

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuua@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0425

机场航班时刻资源管理研究进展

王艳军*, 水笑雨, 王梦尹

(南京航空航天大学 民航学院, 南京 211106)

摘要: 繁忙机场都会面临严重的交通拥堵和航班延误问题。解决该问题的一个有效手段是对机场航班时刻资源进行优化管理。全面介绍了航班时刻资源管理相关的研究进展, 系统回顾了机场公布容量设置、机场航班时刻配置的主要方法和手段。从公布容量确定、单机场、机场网络层面和机场群航班时刻配置及航班时刻配置技术复杂性等方面, 得出机场航班时刻资源优化配置的关键技术问题。展望了机场航班时刻资源管理的主要方向, 并对下一步研究提出建议。

关键词: 机场容量; 时刻分配; 容量需求管理; 战略流量管理; 资源优化

中图分类号: V355

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2024)04-1065-12

大多数繁忙机场都面临着严重的交通拥堵和航班延误问题, 航班时刻需求远远大于机场所能供给的数量, 因此, 需要进行容量和需求管理。航班时刻是“航空器在指定日期和时间, 为抵离某个机场而使用相关基础设施与服务权利”, 是航空运输系统中最宝贵的资源^[1]。航空公司和其他航空器运营人(以下统称“航空承运人”)基于所分配的航班时刻制定航班计划, 为客户提供航空运输服务。虽然目前仍没有一个公认的方法评估时刻的价值^[2], 但从中国最近试行的时刻拍卖及伦敦希思罗机场航班时刻在航空公司之间的转卖, 即可窥见航班时刻价值之巨大, 繁忙机场的一个航班时刻价值上千万美元。由于物理设施资源和运行程序等因素的限制, 机场航班时刻资源有限。航班时刻资源优化配置能够快速提高容量利用率, 尽可能满足航空公司航班时刻需求, 具有重要的理论意义和应用价值, 受到越来越多的关注^[3-4]。本文对机场航班时刻资源管理的相关研究工作进行了综述, 梳理了航班时刻资源管理研究的最新进展和面临的挑战, 为未来的航班时刻资源管理研究和应用提供参考。

1 机场航班时刻资源管理基本概念及方式

1.1 航班时刻协调机场

国际航空运输协会(International Air Transportation Association, IATA)根据机场的供需关系将机场分为3个级别: 航班时刻协调机场、航班时刻辅协调机场和非航班时刻协调机场^[5]。其中, 航班时刻协调机场是指满足以下4个条件的机场: ①在相应的时段内, 对机场物理设施使用的需求远远超过了该机场的容量; ②在短期内不可能通过对机场的物理设施进行改扩建的方式来满足需求; ③机场无法通过自主的航班时刻调整来解决供需不匹配的问题; ④需要一个航班时刻配置的过程, 在航班时刻配置期间必须通过一位时刻协调员来为所有航空承运人分配进场和离场时刻。

由于航空运输需求具有较强的季节性特征, 有些机场在夏秋(冬春)航季为航班时刻协调机场, 在冬春(夏秋)航季为非航班时刻协调机场。根据2022年1月5日数据, 2022夏秋(冬春)航季世界上共有198(170)个航班时刻协调机场和153(153)个

收稿日期: 2022-05-28; 录用日期: 2022-07-06; 网络出版时间: 2022-07-19 14:46

网络出版地址: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20220718.1808.001

基金项目: 国家自然科学基金(U2033203)

*通信作者. E-mail: ywang@nuaa.edu.cn

引用格式: 王艳军, 水笑雨, 王梦尹. 机场航班时刻资源管理研究进展[J]. 北京航空航天大学学报, 2024, 50(4): 1065-1076.

WANG Y J, SHUI X Y, WANG M Y. Research progress on airport slot allocation[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 50(4): 1065-1076 (in Chinese).

航班时刻辅协调机场。中国共有 22 个航班时刻协调机场,是世界上航班时刻协调机场最多的国家。

虽然航班时刻协调机场数量不足全球机场总量的 6%,但是这些机场为世界上近 50% 的旅客提供运输服务。因此,合理配置航班时刻具有重要的现实意义和应用价值。

1.2 航班时刻配置办法和程序

1.2.1 航班时刻管理准则

航班时刻配置的方法可分为行政分配和市场化配置。由于对航班时刻的价值和归属问题存在较大的争议,大多数国家都采用行政化分配的方法,即由管理者或第 3 方根据一定的规则与航空公司协调,对机场航班时刻进行配置。IATA 在定期更新的《Worldwide Slot Guidelines》(WSG)中提出一系列的规则为协调机场和辅协调机场解决时刻分配问题^[6]。2020 年 6 月,IATA、国际机场理事会(Airports Council International, ACI)和世界机场协调人小组(Worldwide Airport Coordinators Group, WWACG)共同发表了第 1 版《Worldwide Airport Slot Guidelines》(WASG)^[5]。各个国家和地区依据 WSG/WASG 规则,提出适用于本国或本地区的航班时刻配置方法和程序。如 2018 年 4 月中国开始实施的《民航航班时刻管理办法》用以指导管理机场的时刻配置^[1];欧盟国家目前依然采用的方法主要是基于 1993 年发布的航班时刻管理办法(即 Regulation 95/93)^[2]。这些办法实施的目的是保证航空承运人公平参与航空市场竞争,提高航班时刻资源高效配置和有效使用等。

WSG 早在上世纪就已被提出,虽然之后经过不断的修订,但仍然存在问题。这些规章和办法仅为航班时刻配置和管理提供了指导性意见,在航班时刻分配过程中依然存在一些技术问题和机制问题亟待解决。2020 年,美国麻省理工学院的 Odoni 对 Regulation 95/93 航班时刻规章进行了深刻的评述,指出欧盟在航班时刻配置过程中存在的关键问题,并提出相关的解决建议^[7]。本文重点对航班时刻行政分配中面临的难点问题进行分析,为航班时刻管理者和研究者提供参考。

1.2.2 航班时刻配置关键概念

1) 航班系列。航班时刻配置中一个关键的概

念,指“航班配置特定运营日(周一至周日的某一日)的航班时刻,应当占用特定运营日相同的时间;若无可能,尽量配置在大致相同的时间”^[1]。WASG 要求航班时刻系列最小长度为 5,即至少连续 5 周在同一时间(或近似时间)内的时刻。如表 1 所示,3 个航空公司申请某一机场(机场 1)的起飞时刻(起飞时刻 1)。其中,航班 AL123 申请下一航季从 2020 年 12 月 8 日至 2021 年 2 月 6 日期间,于每周二、周四和周六早上 08:00 起飞;航班 BL223 申请下一个航季中每天一班的时刻;而航班 CL001 申请下一航季从 2020 年 10 月 26 日至 2020 年 11 月 29 日,每周一、周三、周五、周日执行的从机场 1 起飞至机场 4 的航班时刻。由此可见,航空公司申请时刻系列的多样性和时刻管理规则的复杂性将为优化航班时刻配置大大增加难度。

2) 历史优先权。历史优先权是指航空承运人在上一个同航季某一时刻系列的实际执行率达到了 80% 及以上(中国还要求执行的航段要覆盖超过 2/3 航季),航空公司在本航季将有优先权继续使用该时刻系列,即所谓的祖父权利。该航班时刻系列被称为“历史时刻”。

