

中文引用格式:李楠,闫博芸,孙廩实,等. 考虑空中碰撞风险的 UAV 运行风险评估[J]. 中国安全科学学报,2025,35(10):91-97.

英文引用格式:LI Nan, YAN Boyun, SUN Linshi, et al. Risk assessment of UAV operation considering risk of mid-air collision [J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(10): 91-97.

考虑空中碰撞风险的 UAV 运行风险评估^{*}

李楠¹副教授, 闫博芸¹, 孙廩实², 韩鹏¹副教授, 郑志刚³, 焦庆宇³

(1 中国民航大学 空中交通管理学院, 天津 300300; 2 春秋航空股份有限公司 航务部, 上海 200335; 3 中国民航科学技术研究院 民航运行技术研究所, 北京 100028)

中图分类号: X949

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.10.0894

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助(52102419)。

【摘要】 为提高无人机(UAV)空中交通管理效率、保障飞行安全以及推动 UAV 在复杂空域环境中的安全应用, 聚焦于 UAV 运行风险评估。首先, 针对非结构化空域环境下具有自主感知与决策能力的 UAV, 基于机载通信导航监视能力、机动特性及系统响应时间等关键参数, 构建冲突概率模型和考虑避让机动策略的碰撞概率模型, 量化评估空域碰撞风险; 然后, 鉴于 UAV 相撞事故不会直接导致人员伤亡, 构建综合考虑 UAV 空中相撞事件与系统失效引发坠机的地面风险评估模型; 最后, 以 1×10^{-6} 死亡人数/飞行小时作为安全目标水平, 确定空中飞行所需保持的安全间隔。结果表明: 同时考虑冲突概率和冲突升级为碰撞的概率, 可解决自由飞行阶段风险被低估的问题; 不同运行场景可容许的碰撞风险最大值有较大差异。

【关键词】 无人机(UAV); 运行风险; 碰撞风险; 地面风险; 安全间隔

Risk assessment of UAV operation considering risk of mid-air collision

LI Nan¹, YAN Boyun¹, SUN Linshi², HAN Peng¹, ZHENG Zhigang³, JIAO Qingyu³

(1 College of Air Traffic Management, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China; 2 Operations Management Center, Spring Airlines Co., Ltd., Shanghai 200335, China; 3 Institute of Civil Aviation Operation Technology, CAAC Academy of Science and Technology, Beijing 100028, China)

Abstract: To improve the efficiency of UAV air traffic management, ensure flight safety and promote the safe application of UAVs in complex airspace environments, the risk assessment of UAV operation was focused in this paper. Firstly, for UAVs with autonomous perception and decision-making capabilities in unstructured airspace environments, based on key parameters such as airborne communication, navigation and surveillance capabilities, maneuvering characteristics and system response time. A conflict probability model and a collision probability model considering avoidance maneuvering strategies were constructed to quantitatively evaluate the airspace collision risks. Then, considering that UAV collision accidents do not directly cause casualties, a ground risk assessment model was constructed that comprehensively considers UAV aerial collision events and crashes caused by system failures. Finally, taking 1×10^{-6} deaths/flight hours as the safety target level, the safety separation that needs to be maintained during airborne flights was determined. The results show that considering both the conflict probability and the probability of the

* 文章编号: 1003-3033(2025)10-0091-07; 收稿日期: 2025-06-01; 修稿日期: 2025-08-19

conflict escalating into a collision simultaneously can solve the problem of underestimated risks during the free flight stage. The maximum allowable collision risk varies significantly among different operating scenarios.

