

DOI:10.16356/j.1005-2615.2018.06.013

基于 NSGA-II 的停机位多目标指派建模与仿真

徐思敏 姜雨 王欢 陈丽丽

(南京航空航天大学民航学院,南京,211106)

摘要:为探索大型机场停机位指派问题综合现实有效的解决方法,分析了停机位指派过程设计的利益主体,以最小化航空公司运行成本、最小化旅客步行距离、最小化航班冲突概率同时最大化航空公司之间的公平性为目标,建立大型机场停机位多目标指派模型。采用第 2 代非支配排序遗传算法(Non-dominated sorting genetic algorithm-II, NSGA-II)对模型进行仿真实验,该算法可以对多目标问题进行更高效的求解。分析不同迭代次数下的 Pareto 前沿解集的特性,并将优化解与随机指派结果进行对比,验证了该模型和算法的有效性。

关键词:停机位指派;非支配排序遗传算法;Pareto 前沿解

中图分类号: V351.11

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2018)06-0823-06

Multi-objective Gate Assignment Modeling and Simulation Based on NSGA-II

XU Simin, JIANG Yu, WANG Huan, CHEN Lili

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 211106, China)

Abstract: In order to explore the effective solution to the problem of gate allocation in hub airport, this paper analyzes the stakeholders of the process of the gate assignment. To minimize the operating costs of airlines, the distance traveled passengers and the probability of flight conflict, and to maximize the fairness between the airlines, this paper establishes a multi-objective gate assignment model for hub airport. Non-dominated sorting genetic algorithm-II(NSGA-II) algorithm is used in the simulation model to solve the multi-objective problem more efficiently. This paper analyzes the characteristics of Pareto frontier solution under different iterations. The optimal solution with the random assignment results are compared to verify the effectiveness of the model and algorithm.

Key words: gate assignment; non-dominated sorting genetic(NSGA-II) algorithm; pareto frontier solution

有限的停机位资源已经成为制约大型机场发展的瓶颈。针对现阶段机场拥堵严重的状况,对停机位进行合理的指派,有利于提高机场、航空公司和旅客三方的满意度,对解决目前机场场面拥堵问题具有重要意义。

关于停机位指派的研究, Lim 等^[1]首次建立以最小化步行距离为目标函数的停机位指派动态模型,采用启发式算法对模型进行求解。此后, Seker

等^[2]建立了基于航班起降时间的不确定性的停机位指派鲁棒性优化模型。熊杰等^[3]为了提高机场容量,针对多跑道机场,建立以最小化航空器滑行距离为目标的停机位指派模型。Diepen^[4]、Maharjan^[5]、Jiang^[6]等分别进行实地调研、以最小化航空器滑行燃油成本、最小化总步行距离为主要目标,考量实地可操作性、公平性和旅客步行距离等因素。Dorndorf 等^[7]在最小化未分配停机位的航

基金项目:国家自然科学基金(U1333117)资助项目。

收稿日期: 2017-12-10; **修订日期:** 2018-06-10

通信作者:姜雨,女,副教授,硕士生导师, E-mail:jiangyu07@nuaa.edu.cn。

引用格式: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. Multi-objective gate assignment modeling and simulation based on NSGA-II[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2018, 50(6):823-828.

空器数量的基础上以最大化鲁棒性为目标建立停机位多目标指派模型并进行求解。Nikulin等^[8]建立了以最小化牵引活动数量,最小化新的停机位指派计划和参考计划的绝对偏差为目标的多目标停机位指派模型。Prem等^[9]建立了成本考量下的最大化停机位指派计划鲁棒性的多目标停机位指派模型。杨文东等^[10]以航班延误和停机位空闲时间总和最小为目标,构建停机位指派模型。王笑天等^[11]建立增大停机位鲁棒性指派模型并采用列生成算法进行求解。解英全^[12]将乘客步行总距离最短和航空器总耗油最少设置为停机位指派阶段的目标,实现停机位分配模型的构建。对于停机位指派的模型仿真求解,文献[13]提出采用启发式方法和随机方法结合的方法自上而下求解。Wang等^[14]采用了蚁群算法对延误航班的实时再指派进行仿真验证,证明了其优越性。Liu等^[15]应用混合集合规划(Mixed set programming, MSP)和序贯博弈的方法对模型进行求解,大大节约了计算时间。

