

单机场地面等待问题中的参数设置^{*}

王来军, 史忠科

(西北工业大学 自动化学院, 陕西 西安 710072)

摘 要:近年来,空中交通拥挤现象时有发生,使得流量管理备受瞩目。本文针对空中交通流量管理中的一类单机场地面等待问题,建立了相应的优化数学模型;对该模型进行了仿真验证;基于仿真结果,对模型中的关键参数作了详细的分析讨论,得到了相关参数的物理意义和数学关系式。

关键词:流量管理;地面等待;离散事件系统;地空延迟费用比

中图分类号: V355 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2005)01-0018-04

航空业的迅速发展,有限空间内运行的航空器数量急剧增加,而航空设施如机场等以及管制手段相对发展缓慢,导致了空中交通中拥挤的频繁发生。在流量管理问题的研究中,有一种行之有效的策略——地面等待^[1],就是当预测到拥挤将发生时,尽量将航班在目的地的空中等待转化为在起始地的地面等待的方法。相对于空中等待,地面等待有安全、节约的优点,而且可以避免出现在目的机场上空的由于多架航班同时盘旋而产生的“不可控制”现象。根据所关联的关键机场的数量多少,地面等待问题(GHP)可分为单机场地面等待问题(SGHP)和多机场地面等待问题(MGHP)两类。对于单机场地面等待问题,通常可采用数学规划方法或采用离散事件系统方法^[2~4],其中建立的离散事件系统模型简单易行且能够得到各航班具体的等待时间长度。本文在文献[4]所建模型的基础之上,进一步对其中的相关关键参数进行分析讨论。

1 模型描述

首先,假定机场容量为不确定,并航班在两机场之间的飞行时间保持不变。

给定航班序列 f_1, f_2, \dots, f_N , 设 $A_1 < A_2 < \dots < A_N$ 为对应的航班时刻表到场时刻; $A_1^*, A_2^*, \dots, A_N^*$ 为航班序列中航班分别进行地面等待 g_1, g_2, \dots, g_N 后的到场时刻,对应的在样本 q 中的空中等待分别为 $a_1^q, a_2^q, \dots, a_N^q$ 。这里, g_1, g_2, \dots, g_N 即为模型的决策变量, $a_1^q, a_2^q, \dots, a_N^q$ 为辅助决策变量。

根据系统特性,易得到 $a_i^q = \max\{0, L_{i-1}^{E,q} - A_i^*\}$, 其中 $L_i^{E,q} = L_i^{B,q} + Z_i^q(L_i^{B,q})$ 表示第 i 架航班完全降落的时刻,表示第 $L_i^{B,q} = \max\{0, L_{i-1}^{A_i^*,E,q}\}$ 架航班开始降落的时刻;航班在两机场之间的飞行时间保持不变,所以 $A_i^* = A_i + g_i$; 第一架航班无须地面等待和空中延迟,故有: $g_1 = a_1^q = 0$, 同时可令: $A_1^* = A_1 = 0$; 初始条件 $L_0^{E,q} = 0$ 始终成立。参照文献[4],以总的延迟费用为目标函数,容易得到问题的优化模型如下:

$$\min \sum_{i=1}^N c_i^g g_i + \sum_{q=1}^Q p_q c_i^a \sum_{i=1}^N a_i^q \quad (1)$$

式中,地面等待单位时段费用 c_i^g 和空中等待单位时段费用 c_i^a 认为是已知的。航班时刻表到场时刻 $A_1 < A_2 < \dots < A_N$ 作为系统输入也已知,降落所消耗时间 $Z_i^q(y)$ 和样本 q 的发生概率 p_q 可在系统优化运算前设置。

2 参数设置

利用遗传算法,我们对白云国际机场某天的到场采用模型(1)进行优化,得到了较理想的结果。仿真结

* 收稿日期: 2004-09-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60134010)

作者简介: 王来军(1976-),男,陕西兴平人,博士生,主要从事空中交通管理方面的研究;

史忠科(1956-),男,陕西岐山人,教授,博士生导师,主要从事控制理论、控制工程等方面的研究。

果表明,前面的数学模型中,相关参数的选取不仅直接影响模型求解的结果,而且具有一定的实际物理意义。下面,就具体对模型中的关键参数进行分析讨论。

2.1 c_p^s, c_t^a 的物理意义和对优化问题求解的影响

如果希望航班的空中延迟等待尽可能地少一些,则我们可以对所有的航班取 c_t^a 远大于 c_p^s , 这样以来,如果分配给某航班空中盘旋延迟等待一个时段,则目标函数的值将会增加很多,即相当于给目标函数增加了一个很大的惩罚,因此优化后的结果会尽可能的减少空中盘旋延迟等待,这正是问题求解所期望的结果。反之,如果没有这方面的要求,则一般取 $c_t^a: c_p^s = 3: 1$ 。

