

DOI:10.16356/j.1005-2615.2023.02.019

基于改进 NSGA-Ⅱ 的停机位预分配优化

刘禹汐^{1,2}, 刘继新^{1,2}, 田文^{1,2}

(1. 南京航空航天大学民航学院, 南京 211106; 2. 国家空管飞行流量管理技术重点实验室, 南京 211106)

摘要: 随着民航运输业的发展, 航班密度不断增加, 大型机场的近机位资源紧张问题日益突出, 降低了航班保障效率。为了探索大型枢纽机场停机位预分配问题综合有效的解决方法, 从航空公司、机场和旅客的实际情况出发, 建立多目标停机位分配优化模型, 并设计了改进的带精英策略的非支配排序遗传算法(Non-dominated sorting genetic algorithms-Ⅱ, NSGA-Ⅱ)对模型进行求解, 得到一组 Pareto 前沿解。在交叉和变异操作阶段, 对种群个体以指数形式自适应地调整交叉率和变异率, 以此提高算法的收敛速度和优良解的多样性。实例验证结果表明, 该模型和改进算法相较于人工分配和传统 NSGA-Ⅱ 算法对停机位指派的优化结果更为突出, 尤其在靠桥率和被使用的停机位数量方面; 同时利用性能评价指标对比两种算法, 发现改进型 NSGA-Ⅱ 算法更适合停机位预分配问题的求解。

关键词: 停机位预分配; 多目标优化; 改进型 NSGA-Ⅱ; Pareto 前沿解; 性能评价指标

中图分类号: V351.11

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2023)02-0329-10

Optimization of Gate Pre-allocation Based on Improved NSGA-Ⅱ

LIU Yuxi^{1,2}, LIU Jixin^{1,2}, TIAN Wen^{1,2}

(1. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 211106, China; 2. National Key Laboratory of Air Traffic Flow Management, Nanjing 211106, China)

Abstract: With the development of the civil aviation transportation industry, the density of flights is increasing, and the shortage of near-airport resources in large airports has become increasingly prominent. The lack of near-airport resources reduces the efficiency of flight guarantees. In order to develop a comprehensive and effective solution to the problem of gate pre-allocation in large hub airports, based on the actual situation of airlines, airports and passengers, a multi-objective parking space allocation optimization model is established, and an improved non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-Ⅱ) with an elite strategy is designed to solve the model. The Pareto frontier solution is obtained. In the crossover and mutation operation stage, the crossover rate and the mutation rate are adaptively adjusted for the population individuals in an exponential form, so as to improve the convergence speed of the algorithm and the diversity of excellent solutions. The example verification results show that the optimization results of the model and the improved algorithm are more prominent than the manual allocation and the traditional NSGA-Ⅱ algorithm for parking space assignment, especially in terms of the bridge rate and the number of used parking stands. At the same time, the performance evaluation index is used to compare the two algorithms, and found that the improved NSGA-Ⅱ algorithm is more suitable for solving the gate pre-allocation problem.

Key words: gate pre-allocation; multi-objective optimization; improved NSGA-Ⅱ; Pareto frontier solution; performance evaluation indicators

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB1600500); 国家自然科学基金(71971112); 南京航空航天大学科研与实践创新计划(xcxjh20220709)。

收稿日期: 2022-07-29; **修订日期:** 2022-12-20

通信作者: 刘继新, 男, 副教授, E-mail: larryljx@163.com。

引用格式: 刘禹汐, 刘继新, 田文. 基于改进 NSGA-Ⅱ 的停机位预分配优化[J]. 南京航空航天大学学报, 2023, 55(2): 329-338. LIU Yuxi, LIU Jixin, TIAN Wen. Optimization of gate pre-allocation based on improved NSGA-Ⅱ [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2023, 55(2): 329-338.

对于大型机场而言,机位资源与航班量的增长是彼此促进,又相互制约的两个矛盾体^[1]。其中大型枢纽机场的矛盾尤为突出。停机位分配是一个复杂的问题,因为它涉及广泛的相互依赖的资源,不适当的分配可能会导致航班延误、降低旅客满意度和机场资源的使用效率^[2-3]。

机场停机位分配问题(Airport gate assignment problem, AGAP)最主要的目的就是配置航班到合适的停机位,以便保证旅客能够方便地上下航班、提取行李、转机以及进出航空港,确保机场地面各项作业顺利进行^[4]。其研究涉及到各航空公司进出航班的航线类型、航线距离、机型、航班数量、航班密度、停机时间、中转旅客行走距离和行李搬运距离等多方面的因素,可以归结为具有多项式复杂程度(Nondeterministic polynomial-bounded, NP)的非确定性问题的二次配置问题(Quadratic assignment problem, QAP)^[5-6]。

停机位分配分为预分配阶段和再分配阶段,本文研究的是停机位预分配阶段的优化问题。目前,国内外学者主要从机场和旅客的角度对停机位预分配问题进行研究。从机场运营商的角度出发,Liu等^[7]考虑操作安全约束,以最小化登机口空闲间隔时间方差为优化目标建立了分配优化模型。马思思等^[8]以航班进离港滑行距离最小为目标函数构建停机位分配模型,在实例仿真验证后对比优化方案和原始方案,发现滑行距离和滑行系统可服务航班量均有提高,提高了机场运行效率。袁媛等^[9]考虑跑道的因素建立了以最小化航班场面滑行时间为优化目标的停机位分配模型,利用ILOG CPLEX优化器求解,结果表明所建立模型的可行性,机场运行效率得到提高。赵征等^[10]研究了在资源受限条件下的多目标停机位分配优化问题,以靠桥数最大、航班延误时间最少为优化目标构建停机位分配模型,通过实例验证说明所建立的模型可以有效提高靠桥率、减少航空器延误时间。刘君强等^[11]基于航班延误建立了滑行道-停机位一体化分配模型,并采用基因蚁群算法进行求解。从旅客角度出发,Ding等^[12]以最小化总的旅客在航站楼内的步行时间作为优化目标,研究在过度约束的情况下,当飞机数量超过可用停机位数量时,提出一种新的邻域搜索技术,获得有效的停机位分配方案。Feron等^[13]以最小化乘客转机时间和最大化航班-停机位分配偏好得分为目标函数建立多目标机场停机位分配模型。Kim等^[14]、Ding等^[15]、郑志武等^[16]、王志清等^[17]等在最小化旅客步行距离/时间的基础上,同时考虑了最大化停机位设施的使用率。曾琳燕等^[18]、徐思敏等^[19]、文笑雨等^[20]等综合

