

文章编号: 1005—0523(2006)05—0063—03

天气不确定因素的单机场动态随机模型研究

褚芳芳, 白存儒

(西北工业大学 航空学院, 陕西 西安 710072)

摘要: 针对单机场地面等待问题, 根据我国民航系统的实际情况, 将天气情况不确定加入到目标函数中, 将天气情况不确定导致的航班价值、空中和地面延迟以及总延迟的损耗作为输入, 采用线性规划的方法, 得出衡量优化的地面等待策略的系统参数, 对航班执行地面等待策略, 提出了考虑天气因素的单机场动态随机模型, 并研究了其实现方法。

关 键 词: 空中交通管制; 地面等待策略; 流量管理

中图分类号: U11

文献标识码: A

随着国民经济的飞速发展, 我国的民用航空飞行量增长很快。几个主要的大型机场, 航路以及相应的空域在飞行高峰期出现了严重的拥挤现象, 由于天气因素导致的航班延误占很大比例, 比如在北京、上海、广州等机场。这不仅增加了航班的延误, 加重了空管系统的负担, 而且造成了巨额的延迟费用的损失。当前我国的民用机场中, 交通流量分布不均衡, 北京、上海、广州占了全国的 70% 的交通量。针对世界民航拥挤的现状, 国内外众多学者对空中交通流量管理的方法进行了深入的研究。1987 年, Andreatta 和 Romann—Jacur 进行了系统的静态随机模型研究。随后, Rifkn, Ball 和 Hoffman, 分别针对单机场地面等待问题的静态随机模型进行详细的研究。Richetta—Odoni 在 1993 年提出了静态随机模型。Anderetta 和 Brunetta 对多机场地面等待问题进行了研究, 并建立了启发式方程。国内的地面等模型研究才刚起步。本文针对天气不确定下的单一机场问题, 建立一个动态随机的数学模型。

1 目标函数

以往的模型研究工作, 总的来说是集中在地面和空中延迟的损耗。

$$\min \sum_{f \in F} C_g(\text{航班 } f \text{ 的地面等待时间}) + C_a(\text{航班}$$

f 的空中等待时间), f 是航班, F 是所有航班的集合, $C_g(\cdot)$ 是地面等待损耗函数, $C_a(\cdot)$ 是空中等待损耗函数。虽然在这里损耗函数是变量, 但是通常认为空中损耗高于地面损耗。本模型的目的是寻找地面和空中延迟的最小量。

除了延迟的损耗, 同样需要关注基于总延迟的航班价值的损失。长时间的延迟导致旅客的不满, 并且航空公司运作上出现问题。因此, 总延迟是和空中、地面延迟密切相关。总延迟值可以通过模拟总延迟的效用函数来衡量。

图 1 显示的总延迟效用函数出自 Boeing 公司的 Berge-M 和 Hopperstad-C。可以看出, 短时间的延迟并不影响航班价值, 但是, 当延迟时间增加时, 航班价值的减少就大幅增加。最终, 经过一个门限值, 航班价值变为 0。这个 S 型的曲线很适合这个效用函数。图 1 中, 假设当延迟为 2 小时时航班有 50% 的价值, 当延迟为 4 小时时航班的价值降为 0。

本模型的目标函数包括航班的效用以及地面、空中的延迟损耗。目标函数的目的是为了减少延迟损耗的同时也减少系统的总延迟。目的是最大化系统的预期价值, 就是价值。计算得到的预期效用 U , 减去每架航班的预期的地面和空中延迟损耗 (C_g , C_a)。目标函数: $\max \sum_{f \in F} V(f)$ 。

