

文章编号: 1674-8190(2024)02-056-10

新疆管制区域扇区容量评估与划设研究

伍婷婷, 张涵

(中国民用航空新疆空中交通管理局 空中交通管制部, 乌鲁木齐 830016)

摘要: 新疆是我国与中亚、欧洲连接的重要陆路通道, 是我国“一带一路”陆上至关重要的支点。随着航班量的逐年递增, 新疆管制区域的管制压力逐年增大, 负荷分布不均匀、扇区内冲突点增多的问题愈发严重。面向我国“一带一路”和“空中丝绸之路”的发展要求, 预测 2035 年新疆管制区域的流量增长情况; 基于管制员的工作负荷对当前的扇区划分方案进行容量评估, 结合流容比指标对新疆区域 2035 年的扇区划分提出合理化的建议以满足流量增长的保障需求; 采用计算机仿真技术对 2035 年扇区划设方案进行仿真评估。结果表明: 新的扇区划分能够有效地减少高峰日流量和高峰小时流量, 之前管制员负荷较高的扇区通过合理地划分, 管制压力也得到了明显缓解。

关键词: 流量预测; 扇区容量评估; 管制员工作负荷; 仿真; 扇区划设

中图分类号: V355

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2024.02.07

Capacity assessment and designation of sectors in the Xinjiang control region

WU Tingting, ZHANG Han

(Air Traffic Control Department, CAAC Xinjiang Regional Administration, Urumqi 830016, China)

Abstract: Xinjiang is an important area linking China with Central Asia and Europe, and is a vital land pivot point of China's "One Belt, One Road". As the number of flights increases year by year, the control pressure in Xinjiang control area increases year by year, and the problems of uneven load distribution and increasing conflict points in the sector are becoming more and more serious. In this paper, the traffic growth of the Xinjiang control region in 2035 is predicted in the light of the development requirements of China's "One Belt, One Road" and "Air Silk Road", and then a capacity assessment of the current sector classification scheme is conducted based on the controllers' workload. Finally, computer simulation technology is used to evaluate the sector designation scheme in 2035. The results show that the new sector division can effectively reduce peak day traffic and peak hour traffic. Through reasonable division of sectors with high controller load, the control pressure has also been significantly alleviated.

Key words: traffic forecasting; sector capacity assessment; controller workload; simulation; sector designation

收稿日期: 2023-02-28; 修回日期: 2024-03-06

基金项目: 国家自然科学基金—民航联合基金(U2233208)

通信作者: 伍婷婷(1989—), 女, 学士, 工程师。E-mail: wutingting0210@163.com

引用格式: 伍婷婷, 张涵. 新疆管制区域扇区容量评估与划设研究[J]. 航空工程进展, 2024, 15(2): 56-65.

WU Tingting, ZHANG Han. Capacity assessment and designation of sectors in the Xinjiang control region[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2024, 15(2): 56-65. (in Chinese)

0 引言

新疆,古丝绸之路核心地带,千百年来,联通中外。近年来,作为丝绸之路经济带核心区的新疆,在我国与周边国家发展陆上经贸合作时,是最便利的通道,是中国“一带一路”陆上至关重要的一个支点。2013—2019年,新疆区域航班流量逐年快速增加,2019年达到332 950架次,是2013年的1.72倍,管制员的管制压力也随之增加。面对逐年增加的航空器流量,新疆管制区域势必会出现各扇区负荷分布不均衡,扇区内冲突点增多等问题。

20世纪70年代以来,越来越多的研究人员开始着手对扇区容量进行研究,随着民航业的快速发展,扇区容量的研究也从最初的简单理论研究发展到研究扇区容量的可用性。Ratner等^[1]在建立评估模型来评价终端区的容量时,使用了跑道容量评估的基本方法;Jorna^[2]通过统计管制员的工作负荷来进行扇区容量评估工作,时至今日,该理论方法已日趋成熟,被广泛应用于扇区容量评估工作当中;Chatterji等^[3]在原来管制员工作负荷模型的基础上进行改进,采用神经网络算法大幅提升了评估的速度和准确度,使得该方法得到更广泛的应用;Cloarec等^[4]针对不同扇区不同的交通流特性,建立了不同的管制员工作负荷评估模型,这使得不同区域的扇区容量评估不再局限于相同的评价模型,而是能够根据扇区特点使用更符合本扇区的模型;张功^[5]基于不同的运行场景进一步改进了管制员工作负荷的评价模型,在改进模型的基础上提出了新的扇区容量评估方法;刘璐等^[6]利用人类动力学的思想和研究方法,通过对管制员在通信过程中的时间和空间分布规律加以分析,总结并建立了一套基于此分布规律的扇区容量评估模型;赵文豪^[7]针对某一飞行状态和空域结构下实施空域容量评估无法准确预测出空域运行容量这一问题,提出了对混合运行(目视飞行和仪表飞行两种类型同一管制运行)空域进行容量评估。

