

DOI:10.16356/j.1005-2615.2021.06.013

基于运行保障效率的货运航班停机位分配

袁媛, 翟好鑫, 孙传龙

(沈阳航空航天大学经济与管理学院, 沈阳 110136)

摘要: 基于双分拣中心建立最小化不同紧急程度货物的影响下飞机滑行时间和机下运输至分拣系统时间、最大化货运航班类型和停机位类型的匹配程度以及跑道鲁棒性的多目标优化模型,采用线性加权法对目标函数进行赋值,综合分析不同权重下的分配结果并得到最优方案。借助 CPLEX Studio IDE 12.8.0 软件,以鄂州机场为实例进行求解,实验结果表明,相比于贪婪启发式方法,本文提出的模型得到的分配方案使得飞机滑行时间减少 17.90%,货物运输时间减少 6.96%,机位类型利用率提升 21.21%,跑道使用完全均衡,因此提高了枢纽机场过站时效,运行保障效率有明显提升,可用于货运枢纽机场的实际运营。

关键词: 航空货运; 停机位分配; 运行保障效率; 双分拣中心; 多目标优化

中图分类号: V351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2021)06-0934-07

Gate Assignment of Freight Flight Considering Efficiency Operation Support

YUAN Yuan, ZHAI Haoxin, SUN Chuanlong

(College of Economics and Management, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

Abstract: In order to further solve the problem of freight airport gate assignment and improve the efficiency of airport operation support, considering the double sorting centers and cargo emergency degree, a multi-objective optimization model is established to minimize the aircraft taxiing time and off-board transportation time, and to maximize the matching degree between flight type and stand type, and runway robustness. The linear weighting method is used to assign the objective function, and the distribution results under different weights are analyzed comprehensively to get the optimal scheme. With the help of CPLEX Studio IDE 12.8.0, Ezhou Airport is taken as an example to solve the problem. The experimental results show that compared with the greedy heuristic method, the gate assignment scheme of the model proposed in this paper can reduce the aircraft taxiing time by 17.90%, reduce the cargo transportation time by 6.96%, enhance the utilization rate of aircraft stand type by 21.21%, and the runway usage is completely balanced. Therefore, it improves the transit efficiency of hub airport and the efficiency of operation support, and can be used in the actual operation of freight hub airport.

Key words: air cargo; gate assignment; operation guarantee efficiency; double sorting center; multi-objective optimization

随着中国经济及科技实力的提升,人民生活水平大幅度提高,市场需求促进了现代物流业向资本、科技和人力等多重密集性的体系化服务发展。

鄂州顺丰机场作为全球第四、亚洲第一的国际物流核心枢纽项目,将与武汉联动,构建客货并举、多式联运的组合交通枢纽体系,这也标志着鄂州正在逐

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(71802141)资助项目;教育部人文社会科学研究青年基金(18YJC630219)资助项目;辽宁省教育厅科研基金(LJKR0102, JYT2020023)资助项目。

收稿日期: 2020-06-09; **修订日期:** 2020-11-05

通信作者: 袁媛,女,博士,副教授, E-mail: yy_sau@163.com。

引用格式: 袁媛, 翟好鑫, 孙传龙. 基于运行保障效率的货运航班停机位分配[J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53(6): 934-940. YUAN Yuan, ZHAI Haoxin, SUN Chuanlong. Gate assignment of freight flight considering efficiency operation support[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2021, 53(6): 934-940.

渐成为中国独一无二的国际货运物流中心^[1]。而停机位作为机场的核心资源,其分配对货运枢纽机场的运行效率有直接影响。

当前国内外对停机位分配问题主要以客运作为主,以最小化旅客行走距离^[2]、最小化延误成本^[3]和最小化旅客等待成本^[4]等为目标函数进行优化。在研究方法上,主要采用数学规划^[5-6]、智能优化^[7-8]和系统仿真^[9]等方法进行建模求解。在研究角度上,近几年一些学者开始从飞行区时间考虑,将最小化旅客进出飞行区时间作为目标,综合考虑航空公司、旅客与空管3方面利益进行停机位分配^[10],或建立多跑道机场停机位分配仿真模型减少航班滑行时间^[11]。考虑飞行区的停机位分配结果会减少跑道、滑行道冲突以及航班延误,增加机场地面容量,因此考虑飞行区进行停机位分配非常有必要。