纵观国内外停机位指派研究,国内外学者主要以旅客步行距离、预指派方案的鲁棒性和航空器滑行燃油成本作为优化目标建立单目标模型,或是兼顾停机位空闲时间或航空公司公平性建立多目标停机位指派优化模型。但是这些研究只能反映停机位指派需要解决的部分问题,缺乏全局性。在算法方面,大部分学者采用遗传算法、模拟退火算法或者禁忌搜索算法等对停机位指派模型进行求解,虽然求解速度通常比较快,但是无法进行多目标共同求解。在实际的停机位指派过程中,需要平衡航空公司、机场和旅客的三方利益,使得指派结果的综合效能最大化,同时对多目标模型进行有效的求解。

1 模型建立

1.1 模型假设

(1) 停机位指派是一个连续运行过程,本文选取高峰期內某一时段航班为研究对象。

(2) 停机位数量满足该时段内所有航班需求,即每架航空器均能指派到一个停机位。

(3) 本文研究的停机位指派对象为航班对(以下简称航班),即由同一架航空器执行的进离港两个航班指派到同一个停机位上,且用同一个航班号表示。

(4) 研究时段内的所有航班信息已知,包括航班计划、航空器基本信息和停机位使用情况等。

(5) 对于固定的停机位,航班从停机位到跑道的出入口距离为定值,且为已知数据。

1.2 符号定义

F 为航班集合, $F = \{f_1, f_2, \dots, f_m\}$, m 为研究时段内航班总数, $f_i (1 \leq i \leq m)$ 为航班对代号,以航班进港时间由早到晚进行排序,即 i 越大航班 f_i 的进港时间越晚。

c_{f_i} 为执行航班 f_i 的航空器大小, c_{f_i} 越大,表示航空器越大, c_{f_i} 越小,表示航空器越小;例如:将中型航班标准化为 $\bar{c}_{f_i} = 1$,小型航班取为 $c_{f_i} = 0.6 \bar{c}_{f_i}$,大型航班取为 $c_{f_i} = 1.2 \bar{c}_{f_i}$ 。

L 为航空公司集合, $L = \{l_1, l_2, \dots, l_q\}$, q 为研究时段内航空公司总数, $l_a (1 \leq a \leq q)$ 为航空公司。

F_{l_a} 为 l_a 航空公司的航班集合。

G 为停机位集合, $G = \{g_1, g_2, \dots, g_n\}$, n 是研究范围内的停机位总数, $g_k (1 \leq k \leq n)$ 表示停机位。

c_{g_k} 为停机位 g_k 的类型, c_{g_k} 越大,表示可停放的航空器越大, c_{g_k} 越小,表示可停放的航空器越小。

例如:将中型停机位标准化为 $\bar{c}_{g_k} = 1$,小型停机位取为 $c_{g_k} = 0.6 \bar{c}_{g_k}$,大型停机位取为 $c_{g_k} = 1.2 \bar{c}_{g_k}$ 。

$$X_{g_k} = \begin{cases} 1, & \text{停机位 } g_k \text{ 为近机位;} \\ 0, & \text{远机位。} \end{cases}$$

a_{f_i} 为航班 f_i 的计划进港时间,单位为 min。

d_{f_i} 为航班 f_i 的计划离港时间,单位为 min。

t_{f_i} 为航班 f_i 的停机位占用时间,与本文定义的航班过站时间相同, $t_{f_i} = d_{f_i} - a_{f_i}$,单位为 min。

a'_{f_i} 为航班 f_i 的实际进港时间,单位为 min。

d'_{f_i} 为航班 f_i 的实际离港时间,单位为 min。

b 为同一停机位上连续两个航班之间的缓冲时间,即停机位为航班 f_i 服务的实际时间区间为 $[a'_{f_i} - b, d'_{f_i} + b]$,单位为 min。

