

文章编号:1005-0523(2020)05-0080-09

基于多目标算法的航站楼值机系统动态配置研究

张天炫,包丹文,朱婷,羊钊,田诗佳

(南京航空航天大学民航学院,江苏南京211100)

摘要:针对目前航站楼值机系统动态配置以求解设施使用成本与旅客时间成本两者之和最小化存在的低置信度问题,提出了一种配置方案多目标优化方法。将多目标算法应用到值机系统动态配置过程中,对航空公司和旅客分别设置柜台运营成本和值机排队等待时间的优化目标,构建航站楼值机系统动态配置模型,对南京禄口国际机场T2航站楼D岛值机柜台开放数量进行动态配置。通过NSGA-II算法获得Pareto最优解,同时基于TOPSIS方法的后验评价,对不同的配置方案进行了对比分析,最终得出全天D岛值机系统动态配置结果。该研究有效的消除了成本和时间量纲间的差异,有利于实现航空公司和机场各自独特的优化配置策略,为航站楼值机资源动态配置提供了新方法。

关键词:航空运输;资源动态配置;多目标优化;值机系统;NSGA-II;TOPSIS

中图分类号:[U8] **文献标志码:**A

本文引用格式:张天炫,包丹文,朱婷,等.基于多目标算法的航站楼值机系统动态配置研究[J].华东交通大学学报,2020,37(5):80-88.

Citation format:ZHANG T X,BAO D W,ZHU T,et al. Research on dynamic configuration of terminal check-in system based on multi-objective algorithm[J]. Journal of East China Jiaotong University,2020,37(5):80-88.

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2020.05.012

专家学者对航站楼值机及安检设施动态配置进行了各类研究^[1-5],基于服务标准^[6-9],以设施使用成本与旅客时间成本总成本之和最小化为目标对设施资源进行优化^[10-11],改善旅客满意度。同时,构建适合航站楼空间特点的排队模型^[12-16],有利于确定值机及安检设施具体数量。由决策支持系统^[17]、网络模型^[18]开发的模型能有效反应设施系统内在运行机制,从而进行资源配置。

多目标优化^[19]能对不同成本目标进行针对性研究,展现优化目标间的博弈关系,消除目标量纲不同引起的优化结果低置信度现象。NSGA-II算法^[20]是目前解决多目标优化问题的常用算法之一,通过NSGA-II算法可得到问题的Pareto最优解集。同时,由于多目标优化问题的解不是唯一的,基于TOPSIS法^[21]可以从有限的Pareto解集中选择合适解进行多目标资源优化决策。

在航站楼值机设施动态配置方面,基于多目标算法构造配置模型并运用后验评价方法选择最优方案的研究几乎没有。本文基于多目标算法,分别站在航空公司及旅客角度构建航站楼值机系统动态配置模型,采用NSGA-II多目标遗传算法、TOPSIS方法进行求解,确定最佳配置方案。

1 系统模型与问题描述

1.1 问题描述

如何构建航站楼值机系统动态配置模型,选择综合效益最好的柜台配置方案成为提高机场和航空公司运营水平的关键。本文从柜台运营成本和旅客值机排队等待时间两方面建立优化目标,考虑柜台数约束、排队及服务办理时间运行标准约束和繁忙概率约束三约束条件,提出航站楼值机柜台配置方案。

收稿日期:2020-04-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51608268);南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金(kfj20190708)

作者简介:张天炫(1995—),女,硕士研究生,研究方向为交通运输规划与管理。E-mail:245013490@99.com。

通信作者:包丹文(1982—),男,博士,副教授,研究方向为交通运输规划与管理。E-mail:baodanwen@nuaa.edu.cn。

1.2 目标函数

1) 航空公司值机柜台运营成本目标。值机柜台运营成本反映了柜台配置对航空公司经济发展规划的影响情况,是衡量航空公司收益的重要指导目标,由柜台租用成本和地服人员工作费用两部分组成。在对值机柜台进行优化配置时,航空公司管理部门尽可能要求运营成本达到最小,具体如式(1)所示

$$\min Z_1 = C_s \cdot c + C_p \cdot c \quad (1)$$

式中: Z_1 为航空公司值机柜台运营成本,元/min; C_s 为航空公司值机柜台租用成本,元/(个/min); C_p 为航空公司值机地服人员工作费用,元/(人/min); c 为值机柜台开放数量。