执行率为 80% 的规定通常被称为“不使用就放弃”规则。因此,一些航空公司为了能够在下一个同航季继续使用该航班时刻,经常会运营一些载客率非常低的航班。

3) 时刻申请的优先级。航空承运人所提出的时刻申请可分为 4 类:历史时刻、历史时刻调整、新进航空承运人申请及其他时刻申请。最后一版的 WSG(第 10 版)^[6]和中国的时刻管理办法^[1]中,航班时刻配置的优先级从高到低的顺序为历史时刻、历史时刻调整申请、新进航空承运人申请和其他时刻申请。

根据最新的 WASG^[5]规定,历史时刻和不影响时刻协调参数的历史时刻调整(如仅改变航班号)具有第 1 优先权,即所谓的祖父权利。这些航班时刻统称为“未改变的历史时刻”。在分配完未改变的历史时刻之后,剩余的航班时刻(包含新增的时刻)都被放入时刻池中进行统一配置。

新进航空承运人申请、非新进航空承运人申请和影响到时刻协调参数的历史时刻调整享有同等

表 1 航空公司申请机场航班时刻系列

Table 1 An example of series of slot request

航班号	机型	运营日	起飞机场1	起飞时刻1	落地时刻1	目的地机场	开始日期	结束日期
AL123	320	周二、周四、周六	机场1	08:00	10:50	机场2	2020-12-01	2021-02-06
BL223	320	周一至周日	机场1	07:10	09:45	机场3	2020-10-25	2021-03-27
CL001	320	周一、周三、周五、周日	机场1	14:00	19:30	机场4	2020-10-26	2020-11-29

的优先权。其中, 新进航空承运人是指在某一机场特定运营日内持有的航班时刻数量少于规定的航班时刻数量(如 7 个航班时刻)的航空公司。只有航空公司才具有新进航空承运人资格。按照规定, 时刻池中的 50% 时刻应分配给新进航空承运人。

4) 航班时刻协调参数。航班时刻协调参数或机场公布容量给出了机场单位时间(通常为 1 h 或 15 min)能够分配给航空承运人的时刻数量。一些机场或将其进一步细分为机场的进场容量、离场容量和机场总容量, 或可分为国际航站楼容量、申根

地区航站楼容量等。

航班时刻协调参数实际上设置了机场可分配时刻总数的上限。

5) 航班时刻配置流程。航班时刻配置的基本流程是, 时刻协调员或相关机构确定机场的航班时刻协调参数, 航空承运人提出时刻申请, 然后由时刻协调员根据航班时刻协调参数和时刻申请, 按照一定的规则为航空承运人配置航班时刻, 如图 1 所示。优化配置的航班时刻应尽量满足航空承运人的需求, 不超出航班时刻协调参数的限制。

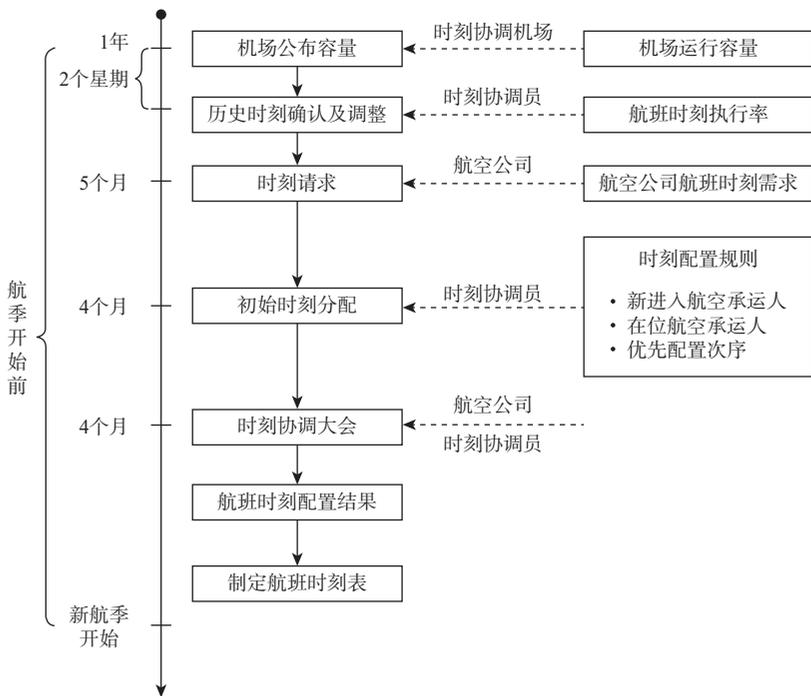


图 1 航班时刻配置基本流程

Fig. 1 Basic process of slot allocation

无论是 WASG^[5] 还是中国民用航空局实施的时刻管理办法^[1], 航班时刻资源管理涉及到的 2 个关键环节分别是航班时刻协调参数的确定和航班时刻初始分配。航班时刻初始分配根据时刻配置的相关规则将时刻分配给航空承运人。以下将对机场公布容量确定方法和时刻配置优化模型与算法进行详细综述。

2 机场公布容量及其确定方法

航班时刻配置的首要基础是确定机场的公布容量(或称为时刻容量、协调参数等)。公布容量构成了现有航班时刻分配方法中的基本概念, 表示基于最大吞吐量的容量管理度量。其规定了每单位时间在航班时刻协调机场可用于分配的航班时刻总数, 并且通常使用每个协调时间间隔内的计划起降架次表示。为了更加精细化的管理, 公布容量还

可根据不同时间间隔内可用的离场架次、进场架次和/或总起降架次表示。确定公布容量至关重要, 因为公布容量决定了航班时刻配置过程中的供给侧, 即机场一共有多少航班时刻可以供航空公司使用。

2.1 典型机场容量的定义及评估方法

机场容量的一个通用定义是在给定运行环境和管制规则等条件下, 单位时间内(通常是 1 h 或 15 min)机场能提供服务的飞行架次。合理确定机场公布容量的难点之一在于准确评估机场的运行容量。公布容量取决于机场的运行容量。理论上, 每个航班时刻协调机场的时刻协调员, 在给定的假设和属性下, 考虑各种容量决定因素进行综合评估研究才能确定公布容量^[8-11]。机场容量可进一步划分为陆侧容量和空侧容量^[12]。陆侧容量考虑机场航站楼内基础设施布局、值机柜台分布等, 是机场能够提供服务的最大旅客数量。空侧容量考虑机

场空侧结构布局,包括跑道系统、滑行道系统和停机位/坪系统,是机场在单位时间内能够为航空器提供服务的架次^[13]。通常,机场的空侧容量是机场容

量的瓶颈。根据容量的应用场景和主要考虑因素,机场容量具有不同的定义和评估方式。表2为几种典型的机场容量定义及评估方法。

表2 几种典型的机场容量定义及评估方法

Table 2 Widely used airport capacity and its measuring methods

容量类型	定义	容量的时间尺度	是否考虑航班延误	主要评估方法	应用场景
理论容量	在给定的机场构型、运行规则和机组组成情况下,机场在单位时间内能够提供的服务架次	a, h	否	类似历史数据/电子表格/排队论模型/仿真	战略规划
最大/饱和容量	在持续交通服务请求下,每单位时间内能够实现的预期飞行架次	h, 15min	是	排队论模型/仿真	战术运行及运行后分析
实际容量	考虑随机达到航班的排队特征,机场实际运行的容量,通常比最大容量低10%~20%	h, 15 min	是	仿真	预战术/战术
持续容量	在连续几个小时内可以实现的小时容量。最大容量的运行通常不能超过1~2 h	h	否	仿真	预战术/战术
结构容量	在宏观阶段用于确定机场容量的基线,在长期预测中故意不考虑一些不可靠或可变因素。通常在2~5 a前评估结构容量	a, 季节	否	历史数据/查询表/电子表格/仿真/容量包络线	早期的空中交通流量容量管理
计划容量	原则上在IATA航季开始之前,或至少在实际运行前18个月计算的机场容量	d, h, 15 min	否	查表/电子表格/仿真/容量包络线	用于网络战略阶段和初始时刻分配
运行容量	在运行前一天评估的机场容量,目的是结合最新的运行信息更新机场容量	h, 15 min	否	仿真	网络预战术和战术阶段
公布容量	时刻协调机场在单位时间(通常为1 h或15 min)能够分配给航空承运人的时刻数量	h, 15 min	否	结合运行容量之后综合分析	时刻配置

