

中文引用格式:靳慧斌,刘希,黄俊,等. 基于定位、速度双误差的物流无人机碰撞概率分析[J]. 中国安全科学学报,2024,34(10):64-70.

英文引用格式:JIN Huibin,LIU Xi,HUANG Jun,et al. Collision probability analysis of logistics UAV based on positioning and speed double errors [J]. China Safety Science Journal,2024,34(10):64-70.

基于定位、速度双误差的物流无人机碰撞概率分析*

靳慧斌¹教授,刘希¹,黄俊²高级工程师,陈怿淳¹

(1 中国民航大学 交通科学与工程学院,天津 300300;

2 中国民用航空上海航空器适航审定中心,上海 200232)

中图分类号:X949

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.10.1657

基金项目:国家自然科学基金重点项目资助(62132017)。

【摘要】 物流无人机(UAV)批量运行会存在一定的碰撞风险,为量化UAV之间在空中的碰撞概率,针对物流UAV空中运行阶段开展建模分析其碰撞风险。基于冲突区域理论,建立定位、速度双误差的UAV碰撞概率模型,分析不同夹角情况下物流UAV碰撞概率变化情况。分析识别美国联邦航空管理局官网中关于民用小型UAV的事故/事件数据中的关键风险因素。结合2万飞行小时的物流UAV故障数据建立UAV安全飞行间隔模型,给出可接受安全水平下的最短飞行间隔。探究在给定飞行间隔前提下不同航迹角以及不同风向对UAV之间碰撞概率的影响。结果表明:当物流UAV之间最短安全间隔大于90.71 m时,所有飞行场景下UAV的风险水平均在可接受范围之内。当航迹角为30°、60°、90°时,碰撞概率随风向变化的波动范围较小,其中,航迹夹角为90°时最稳定。而当夹角为140°时,碰撞概率的波动范围较大,UAV安全飞行对环境因素更为敏感。

【关键词】 定位误差; 速度误差; 物流无人机(UAV); 碰撞概率; 冲突区域; 航迹夹角; 飞行间隔

Collision probability analysis of logistics UAV based on positioning and speed double errors

JIN Huibin¹, LIU Xi¹, HUANG Jun², CHEN Yichun¹

(1 School of Transportation Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China; 2 CAAC Airworthiness Certification Center, Shanghai 200232, China)

Abstract: There is a risk of collision in the batch operation of logistics UAVs. To evaluate the collision probability between UAVs in the air, a model was proposed to analyze the collision risk of logistics UAVs in the aerial operation stage. A UAV collision probability model with the double errors of positioning and velocity was proposed based on the conflict zone theory, and the logistics UAV collision probability variations are analyzed from different angles. The key risk factors in small civil UAV accident/incident data were analyzed and identified based on the data from the Federal Aviation Administration of the United States. The UAV safety flight interval model was proposed based on the logistics UAV failure data of 20 thousand flight hours to determine the shortest flight interval under the acceptable safety level. Furthermore, the effects of track angles and wind directions on the collision probability between UAVs

under constant flight intervals were investigated. The results showed that the risk for all flight scenarios was acceptable when the shortest safety interval between logistics UAVs exceeded 90.71 m. When the track angle was 30, 60, and 90°, the collision probability varied little with the wind direction. Specifically, the collision probability was maintained constantly when the track angle was 90°. The collision probability varied a lot when the angle was 140°, thereby the safe flight of the UAV was sensitive to environmental factors.

Keywords: positioning error; speed error; logistics unmanned aerial vehicle (UAV); collision probability; conflict zones; track corner; flight interval

0 引言

随着自动化和人工智能技术的迅猛发展,传统物流实现了向智慧物流的转变,无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)因其使用灵活,节省人力,广泛应用于物流配送^[1]。UAV 物流配送技术也成为物流企业亚马逊、敦豪航空货运公司以及顺丰等研究热点^[2-3]。然而,UAV 自身的高速飞行以及飞行路径的不确定性导致 UAV 之间极容易发生碰撞,这种碰撞可能导致 UAV 撞击到地面人员或建筑,造成严重的人员伤亡和财产损失。在此背景下研究 UAV 之间的碰撞概率对保障物流 UAV 安全运行具有重要意义。

