

面向航班延误的停机位实时指派优化模型

姜雨¹, 胡志韬¹, 童楚¹, 刘振宇¹, 陈丽丽², 张洪海¹

(1. 南京航空航天大学民航学院, 南京 211106; 2. 航空电子无线电研究所, 上海 200241)

摘要: 为解决航班延误造成机场停机位占用冲突问题, 在对延误等级进行划分的基础上, 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, 构建停机位实时指派的多目标优化模型, 设计带精英策略的非支配排序遗传算法(NSGA-II)求解. 利用我国某大型机场的实际运行数据进行仿真验证. 结果表明: 在机位占用冲突得到成功化解的基础上, 旅客变更登机口的平均步行距离减至102.9 m, 指派至远机位的旅客数减至0人; 所提出的停机位实时指派模型在保证机坪安全运行的前提下, 能有效优化旅客乘机体验, 提升机坪运行效率, 为繁忙机场停机位资源调度提供决策支持.

关键词: 航空运输; 停机位指派; NSGA-II; 航班延误; 多目标优化

An Optimization Model for Gate Re-assignment under Flight Delays

JIANG Yu¹, HU Zhi-tao¹, TONG Chu¹, LIU Zhen-yu¹, CHEN Li-li², ZHANG Hong-hai¹

(1. School of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;

2. Aeronautical Radio Electronics Research Institute, Shanghai 200241, China)

Abstract: To resolve the airport gate usage conflicts resulting from flight delays, this paper proposes a multi-objective optimization model of aircraft-to-gate reassignment on the basis of flight delay classification. The model aims at minimizing apron conflict probability, passenger walking distance, and the number of passengers assigned to remote stands. A non-dominated sorting genetic algorithm with elitist strategy (NSGA-II) is designed to solve the problem. Simulation on the actual operational data of a hub airport shows that, with the gate conflicts being resolved, average passenger walking distance and number of passengers assigned to remote stands reduces to 102.9 m and 0, respectively. On the premise of ensuring safe apron operation, the model proposed herein can effectively optimize passenger flight experience, improve apron operation efficiency, and provide decision support for gate assignment in busy airports.

Keywords: air transportation; gate assignment; NSGA-II; flight delays; multi-objective optimization

0 引言

民航航班量的快速增长与机场资源的瓶颈使航班延误现象成为常态, 对机场场面资源的正常运行造成不利影响, 其中, 停机位资源对延误尤为敏感. 延误发生后, 停机位预指派方案受到扰动, 若不能及时调整方案, 会使延误进一步传播和扩

散. 因此, 面向航班延误的停机位实时指派对提升机场场面资源的运行效率, 降低航空公司航班延误成本, 优化旅客出行体验, 具有重要的实际意义.

停机位实时指派方案是在预指派方案的基础上, 针对停机位实时使用需求与原计划的偏差进行合理调整而得到的. Tang^[1]以航班历史数据作为

收稿日期: 2020-06-12

修回日期: 2020-07-06

录用日期: 2020-07-09

基金项目: 国家自然科学基金/National Natural Science Foundation of China(71971114); 南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金/Fundation of Graduate Innovation Center in NUAA(kfj20190702).

作者简介: 姜雨(1975-), 女, 山东烟台人, 副教授, 博士.

*通信作者: jiangyu07@nuaa.edu.cn

延误时间的参考,通过允许违反一些机位使用约束为航班重新指派停机位.Maharjan等^[2]在对航班延误日特性研究的基础上,构建停机位实时指派模型.Guépet等^[3]构建了停机位指派方案的混合整数规划优化模型,采用两种启发式算法对模型进行求解.近年,国内外学者在建模过程中考虑更多实际因素,在求解过程中应用智能算法,以提高求解效率^[4-5].也有学者从航班延误的分布规律出发,针对旅客出行^[6],机位使用鲁棒性^[7],相邻航班之间的冲突概率^[8]等,建立停机位实时指派模型.

