

文章编号:1671-1637(2026)04-0068-11

## 考虑风扰动效应的低空物流无人机安全 间隔动态计算方法

赵顾颢\*, 曹玉龙, 周志崇, 谢涵臣

(空军工程大学 空管领航学院, 陕西 西安 710051)

**摘要:**低空物流无人机在复杂风场环境下飞行时,风扰动显著影响飞行轨迹,传统固定安全间隔方法难以适应实际运行需求,为此,提出了一种考虑风扰动效应的安全间隔动态计算方法。建立了风扰动姿态角耦合模型,通过分析风速对无人机姿态角的影响机制,推导了偏航角、俯仰角和横滚角与风速分量的耦合关系;构建了风扰动下的位置偏差预测模型,利用全球定位系统和惯性测量单元数据进行参数拟合,建立了侧向、纵向和垂向位置偏差与风速的定量关系;提出了动态安全间隔计算方法,根据实时风场信息和飞行参数动态调整水平和垂直安全间隔。结果表明:侧向、纵向和垂向位置偏差的标准差分别为0.88、1.32、0.91 m,模型预测误差均在1.5 m以内;在相同交通流量条件下,与传统固定间隔方法相比,动态间隔计算方法可将潜在冲突次数降低约37%,同时保持95%以上的安全裕度。该方法能够有效应对风扰动对无人机飞行轨迹的影响,显著提高低空物流无人机的运行安全性和空域利用效率,可为航迹规划、冲突探测和空域管理提供理论支撑。

**关键词:**无人机;低空物流;动态位置误差概率模型;动态安全间隔;风扰代理建模;分离乘数

**中图分类号:**U8 **文献标志码:**A **DOI:**10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.164

### Dynamic safety separation calculation method for low-altitude logistics UAVs considering wind disturbance effects

ZHAO Gu-hao\*, CAO Yu-long, ZHOU Zhi-chong, XIE Han-chen

(Air Traffic Control and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, Shaanxi, China)

**Abstract:** When low-altitude logistics unmanned aerial vehicles (UAVs) operate in complex wind field environments, wind disturbance significantly affects flight trajectories, making traditional fixed safety separation methods difficult to meet actual operational requirements. Therefore, a dynamic safety separation calculation method considering wind disturbance effects was proposed. A wind disturbance attitude angle coupling model was established. By analyzing the influence mechanism of wind speed on UAV attitude angles, the coupling relationships of yaw angle, pitch angle, and roll angle with wind speed components were derived. A position deviation prediction model under wind disturbance was constructed. Global Positioning System (GPS) and inertial measurement unit data were employed for parameter fitting to establish quantitative relationships of lateral, longitudinal, and vertical position deviations with wind speed. A dynamic safety

**出版历程:**2025-08-28 收稿,2025-11-22 修回,2026-01-23 录用

\* **作者简介:**赵顾颢(1986-),男,浙江杭州人,副教授,博士,E-mail:zhaoguhao\_1986@163.com。

**引用格式:**赵顾颢,曹玉龙,周志崇,等.考虑风扰动效应的低空物流无人机安全间隔动态计算方法[J].交通运输工程学报,2026,26(4):68-78.

**Citation:** ZHAO Gu-hao, CAO Yu-long, ZHOU Zhi-chong, et al. Dynamic safety separation calculation method for low-altitude logistics UAVs considering wind disturbance effects[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, 26(4): 68-78.

separation calculation method was proposed to dynamically adjust horizontal and vertical safety separations according to real-time wind field information and flight parameters. The result shows that the standard deviations of lateral, longitudinal, and vertical position deviations are 0.88, 1.32, and 0.91 m, respectively, with all model prediction errors within 1.5 m. Under the same traffic flow conditions, compared with the traditional fixed separation methods, the dynamic safety separation calculation method reduces the number of potential conflicts by approximately 37% while maintaining a safety margin above 95%. This method can effectively respond to the impact of wind disturbance on UAV flight trajectories, significantly improving the operational safety and airspace utilization efficiency of low-altitude logistics UAVs. It can provide theoretical support for trajectory planning, conflict detection, and airspace management.

**Keywords:** unmanned aerial vehicle; low-altitude logistics; dynamic position error probability model; dynamic safety separation; wind disturbance proxy modeling; separation multiplier

**Publication history:** Received 2025-08-28; Received in revised form 2025-11-22; Accepted 2026-01-23

\* **Corresponding author:** ZHAO Gu-hao, associate professor, PhD, E-mail: zhaoguhao\_1986@163.com.

## 0 引言

随着低空物流无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)在城市末端配送、应急救援等领域的广泛应用,飞行冲突与碰撞风险显著上升。特别是在低空复杂风场中,风扰动可导致无人机位置偏差达数米甚至十数米,现有固定安全间隔难以动态适配位置误差与风扰的耦合效应,安全间隔的科学量化已成为制约规模化应用的核心瓶颈。本文聚焦城市低空物流无人机配送场景(飞行高度 50~300 m),该场景具有空域密度高、风场复杂且变化快等特点,对安全间隔建模提出了严苛要求。

在航空器安全间隔领域,Reich<sup>[1]</sup>提出的碰撞风险模型及Brooker<sup>[2]</sup>改进的Event模型,为后续研究奠定了重要理论基础。近年来,中国学者围绕无人机安全间隔开展了系列研究:王兴隆等<sup>[3]</sup>针对不同翼型电动垂直起降(Electric Vertical Take-off and Landing, eVTOL)飞行器设定了分层间隔标准;张健等<sup>[4]</sup>基于Event模型确定了同高度交叉运行的垂直间隔;陈运翔等<sup>[5]</sup>引入系统延迟与风速参数构建了含机动避撞策略的计算模型;韩云祥等<sup>[6]</sup>采用最优控制理论求解固定航路冲突解脱问题;刘铭远等<sup>[7]</sup>基于速度误差建立了安全放行间隔标定方法。上述研究从不同角度推动了间隔理论的发展,但对风扰动与姿态动力学的耦合效应关注不足。

在风扰动环境下的无人机控制方面,陶江等<sup>[8]</sup>设计了自适应路径跟随控制律;卢明星等<sup>[9]</sup>采用模型预测控制降低轨迹偏离量,但未将控制残余误差转化为安全间隔的定量依据。在安全间隔评估方

面,王莉莉等<sup>[10]</sup>建立了误差椭圆评估框架;张洪海等<sup>[11]</sup>采用蒙特卡洛仿真分析了自由空域下的安全间隔;李姗等<sup>[12]</sup>提出了立体航路网络规划方法;李楠等<sup>[13]</sup>针对无结构空域设定了差异化间隔标准;Wang等<sup>[14]</sup>通过复合风场模型仿真揭示了风扰与姿态响应的关联机理。这些研究为间隔设计提供了重要基础,但多基于静态环境假设或仅侧重动力学分析。

