



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2308081

引用格式:陈侯秀,全力炎,于剑,等.基于遗传-禁忌搜索算法绿色低碳停机位分配[J].科学技术与工程,2025,25(1):410-415.

Chen Yuxiu, Quan Liyan, Yu Jian, et al. Green and low carbon gate assignment based on genetic-tabu search algorithm[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(1): 410-415.

基于遗传-禁忌搜索算法绿色低碳停机位分配

陈侯秀^{1,2}, 全力炎^{1,2}, 于剑³, 张立超⁴

(1. 中国民航大学交通科学与工程学院, 天津 300300; 2. 中国民航环境与可持续发展研究中心, 天津 300300;
3. 中国民航管理干部学院, 北京 100102; 4. 佳木斯东郊机场, 佳木斯 154000)

摘要 随着环境气候问题日益严峻,绿色低碳已成为航空运输业可持续发展的重要原则。以单跑道运输机场为研究对象,以绿色低碳、旅客步行距离为优化目标,构建多情景下绿色低碳停机位分配模型,并设计遗传-禁忌搜索组合优化算法求解,最后以中国东北部的运输机场为实例进行仿真实验。实验结果表明,与实际运行分配方案相比,若仅考虑绿色低碳,最优分配方案可减少3.1%的燃油消耗,减少3.1%的航空器滑行距离,减少4.2% HC、3.6% CO、3.1% NO_x、3.1% CO₂排放,但会提高5.3%的旅客步行距离;若同时兼顾绿色低碳和旅客利益,最优分配方案可减少2.1%的燃油消耗,减少2.2%的航空器滑行距离,减少3.8% HC、2.7% CO、2.0% NO_x、2.1%的CO₂排放,减少2.1%的旅客步行距离。可见绿色低碳发展的同时,仍可兼顾旅客利益。

关键词 停机位分配; 绿色低碳; 旅客步行距离; 遗传算法; 禁忌搜索算法
中图分类号 V351; **文献标志码** A

Green and Low Carbon Gate Assignment Based on Genetic-Tabu Search Algorithm

CHEN Yu-xiu^{1,2}, QUAN Li-yan^{1,2}, YU Jian³, ZHANG Li-chao⁴

(1. College of Transportation Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;
2. Research Center for Environment and Sustainable Development of the China Civil Aviation, Tianjin 300300, China;
3. Civil Aviation Management Institute of China, Beijing 100102, China; 4. Jiamusi Dongjiao Airport, Jiamusi 154000, China)

[Abstract] With the increasingly serious problem of climate change, green and low-carbon operations have become an important principle for the sustainable development of the air transportation industry. Taking a single runway transport airport as the research object and green and low-carbon and passenger walking distance as the optimization objective, a green and low-carbon gate assignment model under multiple scenarios was constructed, and a genetic-tabu search combined optimization algorithm was designed to solve it. Finally, a transport airport in northeast China was taken as an example for simulation experiment. The experimental results are shown as follows. In the optimal assignment scheme, if considering green and low-carbon, the fuel consumption can be reduced by 3.1%, the taxiing distance of the aircraft by 3.1%, HC emission by 4.2%, CO emission by 3.6%, NO_x emission by 3.1%, and CO₂ emission by 3.1% comparatively. But passenger walking distance can be increased by 5.3% at the same time. If considering green and low-carbon as well as the interests of the passengers, the fuel consumption can be decreased by 2.1%, the taxiing distance of the aircraft by 2.2%, HC emission by 3.8%, CO emission by 2.7%, NO_x emission by 2.0%, CO₂ emission by 2.1%, and passenger walking distance by 2.1% comparatively. Thus, it is possible to strike a balance between green and low-carbon development and the interests of travelers.

