

文章编号: 1005-0523(2022)04-0058-08



基于计划数据的容量受限机场识别

冯慧琳, 胡 荣, 洪浩强, 张军峰, 王德芸

(南京航空航天大学民航学院, 江苏 南京 211106)

摘要:为准确把握我国机场容量利用情况,融合“容量需求”与“容量供给”提出机场容量利用指数,考察了2019年全国239座机场的容量利用水平;然后,从“全年”及“高峰小时”两个维度开展容量受限机场的识别并从空间分布、机场定位、跑道构型及繁忙小时分布等方面探究了容量受限机场的特征;最后,基于3种未来发展情景,预测了2025年和2035年全国及典型机场容量的利用水平。研究表明:全国约92%的机场容量未受限,且机场间差异显著;11座容量受限机场主要集中于枢纽机场和主协调机场;未来机场容量能够满足中国民航发展需求,仅深圳和西安机场有较大容量压力。可从“增加容量”和“平衡需求”两个视角采取组合措施,提升机场起降需求与容量供给的匹配程度、机场容量利用效率与水平。

关键词:交通工程;容量利用;容量受限机场;机场分类;容量利用指数;高峰小时流量

中图分类号:[U8];V351

文献标志码:A

本文引用格式:冯慧琳,胡荣,洪浩强,等.基于计划数据的容量受限机场识别[J].华东交通大学学报,2022,39(4):58-65.

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.20220406.009

Identification of Capacity Constrained Airport Based on Planning Data

Feng Huilin, Hu Rong, Hong Haoqiang, Zhang Junfeng, Wang Deyun

(College of Civil Aviation Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: In order to accurately explore the airport capacity utilization in China, airport capacity utilization index was proposed integrating "capacity demand" and "capacity supply", which evaluated the level of capacity utilization of 239 airports nationwide in 2019. Then, the capacity constrained airports were identified from the two dimensions of "full year" and "peak hour", the characteristics of which were explored in terms of spatial distribution, airport positioning, runway configuration and rush hour distribution. Finally, three future development scenarios were set to predict the capacity utilization of national and typical airports in 2025 and 2035. The research results indicate that about 92% of the airports in China are not capacity constrained, and there are significant differences among the airports. Eleven capacity constrained airports are mainly served as hubs and main coordinated airports. The airport capacity can generally meet the developing demand of civil aviation in China in the future, and only Shenzhen and Xi'an airports are expected to confront heavy capacity pressure. Combined measures can be taken from the two perspectives of "increasing capacity" and "balancing demand" to improve the matching degree of airport departure and landing demand with capacity supply, and to promote the level of airport capacity utilization.

收稿日期: 2021-09-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1933117)

Key words: traffic engineering; capacity utilization; capacity constrained airports; airport classification; capacity utilization index; peak hour volume

Citation format: FENG H L, HU R, HONG H Q, et al. Identification of capacity constrained airport based on planning data[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2022, 39(4): 58-65.

中国航空运输市场是全球最大、增速最快的市场之一。然而,机场容量的增长速度远低于旅客需求的增速,部分机场在繁忙时刻保障的航班架次超出其容量,导致长时间旅客延误及一系列环境问题^[1-4]。特别是大型机场,机场容量成为制约机场发展的重要原因之一^[5]。判断机场的容量是否受限有助于各方采取措施缓解机场拥挤,进而满足未来发展的需求。

机场容量通常特指跑道系统的容量,多用公布容量来表征^[6]。机场容量受到很多因素影响,如跑道数量和布局、跑道运行模式、航空器起降间隔标准以及天气条件等^[7-8]。机场容量评估是开展机场容量后续研究的基础,学者们提出了不同的机场容量评估指标(例如每小时或每年的机场容量),同时也设计了多种不同的机场容量评估方法^[9-12]。在此基础上,诸多文献采用高峰小时起降架次、容量利用率、剩余容量指数等单一或复合指标开展机场容量利用水平的评价研究。Gelhausen 等^[13]提出利用年起降架次、5%高峰小时流量和容量利用率(小时平均流量与5%高峰小时流量的比值)来识别容量受限的机场。该方法被进一步改进为利用年起降架次和相对高峰小时(起降架次超过小时容量的70%的时间占总运行时间的比例),将机场分为4类并判断出容量严重受限的机场^[14]。Gudmundsson 等^[15]提出利用剩余容量指数(即最大年起降架次与实际年起降架次之差)来评估机场容量利用水平。针对容量不足的机场,不少研究从“硬件扩张”(如新增跑道等)和“软件改善”(如优化运行程序等)两个维度提出了机场容量改善措施^[16-17]。