通过分析上述国内外相关研究可以看出,关于扇区容量评估的研究已经日趋充分和成熟,本文将在前人研究的基础上,使用中国民用航空局在《机场时刻容量评估技术规范》^[8]中提出的基于管制员工作负荷的扇区容量评估方法对新疆管制

区域的扇区容量进行评估。首先建立一种基于支线机场群的流量预测方法,将支线机场按照区域和流量分布划分不同的机场群,结合历史数据预测2035年新疆区域空域的流量;其次,采用基于管制员工作负荷的扇区容量评估方法对当前新疆管制区域的扇区容量进行评估,并计算得到流容比,分析当前扇区划设情况能否适应2035年的流量增长;然后,针对当前容量和流量不匹配的情况,建立流容匹配的扇区划分模型,基于此模型得到的结果,提出2035年扇区规划建议和方案;最后,通过计算机仿真技术来验证新的扇区划分方案的合理性。

1 流量预测分析

流量预测是规划的基础,决定了未来建设的规模和对人员、配套设施的需求。流量预测能够给出合理的航班流量管控决策,实现航班流量的有序管理和优化空域效能^[9]。由于2020年、2021年的航班流量受“新冠”疫情影响较大,在流量分析时暂不考虑,将预测基准年定为2019年。

1.1 空中交通流量总量预测

1.1.1 历史数据分析

新疆地区作为我国西北地区重要的航空枢纽^[10],管制区域航班总流量较大。2013—2019年新疆地区航班总流量统计如表1所示。

表1 新疆区域航班总流量趋势

年度	区域总流量/架次	日平均流量/架次	增长率/%
2013	193 109	529	
2014	207 754	569	7.58
2015	230 333	631	10.87
2016	248 939	682	8.08
2017	258 997	710	4.04
2018	291 834	800	12.68
2019	332 950	912	14.09

1.1.2 空中交通流量预测

根据过去新疆区域航班流量的历史数据,结合新疆民航业务量增长趋势,采用定量和定性分析的方法,利用趋势函数法^[11]、波布加门法^[12]、比例增长法^[13]对2035年新疆区域航班起降架次进行

预测。

1) 趋势函数法

① 直线趋势法

直线趋势法的表达式为

$$Y = aX + b \quad (1)$$

式中: Y 为年航班架次; X 为年份, 2010 年对应的 X 值为 1, 2035 年对应的 X 值为 26; a 、 b 为常数。

经过曲线回归计算得到趋势线方程为

$$Y = 19\ 905X + 102\ 941 \quad (2)$$

② 指数函数趋势法

指数函数趋势法的表达式为

$$Y = ab^X \quad (3)$$

经过曲线回归计算得到趋势线方程为

$$Y = 121\ 270e^{0.093\ 93X} \quad (4)$$

2) 波布加门法

波布加门法的表达式为

$$Y_i = Y_s \left(\frac{T_i - T_0}{T_s - T_0} \right)^2 \quad (5)$$

式中: Y_i 为预测年份航班架次; Y_s 为起始计算年份航班架次; T_i 为预测年份; T_s 为起始计算年份; T_0 为初始年份。

3) 比例增长法

该方法以民航平均增长率作为主要因素对新疆区域起降架次进行预测。根据《新疆维吾尔自治区综合交通(航空)发展战略(2018—2030)》中的相关数据, 新疆区域 2020—2025 年的航班平均年起降架次增长率约为 10%, 2025—2030 年的航班年平均起降架次增长率约为 9%, 2030—2035 年的航班年平均起降架次增长率约为 8%。在 2019 年区域航班总流量的基础上, 根据该比例计算出新疆区域 2035 年预测的航班年起降数量为 1 236 244 架次。

运用以上 3 种方法分别预测 2035 年新疆区域航班运输总量, 取平均值作为最终预测的 2035 年新疆区域总航班量, 如表 2 所示。后续计算机建模仿真实验中将参照此数据设置 2035 年仿真模型中“航班总架次”这一参数。

表 2 航班总量预测
Table 2 Total predicted sorties

年份	航班总量预测值/架次				最终预测 航班总 量/架次
	直线趋势法	指数函数趋势法	波布加门法	比例增长法	
2035	620 471	1 394 372	1 256 937	1 236 244	1 127 006

1.2 基于机场群的航路航线流量分布预测

新疆区域除乌鲁木齐本场外, 共有 24 个支线机场, 乌鲁木齐已与其中 20 个机场开通直飞航线, 各支线机场也互有直飞航线联通。基于支线机场群的航路航线流量分布预测方法的具体实现步骤如下。

1) 按照机场性质与地理分布将支线机场分为 8 个组别, 如表 3 所示。

表 3 机场群及对应机场的起降航班数量(2019 年)
Table 3 Airfield group and corresponding airfield movements (2019)

