

# 飞行间隔安全评估引论

张兆宁 王莉莉 李冬宾 ©编著



科学出版社  
[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

(U-0074.0101)

# 飞行间隔安全评估引论



科学出版社

联系电话: 010-64000249

E-mail: gcjs@mail.sciencep.com

销售分类建议: 交通工程

ISBN 978-7-03-025408-5



9 787030 254085 >

定价: 45.00 元

# 飞行间隔安全评估引论

张兆宁 王莉莉 李冬宾 编著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书根据国内外飞行间隔安全评估理论的最新发展动态,系统介绍了飞行间隔安全评估理论的研究成果。在内容安排上,首先介绍飞行间隔安全评估相关概念,随后介绍安全目标水平的确定方法、飞行间隔安全评估的六种典型模型及其改进和应用,接着给出最小安全间隔计算方法,最后给出了基于 CNS 性能的飞行间隔安全评估模型等研究成果。

本书可作为高等院校空中交通管理专业的本科生、研究生的教学用书,也可以作为从事飞行间隔安全评估方面研究的相关技术人员的参考资料。

### 图书在版编目(CIP)数据

飞行间隔安全评估引论 / 张兆宁,王莉莉,李冬宾编著. —北京:科学出版社,2009

ISBN 978-7-03-025408-5

I. 飞… II. ①张…②王…③李… III. 飞行安全-安全评价-研究 IV. V328

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 151490 号

责任编辑:陈 婕 / 责任校对:桂伟利

责任印制:赵 博 / 封面设计:耕者设计室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

铭浩彩色印装有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2009 年 8 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2009 年 8 月第一次印刷 印张: 11 1/4

印数: 1—1 500 字数: 217 000

定价: 45.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 前 言

航空运输中,飞机的飞行过程包括起飞离场、爬升、巡航、进近和着陆。在整个飞行过程中,飞行安全是最基本的要求,而防止飞机相撞采取的方法就是飞机之间保持一定的飞行间隔。在空中交通流量急速增长的今天,一方面要求在现有条件下尽量缩小飞行间隔、增大容量,另一方面为了保障飞行安全又不能无限制地缩小飞行间隔。飞行间隔安全评估的理论研究就是通过建立数学模型来解决飞机在给定的间隔下飞行的安全程度以及飞机之间保持怎样的间隔才能达到安全要求的问题。

在欧美等航空业发达国家,间隔安全方面的理论研究从 20 世纪 60 年代就已经开始进行了,研究人员综合实际飞行中的大量统计数据和理论研究,建立了有关的飞机碰撞风险理论模型。在这些工作中,典型的模型有 Reich 碰撞风险模型、基于冲突区域的碰撞风险模型、基于位置误差概率的碰撞风险模型、基于随机微分方程的碰撞风险模型、基于事件的碰撞风险模型及基于事故树的风险分析模型,研究的范围涉及航路和跑道上的碰撞风险,并应用这些模型来指导当时空中交通环境下的间隔安全标准的确定。由于我国民航事业起步较晚,国内对有关飞行间隔安全评估方面的研究是从 20 世纪 90 年代才开始,基本上是吸收引用国外研究成果。但进入 21 世纪后,我国相关高校和科研院所在这方面的研究逐步展开,理论和应用研究也进入世界前列。本书系统介绍了国内外飞行间隔安全评估理论研究的成果,随后着重介绍了本书作者的研究内容。

本书是在国内著名民航专家徐肖豪教授的指导下编写的,其中第 1 章由张兆宁编写,第 3 章、第 6 章由李冬宾编写,其余各章由张兆宁和王莉莉共同编写。在编写的过程中,刘计民、卢飞和沈金炜做了大量的材料整理和编写工作,张伟、张彬、刘琼和史磊也做了很多文字校对工作,在此深表感谢。

