

DOI:10.16356/j.1005-2615.2015.04.001

复杂终端区进场交通流优化排序方法研究

胡明华 马园园 田文 尹嘉男

(南京航空航天大学民航学院,南京,210016)

摘要:为提高终端区时空资源利用率,增强空中交通运行效率,研究了复杂终端区进场交通流优化排序问题。通过深入剖析终端区进场定位点、航路航线、多跑道系统等资源运行特性,综合考虑尾流间隔、移交间隔、多跑道运行间隔等各类约束限制,以及最小化航班延误时间、最大化跑道运行容量、最小化终端区飞行时间等优化目标,建立了复杂终端区进场交通流优化排序模型,并采用带精英策略的非支配排序遗传算法对所建模型进行求解。选取上海多机场组成的复杂终端区进行实例验证,仿真实验表明提出的优化方法相比先到先服务方法(First come first serve,FCFS),航班总延误时间减少 20.7%,终端区等待时间减少 60.7%,终端区进场交通流运行效率得到显著提升。

关键词:空中交通管理;复杂终端区;进场排序;多跑道;多目标优化

中图分类号:V355.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2015)04-0459-08

Optimized Sequencing and Scheduling Approach for Arrival Traffic Flow at Complex Terminal Area

Hu Minghua, Ma Yuanyuan, Tian Wen, Yin Jia'nan

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: In order to improve the spatio-temporal resource availability and the operational efficiency of air traffic at terminal area, the sequencing and scheduling problem of arrival traffic flow at complex terminal area is studied. By deeply analyzing the operational characteristics of arrival fix, route and runway system, constraints such as the wake turbulence separation, the control handoff separation and the multi-runway operating separation are considered synthetically. Then an optimized model for arrival sequencing and scheduling problem is established to balance the different targets such as minimizing the total delay of all arrival flights, maximizing the operational capacity of runway system and minimizing the flying time of all arrival flights at terminal area. Based on the theory of the elitist non-dominated sorting genetic algorithm, Pareto optimal solutions are searched in the solution space. Selecting the terminal area of Shanghai multi-airport system as an simulation example, the results show that the proposed method has a 20.7% reduction in flight delays, and a 60.7% reduction in flight waiting time at terminal area compared with the method of first come first serve(FCFS), which can significantly improve the efficiency of arrivals at complex terminal area.

Key words: air traffic management; complex terminal area; arrival sequencing and scheduling; multi-runway; multi-objective optimization

基金项目:国家自然科学基金民航联合研究基金(U1333202)资助项目;国家自然科学基金(71301074)资助项目;江苏省普通高校研究生科研创新计划(KYLX_0290)资助项目;中央高校基本科研业务费专项资金资助项目。

收稿日期:2015-07-01;**修订日期:**2015-08-01

作者简介:胡明华,男,教授,博士生导师,主要研究方向:飞行流量管理、机场和空域容量评估、交通运输规划与管理等。

通信作者:胡明华,E-mail: minghuahu@nuaa.edu.cn。

终端区作为机场飞行区与航路之间的过渡衔接区域,由于交通流快速汇聚和发散,航空器飞行过程的机动性较大,且运行环境具有一定的随机性、动态性和时变性,空中交通运行效率一直较为低下^[1]。特别是在多机场复杂终端区,机场间运行相互影响、航线结构错综复杂、空中交通高度密集、多种运行模式并存,因容量与流量失衡所致的空域拥堵和航班延误问题日益严重,且伴随高调配难度、高管制负荷、高安全风险等一系列运行问题。因此,如何对进场交通流进行优化排序,提高空域资源利用率,提高复杂运行环境下终端区运行效率,从而实现扩容增效与排堵保畅目标,已成为当前中国民航亟待解决的关键理论问题和重大现实需求。

国内外研究学者和科研机构针对终端区进场交通流管理问题已开展大量研究,并取得一系列理论和应用成果,主要集中在模式配置^[2]、容量管理^[3-4]、跑道分配^[5-7]、航班调度^[8-10]等方面,提出了先到先服务(First come first serve, FCFS)、约束位置交换、滑动时间窗、时间提前量等方法,研制了最后进近间隔工具 FAST、进场管理工具 AMAN、跑道分配工具 TNIP 等系统工具^[11-13]。上述成果虽较为丰富,但仍存在以下不足:(1)没有考虑多跑道构型及运行模式对排序过程的影响,忽略了跑道资源之间的协同交互与运行限制;(2)主要针对跑道资源进行调度,忽略了进场点资源调度对整个终端区飞行的影响;(3)优化目标大多从航空公司角度最小化航班延误,忽略了空管、机场、航空公司等各利益方之间的协同决策与综合权衡。

针对上述研究不足,本文从大都市圈机场群协同运行管理需求出发,以涵盖多个机场的复杂终端区为对象,通过建立复杂终端区进场交通流多目标优化排序模型,设计带精英策略的非支配排序遗传算法,对所建模型进行快速求解,旨在科学配置复杂终端区时空资源,优化调度复杂终端区航班序列,切实提升空中交通运行效率,从而缓解日益严重的空域拥堵和航班延误问题。

