

# 基于仿真工具的扇区数量预估方法初探

赵立刚

民航局空管局空域管理中心, 北京  
Email: kybu16@hotmail.com

收稿日期: 2020年9月8日; 录用日期: 2020年9月20日; 发布日期: 2020年9月27日

---

## 摘要

根据空域现有运行特征, 结合空域发展需求, 亟待解决扇区规划中确定扇区数量问题。本文提出一种基于仿真工具的扇区数量预估方法, 利用仿真软件快速获取扇区运行参数, 以管制工作负荷均衡和满足扇区未来一定时间适应性为目标构建评估模型, 采用仿真软件对计算结果进行验证。该方法为管制单位进行扇区划设提供了科学、量化的途径, 具有重要的现实意义。

## 关键词

空中交通管制扇区, 扇区数量预估, 管制工作负荷, 仿真工具

---

# A Preliminary Approach to Sector Number Estimation Based on Simulation Tools

Ligang Zhao

Air Traffic Management Center, Civil Aviation Administration, Beijing  
Email: kybu16@hotmail.com

Received: Sep. 8<sup>th</sup>, 2020; accepted: Sep. 20<sup>th</sup>, 2020; published: Sep. 27<sup>th</sup>, 2020

---

## Abstract

According to the current operating characteristics of airspace and the development demand of airspace, it is urgent to solve the problem of determining the number of sectors in sector planning. In this paper, a method of sector number estimation based on simulation tools is proposed. The simulation software is used to quickly obtain sector operation parameters, and the evaluation model is built to control workload balance and meet the adaptability of the sector for a certain time in the future. The simulation software is used to verify the calculation results. This method provides a scientific and quantitative way for the regulatory unit to delimit sector and has impor-

tant practical significance.

## Keywords

Air Traffic Control Sector, Forecast the Number of Sectors, Control of Workload, The Simulation Tool

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

扇区是匹配运行需要与管制能力的最小空域单元,科学、合理规划扇区不仅直接影响扇区运行安全和效率,同时也影响到管制服务的质量和水平[1] [2]。为应对日趋复杂的空域运行态势,亟需对管制扇区进行更为科学和高效的划设。通常,扇区划设主要与空域结构、交通流量及管制工作负荷等因素密切相关[3] [4] [5] [6]。由于交通流量和空域结构随着行业发展而不断发生变化,这就要求持续优化既有扇区的数量和构型,以便更好适应未来空域运行环境[7] [8]。目前,扇区数量的确定方法主要有三:1) 优化理论方法,根据管制员工作负荷和空域结构直接确定最佳扇区数,理论上效果最好,其缺点是构造模型及其复杂并且不容易求解,仅适于小规模简单扇区划分问题;2) 计算机快速辅助生成算法,生成若干个备选方案,需要多维视角评估其优劣,其缺点是很难处理扇区划设多个目标之间冲突性,并且比较难以定量分析多个备选方案的好坏;3) 基于仿真的扇区方案评估技术,通过人工干预方案,然后快速可视化评估,通过多次迭代找到一个最佳扇区划分方案,既避免了优化理论的模型构建缺陷,又同时丰富了计算机快速辅助生成算法生成多个备选方案的可视化量化评估问题[9]。

因此,亟待开展基于仿真的扇区数量估算方法研究。本文围绕未来空域运行需求,围绕降低风险、提升效率这一目标,以管制工作负荷为关键切入点,应用模拟仿真平台,主要设计了扇区数量估算方法框架,据此给出扇区数量估算方法应用流程和计算步骤,为进一步支持具有前瞻性和适应性的扇区划设方案奠定基础。最后,结合一个案例,验证了模型和算法的有效性和正确性。

## 2. 扇区数量估算方法框架

触发扇区优化、调整的因素通常包括以下两种主要因素:一是空域结构发生变化,这需要调整扇区边界以满足新的空域结构需求;二是流量持续增长,导致现有扇区难以满足运行需求,进而需进一步调整扇区。无论是哪一种因素导致的扇区调整优化,其核心是能够量化计算管制工作负荷,并确定负荷的阈值。综上所述,本方法的框架如图1所示。

具体步骤如下:

