

空中交通流量协同管理

张洪海 著



科学出版社

空中交通流量协同管理

张洪海 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统介绍空中交通流量协同管理的理论、方法与应用,主要内容包括:空中交通流量管理的概念内涵、功能定位、主要特征,以及协同决策理论、协同运行体系和未来发展趋势;提出了协同容流调配、协同地面等待、协同航路管理、协同航班调度等一系列空中交通流量协同管理的主要方法、模型与算法,并进行了验证分析;介绍了美欧空中交通流量协同管理的应用情况,分析了我国空中交通流量协同管理应用现状与发展战略。

本书内容兼具理论性、实用性和前瞻性等特点,适合高等院校民航运输类专业的本科生、研究生,以及从事空中交通管理的科研人员和行业人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

空中交通流量协同管理/张洪海著. —北京:科学出版社, 2016

ISBN 978-7-03-050517-0

I. ①空… II. ①张… III. ①交通流量—空中交通管制 IV. ①V355.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第267766号

责任编辑:陈 静 霍明亮/责任校对:杜子昂

责任印制:张 伟/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>

北京厚诚则铭印刷科技有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年9月第一版 开本:720×1000 1/16

2016年9月第一次印刷 印张:16 1/2

字数:320 000

定价:58.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

随着国民经济快速发展,航空运输需求不断增长,不断增长的空中交通需求与相对缩小的空域系统供给能力之间的矛盾必将日益突出,航班延误、空域拥挤、飞行冲突等现实问题也将日趋严峻。空中交通流量管理是航空运输事业快速发展的必然产物,是降低航班延误、缓解空域拥挤、提高运行效率的有效手段,也是提升空域系统资源使用效率和空中交通管制服务品质的必然选择,已成为现代空中交通管理的重要组成部分和重点发展方向,具有十分重要的现实意义和战略意义。

空中交通流量协同管理是空中交通流量管理发展至今形成的高级形态,是基于协同决策机制的空中交通流量管理,旨在通过空中交通管理、航空公司、机场等航空运输相关部门之间的资源整合、信息共享和协同决策,提高空中交通流量管理的透明性、公平性和有效性。近年来,空中交通流量协同管理发展迅速,已经成为国际民航组织、航空发达国家和地区的共同选择和发展重点,初步形成了一套涵盖运行机制、技术方法、设施系统、标准规范等各要素的协同运行体系,正处于加快建设和改进完善之中。

本书系统阐述空中交通流量协同管理的理论、方法与应用,是作者近十年科研成果的系统总结。全书共7章,第1章为绪论,第2章为理论,第3~第6章为方法,第7章为应用。其中,第1章阐述空中交通流量管理的概念内涵、功能定位、主要特征,以及空中交通流量协同管理的发展历程、主要内容和发展趋势;第2章阐述空中交通流量协同管理的概念原理,协同决策的概念、原则、类型、过程、环境等,以及由运行概念、组织结构、技术方法、支持系统、运行机制等要素组成的运行体系框架;第3章介绍协同容流调配方法,包括基于航空用户偏好信息的机场终端区容流协同调配、基于系统最优与用户均衡的多机场网络容流协同调配、基于空域与流量协同管理机制的航路容流调配等;第4章介绍协同地面等待方法,包括协同时隙分配经典算法、基于3E权衡的协同时隙初次分配方法和基于MAS协调的协同时隙再次分配方法;第5章介绍协同航路管理方法,包括协同航路管理概念框架、协同航路资源分配原理与模型等;第6章介绍协同航班调度方法,包括基于优先权的协同调度模型和基于多准则的协同调度模型等;第7章介绍美欧空中交通流量协同管理的运行机制、设施系统和典型应用案例,以及我国空中交通流量协同管理的目前应用概况和未来发展战略思考。

本书得到了南京航空航天大学胡明华教授的长期指导和帮助;得到了国家空

管飞行流量管理技术重点实验室科研团队的大力支持；得到了国务院、中央军委空中交通管制委员会办公室，中国民用航空局，中国民用航空局空中交通管理局等有关科技项目及南京航空航天大学“十二五”规划教材建设项目的联合资助；在此表示衷心感谢！