由于作者水平有限,书中不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

作 者

2009 年 6 月

# 目 录

## 前言

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 第 1 章 绪论                   | 1  |
| 1.1 飞行间隔安全评估的研究意义          | 1  |
| 1.2 飞行间隔安全评估的研究现状          | 2  |
| 1.2.1 国外研究概况               | 2  |
| 1.2.2 国内研究概况               | 5  |
| 1.3 飞行间隔安全评估研究的发展趋势        | 6  |
| 1.3.1 考虑基于 CNS 性能的飞行间隔安全评估 | 6  |
| 1.3.2 考虑防撞系统的飞行间隔安全评估      | 7  |
| 1.3.3 考虑人为因素的飞行间隔安全评估      | 7  |
| 参考文献                       | 7  |
| 第 2 章 飞行间隔安全评估相关概念         | 10 |
| 2.1 空中交通管制                 | 10 |
| 2.1.1 机场管制                 | 10 |
| 2.1.2 进近管制                 | 11 |
| 2.1.3 区域管制                 | 11 |
| 2.1.4 程序管制                 | 11 |
| 2.1.5 雷达管制                 | 12 |
| 2.2 飞行间隔                   | 12 |
| 2.2.1 侧向间隔                 | 13 |
| 2.2.2 纵向间隔                 | 13 |
| 2.2.3 垂直间隔                 | 14 |
| 2.3 飞行间隔标准                 | 14 |
| 2.3.1 飞行间隔标准概念             | 14 |
| 2.3.2 飞行间隔标准的影响因素          | 15 |
| 2.3.3 飞行间隔标准的最优值           | 15 |
| 2.4 碰撞风险与安全目标水平            | 16 |
| 2.4.1 碰撞风险                 | 16 |
| 2.4.2 安全目标水平               | 18 |
| 2.4.3 碰撞风险与安全目标水平的关系       | 19 |

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| 参考文献 .....                         | 19 |
| <b>第 3 章 安全目标水平的确定方法</b> .....     | 20 |
| 3.1 安全目标水平的研究现状 .....              | 20 |
| 3.2 安全目标水平的计算 .....                | 20 |
| 3.2.1 空中相撞安全目标水平的确定步骤 .....        | 20 |
| 3.2.2 总体安全目标水平的计算方法 .....          | 21 |
| 3.2.3 总体安全目标水平的计算实例 .....          | 22 |
| 3.2.4 空中相撞的安全目标水平的计算 .....         | 28 |
| 参考文献 .....                         | 29 |
| <b>第 4 章 飞行间隔安全评估典型模型</b> .....    | 31 |
| 4.1 Reich 碰撞风险模型 .....             | 32 |
| 4.2 基于冲突区域的碰撞风险模型 .....            | 33 |
| 4.3 基于位置误差概率的碰撞风险模型 .....          | 34 |
| 4.4 基于随机微分方程的碰撞风险模型 .....          | 35 |
| 4.5 基于事件的碰撞风险模型 .....              | 35 |
| 4.6 基于事故树的风险分析模型 .....             | 36 |
| 参考文献 .....                         | 37 |
| <b>第 5 章 Reich 改进模型及应用</b> .....   | 39 |
| 5.1 Reich 改进模型 .....               | 39 |
| 5.2 Reich 改进模型的应用 .....            | 40 |
| 5.2.1 基于 VOR 导航的平行航路侧向碰撞率的计算 ..... | 40 |
| 5.2.2 VOR 导航下的平行航路碰撞风险计算 .....     | 43 |
| 参考文献 .....                         | 46 |
| <b>第 6 章 基于事件的碰撞风险模型应用</b> .....   | 48 |
| 6.1 侧向间隔安全评估模型 .....               | 48 |
| 6.1.1 侧向碰撞风险建模 .....               | 48 |
| 6.1.2 碰撞风险计算 .....                 | 50 |
| 6.1.3 侧向安全性分析 .....                | 57 |
| 6.2 纵向间隔安全评估模型 .....               | 58 |
| 6.2.1 纵向碰撞风险建模 .....               | 58 |
| 6.2.2 碰撞风险计算 .....                 | 62 |
| 6.2.3 纵向安全性分析 .....                | 69 |
| 6.3 垂直间隔安全评估 .....                 | 71 |
| 6.3.1 垂直碰撞风险建模 .....               | 71 |
| 6.3.2 碰撞风险计算 .....                 | 73 |

