

文章编号:1674-8190(2019)03-289-13

# 机场飞行区资源调度问题研究(一): 基本概念与框架

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:** 世界航空运输系统的一体化、协同化和智能化发展对机场飞行区资源调度精细化管理和空中交通运行高效化管控提出了高要求。本文聚焦机场飞行区资源调度的基本概念与框架问题, 是飞行区资源调度问题研究系列之一。从国际公约、理论研究和行业规范视角界定飞行区的基本概念, 分析飞行区的一般运行过程和资源调度内涵。对飞行区资源调度体系涉及的理论方法、系统工具、管理机制等要素及逻辑关系进行系统总结。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; 滑行道; 停机位; 场面

**中图分类号:** V355; U8

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16615/j.cnki.1674-8190.2019.03.001

## The Airfield Resource Scheduling Problem—Part I : Basic Concepts and Framework

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, China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210007, China)

**Abstract:** The integration, collaboration and intelligent development of global air transport system puts high demands on the refined management of resource scheduling in airfield area, and the efficient management and control of air traffic operations. This work focuses on the basic concepts and framework of airfield resource scheduling problem, which is part I of the whole research. The basic concepts of the airfield area are discussed from the perspectives of international conventions, theoretical research and industry regulations, and the general processes and connotation of airfield resource scheduling are analyzed. Then, the framework elements of theoretical methods, system tools, management mechanisms, and the logical relationships among the elements are systematically summarized. It 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; taxiway; gate; surface

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(一):基本概念与框架[J]. 航空工程进展, 2019, 10(3): 289-301.

Yin Jianan, Ma Yuanyuan, Hu Minghua. The airfield resource scheduling problem—Part I : basic concepts and framework[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2019, 10(3): 289-301.

## 0 引言

随着全球航空运输业的持续、快速和蓬勃发展,民用机场在数量、规模和密度方面增速明显。机场作为航空运输基础设施、空中交通起降场所和临空经济发展依托,在全球城市互联互通,综合交通体系建设和国民经济社会发展中的地位与作用愈发重要。机场资源调度是挖掘资源效益,优化飞行流量,缓解拥堵延误,增强飞行性能的有效手段,已成为航空运输管理的重要组成部分和重点发展方向。在整个机场系统内,飞行区是进离场航空器的直接活动区域,其资源调度问题已被公认为机场资源调度体系的最关键环节<sup>[1-2]</sup>。

机场飞行区资源调度问题涉及概念内涵、体系框架、发展脉络、发展趋势、近期热点和主要挑战等诸多方面,本文为该研究系列之一。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基本概念与框架问题,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 概念内涵

本节分别从国际公约、理论研究和行业规范视角对飞行区的基本概念进行界定,分析飞行区的一般运行过程,并阐述飞行区资源调度的内涵。

### 1.1 基本概念界定

#### 1.1.1 国际公约视角

在国际民航组织(International Civil Aviation Organization,简称 ICAO)制定的《国际民航公约附件 14:机场》中,并未直接对“飞行区”进行定义,而介绍了机动区(Maneuvering Area)和活动区(Movement Area)的概念<sup>[3]</sup>。其中,机动区是指除停机坪之外,用于航空器起飞、着陆和滑行的区域;活动区是指用于航空器起飞、着陆和滑行的区域,包括机动区和停机坪两部分。

#### 1.1.2 理论研究视角

在航空运输科学研究领域,不同学者根据各自研究需求对“飞行区”的界定也存在略微差异。大多数研究将机场划分为飞行区,航站区,进出机场的地面交通系统三部分。其中,飞行区为航空器的主要活动区域,又称为“空侧”,包括跑道、滑行道和

停机坪<sup>[4-6]</sup>;航站区和进出机场的地面交通系统为旅客和车辆的主要活动区域,又称为“陆侧”。另外,“场面”一词也得到国内外诸多学者的广泛使用,主要包括滑行道和停机位两大资源<sup>[7-9]</sup>。

#### 1.1.3 行业规范视角

在行业管理方面,中国、美国、加拿大等国对“飞行区”的界定也存在明显差异。根据中华人民共和国民用航空行业标准《民用机场飞行区技术标准:MH 5001-2013》,飞行区(Airfield Area)是指供航空器起飞、着陆、滑行和停靠使用的场地,包括跑道、升降带、跑道端安全区、滑行道、机坪以及机场周边对障碍物有限制要求的区域<sup>[10]</sup>。根据美国联邦航空局(Federal Aviation Administration,简称 FAA)规章 Section 139.5 规定,机场活动区是指跑道、滑行道以及其他用于航空器滑行、起飞和着陆的区域,但不包括停机坪区域,该定义与国际民航组织给出的建议存在明显差异<sup>[11]</sup>。根据加拿大交通运输部民用航空术语体系(Civil Aviation Terminology System,简称 CATS),机场活动区定义则与国际民航组织完全一致,包括机动区和停机坪两部分<sup>[12]</sup>。

可以看出,跑道、滑行道和停机坪作为机场飞行区的三大关键资源已成为航空界的普遍共识。因此,本文主要聚焦跑道、滑行道和停机位资源,研究机场飞行区资源调度问题。

### 1.2 一般运行过程

机场飞行区进离场活动的一般运行过程,以及飞行区与终端区、航站区和地面交通系统等其他机场区域之间的衔接关系如图 1 所示。

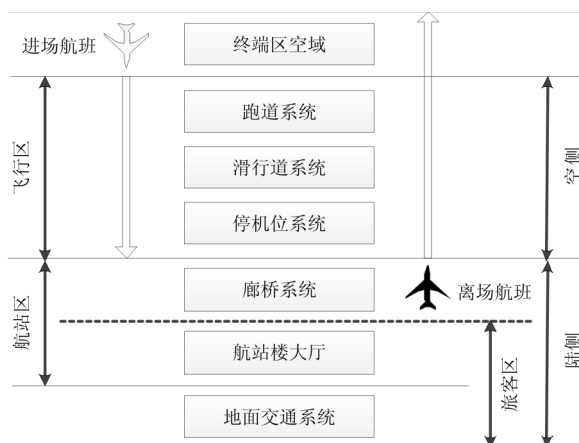


图 1 机场飞行区进离场活动

Fig. 1 Arrival and departure movements in airfield area

飞行区进离场活动的一般过程如下:①进场活动:进场航空器在跑道着陆并经快速脱离道离开跑道后,在机场管制席、地面管制席、流量管理席等席位的指挥下,按照相应的场面滑行引导规则和运行冲突调配策略,经由滑行道系统完成进场滑行过程,最终到达停机坪区域和指定的停机位;②离场活动:离场航空器在放行许可发布席、机场管制席、地面管制席、流量管理席等席位的指挥下,由停机位推出或自主滑出,并按照相应的场面滑行引导规则和运行冲突调配策略,经由滑行道系统完成离场滑行过程,最终到达跑道完成滑跑和起飞活动。考虑机场物理布局、管制策略及运行状况等因素,飞行区的进离场滑行过程可能涉及连续滑行、滑行等待、跑道穿越等不同操作<sup>[13-14]</sup>。

