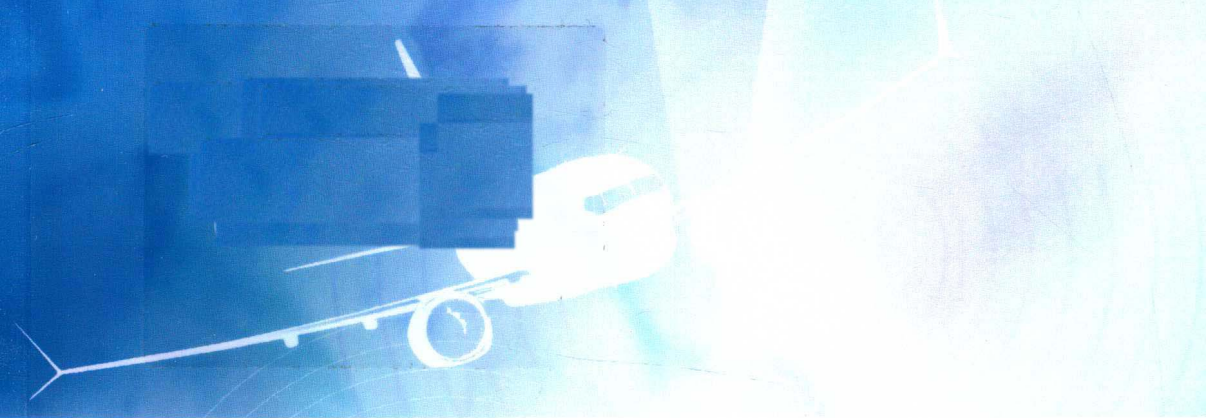




复杂机场航班起降调度 理论与方法

张启钱 卜 建 著



科学出版社

复杂机场航班起降调度 理论与方法

张启钱 卜 建 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书具有较强的系统性、前瞻性和应用创新性,是国内第一部全面深入介绍复杂机场航班起降调度理论与方法的学术专著,主要内容包括:综述航班调度领域国内外相关研究与应用的现状以及面临的热难点和关键问题;建立起降航班流态势属性测度模型与方法,阐述复杂机场起降航班流的运行特性;提出复杂机场航班起降独立调度、联合调度和协同调度的模型与方法体系。

本书适合高等院校民航运输相关专业的本科生、研究生,以及从事空中交通管理的科研人员和行业人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

复杂机场航班起降调度理论与方法/张启钱,卜建著. —北京:科学出版社, 2017.11

ISBN 978-7-03-055416-1

I. ①复… II. ①张… ②卜… III. ①机场—航班—调度 IV. ①F560.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 282514 号

责任编辑: 阚 瑞 余 丁 / 责任校对: 马路遥

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京建宏印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 11 月第 一 版 开本: 720 × 1000 B5

2018 年 1 月第二次印刷 印张: 8 3/4 插页: 2

字数: 160 000

定价: 58.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前言

航空运输业的快速发展引发空中交通流量持续增长,空中交通供需矛盾日益加剧。机场跑道系统是航空系统延误的主要源头,提升跑道运行效率是维持和增加整个空中交通系统容量的关键。因此,系统地研究复杂机场航班起降调度理论与方法,科学地配置机场有限的时空资源是提升机场运行安全与效率,缓解航班延误的重要手段和必然选择。

本书全面分析航班调度领域国内外理论研究和应用现状及面临的热难点、关键点问题,首次阐述复杂机场起降航班流的运行特性,系统提出复杂机场航班起降独立调度、联合调度和协同调度的模型与方法体系,主要内容包括以下几方面。

(1) 研究复杂机场起降航班流运行特性理论,给出航班流流量、密度和速度相关定义及其相互关系;遴选对交通密度敏感的基础状态指标和当量交通量复合指标,建立起降航班流态势属性测度模型与方法;分别采用实测数据、数学建模和微观仿真方法,建立起降航班流互作用模型,揭示起降航班流之间的耦合制约影响特征,为开展复杂机场航班起降调度方法研究提供理论基础和依据。

