

文章编号:1001-4098(2004)07-0102-05

基于排序算法的机场停机位分配问题研究*

文 军^{1,2}, 孙 宏^{1,2}, 徐 杰¹, 梁志杰¹

(1. 西南交通大学 交通运输学院, 四川 成都 610031;

2. 中国民用航空飞行学院 空中管制系, 四川 广汉 618307)

摘 要: 停机位分配作业关系到整个机场的系统运作, 其作用相当重要。通过分析航班占用停机位的特性, 建立停机位分配问题的排序模型, 然后考虑“先到先服务”的规则并通过引入机位标号函数和航班标号函数设计一种求解模型的标号算法, 该算法的计算复杂性为 $O(nm)$, 最后将该算法应用于一个算例, 说明该算法为利用计算机进行停机位自动分配并优化停机位结果提供了一种可行手段。

关键词: 停机位分配; 机场; 固定工件排序; 标号算法

中图分类号: V351.11; U291.3 **文献标识码:** A

机场停机位分配是指, 在考虑机型大小、停机位大小、航班时刻等因素的情况下, 对未来一个时间段(一般为 3~4 小时)范围内的到港或离港航班指定适宜的登机口, 保证航班正点不延误, 为旅客上下飞机提供登机门(故国外也叫机门指派)。停机位分配恰当与否, 不仅对提高航空器的利用率关系密切, 而且对保证航班计划的实现、降低运输成本、为旅客提供优良的服务影响重大。为航班分配停机位包括航班占用停机位时间和占用具体停机位两项内容。这既与航空器种类、到港和离港密集程度有关, 又与机场设备设施和机位分配方法有关。合理编制停机位分配计划是机场生产指挥中心完成作业任务的核心工作之一。建立停机位分配模型并设计相应的算法是实现计算机辅助调度编制停机位分配计划的重要内容。为此, 需要建立关于机场停机位分配问题的数学模型和算法。

针对停机位分配问题, 国外学者提出了不同的分析工具, 可以分为两种: 一种是专家系统^[1,2], 通过将分配原则建立于知识库系统, 并考虑较多的非量化准则; 另一种是数学规划^[3-5], 以旅客在航站楼里步行距离最短为目标函数, 利用 0-1 整数规划探讨分配的可行性及如何分配。前者往往由于受搜索范围的限制, 忽视关键因素而导致分配结果不理想。后一种方法受目标函数的影响, 常会出现把较多的航班分配给较少的有吸引力的停机位, 而且航班时

刻微小的变化都会很容易引起停机位分配的混乱和计算量大增。同时, 国外机场候机楼的规模和航线结构都与国内情况存在显著差别。

本文在系统分析机场停机位分配情况和机场运行管理方式的基础上, 提出描述机场停机位分配问题的固定工件排序模型, 并设计一种求解模型的标号算法。

1 机场停机位分配问题的描述

机场停机位根据所能停放的机型大小分为大、中和小型停机位, 停机位分配是指根据航班的机型属性(B747、A340、B737 等), 为每一个航班指定一个具体的停机位, 包含到达开始使用停机位的时刻和离开结束使用停机位的时刻。在一日的不同时间段内, 由于到港和离港的航班种类、数目和时间不同, 确定航班使用停机位的种类和时间也就不同。机场生产指挥中心调度人员根据上阶段延续到本阶段的航班和本阶段航班到达情况合理分配停机位资源, 对于未来一个阶段(一般为 3~4 小时)的航班进行停机位安排, 准时将航班分配到合适的停机位。因此在分配停机位时, 必须满足下列约束条件:

- ① 每一个航班必须被分配且仅能被分配至一个停机位。
- ② 同一时间同一个停机位不能分配一个以上的航班。

* 收稿日期: 2003-09-06
基金项目: 中国民航飞行学院青年科研基金资助
作者简介: 文军(1968-), 男, 中国民用航空飞行学院空中管制系讲师, 西南交通大学交通运输学院博士研究生, 研究方向: 航空运输规划与管理; 孙宏(1966-), 男, 西南交通大学交通运输学院博士研究生, 研究方向: 航空公司运行管理; 徐杰(1973-), 男, 西南交通大学交通运输学院博士研究生, 研究方向: 交通运输规划与管理等; 梁志杰(1973-), 男, 西南交通大学交通运输学院博士研究生, 研究方向: 交通运输规划与管理等。

