

中文引用格式:张洪海,唐思嘉,万俊强. 航空器自主运行下的平行航路碰撞风险研究[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(8): 70-83.
英文引用格式:ZHANG Honghai, TANG Sijia, WAN Junqiang. Research on collision risk of parallel air routes under autonomous aircraft operation[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(8): 70-83.

航空器自主运行下的平行航路碰撞风险研究^{*}

张洪海¹教授, 唐思嘉¹, 万俊强^{**2}副教授

(1 南京航空航天大学 民航学院, 江苏 南京 211106;

2 中国民航大学 空中交通管理学院, 天津 300300)

中图分类号:X949

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.08.0813

基金项目:国家自然科学基金资助(U2133207);民用飞机专项科研资助项目(MJZ1-7N22);中央高校基本科研业务费项目(KJZ53420250004)。

【摘要】 为有效评估航空器在空地协同的自主运行场景下的碰撞风险并保障运行安全,基于人为因素和通信、导航、监视(CNS)性能,开展航空器自主运行下的平行航路碰撞风险研究。首先,深入分析航空器自主运行场景特征,基于飞行员和管制员认知行为及其交互作用改进认知可靠性与失误分析方法(CREAM),评估自主运行过程中的人因可靠性;然后,结合CNS性能,构建基于人为因素和CNS性能的自主运行航空器碰撞风险模型,分别评估航空器在侧向、纵向、竖直方向和综合碰撞风险;其次,通过平行航路算例验证该方法的可行性,分析人因可靠性和CNS性能对平行航路碰撞风险的影响。结果表明:自主运行航空器在3个方向及综合碰撞风险值均低于目标安全水平(5×10^{-9}),且提高人的认知可靠性和CNS性能均有利于减小平行航路间距,从而提升自主运行的安全性。

【关键词】 航空器自主运行; 平行航路; 碰撞风险; 通信、导航、监视(CNS)性能; 人为因素; 风险评估

Research on collision risk of parallel air routes under autonomous aircraft operation

ZHANG Honghai¹, TANG Sijia¹, WAN Junqiang²

(1 College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing Jiangsu 211106, China; 2 College of Air Traffic Management, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: In the scenario of air-ground collaborative autonomous operations, the collision risk of aircraft was assessed to ensure operational safety. The collision risk of parallel routes under autonomous flight was studied based on human factors and the performance of CNS systems. Firstly, an in-depth analysis of the characteristics of autonomous operation scenarios was performed. The Cognitive Reliability and Error Analysis Method (CREAM) model was improved by incorporating cognitive behavior and interactions between pilots and air traffic controllers to assess human reliability in autonomous operations.

* 文章编号:1003-3033(2025)08-0070-14; 收稿日期:2025-03-15; 修稿日期:2025-05-25

** 通信作者:万俊强(1993—),男,河南息县人,博士,副教授,主要从事空中交通规划与管理方面的研究。E-mail: jqwan@cauc.edu.cn。

Subsequently, combined with the CNS performance and human factors, a collision risk model for autonomous operation aircraft was established. The lateral, longitudinal, vertical, and overall collision risks of the aircraft were evaluated separately. The feasibility of this method was validated through a parallel route example, and the impact patterns of human reliability and CNS performance on the collision risk of parallel routes were analyzed. The results indicate that the collision risk values in all three directions and the overall risk remain below the target safety level (5×10^{-9}). Furthermore, it is demonstrated that improving human cognitive reliability and CNS performance contributes to reducing the spacing between parallel routes, thereby enhancing the safety of autonomous operations.

Keywords: autonomous aircraft operation; parallel air routes; collision risk; communication, navigation, and surveillance (CNS) performance; human factors; risk assessment

0 引言

随着航空运输业的迅速发展,空中交通流量显著增加,导致有限空域范围内交通越来越拥挤。这一趋势不仅加剧了航空器飞行的复杂性,也使得航空安全问题变得更加突出和迫切。为了在保证航空器安全间隔的前提下提高其运行效率,开展空地信息共享与协同的自主运行航空器间碰撞风险研究显得尤为重要。

截至目前,国内外开展了一系列针对碰撞风险评估方法的研究,根据考虑的关键因素,可以分为以下几个类别:

1) 人为因素。BROOKER^[1-3]提出了位置完好性和合理意图理念,在传统事件模型基础上结合人的因素、告警系统和雷达精确性,构建了一系列碰撞风险模型;杨新涅等^[4]研究了包含人为因素的多随机因素影响下飞行间隔评估方法及冲突解脱阈值。

2) 导航性能。张兆宁等^[5]研究了基于航空器导航定位误差修正的碰撞风险计算方法;CAI Qing等^[6]研究并验证了先进的通信、导航、监视(Communication, Navigation, and Surveillance, CNS)技术对减小管制空域中最小安全间隔和碰撞风险的促进作用。

3) 空域复杂性。TAMARA等^[7]采用长达14天的欧洲空域实际运行数据,验证了空域复杂性与冲突风险之间存在强相关性;WANG Hongyong等^[8]通过实际运行数据统计得出航空器平均潜在冲突次数随着复杂性的增加而呈现上升趋势。

上述研究大多集中于航空器在管制运行中的碰撞风险评估。与此同时,作为一种新兴的运行模式,空地协同的航空器自主运行以其更强的自主性、灵活性和协同性为特征,可以显著提升飞行的灵活性和效率^[9-11]。在这种模式下,航空器不仅能够迅速

响应实时的环境变化和管制指令,还能主动进行决策和规划,自主调整飞行计划,从而大幅提高运行效率。然而,随着自主运行模式的引入,潜在的冲突检测任务变得更加复杂,对安全保障的要求也更为严格。在这种情景下,飞行员与管制员间的交互作用显著增强,双方都成为了影响飞行计划调整与执行的关键认知行为主体。这不仅要求航空器具备高度精确的监控能力,以实时掌握航空器间的相对位置和动态变化,从而准确评估潜在的碰撞风险,还要求系统能够迅速、准确地响应各种突发情况,以确保飞行安全。鉴于这些要求,自主运行模式对CNS性能和人因可靠性的依赖显著增加。CNS系统的高效性能是确保自主运行安全的关键,而人因可靠性则是保障飞行员和管制员在复杂交互环境中准确判断和迅速响应的重要因素。为了保障航空器运行安全,在构建航空器碰撞风险评估模型时,需要综合考虑人为因素和CNS性能的影响。

因此,针对空地协同的航空器自主运行这一新兴模式,通过分析自主运行过程主体认知行为,明确人因可靠性在其中的作用,并结合CNS性能参数影响,研究基于人为因素和CNS性能的平行航路碰撞风险,以期提升风险评估模型的准确性和实用性,有效识别并降低自主运行场景下的潜在风险,为航空器的安全运行提供更全面的保障。

1 航空器自主运行下碰撞风险因素及其影响

1.1 碰撞风险影响因素分析

根据前述分析,自主运行航空器的碰撞风险评估主要受到人因可靠性和CNS性能影响,具体作用机制概述如下:

1) 人为因素。在自主运行模式下,飞行员和管

制员不仅要满足传统管制运行需求,还必须适应更加动态的任务环境。飞行员除了执行管制员指令外,还可以根据实时运行状况提出自主飞行计划,并在获得管制员的批准后,自行调整航路或高度;管制员除了进行传统的直接指挥和控制外,还需要为飞行员提供决策支持,使用监控系统跟踪航空器的动态,确保在飞行员自主调整飞行路径时,能够有效预防潜在的飞行冲突。因此,在风险评估中,他们的干预频率、决策正确率、响应速度、认知和情绪管理、经验丰富程度等人因可靠性关联因素的影响作用进一步增强。

2) CNS 性能。CNS 性能对确保自主运行的安全和效率同样具有决定性作用。随着管制员和飞行员之间交互作用的增强,对监测结果的效率和精确性的要求也随之提高。因此,CNS 系统的高性能成为了自主运行的重要保障。CNS 性能包括所需导航性能(Required Navigation Performance, RNP)、所需监视性能(Required Surveillance Performance, RSP)和所需通信性能(Required Communication Performance, RCP)。其中,RNP 提供精准定位和航向信息,主要性能参数包括精确性、连续性、完整性和可用性,高精度的导航系统支持飞行员根据实时数据调整航向和优化航线,有效提升飞行效率 and 安全性;RSP 能够实时追踪航空器的位置和状态,其主要性能参数同样包括精确性、连续性、完整性和可用性,保证管制员能迅速识别潜在的冲突并采取相应措施;RCP 是保障飞行员和管制员能够清晰、及时交流的关键,其主要性能参数包括处理时间、连续性、可用性和完整性。即时的通信能力能够协调自主运行中飞行员的自主决策和管制员的监控指令,确保双方在动态变化的飞行环境中实现紧密的协同合作。

