

DOI: 10.19416/j.cnki.1674-9804.2023.02.023

考虑机场场面滑行的停机位指派研究

马思思* 陆美桦

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

摘要:合理高效的停机位分配能提高机场运行效率和旅客满意度。首先,以旅客步行时间、航空器进/出港滑行时间最短为目标函数,增加同一航空公司的航空器集中停靠约束建立模型。之后设计禁忌搜索算法,以上海浦东国际机场为对象开展实例分析,对比机场原始停机位指派方案,旅客步行时间、进/出港滑行时间分别减少 5.04%、25.28% 和 6.36%,并进行权重灵敏度分析,建议旅客步行时间权重不超过 0.7。最后,基于 Flexsim 设计仿真实验,进/出港滑行时间和冲突次数均减少,可接受延误水平下滑行系统服务航班量增加 3.30%,进/出港最大滑行延误时间减少 9.09% 和 2.94%。

关键词:航空运输;停机位分配;多目标优化;禁忌搜索;灵敏度分析;Flexsim 仿真

中图分类号: U8

文献标识码: A

OSID:



0 引言

机场和空域容量与日益激增的航班量不匹配是民航发展现存的重大矛盾之一,安全高效的机场场面运行可提升机场容量、减缓该矛盾。停机位作为机场的重要资源之一,指派结果直接决定了航空器在机场空侧的滑行距离和旅客在机场陆侧的步行距离。因此,合理分配停机位资源可以提高旅客服务水平和机场场面运行效率。停机位分配问题(gate assignment problem, 简称 GAP)优化目标主要有最小化旅客步行距离^[1-3]、最大化停机位利用率^[4]和鲁棒性^[5],以及综合考虑上述目标^[6]。以上研究主要以提高旅客满意度和停机位使用效率为主,较少考虑停机位分配结果对机场飞行区的影响。对于大型繁忙机场,飞行区往往是机场运行中最易形成瓶颈的区域,航班的延误有 73.3% 是由 10~20 min 的关键运行时段引起^[7]。因此,一些研究将优化目标转移至机场飞行区。Wang Jianfeng 等^[8]主要研究了航空器停留在停机坪道口时对临近停机位上航空器的影响。李军会等^[9]同时考虑航空器滑行距离、旅客步行距离和停机位空闲时

间。Maharjan 等^[10]考虑航空器滑行的燃油消耗和旅客最短步行距离建立多商品流模型。冯程等^[11]以旅客在机场飞行区停留时间最短为优化目标。Neuman 等^[12]在停机位指派模型中增加了航空器推出和进位冲突避免的安全约束。Kim 等^[13]以航空器滑行时间最短和旅客步行距离最短为优化目标,并考虑了中转旅客,之后他们^[14]又引入排队论模型研究航班进/出港过程,设计仿真实验得到更准确的滑行时间和滑行路径,最后完成停机位指派。王超等^[15]研究了平行跑道就近起降运行模式下的停机位分配模型,并设计仿真实验验证优化模型指派结果可减少滑行距离与碳排放。以上研究同时考虑了航空器和旅客,但仅有部分研究在模型中引入了接近真实运行状态的时间参数,并对模型结果进一步分析验证其对飞行区运行效率的影响。

综上,本文以旅客步行时间和航空器进/出港滑行时间最短为目标,增加航空公司约束,方便航空公司在规定时间内完成航班的地面保障作业,并使用上海浦东国际机场实际运行数据为模型参数赋值。基于文献[1]、[2]、[9]、[13]对多种算法的对比结果,选择禁忌搜索算法求解,并进行目标函

* 通信作者。E-mail: masisi@comac.cc

引用格式: 马思思,陆美桦.考虑机场场面滑行的停机位指派研究[J].民用飞机设计与研究,2023(2):139-144. MA S S, LU M H. Study on gate assignment considering airport surface taxiing[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2023(2):139-144 (in Chinese).

