

# 不正常航班恢复的飞机和乘客优化调配模型

乐美龙, 黄文秀

LE Meilong, HUANG Wenxiu

上海海事大学 科学研究院, 上海 201306

Academy of Science, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China

LE Meilong, HUANG Wenxiu. Optimization allocation models for recovery of disrupted flights' aircrafts and passengers. Computer Engineering and Applications, 2014, 50(7):242-246.

**Abstract:** In real life, an airline schedule is often disrupted by lots of factors, such as unexpected aircraft breakdown, adverse weather conditions, air traffic control, etc. These problems not only increase the airlines' operational costs, but also bring lots of loss to the passengers. In order to reduce the airlines' operational costs and the passengers' loss, this paper provides two mathematical models. One is based on aircrafts' allocations, and the other is based on the disrupted passengers' allocations. The models are solved by IBM ILOG CPLEX, and new schemes of aircrafts' allocations and disrupted passengers' allocations are generated. Finally, an example is presented to illustrate the validity and practicability of the mathematical models.

**Key words:** flight; aircrafts' allocation; passengers' allocation; recovery of itinerary

**摘 要:** 现实生活中有很多因素影响航空公司的正常运营, 比如飞机故障、极端天气、航空管制等, 这些问题的产生不仅增加了航空公司的运营成本, 而且还给乘客带来许多损失。为了降低航空公司的运营成本和乘客的损失, 从飞机调配和受干扰乘客的重新调配出发构建模型, 通过 IBM ILOG CPLEX 软件对两个模型进行求解, 并获得了备用恢复行程的飞机调配方案和受干扰乘客的重新调配方案。通过实际算例验证了该模型的有效性和实用性。

**关键词:** 航班; 飞机调配; 乘客调配; 恢复行程

**文献标志码:** A **中图分类号:** N945.15 **doi:** 10.3778/j.issn.1002-8331.1306-0053

## 1 引言

现实生活中当原始航班受到不正常因素影响时, 可能导致多个航班受到干扰, 与此同时受干扰航班上的乘客也必然会受到影响。针对这一问题, 作为航空公司两大重要资源的飞机资源和乘客资源必须做出相应的调整。本文讨论研究了不正常状况发生时受干扰飞机和乘客的恢复问题。

长期以来, 为飞机和乘客恢复建立准确的数学模型是航空运筹学领域的研究重点, 它可以给航空公司带来巨大的经济效益。Teodorovic 和 Guberinic<sup>[1]</sup>是较早研究飞机恢复(Aircraft Recovery Problem, ARP)的学者, 他们考虑了一个和多个飞机出现问题的情况, 以最小化乘客

总延迟时间为目标函数, 在求解模型时用到了分枝定界法(Branch & Bound, B & B)。Teodorovic 和 Stojkovic<sup>[2]</sup>运用了一种启发式算法来解决 ARP 模型的优化问题, 但是, 其首要目标函数是最小化航班取消的数量, 其次是最小化延迟乘客数量, 模型求解采用了动态规划方法。Jarrah<sup>[3]</sup>对于短暂的飞机短缺问题进行了研究, 其模型允许使用调机策略, 分别对延误和取消策略建立了最小费用网络流模型, 考虑的影响成本包括: 航班延迟和取消成本、旅客转移收益损失成本和旅客满意度成本。Lettovsky<sup>[4]</sup>提出了一种航空公司综合恢复模型, 包括飞机恢复、机组恢复和乘客恢复, 引入了一种滚动时域的概念, 在这个特定时段内飞机起飞的数量受到限制。

**基金项目:** 上海市自然科学基金创新行动计划项目(No.10190502500); 上海海事大学启动基金; 上海市科委工程中心项目(No.09DZ2250400); 上海市教委重点学科项目(No.J50604)。

**作者简介:** 乐美龙(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 研究领域: 物流规划与管理, 供应链管理等; 黄文秀(1988—), 男, 硕士研究生, 研究领域: 航空公司运营规划与管理, 供应链管理。E-mail: hwx20123051@163.com