考虑旅客和航空公司公平性,以最小化所有旅客的步行距离和均衡航空公司旅客步行距离为目标建立停机位优化指派模型。

纵观国内外对停机位预分配的研究,主要以旅客步行距离、停机位空闲时间和航空器滑行时间/滑行距离等作为优化目标建立单目标或多目标停机位分配优化模型,并使用启发式算法等对模型进行求解,以满足不同需求的停机位分配。已有的研究很少综合考虑大型枢纽机场、航空公司和旅客的协同优化,以及机场主用机坪构型的运行模式。本文从保障航空公司和机场的利益以及提高旅客满意度的角度出发,在确保机场安全运行的前提下,从靠桥率、被使用停机位的数量和旅客步行距离3个方面建立模型进行停机位预分配优化研究。将指定航空公司的机位分配和机场港湾U型区域的运行规则作为约束条件,以最小化分配到远机位的航班数目、最小化被使用的停机位数量和最小化旅客步行距离为优化目标,建立多目标优化模型。为了改进约束较多的复杂优化问题容易存在早熟及稳定性差的缺点,本文设计了一种自适应调整交叉率和变异率的NSGA-II算法对所建立的停机位预分配优化模型进行有效求解,最后进行实例分析。

1 停机位预分配模型

1.1 问题描述

停机位预分配是指在航班机型、航班时刻表、航空公司和旅客的利益以及机场全局运行顺畅等因素的制约下,由机场运行指挥中心为所有进出港航班分配合适的停机位。为保障航空公司的利益,需要将指定机坪的航空公司的航班分配至优先使用的停机位。而旅客满意度需从旅客步行距离入手,大型枢纽机场的旅客步行距离包括3项:进港旅客的步行距离(停机位与行李提取处之间的距离)、离港旅客的步行距离(安检口与出发停机位之间的距离)、中转旅客的步行距离(中转航班分配到的两个停机位之间的距离),即中转航班的旅客从进港停机位到中转柜台和中转柜台到离港停机位之间的距离。

1.2 假设条件

(1)机场的航班量和时间分布保持在机场容量许可范围内,即在任意时刻,总可以为任一航班指派1个停机位,尽管不是最优但一定是可行的。

(2)由同一架飞机执行的进离港2个航班称为航班对(以下简称航班),用1个航班号表示,且只能分配到1个停机位上。

(3)在研究时段内的航班计划、飞机基本信息、停

机位使用情况、停机位到中转柜台之间的距离和订票信息是已知且完备的,且不考虑当天退票的乘客。

(4)机场内的换乘线路通畅,旅客在换乘过程中对于换乘路线熟知,不考虑乘客绕远路和因拥堵或其他因素而造成的乘客换乘时间延长的情景。

(5)对于旅客步行距离的计算,如果航班被分配到近机位,则旅客步行距离就按照问题描述中所定义的距离进行分类计算;如果航班被分配到远机位停靠,对于旅客来说任意远机位的效果都是一样的,因此可以取一个远大于近机位步行距离的值来代表旅客到任意一个远机位的距离,假设与远机位相关的旅客步行距离均为 1 000 m。

符号定义见表 1。

表 1 符号定义

Table 1 Symbol definition

符号	意义
F	航班集合, $F = \{F(i) i = 1, 2, \dots, n\}$
G	停机位集合, $G = \{G(k) k = 1, 2, \dots, m\}$
i, j	航班编号
l, k	停机位编号
n	研究时段内航班总数
m	研究范围内的停机位总数
G_r	远机位集合
A	中转航班集合
Y_{ik}	0,1 变量, $Y_{ik} = 1$ 表示航班 i 分配到停机位 k , 否则为 0
f_{ij}	从航班 i 转机到航班 j 的旅客人数
f_{oi}	航班 i 离港的旅客人数
f_{io}	航班 i 进港的旅客人数
d_{kl}	中转旅客从停机位 k 经过中转柜台走到停机位 l 的步行距离
d_{ik}^d	航班 i 的离港旅客从停机位 k 走到行李转盘之间的步行距离
d_{ik}^a	航班 i 的进港旅客从安检口走到停机位 k 之间的步行距离
a_i	航班 i 的进入机位时刻
d_i	航班 i 从机位推出的时刻
$z_{k,l}$	0,1 变量, 当且仅当停机位 k 与停机位 l 相邻接时为 1, 否则为 0
F_h	指定机坪的航空公司航班集合
G_h	指定机坪的航空公司对应的停机位集合
k_h	指定机坪的航空公司对应的停机位
α	同一停机位上前一航班离港与后一航班进港的最小间隔时间
C_i	i 航班的机型大小, C_i 越大, 表示航空器越大; 例如: 将小型航班标准化为 $C_i = 1$, 将中型航班标准化为 $C_i = 1.2$, 将大型航班标准化为 $C_i = 1.5$
C_k	k 停机位的类型, 与机型 C_i 对应
Q_i	i 航班的属性, $Q_i = 1$ 表示国内航班停机位, $Q_i = 2$ 表示国际航班停机位
R_k	k 停机位的属性, 与航班属性 Q_i 对应
w_{ijk}	0,1 变量, 当且仅当航班 i 和航班 j 被分配到停机位 k 而且航班 i 是航班 j 的直接前驱航班(即 $1 \leq i < j \leq n$) 时为 1, 否则为 0

1.3 目标函数

(1)靠桥率是指在某一个时间段,靠桥量占总量的百分比,靠桥量即可以用飞机架次表示,也可以用旅客量来表示。飞机靠桥率比较直观,容易统计。因此从提高飞机靠桥率的角度建立目标函数为

$$Z_1 = \min \sum_{i \in F} \sum_{k \in G_r} Y_{ik} \quad (1)$$

该目标函数表示在研究时段内,最小化分配到远机位的航班数目,即让尽可能多的航班分配到近机位,提高靠桥率,让离港旅客通过廊桥登机。

(2)最小化被使用停机位的数量的目标函数可以表示为

$$Z_2 = \min \sum_{k \in G} \text{sgn} \left(\sum_{i \in F} Y_{ik} \right) \quad (2)$$

(3)为提高中转旅客的转机体验感,建立最小化旅客的步行距离目标函数为

$$Z_3 = \min \sum_{k \in G} \sum_{l \in G} \sum_{i \in F} \sum_{j \in F} (f_{ij} \cdot d_{kl} \cdot Y_{ik} \cdot Y_{jl} + f_{oi} \cdot d_{ik}^d \cdot Y_{ik} + f_{io} \cdot d_{ik}^a \cdot Y_{ik}) \quad (3)$$