只有当交通需求大于容量资源供给,容量才会成为瓶颈,出现航班延误。部分学者或机构在定义机场容量时,认为需要考虑航班延误,基于航班延误设定阈值来确定机场容量^[12-14]。例如,美国关于机场容量的定义(除去持续容量)和国际机场协会关于容量的定义都是基于给定的延误水平确定容量^[14]。然而,需要指出的是,延误阈值的确定对于各个机场并不相同。例如,旅客对大型枢纽机场的延误容忍度可能会高,但是对小机场的航班延误容忍度则较低。同时,由于空中等待成本要高于地面等待成本,进场延误阈值要低于离场延误阈值。图2为几种典型容量之间及与航班延误之间的关系。

欧洲航空安全组织并不建议在容量分析时引入延误。因为机场容量仅与需求有关,与具体的航班时刻表无关。在容量评估时引入延误,默认了基

于机场容量的航班时刻表预测。但是,航班时刻表和机场容量应该是相互独立的^[15]。

根据机场容量使用的场景或时期,可以采用不同的容量评估方法。常用方法可分为4类:数学建模、历史运行数据挖掘、计算机仿真和基于管制员工作负荷^[16-17]。建立数学模型能够快速估算出机场的空侧容量,但缺点是计算结果的精度不高^[9];计算机仿真方法考虑机场物理结构、运行规则和航空器性能等因素,建立高度逼真的仿真模型来模拟机场运行,根据仿真后的航班确定机场容量。常见的机场仿真软件包括AirTop^[18]、TAAM^[19]和SIMMOD^[20]等。计算机仿真可以高度逼真的模拟机场的运行,但缺点是耗时、软件价格高;仿真结果依赖于模型的输入。当运行条件或计划变化时,需重新建立仿真模型进行计算。

需要注意的是,机场容量并不是一个简单的数值,而是关于容量率的范围。机场的容量包络线是以进场率和离场率为横纵坐标的一个近似的凸多边形,其定义了在不同运行条件下可能实现的最大容量,如图3所示。Gilbo最早通过定义帕累托边界来确定机场的最大容量^[21]。机场的实际运行容量受到众多因素影响,包括天气、跑道运行方式、机型比例等^[22]。世界上主要国家或地区均发布了相关报告或指导手册,规定了机场容量评估及管理遵循的原则、程序和所用评估技术等,为机场容量评估提供了初步的管理方法和流程^[15,23]。

2.2 公布容量的确定

“公布容量”并非一个快速可测的“数量”,而

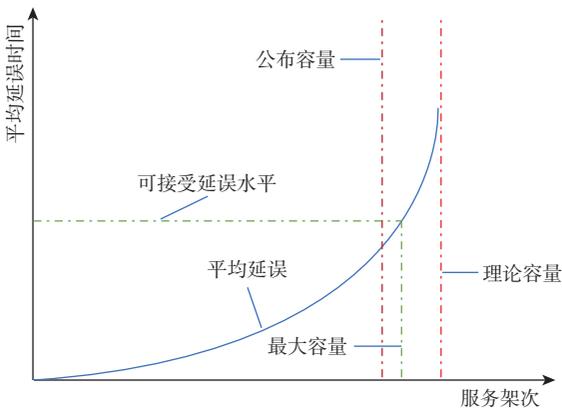
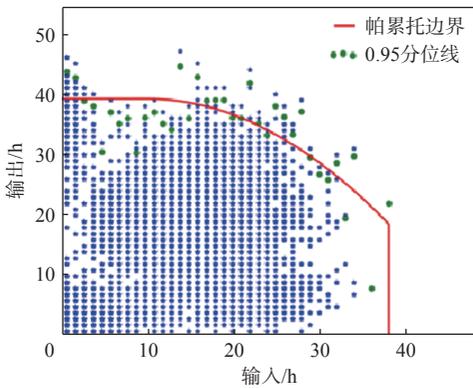


图2 机场容量与航班延误

Fig. 2 Airport capacity and flight delay

图3 机场容量包络线^[24]Fig. 3 Airport capacity coverage curve^[24]

是一个为航班时刻安排经过认可的“基准”或“目标”。该基准必须在时刻分配正式开始之前几个月确定。尽管公布容量对时刻分配过程和效率有重大影响,但公布容量的确定过程研究较少^[25-27]。Zografos等研究已经表明,增加20%的公布容量可提高时刻分配效率65%(即请求与分配的时刻更好匹配)^[28]。当前确定航班时刻协调机场公布容量的方法受到了很多批评,存在的主要问题如下:①航班时刻管理机构有充足的空间进行说明和调整;②根据仪表飞行规则容量的百分比设定极低的容量水平;③确定公布容量的过程是经验性的或临时的;④很少与利益相关者沟通^[9]。

公布容量的确定所存在的问题主要集中在2个方面:①缺乏协同一致的解读、确定和管理公布容量的方法;②公布容量设定的容量水平过高或过低。公布容量还需考虑容量利用率和服务质量(航班延误或准点率)之间的均衡^[29-30]。如果公布容量设置过高,而实际运行容量也较高,那么容量利用率也会很高;但当实际运行容量低于公布容量时,将会造成航班延误。如果公布容量设置较低,虽然保证了较低的航班延误和较高的准点率,但会造成容量资源浪费。同时,也会导致过多的拒绝或更改航空公司申请的航班时刻,间接地干预了航空公司航班时刻设置的偏好。Barnhart等指出未来研究重点之一,是使用分析建模来正确地确定和分配机场容量,同时研究过度分配航班时刻和过低分配时刻的权衡和影响^[30]。

2.3 机场公布容量确定所面临的挑战

基于使用先进方法和工具设置公布容量所面临的挑战总结如下。

1) 公布容量的设置必须要考虑所观测到的机场运行的所有情景(例如天气良好/恶劣等)。仅仅关注恶劣天气的保守公布容量将会造成不必要的过低的航班时刻表;仅关注天气良好下的公布容量

将会造成在恶劣天气下的大量航班延误。

2) 公布容量的设置应该尽可能的按照高精度来设置。例如,不同的跑道、航站楼、机坪设置单独的公布容量,从而使得时刻需求和机场运行能力得到更好的匹配。

3) 当前主要的公布容量设置方法是为机场一天的高峰时段设置一个“平滑”的公布容量。例如,从早上06:00到晚上10:00机场的公布容量为80架次/h。然而,设置公布容量时应该考虑小时的不同。按小时设置公布容量的做法正在被越来越多的欧洲机场所采用(如阿姆斯特丹机场、伦敦希思罗机场和巴黎戴高乐机场)。

此外,应适当设置容量低谷以在实际运行过程中吸收航班延误。例如,在爱尔兰都柏林机场和日本东京成田机场,在公布时刻协调参数时会在06:00或14:00设置一个容量低谷,以吸收航班累积延误。