### 1.3 资源调度内涵

航空运输具有运行高速、自主性弱、不能随停、多方决策等特点,特别是在运行环境、活动载体和管理机制等方面,与铁路、公路、水路、管道等其他运输方式存在明显差异。机场飞行区资源调度过程的耦合作用关系如图 2 所示。

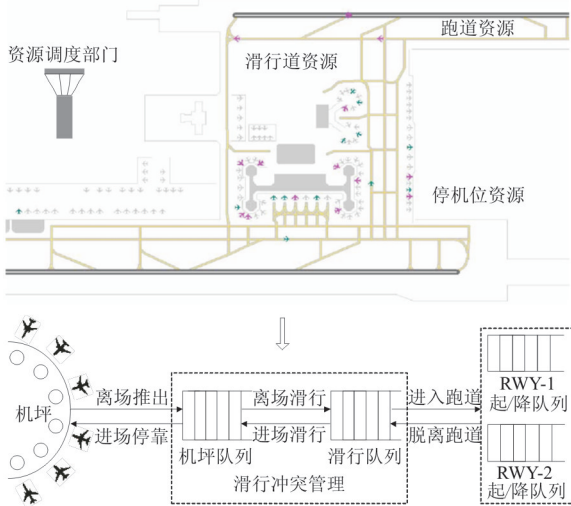


图 2 机场飞行区资源调度的耦合作用关系  
Fig. 2 Coupling interaction relationship of resource scheduling in airfield area

机场飞行区资源调度涉及人、机、环、管等多元因素,其解决难度随着空域、交通、机制、环境的日益复杂而不断增大。其中,空域复杂性主要体现在跑道构型多元,滑行网络庞大,机位布局密集等方面;交通复杂性主要体现在大流量,高密度,小间隔

等方面;机制复杂性主要体现在多因素耦合,多主体协同,多利益权衡等方面;环境复杂性则主要体现在特殊地形,多变气象,突发事件等方面。

资源调度是指对各种资源进行合理有效地测量、分析和使用,已广泛存在于交通、信息、电力、水务等领域<sup>[15-17]</sup>。机场飞行区资源调度旨在对跑道、滑行道和停机位等资源进行科学配置,优化飞行区资源使用策略,充分发挥飞行区资源的最大效益,特别是在诸多大型繁忙机场,空中交通需求已接近、达到甚至超过机场资源供给,频繁引发资源“供”与“需”之间相互失衡的场合。因此,机场飞行区资源调度的主要任务是确保资源“供”与“需”之间的相互匹配<sup>[16]</sup>,实现供需平衡(Demand Capacity Balancing,简称 DCB),如图 3 所示。机场飞行区资源调度的最终目标是挖掘资源效益,优化飞行流量,缓解拥堵延误,增强飞行性能,推动机场资源规划、管理和使用方式由粗放式向精细化转变。

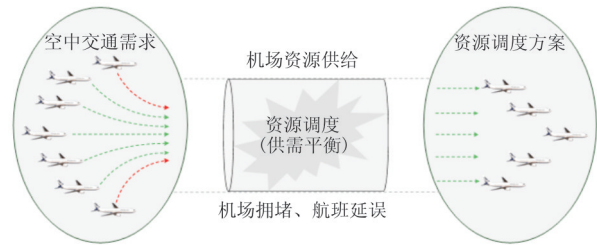


图 3 机场飞行区资源供需平衡示意

Fig. 3 Schematic diagram of resource DCB in airfield area

在对机场飞行区资源调度问题建模时,可将其转化为其他调度领域的类似问题。例如,若把跑道/滑行道/停机位和航空器分别比作生产调度领域的“机器”和“工件”,则飞行区资源调度是加工时间与作业顺序相关的车间作业调度问题,而且是典型的非确定性多项式困难(Non-deterministic Polynomial Hard,简称 NP-hard)组合优化问题。随着航空器数量的不断增加,调度算法的执行时间将呈指数增长,并且很难得到一个精确的全局最优解<sup>[18]</sup>。

通过全面分析当前国内外有关机场运行管理领域的研究与应用情况,本文在探讨机场飞行区资源调度问题时,不仅聚焦狭义层面上的资源“运行控制”,而且还涉及广义层面上的资源“规划管理”,二者均被纳入“调度”的范畴。

## 2 体系框架

机场飞行区资源调度体系是理论方法、系统工具、管理机制等要素及其相互关系共同组成的集合。本节对飞行区资源调度体系的基本框架,体系要素以及各要素之间的逻辑关系进行了分析。

### 2.1 基本框架

针对机场飞行区资源调度的研究与应用情况,其体系框架包括理论方法、系统工具、管理机制三大要素,如图 4 所示。

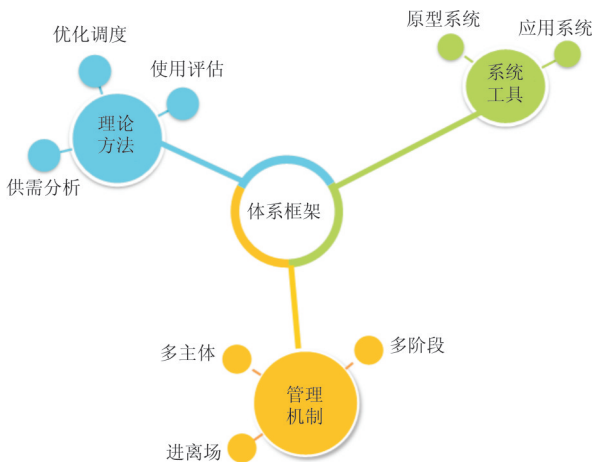


图 4 机场飞行区资源调度基本框架

Fig. 4 Framework of resource scheduling in airfield area

在机场飞行区资源调度体系中,理论方法为基础核心,涵盖供需分析、优化调度和使用评估三部分;系统工具为辅助手段,是理论方法的技术实现,包括原型系统和应用系统两部分;管理机制为制度保障,与理论方法和系统工具间相辅相成。在机场资源调度过程中,空管、机场和航空公司之间存在明显的信息共享和行为交互,使得管理机制成为飞行区资源调度过程中不可忽视的重要内容<sup>[19]</sup>。尤其是在协同决策(Collaborative Decision Making, 简称 CDM)机制的驱动下,传统的飞行区资源调度正向协同调度领域快速发展,视角涵盖多主体协同、进离场协同和多阶段协同等,相应的理论方法和系统工具也不断地丰富拓展和更新换代<sup>[20-21]</sup>。

