

---

# 精确与启发式结合的机场停机位资源分配优化算法

姓名：任家硕

Email: [renjiashuo1993@qq.com](mailto:renjiashuo1993@qq.com)

手机号：15142068111

单    位：东北大学

日    期：2016 年 11 月 15 日

# 一、问题描述

随着世界民航业的迅猛发展，全球机场的机位资源面临非常紧张的局面，提升机场机位资源的利用率已成为机场首要问题。而机位分配合理性的问题却是困扰中国民航的一个难题，破解此难题在提高机场航班正常性的同时更为旅客提供更好的服务。广州白云机场每天都有大量的航班起降，每个航班降落以后都会分配到一个指定的机位进行保障，保障结束以后再离开进行下一航段。为了保障每个航班都有相应的机位，机场会提前一天安排好第二天的所有飞机机位资源。本问题需要将样例提供的 5901 架飞机，安排进指定的 261 个机位中，必须满足下面所提出的约束条件：

- 1、 同一机位不能同时停两架飞机；
- 2、 同一机位前一航班的出机位时间与后一航班的进机位时间间隔不得小于 10 分钟；
- 3、 停机位必须根据航班机型进行分配，机场安全的最基本要求，必须满足。
- 4、 停机位必须根据飞行任务进行分配，以区分客机、货机、专机等，例如 Y 代表普通客运、I 代表货机飞行。
- 5、 停机位必须根据国际国内进行分配，以区分国际国内区域。
- 6、 停机位必须根据航空公司进行分配，实现航空公司在机场的分区化管理。
- 7、 当采取临时措施时，必须满足临时措施的相应规则。

已知条件为：

表 1 为航班信息，包括进港航班的航班号、所属航空公司、进机位时间、出机位时间、航班的国际国内属性、飞行任务、机型、进出港总人数信息。

航空公司	进港航班号	进机位时间	出机位时间	国际国内属性	飞行任务	机型	进出港总人数
CZ	1001	2016/6/30 21:00	2016/7/1 0:05	国际	Y	332	606
CZ	1002	2016/6/30 19:30	2016/7/1 0:05	国际	Y	332	606
Y8	1003	2016/6/30 6:55	2016/7/1 0:05	国内	I	73Y	298
AK	1004	2016/6/30 23:20	2016/7/1 0:10	国际	Y	320	312
CA	1005	2016/6/30 8:50	2016/7/1 0:15	国内	I	75F	238
CZ	1006	2016/6/30 16:45	2016/7/1 0:20	国际	Y	332	606
CZ	1007	2016/6/30 17:10	2016/7/1 0:30	国际	Y	788	500
ET	1008	2016/6/30 14:55	2016/7/1 0:30	国际	Y	773	1100
CZ	1009	2016/6/30 15:30	2016/7/1 0:50	国际	Y	788	500
OZ	1010	2016/6/30 23:55	2016/7/1 0:55	国际	Y	321	362

表 2 为停机位信息，其包含了概述、停机位编号、停机位的国际国内属性、远近机位属性、滑入滑行道、推出滑行道、飞行任务编号、航空公司、机型、受影响机位说明。

概述	停机位	国际国内属性	远近机位属性	滑入滑行道	推出滑行道	飞行任务	航空公司	机型	受影响机位说明
联邦快递专用机坪	FX19	国际、国内	远机位	Q15	Q15	I,J	FX	31X,31Y	
	FX20	国际、国内	远机位	Q15	Q15	I,J	FX	31X,31Y	
	FX21	国际、国内	远机位	Q15	Q15	I,J	FX	31X,32Y	
	FX22	国际、国内	远机位	Q15	Q15	I,J	FX	31X,33Y	
	FX23	国际、国内	远机位	Q15	Q15	I,J	FX	31X,34Y	
	FX24	国际、国内	远机位	Q15	Q15	I,J	FX	31X,35Y	
	FX26	国际、国内	远机位	Q15	Q15	I,J	FX	31X,36Y	
	FX28	国际、国内	远机位	Q15	Q15	I,J	FX	31X,37Y	

