

萧山机场航班调度与优化

摘要

恶劣天气、航空管制、机械故障等原因常会使航班表无法正常运作，决策人员必须把飞机重新指派给航班，决定延误或取消哪些航班，尽快使航班恢复正常。本文构建了以延误成本最小或延误时间最短为目标函数的航班恢复模型，航空公司可以根据需要选择不同的目标函数；细分了延误成本并提出旅客失望溢出成本和失望溢出率概念；采用对模型求解，给出了算法的运行步骤，并在此基础上给出了基于遗传算法的改进。

关键词 0-1 规划、Hungary 算法、遗传算法、主成分分析

1. 问题背景与提出

1.1. 问题背景

航空运输是使用飞机、直升机及其他航空器运送人员、货物、邮件的一种运输方式。具有快速、机动的特点，是现代旅客运输，尤其是远程旅客运输的重要方式；航空运输的发展与整个国民经济发展状况和国民收入水平高度相关。改革开放以来，随着我国国民经济长期、快速稳步的增长，我国航空运输业也一直保持着旺盛的增长势头。

在 1980 年 2004 年的 24 年时间内，我国航空运输周转量由不足 5 亿吨公里增至 230 亿吨公里，年均增长率为 17.34%，运输总周转量在国际民航组织缔约国中的位次，由 1978 年的第 37 位上升到 2004 年的第三位。截止 2004 年底，我国定期航班航线达到 1200 条，其中国内航线（包括香港、澳门航线）975 条，国际航线 225 条，境内民航定期航班通航机场 133 个（不含香港、澳门），形成了以北京、上海、广州机场为中心，以省

会、旅游城市机场为枢纽，其它城市机场为支干，联结国内 127 个城市，联结 38 个国家 80 个城市的航空运输网络。民航机队规模不断扩大，截止至 2004 年底，中国民航拥有运输飞机 754 架，其中大中型飞机 680 架，均为世界上最先进的飞机。2004 年中国民航运输总周转量达到 230 亿吨公里（不包括香港、澳门特别行政区以及台湾省）。截止 2005 年底，全国共有民用运输机 863 架，民航机场 135 个，年运输总周转量居世界第二位，达到 257.77 亿吨公里（不含台湾、香港、澳门）。2007 年 1 月份，全国民航运输总周转量，旅客周转量和货邮周转量同比分别增长 14.7%、8.1% 和 24.2%。

Table 1: 航班延误消耗时间

计 算 过 程	时 间 (万小时)	
航 班 取 消	3.2 亿人次 \times 3.8% \times 3 小时/人次	3648
航 班 晚 点	略微晚点: 3.2 亿人次 \times 25.2% \times 25/60 小时/人次	3360
	晚点: 3.2 亿人次 \times 13% \times 40/60 小时/人次	2772
	严重晚点: 3.2 亿人次 \times 23% \times 90/60 小时/人次	11040
合 计		20820

然而，随着航空运输得飞速发展，各种各样的问题也随着而来。航空业务需求的快速增加使得航空资源越来越紧张。空中交通拥挤现象相比其他国家要严重的多，但是空中交通流量与发达国家相差较远。机场系统容量不能满足越来越多的业务量，从而限制航空业的发展。作为航空运输至关重要的枢纽机场，一半以上已经进入超饱和或接近饱和的状态。同时因为影响航空运输因素的不确定性和不稳定性，使得航空气调度的难度加大，从而使整

个航空运输的灵活性变差，最终导致航班延误越来越严重。所以，如何提高航空调度的稳定性和灵敏性，优化航班调度算法以满足日益增长的航空运输需求，减少空中交通拥堵和航班延误现象是当前航空公司和交通管理部门亟待解决的问题。

2012 全年乘客由于航班延误问题损失了 20820 万小时，按照 88 万每天的民航客运量来计算，平均每次被晚点所损失的时间达到 40 分钟。所以航班延误对乘客造成的时间损失是巨大的。

不仅仅只是旅客时间损失，由于影响航空运输因素具有不确定性和不稳定性，使得航空调度的难度加大，从而使整个航空运输的灵活性变差，最终导致航班延误越来越严重。所以，如何提高航空调度的稳定性和灵敏性，优化航班调度算法以满足日益增长的航空运输需求，减少空中交通拥堵和航班延误现象是当前航空公司和交通管理部门亟待解决的问题。

1.2. 问题提出

针对民航调度问题，我们选取杭州萧山机场作为研究对象，对航班发生延误后，如何调度本机场内的航班才能实现机场的利润最大化这一具体问题建模求解。

2. 数据介绍

2.1. *Kaggle* 航班延误数据集

Kaggle 大数据竞赛是一个国际范围内的数据竞赛。Kaggle 航班延误数据集是美国运输部 (DOT) 交通运输统计局 (BTS) 对美国大型航空公司国内航班的准时到达和晚点情况进行进行的统计数据，时间开始于 2003 年 6 月。为了使用上的方便，我们仅取其中洛杉矶国际机场 2015 年 1 月的进出数据，用于测试我们的算法。

数据包含了日期、这周中的某一天、航班号、起飞的机场和到达的机场，预计起飞时间、预计到达时间、实际起飞时间和实际到达时间、机型、延误时间、是否取消、取消类型等。此外还有滑行时间、起落架收起时间等对我们的问题解决作用不大的数据。

2.2. 萧山机场爬虫数据集

2.2.1. 数据集来源概述

为了增强数据的真实性以及本次作业的实用性，我们对杭州萧山国际机场的进出航班数据使用爬虫技术（scrapy）进行采集。网址如下：

<http://www.hzairport.com/hangban/queryflight.aspx>

网站中包含从当前时刻向前回溯 24 小时内的航班号，机型，出发地/目的地，计划起降时间，实际起降时间等信息。根据我们分析的需要，最终绝对爬取的信息为机型，出发地/目的地，计划起降时间和实际起降时间四项。

出发 到达 数据更新时间为：2018-6-21 10:48:31										
航班号	机型	航空公司	目的站	经停站1	经停站2	计划起飞时间	变更起飞时间	实际起飞时间	航站楼	状态
CZ6952 3U3208 MF4502 MU3134	B738	中国南方航空	乌鲁木齐	西宁		06-20 17:55	06-21 00:40	06-21 01:05	B楼	起飞
UQ2586	B738	乌鲁木齐航空	乌鲁木齐	敦煌		06-20 18:15	06-21 00:50	06-21 01:14	B楼	起飞
CZ6630 3U3190 MF4237	A321	中国南方航空	三亚			06-20 20:50	06-21 01:35	06-21 01:40	B楼	起飞
3U8920 CZ9900 MF5062	A320	四川航空	成都			06-20 21:00	06-20 23:50	06-21 00:03	B楼	起飞
HU7762	B738	海南航空	广州			06-20 21:20	06-21 00:05	06-21 00:42	B楼	起飞
ZH9982 CA3606 HO3812 KY9982	A319	深圳航空	广州			06-20 21:20	06-21 00:40	06-21 00:59	B楼	起飞
CA1566 SC1566 ZH1566	B738	中国国际航空	北京			06-20 22:00	06-21 01:15	06-21 01:39	B楼	起飞
CA715	A321	中国国际航空	曼谷			06-20 22:00		06-21 00:01	A楼	起飞
CZ6484 MF4125	A320	中国南方航空	沈阳			06-20 22:05	06-21 01:25	06-21 01:38	B楼	起飞
NS3306 CZ9854 MF7042	E190	河北航空	石家庄			06-20 22:10	06-20 23:20	06-21 00:00	B楼	起飞
BK2814	B738	奥凯航空	三亚			06-20 22:15	06-20 23:45	06-21 00:06	B楼	起飞

Figure 1: 萧山机场出入港航班延误信息网站

2.2.2. 爬虫技术的具体实现

经过查阅网站源码可知萧山机场的航班信息网站由 aspx 框架写成，使用 javascript 进行页面切换，因此难以使用简单的切换 url 的方式进行爬取。根据这一情况，我们决定使用 python 库 selenium 以及 Google ChromeDriver 将动态网页进行读取，直接对 javascript 脚本进行操作实现页面变换。在每一页则使用 python 库 BeautifulSoup 将网页信息转化为 python 类 (class) 进行读取，并将数据类型转化为字符串分别写入起飞航班和降落航班的文本文件中。

代码附于文末附录，部分数据如下表所示：

Table 2: 起飞航班部分数据

机型	出发地	预计起飞时间	实际起飞时间
A321	北京	06-19 19:40	06-20 01:04
B738	西安	06-19 19:45	06-20 00:23
B737	昆明	06-19 20:05	06-20 01:45
E190	天津	06-19 20:50	06-20 00:27
A320	沈阳	06-19 21:10	06-20 01:11