Keywords: unmanned aerial vehicle (UAV); operation risk; collision risk; ground risk; safety interval

0 引言

随着无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)流量的爆发式增长^[1],多架 UAV 混合运行引发的碰撞风险已成为制约 UAV 大规模应用的关键因素之一^[2]。因此,UAV 运行风险评估已成为 UAV 交通管理领域的研究热点。

诸多学者对此开展了研究,TAN Dayang 等^[3]通过建立 UAV 间隔距离与冲突次数的关联模型,开展城市非管制空域下 UAV 安全间隔阈值研究,仿真分析直飞和速度控制 2 种飞行模式,结果表明:空域密度与冲突次数呈正相关关系,当超过特定临界值时需实施航路或速度管控。张洪海等^[4]采用三维高斯分布与碰撞概率建模方法,开展自由空域环境下多旋翼 UAV 安全间距研究,通过建立 UAV 碰撞风险模型并设定 5% 风险阈值,得出经纬 M600 Pro 机型三维空间安全间隔。励瑾等^[5]基于改进 Reich 模型与位置误差分析相结合的方法,开展城市低空环境下 UAV 与飞鸟碰撞风险评估研究,并通过多航路场景进行仿真验证。在 UAV 地面风险方面,WEIBEL 等^[6]采用事件建模与风险分析方法,开展 UAV 在国家空域系统运行的安全评估研究,提出基于故障率、影响范围、人口密度、遮蔽系数及缓解措施的风险模型。DALAMAGKIDIS 等^[7]采用等效安全水平分析框架与量化模型相结合的方法,建立综合动能参数与遮蔽保护效应的致死概率预测模型,为构建 UAV 监管框架提供了理论支撑。CHE 等^[8]采用多体动力学仿真技术,系统研究了不同故障模式的飞行器坠落路径及影响区域的动态特性。MILANO 等^[9]综合考虑人口分布特征、遮蔽保护效应以及限制飞行区域等多维因素,提出了风险热力图评估体系,开展地面风险评估。JIAO Qingyu 等^[10]通过构建融合卷积神经网络与深度神经网络的 C-Snet 模型,并结合动力学理论开展 UAV 地面风险评估研究,提出一种动态风险评估方法,结果表明:该方法能有效捕捉风险时空特征并实现预测。韩鹏等^[11]通过建立环境影响因子与地面撞击风险评估模型,开展 UAV 在不同任务场景下的地面撞击

风险研究,发现气象条件、地形特征及通信质量显著影响事故风险等级。现有研究还存在以下 2 点不足:①在 UAV 自由飞行阶段,忽略了冲突概率的影响。②在地面风险评估方面,忽略了由于空中碰撞坠地造成的风险,且大多研究借鉴了载人航空器的评估方法。然而,UAV 相撞事故不会直接导致人员伤亡,沿用传统方法所确定的安全间隔往往存在过度保守的问题。

鉴于此,笔者拟针对非结构化空域环境下具有自主感知与决策能力的 UAV,构建综合考虑 UAV 空中相撞事件与系统失效引发坠机的地面风险评估模型,以 UAV 规章联合体制定的风险评估指南(Specific Operations Risk Assessment, SORA)^[12]提出的 1×10^{-6} 死亡人数/飞行小时作为安全目标水平,确定空中飞行的安全间隔,以期 UAV 运行风险评估提供依据。

1 非结构化空域空中碰撞风险模型

非结构化空域空中碰撞风险模型如下:

$$P_c = P_n \cdot P_l \quad (1)$$

式中: P_c 为空中碰撞概率; P_n 为 UAV 在空域中的冲突概率; P_l 为冲突进一步演化为碰撞的概率。

1.1 非结构化空域环境下的冲突概率模型

在非结构化空域环境中, UAV 的空间分布具有随机性,当 UAV 进入该区域时,冲突概率如下:

$$P_n = \rho_u \cdot V_n \quad (2)$$

式中: ρ_u 为该区域的 UAV 分布密度,架次/ m^3 ; V_n 为 UAV 单位时间内的相对运动空间体积, m^3 。将 1 架 UAV 的体积视为 2 架 UAV 的体积和,将另 1 架 UAV 视为质点,当质点与组合区域在空间上发生重叠,即可判定为发生冲突。某一时刻的冲突体积 V_0 如下:

