



空中乘务专业系列教材

空域学概论

路 紫 李志勇 张秋变 雷平化 主编

高等教育出版社

空中乘务专业系列教材

空域学概论

Kongyuxue Gailun

路 紫 李志勇 张秋雯 雷平化 主编

高等教育出版社·北京

内容简介

本书在吸收国内外空域学最新研究成果的基础上,系统介绍了空域学的基础理论和方法。全书共分七章。第一章为绪论,说明空域的基本概念、分类以及空域学学科体系等问题,是全书的思想与知识基础。第二至第六章为空域资源系统、空域管理系统、空域经济系统、空域规划技术系统和空域安全系统等五大系统,重点分析各系统的基本组成要素及系统间的内在关系。第七章为空域协调与分区,主要介绍军民航协调和区域航空运输协调,以及我国区域航空分区、航空物流园等,是空域系统的拓展与延伸。本书注重理论与实际相结合、定性与定量相结合的研究方法。

本书既可作为高等院校航空服务与管理相关专业的教材和教学参考书,也可作为空域管理研究和技术人员的学习用书。

图书在版编目(CIP)数据

空域学概论 / 路紫等主编. -- 北京: 高等教育出版社, 2016.6

ISBN 978 - 7 - 04 - 045235 - 8

I. ①空… II. ①路… III. ①民用航空 - 旅客运输 - 商业服务 - 概论 IV. ①F560.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 084499 号

策划编辑 张欣 责任编辑 牛杰 封面设计 张志 版式设计 王艳红
插图绘制 杜晓丹 责任校对 窦丽娜 责任印制 耿轩

出版发行	高等教育出版社	网 址	http://www.hep.edu.cn
社 址	北京市西城区德外大街 4 号		http://www.hep.com.cn
邮政编码	100120	网上订购	http://www.hepmall.com.cn
印 刷	廊坊市科通印业有限公司		http://www.hepmall.com
			http://www.hepmall.cn
开 本	787mm × 960mm 1/16		
印 张	23	版 次	2016年 6 月第 1 版
字 数	420 千字	印 次	2016年 6 月第 1 次印刷
购书热线	010-58581118	定 价	39.80 元
咨询电话	400-810-0598		

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物料号 45235-00

序

国外空域资源开发利用的理论基础与方法论变革

——以美国为例

空中交通流量的持续增长引发充分开发利用空域资源的理论建设和方法论研究及其应用实践,旨在突破原有的、固定的空域结构及其扇区边界的限制。在过去的十年里世界航线结构和需求有了显著变化,仍保持相对固定的几何扇区形态面临新的挑战,只有重新设计动态空域功能分区才能适应不断变化的交通需求。本序首先分析了当前空域资源开发利用的理论创新,包括“新一代航空运输体系”“灵活空域使用”“平衡扇区”的原理、框架、结构、概式、模型等;然后评价了方法论的变革,总结了从动态空域配置(Dynamic Airspace Configuration, DAC)到动态空域功能分区(Dynamic Airspace Sectorization, DAS)的转化,以及动态空域功能分区的2D-DAS常用方法向3D-DAS方法的演进,并讨论了“基于个体模型”(Agent Based Model, ABM)的局限性和“基于个体模型”改进的应用优势,最后基于空域资源开发利用的变革展望了地理学空间研究从陆域到空域的拓展。

一、空域开发利用的宏观背景

针对航空运输业迅速发展,空域资源与交通需求的矛盾凸显等问题,2015年6月美国联邦航空局和欧盟移动和运输委员会在巴黎签署了空中现代化交通管理的“美国和欧洲无缝隙飞行扩展服务”协定,旨在单一欧洲天空空中交通管理系统研究(Single European Sky ATM Research, SESAR)领域进行深度合作,联合开发大西洋空域资源。我国也将低空空域管理体制改革作为重大战略决策,相信经过几年实践,呈孤立分布的监视或报告空域有望连片,空域の利用也将朝着灵活与高效方向迈进。2014年9月国际航空器拥有者及驾驶员协会(International Council of Aircraft Owner and Pilot Association, IAOPA)、国际通用航空制造商协会(General Aviation Manufacturers Association, GAMA)、中国航空器拥有者及驾驶员协会(CAOPA)联合召开的第27届IAOPA世界会员大会暨第四届中国低空经济论坛,针对我国《低空空域管理改革实施细则》和我国低空政策以及空域

资源进一步充分开发利用的机遇与挑战,关注低空空域管理改革问题,谋划了把握全球通航趋势助推中国通航产业发展,构建安全便捷的空域管理模式、制度机制和服务保障体系,优化空域划设,借鉴国际标准和做法逐步实现我国空域分类管理,最大限度盘活低空空域资源的发展战略。

