

DOI:10.16356/j.1005-2615.2015.01.012

## 交叉口汇聚航班的航线选择方法

王莉莉 周娟 任杰

(中国民航大学空中交通管理学院,天津,300300)

**摘要:**建立了以总延误时间最小为目标的交叉口汇聚航班航线选择问题模型,为到达交叉口的每个航班从固定航线或临时航线中选择合理的一条航线飞行,并且设计了相应的启发式算法计算模型的全局最优解。最后设计了 3 种场景对航图中嘉峪关到雅布赖航线段航班数据进行算例仿真。仿真结果表明,本文模型和算法可解出多个航班最优的航线选择方案,并且产生的总延误时间最小,证明了本文方法的有效性。

**关键词:**交叉口航班;航线选择;临时航线启用;最小总延误时间;启发式算法

**中图分类号:**V355 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2015)01-0083-05

### Route Selection Method of Converging Flight at Intersection

Wang Lili, Zhou Juan, Ren Jie

(College of Air Traffic Management, Civil Aviation University of China, Tianjin, 300300, China)

**Abstract:** For minimizing the total delay time, a route selection model is set up to choose a reasonable route from fixed or temporary routes for each flight reaching the intersection. And the corresponding heuristic algorithm is introduced to calculate the global optimal solution of the model. Finally three scenarios are designed to simulate the flight data of airline between Jiayuguan and Yabulai on the map. The simulation results show that the model and the algorithm can solve the optimal multiple-flight route options, and cost the minimum total delay time, thus indicating the effectiveness of the method.

**Key words:** intersection flights; route selection; temporary route open; minimum total delay time; heuristic algorithm

目前,民航飞机主要运行在航路航线上,随着航班流量的增长,繁忙航路交叉点出现拥堵。军方主动释放空域,临时航线在不断增加,文献[1]提到“从近年军民航使用空域协调情况来看,固定航线划设越来越少,临时航线日趋增多”。因此为充分利用现有资源,促进整个航空运输网络的流畅协调运行,借鉴国外激活管道航路的思想,当某段航线交通流量大导致延误现象很严重且其附近有临时航线时,可考虑启用临时航线缓解交通拥堵,使该段航线的航班以最小的总延误时间完成飞行。

航线选择包含两个方面:从已有网络中选择航

线和启用航线。在已有网络中选择航线方面,文献[2]考虑等待点空中盘旋,从空中飞行时间最短的角度,建立了航线网络中航班最小费用流问题的数学模型。文献[3]从求解最小费用流问题的角度,建立了航线网络中求解最小费用流问题的数学模型。文献[4]用动态网络最小费用流描述的空中交通短期流量管理问题的 ST-TFMP 模型,以北京以及天津机场的空域为例,进行了航班调配的分析以及研究。文献[5]运用非智能非进化算法——Dijkstra 方法,求解起飞机场到目的地机场的最优航线,研究了航线网络中出现某些扇区堵塞或者临时

**基金项目:**国家自然科学基金委员会与中国民用航空局联合基金(61179042)资助项目;中央高校基本科研业务费(ZXH 2012L005)资助项目。

**收稿日期:**2014-05-28;**修订日期:**2014-08-08

**通信作者:**王莉莉,女,博士,教授,E-mail:llwang@cauc.edu.cn。

禁飞情况的航线选择问题。在启用航线方面,文献[6]较全面地总结了管道航路从设计到运行要解决的八大问题,其中包括在何时激活与关闭管道航路,表明周围空域发生延误时可能启用管道航路。文献[7]基于成本目标函数提出了动态航路开合问题模型,考虑了航路最小占用时间约束,以确定什么时候开启哪条航线给特定用户。文献[8]从整体运行费用角度研究关于管道航路的动态使用。文献[9]在航班等待费用和航路运行费用下寻找最合适的激活时刻,建立了最小费用下的管道航路激活问题的数学优化模型。