Table 3: 到达航班部分数据

机型	始发地	预计到达时间	实际到达时间
----	-----	--------	--------

B738 哈尔滨	06-19 18:50	06-20 00:13
B737 昆明	06-19 19:00	06-20 00:09
A319 天津	06-19 20:30	06-20 00:09
A321 三亚	06-19 21:20	06-20 00:15
A320 丽江	06-19 22:15	06-20 00:18

3. 航班延误的影响因素分析

3.0.1. 航班延误原因分析

实际生活中，为了提高飞机的运行效率，航空公司的同一架飞机的运行路线往往不是点对点的往返飞行，而是由连续的不同航段组成的一个闭环。在航班运行闭环中，按照航班延误的表现形式，可以把航班延误分为以下三类：

1. 旅客延误

- 1) 旅客晚到；
- 2) 登记时旅客不辞而别；
- 3) 旅客证件问题耽误时间；
- 4) 旅客因航班延误等其他服务问题霸占飞机或拒绝登机；
- 5) 旅客随身携带过多行李；
- 6) 旅客突发疾病等。

2. 排队延误

- 1) 安检排队延误；

2) 飞机起飞降落排队延误。

3. 航空公司等原因

1) 机械故障；

2) 航线排版不合理等。

其中，因旅客原因导致的航班延误比例已成为航班延误“新的增长点”。而现阶段，波及延误是占比例最高的延误，特别是起飞排队延误。安检排队延误是由于机场的服务能力有限或是旅客在一段时间内太过密集而造成的安检不畅，形成很长的排队等待，这与安检站的服务容量和安检服务效率密切相关，发生的概率相对较低。飞机起飞降落排队延误，是由于起飞或降落航班过多，或是天气、军事活动和流量控制，或者是低效率的地面服务，造成飞机难以立即起飞的地面排队或不能在机场找到降落位置而不得不停留在空中继续盘旋等待排队。这种延误会引起连锁反应，对后续飞机产生较长的排队时间，如果不及时采取措施，就会导致后续所有飞机都延迟起飞或降落，不断累积，形成更大更强的延误波。

航空公司造成的延误，多是因航空公司自身的运营管控能力或机械故障造成的航班计划安排不当引起的航班延误。其管理不畅，服务不周等情况也有可能间接导致排队延误，应予以重视。

3.0.2. 航班延误的指数分布验证

泊松分布适用于描述单位时间（或空间）内随机事件发生的次数。机场作为提供航空运输服务的公共基础设施，单位时间内到达和起飞的飞机数量符合泊松分布特征，可以假设机场飞机的起飞和到达都是服从泊松分布。如果一个序列服从泊松分布，那么它的序列间隔服从负指数分布，即如果飞机到达和起飞呈现出泊松分布，可以推导出起飞和到达延误

时间服从均值为 $1/\lambda$ ，方差为 $1/\lambda^2$ 的指数分布。当然，反过来，只要验证到达延误分布服从指数分布，就可得证飞机到达分布服从泊松分布，并且求出相应的值。

根据收集到的 2016 年 3 月杭州萧山机场和首都机场四个样本时间段航班延误时长和数量（见表 4），利用 matlab 曲线拟合工具箱来分析航班延误样本的实际分布和理论指数分布之间的拟合度，来验证航班延误的指数分布假设，验证结果见表 5。

表 5 检验结果表明，航班延误理论指数分布和实际分布的拟合程度超过 95%，验证了航班到达和起飞符合泊松分布，航班延误符合指数分布。

3.1. 数据的搜集及整理

根据所搜集的 2009-2017 民航行业发展统计公报，我们整理后得到我国 2006-2017 航班延误原因及其所占比例（如表 6 所示）。

3.2. 航班延误主要因素分析

3.2.1. 熵权法

3.2.1.1. 熵权法背景. 熵权法是一种客观赋权方法，在具体使用过程中，熵权法根据各指标的变异程度，利用信息熵计算出各指标的熵权，再通过熵权对各指标的权重进行修正，从而得出较为客观的指标权重。

Table 4: 北京首都机场和杭州萧山机场到达间隔统计

延 误 时 长 (min)	样本 1		样本 2		样本 3		样本 4	
	北京	杭州	北京	杭州	北京	杭州	北京	杭州
5	270	148	273	149	267	146	263	147
10	152	83	154	84	151	83	149	78
15	78	43	79	43	78	43	76	42

20	38	21	38	21	38	21	40	21
25	31	17	31	17	30	17	31	15
30	17	9	17	9	17	9	17	10
35	14	8	14	8	14	8	14	8
40	6	3	6	3	6	6	7	4
45	5	3	5	3	5	3	6	3
50	3	2	3	2	3	2	5	3
55	4	2	4	2	4	2	3	2
60	2	1	2	1	2	1	4	2
65	1	1	1	1	1	1	3	2
>65	8	4	8	4	8	4	11	8

Table 5: 航班延误实际分布与理论指数分布拟合度分析结果

变量	样本一		样本二		样本三		样本四	
	北京	杭州	北京	杭州	北京	杭州	北京	杭州
常数项	2256	1234	2287	1245	2220	1189	2193	1243
指数	-1.295	-1.293	-1.296	-1.294	-1.291	-1.278	-1.278	-1.306
R-squared	0.9658	0.9664	0.9663	0.9657	0.9652	0.9661	0.9674	0.973
Adjusted R-Squared	0.9627	0.9634	0.9621	0.9626	0.9620	0.9630	0.9644	0.9731

Table 6: 航班延误影响因素比例结构表

年份	航空公司	流量控制	天气	其他
2006	44.20%	23.80%	19.90%	12.10%
2007	45.90%	24.90%	19.70%	9.50%
2008	45.82%	21.64%	22.31%	10.23%
2009	42.72%	22.76%	23%	11.52%
2010	41.10%	27.60%	19.50%	11.80%
2011	37.10%	27.50%	20%	15.40%
2012	38.50%	25%	21.60%	14.90%

2013	37.40%	27.60%	21.80%	13.20%
2014	26.40%	25.30%	24.30%	24%
2015	19.10%	30.68%	29.53%	20.69%
2016	9.40%	8.24%	56.52%	25.70%
2017	8.62%	7.72%	51.28%	32.38%

Table 7: 各原因导致我国航班延误所占权重 (熵权法)

延误原因	权重
航空公司自身原因	43.58%
流量控制	27.02%
天气原因	23.77%
其他	5.62%

Table 8: 各原因导致我国航班延误所占权重 (主成分分析法)

延误原因	权重
航空公司自身原因	85.96%
流量控制	11.92%
天气原因	2.12%
其他	0.00%

3.2.1.2. 算法步骤.

1、构建判断矩阵，再对其进行标准化处理。

判断矩阵：

$$R = (r_{ij})_{(m \times n)} \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m)$$

其中， m 表示评价对象数， n 表示评价的指标数。

标准化：

$$b_{ij} = (r_{ij} - r_{\min}) / (r_{\max} - r_{\min})$$

其中, r_{max}, r_{min} 分别表示同一评价指标下不同对象中最满意或最不满意者。

2、根据熵的定义, 确定这 4 个评价指标的熵值。

$$H_j = \frac{-1}{\ln n} \sum_{i=1}^n f_{ij} \ln f_{ij}$$

式中:

$$f_{ij} = \frac{b_{ij}}{\sum_{i=1}^n b_{ij}}, \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m; 0 \leq H_{ij} \leq 1)$$

显然, 当 $f_{ij} = 0$ 时, $\ln f_{ij}$ 无意义, 因此对 f_{ij} 加以修正, 并对其归一化:

$$f_{ij} = \frac{1 + b_{ij}}{\sum_{i=1}^n (1 + b_{ij})}$$

8

3、利用熵值计算评价指标的熵权。

$$W = (w_j)_{1 \times m}$$

$$w_j = \frac{1 - H_j}{n - \sum_{j=1}^n H_j}$$

3.2.2. 主成分分析法

3.2.2.1. 主成分分析法原理.

在实际课题中, 为了全面分析问题, 往往提出很多与此有关的变量 (或因素), 因为每个变量都在不同程度上反映这个课题的某些信息。而主成分分析法可将多个变量通过线性变换以选出较少个数重要变量。这种多元统计分析方法。又称主分量分析。

3.2.2.2. 算法步骤.