T 为同一停机位上两个航班的最小时间间隔,单位为 min。

$S_{g_k}^{\text{arr}}$ 为航空器从跑道出口滑行到停机位 g_k 的距离。

$S_{g_k}^{\text{dep}}$ 为航空器从停机位 g_k 滑行到跑道入口的距离。

$S_{g_k}^{\text{a}}$ 为进港旅客从停机位 g_k 到行李大厅的距离。

$S_{g_k}^{\text{d}}$ 为离港旅客从安检点到停机位 g_k 的距离。

$S_{g_k}^{\text{m}}$ 为旅客从停机位 g_k 步行到中转柜台的距离。

$N_{f_i}^{\text{a}}$ 为航班 f_i 进港旅客数量。

$N_{f_i}^{\text{d}}$ 为航班 f_i 离港旅客数量。

$N_{f_i}^{\text{m}}$ 为航班 f_i 的中转旅客数量。

v 为航空器在飞行区的平均滑行速度,取 $v = 15 \text{ km/h}$ 。

COST_{f_i} 为航班 f_i 单位时间内滑行的油耗成本。

COST_{f_i, g_k} 为航班 f_i 指派到停机位 g_k 产生的停机成本。

$$y_{f_i, g_k} = \begin{cases} 1, & \text{航班 } f_i \text{ 分配到停机位 } g_k; \\ 0, & \text{其他。} \end{cases}$$

$$z_{f_i, f_j} = \begin{cases} 1, & \text{航班 } f_i, f_j \text{ 分配到同一个机位;} \\ 0, & \text{其他。} \end{cases}$$

M 为一个足够大的值。

1.3 模型建立

(1) 目标函数

航空公司运行过程中,要尽力降低航空器运行成本和停机成本。航空器运行成本往往受到诸如恶劣天气、事故等不可控因素的影响较多,往往难以控制。而停机成本则受到指派效率、指派公平性等因素影响较多,通过有效的管理可以大大降低航空器停机成本。

根据中国民用航空局 2007 年颁布的《民用机场收费改革实施方案》中的停机位收费标准和指派原则,建立最小化航空器停机位指派目标函数为

$$\min Z_1 = \sum_{f_i \in F} \sum_{g_k \in G} y_{f_i, g_k} \times \left[\frac{(S_{g_k}^{\text{arr}} + S_{g_k}^{\text{dep}})}{v} \times \text{COST}_{f_i} + \text{COST}_{f_i, g_k} \right] \quad (1)$$

计算方式为

$$\text{COST}_{f_i, g_k} = \begin{cases} 50 \left[\frac{t_{f_i} + 29}{30} \right] & t_{f_i} \leq 240 \text{ min}, X_{g_k} = 1 \\ 55 \times 2c_{f_i} + 45 \left[\frac{t_{f_i} + 59}{60} \right] & t_{f_i} \leq 240 \text{ min}, X_{g_k} = 0 \\ 55 \times 2c_{f_i} + 45 \times 2 & t_{f_i} > 240 \text{ min}, X_{g_k} = 0 \end{cases}$$

从旅客的角度,停机位指派的主要目的是提高旅客满意度。以最小化旅客步行距离为目标建立停机位指派目标函数为

$$\min Z_2 = \sum_{f_i \in F} \sum_{g_k \in G} y_{f_i, g_k} (N_{f_i}^a S_{g_k}^a + N_{f_i}^d S_{g_k}^d + N_{f_i}^m S_{g_k}^m) \quad (2)$$

从机场的角度,停机位指派的主要目的是提高预指派计划的抗干扰能力,以最小化航班指派发生冲突概率为目标建立停机位指派目标函数为

$$\min Z_3 = \sum_{f_i, f_j \in F, i < j} (z_{f_i, f_j} \times P(f_i, f_j)) \quad (3)$$