式中: $f_{ij} \cdot d_{kl} \cdot Y_{ik} \cdot Y_{jl}$ 为中转旅客从前一航班 i 的停机位 k 经过中转柜台步行到后一航班 j 的停机位 l 的距离; $f_{oi} \cdot d_{ik}^d \cdot Y_{ik}$ 为航班 i 的离港旅客从安检口走到停机位 k 之间的距离; $f_{io} \cdot d_{ik}^a \cdot Y_{ik}$ 为航班 i 的进港旅客从停机位 k 走到行李转盘之间的距离。

1.4 约束条件

(1)排他约束

$$Y_{ik} = \sum_{j \in F} w_{ijk} \quad \forall i \in F, \forall k \in G \quad (4)$$

$$Y_{jk} = \sum_{i \in F} w_{ijk} \quad \forall j \in F, \forall k \in G \quad (5)$$

式(4,5)表示不允许任何两个航班同时分配到同一个停机位,确保一个停机位每次最多只能服务于一个航班,即每个航班在同一停机位上最多只有一个直接相邻的后继航班,且最多只有一个直接前驱航班。

(2)唯一性约束

$$\sum_{k \in G} Y_{ik} = 1 \quad \forall i \in F \quad (6)$$

式(6)表示每个航班能且仅能指派一个停机位,即对于航班 i ,只能存在一个停机位 k ,使得 $Y_{ik} = 1$ 。

(3)航班—停机位类型匹配约束

该类约束确保停靠飞机的类型必须和停机位允许的类型一致,具体包括:飞机型号与停机位机体类型匹配,航班的国内/国际航班类型与停机位的类型属性一一对应等。

$$C_i \leq C_k + (1 - Y_{ik})S \quad (7)$$

$$\sum_{k=1}^m Y_{ik} (Q_i - R_k) = 0 \quad (8)$$

式(7)表示停机位大小应与飞机类型相匹配, S 是一个极大的数。式(8)表示符合航班性质(国内航班与国际航班)与停机位相匹配的原则。

(4)安全间隔约束

$$w_{ijk} = \sum_{i \in F} \sum_{j \in F, j > i} \sum_{k \in G} (Y_{ik} \times Y_{jk}) \quad (9)$$

$$e_j + (1 - \sum_{k=1}^m w_{ijk}) R \geq s_i + \alpha \quad (10)$$

$$i < j$$

为避免机位冲突,应保证没有两个登机时间重叠的航班同时被分配到同一个停机位。式(9)判断两个具有先后顺序的航班是否被分配到同一个停机位,式(10)表示同一停机位两个相邻航班之间的间隔应大于或等于安全时间间隔。

(5) 机场主用机坪构型运行规则约束

为保证运行安全,所有航班均需满足机场港湾U型区域的运行规则:相邻机位航空器以及位于同一U型港湾的航空器禁止同时活动,这说明当某一架飞机进入或推出机位时,其相邻机位及位于同一U型港湾的飞机应处于静止状态,或者停机位为空。因此引入0,1变量 $z_{k,l}$,若停机位 k 与停机位 l 相邻接, $z_{k,l}=1$,反之则为0。

$$|a_i - d_j - \beta| \cdot Y_{ik} \cdot Y_{jl} \cdot z_{k,l} \geq 0 \quad (11)$$

$$\forall i, j \in F; \forall k, l \in G$$

$$|a_i - a_j| \cdot Y_{ik} \cdot Y_{jl} + (2 - z_{k,l} - Y_{ik} \cdot Y_{jl}) \cdot P \geq 0 \quad (12)$$

$$\forall i, j \in F; \forall k, l \in G$$

$$|d_i - d_j| \cdot Y_{ik} \cdot Y_{jl} + (2 - z_{k,l} - Y_{ik} \cdot Y_{jl}) \cdot P \geq 0 \quad (13)$$

$$\forall i, j \in F; \forall k, l \in G$$

式(11)表示航班 i 的进入机位时刻与其相邻机位及位于同一U型港湾的航班 j 的推出时刻应当不小于最小安全时间间隔 β ,此处 $\beta=5 \text{ min}$;式(12)和式(13)分别表示航班 i 与其相邻机位及位于同一U型港湾的航班 j 不能同时进入或同时推出停机位。 P 为一个大于零的极大值,以保证约束仅在停机位相邻和位于同一U型港湾时起作用。

(6) 航空公司停机位匹配约束

$$G(F_M) \subseteq G_M, G(F_C) \subseteq G_C$$

$$G(F_A) \subseteq G_A, G(F_e) \subseteq G_e \quad (14)$$

$$F_M, F_C, F_A, F_e \subseteq F_h$$

$$G_M, G_C, G_A, G_e \subseteq G_h$$

式中: F_M, F_C, F_A, F_e 分别为东航、南航、国航和其他航空公司的航班集合; G_M, G_C, G_A, G_e 分别为东航、南航、国航和其他航空公司的指定停机位集合。此约束表示将指定航空公司的航班分配到对应的停机位。

(7) 0,1变量约束

$$Y_{ik} \in \{0, 1\} \quad 1 \leq i \leq n, 1 \leq k \leq m \quad (15)$$

$$X_{i_k} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in F; \forall k_h \in F_h \quad (16)$$

$$w_{ijk} \in \{0, 1\} \quad 1 \leq i < j \leq n; 1 \leq k \leq m \quad (17)$$

式(15~17)对变量类型进行限制。

2 改进型NSGA-II算法设计

考虑到航班-停机位分配问题涉及多个相互冲突的目标,同时又要考虑各种约束条件,因此此类问题是一个解空间的规模不能得到控制的结构化组合优化问题,需要用启发式算法解决。因而本文设计了一种有针对性的改进型带精英策略的NSGA-II算法,对交叉率和变异率进行了非线性自适应调整,实现了交叉算子和变异算子的优化,避免了早熟和寻优效率较低的缺陷。

2.1 个体编码

求解停机位分配优化问题的NSGA-II算法采用一种基于正整数编码的策略。个体中的每一个基因位代表一个航班,个体编码的总长度(即染色体的长度)等于所有航班的数目总和加上目标函数的个数,前一段基因位上的数值代表此航班分配到停机位序号,后一段基因位上的数值分别代表目标函数的值。如图1所示,对于有6个航班的停机位分配问题,其个体编码为这6个航班的停机位分配结果和此分配方案对应的3个目标函数值。

6	2	3	5	1	6	2	2	5	900
---	---	---	---	---	---	---	---	---	-----

图1 染色图示意图

Fig.1 Schematic of the staining diagram

2.2 初始化种群

初始化种群的一般步骤如下:

步骤1 初始化航班集合 F 与停机位集合 G 。

读取航班集合 F 和停机位集合 G 的初始信息,按进港时间的先后顺序对研究时段内的航班进行排序,按各航空公司所包含的停机位序号和先近机位后远机位的原则对停机位进行排序,形成集合。

步骤2 根据航班 i 可停靠的机位 k 需要满足的约束条件,按顺序产生所有航班的可停靠机位集合 $G = \{G_1, G_2, \dots, G_n\}$, G_i 表示航班 i 可停靠的机位集合。

步骤3 遍历航班 i 的可用停机位集合中 G_i 的机位 k ,若航班 i 的到港时刻早于它的前一航班($i-1$)的离港时刻,则在航班 i 可用的停机位集合中将此机位删去。

步骤4 判断 G_i 是否为空集,如果是空集,转到步

骤 2;如果不是空集,转到步骤 5。

步骤 5 判断 $i=n$ 是否成立,如果成立转到步骤 6;如果不成立,则 $i=i+1$,转到步骤 3。

步骤 6 输出初始种群。

2.3 适应度评价

个体的适应度反映了各个个体的优劣程度,从而决定其遗传机会的大小。与遗传算法不同,在 NSGA-II 算法中则是利用种群个体的支配关系以及拥挤度的比较来评价个体的优劣,种群中所处非支配层低的个体的适应度好于所处非支配层高的个体。对于同一非支配层的个体,拥挤距离大的个体具有更优的适应度值。

2.4 遗传操作

NSGA-II 算法属于遗传算法,它模拟了自然选择和遗传中发生的复制、交叉和变异等现象,从任一初始种群出发,通过选择、交叉和变异操作,产生一群更适合环境的个体,向更高的适应度进化以达到寻求问题最优解的目标。算法初期,若交叉率和变异率设置的较小,种群很难产生出优秀的子代。算法后期,若交叉率和变异率设置的较大,则容易使算法陷入局部收敛。传统的遗传算法中,交叉率和变异率是固定的,对于特定的优化问题难以通过反复的实验设置较好的交叉率和变异率,所以本文以指数形式对交叉率和变异率进行非线性地自适应地调整,如式(18,19)所示,利用个体适应度、当代种群最优个体的适应度以及当代种群适应度的平均值计算出该个体的交叉率及变异率,在种群演化中保留了更多优秀的个体,同时增强了较差个体的变异能力,使算法能跳出局部最优解,克服早熟及收敛速度慢的缺点。

$$P_c = \begin{cases} \frac{P_{c\max} - P_{c\min}}{1 + \exp(\frac{f' - \bar{f}}{f_{\max} - \bar{f}})} + P_{c\min} & f' \geq \bar{f} \\ P_{c\max} & f' < \bar{f} \end{cases} \quad (18)$$

$$P_m = \begin{cases} \frac{P_{m\max} - P_{m\min}}{1 + \exp(\frac{f - \bar{f}}{f_{\max} - \bar{f}})} + P_{m\min} & f \geq \bar{f} \\ P_{m\max} & f < \bar{f} \end{cases} \quad (19)$$

式中: $P_{c\min}$ 和 $P_{c\max}$ 分别为交叉率的上界和下界; $P_{m\min}$ 和 $P_{m\max}$ 分别为变异率的上界和下界; f' 为交叉操作中两个被交叉个体中较大的适应度值; f 为变异个体的适应度值; f_{\max} 为当代种群中最优个体的适应度; \bar{f} 为当代种群适应度的平均值。

2.5 算法流程

本文提出的改进型 NSGA-II 求解多目标停机位分配模型的具体步骤如下,流程如图 2 所示。

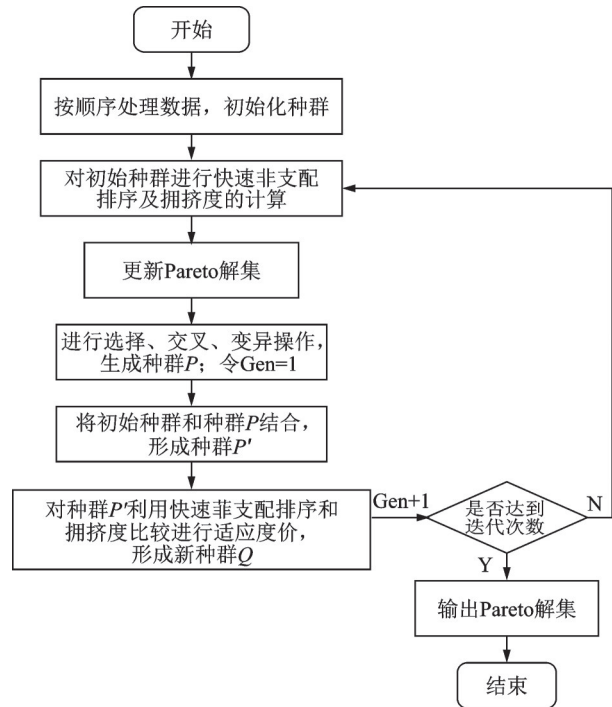


图 2 改进型 NSGA-II 算法求解流程图

Fig.2 Flowchart of the improved NSGA-II algorithm

步骤 1 设定 NSGA-II 算法的各种参数,如迭代次数 Gen_m ,种群数目 N ,选择概率 P_s ,交叉概率的范围 $[P_{c\min}, P_{c\max}]$,变异概率的范围 $[P_{m\min}, P_{m\max}]$,Pareto 解集的最大数目 NG 等。

步骤 2 设置航班起降时间、停机位等参数集合,对参数进行正整数编码。从问题的解到基因型的映射称为编码,即把一个问题的可行解从其解空间转换到遗传算法的搜索空间的转换方法。

步骤 3 将 2.2 节输出的初始种群作为算法的初始种群,根据个体的评价,对初始种群的所有个体进行快速非支配排序及拥挤度的计算。

步骤 4 更新 Pareto 解集:如果此时 Pareto 解集里没有个体,那么将非支配等级为 $Rank_0$ 的个体放入 Pareto 解集中,若是种群中非支配等级为 $Rank_0$ 的个体数目大于 NG ,选择拥挤度大的个体依次放入 Pareto 解集中;对于此时 Pareto 解集不为空的情况,在种群中去除与当前 Pareto 解集相同的个体,对种群中非支配等级为 $Rank_0$ 的个体和当前 Pareto 解集中的个体进行非支配排序和拥挤度的计算,将得到的非支配等级为 0 的个体存入 Pareto 解集,若是非支配等级为 0 的个体大于 NG ,则按照拥挤度降序的顺序依次将个体放入 Pareto 解集中。

