

# 枢纽机场航班延误恢复模型研究

何 昕, 宫献鑫, 王春政, 王 珂

(中国民用航空飞行学院 空中交通管理学院, 四川 广汉 618307)

**摘要:**为了快速恢复枢纽机场航班积压,减少枢纽机场的大面积航班延误。在航空和高速铁路联合运输的思想延伸,以恢复成本最小化为目标,建立枢纽机场大面积航班延误恢复模型,确定短途航班的取消、延误或航班被高速铁路运输替代,实时恢复航班。利用 MATLAB 对上海虹桥国际机场航班延误数据求解,结果显示高速铁路替代模式相对航班地面延误、航班取消等方案使恢复成本降低 15%,节省恢复时间 30min,验证模型恢复枢纽机场大面积航班延误可行、有效。

**关键词:**航班延误;航班恢复;高速铁路替代运输

**中图分类号:**V355 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2018)08-0124-04

我国航班量持续增长,航班正常率却呈下滑趋势。根据中国民航局发布的《2017 年全国民航航班运行效率报告》显示,2006—2015 年航班正常率连续下滑,2015 年再次创下 2010 年以来的最低值 68.33%,2016 年航班正常率显著提升,2017 年航班正常率再次下滑。天气、其他空域用户和航空公司自身原因是造成航班延误的主要原因,且枢纽机场因恶劣天气条件或其他空域用户等原因造成航班积压,延误波的传递致使更大面积航班延误,从而给民航相关各方带来巨大压力和损失。

近年来,国内外对航班延误恢复问题的研究热点主要集中在飞机恢复的研究基础上,进行机组恢复、乘客恢复以及一体化恢复等。Medard 和 Sawhney 使用基于航线网络的深度优先搜索算法和基于任务周期的列生成算法能较快地求解机组恢复问题<sup>[1]</sup>;Jafari 等建立总成本最小化目标函数解决飞机和乘客的综合恢复问题,总成本包括飞机分配成本、总延迟成本、航班取消成本和中断乘客成本<sup>[2]</sup>;Abdelghany 等研究不正常航班恢复的一体化决策工具,整合所有航班资源给出一体化恢复方案<sup>[3]</sup>;Petersen, Sölveling, Johnson 等人通过限制问题规模研究一定恢复期内的一体化恢复问题,并设计列生成算法,给出优化结果<sup>[4]</sup>。白凤建立多商品网络流的数学模型,采用列生成法和启发式算法,实现飞机调度和机组调度方法<sup>[5]</sup>;高强等人以路径流量为变量的线性整数规

划建立模型恢复乘客流<sup>[6]</sup>;刘德刚研究飞机和机组的一体化恢复问题,给出飞机路线优化方案与机组恢复方案<sup>[7]</sup>;朱博等人以最小化恢复总成本为目标函数,衔接飞机、航班、机组和机场的时空,建立一体化恢复的约束规划模型<sup>[8]</sup>。不正常航班恢复的研究处于起步阶段,分阶段恢复和一体化恢复在我国国情下没有取得很好的效果,全局优化方案不理想,不能满足实时性要求。

由于恶劣天气或其他事件,机场容量不足或机场关闭,导致机场航班大量积压。一般情况下,采用地面等待、航班取消等措施,更多地集中在飞机、机组和乘客的恢复,而没有从机场容量方向解决航班延误问题。从机场容量出发,在航空和高速铁路联合运输的思想延伸,实时恢复航班,建立枢纽机场航班延误恢复模型,以恢复成本最小化为目标,确定短途航班的地面延误、取消或延误航班被高速铁路运输替代,节省时间通过协同决策系统重新调整航班。利用 MATLAB 求解案例验证模型的可行性和有效性。

## 1 问题描述

目前,我国高速铁路运营里程世界最长,运营速度世界最快。根据中国铁路总公司数据显示,到 2017 年底,中国高速铁路运营总里程达 2.5 万公里,占世界三分之二。2017 年 7 月,我国《中长期铁路网规划(2008 年调整)》中“四纵四横”铁路网全部贯通。“四纵四横”高速铁路网以覆盖北京、上海、广州、郑

收稿日期:2018-06-11

基金项目:2018 年民航安全能力建设项目资助;2016 年学生科技活动项目资助(X2016-42)。

作者简介:何昕(1979—),女,浙江浦江人,中国民用航空飞行学院,副教授,博士研究生,研究方向:空中交通管理。

州、武汉、西安、重庆、成都等重点枢纽,高速铁路网基本连接起省会城市,实现相邻大中城市之间 1 至 4 小时交通圈。高速铁路铁路网络布局与民航主要航线网络基本重合衔接,可实现乘客运输“零距离换乘”。中国高速铁路运行时速覆盖 200 km、250 km、300 km、350 km 四个速度等级。