因此,人为因素和 CNS 性能对自主运行航空器碰撞风险具有重要影响,直接关系到运行安全和操作效率,并对飞行器在复杂空域中的运行性能及维持安全间隔的能力产生决定性作用。

1.2 自主运行下人因失误概率评估方法

为了深入分析自主运行中人的认知过程可能导致的失误,可以对认知可靠性和失误分析方法(Cognitive Reliability and Analysis Method, CREAM)^[12]进行改进。在自主运行场景中,飞行员和管制员都是认知行为的主体。在评估人因可靠性时,需要分别评价飞行员和管制员的认知行为,且要重视他们之间的交互作用,二者的交互过程如图 1 所示。

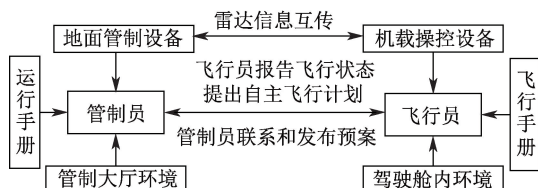


图 1 管制员与飞行员间交互过程

Fig. 1 Interaction between air traffic controllers and pilots

为了更准确且全面地评估自主运行场景下的人因可靠性,文中对 CREAM 方法进行了适当的改进,同时考虑了人机界面和工作环境等共同绩效条件(Common Performance Conditions, CPC)因子,对 2 个认知主体的行为进行综合评价。主要改进了 CREAM 中认知行为和认知功能矩阵评估标准和参照 CPC 和绩效可靠性及权重因子水平^[13],修订后的认知功能失效概率(Cognitive Failure Probability, CFP)值。通过这些改进,能够更精确地评估自主运行环境中的人因可靠性,从而为飞行安全提供更有力的保障。

1.2.1 以飞行员为认知主体的人因可靠性评估

在自主运行场景下,飞行员从单纯的操作执行者转变为监控和管理自主系统操作的关键主体。这要求飞行员具备更强的监控、解释、决策和执行能力,以确保在复杂的飞行环境中能够有效地管理和指导自主系统。

与传统的管制运行模式^[13]相比,自主运行场景下飞行员的认知行为呈现出显著差异。因此,对 CREAM 的改进主要集中在以下几个方面:首先,飞行员需要时刻观察飞行状况,以便及时提出飞行计划或发现飞行异常,这增加了对观察认知活动的需求;其次,飞行员需要根据观察结果提出并解释自主飞行计划的合理性,这要求在认知活动中加入方案确定和讨论环节,并在其中分别融入解释和计划的功能;最后,在执行操作时,飞行员不仅要关注操作正确性,还要实时监控飞行状况,并对飞行计划进行动态调整,这就需要在执行环节中加入观察和计划的功能。

通过这些改进,CREAM 模型能够更清晰地反映出自主运行场景下飞行员的认知行为和功能,主要包括:观察飞行状况;评估并确定可执行的自主运行操作;向管制单位报告并获取必要的许可;执行操作并对结果进行评估和验证。

假设天气良好、小间隔飞行事件发生在白天、飞行员和管制员组织工作高效、工作条件和人机匹配状况均达到优越水平、操作规程合理、任务难度处于人

员处理能力范围内、工作人员接受了充分的培训并且拥有经验的丰富、管制员和飞行员之间的沟通顺畅、能够迅速识别并处理风险、反应时间充足,在评价自主运行中飞行员的认知行为时,参照 CPC 与绩效可靠性及权重因子水平,并据此得到修订后飞行员认知行为的失效模式和 CFP 值^[14],具体见表 1。

表 1 自主运行下飞行员认知行为的失效模式和 CFP

Table 1 Failure modes and CFP of pilots'cognitive behaviors in autonomous operations

飞行员行为	认知活动	认知功能				主要失效模式	基本概率	失误概率
		观察	解释	计划	执行			
观察飞行状况	观察	√	—	—	—	错误辨识	0.070 000 0	0.004 480 0
评估可执行操作	计划	—	*	√	—	不适当的计划	0.010 000 0	0.001 500 0
向管制报告获批	讨论	—	√	*	—	决策失误	0.010 000 0	0.001 500 0
执行操作	执行	*	—	*	√	动作方式错误	0.003 000 0	0.000 495 6

注: * 表示改进的内容;—表示无内容;√表示飞行员行为对应的认知活动和功能无需改进的内容。表 2 同。

自主运行下飞行员的失效模式和 CFP 按下式计算:

$$R_1 = 1 - \prod_{j=1}^4 (1 - CFP_j)$$

(1)

式中: R_1 为由自主运行下飞行员的失效模式和 CFP;CFP 为推导出的自主运行下飞行员失误概率值,计算得约为 0.007 96; CFP_j 为各项飞行员认知行为修正后的 CFP 值; $j=1,2,3,4$,分别对应 4 种认知行为。

1.2.2 以管制员为认知主体的人因可靠性评估

在自主运行场景下,管制员的角色已经从传统的决策者^[15]扩展到了协调者和支持者。他们不仅需要对飞行员的自主运行操作进行监控,还需要提供必要的指导和支持。这种角色的转变要求管制员必须具备更为出色的监控、协调、决策和沟通能力,以确保在自主运行环境下能够有效地管理和协助飞行员,保障飞行的安全和效率。

因此,对 CREAM 的改进主要集中在以下几个方面:首先,管制员需要根据飞行员报告的自主飞行

计划和实时雷达监控信息,进行综合判断和决策,评估自主操作的可行性,并对飞行员自主决策提供支持和指导,这要求在讨论的认知活动中加入解释的功能;其次,管制员需要实时监视空域内自主运行航空器运行状况,并制定相应的协调计划,这要求在计划的认知活动中加入观察功能;最后,在指定协调计划后,管制员需要发布并根据监控状态实时调整协调指令,这要求在执行的认知活动中加入观察的功能。通过这些改进,可以更准确地界定自主运行场景下管制员的认知行为和功能,主要包括:监视飞行动态、评估自主操作的可行性、制定并协调空域内自主运行航空器的飞行计划、实时调整和发布指令、执行操作并对效果进行评估和验证。这些改进有助于确保管制员在自主运行环境中能够有效地履行其职责,提高整体的运行安全性和效率。

在假设条件与前文描述的理想环境相同的情况下,参照 CPC 与绩效可靠性及权重因子水平,对自主运行中管制员的认知行为进行评估,得到管制员认知行为的失效模式和 CFP 值见表 2。

表 2 自主运行下管制员认知行为的失效模式和 CFP

Table 2 Failure modes and CFP of air traffic controllers'cognitive behaviors in autonomous operations

管制员行为	认知活动	认知功能				主要失效模式	基本概率	失误概率
		观察	解释	计划	执行			
监视飞行动态	观察	√	—	—	—	错误辨识	0.070 000 0	0.004 480 0
评估操作可行	诊断	—	—	√	—	决策失误	0.010 000 0	0.000 500 0
提供支持指导	讨论	—	*	√	—	决策失误	0.010 000 0	0.001 500 0
制定飞行计划	计划	*	—	√	—	不适当的计划	0.010 000 0	0.001 140 0
实时发布指令	执行	*	√	—	√	动作方式错误	0.003 000 0	0.000 648 3

自主运行下管制员的失效模式和 CFP 按下式计算:

$$R_2 = 1 - \prod_{j=1}^5 (1 - CFP_j)$$

(2)

式中: R_2 为由自主运行下管制员的失效模式和 CFP;CFP 为推导出的自主运行下管制员失误概率值,计算得约为 0.008 25; CFP_j 为各项管制员认知行为修正后 CFP 值; $j=1,2,\cdots,5$,分别对应 5 种认知行为。

鉴于自主运行中飞行员与管制员之间的交互作用至关重要,笔者认为2大认知主体的失误事件之间存在一定的相关性。考虑到飞行员和管制员认知行为中任意环节失误都可能导致整体失误,文中选择简单并集概率计算方法计算自主运行中飞行员和管制员的综合失误概率,即:

$$R = 1 - (1 - R_1) \times (1 - R_2) \tag{3}$$

式中 R 为飞行员和管制员的综合失误概率,计算结果约为0.016 14。

1.3 CNS性能对航空器碰撞风险的影响

自主运行场景下,CNS性能对航空器碰撞风险

表3 RNP类型

Table 3 Types of RNP

参数	RNP 类型					
	RNP 0.3	RNP 1	RNP 4	RNP 10	RNP 12.6	RNP 20
精确性/n mile	±0.30	±1.00	±4.00	±10.00	±12.60	±20.00
精确性/km	±0.56	±1.85	±7.40	±18.50	±23.30	±37.00

2) RSP定义为在特定的精度和刷新率条件下,能够获取航空器位置、速度和目的地的能力。其性能参数包括精确性(刷新时间和反应时间)、可用性、完整性和连续性。其中,精度直接影响航空器的偏航,因此,文中主要关注由RSP的精确性(刷新时间和反应时间)引起的航空器偏航误差。至今,ICAO主要发布了4种RSP类型,具体见表4。