|                                         |     |
|-----------------------------------------|-----|
| 6.3.3 垂直安全性分析 .....                     | 75  |
| 6.4 交叉航路间隔安全评估 .....                    | 79  |
| 6.4.1 交叉航路碰撞风险建模 .....                  | 79  |
| 6.4.2 碰撞风险计算 .....                      | 81  |
| 6.4.3 交叉航路安全性分析 .....                   | 85  |
| 参考文献 .....                              | 88  |
| <b>第7章 基于冲突区域和位置误差概率的碰撞风险模型应用</b> ..... | 89  |
| 7.1 单航路安全间隔评估 .....                     | 89  |
| 7.1.1 影响单航路安全间隔主要因素 .....               | 89  |
| 7.1.2 单航路碰撞风险模型 .....                   | 90  |
| 7.2 交叉航路间隔安全评估 .....                    | 93  |
| 7.2.1 基于冲突区域的交叉航路碰撞风险模型 .....           | 93  |
| 7.2.2 基于位置误差概率的交叉航路碰撞风险模型 .....         | 96  |
| 7.3 基于位置误差概率模型的平行跑道间隔安全评估 .....         | 98  |
| 7.3.1 平行跑道及运行模式 .....                   | 98  |
| 7.3.2 平行跑道碰撞风险模型 .....                  | 99  |
| 7.3.3 平行跑道碰撞风险仿真计算 .....                | 105 |
| 参考文献 .....                              | 124 |
| <b>第8章 最小安全间隔计算</b> .....               | 126 |
| 8.1 平行航路最小安全间隔计算 .....                  | 126 |
| 8.1.1 计算最小安全间隔模型的建立 .....               | 126 |
| 8.1.2 碰撞风险模型逆问题的算法 .....                | 128 |
| 8.1.3 碰撞风险模型的逆问题算法实例 .....              | 129 |
| 8.2 交叉航路最小安全间隔计算 .....                  | 131 |
| 8.2.1 交叉航路最小安全间隔改进模型的建立 .....           | 131 |
| 8.2.2 算法 .....                          | 133 |
| 8.2.3 算例分析 .....                        | 133 |
| 参考文献 .....                              | 135 |
| <b>第9章 基于CNS性能的飞行间隔安全评估模型</b> .....     | 136 |
| 9.1 CNS系统概述 .....                       | 136 |
| 9.1.1 陆基CNS系统 .....                     | 136 |
| 9.1.2 星基CNS系统 .....                     | 137 |
| 9.2 所需CNS性能 .....                       | 138 |
| 9.2.1 所需通信性能 .....                      | 139 |
| 9.2.2 所需导航性能 .....                      | 141 |



---

|                                     |     |
|-------------------------------------|-----|
| 9.2.3 所需监视性能 .....                  | 145 |
| 9.3 基于 CNS 性能的平行航路碰撞风险评估 .....      | 147 |
| 9.3.1 碰撞风险影响因素分析 .....              | 147 |
| 9.3.2 研究方法思路 .....                  | 147 |
| 9.3.3 基于 CNS 性能的碰撞风险评估模型 .....      | 149 |
| 9.3.4 基于 CNS 性能的平行航路侧向碰撞风险评估 .....  | 150 |
| 9.3.5 基于 CNS 性能的垂直间隔碰撞风险评估 .....    | 156 |
| 9.3.6 基于 CNS 性能的平行航路纵向碰撞风险评估 .....  | 161 |
| 9.4 安全目标水平下的 CNS 性能环境分析 .....       | 166 |
| 9.4.1 CNS 性能环境、安全间隔及安全目标水平的关系 ..... | 166 |
| 9.4.2 规定安全间隔的 CNS 性能环境分析 .....      | 166 |
| 参考文献 .....                          | 172 |

# 第 1 章 绪 论

因为快捷、高效,航空运输一直是国内外长距离运输的主要方式之一。随着航空交通运输业的快速发展,空中交通流量增加很快,空中交通日益拥挤,空域容量稀缺问题逐渐突出。为了改善这种情况,缩小飞行间隔是最有效的办法之一,但这必须在保障安全的前提下施行。国内外相关学者对飞行间隔安全评估做了大量的研究工作,有许多研究成果已经应用于飞行间隔的安全评估及飞行间隔标准的确定。

## 1.1 飞行间隔安全评估的研究意义

自 20 世纪初美国的莱特兄弟发明飞机以来,航空运输逐步发展为五大交通运输方式之一。航空运输以其无可比拟的快速和安全迅速成为 20 世纪中后期最为人们青睐的交通方式,航空运输在整个交通运输体系中占有越来越重要的位置。由于飞行流量大幅增加,使得流量的增长与空域资源有限性的矛盾日益突出,同时也影响着飞行安全。

为了防止飞机发生危险甚至碰撞,让飞机之间保持一定的间隔,国际民航组织(International Civil Aviation Organization, ICAO)对飞机的纵向、侧向和垂直间隔做了明确规定,这些规定涉及目视飞行、仪表飞行、程序管制飞行、雷达管制飞行和雷达监视下的程序管制飞行等。国家空管委和中国民航局据此制定了中国的飞行间隔规定。间隔规定是保证空中交通活动安全、正常运行的核心措施,是空中交通管制部门履行职责的基础法则。

由于有仪器仪表精度问题、气象和航路数据不准问题,也会出现有管制员指挥差错和飞行员操作失误等问题,在航空中违反这些规定的现象也是存在的。违反间隔规定,轻者发生冲突产生潜在碰撞风险,重者发生飞机相撞,导致机毁人亡的严重后果。国外对事故统计调查发现,空中发生飞机相撞死亡的人数是机场地面事故死亡人数的 1760 倍,而且 79% 的空中相撞是与间隔密切相关的<sup>[1]</sup>。我国国内近十年来虽然没有发生空中相撞事故,但也发生了多次危险接近<sup>[2]</sup>。