**收稿日期:** 2013-06-08 **修回日期:** 2013-08-02 **文章编号:** 1002-8331(2014)07-0242-05

Clarke<sup>[5]</sup>构建了一个乘客流模型(Passenger Flow Model, PFM),他认为航空公司中的乘客恢复有一定的优先级,应该在航班时刻表恢复之后进行解决;根据OD(Origin-Destination)对乘客定义了优先级。目标函数是最大化乘客收益,其约束条件中包含了航班容量约束、乘客行程数量约束,以及乘客服务水平约束。Bratu等<sup>[6]</sup>在综合恢复中考虑了备用机组,对乘客成本和航班成本做了一个权衡,模型描述了乘客的行程和航段之间的关系,目标函数是获得最大利润和提高客户满意度。Jafari等<sup>[7]</sup>针对飞机和乘客的综合恢复问题进行了研究,它的目标函数是最小化总成本,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。约束条件主要包括飞机和乘客综合约束、乘客行程约束和确保乘客被送到目的地的约束。高强等<sup>[8]</sup>在飞机和机组线路恢复计划基础上建立了乘客流恢复模型,其模型的特点是以路径流量为变量建立线性规划模型,然后用深度优先算法生成可行路径。赵秀丽等<sup>[9]</sup>针对不正常航班机组恢复问题提出了一种禁忌搜索算法。文献[10]针对航班计划恢复问题又提出了匈牙利算法和遗传算法结合的混合优化算法。Petersen等<sup>[11]</sup>运用列生成和Benders分解算法对航空公司综合恢复问题进行了研究,将航空恢复问题分为4个模块:航班时刻表恢复、飞机恢复、机组恢复和乘客流恢复,通过分解、优化的迭代计算,获取整体最优解。LE Meilong等<sup>[12]</sup>针对飞机和机组恢复问题,提出了一种伴随节点合并的迭代树生成算法。乐美龙等<sup>[13]</sup>又提出了一种多机型不正常航班恢复的时空网络模型。

2 问题描述

图1表示正常情况下航班、飞机和乘客执行情况,包括3架飞机(K1、K2、K3),7个航班(f1、f2、f3、f4、f5、f6、f7),5个机场(A、B、C、D、E),4种乘客行程(P1、P2、P3、P4)。飞机K1执行航班f1、f2,飞机K2执行航班f3、f4,飞机K3执行航班f5、f6、f7。乘客行程P1是从机场A出发乘坐航班f1到机场B,然后在机场B换乘航班f2到其目的地机场D。乘客行程P2是从机场B出发乘坐航班f2到机场A,然后在A机场换乘航班f7到其目的地机场E。乘客行程P3是从机场C出发乘坐航班f3到达机

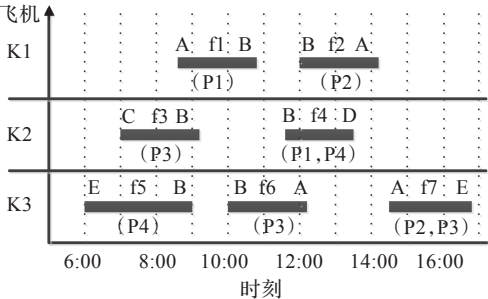


图1 正常情况下的航班、飞机和乘客

场B,然后在机场B换乘航班f6到机场A,最后在机场A换乘航班f7到其目的地机场E。乘客行程P4是从机场E出发乘坐航班f5到机场B,然后在B机场换乘航班f4到其目的地机场D。正常情况下,航空公司和乘客都会按照图1所示的计划有序地执行,此时,4种乘客行程均不会受到干扰。

图2表示由于飞机故障或其他原因造成航班f1和f3延迟。当航班f1和f3被迫延迟后,其后续航班和乘客都会受到干扰。以受干扰航班f1为例,对于行程为P1的乘客,由于航班f1的延迟导致航班f4不能按时起飞,行程为P1的乘客注定受到严重干扰,与此同时,航班f2由于航班f1的延迟而没有充足的过站时间,所以也造成航班f2延迟,因此航班f2中的行程为P2的乘客必然受到干扰。同样航班f3的延迟也会导致其后续航班和乘客受到一定的干扰。因此,当不正常状况发生时,航空公司必须重新安排受干扰乘客的备用恢复行程飞机调配和受干扰乘客重新调配问题。

