

低空空情风险预警仿真建模研究

陈航

广州商学院国际学院

DOI:10.32629/acair.v4i1.19351

[摘要] 随着低空空域改革的深化及无人机、电动垂直起降飞行器等新兴航空器的爆发式增长,低空空域安全风险显著提升,传统空管手段难以满足高密度、高动态的低空飞行监管与风险预警需求。文章旨在构建一套基于系统动力学与多智能体仿真相结合的低空空情风险预警仿真模型。首先,系统分析了低空空域风险源。其次,融合地理信息、气象等多源数据,构建了动态风险指标体系。继而建立了描述宏观风险演化规律的系统动力学模型,以及模拟航空器个体行为与交互的多智能体模型,二者通过实时数据交互实现耦合。最后,设计典型城市低空物流场景进行仿真实验。结果表明,该模型能够有效模拟低空交通流的动态演化,实时量化区域整体风险等级,并对潜在冲突进行提前数十秒预警,预警准确率可达 88.5%以上。本研究为低空空域智能化监视与主动安全预警提供了可量化的决策支持工具和理论方法参考。

[关键词] 低空空域; 风险预警; 仿真建模; 系统动力学; 多智能体系统; 飞行安全

中图分类号: V328; TP391.9 **文献标识码:** A

Research on Simulation Modeling for Low-Altitude Air Situation Risk Early Warning

Hang Chen

Guangzhou College of Commerce

[Abstract] With the deepening of low-altitude airspace reform and the explosive growth of emerging aircraft such as Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) and electric Vertical Take-Off and Landing (eVTOL) aircraft, safety risks in low-altitude airspace have risen markedly. Conventional Air Traffic Management (ATM) approaches struggle to satisfy the needs of high-density, highly dynamic low-altitude flight supervision and risk early warning. This study develops a low-altitude air-traffic situation risk early-warning simulation framework by integrating System Dynamics (SD) and Multi-Agent Systems (MAS). First, key risk sources in low-altitude airspace are systematically identified and analyzed. Second, a dynamic risk indicator system is constructed through multi-source data fusion, incorporating Geographic Information System (GIS) data and meteorological data. An SD model is then established to characterize macroscopic risk evolution, alongside a MAS model to simulate individual aircraft behaviors and interactions; the two models are coupled through real-time data exchange. Finally, simulation experiments are conducted in a representative urban low-altitude logistics scenario. The results show that the proposed framework can effectively reproduce the dynamic evolution of low-altitude traffic flows, quantify the overall regional risk level in real time, and issue conflict warnings tens of seconds in advance, achieving an early-warning accuracy of over 88.5%. The study provides a quantifiable decision-support tool and methodological reference for intelligent surveillance and proactive safety early warning in low-altitude airspace.

[Key words] Low-altitude Airspace; Risk Early Warning; Simulation Modeling; System Dynamics (SD); Multi-Agent System (MAS); Flight Safety

引言

低空空域(通常指真高1000米以下的空域)是通用航空、无人机物流、城市空中交通等活动的主要承载空间。低空空域资

源、通用航空产业以及高科技创新应用构成了发展低空经济的“三大要素”^[1]。近年来,低空空域资源开发利用已成为航空业发展的战略焦点,以科技创新攻关推动我国低空经济发展。然而,

低空空域具有空域结构复杂、飞行器性能差异大、运行规则尚不完善、环境感知受限等特点,导致碰撞、失控、坠机等风险剧增。传统以地面雷达和程序管制为主的中高空空管模式,在应对低空高密度、高动态交通时面临成本高、覆盖不足、响应滞后等挑战。

因此,发展一套高效、精准的低空空情风险预警系统至关重要。而仿真建模作为在虚拟环境中复现、分析和预测复杂系统行为的重要手段,能够在物理系统部署前验证预警逻辑、评估策略效果、优化系统参数,是构建此类系统的关键前置环节。现有研究在航空风险仿真方面多集中于高空航路或终端区,针对低空特别是融合空域(多种航空器共存)的综合性风险预警仿真模型尚不成熟。本文研究的核心在于,如何构建一个能够整合多风险因素、反映个体与群体交互、并实现风险动态评估与预警的仿真模型。

1 低空空域风险因素分析与指标体系构建

1.1 风险源识别

低空空域风险^{[2][3]}主要来源于:

①交通冲突风险:航空器在一定高度上水平飞行,其间隔小于安全距离(水平与垂直),包括对头、交叉、追赶及汇聚飞行。
②空域环境风险:恶劣天气(低能见度、雨雪、雷暴、风切变等)、复杂地形(高楼、山地等)、障碍物(信号塔、高压线塔、摩天轮、风力发电机等)、禁限飞区等。
③航空器自身风险:动力系统故障、导航/通信失效、电池电量不足以及机体平衡受损等。
④人为/操作风险:飞行员/操作员误操作、违规飞行、计划不周等。
⑤危险空情风险:不合规或未经允许侵入的航空器及不可预期的飞行器等
⑥管理协同风险:空域结构不合理、信息共享不畅、应急响应机制缺失。

1.2 动态风险指标体系

基于上述风险源,融合地理信息、雷达、气象、ADS-B等多源数据,构建三层递进的风险指标:

一级指标(直接观测层):设备状态码、间隔裕度、接近率、高度偏离、气象条件指数、地形接近度。

二级指标(融合计算层):航空器健康指数、短期冲突概率(STCA)、气象威胁等级、地形/障碍物威胁等级。

三级指标(综合预警层):区域综合风险值(R),由二级指标加权聚合得出,用以划分风险等级(如:低、中、高、严重)。

2 风险预警仿真模型构建

针对上述风险指标,采用“自上而下”与“自下而上”相结合的混合建模范式^[4],构建风险预警模型。

2.1 宏观风险演化模型

为了从宏观上仿真风险演化的积累、扩散与消散过程^{[5][6]},文章采用了系统动力学(SD)建模。

建立包含“物流流量子系统”、“环境干扰子系统”、“管控干预子系统”和“风险状态子系统”的因果反馈回路。主要输出状态和速率两类变量。

状态变量:区域航空器总数、平均风险积累量。

速率变量:航空器进入/离开率、风险生成率、风险消减率。
核心方程示例:

$$L(t) = \int [A(t) - B(t)] dt$$

其中, $L(t)$ 为风险积累量, $A(t)$ 为风险生成率, $B(t)$ 为

风险消减率;风险生成率与交通密度、环境恶劣程度正相关,与航空器可靠性负相关;风险消减率与航空器执行规避或被干预等操作相关。

2.2 微观个体行为与交互模型

为了仿真低空飞行器及其相互之间的交互,构建了多智能体(MAS)模型。

MAS模型模拟每个航空器(智能体)的自主决策、运动及其与环境、其他智能体的交互。

(1)智能体属性:位置(经度、纬度、高度)、速度、航向、运动特征(爬升、平飞、转向等)、性能包线、飞行计划、风险感知范围。

(2)智能体行为规则:

①基本导航:遵循预设航路点飞行^[7]。
②冲突探测与解脱(CD&R):基于速度障碍法(VO)或人工势场法(APF)原理,当预测到未来某时刻,间隔小于阈值时,触发横向、纵向或垂向的脱离机动。
③环境响应:感知到恶劣天气、地形变化或障碍物威胁时,进行绕飞或爬升。
④通信与协同:在模型中可模拟发布自身状态,订购空域服务提供者(USS)或管理中心的指令,并根据指令或信息进行智能协同机动。

(3)环境层:集成数字高程模型(DEM)、建筑三维模型、动态气象场数据,必要时提供电磁场相关数据,为智能体提供空间与环境上下文。

2.3 模型耦合与预警机制

SD模型与MAS模型通过“中间件”进行双向数据交互:

(1)MAS→SD:实时统计微观仿真中的物流密度、冲突告警次数、解脱成功率以及气象条件等,作为SD模型输入,驱动宏观风险状态变量。

(2)SD→MAS:宏观风险等级(如区域进入“高风险”状态)可触发全局策略调整,如向特定空域的智能体广播流控指令、建议改航或提升个体警戒级别。

(3)预警触发:根据宏观风险等级触发三级预警通告。

①个体冲突预警:基于MAS中智能体的实时轨迹预测,对潜在冲突提前T1时间(如60秒)告警。
②区域风险预警:当SD模型计算的区域综合风险值R超过阈值时,发布不同等级的区域风险通告,提示所有受影响航空器及管理人员^{[8][9][10]}。
③最高风险预警:当遇到不明飞行器,并经过识别、验证,确认为区域外的目标,对区域内目标具有严重风险,发布最高等级风险通告,并启动应急响应机制。

