



通航救援应急调度及低空避险 模型和方法

张 明 著



科学出版社

通航救援应急调度及低空避险 模型和方法

张 明 著

本书获得国家自然科学基金项目
(71271113 和 U1633119) 的资助

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书追踪应急物流和通航飞行安全等科学问题,以安全、高效地实施通航应急救援运行作为研究目标,围绕低空救援系统面临的灾情信息时变性、资源调度动态性、低空避险可靠性三个科学问题,从挖掘阶段性粗糙集规则和融合多源信息的物资分布需求预测,救援资源信息动态变化下救援资源动态调度决策,复杂低空安全态势下多机变高度密集飞行可靠自主避险三个方面研究解决通航低空救援系统的关键性科学问题,系统地介绍通航应急救援的关键理论、模型和方法。

本书可供交通运输规划、应急物流、通航飞行安全理论等领域的教育、科技、管理工作者和高等院校师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

通航救援应急调度及低空避险模型和方法/张明著. —北京:科学出版社, 2017.11

ISBN 978-7-03-055028-6

I. ①通… II. ①张… III. ①航空安全—应急系统—研究 IV. ①V244.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 267296 号

责任编辑:孙伯元 / 责任校对:桂伟利
责任印制:张 伟 / 封面设计:蓝正设计

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>

北京中石油彩色印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 11 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2017 年 11 月第一次印刷 印张:13 1/2

字数:261 000

定价:88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

在抗灾救援及处置突发事件的各项措施中，航空救援具有快速、高效、受地理空间限制少等优势，是世界上许多国家普遍采用的有效手段。但由于灾情和物资需求信息存在动态性、多源性和不确定性，通用航空救援受到地形、天气和航空器性能的制约，这些制约会对通航救援的多种物资和航空器应急调度，以及航空器航迹规划和飞行避险的应急决策，产生重要影响。

通航救援作业类型的特殊性、实施救援主体和业务操作的多样性，给具体的救援实施过程带来一系列挑战。紧急事件和灾害具备很强的突发性，救援越及时，受灾人群获救的概率越高，救灾效果越好，这对救援的时间提出了更为严苛的要求。随着社会和经济的快速发展，需要采用航空技术手段执行的救援任务呈现日趋广泛的特性，从航空遥感的灾区情报收集到大型机械设备的空运，从各类药品、食品等物资的空投到伤员的运送和疏散，无处不在。此外，作为一项极为复杂的系统性工程，通航救援作业涉及预测、监控、决策处置等多个环节。因此，通航救援过程具有时间紧、任务杂、环节多和配合难等特点，需要满足高效和安全的要求。

通航应急调度与低空避险问题的研究可有效提高应急救援的工作效率和安全水平，减少突发事件造成的损失，也是避免贻误施救时机造成更为严重损失的有效手段。本书瞄准《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020 年）》中“突发公共事件防范与快速处置”、“交通运输安全与应急保障”等优先主题，综合多个学科和领域的先进理论及技术，深入探讨影响航空应急科学管理和航空器低空安全运行的若干关键科学问题，完善通航救援应急决策的基础理论和关键技术。

本书围绕低空救援系统面临的灾情信息的时变性、资源调度的动态性、低空避险的可靠性三个科学问题，从建立阶段性粗糙集规则挖掘和多源信息融合的物资分布需求预测、救援资源信息动态变化下救援资源动态调度决策、复杂低空安全态势下多机变高度密集飞行可靠自主避险三个方面研究解决通航低空救援系统的关键性科学问题，在对航空器冲突探测和自主避险的小尺度飞行安全分析的同时，探索低空空域通航应急救援的大尺度动态资源调度，将救援飞行的安全性和资源调度的科学性相融合。上述关键科学问题的研究将为建设低空救援空中交通辅助决策系统奠定理论与技术基础。

本书的主要内容可分为三个部分：第一部分是本书研究背景及综述，包括第

1 章和第 2 章, 介绍本书的研究背景和意义, 以及全书涉及内容的研究进展和评述; 第二部分是救援物资需求分布预测、应急调度和优化选址问题, 包括第 3 章~第 7 章, 主要介绍基于航空器性能的多出救点应急调度、空地联运应急调度、随机风影响下的应急调度以及空地医疗救援起降点选址; 第三部分是低空飞行自主避险问题, 包括第 8 章~第 10 章, 按照救援飞行航迹预测的时段差异, 分别介绍救援飞行航迹规划、短时救援飞行航迹推测及实时救援飞行冲突探测和避险三个层次。