针对空域资源利用的研究认为,依据分异规律的功能分区,已由单一功能要素发展为综合要素,继资源限制因素为指标的“等质地域论”、以社会经济状况为指标的“统一地域论”之后,进入以协调资源利用为目标的“综合地域论”。从理论发展来看,功能分区是合理干预资源利用的一种手段,通过确定不同类型区的边界、资源关系、承载能力,建立一定的等级系统,划分出具有某种特定功能的空域单元,能有效服务特定功能类型区合理空间格局的构建,引导各种功能要素有序流动。空域是一定的空气空间,空域资源是伴随着人类的持续开发而显现的,其功能属性也同样具有综合特征,既要反映空域资源利用状况,又要反映利用过程中效益协调状况,还要反映综合利用率状况。所以,空域资源的功能分区必须考虑国家安全、飞行需要、飞行管制能力和通信、导航、雷达设施建设分布等。

二、理论基础

(一) 新一代航空运输体系

新一代航空运输体系(Next Generation Air Transportation System, NextGen)是美国面对 21 世纪为提高空中运营效率、增加机场吞吐量、保证到达准时度以及确保航空安全水平而提出的,最终目的是为空域用户提供更大的益处,基础是利用新模式、新技术(如星基导航、监视和以网络为中心的系统),组成是通信、监视、导航和空中交通管理四个部分,建设重点是卫星技术、数据链技术和计算机网络。为使空域资源可持续利用,新一代航空运输体系可分为两个领域。第一,通过建立协调机制处理好军用航空和民用航空之间的空中交通服务问题以及处理那些可能危及民用航空器空中活动的问题。空域制度的建设需要考虑不同航空主体(通用航空、航空运输、军用航空)的需求,建立一个相互兼容的空中管理网络,将军民航的通信、导航与监视等技术统一起来,进而促进空域实行军民航一体化网络管理,集中进行交通管制以及飞行监控,实行“天空开放”以完善空域制度并形成一种稳定的标准。第二,在新一代航空运输体系下,飞行器将按照自身的 GPS 导航系统进行最短航线选择,地面导航台起到辅助性的配合作用,以提高飞行自由度。

新一代航空运输体系具有更为完整、统一和综合的特征。第一,强调包括通信、导航、监视等硬件设备的完整性和数据信息、法律法规等软件设备的完整性,

以及航空部门、技术部门、信息部门、政府部门等参与部门的完整性。第二,实现不同用户需求以及不同终端设备在各个方面的统一性,实现国际衔接以及在全球基础上实现信息多样性和系统兼容。第三,体现卫星技术、计算机技术、通信技术、自动化技术的综合,以及航空信息、天气信息、技术信息和管理信息的综合。总之,新一代航空运输体系不再是由航空部门独立构成的,而是由网络部门、政府部门和技术部门等多个部门共同构成的。

网络部门是基础,旨在推进网络数据通信服务系统和监视系统建设,为新一代航空运输体系提供一个强大的信息平台,使低空管制、飞行情报、地面导航和气象服务信息传递通畅。其中,航空信息提供飞行器所有飞行状态信息,为航空机场服务站提供管制指挥和空域飞行活动信息;气象信息提供空域天气状况信息,如终端空域天气类型及其影响下的终端空域容量信息;市场信息提供航空客源地、目的地信息,以提高空管系统空域保障与服务能力。

政府部门涉及法律支持与制度支撑。前者旨在修改完善现有的法律制度和技术标准。在民用航空法中要明确空域资源是一种国家准公共产品并对国家经济社会发展发挥重要作用,明确空域管理组织方式与运行机制、各类空域的飞行规则和所需性能及空管服务标准等。军民航空域管理部门应当按照上述国家法律法规并结合本系统特点,修订相应的规章、规范,依据空域分类标准和所需性能制定航空器机载空管设备配备标准并强制执行,确保航空器性能与相应运行空域的准入条件相匹配。后者,从国家空域资源整体考虑,统一划分管制区,使空域管理区域尽可能一致。改进传统空域资源管理方法,采取空域资源按需分配、对空域用户合理分类、按空域实际需要划分空域结构以发挥空域资源的最大效益。从长远看,还涉及选择市场化的空域管理模式,形成灵活的空域管理体制等。

安全部门旨在实现内外有别的空防管理,根据国家空防任务形式划设空防识别区,减轻空防部门安全责任压力。美国、日本等国家很早就设立了空防识别区,我国也于2013年11月设立了东海防空识别区。同时应将重要设施、炮射区域划设为空中禁区、限制区和危险区,将军事活动空域划定为特殊使用空域,明确区分空防空管职责权限。协调建立通用航空空地联合监管机制,不断加强国家空管委、军航、民航等多方密切配合,防止不符合运行要求和未经审批的航空器扰乱空中秩序。

(二) 灵活使用空域与灵活管理空域

1. 灵活使用空域:资源利用思想的变革

“灵活使用空域”(flexible use of airspace, FUA)是空域资源系统开发利用与合理运行的一种思想变革和物质基础,突破了军用空域或民用空域的指定,确定

