

文章编号:1674-8190(2019)05-577-10

# 机场飞行区资源调度问题研究(三): 研究热点与挑战

尹嘉男<sup>1,2</sup>, 马园园<sup>3</sup>, 胡明华<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学 国家空管飞行流量管理技术重点实验室, 南京 211106)

(2. 英国帝国理工学院 土木与环境工程系交通研究中心, 伦敦 SW7 2AZ)

(3. 中国电子科技集团公司第二十八研究所, 南京 210007)

**摘要:** 全球航空运输需求的持续和迅猛增长,使得诸多大型繁忙机场正面临高频次飞行冲突、大范围空域拥堵、大面积航班延误等一系列严峻问题。本文聚焦飞行区资源调度的研究热点与挑战问题,为机场飞行区资源调度问题研究系列之三。从多维视角对飞行区资源调度问题进行详细分类,梳理近几年在容量预测、跑道配置、态势感知、空地调度、性能权衡等方面的研究热点,并对该领域目前面临的主要挑战进行综合分析。研究成果旨在为机场运行管理理论与应用的可持续发展提供科学指引。

**关键词:** 机场;飞行区;资源调度;跑道配置;态势感知;性能权衡

中图分类号: V355;U8

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2019.05.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## The Airfield Resource Scheduling Problem—Part III : Research Hot-spots and Challenges

Yin Jianan<sup>1,2</sup>, Ma Yuanyuan<sup>3</sup>, Hu Minghua<sup>1</sup>

(1. National Key Laboratory of Air Traffic Flow Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

(2. Centre for Transport Studies, Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College London, London SW7 2AZ, United Kingdom)

(3. The 28th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210007, China)

**Abstract:** The sustained and rapid growth of global air transport demand has caused many hub airports to face a series of challenging problems, such as high-frequency flight conflicts, large-scale airspace congestion, and wide flight delays. The research hot-spots and challenges of airfield resource scheduling problem are focused, which is part III of the whole research. The detailed classification of airfield resource scheduling is undertaken from multiple perspectives, and some research hot-spots in recent years are reviewed, including capacity forecast, runway configuration, situation awareness, airborne ground scheduling and performance tradeoff. Then, a comprehensive analysis of major challenges facing the research field is conducted. The research result is aimed to provide scientific guidance and references for the sustainable development of theory and practice in airport operation management.

**Key words:** airport; airfield area; resource scheduling; runway configuration; situation awareness; performance tradeoff

收稿日期:2018-10-17; 修回日期:2018-11-23

基金项目:中国博士后科学基金面上资助项目(2017M611809);江苏省博士后科研资助计划(1701099C)

国家自然科学基金(61573181,71301074,61671237)

通信作者:尹嘉男, j.yin@nuaa.edu.cn

引用格式:尹嘉男, 马园园, 胡明华. 机场飞行区资源调度问题研究(三):研究热点与挑战[J]. 航空工程进展, 2019, 10(5): 577-586.

Yin Jianan, Ma Yuanyuan, Hu Minghua. The airfield resource scheduling problem—Part III : research hot-spots and challenges [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2019, 10(5): 577-586. (in Chinese)

## 0 引言

飞行区资源调度作为机场运行管理的重点和难点,是挖掘资源效益、优化飞行流量、缓解拥堵延误、增强飞行性能的有效手段。随着机场物理结构的不断庞大,以及空中交通流量的不断密集,飞行区资源调度问题的复杂程度更是日益增加<sup>[1-2]</sup>。在过去的数十年间,飞行区资源调度主要聚焦于容量评估、跑道调度、场面优化等领域,已取得一系列的理论研究与应用实践成果。近年来,随着飞行区资源调度问题研究的不断深入和拓展,在传统研究内容的基础上,该领域正萌芽出一系列新的研究热点,例如容量预测、跑道配置、态势感知、空地调度、性能权衡等,而随之在相应的模型、算法和应用等方面也存在诸多挑战。

机场飞行区资源调度问题共涉及概念内涵、体系框架、发展脉络、发展趋势、研究热点和主要挑战等诸多方面,本文为该研究系列之三。在全面分析国内外机场运行管理领域的理论研究和应用实践成果的基础上,重点聚焦飞行区资源调度的研究热点与挑战问题,以期为航空运输领域科学发展提供方向指引和参考依据。

## 1 研究视角

机场飞行区资源调度领域的研究成果较多且杂乱,本节从调度对象、时空属性、调度环境、管理范畴、调度时序和应用场景六个视角,对其进行了梳理分类,如图 1 所示。



图 1 机场飞行区资源调度研究视角分类

Fig. 1 Classification of research perspectives about resource scheduling in airfield area

### 1.1 调度对象

根据调度对象的不同,可将飞行区资源调度划分为单一化资源调度和一体化资源调度<sup>[3-4]</sup>。

(1) 单一化资源调度。聚焦飞行区某一类单独资源要素的调度问题,例如跑道资源调度、滑行道资源调度、停机位资源调度等。

(2) 一体化资源调度。聚焦两个及以上飞行区资源要素(跑道、滑行道、停机位)的集成调度问题,例如滑行道资源与停机位资源一体化调度、跑道资源与场面资源一体化调度等。