表4 RSP类型

Table 4 Types of RSP

参数	RSP 类型			
	RSP 180	RSP 240	RSP 400	RSP 760
刷新时间/s	180	240	300	760
反应时间/s	2	2	2	2

3) RCP定义为在通信系统中,为确保航空器之间或航空器与地面之间的通信能够达到期望的性能水平而设定的要求,它可以用处理时间、连续性、可用性和完整性来描述,其中,处理时间是导致航空器偏航的主要因素,因此,文中主要考虑处理时间导致的航空器偏航误差。至今,ICAO主要发布了5种RCP类型,具体见表5。

表5 RCP类型

Table 5 Types of RCP

参数	RCP 类型				
	RCP 10	RCP 60	RCP 120	RCP 240	RCP 400
处理时间/s	10	60	120	240	400

大小有显著影响,文中将分别分析RNP、RSP和RCP性能影响,并详细阐述如下:

1) RNP是指在特定空域或航路上,航空器飞行过程中有95%的时间能够达到预期导航性能的精度水平。其性能参数包括精确性、连续性、可用性和完整性,不同的RNP类型对应不同的导航精度水平。其中,精确性能够直接影响航空器的位置偏差,因此,文中主要关注由RNP精确性引起的航空器偏航误差。至今,国际民航组织(International Civil Aviation Organization, ICAO)主要发布了6种主要的RNP类型,具体见表3。

2 自主运行下的平行航路碰撞风险模型

2.1 基于人为因素和CNS性能的碰撞风险模型

由于自主运行场景的灵活性和复杂性,为减少异常情况,文中选择研究平行航路上的航空器碰撞风险,评估时必须全面考虑侧向、纵向和竖直3个方向的风险。鉴于航空领域对安全保障的极高要求,构建一个能全面评估各方向风险的模型至关重要。该模型需要确保对风险进行最大程度的识别与管理,即只要任意方向存在碰撞风险,就判定航空器处于潜在的危险状态。为了构建基于人为因素和CNS性能的平行航路碰撞风险模型,需要做出如下假设:

- 1) 各对航空器的位置是相互独立的。
- 2) 航空器在侧向、纵向和竖直方向的位置是相互独立的。
- 3) 航空器的位置与进入航路系统的时间是相互独立的,且航空器在高空区域以恒定的巡航速度飞行,其各个方向的速度和位置是相互独立的。
- 4) 航空器在理想的环境条件下运行,不受到外部环境因素,如侧风的影响。
- 5) 航空器飞行过程中,驾驶员的操控决策或自动飞行系统的调整在各个方向上是独立的。

如图2所示,将航空器视作一个长、宽、高分别为航空器长度、翼展和机身高度值的碰撞盒(A),描述了航空器穿越侧向、纵向和竖直间隔层(B)的

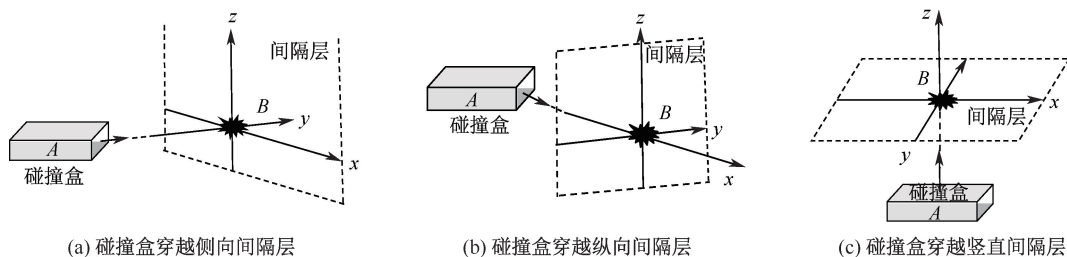


图2 碰撞盒穿越间隔层

Fig. 2 Collision box passing through interval layer

过程。

根据图2中3个方向碰撞特性,构建基于人为因素和CNS性能的平行航路碰撞风险模型,具体如下:

$$N = \max(N_x, N_y, N_z) \quad \text{其中, } i = x, y, z \quad (4)$$

$$N_i = P_i(S_i) F_i \frac{\lambda_x}{\tilde{S}_x} \left\{ E_i(s) \left[\frac{|\Delta \bar{V}|}{2\lambda_x} + \frac{|\dot{y}|}{2\lambda_y} + \frac{|\dot{z}|}{2\lambda_z} \right] + E_i(o) \left[\frac{|\bar{V}|}{2\lambda_x} + \frac{|\dot{y}|}{2\lambda_y} + \frac{|\dot{z}|}{2\lambda_z} \right] \right\} \quad (5)$$

式中: N 为航空器运行中的综合碰撞风险; N_i 为某一方向上的碰撞风险, $i = x, y, z$ 分别表示侧向、纵向和竖直方向,即 N_x 、 N_y 和 N_z 分别为航空器纵向、侧向和竖直方向上的碰撞风险; $P_i(S_i)$ 为重叠概率; S_i 为平行航路之间某一方向的间隔, m ; F_i 为方向因子,即某一特定方向上的风险因素参数; λ_x 、 λ_y 、 λ_z 分别为航空器纵向、侧向和竖直方向的平均几何尺寸,即平均机身长度、翼展宽度和机身高度, m ; $E_i(s)$ 为某一方向占有率,当 $i = x$ 时,表示同方向运行的航空器,在同航路相同高度层上,且满足以目标

航空器为中心、长度为 $2\tilde{S}_x$ 的航段内航空器平均数量和总数的比值,当 $i = y$ 时,表示在侧向相邻航路上,同方向运行在同高度层,且满足以研究航空器

为中心、长度为 $2\tilde{S}_x$ 的航段内航空器平均数量和总数的比值,当 $i = z$ 时,表示同航迹相邻高度层内,

同方向运行的航空器发生竖直临近的频率; $\tilde{S}_x$ 为用来计算 $E_i(s)$ 值的纵向距离(航路长度的一半), m ; $E_i(o)$ 为各个方向的反方向占有率,即反向时相应的比值; $|\Delta \bar{V}|$ 为在同一高度层上沿航路方向飞行的2机的平均相对速度, m/s ; $|\bar{V}|$ 为航空器的平均地速, m/s ; $|\dot{y}|$ 为同一高度层上,相邻航路上飞行的各对航空器的平均侧向相对速度, m/s ; $|\dot{z}|$ 为在同一高度层上飞行的各对航空器的竖直相对速度, m/s 。

其中,方向因子 F_i 是为了统一和简化3个方向碰撞风险模型而设置的,可以表示为:

$$F_i = \begin{cases} P_{y(0)} \cdot P_{z(0)} & i = x \\ P_{z(0)} & i = y \\ P_{y(0)} & i = z \end{cases} \quad (6)$$

式中: $P_{z(0)}$ 为航空器在相同高度上的竖直重叠概率; $P_{y(0)}$ 为航空器在相同航路上的侧向重叠概率。在侧向碰撞风险模型中,当2架航空器在水平面内相对接近时,它们在竖直方向的位置将直接影响碰撞的可能性,故引入 $P_{z(0)}$; 在纵向碰撞风险模型中,通常涉及跟随或相对接近的航空器在同一航线上的前后运动,侧向和竖直位置的重叠直接关系到是否可能追尾或下滑至另一架航空器的飞行路径中,故引入 $P_{y(0)}$ 和 $P_{z(0)}$; 在竖直碰撞风险模型中,侧向重叠概率反映了航空器在相同航线上的相遇概率,故引入 $P_{y(0)}$ 。

2.2 基于人为因素和CNS性能的重叠概率模型

文中对特定间隔和交通流密度条件下平行航路上的碰撞风险进行评估。结合人因可靠性和CNS性能参数对侧向、纵向和竖直碰撞风险影响的分析结果,在Reich碰撞风险模型基础上,推导出基于人为因素和CNS性能的平行航路侧向、纵向和竖直方向的重叠概率计算公式为:

$$P_i(S_i) = (P_{Ni}(S_i) + P_{Si}(S_i) + P_{Ci}(S_i)) R \cdot H_i, \quad i = x, y, z \quad (7)$$

式中: $P_i(S_i)$ 为重叠概率, $i = x, y, z$ 分别表示纵向、侧向和竖直方向; $P_{Ni}(S_i)$ 、 $P_{Si}(S_i)$ 、 $P_{Ci}(S_i)$ 分别为导航系统、监视系统和通信系统性能导致的重叠概率; H_i 为任意方向的人为干预发生频率。

1) 基于RNP精确性导致的重叠概率。由于实际操作中可能出现比RNP值更大的偏航,正常性能和非正常性能之间存在着显著差异,该概率密度函数在尾部具有较高的概率密度值,且延展性较大,因此,利用双指数分布来创建类似的误差模型^[16-17]。

