

中文引用格式:张健,赵巍飞,卢飞,等. 基于 Event 模型的城市物流无人机同高度交叉运行间隔研究[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(5): 99-105.

英文引用格式:ZHANG Jian, ZHAO Yifei, LU Fei, et al. Research on crossing operation separation of urban logistics UAVs at same altitude based on Event model[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(5): 99-105.

基于 Event 模型的城市物流无人机同高度交叉运行间隔研究*

张健 副教授, 赵巍飞** 教授, 卢飞 副教授, 黎宗孝, 罗鑫悦
(中国民航大学 空中交通管理学院, 天津 300300)

中图分类号: X949; V355

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.05.1230

基金项目: 国家自然科学基金资助(52272356); 中央高校基本科研业务费项目(3122022095)。

【摘要】 为解决城市物流无人机飞行流量加大、隔离航线模式空域利用率低的矛盾, 需要实施安全有效的交叉运行。通过研究交叉运行碰撞风险, 确定侧向误差、垂直误差、纵向临近率等核心参数, 构建同高度交叉运行间隔模型。在此基础上, 进一步考虑机载冲突探测与解脱(CDR)系统失效问题, 并运用事件树分析方法, 提出并构建城市物流无人机交叉间隔综合模型。结果表明: 在航线夹角为 60° 情况下, 对标安全目标水平 1.5×10^{-8} , 所需交叉间隔为 158 m; 对标安全目标水平 1×10^{-6} , 所需交叉间隔 155 m。随着交叉角度增大, 运行间隔总体呈现上升趋势, 当接近 180° 时, 即对头运行时, 所需间隔急剧上升, 与实际认知一致。

【关键词】 Event 模型; 城市物流无人机(UAV); 同高度; 交叉运行; 交叉间隔; 冲突探测与解脱(CDR)

Research on crossing operation separation of urban logistics UAVs at same altitude based on Event model

ZHANG Jian, ZHAO Yifei, LU Fei, LI Zongxiao, LUO Xinyue

(College of Air Traffic Management, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: In view of the booming of flight flow of urban logistics UAVs and low airspace utilization due to isolation mode of operation, safe and efficient cross-operation needs to be implemented. The crossing separation model was constructed by studying the crossing operation collision risk at the same altitude, and the core parameters such as lateral error, vertical error and longitudinal proximity rate were determined. By introducing the Event model method and constructing separation model, the failure probability of airborne CDR system was further considered. By using event tree analysis method, a comprehensive model of urban logistics UAV crossing separation was proposed and constructed. Results show that the required crossing separation is 158 m for the target safety of level 1.5×10^{-8} and 155 m for the target safety of level 1×10^{-6} when the route angle is 60 degrees. With the increase of crossing angle, the required separation generally shows an upward trend. When it approaches 180° , that is, opposite direction operation, the required separation increases sharply, which is consistent with the actual cognition.

* 文章编号: 1003-3033(2025)05-0099-07; 收稿日期: 2024-12-11; 修稿日期: 2025-02-18

** 通信作者: 赵巍飞(1971—), 男, 湖南常德人, 博士, 教授, 主要从事空中交通管理、空域融合运行安全等方面的研究。E-mail: yfzhao@cauc.edu.cn。

Keywords: Event model; urban logistics unmanned aerial vehicles (UAV); same altitude; crossing operation; crossing separation; conflict detection and resolution (CDR)

0 引言

低空经济是一种综合经济形态,具有明显的新质生产力特征,发展空间极为广阔。城市物流运输无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)因其速度快、效率高、成本低,成为低空经济的重要抓手。顺丰、迅蚁等企业纷纷开展了城市物流无人机经营活动。但由于运行间隔标准等基本原理认识上的缺失,限制了其进一步发展。当前采取的主流运行模式是由无人机运营企业申报运行航线并自行实施飞行保障。在飞行航线分配上,实行隔离模式。现实运行中采用低密度和隔离化运行模式,导致空域利用率不高。面向场景和营运人主导的运行模式,无法做到对空域的高效使用。未来城市低空无人机运输高密度飞行,交叉运行场景将不可避免,由此衍生的无人机碰撞风险将急剧增加。

