

考虑改航策略的终端区到达航班 优化调度模型及算法研究

黄宝军

中国民航大学, 空中交通管理研究基地, 天津 300300

摘要: 在恶劣天气条件下, 仅采用调速与空中等待等传统的流量管理方法将导致终端区到达航班大量延误。为此, 需要研究恶劣天气下航班改航策略, 并将其与传统流量管理方法结合起来。文章引入改航航班等待时间这一决策变量, 建立了考虑改航策略的到达航班优化调度模型, 并根据航班实际改航情况, 对模型进行了简化处理, 采用改进遗传算法对模型进行求解。对双跑道机场到达航班的仿真表明该模型简单实用, 在一定的恶劣天气条件下能为管制员提供辅助决策支持, 和减少航班延误。

关键词: 空中交通流量管理; 终端区; 改航策略; 恶劣天气; 改进遗传算法

中图分类号: V355

文献标识码: A

文章编号: 1672-4747(2011)02-0001-07

Study of Optimization Scheduling Model and Its Algorithm for Arrival Traffic Considering Rerouting Strategy

HUANG Bao-jun

Air Traffic Management Research Base,

Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China

Abstract: Applying traditional air traffic flow management methods such as speed control and air holding will cause large amount of delay in severe weather. So, it was necessary to study flight rerouting strategy and combine it with traditional flow management methods. An optimization scheduling model for arrival aircrafts was established through introducing

收稿日期: 2010-04-30.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60972006)。

作者简介: 黄宝军(1975-), 女, 湖北新洲人, 中国民航大学副教授, 研究方向为空中交通运输规划与管理。

a decision variable which was the waiting time for rerouting flights. Some simplifications were also made according to the actual situations of flight rerouting. An improved genetic algorithm was designed to solve the optimization problem. Simulation result of dual runway airport demonstrated that the model was simple and practical. It could supply decision support for air traffic controllers in certain severe weather and help to reduce flight delay.

Key words: Air traffic flow management, terminal area, rerouting strategy, severe weather, improved genetic algorithm

0 引 言

对终端区到达航班进行优化调度是空中交通流量管理的重要研究内容。但是，以前的研究主要集中在解决正常天气状况下单跑道机场到达航班优化调度问题^[1,2]。实际上，雷暴等恶劣天气是影响航空安全，造成航班延误的重要原因。在恶劣天气条件下，将改航策略与传统的流量管理方法结合是减少航班延误的重要手段。

对于恶劣天气下改航问题的研究，国外仅有十余年历史，而且大部分集中在改航路径规划方面^[3,4]。在改航航班放行时刻规划方面，1997年 Sarah Stock Patterson 建立了针对改航策略的数学模型^[5]。2000年 Bertsimas 和 Patterson 采用拉格朗日松弛算法（Lagrangian relaxation）对该模型进行了求解，得到航班的起飞放行时刻^[6]。该模型对于建立基于改航策略的空中交通模型具有一定的借鉴意义，但在现有的航路点中规划改航路径具有很大的局限性，缺乏灵活性，不利于对空域资源的有效利用。

我国对改航问题的研究只是处于研究的起步阶段。李雄等研究了改航航班路径规划方法^[7]。2002年，田勇，宋柯等在 Bertsimas 和 Patterson 建立的针对改航策略数学模型的基础上，根据航班优先级顺序，应用 A*算法在已有航路网络中逐个搜索航班改航路径，重点研究了容量对航班起飞时刻的限制^[8]。

目前，关于改航的研究大部分集中在改航路径规划等方面，将改航策略结合到流量管理模型中的研究相对较少。本文考虑将改航策略与传统战术流量管理方法结合，建立恶劣天气（主要考虑雷暴）影响下的

