

DOI:10.16356/j.1005-2615.2024.06.004

考虑中转旅客的枢纽机场航班时刻优化

马辰婷¹, 吴薇薇¹, 关柏川², 丁程锦¹

(1. 南京航空航天大学民航学院, 南京 211106; 2. 中国东方航空江苏有限公司, 南京 210000)

摘要: 为了更加科学合理地配置机场航班时刻资源, 提出了一种考虑中转旅客的航班时刻优化方法。首先, 结合中转旅客出行选择特征, 构建考虑候选行程有效性的航班衔接质量评估模型。其次, 建立最大化航班衔接质量和最小化航班时刻最大偏移量的双目标模型, 增加考虑中转旅客类型、衔接航班类型等约束条件, 使优化模型更加符合枢纽机场实际中转运行情况。最后, 设计了自适应大邻域搜索算法进行求解, 并将模型及算法应用于北京首都国际机场进行案例分析。结果表明, 所构建的模型能依据中转旅客在时间、空间、直飞航班影响以及服务质量上的选择差异, 为旅客提供更多的有效行程, 增加了可达机场数量, 提高了机场连通性。优化后的旅客有效行程和航班衔接质量分别提升了 21.74% 和 21.57%, 约 79.66% 的航班衔接质量得到改善。可见, 优化后的航班时刻在时空分布上更合理, 能显著提高航班之间的衔接质量, 为中转旅客提供更多的有效换乘选择。

关键词: 航空运输; 航班时刻优化; 旅客中转; 航班衔接; 自适应大邻域搜索

中图分类号: V351; U8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2024)06-1013-11

Optimization of Flight Schedules at Hub Airports Considering Transit Passengers

MA Chenting¹, WU Weiwei¹, GUAN Baichuan², DING Chengjin¹

(1. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 211106, China;

2. China Eastern Airlines Jiangsu Limited, Nanjing 210000, China)

Abstract: In order to allocate airport flight time resources more scientifically and reasonably, a flight time optimization method considering transit passengers is proposed. First, a flight connection quality assessment model considering the effectiveness of candidate trips is constructed by combining the travel choice characteristics of transit passengers. Second, a dual-objective model is established to maximize the flight connection quality and minimize the maximum flight time offset, and constraints such as the type of transit passengers and the type of connecting flights are taken into account, so that the optimization model is more in line with the actual transit operation situation of hub airports. Finally, an adaptive large neighborhood search algorithm is designed to solve the problem, and the model and algorithm are applied to Beijing Capital International Airport for case study. The results show that the constructed model can provide passengers with more effective trips, increase the number of reachable airports, and improve airport connectivity based on the differences in the choices of transit passengers in terms of time, space, the impact of direct flights, and service quality. The optimized effective passenger journeys and flight connection quality have been improved by 21.74% and 21.57%, respectively, and the connection quality of about 79.66% of the flights has been improved. It can be seen that the optimized flight schedules are more reasonable in terms of temporal and

基金项目: 国家自然科学基金项目(U2033205); 民航局安全能力专项项目(1007-IMH22004); 南京航空航天大学科研与实践创新计划项目(xcxjh20220712)。

收稿日期: 2024-03-04; **修订日期:** 2024-08-25

通信作者: 吴薇薇, 女, 教授, 博士生导师, E-mail: nhwei@nuaa.edu.cn。

引用格式: 马辰婷, 吴薇薇, 关柏川, 等. 考虑中转旅客的枢纽机场航班时刻优化[J]. 南京航空航天大学学报, 2024, 56(6): 1013-1023. MA Chenting, WU Weiwei, GUAN Baichuan, et al. Optimization of flight schedules at hub airports considering transit passengers[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2024, 56(6): 1013-1023.

spatial distribution, which can significantly improve the quality of connection between flights and provide more effective transfer options for transit passengers.

Key words: air transportation; flight time optimization; passenger transfer; flight connection; adaptive large neighborhood search

近年来,随着人们出行需求的进一步增加,中国枢纽机场规模整体呈现快速增长的趋势。然而,机场面临着严格的容量、时刻资源和航线资源限制,阻碍了全球范围内的航班运营,有效利用稀缺的基础设施资源变得尤为重要^[1]。2021年民航局在《民航旅客中转便利化实施指南》^[2]中明确提出推广旅客中转便利化服务,是在不依赖增加机队、机场等增量资源的前提下,对民航存量资源进行更精准的深入挖掘,提升民航的通达性、衔接度和运行效率,全面改善中转服务品质和旅客中转出行体验,提高旅客出行意愿。此外,由于时刻资源和航线资源有限,越来越多的机场和航空公司更加注重航空旅客中转运输服务。然而,中国机场的航班时刻编排不够紧凑,未能充分发挥机场时刻衔接功能,使得中国枢纽机场的主要特征(主要表现在旅客中转率)仍然不够明显。因此,在航空运输中转市场需求的驱动下,如何合理规划机场的航班时刻,充分发挥机场时刻衔接功能,增加有效中转行程是目前机场运行过程中亟待解决的关键问题。

在航班时刻优化问题方面,目前的研究主要以航班时刻调整量最小、航空公司利益最大、承运人公平性、航班延误时间最小等方面为目标进行研究。Jiang等^[3]提出了包含鲁棒性的动态航班调度设计模型,结果表明动态航班调度可以通过调整航班时刻来显著提高容量利用率,进而增加航空公司利润。Jacquillat等^[4]提出了综合考虑调整量约束、容量约束和减少延误约束的机场航班计划优化方法,并开发了原始迭代求解算法进行求解。Fairbrother等^[5]提出了机场时刻调度的两阶段机制,在分配与各航空公司航班相关的总位移时纳入了航空公司的偏好,提高了时段安排结果的透明度和可接受性。Geng等^[6]构建了航班调整延误时间最小的时刻优化模型,以减少机场系统中的航班延误。Pellegrini等^[7]提出了时刻分配与同步优化的整数线性规划模型,模型中纳入了机场空位分配以及航班过站时间的考虑,基于真实数据进行实验分析,验证了模型的灵活性以及其良好的计算性能。

已有学者将机场中转问题纳入航班时刻优化研究中,Ciftci等^[8]从航班衔接时间入手对航空公司航班波进行优化,提出了以最小化中转乘客过站总时间为目标的数学模型,并采用模拟退火算法和

禁忌搜索算法进行求解。Kepir等^[9]针对航空公司在机队利用率和中转乘客等待时间之间的不平衡等相关问题,以最大限度地提高机队利用率、最小化多数中转乘客的等待时间为目标建立数学模型。李博文^[10]从进出港航班时刻调整唯一性、中转时间限制以及航班时刻调整前后调整量大小限制等约束条件,以航班中转机会最大为目标建立航班时刻优化模型。齐莉^[11]提出了考虑枢纽机场衔接能力的航班时刻优化方法,在构建航班时刻优化模型中增加了航班衔接水平约束条件。李雯^[12]构建了以航空公司利益最大为目标的航班频率优化模型,模型中融入了旅客中转等待成本及航班波相关概念,并使用禁忌搜索算法进行求解。

