

文章编号:1671-1637(2014)06-0074-09

基于航班延误分布的机位鲁棒指派模型

李军会^{1,2}, 朱金福¹, 陈欣³

(1. 南京航空航天大学 经济与管理学院, 江苏 南京 210016; 2. 新南威尔士大学 民航学院, 新南威尔士 悉尼 2052; 3. 南京财经大学 管理科学与工程学院, 江苏 南京 210046)

摘要:为提高机位指派计划的稳定性与降低航班延误波及效应影响,以广州白云国际机场历史航班数据为例,构建了不同航空公司之间差异化的航班延误概率分布,分析了航班延误分布对机位冲突概率的影响。以机位冲突概率最小为目标函数,以机位与航班类型为约束条件,建立了机位鲁棒指派模型,设计了贪婪禁忌搜索算法,使用实际航班数据进行实例验证。计算结果表明:使用提出的机位鲁棒指派模型与贪婪禁忌搜索算法,获得最优解需要的迭代次数为43,计算时间为0.72 s,总的机位冲突概率为2.737 1;使用提出的机位鲁棒指派模型与传统遗传算法,获得最优解需要的迭代次数为72,计算时间为35.00 s,总的机位冲突概率为2.741 2;使用现有的机位闲置时间最大的确定型鲁棒指派方法与提出的贪婪禁忌搜索算法,总的机位冲突概率为3.018 0。与现有的确定型鲁棒指派方法相比,提出的机位鲁棒指派模型可使机位计划的鲁棒性提高9.31%。

关键词:航空运输;机位指派;航班延误;鲁棒性;冲突概率;贪婪禁忌搜索算法

中图分类号:U491.51

文献标志码:A

Robust assignment model of airport gate based on flight delay distribution

LI Jun-hui^{1,2}, ZHU Jin-fu¹, CHEN Xin³

(1. School of Economics and Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, Jiangsu, China; 2. School of Airport, University of New South Wales, Sydney 2052, New South Wales, Australia; 3. School of Management Science and Industrial Engineering, Nanjing University of Finance and Economics, Nanjing 210046, Jiangsu, China)

Abstract: In order to increase the stability of airport gate assignment plan and reduce the propagation effect of flight delay, the different probability distributions of flight delay between different airline companies were set up by using the historical flight data of Guangzhou Baiyun International Airport, and the effect of flight delay distribution on the conflict probability of airport gate was analyzed. The minimum conflict probability of airport gate was taken as objective function, the types of airport gate and flight were taken as constraint conditions, the robust assignment model of airport gate was set up, the greedy tabu search algorithm was designed, and example verification was carried out by using real flight data. Calculation result shows that by using the proposed model and the greedy tabu search algorithm, the iteration times is 43 and the calculation time is 0.72 s when the optimal solution is searched, and the total conflict probability is 2.737 1. By using the proposed model and the traditional genetic algorithm, the iteration times is 72 and the calculation time is 35.00 s when the optimal solution is searched, and the total

收稿日期:2014-07-10

基金项目:国家自然科学基金项目(71171111, 71103034)

作者简介:李军会(1970-),男,陕西西安人,南京航空航天大学工学博士研究生,从事空中运输规划研究。

导师简介:朱金福(1955-),男,江苏金坛人,南京航空航天大学教授,工学博士。

conflict probability is 2.741 2. By using the existed deterministic robust assignment method with the maximum gate idle time and the proposed algorithm, the total conflict probability is 3.018 0. Compared with the existed deterministic robust assignment method, the robustness of airport gate plan raises by 9.31% by using the proposed model. 5 tabs, 6 figs, 23 refs.

Key words: air transportation; airport gate assignment; flight delay; robustness; conflict probability; greedy tabu search algorithm

Author resumes: LI Jun-hui(1970-), male, doctoral student, +86-25-84893502, gzjh_lee@163.com; ZHU Jin-fu(1955-), male, professor, PhD, +86-25-84895388, zhujf@nuaa.edu.cn.

0 引言

机位指派计划是机场运营管理重要的资源计划之一,航班的地勤保障、行李装卸、客舱清洁、配餐供应、油料供应以及为完成以上各种任务所需要的人员计划,都是在机位指派计划的基础上制订的,机位指派计划对科学、高效地使用机位资源具有重大的现实意义。一个稳定的机位指派计划,可以避免过于频繁地对其他机场资源计划进行实时调整,避免由于作业车辆和人员临时频繁调配可能引发的纷乱状态,保持机场运作的流畅和高效,也可以减少由于临时机位变更给旅客带来的不便,保证机场的旅客服务满意率水平。

机位鲁棒指派计划是指机位计划具有这样一种性能,它能够吸收或者抑制航班计划实施过程中一种或多种不确定性因素的影响,保持机位计划的稳定性^[1]。这种策略对减轻实时指派压力,降低航班延误的波及效应影响,保证航班计划、机位计划和其他资源计划的顺利实施有重要现实意义。