### 2.2 体系要素

#### 2.2.1 理论方法

根据机场飞行区资源调度内涵、解决思路和实

施过程,可将相关的理论方法分为资源供需分析、资源优化调度和资源使用评估。其中,资源供需分析用于量化输入,通过分析飞行区资源的供给状况和需求状况,明确飞行区资源供需匹配关系;资源优化调度用于制定方案,通过建立各类飞行区资源优化调度模型及算法,实现机场资源使用的最大效率;资源使用评估用于验证输出,通过建立飞行区资源性能指标体系及评估方法,对机场资源调度方案的实施效果进行评价。

#### (1) 资源供需分析

根据 1.3 节的飞行区资源调度内涵,为实现供需平衡,前提是对“供给”和“需求”进行科学量化,在此基础上便可分析二者之间的相互匹配关系(超量、临界、未超量),如图 5 所示。

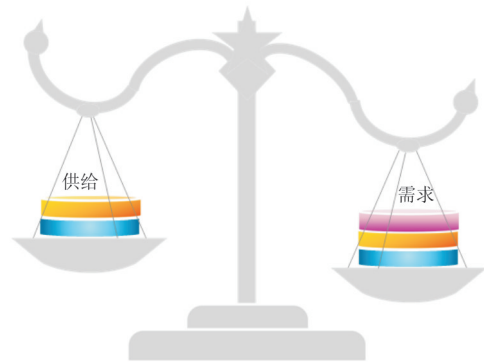


图 5 机场飞行区资源供需关系分析

Fig. 5 Resource DCB analysis in airfield area

在对飞行区资源调度问题建模时,常用的“供给”和“需求”量化方法主要包括:

①“供给”的量化处理:一是直接以“容量”进行表征<sup>[22-24]</sup>,可通过数学模型、仿真评估、统计分析等方式量化,包括静态容量、动态容量、运行容量三类,如图 6 所示。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。二是间接以“间隔”进行表征,在不计算容量值的情况下对资源进行调度<sup>[16,25-28]</sup>,原因在于:容量值作为模型参数进行输入时,其数值设置的客观性和准确性会对资源调度效果产生影响。事实上,“间隔”与“容量”之间是可以相互转换的,在统一量纲的前提下,单位时间内以最小时间间隔运行时的最大航空器数量(即间隔的倒数)便为理论上的“容量”<sup>[23]</sup>。

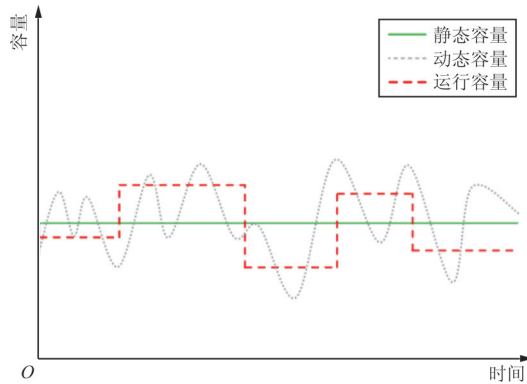


图 6 机场飞行区资源供给容量分类

Fig. 6 Classification of resource capacity in airfield area

②“需求”的量化处理:一是根据航班时刻表,飞行计划中的航班进离场时间,以及标准的航空器滑入、滑出时间,采用计划信息作为模型的输入条件对资源需求进行预测,并实施资源调度<sup>[27-31]</sup>。二是结合航班时刻表、飞行计划以及各种动态和随机因素,考虑需求的不确定性问题,对需求进行预测分析,进而实施资源调度<sup>[25-26,32-35]</sup>。

(2) 资源优化调度

本节从“个量”和“总量”视角对飞行区资源优化调度理论方法进行阐述,研究框架如图 7 所示。

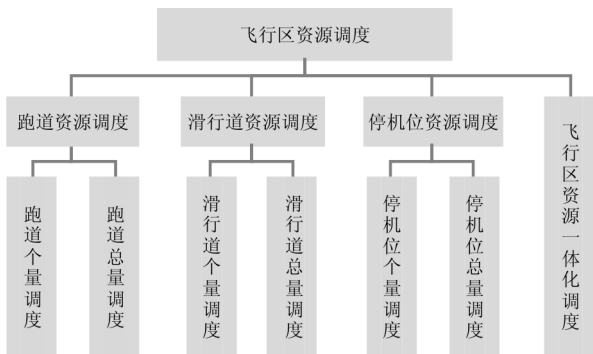


图 7 机场飞行区资源优化调度研究框架

Fig. 7 Framework of resource scheduling optimization in airfield area

在跑道资源调度方面,个量调度侧重跑道起降调度,总量调度侧重跑道运行模式配置。其中,跑道起降调度主要从时间视角(跑道时隙、起降时间)和空间视角(航班序列、跑道分配)对跑道资源进行优化调度,从微观运行控制层面确保起降活动的安全、有序和高效运行<sup>[1,16,21,25-29,36]</sup>。跑道运行模式配置主要对跑道资源组合方式和交通流组织模式进行优化管理,从宏观供需管理层面实现机场跑道

资源的供需平衡<sup>[24,37-39]</sup>。

在滑行道资源调度方面,个量调度侧重滑行规划,总量调度侧重滑行态势感知。其中,滑行规划主要从时间视角(滑行时刻规划)和空间视角(滑行路径规划)对滑行道资源进行优化调度,从微观运行控制层面确保航空器滑行活动的安全、有序和高效运行<sup>[9,14,18,22,40-43]</sup>。滑行态势感知主要对当前及未来的场面滑行态势进行评估预测,并对场面滑行的复杂度进行分析,从宏观态势感知层面准确把握滑行活动的总体运行状况<sup>[44-49]</sup>。