然而,现有研究大多侧重于以机场为中心或以航空公司为中心进行考虑,从旅客的角度来看,优化后的航班时刻可能会限制有效行程的数量或降低航班连接的吸引力,使得“最佳”航班时刻表不会产生最优结果。因此,现有的优化方法可能导致机场内有效中转航班较少或中转航班衔接质量较低,使得旅客不愿或尽可能少的选择中转航班,并可能会增加旅客、航空公司和其他航空运输利益相关者的协调成本。

在考虑旅客方面的研究中,Birolini等^[13]提出了以旅客为中心的机场时刻分配方法,将机场层面、航空公司层面以及旅客层面相结合,以最大化可用航线和最小化转机时间为目标,创建更具有吸引力的航班时刻表。Jacquillat^[14]针对地面延误计划(Ground delay programs, GDP)可能不会为旅客带来最佳行程方案等问题,提出了在大规模网络中平衡航班和乘客延误的以乘客为中心的GDP优化方法。Wei等^[15]基于离散选择广义吸引模型,提出了考虑旅客选择的综合航班时刻表和机队分配的混合整数规划模型,并建立融合启发式算法的多阶段求解方法。因此,本文从中转旅客角度出发,构建考虑候选行程有效性的航班衔接质量评估模型。在此基础上,提出了考虑中转旅客出行选择的机场航班时刻优化方法,在考虑航班时刻唯一性、衔接时间限制、机场容量限制、调整量约束等限制的基础上,增加对旅客中转类型和航班衔接类型的考虑,以提高机场航班衔接质量、减少航班最大偏移量为目标,实现对机场航班时刻的优化。

1 问题描述

枢纽机场是中枢辐射网络的节点、航空客货运的集散中心,其最主要的特征是高比例的中转业务以及高效的航班衔接能力。与非枢纽机场相比,构建一个符合实际运行情况的枢纽机场航班时刻优化模型,需要关注以下方面的问题:(1)如何以中转旅客角度考虑衔接航班的有效性;(2)如何对航班衔接性进行建模;(3)如何在模型中考虑航空公司的接受程度,以降低航班时刻协调难度。

航班作为枢纽机场最重要的资源之一,其编排计划直接影响旅客中转效率。因此,针对问题(1),本文从中转旅客角度出发,考虑航班计划的时空维度等特征,构建航班衔接质量评估模型。针对问题(2),在问题(1)的基础上,以航班衔接质量评估值作为航班时刻调整权重,构建航班时刻优化模型。针对问题(3),在时刻优化模型构建过程中纳入对航班时刻偏移量的考虑,使时刻调整量在航空公司的接受范围内。

此外,随着互联网技术的快速发展,旅客可以根据订票平台上的航班计划等综合信息,合理安排自己的行程。一方面,旅客可以根据已有的中转航班推荐行程进行中转;另一方面,旅客能够根据不同航空公司的航线网络和航班时刻自行选择转机行程。因此,本文的研究对象并非仅针对购票平台已推行的中转航班,而是从旅客自行选择出行行程的角度,通过研究进、离港航班衔接有效性,最大化机场为旅客提供的有效中转出行选择。

2 航班时刻优化模型

2.1 模型假设与决策变量

本节构建了航班时刻优化模型,为方便建模,本部分首先对实际问题建立如下假设。

(1) 航班时刻不是一个准确而具体的时间点,而是一个具体的时间间隔。机场的最小时间长度是相同的,本文设置为5 min^[16]。机场的时刻容量定义了一天中特定时间段内能够起降的最大航班数量。通常情况下,机场的时刻容量可以定义为15 min容量和60 min容量。

(2) 在优化航班时刻表时,只考虑定期航班,不考虑加班、包机、航班取消等情况。

(3) 旅客中转时间是指中转旅客到达机场与后续航班离开机场之间的时间间隔。它必须满足中转类型对应的最小中转时间和可接受的最大中转时间。本文假设旅客过站时间仅与旅客中转类型有关,不考虑旅客个体的差异化特征。

(4) 本文以机场内各航空公司当前的时刻表作为时刻申请,认为各航司所能接受的最大航班时刻偏移量相同。

本文对枢纽机场航班时刻优化问题的决策变量用0-1变量定义。对于到港航班,若到港航班*i*在时刻*j*到达机场则为1,否则为0。对于离港航班,若离港航班*k*在时刻*l*离开机场则为1,否则为0。

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{若到港航班 } i \text{ 在时刻 } j \text{ 到港} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

$$y_{kl} = \begin{cases} 1 & \text{若离港航班 } k \text{ 在时刻 } l \text{ 离港} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式中:*i*为到港航班;*k*为离港航班;*j*为到港时刻 $\{1, 2, \dots, J\}$; *l*为离港时刻 $\{1, 2, \dots, L\}$ 。

2.2 优化目标

(1) 航班衔接质量

本文从中转旅客出行角度出发,使时刻优化结果更符合旅客出行需求。考虑到旅客行程在时间分配方面的内生性^[13],需要定义旅客可能选择的候选行程集。本文提出了一种候选行程有效性标准,即航班衔接质量。该标准涉及航班计划的编排、航线网络的空间结构、直飞航班频率以及中转服务的便利程度等多个方面,即从时间、空间、相对强度以及服务质量方面进行衡量^[17]。

时间指标纳入对旅客中转类型的考虑,用来衡量到港航班与离港航班在给定时间窗内旅客进行中转的可能性,本文在时间指标中设立带有中间阈值的分段评估函数,并进行连续化处理^[18]。空间指标由中转航班的绕航系数表示,由于绕航系数会影响旅客对中转出行的接受程度,所以对绕航系数有一定的阈值设置。相对强度指标反映了中转航班相对于直达航班的吸引力^[18],若两机场间的直达航班频率较少,旅客将偏向于中转航班,使得此类中转航班的衔接质量相对较好。服务质量指标反映了航班运营航空公司之间能够为旅客提供的中转服务的便利程度。航班衔接质量越高,就能够为旅客提供更加有效、多样的中转出行选择,提高旅客出行满意度。因此,本文综合考虑旅客在中转出行选择过程中的重要影响因素,在现有研究^[17]的基础上,构建航班衔接质量评估模型为

$$\tau_{ijklp} = \frac{\lambda_1 T_{ijklp} + \lambda_2 \delta_{ijklp} + \lambda_3 \beta_{ijklp} + \lambda_4 \eta_{ijklp}}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4} \quad (3)$$

式中: τ_{ijklp} 为时刻*j*的进港航班*i*与时刻*l*的离港航班*k*的航班衔接质量;*p*为航班*i*与航班*k*构成的中转航班类型,包括国内-国内、国内-国际、国际-国

