

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2312712

# 考虑地面行人安全的无人机低风险路径规划策略

李奇洋<sup>1,2</sup> 涂海燕<sup>1,2</sup> 叶鸿达<sup>1,2</sup>

(1. 四川大学电气工程学院 成都 610065; 2. 信息与自动化技术四川省高校重点实验室 成都 610065)

**摘要:** 为了提升无人机点到点作业任务的安全性,本文提出了一种低风险路径规划策略。低风险路径规划策略包括风险评估和路径规划两部分。在风险评估部分,以无人机对地面行人的风险作为评估指标,建立风险值评估模型和风险等级评估模型,以风险图作为结果表征无人机作业的安全程度。在路径规划部分,结合风险评估模型的特有背景和特点,提出了一种改进快速探索随机树\*算法,这一算法使用了路径冲突检测和优先探索等策略,可以更加有效的探索到低风险路径。最终,案例分析表明,低风险路径规划策略能有效规划出避开风险较高区域的作业路径,其路径风险代价相比于直线飞行降低了13.16%,其路径规划时间相比于对比算法降低了60.63%和12.20%。因此,这一规划策略具有实用价值,可以提升无人机作业的安全性。

**关键词:** 行人安全;无人机;风险评估;风险地图;路径规划;快速探索随机树\*算法

**中图分类号:** TP2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

## Low-risk path planning strategy to consider ground pedestrian for unmanned aerial vehicle

Li Qiyang<sup>1,2</sup> Tu Haiyan<sup>1,2</sup> Ye Hongda<sup>1,2</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Key Laboratory of Information and Automation Technology, Sichuan Universities, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** In order to improve the safety of the point-to-point operation of unmanned aerial vehicles(UAV), this paper proposes a low risk path planning strategy. Low risk path planning strategy includes risk assessment and path planning. In the part of risk assessment, the risk value assessment model and risk grade assessment model are established by taking the risk of UAV to pedestrians on the ground as the assessment index, and the risk map is taken as the result to represent the safety degree of UAV operation. In the path planning part, combined with the unique background and characteristics of the risk model, an improved rapidly-exploring random tree\* algorithm is proposed. This algorithm uses the strategies of improved collision detection and priority exploration to explore the low-risk path more effectively. Finally, the simulation results show that the low-risk path planning strategy can effectively plan the operation path to avoid the high-risk area. The risk value is reduced by 13.16% compared with the straight-line flight, and the planning time is reduced by 60.63% and 12.20% compared with the contrast algorithm. Therefore, this planning strategy has practical value and can improve the safety of UAV operations.

**Keywords:** safety of ground people; unmanned aerial vehicle; risk assessment; risk map; path planning; rapidly-exploring random tree\*

## 0 引言

近年来,无人驾驶航空器(以下简称无人机)被广泛用于各种作业背景,包括城市建设、航拍摄影、农林植保和管线巡查等。并且,随着无人机与物流货运适配性的提升,外卖配送和快递物资运送等任务在未来将进一步扩大无人机的普及。近年来随着无人机的大范围使用,无人机坠机造

成地面人员伤亡的事件也多次发生。无人机飞行过程具有极高的复杂性,飞行风险无法从根源上完全消除。为了保障地面行人的安全,通过航路规划来尽可能地降低飞行风险被普遍认为是一项可靠的安全措施<sup>[1]</sup>。因此,规划低风险路径供无人机安全作业成为热门需求。

在无人机作业安全问题上,国内外已经有不少研究。以无人机的相关管理机构为例。无人机规章制定联合体

收稿日期:2023-02-02

(Joint Authorities for Rulemaking on Unmanned System, JARUS)颁布了无人机运行风险评估和缓解的指导文件<sup>[2]</sup>。随后,美国、欧洲的航空管理机构等也均出台了相关条例文件和管理政策<sup>[3-4]</sup>。国内,民航研究所也颁布了相应的无人机试运行管理规程<sup>[5]</sup>。这些规章政策都大多参考了无人机风险评估的理论研究,Dalamagkidis等<sup>[6]</sup>参考有人机的风险管理体系,首先提出了无人机的风险评估策略和风险标准。Primatesta等<sup>[7]</sup>利用一种致死概率模型衡量无人机飞行过程的风险。La等<sup>[8]</sup>在致死概率模型的基础上做了改进,针对不同无人机提出了不同的坠落动力学模型。Primatesta等<sup>[9]</sup>将风险地图的概念引入到无人机安全研究中,以用于后续的空域管理和路径规划等任务。胡莘婷等<sup>[10]</sup>在风险概率的基础上,引入了风险成本的概念,以用于无人机作业安全程度的量化。