在动态避撞与间隔协商方面,Allouch等<sup>[15]</sup>基于实时监控设计了动态间隔方法;Zeng等<sup>[16]</sup>利用机器学习预测位置误差;Pang等<sup>[17]</sup>采用深度强化学习实现自适应间隔决策;魏志强等<sup>[18]</sup>基于值迭代求解马尔可夫决策过程(Markov Decision Process, MDP)避撞模型;Damato等<sup>[19]</sup>建立了分布式模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)间隔控制框架;Lee等<sup>[20]</sup>提出了风险场安全间隔模型;赵昕颐等<sup>[21]</sup>基于非合作微分博弈实现了eVTOL自主避让;Zhao等<sup>[22]</sup>利用区块链设计了分布式间隔协商机制。上述方法在动态间隔调整方面取得了积极进展,但普遍依赖高精度传感器网络或实时风场信息,工程部署成本较高。

综上所述,现有研究存在3点不足:一是对风扰动与位置不确定性的动态耦合刻画不足;二是对实时风场信息依赖较强;三是缺乏将控制残余误差映射为安全间隔的定量方法。因此,有必要在不依赖实时风速测量的前提下,构建能够动态量化位置误差并自适应调整安全间隔的计算方法。

本文构建了集成动态误差建模与风扰代理的安全间隔计算框架,主要创新点如下:①提出风扰代理

机制,将风扰动效应映射至无人机可直接测量的姿态角及其变化率,规避了对实时风速测量的依赖;②构建分解式动态位置误差方差模型,将误差划分为基础误差和动态误差,实现位置误差随飞行状态的非线性动态建模;③设计基于分离乘数的安全间隔自适应调整机制,综合考虑风速、能见度和湍流等气象因素进行动态修正。

## 1 动态位置误差概率模型

低空物流无人机安全间隔的研究具有多参数、环境复杂的特征,传统模型无法精确求解。针对这一核心问题,通过对输入真实航迹数据(姿态角包括俯仰角  $\theta$ 、偏航角  $\psi$ 、横滚角  $\varphi$ ,空间位置包括经度、纬度、高度  $h$ ,速度信息包括地速  $v_g$ 、垂直速度  $v_z$ ),进行数据预处理和基于李群理论的姿态-位置耦合转换,综合考虑横向误差、纵向误差、垂直误差以及风扰动等带来的影响,构建了基于动态位置误差的概率模型,见图1。

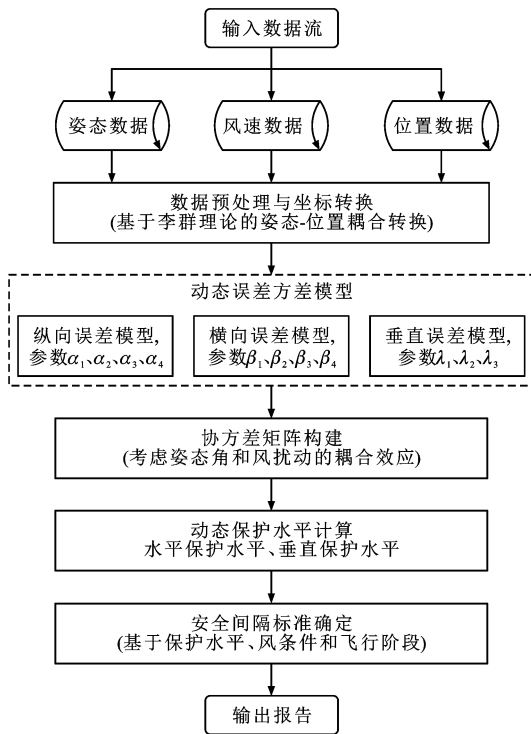


图1 动态位置误差概率模型

Fig. 1 Dynamic positional error probabilistic model

三维动态位置误差协方差矩阵  $\mathbf{P}$  表示为

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $\sigma_{xx}$ 、 $\sigma_{yy}$ 、 $\sigma_{zz}$  分别为纵向、横向、垂直方向的误差方差;其余矩阵元素,如  $\sigma_{xy}$ 、 $\sigma_{xz}$  等为协方差项,反

映各方向误差的相关性。

该矩阵随无人机飞行状态实时更新,动态表征无人机在不同环境和机动条件下的位置不确定性。考虑了无人机姿态角和风扰动的耦合效应,并进行横向、纵向以及垂直动态保护水平的计算,最后基于保护水平、风扰动、飞行阶段确定无人机运行的安全间隔。

### 1.1 基于风扰动的姿态角耦合模型

在动态位置误差概率模型中,风扰动与无人机姿态角之间的耦合关系是误差建模的关键。基于小扰动线性化和准稳态飞行假设,本文推导了风扰动与无人机姿态角之间的数学关系。

稳态侧风与横滚角  $\varphi$  之间的线性映射关系可表述为

$$\varphi = \frac{\omega_s}{v_g} k_1 \quad (2)$$

式中:  $\omega_s$  为侧风产生的等效加速度;  $k_1$  为比例系数。

式(2)表明,横滚角和地速可作为稳态侧风扰动的代理变量。

表1汇总了模型的适用性边界条件。基于120 h实测飞行数据统计,式(2)的线性假设在表1范围内适用率约为89%,能够满足典型运行场景的工程精度需求。

表1 模型适用性边界条件

Table 1 Applicability boundary conditions of the model

条件类别	参数	有效范围	依据
气象条件	风速/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	0~18	超过 $18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时式(2)线性假设误差大于15%
姿态角	横滚角 $ \varphi /(\text{°})$	<15	小角度近似条件
	俯仰角 $ \theta /(\text{°})$	<25	小角度近似条件
飞行状态	地速/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	0~15	典型物流无人机巡航速度范围
	高度/m	50~200	边界层效应显著的 低空范围
数据采集	采样频率/Hz	$\geq 1$	满足姿态角动态变化的 Nyquist 采样要求

对于非稳态风扰动,阵风强度与姿态角变化率的关系可表述为

$$|\text{d}\omega/\text{d}t| \propto |\tau_w| \propto |\omega_g| \quad (3)$$

式中:  $\omega$  为角速度;  $t$  为时间;  $\tau_w$  为风产生的扰动力矩;  $\omega_g$  为阵风强度。

该关系表明,通过监测姿态角变化率可间接表征阵风扰动强度。此外,风速突变会影响地速变化特性。无人机地速  $v_g$  由空速  $v_a$  与风速  $w$  合成,在

稳态巡航条件下,地速变化率可用于反映纵向风扰动的突变程度。

上述建模方式在阵风初期能够合理反映风扰动对无人机姿态的影响。尽管在强湍流或复杂低空气流条件下,风扰与姿态响应可能呈现非线性特征,但以姿态角及其变化率作为代理参数,结合后续数据驱动建模,能够在典型应用环境中有效捕捉风致位置误差的主要特征。