飞行间隔的大小决定了一个特定空域的容量大小,即决定了该空域能容纳飞机的最大数量。众所周知,使用的间隔安全标准过大,则会浪费空域资源;间隔标准越小,空域内可同时容纳飞机数量越多,飞行流量就越大。因此,缩小空域间隔安全标准可以显著增加空中容量,但是当飞行间隔标准减小到一定程度,对于飞机

在空中的飞行安全又构成威胁。所以,应当采取合适的飞行间隔标准,既能达到一定的安全要求,又能满足对空域容量的需求,这就需要对采用的间隔标准进行安全性评估。

飞行间隔的安全评估是研究在一定的飞行环境条件下,在规定的飞行间隔标准下飞机间碰撞风险和确定安全水平等方法技术。该研究内容一直是国内外民航领域研究的前沿热点和难点,并且近年来随着空管设备不断更新和技术不断发展,在满足安全目标水平(target level of safety, TLS)条件下缩小间隔标准成为研究及其应用的重点。

对飞行间隔进行安全评估的目的是为飞行的间隔规定提供理论依据,同时对不合理的间隔规定进行改善。因此,要保障飞行间隔的安全性,需要对间隔标准的安全性进行评估,需要对间隔标准造成的碰撞风险进行分析。

根据国务院、中央军委的决定和国家空管委的统一部署,经过实际经验数据的统计分析、间隔的安全评估分析,借鉴国外的间隔标准规定,中国民航于 2007 年 11 月 22 日北京时间零时起,进行了缩小飞行高度层垂直间隔的改革。此次在我国 8400m 以上、12 500m 以下的空域实施缩小飞行高度层垂直间隔,飞机巡航高度层将由过去的 7 个增加到 13 个,我国 8400m 以上、12 500m 以下的空域内的飞行高度层由原来的 600m 的垂直间隔缩小为 300m。飞机在航路飞行时,飞行最佳巡航高度层和飞行的大部分时间通常都集中在 9000~12 500m 之间,在这一空间范围内实施缩小垂直间隔后,极大地增加了空域容量和空中交通流量,因而减少了由于可用高度层缺乏而造成的空中和地面延误,缓解了航路拥堵。

## 1.2 飞行间隔安全评估的研究现状

### 1.2.1 国外研究概况

国外早在 20 世纪 60~70 年代就开始对缩小间隔标准的空域进行安全评估研究。早期的研究工作主要有两类:一类以英国的 Reich 在 1964 年建立的飞机碰撞模型理论为基础,针对平行航路系统在纵向、侧向和垂直方向分别进行碰撞风险建模的研究<sup>[3,4]</sup>;另一类是以 Rice 的水平交叉理论而展开的<sup>[5,6]</sup>。这两种理论都是首先考虑两架飞机之间的碰撞风险,然后给出管制区域内的一定间隔下的碰撞风险,这在实际的空域安全评估中都有应用。在对飞机碰撞风险及间隔标准进行研究的过程中形成了 6 种典型的评估模型:最早对碰撞风险进行评估的模型是英国的 Reich 于 1964 年提出的 Reich 碰撞风险模型,并于 1966~1968 年间在《导航杂志》(*Journal of Navigation*)上发表了“关于间隔标准的空中交通系统分析 I, II, III”<sup>[7~9]</sup>;1964 年 10 月 Filkins 和 Little 建立了基于位置误差概率的碰撞风险模

型,对飞行间隔标准进行了研究;1993年 Bakker 和 Blom 等运用随机过程的方法,通过求解偏微分方程来研究碰撞风险;1996年 Anderson 和 Lin 基于冲突区域建立了交叉航路碰撞风险模型;1997年 Roger 和 Rick 等基于事故树的方法建立了缩小飞行间隔的碰撞风险评估模型(reduced aircraft separation risk assessment model,RASRAM);2003年英国的 Brooker 教授提出了基于事件的“Post-Reich”模型,即 EVENT 模型。