- 1) 利用仿真工具对所研究空域进行仿真,构建基线模型,获取现有运行条件下相关基础数据;
- 2) 依据现行扇区运行情况确定管制工作负荷,同时计算扇区流量、飞行时间、瞬时架次、平均时间间隔等参考指标;
- 3) 采用多路径交互方式(模拟机、调查问题、设备采集等)获取管制员负荷基本参数值,利用综合模糊评价和效应函数,确定扇区管制工作负荷阈值;
- 4) 根据扇区优化调整的驱动因素,预测未来变化情况,如空域结构调整、航班走向及流量分布变化等,同时预测未来空域结构不变情况下的流量增长值;

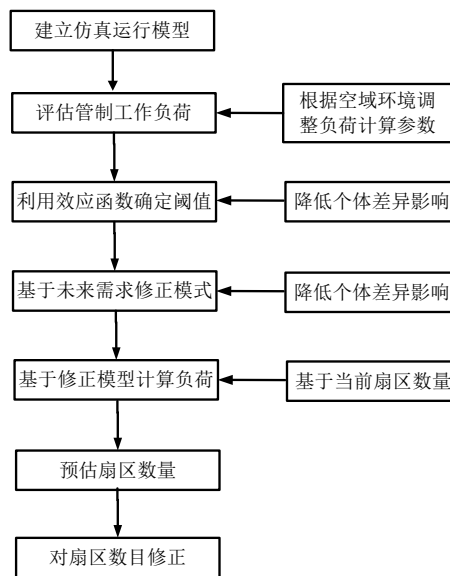


Figure 1. Flow chart of sector number estimation  
图 1. 扇区数量预估流程图

5) 根据预测空域结构变化和流量增长情况,对仿真模型进行修正(如调整航班走向,增加航班数量等),计算基于未来条件现有扇区情况下的管制工作负荷;

6) 针对管制员承担负荷阈值和所需工作负荷进行比较,确定未来扇区数量(小数向上取整)。

7) 根据实际管制需要,对规划扇区数目进行修正。

### 3. 扇区数量估算方法应用流程

根据确定的扇区数量预估方法,针对不同环节设计相应算法并进行应用分析。

#### 3.1. 利用仿真软件建立扇区基线模型

目前,较为流行的空域建模仿真软件主要有 TAAM 和 AIRTOP。本文采用 TAAM 仿真工具建立扇区运行模型,有效复现扇区内交通流分布和空域运行情况,通过提取相关参数,对空域运行进行数字化展示,为扇区数量预估奠定基础。

该环节中,应使基线模型尽量贴近实际运行,这需要与管制员共同进行多次校验,使模型能够更为贴合真实运行情况。

#### 3.2. 利用仿真软件评估扇区参数

扇区划设的重要目的是为降低扇区运行的复杂度,更好地均衡管制工作负荷,因此需要确定合理的指标进行度量。目前,普遍采用管制工作负荷作为划设扇区的主要评估指标。TAAM 中管制工作负荷由五个部分构成,包括监视负荷、冲突严重程度负荷、协调负荷、高度改变负荷和冲突解脱负荷,如式(1)所示:

$$\begin{aligned}
 W &= W_{\text{扇区监视负荷}} + W_{\text{扇区冲突负荷}} + W_{\text{扇区协调负荷}} + W_{\text{高度改变负荷}} + W_{\text{冲突解脱负荷}} \\
 &= \bar{w}_{\text{航空器密度因子}} \times N_{\text{扇区服务的航空器数量}} + \bar{w}_{\text{冲突严重程度因子}} \times N_{\text{不同冲突严重程度的航空器数量}} \\
 &\quad + \bar{w}_{\text{扇区协调因子}} \times N_{\text{进出扇区的航空器数量}} + \bar{w}_{\text{改变高度因子}} \times N_{\text{改变高度的航空器数量}} \\
 &\quad + \bar{w}_{\text{冲突解脱因子}} \times N_{\text{冲突解脱的航空器数量}}
 \end{aligned} \tag{1}$$