1、 计算协方差矩阵。

计算样品数据的协方差矩阵：

$$\Sigma =$$

$(s_{ij})_{p \times p}$ 其中,

$$s_{ij} = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n n(x_{ki} - \bar{x}_i)(x_{kj} - \bar{x}_j)$$

2、 求出 的特征值 λ_i 及相应的正交化单位特征向量 a_i

Σ 的前 m 个较大的特征值 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_m > 0$, 就是前 m 个主成分对应的方差, λ_i

对应的单位特征向量 a_i 就是主成分 F_i 的关于原变量的系数, 则原变量的

第 i 个主成分 F_i 为:

$$F_i = a_i X$$

主成分的方差 (信息) 贡献率用来反映信息量的大小, α_i 为:

$$G(m) = \lambda_i / \sum_{k=1}^p \lambda_k$$

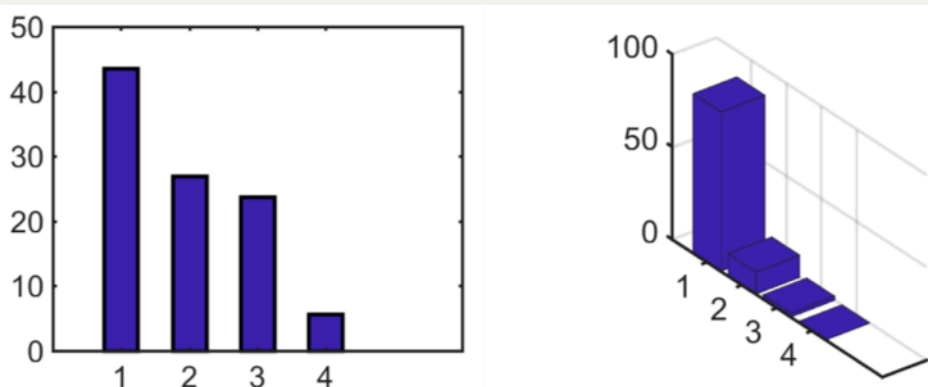


Figure 2: 熵权法与主成分分析法权重图

3、**选择主成分**最终要选择几个主成分，即 F_1, F_2, \dots, F_m 中 m 的确定是通过方差（信息）累计贡献率 $G(m)$ 来确定。

$$G(m) = \frac{\sum_{i=1}^m \lambda_i}{\sum_{k=1}^p \lambda_k}$$

当累积贡献率大于 85% 时，就认为能足够反映原来变量的信息了，对应的 m 就是抽取的前 m 个主成分。

3.3. 模型求解

根据以上提到的熵权法和主成分分析法步骤进行计算，得到各个指标的最终权重和对航班延误的贡献率，见表 7、8。

4. 调度问题解决与优化

4.1. Hungary 算法求解调度方案

4.1.1. 延误成本模型

航班延误所引起的成本损失涉及很多方面，成本比重占据最大的是以下两种：

1. 旅客失望溢出成本

旅客失望溢出成本定义：由于航班延误使旅客不能按原计划到达目的地，旅客对航空公司的信誉失望，导致在下一次的消费选择时放弃该公司的航班而选择其它公司的航班或选择其它交通方式时对该公司造成的损失。

旅客失望率定义：由于航班延误使旅客对航空公司信誉失望，在下一次的消费选择时不选择该公司航班的概率，旅客失望率与延误时间有关。旅客失望溢出成本函数与旅客人数、票价和旅客失望率有关。最大失望溢出成本为本航班上的所有旅客在下一次消费时都不选择该公司的航班，此时的旅客失望溢出成本为：乘客人数 \times 平均票价，旅客失望率为 1，极度失望，下一次 100% 不选择该公司的航班。旅客失望溢出成本采用公式 $P = v \times w \times u$ 计算， v 是该航班上的乘客数， w 是该航班上的平均票价， u 是旅客失望率。这个公式是在充分调研旅客溢出成本的基础上给出的。

通过查阅文献，前人已经通过调研加数据拟合的方式得到旅客失望率函数

$$u = \frac{\sqrt[3]{(t/60)^2}}{29}$$

其中, u 是延误时间 $t(\text{min})$ 的函数。

2. **调运飞机成本** 飞机由其它机场调运到当前机场的成本, 由两机场之间的距离和航油价格决定。

3. 航班的机型

延误航班的运营成本与延误航班的机型有着直接联系, 起飞质量越大的飞机, 其停场费、起降费、旅客服务费等就越高, 相应的地面等待成本也就越高。

本文根据国际民航组织 (ICAO) 的标准, 按照飞机的尾流强弱将飞机分为 3 类分别讨论运营成本。以中型飞机波音 737-300 为例, 据计算, 一架飞机每年花费的租赁费、税金、停场费、飞机维护费用和相应的航材费用等固定性费用为 2500 万元, 按一年有 365 天计算, 1 天的成本约为 7 万元。为了方便分析, 本文假设重型机、中型机和轻型机延误的运营成本分别为 10、7 万元一天和 5000 元一天, 按一天有 24 个小时计算各机型每小时延误运营成本的值。

对于不同的机型, 其延误成本为: $C_{fd} = at$ 其中, a 为飞机每小时延误的运营成本。

4.1.2. 延误航班模型

模型考虑了机型要求, 每个用于替换的机型是原机型的子集, 即属于可替换机型; 目标函数是使延误成本最小化或延误时间最小化, 最

终选择哪个目标函数生成的方案由运控人员根据需要决定。下面定义

一些参数和集合： i 是飞机编号； f 是航班编号；

1. 集合：

a_f ：执行航班 f 的飞机；

a'_f ：替换航班 f 的飞机；

T_i ：可用飞机的就绪时间集合；

T'_j ：最早延误航班之后的航班原计划到达时间集合；

F ：最早延误航班之后的航班集合；

A ：最早延误航班之后可用飞机集

合； A_i ：能够执行 f 航班任务的

机型集合；

A_{im} ：能够在 m 机场维修的机型为 I 的飞机集合；

Z ：当天备用飞机和修复飞机的集合；

2. 变量：

x_{ij}^f ：时间对 i 到 j 的航班；

y_f ：取消航班 f 的标志，为 1 取消，为 0 不取消；

P_f ：航班 f 上的旅客失望溢出成本，

$$u = \frac{{}^3\sqrt{(t/60)^2}}{29}$$

,

其中 $t = T_i - T'_j$ ；

P_{ij} ： i 时刻就绪的飞机执行 j 时刻的航班及后续航班的延误成本，

$$P_{ij} = P_f + \sum_{b \in Z} c_f^b x_b^j$$

其中，第一项是旅客失望溢出成本，第二项是调运备用或修复飞机的成本； c_f^b ：把航班 f 指派给备用飞机的成本；

x_b^j ：0,1 变量，当天可用飞机 b 指派给航班 f 为 1，否则为 0； n_f ：航班 f 在时间对 i 和 j 之间经过的机场数；目标函数表示如下：

$$\min \sum_{f \in F} \sum_{i,j \in T} P_{ij} \text{ or } \min \sum_{f \in F} \sum_{i,j \in T} n_f t_{ij}$$

$$x_i^f + y_j^f = 1$$

s.t.

$$\sum$$

$$\sum_{i \in A} \sum_{f \in F} x_i^f \leq 1$$

$$\leq 1 \quad i \in A \cap Z$$

$$x_i^f = 1 \quad f \in F$$

目标函数有多个，关于延误时间最短和总延误成本最小，但实际过程中目标函数更为复杂，因为航空公司要考虑自身利益并不能一味地置换飞机使得延误时间减小。在本模型中只考虑独立的目标函数。约束条件要保证每个时间对上都有航班覆盖，要保证每个航班都有飞机执行，否则就取消航班，飞机必须同型号才能替换。调度需要整数优化。

4.1.3. 置换矩阵的生成

首先构造延误时间置换矩阵 T_{ij} ：

$$T_{ij} = \begin{bmatrix} t_{11} & \dots & t_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ t_{m1} & \dots & t_{mn} \end{bmatrix}$$

其中 t_{ij} 表示 i 时刻飞机执行第 j 时刻航班的任务所延迟的时间，根据延误时间置换矩阵 T_{ij} ，计算延误成本置换矩阵 P_{ij} ：

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} p_{m111} & \dots & p_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ p & \dots & p_{mn} \end{bmatrix}$$

其中 p_{ij} 表示 i 时刻飞机执行第 j 时刻航班的任务的延误成本。

算法步骤如下：

Step 1: 将已经延误和即将要延误的航班在系统中调出，制成延误航班总表 A。其中包括：航班号、飞机型号、旅客人数、平均票价、原计划进出港时间、延误结束时间。

Step 2: 将可以执行飞机任务的所有飞机在系统中调出，制成备用飞机总表 B。其中包括：航班号、机型号、停驻机场、到达机场、延误时间、后续旅客数。

Step 3: 建立飞机型号表 H 表示机型和可与他置换的机型。

Step 4: 打开 H 表，比较 A 中的飞机型号与 B 记录中的飞机型号是否属于可置换关系，属于可置换关系计算延误时间。否则，填入 null，表示不可执行此置换。