[Keywords] gate assignment; green and low-carbon; passenger walking distance; genetic algorithm; tabu search algorithm

随着气候变化问题日益严峻,航空运输业开始实施一系列减排措施以实现碳中和目标。其中,运行优化是航空运输业在短时间内实现节能减排的重要途径^[1-2]。机场作为航空运输的起讫点,其场

面运行效率与温室气体排放紧密相关^[3-4]。停机位作为重要的场面资源组成部分,是航空器在机场场面滑行过程中的起讫点。不合理的停机位分配方案会增加航空器滑行距离及燃油消耗,进而产生额

收稿日期: 2023-10-17 修订日期: 2024-07-19

基金项目: 中国民航局安全能力基金(1400250000020J074)

第一作者: 陈侯秀(1980—),女,汉族,辽宁沈阳人,博士,教授。研究方向: 绿色民航可持续发展,航空运输规划与管理。E-mail: yuxiuchen1@163.com。

投稿网址: www.stae.com.cn

外的航空排放。因此,合理优化停机位分配方案对提高机场运行效率^[5]、促进航空运输业可持续发展^[6]具有重要意义。

国内外已从提高机场资源利用率、航空公司收益和旅客满意度等多个角度对停机位优化分配开展了相关研究。袁媛等^[7]为减少旅客步行距离与停机位浪费率,基于网络流理论建立优化模型;Silva等^[8]为提高航站楼的非航空收入,构建综合考虑旅客行为和停机位分配的混合整数规划模型;Nikolić等^[9]构建以航空器停机位等待时间最小和近机位利用率最大为目标的优化模型。近年来,国内外学者也逐渐关注通过停机位优化降低航空燃油消耗量。王超等^[10]以平行多跑道混合运行机场为研究对象,构建以航空燃油消耗最少为优化目标的整数规划模型;Shan等^[11]构建以航空燃油消耗最少和近机位利用率及分配方案鲁棒性最大为目标的优化模型;Sun等^[12]以航空燃油消耗最少和机位匹配度最大为优化目标,构建停机位和滑行道联合规划模型。从上述研究总结可以看出,目前学者开展的停机位优化分配对航空燃油消耗的影响研究,多以航空公司和机场的角度进行优化调度,少有考虑旅客满意度。然而,旅客和航空公司是机场的两大客户,旅客满意度也应是机场运行优化重要的考虑因素^[13-14]。

在停机位优化分配模型求解方面,已有研究多以智能优化算法为主^[15-17]。曾琛等^[18]设计遗传算法,求解以停机位空闲时间均匀为目标的优化模型;刘禹汐等^[19]设计 NSGA-II 算法,求解以近机位使用数最多和停机位使用数及旅客步行距离最少为目标的优化模型;Behrends等^[20]为减少航空器从停机位滑行至跑道的延误,构建停机位和滑行道联合规划模型,并设计遗传算法求解。然而遗传算法的局部搜索能力较弱^[21],往往容易陷入早熟收敛^[22]。因此,部分学者又选择了局部搜索能力较强的算法进行求解。王在俊等^[23]设计基于 Pareto 的禁忌搜索算法,对以旅客步行距离、航空器滑行距离及远机位使用数最少为目标的模型进行求解;Li等^[24]设计基于概率学习的禁忌搜索算法,求解以旅客步行距离最少为目标的优化模型。然而,禁忌搜索算法对初始解的依赖性较强,全局最优解的生成高度依赖初始解的选取,较差的初始解将降低收敛速度且容易产生局部最优解^[25]。

基于此,现以绿色低碳为出发点,构建停机位分配优化模型,综合考虑航空燃油消耗与旅客步行距离进行协同决策,以期减少航空燃油消耗量并提升旅客满意度。在模型求解方面,结合遗传算法和禁忌搜索算法局部搜索能力强的特点,设计基于遗

传—禁忌搜索组合优化算法的模型求解方法,并以中国东北地区民用运输机场为研究对象,进行仿真实验。此外,进一步分析停机位优化分配方案对二氧化碳等气体排放的影响,以期减少航空排放对环境的负面影响并为机场管理者开展运行优化提供决策参考。

1 数学模型

截至 2022 年底,中国颁证运输机场共 254 个,全行业运输机场跑道共 283 条,单跑道运输机场占比 90% 以上。因此以单跑道运输机场为研究对象,建立停机位分配数学模型,在此之前,引入下列假设。

- (1) 停机位容量充足,满足航班需求。
- (2) 航班飞行计划及停机位等相关信息已知。
- (3) 假定滑行速度恒定,即 $\bar{v} = 15 \text{ km/h}$ 。
- (4) 不考虑航班拖曳情况,同一航班对停靠在同一个停机位。