1 基本思路

根据复杂终端区空域结构与进场交通流运行特征,将航空器进场过程抽象如图 1 所示。

在复杂终端区内,包含多个机场、多个进场点、多条跑道,某一进场点可能被飞往不同目的机场的进场航班共同使用,且同一机场不同跑道运行模式对进场航班的降落过程亦会产生影响,进场点和跑

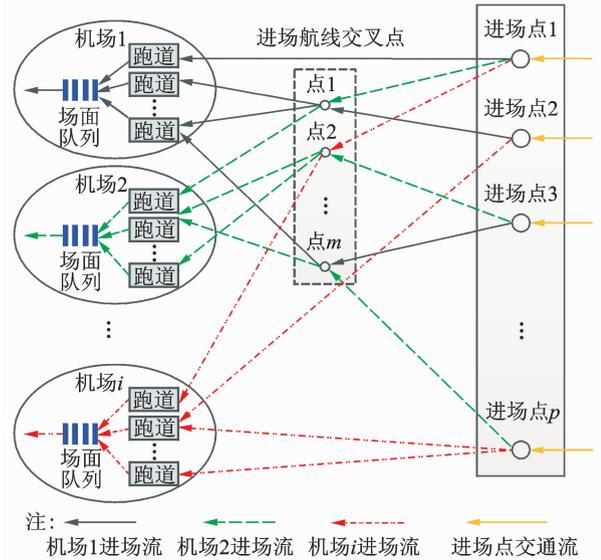


图1 终端区进场过程抽象

Fig. 1 Arrival process abstraction of terminal area

道等关键资源的配置策略将直接影响终端区进场交通流排序结果。考虑到当前研究主要针对跑道系统进行优化排序,未从整个终端区飞行过程审视进场排序问题,因此本文将复杂终端区进场交通流排序过程分为进场点排序和跑道排序两部分。其中,进场点排序主要考虑移交间隔、尾流间隔等约束限制,对通过相同进场点进入终端区并飞往区内各机场的进场交通流进行调度,实现科学高效的终端区初始进场排序;跑道排序主要考虑跑道运行模式、跑道运行间隔、尾流间隔等约束限制,对进场跑道时空资源进行调度,空间资源即为分配的跑道编号,时间资源即为跑道着陆时间。

本文旨在从时空资源协同配置角度研究复杂终端区进场交通流排序问题,为所有进场航班分配最优的进场点时间资源和跑道时空资源,切实提升复杂终端区进场交通流运行效率。

2 模型建立

2.1 变量定义

模型所使用的基本符号和变量定义包括:

A : 复杂终端区内的多机场集合;

R : 所有机场的进场跑道集合;

R_i : 机场 i 的进场跑道集合;

F : 研究时段内的进场航班集合;

F_{ij} : 使用第 i 个机场第 j 条跑道的进场航班集合;

t_{ijk} : 第 i 个机场第 j 条跑道的第 k 架航班的实际着陆时间;

e_{ijk} :第*i*个机场第*j*条跑道的第*k*架航班的计划着陆时间;

r_{ijk} :第*i*个机场第*j*条跑道的第*k*架航班通过进场定位点的时间;

$\kappa_{ijk_1k_2}$:使用第*i*个机场第*j*条跑道的第*k*₁架和第*k*₂架航班之间应满足的尾流间隔时间标准;

$\delta_{ijk_1k_2}$:0-1离散变量,若第*i*个机场第*j*条跑道的第*k*₁架航班先于第*k*₂架航班着陆,则为1,否则为0;

$\varphi_{ijk_1k_2}$:第*i*个机场第*j*条跑道的第*k*₁架与第*k*₂架航班之间应满足的同一仪表着陆系统航向道安全间隔时间标准;

$\phi_{ij_1k_1j_2k_2}$:第*i*个机场第*j*₁条跑道的第*k*₁架航班和第*j*₂条跑道的第*k*₂架航班之间应满足的相邻仪表着陆系统航向道安全间隔时间标准,即相关进近斜距;在独立进近模式下, $\phi_{ij_1k_1j_2k_2} = 0$;

$\epsilon_{ij_1k_1j_2k_2}$:0-1离散变量,若第*i*个机场第*j*₁条跑道的第*k*₁架航班先于第*j*₂条跑道的第*k*₂架航班着陆,则为1,否则为0;

P :复杂终端区进场定位点集合;

ζ_p :进场定位点*p*的管制移交间隔时间标准;

$\theta_{pk_1k_2}$:0-1离散变量,若航班*k*₁和*k*₂均通过进场定位点*p*,且航班*k*₁先于*k*₂通过,则为1,否则为0;

ω_{ijk} :第*i*个机场第*j*条跑道的第*k*架航班到达进场定位点的可行时间窗下限;

$\bar{\omega}_{ijk}$:第*i*个机场第*j*条跑道的第*k*架航班到达进场定位点的可行时间窗上限。

2.2 目标函数

通过深入剖析航空运输各方利益需求,分别从航班延误、跑道容量、飞行时间等3个角度建立优化目标。最小化航班总延误时间为

$$\min \sum_{i \in A} \sum_{j \in R_i} \sum_{k \in F_{ij}} |t_{ijk} - e_{ijk}| \quad (1)$$