本书是作者近 5 年来在通航应急救援研究的基础上撰写完成的科研成果。研究工作获得了作者主持的国家自然科学基金面上项目“面向飞行安全的低空救援空中交通辅助决策系统关键问题研究”(71271113) 以及国家自然科学基金委员会和中国民用航空局共同设立的民航联合研究基金“不确定信息融合下空地联运协同应急决策若干关键问题研究”(U1633119) 的连续资助。本书的撰写得到周毅、王磊、王硕、喻慧和喻珏等研究生的帮助。研究中所需的地震历史数据得到国家地震局地震数据共享中心的大力支持。在此致以最诚挚的感谢。

在撰写本书的过程中, 作者查阅了国内外应急物流和飞行安全领域最新的研究成果。但通航应急救援是个较新的研究领域, 研究涉及内容多, 许多章节本身就是开放的热点课题。本书尚未涉及的相关问题有待进一步完善, 本书存在的不足之处, 敬请读者批评指正。

张 明

2017 年 7 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究的目的和意义	2
1.3 本书内容安排	3
参考文献	9
第 2 章 通航应急救援研究进展及评述	10
2.1 应急救援资源分布需求预测	10
2.2 应急调度优化模型和方法	12
2.3 航空医疗救援设施优化选址	15
2.4 飞行航迹规划、推测和飞行意图推理	19
2.5 飞行冲突探测和避险	22
2.6 航空应急救援的应用研究进展	25
参考文献	27
第 3 章 不确定灾情信息下的应急资源分布需求预测方法	38
3.1 应急救援资源分布需求预测问题概述	38
3.2 基于反馈补偿 K -means 的历史灾情范例聚类算法	39
3.3 基于反馈补偿 K -means 范例推理法的应急资源需求预测	41
3.4 算例分析	43
3.5 小结	49
参考文献	49
第 4 章 基于航空器性能的多出救点物资应急调度模型	51
4.1 航空器调度问题概述	52
4.2 调度优化模型	55
4.3 求解算法设计	58
4.4 算例分析	63
4.5 小结	67
参考文献	68

第 5 章 基于随机风预测的航空应急调度模型	69
5.1 航空调度规划问题概述	69
5.2 随机风影响下的航空器运动模型	69
5.3 随机风影响下的航空调度规划模型	72
5.4 算例分析	76
5.5 小结	81
参考文献	82
第 6 章 基于动态路网的空地联运协同应急调度模型	83
6.1 空地联运协同调度问题概述	83
6.2 空地联运协同调度模型	84
6.3 算例分析	90
6.4 三种运输方式对比分析	102
6.5 小结	105
参考文献	106
第 7 章 空地医疗救援两阶段起降点优化选址覆盖模型	107
7.1 应急调度方式	108
7.2 空地联运调度选址集覆盖模型	110
7.3 空地联运调度选址最大覆盖模型	113
7.4 求解算法	115
7.5 算例分析	117
7.6 小结	125
参考文献	126
第 8 章 基于三维网格和气象预测的航空器低空航迹规划方法	127
8.1 基于三维空域网格的低空飞行计划航迹初始规划方法	128
8.2 基于气象预测模型的低空航空器规划航迹修正方法	137
8.3 小结	148
参考文献	149
第 9 章 基于混合估计和意图推理的飞行航迹推测技术	150
9.1 混合估计算法	150
9.2 意图推理算法	155
9.3 基于飞行状态和飞行意图的航迹推测算法	160
9.4 案例仿真	164
9.5 小结	168
参考文献	168

第 10 章	多冲突模式下实时救援飞行冲突探测与避险方法	170
10.1	低空救援目视飞行规则	171
10.2	冲突探测与避险总体网络结构	173
10.3	基于航迹推测的冲突探测算法	173
10.4	多机救援冲突模式划分	182
10.5	基于 Agent 模型的实时航迹避险算法分析	187
10.6	基于 Multi-Agent 系统的多机实时飞行冲突避险	195
10.7	小结	207
	参考文献	208

第 1 章 绪 论

通用航空（简称通航）应急救援是应急救援的一种方式，特指使用航空技术手段和技术装备实施的一种应急救援，与其他救援手段相比并无本质差异，但独特之处在于其所使用的技术条件和组织管理方式^[1]。在抗灾救援及处置突发事件的各项措施中，通航救援具有快速、高效、受地理空间限制较少的优势，成为许多国家普遍采用的有效救援手段。

