

DOI:10.16356/j.1005-2615.2015.04.012

## 航空公司短期航班计划编排模型及算法

张海峰 胡明华

(南京航空航天大学民航学院,南京,210016)

**摘要:**航班计划编排的实质是对航空公司各种生产要素的优化配置,其优化程度直接影响航空公司市场竞争能力。目前,航空公司在编排短期航班计划时过多地考虑了市场竞争,而忽略了航班延误。文中兼顾市场竞争与航班延误控制,将航班延误控制纳入短期航班计划的编排过程中。通过分析独立延误与波及延误特点,建立基于延误控制的短期航班计划编排模型,并采用贪婪随机自适应搜索过程(Greedy randomized adaptive search procedure,GRASP)算法对模型进行求解。最后,通过实例分析验证了所提方法的有效性。

**关键词:**空中交通管理;短期航班计划;独立延误;波及延误;航空公司

**中图分类号:**F562.6      **文献标志码:**A      **文章编号:**1005-2615(2015)04-0553-06

## Planning Model and Algorithm for Short-Term Flight Scheduling of Airlines

Zhang Haifeng, Hu Minghua

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

**Abstract:** The essence of flight scheduling planning is to optimize the factors in production process. It has a direct impact on the airline market competitiveness. Currently, in the planning of short-term flight scheduling, the market competition is considered too much, while the delays are ignored. Flight delay control is incorporated into the layout process of short-term flight scheduling planning, considering the market competition and flight delays. By analyzing the characteristics of independent delay and propagation delay, a planning model for short-term flight scheduling is built based on delay control strategy. And the model is solved by using the greedy randomized adaptive search procedure (GRASP) algorithm. Finally, the effectiveness of the model is verified by instance analysis.

**Key words:** air traffic management; short-term flight scheduling; independent delay; propagation delay; airlines

航班计划作为航空公司开展一切航空运输活动的基础核心内容,对航空公司来说至关重要。航空公司机务维修、客货销售等其他生产活动均建立在航班计划编排的基础之上,诸如调配人员、安排运力以及进行协调和管理等。航班计划在本质上可以看作是航空公司的产品,它包含了旅客所关心的飞行始发地和目的地、航班时刻、机型和服务内容。旅客会根据这些信息确定是否购买机票,而航空公司则在这个过程中获取收益。因此,从整体上

看,航班计划向上承接了航空公司的战略规划,向下联接了航空公司的实际收益,是一项非常复杂且工作量巨大的任务。

国内外已有诸多学者针对航班计划编排问题开展了大量研究,并取得了一系列的研究成果。文献[1]考虑航线网络节点相互作用,利用博弈论解决成本分配问题。文献[2]通过研究北美和欧洲的航线网络,对比分析了枢纽辐射式航线网络和蛛网式航线网络。文献[3]通过分析巴西国内廉价航空

收稿日期:2014-06-24;修订日期:2015-05-04

通信作者:胡明华,男,教授,博士生导师,E-mail:minghuahu@nuaa.edu.cn。

公司 Gol, 得出了解决廉价航空公司之间竞争的方法。文献[4]利用灰色理论来预测城市间乘客的数量并由此设计航线网络和确定航班频率。文献[5]将复杂网络的概念和技术运用到航空公司航线网络中, 并使用遗传算法对航线网络的利用率和可靠性进行了优化。文献[6]研究表明所提出的广义自回归条件异方差模型可以有效地分析这种非线性结构问题。文献[7]提出了融合了动态规划方法和启发式算法的解决方案来优化机队航班运行计划与维修计划。文献[8]通过仿真数据比较了不同的现存方法在鲁棒性上的表现。文献[9]提出了利用航班时间调整和飞机变更路线的方法来改善航线计划的鲁棒性。中国学者在航班计划编排方面亦取得一部分初步成果<sup>[10-16]</sup>, 并引入了相关的航班计划编排辅助决策支持系统, 但是这些系统工具具有一定的地域特点和局限性, 不能完全适用中国具体的空中交通管理体制, 因此这些系统工具在航班计划编排上仍存在诸多弊端, 使用效果不佳, 目前主要应用在飞机排班、航班计划变更和维护等方面, 而实际的航班计划编排工作仍然主要依靠人工操作和工作经验来实施, 这花费了航班计划编排人员的大量精力, 且工作效率也较为低下。

