



空域规划与管理

Airspace Planning and Management

王莉莉 张兆宁/著



科学出版社

空域规划与管理

Airspace Planning and Management

王莉莉 张兆宁 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

空域相关问题是目前研究的热点。本书从空域规划和空域管理的角度出发,首先对空域的基本概念进行了介绍,然后对空域的属性,尤其是资源属性进行了分析;在此基础上,介绍了空域分类和空域设计的主要内容,重点给出了航路网设计和评估的相关方法和模型;然后论述了空域评估方面的理论和相关模型;最后对空域动态管理问题进行了研究,给出了动态扇区和动态改航的规划模型和优化算法。

本书可作为高等院校空中交通管理等相关专业高年级本科生和研究生的教材及科研参考书,同时也可作为与空域相关的理论研究人员、工程技术人员和管理人员的参考用书和培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

空域规划与管理/王莉莉,张兆宁著. —北京:科学出版社,2019.3

ISBN 978-7-03-060414-9

I. ①空… II. ①王… ②张… III. ①空中交通管制 IV. ①V355.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019) 第 004153 号

责任编辑:周 涵 田轶静/责任校对:彭珍珍

责任印制:吴兆东/封面设计:无极书装

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

*

2019 年 3 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2019 年 3 月第一次印刷 印张:19 1/4

字数:389 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

随着航空运输的迅猛发展, 航空器的运行环境和平台——空域受到了空前的重视。早先的理论一直认为空中交通管理概念是包含空域规划与管理相关内容的, 但随着 PBN(基于性能导航) 技术的发展和智能无人管理理念的不断深入, 国际民航组织已经将空域的概念提升到顶层, 空域的概念涵盖通信、导航、监视和空中交通管理。未来的空中交通将是由智慧空域自主管理运行的, 因此对空域的研究需求是十分迫切的。

我们的研究团队长期从事空域规划与管理方面的研究, 在研究的过程中发现, 有关空域的智能优化研究方面的相关论文逐渐增多, 研究点百花齐放, 但是系统研究空域方面内容的论著却不多见, 所以本研究团队尝试建立空域规划与管理的理论体系, 将空域的研究分为管理政策、分类标准、空域设计、评估和优化几个大的研究方向。因为想先给出一个基础的概述性的入门书, 也因为版面有限, 所以每个研究方向都给出相关的一些研究内容和研究成果, 但是这些内容实际上是远远不能包含该方向上的所有研究成果的。进一步讲, 从第 2 章开始, 之后的每一章都代表一个研究方向, 其研究深化后都有可能单独成书。希望这本书起到抛砖引玉的功效, 能够促进产生一批空域方面研究的专家。

本书的结构安排如下: 第 1 章综合介绍了空域的基本概念和现状; 第 2 章给出了空域的属性分析、空域的政策制定、空域资源的价值分析和利用率计算模型; 第 3 章给出了空域分类的规定和分类方法; 第 4 章给出了飞行程序设计、终端区设计和扇区设计的相关内容; 第 5 章给出了航路网设计方法及相应的评估指标; 第 6 章给出了空域评估的相关研究内容, 以全国情况为例, 给出了空域保障能力评估、航路交叉点的复杂度评估和安全风险评估; 第 7 章探讨了动态扇区的划分和开合问题; 第 8 章给出了动态改航问题的研究成果。考虑到各章内容的相对独立性, 为了方便读者, 各章引用的参考文献直接附在章后。

本书内容由王莉莉组织与设计, 第 1 章、第 3~5 章由王莉莉撰写, 第 2 章、第 6~8 章由张兆宁和王莉莉撰写, 另外, 还有许多教师和研究生参与了理论研究、材料整理和写作, 主要有任杰、李晓津、位放、蒋一森、王航臣、杨勇、刘子昂、鲁胜男、王鑫、周娟、张潇潇、王坤、吴越等, 在此感谢他们对本书的贡献。此外还有许多领导、同事给予了大量帮助, 也在此表示感谢。

