



# 航班延误安全风险评估

杨英宝 宫淑丽 等 © 著



科学出版社

# 航班延误安全风险评估

杨英宝 宫淑丽 等 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书针对社会公众广泛关注的航班延误问题论述了多种民航安全风险评估技术。书中分析了我国民航航班延误的现状和主要致因,论述了航班延误的普遍性、严重性和顽固性,揭示了航班延误与安全风险的同源性、并发性和诱发性关联,航班延误波及的系统性和随机性安全风险,运用模糊层次分析、人工神经网络、灰色综合评价等方法,特别是贝叶斯网络方法对航班延误安全风险进行了多角度评估。

本书内容贴近民航实际,可作为专业学者研究参考书和高等院校教学参考书,适合交通运输业从业人员和广大旅客阅读。

### 图书在版编目(CIP)数据

航班延误安全风险评估 / 杨英宝等著. —北京: 科学出版社, 2015. 10  
ISBN 978-7-03-046037-0

I. ①航… II. ①杨… III. ①民用航空-航班-延误-安全风险-风险评价-中国 IV. ①F562.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 247924 号

责任编辑: 余 江 张丽花 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 徐晓晨 / 封面设计: 迷底书装

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>

北京东华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2015年10月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2015年10月第一次印刷 印张: 16 1/2

字数: 387 000

定价: 82.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

## 前言

改革开放以来,我国民航得到了长足发展。在这个发展进程中,我国民航长期高于世界民航业发展速度、国家经济发展速度以及国内其他交通运输方式发展速度的骄人业绩,自2005年以来逐年逼近美国民航的世界第二大民航运输系统的大国民航地位,进入21世纪以来特别是近10年来稳步提高的安全生产水平和在世界民航安全管理领域中越来越高的话语权,民航运输对国家经济和社会发展越来越显著的促进作用,社会公众对乘坐民航航班出行越来越多的依重和关注,使每一个民航人感到由衷的自豪。

关于这个进程的发展态势,人们经常用持续、快速、健康这样一组相互关联的正面词汇来描述。在相当长的时期内,我国民航的发展是持续的、快速的、健康的。然而不容忽视的是,近年来虽经不懈治理却迟迟未能达到公众满意的航班延误,使人们看到了一种拖累民航持续发展的重负、制约民航快速发展的阻力和影响民航健康发展的顽疾。其拖累之严重,制约之强劲,影响之深刻,已经在日复一日地侵蚀着民航运输安全、便捷、舒适的传统优势,动摇着民航在交通运输服务质量上的样板地位。社会公众对民航航班正常性的满意度和信任度明显下降,危及民航安全的航班长时间、大面积延误和由此引发的群体性事件时有发生,这些又使每一个胸怀职业自豪感的民航人深感忧虑。

怀着强烈的职业责任感,南京航空航天大学民航学院的科研团队在中国民用航空局的支持下专题立项,从2011年起对航班延误条件下民航安全风险的评估问题进行了较全面的持续研究。研究内容包括国内外对航班延误、安全风险和安全管理的研究现状,我国民航航班延误的现状及其风险源性质,航班延误与安全风险之间的关联形式,航班延误波及民航安全风险的作用机制,对航班延误安全风险的调查分析,以及控制航班延误安全风险的政策建议,特别是作为研究的核心内容,运用多种方式从多个角度探索了航班延误安全风险的评估技术。现在奉献给读者的这本书,记载了我们团队历时三年研究的主要成果。

我们在研究过程中深深感到,航班延误对安全风险的波及影响已经越来越受到我国民航全行业的高度重视。例如,针对2014年下半年以来深圳地区由大面积航班延误引发的多起重大社会影响事件,特别是2015年5月因航班严重延误导致接连发生的旅客开舱门事件、航班旅客闯入廊桥事件、航班旅客先于机组到达机位事件以及航空公司员工与旅客冲突等群体性事件引发的社会关注和安全风险,中国民用航空局在专项调查基础上于2015年7月底向全行业发出批评通报,对处置大面积航班延误不力的机场和航空公司等责任单位进行了严肃处理。又据中国民用航空局2015年8月发布的关于维护民用航空秩序保障航空运输安全的通告,在机场和航空器内严禁11种危及民航安全的行为,其中,在机场内堵塞、强占、冲击值机柜台、安检通道及登机口或登机通道,违反规定进入机坪、跑道和滑行道,强行登占、拦截航空器,攀越、损毁机场防护围界以及其他安全防护设施等严禁行为,都是针对近年来各地机场由航班延误引发的少数旅客过激行为而提出的。这些情况表明,我国民航在安全管理实践中对航班延误安全风险的认识在不断提高。



另一方面，虽然航班延误和安全风险都是当下民航领域研究的热点问题，国内外民航界在航班延误和安全风险两个方面都有不少研究成果，但是现有研究往往忽略了二者之间的内在联系。一个令人颇为费解的现象是，在国内外文献中，目前尚未检索到将航班延误和安全风险结合起来进行系统研究的相关报道。显然，将航班延误和安全风险分开来进行研究，难以充分揭示航班延误与民航安全风险之间的内在联系。我们在调研过程中也体会到，忽略航班延误与安全风险之间的内在联系，是迄今在我国民航仍然广泛存在的一种认识惯性。这种理论研究滞后于民航安全管理实践的状况亟待克服。我们希望本书就航班延误安全风险评估问题进行的探索性研究能够引起学界、业界和广大旅客关注，以求对克服上述认识惯性有所推动。

