

航班延误问题原因分析及改进措施

陈绍龄¹，黄聪放¹，姚若璋²

指导老师：关彦辉¹

(1. 中山大学，数学与计算科学学院，广州，510000；

2. 中山大学，地理科学与规划学院，广州，510000)

摘要：随着民航业井喷式的发展，航班延误情况愈发严重，已经成为国内大型机场乃至中国民航发展的瓶颈。本文将在前人对航班延误的理论基础上，着力研究中国航空延误的理论真实性、延误主要原因分析以及相应的提升改正措施。我们通过呈现 2014 年中国各大机场的逐月航班延误率，用 Excel 生成中美历年航班延误对比折线图，对比 flightstats.com 提供的数据，得出中国航班延误最严重是片面的结论；其次，我们将晚点率与运输量、飞机数量、机场与数量进行偏最小二乘回归分析，再结合航班延误因素的 Excel 图表，分析得出航空公司自身管理不合理、流量原因、天气原因三者造成的航班延误在运输量大、空域紧张这一背景下更加严重；同时在对航班运行分析的基础上提出了航班延误波及的概念，对航班延误的原因进行了简单归类，针对繁忙机场，建立了基于贝叶斯网络的航班延误以及延误波及预测模型，利用贝叶斯网络模型，分别建立了面向机场的进港延误，离港延误，航班延误波及模型；最后我们运用了层次分析法结合物元分析、模糊评价等建立了完整的航班延误评价体系模型，并用计算机模拟的方法模拟出飞机排班模型。本文对航班延误与航班延误波及行了初步的研究，所提出的延误表征方法具有积极作用，对机场的实例验证也具有现实的意义。

关键词：最小二乘回归分析 贝叶斯网络 延误波及 层次分析法 模糊综合评价 物元分析法

一、问题重述

民航运输作为国家交通运输行业的一个重要分支，对内代表着高效率，高速度，高成本的运输方式，对外代表国家的基础建设，是国家经济运营情况的一个风向标。根据民航局的统计数据，2014 年春运四十天，民航运送旅客 3810 万人次，飞行班次 28.9 万班，同比增长 12.9% 和 15.8%。随着国民经济的发展，坐飞机成为人们出行的最常见的一个方式，因此空中运输需求不断增加，可以说，民航业的发展方心未艾。在我国现行的空域管理体制（即空军统一管理），有限的空域资源在应对井喷式的中国民航业发展显得力不从心，在拥挤的空中，在拥挤的机场候机楼，航班延误不可避免地产生了。香港南华早报网根据 flightstats.com 的统计称：中国的航班延误最严重，国际上航班延误最严重的 10 个机场中，中国占了 7 个。如何利用有限的资源以应对航空运营过程中潜在的延误，越来越成为航空从业人员关注的焦点。

中国民用航空总局（Civil Aviation Administration of China, CAAC）在近年已出台了一系列政策与法规，用于规范航空公司和空中运输市场秩序。主要内容如下：

1. 加强航班组织和协调，确保航班安全有序实行；
2. 航空公司认真履行放行责任，优化飞机使用模式，提高效率；
3. 确保信息畅通，切实落实旅客的知情权；
4. 航班延误发生后做好后续工作，安抚旅客情绪，认真对待旅客意见；
5. 增加飞行人员的决策能力，加快培养具备二类盲降资质飞行员。

从旅客角度出发，特别是对时间要求比较严格的商务人士来说，长时间的航班延误会严重降低旅客对公司的满意度，甚至影响航空公司的形象，进一步来讲，长时间的航班延误会增加相关工作人员的工作量，使之比较被动，因而降低整个民航系统的运行效率。因此如何通过实时的航班延误预测用以对民航从业者的决策提供强有力的辅助，提供航空服务业的服务质量，提高机场运行效率是中国民航业急需解决的问题。

因此本文就民航航班延误这一热门话题，基于查询到的航空公司数据资料，建立适当的数学逻辑表达，针对以下三个问题提出科学合理的结论。

问题 1. 中国航班延误的严重性判断

问题 2. 中国航班延误的原因比较分析

问题 3. 中国航班延误的改进措施分析

二、问题分析

香港南华早报网根据 flightstats.com 的统计称：中国的航班延误在世界上最为严重，国际上航班延误最严重的 10 个机场中，中国占据了 7 个。因此，航班延误似乎成为了整个中国的集体声讨对象，然而，我们通过对延误率的时空双维度对比，同时对 flightstat 相应统计数据的定义偏差进行修正后重新计算，发现情况并不完全等同报道所说，因此针对上述分析结果我们对于中国航空延误的严重性进行了较为科学的判定。

客观来说，航班延误不可避免。改革开放以来的经济迅猛发展，使得民航运输业得到迅猛发展，对民航体系来讲，具体的表现是空中流量增大，特别是在繁忙机场终端区，交通逐渐变的拥挤，这也导致了整个空中航路的拥挤，航班延误也就随之而来。航班延误已经成为大型终端区商业机场发展的“瓶颈”，甚至是中国民航发展的“瓶颈”。北京，成都，广州，西安等枢纽机场都预测在 2020 能达到当前配置下 95% 的设计容量。随着一些大型枢纽机场新建成双跑道或者建新机场，并陆续投入使用，交通拥挤情况得到一定程度的缓解，但是航班延误问题并没有从根本上得到解决。

显然，降低航班延误率成为中国民航从业人员和管理者共同的任务，随着航空运输需求的持续增长，航班延误问题越发严重，通过对航班数据分析，寻找其内在的诱因，利用数据的结果分析预测延误的波及变化情况，将对航班延误问题的研究有重要的指导意义，本文尝试从机场和航空公司两个不同角度对此问题进行剖析，因航班延误有多种不同的表征方法，有基于时间的，有基于航班运行过程的，本文选择以航班着陆率为主要表征方法，具有前瞻性与合理性。最后，针对得出的延误原因，我们制定出相应理性科学改正措施，并使用现有

数据模拟验证其有效性和可行性。

三、符号说明及模型假设

1. 航班延误问题模型分析

X1: 运输总周转量

X2: 飞机数量

X3: 机场数量

X4: 航线数量

Y: 晚点率

t: 为防止延误, 两个相邻航班之间最少需要的时间间隔。

Num: 航班号

Arr: 目的地

Dep: 始发地

Arrhour, Arrmin: 到达时间

Dephour, Depmin: 出发时间

ArrTime, DepTime: 可以计算的到达和出发时间 Time: 飞行时间

2. 航班延误波及分析

terminal: 即该机场航站楼;

No. i: 第 i 号航站楼, $i=1, 2$;

aircraft_type: 飞机类型, 例如 A320, B737 等;

Airline: 航空公司, 航空公司代码较为常见, 因此文中不着特别说明;

task_code: 航班任务代码;

D_OR_I: D 表示国内航班, I 表示国际航班;

deptime: 航班离港的时间段, 该时间来源于数据库中的实际离港时间;

3. 模型假设

3.1 假设论文中所得相关数据真实有效, 统计合理。

3.2 假设不同的源数据统计方式相同, 故所得数据间兼容。

3.3 假设针对航班延误问题采取的措施即刻生效。

3.4 假设所涉及航空公司决策者都是理性的。

3.5 假设各航空公司决策者相互独立。

四、模型建立与求解

4.1 问题 1 的模型建立与求解

FlightStats 发布的月度全球航空报告称, 6 月份北京、上海在全球 35 个主要国际机场里面的准点率垫底。上海浦东机场倒数第二, 准点率仅为 28.72%。

事实上,自 2013 年 3 月起 FlightStats 发布全球 35 个主要机场延误率排行榜以来,中国北、上、广三地机场四个月间始终处于垫底位置。历史数据显示,2013 年 3 到 5 月,上海浦东机场准点率分别为 30%、33%和 36%,在 6 月则跌至 28.72%。

但是我国的航班准点率真的有这么低吗?答案并不完全是这样。

4.1.1 国际间衡量指标偏差

据提供的数据我们了解到:以 6 月 7 日广州飞北京的中国南方航空 CZ3103 航班为例,南航内部数据显示的是飞机在 12 时 01 分实际滑出(此时显然舱门已关闭),经过跑道滑行后 12 时 35 分实际离地。而在 FlightStats 网站查询到的 CZ3103 航班信息,航班离港时间是 12 时 35 分(也就是实际起飞时间,时间点 C)。而在其页面下方,清晰地标注着航班延误计算的是实际关闭舱门(时间点 B)和计划关闭舱门(时间点 A)相距的时间差。也就是说,FlightStats 在美国和欧洲等大部分国家采用的数据都是飞机“舱门关闭时间”,而对中国机场采用飞机实际起飞时间,由于飞机从关舱门到离地之间还有跑道滑行、等候等耗时,大约需要半个小时,这样的计算方式是不公平的。

其次,鉴于我国国土面积庞大,飞行流量显著高于小面积国家的地域特点,民用航空总局明确规定对于我国机场,若航班在计划起飞时间后 30 分钟内完成起飞(机轮离地),即认为该航班准点放行;对于航空公司而言,如果一个航班在计划降落后 30 分钟内着陆(机轮接地),则该航班准点到港,反之即为晚点。但在这里值得提及的是在国际上规定的晚点时间是在 15 分钟内完成起飞。因此我们所得到的数据是按照各国自己国情所规定的晚点时间进行统计分析,此类数据没有考虑到中国航线的特殊情况。

综合上述原因,我们将flightstats^[1]上 2013 年 2 月份到 10 月份北京首都国际机场和上海虹桥机场的数据进行了修正,如表 1 与图 1 所示:

Airport	BEK 北京首都		PVG 上海虹桥	
月份	修正后	修正前	修正后	修正前
2	53.77%	26.09%	53.88%	27.37%
3	60.26%	30.02%	62.22%	34.76%
4	57.23%	27.92%	59.01%	33.19%
5	54.84%	25.75%	63.33%	35.74%
6	41.22%	18.30%	52.27%	28.72%
7	41.90%	17.83%	35.69%	20.89%
8	60.20%	28.88%	54.38%	27.20%
9	70.06%	36.17%	70.08%	39.59%
10	72.85%	38.25%	70.55%	39.20%