式中: $P(f_i, f_j)$ 为航班 f_i 和航班 f_j 之间发生冲突的概率,且

$$P(f_i, f_j) = \frac{e(f_i, f_j) - \min\{e(f_i, f_j)\}}{\max\{e(f_i, f_j)\} - \min\{e(f_i, f_j)\}}$$

式中: $e(f_i, f_j)$ 可以是反函数、线性函数、余弦函数或指数函数,本文中根据实际情况在仿真中选用指数函数,即 $e(f_i, f_j) = e^{(-\gamma(f_i, f_j))}$, 其中 γ 为一个常数,用于控制曲率,根据实际情况,此处取为 $\gamma = 0.03$ [16]。

根据停机位指派的多目标函数可知,停机位指派结果将对大型航空器的停机位指派更为有利,这对拥有小型航空器较多的航空公司极不公平。本文通过增加“公平性”函数调整停机位指派结果的公平性。分别以航空公司航班的平均滑行距离和机场所有航空器平均滑行距离的差值与所有航空器平均滑行距离的比值最小、航空公司的所有旅客平均步行距离和机场所有航空器旅客平均步行距离差值与所有航空器旅客平均步行距离比值最小为目标,建立停机位指派目标函数为

$$\min Z_4 = \frac{|\bar{S}_a - \bar{S}|}{\bar{S}} \quad l_a \in L \quad (4)$$

$$\min Z_5 = \frac{|\bar{W}_{l_a} - \bar{W}|}{\bar{W}} \quad l_a \in L \quad (5)$$

式中: \bar{S}_{l_a} 为航空公司 l_a 的航班平均滑行距离, \bar{S} 为机场所有航班的平均滑行距离, \bar{W}_{l_a} 为 l_a 航空公司旅客平均步行距离, \bar{W} 为所有旅客平均步行距离。

$$\bar{S}_{l_a} = \frac{\sum_{f_i \in F_{l_a}} \sum_{g_k \in G} y_{f_i, g_k} \times (S_{g_k}^{\text{arr}} + S_{g_k}^{\text{dep}})}{|F_{l_a}|}$$

$$\bar{S} = \frac{\sum_{f_i \in F} \sum_{g_k \in G} y_{f_i, g_k} \times (S_{g_k}^{\text{arr}} + S_{g_k}^{\text{dep}})}{|F|}$$

$$\bar{W}_{l_a} = \frac{\sum_{f_i \in F_{l_a}} \sum_{g_k \in G} y_{f_i, g_k} (N_{f_i}^a S_{g_k}^a + N_{f_i}^d S_{g_k}^d + N_{f_i}^m S_{g_k}^m)}{\sum_{f_i \in F_{l_a}} (N_{f_i}^a + N_{f_i}^d + N_{f_i}^m)}$$

$$\bar{W} = \frac{\sum_{f_i \in F} \sum_{g_k \in G} y_{f_i, g_k} (N_{f_i}^a S_{g_k}^a + N_{f_i}^d S_{g_k}^d + N_{f_i}^m S_{g_k}^m)}{\sum_{f_i \in F} (N_{f_i}^a + N_{f_i}^d + N_{f_i}^m)}$$

(2) 约束条件

$$\sum_{g_k \in G} y_{f_i, g_k} = 1 \quad \forall f_i \in F \quad (6)$$

$$y_{f_i, g_k} \in \{0, 1\} \quad (7)$$

式(6)和(7)为航班指派唯一性约束。即每个航班能且仅能指派一个停机位。

$$\sum_{g_k \in G, X_{g_k} = 0} y_{f_i, g_k} = 1 \quad \forall f_i \in F, T_{f_i} > 240 \quad (8)$$

式(8)表示过站时间超过 4 h 的航班均指派到远机位。

$$y_{f_i, g_k} \times y_{f_j, g_k} \times (d_{f_i} - a_{f_j}) \times (d_{f_j} - a_{f_i}) \leq 0 \quad (9)$$