任何所需的空域为一种连续空域并灵活使用,隔离只具有临时性质,旨在解决军航和民航根据自身需要的空域资源使用上的矛盾,当然禁区、限制区、危险区和航路等固定空域不属于灵活使用空域。这种空域制度更多的是针对以往航空活动实行审批制度阻碍其需求而提出的。目前世界上大部分国家已实行民航主导,空域资源对民航开放,根据军民航管理权限实施不同的空域灵活使用与管理政策,将灵活使用空域划分为军航和民航灵活使用空域。

美国通过国家空域系统(National Airspace System, NAS)率先建立了军民航协调机制,即自由飞行和管制飞行共存的模式。欧洲航空安全组织也采用“灵活使用空域”策略,在多个国家间实现了“同一天空”,强调使用适当的空域管理程序来解决地面延误或改变路线的问题。在其设计中,根据交通状况和在特定时间段内空域的实时使用情况,将空域灵活地划分出民事或军事,此外,澳大利亚的国家空中交通管理系统在空域管理中日渐发挥重要作用,德国的军民航使用空域也通过空域管理单元(Airspace Management Cell, AMC)进行了协调,印度经过十多年的谈判后,民航终于与军方共享空域;日本的空域协调问题不仅涉及日本军民,还涉及驻日美军,也通过协商得到解决。其共同特点是:通过实时军民航协调,并重新组织划设某些军用和民用空域支撑了最大限度的灵活使用空域。通过空域重新调整与配置,充分利用了未使用空域,比传统的交通流量管理,如空中管制、航班改变路线等提供了更多的用户利益。其灵活性取决于军民联合使用空域提高空中交通的潜力。在系统支持下实时监控所有飞行数据,包括管制员的意图、对隔离空域的需要等。实践证明建立与空域灵活使用相适应的空域分配方法,能保证实现空域的高效使用与管理。

2. 灵活管理空域:概念、内容、影响因素与方法

① 概念:在灵活使用空域思想变革基础上的“灵活管理空域”(Flexible Airspace Management, FAM)系统是美国联邦航空管理局(Federal Aviation Administration, FAA)的“新一代航空运输体系”的主要组成部分。这一概念最初是对高空空域(High Altitude Airspace, HAA)提出的。在HAA,航空器配备空对地数据通信(data common)并进行轨道操作(Trajectory Based Operation, TBO),根据用户优先选择路线和所需要的导航性能,为管理者和空域用户提供最大灵活性和效率,逐渐扩展到抵航或离航空域,特别是特殊活动空域和仪表飞行航空域。

② 主要内容:通过重构空域边界以及使用更灵活的方式,在多个均衡网络流量区域间形成动态分配能力,使管理交通流量的限制相对减少。通过FAM的操作使空域配置动态地适应特殊情况下产生的交通需求失衡和空域堵塞状况。

③ 关联因素:空域容量及其空域利用率和空域管理系统。在各空中导航服务提供商(Air Navigation Service Provider, ANSP)与各空中交通组织,如指挥中心,交

通管理单位(Traffic Management Units, TMUs)和信号塔设施共同努力下确定并平衡空域容量需求。交通需求超过空域容量后流量就会被限制,采取的方法包括延迟程序应用和路线重设方案。④主要方法:使用动态空域配置的“修复补丁发布区”(Fixing Posting Areas, FPAs)和区域结合与拆分的方法进行,包括空域重构、灵活的空域使用和通用空域设计,将预定义空域在功能区间自由切换,以满足特殊情况下用户的交通需求,如设备段供、天气事件规避、特殊空域使用、机场配置更改、交通流量更改,以及海洋跟踪更改等。应用这一方法于灵活空域管理时需与一些人本因素相结合,如空域意识模型、态势感知、工作负荷和通信等,以确保灵活空域管理的可行性。

3. 美国联邦航空管理局和美国国家航空航天局方法与模拟研究回顾

方法与模拟研究是灵活管理空域系统发展的前提,为灵活管理空域系统奠定了后续设计与实施的基础。选择适当的空域配置和解决方案也是具有挑战性的,美国联邦航空管理局(Federal Aviation Administration, FAA)和美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)为确定FAM的潜在优势,使用多种空域优化方法探索空域优化配置选项。目标是更好地分配管理者的工作负荷和更有效地利用空域。新近研究十分关注人本因素辨别问题以及FAM技术处理问题。首先是评估FAM操作提供的优势是否对安全性能产生破坏。研究表明,通过重构空域来管理监测交通变化,具有降低工作负荷、提高容量或飞行效率的优势,空域重构为了应对更改已注重对交通流量进行长时间预测。其次是考查空域优化算法在FAM操作中的潜在作用。特别是探讨在没有任何自动化帮助条件下,通过设计者人工重构空域,来检查算法生成的设计方案是否有利于重构过程。研究表明,其程序具有整体可行性,空域配置能动态地满足交通需求。

