

多机场地面等待问题中的损失系数研究

余静¹, 傅强², 吴鹏¹

(1. 四川大学计算机学院 成都 610064; 2. 中国民航飞行学院民航飞行技术与飞行安全科研基地 四川 广汉 618307)

【摘要】以航空公司和乘客的损失程度作度量,将飞机起飞时刻的累计综合损失作为多机场地面等待模型中的损失系数,能更为有效地反映了地面等待的损失程度,强调了延迟时间对损失程度的累计效应和非线性特征。通过参数设置调节各损失因素所占的比例,将影响因子的重要性体现在损失系数的大小中,从而使损失系数可以适应不同的应用环境。

关键词 空中交通流量管理; 损失系数; 延迟时间; 地面等待策略
中图分类号 V355.2 文献标识码 A

Cost Modulus Research in Multi-Airport Ground-Holding Problem

YU Jing¹, FU Qiang², WU Kun¹, China Civil Aviation Flight University

(1. Computer College, Sichuan University Chengdu 610064;

2. Civil Aviation Technique and Security Research Center, China Civil Aviation Flight University Guanghan Sichuan 618307)

Abstract According to the total coast of airlines and passengers, we define the cost unit as a function of the departure time of a aircraft in the multi-airport ground-holding model. This definition will reflect the GDP's cost degree more available and emphasize the delay time's accumulative effect on all costs. By adjusting the value of parameters to suit the percentage of the cost factors, this modulus can apply to different kinds of applications.

Key words air traffic flow management; cost unit; delay time; ground-holding strategy

在空中交通流量管理方法中,地面等待策略是最为经济有效的一种方法。所谓地面等待就是在飞机延误不可避免的前提下,飞机不按预定时刻起飞而延迟起飞,用地面等待代替空中等待。地面等待策略就是确定飞机航班的最佳起飞时间,通过地面等待调节空中交通网络的流量,并使航班的流量与机场、空域的容量大体匹配,减少延误时间,从而减少经济损失,提高机场、空域利用率,保证飞行的安全与准时。可以想见,地面等待比空中等待更安全、更经济。

文献[1]对单机场的地面等待进行了研究。文献[2-4]对静态和动态的多机场的地面等待进行研究,探讨地面等待策略的实时性和随机性问题。美国已把地面等待策略用于实际的空中交通流量管理,并取得了很好的效果。文献[5]对机场地面等待进行研究,并成功地将单机场地面等待策略扩展到多机场地面等待策略,取得了重要的成果。本文在前人研究成果的基础上,对多机场地面等待模型中的损失系数进行定量研究。

1 多机场地面等待模型

多机场地面等待有三种基本数学模型^[6]:

(1) VBO (Vranas, Bertsimas & Odoni)模型(1994年); (2) AT(Andreatta & Brunetta)模型(1999年); (3) BS (Bertsimas & Stock)模型(1994年)。这三种数学模型都是0-1整数规划模型,目标都是使由于飞机延迟造成的总的经济损失最小,其约束方程可归纳为容量约束、航班制订约束、联系约束和整数约束。三种模型的本质不同在于整数变量的含义和选择不同,均可以统一表示为 $\min \sum_{f \in F} C_f \varphi(f)$, 其中 $f \in F$ 表示航班序列; C_f 表示航班 f 的地面延迟损失系数; $\varphi(f)$ 表示航班 f 满足各种约束条件的地面延迟时间函数。迄今的主要研究都集中于 $\varphi(f)$ 和约束条件,而对 C_f 只有经验性的定性分析,没有定量研究。

2 损失系数的影响因子

从实际情况来看,地面延迟损失主要体现在以下两个方面。(1) 航空公司的损失:虽然地面等待将代价昂贵的空中等待转换成了经济损失相对较低的地面等待,但如果某架飞机因在地面等待延迟起飞甚至不能起飞,导致该飞机不能正常地完成以后的飞行任务,依然会给航空公司造成经济损失。(2) 乘客的损失:由于飞机地面等待而造成飞机到达延误,

