

Research on Abnormal Flight Recovery Based on Multi-Objective Planning

Bing Dong, Xin Huang

Air Traffic Management College, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan Sichuan
Email: dbcafuc@126.com

Received: Jul. 5th, 2019; accepted: Jul. 22th, 2019; published: Jul. 29th, 2019

Abstract

The regular implementation of the airline's flight plan can reduce the operating cost of the airline and increase passenger's satisfaction. In actual operation, flight plans are affected by extreme weather, flow control and other factors, which will cause flights not to operate in accordance with the optimal plan, and even lead to serious flight delays. In this paper, the abnormal flight recovery of airlines was studied. Through the analysis of integrated passenger costs, crew recovery and aircraft scheduling, a multi-objective programming mathematical model was established. By selecting the two most important decision-making objectives, cost loss and total passenger delay time, different weights were assigned. The results showed that the method presented in this paper could reduce the total operating cost and passenger's delay time.

Keywords

Air Transport, Abnormal Flights, Multi-Objective Planning, Genetic Algorithm

基于多目标规划不正常航班恢复研究

董兵, 黄鑫

中国民用航空飞行学院空中交通管理学院, 四川 广汉
Email: dbcafuc@126.com

收稿日期: 2019年7月5日; 录用日期: 2019年7月22日; 发布日期: 2019年7月29日

摘要

航空公司的航班计划正常执行能够减少航空公司的运营成本, 增加旅客满意度。在实际运营中, 航班计划受到极端天气、流量管控等因素的影响, 将导致航班不是按最优计划中进行运行的, 甚至会导致严重

的航班延误现象。本文针对航空公司不正常航班恢复方面进行研究, 对综合旅客成本, 机组恢复和飞机调度进行分析, 建立多目标规划数学模型, 通过选择成本损失、旅客延误总时间两个最主要决策目标, 赋予不同权重, 利用遗传算法进行求解, 通过实际算例进行计算分析。结果显示本文给出的方法能够减少运营成本和旅客的延误总时间。

关键词

航空运输, 不正常航班, 多目标规划, 遗传算法

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

我国民航行业一直处于高速持续发展中。据统计: 2018 年旅客的运输量增长 10.2%, 起降架次增长 8.2%, 占据第二大航空运输系统的地位。行业的快速发展对自身的发展形成巨大压力, 各繁忙机场都频繁出现大面积延误等情况, 不利于行业的健康发展。高效的编排航班生产计划能够提高航空器的利用率, 运载率以及航空公司的经济效益。数据显示: 航班正常率提升 0.1%, 航空公司的盈利收入将增加 45 万以上[1]。采用新技术新优化方案, 降低航班延误率, 将产生巨大经济收益, 同时也有助于提升航空公司品牌形象与影响力。国内外的航空企业都将非正常航班恢复作为研究重点, 目前, 对非正常航班的恢复算法和方案, 国内外学者都有深入研究, 但针对综合旅客成本, 机组恢复和飞机调度的研究较少, 本文将从这个角度进行研究。

在飞机恢复方面: Teodorovic 等[2]提出以最小旅客航班延误总时间为目标函数, 将航线网络模型看成具有边约束的网络流, 利用用 Benders 分解算法进行求解。Stojkovic [3]针对飞机路线和机组任务匹配进行研究, 采用 Dantzig-Wolf 算法求, 产生新的优化航班时刻。在机组恢复方面: Guo Wei 等[4]通过利用多商品流的分配理论, 建立机组恢复的数学模型, 利用分枝定界的启发式搜索算法对问题进行求解。Kohl 等[5]提出将飞机路线恢复、机组恢复以及旅客行程恢复问题结合, 建立以多种资源决定支持系统的数学模型, 并设计了算法进行求解。Medard 等[6]提出了航班网络的深度优化的搜索算法, 利用算法生成周期航班任务列, 并利用数据进行实证研究, 数据表明算法能够对受扰机组进行优化调度。刘德刚[7]利用数学模型得到了飞机恢复方案, 再利用另一算法得到机组恢复方案, 比较机组恢复与飞机恢复方案是否相匹配, 如匹配, 输出方案, 得到航班恢复计划, 如不匹配, 修改方案。周志忠[8]整合了航班计划恢复模型、飞机恢复模型、机组人员恢复模型以及旅客行程恢复模型。利用了遗传算法对模型进行了求解。姚韵[9]将匈牙利法引入时空网络的模型研究, 研究了航班任务置换的机理, 论证了任务路径置换的成本关系, 提出基于路径置换的分阶段优化算法, 为飞机路线的恢复提出了新的求解思路。高强[10]在贪婪随机自适应搜索算法基础上, 加入模拟退火算法来优化不正常航班恢复的调度问题。