### 1.2 时空属性

根据时空属性的不同,可将飞行区资源调度划分为时间资源调度和空间资源调度<sup>[5-6]</sup>。

(1) 时间资源调度。对航空器使用飞行区资源要素的具体时间进行调度,例如跑道起降时间、滑行道节点通过时间、停机位进出时间等。

(2) 空间资源调度。对航空器使用飞行区资源要素的空间标识进行调度,例如跑道编号、滑行道/节点编号、停机位编号等。

### 1.3 调度环境

根据调度环境的不同,可将飞行区资源调度划分为静态资源调度和动态资源调度<sup>[7-8]</sup>。

(1) 静态资源调度。调度环境的全部信息均已知,且不考虑不可预测的扰动因素而进行的调度,例如静态容量评估、静态/确定型跑道调度等。

(2) 动态资源调度。调度环境的部分信息已知,且考虑不可预测的扰动因素而进行的调度,例如动态容量预测/评估、动态/随机型跑道调度、滚动时域/滑动时间窗调度等。此时,需根据不断获取的动态信息(气象预报信息、最早着陆时间、目标起飞时间等),对调度方案进行实时更新和调整。

### 1.4 管理范畴

根据管理范畴的不同,可将飞行区资源调度划分为微观资源调度和宏观资源调度<sup>[9-10]</sup>。

(1) 微观资源调度。主要面向资源运行层面,侧重资源个量调度,即对每一架航空器的资源使用

需求进行个体控制,例如跑道起降调度、滑行路径优化、停机位分配等。

(2) 宏观资源调度。包括两个层面:一是侧重资源总量调度,即对航空器群体的资源使用需求进行总量控制,例如跑道运行模式配置、停机位推出率控制等;二是面向资源规划层面,即在当前资源效益接近或者达到最大时,结合资源未来发展需求,对其进行中长期规划。

### 1.5 调度时序

根据调度时序的不同,可将飞行区资源调度划分为战略资源调度、预战术资源调度和战术资源调度<sup>[11-13]</sup>。

(1) 战略资源调度。侧重飞行活动实施前七天以上,通过协调机场资源管理活动、预测分析飞行需求和资源可用情况,制定飞行区资源规划方案、航空器资源使用计划等。

(2) 预战术资源调度。侧重飞行活动实施前一至七天,根据机场可用资源状况、飞行计划、特殊事件等信息,形成飞行区资源预配置计划、容流互适应调配方案等。

(3) 战术资源调度。侧重飞行活动实施当日,根据实时的机场可用资源状态、飞行动态和气象条件等信息,制定飞行区资源动态调度方案、空中交通动态调度方案等。

### 1.6 应用场景

根据应用场景的不同,可将飞行区资源调度划分为常态资源调度和应急资源调度<sup>[14-15]</sup>。

(1) 常态资源调度。面向机场常态运行场景,在机场飞行区各类资源要素未受到相关非常态事件(恶劣天气、重大活动、突发事件、设备故障等)的影响,或者受影响程度较小可忽略不计时而进行的调度。

(2) 应急资源调度。面向非常态运行场景,针对恶劣天气、重大活动、突发事件、设备故障等运行场景,对机场飞行区各类资源要素进行快速识别和调度,并确保机场资源应急调度与事先规划的应急预案之间的相互协调。

## 2 研究热点

从20世纪60年代开始,机场飞行区资源调度领域在传统的时空资源调度方面已取得显著研究成果,即在有限的资源供给条件下如何为进离场航班分配最优的时间和空间调度方案。随着理论研究的深入拓展和应用实践的牵引驱动,近几年该领域萌芽出一系列新的研究需求。下面分别针对机场运行容量预测、跑道运行模式配置、场面滑行态势感知、机场空地联合调度、资源调度性能权衡五个方面,阐述机场飞行区资源调度领域的研究热点。

### 2.1 机场运行容量预测

早期的机场容量研究主要聚焦静态容量评估问题,旨在为航班时刻优化、战略流量管理等提供数据支撑。随着预战术和战术层面的理论研究和实际应用工作的不断推进,传统的单一化、静态化容量值已无法满足航空运输管理的多阶段决策需求<sup>[16-18]</sup>。随着时间的不断变化,静态容量为单一固定值,形成一条直线;动态容量为连续变化值,形成一条曲线;运行容量则为离散变化值,形成多条分段直线。考虑到空中交通管制员的可接受度、可操作性、工作负荷等因素,航空运输决策人员在机场资源调度过程中并不倾向于采用连续多变的动态容量值作为决策过程的输入参数。因此,兼顾理论研究和实际应用的可行性,多场景、阶段性的运行容量正成为航空运输学界和业界的关注热点<sup>[19-24]</sup>。通过统计机场历史的空域、交通、气象、容量等各类数据信息,建立机场容量场景库,结合不断更新的机场运行信息,对每个时间片内的运行容量进行分阶段地动态预测<sup>[25-29]</sup>。

### 2.2 跑道运行模式配置

在传统的飞行区资源调度研究中,跑道运行模式一般为已知条件,尚未充分考虑跑道运行模式对资源调度的影响。机场运行指挥和空中交通管理部门在实际运行中主要根据经验对跑道运行模式进行定性决策,而且倾向于采用单一、固定的静态跑道运行模式配置策略,缺乏动态优化的定量分析

辅助决策工具<sup>[2,30-32]</sup>。以中国航空运输系统为例,在多跑道建设竣工并通过行业验收后,为提高新旧跑道之间的磨合度,保障进离场航班运行安全,无论平行跑道之间的间距为近距、中距还是远距,民航当局通常将隔离运行作为多跑道试运行模式,甚至将该模式持续使用数年之久,使得多跑道系统的一体化运行潜能尚未得到充分释放。跑道运行模式配置主要针对多跑道机场,结合机场容量限制、交通需求、气象条件等信息,考虑模式切换过程中的容量损失等因素,对跑道资源组合方式和交通流组织模式进行优化管理,从可用的跑道资源及运行模式集合中生成最优的配置方案<sup>[31-33]</sup>。

