

空中交通流量管理中的改航策略研究

田 勇¹, 宋 柯², 顾英豪¹

(1. 南京航空航天大学 民航学院, 南京 210016)
(2. 中国民航总局空管局 航行情报服务中心, 北京 100021)

摘要: 针对在恶劣天气下出现的大规模航班延误情况,根据机场和航路段的动态容量约束,建立了改航策略模型,并提出求解该模型的有效算法.选择全国航班时刻表进行仿真,仿真结果表明:该模型提供了在恶劣天气下更安全、更经济的航班改航策略,可为战术级流量管理提供辅助决策.

关键词: 改航;流量管理;地面等待;动态网络

0 引言

80年代末期以来,随着航空运输业的迅速发展,世界各国的空中交通系统面临着越来越严重的交通拥塞,空域资源日趋紧张.当恶劣天气导致机场、空域容量急剧降低时,初期的战术流量管理只是让航班被动地作地面等待,直到预定航路所经过的空域恢复容量才能放行.国内外学者关于地面等待已经开展了大量的研究.1990年,Stephan E. Kolitz和Mostafa Terrab完整地 对单机场地面等待问题进行了研究^[1],1994年 Varnas P B M, Bertsimas D和 Odoni A R研究了多机场动态地面等待问题^[2],1995年,Domitris Bertsimas和 Sarah Stock Patterson又把受限元扩展到航路上,使地面等待理论更趋于完善^[3].在美国,地面等待策略已用于实际的空中交通流量管理并取得了较好的效果.1995年胡明华、陈爱民根据国内空域的实际情况建立了单机场等待策略问题的模型,1997年胡明华、钱爱东对多机场等待策略问题的建模和求解进行了研究^[4-5],2006年徐肖豪和李雄对航班地面等待模型中的延误成本进行了分析与仿真^[6].然而,单纯的地面等待必然会带来严重的航班延误,并波及后续航班.若能为这些航班临时选择一条不受天气影响的航路,绕过恶劣天气影响区,以少量的空中飞行时间来换取大量的地面等待时间,不仅可以产生可观的经济效益,还能提高飞行的安全水平.1997年, Sarah Stock Patterson建立了针对改航策略的数学模型^[7],2000年 Dimitris Bertsimas采用拉格朗日松弛算法对该模型进行了求解^[8].在我国改航还未正式实施,目前只是处于研究的起步阶段.

本文提出一种多机场流量管理的宏观模型.模型采用改航策略,考虑不同机型的延误成本及对后续航班的影响,提供在恶劣天气条件下航班放行时刻、路径的最优分配方案,从而减少延误,大幅提高航空运输的经济效益,并为战术级流量管理提供辅助决策.

1 动态网络模型

改航主要考虑区域、机场、导航台和航路 4个基本元素,这些元素由一系列的节点组成,

而这些节点的错综交杂就形成了空中交通网络.如图 1所示^[7].

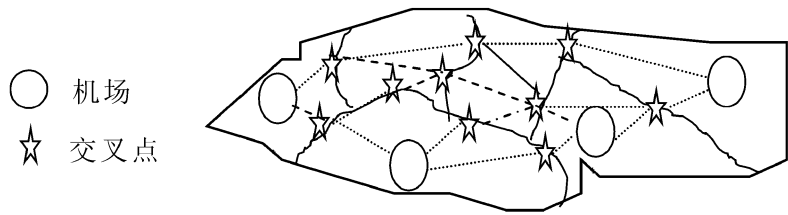


图 1 动态网络模型示意图

空中交通网络中的节点可分成 3 部分: 机场节点、导航台节点和区域移交点.两个导航台节点之间、导航台节点和区域移交点之间或者机场节点和区域移交点之间组成的一条有向边称为弧,每条弧始末两点的距离固定不变,但容量值随天气动态变化.在正常天气条件下,各段航路使用最大容量值.而当天气发生变化时,各段航路的容量值都是一个随时间 t 变化而变化的动态值,当航段上的容量值降为 0 时,该航路便可视作不再存在.所以,两点间的连通、断开状态也是一个动态值.这样的网络便称为动态网络.