式(9)可以确保同一停机位上没有同时指派两个航班

$$z_{f_i, f_j} = \sum_{f_i \in F_j > i, f_j \in F_{g_k} \in G} (y_{f_i, g_k} \times y_{f_j, g_k}) \quad (10)$$

$$a_{f_j} - d_{f_i} + (1 - z_{f_i, f_j})M \geq T \quad i < j \quad (11)$$

式(10)和(11)表示同一停机位上的两个航班应满足一定的安全时间间隔。其中, M 为一个足够大的值

$$c_{f_i} \leq c_{g_k} + (1 - y_{f_i, g_k})M \quad (12)$$

$$i, j, k, a \in \mathbf{Z}^+$$

式(12)表示停机位和机型必须匹配或停机位可停放的航空器大小大于停放的航空器大小。

2 基于 NSGA-II 算法的停机位多目标指派仿真验证

第2代非支配排序遗传算法(Non-dominated sorting genetic algorithm-II, NSGA-II)是由第1代非支配排序遗传算法优化得到的,也是一种针对多目标优化问题得到非支配解集的算法。首先进行种群的初始化,然后对种群中的个体进行快速非支配排序,接下来,以此前进行的非支配排序和拥挤度排序的结果为运行基础进行选择操作,与此同时对种群内的个体进行交叉和变异操作。该算法与遗传算法的最大区别在于 NSGA-II 算法中增加了快速非支配排序和拥挤度排序的过程。

本文将航空器分为大、中、小3类,选取中国某大型机场为仿真对象。根据各机型运行性能数据,设定滑行油耗为:大型航空器 40 kg/min,中型航空器 22 kg/min,小型航空器 12 kg/min。航油价格取 7 500 元/t。选取中国某大型机场 5:00 至 20:00 待指派停机位的国内航班 57 组相关数据为研究对象, G000~G006 为 7 个近机位, G007~G009 为 3 个远机位,默认远机位可以无限制停放。具体航班信息来源于厦门高崎国际机场 2015 年 9 月某工作日从 8:00 至 14:00 的航班和停机位数据,因篇幅原因未列出。

停机位优化指派模型中,取航空器的平均滑行速度 $v=15$ km/h,最短时间间隔参数 $T=15$ min, $M=700$ 。其中, Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 和 Z_5 分别表示目标函数(1—5)的值。采用 NSGA-II 算法对 5 个目标函数同时进行求解,对目标函数进行求解的演变过程如图 1—5 所示。