同高度场景下的交叉运行碰撞风险,国内外学者已开展相关研究。赵洪元^[1]建立交叉航路冲突区域模型;韩松臣等^[2]为航路交叉点划设了碰撞风险区域;孟祥伟等^[3]通过蒙特卡罗仿真分析了不同概率分布模型对碰撞风险的影响;卢飞等^[4]研究了配对进近纵向碰撞风险;黄晋等^[5]采用改进的Event模型评估同高度层交叉航路的碰撞风险;张晓燕^[6]量化了交叉航路碰撞风险,为重新制定间隔标准提供了参考;NOVAK等^[7]通过计算每小时潜在冲突的平均数量、冲突强度指数和交叉口容量评估碰撞概率;KALLINEN等^[8]构建了横向间隔与导航性能之间的等风险面;KALLINEN^[9]提出一种定量、基于碰撞风险的平行航线间隔和同航线无人机纵向间隔模型;SESAR的U-space间隔管理服务课题组^[10]计算了给定安全目标水平下的无人机之间的间隔标准;李琦等^[11]基于Event模型,评估了军用无人机与民机的侧向碰撞风险;卢飞等^[12]评估了陆区航路纵向碰撞风险;王莉莉等^[13]提出规划无人机之间的安全间隔以规避运行风险;张健等^[14]考虑无人机速度误差,提出纵向间隔与调控频率的博弈模型。已有研究主要聚焦于无人机在现有空管体制下的运行,缺乏针对无人机同高度交叉航线运行碰撞风险评估。

鉴于此,笔者拟借鉴Event模型,构建城市物流无人机同高度交叉运行间隔传统模型,并通过确定关键参数,确定航迹交叉下的所需间隔。考虑在城

市物流无人机的自主间隔保持中,机载冲突探测与解脱(Conflict Detection and Resolution, CDR)系统响应能力对交叉间隔的关键作用,引入事件树分析无人机CDR系统失效概率,以期调整和优化传统间隔模型参数,构建符合城市物流无人机自身运行特点的交叉间隔模型。

1 交叉间隔研究方法

经典的Reich模型中存在诸多缺陷,如许多参数的选取较为困难,难以辨别重要参数。学者们分析已有安全评估模型和碰撞风险模型,从碰撞事件角度分析安全间隔并提出Event模型,在计算碰撞风险时,主要参数清晰,过程简单。

事件树分析法是安全系统工程中常用的一种归纳推理分析方法,它是一种按事故发展时间顺序推论可能的后果,从而进行危险源识别的方法。

针对城市物流无人机交叉航线运行场景,综合上述2种模型与方法,将Event模型引入到城市物流无人机同高度交叉运行场景,构建交叉运行间隔模型。先确定侧向误差、垂直误差、纵向临近率等核心参数。再针对侧向误差引发的侧向重叠概率,因其受到无人机机载CDR系统的响应能力影响,针对CDR系统的失效概率,引入事件树分析进行研究和量化,构建考虑CDR失效概率的交叉间隔模型,如图1所示。

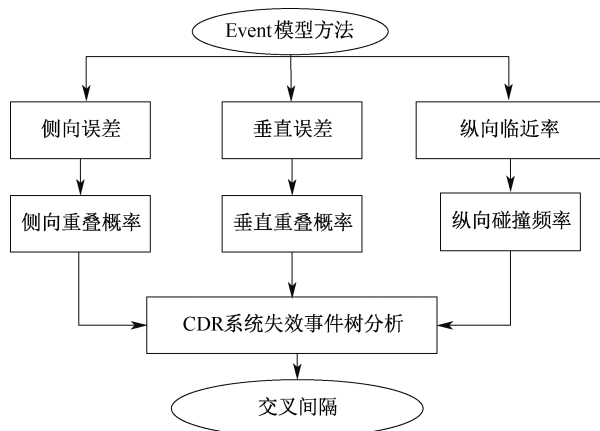


图1 交叉间隔模型框架

Fig. 1 Crossing separation model framework

2 城市物流无人机间隔制定原则

2.1 无人机飞行特征及需求

从现阶段民航运输飞行活动看,主流是遵守仪

表飞行规则的航班飞行,由空管部门提供空管服务。空中交通管制员通过飞行员报告、雷达、广播式自动相关监视 (Automatic Dependent Surveillance-broadcast, ADS-B) 等手段和监视设备,掌握航空器位置、高度、速度等信息,对飞行员发出管制指令。为防止相撞,管制员通过实施间隔标准和冲突通报,确保飞行安全。