由于空中交通流量协同管理仍处于快速发展和实践检验之中，加之作者水平有限，书中难免有不妥之处，恳请广大读者批评指正。不过相信在行业的检验、读者的关心和作者的进一步探索中，本书一定会得到改进和完善。

张洪海

2016年8月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 空中交通流量管理简介	1
1.1.1 概念内涵	1
1.1.2 功能定位	2
1.1.3 主要特征	3
1.2 空中交通流量协同管理概述	5
1.2.1 发展历程	5
1.2.2 主要内容	8
1.2.3 发展趋势	12
第 2 章 协同流量管理理论	15
2.1 协同流量管理理论基础	15
2.1.1 协同学原理	15
2.1.2 协同管理概念	16
2.1.3 协同决策理论	18
2.2 协同流量管理运行体系	26
2.2.1 概念内涵	26
2.2.2 运行概念	27
2.2.3 组织结构	29
2.2.4 支持系统	36
2.2.5 技术方法	41
2.2.6 运行机制	46
第 3 章 协同容流调配方法	59
3.1 协同容流调配问题概述	59
3.2 基于用户偏好信息的机场终端区容流协同调配	60
3.2.1 单机场容流协同调配模型	61
3.2.2 单机场终端区容流协同调配模型	67
3.2.3 多机场终端区容流协同调配模型	73
3.3 基于系统最优与用户均衡的多机场网络容流调配	83
3.3.1 多机场网络流系统	83
3.3.2 协同容流调配模型	84

3.3.3	协同调配评价标准	88
3.3.4	实例仿真验证分析	88
3.4	基于空域与流量协同管理机制的航路容流调配	94
3.4.1	空域与流量协同管理机制	94
3.4.2	航路容流协同调配模型	95
第4章	协同地面等待方法	101
4.1	协同地面等待问题概述	101
4.2	协同地面等待程序流程	102
4.3	协同时隙分配经典算法	104
4.3.1	RBS 算法	104
4.3.2	Compression 算法	105
4.3.3	SCS 机制	106
4.4	基于 3E 权衡的协同时隙初次分配方法	108
4.4.1	地面延误成本分析	108
4.4.2	基于 3E 的分配评价指标	109
4.4.3	协同进场时隙分配问题	110
4.4.4	协同单机场时隙分配问题	123
4.4.5	协同多机场时隙分配问题	132
4.5	基于 MAS 协调的协同时隙再次分配方法	137
4.5.1	基于 MAS 协调的时隙动态交易机制	137
4.5.2	基于 MAS 协调的简单时隙交易分配问题	142
4.5.3	基于 MAS 协调的复杂时隙交易分配问题	147
4.5.4	算例仿真与验证分析	151
第5章	协同航路管理方法	155
5.1	协同航路管理问题概述	155
5.2	协同航路管理概念框架	156
5.3	航路资源协同分配方法	159
5.3.1	航路资源协同分配原理	159
5.3.2	航路资源协同分配模型	164
第6章	协同航班调度方法	168
6.1	协同航班调度问题概述	168
6.2	航班飞行延误成本分析	169
6.3	基于优先权的协同调度模型	170
6.3.1	问题描述	170

6.3.2 优先权重	170
6.3.3 优先权调度模型	173
6.4 基于多准则的协同调度模型	178
6.4.1 问题描述	178
6.4.2 单目标优化模型	179
6.4.3 多目标优化模型	184
第7章 协同流量管理应用	190
7.1 协同流量管理应用概述	190
7.2 美国协同流量管理应用	191
7.2.1 协同运行机制	191
7.2.2 应用设施系统	200
7.2.3 典型应用案例	209
7.3 欧洲协同流量管理应用	214
7.3.1 协同运行机制	214
7.3.2 应用设施系统	227
7.3.3 典型应用案例	229
7.4 中国协同流量管理应用	240
7.4.1 目前应用概况	240
7.4.2 未来发展战略	242
参考文献	248