### 2.3 场面滑行态势感知

机场物理结构的不断庞大,加之空中交通流量的日益密集,使得场面滑行活动的运行环境变得愈发复杂和多变<sup>[2,13,34]</sup>。随着开辟航路航线、新设管制扇区、终端管制中心建设工作的不断推进,空中交通拥堵已由航路空域转移至机场场面<sup>[35]</sup>。在航班的“门到门”运行过程中,机场场面滑行阶段占据十分重要的地位,其态势的复杂度及运行的流畅度对航班运行性能产生较大影响<sup>[36-37]</sup>。场面滑行态势要素涉及滑行时间、队列长度、场面流量、机位推出率等,对滑行延误时间等具有重要影响<sup>[38-40]</sup>。其中,滑行时间(包括滑出时间、滑入时间)预测成为该领域内近期最热的研究主题之一。目前的成果大多采用概率统计理论建立场面滑行时间回归预测模型,同时其他机器学习算法近几年也开始在滑行时间预测领域得到应用<sup>[41-42]</sup>。除了滑行时间预测之外,其他滑行态势因子、滑行态势复杂度、滑行延误预测等问题也得到了相应研究<sup>[2]</sup>。

### 2.4 机场空地联合调度

航空运输活动具有“门到门”的运行特点,运行过程的连续性导致其对机场空地资源的使用需同时兼顾飞行区与终端区的运行限制。事实上,跑道系统作为飞行区和终端区的关联衔接纽带,其调度问题的建模不可避免地涉及到机场的空中和地面系统。另外,跑道系统是航空运输业公认的极易成为机场运行瓶颈的热点区域,其资源调度效率直接

影响着机场空地系统的一体化运行性能。国际民航组织缔约国需在 2028 年实现 AMAN、DMAN、SMAN 三者之间的集成管理,这促使机场空地联合调度问题研究将成为当前、未来 10 年乃至更长一段时间内的研究热点<sup>[43-44]</sup>。机场空地联合调度涉及跑道、滑行道、停机位、定位点、航路航线等诸多资源,其问题建模和算法求解的复杂度非常高<sup>[2,45-47]</sup>。特别地,随着大都市、都市圈、机场群等新形态的不断涌现,传统的机场运行活动正面临复杂的多机场协同运行环境,辖区内多个机场对公共空域资源的使用竞争将变得更为激烈<sup>[48-50]</sup>。

### 2.5 资源调度性能权衡

机场飞行区资源调度问题涉及空管、机场、航空公司、旅客、政府等多方利益主体,而不同的利益主体对资源调度的目标需求存在一定的差异<sup>[2]</sup>。例如,空管关注航班延误、管制负荷等利益,机场关注吞吐量、正常率等利益,航空公司关注飞行时间、燃油消耗等利益,旅客关注航班延误、行走距离等利益,政府关注气体排放、可持续发展等利益<sup>[51-58]</sup>。当前大多数资源调度研究主要聚焦航班延误、吞吐量、飞行时间、行走距离等目标,却忽略了燃油消耗、气体排放、公平性、鲁棒性等目标。即便考虑了多个目标的联合优化问题,其处理方式一般借助权重因子将多个目标转换为一个综合的单目标。然而,权重因子却依赖于人为需求进行预先设定,缺乏一定的科学性,且没有充分考虑各个优化目标之间的动态权衡<sup>[59-61]</sup>。针对不同的优化目标,应采用更为科学的多目标优化方法,建立飞行区资源调度权衡分析模型与算法,生成一系列飞行区资源调度满意解及方案,从而满足不同利益主体对资源调度性能的多样化需求。

## 3 主要挑战

通过综合分析飞行区资源调度领域的研究与应用情况可以发现,虽然目前国内外的研究成果较多,但在模型的普适与应用、算法的稳健与效率、方法与机制的匹配、微观与宏观的结合、常态与应急的衔接等方面仍面临一定的挑战,成为当前及未来

航空运输学界和业界亟待重点关注和解决的问题。

### 3.1 模型的普适与应用问题

从数学建模的角度来看,大多数机场飞行区资源调度问题为优化控制问题。经过 60 余年的理论发展,目前已在跑道资源调度、滑行道资源调度、停机位资源调度三个方面形成了一系列丰富的研究成果,相关的模型也丰富多样,考虑的建模因素越来越多,然而主要停留在理论层面,缺乏一定的普适性和应用性。J. A. Bennell 等<sup>[61]</sup>于 2017 年指出,目前大多数的跑道资源调度模型主要是在仿真环境下进行测试,均未在机场实际应用中得到有效验证。另外,不同模型的假设条件也存在差异,导致模型的适用性较差。因此,未来研究在对飞行区资源调度问题进行建模时,需着重考虑模型的普适与应用问题,尽可能实现理论模型的具体落地和实际指导性。