2) 旅客值机排队等待时间目标。在值机系统总资源定量的情况下,合理高效地利用柜台资源对保证航站楼值机区域秩序、提高旅客满意度具有重要意义。因此在值机柜台进行优化配置时,机场管理部门要保证旅客值机排队等待时间尽可能小,具体如式(2)所示。同时由于大多数大型航站楼值机区域排队系统为多通道服务系统,根据排队论 M/M/C 模型可得到值机柜台总服务强度、空闲概率以及排队长度如式(3)~式(5)所示

$$\min Z_2 = \frac{L_q}{\lambda} \quad (2)$$

$$\rho = \frac{\lambda}{c\mu} \quad (3)$$

$$P_0 = \left[\sum_{n=0}^{c-1} \frac{(c\rho)^n}{n!} + \frac{(c\rho)^c}{c! (1-\rho)} \right]^{-1} \quad (4)$$

$$L_q = \frac{(c\rho)^c \cdot \rho}{c! (1-\rho)^2} \cdot P_0 \quad (5)$$

式中: Z_2 为旅客值机排队等待时间,min; L_q 为值机柜台排队长度; λ 为值机柜台旅客到达率,人/min; ρ 为值机柜台总服务强度; P_0 为值机柜台空闲概率; μ 为单个值机柜台服务率,人/min。

1.3 约束条件

1) 柜台数约束。在实际配置工作中由于资源限制所开放的值机柜台数不能超过系统已有最大资源,式(6)表明了值机柜台总体资源条件限制

$$1 \leq c \leq C \quad (6)$$

式中: C 为值机系统柜台总数。

2) 柜台旅客乘机手续排队及办理时间运行标准约束。在值机系统的实际生产过程中,为了保证值机旅客的高服务满意度,需要将值机服务水平控制在机场运行标准服务水平之上,即95%的国内经济舱旅客乘机手续排队及办理时间应不超过10 min,如式(7)所示

$$1 < \frac{L_q}{\lambda} + \frac{1}{\mu} \leq 10 \quad (7)$$

3) 柜台繁忙概率约束。为了保证地服人员在值机服务过程中不因疲劳操作对服务质量产生影响,降低旅客服务满意度;同时,不造成值机柜台资源浪费,增大柜台运营成本投入。值机柜台繁忙概率应维持在一定的范围内,如式(8)所示

$$P_{\min} < \frac{c-c\rho}{c\rho} \cdot L_q \leq P_{\max} \quad (8)$$

式中: P_{\min} 为值机柜台繁忙概率下限; P_{\max} 为值机柜台繁忙概率上限。

2 算法设计

2.1 NSGA-II 在航站楼值机系统动态配置问题中的实现

NSGA-II 算法源于遗传算法,采用快速非支配排序算法和拥挤距离排序算子,使准 Pareto 域中的个体能扩展到整个 Pareto 域,并均匀分布,保持了种群的多样性;同时引入精英策略,扩大采样空间,防止最佳个