1.1 研究背景

我国是世界上受自然灾害影响最严重的国家之一，据民政部统计^[2]，在一般年份，全国受灾人口约 2 亿人，直接经济损失高达 2000 亿元。尤其近几年，地质和气象灾害频繁发生，具有代表性的有汶川地震、南方冰雪灾害、玉树地震、舟曲泥石流、雅安地震、北川洪灾等，这些灾害均造成巨大数量的人员伤亡和财产损失。除自然灾害外，各种类型的社会安全、事故灾害等突发事件时有发生，已经成为制约我国经济发展和社会稳定的重要因素。在抗灾救援及处置突发事件的各项措施中，通过通航运输救援方式，可以发挥航空运输救援响应速度快、科技含量高、救援效果好、范围广等优势，这是世界上许多国家普遍采用的有效手段。但在航空应急救援体系中，施救的航空器在 1000m 以下的低空运行环境受到地形环境、密集飞行等不确定因素的干扰，以及航空器性能的制约，往往存在安全风险大、施救效率低和实施不科学等问题。同时，灾情和物资需求信息存在动态性、多源性和不确定性，也会对空地联运中的多种物资分配、航空器调度以及车辆调度等的应急决策产生影响。通航救援应急调度和低空避险研究，涉及多个学科和领域的先进理论与技术，能有效地提高救援工作效率及安全水平，同时减少了因突发事件造成的损失，是实施应急救援工作的有效手段。本书针对“突发公共事件防范与快速处置”、“交通运输安全与应急保障”等主题，深入探讨影响航空应急科学管理和航空器低空安全运行的若干关键科学问题，完善通航应急决策的基础理论和关键技术。本书研究内容作为应急保障体系的一个重要方面，对确保科学高效的应急决策和安全可靠的救援飞行意义重大。

1.2 研究的目的是和意义

1.2.1 研究目的

通航救援应急调度和低空避险问题的研究,符合国家航空战略发展需求,对于加快建设有中国特色的国家航空应急救援体系具有重要价值。本书围绕低空救援系统面临的灾情信息的时变性、资源调度的动态性、低空避险的可靠性三个科学问题,从建立阶段性粗糙集规则挖掘多源信息融合的物资分布需求预测技术,救援资源信息动态变化下救援资源动态调度决策,复杂低空安全态势下多机变高度密集飞行可靠自主避险方法三个方面研究解决通航低空救援系统的关键性科学问题,在对航空器冲突探测和自主避险的小尺度飞行安全分析的同时,探索低空空域通航应急救援的大尺度动态资源调度,将救援飞行的安全性和资源调度的科学性相融合,上述关键科学问题的研究将为建设低空救援空中交通辅助决策系统奠定理论与技术基础。

1.2.2 研究意义

本书针对现有的应急资源需求预测、航空应急救援调度及飞行避险等关键科学问题研究中存在的不足展开深入研究,综合运用交通运输工程学、应急预测和决策理论、运筹学等领域最新的理论和技术,采用信息融合技术、飞行仿真技术、数据挖掘技术等领域的最新研究成果,解决通航救援应急调度和低空避险的关键性科学问题,对完善应急救援体系与提升应急保障能力意义重大。

本书的研究具有较强的研究价值和现实意义,主要表现在以下七个方面:

(1) 针对灾情和物资需求信息存在时效性与不确定性,借鉴信息规则挖掘思想,基于历史数据、应急演练的物资需求信息和短期应急需求信息,建立基于阶段性需求信息粗糙集规则挖掘和范例推理多源信息融合的应急物资分布需求预测技术;与以往的物资需求预测研究相比,该方法可有效提高物资动态需求预测的准确度。

(2) 针对救援空域对流天气、道路网的动态变化和救援航空器性能的差异,引入天气与道路网的空间网格模型和航空器性能数据库,以救援时间最短和满足最大物资需求为目标,建立空地联运协同应急调度模型;弥补以往空地联运协同应急调度研究中,忽略航空器性能差异性和天气、路网的动态性导致的调度方案粗放与实施效率低的问题,与空地联运救援实际的贴合度将得到提高。