高效仿真模拟研究在空域配置中具有巨大优势,包括增加空域容量和更好的分配跨区域的工作负荷。2009年,在NASA的空域操作实验室进行的“人在回路”(human-in-the-loop)模拟实施中,为了更好地了解管理者处理空域重构的能力,增加空域容量更改范围,在操作环境中纳入了HAA的技术假设,从频率、规模和交通量三个方面考察了空域边界更改设置,重点是检查不同范围和边界的空域配置更改对管理者的影响。结果表明,管理者的工作负荷和空域重构的可接受性受航空器数量变化的影响,即使在高交通流量期间实施空域重构也是可行的,空域重构可以发生在HAA与完整数据通信能力环境下。设计者依据不同区域设计和边界更改的反馈,还形成了空域意识模型。“人在回路”研究结果给研究人员提供了可实行及可接受的空域重构类型。其实施环境包括:航空器配备完整的数据通信系统;地面具有自动化冲突检测和解决的能力;地对地数

据通信畅通;实施了实时互动交流的轨道和空域管理计划;已有的算法生成的空域配置;设计者在必要时查看预测的交通状况,修改空域或航空器轨道。模拟研究成果也表明,当航空器占据较大比重空域容量,以及航空器的流动特征也可能对灵活空域管理的操作和可接受性产生不利影响。

(三) 平衡扇区工作负荷

美国国家空域系统(NAS)将空域划分成由“空中交通管制员”(Air Traffic Controller, ATC)组成的扇区,进一步强调了空域的重组对稀缺空域资源的充分利用。德拉埃(Delahaye)等(1994)早已归纳了空中交通管制员的工作负荷:监视工作的负荷,检查飞机轨迹提交飞行计划,在其扇区的主要责任是管理扇区整体交通流;避免冲突工作的负荷,当两架飞机彼此接近时,其必须解决这一危险问题;协调工作的负荷,飞行器离开一个空中交通指挥员的管制区域进入另一个管制区域时,其与飞行器之间的信息交换。科帕德卡(Kopardekar)等(2007)指出了空中交通管制员制度中引进自动分区方法的先进性。麦克纳利(McNally)和提帕冯(Thippavong(2008))在动态空域配置(DAC)领域的研究表明,空域资源有效开发与配置实时调整均需适应需求,这种动态的“重新进行空域分区”模式是基于空中交通管制员的负荷而形成的。美国联邦航空局也希望现有的扇区尤其是超负荷的NAS区域,能更好地适应该空中交通模式。道波(Doble)等(2008)讨论了现有空域设计使用DAC方案在打开或关闭扇区时的优势,证明了终端雷达方法控制(terminal radar approach control, TRACON)的可接受性,动态重新分区通常是通过更改跑道配置而实现的。此外,一些空域扇区重新设计突破了航路交通管制中心(Air Route Traffic Control Center, ARTCC)区域内部限制,推广到航路交通管制中心外的扇区的调整和改变上。当然,采用DAC还有很多操作和人本因素问题需要在下一代空中交通控制系统中进一步解决。

诸多学者提出了平衡扇区工作负荷的方法,如通过使用遗传算法生成泰森多边形图(德拉埃(Delahaye)和普埃奇莫尔(Puechmorel), 2006;薛(Xue), 2008),将平面分成多个多面体细胞(韦斯坦因(Weisstein 2009)),通过进化的算法使最初的空域随机进行分区,使所有的扇区都保证凸性,确保飞行器穿越的线性轨迹不会穿过同一个扇区。川丹克(Trandac)等(2002)根据扇区工作负荷的冲突以及空中交通管制员协调工作,提出了一种约束性的规划扇区的方法。克莱因(Klein)等(2007, 2008)引用并提出了一种动态空域配置转移恶劣天气下飞行计划的灵活方法,使某些程式的空域配置可以共享,通过空域扫描来确定扇区工作负荷的超载,将一个扇区重新分配到共享扇区直到工作负荷消除,这也代表了使用共享概念处理动态适应性问题的的发展。另外,为了避免扇区边界破坏带来的在不同DAC需求模式下的变化,田(Tien)和霍夫曼(Hoffmann)(2009)提出

了一种更有效的使用多交通管制员来增加扇区能力的方法,开发了一个混合整数规划(MIP)模型,整合某些虚拟节点适应管制员数量。米切尔(Mitchell)等(2008)设计了一个递归算法进行给定多边形区域的分区,通过减少一连串的分区,达到扇区之间的工作负荷平衡,分区机制描述的重点是利用平均工作量提出峰值工作负荷和协调工作负荷的一些措施。巴苏(Basu)等(2008)研究了用DAC进行时空轨迹几何分区问题,确定扇区内飞行器的最大值或者平均值超过了指定范围即被认为是工作负荷上限,通过减少给定扇区的工作负荷或者减少扇区的数量来满足工作负荷,还讨论了处理负荷平衡(load balancing among processors)、电子分配区域(electric power distribution regions)、传感器网络(sensor networks)等分区方法。