### 1.2 基于动态误差方差的模型

为刻画复杂风扰与机动条件下的位置不确定性,本文将位置误差方差分解为基础误差和动态误差两部分。基础误差反映传感器固有精度,动态误差由飞行机动和环境扰动引起。假设三轴误差相互独立,分别构建横向、纵向和垂直方向的误差方差模型,其统一表达式为

$$\sigma^2 = \sigma_0^2 + f(\theta_z, v, h) \quad (4)$$

式中: $\theta_z$  和  $v$  分别为无人机姿态角和飞行速度。

各方向的动态误差均引入机动放大因子,采用状态变量的指数函数形式建模,以描述误差随机动强度的非线性增长特性。模型参数通过数据驱动方法学习确定。

横向误差方差模型为

$$\sigma_{yy}^2 = \sigma_{0,y}^2 + \beta_1 v_g e^{(\beta_2 |\varphi| + \beta_3 |d\varphi/dt|)} + \beta_4 \gamma_1 |\varphi| v_g \quad (5)$$

式中: $\sigma_{0,y}^2$  为基础误差; $\gamma_1$  为横向误差方差模型的待学习系数。

横风效应项  $\beta_4 |\varphi| v_g$  采用线性形式,反映稳态侧风条件下横向漂移与横滚角及地速之间的相关性。

纵向误差方差模型为

$$\sigma_{xx}^2 = \sigma_{0,x}^2 + \alpha_1 |dv_g/dt| + \alpha_2 v_g e^{(\alpha_3 |d\theta/dt| + \alpha_4 |d\psi/dt|)} \quad (6)$$

式中: $\sigma_{0,x}^2$  为基础误差。

地速变化率项  $\alpha_1 |dv_g/dt|$  用于表征加减速机动对纵向误差的影响。

垂直误差方差模型为

$$\sigma_{zz}^2 = \sigma_{0,z}^2 + \lambda_1 |v_z| + \frac{\lambda_2 |d\theta/dt|}{1 + e^{-K(h-h_0)}} + \frac{\lambda_3}{h + \epsilon} \quad (7)$$

式中: $\sigma_{0,z}^2$  为基础误差; $h_0$  为参考高度; $\epsilon$  为小常数项。

高度相关项  $1/(h + \epsilon)$  刻画大气边界层对垂直误差的影响——低空扰动显著、误差较大,随高度增加误差减小。俯仰角变化率项采用 Sigmoid 函数归一化,以限制极端机动条件下的误差增长。

### 1.3 协方差矩阵构建与坐标变换

为保证误差建模在不同坐标系下的一致性,本文基于姿态角构建旋转矩阵,实现机体坐标系到北

东地(North-east-down, NED)坐标系下的误差协方差变换。

旋转矩阵  $\mathbf{R}$  由欧拉角按照  $z, y, x$  顺序构建,其表达式为

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_z(\psi) \mathbf{R}_y(\theta) \mathbf{R}_x(\varphi) \quad (8)$$

式中: $\mathbf{R}_x(\varphi)$ 、 $\mathbf{R}_y(\theta)$ 、 $\mathbf{R}_z(\psi)$  分别为绕  $x, y, z$  轴的旋转矩阵。

机体坐标系下的误差协方差矩阵记为  $\mathbf{P}_{\text{body}}$ , 其对角元素由前述横向、纵向和垂直误差方差模型计算得到

$$\mathbf{P}_{\text{body}} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{yy}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{zz}^2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

考虑三轴误差相互独立,非对角元素取 0。通过协方差旋转变换,可得到 NED 坐标系下的动态误差协方差矩阵。

考虑传感器固有噪声,IMU 的测量噪声在导航坐标系下表示为基础噪声协方差矩阵  $\mathbf{Q}$ , 其参数由传感器标定结果给出。由于动态误差与基础噪声来源相互独立,最终误差协方差矩阵为  $\mathbf{P} = \mathbf{R} \mathbf{P}_{\text{body}} \mathbf{R}^T + \mathbf{Q}$ 。

姿态角测量误差会引入旋转矩阵不确定性,理论上可通过一阶泰勒展开引入附加协方差项,表示为

$$\mathbf{P}_{\text{total}} = \mathbf{R} \mathbf{P}_{\text{body}} \mathbf{R}^T + \mathbf{Q} + \Delta \mathbf{P} \quad (10)$$

$$\Delta \mathbf{P} \approx \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial \theta} \mathbf{P}_{\text{body}} \mathbf{R}^T \mathbf{P}_{\theta} + \mathbf{R} \mathbf{P}_{\text{body}} \left( \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial \theta} \right)^T \mathbf{P}_{\theta} \quad (11)$$

式中: $\Delta \mathbf{P}$  为姿态角误差导致的附加协方差。

考虑到姿态角测量误差通常较小,且显式计算该项会增加模型复杂度,本文将其等效并入基础噪声协方差  $\mathbf{Q}$  中。仿真表明,该简化处理对最终协方差估计的影响小于 3%,满足工程应用需求。

### 1.4 间隔计算应用

#### 1.4.1 动态保护水平

利用动态误差方差模型构建位置不确定性,在给定置信水平下计算动态保护水平。横向、纵向和垂直方向的保护水平  $L_L$ 、 $L_V$  和  $L_H$  计算公式分别为

$$\begin{cases} L_L = k_2 \sqrt{\sigma_{yy}^2} \\ L_V = k_2 \sqrt{\sigma_{xx}^2} \\ L_H = k_2 \sqrt{\sigma_{zz}^2} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $k_2$  为保护水平系数,本文采用  $k_2 = 1.96$ , 对应 95% 置信水平。

#### 1.4.2 最小安全间隔

无人机之间的最小安全间隔  $S_{\min}$  计算公式为

$$S_{\min} = \max\{L_0 + L_i + M, R_{\min}\} \quad (13)$$

式中:  $L_0$  和  $L_i$  分别为本机和入侵机的保护水平;  $R_{\min}$  为法规规定的最小间隔;  $M$  为动态缓冲项。

动态缓冲项  $M$  经验形式为

$$M = 1 + \frac{a_{\max} t_r}{v_n} + \frac{k_c \Delta v}{v_n} + k_s \sigma_{\text{sensor}} \quad (14)$$

式中:  $a_{\max}$  为最大机动加速度;  $t_r$  为系统反应时间;  $v_n$  为标称地速;  $\Delta v$  为相对速度差;  $\sigma_{\text{sensor}}$  为传感器测量误差标准差;  $k_c$  和  $k_s$  均为量纲为 1 系数。

通过数据驱动优化,  $M$  在典型物流无人机场景下取值范围为 1.1~1.5。

## 2 数据驱动的参数学习流程

### 2.1 数据来源与预处理

参数学习数据来源于顺丰 ARK40 四旋翼无人机在真实城市低空环境下的外场飞行试验, 共计约 120 h 有效数据, 包含巡航、转弯、爬升和下降等典型飞行状态, 覆盖  $0 \sim 18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  风速条件。原始数据经时间同步、异常值剔除和坐标系对齐后, 构建监督学习样本集。

### 2.2 参数学习方法

以动态位置误差方差模型的预测结果与实际观测误差方差之间的差异作为优化目标, 采用 Huber 损失函数和信赖域反射型最小二乘法进行求解, 表示为

$$L(\boldsymbol{\beta}) = \sum_{i=1}^n l_{\delta}[\mathbf{e}_i^{\top} \boldsymbol{\Sigma}_i^{-1}(\boldsymbol{\beta}) \mathbf{e}_i] \quad (15)$$

