

文章编号: 1674-8190(2022)06-097-10

资源受限下的离港航班停机位分配优化模型

赵征¹, 胡莉¹, 贾爱萍², 金辉¹, 钱媛媛²

(1. 南京航空航天大学 民航学院, 南京 211106)

(2. 首都机场集团公司 北京大兴国际机场, 北京 102600)

摘要: 停机位作为机场的重要资源, 优化停机位分配策略, 实现更优的航班运行效率和提高旅客满意度已成为研究的重中之重。针对研究牵引车、管制员等资源受限条件下的停机位分配问题, 以航空器延误时间最少、靠桥数最大为目标, 将靠桥数最大转化为不靠桥数最小, 建立停机位分配优化模型, 采用启发式算法进行求解; 通过北京大兴国际机场进离港信息对停机位分配优化模型进行实例验证。结果表明: 相较于机场实际运行情况, 本文所建立的停机位分配优化模型使航空器延误降低 25.5%、靠桥率提升 8.8%, 在资源受限条件下能够实现场面延误和靠桥率的优化。

关键词: 资源受限; 禁忌搜索算法; 停机位分配; 航班延误; 靠桥率

中图分类号: V355.1

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2022.06.10

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Optimization Model of Parking Space Allocation for Departing Flights under Resource Constraints

ZHAO Zheng¹, HU Li¹, JIA Aiping², JIN Hui¹, QIAN Yuanyuan²

(1. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

(2. Beijing Daxing International Airport, Capital Airport Group Corporation, Beijing 102600, China)

Abstract: As an important resource of the airport, the optimization of parking space allocation strategy to achieve better flight operation efficiency and improve the passenger's satisfaction has become the top priority of research. In order to study the problem of parking space allocation under resource-constrained conditions such as tractors and controllers, aiming at the minimum aircraft delay time and the maximum number of bridges, and transforming the maximum number of bridges into the minimum number of non-bridges, an optimization model of parking space allocation is established, and the heuristic algorithm is used to solve it. The example of parking space allocation model is verified through entrying and departure information of Beijing Daxing International Airport. The results show that, compared with the actual operation of the airport, the parking space allocation optimization model established in this paper can reduce the aircraft delay time by 25.5% and increased bridge rate by 8.8%. The optimization of surface delay and bridge approach rate under the condition of limited resources is realized.

Key words: resource constraints; tabu search algorithm; parking space allocation; flight delay; bridge approach rate

收稿日期: 2022-01-08; 修回日期: 2022-03-15

通信作者: 胡莉, meili_hu@nuaa.edu.cn

引用格式: 赵征, 胡莉, 贾爱萍, 等. 资源受限下的离港航班停机位分配优化模型[J]. 航空工程进展, 2022, 13(6): 97-106.

ZHAO Zheng, HU Li, JIA Aiping, et al. Optimization model of parking space allocation for departing flights under resource constraints[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(6): 97-106. (in Chinese)

0 引 言

停机位分配是指综合考虑各种资源约束以及匹配性约束,给航空器分配最佳的登机口,以提高机场的运行效率和旅客满意度。航空器在机场过站期间通常需要进行一系列保障服务,合理的停机位分配策略对于优化场面保障资源的调度,节约运行成本也有一定的影响,因此停机位分配问题一直是广大研究者热衷的研究内容之一。

当前国内外关于停机位分配问题的研究可以归纳为面向乘客的目标、面向机场的目标以及面向航空公司的目标三类。以乘客为导向的停机位分配问题大多是以最小化步行距离/时间为目标^[1],Xiao M 等^[2]通过分析航空器中转过程及特点,以最小化乘客中转时间、航空器停留时间和登机口使用成本为目标,优化了登机口的分配;Deng W 等^[3]以旅客步行距离最短、停靠远机位数量最小、机位空闲时间均衡为目标,设计了一种改进的蚁群算法对停机位分配问题进行求解;姜雨等^[4]以最小化机坪冲突概率、旅客变更登机口步行距离和指派至远机位的旅客数为目标,构建了停机位实时指派的多目标优化模型,并设计带精英策略的非支配排序遗传算法(NSGA-II)进行求解;J. A. Behrends 等^[5]将航站楼内的乘客移动或货物移动与飞机滑行相结合,采用车间调度问题解决技术,开发了一种遗传算法来解决样本问题并提供最优结果。但上述对于停机位分配问题的研究多假设航空器进离港分配在同一个机位上,不存在航空器拖曳的情况。对于机场和航空公司,除机位的有效利用外,地面保障作业的费用也与停机位的分配有关。使用牵引车将航空器从一个停机位移动到另一个停机位的过程称为拖曳,当航空器在同一机场的不同时段被分至两个不同的停机位时,就需要通过拖曳操作在两个停机位之间移动航空器,这是一项昂贵的作业,因此尽量减少拖曳活动是必要的^[6]。针对上述目标,2008 年 U. Dorndorf 等^[7]将 GAP 建模为一个小团体划分问题,以最大化航班与停机位的匹配度、最小化牵引车使用数量,最小化牵引车操作次数、最大限度地