机场节点是航班流的起始点和终止点,在每个时段内对起飞和降落都有容量限制.当机场容量饱和的情况下,进场或离场飞机只能做空中等待或地面等待.对于机场可构建如图 2 所示模型.任何一个机场 i 可由 5 个节点构成,如图 2 中的 i_A i_B i_C i_D i_E ; 所有到达机场 i 的航班流首先达到节点 i_A , 如果当时机场容量饱和,则该航班只能在 i_A 做空中等待, i_A 上的自环弧表示一单位时间的空中等待.如果可以降落,已完成当天所有任务,无后续航班的飞机从 i_B 点退出网络,而有后续航班的飞机则要到达 i_C 点进行必要的机场周转(如加油、检修、上客等), i_C 点的自环弧便表示这些周转时间.做好下次飞行的准备之后,这些后续航班再流向 i_D 点,准备起飞.到达 i_D 点的飞机还包括一部分从 i_E 点流出的的当天第一次起飞的其他航班.所有到达 i_D 点的飞机,都在 i_D 点按航班优先级排序,如果容量允许,优先级高的航班便优先起飞,优先级靠后的航班如果空域资源不足,则只能在 i_D 点做地面等待. i_D 点得自环弧便表示一个单位时间的地面等待.从机场节点 i_D 出发的航班通过航路到达导航台节点,导航台节点本身不具备任何容量,也就是说飞机不允许在导航台上空停留.

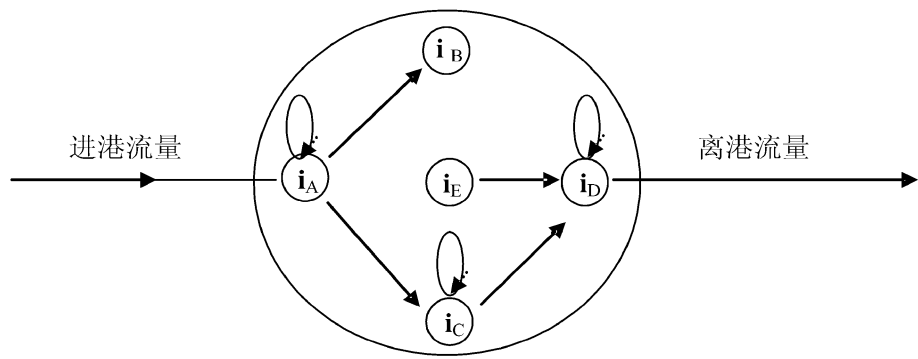


图 2 机场模型示意图

2 改航策略

2.1 问题的提出

为了解决动态网络中的改航策略问题,先作如下假设:

1) 在指定网络 N 内包含 S 个区域和 M 个机场 R 条航段,则整个网络中的容量限制单元有 $(S + M + R)$ 个;

2) 将时间间隔 $[T_s, T_e]$ 等分成 m 个时间段 $T_1, T_2, T_3, \dots, T_m$. 各单元对应的容量估计值随天气情况动态变化,但在每个时间段内为一确定值;

3) 有 n 架航班从起飞机场起飞,并预计在时间段 $[T_s, T_e]$ 内发生如下几种情况,即: 从网络 N 内的起飞机场 $dep(k)$ 起飞,在网络 N 内的目的机场 $arr(k)$ 降落,以及从网络 N 内的机场上空飞越;

4) 记航班集合 F , 后续航班集合 C , 为每个后续航班分配了一个确定的前继任务而不是一架确定的前继航班. 从而,对每个后续航班 $f \in C$, 定义航班 f 的任务为 $k(f)$, 同时指定航班 $f \in C$ 相应的前继航班任务为 $k'(f)$. 因此只需确保每一个后续航班 $f \in C$ 必须有属于任务 $k'(f)$ 的飞机为之所用,而不是强制航班 $f \in C$ 必须为航班 f 的后续航班;

5) 记机型集合 L , 假设机型 $(l \in L)$ 相同的航班地面延误和空中延误成本函数相同,而不考虑所属不同公司及载客人数的差异.