在停机位资源调度方面,个量调度侧重停机位分配,总量调度侧重推出率控制。其中,停机位分配聚焦进场航空器,侧重资源个量调度,对每架航空器的停机位使用需求进行优化控制<sup>[50-54]</sup>。推出率控制聚焦离场航空器,侧重资源总量控制,对特定时段内的离场航空器数量进行合理规划<sup>[55-58]</sup>。

飞行区资源一体化调度综合考虑跑道、滑行道、停机位等各类资源的调度需求,侧重飞行区内两种及两种以上资源的集成调度问题,对整个飞行区系统的时空资源进行联合配置,例如场面资源联合调度,跑道与场面资源联合调度等<sup>[8,14,59-64]</sup>。

(3) 资源使用评估

航空发达国家和地区以及国际民航组织一直努力推进航空运输系统效能的统一度量和管理,针对安全、容量、效率、环境等诸多方面,建立多套独立、成体系的效能评估体系。借鉴航空运输系统效能评估理念,机场飞行区资源调度的评估框架如图 8 所示。

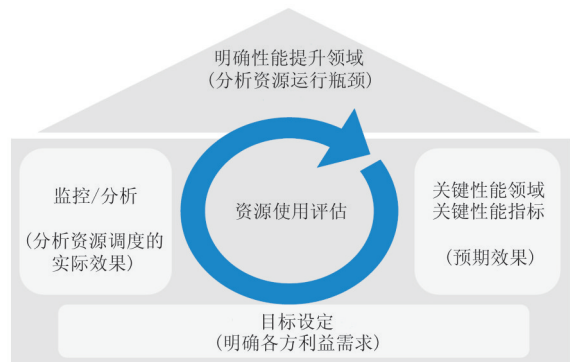


图 8 机场飞行区资源调度评估框架

Fig. 8 Framework of resource scheduling assessment in airfield area

美国国家空域系统效能评估体系研究始于 20 世纪 90 年代初,由 FAA 与 MITRE 公司先进航空

系统研发中心(Center for Advanced Aviation System Development, 简称 CAASD) 共同发起<sup>[65-66]</sup>。1995 年, FAA 系统容量办公室 (FAA's Office of System Capacity, 简称 ASC) 与航空用户、空中交通服务部门共同制定空中交通管理系统效能评估体系以及度量方法, 所涉及的 4 类关键效能指标包括灵活性、可预测性、可达性、延误<sup>[67]</sup>。随后, 美国 ASC 逐步扩大空中交通管理系统效能评估指标的度量范围, 并改进相应的度量方法。自 1998 年开始, FAA 每年均会对美国空中交通管理效能进行评估, 并根据效能评估结果发布美国空管效能和财务年度报告。

欧洲效能评估体系发展基本与美国同步, 欧洲航行安全组织 (European Organisation for the Safety of Air Navigation, 简称 EUROCONTROL) 于 1998 年成立了空中交通管理系统效能评估委员会 (Performance Review Commission, 简称 PRC), 制定欧洲空中交通管理系统效能评估指标及其度量方法, 并于 1999 年发布《欧洲航行安全组织空中交通管理系统效能评估报告》, 所涉及的 10 类关键指标包括: 安全、延误、成本效益、飞行效率、可预测性、环境、公平性、可用性、灵活性、可达性<sup>[68-69]</sup>。自 1998 年开始, PRC 每年均会发布一份欧洲空中交通管理系统效能评估报告, 对欧洲空管系统运行状况进行分析, 并针对各国空管运行存在的问题提出相应的改进建议。

国际民航组织于 2003 年举办的第 11 届空中航行大会提议在 ICAO 框架内制定空中交通管理系统效能评估标准, 从全球、地区和国家等不同层面制定基于不同目标的效能评估标准框架协议, 在世界范围内开展最低限度的空中交通管理系统效能评估工作<sup>[70-71]</sup>。ICAO 于 2004 年颁布《空中导航服务提供者的效能管理和考核》, 2009 年颁布《全球效能手册》, 所涉及的 11 类关键指标包括: 安全、安保、环境、成本效益、容量、效率、灵活性、可预测性、可用性和公平性、参与及协同、全球互用性, 用于指导各缔约国的效能考核工作。

中国民用航空局 (Civil Aviation Administration of China, 简称 CAAC) 于 2016 年发布《空管单位安全效能管理应用指导材料》, 建立了一套空

管安全效能指标, 着重规范空管安全政策和目标、航空安全风险、安全保证、安全促进措施等内容<sup>[72]</sup>。另外, 相关学者对机场效能管理体系的系统框架、指标体系、评估方法和组织实施等内容进行研究<sup>[73]</sup>。

针对美国和欧洲地区的空管运行数据, FAA 和 EUROCONTROL 对其空管效能进行了综合对比分析<sup>[74-75]</sup>。可以看出, 在上述各个国家、地区以及国际组织所建立的航空运输系统效能体系中, 安全、容量、延误、效率、环境、公平性、可预测性等指标已成为共同关注的焦点, 也是飞行区资源使用评估中的关键评价指标。

### 2.2.2 系统工具

结合 2.2.1 节中涉及到的理论方法研究情况, 机场飞行区资源调度系统工具主要集中在资源供给评估, 跑道资源调度, 场面资源 (滑行道资源、停机位资源) 调度三大领域。

#### (1) 资源供给评估

在资源供给评估领域, FAA 研制的机场和空域仿真模型 (Airport and Airspace Simulation Model, 简称 SIMMOD) 以及相应的 PRO 和 PLUS 派生工具, 波音公司旗下的杰普逊公司研制的全空域及机场模拟器 (Total Airspace and Airport Modeller, 简称 TAAM), MITRE 公司研制的机场容量仿真分析工具 (Airport Capacity Analysis Through Simulation, 简称 ACATS), EUROCONTROL 研制的重组空中交通管制数学仿真工具 (Re-organized ATC Mathematical Simulator, 简称 RAMS) 和区域网络容量预测可视化工具 (Network Estimation Visualization of ACC Capacity, 简称 NEVAC), CAAC 研制的空域管理与评估系统 (Air Space Management and Evaluation System, 简称 ASMES) 等, 均可对机场及空域资源的供给能力和空中交通活动进行快速仿真<sup>[16,76-79]</sup>。

#### (2) 跑道资源调度

在跑道资源调度领域, 成熟的系统工具主要包括美国航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, 简称 NASA) 艾姆斯研究中心研制的最后进近间隔工具 (Final Approach Spacing Tool, 简称 FAST), EUROCONTROL 研