制订机位鲁棒计划的方法有:基于机位闲置时间和航班缓冲时间的确定型优化方法、随机规划方法、灰色理论等。Bolot 等以机位闲置时间变化最小为优化目标,分别以分枝定界法、遗传算法等方法为基础建立相应的各种模型,来实现机位计划的鲁棒性目标^[2-5];田晨等以机位空闲时间最均匀为优化目标,设计了遗传算法进行求解,并引入模拟退火思想对适应度函数进行修正^[6];郑攀等建立了机位空闲时间总体方差最小为目标函数的数学规划模型,设计了启发式算法进行求解^[7];Song 等以机位闲置时间的方差最小为目标函数,使用整合了的着色图算法的 Squeaky Wheel Optimization 程序进行求解^[8];Diepen 等以指派到同一机位前后航班间的机位闲置时间最大为鲁棒目标,在 3 种不同的情况下使用列生成算法进行求解^[9];高菁等以机位闲置时间均衡为目标函数,建立了规则可灵活定制的机位指派模型,使

用穷举遍历和遗传算法相结合的优化算法进行模型求解^[10];Kim 等使用纽约拉瓜迪亚机场的航班数据建立了一种机位闲置时间与预期机位冲突时间的指数关系模型,以预期机位冲突时间总和最小作为机位鲁棒指派的目标^[11];Mangoubi 等研究认为计划的缓冲时间能够提高机位计划的可靠性^[12-13];Yan 等为静态机位计划设置了弹性的缓冲时间来吸收在实时机位指派阶段的随机航班延误^[14-15];Dorndorf 等以航班缓冲时间在设定范围的最大化为目标来实现机位计划的鲁棒性^[16-17];Lim 等把航班的到离港时间视为不确定型随机变量,建立了基于随机规划的机位指派模型,并分别以机位冲突数量最少、冲突概率最低、航班到离港时间不确定集最大为目标来实现机位的鲁棒指派^[18-20];Yang 等使用灰色理论方法,通过提高对航班到达和机位占用时间预测的准确性,来改进机位指派计划的鲁棒性^[21]。

总的来讲,既有研究中的主要思想是给指派到同一机位的 2 个航班之间分配一定的机位闲置时间,在一定程度上吸收航班延误对机位计划产生的扰动,降低航班延误,但上述研究大多缺乏对航班延误规律的量化研究,在闲置时间的具体分配上,针对性不强。给航班加上适当缓冲时间,使用扩展航班时间窗来分配机位的策略,一般只有在机位资源相对比较宽裕时,才有条件使用。随机规划和灰色理论都属于在航班到达时间不确定条件下为提高机位指派方案可靠性所作的有益探索,但未能对航班到达时间的不确定性规律进行量化研究。本文将对航班延误的分布规律进行量化研究,通过区分不同航空公司在航班延误分布上的差异,以历史航班数据为基础,得出不同航空公司差异化的航班延误概率分布,建立以机位冲突概率最小为机位鲁棒指派目标的优化模型。

1 航班延误分布规律

航班延误的状况可能会呈现出不同的分布规

律。Blackwood 等研究发现航空公司航班延误状况呈现出明显不同的分布规律,并具有较大差异性^[22-23]。本文利用广州白云国际机场 2011 年 6 月至 2013 年 5 月 2 年间的航班统计数据,经过统计整理,制作了基地航空公司(简称航空公司 A)与非基地航空公司(简称航空公司 B)的航班到达延误分布,见图 1。航班延误表示为相对于计划到港时间的偏离, $[-10, -6]$ 表示航班提前到达 6~10 min, $[6, 10]$ 表示航班到港时间延误 6~10 min,0 表示航班按照航班计划准点到达。

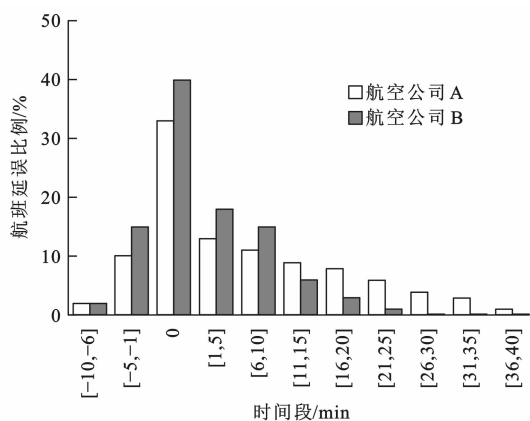


图1 航班到达延误分布

Fig. 1 Distribution of flight arrival delay

从图1可以看出,航空公司A、B在航班延误的时间分布范围和分布比例上,都存在比较明显的差异。航空公司A航班的最大延误为40 min,而航空公司B航班的最大延误只有25 min,航空公司B航班的准点到港比例为40%,航空公司A的准点到港比例只有33%。

使用图1的统计数据,可以得到航空公司A、B航班到达延误的概率分布。航空公司A航班延误(min)为 $[-10, -6]$ 、 $[-5, -1]$ 、0、 $[1, 5]$ 、 $[6, 10]$ 、 $[11, 15]$ 、 $[16, 20]$ 、 $[21, 25]$ 、 $[26, 30]$ 、 $[31, 35]$ 、 $[36, 40]$ 的概率分别为0.02、0.10、0.33、0.13、0.11、0.09、0.08、0.06、0.04、0.03、0.01。