表 1

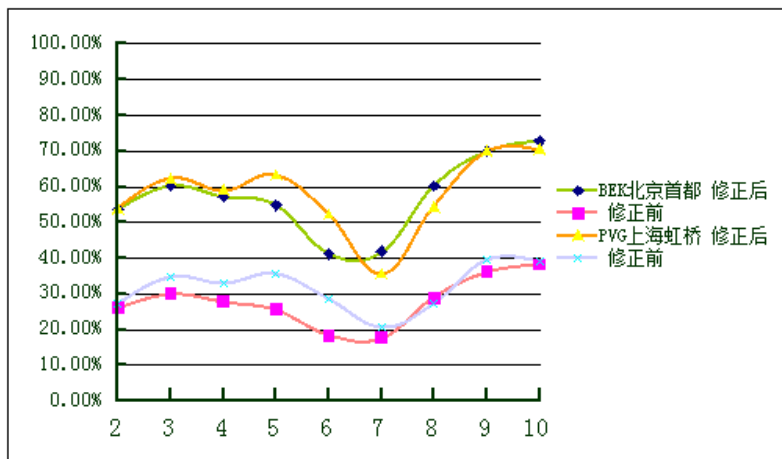


图 1

由上述结果分析得出, flightstats 作为全球性的航空统计网站, 由于各国航空数据统计标准存在差异性, 其显示出的数据指标拉低了中国航空的准时率。

4. 1. 2 单个机场的延误率判断缺乏整体性

机场的延误率不能单从某一段时间或某一个机场的航班情况而断定, 我们应该从长时间和多个机场的整体情况来考虑问题。

以下我们将对查到近年来我国和美国航班延误情况的数据进行分析。为了避免衡量指标差异造成的偏差, 我们采取遵照各国原始数据^[2]所反映的延误率情况的原则, 进行数据和模型的分析。

(1)

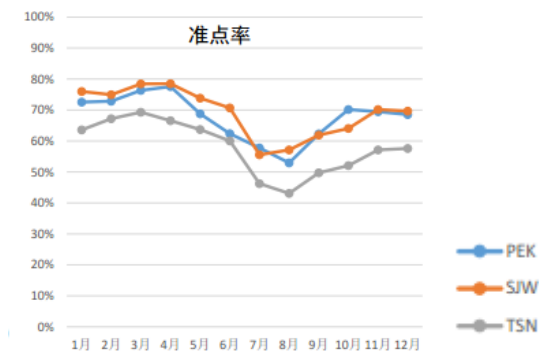
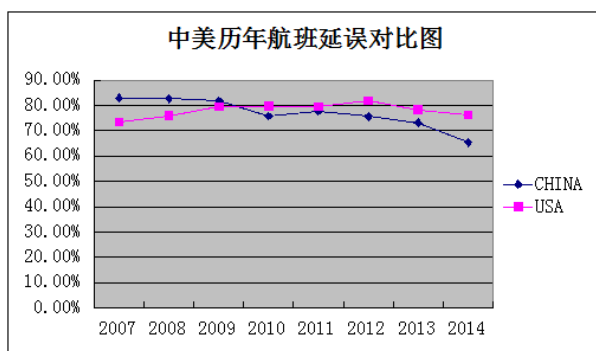


图 3 中国各大机场按月份准点率折线图 (1)

(2)

图 7 中美历年航班准点率对照表^[3]

由图中可以看出中美两国航班的整体正点率差的并不是很多；2010 年以前甚至高于美国。然而美国航班正点率处于上升趋势，中国航班正点率却在逐年降低。

综上我们得出问题 1 的理论解答：南华日报报道存在一定的片面性，因 flightstat 所提供数据未考虑到中外对于航空延误衡量指标的差异，过分夸大了中国航空的延时率。

然而我们依然应该注意到，若运用同国外相同的延时衡量指标，中国航空确实存在着较为严重的延时情况，综合目前现状，中国航班延误问题值得深层次的原因剖析。

4.2 问题 2 的模型建立与求解

4.2.1 问题 2 基础情况概述——航班延误原因基础介绍

总体来讲，航班延误是一个比较复杂的问题，受到很多因素影响，通常的航班延误原因分类有六类，见表 2。而当航班延误发展了一定情况下，对民航运输业的影响就产生了。

1. 天气原因	1. 起飞机场、着陆机场及航路天气状况 2. 基于天气条件的机组技术等级 3. 飞机机型（基于某种气象条件的性能） 4. 恶劣或极端天气
2. 航空管制	1. 流量控制 2. 空域限制
3. 机场管理原因	1. 机场地面保障系统故障 2. 其他机场因素
4. 航空公司原因	1. 机票票务原因 2. 运力调配 3. 机务组装原因
5. 旅客原因	1. 旅客晚到 2. 旅客突发事件
6. 其他原因	劫机、飞机空中故障、失事造成相关航班延误

表 2

4.2.2 航班延误原因模型分析

通过对我国航空日均运输量的计算,发现我国的航空运输量已经超过中国民航局公布的标准。而目前我国对航空运输的需求日益增大,每年都会增加机场、飞机数量,开辟新航线。以下的分析表明,这样的供应不仅没有满足需求的问题,更加剧了航班延误问题。

年份	X1 运输总周转量(亿吨公里)	X2 飞机数量(架)	X3 机场数量(个)	X4 航线数量(条)	Y 晚点率(%)
2010	538.45	1597	175	1880	24.20
2011	577.44	1764	180	2290	22.10
2012	610.32	1941	183	2457	24.31
2013	671.72	2145	193	2876	26.90

表 3^{[4][5]}

样本点的个数为 4, 分别用 1, 2, 3, 4 表示各个样本点, 自变量的观测数据矩阵记为 $A=(a_{ij})_{4 \times 4}$,

因变量观测数据矩阵记为 $B=[b_1, b_2, b_3, b_4]^T$

(1) 数据标准化;

各指标值 a_{ij} 转化为标准化值 ∂_{ij} , 即 $\partial_{ij} = \frac{a_{ij} - \mu_j^{(1)}}{s_j^{(1)}}, i=1, 2, 3, 4; j=1, 2, 3, 4$.

$$\text{式中: } \mu_j^{(1)} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 a_{ij}, s_j^{(1)} = \sqrt{\frac{1}{3} \sum_{i=1}^4 (a_{ij} - \mu_j^{(1)})^2} (j=1, 2, 3, 4)$$

即 $\mu_j^{(1)}, s_j^{(1)}$ 为第 j 个自变量 x_j 的样本均值和样本标准差。对应地,

$$\chi_j = \frac{x_j - \mu_j^{(1)}}{s_j^{(1)}}, j=1, 2, 3, 4$$

为标准化指标变量。

类似地, 将 b_i 转化成标准化指标值 β_i , 即

$$\beta_i = \frac{b_i - \mu^{(2)}}{s^{(2)}}, i=1, 2, 3, 4$$

式子中, $\mu^{(2)} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 b_i, s^{(2)} = \sqrt{\frac{1}{3} \sum_{i=1}^4 (b_i - \mu^{(2)})^2}$, 即 $\mu^{(2)}, s^{(2)}$ 为因变量 y 的样本均值和样本标准差; 对应地, 称

$$\Upsilon = \frac{y - \mu^{(2)}}{s^{(2)}} \text{ 为对应的标准化变量。}$$

(2) 求出相关系数矩阵;

	运输总周转量 (亿吨公里)	飞机数量	机场数量	航线数量	晚点率
运输总周转量 (亿吨公里)	1	0.995116398	0.994209625	0.991255855	0.729224019
飞机数量	0.995116398	1	0.978749024	0.988565656	0.705423242
机场数量	0.994209625	0.978749024	1	0.982922256	0.748300134
航线数量	0.991255855	0.988565656	0.982922256	1	0.633418773
晚点率	0.729224019	0.705423242	0.748300134	0.633418773	1

表 4

根据图中可以看出，运输总量对晚点率的作用为正相关，并且单纯地增多机场、飞机、航线数量并不能达到降低晚点率的效果。

(3) 分别提出自变量组和因变量的成分：

$$\begin{cases} u_1 = -0.0354\chi_1 + 0.2416\chi_2 + 0.2429\chi_3 + 0.1317\chi_4 \\ u_2 = 0.4171\chi_1 + 0.4859\chi_2 + 2.7267\chi_3 - 3.6292\chi_4 \\ u_3 = 0.0178\chi_1 + 3.8808\chi_2 - 1.3909\chi_3 - 2.5100\chi_4 \end{cases}$$

$$\begin{cases} v_1 = 1.2295\partial_1 \\ v_2 = 0.5783\partial_2 \\ v_3 = 0.0155\partial_3 \end{cases}$$

第一个成分解释自变量的比率为 0.9913，只需要取一对成分即可。

(4) 该成分对的标准化指标变量与成分变量之间的回归方程；

求得自变量组和因变量与 u 的回归方程分别为：

$$\begin{aligned} \chi_1 &= 1.7313u_1 \\ \chi_2 &= 1.7231u_1 \\ \chi_3 &= 1.7210u_1 \\ \chi_4 &= 1.7227u_1 \\ \partial &= 1.2295u_1 \end{aligned}$$

(5) 求因变量组和自变量组之间的回归方程

$$\partial = 0.1846\chi_1 + 0.1786\chi_2 + 0.1894\chi_3 + 0.1603\chi_4$$

得到回归方程为

$$y = 6.9658 + 0.0064\chi_1 + 0.0015\chi_2 + 0.0491\chi_3 + 0.0008\chi_4$$

(6) 模型解释

从模型可以看出，运输量、飞机数量、机场数量、航线数量的增加都将使航班延误率增大，而且机场数量的增加对其影响最大。说明航班延误问题不仅仅是由于运输量造成的，涉及的航班管理、航线规划等其他原因更加严重。