制的进场管理工具(Arrival Manager,简称 AMAN)和离场管理工具(Departure Manager,简称 DMAN),澳大利亚交通及地区服务部研制的跑道分配工具(Runway Allocator,简称 RA)等,以及欧洲各国机场根据 AMAN 和 DMAN 系统概念框架研制本地化进离场管理系统,例如英国伦敦希思罗机场的 OSYRIS,法国巴黎戴高乐机场和比利时布鲁塞尔机场的 MAESTRO,德国法兰克福机场和慕尼黑机场的 4D-PLANNER 等<sup>[16,28,36,80-83]</sup>。上述工具均可通过分析历史或实时雷达航迹数据,飞行计划及航空气象等信息,辅助用户制定跑道资源调度方案,经测试取得良好的应用成效。

### (3) 场面资源调度

在场面资源调度领域,美国 NASA 艾姆斯研究中心与 FAA 于 2000 年合作开展场面管理系统(Surface Management System,简称 SMS)的研制工作,并于 2004 年完成运行概念的验证<sup>[84]</sup>。EUROCONTROL 自 20 世纪 90 年代开始研制机场协同决策(Airport Collaborative Decision Making,简称 A-CDM)机制以及配套的系统工具,经过近 20 年的摸索建设与应用实践,目前已广泛应用于欧洲地区的诸多大型机场<sup>[85]</sup>。国际民航组织于 2004 年发布 Doc9830 文件《先进场面活动引导与控制系统(Advanced-Surface Movement Guidance and Control System)》,简称 A-SMGCS 手册,对其运行需求、性能要求、实施指南和具体事宜等进行详细描述,并提出其具体分类、布局实施、设备更新等方案。另外,比利时 Airtopsoft 公司研制的空中交通优化快速仿真工具(Air Traffic Optimization,简称 AirTOP),德国亚琛机场研制的机场综合仿真技术(Comprehensive Airport Simulation Technology,简称 CAST)工具,德国航空航天中心(German Aerospace Center,简称 DLR)研制的滑行道和停机坪管控系统(Taxi and Ramp Management and Control System,简称 TARMAC)等,均可为机场滑行道资源调度以及机场场面资源的联合调度等提供辅助决策工具支持<sup>[16,86-87]</sup>。

### 2.2.3 管理机制

飞行区资源调度过程涵盖不同利益主体、不同交通类型、不同决策阶段,本节分别对多主体协同

管理机制、进离场协同管理机制和多阶段协同管理机制进行阐述。

#### (1) 多主体协同管理机制

欧洲自 20 世纪 90 年代开始研究 A-CDM 机制,用于支撑空中交通管理部门、机场运行指挥部门和航空公司运行控制部门等多利益主体更好地实施各自的业务活动,并辅助各航空运输部门进行高效决策<sup>[16,19-21,23,85,88-89]</sup>。为更好指导欧洲机场协同决策系统建设,EUROCONTROL 和国际航空运输协会(International Air Transportation Association,简称 IATA)于 2006 年联合发布了《机场协同决策实施手册》,目前已进行多次修订<sup>[90]</sup>。该实施手册旨在将传统的以流量管理为主,单向信息集成的协同运行理念延伸至以机场运行为核心的机场协同运行,可大大增强空管、机场、航空公司等航空运输生产部门之间的信息共享与协同决策能力,并有效提升航班运行效率、机场运行性能和服务品质。

机场协同决策的概念要素主要包括信息共享,里程碑方法,可变滑行时间,协同离场前排序,不利条件下的协同决策和航班更新协同管理六类<sup>[16,85,90]</sup>。以里程碑方法为例,图 9 给出了航班放行涉及的 16 类里程碑事件。

A-CDM 机制经过近 20 年摸索建设与应用实践,已在机场资源调度机制优化和系统建设方面积累了大量经验,目前已有 30 余个欧洲大型机场建设成 A-CDM 运行机场。其优势主要在于:改善航空器预测能力,提升机场运行性能,节约航空运输成本,优化机场资源利用,减少空中交通流量和容量管理席位的工作负荷,减少机场拥堵和航班延误,减少环境污染等。目前,A-CDM 已得到国际航空运输协会的认可,并在中美等国推广应用。

#### (2) 进离场协同管理机制

美国 MITRE 公司提出高密度进离场管理(High Density Departure and Arrival Traffic Management,简称 HDDAM)机制,运行概念如图 10 所示,出现恶劣天气或其他影响机场运行能力的事件时,旨在对不同管制单位的人员职责进行重新整合,将管制核心转移至最有效的决策者,从而实现机场进离场交通流的高效管理<sup>[91]</sup>。

