

多机场网络效应在地面等待策略中的应用

余 汇 王仲生

(西北工业大学,西安 710072)

摘 要 在多机场地面等待策略中,对多机场延迟的网络效应进行研究。将其以约束条件的方式加入到运算模型当中,对模型进行优化,并设计启发式算法对模型进行求解。多机场地面等待的网络效应主要体现于航班延迟在多机场网络中传递,该效应在枢纽机场尤其严重。通过对延迟时间中各时间要素进行分析,并得出新的约束条件对模型进行优化。优化后应用于真实算例的求解。求解结果显示:模型更真实地反映了多机场地面等待问题的实际情况,模型的求解为航班调整提供了依据。调整后的航班总延迟时间段数目减少,而航班总运行成本降低,达到了提高运行效率的目的。

关键词 多机场 地面等待策略 网络效应 启发式算法

中图法分类号 V355.1; **文献标志码** A

近年来,我国民用航空事业取得了长足的发展,但由于我国空中交通管理发展起步较晚,同时我国机场基础设施建设不够完善,使我国交通流量管理领域存在的许多问题暴露出来,航班延误问题即为其中重要的一项。解决此问题的有效手段是运用地面等待策略将计划航班进行重排,减少航班延误,将空中等待用地面等待的方式吸收,同时以损失最小为目标合理安排等待时间以提高航空公司的运行效率并降低运行成本。因此,合理地建立地面等待策略模型,并通过有效的求解方法对其求解将为我国的空中交通管理事业提供技术基础。

我国国内许多专家均对多机场地面等待策略方面进行研究,国际上很多空中交通流量管理领域的专家也做了大量的工作,并以地面等待策略为空中交通管理提供了重要的理论和功能支持。美国联邦航空局空中交通控制系统指令中心(ATCSCC)已经采用了地面等待策略为空中交通管制服务提供支持。^[1]作为空中交通管理的短期管理方法,地面等待策略具有成本较低,生效时间快等特点,对控制机场拥塞、减少航班延误有很好的效果。

多机等待模型一般有三种基本模型^[2]:VBO模型、AT模型以及BS模型。其主要思想均为对多个机场的容量限制进行考虑,将地面等待问题延伸至多机场进行分析,其中只有BS模型是假定起飞机场与降落机场容量不足均会引起航班拥挤。以上模型将单机场地面等待模型拓展到了多机场地面等待模型的情况,对策略的拓展过程中,最主要的部分是对多机场航班之间的网络效应进行分析。本文通过对多机场地面等待问题中的网络效应进行研究,结合我国空域的具体情况,在已有研究的基础上,将我国空域航班之间的网络效应作为约束条件对模型优化,并设计了基于计划航班重排的启发式算法,最后应用实际航班数据对模型和算法进行仿真验证。

1 问题提出

多机场地面等待模型中空中交通网络中各个节点的相互作用,如机场的起飞降落流量之间的关系、各个航路点之间的相互制约和影响^[3],是多机场地面等待策略中的一项重要研究内容。在通常航班安排中,为节约成本,飞机航班一般是连续地经过几个机场,而同一航班在其中一个机场的延误,极有可能导致后续航班的延迟,这种情况在繁

2010年3月3日收到

第一作者简介:余 汇(1985—),江西省上饶县人,硕士研究生,研究方向:交通运输规划与管理。

忙机场尤其严重。因为繁忙机场不但起飞容量有限制,降落容量也不能假设为无限,一个航班的延迟很可能导致几个航班的推迟。因此,考虑网络效应对多机场地面等待模型的影响,合理安排地面等待时间,将大大提高飞行效率。

航班延迟在连续航班之间的延续可以化为一项对多机场地面等待模型目标函数的约束(coupling constraints)^[4,5]。此约束式的建立取决于飞机连续航班的延迟时间、服务时间以及闲时间之间的关系。除延迟时间以外,服务时间(service time)是指飞行航班在降落机场后为续航班飞行做准备工作所需时间,该时间段长短在大型机场一般可以视为定值;闲时间(slack time)指的是从飞机做好起飞准备至下一航班起飞的时间长短,该时间根据航班的安排而变化,此时间可以缓冲连续航班延迟的传递。