由于作者水平有限, 书中不妥之处在所难免, 恳请广大读者批评指正。

王莉莉 张兆宁

中国民航大学空中交通管理学院

2019 年 1 月

目 录

前言

第 1 章 空域的基本概念	1
1.1 空域的概念	1
1.2 空域类型	1
1.3 空域现状	7
1.3.1 空域结构数据	7
1.3.2 空域现状特点	9
1.4 空域规划与空域管理的概念	10
参考文献	11
第 2 章 空域资源分析	12
2.1 空域资源的属性分析	12
2.1.1 空域资源的概念	12
2.1.2 空域资源的属性	12
2.2 制定国家空域资源利用政策的原则和框架	15
2.2.1 国家空域资源利用政策的出发点和依据	15
2.2.2 制定国家空域资源利用政策的原则	16
2.2.3 国家空域资源利用政策的框架体系	17
2.3 空域资源的价值分析和度量	18
2.3.1 空域资源的价值分析	19
2.3.2 基于影子价格的空域资源的价值度量	20
2.4 空域资源利用率的计算模型	26
2.4.1 基于空间概念的空域资源利用率计算模型	26
2.4.2 基于时空的区域管制空域资源短时利用率模型	27
2.4.3 基于时空资源消耗的终端区的短时利用率模型	31
2.5 空域资源的现状与利用策略	37
2.5.1 空域资源利用目前存在的问题	37
2.5.2 空域资源的利用策略	38
参考文献	40
第 3 章 空域分类	41
3.1 空域分类概况	41

3.1.1	空域分类概念及目的	41
3.1.2	空域分类依据与原则	41
3.1.3	空域分类相关因素	41
3.1.4	空域分类的产生原因	42
3.1.5	国际民航组织空域分类的基本状况	43
3.2	美国空域分类进化过程	44
3.2.1	非管制阶段	44
3.2.2	管制空域 (E 类) 诞生	45
3.2.3	过渡空域 —— D、C、B 类空域的雏形	45
3.2.4	D 类空域的出现	45
3.2.5	雷达时代的来临	46
3.2.6	限制空域 —— C、B 类空域产生	46
3.2.7	A 类空域产生	47
3.3	国外空域分类方案	47
3.3.1	美国空域分类方案	47
3.3.2	英国空域分类方案	48
3.3.3	德国空域分类方案	49
3.3.4	澳大利亚空域分类方案	50
3.4	我国目前空域分类情况及分析	51
3.4.1	我国目前空域分类方案	51
3.4.2	中、美空域分类状况对比	52
3.4.3	我国目前空域分类方案的缺陷	53
3.4.4	对我国空域分类的建议	54
3.5	空域分类及变更模型	55
3.5.1	空域分类模型	55
3.5.2	空域分类的转换条件	57
3.5.3	空域类型的变更建议和讨论	58
3.6	空域分类的未来发展趋势	59
3.6.1	美国未来空域的发展趋势	59
3.6.2	欧洲未来空域的发展趋势	60
	参考文献	61
第 4 章	空域设计	62
4.1	飞行程序设计	62
4.1.1	飞行程序设计定义	62
4.1.2	飞行程序设计原则	63

4.1.3	飞行程序的结构	63
4.1.4	飞行程序设计考虑的因素	65
4.1.5	飞行程序设计的基本步骤	65
4.1.6	程序设计相关基本概念	66
4.1.7	传统程序设计技术总结	67
4.1.8	PBN 程序设计技术总结	70
4.2	终端区空域设计	73
4.2.1	终端区空域概述	73
4.2.2	终端区空域设计的现状分析	74
4.2.3	终端区域内的运行实际分析	76
4.2.4	标准仪表离场和进场航路的建立	76
4.2.5	重点的理想位置	78
4.2.6	终端空域的设计步骤	79
4.3	扇区设计	81
4.3.1	扇区概念	81
4.3.2	扇区结构特征	81
4.3.3	扇区划分种类	86
4.3.4	扇区划分考虑因素	87
	参考文献	87
第 5 章	航路网设计	88
5.1	航路与航路网	88
5.1.1	航路与航路网简介	88
5.1.2	航路网结构的发展	88
5.1.3	航路网规划的意义与目的	91
5.2	航路网规划	91
5.2.1	航路网规划的原则	92
5.2.2	航路网规划的考虑因素	92
5.2.3	航路网与机场的关系	93
5.2.4	航路与航空公司航线的匹配关系	93
5.2.5	航路网规划参考方法	94
5.3	枢纽机场确定方法	99
5.3.1	基本假设和说明	99
5.3.2	模型建立	100
5.3.3	模型的求解	103
5.3.4	实例验证及分析	103

