

航班延误树的构造与波及分析

曹卫东^{1,2}, 丁建立¹

CAO Wei-dong^{1,2}, DING Jian-li¹

1. 中国民航大学 计算机学院, 天津 300300

2. 天津大学 系统工程研究所, 天津 300072

1. Computer College of Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China

2. Institute of System Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

E-mail: caowdf@yahoo.com.cn

CAO Wei-dong, DING Jian-li. Flight delay tree and propagation analysis. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(16): 202-204.

Abstract: Because an airplane is needed to carry out several scheduled flight services in a day, of each service linked another, one delay will propagate to the other. This paper investigates the aircraft and crew resources for the influence of flight delay and propagation and describes the process of creating a delay tree. Triggered by beginning flight delay, it develops a delay propagation tree with initial flight as its root and statistic some metrics. It analyzes the relationship among the time of day, the duration of initial delay and the propagation in an instance. Its purpose is to help the optimization of aircraft and crew schedule, thereby reduce the flight delay.

Key words: flight delay; delay flight set; flight delay tree; DM

摘要: 由于一架飞机在一天中要执行多个航班, 各航班之间存在前后衔接关系, 因此, 一个航班的延误会波及到下游许多其它航班。重点研究飞机和机组资源对于航班延误与波及的影响, 给出延误树的生成过程, 通过初始航班延误的触发, 动态建立以该航班为根结点的航班延误树, 并根据统计结果给出相关量值。实例分析了初始航班延误发生的时刻、持续时间与波及的程度, 以期辅助优化飞机与机组排班, 减少航班延误。

关键词: 航班延误; 延误航班集; 航班延误树; 航班延误指数

DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2008.16.062 文章编号: 1002-8331(2008)16-0202-03 文献标识码: A 中图分类号: TP301.6

1 引言

航班延误一直是困扰全球民航业的一个主要问题, 导致延误的因素很多, 其主要原因可分为五大类: 天气原因; 空中交通管制原因; 机场保障原因; 旅客自身原因; 航空公司原因等。一方面, 由于其中的一个或多个原因会导致航班延误的发生; 另一方面, 由于一架飞机在一天中要执行多个航班, 各航班之间存在前后衔接关系, 因此, 一个航班的延误会波及到下游许多其它航班, 从而造成大面积的航班延误。飞机和机组是飞行的主要资源, 也是航班延误波及的重要因素。本文仅考虑这两个因素, 以期能够更加清晰地刻画航班延误与波及问题。

本文采用波及树^[1]的思想来研究航班延误波及问题, 给出初始航班延误发生时, 可能引起的下游航班延误情况, 构造航班延误树, 并引入反映航班延误生成树的量值及航班延误指数, 最后, 实例分析了初始航班延误发生的时刻、持续时间与波及的程度。

2 背景分析与符号定义

2.1 背景分析

由于航班之间的衔接性以及飞行操作资源的独立匹配, 当一个航班发生延误时, 会带来许多后续的航班延误。对于大型枢纽机场, 这种具有衔接性的航班占有很大比例^[2], 因此, 会产生大面积的航班延误。

现在分析初始航班延误而导致的延误航班集。考虑最大限度地利用飞行资源(飞机和机组), 两个连续航班之间采取最小周转时间。如果初始航班在起飞机场发生离港延误, 且空中飞行时间不变, 则在目的机场将有到达延误。由于航班之间的联系紧密, 松弛时间少, 飞机和机组各自独立分配(因为优化机组时间和优化飞机利用率是不同的, 飞机和机组独立排班在多数航空公司很常见^[3]), 则因等待飞机资源将导致一个航班延误, 等待机组资源又会引起另一个航班延误, 延误的航班再不断波及到下游航班, 这样更多的航班进入由于初始延误而产生的延

基金项目: 国家自然科学基金(the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60572167); 国家高技术研究发展计划(863)(the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.2006AA12A106)。

作者简介: 曹卫东(1964-), 女, 博士研究生, 副教授, 主要研究方向为数据库技术与数据挖掘; 丁建立(1963-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为智能仿生算法与智能决策。