航空公司B航班延误(min)为 $[-10, -6]$ 、 $[-5, -1]$ 、0、 $[1, 5]$ 、 $[6, 10]$ 、 $[11, 15]$ 、 $[16, 20]$ 、 $[21, 25]$ 的延误概率分别为0.02、0.15、0.40、0.18、0.15、0.06、0.03、0.01。

2 机位冲突概率

被指派到同一机位的2个航班在多大程度上可能发生机位冲突,不但取决于这2个航班间的时间间隔(即前1个航班的离港时间与后1个航班的到港时间之间的间隔),而且还取决于这2个航班各自的延误概率分布。假设航空公司A的2个航班被指派到同一机位,其计划的到港时间和离港时间分别为08:20与09:00、09:30与10:10,航班间的时间间隔为30 min,其可能发生机位冲突的时间(例1)见图2。

由图2可知,2个航班可能的机位冲突时间为 $[09:20, 09:40]$,由于到港时间事件互相独立,在这个时间段发生机位冲突的概率等于航班1在此时间段占用机位的概率与航班2在此时间段占用机位概率的乘积。根据航班到达延误概率分布可知,2个航班在 $[09:20, 09:40]$ 占用机位的概率分别为0.140 0、0.120 0,则在此时间段2个航班发生机位冲突的概率为0.016 8。如果航空公司B的航班1和航空公司A的航班2被先后指派到同一机位,2个航班的计划到港和离港时间同上例,2个航班之间的时间间隔仍为30 min,其可能发生机位冲突的时间(例2)见图3。2个航班可能的机位冲突时间为 $[09:20, 09:25]$,2个航班在该时间段内发生机位冲突的概率为0.000 2。相同时间间隔下的航班机位冲突概率见表1。

由表1可知,即使指派到同一机位2个航班间的时间间隔相同,其发生机位冲突的可能性也会存在较大差异。既有研究只考虑使用航班时间间隔的方法(分配机位闲置时间与使用航班缓冲时间),显

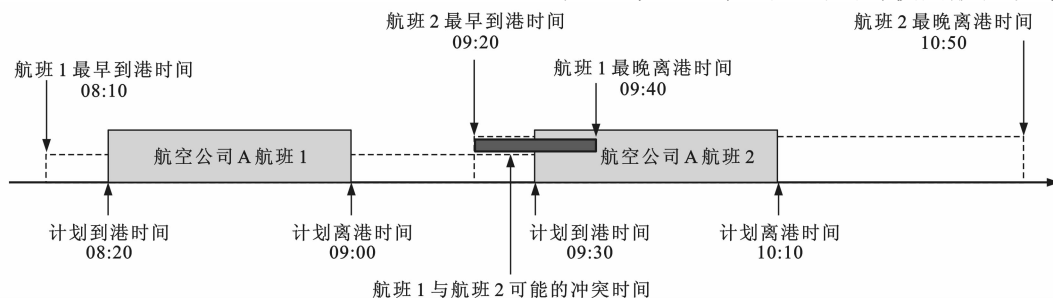


图2 例1中的航班冲突

Fig. 2 Flight conflict in example 1

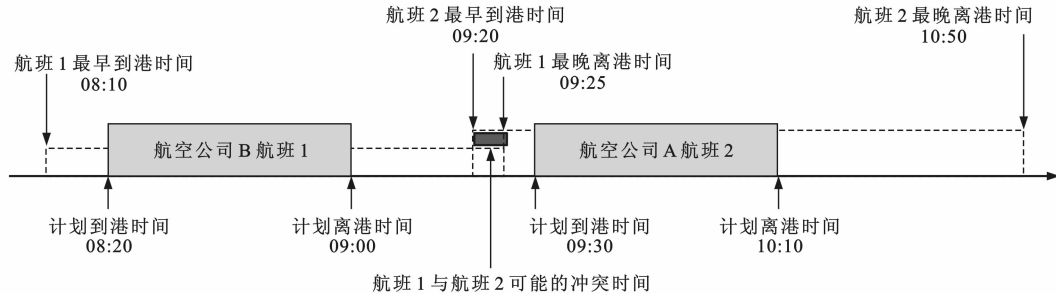


图3 例2中的航班冲突

Fig. 3 Flight conflict in example 2

表1 航班冲突概率

Tab. 1 Flight conflict probabilities

序号	指派到同一机位的2个航班				可能的机位冲突 时间/min	机位冲突概率
	航班归属组合	前1个航班到港与离港时间	航班间时间间隔/min	后1个航班到港离港时间		
1	A、A	08:10, 09:00	30	09:30, 10:00	20	0.016 8
2	B、A	08:10, 09:00	30	09:30, 10:00	5	0.000 2
3	A、B	08:10, 09:00	30	09:30, 10:00	20	0.016 8
4	B、B	08:10, 09:00	30	09:30, 10:00	5	0.001 5