综上,虽启用航线可能会增加费用,但是能较大程度地减少总延误时间。同时鉴于航线交叉口处会有来自不同航线的航班汇聚,容易出现航班拥堵和延误现象,因此本文从总延误时间角度考虑启用临时航线为交叉口汇聚航班选择合理航线,让其有序进入下一段航线,如图1所示。正常情况下到达交叉口的航班需要排序,按一定间隔进入固定航线,但当航班拥堵严重时,可启用附近的临时航线,考虑到有些临时航线航程大于固定航线航程,因此航班在其上的飞行时间较大,即便进入该临时航线的航班在交叉口处等待时间小,该航班到达汇点时的延误时间也可能很大。因此以所有航班在汇点处的总延误时间最小为目标建立模型,并设计相应启发式算法进行算例仿真,验证模型和算法的可行性和有效性。

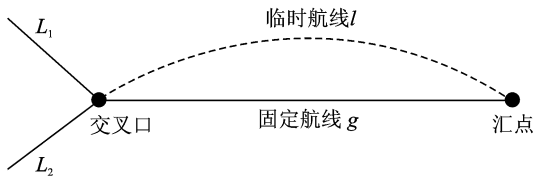


图1 航线结构图

Fig. 1 Route structure

## 1 数学模型的建立

### 1.1 问题描述

航线交叉口处会有来自不同航线的航班汇聚,容易出现航班拥堵和延误现象,需要为交叉口汇聚航班选择合理的航线,使其安全有序地进入交叉口。若某段固定航线旁边有与其起点、终点相同的临时航线,方向也与固定航线同向,该条航线的通信导航设施工作正常,天气状况也良好,此时考虑启用临时航线,使进入交叉口的所有航班按照一定规则从固定航线和临时航线中选择更合适的航线飞行,以达到总延误时间最小的目标。

### 1.2 模型假设

为建立模型提出以下假设:

(1)假设通过该段固定航线的所有航班的飞行时间是相同的,通过临时航线的所有航班的飞行时间也相同;

(2)假设固定航线和临时航线的容量是固定不变的已知值,且其流量均不超出相应的容量;

(3)雷达监控条件下的程序管制间隔只需75 km,而雷达管制间隔仅需要20 km甚至更小,文中使用安全时间间隔代替距离间隔,取雷达管制间隔20 km,换算为时间间隔约为 $\Delta t \approx 2$  min。

### 1.3 目标函数

启用临时航线后临时航线和固定航线同时运行,到达交叉口的每个航班都可从其中选择一条航线飞行,使得这组航班在汇点处的总延误时间最小。为使求得的最小总延误时间是全局最优解,从 $N$ 个航班整体角度出发。由于每个航班有两种选择, $N$ 个航班进行航线选择就有 $2^N$ 个组合,每个组合对应1个总延误时间,所有组合对应的总延误时间的最小值即为全局最优解。建立目标函数为

$$Z = \text{Min}H_N = \text{Min} \left\{ \sum_s \sum_k [y(k) \cdot (C'_{gs} - a'_{gs})] + \sum_s \sum_k [z(k) \cdot (b'_{ls} - a'_{ls})] \right\}$$

其中: $H_N$ 为来自交叉口处的 $N$ 个航班在汇点的总延误时间; $C_{gs}$ 为选择固定航线的第 $s$ 个航班实际进入固定航线的时刻; $b_{ls}$ 为选择临时航线的第 $s$ 个航班实际进入临时航线的时刻; $C'_{gs}, b'_{ls}$ 分别为进入固定航线、临时航线的第 $s$ 个航班实际到达汇点的时刻; $a'_{gs}, a'_{ls}$ 为分别为进入固定航线、临时航线的第 $s$ 个航班预计到达汇点的时刻; $y(k)$ 为0-1决策变量,表示第 $k \in [1, N]$ 且 $k \in \mathbf{Z}$ 个航班是否选择固定航线; $z(k)$ 为0-1决策变量,表示第 $k \in [1, N]$ 且 $k \in \mathbf{Z}$ 个航班是否选择临时航线;第1项 $\sum_s \sum_k [y(k) \cdot (C'_{gs} - a'_{gs})]$ 表示选择固定航线的航班在汇点的总延误时间;第2项 $\sum_s \sum_k [z(k) \cdot (b'_{ls} - a'_{ls})]$ 表示选择临时航线的航班在汇点的总延误时间。

### 1.4 约束条件

进行航线选择时主要考虑:航班在固定航线或临时航线上飞行时均需满足安全间隔时间,且只能选择固定航线或临时航线中的一条飞行,故需设定0-1决策变量以确定航线选择结果。