Step 5: 在每个可置换关系中，将延误时间最短的置换关系作为初始解，得出最初的延误时间，以及最终的调查方案。

Step 6: 若输出方案中没有飞机重复执行任务，则输出调整方案；若有重复执行任务，将重复的航线进行匈牙利指派，进行任务指派，得到优化方案，并获解延误时间。在输出飞机中没有飞机重复执行任务时停止，输出调整后的航班，以及总延误时间。

最终可由上述矩阵得出航班置换方案，当然航班的置换最终还是要权衡两者的大小。单纯考虑延误成本最小，势必使得延误时间不是最优，而若使得延误时间最优，又可能造成延误成本偏大，故在延误时

间合理的范围内求出使得延误成本最低的方案，才是航空公司的最终目标。

4.2. 对 Hungary 算法的改进

虽然 Hungary 算法可以直接求得最优解，但是在一些情况下，受限于计算量的缘故，直接采用 Hungary 算法可能不能直接得出结果，因此现考虑将遗传算法引入，以快速搜索最优解。

4.2.1. 遗传算法简介

遗传算法的实现过程实际上就像自然界的进化过程那样。首先寻找一种对问题潜在解进行“数字化”编码的方案，建立表现型和基因型的映射关系。然后用随机数初始化一个种群，种群里面的个体就是这些数字化的编码。接下来，通过适当的解码过程之后，用适应性函数对每一个基因个体作一次适应度评估。用选择函数按照某种规定择优选择。让个体基因交叉变异。然后产生子代。遗传算法并不保证你能获得问题的最优解，但是使用遗传算法的最大优点在于你不必去了解 and 操心如何去“找”最优解。而只要简单的“否定”一些表现不好的个体就行了。

经过这一系列的过程（选择、杂交和突变），产生的新一代个体不同于初始的一代，并一代一代向增加整体适应度的方向发展，因为最好的个体总是更多的被选择去产生下一代，而适应度低的个体逐渐被淘汰掉。这样的过程不断的重复，每个个体被评价，计算出适应度，两个个体杂交，然后突变，产生第三代。周而复始，直到终止条件满足为止。

一般终止条件有以下几种，比如进化次数限制，或是计算耗费的资源限制（例如计算时间、计算占用的内存等），或是一个个体已经满足最小值的条件，即最小值已经找到或者适应度已经达到饱和，继续进化不会造成适应度更好的个体。

4.2.2. 编码

构建 $2L \times n$ 的染色体个体矩阵 Y 进行编码，其中 L 为需要规划的航班数， n 为时段数（每段 15min）， Y 的行需要进行流量分配约束：

$$\sum x_d(t) = 1, x_d(t) =$$

$$\{0,1\}, \forall x_d \in Dep \quad t \in T_d$$

$$\sum y_a(t) = 1, y_a(t) =$$

$$\{0,1\}, \forall y_a \in Arr \quad t \in T_a$$

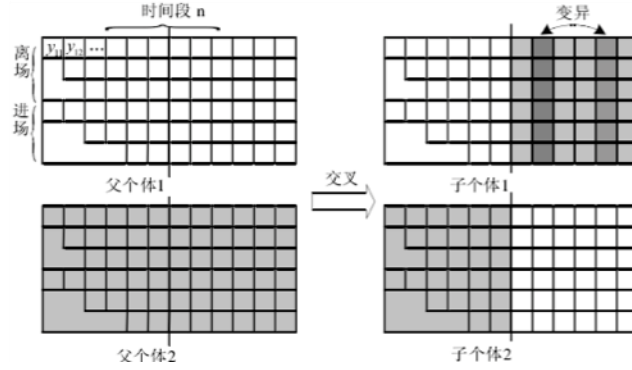


Figure 3: 算法示意

以确保每个航班有且仅有一个进场或离场时段。

Y 的列需要进行流量限制约束,

$$u_t = \sum_{a \in Arr} y_a(t), \forall t \in T$$

$$v_t = \sum_{d \in Dep} x_d(t), \forall t \in T$$

$$0 < u_t < U_t, \forall t \in T$$

$$0 < v_t < V_t, \forall t \in T$$

以确保航班满足机场的最大容量要求。

因此对于 Y 来讲, 有:

$$Y = \begin{bmatrix} y_{11} & \dots & y_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ y_{2L1} & \dots & y_{2Ln} \end{bmatrix}$$

其中若 $y_{ij} = 1$ 则表示航班 i 在时段 j 内的离场 (进场); 若 $y_{ij} = 0$, 则表示不在该时段内有动作。

如 3 所示, 满足约束的个体代表一种可行的流量分配方案, 对于每个个体, 其个体适应度可以通过上文的损失函数计算得出, 经过轮盘赌算

法选择, 将父个体交叉并对交叉得到的子个体再进行行列约束, 最后变异的操作采用随机选择两列互换的方式。

4.2.3. 算法流程

1. 初始化:

- 1) 为离场航班初始编码, 初始化离场航班 i 的所有元素。
- 2) 最大离场容量约束修正。
- 3) 为进场航班初始编码, 初始化进场航班 i 的所有元素。
- 4) 最大进场容量约束修正。
- 5) 进离场容量曲线约束修正。

2. 选择:

首先计算目标函数值 H , 得到个体适应值并将个体按其适应度值降序排列。然后根据预先设定的淘汰率, 淘汰适应度值较小的个体, 并复制相同比例的最优个体 (适应度值较大的个体), 以保证种群大小不变。

3. 交叉遗传:

随机选择交叉点 (如上图中加黑直线位置), 则把矩阵 Y 分成左右两部分; 然后交换父个体 1 和 2 的染色体矩阵右侧部分的 y_{ij} 值, 从而生成了子个体 1 和 2。

然后执行约束条件, 如果行中有两个进场或离场时段, 则随机去掉一个; 如果行中没有进场或离场时段, 则在该行可能的进场或离场时段集合中随机选择一个作为进场或离场时段, 此时该时段对应的列约束可能

不再满足，若不满足则在集合中重新随机选择。如果还是不满足列约束，则淘汰该个体，保留该子个体对应的父个体。

4. 变异:

随机选择一个个体中的两列 a、b 互换产生新个体的方式。并使互换操作满足行约束，但可能不满足列约束，若不满足列约束，则重新随机选择其他两列互换，直至满足列约束为止。结束一轮的算法，开始下一轮，直到算法结束。

图 4 给出了几次遗传算法的收敛曲线。

5. 总结

本文章中，我们分析了造成航班延误的主要原因，并针对杭州萧山机场的航班调度进行了数据爬取、模型建立、预处理、生成置换矩阵、Hungary 算法计算和 Hungary 算法的遗传算法改进，给出了一套完整的调度方案。

我们得到了以下结果：

1、造成航班延误的主要原因是流量控制和航空公司自身原因，这些因素是相对可控的。

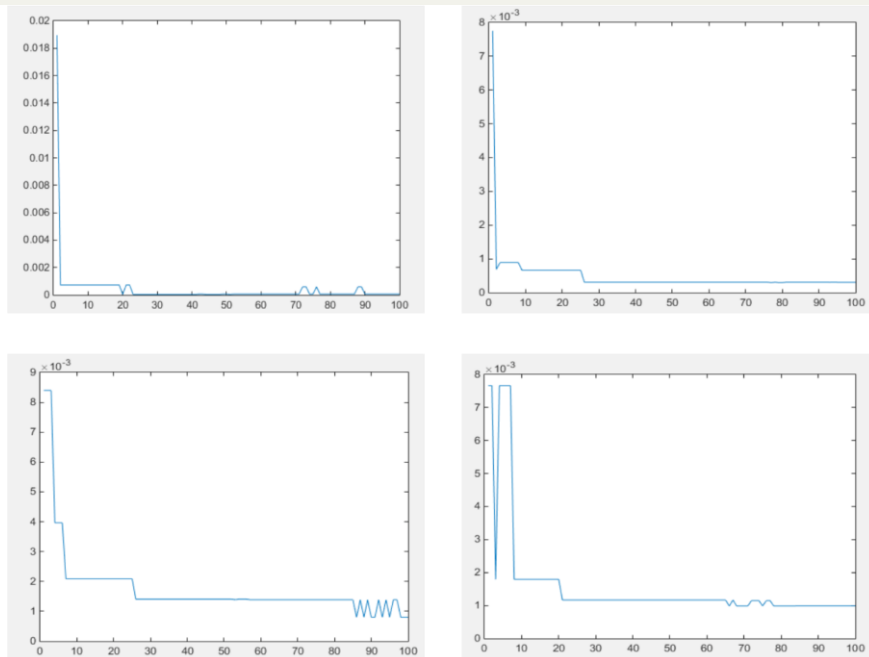


Figure 4: 遗传算法的收敛曲线

2、 航班延误的成本有时间成本和金钱成本，其中对旅客来说，主要的成本是时间成本；对机场和航空公司来说，时间成本和金钱成本都需要纳入考虑，金钱成本又分为调运费飞机成本、旅客失望溢出成本、租赁/跑道占用成本。