机场群	机场名称	起降航班数/架次
阿勒泰/喀纳斯/富蕴	阿勒泰	8 033
	喀纳斯	3 134
	富蕴	40 889
吐鲁番/石河子	吐鲁番	6 219
	石河子	3 213
克拉玛依/塔城	克拉玛依	19 497
	塔城	9 476
	伊宁	13 860
伊宁/博乐/那拉提/昭苏	博乐	55 859
	那拉提	2 027
	昭苏	—
和田/于田	和田	23 743
	于田	—
喀什/莎车/塔什库尔干	喀什	26 348
	莎车	4 297
	塔什库尔干	—
哈密	哈密	3 806
库尔勒/且末/若羌	库尔勒	28 333
	且末	2 314
	若羌	3 119

2) 根据 2015—2019 年的历史数据, 利用趋势函数法对 2035 年每个机场群对应的机场起降架次进行预测。

3) 通过分析 2019 年一个机场群的航班计划, 得出一个机场群离场/进场航班架次占起降架次的比重, 以及离场/进场航班中飞往各地区所占的比重。根据前者可以预测得到 2035 年该机场群的离场/进场航班架次, 根据后者可以预测得到 2035 年该机场群离场/进场航班中飞往各地区的架次。

4) 将预测得到的 2035 年一个机场群离场/进场航班飞往各地区的架次分配到飞往对应地区的

航线,得到2035年一个机场群影响下的离场/进场航线预测流量,通过对某一航线在不同机场群中得到的离场/进场航线预测流量求和即可得到2035年某一离场/进场航线的预测总流量。

5) 将某一航线2035年预测的离场航班流量和进场航班流量求和即可得到该航线2035年预测的总流量。

1.3 扇区流量预测

根据2035年新疆区域内的航路航线的流量预测,将其分配到航路航线所属的扇区,得到9个扇区2035年的扇区流量预测结果,如表4所示。

表4 2035年各扇区流量预测结果
Table 4 Flow forecast results by sector for 2035

扇区	2035年起降航班流量/架次
01扇	577 161
02扇	601 110
03扇	435 883
04扇	304 449
05扇	483 175
06扇	476 999
07扇	440 586
08扇	389 499
09扇	402 031

2 基于管制员工作负荷的扇区容量评估

2.1 管制员工作负荷评估模型

2.1.1 繁忙等级划分

在管制空域实际运行过程中,每个时间段、不同航路上的交通流特征不同,造成管制员工作的繁忙程度不同,工作负荷也不同,为了能够对空管保障能力进行更加合理地评估,本文将管制员的工作状态分成I(低)、II(中)、III(高)三类。

I类为不繁忙状态:小时流量在管制空域峰值服务能力的60%以下。此时管制空域内飞行流量主要集中在少数航路上或者飞行流量较少,存在较少的潜在冲突,管制员调配简单,管制通话频率较低^[14]。

II类为中等繁忙状态:小时流量在管制空域峰值服务能力的60%~80%。管制空域内飞行流量较大,飞行流量主要集中在少数航路上且较大,

存在较多的潜在冲突,调配难度增加,管制通话频率较高^[15]。

III类为繁忙状态:小时流量在管制空域峰值服务能力的80%以上。管制空域内飞行流量主要集中分布在部分航路上且飞行流量较大,存在很多潜在冲突,调配难度很大,管制通话频率很高。

2.1.2 通信负荷

通信负荷主要分为管制员通过地空通信系统指挥航空器飞行的管制指令的发布和监听飞行员请求、报告和复诵的指令^[16]。通信负荷可以表示为^[17]

$$\overline{W}_{ij}^{\text{com}} = \overline{W}_{ij}^{\text{con}} + \overline{W}_{ij}^{\text{pil}} \quad (6)$$

式中: $\overline{W}_{ij}^{\text{con}}$ 为繁忙等级*i*时航段*j*上管制员通信工作负荷(单位:s); $\overline{W}_{ij}^{\text{pil}}$ 为繁忙等级*i*时航段*j*上飞行员通信工作负荷(单位:s)。

2.1.3 非通信负荷

非通信负荷主要分为飞行进程单的操作、雷达屏幕操作和管制协调三个方面^[13]。非通信负荷可以表示为^[18]

$$\overline{W}_{ij}^{\text{incom}} = \overline{W}_{ij}^{\text{str}} + \overline{W}_{ij}^{\text{co}} \quad (7)$$

$$\overline{W}_{ij}^{\text{str}} = \sum_{k=1}^m \overline{W}_k^{\text{str}} m_k^{\text{str}} \quad (8)$$

式中: $\overline{W}_{ij}^{\text{str}}$ 为繁忙等级*i*时航段*j*电子进程单等操作工作负荷(单位:s); $\overline{W}_{ij}^{\text{co}}$ 为繁忙等级*i*时航段*j*协调工作负荷(单位:s);*m*为雷达屏幕操作的种类总数; $\overline{W}_k^{\text{str}}$ 为第*k*类操作的平均所需时间(单位:秒/次); m_k^{str} 为第*k*类操作的次数;下标*k*表示操作的类别。

