

基于混合整数规划的停机位优化调度研究



张红颖¹ 申荣苗¹ 罗谦²

1 中国民航大学电子信息与自动化学院 天津 300300

2 中国民用航空总局第二研究所 成都 610041

摘要 为有效缓解机场航空器延误现状,系统地研究了机场停机位优化调度问题。通过深入剖析机场地面运行特性,综合考虑航空器机型匹配、缓冲时间和航空器冲突等约束限制,科学合理地权衡机场各种利益需求,提出优化停机位调度问题的混合整数规划模型,主要目标是在确保航空器安全运行的前提下,使得航班延误的总时间最短。该模型引入了概率分布函数,以避免航空器冲突的发生,结合多目标优化及分支界定算法的基本理论,寻求最优的分配方案。仿真实验表明,模型对机场预计进港航空器时间进行优化排序,通过优化调度方案调整停机位分配冲突,得到最优的分配方案。该算法能够缩小搜索空间,提高求解效率,显著减低延误总时间,提高机场停机位的资源利用率。与启发式算法相比,所提算法可使航空器延误减少 2.4%,因此该方法能够有效降低机场地面航班延误率。

关键词 航班延误;停机位调度;混合整数规划;概率分布函数;分支界定算法

中图分类号 TP391.9

Study on Optimal Scheduling of Gate Based on Mixed Integer Programming

ZHANG Hong-ying¹, SHEN Rong-miao¹ and LUO Qian²

1 College of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China

2 The Second Research Institute of Civil Aviation Administration of China, Chengdu 610041, China

Abstract In order to alleviate effectively the current situation of airport aircraft delay, the optimal scheduling of airport gate is studied. By deeply analyzing the characteristics of airport ground operation, considering the constraint restrictions such as aircraft model matching, buffer time and aircraft conflict, scientifically and reasonably weighing the various interest needs of the airport, this paper proposes a mixed integer programming model to optimize the gate scheduling problem, the main goal is to ensure the safe operation of the aircraft under the premise, so that the total flight delay time is the shortest. The probability distribution function is introduced to avoid the occurrence of aircraft conflict. Combining with the basic theory of multi-objective optimization and branching definition algorithm, the optimal assignment scheme is sought. The simulation results show that the model optimizes the timing of the expected inbound aircraft in the airport, adjusts the position allocation conflict by optimizing the scheduling scheme, and gets the optimal allocation scheme. The algorithm can reduce the search space, improve the efficiency of the solution, significantly reduce the total delay time, and improve the utilization rate of airport gate resources. Compared with heuristic algorithm, the aircraft delay is reduced by 2.4%, and the proposed method can effectively reduce the delay rate of airport ground flight.

Keywords Flight delay, Gate scheduling, Mixed integer programming, Probability distribution function, Branch-and-cut method

1 引言

停机位分配是在考虑约束条件、航空器型号、航班时刻及停机位类型等因素的情况下,在特定时间段为每架进港航空器指定合适的停机位,以保证航空器正常运行^[1-2]。近年来,航空业发展迅速,机场管制服务水平低,交通拥堵现象严重,造成航班延误。在机场地面资源基础设施不变的情况下,停机位是机场运行管理中的关键资源,合理的停机位调度优化不仅可以缓解机场停机位使用的紧张状况,提高地面容量,保

障场面运行的安全与流畅,更有助于提升整个停机坪乃至终端区的运行效率^[3-5]。

近年来,停机位调度问题中的不确定性问题^[6]是国内外研究学者的研究热点之一。在内外环境不变的情况下,可将大型停机位分配问题划分为数学规划技术^[7]和启发式算法^[8]两大类。数学规划技术包括分支界定法^[9]、动态规划^[10]和局部搜索^[11]等算法,通过选定优化目标进行求解,创建具有灵活性的停机位调度系统;启发式算法包括遗传算法^[12]、禁忌搜索算法^[13]和模拟退火算法^[14]等人工智能算法,但其求解

收稿日期:2019-04-29 返修日期:2019-10-31 本文已加入开放科学计划(OSID),请扫描上方二维码获取补充信息。

基金项目:国家自然科学基金民航联合研究基金重点项目(U1533203)

This work was supported by the Key Projects of the Civil Aviation Joint Fund of the National Natural Science Foundation of China(U1533203).