本文以鄂州机场货运航班为研究对象进行停机位和跑道分配。根据鄂州机场实际情况创新性地考虑组合机位和双分拣中心,并引入货物紧急程度系数减少航班场面滑行时间和货物运输时间来提升货运枢纽机场的运行保障效率,与此同时,重视机型匹配度和跑道均衡进行多目标优化。在保障机场运行效率的前提下综合考虑多方主体利益,为提高国际货运枢纽机场的货运周转率提供参考。

1 停机位分配问题模型

1.1 假设条件

在模型建立之前,先提出以下假设条件。

(1)信息完备假设:在机场计划期开始之前,制定决策所必需的航班计划、机场资源等信息是已知且完备的。

(2)容量满足假设:航班总量及其进离港时间分布保持在机场容量许可范围之内,远机位可以容纳无限架次飞机,即任何时刻,机场总可以为任一进港航班分配1个停机位,尽管不是最优但一定可行。

(3)停机位使用假设:对到达航班分配停机位时的采取“先到先服务”服务策略,不考虑使用备用停机位以及维修机位。

1.2 模型参数及变量

停机位分配问题相关的数学符号定义如下。

(1)已知参数

F : 停机位分配计划期内所有到港航班集合。

B : 停机位分配计划期内所有离港航班集合。

K : 停机位分配计划期可提供的所有停机位集合。

K_1 : 停机位分配计划期可提供的固定近机位

集合。

K_2 : 停机位分配计划期可提供的组合近机位集合,每个组合机位由两个相邻的小型机位组成,允许两个轻型飞机或一个大型飞机使用。

R : 停机位分配计划期可提供的所有跑道集合。

H : 停机位分配计划期可提供的分拣中心集合。

N : 机场的近机位总数,近机位为鄂州机场规划的距离航站楼较近的机位, $N+1$ 为远离航站楼的停机坪,即远机位,其容量无限大。

i : 进港航班对应序号,且 $i \in F$ 。

j : 离港航班对应序号,且 $j \in B$ 。

k : 停机位对应序号,且 $k \in K$,对于组合近机位 $(k_1, k_2) \in K_2$,总有 $k_1 > k_2$ 。

r : 跑道对应序号,且 $r \in R$ 。

h : 分拣中心对应序号,且 $h \in H$,由于鄂州机场和武汉天河机场存在业务对接,本文采用双分拣中心策略, $h=1$ 表示货物在鄂州机场内部货站进行分拣; $h=2$ 表示在武汉天河机场对货物进行检验、分拣等工作,到达鄂州机场时直接由拖车运输到所分配停机位。

A_i : 航班 i 计划到港时刻。

D_j : 航班 j 计划离港时刻。

c_i : 根据顺丰全货机航班 i 类型的不同最大载重分为重、中、轻型,最大载质量大于60 t为重型,最大载质量20~60 t为中型,最大载质量小于20 t为轻型,分别用2、1、0表示。

ρ_k : 停机位 k 允许停放的最大机型分为大、中、小型,用2、1、0表示,远机位用3表示。

α_i : 根据顺丰空运时效中即日达、次晨达、次日达、隔日达确定航班 i 的紧急程度,紧急程度越高的货物,对应的权重就越大。

T_{ik} : 如果航班 i 装卸的货物为机场货站货物,有 $T_{i1} = 1$ 且 $T_{i2} = 0$,如果为天河机场货物,有 $T_{i2} = 1$ 且 $T_{i1} = 0$ 。

(2)决策变量

X_{ik} : 如果航班 i 分配在停机位 k 有 $X_{ik} = 1$,否则 $X_{ik} = 0$;

R_{ir}^a : 如果进港航班 i 分配在跑道 r ,有 $R_{ir}^a = 1$,否则 $R_{ir}^a = 0$;

R_{jr}^d : 如果离港航班 j 分配在跑道 r ,有 $R_{jr}^d = 1$,否则 $R_{jr}^d = 0$ 。

1.3 约束条件

$$\sum_{k \in K} X_{ik} = 1 \quad \forall i \in F; \quad c_i = 0, 1 \quad (1)$$

$$\sum_{k \in K_1} X_{ik} + \frac{\sum_{(k_1, k_2) \in K_2} (X_{ik_1} + X_{ik_2})}{2} + X_{i(N+1)} = 1$$

$$\forall i \in F; c_i = 2 \quad (2)$$

$$X_{ik_1} = X_{ik_2} \quad \forall i \in F; (k_1, k_2) \in K_2; c_i = 2 \quad (3)$$

$$\sum_{r \in R} R_{ir}^a = \sum_{r \in R} R_{jr}^d = 1 \quad \forall i \in F; j \in B \quad (4)$$