体的丢失,提高了算法的运算速度和鲁棒性。

航站楼值机系统动态配置为多目标、非线性,有众多约束条件的复杂规划问题,NSGA-II在求解动态配置模型中的实现步骤如图1所示。

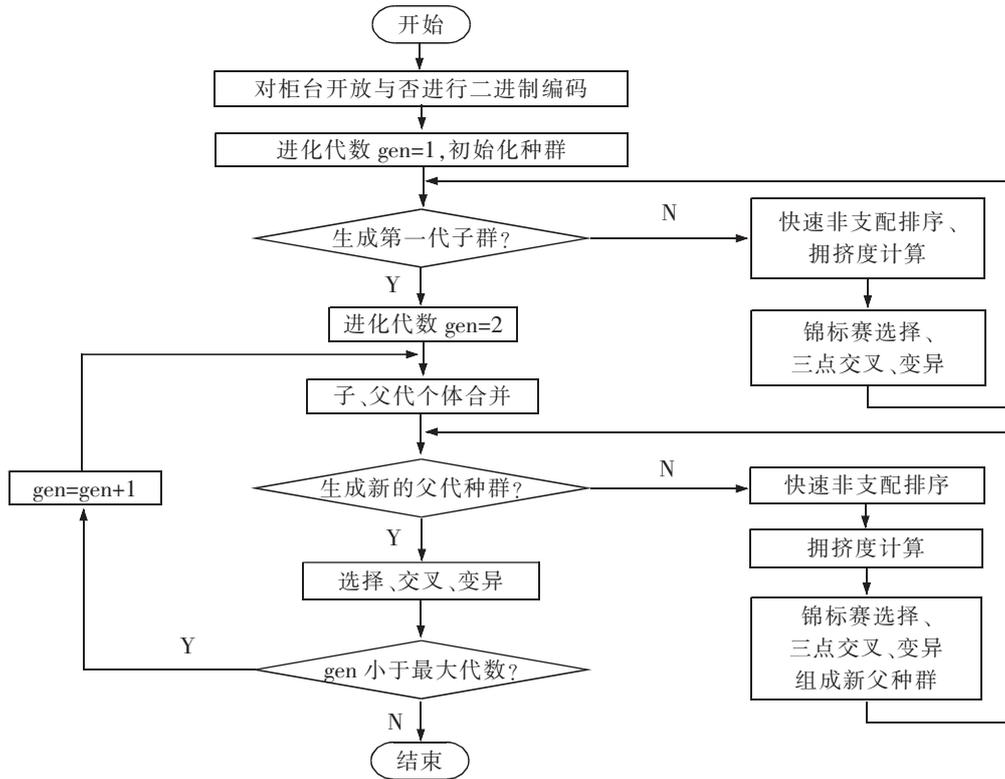


图1 NSGA-II算法流程图
Fig.1 NSGA-II algorithm flowchart

2.2 TOPSIS 方法

通过 NSGA-II 算法得到了航站楼值机系统动态配置问题的 Pareto 最优解集,但通常需要选择综合效益最好的方案来进行具体配置,于决策者而言,从所有 Pareto 最优解中选择一个方案称为后验评价。本文在 TOPSIS 方法的基础上,对 Pareto 最优解进行排序,确定最终柜台配置方案。

1) 方法概述。TOPSIS 方法是有限方案多目标决策分析的常用方法,它可以计算出理想中的最佳方案和最差方案,同时求解各评价方案与最佳、最差方案之间的距离,得出该方案与最佳方案的接近程度,最后对评价方案进行排序。

2) TOPSIS 后验评价实现步骤。① 根据 Pareto 最优柜台配置解构建初始化判断矩阵;② 对初始化判断矩阵进行归一化处理;③ 根据 DELPHI 法得到柜台运营成本及旅客值机排队等待时间的信息权重矩阵,并形成加权判断矩阵;④ 根据加权判断矩阵获得两目标的正负理想解;⑤ 计算各评价目标值与理想值之间的距离及相对贴适度;⑥ 根据相对贴适度对各评价目标进行排序,得到最终决策结果。

3 实例分析

3.1 数据获取及分析

本文选取南京禄口国际机场 T2 航站楼 D 岛值机柜台作为研究对象,对 D 岛值机旅客到达情况和值机柜台服务能力进行了分析。研究数据来自对 2019 年中国东方航空夏秋航季航班和值机区域高峰时段的调查,通过模型分析和录制视频的方式进行数据获取。

1) D 岛值机柜台旅客到达率。根据 2019 年中国东方航空夏秋航季航班离港时刻、航班座位数及航班拥挤度并假设柜台值机比例为 60%,通过离港时刻主导的单航班离港旅客聚集模型(TD-SFAPM 模型)可得到 D 岛值机柜台全天 5:00-22:20 每 10 min 旅客到达率,且 TD-SFAPM 模型使规定 10 min 时段内的旅客到达数服从相应到达率的泊松分布,如图 2 所示。

