

无人机融入传统空域的空中碰撞风险研究

李 丹^{1,2}, 黄龙杨¹, 林嘉美霖¹, 李诚龙^{1,3}, 兰荣华²

(1. 中国民用航空飞行学院 空中交通管理学院, 四川 广汉 618307; 2. 四川西南航空职业学院 空港管理学院, 成都 610401; 3. 北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

摘要:随着工业级无人机在各行业的广泛应用,无人机融入传统空域系统所带来的空中碰撞风险问题备受关注。首先介绍无人机空中碰撞风险的研究现状;然后分析对比几类重要的碰撞风险模型,讨论不同模型的优劣及适用范围;再从有人驾驶航空器的角度,根据运行环境、操作类型、空域限制、管控及服务要求对无人机运行场景进行分类;最后结合碰撞模型与运行场景讨论无人机空中风险定量模型的适用性,提出对未来研究的建议。研究成果旨在为无人机融入传统有人机空域的风险评估提供理论指导,助力无人机法律法规体系的构建。

关键词:碰撞风险;无人机;碰撞模型;运行场景

中图分类号:U8;V279 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2023)16-0141-06

“十四五”期间,低空空域改革进程不断深化,低空的高度由 1 000 m 进一步拓展至 3 000 m,这为无人机进入低空空域运行提供了有利条件。民航局也相继在四川、湖南、江西等地建立无人驾驶航空试验区进行先期探索,以此适应无人机进入传统有人机空域运行这一新需求。目前,在传统空域运行无人机系统,运营商须证明其操作是在可接受的安全水平内。随着无人机在机场终端区或在航路上运行的新场景出现,国内外学者的研究视角也逐渐由无人机的对地风险转至对空风险的评估。

Martin 等^[1]指出利用特定运行风险评估(specific operations risk assessment, SORA)方法,通过对交通密度、避撞功能的连续性等进行定性的规则集定义,将空中碰撞风险分为 a、b、c、d 四个等级以此评估无人机的空中碰撞风险。McFadyen 和 Martin^[2]将有人机与无人机的实时监控数据、高度保持误差和成熟的碰撞建模方法相结合,研究了无人机在机场周围运行时的垂向碰撞率。Banerjee 等^[3]基于轨迹偏差概率、暴露面积和障碍物测量噪声等建立了无人机与障碍物的空中碰撞风险。欧洲航空安全局(European Aviation Safety Agency, EASA)的工作小组^[4]也于 2021 年提出在评估早期,有必要缩小评估范围,将重点放在大众市场上

的无人机上,现在是时候对大中型无人机与有人机之间的碰撞风险建立风险评估模型,并为此进行了空中风险的定性评估。在国内,陈亚青等^[5]指出目前针对无人机的运行规章仍存在内容较笼统,缺乏强制执行效力和可操作性的问题,提出需逐步完善无人机的适航管理、安全管理等内容。陈义友等^[6]指出无人机运行场景的策略制定和相关支撑技术均处于探讨和论证阶段,并基于多场景、多类型、多阶段等要素设计了民用无人机交通管理体系架构,以支撑无人机安全、高效的融入国家空域系统。韩鹏等^[7]通过分析有人机与无人机的运行特点,计算了终端区场景下无人机与有人机的空中碰撞概率。励瑾等^[8]融合城市低空因素,通过改进 Reich 模型建立基于位置误差的碰撞风险模型探究飞鸟与无人机之间的碰撞风险。

综上所述,现有成果对开展无人机融入传统空域的空中碰撞风险研究具有重要意义。但是,目前的研究对象大多集中在物流无人机,此场景的运行还远未达到融合运行的标准,而针对新场景下无人机运行的空中碰撞风险评估还较为少见,同时也缺少量化、通用化、体系化的评估方法和流程。鉴于此,本文拟对无人机运行场景进行分类,将场景与风险模型相结合,提出未来对无人机空中碰撞风

收稿日期:2023-05-04

基金项目:四川省自然科学基金(2023NSFSC0903)。

作者简介:李丹(1993—),女,陕西宝鸡人,中国民用航空飞行学院空中交通管理学院,硕士研究生,研究方向为交通运输、有人机/无人机融合运行风险评估;黄龙杨(1973—),男,安徽六安人,中国民用航空飞行学院空中交通管理学院,副教授,博士,研究方向为无人机空中交通管理。