因此, 为满足航空公司目前在短期航班计划编排方面的迫切需求, 亟需对航班计划编排进行科学合理的研究, 从而高效配置航空公司运行资源, 实现航班计划的实际可操作性和运行高效性。

## 1 问题描述

航班计划可以分为广义和狭义航班计划两种, 狭义航班计划指定期航班的频率、班期、时刻以及机型指派等的决策问题, 在中国这种计划的执行周期是半年; 广义航班计划指和航空生产活动相关的一系列生产计划, 包括狭义航班计划、飞机维修计划、飞机排班、机组排班等, 他们之间的关系如图 1 所示。

航班计划可以划分为季度航班计划、月度航班计划以及即时航班计划。由于中国民航市场变化剧烈, 往往长期计划很难得以实施, 因此航空公司趋于制订短期航班计划。一般航空公司在运行控制中采用的是周计划, 通常是编制两周的航班计划。更短期的计划是 3 天的航班计划, 3 天的航班计划是真正不变的航班计划, 这个计划是航空公司各部门围绕执行的计划。

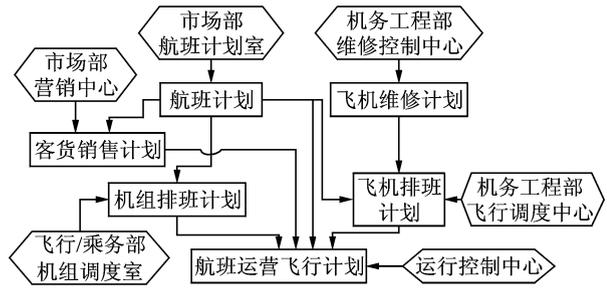


图 1 航空公司生产计划关系

Fig. 1 Relation between airline scheduling about flight operation

目前大多数航空公司航班计划的编排由市场部下航班管理处负责, 在实际编排过程中, 很多时候由于工作人员的经验不足、缺乏有效沟通、忽视现场保障程序, 使得各季航班从编制出来开始就存在着较大的问题。

在编排 3 天之内的航班计划时将航班延误考虑进去, 就需要对延误的产生进行详细的划分。可以将延误划分为两类: 独立延误与波及延误。

(1) 独立延误: 是指航班受天气、流控、地面保障等原因直接导致的延误, 即由航班自身原因引起的延误, 与其飞行路线等无关。如始发航班的离港延误以及空中飞行时间的延误等。

(2) 波及延误: 当上游航段发生延误时, 由于飞机晚到或机组晚到等对下游航班造成的延误, 该延误由上游航班的延误传播下来, 与飞行路线有关。

由于航空公司连续航班之间存在时间上的衔接关系, 当紧前航班由于某种原因发生延误, 其一般会传播到后续航班。这样, 不仅影响航班的正常离港和到港, 还影响旅客的衔接。而当紧前航班延误时, 调整后续航班的过站时间可以有效地减少延误的传播。通常, 这也是航空公司控制延误传播的常用方法。如图 2 所示为两个连续航班  $i, j$  的离港、到达和延误图。