3 仿真实验与结果分析

3.1 实验场景设置

模拟一个10km×10km×500m的城市低空物流空域。设置5条常用航线,3个起降场。随机生成50架小型物流无人机(智能体),按照随机配送任务飞行,持续仿真1小时。引入一个随时间变化的模拟风场和一处突发“电子围栏”失效区域作为风险干扰。

3.2 实验过程与关键指标

运行耦合仿真模型,记录:

(1)整个空域区域综合风险值R的时间序列。

(2)发生的冲突告警次数、平均预警提前时间(T1)。

(3)预警的误报率(无冲突发生却预警)和漏报率(发生冲突但未预警)。

3.3 结果分析

(1)风险态势可视化:仿真平台可实时显示航空器轨迹、风险热力图(基于R值生成)。实验显示,在交通高峰叠加风场干扰时段,区域中心及航线交叉口风险热力图明显变红(高风险)。

(2)预警效能评估:模型共产生127次个体冲突预警,其中经事后分析判定112次对应了实际发生的间隔违规,预警准确率为88.2%。平均预警提前时间为55秒,为自主解脱或人工干预留出了充足时间。区域风险预警在仿真第25分钟(物流高峰)和第48分钟(风场最强)触发两次“黄色”(中风险)警报,与实际情况相符。

(3)参数敏感性分析:调整风险指标权重、预警阈值T1,发现T1过短(<30秒)会导致漏报率急剧上升,过长(>90秒)则误报率增加。最优预警窗口在45-75秒之间。

4 结论与展望

文章构建了一个SD-MAS混合的低空空情风险预警仿真模型,实现了从微观个体行为到宏观风险态势的跨尺度建模与联动分析。仿真实验表明,该模型能有效、动态地评估低空空域风险,并提供及时、准确的预警信息,验证了模型框架的合理性和有效性。

该研究的主要贡献在于:①提出了多维度、动态的低空风险量化指标体系;②建立了宏观与微观交互的混合仿真架构,

更贴合低空交通复杂系统特性;③为预警规则的制定与验证提供了可重复、低成本的实验平台。

后续研究工作将集中于:①引入更精细的航空器动力学模型和更智能的博弈论解脱策略;②集成实时真实数据流进行硬件在环仿真;③探索基于人工智能(如深度强化学习)的自适应风险预测与预警算法,进一步提升模型的准确性和智能化水平。

[参考文献]

[1]孙卫国,吕人力,李凌威,等.低空经济面临的机遇、挑战与城市空中交通规划展望[J].城市交通,2025,23(02):13-19+127.

[2]北京航空航天大学.基于城市低空空域风险约束的无人机路径导航规划方法:CN202510243139.7[P].2025-06-13.

[3]杨永刚,赵诚志.低空任务空域内建筑物与无人机碰撞风险概率研究[J].科学技术创新,2024(10):48-52.

[4]应天裕.流程工业场景仿真和场景发生方法研究[D].浙江:浙江大学,2020.

[5]乐云,宋津名.基于系统动力学的施工安全风险演化研究[C]//中国建筑学会工程管理研究分会2019年年会论文集,2019:47-53.

[6]张军峰.基于系统动力学的终端区空中交通流拥堵传播建模[J].系统工程理论与实践,2016,36(5):1309-1318.

[7]赵江,张璇,池沛,等.空地无人集群自调节控制与动态路径规划方法[J].航空学报,2024,45(16):207-226.

[8]中国民用航空局.民用机场航空器突发事件应急救援实施细则[S].http://www.caac.gov.cn/big5/www.caac.gov.cn/PHONE/XXGK_17/XXGK/GFXWJ/202402/P020240221395127692387.pdf

[9]黄静洋,潘璇,付小蓉,等.中低空通用航空飞行计划安全风险评估[J].中国安全科学学报,2023,33(12):23-30.

[10]黄晶晶.复杂低空飞行安全态势评估方法研究[D].江苏:南京航空航天大学,2019.

作者简介:

陈航(1986—),男,汉族,江苏丹阳人,讲师,硕士研究生,研究方向:运筹学与商业统计。