险的研究思路与方法,希望为无人机空中碰撞风险评估提供方法指导。

1 无人机空中碰撞风险研究现状

欧洲航空安全局(EASA)提出将无人机的运行分开放类、特定类和审定类进行风险评估^[9],尤其对特定类无人机提出一种 SORA 的方法。其中对于空中碰撞风险的评估思路^[10]可分定义运行概念(concept of operations,ConOps)、定义空中相遇等级、确定初始空中碰撞风险、使用缓解措施和确定最终空中碰撞风险 5 个步骤。

如图 1 所示,无人机运行场景^[10]被分为 X、Y、Z 三类,在 X 型空域,需要降低与其他飞机相遇的可能性,事故责任由超视距运行(beyond visual line of sight,BVLOS)操作员承担,在 Y 型和 Z 型空域,必须进行操作申报和位置报告。结合运行要素和风险要素划分 12 类空中相遇场景,运行要素包括飞行规则、运行高度、机场环境、空域类型[管制空域/监视应答器强制区(transponder mandatory zone, TMZ)/农村/城市的非管制空域]和潜在人口等要素,风险要素包括有人机与无人机的接近率、几何形状及飞机动力学要素。与此同时,根据无人机与有人机间碰撞风险的可接受程度定义 4 级空中风险等级(air risk class,ARC),基于场景与空中相遇等

级确定初始风险等级^[10](图 2),经过战略措施和战术措施的缓解确定最终空中碰撞风险。

我国正参考 EASA 提出的 SORA 方法推进相关安全评估工作^[11]。但目前,各国对无人机空中碰撞风险的研究还停留在定性分析的阶段,未能将空中碰撞风险的定量分析融入 SORA 的大框架之下。

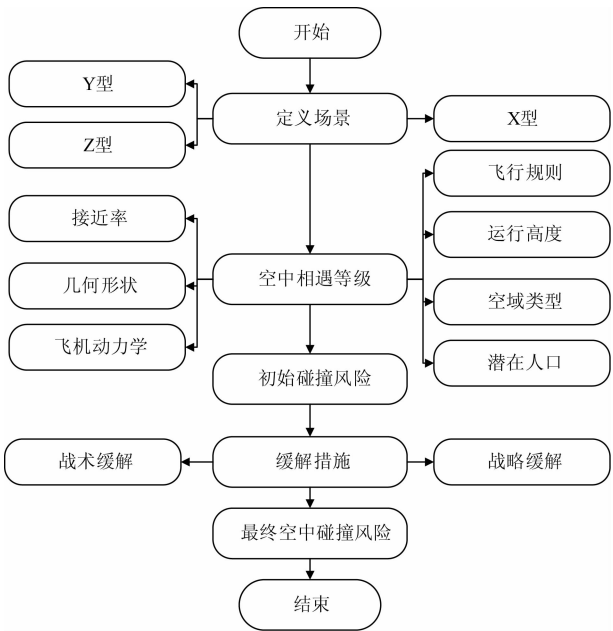
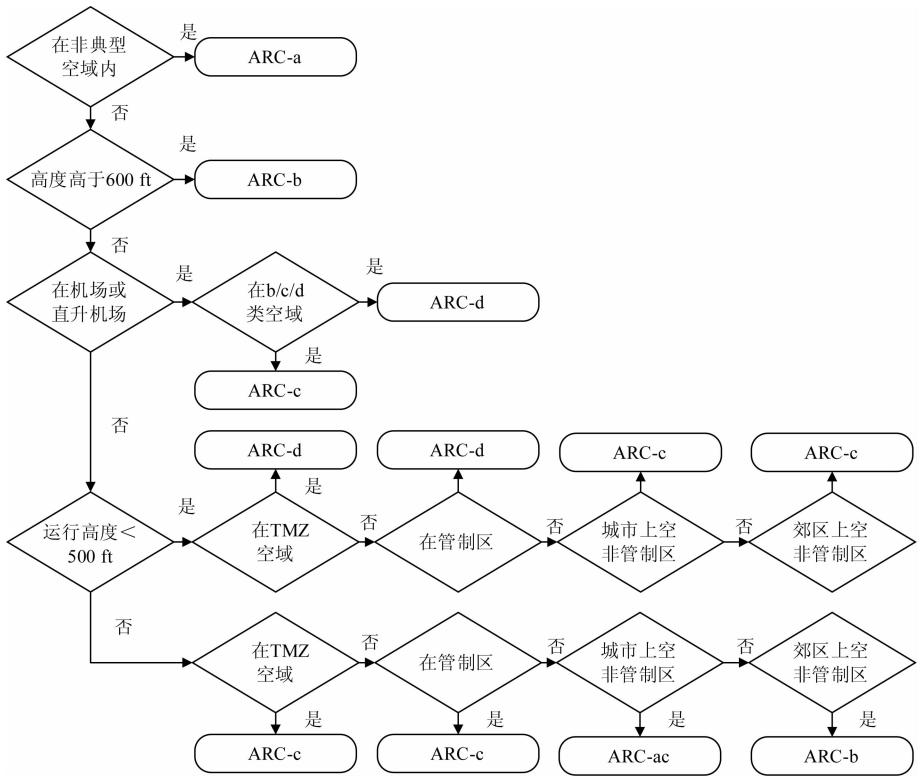