第1章 绪 论

1.1 空中交通流量管理简介

1.1.1 概念内涵

随着国民经济快速发展,航空运输需求不断增长,不断增长的空中交通需求与相对缩小的空域系统供给能力之间的矛盾必将日益突出,空域拥挤、航班延误、飞行冲突等现实问题也将日趋严峻。这势必要求持续增强空中交通管理(简称空管)的能力,不断提升空中交通安全水平和运行效率,有效解决各种现实问题。空中交通流量管理(air traffic flow management, ATFM)是航空运输事业快速发展的必然产物,是降低航班延误、缓解空域拥挤、提高运行效率的有效手段,也是提升国家空域系统(national airspace system, NAS)资源使用效率和空中交通管制服务品质的必然选择,更是推动军民航融合发展、全球空管一体化运行的战略需要,已经成为现代空中交通管理的重要组成部分和重点发展方向,具有十分重要的现实意义和战略意义。

根据国际民航组织的定义,空中交通流量管理是指为有助于空中交通安全、有序和快捷运行,确保最大限度地利用空中交通管制服务,并符合有关当局公布的标准和容量而设置的一种运行服务。更准确地讲,空中交通流量管理是指当空中交通流量接近或达到空中交通管制可用容量时,适时采取有效措施,确保空中交通流量最佳流入或通过相应管制区域,尽量减少甚至避免飞行计划冲突和航班延误,充分利用空域系统时空资源。从本质上讲,空中交通流量管理是一种基于容量与需求的空中交通流量时空分布优化决策过程,其根本任务是当预计流量接近或达到管制能力时,适时采取优化调配措施,平衡空中交通供需,促进空中交通流顺畅、高效运行;其现实作用是通过优化流量的时空分布,以避免延误、降低延误或转移延误为目标(方式)解决航班延误问题,提高航班正常性和资源利用率。

空中交通流量管理既是一种运行服务,又是一种管理活动,需要专门的组织机构承载职能、高效的运行机制保障实施、科学的技术手段支持决策、统一的法规标准约束行为,是一个由组织机构、运行机制、技术手段、法规标准等要素组成的有机整体。其中,组织机构是指为实施流量管理而确立的组织机构、管理权限、职能划分及制度安排的总称,在各要素中处于主导地位,决定着流量管理活动的性质、方向、效率和效果。因此,为实施统筹高效的流量管理,首先需要构

建一个科学的组织机构体系。运行机制是指组织体系维持功能的内在机理及其运行方式,是影响管理活动的各因素的结构、功能及其相互关系,以及这些因素产生影响、发挥功能的作用过程和作用原理。简单地讲,运行机制是决定管理行为的内外因素及相互关系的总称,是引导和制约各项管理活动的基本规则、运行程序及相应制度。为保障各项工作任务和目标实现,必须建立一套与之相应的运行机制。技术手段是指在空中交通流量管理活动中所采用的各种方法、程序、规则及支持系统工具等的总称。法规标准是对空中交通流量管理各要素进行规范与约束的系统化、层级化、序列化、标准化的体系,包括有关法律条款、行政法规、部门规章等,是各类流量管理机构、人员和用户享有权利和履行责任的共同依据。

然而,由于空管是一个快速发展的科技应用领域,空管的发展本质上是一部空管科技发展史,空管的每一次革新发展都是由新理念、新科技带动和推动的。随着全球空管一体化、协同决策、四维航迹运行等新理念、新科技在空管中的不断创新引用,空中交通流量管理的概念也在发生演化,不断拓展概念内涵,促进组织机构、运行机制、技术手段、法规标准等各要素全面进步,进而形成新的概念体系。

1.1.2 功能定位

空中交通流量管理是空中交通管理的重要组成部分,具有明确的功能定位,与其他组成部分既有显著区别、又有较强联系。空中交通管理主要由空域管理、空中交通流量管理和空中交通服务三大部分组成。其中,空域管理旨在依据国家空域系统使用需求及空防空管发展要求,优化空域结构,改善空域环境,科学配置与利用空域系统资源,满足各类航空用户使用需求;空中交通流量管理旨在优化流量分布,减少航班延误,缓解空域拥挤,提高时空资源利用率;空中交通服务包括空中交通管制服务、情报服务和告警服务,空中交通管制服务旨在防止航空器与航空器相撞以及与障碍物相撞、加速空中交通有序流动,情报服务旨在向飞行中的航空器提供有益于安全和有效地实施飞行的建议和情报,告警服务旨在向有关组织发出需要搜寻援救航空器的通知并根据需要协助或协调搜寻救援工作。