为准确评估 UAV 碰撞风险,欧洲航空安全局提出 UAV 运行等效安全水平,即 UAV 的碰撞风险水平不得高于民航客机的风险水平^[4]。目前,国内外学者对 UAV 风险的研究主要分为 UAV 失效风险^[5]、UAV 对地风险评估^[6]。在 UAV 失效风险方面,贝叶斯网络得到广泛的应用^[7],如 ZHANG Honghong 等^[8]将贝叶斯网络与系统理论过程分析结合,分析物流 UAV 的事故概率;HAN Peng 等^[9]根据 UAV 实际运行数据,建立了贝叶斯网络风险评估模型,并给出了有效的风险缓解措施。在对地风险评估方面,PRIMATESTA 等^[10]量化了特定空域下 UAV 对地面人口造成的风险后果;ZHOU Qiang 等^[11]建立了对地风险评估模型;KOH 等^[12]分析了不同重量以及不同飞行高度坠落与地面人员致死率之间的关系;钟昱等^[13]针对物流 UAV 出现机、货分离情况建立了 UAV 与货物坠地造成的人员伤亡模型,并建立了风险评估矩阵。综上,在空中飞行风险方面,研究侧重于零部件故障引发的飞行失效风险;而对地风险则主要关注 UAV 失效坠地对地面人员和建筑造成的损失。然而,随着 UAV 的批量运行,飞行过程中发生碰撞的风险也日益引人关注。当前研究多集中于 UAV 与有人机之间的碰撞风

险^[14-15],并通常仅考虑单一误差因素带来的碰撞风险^[16],很少针对城市物流 UAV 自由飞行的特点进行相关的碰撞研究。

鉴于此,笔者拟提出基于定位、速度双误差的 UAV 碰撞概率模型,并综合考虑多种影响飞行安全的因素,构建 UAV 安全飞行间隔模型,并进一步研究空域环境中风向对 UAV 碰撞概率的影响。以期为物流 UAV 飞行安全评估提供重要的研究基础。

1 飞行冲突区域理论

根据已有研究成果^[17],依据物流 UAV 的飞行航迹之间的夹角以及航迹在水平面投影之间的夹角建立空间直角坐标系,搭建冲突区域进行风险建模分析。

1.1 冲突理论与安全标准

飞行冲突指的是航空器在飞行过程中,与所在空域其他航空器在某一时刻空间上发生重叠,即 2 航空器的水平或垂直距离小于规定的最短间隔^[18]。

评估物流 UAV 运行风险,首先需要确定合理的安全目标标准。国际民航组织对于航空器之间的碰撞风险标准定为 1.5×10^{-8} 次事故/飞行小时^[17],欧洲航空安全局提出 UAV 运行的等效安全水平,文中研究小型物流 UAV,因此,安全标准可采用 1.5×10^{-8} 次事故/飞行小时。

1.2 物流 UAV 飞行安全影响因素

从以下几个方面分析物流 UAV 碰撞概率的影响因素。

1) 导航定位误差。导航定位系统误差会使 UAV 在飞行过程中实际所处位置与预计到达位置存在一定的差异,最终引发安全事故。假设 UAV 的定位误差服从均值为 0、标准差为 σ_g 高斯随机分布^[14],即 $\varepsilon_g \sim N(\mu_g, \sigma_g^2)$ 。

2) 飞行速度误差。基于冲突区域建立的碰撞概率模型是从动态的角度分析碰撞概率,因此,速度

误差会对其造成一定的影响,且文中设定速度误差服从均值为0、标准差为的 σ_v 正态分布,即 $\varepsilon_v \sim N(\mu_v, \sigma_v^2)$ 。