通信作者:张红颖(carole_zhang0716@163.com)

复杂度高且难以满足实时性要求。国内外对提升停机位鲁棒性的研究通常以空闲时间段均衡性^[15]为目标或者通过增加同一停机位相邻航空器的空闲时间^[16]来实现。但空闲时间的均衡性在解决停机位冲突问题时不明确且没有针对性,大型机场高峰时期存在航空器短时间高密度运行的特征。此外,航空器延误对停机位预分配方案影响较大,大多文献使用时间窗^[18]来解决该问题,但不适用于实际机场运行。

本文通过对进离港航空器预计到达离开时间,航空器在停机位停留时间和进离港航空器实际到达离开时间等信息进行分析,考虑了影响机场容量的停机位调度的因素、停机位调度形式、停机位分配方案的制定和停机位调度问题的动态特性等方面,对进港航班停机位调度问题进行研究,建立混合整数规划模型。

2 停机位调度优化模型设计

近年来,研究者从不同角度对停机位分配问题进行研究,并对具体问题建立数学模型,通过优化软件结合仿真对算法进行优化,研究停机位资源配置问题,对优化目标(如时间、效率或成本等)实现最优化。

2.1 停机位分配问题的描述

在实际动态运营过程中,由于天气、航空管制等因素的影响,实际机场地面运行情况与计划分配方案可能存在偏差,造成机场管理人员对停机位分配方案的实施和协调较为混乱。本文通过使用停机位优化调度协调实时更改和更新停机位数据的管理方式来管理机场的不同登机口^[18-19]。

假设以节点集的形式表示机场地面单架航空器分配给停机位的情况,具体如下:

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1m} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \cdots & p_{nm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, P 为 $n \times m$ 矩形, P 中的每个元素表示将航空器分配给对应停机位, p_{nm} 表示将航空器 n 分配给停机位 m , $p_{nm} = 1$ 表示航空器分配的停机位是满足要求的,否则 $p_{nm} = 0$ 。

假设以节点集的形式表示相邻两架航空器在 t 时刻分配给不同停机位的情况,具体如下:

$$Q_{ij}(t) = \begin{bmatrix} q_{ij,11}(t) & q_{ij,12}(t) & \cdots & q_{ij,1m}(t) \\ q_{ij,21}(t) & q_{ij,22}(t) & \cdots & q_{ij,2m}(t) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ q_{ij,n1}(t) & q_{ij,n2}(t) & \cdots & q_{ij,nm}(t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

矩阵 $Q_{ij}(t)$ 代表航空器 i 和航空器 j 对不同停机位的选择情况,不同航空器选择不同类型的停机位进行分配和管理。

停机位分配主要考虑两个方面的问题:航空器分配的停机位以及航空器占用停机位的时间。停机位调度指对分配方案中的不合理情况及时调整并给出相应的解决方案。为了防止部分航空器没有被分配到停机位,在式(1)、式(2)中增加虚拟停机位来解决停机位分配问题。如果航空器被分配到虚拟门,则乘客需要通过摆渡车到达登机口。对于航空器在停机位的停留时间,若航空器停留时间过长会造成停机位数量迅速下降,为了避免这种情况,对长期停留的航空器作鲁棒性处理,即进行停机位调度优化,包括航班时刻表不敏感航空器的

停机位优化和航空器再分配的停机位数量的优化等。

对于分配给同一停机位的相邻两架航空器,其发生冲突的原因取决于前一架航空器的离开时间和后一架航空器的到达时间之间的间隔。如果被分配到某一固定停机位的前后两架航空器之间的运行时间间隔是固定的,则不会发生冲突,否则,航空器间容易发生冲突。图1为相邻两架航空器分配到同一个停机位的3种情况,横轴 t 表示时间,纵轴 g 表示停机位。

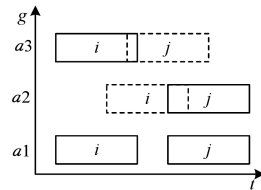


图1 停机位冲突

Fig. 1 Gate conflict

当航空器 i 和 j 分配到停机位 $a1$ 时,航空器 i 和 j 之间存在时间间隔,无冲突发生;当航空器 i 和 j 分配到停机位 $a2$ 时,由于航空器 i 延误,当航空器 j 到达停机位 $a2$ 时,航空器 i 仍然占据该停机位,航空器 j 需要等待航空器 i 离开后才能占用该停机位;当航空器 i 和 j 分配到停机位 $a3$ 时,由于航空器 j 提前到达,当其到达停机位 $a3$ 时,航空器 i 仍然占据该停机位,航空器 j 需要等待航空器 i 离开后才能占用该停机位。