③应满足航站衔接以及过站时间衔接要求,即航班开始使用到结束使用停机位时间间隔不得低于飞机完成一次过站作业(如客货的装卸、飞机清洁等)所需的最低时间要求;此外使用同一停机位的航班前后之间应至少保持有一定的时间间隔,以保证航班顺利进出停机位和弥补一些意外造成的延误发生。

④机位与所使用机位的航班应该相互匹配,即大型航班只能使用大型停机位,不能安排到中型或小型停机位。但是中型航班可以使用大型停机位,但是不能使用小型停机位。

在对飞机进行停机位分配时,本文假设航班时刻表为已知,并且按照“先到先服务”原则对航班进行机位分配,但是由于机场停机位是有限的,每个航班都有一个使用停机位的时间范围,否则只能使用远端停机坪,采用摆渡车上下旅客,造成航班过站时间较长,航班延误,并且给旅客带来不便。现寻求一种分配方案,使未能分配到停机位的航班数目最少。

2 航班机位分配的排序模型

设一段时间内所有待分配的航班集合为 $\bar{J} = \{J_j | j = 1, 2, \dots, n\}$ (n 为待分配的航班总数),可用于停放航班的机位集合为 $\bar{G} = \{G_i | i = 1, 2, \dots, m\}$ (m 表示停机位总数),每个航班 J_j 均有固定的使用机位的开始 T_{B_j} 和结束 T_{E_j} 时刻(其中 T_{E_j} 已经包含了航班的最低过站时间),记为 $J_j = (T_{B_j}, T_{E_j})$,航班与机位的匹配关系可以用映射函数表示为 $\varphi: \bar{J} \rightarrow \bar{G}$, 或 $\Phi: \bar{G} \rightarrow \bar{J}$, 现寻求一种机位对航班的分配,使满足:

- ①同一时间内每个航班最多只能占用一个停机位;
- ②每个航班只能被分配给一个停机位使用,且航班一旦开始被执行就不能中断直至使用完毕;
- ③航班与所分配的机位应相匹配。

这是一个特殊的固定工件排序问题(fixed job scheduling problem),其中航班集合 \bar{J} 为工件集,停机位集合 \bar{G} 为机器集,按照排序论的标记方式^[6],机位分配问题表示为

$$P_m | \text{FixedJob}, \bar{J} \rightarrow \bar{G} \text{ Mapping} | \sum_j U_j \quad (1)$$

式中: P_m 表示 m 个平行机器; $U_j = 1$ 表示未能给航班 J_j 分配一个相匹配的机位,即航班 J_j “丢失”,否则 $U_j = 0$ 。显然, $\sum_j U_j = 0$ 表示一个可行的航班_机位分配的安排。

3 机场停机位分配的算法设计

固定工件排序问题在生产调度领域有着广泛的应用背景,许多资源有限的生产计划安排问题都可以归结为该问题,Arkin^[5]等数据表明该问题为 NP-hard,因此不存在好的多项式算法。Gupta^[8]等在研究电路设计中的线路安排

问题时首先提出该问题,并构造了一种启发式算法,其基本思想是在不考虑工件_机器匹配约束的条件下,以需用机器数最少为优化目标,按“先到先服务”的规则给工件分配机器。在 Gupta 研究的基础上,Fischetti^[9]等进一步研究了公共汽车司机的排班问题(BDSP),李文权^[10]研究了铁路区段站的到发线占用及调机问题等,孙宏^[11]研究了航空公司飞机排班问题。根据“先到先服务”以及“航班任务均衡”的原则,本文构造了航班_机位标号算法以解决航班—机位分配问题。

(1) 标号函数定义

定义1 航班标号函数:

$$Job(j) = \begin{cases} i, & i = 1, 2, \dots, m, \text{ 航班 } J_j \text{ 分配给机位 } G_i \\ 0, & \text{ 航班 } J_j \text{ “丢失”, 即航班未分配机位} \end{cases} \quad (2)$$

设处于待命状态的机位集合为 $\bar{G}_{fre} = \{G_i | i = 1, 2, \dots, m_{fre}, m_{fre} \leq m\}$, 其中 m_{fre} 表示处于空闲状态的机位数。

定义2 机位标号函数

对于每个空闲的机位 $G_i \in \bar{G}_{fre}$, 根据其被使用的上一个航班结束使用时刻的先后顺序定义一个对应于该机位的标号函数 $Pro(i)$, $Pro(i) = 1, 2, \dots, m_{fre}$, 算法中根据 $Pro(i)$ 的值决定机位 G_i 参与下一个航班分配的优先顺序。