在路径规划方面,目前研究比较成熟<sup>[11]</sup>。但结合无人机安全和风险的路径规划成果还较少。现有的相关研究有:Primatesta等<sup>[12]</sup>在完成无人机风险评估工作的基础上,利用快速探索随机树\*(rapidly-exploring random tree, RRT\*)算法实现了以风险值作为代价的路径规划。胡莘婷等对风险指标做了一定改进,提出了风险成本的概念,利用传统RRT\*算法实现了风险路径规划<sup>[10]</sup>。Peng等<sup>[13]</sup>同时考虑飞行风险和飞行距离,利用蚁群算法搜索最优路径。胡莘婷等<sup>[14]</sup>将自己之前的风险评估工作基础上拓展到了3个高度层,并利用蚁群算法搜索最低风险路径。张宏宏等<sup>[15]</sup>提出了一种改进蚁群算法,加入聚类算子,能够同时搜索多条低风险路径。

上述文献虽然在无人机风险评估与路径规划方面做出了一定贡献,但使用的低风险路径规划方法存在一定局限性:传统RRT\*算法存在场景依赖问题,并且其在某些场景下存在随机性强,存在无效搜索多的弊端,搜索时间长的弊端;蚁群算法以迭代方法做全局任务搜索,地图尺寸较大或者求解步长较小时,求解时间会呈几何级数增长,更适合局部或小范围的路径搜索。

相比于其他算法,RRT系列算法对解决风险评估下的路径规划问题更有潜力。目前RRT系列算法相关研究有:文献[16]在RRT算法的基础上通过取消步长限制、加入贪婪搜索的方式提升算法的搜索能力。文献[17]通过反向寻优和三次样条曲线插值等策略改进RRT算法,从而降低路径长度提升路径光滑性。文献[18]提出一种无碰撞检测快速探索随机树\*(NCC-RRT\*)算法,在RRT\*算法的基础上,引入碰撞风险评估函数来改进碰撞检测,从而提高算法收敛速度。文献[19]在RRT\*算法搜索前对地图进行简化处理,并在搜索过程中加入智能采样因子策略,从而提升算法的收敛速度。

因此,为了保障地面行人安全,降低无人机作业路径的潜在风险,本文提出了一种新的无人机低风险路径规划策略。这一策略中包含了无人机风险评估模型和无人机低风

险路径规划算法。利用无人机风险评估模型评估不同飞行区域的风险程度,以飞行路径的风险代价量化整次飞行任务的安全程度,利用改进RRT\*算法规划出低风险飞行路径,从而提升无人机在城市空中作业任务的安全性。

## 1 风险评估

风险评估基于评估模型与评估方法为无人机低风险路径规划策略提供风险地图,以指导路径规划任务。

### 1.1 风险链模型

风险链模型用于计算风险值,采用国际常用的伤亡人数每时作为量化指标。

一次无人机坠机事件可被分解为4个物理阶段,分别是失事阶段、坠落阶段、撞人阶段和致死阶段。利用因果链建立概率链模型如式(1)所示。

$$R = \iint_{(x,y) \subset A} P_{\text{event}} \cdot P_{\text{descent}} \cdot P_{\text{collision}} \cdot P_{\text{fatality}} dx dy \quad (1)$$

式中: $A$ 是无人机从某一空中位置失事后在地面上的潜在坠机区域, $P$ 是坠机过程中各个物理阶段的条件概率: $P_{\text{event}}$ 对应失事阶段; $P_{\text{descent}}$ 对应坠落阶段; $P_{\text{collision}}$ 对应撞人阶段; $P_{\text{fatality}}$ 对应致死阶段。

#### 1) 失事阶段

失事阶段,无人机由于与其他飞行器或飞行物发生撞击、无人机电源、执行器等重要部件故障等原因失去动力,进入失控状态。基于现有的统计数据,这一阶段的发生概率取 $P_{\text{event}} = 10^{-3}$ 次/h<sup>[8]</sup>。