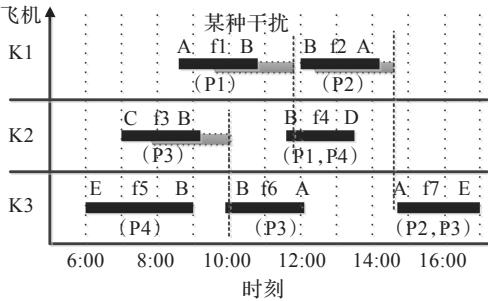


图2 不正常情况下的航班、飞机和乘客

3 模型构建

3.1 受干扰乘客的备用恢复行程飞机调配模型

集合、参数和决策变量:  $K$  为干扰发生时,备用恢复行程飞机集合,  $k \in K$ ;  $R$  为干扰发生时,备用恢复行程所在的航班串集合,  $r \in R$ ;  $t_1^r$  为备用恢复行程航班串  $r \in R$  的初始航班的最早起飞时间;  $t_2^r$  为备用恢复行程航班串  $r \in R$  的前一航班的降落时间;  $u$  为飞机最小过站时间;  $C_{kr}$  为飞机  $k \in K$  指派给备用恢复行程航班串  $r \in R$  的成本;  $x_{kr} = 1$ , 代表飞机  $k \in K$  指派给备用恢复行程航班串  $r \in R$ , 否则  $x_{kr} = 0$ 。

min ∑\_{k ∈ K} ∑\_{r ∈ R} C\_{kr} x\_{kr} (1)

∑\_{r ∈ R} x\_{kr} = 1, ∀ k ∈ K (2)

∑\_{k ∈ K} x\_{kr} = 1, ∀ r ∈ R (3)

x\_{kr} = { 1 or 0, t\_1^r - t\_2^r - u ≥ 0, 0, t\_1^r - t\_2^r - u < 0 }, ∀ k ∈ K, ∀ r ∈ R (4)

目标函数(1)表示最小化受干扰乘客备用恢复行程的飞机调配成本;约束(2)确保飞机  $k \in K$  只能且必须

执行一个备用恢复行程航班串;约束(3)确保备用恢复行程航班串  $r \in R$  只能且必须由一个飞机执行;约束(4)确保  $x_{kr}$  为带有约束的 0-1 决策变量,当备用恢复行程航班串  $r \in R$  的初始航班的最早起飞时间  $t_1^r$  与  $r \in R$  的前一航班的降落时间  $t_2^r$  之差大于等于最小过站时间  $u$  时,决策变量  $x_{kr}$  可以取 1 或 0,表示飞机  $k \in K$  可以调配给行程  $r \in R$ ,也可以不调配;否则,决策变量只能取 0,表示飞机  $k \in K$  不能调配给行程  $r \in R$ 。

### 3.2 受干扰乘客重新调配模型

集合:  $F$  为不正常状况发生时,受干扰航班的集合,  $f \in F$ ;  $P$  为受干扰乘客的行程集合,  $p \in P$ ;  $IT(p)$ : 行程  $p \in P$  中的航班集合,  $f \in IT(p)$ ;  $R(p)$  为行程  $p \in P$  的备用恢复行程航班串集合,  $r \in R(p)$ 。

参数:  $CD_f$  为受干扰航班  $f$  上的乘客延误 1 min 的成本,  $f \in F$ ;  $CC_f$  为受干扰航班  $f$  上的单位乘客取消的成本,  $f \in F$ ;  $S(p)$  为行程  $p \in P$  的乘客被迫换乘其他航空公司航班或转换其他交通工具给该航空公司造成的单位惩罚成本;  $CD_r$  为受干扰乘客换乘备用恢复行程  $r \in R(p)$  的成本,  $p \in P$ ;  $td_{IT(p,n)}$  为受干扰行程  $p$  中第  $n$  个航段的实际起飞时间,  $p \in P$ ;  $ta_{IT(p,n-1)}$  为受干扰行程  $p$  中第  $(n-1)$  个航段的实际降落时间,  $p \in P$ ;  $T_f$  为受干扰航班  $f \in F$  的原计划起飞时间;  $t_r$  为备用恢复行程  $r \in R(p)$  初始航班的起飞时间,  $p \in P$ ;  $t$  为干扰情况的发生时间;  $N_p$  为受干扰行程  $p \in P$  上的乘客人数;  $NP_f$  为受干扰航班  $f \in F$  上的乘客人数;  $NR_r$  为备用恢复行程  $r \in R(p)$  原有的乘客人数,  $p \in P$ ;  $CAP_r$  为备用恢复行程  $r \in R(p)$  所用飞机的容量,  $p \in P$ ;  $IT(p,n)$  为受干扰行程  $p$  中第  $n$  个航段,  $p \in P$ 。