内、国际-国际; $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ 分别是时间、空间、相对强度以及服务质量指标的加权系数; $T_{ijklp}, \delta_{ijklp}, \beta_{ijklp}, \eta_{ijklp}$ 分别为时刻 j 的进港航班 i 与时刻 l 的离港航班 k 的时间、空间、相对强度和服务质量指标值, 计算方式为

$$T_{ijklp} = \begin{cases} 1 & t_p^{mct} \leq y_{kl} - x_{ij} \leq t_p^{mt} \\ 1 - \frac{y_{kl} - x_{ij} - t_p^{mt}}{t_p^{mact} - t_p^{mt}} & t_p^{mt} < y_{kl} - x_{ij} \leq t_p^{mact} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

$$R_{ijklp} = \frac{D_{ij \cdot p} + D_{\cdot klp}}{D_{ijklp}} \quad (5)$$

$$\delta_{ijklp} = \begin{cases} 1 & R_{ijklp} \leq 1.2 \\ \frac{1.4 - R_{ijklp}}{0.2} & 1.2 < R_{ijklp} \leq 1.4 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

$$\beta_{ijklp} = \begin{cases} 1 - \frac{D_{ijklp}^f}{8} & D_{ijklp}^f \leq 8 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

$$\eta_{ijklp} = \begin{cases} 1 & F_{ijklp} \in S_1 \\ 0.9 & F_{ijklp} \in S_2 \\ 0.3 & F_{ijklp} \in S_3 \\ 0.1 & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

式中: t_p^{mct}, t_p^{mact} 分别为 p 类中转旅客的最小过站时间和最大可接受时间; t_p^{mt} 为 p 类旅客的中间时间, 取值为 t_p^{mct} 和 t_p^{mact} 的平均值; R_{ijklp} 为时刻 j 进港的航

班 i 与时刻 l 离港的衔接航班 k 的绕航系数; $D_{ij \cdot p}, D_{\cdot klp}, D_{ijklp}$ 分别为航班 i 的离港机场至该航班目的机场的距离、衔接航班 k 的离开机场至该航班到港机场的距离、航班 i 的离港机场至航班 k 的到港机场间的距离; D_{ijklp}^f 为航班 i 的出发机场至后续航班 k 的到达机场的直飞航班频率; F_{ijklp} 为 p 类中转类型下航班 i 与后续航班 k 对应的服务类型; S_1 表示两个航班由同一家全服务航空公司提供服务; S_2 表示两个航班由同一联盟的不同全服务航空公司提供服务; S_3 表示航班由不同联盟的全服务航空公司或同一家低成本航空公司提供服务。模型中涉及的参数根据已有研究获得^[17-19]。

综上, 航班衔接质量的计算方式如图1所示。首先, 根据机场航班时刻从时间指标上对到达航班进行可衔接离港航班的匹配, 初步构建候选行程集。其次, 将候选行程中的衔接航班分别从空间、相对强度指标进行评估, 该阶段可以识别衔接航班的有效性, 即当 $T_{ijklp} \delta_{ijklp} \beta_{ijklp} \eta_{ijklp} \neq 0$ 时, 航班 i 与航班 k 为有效衔接航班。最后, 对进港航班和有效衔接航班的衔接质量进行评估, 对单个进港航班而言, 能够为旅客提供的候选行程数量等于有效衔接航班数量, 衔接质量等于该航班所有有效航班衔接质量之和, 场内所有进港航班能够提供的衔接质量反映了机场为旅客提供的中转出行选择的能力。

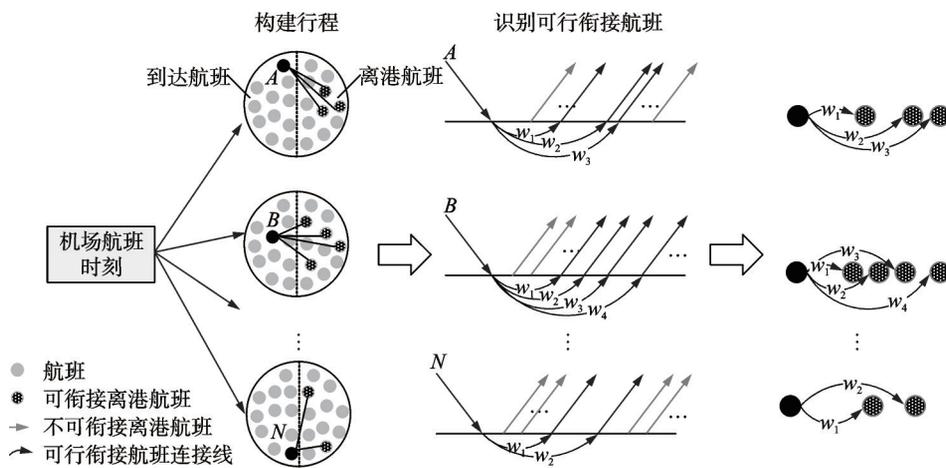


图1 航班衔接质量计算示意图

Fig.1 Diagram of flight connection quality calculation

(2) 目标函数

本文建立了2个目标函数。模型第1个目标为最大化航班衔接质量。现有研究在旅客中转出行问题中多以最大化中转机会^[10]为目标函数, 这种方法能够提高中转旅客候选行程的数量, 但没有对候选行程的有效性进行判别。在旅客中转出行选择的问题中, 本文不仅期望优化结果能够增加旅

客中转换乘机会, 更期望在优化过程中能够尽可能地为旅客提供绕航系数小、直飞航班频率少、服务质量高的中转候选行程, 即将更多的有效中转航班尽可能衔接, 增加候选行程的有效性。综上, 目标函数定义为

$$\max \sum_{i \in F_a} \sum_{j \in S_a} \sum_{k \in F_a} \sum_{l \in S_a} \sum_{p \in P} \omega_{ijklp} z_{ijklp} \quad (9)$$

式中: F_a, F_d 为枢纽机场到港、离港航班集合; S_a, S_d 为枢纽机场到港、离港航班时刻集合; P 为机场航班中转类型集; z_{ijklp} 为到港航班*i*和离港航班*k*是否构成可衔接航班,该变量要求航班间的衔接时间间隔满足一定时间窗要求,时间窗要求最小值应大于该类型中转旅客的最小换乘时间,最大值不应超过该类中转旅客的最大可接受时间。本文将航班衔接质量引入目标函数,建立考虑旅客中转出行选择的航班时刻优化模型,使其在计划范围内最大化中转候选行程的数量与质量。

一般情况下,航空公司请求时刻与实际分配时刻偏移量越小,航空公司对时刻表的接受度越高^[16],这样虽然可能导致机场总偏移量增加,但能够避免少数航空公司的航班时刻调整量过大的问题。因此,模型的第2个目标为最小化航班时刻最大偏移量,以到港、离港航班在机场的出发、到达时间调整量绝对值作为偏移量,目标函数表示单个航班时刻偏移量的最大值最小,定义为

$$\min (\max \{|u_i|, |u_k|\}) \quad (10)$$

式中: u_i 为到港航班*i*的时刻调整量; u_k 为离港航班*k*的时刻调整量。

2.3 约束条件

目前在涉及旅客中转的航班时刻优化模型中,主要考虑了航班时刻唯一性、衔接时间限制、机场容量限制、调整量约束等限制条件^[8,10]。本文除了考虑这些常规约束之外,还考虑了旅客中转类型、衔接航班类型,使优化后的航班时刻更符合实际运行情况,提高旅客中转出行质量。

$$\sum_{j \in S_a} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in F_a \quad (11)$$