Reich 模型是针对平行航路系统在纵向、侧向和垂直方向分别建立的碰撞风险模型且主要适用于计算洋区平行航路上的碰撞风险和间隔之间的关系。1965年,ICAO 设立了北大西洋规划小组(The North Atlantic System Planning Group, NATSPG),专门从事实施缩小侧向间隔标准安全评估决策流程的分析。因为北大西洋空域航路基本符合 Reich 模型所局限的平行航路条件,NATSPG 小组采用了 Reich 碰撞风险模型最初的分析 and 建模结果,并在北大西洋地区采集大量数据作为模型的输入参数。NATSPG 小组对 Reich 模型进行了发展,并根据导航精度、间隔标准、交通密度和飞机的几何尺寸在改进的 Reich 碰撞风险模型基础上计算出了每  $10^7$  飞行小时整个空域会发生的碰撞次数。NATSPG 小组同时还根据以往飞行的经验提出了一个最大可接受的安全目标水平:0.15~0.4 次碰撞/ $10^7$  飞行小时,并将所计算出的缩小侧向间隔碰撞风险结果 1.0 次碰撞/ $10^7$  飞行小时与 TLS 进行比较,从而得出结论:建议实施侧向间隔标准 90n mile<sup>①</sup> 是不安全的,该项提议不能被采纳<sup>[10]</sup>。

Brooker 于 1984 年运用 Reich 模型对北大西洋空域的侧向碰撞风险进行了研究,分析了侧向间隔由 120n mile 降至 60n mile 的可能性<sup>[11]</sup>。

1992 年美国联邦航空管理局(Federal Aviation Administration,FAA)垂直间隔项目技术中心的 Cox 和 Harrison 等运用 Reich 模型分析了欧洲地区和北大西洋地区 FL290 以上的垂直间隔标准由 2000ft<sup>②</sup> 降至 1000ft 的可能性<sup>[12~14]</sup>。为了对航路上飞行的飞机保持其垂直间隔的性能进行估计,他们分别对 10 个相互独立的区域雷达数据进行了研究,并借鉴 Reich 模型和北大西洋空域碰撞风险模型,建立了评估垂直间隔的碰撞风险仿真模型。该模型包含专门的计算机仿真程序,可以根据飞行计划和跟踪雷达数据对不同间隔标准环境下飞机的飞行运动信息进行仿真,并将数据作为碰撞模型的输入参数。FAA 指出,相邻航路上的飞机,在其同时丧失水平间隔的情况下,如果这两架飞机相对保持垂直导航性能较好,是构不成碰撞风险的,因此必须对典型和非典型两种情况下的垂直导航性能进行研究。典型导航性能描述了在导航系统正常工作时,出现的常见小位置误差;非典型导航性能是因导航系统故障或人为失误引起的,可导致与预定位置出现的较大误差。

① 1n mile(海里)=1852m。

② 1ft(英尺)=0.3048m。

1993年,亚太地区航路规划和实施小组建议在亚太所有地区采用50n mile作为最小纵向间隔标准。1993~1994年间澳大利亚对此纵向间隔标准实施了安全评估,其在成熟的Reich碰撞风险模型基础上,向间隔总概念审查专家组提交了对纵向间隔进行评估的方法,它主要涉及空中交通管制(air traffic control, ATC)程序下或自动相关监视(automatic dependent surveillance, ADS)环境下航路的纵向间隔标准的安全评估<sup>[10]</sup>。

1993年, Bakker和Blom等运用随机过程的方法,通过求解偏微分方程的方法来研究碰撞风险<sup>[15]</sup>,运用马尔可夫过程解决了吸收边界的碰撞问题,分析了在瞬态边界情况下的交汇问题,并研究了在三维航路网络的交汇率(in-crossing rate),最后与Reich模型进行了比较。该方法的理论基础虽然比较复杂,但是限制条件没有Reich模型那样严格。

Anderson和Lin于1996年基于冲突区域建立的交叉航路碰撞风险模型,用侧向间隔标准来确定侧向间隔点,以侧向间隔点到航路交叉点的距离为半径画圆,该圆与两条交叉航路的交点确定的矩形为冲突区域,用条件概率分析了处于冲突区域内两条航路上的飞机之间的碰撞风险,并首先提出了碰撞临界区的概念<sup>[16]</sup>。

英国Cranfield大学的Brooker于2002年从事故分析的角度对间隔的安全性进行了分析<sup>[17]</sup>,对现有的间隔安全评估和碰撞风险模型进行了研究,提出了一种新的概念性方法。该方法归纳了空中交通安全管理的层次结构,即管理规则和程序、告警系统和操作人员等,提出设备的位置完好性和人员的合理意图(reasonable intent)概念,并对其不同组合情况下的风险进行了合理的归类处理和分配,给出统计意义上的平均碰撞风险法。

2003年, Brooker在英国《导航杂志》提出EVENT模型,对侧向的碰撞风险进行了评估<sup>[18]</sup>。该模型为A机定义了一个碰撞盒(collision box),与Reich模型的碰撞模板类同。与Reich模型不同的是EVENT模型没有定义临近层,而为B机定义了一个间隔片(separation sheet),该间隔片是以飞机B为原点在X轴和Z轴上的没有厚度的平面,由于飞机穿越间隔片时具有三个方向的速度,因此EVENT模型定义了一个扩展碰撞盒(the extended collision box),碰撞的概率就是飞机A的碰撞盒穿越间隔片的概率和飞机B位于扩展碰撞盒的概率的乘积。