已有研究成果考虑到航班延误对机场停机位调度的影响,但未考虑延误等级的划分.单一化的机位调整策略难以适用于所有情境,且无法体现决策的公平性.因此,本文从对航班延误等级的界定出发,在保证机坪安全运行的前提下,针对轻度航班延误状态和中/重度航班延误状态,提出一种面向航班延误的停机位实时指派多目标优化模型,为繁忙机场停机位调度提供决策依据.

1 问题与建模

1.1 问题描述

航班延误会对机场停机位资源的正常运行造成扰动.主要体现在:同一机位的前一架航空器占用超时,后续航空器无法在预定时间正常使用机位.停机位实时指派任务是在停机位预指派的基础上,对部分航班的使用机位进行空间(机位)或时间(占用时段)上的合理调整,以化解机位占用冲突.

1.2 模型假设

(1) 研究时段设为2 h,指派对象为时段内的进港航空器(包括进港后又离港的航空器);

(2) 不考虑航空器拖曳,即航空器在停场过程中不可更换机位;

(3) 为防止发生航空器无可用机位的情况,假设存在一个容量无限且满足各类约束的虚拟远机位.

(4) 不考虑航班取消和临时更换航空器.

1.3 模型建立

首先对延误等级进行界定,设定差异化的指派目标.轻度延误状态下,为保证指派计划的一致性,减少管制等工作人员的额外负担,在化解冲突的前提下,尽可能减少对原指派计划的变动,即最

小化因变更机位而增加旅客步行距离;中/重度延误状态下,需要在化解冲突的同时提升机坪运行效率.机坪运行效率可通过近机位的利用率衡量,即尽可能将航空器指派至近机位,故该目标可抽象为最小化指派至远机位的旅客数.面向航班延误的停机位实时指派模型框架如图1所示.

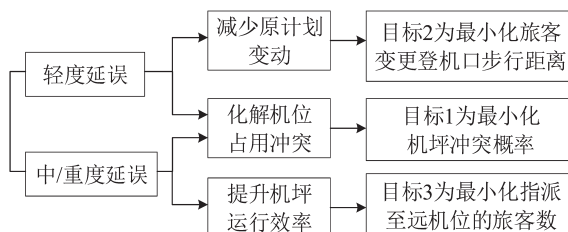


图1 停机位实时指派优化模型框架

Fig. 1 Model framework of gate reassignment optimization

(1) 目标函数.

$$\min O_1 = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l \max \left\{ \max_{i,j \in A} \{z_{k,m} x_{i,k} x_{j,m} v_{i,j}\}, \max_{i,j \in A} \{x_{i,k} x_{j,k} v_{i,j}\} \right\} \quad (1)$$

$$\min O_2 = \sum_{k,m \in G} \sum_{i \in A} c_i d_{k,m} x_{i,k} u_{i,m} \quad (2)$$

$$\min O_3 = \sum_{k \in G} \sum_{i \in A} c_i x_{i,k} y_k \quad (3)$$

(2) 约束条件.

$$\sum_{k \in G} x_{i,k} = 1, \forall i \in A \quad (4)$$

$$x_{i,k} x_{j,k} (t_i^{\text{dep}} - t_j^{\text{arr}})(t_j^{\text{dep}} - t_i^{\text{arr}}) \leq 0, \forall i, j \in A; k \in G \quad (5)$$

$$s_i \leq s_k + (1 - x_{i,k})M, \forall i \in A; k \in G \quad (6)$$

$$x_{i,k} x_{j,k} (t_i^{\text{dep}} - t_j^{\text{arr}} - T_b)(t_j^{\text{dep}} - t_i^{\text{arr}} - T_b) \leq 0, \forall i, j \in A; k \in G \quad (7)$$

$$x_{i,k}, y_k, z_{k,m}, u_{i,m} \in \{0, 1\} \quad (8)$$

式中: A 为运行航空器集合; G 为所有可用机位集合; P 为机坪集合; p_t 为 P 中元素, 代表第 t 个机坪, 共有 l 个机坪; i, j 为航空器; k, m 为机位; c_i 为航空器 i 执行的离港航班的旅客数量; $d_{k,m}$ 为旅客从停机位 k 更换至停机位 m 的步行距离; s_i, s_k 分别表示航空器 i 和机位 k 的大小等级; $t_i^{\text{arr}}, t_i^{\text{dep}}$ 分别为航空器 i 的预计开始和预计结束占用机位时间; $y_k, z_{k,m}, u_{i,m}$ 为 0-1 变量, 分别描述机位是否为远机位、两机位是否为相邻机位、航空器 i 是否被预指派至机位 m ; $x_{i,k}$ 为模型的决策变量, 描述航空器 i 是否被指派至机位 k ; M 为一个足够大