减少未分配航班数量为目标,考虑这些目标的线性组合,并通过弹性链算法解决上述问题;2010 年 U. Dorndorf 等^[8]又扩展了此模型,提出了一种在多时段时间范围内建立参考时间表的方法;J. Guépet 等^[9]以最大化分配停机位的乘客/航空器数量,并尽量减少拖曳活动的次数为目标,将停机位分配看做混合整数规划问题,并提出了两种启发式算法对该问题进行求解;Yu Chuhang 等^[10]以拖曳成本、预期冲突成本和换乘成本为目标,建立了复杂的非线性模型,并设计了自适应大邻域搜索算法,将其与基准算法比较,表明该算法在解决所考虑问题上的优势;P. Kumar 等^[11]使用一个线性目标函数,通过将牵引飞机的成本乘以表示实现牵引的变量来计算停机位分配的牵引成本;Yu C 等^[12]通过假设飞机到达和停靠是分开活动,将表示任务的拖曳成本的二次目标函数最小化。此外提高机位分配的鲁棒性也是研究的重点,航空器进离港时通常会提前或滞后一段时间,为了减少航空器提前或滞后对其他航空器造成连锁效应,停机位分配过程中通常要求设置机位缓冲时间,以保证其在吸收短暂的航空器延误后不会对后续航空器造成影响^[13]。针对上述研究目标,冯霞等^[14]建立了以机位缓冲时间成本、航空器匹配度和靠桥率(进离港航空器停靠在近机位的概率)最大为优化目标的鲁棒性停机位分配模型,有效减少了航空器的占用冲突;B. Dijk 等^[15]利用可恢复鲁棒性的概念,考虑航班延误的历史数据,模拟代表飞机提前或延后到达的场景,在停机位冲突的情况下提出多种可恢复稳健性的策略,提高了停机位分配的鲁棒性;J. Castaing 等^[16]使用历史数据预测延误分布,考虑四种稳健性度量指标,设计了一种停机位分配优化方案,实现了最小化登机口堵塞的预期影响,并将其与现有方法相比,证明了该优化方案的先进性;杨守剑等^[17]采用最小化停机位空闲时间的数学模型,考虑确定性因素和不确定性因素以及分配的动态特性等约束条件,建立了停机位分配模型,提高了停机位的使用效率。上述研究主要是基于机位匹配性约束,没有考虑在停机位分配过程中的牵引车、管制员等资

源约束。

综上所述,现有的停机位分配问题的研究大多假设不存在航空器拖曳的情况,且约束条件相对固定,在分配机位时仅考虑了航空器的机型大小、航司属性等与机位的匹配性约束,并没有考虑管制员资源、牵引车资源等因素在机位分配及运行过程所产生的影响。由于航空器进离港过程都需要管制员进行指挥以及牵引车辅助近机位推出,因此在管制员、牵引车数量受限的情况下,会限制航空器的进离港数量,进而导致供需失衡下航空器产生延误。

本文构建一种基于多资源受限条件的停机位分配优化模型,充分考虑场面资源受限的实际运行情况,采用启发式算法对停机位分配进行优化,实现场面延误和航空器靠桥率的多目标优化,以期为机场管理者进行决策提供参考。

1 停机位分配中的资源要素分析

由于航空器进离机位都需要管制员进行指挥,且航空器从近机位离港或拖曳时,需要牵引车辅助等,因此停机位分配过程中涉及到的保障资源主要包括机位资源及各种保障设备资源。

(1) 机位资源

停机位按照其与航站楼的相对位置可以分为近机位和远机位^[18]。近机位通过廊桥直接和航站楼连接,有效节约了旅客登机时间和航空器保障成本,是机场的优势资源。但机场近机位数量有限,当航空器的机位需求超过其所拥有的近机位容量时,必然会导致部分航空器需要停靠在远机位。因此在有限近机位资源条件下如何提高进离港航空器的靠桥率是机场提升服务质量的关键。

(2) 管制员资源

机坪管制员主要负责航空器的机位滑进(出)。目前机场内配备的机坪管制员数量是有限的,且每个管制员能同时管理的航空器数量也是有限的,当场面上需要管制的航空器数量超过了机坪管制员的管制能力时,航空器必须等待,导致航空器延误,因此管制员资源是停机位分配过程中需要考虑的限制因素之一。

(3) 牵引车资源

作为机场的特种设备,牵引车资源数量有限,场面上对牵引车的使用主要包括两个方面,一是航空器的拖曳过程需要牵引车执行;二是航空器从近机位离港时,需要牵引车辅助航空器推出。因此受到牵引车资源限制的航空器同样也会延误,对航空器的正常性及旅客满意度造成影响。

2 场面延误仿真模型构建

停机位分配过程中导致航空器发生延误的因素有很多,包括机位之间相互限制因素以及航空器离场推出时因缺少牵引车和管制员而不得不发生延误等情况,这些因素与航空器延误之间存在典型的非线性关系,如果依靠建立数学模型进行求解,得到的延误数据很可能会由于假设条件过多而不能如实反映场面运行实际。因此本文考虑建立仿真模型对航空器的延误数据进行采集。航班延误仿真模型的构建过程如图1所示,将停机位分配过程分为进场机位分配模块、航后拖曳模块、离场拖曳模块以及离场机位分配模块四个部分,依据各模块内部的逻辑关系以及模块与模块之间的资源共享机制,得出某一停机位分配策略下的航空器延误值,从而为后续停机位分配策略的评估与优化提供依据。从图1可以看出:航班进港离开跑道至滑行至机位的过程中需要管制员进行指挥,当判断有空闲管制员时,如果预分配机位也处于空闲状态,航班会在管制员的指挥下按照计划滑行至指定机位,若机位被占用,则会执行机位再分配决定;当航班进港占用近机位并且过站时间大于6h,则判断该航班需要执行航后拖曳操作,当牵引车和管制员空闲时,将航班按照计划拖曳至远机位停驻;当航班在远机位停驻完成后,如果航班需要拖曳至近机位离港,首先判断牵引车和管制员状态,如果两者都处于空闲状态,则按照计划执行离港拖曳操作;航班离港时,如果是从近机位离港,则需要牵引车辅助完成后推操作,并在管制员指挥下滑行至指定跑道,如果是从远机位离港,可以直接在管制员指挥下滑行至离港跑道。