空域管理、空中交通流量管理、空中交通管制服务是空中交通管理的三大核心业务。三者的任务目的、管理对象和实施时间等各有不同,具有互补性、交叉性和不可替代性,共同有效维护和促进空中交通安全,维护空中交通秩序,保障空中交通畅通。从任务目的上看,简单地讲,空域管理主要用于合理配置空域资源,满足各类用户使用需求;空中交通流量管理主要用于优化流量时空分布,提高空中交通运行效率;空中交通管制服务主要用于提供空中交通各种服务,保障

空中交通运行安全。从管理对象上看,空域管理的对象是空域系统本身,通过优化空域结构、管理模式和使用机制等,尽量满足各类航空用户使用需求;空中交通流量管理的对象通常是一定时间和空间范围内由大量飞行计划或航空器群体组成的空中交通需求或空中交通流量,通过全局优化流量时空分布,从宏观角度间接管理大量航空器运行;空中交通管制服务的对象主要是少量航空器个体,通过局部保障航空器安全间隔或引导航空器安全飞行,从微观角度直接管制少量航空器运行。从实施时间上看,空域管理、空中交通流量管理通常划分战略、预战术、战术等多个持续管理的实施时间阶段,而空中交通管制服务仅在战术阶段发挥作用,为航空器提供实时的管制服务。

随着空中交通管理不断革新发展,空中交通流量管理与空域管理、空中交通管制服务等业务正在逐渐融合,其作用地位必将越来越突出,将逐渐发展成为空中交通管理的业务重心。一方面,空中交通流量管理将与空域管理互相适应和有机结合。空域管理将结合空中交通需求和流量管理策略,实施动态管理和灵活使用机制,提高空域管理效率和资源利用率,满足各类航空用户需求;空中交通流量管理也将结合动态的空域结构和灵活的使用规则,实施空中交通流量与容量协同管理机制,改进空中交通流量时空优化策略,提高空中交通运行效率和时空资源利用效率。另一方面,空中交通流量管理将与空中交通管制服务互相依托和高度集成。空中交通流量管理依托空中交通管制服务提供决策所需的空域系统容量及管制运行等信息,以制定科学有效的流量管理措施,并依托空中交通管制服务负责执行某些措施,发挥管理效能;同时,空中交通管制服务可通过执行流量管理措施,提高管制服务品质,降低管制工作负荷。最终,空中交通流量管理与空域管理、空中交通管制服务互相适应、互相依托、互相融合,从战略、预战术和战术等各阶段实现空中交通流量与空域协同管理,从全国、区域、终端等各层级实现航班运行协同决策与自动管制,进而实现安全、高效、经济和绿色的现代化空中交通管理。

1.1.3 主要特征

根据空中交通流量管理的概念内涵、功能定位及其发展趋向,目前空中交通流量管理具有最优性、系统性、预先性、协同性等四个显著特征,其中,最优性是本质特征,系统性、预先性是管理特征,协同性是发展特征。

1. 最优性

空中交通流量管理问题本质上是空中交通需求在时间和空间上的分布优化问题,是空中交通需求与空域系统容量之间的匹配优化问题,具有显著的最优性。

空中交通流量管理优化问题通常是指当出现空中交通供需严重失衡问题,即空中交通需求严重超出空域系统容量限制,将要发生大面积航班延误或大范围空域拥挤问题时,通常以最小化航班延误为优化目标,以满足空中交通管制安全要求、空域系统容量限制、航空用户利益需求为约束条件,建立解决特定问题的空中交通流量调配优化策略或算法,例如,航班时刻优化、地面等待优化、时隙分配优化、排序优化、改航优化等策略或算法,优化平衡空中交通供需,以实现最小化航班延误、最大化资源利用的根本目的。