决策变量:  $z_f = 1$ , 受干扰航班  $f \in F$  被取消, 否则  $z_f = 0$ ;  $y_p = 1$ , 行程  $p \in P$  受到干扰, 否则  $y_p = 0$ ;  $y_r = 1$ , 备用恢复行程  $r \in R(p)$  受到干扰, 否则  $y_r = 0$ ;  $it_p^r$ , 行程  $p \in P$  的乘客被重新分配给备用恢复行程  $r \in R(p)$  的人数;  $trn_p$ , 行程  $p \in P$  的乘客换乘其他航空公司或转换其他交通工具的人数;  $td_f$ , 受干扰航班  $f \in F$  的实际起飞时间;  $ta_f$ , 受干扰航班  $f \in F$  的实际降落时间;  $t_{del}^f$ , 受干扰航班  $f \in F$  的延误时间。

$$\min \sum_{f \in F} CD_f(1 - z_f)[td_f - T_f]NP_f + \sum_{f \in F} CC_f z_f NP_f + \left( \sum_{p \in P} S_p trn_p \right) + \left[ \sum_{p \in P} \sum_{r \in R(p)} CD_r it_p^r (ta_{it(r,l)} - ta_{it(p,l)}) \right] \quad (1)$$

$$ta_f = td_f + DT_f(1 - z_f), \forall f \in F \quad (2)$$

$$td_f = T_f + t_{del}^f, \forall f \in F \quad (3)$$

$$td_f \geq T_f, \forall f \in F \quad (4)$$

$$y_p \geq z_f, \forall p \in P, \forall f \in IT(p) \quad (5)$$

$$\sum_{r \in R(p)} it_p^r + trn_p = N_p y_p, \forall p \in P \quad (6)$$

$$\sum_{r \in R(p)} it_p^r + NR_r \leq CAP_r, \forall r \in R(p), \forall p \in P \quad (7)$$

$$t_r - t \geq u, \forall r \in R(p) \quad (8)$$

$$\sum_{p \in P} it_p^r \leq \sum_{p \in P} N_p(1 - y_r), \forall r \in R(p) \quad (9)$$

$$(td_{IT(p,n)} - ta_{IT(p,n-1)} - u) \times y_p \leq 0, \forall p \in P \quad (10)$$

$$(td_{IT(p,n)} - ta_{IT(p,n-1)} - u) \times (1 - y_p) \geq 0, \forall p \in P \quad (11)$$

$$z_f, y_p, y_r = \{0, 1\}; td_f, ta_f, t_{del}^f \in \mathbb{R}; it_p^r, trn_p \in \mathbb{Z}, \forall f \in F, \forall p \in P, \forall r \in R(p) \quad (12)$$

目标函数(1)表示最小化乘客受干扰情况下的重新调配分配成本,包括受干扰航班乘客延误成本、受干扰航班乘客取消成本和受干扰乘客换乘其他航空公司航班或转换其他交通工具给该航空公司造成的惩罚成本,以及受干扰乘客换乘备用恢复行程的延误成本;约束(2)表示受干扰航班的实际降落时间等于实际起飞时间与航班飞行时间之和;约束(3)表示受干扰航班的实际起飞时间等于计划起飞时间与航班延误时间之和;约束(4)表示受干扰航班的实际起飞时间与计划起飞时间的关系;约束(5)确保行程  $p$  中有一个或多个航班取消,则行程  $p$  受到干扰。约束(6)确保行程  $p$  受干扰时,它的所有乘客都被重新调配;约束(7)确保被分配给备用恢复行程的受干扰乘客加上它的原有乘客不超过该行程的飞机容量;约束(8)确保备用恢复行程初始航班的起飞时间与干扰发生时间之差不小于飞机最小过站时间;约束(9)确保受干扰乘客不被分配给一个中间有取消航班的行程;约束(10)和(11)确保行程  $p$  中的航班之间有足够的飞机过站时间;约束(12)确保  $z_f, y_p, y_r$  为 0-1 决策变量,  $td_f, ta_f, t_{del}^f$  为正实数,  $it_p^r, trn_p$  为整数。

## 4 算例和算例分析

本文选取上海航空公司航班计划表的部分实际数据,如表 1 所示。乘客的行程一般由航班构成,该航班表包含了 28 个航班,15 个乘客行程,各参数设计如下:飞机最小过站时间  $u$  为 50 min,受干扰航班乘客的单位延误成本  $CD_f$  为 3 元;受干扰航班  $f$  被取消的单位乘客成本  $CC_f$  为该航班的单位乘客费用;受干扰乘客转换其他航空公司或其他交通工具对上海航空公司的惩罚成本  $S(p) = \lambda \times CC_f$ , 系数  $\lambda = 1.1$ ;受干扰乘客换乘备用恢复行程的单位延误成本为 1 元;三种机型 737-800、