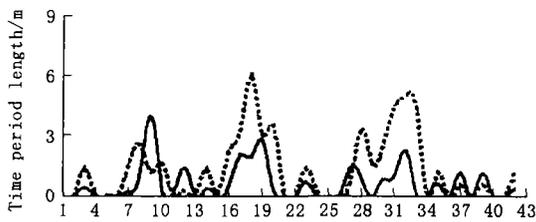
进一步地, c_p^s, c_t^a 还表示了机型偏好。对不同的机型(大型 L、中型 M、小型 S),如果各自对应的 c_p^s, c_t^a 取值分别相等,其物理意义就是对航班型号不加区别,总认为它们对延迟费用产生一样的影响,进而延迟会在各种型号的航班当中按古典概型随机分布。反之,如果大型 L、中型 M、小型 S 航班的 c_p^s, c_t^a 依次减少,表示延迟相等的时段,对于大型航班惩罚将是最为严厉的,中型航班次之,小型航班惩罚最轻。实际中多是这种情况,其结果将是小型航班最有可能分配到较多的延迟(无论是地面等待还是空中延迟)。

令 $\alpha = c_p^s / c_t^a$, 则根据问题的实际物理意义可知一般有 $\alpha > 1$ 成立。但 α 可否小于或等于 1 呢? 此时,会有什么结果且代表什么含义呢? 下面,我们将基于仿真结果,给出 α 的变化对实际问题的求解产生的影响。针对 12:00-14:00 白云机场的到场优化,我们得到该时区内所有航班地面等待大小 D 关于参数的变化情况,具体优化结果和相关图形见图 1 和表 1(I: 地面等待时间设计总量; II: 空中延迟时间加权估计; III: 优化后空地总延迟费用; IV: 未优化时空中延迟费用)。

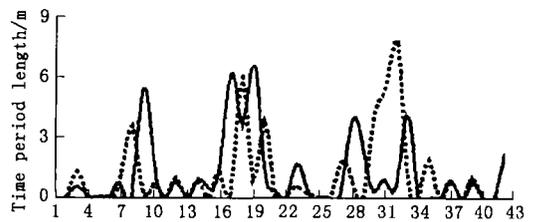
由表 1 容易看出,当 α 增大时,则航班的地面等待相对增加同时空中延迟相对减少,即部分空中延迟转化为地面等待。具体地,由 α 的变化引起的地面等待和空中延迟的变化情况如图 1 所示。图 1 纵坐标表示延迟时段的大小,横坐标表示航班的班次;实线代表地面等待;虚线表示空中延迟。

表 1 不同空地延迟费用比下的优化结果对比

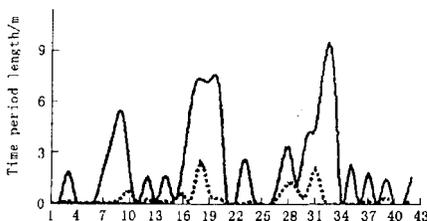
$\alpha = c_p^s / c_t^a$	I	II	III	IV
2: 3	5 8	64 4	146 1	140 4
2: 2	32 8	38 3	141 9	140 4
3: 2	68 4	13 7	177 9	210 5
6: 2	84 6	6 9	210 6	421 1
12: 2	96 7	3 1	230 2	842 2



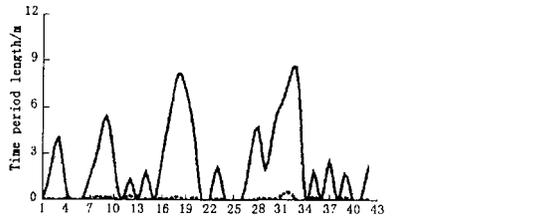
(a) 2:3 时地面等待和空中延迟



(b) 2:2 时地面等待和空中延迟



(c) 6:3 时地面等待和空中延迟



(d) 12:2 时地面等待和空中延迟

图 1 空地延迟费用曲线对比图

根据图 1, 当 $\alpha < 1$ 时, 表明地面等待费用高于空中延迟, 所以根本没有必要进行地面等待; 当 $\alpha = 1$ 时, 表明地面等待同空中延迟费用相当, 所以两者发生的量不相上下; 当 $\alpha > 1$ 时, 表明地面等待费用低于空中延迟费用, 所以地面等待将替换部分空中延迟而占优势; 进一步地, 当 α 继续增大时, 表明地面等待费用大大低于空中延迟费用, 所以地面等待将替换大部分空中延迟而占绝对优势。比如, 将 α 设置为 12: 2 则优化结果中的空中延迟几乎消失。

总之, α 较大时, 空中延迟将大量被地面等待所代替, 也就是说, 此时的地面等待策略是保守和悲观的。相反地, 当 α 趋近于 1 时, 则表明空中延迟和地面等待的耗费近似相等, 从而不必要进行大量的地面等待, 此