步骤 5 进行选择、交叉及变异操作,生成第一代种群 P ,令 $Gen=1$ 。

步骤 6 将初始种群和种群 P 合并,并去除相同的个体,形成种群 P' 。

步骤 7 对种群 P' 中个体进行快速非支配排序,将

所有不能被任何其他解支配的个体挑出来设为 $Rank_0$, 然后将这些个体从种群 P' 中排除, 考虑剩下的所有不能被任何其他解支配的个体, 挑出来设为 $Rank_1$ 。通过支配关系将种群中所有的个体进行排序, 得到所有个体的非支配等级。当 $\sum_{i=0}^{n-1} Rank_i < N$ 时, 按 $Rank_0, Rank_1, \dots, Rank_{n-1}$ 的顺序将每个等级中的个体放入一个新种群 Q 中, 如果 $\sum_{i=0}^n Rank_i \geq N$, 则选取拥挤度大的个体进入种群 Q 。

步骤 8 令 $Gen = Gen + 1$, 若 $Gen > Gen_m$, 则输出 Pareto 解集, 算法运行结束, 否则跳转到步骤 3。

3 实例验证

以国内某大型枢纽机场当日 221 个航班对为例, 使用本文提出的改进型 NSGA-II 算法对航班-停机位的预分配进行多目标优化, 以验证该算法的有效性。该大型枢纽机场在当天投入使用的停机位共 75 个, 机场主用客运机坪布局如图 3 所示。其中 211~224 为 14 个远机位, 301~361 为 61 个近机位, 在该机场中转换乘的旅客共 627 人。航班进离港时间、机型与停机位类型的匹配关系、各停机位之间的距离等由于篇幅原因未列出。

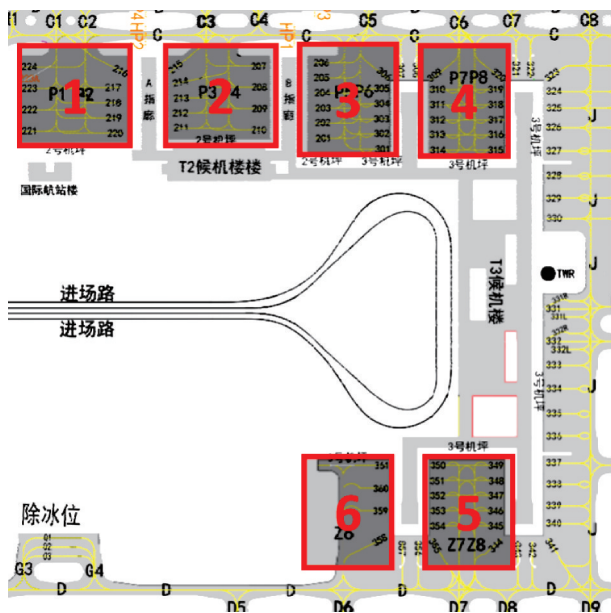


图3 实例机场主用客运机坪布局

Fig.3 Main passenger apron layout of the example airport

对于改进型 NSGA-II 算法, 种群数目 $N = 100$, 交叉概率的范围 $[P_{cmin}, P_{cmax}] = [0.2, 0.9]$, 变异概率的范围 $[P_{mmin}, P_{mmax}] = [0.01, 0.2]$ 。采用改进型 NSGA-II 算法对 3 个目标函数同时进行求解, 迭代过程中 3 个目标函数的变化曲线如图 4~6 所示。

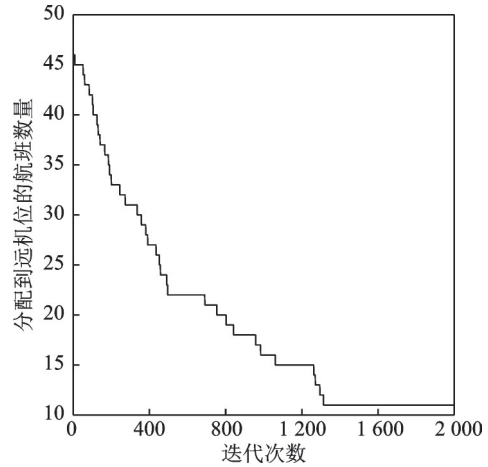


图4 目标函数1的迭代变化曲线

Fig.4 Iterative curve of objective function 1

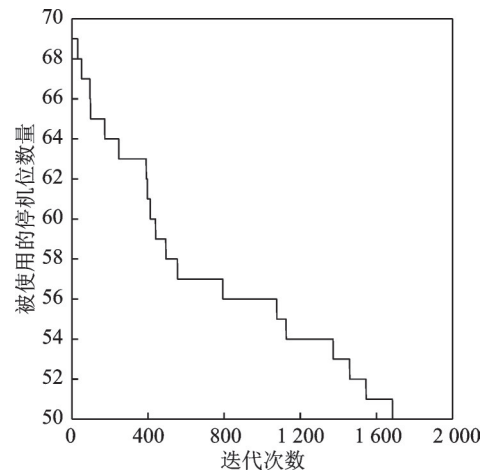


图5 目标函数2的迭代变化曲线

Fig.5 Iterative curve of objective function 2

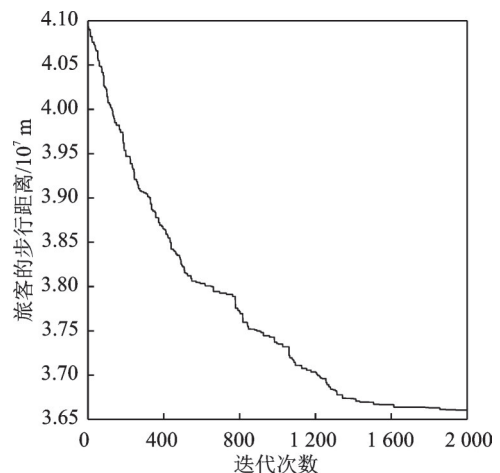


图6 目标函数3的迭代变化曲线

Fig.6 Iterative curve of objective function 3

从图4~6可以看出, 由于数据量较大、约束条件较多, 在迭代将近 2000 次的时候目标函数才开始趋于收敛。在迭代过程中, 每一代的 Pareto 解集中帕累托最优解的个数都不相同, 在运行 2000 次