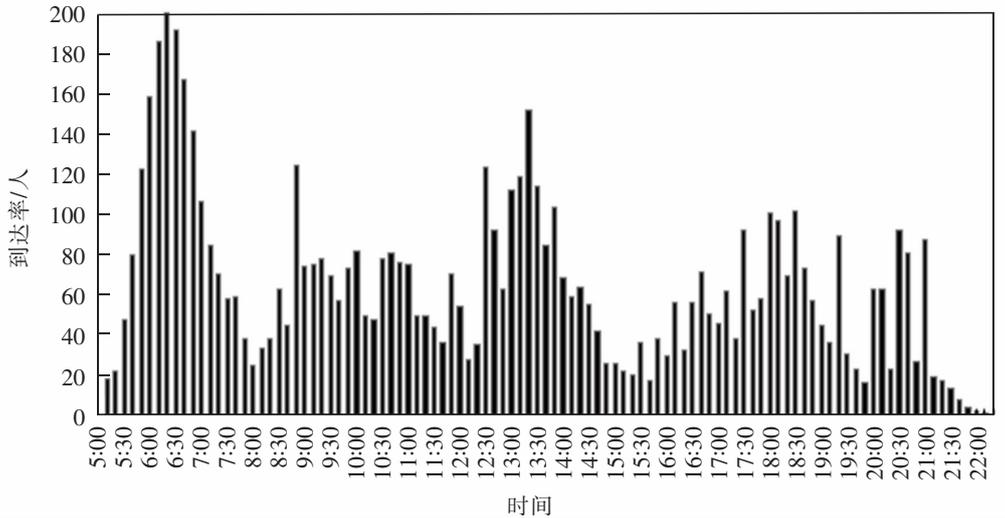


图 2 2019 年夏秋航季 D 岛值机柜台值机旅客到达率

Fig.2 Passengers' arrival rate at the D Island check-in counter during the summer and autumn season of 2019

2) D 岛值机柜台单窗口服务率。通过视频录制随机调查了值机区域 2019 年 7 月 8 日、9 日两天 6:00-7:00 高峰时段 100 名旅客在 D 岛值机柜台的值机服务时间如图 3 所示。

运用 SPSS 软件对高峰时段 D 岛值机柜台单窗口值机服务时间进行 K-S 非参数指数分布检验,检验结果如表 1 所示。

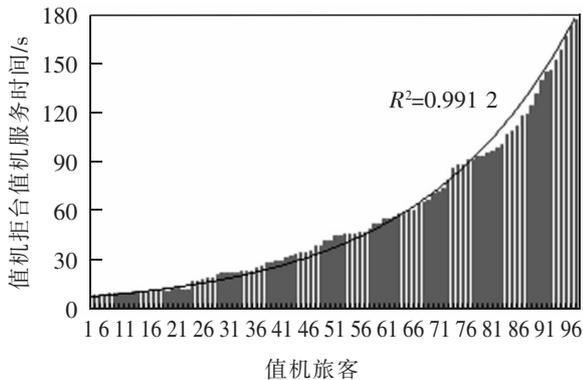


图 3 D 岛值机柜台单窗口值机服务时间

Fig.3 Single-window service time at the D Island check-in counter

表 1 单窗口值机服务时间 Kolmogorov-Smirnov 指数分布检验结果

Tab.1 Kolmogorov-Smirnov exponential distribution test results of single-window service time

服务时间 Kolmogorov-Smirnov 指数分布检验结果	
数据量总数	100
指数分布参数	1/54.57
渐近显著性	0.082

由于渐近显著性 Sig=0.082>0.05, 可认为 D 岛值机柜台单窗口值机服务时间分布与指数分布没有明显差异,服从参数 $\lambda = \frac{1}{54.57} = 0.018 3$ 的指数分布。