#### 2) 坠落阶段

坠落阶段,无人机从空中失事点坠落至地面。这一过程中,无人机只受到动力学的约束和风力的约束。

只存在空气动力学作用的约束下,无人机的运动状态的建模如式(2)所示。

$$m\ddot{\mathbf{x}}_d = m\mathbf{g} - c|\dot{\mathbf{x}}_d|\dot{\mathbf{x}}_d \quad (2)$$

式中: $m$ 是无人机的质量; $\mathbf{g} = [0, 0, g]^T$ , $\mathbf{g}$ 是重力加速度; $\mathbf{x}_d$ 是无人机在空气动力学作用下产生的位移。

只存在风力作用的约束下,无人机的运动状态的建模如式(3)所示。

$$\dot{\mathbf{x}}_w = \int_0^{t_d} \mathbf{v}_w dt \quad (3)$$

式中: $\mathbf{v}_w$ 是外部环境中的风速; $t_d$ 是无人机经历的坠落过程的时间; $\mathbf{x}_w$ 是无人机在风力作用下产生的位移。

假设二者的作用呈叠加效果,可以建立无人机的运动模型如式(4)所示。

$$\mathbf{x}_f = \mathbf{x}_d + \mathbf{x}_w \quad (4)$$

式中: $\mathbf{x}_f$ 是坠落过程中无人机最终的实际位移。

当模型不具有参数不确定性,可以直接解出地面撞击点位置。当模型具有参数不确定性,地面撞击点位置满足概率分布,以抽象函数表达其映射关系如式(5)所示。

$$P_{\text{descent}} = f(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{x}_d, \mathbf{x}_w) \quad (5)$$

式中： $f$  是概率密度函数映射关系<sup>[20]</sup>； $x$ 、 $y$  是地面位置坐标。在计算机分析求解时，采用蒙特卡洛方法的数值求解结果，来代替映射关系的离散化模型<sup>[21]</sup>。

3) 撞人阶段

撞人阶段，无人机撞击到地面行人。使用地面行人的暴露面积来估计撞人阶段的概率，其表达式如式(6)所示。

$$P_{\text{collision}} = \frac{NA_{\text{exp}}}{A_{\text{grid}}} \quad (6)$$

式中： $N$  是一块单位区域的人口数量， $A_{\text{grid}}$  是单位区域的面积， $A_{\text{exp}}$  是单个行人的暴露面积。单个行人的暴露面积通过无人机的俯冲运动建模<sup>[13]</sup>，模型如式(7)所示。

$$A_{\text{exp}} = 2(r_p + r_u) \frac{h_p}{\tan\theta} + \pi(r_p + r_u)^2 \quad (7)$$

式中固定参数  $h_p$ 、 $r_p$ 、 $r_u$  分别为行人高度、行人圆柱体半径、无人机圆柱体半径； $\theta$  为无人机俯冲运动角度。

4) 致死阶段

致死阶段，无人机撞击到人后致人死亡。使用动能-遮蔽模型估计行人的致死概率<sup>[22]</sup>，其表达式如式(8)所示。

$$P_{\text{fatality}} = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{\beta}{E_c}\right)^{\frac{1}{18}}}} \quad (8)$$

式中： $\alpha$  和  $\beta$  是模型中两常量参数； $E_c$  是坠地时刻无人机的碰撞动能； $S_f$  是坠机坠地位置处的遮蔽系数<sup>[21]</sup>。

1.2 风险等级图

风险等级图用于衡量区域的风险等级。风险等级建模考虑直接伤害和二次伤害两大风险源。将两种伤害源对应的风险分别进行单独评定；再将两单独风险层叠加；取二者中等级更高的结果作为此区域的最终风险等级。

1) 直接风险层

直接伤害是无人机坠机直接撞击到地面行人造成伤害。直接风险层的生成基于风险值和风险等级。风险值计算基于风险链模型。风险值与安全等级对应关系如表 1 所示。

表 1 风险值与安全等级

区域风险 阈值	区域安全 等级	安全等级 标号	区域飞行规定
$0 \sim 10^{-6}$	安全	Lv1	自由飞行
$10^{-6} \sim 10^{-5}$	低风险	Lv2	需要提前进行报备
$10^{-5} \sim 10^{-4}$	中风险	Lv3	需要安装风险缓解措施
$10^{-4} \sim 1$	高风险	Lv4	禁飞

