

doi:103969/j. issn. 0490-6756. 2013. 03. 011

多机型不正常航班恢复的时空网络模型

乐美龙, 王婷婷, 吴聪聪

(上海海事大学科学研究院物流研究中心, 上海 201306)

摘要: 航空公司在执行日常飞行任务过程中, 不可避免地会遇到恶劣天气、飞机故障等突发事件。此时, 以最短时间、最小成本, 调用可利用的资源进行航班的恢复是航空公司的重要目标。航班恢复包括飞机恢复、机组恢复及乘客恢复。其中飞机恢复是航空公司考虑的首要因素。在目前涉及飞机恢复的文献中, 往往是单机型的飞机恢复, 但实际中航空公司也可能调用不同机型的飞机进行航班的恢复。本文建立了单机型和多机型的时空网络模型, 结合数学模型, 采用 Gurobi 优化软件进行求解。实验结果表明, 本文所提出的模型在有限时间内可以给出相对优化的恢复方案。

关键词: 飞机恢复; 时空网络; 多机型; 航班恢复

中图分类号: TP319 **文献标识码:** A **文章编号:** 0490-6756(2013)03-0477-07

The time-band model for recovery of multi-type aircrafts' disrupted flights

LE Mei-Long, WANG Ting-Ting, WU Cong-Cong

(The Center of Logistic Research, College of Scientific Research,
Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Unpredictable events like extreme weather, mechanical failure may occur during airlines' daily flights schedule. As a result, it is airlines' primary goal that recovering disrupted flights using available resources in the lowest cost as soon as possible. Airlines recovery includes aircrafts recovery, crew recovery and passengers' recovery. Among all the concerns in the recovery, the aircraft is the first one. In most references, flights' recovery of one type aircraft is common. However, airlines may use different type of aircrafts to recovery disrupted flights. In this paper, a time-band model for multi-type aircrafts is built. In the base of mathematical model, the authors use Gurobi to solve the problem. The data used here is from a big airline in Shanghai. The experimental computational result states the method could get relatively optimal solution in finite time.

Key words: aircraft recovery, time-band, multi-type, flight recovery

1 引言

中国民航局发布的民航行业发展统计公报披露, 2011 年我国航空公司计划执行航班 235.3 万

班, 正常执行 181.5 万班, 航班正常率为 77.2%, 不正常航班比例超过 1/5。据美国航空协会统计, 每年航班不正常事件会给美国航空业造成的损失约 100 亿美元。飞机资源是航空公司最为重要的资

收稿日期: 2012-11-05

基金项目: 上海市自然科学基金创新行动计划项目(10190502500); 上海市科委工程中心项目(09DZ2250400); 上海市教委重点学科项目(J50604)

作者简介: 乐美龙(1964—), 男, 教授, 博导。研究方向为供应链与物流规划。E-mail: meilongle@hotmail.com

通讯作者: 王婷婷。E-mail: ting33398@yahoo.cn

源^[1],在有关飞机恢复方面,前人作了不少有益的探索;Nillofar 提出了同时考虑飞机和乘客的模型,用“航班环”的概念代替“航班”来建立该模型^[2];Rosenberger 提出了关于航班重新排班和调整飞机航线的模型,采用一种选择启发式算法,他们还用该模型来解决机组和乘客问题^[3];Arguello 运用了一种贪婪随机适值搜索过程(GRASP)来重新规划受到地面等待和延误的航班^[4];Bisaillon 提出了一种大规模邻域搜索的启发式算法来解决飞机和乘客的恢复问题,在初始解的基础上进行大规模的原始排班变动^[5]. Abdelghny 运用了一种决策支持工具(DSTAR)来解决航空公司遇到突发事件时的恢复问题^[6];Thengvall 结合了各种资源的平衡来建立模型,运用循环启发式算法来求解^[7];Gang Yu^[8]提出了一种时空网络模型,运用弧与节点建立模型,使得取消和推迟航班的成本最小.但是,该文章解决的是单机型的飞机恢复问题,没有涉及不同机型的相互调用.另外,作者及所在团队也对不正常航班的恢复做了相关研究^[9,10].