D 岛值机柜台全天 5:00-22:20 每 10 min 时段内旅客到达数服从泊松分布,值机柜台单窗口值机服务时间服从指数分布,因此该值机岛值机柜台排队服务系统实际运行情况满足排队论 M/M/C 模型。

3.2 NSGA-II 仿真测试参数设置

仿真测试选取 6:00 航站楼 D 岛 20 个值机柜台相关数据,表 2 给出了动态配置问题原始数据。

表 2 值机系统动态配置问题原始数据
Tab.2 Raw data of check-in system dynamic configuration issues

动态配置问题	测试参数	原始数据
成本数据	值机柜台租用成本/(元·(个/min))	4
	值机地服人员工作费用/(元·(人/min))	0.56
旅客数据	D 岛值机柜台旅客到达率/(人/min))	15.8
值机柜台数据	值机柜台总数/个	20
	D 岛单个值机柜台服务率/(人/min)	1.10
	值机柜台繁忙概率下限	0.50
	值机柜台繁忙概率上限	0.98

其中,NSGA-II 算法采用 Matlab 编程,参数设置如表 3 所示。

表 3 NSGA-II 算法参数
Tab.3 NSGA-II algorithm parameters

种群规模	进化代数	目标数	变量("0-1"变量)数	交叉概率(三点交叉)	变异概率
20	100	2	20	0.8	0.2

3.3 仿真测试结果

由于优化目标为航空公司柜台运营成本和旅客值机排队等待时间,且变量为整数,Pareto 最优解集为二维空间中相互孤立的点,趋势线为一曲线。基于航站楼值机系统动态配置模型运行 NSGA-II 算法求解 Pareto 最优解,如表 4 所示。

表 4 6:00 航站楼值机系统动态配置问题 Pareto 最优解
Tab.4 Pareto-optimal set for dynamic configuration problem of terminal check-in system at 6:00

序号	6:00 值机柜台开放数量	航空公司柜台运营成本/(元/min)	旅客值机排队等待时间/min
1	15	68.40	7.50
2	16	72.96	2.50
3	17	77.52	1.13
4	18	82.08	0.56
5	19	86.64	0.29
6	20	91.20	0.15

航空公司柜台运营成本和旅客值机排队等待时间两个目标均为越小越优,在 Pareto 前沿面上,非劣的值机柜台配置方案的一个目标值增大必然会引起另一个目标的减小,从 1 号方案至 6 号方案,模型优化结果从倾向于航空公司柜台运营成本最小逐步过渡到旅客值机排队等待时间最小,成本从 68.40 元/min 增至 91.20 元/min,而等待时间从 7.50 min 降至 0.15 min,不存在某一方案使优化的两目标值同时达到最小,两目标之间存在博弈。

3.4 Pareto 最优解后验评价

NSGA-II 得到的 6 组 Pareto 最优解能充分兼顾不同的值机系统配置方案,采用基于 TOPSIS 方法的决策过程可从 6 组解中寻找综合效益最优的解。

1) 评价指标同趋势化。在进行评价时,应使所有指标变化方向一致,通常将低优指标和中性指标全转化为高优指标。因此将模型优化目标这两低优指标通过倒数法转化为高优指标,同趋势化的初始判断矩阵值如表 5 所示。

表 5 同趋势化的初始判断矩阵值
Tab.5 Co-trend and initial judgment matrix value

序号	6:00 值机柜台开放数量	航空公司柜台运营成本/(元/min)	旅客值机排队等待时间/min
1	15	0.014 6	0.133 3
2	16	0.013 7	0.400 0
3	17	0.012 9	0.885 0
4	18	0.012 2	1.785 7
5	19	0.011 5	3.448 3
6	20	0.011 0	6.666 7

2) 初始判断矩阵归一化。归一化处理后的矩阵值如表 6 所示。

表 6 归一化矩阵值
Tab.6 Normalized matrix value

序号	6:00 值机柜台开放数量	航空公司柜台运营成本/(元/min)	旅客值机排队等待时间/min
1	15	0.469 4	0.017 1
2	16	0.440 1	0.051 4
3	17	0.414 2	0.113 8
4	18	0.391 2	0.192 9
5	19	0.370 6	0.231 4
6	20	0.352 1	0.244 3