2) 二次风险层

二次伤害是无人机坠机到地面造成的间接伤害。二次风险层的生成方法是：利用地面建筑单位的性质作筛选，确定潜在风险区，并进行单独的风险评定。

潜在风险区的中心坐标由潜在风险建筑的地理位置确

定。潜在风险区的半径大小由无人机的坠机滑翔距离确定，这一距离可以由坠落阶段的运动模型估计。潜在风险区的安全等级由其中心建筑的安全等级决定。参考无人驾驶航空器飞行管理暂行条例<sup>[23]</sup>，本文制定的安全等级划分细则如表 2 所示。

表 2 潜在风险域划分规则表

建筑单位性质	风险等级
超高建筑,军区,大型车站、码头、港口,发电厂,变电站,易燃易爆物仓库等	高风险
有人驾驶机场,中型车站、码头、港口,大型加油站,生化物仓库等	中风险
其他建筑单位	安全

2 路径规划

根据无人机风险评估理论，将两单独风险图层叠加，生成整体风险等级图。在风险等级图中，高风险区域是禁飞区；非高风险区域虽然都可飞，但不同区域的直接风险层的风险值大小依旧有差异。因此，在需要避开高风险禁飞区的前提下，为了规划出一条整体风险尽量低的飞行路径，本文提出一种改进 RRT\* 算法用于低风险路径规划策略，同时利用直接风险层的风险值图和整体风险等级图指导无人机的路径规划任务。

对于常规路径规划任务，一般采用经典 RRT\* 算法搜索路径。经典 RRT\* 算法的细节可以参考文献[20]<sup>[24]</sup>。

与常规路径规划任务相对比，本文的路径规划任务主要有以下特点：

1) 规划飞行路线时，需要同时满足规划风险最低路径和规避高风险禁飞区的需求。

2) 路径风险衡量指标为整条飞行路径的风险代价。

3) 高风险禁飞区具有形状规整、分布稀疏的特点。

将这一任务抽象为最优代价与避障的路径规划问题。其中代价值即为风险值，并且具有不连续的特点；其中抽象的障碍物区即为高风险禁飞区，并且具有形状规整、分布稀疏的特点。因此，提出本文的路径规划思想：利用直接风险层的风险值图指导规划低风险路径；利用风险等级图指导规避高风险禁飞区。

对传统 RRT\* 算法做出如下改进以适配：

1) 提出风险代价作为路径代价函数。

2) 针对禁飞区域形状规整的特点，提出改进路径冲突检测策略。

3) 针对禁飞区域分布稀疏的特点，加入目标点采样。

4) 针对区域风险等级评估的背景，提出优先探索策略。

2.1 代价函数

在路径规划中以无人机飞行任务的安全性能作为首要保障。因此，无人机的飞行任务的安全程度以单程飞行风

险为量化指标。在理想的空管政策中,一次预定的飞行任务需要量化的风险低于一定阈值,才可作为安全任务进行批准。因此,提出单程飞行风险模型作为路径规划的代价函数,其表达式如下:

$$C = \int_{init}^{goal} R(x, y) ds \quad (9)$$

式中:  $C$  是单程飞行风险代价,量化了整次飞行任务的风险程度,飞行风险代价越高,飞行任务安全程度越低;  $init$  和  $goal$  是无人机飞行任务起点与终点;  $R$  是风险值;  $x, y$  是地面位置坐标;  $s$  是飞行路径。

## 2.2 路径冲突检测

传统 RRT\* 算法利用碰撞检测方法避开不可行区域。其思想是将潜在路径按小分辨率采样,再逐点遍历判断是否在不可行区域内,从而判断路径是否与不可行区域发生碰撞。由于需要遍历,这一检测方法存在耗时高,效率低的缺点。

针对风险地图中禁飞区形状规整的特点,本文提出一种路径冲突检测策略,代替碰撞检测方法,指导无人机路径规避禁飞区域。

策略的思想是利用禁飞区中心点到潜在路径的距离实现可行性检测,具体模型如下。其中多边形区域为禁飞区域;  $O$  点为禁飞区域中心;  $A_i$  点为潜在路径  $i$  的起始点;  $B_i$  点为潜在路径  $i$  的终止点;  $OL$  为禁飞区域最大半径。