最大化多机场系统跑道运行容量,等价转化为最小化跑道总调度时长,即最后一架进场航班与第一架进场航班的跑道着陆时间差值

$$\min \{ \max(t_{ijk}) - \min(t_{ijk}) \} \quad (2)$$

最小化进场航班终端区总飞行时间为

$$\min \sum_{i \in A} \sum_{j \in R_i} \sum_{k \in F_{ij}} (t_{ijk} - r_{ijk}) \quad (3)$$

2.3 约束条件

在多机场终端区进场运行管理过程中,航班应满足连续降落航空器尾流间隔、多跑道运行间隔、终端区进场定位点管制移交间隔、空域资源占用时间范围限制等。

连续降落航空器之间的尾流间隔限制为

$$t_{ijk_2} \geq \delta_{ijk_1k_2} (t_{ijk_1} + \kappa_{ijk_1k_2}) \quad \forall i \in A, \forall j \in R_i, \forall k_1, k_2 \in F_{ij} \quad (4)$$

同一跑道仪表着陆系统航向道上前后两架进场航空器之间的安全间隔限制为

$$t_{ijk_2} \geq \delta_{ijk_1k_2} (t_{ijk_1} + \varphi_{ijk_1k_2}) \quad \forall i \in A, \forall j \in R_i, \forall k_1, k_2 \in F_{ij} \quad (5)$$

相邻仪表着陆系统航向道上同时进近的航空器之间的安全间隔限制为

$$t_{ij_2k_2} \geq \epsilon_{ij_1k_1j_2k_2} (t_{ij_1k_1} + \phi_{ij_1k_1j_2k_2}) \quad \forall i \in A, \forall j_1, j_2 \in R_i, j_1 \neq j_2, \forall k_1 \in F_{ij_1}, k_2 \in F_{ij_2} \quad (6)$$

航班在终端区进场定位点的管制移交间隔限制为

$$r_{i_2j_2k_2} \geq \theta_{pk_1k_2} (r_{i_1j_1k_1} + \zeta_p) \quad \forall i_1, i_2 \in A, \forall j_1 \in R_{i_1}, j_2 \in R_{i_2}, \forall k_1 \in F_{i_1j_1}, k_2 \in F_{i_2j_2}, \forall p \in P \quad (7)$$

每架航班到达进场定位点的可行时间窗约束,即对其到达进场定位点的最早时间和最晚时间的范围限制为

$$\omega_{ijk} \leq r_{ijk} \leq \bar{\omega}_{ijk} \quad \forall i \in A, \forall j \in R_i, \forall k \in F_{ij} \quad (8)$$

式中:可行时间窗的下限 ω_{ijk} 是指根据航空器性能和当前序列位置,按照最短航线实施飞行活动,计算得到的航班到达进场点的最早时间;可行时间窗上限 $\bar{\omega}_{ijk}$ 是指根据航空器性能和载油量等数据,在确保航班足以着陆的前提下,计算得到航班到达进场点的最晚时间。

3 算法设计

3.1 算法流程

本文采用带精英策略的非支配排序遗传算法NSGA-II对所建多目标优化模型进行求解^[14-15],具体步骤如下:

第一步 分析多机场终端区空域结构和运行规则信息,获取各进场定位移交间隔,机场跑道数量和运行方式,航班计划和飞行数据等信息。

第二步 确定航班的进场定位点可行时间窗,根据时间窗进行编码,随机产生初始种群。

第三步 对初始父代种群执行二元锦标赛选择、交叉和变异等遗传操作,形成子代种群。

第四步 将当前进化代数对应的父代种群和子代种群合并,根据种群中所有个体编码,将基因位转换为初始进场序列和进场时间,并结合预计进场飞行时间确定航班到达跑道的的时间。

第五步 对种群所有个体执行快速非支配排序操作,生成各层级 Pareto 前端。

第六步 计算每一层 Pareto 前端的拥挤距离,选出若干最优个体形成新的父代种群。

第七步 对新的父代种群执行二元锦标赛选择、交叉和变异等遗传操作,形成子代种群。

第八步 判断当前进化过程是否满足终止条件。若满足,则算法结束,输出 Pareto 最优解;否则,转至第四步继续迭代。

3.2 编码与解码

本文采取实数编码方式对航班通过进场定位点的时间进行染色体编码。根据每架进场航班的可行时间窗 $[\omega_{ijk}, \bar{\omega}_{ijk}]$, 计算过点时间

$$r_{ijk} = \mu_{ijk} \bar{\omega}_{ijk} + (1 - \mu_{ijk}) \omega_{ijk} \quad (9)$$

式中, $\mu_{ijk} \in [0, 1]$ 为线性插值系数。

在生成初始种群时,每条染色体对应的所有进场航班的基因均在 $0 \sim 1$ 中均匀随机生成。根据式(9),任意一条染色体中对应于第 i 个机场第 j 条跑道的第 k 架航班的基因即为线性插值系数 μ_{ijk} 。因此,该编码可确保每架航班通过进场定位点的时间均在可行时间窗 $[\omega_{ijk}, \bar{\omega}_{ijk}]$ 内。显然,式(9)即为染色体的解码公式。