(3) 针对救援运输形式多样性和单一运输方式局限性,通过建立空地联运的医疗救援集覆盖模型和最大覆盖模型的两阶段选址优化模型,保证优化选址结果

的覆盖特性和经济特性；弥补了单一运输方式带来的救援效率低、经济性差的缺陷，同时也扩大了医疗救援的有效覆盖范围。

(4) 针对航空器救援航迹规划面临的地形和侧风的复杂变化，引入无迹卡尔曼滤波 (unscented Kalman filter, UKF) 算法对低空侧风预报数据融合，并建立基于三维空间网格和时间窗的航空器飞行轨迹安全规划方法；与以往的救援航迹规划研究相比，可有效提高航空器救援航迹规划的准确性，为航空器冲突探测和解脱策略安全实施提供依据。

(5) 针对复杂低空救援飞行环境下的航迹推测问题，给出了基于航空器飞行状态和意图推理的航迹推测 (state-based and intent-based trajectory prediction, SIBTP) 算法。该算法将交互式多模型 (interacting multiple model, IMM) 和改进的意图推理算法 (improved intent inference algorithm, IIIA) 相结合，克服了单个算法的缺陷，将整个航迹推测过程构建在空域三维网格上，简化了算法的复杂性，提高了算法的运算效率。仿真结果表明，SIBTP 算法推测得到的结果比单独使用 IIIA 推测的航迹更加精确，更能够保证实时飞行冲突探测与避险的准确性。

(6) 针对复杂低空环境航空器运行状态时变的安全态势，参照低空目视飞行规则和航空器飞行预警时间，通过建立三维空间网格，基于航空器时空参量和性能指标，建立多机变高度机动飞行的冲突探测模型，与传统的同高度变速冲突探测研究相比，该方法与航空应急救援实际贴合度将得到提高。

(7) 针对复杂的多机协作避险飞行，建立多机飞行避险优先级规则，综合运用人工智能的 Multi-Agent 方法，确定多机密集飞行可靠自主避险方法，弥补传统的冲突避险研究中，忽略冲突模式判定导致的避险安全度不高的问题，将有效提高航空器自主避险的可靠性。

1.3 本书内容安排

本书的研究以航空救援中的物资调度为出发点，通过增加调度架次，提高各个受灾点物资满足率，减小救援飞行在运输过程中的时间与运输成本消耗，以便有效提高救援的效率和水平；同时，从航空器预战术救援飞行航迹规划入手，在实际的飞行过程中，进行飞行航迹推测以及实时通航救援飞行冲突探测和避险，并以航空器从起点到目标点的安全高效飞行为目标。本书主要研究内容是在确保救援高效的前提下，对低空飞行安全进行分析，在确定航空器救援任务以及目视救援飞行规则和避让规则基础上，通过智能优化方法，构建低空飞行自主避险方法，最终实现航空器在低空救援空域安全高效地自主飞行。

1.3.1 研究内容

1. 不确定灾情信息下应急资源分布需求预测方法

应急救援资源的需求预测,受到社会、环境等因素影响,具有很强的时效性和阶段性,同时灾情和物资需求信息有着模糊性和不确定性,灾情发生短时间内获取的信息极为有限,需要在对灾区历史统计数据进行挖掘的基础上预测资源需求分布,以保证预测的准确性。以往的模型不能将历史数据挖掘规则结合到不确定信息融合应急救援物资需求预测中,因而难以获得准确的应急物资需求。

本书在不确定灾情信息条件下,根据历史数据采用模糊粗糙集方法获取救援优先级决策规则,并运用数据挖掘和信息融合技术对初步获取的灾情信息进行信息识别,再运用反馈补偿 K -means 范例推理算法对各受灾点的应急救援物资分布需求进行动态的预测。该内容见本书第 3 章。

2. 基于航空器性能的多出救点物资应急调度模型

目前对于航空救援的研究较少,且大多集中于战略层面的救援体系建设和应急响应研究,战术层面的研究有应急救援指挥中心选址研究以及航空器调度算法的研究,缺乏对于性能差异的救援航空器在多出救点进行多种物质和航空器应急调度研究,并未形成成熟的调度策略和研究思路。

本书对航空器调度问题进行了系统性阐述,从概念性的一般论述到构成要素的组成,再到问题分类,构造了航空器调度问题的优化模型,结合传统的矩阵编码的遗传算法和优化的爬山遗传算法对仿真实例进行结算,完成了分配方案和路径优化。侧重于各类物资及初始运力分布的调度安排,为之后的战术应急调度方案提供指导。该内容见本书第 4 章。