图中, 计划过站时间  $PCT_{ij}$  等于航班  $j$  的计划出发时间  $PDT_j$  减去航班  $i$  的计划到达时间  $PAT_i$

$$PCT_{ij} = PDT_j - PAT_i \quad (1)$$

计划松弛时间  $Slack_{ij}$  为计划过站时间  $PCT_{ij}$  与最小过站时间  $MCT_i$  之差

$$Slack_{ij} = PCT_{ij} - MCT_i \quad (2)$$

航班  $i, j$  由同一架飞机执行时, 从航班  $i$  传播

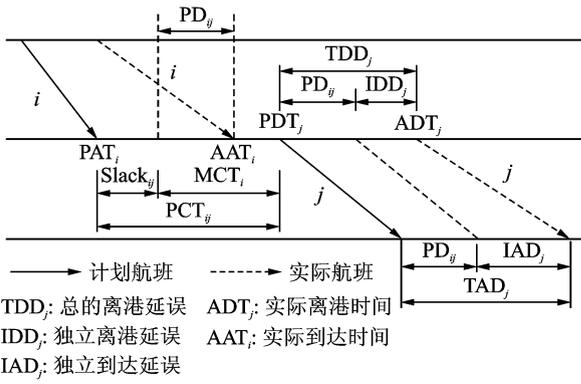


图 2 进离港连续航班间的波及延误

Fig. 2 Sweep delay between successive flights in airport

到航班  $j$  的延误  $PD_{ij}$  为

$$PD_{ij} = \text{Max}(TAD_j - \text{Slack}_{ij}, 0) \quad (3)$$

式中:  $TAD_j$  表示总的到达延误。

航班独立延误是产生波及延误的诱因,只要确定独立延误就可以推算出波及延误。独立延误可以采用时间度量,如延误 30,60 min 等。航班独立延误属性值的确定可以根据统计资料结合气象预报资料,对其进行合理的估计。考虑研究与计算的方便性,可以认为航班独立延误时间具有一定的概率分布

$$p_i(t) = \int_0^t d_i(t) dt \quad (4)$$

式中:  $p_i(t)$  和  $d_i(t)$  分别表示航班  $i$  独立延误  $t$  时间的概率和概率密度函数。

航班波及延误是基于飞行路线的前向航班延误而产生的延误,这种延误的确定需要根据航班在飞行路线中的位置而确定,如图 3 所示。



图 3 飞机路线航班波及延误链

Fig. 3 Flight sweep delay chain of aircraft route

航班独立延误是由多种原因共同构成的,可以近似认为是服从正态分布。假定航班 1 的独立延误  $y$  服从正态分布  $N(\mu_1, \sigma_1^2)$ , 航班 2 的波及延误时间为随机变量  $x$ , 航班 1 与航班 2 之间的过站时间包含的松弛时间为  $s$ , 则航班 2 的波及延误时间小于  $t$  时间的概率为

$$p\{x < t\} = p\{x = y - s < t\} = p\{y < s + t\} = \int_{-\infty}^{s+t} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(y-\mu)^2}{2\sigma^2}} dy \quad (5)$$

假定飞行路线中任意一个位置的航班  $i$  之前的航班为  $y_1, \dots, y_{i-1}$ , 当这些航班独立延误  $y_i$  服从正态分布  $N(\mu_i, \sigma_i^2)$  且相互独立时,航班  $i$  的波及延误概率为

$$p\{x < t\} = p\left\{x = \sum_{j=1}^{i-1} (y_j - s_j) < t\right\} = p\left\{\sum_{j=1}^{i-1} y_j < \sum_{j=1}^{i-1} s_j + t\right\} = \int_{-\infty}^{\sum_{j=1}^{i-1} s_j + t} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \prod_{j=1}^{i-1} \sigma_j} e^{-\frac{\left(y - \sum_{j=1}^{i-1} \mu_j\right)^2}{2 \left(\prod_{j=1}^{i-1} \sigma_j\right)^2}} dy \quad (6)$$

## 2 航班计划编排模型

飞机排班整体化方式要求编排航班计划时,同时给出航班时刻表中每个航班所用的飞机尾号,将原有航班计划编排中首先确定航班所用的机型,然后再确定航班所使用的飞机尾号的方式,融合为一个过程。对于基于延误控制的航班计划编排采用这种方式避免了先入为主地限制了航班的所用机型,进而限制了航班的飞行路线,这将会对航班的波及延误控制产生不利。因此,基于延误控制的航班计划编排模型如下

$$\begin{aligned} \min E(z) = & \sum a_{R_k} x_{R_k} cE(B_{Rk}) + \\ & \sum a_{R_k} x_{R_k} P_f \max(S_k - I_k, 0) + \sum M_{kf} a_{R_k} x_{R_k} \end{aligned} \quad (7)$$

s. t.

$$\sum_k a_{R_k} x_{R_k} = 1 \quad \forall f \in F \quad (8)$$

$$\sum_{R_k} x_{R_k} = 1 \quad \forall k \in K \quad (9)$$

$$\sum_a \sum_k x_{R_k} \times y_{kt} = t_a \quad \forall t \in T \quad (10)$$

$$\sum_k \sum_{R_k} x_{R_k} \leq |K| \quad (11)$$

式(7)表示目标函数,表明航空公司追求的是航班波及延误损失、旅客溢出成本与飞行成本之和最小化;式(8)为航班覆盖约束,表明编排计划中的所有航班都需要有飞机执行且只能执行一次;式(9)为飞行路线约束,表明对于每一架飞机只能执行一条飞行路线;式(10)为飞机流平衡,表明计划期结束时在过夜机场飞机各机型所需要数量;式(11)为飞机能力约束,表明编排计划所用飞机不能超过所提供的飞机数量。其中:  $K$  表示飞机集合,