2.1.4 思考负荷

思考负荷是指航空器在本扇区指定的航段飞行过程中,管制员计算该航空器航行要素、判断及解决冲突等行为思考的平均时间。为保证测量的准确性,本文采用调查问卷的方法,通过设计相应的调查表,要求所评估扇区一线工作经验丰富的管制员予以填写,并进行统计分析^[19]。思考负荷可以表示为

$$\overline{W}_{ij}^{\text{thk}} = \overline{w}_{ij}^{\text{thk}} m_{ij}^{\text{thk}} \quad (9)$$

式中: $\overline{w}_{ij}^{\text{thk}}$ 为繁忙等级*i*时航段*j*单条指令平均思考负荷权值(单位:秒/架); m_{ij}^{thk} 为繁忙等级*i*时航段*j*单架航空器平均指令数(单位:条)。

2.1.5 总工作负荷

综上所述,在单位时间片 t 内,管制员的工作负荷模型表达式为

$$W_i(t) = \sum_{j=1}^n (\bar{w}_{i_j}^{\text{com}} + \bar{w}_{i_j}^{\text{incom}} + \bar{w}_{i_j}^{\text{thk}}) \quad (10)$$

根据所采集的数据,利用管制员工作负荷模型计算出扇区内各航路工作负荷,并由扇区空管保障能力评估系统统计计算相对应的航空器数量,确定工作负荷和航空器数量之间的函数关系^[14]。

2.2 管制员工作负荷回归分析模型

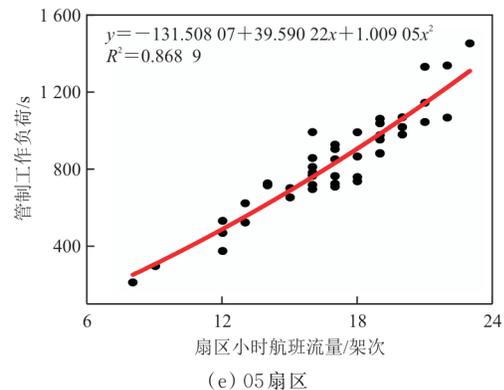
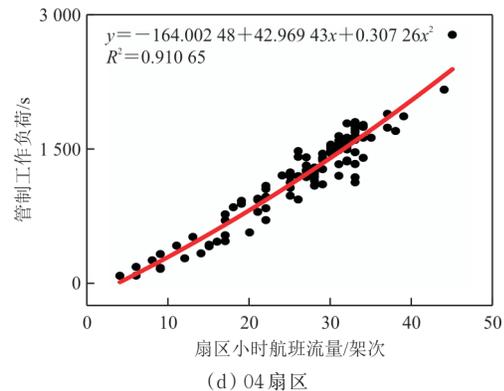
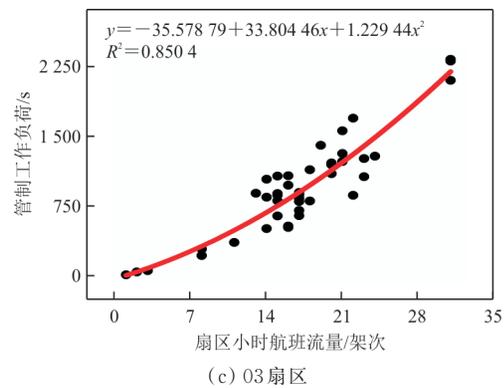
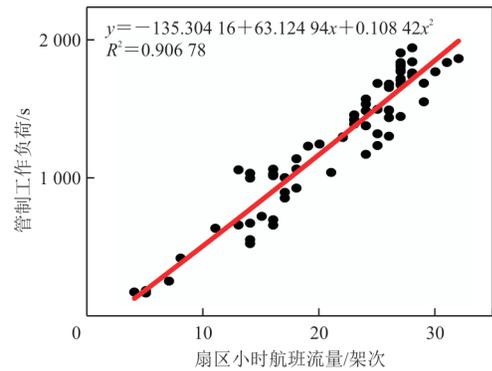
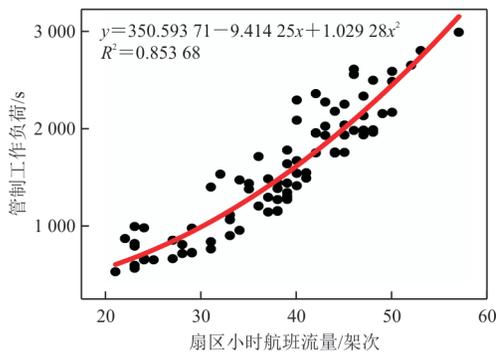
依据实际运行中,管制员工作负荷与扇区空管保障能力之间的关系,用回归分析方法^[20]建立模型。将飞行流量作为自变量,管制员工作负荷作为因变量,计算出两者的函数关系 $W=f(N)$,预测管制员工作负荷达到规定值时的扇区空管保障能力结果。

