

基于时间点和时间带的非正常航班恢复模型差异分析

徐海文^{1,2}, 韩松臣^{1,3}, 张 永²
(1. 南京航空航天大学民航学院, 江苏 南京 210007;
2. 中国民用航空飞行学院计算机学院, 四川 广汉 618307;
3. 四川大学空天科学与工程学院, 四川 成都 610065)

摘要: 通过时间点时空网络的精确性和时间带时空网络的快速性, 得到了基于时间点的非正常航班恢复模型比基于时间带的非正常航班恢复模型的延误费用更小更精确, 但涉及时空节点较多, 计算速度较慢。通过真实航班公司的数值试验, 验证了两种非正常航班恢复模型的差异。
关键词: 航班延误费用 非正常航班 时间点时空网络 时间带时空网络

由于天气、时刻、空域、机组和旅客等原因导致了一些非正常航班, 这些航班遇到执飞飞机、机场、空域等耦合因素, 就会导致更多航班的延误或取消, 从而带来了巨大的经济损失。因此, 很多学者致力于研究非正常航班恢复问题, 特别是以最小化恢复费用为目标的非正常航班恢复问题取得了大量的研究成果^[1,2]。2001 年, Bard 和 Yu 较早地提出了利用离散时间带的时空网络图构建近似计算延误费用的非正常航班恢复模型, 其后利用离散时间带计算近似延误费用发挥了关键作用^[3]。2006 年, Bratu 和 Barnhart 构建了通过决定取消航班或推迟航班来达到最小化恢复费用的乘客和飞机混合恢复模型, 该模型同时考虑了乘客、备用机组、飞机的情况下, 将平衡总运营费用和评估出的乘客总延误和取消费用的最优平衡恢复费用作为目标, 使用航班时空网络给出可能航班的恢复费用和乘客恢复费用; 基于真实数据的仿真试验结果表明该模型可以减少 40% 受延误的乘客、45% 要求住宿的乘客和 33% 的延误时间^[4]。然而离散时间带的时空网络图在计算近似延误费用时可能产生一些不可避免的误差, 时间点的时空网络图在计算延误费用时, 则相对较为精确; 基于时间点和时间带的时空网络图存在一定的差异, 从而导致了基于时间点和时间带的非正常航班恢复模型的可行解区域不同。随后本文首先给出基于时间点和时间带的航班延误费用计算差异, 其次进一步指出了两种不同计算方式在计算非正常航班恢复模型的差异; 最后利用基于真实航班数据的数值试验验证了两种模型差异性。

一、时间点时空网络和时间带时空网络

时间点时空网络主要是根据恢复期间的可用飞机产

生机场可用时间节点, 然后利用航班时刻和机场时间点产生时空网络图, 利用航班实际到达时间点和计划到达时间点计算航班延误费用。该图横轴为机场, 纵轴为可用飞机时间, 连线为所有可能执行的航班。时间带时空网络主要利用固定时间段将恢复期划分成一些时间带, 然后将一个时间带内的飞行活动归结到时间带的下端点, 进而利用可用飞机时间所处的机场时间带端点产生时空网络图和计算航班延误费用。该图横、纵轴和连线与时间点时空网络相同。

假定航班时刻如表 1, 分别建立了时间点时空网络(图 1)和时间带时空网络(图 2), 从而更加清楚地说明二者的差异。其中最小转场时间设为 40 分钟, 时间带的固定时间段为 60 分钟。恢复期间为 7:00~17:00。

表 1 航班时刻表					
航班号	执飞飞机	起飞机场	到达机场	起飞时刻	到达时刻
11	1	成都	厦门	07:35	10:20
12	1	厦门	昆明	11:05	14:00
21	2	成都	昆明	10:40	12:20
22	2	昆明	成都	07:40	09:20

二、基于时间点和时间带的非正常航班恢复模型

关于时间点和时间带非正常航班模型借鉴了 Bard 和 Yu 在文献 [3] 的离散时间带非正常航班模型, 主要基本符号不再一一说明, 其中时间点和时间带非正常航班模型的符号涉及的时空节点分别为相应时空网络图中的节点。文献 [3] 的非正常航班模型为采用离散时间带的时空网络图和精确飞机可用时间点的混合时空网络图。本文