2 飞机恢复问题描述

不管是由于飞机故障、机组人员病假等航空公司的原因,还是天气、流量控制等其他原因,航班不正常难以避免.一般来说,航空恢复问题主要包括飞机恢复、机组恢复及乘客恢复.其中飞机是航空公司日常运行中成本最高的部分,因此飞机为首要恢复对象,其次是机组,最后是乘客^[11].进行飞机恢复时,可以采取的措施包括运用备用飞机、飞机调用、飞机互换、飞机超时限飞行等.衡量飞机航线安排的标准一般采用航班取消和推迟成本^[12].

3 时空网络(Time-band)模型

本文采用类似文献[8]的时空网络方法,将航班成本转换为包括推迟成本、取消成本在内的数学模型.这种数学模型可标绘在时空网络图中,从而可以得到飞机的飞行航线.这样,我们将飞机恢复问题转化为成本流最小的问题.在网络图中,节点表示飞机可能停留的时间与机场.连接两个节点的边表示航班,每条边的出发点都表示在该点有可以利用的飞机.因此,有的航班在网络图中会用推迟后的边表示,产生航班推迟成本.另外,在多机型的时空网络图中还存在飞机调用的边,并产生调机成本,这会在后文中作详细解释.

3.1 时空网络图的构建

3.1.1 单机型时空网络 为了后面描述多机型时空网络图的建立步骤,这里先介绍文献[8]给出的单机型网络图的构建方法.在单机型的时空网络图中,存在两种类型的节点,和两种类型的边,它们分别是:(1)中间节点:表示横坐标为机场,纵坐标为时间的非最终降落点的节点;(2)沉没节点:表示各机场飞机最终降落点;(3)航班边:表示航空计划中的航班的边;(4)停场边:表示在某一点飞机不再执行航班,从而直接停在相应机场的边.单机型时空网络的构建步骤如下.

(1) 建立初始航班网络图;

(2) 针对每架可利用的飞机,画出可能的航班边,包括复制边;

(3) 将每个机场-时间节点连接到该机场的沉没节点,形成停场边;

(4) 删除孤立节点.

对于具体算法的描述,文献[8]给出了时空网络图构建步骤,本文不再赘述.

表 1 给出了本文的算例数据,该数据为上海某航空公司波音 737-800 和波音 757-200 的部分航班数据,共有航班 16 个,涉及 4 个机场.同航线航班间的连接时间为 50 min,航班取消成本按照航班上的乘客总票价确定.

现假设 737-800 中的飞机 1 与 757-200 中的飞机 1 发生故障,当天无法正常飞行.根据算例数据,运用上述介绍的单机型时空网络构建方法,构造出这两种机型在出现不正常情况时的时空网络图,如图 1 所示.图中以 30 min 划分时间段,从 11 点至 24 点共有 26 个时间段.以 24 点为结束点是因为考虑到宵禁情况.图中共航班边 51 条,停场边 23 条.点 3,8,14,18 为沉没节点,其余的点为中间节点.

3.1.2 多机型时空网络 在多机型的时空网络图中,存在两种类型的节点,和三种类型的边.除上述单机型的节点和边以外,还有调机边.调机边表示在某一节点用另外机型的飞机代替原机型的飞机执行相应航班的边.多机型时空网络图的转换步骤如下:

(1) 根据第 3.1.1 节中单机型的构建方法构造各机型的时空网络;

(2) 对于可交换的两种机型的时空网络,将 A 机型网络上各机场的时间节点与 B 机型相同机场

表 1 初始航班计划表
Tab.1 Flights schedule

飞机	航班号	出发点	到达点	出发时刻	到达时刻	飞行时长	取消成本(元)
737-800 飞机 1	1	深圳	虹桥	10:00	11:45	1:45	74480
	2	虹桥	广州	12:35	14:25	1:50	166749
	3	广州	虹桥	15:15	17:05	1:50	126216
737-800 飞机 2	4	广州	虹桥	11:30	13:35	2:05	130620
	5	虹桥	深圳	14:25	16:35	2:10	105840
	6	深圳	虹桥	17:25	19:35	2:10	105840
737-800 飞机 3	7	首都	广州	11:00	14:10	3:10	73168
	8	广州	首都	15:00	18:15	3:15	66793
	9	首都	广州	19:05	22:15	3:10	82756
757-200 飞机 1	10	虹桥	首都	13:15	15:40	2:25	35895
	11	首都	虹桥	16:30	18:40	2:10	101445
	12	虹桥	广州	19:30	21:35	2:05	228204
757-200 飞机 2	13	虹桥	广州	11:30	13:30	2:00	83184
	14	广州	虹桥	14:20	16:25	2:05	188265
	15	虹桥	首都	17:15	19:20	2:10	29115
	16	首都	虹桥	20:10	22:25	2:15	125632.5

