

中文引用格式:李航,韩凤,胡小兵. 城市无人机坠落对地面交通的风险评估方法[J]. 中国安全科学学报,2025,35(6):157-164.

英文引用格式:LI Hang, HAN Feng, HU Xiaobing. Risk assessment method of urban UAVs falling onto ground transportation[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(6): 157-164.

城市无人机坠落对地面交通的风险评估方法^{*}

李航 讲师, 韩凤, 胡小兵^{**} 教授

(中国民航大学 安全科学与工程学院, 天津 300300)

中图分类号:X951;X949

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.06.0906

基金项目:天津市自然科学基金多元投入青年项目资助(23JCQNJC00230);民航安全能力建设项目(HA202511);
研究生科研创新项目(2023YJSKC09013)。

【摘要】 为全面评估城市无人机(UAV)坠落对于地面交通的风险,提出一种“理论分析+仿真试验”的系统风险评估方法。首先,构建城市空-地交通网络结构,考虑无人机与地面车辆的动态性,以及空-地交通网络的流量特征,运用理论推导,得出可能的地面交通风险区间;其次,开展蒙特卡罗仿真试验,得到基于试验统计结果的地面交通风险值;然后,将理论分析与仿真试验分析相结合,综合评估无人机坠落对地面交通的风险;最后,以天津市为例开展仿真案例研究。结果表明:无人机坠落对地面交通的风险受坠机概率、地面交通密度、空中路网结构等多个因素影响;仿真试验的统计风险值与理论分析风险区间相符,初步验证了所提方法的合理性。

【关键词】 无人机(UAV)坠落; 地面交通; 风险评估; 风险区间; 蒙特卡罗仿真

Risk assessment method of urban UAVs falling onto ground transportation

LI Hang, HAN Feng, HU Xiaobing

(College of Safety Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: In order to comprehensively assess the risk of urban UAVs falling onto ground transportation, a systematic risk assessment method combining theoretical derivation and simulation experiments was proposed. Firstly, the urban air-ground traffic network structure was constructed. Considering the dynamics of UAVs and ground vehicles, as well as the traffic flow characteristics of the air-ground traffic network, theoretical derivation was used to determine the possible ground traffic risk interval. Secondly, Monte Carlo simulation was carried out to obtain the ground traffic risk value based on the statistical results of the test. Then, the theoretical analysis and simulation test analysis were combined to comprehensively evaluate the risk of UAVs falling to ground traffic. Finally, a simulation case study was carried out in Tianjin. The results show that the risk of UAVs falling on ground traffic is affected by several factors such as crash probability, ground traffic density, and the structure of the air road network. The statistical risk value of the simulation test is consistent with the theoretical analysis of the risk interval, which preliminarily verifies the reasonableness of the proposed method.

Keywords: unmanned aerial vehicle (UAV) falls; ground traffic; risk assessment; risk interval; Monte Carlo simulation

* 文章编号:1003-3033(2025)06-0157-08; 收稿日期:2025-02-09; 修稿日期:2025-04-27

** 通信作者:胡小兵(1975—),男,四川攀枝花人,博士,教授,主要从事复杂系统安全和风险、智能计算、空中交通管理等方面的研究。E-mail:huxbtg@163.com。

0 引言

近几年,随着低空经济快速发展,无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)数量迅速增加,截至2023年底,我国(不含港澳台地区)注册无人机已超过126万架^[1]。与此同时,急剧增加的无人机数量给地面人员、财产和交通安全等带来严峻挑战。国内外由于空中碰撞、系统失效等原因导致的无人机坠地造成的地面人员伤亡、影响地面交通等事件时有发生^[2-4]。因此,非常有必要针对城市无人机运行产生的地面安全风险问题开展相关工作。

目前,针对无人机运行造成的地面安全风险的问题,国内外学者已经展开了相关研究,主要涉及无人机坠落后对地面人员安全与财产损失的风险评估,以及对地面道路的影响等方面。针对地面人员安全与财产损失方面,LIU Yang等^[5]针对无人机在地面上坠毁时潜在撞击位置的概率估计问题构建地面安全评估模型,结果表明:各类无人机操作均呈现出不同程度的风险性,无法保证地面人员安全;胡莘婷^[6]为了评估无人机在城市区域运行时对行人可能造成的威胁,建立了一个基于城区行人安全的无人机运行风险评估模型,发现不同区域的风险成本存在显著差异;任新惠等^[7]为了评估无人机在城市运行区域的风险,基于某公园的栅格图像构建了第三方风险模型,评估结果显示,不同区域和高度下的风险分布存在差异;COUR-HARBO^[8]针对无人机在飞行时可能面临的失效下降导致人员死亡的风险,通过随机建模对无人机失效后下降而导致的死亡概率进行量化,分析无人机撞击地面后致死的风险;LUM等^[9]针对无人系统操作中的任务风险评估问题,通过识别主要风险源提出一种基于风险模型的方法,有效降低了空中碰撞风险;韩鹏等^[10]为提高无人机安全风险评估的精确性和置信度,建立了坠地撞击点预测模型,发现航迹误差作用下坠地撞击点的分布遵循正态分布特征;刘欣欣^[11]针对城市物流无人机的运行安全风险评价问题,通过建立无人机坠毁事故严重度模型,并设计算法,识别了物流无人机在城市区域内的安全风险;苏成林等^[12]为计算无人机在地面坠毁后造成的伤人风险值,考虑随机风速风向带来的风险作用,得出环境内风的作用会使无人机坠毁后对地面造成的风险分布不均匀;李亚飞等^[13]为降低无人机在城区内运行风险,提出考虑建筑物遮蔽效果的无人机路径规划方法,可减小