的值; T_b 为最小时间间隔; v_{ij} 表示航空器 i 与 j 发生冲突的概率, 其值与两航空器间的机位占用时间间隔 T_{ij} 有关, λ 为冲突概率系数, 即

$$T_{ij} = \min \left\{ |t_j^{\text{arr}} - t_i^{\text{arr}}|, |t_i^{\text{dep}} - t_j^{\text{arr}}|, |t_j^{\text{dep}} - t_i^{\text{dep}}| \right\} \quad (9)$$

$$v_{ij} = \exp(-\lambda T_{ij}) \quad (10)$$

式(1)针对所有航班延误状态, 表示最小化机坪冲突概率, 机位冲突分为同一机位的先后航空器冲突和同一时刻相邻机位的航空器冲突; 式(2)针对轻度航班延误状态, 表示最小化旅客变更登机口步行距离; 式(3)针对中/重度航班延误状态, 表示最小化指派至远机位的旅客数; 式(4)为航班指派的唯一性约束, 即一架航空器能且仅能被指派至一个停机位; 式(5)为机位占用的唯一性约束, 即同一个停机位在同一时刻只能被一架航空器占用; 式(6)为类型匹配约束, 即航空器的机型大小应与停机位的大小相匹配; 式(7)为同一机位的占用时间间隔约束。

2 算法设计

停机位实时指派问题是大规模整数规划问题, 存在多种可行性约束, 求解难度较大. 带精英策略的非支配排序遗传算法(NSGA-II)在处理多目标优化问题时生成 Pareto 前沿, 能为决策者提供良好的决策空间, 因此, 采用 NSGA-II 进行求解. 具体步骤如下.

Step 1 编码. 采用十进制整数编码方式, 每个基因位置代表航空器被指派至的停机位编号, 染色体长度等于研究时段内进港航空器数目.

Step 2 初始化. 依据停机位使用的约束条件, 在可行范围内随机生成规模为 N 的初始种群, 作为第一代父代种群.

Step 3 初代个体适应度产生. 对于生成的初始父代种群, 计算每个个体在各个目标函数上的值, 并依据其间是否存在支配关系对所有个体进行非支配分层与拥挤距离排序. 拥挤距离计算方法为

$$D_C = \sum_{n=1}^r \left(|O_n^{C+1} - O_n^{C-1}| \right) \quad (11)$$

式中: D_C 为解 C 的拥挤距离; r 为问题中目标函数的个数; O_n^{C+1} 与 O_n^{C-1} 分别表示解 $(C+1)$ 与解

$(C-1)$ 在第 n 个目标函数 O_n 上的值.

拥挤距离可以比较各个解之间的相对优劣, 拥挤距离小的解易被其他解代替, 故在进行解的选择时, 优先选择拥挤距离较大的解.

Step 4 交叉和变异操作. 采用二元锦标赛法从父代种群中选取 N 个个体, 记为 W_t , 分别以概率 p_c 、 p_m 进行两点交叉、单点变异操作, 产生 N 个新个体. 生成新个体的过程中需要对个体按照式(4)~式(7)进行可行性检验, 对于不满足约束条件的个体, 随机产生新的可行方案进行替换, 新个体记为 Q_t .

Step 5 选择运算和精英策略. 对合并后规模为 $2N$ 的种群 R_t , 计算每个个体的适应度, 并依据其间是否存在支配关系对所有个体进行非支配分层, 从高到低记为 F_1 、 F_2 、 F_3 , 以此类推. 在层次内部进行拥挤距离排序, 如图2所示. 从第一层开始选取 N 个个体组成新的子代种群, 记为 W_{t+1} .