3.3 适应度函数

根据适应度函数单值、非负、最大化等基本特点,将目标函数转化为适应度函数

$$F_1 = \left\{ \left(\sum_{i \in A} \sum_{j \in R_i} \sum_{k \in F_{ij}} |t_{ijk} - e_{ijk}| \right) + \epsilon \right\}^{-1} \quad (10)$$

$$F_2 = \{ \max(t_{ijk}) - \min(t_{ijk}) \}^{-1} \quad (11)$$

$$F_3 = N - \sum_{i \in A} \sum_{j \in R_i} \sum_{k \in F_{ij}} (t_{ijk} - r_{ijk}) \quad (12)$$

式中: ϵ 为 $[0.5, 1.5]$ 内的任意实数; N 为足够大的正数,例如研究时段内进场航班终端区最大飞行时间的两倍。

3.4 遗传算子

采用线性重组交叉和随机因子变异方式。假设两条交叉染色体在相同基因位上对应的时间基因片段分别为 x 和 y , 则交叉后得到的新时间基因片段为

$$x' = \mu x + (1 - \mu) y \quad (13)$$

$$y' = \nu y + (1 - \nu) x \quad (14)$$

式中, μ 和 ν 为 $[-0.25, 1.25]$ 之间的随机数。

3.5 间隔处理

根据重型、中型和轻型三种不同机型的进近速度,可将各类安全间隔空间标准转换为时间标准。以同一仪表着陆系统航向道雷达间隔为例,间隔标准时空转换公式如下

$$h_{ij} = \begin{cases} \frac{d_{ij}}{v_j} & v_i \leq v_j \\ \frac{d_{ij}}{v_j} + \chi \left(\frac{1}{v_j} - \frac{1}{v_i} \right) & v_i > v_j \end{cases} \quad (15)$$

式中: h_{ij} 和 d_{ij} 分别表示前机 i 与后机 j 安全间隔的时间标准和空间标准; v_i 和 v_j 分别表示前机 i 与后机 k 的进近速度; χ 表示前机 i 与后机 j 公共进近航段的长度。

4 实例验证

4.1 实验设计

选取中国上海都市圈内浦东机场和虹桥机场所在的多机场复杂终端区北向运行为实例,对某典型日 14:00~15:59 高峰运行时段内的进场交通流进行优化排序,从时空资源协同配置角度为研究时段内所有进场航班分配最优资源。上海多机场复杂终端区空域结构如图 2 所示。

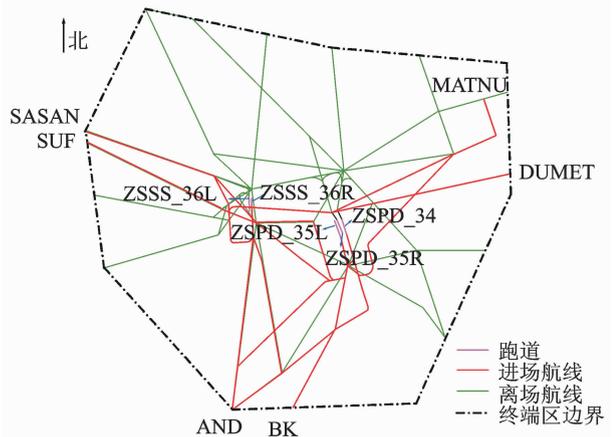


图 2 上海多机场复杂终端区空域结构

Fig. 2 Airspace structure of Shanghai complex multi-airport terminal area

上海多机场复杂终端区共有 AND、BK、DUMET、MATNU、SASAN 和 SUF 六个进场定位点,以及 5 条起降跑道。以向北运行为例,浦东机场包括 34、35L、35R 等 3 条平行跑道,进场跑道为 34 和 35L,间距为 2.72 km,南端跑道头偏移量为 0.8 km,采用相关进近模式运行;虹桥机场包括 36L、36R 等 2 条平行跑道,进场跑道为 36R,采用隔离运行模式运行。研究时段内的进场航班总数量为 116 架,其中浦东机场和虹桥机场的进场航班数量分别为 71 架和 45 架。

数学模型输入参数包括:上海复杂终端区同航向、同高度进场管制移交间隔为 20 km,同一仪表着陆系统航向道雷达间隔为 6 km,相邻仪表着陆

系统航向道雷达间隔为 6 km。重型、中型和轻型航空器的平均进近速度分别为 150 节、130 节和 90 节。连续降落航空器雷达间隔下尾流间隔最低标准如表 1 所示。

表 1 雷达间隔的尾流间隔最低标准

Tab. 1 Wake turbulence radar separation minima

前机机型	后机机型		
	重型	中型	轻型
重型	8	10	12
中型	6	6	10
轻型	6	6	6

遗传算法控制参数包括:种群规模为 200,终止进化代数为 800,染色体编码长度为 116,交叉概率为 0.8,变异概率为 0.015。

4.2 结果分析

仿真实验表明,随着种群进化代数的不断增加,个体逐渐朝着最优方向逼近,并在决策空间内快速搜索到 Pareto 最优解。以上海浦东和虹桥机场两小时高峰时段运行数据为例,算法执行时间为 7.6 min。通过不断进行测试,算法搜索性能较好,计算结果合理。