$$V_0 = \frac{2\pi}{3}XYZ \quad (3)$$

式中 X 、 Y 、 Z 为 2 个 UAV 在侧向、纵向、垂向的距离, m 。

在 ΔT 内的相对运动空间体积为如下:

$$V_n = YZ\pi \left(V_l \cdot \Delta T + \frac{2}{3}X \right) \quad (4)$$

式中: V_l 为相对速度, m/s ; ΔT 为运动时间, s 。假设 UAV 之间的冲突相互独立, ΔT 时间内的冲突概率如下:

$$P_n = \frac{N}{V_s} \cdot \frac{(N-1)}{2} YZ \pi \left(V_l \cdot \Delta T + \frac{2}{3} X \right) \quad (5)$$

式中: N 为 UAV 数量, 架; V_s 为空域体积, m^3 。

1.2 基于避让机动策略的碰撞概率模型

在近距离接近阶段, 2 架 UAV 可执行避让机动策略进而避免相撞。岳仁田等^[13]通过仿真得出协同等角偏转的避让效果最优, 即 2 架 UAV 同时向左或向右转向相同角度, 如图 1 所示。在避让机动过程中, 2 架 UAV 之间距离最小的位置为最近接近点 (Point of Closest Approach, PCA), 若 2 架 UAV 抵达最近接近点时的间距小于 UAV 的半径和, 视为发生碰撞; 反之, 视为成功避让。

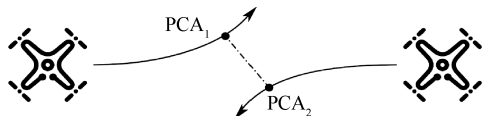


图 1 避让方式

Fig. 1 Schematic diagram of collision avoidance

在非结构化空域环境中, UAV 运行轨迹具有随机性, 可能产生任意相对航向角度的相遇。为确保安全运行, 选取相对航向角为 180° 进行分析。若该角度能有效避让, 则与其他任何角度相遇, 均可满足安全要求。

假设 UAV 在 0 时刻开始执行避让机动策略, 则 UAV_i 在 Δt 时刻的位置为:

$$\begin{aligned} u_i(\Delta t) = & \\ \begin{cases} x_i(\Delta t) = x_i(0) + v_i \cdot \cos(\varphi_i(0) + \theta_i \Delta t) \cdot \Delta t \\ y_i(\Delta t) = y_i(0) + v_i \cdot \sin(\varphi_i(0) + \theta_i \Delta t) \cdot \Delta t \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $x_i(\Delta t)$ 、 $y_i(\Delta t)$ 分别为 Δt 时刻 x 、 y 轴位置坐标; v_i 为 UAV_i 的速度, m/s ; $\varphi_i(0)$ 为初始航向; θ_i 为转弯率的最大值, rad/s 。

2 架 UAV 在 Δt 时刻的相对距离 $D(\Delta t)$ 为:

$$D(\Delta t) = u_1(\Delta t) - u_2(\Delta t) \quad (7)$$

定义 2 架 UAV 从启动避让机动策略直至到达 PCA 处所经过的时间为 t_{PAC} 。设定初始间隔为极小值, 随后迭代执行以下流程: 将 2 架 UAV 到达 PCA 时的相对距离 $D(t_{\text{PAC}})$ 和组合体半径 $2r$ 进行对比, 如果 $D(t_{\text{PAC}}) \leq 2r$, 则逐步增大间隔, 并重新执行上述流程, 直到 $D(t_{\text{PAC}}) > 2r$, 此时记录的间隔就是有效执行避让机动策略所需的最小间隔。