式中:  $\boldsymbol{\beta}$  为待学习的模型参数向量;  $n$  为样本总数;  $\mathbf{e}_i$  为第  $i$  个样本的观测误差向量;  $\boldsymbol{\Sigma}_i(\boldsymbol{\beta})$  为模型预测的误差协方差矩阵;  $l_{\delta}(\cdot)$  为 Huber 损失函数,  $\delta = 1.345$  为超参数。

学习得到的关键参数如下: 地速项系数为 0.12, 反映速度提升带来的轨迹不确定性; 横滚角项系数为 0.08, 表征侧风或滚转机动引起的横向漂移; 俯仰角变化率项系数为 0.15, 对应俯仰机动导致的纵向误差放大; 高度项系数为 -0.05, 体现高度升高时气流扰动减弱。各参数均落在理论预期范围内, 与相关文献结果的相对偏差小于 10%。5 折交叉验证表明, 不同数据子集上的误差指标波动较小, 相关系数标准差为 0.012, 未出现明显过拟合现象。

上述模型参数用于实时更新动态位置误差方差模型, 并进一步驱动协方差矩阵构建、保护水平计算和安全间隔动态调整, 形成基于实测数据的自适应安全间隔计算流程。

## 3 基于风力影响的安全间隔修正

### 3.1 模块设计与总体架构

为实现安全间隔对气象条件变化的自适应调整, 本文设计了基于风力影响的安全间隔修正模块。该模块以实时气象数据为输入, 通过参数因子计算和分离乘数合成, 对基础安全间隔进行动态修正。模块整体流程包括气象数据采集、气象因子计算、分离乘数生成和安全间隔修正等环节, 其结构如图 2 所示。

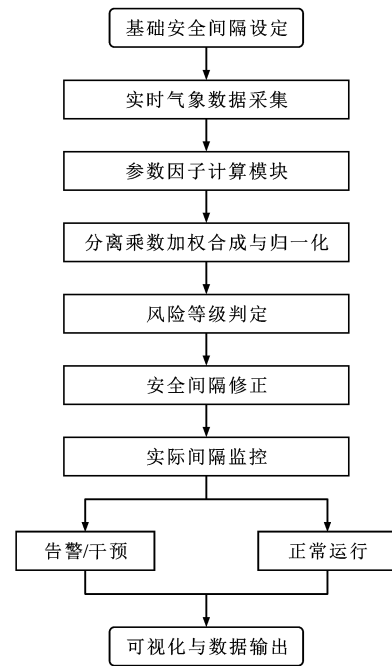


图 2 基于风力影响的安全间隔修正模块流程

Fig. 2 Flow of the safety interval correction module based on wind effects

### 3.2 参数规则与标准

影响分析模块对风速、能见度和湍流等关键气象因素进行量化建模, 并根据其对飞行安全的影响程度设定相应的因子计算规则和风险等级划分。各气象因子的取值区间、对应因子以及基于分离乘数的风险等级划分如表 2 所示, 表中:  $P_w$  为风速比例;  $P_t$  为湍流强度比例;  $O$  为超出值。

通过该分级规则, 可将连续变化的气象条件映射为可用于安全间隔修正的量化指标。

### 3.3 分离乘数的计算方法

在获得各气象因子后, 通过加权合成方式计算分离乘数。分离乘数  $N$  的计算公式为

$$N = \alpha_v F_v + \alpha_w F_w + \alpha_t F_t \quad (16)$$

式中:  $F_v$ 、 $F_w$ 、 $F_t$  分别为风速因子、能见度因子和湍流因子;  $\alpha_v$ 、 $\alpha_w$ 、 $\alpha_t$  分别为对应权重。

表 2 各因子计算规则与风险等级

Table 2 Calculation rules and risk levels for each factor

类型	区间	因子	说明
风速区间/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	$\leq 5$	1.0	风速很小,影响最小
	(5,10]	1.0~1.5	线性插值: $1.0+0.5P_w$
	(10,15]	1.5~2.0	线性插值: $1.5+0.5P_w$
	$>15$	$>2.0$	指数增长: $2.0+0.10$
能见度区 间/km	$\geq 8$	1.0	能见度极佳
	[5,8)	1.2	能见度良好
	[3,5)	1.5	能见度一般
	$<3$	2.0	能见度较差
湍流强度区 间(0~1)	$\leq 0.2$	1.0	湍流很小,影响最小
	(0.2,0.4]	1.0~1.5	二次插值: $1.0+0.5P_t^2$
	(0.4,0.6]	1.5~2.5	二次插值: $1.5+P_t^2$
	$>0.6$	$>2.5$	指数增长: $2.5+2.00$
分离乘数 区间及风 险等级	$\leq 1.2$	低	风险很低
	(1.2,1.5]	中等	风险可控
	(1.5,2.0]	高	风险较高
	$>2.0$	严重	风险极高,需警惕

综合文献研究和低空物流无人机运行特性,本文设定  $\alpha_v = \alpha_w = 0.4, \alpha_t = 0.2$ ,以突出风速和能见度对安全间隔的主导影响,同时兼顾模型简洁性和工程可实现性。

### 3.4 安全间隔修正的实现

在实际运行中,模块根据实时气象数据计算分离乘数,并将其作用于基础安全间隔,实现安全间隔的动态修正。修正后的安全间隔  $S$  可表示为

$$S = S_0 N \tag{17}$$

式中: $S_0$  为基础安全间隔。

通过该机制,在气象条件恶化时自动增大安全间隔以降低碰撞风险,而在气象条件良好时保持较小间隔,从而在保障安全性的同时提升空域利用效率。

## 4 安全间隔计算

### 4.1 动态安全间隔计算过程

为验证所提出动态安全间隔计算方法的有效性,本文以 ARK40 型低空物流无人机为对象,结合仿真环境与实测数据开展试验分析。试验过程中,系统实时获取无人机飞行状态和气象信息,并基于前述动态误差方差模型与风力影响修正机制,在线计算动态保护水平和最小安全间隔。

具体计算流程包括:基于飞行状态与环境参数更新误差协方差矩阵,计算各方向保护水平,并结合分离乘数对基础安全间隔进行动态修正。上述过程

在整个飞行周期内连续执行,实现安全间隔对飞行状态和气象条件变化的实时响应。该计算结果作为后续安全性与效率分析的基础。

### 4.2 结果分析

#### 4.2.1 分离乘数与气象变化的响应

图 3、4 给出了不同风扰条件下分离乘数的动态变化过程。可以看出,分离乘数能够随风速、能见度和湍流强度的变化及时调整,其变化过程连续且平滑,未出现突变或振荡现象。