### 3.2 算法的稳健与效率问题

目前已知的机场飞行区资源调度算法众多,主要分为精确算法、启发式算法、元启发式算法、近似算法四类<sup>[2-3,6,36,57,62-70]</sup>。其中,精确算法包括分支定界法、割平面法、动态规划法等;启发式算法包括贪婪算法、局部搜索算法、爬山算法等;元启发式算法包括遗传算法、蚁群算法、模拟退火算法等;近似算法没有明确定义,例如贪婪算法、局部搜索算法、随机近似算法等。其中,启发式算法和元启发式算法通常亦被归类为近似算法。对于大多数飞行区资源调度模型,很难求解到全局最优解,并且很难在多项式时间之内进行求解<sup>[53,71-72]</sup>。为在有限的计算成本内得到飞行区资源调度的满意解,启发式算法和元启发式算法得到了广泛应用,但是当前的算法执行效率仍较为低下。因此,未来研究在对飞行区资源调度算法进行设计时,需着重考虑算法的稳健与效率问题,尽可能实现调度算法的快速性和有效性。

### 3.3 方法与机制的匹配问题

由于机场飞行区资源调度过程涉及空管、机场、航空公司等多个航空运输生产部门,上述部门

的业务流程及交互关系对调度效果具有重要影响<sup>[49,73]</sup>。而且,新机制的推广应用势必会促进传统资源调度方式的变革<sup>[2,12,73-75]</sup>。例如,A-CDM 通过推动以机场运行为核心的多方资源整合和信息共享,改变了空管、机场和航空公司等部门的传统业务流程;HDDAM 通过重新整合区域、进近、塔台等不同管制单位职责,将进离场管理的核心转移至最有效的决策者。考虑飞行区资源调度的实际应用需求,其方法研究和机制设计之间需保持双向反馈:“方法”的研究必须契合“机制”这一软环境,而“机制”的概念论证则需要借助“方法”来实现。目前,基于 CDM 的协同场面管理、协同地面等待、协同航班调度、协同队列管理等相关理论方法得到了衍生发展<sup>[73,76-78]</sup>,而 HDDAM 正由 MITRE 公司进行概念论证。因此,未来研究在对飞行区资源调度问题进行建模、分析与优化时,需着重考虑方法与机制的匹配问题,尽可能实现调度理论的适用性。

### 3.4 微观与宏观的结合问题

当前研究针对飞行区资源调度的微观层面和宏观层面均进行了一定的独立性研究,微观层面主要聚焦资源“个量”调度,宏观层面主要聚焦资源“总量”调度。微观层面的飞行区资源调度包括跑道起降调度、滑行规划、停机位分配等<sup>[5-9,34-39,61-64,79-82]</sup>,宏观层面的飞行区资源调度包括跑道运行模式配置、滑行态势感知、停机位推出率控制等<sup>[2,31-33,40,83-90]</sup>。然而,当前研究尚未充分考虑微观与宏观的结合问题,无法实现资源“个量”调度与“总量”调度的交互协同。例如,当前的跑道起降调度研究尚未充分考虑复杂跑道构型、跑道运行模式配置等因素对空中交通运行的影响,建模过程中大多将多跑道资源看作一个整体系统,忽略了多跑道系统内部之间的协同运行特性及相互作用关系;当前的滑行规划研究尚未充分考虑机场飞行区的态势复杂度问题,以滑行时间最小为目标的滑行规划方案可能会引发更多的场面冲突,从而导致滑行态势复杂度的急剧增大;当前的离场调度研究尚未充分考虑推出率限制对调度过程的影响。因此,未来研究在对飞行区资源调度问题进行多视角

管理时,需着重考虑微观与宏观的结合问题,尽可能实现宏观规划管理与微观运行控制之间的协同交互。

### 3.5 常态与应急的衔接问题

航空运输活动极易受恶劣天气、重大活动、突发事件、设备故障等各类内外部因素影响,导致机场资源供给能力骤然降低<sup>[2,15-16,49]</sup>。例如,雷暴、冰雪、大雾、低云、军事飞行活动、通航飞行活动引发的容量降低等直接因素,以及地震、洪灾、火灾引发的空管业务中断等间接因素。在上述因素发生导致的应急环境下,突然减小的机场资源供给能力必然不能满足常规或骤增的空中交通需求<sup>[20,49]</sup>。特别是自然灾害等不可抗力因素导致的机场及空管业务中断的情况下,突然减小甚至完全丧失的管制运行保障能力可能导致机场关闭、航班备降以及严重的航空事故等后果。当前研究主要聚焦常态运行状况下的机场资源调度问题,尚未针对非常态运行场景开展大量的系统性研究。为增强机场在各类应急场景下的资源供给能力,提升机场系统风险抵御能力和安全水平,亟需对机场在各类应急场景下的可用资源进行应急调度<sup>[15,91-92]</sup>。因此,未来研究在对飞行区资源调度问题进行多场景管理时,需着重考虑常态与应急的衔接问题,尽可能实现常态管控与应急管控之间的相互协调和快速切换。

## 4 结束语

大多数飞行区资源调度问题均可抽象为优化控制问题,建模过程需兼顾机场终端区运行条件,且涉及诸多优化目标和约束限制。随着机场物理结构的不断庞大,以及空中交通流量的不断密集,飞行区资源调度问题的复杂程度急剧增加。在机场飞行区的实时动态运行需求下,提高模型的普适性和应用性,增强算法的稳健性和时效性,成为当前及未来亟待重点解决的关键问题。

航空运输具有多层级管理、跨区域运行和高动态管控等特点,内部存在海量、多元和异构的大数据信息,其蕴含的丰富价值亟待挖掘和利用。当前,国内外均已明确数据的基础性战略地位,航空