执行避让机动策略的步骤为: ①检测、跟踪; ②间隔指令; ③驾驶员/自动驾驶系统处理; ④避让机动。步骤①至④所需安全间隔 l 如下:

$$l = l_a + c \cdot (t_l + t_s + t_p) \quad (8)$$

式中: l_a 为成功执行避让机动策略所需的间隔, m ; c 为 2 架 UAV 的相对速度, m/s ; t_l 为检测、跟踪所需的时间, s ; t_s 为间隔指令响应时间, s ; t_p 为驾驶员或自动驾驶系统处理所需的时间, s 。式 (8) 中, 各个参数会受系统偏差、定位精度及人为因素的影响。假设各影响因素均符合高斯分布特征^[14], l 的标准差 σ 为:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_a^2 + t^2(\sigma_l^2 + \sigma_s^2 + \sigma_p^2)} \quad (9)$$

式中: σ 为 l 的标准差; σ_a 、 σ_l 、 σ_s 、 σ_p 分别为式 (8) 中变量 l_a 、 t_l 、 t_s 、 t_p 的标准差; t 为执行避让机动策略的总时间, s 。

有效执行避让机动策略的概率如下:

$$P_a = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \int_{-\infty}^s \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) dx \quad (10)$$

式中: P_a 为有效执行避让机动策略的概率; S 为 2 架 UAV 之间的距离, m ; μ 为 l 的均值; x 为避让机动中的实时距离, m 。从冲突升级为碰撞事件的概率 P_l 如下:

$$P_l = 1 - P_a \quad (11)$$

2 地面风险评估模型

UAV 因无需搭载人员, 发生空中相撞事故时不会引发机组人员的伤亡, 故将空中相撞概率与系统失效概率作为输入参数, 构建地面风险评估模型, 量化评估其导致地面人员伤亡的概率。

具体评估流程包括: ①基于 UAV 坠落方式确定影响范围; ②结合区域人口分布密度计算潜在受影响人数; ③综合考虑障碍物遮蔽效应和冲击动能分析致死率; ④结合坠机概率、影响人数及致死率, 实现运行风险的量化评估。

地面风险 P_k 可表示为:

$$P_k = P_e \times N_p \times P_s \quad (12)$$

式中: P_e 为坠地事故发生的概率; N_p 为受影响的地面人员数量; P_s 为事故导致的致死率。

2.1 坠地事故发生概率

假设 UAV 产生碰撞事故即会坠落, 在坠落过程中保持结构完整性。系统失效概率 P_f 如下:

$$P_f = \frac{1}{T_f} \quad (13)$$

式中 T_f 为 2 次连续故障之间的间隔时间^[8], s。

UAV 坠地事故发生的概率如下:

$$P_e = P_i + P_f \quad (14)$$

2.2 坠地事故影响人数

坠地事故影响人数 N_p 如下:

$$N_p = A \times \rho_p \quad (15)$$

式中: A 为 UAV 坠地事故的影响区域面积, m^2 ; ρ_p 为人口密度, 人/ m^2 。

UAV 下坠方式可为垂直向下坠落和以一定的俯冲角度冲击地面。

垂直向下坠落的影响范围是一个圆, 如图 2 所示。图 2 中, 参数 R_U 为 UAV 的半径, m; W_p 为人体宽度的平均值, m。可推导出 UAV 垂直向下坠落的影响范围面积, 计算公式如下^[15]。

$$A_1 = \pi \cdot (W_p + R_U)^2 \quad (16)$$

UAV 以一定的俯冲角度冲击地面的影响范围如图 3 所示。

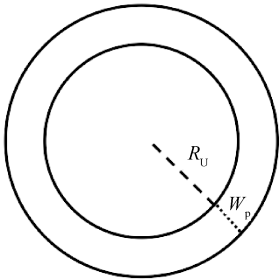


图 2 垂直向下坠落的坠地影响范围

Fig. 2 Impact area of vertical downward fall

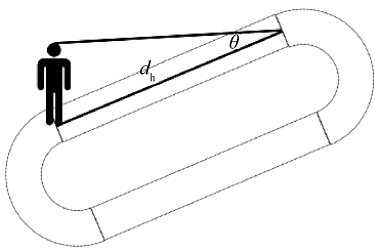


图 3 以一定的俯冲角度冲击地面的影响范围

Fig. 3 An area of impact that falls downward at an angle

UAV 从人体平均高度至完全触地过程中, 在其运动轨迹所形成的空间扫掠范围中均有可能接触到人体。坠地影响范围的面积计算如下:

$$d_h = \frac{H_p}{\tan \theta} \quad (17)$$

$$A_2 = 2d_h(H_p + R_U) + \pi(H_p + R_U)^2 \quad (18)$$

式中 d_h 为 UAV 到达人体平均高度 H_p 后继续下坠直到接触到地面的水平位移量, m。

结合坠落区域的人口密度, 将式 (16)、式 (18) 分别代入式 (15), 可得到地面撞击的影响人数。

2.3 致死率

采用 DALAMAGKIDIS 等^[8] 提出的致死率公式计算 UAV 坠地的致死率, 过程如下:

$$P_s = \frac{1 - k}{1 - 2k + \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}} \cdot \left[\frac{\beta}{E_i} \right]^{\frac{3}{Z_s}}} \quad (19)$$

式中: Z_s 为遮蔽系数, 取值范围为 $(0, \infty)$, 其数值大小反映遮蔽物对人体保护效能的高低。在冲击动能相同的情况下, Z_s 值越大, 防护性能越显著, 人员死亡率相应降低。参数 α 为 Z_s 取值为 6 时, 致死率达 50% 所需的动能, J; β 为表示 Z_s 趋近于 0 时, 撞击导致死亡所需的动能阈值, β 取值为 34 J^[8]。 E_i 为 UAV 与地面发生碰撞时瞬间释放的动能, J。引入矫正因子 k 优化低动能区间的致死概率预测精度, 其取值如下:

$$k = \min \left[1, \left(\frac{\beta}{E_i} \right)^{\frac{3}{Z_s}} \right] \quad (20)$$

当 UAV 从高度 h 处坠落, 加速度 a 为:

$$a = \frac{G - F_d}{m} = g - \frac{c_D A_u \rho_A v_f^2}{2m} \quad (21)$$

式中: G 为 UAV 的重力, N; F_d 为受到的阻力, N; m 为 UAV 质量, kg; c_D 为阻力系数; A_u 为 UAV 在坠地方向的横截面积, m^2 ; ρ_A 为空气密度, kg/m^3 ; v_f 为 UAV 坠落速度, m/s 。

设初始向下坠落速度为 0, 则 E_i 如下:

$$E_i = \frac{1}{2} m u^2 = \frac{1}{2} m \left(\int_0^t g - \frac{c_D A_u \rho_A v_f}{2m} dt \right)^2 \quad (22)$$

式中 u 为实际速度, m/s 。UAV 坠落过程中的动能包含平动和转动 2 种分量。上述方法仅考虑了平动动能, 但多旋翼 UAV 坠落时往往是旋转下降的, 其气动参数持续变化, 难以精确测定。非结构化空域中的 UAV 运行高度具有不确定性。因此, 文中采用文献 [8] 提出的方法, 以最大飞行速度 v_o 的 1.4 倍作为坠机末速度, 其 E_i 表达式为:

$$E_i = \frac{1}{2} m v_o^2 \quad (23)$$

3 UAV 运行风险算例分析

3.1 碰撞风险模型参数

文献 [16] 量化评估驾驶员响应时间, 试验

数据中极端情况下的具体数值详见表 1。

表 1 驾驶员响应时间相关数值

Table 1 Pilots response time correlation values			
驾驶员响应时间	数据通信传输延迟与驾驶员认知决策耗时	系统执行与界面显示滞后	合计
μ	7.63	4.38	12.01
σ	5.66	2.75	6.29