4) 设置公布容量时还应考虑需求的时段模式,同时考虑交通需求和容量。航空公司和机场可能会倾向于一定程度的高延误来换取更多的时刻。公布容量和延误水平之间的均衡应该深入的探讨。

因此,公布容量设置为一个合理的数值,既能实现既定的服务水平,同时也考虑了机场利用率和延误之间的非线性关系。如何合理的设置容量曲线是一个值得深入研究的问题。

3 基于行政手段的时刻配置

在机场公布容量确定之后,航空公司将会提交时刻申请。航班时刻管理部门将会根据相关的规则进行时刻配置。Zografos等在2017年和2018年对航班时刻分配问题相关研究进行了综述^[31-32],指出机场航班时刻分配是一个极具挑战性的研究方向。航班时刻分配和最佳公布容量水平的设定是密切相关的,都是优化机场稀缺资源分配和使用的核心。航班时刻分配的主要难点之一在于如何考虑多重因素的限制,为整个航季合理有效地分配航班时刻系列。时刻配置的主要方法可分为基于市场手段的航班时刻分配和基于行政手段的时刻分配。基于市场驱动的时刻配置主要从时刻拍卖^[33-34]和交易^[35-42]等方面在理论上探讨解决机场拥堵的方法。一些学者认为基于拥堵的收费策略是对所有机场都适应的时刻分配策略^[42]。在航班时刻配置过程中引入市场机制,在一定程度上可以促进时刻的高效利用,但时刻权属、时刻定价等关键问题尚未解决。由于目前尚未有任何国家采用基于市场的航班时刻配置方法,因此,本文仅针对

基于行政手段的航班时刻配置研究进行综述。表3为时刻配置模型和算法研究的相关文献。

3.1 问题描述

机场航班时刻分配问题旨在将航空公司在机场所申请的运行(着陆或起飞)分配到给定分配时段内的协调时间间隔,其主要目标是最小化基于延误的成本。延误成本可以表示为运行延误或调配延误。运行延误通常以航班预计进场/离场延误和/

或乘客总延误表示。“调配延误”是基于距离的度量,用于表示所请求时刻与所分配时刻之间的差异(即“被移动的步数”)。除了考虑分配效率,时刻配置的目标还可以为公平与公正、获取与竞争及环境目标等。时刻分配问题的主要约束包括机场公布容量、现有时刻分配框架下的优先级、航空公司和机场的运营要求(例如航班周转时间、航班连接)、流量管理约束(如空域扇区的容量)及时刻分

表3 机场航班时刻配置相关研究文献

Table 3 Research literature on airport slot allocation

文献	优化目标	约束条件	时刻配置尺度	求解算法/规划模型
文献[3]	①长系列偏移的最小化;②全季节系列偏移的最小化;③最大限度地减少长途航班的偏移;④最小化国际航班偏移;⑤最小化本地飞机时隙请求偏移;⑥最大偏移最小;⑦偏移时隙数量最小座椅偏移最小;⑧最小化协调机场航班偏移	①时刻唯一性约束;②机场容量约束;③航班周转时间约束	单机场,整个航季	启发式算法、基于 ϵ 约束的方法、多准则决策分析、TOPSIS法、PSAM
文献[4]	①总偏移最小化;②最大偏移最小化;③绝对公平的最大偏离(MDA)最小化	①时刻唯一性约束;②机场容量约束;③航班周转时间约束	单机场,整个航季	TOSAM 启发式算法
文献[28]	总偏移最小	①以时段和天为单位的机场容量约束;②航班周转时间约束	单机场,整个航季	线性松弛算法
文献[31]	运行效率、时刻分配效率、时刻资源利用、环境影响、公平性	①机场公布容量约束;②现有航班时刻分配框架下的优先级(如,历史航班时刻持有量);③航空公司和机场的运行要求(例如,周转时间、地面等待、航班连接性);④ATFM空中交通流量管理约束(如,空域扇区的容量);⑤其他用于时刻请求调度的标准。	单机场,整个航季 机场网络,多天/整个航季	公布容量建模与战略航班时刻调度模型
文献[32]	①总偏移最小化;②最大航班偏移量最小化	①时刻的唯一性约束;②机场容量约束;③航班周转时间约束	单机场,整个航季	整数线性规划模型——SAM-II
文献[43]	①总偏移最小化;②总偏移平方的最小化	①时刻唯一性约束;②机场容量约束;③航班周转时间约束	单机场,整个航季	大邻域搜索技术(LNS);目标可行泵算法(FP)
文献[44]	①总偏移最小化;②最大偏移最小;③偏移时隙数量最小	①时刻的唯一性约束;②机场容量约束;③航班周转时间约束	单机场,整个航季	2阶段mat启发式算法
文献[45]	①总偏移最小化;②最大偏移量最小	①时刻唯一性约束;②机场容量约束;③航班飞行时间约束;④航班周转时间约束	单机场,整个航季	大规模邻域搜索/建设性启发式算法和改进启发式算法
文献[46]	①准时性能最大化;②单个航班最大偏移量最小化/时刻表偏移的加权总和最小化③航空公司间的公平性最大化	①时刻唯一性约束;②航班计划轮挡时间;③航班最大偏移量约束;④航班周转时间约束;⑤15 min航班进场和离场容量约束	单机场,一天	结合随机排队模型和容量综合利用动态规划模型的机场拥堵模型
文献[47]	①航空公司间公平的最大化;②总偏移最小化	①时刻唯一性约束;②机场容量约束;③航班周转时间约束;④航空公司公平性约束	单机场,整个航季	混合整数规划模型、 ϵ 约束法
文献[48]	①总偏移最小化;②最小化与绝对公平的最大偏差;③最小化与平均公平性(MMR)的最大偏差;④最小化基尼指数;	①时刻唯一性约束;②机场容量约束;③航班飞行时间约束;④航班周转时间约束	单机场,整个航季	混合整数规划模型、 ϵ 约束方法
文献[49]	总偏移最小	①机场容量限制;②空域扇区容量限制	机场网络,一天	迭代局部搜索算法
文献[50]	总偏移和运行延误加权总和的最小	①时刻唯一性约束;②机场容量约束;③航班飞行时间约束;④航班周转时间约束	机场网络,整个航季	随机规划,并行算法
文献[51]	①空域用户的总成本最小;②偏移时隙数量最小	①时刻的唯一性约束;②机场容量约束;③航班对前后航班一致约束;④请求对的最小、最大间隔时间约束;⑤航班周转时间约束	机场网络,多天	整数线性规划模型——SOSTA
文献[51]	①总偏移最小化;②最大偏移最小;③被拒绝的时刻总数最小;④被偏置的时刻总数最小	①时刻唯一性约束;②机场容量约束;③航班飞行时间约束;④航班周转时间约束	单机场,整个航季	启发式算法/基于优先级的多目标舱位分配模型(PSAM)
文献[52]	①总偏移最小化;②绝对公平的最大偏离(MDA)最小化;③偏离航司偏好偏移的偏移量最小化	①时刻唯一性约束;②机场容量约束;③航班周转时间约束	单机场,整个航季	混合整数规划模型、 ϵ 约束方法
文献[53]	总偏移最小化	①时刻唯一性约束;②机场容量约束;③航班周转时间约束	单机场,整个航季	分支切断方法、整数规划模型