伴随无人机成为航空活动新势力,传统空管模式不再适合。对比有人机飞行,有 2 个方面困难对无人机构成挑战:①探测和避让 (Detect And Avoid, DAA) 其他航空器的能力;②遵守目视气象条件的能力。考虑到无人机业务的数量庞大,传统用于规范有人机的空管模式不能直接为其服务。国际民航组织 (International Civil Aviation Organization, ICAO) 10019 号文件指出,通过 DAA 模块处理交通冲突的问题,是未来无人机运行的前提条件。

为提升低空飞行活动安全和效率,应对无人机驾驶和无人管制的新型管控模式,需要开发新的冲突管理手段,无人机自主间隔保持成为有效路径。

2.2 无人机间隔制定原则

根据 ICAO 9689 号文件,运行间隔的影响因素包括航线结构、空中交通服务能力、安全目标水平、空中交通流量、航空器性能等。结合城市物流无人机交叉运行场景,分析相关原则。

1) 航线结构。航线结构是空中交通复杂性体现的重要因素,航线结构对间隔制定具有重要影响。选取交叉航线同高度运行场景,基于该构型,需要考虑 2 机在交叉点附近的交叉角度、纵向距离、垂直误差、纵向临近率等参数。

2) 空中交通服务能力。空中交通服务能力涉及通信延迟水平、导航定位能力、高度测量精度、是否具备监视引导能力等。在此场景下,飞行前基于飞行计划,为城市物流无人机配备所需交叉间隔,飞行中无人机在程控下实施自主飞行。其中,机载 CDR 响应能力是该指标的重要体现。

3) 安全目标水平针对无人机运行,ICAO 和各国航空主管部门尚未制定统一标准。因此,采用有人机已有安全目标水平。根据 ICAO 描述的有人机安全目标水平,碰撞风险一般表示为每飞行小时航空器出现碰撞的次数。安全目标水平均指定为 5×10^{-9} 次/飞行小时。

4) 空中交通流量。由于目前城市物流无人机总体交通流量不大,采取相对保守的运行模式,已有

冲突管理需求表现的不明显。研究者选取实际运行数据用于交叉构型中的纵向临近率的计算。

5) 无人机性能。无人机性能指标包括尺寸、重量、轴距、旋翼升、阻力系数、巡航速度、避撞能力等,这些将直接决定无人机飞行中的纵向加速度、侧向加速度、垂直加速度、俯仰角、滚转角、偏航角。此外,基于城市物流无人机历史航迹数据,统计无人机的外在性能指标,如导航定位误差、高度保持能力、位置更新周期等。研究中将选取业内具有代表性的典型机型历史运行数据进行研究。

3 交叉运行场景和风险描述

3.1 运行场景

同高度层交叉航线 L_1 和 L_2 ,交叉航线上 2 架无人飞机为 A 和 B,2 机航迹夹角为 ω ,2 机在侧向、纵向/垂直方向的位置彼此相互独立。以无人机 A 为中心,建立碰撞盒 ($\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ 分别为碰撞盒的长、宽、高,分别用无人机的机身长、翼展和机身高进行度量)。交叉间隔如图 2 所示,其中, S_c 为当前机到达交点时,后机与交叉点距离,即交叉间隔。

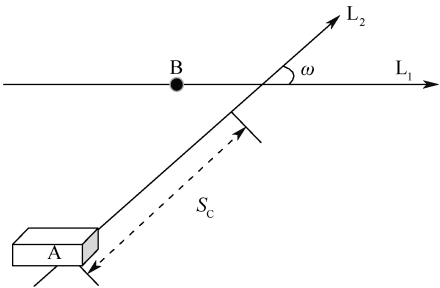


图 2 交叉间隔
Fig. 2 Crossing separation diagram

3.2 碰撞风险描述

以无人机 B 为原点建立空中直角坐标系,其中,垂直于无人机 A 所飞航线的平面定义为交叉间隔层。 x 轴为 A 所飞航线的方向, y 轴为水平面上垂直于 A 所飞航线的方向, z 轴为垂直向上, y 轴和 z 轴所确定的平面定义为交叉间隔层,如图 3a 所示。当纵向飞行发生大误差时,碰撞盒以相对速度飞向交叉间隔层。在穿越交叉间隔层的过程中,碰撞盒在纵向、侧向和垂直方向上都会发生相应的移动,如图 3b 所示,其中, C, G, H, E, I, J 为碰撞盒运动位置点;为计算方便,将 C, D, E, F 作为扩展碰撞盒运动位置点。