3、 给出一个延误表（包含已延误的航班和即将延误的航班），我们的置换矩阵生成算法能成功地将延误表转为时间成本的置换矩阵和金钱成本的置换矩阵，之后我们的算法（基于 Hungary 算法）能很好地给出一个调度方案。（附录中给出了 6 月 20 日早上 6 点到 7 点一个小时内调度方案）

- 4、 在 Hungary 算法的基础上，我们给出了一个基于遗传算法的改进，能够显著改善算法在针对较大的置换矩阵时的实时性。

我们的模型有以下的优点：

- 1、 从萧山机场爬虫数据出发，结合实际情况，选取旅客延误、排队延误、航空公司原因等指标，分析延误原因，并结合主要原因，进行针对性的处理，从而改善航班延误现象。

对本地航班调度有较高的参考价值。

- 2、 该模型可以针对不同群体给出相应的应对建议，如航空公司应合理安排航班，乘客应选择合理出行时间等。航司、机场也可以根据自身的数据对评价函数的权重、项目进行增添或修改，使得模型更符合实际。

- 3、 算法的效率本身较高，提出的改进方法使得算法的效率变得更高。我们的模型在以下几点上还可以改进：

- 1、 如果可以获得更多的有效数据，我们可以进一步完善整个体系，提高航班延误的预测精度和调配的合理性

- 2、 本模型主要考虑了显性损失，针对隐性损失，我们仅进行了粗

浅的探究。如果有跟多的数据，则可以对该部分进行量化。

参考文献

[1]2006 2017 年民航行业发展统计公报;

[2]Operations research in the airline industry[M]. Springer Science & Business Media, 2012.

[3] 赵秀丽, 朱金福, 郭梅. 不正常航班延误调度模型及算法 [D]. , 2008.

[4]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.

5、 赵秀丽. 航空公司不正常航班恢复模型及算法研究 [J]. 南京, 2010.

6、 杭州萧山机场官网, 离港航班延误查询, <http://www.hzairport.com> 我们的小

组分工见下表:

分工						
问题提出	√	√	√	√	√	√

思路设计	√		√	√	√	
数据采集	√	√				√
算法设计	√		√	√	√	
算法实现	√		√	√	√	
文档撰写	√	√	√	√	√	√
PPT 制作	√	√				√
展示	√		√		√	

附

录

```
from selenium import webdriver from bs4
import BeautifulSoup import time import
pandas as pd import sys
# reload ( sys )
# sys . setdefaultencoding ( ' utf -8' )

def crawl ( url ) : driver =
    webdriver . Chrome () driver . get ( url )
    #driver . switch_to . frame ( ' content ' ) page = 0 lst
    = []
        with open ( ' ./ flight_arrive . txt ' , ' a ' ) as f :
            data_list = [ ] tplan = [ ] tactual = [ ] ttype = [ ] tdes = [ ] while page
            < 30 : soup = BeautifulSoup ( driver . page_source )
                print ( soup )

            i = 0 ; for idx , tr in enumerate ( soup . find_all ( ' tr ' ) ) :
                # print ( tr )
                # print ( idx ) if ( idx >= 10 and idx <= 21 ) :
                    tds = tr . find_all ( ' td ' )
                    # print ( tds )
                    # for string in tds
                    # print ( tds [ 0 ] . string )

                    # for i in range ()
```

A

.

代

码

附

录

航班到达数据

机型 始发地 预计到达时间 实际到达时间			
B738	哈尔滨	06-19 18:50	06-20 00:13
B737	昆明	06-19 19:00	06-20 00:09
A319	天津	06-19 20:30	06-20 00:09
A321	三亚	06-19 21:20	06-20 00:15
A320	丽江	06-19 22:15	06-20 00:18

A321	重庆	06-19 22:40	06-20 00:29
B738	绵阳	06-19 22:45	06-20 01:30
A321	澳门	06-19 22:50	06-20 00:10
A320	昆明	06-19 23:05	06-20 00:21
A319	重庆	06-19 23:10	06-20 02:32
A320	成都	06-19 23:15	06-20 01:37
A321	深圳	06-19 23:15	06-20 01:42
A320	西双版纳	06-19 23:20	06-20 02:07
B738	珠海	06-19 23:20	06-20 00:09
A320	哈尔滨	06-19 23:35	06-20 00:12
A320	香港	06-19 23:35	06-20 00:27
A320	丽江	06-19 23:40	06-20 00:54
A320	珠海	06-19 23:50	06-20 00:33

A320	太原	06-19 23:50	06-20 00:40
B738	三亚	06-19 23:55	06-20 00:57
A320	昆明	06-19 23:55	06-20 00:37
A320	重庆	06-20 00:05	06-20 03:50
A319	桂林	06-20 00:10	06-20 00:50
A320	克拉玛依	06-20 00:10	06-20 00:43
A319	深圳	06-20 00:15	06-20 02:26
A319	北京	06-20 00:15	06-20 00:00
B738	深圳	06-20 00:20	06-20 01:27
A321	成都	06-20 00:20	06-20 04:06
A319	银川	06-20 00:20	06-20 00:23
B738	兰州	06-20 00:25	06-20 01:06
A320	昆明	06-20 00:25	06-20 03:09

A320	揭阳	06-20 00:25	06-20 01:01
A319	邯郸	06-20 00:30	06-20 00:09
A320	深圳	06-20 00:35	06-20 02:42
B738	重庆	06-20 00:35	06-20 04:29
A320	库尔勒	06-20 00:40	06-20 01:39
A320	成都	06-20 00:40	06-20 00:25
A320	重庆	06-20 00:40	06-20 04:46
A320	丽江	06-20 00:45	06-20 03:34
A320	大连	06-20 00:45	06-20 01:25
B738	北京	06-20 00:45	06-20 00:31
A320	南宁	06-20 00:45	06-20 02:12
A320	西安	06-20 00:50	06-20 01:11
A320	昆明	06-20 01:00	06-20 03:04

A319	西安	06-20 01:15	06-20 02:41
A321	广州	06-20 01:25	06-20 03:12

A320	海口	06-20 01:30	06-20 01:53
A320	西双版纳	06-20 01:50	06-20 03:44
A321	北京	06-20 01:55	06-20 01:22
A320	曼谷	06-20 07:00	06-20 07:13
B738	厦门	06-20 08:15	06-20 07:47
B738	北京	06-20 08:25	06-20 08:03
A320	济州	06-20 08:30	06-20 07:45
A320	成都	06-20 08:40	06-20 08:15
B738	深圳	06-20 08:40	06-20 08:48
A320	普吉岛	06-20 08:40	06-20 08:54
B738	郑州	06-20 08:50	06-20 08:19
B738	青岛	06-20 08:50	06-20 08:07
B738	大连	06-20 08:55	06-20 08:43
B738	北京	06-20 08:55	06-20 08:46

B738	厦门	06-20 09:00	06-20 08:40
B738	深圳	06-20 09:00	06-20 08:51
B738	广州	06-20 09:00	06-20 08:28
A319	北京	06-20 09:05	06-20 09:07
E190	南阳	06-20 09:15	06-20 09:00
B738	石家庄	06-20 09:20	06-20 09:50
B738	三亚	06-20 09:25	06-20 09:19
B739	深圳	06-20 09:35	06-20 09:14
B738	郑州	06-20 09:35	06-20 09:39
A320	大连	06-20 09:35	06-20 08:57
A332	成都	06-20 09:35	06-20 09:26
A333	北京	06-20 09:40	06-20 09:30
A320	石家庄	06-20 09:40	06-20 10:17
B738	太原	06-20 09:40	06-20 09:12