配额外标准等。在过去的十几年中,越来越多的学者关注时刻分配问题。在现有文献中,单机场、机场网络层面和机场群的时刻分配都有相关研究开展。

3.2 单机场航班时刻分配

单机场航班时刻分配是在机场容量和机场/航空公司运营限制下,给定航班时刻分配策略,将机场时刻分配给各个航空公司的过程,本质上属于资源受限的分配问题。对于资源受限分配问题的统一表示法和分类方案,可以参考 Brucker 等的工作^[54]。

Pritsker 等提出在现实情况下广泛适用的一般性资源受限调度问题的规划建模方法^[55]。在此基础上,Zografos 等于 2012 年构建了单机场航班时刻优化问题的整数线性规划模型^[28]。该模型在 IATA WSG^[6] 和 EU 95/93^[2] 航班时刻管理规则的基础上,考虑了机场容量和航班周转时间的限制,引入时刻请求的优先级组概念,以计划延误最小为目标进行分层求解。模型通过 3 个协调机场的实际航班数据进行验证,结果表明能够大大降低航空公司请求时刻和实际分配航班时刻之间的偏移。

航班时刻配置模型逐步由单目标优化问题向多目标优化方向转变^[43]。优化的目标并不仅仅局限于总的时刻偏移最小化,还可以包括最小化最大时刻偏移量等。Zografos 等权衡了时刻分配效率和可接受性,构造了 2 个双目标时刻协调模型^[32]。第 1 个规划模型考虑最小化总计划偏移和最大可接受时刻偏移量,第 2 个模型考虑最小化总计划偏移和分配在可接受时间窗之外的时刻请求的数量。结果表明牺牲少量航班时刻协调效率就可有效提高航空公司对协调航班时刻的可接受度。2018 年,Ribeiro 等考虑了 IATA 时刻分配规则^[44],建立了航班时刻分配优化模型,并通过模型优化结果与航班时刻实际配置结果对比,证明了该模型能够更大限度的满足航空公司的需求、充分利用机场公布容量。他们构建了一个多目标字典最小化的航班时刻分配模型^[45]。该模型还考虑 IATA 指南中的一系列复杂的优先级和规定,最后模型以字典最小化方式而不是分层次法求解。此外,还进一步探讨了如何调整当前的 IATA 时刻分配规则,以此提高航班时刻协调机场的时刻分配效率和效益^[46]。

随着研究的进展,越来越多的学者开始关注航班时刻配置中的公平性。Zografos 和 Jiang^[47-48] 引入了公平性,提出一个双目标模型研究计划偏移和公平性的权衡问题,并使用 ϵ 约束方法求解。针对一个拥挤机场,模型分别进行了分层和非分层求解。非分层情况下求解模型,忽略了优先级组,所

有的时刻将同时进行分配。分析表明,在 2 种情况下计划偏移的很小“牺牲”的增加,将会使公平性显著提高。

航班时刻配置实际工作中还面临航空公司需求的不确定性及时刻申请取消等问题。在对欧洲机场航班时刻配置研究时,Odoni 发现在欧洲 32 个国家的所有航班时刻协调机场,大约有 10% 的航班时刻在初始阶段分配给航空公司之后并未被使用(约为 100 万个航班时刻)^[7],造成航班时刻资源的严重浪费。目前航班时刻协调员面临的最大挑战是需要在各种容量限制下满足航空公司的需求。容量限制的数量和种类的增加被认为是航班时刻分配复杂性的主要来源之一。最早通过数学建模的航班时刻配置工作仅考虑了机场跑道容量和飞机周转时间限制。后来,一些机场的停机坪和/或机场航站楼的容量可能也成为限制因素,相关模型已扩展到能够捕获航站楼和停机坪的容量限制。在欧洲,大部分机场必须同时为申根和非申根航班提供服务。因此,机场能够处理国际旅客数量的能力可能会限制可以安排的国际航班时刻数量。

单机场航班时刻配置过程中的难点和所面临的挑战总结如下。

1) 单机场航班时刻配置的主要难点是时刻配置需要满足各种约束限制。这些约束来自机场的公布容量、航班连接、排班规律性/时刻表规律性和其他技术限制。目前时刻协调员面临的最大挑战是在各种容量限制下满足航空公司的需求。

2) 要充分考虑复杂而多样的目标和约束,考虑其在航班时刻配置模型中的合理性和有效性。目前单机场航班时刻配置模型逐步由单目标优化向多目标优化转变,容量约束的数量和种类也大大增加,成为航班时刻分配复杂性的主要来源之一。Ribeiro 等对 2015 年夏航季葡萄牙 3 个机场的时刻配置进行了优化,包括 2 个大中型机场:马德拉机场(年起降 25 000 架次)和波尔图机场(年起降 85 000 架次),及一个大型机场里斯本机场(年起降约 200 000 架次)^[45]。当在考虑跑道容量限制的基础上添加航站楼容量限制时,模型的约束数量从 3 358 397 个增加到 3 691 247 个。继续考虑停机坪和航站楼容量时,约束的数量高达 3 872 687 个,计算复杂度显著增加。使用 CPLEX 求解器,经过 7 天时间计算也无法找到最优解。因此,需要启发式算法和更多新颖的方法来解决这个大规模优化问题。

3) 在遵循时刻分配规则的基础上,更加满足实际的航班时刻管理工作需求,充分应对航班时刻配

置实际工作中航空公司需求的不确定性及时刻申请取消等问题,减少航班时刻资源的浪费。这也是航班时刻管理部门需要解决的重要问题。

3.3 机场网络层面航班时刻分配

机场网络层面航班时刻分配模型克服了单机场模型的主要缺陷,即忽略了出发机场和目的地机场航班时刻协调配置的连续性和一致性,从而导致航班时刻分配实际效果低下。Castelli等提出一个机场网络层面的航班时刻分配模型,旨在最小化因始发地和目的地机场分配时刻不一致导致的航空公司申请航班时刻的偏移^[35,49]。该模型基于Bertsimas等的空中交通流量管理模型^[36],考虑了航班飞行所经过的扇区的容量限制。Corolli等进一步考虑了网络层面时刻分配时机场容量的不确定性问题,提出了2阶段的随机规划算法^[50]。网络层面的时刻优化问题面临的一个关键难点是模型的求解。Pellegrini等^[51]提出了启发式算法在可接受时间水平内求得网络层面时刻分配的满意解。上述研究仅关注一天的时刻配置。Benlic^[56]考虑了机场容量和航路扇区容量的限制,提出一个2阶段的智能优化算法,对欧洲机场网络一个航季的时刻进行了优化。然而,该研究并未考虑航空公司时刻申请的历史优先权等因素,仅通过模拟生成的时刻申请数据进行验证。

网络层面的时刻配置研究并未考虑航班时刻配置过程中的规则限制。已有算法在求解大规模机场航班时刻配置时未能考虑历史时刻、新进航空承运人等约束,存在求解效率低甚至无法求到最优解等问题。

机场网络层面航班时刻分配过程中的现有难点和所面临的挑战如下。

1) 机场网络层面的航班时刻配置应当充分考虑航班时刻配置过程中的规则限制,这是一个目前尚未解决的技术难点。在机场网络运行层面是否应当考虑空域容量约束,也是一个值得探讨的问题。

2) 为机场网络层面航班时刻配置优化问题开发及时有效的求解方法,将是一个巨大的挑战。网络层面航班时刻配置模型的约束数量和计算复杂度显著增加,已有算法可能无法求出最优解。