2 机在纵向、侧向和垂直方向的相对速度分别

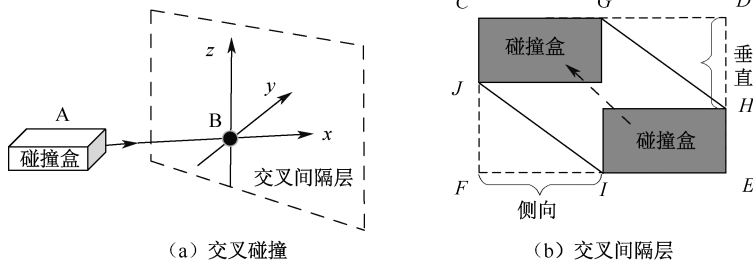


图3 无人机交叉碰撞

Fig. 3 UAVs crossing collision diagram

为 u 、 v 、 w ，纵向穿越所需的时间为 t ，显然 $t = \frac{2\lambda_x}{u}$ 。 t 时间内碰撞盒相对于交叉间隔层在侧向和

垂直方向移动的距离分别为 $v \times \frac{2\lambda_x}{u}$ 和 $w \times \frac{2\lambda_x}{u}$ 。碰撞盒在穿越过程中，若质点 B 恰好位于上述长方形范围内，则说明 2 机发生了碰撞。碰撞风险可通过碰撞盒穿越间隔层的频率与 B 机位于长方形范围内的概率计算。

4 交叉运行碰撞风险及间隔模型

4.1 无人机交叉运行间隔模型

结合运行风险描述，可知无人机 C 侧向位于长方形范围内的概率为：

$$P_y = P_y(S_y) \times \left(1 + \frac{2v\lambda_x}{2u\lambda_y}\right) \quad (1)$$

式中 $P_y(S_y)$ 为 2 机侧向距离是 S_y 时侧向重叠概率。

同理，无人机 C 在垂直维度位于长方形范围内的概率为：

$$P_z = P_z(0) \times \left(1 + \frac{2w\lambda_x}{2u\lambda_z}\right) \quad (2)$$

式中 $P_z(0)$ 为 2 机出现垂直重叠概率。

基于碰撞风险描述，构建城市物流无人机交叉航线运行下的碰撞风险模型：

$$N_c = 2 \times Q \times P_y(S_y) \times P_z(0) \times \left(1 + \frac{2v\lambda_x}{2u\lambda_y}\right) \times \left(1 + \frac{2w\lambda_x}{2u\lambda_z}\right) \quad (3)$$

式中： Q 为纵向碰撞率，即无人机 A 穿越间隔层的频率； N_c 为交叉航路碰撞风险。

$$Q = E(0) \times \frac{\lambda_x}{S_c \cos \omega + \lambda_x} \quad (4)$$

式中 $E(0)$ 为纵向邻近率，体现单位时间内无人机小于纵向间隔的频率。

4.2 间隔模型核心参数

1) $E(0)$ 计算如下式：

$$E(0) = \frac{n_z}{n} \quad (5)$$

式中： n_z 为单位时间内相邻高度层上纵向间隔小于垂直间隔引发冲突的无人机数； n 为单位时间相邻高度层上运行无人机总数。

单位时间相邻高度层上纵向间隔小于垂直间隔的无人机数，可通过航线流量得到，即计算相邻高度层遭遇小于纵向间隔的频率。结合实际航线流量数据，基于纵向间隔和冲突判定条件，求解纵向冲突率。计算式为：

$$F_c = q \int_0^{S_x} \frac{q}{TV} \exp\left(-\frac{qk}{TV}\right) dk \quad (6)$$