2. 不正常航班恢复基本方案

不正常航班计划恢复问题是多约束多变量问题, 受扰航班恢复是一个大规模整数规划实时求解的问题。航班受扰后, 航空公司会对飞机资源、机组资源、旅客的行程安排等进行资源重组, 生成一份临时性计划, 使航班计划尽快恢复到正常, 以便后续的航班计划的正常的执行。航空公司的不正常航班恢复

问题可以分为以下四个子问题：1、航班、复问题：通过延误、取消、合并、备降航班来修复航班时刻表；2、飞机计划恢复问题：又称飞机路线恢复问题，飞机恢复主要策略有：机型替换，飞机交换，不同航空公司航班合并，使用备份飞机等。3、受扰机组的恢复问题：为修复后的航班时刻表指派具体机组。机组恢复的主要策略有：加机组或搭机、使用备份机组等。4、受扰航班的旅客行程的恢复问题：为受扰旅客安排新的行程，尽快将其运抵目的地。旅客是航空公司服务的对象，旅客行程恢复对航空公司的服务质量提升非常重要。

3. 不正常航班恢复问题建模

3.1. 航班恢复模型的参数分析

受扰航班的恢复面临两个困难：一是受扰航班延误的成本计算，二是航班恢复的时间随机性。通过已有的文献，本文将成本概括为：飞行延误成本，地面延误成本，飞机调配成本，旅客食宿成本，航空公司品牌形象损失。受扰航班的恢复是一个实时性问题。由于外界环境的影响是在随机的。因此模型中的成本为统计成本。

3.2. 模型建立

根据已有的文献，当飞机在运行过程中通常将飞机在空中等待时间转化为地面等待时间。对于 m 个延误航班 f_1, f_2, \dots, f_m ， F 表示所有航班 $f_i \in F$ ， i 表示本公司航班数量， $i = 1, 2, \dots, n$ ， S 为分配给航空公司的所有时隙集合 $s_j \in S$ ， s_j 表示分配给本公司的时隙， $j = 1, 2, \dots, n$ ，根据上述分析，以航班延误恢复成本最小作为目标函数，建立模型：

$$t_1(x) = \min \sum_{f_i \in F} \sum_{s_j \in S} c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

$$c_{ij} = (\alpha_i^{yy} + \alpha_i^{yl} + \alpha_i^{lk}) |s_j - d_i|$$

其中： x_{ij} 是当航班 f_i 指派到时刻 s_j 时， $x_{ij} = 1$ ；否则 $x_{ij} = 0$ ； α_i^{yy} 是该机型每小时的运营平均成本。 α_i^{yl} 是航班 f_i 的每小时盈利损失， $\alpha_i^{yl} = n_i \times p_i \times \rho / h_i$ ， p_i 是航班 f_i 的平均票价， ρ 是航空公司每架航班的平均利润率， h_i 航班预计要飞行的时间， α_i^{lk} 是航班 f_i 的旅客单位时间延误的经济损失， $\alpha_i^{lk} = n_i \times l_i$ ， l_i 是每名旅客单位时间平均延误成本。 s_j 是时刻的最初时间。 d_i 是航班 f_i 初始时刻表要起飞时间。 $s_j - d_i$ 表示航班延误的时间。

以最小旅客总延误时间为目标函数建立数学模型：

$$t_2(x) = \min \sum_{f_i \in F} \sum_{s_j \in S} n_i (s_j - d_i) x_{ij} \quad (2)$$

其中： n_i 是航班 f_i 的旅客人数。 x_{ij} ：当航班 f_i 指派到时刻 s_j 上时， $x_{ij} = 1$ ；否则为 0。 s_j 是时刻的起始时间； d_i ：是航班 f_i 初始时刻起飞时间。

4. 模型求解

4.1. 模型的归一化处理

本中以飞机延误总成本和旅客延误总时间为目标函数建立多目标规划模型。两目标函数单位不统一，需进行量纲转化。通过变换，根据以往研究，引入目标函数权重系数 λ_r 将多目标变换成线性加权的形式，

$$T(x) = \min \{ \lambda_1 t_1(x) + \lambda_2 t_2(x) \} \text{ 其中: } \sum_{r=1}^2 \lambda_r = 1, r = 1, 2.$$