航空器侧向或纵向的导航误差概率密度函数可以用2个期望值为0的双指数分布混合函数描述,并以RNP精确度值作为决定参数,即:

$$f_{Ni}(\sigma_{RNP}) = (1 - \alpha) \times f_{Ni-n}(\sigma_{RNP}) + \alpha \times f_{Ni-g}(\sigma_{RNP}) = (1 - \alpha) \times \frac{1}{2\alpha_1} \exp\left(-\left|\frac{\sigma_{RNP}}{\alpha_1}\right|\right) + \alpha \times \frac{1}{2\alpha_2} \exp\left(-\left|\frac{\sigma_{RNP}}{\alpha_2}\right|\right) \quad (8)$$

式中: $f_{Ni}(\sigma_{RNP})$ 为航空器导航定位误差的概率密度函数; f_{Ni-n} 和 f_{Ni-g} 分别为航空器侧向或纵向的导航误差概率密度函数的2个双指数分布混合函数; σ_{RNP} 为导航误差值(RNP精确性参数); α 为一个介于0和1之间的权重参数,表示非正常性能的航空器数量和航空器总数的比值; α_1 为导航精度引起的误差的概率密度函数所对应的参数; α_2 为机械故障和技术误差等大误差的概率密度函数所对应的参数。 α_1 和 α_2 都是决定参数,可以调整双指数分布的形状。

根据RNP的定义可知,在给定的飞行阶段、特定空域或航迹上,至少95%的飞行时间内,需要保证航迹精确度在 $\pm n$ n mile,如图3所示。

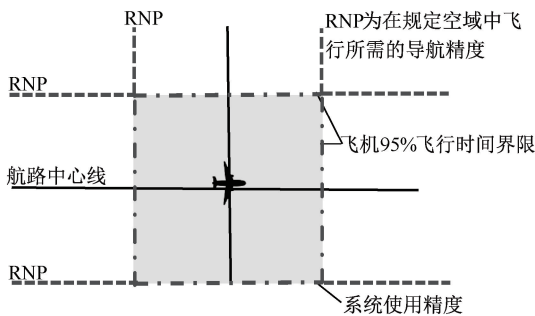


图3 RNP概念

Fig. 3 RNP concept diagram

因此可以得到下式:

$$\int_{-n}^n \frac{1}{2\alpha_1} \exp\left(-\left|\frac{\sigma_{RNP}}{\alpha_1}\right|\right) d\sigma_{RNP} = 0.95 \quad (9)$$

2架航空器的位置相互独立,用卷积公式计算,可以得到基于RNP性能的重叠概率为:

$$P_{Ni}(S_i) \approx 2\lambda_i \int_{-\infty}^{+\infty} f_{Ni}(\sigma_{RNP}) f_{Ni}(S_i + \sigma_{RNP}) d\sigma_{RNP} = 2\lambda_i \left\{ \left(\frac{1 - \alpha}{2\alpha_1} \right)^2 (\alpha_1 + S_i) \exp\left(-\left|\frac{S_i}{\alpha_1}\right|\right) + \left(\frac{\alpha}{2\alpha_2} \right)^2 (\alpha_2 + S_i) \exp\left(-\left|\frac{S_i}{\alpha_2}\right|\right) + \right.$$

$$\left. \frac{\alpha(1 - \alpha)}{2} \left[\frac{\exp\left(-\left|\frac{S_i}{\alpha_1}\right|\right) + \exp\left(-\left|\frac{S_i}{\alpha_2}\right|\right)}{\alpha_1 + \alpha_2} + \frac{\exp\left(-\left|\frac{S_i}{\alpha_1}\right|\right) - \exp\left(-\left|\frac{S_i}{\alpha_2}\right|\right)}{\alpha_1 - \alpha_2} \right] \right\} \quad (10)$$

式中 $P_{Ni}(S_i)$ 由加号分隔可以看作三项,当 α 很小时第二项可以忽略不计,此时 $P_{Ni}(S_i)$ 可以由第一项和第三项共同确定,权重系数需要依据相关理论和实际运行中的统计数据确定,文中仅考虑RNP精确性导致的侧向重叠概率,即 $\alpha = 0$ 。

2) 基于RSP精确性导致的重叠概率。与RNP建模过程类似,使用双指数分布来建立基于RSP精度的偏航误差模型。因此,RSP精确性导致航空器偏航的概率密度函数可以表示为:

$$f_{Si}(\sigma_{RSP}) = (1 - \beta) f_{Si-n}(\sigma_{RSP}) + \beta f_{Si-g}(\sigma_{RSP}) \quad (11)$$

式中: $f_{Si}(\sigma_{RSP})$ 为航空器监视误差的概率密度函数; f_{Si-n} 和 f_{Si-g} 分别为航空器监视误差概率密度函数的2个双指数分布混合函数; σ_{RSP} 为监视误差值(RSP精确性参数); β 为权重参数,介于0和1之间,表示非正常性能的航空器数量和航空器总数的比值; β_1 为监视精确性引起的误差的概率密度函数所对应的参数; β_2 为机械故障和技术误差等大误差的概率密度函数所对应的参数。 β_1 和 β_2 都是决定参数,可以调整双指数分布的形状。

RSP的精确性表示监视设备对目标(航空器或其他监视对象)位置定位的准确度要求,即在95%的概率下,目标位置应位于以航空器为中心、精确度为半径的圆形区域内,如图4所示。

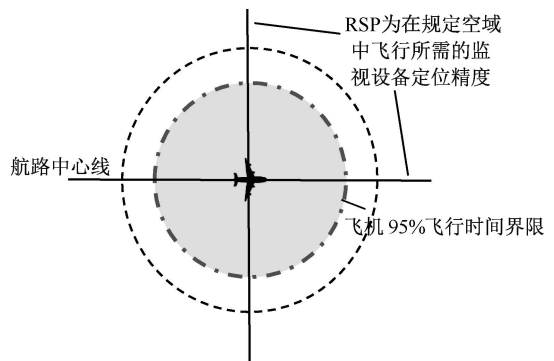


图4 RSP概念

Fig. 4 RSP concept diagram

因此可以得到下式:

$$\int_{-n'}^{n'} \frac{1}{2b_1} \exp\left(-\left|\frac{\sigma_{\text{RSP}}}{b_1}\right|\right) d\sigma_{\text{RSP}} = 0.95 \quad (12)$$

$$n' = (\psi + T_r) \times |\vec{v}| \quad (13)$$

式中: n' 为 RSP 的不同精确性所对应的精度; ψ 为刷新率; T_r 为反应时间; $|\dot{v}|$ 为航空器侧向/纵向/竖直偏航速度。由于 RSP 类型基于刷新率划分, 通过 95% 概率下的精度积分方程可推导出参数 $b_i =$

$$-\frac{n'}{\ln 0.05}^{\circ}$$

2架航空器相互独立,用卷积公式计算,可以得到基于RSP性能的重叠概率为:

$$\begin{aligned}
P_{Si}(S_i) &\approx 2\lambda_i \int_{-\infty}^{+\infty} f_{Si}(S_i + \sigma_{\text{RSP}}) d\sigma_{\text{RSP}} = \\
&2\lambda_i \left\{ \left(\frac{1-\beta}{2b_1} \right)^2 (b_1 + S_i) \exp\left(-\left| \frac{S_i}{b_1} \right| \right) + \right. \\
&\quad \left(\frac{\beta}{2b_2} \right)^2 (b_2 + S_i) \exp\left| \frac{S_i}{b_2} \right| + \\
&\quad \frac{\beta(1-\beta)}{2} \left[\left(\frac{\exp\left(-\left| \frac{S_i}{b_1} \right| \right) + \exp\left(-\left| \frac{S_i}{b_2} \right| \right)}{b_1 + b_2} \right) + \right. \\
&\quad \left. \left. \left(\frac{\exp\left(-\left| \frac{S_i}{b_1} \right| \right) - \exp\left(-\left| \frac{S_i}{b_2} \right| \right)}{b_1 - b_2} \right) \right] \right\} \quad (14)
\end{aligned}$$

其中, β 对重叠概率的影响远大于 b_2 的影响, 所以把 b_2 直接定义为最大的偏航, 即 $b_2 = S_i$, 取 $\beta = 0.01$ 。

3) 基于 RCP 精确性导致的重叠概率。与建立基于 RNP、RSP 的航空器偏航误差模型类似,得到基于 RCP 的航空器偏航误差概率密度为:

$$f_{G_i}(\sigma_{\text{RCP}}) = (1 - \eta) \times f_{G_{i-n}}(\sigma_{\text{RCP}}) + \eta \times f_{G_{i-g}}(\sigma_{\text{RCP}}) \quad (15)$$

