

文章编号:1671-1637(2016)02-0109-09

终端区进离场资源分配优化模型

万莉莉^{1,2}, 胡明华^{1,2}, 田 勇^{1,2}, 张 思³

(1. 南京航空航天大学 民航学院, 江苏 南京 211106; 2. 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, 江苏 南京 211106; 3. 乔治梅森大学 空中交通运输系统研究中心, 弗吉尼亚 费尔法克斯 22030)

摘要:为提高终端区运行效率和减小航班延误,考虑了空域容量和安全间隔等约束,以最小化航班总燃油消耗、均衡进场点等待时间和最小化航班总延误为优化目标,建立了终端区空域进离场资源分配优化模型,设计了带精英策略的非支配排序遗传算法,使用上海终端区实际运行数据进行实例验证。计算结果表明:当 SASAN 进场节点容量下降时,与先到先服务策略相比,进场点分配策略下总燃油消耗由 462 282.7 kg 降为 337 752.9 kg,减少了 26.9%,HC、CO、NO_x 排放量分别由 492.6、3 815.7、16 570.6 kg 降为 429.2、3 352.1、14 129.1 kg,进场点总等待时间减少了 93.5%,所有航班平均延误降为 104 s,94.6%的航班的延误在 600 s 以内,因此,优化模型能有效解决终端区交通需求不均衡或节点容量下降导致的延误,提高终端区运行效率。

关键词:航空运输;终端区;资源分配;多目标优化;AFA 策略;燃油消耗;排放;航班延误

中图分类号: V355

文献标志码: A

Optimization model of arrival and departure resource allocation in terminal area

WAN Li-li^{1,2}, HU Ming-hua^{1,2}, TIAN Yong^{1,2}, ZHANG Si³

(1. School of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, Jiangsu, China;
2. National Key Laboratory of Air Traffic Flow Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, Jiangsu, China; 3. Center for Air Transportation Systems Research, George Mason University, Fairfax 22030, Virginia, USA)

Abstract: In order to improve the operation efficiency of terminal area and reduce the flight delay, some factors such as airspace capacity and safety interval were considered, the minimum total flight fuel consumption, balance arrival fix holding time and minimum total flight delay were taken as optimization objectives, the elitist non-dominated sorting genetic algorithm was designed, and example verification was carried out by using the real operation data of Shanghai terminal area. Calculation result shows that when the capacity of arrival fix SASAN decreases, compared with the first come first service (FCFS) strategy, the total fuel consumption decreases by 26.9% from 462 282.7 kg to 337 752.9 kg by using arrival fix allocation (AFA) strategy, HC, CO and NO_x emissions decrease from 492.6, 3 815.7 and 16 570.6 kg to 429.2, 3 352.1 and 14 129.1 kg respectively, total arrival fix holding time decreases by 93.5%, the average delay time of all flights decreases to 104 s, and the delays of 94.6% of flights are less

收稿日期:2015-11-11

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金项目(NJ20140017);江苏省自然科学基金项目(BK20130821)

作者简介:万莉莉(1981-),女,江苏东台人,南京航空航天大学讲师,工学博士研究生,从事空中交通运输规划与管理研究。

导师简介:胡明华(1962-),男,湖南益阳人,南京航空航天大学教授,工学博士。

than 600 s. Obviously, the optimization model can effectively solve the delay in terminal area because of traffic demand unbalance and fix capacity decrease, and improve the operation efficiency of terminal area. 2 tabs, 13 figs, 25 refs.

Key words: air transportation; terminal area; resource allocation; multi-objective optimization; AFA strategy; fuel consumption; emission; flight delay

Author resumes: WAN Li-li(1981-), female, lecturer, doctoral student, +86-25-52112039, wanlili@nuaa.edu.cn; HU Ming-hua(1962-), male, professor, PhD, +86-25-84896650, minghuahu@263.net.

0 引 言

终端区作为向进离场航空器提供空中交通管制服务的复杂区域,通常包含一个或多个机场,具有航班密度大、空域耦合度高、交通流相关性强等特点。随着空中交通流量的迅猛增长,终端区作为航空运输网络中的关键节点,供需矛盾日益突出,航班延误、空域拥堵和飞行事故时有发生,因此,在保证安全的前提下,科学合理地分配终端区进离场资源,对于提升终端区运行效率、缓解航班延误等具有重要意义。

国内外已有很多学者对终端区进离场资源分配问题进行了相关研究,并取得了一系列成果。Brinton引入隐枚举法求解具有非线性约束的进场航班排序问题^[1];Carr等考虑航空公司权限来优化进场队列,并通过快速仿真将优化策略与先到先服务(First Come First Service, FCFS)策略进行比较^[2-3];Solveling等对存在不确定性的跑道运行进行优化^[4];Anagnostakis等针对跑道运行计划建立两阶段航班随机优化模型^[5]。以上研究均把跑道系统从终端区运行中隔离出来作为独立的资源考虑,限制了终端区运行效率的进一步提高。Gilbo认为终端区除跑道为瓶颈外,在终端区其他位置也可能产生严重延误^[6];Saraf等对终端区空域进行整体动态分层调度^[7];Bianco等采用车间调度理论,建立了给定路径的航班调度模型^[8];Koeners等通过动态规划滑行路径来实时优化跑道排序以提高跑道使用效率^[9];Kim等同时考虑排序和跑道分配来最小化对环境的影响,并将研究扩展到进场和离场运行中^[10-11];Berge等针对多跑道运行规划进行了进场航班建模与分析^[12];Simaiakis等通过对航空器的推出率进行管理来优化多跑道调度^[13];Atkin等对推出时间分配问题进行了研究^[14];张启钱等利用滚动时域控制策略对航班进行动态排序^[15-16];尹嘉男等提出协同运行模式下和相关进近模式下的多跑道时空