1.1 目标函数

航空器的滑行距离与燃油消耗密不可分,为客观反映航空器的滑行油耗,考虑不同机型燃油流率对航空器滑行油耗影响,航空器滑行总燃油消耗如式(1)所示。

$$f_1 = \sum_j^n \sum_i^m \left(\frac{L_{i,j}^{\text{arr}} X_{i,j} + L_{i,j}^{\text{dep}} X_{i,j}}{\bar{v}} n_i \text{rate}_i \right) \quad (1)$$

式(1)中: f_1 为航空燃油消耗量; $L_{i,j}$ 为航空器*i*分配至停机位*j*的滑行距离,上角标 arr、dep 分别为进港和离港; $X_{i,j}$ 为布尔变量; \bar{v} 为滑行速度; n_i 、 rate_i 为航班器*i*的发动机个数及慢车状态下的燃油流率; m 为航班对总数; n 为停机位个数。

推进航空运输业绿色低碳发展的同时,仍需兼顾旅客满意度,以旅客步行距离代表旅客满意度,如式(2)所示。

$$f_2 = \sum_j^n \sum_i^m X_{i,j} (N_{i,\text{arr}} D_{j,\text{arr}} + N_{i,\text{dep}} D_{j,\text{dep}}) \quad (2)$$

式(2)中: f_2 为旅客步行距离; N_i 为航班对*i*的旅客人数; D_j 为航空器*i*停靠停机位*j*旅客步行距离。

由于燃油消耗量与旅客步行距离量纲不同,因此需归一化处理,最终优化目标函数如式(3)所示。

$$\min f = w_1 \frac{f_1}{f_1^*} + w_2 \frac{f_2}{f_2^*} \quad (3)$$

式(3)中: w_i 为各目标的权重; f_i^* 为各目标的最优值。

航空器滑行过程中因燃油消耗所产生二氧化碳等气体排放,如式(4)所示。

$$f_{\text{gas}} = \sum_{k=1}^4 \sum_{i=1}^m (t_i n_i \text{rate}_i E_{i,k}) \quad (4)$$

式(4)中: f_{gas} 为气体排放量; t_i 为航空器*i*的总滑行时间; $E_{i,k}$ 为航空器*i*慢车状态下气体*k*排放指数,取自国际民航组织发动机排放数据库^[26],碳排放指数为3.15 kg/kg,*k*为气体类型:CO₂、CO、NO_x、HC。

1.2 约束条件

$$\sum_{j=1}^n X_{i,j} = 1 \quad (5)$$

$$X_{i_1,j} X_{i_2,j} (t_{i_1}^{\text{dep}} - t_{i_2}^{\text{arr}}) (t_{i_2}^{\text{dep}} - t_{i_1}^{\text{arr}}) \leq 0 \quad (6)$$

$$t_{i_2}^{\text{arr}} - t_{i_1}^{\text{dep}} + (1 - Y_{i_1,i_2}) M \geq T_{\text{min}} \quad (7)$$

$$r_i \leq r_j + (1 - X_{i,j}) M \quad (8)$$

$$X_{i,j}, Y_{i_1,i_2} \in \{0,1\}, \forall i \in F, \forall j \in G \quad (9)$$

式中: $X_{i,j}$ 、 Y_{i_1,i_2} 为布尔变量,当前仅当航班*i*被分配至机位*j*时, $X_{i,j}$ 为1,否则为0;航班*i*₁、*i*₂占用的停机位相同时, Y_{i_1,i_2} 为1,否则为0;*F*为航班对集合;*G*为停机位集合。

式(5)为唯一性约束,即每个航班必须且仅能被分配至一个停机位;式(6)为独占性约束,即每个停机位至多被一个航空器占用;式(7)为安全时间间隔约束,即占用同一机位的航班之间有最小安全时间间隔 T_{min} ,以增加停机位分配的鲁棒性;式(8)为机型匹配约束,即航空器大小等级小于等于停机位等级;式(9)为决策变量约束。

2 遗传-禁忌搜索组合算法设计

停机位分配属于 NP-hard 问题,传统方法很难在较短时间内找到最优解,而智能算法近年来常用于求解该类问题。

遗传算法(genetic algorithm, GA)是一种随机全局搜索优化算法,但局部搜索能力较弱,往往得到的解是全局近似最优解,而禁忌搜索算法(tabu search, TS)有较强的局部搜索能力,但通常得到的解是局部最优解,能否得到最优解取决于初始解的选取。