上述研究拓展了机场容量及其利用水平评价等研究并取得了丰富的研究成果,但仍有如下问题亟待深入:① 机场容量不足既可表现为繁忙小时的起降架次超出容量限值,亦可表现为机场全年高负荷运行,如何在容量受限机场分析中兼顾“短时不足”与“长期受限”? ② 现有机场容量利用水平评价研究,针对国外机场的多,分析我国机场的少,特别

是对我国容量受限机场特征及未来发展态势的分析更为缺乏。本文综合机场“容量需求”与“容量供给”,设计机场容量利用指数并衡量机场全年容量利用水平;进一步引入高峰小时流量系数构建容量受限机场识别矩阵,对2019年全国239个机场开展容量利用水平分类及特征分析;最后,采用情景分析法,预测未来机场容量利用状况,以期为更好提升机场容量利用率、满足中国民航未来发展需求提供参考。

1 研究方法与数据来源

1.1 机场容量利用指数

本文引入容量利用指数来评估某时间段内(本文为一年)机场容量的利用水平。某机场的容量利用指数可表示为

$$u = \frac{a}{cn} \quad (1)$$

式中: u 为机场的容量利用指数; a 为实际年起降架次,架次; c 为小时容量,即单位小时最大起降架次,架次/h; n 为年运行小时数,h,即 24×365 。在研究期间新开航或停航的机场,其年运行小时数按实际通航天数确定。

易知,容量利用指数 $u \geq 0$,且其取值越大,说明该机场的容量利用率越高。当 $u=0$ 时,表示机场未通航;当 $u=1$ 时,表示机场所有容量均得到利用,机场已经达到其理论最大起降保障能力;当 $u>1$ 时,表明该机场已超负荷运行,机场容量严重短缺。

在此基础上,可进一步分析全国所有机场容量的利用指数

$$u_N = \frac{\sum_{i=1}^m a_i}{\sum_{i=1}^m c_i n_i} \quad (2)$$

式中: u_N 为全国机场容量利用指数; m 为全国机场总数;下标 i 为机场序号, $i=1,2,3,\dots,m$ 。

容量利用指数将机场的“容量需求”(实际年飞机起降架次)与“容量供给”(年最大飞机起降架次)联系起来,可直观地反映机场的容量利用情况。理论上,机场年最大起降架次受两个因素影响:机场年运行小时数与单位小时最大起降架次。其中,单位小时最大起降架次与机场跑道条数、跑道构型、跑道运行模式等密切相关。为了便于机场间比较,本文基于 Gelhausen 等^[13-14]提出的方法与标准,设置不同跑道构型的单位小时最大起降架次参考值。

1.2 容量受限机场识别

机场容量受限可表现为在某些繁忙时刻,机场实际保障航班架次超出其公布容量,也可表现为该机场全年保障较多航班架次,机场容量利用率高,无足够的额外空闲时刻满足未来增长的航班架次。为较全面、准确地识别容量受限机场,本文拟从“全年”与“高峰小时”两个维度来评估机场容量是否受限。其中,利用机场容量利用指数刻画“全年”机场容量利用情况;引入高峰小时流量系数表征“高峰小时”的繁忙程度,如式(3)所示

$$p = \frac{v}{c} \quad (3)$$

式中: p 为高峰小时流量系数; v 为高峰小时流量,架次/h。易知 $p \in [0, +\infty)$,当 $p \geq 1$ 时,表明该机场在某些小时呈现容量受限的现象。

需说明的是,高峰小时流量有多种不同界定方法,其中应用范围最广的是将机场全年各小时起降架次按从高到低排序,排在第5%位次的小时流量即定义为高峰小时流量。多项研究也表明,5%高峰小时流量较其他确定高峰小时流量的方法波动性更低,且得到回归分析结果的支持^[18]。本文采用这一方案计算高峰小时流量系数。

因而,利用容量利用指数与高峰小时流量系数即可构造容量受限机场识别矩阵(图1)。

如图1所示,根据容量利用指数与高峰小时流量系数,将机场划分为4类:“高-高”“高-低”“低-高”与“低-低”。由识别矩阵的指标可知,对于“高-高”类型机场,其全年容量利用率高且高峰小时流量超过最大起降架次参考值,这类机场可定义为容量受限机场;“高-低”与“低-高”两类机场,存在全年或某些高峰小时的容量受限现象,这些机场的容量虽未全面告警,但值得关注,随着机场起降架次