为评估所提方法的优化效果,下面分别采用两种排序策略对研究时段内进场航班进行调度,分别为经典的 FCFS 策略和本文的优化排序策略,并深入对比分析两种排序策略的具体执行效果。

以模型中式(1~3)对应的 3 个优化目标为度量对象,对比分析两种策略执行效果。对于目标 1,FCFS 策略的航班总延误时间为 12 125 s,而优化策略的航班延误总时间为 9 613 s,相比之下航班延误总时间减少了 2 512 s,即下降了 20.7%。对于目标 2,FCFS 策略的跑道总调度时间为 7 245 s,优化策略的跑道总调度时间为 7 209 s,两种策略下跑道总调度时间差别不大。对于目标 3,FCFS 策略的终端区飞行总时间为 160 068 s,超出标准飞行时间的总等待时间为 2 943 s;优化策略的终端区飞行总时间为 158 098 s,超出标准飞行时间的总等待时间为 1 158 s;相比之下,终端区总等待时间减少了 1 785 s,即下降了 60.7%,因此优化策略可以显著提升进场航班在终端区飞行的顺畅度。

图 3 为终止代数对应的种群中所有个体在决策空间中的分布情况。其中,蓝色标记为所有可行解,红色和蓝色双重标记为 Pareto 前端上的非支配解。多次仿真测试表明,初始种群经 500 次左右迭代已逐步收敛,算法可在保持种群多样性的前提

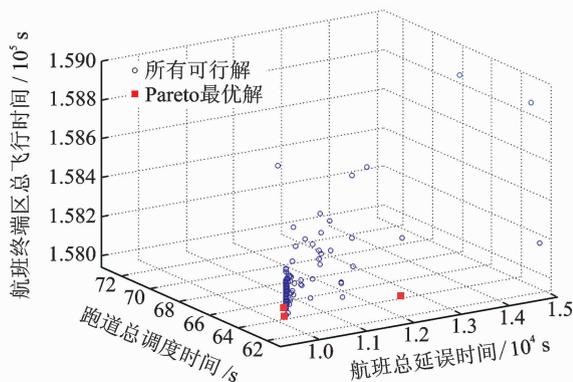


图 3 Pareto 最优解分布

Fig. 3 Distribution of Pareto optimum solutions

下搜索到 Pareto 最优解,可有效避免遗传算法过早收敛而出现早熟现象。

图 4 为两种策略下航班总延误时间随航班架次变化的曲线。从两条曲线的总体变化趋势可以看出,从第 7 架进场航班开始,优化策略的航班总延误时间要明显小于 FCFS 策略的航班总延误时间。相比 FCFS 策略,优化策略对应的航班总延误时间共减小了 2 512 s,下降幅度为 20.7%,优化效果较为显著。

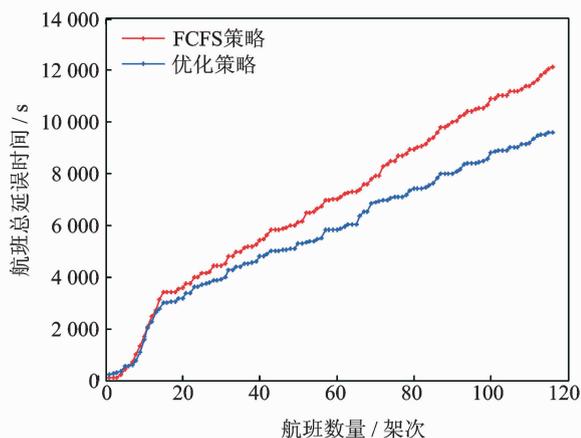


图 4 不同策略下航班总延误时间与航班数量关系曲线

Fig. 4 Relationship of flight delay and flight quantity using different strategies

图 5 为两种策略下可接受延误水平与正常航班数量之间的关系。为便于进行问题说明,此处的“正常航班”是指延误时间小于等于可接受延误水平的航班。若可接受延误水平为 100 s,则 FCFS 策略和优化策略对应的正常航班数量分别为 66 架和 86 架;若可接受延误水平为 200 s,则 FCFS 策略和优化策略对应的正常航班数量分别为 97 架和 100 架;若可接受延误水平为 300 s,则 FCFS 策略和优化策略对应的正常航班数量分别为 108 架和

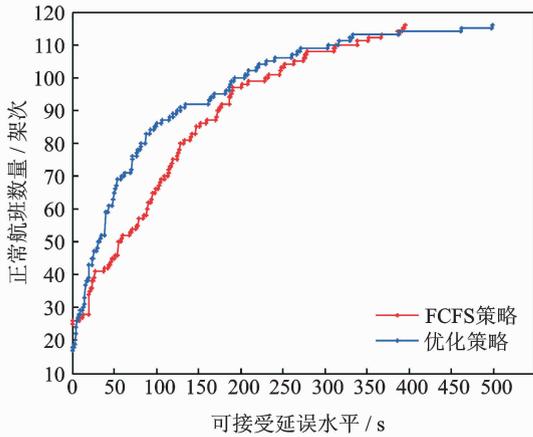


图5 不同策略下可接受延误水平与正常航班数量关系曲线

Fig. 5 Relationship of accepted delay horizon and punctual flight quantity using different strategies