时的地面等待策略称为是积极和乐观的。

2.2 $Q \in Z_+, p_q \in [0, 1]$ 的物理意义和对优化问题求解的影响

这两个参数体现了问题随机性的严重程度并直接影响到问题的复杂度。作为目标机场可选的容量样本的总的数量大小, Q 表示机场容量的发生范围, 如果 Q 取值较大, 虽然能更为精确地将实际情况表示出来, 但是这也表示机场容量的随机性较强, 同时由目标函数的表达式可知优化问题维数也将大幅增加, 从而求解复杂度变大。一般地, 我们取 $Q=3$, 用以分别表示机场容量情况的好、一般、差三种情形。 p_q 表示样本 q 发生的概率, 即机场容量各个情况的发生的可能性大小, 如果预测到机场容量在某时段很可能十分稳定且比较大, 则我们可以将表示此情况的样本的发生概率取一个较大的常值, 同时表示其它情况的样本的发生概率取较小的值(可以是常值, 也可以是关于时间的表达式)。

2.3 参数 α 和 p_q 的数学关系

上面, 我们通过实例以及计算得到的图形直观地分析了 α, p_q 的物理意义和对问题求解的影响。那么, 总的延迟费用到底同 α 和 p_q 有什么样的数学关系呢?

针对两个不同的样本(两者对应的机场到场率不同), 当第一个的空中延迟恰好完全转换为地面等待时, 如果对第二个仍采用相同的到场时间安排(或者说相同的地面等待), 则并很可能无法将所有空中延迟转换为地面等待, 即仍有航班排队等待降落。那么, 采用不同的地面等待, 整体效果是否会好一些呢? 这一点自然依赖于两个参数: 样本的发生概率 p_q 和地空延迟费用比 α 。

以发生概率为权系数的航班延迟费用的加权平均作为航班的总延迟费用的度量。假定共有 N 架航班要求在时段 T 内降落到目标机场内。简单起见, 我们假设机场容量样本数量为 2 其中样本 1 表示为 q_1 , 样本 2 表示为 q_2 。不妨认为 q_1 对应的平均机场容量大于 q_2 对应的平均机场容量, 即 q_2 对应的机场到场率相对于 q_1 有所缩减。对应于 q_1 , 令 p_1 为样本发生概率, G'_1, G'_2, \dots, G'_N 为使得航班不进行空中延迟的最小地面等待序列, \tilde{G} 为平均地面等待大小; 对应于 q_2 , 令 p_2 为样本发生概率, $G''_1, G''_2, \dots, G''_N$ 为使得航班不进行空中延迟的最小地面等待序列, \tilde{G}'' 为平均地面等待大小。显然, $\tilde{G}' \leq \tilde{G}''$ 且 $\forall i \in Z, 1 \leq i \leq N$ 满足: $G'_i \leq G''_i$ 。现在, 我们证明航班延迟费用的加权平均同且仅同样本的发生概率和空地延迟费用比有关。

假设最终采用的地面等待序列为: G_1, G_2, \dots, G_N , 平均地面等待大小为 \tilde{G} 。而且, 该等待序列还满足: $\tilde{G}' \leq \tilde{G} \leq \tilde{G}''$ 及 $\forall i \in Z, 1 \leq i \leq N$, 则: $G'_i \leq \tilde{G} \leq G''_i$ 进而当 q_1 发生时, 航班空中延迟与地面等待的加权平均(权重依据是空地延迟费用比)可表示为 $W' = (\tilde{G}c_g + \tilde{A}_1c_a) \wedge (c_g + c_a)$ 。其中 \tilde{A}_1 为非负实数, 表示 q_1 发生时航班平均进行的空中延迟, 当 G_1, G_2, \dots, G_N 给定时 \tilde{A}_1 就是一个确定的常数。应该注意, 虽然 $\tilde{G}' \leq \tilde{G}$ 但这决不意味航班就不进行空中延迟。易知, \tilde{A}_1 理论上的最大取值为 $(\tilde{G} - \tilde{G}')$, 最小取值为 0。