动态网络中的改航策略问题即为: 对于指定网络 N , 在满足各空域单元容量限制的条件下,在满足空中交通管制的规则和实际情况的合理性要求下,求出每个航班在恶劣天气条件下最优放行时刻和最优改航路径,使得地面等待和改航的延误损失总和最小.

2.2 目标函数

定义网络的运输任务 k 为一个起飞机场和目的机场对之间所有航班飞行, $x_{i,j,l}^k(t)$ 为属于任务 k 的在 t 时刻从节点 i 出发,在 $t + t_{i,j}$ 时到达节点 j 机型为 l 的航班数, d_l^g 为机型为 l 的航班在地面延误的单位成本函数, d_l^T 为机型为 l 的航班在空中飞行的单位成本函数, $Time_l$ 为所有机型为 l 的航班计划飞行的时间总和.

在恶劣天气下,航班可能由于地面等待,或是空中减速,或是选择了一条比预计航路长的航路而延误.此外一个后续航班也可能因为在预计起飞时间没有飞机可用而延误.类似地,定义:

1) 由在起飞机场地面等待引起的损失为:

$$C^g = \sum_{\{k, t, i = dep(k), l \in L\}} d_l^g x_{i, D, i, l}^k(t) \quad (1)$$

2) 后续航班因无飞机可用而产生的延误损失;

$$C^f = \sum_{\{(k, t, f): f \in C, k(f) = k\}} (t - d_f) y_f(t) \quad (2)$$

其中 d_f 为航班 f 的计划离场时间, $y_f(t)$ 为针对后续航班引入的发散航班变量

$$y_f(t) = \begin{cases} 1, & \text{执行航班 } f \in C \text{ 的飞机能够在时间 } t \in T_f \text{ 起飞} \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

3) 沿原航路飞行时由于减速而引起的延误损失

$$C^T = \sum_{\{k, i, t, l \in L\}} d_l^T x_{i, i, l}^k(t) \quad (3)$$

4) 飞行速度不变时,由于改航导致空中飞行时间增加而引起的延误损失,等于空中飞

行总的实际费用减去所有空中飞行的预计费用。

$$C^R = \sum_{\{k, t, (i, j) \in N(k), l \in L\}} a_{ti, j}^T x_{i, j, l}^k(t) - c^T \text{Time} \quad (4)$$

这样,改航策略问题就是在满足一定约束条件下,使动态网络中所有航班的总延误损失最小,即目标函数式为

$$\min \sum_{\{k, i, t, l \in L\}} (C^g + C^f + C^a + C^R) \quad (5)$$

2.3 约束条件

约束条件为:

1) 对于 $\forall i \in S, k, t$, 区域之间的动态流量是守恒的,即

$$\sum_{\{j \mid (i, j) \in N(k)\}} x_{i, j, l}^k(t) - \sum_{\{j \mid (j, i) \in N(k)\}} x_{j, i, l}^k(t - t_{j, i}) = 0 \quad (6)$$

2) 对于 $\forall k, t, i = \text{arr}(k)$, 机场 i 在节点 i_A 的流量守恒;

$$\sum_{\{j \mid (j, i_A) \in N(k)\}} x_{j, i_A, l}^k(t - t_{j, i_A}) - x_{i_A, i_B, l}^k(t) - x_{i_A, i_C, l}^k(t) = 0 \quad (7)$$

3) 对于 $\forall k, t, i = \text{arr}(k)$, 机场 i 在节点 i_B 的流量守恒, $Exit_k(t)$ 为任务 k 中在时间 t 从 i_B 点退出航路网络的航班数量;

$$x_{i_A, i_B, l}^k(t) + x_{i_B, i_B, l}^k(t - 1) - x_{i_B, i_B, l}^k(t) = Exit_k(t) \quad (8)$$