表1 航班计划表

机型、飞机尾号	航班号	始发机场	目的机场	离港时间	到港时间	旅客数量/人	乘客费用/(元·人 <sup>-1</sup> )	飞机最大容量/人
767-300 2498	FM9373	虹桥	深圳	8:10	10:35	56	450	225
	FM9374	深圳	虹桥	11:40	13:35	80	500	225
	FM9305	虹桥	广州	14:30	16:35	136	630	225
	FM9306	广州	虹桥	17:30	19:35	140	680	225
737-800 2876	FM9253	虹桥	厦门	8:05	9:30	112	380	167
	FM9254	厦门	虹桥	10:20	12:00	193	450	167
	FM9107	虹桥	首都	13:15	15:40	130	680	167
	FM9102	首都	虹桥	16:35	18:45	120	450	167
	FM9307	虹桥	广州	20:30	22:35	137	640	167
767-300 5132	FM9303	虹桥	广州	8:30	10:35	78	630	225
	FM9304	广州	虹桥	11:30	13:35	104	630	225
	FM9315	虹桥	广州	16:00	18:05	136	630	225
	FM9316	广州	虹桥	18:55	21:10	165	680	225
	FM9523	虹桥	福州	22:00	23:15	159	310	225
757-200 5077	FM9163	虹桥	太原	8:05	10:10	139	360	239
	FM9164	太原	虹桥	11:05	12:55	146	430	239
	FM9259	虹桥	厦门	14:45	16:15	168	380	239
	FM9347	厦门	广州	17:05	18:10	170	450	239
	FM9350	广州	虹桥	19:05	21:10	145	680	239
737-300 5370	FM9311	虹桥	广州	9:20	11:25	111	630	225
	FM9312	广州	虹桥	12:25	14:30	167	680	225
	FM9381	虹桥	郑州	15:10	16:50	111	400	225
	FM9382	郑州	虹桥	17:40	19:05	134	400	225
737-800 2632	FM9308	广州	虹桥	8:10	10:15	136	680	167
	FM9301	虹桥	广州	11:30	13:30	98	630	167
	FM9302	广州	虹桥	14:30	16:35	36	630	167
	FM9133	虹桥	天津	17:30	19:15	56	310	167
	FM9134	天津	虹桥	20:10	22:05	38	310	167

767-300、757-200 的 CASM 值分别为 0.32、0.48、0.36。 $C_{kr}=CASM_k\times d_r\times CAP_k$ ， $C_{kr}$  为飞机调配成本， $CAP_k$  为飞机  $k\in K$  的容量， $CASM_k$  为飞机  $k\in K$  可用座位公里成本， $d_r$  为备用恢复行程串  $r$  的行程距离。

(1)不正常状况 1:尾号为 2498 的飞机在 13:35 到达虹桥机场后,由于飞机故障造成 4 个小时的延误。此时,航班 FM9305 和 FM5306 受到干扰,其乘客也受到干扰。

通过 IBM ILOG CPLEX 12.2 软件对受干扰飞机和乘客分别进行备用行程飞机调配和乘客重新调配,运行环境为英特尔酷睿 2 双核 T6570@ 2.1 GHz 笔记本处理

器,5 120 MB 内存,64 位 Windows 7 操作系统,求解时间分别为 4.38 s 和 5.68 s。备用恢复行程飞机调配模型的优化结果显示:机型为 757-200,尾号为 5077 的飞机执行航班 FM9315、FM9316、FM9523;机型为 767-300,尾号为 5132 的飞机执行航班 FM9259、FM9347、FM9350;调整后的飞机调配成本为 744 205 元,调整前的飞机调配成本为 755 712 元,调整前后相比,飞机调配成本降低了 11 507 元,并且指派后的飞机都满足时间和空间要求。经过微调后飞机和乘客恢复方案如表 2 所示,优化后的乘客调配成本为 206 585 元,如果在不正常状况发

表2 不正常情况 1 的恢复方案

机型、飞机尾号、容量	航班号	始发机场	目的机场	离港时间	到港时间	原载乘客+重新分配乘客/人
757-200、5077、239	FM9315	虹桥	广州	16:00	18:05	136+103
	FM9316	广州	虹桥	18:55	21:10	165+74
	FM9523	虹桥	福州	22:00	23:15	159
767-300、5132、225	FM9259	虹桥	厦门	14:45	16:15	168+33
	FM9347	厦门	广州	17:05	18:10	170+33
	FM9350	广州	虹桥	19:05	21:10	145+66
取消航班	FM9305(未调配乘客为 0 人)			FM9306(未调配乘客为 0 人)		