B738	厦门	06-20 09:45	06-20 09:45
B738	长沙	06-20 09:50	06-20 09:43
A321	西安	06-20 09:50	06-20 09:41
B738	高雄	06-20 09:50	06-20 09:36
B738	广州	06-20 09:55	06-20 09:47
A320	昆明	06-20 09:55	06-20 09:59
B738	青岛	06-20 10:00	06-20 09:33
B738	贵阳	06-20 10:00	06-20 10:13
A321	香港	06-20 10:05	06-20 09:53
A332	北京	06-20 10:05	06-20 10:56
E190	天津	06-20 10:10	06-20 10:44
B738	广州	06-20 10:10	06-20 10:08
A320	深圳	06-20 10:15	06-20 10:22
B738	珠海	06-20 10:15	06-20 09:58

B738	哈尔滨	06-20 10:20	06-20 10:36
A332	西安	06-20 10:20	06-20 10:32
A320	哈尔滨	06-20 10:20	06-20 10:06
B738	重庆	06-20 10:30	06-20 10:25
A320	北京	06-20 10:35	06-20 11:25
B738	太原	06-20 10:40	06-20 10:39
A320	重庆	06-20 10:40	06-20 10:53
B738	三亚	06-20 10:45	06-20 10:29
B789	北京	06-20 10:50	06-20 11:58
A320	重庆	06-20 10:50	06-20 10:59
A320	海口	06-20 10:55	06-20 10:49
A321	北京	06-20 10:55	06-20 11:47
A320	烟台	06-20 10:55	06-20 11:28
B737	石家庄	06-20 10:55	06-20 12:18

B738	大连	06-20 11:00	06-20 10:42
A320	成都	06-20 11:00	06-20 11:33
A319	沈阳	06-20 11:05	06-20 10:47
A320	长春	06-20 11:05	06-20 11:12
B738	桂林	06-20 11:15	06-20 11:16
A320	昆明	06-20 11:20	06-20 11:36
A332	马德里	06-20 11:20	06-20 12:03
B738	珠海	06-20 11:30	06-20 12:05
A320	运城	06-20 11:30	06-20 11:21
A320	廊曼	06-20 11:35	06-20 11:39
B738	深圳	06-20 11:40	06-20 13:25
A320	昆明	06-20 11:45	06-20 12:49
E190	大连	06-20 11:45	06-20 12:29
B737	郑州	06-20 11:45	06-20 11:42

A321	广州	06-20 11:50	06-20 16:37
A321	三亚	06-20 11:55	06-20 12:26
B738	重庆	06-20 11:55	06-20 12:41
A320	太原	06-20 12:00	06-20 12:07
A320	成都	06-20 12:00	06-20 13:10
B738	大连	06-20 12:05	06-20 11:44
A320	惠州	06-20 12:05	06-20 14:47
A320	银川	06-20 12:20	06-20 12:52
B738	昆明	06-20 12:30	06-20 12:34
B738	海口	06-20 12:40	06-20 13:01
B738	天津	06-20 12:40	06-20 13:28
B737	保山	06-20 12:45	06-20 14:06
A321	广州	06-20 12:45	06-20 15:00
A319	拉萨	06-20 12:45	06-20 13:23

A320	榆林	06-20 12:50	06-20 13:17
A320	东京成田	06-20 12:50	06-20 12:46
A320	沈阳	06-20 12:55	06-20 12:37
A321	深圳	06-20 12:55	06-20 15:19
A320	北京	06-20 12:55	06-20 13:03
B738	广州	06-20 13:05	06-20 15:27
A333	吉隆坡	06-20 13:10	06-20 13:19
B738	太原	06-20 13:10	06-20 14:19
A321	北京	06-20 13:15	06-20 13:43
B738	贵阳	06-20 13:20	06-20 14:17
B739	普吉岛	06-20 13:25	06-20 13:49
A321	广州	06-20 13:25	06-20 16:24
B738	清州	06-20 13:25	06-20 13:15
A320	厦门	06-20 13:40	06-20 14:42

B738	昆明	06-20 13:40	06-20 14:24
A319	呼和浩特	06-20 13:40	06-20 16:15
A321	首尔仁川	06-20 13:45	06-20 15:42
B738	揭阳	06-20 13:45	06-20 13:39
A321	呼和浩特	06-20 13:45	06-20 14:58
B738	三亚	06-20 13:45	06-20 15:50
A321	北京	06-20 13:50	06-20 13:58
A321	西安	06-20 13:50	06-20 15:47
B738	乌鲁木齐	06-20 13:50	06-20 13:52
A321	南宁	06-20 13:50	06-20 15:33
A320	大连	06-20 13:55	06-20 13:55
A320	贵阳	06-20 13:55	06-20 15:07
A319	重庆	06-20 14:05	06-20 15:10
A319	首尔仁川	06-20 14:05	06-20 14:10

B738	深圳	06-20 14:10	06-20 17:08
A320	格尔木	06-20 14:15	06-20 14:50
A321	台北桃园	06-20 14:20	06-20 17:01
B738	湛江	06-20 14:25	06-20 17:41
A321	澳门	06-20 14:25	06-20 14:02
B738	泉州	06-20 14:25	06-20 14:53
A321	成都	06-20 14:35	06-20 15:55
A320	丽江	06-20 14:35	06-20 14:56
A333	香港	06-20 14:35	06-20 14:31
B738	厦门	06-20 14:45	06-20 15:12
B738	烟台	06-20 14:45	06-20 16:17
B738	大连	06-20 14:50	06-20 15:24
A320	揭阳	06-20 14:50	06-20 16:22
A333	北京	06-20 14:50	06-20 15:35

A321	北京	06-20 14:55	06-20 14:28
B738	成都	06-20 14:55	06-20 18:13
A321	北京	06-20 14:55	06-20 14:28
A320	大连	06-20 14:55	06-20 14:34
B738	南宁	06-20 15:15	06-20 16:33
A320	昆明	06-20 15:15	06-20 15:14
B737	大阪关西	06-20 15:20	06-20 15:17
A321	哈尔滨	06-20 15:30	06-20 15:39
B738	乌鲁木齐	06-20 15:30	06-20 17:58
B738	郑州	06-20 15:30	06-20 17:49
E190	石家庄	06-20 15:40	06-20 17:05
A320	西宁	06-20 15:40	06-20 16:55
E190	揭阳	06-20 15:40	06-20 18:23
A319	兰州	06-20 15:50	06-20 16:13

A320	静岡	06-20 15:55	06-20 15:30
A321	长春	06-20 15:55	06-20 17:55
B738	重庆	06-20 15:55	06-20 17:53
B738	深圳	06-20 16:00	06-20 19:13
B738	北京	06-20 16:10	06-20 17:47
B738	沈阳	06-20 16:20	06-20 17:03
E190	台中	06-20 16:25	06-20 16:27
B738	武汉	06-20 16:25	06-20 17:44
B738	厦门	06-20 16:30	06-20 18:54
A332	多哈	06-20 16:30	06-20 17:19
B738	茅台	06-20 16:35	06-20 16:49
E192	呼和浩特	06-20 16:50	06-20 16:56
A332	北京	06-20 16:50	06-20 16:52
A320	桂林	06-20 16:55	06-20 17:14

B738	长春	06-20 16:55	06-20 18:16
A320	兴义	06-20 17:00	06-20 18:41
A320	哈尔滨	06-20 17:10	06-20 18:00
A320	张家口	06-20 17:10	06-20 18:39
A320	成都	06-20 17:15	06-20 16:47
B738	乌鲁木齐	06-20 17:15	06-20 18:52
A320	临沂	06-20 17:15	06-20 17:10
B738	哈尔滨	06-20 17:20	06-20 18:47

[H] 机型	出发地	预计起飞时间	实际起飞时间
A321	北京	06-19 19:40	06-20 01:04
B738	西安	06-19 19:45	06-20 00:23
B737	昆明	06-19 20:05	06-20 01:45
E190	天津	06-19 20:50	06-20 00:27
A320	沈阳	06-19 21:10	06-20 01:11
B738	长沙	06-19 21:15	06-20 00:46
A319	广州	06-19 21:20	06-20 00:14
A321	广州	06-19 21:25	06-20 01:21
B738	广州	06-19 21:30	06-20 00:06
B738	北京	06-19 22:00	06-20 01:09
A321	岷港	06-19 22:05	06-20 00:25
A320	沈阳	06-19 22:05	06-20 01:28
B738	厦门	06-19 22:25	06-20 00:41

A321	三亚	06-19 22:35	06-20 01:57
B738	泉州	06-19 22:50	06-20 00:31
B789	新加坡	06-19 22:50	06-20 00:08
B738	青岛	06-19 22:55	06-20 01:07
A320	成都	06-19 23:00	06-20 00:20
A320	廊曼	06-19 23:15	06-20 00:12
B738	石家庄	06-19 23:20	06-20 00:09
B739	廊曼	06-19 23:50	06-20 01:34
B738	普吉岛	06-19 23:50	06-20 01:16
A332	多哈	06-19 23:55	06-20 00:58
A332	洛杉矶	06-19 23:55	06-20 00:17
A320	西哈努克国际机场	06-20 00:20	06-20 01:02
A320	暹粒	06-20 00:20	06-20 00:38
A320	烟台	06-20 06:10	06-20 07:07