定义3 航班与机位匹配特性的变量

$$\beta_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{机位 } G_i \text{ 与航班 } J_j \text{ 匹配} \\ 1, & \text{否则} \end{cases} \quad (3)$$

(2) 标号算法流程

航班_机位分配问题的标号算法流程描述如下:

Step1 对应每个航班开始使用和结束使用停机位的时刻,分别定义一个到达事件和出发事件,将所有到达事件和出发事件按其发生时间的先后重新排序,这样得到在本时间段的事件集合为 $Z^0 = \{Z_{k^0}^0 | k^0 = 1, 2, \dots, 2n\}$, 其中 $Z_{k^0}^0$ 表示任一航班到达或出发事件,当到达事件与出发事件同时发生时,总是安排出发事件在前,由于在本时间段内有 n 个航班需分配停机位,而每个航班均对应应有到达和出发两个事件,所以本阶段的事件总数为 $2n$ 。

记由前一时间段延续到本时间段的事件集合为 $Z^- = \{Z_{k^-}^- | k^- = 1, 2, \dots, p\}$, 其中 $Z_{k^-}^-$ 均为出发事件,并按其发生时间的先后进行排序, p 表示由前一时间段延续到本时间段的事件总数;由本时间段延续到下一时间段的事件集合为 $Z^+ = \{Z_{k^+}^+ | k^+ = 1, 2, \dots, q\}$, 其中 $Z_{k^+}^+$ 均为出发事件,也按其发生时间的先后进行排序, q 表示由本时间段延续到下一时间段的事件总数。

令 N 表示本时间段内需要处理的事件总数,则 $N = 2n + p - q$, 从而本时间段内需要处理的事件集合为

$$Z = \{Z_k | k = 1, 2, \dots, N\} = Z^- + Z^0 - Z^+ \quad (4)$$

根据前一时间段的航班_机位分配情况以及停机位的使用信息确定 \bar{G}_{fre} 及 $Pro(i)$ 的初值,用计数器 Counter 记

录“丢失”的航班数量,赋初值 $Counter=0$ 。

Step2 当事件 Z_k 为出发事件,且其对应的航班为 J_j ,则

$m_{fre} = m_{fre} + 1$

(5)

$\bar{G}_{fre} = \bar{G}_{fre} + \{G|i = Job(j)\}$

(6)

$Pro(Job(j)) = m_{fre}$

(7)

当事件 Z_k 为到达事件,且其对应的航班为 J_j ,则找出一个 $G_{i_k} \in \bar{P}_{fre}$,使满足

$$\begin{cases} \beta_{ij} = 0 \\ Pro(i_k) = \min\{Pro(i)|i \in \bar{G}_{fre}\} \end{cases}$$

(8)

如果 G_{i_k} 存在,则赋值 $Job(j)=G_{i_k},m_{fre}=m_{fre}-1,\bar{G}_{fre}=\bar{G}_{fre}-\{G_{i_k}\}$ 并对于 $G_i \in \bar{G}_{fre}$,且 $Pro(i)>Pro(i_k)$,对停机位标号进行赋值为 $Pro(i)=Pro(i)-1$,否则 $Job(j)=0,Counter=Counter+1$ 。

Step3 $k=k+1$

Step4 如果 $k \leq N$,转 Step2;否则停止计算,以 Gantt 图的形式输出 $Job(j),j=1,2,\cdots,n,Counter$ 。

(3) 计算结果调整

当 $Counter>0$ 时,说明存在航班“丢失”,即航班未分配机位,这时需要对停机位分配结果进行人工调整,基本方法有:

①战术调整:由调度员根据经验调整航班—机位的分配,以“找回”丢失的航班;

②战略调整:通过与航空公司协商,采用远端停机坪,用摆渡车上下旅客,或者推迟航班使用停机位。

(4) 算法复杂性分析

算法的复杂性由算法的结构以及须处理的事件数量决定,设待分配机位的航班数量为 n ,停机位数量为 m ,由于 $N \leq 3n, m_{fre} \leq m$,在 Step1 中,按照事件发生时间的先后进行排序的复杂性为 $O(n)$,在 Step2 至 Step4 中,对待分配机位的航班选出一个停机位的复杂性为 $O(m)$,因此,完成航班_机位分配的算法复杂性为 $O(nm)$ 。