3) 空域侧风。UAV 的飞行空域为低空空域并且冲突区域相对较小,低空的空气湍流等数据较难捕捉。因此,仅考虑风向对 UAV 碰撞的影响。

4) UAV 系统可靠性。UAV 自身出现故障会直接影响飞行安全,各个因素之间相互作用很可能导致 UAV 失去动力或严重偏离航迹。

5) 人为因素。由于操作人员在紧急情况下人为干预失败以及对 UAV 的维护不当、检查失误,导致 UAV 在飞行过程中发生碰撞事故。

2 物流 UAV 运行风险模型

以2架 UAV 同航迹反梯度飞行为例,建立基于冲突区域理论的碰撞模型。最初的 REICH 模型碰撞模板设定为长方体^[18],但是,在发生航迹偏离之后,飞机之间的水平碰撞判定较难,为方便判定,将碰撞模板采用圆柱体代替^[19],这虽然解决了上述问题,但对于物流 UAV 来说,由于自身的灵活性,碰撞判定需要考虑垂直方向的距离变化,因此,将物流 UAV 的碰撞模板视为以 UAV 自身为中心,半径为 R 的球体^[20],如图 1 所示。

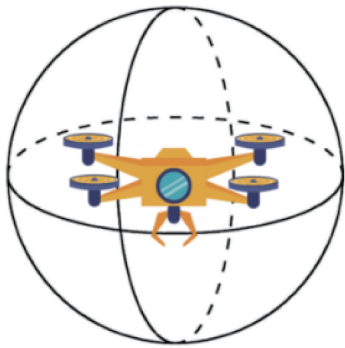


图 1 球形保护域

Fig. 1 Spherical protection area

设 R 为 2 架 UAV 长度、宽度、高度各自加和平均值的最大值,则:

$$R = \max\left(\frac{\lambda_{1x} + \lambda_{2x}}{2}, \frac{\lambda_{1y} + \lambda_{2y}}{2}, \frac{\lambda_{1z} + \lambda_{2z}}{2}\right) \quad (1)$$

式中 λ_{μ} 为*i*架 UAV 在 μ 方向上的长度,其中, $i = 1, 2; \mu = x, y, z$ 。

2.1 物流 UAV 冲突场景设定

以 UAV 变梯度飞行为例,假设 2 架 UAV 的冲突区域类型属于同向航迹冲突。UAV-1 执行降梯

度飞行任务,预期飞行轨迹为 L_1 , UAV-2 执行升梯度飞行任务,预期飞行轨迹为 L_2 ,并且在冲突区域内 2 架 UAV 预计轨迹相交于一点 O 。物流 UAV 飞行示意如图 2 所示。

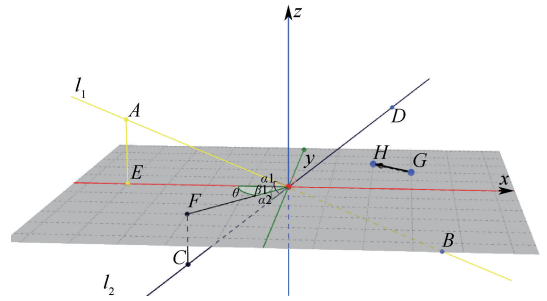


图 2 物流 UAV 飞行

Fig. 2 Logistics UAV flight diagram

由图 2 可知: UAV-1 的航迹 $l_1: A \rightarrow B$, UAV-2 的航迹 $l_2: C \rightarrow D$, l_1 与平面 XOY 的夹角为 α_1 , l_2 与平面 XOY 的夹角为 α_2 , 2 架 UAV 飞行航迹之间的夹角为 β , 飞行航迹在平面 XOY 上投影之间的夹角为 $\theta = \angle EOF$, 则有:

$$\cos\theta = \frac{\cos\beta}{\cos\alpha_1 \cos\alpha_2} - \tan\alpha_1 \tan\alpha_2 \quad (2)$$

根据式 (2) 可知: 冲突区域的大小由 $\alpha_1, \alpha_2, \beta$ 以及最小安全间隔共同决定。为方便研究, 冲突区域由六面体表示, 如图 3 所示。