(2) 研究复杂机场航班起降独立调度方法。基于滚动时域控制策略的单机场单跑道进场多目标调度模型,采用遗传算法高效求解了延误时间最小、延误成本最小以及混合目标下的优化调度结果;建立多机场系统离场优化调度模型并设计禁忌搜索算法进行求解,采用蒙特卡罗方法验证分析不同定位点限制间隔和飞行时间对排序结果的影响。研究可为单机场进场高峰时段和多机场离场运行提供决策参考。

(3) 研究复杂机场航班起降联合调度方法。以滚动时域控制策略为基础,考虑多跑道进离场管制运行条件和安全要求等限制因素,分别构建航班延误总时间最小的单目标,以及权衡航班延误与管制工作负荷的多目标优化函数,建立多跑道起降航班联合调度动态排序模型,设计基于滚动时域控制的遗传算法,验证不同目标设置下的优化调度性能,可提升不同决策目标下多跑道机场运行能力和安全性。

(4) 研究复杂机场航班起降协同调度方法。提出多机场系统起降航班流量协同调配方法,建立多机场开放网络模型和用户均衡配流模型,分析不同均衡约束参数值下结果敏感性;研究多主体决策下航班起降次序协同调度方法,采用多智能体系统建立航班次序调度协调交易模型和次序交换调度模型,实现协同决策机

制下航班起降顺序的二次分配。研究可为科学平衡多机场系统容流关系，提升协同决策环境下航班运行效率提供理论方法支撑。

本书的研究不仅完善了航班调度理论与方法，且对复杂机场规划、运行及管理等方面具有较强的指导意义。本书得到了南京航空航天大学胡明华教授的长期指导和帮助、得到了国家空管飞行流量管理技术重点实验室张洪海、王艳军、刘继新、田勇、赵征、谢华、彭瑛等老师和李印凤、杨磊、袁立罡、尹嘉男、施赛峰、杨晶妹等同学和朋友的大力支持、协助编写和出版资助，在此表示衷心感谢！限于作者水平，书中难免有不妥之处，恳请读者批评、指正！

张启钱

2017年8月1日

注 释 表

F_{ARR}	跑道到达流量
μ_{ARR}	跑道跟进到达航空器间隔余度均值
σ_{ARR}	跑道跟进到达航空器间隔余度方差
p	航空器序号
P_1	机型代号
P_2	机型代号
x	横坐标，正方向表示东
y	纵坐标，正方向表示北
h	惯性高度
h_p	气压高度
ϕ	航向角
γ	航迹角
φ	倾斜角
α_t	发动机安装角
α	几何安装角
W_x, W_y, W_h	风速在东、北、前三个方向分量
$\dot{W}_x, \dot{W}_y, \dot{W}_h$	风速加速度在东、北、前三个方向分量
$\dot{m}_f$	燃油消耗率
M	马赫数
V_{CAS}	修正空速
V_g	地速
p	大气压力
a	声速
$()_{sl}$	修正海平面气压参数
K_m	飞行流量的月变化系数
K_w	飞行流量的周变化系数
K_{wav}	不同流向航空器比例
K_{Π}	不同高度层航空器比例