因此,针对上述构建的数学模型,以遗传算法的最终解作为禁忌搜索算法的初始解,设计遗传-禁忌搜索组合优化算法求解。

2.1 遗传算法设计

采用整数编码方式,染色体的基因代表所有待分配机位的航班,每个基因值为一个停机位,表示将该停机位分配给对应的航班。染色体长度为所有待分配机位航班的数量。

(1)种群初始化:按照先到先服务原则,依次对各航班随机生成满足约束条件的机位。

(2)适应度函数:将模型的目标函数作为评价个体优劣的适应度函数。

(3)选择算子:使用轮盘赌选择法,适应度值越优,被选择的概率越大。

(4)交叉算子:采用片段交叉,即以交叉概率 P_c 交换任意两个染色体在相同位置的基因段。

(5)变异算子:单点变异,即对于每条染色体有 P_m 的概率发生变异,随机改变染色体上某一基因值。

(6)终止准则:当达到最大迭代次数时,完成迭代。

在迭代过程中,每次迭代完成上述操作后,可能会产生非可行解。对于非可行解,按先到先服务原则分配机位,对后来产生机位冲突的航班重新分配当前时段可用停机位,若已没有可用停机位,则该个体重新初始化。

2.2 禁忌搜索算法设计

编码方式:每个停机位为一元胞,其值为分配至该机位的所有航班,因此分配方案可用1个 $1 \times n$ 的元胞数组表示。

(1)初始解生成:由遗传算法最终解作为初始解。

(2)适配值函数:将目标函数作为适配值函数。

(3)邻域结构:通过插入和交换产生若干邻域解,候选解为整个邻域。

(4)禁忌表:禁忌表的长度 = sqrt(航班数)^[27],禁忌对象为交换的解,按照先进先出的原则,释放禁忌对象。

(5)藐视准则:候选解的适配值优于当前最优解。

(6)终止准则:连续未进化次数 \geq 最大连续未进化次数。

3 实例验证

以中国东北地区机场为例,该机场共6个停机位、1条跑道。选取该机场某正常工作日一天的真实运行数据,该机场的部分航班运行数据以及停机位信息如表1和表2所示。根据国际民航组织航空器发动机排放数据库,筛选各机型慢车状态下对应的发动机燃油流率和气体排放指数,如表3所示。

针对上述构建的数学模型以及设计的组合优化算法,借助 MATLAB R2021b 编程,进行实例验证。其中遗传算法种群数目 $N = 30$,交叉概率 $P_c = 0.9$,变异概率 $P_m = 0.05$,遗传算法迭代次数为100,禁忌搜索算法最大连续未进化迭代次数为100。

建立低碳节油 S_1 、旅客步行距离最少 S_2 、低碳节油与旅客利益同等重要 S_3 、低碳节油重要程度高于旅客利益 S_4 共4种情景,不同情景下的最终优化目标值如表4所示。

表1 航班运行数据

Table 1 Flight operation data

| 航班序号 | 机型 | 进港时间 | 进港旅客人数 | 离港时间 | 离港旅客人数 |
|------|-------|-------|--------|-------|--------|
| 1 | B737 | 08:19 | 139 | 09:31 | 159 |
| 2 | ARJ21 | 10:18 | 41 | 11:24 | 76 |
| 3 | A319 | 10:59 | 94 | 13:06 | 122 |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| 13 | B737 | 19:08 | 136 | 20:15 | 123 |
| 14 | A321 | 19:57 | 167 | 21:30 | 146 |
| 15 | B737 | 21:21 | 170 | 22:20 | 121 |

表2 机场停机位信息

Table 2 Airport gate information

| 序号 | 停机位等级 | 进港滑行距离/m | 离港滑行距离/m | 进港步行距离/m | 离港步行距离/m |
|----|-------|----------|----------|----------|----------|
| 1 | B | 2 066 | 1 666 | 123 | 105 |
| 2 | C | 2 019 | 1 619 | 159 | 115 |
| 3 | C | 1 972 | 1 572 | 126 | 97 |
| 4 | C | 1 925 | 1 525 | 100 | 98 |
| 5 | C | 1 878 | 1 478 | 95 | 122 |
| 6 | C | 1 831 | 1 431 | 111 | 155 |