4.2.3 由中国民航局的统计结果描述航班延误原因概况

主要航空公司						
	航班数（万次）	正常率	航空公司原因	流量原因	天气原因	其他
2010	188.8	75.80%	41.10%	27.60%	19.50%	11.80%
2011	201.8	77.90%	37.10%	27.50%	20.00%	15.40%
2012	208.7	75.69%	37.50%	25.00%	21.90%	15.60%
2013	237.1	73.10%	37.00%	27.40%	22.10%	13.50%

表 5

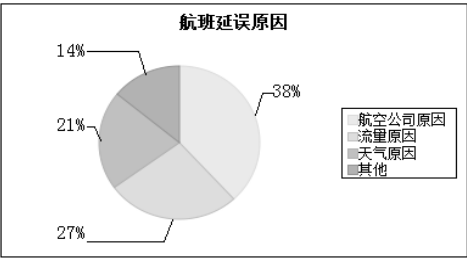


图 8

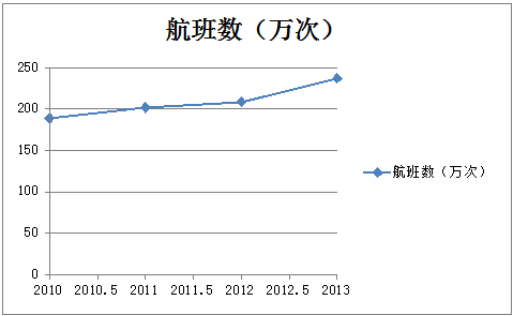


图 9

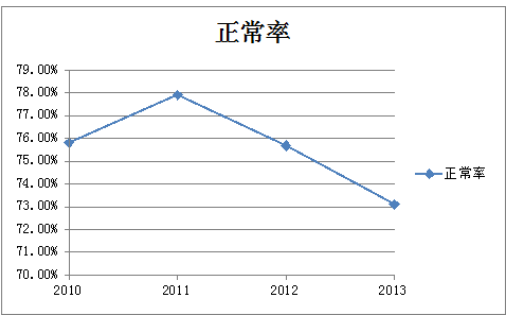


图 10

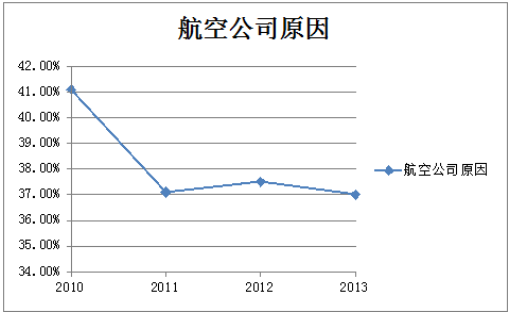


图 11

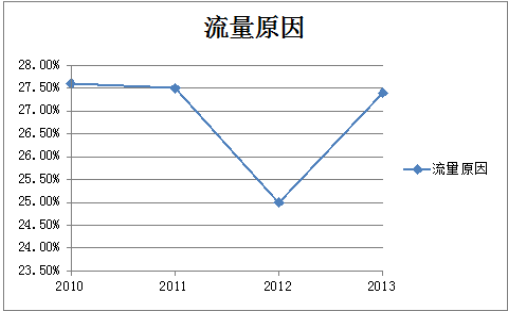


图 12

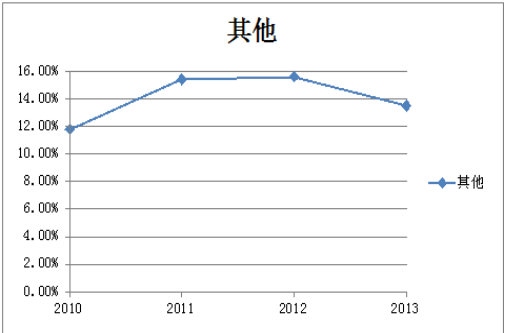
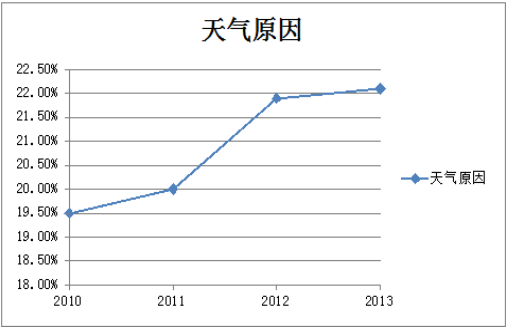


图 13

图 14

由图表可以看出，航空公司管理缺陷、流量控制和天气原因是造成航班延误的三大因素，其中航空公司自身的管理缺陷所造成延误问题最严重。

4. 2. 4 基于航班着陆率的航班延误分析^[6]

4. 2. 4. 1 航班着陆率

航班延误往往具有不可预知性和随机性，因此，表征航班延误，通过可以测量的数据来表征航班延误。本文通过一个新的概念来表征航班延误，即航班着陆率（Aircraft Arrival Rates 简写 AAR）。航班着陆率的定义为每小时内机场安全着陆的航空器数量。机场根据多年的运营经验以及数据积累，可以得出机场在某一个时间段内着陆的飞机数量，形成所需着陆架次表，当航班延误产生的时候，实时着陆数据必然小于所需着陆数据。那么，通过预测实时着陆数据，也就是航班着陆率，就可以表征延误。基于多种原因，航班延误不可避免，特别是在恶劣天气情况下，为确保安全，地面管制部门往往要实施流量控制，那么地面延迟不可避免，等待起飞航班需要实施地面延迟程序。航班着陆率由于其具有前瞻性，因此其在表征航班延误，特别是航班进港延误上有独特的优势。

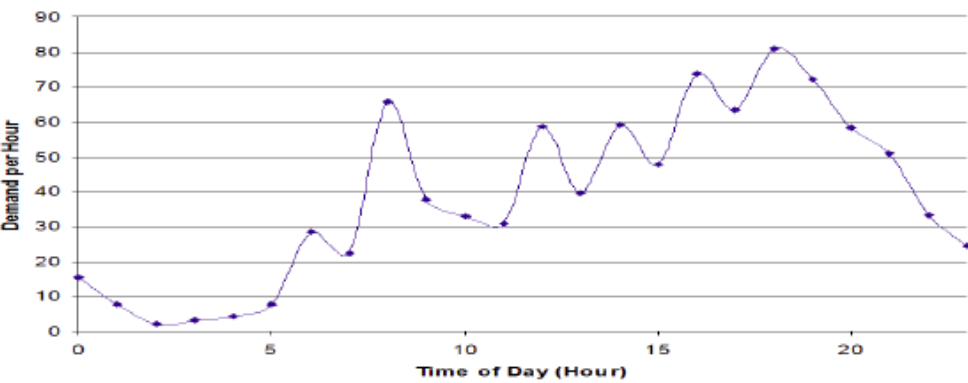


图 15 所需着陆容量图

航班着陆率与航班延误有着紧密的联系，当潜在的航班延误因子发生的时候，航班着陆率必然降低。

下图是某国际机场的航班着陆率—航班延误时间图，该图是机场在一段时间内，这段时间内机场着陆情况没有发生大的变化，机场进港延误与着陆率的关系图，从图中可以直观的看着到，当着陆率低于标准值的时候，航班延误产生了。

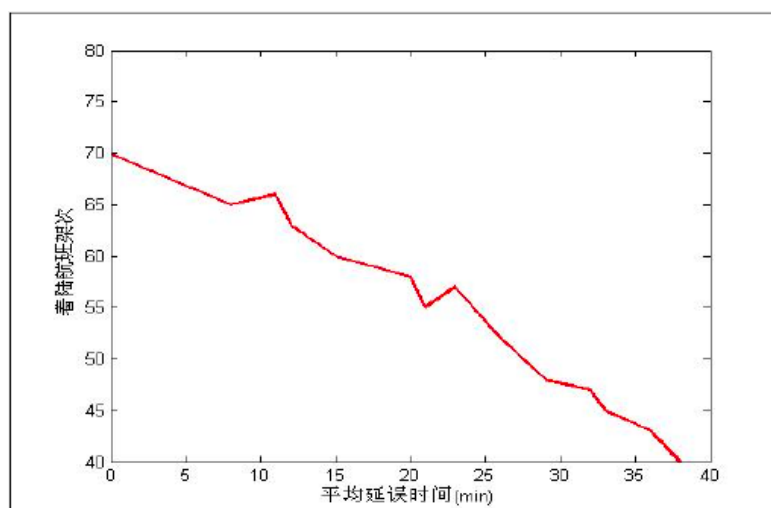


图 16 航班着陆率—延误时间图

4.2.4.2 航班延误的波及影响

航空运输的直接运营单位是航班公司，无论是民营航空公司还是国家航空公司，航空公司作为企业的最直接目的就是盈利，因此它往往更多关心公司自身的运行效益和如何降低运营成本。为了降低运营成本，提高飞机的利用率，公司往往安排同一架飞机执行连续或者短时间间隔的多个航班任务，这就是一般意义上的连续航班，连续航班模式是国内外各个航空公司最常见的经营模式之一。以中国国际航空公司（以下简称国航）浙江分公司为例，该公司一天中计划航班 90 个，其中连续执行 3 个航班的飞机机组为 8, 15 组连续飞行 4 个航班，10 连续飞行 5 个航班，大量的飞机执行的是两个航班，其中 80% 的机组及相关人员（包括：飞行员、地面机务人员、签派员、乘务人员和空警人员）都执行了至少两个航班。由于航班计划的紧密，公司为了最大限度的利用飞机，飞机在连续执行两个或者两个以上的航班时，如果在执行过程中任意一个环节延误了，那就可能会引起更多的延误，这个延误可能会延续到下一个航班甚至下几个航班，这就是延误波及。不难理解，在大型机场，特别是在大型枢纽机场，如首都国际机场，上海浦东机场，航班延误往往会引起更大面积的航班延误，这给公司带来了大量的经济损失。