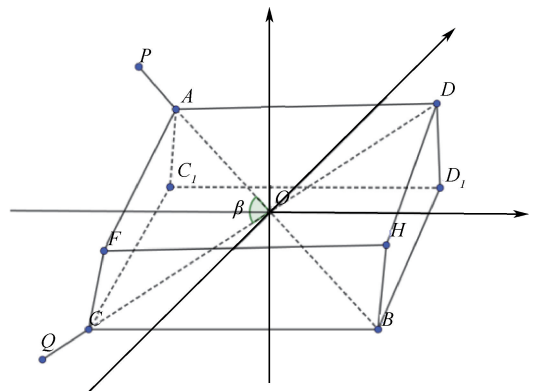


图 3 UAV 冲突区域

Fig. 3 UAV conflict area

图 3 中, 设 UAV-1 从 P 点到 A 点所用的时间为 t_A , 从 A 点到 B 点所用的时间为 t_B ; UAV-2 从 Q 点到 C 点所用的时间为 t_C , 从 C 点到 D 点所用的时间为 t_D , 2 架 UAV 预计飞行航迹相交于中心点 O 。实际飞行过程中 2 架 UAV 基本不会同时进入冲突区域, 因此, 假设 UAV-1 先到达 A 点, 在 t_A 之后 UAV-2 到达 C 点, 其中, $t_A \in (0, t_B)$ 。

2.2 碰撞概率模型

以各自的飞行方向在水平面的投影为 X 轴,与其垂直的方向为 Y 轴,垂直方向为 Z 轴建立空间坐标系,2 个坐标系共用原点 O 与 Z 轴,因此,将坐标旋转的推导转化为平面直角坐标系分析。坐标轴 $x'o'y'$ 按照顺时针方向旋转 α 之后与 xoy 重合,坐标变换矩阵为^[21]:

$$X' = X \begin{pmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha \\ -\sin\alpha & \cos\alpha \end{pmatrix} \quad (3)$$

通过分析冲突场景可知:当时间间隔 t_Δ 固定,任意时刻的 UAV 之间的瞬时碰撞概率为:

$$P = \int_{-R}^R f(L - L_b) dL = \int_{-R}^R \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_g^{12}\sigma_v^{12}} \exp\left(-\frac{(L - L_b)^2}{2(\sigma_g^{12})^2(\sigma_v^{12})^2}\right) \right] dL \quad (4)$$

式中: L 为考虑误差的 UAV 之间飞行间隔, m ; L_b 为不考虑导航误差、速度误差的情况,只考虑风的影响下 UAV 之间的飞行间隔, m 。 σ_g^{12} 与 σ_v^{12} 的推导需要根据式(3)进行计算,具体计算过程如下:

$$\sigma_g^{12} = \sqrt{(\sigma_{xg}^{12})^2 + (\sigma_{yg}^{12})^2 + (\sigma_{zg}^{12})^2} \quad (5)$$

按照式(5)的推导过程,同理计算出 σ_v^{12} 的值,将其代入式(4)进行求解,计算出在任意 t_Δ 下的瞬时碰撞概率。当冲突区域内的飞行总时间 T 已知,单位时间内 UAV 之间的碰撞概率 C_p 为:

$$C_p = \frac{\int_0^T P dt}{T} \quad (6)$$

由于实际飞行的场景中,UAV 进入冲突区域内的时间间隔是一个随机变量,假设 t_Δ 是均匀分布的,由此可以计算出在该运行场景中,UAV 之间碰撞的总概率 C_{PB} 为:

$$C_{PB} = \sum_0^{\max_\Delta} C_p \quad (7)$$

UAV 在运行过程中机载设备出现故障也会严重影响飞行安全,因此,考虑到 UAV 自身的可靠性对飞行安全的影响,假设飞行过程中设备出现严重故障的概率为 u_1 ,计算式为:

$$u_1 = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p'_i) \quad (8)$$

式中: n 为严重故障种类数; p'_i 为第 i 种故障类型发生的概率。

假设 UAV 运行过程中人为可靠性为 u_2 ,则可计算出 UAV 的运行总风险 E_R 为:

$$E_R = 2 \times 3\,600 \times CP_b \times u_1 \times (1 - u_2) \quad (9)$$

2.3 空域中风对 UAV 碰撞的影响

低空空域湍流与风切变对其飞行安全的影响较小,因此,不考虑风切变对飞行安全的影响,也不考虑风对 UAV 旋翼产生拉力与扭矩的影响,将 UAV 看作一个整体进行建模,有风阻力公式如下:

$$F_\mu = \frac{1}{2} c \rho S_\mu (V_w^\mu)^2 \quad (10)$$

式中: F_μ 为 UAV 在 μ 方向受到风的阻力; c 为阻力系数,取值为 0.2; ρ 为空气密度,取值为 1.293 kg/m^3 ; S_μ 为在 μ 方向的迎风面积; V_w^μ 为空域风速在 μ 方向上的分量。在此基础上将 UAV 看成一个整体进行受力分析,分别计算由于风的影响,UAV 在 3 个方向上发生的偏移量,如下式:

$$S_\mu = \frac{1}{2} a_\mu t^2 \quad (11)$$

式中: S_μ 为因风的影响 UAV 在方向 μ 上产生的偏移量; $a_\mu = \frac{F_\mu}{m}$ 为 UAV 在方向 μ 上的加速度; t 为飞行时间。

3 多种场景的 UAV 碰撞概率

分别选取同向航迹、逆向航迹、交叉航迹为研究对象,分析相同飞行速度情况下 UAV 最短飞行间隔 L_{\min} 与运行风险的关系。

3.1 UAV 飞行数据参数确定

根据文献[9]中物流 UAV 的飞行数据,提取出严重影响飞行安全的风险因素,结果见表 1。

表 1 UAV 系统故障类型分析及概率

Table 1 UAV system failure type analysis and probability

故障类型	故障介绍	故障概率
电池故障	电池故障会直接导致失去升力与飞行速度,严重影响 UAV 飞行安全	7.42×10^{-4}
电机故障	电机发生故障时,旋翼失去动力导致升力不足	1.24×10^{-4}
桨叶故障	桨叶故障一般分为桨叶断裂与桨叶松动 2 种,严重则会造桨叶脱落,UAV 会发生意外坠落	4.95×10^{-6}
货舱故障	货舱发生松动会使 UAV 飞行过程中货物发生脱落,严重影响飞行安全	8.81×10^{-5}
遥控装置故障	当 UAV 出现飞行异常的情况,驾驶员需要合理控制 UAV,人工干预不及时,则会引发更多的安全问题	2.13×10^{-6}

由表 1 可知:UAV 在飞行过程中发生严重事故的概率为 9.676×10^{-4} 。

为量化人为可靠性,提取美国联邦航空管理局(Federal Aviation Administration, FAA)中 104 起民用 UAV 事故数据诱因进行分析,结果如图 4 所示。

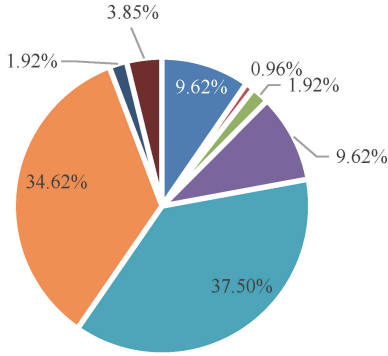


图 4 事故/事件诱因占比

Fig. 4 Cause proportion of accident/incidents

由图 4 可知:由于人为因素引起的事故占比为 9.62%,系统故障占比为 86.54%。而文献[9]中 2 万飞行小时内 UAV 系统故障的次数约为 300 次,由此可以计算出在每飞行小时,系统故障发生的概率为 1.5%,则可推算出每飞行小时内人为可靠性。

$$u_2 = 0.999\ 974 \quad (12)$$

选取 UAV M600 为研究对象,具体参数见表 2。

表 2 UAV M600 参数取值

Table 2 UAV M600 parameter values

参数	重量 m/kg	长度 λ_x/m	宽度 λ_y/m	高度 λ_z/m	最大速度 $v_{max}/$ ($m \cdot s^{-1}$)	最小速度 $v_{min}/$ ($m \cdot s^{-1}$)
取值	12	1.668	1.518	0.759	18	3

3.2 结果分析

在不考虑风速的影响下,探讨 UAV 之间的碰撞概率与航迹夹角 θ 、最短安全间隔 L_{min} 的关系,从中找出碰撞概率出现极值情况的航迹夹角 θ 。具体变化趋势如图 5 所示。