然并没有完全反映航班可能实际面临的机位冲突的大小,时间间隔的均衡并不能代表机位冲突可能性的均衡。

3 模型描述

3.1 模型参数定义

令 m, n 分别为需要指派机位的航班数量和机场可用的机位数量; T_{ia}, T_{id} 分别为航班 i 的计划到港时间和计划离港时间; T_{ks} 为机位 k 的开始可用时间; P_k 为机位 k 的机位类型, $P_k \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$; L_i 为航班 i 的类型, $L_i \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$, 当 $L_i \leq P_k$ 时, 航班 i 可停靠机位 k ; T_{mc} 为机位最短衔接时间, 即前1个航班离开某机位到下1个航班到达该机位最短的安全时间间隔; B_j^- 为参照历史延误分布下航班 j 的最大提前到港时间, $B_j^- \in \{B^{A-}, B^{B-}\}$, B^{A-}, B^{B-} 分别为航空公司 A、B 航班的最大提前到港时间; B_j^+ 为参照历史延误分布下航班 j 的最大延误, $B_j^+ \in \{B^{A+}, B^{B+}\}$, B^{A+}, B^{B+} 分别为航空公司 A、B 航班的最大延误; x_{ik} 为 0-1 决策变量, 如果航班 i 被指派到机位 k , 则 x_{ik} 为 1, 否则为 0; x_{ijk} 为 0-1 决策变量, 如果航班 i 和航班 j 先后被指派到同一机位 k , 即 $x_{ik} = x_{jk} = 1$, 则 x_{ijk} 为 1, 否则为 0; P_{ijkc} 为航班 i, j 在机位 k 发生机位使用冲突的概率。

当航班 i, j 先后被指派到同一机位 k , 即 $x_{ik} = 1$, 且这 2 个航班可能在某个时间段同时占用该机位, 则航班 i, j 在机位 k 发生机位使用冲突的概率

P_{ijkc} 为

$$P_{ijkc} = P_{ikd} P_{jka} \quad (1)$$

式中: P_{ikd}, P_{jka} 分别为航班 i 和航班 j 在时间范围 $[T_{ja} - B_j^-, T_{id} + B_i^+]$ 内占用机位 k 的概率。

3.2 数学模型

以总的航班机位冲突概率 Z 最小为目标函数, 以机位与航班类型为约束条件, 建立模型为

$$\min Z = \sum_{i,j=1}^m \sum_{k=1}^n P_{ijkc} x_{ijk} \quad (2)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{i=1}^m x_{ik} = 1 \quad (3)$$

$$(P_k - L_i) x_{ijk} \geq 0 \quad (4)$$

$$x_{ijk} \geq x_{ik} + x_{jk} - 1 \quad (5)$$

$$T_{ja} x_{jk} - T_{id} x_{ik} \geq T_{mc} x_{ijk} \quad (6)$$

目标函数式(2)表示所有被指派到同一机位的2个航班发生机位冲突概率最小; 式(3)表示1个航班只能分配给1个机位; 式(4)表示航班类型要与机位类型相匹配; 式(5)用于判断2个航班是否被指派到同一机位; 式(6)表示指派到同一机位的前后2个航班, 其离港和到港时间应满足最短的安全衔接时间要求。

4 算法设计

由于航班的到达延误呈离散分布, 与传统机位指派问题中的旅客步行距离、飞机滑行距离、航班等待等指标相比, 机位冲突概率的取得相对较难, 普通

的线性规划方法并不适合本文建立的模型。启发式算法是解决优化问题比较有效的方法,本文设计了贪婪禁忌搜索算法求解问题。

4.1 贪婪算法步骤

Step 1:将所有航班按计划到港时间 T_{ia} 的先后顺序进行排序,产生 1 个航班计划到港时间的队列。

Step 2:从上述航班队列中当前第 1 个航班开始,从现有机位中选择机位可用时间 $T_{ks} < T_{ia}$ 的备选机位集合,即航班到港后可供其选择停靠的机位集合。

Step 3:在备选机位集合中计算所有元素的目标函数值,选择目标函数值最小的机位 k 作为当前航班指派的机位。

Step 4:更新被指派机位 k 的最早可用时间,在航班序列中去除第 1 个航班。

Step 5:如果航班序列为空,则输出指派结果,否则转 Step 3。

贪婪算法只是实现了在每个指派时间点上目标函数的最优,属局部优化,需要进一步通过禁忌搜索的方法进行全局优化。

4.2 禁忌搜索算法步骤

Step 1:初值设定。使用贪婪算法生成的初始解 x ,令当前解 $Z_1 = x$,初始化禁忌条件,令禁忌搜索迭代次数计数变量的初始值为 0。

Step 2:终止条件。本文将禁忌搜索的最大迭代次数设定为 100,并将其作为算法的终止条件,如果算法运行达到设定的最大迭代次数,则中止程序,记录并输出最优解 Z_2 ,否则转 Step 3。

Step 3:邻域搜索。产生当前解 Z_1 的所有邻域解,对于 n 个航班需要指派到 m 个机位的机位指派问题,向量 $x = (g_1, g_2, \dots, g_n)$ 构成机位指派问题的一个解,如果向量 $y = (g'_1, g'_2, \dots, g'_n)$ 与向量 x 的对应元素至少有一个元素不相同,则称 y 是 x 的邻域。本文使用插入移动和交换移动的方法,构建当前解的所有邻域解。

Step 4:藐视准则。计算当前解 Z_1 所有邻域解对应的适配值,记录适配值最小的邻域解 Z_3 ,本文直接把目标函数作为适配值函数。如果 Z_3 对应的适配值小于当前最优解 Z_2 对应的适配值,则令 $Z_2 = Z_3$ (藐视准则),将 Z_3 与 Z_2 交换,作为禁忌对象替换最早进入禁忌表的禁忌对象,转 Step 6,否则,继续 Step 5。