附录 B.2. 萧 19 日航班出	A320	西宁	06-20 06:20	06-20 06:26	山机场 6 月 发数据
	A320	银川	06-20 06:20	06-20 06:29	

A320

	库尔勒	06-20 06:25	06-20 06:30
A320	丽江	06-20 06:35	06-20 07:00
A320	珠海	06-20 06:35	06-20 07:39
A320	成都	06-20 06:35	06-20 06:54
B738	哈尔滨	06-20 06:40	06-20 07:19
A320	哈尔滨	06-20 06:40	06-20 06:58
A320	兴义	06-20 06:45	06-20 06:50
A319	海口	06-20 06:45	06-20 07:45
A320	克拉玛依	06-20 06:50	06-20 07:29
A320	兰州	06-20 06:50	06-20 08:11
A320	太原	06-20 06:50	06-20 07:02
A321	北京	06-20 06:55	06-20 07:42
B738	乌鲁木齐	06-20 06:55	06-20 08:02
A320	西安	06-20 06:55	06-20 07:58

A320	北京	06-20 07:00	06-20 07:36
A320	延吉	06-20 07:05	06-20 07:13
A320	张家口	06-20 07:05	06-20 08:00
A319	稻城亚丁	06-20 07:05	06-20 08:18
B738	深圳	06-20 07:05	06-20 08:35
A320	榆林	06-20 07:10	06-20 08:07
A320	兰州	06-20 07:10	06-20 12:07
B738	广州	06-20 07:10	06-20 07:56
B738	茅台	06-20 07:15	06-20 08:24
A320	乌鲁木齐	06-20 07:15	06-20 08:42
A320	沈阳	06-20 07:15	06-20 08:14
A320	胡志明	06-20 07:20	06-20 08:57
B738	南宁	06-20 07:20	06-20 08:52
B738	三亚	06-20 07:25	06-20 09:15
A320			

A320			
A320	昆明	06-20 07:25	06-20 10:22
A321	广州	06-20 07:25	06-20 09:04
A321	深圳	06-20 07:30	06-20 09:11
A319	昆明	06-20 07:30	06-20 09:30
A319	广元	06-20 07:30	06-20 09:13
B738	海口	06-20 07:35	06-20 09:40
B738	天津	06-20 07:35	06-20 08:49
B738	太原	06-20 07:40	06-20 09:26
A319	重庆	06-20 07:40	06-20 09:48
A319	呼和浩特	06-20 07:40	06-20 09:19
A320	新加坡	06-20 07:45	06-20 11:14
A321	成都	06-20 07:45	06-20 09:38
B738	海拉尔	06-20 07:45	06-20 09:43
A320	嘉峪关	06-20 07:50	06-20 12:15

A321	深圳	06-20 07:50	06-20 09:36
A321	南宁	06-20 07:50	06-20 10:04
A320	哈尔滨	06-20 07:55	06-20 08:04
B738	烟台	06-20 08:00	06-20 08:16
A320	银川	06-20 08:00	06-20 13:09
A321	广州	06-20 08:00	06-20 09:59
A333	香港	06-20 08:00	06-20 10:26
A320	西宁	06-20 08:05	06-20 10:34
B737	西昌	06-20 08:05	06-20 10:42
B738	贵阳	06-20 08:05	06-20 10:53
B738	成都	06-20 08:10	06-20 10:58
A320	惠州	06-20 08:10	06-20 10:18
A321	西安	06-20 08:15	06-20 09:50
A321	太原	06-20 08:15	06-20 09:56
A320			

A320			
A321	广州	06-20 08:20	06-20 11:05
B738	厦门	06-20 08:20	06-20 11:30
A320	乌鲁木齐	06-20 08:20	06-20 09:02
A321	贵阳	06-20 08:25	06-20 08:46
B738	乌鲁木齐	06-20 08:25	06-20 10:10
B738	乌鲁木齐	06-20 08:35	06-20 09:33
A321	北京	06-20 08:35	06-20 09:07
	香港	06-20 08:35	06-20 11:43
	深圳	06-20 08:45	06-20 12:12
A320	静岡	06-20 08:50	06-20 08:54
A319	六盘水	06-20 08:50	06-20 11:25
A320	丽江	06-20 08:50	06-20 11:12
B738	珠海	06-20 08:55	06-20 12:37
A320	丽江	06-20 08:55	06-20 13:07

A320	曼谷	06-20 08:55	06-20 11:52
A319	拉萨	06-20 09:00	06-20 11:57
A321	澳门	06-20 09:00	06-20 09:53
B738	青岛	06-20 09:00	06-20 09:09
A321	呼和浩特	06-20 09:05	06-20 11:21
A319	首尔仁川	06-20 09:05	06-20 09:17
B738	厦门	06-20 09:20	06-20 10:48
A333	北京	06-20 09:20	06-20 10:14
A320	哈尔滨	06-20 09:25	06-20 11:50
A321	长春	06-20 09:25	06-20 09:59
A321	台北桃园	06-20 09:30	06-20 12:41
A320	澳门	06-20 09:40	06-20 10:31
A320	西双版纳	06-20 09:40	06-20 11:39
B738	长春	06-20 09:40	06-20 10:13
A320			

A320			
B738	三亚	06-20 09:45	06-20 12:26
B738	重庆	06-20 09:50	06-20 12:11
A320	素叻他尼	06-20 09:55	06-20 12:49
A333	温哥华	06-20 09:55	06-20 10:24
B738	郑州	06-20 09:55	06-20 10:48
B738	大连	06-20 10:00	06-20 10:37
B738	大连	06-20 10:00	06-20 10:56
B738	深圳	06-20 10:05	06-20 13:15
B738	青岛	06-20 10:05	06-20 10:44
B738	锦州	06-20 10:15	06-20 10:29
B738	沈阳	06-20 10:15	06-20 11:07
A319	乌鲁木齐	06-20 10:20	06-20 12:17
E190	南阳	06-20 10:20	06-20 12:29
B738	西安	06-20 10:25	06-20 12:35

B738	北京	06-20 10:25	06-20 12:24
B738	哈尔滨	06-20 10:30	06-20 11:17
B738	郑州	06-20 10:40	06-20 13:08
A320	石家庄	06-20 10:40	06-20 12:19
A320	珠海	06-20 10:40	06-20 11:47
B738	太原	06-20 10:45	06-20 12:57
B738	新加坡	06-20 10:50	06-20 13:29
B739	深圳	06-20 10:50	06-20 11:19
A332	成都	06-20 10:50	06-20 12:21
A320	西宁	06-20 11:00	06-20 14:19
A333	北京	06-20 11:00	06-20 13:05
B738	桂林	06-20 11:00	06-20 11:29
B738	高雄	06-20 11:00	06-20 11:23
A321	香港	06-20 11:05	06-20 14:30
A320			

A320			
A320	佳木斯	06-20 11:05	06-20 11:27
B738	哈尔滨	06-20 11:05	06-20 12:51
B738	银川	06-20 11:10	06-20 13:28
B738	郑州	06-20 11:10	06-20 13:37
A321	西安	06-20 11:10	06-20 12:47
B738	广州	06-20 11:15	06-20 13:16
E190	揭阳	06-20 11:15	06-20 12:59
A320	深圳	06-20 11:20	06-20 15:52
B738	珠海	06-20 11:20	06-20 12:43
B738	沈阳	06-20 11:25	06-20 12:08
A332	北京	06-20 11:30	06-20 13:18
A320	广州	06-20 11:30	06-20 14:28
A332	西安	06-20 11:35	06-20 13:33
B738	南宁	06-20 11:35	06-20 13:30

B738	重庆	06-20 11:35	06-20 13:38
	重庆	06-20 11:45	06-20 13:49
	重庆	06-20 11:50	06-20 13:44
B738	贵阳	06-20 11:55	06-20 13:42
B789	北京	06-20 11:55	06-20 13:22
A320	兰州	06-20 12:00	06-20 14:44
B738	贵阳	06-20 12:00	06-20 13:53
B738	太原	06-20 12:05	06-20 13:51
A320	海口	06-20 12:05	06-20 14:03
B738	三亚	06-20 12:10	06-20 12:33
A320	南宁	06-20 12:10	06-20 14:07
A320	哈尔滨	06-20 12:10	06-20 13:24
A321	北京	06-20 12:15	06-20 13:57
A320			