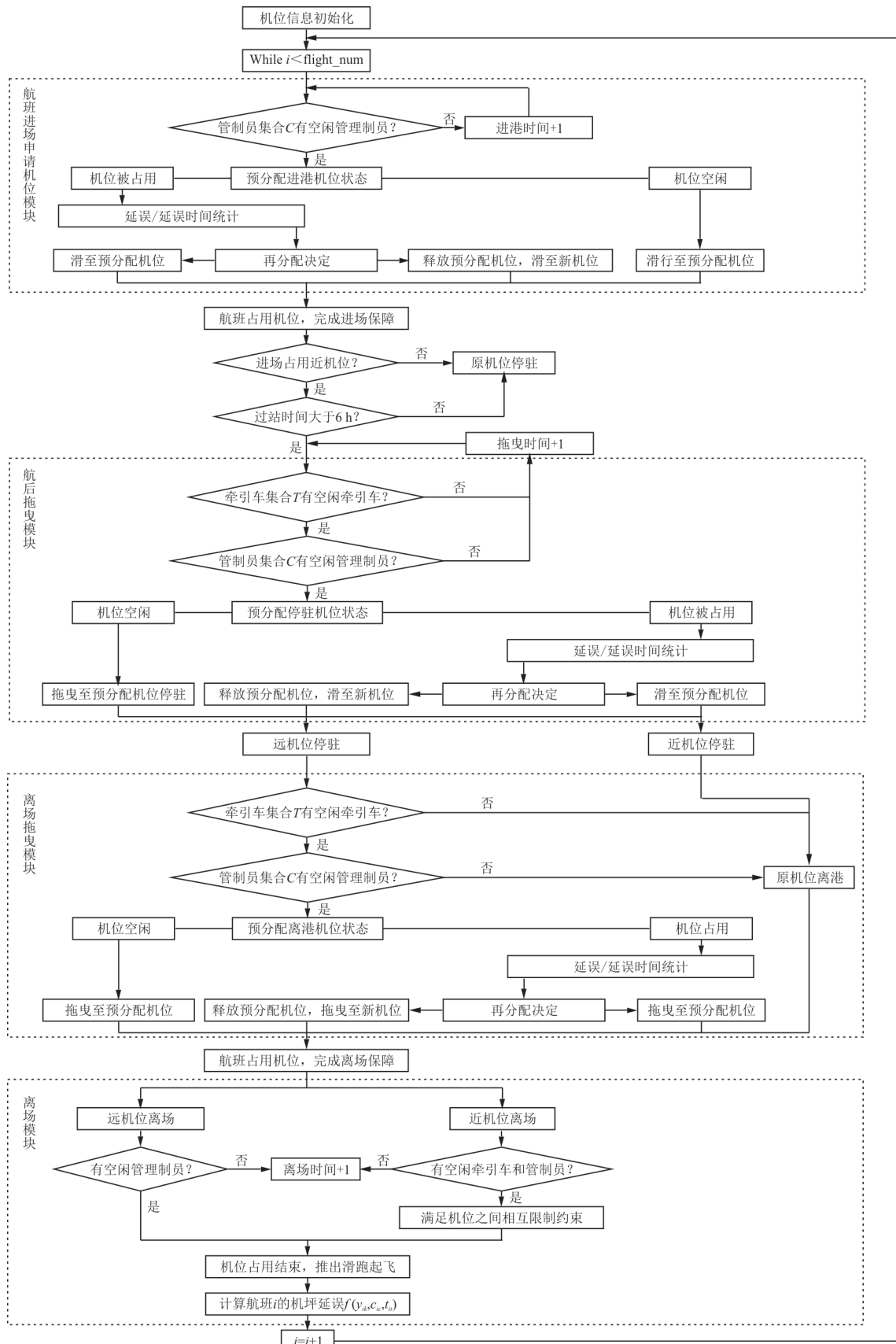


图 1 航班延误仿真模型图

Fig. 1 Simulation model diagram of flight delay

离场机位分配模块中求解航空器离港延误时间的伪代码如算法1所示,为统一符号使用,算法1中的符号与第3节停机位优化模型中的符号定义相同。除此之外, L_{kr} 为 k 机位至 r 跑道的滑行时间, d_i 为近机位离港时使用牵引车将航空器从机位推出的时间。

算法1:离场模块延误统计伪代码

```

input:  $E_{Di}, y_{ik}, R_{ir}$ 
while  $t = E_{Di}$ :
    if  $y_{ik}''' = 1$  and  $n_k = 0$ : #近机位离港
        if  $C[c].end\_used\_time < E_{Di}$  and  $T[t].end\_used\_time < E_{Di}$ 
        and 当前不存在推出冲突:
             $C_{ic} = 1, T_{it} = 1, E_{Ai} = E_{Di}$ 
             $C[c].start\_used\_time = E_{Ai}$ 
             $C[c].end\_used\_time = E_{Ai} + L_{kr}$ 
             $T[t].start\_used\_time = E_{Ai}$ 
             $T[t].end\_used\_time = E_{Ai} + d_i$ 
        else:
             $E_{Di} += 1$ 
    if  $y_{ik}''' = 1$  and  $n_k = 1$ : #远机位离港
        if  $C[c].end\_used\_time < E_{Di}$ :
             $C_{ic} = 1, T_{it} = 1, E_{Ai} = E_{Di}$ 
             $C[c].start\_used\_time = E_{Ai}$ 
             $C[c].end\_used\_time = E_{Ai} + L_{kr}$ 
        else:
             $E_{Di} += 1$ 
f( $y_{ik}, t_{it}, c_{ic}, w_{km}$ ) =  $E_{Ai} - E_{Di}$ 