当 q_2 发生时, 用 \tilde{A}_2 表示航班平均进行的空中延迟, 则航班空中延迟与地面等待的加权平均可表示为 $W'' = (\tilde{G}c_g + \tilde{A}_2c_a) \wedge (c_g + c_a) = (\tilde{G}c_g + (\tilde{G}'' - \tilde{G})c_a) \wedge (c_g + c_a)$ 。由此可知, 航班延迟费用的加权平均为 $W = p_1W' + p_2W'' = \frac{\tilde{G}c_g p_1 + \tilde{A}_1 c_a p_1}{c_g + c_a} + \frac{\tilde{G}c_g p_2 + (\tilde{G}'' - \tilde{G})c_a p_2}{c_g + c_a} = \frac{\tilde{G}c_g (p_1 + p_2) + (\tilde{A}_1 p_1 + (\tilde{G}'' - \tilde{G})p_2)c_a}{c_g + c_a}$ 。令 $\alpha = \frac{c_g}{c_g + c_a}$ 为航班的空地延迟费用比, 则 $W = (\tilde{G}c_g + (\tilde{A}_1 p_1 + (\tilde{G}'' - \tilde{G})p_2)c_a) \wedge (c_g + c_a) = (\tilde{G} + (\tilde{A}_1 p_1 + (\tilde{G}'' - \tilde{G})p_2)\alpha) \wedge (1 + \alpha)$ 。所以, 当给定一个地面等待的分配策略时, 航班延迟费用的加权平均同且仅同样本的发生概率和空地延迟费用比有关。对于存在多样本的情形, 应该有类似的结果, 限于篇幅, 这里不再赘述。

上式还可以改造为 $W = (\tilde{G} + (\tilde{A}_1 p_1 + (\tilde{G}'' - \tilde{G})p_2)\alpha) \wedge (1 + \alpha) = (\tilde{G}(1 - p_2\alpha) + \tilde{A}_1 p_1 \alpha + \tilde{G}'' p_2 \alpha) \wedge (1 + \alpha)$ 。

当 $p_2\alpha > 1$ 时, $\tilde{G}(1 - p_2\alpha)$ 随着 \tilde{G} 的增加而变小且在 $\tilde{G} = \tilde{G}''$ 时达到最小值, 此时 \tilde{A}_1 同时也取最小值 0 所以 W 得到最小值 $W_{\min} = (\tilde{G}''(1 - p_2\alpha) + 0p_1\alpha + 0p_2\alpha) \wedge (1 + \alpha) = (\tilde{G}'') \wedge (1 + \alpha)$ 。

当 $p_2\alpha < 1$ 时, $\tilde{G}(1 - p_2\alpha)$ 随着 \tilde{G} 的增加而变大, 故在 $\tilde{G} = \tilde{G}'$ 时达到最小值, 此时 \tilde{A}_1 同时也取最小值 0 所以 W 得到最小值 $W_{\min} = (\tilde{G}'(1 - p_2\alpha) + 0p_1\alpha + \tilde{G}'' p_2 \alpha) \wedge (1 + \alpha) = (\tilde{G}' + (\tilde{G}'' - \tilde{G}')p_2\alpha) \wedge (1 + \alpha)$ 。

由此我们得到如下结论: 对满足上述一系列条件的地面等待问题, 当 $p_2 \alpha < 1$ 时, 采用机场容量较大情形下样本对应的使得航班不进行空中延迟的最小地面等待序列, 可获得最小延迟费用; 当 $p_2 \alpha > 1$ 时, 采用机场容量较小情形下样本对应的使得航班不进行空中延迟的最小地面等待序列, 可获得最小延迟费用。

3 结束语

针对当前空中交通日益繁忙的现状, 本文给出了一类空中交通流量管理模型, 并对其进行了求解的仿真验证。验证结果表明了模型的有效性, 基于此, 本文进一步重点讨论分析了模型的关键参数对问题求解的影响, 并给出了相关的数学关系式。本文的研究结果对求解空中交通流量管理问题有一定应用参考价值。

参考文献:

- [1] Andreatta G. Aircraft Flow Management Under Congestion [J]. Transportation Science 1987(21): 249 - 253.
- [2] Hoffman R Ball M. A Comparison of Formulations for the Single - Airport Ground Holding Problem with Banking Constraints [R]. TR 98 - 44 1997.
- [3] Antonio Alonso S. Laureano F. Escudero María Teresa Ortu. A Stochastic 0 - 1 Program Based Approach for the Air Traffic Flow Management Problem [J]. European Journal of Operational Research 2000 120: 47 - 62.
- [4] Wang Laijun Shi Zhongke. A Discrete Event System Approach for Solving the Ground Holding Problem [J]. Journal of System Simulation 2004 16(10): 2270 - 2273.

(编辑: 姚树峰)

The Study of Parameter - Step for Solving a Type of ATFM Model

WANG Lai - jun SHI Zhong - ke

(School of Automation, Northwestern Polytechnical University Xi'an, Shaanxi 710072, China)

Abstract Congestion in air traffic raises safety concerns and causes excessive costs, so ATFM is a focus of world's attention now. Mathematical model is built for solving a type of ground holding problem that belongs to ATFM first. Then a simulation is performed and the result shows that the model is logical and feasible. Based on the simulation result, some researches on the parameters of the model are carried out.

Key words flow management; ground holding problem; discrete event system; ratio of the cost of ground - holding to air - delay