终端区到达航班优化调度模型，为恶劣天气条件下终端区流量管理提供辅助决策支持。

1 改航策略在终端区流量管理中的应用

在雷暴等恶劣天气影响下，对于局部范围内持续时间较短的雷雨云，一般可以从雷雨云的上风面或者雷雨云的间隙中绕飞。目前，研究者已提出了多种改航路径规划的算法，例如，基于多边形、基于标准离场程序、基于自由飞行思想的改航路径规划方法等^[3,4,7]。采用上述方法，可以规划出考虑恶劣天气影响范围的、易于空管指挥及飞行操作的最短改航路径。将航班改航策略融入流量管理模型中，可以通过调速、空中等待、改航等多种控制策略的综合运用，实现减少航班延误的目标。

2 考虑改航策略的到达航班优化调度模型

2.1 模型建立

考虑改航策略的排序问题可以表述为，已知飞机预计到达进场定位点时间 ETA_{ff} ，在满足各种约束条件的前提下，通过调速、空中等待及改航等控制策略，调整从各进场定位点进场的队列中航空器的位置及跑道分配，以及受天气影响航班飞行路径，使得所有进场航空器在跑道入口处的总延误成本最小。目标函数为：

$$\min \left(\sum_{f \in F} J_{\text{delay}}(STA_{RWY} - RTA_{RWY}) \right) \quad (1)$$

式中,

F ——所有参加排序的航空器集合;

RTA_{RWY} ——航空器 f 最早可能到达跑道头时间, 在多跑道情况下, RTA_{RWY} 为各跑道预计到达跑道头时间 ETA_{RWY} 中最小者;

STA_{RWY} ——航空器 f 安排进场时间;

J_{delay} ——航空器 f 延误的成本函数。

到达航班调度排序是个复杂的问题, 涉及到很多空管规则、管制员工作负荷及调配难度等诸多方面的问题, 需要考虑多种约束条件。本文主要考虑了进场定位点处飞机进近间隔要求、跑道头飞机尾流间隔要求、最大位置移动约束等限制条件: 对于不受恶劣天气影响航班,

$$STA_{ff_j} = \max\{ETA_{ff_j}, STA_{ff_i} + sep_{ff}\} \quad (2)$$

$$STA_{RWY} = \max\{STA_{RWY}^a + sep, ETA_{RWY}\} \quad (3)$$

对于受恶劣天气影响航班,

$$STA_{ff_j} = \max\{RTA_{ff_j}, STA_{ff_i} + sep_{ff}\} \quad (4)$$

$$STA_{RWY} = \max\{ETA_{RWY} + (t_{wait} + d / v_{avg} - T_f), STA_{RWY}^a + sep\} \quad (5)$$

$$|S_i - S_{i_{FCFS}}| \leq MPS \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

式中,

STA_{ff_i} 、 STA_{ff_j} ——由同一进场定位点相继进入机场的航班 i 、 j 安排到达进场定位点的时间;

sep_{ff} ——定位点处纵向间隔要求;

ETA_{ff} ——飞机预计到达进场定位点时间;

RTA_{ff} ——受天气影响航班最早可能到达进场定位点的时间;

STA_{RWY}^a ——安排降落的跑道上前机的安排到达跑道时间;

sep ——根据两机类型确定的尾流间隔;

ETA_{RWY} ——预计到达跑道时间, 等于 (STA_{ff}

+ T_i), 其中 T_i 为从进场定位点至跑道头经验飞行时间;

t_{wait} ——飞机改航之前, 采取空中等待或调速等措施延误时间;

d ——最短改航路径长度;

v_{avg} ——平均飞行速度;

T_f ——正常情况下改航航段平均飞行时间;

S_i ——飞机安排进场次序;

$S_{i_{FCFS}}$ ——根据飞机最早可能到达跑道时间 RTA_{RWY} , 按 FCFS 规则确定的次序。

2.2 模型简化

对于雷暴等恶劣天气而言, 随着其移动和发展变化, 考虑各种约束条件的最短改航路径是不同的。上述模型中实际上涉及到两个优化问题, 一是改航路径的优化, 二是进场航班总延误成本优化, 而且这两个优化过程互相影响。对此, 可以将某一时段内天气影响区域合并, 这样可将动态影响区域划设问题转变为静态问题处理, 并据此规划出该时段内航班的最短改航路径。对于持续时间较短的雷暴天气, 可将不同时段、性能相近飞机的最短改航路径长度 (即式 5 中路径长度 d) 通过列表的形式给出。采用上述方法, 可将两个优化问题分开处理。