乘客会有抱怨情绪;此外,由于有一部分乘客还要在飞行的下一站转机,如果延误了转机,乘客会强烈不满。

本文用乘客的不满意程度来衡量乘客的损失,并且假定所有乘客对同一情形的不满意程度(即损失)是一样的。所以,一架飞机在地面等待至 t 时刻起飞时的损失系数,应当考虑乘客和航空公司两方面的损失程度。乘客和航空公司对某架飞机在 t 时刻起飞越感到不满意,说明该飞机地面等待的损失越大。反过来,飞机地面等待的损失越大,说明该飞机上的乘客及飞机所属航空公司对延迟起飞的不满意程度越高。由此可定义:飞机的地面等待损失系数是地面等待后起飞时刻 t 的函数,且与地面等待时间长短、机型(飞机大小)、旅客人数(实际载客量和下一站转机人数)、是否连续飞行,以及是否在黄金时间段进行地面等待等因变量有关。

记 $F[i]$ 为某机场进行地面等待队列 F 中的第 i 架飞机。为 $F[i]$ 定义以下的属性:(1) 预计离开登机口的时间 t_{sp} ; (2) 实际起飞时间 t ; (3) 机上实际乘客数 N ; (4) 预计在下一站转机的乘客数 N_c ; (5) 乘客预计在下一站转机的时间 t_c ; (6) 飞机连续飞行时 $F[i]$ 在下一站的预计起飞时间 t_{cf} ; (7) 飞机到达下一站的预计时间 t_{sa} ; (8) 飞机最大载客量 N_{cap} 。

一架飞机 $F[i]$ 在 t 时刻($t > F[i].t_{sp}$)起飞时的

$$C_2(t) = \begin{cases} a_2 N_c^{b_3} \left(\frac{t_c - t_{sa}}{a_3 + (t_c - t_{sa}) - (t - t_{sp})} \right)^{b_4} & \text{若 } t_c - t_{sa} \geq t - t_{sp} \\ 0 & \text{若 } t_c - t_{sa} < t - t_{sp} \end{cases} \quad (2)$$

式中 a_2 、 a_3 、 b_3 和 b_4 均为正常数。由于转机乘客的转机时间可能不一致,取 t_c 为所有乘客不同转机时间的加权平均值。

$C_3(t)$ 与飞机的载客量和飞机地面起飞延迟的时间成正比。在起飞延迟时间相同的情况下,载客量多的大飞机比载客量少的小飞机对航空公司造成的损失大。同时,还应考虑飞机在连续飞行的情况

$$C_3(t) = \begin{cases} a_4 N_{cap}^{b_5} \left(\frac{t_{cf} - t_{sa}}{a_5 + (t_{cf} - t_{sa}) - (t - t_{sp})} \right)^{b_6} & \text{若 } t_{cf} - t_{sa} \geq t - t_{sp} \\ \infty & \text{若 } t_{cf} - t_{sa} < t - t_{sp} \end{cases} \quad (3)$$

式中 a_3 、 a_4 、 b_5 和 b_6 均为正常数。

3 实验结果分析

在实际应用中,各个机场的运作状况不尽相同,各地域乘客对乘坐航班的要求不同,各航空公司飞

地面等待损失可分解为三个部分,即 $C_f(t) = C_1(t) + C_2(t) + C_3(t)$,其中 $C_1(t)$ 、 $C_2(t)$ 和 $C_3(t)$ 分别反映机上所有乘客、需要转机的乘客和所属航空公司认为该飞机在 t 时刻起飞的损失程度。

$C_1(t)$ 应与机上所有乘客数及飞机已经延迟的时间成正比关系。对于只有乘客数不同而其他数据完全相同的两架飞机,应该认为乘客数较多的飞机损失较大;对于只有地面等待时间不同的两架飞机,则应该认为等候时间长的飞机损失较大。因此,可给出如下描述乘客损失程度的公式:

$$C_1(t) = a_1 (t - t_{sp} + a_0)^{b_1} N^{b_2} \quad (1)$$

式中 a_0 、 a_1 、 b_1 和 b_2 是正常数。由于 $t - t_{sp}$ 可能为 0,所以在式(1)中应设置一个正常数 a_0 ,当 N 增大时, $C_1(t)$ 也随之增大,反映出乘客数较多的飞机损失系数较大。