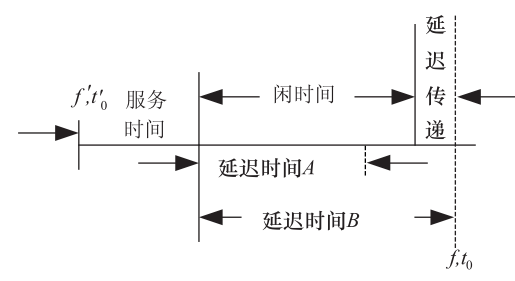


图1 延迟传递效果图

根据各时间之间的关系以及其对系统的作用,在模型当中,对以下二个问题进行分析和研究。首先,是各时间对系统中延迟传递的影响。如图1中延迟时间A所示,连续航班中上次航班飞行延迟大于两次航班间的闲时间,则上次航班的延迟时间将被闲时间全部吸收后;而当图1中发生延迟时间B所示情况时,当延迟时间大于闲时间,延迟时间被闲时间部分吸收;当服务时间和闲时间相加小于延迟时间时,其延迟将被部分传递至下一次航班;其次,是各时间对系统的影响,闲时间的长短取决于机场状况以及起降飞机的机型,在一定机场和一定航班中可以认为其为常值;但延迟时间的最大长度则应有一定的限制,否则,部分航班的延迟时间过长将会造成难以预计的损失。基于以上两方面的考虑,通过对相关时间变量加入约束条件进行表

达,即在多机场地面等待模型中加入网络效应的约束条件,以优化模型,使模型建立更切合实际。

2 多机场地面等待模型

2.1 模型假设

多机场地面等待模型建立在对多个机场容量限制条件基础之上,假设起降机场均符合相同的容量限制规则,并选取双跑道运行情况下目视飞行规则(VFR指天气较好条件下的飞行规则)作为容量限制规则^[6]。由于在航班的排班基础上已经产生航班延迟时模型的研究才有意义,因此,只有当预订航班在某一机场的起降数量超过容量限制时模型才成立。在此条件上,针对固定的一组机场序列Z,在一段时间T内,对飞机集合F的起飞降落情况进行分析。假设F中的所有飞机均在机场Z集合内进行起飞和降落,对于任一架次的飞机f,令其预定起飞机场以及预定降落机场已知。在模型中定义损失系数:空中等待成本和地面等待成本两项,而每一个机场一定时刻内的起飞容量和到达容量已知。

在多机场地面等待模型中考虑延迟在整个网络中的传递,假设对于航班集合F的后续航班集合为F',即对于航班f,f'为航班f的后续航班。延迟传递发生在这两个航班的运行过程当中。

下面对模型中的一些主要参数及符号进行说明:

- Z_f^d : 飞机f的预定起飞机场;
- Z_f^a : 飞机f的预定降落机场;
- $F、F'$: 飞机航班集合及连续航班的后续航班集合;
- $F' \subseteq F, F_z$: 代表在机场Z降落的航班;
- T : 航班时间序列,根据要处理的航班时段,将其按一定时间长度分为等长的时间序列, $t \in T$;
- c_f^a : 飞机f的空中等待成本;
- c_f^g : 飞机f的地面等待成本;
- d_f : 航班f计划起飞时间;
- r_f : 航班f计划着陆时间;

D_k^t : 机场 k 在时间序列 t 内的起飞容量;
 A_k^t : 机场 k 在时间序列 t 内的降落容量;
 $e_{f,f'}$: 航班 f 与 f' 之间的服务时间;
 $s_{f,f'}$: 航班 f 与 f' 之间的闲时段;
 u_f^t, v_f^t : 航班起飞及降落的决策变量, 只能取 0 或 1。当 $u_f^t = 1$ 时表示 f 在时刻 t 起飞, $v_f^t = 1$ 时表示 f 在时刻 t 降落。

由上述假设与分析可知:

$$g_f = \sum_{t \in T} t \times u_f^t - d_f \tag{1}$$

$$a_f = \sum_{t \in T} t \times v_f^t - r_f - g_f \tag{2}$$

2.2 目标函数

本文以最低成本为分析对象, 考虑飞机的地面等待成本和空中等待成本, 令空中等待时间为 a_f , 地面等待时间为 g_f , 可得到其目标函数为:

$$\min = \sum_{f \in F} (c_f^a a_f + c_f^g g_f) \tag{3}$$

即要求每个航班的空中等待成本及地面等待成本最小。

2.3 约束条件

2.3.1 唯一性约束

$$\sum_{t \in T} u_f^t = 1, \quad \forall f \in F \tag{4}$$

$$\sum_{t \in T} v_f^t = 1, \quad \forall f \in F \tag{5}$$

表示对于任意一个航班, 只能有一个确定的起飞和降落时间。

2.3.2 机场容量约束

$$\sum_{f \in F_z, t \in T} u_f^t = 1 \leq D_z^t, \quad \forall t \in T \tag{6}$$

$$\sum_{f \in F_z, t \in T} v_f^t = 1 \leq A_z^t, \quad \forall t \in T \tag{7}$$