```

3 停机位分配优化模型

停机位分配过程涉及到多种资源,包括停机位、牵引车、管制员等,本文通过建立数学模型的方式详细介绍停机位分配过程中各资源之间的耦合作用关系,为后续分析奠定理论基础。

3.1 参数及符号定义

停机位分配优化模型中用到的符号和参数说明如下:

- F : 航空器集合, $F = \{i | j = 1, 2, \dots, n\}$;
- G : 停机位集合, $G = \{k | k = 1, 2, \dots, m\}$;
- T : 牵引车集合, $T = \{t | t = 1, 2, \dots, d\}$;
- C : 管制员集合, $C = \{c | c = 1, 2, \dots, f\}$;
- E_{Ai} : 航空器 i 的计划进港时间, $i \in F$;
- E_{Di} : 航空器 i 的计划离港时间, $i \in F$;
- A_{Ai} : 航空器 i 的实际进港时间, $i \in F$;
- A_{Di} : 航空器 i 的实际离港时间, $i \in F$;
- V_i : 航空器 i 的机型大小, $i \in F, V_i \in \{1, 2, 3, 4\}$

分别对应航空器机型C、D、E、F四种;

c_i : 航空器 i 的所属航司, $i \in F, c_i \in \{1, 2, 3\}$ 分别对应三个不同航司;

t_k : 机位 k 的大小, $k \in G, t_k \in \{1, 2, 3, 4\}$ 分别对应机位C、D、E、F四种大小;

n_k : 机位 k 的位置参数, $k \in G, n_k \in \{0, 1\}$, 为1时代表近机位, 为0代表远机位;

c_k : 机位 k 的所属航司, $k \in G, c_k \in \{1, 2, 3\}$ 分别对应三个不同航司;

o : 停放在同一机位的两个相邻航空器间的缓冲时间约束;

s : 停放在有相互限制停机位时两航空器避免滑入推出冲突的缓冲时间约束;

M : 一个很大的数;

$y_{ik}(y'_{ik}, y''_{ik}, y'''_{ik})$: $0 \sim 1$ 决策变量, 航空器 i 在(进港、停驻、离港)分配到机位 k 时为1, 否则为0, $i \in F$;

Z_{ijk} : $0 \sim 1$ 决策变量, 航空器 i, j 分配到机位 k 且航空器 j 紧跟在航空器 i 后面时为1, 否则为0, $i, j \in F$;

w_{km} : 机位之间相互限制参数, $w_{km} \in \{0, 1\}$, 机位 k 和机位 m 之间有相互限制时为1, 否则为0;

c_{ic} : $0 \sim 1$ 决策变量, 管制员 c 为航空器 i 提供服务时为1, 否则为0;

T_{it} : $0 \sim 1$ 决策变量, 牵引车 t 为航空器 i 提供服务时为1, 否则为0;

g_i^{dc} : 表示航空器 i 结束占用管制员 c 的时刻;

g_i^{ac} : 表示航空器 i 开始占用管制员 c 的时刻;

q_i^{dt} : 表示航空器 i 结束占用牵引车 t 的时刻;

q_i^{at} : 表示航空器 i 开始占用牵引车 t 的时刻;

$$\begin{cases} X'_i = 1 & (\text{航班进港停靠在近机位}) \\ X'_i = 0 & (\text{航班进港停靠在远机位}) \\ X''_i = 1 & (\text{航班停驻时停靠在近机位}) \\ X''_i = 0 & (\text{航班停驻时停靠在远机位}) \\ X'''_i = 1 & (\text{航班离港停靠在近机位}) \\ X'''_i = 0 & (\text{航班离港停靠在远机位}) \end{cases}$$

3.2 目标函数建立

综合考虑停机位分配关键效能指标(航空器

延误时间和靠桥数),以航空器早高峰离港总延误时间最小,靠桥数最大为优化目标,并将航空器离港靠桥数最大等效为不靠桥数最小。考虑多目标优化的公平性原则,将目标函数中的关键效能指标进行归一化处理。 d_A 为航班延误时间, b 为不靠桥数, N 为航空器数量, $d_A = f(y_{ik}, t_{it}, c_{ic}, w_{km})$, $b = N - \sum_{i=1}^n X_i''$,归一化公式为 $w = \frac{x}{\max x}$, x 为 $d_A, b, \max x$ 代表所有 x 中最大的数,则目标函数 W 可以表示为

$$W = \min(w_{dA} + w_b) \quad (1)$$

通过 $f(y_{ik}, t_{it}, c_{ic}, w_{km})$ 表示机场因机位之间相互限制因素,即管制员、牵引车资源约束所导致的航空器延误时间,该时间由第 2 节描述的航班延误仿真模型得出。