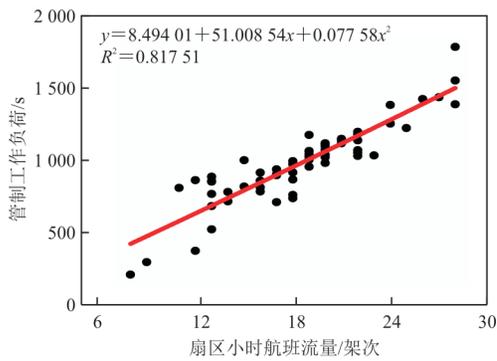
2.3 数据采集

通讯负荷采集 2022 年 7 月 11 日~7 月 17 日共计 7 日管制员通话录音,每个小时内通话时间相加得到该小时的通讯负荷。操作负荷主要包括:填写进程单,记录航空器高度、摆放进程单等^[21]。操作次数采集自 2022 年 7 月 18 日~7 月 24 日乌鲁木齐管制现场,思考负荷分为 3 个等级。

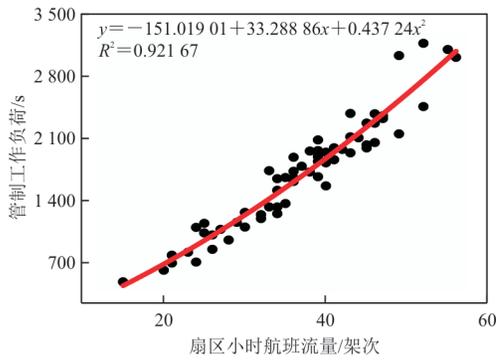
2.4 扇区容量评估结果

乌鲁木齐 01 扇~09 扇 1 小时时间片管制员工作负荷与航空器数量拟合图如图 1 所示。通过必选一元一次、一元二次、一元三次和多元一次回归模型的 R 检验结果,选择一元二次回归拟合效果最为理想。

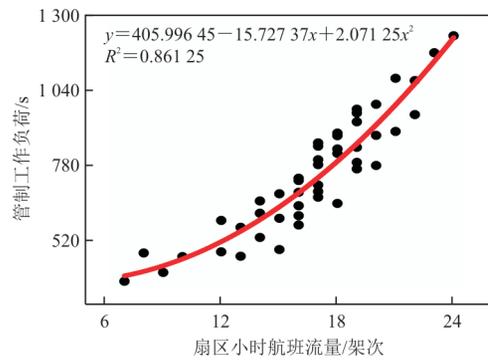




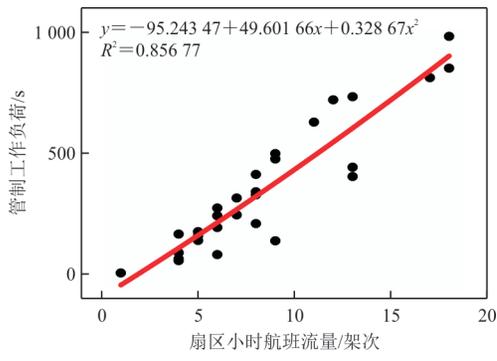
(f) 06 扇区



(g) 07 扇区



(h) 08 扇区



(i) 09 扇区

图 1 9 个扇区 1 小时时间片管制员工作负荷与航空器流量关系图

Fig. 1 Plot of controller workload versus number of aircraft for 1 hour time slice in 9 sectors

结合国外相关理论、国内实际情况及相关管制单位意见,小时运行容量为工作负荷达到最高负荷 65% 时的航空器数量,最大运行容量为运行容量 120%,15 分钟容量为最大运行容量 25%^[22]。根据拟合方程,乌鲁木齐 9 个扇区的容量评估结果如表 5 所示。

表 5 基于管制工作负荷评估容量结果

Table 5 Assessment of capacity results based on regulated workload

扇区	管制工作负荷评估 1 小时运行容量/(架次·小时 ⁻¹)
01 扇	95
02 扇	80
03 扇	89
04 扇	87
05 扇	60
06 扇	69
07 扇	96
08 扇	61
09 扇	52

3 扇区划设调整与仿真验证

3.1 流容比与扇区数量预测

根据第 1 节对 2035 年各扇区的流量预测结果,计算得到 2035 年各扇区高峰小时流量(q_i)与当前各扇区 1 小时运行容量(c_i)的流容比^[23],由公式(11)得到扇区数量预测结果,计算结果如表 6 所示。

$$S_y = \sum_{i=1}^9 \frac{q_i}{c_i} \quad (11)$$

式中: S_y 为预测目标年扇区预测数量; i 为扇区标号,取 1,2,⋯,8,9。

表 6 2035 年高峰日小时流容比计算表

Table 6 Calculation table for peak day hourly flow capacity ratio in 2035

扇区	预测 2035 年高峰小时流量/架次	当前 1 小时运行容量/架次	流容比
01 扇	120	48	2.50
02 扇	102	37	2.76
03 扇	81	32	2.53
04 扇	107	44	2.43
05 扇	69	33	2.09
06 扇	80	36	2.22
07 扇	124	46	2.70
08 扇	81	34	2.38
09 扇	71	37	1.92

随着 2035 年航班流量的增长,超出了原有扇区的服务能力,需要对原有扇区进行拆分。为准确客观地对当前容量和流量不匹配的扇区进行划分,建立基于流量增长容流匹配的扇区划分模型。