资源优化调度方法^[17-18]。

上述研究成果仍存在以下不足:因为交通拥塞形成于终端区与跑道之间,以往的研究主要集中在这些空域资源的优化,而忽略了交通需求不平衡或恶劣天气下容量减小而导致的交通拥塞,进离场资源分配模型不具备自适应能力;优化目标多为终端区飞行流量最大化和航班延误最小化,未考虑航空器燃油消耗最小化,以及因燃油燃烧引起的气体排放污染、光化学污染及噪音污染等环保因素,不符合发展绿色航空、健康出行的理念。基于此,本文提出一种终端区进离场资源分配优化策略,以制定安全、高效和环保的流量管理战术决策,通过综合考虑终端区进离场节点容量、跑道容量、管制移交间隔、尾流间隔等因素,建立终端区进离场资源多目标优化分配模型,采用带精英策略的非支配排序遗传算法求解,并与FCFS策略进行计算结果对比。

1 进离场资源优化模型

1.1 优化策略

终端区通过进离场点与航路连接,通过跑道与机场场面连接,是航路和机场场面之间的过渡衔接区域,复杂的进离场交互运行特性导致其频繁地成为航班运行的关键瓶颈区域。终端区见图1,终端区内包含多个机场,来自不同起飞机场的任一航班必须先经过终端区边界上的某个进场点进入终端区,才能继续沿着预定的标准仪表进场程序在相应跑道上进行汇聚降落;从跑道起飞的任一航班沿着预定的标准仪表离场程序分散离场后,必须先经过终端区边界上的某个离场点离开终端区,才能加入航路前往目的机场。

众所周知,跑道系统是导致航班延误的主要瓶颈区域,然而在某些终端区,跑道运行能力不足却并非形成航班延误的主要原因。在终端区内部,航班延误沿着到达交通流的反方向传播,机场场面上的延误影响跑道运行,并会传播到终端区进场点上,甚

至波及其他机场和区域。终端区进场点作为到达交通流排序的关键参考点,当各进场点交通流分配不平衡时,极易导致终端区某些进场点资源闲置,同时其他进场点却出现容流失衡的情况,进而导致在部分进场点形成等待序列,并将延误向终端区外传播,因此,与跑道系统类似,进场点也可能成为影响终端区运行效率的关键瓶颈。

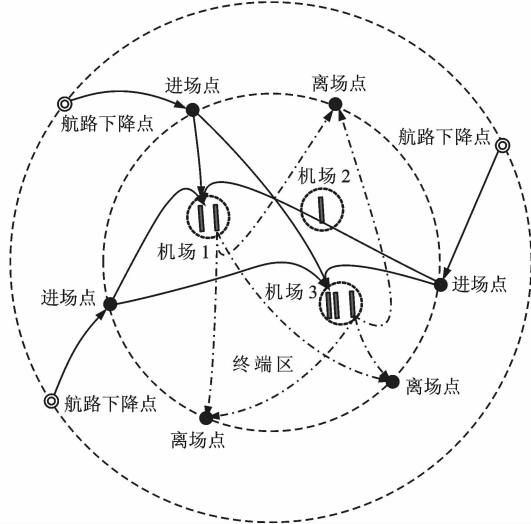


图1 终端区

Fig.1 Terminal area

为解决上述问题,本文综合考虑跑道和进离场节点容量、航空器性能、终端区交通流分布特性、管制间隔等诸多因素,通过优化终端区进场点分配(Arrival Fix Allocation, AFA)策略以分散进离场航班延误,并利用燃油利用效率更高的巡航阶段来降低延误,将航路下降阶段包含至终端区飞行中,建立扩展终端区。其中,进离场节点容量可由终端区最小管制间隔和航空器过点速度来确定,但相关参数会随航空气象条件、尾随间隔等流量管理策略而发生阶段性波动^[19],节点容量波动见图2。通常航线规划时会首选城市对之间的最短路径,因此,调整航班进场点可能会导致飞行路径更长。但航班选择

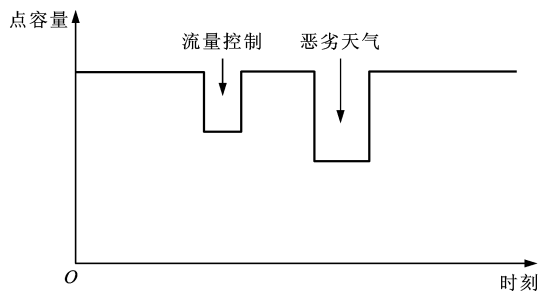


图2 节点容量波动

Fig.2 Fluctuation of fix capacity

在进入终端区之前就更改从航路下降点到终端区进场点之间的飞行路径,不仅能通过在燃油利用效率更高的巡航阶段来降低延误,获得更多的燃油消耗和污染气体排放,还能解决因恶劣天气导致部分空域和进场点无法使用的问题。