$k \in K$  表示某机尾号的飞机;  $T$  表示机型集合,  $t \in T$  表示机型;  $A$  表示计划期结束时过夜机场集合,  $a \in A$  表示过夜机场;  $F$  表示航班集合,  $f \in F$  表示某机尾号的飞机;  $t_a$  表示在过夜机场  $a$  需要的  $t$  型飞机的数量;  $I_k$  表示飞机  $k$  的座位数;  $R_k$  表示由飞机  $k$  所执行的飞行路线;  $P_f$  表示航班  $f$  平均票价;  $M_{kf}$  表示飞机  $k$  运行航班  $f$  的飞行成本;  $c$  表示航班延误每分钟产生的损失;  $a_{fk}$  表示航班  $f$  是否包含在飞机  $k$  所执行的飞行路线  $R$  中,  $a_{fk} = 1$  表示在,  $a_{fk} = 0$  表示不在;  $B_{fk}$  表示航班  $f$  在飞机  $k$  所执行的飞行路线  $R$  中波及延误时间;  $y_{kt}$  表示飞机  $k$  是否属于机型  $t$ , 若属于, 则  $y_{kt} = 1$ , 否则  $y_{kt} = 0$ ;  $x_{rk}$  为 0 或 1 决策变量, 表示飞机  $k$  执行的飞行路线  $R$  构成航班计划中的飞行路线,  $x_{rk} = 1$  表示在,  $x_{rk} = 0$  表示不在。

### 3 求解算法

由于目标函数中航班波及延误是一个随机变量, 因此目标函数是一个期望值。根据前述分析, 航班波及延误只有在飞行路线确定的情况下才能确定, 所以该问题不是一个线性问题, 其求解比较困难。求解路线问题的一个难点在于路线的生成与路线的选择。对于该问题, 一个飞机路线的形成是通过航班之间的时空衔接构成一条飞机路线, 由于可以产生的飞机路线数量极大, 而真正构成解的飞机路线数量却极少。从大量的飞机路线中选择出极少数量的飞机路线按照集合划分的原则构成解, 一方面会造成要存储大量的备选飞机路线, 另一方面很难选择出飞机路线的集合以满足集合划分的要求。因此建立一种产生较少的飞机路线且这些飞机路线恰好满足集合划分的要求, 通过这些飞机路线的以不破坏集合划分要求等约束的简单变换产生新的飞机路线, 可以很好地减小飞机路线的存储并降低飞机路线选择的困难。Arguello 设计了一种启发式算法, 即贪婪随机自适应搜索过程 (Greedy randomized adaptive search procedure, GRASP), 用于解决不正常航班的飞行路线恢复问题。编排计划的飞行路线形成也可以借鉴该方法。该方法可以避免遍历产生所有可行的飞行路线。GRASP 算法的基本步骤如下:

(1) 构造一个初始解, 给每一个航班都分配一架飞机, 如果飞机数目不足则用虚拟飞机代替来生成一个初始解。

(2) 构造一个基本可行解, 通过将虚拟飞机后的航班移动到真实飞机的飞行路线后, 并对真实飞机的过夜机场数量进行检查得到一个基本可行解。

(3) 通过对基本可行解进行邻域搜索, 寻找符合航班连接规定的航班串或环, 获得邻域解。对每对飞行路线形成的所有邻域解计算成本, 将引起延误成本下降的邻域解存储在一个限制选择列表 (Restricted candidate list, RCL) 内。然后, 随机选取限制选择列表中的一个邻域解, 用其改造当前执行解形成新的执行解, 这样就完成了一次迭代。这个过程一直重复到 RCL 为空或达到 CPU 运行时间限制。

邻域解的构造方法如下: 任意选择两条飞行路线, 采用航班环的前、中、后插入, 把其中一条飞行路线的子航班环加入到另一条飞行路线合适的位置, 或者把尾航班串插入到另一条飞行路线的尾部, 这种策略叫做增广操作; 也可采用交换策略, 将其中一条飞行路线的子航班环或者尾航班串与另一条飞行路线合适的子航班环和尾航班串进行交换有关增广操作、交换操作。