3) 由于机场所属国家或地区不同,如果对机场网络中所有的机场航班时刻进行统一配置,还会面临一些政策等方面的问题。

因此,现阶段实施机场网络层面航班时刻统一配置的条件尚未成熟。

3.4 机场群时刻配置

近年来随着机场群的建设发展涌现出一个新

的问题是机场群的航班时刻资源协同配置。早期 Hansen 和 Weidner 定义多机场系统的边界为 $50 \text{ km}^{[57]}$, 而 Bonnefoy 和 Hansman 随后将其扩大至 50 mi (约 $80.5 \text{ km}^{[58]}$)。虽然对机场群并无一个统一的定义,但机场群一般是指存在于城市群周围的机场。城市群是城市发展到一定阶段的空间组织形式,是在地域上集中分布的若干城市和特大城市集聚而成的庞大的、多核心、多层次的城市群,是生产要素、空间资源和流通市场一体化优化的对象空间^[59]。机场群并非区域内多个机场的简单集合,更是以协同运行和差异化发展为主要特征的多机场体系。

自 2009 年以来,众多学者针对多机场系统的运行开展了深入的研究^[60-68]。文献 [61-62, 68-70] 对亚特兰大、洛杉矶、纽约和迈阿密 4 个多机场系统,从机场构型相关性、空域耦合程度、交通流的交互及环境天气等限制因素进行了分析和对比,为 NextGen 计划下多机场系统的运行概念提供理论基础。文献 [60,69] 建立了基于系统论的框架体系对多机场系统的运行相关性进行研究,对 3 个多机场系统建立了网络拓扑结构,用延误对服务运行的相关性进行分析。在多机场系统中,纽约多机场系统、旧金山湾区多机场系统一直都是重要研究对象^[69],而研究出发点包括空域运行^[70-71]、交通流模式识别^[67, 72-75]、离场放行^[76]、容量提升等方面^[66-77]。2015 年之后,多机场研究的重点转向多机场一体化运行^[78-80]。2020 年, Yoo 等利用美国航空航天局开发的交通管理仿真工具,对纽约机场群的 2 种不同运行情景进行仿真分析,验证了在纽约机场群内一体化需求管理的效益^[81]。国内针对多机场研究最早始于 2009 年, Wang 等对上海多机场的离场航班排序问题进行了探讨^[82]。随后,相关学者针对京津冀、长三角和珠三角的多机场系统运行开展了相关研究^[83]。目前多机场研究的重点主要是机场群内交通模式特征识别、空域运行效率和进离场战术优化等,鲜有针对机场群内需求管理和航班时刻配置的研究。

由于机场群内机场之间的距离较近,各个机场的进离场航班之间存在相互影响,使得所有机场很难都在最优的配置下运行。这意味着对一个机场进行资源分配和航班时刻优化时,不仅仅需要考虑当前机场的进离场航班之间的权衡,同时还需要考虑多机场系统中其他机场的进离场容量的权衡。深入理解机场容量的权衡及他们与其他外部因素(如单机场和多机场的运行条件,机场布局)的相关性,对于高效利用机场容量非常重要。高效利用机

场群时刻资源面临如下挑战。

1) 合理的分工定位、优化的航线网络结构是机场群高效运行的前提和基础。机场群内多个枢纽机场、干线机场和支线机场并存,机场功能定位存在差异,机场发展目标和交通需求不同。已有多机场描述性分析工作并未考虑这些重要因素,机场群运行(交通需求)模式识别结果对提升机场群时刻资源管理效率作用甚微。如何综合机场群整体及个体发展需求,优化机场群内交通流,对于提高机场群航班时刻配置效果十分重要。

2) 科学合理确定机场群公布容量是一个巨大的挑战。单机场稳健性公布容量确定方法已经是一个尚未解决的难题。在充分考虑机场群内机场功能定位、机场群运行交互等因素的同时,来确定机场和机场群的公布容量,鲜有相关工作开展,这是一个极具挑战的课题。

3) 机场群航班时刻资源优化配置应考虑目标和约束条件的多样性及不确定性,这是一个需要攻克的技术难题。机场群航班时刻资源管理应考虑不同航空公司在协调机场、辅协调机场和非协调机场的时刻需求,综合机场、空域容量和运行等方面限制,权衡机场及航空公司的利益,为未来的6个月分配对应的时刻。无论是优化建模还是应用求解都是一个不小的挑战。

4 结束语

合理配置机场航班时刻资源关系到航空运输系统运行的效率和效益。世界上大多数的繁忙机场主要采用基于行政手段的时刻配置方法。本文首先对机场航班时刻资源管理中的关键问题进行梳理,主要包括航班时刻配置关键概念、航班时刻配置办法和程序、机场公布容量及其确定方法、公布容量确定所存在的问题和所面临的挑战等,然后从单机场航班时刻分配、机场网络层面时刻分配和机场群时刻配置3个方面,重点回顾了基于行政分配的航班时刻配置手段和方法。航班时刻配置的结果直接关系到国家的经济命脉,对整个交通运输体系具有举足轻重的作用。因此,基于市场化的航班时刻配置方法难以在航班时刻初级市场配置中得以应用。市场化手段唯一可发挥作用的地方是航班时刻的次级市场配置。当前的航班时刻管理办法允许时刻在航空公司之间流动,但是缺乏明确合理的监管机制。一个关键的问题是不完全竞争与不完全法规之间的平衡。随着航空运输业和其他运输方式的发展,科学高效管理繁忙机场的航班时刻资源将会面临新一轮的持续挑战。

参考文献 (References)

- [1] 中国民用航空局. 民航航班时刻管理办法: 民航发[2018]1号[EB/OL]. (2018-01-05)[2022-04-25]. https://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/ZFGW/201802/t20180224_49532.html.
Civil Aviation Administration of China. Civil aviation flight slot management measures: CAAC [2018] No. 1[EB/OL]. (2018-01-05)[2022-04-25]. https://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/ZFGW/201802/t20180224_49532.html.
- [2] UNION E. Council Regulation (EEC) No 95/93 of 18 January 1993 on common rules for the allocation of slots at Community airports [EB/OL]. (1993-01-18)[2022-04-25]. <https://www.eumonitor.eu/9353000/1/j9vvik7m1c3gyxp/vhckkmr4ymww>.
- [3] JORGE D, AN-TUNES RIBEIRO N, PAIS ANTUNES A. Towards a decision-support tool for airport slot allocation: Application to Guarulhos (Sao Paulo, Brazil)[J]. Journal of Air Transport Management, 2021, 93: 102048.
- [4] KATSIGIANNIS F A, ZOGRAFOS K G, FAIRBROTHER J. Modelling and solving the airport slot-scheduling problem with multi-objective, multi-level considerations[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2021, 124: 102914.
- [5] Airports Council International, International Air Transport Association, Worldwide Airport Coordinators Group. Worldwide Airport Slot Guidelines (WASG)[R]. Geneva: IATA, 2020.
- [6] IATA. Worldwide Slot Guidelines (WSG) [R]. Geneva: IATA, 2011.
- [7] ODONI A R. A review of certain aspects of the slot allocation process at Level 3 airports under regulation 95/93: ICAT-2020-09 [R]. Cambridge: MIT International Center for Air Transportation, 2020.
- [8] NEUFVILLE R, ODONI A R, BELOBABA P, et al. Airport systems planning, design, and management [M]. 2nd ed. New York: McGraw Hill, 2013: 89-95.
- [9] 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.
- [10] BALL M, BARNHART C, NEMHAUSER G, et al. Chapter 1 air transportation: Irregular operations and control[M]. Amsterdam: Elsevier, 2007: 1-67.
- [11] STRAKA P, MARTIN P, VIMARD V, et al. Capacity assessment at Dublin Airport for the purpose of setting slot coordination parameters: P2410D008 [R]. Hampshire: Ashkelio: 2017.
- [12] TAY G, KARPSTEIN R, HORNING M. Airport capacity assessment of the air transportation network in selected global regions [C]// Proceedings of the Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Reston: AIAA, 2018: 4234.
- [13] MORISSET T. Comparing capacities and delays at major European and American airports[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2011.
- [14] TRANSSOLUTIONS, CONSULTING F, RAKAS J, et al. Defining and measuring aircraft delay and airport capacity thresholds[M]. Washington, D. C.: Transportation Research Board, 2014.
- [15] O'FLYNN, S. Airport capacity assessment methodology: 1.1[R].