为了规范终端区进离场资源分配优化过程,便于问题说明,对终端区进离场资源分配优化模型作如下假设。

(1)所有航班均按照指定飞行轨迹飞行。

(2)一旦进场航班被分配了进场点,或者离场航班开始离场,则不能变更飞行轨迹。

(3)进场航班只在进场点进行空中等待,离场航班只在机场场面进行地面等待。

(4)对多跑道机场,为所有进场航班就近分配跑道。

(5)终端区内所有机场未来天气的预测周期可被等分为若干个时间窗,不同天气条件下各机场对应的跑道运行模式容量已知。

1.2 优化目标

终端区进离场资源分配优化的根本目的是使终端区空域与跑道系统能更好地匹配,从而尽可能减少因交通流不均衡或节点容量降低所造成的航班延误过于集中及由此产生的“雪球效应”,进而提高终端区空域和跑道的利用率,并减少航班燃油消耗和污染气体排放。本文从减小燃油消耗和污染气体排放、均衡进场点等待时间和降低航班总延误等3个角度建立优化目标。

1.2.1 最小化航班总燃油消耗量

燃油消耗直接影响航班的运营成本和污染气体排放,降低燃油消耗是发展绿色航空的重要目标之一,因此,模型使所有航班总燃油消耗量最小,即

$$\min G = \sum_{i \in A} \sum_{k \in K} \sum_{w \in W} \lambda_{ik,w} (t_{i1} F_{i1} + t_{i2} F_{i2} + t_{i3} F_{i3}) + \sum_{i \in D} (S_{i1} - E_{i1}) F_{i4} \quad (1)$$

式中: G 为航班总燃油消耗量; A 、 D 、 W 、 K 分别为进场航班、离场航班、时间窗、进场点集合; $\lambda_{ik,w}$ 为决策变量,若航班 i 在时间窗 w 内过进场点 k , $\lambda_{ik,w}$ 为1,否则为0; t_{i1} 、 t_{i2} 、 t_{i3} 分别为进场航班 i 在进场点的等待时间、航路下降段的飞行时间和进近段的飞行时间; F_{i1} 、 F_{i2} 、 F_{i3} 分别为进场航班 i 在进场点等待、航路下降和进近时的燃油消耗率; F_{i4} 为进场航班 i 离场前在地面等待时的燃油消耗率; S_{i1} 为进场航班 i 的实际离场时间; E_{i1} 为进场航班 i 的预计离场时间。

离场航班在起飞阶段的燃油消耗相比进场阶段更高,且流量管理优先考虑地面等待,因此,航班总燃油消耗量中不计离场航班进入跑道之后的燃油消耗,其他各飞行阶段均使用 Eurocontrol 建立的航空器基础数据库 BADA 3.11 来计算相应运行模式下的燃油消耗率^[20]。

航空器在消耗燃油的同时会排放大量污染气体,且在终端区运行时飞行高度低,距离机场近,会直接影响当地的空气质量指数。如航空排放中的 HC 经太阳紫外线照射后会生成一种有毒的光化学烟雾,强烈刺激人的眼睛和鼻喉,CO 是无色无味的有毒气体,NO_x 容易形成酸雨和破坏臭氧层^[21]。以上各种污染气体的排放量在各飞行阶段中与燃油消耗量和相应气体的排放指数成正比,即

$$e_j = \sum_{i \in A \cup D} \sum_n I_{i,j,n} t_{i,n} F_{i,n} \quad (2)$$

式中: e_j 为第 j 种气体的排放量; $I_{i,j,n}$ 为航班 i 处于飞行阶段 n 时第 j 种气体的排放指数,可利用 ICAO 公布的发动机排放数据库^[22-23]通过回归插值法获得航班各飞行阶段的气体排放指数; $t_{i,n}$ 为进场航班 i 在飞行阶段 n 所经历的时间; $F_{i,n}$ 为进场航班 i 处于飞行阶段 n 时的燃油流率。

1.2.2 均衡进场点等待时间

为避免因进场点流量不均衡或进场点容流不平衡所造成的航班延误过于集中及由此产生的“雪球效应”,需均衡进场点等待时间,其实质是将所有进场航班的等待时间在各进场点之间平均分配,以保证进场资源的公平分配和跑道资源的合理利用,即

$$Z_1 = \min \left(\sum_{k \in K} |T_k - T| \right) \quad (3)$$

$$T_k = \sum_{i \in A} \sum_{w \in W} \lambda_{ik,w} t_{il}$$

$$T = \frac{\sum_{k \in K} T_k}{|K|}$$

式中: Z_1 为等待时间目标函数; T_k 为过进场点 k 的进场航班在该点的等待时间之和; T 为所有进场航班在各进场点的平均等待时间; $|K|$ 为进场点集合大小。

1.2.3 最小化航班总延误

航班延误已成为世界航空运输业日益关注的焦点问题,不仅影响着航空公司的运行效率和服务质量,而且与机场和空管部门的成本及安全均紧密相关,因此,模型最小化所有航班的总延误时间,即

$$Z_2 = \min \left[\sum_{i \in A} (S_{i2} - E_{i2}) + \sum_{i \in D} (S_{i1} - E_{i1}) \right] \quad (4)$$