设扇区的容量为 C ,扇区内每条航线的流量为 x ,扇区内所有机场起降的航班数量为 A ,预测的流量为 P 。建立如下的容流匹配扇区数量划设模型:

$$z = \max \sum_{i=1}^n \frac{\sum_{j=1}^{m_i} x_{ij}}{C_i} \quad (12)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_{j=1}^{m_i} x_{ij} \leq C_i & (i = 1, 2, \dots, n) \\ x_{ij} \leq P_{ij} & (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m_i) \\ \sum_{j=1}^{m_i} x_{ij} \leq A_i & (i = 1, 2, \dots, n; n \geq 10) \end{cases}$$

式中: n 为扇区的个数; m_i 为第 i 个扇区内的航线数量; x_{ij} 为第 i 个扇区内第 j 条航线的流量; C_i 为第 i 个扇区的容量; P_{ij} 为第 i 个扇区内第 j 条航线的预测流量; A_i 为第 i 个扇区内所有机场起降航班的数量。

本文的目标是最大化所有扇区的流量与容量之比的总和,即使所有扇区的流量尽可能接近它的容量。利用 Lingo 软件计算求得 2035 年扇区的数量为 21 个,具体对哪些扇区进行分割还需要结合扇区当前的运行情况和未来年的变化情况进行分配。编写代码如下。

Lingo 代码说明:

```

model:
sets:(定义参数)
i/1..n/;(定义扇区)
j(i)/1..m(i)/;(定义航线)
endsets

variables:(定义变量)
x(i,j);(定义流量)
z;(定义目标函数值)

maximize:
z=@sum(i,@sum(j,x(i,j)/C(i))):(定义目标函数)

subject to:(定义约束条件)
@for(i,@sum(j,x(i,j))<=C(i));
@for((i,j),x(i,j)<=P(i,j));
n>=10;
@for(i,@sum(j,x(i,j))<=A(i));(分别定义式(14)中的约束条件)

end-model
solv

```

3.2 扇区划设建议

从表 6 中的流容比可以看出:各个扇区的流容比普遍较高,其中比较突出的扇区是乌鲁木齐 01 扇、02 扇、03 扇、04 扇和 07 扇,结合流量预测和数据采集过程中所发现的问题,对新疆管制扇区 2035 年的扇区划分提出以下建议:

1) 根据流量预测结果可知,乌鲁木齐 01 扇与 07 扇当前和未来年的航班流量较大且流容比较高。受限于两扇区的水平范围,建议将乌鲁木齐 01 扇与 07 扇按照高度层进行进一步细分,形成高低扇。

2) 乌鲁木齐 04 扇承担向乌鲁木齐终端进场排序的任务,且航线方向较为复杂。在数据采集过程中发现,04 扇飞越航班流与乌鲁木齐进场航班存在冲突待分流的问题,建议对乌鲁木齐 04 扇按高低和水平空间同时分扇。

3) 乌鲁木齐 02 扇具有多个出境点,下辖多个支线机场,航线方向错综复杂,是“空中丝绸之路”的重要保障扇区,建议对 02 扇进行水平范围的扇区划分。

4) 随着俄乌冲突等不确定因素的突发,国外飞越航班航线调整,导致阿拉木图出境流量增加,同时 03 扇承担南疆支线机场向乌鲁木齐终端区离场排序功能,建议 03 扇按高低和水平空间同时分扇。

3.3 仿真验证

3.3.1 仿真评估方法

在空域仿真模型中,仿真程序首先根据典型日航班时刻表,按照加压比例随机产生新的飞机流。

随机飞机流中进场的飞机首先通过各个交接点进入终端空域,在终端空域的飞行中基于实际管制规则智能控制飞机的飞行轨迹(如位置、高度、时间),仿真程序自行实时产生管制指令,包括发布落地条件、调整高度、调整航向、可以进近、允许落地等,并把指令发送的时间、内容等信息以及飞机在空域的飞行轨迹、飞行时间存入数据表中。

随机飞机流中的离场飞机,首先根据实际机

位情况,安排到停机坪的相应机位上;仿真程序会根据离场飞机计划离开停机位的时刻开始滑行,依照管制规则智能修正滑行路径以避免冲突,最终在跑道头依据管制规则判断起飞时机,离场飞机离开跑道后进入空域仿真模块。仿真程序对整个过程中的有关数据进行存储。

本文使用 AIRTOP (Air Traffic Optimization) 软件进行调整后扇区的建模,通过建立调整后区域扇区模型和航路点航线模型,导入当前典型高峰日的航班信息并运行,在此基础上根据预测的 2035 年新疆管制区域的总航班流量进行加压加量,即可得到调整后扇区在预测的 2035 年流量的情况下各个扇区的容量结果,验证扇区调整措施的合理性与有效性。