采用上述简化处理后, 与传统到达航班优化调度模型比较, 考虑改航的优化模型中除了对飞机降落次序和跑道分配进行调整之外, 还增加了一个决策变量 t_{wait} , 即航班改航之前, 采取空中等待或调速等措施延误时间, 即根据航班总体延误成本优化需要, 改航航班可能立即改航, 也可能通过等待或减速延误一段时间后再进行改航。

不失一般性, 假定雷暴影响区域为进场定位点前一航段, 该航段正常飞行时间为 T_f (为简化, 未考虑机型区别), 影响时间范围为 $T_{start} - T_{end}$, 这一时间段可分为 n 个时间片。设飞机预计到达进场定位点时间为 ETA_{ff} , 则在雷暴影响下飞机最早可能到达进场定位点时间 RTA_{ff} 如表 1 所示。

表1 恶劣天气影响下航班最早可能到达进场定位点时间
Tab.1 The earliest possible arrival time at meter fix under severe weather influence

飞机到达受影响航段开始点所处时间范围	最短改航路径飞行时间	飞机最早可能到达进场定位点时间
$T_{start} - T_2$	T_{r1}	$\min\{ETA_{ff} - T_f + T_{r1}, T_2 + T_{r2}, \dots, T_n + T_{rn}, T_{end} + T_f\}$
$T_2 - T_3$	T_{r2}	$\min\{ETA_{ff} - T_f + T_{r2}, T_3 + T_{r3}, \dots, T_n + T_{rn}, T_{end} + T_f\}$
...
$T_n - T_{end}$	T_{rn}	$\min\{ETA_{ff} - T_f + T_{rn}, T_{end} + T_f\}$

考虑到在实际飞行中, 为保证飞行安全, 飞机改航多从雷雨云的上风面绕行, 所以, 一般情况下, $T_{r1} > T_{r2} > \dots > T_{rn}$ 。因此, 可以不考虑决策变量 t_{wait} , 只考虑飞机降落次序和跑道分配调整。因为随着时间流逝, 改航所需飞行时间越来越短, 所以, 由于降落次序或跑道分配调整造成飞机降落时间推迟一定能满足。式(5)可简化为

$$STA_{RWY} = \max\{STA_{RWY}^a + sep, RTA_{RWY}\} \quad (7)$$

式中, 设从该定位点至各跑道经验飞行时间分别为 T_{r1}, \dots, T_{rn} , 则飞机最早可能到达跑道时间为:

$$RTA_{RWY} = \min(STA_{ff} + T_{r1}, \dots, STA_{ff} + T_{rn})。$$

3 改进遗传算法设计

到达航班调度属于组合优化问题, 而且还要考虑复杂的空管约束, 因此, 传统算法在解决此类问题上存在各种局限。遗传算法是一种通过模拟自然进化过程的搜索最优解的方法。它具有大规模并行随机搜索能力, 寻优能力强, 收敛速度快, 适合解决复杂的全局优化问题, 对于组合优化中的 NP 完全问题非常有效。但是, 简单遗传算法存在早熟或种群进化停滞不前的问题。为此, 本文借鉴 TSP 问题求解方法^[10-12], 对基本遗传算法的交叉、变异等操作算子进行了一定的改进, 并利用改进的遗传算法对到达航班优化调度问题进行求解。

3.1 算法操作流程

本文算法操作的步骤如下:

(1) 初始化;

(2) 选择: 对所有个体按适应度大小进行排序, 根据代沟从初始种群中选择个体, 生成中间一代染色体;

(3) 按照一定的变异概率进行变异操作;