3.3 约束条件

模型考虑停机位分配过程中的航班机位匹配性约束及管制员和牵引车资源 3 类约束条件。

(1) 机位约束

$$\sum_{k \in G} y'_{ik} = \sum_{k \in G} y''_{ik} = \sum_{k \in G} y'''_{ik} = 1 \quad (2)$$

$$\sum_{j \in F} Z_{ijk} \leq y_{ik} \quad (3)$$

$$\sum_{i \in N} Z_{ijk} \leq y_{jk} \quad (4)$$

$$c_i y_{ik} = c_k y_{ik} \quad (5)$$

$$v_i \leq t_k + (1 - y_{ik})M \quad (6)$$

$$E_{Ai} + (1 - Z_{ijk})M \leq E_{Di} + o \quad (7)$$

式(2)表示每个航空器在每个阶段只能安排在一个停机位上;式(3)表示同一停机位的航空器最多有一个后继航空器;式(4)表示同一停机位的航空器最多有一个前续航空器;式(5)表示当航空器 i 分配到机位 k 时,满足航空器 i 的航司和机位 k 的航司相同约束;式(6)表示当航空器 i 分配到机位 k 时,满足航空器 i 的机型大小和机位 k 的大小匹配约束;式(7)表示分配到同一停机位两相邻航空器间的固定缓冲时间约束。

(2) 牵引车和管制员约束

$$t_{it} t_{jt} (q_i^{dt} - q_j^{at})(q_j^{dt} - q_i^{at}) \leq 0 \quad (8)$$

$$c_{ic} c_{jc} (g_i^{dt} - g_j^{at})(g_j^{dt} - g_i^{at}) \leq 0 \quad (9)$$

式(8)表示同一个牵引车在同一时间只能被一架航空器占用;式(9)表示同一管制员在同一时间只能被一架航空器占用。

4 启发式算法设计

停机位分配问题是一个典型的 NP-hard 问题,常采用启发式算法进行求解。本文提出一种求解多资源受限条件下停机位分配问题的启发式智能算法。首先按照“先到先服务”的原则对航空器进行排序,并对其进行初始指派。具体步骤如下:

Step 1: 为进场航空器优先选取满足约束条件的近机位停靠,如果没有空闲近机位,则将航空器安排到满足约束条件的远机位停靠;

Step 2: 将过站时间大于 6 h 的航空器分为进港、停驻、离港阶段,并分别安排机位;

Step 3: 判断是否为所有航空器都分配了停机位,若分配完成,则得到初始解;否则重复 Step 1、Step 2 直至所有航空器都被分配停机位。

然后使用禁忌搜索算法^[19]对上述初始指派方案进行优化,需要确定适配值函数、邻域结构、禁忌对象、停止准则、候选解的选择方法等要素,本文设计的邻域移动如图 2 所示,其中 Flight 表示航班,Flight 1~Flight 4 指代不同的航班标号。

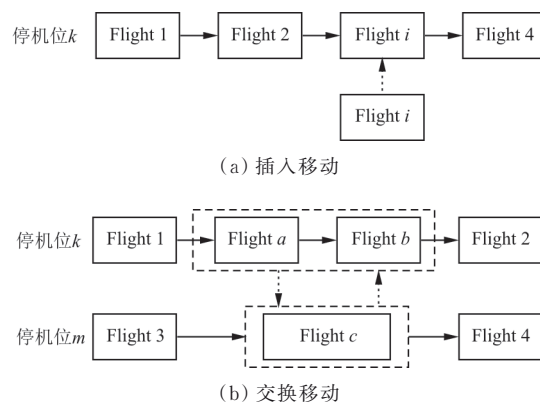


图 2 邻域结构

Fig. 2 Neighborhood structure

5 实例分析

5.1 实验数据

考虑到早高峰离港航班较多,对牵引车需求

大,且对始发航班延误小、靠桥率高均有较高的要求,因此,本文以早高峰离港航班运行作为研究对象。同时,由于停机位分配过程中机位的初始占用状态对实验结果会产生一定影响,将实验样本选取时间延长,选取北京大兴国际机场(ZBAD)

2019年11月的典型日12时至次日12时(共计24 h)的航空器运行数据作为基础数据样本,涉及航空器370架次,其中次日早高峰离港航空器114架次,部分航空器信息如表1所示,航空器进离港计划如图3所示。

表1 部分航空器信息表
Table 1 Partial Aircraft Information Sheet

航班号	计划进港时间	计划离场时间	机型	进港机位	地面代理	离港机位	实际离场时间
1	2020-11-02 13:00	2020-11-03 06:50	C	421	东航地服	421	2020-11-03 07:00
2	2020-11-02 13:00	2020-11-02 16:00	C	478	BCS地服	478	2020-11-02 15:59
3	2020-11-02 13:05	2020-11-02 14:10	C	106	南航地服	106	2020-11-02 14:10
4	2020-11-02 13:15	2020-11-02 14:30	C	146	BCS地服	146	2020-11-02 14:33
5	2020-11-02 13:25	2020-11-02 15:40	C	107	BCS地服	107	2020-11-02 15:45
6	2020-11-02 13:25	2020-11-02 14:35	C	145	BCS地服	145	2020-11-02 14:33
7	2020-11-02 13:25	2020-11-02 15:10	C	130	东航地服	130	2020-11-02 15:10
...	...	...	...	...	...	...	...