4 算例

现把上述算法用于如表 1 所示的 7 个停机位对 18 个航班的停机位分配问题,航班使用机位的开始、结束时刻由四位数字组成,依次表示时、分,如 1225 表示 12 点 25 分。算例中的所有航班均处于 10:00~14:00 时间段内,因此可给停机位集合 \bar{G}_{fre} 赋初值 $\bar{G}_{fre}=\{G_i|i=1,2,\cdots,7\}$,给停机位标号函数赋初值 $Pro(i)=i,i=1,2,\cdots,m_{fre}$ 。用标号算法得出的航班_机位分配结果为: $Job(9)=Job(1)=Job(8)=G_1,Job(14)=Job(5)=G_2,Job(3)=Job(7)=G_3,Job(11)=Job(12)=Job(15)=G_4,Job(4)=Job(2)=Job(17)=G_5,Job(16)=Job(13)=G_6,Job(18)=Job(10)=G_7,Counter=3$ 。将计算结果以 Gantt 图的形式表示(如图 1 所示),从图 1 可以直观地看出:分配到机位 G_5 的航班 Flight04 和 Flight02 是不合法的,需要调整;同时由于可用的停机位资源有限,航班 Flight06 被“丢失”,即未有合适的停机位供其使用。通过将分配给停机位 G_4 和 G_5 的航班进行交换,可将“丢失”航班节的数目减到最少($Counter=1$),调整后的航班_机位分配情况见图 2。

表 1 航班_机位分配匹配特性

航班 (J_j)	结束时刻 (T_{B_j})	结束时刻 (T_{E_j})	航班_机位匹配特性(β_{ij})						
			G_1	G_2	G_3	G_4	G_5	G_6	G_7
Fight01	1120	1220	0	0	1	1	1	1	1
Fight02	1200	1250	0	0	1	0	1	0	0
Fight03	1105	1155	0	0	0	0	0	1	1
Fight04	1010	1105	0	0	0	0	1	0	0
Fight05	1210	1340	0	0	1	1	1	1	1
Fight06	1135	1235	1	1	0	0	0	0	0
Fight07	1215	1305	0	0	0	0	0	1	1
Fight08	1240	1340	0	0	1	1	1	1	1
Fight09	1000	1100	0	0	0	0	0	1	1
Fight10	1155	1300	1	0	1	0	0	0	0
Fight11	1000	1055	0	0	0	0	0	1	1
Fight12	1130	1220	0	0	0	0	0	1	1

Fight13	1125	1205	1	0	0	1	0	0	0
Fight14	1025	1135	0	0	1	1	1	1	1
Fight15	1245	1335	0	0	0	0	0	1	1
Fight16	1000	1100	1	0	1	0	0	0	0
Fight17	1310	1400	0	0	0	0	0	1	1
Fight18	1030	1120	1	0	1	0	0	0	0

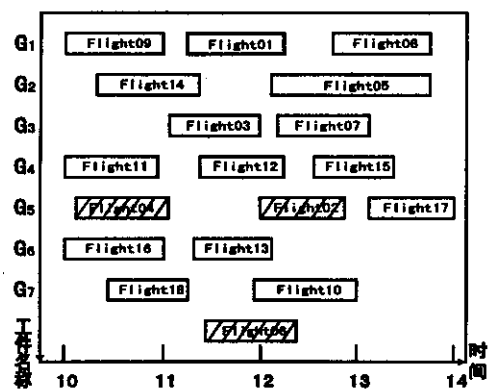


图 1 基于标号算法的航班_机位分配

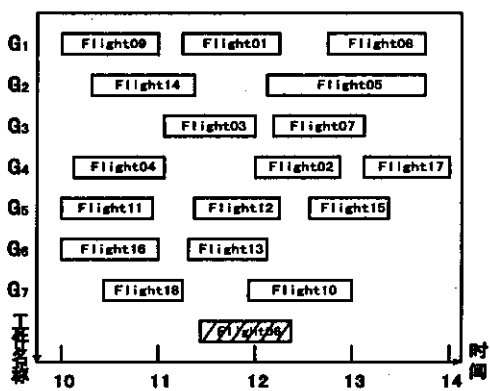


图 2 调整后的航班_机位分配

5 结束语

针对机场运行管理中的停机位分配问题,本文提出了停机位分配的排序模型,并提出了一种求解该模型的标号算法,为利用计算机对停机位进行自动分配以及优化分配方案提供了一种可行的方法,该方法的使用不仅可以提高工作效率,而且还可以减少因停机位分配不当而造成的航班和旅客的延误。需要指出的是,停机位分配是一个复杂的问题,涉及的因素较多,本文也仅对静态分配以及针对航班“先到先服务”进行了分析,关于航班任务的重要性与机位分配的动态性还需进一步研究。

参考文献:

[1] Gosling G D. Design of an expert system for aircraft gate assignment[J]. Transportation Research A, 1990,24(1):59~69.