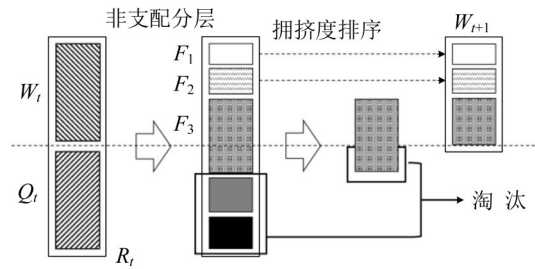


图2 NSGA-II 的选择运算和精英策略

Fig. 2 Selection and elitist strategy in NSGA-II

Step 6 重复 Step 3~Step 5, 直到达到最大迭代次数 M_{GEN} . 程序终止后, 处于个体分层中第一层个体, 即为所求解问题的非支配解.

3 仿真实验

3.1 仿真数据

机场运行过程中国内/国际航班机位相互独立, 选取其一研究即可. 以北京首都机场 T3 航站楼的国内停机位系统为研究对象, 进行仿真验证. 选取停机坪 P3、P4、P5, 系统共 85 个近机位和 42 个远机位, 如图3所示. 2018年3月4日的国内航班运行数据如表1所示, 停机位信息如表2所示, 其中, B 为近机位, R 为远机位. 参考该机场航班延误程度划分规则, 如表3所示, 该日 07:00-09:00 时段航班延误率 17.8%, 处于轻度航班延误状态; 14:00-16:00 时

段航班延误率44.9%,处于重度航班延误状态.取 $\lambda = 0.23$,分别对两种状态下的停机位实时指派仿真结果进行分析.

$N = 200$ 、 $M_{\text{GEN}} = 200$ 、 $p_c = 0.8$ 、 $p_m = 0.08$

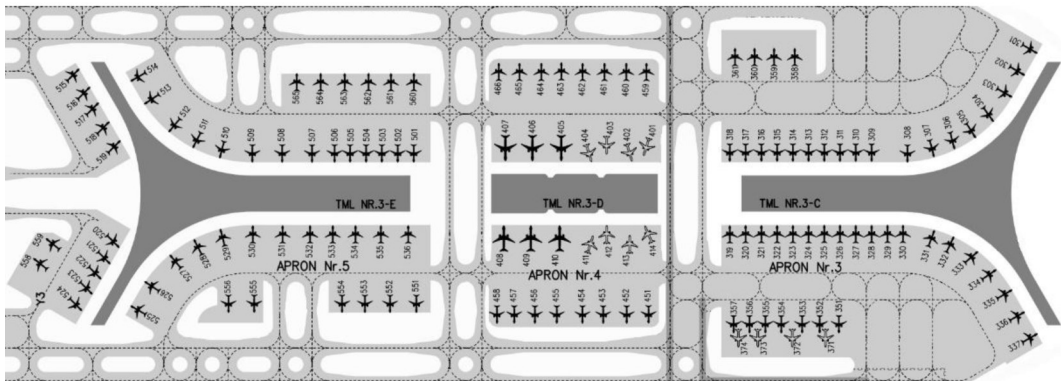


图3 北京首都国际机场T3航站楼停机位系统
Fig. 3 PEKT3 terminal gates system

表1 研究时段运行航空器数据示例
Table 1 Example of operating aircraft datain study period

航空器机号	机型大小	进港航班号	进港航班旅 客人数/人	机位占用 时间段	离港航班号	离港航班旅 客人数/人
B5442	S			07:00-08:44	CA1643	130
B1731	S	SC4651	156	08:43-09:45	SC4652	157

表2 研究时段停机位数据示例
Table 2 Example of gates data in study period

停机位编号	机坪	机位大小	类 型	相邻机位
305	P3	L	B	304,306

表3 机场航班延误等级划分规则
Table 3 Airport flight delay classification rules

航班延误状态	划分规则
轻度	$p_D \in [0, 20]$ 或 $N_D \in [15, 20]$
中度	$p_D \in (20, 40]$ 或 $N_D \in (20, 30]$
重度	$p_D \in (40, \infty]$ 或 $N_D \in (30, \infty]$

注: p_D 为延误率(%), N_D 为延误航班数量.