续表

K_{area}	不同区域航空器比例
n_{way}^i	i 航路走向上航空器的数量
N_{way}	航路上航空器总数
n_{Π}^i	i 高度层上航空器数量
n_{area}^i	i 分区内航空器数量
N_{area}	目标区域内的航空器总数
h_d	机头间距
L_n	第 n 架飞机的机身长度
$h_{d,n+1}$	第 n 架与第 $n+1$ 架飞机之间的间隔
$\overline{u}_t^t$	时间平均速度
$\overline{u}_t^s$	空间平均速度
$\overline{V}_t$	t 时刻终端区内交通流平均流速
$S_{V,t}$	速度标准差
C_t	交通混合系数比
S_t^{hd}	航向标准差
$N_{e,t}$	当量航班数
U_t	时刻 t 终端区交通拥堵状态值
C_p	终端区最大瞬时容量
K_t	基础状态指标系数
$k_{v,t}$	时刻 t 速度指标系数
$k_{s^v,t}$	时刻 t 速度标准差指标系数
$k_{s^{hd},t}$	时刻 t 航向标准差指标系数
$k_{c,t}$	时刻 t 交通混合比指标系数
V_i	i 机型航空器进近速度
δV_i	i 机型航空器速度不确定性, 假设该值符合均值为 0, 标准差为 σV_i 的正态分布
X_n	航空器 n 距最后进近航段起点的距离
p_i	i 机型航空器的概率
t_{L0}	航空器 L 穿越跑道端的时刻
D	最后进近航段长度
S_{ij}	最后进近过程中 i 机型航空器跟随 j 机型航空器飞行应保持的最小间隔
μ	管制员针对连续进入最后进近航段航空器实施的时间间隔
R_{a_i}	i 机型航空器进场跑道占用时间

缩 略 语

4D	4 Dimensions	4 维
ACAS	Airborne Collision Avoidance System	机载防撞系统
ADS-B	Automatic Dependent Surveillance-Broadcast	广播式自动相关监视
AMAN	Arrival Management	进场管理
ANN	Artificial Neural Network	人工神经网络
AOC	Airlines Operation Center	运行控制中心
ASBU	Aviation System Block Update	航空系统组块升级
ASA	Automatic Slot Assignment	自动时隙分配
ATWIT	Air Traffic Workload Input Technique	空中交通负荷输入技术
ASP	Aircraft Sequencing Problem	飞机调度问题
ATC	Air Traffic Control	空中交通管制
ATFM	Air Traffic Flow Management	空中交通流量管理
BFGS	Broyden-Fletcher-Goldfard-Shanno Method	BFGS 算法
BP	Back Propagation	反向传播
BDI	Belief-Desire-Intention	信念-愿望-意图
CDM	Collaborative Decision Making	协同决策
CPS	Constrained Position Shift	约束位置交换
CSH	Cheapest Search Heuristic	最廉价启发式搜索算法
DMAN	Departure Management	离场管理
ETA	Estimated Time of Arrival	预计到达时间
ETD	Estimated Time of Departure	预计离场时间
FAA	Federal Aviation Administration	美国联邦航空局
FCFS	First Come First Served	先到先服务算法
GA ⁴	Genetic Algorithm	遗传算法
ICAO	International Civil Aeronautical Organization	国际民航组织
IFR	Instruments Flight Rules	仪表飞行规则
RHC	Receding Horizon Control	滚动时域控制
MAS	Multi-Agent System	多智能体系统
MIT	Minutes-in-Tail or Miles-in-Tail	尾随间隔

续表

MOOM	Multi-Object Optimization Model	多目标优化模型
MADSP	Muti-Airport Departure Scheduled Problem	多机场离场排序问题
STA	Scheduled Time of Arrival	实际到达时间
SID	Standard Instrument Departure	标准仪表离场程序
SADSP	Single-Airport Departure Scheduled Problem	单机场离场排序问题
TA	Time Advanced	时间提前

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 研究现状综述	2
1.2.1 研究现状	2
1.2.2 研究分析	6
1.3 研究内容及创新	6
1.3.1 研究内容	6
1.3.2 研究方案	7
1.3.3 创新工作	9
1.4 章节安排	10
1.5 本章小结	11
第 2 章 复杂机场起降航班流运行特性分析	12
2.1 概述	12
2.2 复杂机场航班运行环境	12
2.2.1 空域运行环境	12
2.2.2 管制运行环境	13
2.3 机场起降航班流基本属性	14
2.3.1 航空器基本属性	14
2.3.2 航班流基本属性	16
2.3.3 航班流态势属性	21
2.4 起降航班流耦合运行特性	27
2.4.1 基于实测数据的起降航班流特性	27
2.4.2 基于数学模型的起降航班流特性	40
2.4.3 基于微观仿真的起降航班流特性	47
2.5 本章小结	52