$$\sum_{k \in K} (c_i - \rho_k) \times X_{ik} \geq 0 \quad \forall i \in F; c_i = 0, 1 \quad (5)$$

$$\sum_{k \in K_1} (c_i - \rho_k) \times X_{ik} \geq 0 \quad \forall i \in F; c_i = 2 \quad (6)$$

$$\begin{cases} X_{i_1 k} + X_{i_2 k} \leq 1 & \forall i_1, i_2 \in F; i_1 \neq i_2 \\ |A_{i_1} - D_{i_2}| \leq 30 & |A_{i_2} - D_{i_1}| \leq 30, k \in K_1 \cup K_2 \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} R_{i_1 r}^a + R_{i_2 r}^a \leq 1, \forall i_1, i_2 \in F; i_1 \neq i_2 \\ |A_{i_2} - A_{i_1}| \leq 5 & r \in R \end{cases} \quad (8)$$

$$R_{j_1 r}^d + R_{j_2 r}^d \leq 1$$

$$\forall j_1, j_2 \in B, j_1 \neq j_2; |D_{j_2} - D_{j_1}| \leq 5; r \in R \quad (9)$$

$$\begin{cases} X_{j_1 k_1} + X_{j_2 k_2} \leq 1 & \forall j_1, j_2 \in B; j_1 \neq j_2 \\ |D_{j_1} - D_{j_2}| \leq 5 & k_1, k_2 \in K; k_1 - k_2 = 1 \end{cases} \quad (10)$$

$$X_{ik}, X_{jk}, R_{ir}^a, R_{jr}^a, R_{ir}^d, R_{jr}^d \in \{0, 1\} \quad (11)$$

约束(1~2)表示1个航班只允许分配至1个停机位。约束(3)表示重型飞机对于组合机位占用的一致性。约束(4)表示只允许1个进(离)港航班分配在1个进(离)港跑道。约束(5~6)表示停机位类型与航班机型匹配的约束。约束(7)表示同一近机位相邻航班时间间隔约束,本文按照同一停机位相邻航班的间隔时间为30 min。约束(8~9)表示同一进(离)港跑道相邻航班时间间隔约束,本文按照同一进(离)港跑道相邻航班的间隔时间为5 min。约束(10)表示相邻机位推出约束,本文按照相邻机位推出时间间隔为5 min。约束(11)表示变量为0、1变量。

2 目标函数选择

由于停机位分配问题涉及到航班经济效益、货仓转移效率、机场资源的有效利用以及货物紧急程度等多个方面,因此从不同角度出发可以得到不同的优化目标,而不同机场的侧重点也不相同。本文采用线性加权法权衡多方主体利益来优化目标函数指标。

2.1 飞机滑行时间

对于多跑道机场,飞行区运行受停机位分配结果影响严重,因此合理分配停机位对于提高航班滑行效率很有必要^[12]。而顺丰自营全货机数量高达58架,对于航班进离港场面滑行时效提出了更高的要求。航班进离港时对于跑道和停机位的选择会影响货物到达航站楼的距离,不同载质量的货机

场面滑行速度也有所不同。因此,对机场和货机进行分析建立最小化进离港航班场面滑行时间目标函数

$$\begin{aligned} \min Z_1 = & \sum_{i \in F} \sum_{k \in K} \sum_{r \in R} \frac{S_{rk}^{\text{arr}}}{v_i} \times \alpha_i \times X_{ik} \times R_{ir}^a + \\ & \sum_{j \in B} \sum_{k \in K} \sum_{r \in R} \frac{S_{rk}^{\text{dep}}}{v_j} \times \alpha_j \times X_{jk} \times R_{jr}^d \end{aligned} \quad (12)$$

式中: S_{rk}^{arr} 为航空器从跑道 r 出口滑行到停机位 k 的距离; S_{rk}^{dep} 为航空器从停机位 k 滑行到跑道 r 入口的距离。由于不同载质量的货机滑行速度各有不同,本文取重型飞机在飞行区的平均滑行速度为 $v=18$ km/h,中、轻型飞机在飞行区的平均滑行速度为 $v=7.2$ km/h。为了对紧急货物有所侧重,对不同航班进离港滑行时间进行权重系数 α_i 赋值,通过加快调整航班滑行速度、跑道及滑行道就近选择等方法优先优化装载紧急货物航班的滑行时间。