4) 对于 $\forall k, t, i = \text{arr}(k)$, 机场 i 在节点 i_C 的流量守恒, $r(i)$ 为在机场 i 的过站时间;

$$\sum_{\{f \in C \mid k = k'(f)\}} y_f(t) + x_{i_C, i_C, l}^k(t) - x_{i_C, i_C, l}^k(t - 1) - x_{i_A, i_C, l}^k(t - r(i)) = 0 \quad (9)$$

5) 对于 $\forall k, t, i = \text{dep}(k)$, 机场 i 在节点 i_D 的流量守恒, $Takeoff_k(t)$ 为任务 k 中计划在时间 t 从该机场起飞的航班数;

$$\sum_{\{j \mid (i_D, j) \in N(k)\}} x_{i_D, j, l}^k(t) - \sum_{\{f \in C \mid k = k(f)\}} y_f(t) - x_{i_D, i_D, l}^k(t - 1) = Takeoff_k(t) \quad (10)$$

6) 对于 $\forall i, t$, 区域内飞行的航班数不超过其容量估计值;

$$\sum_k \sum_{\{j \mid (i, j) \in N(k)\}} \sum_{\{t: t - t_{i, j} < t' \leq t\}} x_{i, j, l}^k(t') \leq C(t) \quad (11)$$

7) 对于 $\forall f \in C$, 每一个后续航班都必须在其可行时间段 T_f 内的某个时刻 i 能够起飞。

$$\sum_{i \in T_f} y_f(t) = 1 \quad (12)$$

3 模型求解

改航问题不仅要解决动态网络的最短路问题,还要规划所有航班的飞行方案,使总损失达到最小。全国航路网由于受天气影响,其连通状态随时间不断变化。在任何时刻,按传统的静态网络最短路求法所得的最短路都无法保证在下一时刻该最短路仍然连通。虽然静态网络最短路求法中可以设置高惩罚函数值来把短路状态转化为通路状态,但必须加上时间变量在其中,也就相当于动态网络的解法了。所以按一般静态网络的方法无法解决本问题。但本问题的动态网络也是有规律可言的,该网络在任意时刻的状态都是由初始网络(正常条件下)断开若干条弧得来的,即在任何时刻网络中任意两点间的最短路都要长于初始网络中该两点间的最短路。因此可采用人工智能中求解静态网络的 A^* 算法来处理本系统的动态网

络.在规划所有航班的放行方案时,要综合考虑不同航班对空域资源的占用/产出比、空管规定、各航空公司的个体利益等影响因素,确定航班的优先级,进行合理地排序.

改航策略生成算法具体流程描述如下:

Step 1 判断当前时刻 T 是否等于优化终止时刻 T_{end} , 如果相等则退出, 否则将所有 $T_k \leq T$ 的航班加入到待优化航班表中.

Step 2 将待优化航班表中的所有航班按在时刻 T 的优先级系数 P_k 降序排列.

Step 3 判断待优化航班表是否为空, 若为空, 则令 $T = T + 1$, 转入 Step 1; 否则标记待优化航班表中第一个航班为 f , 判断其起飞机场有无起飞容量, 若有, 执行 Step 4; 否则将此航班剔除, 继续执行 Step 3.

Step 4 判断航班 K 预定航段、降落机场的容量是否满足容量约束, 若满足, 则将预定飞行方案作为最优飞行方案保存到优化结果表中, 并根据飞行速度将该航路上对应时间、对应航段上的容量值减 1, 并转到 Step 3. 若否, 执行 Step 5.

Step 5 求出航班 f 在 T 时刻从起飞机场到目的机场的最短航路, 将新航路飞行时间增加所带来的空中损失折算成等价的地面等待时间 ΔT , 则该航班的最优起飞时间一定在 T 和 $T + \Delta T$ 之间.

Step 6 在 T 和 $T + \Delta T$ 之间, 以每 5 分钟为步长, 依次求出航班 f 在各时刻起飞飞往目的机场的最短路, 求出各种飞行方案空中迂回飞行成本以及地面等待成本之和. 比较得出航班 f 各种飞行方案中总损失最小的方案, 作为该航班的最优解. 将航班 f 放入优化结果表, 并将优化方案所对应时间、对应航段上的容量值减 1.