以上研究丰富了扇区平衡技术,改进了现行的飞行器技术和为飞行器服务的技术,在飞行器飞行和航线的选择中应用了新的软件技术,对迅速变化和不断扩大的航空系统成功实施了事前预防的安全管理方法,使有效的空域资源发挥出更大的效益。

三、方法论变革及应用

(一) 基于算法生成的空域配置设计

根据FAM的概念,为了应对和满足可能的或给定的交通状况变化所需的空域,目前主要利用空域配置优化算法来生成各种空域重构,学者们预先设计或选用一组预定义边界或区域选项来进行空域配置的设计。与没有空域重构算法而自动生成或由设计者人工创建的条件比较,空域配置优化算法更为有效。在FAM操作中形成了四种空域配置优化算法。动态空域单位切片(DAU slices)、细胞几何区域(cell geo sect)、区域流动(sector flow)和泰森多边形图(voronoi)。不同算法给设计者提供了不同的机会来更好地了解具体的设计因素和解决途径。动态空域单位切片算法通过一系列周边区域间的增量片单位划分出动态空域。这些单位分配给特定空域内能够最有效分配交通流量需求的合适区域,新的功能分区在特定时间间隔内生成并更改,减少了区域超过或者低于流量的情况。细胞几何区域算法把空域划分成小六角形细胞网络,来平衡航空器停留时间以及在区域间数量的不均匀问题,系统地结合相邻细胞共享交通流量,同时维持交通最优化标准。区域流动算法创建区域边界并根据界定的聚类准则,通过聚集时间采集的航空器位置,确定特定空域的交通流量,并将其余的航空器位置分配给合适的聚类,基于产生的聚类文件填补空旷的聚集区域。在特定时间内每个聚类都可以最有效地围绕航空器所在位置。一旦建立空域边界空域配置就会调整空域范围内的密度因素。泰森多边形图算法用于分割空域为凸形区域,

形成一套相关的“生成点”,结合遗传算法对这些点进行优化配置,以减少预定义的度量标准(如航空器数量、飞行时间、区域边界过境点数量等)优化空域设计,很好地满足最终状态目标,保证重构选项不仅在横向也可以在纵向范围的设置。

(二) 从动态空域配置到动态空域分区的转化

使用更为有效的资源分配方法达到空域容量需求平衡是空域资源利用研究的基本目标,所以越来越注重动态变化、流量变化和资源要求(泽林斯基(Zelinski),2009)。目前多是通过管理飞行轨迹时空结构以及空中交通管制员(ATC)调整以满足空域用户的需求(李(Lee)等,2008)。动态空域配置(DAC)是一种面对空域资源开发与空域容量管理的挑战而提出的,同时满足交通约束条件和复杂性结构,以及高度多样化的运营模式(科帕德卡(Kopardekar)等,2007)。但由于各种人为因素影响,其在扇区和空域重新配置操作上的应用还很有限(米切尔(Mitchell)等,2008)。分析DAC方法的局限性,有利于设计更有效的空域重构支持工具。动态空域分区(DAS)是空域重组的一种新的有效方法,能实现需求和容量的平衡,减轻空中交通管制员的工作负荷,确保空中交通流通的有序性。在DAS中,基于动态密度措施(如交通流量、飞行器密度、扇区边界、扇区时间、可变性和速度变化)、ATC的工作量和扇区的几何约束(如凸性、棱镜约束),重新对空域扇区进行动态配置(联邦航空管理局第7210.3U,联邦航空管理局第7400.2F,2006)。

DAS的本质是有多个相互矛盾的目标,空中交通管制员难以创建大量碎小的空域扇区,同时,也不能将扇区进行组合以免造成一个扇区内空中交通管制员工作负荷过大。因此,有学者通过扇区间的调整以及交通流量削减,提出多目标的动态功能分区方法(布林顿(Brinton)和普兰吉(Pledgie),2008;薛(Xue),2008),保持在交通过境点和扇区边界距离使空中交通管制员有足够的时间去应对潜在的冲突,在一个可操控的时间环境中使DAS适应频繁的交通变化和成本最小化。动态空域分区评估方法的重要基础是空中交通数据,如速度、航向、高度,所使用的空中交通数据来源于一个固定的时间窗口对领空飞行轨迹的统计(阿拉姆(Alam)等,2008)。当基于公共信息网获得一个给定时期内航班流量统计数据时,就可以生成横向图和横向热点图,表明交通流量的过境点特征。