(4) 按照一定的交叉概率进行多次交叉操作, 从中择优加入新种群中;

(5) 由于使用了代沟, 新种群的个体数少于原始种群的大小, 基于适应度插入所有新种群代替最不适应的原始种群个体, 最终生成后代染色体。这样可保证父代种群中最适合个体被连续代繁殖。

上述过程不断迭代, 直至符合终止条件。

3.2 染色体的构造

本文用 2 条染色体分别代表飞机序列和跑道序列。多跑道条件下, 飞机着陆调度问题属于组合优化问题, 因此, 采用整数编码方式最为有效。染色体的长度为某一时间段内处于调度区域内的的飞机数量。假设有 n 架飞机和 2 条跑道, 基因编码的表示如下:

表2 飞机序列和跑道染色体编码

Tab.2 Chromosome coding for aircrafts and runways

C_1	C_2	C_3	...	...	...	...	...	C_{n-1}	C_n
1	2	2	...	...	...	...	...	1	2

第 1 条染色体中, C_1 、 C_2 分别表示第一位、第二位降落的飞机序号, 依此类推, C_n 表示最后一个降落飞机序号。第 2 条染色体中, 第一位表示第 1 架降落飞机选定编号为 1 的跑道, 第二位表示第 2 架降落飞机选定编号为 2 的跑道; 以此类推, 最后一位表示最后一个降落飞机选定编号为 2 的跑道。

3.3 目标函数和适应度计算

在遗传算法中, 适应度确定对遗传算法的性能有

较大的影响。在终端区到达飞机调度优化模型中，只有一个优化目标，因此，选择染色体上航空器的总延误成本作为目标函数，即染色体 J_i 的目标函数为：

$$O(J_i) = \sum_{f \in F} J_{\text{delay}}(STA_{RWY} - RTA_{RWY}) \quad (8)$$

为了保持种群内的多样性，按个体在种群中的排序计算其适应度，使目标函数最小的个体适应度为 2，而目标函数值最大的个体适应度为 0。

3.4 变异操作

本文算法中变异概率是根据个体所处位置确定的，这样既可防止优良基因因为变异而遭破坏，又可在陷于局优解时为种群引入新的基因。变异概率 P_m 如下：

$$P_m = \begin{cases} k_1 \frac{(f_{\max} - f)}{(f_{\max} - f_{\text{avg}})} & f \geq f_{\text{avg}} \\ k_2 & f < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (9)$$

式中， f_{\max} 为种群适应度最大值； f_{avg} 为种群适应度平均值； f 为个体的适应度值； k_1 、 k_2 为常数，一般取 0.5。需要注意的是，计算变异概率时所用的适应度值与上文介绍的不同，此处适应度 $f(J_i)$ 为：

$$f(J_i) = M - O(J_i) \quad (10)$$

式中， M 为一大数，使适应度值非负。

对于跑道染色体而言，变异操作较为简单，可采用传统的基本位变异操作。对于飞机序列染色体，可随机选择两个基因位，然后将这两个基因位上的基因互换。

3.5 交叉操作

对于跑道染色体而言，交叉操作可采用传统的单点交叉、两点交叉。对飞机序列染色体，本文借鉴文 [10] 为 TSP 问题设计的交叉算子，对顺序交叉算子进行一定的改进，设计了基于小范围竞争择优的两点交叉算子。

假设两个父代个体为 a_1 、 a_2 ，子代个体为 b_1 、 b_2 ，随机设置两个交叉点 1、2。则子代个体 b_1 按如

下规则获得：在交叉点 1 之前， b_1 继承 a_1 的对应基因值，在交叉点 1 和 2 之间 b_1 继承 a_2 （依次从 a_2 中取与 b_1 不相同的值），交叉点 2 之后 b_1 依次从 a_2 中取与 b_1 不相同的值。 b_2 的设置与此类似。