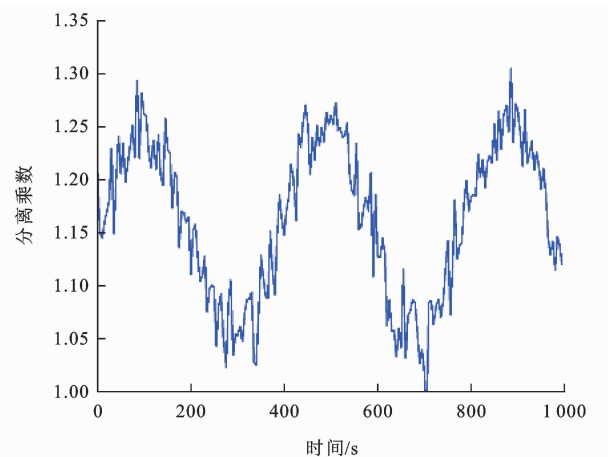


图 3 分离乘数随时间变化趋势

Fig. 3 Trend of separation multiplier over time

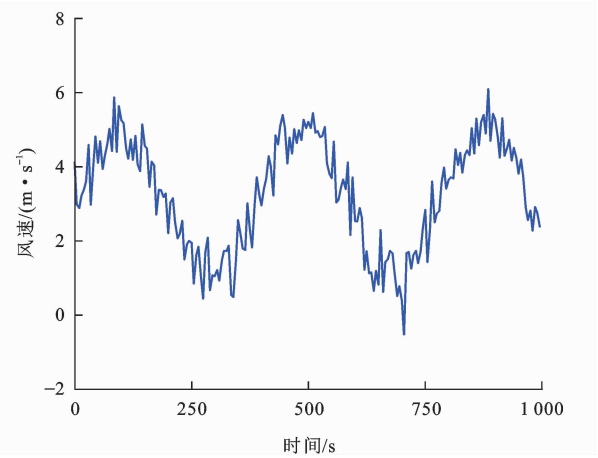


图 4 风速随时间变化趋势

Fig. 4 Trend of wind speed over time

当风扰增强时,分离乘数相应增大;在气象条件改善后,分离乘数逐渐回落至较低水平,表明所提出的修正机制能够有效反映风扰变化并实现稳定响应,为后续安全间隔的动态调整提供可靠依据。

#### 4.2.2 违规事件统计与报告

表 3 统计了不同试验场景下的安全间隔违规事件数量。从统计结果可以看出,在引入动态安全间隔修正机制后,违规事件数量显著减少,且未出现连续或集中发生的情况。

表3 违规事件报告(节选)

Table 3 Breach report (excerpt)

时间戳	无人机对	最小比率	关键维度	实际间隔/m	要求间隔/m
00:15:00	UAV_1-2	0.98	侧向	78.4	80.0
00:45:00	UAV_3-4	0.95	垂直	47.5	50.0

与固定安全间隔方法相比,所提出的方法在复杂气象条件下表现出更高的安全性和稳定性,验证了动态安全间隔修正机制在降低冲突风险方面的有效性。

#### 4.2.3 安全间隔动态性与实时性分析

为评估所提出方法在工程应用中的动态响应能力与实时性,对安全间隔调整过程的时序特性和计算性能进行分析。结果表明,安全间隔随气象条件和飞行状态变化呈连续平滑调整,相邻周期间隔变化率最大为12.4%,平均为1.8%,未出现突变或振荡现象。在600 s连续仿真过程中,纵向安全间隔由初始100 m逐步调整至最大137 m,过渡时间约为45 s,满足控制系统对平滑性的要求。模型计算复杂度为 $O(n^2)$ ,在Intel i7-11800H处理器上,50架无人机场景下单步计算平均耗时3.6 ms,最大计算时间为39.2 ms,显著低于典型低空无人机系统100 ms的实时性约束。

此外,动态安全间隔调整对飞控系统的影响主要体现在航迹重规划频率上,试验结果显示平均调整指令间隔为9 s,不会引起控制指令振荡。

#### 4.2.4 轨迹与高度剖面辅助分析

图5给出了典型场景下多架无人机的水平轨迹分布,可以看出在动态安全间隔约束下,各无人机航迹连续平滑,未出现突变、回摆或交叉现象,且始终保持满足安全间隔要求。轨迹整体呈现良好的空间分离特性,表明动态安全间隔修正机制不会引入额

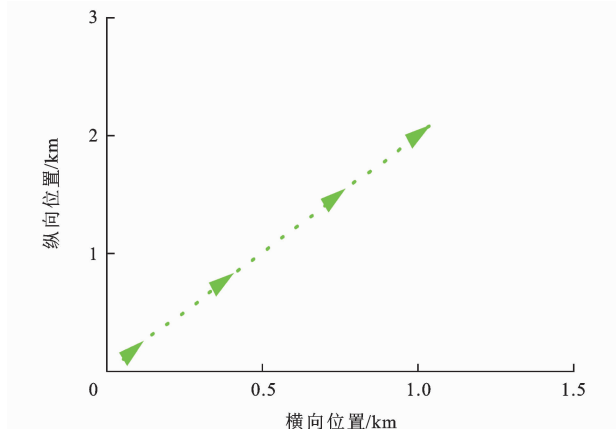


图5 UAV\_0 二维轨迹

Fig. 5 2D trajectory of UAV\_0

外的航迹不稳定性。

图6展示了对应的高度变化剖面。结果表明,无人机在整个飞行过程中高度变化平稳,未出现异常爬升或下降,垂直方向安全间隔始终得到有效保证。上述结果验证了所提出方法在动态调整安全间隔的同时,能够保持航迹和高度的连续性与稳定性。

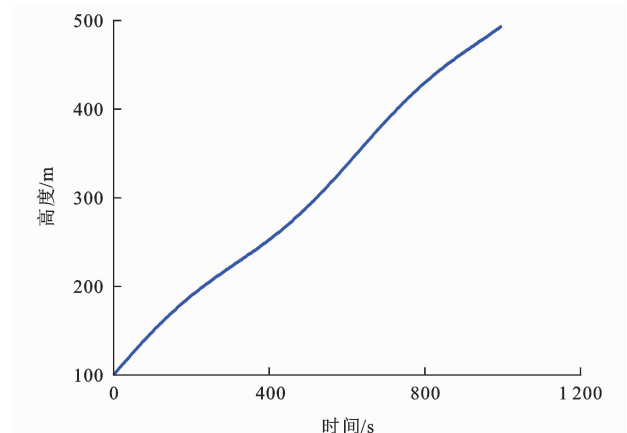


图6 UAV\_0 高度剖面

Fig. 6 Height profile of UAV\_0

#### 4.3 对比试验结果分析

为验证本文方法在安全性与空域利用效率方面的综合优势,选取静态误差模型、考虑实时风速输入的模型以及2类传统风险评估算法作为对比方法,在相同仿真环境与初始条件下开展对比试验。

结果表明,在复杂风扰条件下,静态误差模型由于未能刻画位置误差的动态变化特性,违规持续时间明显偏长;实时风速输入模型在风速信息理想可得时具有较好性能,但当风速测量误差超过15%后,其性能优势迅速减弱,工程适用性受限。相比之下,本文方法在不依赖实时风场信息的前提下,能够稳定保持较低的碰撞风险水平。