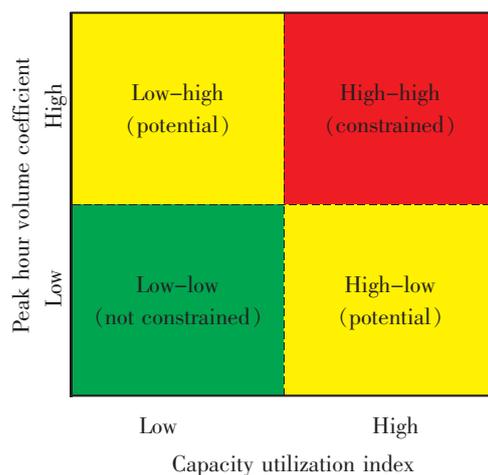


图1 容量受限机场识别矩阵示意图

Fig.1 Schematic diagram of the capacity constrained airport identification matrix

增长,这类机场很可能演变为“高-高”类型;最后,“低-低”类型机场无论从全年还是高峰小时来看,仍具有较多空闲容量来满足额外的起降架次,这些机场容量不受限。

显然,指标阈值的选取对容量受限机场最终识别结果会有显著影响。本文基于以往研究及经验分析^[14],将容量利用指数与高峰小时流量系数的阈值分别设定为0.6和1,进一步分析阈值选取对识别结果的影响。

1.3 未来发展情景设置

IATA 预测到2025年左右,中国将取代美国成为世界第一民航大国。同时,突发的新冠肺炎疫情、国际贸易纷争等给包括我国在内的全球民航运输业带来了极大的冲击,并给民航业复苏及未来发展带来了很大的不确定性^[19-22]。

机场容量能否支撑中国未来民航的发展,可从“容量需求”与“容量供给”的匹配程度加以分析。本文设置3种未来发展情景。

目标规划情景。该情景中的“容量需求”与“容量供给”均以国家、行业规划为依据:①容量需求以《新时代民航强国建设行动纲要》《全国民用运输机场布局规划》等规划目标为未来容量需求目标值;②容量供给以《全国民用运输机场布局规划》和机场扩建工程规划中机场新建、扩建、迁建等方案为基础,折算新增的机场容量。

疫情冲击情景(分乐观、悲观预测)。考虑到新

新冠肺炎疫情对民航业的影响,根据 ICAO、IATA 等的预测并结合我国民航业恢复现状进行未来发展情形设置:① 容量需求细分为国内航线和国际航线。考虑到 2020 年下半年,国内航线迅速恢复,客运量已恢复至 2019 年同期的九成以上,2021 年恢复增长,国内航线预测采用增长滞后一年的方法;而由于国外疫情的爆发,多国采取了管制措施(如我国“五个一政策”“熔断机制”等),这些管制措施何时解除以及疫苗何时普及存在较大的不确定性,国际航线预测根据 IATA、Gudmundsson 等^[23]的预测,结合我国民航业恢复情况,进一步划分为乐观预测和悲观预测。乐观预测采用增长滞后 2 年的方法;悲观预测认为增长滞后 3 年且增速减少至原来的 80%;② 考虑到疫情影响,目标规划情景中的新增机场容量会出现部分的缓建或取消。本情景容量供给以目标规划情景中容量供给的 80%加以折算。

同时,采用蒙特卡洛模拟方法^[20-24],对 3 种未来发展情景预测进行稳健性检验。首先,基于上述方法预测出 2025/2035 年机场容量需求与容量供给;假设 2025/2035 年容量需求与供给分别在 $\pm 5\%$ 和 $\pm 10\%$ 范围服从正态分布波动,开展大量(10 000 次)抽样分析;最后讨论分析模拟结果,加深对预测结果的认识。

1.4 数据来源

本文研究对象是 2019 年中国大陆的 239 个民用机场。受限于数据可得性,不考虑香港、澳门和台湾地区的机场。

基于《2019 年民航机场生产统计公报》与民航局飞行计划数据开展研究。需要说明的是,飞行计划数据仅包括正班飞行的航班信息,不含训练、包机等其它飞行数据,其涵盖的航班架次少于统计公报中起降总量(约为 91.2%)。但考虑到定期航班是大型机场运行的主要业务,飞行训练等其它飞行更集中于小机场,飞行计划数据对容量受限机场(通常为大型机场)的识别结果影响很小。事实上,如果只统计起降架次排名前 20 位的机场,飞行计划数据与统计公报中数据相差不足 1%。