2. 系统性

空中交通流量管理的最优性决定了其系统性。从系统学的角度,为实现空中交通需求时空分布的最优化,必须构建一个结构完整的组织管理体系和功能完备的决策支持系统,才能更加有效地实现系统最优目标和最大效益。理论上讲,在空中交通流量管理能力不变的条件下,组织管理体系的结构设计越简单、决策支持系统的作用范围越大,越容易实现系统最优性,发挥最佳效果。在组织管理体系上,一个国家或地区的空中交通流量管理通常实施分级管理,构建一个涵盖全国、区域、终端区及繁忙机场的流量管理组织机构体系,明确层级划分、机构设置、管辖范围、权责关系等,为组织实施流量管理提供根本保障;在决策支持系统上,通常构建一个符合需求、配套组织、综合集成、可持续发展的决策支持系统体系,为高效实施流量管理提供科学手段。

3. 预先性

空中交通流量管理活动基本上都是在航班运行之前完成的,是一种基于预测的管理活动,具有显著的预先性。根据实施时间,通常把空中交通流量管理活动划分为战略管理、预战术管理和战术管理三大阶段。其中,战略管理阶段通常为航班运行前数月至前七日,主要活动包括预测分析空中交通需求和空域系统容量变化情况,针对供需失衡问题,制订流量管理预案、容量使用计划等;预战术管理阶段通常为航班运行前七日至前一日,主要活动包括进一步预测分析需求与容量平衡情况,更新流量管理预案,制订并发布流量管理每日计划;战术管理阶段通常为航班运行当日,主要活动包括执行预战术阶段制订的每日计划,根据突发的供需失衡问题,制定并实施战术流量管理措施,这些措施一般也是提前一段时间制定和实施的。

4. 协同性

协同性是空中交通流量管理快速发展所呈现的新特征,即协同决策理念在空交通流量管理中的全面运用和蔓延发展而体现的显著特征。协同性主要表现在

内外协同、人机协同、军民协同等方面。其中,内外协同是指空中交通流量管理组织体系内外部之间的协同合作,主要是指空管、航空公司及机场等决策主体之间的协作,所有主体依托协同决策信息共享平台,及时沟通协调,相互支持配合,实施科学决策,以实现共同目标、满足各自需求;人机协同是指空中交通流量管理人员与决策支持系统之间的协同配合,空中交通流量管理协同决策是以人为主、系统为辅的决策;军民协同是指军民航空域资源使用、飞行活动冲突之间的统筹协调,可有效提高空域资源利用率和航班正常性,也是军民融合发展的重要特征。

1.2 空中交通流量协同管理概述

1.2.1 发展历程

空中交通流量协同管理是基于协同决策的空中交通流量管理,简称协同流量管理,它允许空管、航空公司、机场等航空运输相关部门之间共享信息,从而做出更透明、更公平、更有效的决策,共同解决航班延误、空域拥挤等问题,提高航班正常性和资源利用率,是空中交通流量管理发展至今形成的高级形态。空中交通流量管理作为航空运输业快速发展的产物,是在空中交通管制系统不能满足快速增长的空中交通需求的背景下产生的。20世纪60年代,美欧等航空发达国家和地区的空交通管制系统已不能适应快速增长的航空运输需要,空中交通需求超出了空域系统容量限制,空域拥挤和航班延误等问题频繁发生,人们便开始研究如何规划、协调和优化空中交通流量,才能实现空中交通快速、有序和安全运行,即开始研究空中交通流量管理问题,并逐渐成为世界航空发达国家和地区的共同选择和发展重点,逐步建立了适合自身的空中交通流量管理协同运行体系,负责对本国或本地区的空中交通流量实施全面管理。