5.4 航路网的评价指标	106
5.4.1 航路网布局质量指标	106
5.4.2 航路网运行指标	109
5.4.3 航路网拓扑结构特征	110
参考文献	114
第 6 章 空域评估	115
6.1 空域容量评估	115
6.1.1 空域容量评估概述	115
6.1.2 航路交叉点容量评估	117
6.1.3 基于跟驰稳定的终端区容量评估方法	122
6.1.4 基于管制员工作负荷的扇区容量评估	125
6.2 空域保障能力评估	128
6.2.1 空域保障能力评估概述	128
6.2.2 空域保障能力评估指标体系	128
6.2.3 评估数据的处理	139
6.2.4 评估结果	151
6.3 航路交叉点的复杂度评估	153
6.3.1 航路交叉点复杂度模型构建	153
6.3.2 复杂度模型参数的敏感性分析	154
6.3.3 航路典型交叉点复杂度的评估结果	157
6.4 航路交叉点的安全风险评估	158
6.4.1 航路交叉点碰撞风险模型建立	158
6.4.2 航路典型交叉点安全风险的评估结果	173
参考文献	173
第 7 章 动态扇区	175
7.1 基本概念	175
7.2 基于管制员工作负荷的扇区规划模型	177
7.2.1 管制员工作负荷模型	177
7.2.2 扇区优化模型	178
7.3 基于进离场航路分离管制下的终端空域扇区优化模型	179
7.3.1 功能性扇区规划的规划步骤	179
7.3.2 功能性扇区规划的优化模型	179
7.4 基于整数规划的终端区动态扇区划分	181
7.4.1 指定终端区空域范围	181
7.4.2 整数规划模型	181

7.4.3 扇区分	184
7.4.4 算例验证	185
7.5 基于复杂度分析的空域扇区分	188
7.5.1 复杂度关键评价指标的构建	188
7.5.2 空域扇区复杂度模型研究	193
7.5.3 基于复杂度分析的空域扇区分研究	201
7.6 扇区的动态开合	206
7.6.1 合理调整扇区的评估模型	207
7.6.2 扇区分配的复杂性	208
7.6.3 可行性扇区组合	208
7.6.4 扇区动态使用的划分模型	210
7.6.5 扇区动态使用的实现与结果分析	211
7.7 基于 Delaunay 三角形的分时段扇区动态开合	212
7.7.1 Delaunay 三角形介绍	213
7.7.2 高空扇区划分的基本思路	213
7.7.3 建立管制扇区划分方法模型	213
7.7.4 算例分析	217
参考文献	221
第 8 章 动态改航	222
8.1 改航路径规划简介	222
8.1.1 改航相关概念介绍	222
8.1.2 飞行区域划设方法的研究现状	225
8.1.3 改航路径规划方法研究现状	229
8.2 飞行受限区域划设	232
8.2.1 影响航路飞行安全的重要天气	233
8.2.2 静态飞行受限区	235
8.2.3 动态飞行受限区	237
8.2.4 飞行受限区的形状及分布特征	243
8.3 不同飞行受限区域下的改航路径规划	247
8.3.1 块状飞行受限区域下的改航路径规划	247
8.3.2 带状分布飞行受限区域下的改航路径规划	254
8.3.3 散点状分布飞行受限区域下的改航路径规划	259
8.3.4 圆形飞行受限区域下的改航路径规划	266

8.3.5 椭圆形飞行受限区域下的改航路径规划	274
8.3.6 动态多边形飞行受限区域下的改航路径规划	279
参考文献	298

第1章 空域的基本概念

1.1 空域的概念

研究空域首先应当明确空域的定义。就航空而言,无论军航还是民航,“空域”这一术语都有着广泛的使用,各界都从自己的角度给出了空域的定义,但还没有一个统一的明确的定义。

《中国人民解放军军语》中将空域定义为“根据飞行训练和作战的需要而划定的一定范围的空间”;《空军百科简编》将其定义为“根据航空器实施作战、飞行训练、科学实验等的需要划定的具有一定范围的空间”;《航空法规分析》(北京航空航天大学教材)将其定义为“空域是指地球表面以上的空气空间”;《空中交通管理新论》(施和平著)中将其定义为“空中交通工具在空气空间中的活动范围称为可航空间(又简称为空域)”;丰宗旭等在《空域特性及空域管理》一文中将空域定义为“地球表面以上可供航空器飞行的一定范围的空间”。

