5 所示,分析可得:考虑风险评估的规划方法通过额外支付 7% 的路径代价,换取了一条风险值降低 80% 的安全路径,有利于无人机在复杂低空环境下安全运行。

为验证算法在实际环境中的效果,将本文算法集成

表5 航路规划方法性能对比

Table 5 Performance comparison of route planning methods

类别	路径风险值	路径长度/m
考虑风险评估的规划方法	4.82×10^{-6}	152.39
不考虑风险评估的规划方法	2.37×10^{-5}	141.85

在自主设计的旋翼无人机实验平台上进行飞行实验。实验系统由多旋翼无人机、数据链和地面站构成。飞控系统采用 PIX 自驾仪,采用 GPS 系统进行定位,更新频率 10 Hz,通过串口通信进行数据传输,数传部分采用 Microhard P400-840 模块,其频率为 840 MHz,硬件系统结构如图 13 所示。

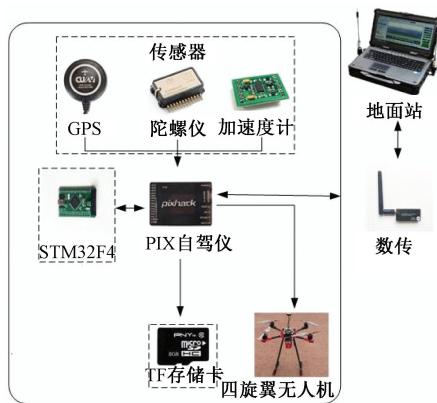


图 13 硬件系统结构

Fig. 13 Hardware system structure

无人机实际飞行动态过程如图 14 所示,地面站航迹如图 15 所示,由实飞实验分析可得:无人机能够在规避障碍物的同时,按照规划的风险值较低的路线进行安全飞行,验证了本文所提规划算法的有效性与实用性。

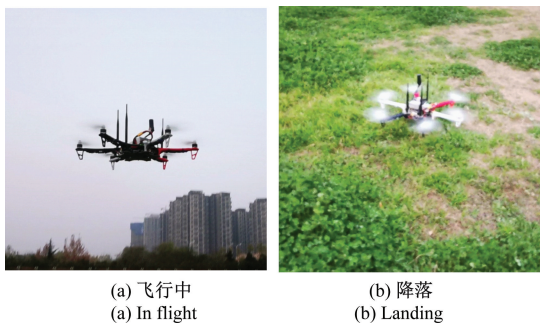
(a) 飞行中
(a) In flight(b) 降落
(b) Landing

图 14 无人机实飞过程

Fig. 14 UAV actual flight process

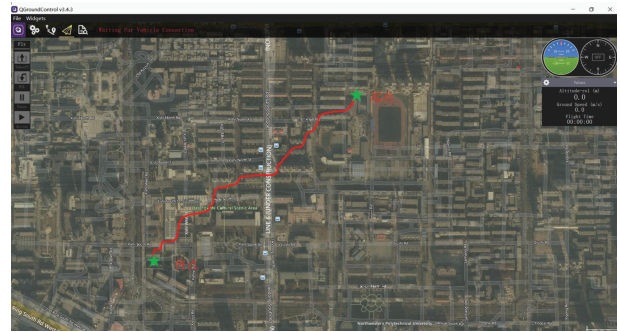


图 15 实验无人机飞行航迹

Fig. 15 Flight track of experimental UAV

5 结 论

本文结合城市复杂低空空域的特点,考虑区域风险评估,为无人机规划出一条相对安全的平滑可飞路径。针对城市低空空域障碍物种类多、不确定性高的特点,构建了包含密集障碍物的复杂低空环境,贴近实际城市运行;针对无人机坠落事故对人员、财产密度大的城市空间造成威胁的情况,基于区域风险评估,将路径风险值考虑在路径规划过程中,生成一条相对安全的规划路径;针对经典蚁群算法生成的离散路径不满足无人机性能约束问题,提出了改进蚁群算法,并用三次 B 样条曲线对路径进行平滑处理,得到无人机可飞路径。

参考文献

- [1] 全权,李刚,柏艺琴,等. 低空无人机交通管理概览与建议[J]. 航空学报,2020,41(1):6-34.
QUAN Q, LI G, BAI Y Q, et al. An overview and suggestions on traffic management of low-altitude UAV[J]. Acta Aerophenica Sinica, 2020, 41(1): 6-34.
- [2] 张启瑞,魏瑞轩,何仁珂,等. 城市密集不规则障碍空间无人机航路规划[J]. 控制理论与应用, 2015, 32(10): 1407-1413.
ZHANG Q R, WEI R X, HE R K, et al. Flight path planning of urban dense irregular obstacle space UAV[J]. Control Theory and Application, 2015, 32(10): 1407-1413.
- [3] LEVASSEUR B, BERTRAND S, RABALLAND N, et al. Accurate ground impact footprints and probabilistic maps for risk analysis of UAV missions[C]. IEEE Aerospace Conference Big Sky, 2019: 1-10.
- [4] LUO Q, WANG H B, ZHEND Y, et al. Research on path planning of mobile robot based on improved ant colony algorithm[J]. Neural Computing and Applications, 2019(1): 1-12.
- [5] BAO SH T, LU Y G. Research on path planning of UAV