由图 5 可知:UAV 之间的碰撞概率随着夹角的增大呈现先增后减再增的趋势,并且分别在 90° 与 140° 处取到极值点,极小值点与夹角 60° 时的碰撞概率相当;当夹角为 30° 的时候,碰撞概率的上升趋势最陡峭。结合实际情况,文中不考虑夹角 180° 的情况。因此,选取的航迹角度为 30° 、 60° 、 90° 、 140° 分别分析 UAV 碰撞概率与风向之间的关系。

选取的飞行速度为 $13\ m/s$,分别从同向航迹、逆向航迹、交叉航迹 3 种情况进行分析,最终得出符

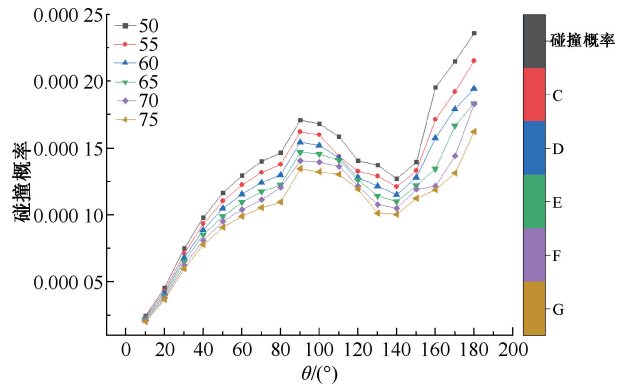


图 5 不同夹角与不同 Smin 的碰撞概率

Fig. 5 Collision probability at different angles

合运行安全标准的最短飞行间隔以便于后续分析,计算结果如图 6 所示。

由图 6 可知:UAV 之间的最短安全间隔 $L_{min} > 90.71\ m$ 时,所有飞行场景的运行风险水平在可接受范围内,因此,认为安全飞行间隔在该区间内时,UAV 运行风险水平为低。

分别选取航迹之间夹角为 30° 、 60° 、 90° 和 140° 的情况下,分析风向对 UAV 碰撞概率的影响。不同航迹角中风向与 UAV 碰撞概率之间的关系如图 7 所示。

由图 7 可知:当航迹夹角为 30° 、 60° 、 90° 时,UAV 之间碰撞概率随风向变化的波动范围较为平稳,其中,夹角为 90° 时最为稳定,当 UAV 之间的航迹夹角为 140° 时,碰撞概率的波动范围较大,此时当风向与 UAV1 飞行方向的夹角大于 120° 或者小于 10° 时,碰撞概率处于较低的水平。

3.3 对比分析

文献[16]中计算的小型 UAV 同向飞行 L_{min} 为 $114.15\ m$,文中所计算的符合安全运行水平下任意水平飞行方向的 L_{min} 为 $90.71\ m$,结果偏小的原因有 2 个,分别为:①文中研究对象为 M600,其型号比该文章的规格偏小;②文献[16]中 UAV 飞行速度选为 $13.9\ m/s$,文中选取的为 $13\ m/s$ 。文中研究的飞行间隔更小,间距的缩短意味着在相同的空域内能够运行更多的 UAV 来满足增长的物流需求,同时,在既定的飞行航迹中,通过空域中存在的风速与风向来决定 UAV 是否执行飞行任务,对提高物流 UAV 运行安全水平有着极大的现实意义。

综上,在考虑多种因素的情况下,建立的物流 UAV 碰撞概率模型具有实用价值,更符合 UAV 实际运行中的场景,在满足运行安全水平的前提下,最大限度的提高空域利用率,满足城市物流的运输需求。