无人机运行风险成本。就无人机坠落后对地面道路的影响研究方面,胡莘婷等^[6]建立了无人机对路面上车辆的风险评估模型,并提出风险代价计算指标;BERTRAND等^[14]专注于无人机坠落后对特定线路的影响,通过对数千米道路的实例研究,验证其方法的有效性。

综上可知:目前,无人机坠落相关的风险研究主要聚焦于地面人员生命安全的风险分析,对地面交通影响的风险研究较少。且现有关于评估无人机坠落后对地面交通影响的研究通常局限于单条或少数几条道路,其评估范围相对较小,导致评估结果缺乏系统性,实际应用潜力有限。鉴于此,笔者充分考虑城市范围内大规模空中无人机和地面车辆的实时动态运行特征,从理论分析与仿真试验分析2方面,提出一种城市无人机坠落后对地面交通影响的系统性风险评估方法,并以天津市为例,开展案例验证研究,以期对低空飞行和地面交通的运行安全提供支撑。

1 无人机对地面交通影响特征分析

城市上空飞行的无人机异常坠落可能对地面运行车辆等带来严重的安全风险,造成交通堵塞,甚至人员伤亡和财产损失。为准确评估无人机坠落后对地面交通影响的风险,先分析清楚无人机坠落后对地面运行车辆的影响特征。

1) 相比于地面的行人,车辆运行速度快、对高空坠物的躲避条件有限,更容易发生交通事故,造成严重影响。无人机坠落过程中,不仅带有一定的残存动力,同时伴有显著的噪声。汽车驾驶员身处封闭车内环境,不易及时察觉到无人机坠落的噪声,也无法随意改变车辆行驶方向或突然停车,于是更有可能与坠落的无人机发生碰撞,导致汽车受损,威胁生命安全。

2) 空中无人机和地面车辆都属于遵循特定交通规则的高速运行物体,必须充分考虑其动态运行特征,才可能准确评估无人机坠落后对地面交通造成的风险。这些动态因素可能包括无人机飞行的路径、速度、高度和坠机概率等,地面车辆的行驶路径、行驶速度等。同时,还要考虑不同时段城市空中交通路网和地面交通路网的交通流量等特征。

具体地,假设城市空中交通路网为 $R_u(L_u, N_u)$ 、地面交通路网为 $R_c(L_c, N_c)$ 。其中, N_u 和 L_u 分别为空中交通路网的节点集与连接集, N_c 和 L_c 分别为地面交通路网的节点集与连接集; u 和 c 分

别表示无人机与车辆。于是,得到城市空-地交通网络结构,如图1所示。

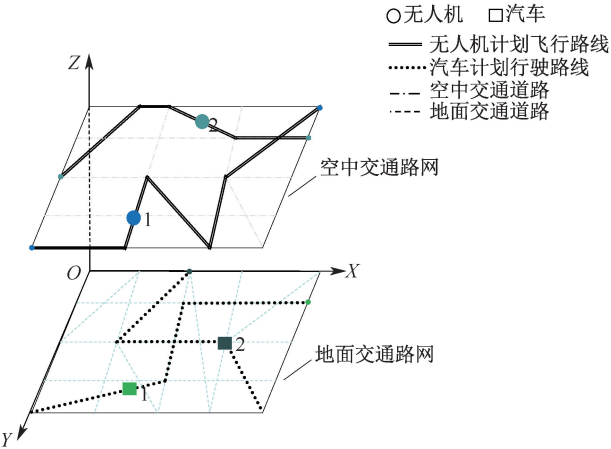


图1 城市空-地交通网络结构

Fig.1 Urban air-ground transportation network structure

通过充分考虑以上相关因素,可定量评估给定坠机概率下无人机异常坠落对地面交通造成的风险。由于目前低空无人机运行管理规则及组织形式还有待讨论,其主要聚焦于隔离空域和自由空域运行2种模式,文中研究主要面向自由空域下低空无人机运行导致的地面交通风险评估问题。