基于以上描述可知，连续航班的运行存在这样的问题：由于航班计划时间紧密，活动时间短，当初始航班或者当中某一个航班发生延误的时候，后续下游航班往往会发生不同程度的延误。而延误波及情况会因为下游的过站时间的不同而不同。在中国民航产业的早期，由于航班数量比较少，且航班间隔比较长，航班延误问题只是某个航班的单一问题，且航班延误的成因简单，如天气原因，工程机务原因等，不涉及到延误的传播。而当航空业发展到今天，整个行业出于井喷式发展的阶段，航班计划中的航班安排的越来越密集，使得个航班之间的关系越来越密切，这就造成单一的航班延误通过各种关联关系将延误传递到下一个甚至下几个航班。

现在两个相关联的航班分别为 A 和 B，多个航班相关联的情况类似，这里用两个航班来举例。A 和 B 的关联性可以分为以下三类：

(1) 飞行器关联: 也就是航班 A 和航班 B 使用的是同一架飞机, 区别是其航班号不同。也就是说同一架飞机执行两次连续的飞行任务, 使用了不同的航班号。

(2) 机组及服务人员关联: 航班 A 和航班 B 使用相同的机组人员, 包括飞行员, 乘务员, 空警, 航空公司运控中心签派员。

(3) 旅客关联: 就是航班 A 中的旅客有一部分来自航班 B 在某枢纽机场的周转。三种航班关联中, 当潜在的延误可能会发生的时候, 公司或者机场当局会采取切实有效的措施以应对由第 2, 3 两种关联带来的延误, 从这个角度来讲, 后面两种关联性引起的航班延误可以最大限度得到限制, 甚至避免。因此在本文中我们主要研究第一种关联性引起的航班延误。

4.2.5 基于贝叶斯网络的数学建模

设在某一航班链中, 航班 A 和航班 B 处于航班链中不同的位置, 二者关系如图 3 表示:

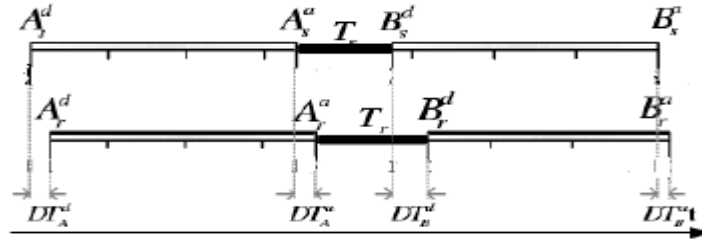


图 17 航班延误实例图

在该航班链中, 航班 A 处于航班链的上游, 航班 B 处于航班链的下游, 在飞行计划中, 航班 A 预计离地时刻为 A_s^d , 航班 B 的预计离地时刻为 B_s^d , 那么, 在运行过程中, 因为种种原因, 当 A 的实际离地时刻时间 A_r^d 推迟了, 也就是 A 航班的进港被推迟了, 也就是延误了, 相应地航班链中的 A 航班要转化称航班链中 B 时的进港也产生了延迟:

$$DT_A^d = A_r^d - A_s^d \quad (3.1)$$

$$DT_A^a = A_r^a - A_s^a \quad (3.2)$$

其中 A_r^a 和 A_s^a 表示处在上游航班链中 A 航班的实际离地时间和预计在下游机场着陆时间。A 航班的下游航班为 B, 由于他与 A 航班同处于一个航班链上, 而航班 B 处在航班链当中 A 航班的下游, 那么 B 航班必然受到 A 航班的影响, B 航班的实际离地时刻为 B_r^d , 由于 A 航班的延误波及到了航班 B, 航班 B “无辜” 的受到牵连, 使得 B 航班产生了相应的离港, 进港延误:

$$DT_B^d = B_r^d - B_s^d \quad (3.3)$$

$$DT_B^a = B_r^a - B_s^a \quad (3.4)$$

其中 B 航班的实例离地时刻是 B_r^d , 计划离地时刻是, 在下游机场实际着陆时间是 B_r^a , 预计着陆事件是 B_s^a , B_s^d 与 A 航班的在下游机场的预计着陆时间 A_s^a 差值称为航班过站时间, 而这段时间主要有两个功能, 机地服人员对飞机进行航班前准备, 和旅客登机、等待空管

指令，那么根据以上描述可得：

$$T_s^{AB} = B_s^d - A_s^a = t_{gs} + \Delta t \quad (3.5)$$

$$T_r^{AB} = B_r^d - A_r^a = t_{gs} + \Delta t \quad (3.6)$$

其中 A 航班的实际过站时刻是 T_s^{AB} ，B 航班的实际过站时刻是 T_r^{AB} 。 t_{gs} 表示机场地服人员地面服务时间， Δt 表示旅客登机、等待空管指令时间。那么，根据以上数学表达式的实际意义，得出：

$$B_r^d = A_r^a + T_r^{AB} \quad (3.7)$$

$$B_s^d = A_s^a + T_s^{AB} \quad (3.8)$$

把 3.7，3.8 带入 3.3 可得：

$$\begin{aligned} DT_B^d &= B_r^d - B_s^d \\ &= A_r^a + T_r^{AB} - (A_s^a + T_s^{AB}) \\ &= DT_A^a - (T_s^{AB} - T_r^{AB}) \end{aligned} \quad (3.9)$$

公式 3.9 是航班延误一次波及的数学表达式，根据以上思路，利用相同方法可以得到航班延误二次波及的数学表达式：

$$DT_C^d = DT_A^a - (T_s^{BC} - T_r^{BC}) \quad (4.0)$$

当延误波及产生的时候，有

$$\begin{aligned} DT_A^d - DT_A^a &= (A_r^d - A_s^d) - (A_r^a - A_s^a) \\ &= (A_r^d - A_r^a) - (A_s^d - A_s^a) = T_r^a - T_s^a \end{aligned} \quad (4.1)$$

航班 A 的实际离地时刻为 T_r^a ，预计离地时刻为 T_s^a 。由于飞行时间与飞行距离，机型一般情况下变化较小，那么一般情况下可以考虑飞行时间为一个固定值，于是有 $T_r^a \approx T_s^a$ ，带入公式 3.7 可得 $DT_B^d \approx DT_B^a$ 与公式 3.9 一起带入公式 4.0，得到：

$$\begin{aligned} DT_C^d &= DT_B^a - (T_s^{BC} - T_r^{BC}) \\ &\approx DT_B^d - (T_s^{BC} - T_r^{BC}) \\ &= DT_B^a - (T_s^{BC} - T_r^{BC}) - (T_s^{BC} - T_r^{BC}) \end{aligned} \quad (4.2)$$

对公式继续进行推导得出：

$$DT_N^d = DT_A^a - (\sum_{i=1}^n T_s^i - \sum_{i=1}^n T_r^i) \quad (2 \leq N \leq 10) \quad (4.3)$$

由 $DT_B^d = DT_A^a - (T_s^{AB} - T_r^{AB})$ 可知，在飞行器相关的连续航班中，A 的进港航班延误对 B 的离港延误影响巨大。当进港有轻度延误时，即等式右边第一项值较小，可以通过一系列缩短过站的手段，即增大第二项，将轻度延误吸收、甚至消除，使延误不再波及或波及较小。但若进港为中、重度延误，即第一项数值较大时，而第二项的值不能无限增大： $\max(T_s - T_r) = T_s - \min T_r < T_s$ ，其中 T_s 为定值，则波及基本无法避免，离港必会因为进港延误的波及而产生延误。特别当第二项为负值时，波及所产生的延误将放大。

4.2.6 运行结果分析

4.2.6.1 航班运行数据的 MATLAB 建模

为了利用 MATLAB 软件对之前提出的数学方法进行计算，本文参考国内航空公司的资料，将航班延误的延误代码如表 7 表示：

天气原因	流量控制	运输服务	工程机务	机场设计	机组人员	公司计划
TQ	LL	JW	YS	JC	JZ	JH
场区秩序	食品供应	安检	联检	旅客原因	禁飞	需要说明
CQ	SP	AJ	LJ	LK	JF	RA

表 6 航空公司延误代码

可以知道，国内民从业或者相关人员更为关注离港延误，对进港延误来讲，航线距离相对固定，飞机速度变化较小或者说是 在一个很小的范围内变化，也就是说飞机在空中的相对航行时间固定，那么如果某离港的飞机能正常起飞，那么该航班在目的地机场正点降落的概率大大增加。在这个实践基础上，本节通过贝叶斯模型建模，分析贝叶斯航班离港延误。为进行机场航班延误分析，选择广州白云国际机场数据库中的数据，进行贝叶斯网络结构的学习和试验。

任务	客包	货包	普加	试飞	正班	补班	调机	返航	专机	专机保障
代码	KB	HB	PJ	SF	ZB	BB	DJ	FH	ZJ	ZJBZ

表 7 航班任务属性代码

在实际工作中，由于时间是连续型变量，但对于贝叶斯网络结构学习，连续时间是没有任何意义的，因此对时间进行离散化处理，相应的描述如为：t1 to t2 用来表示 t1 到 t2 时间段。

离港延误的时间，这里是一个时间段，而不是一个时间值，是实际离港时间与计划离港时间的差值，同样，将连续的时间变量值进行了离散化处理，则对应的描述如下：

less than n:表示延误时间小于 n 分钟的延误；
from t1 to t2:表示延误时间 t1 分钟到 t2 分钟之间的延误，即实际离港时间比计划离港时间的延误值小于 t2 分钟，大于 t1 分钟；
more than n: 表示延误时间大于 n 分钟的延误，即实际离港时间比计划离港时间的延误值大于 n 分钟。

terminal	aircraft_type	Airline	task_code	D_OR_I	dep_time	delay_mins
N01	A320	3U	ZB	D	16:22	12
N01	A321	CA	ZB	D	20:21	20
N02	B737	MU	ZB	I	10:28	10
N02	B747	CZ	ZB	I	14:26	40