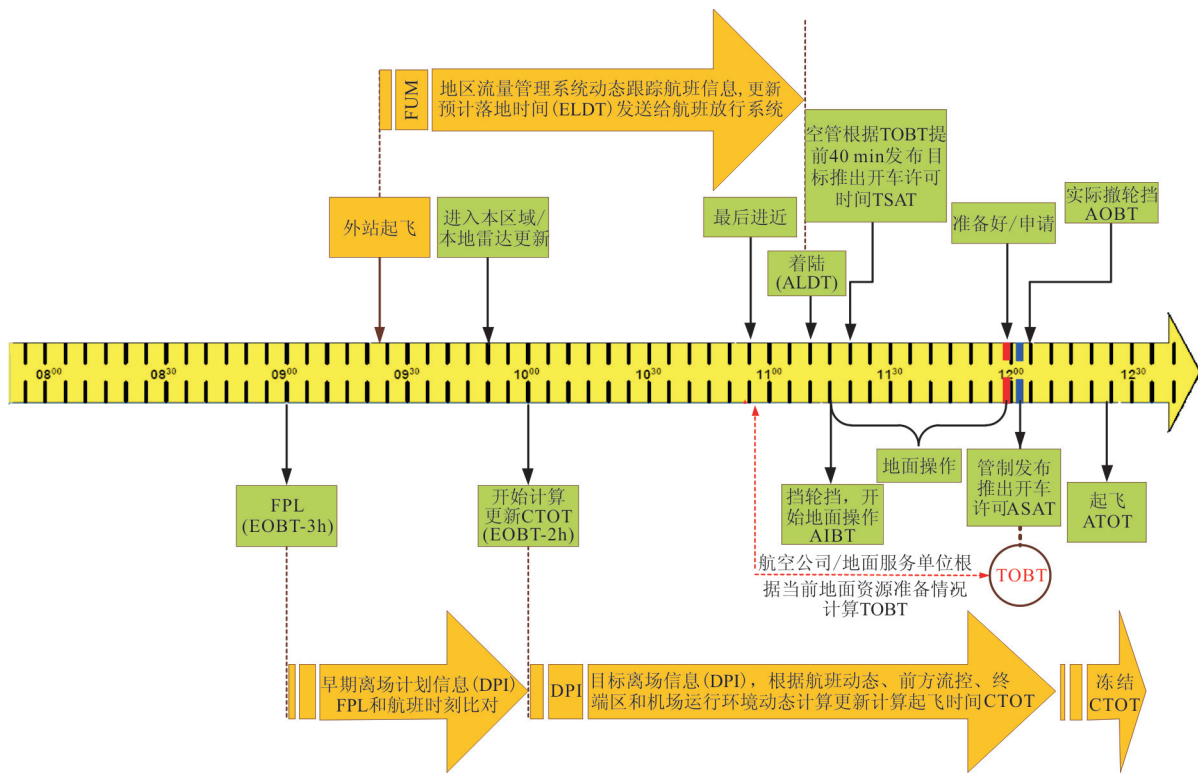


图 9 机场协同决策里程碑方法

Fig. 9 Milestone approach in A-CDM

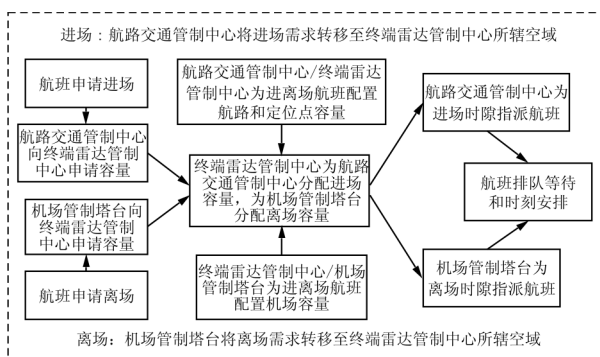


图 10 高密度进离场管理运行概念

Fig. 10 HDDAM concept of operations

在此概念框架下,通过融合自动化和态势共享展示功能,协助所有管制单位对空中交通进行高效规划和管理,并推动个体与单位之间的高效决策。对于离场航班,航路交通管制中心(Air Route Traffic Control Centers,简称 ARTCC)负责设置所有定位点的容量,终端雷达管制中心(Terminal Radar Approach Control Facilities,简称 TRACON)负责为机场分配容量时隙,满足航路交通管制中心的容量限制和空域需求,机场交通管制塔台

(Airport Traffic Control Towers,简称 ATCT)负责为每个时隙分配满足运行要求的航班,此方法可保证每个管制单位均能管理辖区范围内的交通。对于进场航班,采取类似于离场航班的方法进行管理,即每个机场交通管制塔台负责设置机场容量,终端雷达管制中心负责为每条进场航路分配进场时隙,航路交通管制中心负责为航班分配可用进场航路。

### (3) 多阶段协同管理机制

除了航空运输生产主体之间的协同管理机制之外,对于机场不同运行阶段的资源供需平衡协同管理模式也得到研究和关注。图 11 所示为长期规划、中/短期规划和执行层面等不同阶段对应的机场供需平衡管理模式,该过程由资源驱动,不同阶段的供需平衡过程存在一定差异并相互衔接。每一个独立的过程均从“外部世界”接收或是向其提供数据信息,例如空管中心、航空公司/机场具体数据(虚线)或是早期规划周期(实线)中实施的供需平衡。

在平衡机场资源供需时,考虑的主要因素包括



空域运行要求、交通需求、可用容量计划和解决方案目录等。供需失衡探测案例主要包括:不满足目标性能水平的探测,跑道负载计划的确定和修正,滑行道负载计划的确定和修正,停机位负载计划的确定和修正,除冰资源负载计划的确定和修正等。

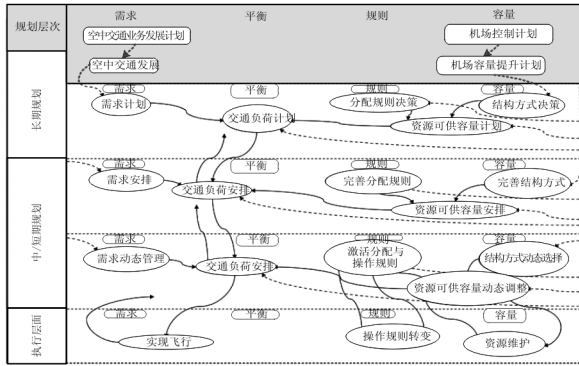


图 11 机场资源供需平衡管理模式

Fig. 11 Pattern of resource DCB in airfield area

### 2.3 逻辑关系

结合 2.1 节和 2.2 节阐述的相关内容,在机场飞行区资源调度体系中,理论方法、系统工具和管理机制等要素之间相互交互,存在一定的逻辑关系,具体如图 12 所示。

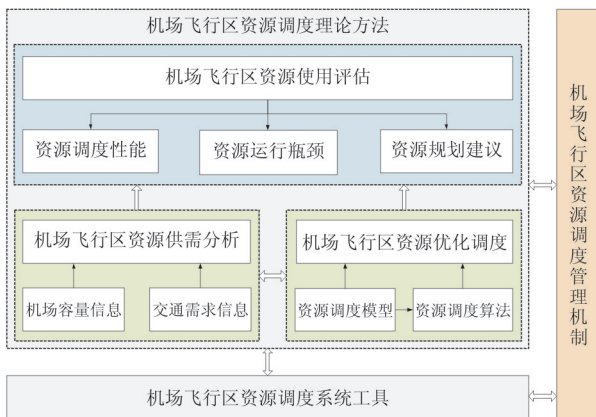


图 12 机场飞行区资源调度体系要素逻辑关系

Fig. 12 Logical relationship of elements in the framework of resource scheduling in airfield area

从图 12 可以看出,理论方法、系统工具、管理机制三者之间存在双向的交互反馈。理论方法为系统工具研发的基础,而系统工具的运行性能对理论方法的改进完善和丰富发展提出新的要求;系统

工具是理论方法的技术实现,也是管理机制实施的“硬环境”;管理机制是理论方法建模和系统工具研发的“软环境”,而理论方法建模和系统工具研发能反映管理机制的优劣。在理论方法体系模块中,资源供需分析是飞行区资源调度的基础研究支撑,资源优化调度是飞行区资源调度的核心研究内容,资源使用评估则是飞行区资源调度的效果评价手段。