式中： F_c 为纵向冲突率， h^{-1} ； S_x 为纵向间隔，m； q 为无人机航线运行中遭遇其他无人机的次数； T 为单位时间，取 3 600 s； V 为无人机巡航速度，m/s； k 为 2 机纵向距离，m。经统计， q 为 30； V 取 12 m/s。求解得到纵向邻近率为 0.01。

2) 侧向重叠概率。交叉航路上侧向重叠概率随着时间的不同在不断变化，根据平行航路上无人机运行特点，结合航线构型进一步计算。基于已有研究和数据统计，无人机侧向定位误差服从正态分布^[20]，即

$$f_y(s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \exp\left(-\frac{s^2}{2\sigma_y^2}\right) \quad (7)$$

式中： $f_y(s)$ 为无人机侧向定位误差的概率密度函数；无人机侧向定位误差的方差值 $\sigma_y^2 = 1.5753 \text{ m}^2$ ； s 为 2 机侧向距离值，m。设定同高度、航迹交叉角为 ω 下的 2 架无人机所需交叉间隔 S_c 如图 4 所示，其中， A_1 和 A_2 代表 A 机行进位置； B_1 和 B_2 代表 B 机行进位置。

当 B 机到达交点时，A 机刚好距交叉点为 S_c ，2 机侧向距离 $S_y = S_c \sin \omega$ 。由于 2 机位置彼此相互

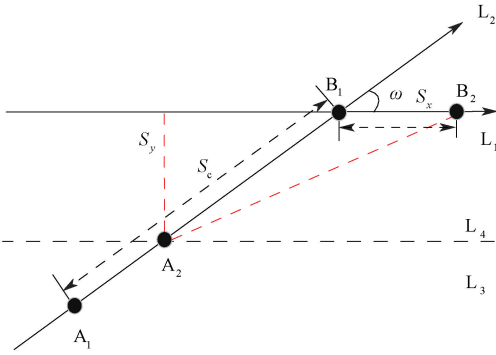


图 4 同高度交叉运行

Fig. 4 Crossing operation diagram at the same altitude

独立,因此,2 机侧向重叠概率为:

$$P_y(S_y) = 2\lambda_y \int_{-\infty}^{\infty} f_y(s)f_y(S_y + s)ds \quad (8)$$

在 B 机通过交点后,2 机侧向间隔不断缩小,侧向碰撞风险逐渐加大。但当 B 机通过交点距离符合纵向间隔 S_x 时,2 机满足安全运行间隔。将 A 机距离交叉点为 $S_c - S_x$ 位置作为评估侧向碰撞风险的临界值:

$$S_y = (S_c - S_x) \sin \omega \quad (9)$$

计算并确保此时的侧向重叠概率满足条件,是确保运行安全的关键。

$$P_y(S_y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(\sigma_{yA}^2 + \sigma_{yC}^2)}} \int_{-\infty}^q \exp\left(-\frac{(s - S_y)^2}{2(\sigma_{yA}^2 + \sigma_{yC}^2)}\right) ds \quad (10)$$

3) 垂直重叠概率。高度保持误差可分为技术误差和运行误差,从技术误差评估垂直重叠概率。通过数据统计,垂直误差服从正态分布:

$$f_z(0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \exp\left(-\frac{l^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad (11)$$

式中: $f_z(0)$ 为无人机垂直误差的概率密度函数; σ_z^2 为无机高度误差的方差, $\sigma_z^2 = 1.3895 \text{ m}^2$; l 为 2 机垂直距离, m。

因为 2 无人机位置彼此相互独立,所以 2 机由于技术误差引起垂直重叠概率为:

$$P_z(0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(\sigma_{zA}^2 + \sigma_{zC}^2)}} \int_{-\lambda_z}^{\lambda_z} \exp\left(-\frac{l^2}{2(\sigma_{zA}^2 + \sigma_{zC}^2)}\right) dl \quad (12)$$

4.3 考虑失效概率的交叉间隔模型

无人机 CDR 系统设计中,间隔保持是由空管模块、飞控模块和机动模块的协同配合实现的。其中,空管模块负责监控无人机之间的相对位置和间隔,

分析无人机所处飞行状态,作出决策,用时 t_1 。空管模块将指令发送给飞控模块,后者转换成具体飞行控制信号,用时 t_2 。机动模块根据飞控模块提供的飞行控制信号,执行机动飞行,用时 t_3 。