式中: $f_{Ci}(\sigma_{\text{RCP}})$ 为航空器通信误差的概率密度函数; f_{Ci-n} 和 f_{Ci-g} 分别为表示航空器监视误差概率密度函数的 2 个双指数分布混合函数; σ_{RCP} 为通信误差值; η 为介于 0 和 1 之间的权重参数, 表示非正常性能的航空器数量和航空器总数的比值; η_1 为通信时间引起的误差的概率密度函数所对应的参数; η_2 为机械故障和技术误差等大误差的概率密度函数所对应的参数。 η_1 和 η_2 都是决定参数, 可以调整双指数分布的形状。

根据 RCP 的定义,处理时间指的是最大完成处理时间的 95%,如图 5 所示。

因此可以得到下式:

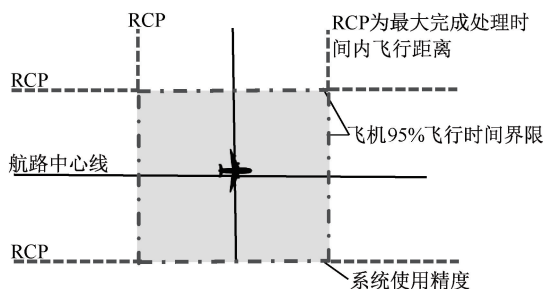


图 5 RCP 概念

Fig. 5 RCP concept diagram

$$\int_{-n''}^{n''} \frac{1}{2c_1} \exp\left(-\left|\frac{\sigma_{\text{RCP}}}{c_1}\right|\right) d\sigma_{\text{RCP}} = 0.95 \quad (16)$$

$$n'' = T_d \times |\vec{v}| \quad (17)$$

式中: n'' 为 RCP 的不同处理时间所对应的精度; T_d 为处理时间。由于 RCP 类型基于通信时间, 通过 95% 概率下的精度积分方程可推导出参数 $c_1 = -\frac{n''}{\ln 0.05}^\circ$

由 RCP 导致的航空器重叠概率可以表示为:

$$\begin{aligned}
P_{Ci}(S_i) &\approx 2\lambda_i \int_{-\infty}^{+\infty} f_{Ci}(\sigma_{\text{RCP}}) f_{Ci}(S_i + \sigma_{\text{RCP}}) d\sigma_{\text{RCP}} = \\
&2\lambda_i \left\{ \left[\left(\frac{1-\eta}{2c_1} \right)^2 (c_1 + S_i) \exp\left(-\left| \frac{S_i}{c_1} \right| \right) + \right. \right. \\
&\quad \left. \left(\frac{\eta}{2c_2} \right)^2 (c_2 + S_i) \exp\left| \frac{S_i}{c_2} \right| + \right. \\
&\quad \left. \frac{\eta(1-\eta)}{2} \left[\left(\frac{\exp\left(-\left| \frac{S_i}{c_1} \right| \right) + \exp\left(-\left| \frac{S_i}{c_2} \right| \right)}{c_1 + c_2} \right) + \right. \right. \\
&\quad \left. \left. \left. \left. \left(\frac{\exp\left(-\left| \frac{S_i}{c_1} \right| \right) - \exp\left(-\left| \frac{S_i}{c_2} \right| \right)}{c_1 - c_2} \right) \right] \right] \right\} \quad (18)
\end{aligned}$$

其中, $P_{Ci}(S_i)$ 由加号分隔可以看作 3 项, 当 η 非常小时, 第 2 项可忽略, 此时 $P_{Ci}(S_i)$ 可由第 1 项和第 3 项确定。文中不考虑大误差的出现, 即 $\eta=0$ 。

3 典型航空器运行案例分析

在选择航空器碰撞风险的研究对象时,需要它具有典型性、普遍性、数据可得性和应用广泛性。这些特点共同保障研究对象能全面、准确地反映航空器碰撞风险的一般性特征,并为制定普遍适用的安全策略和标准提供有力支持。波音 737-800 作为全球广泛使用的窄体客机,符合上述所有特点,同时,它的研究结果也可为其他相似机型的碰撞风险管理提供借鉴和参考。因此,文中选择波音 737-

800 作为研究对象。

在计算侧向和纵向占有率时,其值定义为同一高度层及航路上任意时刻邻近航空器数量与总航空器数量的比值。 $E_i(s)$ 和 $E_i(o)$ 可以通过对算例场景下所研究航段上临近的航空器数量进行统计分析得到^[18]。在研究竖直占有率时,由于相邻高度层上的航空器都是反向飞行的,所以文中只考虑反向飞行的情况,即 $E_z(s) = 0$ 。

表 6 碰撞风险参数

Table 6 Collision risk parameters

$\lambda_x/\text{n mile}$	$\lambda_y/\text{n mile}$	$\lambda_z/\text{n mile}$	$S_x/\text{n mile}$	$S_y/\text{n mile}$	$S_z/\text{n mile}$	$\tilde{S}_x/\text{n mile}$	$E_x(s)$
0.021 330	0.019 330	0.006 790	50.000 000	5.000 000	0.165 000	250.000 000	0.340 000
$E_y(s)$	$E_z(s)$	$E_x(o)$	$E_y(o)$	$E_z(o)$	$ \bar{V} /\text{kn}$	$ \bar{\Delta V} /\text{kn}$	$ \bar{\dot{x}} /\text{kn}$
0.260 000	0.000 000	0.010 000	0.010 000	0.001 000	450.000 000	5.000 000	120.000 000
$ \bar{\dot{y}} /\text{kn}$	$ \bar{\dot{z}} /\text{kn}$	$P_y(0)$	$P_z(0)$	R	HIF _x	HIF _y	HIF _z
120.000 000	1.500 000	0.043 000	0.570 000	0.016 140	0.001 440	0.000 432	0.005 040

3.1 航空器重叠概率计算

将表 3 中 RNP 精确性值代入 $a_1 = -\frac{n}{\ln 0.05}$,不同精度类型的 RNP 所得值对于 3 个方向均适用,不同精度类型的 RSP 在 3 个方向所得 a_1 值见表 7。

表 7 不同精度类型的 RNP 对应的 α_1 值

Table 7 Corresponding α_1 values for different accuracy types of RNP

RNP 类型	RNP 0.3	RNP 1	RNP 4	RNP 10	RNP 12.6	RNP 20
α_1 值	$\alpha_1 = 0.100$	$\alpha_1 = 0.334$	$\alpha_1 = 1.335$	$\alpha_1 = 3.338$	$\alpha_1 = 4.206$	$\alpha_1 = 6.676$

表 8 3 个方向不同精度类型的 RSP 对应的 b_1 值

Table 8 Corresponding b_1 values for different accuracy types of RSP in three directions

方向	RSP 180	RSP 240	RSP 400	RSP 760
侧向($i=y$)	$b_1 = 2.025$	$b_1 = 2.693$	$b_1 = 4.473$	$b_1 = 8.479$
纵向($i=x$)	$b_1 = 2.025$	$b_1 = 2.693$	$b_1 = 4.473$	$b_1 = 8.479$
竖直($i=z$)	$b_1 = 0.025$	$b_1 = 0.034$	$b_1 = 0.056$	$b_1 = 0.106$

将表 5 中 RCP 处理时间值代入 $c_1 = -\frac{n''}{\ln 0.05}$,计算竖直重叠概率时,取 $|\bar{v}| = 1.5 \text{ n mile/h}$,不同精度类型的 RCP 在 3 个方向所得 c_1 值见表 9。

表 9 3 个方向不同精度类型的 RCP 对应的 c_1 值

Table 9 Corresponding c_1 values for different accuracy types of RCP in three directions

方向	RCP 10	RCP 60	RCP 120	RCP 240	RCP 400
侧向($i=y$)	$c_1 = 0.111$	$c_1 = 0.668$	$c_1 = 1.335$	$c_1 = 2.670$	$c_1 = 4.451$
纵向($i=x$)	$c_1 = 0.111$	$c_1 = 0.668$	$c_1 = 1.335$	$c_1 = 2.670$	$c_1 = 4.451$
竖直($i=z$)	$c_1 = 0.001$	$c_1 = 0.008$	$c_1 = 0.017$	$c_1 = 0.033$	$c_1 = 0.056$

基于表 7—表 9 中数值,由式(10)、式(14)、式(18)可以得到算例参数场景中,基于各 RNP、RSP、RCP 组合下自主运行航空器的 3 个方向的重

叠概率 $P_{Ni}(S_i)$ 、 $P_{Si}(S_i)$ 和 $P_{Ci}(S_i)$,计算结果见表 10—表 12。

根据文献[19]中人为干预次数计算方法,假设在理想情况下,平行航路上每小时管制员侧向、纵向和竖直方向上的干预次数 HIF_x、HIF_y 和 HIF_z 分别为 4.32×10^{-4} 、 1.44×10^{-3} 和 5.04×10^{-3} 。根据文献[20]可知: $P_z(0)$ 和 $P_y(0)$ 分别为 0.57 和 0.004 3。根据 ICAO 规定可以确定各个方向的最大安全间隔。基于以上分析,可确定所需部分参数值,具体见表 6。