Step 5:分散搜索。判断邻域解对应的各对象的禁忌属性,在候选解集非禁忌对象中选取使得最

小的邻域解作为 Z_3 ,令 $Z_2 = Z_3$,同时将 Z_3 与 Z_2 交换,作为禁忌对象替换最早进入禁忌表的禁忌对象。

Step 6:更新迭代次数,转至 Step 2。

禁忌搜索算法流程见图 4。

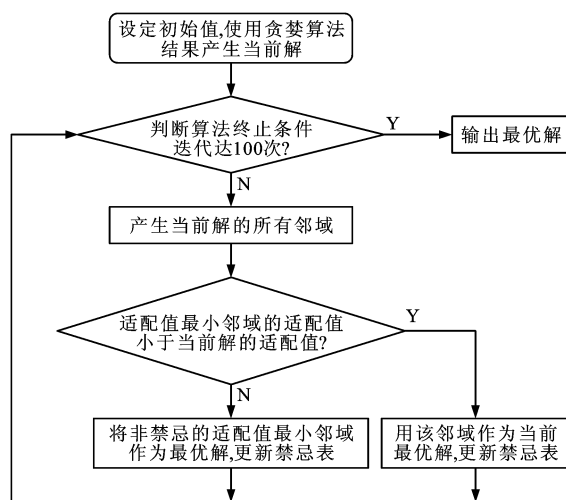


图 4 算法流程

Fig. 4 Algorithm flow

5 计算结果分析

案例分析选取广州白云国际机场典型日 09:00~14:00 的部分到港航班数据,共 62 个航班,20 个可用机位,航班计划见表 2。假设航空公司 A、B 航班的到达时间均符合历史延误分布规律,采用本文建立的模型与设计的算法,完成上述算例的求解时间为 0.72 s,冲突概率计算结果见表 3。

由表 3 可见,通过贪婪算法得到的初始指派方案机位冲突概率的总和为 2.764 6,经过禁忌搜索优化,在所有 20 个机位中,共有 8 个机位上 12 个航班的初始指派方案得到了交换移动,虽然机位 102、104、110 和 118 在禁忌搜索后目标值略有增加,但却使得机位 105、108、109 和 115 的目标值得到了更大程度的改善,体现出了全局优化的优势,最终使得指派方案的机位冲突概率降低到 2.737 1,冲突概率的改进值为 0.027 5,即通过禁忌搜索计算可以进一步提高解的质量。禁忌搜索算法收敛曲线见图 5。

从图 5 可以看出,在禁忌搜索迭代过程的初期,目标函数的收敛速度较快,经过前 30 多次的迭代,目标函数已经非常接近优化解,随着迭代过程的持续进行,目标函数值得到不断优化,在第 43 次搜索中就达到了优化目标,在其后的 57 次迭代过程中,都没有搜索到更优解,由此可见本文算法具有较好的收敛效果。

为反映本文算法的优越性,使用上述算例数据,

表 2 航班计划

Tab. 2 Flight schedules

航班号	计划到港时间	计划离港时间	航班号	计划到港时间	计划离港时间	航班号	计划到港时间	计划离港时间
A50	9:00	12:11	A22	11:28	12:20	A11	13:04	13:49
A53	9:32	11:02	B18	11:33	12:45	B3	13:07	15:00
A17	10:02	11:02	A35	11:33	12:40	A19	13:08	13:58
A34	10:11	11:08	A14	11:40	12:30	A61	13:08	13:52
A4	10:21	11:05	A10	11:50	12:50	B36	13:10	13:43
A59	10:35	12:16	B21	12:02	13:02	A48	13:12	13:51
B9	10:38	11:20	A29	12:08	13:24	A16	13:30	14:30
B57	10:41	12:31	A47	12:10	13:06	B39	13:31	14:31
A13	11:02	11:32	A41	12:15	13:22	B30	13:34	14:29
A38	11:06	12:38	A60	12:21	13:24	B27	13:36	14:41
A1	11:10	12:15	A51	12:27	13:25	A24	13:46	14:46
A20	11:10	11:55	A23	12:29	13:43	B52	13:47	14:47
A25	11:12	12:20	A2	12:30	13:00	A42	13:49	14:49
A31	11:12	12:10	A32	12:33	13:33	B33	13:50	14:40
A7	11:13	12:40	A26	12:37	13:34	B12	13:55	15:00
A46	11:18	12:02	A44	12:37	13:50	A37	13:55	14:55
A28	11:19	12:00	A58	12:37	14:37	A62	13:57	15:42
A43	11:20	12:30	B15	12:45	13:24	A49	13:58	14:48
B54	11:21	12:24	A55	12:51	13:36	B45	13:58	15:18
A5	11:22	12:30	A8	12:57	13:40	B56	13:59	15:19
A40	11:26	12:08	B6	13:02	14:05			