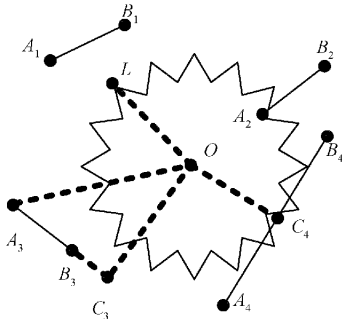


图1 路径冲突检测示意图

1) 当禁飞区中心到路径起始点的距离大于最大半径和路径长度之和,路径和禁飞区没有冲突,如图1中的路径1所示。

$$|\vec{OA}_1| > |\vec{OL}| + |A_1B_1| \Rightarrow \text{NoCollision} \quad (10)$$

2) 当禁飞区中心到路径起始点的距离小于最大半径,路径和禁飞区可能会冲突,如图1中的路径2所示。

$$|\vec{OA}_2| < |\vec{OL}| \Rightarrow \text{Collision} \quad (11)$$

3) 当禁飞区中心到路径起始点的距离介于上述二者之间,则通过禁飞区中心到路径的垂线距离来判断是否发生冲突。当垂线距离大于禁飞区最大半径时,不会发生冲突,如图1中的路径3所示;当垂线距离小于禁飞区域最大半径时,可能会发生冲突,如图1中的路径4所示。

$$|\vec{AC}| = \frac{|\vec{AO} \times \vec{AB}|}{|\vec{AB}|} \quad (12)$$

$$|\vec{OC}| = \sqrt{|\vec{AO}|^2 - |\vec{AC}|^2} \quad (13)$$

$$|\vec{OC}_3| \leq |\vec{OL}| \Rightarrow \text{Collision} \quad (14)$$

$$|\vec{OC}_4| > |\vec{OL}| \Rightarrow \text{NoCollision} \quad (15)$$

当潜在路径一定不会发生冲突,既路径不会经过禁飞区时,则采取当前路径为可行路径;当潜在路径可能会发生冲突时,既路径可能会经过禁飞区时,一律视作路径为不可行路径。

在 RRT\* 拓展树拓展节点时,利用路径冲突检测策略代替原有碰撞检测方法,来检测拓展路径的可行性。通过实验对比二者性能:以本文地图为示例,以 2.5 m 步长作为采样步长,每组取 10 000 条潜在路径,取 3 组对比试验,检测时间花费如表 3 所示。

表3 时间花费

单条路径长度	75 m	125 m	250 m
传统碰撞检测方法	0.883 s	1.084 s	2.226 s
路径冲突检测策略	0.209 s	0.199 s	0.198 s

通过上述实验结果可以发现,传统碰撞检测方法的时间花费远大于路径冲突检测策略;且路径冲突检测策略的时间花费不受路径长度影响。

因此,这一方法虽然牺牲了小部分禁飞区近处的可行路径,但可以保证一定规避禁飞区;且在算法实现层面大大提升了路径检测效率,减少了路径规划的时间花费。

## 2.3 目标点采样

传统路径规划算法针对的地图具有随机性大、障碍物连通域多的特点,因此 RRT\* 使用随机探索方式,但这一方式存在偏离目标区域和无效搜索的问题。本文模型中,地图中的禁飞区域有分布稀疏的特点,利于使用直线探索方式。因此,在搜索初始路径时,加入目标点采样策略,以引导直线探索<sup>[25]</sup>。

目标点采样策略是指拓展树在拓展新节点时,只以一定的概率采样随机点作为新节点;以剩余概率采样最终目标点作为新节点。新节点再进行后续的改写父节点和重布线等操作。

目标点采样策略加入后,随机树的探索目标性更强,收敛速度加快。因此,这一策略非常适合用于搜索初始路径。

## 2.4 优先探索

传统 RRT\* 算法的拓展树都是采用随机探索策略,拓展新的随机节点时以同等概率在地图上进行均匀的局部采样。这一策略使得拓展树的搜索具有随机性,从而扩大搜索范围,但存在无效搜索多的弊端,搜索时间长的弊端。本文的规划任务中,是以风险指标作为代价,并且每块区域同时具有风险值和风险等级的属性。结合这一背景,为了更快地探索到更低风险的路径,因此提出优先探索策略,将其引用于初始路径优化阶段。

优先探索策略是一种非随机采样策略,思想是引导拓

展树朝向更低风险等级的区域进行探索。根据这一思想,拓展树将以更高的概率探索风险等级更低的区域;将以更低的概率探索风险等级更高的区域。这一策略的具体实现可分为前处理和采样两阶段。