表3 针对不正常情况2的恢复方案

机型、飞机尾号、容量	航班号	始发机场	目的机场	离港时间	到港时间	原载乘客+重新分配乘客/人	延误/min
767-300、5132、225	FM9304	广州	虹桥	11:30	13:35	104+69	0
	FM9315	虹桥	广州	16:00	18:05	136+58	0
737-300、5370、225	FM9312	广州	虹桥	12:25	14:30	167+89	0
737-800、2632、167	FM9302	广州	虹桥	14:50	16:55	36	20
	FM9133	虹桥	天津	17:45	19:30	56	10
	FM9134	天津	虹桥	20:20	22:15	38	10
取消航班	FM9308(未重新调配乘客为9人)		FM9301(未重新调配乘客为9人)				

生后,采用直接顺延所有受干扰的航班所产生的乘客延误成本为231 840元,优化后较优化前乘客调配成本降低了25 255元。因此,通过计算优化模型,飞机和乘客恢复的总成本降低了11 507+25 255=36 762元。

(2)不正常状况2:由于机场原因,机型737-800的飞机在8:00~14:00不能在广州机场起降。

针对上述状况,由于飞机调配方案已经为最优(在此不再列出调配方案),只需对乘客进行重新调配。通过CPLEX优化软件进行求解,运行时间为3.56 s,经过微调后的具体方案如表3所示。当不正常状况发生后,采用直接顺延所有受到干扰的航班所产生的延误成本为251 720元,而优化后的总成本为141 579元,相对于直接顺延航班,优化后使总成本降低了111 141元。

5 总结

研究了航空公司不正常状况发生时,受干扰乘客的备用恢复行程飞机调配和受干扰乘客重新调配问题,考虑了乘客行程的连续性、完整性和飞机的乘客容量限制。通过算例验证了运用本文模型可以在短时间内取得优化的、可行的、经济的调配方案,可帮助航空公司迅速恢复飞机和乘客的调配计划,表明模型具有一定的实用性和有效性。但是,在目前的研究中,仍然存在一些问题,比如,本文没有考虑到干扰状况发生时,机组人员的重新调配问题,这将成为后续的研究方向。

参考文献:

[1] Teodorovic D, Gubernic S. Optimal dispatching strategy on and airline network after a schedule perturbation[J]. European Journal of Operations Research, 1984, 15: 178-182.  
[2] Teodorovic D, Stojkovic G. Model for operational daily air-

line scheduling[J]. Transportation Planning and Technology, 1990, 14: 273-285.  
[3] Jarrah A I Z, Yu G, Krishnamurthy N, et al. A decision support framework for airline flight cancellations and delays[J]. Transportation Science, 1993, 27(3): 266-280.  
[4] Lettovsky L. Airline operations recovery: an optimization approach[D]. Georgia Institute of Technology, 1997.  
[5] Clarke M D D. Development of heuristic procedures for flight rescheduling in the aftermath of irregular airline operation[D]. Massachusetts Institute of Technology, 1998.  
[6] Bratu S, Barnhart C. Flight operations recovery: new approaches considering passenger recovery[J]. Journal of Scheduling, 2006, 9: 279-298.  
[7] Jafari N, Zegordi S H. The airline perturbation problem: Considering disrupted passengers[J]. Transportation Planning and Technology, 2010, 33(2): 203-220.  
[8] 高强, 严俊, 陆宏兰. 不正常航班旅客流恢复方法[J]. 科学技术与工程, 2011, 27(9).  
[9] 赵秀丽, 朱金福, 郭梅. 航空公司不正常航班机组恢复模型和算法研究[J]. 交通科学与工程, 2010, 26(4): 76-79.  
[10] 赵秀丽, 孙梅. 航班计划恢复模型和混合优化算法研究[J]. 广西大学学报: 自然科学版, 2012, 37(2): 336-340.  
[11] Petersen J D, Sölveling G. An optimization approach to airline integrated recovery[J]. Transportation Science, 2012, 46(4): 482-500.  
[12] Le Meilong. Solving airlines disruption by considering aircraft and crew recovery simultaneously[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2013, 18(2): 243-252.  
[13] 乐美龙, 王婷婷, 吴聪聪. 多机型不正常航班恢复的时空网络模型[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2013, 50(3): 477-483.