图 1 空中碰撞风险评估流程



1 ft≈0.304 8 m

图 2 空中相遇等级^[10]

对于空中相遇等级的定性分类与通过缓解措施降低风险的定性研究也减少了无人机进入传统有人机空域运行的可能性,而这方面问题也正是 SORA 下一个 3.0 版本拟解决的重点。

2 空中碰撞风险模型对比

定量研究空中碰撞风险涉及碰撞风险模型的构建,是载人航空的一个长期研究领域。航空器的安全间隔可通过定量分析确定,并以此保证运行的安全性。对无人机空中碰撞概率的计算也可在合适的情况下参考有人机碰撞风险模型建立。在实践中,最成熟和最常用的模型分为 3 类:基于几何碰撞盒的模型、基于数据驱动的模型、基于模拟仿真的模型。

2.1 基于几何碰撞盒的模型

基于几何碰撞盒的模型通常会将飞机近似于一个规则的立体形状,如长方体、圆柱体、球体等几何体。一般会把其中一架飞机看作一个质点,并将忽略的体积转移到另一架飞机的体积膨胀中,以此定义碰撞区域和碰撞事件的发生。例如,经典的 Reich 模型^[12]、Event 模型^[13]和 gas 模型^[14]就是典型的通过建立碰撞盒计算碰撞概率的方法。

2.2 基于数据驱动的模型

数据驱动的模型根据雷达检测到的交通数据进行分析,通过高斯分布、拉普拉斯分布等误差分布函数对风险进行建模,评估碰撞风险,提供决策支持。Anderson 模型^[15]、卷积模型^[16]和基于概率公式推导的模型^[17]是其中的典型代表。

2.3 基于模拟仿真的模型

此类模型利用蒙特卡洛等多种仿真方法对飞

机的轨迹或误差进行计算机模拟,产生大量数据,通过修改空域环境、设备性能等可自由模拟各类场景,应用非常灵活。Maki 等^[18]利用仿真的无人机轨迹进行高斯概率分布,有效地估计了近半空碰撞的概率。Wang 等^[19]基于无人机三维飞行动力学的蒙特卡罗仿真方法,在无人机飞行能力的约束下生成大量随机样本计算不同场景下各时间段的碰撞概率。

综上所述,各类碰撞模型的优劣及适用范围如表 1 所示。

3 无人机运行场景描述

实施面向运行场景的风险评估方法是民航局对无人机风险管理^[20]的基本策略之一,无人机(un-named aerial rehicles, UAV)的空中碰撞风险因其自身装备不一、性能各异、运行环境不同而变化,理清无人机融入传统空域的各类运行场景(表 2)有助于开展无人机空中碰撞风险的分类研究。

4 未来研究的思考与建议

通过对碰撞模型的对比与无人机运行场景的分类,发现起飞全重在 25 kg(含)以下、运行高度在 300 m 以下的无人机在非管制空域运行时,与有人机相撞的可能性较低。因此,未来无人机融入传统空域的空 中碰撞风险的定量研究主要从以下几方面展开。