表 8 机场延误数据示例表

4.2.6.2 MATLAB 计算过程及结果

对真实的机场航班数据进行处理，利用机场的真实航班数据，在 Matlab 中构建贝叶斯

网络数据库，对延误时间进行等级分类，其等级区间为 $[0, 30)$ ， $[30, 60)$ ， $[60, 120)$ ， $[120, 240)$ ， $[240, +\infty)$ ，即正常航班，轻度延误，中度延误，一般重度延误，超重度延误。由于不同的时间段对应不同的繁忙程度，把一个运行日的时间划分为三个时间段，即 0 至 10 点，10 点至 18 点，18 点至 24 点，对利用整个数据库在 MATLAB 中调用贝叶斯函数对数据库进行运算，从运行结果来看，一个运行日当中的航班延误大部分都发生在 10 点到 20 点这个时间段内。

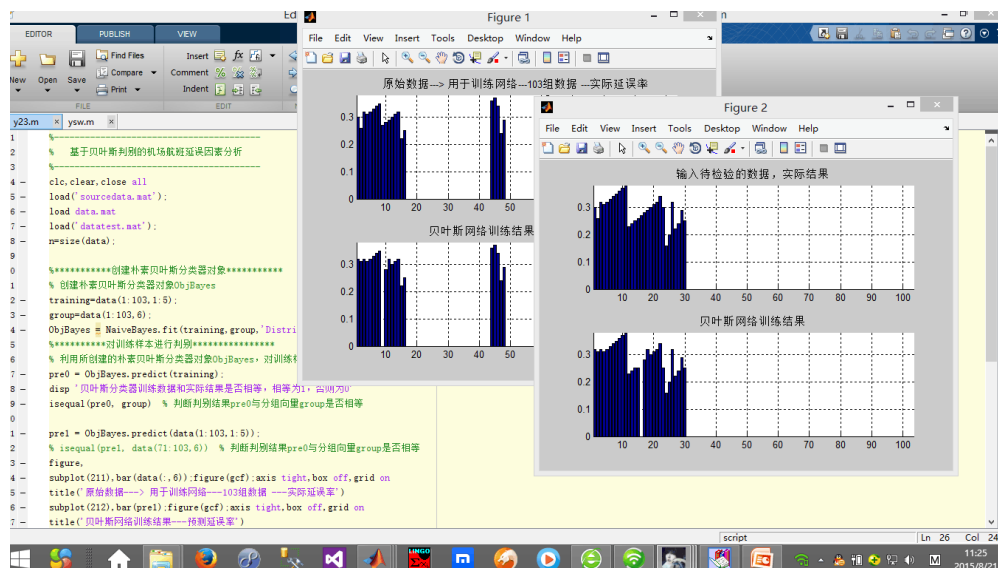


图 18 MATLAB 运行截图

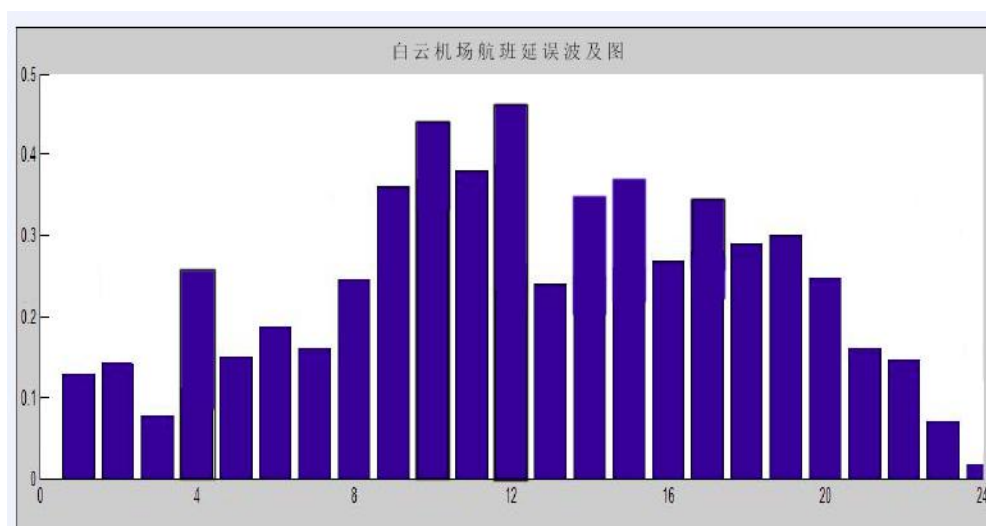


图 19: 白云机场航班延误图

通过图 19 的运行结果可知，机场一个运行日的延误大多数发生在 10 点至 20 点之间，选择 10 点至 20 点之间的数据作为研究对象，考察机场整体进港、离港延误的分布情况，运行结果如图 20。

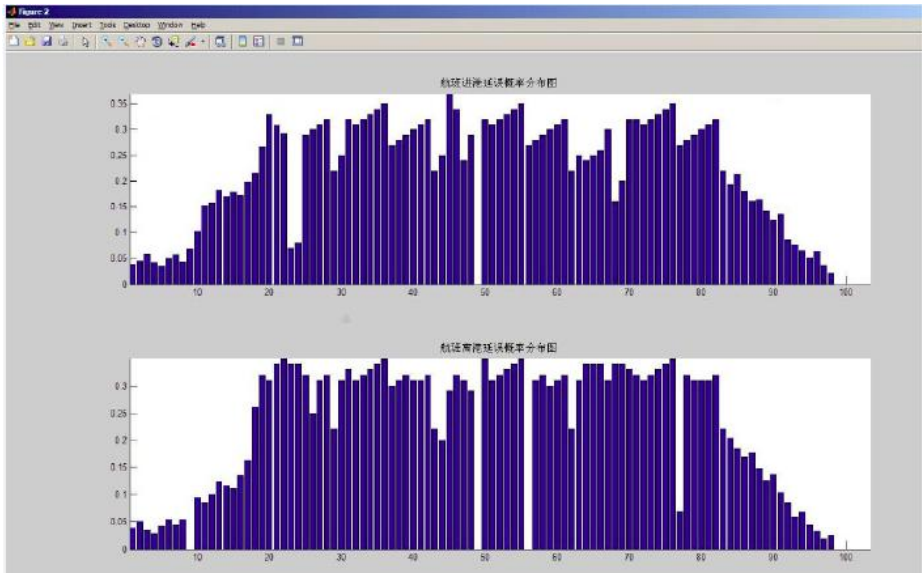


图 20：航班延误整体分布图

如图 20 所示，进港、离港延误时间的概率分布主要是在 30-80 分钟这个时间段内，约占 51%和 57%，基于这个延误概率分布表，可以简单地认为该机场的航班运营情况较好。

现在考察当进港延误分别为轻度延误时，离港延误的概率分布情况（如图 21）。当进港延误主要是轻度延误的时候约占 36%，离港延误重要表现为正常航班和轻度延误，分别约 33%和 33%。

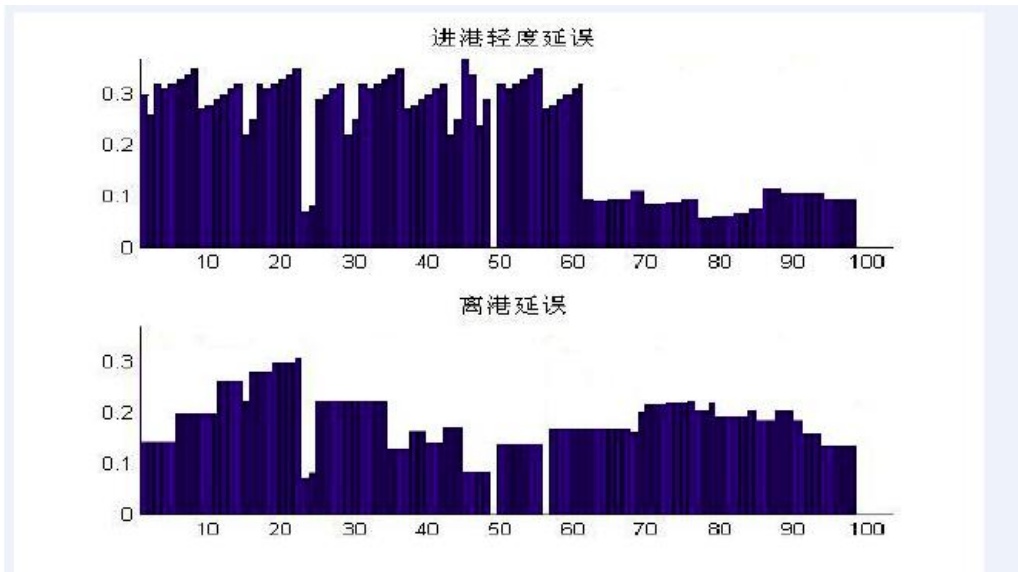


图 21：进港轻度延误示意图

当进港延误为中度延误的时候（如图 22），离港延误主要表现为轻度延误和中度延误，其概率分别约为 32%和 25%，而航班正常的概率为 17%。

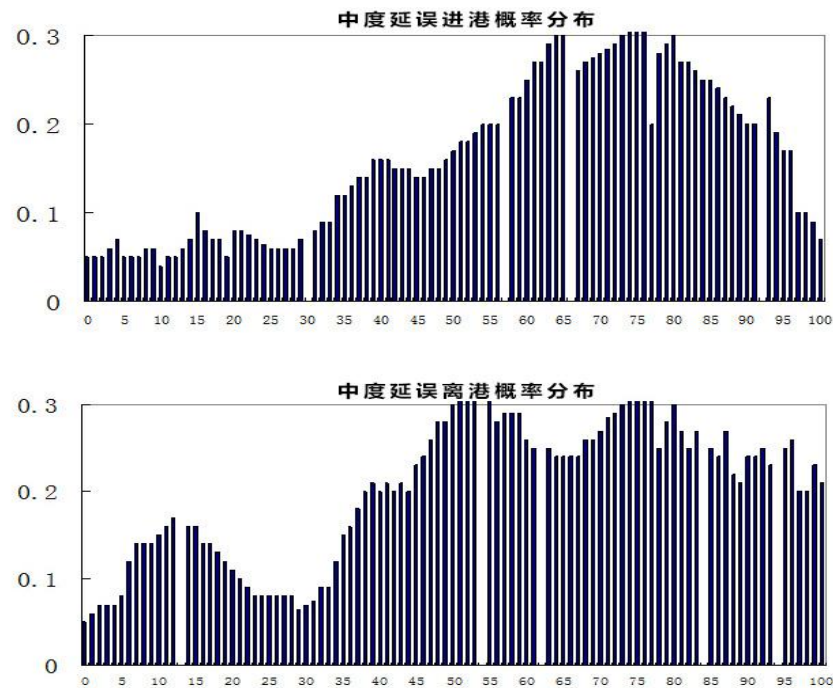


图 22：进港中度延误示意图

综上，通过贝叶斯网络模型分析，得出中国航空延误存在一定的波及效应，即在天气情况、流量限制和航班管理不当造成航线延误的基础上，由于中国的航线平均长度因国土面积原因远高于世界其他国家，存在着普遍的航线延误波及现象，这也是导致大面积连锁性航空延误的重要原因。