2004年, Brooker运用EVENT模型分析了雷达的不精确性对碰撞风险的影响<sup>[19]</sup>。雷达的精确性较高,由于雷达的误差造成碰撞几乎是不可能发生的,但是管制员根据雷达误差信息所做出的错误判断就有可能造成碰撞。同年, Brooker以概率论为前提,定义每单位飞行小时内严重违反间隔的频率、碰撞比例因子和安全防护保障失败的概率,对冲突概率进行了分析<sup>[20]</sup>。

2005年, Brooker在侧向间隔EVENT碰撞风险模型的基础上又提出了纵向间隔EVENT碰撞风险模型,从模型中能容易地分析系统主要参数对碰撞风险的影响和作用,同时易于将碰撞预测和风险分析集成在模型中加以分析<sup>[21]</sup>。

在制定飞行间隔的标准和实施方面,ICAO 做了大量的工作。最具意义的是提供全球航空导航服务方案的产生。飞机最低间隔标准的制定和实施是这项工作研究的一个方面。ICAO 的空中导航委员会组成了专家小组对专门问题进行研究,并向国际航空团体提出可行的技术解决方案。13 个专家小组中向委员会提供建议的小组是飞行间隔总概念审查专家小组(Review of the General Concept of Separation Panel, RGCSP),这个小组主要从事最低间隔标准的研究。RGCSP 在 1976 年针对飞行在平行航路(同一高度层)上的飞机发生碰撞进行了深入的研究,目的是通过科学论证以达到缩小 ICAO 规定的两条平行航路间隔 20n mile 的限制,从而更有效地提高空域利用率。RGCSP 并于 1985 年、1988 年和 1991 年陆续对他们的研究成果进行了修改和完善。目前,RGCSP 已经在一些主要飞行环境中实现了缩小最低间隔标准的目标。这主要包括:基于甚高频全向信标(very-high-frequency omni-directional range, VOR)的航路和终端空域的同向和相对飞行的平行航路间隔;为基于所需导航性能精度(required navigation performance, RNP)且具备区域导航(area navigation, RNAV)能力的飞机建立的空中交通服务(air traffic service, ATS)航路;在飞行高度层 29000~41000ft 间的垂直间隔标准(reduced vertical separation minimum, RVSM)缩小为 300m(1000ft);基于 RNAV 和 RNP、用于远洋和远程航路空域上的 50n mile 侧向和纵向的最低间隔标准。目前,RGCSP 正着手研究在基于 RNAV、RNP 和增强对空监视和通讯的情况下,把航路水平最低间隔标准进一步缩小为 30n mile 的措施。

### 1.2.2 国内研究概况

在国内,对于飞行间隔标准的研究起步较晚、成果较少。1998 年,赵洪元对两条交叉航路上飞机发生冲突次数进行了研究<sup>[22]</sup>,给出了一种新型的“交叉航路间隔”模型,最后推导出在两条交叉航路上飞机在单位时间内发生冲突次数的计算模型,并对此进行了详细的分析,但由于没有考虑飞机的偏航问题,其应用受到一定限制。

1999 年,李春锦等对平行航路碰撞风险的 Reich 模型进行了初步研究<sup>[23]</sup>,并对建模思想过程进行了分析,但只对平行航路进行分析,并未分解到侧向、纵向和垂直方向分别考虑。2001 年,徐肖豪教授带领王欣用 Filkins 的概率论方法在假设纵向、侧向和垂直方向相互独立的前提下,分别分析了纵向、侧向和垂直方向上的碰撞风险问题<sup>[24]</sup>。2001 年,潘卫军等利用碰撞风险性模型进行空域安全评估,并对评估后的空域建立相应的空域监控和管理机制,从而达到从空域安全规划的角度缩小飞行最低间隔安全标准,保证空域安全<sup>[25]</sup>。2002 年,徐肖豪教授指导应爱玲运用 Reich 模型研究了洋区平行航路的间隔标准的安全评估问题<sup>[26]</sup>。2004 年,徐肖豪教授指导李冬宾运用事件模型对航路侧向、纵向和垂直方向安全间隔进行评估,并对交叉航路安全间隔也进行了评估<sup>[27~32]</sup>。2007 年,张兆宁教授指导张晓燕用改进的 Reich 模型对 VOR 导航台下的平行航路碰撞风险进行了建模分析,