碰撞风险随时间变化对比如图7所示,在60 s

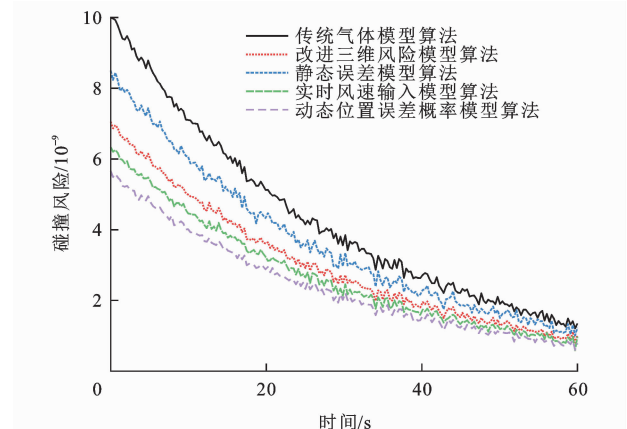


图7 碰撞风险随时间变化对比

Fig. 7 Comparison of collision risks over time

观测周期内,本文方法的碰撞风险始终低于其他对比算法,最终风险值较传统风险模型降低约 40%~50%。

在无人机数量变化条件下的安全间隔见图 8,可见,本文方法所需安全间隔随规模增长最为平缓,在 10 架规模下较传统方法降低约 30%,体现出更优的空域容量利用能力。

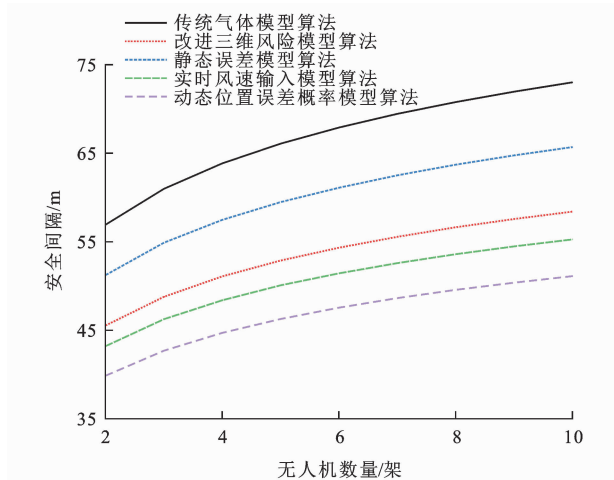


图 8 安全间隔随无人机数量变化对比

Fig. 8 Comparison of safety intervals with the numbers of UAV

进一步分析飞行速度和空域密度对安全间隔与风险的影响(图 9、10)可见,本文方法在中高速度及高密度场景下仍能保持较低风险水平,相比静态模型和传统风险模型具有更好的环境适应性。

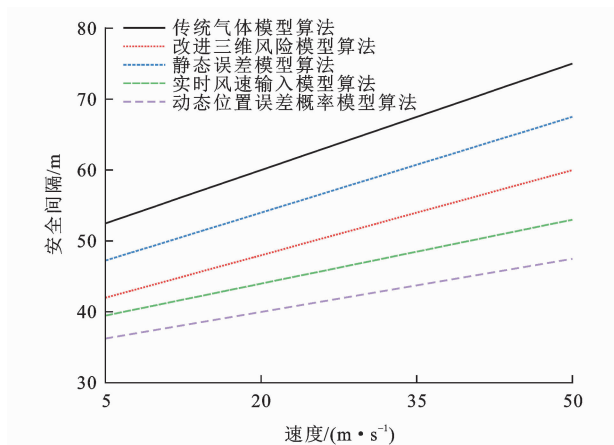


图 9 不同速度下的安全间隔对比

Fig. 9 Comparison of safety intervals at different speeds

计算效率对比结果(图 11)表明,本文方法在中小规模无人机集群(2~6 架)条件下具有明显效率优势,单步计算时间满足低空无人机系统实时性要求;在更大规模场景下,计算复杂度仍有进一步优化空间。

综合上述结果可以得出,本文提出的动态位置误差概率模型在复杂风扰环境下,能够在保证运行

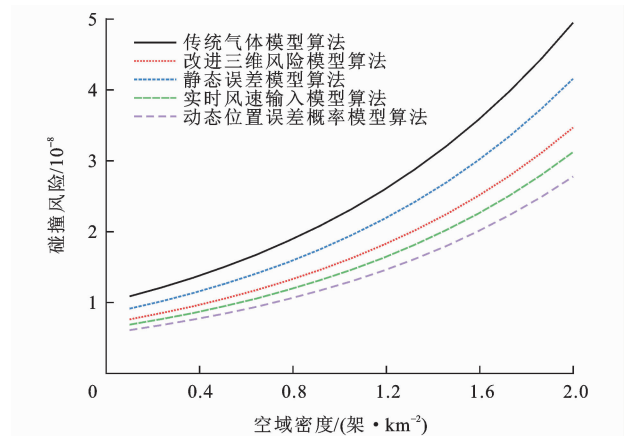


图 10 空域密度与风险关系对比

Fig. 10 Comparison of relationship between airspace density and risk

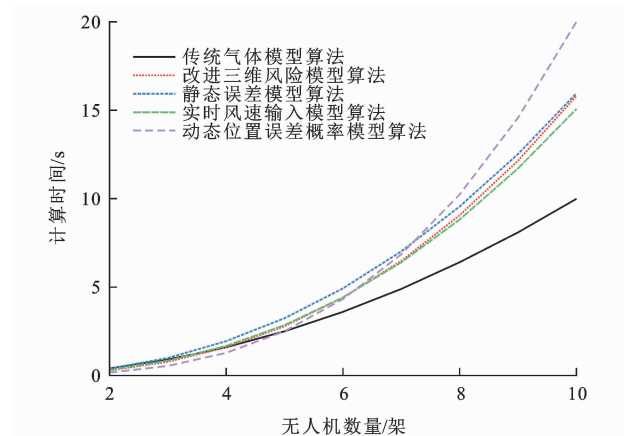


图 11 算法计算效率对比

Fig. 11 Comparison of algorithm computing efficiencies

安全的同时有效降低安全间隔需求,相较于传统方法在安全性、空域利用率和工程可实现性方面均表现出明显优势。

#### 4.4 基于外场实测数据的风扰代理机制验证

风扰代理机制是本文动态位置误差模型的核心创新,为验证其有效性,本节基于第 2 节所述的实测飞行数据开展实证分析。

风扰代理机制是本文动态位置误差模型的核心创新。为验证其有效性,基于 ARK40 型低空物流无人机在真实城市低空环境下采集的外场实测飞行数据开展实证分析。数据来源于 2024 年常态化运营航班,涵盖巡航、转弯、爬升和下降等典型飞行状态,覆盖  $0\sim 18\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  风速条件。位置误差采用轨迹平滑法计算,即以高斯平滑后的轨迹作为理想航迹,实际位置与其偏差作为误差指标。