4. 2. 7 航班延误原因综合导图

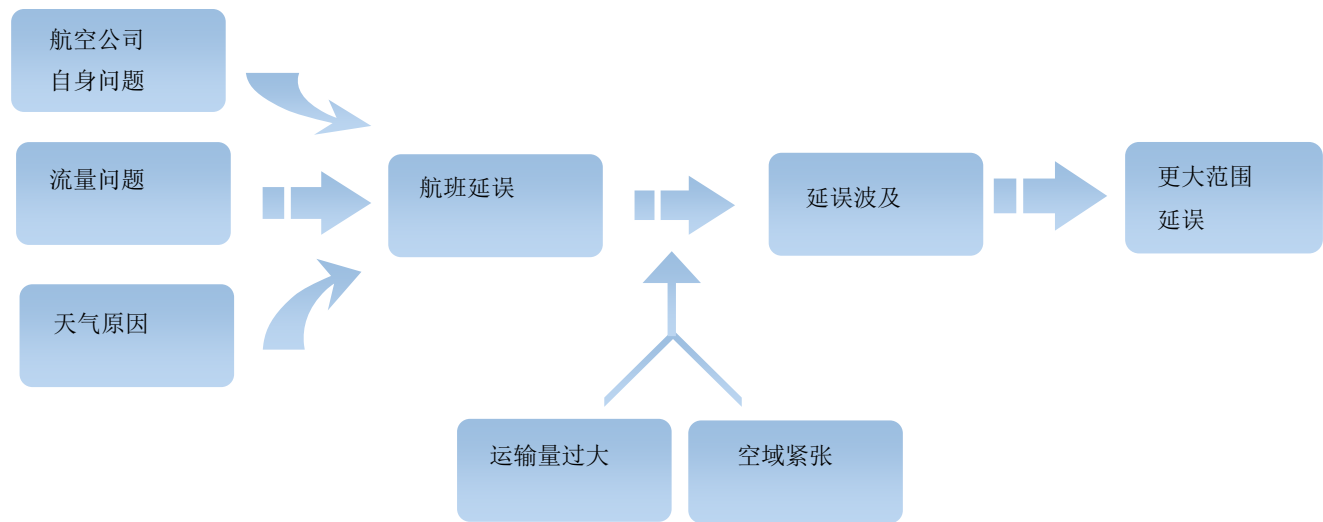


图 23

4. 3 问题 3 的模型建立与求解

4. 3. 1 建立航空公司延误统计系统^[7]

4. 3. 1. 1 航班延误统计指标

由问题 2 的分析已经得出，航空公司协调管理不当在飞机延误因素中占了最大比重，因此建立航空公司飞机延误信息记录系统，针对各个环节得出具体的统计，有助于明确管理过程中的问题重点，对于各级管理部门和运营单位对延误进行控制有着十分积极的意义。

本文所建立的航班延误统计指标体系分为两个层次，最上面一层从四个方面来考虑航班延误统计，包括：机场延误统计指标体系、航空公司延误统计指标体系、空管延误统计指标体系和其他延误统计指标体系。每一个指标体系围绕航班运行，具体细化出相应的统计指标项，共分为 23 项指标，具体如图 24 所示。 上述指标体系中对各个指标的计算需要有一个统一的标准来衡量。例如，为了对货物装载延误进行统计，需要根据机场和航空公司相关的实际运行情况，制定出一个统一的货物装载时间标准，对货物装载延误的统计按照此标准进行统计。图 25 是针对某一机型的各个时间段的分配示意图。通过机场、航空公司等民航相关单位的调研，在充分分析的基础上，结合运行中的实际情况，文中对于部分统计指标给出如下的时间标准，如表 10 所示。

空管延误统计指标	机场延误统计指标	航空公司延误统计指标	其他延误指标
撤轮挡延误	货物装载延误	飞机故障维修延误	天气情况延误
推出延误	安全检查延误	常规飞机维护延误	旅客延误
滑行延误	联合检查延误	飞机清洁延误	处理突发事件延误
航路延误	地面事故延误	空勤人员延误	
	设施故障延误	食品供应延误	
	油料保障延误		

图 24：航班延误统计指标体系

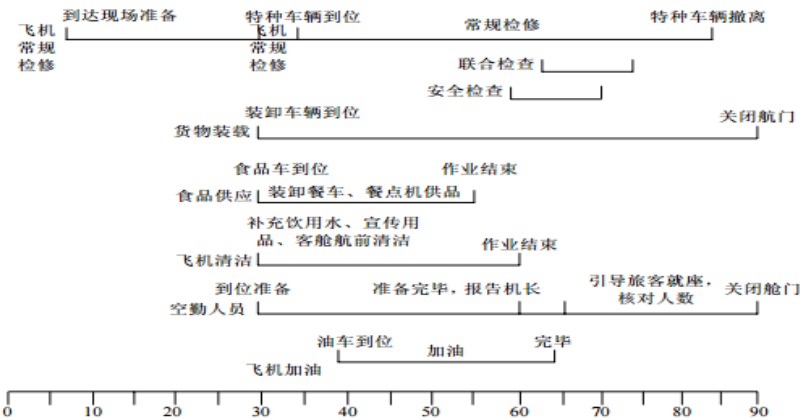


图 25：航班运行保障时间分配

航班特点	指标名称及时间标准						
	货物装载 平均时间 /min	安全检查 时间/min	联合检查 时间/min	油料保障 时间/min	飞机常规 维护时间 /min	飞机清洁 时间/min	食品供应 时间/min
60 座以下	50	5	5	15	25	20	15
61~150 座以下	55	10	10	20	30	25	20
151~200 座以下	60	15	15	25	35	30	25
201~300 座以下	65	20	20	30	40	35	30
301~400 座以下	70	25	25	35	45	40	35

表 9 指标统计时间标准

4.3.1.2 航班延误等级评估

本文采用上述延误统计指标和方法对南方航空公司航班延误情况进行了统计。该公司 12 月份前 12 天延误航班数目为 10 班，通过对这些航班延误运行状况的分项统计，可得到总体统计表 11。

航班号	日期	起飞延误/min				航班延误 /min	到达延误 /min
		空管延 误总时 间	机场延 误总时 间	公司延 误总时 间	其他延误 总时间		
B1	12. 2				19	17	36
B2	12. 2			30		5	35
B3	12. 4	40					40
B4	12. 5			45		20	65
B5	12. 5	18					18
B6	12. 9	25				8	33
B7	12. 9			16		14	30
B8	12. 10		20			27	47
B9	12. 12		7		9		16
B10	12. 14	12			9		21

表 10 南方航空公司航班延误整体统计

由表 11 可见，通过上述统计，可分析造成延误的主体（空管、机场、航空及其它因素及这些因素对总延误（到达延误）的影响程度。另外通过对二级指标项的分析，还可以分析造成延误的具体原因，以采取相应的应对和改进措施。

因为航班延误涉及的主观评价较多，例如繁忙程度不同的机场对延误的可接受程度也不相同，模糊综合评价较适合多因素、复杂的综合评价问题，因此，本文所建立的航班延误等级评估模型采用模糊综合评价方法。

(1) 确定评判因素集

根据航班延误统计指标对给定的因素集合 U 进行划分：

第一层因素：U = {U1，U2，U3，U4} = {空管延误，机场延误，航空公司延误，其他延

误}

第二层因素 U_i 的构成 U_{ij} 为:

$U1 = (U11, U12, U13, U14) = \{\text{撤轮挡延误, 推出延误, 滑行延误, 航路延误}\}$

$U2 = (U21, U22, U23, U24, U25, U26) = \{\text{货物装载延误, 安全检查延误, 联合检查延误, 地面事故延误, 设施故障延误, 油料保障延误}\}$

$U3 = (U31, U32, U33, U34, U35) = \{\text{飞机故障维修延误, 常规飞机维护延误, 飞机清洁延误, 空勤人员延误, 食品供应延误}\}$

$U4 = (U41, U42, U43) = \{\text{天气情况延误, 旅客延误, 处理突发事件延误}\}$

(2) 建立各因素的评判集 V

根据航班的运行方式, 结合航班延误的特点, 确定延误指数为: 1 (低度延误)、2 (一般延误)、3 (中度延误) 和 4 (高度延误)。

(3) 确定各因素的权重矩阵

采用层次分析法结合物元分析法确定各个指标的权重, 可以较大地提高各个权重指标的客观性。下面介绍一级指标 $A(B1, B2, B3, B4)$, 加权向量 $WA(b1, b2, b3, b4)$ 的计算过程。结合专业性意见和以往数据分析结果, 可建立 3 个有效专业判断矩阵。