$$\sum_{l \in S_d} y_{kl} = 1 \quad \forall k \in F_d \quad (12)$$

$$\sum_{i \in F_a} \sum_{k \in F_d} z_{ijklp} \leq M \theta_{jlp} \quad \forall j \in S_a; l \in S_d; p = p' \quad (13)$$

$$z_{ijklp} = 0 \quad \forall i \in F_a; j \in S_a; k \in F_d; l \in S_d; p \in P / \{p'\} \quad (14)$$

$$x_{ij} + y_{kl} \geq 2 \sum_{p \in P} z_{ijklp} \quad \forall i \in F_a; j \in S_a; k \in F_d; l \in S_d \quad (15)$$

$$\sum_{i \in F_a} \sum_{j=s}^{s+L_c} x_{ij} \leq R_{sc}^a \quad \forall j \in S_a | j < J - L_c + 1; c \in C \quad (16)$$

$$\sum_{k \in F_d} \sum_{l=s}^{s+L_c} y_{kl} \leq R_{sc}^d \quad \forall l \in S_d | l < L - L_c + 1; c \in C \quad (17)$$

$$\alpha_n \sum_{i \in F_a} \sum_{j=s}^{s+L_c} x_{ij} + \mu_n \sum_{k \in F_d} \sum_{l=s}^{s+L_c} y_{kl} \leq R_{scn}^{\text{tot}}$$

$$\forall j \in S_a | j < J - L_c + 1$$

$$l \in S_d | l < L - L_c + 1; c \in C \quad (18)$$

$$\sum_{j \in S_a} j x_{ij} = \sum_{j \in S_a} j F_{ij} + u_i \quad \forall i \in F_a \quad (19)$$

$$\sum_{l \in S_d} l y_{kl} = \sum_{l \in S_d} l F_{kl} + u_k \quad \forall k \in F_d \quad (20)$$

$$x_{ij}, y_{kl}, z_{ijklp} \in \{0, 1\}; u_i, u_k \in \mathbf{Z}; \forall i \in F_a; \forall j \in S_a; \forall k \in F_d; \forall l \in S_d; \forall p \in P \quad (21)$$

式中: M 为无穷大数; θ_{jlp} 为0-1变量,当时刻*j*和*l*之间满足*p*类中转旅客的过站时间要求则为1,否则为0; p' 为衔接航班的中转航班类型; C 为机场容量时间区间集合; L_c 为容量时间区间的长度; $R_{sc}^a, R_{sc}^d, R_{scn}^{\text{tot}}$ 为枢纽机场在时间*c*区间到港、离港、总容量限制; s 为时刻序号; α_n, μ_n 为机场容量包络曲线参数; F_{ij}, F_{kl} 为0-1变量,当申请时刻表中到港航班*i*在时刻*j*进港、离港航班*k*在时刻*l*离港为1,否则为0。式(11,12)是航班时刻唯一性约束,确保每个到港、离港航班必须且只能被分配到一个时刻。式(13~15)为航班衔接性约束, p' 为衔接航班的中转类型,由航班*i, k*属性决定。式(14)确保每个可行衔接航班对*i, k*只属于一种中转类型。式(15)中如果进港航班*i*和离港航班*k*之间存在连接,且满足*p*中转类型时间要求,则 $z_{ijklp}=1$,否则为0。式(13~15)允许到港航班与离港航班可衔接的前提是离港时刻和到港时刻之间的差值满足旅客中转时间约束。式(16~18)为机场滚动容量约束,分别表示*c*时段内进港航班、离港航班、场内航班总数受到的机场时刻容量限制。式(19~20)表示航班时刻偏移量约束,调整后的航班时刻等于申请时刻与航班时刻偏移量之和。式(21)为变量取值约束。

2.4 模型求解

上述模型为多目标整数规划模型,区别于一般的航班时刻优化模型,本文考虑了进离港航班的衔接关系,增加了问题的复杂度。由于本研究主要考虑旅客中转出行选择,对应目标函数为航班衔接质量最大。因此,在模型求解过程中,使用约束法^[16]将航班最大偏移量最小化转化为新的约束条件,并加入模型中。如式(22~23)所示,表示到港、离港航班的时刻偏移量不能超过航空公司所能接受的最大偏移量值。

$$|u_i| \leq u_{\max} \quad \forall i \in F_a \quad (22)$$

$$|u_k| \leq u_{\max} \quad \forall k \in F_d \quad (23)$$

式中 u_{\max} 为允许的航班时刻最大偏移量。

由于本文模型中变量的规模较大,对存储空间要求较高,求解器无法直接对模型进行准确求解。因此,基于Birolini等^[13]研究,本文设计了自适应大邻域搜索算法对模型进行求解,算法的具体步骤如下,流程如图2所示。

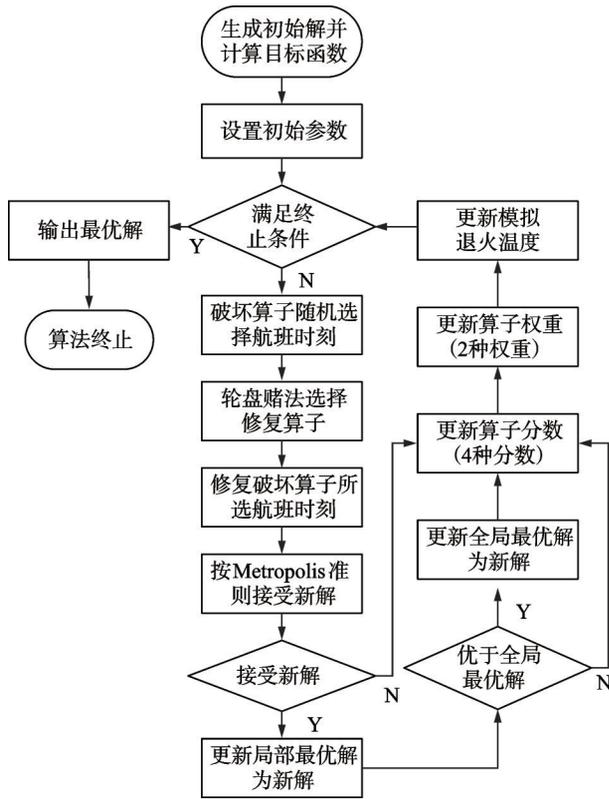


图2 自适应大邻域搜索算法流程

Fig.2 Flowchart of adaptive large neighborhood search algorithm

步骤1 生成初始解,设置初始参数。输入原始航班时刻数据,检查该时刻表是否满足约束即式(16~18),在不满足容量约束的时刻区间内,随机选择一个航班进行时刻调整,时刻调整量绝对值不大于 u_{max} ,循环调整直至时刻表满足容量约束条件并设为初始解;否则,设置该时刻表为初始解。在此基础上,计算到港、离港航班之间的衔接质量,即目标函数,将其设置为初始全局最优解和局部最优解。初始参数包括初始迭代次数、最大迭代次数、权重更新系数、算子初始权重、初始次数以及初始得分等。

步骤2 判断是否满足终止条件。若满足则执行步骤6,输出最优解。否则,使用随机破坏算子对当前解进行破坏,即随机选择15%的航班,改变被选航班当前的航班时刻,具体操作是将被破坏到港航班的航班时刻赋值时刻最大值、离港航班的航班时刻赋值时刻最小值,使破坏航班无法与其他航班进行衔接。