表3 慢车状态下航空器发动机燃油流率及排放指数

Table 3 Aircraft engine fuel rates and emission indices under idle conditions

| 机型 | 典型发动机型号 | 数量/个 | 燃油流率/(kg·s ⁻¹) | HC/(g·kg ⁻¹) | CO/(g·kg ⁻¹) | NO _x /(g·kg ⁻¹) |
|-------|-------------|------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|--|
| A320 | CFM56-5A3 | 2 | 0.104 | 1.3 | 16.2 | 4.1 |
| B737 | CFM56-3C-1 | 2 | 0.124 | 1.42 | 26.8 | 4.3 |
| ARJ21 | CF34-10A | 2 | 0.084 | 6.96 | 52.05 | 3.45 |
| A319 | CFM56-5B5/P | 2 | 0.102 | 6.2 | 30 | 3.8 |
| A321 | V2530-A5 | 2 | 0.138 | 0.1 | 10.95 | 5 |

表4 不同情景下目标函数值

Table 4 Objective function values for different scenarios

| 情景 | S ₁ | S ₂ | S ₃ | S ₄ |
|-------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| w ₁ :w ₂ 权重设置 | 1:0 | 0:1 | 0.5:0.5 | 0.8:0.2 |
| GA-燃油消耗/kg | 2 701.09 | 2 771.75 | 2 746.66 | 2 711.01 |
| GA-碳排放量/kg | 8 508.43 | 8 731.02 | 8 651.98 | 8 539.70 |
| GA-旅客步行距离/m | 444 015 | 405 101 | 405 467 | 425 429 |
| GA-TS-燃油消耗/kg | 2 694.86 | 2 759.29 | 2 746.66 | 2 723.46 |
| GA-TS-碳排放量/kg | 8 488.81 | 8 691.76 | 8 651.95 | 8 578.90 |
| GA-TS-旅客步行距离/m | 446 684 | 403 574 | 404 864 | 415 270 |
| 最优分配方案目标值 | 1 | 1 | 1.01 | 1.01 |
| 实际分配方案目标值 | 1.03 | 1.05 | 1.04 | 1.04 |

实际运行的停机位分配方案 S₀下,燃油消耗为 2 781.13 kg,二氧化碳排放量为8 760.56 kg,旅客步行距离为 424 255 m。实际运行方案在 4 种情景下的最终目标值分别为 1.03、1.05、1.04、1.04。4 种情景下最优解的目标函数值迭代曲线如图 1 所示。

由图 1 可发现,目标函数值在遗传算法的求解基础上进一步优化,验证了遗传-禁忌搜索组合优化算法的可行性。实验结果表明,若仅考虑低碳节油,最优方案的燃油消耗 f₁^{*} 为 2 694.86 kg,此时二氧化碳排放量为 8 488.81 kg,与实际运行分配方案相比,虽然会减少 3.1% 的油耗和二氧化碳排放量,但旅客步行距离将会提高 5.3%,从 424 255 m 上升到 446 684 m。若仅考虑旅客步行距离,最优方案的旅客步行距离 f₂^{*} 将减少 4.9%,减少至 403 574 m。此时燃油消耗为 2 759.29 kg,二氧化碳排放量为 8 691.76 kg,相对于实际分配方案减少 0.79%。由此可见,低碳节油的效果并不理想,因此需要综合考虑两者的利益,后续不再讨论 S₂ 情景。

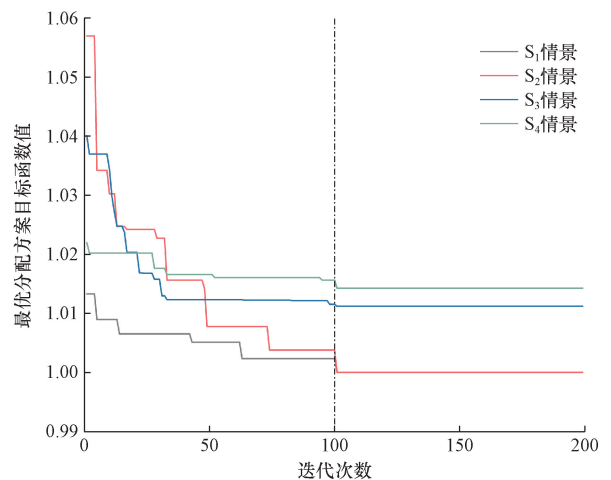


图1 目标函数值迭代图

Fig. 1 Iterative graph of objective function value

通过设置多组权重组合发现,当低碳节油与旅客利益同等重要时,即 w₁ = 0.5, w₂ = 0.5,最优方案的油耗为 2 746.66 kg,二氧化碳排放量为 8 651.95