式中: Z_2 为总延误目标函数; S_{i2} 为进场航班 i 的实际进场时间; E_{i2} 为进场航班 i 的预计进场时间。

1.3 约束条件

1.3.1 进场点唯一性约束

每个进场航班只能分配一个进场点,即

$$\sum_{k \in K} \sum_{w \in W} \lambda_{ik,w} = 1 \quad (5)$$

1.3.2 容量约束

任一时间窗内经过进场点的航班总和不能超过该点的容量,即

$$\sum_{i \in A} \lambda_{ik,w} \leq C_{k,w} \quad (6)$$

式中: $C_{k,w}$ 为进场点 k 在时间窗 w 内的容量。

任一时间窗内在跑道上起降的航班总和不能超过该跑道的容量,即

$$\sum_{i \in A \cup D} \xi_{ir,w} \leq B_{r,w} \quad (7)$$

式中: $\xi_{ir,w}$ 为决策变量,若航班 i 在时间窗 w 内在跑道 r 上起飞或着陆, $\xi_{ir,w}$ 为 1,否则为 0; $B_{r,w}$ 为跑道 r 在时间窗 w 内的容量。

1.3.3 最大空中等待时间约束

每个进场航班在进场点的等待时间不能超过最大空中等待时间,即

$$t_{il} \leq T_{\max} \quad (8)$$

式中: T_{\max} 为最大空中等待时间。

2 算法设计

本文选取带精英策略的非支配排序遗传算法(以下称为 NSGA-II)对终端区进离场资源分配优化模型进行求解。NSGA-II 作为经典的智能优化方法,具有收敛好、运行速度快的优点,已成为众多多目标优化算法的基准^[24-25]。相对于第 1 代非支配排序遗传算法,NSGA-II 通过引入精英策略和采用拥挤度比较算子,在解决多目标优化问题时可降低计算的复杂度,并保持种群的多样性,从而提高优化结果的精度和鲁棒性。

2.1 算法流程

NSGA-II 算法的基本思想为:根据约束条件对随机产生的初始种群执行快速非支配排序,每个个体被赋予秩;然后采用二进制锦标赛法选择、交叉和变异等遗传算子来得到子代种群;再合并当前代数所对应的父、子代种群后执行快速非支配排序操作,并使用拥挤比较算子对位于 Pareto 前端所有可行解拥挤比较操作进行排序;选取其中的最优个体来组成新的父代种群,并通过遗传操作生成新的子代

种群;反复进化迭代,并在迭代过程中始终保持种群规模不变,直至预定条件满足(如终止进化代数等)时,终止迭代,并输出 Pareto 最优解。NSGA-II 算法流程见图 3。

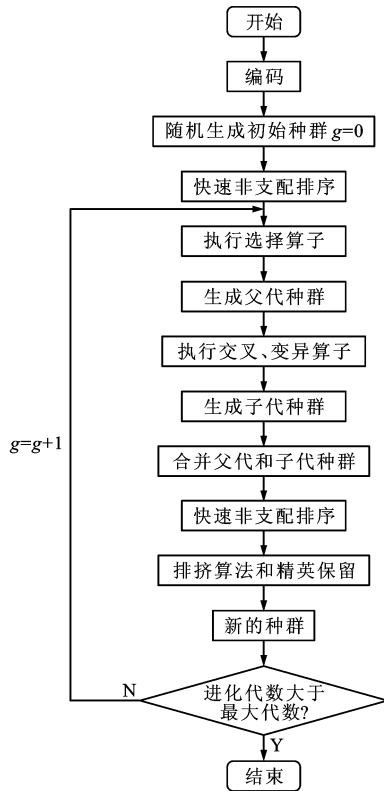


图 3 NSGA-II 算法流程

Fig. 3 Algorithm flow of NSGA-II

2.2 染色体编码

对进场航班进行染色体编码,染色体中的每个基因划分为航路下降航段基因、进场点基因和进场航线基因 3 个部分(图 4), a_i 为航班 i 的航路下降航段基因, b_i 为航班 i 的进场点基因, c_i 为航班 i 的进场航线基因。

a_1	a_2	...	a_i
b_1	b_2	...	b_i
c_1	c_2	...	c_i

图 4 染色体编码

Fig. 4 Chromosome coding

2.3 初始种群生成

根据航班计划使用的飞行路径和着陆时刻,计算进场航班预计进入扩展终端区的时刻。根据扩展终端区进入点信息和跑道分配信息,随机选择航班飞行路径,将其做为初始种群。为保证初始解集具备一定的差异性,提高算法获取全局最优解的可能性,要求种群中 Hamming 距离大于某一预先设定

值的染色体数量必须超过一定的比例。

2.4 适应度函数构造

适应度是以数值方式来评价个体优劣程度的指标,其数值越大表明个体的适应性越强,所对应的解质量越高,反之则个体适应性越差,所对应的解质量越低。本文基于适应度函数的通用性、规范性和合理性设计规则,并满足单值、连续、非负和最大化等条件,将模型的 3 个目标函数转化为以下 3 个初始适应度函数

$$H_1 = \left[\sum_{i \in A} \sum_{k \in K} \sum_{w \in W} \lambda_{ik,w} (t_{i1} F_{i1} + t_{i2} F_{i2} + t_{i3} F_{i3}) + \sum_{i \in D} (S_{i1} - E_{i1}) F_{i4} \right]^{-1} \quad (9)$$

$$H_2 = \left(\sum_{k \in K} |T_k - T| \right)^{-1} \quad (10)$$

$$H_3 = N - \sum_{i \in A} (S_{i2} - E_{i2}) - \sum_{i \in D} (S_{i1} - E_{i1}) \quad (11)$$