4.1 轻小型无人机与有人机在终端区运行

在终端区的轻小型无人机通常在隔离空域内运行,其轨迹随任务类型多变,而有人机则按照规定程序执行进离场飞行或起落航线飞行。此时,两

表 1 各类碰撞风险模型对比

模型	优点	缺点	约束条件	应用场景
Reich 模型	能够很好地进行平行间隔安全评估,易于计算	缺乏灵活性,不适用于复杂航路	仅适用于三维平行航迹	固定平行航迹;无通信导航监视(communication navigation surveillance,CNS)设备
gas 模型	模型近似小型无人机的状态,容易计算	未考虑飞机飞行性能因素	假设速度方向是三维随机分布	自由飞行场景
Event 模型	直观易于理解,相对于 Reich 适用于更多场景	未将环境因素或人为因素加入模型	较少	平行、交叉航路
Anderson-Hsu 模型	针对交叉航路进行建模,针对性强,准确性高	由 16 组方程组成,难以计算	假设飞机沿航迹导航误差是双指数分布	雷达监视外的交叉航路,确认同轨迹间隔
基于误差分布卷积模型	将时间特征与空间重叠概率相结合,可计算不同时间的碰撞概率	模型本身还未在操作设置中验证	假设不同类型无人机高度误差分布	机场附近有人机和无人机的垂直重叠概率
基于概率公式模型	考虑了信息的不确定性,碰撞风险值预估更精确	未考虑环境因素对碰撞概率的影响	风险指标是离散的	任意航路
轨迹模拟模型	解决了无人机运行数据缺少的问题	需要大量有人机历史数据	较少	近空中碰撞风险
基于飞行动力学和随机误差模拟模型	通过状态更新入侵者的位置报告数据来增强预测性	需要大量数据	较少	非合作无人机进入机场终端区

表 2 无人机融入传统空域的运行场景

空域用户	I 类 UAV	1.5 kg≤起飞全重≤25 kg UAV				轻小型 UAV/通航飞机		中型 UAV/民航客机	中型 UAV/通航飞机	大型 UAV/民航客机
运行环境		城市		郊区		本场起落航线	进离场飞行	航路飞行		
		居住区	人口聚集区	人口稀少区	农田			终端区 近距跑道起飞、进近、着陆段		
操作类型	开放类	视距内运行（visual line of sight, VLOS）/BVLOS				有人机沿规定程序飞行 仪表飞行规则（instrument flight rules, IFR）； 目视飞行规则（visual flight rules, VFR）		航路上有人机沿规定程序飞行 IFR； 终端区 IFR/VFR		
						无人机在隔离空域运行； VLOS		无人机遵守与有人机相同的空中交通管理规则； 自主飞行		
空域限制	目视飞行航线	报告空域				监视空域		管制空域		
	真高 50 m 以下	真高 300 m 以下		真高 120 m 以下		真高 3 000 m 以下； d 类空域		标准大气压高度 6 000 m 以下； b/c/d 类空域		a/b/c/d 类空域
管控要求	实名登记	实名登记、电子围栏； 飞行计划审批				保持双向通信；可在终端显示 UAV 相关信息		具备与有人机同等水平的通信、导航、监视功能； 加装探测与避让（detect and avoid, DAA）设备		
服务标准	无	提供气象、告警服务，根据用户需求提供航空情报服务；无人机云提供数据服务				提供飞行情报、气象、告警服务		提供管制、飞行情报、气象服务、告警服务		

者相对位置不能单纯地总结为平行航路或交叉航路。因此,此类运行适合采用基于数据驱动的模式探讨碰撞概率的大小。

在此应用模型时,可先估计隔离空域上空有人机空间位置的概率分布;其次,对无人机行为适当近似,使用统计分析来估计有人机与无人机在运行空间的重叠概率;再将有人机的时间特征与空间重叠概率相结合;最后使用无人机任务持续时间及对最坏情况的假设来估计跨越隔离空域上空的碰撞风险。此方法可充分利用现有可用交通数据,对无人机的完整性、机密性和可用性进行基于概率的评估,而且可考虑到环境的随机性,从而更精确地计算碰撞概率。