第3章 复杂机场航班起降独立调度研究	53
3.1 概述	53
3.2 航班着落多目标优化调度模型	53
3.2.1 基于RHC的多目标优化遗传调度算法	53
3.2.2 多目标优化调度着落仿真验证	58
3.3 航班离场多目标优化调度模型	61
3.3.1 多目标优化调度模型与算法	61
3.3.2 多目标优化调度离场仿真验证	68
3.4 本章小结	75
第4章 复杂机场航班起降联合调度研究	76
4.1 概述	76
4.2 问题描述	76
4.3 多跑道起降单目标动态优化调度方法	78
4.3.1 基于滚动时域控制策略的航班动态排序模型	78
4.3.2 基于滚动时域控制策略的遗传算法	79
4.3.3 仿真验证	81
4.4 多跑道起降多目标动态优化调度方法	84
4.4.1 基于RHC策略的航班动态排序模型	84
4.4.2 基于RHC策略的遗传算法	86
4.4.3 仿真验证	88
4.5 本章小结	92
第5章 复杂机场航班起降协同调度研究	93
5.1 概述	93
5.2 基于开放网络的起降流量协同调配方法	93
5.2.1 问题描述	94
5.2.2 开放机场网络模型	95
5.2.3 用户均衡配流模型	98
5.2.4 仿真验证	99
5.3 基于多体决策的起降次序协同调度方法	104
5.3.1 问题描述	104
5.3.2 多体协同决策模型	104
5.3.3 AOC Agent 协调推理模型	106

5.3.4 AOC Agent 次序交换效用	108
5.3.5 仿真验证	112
5.4 本章小结	117
第 6 章 总结与展望	118
6.1 本书的主要工作	118
6.2 本书的研究展望	119
参考文献	121
彩图	127

第1章 绪 论

1.1 研究背景与意义

随着全球化时代的到来,航空运输已经成为近四十年来最主要且不可或缺的交通方式之一。在国际社会经济环境错综复杂的形势下,我国航空运输需求持续旺盛,空中交通量增速迅猛,2013年,全国民航运输机场完成旅客吞吐量7.54亿人次、货邮吞吐量1258.52万吨、起降731.54万架次,分别比2012年增长11.0%、4.9%和10.8%,目前,国内年旅客吞吐量1000万人次以上的运输机场有24个,其中,北京、上海和广州三大城市机场旅客吞吐量占全部机场旅客吞吐量的29.0%^[1]。然而,空中交通需求与国家空域系统容量、空中交通管理能力之间的失衡导致了空中交通系统抗干扰能力不强,空中交通延误频发,旅客满意度持续下降,航班延误已经成为社会广泛关注和议论的焦点,损害了民航的社会形象,在一定程度上阻碍了民航和社会经济发展的进程^[2,3]。据《中国大陆地区2014年航班准点率报告》显示,2014年,中国大陆地区机场平均放行准点率为65.44%,乘客和机组花在等待飞机起飞上的时间累计长达122051896min,客运航班平均延误时间为19min,已经成为全球航班延误最严重的国家^[4]。为满足持续增长的空中交通需求,各界人士从不同角度探寻空中交通系统扩容方案。然而,机场新改扩建往往需要花费大量时间,且受土地和空域等客观资源的限制,特别是多机场系统内的机场扩建更是举步维艰、耗时耗力,难以在短期内满足空中交通需求的增长,从而使得机场成为整个国家空中交通网络的瓶颈点。

复杂机场一般是指物理规模庞大、空域网络交错、交通流量密集、资源限制多的大型繁忙机场,呈现运行高风险、保障高压、管制高难度等显著特点,是空域拥挤、航班延误、冲突频发的热点区域,是影响整个空中交通运行效率的核心节点,也是国家空中交通网络瓶颈点中亟须突破的难点。20世纪末,欧洲提出机场协同决策理念,旨在通过在空管、航空公司和机场之间共享交通运行信息,建立共同的情景意识,从而协商确定航班起飞时刻与推出时刻,一定程度上缓解了机场交通拥堵问题,减少尾气的排放和噪声污染,提升旅客的舒适感。2012年我国民航局适时部署全国机场协同决策(Collaborative Decision-Making, CDM)系统建设,以期提升复杂机场运行效率、经济性和环保性,缓解“关舱门后旅客长时间等待问题”。然而,由于缺乏科学、明确的空中交通流量管理核心技术方法