GRASP 算法的基本流程如图 4 所示。

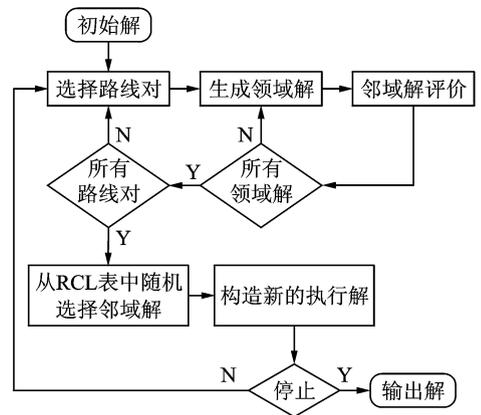


图 4 GRASP 算法流程图

Fig. 4 Flow chart of GRASP algorithm

### 4 实例分析

某航空公司某一天的航班时刻表如表 1 所示, 航空公司根据历史统计信息对航班的独立延误分布已经获得, 都为相互独立的正态分布。假设每位旅客延误成本为 1 元/分钟/人。

表 1 航班信息表

Tab. 1 Information of flight

航班编号	出发机场	计划出发时间	到达机场	计划到达时间	平均票价/元	旅客量/人	独立延误分布
F1	北京	8:00	西安	9:30	500	230	(20,8)
F2	北京	8:00	武汉	9:30	600	200	(30,12)
F3	西安	8:00	北京	9:30	500	230	(40,5)
F4	西安	8:00	广州	9:30	800	300	(10,4)
F5	北京	8:00	南京	10:00	400	150	(22,6)
F6	西安	8:15	重庆	9:15	400	170	(35,8)
F7	北京	8:40	上海	10:10	700	270	(30,10)
F8	西安	8:40	石家庄	10:10	600	90	(45,17)
F9	北京	9:40	长春	11:10	400	180	(10,4)
F10	北京	10:00	西安	11:30	500	250	(15,8)
F11	广州	10:00	上海	11:30	500	400	(30,10)
F12	西安	10:00	南京	11:30	400	80	(26,7)
F13	重庆	10:00	三亚	11:30	500	180	(36,12)
F14	西安	11:00	深圳	12:30	700	150	(14,6)
F15	石家庄	11:00	太原	12:00	300	120	(24,8)
F16	武汉	12:00	广州	13:30	700	150	(22,8)
F17	南京	12:00	广州	13:30	500	300	(35,15)
F18	上海	12:00	广州	13:30	600	100	(36,12)
F19	长春	12:00	北京	13:30	400	160	(24,6)
F20	上海	12:00	北京	13:30	700	180	(26,7)
F21	西安	12:30	北京	14:00	600	200	(40,18)
F22	三亚	12:30	重庆	14:00	500	140	(40,18)
F23	太原	12:40	石家庄	13:40	300	120	(32,16)
F24	深圳	14:00	北京	15:30	850	80	(23,9)
F25	南京	14:00	青岛	15:30	400	100	(18,8)
F26	北京	14:20	太原	15:30	400	150	(14,6)
F27	石家庄	14:20	西安	15:50	600	160	(16,6)
F28	广州	14:30	南京	16:00	600	100	(40,13)
F29	北京	14:30	沈阳	15:30	300	120	(32,7)
F30	广州	15:00	西安	16:30	650	90	(38,12)
F31	重庆	15:00	西安	16:00	400	130	(23,9)
F32	广州	15:30	南京	17:00	600	150	(35,8)
F33	太原	16:20	西安	17:30	300	150	(22,8)
F34	沈阳	16:30	北京	17:30	300	180	(27,8)
F35	西安	16:40	石家庄	18:10	600	140	(24,12)
F36	北京	17:00	西安	18:30	600	60	(45,17)
F37	青岛	17:00	北京	18:30	400	120	(24,8)
F38	西安	17:00	三亚	19:20	700	190	(18,8)
F39	北京	18:00	武汉	19:30	600	120	(32,16)
F40	南京	18:00	青岛	19:30	400	60	(16,6)
F41	北京	18:10	西安	19:40	500	160	(24,5)
F42	西安	19:00	广州	20:30	700	100	(24,12)
F43	南京	19:00	西安	20:30	450	180	(24,9)
F44	西安	19:00	南京	20:30	500	300	(40,13)
F45	石家庄	19:00	太原	20:00	300	100	(24,9)
F46	西安	20:00	北京	21:30	500	200	(34,6)
F47	北京	20:00	西安	21:30	500	180	(45,18)
F48	武汉	20:00	青岛	21:30	650	100	(10,4)
F49	三亚	20:00	西安	22:20	700	150	(35,8)
F50	太原	20:40	西安	22:00	600	200	(34,6)
F51	青岛	21:00	北京	22:30	400	120	(24,6)
F52	西安	21:00	北京	22:30	500	250	(15,8)
F53	南京	21:20	北京	22:50	500	100	(38,12)
F54	广州	22:00	北京	23:30	600	80	(32,7)
F55	北京	22:00	西安	23:30	400	160	(27,8)
F56	青岛	22:30	北京	24:00	350	80	(24,5)