2.2 机下至货仓运输时间

鄂州机场作为顺丰打造的货运枢纽机场,货物由机下运输至分拣系统的时间会直接影响到枢纽的过站时效。而鄂州顺丰机场与武汉天河机场未来实现客货并举、联动融合以及多式联运的组合交通枢纽体系^[13],对枢纽运行效率必将带来提升。本文将武汉天河机场假设为分拣中心,来自武汉天河机场的货物不需再在鄂州机场进行入库、驳运和关检等环节,可以直接由货站分配到对应的停机位,从而节省大量时间。当货机到达分配的停机位后,会根据货机的载质量分配不同数量的拖车,而不同的停机位至货站的距离不等,拖车将货物运送至货仓的速度大致相等。于是本文根据鄂州机场布局大体估算不同停机位至货仓距离和拖车速度,建立最小化机下至货仓运输时间的目标函数

$$\begin{aligned} \min Z_2 = & \sum_{i \in F} \sum_{k \in K} \sum_{h \in R} \frac{S_{hk}^a}{v} \times T_{ih} \times \alpha_i \times X_{ik} + \\ & \sum_{j \in B} \sum_{k \in K} \sum_{h \in H} \frac{S_{hk}^d}{v_j} \times T_{ih} \times \alpha_j \times X_{jk} \end{aligned} \quad (13)$$

式中: S_{hk}^a 为货运拖车从停机位 k 至货站 h 的距离; S_{hk}^d 为拖车从货站 h 到停机位 k 的距离。取拖车运输货物的平均滑行速度为 $v=21.6$ km/h。同样地,由于不同紧急程度货物的时效性要求,对不同航班运输货物时间进行权重系数 α_i 赋值,通过加快装卸货物速度、调整拖车运输速度、加油程序优化以及配备充足相关工作人员等方法优先优化装载紧急货物航班的机下运输时间。

2.3 机型与停机位匹配

为了充分利用机场的停机位资源,停机位大小要与所停放的飞机机型相匹配,货机大致分为重型、中型和轻型3种,载质量越大的飞机占用停机位越大,对于不同型号的飞机,优先停在与之匹配

的机位,否则停在允许的较大型号机位。如果目前暂无空闲停机位,则将到达的飞机停放至远机位。由于机型与停机位不匹配时会造成停机位资源的浪费,因此最大化停机位利用率就是最小化停机位资源的浪费。对于分配到停机位 k 的航班 i , 给定一个参数来表示停机位资源的浪费率

$$y_{ik} = \begin{cases} 0 & \rho_k - c_i = 0 \\ 0.3 & c_i - \rho_k = 2 \\ 0.5 & \rho_k - c_i = 1 \\ 0.7 & \rho_k - c_i = 2 \\ 1 & k = N + 1 \end{cases} \quad (14)$$

所以最小化停机位资源浪费率的停机位分配目标函数为

$$\min Z_3 = \sum_{i \in F} \sum_{k \in K} X_{ik} \times y_{ik} \quad (15)$$

2.4 跑道鲁棒性

机场运行时常会遇到天气、紧急事件等不可抗力,而考虑跑道均衡会增加跑道分配的鲁棒性,当遇到扰动需再分配跑道时,最小化需变动跑道的航班数量,降低机场工作人员工作量。同时随着跑道数量的增加,机场运营所提供服务的航班容量也会增加,考虑跑道均衡可以更大限度的使机场设施资源使用均衡。所以,本文最大化跑道均衡的目标函数为

$$\min Z_4 = \frac{\left| \sum_{i \in F} R_{i1}^a - \bar{R}_1^a \right|}{\bar{R}_1^a} + \frac{\left| \sum_{j \in B} R_{j2}^d - \bar{R}_2^d \right|}{\bar{R}_2^d} \quad (16)$$

式中: \bar{R}_1^a 为进港航班中平均分配在第 1 跑道的航班数量; \bar{R}_2^d 为离港航班中平均分配在第 2 跑道的航班数量。

2.5 多目标优化

为了在满足运行保障效率的前提下全面考虑机场、航班和货运的多方主体利益,本文建立多目标优化模型尽可能使调度结果的综合效能最大化,并利用线性加权法进行系统分析,根据各目标的优先级把多目标优化模型转化为综合目标进行优化。设 β_m 为第 m 个目标函数的权重, $Z_{\max} = \max\{Z_m\}$, 将不同量纲的目标函数经过归一化处理的效果函数为

$$\min Z = \sum_{m=1}^4 \frac{\beta_m \cdot Z_m}{Z_{\max}} \quad (17)$$

3 实例分析

鄂州机场规划有两个跑道,且满足同时起降要求,本文采用夜班的 116 个全货机航班数据和航站楼的 20 个典型的近机位、1 个远机位进行实验,其中 G01~G05 机位为固定大型机位; G06~G11 机位为固定中型机位; G12 为固定小型机位;