航班延误和安全风险都是民航运输生产中的复杂问题，把二者结合起来在统一的系统框架下进行研究更不是一件容易的事。为了确保探索取得成果，我们对研究范围做了必要的限定。在航班延误波及的系统风险和随机风险中，考虑系统风险的普遍性，我们在兼顾随机风险的同时，把研究重点放在系统风险上。在与航班延误密切关联的同源性风险、并发性风险和诱发性风险中，考虑不同类型航班延误及其风险发生的实际情况，我们对并发性风险只做了简要讨论，把研究重点放在伴随各种多发性航班延误出现的同源性风险上，并对大面积严重航班延误引致的诱发性风险给予了较多关注。尽管有了这些限定，我们在研究过程中仍时常感到力不从心。这既反映出我们研究能力有限，也说明了研究任务的艰巨性。对于前者，我们将在后续研究中努力提高，也请各位读者多多赐教。对于后者，我们希望本书能起到抛砖引玉的作用，吸引国内外专家学者更多地关心民航航班延误的安全风险问题，即使只能激起批评和不同意见的争鸣，我们也感到十分荣幸。

评估民航航班延误安全风险的目的在于认识其形成和发展规律，在此基础上对航班延误安全风险进行更自觉、更有效的控制，这将有益于提高我国民航的持续安全水平，促进民航业持续健康发展，为广大旅客创造更便捷、更安全的航空旅行环境，具有重要安全效益和社会效益。我们希望本书面向航班延误安全风险这一民航安全生产中新的现实问题开展的探索研究，能够有助于我国民航提高管理航班延误安全风险的主动性，提高在世界民航安全管理领域的引领能力和话语权。我们愿意以本书出版作为新的开端，在民航内外各界人士的大力支持下，为深化航班延误安全风险研究继续尽绵薄之力。

作者

2015年9月9日

# 目 录

## 前言

|       |                     |    |
|-------|---------------------|----|
| 第 1 章 | 概述                  | 1  |
| 1.1   | 研究背景                | 1  |
| 1.2   | 国内外研究现状             | 3  |
| 1.2.1 | 航班延误研究现状            | 3  |
| 1.2.2 | 民航安全管理研究现状          | 5  |
| 1.2.3 | 民航安全风险研究现状          | 7  |
| 1.3   | 研究重点                | 8  |
| 1.3.1 | 理论研究                | 8  |
| 1.3.2 | 实证研究                | 9  |
| 1.3.3 | 应用研究                | 9  |
| 第 2 章 | 航班延误现状及其风险源性质       | 11 |
| 2.1   | 我国民航航班延误现状          | 11 |
| 2.1.1 | 航班延误总体形势不容乐观        | 11 |
| 2.1.2 | 航班延误在繁忙航线和机场尤为严重    | 12 |
| 2.1.3 | 繁忙航线和机场的航班延误具有全局性影响 | 12 |
| 2.1.4 | 天气和流量是航班延误的主要致因     | 13 |
| 2.1.5 | 对航班延误致因的研究有待深入      | 14 |
| 2.2   | 航班延误的普遍性            | 14 |
| 2.3   | 航班延误的顽固性            | 15 |
| 2.4   | 航班延误的严重性            | 16 |
| 2.5   | 航班延误的安全风险           | 18 |
| 第 3 章 | 航班延误关联安全风险          | 19 |
| 3.1   | 同源性关联               | 19 |
| 3.1.1 | 关联机理                | 20 |
| 3.1.2 | 关联因素                | 21 |
| 3.2   | 并发性关联               | 26 |
| 3.3   | 诱发性关联               | 27 |
| 3.3.1 | 关联环节                | 27 |
| 3.3.2 | 航班延误链的累积效应          | 30 |
| 3.3.3 | 航班延误诱发安全风险          | 31 |
| 3.4   | 航班延误的复合风险           | 31 |
| 3.4.1 | 作用机制                | 31 |
| 3.4.2 | 航班延误复合风险建模          | 33 |

|       |              |    |
|-------|--------------|----|
| 第 4 章 | 航班延误波及安全风险   | 37 |
| 4.1   | 评估工具选择       | 37 |
| 4.1.1 | 主要的评估工具      | 37 |
| 4.1.2 | 贝叶斯网络        | 39 |
| 4.2   | 风险形成机制       | 42 |
| 4.2.1 | 系统性风险        | 42 |
| 4.2.2 | 随机性风险        | 46 |
| 4.3   | 系统性风险评估      | 47 |
| 4.3.1 | 结构维描述        | 47 |
| 4.3.2 | 时间维描述        | 47 |
| 4.3.3 | 评估步骤         | 48 |
| 4.4   | 随机性风险评估      | 48 |
| 4.4.1 | 描述方法         | 48 |
| 4.4.2 | 求解算法         | 49 |
| 4.5   | 基于贝叶斯网络的风险评估 | 52 |
| 4.5.1 | 航班延误影响因素分析   | 52 |
| 4.5.2 | 定性分析         | 53 |
| 4.5.3 | 定量分析         | 54 |
| 4.5.4 | 算例           | 57 |
| 第 5 章 | 航班延误安全风险调查分析 | 59 |
| 5.1   | 评估指标设计原则     | 59 |
| 5.2   | 波及性影响指标      | 60 |
| 5.2.1 | 航班延误时长       | 60 |
| 5.2.2 | 日延误航班数       | 60 |
| 5.2.3 | 日延误旅客人数      | 61 |
| 5.2.4 | 航班延误处置情况     | 61 |
| 5.3   | 同源性关联指标      | 62 |
| 5.3.1 | 自然环境因素       | 63 |
| 5.3.2 | 人工环境因素       | 65 |
| 5.3.3 | 人的因素         | 67 |
| 5.3.4 | 设备设施因素       | 68 |
| 5.3.5 | 管理因素         | 72 |
| 5.4   | 指标的赋值        | 77 |
| 5.4.1 | 分专业赋值        | 77 |
| 5.4.2 | 分层次赋值        | 77 |
| 5.4.3 | 关联赋值         | 78 |
| 5.4.4 | 互动赋值         | 78 |
| 5.5   | 调研数据分析       | 78 |
| 5.5.1 | 数据处理         | 78 |