3. 基于随机风预测的航空应急调度模型

需要依据资源需求的动态变化,根据动态天气对航行轨迹的影响、出救点与目的地之间的距离以及航空器的运力,来协同调度从出救点到受灾点或配送中心的物资和运力,满足总体救援时间最短、物资需求满意度最高等要求。以往的研究大多只考虑单一因素对航路的影响或者只考虑航路的规划与航空运输效率,并未将多因素与航空运输相结合,缺乏多种动态天气对航空运输影响的研究,从而使模型趋于理想化,无法应用到航空救援的实际场景中。

本书考虑随机风对航空器飞行轨迹的影响,应用基于无迹卡尔曼滤波的数值气象预报释用技术对航路上的随机风进行预测,分析随机风影响下的航空器运动轨迹,依据速度矢量合成原理,构建航空器运动模型;然后,以物资需求满足率最大、救援优先满意度最大和应急响应时间最短为目标,建立由出救点到受灾点

的航空应急救援调度规划多目标模型；最后，根据上述应急资源预测方法计算出各受灾点的救援优先级和物资需求量，确定航空运输配送方案，完成从出救点到受灾点进行直接救援的航空调度方式。该内容见本书第5章。

4. 基于动态路网的空地联运协同应急调度模型

空地联运救援条件下，需要依据资源需求的动态变化，根据航空器和车辆运力分布、对流天气对航空救援影响以及不同种类物资需求度，来协同调度物资和运力，满足救援时间最短、物资需求度最高的要求。以往的研究大多以单一运输方式为主，或将联运应急调度模型通过理论抽象进行简化，缺乏考虑天气、路段损毁的动态路网、航空器性能差异等对于空地联运的影响，从而使模型趋于理想化，无法应用于空地联运实际中。

本书首先按照距离划分出若干个由出救点-配送中心、配送中心-受灾点组合的交通小区，建立三层救灾网络；其次，考虑道路损毁对地面调度的影响，提取应急交通流数据，构建道路损毁条件下的地面动态路网运输调度模型；再次，借鉴航空应急救援调度方法，结合地面运输调度模型，以总体运输时间最短为线索，构建空地联运协同调度模型；最后，根据应急资源预测方法计算出各受灾点的救援优先级和物资需求量，确定空地联运配送方案，完成从出救点经由配送中心到受灾点的应急救援间接运输调度方式。

其中，空-地联运协同运输调度是指通过预测出的各受灾点物资需求量按照配送中心-受灾点交通小区的划分方式推断出各配送中心的物资需求量，再根据各配送中心的物资需求量划分受灾点-配送中心交通小区，并通过航空调度方式合理地将出救点的航空器及各类物资分配到对应的配送中心，最后通过地面调度方式将配送中心的救援物资分配到各个受灾点（见图1.1），这种救援方式提高了自然灾害的响应效率以及应急救援资源的利用率。该内容见本书第6章。

5. 空地医疗救援两阶段起降点优化选址覆盖模型

科学合理地开展应急医疗救援起降点选址问题研究，最大限度地发挥有限的应急资源的价值，是医疗救援中的一项重要工作。该项研究工作总结如下。①提出空地联运的医疗应急调度方式。针对出救点属性以及航空器在受灾点能否着陆，设置转运点进行转运调度，并对应空地联运（无转运点）和空地转运（有转运点）两种空地结合的应急调度方式进行对比研究。②建立两阶段选址覆盖模型。以覆盖面最大为目标建立集覆盖模型，以应急救援设施建设总成本最小为目标建立最大覆盖模型，集覆盖模型的最优目标函数值作为最大覆盖模型的经济约束，得到最优的航空器和车辆混合配置比例，保证层次模型间的衔接性、选址结果的覆盖特性和经济特性。③构建应急调度方式矩阵，进行模型预处理。基于医疗救援背