3.2 轻度航班延误状态下的实时指派结果分析

07:00-09:00进港航空器共7架,仿真结果共得到8组 Pareto 解,如表4所示.由于受到轻度航班延

误影响,预指派方案中有两处停机位(304、328)发生占用时间冲突,8组实时指派方案均将这两架航空器的使用机位调整到邻近的近机位,虽然增加了旅客步行距离,却有效避免了机位占用冲突.

机坪冲突概率及旅客更换登机口需要步行距离如图4所示.可以发现,各组实时指派方案均互不支配,同一个停机位指派方案在两个目标上呈现相反的趋势,较小的机坪冲突概率同时意味着旅客更换登机口步行距离的增加.方案中机坪冲突概率最低降至 2.4×10^{-4} (机位占用时间平均间隔 36.2 min),旅客更换登机口总步行距离最小为 111 330 m,即平均每位旅客需多步行 102.9 m 到达调整后的登机口.

表4 07:00-09:00轻度航班延误状态下的停机位实时指派方案
Table 4 07:00-09:00 gate assignment scheme under slight flight delays

航空器机号	B1466	9VSYI	B6906	B1458	B7567	B1760	B1731
预指派方案	463	508	328	309	316	310	304
方案1	463	508	321	308	310	309	302
方案2	463	509	330	310	308	309	302
方案3	463	508	330	302	309	317	301
方案4	463	508	336	309	316	308	317
方案5	463	509	336	316	308	309	301
方案6	463	509	336	309	301	317	316
方案7	463	508	337	301	308	317	302
方案8	463	511	336	302	308	310	301

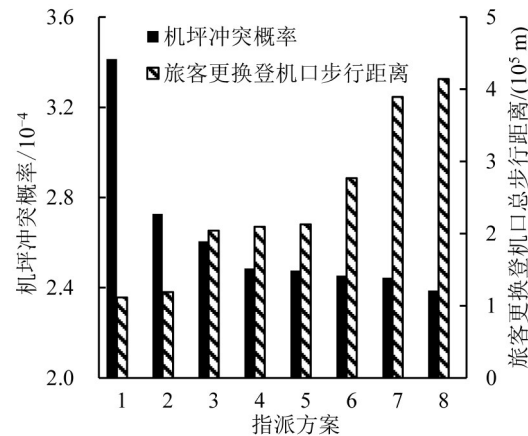


图4 07:00–09:00 停机位实时指派方案的 Pareto 解分布
Fig. 4 07:00–09:00 Pareto front distribution in gate reassignment scheme

3.3 重度航班延误状态下的实时指派结果分析

14:00–16:00 进港航空器共 38 架. 算法终止后得到 4 组 Pareto 解, 指派方案如表 5 所示. 观察发现, 38 架待指派航空器中, 有 5 架航空器的预指派方案在 4 种方案中均未被改变, 仅占 13.2%, 表明重度延误状态下的停机位实时指派策略倾向于调整大多数航空器的预设停机位, 以旅客步行距离的增加换取近机位资源的高效利用, 从而尽快化解航班延误. 研究时段内共有 6 个停机位发生了不同程度的占用时间冲突, 即 302、309、313、314、402、520. 在优化结果中, 4 种方案下停机位 302、313、314 及 520 均没有被分配给任何航空器, 避免了冲突发生, 从侧面反映预指派计划缺乏鲁棒性, 易受延误干扰.

表 5 14:00–16:00 重度航班延误状态下的停机位实时指派方案(部分)
Table 5 14:00–16:00 part of gate assignment scheme under severe flight delays

航空器机号	B6513	B1977	B5442	B7180	B6496	HL8059	...
预指派方案	301	501	306	309	312	519	
方案 1	303	515	312	304	316	519	
方案 2	303	558	312	304	316	519	...
方案 3	303	558	312	304	316	519	
方案 4	303	558	312	304	316	519	

表 6 为停机位实时指派方案对比结果. 由表 6 可知: 预指派方案中有 3 架航空器被指派至远机位, 而 4 组方案均将它们调整至近机位, 这是因为 3 架航空器执行的进港航班旅客人数相对较多; 方案 2 同样有 3 架航空器被指派至远机位, 但旅客数从 528 人下降至 421 人, 减少了 20.3%, 体现了本文算法的有效性. 在避免机位冲突的前提下, 方案 1 中没有航空器被调整至远机位, 机坪运行效率最