|            |                     |            |
|------------|---------------------|------------|
| 5.5.2      | 航班延误波及安全风险          | 85         |
| 5.5.3      | 同源性关联——延误致因         | 86         |
| 5.5.4      | 同源性关联——风险致因         | 88         |
| 5.5.5      | 延误致因与风险致因的关联性       | 90         |
| <b>第6章</b> | <b>航班延误安全风险评估初探</b> | <b>92</b>  |
| 6.1        | 机场子系统航班延误安全风险因素     | 93         |
| 6.2        | 评估指标体系              | 94         |
| 6.3        | 经典评价方法              | 95         |
| 6.3.1      | 层次分析法               | 96         |
| 6.3.2      | 模糊综合评价法             | 98         |
| 6.3.3      | 模糊层次分析法             | 99         |
| 6.3.4      | 人工神经网络法             | 100        |
| 6.3.5      | 灰色综合评价法             | 101        |
| 6.3.6      | 经典评价方法比较            | 102        |
| 6.4        | 经典方法评估实例            | 103        |
| 6.4.1      | 人工神经网络风险评估          | 103        |
| 6.4.2      | 模糊层次分析风险评估          | 105        |
| 6.5        | 贝叶斯网络方法风险评估         | 111        |
| 6.5.1      | 构建网络                | 112        |
| 6.5.2      | 确定节点的条件概率表          | 112        |
| 6.5.3      | 更新节点的边缘概率           | 113        |
| 6.5.4      | 模型推理及评估实例           | 117        |
| <b>第7章</b> | <b>航班延误安全风险评估二探</b> | <b>119</b> |
| 7.1        | 风险评估在机场安全管理中的地位     | 119        |
| 7.2        | 评估指标体系              | 121        |
| 7.2.1      | 人员子系统               | 122        |
| 7.2.2      | 设备设施子系统             | 124        |
| 7.2.3      | 环境子系统               | 126        |
| 7.2.4      | 安全管理子系统             | 126        |
| 7.3        | 风险因素模糊聚类            | 128        |
| 7.3.1      | 基本概念                | 129        |
| 7.3.2      | 分析步骤                | 130        |
| 7.4        | 模糊聚类风险分析实例          | 133        |
| 7.4.1      | 数据处理                | 134        |
| 7.4.2      | $\lambda$ 值的确定      | 136        |
| 7.4.3      | 模糊聚类结果分析            | 142        |
| 7.5        | 贝叶斯网络安全风险评估         | 143        |
| 7.5.1      | 方法的适用性              | 143        |
| 7.5.2      | 建模工具                | 144        |

|        |                  |     |
|--------|------------------|-----|
| 7.5.3  | 评估过程             | 144 |
| 第 8 章  | 航班延误安全风险评估三探     | 153 |
| 8.1    | 从航班延误到风险管理       | 153 |
| 8.1.1  | 航班的正常与不正常        | 153 |
| 8.1.2  | 航班延误致因           | 154 |
| 8.1.3  | 航班延误的安全风险        | 155 |
| 8.1.4  | 风险管理             | 155 |
| 8.2    | 安全风险与航班延误的同源性关联  | 156 |
| 8.2.1  | 指标设计原则           | 157 |
| 8.2.2  | 指标设计             | 158 |
| 8.2.3  | 数据收集与处理          | 159 |
| 8.2.4  | 结果分析             | 160 |
| 8.3    | 航班延误安全风险模糊综合评估   | 161 |
| 8.3.1  | 建模步骤             | 163 |
| 8.3.2  | 实例分析             | 165 |
| 8.4    | 减少航班延误安全风险的管理策略  | 168 |
| 8.4.1  | 贝叶斯网络模型补充        | 168 |
| 8.4.2  | 构建模型             | 171 |
| 8.4.3  | 多指标同源性关联评估       | 174 |
| 8.5    | 基于同源性关联的安全风险管理策略 | 176 |
| 第 9 章  | 航班延误安全风险综合评估     | 179 |
| 9.1    | 航班延误影响强度         | 179 |
| 9.2    | 安全风险影响强度         | 182 |
| 9.3    | 各因素风险评估          | 186 |
| 9.4    | 复合风险分析           | 199 |
| 第 10 章 | 控制航班延误安全风险的对策建议  | 203 |
| 10.1   | 充分认识航班延误的安全风险    | 203 |
| 10.2   | 正视矛盾, 实事求是       | 203 |
| 10.3   | 标本兼治, 重在治本       | 205 |
| 10.4   | 追根求源, 综合治理       | 206 |
| 10.4.1 | 天气原因             | 206 |
| 10.4.2 | 航空公司原因           | 206 |
| 10.4.3 | 空中交通管制原因         | 208 |
| 10.4.4 | 机场原因             | 208 |
| 10.4.5 | 旅客原因             | 209 |
| 10.5   | 改革创新, 拓展资源       | 209 |
| 10.5.1 | 进一步理顺空管体制        | 210 |
| 10.5.2 | 合理划分管制区域         | 210 |
| 10.5.3 | 大力改善空管系统基础设施     | 211 |