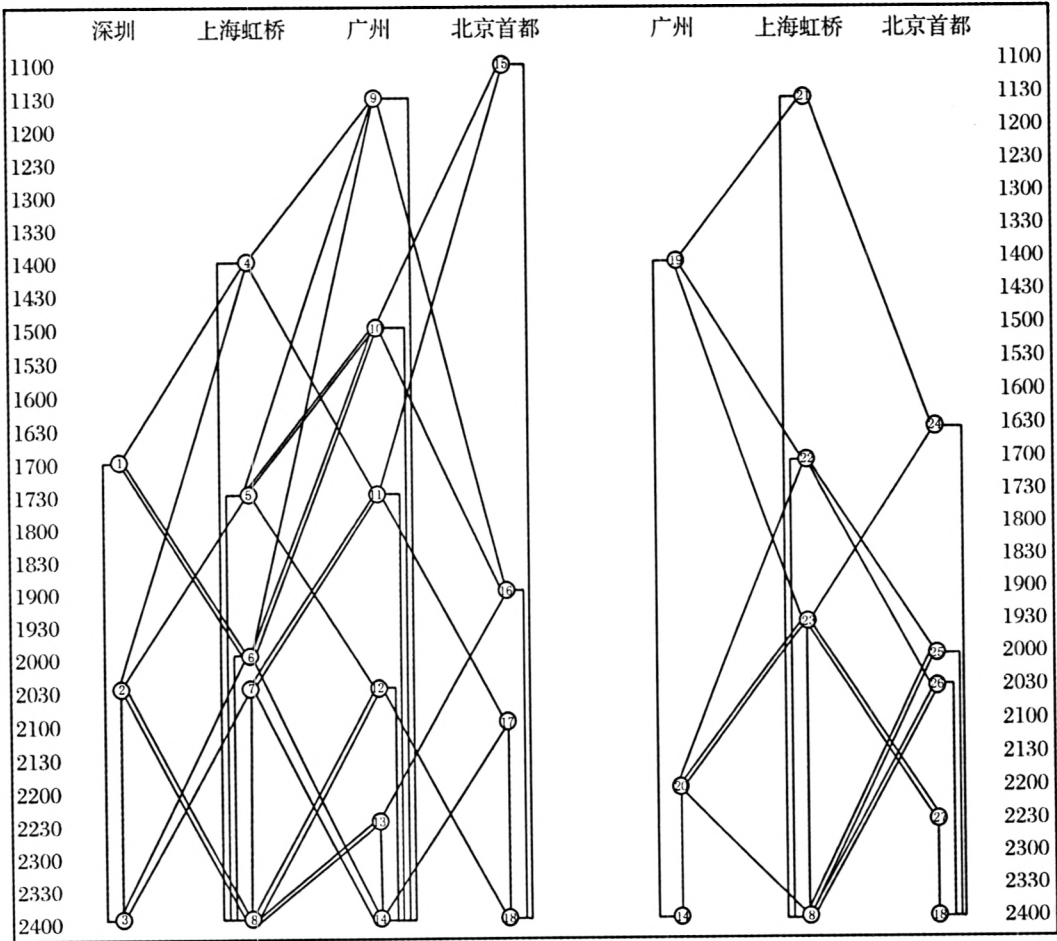


图 1 737-800 和 757-200 的单机型时空网络图
Fig. 1 Time-band transformation network of 737-800 and 757-200 fleets

的时间相同或较晚的时间节点之间加上调机边. 反之, 对 B 机型网络做同样的操作. 这样便得到了两机型之间的调机边.

根据这种方法, 得到算例中两机型综合的时空网络图, 如图 2 所示. 除了第 3.1.1 节中图 1 的节

点和边之外, 还增加了 18 条调机边, 代表 28 种调机情况, 因为有的节点出发的调机边可能包括两种机型的调机. 另外, 经过调机, 原来的航班边可能由另一机型的飞机执行, 因此实际得到的航班边共 90 条. 有些重复边由于图的复杂性, 没有全部画出.