(1)若 $N$ 个航班预计进入固定航线的时刻为数列 $\{a_k\}, k \in [1, N]$ 且 $k \in \mathbf{Z}$ ,按固定航线安全

时间间隔放行这  $N$  个航班进入固定航线的时刻为数列  $\{C_k\}$ ,  $k \in [1, N]$  且  $k \in \mathbf{Z}$ , 其中  $C_1 = a_1$ , 设  $t_{gu}$  为航班在固定航线上的飞行时间,  $a'_k$  为航班  $k$  预计到达汇点的时刻,  $C'_k$  为航班  $k$  按安全间隔到达汇点的时刻, 则

$$C_k = \begin{cases} a_k & a_k \geq C_{k-1} + \Delta t \\ C_{k-1} + \Delta t & a_k < C_{k-1} + \Delta t \end{cases} \quad k \in [2, N], k \in \mathbf{Z}$$

$$a'_k = a_k + t_{gu}, C'_k = C_k + t_{gu} \quad k \in [1, N] \quad (1)$$

(2) 不同预计时间进入交叉口的航班按先到先服务(First come first served, FCFS)排序, 相同预计时间进入交叉口的航班按延误时航班优先级<sup>[10]</sup>排序, 优先级较高的航班在进入交叉口时享有优先权, 应排序在前, 由此可将所有航班顺序标号为  $1, 2, 3, \dots, k, \dots, N$  (原始标号)。在每个组合里, 将选择固定航线的航班顺序标号为  $g_1, g_2, g_3, \dots, g_s, \dots$ , 选择临时航线的航班顺序标号为  $l_1, l_2, l_3, \dots, l_m, \dots$ , 设标号为  $g_s$  或  $l_m$  的航班原始标号为  $k$ , 有  $a'_{g_s} = a'_k$  或  $a'_{l_m} = a'_k$ , 则

$$C_{g_s} = \begin{cases} a_{g_s} & a_{g_s} \geq C_{g_s, s-1} + \Delta t \\ C_{g_s, s-1} + \Delta t & a_{g_s} < C_{g_s, s-1} + \Delta t \end{cases} \quad s \in [2, n_1], s \in \mathbf{Z}, C_{g_1} = a_{g_1}$$

$$C'_{g_s} = C_{g_s} + t_{gu}, s \in [1, n_1], s \in \mathbf{Z} \quad (2)$$

设  $t_{lin}$  为航班在临时航线上的飞行时间, 则

$$b_{l_m} = \begin{cases} a_{l_m} & \text{若 } a_{l_m} \geq b_{l, m-1} + \Delta t \\ b_{l, m-1} + \Delta t & \text{其他} \end{cases} \quad m \in [2, n_2], m \in \mathbf{Z}, b_{l_1} = a_{l_1}$$

$$b'_{l_m} = b_{l_m} + t_{lin}, m \in [1, n_2], m \in \mathbf{Z} \quad (3)$$

(3)  $y(k), k \in [1, N]$  为 0-1 决策变量,  $z(k), k \in [1, N]$  为另一 0-1 决策变量。则

$$y(k) = \begin{cases} 1 & \text{第 } k \in [1, N] \text{ 个航班选择固定航线} \\ 0 & \text{第 } k \in [1, N] \text{ 个航班不选择固定航线} \end{cases} \quad (4)$$

$$z(k) = \begin{cases} 1 & \text{第 } k \in [1, N] \text{ 个航班选择临时航线} \\ 0 & \text{第 } k \in [1, N] \text{ 个航班不选择临时航线} \end{cases} \quad (5)$$

(4) 对于第  $k \in [1, N]$  个航班只能选择固定航线或临时航线中的一条, 则

$$y(k) + z(k) = 1 \quad (6)$$

## 2 算法设计

根据模型和航线选择思路, 设计相关的启发式算法, 使用 Matlab 软件编程求解该问题, 算法步骤如下:

(1) 确定  $N$  个航班(包括来自  $L_1$  的  $N_1$  个航班和来自  $L_2$  的  $N_2$  个航班)预计进入固定航线的时刻数列  $\{C_k\}$ ,  $k \in [1, N]$  且  $k \in \mathbf{Z}$ , 并根据  $t_{gu}$  确定  $a'_k$ 。