数权重灵敏度分析。最后基于 Flexsim 仿真软件建立机场飞行区仿真模型,对比模型结果和原始停机位指派方案对飞行区运行的影响。

1 停机位分配模型

1.1 目标函数

旅客步行时间包括停机位对应登机门到安检通道的步行时间 t_j^{PA} 、登机门到中转柜台的步行时间 t_j^{PZ} 和登机门到行李提取大厅的步行时间 t_j^{PX} , 记为:

$$f^p = \sum_{i \in F} \sum_{j \in G} x_{ij} t_j^p \quad (1)$$

$$t_j^p = \alpha t_j^{PA} + \beta t_j^{PZ} + \gamma t_j^{PX}, \forall j \in G \quad (2)$$

式中: F 表示航班集合, $i \in F$; G 表示停机位集合, $j \in G$; x_{ij} 表示航班 i 被分配到停机位 j , 则为 1, 否则为 0; α, β, γ 表示权重, 与机场旅客结构有关, $\alpha, \beta, \gamma \in [0, 1]$, 且 $\alpha + \beta + \gamma = 1$ 。

进港航空器滑行时间 t_{jr}^{AA} 和出港航空器滑行时间 t_{jr}^{AD} 记为:

$$f^{AA} = \sum_{i \in F} \sum_{j \in G} \sum_{r \in R^A} x_{ij} y_{ir} t_{jr}^{AA} \quad (3)$$

$$f^{AD} = \sum_{i \in F} \sum_{j \in G} \sum_{r' \in R^D} x_{ij} z_{ir'} t_{jr'}^{AD} \quad (4)$$

式中: R^A 表示进港跑道集合, $r \in R^A$; R^D 表示出港跑道集合, $r' \in R^D$; y_{ir} 表示航班 i 进港使用跑道 r , 则为 1, 否则为 0, 有 $\sum_{r \in R^A} y_{ir} = 1, \forall i \in F$; $z_{ir'}$ 表示航班 i 离港使用跑道 r' , 则为 1, 否则为 0, 有 $\sum_{r' \in R^D} z_{ir'} = 1, \forall i \in F$ 。

采用传统的线性加权方法得到模型目标函数, 记为:

$$\min Z = \omega_1 f^p + \omega_2 f^{AA} + \omega_3 f^{AD} \quad (5)$$

式中: $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 分别表示各个目标的权重, $\omega_1, \omega_2, \omega_3 \in [0, 1]$, 且 $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1$ 。

1.2 约束条件

$$\sum_{j \in G} x_{ij} = 1, \forall i \in F \quad (6)$$

$$(T_j - M_i) x_{ij} \geq 0, \forall i \in F, j \in G \quad (7)$$

$$x_{ij} x_{kj} (STD_i - STA_k + \Delta T_j) (STD_k - STA_i + \Delta T_j) \leq 0, \forall i, k \in F \text{ 且 } i \neq k, \forall j \in G \quad (8)$$

$$x_{ij} \leq \sum_{c \in C} p_{ic} q_{jc}, \forall i \in F, \forall j \in G \quad (9)$$

式(6)表示航班停靠时, 必须被分配且仅能被分配一个停机位。式(7)表示航班所属机型与停靠的停机位必须相互匹配: T_j 代表停机位类型; M_i 表

示航班 i 所属的机型。式(8)表示航班停靠的安全间隔, 任意两个航班停靠相同机位时, 需要保持一个安全时间间隔: STA_i 和 STD_i, STA_k 和 STD_k 分别表示航班 i 和航班 k 的计划进港时间和计划离港时间; ΔT_j 表示停机位 j 连续使用的最小间隔时间。式(9)表示航空公司约束, 定义航空公司集合为 $C, c \in C$, 分配给航班 i 的停机位 j 必须属于航班 i 所在的航空公司 c ; p_{ic} 表示航班 i 属于航空公司 c , 则为 1, 否则为 0; q_{jc} 表示停机位 j 属于航空公司 c , 则为 1, 否则为 0。

2 禁忌搜索算法

结合停机位分配问题的特点, 规定: (1) 一个停机位的指派方案中涉及到多个航班, 而每个航班只能选择一个停机位停靠, 因此将某航班是否停靠某停机位作为禁忌对象; (2) 记 M_1 表示可供航班 i 停靠的停机位个数, M_2 表示可供航班集合 I 停靠的停机位个数, 选择 $\sqrt{M_1}$ 和 $\sqrt{M_2}$ 作为停机位分配问题求解算法的禁忌长度^[16]; (3) 在构造候选集时, 有两种邻域搜索方法: 方法一, 停机位插入操作, 即 $(F_i, G_j) \Rightarrow (F_i, G_m)$, 是在满足约束条件的情况下将航班 i 从停机位 j 转移到停机位 $m (j \neq m)$; 方法二, 停机位区域置换操作, 即 $(F_i, G_j) \Leftrightarrow (F_k, G_m)$, 是在满足约束条件的情况下将停机位 j 上的航班集合 I 与停机位 $m (j \neq m)$ 上的航班集合 K 进行交换。采用目标函数的差值来评价这两种操作^[17]:

$$u_1 = obj|_{(F_i, G_j)} - obj|_{(F_i, G_m)} \\ = \omega_1 (t_j^p - t_m^p) + \omega_2 \sum_{r \in R^A} y_{ir} (t_{jr}^{AA} - t_{mr}^{AA}) \quad (10)$$

$$+ \omega_3 \sum_{r' \in R^D} y_{ir'} (t_{jr'}^{AD} - t_{mr'}^{AD}) \\ u_2 = obj|_{(F_i, G_j, F_k, G_m)} - obj|_{(F_i, G_m, F_k, G_j)} \\ = \omega_1 (n_I - n_K) (t_j^p - t_m^p) + \omega_2 \sum_{r \in R^A} \sum_{i \in I} y_{ir} (t_{jr}^{AA} - t_{mr}^{AA}) \\ + \omega_3 \sum_{r' \in R^D} \sum_{k \in K} y_{ir'} (t_{jr'}^{AD} - t_{mr'}^{AD}) \quad (11)$$

式中: n_I 和 n_K 分别表示航班集合 I 和 K 的元素个数。

3 实例分析

3.1 典型机场

选取上海浦东国际机场某日上午 08:00-12:00 运行数据开展实例分析, 跑道运行方向为北向南,

共有109个航班,涉及62个停机位和5家航空公司,数据示例见表1。模型优化目标参数数据为:浦东机场旅客中转量占进港航班旅客量的10%左右,令 $\alpha=0.5, \beta=0.05, \gamma=0.45$,计算旅客步行时间;目前国内大部分机场采用固定滑行路径^[18],因此选择机场协同决策系统典型日前一月相同时段共3700对进/出港滑行数据,统计各停机位至各跑道端的进/出港平均滑行时间;安全时间间隔 ΔT_j 取值与停机位类型有关,规定C类停机位取10 min, D类停机位取15 min, E类停机位取20 min, F类停机位取25 min。为加速优化过程,对目标函数中的时间参数进行归一化处理,数据示例见表2。

表1 典型日部分航班时刻表(08:00-12:00)

进港			出港			机型	航司
航班号	时刻	跑道	航班号	时刻	跑道		
BB8892	8:00	1	BB8579	13:15	3	A320	BB
DD057	8:15	1	DD058	10:05	3	A359	DD
DD1965	8:30	2	DD1966	9:35	4	A319	DD

表2 部分停机位相关信息

停机位	类型	安全间隔	旅客步行时间	各跑道滑行时间				航司
				1	2	3	4	
1	D	15	0.040 1	0.252 5	0.760 3	0.233 0	0.760 3	CC
2	D	15	0.040 1	0.304 5	0.733 0	0.268 1	0.733 0	CC
3	D	15	0.040 1	0.215 7	0.999 8	0.208 1	0.999 8	CC

3.2 求解结果

令 $\omega_1=0.4, \omega_2=0.4, \omega_3=0.2$,模型计算结果见表3。基于禁忌搜索算法求解的停机位分配结果更优于机场原分配结果,旅客步行时间、航空器进港滑行时间和航空器出港滑行时间分别缩短69 min, 372 min和143 min,减少5.04%、25.28%和6.36%,航空器进港滑行时间优化效果最为明显。