图 1—5 中,横坐标为 Pareto 前沿解的个数,每一次迭代均按照数值升序取前 50 个解,纵坐标分别为 5 个目标函数, 3 条曲线分别表示迭代 100

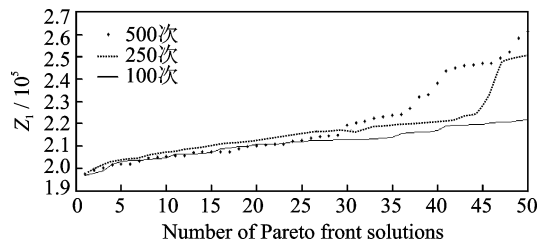


图 1 目标函数 Z_1 与迭代次数的关系

Fig. 1 Relationship between objective function Z_1 and number of iterations

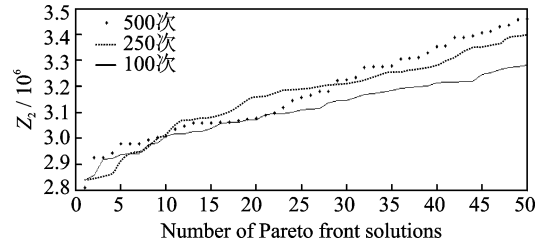


图 2 目标函数 Z_2 与迭代次数的关系

Fig. 2 Relationship between objective function Z_2 and number of iterations

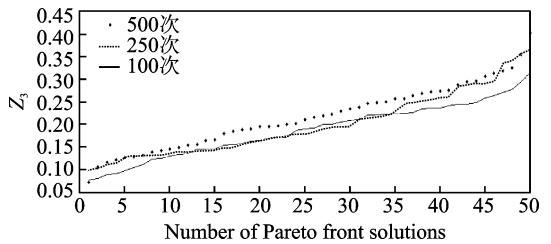


图 3 目标函数 Z_3 与迭代次数的关系

Fig. 3 Relationship between objective function Z_3 and number of iterations

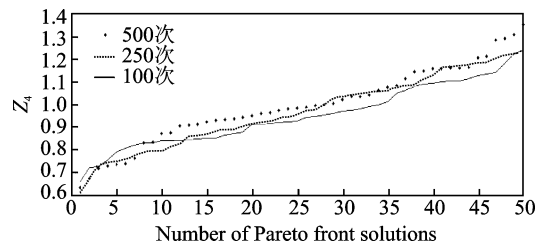


图 4 目标函数 Z_4 与迭代次数的关系

Fig. 4 Relationship between objective function Z_4 and number of iterations

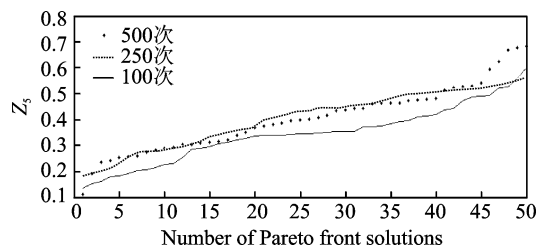


图 5 目标函数 Z_5 与迭代次数的关系

Fig. 5 Relationship between objective function Z_5 and number of iterations

次,250次,500次所获得的 Pareto 前沿解的取值。随着迭代次数的增加,所获得 Pareto 前沿解的目标函数值都在减小,这说明 NSGA-II 算法得到的解的质量在不断提高。通过不断迭代求解,求解结果在航空公司运行成本、旅客总步行距离、调度计划鲁棒性以及航空公司公平性上的表现都有所提高。以 Pareto 前沿解为基础单位,研究求解每个函数单位的数值特征,分析不同迭代次数下所得 Pareto 前沿解集所有解的平均值、中位值、最大值和最小值的变化。具体趋势如图 6—10 所示,纵坐标为 Pareto 解集关于目标函数的数值特征,横坐标为迭代次数。

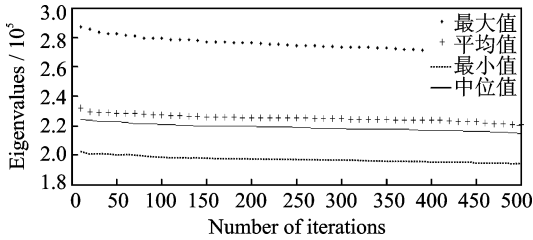


图 6 目标函数 Z_1 的特征值与迭代次数的关系

Fig. 6 Relationship between eigenvalues of objective Z_1 and number of iterations

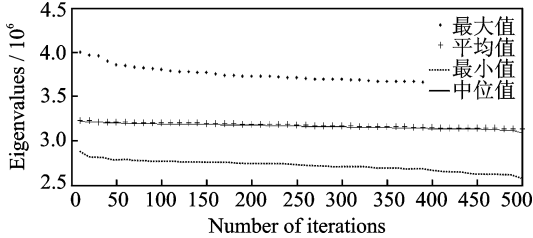


图 7 目标函数 Z_2 的特征值与迭代次数的关系

Fig. 7 Relationship between eigenvalues of objective Z_2 and number of iterations