在上述定义的基础上,本书定义空域为:地球表面以上,具有一定大小、形状和结构,以空气为介质,可用于航空活动的特定空间,其功能是为空中交通工具提供运行空间以便完成其预定的任务。

这里的空间通常认为是大气层以内的空间,为空气空间。这里所说的空中交通工具就是航空器。航空活动主要是指飞行,包括军事航空的作战和飞行训练,民用航空的运输,对于通用航空还包括勘测、照相、飞播、灭火等内容。

空域提供的服务可以分成两种:一种是自然进行无须人参与的,可称为自然服务;另一种是人借助设备,利用技术提供的服务,可称为人工服务。自然服务,比如由于存在大气而产生的浮力和空气动力,又如因大气透明而在日间产生的自然光照明,以及因大气重量而产生的气压变化等。人工服务是空域服务中内容比较丰富的一部分,包括了通信、导航、监视等内容,这些在空中交通服务理论中按照服务的内容被分为三类:空中交通管制服务、空中交通情报服务、空中交通告警服务。随着空中交通的发展,人们在飞机上也会逐渐需要个性化的其他信息服务,这里可以将其列为第四类——资讯服务。

1.2 空域类型

根据不同的划分标准,可将空域划分为不同类型。根据国际民用航空组织(简

称国际民航组织, ICAO) 的规定, 将空域划分为飞行情报区、管制区、特殊用途空域、咨询区。特殊用途空域包含危险区、限制区、禁区、预留区、放油区。

我国空域类型的划分与国际民航组织的规定大同小异, 而且我国颁发的相关文件上对空域类型的规定也不完全相同。根据《中国民用航空空中交通管理规则》, 空域分为飞行情报区、管制区、限制区、危险区、禁区、航路和航线^[1]。按照《中华人民共和国飞行基本规则》的规定, 空域通常划分为机场飞行空域、航路、航线、空中禁区、空中限制区和空中危险区等。此外还有根据空域管理和飞行任务需要划设的空中走廊、空中放油区和临时飞行空域^[2]。下面对部分空域类型进行介绍。

1. 飞行情报区

飞行情报区是指为提供飞行情报服务和告警服务而划定的空间范围。飞行情报区内的飞行情报工作由该区飞行情报部门承担或由指定的单位负责。为了便于对在中国境内和经国际民航组织批准由我国管理的境外空域内飞行的航空器提供飞行情报服务, 全国共划分为北京、兰州、广州、武汉、上海、沈阳、乌鲁木齐、昆明、三亚、香港和台北 11 个飞行情报区。为了及时有效地对在我国飞行情报区内遇险失事的航空器进行搜寻援救, 在我国境内及其附近海域上空划设搜寻援救区, 搜寻援救区的范围与飞行情报区相同。

2. 管制区

管制区指为本区的飞行提供空中交通管制服务的空域。不同的空域类型, 服务可有所不同。每个管制区的确定也取决于无线电的覆盖范围、地理边界、配备的人员、设施及管理手段等。根据飞行量、空域结构、活动的构成等, 在垂直方向, 可划分为高空、中低空管制区。我国将管制空域分为高空管制区、中低空管制区、进近(终端)管制区和塔台管制区(也称为 A、B、C、D 类空域)。图 1.1 为大连管制区示意图。

管制区里还根据需要划有终端区和扇区。终端区是设在一个或者几个主要机场附近的空中交通服务航路汇合处的管制区。通常情况下, 在终端管制区内同时为两个或者两个以上机场的进场和离场飞行提供进近管制服务。终端区作为整个空管系统的一个子系统, 由于航空器在其中的运行主要是起飞、下降、对头飞行, 所以从某种程度上说, 是情况最复杂的一个子系统。

一般情况下, 根据管制员的工作负荷, 会将终端区再划分为两个或者两个以上的部分, 每个部分称为一个管制扇区, 其目的是将管制区的工作量分配至两个或者两个以上的管制席位, 减轻单一管制席位的工作负担或者减少陆空通话频率拥挤。