2 “理论分析+仿真试验”风险评估方法

2.1 风险定义与风险评估方法概述

借鉴经典风险定义,结合本研究聚焦的无人机坠落对地面交通风险的问题,这里将风险定义为:城市空中运行的无人机异常坠落,及其对地面交通造成的影响。其中,无人机异常坠落通常指由于自身功能失效或空中碰撞等原因导致的坠落,可以用坠机概率反映其危险性;无人机坠落对地面交通造成的影响指坠落的无人机可能影响的地面坠落点附近的交通路段和路段上运行的车辆情况。具体风险数学表达为

$$R_{t_{uc}} = fS_{t_{uc}} \tag{1}$$

式中: t_{uc} 为不同的时间段, $t_{uc} \in \{1,2,\cdots,q_{uc}\}$; R 为无人机异常坠落对地面交通的风险; f 为无人机异常坠落的概率,即坠机概率; S 为无人机异常坠落对地面交通造成影响的严重程度。

在明确风险定义的基础上,为实现无人机坠落对地面交通影响的定量风险分析,提出理论分析与仿真试验相结合的风险评估方法,总体流程如图2所示。

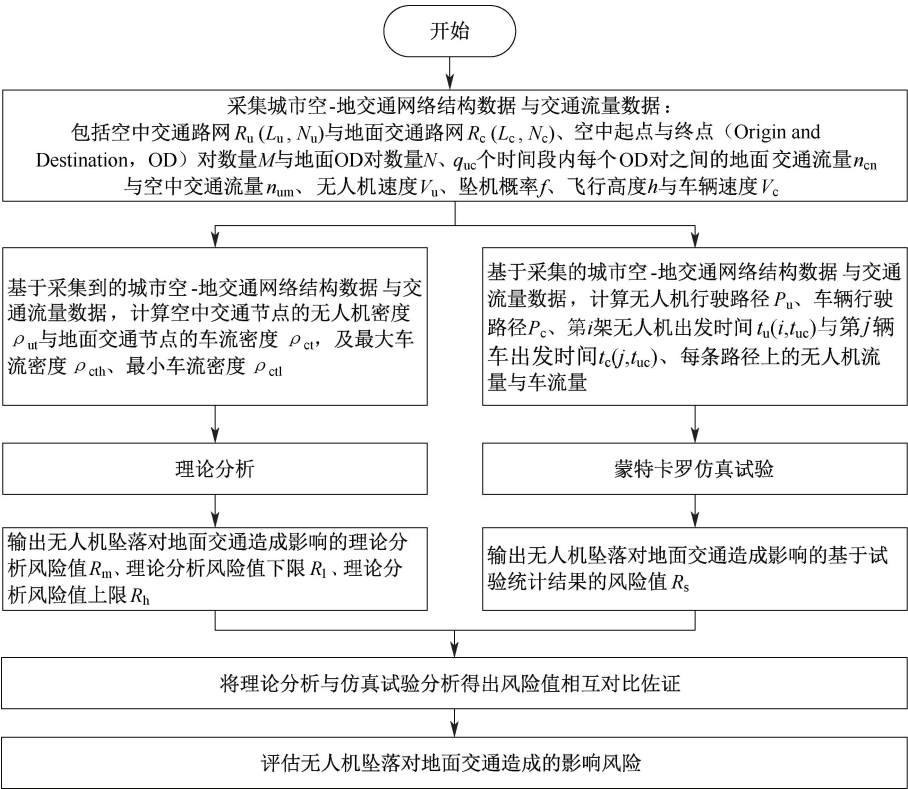


图2 评估方法总体流程

Fig.2 Overall flowchart of assessment method

2.2 基于理论推导的风险分析方法

理论风险分析的基本思想是:基于城市空-地交通网络结构数据和交通流量数据,以空中交通路网与地面交通路网的交叉点作为主要坠机点,计算交叉点数量、交叉点所对应的空中交通路网连接与地面交通路网连接上的交通流量;再结合坠机概率等关键因素,通过数学公式推导,得出理论分析风险值下限、理论分析风险值、理论分析风险值上限来评估无人机坠落后对地面交通造成的风险。其中 R_l 为理论分析风险值下限,它假设空中交通路网与地面交通路网交叉点处的整个地面交通流量处于最小值时,计算可能造成的最小风险;同理, R_h 为理论分析风险值上限,它基于整个地面交通流量达到最大值的假设,计算可能造成的最大风险; R_m 为理论分析风险值,表示实际地面交通流量下,无人机坠落后对地面交通造成的风险。具体流程如下:

步骤 1:数据设置。采集研究城市空-地交通路网结构数据,确定空中交通路网与地面交通路网中所包含的 OD 之间的路径数量 M 与 N ,运用路径规划算法求解最短行驶路径 P_u 与 P_c ,并收集在 q_{uc} 个不同时间段内各自的航线间的空中交通流量 n_{um} 与道路间的地面交通流量 n_{cn} ,及速度 V_u 与 V_c 。

步骤 2:空-地路网交叉点计算。基于步骤 1 中的路网数据,遍历空中交通路网与地面交通路网中的每一组连接组合,定义每条连接的直线方程,并结合连接上的 2 个端点坐标作为边界条件,运用数学方法解方程,确定空中与地面交通路网之间的交叉点数量 q ,明确无人机在飞行过程中可能与地面交通产生交互的具体位置,为分析无人机在交叉点的潜在坠落风险提供支撑。