表 10 基于不同性能 RNP、RSP、RCP 组合的侧向重叠概率

Table 10 Lateral overlap probability based on integration of RNP, RSP and RCP with different performances					
RNP 类型	$P_{Ny}(S_y)$	RSP 类型	$P_{Sy}(S_y)$	RCP 类型	$P_{Cy}(S_y)$
RNP 0.3	9.51×10^{-22}	RSP180	1.49×10^{-3}	RCP 10	1.10×10^{-19}
RNP 1	1.46×10^{-7}	RSP240	1.60×10^{-3}	RCP 60	6.89×10^{-5}
RNP 4	8.12×10^{-4}	RSP400	1.50×10^{-3}	RCP 120	8.12×10^{-4}
RNP 12.6	1.62×10^{-3}	RSP760	1.01×10^{-3}	RCP 240	1.60×10^{-3}
RNP 10	1.53×10^{-3}	—	—	RCP 400	1.50×10^{-3}
RNP 20	1.20×10^{-3}	—	—	—	—

表 11 基于不同性能 RNP、RSP、RCP 组合的纵向重叠概率

Table 11 Longitudinal overlap probability based on integration of RNP, RSP and RCP with different performances					
RNP 类型	$P_{Nx}(S_x)$	RSP 类型	$P_{Sx}(S_x)$	RCP 类型	$P_{Cx}(S_x)$
RNP 0.3	3.81×10^{-216}	RSP 180	3.23×10^{-6}	RCP 10	1.02×10^{-194}
RNP 1	4.66×10^{-65}	RSP 240	3.23×10^{-6}	RCP 60	3.77×10^{-33}
RNP 4	1.67×10^{-17}	RSP 400	3.65×10^{-6}	RCP 120	1.67×10^{-17}
RNP 12.6	1.60×10^{-8}	RSP 760	2.67×10^{-5}	RCP 240	5.80×10^{-10}
RNP 10	2.25×10^{-7}	—	—	RCP 400	3.88×10^{-7}
RNP 20	7.58×10^{-6}	—	—	—	—

表 12 基于不同性能 RNP、RSP、RCP 组合的竖直重叠概率

Table 12 Vertical overlap probability based on integration of RNP, RSP and RCP with different performances					
RNP 类型	$P_{Nz}(S_z)$	RSP 类型	$P_{Sz}(S_z)$	RCP 类型	$P_{Cz}(S_z)$
RNP 0.3	1.73×10^{-2}	RSP 180	1.69×10^{-3}	RCP 10	1.23×10^{-69}
RNP 1	9.27×10^{-3}	RSP 240	4.79×10^{-3}	RCP 60	1.01×10^{-8}
RNP 4	2.53×10^{-3}	RSP 400	1.27×10^{-2}	RCP 120	1.30×10^{-4}
RNP 12.6	1.02×10^{-3}	RSP 760	1.73×10^{-2}	RCP 240	4.16×10^{-3}
RNP 10	8.07×10^{-4}	—	—	RCP 400	1.26×10^{-2}
RNP 20	5.08×10^{-4}	—	—	—	—

3.2 航空器碰撞风险参数值计算

根据上述分析,可以得到航空器碰撞风险模型所需要的性能参数值,安全间隔、航空器平均尺寸和相对速度等碰撞风险参数值等可从表 6 中直接获取,人因可靠性已由基于改进的 CREAM 方法分析得到,为 $R=0.016\ 14$,不同 RNP、RSP 和 RCP 性能组合下的重叠概率可以从表 10—表 12 中直接取用。将以上数据代入式(4)和式(5),计算 RNP 0.3、RSP 180 和 RCP 240 组合下的各个方向的碰撞风险和自主运行航空器综合碰撞风险:

$$N_y = (P_{Ny}(S_y) + P_{Sy}(S_y) + P_{Cy}(S_y)) \times R \times H_y$$
$$P_{z(0)} \frac{\lambda_x}{\tilde{S}_x} \left[E_y(s) \left\{ \frac{|\overline{\Delta V}|}{2\lambda_x} + \frac{|\dot{y}|}{2\lambda_y} + \frac{|\dot{z}|}{2\lambda_z} \right\} + E_y(o) \left\{ \frac{|\bar{V}|}{2\lambda_x} + \frac{|\dot{y}|}{2\lambda_y} + \frac{|\dot{z}|}{2\lambda_z} \right\} \right] = 1.055 \times 10^{-9}$$

(19)

$$N_x = (P_{Nx}(S_x) + P_{Sx}(S_x) + P_{Cx}(S_x)) \times R \times H_x$$

$$P_{z(0)} P_{y(0)} \frac{\lambda_x}{\tilde{S}_x} \left\{ E_x \left[\frac{|\overline{\Delta V}|}{2\lambda_x} + \frac{|\dot{y}|}{2\lambda_y} + \frac{|\dot{z}|}{2\lambda_z} \right] + E_x(o) \left[\frac{|\bar{V}|}{2\lambda_x} + \frac{|\dot{y}|}{2\lambda_y} + \frac{|\dot{z}|}{2\lambda_z} \right] \right\} = 1.626 \times 10^{-13}$$

(20)

$$N_z = (P_{Nz}(S_z) + P_{Sz}(S_z) + P_{Cz}(S_z)) \times R \times H_z$$
$$P_{y(0)} \frac{\lambda_x}{\tilde{S}_x} \left\{ E_z(s) \left[\frac{|\overline{\Delta V}|}{2\lambda_x} + \frac{|\dot{y}|}{2\lambda_y} + \frac{|\dot{z}|}{2\lambda_z} \right] + E_z(o) \left[\frac{|\bar{V}|}{2\lambda_x} + \frac{|\dot{y}|}{2\lambda_y} + \frac{|\dot{z}|}{2\lambda_z} \right] \right\} = 1.172 \times 10^{-10}$$

(21)

$$N_{\text{total}} = \max(N_x, N_y, N_z) = 1.055 \times 10^{-9}$$

(22)

式中 N_{total} 为综合碰撞风险。

结果表明:给定条件下任意方向的碰撞风险和综合碰撞风险均小于 ICAO 规定的航路飞行环境下每个方向上的安全目标水平^[19] 5×10^{-9} ,符合航空器的安全间隔运行标准。进一步计算所有 CNS 性能