表3 基于禁忌搜索算法的求解结果

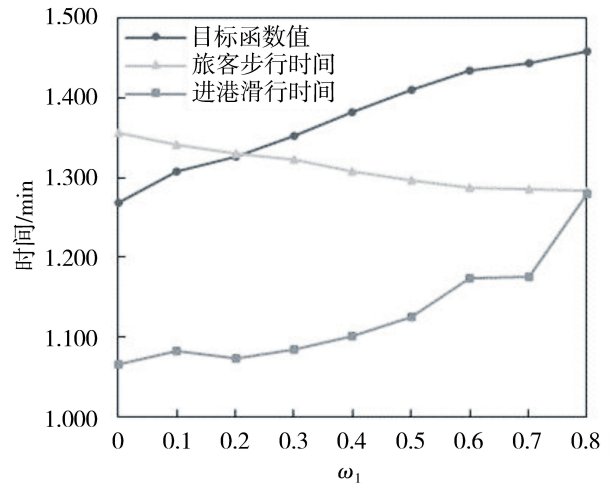
指标值	单位:min	
	模型求解结果	机场原分配结果
目标函数值	1 383.04	1 588.22
旅客步行总时间	1 307.39	1 376.79
进港滑行总时间	1 100.40	1 472.66
出港滑行总时间	2 099.64	2 242.20

3.3 灵敏度分析

对目标函数中的权重进行灵敏度分析,进一步

说明权重的取值对目标函数值的影响。考虑到机场一般更关心旅客和航空器进港阶段,因此令 $\omega_3=0.2, \omega_1+\omega_3=0.8, \omega_1, \omega_2 \in [0, 0.8]$ 。

结果如图1所示,随着 ω_1 的增加,旅客步行时间逐渐减少,但目标函数值和航空器进港滑行时间均增加。 ω_1 增加至0.2时,航空器进港滑行时间略有下降。 ω_1 增加至0.7时,航空器进港滑行时间迅速增加,旅客步行时间下降趋势变缓。因此,建议目标函数权重 ω_1 不超过0.7。

图1 ω_1 对优化目标的影响效果

4 仿真实验

Flexsim 仿真软件主要用于物流系统^[19],支持离散系统和连续流体系统建模^[20],并且有较为强大的实体对象控件,比如暂存区、传送带、分拣传送带等,可以分别表示停机位、滑行道、跑道。基于浦东机场CAD底图构建仿真模型,规定航空器在滑行道上的最大滑行速度为27 km/h,前后两架航空器需要保持的滑行间隔见表4。

表4 场面滑行间隔标准

前机	后机		
	重型	中型	轻型
重型	300	300	300
中型	200	200	200
轻型	100	100	100

以方案0为机场原分配结果,方案1为模型分配结果。首先分析航空器滑行的实际时间和滑行过程中冲突发生的次数,按照浦东机场实际进/出

港航班量增加随机航班,进行 20 次仿真实验取平均值,得到结果如表 5 所示。对比方案 0 和方案 1 发现,方案 1 整体优于方案 0,方案 1 的进/出港滑行时间明显较短,减少了进/出港冲突发生次数也小于方案 0,但进港滑行过站中的最大冲突发生次数一样。

表 5 仿真结果

指 标	方案 0	方案 1
实际进港滑行总时间/min	1 597.28	1 212.35
最大进港滑行时间(min/架次)	30.50	22.00
进港滑行冲突发生总次数/次	107	98
最大进港滑行冲突发生次数(次/架次)	2	2
实际出港滑行总时间/min	2 302.43	2 078.33
最大出港滑行时间(min/架次)	45.67	34.36
出港滑行冲突发生总次数/次	143	121
最大出港滑行冲突发生次数(次/架次)	3	2

为了进一步验证文章所提的优化模型对场面运行情况的影响,对两种方案下机场滑行系统可服务航班量进行比较。假设进港滑行不超过 20 min 和出港滑行不超过 35 min 为可接受水平,设计实验时段为 10:00-11:00,添加随机航班至滑行时间超过标准滑行时间,得到滑行系统可服务航班量,如图 2 所示。方案 0 中平均可服务航班量为 91 架次,方案 1 为 94 架次,增加 3 架次,提高 3.30%。