运输大数据研究与应用正面临良好的发展机遇。通过开展航空运输大数据统计分析、规律探索、业务优化、预测分析、宏观决策、绩效管理等服务,实现科学数据的科学管理,为机场飞行区资源调度提供强有力的技术支持。

机场飞行区资源调度问题研究的涉及面广,包括概念内涵、体系框架、发展脉络、发展趋势、研究热点和主要挑战等诸多方面。该研究分为三个系列,本文仅为研究系列之三。在之前的研究系列之一和研究系列之二中,已分别对飞行区资源调度的基本概念与框架、发展脉络与趋势等问题进行了深入的研究与探讨。通过上述关于飞行区资源调度三个系列的完整研究,旨在为机场运行管理理论与应用的可持续发展提供科学指引。

### 参考文献

- [1] Fergus J, Sharma S. Real time metrics and analysis of integrated arrival, departure, and surface operations[C]// The 17th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Virginia: AIAA, 2017: 1-7.
- [2] 尹嘉男, 马园园, 胡明华. 复杂机场资源调度理论与方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2019.  
Yin Jianan, Ma Yuanyuan, Hu Minghua. Resource scheduling in complex airport systems: theory and methods[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2019. (in Chinese)
- [3] 徐肖豪, 臧志恒. 基于 MILP 的飞机滑行排序的优化[J]. 交通与计算机, 2007, 25(2): 142-145.  
Xu Xiaohao, Zang Zhiheng. Optimization for aircraft taxi scheduling based on MILP[J]. Transport and Computer, 2007, 25(2): 142-145. (in Chinese)
- [4] Kjenstad D, Mannino C, Nordlander T E, et al. Optimizing AMAN-SMAN-DMAN at Hamburg and Arlanda airport[C]// The 3rd SESAR Innovation Days. Brussels: EUROCONTROL, 2013: 1-3.
- [5] 徐肖豪, 姚源. 遗传算法在终端区飞机排序中的应用[J]. 交通运输工程学报, 2004, 4(3): 121-126.  
Xu Xiaohao, Yao Yuan. Application of genetic algorithm to aircraft sequencing in terminal area[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2004, 4(3): 121-126. (in Chinese)
- [6] 尹嘉男, 胡明华, 彭瑛, 等. 相关进近模式下多跑道时空资源优化调度方法[J]. 航空学报, 2014, 35(11): 3063-3072.  
Yin Jianan, Hu Minghua, Peng Ying, et al. Optimized method for multi-runway spatio-temporal resource scheduling in the mode of dependent approaches[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(11): 3063-3072.

- (in Chinese)
- [7] Beasley J E, Krishnamoorthy M, Sharaiha Y M, et al. Scheduling aircraft landings-the static case[J]. *Transportation Science*, 2000, 34(2): 180-197.
- [8] Saraf A P, Slater G. Optimal dynamic scheduling of aircraft arrivals at congested airports[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2008, 31(1): 53-65.
- [9] 尹嘉男, 胡明华, 赵征. 多跑道机场停机位分配仿真模型及算法[J]. *交通运输工程学报*, 2010, 10(5): 71-76.  
Yin Jianan, Hu Minghua, Zhao Zheng. Simulation model and algorithm of multi-runway airport gate assignment[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2010, 10(5): 71-76. (in Chinese)
- [10] Simaiakis I, Khadilkar H, Balakrishnan H, et al. Demonstration of reduced airport congestion through pushback rate control[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2014, 66: 251-267.
- [11] Hebl J S, Wijnen R A A. Development of a runway allocation optimisation model for airport strategic planning[J]. *Transportation Planning and Technology*, 2008, 31(2): 201-214.
- [12] 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 Minghua. *Theory and method of air traffic flow management*[M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese)
- [13] Gupta G, Waqar M, Yoon J. An integrated collaborative decision making and tactical advisory concept for airport surface operations management[C]//The 12th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations(ATIO) Conference and 14th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference. Virginia: AIAA, 2012: 1-10.
- [14] Wu C L, Caves R E. Modelling and optimization of aircraft turnaround time at an airport[J]. *Transportation Planning and Technology*, 2004, 27(1): 47-66.
- [15] Balakrishnan H. Techniques for reallocating airport resources during adverse weather[C]//The 46th IEEE Conference on Decision and Control. New York: IEEE, 2007: 2949-2956.
- [16] Krozel J, Weidner T, Hunter G, et al. Terminal area guidance incorporating heavy weather[C]//The Guidance, Navigation, and Control Conference. New Orleans: AIAA, 1997: 3541-3550.
- [17] 尹嘉男, 胡明华, 赵征. 多跑道机场地面容量评估模型[C]//航空器适航与空中交通管理学术年会论文集. 北京: 中国航空学会, 2010: 15-19.  
Yin Jianan, Hu Minghua, Zhao Zheng. Evaluation model of multi-runway airport ground capacity[C]//The Aircraft Airworthiness and ATM Symposium. Beijing: CSAA, 2010: 15-19. (in Chinese)
- [18] Rubnich M, Delaura R. Initial validation of a Convective Weather Avoidance Model(CWAM) in departure airspace [C]//The 30th AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference. Virginia, New York: AIAA, IEEE, 2011: 1-10.
- [19] Mitchell J, Polishchuk V, Krozel J. Airspace throughput analysis considering stochastic weather[C]//The AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit. Virginia: AIAA, 2006: 6770-6777.
- [20] Robinson M, Delaura R, Underhill N. The Route Availability Planning Tool(RAPT): evaluation of departure management decision support in New York during the 2008 convective weather season[C]//The 8th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar. Washington, D. C., Brussels: FAA & EUROCONTROL, 2009: 1-7.
- [21] Kim J, Zou J, Mitchell J, et al. Sensitivity of capacity estimation results subject to convective weather forecast errors[C]//The AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Virginia: AIAA, 2009: 6169-6202.
- [22] 张静, 徐肖豪, 王飞. 天气影响的机场容量概率分布[J]. *南京航空航天大学学报*, 2011, 43(1): 41-48.  
Zhang Jing, Xu Xiaohao, Wang Fei. Probability distribution of airport capacity affected by weather[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2011, 43(1): 41-48. (in Chinese)
- [23] 张静, 徐肖豪, 王飞. 天气季节性影响的机场到达容量概率分布[J]. *西南交通大学学报*, 2011, 46(1): 154-161.  
Zhang Jing, Xu Xiaohao, Wang Fei. Seasonal effects of weather on probability distribution of airport arrival capacity[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2011, 46(1): 154-161. (in Chinese)
- [24] Tien S L, Taylor C, Vargo E, et al. Using ensemble weather forecasts for predicting airport arrival capacity[J]. *Journal of Air Transportation*, 2018, 26(3): 123-132.
- [25] Wang Y. Prediction of weather impacted airport capacity using ensemble learning[C]//The 30th AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference. Virginia, New York: AIAA, IEEE, 2011: 1-7.
- [26] 张静. 天气影响的机场容量与延误评估研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.  
Zhang Jing. *Research on airport capacity and delay assessment affected by the weather*[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)
- [27] 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 forecast*[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015. (in Chinese)
- [28] 吴懿君. 多场景扇区容量评估技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.  
Wu Yijun. *Research on evaluation of multi-scenario sector capacity*[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016. (in Chinese)
- [29] CSRA Company. Flight schedule monitor user's guide,