10.5.4 积极发展新航行系统 ..... 211

10.6 全面着力，突出重点 ..... 211

10.7 研究规律，协同治理 ..... 212

10.8 以人为本，强化激励 ..... 213

结语 探索航班延误与安全风险的内在联系 ..... 214

参考文献 ..... 217

附录 1 航班延误波及民航安全风险评估技术研究调查表 ..... 223

附录 2 航班延误波及民航安全风险评估技术研究调研报告 ..... 225

后记 ..... 251



# 第1章 概述

## 1.1 研究背景

改革开放以来,我国民航一直在以高于世界民航业的平均水平一倍以上的速度持续快速发展。2013 年,我国民航业完成旅客运输量 3.5397 亿人次,比 2012 年增加 3461 万人次,增加 10.8%,如图 1.1 所示。运输周转量 671.72 亿吨公里,比 2012 年增加 61 亿吨公里,增加 10.1%,如图 1.2 所示。截至 2013 年年底,我国民航在册运输飞机达到 2145 架,比 2012 年增加 204 架<sup>[1]</sup>。预计到 2020 年之前,我国民航仍将以年均 10%左右的速度继续增长。自 2005 年以来,我国民航一直稳居国际民航组织成员国第二大航空运输系统的地位,仅次于目前居第一位的美国,而且与美国的差距仍在迅速缩小。

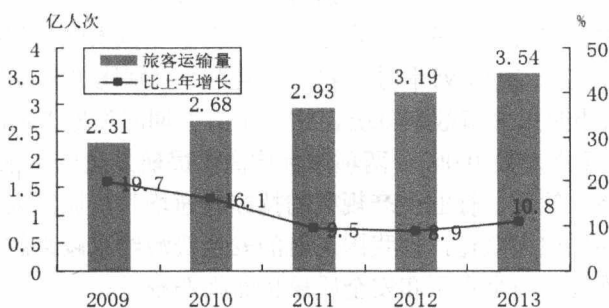


图 1.1 2009~2013 年中国民航旅客运输量

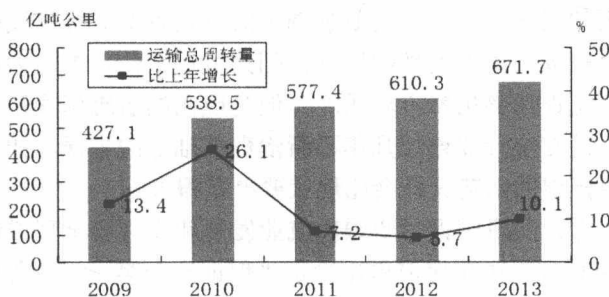


图 1.2 2009~2013 年中国民航运输总周转量

我国民航的持续快速发展为国家经济社会发展做出了巨大贡献。民航是国家经济社会发展中重要的战略性、先导性基础产业,是国家综合交通运输体系中应用现代科学技术最广泛、最具现代化特征的重要组成部分。民航的发展在国家交通运输体系乃至整个国民经济的产业结构升级中占有重要地位,对国家航空制造业和旅游业等经济部门的发展具有重要的促进作用。2012 年 7 月,国务院发布了《关于促进民航业发展的若干意见》(以下简称《意见》),这是指导我国民航今后一个时期发展的纲领性文件。《意见》把

民航业的发展上升到国家战略层面,为我国民航的科学发展注入了强大动力。在新的历史起点上,中国民航业正在奋发努力,积极为国家经济社会发展做出更大的贡献。

我国民航持续快速发展为民航业自身的发展开拓了巨大的空间。据国际航空运输协会(International Air Transport Association, IATA)统计,2012年,全世界民航业共盈利折合人民币360多亿元,而仅中国民航一家就盈利达295亿元,其中航空公司盈利209亿元,约占世界民航业盈利总额的60%<sup>[2]</sup>。在世界民航业自2007年世界金融危机以来发展持续陷入低迷的大环境下,我国民航业一枝独秀。这显示了国家经济社会发展对民航业发展的巨大推动力量,显示了我国民航业朝气蓬勃的发展势头。

与此同时,我国民航持续快速发展对行业自身的发展形成了巨大压力,航班延误是这种压力的一个主要表现。在全国各地每天都在频繁发生的航班延误,已经使许多旅客怀疑民航快捷、舒适、方便的基本优势,这影响了民航在国家经济社会发展和综合交通运输体系现代化中发挥应有的作用。在一些繁忙机场上时有发生严重航班延误引发的混乱局面已经直接影响到民航运行秩序,一些由航班延误引发的个别旅客过度维权等群体事件已经造成了恶劣的社会影响。