航空公司拥有 2 种机型,每种机型的飞行小时成本、飞机架数、可用座位数及最小过站时间等信息如表 2 所示。

表 2 机型信息表

Tab. 2 Information of aircraft types

机型	座位数	过站时间/运行成本/ min 元	飞机架数	最大起飞架次	基地
A	200	30	40 000	5	6 北京
B	150	30	20 000	5	7 西安

根据基于延误的排班计划得出的排班计划如表 3 所示。如果在排班时不考虑波及延误对排班计划的影响,其排班计划如表 4 所示。

从表 3,4 可以看出,两种排班方案在飞行成本与旅客溢出成本上完全相同,所以在不考虑延误成本时,两种方案都是最优方案。但是如果考虑延误对航班运行的影响,前一种方案比后一种方案或可

表 3 考虑波及延误的排班计划

Tab. 3 Flight schedule considering sweep delay

飞机尾号	排班计划	波及延误成本/元	飞行成本/元	溢出成本/元	总成本/元
A01	F2-F16-F28-F40-F51	0	150 000	30 000	253 000
A02	F5-F17-F30-F42-F54	0	160 000	75 000	280 000
A03	F1-F14-F24-F39-F48-F56	5800	180 000	40 000	297 800
A04	F9-F19-F26-F33-F44-F53	640	333 333	50 000	373 973
A05	F7-F20-F29-F34-F41-F52	0	320 000	74 000	355 000
B01	F12-F25-F37-F47	0	240 000	0	240 000
B02	F4-F11-F18-F32-F43	30 600	300 000	180 000	510 600
B03	F3-F10-F21-F36-F46-F55	93 800	360 000	40 000	493 800
B04	F6-F13-F22-F31-F35-F45-F50	58 380	176 667	53 000	285 047
B05	F8-F15-F23-F27-F38-F49	46 200	193 333	34 000	254 533
合计		235 420	2 413 333	576 000	3 343 753

表 4 不考虑波及延误的排班计划

Tab. 4 Flight schedule without considering sweep delay

飞机尾号	排班计划	波及延误成本/元	飞行成本/元	溢出成本/元	总成本/元
A01	F5-F17-F32-F40-F51	1 800	160 000	75 000	236 800
A02	F1-F14-F24-F39-F48-F56	5 800	180 000	40 000	225 800
A03	F2-F16-F30-F42-F54	0	150 000	30 000	180 000
A04	F9-F19-F29-F34-F41-F52	6 220	320 000	25 000	351 220
A05	F7-F20-F26-F33-F44-F53	0	333 333	99 000	432 333
B01	F3-F10-F21-F36-F46-F55	93 800	360 000	40 000	493 800
B02	F4-F11-F18-F28-F43	43 600	300 000	180 000	523 600
B03	F12-F25-F37-F47	0	240 000	0	240 000
B04	F6-F13-F22-F31-F38-F49	49 160	193 333	51 000	293 493
B05	F8-F15-F23-F27-F35-F45-F50	62 140	176 667	36 000	274 807
合计		262 520	2 413 333	576 000	3 251 853

减少 27 100 元的成本。同时注意到表 3 中影响波及延误成本最突出的飞行路线是 B03, B04, B05, 这些飞机路线具有共同的特点即城市对之间的对飞。这种由反复对飞的航班构成的飞行路线往往过站时间不充分, 易造成波及延误的扩散。目前大多数航空公司都采用这种飞行模式, 因而航班出现延误的现象非常突出。同时可以看出, 第一种方案只有 6 条飞行路线存在航班延误成本, 而后一方案有 7 条飞行路线存在航班延误成本, 这说明后一方案在执行过程中更多的飞行路线可能出现航班延误。这将给运行控制带来不利的影响, 在不正常航班恢复中会有更多的飞行路线需要变更初始路线, 这将产生机组、地服、维修等资源一系列的变化使得航班恢复工作困难重重。