步骤3 基于轮盘赌选择机制选择修复算子。修复算子针对被破坏的部分进行重建,实现邻域搜索,从而得到一系列解的集合。本文设计了2种修复算子,分别是随机修复和贪婪修复。

(1) 随机修复:对破坏航班随机选择航班时刻进行修复,判断是否满足模型约束,直到所有破坏

航班都被重新安排航班时刻。

(2) 贪婪修复:对被破坏航班的可调整航班时刻依次进行检验,选择航班衔接质量最大时对应的航班时刻进行修复。具体方法为:固定被破坏航班于可调整时刻范围内的某一时刻,对到/离港航班而言,识别可衔接离/到港航班。遍历被破坏航班的可调整时刻集合,计算各时刻的航班衔接质量,衔接质量最大对应的航班时刻即为该航班的修复时刻,如图3所示。

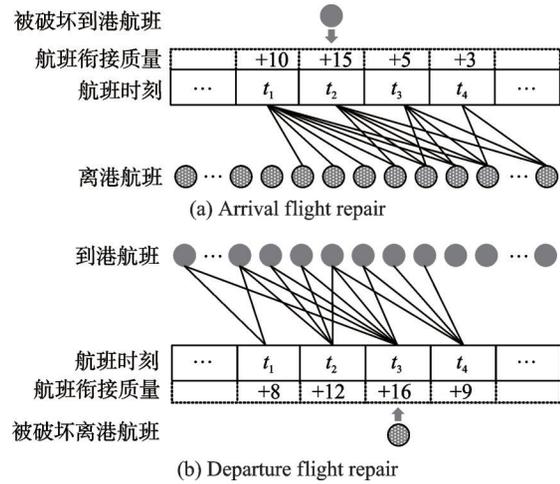


图3 贪婪修复算子

Fig.3 Greedy repair operator

步骤4 基于模拟退火算法Metropolis准则判断新解是否被接受。当新解大于局部最优解时,新解一定被接受,更新局部最优解为新解,进而判断新解是否优于全局最优解,若优于全局最优解,则更新全局最优解为新解。否则,执行步骤6。

由于Metropolis准则会在一定概率下接受劣解。因此,若新解不大于局部最优解,仍有一定概率接受新解为局部最优解。

步骤5 动态调整权重(自适应过程)。每次迭代后,经过算子组合计算得到的新解有4种情况,分别是新解更新了全局最优、新解未更新全局最优解但更新了局部最优解、新解未优于最优解但被接受、新解被舍弃。一次迭代完成后需要对算子进行评分,上述4种情况分别对应不同的分数,本文设置为1.5、1.2、0.8、0.6。算子权重更新计算为

$$\omega_d = \begin{cases} \omega_d & c_d = 0 \\ (1 - \rho)\omega_d + \rho \frac{n_d}{c_d} & c_d > 0 \end{cases} \quad (24)$$

式中: d' 为算子索引; ω_d 为算子权重; n_d 为算子分数; c_d 为算子的使用次数; ρ 为权重更新系数。动态调整权重主要针对修复算子,算子的初始选择概率相同,更新后的算子选择概率为各算子权重的归一化结果,从而使权重大的算子更有可能被选到。

步骤 6 更新迭代次数以及模拟退火温度,判断是否满足终止条件。若是,输出全局最优解,算法终止。否则,返回步骤 2。

3 案例分析

3.1 案例背景及参数设置

本文以北京首都国际机场为研究对象,优化调整机场的航班时刻,增加航班间的衔接质量,提高旅客在该机场内中转出行选择的有效性及其多样性。本文使用的数据是 OAG 数据库中北京首都国际机场 2019 年 8 月 17 日的航班计划,共有计划起降航班 1 496 架次,其中进港航班 703 架次,离港航班 793 架次。数据包括航班号、承运航空公司、始发和到达机场、出发和到达时刻等。模型参数设置如下。

(1) 机场内不同中转类型旅客的最小过站时间 (Minimum connection time, MCT) 和可接受的最大中转时间 (Maximum connection time, MACT)。旅客在机场的中转类型包括国内-国内、国内-国际、国际-国内以及国际-国际 4 种,各类型时间约束既可以确保中转的可行性,又可以减少旅客等候的不确定性。因此,本文限定时间阈值如表 1 所示^[17]。

表 1 不同中转类型的 MCT 与 MACT

中转类型	MCT/min	MACT/min
国内-国内	50	180
国内-国际	120	360
国际-国内	120	360
国际-国际	160	480

(2) 航班衔接质量评估模型参数设置。由于旅客对中转时间的敏感程度较高,对中转服务便利性的敏感程度较低,所以本文假设 $\lambda_1=2.4, \lambda_2=1, \lambda_3=0.87, \lambda_4=0.76$ ^[17]。

(3) 机场时刻容量限制了由于资源可用性,在给定时间间隔(如 15 min, 60 min)内可以起降的航班数量,该容量通常以滚动容量限制的形式表示。本文统计了 2019 年 8 月机场历史的进离港航班数据,基于角度的异常值检测 (Angle-based outlier detection, ABOD) 算法和凸包算法确定机场容量包络曲线^[20],如图 4 所示。因此,模型中设置进场容量最大为 26 架次/15 min、77 架次/60 min,离场容量最大为 28 架次/15 min、99 架次/60 min,总容量由机场容量包线函数限制。

(4) 为了尽可能保证各航空公司的相对公平性,航班时刻的最大偏移量设置为 30 min。

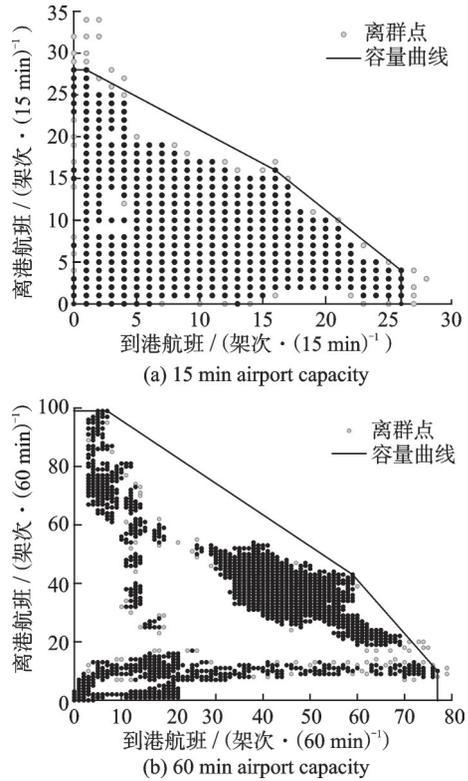


图 4 机场容量包络线

Fig.4 Airport capacity envelope line

3.2 优化结果与分析

3.2.1 基于航班衔接质量与基于中转机会模型对比

目前,在涉及机场中转的时刻优化研究中,学者多从中转机会方面考虑,通过提升机场衔接航班数量增加中转旅客的吸引力,进而提升机场旅客中转率。考虑到若仅从中转机会角度入手,虽然在一定程度上能够增加中转旅客的候选行程数量,能够将部分没有衔接的航班通过时刻调整尽可能衔接起来,但是这种方法无法对航班之间的衔接质量进行比较。因此,本部分选取 2019 年 8 月 17 日 12:00~16:00 间 300 架航班的航班计划进行案例分析,以对这 2 种方法进行对比研究。