(2) 确定  $N$  个航班进行航线选择组成的所有  $2^N$  个组合( $p$  条临时航线时, 组合为  $(p+1)^N$ )。

(3) 对每个组合, 将选择固定航线的航班顺序标号为  $g_1, g_2, g_3, \dots, g_s, \dots$ , 选择临时航线的航班顺序标号为  $l_1, l_2, l_3, \dots, l_m, \dots$  ( $p$  条临时航线时, 将选择第  $p$  条临时航线的航班顺序标号为  $lp_1, lp_2, lp_3, \dots, lp_m, \dots$ ), 并将标号  $g_s, l_m$  与原始标号  $k$  对应, 求出  $a_{g_s}, a_{l_m}$ , 从而确定  $y(k), z(k), C'_{g_s}$  和  $b'_{l_s}$ , 最后求解各组合的总延误时间  $H_N$ 。

(4) 由  $Z = \text{Min}H_N$  求出所有组合的最小总延误时间  $Z$ , 从而反推确定  $N$  个航班的航线选择情况。

(5) 输出结果, 算法结束。

## 3 算例仿真

图 2 是从航图中截取的部分, 图中显示了嘉峪关到雅布赖的航线结构, 嘉峪关是一个航线交叉点, 在嘉峪关与雅布赖之间正好有一条临时航线 X51, 根据该地区在 2010 年 08 月某日上午 8:00~



图 2 嘉峪关-雅布赖航线结构

Fig. 2 Jiayuguan-Yabulai route structure



## 参考文献:

- [1] 王利亚. 提高空域使用效率确保飞行安全顺畅[J]. 空中交通管理, 2011(6): 4-6.  
Wang Liya. Improve the efficient use of airspace to ensure flight safety and smooth [J]. Air Traffic Management, 2011(6): 4-6.
- [2] 刘佳, 王莉莉. 基于最小时间的航线选择问题[J]. 中国民航飞行学院学报, 2013(4): 16-18.  
Liu Jia, Wang Lili. Route selecting problem based on the minimum time [J]. China Civil Aviation Flight College, 2013 (4): 16-18.
- [3] 张陆彬, 王莉莉, 张兆宁. 航线网络中基于最小费用流的航线选择问题[J]. 航空计算技术, 2010, 40(6): 35-37.  
Zhang Lubin, Wang Lili, Zhang Zhaoning. Route selecting problem based on minimum cost flow in route network [J]. Aeronautical Computing Technique, 2010, 40(6): 35-37.
- [4] 程朋, 崔德光, 吴澄. 空中交通短期流量管理的动态网络流模型[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2000, 40(11): 114-118.  
Cheng Peng, Cui Deguang, Wu Cheng. Dynamic network flow model of short-term air traffic flow management [J]. Tsinghua University: Natural Science Edition, 2000, 40 (11): 114-118.
- [5] Peng Wei, Chen J T, Dominick A, et al. Routing flexible traffic into metroplex [C] // AIAA Guidance, Navigation and Control Conference. Portland: [s. n.], 2011: 8-11.
- [6] Robert H, Joseph P. Principles of airspace tube design for dynamic airspace configuration [C] // The 26th Congress of International Council of the Aeronautical Sciences ( ICAS). Anchorage: [s. n. ], 2008: 14-19.
- [7] Geng Rui, Cheng Peng. Dynamic air route open-close problem for airspace management [J]. Tsinghua Science & Technology, 2007, 12(6): 647-651.
- [8] Chen J T, Dominick A, Joseph K, et al. Flexible tube-based network control [C] // AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Chicago: [s. n. ], 2009: 10-13.
- [9] 王莉莉, 刘艺程. 管道航路激活费用问题优化研究 [J]. 河南科技大学学报: 自然科学版, 2013, 34(1): 41-44.  
Wang Lili, Liu Yicheng. Optimization studies of the pipeline route activation fee problem [J]. Henan University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2013, 34 (1): 41-44.
- [10] 张炳祥. 飞行签派业务 [M]. 北京: 中国三峡出版社, 2001.  
Zhang Bingxiang. Flight dispatch operations [M]. Beijing: China Three Gorges Press, 2001.