3) 获取最优及最劣配置方案。

4) 计算各方案目标值与理想值之间的距离。根据 DELPH 法得到专家对航空公司柜台运营成本及旅客值机排队等待时间两目标值的权重矩阵,分别计算各方案两目标值与最优方案和最劣方案的距离,计算结果如表 7 所示。

5) 选择最终决策方案。计算各方案与最优方案的相对贴适度,并按相对贴适度对 6 组方案进行排序,选择综合效益最优的方案作为配置问题最优解,相对贴适度及排序结果如表 7 所示。

表 7 不同值机柜台配置方案排序结果
Tab.7 Sorting results of different check-in counter configuration plans

序号	6:00 值机柜台开放数量	与最优方案距离	与最劣方案距离	相对贴适度	排序结果
1	15	0.101 6	0.105 0	0.508 2	3
2	16	0.090 2	0.080 2	0.470 8	6
3	17	0.076 5	0.070 4	0.479 4	5
4	18	0.073 7	0.086 0	0.538 7	1
5	19	0.088 6	0.097 3	0.523 3	2
6	20	0.105 0	0.101 6	0.491 8	4

排序结果表明,值机系统开放 18 个柜台时综合效益最好。

3.5 配置方案对比分析

1) 方案优化目标差值分析。其中,不同值机柜台配置方案与最优方案两优化目标之间的差值如图 5 所示。可见,航空公司柜台运营成本与旅客值机排队等待时间是两完全相反的优化目标,运用 TOPSIS 方法不仅可以展现优化目标间的博弈关系,而且能充分反映了各配置方案之间的差距,提供更多决策支持信息,利于选择航站楼值机系统动态配置问题最佳折衷配置方案。

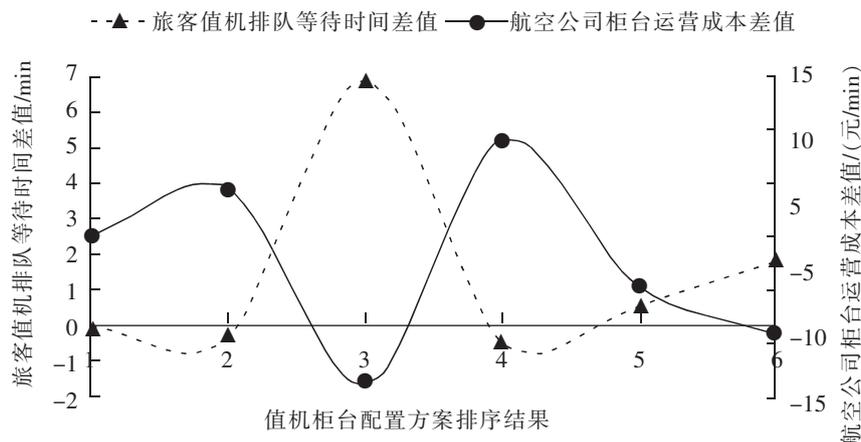


图 4 6:00 不同配置方案优化目标差值分析图

Fig.4 Difference between optimization goals of different configuration plans at 6:00

2) 不同权重最优方案分析。由于不同机场及航空公司对旅客满意度、航站楼运行效率及航空公司运营成本的决策需求存在差异,运用 DELPHI 法得出的专家对成本及时间两目标值的权重矩阵有所不同。表 8 显示了不同权重矩阵下综合效益最优柜台配置情况:随着航空公司柜台运营成本权重的增加,值机柜台开放数量和航空公司柜台运营成本逐渐减少,旅客值机排队等待时间逐渐增加;当成本权重增加至 0.9 时,旅客值机排队等待时间突增。可见,Pareto 最优解能充分兼顾不同的值机系统配置方案,满足各类机场及航空公司的不同决策需求。