4.2. 基于遗传算法的求解

有关遗传算法的介绍, 许多文献都有介绍[11][12], 按照遗传算法的基本要求, 本文利用该方法进行了求解, 航班与分配的时隙是一一对应的关系, 保证每个航班都被分配一个时隙。本文根据模型的特点与航班和时隙的关系选择二进制 0-1 编码, 并通过产生随机数的方式选择变异和交叉的位置, 加快计算的速度。具体如下:

- 1) 确定种群大小 n , 交叉概率 p_c , 变异概率 p_m ;
- 2) 初始化种群: 产生 n 组可行解组成初始种群 p_0 ;
- 3) 计算种群中个体的适应度值并进行选择操作;
- 4) 按照交叉概率 p_c 、变异概率 p_m 进行遗传操作;
- 5) 算法终止条件判断, 如果满足终止条件, 则输出最优解, 算法结束, 否则转步骤 3。

在本模型中, 种群即为航班与时隙的分配方案, 使用随机化法生成初始种群, 种群大小为 100。遗传运算中, 交叉概率 p_c 取值 0.95, 变异概率 p_m 取值 0.05, 在计算适应度时, 使用 TS 算法来改进种群个体质量, 使得找到最优解效率有所提升。适应度函数选取:

$$fitness = \frac{1}{T(x)}. \quad (3)$$

5. 案例分析

5.1. 案例参数

本文涉及到的机型按尾流等级分为重型(H)、中型(M)。双流机场由于流量控制的原因出现航班延误, 其中在 08:00~11:00 时间段影响到国内某航空公司 7 个航班的正常执行, 具体航班信息见表 1。

Table 1. Basic information of affected flights

表 1. 受影响航班基本信息

序号	机型	时刻表 起飞时刻	分配到的 时隙	预计飞行 时间	旅客人数	平均票价
CA4031	M	0825	0840	0425	114	1640
CA4409	H	0845	0900	0120	89	1390
CA4101	M	0900	0928	0345	132	1930
CA4531	H	0935	1000	0300	112	1360
CA4413	H	1030	1050	0135	108	750
CA8222	M	1050	1100	0200	122	750
CA441	M	1055	1105	0240	89	1389

通过分析发现, 将会有 7 个航班都会产生不同程度的延误。显然, 这样的航班安排不利于航空公司的利益要求, 同时也大大降低了航班正点率。对航空公司的不利影响大大加大。

运营成本匹配, α_i^y 取值如表 2 所示:

Table 2. Aircraft operating costs

表 2. 飞机运营成本

机型	代表符号	最大起飞重量/t	尾流等级	运营成本 α_i^y (元/小时)
重型机	H	>136	重型	4200
中型机	M	7~136	中型	3000
轻型机	L	<7	轻型	210

其中：航空公司平均利润率 ρ 可以取值为 2.6%；时间-金钱系数 $T_m = 1$ ；每名旅客单位时间平均延误成本 l_i 可以取值为 50 元/小时；航空公司运行控制中心对本次不正常航班恢复的成本损失 $f_1(x)$ 、旅客总延误时间 $f_2(x)$ 的重视程度分别为 $\lambda_1 = 0.7, \lambda_2 = 0.3$ 。

5.2. 案例计算结果

航班调整决策目标数值计算, 具体结果如表 3 所示:

Table 3. Loss of affected flights

表 3. 受扰航班损失表

航班号	机型	时刻表起飞时刻	成本损失(元)	旅客总延误时间(MIN)
CA4031	M	0825	1200	1710
CA4409	H	0845	980	1335
CA4101	M	0900	3755	3696
CA4531	H	0935	2575	2800
CA4413	H	1030	2044	2160
CA8222	M	1050	800	1220
CA441	M	1055	650	890
合计			12004	13811

根据计算结果, 做出分析如下表: 由以上计算结果分析, 运用遗传算法, 成本损失目标函数在第 12 次迭代时达到最小值 10378, 旅客总延误时间目标函数在第 12 次迭代时达到最小值 12607 min。具体结果如表 4 所示

Table 4. The result of reallocating slots

表 4. 航班重新分配时隙的结果

航班号	机型	时刻表起飞时刻	分配到的时隙	成本损失(元)	旅客延误总时间(MIN)
CA4031	M	0825	0840	1200	1710
CA4409	H	0845	0928	3109	3827
CA4101	M	0900	0900	0	0
CA4531	M	0935	1000	2575	2800
CA4413	H	1030	1050	2044	2160
CA8222	H	1050	1100	800	1220
CA441	M	1055	1105	650	890
总计				10378	12607