式中: N 为足够大的正数; $H_1 \sim H_3$ 分别为式(1)、(3)、(4)的适应度函数。

3 试验例证

3.1 试验设计

本文选取上海终端区为研究对象,其为上海浦东、上海虹桥 2 个多跑道国际机场提供空中交通管制服务,空域资源紧张,飞行流量大,是国际公认的大型繁忙多机场终端区。通过选取浦东和虹桥国际机场某典型日高峰运行时段 11:00~17:59 之间的航班进行仿真,并对 AFA 策略优化结果和 FCFS 策略结果进行对比。

研究时段内上海终端区的航班总数量为 735 架次,其中浦东国际机场和虹桥国际机场的航班数量分别为 426 架次和 309 架次。当天浦东机场共有 3 条跑道运行,其中 34 号和 35L 号跑道用于进场,34 号和 35R 号跑道用于离场;虹桥机场共有 2 条跑道运行,其中 36R 号跑道用于进场,36L 号跑道用于离场。上海终端区中的 AND、BK、DUMET、MATNU 和 SASAN 五个点用于进场,NXD、LAMEN、ODULO、PIKAS、HSN 和 P267 六个点用于离场。在通常情况下,上海终端区同航向、同高度进场管制移交间隔均为 20 km。当天部分进场点因恶劣天气需增大管制移交间隔,导致相应的节点容量下降(表 1)。

本实例中的遗传算法控制参数为:染色体编码长度为 735,种群规模设置为 300,终止进化代数设置为 200,交叉概率设置为 0.8,变异概率设置为 0.01,执行遗传操作时采用线性重组交叉和随机因

表 1 恶劣天气下进场节点容量的变化

Tab. 1 Fluctuation of arrival fix capacities under severe weather condition

进场点	原容量/(架次·h ⁻¹)	现容量/(架次·h ⁻¹)
AND	25	25
BK	25	25
DUMET	25	25
MATNU	25	25
SASAN	25	15

子变异规则,并采用精英保留策略保留较优解对应的染色体。

3.2 结果分析

仿真试验表明,当种群进化代数不断增加时,个体向最优方向不断逼近,并在决策空间内快速找到 Pareto 最优解。

图 5 为总燃油消耗量在对应的种群中个体最优性能与平均性能随进化代数的变化趋势。可以看出,在 60 代以内总燃油消耗量从 360 367.7 kg 迅速减小到 339 524.1 kg;在 60~100 代,总燃油消耗量的减大幅度变缓,从 339 524.1 kg 降低为 338 111.2 kg;在 100 代之后,总燃油消耗量趋于稳定,波动很小。

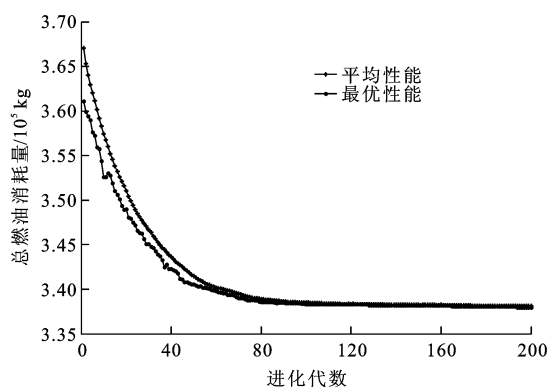


图 5 种群进化过程中总燃油消耗量变化趋势

Fig. 5 Changing trends of total fuel consumption in population evolution

FCFS 和 AFA 策略下终端区飞行各阶段的燃油消耗量及总燃油消耗量对比见图 6。与 FCFS 策略相比,AFA 策略在仿真时间段内的总燃油消耗量由 FCFS 的 462 282.7 kg 降低为 337 752.9 kg,减少了 26.9%。

随着总燃油消耗量减少,污染气体排放量也同时降低,HC、CO 和 NO_x 排放量分别从 FCFS 策略的 492.6、3 815.7、16 570.6 kg 降低为 AFA 策略的 429.2、3 352.1、14 129.1 kg,见图 7。