在上述情况中,如果航空器提前到达或者航班延误,停机位也很容易发生冲突,其主要原因是同一停机位相邻航空器的时间间隔太短,时间间隔是影响停机位发生冲突的决定因素之一。缓冲时间的设置在一定程度上有助于吸收小幅度的航班延误或停机位冲突。相邻停机位最小时间间隔的组成如图2所示。图2中, $I = T_i + t + T_j$ 表示相邻停机位的最小时间间隔, T_i 表示航空器 i 滑出停机位的最小间隔时间, t 表示相邻航空器分配给同一停机位的空闲时间, T_j 表示航空器 j 滑入停机位的最小间隔时间。如果航空器停留时间过短,则可能发生冲突;如果航空器停留时间过长,则停机位利用率低,机场费用增加。

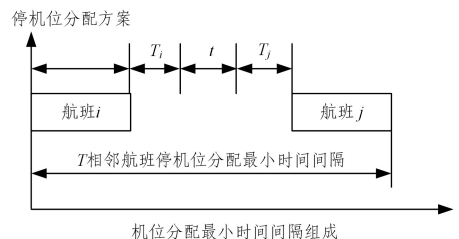


图2 为相邻停机位分配最小时间间隔

Fig. 2 Minimum time interval for adjacent gate allocation

停机位属于特殊节点,对延误航班的停机位进行优化调度主要包括两种情况:将延误航班重新分配给未被分配的停机位和分配给已分配的停机位。若分配给前者,停机位分配方案没有变化;若分配给后者,则导致停机位分配方案的鲁棒性下降。鲁棒性下降的原因包括:停机位允许存放的航空器型号匹配度高,停机位状态空闲时间短,当前停机位最新状态更新快以及相邻停机位限制因素等。

本文通过设定合适的缓冲时间来高效吸收实时分配中的

飞行器延误问题,生成抗干扰能力强的预分配方案;在执行阶段对调度计划进行修改或者重新制定新的调度计划。

2.2 关于停机位调度的混合整数规划模型的构建

(1)目标函数

本文研究的机场停机位优化调度是在已知飞行器预计离港时间和实际离港时间的前提下,在保证安全的同时,为了防止模型的复杂性过高,将目标函数设计成可接受的线性函数,以保证飞行器离开停机位的延误时间总和最小。在规划模式下,利用航班时刻表和停机位分配计划得到如下线性目标函数:

$$\min f = \alpha \sum_{i=1}^n (d_i' - d_i) - \beta \theta + \gamma \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m x_{ik} z_{ik} \quad (3)$$

其中, α, β, γ 分别代表飞行器最小离开延误权重、缓冲时间权重和机型停机位匹配度权重; d_i', d_i 分别代表飞行器实际离开停机位的时间和预计离开停机位的时间; θ 代表飞行器在停机位的缓冲时间; x_{ik} 为 1 表示飞行器分配到停机位,否则为 0; z_{ik} 为飞行器与停机位的匹配度,如果机型与停机位匹配则为 1,否则为 0。不同飞行器型号对停机位的要求不同,其匹配度不同所造成的影响也不同。对于停机位分配问题,本文主要以飞行器分配停机位所花费的时间最短来确定 3 个权重系数以及权重所占的比例,具体如下:

$$\alpha = \frac{\max C_{gk} - C_{f1}}{\max C_{gk}} \quad (4)$$

其中, $\max C_{gk}$ 为容纳所分配的飞行器类型的最大型号的停机位。例如已知飞行器为小型飞行器,即 $C_{f1} = 1$,所分配的停机位为大型停机位,即 $C_{gk} = 3$,则求得:

$$\max C_{gk} = 3 \quad (5)$$

C_{f1} 为航站楼内最大的停机位大小, x_{ik} 为 1 表示将飞行器分配到停机位, x_{ik} 为 0 表示没有将飞行器分配到停机位。

$$\beta = \begin{cases} \frac{60}{\Delta\theta + 1}, & 10 < \Delta\theta < 60 \\ 1, & \Delta\theta \geq 60 \end{cases} \quad (6)$$

其中, $\Delta\theta$ 为停放在同一停机位的相邻飞行器的间隔时间。

(2)约束条件

1)受限约束:针对飞行器停机位匹配问题,即大型停机位可以停放所有型号的飞行器,小型停机位只能停放中小型飞行器。该约束中包含一个虚拟停机位,即停机坪。当航班没有可分配的停机位时,需要将其分配到停机坪。

$$g_i \leq f_k + (1 - FG_{i,k})C \quad (7)$$

$$x_{i,k} \leq FG_{i,k}, \forall i \in F, k \in G \quad (8)$$

其中, g_i 为停机位的机型, f_k 为停机位允许的最大机型, C 为正整数。

2)对于每一架降落的飞机必须安排且只能安排一个停机位。

$$\sum_{k=1}^m x_{ik} = 1, 1 \leq i \leq n \quad (9)$$

其中, x_{ik} 表示飞行器 i 停放在停机位 k 上。

3)为避免冲突,相邻飞行器的进离港时间间隔要满足最小过站时间要求。

$$\begin{cases} d_i - a_j \geq \alpha x_{ik} x_{j(k+1)} \\ d_j - a_i \geq \alpha x_{ik} x_{j(k+1)} \\ a_i - a_j \geq \alpha x_{ik} x_{j(k+1)} \end{cases} \quad (10)$$