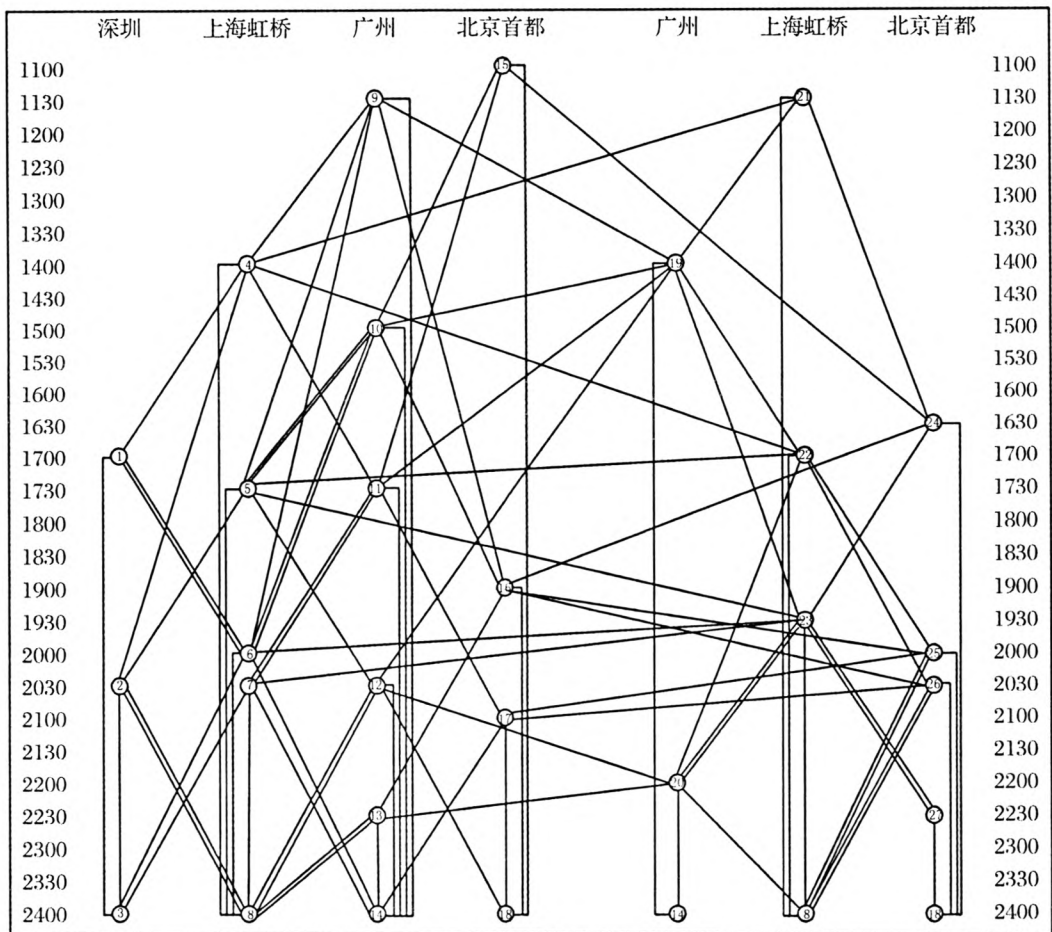


图 2 737-800 和 757-200 两机型时空网络图

Fig. 2 Time-band transformation network of two fleets for sample problem

3.2 数学模型

在求解过程中, 我们的目标是包括推迟成本、调机成本和航班取消成本在内的总成本最小, 这里的推迟成本是指某个航班由于换飞机导致的成本和航班推迟成本之和, 而调机成本是指调机给机场造成的成本, 如人工、设备等的成本. 多机型不正常航班恢复的数学模型如下所示.

(1) 索引: i, j 为点索引; k 为机型索引; f 为航班索引; l 为边索引.

(2) 集合: I 为中间点集合; J 为沉没点集合; K 为机型集合; F 为航班集合; G 为停场边集合; R 为调机边集合; L 为航班边集合; $L(f)$ 为表示航班 f

的航班边集合; $O(i, k)$ 为机型 k 执行的从点 i 出发的航班边集合; $T(i, k)$ 为机型 k 执行的终点为 i 的航班边集合.