1)前处理阶段:利用卷积核计算区域的聚集风险。卷积核尺寸取 3~5 倍探索步长,卷积核元素取各区域的权重系数,卷积值为该区域的聚集风险值  $v$ 。聚集风险值越大,附近一片区域的风险程度的越高。聚集风险值求解过程如图 2 所示。

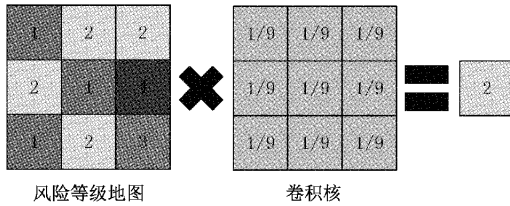


图 2 聚集风险值求解

2)采样阶段:采样阶段加入二次采样机制,以提高低聚集风险区域的被采样概率。当采样到当前区域时,有一定概率触发二次采样机制;二次采样后选择两次采样区域中聚集风险值更小的区域作为最终采样区域。每个区域触发二次采样机制的概率值与聚集风险值成正比,其模型如下:

$$P_{ds}(x,y) = \frac{\ln v(x,y)}{\ln v_{\max}}, 1 \leq v(x,y) \leq 4 \quad (16)$$

式中:  $v$  是聚集风险值;  $x, y$  是地面位置坐标;  $P_{ds}$  是对应区域采样时触发二次采样机制的概率。当地区聚集风险值越高,触发二次采样机制的概率越大,因此更容易采样聚集值更低的区域作为最终采样区域以进行后续探索。

基于风险等级地图,分别采用随机探索策略和本文提出的优先探索策略进行 1 000 次的新节点采样。不同风险等级的区域的采样点数量占比统计结果如表 4 所示。根据结果可知,引入优先探索策略后,探索树将更趋向于采样更低风险的区域,被采样区域的整体风险更低。

表 4 采样点统计结果 %

路径长度	安全区	低风险区	中风险区	高风险区
随机探索策略	35.9	43.5	15.6	5.0
优先探索策略	51.3	40.5	7.7	0.5

### 3 案例分析

本文选取 DJI Phantom 4 无人机和一块市区普通地域分别作为飞行无人机和飞行区域。按照本文策略进行风险评估和路径规划的仿真算例分析。飞行无人机的参数信息如表 5 所示,符号  $N$  表示带不确定性参数的正态分布。飞行区域位于四川省成都市高新区,区域规格为 5.5 km × 5.5 km,区域地理坐标为(104.018 6, 30.624 4)。飞行区域地图如图 3 所示。仿真算例分辨取 25 m × 25 m,以用于

模型离散化、地图栅格化和数据分析处理等操作。

表 5 无人机参数信息

参数	数值
无人机质量( $m \cdot kg^{-1}$ )	1.4
无人机最大半径( $r \cdot m^{-1}$ )	0.2
无人机阻力系数( $c$ )	0.0091
无人机水平方向速度( $v \cdot ms^{-1}$ )	$N(9,3)$
无人机垂直方向速度( $v \cdot ms^{-1}$ )	$N(0,1)$
无人机飞行高度( $h \cdot m^{-1}$ )	$N(120,5)$



图 3 飞行区域地图

#### 3.1 风险评估

从相关部门获取飞行区域的人口分布;利用 OpenStreet 获取飞行区域的地图模型;通过区域分类<sup>[21]</sup>获取飞行区域的遮蔽系数分布。利用本文所提出的策略,离线评估得到飞行无人机在飞行区域执行飞行任务的风险值图和风险等级图如图。风险值图如图 4 所示,风险等级图如图 5 所示。

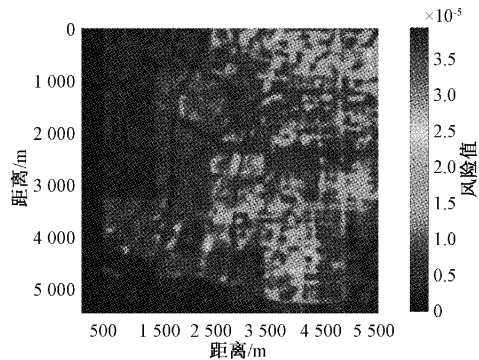


图 4 风险值图

#### 3.2 路径规划

以飞行无人机的单程飞行任务,利用本文提出的策略进行路径规划。算法的步长取 50 m,算法重布线半径取 100 m。假设飞行起点和终点为飞行区域左下与右上,利用普通 RRT\*、NCC-RRT\* 算法和本文的改进 RRT\* 算法做规划,路径如图 6 所示。