表 3 冲突概率计算结果

Tab. 3 Calculation results of conflict probability

机位号	贪婪算法指派方案		禁忌搜索优化后指派方案		冲突概率 改变值
	停靠航班	冲突概率	停靠航班	冲突概率	
101	A50、A51、B33	0.087 8	A50、A51、B33	0.087 8	0.000 0
102	A53、A22、A26	0.076 8	A53、A22、A26、B56	0.114 2	-0.037 4
103	A17、A40、A41、B52	0.192 2	A17、A40、A41、B52	0.192 2	0.000 0
104	A34、A35、A19	0.052 8	A34、B18、A61、A49	0.167 0	-0.114 2
105	A4、B18、B6	0.079 9	A4、A35、B3	0.063 8	0.016 1
106	A59、A2、B36、A37	0.211 1	A59、A2、B36、A37	0.211 1	0.000 0
107	B9、A14、A8、A24	0.156 0	B9、A14、A8、A24	0.156 0	0.000 0
108	B57、A58	0.099 6	B57、A55、B12	0.083 4	0.016 2
109	A13、A10、A61、B56	0.267 4	A13、A10、A19	0.100 8	0.166 6
110	A38、A11	0.026 4	A38、B6	0.037 4	-0.011 0
111	A1、A23、A42	0.183 6	A1、A23、A42	0.183 6	0.000 0
112	A20、B21、A48、A62	0.335 8	A20、B21、A48、A62	0.335 8	0.000 0
113	A25、A32、B45	0.103 4	A25、A32、B45	0.103 4	0.000 0
114	A31、A60、A16	0.183 6	A31、A60、A16	0.183 6	0.000 0
115	A7、B3	0.037 4	A7、A11	0.037 2	0.000 2
116	A46、A47、B39	0.155 0	A46、A47、B39	0.155 0	0.000 0
117	A28、A29、B27	0.211 1	A28、A29、B30	0.211 1	0.000 0
118	A43、A55、B12	0.108 6	A43、A58	0.117 6	-0.009 0
119	B54、A44	0.051 6	B54、A44	0.051 6	0.000 0
120	A5、B15、B30	0.144 5	A5、B15、B27	0.144 5	0.000 0
合计		2.764 6		2.737 1	0.027 5

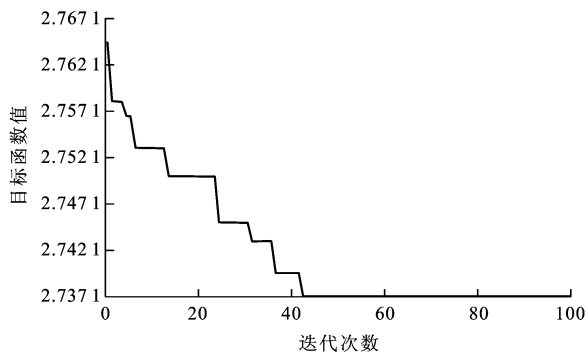


图5 禁忌搜索算法收敛曲线

Fig. 5 Convergence curve by using tabu search algorithm

设计遗传算法与贪婪禁忌搜索算法进行比较。遗传算法的主要设置内容如下。

(1)基因编码。染色体中的基因表示待分配机位的每个航班,基因的值机位序号。染色体中的基因位按机位号分成不同的组,每组之间用0隔开。本文算例中每个染色体都有20个组、62个航班基因位和19个机位组分隔位,染色体的总长度为81。

(2)初始种群规模。初始种群按照染色体编码规则,使用随机排序方式产生。考虑到种群数量对遗传算法精度和计算时间的影响,如果种群数量较小,可加快收敛速度,但容易陷入局部极小值,如果种群数量过大,比较容易找到最优解,但收敛速度较慢。根据本文算例特点,初始种群规模设为200。

(3)适应度评估。使用目标函数航班机位冲突概率作为基本适应度函数,如果某个染色体对应的航班机位指派方案不满足航班机位匹配约束、最短安全衔接时间或其他约束条件,通过在目标函数的基础上增加惩罚值的方法,降低该染色体的适应度值,惩罚值设为1 000。

(4)基因选择。以适应度值大小为依据,从当前群体中选择适应度值高的染色体遗传到下一代群体中,并淘汰适应度低的染色体。采用轮盘赌选择策略,当染色体 g 的适应度值为 $f(g)$,种群规模为 N 时,染色体 g 被选择遗传到下一代的概率为

$$P(g) = \frac{f(g)}{\sum_g f(g)} \quad (7)$$

(5)基因交叉。以0.2的比例作为基因交叉操作的数量,从当前种群中随机选择2个染色体作为父代,随机选择一个基因位,将这2个染色体在此基因位之后的基因进行互换产生2个新的染色体。

(6)基因变异。以0.01的比例作为基因变异的

数量,从种群中随机选择1个染色体,随机选择该染色体中的2个基因,交换位置,然后在所对应的机位组内,按照航班进港时间对航班进行排序,从而产生1个新的染色体。

(7)算法收敛条件。以种群进化次数作为收敛条件。为便于与贪婪禁忌搜索算法进行比较,设种群进化次数与禁忌搜索算法的迭代次数相同,均为100次。经过100次运算后,停止运算并输出得到的机位指派方案。遗传算法的收敛曲线见图6,分别利用遗传算法和贪婪禁忌搜索算法得到的优化结果见表4。