(3) 参数: $df_{i,k}$ 为机型 k 执行航班 f 的航班边 l 的推迟成本 (+ 换机成本); c_f 为航班 f 的取消成本; c_r 为调机航班 r 的成本; $a_{i,k}$ 为机型 k 在节点 i 的可用飞机数, $i \in I$; $h_{i,k}$ 为沉没点 i 所需要的机型 k 的飞机数, $i \in J$.

(4) 变量: $x_{f,i,k}$ 表示机型 k 执行航班 f 的航班边 l 时为 1, 否则为 0; y_f 表示航班 f 取消为 1, 否则为 0; w_r 表示执行调机边 r 为 1, 否则为 0; $z_{l,k}$ 表示机型 k 执行停场边 l 的飞机数, $l \in G$.

(5) 目标函数:

$$\min \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} \sum_{f \in F} d_{f,k} x_{f,k}^l + \sum_{f \in F} c_f y_f + \sum_{r \in R} c_r w_r \quad (1)$$

(6) 约束条件:

$$\sum_{k \in K} \sum_{l \in L(f)} x_{f,k}^l + y_f = 1, \forall f \in F \quad (2)$$

$$\sum_{f \in F} \sum_{l \in L(f) \cap O(i,k)} x_{f,k}^l - \sum_{f \in F} \sum_{l \in L(f) \cap T(i,k)} x_{f,k}^l + \sum_{r \in R \cap O(i,k)} w_r - \sum_{r \in R \cap T(i,k)} w_r + \sum_{r \in R \cap T(i,k)} z_{i,k} = a_{i,k}, \forall i \in I, \forall k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{f \in F} \sum_{l \in L(f) \cap T(i,k)} x_{f,k}^l + \sum_{l \in G \cap T(i,k)} z_{i,k} = h_{i,k}, \forall i \in J, \forall k \in K \quad (4)$$

$$x_{f,k}^l \in \{0, 1\}, \forall f \in F, k \in K, l \in L(f) \quad (5)$$

$$y_f \in \{0, 1\}, w_r \in \{0, 1\}, z_{i,k} \in Z_+ =$$

$$\{0, 1, 2, \dots\}, \forall f \in F, r \in R, l \in G, k \in K \quad (6)$$

在该模型中,目标函数(1)为包括换机成本在内的航班推迟成本,航班取消成本及调机成本总和;约束条件中,式(2)表示对于任意的航班,要么由飞机执行,要么取消;式(3)表示由各点的进出平衡,等号右边表示该节点的飞机平衡流量;式(4)指各机场必须满足当天结束时各机型的飞机数量;式(5)和式(6)为变量取值范围.该模型保证了截止时间内各机场不同机型的飞机数量满足航班计划,以保证第二天航班计划的正常执行.需要说明的是,若进行单机型恢复计算,则将式(1)中的第三部分,以及式(3)中的第三、四项等于0,即式(1)、(3)式可由式(7)、(8)代替^[13].

$$\min \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} \sum_{f \in F} d_{f,k} x_{f,k}^l + \sum_{f \in F} c_f y_f \quad (7)$$

$$\sum_{f \in F} \sum_{l \in L(f) \cap O(i,k)} x_{f,k}^l - \sum_{f \in F} \sum_{l \in L(f) \cap T(i,k)} x_{f,k}^l + \sum_{l \in G \cap T(i,k)} z_{i,k} = a_{i,k}, \forall i \in I, \forall k \in K \quad (8)$$

4 复杂度分析

在时空网络模型的初始化过程中,节点的个数与机场个数线性相关.不妨设节点数为 $O(mt)$,其中 m 指机场数量, t 指最大时间段数.由于 t 是任意的,因此节点数只与机场数线性相关.设 r 指可用飞机数,则定位机场和时间时需要线性搜索,执行 r 次,初始的节点标记次数最大值为 $O(r(m+t))$.将标记点进行排序时最多需要 $O(r \log r)$ 次.