全国民航发展目标、机场新建、扩建等数据摘自《新时代民航强国建设行动纲要》《全国民用运输机场布局规划》及相关机场官网。

2 结果分析

2.1 机场容量利用指数

从指数大小来看,2019 年北京首都机场的容量利用指数最大(0.848)、九寨黄龙机场最小(0.001)。北京首都、深圳宝安、成都双流机场的容量利用指数非常高,均超过 0.8,说明这 3 座机场容量非常紧张,几乎没有剩余容量来满足未来额外增加的航班架次。全国所有机场的平均容量利用指数为 0.175,仅有 61 个机场(占全国 25.5%)高于全国平均水平,表明我国大部分机场的容量尚未得到充分利用。

从空间分布来看,在容量利用指数高于全国平均的机场中,近 60%分布于中南和华东地区;且在中南和华东地区的机场中,容量利用指数高于全国均值的机场分别占 47.3%和 40.9%,表明这两个地区的机场容量利用率普遍较高,也佐证了该地区航空需求量较大。华北地区仅 6 座机场容量利用指数高于平均值,占该地区机场总数的 16.7%。这是由于华北地区航空市场集中度高,北京首都机场作为全国最大的国际枢纽,机场容量大(3 条跑道)、辐射范围广,2019 年旅客吞吐量超 1 亿(占华北地区的 51.4%)。西部地区由于经济欠发达,航空需求不旺盛,机场容量利用率普遍较低。在新疆地区,仅有乌鲁木齐地窝堡和博乐阿拉山口两座机场的容量利用指数高于全国均值,其余机场的容量利用率均非常低(容量利用指数的平均值仅为 0.040)。

从跑道构型来看,多跑道机场容量利用指数的均值为 0.595,其中 56.3%的机场的容量利用指数高于 0.6。多跑道机场均为国际或区域枢纽,服务范围广、航空需求大,更可能面临容量受限问题。而单跑道机场绝大部分为支线机场,容量利用指数普遍较低,均值仅为 0.115。在 223 座单跑道机场中,仅有 7 座机场的容量利用指数超过 0.6。

如果机场某小时流量超过单位小时最大起降架次,我们将该小时定义为繁忙小时。2019 年,全国仅 34 个机场经历繁忙小时(预示这些机场更可能面临容量受限的困境),且多集中于多跑道机场(表 1);尤其是双跑道(相关运行)和三跑道机场,平均全年近 1/5 的时间都处于繁忙状态。

2.2 容量受限机场识别

容量受限机场识别矩阵的分类结果如图 2 所示。

表 1 不同跑道构型的全年繁忙小时统计表
Tab.1 Statistics of annual rush hours for different runway configurations

Runway configuration	Number of airports	Total number of rush hours/h	Number of rush hours per airport/h
Single runway	223	13 247	59
Two dependent parallel runways	10	14 883	1 488
Two independent parallel runways	1	920	920
Three parallel runways	3	5 228	1 743
Four intersecting runways	1	0	0
Four parallel runways	1	127	127

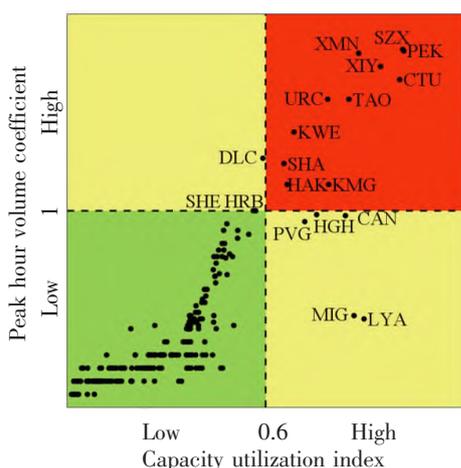


图 2 容量受限机场识别矩阵结果图

Fig.2 Results of the capacity constrained airport identification matrix

“高-高”类型机场,即容量受限机场共 11 座。从机场所在城市看,有 4 座容量受限机场所在城市 2019 年 GDP 排名位列全国前十。除乌鲁木齐、贵阳和海口外,其它机场所在城市 GDP 均在全国前 35 名,可见容量受限机场的空间分布与地区经济发展有较强的相关性。乌鲁木齐、贵阳和海口均为省会城市,在区域政治和对外发展上均具有重要的战略地位;乌鲁木齐地窝堡机场是中国与西亚、中亚对外交流的重要门户;贵阳和海口是重要旅游城市,拥有大量的航空需求;海口美兰机场还是中国与东南亚黄金航道连接的区域航空枢纽。考虑到这 3 座城市重要的区域政治与对外交流的战略意义,其航空运输需求很高,机场同样面临着容量受限的问题。