对每一对父代个体，上述交叉操作多次进行，然后从中选择两个适应度最高的个体，送入子代个体中。

3.6 约束条件的处理

约束条件处理一般有三种方法：搜索空间限定法、可行解变换法和罚函数法。本文算法采用搜索空间限定法，即交叉、变异模块中考虑各种约束条件，使交叉变异后产生的新个体为可行解。

4 仿真算例

4.1 仿真数据

本文算例假定仿真机场有 4 个进场定位点： M_1 、 M_2 、 M_3 和 M_4 ，2 条跑道 R_1 和 R_2 。设从 4 个进场定位点至跑道 R_1 、 R_2 的经验飞行时间如表 3 所示：

表 3 经验飞行时间/min

Tab.3 Empirical travel time/min

跑道	M_1	M_2	M_3	M_4
R_1	12	15	19	17
R_2	14	18	20	15

假定受雷暴影响航段为进场定位点 M_3 之前航段，受影响时间范围为 7:50~8:20，设正常情况下该航段平均飞行时间为 10 min，即受影响航班为预计到达 M_3 定位点的时间在 8:00~8:30 之间的航班。考虑 ETA_{ff} 在 8:00~8:40 之间 55 架航班，设雷暴影响区域划设时间片范围为 15 min，由表 1 可得受影响航班最早可能到达 M_3 的时间见表 4。

在实际运行中，由于机型不同，上述运行时间不完全相同。由于本文重点考察考虑改航策略的流量管理算法，因此做了一定简化处理。针对具体机场可建立详细的模型，这并不妨碍本文对模型和算法的分析。

表4 受影响航班最早可能到达M3定位点的时间

Tab.4 The earliest arrival time at meter fix M3 for the weather-impacted flights

飞机到达受影响航段开始点时间范围	最短改航路径所需飞行时间/min	飞机最早可能到达M3定位点时间/s
7:50-8:00	20	$ETA_{ff} + 600$
8:00-8:05	20	1200
8:05-8:15	15	$ETA_{ff} + 300$
8:15-8:20	15	1800

注：为仿真计算方便， ETA_{ff} 为以秒计算的时刻，即0为08:00:00，如600为08:10:00。

飞机在停机位处间隔要求为1min，飞机在跑道入口处尾流间隔按规定间隔标准确定。

对仿真机场从8:00—8:40（预计到达定位点时间 ETA_{ff} ）之间进场的55架飞机，本文采用前述模型和算法用MATLAB 7.0编程进行了计算，编程中参考了部分英国Sheffield大学的MATLAB遗传算法工具箱的代码。

4.2 FCFS排序方法

FCFS是最直接、也是管制员经常采用的排序方法。在计算的时候，算法中不仅要考虑跑道入口处间隔，还需考虑飞机在进场定位点处排队等待。

对于FCFS排序，本文借鉴美国CTAS算法^[9]。首先将各定位点处飞机按间隔要求拉开间距，得到定位点处安排到达时间 STA_{ff} ；然后据此计算飞机最早可能到达跑道时间 RTA_{RWY} ；按 RTA_{RWY} 确定飞机在跑道入口着陆次序，并计算安排的跑道到达时间 STA_{RWY} ；如果飞机在终端区内延误超过最大可吸收延误，则飞机到达定位点时间还需重新修改。

根据仿真结果，对跑道分配进行优化所得结果与根据 STA_{RWY} 分配跑道（即哪条跑道 STA_{RWY} 小，就选择哪条跑道降落）所得结果类似。因此，对于跑道分配问题，本文仿真算法根据 STA_{RWY} 最小原则分配跑道。实际运行中，管制员多按照交替使用的原则来安排跑道，因此，实际总延误可能比本算法计算的要大。

4.3 仿真结果分析

以所有进场航班总延误时间为目标函数（如果知道航班延误成本函数，也可直接用延误成本优化），可得 $MPS = 2$ 时的计算结果（如表5所示）。

表5 $MPS = 2$ 时，进场航班总延误时间计算结果

Tab.5 Total delay time of the arrival flights ($MPS = 2$)