和系统支撑,当前协同决策仅停留于信息共享的初级阶段,难以充分实施协同决策思想,提升机场系统服务能力。随着航空运输业的快速发展,空中交通需求的迅速增长,人为决策的空中交通管理模式势必难以满足日益增长的空中交通需求,必然引发机场飞机严重积压与高成本的空中等待,不仅影响航空运输企业效益和信誉、影响社会经济的发展,还影响航班正常飞行、危及飞行安全。因此,基于复杂机场现实运行问题,面向我国建设现代化空中交通管理系统宏伟战略目标,以及国际民航组织发布的航空系统组块升级(Aviation System Block Update, ASBU)计划中机场运行绩效领域升级要求,亟须开展复杂机场航班起降调度理论与方法研究,探索跑道起降航班流基本属性与耦合特性,系统建立各类跑道类型和运行模式下的起降航班调度方法,完善空中交通管理相关理论基础和方法体系,对于缓解机场交通拥塞,提高系统资源利用率,增加飞行流量,保障飞行安全,减少航班延误,提高航空运输企业效益和信誉,促进社会经济发展等具有重要意义。

(1) 有利于科学制定机场拥塞缓解策略。通过研究复杂机场起降航班流基本属性和耦合运行特性,揭示制约机场运行能力的关键要素,可为明确机场起降航班流调度策略实施对象、作用范围和持续时间提供决策依据。

(2) 有利于系统解决机场供需失衡问题。通过研究不同跑道类型和运行模式下航班起降调度问题,可以最优利用容量、最佳分配流量,系统性解决单跑道、多跑道、多机场等各种场景下容需失衡问题,以实现容量利用和流量分配的最优化与经济性。

(3) 有利于协同解决航班起降次序问题。通过研究多主体决策下的起降次序协同调度问题,综合考虑空管、机场和航空公司等各因素,为航班科学调配起降次序,以确保飞行安全,提高跑道利用率,减少延误损失,降低管制负荷,实现安全、高效和公平地调控航空器。

1.2 研究现状综述

1.2.1 研究现状

机场航班起降调度问题主要是航班排序问题,研究起步于20世纪80年代,取得了较为丰硕和系统的理论与应用研究成果,欧美等航空发达国家和地区已经逐步推行离场排序系统作为管制员的辅助决策工具。航班排序常用方法包括先到先服务、时间提前、约束位置交换、滑动窗优化以及模糊模式识别等算法。此外,还有研究通过建立问题的混合整数线性规划模型,采用分支定界法、

遗传算法或模糊方法等进行求解。按研究对象可分为进场排序、离场排序和进离场协同排序。

1. 进场排序问题

航班进场排序问题最早可追溯到 1980 年, Psaraftis 采用动态规划方法求解单机场航班调度问题, 并将该方法应用于进场航班排序^[5]。为求解方便, 该方法假设具有相同性质的工作以最小化加工成本为目标。Bianco 等在此基础上建立了进场排序问题的 NP (Non-Deterministic Polynomial) -hard 组合模型, 并发现当准备时间为 0 的情况下, 所构建的公式弱化为不对称旅行商问题, 表明跑道排序问题是一个 NP 完全问题^[6]。然而, 该研究忽略了航空器运行时间限制和非连续运行之间所需的时间间隔。事实上, 对于一个三元航空器组中的连续航空器施加时间间隔, 并不能自动保证第一和第三架航空器间满足间隔要求。Beasley 等采用混合整数线性规划作为描述跑道排序问题的基础, 通过计算结果表明建模工作的有效性与优越性^[7]。然而, 该方法无法在合理有限的时间内完成真实交通规模下的优化运算, 其主要原因是在弱线性规划松弛下采用“大 M”法模拟非凸结果。因此, 确定性建模与求解结果可以成为验证启发式算法有效性的佐证, 但无法应用于实际航班排序中。