目标函数为：

总分=参数 1\*分配完成率+参数 2\*靠桥率+参数 3\*靠桥旅客率-参数 4\*临时措施率-参数 5\*道口冲突率

1、 参数分配完成率=获得机位的航班量/总航班量

解释：用于衡量机场给航班分配机位资源的完成情况，即获得机位的航班越多，则分配完成率越高。

2、 靠桥率=靠桥航班量/总航班量

解释：机场的机位分为近机位和远机位，近机位是有登机桥的机位，远机位无登机桥，分配给近机位的航班量越多，则靠桥航班量越多，靠桥率越高。

3、 靠桥旅客率=靠桥航班的旅客人数/总旅客人数

解释：机场的机位分为近机位和远机位，近机位是有登机桥的机位，远机位无登机桥，靠桥分配在近机位的航班，靠桥旅客率越高旅客越方便。

4、 临时措施率=执行临时措施的航班量 /总航班量

解释：当启动应急措施以后，航班被超额分配到超远机坪、临时机位、公务机坪这三处区域的数量，因为这些措施将降低机场效率、增大运行风险，所以应减少使用。

5、 道口冲突率=滑行通道冲突航班量/总航班量

解释：航班进出机位占用滑行道时间均为 5 分钟，假设航班进机位时间为 10:00，出机位时间为 11:00，那么该航班滑行道占用时间为 09:55-10:00 和 11:00-11:05。相同滑行道的航班请勿同时推入或滑出。

---

6、当前为参数为：

参数 1=10.0；

参数 2=3.0；

参数 3=3.0；

参数 4=1.0；

参数 5=1.0

## 二、精确算法设计

根据本题中所给的各项条件，目标函数，建立数学模型，调用 cplex 对其进行求解。

### 2.1 决策变量

设  $N$  为航班总数， $M$  为停机位总数， $R$  为滑道总数。

(1) 航班  $i$  占用停机位  $j$  表示为：

$$x[i][j] \quad i \in [0, N], j \in [0, M]$$

当该值为 1 时，表示占用，值为 0 时表示不占用。

(2) 航班  $i$  占用滑入滑道  $k$  表示为：

$$yin[i][j] \quad i \in [0, N], k \in [0, R]$$

当该值为 1 时，表示占用，值为 0 时表示不占用。

(3) 航班  $i$  占用滑入推出滑道  $k$  表示为：

$$yout[i][j] \quad i \in [0, N], k \in [0, R]$$

当该值为 1 时，表示占用，值为 0 时表示不占用。

(4) 航班  $i$  是否与其他航班冲突表示为：

$$z[i] \quad i \in [0, N]$$

当该值为 1 时，表示冲突，值为 0 时表示不冲突。

### 2.2 目标函数

本题的目标函数为：

$10 * \text{分配完成率} + 3 * \text{靠桥率} + 3 * \text{靠桥旅客率} - 1 * \text{临时措施率} - 1 * \text{道口冲突率}$   
即：

$$\begin{aligned}
\max \quad & \frac{10}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M x[i][j] + \frac{3}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M x[i][j] distance[j] \\
& + \frac{3}{\sum_{i=1}^N numberOfFlight[i]} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M x[i][j] numberOfFlight[i] distance[j] \\
& - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M x[i][j] temporaryMeasures[j] - \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N z[i]
\end{aligned}$$

其中

$$distance[j] = \begin{cases} 0 & j \in [0, N] \\ 1 & j \in [0, N] \end{cases}$$

0 表示停机位 j 不靠桥，1 表示停机位 j 靠桥。

$$numberOfFlight[j] \quad j \in [0, N]$$

表示航班 i 的旅客人数。

$$temporaryMeasures[j] = \begin{cases} 0 & j \in [0, N] \\ 1 & j \in [0, N] \end{cases}$$