(三) 2D 动态空域分区方法

常用的2D-DAS算法有三种:①飞行轨迹聚类(Flight Trajectory Clustering)算法,基于飞行轨迹的集群(布林顿(Brinton)和普兰吉(Pledgie),2008),由飞行线路进行分组形成扇区边界,再由飞行轨迹组成空中交通流,使每个轨迹构成一个时空数据集,通过飞行轨迹和飞行位置聚类对空域进行功能分区。②混

合整数规划(mixed integer programming algorithm, MIP)算法,将空域划分成六边形细胞,根据工作负荷和连接性对细胞进行集群(米切尔(Mitchell)等,2008;韦里亚克(Verlhac)和曼琼(Manchon),2001),依据在细胞内飞行器数量确定每个细胞的承载力,航班从一个细胞*i*流入从相邻细胞*j*流出,每个细胞的工作量就成为最后的流量。③ 泰森多边形与遗传算法(Voronoi Diagrams with Genetic Algorithm),利用空域分区和遗传算法优化分区(德拉埃(Delahaye)等,2001;薛(Xue),2008和张(Zhang),2004),将一个空间分解为在周围产生点的子扇区,一个区域内所有的点以及由这些点产生的点比其他区域内产生的点更接近,然后用遗传算法给定参数将泰森多边形的点进行优化。

由于2D-DAS方法较少涉及多目标问题,特别是2D在功能分区时高度考虑缺失问题,而在飞行器爬升期间高度设计又是关键部分,尤其是在过渡空域中,因此研究动态功能分区的重点集中在高度维上,最近已开始关注3D动态空域功能分区方法。德拉埃(Delahaye)和普埃奇莫尔(Puechmorel)(2008),基辛格(Kicing)和优素菲(Yousefi)(2009)和米切尔(Mitchell)等(2008)拓展了二维空域动态功能分区方法,将空域视为三维空间中平均分布的网格细胞,其中将启发式空域分割方法用于扇区的形成中,进行3D功能分区。学者们利用遗传算法(Genetic Algorithm, GA)确定个体的初始位置,并将基于个体的模型(ABM)用于确定细胞的集聚。使用基于个体的模型的聚类方法可使每一个个体代表一个扇区,在空域内找到并组成最佳的细胞和进入扇区的三维空间。然而ABM违反了棱镜约束条件,使得空中交通管制员无法在屏幕上进行空中交通管理,并且,由于ABM具有嵌入式扇区和非凸性的形状,使得航班可以多次进入同一扇区从而增加了管制员的工作负荷。这种依据空中交通通用性和工作负荷的空域分区方法不能提供最佳的DAS解决方案。

(四) 3D-DAS方法的改进

新的3D-DAS方法经多种不同模型的改良,更好地考虑了每个模型的多目标(工作负荷平衡和扇区飞行时间)优化。使用空中交通数据对基于个体模型的3D空域功能分区的性能和效率进行分析、比较、评价发现,高效的3D-DAS方法能针对空中交通需求的波动对空域进行重新分区。正因为ABM具有以上局限性使得其无法在实践中应用,通过实验评估提出了一种改进的基于个体的模型(iABM),与现有的模型相比提高了直棱柱的满意度、降低了计算成本。

总结3D-DAS方法的利用,需有正确的棱镜、凸性、嵌入式扇区、形状的多样性和效率。形状多样的扇区为空中交通流量校准和扇区间保持必要的最小距离边界和交通流过境点提供了更大的灵活性。ABM的局限性以及产生原因和可能的解决为建立一个改进的基于个体的模型(iABM)提供了基础,iABM是一

个改进的 3D 空域分区个体模型 (Agent Based Model), iABM 的一个目标是满足棱镜约束和解决嵌入式扇区问题,另一目标是解决扇区交通最大化和空中交通管制员的工作负荷问题。为了满足正确的棱镜约束条件,必须将相同的水平或者垂直的细胞进行分组。前文已述,空域结构包括航线路径和关键顶点,可由一组边和点之间的无向边缘图来描述,边和点的动态工作负荷由监视工作负荷、协调工作量负荷、避免冲突负荷三部分组成,共同构成复杂性空域,以满足约束凸性、最小距离(扇区保护区周围两个顶点之间的距离)和最小穿越时间的需要,iABM 克服了一些 ABM 模型的限制,较好地考虑了 ATC 工作量和扇区符合交通流。