4.2 中大型无人机与有人机在航路运行

中大型无人机在航路上运行需遵守与有人机同样的飞行规则,配备符合要求的通信导航监视等设备。此时,无人机与有人机的轨迹都比较固定,可将无人机视为有人机考虑,这类运行可采用基于几何碰撞盒的模型探讨其碰撞概率。

此类模型应用时间久且简单方便,对此类场景可建立有人机与无人机的碰撞盒,分平行航路与交叉航路进行探讨,还可将人为因素、环境因素、缓解措施等纳入模型中改进模型,使预测结果更加准确可靠。

4.3 中大型无人机与有人机在终端区运行

中大型无人机在近距跑道起飞、进近、着陆过

程中可能与有人机的运行产生冲突,同时也存在有人机误入无人机跑道的情况,严重影响飞行安全。对此类运行可采用基于仿真模拟的模型评估风险。

基于蒙特卡洛等仿真方法可建立无人机的 3D 运动模型^[21],分析无人机沿指定路径运动时的轨迹,通过设置无人机导航、监视、通信设备性能,增加时间长度和交通密度,可自由模拟空域环境,以此评估中大型无人机在终端区造成的碰撞风险。此方法还可根据模拟效果优化空域的进离场及起落航线程序设计,进一步降低碰撞风险概率。

5 结语

无人机融入有人机空域运行已对传统空域提出了一系列安全挑战,由此引发的诸如空域需精细化分类、风险需等级评估、管理需灵活适应市场等问题亟待解决。目前各国对无人机融入有人机空域运行的碰撞风险研究还存在以下问题:①囿于无人机的增速与市场占有率,为解决主要矛盾,风险研究呈现场景单一、对象单一且多集中在对地风险这些现象,对空风险的研究相对滞后;②各国普遍采纳的 SORA 方法中,对空中相遇等级的划分并不适用于我国现状,部分场景无法通过其流程对初始风险定级;③对空中碰撞风险停留在定性分析的层面,欠缺定量研究,难以用数据支撑风险评估的

可靠性。

对此,在分析 EASA 对空中碰撞风险的研究基础上,对我国无人机运行场景进行全面归类,该场景分类旨在梳理各类无人机的特点,明确各场景下研究的主要对象和主要风险来源,完善现有 SORA 框架体系,解决无人机多场景运行的空中碰撞风险评估未量化、不全面的问题。

传统有人机的碰撞风险模型研究已渐成体系,无人机的空中碰撞风险还未分类、分级、分场景构建定量评估体系,也未明晰研究方法的适用性。因此,结合场景分类与成熟碰撞模型,无人机融入传统空域的空 中碰撞风险研究可以从 3 个方面开展:①轻小型无人机与有人机在终端区运行可采用基于数据驱动 的模型分析;②中大型无人机与有人机在航路运行可采用基于几何碰撞盒的模型分析;③中大型无人机与有人机在终端区运行可采用基于仿真模拟的模型分析。后续的研究还需将人为因素、缓解措施和管理因素等纳入模型,建立更适合无人机运行的碰撞风险模型,用以支撑无人机融入传统空域 的实践活动。

参考文献

[1] MARTIN T, HUANG Z F, MCFADYEN A. Airspace risk management for UAVs; a framework for optimising detector performance standards and airspace traffic using JARUS SORA[A]. Proceedings of the 37th AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference. London: IEEE, 2018:1516-1525.

[2] MCFADYEN A, MARTIN T. Understanding vertical collision risk and navigation performance for unmanned aircraft[C]//Proceedings of the 37th AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference. London: IEEE, 2018:1-10.

[3] BANERJEE P, GOROSPE G, ANCEL E. 3D representation of UAV-obstacle collision risk under off-nominal conditions[C]//Proceedings of 2021 IEEE Aerospace Conference (50100). Big Sky, MT, USA: IEEE, 2021:1-7.

[4] EASA. Drone collision task force: final report[R/OL]. (2016-10-04). [https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/TF% 20Drone% 20Collision _ Report% 20for%20Publication%20\(005\). pdf](https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/TF%20Drone%20Collision_Report%20for%20Publication%20(005).pdf).

[5] 陈亚青, 郑稀元, 韩丹, 等. 民用无人机发展管理现状及路径规划研究进展[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(15): 5951-5966.