- Version 13.0 [R]. CSRA/TFMM-14/1898, Virginia, 2016.
- [30] Bertsimas D, Frankovich M, Odoni A R. Optimal selection of airport runway configurations[J]. *Operations Research*, 2011, 59(6): 1407-1419.
- [31] Li L, Clarke J P. A stochastic model of runway configuration planning[C]// *The AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*. Virginia: AIAA, 2010: 7697-7703.
- [32] 尹嘉男, 胡明华, 张洪海, 等. 多跑道协同运行模式优化方法[J]. *航空学报*, 2014, 35(3): 795-806.  
Yin Jianan, Hu Minghua, Zhang Honghai, et al. Optimization approach for collaborative operating modes of multi-runway systems[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35(3): 795-806. (in Chinese)
- [33] Yin J N, Ma Y Y, Hu Y X, et al. Dynamic runway configurations and flexible arrival/departure tradeoffs in metroplex airports[C]// *The 37th AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference*. London: AIAA, IEEE, 2018: 1-8.
- [34] 尹嘉男. 复杂机场飞行区运行管控方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.  
Yin Jianan. Management and control method for airfield area operations at complex airport[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016. (in Chinese)
- [35] Smeltink J W, Soomer M J, De Waal P R, et al. Optimisation of airport taxi planning[R]. NLR-TP-2003-475, Amsterdam: National Aerospace Laboratory NLR, 2003.
- [36] Marin A G. Airport management: taxi planning[J]. *Annals of Operations Research*, 2006, 143(1): 191-202.
- [37] 唐勇, 胡明华, 黄荣顺, 等. 基于空闲时间窗和多 Agent 的 A-SMGCS 航空器滑行路由规划[J]. *航空学报*, 2015, 36(5): 1627-1638.  
Tang Yong, Hu Minghua, Huang Rongshun, et al. Aircraft taxi routes planning based on free time windows and multi-agent for A-SMGCS[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2015, 36(5): 1627-1638. (in Chinese)
- [38] Clewlow R, Simaiakis I, Balakrishnan H. Impact of arrivals on departure taxi operations at airports[C]// *The AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*. Virginia: AIAA, 2010: 1-8.
- [39] 尹嘉男. 平行跑道机场地面容量评估技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.  
Yin Jianan. Research on capacity evaluation at airport airside with parallel runways[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011. (in Chinese)
- [40] Yin J N, Hu M H, Ma Y Y, et al. Airport taxi situation awareness with a macroscopic distribution network analysis[J]. *Networks and Spatial Economics*, 2019, 19(3): 669-695.
- [41] Balakrishnan P, Ganesan R, Sherry L, et al. Estimating taxi-out times with a reinforcement learning algorithm[C]// *The 27th AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference*. Virginia, New York: AIAA, IEEE, 2008: 1-7.
- [42] Herrema F, Curran R, Visser H, et al. Taxi-out time prediction model at charles de gaulle airport[J]. *Journal of Aerospace Information Systems*, 2018, 15(3): 120-130.
- [43] Abeyratne R. The aviation system block upgrades: legal and regulatory issues[J]. *Air and Space Law*, 2014, 39(2): 131-154.
- [44] Lutte B. ICAO aviation system block upgrades: a method for identifying training needs[J]. *International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace*, 2015, 2(4): 1-15.
- [45] Gunther Y, Inard A, Werther B, et al. Total airport management (operational concept and logical architecture)[R]. TAM\_OCD\_short\_v1.0, Brussels, Augsburg: EUROCONTROL & DLR, 2006.
- [46] Kjenstad D, Mannino C, Schittekat P, et al. Integrated surface and departure management at airports by optimization[C]// *The 5th International Conference on Modeling, Simulation and Applied Optimization (ICMSAO)*. Portugal: SCITEPRESS, 2013: 1-5.
- [47] Pavese G, Bruglieri M, Rolando A, et al. DMAN-SMAN-AMAN optimisation at milano liniate airport[C]// *The 7th SESAR Innovation Days*. Brussels: EUROCONTROL, 2017: 1-10.
- [48] 马园园, 胡明华, 张洪海, 等. 多机场终端区进场航班协同排序方法[J]. *航空学报*, 2015, 36(7): 2279-2290.  
Ma Yuanyuan, Hu Minghua, Zhang Honghai, et al. Optimized method for collaborative arrival sequencing and scheduling in metroplex terminal area[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2015, 36(7): 2279-2290. (in Chinese)
- [49] 马园园. 多机场终端区进离场交通流协同管理方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.  
Ma Yuanyuan. Collaborative management method for arrival and departure traffic flows in multi-airport terminal area[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016. (in Chinese)
- [50] 马园园, 胡明华, 尹嘉男, 等. 多机场终端区进离场交通流协同排序方法[J]. *航空学报*, 2017, 38(2): 220-232.  
Ma Yuanyuan, Hu Minghua, Yin Jianan, et al. Collaborative sequencing and scheduling method for arrival and departure traffic flow in multi-airport terminal area[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2017, 38(2): 220-232. (in Chinese)
- [51] 陈欣. 机场空侧容量评估与优化方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.  
Chen Xin. Research on capacity evaluation and optimization methods at airport airside[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007. (in Chinese)
- [52] 李珍, 张军, 张学军. 基于遗传算法的航班离港调度建模及仿真[J]. *交通与计算机*, 2008, 26(6): 39-42.  
Li Zhen, Zhang Jun, Zhang Xuejun. Modeling and simulation of departure scheduling problem based on genetic algo-