后得到一组 Pareto 前沿,如表 2 所示。

从表 2 可以看出,随着停机位总使用量(z_2)的减少,旅客步行距离(z_3)在逐渐增加,这说明这两个优化目标是矛盾的。而分配到远机位的航班数量(z_1)则与旅客步行距离的变化趋势一致,与停机位总使用量的变化趋势相反,说明优化目标 z_2 和优化目标 z_1, z_3 是矛盾对立的。如果仅仅采用单目标优化算法求解,则无法兼顾对立的目标。使用本文设计的改进型 NSGA-II 算法求解,可以最终确定一组 Pareto 解集,该解集中的每个解都能够兼顾

这 3 个优化目标,由此得到优化后的较为合理的停机位预分配方案。图 7 给出了 Pareto 解 1 的停机位分配调度图,此解为旅客步行距离最小的解。

表 2 Pareto 前沿
Table 2 Pareto frontier

Pareto 解	z_1	z_2	z_3/m
1	11	54	36 606 650
2	12	52	36 706 383
3	13	51	36 784 523
4	14	50	36 803 415

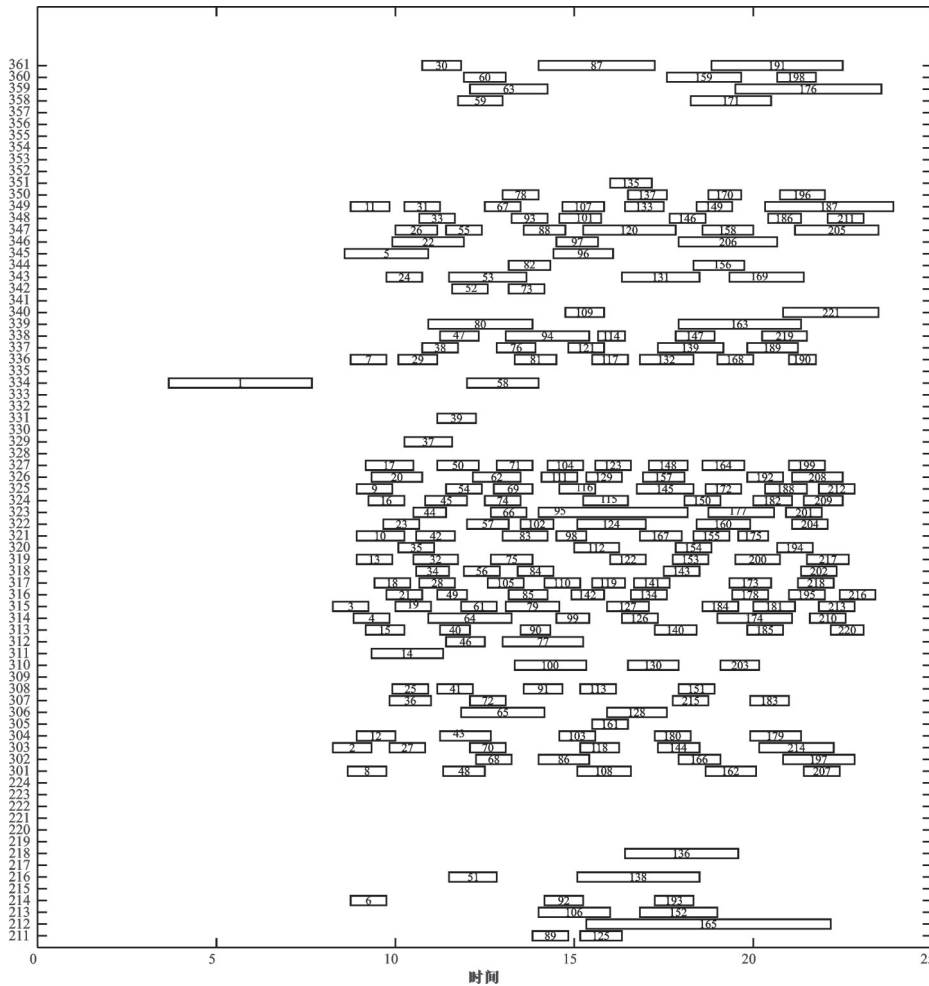


图 7 z_3 最小的停机位分配甘特图
Fig.7 Gantt chart for z_3 minimum stand allocation

为验证本文设计的改进型 NSGA-II 算法的有效性,本文使用传统 NSGA-II 算法对停机位预分配优化模型进行求解,将两种算法得到的 Pareto 前沿进行比较,并且在旅客步行距离最小的情况下对比人工分配、使用传统 NSGA-II 算法优化后以及使用改进型 NSGA-II 算法优化后的目标函数值,结果分别如图 8,9 所示。

从图 8,9 可以看出,使用两种 NSGA-II 算法优化后得到的停机位预分配方案对应的 3 个目标

函数更为理想,其中改进型 NSGA-II 算法比传统 NSGA-II 算法的优化效果更好。以旅客步行距离最小的情况为例,从 Pareto 前沿的结果可以得出:对于目标函数式(1),转化成飞机靠桥率,使用改进型 NSGA-II 算法求解得到的结果比传统 NSGA-II 算法增加了 2.26%,比人工分配增加了 17.19%;对于目标函数式(2),使用改进型 NSGA-II 算法求解得到的结果比传统 NSGA-II 算法减少了 10.00%,比人工分配减少了 23.94%;对于

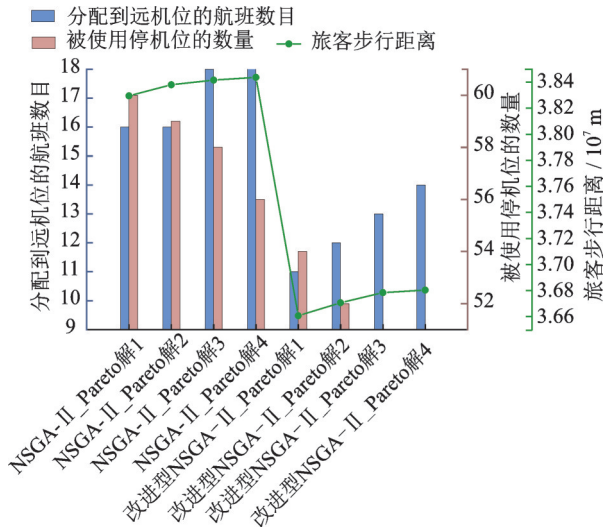


图8 两种算法的Pareto前沿结果

Fig.8 Pareto frontier results of the two algorithms

目标函数式(3),使用改进型NSGA-II算法求解得到的结果比传统NSGA-II算法减少了1 688 687 m,降低约4.41%,比人工分配减少了6 532 853 m,降低约15.14%。