另一方面,我国民航持续快速发展也对行业的飞行安全形成了巨大的压力。经过几代民航人的不懈努力,我国民航的安全水平已经取得了令世人瞩目的提高。“十一五”期间,中国民航运输飞行2036万小时、976万架次,分别比“十五”期间增长95%和81%,运输飞行百万小时重大事故率0.05,比“十五”期间降低74%;百万架次重大事故率0.1,亿客公里死亡人数0.003,两项指标均高于民航发达国家水平<sup>[3]</sup>。“十二五”期间又有了新的提高。然而,行业生产规模的持续快速增长,旅客人群在规模上的持续快速增长和结构上的日益大众化,使我国民航的安全资源约束越来越紧张,持续安全的健康发展面临严峻挑战,安全水平和安全质量也面临严峻考验。

我国民航的航班延误问题已经受到社会公众的高度关注和中央领导的高度重视。在2008年年初的民航工作会议上,时任国务院副总理、分管民航工作的张德江同志明确指出“航班正点是最大的服务质量”,突出强调了航班正点率对提高民航服务质量的重要性。近年来,中国民航局一直把治理航班延误列为重点工作,整治力度越来越大。虽然目前我国民航的航班延误形势仍然不容乐观,但是现在的航班延误是在行业持续发展到更大规模上的延误,是在全行业连续几年不断治理基础上的延误。如果没有这种持续的治理,我国民航航班延误的形势无疑会比现状要严重得多。

从事物的本质上看,航班延误对我国民航业发展和飞行安全形成的压力是相互关联的。1957年,周恩来总理对中国民航做出批示“保证安全第一,改善服务工作,争取飞行正常”,深刻揭示了民航服务质量和飞行安全的统一性。2010年,中国民航局局长李家祥强调,航班正常工作是一项系统工程,民航各个运行单位之间要紧密团结协作,形成完整的安全链和无缝隙的服务链。他对航班延误的系统工程观点进一步揭示了航班正常和飞行安全的整体性联系。

本书从对航班正常和飞行安全之间整体性联系的基本认识出发,专题研究航班延误对民航安全风险的波及影响,研究工作围绕以下3点基本认识展开:

(1)航班延误是一种重要的安全隐患,它与安全风险之间存在着同源性、并发性和诱发性等多种方式的复杂关联,可以通过各种关联方式波及民航安全风险。这些安全风险

如果得不到及时控制而积累到一定程度,就有可能酿成不同层次的不安全事件;在一些条件下,航班延误可以直接转化为不安全事件。

(2)关联性是系统的基本属性。航班延误和安全风险之间的复杂关联,使他们共存于民航安全生产系统。在民航安全生产过程中,应该更多地关注航班正常与民航安全的共存和统一,关注两者之间循环递进的双向联系。一方面,航班延误可能酿成各种不安全事件;另一方面,不安全事件也是造成航班延误的重要因素;由航班延误导致的不安全事件有可能反过来造成更大面积的航班延误。

(3)在建设民航强国的进程中,安全具有第一位的重要性。经过几十年的不懈努力,我国民航已经取得了世界一流的安全业绩。在今后的安全监督管理中,我国民航要持续引领世界民航安全的发展潮流,应该更加重视航班延误与安全风险的关联性。深刻认识航班延误的各种致因,采取各种有针对性的应对措施,取得旅客更多的理解和配合,持之以恒地治理航班延误,这是降低民航生产的安全风险,前移安全关口的有效途径。

以上3点基本认识是本书研究航班延误安全风险评估问题的出发点和落脚点。

## 1.2 国内外研究现状

航班延误和安全风险都是国内外民航业研究的热点问题,目前国内外民航业对航班延误和安全风险都有不少研究,在这两个方面都有不少研究成果。但是传统的做法都是对航班延误和安全风险分别进行研究,很少关注两者之间的整体性联系。迄今为止,尚未检索到将两者结合起来进行研究的文献和相关技术报道。

### 1.2.1 航班延误研究现状

在航班延误方面,学者们的研究主要集中在航班延误的成因及延误的传播效应上。

发达国家较早开展了民航航班延误问题的研究,一些研究成果已经成为航空公司与机场运营中的指导性依据,取得了很好的效果。Luo S., Yu G. 和 Ruter S. M. 等认为,跑道容量不足是导致航班延误的首要原因,因此应当采取相应的应对措施,例如修建新跑道,增加跑道和滑行道容量,改善空中流量控制设施和流程,从而改进离港和降落顺序,提高机场容量和降低航班延误。这些方法需要大量的资金,会对环境造成很大影响,而且需要一段很长的时间才能实施完成<sup>[4,5]</sup>。Xu Ni.等通过建立贝叶斯网络模型,对美国3个枢纽机场间的航班延误数据进行处理,分析了航班延误的传播影响<sup>[6,7]</sup>。Lisa Schaefer L.和 Millner D.利用 DPAT 工具,对机场间的航班延误传播进行建模,研究了由于天气原因造成机场容量变化所带来的影响<sup>[8]</sup>。Wang P. T. R.等提出了一个分析模型,显示空域容量、流量需求和航线规划松紧度等因素之间的相互作用。该模型可以跟踪机场间的航路,包括航班经过的各个限制区和航路区的横断面,跟踪在航班延误过程中,机场和航路的容量变化,流量需求的变化,以及航线计划的松紧度等因素的影响<sup>[9]</sup>。他们提出的另一个分析模型可以分离影响航班延误及其传播的可控制因素与随机变化因素<sup>[10]</sup>。Hansen M.研究了航班延误对机场容量的影响,提出了针对机场空域容量的航班延误预测仿真算法<sup>[11]</sup>。Jonathan B.和 Yu G.研究了航班延误恢复的调度算法<sup>[12]</sup>。Roger B., Lee B.和 James R.研究了航班延误传播的预评估方法,提出了一种延迟乘数的概念,研究了航班延误传