kg, 相比实际运行分配方案减少 1.2%, 旅客步行距离减少至 404 864 m, 相对减少 4.6%。当低碳节油的重要程度高于旅客利益时, 即 $w_1 = 0.8, w_2 = 0.2$, 最优方案油耗为 2 723.46 kg, 二氧化碳排放量为 8 578.90 kg, 相比实际运行分配方案减少 2.1%, 旅客步行距离减少至 415 270 m, 相对减少 2.1%。

综上所述, S_4 情景下最优分配方案能够较好兼顾航空燃油消耗与旅客满意度, 减少航空公司燃油消耗进而减少场面二氧化碳排放量, 同时提升旅客满意度。此时的最优停机位分配方案与实际运行停机位分配方案甘特图如图 2 所示。

对比可发现, 实际运行 S_0 和 S_4 情景下的分配方案, 1 号停机位均未被占用, 这是由 1 号停机位的大小无法满足执行所有航班的航空器大小所导致。 S_4 情景下, 将大多数航班分配在 4、5 号停机位。这是由航空器总滑行距离相较于 2、3 号停机位短, 旅客步行距离相较于 6 号机位短, 这两者共同导致的。

航空器在场面滑行过程中, 因燃油消耗会产生二氧化碳等气体。相比实际运行分配方案 S_0, S_1 情景下的最优分配方案相对减少 4.2% HC 排放, 3.6% CO 排放, 3.1% NO_x 排放; S_4 情景下的最优分配方案相对减少 3.8% HC 排放, 2.7% CO 排放, 2.0% NO_x 排放, 各情景下的气体排放量如图 3 所示。

机场场面运行过程中, 燃油消耗的主要途径是航空器滑行。实际运行分配方案 S_0 总滑行距离为 52 032 m, S_1, S_4 情景下最优分配方案的总滑行距离为 50 434 m 和 50 904 m, 相对减少 3.1% 和 2.2%, 各航班航空器滑行距离, 如图 4 所示。