Step 7 转入 Step 3, 直至求出所有航班的最优起飞时间和飞行路径后结束.

4 仿真实例

为了验证上述模型的效率, 本文选取 2006 年 8 月 9 日全国范围的航班时刻表数据和天气数据对其进行了仿真验证. 当天有台风经过台湾海峡在广东东部登陆, 并继续向西北部内陆扩散, 持续时间从 9:00 到 21:00, 天气等级为恶劣, 云团面积为中等, 速度为 15 公里/小时. 受其影响, 被云团覆盖范围的机场和航路段容量值 100% 损失, 即降为 0. 对全天 3867 个航班, 取 30 分钟为一个时间片进行航班排序和改航路径进算, 再加载地图图层和云团图层进行仿真. 仿真界面如图 3 所示.

图 3 中以航班 MU2157 为例, 原定 16:15 从北京机场起飞, 经沙河 (CU)、青白口 (CD)、G212 南城子 (KR)、B458 魏县 (WXI)、A461 龙口 (LKO)、R343, 2 小时 30 分钟后到南宁机场降落, 虚线代表该航班原定航路. 受台风影响, A461 魏县 - 龙口段 16:00 - 20:00 关闭, 该航班无法正常放行. 在目前的流量管理工作中, 只能让 MU2157 在北京机场作地面等待, 等 A461 魏县 - 龙口段恢复使用后再依次放行. 考虑到在这一时段北京机场会有大量航班积压等待放行, 该航班在地面等待时间至少为 3 小时 45 分钟, 甚至可能取消该航班. 本算法可为该航班临时选择了一条绕开云区的航线, 16:25 从北京机场起飞, 经西柳河屯 (WF)、石各庄 (VM)、泊头 (BTO)、H2 骆岗、R343, 2 小时 45 分钟后到南宁机场降落. 图中粗实线代表该航班改航后的航线, 10 分钟的地面等待延误加上 15 分钟的改航延误, 该航班的总延误为 25 分钟.