组合在 3 个方向的碰撞风险和综合碰撞风险,结果如图 6 所示。

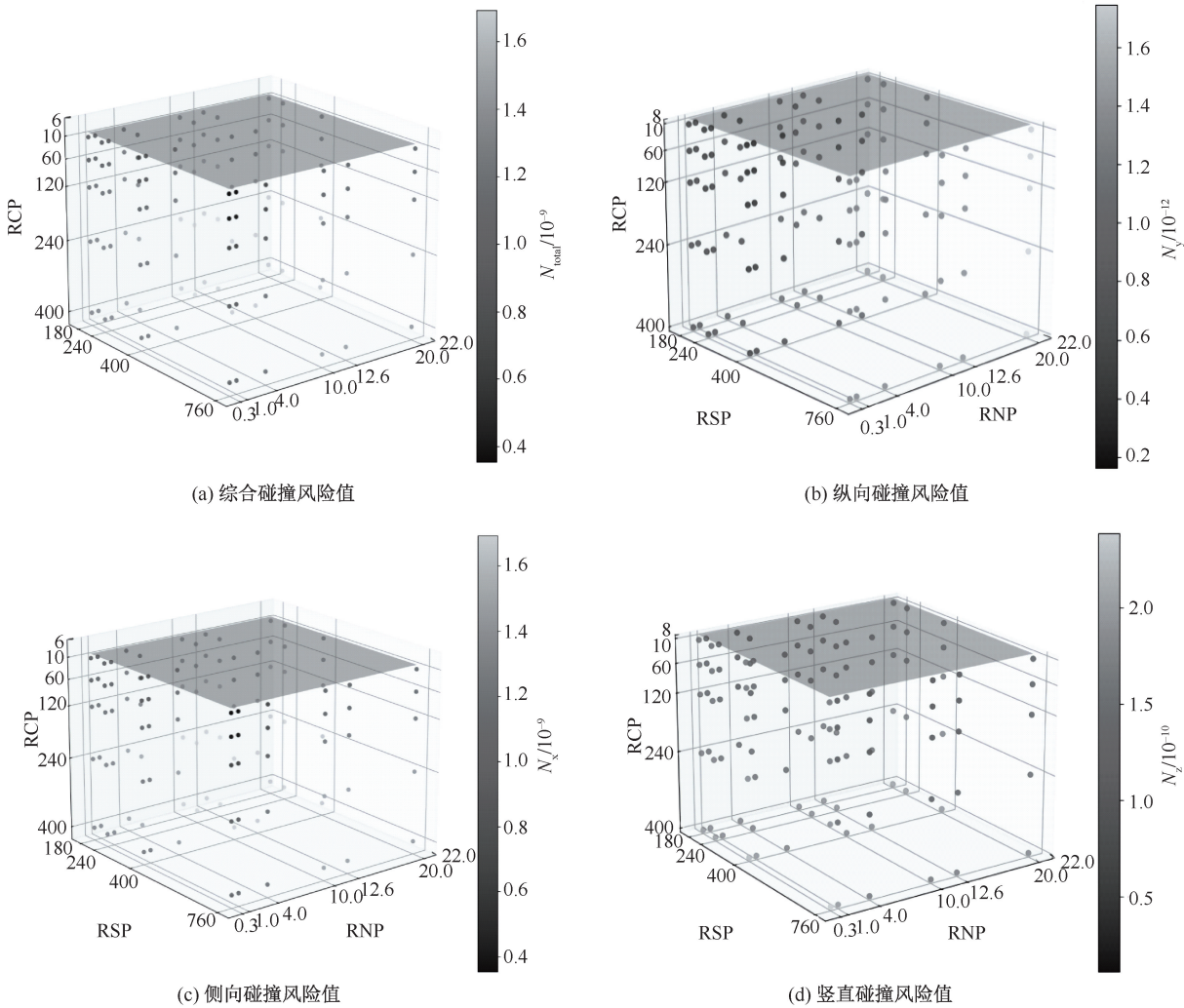


图 6 不同 CNS 性能下的 3 个方向和综合碰撞风险值

Fig. 6 Three orientations and combined collision risk values under different CNS performances

图 6 中每个点代表一个特定的 RNP、RSP 和 RCP 的组合,点的灰度表示该组合下的碰撞风险值,该值范围根据灰度条的显示而定,图中的平面代表安全目标水平 5×10^{-9} ,由图 6 可知:任意 CNS 性能下的纵向、侧向、竖直方向和综合碰撞风险值的点均在 ICAO 规定的安全阈值平面之下,即计算得到的所有碰撞风险值均低于安全目标水平,说明该计算方法可行。

为探究人因可靠性和 CNS 性能对碰撞风险的影响,在其他参数恒定的情况下,分别调整人因可靠性和 CNS 性能的参数值。从图 6 可以看出,在计算碰撞风险值时,侧向碰撞风险图与综合碰撞风险图最为相似,因此选择侧向碰撞风险进行深入分析。在图 6 中,横轴代表侧向间隔大小,纵轴则表示随着间隔标准变化所对应的碰撞风险值(根据文献[20]

中方法,将 N_i 值转换成以 10 为底的对数,以便更直观地展示)。

图 7a 为侧向碰撞风险随航路侧向间隔变化的关系,对比了考虑和不考虑人为因素影响 2 种情况下的风险变化。其中,黑色实线表示考虑人为因素影响,灰色虚线表示不考虑人为因素影响,灰色实线代表 ICAO 安全阈值。分析表明:随着侧向间隔的增加,碰撞风险始终低于 ICAO 安全阈值且逐渐降低,而考虑人为因素影响时风险更低。这表明在自主运行场景下,管制员与飞行员的交互能有效降低平行航路运行的碰撞风险。在航空器自主运行中,提升飞行员和管制员的操作水平,加强他们的交互,提高人因可靠性,不仅能保障运行安全,还能适当减小航空器间最小安全间隔标准,从而提升运行效率。

保持其他给定参数不变,仅改变 RNP、RSP 和

RCP 精度,分析在自主运行模式下 CNS 性能对碰撞风险的影响效果,结果如图 7b—图 7d 所示。

图 7b 为不同 RNP 标准下侧向碰撞风险的变化情况。其中,RNP 0.3、RNP 4、RNP 10 分别采用不同符号和线型表示,灰色实线代表 ICAO 规定安全阈值。分析表明:随着侧向间隔的增加,各 RNP 标准下的碰撞风险均低于 ICAO 安全阈值且呈下降趋势,而 RNP 0.3 标准下碰撞风险显著低于 RNP 4 和 RNP 10。鉴于侧向安全间隔通常为 5 n mile,选取 3.5~6.5 n mile 区间进行放大分析,可见:RNP 0.3 标准下碰撞风险始终低于其他标准。因此,采用更高精度的导航系统可显著降低碰撞风险,进而在保障安全的前提下减小侧向间隔,提升运行效率。

图 7c 为不同 RSP 标准下侧向碰撞风险的变化情况。其中,RSP 180、RSP 240、RSP 400 分别采用不同符号和线型表示,灰色实线代表 ICAO 规定安全阈值。分析表明:随着侧向间隔的增加,各 RSP 标准下的碰撞风险均低于 ICAO 安全阈值且呈下降趋势,而 RSP 180 标准下碰撞风险在侧向间隔大于 3.5 n mile 后显著低于 RSP 240 和 RSP 400。鉴于侧向安全间隔通常为 5 n mile,选取 3.5~6.5 n mile

区间进行放大分析,可见:RSP 180 标准下碰撞风险始终低于其他标准。因此,使用更高精度的监视导航系统可显著降低碰撞风险,进而在保障安全的前提下减小侧向间隔,提升运行效率。

图 7d 为不同 RCP 标准下侧向碰撞风险的变化情况。其中,RCP 60、RCP 240、RCP 400 分别采用不同符号和线型表示,灰色实线代表 ICAO 规定安全阈值。分析表明:随着侧向间隔的增加,各 RCP 标准下的碰撞风险均低于 ICAO 安全阈值且呈下降趋势,而 RCP 60 标准下碰撞风险在侧向间隔大于 2.3 n mile 后显著低于 RCP 240 和 RCP 400,并且快速下降。鉴于侧向安全间隔通常为 5 n mile,选取 3.5~6.5 n mile 区间进行放大分析,可见:RCP 60 标准下碰撞风险始终低于其他标准。因此,提升通信性能可有效降低碰撞风险,从而允许航空器间维持较小的侧向间隔,提升运行安全水平和飞行效率。

综上可知:①提升 RNP、RSP 和 RCP 的性能,均可显著降低侧向碰撞风险。在确保安全的前提下,这使得设置更小的航路侧向间隔成为可能,进而提升航路容量。②在自主运行场景下,高性能 CNS 系统与可靠人为因素的协同作用,能够进一步降低碰

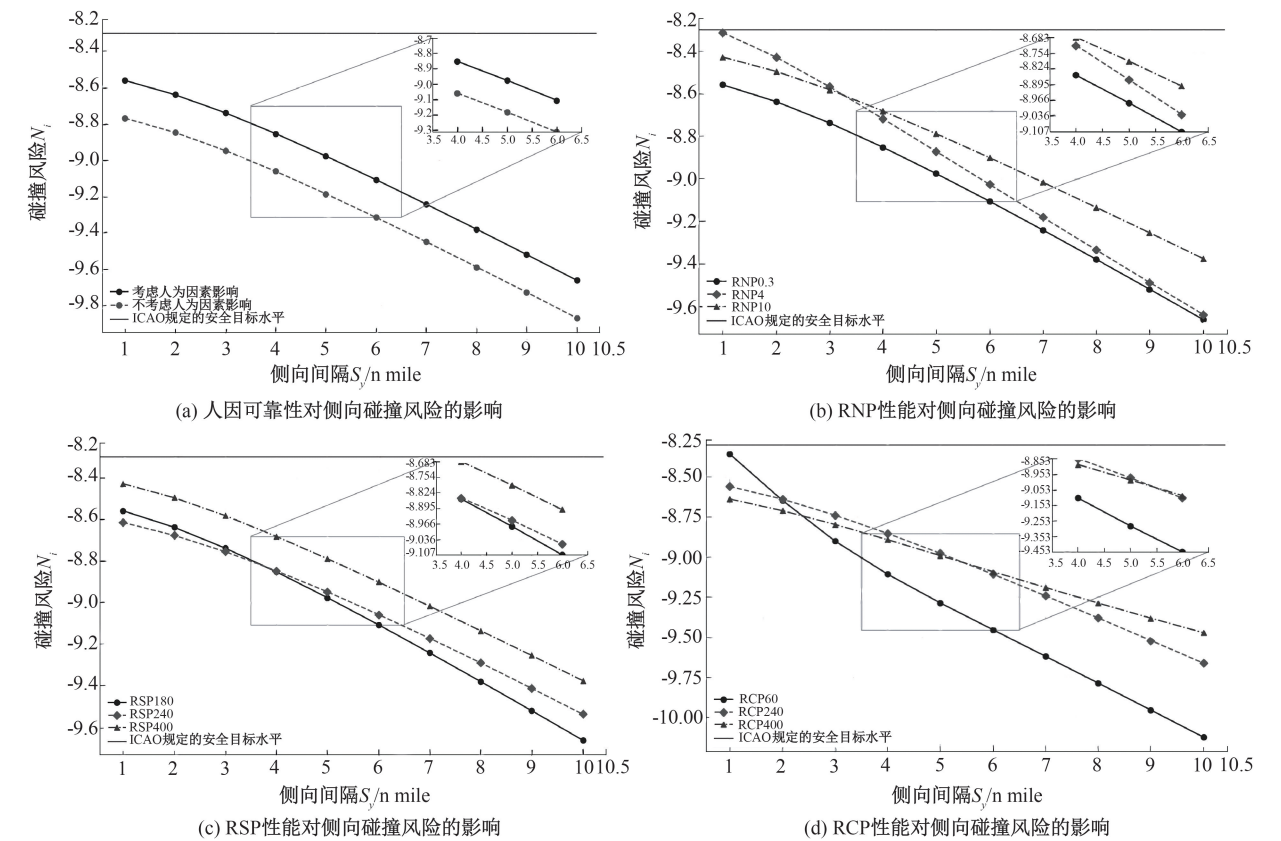


图 7 人因可靠性、RNP、RSP 和 RCP 性能分别对侧向碰撞风险的影响

Fig. 7 Impacts of human reliability, RNP, RSP, and RCP performance on lateral collision risk