0 表示停机位 j 不是临时措施，1 表示停机位 j 是临时措施。

2.3 约束条件为：

(1) 每架航班只能选择一个机位：

$$\sum_{j=1}^M x[i][j] \leq 1, \quad i \in [0, N]$$

(2) 同一机位同一时刻只能停一架航班，当航班 $i_1$ 和航班 $i_2$ 均可停放在 j，且满足：

$$(tin[i_1] - tout[i_2]) \cdot (tin[i_2] - tout[i_1]) > 0$$

时，则有：

$$x[i_1][j] + x[i_2][j] \leq 1, \text{ 其中 } i_1, i_2 \in [0, N], j \in [0, M]$$

其中 $tin[i]$ 表示航班 i 的进机位时间， $tout[i]$ 表示航班 i 的出机位时间

(3) 航班所使用滑道的约束

$$\sum_{k=1}^R yin[i][k] = \sum_{j=1}^M x[i][j], \quad i \in [0, N]$$

$$\sum_{k=1}^R yout[i][k] = \sum_{j=1}^M x[i][j], \quad i \in [0, N]$$

$$yin[i][k] \geq x[i][j] \cdot gateToInRoad[j][k]$$

$$yout[i][k] \geq x[i][j] \cdot gateToOutRoad[j][k]$$

$$i \in [0, N], j \in [0, M], k \in [0, R]$$

其中  $gateToInRoad[j][k]$  表示机位  $j$  属于滑入滑行道  $k$ ,  $gateToOutRoad[j][k]$  表示机位  $j$  属于推出滑行道  $k$ 。

(4) 冲突机位不能同时使用, 当停机位  $j_1$  与  $j_2$  是冲突机位, 并且航班  $i_1$  可停放在  $j_1$ , 航班  $i_2$  均可停放在  $j_2$ , 且满足:

$$((tin[i_1] - 5min) - (tout[i_2] + 5min)) \cdot ((tin[i_2] - 5min) - (tout[i_1] + 5min)) > 0$$

时, 则有:

$$x[i_1][j_1] + x[i_2][j_2] \leq 1, \text{其中 } i_1, i_2 \in [0, N], j_1, j_2 \in [0, M]$$

(5) 特定机位会影响某些机位的滑入或滑出, 当停机位  $j_1$  影响  $j_2$  的滑入时, 并且航班  $i_1$  可停放在  $j_1$ , 航班  $i_2$  均可停放在  $j_2$ , 且满足:

$$tin[i_1] < tin[i_2] < tout[i_1]$$

时, 则有:

$$x[i_1][j_1] + x[i_2][j_2] \leq 1, \text{其中 } i_1, i_2 \in [0, N], j_1, j_2 \in [0, M]$$

同理, 当停机位  $j_1$  影响  $j_2$  的推出时, 并且航班  $i_1$  可停放在  $j_1$ , 航班  $i_2$  均可停放在  $j_2$ , 且满足:

$$tin[i_1] < tout[i_2] < tout[i_1]$$

时, 则有:

$$x[i_1][j_1] + x[i_2][j_2] \leq 1, \text{其中 } i_1, i_2 \in [0, N], j_1, j_2 \in [0, M]$$

(6) 计算滑道上航班冲突约束

$$z[i_1] \geq (yin[i_1][k] + yin[i_2][k] - 1) \times conflictFlightInIn[i_1][i_2],$$

$$i_1 \in [0, N], i_2 \in [0, N], k \in [0, R]$$

$$z[i_2] \geq (yin[i_1][k] + yin[i_2][k] - 1) \times conflictFlightInIn[i_1][i_2],$$

$$i_1 \in [0, N], i_2 \in [0, N], k \in [0, R]$$

$$z[i_1] \geq (yin[i_1][k] + yout[i_2][k] - 1) \times conflictFlightInOut[i_1][i_2],$$

$$i_1 \in [0, N], i_2 \in [0, N], k \in [0, R]$$

$$z[i_2] \geq (yin[i_1][k] + yout[i_2][k] - 1) \times conflictFlightInOut[i_1][i_2],$$

$$i_1 \in [0, N], i_2 \in [0, N], k \in [0, R]$$

$$z[i_1] \geq (yout[i_1][k] + yin[i_2][k] - 1) \times conflictFlightOutIn[i_1][i_2],$$

$$i_1 \in [0, N], i_2 \in [0, N], k \in [0, R]$$

$$z[i_2] \geq (yout[i_1][k] + yin[i_2][k] - 1) \times conflictFlightOutIn[i_1][i_2],$$