其中,  $\bar{w}$ <sub>航空器密度因子</sub>、 $\bar{w}$ <sub>冲突严重程度因子</sub>、 $\bar{w}$ <sub>扇区协调因子</sub>、 $\bar{w}$ <sub>改变高度因子</sub>和 $\bar{w}$ <sub>冲突解脱因子</sub>分别为扇区监视负荷、冲突负荷、协调负荷、高度改变负荷以及冲突解脱负荷的权重。 $N$ <sub>扇区服务的航空器数量</sub>为当前扇区内接受管制服务的航空器数量再加上一定时间段内(如1小时)进入扇区的航空器数量, $N$ <sub>不同冲突严重程度的航空器数量</sub>为扇区中发生和即将发生冲突的航空器数量, $N$ <sub>进出扇区的航空器数量</sub>为进入和离开扇区的航空器数量, $N$ <sub>改变高度的航空器数量</sub>为扇区中上升或下降的航空器数量, $N$ <sub>冲突解脱的航空器数量</sub>为通过调速、改航向、改变高度解脱冲突的航空器数量。由于TAAM在计算扇区管制工作负荷时,并未考虑特定空域结构对于上述不同负荷的影响,因此,需结合具体管制过程对式(1)中的参数系数进行相应修正。

修正过程中主要考虑扇区特征,将扇区特征与管制工作负荷种类进行匹配,并修正相应参数,具体包括:

- 1) 扇区内冲突占比较高,对应调整冲突负荷系数;
- 2) 扇区内流量较高,相对冲突少,对应调整监视负荷系数;
- 3) 扇区内、高度变化较多,冲突相对较少,应提高高度改变负荷系数;
- 4) 管制区内扇区数量较多、面积较小时,应提高协调负荷系数。

由于目前完全量化扇区特征和管制工作负荷系数,尚存在一定难度,以上修正过程可在管制员沟通过程中完成,可针对不同扇区在TAAM原有系数基础上进行一定范围的调整。

### 3.3. 确定管制工作负荷阈值

由于每个管制员负责的扇区交通流特征存在差异,且管制工作负荷强度不同,基于仿真工具评估扇区运行特征需分析各扇区不同管制员的工作负荷强度差异,同时兼顾管制工作负荷阈值个体差异和共性,来估算其合理阈值。相关流程见图2所示。

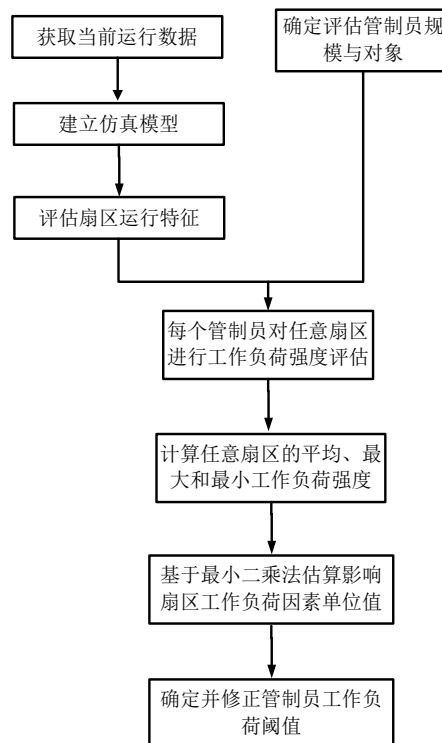


Figure 2. Flow chart of control workload threshold estimation based on simulation tool

图2. 基于仿真工具的管制工作负荷阈值估算流程图

具体步骤如下:

步骤 1: 建立基线仿真模型, 包括空域结构、扇区、航线、航班走向等基本数据。

步骤 2: 根据现行条件下的运行数据, 计算既有全部  $K$  个扇区的流量、飞行时间、瞬时架次、平均时间间隔、飞行冲突等参考指标, 扇区  $i(i=1,2,\dots,K)$  的工作负荷  $S_i$  与这些因素相关, 计算过程如式(2)所示。

$$S_i = \sum_{h=1}^H w_h \cdot N_h^i \quad (2)$$

其中:  $H$  是影响扇区工作负荷的因素数量,  $N_h^i$  是扇区  $i$  影响因素  $h$  的数量,  $w_h$  是影响因素  $h$  的单位工作负荷。显然,  $H$  和  $N_h^i$  为已知,  $w_h$  需要进一步估算。

步骤 3: 如共有  $M$  个管制员参与问询, 每个管制员  $j$  的工作负荷阈值记为  $V_j$ , 满足  $V_j = V_l$  ( $j, l=1,2,\dots,M$ )。每个管制员  $j$  对扇区  $i$  的工作负荷强度记为  $a_{ij} = S_i/V_j$ , 此数值可通过问卷调查或直接提问方式获取。