从机场定位来看,11 座容量受限机场均为民航局规划的国际或区域枢纽。除贵阳龙洞堡机场,其余 10 座均为时刻主协调机场。主协调机场的时刻需求旺盛、调整余地很小,需实施 24 h 航班时刻协调配置,这与容量受限机场的特征相一致。由此可见,本文提出的容量受限机场识别方法,兼顾全年和高峰

小时两个维度,可有效识别出容量受限的机场。

“高-低”和“低-高”两类机场存在部分(全年或高峰小时)的容量问题。“高-低”类机场有 5 座,这类机场从高峰小时容量来看仍具有一定的航班增长空间,但从全年看,容量利用率较高,剩余容量较少。上海浦东、广州白云和杭州萧山这 3 座大型机场属于此类。虽然这 3 座机场全年的起降架次很高,但由于航班时刻规划较为合理,且采用机场协同决策(A-CDM)、云智汇(BY-ACDM)系统等技术提升航班运行效率,从高峰时刻来看,仍有一定的容量剩余。

“低-高”类机场仅有 3 座(大连周水子、哈尔滨太平和沈阳桃仙机场),全部分布在东北地区。其高峰小时起降架次略高于(或等于)小时最大起降架次,在少数高峰小时比较繁忙。从月起降架次和月高峰小时数看,由于学生和旅客客流在暑运期间大幅增加,这 3 座机场 7、8 月较为繁忙,而其余时间仍有一定的容量剩余。从全年来看,它们仍有空余容量供未来增加的航班使用。

“高-低”和“低-高”类机场虽然目前仍未面临严重的容量受限问题,但随着未来航空业务量的增加,很可能转变为容量受限机场。需密切关注这些机场容量和航空需求的变化,及时发现并缓解潜在的容量问题。

“低-低”类机场(共 220 座)从全年容量利用率和高峰小时起降架次来看,都具有较多的剩余空间,机场容量不受限。全国超过 92%的机场是容量不受限机场,其中超过一半分布在我国西部地区。而新疆和华北地区超过 95%的机场为容量不受限机场。

2.3 受限机场容量利用趋势

基于数据可得性,选取有明确 2025/2035 年规划目标的 5 座容量受限机场作为典型机场,基于目标规划、疫情冲击(分为乐观、悲观预测)3 种情景,开展 2025/2035 年全国和典型机场的容量利用

指数预测。

目标规划情景下各机场的容量利用指数均大于疫情冲击情景,这是由于受疫情影响,预测起降架次较规划目标明显减少,虽然新增机场容量会出现部分的缓建或取消,但航班需求受到疫情的冲击更大;因此,受疫情影响,机场的容量问题得到了部分缓解。

2025 年(图 3),3 种情景下全国机场平均容量利用指数的最大概率值均较 2019 年有所增长,目标规划情景下最大(最大概率值为 0.199),较 2019 年增长 13.7%;疫情冲击情景(悲观预测)下最小(最大概率值为 0.194),较 2019 年增长 10.9%。虽然全国平均容量利用指数较 2019 年有所增长,但仍然处在较低水平。

典型机场在 2025 年前均有新(迁)建跑道计划,2025 年各机场的容量利用指数较 2019 年均有

所下降。其中,厦门高崎机场(单跑道)将迁至厦门翔安机场(3 跑道),容量显著增加,容量利用指数降幅最大(36.4%~47.3%),且在每种情景下均小于 0.5,容量不再严重受限。然而,其余典型机场的容量利用指数虽然有所下降,但仍然较高,特别是深圳宝安、西安咸阳、青岛流亭(迁至青岛胶东)机场所预测的容量利用指数在 3 种情景下的最大概率值均高于 0.6,容量仍将受限。

到 2035 年(图 4),全国机场平均容量利用指数进一步增加,较 2019 年增加 11.4%~24.6%,但总体上仍处在较低水平。典型机场的容量利用指数持续上升,最大概率值普遍在 0.6 以上。昆明长水机场的容量利用指数增幅最大(约 16.1%),增至 0.8 左右。深圳宝安、西安咸阳机场的容量利用指数在 3 种情景下均超过 0.9,几乎没有空闲容量剩余,发展将严重受到容量不足的制约。