航空公司在进行延误等级评估时, 可根据自身数据量建立多个判断矩阵^[8]以提升精度。

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 3 & 5 \\ \frac{1}{5} & 1 & 3 & 5 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 1 & 5 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & 1 \end{bmatrix} \quad A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 & 7 \\ \frac{1}{3} & 1 & 5 & 5 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & 1 & 5 \\ \frac{1}{7} & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & 1 \end{bmatrix} \quad A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 3 & 5 \\ \frac{1}{3} & 1 & 3 & 5 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 1 & 5 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & 1 \end{bmatrix}$$

根据判断矩阵通过计算分别得到其特征向量, 并作一致性检验后, 可确定专业性意见综合给出的第一层因素权重, 以此构造权重复合物元矩阵 R :

$$R = \begin{bmatrix} & M1 & M2 & M3 & M4 \\ c1 & 0.4798 & 0.2922 & 0.1666 & 0.1044 \\ c2 & 0.4522 & 0.3021 & 0.1666 & 0.0791 \\ c3 & 0.5252 & 0.2241 & 0.1846 & 0.0061 \end{bmatrix}$$

式中 $c1, c2, c3$ 分别是专业信息确定 3 个的 $B1, B2, B3, B4$ 的权重值。

计算标准物元和节域物元, 从而可得关联函数物元:

$$R_{ij} = \begin{bmatrix} & M1 & M2 & M3 & M4 \\ c1 & 0.7360 & 0.6525 & 1 & 1 \\ c2 & 0.5729 & 1 & 1 & 0.4852 \\ c3 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

计算各专家的效度矩阵 $RV = (v1, v2, v3) = (0.3303, 0.3496, 0.3201)$

对原权重复合物元矩阵 R 进行修正, 得修正复合物元矩阵 $R\epsilon$, 即航班延误统计第一层指标因素的权重

$WA = (A1, A2, A3, A4) = (0.4847, 0.2597, 0.1724, 0.0641)$

同理可确定航班延误等级评估的二级指标向量B1（空管延误）、B2（机场延误）、B3（航空公司延误）、B4（其他延误）的权重分别为：

空管延误权重值：

$$WB1 = (b11, b12, b13, b14) = (0.2662, 0.3215, 0.2412, 0.1711)$$

机场延误权重值：

$$WB2 = (b21, b22, b23, b24, b25, b26) = (0.2859, 0.1021, 0.1122, 0.1570, 0.1717, 0.1711)$$

公司延误权重值：

$$WB3 = (b31, b32, b33, b34, b35) = (0.3021, 0.2665, 0.2089, 0.2121, 0.0240)$$

其他延误权重值：

$$WB4 = (b41, b42, b43) = (0.3612, 0.3812, 0.2567)$$

(4) 建立第二层因素模糊评判矩阵 R

邀请5位机场和航空公司的一线人员组成专家组，对南方航班延误统计情况进行评判，评判时分别在四个评判等级上对某项评估；要素作属于或不属于的二值逻辑判断，即当认为该要素属于该等级时记1，否则记0。在统计 r_{ij} 时取 $r_{ij} = P' / P$ ，其中P为参加评判的专家总人数，P' 为选择某一要素属于该等级的专家位数。根据五位专家的判断，得到各评判矩阵：

$$R1 = \begin{bmatrix} 0.3 & 0.1 & 0.5 & 0.1 \\ 0.3 & 0.2 & 0.4 & 0.1 \\ 0.3 & 0.2 & 0.4 & 0.1 \\ 0.2 & 0.2 & 0.4 & 0.2 \end{bmatrix} \quad R2 = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.2 & 0.4 & 0.1 \\ 0.1 & 0.2 & 0.1 & 0.4 \\ 0.1 & 0.1 & 0.4 & 0.4 \\ 0.1 & 0.2 & 0.5 & 0.2 \\ 0.1 & 0.2 & 0.3 & 0.4 \\ 0.1 & 0.2 & 0.3 & 0.4 \end{bmatrix}$$

$$R3 = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.3 & 0.4 & 0.3 \\ 0.2 & 0.3 & 0.4 & 0.1 \\ 0.1 & 0.2 & 0.3 & 0.4 \\ 0.1 & 0.1 & 0.4 & 0.4 \\ 0.1 & 0.2 & 0.3 & 0.5 \end{bmatrix} \quad R4 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.1 & 0.2 & 0.3 \\ 0.1 & 0.2 & 0.4 & 0.3 \\ 0.1 & 0.1 & 0.2 & 0.5 \end{bmatrix}$$

(5) 模糊综合评价结果

经过合成运算，得到第二层次的综合评判结果Bi：

$$B1 = WB \circ R1 = (0.1838, 0.1369, 0.2857, 0.0428)$$

$$B2 = WB \circ R2 = (0.1004, 0.2459, 0.3479, 0.2347)$$

$$B3 = WB \circ R3 = (0.1514, 0.3617, 0.3529, 0.1439)$$

$$B4 = WB \circ R4 = (0.1762, 0.1386, 0.2936, 0.3643)$$

第一层评价结果为：

$$A = WA \circ B = (0.1725, 0.1693, 0.3341, 0.1299)$$

依据最大隶属度原则，即可得出航空公司12月份的航班延误综合等级与相应延误指数，此时对应延误指数为2。

综上，运用该方法能够更加准确有效地反映航班整个运行过程的延误状况，能满足空管、

航空公司及机场的不同需求，而且有助于各级管理部门和运行单位对延误进行控制。

4.3.2 加强空域流量控制

空域流量虽然是一个不可控因素，但只要通过合理手段，还是能够有效进行梳理，减少此类因素导致的航班延误。空中交通流量控制主要是通过长、中、短等措施来展开。中长期控制的目的是实现空中交通流量基本不超过控制点的容量；空中交通流量的长期调配措施是在制订航班班期时刻表及飞行前对非定期航班的飞行时刻进行严格的限制和调整；中期调配是在航空器起飞前 24h 采用临时调整起飞时间的方式，让飞机间的间隔符合管制规定。短期调配是指当出现流量控制时，通过及时的信息沟通和协调，使得飞机飞行航线和高度得到及时调整，从而保证飞机会见的高度以及各种指标符合标准，保证飞机安全有序地运行。

4.3.2.1 飞机排班基本模型^[9]建立

在已知多个航班的航班信息的情况下，我们组成可以防止延误的航班序列。取 10 个航班为例，用 DevC++进行编程。

将 10 个航班按照出发时间从前到后的时间顺序输入，然后从第一个开始筛选。因为一般情况下，航班序列都只包含三个以内的航班，所以我们只考虑三个以内的航班序列以简化程序。如果前面的航班的目的地和后面的航班的始发地相同，而且前面航班的到达时间加上可以防止延误的两个航班之间必要的时间间隔 t 后仍然小于后面航班的出发时间，则视这两个航班为可以连在一起的航班，也就是可以由一架飞机完成。经过四次循环，程序找出所有满足条件的航班序列。

(1) 数据样例：

	航班号	出发机场	到达机场	出发时间	到达时间
1	5167	CAN	SYX	7:40	9:10
2	6753	SYX	SHA	8:10	10:55
3	985	CKG	BJS	11:00	13:30
4	3758	SYX	BJS	12:30	15:55
5	1303	BJS	SZX	13:30	16:35
6	1327	BJS	CAN	14:00	17:10
7	8974	SHA	CKG	17:55	20:05
8	2267	BJS	CKG	18:50	20:25
9	3546	SZX	CAN	22:30	23:55
10	5987	BJS	SHA	21:30	23:30

表 11

(2) 程序设计、数据导入和运行结果(见附件)

(3) 将这些航班序列及其航班信息排列出来：

序列	顺序	航班号	出发机场	到达机场	出发时间	到达时间
----	----	-----	------	------	------	------

1	1	5167	CAN	SYX	7:40	9:10
	2	3758	SYX	BJS	12:30	15:55
	3	2267	BJS	CKG	18:50	20:25
	4	5987	BJS	SHA	21:30	23:30
2	1	6753	SYX	SHA	8:10	10:55
	2	8974	SHA	CKG	17:55	20:05
3	1	985	CKG	BJS	11:00	13:30
	2	2267	BJS	CKG	18:50	20:25
4	1	985	CKG	BJS	11:00	13:30
	2	5987	BJS	SHA	21:30	23:30
5	1	3758	SYX	BJS	12:30	15:55
	2	2267	BJS	CKG	18:50	20:25
6	1	3758	SYX	BJS	12:30	15:55
	2	5987	BJS	SHA	21:30	23:30
7	1	1303	BJS	SZX	13:30	16:35
	2	3546	SZX	CAN	22:30	23:55

表 12

因此通过建立科学的排列模型，鉴于以往数据经验如对于类似天气状况的航线预测，对于现有航班进行科学统计后得出合理的排布结论，有助于减少航班延误情况的发生。

五、模型的改进方向

1. 数据相对匮乏，目前我们获得数据的渠道为网络资料与民航部门相应统计年鉴，数据缺乏年度和地区的连续性。若可根据航班运行的一般规律，结合可以获得的实时监测数据，建立相应的状态空间模型：如能不断根据实测数据预测航班运行关键操作完成的时间，有关部门就能及时调整策略，做出更合理的安排。

2. 我们的分析大部分基于全国尺度的航空延误数据，因此存在着各类航空公司管理能力，组织结构相同及各机场基础设施，航空条件，运营成本均相等的前期条件，此与现实情况存在差异；因此还可适当针对部分大型机场增加控制特征变量，使得分析结果更加具有针对性。

3. 航班延误具有传递性，可以从上游机场传递到下游机场，本文只是从一个机场着手，对多机场的航班延误情况进行分析从而建立整体航线的延误模型值得研究。

4. 由于笔者的时间精力有限，本文只是建立了航班延误的评价体系，对于评价后根据不同级别展开的应对措施并没有具体阐明，建立一套完整的预警体系是未来急需解决的问题。另外，评价模型主要以航空公司为出发点，事实上对机场、航空公司、空管等三方协同预警，建立预警信息共享平台，实现与航班运行相关的全系统协同预警，最大限度减少航班延误，增加预警准确度，是未来一个需要深入研究的方向。