纵观美欧等航空发达国家和地区空中交通流量管理的发展历程,其发展经历了一个由简至繁、由点及面、由低级到高级的渐进历程,也是一个组织机构、运行机制、技术手段、法规标准等各要素全面进步的发展历程,大致可划分四个发展阶段:第一,起步研用阶段。20世纪60年代,美国率先开始研究实施空中交通流量管理,美国联邦航空管理局(federal aviation administration, FAA)先后提出采用达到计量程序和航路计量程序,分别用于解决机场航班延误和航路拥塞问题,并在航路交通管制中心设置负责流量管理的交通管理单位。20世纪70年代,美国联邦航空管理局开始建设空中交通管制系统指挥中心(air traffic control system command center, ATCSCC),研制增强型交通管理系统,负责平衡全国空中交通流量与空域系统容量。1970年,国际民航组织召开第一次空中交通流量管理非正式会议,一年后,在国际民航组织欧洲地区第六次航行会议上,正式提出

把空中交通流量管理作为空中交通管制服务的补充功能,并提议建设地区级的流量与空域管理机构;随后,法国、德国等12个欧洲国家先后建立了地区级的流量管理机构,负责各自辖区内的流量控制和空域管理。第二,全面建设阶段。20世纪80年代,美欧等国家和地区着手建设国家级或中央级流量管理机构,设置流量管理单位或席位,开发空中交通流量管理系统。美国联邦航空管理局在华盛顿总部设立中央流量管制室,通过动态监控飞行活动为管制部门提供预警服务,初步实现了地面等待和流量预测计划。1988年,欧洲民航会议成员国的交通部长提议制定中央流量管理机构建设方案,同年欧洲航行安全组织批准了该提议并委托其下属公司制订建设计划,一年后授权中央流量管理机构负责统一管理各成员国空域。第三,运行改进阶段。20世纪90年代,欧美等国家和地区基于传统的集中式管理模式,引入协同决策(collaborative decision making, CDM)概念,健全运行组织体系,改进技术支持手段,不断提高管理能力。1994年,美国联邦航空管理局建成了空中交通管制系统指挥中心,形成了由空中交通管制系统指挥中心、航路管制中心交通管理单位、终端区及繁忙机场交通管理单位构成的三级流量管理运行组织体系;并开始与航空公司合作,建立协同决策机制,交换和共享航班动态信息,研制决策支持系统工具,进一步增强交通管理系统功能。欧洲开始研究协同决策概念在空中交通管理中的应用,研发了离场管理、进场管理等一系列高级决策支持工具;1995年,建成中央级流量管理机构并正式投入运行,形成了由中央流量管理单位、各区域管制中心流量管理席位构成的二级流量管理运行组织体系。第四,升级换代阶段。21世纪初,美国提出了新一代航空运输系统计划,旨在建立一个更加现代化的新型航空运输系统,以满足未来航空运输对安全、容量、灵活、效率及安保的战略需要;欧洲提出了单一欧洲天空计划,旨在统一规划、监控欧洲成员国空域,建立欧洲统一的空中交通管理系统。为此,美欧正在研制新一代流量管理系统工具,逐步完成升级换代,满足其战略计划的实施要求。

协同流量管理形成于空中交通流量管理发展中的第三阶段——运行改进阶段,即20世纪90年代。美国是协同流量管理的先驱者,主要用于解决由于航路或机场容量下降而引发的航班延误问题。1993年9月,美国联邦航空管理局和航空公司联合发起了数据交换试验,以评估、分析更新计划信息对流量管理决策的影响,该试验拉开了协同流量管理发展的序幕。1994年8月,空中交通管制系统指挥中心在预备试验中提出了CDM概念,分析表明人在环路(human-in-the-loop)的改进决策可使参与航空公司的总延误降低10%~40%;同年12月,空中交通管制系统指挥中心联合航空公司在弗吉尼亚州雷斯頓城的Metron科学咨询公司进行试验分析,以测试改进的决策及其新程序的组合效果,结果表明在不同机场和方案下总延误减少了10%~35%,验证了协同决策的显著效果。1995年春,空中交通管制系统指挥中心和国家空域系统用户在协同决策角色和责任上达成一致意