同时利用常用的多目标进化优化算法的性能评价指标对两种算法进行比较,选取多种数据集

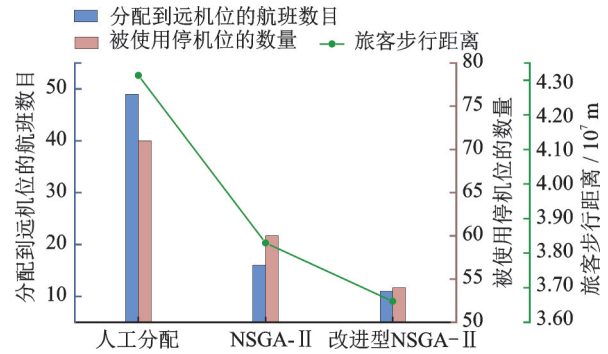


图9 3种方法对应的目标函数

Fig.9 Objective function corresponding to the three methods

应用这两种算法分别进行30次独立运行,得到的各项指标的平均值如表3所示。表中算法1为传统NSGA-II算法,算法2为改进型NSGA-II算法,A为本文使用的航班数据。所用的算法性能评价指标分别为世代距离(Generational distance, GD)、收敛性指标相对概率(Relative possible, RP)、反转世代距离(Inverted generational distance, IGD)和平均豪斯多夫距离 Δ_p ,其中GD和RP为收敛性评价指标;IGD和 Δ_p 为综合性评价指标,可以同时衡量解集的收敛性、分布性和多样性。

表3 独立运行30次得到的评价指标对比结果

Table 3 Comparison results of evaluation indicators obtained after 30 times independent running

数据集	GD		RP		IGD		Δ_p	
	算法1	算法2	算法1	算法2	算法1	算法2	算法1	算法2
A	3.63×10^5	2.43×10^3	0.29	2.25	3.08×10^5	6.25×10^3	7.09×10^5	1.06×10^4
B	1.22×10^5	4.36×10^3	0.87	1.38	3.10×10^5	1.10×10^4	5.38×10^5	1.91×10^4
C	3.78×10^5	3.11×10^3	0.65	1.78	5.34×10^5	9.89×10^3	7.65×10^5	2.10×10^4
D	3.66×10^5	3.98×10^3	0.67	1.65	5.45×10^5	1.02×10^4	7.55×10^5	2.08×10^4
E	3.15×10^5	2.97×10^3	0.35	1.74	5.21×10^5	9.30×10^3	6.99×10^5	1.88×10^4
F	6.89×10^5	5.88×10^3	0.21	1.87	6.33×10^5	9.28×10^3	8.23×10^5	1.58×10^4
G	4.65×10^5	4.22×10^3	0.53	1.46	5.39×10^5	1.00×10^4	7.45×10^5	1.66×10^4
H	1.26×10^5	1.98×10^3	0.30	1.99	1.01×10^5	8.75×10^3	5.45×10^5	1.38×10^4
I	1.32×10^5	2.33×10^3	0.25	1.86	1.47×10^5	8.31×10^3	5.78×10^5	1.21×10^4
J	2.28×10^5	2.66×10^3	0.24	1.79	2.00×10^5	7.95×10^3	6.63×10^5	1.17×10^4

由表3可以看出,改进型NSGA-II算法的GD值比传统NSGA-II算法小,RP值比传统NSGA-II算法大,说明改进型NSGA-II算法得到的解集的收敛性较好;改进型NSGA-II算法的IGD值和 Δ_p 值均比传统NSGA-II算法小,说明改进型NSGA-II算法得到的解集分布更加均匀广泛、多样性更好。

其次,选取数据集A,应用传统NSGA-II算法和改进型NSGA-II算法分别进行100次独立实验,针对优化结果计算上述4个指标:GD、

RP、IGD、 Δ_p ,并将100组评价指标以箱线图的形式展示出来,如图10所示。

综上所述,本文设计的以指数形式对交叉率和变异率进行非线性自适应调整的改进型NSGA-II算法对停机位预分配问题的优化效果很好,该优化结果不仅提高了飞机靠桥率和旅客的满意度,而且节约了停机位资源,最大限度地提高机场的运营效率,保障了机场、航空公司和旅客三方的利益。

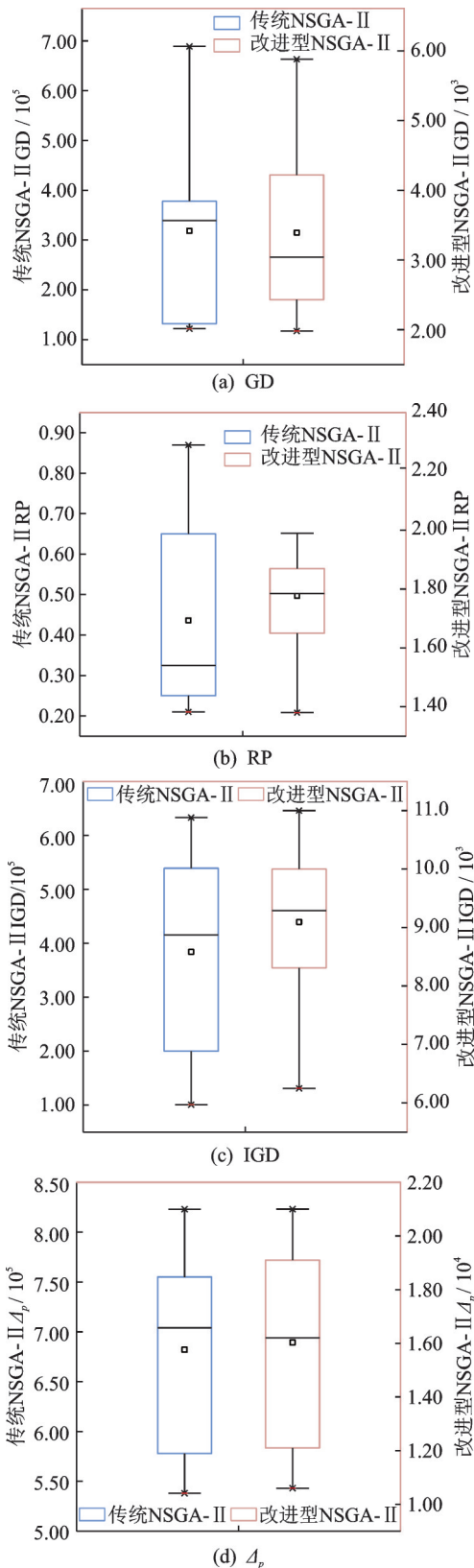


图 10 多目标优化评价指标的箱线图

Fig.10 Boxplots of multi-objective optimization evaluation indicator

4 结 论

(1) 本文综合考虑大型枢纽机场、航空公司和旅客的利益,在确保机场安全运行的前提下,从靠

桥率、被使用停机位的数量和旅客步行距离 3 个方面建立模型寻找最优的停机位预分配方案,并设计了一种自适应调整交叉率和变异率的 NSGA-II 算法对所建立的停机位预分配优化模型进行有效求解。