- Brussels: EUROCONTROL, 2016.
- [16] 胡明华. 空中交通流量管理理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- HU M H. Theory and method of air traffic flow management[M]. Beijing: Science Press, 2010 (in Chinese).
- [17] RAMAMOORTHY K, HUNTER G. Simulation-based airport capacity estimation[C]// Proceedings of the Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Reston: AIAA, 2013: 4354.
- [18] DHIR V. Estimation of runway capacity at Changi Airport using AirTOP and Monte Carlo analysis[D]. Singapore: Nanyang Technological University, 2015.
- [19] BAZARGAN M, FLEMING K, SUBRAMANIAN P. A simulation study to investigate runway capacity using TAAM[C]// Proceedings of the Winter Simulation Conference. Piscataway: IEEE Press, 2003: 1235-1243.
- [20] SCHINWALD C, PLÖTNER K O, HORNUNG M. Using airport fast-time simulation models to increase the quality of airport capacity utilization studies[C]// Proceedings of the AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference. Reston: AIAA, 2016: 421.
- [21] GILBO E P. Airport capacity: Representation, estimation, optimization[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 1993, 1(3): 144-154.
- [22] KICINGER R, CHEN J T, STEINER M, et al. Probabilistic airport capacity prediction incorporating weather forecast uncertainty[C]// Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Reston: AIAA, 2014: 1465.
- [23] GENTRY J, DUFFY K, SWEDISH W J. Airport capacity profiles: F055-L11-014[R]. Washington, D.C.: FAA, 2014.
- [24] 许辰澄. 基于历史数据的机场系统运行耦合特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020: 39-67.
- XU C C. Research on coupling characteristics of airport system operation based on historical data[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020: 39-67(in Chinese).
- [25] RAILSBACK P, SHERRY L. Survey of rationales and methods for determining declared airport capacity[C]// Transportation Research Board 85th Annual Meeting. Washington, D.C.: TRB, 2006: 01029356.
- [26] STAMATOPOULOS M A, ZOGRAFOS K G, ODONI A R. A decision support system for airport strategic planning[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2004, 12(2): 91-117.
- [27] KÖSTERS D. Study on the usage of declared capacity at major German airports: 2007-01-18[R]. Aachen: RWTH Aachen University, 2007.
- [28] ZOGRAFOS K G, SALOURAS Y, MADAS M A. Dealing with the efficient allocation of scarce resources at congested airports[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2012, 21(1): 244-256.
- [29] SWAROOP P, ZOU B, BALL M O, et al. Do more US airports need slot controls? A welfare based approach to determine slot levels[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2012, 46(9): 1239-1259.
- [30] BARNHART C, FEARING D, ODONI A, et al. Demand and capacity management in air transportation[J]. EURO Journal on Transportation and Logistics, 2012, 1(1-2): 135-155.
- [31] 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(1): 3-24.
- [32] ZOGRAFOS K G, ANDROUTSOPOULOS K N, MADAS M A. Minding the gap: Optimizing airport schedule displacement and acceptability[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2018, 114: 203-221.
- [33] BALL M O, BERARDINO F, HANSEN M. The use of auctions for allocating airport access rights[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2018, 114: 186-202.
- [34] 丁蓉蓉. 航班时刻资源拍卖与协同分配问题研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018: 37-112.
- DING R R. Research on auction and co-allocation of flight slot resource[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018: 37-112(in Chinese).
- [35] CASTELLI L, PELLEGRINI P, PESENTI R. Airport slot allocation in Europe: Economic efficiency and fairness[J]. International Journal of Revenue Management, 2012, 6(1/2): 28.
- [36] BERTSIMAS D, LULLI G, ODONI A. An integer optimization approach to large-scale air traffic flow management[J]. Operations Research, 2011, 59(1): 211-227.
- [37] SHENG D, LI Z C, FU X W. Modeling the effects of airline slot hoarding behavior under the grandfather rights with use-it-or-lose-it rule[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2019, 122: 48-61.
- [38] MIRANDA V A P, OLIVEIRA A V M. Airport slots and the internalization of congestion by airlines: An empirical model of integrated flight disruption management in Brazil[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2018, 116: 201-219.
- [39] AVENALI A, D'ALFONSO T, LEPORELLI C, et al. An incentive pricing mechanism for efficient airport slot allocation in Europe[J]. Journal of Air Transport Management, 2015, 42: 27-36.
- [40] FUKUI H. An empirical analysis of airport slot trading in the United States[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2010, 44(3): 330-357.
- [41] BASSO L J, ZHANG A M. Pricing vs. slot policies when airport profits matter[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2010, 44(3): 381-391.
- [42] VERHOEF E T. Congestion pricing, slot sales and slot trading in aviation[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2010, 44(3): 320-329.
- [43] ANDROUTSOPOULOS K N, MANOUSAKIS E G, MADAS M A. Modeling and solving a bi-objective airport slot scheduling problem[J]. European Journal of Operational Research, 2020, 284(1): 135-151.
- [44] RIBEIRO N A, JACQUILLAT A, ANTUNES A P, et al. An optimization approach for airport slot allocation under IATA guidelines[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2018, 112: 132-156.
- [45] RIBEIRO N A, JACQUILLAT A, ANTUNES A P. A large-scale neighborhood search approach to airport slot allocation[J]. Trans-