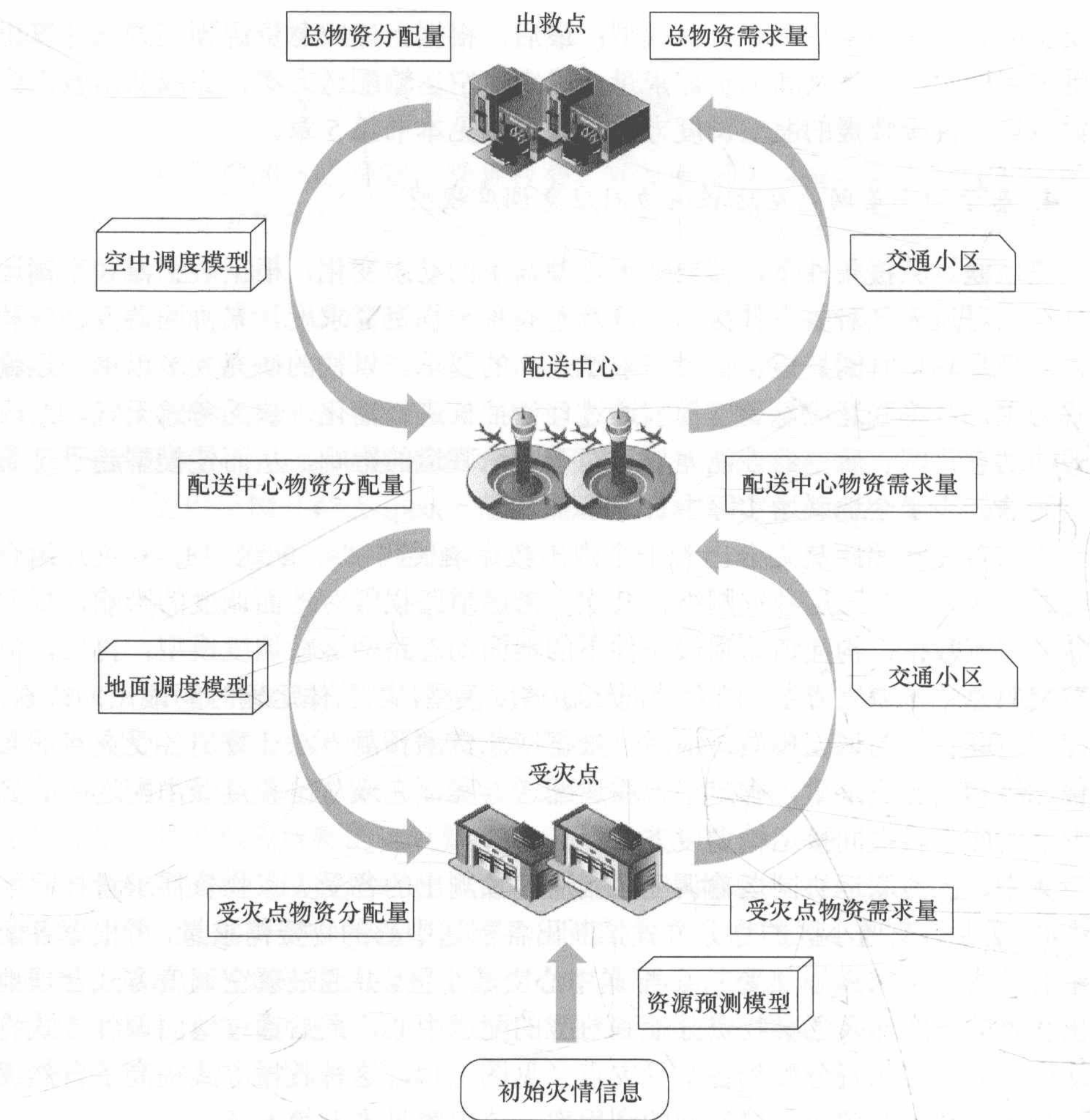


图 1.1 空-地联运流程图

景，将总救援过程分为“出救点-受灾点，受灾点-医院”两阶段，并结合不同应急调度方式的运输与装卸载特性，分阶段建立响应时间和总救援时间约束，进而得到应急调度方式矩阵，极大缩短模型求解时间。通过算例研究分析表明，相对于以往文献，本书提出的选址模型，覆盖率、建设成本和救援时间等指标获得更优的结果，验证了本书两阶段选址覆盖模型的可行性和高效性。该内容见本书第 7 章。

6. 基于三维网格和气象预测的航空器低空航迹规划方法

已有的研究多数是二维平面内的路径规划，低空飞行中三维的航迹规划主要使用的是高度修正方法，很少考虑航空器的性能约束，并且已解决的多数是单个航空器航迹规划问题，没有考虑多航空器之间的飞行冲突问题。本书针对目前航迹规划