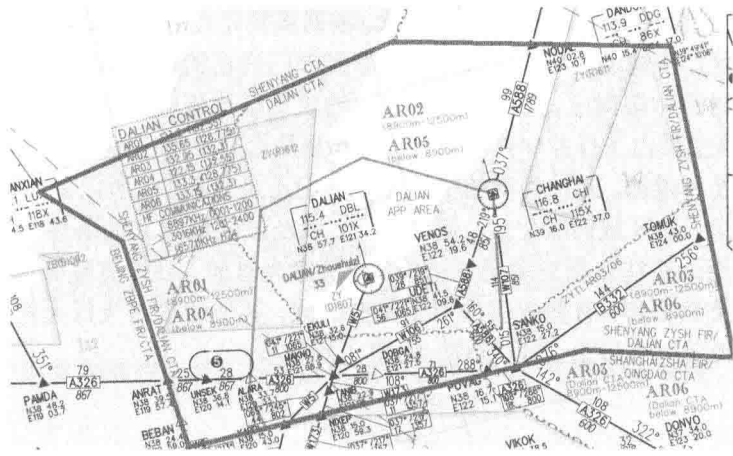


图 1.1 大连管制区示意图

3. 危险区 (D)

危险区位于机场、航路、航线附近的对空射击场或者发射场等，根据其射向、射高、范围，可以在上空划设空中危险区或者临时空中危险区。在规定时限内，禁止无关航空器飞入空中危险区或者临时空中危险区。危险区可以由每个主权国家根据需要在陆地或领海上空建立，也可以在无明确主权的地区建立，它在所有限制性空域中约束、限制最少。有关国家应在其正式的文件、通告中发布该区建立的时间、原因、持续的长短，以便于其他飞行员能应对该空域中的危险。国际民航组织规定，在公海区域，只能建立危险区，因为谁也无权对公海飞行施加更多的限制。在美国，此区域被建立在国际水域上空。当该区域建立危险区所依赖的条件不存在时，即行撤销。危险区在航图上以 D 表示，如图 1.2 所示。

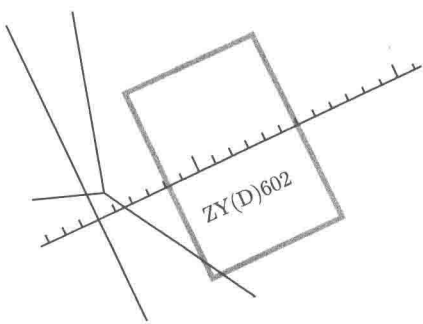


图 1.2 危险区示意图

4. 限制区 (R)

限制区一般设置在航路、航线附近的军事要地、兵器试验场上空和航空兵部

队、飞行院校等航空单位的机场飞行空域。根据需要还可以在其他地区上空划设临时空中限制区。在规定时限内, 未经飞行管制部门许可的航空器, 不得飞入空中限制区或者临时空中限制区。该区域是限制、约束等级比危险区高, 又比禁区低的一种空域。在该空域内飞行并非是绝对禁止的, 而是否有危险已不能仅仅取决于飞行员自身的判断和推测。此种类型的空域建立一般不是长期的, 所以最重要的是要让有关方面知道, 该区域何时生效、何时终止, 以及该区域建立的条件和原因等。建立限制区的原因往往包括空中靶场试验、高能激光试验、导弹试验等, 有些限制区的生效时间持续多年, 有些仅仅作用于某些时段, 其他时段对飞行无任何影响。在航图上, 限制区用字母 R 加以标注, 如图 1.3 所示。



图 1.3 限制区示意图

5. 禁区 (P)

禁区划设在国家重要的政治、经济、军事目标上空。未按照国家有关规定经特别批准, 任何航空器不得飞入空中禁区和临时空中禁区。该区域是限制、约束等级最高的区域, 被划分为永久性和临时性禁区两种。空中禁区一旦建立, 任何飞行活动被禁止, 除非有特别紧急的情况, 否则将遭受致命的灾难。这些区域主要用来保护关系到国家利益的重要设施, 如核设施、化学武器生产基地以及其他某些敏感区域。各国对禁区的建立都比较慎重, 常以醒目的字母 P 在航图上加以标注, 如图 1.4 所示。