在时空网络模型的构造时,需要添加航班边,去除未标记点,以及添加停场边三个主要步骤.设

n 为航班数,则航班边数为 $O(mnt)$,即与 m 和 n 呈多项式的关系.添加航班边时找出一个点需要 $O(m+t)$ 次,将一个元素放到有序列表中需要 $O(\log(mt))$.因此添加航班边需要 $O(mnt(m+n+\log(mt)))$ 次.添加停场边可以通过找出对应的沉没点来进行,共需要 $O(m^2t)$ 次.整个构造过程的复杂度由添加航班边来控制,需要 $O(mt^2)$ 次,与机场数和航班数呈伪多项式的关系.在添加调机边时,设机型数为 s ,则搜索出可相互替换的两种机型最多需要 $O(s(s-1))$ 次.找出其中一个机型网络图的一个节点需要 $O(m_1+t)$ 次, m_1 指其中一个机型网络的机场数.首先需要找到另一机型网络中与节点相同的机场,然后找出晚于该节点时间的节点,添加调机边.若 m_2 指另一机型网络的机场数,则需要 $O((sm_1+t)((s-1)m_2+t))$ 次.

因此,时空网络模型可以在多项式时间内给出可行解,解决时间相对较快.由于该模型中时间段任意划分,时间节点位置的精确性与时间段的长短有关.时间段越短,节点位置越精确.因此,该模型以30 min作为时间段的划分,计算出的航班推迟成本也存在不精确性.在实际计算时,需要将可行解进行调整,得出准确的成本.

5 算例结果分析

本文用C#作为编程语言,在个人笔记本电脑(Duo CPU@2 GHz,1 GB RAM)上运行,使用Gurobi46优化软件进行求解.以第3.1.1节给出的数据分别进行单机型和多机型不正常航班的恢复进行计算,可以得到可行解.

本文在计算时基于以下假设:(1)航班取消成本按照该航班上乘客的机票总价计算;(2)航班推迟成本按照每分钟120元计算^[2];(3)航班换机型飞行时,若737-800代替757-200,由于飞机比原来容量小,因此产生换机成本,按照每个乘客50元计算,这个取值基于换机型给乘客带来的心理反感成本,该成本加到航班推迟成本中合并计算.反之,用大飞机替换小飞机则不产生换机成本;(4)飞机调换会在相应机场产生调机成本,按照每次1000元计算,这个取值基于换机型时产生的设备及人工成本;(5)航班间连接时间为50 min.

表2为单机型计算结果.得到优化结果所用时间为0.02 s,计算时间较短.软件优化结果总成本为451011.5元,按照实际时间调整后的总成本为453411.5元.

表 3 为机型之间可以替换的航班恢复结果,得到该结果所用时间为 0.03 s,计算时间较短. 软件优化结果所得总成本为 426341 元,按照实际时间调整后的总成本为 438941 元.

表 2 单机型波音 737-800、757-200 航班恢复安排表
Tab. 2 Separate recovering flights schedules for 737-800 and 757-200

机型	飞机	航班号	出发点	到达点	出发时刻	到达时刻	推迟成本(元)	取消成本(元)	调机成本(元)
737-800	2	4	广州	虹桥	11:30	13:05			
		2	虹桥	广州	13:55	15:45	9600		
		8	广州	首都	16:35	19:50	11400		
		9	首都	广州	20:40	23:50	11400		
	3	7	首都	广州	11:00	14:10			
		3	广州	虹桥	15:15	17:05			
		5	虹桥	深圳	17:55	20:05	25200		
		6	深圳	虹桥	20:55	23:05	25200		
	取消	1	深圳	虹桥				74480	
757-200	2	10	虹桥	首都	13:15	15:40			
		11	首都	虹桥	16:30	18:40			
		12	虹桥	广州	19:30	21:35			
		14	广州	虹桥	22:25	24:30	58200		
	取消	13	虹桥	广州				83184	
		15	虹桥	首都				29115	
		16	首都	虹桥				125632.5	

表 3 波音 737-800 与 757-200 多机型航班恢复安排表
Tab. 3 Simultaneous recovering flights schedules for 737-800 and 757-200