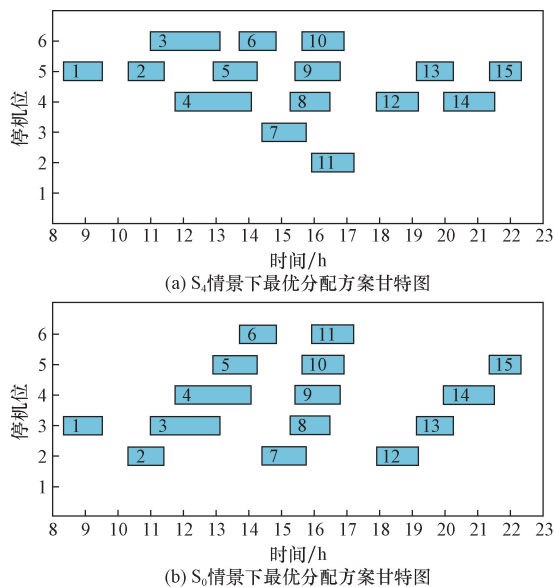


图 2 停机位分配甘特图
Fig. 2 Gantt chart of gate assignment

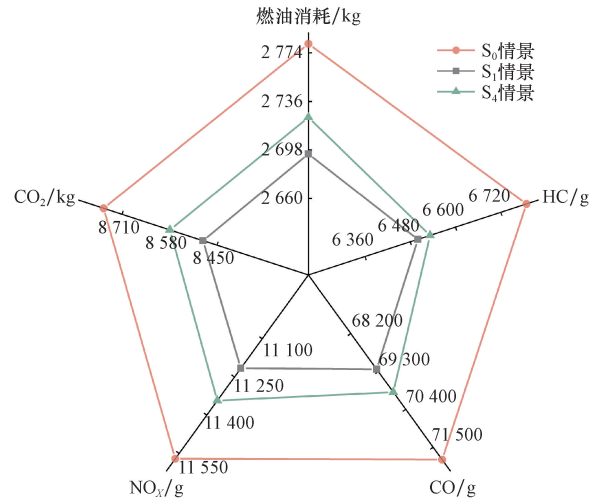


图 3 燃油消耗与气体排放量
Fig. 3 Fuel consumption and gas emission

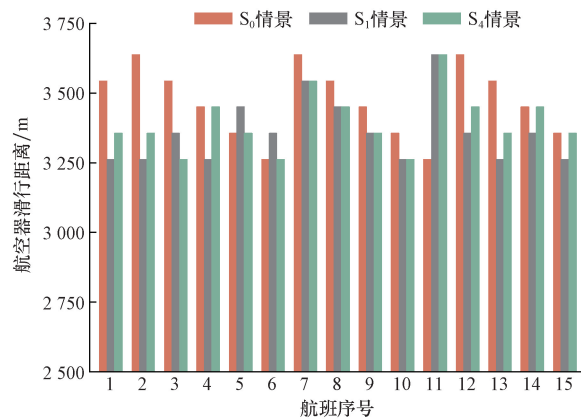


图 4 航空器滑行距离
Fig. 4 Aircraft taxiing distance

4 结论

以单跑道运输机场为研究对象, 以绿色低碳为出发点, 构建多情景下绿色低碳且兼顾旅客满意度的停机位分配优化模型, 并设计遗传-禁忌搜索组合优化算法求解, 最终以中国东北地区运输机场进行实例验证。

实验结果表明, 若仅考虑低碳节油, 会以减少旅客利益为代价, 加剧旅客步行距离。若同时兼顾二者的利益, 燃油消耗量、二氧化碳等气体排放量以及旅客步行距离均会减少。在实际运行中, 机场运行决策者可根据实际需求设置不同权重组合, 研究为机场管理决策者提供科学参考依据。

由于仅考虑单跑道运输机场, 航班、停机位数量较少, 场面结构复杂程度较低, 且采用固定的航空器滑行路径, 未考虑航班在实际滑行过程中是否会出现滑行冲突等现象, 未来可考虑绿色低碳停机位和滑行道的联合优化, 推进航空运输业碳减排进程。