图 3 展示了简单求解空中路网与地面路网交叉点的过程。假设有 2 组不同的道路连接,分别为空中路网中的 L_{u12} 、 L_{u34} (交点为 K),与地面路网中的 L_c 、 L_{c12} 、 L_{c34} 。将空中路网中连接 L_{u12} 、 L_{u34} 投影到地面路网上,分别对应虚线段 L'_{u12} 、 L'_{u34} ,其中, L'_{u12} 与 L_c 平行且重叠,交点设为 K_{c1} 、 K_{c2} ; L'_{u12} 与 L_{c12} 的交点为 K_1 , L'_{u34} 与 L_c 、 L_{c34} 、 L_{c12} 分别相交于点 K' 、 K_2 、 K_3 。经过投影方法,找到该场景下 2 个路网的所有交叉点为 K' 、 K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_{c1} 、 K_{c2} 。

步骤 3:无人机坠落对地面交通的理论风险分析。首先,基于交通流量相关数据,运用式(2)一式(4)计算空中交通路网各连接的无人机密度 ρ_{ut} 与地面交通路网各连接的车流密度 ρ_{ct} ,并找出最大

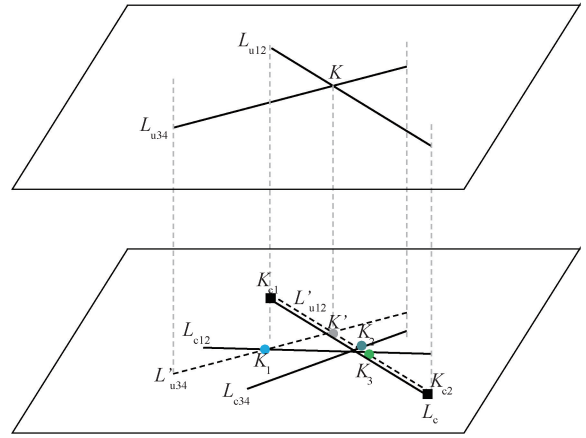


图 3 空中路网与地面路网的交叉点计算
Fig. 3 Intersection between air and ground road networks

车流密度 ρ_{cth} 与最小车流密度 $\rho_{ctl} \circ \rho_{cth}$ 与 ρ_{ctl} 这 2 个值将分别作为空中交通路网与地面交通路网交叉点投影到地面交通路网交通流量的最大值与最小值,用于计算理论分析风险值上限与理论分析风险值下限。

$$q_{pc}(j, t_{uc}) = l_c(j, t_{uc}) / V_c, j = 1, 2, \dots, L_c \quad (2)$$

$$\rho_{ut}(i) = \text{sum}(n_{um}(p'_u \{i\} (q_u))), i = 1, 2, \dots, L_u \quad (3)$$

$$\rho_{ct}(j, t_{uc}) = \text{sum}(n_{cn}(p'_c \{j\} (q_c) / q_{pc}(j, t_{uc}) / t_l)) \quad (4)$$

$$j = 1, 2, \dots, L_c \quad (4)$$

$$\rho_{cth} = \max(\rho_{ct}(j, t_{uc})) \quad (5)$$

$$\rho_{ctl} = \min(\rho_{ct}(j, t_{uc})) \quad (6)$$

式中: $q_{pc}(j, t_{uc})$ 为在时间段 t_{uc} 内,地面交通路网连接 j 插入节点的个数; l_c 为连接长度。由于本研究假设空中交通路网每个时间段内的无人机流量相同,故 $\rho_{ut}(i)$ 为经过空中交通路网连接 i 的无人机密度; $\rho_{ct}(j, t_{uc})$ 为在时间段 t_{uc} 内,经过地面交通路网连接 j 的所有路径中的平均车流密度; t_l 为总的仿真时间; p'_u 与 p'_c 分别存储空中交通路网与地面交通路网中每条路径所包含的连接编号; q_u 与 q_c 分别为 2 个路网的每条路径中包含的连接数量。

同时,根据步骤 2 中确定的 q ,计算交叉点相对应的空中交通路网连接上无人机的平均密度 ρ_{uta} 与相对应的地面交通路网连接上实际车流密度 ρ_{cta} ,用于后续理论分析风险值的计算。

$$\rho_{uta} = \text{sum}(\rho_{ut}(i)) / q \quad (7)$$

$$\rho_{cta} = \text{sum}(\rho_{ct}(j, t_{uc})) / q \quad (8)$$

步骤 4:结合无人机的坠机概率与上述计算得出的数据结果,推导出无人机坠落对地面交通的理论风险区间计算公式,即式(10)一式(12),初步评

估其风险。

$$q_z = \rho_{\text{uta}} f \quad (9)$$

$$R_h = q_z \rho_{\text{eth}} \quad (10)$$

$$R_l = q_z \rho_{\text{clt}} \quad (11)$$

$$R_m = q_z \rho_{\text{cta}} \quad (12)$$

式中 q_z 为在交叉点处坠落的无人机数量。

2.3 基于仿真试验的风险分析方法

在仿真试验分析中,开展蒙特卡罗仿真试验,主要结合具体路网结构和交通案例,实时判断无人机与车辆的运行位置及状态,考虑速度误差计算无人机坠落后对地面的影响区域,并统计无人机的坠落次数与影响区域内的车辆数目,得到基于试验统计结果的风险值。具体流程如下。