收稿日期: 2007-11-22 **修回日期:** 2008-02-27

误航班集。

有几种情况会阻止这种延误的波及:其一,两个连续航班之间有足够的时间,吸收延误;其二,飞机或机组由于某些原因(如机务维修、航线排班完成等)结束当天的飞行任务;其三,当天的航班计划结束;另外,如果连续航班之间有一定的松弛时间吸收部分延误,则延误的程度将会减弱。事实上,还有其它因素可能会阻止航班延误的传播,例如可以采取:取消航班,调用预留机组等。文章的研究暂且不考虑这些情况,而专注于航班延误及其由此带来的波及效应。

2.2 相关符号定义与说明

文中用到的符号,在此作统一的定义与说明。

tt : 周转时间(turn time),两个连续航班之间所必需的时间。

st : 松弛时间(slack time),两个连续航班之间的间隔减去周转时间所剩的空闲时间;

f_i : 航班号(flight i)($i=0,1,2,\dots$)其中 $i=0$ 表示初始航班;

dep : 起飞地(departure);

$sdep$: 计划离港时间(schedule departure);

$adep$: 实际离港时间(actual departure);

$pdep$: 预计实际离港时间(projected departure);

arr : 目的地(arrival);

$sarr$: 计划到达时间(schedule arrival);

$aarr$: 实际到达时间(actual arrival);

$parr$: 预计实际到达时间(projected arrival);

ID : 初始延误时间(Initial delay);

pr : 预计准备就绪时间(projected ready);

ppd : 预计波及延误时间(projected propagation delay);

Δt : 预计波及延误时间在 Δt 范围之内($0 < ppd < \Delta t$)时,不作为延误处理。参考中国民航目前的规定,假设 $\Delta t=15$ min;

res : 当前航班的直接上游关联资源, $res=(f,R)$, 表示当前航班用直接上游航班 f 的 R 资源。 R 的值域为 $(A,C,A\&C)$, 其中 A (aircraft) 表示飞机; C (crew) 表示机组; $A\&C$ (aircraft & crew) 表示飞机和机组;

$flag$: 有无波及延误(0:无,1:有);

S : 延误造成的严重度,延误航班集中除初始航班外被波及而延误的航班总数;

DT : 总波及延误时间,延误航班集中不包括初始延误的下游航班延误的总时间:

$$DT = \sum_{i=1}^s ppd_i \quad (1)$$

$DM^{[4]}$: 航班延误指数,延误航班集的总延误时间与初始延误时间的比率:

$$DM = \frac{ID+DT}{ID} \quad (2)$$

3 航班延误树的构造

3.1 航班延误树

根据背景分析,用延误航班集构造以初始延误航班为根节点的航班延误树。如图1所示,其中深色背景填充的圆圈作为树的根结点,由初始延误航班构成;浅色背景填充的圆圈作为树的中间结点,由被波及延误的航班构成;无色背景的圆圈作为树的叶子结点,代表无波及延误的航班或飞机/机组结束任务标志。

航班延误树的结点构成:

(1)以初始延误航班建立树的根结点

初始延误是一个独立的航班延误,也就是说它不是由于上游航班晚到达造成的,可能是机械问题或天气状况等产生的延误。以 f_0 作为航班延误树的根结点,描述根结点属性包括: ($dep, arr, sdep, sarr, ID, adep, aarr$);

(2)以被波及延误的航班建立树的分支结点

根据中国民航统计航班正常的标准^[5]:比计划离港时间推迟 15 min 之内离港的航班,不作为延误处理。则 $pr-sdep > 15$ min, 称为被波及延误的航班。

分支结点属性包括:

($dep, arr, sdep, sarr, pr, pppd, pdep, parr, res, flag$)

结点属性及其相互关系:

① $dep, arr, sdep, sarr$ 见 2.2 小节;

② $pr = parr + tt$;

③ $ppd = pr - sdep$;

④ $res = (f_i, A)$: 当前航班 f_j 需要等待 f_i 的飞机,航班延误树中表示为 $f_i \xrightarrow{\text{飞机}} f_j$, 如图1的航班 f_0 与 f_1 , 其中 f_1 的 $res = (f_0, A)$ 。同理:

$res = (f_i, C)$: 航班延误树中表示为 $f_i \xrightarrow{\text{机组}} f_j$;