由于航班排序问题是一个典型的 NP-hard 问题, 在很长的一段时间中, 研究者找不到一种高效的算法求解最优或者近似最优解。在 20 世纪 90 年代初, 随着人工智能的兴起, 研究者基于航班排序问题提出一些近似求解算法。其中最著名的是约束位置交换 (Constrained Position Shift, CPS) 启发式算法, 该算法通过寻找使得吞吐量最大的序列, 选择延误最小情况下吞吐量最大的排序方式, 可用于解决静态和动态航班着陆排序问题, 并通过采用快速仿真方法比较 CPS 与先到先服务策略, 验证了该算法的有效性和高效性, 成为了航班排序领域内的重要基础。至此, 贪心算法、元启发式算法等近似求解方法得到广泛关注。

1997 年, Bianco 等开展多跑道航班排序问题研究。研究将排序问题映射成具有序列相关调整时间和释放时间的确定性生产车间调度问题, 并提出了一种快速动态的局域启发式算法——最廉价启发式搜索 (Cheapest Search Heuristic, CSH) 算法^[6]。研究结果表明, 该算法与先到先服务相比可平均提升容量 30%, 降低延误 40%, 具有显著的优化效果。

2000 年, Carr 等提出了优先级排序概念, 将航空公司着陆偏好融入空中交通管制自动化的排序算法中^[8]。该优先级排序是将按照预计到达跑道时间排序的航班队列作为初始值, 而非先到先服务顺序。研究表明, 该方法相较先到先服务在减少调整航班数量上具有一定优势, 但可能导致排序效率的降低。

2006 年, Pinol 等在静态运行环境下进场排序研究基础上考虑动态落地时间

问题^[9]。研究为落地时间的动态变化定义了一个通用的决策框架, 即当需要制定排序决策时, 时间更替问题才会触发产生, 并且新决策的制定必须与旧决策具备外显关系。为求解落地时间的动态更替问题, 研究者采用三种算法: 一个精确优化和两个启发式优化。研究结果表明, 由于受时间限制, 启发式算法相较精确算法具有更好的求解质量。

2006 年, Balakrishnan 等提出的 CPS 算法可有助于维持航空器运行人员间的公平性并增加了着陆时间的可预测性^[10]。研究以 CPS 为基础建立跑道排序的动态规划算法, 以最大化吞吐量或最小化运行时间为目标, 考虑时间窗和优先权等相关系统约束, 为多跑道运行条件提供了优化思路。

2007 年, Bauerle 等研究了进场航班的排队过程以及蕴含的机场容量问题^[11]。研究认为航班到达时间间隔可假设为泊松过程, 并采用 M/SM/1 队列模拟单跑道运行。在此基础上, 研究拓展至双跑道运行, 构建了启发式路径选择策略, 包括公平抛硬币法、随机分割法、循环法、改进的加入最小负载法等。研究结果表明, 加入最小负载法产生的平均延误最小, 随机分割法结果最不理想。

2008 年, Soomer 等以单跑道为对象开展类似的工作, 并将航空公司成本考虑在内^[12]。研究构建混合整数线性规划模型与局域启发式算法, 以预计到达时间排序结果作为初始可行解, 并采用邻域交换和移动提升初始解效率。研究结果表明, 该算法可达到数分钟 100 架次的处理能力, 与实际运行相比, 能够为航空公司节省巨大成本。

2011 年, Yu 等提出了元胞自动机优化算法解决单跑道进场航班排序问题^[13]。该算法包含两个主要步骤: 首先采用元胞自动机仿真航班着陆过程, 得到一个较好的着陆顺序; 进而采用随机局域搜索算法从上一步可行序列中得到优化解。研究结果表明, 与基于线性规划的树搜索、启发式算法、蚁群优化、分散搜索和生物学算法等相比, 元胞自动机优化算法在绝大多数情况下无论是求解质量和运算速度均具有优越性。