存在的诸多问题,在保证飞行安全的前提下,合理有效地划分低空救援空域三维网络,最大化利用空域满足救援需求。在空域网格划分的基础上,结合救援飞行任务、地形及气象因素、航空器的性能等约束构建单航空器初始最优飞行计划航迹搜索方法。在单航空器初始最优飞行计划航迹的基础上,结合时间窗原理以及飞行任务优先级属性,规划多航空器无冲突最优飞行计划航迹,并为实时的飞行冲突探测提供理论基础。

同时,针对数值天气预报数据误差较大和高空气象数据不适用于低空的问题,本书针对航空器在低空风环境中的规划航迹修正问题,建立气象预测修正模型,通过插值模型获取各航路点的矢量风数据,并基于 UKF 预测模型来融合记录数据与预报数据,修正其系统误差,由矢量合成计算得出航空器地速,将其应用到航迹规划中,从而在时间与空间两个方面提高规划航迹的精确度。最后,通过算例分析对模型进行对比验证。该内容见本书第 8 章。

7. 基于混合估计和意图推理的短期飞行航迹推测技术

在推测航空器的飞行航迹时,可以不受推测时间限制,但是随着推测时间延长,航迹推测的偏差会成倍增加。特别是在没有明确的航路、航线约束、导航台引导和空管二次雷达监视的环境下,参与低空救援飞行的航空器,主要依靠飞行员取地标参照物或通过全球定位系统(global positioning system, GPS)定位点来进行点到点的目视飞行。在这种情形下会给实时的航迹推测带来很大困难,同时也会给低空应急救援飞行带来更多不安全因素。

实时冲突探测保障低空飞行安全首先要解决的是精确的航迹推测。针对复杂低空救援飞行环境下实时的航迹推测问题,本书在划设的空域三维网格基础上,提出了基于混合估计和意图推理的航迹推测算法,该算法将 IMM 和 IIIA 相结合,具有水平和垂直方向上的航迹推测功能,实现了对低空救援环境中进行三维机动航空器的航迹推测。推测得到的航迹比单独使用 IMM 或者 IIIA 得到的推测航迹都精确,同时该算法与之前的方法相比,简化了算法模型,提高了运算效率,能够保证航迹推测算法的实时性要求。该内容见本书第 9 章。

8. 多冲突模式下实时救援飞行冲突探测与避险方法

低空飞行没有航路航线引导,飞行员采取的是点到点地目视飞行,这将导致较大的飞行偏差,给实时的冲突探测带来很大困难。同时,低空飞行受到的地形、恶劣天气以及风的影响要比高空航路飞行严重很多。所以,低空飞行过程中会有频繁的机动飞行,这也给实时的冲突探测与避险增加了很大难度。

本书在划设的空域三维网格环境中,提出了基于航迹推测的实时冲突探测算法与基于 Multi-Agent 模型的自主冲突避险算法。该算法在空域网格基础上,构建了基于航迹推测的冲突探测算法。该算法对两航空器水平面内可能的相遇态势进行分

析，在精确航迹推测的基础上，先判定两推测航迹在空间上是否有交集，然后计算可能的冲突网格节点的时间窗，最后通过判断两个时间窗是否有交集来判定冲突。冲突避险算法在探测到飞行冲突时，为了实现自主避让飞行冲突，将航空器当做智能体 Agent，发生冲突的 Agent 通过相关救援目视飞行避让规则构建 Agent 模型。基于各个 Agent 任务优先级的不同，进行非协作式航向调整冲突避险策略，并提出了协作式航向调整冲突避险策略思想，确保航空器能够得到最优无冲突飞行航迹。在无冲突路径集中，选择一条最短、转弯次数最少的路径作为最优飞行航迹。

由于冲突态势多样化，既有两架航空器之间的冲突，又有多机之间的冲突；此外，由于救援航空器往往会以编队方式飞行，还要考虑机队在飞行中遭遇冲突的情形，多种类型的冲突态势使得冲突避险问题复杂化。本书提出了基于推测飞行轨迹的冲突探测模型，并引入基于目视飞行间隔标准的保护区模型来弥补基于推测轨迹冲突探测模型在特殊情形下的不足，以避险预警时间为基准，将冲突划分为两机（含机队）、多机模式。在每种冲突模式中，根据冲突航空器的飞行过程以及执行的任务划分不同冲突场景。在冲突避险方面，界定了两机、多机、机队三种冲突模式，并针对三种冲突模式分别提出了避险方案，从而实现协作式飞行冲突避险。该内容见本书第 10 章。