109架。对于可接受延误水平在6~395 s的正常航班数量,优化策略的执行效果均显著优于FCFS策略。从两条曲线的尾端可以看出,FCFS策略将单架航班的延误时间控制在396 s以内,而优化策略将单架航班的延误时间控制在499 s以内。结合图4所示内容,虽然优化策略下单架航班的最大延误时间要大于FCFS策略,但其对应的总延误时间却小于FCFS策略,这说明本文提出的优化排序策略以适度牺牲某架航班进场延误时间(增加104 s)为代价,可以换取整体航班平均延误时间的总体下降。总体来说,优化策略的执行效果较好。

图6为两种策略下每架航班的延误时间对比,其中,红色和蓝色柱形分别表示FCFS策略和优化策略的航班延误时间,且柱顶为红色表示优化策略的航班延误时间小于FCFS策略的航班延误时间,

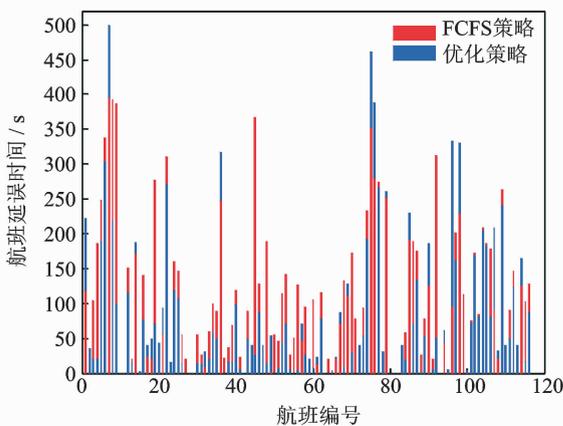


图6 不同策略下航班延误时间对比曲线

Fig. 6 Comparison of flight delay using different strategies

红色高出蓝色部分表示优化策略的延误减少量;反之,柱顶为蓝色则表示优化策略的航班延误时间大于FCFS策略的航班延误时间,蓝色高出红色部分表示优化策略的延误增加量。可以看出,优化策略下大部分航班的延误时间均小于FCFS策略对应的计算结果,少部分航班的延误时间大于FCFS策略对应的计算结果。与FCFS策略相比,优化策略有66架航班的延误时间减少,累计减少量为4 301 s,得到优化的航班比例为56.9%;有40架航班的延误时间增加,累计增加量为1 789 s,未得到优化的航班比例为34.5%;有10架航班在两种策略下的延误时间相同,且均为0 s。因此,与FCFS策略相比,本文所提出的优化策略可对更多比例的进场航班产生积极有效的延误下降作用,优势比例为22.4%。

综合图4~6可以发现,本文所提出的优化策略大大降低了航班的总延误时间,即单架航班平均延误时间。其中,优化策略和FCFS策略对应的单架航班平均延误时间分别为82.9 s和104.5 s。虽然优化策略对所有航班的优化效果有优有劣,航班延误时间有增有减,但是总体上却明显优于FCFS策略,优化策略虽牺牲了小部分航班的延误时间,但却换取了整体航班队列平均运行效率的提升。

通过对FCFS策略和优化排序策略的执行效果进行对比,进场点时间偏差在60 s以内的有90架,在100 s以上的有24架。对于优化策略,在进场点处,为所有航班设置了可行时间窗,包括航班可以提前到达的最早时间,有40架航班早于计划时间,幅度最大的一架提前40 s,总计提早1 005 s。对于跑道时间,两种策略计算所得的跑道时间差别在60 s以内的有84架,在100 s以上的有22架。

图7为不同策略下多机场终端区时间资源配置情况对比。随机选取10架进场航班,对比其在FCFS策略和优化策略下计划和调度的进场点时间和跑道时间配置情况。可以看出,优化策略对进场航班进入终端区的顺序和时间进行了一定幅度的调整,但两种策略下大部分航班的进场点时间和跑道时间之间偏差却不大,且大部分差别可归因于进场顺序和进场时间的调整。

图8为不同策略下多机场终端区各进场点处航班的进场顺序和进场时间对比情况。其中,蓝色“o”表示优化策略下航班通过进场点的时间,红色“o”表示FCFS策略下航班通过进场点的时间。相比FCFS策略,优化策略对进场点AND、DU-MET、SASAN的少数航班的进场顺序进行了调