高, 同时机坪冲突概率被控制在 10.7×10^{-5} (机位占用时间平均间隔 39.6 min); 方案 4 的机坪冲突概率最低, 为 4.9×10^{-5} (机位占用时间平均间隔 43 min), 安全运行水平最高, 但有 725 名旅客被安排至远机位. 停机位实时指派问题作为多目标优化问题, 求解结果在目标上存在差异, 决策者可根据实际需求在选择范围内做出合适的决策.

表 6 14:00–16:00 停机位实时指派方案对比
Table 6 14:00–16:00 contrast of gate assignment scheme

方 案	指派至远机位的航空器	指派至远机位的航空器数量/架	指派至远机位的旅客数/人	机坪冲突概率/ 10^{-5}
预指派方案	B1468、B6326、B6497	3	528	
方案 1	无	0	0	10.7
方案 2	B1977、B1957、HL7772	3	421	5.4
方案 3	B1977、B1957、B6313、HL7772	4	573	5.3
方案 4	B1977、B1957、B8326、B6313、HL7772	5	725	4.9

目标函数平均值变化趋势如图 5 所示. 由图 5 可知: 初始条件下两目标均值都较高, 随着迭代的进行, 出现比较明显的下降趋势; 第 80 次迭代后,

指派至远机位旅客数均值有小幅上升趋势, 这是因为当几乎所有航班都被指派到近机位时, 仅在近机位范围内调整难以使机坪冲突概率进一步下

降,此时需要将少数航空器指派至远机位以减小冲突;两目标函数均值在第130次迭代后收敛,收敛状态下,机坪冲突概率均值小于 1×10^{-4} ,即机位占用时间平均间隔超过40 min.

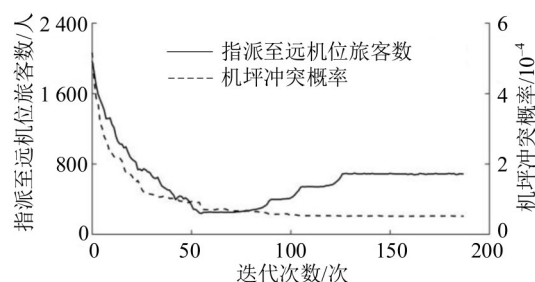
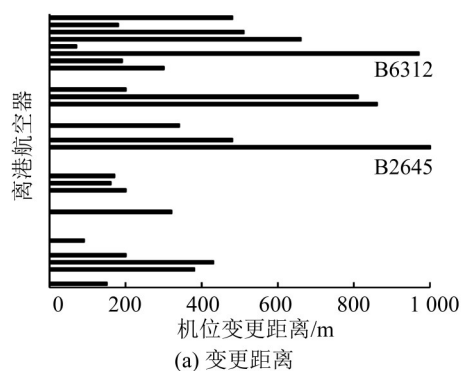
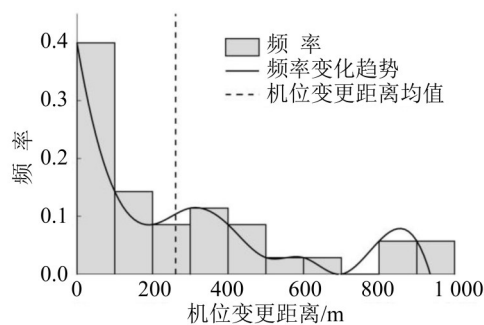


图5 14:00-16:00 目标函数平均值迭代曲线

Fig. 5 14:00-16:00 evolution of mean value of objective function



(a) 变更距离



(b) 变更距离频率分布

图6 14:00-16:00 航空器机位变更距离的分布规律

Fig. 6 14:00-16:00 distribution of gate shifting distance for aircraft

4 结 论

本文研究了航班延误情境下的机场停机位实时指派问题.在对机场航班延误等级进行界定并考虑差异化指派目标的基础上,构建了面向航班延误的停机位实时指派多目标优化模型,并给出求解方法.结果表明:多目标优化中各目标不会同时达到最优,可根据实际情况选取指派方案;所提模型可成功化解延误导致的机位占用冲突,并有效优化旅客乘机体验和提升机坪运行效率.下一步研究可考虑航班取消、航空器拖曳等机坪运行过程中的实际情况,使模型更加细化.