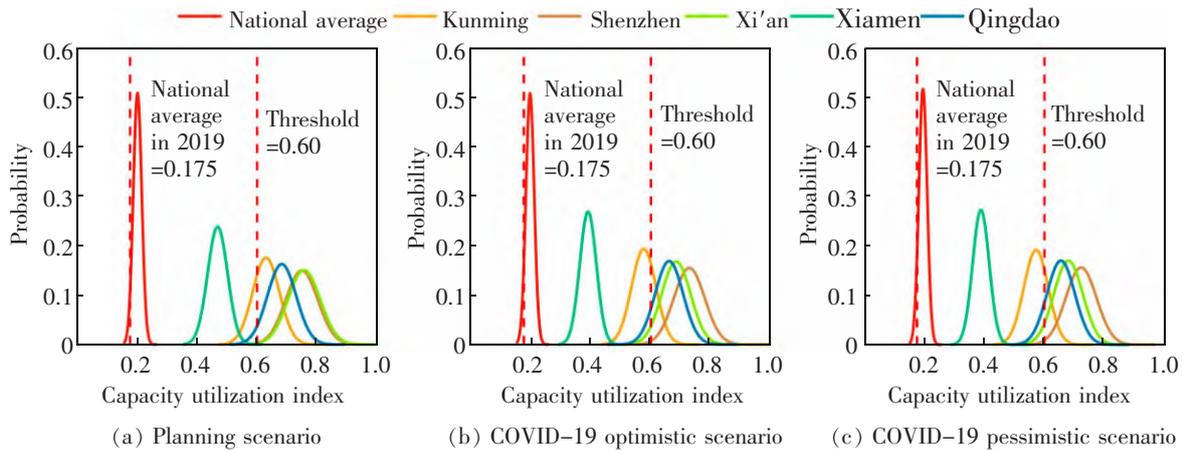


图 3 全国及典型机场容量利用预测图(2025)

Fig.3 Capacity utilization prediction of the national and typical airports (2025)

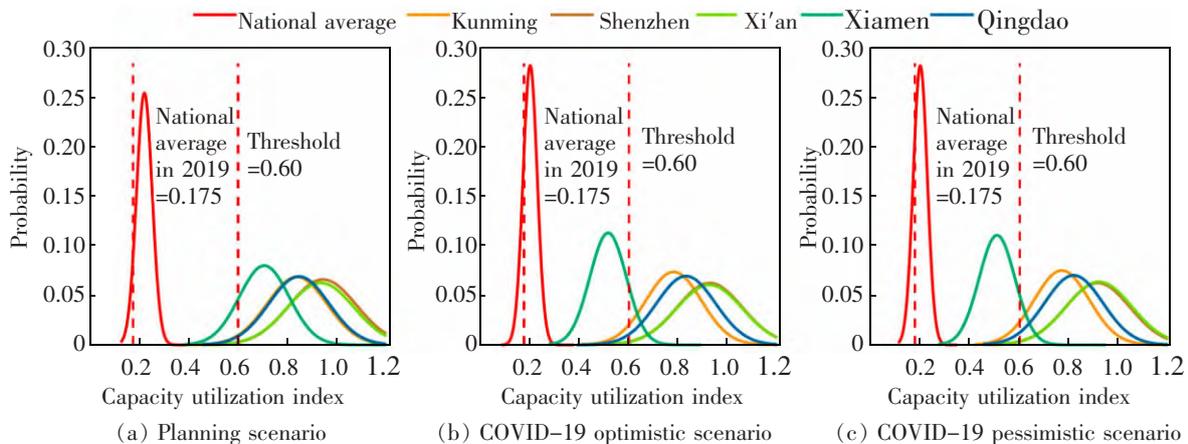


图 4 全国及典型机场容量利用预测图(2035)

Fig.4 Capacity utilization prediction of the national and typical airports (2035)

2.4 不确定性分析

1) 容量利用指数和高峰小时流量系数的阈值选取。这是影响机场分类和容量受限机场识别的不确定性来源。较大的阈值将缩小容量受限机场的范围;反之亦然。例如,保持高峰小时流量系数的阈值不变,将容量利用指数的阈值从0.60提高到0.65,容量受限机场的数量将降至8个;如果下降到0.55,则增加至14个。

2) 单位小时最大起降架次参考值。本文单位小时最大起降架次参考了Gelhausen的研究成果。由于我国机场运行环境复杂,存在即使跑道构型相同但公布容量不尽相同的情形。此外,本文为便于比较,默认未来各跑道构型的单位小时最大起降架次参考值和2019年相同。倘若引入新技术、采用新标准提高了参考值,未来的容量利用指数将比当前结果小。