1) 仿真试验初始化。需根据试验需求和目标来确定 t_i 、时间单位 t_{unit} 与蒙特卡罗仿真次数 q_M ; 之后读取空中交通路网与地面交通路网中的路网信息与交通信息,包括节点集 N_u, N_c 与连接集 L_u, L_c , P_u 与 P_c 及 q_{uc} 个时间段内交通流量 n_{um}, n_{cn} 、全域空中交通流量总量 n_{tum} 及全域地面交通流量总量 n_{tcn} 等,以及按照实际交通情况及无人机的安全性要求来设定关键参数,包括无人机飞行高度 h 、 V_u 与 V_e 等;令无人机与车辆的初始运行状态 $u_s(i, t_{uc})$ 与 $c_s(j, t_{uc})$ 及无人机坠落后对地面交通影响区域内的车辆数目 m_c 分别等于 0,并在规定时间内随机生成无人机与车辆的出发时间 $t_u(i, t_{uc})$ 与 $t_c(j, t_{uc})$ 。

2) 仿真试验运行。首先,判断无人机与车辆的运行位置及状态。当仿真程序运行时间 t 达到或超过某个无人机或车辆的出发时间时,该无人机或车辆将从预设的路径起点出发开始移动,运行状态 $u_s(i, t_{uc})$ 或 $c_s(j, t_{uc})$ 将由初始状态 0 变为 1,时刻更新其移动位置坐标,在无人机或车辆运行到终点后 $u_s(i, t_{uc})$ 或 $c_s(j, t_{uc})$ 将变为 3。

其次,计算无人机坠落后对地面的影响区域。无人机坠落事件中导致的最终风险为对地撞击,其坠落位置为潜在的风险区域,可能会影响地面交通。坠落过程中受空气阻力等干扰,无人机实际飞行速度会产生波动(速度误差),速度误差有上限和下限,分别代表速度可能增加或减少的最大幅度。为模拟无人机的坠落情况,在试验中引入随机数 λ ,当 f 低于 λ 时,无人机将会在其飞行路径上随机选择一个位置发生坠落,令 $u_s(i, t_{uc}) = 2$ 。

假设无人机原计划飞行速度为 V_u ,速度误差为 v_e ,按该速度正常飞行下的坠地点记为 x_0 。考虑到

速度误差的影响,先得到速度误差下限和速度误差上限情景下的坠地点分别记为 x_1, x_2 ,再根据 x_1 与 x_2 确定影响区域半径,由 x_1 与 x_2 所构成线段的垂直平分线(即直径)中心点作为圆心,得到最终的地面影响区域,如图 4 所示。具体的数学表达式如下:

$$x_0 = V_u \sqrt{\frac{2h}{g}}; x_1, x_2 = (V_u \mp v_e) \sqrt{\frac{2h}{g}} \quad (13)$$

式中 g 为重力加速度, m/s^2 。

坠地影响区域的半径 r 可计算为:

$$r = (x_2 - x_1)/2 \quad (14)$$

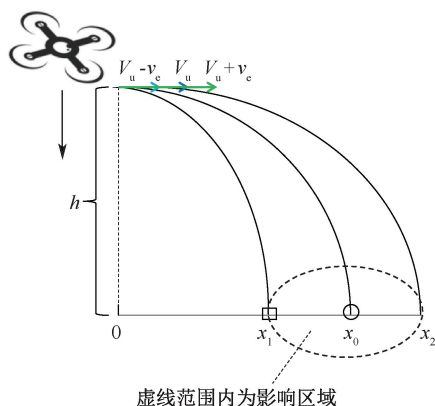


图 4 无人机以不同速度坠落对地面的影响区域

Fig. 4 Influence area of UAVs falling onto ground at different speeds

最后,进行无人机坠落后对地面交通影响的仿真试验风险分析,统计无人机的坠落次数 q_f 及影响区域内的车辆数目 m_c 。为了确保结果的准确性和可靠性,后续重复进行 q_M 组蒙特卡罗仿真试验,对仿真试验数据进行统计和分析。

结合式(1)与上述步骤中确定的无人机坠落位置和地面交通密度等因素,可由下式计算得出基于仿真试验统计结果的风险值 R_s :

$$R_s = m_c (q_f / q_M) / t_i \quad (15)$$

3 风险评估案例分析

以天津市中心六城区与环城四区的部分区域(不包括天津滨海机场等禁飞区)为研究区域,仿真评估该区域内无人机坠落后对地面交通的风险水平,验证文中所提方法的有效性和实用性。