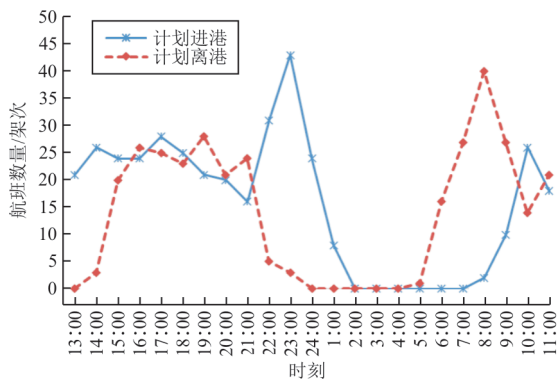


图3 航班计划进离港时刻分布

Fig. 3 Distribution of scheduled arrival and departure times of flights

ZBAD现阶段机位、跑道及场面相关资源使用情况如表2所示,其中管制员有2名,每名管制员可以同时指挥10架次正在场面滑行的航班。根据ZBAD场面分为东、西塔台以及大兴AOC统计实证,机坪管制员的运行模式为东塔台管制员负责北一跑道、东跑道运行相关的机场东区场面运行,其余是西塔台负责,本文在建立模型时统一采用上述所提到的分区域(跑道)运行模式。ZBAD目前主要存在南航地服(CSN)、东航地服(CES)以及BCS三家地面代理,每家地面代理分管多家不同的航空公司^[18]。同一家地服代理的航空公司之

间可以共享场面停机位资源。实验参数设置最大迭代次数为2 000,候选集大小为100,禁忌长度为15。

表2 ZBAD机位、跑道及相关资源使用情况
Table 2 Use of ZBAD positions, runways and related resources

资源名称	数量
近机位	58
远机位	122
离场跑道	2
管制员	2
牵引车	25

5.2 实验结果分析

采用上述航空器运行计划进行实验,将机场实际运行情况、初始解统计情况与采用启发式算法开展实验的结果分别进行记录。进场航空器数量统计图如图4所示,可以看出:航空器的进港延误主要集中在23点,实验结果符合航空器延误一般规律。离场航空器数量统计图如图5所示,可以看出:航空器离港延误主要集中在7~9点。

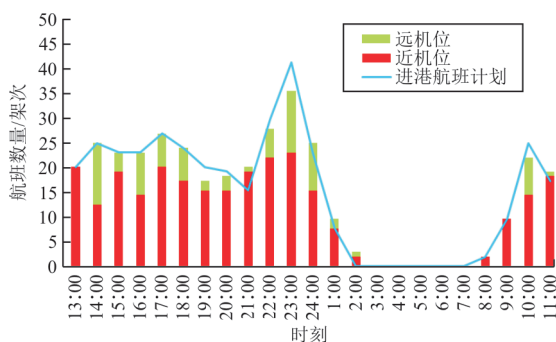


图 4 进场航空器数量统计图

Fig. 4 Statistical chart of the number of arriving aircraft

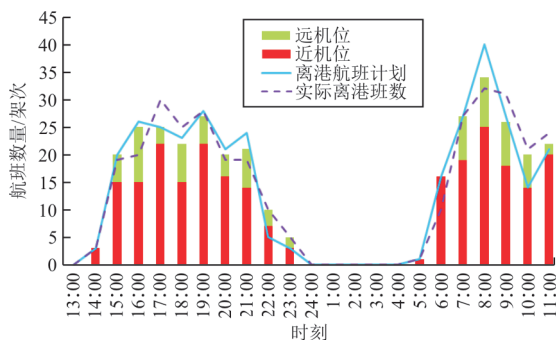


图 5 离场航空器数量统计图

Fig. 5 Statistical chart of the number of departing aircraft

在早高峰时段进港航班数量较少,主要为离港航班,这也是本文选择早高峰离港航班为研究对象的主要原因之一。

早高峰时段牵引车资源使用频次如图 6 所示。

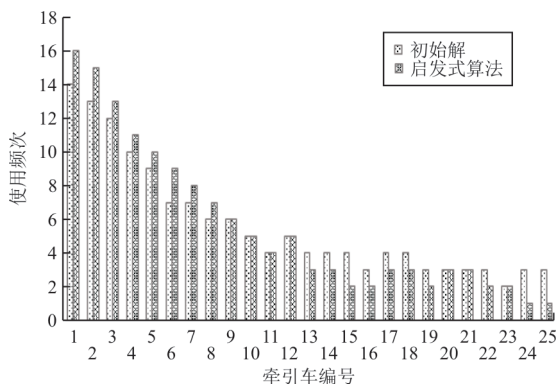


图 6 早高峰牵引车使用频次统计图

Fig. 6 Statistics chart of the frequency of tractor usage in the morning peak

从图 6 可以看出:采用启发式算法后,1~8 号牵引车的使用频次增加,13~19、22~25 号牵引车的使用频次减少。由于本文牵引车使用规则为按序号优先使用,通过上述分析可以发现,采用启发式算法后,1~8 号牵引车的使用时间得到优化,使

用频次增加,缓解了后续牵引车的使用,进而缓解了场面牵引车资源紧张的问题。

早高峰时段牵引车受限情况如图 7 所示,可以看出:牵引车资源在早高峰时段(6~10 点)被大量使用,在初始解中,早高峰 7 点和 8 点全部牵引车投入使用,牵引车需求量超过了机场所拥有的牵引车资源限制,故需要滑出的航班必须等待直至有牵引车空闲,产生航班延误。采用启发式算法后,8 点牵引车使用数量为由 25 辆变为 22 辆,有部分牵引车空闲,这是由于启发式算法生成了更优的停机位分配策略,优化了牵引车的使用,牵引车资源被及时释放,得到及时释放的牵引车又可以服务更多的航班,由于牵引车资源限制而导致的航班延误进一步缓解。综合分析图 6~图 7,采用启发式算法后,提高了牵引车的使用频次,使得早高峰达到牵引车资源限制的时间段减少,避免牵引车资源使用需求超过容量限制。