播对航空公司的影响<sup>[13]</sup>。Kondo A.分析了点对点式航线网络与枢纽式航线网络对航班延误的不同传播效应<sup>[14]</sup>。Milan J.对航班延误进行了系统分析,将导致航班延误的因素分为内部因素与外部因素。其中,内部因素主要指航班的需求与航空运输系统容量的不平衡,可以通过优化现有机场跑道和限制区的容量来改善需求与容量的平衡状况<sup>[15]</sup>。Bratu S.等从经济学角度介绍了一种航班优化模型。在不正常航班发生时,在考虑多方面因素的情况下如何使总运营成本和乘客总延误成本最小化,目标是在各种成本之间找到一个平衡点<sup>[16]</sup>。L. Delgado 和 Prats X.提出,在空中交通流量管理过程中,适当降低飞机在航路上的飞行速度可以缓解地面航班延误。由于巡航高度和巡航速度的变化都会对航班延误及飞机的燃油成本产生影响,这对于我国民航具有重要的指导意义和经济价值<sup>[17]</sup>。Rodrigo B., Martin D.和 Augusto V.分析了航班延误对旅客需求和票价的影响,计算了航班延误对轮挡时间和理想飞行时间的影响,认为航班延误会减少旅客需求,损害消费者和航空公司的利益;航空公司利益受损的程度是消费者的3倍,因此航空公司需在弥补延误损失方面投入更多的精力<sup>[18]</sup>。Baumgarten P., Malina R., Lange A.采用经验法分析了美国国内航空公司航线网络中,枢纽机场发生航班延误的影响,认为航空公司在制定航班计划时,需要设置缓冲时间,以缓解航班延误造成的影响,否则将会增加航空公司航线网络运行的难度<sup>[19]</sup>。

我国在航班延误的预警及处理等方面也进行了深入研究,取得了一些喜人成绩。这些研究成果结合了中国民航业的特殊性,因此相比国外的研究成果更具有说服力,在帮助我国民航减少航班延误、提高航班正常率方面具有更多的指导价值。

许巧莺等将铁路运输的理论成果应用于航班延误传播,研究航班延误的延滞影响,分析航班延误的扩散范围,提出了一套应对航班延误的策略<sup>[20]</sup>。石丽娜以预警管理理论为基础,在调查多家航空公司航班延误情况的基础上,建立了航空公司航班延误预警评价指标,运用多级模糊综合评判方法构建评价模型,给出了航班延误预警管理的方法<sup>[21]</sup>。徐肖豪和李雄研究了航班地面等待过程中的延误成本问题,建立了单元受限地面等待问题的数学模型,分析了航班延误成本的构成,给出了航班延误显性成本的计算方法,并将其应用于数学模型中目标函数的计算<sup>[22]</sup>。刘光才、刘雷研究了美国民航减少航班延误的方法,包括容量提升和需求管理方法,提出了我国要从根本上降低航班延误率的建议,包括加强基础设施建设、提升空域容量和优化资源配置等<sup>[23]</sup>。刘玉洁认为,航班延误多发生在繁忙的枢纽机场,枢纽机场是航班链中的关键环节,以枢纽机场为研究对象对航班延误的传播效果进行了预测,建议将航班延误情况及时向航空公司和乘客发出预警,以采取针对性的措施<sup>[24]</sup>。陈坦坦将高级 Petri 网模型应用到航班延误链式反应及传播效果分析,推导出平均飞机延误传播时间和飞机延误传播时间的计算公式,为建立航班延误预警与传播分析系统提供了理论工具<sup>[25]</sup>。姚韵、朱金福采用可拓关联函数对不正常航班进行预警,同时选取滞留的旅客人数、航班平均延误的时间、运力的调配富余度等指标构建指标体系,通过对模型的实例仿真,为不正常航班的服务环境状况提供预警信息<sup>[26]</sup>。吕宗平、胡欣、丁建立从航班延误造成的后果入手,提出滞留旅客数量、平均延误时间、延误航班数等指标,建立多层次的航班延误指标体系与预警量级,采用模糊综合评判法对航班延误进行预警分析<sup>[27]</sup>。张亮在分析航班运行过程的基础上,建立了航班延误统计指标体系,进行了延误等级评估研究<sup>[28]</sup>。全冠生将生物免疫系统机制与机场航班运行机