步骤 4: 对于同一扇区  $i$ , 计算全部管制人员工作负荷强度均值  $a_i^+ = \sum_{j=1}^M a_{ij}/M$  (用于计算理想未来扇区数), 以及最大工作负荷强度  $a_i^O = \max_j a_{ij}$  (用于计算悲观未来扇区数)和最小工作负荷强度  $a_i^P = \min_j a_{ij}$  (用于计算乐观未来扇区数)。

步骤 5: 分别计算任意扇区  $i$  和  $i'$  之间最大、最小和平均工作负荷强度之比, 即  $a_i^+/a_{i'}^+ = S_i/S_{i'} = \sum_{h=1}^H w_h^+ \cdot N_h^i / \sum_{h=1}^H w_h^+ \cdot N_h^{i'}$ ,  $a_i^O/a_{i'}^O = S_i/S_{i'} = \sum_{h=1}^H w_h^O \cdot N_h^i / \sum_{h=1}^H w_h^O \cdot N_h^{i'}$ ,  $a_i^P/a_{i'}^P = S_i/S_{i'} = \sum_{h=1}^H w_h^P \cdot N_h^i / \sum_{h=1}^H w_h^P \cdot N_h^{i'}$ , 其中  $w_h^+$ 、 $w_h^O$  和  $w_h^P$  是三种情况下影响因素  $h$  的单位工作负荷。

步骤 6: 利用最小二乘法, 在理想、乐观和悲观三种情况下, 估算影响扇区工作负荷的任意因素  $h$  涉及的  $w_h^+$ 、 $w_h^O$  和  $w_h^P$ , 据此可以计算三种情况下的扇区工作负荷  $S_i^+ = \sum_{h=1}^H w_h^+ \cdot N_h^i$ 、 $S_i^O = \sum_{h=1}^H w_h^O \cdot N_h^i$  和  $S_i^P = \sum_{h=1}^H w_h^P \cdot N_h^i$ , 以及基于扇区运行特征的任意管制员工作负荷阈值  $S_i^+/a_i^+$ 、 $S_i^O/a_i^O$ 、 $S_i^P/a_i^P$ , 满足  $\min_{w_h^+} \left| \frac{a_i^+}{a_{i'}^+} - \sum_{h=1}^H w_h^+ \cdot N_h^i / \sum_{h=1}^H w_h^+ \cdot N_h^{i'} \right|$ 、 $\min_{w_h^O} \left| \frac{a_i^O}{a_{i'}^O} - \sum_{h=1}^H w_h^O \cdot N_h^i / \sum_{h=1}^H w_h^O \cdot N_h^{i'} \right|$ 、 $\min_{w_h^P} \left| \frac{a_i^P}{a_{i'}^P} - \sum_{h=1}^H w_h^P \cdot N_h^i / \sum_{h=1}^H w_h^P \cdot N_h^{i'} \right|$ 。

步骤 7: 兼顾不同管制员个体差异和贡献, 计算理想、乐观和悲观三种情况下任意管制员工作负荷阈值  $\sum_{i=1}^K S_i^+/a_i^+$ 、 $\max_i S_i^O/a_i^O$  和  $\min_i S_i^P/a_i^P$ 。

### 3.4. 基于未来情况调整仿真模型

根据未来扇区调整动因, 对模型进行修正, 构建基于未来运行条件下的仿真模型。主要工作包括:

1) 航班运行预测和增量, 满足未来需求数量; 2) 对应调整班机航线走向以满足空域结构变化需求。为进一步评估管制工作负荷, 完成仿真模型奠定基础。

### 3.5. 基于未来变化调整模型评估管制工作负荷

基于预测未来扇区变化情况构建仿真评估模型, 利用管制工作负荷计算方法, 运行仿真模型, 获取变化后各扇区的管制工作负荷值。

### 3.6. 预估扇区数量

根据仿真结果得出未来环境变化情况下各个扇区需要的管制工作负荷情况。将各扇区所需负荷总值与确定的负荷阈值进行对比, 评估现有扇区划分的合理性, 确定所需扇区基数。判断超出扇区负荷阈值的扇区数量和分布情况, 并衡量扇区拆分和组合可能性, 进而在扇区基数基础上进行增加, 给出预估数