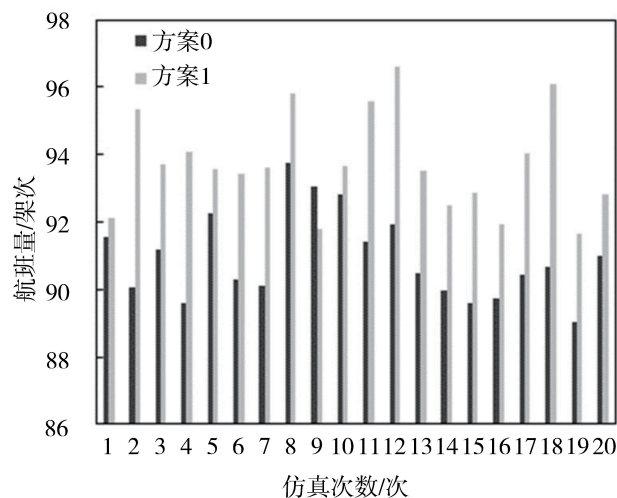


图 2 可接受延误水平下机场滑行系统服务航班量

继续添加随机航班,得到航班量与延误水平的关系,如图 3 和图 4 所示。当航班量达到 110 架次时,两种方案下的进港滑行延误时间分别为 77 min 和 70 min,减少了 9.09%,出港滑行延误时间分别为 102 min 和 99 min,减少了 2.94%。同时,方案 1 在进港滑行方面更优于方案 0,在同一航班量下延误水平远低于方案 0,而在出港滑行中,当航班量达到一定程度时(106 架次),方案 1 的延误水平逐渐接近方案 0。综上,优化模型对进港滑行的影响大于出港滑行,且当航班量逐渐增加,两种方案的出港滑行延误时间也逐渐接近。

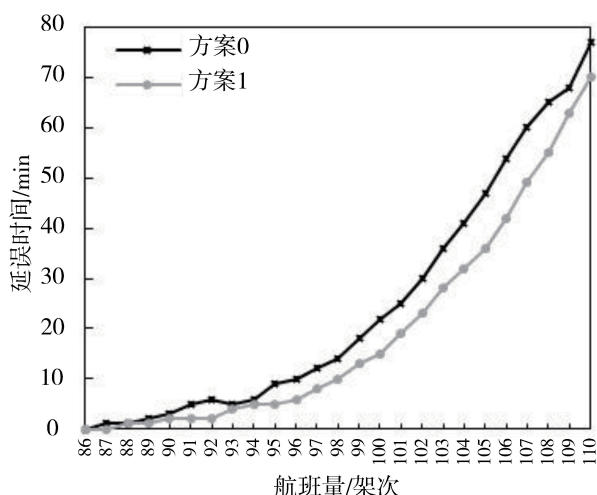


图 3 航班量与进港滑行延误时间关系图

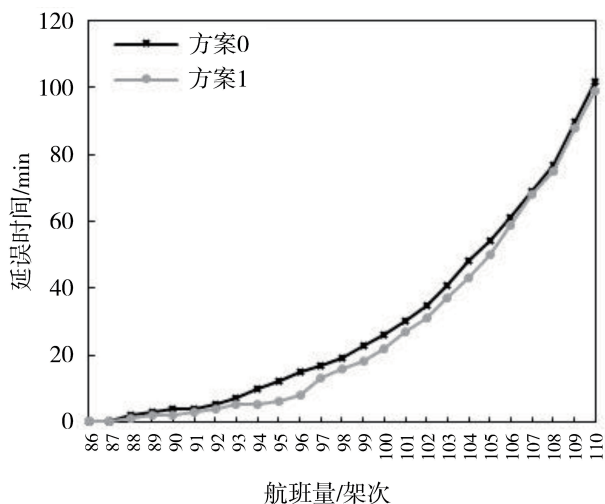


图 4 航班量与出港滑行延误时间关系图

5 结论

(1) 在已有研究的基础上对停机位分配模型

进行了改进,优化了目标函数,并完善了约束条件,采用禁忌搜索算法进行求解,并与随机分配结果进行对比,证明模型的有效性。

(2) 设计仿真实验分析模型求解的停机位分配结果对机场场面运行的影响,结果表明:进/出港滑行时间和冲突次数均减少,但进港滑行中最大冲突次数保持不变;可接受延误水平下,滑行系统可服务航班量增加;同一航班量下延误时间更短,但当航班量持续增加时,出港滑行的延误时间会与随机分配方案趋于一致。

(3) 本文中的停机位分配模型仍存在诸多未考虑因素,要尽可能接近实际情况,还需要进一步优化,比如增加同机坪安全时间间隔,避免航空器在推出/进位同一停机坪时发生冲突等。

参考文献:

- [1] AKTEL A, YAGMAHANB, OZCAN T, et al. The comparison of the metaheuristic algorithms performances on airport gate assignment problem[J]. Transportation Research Procedia, 2017, 22:469-478.
- [2] PINTEA C, POP P C, CHIRA C, et al. A hybrid ant-based system for gate assignment problem[C]// International Workshop on Hybrid Artificial Intelligence Systems. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008: 273-280.
- [3] 卫东选. 基于运行安全的机场停机位分配问题研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- [4] 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.
- [5] YU C H, ZHANG D, LAU H Y K. MIP-based heuristics for solving robust gate assignment problems[J]. Computers and Industrial Engineering, 2016, 93: 171-191.
- [6] TANG C H, WANG W C. Airport gate assignments for airline-specific gates[J]. Journal of Air Transport Management, 2013, 30(7): 10-16.
- [7] ATKIN J, BURKE E K, RAVIZZA S. The airport ground movement problem: past and current research and future directions[C]// 4th International Conference on Research in Air Transportation. 2010.
- [8] WANG J F, SHORTLE J F, WANG J, et al. Analysis of gate-waiting delays at major US airports[C]// 9th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference (ATIO). [S.l.]: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2009.
- [9] 李军会, 朱金福, 高强. 基于贪婪禁忌算法的停机位指派问题研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2011, 11(4): 173-179.
- [10] MAHARJAN B, MATIS T I. Multi-commodity flow network model of the flight gate assignment problem[J]. Computers and Industrial Engineering, 2012, 63(4): 1135-1144.
- [11] 冯程, 胡明华, 赵征. 一种新的停机位分配优化模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2012, 12(1): 131-138.
- [12] NEUMAN U M, ATKIN J A D. Airport gate assignment considering ground movement[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2013, 8197: 184-198.
- [13] KIM S H, FERON E, CLARKE J P. Gate assignment to minimize passenger transit time and aircraft taxi time[J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 2013(2): 467-475.
- [14] KIM S H, FERON E. Impact of gate assignment on departure metering[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15(2): 699-709.
- [15] 王超, 任云鸿. 面向节油减排的平行多跑道混合运行机场停机位分配模型[J]. 交通信息与安全, 2021, 39(5): 144-152.
- [16] 郑攀. 民用机场停机位分配问题优化模型与算法的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
- [17] 马思思. 繁忙机场滑行道和停机位联合调度研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- [18] 尹嘉男, 胡明华, 赵征. 多跑道机场停机位分配仿真模型及算法[J]. 交通运输工程学报, 2010, 10(5): 71-76.
- [19] 许晨. 基于 Flexsim 的某汽车装配车间物流建模与仿真的研究[D]. 济南: 山东大学, 2008.
- [20] 秦天保, 周向阳. 实用系统仿真建模与分析——使用 Flexsim[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.

作者简介

马思思 女, 硕士, 工程师。主要研究方向: 航空器运行数据管理。E-mail: masisi@comac.cc

陆美桦 女, 硕士, 工程师。主要研究方向: 飞机顶层需求定义。E-mail: lumeihua1@comac.cc

Study on gate assignment considering airport surface taxiing

MA Sisi * LU Meihua

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

Abstract: Reasonable and efficient gate assignment can improve airport operation efficiency and passenger satisfaction. Firstly, a gate assignment optimization model was established based with the objective of the shortest passenger walking time and aircraft taxiing time, and the constraint of aircraft centralized parking for the same airline was added. Then, a tabu search algorithm was designed, and taking the Shanghai Pudong International Airport as a typical airport for an example analysis, it was found that the passenger transit time, aircraft taxi-in time and taxi-out time were reduced by 5.04%, 25.28% and 6.36% respectively, and the weight sensitivity analysis was carried out. It is recommended that the weight of passenger transit time should not exceed 0.7. Finally, a simulation experiment was established based on Flexsim. The results show that the actual aircraft taxi-in time, taxi-out time, and the number of taxi conflicts are reduced. The number of taxiing system service flights increases by 3.30% under the acceptable delay level, and the maximum taxiing delay time of arrival and departure decreases by 9.09% and 2.94%, respectively.

Keywords: air transportation; gate assignment; multi-objective optimization; tabu search; sensitivity analysis; Flexsim simulation

* Corresponding author. E-mail: masisi@comac.cc