- rithm[J]. *Transport and Computer*, 2008, 26(6): 39-42. (in Chinese)
- [53] Clare G, Richards A G. Optimization of taxiway routing and runway scheduling[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2011, 12(4): 1000-1013.
- [54] 赵巍飞, 朱潇, 王红勇. 终端区飞机排序的人工蜂群算法[J]. *科学技术与工程*, 2013, 13(31): 9258-9262. Zhao Yifei, Zhu Xiao, Wang Hongyong. Artificial bee colony algorithm of aircraft sequencing in terminal area[J]. *Science Technology and Engineering*, 2013, 13(31): 9258-9262. (in Chinese)
- [55] Khadilkar H, Balakrishnan H. Optimal control of airport operations with gate capacity constraints[C]// *The European Control Conference*. New York: IEEE, 2013: 608-613.
- [56] Wei W, Patel M H, Choy A. A two-stage stochastic programming model for integrated airport surface operations under uncertainties[J]. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 2014, 18(1): 1-30.
- [57] 尹嘉男, 胡明华, 张洪海, 等. 独立离场模式下多跑道时空资源优化调度方法[J]. *航空学报*, 2015, 36(5): 1574-1584. Yin Jianan, Hu Minghua, Zhang Honghai, et al. Optimized method for multi-runway spatio-temporal resource scheduling in the mode of independent departures[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2015, 36(5): 1574-1584. (in Chinese)
- [58] Yin J N, Hu Y X, Ma Y Y, et al. Multi-objective optimization of airport runway scheduling under uncertain conditions [C] // *The 98th Transportation Research Board Annual Meeting*. Washington, D. C. : TRB, 2019: 1-15.
- [59] Atkin J A, Burke E K, Greenwood J S, et al. On-line decision support for take-off runway scheduling with uncertain taxi times at London Heathrow airport [J]. *Journal of Scheduling*, 2008, 11: 323-346.
- [60] Heidt A, Helmke H, Kopolke M, et al. Robust runway scheduling under uncertain conditions[J]. *Journal of Air Transport Management*, 2016, 56: 28-37.
- [61] Bennell J A, Mesgarpour M, Potts C N. Dynamic scheduling of aircraft landings[J]. *European Journal of Operational Research*, 2017, 258(1): 315-327.
- [62] Babic O, Teodorovic D, Tosic V. Aircraft stand assignment to minimize walking[J]. *Journal of Transportation Engineering*, 1984, 110(1): 55-66.
- [63] Haghani A, Chen M C. Optimizing gate assignments at airport terminals[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 1998, 32(6): 437-454.
- [64] Yan S, Huo C M. Optimization of multiple objective gate assignments[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2001, 35(5): 413-432.
- [65] Balakrishnan H, Chandran B G. Algorithms for scheduling runway operations under constrained position shifting[J] *Operations Research*, 2010, 58(6): 1650-1665.
- [66] Bennell J A, Mesgarpour M, Potts C N. Airport runway scheduling[J]. *Annals of Operations Research*, 2011, 9(2): 115-138.
- [67] Maharjan B, Matis T I. An optimization model for gate re-assignment in response to flight delays[J]. *Journal of Air Transport Management*, 2011, 17(4): 256-261.
- [68] Kim S H, Feron E, Clarke J P. Gate assignment to minimize passenger transit time and aircraft taxi time[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2013, 36(2): 467-475.
- [69] 胡明华, 马园园, 田文, 等. 复杂终端区进场交通流优化排序方法研究[J]. *南京航空航天大学学报*, 2015, 47(4): 459-466. Hu Minghua, Ma Yuanyuan, Tian Wen, et al. Optimized sequencing and scheduling approach for arrival traffic flow at complex terminal area[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2015, 47(4): 459-466. (in Chinese)
- [70] Aktel A, Yagmahan B, Özcan T, et al. The comparison of the metaheuristic algorithms performances on airport gate assignment problem[J]. *Transportation Research Procedia*, 2017, 22: 469-478.
- [71] Bojanowski L, Harikiopoulou D, Neogi N, et al. Multi-runway aircraft sequencing at congested airports[C]// *The American Control Conference (ACC)*. New York: IEEE, 2011: 2752-2758.
- [72] Ng K K, Ee C K, Chan F T, et al. Robust aircraft sequencing and scheduling problem with arrival/departure delay using the min-max regret approach[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2017, 106: 115-36.
- [73] 张洪海. 空中交通流量协同管理[M]. 北京: 科学出版社, 2016. Zhang Honghai. Collaborative air traffic flow management [M]. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese)
- [74] European Organisation for the Safety of Air Navigation. Airport CDM operational concept document[R]. Brussels: EUROCONTROL, 2006.
- [75] The MITRE Corporation. The High Density Departure and Arrival Traffic Management (HDDAM) Concept [R]. MP120146, Virginia; The MITRE Corporation, 2012.
- [76] Burgain P, Feron E, Clarke J P. Collaborative virtual queue: Benefit analysis of a collaborative decision making concept applied to congested airport departure operations [J]. *Air Traffic Control Quarterly*, 2009, 17(2): 195-222.
- [77] Deroo R, Gama A. Optimization of take-off runway sequences for airports under a CDM framework[M]. Berlin: Springer, 2017: 161-183.
- [78] Okwir S, Ulfvengren P, Angelis J, et al. Managing turnaround performance through collaborative decision making [J]. *Journal of Air Transport Management*, 2017, 58: 183-