G13~G20 号机位为小型组合机位。同时选取某日晚 20:00 至早 10:00 出发或到达的航班验证和求解模型。表 1 为鄂州机场待分配航班数据。

表 1 某机场待分配航班数据

Table 1 Flight data to be assigned in an airport

航班	机型	到港时刻	离港时刻	航班	机型	到港时刻	离港时刻
F01	M	2000	2100	F59	L	0225	0340
F02	L	2000	2220	F60	M	0240	0340
F03	S	2015	2100	F61	L	0345	0540
F04	S	2015	2105	F62	M	0400	0510
F05	M	2020	2115	F63	L	0400	0530
F06	M	2020	2130	F64	L	0405	0520
F07	L	2025	2135	F65	S	0410	0500
F08	S	2025	2110	F66	M	0410	0515
F09	L	2040	2235	F67	S	0415	0505
F10	S	2050	2135	F68	S	0425	0500
F11	L	2100	2325	F69	M	0425	0535
F12	M	2105	2205	F70	S	0430	0510
F13	L	2110	2250	F71	L	0505	0650
F14	L	2115	2310	F72	L	0520	0655
F15	S	2115	2205	F73	L	0525	0705
F16	L	2120	2310	F74	M	0520	0640
F17	L	2120	2320	F75	L	0530	0640
F18	M	2125	2220	F76	L	0530	0715
F19	M	2130	2230	F77	L	0535	0650
F20	S	2155	2245	F78	L	0535	0710
F21	S	2220	2320	F79	L	0540	0700
F22	L	2220	0045	F80	L	0540	0735
F23	S	2225	2315	F81	L	0550	0715
F24	M	2225	2330	F82	M	0550	0700
F25	S	2230	2315	F83	L	0600	0730
F26	M	2230	2335	F84	M	0605	0710
F27	L	2240	0130	F85	M	0605	0705
F28	S	2245	2335	F86	S	0610	0720
F29	S	2250	2330	F87	M	0615	0720
F30	M	2235	2355	F88	L	0650	0815
F31	S	2300	2350	F89	L	0710	0830
F32	M	2300	0000	F90	L	0720	0835
F33	M	2345	0045	F91	M	0720	0825
F34	M	2355	0055	F92	M	0730	0835
F35	M	0000	0110	F93	L	0725	0940
F36	S	0000	0050	F94	S	0735	0825
F37	S	0005	0050	F95	S	0725	0905
F38	M	0010	0110	F96	L	0755	1040
F39	L	0010	0140	F97	L	0800	0915
F40	S	0015	0055	F98	L	0805	1035
F41	M	0025	0125	F99	M	0805	0905
F42	M	0030	0140	F100	L	0815	1010
F43	M	0030	0125	F101	L	0820	0915
F44	L	0035	0250	F102	M	0830	0955

续表

航班	机型	到港时刻	离港时刻	航班	机型	到港时刻	离港时刻
F45	L	0055	0205	F103	S	0835	0920
F46	L	0115	0235	F104	L	0850	1030
F47	L	0125	0240	F105	L	0850	1045
F48	L	0125	0255	F106	L	0900	1030
F49	L	0130	0255	F107	M	0920	1020
F50	L	0135	0310	F108	M	0930	1020
F51	M	0135	0235	F109	S	0930	1010
F52	L	0140	0310	F110	S	0935	1025
F53	M	0140	0245	F111	M	0935	1040
F54	M	0150	0245	F112	S	0940	1025
F55	L	0155	0325	F113	M	0940	1035
F56	M	0205	0300	F114	S	0955	1045
F57	L	0215	0400	F115	S	1000	1050
F58	M	0220	0315	F116	S	1000	1050

3.1 求解速度分析

本文使用优化求解软件 CPLEX Studio IDE 12.8.0, 在处理器 Intel(R)Core(TM) i5-8250 CPU @ 1.60 GHz, 内存 8 GB 的环境下进行实验测试。根据建立的模型对不同规模下的数据集和同一规模下不同分布的数据集进行求解, 验证了模型的稳定性和有效性。

3.2 分配结果分析

为了测试本文所提出的数学模型的有效性, 产生 2 组可行的停机位分配方案。首先仅满足模型中分配规则进行停机位随机分配, 获得 1 组随机分配方案。然后采用贪婪启发式方法, 根据“先到先服务”的原则, 综合考虑停机位和航班类型对航班分配停机位, 尽量让同等类型的航班和停机位匹配, 相同条件下选择距离较近的停机位, 若没有同等类型的停机位与其相匹配, 再选择次近类型的停机位, 相同条件下选择距离较近的停机位, 对于进离港跑道分配在满足同一跑道间隔时间前提下, 尽量让跑道使用均衡, 最终得到贪婪启发式下的停机位分配方案。