500~900 km 是高速铁路和航空竞争博弈的显著距离,而 692 km 是高速铁路和航空运输市场的分界距离<sup>[9]</sup>,换言之,飞行距离 700 km 之内航班可被高速铁路替代。根据《2017 年全国民航航班运行效率报告》的统计,我国城市之间的航班飞行距离在 800 公里范围内,约占全年航班量的 34%。仅从民航机场和高速铁路站点的空间布局分析,我国大中城市高速铁路和民航机场共同布局,如北京、浦东、广州、昆明等机场和高速铁路服务市场重叠。从地面交通时间成本的角度,我国大部分繁忙机场 1 h 和 2 h 空间服务市场与高速铁路重叠<sup>[10]</sup>。我国机场与高速铁路的服务市场的重叠情况和空间效应以及我国高速铁路的运营网络和运行时速都为延误航班被高速铁路运输替代模式奠定基础。

延误航班被高速铁路运输替代模式可运用在进、离港航班,使用高速铁路运输替代模式节省时间可通过协同决策系统重新调整航班。在目前,航空公司在航班恢复中几乎没有运用延误航班被高速铁路运输替代。在某些情况下,交通模式替代可以减少机场航班延迟,并且使乘客更早到达。假设当机场容量由于天气等原因在 6:00—7:00 时减少,7:00 以后恢复。图中曲线表示航班根据预定计划到达时间,折线表示航班受容量限制的到达时间,圆点表示高速铁路运输到达机场时间。对于航班  $i$ ,飞机延误到达时间为  $t$ ,使用高速铁路运输到达时间为  $t_1$ 。如果高铁运输时间小于延误时间  $t$ ,则用高速铁路运输替代飞行  $i$  的节省时间  $(t - t_1)$ ,如图 1 所示。

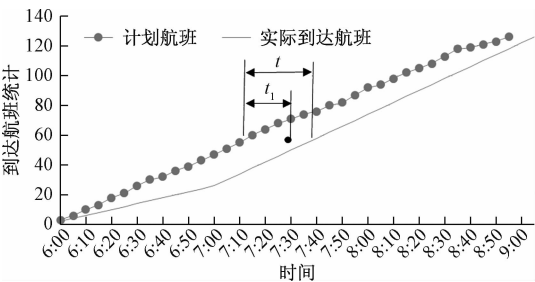


图 1 使用高速铁路替代运输模式节省时间

模式间替代可使航空公司做出更可靠的航班恢复方案。航空公司实施这一程序可实现的好处包括:

- 1)实时恢复航班,减少延误时间;
- 2)更有效地利用稀缺的空域资源,减少航空器积压,有利于国际航班或重要航班优先离港;
- 3)避免地面等待过长,减少空中延迟成本或取消费用;
- 4)减少乘客延误连接和延迟成本,提高乘客满意度;
- 5)机组人员和航空器恢复灵活性提高。

2 航班延误恢复模型构建

2.1 模型假设

为了避免过多涉及航空公司转移乘客的细节特征,简化数学模型,突出枢纽机场大面积航班延误时高速铁路替代运输的特点,作出以下假设:

乘客全部重新分配。高速铁路运输能力充足,取消航班上的所有乘客将立即被重新分配到高速铁路服务。忽略乘客由候机楼到高速铁路站转移时间。

高速铁路运输价格。为了节省运输成本,航空公司分配全部乘客乘坐二等座,高速铁路票价按照官方网站公布价格的 80% 计算。

2.2 模型符号

模型中涉及的符号意义如表 1 所示。

表 1 模型中符合意义

|           |                         |
|-----------|-------------------------|
| $Del_i$   | 航班 $i$ 的延误总成本           |
| $Delc_i$  | 航班 $i$ 每小时空中延误成本或地面延误成本 |
| $\beta$   | 乘客时间成本占延误成本的比例          |
| $Pax_i$   | 航班 $i$ 的乘客数量            |
| $W_i$     | 航班 $i$ 的延误时间            |
| $Aopc_i$  | 航班 $i$ 每小时运营成本          |
| $PaxAc$   | 航班乘客每小时时间成本             |
| $Ft_i$    | 航班 $i$ 飞行小时数            |
| $Rep_i$   | 高速铁路替代航班 $i$ 的总成本       |
| $\alpha$  | 取消费用占替代总成本的比例           |
| $Canc_i$  | 航班 $i$ 的取消费用            |
| $paxBc$   | 高速铁路乘客每小时时间成本           |
| $Bopec_i$ | 替代航班 $i$ 的高速铁路运输费用      |
| $Bt_i$    | 替代航班 $i$ 的高速铁路运输时间      |
| $Can_i$   | 航班 $i$ 的取消总成本           |
| $Dt_i$    | 航班 $i$ 取消时乘客候机时间        |
| $C$       | 延误航班恢复总成本               |