见，并由联邦航空管理局发展部门和空中交通部门联合签发；同年夏，协同决策行动与自由飞行行动计划一样得到许多委员会的推荐。1996年3月，联邦航空管理局成立了通信工作组和协同航路工作组，前者主要负责研究确定哪些实时数据可被交换，后者主要负责在航空公司运控部门和空中交通管制部门之间研究开发有效的协商方式，用于协商起飞之前和飞行阶段的航班改航问题，以最大化国家空域系统的安全性和效率；同年10月，主要航空公司通过航班时刻监控工具测试了协同决策概念及其应用。1997年2月，通信工作组设计了航空公司运控中心网络，作为协同决策的一种重要通信基础设施；7月，有七家航空公司加入该网络参与协同运行；10月，在该网络中设置国家空域系统状态数据项。1998年1月，协同决策原型系统（增强型地面延误程序）在旧金山和纽瓦克机场测试运行，最初测试结果显示航空公司延误可减少48%，节约了大量成本；4月，测试扩展到拉哇地和圣路易斯机场；9月，扩展到美国所有机场，国家空域系统状态信息基础设施投入在线运行。1999年3月，更新了Volpe国家运输系统中心CDM枢纽站的软件和硬件配置；4月，举行开放型季度培训吸引更多的参与者。2000年6月，结束了增强型地面延误程序原型测试，正式投入运行，并开始开发、测试和实施协同航路概念及原型工具，向所有航空公司运控中心网络用户开放国家空域系统状态安全和效率信息，这标志着美国协同流量管理的发展由研发测试迈向实际应用。随后，美国不断完善协同决策机制，升级系统工具功能，增强协同流量管理能力，逐步推动流量管理系统走向现代化。例如，2001年，引入了简单的航班替换机制，开始采用接近实际的事后运行评估工具；2002年，开始在人在环路中模拟时隙信任交易机制；2003年，在航路管理工具中加入航路规划信息，正式启用时隙信任交易机制；2004年，把事后运行评估工具的网络版本提供给航空用户，在数据资源中增加流量限制区域/流量评估区域、离场航路编码和航路规划信息，在航班时刻监控工具新版本中增加预计离场许可时刻交换请求功能；2005年6月，在增强型交通管理系统枢纽中心和77个站点安装最先进的计算机和通信设备，这也是美国流量管理系统向现代化迈出的第一步。

欧洲协同流量管理的发展主要体现在机场运行方面。2000年，欧洲航行安全组织开始研究协同决策概念在机场中的应用，提出了机场协同决策（airport collaborative decision making, A-CDM）概念，旨在提高机场运行可预见性，避免机场成为整个空中交通管理系统的瓶颈。2006年4月，欧洲航行安全组织、国际航空运输协会和欧洲国际机场协会联合发布了机场协同决策执行手册，以推进机场协同决策在欧洲的应用，该手册经过5次修订，于2012年3月发布了最新版本。欧洲机场协同决策是对协同流量管理的扩展应用，扩展成以机场运行为核心的机场运控部门、中央流量管理单位、空中交通管制部门、航空器运营和地勤保障等更多方之间的信息共享和协同决策，改变了空管、机场和航空公司等单位传统业务流程，显著提高了机场运

行效率,改善了空中交通流量与容量管理,提高了航班运行品质,节约了大量运行成本,从系统角度实现了协同共赢的目标,已经取得了良好的经济效益和社会效益。

2012年,国际民航组织发布了《协同式空中交通流量管理手册》,其中包括协同决策和空中交通流量管理两部分内容,第一部分描述协同决策概念、信息交换作用和协同决策过程等,然而第二部分由于没有完成,内容缺失。2014年,国际民航组织发布完整的《协同式空中交通流量管理手册》(第2版),补充了第二部分,其中包括空中交通流量管理的基本原理、组织结构、实施阶段、主要措施、数据交换、通信要求等,为世界各国实施协同流量管理提供了指导建议,对于加快协同流量管理发展具有重要的推动作用。

1.2.2 主要内容

协同流量管理作为一种政府与行业的联合行动,最初旨在引入协同决策概念、技术和程序改进传统的流量管理模式,提高管理的有效性和公平性。然而,经过二十几年的发展,目前协同决策理念已经融入空中交通流量管理的各要素中,其组织机构、运行机制、技术手段、法规标准等各要素均得到了全面进步,形成了一套协同流量管理体系,其中包括协同决策运行机制、协同流量管理方法和协同管理支持系统三方面主要内容。