表 8 不同权重矩阵下综合效益最优柜台配置情况

Tab.8 Configuration of counters with optimal comprehensive benefits under different weight matrices

航空公司柜台运营成本权重	6:00 值机柜台开放数量	航空公司柜台运营成本/(元/min)	旅客值机排队等待时间/min
0.1	20	91.20	0.15
0.2	19	86.64	0.29
0.3	19	86.64	0.29
0.4	19	86.64	0.29
0.5	19	86.64	0.29
0.6	19	86.64	0.29
0.7	18	82.08	0.56
0.8	18	82.08	0.56
0.9	15	68.40	7.50

3.6 D 岛值机系统动态配置结果

最终,2019 年夏秋航季 D 岛值机系统全天 5:00-22:00 每半小时综合效益最优柜台动态开放数量如图 5 所示,其分布情况与值机旅客到达率相符合。6:30 时柜台开放数量最多,为 19 个;5:00 和 22:00 时柜台开放数量最少,为 1 个。

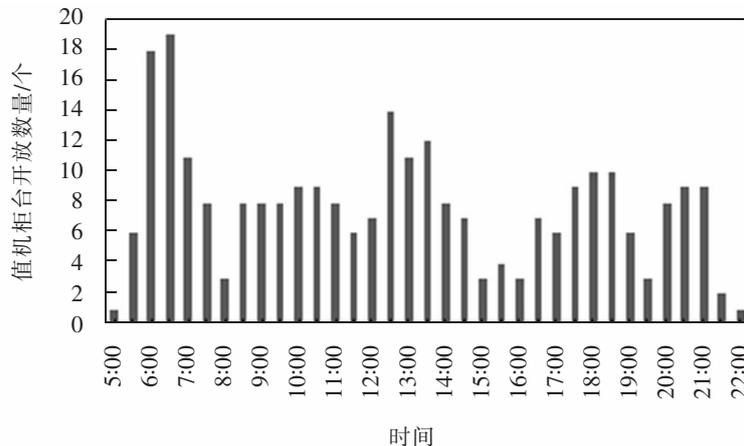


图5 2019年夏秋航季D岛值机柜台动态开放数量

Fig.5 Dynamic opening number of D-island check-in counters during the summer and autumn season of 2019

4 结论

本文采用多目标算法,构建航站楼值机系统动态配置模型,消除了航空公司柜台运营成本和旅客值机排队等待时间量纲间的差异。在NSGA-II算法中,充分考虑了柜台数、排队及服务办理时间运行标准和繁忙概率三方面约束条件,生成了Pareto最优解集,清晰地展示了成本与时间之间的博弈过程。同时基于TOPSIS方法的后验评价,对Pareto最优解进行排序,确定了航站楼值机系统动态配置问题综合效益最优的配置方案。利用航站楼值机系统动态配置模型能对比各时段可选值机柜台配置方案与最优方案的相对贴切度,找到最佳折衷配置方案,使运营成本和旅客等待时间两决策目标同时达到最优化的效果。

参考文献:

- [1] PARLAR M, RODRIGUES B, SHARAFALI M. Event-based allocation of airline check-in counters: a simple dynamic optimization method supported by empirical data[J]. *International Transactions in Operational Research*, 2018, 25(5): 1553-1582.
- [2] BRUNNER J O, STOLLETZ R. Stabilized branch and price with dynamic parameter updating for discontinuous tour scheduling[J]. *Computers & Operations Research*, 2014, 44: 137-145.
- [3] HSU C I, CHAO C C, SHIH K Y. Dynamic allocation of check-in facilities and dynamic assignment of passengers at air terminals [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2012, 63(2): 410-417.
- [4] YAN S Y, TANG C H, CHEN J H. Common-use check-in counter reassignments with a variable number of service lines and variable length of time window[J]. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 2014, 37(5): 643-658.
- [5] KIERZKOWSKI A, KISIEL T. A model of check-in system management to reduce the security checkpoint variability[J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2017, 74: 80-98.
- [6] KUO C W, JOU R C. Air passengers' willingness to pay for counter check-in services[J]. *Transportation Research Part A Policy and Practice*, 2018, 107: 203-215.
- [7] ZHANG L C. Applied-information technology in passengers' check-in system of airport terminal based on the enterprise dynamics[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 540: 390-3.
- [8] MOTA M M. Check-in allocation improvements through the use of a simulation-optimization approach[J]. *Transportation Research Part A Policy and Practice*, 2015, 77: 320-335.
- [9] KIERZKOWSKI A, KISIEL T, PAWLAK M. Passenger level of service estimation model for queuing systems at the airport[J]. *Archives of Transport*, 2018, 46(3): 29-38.
- [10] PARLAR M, RODRIGUES B, SHARAFALI M. On the allocation of exclusive-use counters for airport check-in queues: static vs. dynamic policies[J]. *Opsearch*, 2013, 50(3): 433-53.