$res = (f_i, A\&C)$: 航班延误树中表示为 $f_i \xrightarrow{\text{飞机和机组}} f_j$;

⑤ $flag=1$: 如果 f_j 的 $ppd > \Delta t$, 如图1的航班 f_1, f_2, f_i 。

(3)分别以无波及延误的几种情况作为树的叶子结点
叶子结点属性包括:

$dep, arr, sdep, sarr, pr, res, flag=0$

$ppd < \Delta t$, 视为无波及延误, $flag=0$, 如图1的航班 f_i ;

$sdep > pr$, 也可以表示为 $st > 0$, 即两个连续航班之间有足够的时间吸收延误,则下游无延误波及,以此航班作为延误树的叶子结点, $flag=0$, 如图1的航班 f_j ;

如果根据航班计划,连续航班中的下游航班,虽然受到延误波及,但它是当天的最后航班,则此航班作为延误树的叶子结点, $flag=0$;

如果飞机或机组由于某些原因(如机务维修,航线排班完成等)结束当天的飞行任务。则给出“结束任务”标识,并以此作为延误树的叶子结点。如图1的 f_i 航班到达后,机组结束任务。

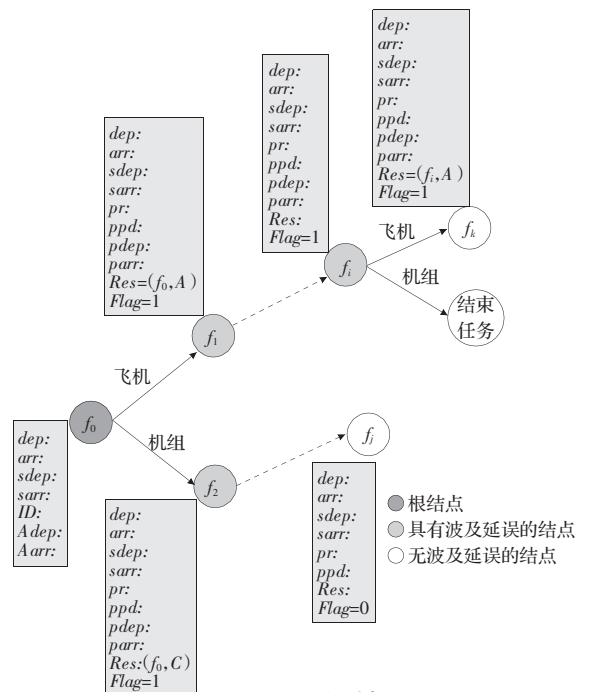


图1 航班延误树

3.2 程序结构

通过输入初始航班号及延误时间,触发动态生成以该航班为根的延误波及树,并同时计算 2.2 小节中的各分析量值。程序设计中所需数据:航空公司航班计划表;飞机排班表视图;机组排班表视图;具有飞机和机组信息的航班时刻表视图;并且这些表或视图按时间有序。为简化程序设计,延误树结点结构统一为分支结点,根结点,叶子结点无关属性取值为空。

(1) 建立延误树子程序主要结构

```
int create_delaytree( $f_0$ )
{
    flightType  $f_i$ ;
    do while( $f_i$ =succ( $f_0$ )) is not null loop
        /*succ( $f_0$ ),  $f_0$  的直接后继航班 */
        {
            ( $*f_0$ )=(flightnode*)malloc(LENG);assign( $f_0$ );
            /*assign( $f_0$ ), 计算并赋值  $f_0$  的属性 */
            case
            {
                 $f_i$ .res=( $f_0, A$ ) or  $f_i$ .res=( $f_0, A \& C$ )
                {
                    creat_delaytree(&( $*f_0$ )->lchild);
                }
                 $f_i$ .res=( $f_0, C$ )
                {
                    creat_delaytree(&( $*f_0$ )->rchild);
                }
            }end case
        }end loop
        {
            ( $*f_0$ )->data=NULL;
            return;
        }
}
```