目前关于 UAV 避撞指令响应时间的研究数据较为缺乏。为此，参考载人航空领域空中交通管制的响应时间标准。MITRE 公司针对不同工作负荷下管制员响应时间的研究结果^[17] 见表 2。基于技术评估，文中研究将 2 s 的更新周期设定为跟踪检测时间的保守上限值。

表 2 空中交通管制响应时间

Table 2 Response time of air traffic control			
空中交通管制响应时间	告警反应	操作持续时长	合计
μ	4.6	2.3	6.9
σ	4.1	2.7	4.9

表 4 相关参数

Table 4 Correlation parameter									
相关参数	纵向尺寸/m	横向尺寸/m	垂直高度/m	整机质量/kg	最大飞行速度/(m·s ⁻¹)	人体宽度平均值/m	人体高度平均值/m	α/J	β/J
数值	1.24	1.24	0.45	5.9	20	0.3	1.7	1×10 ⁶	34

表 5 不同速度下避让碰撞所需距离

Table 5 Distance required to avoid collision m				
A 机速度/(m·s ⁻¹)	B 机速度/(m·s ⁻¹)			
	5	10	15	20
5	96	107	122	140
10	107	122	138	156
15	122	138	156	175
20	14	156	175	194

50 km×60 km×2 km 空域内运行的冲突概率、碰撞概率、碰撞风险见表 6，具体变化曲线如图 4 所示。随着安全间隔的不断增加，碰撞概率逐渐减小，冲突概率不断增加。当间隔为 2 500 m 时，碰撞风险为 1.31×10⁻⁸ 次/h，可以满足国际民航组织对碰撞风险 1.5×10⁻⁸ 次/h 的规定。

表 6 采用避撞措施的冲突概率、碰撞概率及碰撞风险

Table 6 Collision probability, collision probability and collision risk using collision avoidance measures			
安全间隔/m	冲突频率	碰撞概率	空中碰撞风险
2 200	1.29	1.68×10 ⁻⁶	2.18×10 ⁻⁶
2 300	1.41	3.12×10 ⁻⁷	4.41×10 ⁻⁷

3.2 地面风险评估模型数据说明

选取 3 种代表性运行场景^[11] 见表 3，某型号 UAV 的相关参数见表 4。

表 3 运行场景参数

Table 3 Operation scenario parameters			
场景编号	场景特征	人口密度/(人·km ⁻²)	遮蔽系数
1	山地农林、自然保护区、边境等人口稀少且植被茂盛的地区	100	6
2	人口密度较高的城市郊区	1 000	3
3	城市居民区、商业区等人口密度极大且几乎无遮蔽物的地区	10 000	1

3.3 计算结果与分析

2 架 UAV 在不同飞行速度下避免碰撞所需的间隔距离见表 5。

从表 5 中选取当 2 架 UAV 的飞行速度都为 20 m/s，以 180°对向飞行的情况，5 架 UAV 同时在

续表 6

安全间隔/m	冲突频率	碰撞概率	空中碰撞风险
2 400	1.53	5.23×10 ⁻⁸	8.04×10 ⁻⁸
2 500	1.67	7.88×10 ⁻⁹	1.31×10 ⁻⁸
2 600	1.80	1.07×10 ⁻⁹	1.93×10 ⁻⁹

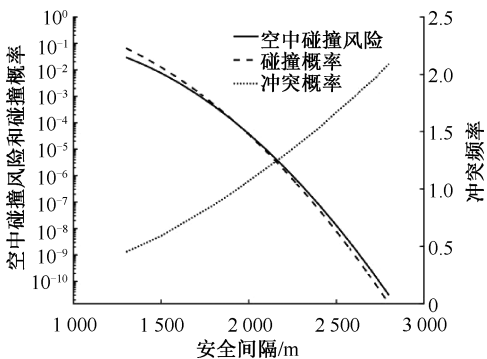


图 4 碰撞概率、碰撞风险和冲突概率随安全间隔的变化

Fig. 4 Plot of collision probability, collision risk and collision probability with safety interval