通过数学模型分别对单目标函数求得最优后, 与随机分配、贪婪启发式获得的分配方案对比分析如表 2 所示。对比数据可见, 各目标函数互相制约、互相影响, 例如, 当仅考虑停机位类型利用率时会优先将航班分配到与其大小匹配的停机位, 此时停机位类型利用率相对于贪婪启发式优化了 25.11%, 相对于随机分配优化了 77.76%, 从而忽视飞机滑行距离和货物运输距离, 导致飞机滑行时间和货物运输时间增加, 但各目标函数都有其现实意义。

表 2 单目标优化目标函数值对比

Table 2 Comparison of objective function values of single objective optimization

目标函数	随机分配	贪婪启发式	$\min Z_1$	$\min Z_2$	$\min Z_3$	$\min Z_4$
Z_1/\min	9 326.458	8 264.375	6 697.083	8 177.708	8 658.056	15 526.667
Z_2/\min	4 034.722	3 721.944	3 539.028	3 359.444	3 760.417	5 166.667
Z_3	77.8	23.1	22.5	26.2	17.3	116
Z_4	0.181	0.004	0.009	0.022	0.181	0

因此, 在研究过程中需对这些目标各自分配一定的权值比重, 使优化结果最大可能地兼顾各个方面。为更加精确地分析目标函数值, 令 $\sum_{m=1}^4 \beta_m = 100$, 为方便结果数值分析, 对 β_m 取可能整十数值为 10、20、30、40、50、60、70 和 80。根据分析可以发现, 优先考虑不同目标函数, 得到的目标函数值和停机位分配方案有所区别。

通过对 66 种权重赋值方案对应的停机位分配结果进行分析发现:

(1) 存在多种不随权重变化的停机位-航班组合。例如中型航班 F01 一直分配在 G10, 中型航班 F35 一直分配在中型停机位 G11。航班类型与停机位类型恰好匹配时, 若同时进离港时间只允许其停放在此停机位, 或此停机位至跑道或分拣中心距离较近, 则该停机位-航班组合较为稳定, 航班会一直分配在此停机位。

(2) 货物紧急程度较高的航班停机位分配较

为稳定。随着目标函数权重的变化, 75% 载有即日达货物的航班停机位分配方案不受影响, 且所分配的停机位分布在航站楼两端。如 F42 航班不随比重变化而改变停机位号码, 一直在 G10 停机位。

(3) 组合和拆分机位一定程度上减少了飞机滑行时间和货物运输时间, 增加了停机位利用率。若优先考虑货物运输时间目标函数, 随着权重的不同, 重型航班仅有两种分配结果, 即分配至组合机位或远机位, 如 F90 的机位分配有 G13 与 G14 的组合停机位或远机位 G21。可见, 如果没有组合机位, 航班只能停靠在远端停机坪, 这就极大地增加了运行成本, 降低了航空货运效率。

(4) 远机位使用情况。综合分析不同权重下的停机位分配方案, 发现 10、70、10、10 权重下远机位使用次数最多, 高达 23 次, 随着货物运输时间目标函数的增加, 远机位使用次数增加较为明显, 可见货物运输时间目标函数与停机位利用率目标函数冲突较大, 选取较优权重时应尽量均衡两目标函数。

通过对 66 种权重赋值方案对应的目标函数值进行分析发现:

(1)航班场面滑行时间目标函数值较为稳定。当优先考虑滑行时间、机位匹配和跑道均衡时,飞机滑行时间相对于贪婪启发式的优化率都能稳定在 18% 以上,但当优先考虑货物运输时间时,若飞机滑行时间目标函数的权重占比小于 30% 时优化率下降比较明显,所以考虑货物运输的同时不能忽视飞机滑行时间目标函数。

(2)应避免货物运输时间目标函数的权重过大。虽然各目标函数之间存在相互制约,但当货物运输时间目标函数权重占比大于 50% 时,会导致飞机场面滑行时间优化率减少近 2%,并且严重影响停机位利用率,导致停机位资源的浪费。

(3)应尽量避免机位利用率目标函数权重过小。当停机位利用率目标函数权重占比为 10% 时,较多的航班会停靠在远端停机坪,增加机场运营成本,降低货物周转率,近机位却没有得到充分利用,造成更多的机位浪费。