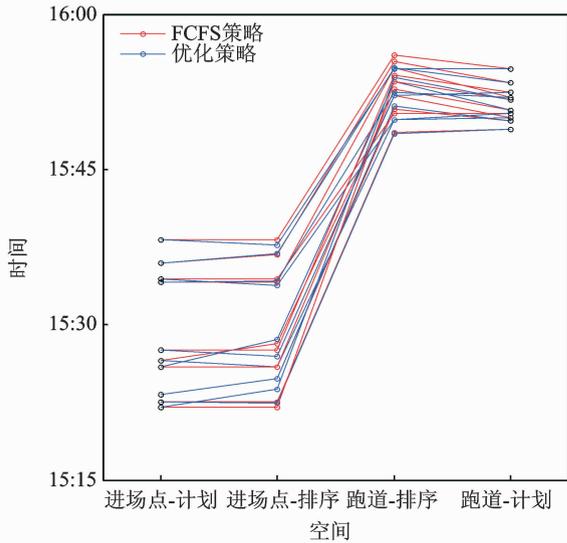


图 7 不同策略下终端区时空资源配置对比

Fig. 7 Comparison of spatio-temporal resource configuration at terminal area using different strategies

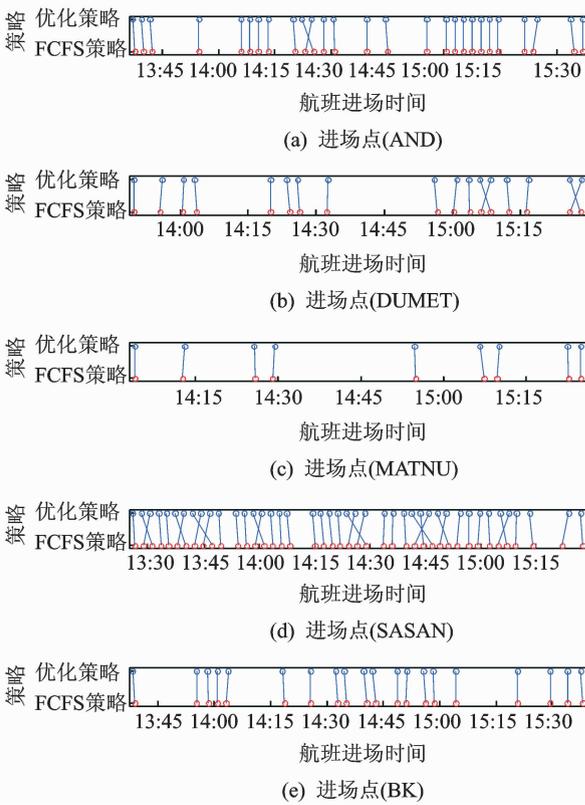


图 8 不同策略下进场点排序情况对比

Fig. 8 Comparison of arrival fix sequencing using different strategies

整,其中以相对繁忙的进场点 SASAN 的航班进场顺序调整幅度最大。对于进场点 MATNU、BK 处的航班,优化策略与 FCFS 策略所得航班进场顺序相同,仅是对进场时间进行了调整。通过观察还可

发现,在进场定位点处的交通流排序主要更改航班通过各进场点的空间顺序,对空间资源的时间属性并不做太大改变。以进场点 SASAN 第 8,9,10 架航班为例,FCFS 策略下的航班分别为 8L9885, CZ3967, MU788, 过点时间分别为 13:42:32, 13:44:51, 13:47:10; 优化策略下第 8,9,10 架航班分别为 MU788, 8L9885, CZ3967, 过点时间为 13:42:2, 13:44:22, 13:46:41, 与 FCFS 策略的时间点差别均在 30 s 左右。

图 9 为不同策略下各跑道航班着陆序列与着陆时间对比。其中,蓝色“▽”表示优化策略下航班的跑道着陆时间,红色“▽”表示 FCFS 策略下航班的跑道着陆时间;同一条线连接的是不同策略下的同一架航班,且蓝色线条表示优化策略所得航班着陆延误时间小于 FCFS 策略所得航班着陆延误时间,红色则表示大于,绿色则表示两者相等。对于浦东机场,优化策略与 FCFS 策略计算所得航班的总延误时间分别为 4 429 s 和 6 901 s,终端区飞行等待时间分别为 668 s 和 1 599 s;虹桥机场在两种策略下的延误时间分别为 5 184 s 和 5 224 s,终端区飞行等待时间分别为 490 s 和 1 344 s。对于浦东机场,相比 FCFS 策略,优化策略共有 43 架进场航班延误时间减少,累计减少量为 3 203 s;共有 22 架航班延误时间增加,累计增加量为 731 s;结合累计减少量与累计增加量可得,航班延误时间的净减少量为 2 472 s;其余 6 架航班延误时间相等且为 0;此外,优化策略与 FCFS 策略相比有 21 架航班