3.1 仿真试验设计与参数设置

基于 Matlab2019 环境进行仿真试验,首先,利用 Bigemap GIS Office 截取天津市中心六城区及环城四区的部分区域地图,运用 GetData Graph Digitizer 提取相关重要节点和连接,描绘地面交通

网络结构。

由于目前缺乏成熟的空中交通路网,为了验证所提的风险评估方法,文中选取地面交通路网最外部节点作为空中交通路网的最外圈节点,并随机选取部分内部节点作为空中交通路网的内部节点,构建空中交通网络,进而形成天津市空-地交通网络结构(图5)。其中,空中交通路网共有57个节点、93条连接,地面交通路网共有600个节点,1 000条连接。

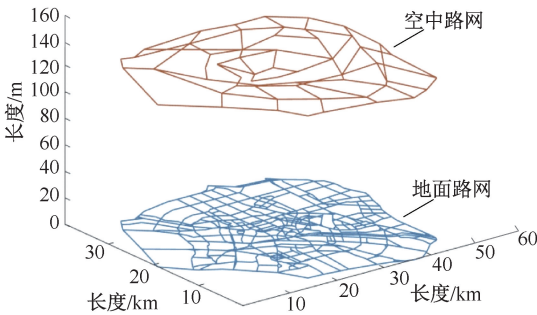


图5 天津市空-地交通网络结构

Fig. 5 Tianjin air-ground transportation network structure

在仿真试验中,以 YI Erida 无人机为例,设置 $M=60$ 、 $N=1\ 000$ 、 $h=120\text{ m}$ 、 $V_u=28\text{ m/s}$ 、 $V_c=34\text{ m/s}$ 、 $q_{uc}=12$ 。其中,所有时间段采用“左闭右开”区间表示法,如 8:00—9:00 表示 $[8:00\leq t<9:00]$ 。为了验证文中所提出方法,假定每个小时段无人机流量相同,均为 2 560 pcu/h;车辆流量根据真实生活中的出行高峰期等有所不同,12 个时间段的车流量分别为 751 309、650 000、219 795、550 089、549 546、217 988、228 600、228 772、220 125、899 373、900 303、223 162 pcu/h。

基于上述交通流数据,根据中国民用航空局《民用无人驾驶航空器系统适航审定分级分类和系统安全性分析指南》^[15],设定 2 种坠机概率,分别在 $f=1/10\ 000$ 与 $f=1/100\ 000$ 的情况下进行 100 组独立的蒙特卡罗仿真试验,验证风险评估方法的有效性。

3.2 结果分析

依据仿真试验设计与参数设置,运用所提的理论分析与仿真试验方法,评估天津市的无人机坠机对地面交通的风险,仿真结果见表 1、表 2。

由表 1 可知:当 $f=1/100\ 000$ 时,根据理论公式计算得出的不同时段风险值区间有所不同。具体地,随着地面不同时段车流量的增加,风险区间的上

表 1 风险评估结果 ($f=1/100\ 000$)

Table 1 Risk assessment results ($f=1/100\ 000$)

时间段	仿真结果 $R_s/10^{-4}$	理论分析结果		
		R_l	$R_m/10^{-5}$	$R_h/10^{-3}$
8:00—9:00	0	0	11.30	1.73
9:00—10:00	0	0	9.78	1.50
10:00—11:00	0	0	3.25	0.54
11:00—12:00	0	0	8.27	1.26
12:00—13:00	0	0	8.26	1.25
13:00—14:00	0	0	3.27	0.52
14:00—15:00	0	0	3.54	0.54
15:00—16:00	0	0	3.51	0.54
16:00—17:00	0	0	3.28	0.52
17:00—18:00	0	0	13.60	2.06
18:00—19:00	2.50	0	13.60	2.07
19:00—20:00	0	0	3.29	0.52
加和	2.50	0	85.00	13.00

表 2 风险评估结果 ($f=1/10\ 000$)

Table 2 Risk assessment results ($f=1/10\ 000$)

时间段	仿真结果 $R_s/10^{-4}$	理论分析结果		
		R_l	$R_m/10^{-4}$	$R_h/10^{-3}$
8:00—9:00	4.50	0	11.30	17.30
9:00—10:00	1.42	0	9.78	15.00
10:00—11:00	2.33	0	3.25	5.40
11:00—12:00	2.67	0	8.27	12.60
12:00—13:00	5.56	0	8.26	12.50
13:00—14:00	1.50	0	3.27	5.21
14:00—15:00	0	0	3.54	5.36
15:00—16:00	0.61	0	3.51	5.42
16:00—17:00	1.22	0	3.28	5.15
17:00—18:00	1.33	0	13.60	20.60
18:00—19:00	4.25	0	13.60	20.70
19:00—20:00	6.11	0	3.29	5.18
加和	31.50	0	84.95	130.42

限也随之增加。这表明:在给定的无人机坠落概率下,无人机坠落对地面交通造成的风险水平与地面的交通流量密切相关。

在仿真试验分析结果中,除 18:00—19:00 这一特定的时间段内风险值达到 2.50×10^{-4} 以外,其他时段的风险值均为 0。这表明,在大多数情况下,无人机坠落并未对地面交通造成显著影响。这可能是由于仿真试验次数相对较少或坠机概率设置较小所致。