制联系起来,提出了基于免疫否定选择算法的枢纽机场航班延误检测与预警方法<sup>[29]</sup>。舒莉对航空公司航班延误服务补救策略进行了研究<sup>[30]</sup>。徐涛等提出了一种基于贝叶斯网络的航班延误预测与传播分析模型,通过设定各因素的属性信息,可以对航班是否发生延误及其延误级别进行概率预测<sup>[31]</sup>。郑晓洋提出了延误传播指数和航班延误成本指标,建立了一个航班延误传播严重时的航班取消策略遍历模型<sup>[32]</sup>。董钰就大规模航班延误恢复调度模型进行了研究,其中延误成本的构成包括了取消成本、旅客时间损失、航空公司运营成本等<sup>[33]</sup>。刘小飞建立了基于数据挖掘的航班延误预测模型,提出了一个融合先验知识的支持向量机回归方法<sup>[34]</sup>。计金玲提出了基于生物免疫应答机制的航班延误恢复调度模型,对离港延误航班进行了仿真实验,验证了模型的有效性<sup>[35]</sup>。赵秀丽等从航空公司的角度出发,建立以航班延误时间较短和航班延误成本较小为目标函数的航班恢复模型,提出旅客失望溢出成本和失望溢出率的概念,根据实际情况选择不同的目标函数,借助匈牙利算法和启发式算法求出目标函数的解,该模型指出了发生航班延误时,应如何调整航班计划表,使航班尽快恢复正常<sup>[36]</sup>。刘雄分析了航班延误对枢纽机场造成的影响,提出枢纽机场航班延误预警管理的原理、方法和流程等,主要采用灰色综合评价模型对枢纽机场的航班延误进行预警评估,利用实例仿真验证了模型的可靠性<sup>[37]</sup>。丁建立、李华峰提出利用危险模式和灰色预测相结合的方法预测航班延误,以实例验证了方法的可行性,所建模型具有良好的预测能力<sup>[38]</sup>。

综上所述,国内外对于航班延误的研究较多关注延误成因分析、减少延误导致的不良影响、航班延误的恢复算法、航班延误时旅客满意度以及航班延误发生后的事后管理等,未见以航班延误为切入点对安全风险进行的系统研究。这反映出目前国内外民航业对航班延误诱发安全风险的规律性还缺乏系统认识,理论研究滞后于民航安全管理实践的客观需要。

## 1.2.2 民航安全管理研究现状

如何提高民航安全管理水平,保障公众安全出行,世界民航业一直对此进行着不懈探索。这方面的研究成果集中体现在世界各国对民航安全管理体系(Safety Management System, SMS)的理论探索和建设实践上。

2003年,国际民航组织(International Civil Aviation Organization, ICAO)在公约附件14中明确提出有关安全管理体系的概念及建设SMS的要求。2006年,国际民航组织修订公约附件6、11和14,要求成员国在机场、空中交通管制(以下简称“空管”)和飞行运行等单位建立安全管理体系,明确规定航空安全管理的方法。2008年,国际民航组织修订附件1、6、8、11、13和14,对成员国建设民航安全管理体系提出更具体的要求,并要求推进内容更全面的国家航空安全纲要(State Safety Program, SSP),要求成员国在政府层面制定和实施保证国家总体航空安全的规章和行动方案。为了推动安全管理体系的建设,国际民航组织发布并修订了《安全管理手册》(Doc 9859),针对航空公司、机场、空管等相关单位说明了建设安全管理体系的重要性及方法。《安全管理手册》倡导以风险管理控制为中心、以实现系统安全为目标的管理理念<sup>[39, 40]</sup>。

国际民航组织将安全管理体系定义为“一个管理安全的方法,其中包括必要的组织结构、责任、政策和程序”。构建安全管理体系的目标是提高对安全主客观情况的认识,



促进安全基础设施标准化建设,提高民航风险分析和评估能力,维护并增加安全的有效性,加强事故防范以及补救行动,在内部持续进行事故征候监控等。安全管理体系基于四大支柱建立,即安全政策、安全风险管理、安全保证和安全促进。这四大支柱保证了安全管理体系的有效性和稳定性<sup>[40]</sup>。

### 1. 安全政策

以质量管理体系为原则,规定相应的程序和政策、制度,说明期望、责任和权利等内容,为安全生产提供政策保障。

### 2. 安全风险管理

通过风险评估和改善措施将风险控制在可承受的水平以下,在降低风险、保障安全的情况下实现安全管理的目标。

### 3. 安全保证

在实施对安全的监控、评估、分析和控制的活动过程中,对风险进行定期的复查和反馈,确保安全生产。安全保证与安全风险管理之间要协调配合工作,保证安全管理体系在应用过程中发挥有效的作用。

### 4. 安全促进

安全管理体系的最终目标是促进安全生产。安全促进作为安全管理体系的最后一个支柱,需要将促进安全生产作为企业的核心价值观,在安全生产过程中不断总结完善政策、程序,确保企业安全有序的生产。