其中, d_i, a_i, d_j, a_j 分别表示飞行器 i 和飞行器 j 的离开停机

位时间和到达停机位时间; $x_{ik}, x_{j(k+1)}$ 分别表示飞行器 i 停放在停机位 k 和飞行器 j 停放在停机位 $k+1, i, j \in N, k, k+1 \in M, \alpha$ 是最小冲突避免时间。

4)活动重叠限制:任何时候,任意两架不同的航班不能停放在同一个停机位上。

$$x_{ik} x_{jk} (d_j - a_i) (d_i - a_j) \leq 0 \quad (11)$$

分配到同一停机位的相邻飞行器存在安全事件间隔,假设飞行器 i 比飞行器 j 先进入停机位,则:

$$a_i < d_i < a_j < d_j \quad (12)$$

反之,如果飞行器 j 比飞行器 i 先进入停机位,则:

$$a_j < d_j < a_i < d_i \quad (13)$$

从而求得:

$$a_i < d_i \quad (14)$$

$$a_j < d_j \quad (15)$$

5)如果将飞行器 i 分配给停机位 k ,将飞行器 j 分配给停机位 l ,则 z_{ijkl} 为 1,否则 z_{ijkl} 为 0。

$$\begin{cases} z_{ijkl} \leq x_{ik}, & 1 \leq i, j \leq n, 1 \leq k, l \leq m \\ z_{ijkl} \leq x_{jl}, & 1 \leq i, j \leq n, 1 \leq k, l \leq m \\ x_{ik} + x_{jl} - 1 \leq z_{ijkl}, & 1 \leq i, j \leq n, 1 \leq k, l \leq m \end{cases} \quad (16)$$

6)决策变量为 0-1 的限制。

$$x_{ik} \in \{0, 1\}, \forall i \in F, k \in G \quad (17)$$

$$Z_{ijkl} \in \{0, 1\}, \forall i, j \in F, k, l \in G \quad (18)$$

7)正整数约束。

$$C \in \mathbb{N}^+ \quad (19)$$

3 混合整数规划模型的求解

停机位调度问题属于组合优化问题,问题规模随着飞行器和停机位数量的增加不断增大,则系统计算复杂度增加,该问题属于 NP-hard 难题,直接求解比较困难。一般采用的方法有启发式算法、禁忌搜索算法、分支定界法、模拟退火算法、遗传算法和专家系统等。其中,分支界定法用于求解整数规划问题最常用的方法之一,被认为是实用性最强、求解效率最高的算法。

3.1 模型的分析 and 求解

对于停机位分配问题,考虑航班延误造成停机位冲突的情况进行停机位优化调度。假设前后两架飞机分别为飞行器 i 和飞行器 j ,作业时间分别为 T_i 和 T_j ,最小间隔时间为 t ,空闲时间为 r ,飞行器 i 比飞行器 j 先进入机位。如图 3 所示,在 $(r+t2) < t1 < (r+t2+t+T_i)$ 时,飞行器 i 和 j 停放同一停机位的冲突调解图。

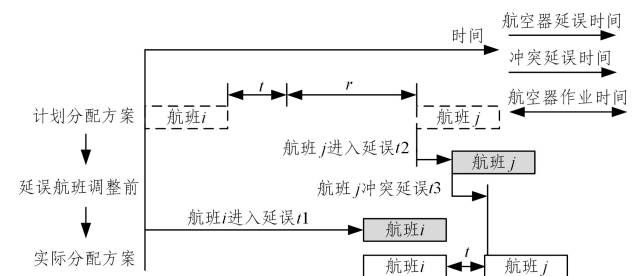


图 3 前后飞行器的时间间隔为 $(r+t2) < t1 < (r+t2+t+T_i)$
Fig. 3 Time interval between front and rear aircraft is $(r+t2) < t1 < (r+t2+t+T_i)$