3.3.2 模型建立

针对水平方向和垂直方向上的空间性质建立调整后的扇区模型,共建立 21 个扇区。根据采集到的航路点坐标信息,将其整理为 .csv 表格文件的形式导入软件中,建立航路点、航线模型。将历史航班数据整理成 .csv 格式文件导入软件便完成了模型的建立。本文选取 2019 年 8 月 9 日~8 月 11 日的航班数据,在此基础上根据预测的 2035 年的流量进行加压加量。

3.3.3 仿真结果

将仿真方案运行 10 次,得到 10 组 2035 年流量的仿真运行结果。每个扇区选取 10 组运行结果中最大的日流量作为该扇区的日流量,选取小时流量数最大的前 6 个小时的中位数作为该扇区的高峰小时流量,得到 2035 年流量的 21 个扇区的日流量和高峰小时流量如表 7 所示。将仿真内的扇区模型调整为当前的 9 个扇区,按照预测的 2035 年的流量进行仿真运行,得到当前 9 个扇区在预测的 2035 年的流量下高峰日流量和高峰小时流量,如表 8 所示。从表 7~表 8 可以看出:在相同流量的情况下,调整后的扇区高峰小时流量较当前扇区划分方案有明显降低,管制员的管制压力得到分散与平衡,扇区运行效率得到改善,说明本文给出的扇区划分建议较为合理。

表 7 扇区调整后的高峰日流量和高峰小时流量仿真结果
Table 7 Simulation results for peak daily and peak hourly flows after sector adjustment

扇区	高峰日流量/架次	高峰小时流量/架次
01 扇	455	40
02 扇	426	39
03 扇	481	42
04 扇	423	40
05 扇	443	41
06 扇	467	44
07 扇	492	46
08 扇	399	39
09 扇	412	40
10 扇	300	31
11 扇	291	30
12 扇	372	35
13 扇	381	37
14 扇	403	38
15 扇	416	38
16 扇	389	37
17 扇	323	33
18 扇	337	34
19 扇	318	33
20 扇	281	30
21 扇	287	31

表 8 扇区调整前的高峰日流量和高峰小时流量仿真结果
Table 8 Simulation results for peak daily and peak hourly flows before sector adjustment

扇区	高峰日流量/架次	高峰小时流量/架次
01 扇	1 367	120
02 扇	1 023	102
03 扇	1 005	81
04 扇	942	107
05 扇	630	69
06 扇	820	80
07 扇	1 336	124
08 扇	1 021	81
09 扇	600	71

4 结 论

通过对比分析 AIRTOP 仿真软件对 2035 年扇区划设方案和原扇区划设方案的仿真结果可以看出,对高峰日流量和高峰小时流量较高的扇区进行水平范围和垂直范围的扇区划分后,这两项指标都得到了不同程度的降低,表明扇区划设方案能够有效地应对 2035 年新疆区域的流量增长,验证了扇区划设方案的有效性 with 合理性。但是由于扇区数量由原本的 9 个增设至 21 个,需要针对扇区数量和要求配备足量的管制员以应对增设的管制扇区。

参 考 文 献

- [1] RATNER R S, SIDDIQUEE W, GLASER M B, et al. A methodology for evaluating the capacity of air traffic control systems: FAA-RD-70-69[R]. US: FAA, 1970.
- [2] JORNA P. Operator workload as a limiting factor in complex systems[M]. Berlin: Springer, 1991: 281-292.
- [3] CHATTERJI G B, SRIDHAR B. Neural network based air traffic controller workload prediction[C]// Proceedings of the 1999 American Control Conference. US: IEEE, 1999: 2620-2624.
- [4] CLOAREC D, PURVES K, VERGNE F. Co Space 2003 controller model based study assessment of airborne spacing tasks in the extended TMA[R]. US: EEC, 2004: 1-10.
- [5] 张功. 基于管制员工作负荷的扇区容量评估技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
ZHANG Gong. Research on sector capacity assessment technology based on controller workload[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013. (in Chinese)
- [6] 刘璐, 韩松臣. 基于管制通信规律的扇区容量模型[J]. 指挥信息系统与技术, 2016, 7(6): 45-48.
LIU Lu, HAN Songchen. Sector capacity model based on control communication laws[J]. Command Information System and Technology, 2016, 7(6): 45-48. (in Chinese)
- [7] 赵文豪. 目视和仪表混合运行下空域容量评估及分析[D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2018.
ZHAO Wenhao. Airspace capacity assessment and analysis under mixed visual and instrument operation [D]. Guanghan: Civil Aviation Flight Academy of China, 2018. (in Chinese)
- [8] 中国民用航空局. 机场时刻容量评估技术规范: AP-93-TM-2017-01[S]. 北京: 中国民用航空局, 2003.
CAAC. Technical specification for capacity assessment at airport hours: AP-93-TM-2017-01[S]. Beijing: CAAC, 2003. (in Chinese)
- [9] 陈恺, 曾培彬, 蔡浩. 改进型空中交通流量预测算法的验证与实现[J]. 计算机测量与控制, 2020, 28(12): 267-272.
CHEN Kai, ZENG Peibin, CAI Hao. Validation and implementation of improved air traffic flow prediction algorithms [J]. Computer Measurement and Control, 2020, 28 (12): 267-272. (in Chinese)
- [10] 牛苗苗. 新疆区域次枢纽机场发展研究[J]. 空运商务, 2022(1): 28-32.
NIU Miaomiao. Research on the development of Xinjiang regional sub hub airport [J]. Air Transport Business, 2022 (1): 28-32. (in Chinese)
- [11] 孙君茹. 基于蚁群算法的地区配电网规划研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2020.
SUN Junru. Research on regional distribution network planning based on ant colony algorithm [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2020. (in Chinese)
- [12] 黄娟, 贺政纲. 基于 Logit 模型的空铁联运运量预测[J]. 交通运输工程与信息学报, 2018, 16(4): 88-92.
HUANG Juan, HE Zhenggang. Air-rail intermodal transport volume prediction based on Logit model [J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2018, 16(4): 88-92. (in Chinese)
- [13] 刘英兰. 岳阳机场航空业务量预测[J]. 低碳世界, 2021, 11(2): 167-168.
LIU Yinglan. Yueyang airport aviation business volume forecast [J]. Low Carbon World, 2021, 11(2): 167-168. (in Chinese)
- [14] 赵征. 空域容量评估与预测技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
ZHAO Zheng. Research on airspace capacity assessment and prediction technology [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015. (in Chinese)
- [15] 张婧婷. 基于管制负荷的扇区运行安全评估研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
ZHANG Jingting. Research on sector operation safety assessment based on regulatory load [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014. (in Chinese)
- [16] 徐蕾. 扇区容量评估技术的进一步研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
XU Lei. Further research on sector capacity evaluation technology [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)
- [17] 朱海川. 海口美兰机场飞行流量管理效益研究[D]. 海口: 海南大学, 2017.
ZHU Haichuan. Research on the benefits of flight flow management at Haikou Meilan Airport [D]. Haikou: Hainan