A320			
A319	沈阳	06-20 12:15	06-20 12:45
B737	石家庄	06-20 12:20	06-20 14:12
B738	桂林	06-20 12:20	06-20 12:52
A320	昆明	06-20 12:25	06-20 14:20
B738	贵阳	06-20 12:30	06-20 15:10
B738	珠海	06-20 12:30	06-20 14:14
A321	广州	06-20 12:30	06-20 14:39
A320	运城	06-20 12:30	06-20 14:09
B738	厦门	06-20 12:40	06-20 14:17
A320	廊曼	06-20 12:45	06-20 13:10
A320	北京	06-20 12:45	06-20 14:24
B738	深圳	06-20 12:45	06-20 14:41
E190	大连	06-20 12:50	06-20 14:48
B737	乌鲁木齐	06-20 12:50	06-20 14:37

B738	桂林	06-20 12:55	06-20 14:42
A321	广州	06-20 12:55	06-20 18:04
A320	成都	06-20 13:05	06-20 14:34
B738	澳门	06-20 13:05	06-20 14:47
A321	长春	06-20 13:05	06-20 15:41
A320	张家界	06-20 13:20	06-20 14:22
B738	武汉	06-20 13:35	06-20 13:48
A320	香港	06-20 13:35	06-20 15:00
B738	银川	06-20 13:40	06-20 14:32
A320	东京成田	06-20 13:40	06-20 14:05
B738	海口	06-20 13:45	06-20 14:51
A320	大同	06-20 13:45	06-20 14:01
A319	拉萨	06-20 13:45	06-20 15:22
A320			

A320			
A321	广州	06-20 13:50	06-20 16:07
A320	重庆	06-20 13:55	06-20 14:11
B737	保山	06-20 13:55	06-20 15:35
A320	兰州	06-20 13:55	06-20 14:58
B738	曼谷	06-20 14:00	06-20 15:17
B738	西宁	06-20 14:05	06-20 15:02
A320	三亚	06-20 14:10	06-20 15:26
A321	深圳	06-20 14:15	06-20 16:46
B738	哈尔滨	06-20 14:20	06-20 15:28
B738	包头	06-20 14:20	06-20 15:06
B739	普吉岛	06-20 14:25	06-20 15:08
A321	北京	06-20 14:25	06-20 17:54
A333	吉隆坡	06-20 14:25	06-20 14:55
B738	清州	06-20 14:30	06-20 14:53

B738	揭阳	06-20 14:50	06-20 16:04
A320	贵阳	06-20 14:55	06-20 17:22
B738	昆明	06-20 14:55	06-20 15:44
A321	首尔仁川	06-20 15:00	06-20 16:57
A320	冲绳	06-20 15:05	06-20 15:15
A319	银川	06-20 15:05	06-20 18:16
A319	长春	06-20 15:05	06-20 15:45
B738	昆明	06-20 15:10	06-20 16:49
A320	乌鲁木齐	06-20 15:25	06-20 15:38
B738	阿克苏	06-20 15:30	06-20 15:56
A321	西安	06-20 15:30	06-20 15:33
	西安	06-20 15:45	06-20 15:50

A320

B738	南宁	06-20 15:50	06-20 17:17
A320	揭阳	06-20 15:50	06-20 17:33
A333	香港	06-20 15:50	06-20 16:58
A320	桂林	06-20 15:55	06-20 16:16
A320	昆明	06-20 15:55	06-20 16:53
A321	北京	06-20 16:00	06-20 16:09
B738	厦门	06-20 16:00	06-20 17:15
A321	贵阳	06-20 16:00	06-20 17:04
A320	遵义	06-20 16:05	06-20 16:24
A320	大连	06-20 16:05	06-20 16:11
B738	重庆	06-20 16:05	06-20 16:44
B738	太原	06-20 16:10	06-20 16:28
A333	北京	06-20 16:15	06-20 17:19

A319	天津	06-20 16:20	06-20 16:40
A321	重庆	06-20 16:20	06-20 17:29
B738	南宁	06-20 16:20	06-20 18:09
B737	大阪关西	06-20 16:25	06-20 16:42
A321	哈尔滨	06-20 16:30	06-20 17:24
B738	乌鲁木齐	06-20 16:35	06-20 19:05
A320	哈尔滨	06-20 16:55	06-20 17:39
E190	泉州	06-20 17:00	06-20 18:36
A321	呼和浩特	06-20 17:10	06-20 17:37
A319	兰州	06-20 17:10	06-20 17:26
A321	成都	06-20 17:15	06-20 17:41
B738	北京	06-20 17:15	06-20 18:59
B738	武汉	06-20 17:30	06-20 18:57

A320	太原	06-20 17:35	06-20 18:34
E190	天津	06-20 18:00	06-20 18:24

附录 B.3. 运行结果选取萧山机场 6 月 20 日早上

6 7 点的 1 个小时的数据，制作延误表如下：航班号 机种 计划到达 到达时

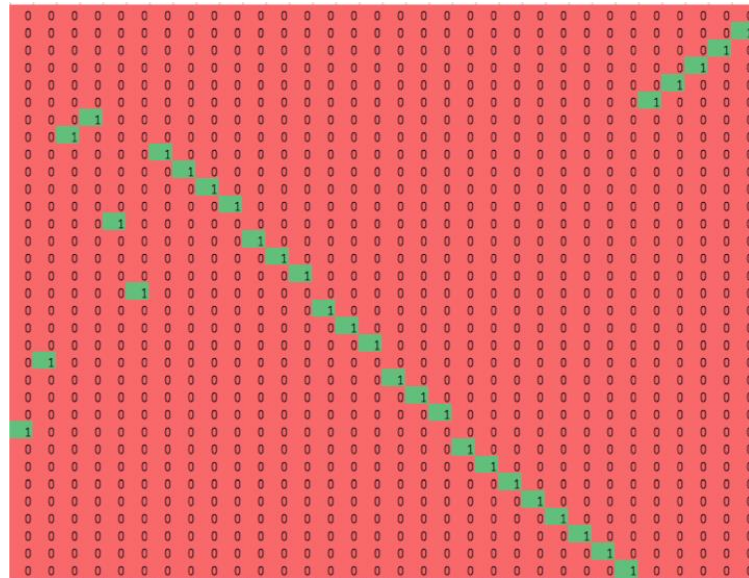
间 计划离开 离开时间 乘客数 平均票价

1	1	0	0	20	38	241	865
2	1	0	0	610	707	238	673
3	1	0	0	620	626	243	1073
4	1	0	0	620	629	243	750
5	1	0	0	625	630	248	1028
6	1	0	0	635	700	244	840
7	1	0	0	635	739	242	705
8	1	0	0	635	654	246	1023
9	1	0	0	640	719	245	725
10	1	0	0	640	658	247	747
11	1	0	0	645	650	248	1114
12	1	0	0	645	745	245	1146
13	1	0	0	650	729	242	1154
14	1	0	0	650	811	246	956
15	1	0	0	650	702	243	1179
16	1	0	0	655	742	245	922
17	1	0	0	655	802	241	636
18	1	0	0	655	758	239	737

19	1	0	0	700	736	237	565
20	1	5	350	2300	2300	247	825
21	1	10	50	2300	2300	241	528
22	1	20	43	2300	2300	240	1104
23	1	15	226	2300	2300	243	1601
24	1	15	0	2300	2300	238	1323
25	1	20	127	2300	2300	238	1075
26	1	20	406	2300	2300	245	505
27	1	20	23	2300	2300	239	1236
28	1	25	106	2300	2300	238	935
29	1	25	309	2300	2300	245	1476
30	1	25	101	2300	2300	243	1649
31	1	30	9	2300	2300	242	1625
32	1	35	242	2300	2300	244	552
33	1	35	429	2300	2300	240	1146
34	1	40	139	2300	2300	239	775
35	1	40	25	2300	2300	237	949
36	1	40	446	2300	2300	237	821
37	1	45	334	2300	2300	236	560
38	1	45	125	2300	2300	246	1011
39	1	45	31	2300	2300	240	575
40	1	45	212	2300	2300	243	734
41	1	50	111	2300	2300	244	626
42	1	100	304	2300	2300	236	849
43	1	115	241	2300	2300	242	1161
44	1	125	312	2300	2300	238	588
45	1	130	153	2300	2300	242	1150

46	1	150	344	2300	2300	239	1122
47	1	155	122	2300	2300	244	625

运行代码，获得的调度方案如下所示：



其中绿色为 1，红色为 0，对应的绿色代表两个航班的置换。