根据采集的实际飞行计划统计, 当天未能实施改航策略, 全天 232 个航班取消, 952 个航

当前时刻: 19: 45 当前飞行航班总数: 164 架 已完成飞行航班总数 1659 架

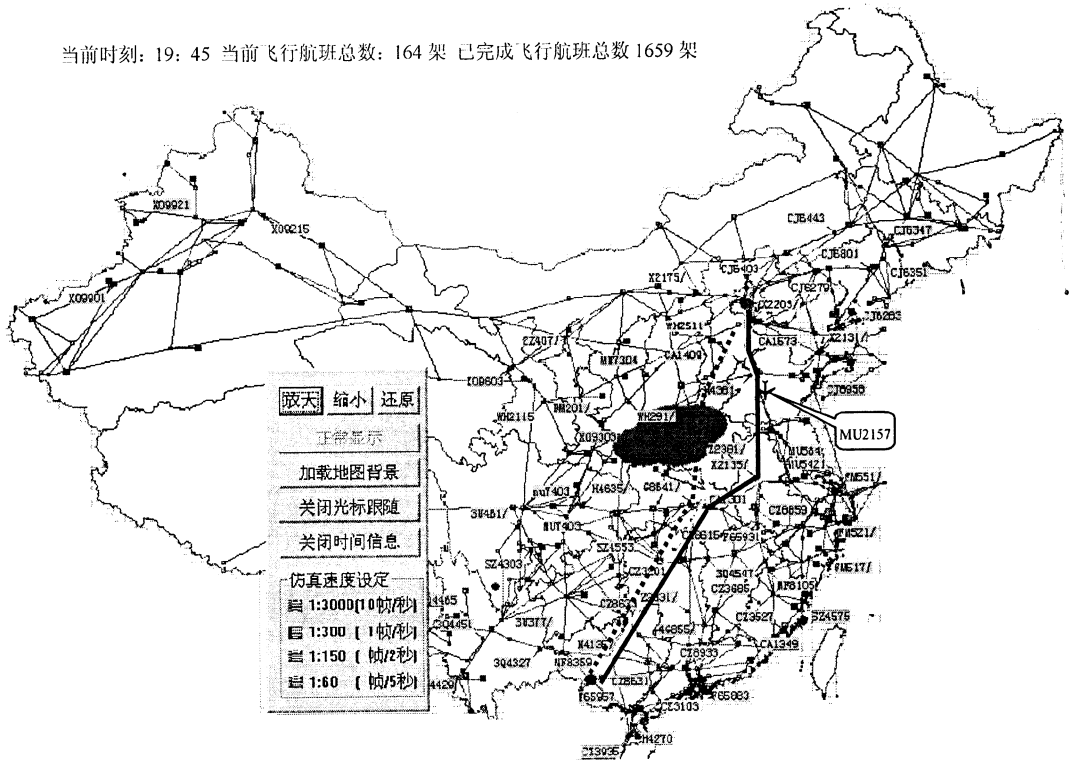


图 3 改航策略仿真示意图

班延误,地面等待总延误时间为 85680分钟,经济损失之大难以估量.仿真表明,采取改航策略后,全天航班的地面等待总延误时间为 13190分钟,航路变更的航班共 226架次,约占总航班的 6%,改航增加的总飞行时间为 4825分钟,另取消航班为 22架次,本改航方案总经济损失仅为 3935739元.

5 结 论

当遭遇恶劣天气而无法使用当前航路时,空中交通流量管理改航问题能够决定如何选择新的航路以重新引导航班到达目的地.文中结合全国航班时刻表,对空域容量受限时改航策略模型进行了仿真计算.结果表明,尽管目前我国空中交通管制实际中,还没有采用改航这种灵活的措施,但改航能在恶劣天气条件下有效地为航空器选择最佳的飞行路线,从而极大地减少延误,并为战术级流量管理提供辅助决策.

参考文献:

[1] Stephan E K, Terrab M. Real-time Adaptive Aircraft Scheduling, Charles Stark Draper Laboratory [M]. Cambridge, Massachusetts, 1990. 1-80.

[2] Vranas P B M, Bertsimas D, Odoni A R. Dynamic ground-holding policies for a network of airports [J]. Transportation Science, 1994, 28(4): 257-291.

[3] Bertsimas D, Patterson S S. The air traffic flow management problem with enroute capacities [J]. Operations Research, 1998, 46(3): 406-422.

[4] 胡明华,陈爱民,徐肖豪,等.多元受限的地面等待策略问题研究 [J]. 南京航空航天大学学报, 1998, 30(1): 42-46.

- [5] 胡明华,朱晶波,田勇.多元受限的航班时刻优化模型与方法研究[J].南京航空航天大学学报,2003,35(3): 326-332.
- [6] 徐肖豪,李雄.航班地面等待模型中的延误成本分析与仿真[J].南京航空航天大学学报,2006,38(1): 115-120.
- [7] Sarah Stock Patterson. Dynamic flow management problems in air transportation[D]. Massachusetts Institute of Technology, 1997. 55-76.
- [8] Dimitris Bertsimas. The traffic management rerouting problem in air traffic control: A dynamic network flow approach[J]. Transportation Science, 2000, 34(3): 239-255.

The Research on Rerouting Problem in Air Traffic Flow Management

TIAN Yong¹, SONG Ke², GU Ying-hao¹

(1. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
Nanjing 210016, China)

(2. Aeronautical Information Services of China ATMB, CAAC, Beijing 100021, China)

Abstract According to cosmical flight delay due to weather in air traffic flow management, and the dynamic capability restriction of airports and route segments, this paper gave a rerouting policies model and proposed an effective algorithm. Data form domestic flight schedule were used to verify the model. The model provides safer and more economic flight assignments by rerouting. The model also provides the Civil Aviation Administration of China with assistance for tactical decisions.

Keywords reroute; flow management; ground-holding; dynamic network