同时可以发现,基于试验统计结果的风险值均在运用理论公式计算出的风险区间内。即,具体的

试验分析结果与理论分析的风险区间结果是相符的。这初步验证了本研究所提的风险评估方法的合理性。

由表2可知:当 $f=1/10\,000$ 时,总体上,相比于 $f=1/100\,000$ 时,基于理论公式计算的不同时段的风险区间上限均有所增大,且试验结果显示每个时段都出现了一定程度的交通风险,这反映出,随着无人机的坠机概率增大,相应对地面交通的安全风险显著增大。一般地,无人机坠机概率越大、特定时段的地面交通流量越大,无人机坠落后对地面交通造成的可能风险也越大;反之亦然。

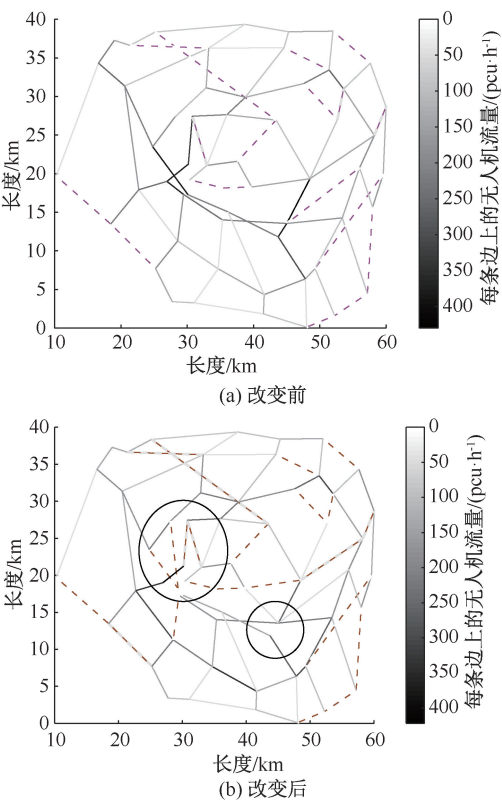
同时,通过比较基于试验统计结果的风险值与理论分析风险值,可以得到与 $f=1/100\,000$ 时相似的结果,即总体上基于试验统计结果的风险值和理论分析的风险区间存在着较高的一致性。例如,在地面交通流量密度较高的9:00—10:00、12:00—13:00、17:00—18:00、18:00—19:00等时间段,仿真试验的风险值与理论分析风险值基本相近。

3.3 改变空中路网结构后的风险评估结果

为了进一步验证文中所提方法的有效性,对原有空中交通路网结构进行了优化后再分析。首先,梳理原有空中交通路网与地面交通路网的所有交叉点,明确无人机与地面的潜在冲突点(图6a);然后比较交叉点区域的空中交通状况,初步选取2个交叉点,通过对交叉点附近2条空中交通流量较大的连接结构导向交通流量相对较少的边缘区域,以适当优化空中交通路网结构(图6)。

针对新的空中交通路网再进行理论分析和仿真试验分析,结果如图7所示(由于篇幅限制,只给出理论分析风险值与基于试验统计结果的风险值)。当 $f=1/100\,000$ 时,对比空中交通路网初步调整前后的风险结果(表1与图7),可知调整后的空中交通路网结构,地面交通的总体理论分析风险值有明显下降趋势。虽然,仿真试验分析时,调整后的空中路网下有2个时段都出现了地面交通风险,但总的基于试验统计结果的风险值下降明显。同时,基于试验统计所得的风险值全部位于理论分析的风险区间之内,进一步验证文中所提方法的有效性。同理,当 $f=1/10\,000$ 时,可以得到相似结论。

综合分析案例结果可知:无人机坠落造成的地面交通风险受坠机概率、地面交通密度、空中路网结构等多个因素影响。同时,笔者提出的基于“理论分析+仿真试验”的无人机坠落对地面交通的风险



注:虚线表示接近于0的交通流量分布。

图6 空中路网结构对比
Fig. 6 Comparison of airway network structure

评估方法得到了初步验证,可以对评估无人机对地面交通造成的风险提供方法思路。

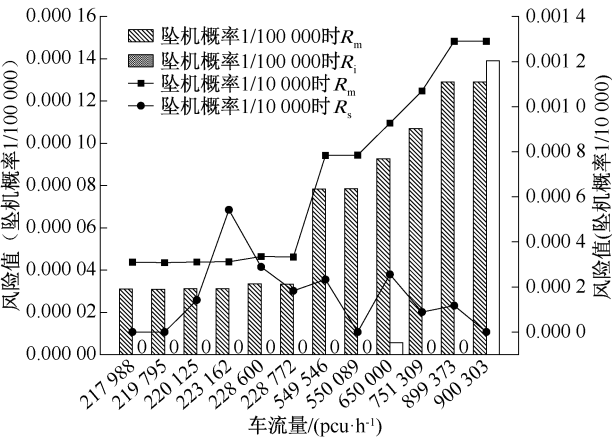


图7 空中路网结构改变后的风险评估结果
Fig. 7 Risk assessment results after change of air road network structure