由图 6 可知,所规划路径避开了高风险等级的禁飞区,

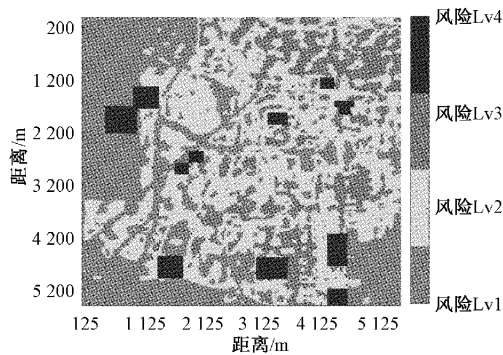


图5 风险等级图

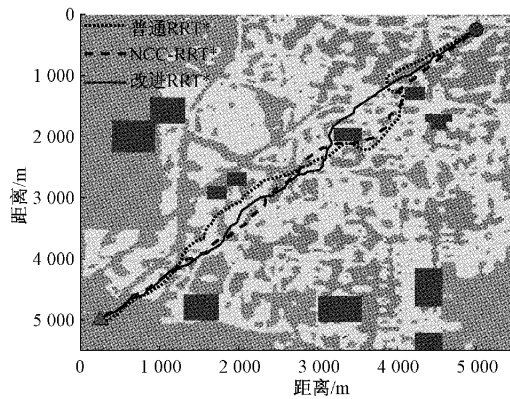


图6 飞行路径

所选路径经过区域大多为风险值较低的区域。将本文提出方法与对比方法相比较,重复仿真实验10次,规划路径的飞行距离和风险值等信息如表6所示。

表6 仿真实验结果

	飞行距离/m	风险代价	规划时间/s
直线飞行	6 717.5	$6.363 \times 10^{-2}$	—
传统 RRT*	7 678.0	$6.145 \times 10^{-2}$	28.095
NCC-RRT*	7 267.3	$5.973 \times 10^{-2}$	12.599
改进 RRT*	7 225.5	$5.525 \times 10^{-2}$	11.062

本文所提出策略求解的路径相比于直线飞行方法的路径:在实际飞行距离轻微增加的情况下,避开了沿途的2个高风险区域,单程飞行路径的风险代价降低了13.16%。将本文策略与传统RRT\*算法和NCC-RRT\*算法对比:规划路径的风险代价降低了10.09%和7.50%,规划时间降低了60.63%和12.20%。因此,这一规划路径方法具有实用价值,可以规划低风险代价的飞行路径从而提高飞行安全性,可以运用于实际的航空管理和路径规划,提高无人机空中作业的安全性。

#### 4 结 论

针对无人机点到点的作业背景,本文提出了一种低风

险路径规划策略用于提升无人机空中作业的安全性。这一策略包括风险评估和路径规划两部分。在风险评估部分,建立了无人机风险评估模型,同时提出了风险值和风险等级指标,用于衡量无人机飞行作业的安全程度。在路径规划部分,针对风险评估结果的特点,提出了一种具有针对性改进的RRT\*算法,基于风险值和风险等级做无人机的低风险路径规划。最终仿真实验表明,利用本文策略可以规划出一条低风险路径,这条路径可以规避风险较高的区域,从而降低单程飞行的整体风险,提升无人机作业的安全性。