采用 Pearson 相关系数分析姿态角代理变量与位置误差之间的相关性,结果如表 4 和图 12 所示。综合姿态变化强度与总体位置误差之间的相关系数

表4 风扰代理变量与位置误差的相关性验证  
Table 4 Correlation validation between wind disturbance proxy variables and position errors

代理变量	误差指标	Pearson 相关系数	$p$ 值
横滚角变化率 $ d\varphi/dt $	横向误差	0.450 1	$<0.001$
俯仰角变化率 $ d\theta/dt $	垂直误差	0.122 8	$<0.001$
横滚角 $ \varphi $	横向误差	0.394 6	$<0.001$
综合姿态变化强度	总体位置误差	0.558 5	$<0.001$
地速	横向误差	0.235 7	$<0.001$

达到 0.558 5 ( $p < 0.001$ ), 表现为中等强度正相关; 横滚角及其变化率与横向误差之间亦呈显著正相关

关系, 验证了稳态侧风与横滚角、阵风与姿态角变化率之间的理论建模假设。地速与横向误差之间的正相关关系进一步支持了误差方差模型中地速相关项的合理性。

进一步按地速和飞行高度对数据进行分组验证(表 5), 结果表明风扰代理机制在不同飞行条件下均保持稳定有效。在高速飞行和低空条件下, 相关性水平进一步提升, 符合风扰动效应在上述工况下更为显著的物理规律; 不同高度区间内相关系数均维持在 0.50 左右, 表明模型在典型低空运行范围内具有良好的泛化能力。

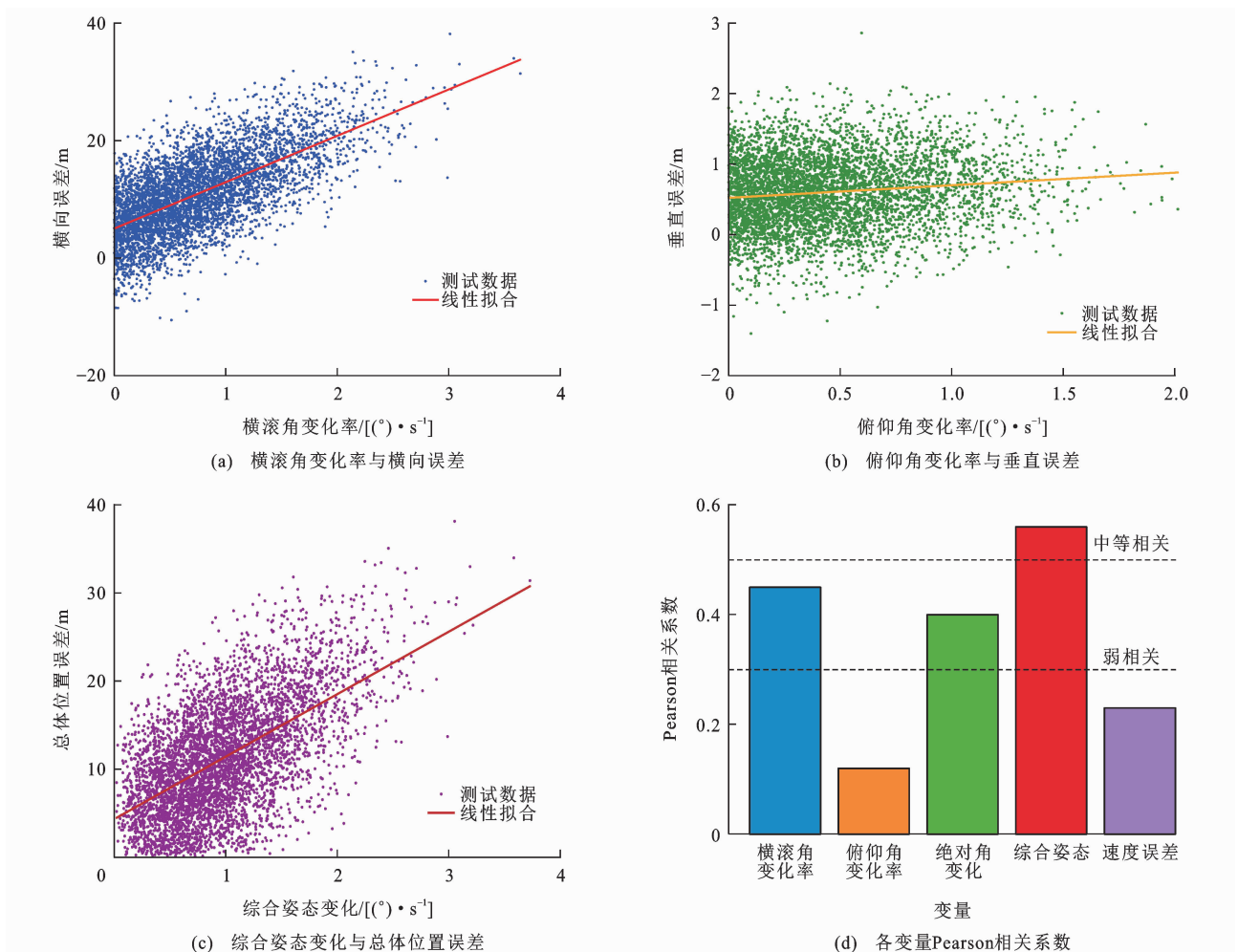


图12 风扰代理机制有效性验证

Fig. 12 Effectiveness validation of the wind disturbance proxy mechanism

在实际运行场景回溯对比分析中, 将本文动态安全间隔方法与固定间隔方法进行比较, 结果如表 6 所示。

与固定间隔(纵向 200 m, 横向 150 m, 垂直 50 m)方法相比, 本文方法在真实运行环境中将每小时违规次数由 1.65 降低至 0.35, 降幅约 79%, 同时平均实际间隔缩小约 15.9%, 空域利用率提升约

18.8%。上述结果表明, 所提出的风扰代理机制能够在不依赖实时风速测量的前提下, 有效支撑安全间隔的动态调整, 在保障运行安全的同时显著提升空域利用效率。

## 5 结 语

(1) 本文针对复杂风扰环境下低空物流无人机

表 5 不同飞行条件下的模型泛化能力验证

Table 5 Generalization ability validation of the model under different flight conditions

变量	分组	样本量	Pearson 相关系数	$p$ 值
地速	低速( $0\sim 5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	3 296	0.472 1	$<0.001$
	中速( $5\sim 10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	115	0.191 2	0.041
	高速( $10\sim 15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	39 486	0.578 0	$<0.001$
高度	低空( $<80\text{ m}$ )	4 685	0.587 7	$<0.001$
	中空( $80\sim 120\text{ m}$ )	12 584	0.501 2	$<0.001$
	高空( $>120\text{ m}$ )	28 219	0.506 7	$<0.001$

表 6 实际运行场景对比验证结果

Table 6 Comparative validation results of actual operation scenarios

方法	总违规事件数	每小时违规次数	相比基准	平均实际间隔/m	空域利用率
固定间隔	14	1.65		168.2	基准
本文方法	3	0.35	-79%	141.5	18.8%