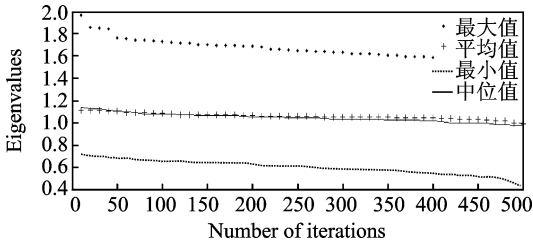


图 8 目标函数 Z_3 的特征值与迭代次数的关系

Fig. 8 Relationship between the eigenvalues of objective Z_3 and number of iterations

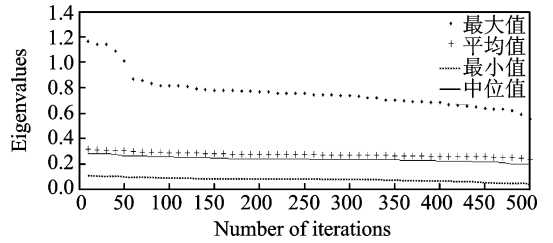


图 9 目标函数 Z_4 的特征值与迭代次数的关系

Fig. 9 Relationship between the eigenvalues of objective Z_4 and the number of iterations

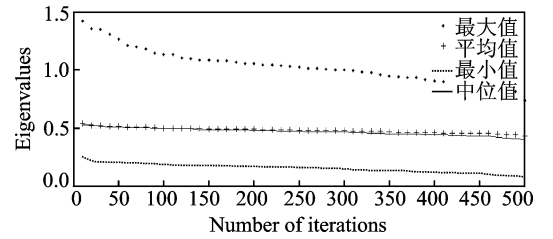


图 10 目标函数 Z_5 的特征值与迭代次数的关系

Fig. 10 Relationship between the eigenvalues of objective Z_5 and the number of iterations

从图 6—10 可以看出,其纵坐标依次为 5 个目标函数,横坐标为迭代次数,4 种不同的曲线分别表示某迭代次数下得到的所有 Pareto 前沿解关于不同目标函数的数值特征值,包括最大值、平均值、最小值和中位数。随着迭代次数的增加,每一代 Pareto 解集中所有解的目标函数值的平均值、中位数、最大值和最小值都在不断减小,即通过 NSGA-II 算法得到的解的目标值的整体变化趋势在不断减小,且整组数据的波动没有变大,可以保证所得数值的公平性并且减小偶然性,可见所得 Pareto 解集中的解的整体质量在不断提高。另分析 5 组图片,发现每组数据中的中位值都略小于平均值,说明整组数据呈现右偏分布。表 1 是迭代 500 次的 Pareto 前沿解和人工指派结果比较,验证了本模型对停机位指派问题进行优化的程度。

表 1 中已将迭代 500 次的各个解中的侧重目标函数值加黑标出。在最终得到的所有 Pareto 前沿解中,分别取 Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5 值最小的 5 个解,将其与人工指派结果进行比较,可见经过 NSGA-II 算法优化的结果总体大大优于随机指派的结果。

表 1 迭代 500 次的 Pareto 前沿解和人工指派结果比较

Tab. 1 Comparison of Pareto frontier solutions and artificial assignment results for 500 iterations

仿真结果	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5
人工指派	252 382	3 157 060	0.887 554	1.183 579	0.700 605
总费用最小	201 094	3 304 680	0.354 150	1.197 273	0.236 298
总步行最小	202 552	2 798 650	0.150 398	1.178 293	0.582 375
总公平滑行最小	229 813	3 436 370	0.380 745	0.671 457	0.737 848
总公平步行最小	214 843	3 508 850	0.246 032	1.105 296	0.163 441
总鲁棒最小	207 373	3 465 140	0.096 382	1.356 048	0.379 194

随机指派的每个目标值都明显差于经过 500 次迭代的优化解,经过迭代,解的质量已经明显提高。除此之外,还可以根据需求对 NSGA-II 算法得到的 Pareto 解集中的解进行人工选择,使得最终得到的解更符合实际需求。