式(6)及式(7)表示, 在每一个时刻下, 对机场集合的每一个机场起飞容量和降落容量将限制在该机场的起飞和降落飞机数。对于其中任意一个起飞或着陆机场来说, 均有起飞着陆向量, 该向量代表某一次航班是否在该机场起飞或着陆, 当某一次航班在 k 机场着陆时, 此向量的此列取值为 1, 否则为 0。

2.3.3 航班延误约束

$$g_f \geq 0, \quad \forall f \in F \tag{8}$$

$$a_f \geq 0, \quad \forall f \in F \tag{9}$$

式(8)、式(9)的两个约束为模型具有实际意义的基本条件, 即当航班无等待或等待时间为负时, 则模型失去意义。将式(8)、式(9)转化为以决策变量为变量的约束式, 从而将模型的求解转换为整数规划问题进行分析。

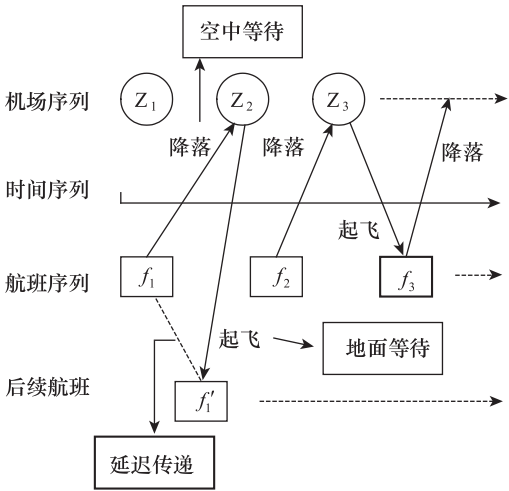


图2 多机场地面等待模型

图2 简要地说明了, 多机场地面等待模型中各参变量的关系。其中空中等待由实际降落时间和计划降落时间之差产生; 地面等待由实际起飞时间和计划起飞时间之差产生; 航班与其后续航班之间产生航班延迟传递。

3 模型优化及求解

3.1 模型优化

鉴于上述多机杨地面等待策略, 进一步考虑网络效应对多机场航班安排产生的影响, 使模型更符合航班的实际情况。多机场网络效应主要体现在两个方面, 首先是连续航班的约束, 对于每一个航班, 文章将不考虑机场的备用飞机, 即每一个航班如果发生延迟, 将会对下一个航班产生影响。飞机在一个机场降落之后, 无法立即从机场起飞, 要做

基本的准备工作,因此,在没有备用飞机的情况之后,会对航班连续性产生影响。其约束可用式(10)来表示^[7]。

$$g_f + a_f + e_{f,f'} \leq g_{f'} + s_{f,f'}(f, f' \in F) \tag{10}$$

其次是航班的延迟约束,即对于属于航班集合内的任意一项航班,其延迟均不能超过某时间常量,其约束可用式(11)表示。

$$a_f + g_f \leq L(f \in F) \tag{11}$$

3.2 模型求解

本文中讨论的问题为 0—1 整数规划问题。整数线性规划问题可用遍历的方法将有可能情况代入模型,在得出的组合中选择满足约束条件又合目标函数最小的值,但是一般多机场地面等待策略问题规模庞大,几乎不可能遍历所有情况。针对整数规划算法,一般采取下述方法。首先对整数规划约束条件进行线性松弛,其后对取得的最优解进行整数化处理。然而大多数整数规划问题在线性松弛后不能得到最优解,因此当此类问题无法求解时,更好的方法是启发式算法^[8]。根据本模型的特点,本文中建立了一种基于计划航班的排班算法对模型进行求解,下面过程为算法的具体步骤:

- 1) 初始化全部航班,按航班的相关属性对其进行分类。每一个航班具有以下主要属性:计划起飞时间、计划降落时间、机型、起飞机场以及降落机场。分类后,得出时间序列,机场序列对应的航班流量。
- 2) 对所有航班进行分时段分起降机场进行优先级排序。排序规则按照三个方面进行考虑:首先,计划排班时刻在前的取得高优先级;其次,在同机场起飞的航班优先级低于降落航班;再次,机型较大的飞机取得高优先级。
- 3) 对全部航班排序后的航班进行局部排序。对排序后的航班,取出所有航班中的连续航班,令其取得较高优先级。并随机选取航班进行优先互换。
- 4) 对排序后的航班进行加入容量约束,将计划起降数超过容量约束的航班按航班优先级进行推迟,优先级最小的首先推迟。