$$i_1 \in [0, N], i_2 \in [0, N], k \in [0, R]$$

$$z[i_1] \geq (yout[i_1][k] + yout[i_2][k] - 1) \times conflictFlightOutOut[i_1][i_2],$$

$$i_1 \in [0, N], i_2 \in [0, N], k \in [0, R]$$

$$z[i_2] \geq (yout[i_1][k] + yout[i_2][k] - 1) \times conflictFlightOutOut[i_1][i_2],$$

$$i_1 \in [0, N], i_2 \in [0, N], k \in [0, R]$$

其中,  $conflictFlightInIn[i_1][i_2]$ 、 $conflictFlightInOut[i_1][i_2]$ 、

$conflictFlightOutIn[i_1][i_2]$ 、 $conflictFlightOutOut[i_1][i_2]$  分别表示滑道上滑入时间冲突的航班、滑入与滑出时间冲突的航班、滑出与滑入时间冲突的航班、滑出时间冲突的航班, 若冲突为 1, 反之为 0。

### 三、精确与启发式结合算法设计

由于本题目计算量巨大, 考虑到计算机硬件问题, 可能无法再有效的时间内求得最优解, 于是引入分段精确解的设计。

#### 3.1 产生较好初始解

较好的初始解有两点要求: 一是能快速求得, 二是要尽可能接近最优解。本题目场景下, 选择无非是将总航班量划分成几部分, 或者将机位划分成几部分来分段取最优解。而划分出的区块越大, 初始解会越接近最优解。我们的选择是先对机位作分类, 总体思路是能减少子问题约束或者航班量。所有 274 个机位划分为以下两类:

1) 超远机坪机位 (包括 501~515 以及 501L, 左右减容等机位), 临时机位 (L 开头机位), 西区父子公务机坪以及一部分西区公务机坪 (包括 411~429, 因为这部分机位受到 413A 等组合机位影响, 或者可停航司只能为 YT, ZZ) 共计 106 个机位。

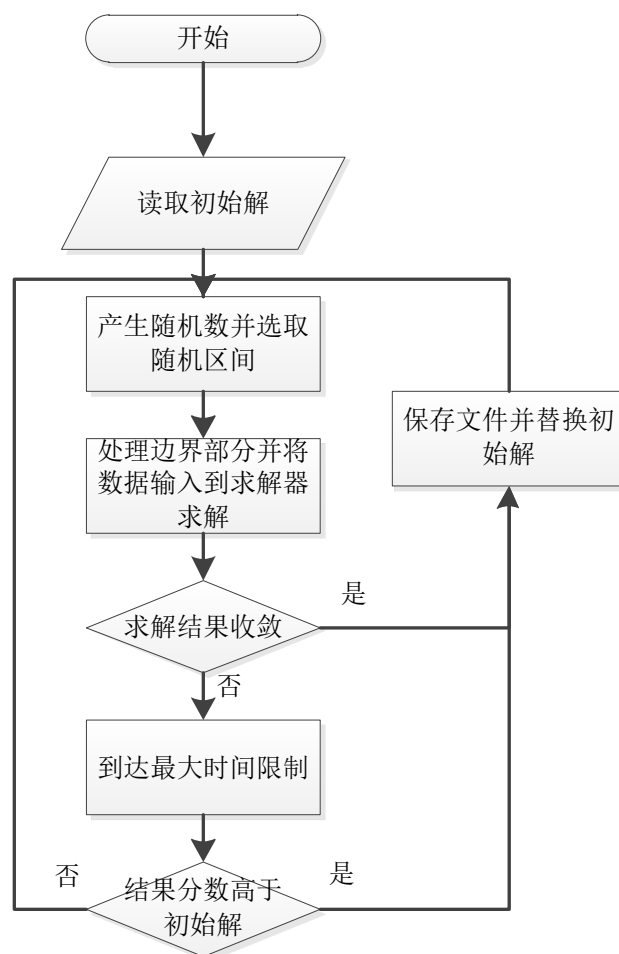
2) 本场剩余的 168 个机位。

从机位分类情况来看, 剩余的 168 个机位将所有可能的临时措施剥离了出去, 可以减少大量约束, 原本我们希望 5901 个航班可以一起试着先分到这 168 个机位, 然后再将未分配成功的航班分到另一类的 106 个机位之中, 但是 5901 个航班仍然太多了, 于是将所有航班也划分成两部分, 先将序号小于 3k 的航班分到 168 个机位中,