$C_2(t)$ 与飞机上需要转机的乘客数有关。另外,还应考虑该飞机到达下一站时乘客离、转机所需的时间。显然,某架飞机的乘客离转机时间越短,表明该飞机的损失系数越大。如果飞机在 t 时刻起飞已经不能在乘客下一站转机时刻之前到达下一站,那么,无论以后何时起飞,可认为因乘客不能转机而带来的损失将不再随飞机延迟的时间递增,并规定为 0。于是,飞机上准备转机乘客的损失程度可由如下公式来描述:

下到达下一站的时刻离后继预计起飞时刻的准备时间,准备时间越短,飞机的损失系数应越大;如果飞机在 t 时刻起飞已经不能在后继预计起飞时刻之前到达下一站,那么,无论以后何时起飞,因后继飞行不能正常起飞而带来的航空公司的损失将骤然增大(规定为 ∞),于是可给出描述航空公司对飞机 $F[i]$ 在 t 时刻起飞的损失程度:

机的飞行情况不同(如有的航空公司客运量大,飞机飞行任务重;有的航空公司飞行任务相对较轻,延迟一些时间起飞对其影响不大)、考察的时期不同(如某些节假日比平时乘客量大得多,而且乘客要求尽早到达目的地的愿望比平时更为强烈)等,可根据上

述不同情况适当地调整常数 $a_0 \sim a_4$ 和 $b_1 \sim b_6$, 以使模型满足各种不同的需要。

现假设某机场有一架等待起飞的飞机, 相关数据如表1所示。表中的时间数据均为从零时零分开始计算的分钟数。另外, 假设该机场每5 min可以起飞一架飞机, 根据式(1)、(2)和(3)中的数量关系设置参数 $a_0 \sim a_4$ 为 $a_0=5.000$ 、 $a_1=0.003$ 、 $a_2=0.050$ 、 $a_3=1.000$ 和 $a_4=0.002$; 再假设参数 $b_1 \sim b_6$ 全为1, 在不同的起飞延迟时间下进行多次模拟, 计算结果如表2所示。

表1 等待起飞的飞机数据

t_{sp}	t_{sa}	t_c	t_{cf}	N_{cap}	N	N_c
540	750	790	830	300	200	50

表2 不同延迟时间下的计算结果

序 号	地面延迟 时间/min	C_1	C_1 所占 比例/(%)	C_2	C_2 所占 比例/(%)	C_3	C_3 所占 比例/(%)	C_f
1	5	6.000	63.76	2.778	29.52	0.632	6.72	9.410
2	10	9.000	69.76	3.226	25.00	0.676	5.24	12.902
3	20	15.000	73.00	4.762	23.17	0.787	3.83	20.549
4	60	39.000	94.46	0.000	-	2.286	5.54	41.286
5	100	63.000	-	0.000	-	-	-	-

从表2不难看出, 在保持参数不变的情况下, 损失系数 C_f 的大小随着地面飞机起飞延迟时间的增加而快速增加, 各分量 C_1 、 C_2 和 C_3 也相应增加, 但其所占比例却无变化规律。另外, 当延迟时间大于乘客在下一站转机的过渡时间时, 损失系数的 C_2 分量突变为0, 表明转机乘客已经无法登上一航班, 如果继续地面等待, 则在后续损失系数中将不再考虑转机乘客的损失; 当飞机的延迟时间大于下一站连续飞行前的准备时间时, 损失系数的 C_3 分量突变为, 表明该飞机已经无法完成连续飞行的任务。所以, 在利用多机场地面等待策略优化航班时刻表时, 应优先考虑规避这两种特殊情况。