中转机会是指进港旅客在一段时间内可以获得的出港航班机会^[10],如式(25)所示。因此,对比模型中目标函数设置为最大化中转机会数量,如式(26)所示,约束条件为式(11~21)。

$$N(t) = A(t) \times \sum_{x=t+MCT}^{t+MACT} D(x) \quad (25)$$

$$\max \sum_t N(t) \quad (26)$$

式中: $N(t)$ 表示旅客在 t 时刻到达机场可以获得的中转机会数量; $A(t)$ 和 $D(t)$ 分别表示在 t 时刻机场的到港、离港航班数量。

从表 2 可以看出,基于中转机会的优化结果能够为旅客提供 10 317 个中转候选行程选择,但

当考虑时间、空间、相对强度以及服务质量指标等必要的航班衔接条件时,该方法得到的有效候选行程数量仅为3 047个。本文提出的基于航班衔接质量的优化结果能够为旅客提供9 911个中转候选行程选择,尽管对比模型的优化结果少了4.10%,但从中转机会的有效性方面来看,本文模型为旅客提供的有效衔接航班数量对比模型增加了约8.04%。

表2 模型对比结果

Table 2 Results of model comparison

参数	本文模型	对比模型
中转机会总数	9 911	10 317
$\delta_{ijklp} \neq 0$	3 828	3 591
$\beta_{ijklp} \neq 0$	7 497	7 670
$\delta_{ijklp} \& \beta_{ijklp} \neq 0$	3 293	3 047

在航班衔接质量方面,本文模型与对比模型的到港航班衔接质量趋势大致相同,如图5所示。其中,有50.67%的航班衔接质量大于对比模型,有32.67%的衔接质量相当,仅有16.67%的航班衔接质量小于对比模型。整体来看,本文模型的衔接质量为2 784.70,对比模型的衔接质量为2 584.78,对比模型在中转机会数量上优于本文模型,但在航班衔接质量上相差了7.73%,这是由于中转机会中有较多的无效衔接航班,衔接航班仅满足时间约束,在空间、相对强度以及服务质量指标上的评估值较

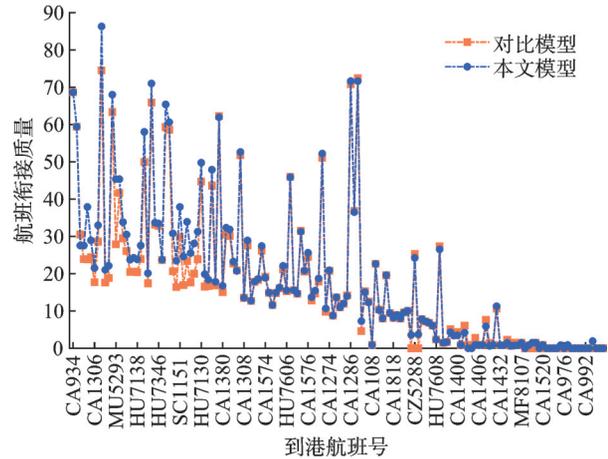


图5 模型衔接质量结果对比

Fig.5 Comparison of model articulation quality results

小。对旅客而言,无效的中转机会不会纳入中转出行的候选行程内。

上述研究已针对中转机会(时间指标)进行分析。因此,本部分对空间、相对强度、服务质量指标和航班衔接质量值分布进行对比。两个模型的有效衔接航班的评估值分布如图6所示。本文模型在中转机会优化结果少于对比模型的情况下,在各区间的航班架次多于对比模型,进一步表明模型在优化过程中将绕航系数小、直飞航班少和服务质量高的航班尽可能衔接起来,这些航班组成的候选行程更容易被旅客所接受,突出模型的优越性。但是,两个模型指标评估值分布趋于一致,这是由于

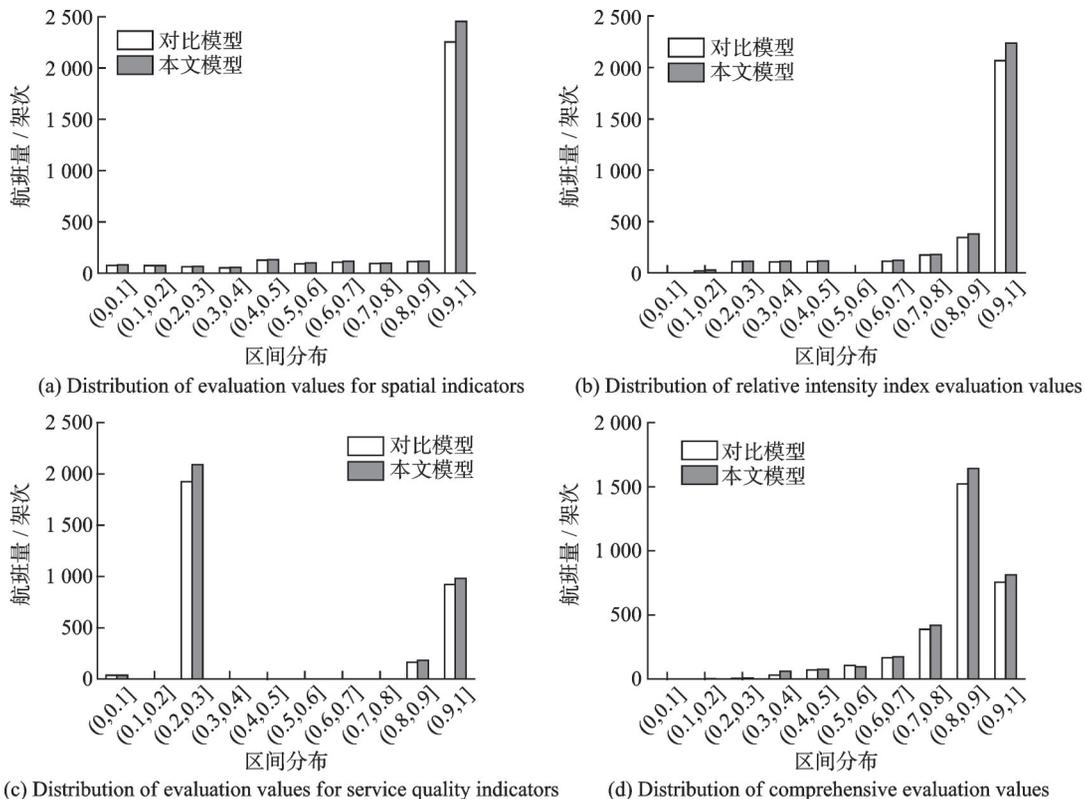


图6 指标评估值分布对比

Fig.6 Comparison of distribution of assessment values of indicators

北京首都机场辐射机场的范围与航班时刻偏移量受限,航班调整范围较小,但仍旧可以看出对比模型对旅客而言未能提供最佳的出行选择。

3.2.2 优化前后结果对比

本部分选取 2019 年 8 月 17 日 6:00~24:00 间 1 498 架航班的航班计划进行案例分析。优化前,

机场内衔接航班质量为 16 079.70,能够为旅客提供 20 271 个有效中转机会。优化后,机场的衔接航班质量为 19 547.52,提升了 21.57%,为旅客提供有效中转机会总数为 24 678 个,平均每个航班的到达旅客增加约 7 个中转候选行程,优化结果如表 3 所示。