六、参考文献及数据来源

- [1] *Airline and Airport On-time Performance Report*, <http://www.flightstats.com>, 2015.6.10
- [2] 数据来源: 中国民航局, *2013 年全国运输机场生产统计公报[EB/OL]*,
http://www.caac.gov.cn/i1/K3/201203/t20120321_47038.html, 2015.6.10
- [3] 数据来源: 美国运输部, <http://www.rita.dot.gov/>, 2015.6.10.
- [4] [ISBN 978-7-5128-0144-8]中国民用航空局发展计划司, *从统计看民航.2013*, 北京: 中国民航出版社, 2014.11
- [5] [ISBN 978-7-5128-0216-2]中国民用航空局发展计划司, *从统计看民航.2014*, 北京: 中国民航出版社, 2015.11
- [6] [10624S100224]扶雪尧, *基于航班着陆率的航班延误研究*
- [7] 赵巍飞, 张亮, *航班延误统计指标体系及延误等级评估探究*, 交通运输工程与信息学报, 2009 年 6 月第 7 卷第 2 期
- [8] 相关数据及专家判断矩阵均来自于南方航空公司白云机场分部市场运营部
- [9] [ISSN 1000-0054 CN 11-2223/N]马正平, 崔德光, *机场航班延误优化模型*, 清华大学学报., 2004 年第 44 卷第 4 期

七、附录

1. 最小二乘回归分析 matlab 程序及运行结果

```
>> ab0=load('1.txt');
>> mu=mean(ab0);sig=std(ab0);
>> rr=corrcoef(ab0);
>> ab=zscore(ab0);
>> a=ab(:, [1:4]);b=ab(:, end);
>> [XL, YL, XS, YS, BETA, PCIVAR, MSE, stats] =plsregress(a,b)
```

XL =

1.7313	0.0424	0.0265
1.7231	-0.0537	0.1679
1.7210	0.1494	-0.1258
1.7227	-0.1656	-0.0690

YL =

1.2295	1.1657	0.3599
--------	--------	--------

XS =

-0.6400	0.5810	0.0535
-0.2019	-0.5982	-0.5928
0.1085	-0.3816	0.7698
0.7334	0.3988	-0.2305

YS =

-0.1110	0.8119	0.0069
-1.4249	-1.0615	-0.0768
-0.0422	-0.1956	0.0997
1.5781	0.4452	-0.0299

BEIA =

0.0000
1.8596
1.5274
2.3014
-4.9819

PCIVAR =

0.9913	0.0045	0.0041
0.5039	0.4529	0.0432

MSE =

3.0000	0.0260	0.0124	0.0000
0.7500	0.3721	0.0324	0.0000

stats =

W:	[4x3 double]
I2:	[4x1 double]
Xresiduals:	[4x4 double]
Yresiduals:	[4x1 double]

```

>> xw=a\XS

xw =

    -0.0354    0.4171    0.0178
     0.2416    0.4859    3.8808
     0.2429    2.7267   -1.3909
     0.1317   -3.6292   -2.5100

>> yw=b\YS

yw =

     1.2295     0.5783     0.0155

>> ncomp=input(' 请根据PCIVAR的值确定提出成分对的个数ncomp=' );
请根据PCIVAR的值确定提出成分对的个数ncomp=1
>> [XL2,YL2,XS2,YS2,BEIA2,PCIVAR2,MSE2,stats2] =plsregress(a,b,ncomp)

XL2 =

     1.7313
     1.7231
     1.7210
     1.7227

YL2 =

     1.2295

XS2 =

    -0.6400
    -0.2019
     0.1085
     0.7334

```

```

YS2 =

    -0.1110
    -1.4249
    -0.0422
     1.5781

BEIA2 =

     0.0000
     0.1846
     0.1786
     0.1894
     0.1603

PCIVAR2 =

     0.9913
     0.5039

MSE2 =

     3.0000     0.0260
     0.7500     0.3721

stats2 =

           W: [4x1 double]
           I2: [4x1 double]
    Xresiduals: [4x4 double]
    Yresiduals: [4x1 double]

>> n=size(a,2);
>> beta3(1)=mu(end)-mu(1:n)./sig(1:n)*BEIA2([2:end],:).*sig(end);
>> beta3([2:n+1])=(1./sig(1:n)).^2*sig(n+1:end).*BEIA2([2:end])

beta3 =

     6.9658     0.0064     0.0015     0.0491     0.0008

```

2. 飞机排班模型程序

```

#include<iostream>

using namespace std;

const double t=1.5;

//为防止延误，两个相邻航班之间最少需要的时间间隔。这里假设为 1.5 ， 即 90 分钟。

```

```

struct FLIGHT{//航班信息结构体
    int num;//航班号
    char Dep[3];//始发地
    char Arr[3];//目的地
    int Dephour,Depmin;//出发时间（包括小时和分钟）
    int Arrhour,Arrmin;//到达时间（包括小时和分钟）
    double ArrTime,DepTime;//转换成可以计算的时间
    double time;//飞行时间
};

int main() {
    FLIGHT f[10];//声明航班，默认 10 个，必要时可以更改
    for(int i=0;i<10;i++) {
        cout<<"Please input the "<<i+1<<"th flight number: ";
        cin>>f[i].num;//输入航班号
        cout<<"Please input the "<<i+1<<"th departure airport: ";
        for(int j=0;j<3;j++){
            cin>>f[i].Dep[j];
        }//输入始发地
        cout<<"Please input the "<<i+1<<"th arrival airport: ";
        for(int j=0;j<3;j++){
            cin>>f[i].Arr[j];
        }//输入目的地
        cout<<"Please input the "<<i+1<<"th departure time: ";
        cin>>f[i].Dephour>>f[i].Depmin;//输入出发时间
        cout<<"Please input the "<<i+1<<"th arrival time: ";
        cin>>f[i].Arrhour>>f[i].Arrmin;//输入到达时间
        f[i].ArrTime=(double)f[i].Arrhour+(double)f[i].Arrmin/60;//转换成可以计算的
        航班到达时间，例如 14: 30—>14.5
        f[i].DepTime=(double)f[i].Dephour+(double)f[i].Depmin/60;//转换成可以计算的
        航班出发时间
        f[i].time=f[i].ArrTime-f[i].DepTime;//计算飞行时间
        cout<<endl;
    }
}

```

```

for(int i=0;i<10;i++){//从第一个航班开始找可以组成的航班序列，一般情况下一个
航班序列只由三个以下航班组成，所以简化程序到只筛选三次
    for(int j=i+1;j<10;j++){
        bool w=false;//判断可不可以组成航班序列的 bool 类型变量

        if(f[j].Dep[0]==f[i].Arr[0]&&f[j].Dep[1]==f[i].Arr[1]&&f[j].Dep[2]==f[i].Ar
r[2]&&f[i].ArrTime+t<=f[j].DepTime){
            //如果可以组成一个航班序列
            cout<<f[i].num<<"-"<<f[j].num;//输出航班序列

            w=true;
            for(int p=j+1;p<10;p++){

                if(f[j].ArrTime+t<=f[p].DepTime&&f[p].Dep[0]==f[j].Arr[0]&&f[p].Dep[1]==f[j
].Arr[1]&&f[p].Dep[2]==f[j].Arr[2]){
                    //如果可以组成含有三个航班的航班序列
                    cout<<"-"<<f[p].num;//输出航班序列
                }
            }
        }

        if(w){
            cout<<endl;
        }
    }
}

return 0;//程序结束
}

```

3. 飞机排班模型运行结果

```

Please input the 1th flight number: 5167
Please input the 1th departure airport: CAN
Please input the 1th arrival airport: SYX
Please input the 1th departure time: 7 40
Please input the 1th arrival time: 9 10

Please input the 2th flight number: 6753
Please input the 2th departure airport: SYX
Please input the 2th arrival airport: SHA
Please input the 2th departure time: 8 10
Please input the 2th arrival time: 10 55

Please input the 3th flight number: 985
Please input the 3th departure airport: CKG
Please input the 3th arrival airport: BJS
Please input the 3th departure time: 11 00
Please input the 3th arrival time: 13 30

Please input the 4th flight number: 3758
Please input the 4th departure airport: SYX
Please input the 4th arrival airport: BJS
Please input the 4th departure time: 12 30
Please input the 4th arrival time: 15 55

Please input the 5th flight number: 1303
Please input the 5th departure airport: BJS
Please input the 5th arrival airport: SZX
Please input the 5th departure time: 13 30
Please input the 5th arrival time: 16 35

Please input the 6th flight number: 1327
Please input the 6th departure airport: BJS
Please input the 6th arrival airport: CAN
Please input the 6th departure time: 14 00
Please input the 6th arrival time: 17 10

Please input the 7th flight number: 8974
Please input the 7th departure airport: SHA
Please input the 7th arrival airport: CKG
Please input the 7th departure time: 17 55
Please input the 7th arrival time: 20 25

Please input the 8th flight number: 2267
Please input the 8th departure airport: BJS
Please input the 8th arrival airport: CKG
Please input the 8th departure time: 17 55
Please input the 8th arrival time: 20 05

Please input the 9th flight number: 3546
Please input the 9th departure airport: SZX

```

```

Please input the 9th flight number: 3546
Please input the 9th departure airport: SZX
Please input the 9th arrival airport: CAN
Please input the 9th departure time: 22 30
Please input the 9th arrival time: 23 55

Please input the 10th flight number: 5987
Please input the 10th departure airport: BJS
Please input the 10th arrival airport: SHA
Please input the 10th departure time: 21 30
Please input the 10th arrival time: 23 30

5167-3758-2267-5987
6753-8974
985-2267
985-5987
3758-2267
3758-5987
1303-3546

```

```

-----
Process exited with return value 0
Press any key to continue . . .

```