(4)尽可能选择跑道使用均衡的分配方案。对 66 种权重下的跑道使用情况进行分析,共有 55 种权重下跑道均衡目标函数 $Z_4=0$, 9 种权重下 $Z_4=0.004$, 3 种权重下 $Z_4=0.009$, 综合考虑 3 种均衡状态, $Z_4=0$ 时进离港时使用两个跑道的航班数量分别都是 58 架,跑道使用完全均衡。

3.3 较优方案选择

本文根据不同权重下的分配结果设定各目标函数优先级:飞机滑行时间目标函数权重大于 30%,货物运输时间目标函数小于 50%,机位利用率目标函数权重占比大于 10%,并且尽量保证跑道使用均衡。根据不同权重下的目标函数值和分配结果分析得出,该优先级下当赋值权重为 30、40、20、10 时目标函数值较优,此时飞机滑行时间为 6 784.861 min,较贪婪启发式优化了 17.90%,货物运输时间为 3 462.917 min,较贪婪启发式优化了 6.96%,机位类型利用率优化了 21.21%,跑道使用完全均衡,比贪婪启发式各个方面均有改善。相应的停机位分配结果如表 3 所示,其中停机位绝对利用率是指停机位被占用时间与总时间的比率,相对利用率是考虑安全时间间隔后停机位被占用时间与总时间的比率,该分配方案对应的甘特图如图 1 所示。

3.4 鲁棒性测试

在较优权重下,对 21 个停机位 116 个航班数据集加入扰动,假设 G06 停机位在夜间 02:00~03:00 由于特殊因素不能使用,此时对模型进行求解并得到停机位分配和跑道方案,通过实例证明,加入扰动后模型求解时间与加扰动前相,对应的飞机滑行时间为 6 774.861 min,货物运输时间为 3 466.25 min,机位浪费率为 18.2%,跑道使用完全均衡,相比于扰动前飞机滑行时间减少了 10 min,

表 3 停机位分配结果
Table 3 Results of gate assignment

机位	航班号	数量	绝对利用率/%	相对利用率/%
G01	F11、F49、F63、F83、F100	5	56.08	68.25
G02	F7、F22、F47、F61、F88、F105	6	44.44	60.32
G03	F9、F45、F60、F72、F93	5	38.10	50.79
G04	F2、F43、F55、F64、F81、F97	6	40.21	56.08
G05	F16、F39、F57、F75、F89、F106	6	48.15	64.02
G06	F33、F56、F62、F114	4	19.58	29.10
G07	F18、F34、F51、F85、F102	5	24.87	37.57
G08	F12、F30、F41、F82、F92、F108	6	35.45	51.32
G09	F6、F26、F38、F54、F74、F91、F113	7	34.39	53.44
G10	F1、F19、F32、F42、F58、F66、F87、F107	8	39.68	61.90
G11	F5、F24、F35、F53、F69、F84、F99、F111	8	41.80	64.02
G12	F3、F25、F40、F65、F86、F103、F115	7	21.69	40.74
G13	F15、F28、F37、F50、F71、F90、F112	7	44.44	63.49
G14	F31、F50、F71、F90	4	34.39	43.92
G15	F13、F59、F76、F96	4	47.09	56.61
G16	F13、F59、F76、F96	4	47.09	56.61
G17	F23、F52、F80、F101	4	26.98	36.51
G18	F4、F20、F52、F70、F80、F101、F116	7	31.22	50.26
G19	F10、F21、F48、F68、F77、F94、F109	7	32.80	51.85
G20	F8、F29、F36、F48、F67、F77、F95、F110	8	42.86	65.08
远机位	F14、F17、F27、F44、F46、F73、F78、F79、F98、F104	10	68.25	71.43