表 3 优化结果对比

Table 3 Comparison of optimization results

航班	航班衔接质量			有效中转机会		
	原始	优化后	提升率/%	原始/个	优化后/个	提升率/%
CZ6042	42.05	43.30	2.98	55	56	1.82
MU5195	22.37	27.75	24.02	32	39	21.88
HU7604	28.79	32.23	11.95	37	45	21.62
CA980	39.68	44.35	11.79	50	56	12.00
O36872	15.12	19.08	26.16	21	26	23.81
HU7930	39.96	43.51	8.87	52	56	7.69
MU5014	39.60	41.46	4.71	51	54	5.88
CA822	40.23	41.58	3.35	50	52	4.00
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
总计	16 079.70	19 547.52	21.57	20 271	24 678	21.74

在航班衔接质量方面,有 20.34% 的航班衔接质量未得到改善,绝大多数航班处于后段时间,这是由于旅客到达机场后需要预留一定的中转换乘时间,后段时间的航班在有限的时间内不满足衔接航班的时间约束。有 63.44% 航班的衔接质量提升率处于 0~50%,8.25% 航班提升了 50%~100%,6.12% 的航班提升了 100% 以上。其中,国内航班衔接质量提升最大为 24.00,航班号为

CA1610,该航班为长春龙嘉国际机场出发至北京首都机场到达,如图 7 所示。图中以线路粗细和透明度表示有效衔接航班质量,图 7(a,b)分别为优化前、后的航班时刻表能够为旅客提供的候选行程。可以看出,在不增加机场增量资源的前提下,优化后航班旅客新增可达的国际目的地 6 个,新增可达的国内目的地 9 个,可达目的地更加多样。

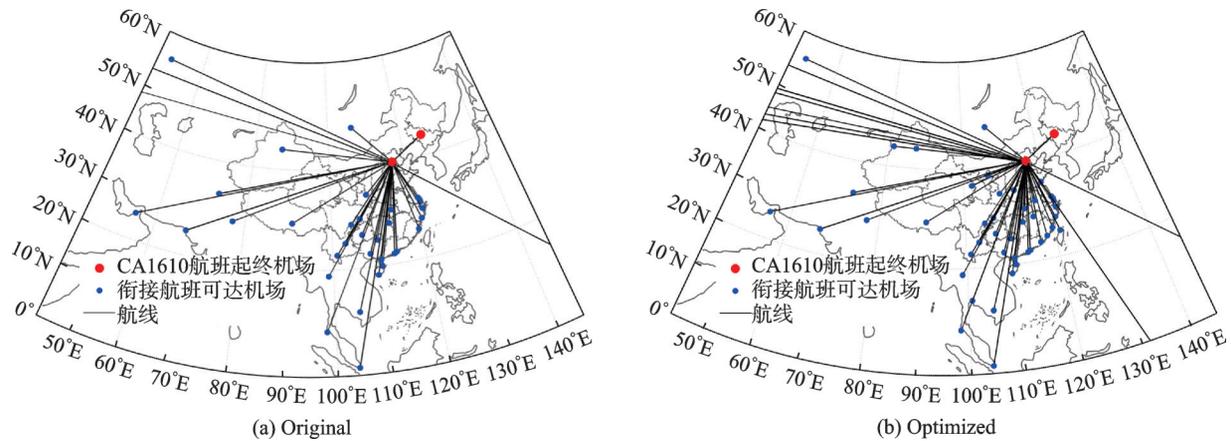


图 7 CA1610 中转候选行程对比图

Fig.7 CA1610 transit candidate trip comparison chart

从有效中转机会方面来看,原始航班时刻表满足时间约束能够提供 56 037 个中转出行选择,然而空间指标和相对强度指标评估值不为 0 的仅有 20 271 个。优化后,有效中转机会为 24 678 个,其中,62.45% 航班的有效中转机会提升率处于 0~50%,7.97% 航班提升了 50%~100%,5.26% 的航

班提升了 100% 以上,有效中转机会提升最大为 44 个。为了进一步说明以旅客为中心的时段分配在行程层面的影响,图 8 提供了优化前后到达旅客可选择的行程方案中,有效中转机会数量和衔接时间的柱状图,可以看出优化后航班对应的衔接航班数量增加,旅客候选出行选择明显增多。

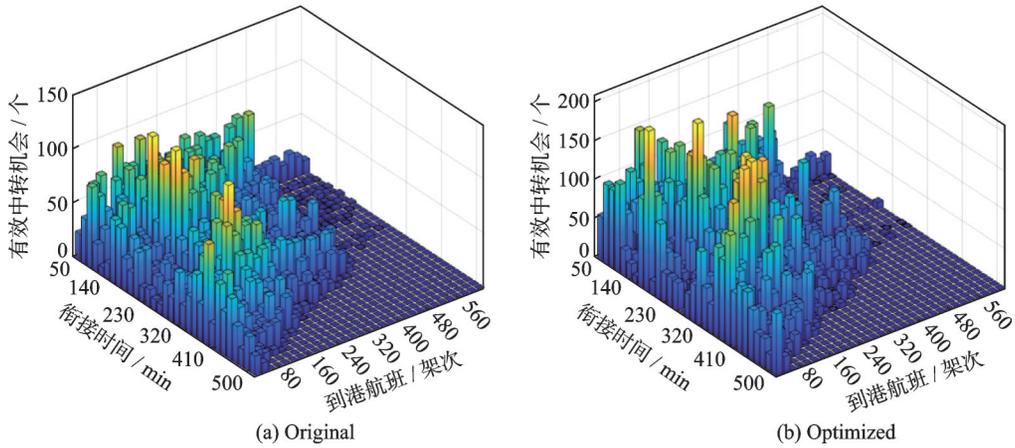


图8 有效中转机会对比

Fig.8 Comparison of effective transit opportunities

从航空公司航班时刻偏移量角度对时刻优化结果进行分析。其中,中国国际航空公司运行的航班数占航班总量的43.25%,到港航班310架次,离港航班337架次,航班时刻偏移量占总量的42.82%。东方航空公司运行的航班数占航班总量的17.91%,到、离港航班分别为128,140架次,航班时刻偏移量占比为18.19%。航班量占比最小的航司为吉祥航空公司,航班时刻偏移量为0。从图9中可以看出航空公司总计划偏移量与总的请求航班量成一定比例,即航空公司运行的航班数量越多,该航司航班时刻调整总量相对较大,航空公司间相对公平^[21]。