- University, 2017. (in Chinese)
- [18] 沈丽楠. 主客观综合容量评估技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2012.
SHEN Linan. Research on subjective and objective comprehensive capacity assessment technology [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)
- [19] 张琼方. 基于管制复杂性的扇区繁忙等级划分研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2014.
ZHANG Qiongfang. Research on sector busy classification based on regulatory complexity [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014. (in Chinese)
- [20] 程予, 叶博嘉, 姚虹翔. 增开区域扇区管制工作负荷评估及预测研究[J]. 航空计算技术, 2021, 51(6): 60-64.
CHENG Yu, YE Bojia, YAO Hongxiang. Research on workload assessment and prediction of increased regional sector control [J]. Aviation Computing Technology, 2021, 51(6): 60-64. (in Chinese)
- [21] 曾艺. 基于管制员负荷的扇区容量评估及空管安全风险管
理研究[D]. 南昌:华东交通大学, 2021.
ZENG Yi. Research on sector capacity assessment and air traffic control safety risk management based on controller load [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2021. (in Chinese)
- [22] 乔玉洁. 不良天气影响下基于改进 WITI 指标的扇区容量模型研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2021.
QIAO Yujie. Research on sector capacity model based on improved WITI indicators under adverse weather conditions [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2021. (in Chinese)
- [23] 赵焱飞, 黄婕, 齐雁程. 基于网络流的多管制扇区通行能力[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(16): 10805-10811.
ZHAO Yifei, HUANG Jie, QI Yancheng. Multi managed sector capacity based on network flow [J]. Science and Engineering, 2022, 22(16): 10805-10811. (in Chinese)

(编辑:马文静)

(上接第 34 页)

- [23] MAO Y J, HU Z W, XU C, et al. Vector aeroacoustics for uniform mean flow: acoustic velocity and vortical velocity [J]. AIAA Journal, 2018, 56(7): 2782-2793.
- [24] 刘秋洪, 王焯桁, 薛丝丹, 等. 均匀流中声学速度预测的时域解析公式[J]. 空气动力学学报, 2023, 41(7): 84-92.
LIU Qiuhong, WANG Xuheng, XUE Sidan, et al. Time-domain analytical formulation for acoustic velocity prediction in uniform mean flow [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2023, 41(7): 84-92. (in Chinese)
- [25] KAMBE T. A new formulation of equations of compressible fluids by analogy with Maxwell's equations [J]. Fluid Dynamics Research, 2010, 42(5): 1-18.
- [26] MAO Y, ZHANG Q, XU C, et al. Two types of frequency-domain acoustic-velocity formulations for rotating thickness and loading sources [J]. AIAA Journal, 2015, 53(3): 713-722.
- [27] 薛丝丹, 钱振昊, 刘秋洪, 等. 二维圆柱对旋转单极子点源的声散射 [J]. 噪声与振动控制, 2022, 42(5): 60-65.
XUE Sidan, QIAN Zhenhao, LIU Qiuhong, et al. Sound scattering of a two-dimensional cylinder due to a rotating monopole point source [J]. Noise and Vibration Control, 2022, 42(5): 60-65. (in Chinese)

(编辑:丛艳娟)