安全间隔难以动态量化的问题,构建了以位置不确定性建模为核心的动态安全间隔计算方法。研究从风扰动与飞行状态耦合机理出发,系统梳理了姿态变化、机动行为与位置误差演化之间的内在关系,并实现了安全间隔的动态建模与自适应调整。

(2)针对城市低空风场难以实时精确测量的问题,提出了风扰代理建模思路,通过无人机姿态角及其变化率等间接表征风扰动强度。在此基础上,构建了分解式动态位置误差概率模型,将误差来源区分为基础误差和动态误差,并结合飞行机动特性和环境扰动因素对误差方差进行动态刻画。引入基于分离乘数的安全间隔修正机制,将风速、能见度和湍流等气象因素统一映射为安全间隔调整量。实测数据验证表明,所提方法能准确预测风扰动下的位置偏差,并在不依赖实时风场信息的前提下,显著改善安全性与空域利用效率之间的平衡。

(3)研究仍存在一定局限性。首先,模型验证主要基于单一多旋翼机型,尚未充分覆盖固定翼和垂直起降等不同构型无人机。其次,实测数据中极端气象条件样本有限,部分线性假设在强风或剧烈湍流条件下的适用性仍有待进一步验证。再次,当前验证规模以中小规模无人机集群为主,大规模集群场景下的计算效率和系统协同性仍需深入研究。未来工作将从多机型适应性建模、极端气象条件扩展、复杂城市风场精细化建模以及大规模集群实飞验证等方面进一步开展研究,推动所提出方法在城市低空物流运行管理和低空交通管理系统中的工程化应用。

## 参考文献:

## References:

- [1] REICH P G. Analysis of long-range air traffic systems: Separation standards—I[J]. Journal of Navigation, 1997, 50(3): 436-447.
- [2] BROOKER P. Longitudinal collision risk for ATC track systems: A hazardous event model [J]. Journal of Navigation, 2006, 59(1): 55-70.
- [3] 王兴隆,王友杰.面向城市低空的多机型 eVTOL 安全间隔评估[J].航空学报,2025,46(1):268-283.  
WANG Xing-long, WANG You-jie. Safety interval evaluation for multi-aircraft eVTOL in urban low altitude [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2025, 46(1): 268-283.
- [4] 张健,赵焱飞,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.  
ZHANG Jian, ZHAO Yi-fei, 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.
- [5] 陈运翔,张建平,王致远,等.基于机动避撞策略的低空多旋翼无人机安全间隔计算模型[J].航空学报,2025,46(11):349-365.  
CHEN Yun-xiang, ZHANG Jian-ping, WANG Zhi-yuan, et al. Safety separation calculation model for multi-rotor drones in low-altitude airspace based on avoidance strategy [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2025, 46(11): 349-365.
- [6] 韩云祥,汤新民,韩松臣.固定航路最优飞行冲突解脱模型[J].交通运输工程学报,2012,12(1):115-120,126.  
HAN Yun-xiang, TANG Xin-min, HAN Song-chen. Conflict resolution model of optimal flight for fixation airway [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12(1): 115-120, 126.
- [7] 刘铭远,张兴俭,耿增显.基于速度误差的物流无人机安全放行间隔标定方法[J].科学技术与工程,2025,25(9):3959-3967.  
LIU Ming-yuan, ZHANG Xing-jian, GENG Zeng-xian. Calibration method of safe takeoff interval for logistics UAVs based on speed error [J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(9): 3959-3967.
- [8] 陶江,曹云峰.低空时变风扰下无人机避障路径跟随方法[J].北京航空航天大学学报,2025,51(1):175-182.  
TAO Jiang, CAO Yun-feng. UAV obstacle avoidance path-following method under time-varying wind disturbance at low altitudes [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2025, 51(1): 175-182.
- [9] 卢明星,李占芳.风扰条件下无人机自适应轨迹跟踪策略研究[J].机械设计与制造,2025(10):328-334,339.  
LU Ming-xing, LI Zhan-fang. Research on adaptive trajectory tracking strategy of UAV under wind disturbance [J]. Machinery Design & Manufacture, 2025(10): 328-334, 339.
- [10] 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 Li-li, 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.
- [11] 张洪海,李博文,刘 隰,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):3149-3156.
- ZHANG Hong-hai, LI Bo-wen, LIU Hao, et al. Demarcation method of safety separation for multi-rotor UAV in free airspace[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2023, 45(10): 3149-3156.
- [12] 李 姗,张洪海,李卓伦.城市低空物流无人机立体航路网络规划方法[J].*交通运输工程学报*,2026,26(4):50-67.
- LI Shan, ZHANG Hong-hai, LI Zhuo-lun. Planning method for three-dimensional air route network of urban low-altitude logistics drones [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2026, 26(4): 50-67.
- [13] 李 楠,孙廩实,焦庆宇,等.无人机安全间隔的确定方法[J].*科学技术与工程*,2024,24(26):11463-11472.
- LI Nan, SUN Lin-shi, JIAO Qing-yu, et al. The method for determining the safety separation of unmanned aerial vehicles[J]. *Science Technology and Engineering*, 2024, 24(26): 11463-11472.
- [14] WANG J, YANG J, YANG Z. Dynamics modeling and simulation of multi-rotor UAV based on the composite wind field model[C]//IEEE. 2022 13th International Conference on Reliability, Maintainability, and Safety (ICRMS). New York: IEEE, 2022: 127-134.
- [15] ALLOUCH A, KOUBAA A, ABBES T, et al. Dynamic separation for UAV traffic management in urban environments[C]//IEEE. 2019 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). New York: IEEE, 2019: 1214-1223.
- [16] ZENG Y, ZHANG R, LIM T J. Machine learning-based position error prediction for UAV navigation [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(6): 6123-6134.
- [17] PANG B, HU Q, NIE J, et al. Adaptive separation assurance for urban air mobility using deep reinforcement learning[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2023, 132: 108048.
- [18] 魏志强,安 心.基于值迭代的无人机动态避撞优化方法[J].*交通运输工程学报*,2026,26(3):215-227.
- WEI Zhi-qiang, AN Xin. A dynamic collision avoidance method for UAVs using value iteration[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2026, 26(3): 215-227.
- [19] DAMATO E, MATTEI M, NOTARO I. Distributed reactive model predictive control for collision avoidance of unmanned aerial vehicles in civil airspace[J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2020, 97: 185-203.
- [20] LEE S, CHOI J, KIM D. Risk field-based separation assurance for unmanned aircraft systems in urban airspace[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023, 24(5): 5428-5441.
- [21] 赵昕颐,王岩韬,赵焱飞.非合作博弈下 eVTOL 自主避让决策与控制方法[J].*交通运输工程学报*,2026,26(3):198-214.
- ZHAO Xin-yi, WANG Yan-tao, ZHAO Yi-fei. Autonomous avoidance decision and control for eVTOL based on non-cooperative games [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2026, 26(3): 198-214.
- [22] ZHAO L, DELAHAYE D, SBIHI M. Block chain-enabled distributed separation negotiation for autonomous drones[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2024, 158: 104445.