由于航空器 i 和 j 进入机场的先后顺序固定,因此在航班延误较短的情况下或其他机位繁忙的情况下,航空器 j 适当向后延误以取消冲突。

根据图 3,考虑到航班延误、早到及取消等不正常现象引起的停机位重新分配,对航空器设置合适的缓冲时间。如果缓冲时间安排不妥当,则延迟起飞的航空器和提前到达的航空器很容易发生冲突。因此引入概率冲突函数,该函数可将连续分配到同一停机位的相邻两个航空器通过间隔时间有效地联系起来,以提升停机位分配的鲁棒性。为使停机位的分配鲁棒性提高,根据航空器进离港延误时间,用下式表示近似的期望冲突模型。

$$E = \sum_{i \in F} \sum_{j \in F} f(\Delta t(i, j)) \times \sum_{k \in G} \delta_{ijk} \quad (20)$$

其中, $\Delta t(i, j)$ 表示航空器 i 和 j 的预计间隔时间,具体数值根据表 1 中航空器 i 和 j 的预计和实际进离港时间确定。 $f(\Delta t(i, j))$ 为航空器 i 和 j 离开停机位的预计冲突概率函数。

表 1 部分航空器数据

Table 1 Part of airport data

机型	机号	预计到	实到	机位	机型	
1	B738	B5651	0930	0917	233	中
2	A332	HL7539	0930	0950	269	大
3	B3366	CRJ900	0945	0941	907	小
4	B738	B5372	1030	1044	247	中
5	E190	B3122	1200	1221	249	中
6	B739	B5120	1205	1215	239	大
7	B738	B5348	1350	1400	241	中
8	MA60	B3453	1440	1455	902	小
9	A321	BHTK	1515	1502	262	中
10	B738	B1985	1640	1623	241	中
11	B738	B7085	1645	1651	242	中
12	B738	B5526	1710	1713	243	中
13	A319	B6421	1810	1820	233	中
14	A333	B5972	1840	1849	235	大
15	B738	B5372	2035	2010	239	中

下面引入解决冲突概率的目标函数,具体如式(21)所示:

$$\min \varphi = \sum_{i \in F} \sum_{j \in F} p_{ij} \times \sum_{k \in G} \delta_{ijk} \quad (21)$$

其中,航空器 i 和航空器 j 为依次分配给同一停机位的两架相邻航空器。如果航空器 i 分配给停机位 k 即 $x_{ik} = 1$,且航空器 j 分配给停机位 k 即 $x_{jk} = 1$ 时,则 $\delta_{ij} = 1$;否则 $\delta_{ij} = 0$ 。概率分布函数 p_{ij} 表示为:

$$p_{ij} = \frac{1}{l(i, j)} \quad (22)$$

因为航空器 i 和航空器 j 为依次分配给同一停机位的两架相邻航空器,则假设被分配特定停机位的相邻航空器之间的时间间隔为 $[a_i - \theta, d_j + \theta]$ 。定义 $l(i, j)$ 如下:

$$l(i, j) = a_j - d_i + 2\theta \quad (23)$$

其中, a_i 为航空器 i 的预计到达时间, d_j 为航空器 j 的预计离开时间, θ 为缓冲时间。如果 $l(i, j) > 0$,则航空器 i 和 j 之间没有冲突;反之,则发生冲突。如果停放在同一停机位的相邻航空器间存在冲突,则引入评价函数 $e(i, j)$ 。

评价函数 $e(i, j)$ 取决于机场地面实际运行情况。根据航空器进离港时间历史数据分析,在鲁棒性分配中,采用线性函数评估停机位冲突。

$$e_2(i, j) = -l(i, j) \quad (24)$$

采用指数函数评估停机位冲突:

$$e_2(i, j) = \exp(-\chi l(i, j)) \quad (25)$$

其中, χ 一般取小于 0.1 的常数,用于控制指数函数的曲率。

基于 $l(i, j)$ 评估航空器 i 和 j 之间的停机位冲突概率平均值,间隔越大则发生冲突的可能性越小。

$$E(p(i, j)) = \frac{\max\{e(i, j)\} - e(i, j)}{\max\{e(i, j)\} - \min\{e(i, j)\}} \quad (26)$$

由于停机位发生冲突的概率是由航空器间的时间间隔衡量的,如果航空器预计进离港时间已知,则发生冲突的概率是固定的。

在第二阶段求解时,将冲突函数线性化可极大地减小问题规模,并降低混合整数规划问题的求解难度,算法复杂度由原来的高效求解复杂度 $O(n^k)$ 降低到 $\{0, 1\}$ 变量中的 $O(2^n)$,所以整个求解过程的效率显著提高。