图 8 为航班平均进场点等待时间在对应的种群

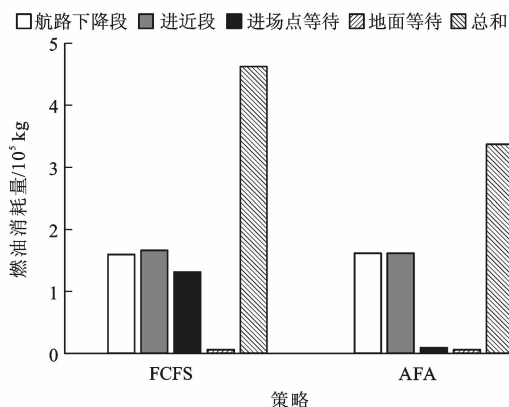


图 6 不同策略下的燃油消耗量对比

Fig. 6 Comparison of fuel consumptions under different strategies

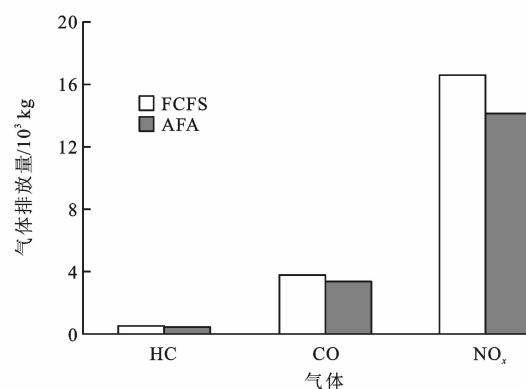


图 7 不同策略下的气体排放量对比

Fig. 7 Comparison of gas emissions under different strategies

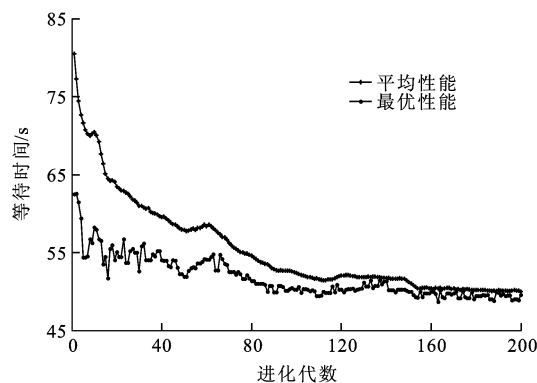


图 8 种群进化过程中航班平均进场点等待时间变化趋势

Fig. 8 Changing trends of average arrival fix holding time of flights in population evolution

中个体最优性能与平均性能随进化代数的变化趋势。在 80 代以内航班平均进场点等待时间从 62.6 s 迅速减小到 47.6 s;在 80~160 代,航班平均进场点等待时间的减大幅度变缓,从 47.6 s 降低为 45.9 s;在 160 代之后,航班平均进场点等待时间趋于稳定,波动很小。

因天气原因导致 SASAN 进场节点容量由 25 架次·h⁻¹降低为 15 架次·h⁻¹,采取 FCFS 策

略时过 SASAN 点的进场航班等待时间之和达到 244 161.1 s, 占有进场点总等待时间的 92%, 平均等待时间为 1 836 s, 终端区延误严重且过于集中在 SASAN 点。与此同时, 其他 4 个进场点 90% 的航班等待时间都在 240 s 以下, 空闲资源明显利用不足。FCFS 策略下各进场点等待时间见图 9, AND、BK、DUMET、MATNU 的进场航班等待时间分别占有进场点总等待时间的 5%、1%、1%、1%。

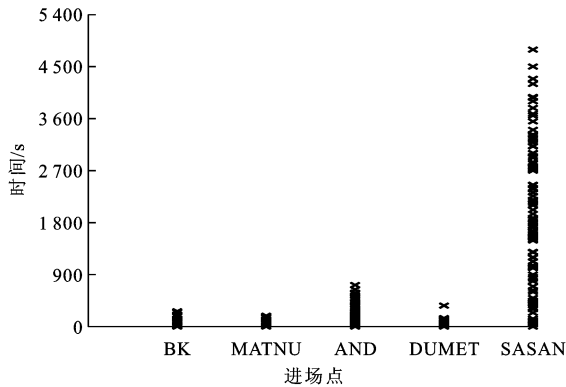


图9 FCFS策略下各进场点等待时间

Fig. 9 Arrival fix holding times under FCFS strategy

使用 AFA 策略重新分配进场点后, 经过 SASAN 点的进场航班从 133 架次减少为 98 架次, 平均等待时间降低为 55.7 s; 同时, 所有航班的平均进场点等待时间为 45.5 s, 各进场点延误相对均衡且延误明显缓解。AFA 策略下各进场点等待时间见图 10, AND、BK、DUMET、MATNU、SASAN 的进场航班等待时间分别占有进场点总等待时间的 29%、14%、15%、16%、26%。

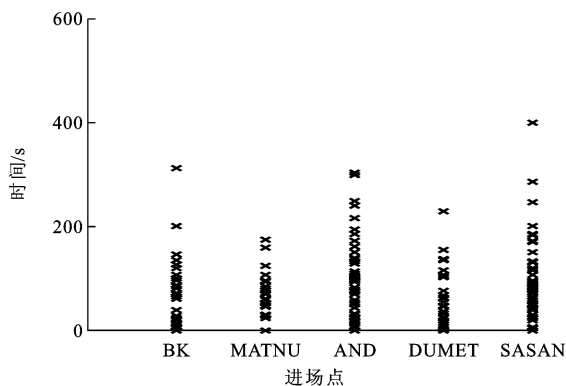


图10 AFA策略下各进场点等待时间

Fig. 10 Arrival fix holding times under AFA strategy

AFA 策略通过优化分配进场点改变航班进场路径, 从而减小终端区进场点等待时间, 优化结果通过对 62 架次进场航班的进场路径进行重新分配, 航路下降段的飞行时间从 FCFS 策略的 842 737.7 s 增加到 856 502.5 s, 只增加了 1.7%, 但进场点总等

待时间由 261 530.2 s 降低为 17 060.0 s, 减少了 93.5%, 优化分配进场点后通过更改从航路下降点到终端区进场点之间的飞行路径能有效降低延误 (图 11)。