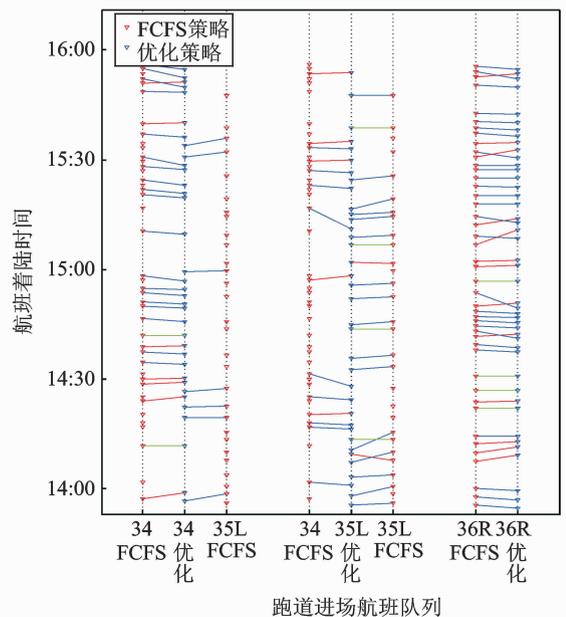


图 9 不同策略下跑道排序情况对比

Fig. 9 Comparison of runway sequencing using different strategies

的着陆跑道进行调整。对于虹桥机场,相比 FCFS 策略,优化策略共有 23 架航班延误时间减少,累计减少量为 1 098 s;共有 18 架航班延误时间增加,累计增加量为 1 058 s;结合累计减少量与累计增加量可得,航班延误时间的净减少量为 40 s;其余 4 架航班延误时间相等且为 0。对比发现,优化策略对浦东机场的优化效果较虹桥机场更为明显,原因如下:浦东具有多条进场跑道,而虹桥机场仅有一条跑道用于进场。在上海复杂的多机场终端区内,跑道对进场航班流的运行影响较大,跑道容量不足将严重影响航班运行效率。

5 结束语

本文提出的复杂终端区进场交通流优化排序方法综合考虑安全、容量、效率等航空运输各方利益需求,可对终端区时空资源进行科学、高效和合理配置,从而有效提升空中交通运行效率。相比经典的 FCFS 策略,本文所提方法优化效果较为显著,特别体现在降低航班总延误时间和终端区航班等待时间两个方面。研究发现,跑道是限制上海多机场复杂终端区进场交通流整体运行效率的关键因素。对于具有单条进场跑道的虹桥机场,由于跑道限制导致航班的终端区等待时间较长;而对于具有多条进场跑道的浦东机场,科学合理的进场交通流排序策略可大幅提升空中交通运行效率,进而有效降低航班延误。

参考文献:

- [1] Atkins S. Investigating the nature of and methods for managing metroplex operations: Initial site survey report[R]. NASA Metroplex NRA Project Report No. NNA07BC56C, 2011.
- [2] Bertsimas D, Frankovich M, Odoni A. Optimal selection of airport runway configurations[J]. Operations Research, 2011, 59 (6): 1407-1419.
- [3] Alexander D, Donaldson R, Hansman J. Capacity improvement potential for the New York metroplex system[C]//10th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference. Fort Worth, Texas; AIAA, 2010: 1-12.
- [4] Gluchshenko O. Dynamic usage of capacity for arrivals and departures in queue minimization[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Control Applications. [S. l.]: IEEE, 2011: 139-146.
- [5] Atkin J A D, Burke E K, Greenwood J S, et al. Hybrid metaheuristics to aid runway scheduling at London heathrow airport[J]. Transport Sci, 2007, 41: 90-106.
- [6] Hancerliogullari G, Rabadi G, Al-Salem A H, et al. Greedy algorithms and metaheuristics for a multiple runway combined arrival-departure aircraft sequencing problem[J]. Journal of Air Transport Management, 2013, 32: 39-48.
- [7] Saraf A, Schleicher D, Griffin K, et al. Assessment of the potential benefits of an ideal integrated metroplex-wide departure planner[C]// 9th AIAA Aviation, Technology, Integration, and Operations Conference. Hilton Head: [s. n.], 2009:1-23.
- [8] 荀海波, 徐肖豪, 陈旭华. 机场终端区着陆次序的排序规划[J]. 南京航空航天大学学报. 1999, 31(2): 178-183.
Xun Haibo, Xu Xiaohao, Chen Xuhua. Analysis of sequencing algorithms for arrival traffic in terminal area[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics. 1999, 31(2):178-183.
- [9] Balakrishnan H, Chandran B. Scheduling aircraft landings under constrained position shifting [C]// AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit. Keystone: AIAA, 2006: 2175-2197.
- [10] 杨秋辉, 游志胜, 冯子亮, 等. 一种改进的基于遗传算法的多跑道到达飞机调度[J]. 四川大学学报:工程科学版, 2006, 38(2): 141-145.
Yang Qiuhui, You Zhisheng, Feng Ziliang, et al. Scheduling arrival aircrafts on multiple runways based on an improved genetic algorithm[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2006, 38(2): 141-145.
- [11] Smith C, Piggott A, Morris C, et al. Final approach spacing tool[C]// Proceedings of 2nd USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar. Orlando:[s. n.], 1998.
- [12] European Organization for Safety Air Navigation. Phare advanced tools: Arrival manager final report [R]. PHARE/NATS/PAT-6. 7. 7. 4/FR, 1999.
- [13] Australian Government. Runway allocator: Interactive runway use analysis tool[M]. Canberra: Department of Transport and Regional Services, 2006.
- [14] 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 Jia'nan, 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.
- [15] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.