将空中碰撞风险 1.31×10⁻⁸ 和系统失效的概率 6.04×10⁻⁵ 代入运行风险的地面风险模型^[18]，计算

结果如图 5 所示。场景 3 因人口密度高且遮蔽系数低，仅系统失效引发的坠机事故就可导致地面伤亡率高于安全目标水平，此时，需采取降落伞或提升系统可靠性等来满足运行风险标准。场景 1 和场景 2 的安全间隔可以进一步缩小，将空中碰撞风险代入运行风险的地面风险评估模型，计算结果如图 6 所示。2 种场景可容许的碰撞风险最大值分别为 3.89×10^{-3} 和 1.03×10^{-4} 次事故/飞行小时，汇总结果见表 7，场景 1 和场景 2 的安全间隔可分别缩短至 1 600 和 2 000 m。

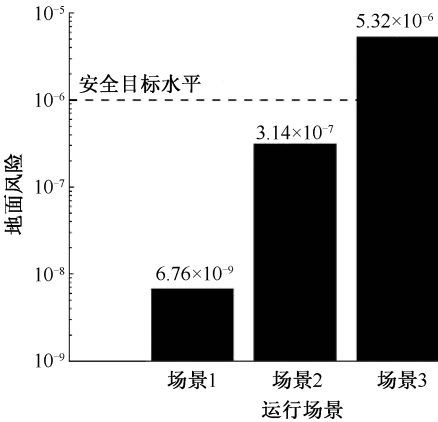


图 5 3 种运行场景下的地面风险

Fig. 5 Ground risks in three operating scenarios

表 7 计算结果汇总

Table 7 Summary of calculation results

运行场景	安全目标水平	最大允许碰撞风险	地面风险	安全间隔/m
1	1×10^{-6}	3.89×10^{-3}	6.76×10^{-9}	1 600
2	1×10^{-6}	1.03×10^{-4}	3.14×10^{-7}	2 000
3	1×10^{-6}	—	5.32×10^{-6}	—

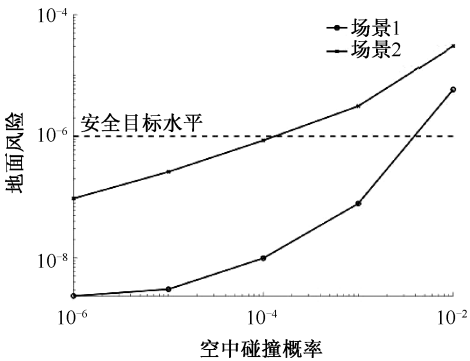


图 6 地面风险随碰撞风险变化曲线

Fig. 6 Variation curve of ground risk with collision risk

4 结 论

- 1) 随着安全间隔的增大，冲突概率逐渐增大，碰撞概率和碰撞风险逐渐减小。运行风险中地面风险随碰撞风险的增加而增大。
- 2) 场景 1 和场景 2 可容许的碰撞风险最大值分别为 3.89×10^{-3} 和 1.03×10^{-4} 次事故/飞行小时，最小安全间隔分别为 1 600 和 2 000 m。场景 3 需采取降落伞或提升系统可靠性等来满足运行风险标准。
- 3) 目前关于 UAV 起降阶段运行风险的研究较少，后续研究可针对 UAV 在起降阶段的运行特性展开系统分析。

参 考 文 献

[1] GOODCHILD A, TOY J. Delivery by drone: an evaluation of unmanned aerial vehicle technology in reducing CO₂, emissions in the delivery service industry [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2017, 61: 58–67.

[2] GERARDO O, THOMAS L, LUIS G, et al. UAS airborne collision severity evaluation, final report volume I [R]. Department of Transportation Federal Aviation Administration, USA, 2017.