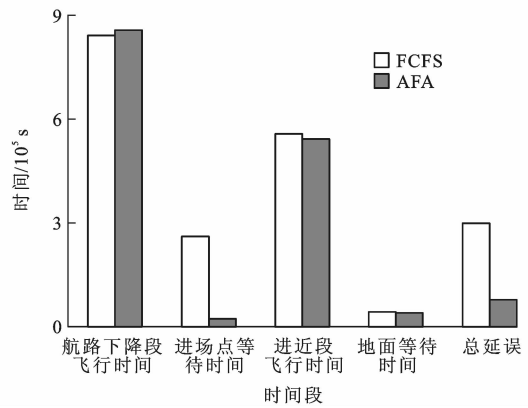


图11 不同策略下的所需时间对比

Fig. 11 Comparison of required times under different strategies

由此可见, 在进场节点容量下降时, 本文所提模型可有效均衡终端区各进场点的等待时间, 使进场点总等待时间减小。

图 12 为航班总延误时间对应的种群中个体最优性能与平均性能随进化代数的变化趋势。在 60 代以内航班总延误时间从 206 869.9 s 迅速减小到 88 850.7 s; 在 60~100 代之间, 航班总延误时间的减小幅度变缓, 从 88 850.7 s 减小为 81 088.1 s; 在 100 代之后, 航班总延误时间趋于稳定, 波动很小。

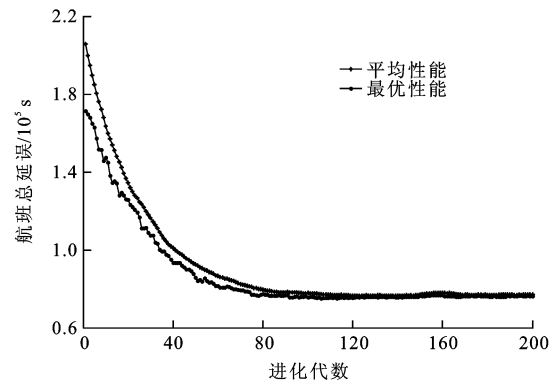


图12 种群进化过程中航班总延误变化趋势

Fig. 12 Changing trends of total flight delay in population evolution

图 13 为不同策略下累积延误架次与延误时间的关系, 其中累积延误架次指航班延误时间小于某一延误时间的航班数量。当 SASAN 节点容量降低时, FCFS 策略中未延误的航班为 252 架次, 由于采取先到先服务原则, 进场时间靠后的部分航班延误较大, 单架航班最大延误达到 4 500 s, 所有航班平均延误时间达到 414 s; AFA 策略通过灵活分配进场航班的进场点, 大幅减小了航班延误, 未延误的航班

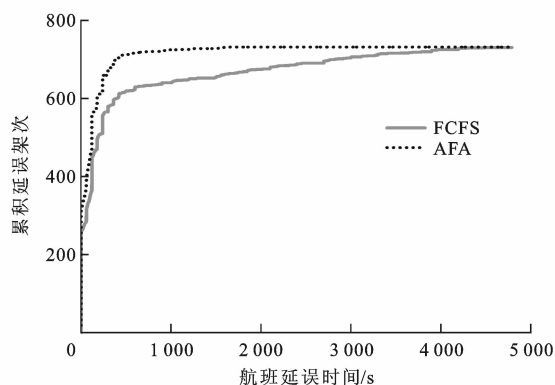


图 13 不同策略下累积延误架次与延误时间的关系

Fig. 13 Relationships between accumulated number of delayed flights and delay time under different strategies

增加到 305 架次,单架航班最大延误降低为 1 597 s,所有航班平均延误时间也降低为 104 s。

表 2 给出了使用 FCFS 策略和 AFA 策略时,不同延误时间对应的航班架次占航班总架次的比重,使用 AFA 策略后,有 94.6% 的航班延误小于 600 s。

表 2 不同策略下不同延误对应的架次占比

Tab. 2 Flight proportion with different delay times under different strategies

延误时间/s	FCFS		AFA	
	架次	占比/%	架次	占比/%
0	252	34.3	305	41.5
0~300	321	43.7	343	46.7
300~600	54	7.4	47	6.4
>600	108	14.6	40	5.4

4 结 语

本文针对终端区优化问题进行了研究,建立了终端区进离场资源分配优化模型,并选取典型繁忙终端区进行了多目标优化求解及结果分析。研究表明,该优化模型与先到先服务相比,减小了燃油消耗和污染气体排放,均衡了进场点等待时间,并降低了航班总延误时间和延误架次,能有效解决终端区交通需求不均衡或节点容量下降导致的延误,提升终端区运行效率。由于重新分配终端区进场点会导致在区域管制范围内的航路调整,会受到管制员、机组等人为因素的影响,终端区的空域结构、跑道构型等也会对实际运行产生较大限制,因此,未来的研究可结合终端区与区域耦合运行,深入分析扇区、航路等空域资源的分配优化。

参 考 文 献 :

References :

[1] BRINTON C R. An implicit enumeration algorithm for arrival aircraft scheduling[C]//IEEE. 11th Digital Avionics

Systems Conference. New York: IEEE, 1992: 268-274.