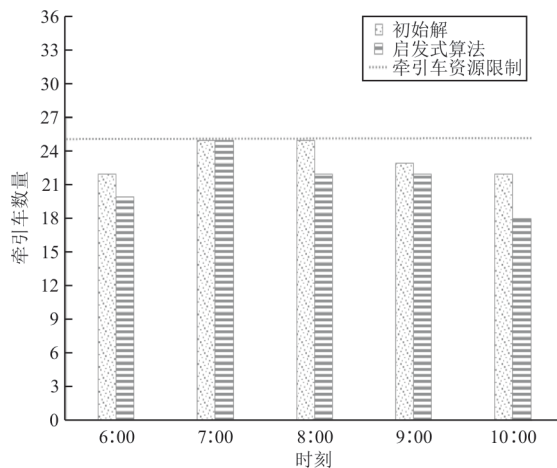


图 7 早高峰牵引车受限情况统计图

Fig. 7 Statistical chart of restricted tractor vehicles in the morning peak

早高峰阶段管制员资源利用频次如图 8 所示,其中横坐标表示形式为“管制员编号-管制员工作能力编号”,一个管制员能同时管理 10 架航班,因此工作能力编号为 1~10 共 10 个数字,如 1-1 代表第一个管制员编号为 1 的工作能力共管理过的航班架次,此部分分析与牵引车类似,不再赘述。

早高峰管制员 1 受限情况如图 9 所示,每个时间段内管制员 2 的使用情况如图 10 所示,可以看出:采用启发式算法后,达到管制员资源限制的时间段明显减少,如图 9 中的 7 点、9 点以及图 10 中的 9 点所示。

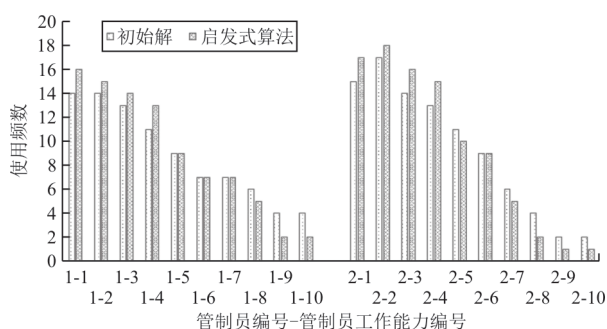


图8 早高峰管制员使用频数统计图

Fig. 8 Statistical graph of the frequency of use of controllers in the morning peak

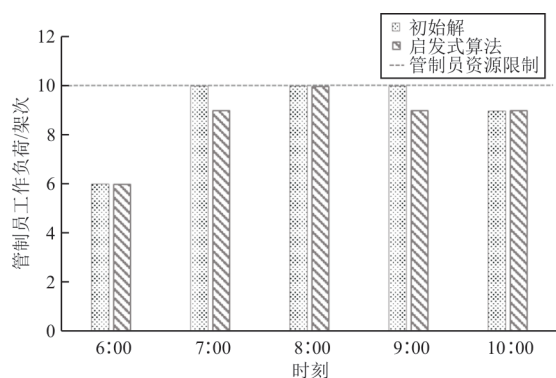


图9 早高峰管制员1受限情况统计图

Fig. 9 Statistical chart of the restricted situation of controller 1 in the morning peak

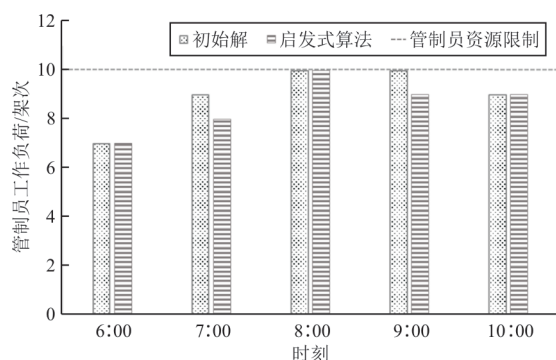


图10 早高峰管制员2受限情况统计图

Fig. 10 Statistical chart of the restricted situation of controller 2 in the morning peak

机场实际运行结果、初始解统计结果和采用启发式算法进行的实验结果统计如表3所示。

表3 场面实际运行情况与实验结果统计表
Table 3 Statistical table of actual operation and experimental results of the scene

方法	目标函数值	延误/min	靠桥数	靠桥率/%
机场运行情况统计	1.39	188	74	64.9
初始解统计	1.34	180	72	63.2
启发式算法统计	1.19	140	84	73.7

从表3可以看出:初始解中场面延误为180 min,靠桥数为72,和机场实际运行情况较为接近;采用启发式算法后场面延误为140 min,比机场实际运行情况减少了25.5%;航空器的靠桥率(近机位离港)为73.7%,靠桥率增加8.8%,目标函数值为1.19,优于机场实际运行情况统计所得目标函数值1.34。对比初始解统计结果和启发式算法统计结果,发现场面延误减少22.2%,这是由于采用启发式算法后,更优的停机位分配策略使得牵引车和管制员等资源的调度更加合理,由于资源限制而导致的航班延误得到缓解。综上所述,本文构建的停机位分配模型可以很好地降低场面延误,提高航空器靠桥率。

6 结 论

(1) 本文建立的多资源限制条件下的停机位分配优化模型可以如实反映场面运行实际情况。

(2) 构建航班延误仿真模型求解航空器的延误时间,可以有效解决数学模型假设条件过多导致计算结果不准确的问题,为后续停机位分配策略的评估提供了切实依据。

(3) 通过北京大兴国际机场典型日的实际航班数据验证,得到航空器延误比机场实际运行情况减少了25.5%,航空器靠桥率增加了8.8%,本文所建立的停机位分配优化模型能够有效减少航空器延误、提高靠桥率。

本文后续将着重研究可变资源条件下的停机位分配,即逐渐增加机场牵引车和管制员数量,直至资源充足,从而得到不同资源情况下的目标是否提升以及提升的具体数值,为机场及地服公司提供相应参考。

参考文献

- [1] 尹嘉男,马园园,胡明华. 机场飞行区资源调度问题研究(二):发展脉络与趋势[J]. 航空工程进展, 2019, 10(4): 423-435.
YIN Jianan, MA Yuanyuan, HU Minghu. The airfield resources scheduling problem-part II: development status and trends[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2019, 10(4): 423-435. (in Chinese)
- [2] XIAO M, CHIEN S, SCHONFELD P, et al. Optimizing flight equencing and gate assignment considering terminal configuration and walking time[J]. Journal of Air Transport Management, 2020, 86: 101816.