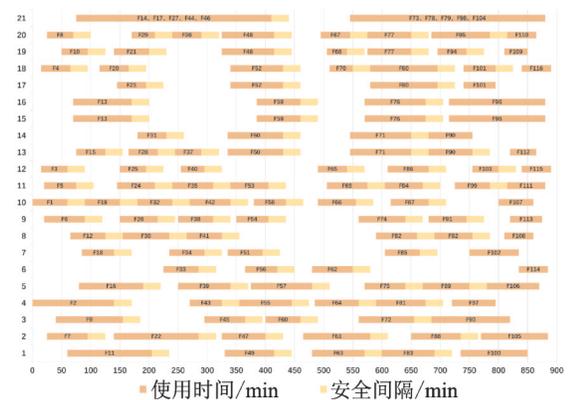


图 1 停机位分配结果甘特图

Fig.1 Gantt chart of gate assignment result

货物运输时间增加了 3 min,变化可以忽略不计,验证了模型求解时间和求解质量的鲁棒性。

4 结 论

本文基于鄂州机场建立了考虑国际货运枢纽机场综合效率的停机位分配模型,并在合理时间内快速求解,满足机场实际分配的时效性和合理性要求。通过设置双分拣中心和不同紧急程度货物的权重,在实际算例中发现载有紧急程度较高的航班的停机位分配规律,并在一定程度上分散了鄂州机场货物运输的压力,发挥鄂州顺丰机场与武汉天河机场联动融合、多式联运的组合交通枢纽体系优势,提升枢纽机场的运行效率。通过线性加权法对多目标权重进行赋值,并在鄂州机场实例中分析不同优先级下停机位分配结果的特征,为货运枢纽机场提供可参考的停机位分配结论,并选择一种较为经济适用高效的停机位分配结果,该结果满足机场分配规则,也能较好地满足机场运行保障效率,减少航班滑行时间和货物运输时间,同时充分利用停机位资源,均衡使用机场跑道资源。本文考虑双分拣中心、货物紧急程度和多目标优化进行停机位分配,下一步将在动态停机位分配和算法优化方向进行研究。同时,线性加权法无法取尽所有可能的权重,对此需要开发一种新的求解算法来生成完整或者近似完整的 Pareto 解^[14]。尽管该方法在计算上较为苛刻,但使用精确的方法来获得 Pareto 近似解值得进一步研究。

参考文献:

- [1] 周睿全. 基于孟菲斯经验的鄂州国际物流核心枢纽建设研究[J]. 全国流通经济, 2018(31): 31-32.
ZHOU Ruiquan. Research on the construction of Ezhou international logistics core hub based on Memphis experience[J]. China Circulation Economy, 2018(31): 31-32.
- [2] DIJK B, SANTOS B F, PITA J P. The recoverable robust stand allocation problem: A GRU airport case study[J]. OR Spectrum, 2019, 41: 615-639.
- [3] DENG W, LI B, ZHAO H. Study on an airport gate reassignment method and its application[J]. Symmetry, 2017, 9(11): 258.
- [4] 王璐, 吴辉, 孙智慧. 机场物流管理中机场停机位调度问题研究[J]. 物流工程与管理, 2016, 38(11): 68-69.
WANG Lu, WU Hui, SUN Zhihui. Research on aircraft stands scheduling problem in airport logistics management[J]. Logistics Engineering and Management, 2016, 38(11): 68-69.
- [5] VAN SCHAIJK O R P, VISSER H G. Robust flight-to-gate assignment using flight presence probabilities[J]. Transportation Planning and Technology, 2017, 40(8): 928-945.
- [6] 吴刚, 严俊. 不正常航班恢复的一种改进的列生成算法[J]. 南京航空航天大学学报, 2014, 46(2): 329-334.
WU Gang, YAN Jun. Improve column generation algorithm for disrupted airline schedules recovery[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2014, 46(2): 329-334.
- [7] 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.
- [8] AKTEL A, YAGMAHAN B, ÖZCAN T, et al. The comparison of the metaheuristic algorithms performances on airport gate assignment problem[J]. Transportation Research Procedia, 2017, 22: 469-478.
- [9] NARCISO M E, PIERA M A. Robust gate assignment procedures from an airport management perspective[J]. Omega, 2015, 50: 82-95.
- [10] 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, 2011, 12(1): 131-138.
FENG Cheng, HU Minghua, ZHAO Zheng. A new optimization model of airport gate assignment[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2011, 12(1): 131-138.
- [11] 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.
YIN Jianan, HU Minghua, ZHAO Zheng. Simulation model and algorithm of multi-runway airport gate assignment[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(5): 71-76.
- [12] 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. Gate assignment optimization based on efficiency improvement of airport taxiing[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2018, 40(4): 24-30.
- [13] 蔡少渠, 潘昭宇. 鄂州顺丰机场开工, 打造下一个“孟菲斯”[J]. 运输经理世界, 2017(12): 70-71.
CAI Shaoqu, PAN Zhaoyu. Ezhou Shunfeng airport starts to build the next Memphis[J]. Transport Business China, 2017(12): 70-71.
- [14] DAS G S, GZARA F, STÜTZLE T. A review on airport gate assignment problems: Single versus multi objective approaches[J]. Omega, 2020, 92: 1-12.

(编辑:刘彦东)