- [2] CARR G C, ERZBERGER H, NEUMAN F. Delay exchanges in arrival sequencing and scheduling[J]. Journal of Aircraft, 1999, 36(5): 785-791.
- [3] CARR G C, ERZBERGER H, NEUMAN F. Fast-time study of airline-influenced arrival sequencing and scheduling[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2000, 23(3): 526-531.
- [4] 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.
- [5] ANAGNOSTAKIS I, CLARKE J P, BÖEHME D, et al. Runway operations planning and control: sequencing and scheduling[J]. Journal of Aircraft, 2001, 38(6): 988-996.
- [6] GILBO E P. Optimizing airport capacity utilization in air traffic flow management subject to constraints at arrival and departure fixes[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 1997, 5(5): 490-503.
- [7] SARAF A P, SLATER G L. Optimal dynamic scheduling of aircraft arrivals at congested airports[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2008, 31(1): 53-65.
- [8] BIANCO L, DELL'OLMO P, GIORDANI S. Scheduling models for air traffic control in terminal areas[J]. Journal of Scheduling, 2006, 9(3): 223-253.
- [9] KOENERS G J M, STOUT E P, RADEMAKER R M. Improving taxi traffic flow by real-time runway sequence optimization using dynamic taxi route planning[C]//IEEE. 30th Digital Avionics Systems Conference. New York: IEEE, 2011: 1-12.
- [10] KIM B, LI L, CLARKE J-P. Runway assignment by minimizing emissions in terminal airspace[C]//AIAA. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Reston: AIAA, 2010: 1-13.
- [11] KIM B, LI L, CLARKE J-P. Runway assignments that minimize terminal airspace and airport surface emissions[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2014, 37(3): 789-798.
- [12] BERGE M E, HARALDSDOTTIR A, SCHARL J. The multiple runway planner (MRP): modeling and analysis for arrival planning[C]//IEEE. 25th Digital Avionics Systems Conference. New York: IEEE, 2006: 1-11.
- [13] SIMAIKIS 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.
- [14] ATKIN J A D, MAERE G D, BURKE E K, et al. Addressing the pushback time allocation problem at Heathrow Airport[J]. Transportation Science, 2013, 47(4): 584-602.
- [15] 张启钱,胡明华,施赛锋,等.多跑道航班起降调度优化算法[J]. 交通运输工程学报,2012,12(6):63-68.
- ZHANG Qi-qian, HU Ming-hua, SHI Sai-feng, et al. Optimization algorithm of flight takeoff and landing on multi-

- runways[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12(6): 63-68. (in Chinese)
- [16] 杨晶妹. 终端区进场航班排序方法研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2010.
- YANG Jing-mei. Research on algorithms for scheduling arrival aircrafts in terminal area[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010. (in Chinese)
- [17] 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): 3064-3073.
- YIN Jia-nan, HU Ming-hua, PENG Ying, et al. Optimized method for multi-runway spatio-temporal resource scheduling in mode of dependent approaches[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(11): 3064-3073. (in Chinese)
- [18] 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 Ming-hua, ZHANG Hong-hai, 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)
- [19] 孙 浩, 胡明华, 张 颖. 基于遗传算法的扇区边界尾随间隔管理方法的研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2010, 10(6): 174-179.
- SUN Hao, HU Ming-hua, ZHANG Ying. Research of miles-in-trail strategy in sector boundary based on genetic algorithm[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2010, 10(6): 174-179. (in Chinese)
- [20] 夏 卿. 飞机发动机排放对机场大气环境影响评估研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2009.
- XIA Qing. Research on the atmospheric environment impact assessment from aircraft engine emissions in airport[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009. (in Chinese)
- [21] 孙见忠, 左洪福, 刘鹏鹏, 等. 航空发动机污染物排放量估算方法[J]. 交通运输工程学报, 2012, 12(2): 53-61.
- SUN Jian-zhong, ZUO Hong-fu, LIU Peng-peng, et al. Estimation method of aeroengine pollution emissions[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12(2): 53-61. (in Chinese)
- [22] 魏志强, 王 超. 航班飞行各阶段污染物排放量估算方法[J]. 交通运输工程学报, 2010, 10(6): 48-52.
- WEI Zhi-qiang, WANG Chao. Estimating method of pollution emissions for scheduled flight in different phases[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(6): 48-52. (in Chinese)
- [23] 黄 勇, 吴冬莺, 王金涛, 等. 中国上空民航飞机 NO_x 排放分布再探[J]. 北京航空航天大学学报, 2001, 27(3): 289-292.
- HUANG Yong, WU Dong-ying, WANG Jin-tao, et al. Further assessment of the NO_x emission from CAAC fleet over China[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2001, 27(3): 289-292. (in Chinese)
- [24] SRINIVAS N, DEB K. Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms[J]. Evolutionary Computation, 1994, 2(3): 221-248.
- [25] 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.

《交通运输工程学报》2016 年征订通知

《交通运输工程学报》是由国家教育部主管, 长安大学主办, 国务院学位委员会交通运输工程学科评议组、东南大学与西南交通大学共同协办的交通运输领域的学术理论刊物, 两院院士沈志云教授任名誉主任委员; 主要刊载道路与铁道工程、载运工具运用工程、交通运输规划与管理、交通信息工程与控制等领域高水平的学术论文和重大工程实践项目产生的论文; 主要读者对象为国内外交通运输领域的科研人员、工程技术人员及大专院校相关专业的师生。

《交通运输工程学报》为双月刊, 大 16 开本, 160 个页码, 每期定价 100.00 元, 全年共 600.00 元。可到当地邮局订阅, 邮发代号为 52-195, 也可直接汇款至《交通运输工程学报》编辑部订阅。

开户银行: 中国银行西安翠华路支行

账 号: 102407337258

账 户: 长安大学杂志社

邮政编码: 710064

联 系 人: 胡广平

电 话: 029-82334382

地 址: 陕西省西安市南二环路中段长安大学杂志社

E-mail: jygc@chd.edu.cn