基于工作流程,建立无人机运行过程事件树,如图 5 所示。

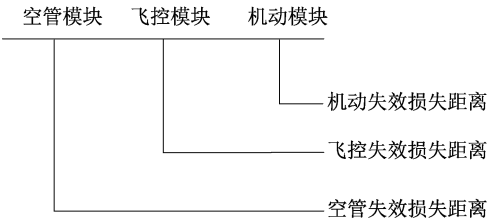


图 5 CDR 系统失效分析

Fig. 5 Failure analysis of CDR system

基于事件树,结合运行数据的统计,细分为 4 种情况分别描述系统失效的概率及对间隔损失的影响。令 P_1 、 P_2 、 P_3 表示 3 个模块正常运行概率。

1) 3 个模块均正常,全力保持所需间隔。 $P_1P_2P_3$ 为 94%,交叉间隔保持不变。

2) 机动模块失效, $P_1P_2\bar{P}_3$ 为 3%,交叉间隔将部分损失。

3) 飞控模块和机动模块失效, $P_1\bar{P}_2\bar{P}_3$ 为 2%,交叉间隔将部分损失。

4) 3 个模块均失效, $\bar{P}_1\bar{P}_2\bar{P}_3$ 为 1%,交叉间隔将部分损失。

需要指出,各模块失效概率会影响交叉间隔的取值,尤其是交叉间隔的损失带来的侧向重叠概率等参数的计算(图 4);而相关参数的变化将直接影响交叉运行中的碰撞风险。基于失效概率,可构建综合考虑 CDR 失效的无人机交叉运行间隔模型,如下式:

$$N_c = P_1P_2P_3 \cdot N_c(S_c) + P_1P_2\bar{P}_3 \cdot N_c(S_c - V_r t_3) + P_1\bar{P}_2\bar{P}_3 \times N_c(S_c - V_r(t_2 + t_3)) + \bar{P}_1\bar{P}_2\bar{P}_3 \times N_c(S_c - V_r(t_1 + t_2 + t_3)) \quad (13)$$

式中 V_r 为 2 机相对速度, m/s。

依据 ICAO DOC9854,面向有人机的间隔标准确定中,不考虑机载避撞能力。然而,基于城市物流无人机交叉运行特点,为提高其安全防护能力,在交叉航线运行间隔模型构建中,需考虑无人机机载 CDR 系统失效概率。基于该理念构建的交叉间隔,更具安全性和实用价值。

5 无人机交叉间隔的确定

基于交叉间隔模型,对标安全目标水平(Target

Level of Safety, TLS), 可确定所需交叉间隔。尽管 ICAO 和各国航空主管部门尚未制定统一 TLS, 但考虑无人机之间碰撞可能涉及坠落引发地面伤亡, 且城市低空物流无人机运行在人口稠密地区, 故采取 ICAO 针对有人机的安全目标水平取值开展研究。与此同时, 以通用航空运行领域常用的 1×10^{-6} 指标作为对比。

5.1 无人机性能分析

以某运营无人机配送航线数据为例, 并选取其地面控制系统 2021 年 5 月某天收集的飞行航迹数据共 25 000 条进行分析。此外, 通过调研, 得到该型无人机机型参数。无人机航迹数据见表 1。

表 1 无人机航迹数据

Table 1 UAV track data format

参数	取值	参数	取值
纬度/(°)	25.846	北向速度/(m·s ⁻¹)	-0.019
经度/(°)	114.919	东向速度/(m·s ⁻¹)	-0.031
高度/m	108.802	地向速度/(m·s ⁻¹)	0.006

通过误差拟合分析航迹数据, 得到该无人机航迹运行性能, 具体参数见表 2。

表 2 无人机机型参数

Table 2 UAV model parameters

参数	取值	参数	取值	参数	取值
最大起飞质量/kg	37	纵向定位期望	0	纵向定位方差/m ²	1.741 2
最大载荷/kg	12	侧向定位期望	0	侧向定位方差/m ²	1.575 3
巡航速度/(m·s ⁻¹)	12	高度定位期望	0	高度定位方差/m ²	1.389 5
几何尺寸/m×m×m	2.5×2.5×0.6	速度误差期望	0	速度误差方差/m ²	0.072 3