参考文献:

- [1] TANG C H. A gate reassignment model for the taiwan taoyuan airport under temporary gate shortages and

旅客更换登机口步行距离并非重度延误状态下的优化目标,相反地,为实现机坪运行的整体优化,需调整大量航空器的机位使用计划,故旅客步行距离显著增加.以方案1为例,从机位分配公平性角度分析航空器机位变更距离的分布规律(仅针对近机位范围),如图6(a)、(b)所示.航空器机位变更距离的均值为261.4 m,均值以下的分布较为密集,55%的航空器的机位变更距离小于200 m;均值以上的分布则较为均匀,仅有两架航空器的变更机位距离超过800 m.整体分布趋势表明,重度延误状态下的停机位实时指派方案具有较好的公平性.

stochastic flight delays[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A: Systems and Humans: A Publication of the IEEE Systems, Man, and Cybernetics Society, 2011, 41(4): 637-650.

- [2] MAHARJAN B, MATIS T I. An optimization model for gate reassignment in response to flight delays[J]. Journal of Air Transport Management, 2011, 17(4): 256-261.
- [3] 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.
- [4] ZHANG D, KLABJAN D. Optimization for gate reassignment[J]. Transportation Research Part B, 2017, (95): 260-284.
- [5] YU C, ZHANG D, LAU H Y K. A heuristic approach for solving an integrated gate reassignment and taxi scheduling problem[J]. Journal of Air Transport Management, 2017(62): 189-196.

- based on time satisfaction for O2O food delivery[J]. Chinese Journal of Management Science, 2016, 24(S1): 170-176.]
- [6] 张源凯, 黄敏芳, 胡祥培. 网上超市订单分配与物流配送联合优化方法[J]. 系统工程学报, 2015, 30(2): 251-258. [ZHANG Y K, HUANG M F, HU X P. Online order distribution model of fast food chain enterprises[J]. Journal of Systems Engineering, 2015, 30(2): 251-258.]
- [7] 韩曙光, 章园园. 基于最小集合覆盖的电商订单拆分及配送方式[J]. 浙江理工大学学报(社会科学版), 2019, 42(6): 627-636. [HAN S G, ZHANG Y Y. E-commerce order splitting and distribution method based on minimal set covering problem[J]. Journal of Zhejiang University of Technology (Social Science Edition), 2019, 42(6): 627-636.]
- [8] 于滨, 靳鹏欢, 杨忠振. 两阶段启发式算法求解带时间窗的多中心车辆路径问题[J]. 系统工程理论与实践, 2012, 32(8): 1793-1800. [YU B, JIN P H, YANG Z Z. Two-stage heuristic algorithm for multi-depot vehicle routing problem with time windows[J]. System Engineering: Theory & Practice, 2012, 32(8): 1793-1800.]
- [9] 赵亮, 梁晓萍, 杨华龙, 等. 客户配送要求变动下的VRPSDP干扰管理优化[J]. 交通运输系统工程与信息, 2018, 18(3): 218-224. [ZHAO L, LIANG X P, YANG H L, et al. Disruption management model for VRPSDP with changes of customer request and time window[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2018, 18(3): 218-224.]

上接第190页

- [6] BI J, LI Q W, ZHAO X M. On the Real-time airport parking position reassignment problem[C]// Proceedings of the 2017 7th International Conference on Social Network, Communication and Education, Paris: Atlantis Press, 2017.
- [7] XU L, ZHANG C, XIAO F, et al. A robust approach to airport gate assignment with a solution-dependent uncertainty budget[J]. Transportation Research Part B, 2017(105): 458-478.
- [8] 李倩雯. 机场停机位优化分配模型构建[D]. 北京: 北京交通大学, 2018. [LI Q W. Research on optimization models for airport gate assignment problem[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.]