图 1.4 禁区示意图

为一个等待高度层。图 1.6 为天津等待空域示意图。机场飞行空域的划设,由驻机场航空单位提出方案,报所在地区的中国人民解放军军级航空单位或者军区空军批准。

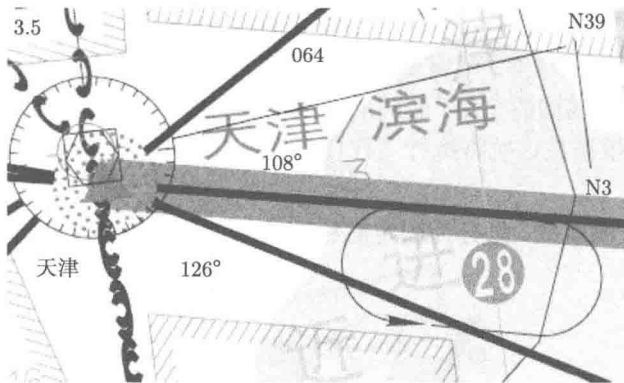


图 1.6 天津等待空域示意图

9. 空中放油区

空中放油区一般规划在远离城市的地带,通常在大型机场周边建立。主要目的是放掉多余燃油,使飞机着陆时不超过最大允许着陆重量,对飞机不造成结构性损伤,大大减少其他可能事件的发生,如图 1.7 所示。



图 1.7 空中放油区示意图

10. 临时飞行空域

临时飞行空域是为了满足通用航空空域使用临时性、不确定性的需求而设立的,《通用航空飞行管制条例》规范了临时飞行空域,并进行了可操作性的具体细

化,同时明确了批准权限。通用航空根据飞行活动要求,需要划设临时飞行空域的,应向飞行管制部门提出划设临时飞行空域的申请。从事通用航空飞行活动的单位、个人申请,经批准后方可实施。

划设临时飞行空域的申请应当包括下列内容:①临时飞行空域的水平范围、高度;②飞入和飞出临时飞行空域的方法;③使用临时飞行空域的时间;④飞行活动性质;⑤其他有关事项。

此外,国际民航组织涉及但我国空域没有的空域分类还有咨询区和预留区。

(1) 咨询区。咨询区指介于情报区和管制区之间的一种临时的、过渡性的空域。筹建咨询区可以便于未来在人员选拔、培训以及设施添置等满足要求时平稳地过渡到能提供更多、更及时服务的管制区。

(2) 预留区。预留区一般分为两种,参照地面相互位置不动的空域即为固定性预留区,相互位置移动的空域即为活动性预留区。前者涉及的飞行活动有军事训练、飞行表演等;后者往往涉及空中加油、航路编队飞行等。无论是哪种,在预留区的外围应建立有缓冲区,以便于 ATC(空中交通管制人员)机构能有足够的余量保证其他飞行安全。无论是何种预留区,使用的时间有长有短,但是当预留区建立时的相关活动/飞行结束后,该区也应撤销。

1.3 空域现状

1.3.1 空域结构数据

截至 2014 年 12 月,我国空域结构数据如下:

中国现有飞行情报区 11 个:北京、兰州、广州、武汉、上海、沈阳、乌鲁木齐、昆明、三亚、香港和台北。

区域管制区 28 个,分别是:北京、呼和浩特、太原、长沙、广州、桂林、南宁、成都、贵阳、昆明、拉萨、兰州、西安、三亚、合肥、济南、南昌、青岛、上海、厦门、大连、哈尔滨、呼伦贝尔、沈阳、乌鲁木齐、阿克苏、武汉、郑州。

终端管制区 1 个:珠海。

进近管制区 39 个:北京、天津、太原、呼和浩特、石家庄、长沙、广州、汕头、湛江、桂林、南宁、武汉、郑州、成都、重庆、贵阳、昆明、兰州、西安、银川、海口、三亚、福州、杭州、济南、南京、青岛、上海、温州、厦门、合肥、南昌、长春、大连、哈尔滨、沈阳、乌鲁木齐、宁波、西宁。

截至 2014 年,我国有 66 个危险区、199 个限制区、1 个禁区、278 个扇区(其中区域管制扇区 174 个,包含高空管制扇区 137 个,中低空管制扇区 37 个;进近管制扇区 104 个)。