3.2 算法计算步骤

在求解停机位调度问题时,停机位分配的鲁棒性与相邻航班之间的缓冲时间成正比,但随着缓冲时间的增加,航空器起飞的延误时间也随之更加。在模型求解过程中,需要平衡缓冲时间。模型的求解步骤如下:

Step1 定义航空器 i 和停机位 k 的集合 F 和 G 。确定航空器类型和停机位类型,按航空器进港时间顺序从低到高排序。设置航空器 i 的初始值,令 $i = 1$,停机位 $g_k = 0$,即停机位处于空闲状态。

Step2 初始化。利用线性松弛问题为原问题提供航空器允许间隔时间的上界,如果将航空器停放在停机坪,则定义航空器分配到停机位的值为零,根据式(6)得到松弛问题的上界。

Step3 将所有可利用的航空器放入一个集合,在该集合中的航空器停放在停机位的时间不发生冲突,可停靠在同一停机位。设置该集合初始为空,表示没有航空器。

Step4 假设存在一个可行的停机位调度方案,对于每个可利用的航空器,均存在一组可行的、最优的停机位供其分配。设置冲突航空器集合,保存所有已经分配好停机位的航空器,对于不满足要求的航空器,按照其约束条件的限制,在可利用的停机位集中对所有未分配且受限的航空器进行停机位优化调度,用节点集的形式记录所有被调度的航空器和停机位。

Step5 对原问题不断分解,删除已分配的航空器的集合数量,在不考虑变量类型的情况下求解该模型的可行解,直到求出满意约束条件的最优解。

Step6 如果达到最优迭代值,输出结果,算法结束,否则转入 Step1。

4 实例分析数据来源

根据某机场一天典型的航班计划,以时段 9:00—20:40 之间的到达航班为例,按航班到达时间对航空器进行排序,并进行系统测试和仿真,部分航班计划如表 1 所列。其中可用停机位为 10 个,使用的数据集包括 35 架航班,同一停机位相邻航空器之间的安全间隔距离 5 min,停机位缓冲时间 $\xi = 30$ min,其中将 9:00 计为 0900 时刻。

表 1 给出了部分航班计划信息。通过对数据进行处理,

估计停机位分配的鲁棒性,包括给定的缓冲时间,采用优化模型和启发式算法求解静态停机位分配问题。利用航空器延误情况,评估随机航班延误对静态停机位分配的影响以及不同缓冲时间对实时停机位分配的影响。

根据 3.1 节内容,对分配到同一停机位的相邻两架航空器进行分析。假设航空器 i 的预计到达时间为 11:40,实际到达时间为 12:00,则根据航空器概率冲突函数求得 $p_1 = 0.26$;如果航空器 j 的预计离开时间为 12:10,实际到达时间为 12:00,则根据航空器概率冲突函数求得 $p_2 = 0.20$,故航空器 i 和航空器 j 在 12:00 发生冲突的概率为 $p = 0.052$ 。如果不考虑航空器类型对停机位分配问题的影响,运用 Matlab 根据航空器实际进离港数据评估航空器间的冲突问题。一般情况下,适当调整航空器的缓冲时间,随着时间间隔的增大,停机位冲突的平均概率函数随线性函数线性减小,指数函数显著减小,期望冲突的曲线估计函数如图 4 所示。

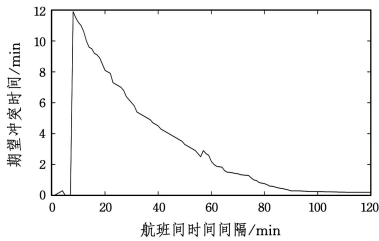


图 4 期望冲突的曲线估计

Fig. 4 Curve estimation of expected conflict

图 4 中,开始时时间间隔相对较短,曲线较陡,随着航空器间隔时间小幅度增加,停机位调度方案的鲁棒性能效果显著;随着航空器间隔时间变长,航班间隔时间对航空器间发生冲突的影响变小,因为航班间隔时间过长,则发生冲突的概率很低,可以忽略不计。

实验结果表明,该模型能最小化航空器的最小延误,停机位预分配方案在一定程度上得到提升。对于大规模的航空器

来讲,由于问题的规模随指数增长,无法得到最优解,但是仍然能减少航空器的延误。

进港航空器的总延误时间是每架航空器的延误时间之和,虽然航空器的部分延误时间会被缓冲时间吸收,但实际的航空器延误时间会随着航空器规模的增加而增加。与不存在缓冲时间相比,在存在缓冲时间的情况下,航空器的停机位分配方案的鲁棒性更好,大部分航班延误会被吸收;在不存在缓冲时间的情况下,航班延误时间无法得到很好的处理,导致延误时间不断增加。在相同条件下,设定缓冲时间时,运用不同算法求解进港航空器在停机位问题中延误情况,结果如图 5 所示。