2.3 函数构建

以航班延误恢复总成本最小化为目标,即对于每个航班恢复成本最小,建立枢纽机场大面积航班延误

恢复模型。

$$Del_i = (Delc_i + \beta \cdot PaxAc \cdot Pax_i)W_i + (Aopc_i + \beta \cdot PaxAc \cdot Pax_i)Ft_i \quad (1)$$

$$Rep_i = \alpha \cdot Canc_i + (\beta \cdot paxBc \cdot Pax_i)Bt_i + 0.8Bopc_i \cdot Pax_i \quad (2)$$

$$Can_i = Canc_i + \beta \cdot paxDelc \cdot Pax_i \cdot Dt_i \quad (3)$$

$$x_i = \min(Del_i \quad Can_i \quad Rep_i) \quad (4)$$

$$C = \sum_{i=1}^n x_i \quad i = 1, 2, 3, 4, \dots, n \quad (5)$$

目标函数 5 为航班恢复总成本。函数 4 为选择恢复模式时对于航班  $i$  恢复成本最小。函数 1 为航班延误成本,包括航班空中延误成本或地面延误成本和乘客延迟成本,航班运行成本和乘客时间成本。函数 2 是高速铁路替代航班费用,替代成本包括高速铁路运输成本和高速铁路乘客时间成本,航班取消固定成本,为了提高乘客的满意度,高速铁路运输时间大于 8 小时,不采用替代模式。函数 3 为航班取消成本,包括航班固定取消成本和旅客候机时间成本。

### 3 实例分析

从上海虹桥国际机场官方网站选取某天上海虹桥国际机场 9:00—11:00 航班时刻计划,计划国内到达航班 30 架次。假设由于天气原因,8 点至 10 点机场出现服务能力不足,在此期间航班每小时 5 架次到达机场,之后恢复正常服务能力,每 5 分钟 3 架次到达,到 9 点航班已延误 60 分钟。上海虹桥国际机场部分航班时刻机场如表 2 所示。

表 2 上海虹桥国际机场 9:00—12:00 部分进港航班

| 航班号    | 计划飞行时间  | 到达   | 出发城市 | 高速铁路运行时间 | 高速铁路票价 |
|--------|---------|------|------|----------|--------|
| SC4661 | 1h40min | 0900 | 青岛   | 7h       | 518    |
| MU5516 | 1h35min | 0900 | 青岛   | 7h       | 518    |
| KN2217 | 1h10min | 0900 | 天津   | 4h       | 513    |
| 9C8930 | 2h25min | 0910 | 广州   | 6h50min  | 793    |
| HO1252 | 2h20min | 0910 | 北京   | 4h40min  | 558    |
| SC4861 | 1h50min | 0910 | 烟台   | 8h       | 566    |
| MF8178 | 2h25min | 0915 | 北京   | 4h40min  | 558    |
| HO1288 | 2h25min | 0920 | 广州   | 6h50min  | 793    |
| SC4949 | 2h25min | 0925 | 重庆   | 10h      | 509    |

对到达航班进行统计分析,对基本参数进行设置<sup>[11]</sup>,如表 3 所示。

对于普通国内航班飞行每名旅客时间成本约为 50 元/小时<sup>[11-12]</sup>,高速铁路运输每名旅客时间成本约为 24 元/小时<sup>[13]</sup>。根据民航资源网统计,截止 2017 年 9 月,我国国内客座率为 84.9%,乘客数取航

班  $i$  最大载客数的 85%。航班的取消成本由总的旅客人数乘以平均票价求得<sup>[14-15]</sup>。若使用高速铁路运输替代,相邻时间段内相同出发、到达机场,可被同一班高速铁路运输。利用 MATLAB 对航班恢复模型进行编程,计算结果如下表 4 所示。

表 3 部分机型基本参数

| 机型       | 地面延误成本<br>(元/小时) | 空中延误成本<br>(元/小时) | 营运成本<br>(元/小时) | 最大载客数 |
|----------|------------------|------------------|----------------|-------|
| A321     | 1 340            | 16 175           | 38 783         | 220   |
| A320     | 1 090.2          | 14 316           | 32 361         | 180   |
| B737—700 | 1 065.6          | 11 307           | 29 978         | 149   |
| B777     | 2 244.6          | 32 309.4         | 72 614         | 440   |