(2) 针对大型枢纽机场某一日的 221 个航班对的停机位预分配过程进行优化仿真分析,并与人工分配方法和传统的 NSGA-II 算法进行比较,结果表明所设计的改进型 NSGA-II 算法的优化效果更突出,解集的收敛性、分布性和多样性更好。

(3) 由于恶劣天气条件、人工操作失误等诸多方面的因素都会对停机位预分配过程造成影响,进而增加再分配过程中运控人员的工作负荷。后续的研究可以进一步考虑更加详细的约束条件和更多的优化目标,如航班进离港时刻的变动等,建立通用模型,以减小随机扰动因素对停机位预分配方案带来的影响。

参考文献:

- [1] YU C, ZHANG D, LAU H Y K. MIP-based heuristics for solving robust gate assignment problems[J]. Computers & Industrial Engineering, 2016, 93: 171-191.
- [2] 闫萍,刘梦诗.基于免疫遗传算法的停机位动态再分配优化[J].计算机仿真,2021,38(10):53-57.
YAN Ping, LIU Mengshi. Optimization of parking bay dynamic reassignment based on immune genetic algorithm[J]. Computer Simulation, 2021, 38 (10): 53-57.
- [3] 王倩,田勇,林李李,等.基于枢纽机场旅客中转的登机口指派模型[J].航空计算技术,2019,49(4):67-71.
WANG Qian, TIAN Yong, LIN Lili, et al. Boarding gate assignment model based on passenger transfer at hub airports[J]. Aviation Computing Technology, 2019, 49(4): 67-71.
- [4] DELL'ORCO M, MARINELLI M, ALTIERI M G. Solving the gate assignment problem through the fuzzy bee colony optimization[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2017, 80: 424-438.
- [5] ZHANG D, KLABJAN D. Optimization for gate reassignment[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2017, 95: 260-284.
- [6] DAŞ G S. New multi objective models for the gate assignment problem[J]. Computers & Industrial Engineering, 2017, 109: 347-356.
- [7] LIU S, CHEN W, LIU J. Optimizing airport gate assignment with operational safety constraints[C]//Proceedings of the 20th International Conference on Auto-

- mation and Computing. Bedfordshire, UK: IEEE, 2014: 61-66.
- [8] 马思思,唐小卫.基于机场滑行效率提升的停机位优化分配模型[J].武汉理工大学学报,2018,40(4):24-30.
- MA Sisi, TANG Xiaowei. Optimal allocation model of parking space based on airport taxiing efficiency improvement[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2018, 40(4):24-30.
- [9] 袁媛,翟好鑫.考虑跑道的航班停机位分配研究[J].科技和产业,2021,21(2):265-268.
- YUAN Yuan, ZHAI Haoxin. Study on flight parking space allocation considering runway[J]. Science and Technology and Industry, 2021, 21(2):265-268.
- [10] 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(6):97-106.
- ZHAO Zheng, HU Li, JIA Aiping, et al. Optimization model of parking slot allocation for outbound flights under resource constraints[J]. Aeronautical Engineering Progress, 2022(6):97-106.
- [11] 刘君强,张马兰,陈鹏超,等.基于协同决策的多航站楼停机位实时分配算法[J].南京航空航天大学学报,2015,47(1):71-76.
- LIU Junqiang, ZHANG Malan, CHEN Pengchao, et al. A real-time allocation algorithm for multi-terminal parking spaces based on collaborative decision-making[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 47(1): 71-76.
- [12] DING H, LIM A, RODRIGUES B, et al. New heuristics for over-constrained flight to gate assignments[J]. Journal of the Operational Research Society, 2004, 55(7): 760-768.
- [13] FERON E, KIM S H, CLARKE J P. Gate assignment to minimize passenger transit time and aircraft taxi time[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2013, 36(2): 467-475.
- [14] KIM S H, FERON E, CLARKE J P, et al. Airport gate scheduling for passengers, aircraft, and operation[EB/OL]. (2013-1-16). <http://export.arxiv.org/pdf/1301.3535>.
- [15] DING H, LIM A, RODRIGUES B, et al. The over-constrained airport gate assignment problem[J]. Computers & Operations Research, 2005, 32(7): 1867-1880.
- [16] 郑志武,刘军政,刘文萍,等.天津机场登机口分配仿真与优化策略研究[J].现代商贸工业,2017(6):186-187.
- ZHENG Zhiwu, LIU Junzheng, LIU Wenping, et al. Research on boarding gate allocation simulation and optimization strategy in Tianjin Airport[J]. Modern Commerce and Industry, 2017(6):186-187.
- [17] 王志清,商红岩,宁宣熙.机场登机口优化调度算法及实证[J].南京航空航天大学学报,2007,39(6):819-823.
- WANG Zhiqing, SHANG Hongyan, NING Xuanxi. Airport boarding gate optimization scheduling algorithm and demonstration[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 39(6): 819-823.
- [18] 曾琳燕,姜雨,罗宇骁.基于旅客步行距离的停机位均衡优化指派建模[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2014,38(4):895-899.
- ZENG Linyan, JIANG Yu, LUO Yuxiao. Modeling for optimal assignment of parking spaces based on walking distance of passengers[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering Edition), 2014,38(4):895-899.
- [19] 徐思敏,姜雨,王欢,等.基于NSGA-II的停机位多目标指派建模与仿真[J].南京航空航天大学学报,2018,50(6):823-828.
- XU Simin, JIANG Yu, WANG Huan, et al. Modeling and simulation of multi-objective assignment of parking spaces based on NSGA-II[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 50(6): 823-828.
- [20] 文笑雨,孙海强,王蒙,等.基于NSGA-II的多目标航班登机口调度研究[J].河南理工大学学报(自然科学版),2020,39(3):122-130.
- WEN Xiaoyu, SUN Haiqiang, WANG Meng, et al. Research on multi-objective flight boarding gate scheduling based on NSGA-II [J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2020, 39(3):122-130.

(编辑:张蓓)