5.2 常规交叉运行间隔

基于交叉间隔模型, 结合实际无人机数据, 计算所需交叉间隔。选取某型无人机尺寸为 2.5 m×2.5 m×0.6 m, 速度 12 m/s, 航迹交角 $\omega=60^\circ$ 。基于式(1)得到航迹交角为 60° 时所需交叉间隔, 如图 6 所示, 由图 6 可知: TLS 取 1.5×10^{-8} 和 1×10^{-6} 时, 所需交叉间隔分别为 156 和 153 m。

5.3 考虑系统失效的综合间隔

考虑系统失效情形下的综合间隔模型中, t_1 、 t_2 、 t_3 均取 0.04 s, 令 2 机 V_r 取 24 m/s。基于式(8), 得到交叉航迹交角为 60° 时所需交叉间隔, 如图 7 所示。

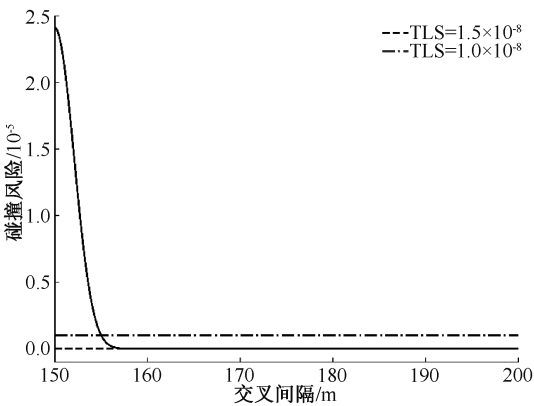


图 6 夹角 60° 所需交叉间隔

Fig. 6 Required crossing separation at angle 60°

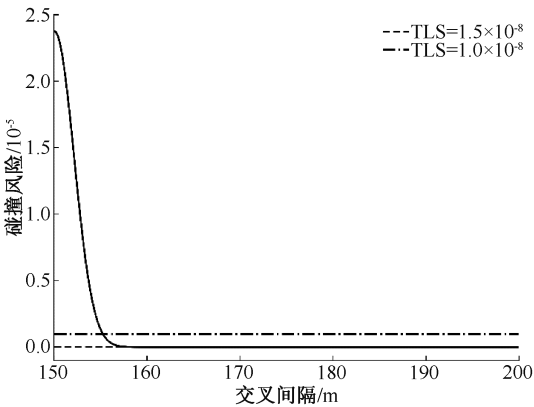


图 7 夹角 60° 且考虑系统失效的交叉间隔

Fig. 7 Required crossing separation at angle 60° with considering system failure

由图 7 可知: TLS 取 1.5×10^{-8} 和 1×10^{-6} 时, 所需交叉间隔分别为 158、155 m。

5.4 交叉间隔与航迹夹角的关系

考虑航迹夹角变化下所需交叉间隔变化情况, 如图 8 所示。

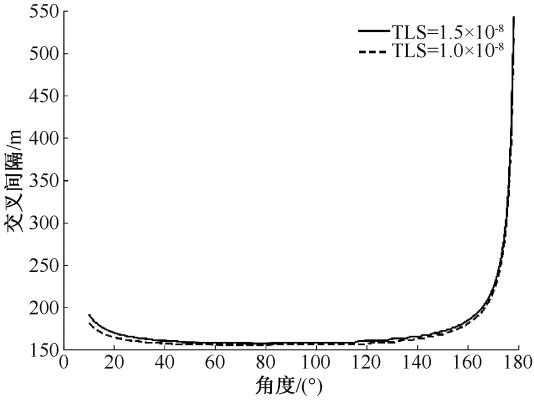


图 8 角度变化下的交叉间隔

Fig. 8 Crossing separation with varying angles

从图8中可以看出,随着交叉角度增大,运行间隔总体呈现上升趋势,当接近 180° 时,即对头运行时,所需间隔急剧上升,与实际认知一致。

6 结 论

1) 面向城市物流无人机交叉间隔研究,应用 Event 模型,构建常规间隔模型,并得到所需运行间隔。考虑无人机 CDR 设备失效事件,应用事件树分析,构建交叉运行综合间隔模型。