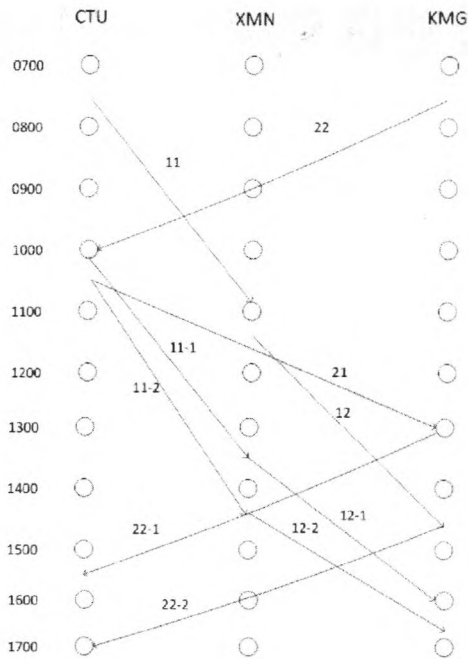


图1 时间点时空网络图

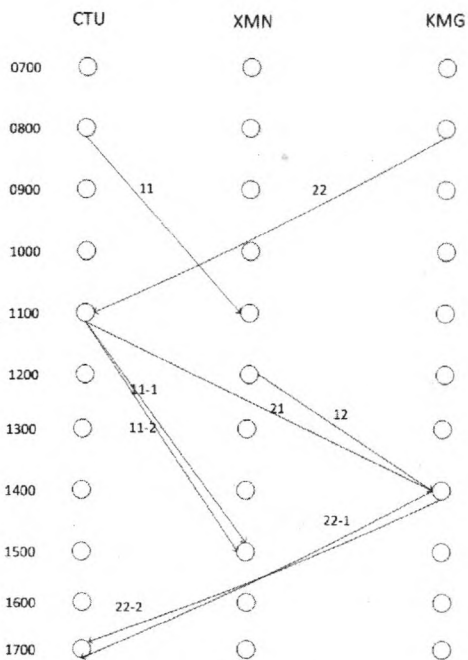


图2 时间带时空网络图

延误时间为实际到达时间减去计划到达时间，延误费用为 $C(t)=20 \times t$ 。

基于时间点非正常航班模型没有划分时间带，机场时间点为精确可用飞机时间空间节点。符号不做变化，但符号代表意义均为基于时间点时空网络图下的时空节点。特别地，记 ed_{ij}^k 为依据时间点的时空点 i 到 j 的航班 k 的延误费用。

基于时间带非正常航班恢复模型采用固定时间段划

分恢复时间区间，不同之处在于把时间带内活动归结到时间带区间下端，虽然计算延误费用的公式相同，但延误时间受近似时间带下端误差影响。特别地，记 dd_{ij}^k 为依据时间带的时空点 i 到 j 的航班 k 的延误费用，其余符号不变，但意义均为基于时间带时空网络图下的时空节点。下面给出基于时间点和时间带非正常航班的恢复模型。

$$\begin{aligned} \min & \sum_{k \in F} \sum_{i \in P(k)} \sum_{j \in H(k,i)} sd_{ij}^k x_{ij}^k + \sum_{k \in F} c_k y_k \\ s.t. & \begin{cases} \sum_{i \in P(k)} \sum_{j \in H(k,i)} x_{ij}^k + y_k = 1 & (1) \\ \sum_{k \in G(i)} \sum_{j \in H(k,i)} x_{ij}^k + z_j - \sum_{k \in L(i)} \sum_{j \in M(k,i)} x_{ji}^k = a_i \quad \forall i \in I & (2) \\ \sum_{k \in L(i)} \sum_{j \in H(k,i)} x_{ji}^k + \sum_{j \in Q(i)} z_j = h_i \quad \forall i \in J & (3) \\ x_{ij}^k \text{ 为 } 0 \text{ 或 } 1, \forall k \in F, i \in F, j \in H(k,i), \\ y_k \text{ 为 } 0 \text{ 或 } 1, \forall k \in F, \\ z_i \in N, \forall i \in I. \end{cases} \end{aligned}$$

其中 (1) 为每一个航班执行或取消，(2) 为时空节点的流约束，(3) 为飞机平衡约束。

注：①当 sd_{ij}^k 为 ed_{ij}^k 时，(1)-(3) 中的时空节点为基于时间点时空网络的节点，模型为基于时间点非正常航班恢复模型 (TSM)。

②当 sd_{ij}^k 为 dd_{ij}^k 时，(1)-(3) 中的时空节点为基于时间带时空网络的节点，模型为基于时间带非正常航班恢复模型 (TBM)。

由于基于时间点的不正常恢复模型涉及时空节点较多，计算时间应该较慢，但计算结果较为精确；基于时间带的非正常航班恢复模型涉及时空节点较少，计算时间较快，但由于时空网络中每次产生可能航班存在一定时长的误差，从而导致了该模型在大规模非正常航班恢复的计算中容易产生较大误差。