值。该算法流程如图 3 所示。

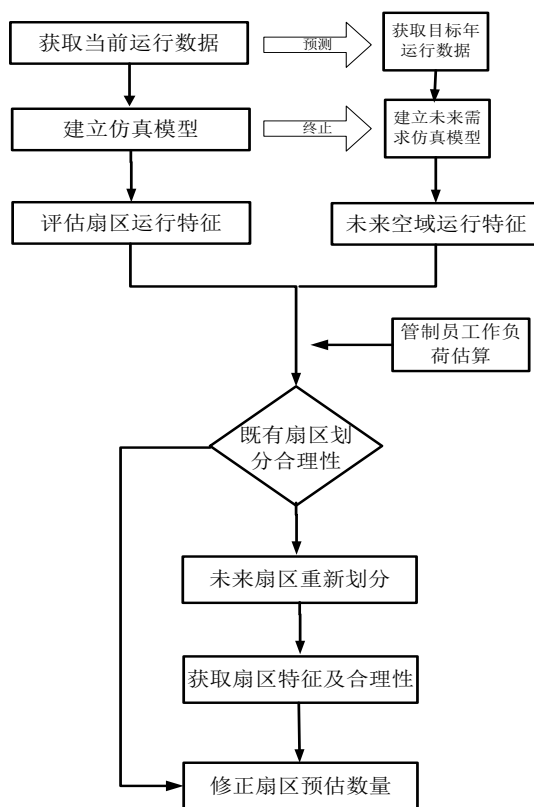


Figure 3. Flow chart of sector number estimation based on simulation software  
图 3. 基于仿真软件的扇区数量预估流程图

具体步骤如下：

步骤 1：根据现有扇区及未来预测相关数据，分别考量扇区流量、飞行时间、瞬时架次、平均时间间隔等参数，确定各自扇区所需管制工作负荷。

步骤 2：根据管制员所承担工作负荷阈值，计算当前及未来全部扇区的管制工作负荷强度，若它们的值均小于 1，则既有扇区合理，转步骤 5；否则，转步骤 3。

步骤 3：根据扇区优化调整驱动因素，结合空域结构调整、航班走向和流量重新分配等策略，对于管制工作负荷强度小于 1 的扇区，可扩大其边界或调整交通流；对于管制工作负荷强度大于 1 的扇区可缩减其边界。利用仿真软件不断评估修正后的扇区划设方案，直至其管制工作负荷强度均小于 1。

步骤 4：根据管制员承担的负荷阈值和所需工作负荷进行比较，确定未来扇区数量(小数向上取整)。

步骤 5：输出扇区数，流程停止。

根据实际管制运行情况，对上述预估数量进行修正，确定最终数量。

#### 4. 案例分析

某进近管制扇区因流量增长，需对扇区进行调整，需要确定其未来所需扇区数量。前期已经构建了该管制区的 TAAM 仿真模型，完成该区域模型校验，利用预估算法和流程计算扇区管制工作负荷阈值并进行扇区数量预估。



#### 4.1. 确定扇区负荷阈值

通过 TAAM 仿真工具对某进近管制区现有流量下现有扇区空域运行情况进行仿真分析, 选择高峰时段, 统计得到扇区流量、负荷、飞行时间、瞬时架次、平均时间间隔等数据如表 1 所示。

**Table 1.** Simulation data of current flow and existing schemes

**表 1.** 现有流量现有方案仿真数据

现有流量现有方案						
扇区	高峰时段 平均小时流量	高峰时段 平均小时总负荷	高峰时段 平均小时飞行时间	平均飞行时间	瞬时架次	平均时间间隔
AP01	18	42.01	01:38:03	00:05:30	1.60	00:03:26
AP02	28	59.72	03:25:26	00:07:15	3.31	00:02:11
AP03	41	90.72	06:46:29	00:09:34	6.60	00:01:27
AP04	13	28.89	01:08:18	00:05:15	1.11	00:04:44