收稿日期: 2006—04—19

作者简介: 褚芳芳 (1980—), 女, 陕西西安人, 西北工业大学航空学院研究生, 研究方向: 交通运输规划与管理。

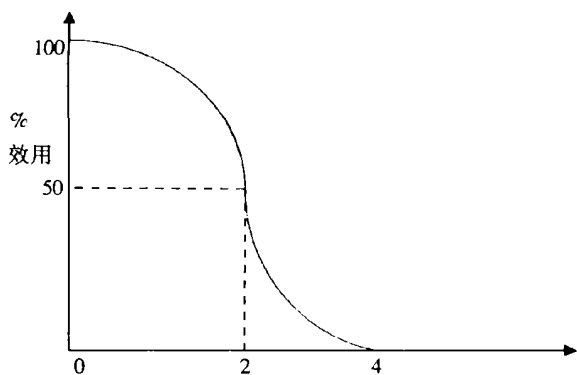


图 1 总延迟效用函数

$V(f) = U(\text{航班 } f \text{ 的总延迟}) - (C_g(\text{航班 } f \text{ 的地面延迟}) + C_a(\text{航班 } f \text{ 的空中延迟}))$.

S 型有效函数, $U(d)$, 如下:

$$U(d) = \exp^{-d^2/0.22} \quad (1)$$

其中, d 是航班的实际到达时间和原始计划时间之差.

2 随机模型

随机模型的时间范围为 $[0, \dots, L]$, 航班都降落在机场 Z . 将一天的时间分为有限个相等的时间段, $t=1, \dots, T$. 在时间段 t 内到达机场 Z 的航班数是 N_t . 航班在时间段 $[0, \dots, L]$ 内到达机场 Z 的总数是 N_{total} , 则 $\sum_{t=1}^T N_t = \sum_{t=1}^T N_t N_{\text{total}}$.

在随机模型中, 将天气的不确定转化为一个个随机变化的容量情景, 下面用公式表达这个随机过程. 假设所有的天气情景的发生概率是已知的. 设 Q 为不同的情景数量. 每个情景对应不同时间段的容量情况. 设 M_{qt} 为在情景 q 下, 时间段 t 内的容量, 其中 $q=1, \dots, Q, t=1, \dots, T$. 设 M_i 为时间段 $i=1, \dots, T$ 的机场容量. 为了使航班尽量在计划时间内到达, 这里定义一个附加时间段 $T+1$, 有 $M_{T+1} = N_{\text{total}}$. 概率 P_q , 代表每个天气情景的发生概率. 设 X_{ij} 为航班初始计划在时间段 i 到达, 但经过重新计划在时间段 j 到达的航班数, 其中 $i=1, \dots, T, i \leq j \leq T+1$. 并且 $\sum_{j=1}^{T+1} X_{ij} = N_i$. 定义 Ω_{qijk} 为容量情景 q 下, 原本在时间段 i 计划到达航班数, 重新计划在时间段 j 到达, 实际是在时间段 k 到达的航班数. 因此, $\sum_{k=j}^{T+1} \Omega_{qijk} = X_{ij}$, 对于所有的 i , 且 $j \geq i$ 在 q 下. S_{qi} 代表时间段 i, q 下的没有使用的容量.

本随机目标函数最大化了系统的期望价值,

$$\max_{q=1}^Q P_q \left(\sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^{T+1} \sum_{k=1}^{T+1} \Omega_{qijk} [U(k-i) - C_a(k-j) - C_g(j-i)] \right) \quad (1)$$

符合以下的限制条件:

$$\sum_{j=1}^{T+1} X_{ij} = N_i \quad i=1, \dots, T \quad (3)$$

$$S_{qk} + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \Omega_{qijk} = M_{qk} \quad k=1, \dots, T+1, q=1, \dots, Q \quad (4)$$

$$X_{ij} = \sum_{k=1}^{T+1} \Omega_{qijk} \quad i=1, \dots, T, i \leq j \leq T+1, q=1, \dots, Q \quad (5)$$

$$X_{ij}, S_{qk}, \Omega_{qijk} \geq 0 \quad i=1, \dots, T, i \leq j \leq k \leq T+1, q=1, \dots, Q \quad (6)$$

条件(3)确保每个航班都可以重新进行计划. 条件(4)指在时间段 k 内到达的航班数少于或等于这一时刻的容量. 条件(5)确保每架航班都能着陆. 条件(6)确保航班重新计划的数量, 未使用的容量, 以及航班真实到达数都是非零的.