机型	飞机	航班号	出发点	到达点	出发时刻	到达时刻	推迟成本(元)	取消成本(元)	调机成本(元)
737-800	2	4	广州	虹桥	11:30	13:35			
		5	虹桥	深圳	14:25	16:35			
		6	深圳	虹桥	17:25	19:35			
	3	2	虹桥	广州	20:25	22:15	56400		
		7	首都	广州	11:00	14:10			
		8	广州	首都	15:00	18:15			
757-200		16	首都	虹桥	20:10	22:25	5250		1000
		13	虹桥	广州	11:30	13:30			
		14	广州	虹桥	14:20	16:25			
		12	虹桥	广州	19:30	21:35			
		3	广州	虹桥	22:25	24:15	51600		1000
		取消	1	深圳	虹桥			74480	
			9	首都	广州			82756	
			10	虹桥	首都			35895	
			11	首都	虹桥			101445	
			15	虹桥	首都			29115	

上述两次优化结果,与直接取消受扰航班相比较的情况如表 4 所示. 其中直接取消方式为取消所有受扰航班,需要取消 6 个航班,即航班 1,2,3,10,11,12.

表 4 三种情况的详细比较

Tab. 4 Comparison for three different recovering solutions

情况	推迟航班数	取消航班数	计算时间(s)	总成本(元)
直接取消		6		732989
单机型	6	4	0.02	453411.5
多机型	3	5	0.03	438941

单机型航班恢复结果成本降低了 279577.5 元,优化程度达 38.14%;多机型优化结果成本降低了 294048 元,优化程度达 40.12%。而多机型优化结果在单机型优化结果的基础上成本又降低了 14470.5 元,优化程度为 3.19%。

6 结 语

本文针对发生突发事件时航班计划受扰的情况,运用时空网络模型解决多机型不正常航班的恢复问题,并用 Gurobi 优化软件进行求解。本文运用算例数据,分别建立了单机型、多机型的时空网络模型,并求解。实验结果表明,单机型时空网络模型得出的成本较取消受扰航班成本大幅降低,而多机型模型得出的成本又进一步小幅降低。同时,模型给出的解决方案满足飞机流平衡,不影响次日航班的正常执行。但是,本文尚存在一些不足之处,模型只能解决当日的航班恢复,没有考虑多日内的恢复问题以及机组人员和乘客的安排。这些均为我们进一步的研究方向。

参考文献:

[1] Kohl N, Larsen A, Larsen J, *et al.* Airline disruption management-perspectives, experiences and outlook [J]. Journal of Air Transport Management, 2007, 13: 149.

[2] Niloofar J, Sayed H Z. Simultaneous recovery model for aircraft and passengers [J]. Journal of the Franklin Institute, 2011, 348: 1638.

[3] Jay M R, Ellis L J, George L N. Rerouting aircraft for airline recovery [J]. Transportation Science, 2003, 37(4): 408.

[4] Arguello M F, Bard J F, Yu G. A GRASP for aircraft routing in response to groundings and delays [J]. Journal of Combinatorial Optimization, 1997, 5:

211.

[5] Serge B, Jean F C, Gilbert L, *et al.* A large neighborhood search heuristic for the aircraft and passenger recovery problem [J]. 4OR-Q J Oper Res, 2011, 9: 139.

[6] Khaled F A, Ahmed F A, Goutham E. An integrated decision support tool for airlines schedule recovery during irregular operations [J]. European Journal of Operational Research, 2008, 185: 825.

[7] Benjamin G T, Jonathan F B, Gang Y. Balancing user preferences for aircraft schedule recovery during irregular operations [J]. IIE Transactions, 2000, 32: 181.

[8] Gang Y, Jonathan F B, Michael F A. Optimizing aircraft routings in response to groundings and delays [J]. IIE Transactions, 2001, 33: 931.

[9] Le M L, Wu C C, Zhan C X. 30 years' march of mathematical programming-a classification and literature review[C] // 2011 International Conference on Transportation and Mechanical & Electrical Engineering (TMEE 2011). 2011: 113.

[10] Le M L, Sun L H. Optimal airline crew recovery considering flight time constraint and pairing rule[C] // 2011 International Conference on Transportation and Mechanical & Electrical Engineering (TMEE 2011). 2011: 118.

[11] Jen C, Allan L, Jesper L, *et al.* Disruption management in the airline industry-Concepts, models and methods [J]. Computers & Operations Research, 2010, 37: 809.

[12] Massoud B. Airline operations and scheduling[M]. 2nd ed. USA: Ashgate Publishing Limited, 2010.

[13] 朱金福. 航空运输规划[M]. 陕西: 西北工业大学出版社, 2009.

[责任编辑: 伍少梅]