- portation Science, 2019, 53(6): 1772-1797.
- [46] RIBEIRO N A, JACQUILLAT A, ANTUNES A P, et al. Improving slot allocation at Level 3 airports[J]. Transportation Research Part A:Policy and Practice, 2019, 127: 32-54.
- [47] ZOGRAFOS K G, JIANG Y. A Bi-objective efficiency-fairness model for scheduling slots at congested airports[J]. Transportation Research Part C:Emerging Technologies, 2019, 102: 336-350.
- [48] JIANG Y, ZOGRAFOS K G. A decision making framework for incorporating fairness in allocating slots at capacity-constrained airports[J]. Transportation Research Part C:Emerging Technologies, 2021, 126: 103039.
- [49] PELLEGRINI P, CASTELLI L, PESENTI R. Secondary trading of airport slots as a combinatorial exchange[J]. Transportation Research Part E:Logistics and Transportation Review, 2012, 48(5): 1009-1022.
- [50] COROLLI L, LULLI G, NTAIMO L. The time slot allocation problem under uncertain capacity[J]. Transportation Research Part C:Emerging Technologies, 2014, 46: 16-29.
- [51] PELLEGRINI P, BOLIĆ T, CASTELLI L, et al. SOSTA: An effective model for the Simultaneous Optimisation of Airport Slot Allocation[J]. Transportation Research Part E:Logistics and Transportation Review, 2017, 99: 34-53.
- [52] FAIRBROTHER J, ZOGRAFOS KG, GLAZEBROOK KD. A slot-scheduling mechanism at congested airports that incorporates efficiency, fairness, and airline preferences[J]. Transportation Science, 2019, 54(1): 115-138.
- [53] FAIRBROTHER J, ZOGRAFOS KG. Optimal scheduling of slots with season segmentation[J]. European Journal of Operational Research, 2021, 291(3): 961-982.
- [54] BRUCKER P, DREXL A, MÖHRING R, et al. Resource-constrained project scheduling: Notation, classification, models, and methods[J]. European Journal of Operational Research, 1999, 112(1): 3-41.
- [55] PRITSKER A, WAITERS LJ, WOLFE PM. Multiproject scheduling with limited resources: A zero-one programming approach[J]. Management Science, 1969, 16(1): 93-108.
- [56] BENLIC U. Heuristic search for allocation of slots at network level[J]. Transportation Research Part C:Emerging Technologies, 2018, 86: 488-509.
- [57] HANSEN M, WEIDNER T. Multiple airport systems in the United States: Current status and future prospects[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 1995: 8-17.
- [58] BONNEFOY P A, HANSMAN R J. Emergence of secondary airports and dynamics of regional airport systems in the United States[J]. Massachusetts Institute of Technology, 2006.
- [59] 傅志寰, 陆化普. 城市群交通一体化: 理论与研究与案例分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2016.
- FU Z H, LU H P. Urban agglomeration transportation integration: Theory and case study[M]. Beijing: China Communications Press, 2016 (in Chinese).
- [60] AYYALASOMAJAJULA S, DELAURENTIS D. Developing strategies for improved management of airport metroplex resources[C]// Proceedings of the 9th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Reston: AIAA, 2009: 7036.
- [61] REN L L, CLARKE J P, SCHLEICHER D, et al. Contrast and comparison of metroplex operations: An air traffic management study of Atlanta, los angeles, New York, and Miami[C]// Proceedings of the 9th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Reston: AIAA, 2009: 7134.
- [62] TIMAR S, SCHLEICHER D, SARAF A, et al. Metroplex demand analysis and applications[C]// Proceedings of the AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference. Reston: AIAA, 2010: 7611.
- [63] CAPOZZI B, ATKINS S, CHOI S. Towards optimal routing and scheduling of metroplex operations[C]// Proceedings of the 9th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Reston: AIAA, 2009: 7037.
- [64] DONALDSON A, HANSMAN R J. Capacity improvement potential for the New York metroplex system[C]// Proceedings of the 10th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference. Reston: AIAA, 2010: 9285.
- [65] VINAY V, AYYALASOMAJAJULA S, DELAURENTIS D. A metroplex capacity enhancement strategy through coordinated use of runway dependencies[C]// Proceedings of the 11th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference. Reston: AIAA, 2011: 7067.
- [66] CAPOZZI B, ATKINS S. A hybrid optimization approach to air traffic management for metroplex operations[C]// Proceedings of the 10th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Reston: AIAA, 2010: 9062.
- [67] AMARO CARMONA M A, SAEZ NIETO F, VERDONK GAL-LEGO C E. A data-driven methodology for characterization of a terminal manoeuvring area in multi-airport systems[J]. Transportation Research Part C:Emerging Technologies, 2020, 111: 185-209.
- [68] SCHLEICHER D, CLARKE J P, SARAF A, et al. A concept of operations for a NextGen metroplex scheduling concept[C]// Proceedings of the 11th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Reston: AIAA, 2011: 7065.
- [69] MARZUOLI A C, FERON E, HANSEN M, et al. Multimodality in a metroplex environment: A case study in the San Francisco Bay Area[C]// Proceedings of the AIAA Infotech @ Aerospace. Reston: AIAA, 2015: 1571.
- [70] CLARKE J P, REN L L, MCCLAIN E, et al. Evaluating concepts for metroplex operations[C]// Proceedings of the 10th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Reston: AIAA, 2010: 9249.
- [71] WIELAND F, TYAGI A, KUMAR V, et al. METROSIM: A metroplex-wide route planning and airport scheduling tool[C]// Proceedings of the 14th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Reston: AIAA, 2014: 2162.
- [72] MURÇA M C R, HANSMAN R J. Identification, characterization, and prediction of traffic flow patterns in multi-airport systems[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 20(5): 1683-1696.
- [73] SIDIROPOULOS S, MAJUMDAR A, HAN K, et al. Identifying

- significant traffic flow patterns in Multi-Airport Systems Terminal Manoeuvring Areas under uncertainty[C]// Proceedings of the 16th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Reston: AIAA, 2016: 3162.
- [74] ZHANG Y, TANG H L, KNORR D, et al. Measuring the benefits of NextGen metroplex in convective weather: case study of north texas metroplex[C]// Proceedings of the Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Reston: AIAA, 2018: 4235.
- [75] MURÇA M C R, HANSMAN R J, LI L S, et al. Flight trajectory data analytics for characterization of air traffic flows: A comparative analysis of terminal area operations between New York, Hong Kong and Sao Paulo[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2018, 97: 324-347.
- [76] CHEVALLEY E, PARKE B, KRAUT J, et al. Scheduling and delivering aircraft to departure fixes in the NY metroplex with controller-managed spacing tools[C]// Proceedings of the 15th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Reston: AIAA, 2015: 2428.
- [77] IDRIS H R, SHEN N, SARAF A P, et al. Queue buffer sizing for efficient and robust integrated departure scheduling[C]// Proceedings of the 16th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Reston: AIAA, 2016: 3901.
- [78] IDRIS H. Queuing analysis of interdependencies between multi-airport system operations[C]// Proceedings of the 9th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Reston: AIAA, 2009: 7039.
- [79] XUE M, ZELINSKI S, MULFINGER D G. Uncertainty analysis of integrated departures and arrivals: A los angeles case study[C]// Proceedings of the Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Reston: AIAA, 2013: 4347.
- [80] XUE M, ZELINSKI S. Optimization of integrated departures and arrivals under uncertainty[C]// Proceedings of the Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Reston: AIAA, 2013: 4322.
- [81] YOO H S, EVANS A D, KULKARNI D, et al. Benefit assessment of the integrated demand management concept for multiple New York metroplex airports[C]// Proceedings of the AIAA Scitech 2020 Forum. Reston: AIAA, 2020: 1400.
- [82] WANG Y J, HU M H, SUI D, et al. Departure scheduling in a multi-airport system[C]// Proceedings of the 8th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar. California: ATM, 2009.
- [83] 彭瑛. 多机场群运行评估与优化研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014: 36-90.
- PENG Y. Evaluation and optimization of metroplex operation[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014: 36-90(in Chinese).

Research progress on airport slot allocation

WANG Yanjun*, SHUI Xiaoyu, WANG Mengyin

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

Abstract: Most of the busiest airports face severe congestion and flight delays. Optimal allocating airport slots is one of the most effective ways in airport demand management. This paper systematically reviews the progress of research in airport slots allocation, as well as the main techniques in setting airport declared capacity and allocating slots. The major challenging issues of stochastic optimization were identified in such areas as the determination of airport declared capacity, the slot allocation in an airport, in an airport network and in the multi-airport system, and the technical complexity. Main research directions in slot allocation are further discussed and suggested.

Keywords: airport capacity; slot allocation; demand and capacity management; strategic air traffic flow management; stochastic optimization