3 模型分析

本模型的最优化方程为: $\max_{q=1}^Q P_q \left(\sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^{T+1} \sum_{k=1}^{T+1} \Omega_{qijk} [U(k-i) - C_a(k-j) - C_g(j-i)] \right)$ 其中 $U(d) = \exp^{-d^2/0.22}$, 航班计划在时间段 i 到达, 实际在时间段 k 到达, $(k-i)$ 指航班的实际到达时间于计划到达时间之差, $U(k-i)$ 是航班 f 的有效价值. 由于 Q 是一个有限的数, 根据我国民航发展的实际情况, 在这里我们取 Q 较小, 所以本模型通过一个线性函数或者一个二次函数来接近 S 型曲线函数. 这样就可以把一个随机程序转换为确定型等式进行计算. 时间段为从早上 8 点到午夜 12 点, 分成 16 个 15 分钟的间隔. 假设机场 Z 有 3 条跑道, 根据数据可以得出每 15 分钟 30 架次的起落. 结合我国民航系统的实际情况, 在这里假设有 5 种天气情景: 良好天气情况, 发生时间较晚的风雪天气, 剧烈风雪天气, 一天的中期发生的风雪天气, 无法预测的风雪天气. 每个天气情景对应应有 3 种容量情景 ($Q=3$), $M_{qt}, q=1, \dots, Q, t=1, \dots, T$. 根据 S 型曲线的特点, 我们使用一个简单的效用函数, $U(\text{总延迟}) = 100 - 25 * (\text{总延迟})$, 这表示经过 2 个小时延迟的航班效用为 50%. 一般定义的地面和空中延迟的损耗比例为 $C_g(\text{地面延迟})/C_a(\text{空中延迟}) = 1/4$. 我们需要解决随机线性最优化问题, 找到 X_{ij}^* 最

优航班价值,其中 X_{ij}^* 是计划在时间段 i 到达,却经过重新计划在时间段 j 到达的航班数. Ω_{qijk}^* 指在情景 q 下, $(k-j)$ 是空中延迟的空中延迟总和.可以使用线性规划的方法进行计算.在确定型模型中,目标函数为 $\max \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^{T+1} \sum_{k=j}^{T+1} \Omega_{ijk}^* [U(k-i) - C_a(k-j) - C_g(j-i)]$.确定性模型假设天气情况是确定的,只笼统的考虑航班的效用函数,空中和地面延迟,模型相对简单.

4 结束语

本模型利用地面等待策略,在线性规划基础上,将容量的不确定性转化为一个个容量情景,但本文只是提出了一种考虑天气不确定的一种随机模型,对算法进行了研究分析,还需要进行进一步的实际数据的仿真计算.考虑到我国民航的实际情况,大部分的航班延误是由天气情况导致的,北京,上海等流量大的机场在夏季雷雨季节几乎天天都

有航班延误,严重影响空中交通,所以将天气情况的不确定考虑进模型中是十分必要的,本模型具有一些实用价值.

参考文献:

[1] Richetta O and Odoni A R. Dynamic Solution to the Ground Holding Problem in Air Traffic Control[M]. Transportation Research-A. 1994.

[2] 胡明华, 钱爱东. 空中交通流量控制系统的建模研究[J]. 江苏航空, 1999; 3-4.

[3] 甘应爱. 运筹学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1990.

[4] Ball M. O, R. Hoffman, A. Odoni, R. Rifkin, A Stochastic Integer Program with Dual Network Structure and Its Application to the Groud-Holding Problem, Operations Research, 2003, 51

[5] Berge M and Hopperstad C, The Boeing Company, Personal Communication, 2002

[6] Ball M, Hoffman R, and Vossen T, Analysis of Demand Uncertainty Effects in Ground Delay [Z]. Programs, University of Maryland R. H. Smith School Working Paper.

Analyses of Single Airport Dynamic Stochastic Model with Weather Uncertainty

CHU Fang-fang, BAI Cun-ru

(College of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Aiming at the single airborne grounding-hold problem, and according to real instance of civil aviation in our country, the weather uncertainty was considered in the model. The value of flight and airborne grounding-hold cost were input. With linear programming, the optimized airborne grounding-hold parameters were combined. The analyses of model were calculated, which validated the practicability of the system.

Key words: air traffic control; ground delay decision; flow management