3 结束语

本文从航空公司、机场和旅客三方角度出发,旨在寻找航空公司运行成本、旅客步行距离和航班冲突概率综合最小化的停机位指派方案,兼顾航空公司之间的公平性,寻求指派结果综合效能最大化。提出了一种满足三方利益的停机位指派模型,采用 NSGA-II 算法对模型进行求解,具有突出的优化性能,可以为机场的停机位指派决策提供参考。NSGA-II 算法不是简单地按对多个目标进行分配权重的方法进行求解,而是对 5 个目标同时进行求解,因此对 NSGA-II 算法的求解结果与不同算法下单目标的优化结果进行比较可以作为接下来的研究方向。

参考文献:

- [1] LIM A, RODRIGUES B, ZHU Y. Airport gate scheduling with time windows[J]. *Artificial Intelligence Review*, 2005, 24(1):5-31.
- [2] SEKER M, NOYAN N. Stochastic optimization models for the airport gate assignment Problem[J]. *Transportation Research Part E Logistics & Transportation Review*, 2012, 48(2):438-459.
- [3] 熊杰,张晨. 基于飞机滑行油耗的枢纽机场机位分配研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2010, 10(3):165-170.
XIONG Jie, ZHANG Chen. Airport gate assignment with airplane taxiing cost analysis[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2010, 10(3):165-170.
- [4] DIEPEN G, AKKER J M V D, HOOGEVEEN J A, et al. Finding a robust assignment of flights to gates at Amsterdam airport schiphol[J]. *Journal of Scheduling*, 2012, 15(6):703-715.
- [5] MAHARJAN B, MATIS T I. Multi-commodity flow network model of the flight gate assignment problem[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2012, 63(4):1135-1144.
- [6] JIANG Y, ZENG L, LUO Y. Multiobjective gate assignment based on passenger walking distance and fairness[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013(7):717-718.
- [7] DORNDORF U, JAEHN F, PESCH E. Flight gate scheduling with respect to a reference schedule[J]. *Annals of Operations Research*, 2012, 194(1):177-187.
- [8] NIKULIN Y, DREXL A. Theoretical aspects of multicriteria flight gate scheduling: Deterministic and fuzzy models[J]. *Journal of Scheduling*, 2010, 13(3):261-280.
- [9] PREM K V, BIERLAIRE M. Multi-objective airport gate assignment problem in planning and operations [J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2014, 48(7):902-926.
- [10] 杨文东,朱金福,许俐. 基于航班连结树的机场停机位指派问题研究[J]. *山东大学学报(工学版)*, 2010, 40(2):153-158.
YANG Wendong, ZHU Jinfu, XU Li. Research on the gate assignment problem in airport based on the flight connecting tree[J]. *Journal of Shandong University(Engineering Science)*, 2010, 40(2):153-158.
- [11] 王笑天,田勇,万莉莉,等. 基于列生成算法的停机位指派的鲁棒性研究[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2015, 39(1):171-174.
WANG Xiaotian, TIAN Yong, WAN Lili, et al. Research on robustness of gate assignment based on column generation methods[J]. *Journal of Wuhan University of Technology(Transportation Science & Engineering)*, 2015, 39(1):171-174.
- [12] 解英全. 基于遗传蚁群混合算法的机场停机位分配研究[D]. 西安:西安工业大学, 2015.
XIE Yingquan. Aircraft stand assignment research based on genetic ant colony hybrid algorithm[D]. Xi'an:Xi'an Technological University, 2015.
- [13] GENÇ H M, EROL O K, IBRAHIM E, et al. A stochastic neighborhood search approach for airport gate assignment problem[J]. *Expert Systems with Applications*, 2012, 39(1):316-327.
- [14] WANG H, LUO Y, SHI Z. Real-time gate reassignment based on flight delay feature in hub airport[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, 18(5):708-716.
- [15] LIU J Q, ZHANG M L, CHEN P C, et al. An integrative approach with sequential game to real-time gate assignment under CDM mechanism[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, 25(1):172-181.
- [16] 曾琳燕. 大型机场停机位多目标指派研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2014.
ZENG Linyan. Study on large airport multi-objective gate assignment[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.