[3] TAN Dayang, CHI Wanchao, MOHAMED S M F B, et al. Study on impact of separation distance to traffic management for small uas operations in urban environment [M]. Transdisciplinary Engineering: A Paradigm Shift. Amsterdam: IOS Press, 2017: 39–46.

[4] 张洪海, 李博文, 刘晔, 等. 自由空域下多旋翼无人机安全间隔标定方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2023, 45 (10): 3 149–3 156.

ZHANG Honghai, LI Bowen, LIU Hao, et al. Demarcation method of safety separation for multi-rotor UAV in free airspace [J]. Systems Engineering and Electronics, 2023, 45 (10): 3 149–3 156.

[5] 励瑾, 钟罡, 张晓玮, 等. 城市低空无人机空中碰撞风险计算方法研究 [J]. 现代交通与冶金材料, 2022, 2

(5): 20–30.

[6] WEIBEL R E, HANSMAN R J. Safety considerations for operation of unmanned aerial vehicles in the national airspace system: ICAT–2005–1 [R]. Massachusetts Institute of Technology, 2005.

[7] DALAMAGKIDIS K, VALAVANIS K P, PIEGL L A. On integrating unmanned aircraft systems into the national airspace system [M]. Netherlands: Springer, 2009: 21–49.

[8] CHE MAN M H, HU Haoliang, LOW K H. Crash area estimation for ground risk of small unmanned aerial vehicles due to propulsion system failures [C]. AIAA Scitech 2022 Forum, 2022: 1 506–1 522.

[9] MILANO M, PRIMATESTA S, GUGLIERI G. Air risk maps for unmanned aircraft in urban environments [C]. 2022 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2022: 1 073–1 082.

[10] JIAO Qingyu, LIU Yansi, ZHENG Zhigang, et al. Ground risk assessment for unmanned aircraft systems based on dynamic model [J]. Drones, 2022, 6 (11): 324–352.

[11] 韩鹏, 赵云飞. 基于飞行环境建模的 UAV 地面撞击风险研究 [J]. 中国安全科学学报, 2020, 30 (1): 142–147.

HAN Peng, ZHAO Yifei. Study on ground impact risk of UAV based on flight environment [J]. China Safety Science Journal, 2020, 30 (1): 142–147.

[12] JAR-DEL-WG6-D. 04, Guidelines on specific operations risk assessment (SORA) [S]. 2019.

[13] 岳仁田, 马赵飞. 基于几何关系的无人机低空飞行冲突探测与解脱策略 [J]. 中国安全科学学报, 2023, 33 (5): 112–120.

YUE Rentian, MA Zhaofei. Detection and resolution strategy of UAV low-altitude conflict based on geometric relations [J]. China Safety Science Journal, 2023, 33 (5): 112–120.

[14] SHINSUKE E. Aircraft collision models [R]. Massachusetts Institute of Technology, 1982.

[15] USA Department of Transportation Federal Aviation Administration, AC No: 431. 35 – 1. Expected casualty calculations for commercial space launch and reentry missions [Z]. 2013.

[16] SHIVELY R J, VU K P L, BUKER T J. Unmanned aircraft system response to air traffic control clearances [J]. Human, 2013, 57 (1): 31–35.

[17] STELZER E K, MORGAN C E, MCGARRY K A, et al. Human-in-the-loop simulations of surface trajectory-based operations [C]. Ninth USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar, 2012: 1–12.

[18] 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): 136–142.

LI Yafei, LIU Minghuan, WANG Lili. Risk assessment of urban UAV operation under influence of buildings [J]. China Safety Science Journal, 2022, 32 (7): 136–142.



作者简介： 李楠 （1978—），女，辽宁抚顺人，硕士，副教授，主要从事机场运行仿真与优化、无人机运行风险等方面的研究。E-mail: lily_ cauc@ 163. com。