1. 协同决策运行机制

协同决策运行机制是以协同决策理念为指导思想的运行机制,是一个协同流量管理运行组织机构体系根据自身发展现状、现实需求和重要问题,建立的一套保障组织机构高效运转、引导实际问题协同解决的基本规则、运行程序及相应制度,是决定协同管理行为的内外因素及相互关系的总称,在协同流量管理运行体系中起主导作用。建立协同决策运行机制,将空管、航空公司、机场等组织的有关部门、人员、设备、技术、信息、流程等资源连接、沟通、共享和交互起来,使各类组织能够为完成共同任务或目标而实施协同决策;各类管理组织通过部门重组、层级结构、角色分配、流程设计、资源规划、工作计划和日程安排等实现各类工作任务的协同,消除协同过程中产生的各种壁垒和障碍,通过最大化利用有限的时间和空间资源,实现时空资源效益的最大化。因此,构建协同决策运行机制是实施协同流量管理的首要问题,需要明确协同决策理念、组织结构、机制类型与构建思路等关键内容。

其中,协同决策理念是一种基于资源整合和信息共享的多主体(空管、航空公司、机场等)之间联合运行的协作理念,用于创造一种透明、公平和高效的协同空管环境。协同决策理念是一种集透明决策、群体决策、系统决策于一体的决

策理念,所有决策主体按照积极参与、资源共享、公平竞争和全面协调的基本原则,借助资源整合和信息共享平台,及时沟通协调,相互支持配合,实施科学决策,以实现共同目标,满足各自需求。根据参与主体的角色和目标不同,协同决策包括具有共同目标或互补目标或对立目标的多边决策、具有共同目标或互补目标或对立目标的单边决策六种类型。每类决策都需要事先商定协同决策过程和规则,统一标准,规范行为,以确保迅速合理地做出决策。此外,还需要构建一个协同决策赖以生存的大环境,包括政策环境、组织环境、技术环境、信息环境、系统环境、制度环境等。

组织结构是表明组织各部分排列顺序、空间位置、聚集状态、联系方式,以及各要素之间相互关系的一种模式,它是执行任务、现实目标的组织体制。建立一个组织结构合理、机构设置健全、权责关系清晰,岗位、人员及制度等完备的组织体制是有效实施协同流量管理的根本保障。组织结构设计是其中非常重要的内容,用来描述组织体系内部层级划分、机构设置、责权范围、管理模式,以及各层级、各机构之间协同关系。组织结构设计一般按照目标导向、适度超前、协调优化、责权对等、高效管理、体系融合的原则进行,其关键是确立管理模式和协同关系,即确立各主体的目标、责任、权益,以及各主体间的协同关系和各层级间的集分权关系,为建立一套针对性强、无缝隙化、灵活高效的协同决策运行机制提供基础框架。

运行机制是运行组织体系为维持协同决策功能,以一定的规则规范体系内部各部分或各要素之间相互作用、相互联系、相互制约的形式、运行原理和内在工作方式,决定着空中交通流量协同管理的任务性质、目标实现和实施功效。因此,必须建立一套完备、灵活、高效、协调的运行机制和工作程序,确保高效运转和发挥协同效应。根据空中交通流量管理的事件类型和业务活动划分,协同决策运行机制通常分为常规事件、应急事件和重大事件下的协同运行机制,以及协同会商机制、信息共享机制、应急响应机制、跨国协调机制等多种类型。运行机制构建的根本目的是实现协同流量管理的目标,不同类型的机制具有不同的实现目标。因此,运行机制构建的总体思路是面向协同流量管理的目标,通过分析运行现状,评估现状与目标之间的差距,找出缩小差距的协同方式,执行协同决策过程,实现协同效应。

2. 协同流量管理方法

协同流量管理方法是流量管理人员解决实际问题所采用的各种协同决策方法、程序、规则等的总称。协同流量管理是在传统流量管理的基础上发展起来的,其协同决策方法也是对传统方法的增强或改进。自20世纪80年代以来,针对空中交通流量管理的研究非常活跃,目前已经取得了较为丰硕的研究和应用成果,形成了一