下面, 假定飞机延迟20 min起飞, 保持参数 $a_0 \sim a_4$ 不变, 选取不同的参数 $b_1 \sim b_6$ 进行多次计算来说明所选参数对 C_f 及 C_1 、 C_2 、 C_3 的影响, 计算结果如表3所示。从表3中的计算结果可以得出结论: 通过调节参数 $b_1 \sim b_6$ 的值可以调节 C_f 中各分量的构成比例。例如, 如果认为乘客数量的多少对飞机地面起飞延迟损失有较大影响时, 可以适当地增加 b_2 的值, 提高 $C_1(t)$ 在整个损失系数 $C_f(t)$ 中所占的比例; 如果要尽量保证下一站转机的乘客不误机, 则可以适当地增加 b_3 和 b_4 的值, 增加 $C_2(t)$ 在 $C_f(t)$ 中所占的比例; 如果认为飞机的连续飞行对航空公司的损失影响较大时, 可相应增加 b_5 和 b_6 的值, 以提

高 $C_3(t)$ 在 $C_f(t)$ 中所占的比例。

表3 参数 $b_1 \sim b_6$ 对 C_f 的影响

序号	模拟参数设置	C_1 所占 比例/(%)	C_2 所占 比例/(%)	C_3 所占 比例/(%)	C_f
1	$b_1=1$ $b_2=1$ $b_3=1$	73.00	23.17	3.83	20.549
	$b_4=1$ $b_5=1$ $b_6=1$				
2	$b_1=1$ $b_2=1$ $b_3=1$	60.35	36.49	3.16	24.857
	$b_4=2$ $b_5=1$ $b_6=1$				
3	$b_1=1$ $b_2=1$ $b_3=0.8$	75.24	20.81	3.95	19.935
	$b_4=2$ $b_5=1$ $b_6=1$				
4	$b_1=1$ $b_2=1.3$ $b_3=0.6$	82.56	2.13	15.31	89.047
	$b_4=2$ $b_5=1.5$ $b_6=1$				
5	$b_1=1$ $b_2=1$ $b_3=1$	35.76	21.62	42.61	41.944
	$b_4=2$ $b_5=1.5$ $b_6=2$				

实际应用中, 可根据机场中飞机及所属航空公司的具体情况, 从大量统计数据中获取一般乘客以及需要中转乘客的分布情况, 从而选取相对较为恰当的参数 $a_0 \sim a_4$ 和 $b_1 \sim b_6$ 的值来确定 $C_1(t)$ 、 $C_2(t)$ 和 $C_3(t)$ 在损失系数中所占的比例。

4 结 论

试验表明, 在分别考虑航空公司和乘客损失的基础上, 将多机场地面等待模型中的损失系数定义为飞机起飞时刻 t 的函数, 可以更为有效地反映地面等待的损失程度; 强调飞机起飞延迟时间对损失程度的累计效应, 打破了损失系数固定不变的传统模式; 通过多参数调节可以调整各损失因素在损失系数中所占的比例, 将影响因子的重要性体现在损失系数的大小中, 从而使损失系数可以适应不同的应用环境。

参 考 文 献

- [1] TERRAB M. ATC flow control through ground-holding[D]. Cambridge: MIT, 1989.
- [2] VRANAS P B, BERTSIMAS D J, ODoni A R. The multi-airport ground-holding program in air traffic control[J]. Operations Research, 1994, 42(2): 249-261.
- [3] MUKHERJEE A. Dynamic stochastic optimization models for air traffic flow management[D]. Berkeley: University of California, 2004.
- [4] BHOGADI N. Modeling demand uncertainties during ground delay programs[D]. Maryland: The National Center of Excellence in Aviation Operations Research (NEXTOR), 2002.
- [5] 胡明华, 钱爱东, 苏兰根. 多机场地面等待问题模型研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2000, 32(5): 586-590.
- [6] 滕 达. 多机场流量管理方法的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2004.

编 辑 熊思亮