1.3.2 技术路线

本书主要章节的技术路线如图 1.2 所示。

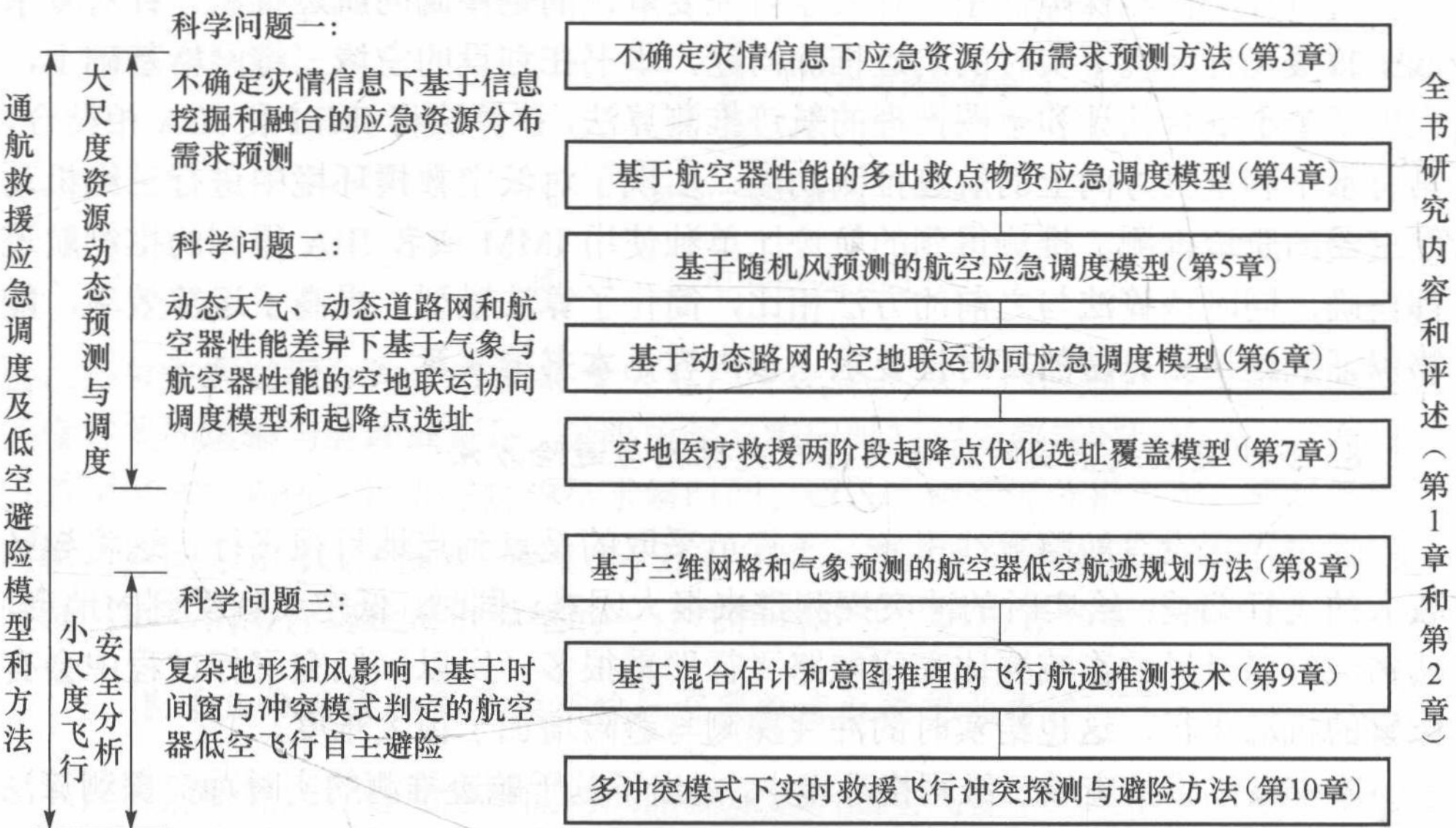


图 1.2 技术路线图

参 考 文 献

- [1] 于耕. 航空应急救援[M]. 北京: 航空工业出版社, 2009: 3-7.
- [2] 刘大响, 王湘穗. 安国利民的重大预战术举措——大力发展我国航空应急救援能力的思考[J]. 中国工程科学, 2009, 11(6): 68-73.