(2) 遍历延误树进行延误分析量值的计算

```
void scan_delaytree(flightnode  $*f_0$ )
{
    if ( $f_0$ )
    {
        print( $f_0$ ->data);
        if  $ppd > \Delta t$  then
            {  $flag=1$ ;  $s=s+1$ ;  $DT=DT+ppd$ ; }
        Else
            {  $flag=0$ ; }
        scan_delaytree( $f_0$ ->l);
        scan_delaytree( $f_0$ ->r);
    }
}
```

最后,在主程序中实现 DM 的计算。

4 实例分析

某航空公司的部分航班计划见表 1,由于天气原因, f_0 延误 120 min, 该延误波及其后续航班 $f_1 \sim f_6$, 结合机组排班计划及飞机排班计划,应用第 3 章的方法,输入初始延误航班号 f_0 , 以及

延误时间 120 min, 动态产生以 f_0 为根的航班延误树, 见图 2。其中周转时间取平均最小周转时间 $t=35$ 。

表 1 航班计划

航班号	起飞港	达到港	班期	离站	到达
f_0	A	B	1-7	7:00	8:22
f_1	B	C	1-7	9:06	13:16
f_2	B	D	1-7	9:10	13:00
f_3	C	E	1-7	13:59	15:29
f_4	D	F	1-7	14:00	15:58
f_5	E	C	1-7	17:00	20:03
f_6	F	E	1-7	16:55	19:28
f_7	F	I	1-7	18:05	21:00
f_8	C	E	1-7	21:00	22:31
f_9	E	H	1-7	20:35	23:36

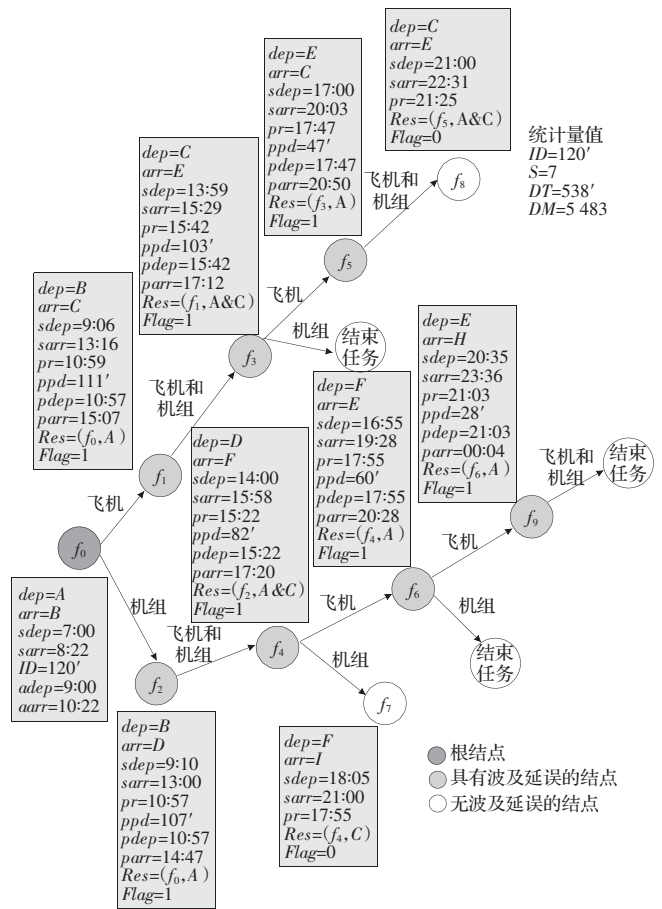


图 2 初始延误 120 min 的航班延误树

图 2 中可见, 每个根延误会生成一个延误的航班集, 由此构成延误波及树。如果航班计划中有足够的松弛时间吸收初始延误, 这棵树有可能只包括一个航班; 如果初始延误发生的时间晚, 2.2 小节中的各运算量相对比较小; 如果初始延误发生的时间早, 同时时间长度大, 则上述运算量大, 也就是说各运算量随初始延误发生的时间和延误的时间长度而变化。对于这种变化规律, 可以树中任何中间结点(非根结点, 非叶子结点)作为根结点而直接得到; 以图 2 为例进行更进一步的分析, 当增加初始延误时间 $ID=180$, 则波及延误航班集元素增加。由于篇幅限制不再详细描述。

图 2 的统计量值反应, 初始延误 120 min, 造成总的波及延