- 196.
- [79] Solveling G, Solak S, Clarke J P, et al. Runway operations optimization in the presence of uncertainties[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2011, 34(5): 1373-1382.
- [80] Montoya J, Sivakumar R, Zachary W. Multiobjective departure runway scheduling using dynamic programming[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2014, 15(1): 399-413.
- [81] Kapolke M, Furstenau N, Heidt A, et al. Pre-tactical optimization of runway utilization under uncertainty[J]. *Journal of Air Transport Management*, 2016, 56: 48-56.
- [82] Evertse C, Visser H G. Real-time airport surface movement planning: minimizing aircraft emissions[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2017, 79: 224-241.
- [83] Foyle D C, Andre A D, Mccann R S, et al. Taxiway navigation and situation awareness (T-NASA) system: Problem, design philosophy, and description of an integrated display suite for low-visibility airport surface operations [C]//The SAE/AIAA World Aviation Congress. Virginia: AIAA, 1996: 1-6.
- [84] Andre A D, Hooy B L, Foyle D C, et al. Field evaluation of T-NASA: Taxi navigation and situation awareness system[C]//The 17th AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference. Virginia, New York: AIAA, IEEE, 1998: 1-10.
- [85] Idris H, Clarke J P, Bhuvu R, et al. Queuing model for taxi-out time estimation[J]. *Air Traffic Control Quarterly*, 2002, 10(1): 1-22.
- [86] Simaiakis I, Sandberg M, Balakrishnan H, et al. Design, testing and evaluation of a pushback rate control strategy [C]//The 5th International Conference on Research in Air Transportation. Washington, D. C., Brussels: FAA & EUROCONTROL, 2012: 1-8.
- [87] Sandberg M, Simaiakis I, Balakrishnan H, et al. A decision support tool for the pushback rate control of airport departures[J]. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 2014, 44(3): 416-421.
- [88] Mcfarlane P, Balakrishnan H. Optimal control of airport pushbacks in the presence of uncertainties[C]//The American Control Conference (ACC). New York: IEEE, 2016: 233-239.
- [89] Yin J N, Hu Y X, Ma Y Y, et al. Machine learning techniques for taxi-out time prediction with a macroscopic network topology[C]//The 37th AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference. Virginia, New York: AIAA, IEEE, 2018: 1-10.
- [90] Yin J N, Hu M H, Ma Y Y, et al. Spatial-temporal topology and performance analysis of airport taxi network[C]//The 97th Transportation Research Board Annual Meeting. Washington, D. C.: TRB, 2018: 1-10.
- [91] Yang Z, Wang G, Zhou D. Emergency planning: Small airport scheduling in disaster relief[C]//The 9th IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC). New York: IEEE, 2012: 289-294.
- [92] Polater A. Managing airports in non-aviation related disasters: A systematic literature review[J/OL]. [2018-10-17]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2018.05.026>.

#### 作者简介:

尹嘉男(1986—),男,博士,博士后,英国帝国理工学院 Sponsored Researcher。主要研究方向:机场规划、管理与评估,空中交通流量管理,航空大数据与人工智能等。

马园园(1987—),女,博士,工程师。主要研究方向:机场群协同运行管理,空中交通流量管理,空中交通系统建模与仿真等。

胡明华(1962—),男,博士,教授,博导。主要研究方向:国家空域系统规划、管理与评估,飞行流量管理,空中交通管理系统信息化与智能化等。

(编辑:丛艳娟)