[6] 陈义友, 张建平, 邹翔, 等. 民用无人机交通管理体系架构及关键技术[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(31): 13221-13237.

[7] 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.

[8] 励瑾, 钟罡, 张晓玮, 等. 城市低空无人机空中碰撞风险计算方法研究[J]. 现代交通与冶金材料, 2022(5): 20-30.

[9] EASA. Specific operations risk assessment 2.5 version[R/OL]. [2023-01-10]. <https://www.eurocockpit.be/positions-publications/specific-operations-risk-assessment-sora>.

[10] EASA. U-SPACE concept of operations[R/OL]. 2019-09-14. <https://corus-xuam.eu/new-u-space-conops/>.

[11] 中国民用航空局. 特定类无人机试运行管理规程(暂行)[R/OL]. (2019-02-01). [http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/GFXWJ/201902/t20190201_194511. html](http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/GFXWJ/201902/t20190201_194511.html).

[12] REICH P G. Analysis of long-range air traffic systems: separation standards I[J]. Journal of Navigation, 1966, 19(1): 88-98.

[13] BROOKER P. Lateral collision risk in air traffic systems: a post-Reich event model[J]. Journal of Navigation, 2003, 56(3): 399-409.

[14] SHINSUKE E. Aircraft collision models[R]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, Flight Transportation Laboratory, 1982: 43-83.

[15] ANDERSON D, LIN X G. Collision risk model for a crossing track separation methodology[J]. Journal of Navigation, 2019, 49(3): 337-349.

[16] MCFADYEN A, MARTIN T, PEREZ T. Low-level collision risk modelling for unmanned aircraft integration and management[C]//Proceedings of the 2018 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT, USA: IEEE, 2018: 1-10.

[17] HARTMANN K, STEUP C. The vulnerability of UAVs to cyber attacks-an approach to the risk assessment [C]//Proceedings of the 5th International Conference on Cyber Conflict. Tallinn, Estonia: IEEE, 2013: 1-23.

[18] MAKI E, WEINERT A, KOCHENDERFER M. Efficiently estimating ambient near mid-air collision risk for unmanned aircraft [C]//Proceedings of AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference. Fort Worth, Texas: AIAA, 2010: 1-8.

[19] WANG C H J, TAN S K, LOW K H. Three-dimensional Monte-Carlo modeling for UAS collision risk management in restricted airport airspace[J]. Aerospace Science and Technology, 2020, 105: 105964.

[20] 中国民用航空局. 民用无人驾驶航空器系统空中交通管理办法[R/OL]. (2021-07-15). [http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/GFXWJ/201610/t20161008_40016. html](http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/GFXWJ/201610/t20161008_40016.html).

[21] WANG C H J, TAN S K, LOW K H. Collision risk management for non-cooperative UAS traffic in airport-restricted airspace with alert zones based on probabilistic conflict map[J]. Transportation Research Part C-emerging Technologies, 2019, 109: 19-39.

Research on Air Collision Risk of UAV Integrated into Traditional Airspace

LI Dan^{1,2}, HUANG Longyang¹, LIN Jiameilin¹, LI Chenglong^{1,3}, LAN Ronghua²

(1. School of Air Traffic Management, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, Sichuan, China;

2. School of Airport Management, Sichuan Southwest Aviation Vocational College, Chengdu 610401, China;

3. School of Electronics and Information Engineering Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: With the wide application of industrial unmanned aerial vehicles in various industries, the air collision risk of unmanned aerial vehicles (UAV) integrated into traditional airspace systems has attracted much attention. Firstly, the research status of UAV air collision risk was introduced. Then several important collision risk models were analyzed and compared, the advantages and disadvantages of different models and their application scope were discussed. From the perspective of manned aircraft, the operation scenarios of UAV were classified according to the operation environment, operation types, airspace restrictions, control and service requirements. Finally, the applicability of the quantitative model of UAV air risk was discussed by combining the collision model with the operation scenario, and suggestions are put forward for future research. The research results can provide theoretical guidance for the risk assessment of UAV in the integrated airspace and help build laws and regulations system of UAV.

Keywords: collision risk; UAV; collision model; operation scenario