并结合概率论与划设保护区的方法对交叉航路碰撞风险问题进行了研究<sup>[33~35]</sup>。同年,张秀辉在张兆宁教授的指导下用迭代算法对平行航路及交叉航路下飞机碰撞风险逆问题进行了初步研究,并运用概率论的方法对单航路安全间隔进行了研究,同时考虑了平行跑道的间隔安全评估问题<sup>[36~38]</sup>。2008年,张兆宁和王莉莉指导黎新华基于跟驰理论分析了人为因素对航路纵向间隔安全的影响<sup>[39]</sup>。

国内外的飞行间隔安全评估研究大致可以分为两个方向:一个方向是从概率论的角度入手,分析在特定航路结构、特定的导航条件下,特定的飞机间发生的碰撞风险;另一个方向是从飞机在航路上飞行时,为飞机在空间上提供一个临近区和碰撞风险区这样一个类似保护区的方法入手,来研究如何制定这样的风险区,使得飞机在空中飞行时的碰撞风险最小。以上两个研究方向所要达到的目的是一样的,都是为了在保障空中交通活动安全,防止飞机与飞机、飞机与地面障碍物之间发生碰撞风险的前提下,控制和调节空中交通流量,保证空中交通运输活动达到效益最大化。

### 1.3 飞行间隔安全评估研究的发展趋势

飞行间隔安全评估针对飞行环境,对给定的间隔,研究飞机之间发生碰撞的可能性,进而考察飞行的安全程度。飞行环境因素主要包括:航路结构、交通流密度、通信导航监视(communication and navigation and surveillance, CNS)性能和人为因素。其中,人为因素主要包括管制员因素及飞行员因素。

为了对飞行间隔安全进行评估,需要建立碰撞风险模型。由于建立模型时考虑的飞行环境不同,采用建立模型的数学理论方法不同,每个模型都有自己的适用范围和一定的局限性。

国内外目前已建立了平行航路、交叉航路和任意航路的这种碰撞风险模型并逐渐应用到飞行间隔的安全评估中。综合已有模型,考察未来的飞行环境,今后的飞行间隔安全评估将主要集中在以下方面的研究:建立基于通信导航监视性能的碰撞风险模型;分析防撞系统对碰撞风险的影响;剖析人为差错造成的碰撞风险。

#### 1.3.1 考虑基于 CNS 性能的飞行间隔安全评估

大部分的碰撞风险模型主要是考虑导航性能对碰撞风险的影响,而考虑通信性能、监视性能对碰撞风险的影响的研究较少<sup>[40,41]</sup>。CNS 系统是空中交通管理的主要组成部分,考虑飞行环境时应同时考虑到通信导航监视的影响,因为碰撞风险模型需要从系统的观点进行研究。目前的飞行环境逐渐脱离了对通信、导航和监视具体设备的要求,而是从其所能达到的性能方面给出要求,因此,在以后的研究中应考虑基于 CNS 性能的飞行间隔安全评估。

### 1.3.2 考虑防撞系统的飞行间隔安全评估

国内的大型运输飞机都装有机载防撞系统,该系统有效地预防了空中相撞事故的发生。不考虑防撞系统的碰撞风险的分析结果对于实际的安全性来讲是相对保守的,不能客观地反映空中交通管理系统的整体安全性。防撞系统主要包括地面防撞系统——短期冲突探测告警(short term conflict alert, STCA)和机载防撞系统——空中交通警戒与防撞系统(traffic alert and collision avoidance system/airborne collision avoidance system, TCAS/ACAS)。前者是面向管制员的,在飞行间隔小于间隔标准之前向管制员发出告警信息,管制员采取相应措施以使得飞机恢复正常的飞行间隔运行;若管制员干预失败,则间隔继续减小,直至引发TCAS向飞行员发出告警信息,并提供相应的警戒信息(traffic advisory, TA)和决策信息(resolution advisory, RA)。

Brooker 教授对机载防撞系统的安全性进行了过程分析<sup>[42~44]</sup>,李冬宾、徐肖豪等运用事件树的方法研究了防撞系统对碰撞风险的影响<sup>[31]</sup>。国内外的研究主要侧重于间隔保障的安全性,而没有分析包含防撞系统在内的整个空中交通管理系统的整体安全性,所以应加强这方面的研究。