由表 1 可知, 由于 03 扇为进场扇, 负责所有进场航班的指挥与协调, 导致 03 扇负荷最大; 02 扇流量较大, 导致其负荷相对较大; 其他扇区负荷较小。管制员依据实际管制运行经验, 对每个扇的负荷阈值进行估计, 各扇区管制负荷达到阈值的百分数情况分别如下: AP01 扇达到 40%, AP02 扇达到 60%, AP03 扇达到 85%, AP04 扇达到 30%。利用管制员工作负荷综合计算方法确定管制员工作负荷阈值为 101.89。

#### 4.2. 未来目标年扇区数量预估

地区经济发展与实际运行情况产生了新的空域需求。随着流量不断增长, 现有规划扇区已较难满足未来空域需求, 需对扇区进行调整。通过对某机场采用移动平滑指数进行预测, 得出扇区规划时间段内的航班量, 如表 2 所示(2020 年数值采用预测值暂不考虑疫情带来的波动影响)。

**Table 2.** Flight situation before and after airport cloning

**表 2.** 机场克隆前后航班情况

机场克隆前后航班情况 (架次)				
机场	2019 年	2020 年	2021 年	2022 年
某机场	1337	1431	1532	1635

针对预测后航班量以及该空域未来特定功能需求, 利用 TAAM 工具进行仿真分析, 获取基于当前扇区情况的管制工作负荷值。目标年未来流量现有扇区的仿真数据如表 3。

**Table 3.** Existing schemes for future traffic

**表 3.** 未来流量现有方案

未来流量现有方案						
扇区	繁忙时段 平均小时流量	繁忙时段 平均小时负荷	繁忙时段 平均小时飞行时间	平均飞行时间	瞬时架次	平均时间间隔
AP01	23	53.54	02:11:04	00:05:39	2.06	0:02:45
AP02	34	73.38	04:55:37	00:08:52	4.76	0:01:52
AP03	51	112.57	08:23:01	00:09:35	8.22	0:01:10
AP04	16	35.80	01:22:56	00:05:11	1.34	0:03:52

通过仿真未来流量现有扇区的运行情况,发现各扇区流量和管制负荷都出现了显著增长。其中,03扇出现了超负荷运行。这说明现有扇区规划已不能满足未来增长需求,需针对目标年的扇区数量进行预估,使扇区调整更具更好的适应性。根据管制工作负荷阈值和评估后各个扇区所需的管制工作负荷总值以及扇区功能预留,初步预估在目标年应规划7个扇区。通过仿真验证并结合管制单位运行需求,对规划7个扇区的合理性进行评估,最终确定所需扇区数量为7个。

## 5. 总结

扇区数量预估为科学、智能划设扇区提供了重要基础,可以有效应对扇区调整面临的诸多不确定因素。本文探讨了一种基于仿真工具的扇区数量预估方法,主要设计了扇区数量估算方法框架,据此给出扇区数量估算方法应用流程和计算步骤。该方法涉及到交通流预测、管制工作负荷计算和仿真建模的综合应用,以管制工作负荷均衡和满足扇区未来一定时间适应性为目标估算未来扇区数量,为科学规划扇区提供了可量化的坚实数据支撑。

## 参考文献

- [1] 赵海, 杭旭. 优化空中交通管制容量评价指标的思考[J]. 空运商务, 2019(1): 62-64.
- [2] 李佳君. 浅谈空中管制中动态扇区划分及管制员指派优先[J]. 科技创新与应用, 2015(21): 268.
- [3] 王超, 陈昱. 基于 BSP 和动态规划的大规模空域扇区划分[J]. 计算机应用研究, 2015, 32(11): 3259-3263.
- [4] 庄旻. 空域扇区划分方案优劣综合评估方法探索[J]. 科技风, 2015(6): 107.
- [5] 温振宇. 空域扇区划分方案优劣综合评估方法探索[J]. 科技传播, 2014, 6(15): 96+99.
- [6] 叶志坚, 王莉莉, 荆增强, 耿增显, 向秋. 动态空域扇区划分管制员指派优化方法[J]. 数学的实践与认识, 2014, 44(5): 80-85.
- [7] 叶志坚, 聂润兔, 王莉莉, 高伟. 空域扇区划分方案优劣综合评估方法[J]. 航空计算技术, 2014, 44(1): 17-22.
- [8] 张炳祥. 基于加权 Voronoi 图的扇区优化研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2013, 37(3): 570-573.
- [9] 赵立刚. 对扇区划设方法的思考[J]. 空中交通, 2019(9): 11-14.