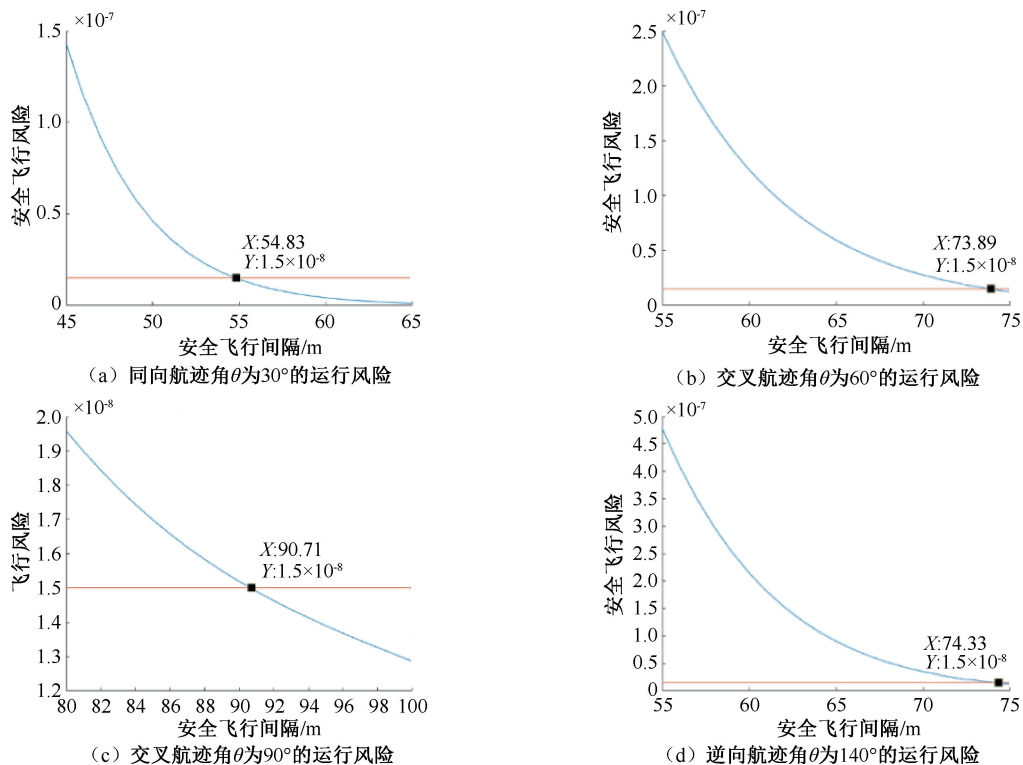


图 6 3 种情况下 UAV 运行风险
Fig. 6 UAV operation risk in 3 cases

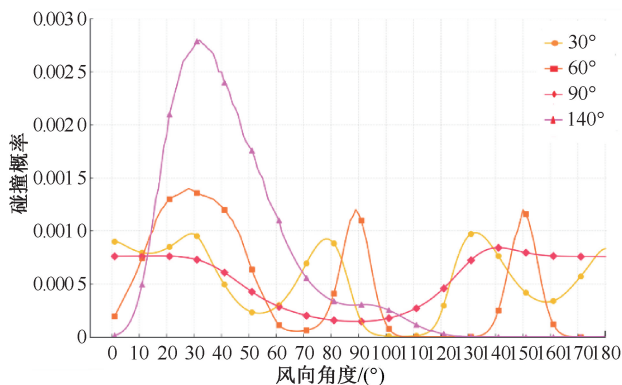


图 7 不同航迹角中风向与 UAV 碰撞概率之间的关系

Fig. 7 Relationship between wind direction and UAV collision in different track angles

4 结 论

1) 综合考虑 UAV 的定位误差、速度误差、风速、UAV 系统以及人为因素,建立物流 UAV 之间的碰撞概率模型。

2) 通过合理假设,并选取合适的空域参数,利用模型计算出 UAV 运行风险与飞行最短间隔之间的关系,最终得出,在保证安全运行水平的前提下,小型物流 UAV 之间的最短飞行间隔为 90.71 m。

3) 分析不同航迹角下 UAV 碰撞概率与风向之间的关系,当航迹角为 30、60、90°时,碰撞概率的波动趋于稳定,而当夹角为 140°时,碰撞概率的波动较大。

4) 为使模型更为准确并更加接近实际情况,今后的研究应考虑 UAV 自身的避障能力对 UAV 运行总风险的影响,使结果更为准确。

参 考 文 献

[1] 李亚飞,刘明欢,王莉莉. 建筑物影响下的 UAV 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.

[2] DORLING K, HEINRICHS J, MESSIER G G, et al. Vehicle routing problems for drone delivery[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2016, 47(1): 70-85.

[3] WANG Zheng, SHEU J B. Vehicle routing problem with drones[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2019, 122: 350-364.