表 4 航班延误和运用高速铁路替代比较结果

|                 | 使用地面等待、取消等手段 | 高铁替代      |
|-----------------|--------------|-----------|
| 成本(元)           | 3 829 952    | 3 230 536 |
| 航班取消数量          | 9            | 6         |
| 高速铁路替代数量        |              | 6         |
| 使用取代运输节省的时间(分钟) |              | 30        |

计算结果显示,使用高速铁路代替模式,可以降低航空公司航班延误恢复成本,加快枢纽机场航班延误恢复速度。与使用地面延误、取消等手段延误恢复成本相比,高速铁路替代模式的航班恢复成本减少 15%以上,航班恢复时间减少 16%。

### 4 结语

本文在航空和高速铁路联合运输的思想延伸,枢纽机场大范围的航班延误时,航空公司取消短途航班,并运用高速铁路替代航空运输重新运输乘客,以减少航班总量,从而实时快速恢复航班。以航班恢复成本最小为目标,建立枢纽机场大面积航班延误恢复模型确定短途航班的取消或航班被高速铁路运输替代,减少航班恢复成本和航班恢复时间。通过算例验证了模型的正确性和可行性,可为枢纽机场大面积延误恢复航班时提供新的恢复措施。模型仅考虑航班取消、延误策略,未考虑航班合并、机型交换等策略。使用高速铁路替代运输模式时,机组恢复和航空器恢复还需进一步深入。

### 参考文献

- [1] CLAUDE P MEDARD, NIDHI SAWHNEY. Airline crew scheduling from planning to operations[J]. European Journal of Operational Research, 2007, 183(3): 1013—1027.
- [2] JAFARI N, ZEGORDI S H. The airline perturbation problem: considering disrupted passengers [J]. Transportation

- Planning and Technology, 2010, 33(2): 203—220.
- [3] ABDELGHANY K F, ABDELGHANY A F, EKOLLU G. An integrated decision support tool for airlines schedule-recovery during irregular operations[J]. European Journal of Operational Research, 2008, 185(2): 825—848.
- [4] J D PETERSEN, G SÖLVELING, E L JOHNSON, J P CLARKE, S SHEBALOV. An optimization approach to airline integrated recovery[C]//AGIFORS 50th Annual Symposium, 2010.
- [5] 白凤. 不正常航班的飞机和机组调度研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- [6] 高强, 严俊, 陆宏兰. 不正常航班乘客流恢复方法[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(27): 6670—6673.
- [7] 刘德刚. 航空公司实时飞机和机组调配问题的研究[D]. 北京: 中国科学院, 2002.
- [8] 朱博, 朱金福, 高强. 飞机和机组一体化恢复的约束规划模型[J]. 交通运输工程学报, 2013, 13(1): 77—83.
- [9] 丁金学, 金凤君, 王姣娥, 等. 高速铁路与民航的竞争博弈及其空间效应——以京沪高铁为例[J]. 经济地理, 2013, 33(5): 104—110.
- [10] 王姣娥, 胡浩. 中国高铁与民航的空间服务市场竞争分析与模拟[J]. 地理学报, 2013, 68(2): 175—185.
- [11] 李鹤. 航班延误成本研究[D]. 中国民用航空学院 中国民航大学, 2006.
- [12] 丁建立, 计金玲, 黄剑雄. 基于免疫机制的航班延误快速恢复模型及实现[J]. 计算机工程与设计, 2008(19): 5029—5032.
- [13] 陈喜春, 张浩玮. 基于出行目的的铁路旅客时间价值研究[J]. 计算机仿真, 2013, 30(12): 149—153.
- [14] 姜茂, 韩晓龙. 基于航班延误的飞机和乘客恢复模型[J]. 华中师范大学学报: 自然科学版, 2015, 49(6): 876—882.
- [15] 张力菠, 鲍和映. 基于离散时空网络的不正常航班调度模型[J]. 系统工程, 2013, 31(12): 60—68.

## Research on Delay Recovery Model of Hub Airport

HE Xin, GONG Xian-xin, WANG Chun-zheng, WANG Ke

(College of Air Traffic Management, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan Sichuan 618307, China)

**Abstract:** In order to quickly resume flight delays at hub airports, delays in large-scale flights due to delays in hub airports have been reduced. Based on the joint transportation of aviation and high-speed railways, with the goal of minimizing recovery costs, a model for delay recovery of large-area flights at hub airports was established, and cancellation of short-haul flights or replacement of flights by high-speed rail transport was confirmed, and flights were resumed in real time. Using MATLAB to calculate the flight data of Shanghai Hongqiao International Airport, the results show that the high-speed railway alternative model reduces the recovery cost by 15% and saves recovery time by 30 minutes compared with the flight ground delay, flight cancellation, etc. The verification of the model recovery hub airport's large area flight delay is feasible and effective.

**Key words:** flight delays; flight recovery; high speed rail alternative transport