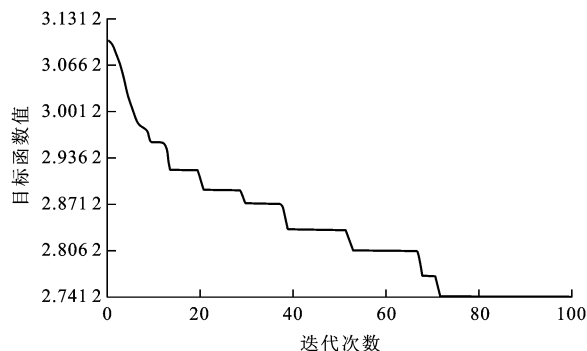


图6 遗传算法收敛曲线

Fig. 6 Convergence curve by using genetic algorithm

表4 两种算法优化结果对比

Tab. 4 Comparison of optimization results for two algorithms

算法	达到最优解 运算次数	运行 时间/s	初始解	最优解
遗传算法	72	35.00	3.124 3	2.741 2
贪婪禁忌搜索算法	43	0.72	2.764 7	2.737 1

由图5、6和表4可见,贪婪禁忌搜索算法在实现最优解的运算次数、运行时间和初始解质量方面都比遗传算法具有较高的优越性,2种算法的最优解非常接近,但禁忌搜索算法的最优解仍然保持相对优越。形成这种差异的主要原因在于,在初始解的获得方法上,禁忌搜索算法通过贪婪算法获取初始可行解,在一定程度上缩小了最优解的搜索空间。而传统遗传算法使用随机方法获得第1代种群,所以最优解的搜索空间相对较大,通过基因交叉、变异实现染色体进化的过程相对较长,运行时间也相对较长。

机位闲置时间最大的鲁棒指派方法是目前国内机场最常用的机位指派方法,为体现本文模型的优越性,使用本文算例数据,在相同的假设条件下,采用机位闲置时间最大的鲁棒指派方法与本文提出的贪婪禁忌搜索算法,得到的机位指派结果见表5。

表 5 两种方法求得的机位指派结果

Tab. 5 Assignment results of airport gate by using two methods

机位号	机位闲置时间最大指派方案		本文模型指派方案		冲突概率 改变值
	停靠航班	冲突概率	停靠航班	冲突概率	
101	A50、A51、A42	0.108 6	A50、A51、B33	0.087 8	0.020 8
102	A53、A22、A26、A49	0.114 0	A53、A22、A26、B56	0.114 2	−0.000 2
103	A17、A40、A41、A24	0.192 0	A17、A40、A41、B52	0.192 2	−0.000 2
104	A34、A35、A19	0.219 4	A34、B18、A61、A49	0.167 0	−0.114 2
105	A4、B18、B6	0.079 9	A4、A35、B3	0.063 8	0.016 1
106	A59、A2、B36、A37	0.211 1	A59、A2、B36、A37	0.211 1	0.000 0
107	B9、A14、A8、B52	0.205 0	B9、A14、A8、A24	0.156 0	0.049 0
108	B57、A58	0.099 6	B57、A55、B12	0.083 4	0.016 2
109	A13、A10、A61、B56	0.267 4	A13、A10、A19	0.100 8	0.166 6
110	A38、A11	0.026 4	A38、B6	0.037 4	−0.011 0
111	A1、A23、B33	0.232 6	A1、A23、A42	0.183 6	0.049 0
112	A20、B21、A48、B45	0.384 8	A20、B21、A48、A62	0.335 8	0.049 0
113	A25、A32、A62	0.103 2	A25、A32、B45	0.103 4	−0.000 2
114	A31、A60、B39	0.232 6	A31、A60、A16	0.183 6	0.049 0
115	A7、B3	0.037 4	A7、A11	0.037 2	0.000 2
116	A46、A47、A16	0.154 8	A46、A47、B39	0.155 0	−0.000 2
117	A28、A29、B27	0.211 1	A28、A29、B30	0.211 1	0.000 0
118	A43、A55、B12	0.108 6	A43、A58	0.117 6	−0.009 0
119	B54、A44	0.051 6	B54、A44	0.051 6	0.000 0
120	A5、B15、B30	0.144 5	A5、B15、B27	0.144 5	0.000 0
合计		3.018 0		2.737 1	0.280 9

由表 5 可见,本文模型的运算结果(2.737 1)优于使用机位闲置时间最大的鲁棒指派方法得出的运算结果(3.018 0),提高了 9.31%。2 种方法得到的机位指派方案中只有 106、117、119 和 120 共 4 个机位的指派结果完全相同,其他 16 个机位的指派结果部分或完全不同。产生这个差异的原因是,后者只注重于航班间隔时间的长短,而本文算法更注重于机位冲突概率的大小,包含了对航班时间间隔和航班延误概率分布的同时考量。

6 结 语

使用基于机位闲置时间的确定型鲁棒方法,在现实环境中有一定的局限性,未能完全反映航班将会实际面临的机位冲突,机位计划的鲁棒性会相对较差。本文考虑了不同航空公司之间差异化的航班历史延误概率分布,建立了以机位冲突概率最小为目标的鲁棒指派模型,设计了贪婪禁忌搜索算法进行求解,使用实际航班数据进行了案例分析。研究结果表明:与现有的方法相比,使用本文模型可以使