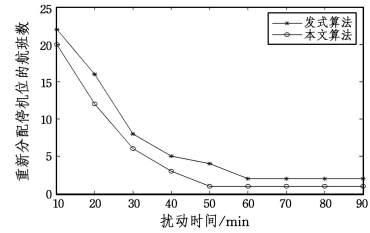


图 5 不同算法下重新分配的航空器数量

Fig. 5 Number of aircraft reassigned under different algorithms

由图 5 可知,在缓冲时间相同的情况下,根据表 1 中航空器的实际进离港时间,对比分析两种不同分配方式下需要重新分配的航空器数量。根据目标函数和实际某机场的数据,对研究时间段内的航空器在停机位分配过程中重新分配的航班数进行分析。在缓冲时间较低的情况下可以看出,启发式算法需要重新分配的航空器数量更多,而且两种算法的分配方案的抗干扰能力都很差。随着扰动时间的更加,需要重新分配的航班数量减少,而本文算法需要重新分配的航空器数量明显低于启发式算法。但整个过程中,如果缓冲时间过大会导致机会利用率下降。在缓冲时间为 30~40 min 时,停机位利用率达到最大。优化前和优化后停机位的分配方案如表 2 所列。

表 2 停机位分配方案

Table 2 Gate assignment scheme

航班编号	停机位编号 优化前	停机位编号 优化后	航班编号	停机位编号 优化前	停机位编号 优化后	航班编号	停机位编号 优化前	停机位编号 优化后	航班编号	停机位编号 优化前	停机位编号 优化后	航班编号	停机位编号 优化前	停机位编号 优化后	航班编号	停机位编号 优化前	停机位编号 优化后
1	4	4	7	4	2	13	2	4	19	5	5	25	4	1	31	1	1
2	3	2	8	6	6	14	5	5	20	6	3	26	5	5	32	2	2
3	5	5	9	5	5	15	3	3	21	1	1	27	2	2	33	5	5
4	3	3	10	1	3	16	6	6	22	2	2	28	3	3	34	3	3
5	1	1	11	4	2	17	1	2	23	3	3	29	6	6	35	4	4
6	2	4	12	7	1	18	4	4	24	1	4	30	4	4	36	2	1

从表 2 可以看出,优化前后航空器停机位的位置发生了变化,例如对于航空器 2 而言,优化前航空器 2 在停机位 3,优化后被分配到停机位 2,有效地增大了相邻航空器间的缓冲时间。停机位分配模型优化前后,停机位的分配情况用甘特图表示,如图 6 和图 7 所示。对比图 6 和图 7 可知,分配到远机位的航空器经过优化后被分配到近机位,远机位的使用率降低,近机位停放的航空器数量增加,使得近机位利用率高。同时,停在同一停机位的相邻航班的间隔时间变长,鲁棒性增强,如航班 24 号可能与航班 21 号、22 号、23 号的推出时间间隔较小,则有可能产生冲突,运用优化建模之后,航空器总延误时间减少 2.4%,有效减少了航班冲突,提高了机场运行的安全效率。