3 对策建议

基于以上分析,提出如下缓解机场容量约束的建议。

从增加容量角度来看:① 优先在容量受限机场新建跑道或其附近地区新建机场以增加容量。② 鉴于新建机场/跑道的时间和资金成本,优先考虑引入新技术以提高机场容量^[14]。例如:尾流重新分类(RECAT-CN)^[25]、机场协同决策(A-CDM)、空管辅助决策系统(AMAN/DMAN),等。③ 容量受限机场几乎都是主协调机场,民航局应优先关注这些机场的时刻需求。

从平衡需求角度来看:① 建议政府与机场采取费用补贴、税收优惠等措施鼓励航空公司将航班从容量受限机场转移到附近未充分利用的机场^[26],尤其针对京津冀、长三角、粤港澳等机场群。② 优化时刻管理办法,鼓励采用基于市场的措施将航班从繁忙小时转移到非繁忙小时^[27]。

如果能够综合实施上述措施,那么航空需求将在时间分布(从高峰时段到非高峰时段)和空间分布(从容量受限的机场转移至容量未充分利用的机场)上均得到更好平衡,从而实现需求与容量的更优匹配、机场容量的更高利用。

4 结论

1) 全国大多数机场的容量未得到充分利用,约75%的机场的容量利用指数低于全国平均。机场容

量利用率存在显著差异,呈现“东南部机场高、西北部机场低”“多跑道机场高、单跑道机场低”的特点。

2) 11座机场识别为容量受限机场,主要分布在经济较为发达的城市,这些机场均为国际或区域枢纽,且有10座为主协调机场。

3) 2025/2035年全国机场容量利用率预测将持续上升,但仍保持在较低水平。深圳宝安和西安咸阳机场未来将面临较大的容量不足压力。

4) 协同实施“增加供给”与“平衡需求”组合措施,可从“时间”与“空间”维度实现容量供给与市场需求的更好匹配,优化机场容量利用。

参考文献:

- [1] COKORILO O. Environmental issues for aircraft operations at airports[J]. Transportation Research Procedia, 2016, 14: 3713-3720.
- [2] HU R, ZHU J L, ZHANG Y, et al. Spatial characteristics of aircraft CO₂ emissions at different airports; some evidence from china[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2020, 85: 102435.
- [3] MASIOL M, HARRISON R M. Aircraft engine exhaust emissions and other airport-related contributions to ambient air pollution: A review[J]. Atmospheric Environment, 2014, 95: 409-455.
- [4] 洪浩强, 胡荣, 张军峰, 等. 机场航空器碳排放演变的驱动因素分解研究[J]. 华东交通大学学报, 2020, 37(5): 74-79. HONG H Q, HU R, ZHANG J F, et al. Decomposition of driving factors for the revolution of carbon emissions of aircraft in airports[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2020, 37(5): 74-79.
- [5] 杨磊, 胡明华, 尹苏皖, 等. 大型繁忙机场场面离场交通流拥堵特征分析[J]. 航空学报, 2016, 37(6): 1921-1930. YANG L, HU M H, YIN S W, et al. Characteristics analysis of departure traffic flow congestion in mega-airport surface [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(6): 1921-1930.
- [6] JANIC M. Analysing and modelling some effects of solutions for matching the airport runway system capacity to demand [J]. Journal of Air Transport Management, 2017, 65: 166-180.
- [7] MOHRI S S, KARIMI H, KORDANI A A, et al. Airline hub-and-spoke network design based on airport capacity envelope curve: A practical view[J]. Computers & Industrial Engineering, 2018, 125: 375-393.
- [8] 康瑞, 杨凯. 考虑跑滑结构的机场跑道容量评估模型[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2016, 53(2): 319-325. KANG R, YANG K. Runway capacity evaluation model with considering of runway and taxiway instruction[J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 2016, 53(2): 319-325.
- [9] 沈笑云, 陈泰安, 张思远. 基于ADS-B数据的跑道容量评