再将剩余未分配成功航班也试着分到 168 个机位中，最后再把实在分不到这 168 个机位的航班分到 106 个机位中。两部分航班，两类机位分配在衔接的部分可能有一些冲突，处理上有一些技巧，我们处理的方式为对于已经分配成功的航班，仍然会设置决策变量，只不过对于这部分航班，可选机位只能选择分配好的机位，否则就没有机位再给它使用。经过这样的处理，可以很快得到较好的初始解，这个初始解的分数可以达到 14.32。

### 3.2 迭代提升

在前述初始解生成的过程中，数据分割导致产生若干数据连接段。这些连接部分可能是某一段的精确解，但几乎不可能同时满足是两段的精确解。这就导致分段分配完成后数据连接部分仍然有很大的优化空间，因此可以考虑将连接部分做局部精确解优化，然而当连接部分经过精确求解后又会产生新的数据连接段，所以利用启发式的思想引入随机数选取随机区间进行局部优化可以在有限计算时间内得到较优解。具体方法流程如下图所示：





---

上述流程中“产生随机数并选取随机区间”部分，在选取随机区间时，区间的位置由产生的随机数决定，而区间的大小取决于计算机的计算能力，理论上区间越大越接近精确解，但是区间设置过大会导致收敛时间过长或者超出内存限制，因此需要根据计算能力选择合适的区间大小（目前采用控制区间时间长度和飞机数量两种方式）。

## 四、算法结果

对于本次读取的数据集，去除进港时间晚于出港时间的错误航班，共 5901 条航班，最终得到的结果见 sure\_14.033.csv，共为 5693 个航班分配停机位，4211 个航班被分配在近机位，1728052 名旅客分配在靠桥航班，160 个航班执行临时措施，291 个航班存在滑道冲突，结果为用建立数学模型调用 CPLEX 分段求解后得到的解以启发式进行修复得到的。最终得到的目标函数值为：14.033

算法时间：6374.67 秒

机型：Dell

CPU：Intel(R) Core(TM) i7-4610M CPU @ 3.00GHz

内存：8 GBytes

## 五、程序使用说明

程序在 Microsoft Visual Studio 2013 中编译而成，CPLEX 使用 12.6.1 教育版，可以直接用高于该版本的 VS 直接打开，程序所需的数据集.csv 文件放在项目中 FlightOPS\FlightOPS 目录下，输出结果也放在同一目录下。打开程序的 project 项目后，直接编译运行，即可输出算法结果，在上述目录下找到 bestResult.csv 即为最优算法方案结果。下图为程序结果运行图：

E:\renjiashuo\program\机场停机位资源分配优化\第二阶段\程序\FlightOPS\x64\Release\FlightOPS.exe

```
Clique cuts applied: 80
Zero-half cuts applied: 84
Lift and project cuts applied: 3
Gomory fractional cuts applied: 13

Root node processing (before b&c):
  Real time = 169.67 sec. (160312.37 ticks)
Parallel b&c, 4 threads:
  Real time = 0.00 sec. (0.00 ticks)
  Sync time (average) = 0.00 sec.
  Wait time (average) = 0.00 sec.
-----
Total (root+branch&cut) = 169.67 sec. (160312.37 ticks)
获得机位航班量: 678
靠桥航班量: 472
靠桥旅客人数: 195314
执行临时措施的航班量: 23
滑行通道冲突航班量: 37
getObjValue: 13.8598
getBestObjValue: 13.8688
X_SUM: 5743
```

```
CPLEX求解用时 : 6322.08 秒
删除了 71 架冲突的航班。
最优目标函数值已更新: 0 -> 14.0329
存储结果到csv文件用时 : 0.312 秒
程序总用时 : 6374.67 秒
请按任意键继续. . .
搜狗拼音输入法 全 :
```