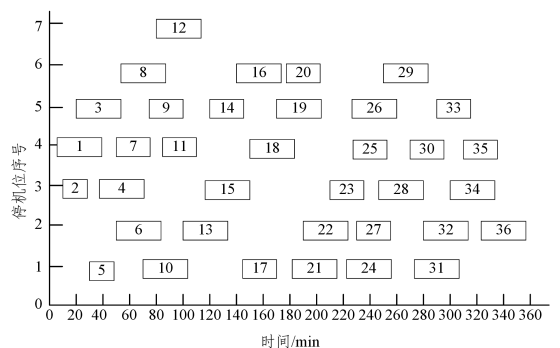


图 6 优化前的停机位分配方案

Fig. 6 Pre-optimization gate allocation scheme

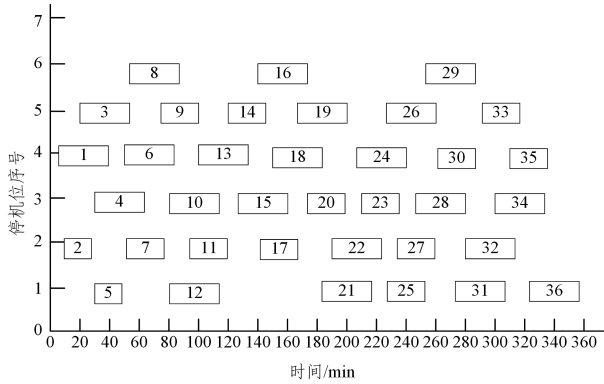


图7 优化后的停机位分配方案

Fig. 7 Optimized gate allocation scheme

本文模型采用一种综合的方法,对停机位调度问题进行优化。文中提出的解决方法对于小规模问题,容易在合理的时间内求得最优或者近似最优解。当问题规模较大时,需要更多的时间和空间来求得最佳解决方案。未来的工作是尝试用其他算法来优化此类大规模问题。

结束语 停机位调度是一类随机性强、系统结构复杂的实际分配问题,本文为在有限资源条件下合理解决航空器调度问题,建立了基于混合整数规划的模型,该模型通过不断实时更改及更新停机位数据,采用分支界定法求解模型优化函数值,将停机位调度问题简化为线性化模型求解,不仅提升了求解速度,而且可以快速寻求最优的停机位调度方案。实验仿真结果表明:本文所建立的停机位优化调度模型可以有效降低航空器延误时间,提升近停机位的使用率,提高了航班的靠桥率,节省了旅客的登机时间;其次,调整了相邻航班之间的缓冲时间以提高停机位分配的抗干扰能力,使得鲁棒性增强,期望冲突减少。

参考文献

- [1] 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.
- [2] LIU L H, ZHANG Y P, XING Z W, et al. Optimization of aircraft pushback decision based on discrete differential evolution[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and information technology*, 2016, 16(6): 196-203.
- [3] ZHANG J R, WANG G, TONG S Y. Research on Flight First Service Model and Algorithms for the Gate Assignment Problem[J]. *CMC-Computers, Materials & Continua*, 2019, 61(3): 1091-1104.
- [4] ZHAO J M, WU W J, LIU Z M, et al. Airport gate assignment problem with deep reinforcement learning[J]. *High Technology Letters*, 2020, 26(1): 102-107.
- [5] LI Z, WANG Z X, SUI H. Research on the Evaluation Index System of Operational Support Effectiveness of Military Airport Facilities[J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2018, 32(9): 209-216.
- [6] DORNDORF U, JAEHN F, PESCH E. Flight gate assignment and recovery strategies with stochastic arrival and departure times[J]. *Or Spectrum*, 2016, 39(1): 1-29.
- [7] BOURAS A, GHALEB M A, SURYAHATMAJA U S, et al. The airport gate assignment problem: a survey[J]. *Scientific World Journal*, 2014, 2014(6): 9165-9172.
- [8] CHENG C H, HO S C, KWAN C L. The use of meta-heuristics for airport gate assignment[J]. *Expert Systems with Applications*, 2012, 39(16): 12430-12437.
- [9] YU C, ZHANG D, 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.
- [10] ZHANG J, CHEN Q, SUN G, et al. Disruption Scheduling of Airport Gate Based on Tabu Search Algorithm[C]// *Control Conference*, 2014(CCC). IEEE, 2014: 84-88.
- [11] NEUMAN U M, ATKIN J A D. Airport Gate Assignment Considering Ground Movement[J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2013, 8197: 184-198.
- [12] LI D. Research on batch scheduling problem with non-identical job sizes using ant colony optimization algorithm[D]. Hefei: Anhui University, 2014.
- [13] LI Y L, LI Y. Aircraft stands assignment optimization based on variable tabu length[J]. *Journal of Computer Applications*, 2016, 36(10): 2940-2944.
- [14] WANG Y H, ZHU J F, ZHU B, et al. Mixed collection planning method for seat allocation in busy airports[J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Information & Management Engineering)*, 2015, 37(4): 427-431.
- [15] BOURAS A, GHALEB M A, SURYAHATMAJA U S, et al. The Airport Gate Assignment Problem: A Survey[J]. *Scientific World Journal*, 2014, 27(6): 9165-9172.
- [16] PANG M B, ZHANG S L, LI C X. Bi-level programming of urban bus stop locating[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2013, 30(3): 118-124.
- [17] PREM KUMAR V, BIERLAIRE M. Multi-objective airport gate assignment problem in planning and operations[J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2015, 48(7): 902-926.
- [18] SANG H K, FERON E. Impact of Gate Assignment on Departure Metering[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2014, 15(2): 699-709.
- [19] 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.



ZHANG Hong-ying, born in 1978, Ph.D., professor, postgraduate supervisor. Her main research interests include airport intelligence and automation technology.