- [3] DENG W, SUN M, ZHAO H, et al. Study on an airport gate assignment method based on improved ACO algorithm [J]. *Kybernetes*, 2018, 47(1): 20-43.
- [4] 姜雨, 胡志韬, 童楚, 等. 面向航班延误的停机位实时指派优化模型[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2020, 20(5): 185-190, 217.
- JIANG Yu, HU Zhitao, TONG Chu, et al. An optimization model for gate re-assignment under flight delays [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2020, 20(5): 185-190, 217. (in Chinese)
- [5] BEHRENDTS J A, USHER J M. Aircraft gate assignment: using a deterministic approach for integrating freight movement and aircraft taxiing [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2016, 102: 44-57.
- [6] GÜLESIN S D, FATMA G, THOMAS S. A review on airport gate assignment problems: single versus multi objective approaches[J]. *Omega*, 2020, 92(C): 1-10.
- [7] DORNDORF U, JAEHN F, PESCH E. Modelling robust flight-gate scheduling as a clique partitioning problem [J]. *Transportation Science*, 2008, 42(3): 292-301.
- [8] DORNDORF U, JAEHN F, PESCH E. Flight gate scheduling with respect to a reference schedule [J]. *Annals of Operations Research*, 2010, 194: 177-187.
- [9] GUÉPET J, ACUNA-AGOST R, BRIANT O, et al. Exact and heuristic approaches to the airport stand allocation problem [J]. *European Journal of Operational Research*, 2015, 246(2): 597-608.
- [10] YU Chuhang, ZHANG Dong, LAU H Y K. An adaptive large neighborhood search heuristic for solving a robust gate assignment problem[J]. *Expert Systems with Applications*, 2017, 84: 143-154.
- [11] KUMAR P, BIERLAIRE M. Multi-objective airport gate assignment problem in planning and operations [J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2014, 48(7): 902-926.
- [12] YU C, ZHANG D, LAU H Y. An adaptive large neighborhood search heuristic for solving a robust gate assignment problem [J]. *Expert System Application*, 2017, 84: 143-154.
- [13] 袁媛, 翟好鑫, 吴宏元, 等. 民用机场停机位分配问题研究综述[J]. *沈阳航空航天大学学报*, 2019, 36(6): 46-60.
- YUAN Yuan, ZHAI Haoxin, WU Hongyuan, et al. Summary of the gate assignment problem in civil airports [J]. *Journal of Shenyang Aerospace University*, 2019, 36(6): 46-60. (in Chinese)
- [14] 冯霞, 王青召. 考虑缓冲时间成本的鲁棒性停机位分配[J]. *北京理工大学学报*, 2019, 39(4): 384-390.
- FENG Xia, WANG Qingzhao. Robust gate assignment considering buffer time cost [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2019, 39(4): 384-390. (in Chinese)
- [15] DIJK B, SANTOS B F, PITA J P. The recoverable robust stand allocation problem: a GRU airport case study [J]. *OR Spectrum*, 2019, 41: 1-25.
- [16] CASTAING J, MUKHERJEE I, COHN A, et al. Reducing airport gate blockage in passenger aviation: Models and analysis [J]. *Computers and Operations Research*, 2016, 65: 189-199.
- [17] 杨守剑, 白存儒. 机场停机位优化分配研究[J]. *航空工程进展*, 2010, 1(3): 301-305.
- YANG Shoujian, BAI Cunru. Research on the airport gate assignment optimization [J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2010, 1(3): 301-305. (in Chinese)
- [18] 赵征, 胡莉, 钱媛媛, 等. 基于多 Agent 的航空器拖曳规则优化配置方法研究[J]. *系统仿真学报*, 2022, 34(1): 113-125.
- ZHAO Zheng, HU Li, QIAN Yuanyuan, et al. Research on optimal allocation method of aircraft towing rules based on multi-agent [J]. *Journal of System Simulation*, 2022, 34(1): 113-125. (in Chinese)
- [19] 高元, 潘帅, 李娟, 等. 基于取送一体化服务模式的车辆路径问题及其禁忌搜索算法研究[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2021, 45(2): 259-263, 269.
- GAO Yuan, PAN Shuai, LI Juan, et al. Research on diesel engine fault diagnosis based on improved adaboost algorithm [J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2021, 45(2): 259-263, 269. (in Chinese)

作者简介:

赵 征(1978—),男,博士,讲师。主要研究方向:空域与机场运行评估和优化。

胡 莉(1996—),女,硕士研究生。主要研究方向:交通运输规划与管理。

贾爱萍(1989—),女,硕士,中级工程师。主要研究方向:交通运输规划与管理。

金 辉(1998—),男,硕士研究生。主要研究方向:适航安全性评估。

钱媛媛(1969—),女,学士,中级工程师。主要研究方向:机场运行管理。

(编辑:丛艳娟)