[2] Su Y Y,Srihari K. A knowledge-based aircraft-gate assignment advisor[J]. Computers and Industrial Engineering, 1993, 25(2):123~126.

[3] Babic O, Teodorovic D, Tosic V. Aircraft stand assignment to minimize walking[J]. Journal of Transportation Engineering,1984,110(1):55~66.

[4] Bihl R A. A conceptual solution to the aircraft gate

assignment problem using 0-1 linear programming[J]. Computers and industry Engineering, 1990,19 (3):280~284.

[5] Bolat A. Procedures for providing robust gate assignments for arriving aircrafts [J]. European Journal of Operational Research, 2000,120(1):63~80.

[6] 唐国春. 排序问题的定义分类和在国内的某些研究进展[J]. 运筹学杂志,1990,(2):146~156.

[7] Arkin E M, Silverberg E B. Scheduling jobs with fixed start and end times[J]. Discrete Applied Mathematics, 1987,18:1~8.

[8] Gupta U I, Lee D T. Leung J Y T. An optimal solution for the channel-assignment problem [J]. IEEE Transactions Computer, 1979, C-28: 807 ~ 810.

[9] Fischettim, Martello M S, Toth P. Approximation algorithms for fixed job schedule problems [J]. Operational Research, 1992,40:96~108.

[10] 李文权. 铁路区段站日工作计划优化模型及其算法的研究[D]. 成都:西南交通大学,1996.

[11] 孙宏,杜文. 航空公司飞机排班问题的排序模型及算法[J]. 系统工程理论方法应用,2002,11(3): 244~247.

Study of the Gate Assignment in Airport
Based on Fixed Job Scheduling Algorithm

WEN Jun^{1,2},SUN Hong^{1,2},XU Jie¹,LIANG Zhi-jie¹

- (1. College of Traffic & Transportation, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;
- 2. ATC Department, China Civil Aviation Flying College, Guanghan 618307, China)

Abstract: Gate assignment plays an important role and has significant impact on the operation of an airport system. A fixed job scheduling model of gate assignment in airport is set up by analyzing the characteristics of time intervals set that the scheduled flights use the gates. Then, a labeling function of flight and a gate labeling function are introduced; and the labeling algorithm is presented according to the rule "First-In-First-Out"; The computerizing complexity of this algorithm is $O(nm)$. Finally, an example is analyzed to demonstrate the application of this algorithm. This shows that an optimal gate assignment scheme is feasible for computerization.

Key words: Gate Assignment; Airport; Fixed Job Scheduling; Labeling Algorithm

“现代物流系统科技发展与管理” 征文启事

中国系统工程学会学术工作委员会与湖南省系统工程学会决定于 2004 年 11 月在湖南长沙联合举办“现代物流系统科技发展与管理”学术会议，向全国征文，欢迎大家踊跃投稿。会议将正式公开出版论文集，举行论文评选并颁发优秀论文证书，推荐优秀论文到《系统工程》发表。现将有关事项公告如下：

一、征文范围

- (1) 物流产业、物流园区与物流网络规划；(2) 物流统计指标体系与统计方法；(3) 供应链管理；(4) 物流成本管理；(5) 仓储装备、仓储技术与仓储管理；(6) 运输装备与技术；(7) 城市交通与物流基础；(8) 冷链装备与技术；(9) 物流信息系统及其相关技术；(10) 连锁经营中的物流组织与管理；(11) 物流配送的组织、方式、线路优化等；(12) 电子商务物流；(13) 物流企业的业务再造；(14) 其他。

二、投稿地址及联系方式

湖南长沙岳麓区湖南大学经贸学院张汉江收，邮政编码：410079。来稿请在信封上注明“会议征文”字样。

电子邮箱：zhanghj1978@163. com

传真：0731-8684621，请注明“张汉江收会议征文”。

联系电话：0731-8684653（O），13507435519

三、征文截止日期

2004 年 9 月 30 日。