三、实例分析

为了详细说明基于时间点和时间带的非正常航班恢复模型的差异，特别采用国内某航空的 20 架飞机执飞的 63 个航班真实航班数据 (表 2)，利用 Microsoft Visual Studio 2010 调用 Cplex 12.3 对上述模型进行了计算，计算平台为联想笔记本，CPU 为 Intel core i3-3227，内存为 12G，windows 7, 64 位操作系统。计算结果在表 3。假定 1 号飞机当天出现机械故障，第二天 4 点恢复正常，恢复期为 07:00-27:00，时间带为 30 分钟，转场时间 40 分钟，延误费用函数为 $20 \times$ 延误时间。

由表 3 不难看出：基于时间点非正常航班恢复模型的计算结果更加精确，航班延误费用相对较低，但 CPU 计算时间略长；基于时间带的非正常航班恢复模型

表 2 航班时刻表

飞机编号	航班编号	起飞机场	到达机场	起飞时刻	到达时刻	取消费用（元）
1	11	重庆	宁波	0725	0945	22220
1	12	宁波	重庆	1035	1300	22080
1	13	重庆	深圳	1825	2030	19420
1	14	深圳	重庆	2135	2345	19280
2	21	昆明	南宁	1150	1250	13960
2	22	南宁	福州	1335	1535	19980
2	23	福州	南宁	1630	1830	20400
2	24	南宁	昆明	1915	2040	14520
.....						
19	191	杭州	哈尔滨	0805	1105	26560
19	192	哈尔滨	杭州	1255	1625	28940
19	193	杭州	太原	1835	2040	19700
19	194	太原	杭州	2130	2345	19560
20	201	杭州	大连	1825	2025	18160
20	202	大连	杭州	2125	2320	19420

表 3 基于时间点和时间带非正常航班恢复模型的结果对比

TSM,MinZ=17800					TBM,Minz=33600				
CPU 时间: 0.59 秒					CPU 时间: 0.02 秒				
航班	DCost	航班	DCost	航班	DCost	航班	DCost	航班	DCost
13	100	11	100	42	300	122	200	174	200
102	4600	13	700	43	300	124	300	181	3500
103	4400	14	500	44	400	131	200	182	3100
104	2400	21	200	61	900	141	300	191	1100
172	1100	22	500	62	400	142	600	192	100
173	900	23	600	71	200	143	900	202	100
174	600	24	900	101	400	144	700		
181	2700	31	900	102	5000	162	300		
182	1000	41	300	103	4900	172	100		

注：DC 表示延误费用。延误费用的单位：元。

的计算结果相对误差较大，航班延误费用高，产生延误航班费用的航班较多，但 CPU 计算时间较快。

本文通过分析时间点离散时空网络和时间带时空网络，得到了时间点和时间带非正常航班恢复模型的关键差异；利用真实航班数据，通过数据仿真结果得到了基于时间点非正常航班恢复模型和基于时间带非正常航班恢复模型的优缺点。

参考文献：

[1] P.Belobaba,A.Odoni,C.Barnhart.Theglobalairlineindustry[M].

Chippenham,Wiltshire:Wiley,253-274,2009.
[2] 朱金福.航空运输规划[M].西北工业大学出版社,2009.
[3] J.F.Bard,G.Yu.Optimizingaircraftroutinginresponsetogrounding sanddelays[J].IieTrans,2001,33,931-947.
[4] S.Bratu,C.Barnhart.Flightoperationsrecovery:Newapproaches consideringpassengerrecovery[J].JSched,9:279-298,2006.

基于时间点和时间带的非正常航班恢复模型差异分析

作者：[徐海文](#)，[韩松臣](#)，[张永](#)

作者单位：[徐海文\(南京航空航天大学民航学院, 江苏 南京210007;中国民用航空飞行学院计算机学院, 四川 广汉 618307\)](#)，[韩松臣\(南京航空航天大学民航学院, 江苏 南京210007;四川大学空天科学与工程学院, 四川 成都610065\)](#)，[张永\(中国民用航空飞行学院计算机学院, 四川 广汉, 618307\)](#)

刊名：[管理观察](#)

英文刊名：[Management Observer](#)

年，卷(期)：2015 (34)

引用本文格式：[徐海文](#). [韩松臣](#). [张永](#) [基于时间点和时间带的非正常航班恢复模型差异分析](#) [期刊论文]-[管理观察](#) 2015 (34)