机位计划的鲁棒性提高 9.31%,能更准确地反映机位冲突的可能性,机位计划的鲁棒性相对较强。本文建立的模型没有考虑航班到达机场后由于机场地面原因引起的二次延误,在模型建立和算法设计方面还有待改进,这是今后的研究方向。

参 考 文 献 :
References :

[1] 接 婧. 国际学术界对鲁棒性的研究[J]. 系统工程学报, 2005,20(2):153-159.
JIE Jing. Study of robustness in the world[J]. Journal of Systems Engineering, 2005, 20(2): 153-159. (in Chinese)
[2] BOLAT A, AS-SAIFAN K. Procedures for aircraft-gate assignment[J]. Mathematical and Computational Applications, 1996, 1(1): 9-14.
[3] BOLAT A. Assigning arriving flights at an airport to the available gates[J]. Journal of Operational Research Society, 1999, 50(1): 23-24.
[4] BOLAT A. Procedures for providing robust gate assignment for arriving aircrafts[J]. European Journal of Operational Research, 2000, 120(1): 63-80.

- [5] BOLAT A. Models and a genetic algorithm for static aircraft-gate assignment problem[J]. Journal of the Operational Research Society, 2001, 52(10): 1107-1120.
- [6] 田 晨,熊桂喜. 基于遗传算法的机场机位分配策略[J]. 计算机工程, 2005, 31(3): 186-188, 228.
TIAN Chen, XIONG Gui-xi. Airport parking-position assignments strategy based on GA[J]. Computer Engineering, 2005, 31(3): 186-188, 228. (in Chinese)
- [7] 郑 攀,胡思继,张 晨. 机门指派模型建立与启发式算法设计[J]. 系统工程学报, 2011, 26(1): 127-131.
ZHENG Pan, HU Si-ji, ZHANG Chen. Gate assignment modeling and heuristic algorithm design[J]. Journal of Systems Engineering, 2011, 26(1): 127-131. (in Chinese)
- [8] SONG Xue-yan, YU Cui-ling. An improved squeaky wheel optimization approach to airport gate assignment problem[C]// Springer. 2011 International Conference on Knowledge Engineering and Managemnt. Nanning: Springer, 2011: 41-45.
- [9] DIEPEN G, AKKER J M, 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.
- [10] 高 菁,杨旭东. 基于规则的机位分配问题研究[J]. 计算机科学, 2012, 39(增): 51-53.
GAO Jing, YANG Xu-dong. Research on craft-seat assignment based on rules[J]. Journal of Computer Science, 2012, 39(S): 51-53. (in Chinese)
- [11] KIM S H, FERON E. Robust gate assignment[C]// AIAA. 2011 AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Portland: AIAA, 2011: 1-12.
- [12] MANGOUBI R S, MATHAISEL D E X. Optimizing gate assignments at airport terminals[J]. Transportation Science, 1985, 19(2): 173-188.
- [13] HASSOUNAH M, STEUART G. Demand for aircraft gates[J]. Transportation Research Record, 1993(1423): 26-33.
- [14] YAN Shang-yao, SHIEH C Y, CHEN M. A simulation framework for evaluation airport gate assignment[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2002, 36(10): 885-898.
- [15] YAN Shang-yao, HUO C M. Optimization of multiple objective gate assignments[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2001, 35(5): 413-432.
- [16] DORNDORF U, JAEHN F, PESCH E. Modeling robust flight gate scheduling as a clique partitioning problem[J]. Transportation Science, 2008, 42(3): 292-301.
- [17] DORNDORF U, JAEHN F, PESCH E. Flight gate scheduling with respect to a reference schedule[J]. Annals of Operational Research, 2012, 194(1): 177-187.
- [18] LIM A, WANG Fan. Robust airport gate assignment[C]// IEEE. Proceedings of the 17th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence. Hong Kong: IEEE, 2005: 74-81.
- [19] SEKER M, NOYAN N. Stochastic optimization models for the airport gate assignment problem [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2012, 48(2): 438-459.
- [20] XU Liang, WANG Fan, XU Zhou. A robust approach for the airport gate assignment[C]//LIU J J, FU Xiao-wen, YIP T L, et al. International Forum on Shipping, Ports and Airports(IFS-PA) 2010-Integrated Transportation Logistics: from Low Cost to High Responsibility. Chengdu: TRB, 2010: 15-24.
- [21] YANG Shang-wen, HU Ming-hua. Airport gate assignment based on improved GM(1,1) model[C]//IEEE. Proceedings of 2009 IEEE International Conference on Gray System and Intelligent Services. Nanjing: IEEE, 2009: 403-407.
- [22] BLACKWOOD P. Understanding flight delays at U. S. airports in 2010, using Chicago O'Hare Airport as a case study[D]. Kalamazoo: Western Michigan University, 2010.
- [23] 杨文东,黄鹂诗,刘万明. 首都机场航班延误分布规律分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2013, 13(2): 199-204.
YANG Wen-dong, HUANG Li-shi, LIU Wan-ming. Flight delay distribution law at Capital Airport of Beijing[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2013, 13(2): 199-204. (in Chinese)