撞风险,提升航空器运行的安全性和效率。

因此,在航空器自主运行中,选用性能更佳的 CNS 系统,并充分提升人因可靠性,可以在保障安全的基础上,有效提升航空器的运行效率。

4 结 论

1) 结合自主运行特性改进 CREAM 模型。从认知主体角度将自主运行过程中认知行为分为飞行员行为和管制员行为,利用改进的 CREAM 模型分析人因可靠性与自主运行航空器碰撞风险的关系,可以得到 2 个主体的综合失误概率约为 0.016 14。该改进后模型可用于评估自主运行人因可靠性。

2) 构建基于人因可靠性和 CNS 性能的航空器自主运行风险评估模型,分别评估平行航路上自主运行航空器侧向、纵向、竖直方向和综合碰撞风险,仿真验证在给定自主场景下,不同 CNS 精度的碰撞风险计算结果均小于 ICAO 规定的安全目标水平。

说明本文建立的模型能够科学有效的评估平行航路下自主运行航空器碰撞风险大小。

3) 碰撞风险随人因可靠性和 CNS 性能提升呈下降趋势。人因可靠性和 CNS 性能的提升均能显著降低自主运行航空器碰撞风险,从而允许设置更小的安全间隔标准,即在自主运行场景下,高性能的 CNS 设备和可靠的人为因素可以协同作用,提高航空器运行的安全和效率,为优化自主运行航空器的运行策略奠定理论基础。

4) 文中在构建综合碰撞风险模型时,为了满足绝对安全需求,尚未考虑 3 个方向上碰撞风险的关联性。同时,鉴于航空器自主运行是一种面向未来的运行范式,人因可靠性指标仍有显著的改进空间。因此,在未来研究中可以进一步提升综合指标以得到更严谨和应用性更强的结果,并在实际应用中验证。此外,进一步研究如何提升人因可靠性和 CNS 性能,将是提高自主运行安全效率的关键方向。

参 考 文 献

- [1] BROOKER P. Lateral collision risk in air traffic systems: a 'post-reich' event model[J]. *Journal of Navigation*, 2003, 56(3):399-409.
- [2] BROOKER P. Radar inaccuracies and mid-air collision risk: part 1 a dynamic methodology[J]. *Journal of Navigation*, 2004, 57(1):25-37.
- [3] BROOKER P. Longitudinal collision risk for ATC track systems: a hazardous event model[J]. *Journal of Navigation*, 2006, 59(1):55-70.
- [4] 杨新渥,任治. 多随机因素影响下飞行间隔评估及冲突解脱阈值研究[J]. *安全与环境学报*, 2018, 18(1):1-4.
YANG Xinsheng, REN Zhi. On the flight temporal separation assessment and the conflict resolution threshold in view of the influence of the random factors[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2018, 18(1):1-4.
- [5] 张兆宁,余晟. 自由飞行下基于航空器定位误差修正的碰撞风险研究[J]. *安全与环境学报*, 2017, 17(5):1 633-1 636.
ZHANG Zhaoning, YU Sheng. On the collision risk in rectification of the aircraft positioning error under the free flight condition[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2017, 17(5):1 633-1 636.
- [6] CAI Qing, ANG Haojie, ALAM S. Collision risk assessment of reduced aircraft separation minima in procedural airspace using advanced communication and navigation[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2023, 36(4):315-337.
- [7] TAMARA P, NETJASOV E, CRNOGORAC D. Analysis of relationship between air traffic demand, safety and complexity in FABEC airspace [C]. *Proceeding in 9th SESAR Innovation Days*, 2019:1-8.
- [8] WANG Hongyong, SONG Ziqi, WEN Ruiying. Modeling air traffic situation complexity with a dynamic weighted network approach[J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2018(1):1-15.
- [9] 叶博嘉,薛奥林,伍小元,等. 管型航路中航空器自主运行模式[J]. *西南交通大学学报*, 2020, 55(4):873-881.
YE Bojia, XUE Aolin, WU Xiaoyuan, et al. Autonomous operation mode of aircrafts in tube air corridor[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2020, 55(4):873-881.
- [10] XU Xiyang, PENG Wei. Scalable Multi-Agent computational guidance with separation assurance for autonomous urban air mobility[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2020, 43(3):1-14.
- [11] QIN Huayang, TAN Panlong, CHEN Zengqiang, et al. Deep reinforcement learning based active disturbance rejection

- control for ship course control[J]. *Neurocomputing*, 2022, 484:99–108.
- [12] 杨越,张燕飞,王建忠. 基于 CREAM 和贝叶斯网络的空管人误概率预测方法[J]. *中国安全生产科学技术*, 2020, 16(3):37–43.
- YANG Yue, ZHANG Yanfei, WANG Jianzhong. Prediction method of human error probability in air traffic management based on CREAM and Bayesian network[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2020, 16(3):37–43.
- [13] 郭云东,孙有朝. 基于 FBCREAM 方法的飞机驾驶人因可靠性评估模型[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(27): 11 843–11 849.
- GUO Yundong, SUN Youchao. Human reliability assessment model for aircraft operating based on FBCREAM method[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(27):11 843–11 849.
- [14] 吕宗平,王松涛,张兆宁. 基于 CREAM 和 IDAC 综合分析法的自由飞行下航空器碰撞风险评估[J]. *安全与环境工程*, 2017, 24(1):111–114,120.
- LYU Zongping, WANG Songtao, ZHANG Zhaoning. Collision risk in free flight based on CREAM and IDAC[J]. *Safety and Environment Engineering*, 2017, 24(1):111–114, 120.
- [15] 刘继新,曾道宇,冯思旭,等. 基于改进 CREAM 扩展法的管制人员人因可靠性分析[J]. *安全与环境学报*, 2018, 18(6):2 246–2 251.
- LIU Jixin, ZENG Xiaoyu, FENG Sixu, et al. Human reliability analysis of the air traffic controllers based on the development method CREAM[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2018, 18(6):2 246–2 251.
- [16] AHN S, EMEK K R, OSMAN T. The hybrid method combined STPA and SLIM to assess the reliability of the human interaction system to the emergency shutdown system of LNG ship-to-ship bunkering[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 265(4): DOI:10.1016/j.oceaneng.2022.112643.
- [17] 张兆宁,张晓燕,李冬宾. 基于 VOR 导航的平行航路侧向碰撞率计算模型[J]. *交通运输工程学报*, 2007, 7(3): 21–24.
- ZHANG Zhaoning, ZHANG Xiaoyan, LI Dongbin. Computation model of lateral collision rate on parallel routes based on VOR navigation[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2007, 7(3):27–24.
- [18] 张兆宁,刘计民,王莉莉. 基于 CNS 性能的平行航路纵向碰撞风险评估[J]. *西南交通大学学报*, 2009, 44(6): 918–925.
- ZHANG Zhaoning, LIU Jimin, WANG Lili. Assessment of longitudinal collision risk on parallel routes based on CNS performances[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2009, 44(6):918–925.
- [19] 左谛,许有臣,金开研. 基于航空器高度保持性能的风险碰撞模型优化[J]. *中国安全生产科学技术*, 2020, 16(8):31–36.
- ZUO Di, XU Youchen, JIN Kaiyan. Optimization of risk collision model based on altitude holding performance of aircraft[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2020, 16(8):31–36.
- [20] 万俊强,赵凝飞. 基于 CNS 性能及人为因素的纵向碰撞风险研究[J]. *航空计算技术*, 2017, 47(4):34–37,42.
- WAN Junqiang, ZHAO Yifei. Study on longitudinal collision risk of parallel routes based on CNS performance and human factors[J]. *Aeronautical Computing Technique*, 2017, 47(4):34–37,42.

作者简介: 张洪海 (1979—),男,山东菏泽人,博士,教授,主要从事航空航天科学与工程、计算机软件及计算机应用、自动化技术、空中交通管理、航空运输等方面的研究。
E-mail:honghaizhang@nuaa.edu.cn。