#### 参考文献

- [1] 李亚飞,刘明欢,王莉莉.建筑物影响下的无人机城区运行风险评估[J].中国安全科学学报,2022,32(7):136-42.
- [2] JARUS. JARUS CS-LUAS recommendations for certification specification for light unmanned aeroplane systems[R/OL].(2016-11-20)[2016-09-11].[http://jarus-rpas.org/wp-content/uploads/2023/06/jar\\_07\\_doc\\_CS\\_LUAS.pdf](http://jarus-rpas.org/wp-content/uploads/2023/06/jar_07_doc_CS_LUAS.pdf).
- [3] AGENCY E A S. Notice of proposed amendment introduction of a regulatory framework for the operation of drones[R/OL].(2017-05-01)[2017-05-01].[http://www.woebeking.de/downloads/5.EMFU\\_NPA\\_2017-05\\_Introduction.pdf](http://www.woebeking.de/downloads/5.EMFU_NPA_2017-05_Introduction.pdf).
- [4] ADMINISTRATION F A. FAA unmanned aircraft systems integraion pilot program[R/OL].(2020-01-01)[2020-01-01].[https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/uas/programs\\_partnerships/completed/integration\\_pilot\\_program/IPP\\_Final\\_Report\\_20210712.pdf](https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/uas/programs_partnerships/completed/integration_pilot_program/IPP_Final_Report_20210712.pdf).
- [5] 中国民航局.我国民航局发布《特定类无人机试运行管理规程(暂行)》[J].机器人技术与应用,2019(2):1.
- [6] DALAMAGKIDIS K, VALAVANIS K P, PIEGL L A. Evaluating the risk of unmanned aircraft ground impacts[C].Control and Automation, 2008 16th Mediterranean Conference on, IEEE, 2008.
- [7] PRIMATESTAA S, CUOMOB L, GUGLIERI G. An innovative algorithm to estimate risk optimum path for unmanned aerial vehicles in urban environments[J].Transportation Research Procedia, 2018, 35:44-53.
- [8] LA COUR-HARBO A. Quantifying risk of ground impact fatalities for small unmanned aircraft[J].Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2018, 93(1-2): 367-84.
- [9] PRIMATESTA S, RIZZO A, LA COUR-HARBO A. Ground risk map for unmanned aircraft in urban environments[J].Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2019, 97(3-4): 489-509.
- [10] 胡莘婷,戴福青.基于城区行人安全的无人机运行风险评估[J].中国安全科学学报,2020,30(8):

- 137-42.
- [11] 叶鸿达, 黄山, 涂海燕. 基于改进 Bi-RRT\* 算法的移动机器人路径规划[J]. 电光与控制, 2022, 29(2): 76-81.
- [12] PRIMATESTA S, CUOMO L S, GUGLIERI G, et al. An innovative algorithm to estimate risk optimum path for unmanned aerial vehicles in urban environments[J]. Transportation Research Procedia, 2018, 35: 44-53.
- [13] PENG H A N, YIFEI Z. An air route planning model of unmanned aerial vehicles under constraints of ground safety [J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2021, 38(2):298-305.
- [14] 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]. 航空学报, 2021, 42(6): 463-74.
- [15] 张宏宏, 甘旭升, 李双峰, 等. 复杂低空环境下考虑区域风险评估的无人机航路规划[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(1): 257-66.
- [16] 文汉云, 刘攀. 基于多策略改进的 RRT 算法[J/OL]. 长江大学学报(自然科学版), 1-8[2023-12-27]<https://doi.org/10.16772/j.cnki.1673-1409.20220517.002>.
- [17] 谭波, 罗均, 罗雨松, 等. 改进 RRT 算法的机器人路径规划[J]. 重庆大学学报, 2023, 46(9):13-22.
- [18] 林依凡, 陈彦杰, 何炳蔚, 等. 无碰撞检测 RRT\* 的移动机器人运动规划方法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(10): 257-67.
- [19] 许万, 杨晔, 余磊涛, 等. 一种基于改进 RRT\* 的全局路径规划算法[J]. 控制与决策, 2022, 37(4): 829-38.
- [20] LA COUR-HARBO A. Ground impact probability distribution for small unmanned aircraft in ballistic descent [C]. 2020 International Conference on Unmanned Aircraft Systems(ICUAS). IEEE, 2020.
- [21] 王文涛, 甘旭升, 吴亚荣, 等. 考虑不确定性的低空无人机运行风险评估方法[J]. 现代防御技术, 2022, 50(5):14-21.
- [22] On integrating unmanned aircraft systems into the national airspace system: Issues, challenges, operational restrictions, certification, and recommendations [M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2009.
- [23] 无人驾驶航空器飞行管理暂行条例[N]. 人民日报, 2023-06-29(17).
- [24] 韩晓微, 石泽亮, 王骁. 一种改进的双向 Informed-RRT\* 算法[J]. 沈阳大学学报(自然科学版), 2022, 34(6): 442-52, 20.
- [25] 王雨, 刘延俊, 贾华, 等. 基于强化 RRT 算法的机械臂路径规划[J]. 山东大学学报(工学版), 2022, 52(6): 123-130, 138.

#### 作者简介

李奇洋, 硕士研究生, 主要研究方向为无人机风险评估、路径规划和非线性控制等。

E-mail: liqiyang@stu.scu.edu.cn