- based on ant colony algorithm with angle factor [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1627(1): 1-8.
- [6] 张启钱,许卫卫,张洪海,等. 复杂低空物流无人机路径规划[J]. *北京航空航天大学学报*, 2020, 46(7): 1275-1286.
ZHANG Q Q, XU W W, ZHANG H H, et al. Path planning for logistics UAV in complex low-altitude airspace [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2020, 46(7): 1275-1286.
- [7] 张启钱,王中叶,张洪海,等. 基于 SMILO-VTAC 模型的复杂低空多机冲突解脱方法[J]. *交通运输工程学报*, 2019, 19(6): 125-136.
ZHANG Q Q, WANG ZH Y, ZHANG H H, et al. A complex low-altitude multi-aircraft conflict resolution method based on SMILO-VTAC model [J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2019, 19(6): 125-136.
- [8] SARIM M, RADMANESH M, DECHERING M, et al. Distributed detect-and-avoid for multiple unmanned aerial vehicles in national airspace [J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 2019, 141(7): 1-9.
- [9] FAN X J, GUO Y J, LIU H, et al. Improved artificial potential field method applied for AUV path planning[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, 2020: 1-21.
- [10] DURAND N. Constant speed optimal reciprocal collision avoidance[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2018, 96: 366-379.
- [11] ZHANG Y Y, LI SH, GUO H L. A type of biased consensus-based distributed neural network for path planning[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2017, 89(3): 1-3.
- [12] CHANG Y, WANG Y Q, ALSAADI F E, et al. Adaptive fuzzy output-feedback tracking control for switched stochastic pure-feedback nonlinear systems [J]. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 2019(8): 1567-1582.
- [13] ALEXANDRA G, ESTEN I G, DAC-TU H, et al. UAVs trajectory planning by distributed MPC under radio communication path loss constraints [J]. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2015, 79(1): 115-134.
- [14] WU J F, WANG H L, LI N, et al. Distributed trajectory optimization for multiple solar-powered UAVs target tracking in urban environment by adaptive grasshopper optimization algorithm [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2017, 70: 497-510.
- [15] 管祥民,吕人力. 基于满意博弈论的复杂低空飞行冲突解脱方法[J]. *航空学报*, 2017, 38(S1): 120-128.
GUAN X M, LYU R L. A conflict resolution method for complex low-altitude flight based on satisfactory game theory [J]. *Acta Aeronautica Sinica*, 2017, 38(S1): 120-128.
- [16] SISLAK D. Agent-based cooperative decentralized airplane-collision avoidance [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2011, 12(1): 36-46.
- [17] PRIMATESTA S, GUGLIERI G, RIZZO A. A risk aware path planning strategy for UAVs in urban environments [J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2019, 95(2): 629-643.
- [18] 张宏宏,甘旭升,吴亚荣,等. 基于 Monte-Carlo 的无人机系统安全目标水平评估[J/OL]. *光电与控制*: 1-6 [2020-11-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1227.TN.20201016.0848.002.html>.
ZHANG H H, GAN X SH, WU Y R, et al. Level assessment of safety targets for unmanned aerial vehicle systems based on Monte-Carlo [J/OL]. *Lightning and Control*: 1-6 [2020-11-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1227.TN.20201016.0848.002.html>.
- [19] 胡莘婷,吴宇. 面向城市飞行安全的无人机离散型多路径规划方法[J/OL]. *航空学报*: 1-11 [2020-11-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20200821.1328.006.html>.
HU X T, WU Y. Discrete multi-path planning method of unmaned aerial vehicle for urban flight safety [J/OL]. *Journal of Aviation*: 1-11 [2020-11-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20200821.1328.006.html>.
- [20] KOH C H, LOW K H, LI L, et al. Weight threshold estimation of falling UAVs (unmanned aerial vehicles) based on impact energy[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2018, 93: 228-255.
- [21] 张泽京,张曙光,柳旭,等. 无人机系统安全目标水平预估方法[J]. *航空动力学报*, 2018, 33(4): 1017-1024.
ZHANG Z J, ZHANG SH G, LIU X, et al. Estimated method of target level of safety for unmanned aircraft system[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2018, 33(4): 1017-1024.
- [22] ZHANG X J, LIU Y, ZHANG Y. Safety assessment and risk estimation for unmanned aerial vehicles operating in national airspace system [J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2018, 1-11.
- [23] YU CH X, SHEN Z Y, LI P F. Route optimization of aquatic product transportation based on an improved ant colony algorithm[J]. *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, 2020, 24(4): 488-493.
- [24] 魏潇龙,姚登凯,谷志鸣,等. 基于分割法的无人机路

径规划研究[J]. 计算机仿真, 2016, 33(1): 90-94.

WEI X L, YAO D K, GU ZH M, et al. Research on UAV path planning based on segmentation [J]. Computer Simulation, 2016, 33(1): 90-94.

- [25] NGOC H T, ANH D N Y, THANH N N. A genetic algorithm application in planning path using b-spline model for autonomous underwater vehicle (AUV) [J]. Applied Mechanics and Materials, 2020, 4796: 54-64.

作者简介



张宏宏, 2018 年于空军工程大学获得学士学位, 现为空军工程大学硕士研究生, 主要研究方向为无人机航路规划、安全评估。

E-mail: anhuifuyangzh@ sina. com

Zhang Honghong received his B. Sc. degree from Air Force Engineering University in 2018. He is currently a master student at the Air Force University of

Engineering. His main research interests include UAV path planning and safety assessment.



甘旭升(通信作者), 1997 年于空军工程学院获得学士学位, 2004 年于空军工程大学获得硕士学位, 2008 年于西北工业大学获得博士学位, 现为空军工程大学副教授, 主要研究方向为无人机空中交通管理、航空管制。

E-mail: gxsh15934896556@ qq. com

Gan Xusheng (Corresponding author) received his B. Sc. degree from the Air Force Engineering College in 1997, received his M. Sc. degree from the Air Force Engineering University in 2004, and received his Ph. D. degree from Northwestern Polytechnical University in 2008. He is currently an associate professor at the Air Force Engineering University. His main research interests include UAV air traffic management and air traffic control.