从表 3 和表 4 中的计算结果可以看出, 算法优化的原则是优先保障大型飞机、旅客人数多、票价高的航班, 以及航程短、旅客人数少、票价较低的航班。最终计算结果中, 成本损失由航班调整前的 12004 元减少到 10378 元, 旅客延误总时间由航班调整前的 13811 min 减少到 12607 min。由此可见, 成本损失的减少比较明显, 而旅客延误总时间较航班调整前增加 287 min。导致这个结果的主要原因是成本损失与旅客总延误时间对决策者有着不同的权重, 即受到公司的制度, 不正常航班处理规定, 以及公司利益目

标的影响。

计算结果表明, 本文所建立的基于多目标优化的受扰航班恢复模型, 在一定的程度上能有效对成本因子以及延误时间进行综合分析。可根据子目标函数的权重进行调整, 从而达到不同的航班调配策略。综合考虑建立的模型与算法运用, 本模型更适用于航班量较大, 分配的时隙比较集中的航空公司。对于短时间内不正常航班的调配具有显著作用。

6. 结论

本文对航班延误问题中涉及的航班延误成本和旅客总延误时间两大问题: 进行了研究。通过分析建立了多目标优化数学模型并通过遗传算法对问题进行了求解。对案例进行分析发现建立的多目标不正常航班恢复模型, 能有效对成本因子以及延误时间综合分析。根据子目标函数的权重达到不同的航班调配策略。能够有效地利用时隙资源, 减少航空公司的损失, 减少旅客总延误时间。在一定意义上, 本模型是成功的。

参考文献

- [1] 中国民航局. 关于统筹推进民航降低成本工作的实施意见[EB/OL]. http://www.caac.gov.cn/PHONE/XXGK_17/XXGK/ZFGW/201905/t20190515_196203.html, 2019-05-15.
- [2] Teodorvic, G. (1984) Optimal Dispatching Strategy on Airline Network after a Schedule Perturbation. *European Journal of Operational Research*, **15**, 178-182. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(84\)90207-8](https://doi.org/10.1016/0377-2217(84)90207-8)
- [3] Stojkovic, F.S. (1998) The Operational Airline Crew Scheduling Problem. *Transportation Science*, **32**, 232-245.
- [4] Wei, G. and Yu, G. (1997) Optimization Model and Algorithm for Crew Management during Airline Irregular, Operations. *Journal of Combinatorial Optimization*, **1**, 305-321. <https://doi.org/10.1023/A:1009780410798>
- [5] Kohl, N. (2007) Airline Disruption Management-Perspectives, Experience and Outlook. *Journal of Air Transport Management*, **13**, 149-162. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2007.01.001>
- [6] Sawhney, M. (2007) Airline Crew Scheduling from Planning to Operations. *European Journal Operational Research*, **183**, 1013-1027. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.12.046>
- [7] 刘德刚. 航空公司实时飞机和机组调配问题的研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国科学院, 2002.
- [8] 周志忠. 飞行运行实时优化控制研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京航空航天大学, 2002.
- [9] 姚韵. 航空公司不正常航班管理和调度算法研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.
- [10] Qiang, G. (2009) Research on Greedy Simulated Annealing Algorithm for Irregular Flight Schedule Recovery Model. *Proceedings of IEEE International Conference on Grey Systems and Intelligent Services*, Vol. 2, Nanjing, 10-12 November 2009, 1469-1475. <https://doi.org/10.1109/GSIS.2009.5408145>
- [11] 王小平, 曹立明. 遗传算法: 理论、应用与软件实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.
- [12] 井祥鹤, 魏冬峰, 周献中, 等. 运输方式选择多目标优化问题的混合遗传算法[J]. *计算机工程与应用*, 2008, 44(6): 210-212.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网首页：<http://cnki.net/>，点击页面中“外文资源总库 CNKI SCHOLAR”，跳转至：<http://scholar.cnki.net/new>，搜索框内直接输入文章标题，即可查询；
或点击“高级检索”，下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2326-3431，即可查询。
2. 通过知网首页 <http://cnki.net/>顶部“旧版入口”进入知网旧版：<http://www.cnki.net/old/>，左侧选择“国际文献总库”进入，搜索框直接输入文章标题，即可查询。

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：ojtt@hanspub.org