### 3 结束语

为切实解决机场飞行区资源调度问题,需加强多阶段、多视角、多目标、系统化的研究与应用。多阶段涵盖战略、预战术、战术等,也可包括事后分析;多视角涵盖微观与宏观、进场与离场、民航与军航、时间与空间、静态与动态、常态与应急等;多目标涵盖安全、容量、延误、效率、环境、公平性、可预测性等;系统化包括跑道、滑行道、停机位等资源的集成考虑,以及规划设计、运行管理、性能评估的集成考虑。

从国外航空运输系统发展历程来看,原型系统研发在工程建设中具有不可替代的重要作用,也是后续商业系统开发的基础,可大大减少因需求不确定而导致的额外开发成本,并提高系统在实际运行中的可用性。在使用一套成熟的飞行区资源调度系统之前,需经历概念论证、系统设计、原型系统研发与测试、商业系统研发与测试、正式运行与推广等一系列过程。

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、近期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一。在后续的研究系列之二和研究系列之三,将分别对飞行区资源调度的发展脉络与趋势,研究热点与挑战等问题进行深入的研究与分析。

### 参考文献

[1] Soomer M J, Geert J F. Scheduling aircraft landings using airlines' preferences[J]. European Journal of Operational Research, 2008, 19(1): 277-291.  
 [2] 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.  
 [3] International Civil Aviation Organization. Aerodromes-Vo-

- lume I, Aerodrome design and operations[R]. AN14-1, Quebec: ICAO, 2016.
- [4] 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)
- [5] 郭海琦. 机场飞行区运行仿真建模与系统开发[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.  
Guo Haiqi. Airport airside operation simulation modeling and system developing[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009. (in Chinese)
- [6] 曾鑫. 飞行区防碰撞研究[D]. 成都: 中国民用航空飞行学院, 2009.  
Zeng Xin. The research of prevent collisions at airfield[D]. Chengdu: Civil Aviation Flight University of China, 2009. (in Chinese)
- [7] Deau R, Gotteland J B, Durand N. Airport surface management and runways scheduling[C]//The 8th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar. Washington, D. C., Brussels: FAA & EUROCONTROL, 2009: 1-9.
- [8] Malik W, Gupta G, Jung Y. Managing departure aircraft release for efficient airport surface operations[C]//The AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Virginia: AIAA, 2010: 7276-7283.
- [9] 薛清文. 大型机场场面停机位和滑行道调度的理论研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.  
Xue Qingwen. Theory research on scheduling of taxiway and gate at hub airport[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017. (in Chinese)
- [10] 中国民用航空局. MH 5001-2013 民用机场飞行区技术标准[S]. 北京: 中国民用航空局, 2013.  
Civil Aviation Administration of China. MH 5001-2013 aerodrome technical standards[S]. Beijing: CAAC, 2013. (in Chinese)
- [11] US Department of Transportation. 14 CFR 139.5 federal aviation regulations-definitions [S]. Washington, D. C.: FAA, 2013.
- [12] Transport Canada. Civil aviation terminology system[EB/OL]. [2016-10-13]. <https://www.tc.gc.ca/eng/civilaviation/menu.htm>.
- [13] 潘卫军. 空中交通管理基础[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2005.  
Pan Weijun. Basis of air traffic management[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2005. (in Chinese)
- [14] Balakrishnan H, Jung Y. A framework for coordinated surface operations planning at dallas-fort worth international airport[C]//The AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit. Virginia: AIAA, 2007: 6553-6560.
- [15] 林伟伟, 齐德昱. 云计算资源调度研究综述[J]. 计算机科学, 2012, 39(10): 1-6.  
Lin Weiwei, Qi Deyu. Survey of resource scheduling in cloud computing[J]. Computer Science, 2012, 39(10): 1-6. (in Chinese)
- [16] 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)
- [17] 汤兆平, 秦进, 孙剑萍, 等. 不确定条件下铁路应急资源调度多目标优化方法研究[J]. 铁道学报, 2018, 40(1): 9-16.  
Tang Zhaoping, Qin Jin, Sun Jianping, et al. Multi-objective optimization method for dispatching of railway emergency resources under uncertainty conditions[J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(1): 9-16. (in Chinese)
- [18] Clare G, Richards A G. Optimization of taxiway routing and runway scheduling[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2011, 12(4): 1000-1013.
- [19] Okwir S, Correias A. Collaborative decision making(CDM) in airport surface: Europe vs USA implementations, challenges and best practices[C]//The Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference(ICNS). New York: IEEE, 2014: G2-1-G2-15.
- [20] Ball M O, Chen C Y, Hoffman R, et al. Collaborative decision making in air traffic management: current and future research directions[M]//Anon. New Concepts and Methods in Air Traffic Management, 2001: 17-30.
- [21] 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)
- [22] Marin A G. Airport management: taxi planning[J]. Annals of Operations Research, 2006, 143(1): 191-202.
- [23] 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)
- [24] 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)
- [25] 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.
- [26] 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, 1-6.

- [27] Beasley J E, Krishnamoorthy M, Sharaiha Y M, et al. Scheduling aircraft landings—the static case[J]. *Transportation Science*, 2000, 34(2): 180-197.
- [28] 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)
- [29] Balakrishnan H, Chandran B. Scheduling aircraft landings under constrained position shifting[C]// *The AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*. Virginia: AIAA, 2006: 6230-6238.
- [30] 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 algorithm[J]. *Transport and Computer*, 2008, 26(6): 39-42. (in Chinese)
- [31] 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)
- [32] 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.
- [33] Heidt A, Helmke H, Kopolke M, et al. Robust runway scheduling under uncertain conditions[J]. *Journal of Air Transport Management*, 2016, 56: 28-37.
- [34] Kopolke 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.
- [35] Chen D, Hu M H, Zhang H H, et al. A network based dynamic air traffic flow model for en route airspace system traffic flow optimization[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2017, 106: 1-19.
- [36] 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)
- [37] Heblis S J, 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.
- [38] Bertsimas D, Frankovich M, Odoni A R. Optimal selection of airport runway configurations[J]. *Operations Research*, 2011, 59(6): 1407-1419.
- [39] 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.
- [40] 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)
- [41] 朱新平, 汤新民, 韩松臣. A-SMGCS 滑行道冲突预测与避免控制[J]. *南京航空航天大学学报*, 2011, 43(4): 504-510.  
Zhu Xinping, Tang Xinmin, Han Songchen. Conflict prediction and avoidance control for A-SMGCS taxiway[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2011, 43(4): 504-510. (in Chinese)
- [42] 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.
- [43] 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)
- [44] 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*. Indiana: AIAA, 1996: 5651-5660.
- [45] Andre A D, Hooey 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.
- [46] 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.
- [47] 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.
- [48] Yin J N, Hu M H, Ma Y Y, et al. Airport taxi situation