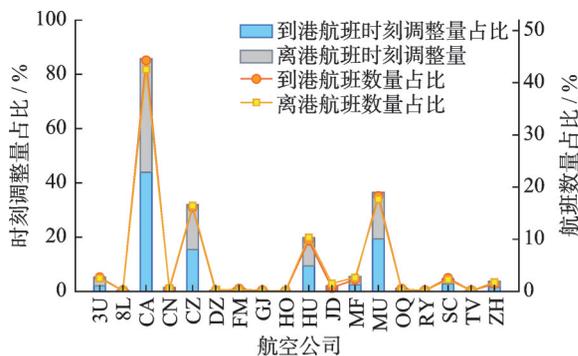


图9 航空公司航班时刻偏移量

Fig.9 Time offsets of airline flights

4 结 论

本文基于中转旅客出行选择特征,建立了考虑旅客中转出行选择的航班时刻优化模型,设计了自适应大邻域搜索算法进行模型求解,并选取北京首都国际机场对所提方法进行仿真验证。结果表明:

(1) 通过将本文模型与基于中转机会的时刻优化模型结果对比,发现本文模型优化后的航班时刻表在显著提高到达旅客候选行程数量的同时,能够兼顾提升航班间的衔接质量。经案例验证得知,

本文模型优化结果在中转机会少于对比模型4.10%的情况下,有效候选行程数量高于对比模型8.04%,航班衔接质量优于对比模型7.73%,提升了199.92。

(2) 本文模型在优化过程中能够结合中转换乘时间、航线网络空间结构、直飞航班频率以及服务质量等方面,显著提升有效候选行程数量与航班的衔接质量。分析案例发现,优化后有效候选行程增加了21.74%,衔接质量提升率达21.57%,约79.66%航班衔接质量得到改善,每个航班的到达旅客约增加了7个候选行程。在有效中转会中,62.45%的航班提升率处于0~50%,7.97%航班提升了50%~100%,5.26%的航班提升了100%以上,优化结果中旅客候选行程明显增多。

(3) 根据本文模型优化结果,发现航空公司总计划偏移量与总的请求航班量成一定比例,航空公司之间相对公平。

本文在航班时刻优化过程中未对航班进行筛选,未来可以将一些常年运行且效益较好的直达航班移出时刻调整航班范围。其次,本文虽然对机场做出15 min和60 min的时刻容量约束,并采用了滚动容量约束形式,但为了更好地均衡匹配航班需求,可以将容量约束的时间间隔逐渐缩小至5 min。

参考文献:

- [1] 谢华,王媚乙,杨磊,等.基于空中交通运行水平的航季划分方法[J].南京航空航天大学学报,2023,55(5):878-887.
XIE Hua, WANG Meiyi, YANG Lei, et al. Method of flight season division based on operation level of air traffic[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2023, 55(5): 878-887.
- [2] 中国民用航空局.民航旅客中转便利化实施指南

- [EB/OL]. (2021-02-10). http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/ZFGW/202102/t20210223_206549.html.
- [3] JIANG H, BARNHART C. Robust airline schedule design in a dynamic scheduling environment[J]. *Computers & Operations Research*, 2013, 40(3): 831-840.
- [4] JACQUILLAT A, ODONI A R. An integrated scheduling and operations approach to airport congestion mitigation[J]. *Operations Research*, 2015, 63(6): 1390-1410.
- [5] FAIRBROTHER J, ZOGRAFOS K G, GLAZEBROOK K D. A slot-scheduling mechanism at congested airports that incorporates efficiency, fairness, and airline preferences[J]. *Transportation Science*, 2020, 54(1): 115-138.
- [6] GENG Xi, HU Minghua. Collaboration optimization of flight schedule in beijing-tianjin-hebei airport group [J]. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2020, 37(6): 928-935.
- [7] PELLEGRINI P, BOLIĆ T, CASTELLI L, et al. SOSTA: An effective model for the simultaneous optimisation of airport Slot allocation[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2017, 99: 34-53.
- [8] ÇİFTÇİ M E, ÖZKIR V. Optimising flight connection times in airline bank structure through simulated annealing and Tabu search algorithms[J]. *Journal of Air Transport Management*, 2020, 87: 101858.
- [9] KEPİR B, KOÇYİĞİT Ç, KOYUNCU I, et al. Flight-scheduling optimization and automation for AnadoluJet[J]. *Interfaces*, 2016, 46(4): 315-325.
- [10] 李博文. 国际航空客运枢纽运行效率评价及航班波优化设计研究[D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2021. LI Bowen. Research on operational efficiency evaluation and flight wave optimization design of international air passenger hub[D]. Guanghan: Civil Aviation Flight University of China, 2021.
- [11] 齐莉. 基于航班波运行的枢纽机场航班时刻优化研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2016. QI Li. Research on flight time optimization of hub airport based on flight wave operation[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2016.
- [12] 李雯. 枢纽机场航班波构建方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010. LI Wen. Research on the construction method of flight waves in hub airport[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010.
- [13] BIROLINI S, JACQUILLAT A, SCHMEDEMAN P, et al. Passenger-centric slot allocation at schedule-coordinated airports[J]. *Transportation Science*, 2023, 57(1): 4-26.
- [14] JACQUILLAT A. Predictive and prescriptive analytics toward passenger-centric ground delay programs [J]. *Transportation Science*, 2022, 56(2): 265-298.
- [15] WEI K J, VAZE V, JACQUILLAT A. Airline timetable development and fleet assignment incorporating passenger choice[J]. *Transportation Science*, 2020, 54(1): 139-163.
- [16] 水笑雨, 王艳军, 王子明, 等. 考虑机场公平性的机场群航班时刻分配[J]. *航空学报*, 2023, 44(8): 327212. SHUI Xiaoyu, WANG Yanjun, WANG Ziming, et al. Slot allocation of multi-airport system considering airport fairness[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2023, 44(8): 327212.
- [17] 马辰婷, 吴薇薇, 李名杰, 等. 考虑航班波结构特征的机场中转水平研究[J]. *交通运输工程与信息学报*, 2023, 21(4): 129-137. MA Chenting, WU Weiwei, LI Mingjie, et al. Airport transfer level investigation considering flight wave structure characteristics[J]. *Journal of Transportation Engineering and Information*, 2023, 21(4): 129-137.
- [18] LEE S Y, YOO K E, PARK Y. A continuous connectivity model for evaluation of hub-and-spoke operations[J]. *Transportmetrica A: Transport Science*, 2014, 10(10): 894-916.
- [19] ZHU Z R, ZHANG A M, ZHANG Y H. Measuring multi-modal connections and connectivity radiations of transport infrastructure in China[J]. *Transportmetrica A: Transport Science*, 2019, 15(2): 1762-1790.
- [20] 沈笑云, 陈泰安, 吴世桂, 等. 基于ABOD算法的机场容量包络曲线设计研究[J]. *计算机仿真*, 2022, 39(4): 41-45, 56. SHEN Xiaoyun, CHEN Taian, WU Shigui, et al. Research on airport capacity envelope curve design based on ABOD algorithm[J]. *Computer Simulation*, 2022, 39(4): 41-45, 56.
- [21] PYRGIOTIS N, MALONE K M, ODONI A. Modelling delay propagation within an airport network[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2013, 27: 60-75.

(编辑:张蓓)