5) 将推迟后的航班进行时间段、机场分类,计算所有时间段、所有机场的起降数是否超过容量限制,超过则转至 4),不超过则转至 6)。

6) 计算所有航班空中等待时间段和地面行进行时间段,得出总成本。记录等待时间段数和总成本,加入延迟长度限制,如超出限制,直接转至 3),如未超出限制,则迭代次数加 1,然后转至 3)。当迭代次数超出 1 000 次,则输出总成本最小的航班序列。

4 仿真过程及结果分析

一般情况下,多机场地面等待策略主要针对位于同一个空域内不同机场间的航班安排,然而我国的航班流量分布极不均衡,其主要流量集中在北京、上海、广州三个繁忙机场,本文采用此三个机场一定时段中的航班数据进行模拟仿真,航班数据选取某天 12:00—14:00 两个小时内,三个机场航班的 118 次航班^[9],按照模型假设,飞行等待的成本可划分为空中成本和地面成本,每部分成本又包括大型飞机、中型飞机和小型飞机三个部分^[10],取空地成本比为 3: 1,取大中小型飞机单位地面等待成本为 1.3、1.5 以及 1.2,单位时间段长度取 20 min,并取最长延迟时间段数为 40 min,运用 NET 对算法进行编程实现,经算法验证,运行时间在 30 s 左右,达到了航班排序时效性要求。通过与先来先服务(First Come First Serve, FCFS)算法比较可以发现,文中提出的模型及算法具有有效性。

表 1 模型运算结果

	FCFS	启发式算法
地面等待成本	39	51.5
空中等待成本	108.3	82.2
总等待成本	147.3	133.7

通过仿真运算,可求出等待的总成本为 133.7,降低了航班运行的总成本,同时通过将空中等待时间转化为地面等待时间,提高了航班的运行效率。

5 结 论

本文提出的优化模型可解决拥有连续航班的多机场地面等待问题,减少航班的延迟,节约航班成本,提高系统运行效率。同时,还可以为空中交通流量管理系统提供决策支持。但是在多机场地面等待问题中各种影响因素繁多,在实际应用过程当中仍需进一步地改进和完善。

参 考 文 献

1 Brunetta L, Guastalla G,Navazio L. Solving the multi-airport ground holding problem. Springer Netherlands, 1998;81(0):271—288

2 Odoni A R. The flow management problem in air traffic control. In: Odoni A R, Szego G,eds. Flow Control of Congested Networks. Berlin: Springer-Verlag, 1987;269—298

3 关 钰,杨红雨. 空中交通流量管理中地面等待策略问题的研究. 成都:四川大学, 2006

4 张 军. 现代空中交通管理. 北京:北京航空航天大学出版社, 2005

5 Vranas P B, Bertsimas D, Odoni A R. Dynamic ground-holding policies for a network of airports. Transportation Science, 1994;28(4): 275—291

6 谢玉兰. 首都机场容量分析与优化调度策略研究. 北京:清华大学, 2002

7 张兆宁,王莉莉. 空中交通流量管理. 北京:科学出版社, 2009

8 Hillier F S, Lieberman G J. Introduction to operations research: 8th Edition. Califorua; Mc GrawHill Scienle/Engineering/Math July,2004

9 徐晓敏. 多机场流量管理研究及其软件实现. 西安:西北工业大学, 2003

10 周 鹏. 机场流量管理建模及其优化研究. 西安:西北工业大学, 2000

The Application of Multi –airport Network Effect in the Ground Holding Policy

YU Hui ,WANG Zhong-sheng

(Northwestern Polytechnical University, Xi' an 710072 ,P. R. China)

[Abstract] In the multi-airport ground holding policy, the delay caused by multi-airport effect is studied; than the effect is added into the model-building to make the optimization, the optimized model was figured out using a newly designed heuristic algorithm. The network effect of multi-airport mainly lies in the delay passing through network; this effect becomes worse in the hub airport. The time elements of the delay is analyzed and figured out a new constraint to optimize the model. The optimized model is used to figure out a real failure in a plane. The result shows; the result can be a basis for the rearrangement of the flight in order to reduce the flight delay and overall cost while raise the efficiency.

[Key words] multi-airport ground holding policy network effect heuristic algorithm