- 估方法研究[J]. 信号处理, 2020, 36(11): 75-82.
- SHEN X Y, CHEN T A, ZHANG S Y. Research on runway capacity evaluation method based on ADS-B data[J]. Journal of Signal Processing, 2020, 36(11): 75-82.
- [10] TEE Y, ZHONG Z. Modelling and simulation studies of the runway capacity of changi airport[J]. The Aeronautical Journal, 2018, 122(1253): 1022-1037.
- [11] 蒋兵, 胡明华, 田勇, 等. 机场跑道容量评估模型和估计方法的进一步研究[J]. 交通运输工程学报, 2003, 3(2): 80-83.
- JIANG B, HU M H, TIAN Y, et al. Further research of airport runway capacity evaluation[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2003, 3(2): 80-83.
- [12] 沈志远, 胡莹莹. 考虑尾流影响的侧向双跑道机场的跑道容量研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(1): 161-170.
- SHEN Z Y, HU Y Y. Runway capacity of lateral double-runway airport considering wake effect[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(1): 161-170.
- [13] GELHAUSEN M C, BERSTER P, WILKEN D. Do airport capacity constraints have a serious impact on the future development of air traffic? [J]. Journal of Air Transport Management, 2013, 28: 3-13.
- [14] GELHAUSEN M C, BERSTER P, WILKEN D. Airport capacity constraints and strategies for mitigation a global perspective[M]. London: The Academic Press, 2019.
- [15] GUDMUNDSSON S, PALEARI S, REDONDI R. Spillover effects of the development constraints in london heathrow airport[J]. Journal of Transport Geography, 2014, 35: 64-74.
- [16] JACQUILLAT A, ODONI A R. A roadmap toward airport demand and capacity management[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2018, 114: 168-185.
- [17] 胡明华, 裔田园, 任禹蒙. 基于改进匈牙利算法的机场航班时刻优化研究[J]. 计算机应用研究, 2019, 36(7): 2040-2043.
- HU M H, YI T Y, REN Y M. Optimization of airport slot based on improved hungarian algorithm[J]. Application Research of Computers, 2019, 36(7): 2040-2043.
- [18] WILKEN D, BERSTER P, GELHAUSEN M C. New empirical evidence on airport capacity utilisation: relationships between hourly and annual traffic volumes[J]. Research in Transport Business & Management, 2011, 1(1): 118-127.
- [19] CHRISTIDIS P, CHRISTODOULOU A. The predictive capacity of air travel patterns during the global spread of the Covid-19 pandemic: risk, uncertainty and randomness[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17(10): 3356.
- [20] TRUONG D. Estimating the impact of Covid-19 on air travel in the medium and long term using neural network and monte carlo simulation[J]. Journal of Air Transport Management, 2021, 96: 102126.
- [21] 彭峥. 新冠肺炎疫情对民航的影响分析与政策建议[J]. 交通运输研究, 2020, 6(1): 33-34.
- PENG Z. Influence of Covid-19 on civil aviation and policy recommendations[J]. Transport Research, 2020, 6(1): 33-34.
- [22] LINDEN E. Pandemics and environmental shocks: what aviation managers should learn from Covid-19 for long-term planning[J]. Journal of Air Transport Management, 2020, 90: 101944.
- [23] GUDMUNDSSON S V, CATTANEO M, REDONDI R. Forecasting temporal world recovery in air transport markets in the presence of large economic shocks: the case of Covid-19 [J]. Journal of Air Transport Management, 2021, 91: 102007.
- [24] 朱陆陆. 蒙特卡洛方法及应用[D]. 武汉: 华中师范大学, 2014.
- ZHU L L. The Monte Carlo method and application[D]. Wuhan: Central China Normal University, 2014.
- [25] 赵宁宁, 陈越, 李晓晨, 等. 航空器尾流重新分类标准的安全性评估方法[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(4): 1277-1283.
- ZHAO N N, CHEN Y, LI X C, et al. Safety assessment method of the aircraft wake vortex recategorizing standard [J]. Journal of Safety and Environment, 2020, 20(4): 1277-1283.
- [26] EVANS A, SCHAFER A W. Simulating airline operational response to airport capacity constraints[J]. Transport Policy, 2014, 34: 5-13.
- [27] ZOGRAFOS K G, MADAS M A, ANDROUTSOPOULOS K N. Increasing airport capacity utilisation through optimum slot scheduling: review of current developments and identification of future needs[J]. Journal of Scheduling, 2017, 20: 3-24.



第一作者: 冯慧琳(1999—), 女, 硕士研究生, 研究方向为民航可持续发展。E-mail: fenghl990303@163.com。



通信作者: 胡荣(1980—), 男, 副教授, 管理学博士, 博士后, 研究方向为民航可持续发展。E-mail: hoorong@nuaa.edu.cn。

(责任编辑: 刘棉玲)