2) 新模型考虑了设备失效问题,有效拓展了航空器间隔研究方法,可以提供更具安全性的交叉运行间隔值,并可确定不同安全目标水平下城市物流无人机间隔。

3) 通过对交叉间隔随航迹交角的变化规律研究,发现随航迹夹角增大交叉间隔呈现增大趋势。该研究可用于指导不同航线结构下间隔配备,并可为无人机自主间隔保持能力构建提供理论支持。

参 考 文 献

- [1] 赵洪元. 两条交叉航线上飞机发生危险冲突次数模型的研究[J]. 系统工程与电子技术, 1998(5): 7-9, 18. ZHAO Hongyuan. Study on the model for computing the number of dangerous conflicts among aircrafts on two intersecting tracks[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 1998(5): 7-9, 18.
- [2] 韩松臣, 曲玉玲, 孙樊荣, 等. 航路交叉点处碰撞风险模型[J]. 西南交通大学学报, 2013, 48(2): 383-389. HAN Songchen, QU Yuling, SUN Fanrong, et al. Collision risk model around intersection of airways[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2013, 48(2): 383-389.
- [3] 孟祥伟, 张平, 王瑛. 交叉航路航空器碰撞风险评估[J]. 北京航空航天大学学报, 2010, 36(9): 1 021-1 025. MENG Xiangwei, ZHANG Ping, WANG Ying. Aircraft collision risk assessment at intersecting air routes[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 36(9): 1 021-1 025.
- [4] 卢飞, 陈昊南. 模糊 PID 控制下的 CSPRs 配对进近纵向碰撞风险[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(11): 97-104. LU Fei, CHEN Haonan. Longitudinal collision risk of CSPRs paired approach under fuzzy PID control[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(11): 97-104.
- [5] 黄晋, 焦瑶瑶, 刘厚荣, 等. 基于改进 Event 模型的交叉航路碰撞风险分析[J]. 航空计算技术, 2023, 53(1): 11-15. HUANG Jin, JIAO Yaoyao, LIU Hourong, et al. Cross route collision risk analysis based on improved Event model[J]. Aeronautical Computing Technology, 2023, 53(1): 11-15.
- [6] 张晓燕. 交叉航线碰撞风险计算方法比较[J]. 中国民航飞行学院学报, 2009, 20(3): 10-12, 16. ZHANG Xiaoyan. Comparison of cross route collision risk calculation methods[J]. Journal of Civil Aviation Flight University of China, 2009, 20(3): 10-12, 16.
- [7] NOVAK A, HAVEL K, ADAMKO P. Number of conflicts at the route intersection-minimum distance model[J]. Aviation, 2019, 23(1): 1-6.
- [8] KALLINEN V, MCFADYEN A. Collision risk modeling and analysis for lateral separation to support unmanned traffic management[J]. Risk Analysis, 2022, 42(4): 854-881.
- [9] KALLINEN V A. Collision risk modelling for unmanned aircraft separation and traffic management[D]. Queensland: Queensland University of Technology, 2022.
- [10] SESAR 2021, Algorithms for analysing the collision risk[S].
- [11] 李琦, 甘旭升, 孙静娟, 等. 军航无人机与民航航班侧向碰撞风险评估[J]. 北京航空航天大学学报, 2021, 47(4): 724-730. LI Qi, GAN Xusheng, SUN Jingjuan, et al. Risk assessment of lateral collision between military UAV and civil aviation flight[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 47(4): 724-730.
- [12] 卢飞, 陈昊南. 基于 PID 的陆区航路纵向碰撞风险控制[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(9): 86-93. LU Fei, CHEN Haonan. Longitudinal collision risk control in land route based on PID[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(9): 86-93.
- [13] 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.
- [14] 张健, 王守源, 赵颖飞, 等. 城市无人机航线飞行间隔与调控频率综合研究[J]. 交通信息与安全, 2024, 42(1): 11-18. ZHANG Jian, WANG Shouyuan, ZHAO Yifei, et al. Comprehensive study on route flight separation and control frequency of urban UAV[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2024, 42(1): 11-18.

作者简介: 张健 (1982—), 男, 河北廊坊人, 博士, 副教授, 主要从事空中交通管理、空中交通融合运行安全评估方面的研究。E-mail: zhangjian@cauc.edu.cn。