- [4] 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, 2020:1 442-1 451.
- [5] ANCEL E, CAPRISTAN F M, FOSTER J V, et al. Real-time risk assessment framework for unmanned aircraft system (UAS) traffic management (UTM)[C]. 17th Aiaa Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, 2017: DOI: 10. 2514/6. 2017-3273.
- [6] KIM Y, BAE J. Risk-based UAV corridor capacity analysis above a populated area[J]. Drones, 2022, 6(9):DOI: 10. 3390/DRONES6090221.
- [7] 张兆宁, 梁玉文. 自由飞行下基于贝叶斯网络的碰撞风险研究[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(9):40-45.
ZHANG Zhaoning, LIANG Yuwen. Bayesian network-based study on collision risk in free flight[J]. China Safety Science Journal, 2014, 24(9):40-45.
- [8] ZHANG Honghong, GAN Xusheng, LIU Ying, et al. Risk assessment framework for low-altitude UAV traffic management[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2022, 42(3): 2 775-2 792.
- [9] HAN Peng, YANG Xinyue, ZHAO Yifei, et al. Quantitative ground risk assessment for urban logistical unmanned aerial vehicle (UAV) based on Bayesian network[J]. Sustainability, 2022, 14(9):DOI:10. 3390/su14095733.
- [10] PRIMATESTA S, GUGLIERI G, RIZZO A. A risk-aware path planning strategy for UAVs in urban environments[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2019, 95:629-643.
- [11] ZHOU Qiang, XU Mutian. Research on risk assessment of uav to buildings[C]. 2021 International Conference on Information Control, IEEE, 2021:37-40.
- [12] 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.
- [13] 钟罡, 励瑾, 张晓玮, 等. 物流无人机对地风险评估方法研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2022, 22(4): 246-254.
ZHONG Gang, LI Jin, ZHANG Xiaowei, et al. A risk assessment method of logistics drones on ground[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2022, 22(4):246-254.
- [14] 韩鹏, 周斌, 张恩宇. 终端区多场景有人机/无人机空中碰撞风险研究[J]. 西华大学学报: 自然科学版, 2022, 41(2):8-11, 50.
HAN Peng, ZHOU Bin, ZHANG Enyu, Air collision risk of manned drones in multiple scenarios in the terminal area[J]. Journal of Xihua University: Natural Science Edition, 2022, 41(2):8-11, 50.
- [15] 高扬, 郭钊, 陈靖淞, 等. 融合空域无人机与有人机冲突风险预测与解脱[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(6): 3 288-3 294.
GAO Yang, GUO Fan, CHEN Jingsong, et al. Conflict prediction and relief between UAV and manned aircraft in fusion airspace[J]. Journal of Safety and Environment, 2022, 22(6):3 288-3 294.
- [16] 王莉莉, 阳杰. 基于位置误差概率模型的物流无人机安全间隔评估方法研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(3):184-192.
WANG Lili, YANG Jie, Research on assessment method of safety separation for logistics UAVs based on position error probability model[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2022, 18(3):184-192.
- [17] 曲玉玲. 空中交通碰撞风险建模研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2012.
QU Yuling. Research on collision risk modeling of air traffic [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [18] 刘章. 基于 REICH 模型的同高度交叉航路碰撞风险研究[J]. 深圳大学学报: 理工版, 2020, 37(2):136-142.
LIU Zhang. Collision risk of crossing airlines at the same altitude based on REICH model[J]. Journal of Shenzhen University: Science and Engineering, 2020, 37(2):136-142.
- [19] 夏昌青. 基于冲突风险的航路网络安全性分析[D]. 南京:南京航空航天大学, 2015.
XIA Changqing. Security analysis of air route network based on conflict risk [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.
- [20] 张洪海, 李博文, 刘焱, 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.
- [21] 邹依原. 智慧城市环境下无人机安全间隔标定方法研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2021.
ZOU Yiyuan. Research on the Demarcation method of safe separation for unmanned aerial vehicle in future smart cities[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.

作者简介: 靳慧斌 (1976—), 男, 河北石家庄人, 博士, 教授, 主要从事航空风险评估、人机工效设计、智能人机协同等方面的研究。E-mail: airhf207@163.com。