(五) 流量管理与平衡扇区的应用

美国领空的需求是完全动态的,当前的空域资源配置主要是利用历史的空中交通流模式,某些情况下可能会影响扇区的能力并减少交通流量。因此,为了更好地利用空域资源,美国联邦航空管理局 (FAA) 一直在探索动态空域分区方法,以及调整当前空中交通流静态扇区边界以扩大扇区能力 (FAA, 2002; 田 (Tien) 和霍夫曼 (Hoffmann), 2009)。一个应用实例是依据 Metron 航空的 1936 次航班通过美国领空克利夫兰、俄亥俄州附近的情景描述,扇区配置显示 11 个二维投影,生成的 195 个虚拟扇区涵盖了原扇区的整个封闭体,这些扇区覆盖在三个高度水平上,生成虚拟空域 7315 米至 9449 米的最底层,9449 米至 10973 米的中间层,10973 米以上的最高层。用 195 个三维虚拟扇区以及给定的 3D 飞行轨迹的时间范围,使网格点位于每个虚拟扇区的中心位置并重新分组,根据获得的结果计算了在每个虚拟扇区中的飞行器峰值和平均数量,不限制可解决问题的次数和持续时间,相关扇区的工作负荷和组合措施评估可见,所有三层空域的飞行器数量平均分布扇区的配置更加平衡,峰值工作负荷得到公平分配。

新扇区配置仍然存在一些缺点。原来的扇区之间的设计是相对同质的水平高度,然而分层扇区对应的高度有很大不同,这可能会对空中交通管制员在不同高度的扇区间操作转换产生影响。优素菲 (Yousefi) 和多诺霍 (Donohue) (2004) 指出,该方法分别在每一层生成扇区,而在跨越多个层的情况下空域扇区难以定义特殊水平扇区的交通密度。这些潜在缺陷是人在回路设计功能障碍空域需要考虑的一个问题,米切尔 (Mitchell) 等 (2008) 的论文在这方面提供了一个很好的讨论。

四、关于学科的展望

新世纪以来,关于空间事物的研究正在由陆域、海域向空域演进。相对于陆域和海域要素的边际特征而言,空域边界更趋向模糊、使用更为灵活,并且空域资源也不是一个静态的绝对空间的概念,而是一个反映更多相互关系的过程。

同时,空域使用类型划分也是新时期空间管治科学化的重要举措。这就是空间深刻变化所体现出的主要学科问题。当前空域资源开发利用的理论创新主要体现在新一代航空运输体系、灵活空域使用、平衡扇区的变革与应用问题上,包括概念、原理、框架、结构、概式、模型和组成特点等,为统筹空间资源开发,确定空域网络架构与功能,协调基础设施与空间管治提供依据。近来3D空域功能分区模式给出了启发式空域分割的基本方法,在灵活空域管理中可发挥动态空域配置的优势以适应空域边界的自由变换,过去的空中交通管理(Air Traffic Management, ATM)仅仅可以进行各功能区间的结合与拆分,而动态空域配置方法可以通过灵活空域管理使空域进一步适应空中交通需求,减少飞行需求和空域容量之间的不平衡。通过开发适于空间类型划分的空域系统方法,有助于解决不同类型因子的空间分值叠加问题,尤其是侧重解决基于不同等级、不同形态的设施以及路网结构的不同类型、不同方式、不同半径的空间扩散的技术实现问题,使其成为解决空域不同活动间冲突的有效工具。为了更深入地理解、发展空域学相关基本理论与方法论,将其作为一门基础课程在教学中系统传授相关知识具有一定的学科意义,此外,为了有利于国家空域系统的进一步改善,管理者也需要更好地理解其内涵,这就是《空域学概论》一书编写的目的。

未来随着陆地资源的枯竭,人们对于空域资源的依赖愈加强烈,在应用陆域要素功能理论于空域要素功能研究时,需把区域空间思想融入空域学分析框架中,旨在重构空域发展格局,实现陆—空联动与融合。我国正进入空域资源开发与空间组织演化的关键阶段,揭示空间组织演化中的潜在问题,描述空间组织演化面临的形态、地域、陆空关系的转变,在满足宏观的空域资源利用与微观的扇区管理需要的前提下,合理确定网络型空间架构与功能布局,统筹基础设施及空间管治与协调,对于优化目前空域资源利用,改善无序发展引发各种问题都具有重要意义。

通过以上对国外空域资源开发利用理论、方法与实例的概括性回顾,我们认为空域学的学科与课程建设势在必行。

路紫

2015年11月

前 言

近年来,空域科学在理论与实践进一步向综合性发展,涉及的知识面日趋广阔,与相邻学科的关系愈益紧密。同时,包括自身特殊领域、方法与理论在内的学科独立性也已初步建立。但是国内目前尚缺乏系统的空域科学基础教材,这既不利于帮助学生全面了解空域基本知识,为毕业后参与相关工作积累知识财富,也不利于空域科学基础理论、方法论及其应用的发展,迎接新时期空中交通的挑战。编者认为,有必要总结空域科学相关研究中最先进、最精彩的基本规律与原理、关键技术与知识,编写一本能综合反映空域科学领域新成果、新思维、新方法、新发现的教科书——《空域学概论》,为航空服务相关专业人才培养提供理论依据和教学指导。

本书的特色在于:

第一,引进、综合与归纳是基本出发点。本书较系统地参阅了国内外研究文献,并以此为基础综合和归纳了空域科学知识体系,所综述的国内外文献数量较大、覆盖面广,充分引入、解释最新研究成果和实践经验,注重理论性与实用性的结合、定量与定性分析的结合,为其系统性、科学性提供了有力保障。

第二,尝试进行空域学学科体系的构建。本书构建在一个独特的框架体系之上:基于系统论基本理念,沿着“资源本体的基础—资源利用中的管理—资源经济开发的产业化—资源开发技术与规划—安全保障”的框架思路,尝试构建空域科学的资源系统、管理系统、经济系统、规划技术系统和安全系统五大系统。

第三,突出其跨学科的特性。空域学作为一门新型交叉学科,是一个多学科介入的领域,汇集了多方面知识,涉及资源学、管理学、地理学、经济学、环境学与规划学等。在编写过程中,编者努力使理论结合实际,尽可能汲取社会经济活动中所积累的各相关学科领域的思想和精华,以突出其跨学科的特性。

第四,助推我国空域改革与实践。本书关注空域改革这一热点问题,总结了国外航空发达国家空域管理的先进经验和方法,汲取了其中有益成分,这将有利于推动我国空域改革的进程,促进空域资源开发利用可持续性。

总之,本书不仅是航空服务专业学生应该开设的一门重要专业基础课程,也是从事空域开发利用与管理的实践者和理论研究者应该掌握的重要知识。为了适应课程学习的要求,本书在编写过程中注意保持了教学内容的系统性,同时力

求能反映当前空域学的最新发展。需要指出,本书是一门理论性、专业性、应用性均较强的课程,涉及内容广泛,因此如何在规定的学时内使学生掌握基本知识,并能在今后的工作中有效利用还需要教学实践确认。

本书建立了五大系统和我国空域协调与分区的内容结构,共分七章,第一章为绪论,是全书的思想基础;第二至六章依次为空域资源系统、空域管理系统、空域经济系统、空域规划技术系统、空域安全系统;第七章为空域协调与分区,包括由中央—地方—机场组成的纵向系统和由全国各航空区组成的横向系统。五大系统分别描述了各自的相关概念、基本知识和发展现状,旨在为我国空域资源的合理开发利用和空中交通的安全管理提供理论与方法;空域协调与分区描述了我国空域地理分区差异问题,旨在说明我国空域资源应用现状,延伸五大系统的研究内容。

本书是经过几年的酝酿、考察、实践与发掘才逐渐完成的。编写过程中,离不开我们的学生的热情参与与协同攻关,他们的支持是十分有力的。他们是李贺、邢璐霞、刘琳、王玉婷、温静、杨悦、尚昊晨、刘巨、刘洋、艾巧玥、崔腾宇、韩汝珂、翟杨杨、张红美、纪树颖、许静平、李晶晶、杜欣儒、白龙等。高等教育出版社的编辑付出了辛勤的劳动,做了大量细致的工作,书中引用了国内外专家学者和有关部门的学术文献和规划成果,在此一并表示深切谢意。由于该学科成熟度的局限和编者水平的限制,书中内容选取和体系构建尚有欠缺,对不完善和差错之处,希望得到专家等读者的指正和批评,以便及时改进。

我们衷心希望,本书的出版既能推动高等院校航空服务的学科建设与教学实践,也能促进空域科学的全面发展。

路紫 张秋雯

2015年8月

目 录

第一章 绪论	1	运行的国内外比较	116
第一节 空域的概念、分类、利用与 研究综述	1	第四节 美国“灵活空域管理”系统 发展过程:设计与执行	125
第二节 空域学学科体系的构建	17	复习思考题	135
复习思考题	31	参考文献	135
参考文献	31	第四章 空域经济系统	141
第二章 空域资源系统	34	第一节 通用航空产业发展及其 产业链(产业集群) 构成	141
第一节 空域资源开发利用的 基本理论	34	第二节 我国商务航空的发展:供给 与需求	154
第二节 空域资源开发利用的 评估方法	45	第三节 我国商务航空发展的环境 与趋势分析	164
第三节 空域流量控制技术与 应用	61	第四节 通用航空旅游产品体系与 发展模式	171
第四节 空域资源开发利用展望: 新一代航空运输体系 构建	71	第五节 固定基地运营的发展与 运营模式及其演变	185
第五节 美国空域资源开发利用的 基础性支持	80	复习思考题	195
复习思考题	94	参考文献	196
参考文献	94	第五章 空域规划技术系统	200
第三章 空域管理系统	99	第一节 空域规划概述	200
第一节 航空制度建立:历史与 展望	99	第二节 终端区扇区划设方法	211
第二节 中国低空开放发展 评述	107	第三节 低空突防航路规划的 算法	219
第三节 基于 FUA 的空域管理系统		第四节 枢纽机场规划设计理念与 应用	227