从世界范围看,安全管理体系的概念在国际民航业一直未形成统一的理论和实践模式,国家航空安全纲要也还在推进过程中。率先提出安全管理体系的加拿大等国和国际民航组织提出的民航安全管理体系概念偏窄,基本上局限于列明有关规章标准,规定企业自查或报告的要求等。在作为民航安全管理重要内容的风险控制方面,对民航风险评估方法的实用性研究尚处于探索阶段。美国联邦航空局(Federal Aviation Administration, FAA)对民航安全实行符合性管理,审查航空单位运行与国际组织、国家和行业制定的各种规章和标准的符合情况,同时采用单一指数法反映行业安全状况<sup>[41]</sup>,采用 ATOS 系统收集民航安全信息<sup>[42]</sup>,在此基础上进行风险评估。国外众多与航空安全相关的组织和学者近年来在民航安全、事故分析、安全法规体系、安全管理体系、风险控制、安全监察、安全文化等方面做了许多专题研究,推动了民航安全管理的改革和创新。美国的 Stolzer A. J., Halford C. D.和 Goglia J. J. 三位学者 2010 年出版了 *Safety Management System in Aviation* 一书,全面深入地阐述了安全管理体系,作者运用高质量管理方法和工具介绍安全管理体系,认为高质量的管理原则是建立高效安全管理体系的基础,在此基础上对安全管理体系作了详细的讨论<sup>[43]</sup>。

在机场安全管理方面,Hale 针对荷兰史基浦机场,对机场组织间的安全管理作了详尽阐述,提出了事故发生后的安全管理技术<sup>[44]</sup>。Edkins G.D.将航空安全文化、员工对航空安全隐患的感知、员工报告安全隐患的意愿、对已发现安全隐患的执行力等指标运用

在航空安全管理标准评估中<sup>[45]</sup>。Smart K.通过英国航空事故调查部门的事故数据,发现机场安全保障问题是一些空难发生的重要致因<sup>[46]</sup>。Wong D.K.Y.等对机场等单位存在的安全风险因素进行了识别和分类<sup>[47]</sup>。

国内学者在这一领域也做了大量的理论探讨和管理实践。2007年,时任中国民航总局副局长的王昌顺在其博士学位论文《中国民航安全管理研究》中,运用多种分析方法对我国民航的安全管理进行了深入研究,文中使用的经济学周期波动理论、安全经济学理论等方法颇具创新性<sup>[48]</sup>。李洋在其学位论文《我国民航安全管理系统研究》中,对比研究了国内外民航安全管理系统建设实践,以独特的视角综合研究了我国民航安全管理整体情况,将公共管理与安全风险作为一个整体进行研究,对我国民航安全管理体系建设中反映出的问题做了归纳,提出若干条符合我国民航安全管理系统建设特点的意见<sup>[49]</sup>。本书作者2013年出版专著《民航安全系统工程》,以系统工程理论为指导,从人的系统、设备系统、环境系统、管理系统、信息系统以及应急救援系统等基本子系统入手,研究各子系统的功能结构及相互影响;从安全调查、安全分析、风险评估、监管审计和管理决策等基本环节入手,研究了民航安全生产管理的基本流程<sup>[50]</sup>。吴民胜对现代化大型国际机场安全防范系统的设计进行了构思<sup>[51]</sup>。高凯对民航机场灾害预警管理方法进行了研究,包括民航机场灾害预警系统的原理、指标体系的建立以及系统的开发过程等<sup>[52]</sup>。中国民航大学王永刚在人的因素和组织因素对民航安全的影响方面做了深入研究。武汉大学罗帆、余廉等在航空交通灾害预警管理方面做了开创性的研究工作。西南交通大学的马国忠等利用多层次模糊评估方法研究民航系统安全,计算民航系统的综合安全度。南京航空航天大学胡明华研究了民航空管安全管理体系建设问题,提出我国民航应按照ICAO要求,建设具有适切性、系统性和整体性特征的空管安全管理体系。南京航空航天大学左洪福、王华伟等在航空公司及机务维修领域安全评估方面开展了大量研究。中国民航科学技术研究院在利用飞行数据进行飞行品质监控技术研究方面做了大量研究,先后开展了中国民航人为因素、民航安全经济学应用、中国民航安全管理基础体系、中国民航安全纲要、民航安全风险监测方法、航空安全信息国际共享等多项重要研究工作。

### 1.2.3 民航安全风险研究现状

安全风险,特别是安全风险的因果关系,一直是安全工程领域研究的热点问题。在民航安全领域,国外很多学者在安全风险的因果关系分析建模方面开展了研究。Fedja N.和Milan J.综述了当前民航安全评价中主要的因果模型,介绍了故障树分析(Fault Tree Analysis, FTA)、事件树分析(Event Tree Analysis, ETA)、同源性失效分析和人工智能方法的适用范围和应用现状<sup>[53]</sup>。荷兰交通运输部推行了预防事故、提高安全水平的计划,其研究的重点就是安全风险因果模型,相关研究成果见参考文献[54]、[55]。FAA也专门开展了民航安全风险因果模型方面的研究与应用推广,参考文献[56]分析了技术风险对民航安全的影响,提出了针对性的安全管理对策与建议。参考文献[57]利用采集到的民航事故数据,采用ETA方法进行了民航安全风险源分析。Spouge J.采用ETA和FTA相结合的方法,研究了地面事故的风险控制策略和方法<sup>[58]</sup>。Luxhoj J.和Coit D.利用事故报告系统的数据,采用贝叶斯网络方法,分析了导致事故的原因<sup>[59]</sup>。Roelen A.L.C.,Wever R.和Cooke R.M.等分析了当前使用贝叶斯网络方法进行的安全风险事故因果研究中,面