4 结 论

1) 无人机坠机概率、地面交通密度、空中路网结构等都会影响无人机坠落对地面交通造成的风险水平。要减轻城市无人机运行对地面交通的影响,

需考虑以上因素,进行综合分析,才可能提出合理的应对方法。

2) 文中所提的无人机坠落后对地面交通的风险评估方法具有一定合理性,可以为评估无人机对地面交通的风险提供一定的方法支撑。

3) 在仿真试验过程中,部分参数如坠机概率的取值偏大且统一,以便更明显地观察极端情况,但在

实际应用中可根据不同型号无人机和气候条件灵活调整坠机概率,因此这并不影响本方法的适用性。

4) 未来将在现有风险评估方法的基础上,进一步深化考虑相关因素,如考虑交通流量的波动性、不同型号无人机和气象条件坠机特征,增加最优区间的计算,优化改进评估模型和方法,更全面地评估无人机坠落后对地面交通的风险。

参考文献

[1] 中国民用航空局. 截至 2023 年底,国内注册无人机达 126.7 万架[EB/OL]. (2024-03-29). <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1794862800178646296&wfr=spider&for=pc>.

[2] 蔡云鹏,周大鹏,丁江川. 具有防撞安全约束的无人机集群智能协同控制[J]. 航空学报,2024, 45(5): 398-408. CAI Yunpeng, ZHOU Dapeng, DING Jiangchuan. Intelligent collaborative control of UAV swarms with collision avoidance safety constraints[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(5): 398-408.

[3] ZHANG Na, LIU Hu, NG B F, et al. Collision probability between intruding drone and commercial aircraft in airport restricted area based on collision-course trajectory planning[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2020: DOI:10.1016/j.trc.2020.102736.

[4] 白春玉,郭亚周,刘小川,等. 民用轻小型无人机碰撞安全特性研究进展[J]. 航空学报,2022,43(6):137-153. BAI Chunyu, GUO Yazhou, LIU Xiaochuan, et al. Research progress of collision safety characteristics of civil light and small UAVs[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(6): 137-153.

[5] LIU Yang, ZHANG Xuejun, WANG Zhi, et al. Ground risk assessment of UAV operations based on horizontal distance estimation under uncertain conditions[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2021:DOI:10.1155/2021/3384870.

[6] 胡莘婷. 城市环境下无人机运行风险评估及路径规划[D]. 天津:中国民航大学,2021. HU Xinting. Risk assessment and path planning for unmanned aerial vehicle operations in urban environments[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2021.

[7] 任新惠,程彩霞. 城市运行无人机第三方风险模型构建及应用[J]. 中国安全科学学报,2021,31(9):15-20. REN Xinhui, CHENG Caixia. Construction and application of third-party risk model for unmanned aerial vehicle operation in urban environment[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(9): 15-20.

[8] COUR-HARBO A L. Quantifying risk of ground impact fatalities of power line inspection BVLOS flight with small unmanned aircraft[C]. International Conference on Unmanned Aircraft Systems, IEEE, 2017: 1 352-1 360.

[9] LUM C, WAGGONER B. A risk based paradigm and model for unmanned aerial systems in the national airspace[M]. St. Louis, Missouri, USA: AIAA Infotech @ Aerospace 2011, 2011: 14-24.

[10] 韩鹏,张冰玉. 航迹误差对无人机坠地伤人风险评估的影响[J]. 中国安全科学学报,2021,31(2):106-111. HAN Peng, ZHANG Bingyu. Effect of track error on safety risk assessment of UAV ground impact[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(2): 106-111.

[11] 刘欣欣. 车协同无人机配送路径优化与物流无人机风险评价研究[D]. 太原:太原科技大学,2023. LIU Xinxin. Research on route optimization of vehicle-coordinated UAV distribution and risk assessment of logistics UAV[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2023.

[12] 苏成林,王志,刘洋. 随机风速风向对无人机地面风险作用效果研究[J]. 中国安全科学学报,2023, 33(8): 101-108. SU Chenglin, WANG Zhi, LIU Yang. Research on effects of random wind speed and direction on UAV ground risk[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(8): 101-108.

[13] 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.

[14] BERTRAND S, RABALLAND N, VIGUIER F. Evaluating ground risk for road networks induced by UAV operations[C]. 2018 International Conference on Unmanned Aircraft Systems, 2018: 168-176.

[15] 中国民用航空局. 民用无人驾驶航空器系统适航审定分级分类和系统安全性分析指南[EB/OL]. (2023-02-13). https://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/GFXWJ/202302/t20230213_217211.html.



作者简介: 李航 (1989—),男,陕西岐山人,博士,讲师,主要从事复杂系统安全韧性、民航应急管理等方面的研究。E-mail:lih@cauc.edu.cn。