## 5 结 论

(1) 传统的航班计划编排方法不考虑延误, 易造成航班运行控制中无法对航班延误进行有效的控制与预防。当在编制航班计划中考虑航班延误时, 需要对延误产生原因与作用方式进行分析。

(2) 本文将航班延误分为独立延误与波及延误, 独立延误是航班固有的延误, 无论航班如何编排都不可能减少该延误发生的可能。波及延误是一个随机变量, 其计算只能依据明确的飞行路线才可以计算。航空公司可以通过优化编排航班以减少波及延误。

(3) 对于模型的求解, 为了避免遍历产生所有可能的飞行路线, 采用 GRASP 求解算法通用局域解的构造减少了飞行路线产生的困难, 并通过增量计算大大减少了计算量。通过实例分析, 可以看出基于航班延误的航班计划编排, 可以减小航班延误发生的可能性。

### 参考文献:

- [1] Skorin-Kapov D. Network cost allocation games based on threshold discounting [J]. *Mathematical Communications*, 2002, 7(1): 1-14.
- [2] Reynolds-Feighan A. Characterisation of airline networks: A North American and European comparison [J]. *Journal of Air Transport Management*, 2010, 16(3): 109-120.
- [3] Oliveira A V M. An empirical model of low-cost carrier entry [J]. *Transportation research Part A: Policy and Practice*, 2008, 42(4): 673-695.
- [4] Hsu C I, Wen Y H. Application of grey theory and multi objective programming towards airline network design [J]. *European Journal of Operational Research*, 2000, 127(1): 44-68.
- [5] Paolo H E D. Nature inspired cooperative strategies for optimization (NICSO 2007) [M]. S. l.: Springer Berlin Heidelberg, 2008: 495-505.
- [6] Adrangi B, Chatrath A, Raffiee K. The demand for US air transport service: A chaos and nonlinearity investigation [J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2001, 37(5): 337-353.
- [7] Moudani W E, Mora-Camino F. A dynamic approach for aircraft assignment and maintenance scheduling by airlines [J]. *Journal of Air Transport Management*, 2000, 6(4): 233-237.
- [8] Niklaus E, Matteo S, Michel B. Robust airline schedules [C] // Schedule and Strategic Planning Study Group Meeting. Lausanne: AGIFORS, 2010: EPFL-TALK-152406.
- [9] Burke E K, De Causmaecker P, De Maere G, et al. A multi-objective approach for robust airline scheduling [J]. *Computers & Operations Research*, 2010, 37(5): 822-832.
- [10] 都业富. 实用航班计划优化方法 [J]. *系统工程理论与实践*, 1995(2): 23-27.  
Du Yefu. A practical optimal method of scheduling [J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 1995(2): 23-27.
- [11] 冯心玲, 龚月姣, 林映霞, 等. 用遗传算法优化航班规划问题 [J]. *计算机工程与设计*, 2009, 30(19): 4468-4471.  
Feng Xinling, Gong Yuejiao, Lin Yingxia, et al. Optimizing flight planning problem with genetic algorithm [J]. *Computer Engineering and Design*, 2009, 30(19): 4468-4471.
- [12] 黄子君, 许俐. 基于 ServiceModel 的国内航班计划运行仿真 [J]. *交通运输系统工程与信息*, 2010, 10(2): 76-82.  
Huang Zijun, Xu Li. Domestic flight schedule simulation using service model [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2010, 10(2): 76-82.
- [13] 史彦飞. 基于旅客选择行为的航班计划优化研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.  
Shi Yanfei. Research on airline schedule optimization based on passenger choice behavior [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [14] 朱星辉. 航空公司航班计划优化设计研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
- [15] 李福娟. 基于航线决策的航班计划优化研究 [D]. 上海: 同济大学, 2007.
- [16] 柏明国, 朱金福. 航空公司航线网络设计的一种三阶段方法 [J]. *南京航空航天大学学报*, 2006, 38(2): 181-185.  
Bai Mingguo, Zhu Jinfu. Three-stage method for airline network design [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2006, 38(2): 181-185.