- awareness with a macroscopic distribution network analysis [J/OL]. [2018-01-03]. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11067-018-9402-5>.
- [49] 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.
- [50] Babic O, Teodorovic D, Tosic V. Aircraft stand assignment to minimize walking[J]. *Journal of Transportation Engineering*, 1984, 110(1): 55-66.
- [51] Yan S, Huo C M. Optimization of multiple objective gate assignments[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2001, 35(5): 413-432.
- [52] 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)
- [53] 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)
- [54] 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.
- [55] 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.: FAA & EUROCONTROL, 2012: 1-8.
- [56] 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.
- [57] 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.
- [58] 赵巍飞, 侯文涛, 岳仁田. 基于推出率控制的机场拥挤管理策略研究[J]. *科学技术与工程*, 2014, 14(5): 309-313.  
Zhao Yifei, Hou Wentao, Yue Rentian. Research on strategy of airport congestion management based on pushback rate control [J]. *Science Technology and Engineering*, 2014, 14(5): 309-313. (in Chinese)
- [59] Gunther Y, Inard A, Werther B, et al. Total airport management (operational concept and logical architecture)[R]. TAM\_OCD\_short\_v1.0, Brussels: EUROCONTROL & DLR, 2006.
- [60] Spies G, Piekert, F, Marsden A, et al. Operational concept for an airport operations center to enable total airport management[C]//The 26th International Congress of the Aeronautical Sciences. Anchorage: ICAS, 2008: 1-10.
- [61] 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). Hammamet: IEEE, 2013: 1-5.
- [62] 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)
- [63] 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.
- [64] 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)
- [65] Bolczak C N. National Airspace system performance baseline I: ATC-preferred vs. great circle routes[R]. MTR 97W0000019, Virginia: The MITRE Corporation, 1997.
- [66] Bolczak C N. National airspace system performance baseline II: civilian access to special use airspace [R]. MTR 97W0000041, Virginia: The MITRE Corporation, 1997.
- [67] Bolczak C N, Hoffman J H, Jensen A J, et al. National airspace system performance measurement: overview[R]. MTR 97W0000035, Virginia: The MITRE Corporation, 1997.
- [68] Fron X. ATM performance review in Europe[C]//The 2nd USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar. Washington, D. C.: FAA & EUROCONTROL, 1998: 1-11.
- [69] European Organisation for the Safety of Air Navigation. Performance review report of the European air traffic management system in 1999[R]. PRR3-1999, Brussels: EUROCONTROL, 2000.
- [70] International Civil Aviation Organization. Air navigation services performance[R]. A35-WP/158, EC/24, TE/22, Quebec: ICAO, 2004.
- [71] International Civil Aviation Organization. 2013-2028 global air navigation plan [R]. Doc 9750-AN/963, Quebec:

- ICAO, 2013.
- [72] 中国民用航空局空管行业管理办公室. 空管单位安全绩效管理应用指导材料[R]. IB-TM-2016-002, 北京: 中国民用航空局, 2016.  
Office of Air Traffic Management, Civil Aviation Administration of China. Guidance manual for safety performance management of air traffic management units[R]. IB-TM-2016-002, Beijing: CAAC, 2016. (in Chinese)
- [73] 曾波平, 赵颖. 中国民用机场绩效管理[M]. 北京: 中国民航出版社, 2010.  
Zeng Boping, Zhao Ying. Performance management of Chinese civil airports[M]. Beijing: China Civil Aviation Press, 2010. (in Chinese)
- [74] Gulding J, Knorr D, Roseo M, et al. US/Europe comparison of ATM-related operational performance[J]. Air Traffic Control Quarterly, 2010, 18(1): 5-27.
- [75] Morisset T, Odoni A R. Capacity, delay, and schedule reliability at major airports in Europe and the United States [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2011, 2214: 85-93.
- [76] Federal Aviation Administration. SIMMOD: the airport and airspace simulation model: reference manual[R]. AT-AC-HNTB-04118, Washington, D. C.: FAA, 1987.
- [77] European Organisation for the Safety of Air Navigation. RAMS: Re-organized ATC mathematical simulator [EB/OL]. [1996-05-13]. <https://www.isa-software.com/>.
- [78] Jeppesen Company. Total airspace and airport modeler (TAAM): rapid airport and airspace simulation modeling [EB/OL]. [1999-03-24]. <http://www1.jeppesen.com/aviation/products/taam/total-airspace-airport-modeler.jsp>.
- [79] 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)
- [80] Smith C, Piggott A, Morris C, et al. Final approach spacing tool[C]// The 2nd USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar. Washington, D. C.: FAA & EUROCONTROL, 1998: 1-13.
- [81] European Organisation for the Safety of Air Navigation. Phare advanced tools: arrival manager final report [R]. DOC 98-70-18, Volume 2 of 10, Brussels: EUROCONTROL, 1999.
- [82] European Organisation for the Safety of Air Navigation. Phare advanced tools: departure manager final report[R]. DOC 98-70-18, Volume 5 of 10, Brussels: EUROCONTROL, 1999.
- [83] Australian Government. Runway allocator: interactive runway use analysis tool[R]. Canberra: Department of Transport and Regional Services, 2006.
- [84] Atkins S, Jung Y, Brinton C, et al. Surface management system field trial results [C]// The 4th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Forum. Chicago: AIAA, 2004: 147-159.
- [85] European Organisation for the Safety of Air Navigation. Airport CDM operational concept document[R]. Brussels: EUROCONTROL, 2006.
- [86] Dippe D A. Taxi and ramp management and control system (TARMAC) [C]// American Control Conference. New York: IEEE, 1990: 529-534.
- [87] International Civil Aviation Organization. Advanced surface movement guidance and control systems (A-SMGCS) manual[R]. Doc 9830, Quebec: ICAO, 2004.
- [88] 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)
- [89] 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)
- [90] CDM-TF, European Organisation for the Safety of Air Navigation. Airport CDM implementation-the manual [R]. Brussels: EUROCONTROL, 2006.
- [91] The MITRE Corporation. The high density departure and arrival traffic management (HDDAM) concept [R]. MP 120146, Virginia: The MITRE Corporation, 2012.

### 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)