[11] 包邻淋. 航站楼安检系统研究与优化[D]. 天津: 中国民航大学, 2017.

- [12] PARLAR M, SHARAFALI M. Dynamic allocation of airline check-in counters: A queueing optimization approach[J]. *Management Science*, 2008, 54(8): 1410-1424.
- [13] BRUNEEL H, WITTEVRONGEL S. Analysis of a discrete-time single-server queue with an occasional extra server[J]. *Performance Evaluation*, 2017, 116: 119-142.
- [14] 杨扬. 人工值机柜台动态分配策略研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2017.
- [15] KR PAN L, MARŠANIĆ R, MILKOVIĆ M. A model of the dimensioning of the number of service places at parking lot entrances by using the queueing theory[J]. *Tehnicki Vjesnik*, 2017, 24(1): 231-238.
- [16] 张天炫, 包丹文, 狄智玮, 等. 基于 K-means 的航空旅客空间行为模式研究[J]. *华东交通大学学报*, 2019, 36(5): 59-66.
- [17] BRUNO G, DIGLIO A, GENOVESE A, et al. A decision support system to improve performances of airport check-in services[J]. *Soft Computing*, 2019, 23(9): 2877-2886.
- [18] TANG C H. A network model for airport common use check-in counter assignments[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2010, 61(11): 1607-1618.
- [19] 陶浪, 马昌喜, 朱昌锋, 等. 基于遗传算法的定制公交线路多目标优化[J]. *兰州交通大学学报*, 2018, 37(2): 31-37.
- [20] 陈辅斌, 李忠学, 杨喜娟. 基于改进 NSGA2 算法的多目标柔性作业车间调度[J]. *工业工程*, 2018, 21(2): 55-61.
- [21] DHANALAKSHMI S, KANNAN S, MAHADEVAN K, et al. Application of modified NSGA-II algorithm to combined economic and emission dispatch problem[J]. *Electrical Power and Energy Systems*, 2011, 33: 992-1002.

Research on Dynamic Configuration of Terminal Check-in System Based on Multi-Objective Algorithm

Zhang Tianxuan, Bao Danwen, Zhu Ting, Yang Zhao, Tian Shijia

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211100, China)

Abstract: Aiming at the low confidence in the dynamic configuration of terminal check-in system to minimize the sum of facility usage costs and passengers time costs, a multi-objective optimization method is proposed. The multi-objective algorithm was applied to the dynamic configuration process of check-in system. The optimization targets of counter operating costs and check-in waiting time for airlines and passengers were set respectively, and dynamic configuration model of terminal check-in system was built to configure the opening number of D-island check-in counters in the Nanjing Lukou International Airport Terminal 2 dynamically. The NSGA-II algorithm was employed to obtain the Pareto optimal solution, at the same time, a posteriori evaluation based on TOPSIS was used to compare and analyze the different configuration schemes. Finally, the dynamic configuration results of the D-island check-in system for the whole day were obtained. The research effectively eliminates the difference between cost and time dimensions, which is beneficial for airlines and airports to achieve unique optimization strategies and provides a new method for dynamic configuration of check-in resources.

Key words: air transportation; dynamic resource configuration; multi-objective optimization; check-in system; NSGA-II; TOPSIS