随着多机场系统的兴起, 多机场进场航班排序成为研究热点。2010 年, Saraf 等分别以先到先服务、独立排序和繁忙机场优先三种方式研究进场排序问题, 并进行了实例验证与比较^[14]。2011 年, Daniel 等以航空公司为对象, 以航空公司运营、航班时刻表安排和多机场进场时刻排序为要点, 探讨多机场系统运行灵活性问题^[15]。2015 年, 马园园等引入多元受限时间窗理念, 建立了多机场终端区进场航班协同排序模型, 设计了带精英策略的非支配排序遗传算法, 系统研究了多机场终端区进场航班协同排序问题^[16-18]。

2. 离场排序问题

由于着陆航班较离场航班具有较高的优先级, 所以国内外学者的研究起初主

要集中于进场航班的调度问题上,离场航班排序研究较少。2001年,Anagnostakis等以自动化决策辅助系统为背景提出离场排序框架和算法,旨在辅助空中交通管制员管控离场交通,缓解场面拥堵与延误带来的不利影响^[19]。2004年,Capri等提出了离场航班排序的动态模型,考虑了变量的时变性,采用遗传算法求解单跑道离场问题,验证了模型与算法的高效性^[20]。2007年Atkin等提出了基于禁忌搜索算法的离场航班排序方法并应用于伦敦希思罗国际机场^[21]。2009年,Gupta等以达拉斯机场运行为背景,以最大化吞吐量、最小化系统延误和最大个体延误为多目标,兼顾效率与公平,以尾流间隔、离场点间隔为约束,兼顾跑道与空域,建立了基于混合整数线性规划的离场航班排序模型^[22]。该模型具有很强的通用性,并能够解决各类场景下的离场排队问题。2009年,王飞等考虑航班正常率、旅客延误成本和基尼系数等多目标问题,建立离场时隙控制的多目标优化方法,探讨了离场时隙分配多目标矛盾与转换^[23]。

3. 进离场协同排序问题

2010年,Atkin等研究发现,之前的研究由于面向机场和利益相关者的不同,航班排序所使用的目标与约束具有很大差异,但混合整数线性规划和遗传算法成为了研究该问题的标准模板^[24]。研究认为,跑道进场与离场排序之间具有强烈的相关性,并且跑道排序与机场场面运行问题具有强烈的相关性,需要联合考虑。2010年,Sherali等开始着眼进离场航班联合排序问题的研究^[25,26],采用不对称旅行商问题进行描述,以最小化运行时间为目标,考虑相关时间间隔和时间窗限制。在此基础上,2012年,Al-Salem等建立混合整数线性规划模型,构建有效的不等式和对称性约束^[27]。2013年,Hancerliogullari等开展多跑道混合运行模式下航班排序研究,旨在同时优化进离场航班运行效率^[28]。该方法将航班排序问题描述为具有非均等准备时间、目标时间和时间限制的平行机调度问题,并提出带间隔与准备时间的适应性直观延误成本的贪婪算法。

进离场协同排序问题涉及协同决策下的起降容量的转化。国内外学者在机场容流协同调配方面取得的许多进展可为研究进离场协同排序提供基础。Gilbo^[29]、余江等^[30]、马正平等^[31]和陈欣等^[32]以进离场延误航班总量最小为目标提出容流优化配置方法;Paolo等以最小化航班延误时间为目标建立优化模型,采用动态规划的方法研究容量配置问题^[33]。2000年,Gilbo等把进场与离场视为密切相关的过程,提出CDM下进离场协同流量管理策略和协同容流优化模型^[34]。2008~2009年,张洪海等基于容量动态限制和进离场容量相互转化,研究CDM下机场及终端区进离场流量与容量匹配问题,提出了容量利用和流量分配协同优化策略,可以在充分利用容量与最小化航班延误损失的同时兼顾航空公司的利益,使问题更趋合理^[35,36];并进一步综合考虑空中交通管制、航空公司和机场等因素,建立