参 考 文 献

- [1] Air Transport Action Group. Waypoint 2050 [R]. Geneva: Air Transport Action Group, 2021.
- [2] European Environment Agency. European Aviation Environmental Report[R]. Cologne: EASA, 2022.
- [3] 张田, 田勇. 中国民航飞机大气污染物和碳排放清单估算[J]. 中国环境科学, 2023, 43(10): 5614-5623.
Zhang Tian, Tian Yong. Estimation of both air pollutants and carbon emission inventories from civil aircrafts in China[J]. China Environmental Science, 2023, 43(10): 5614-5623.
- [4] Sman E V D, Peerlings B, Kos J, et al. Destination 2050—a route to net zero european aviation[R]. Amsterdam: NLR-Royal Netherlands Aerospace Centre & SEO Amsterdam Economics, 2021.
- [5] 黄学林, 王观虎, 陈奇奇, 等. 基于 Petri 网军民共用停机坪运行仿真与分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(2): 841-849.
Huang Xuelin, Wang Guanhu, Chen Qiqi, et al. Simulation and analysis of military-civilian shared apron operation based on Petri-net[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(2): 841-849.
- [6] Chao C C, Tang C H, Hsiao Y H. Planned gate and runway assignments considering carbon emissions and costs [J]. International Journal of Sustainable Transportation, 2020, 14(8): 643-655.
- [7] 袁媛, 翟好鑫. 基于网络流理论的停机位分配多目标优化模型[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(29): 12204-12210.
Yuan Yuan, Zhai Haixin. Multi-objective optimization model of gate assignment based on network flow theory [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(29): 12204-12210.
- [8] Silva J, Kalakou S, Andrade A R. Maximizing non-aeronautical revenues in airport terminals using gate assignment and passenger behaviour modelling[J]. Journal of Air Transport Management, 2023, 112: 102452.
- [9] Nikolic' M, Rakas J, Teodorovic' D. Formulation of the airport collaborative gate allocation problem and the bee colony optimization solution approach[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2024, 128: 107433.
- [10] 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.
Wang Chao, Ren Yunhong. A model of gate allocation for parallel multi-runway hybrid operation from the perspective of fuel-saving and carbon emission reduction[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2021, 39(5): 144-152.
- [11] Shan Y X, Shao Y W, Yuan Q, et al. Multiobjective gate assignment model considering carbon emissions[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2023, 20(5): 3952.
- [12] Sun R F, Li J, Niu K X, et al. Research on joint ground movement optimization based on bilevel programming[J]. Aerospace, 2022, 9(9): 502-502.
- [13] Tahanisaz S, Shokhyar S. Evaluation of passenger satisfaction with service quality: a consecutive method applied to the airline industry [J]. Journal of Air Transport Management, 2020, 83: 101764.
- [14] Halpern N, Mwesumo D. Airport service quality and passenger satisfaction: the impact of service failure on the likelihood of promoting an airport online[J]. Research in Transportation Business & Management, 2021, 41: 100667.
- [15] 朱承元, 于海波. 停机位分配的多商品网络流模型及离散粒子群算法[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(10): 4417-4425.
Zhu Chengyuan, Yu Haibo. Multi-commodity network flow model and discrete particle swarm algorithm for gate assignment problem [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(10): 4417-4425.
- [16] Li J, Li K P, Tian Q N, et al. A column generation-based algorithm for gate assignment problem with combinational gates[J]. Expert Systems with Applications, 2024, 238: 121792.
- [17] Kim S H, Feron E, Clarke J P, et al. Airport gate scheduling for passengers, aircraft, and operations[J]. Journal of Air Transportation, 2017, 25(4): 109-114.
- [18] 曾琛, 王润东. 基于遗传算法的动态飞机停机位分配模型研究[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(4): 199-204.
Zeng Chen, Wang Rundong. Research on dynamic aircraft stand allocation model based on genetic algorithm [J]. Computer Measurement & Control, 2023, 31(4): 199-204.
- [19] 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.
- [20] Behrends J, Usher M J, Guo J. An integrated solution for the aircraft taxi and gate assignment problems[J]. Cogent Engineering, 2017, 4(1): 1-19.
- [21] Zhu Z N, Li X, Chen H Y, et al. An effective and robust genetic algorithm with hybrid multi-strategy and mechanism for airport gate allocation[J]. Information Sciences, 2024, 654: 119892.
- [22] 王勇, 魏远哈, 蒋琼, 等. 带时间窗的三维装载物流配送优化方法研究[J]. 运筹与管理, 2022, 31(12): 111-119.
Wang Yong, Wei Yuanhan, Jiang Qiong, et al. Study on the optimization method of three-dimensional loading logistics distribution with time windows[J]. Operations Research and Management Science, 2022, 31(12): 111-119.
- [23] 王在俊, 王吉豪, 王乾垒, 等. 基于多目标优化禁忌搜索算法的停机位分配方法研究[J]. 自动化技术与应用, 2023, 42(3): 4-7.
Wang Zaijun, Wang Jihao, Wang Qianlei, et al. Research on multi-objective optimized gate assignment[J]. Techniques of Automation and Applications, 2023, 42(3): 4-7.
- [24] Li M J, Hao J K, Wu Q H. Learning-driven feasible and infeasible tabu search for airport gate assignment[J]. European Journal of Operational Research, 2022, 302(1): 172-86.
- [25] 赵剑英, 李建国, 薛千树. 基于改进禁忌搜索算法的立体车库搬运器路径优化建模与仿真[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(35): 15279-15285.
Zhao Jianying, Li Jianguo, Xue Qianshu. Modeling and simulation of stereo garage handler path optimization based on improved tabu search algorithm[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(35): 15279-15285.
- [26] International Civil Aviation Organization (ICAO). ICAO engine exhaust emissions databank [DB/OL]. (2019-05) [2023-10-17]. <https://www.easa.europa.eu/domains/environment/icao-aircraft-engine-emissions-databank>.
- [27] 冯霞, 王青召. 考虑缓冲时间成本的鲁棒性停机位分配[J]. 北京理工大学学报, 2019, 39(4): 384-390.
Feng Xia, Wang Qingzhao. Robust gate assignment considering buffer time cost[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2019, 39(4): 384-390.