影响因素	策略	FCFS情况/s	优化调度结果/s
无恶劣天气影响	不考虑改航策略	5 402	2 765
有恶劣天气影响	不考虑改航策略	13 370	11 985
	考虑改航策略	9 398	6 960

由表5可见，在没有恶劣天气影响时，优化算法能取得较好的优化效果，航班总延误时间比FCFS时减少了48.8%。在有恶劣天气影响时，航班延误大幅增加，此时仅采用排序优化，优化效果非常有限，相对FCFS情况，总延误时间仅减少10.4%。在恶劣天气情况下，如果同时采用改航策略时，则总延误时间减少为6 960s，相对FCFS情况（13 370s）减少了47.9%。由此可见，在恶劣天气下，综合采用包括改航策略、调速、空中等待的流量管理算法能有效减少航班延误。

对于动态算例，模型和算法都是类似的，只需在定时更新时，在排序队列中去掉已经离开终止调度界限的飞机，同时加入刚进入起始调度界限的飞机。

5 结束语

雷暴等恶劣天气是导致航班延误的重要原因。在恶劣天气下，有效利用航班改航策略是国外目前流量管理的热点问题。本文引入改航航班等待时间这一决策变量，建立了考虑改航策略的终端区到达航班优化调度模型。采用划分时间片规划改航路径的方法，将改航路径规划问题与流量管理模型区分开来，并根据航班改航实际情况，对模型进行了简化。仿真

算例结果表明,本文模型简单实用,在恶劣天气下,综合采用包括改航在内的流量管理策略能有效减少航班延误。

本文模型和算法是对基于改航策略的流量管理

模型和算法的初步探讨,由于雷暴等恶劣天气的复杂性和多样性,还需要研究者对不同恶劣天气下改航策略及流量管理模型和算法进行深入研究和实地验证。

参考文献

- [1] 王 飞, 徐肖豪, 张 静. 终端区飞机排序的混合人工鱼群算法[J]. 交通运输工程学报, 2008, 8(3): 68-72.
- [2] 何 智, 高 超, 姚 凯等. 终端区空中交通流量管理中的航班动态排序系统研究[J]. 交通与计算机, 2005, 23(2): 119-122.
- [3] Sridhar B., Chatterji G. B., Grabbe S., et al. Integration of traffic flow management decisions[C]. Monterey, Cal: AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, 2002: 1-9.
- [4] Krozel J., Penny S., Prete J., et al. Automated route generation for avoiding deterministic weather in transition airspace[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2007, 30(1): 144-153.
- [5] Sarah Stock Patterson. Dynamic flow management problems in air transportation [D]. Massachusetts Institute of Technology, 1997, 55276.
- [6] Bertsimas D., Patterson S. S. The traffic flow management rerouting problem in air traffic control: a dynamic network flow approach[J]. Transportation Science, 2000, 34(3): 239-255.
- [7] 李 雄, 徐肖豪, 朱承元 等. 基于几何算法的空中交通改航路径规划研究[J]. 系统工程, 2008, 26(8): 37-40.
- [8] 田 勇, 宋 柯, 顾英豪. 空中交通流量管理中的改航策略研究[J]. 数学的实践与认识, 2008, 38(10): 70-76.
- [9] Heinz Erzberger. Design principles and algorithms for automated Air traffic management[R]. Paper presented at the Mission Systems Panel of AGARD and the Consultant and Exchange Program of AGARD, Madrid, Spain, 1995.
- [10] 钟文亮, 詹志辉等. 求解 TSP 的交叉算子设计策略[J]. 计算机工程与设计, 2007, 28(10): 2408-2411.
- [11] 蔡龙飞, 基于改进遗传算法的多目标问题的研究[J]. 计算机工程与科学, 2008, 30(3): 75-77.
- [12] 雷英杰, 张善文等. 遗传算法工具箱及应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004.

(中文编辑: 吴继屏)