### 1.3.3 考虑人为因素的飞行间隔安全评估

碰撞风险产生的原因主要分为位置完好性和合理意图,前者是由于导航误差等非人为因素造成的在指定航路上的位置误差,而后者是由于人为差错所造成的飞机在非指定航路上的飞行,导航性能的提高将使得位置完好性所造成的碰撞风险比例继续降低,从而使得人为因素成为碰撞风险研究的主要因素。在以往的研究中,人的差错所造成的大误差(合理意图)和一般误差(位置完好性)均采用不同参数的相同概率分布进行研究,但是这样的方法过于笼统而且没有对人为差错影响碰撞风险的过程进行具体的分析。张兆宁、王莉莉等分析了人为因素对飞行安全间隔的影响<sup>[39]</sup>。

空中交通管理系统是一个典型的包含连续变量和离散变量的混杂系统,在飞行间隔安全评估过程中,“位置完好性”是基于导航误差的连续变量,是在正确的航路上的位置误差;而“合理意图”是基于人为差错的离散变量,由于管制员差错导致飞机在错误的航路上飞行,是在错误航路上的位置误差。因此,运用混杂系统理论对飞行间隔的安全性进行评估将成为一个新的研究方向。

### 参 考 文 献

- [1] van Es G W H. A review of civil aviation accidents air traffic management related accidents; 1980-1999 [C]//The 4th International Air Traffic Management R&D Seminar, New-Mexico, 2001.



- [2] 中国民航航空安全报告[R]. 北京:中国民航总局,2006.
- [3] Mizumachi M, Ohmura T. Electronics and communication in Japan [J]. Information and Communication Engineers of Japan, 1977, 30(60): 86-93.
- [4] Odoni A R, Endoh S. A general model for predicting the frequency of air conflicts[C]//Proceedings of the Conference on Safety Issues in Air Traffic Systems Planning Design, Princeton University, Princeton, 1983.
- [5] Bellantoni J F. The calculation of aircraft collision probabilities [J]. Transportation Science, 1973, 7(4): 317-339.
- [6] Hsu D A. The evaluation of aircraft collision probabilities at intersecting air routes [J]. Journal of Navigation, 1981, 34(1): 78-102.
- [7] Reich P G. Analysis of long-range air traffic systems; Separation standards I [J]. Journal of Navigation, 1966, 19(1): 88-98.
- [8] Reich P G. Analysis of long-range air traffic systems; Separation standards II [J]. Journal of Navigation, 1966, 19(2): 169-186.
- [9] Reich P G. Analysis of long-range air traffic systems; Separation standards III [J]. Journal of Navigation, 1966, 19(3): 331-347.
- [10] Doc9689—AN/953. ICAO. Manual on airspace planning methodology for the determination of separation minima[S]. Montreal: International Civil Aviation Organization, 1998.
- [11] Brooker P. Aircraft collision risk in the North Atlantic region [J]. Journal of the Operational Research Society, 1984, 35(8): 695-703.
- [12] Cox M E, Harrison D, Moek G, et al. European studies to investigate the feasibility of using 1000 ft vertical separation minima above FL 290, part I [J]. Journal of Navigation, 1991, 44 (2): 171-183.
- [13] Cox M E, Harrison D, Moek G, et al. European studies to investigate the feasibility of using 1000 ft vertical separation minima above FL 290, part II [J]. Journal of Navigation, 1992, 45 (1): 91-106.
- [14] Cox M E, Harrison D, Moek G, et al. European studies to investigate the feasibility of using 1000 ft vertical separation minima above FL 290, part III [J]. Journal of Navigation, 1993, 46 (2): 245-261.
- [15] Bakker G J, Blom H A P. Air traffic collision risk modeling[C]//Proceedings of the 32nd Conference on Decision and Control, San Antonio, Texas, 1993: 1464-1469.
- [16] Anderson D, Lin X G. Collision risk model for a crossing track separation methodology [J]. Journal of Navigation, 1996, 49(2): 337-349.
- [17] Brooker P. Future air traffic management: Quantitative en route safety assessment, part 1-review of present methods, part 2-new approaches [J]. Journal of Navigation, 2002, 55(2, 3): 197-210, 363-379.
- [18] Brooker P. Lateral collision risk in air traffic systems; A 'Post-Reich' event model [J]. Journal of Navigation, 2003, 56(3): 399-409.
- [19] Brooker P. Radar inaccuracies and mid-air collision risk; Part 1-a dynamic methodology, Part 2-en route radar separation minima [J]. Journal of Navigation, 2004, 57(1): 25-51.
- [20] Brooker P. Airborne separation assurance systems; Towards a work programme to prove safety [J]. Safety Science, 2004, 42(8): 723-754.
- [21] Brooker P. Longitudinal collision risk for ATC track systems; A hazardous event model [J]. Journal of Navigation, 2006, 59(1): 55-70.
- [22] 赵洪元. 违反飞机纵向间隔概率模型的研究[J]. 北方交通大学学报, 1988, 22(3): 49-52.