

# 航班延误预警 Web 服务的设计与实现

荣 耀<sup>1,2</sup>, 王建东<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学信息科学与技术学院, 南京 210016; 2. 南京师范大学中北学院, 南京 210046)

**摘要:** 针对航班延误预警缺乏软件支撑的现状, 分析关键飞行资源对航班波及延误的影响并建立波及延误模型, 设计并实现航班延误预警 Web 服务的接口与算法, 并利用前端系统调用 Web 服务给出仿真计算实例。实验表明, 该 Web 服务为航班延误预警提供了有效的定量分析工具。

**关键词:** 航班延误; 波及延误; 延误预警; 软件组件; Web 服务

## Design and Implementation of Web Service to Predict Flight Delay

RONG Yao<sup>1,2</sup>, WANG Jian-dong<sup>1</sup>

(1. College of Information Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016;

2. College of Zhongbei, Nanjing Normal University, Nanjing 210046)

**【Abstract】** To solve the lack of software foundation for predicting flight delay, a Web service to predict flight delay is designed and implemented. The effect to propagated flight delay of critical flight resources is analyzed, and a flight delay propagation model is created. Then the interfaces and algorithms of the Web service are designed and implemented. And a simulation analysis through front-end system that invokes the Web service is presented. It shows that the Web service offers an effective approach to quantitative analysis of flights delay.

**【Key words】** flight delay; propagated delay; delay predict; software component; Web service

天气、空中管制以及航空计划等因素可能会导致航班延误甚至大面积的波及延误, 给航空公司、旅客、机场等造成巨大的损失。现有航班延误研究大多基于机场<sup>[1-3]</sup>以及对延误的事后分析<sup>[4]</sup>, 且停留在理论探索层面, 可供航班延误预警的软件组件非常少见。本文从飞机、驾驶员机组和乘务员机组 3 种关键的飞行资源出发研究航班延误波及问题, 并给出延误预警 Web 服务的设计与实现, 以期对航班延误预警问题的定量分析提供软件组件支撑。

### 1 航班延误波及模型的建立

为了优化利用飞机和机组资源, 很多航空公司在制定航班计划时常常将飞机和机组资源进行独立的分配。由于一架飞机和一个机组在一天中通常要执行多个航班, 各航班之间存在时间和资源上的衔接关系, 因此一个航班发生延误可能会波及下游航班出现连锁延误, 下游航班可能会继续传播延误, 从而导致链式延误现象的发生。假定航班计划安排紧密, 上下游连续航班之间只有必要的等待资源时间和周转时间, 那么, 如果初始航班在起飞机场发生延误, 并且该延误未因空中加速飞行而得以补偿, 则在目的机场将发生到达延误。在该航班的飞机、驾驶员或乘务员机组分别被 3 个下游航班所等待的极端情况下, 其 3 个下游航班将因等待这些资源而发生 3 个波及延误。由于延误的航班可能会不断波及下游航班, 从而使更多的下游航班因初始航班延误而被波及延误。而从一个下游航班的角度来看, 由于可能同时需要使用多个上游航班的资源, 如使用甲航班的飞机、乙航班的驾驶员机组、丙航班的乘务员机组, 从而导致该航班受到甲、乙、丙 3 个航班延误共同的影响。此外, 由于下游航班只会受到上游航班的影响而不会反向影响上游航班, 那么, 如果构建一

个因天气等原因而造成的初始延误航班所波及的下游航班模型, DAG(有向无环图)显然是最有效的描述手段。由于以单个初始延误航班作为研究起点, 因此该 DAG 有且仅有一个入度为 0 的顶点。

为了便于构建和分析航班延误波及模型, 定义变量如下:

$F_i$ : 航班号( $i=0,1,2,\dots$ );

$F_0$  为初始航班;

$Dep$ : 起飞机场;  $Des$ : 到达机场;

$TT$ : 周转时间;

$Tsd$ : 计划离港时间;

$Ted$ : 预计实际离港时间;

$Tsa$ : 计划到达下一机场时间;

$Tea$ : 预计实际到达下一机场时间;

$Ter$ : 预计准备就绪时间;

$ID$ : 初始延误时间;

$EPD$ : 预计波及延误时间;

$ADT$ : 允许延误时间( $EPD$  小于  $ADT$  时不作为延误处理, 参考中国民航当前规定,  $ADT$  取 15 min);

$RF_i$ : 当前航班  $F_i$  的直接上游关联资源;

$DFlag$ : 表示是否有波及延误。

若  $F_i$  的  $EPD > ADT$ , 则  $DFlag=1$ , 表示有波及延误, 否则  $DFlag=0$ , 无波及延误;  $TP$ : 初始延误航班的所有下游航班数目;  $TPD$ : 波及延误航班总数, 即除初始延误航班外被

**基金项目:** 国家“863”计划基金资助重点项目(2006AA12A106)

**作者简介:** 荣 耀(1971 -), 男, 讲师、博士研究生, 主研方向: 软件架构, 软件工程; 王建东, 教授、博士生导师

**收稿日期:** 2008-05-25 **E-mail:** royal@royaloo.com

波及延误的航班数；*TPT*：波及延误总时间，即不包括初始延误的下游航班延误的总时间；*IDF*：延误航班指数，因初始延误而导致的下游延误航班数与全体下游航班数之比；*IDT*：延误时间指数，由于初始延误而产生的总波及延误时间与初始延误时间之比。

根据航班计划和初始航班延误信息，以计划起飞时间 *Tsd* 顺序和资源使用关系构造以初始延误航班为根顶点的全体涉及航班 DAG，如图 1 所示。弧  $\langle Fi, Fj \rangle$  表示 *Fi* 是 *Fj* 的直接上游航班，*Fj* 是 *Fi* 的直接下游航班。弧上的标注表示 *Fj* 所使用的 *Fi* 的资源，例如图 1 中 *F2* 使用 *F0* 的飞机资源，即  $RF2=((F0, A))$ 。初始延误航班以根顶点 *F0* 表示，各属性值均已知(其中， $Ted=Tsd+ID$ ； $Tea=Tsa+ID$ )。以所有下游航班建立 DAG 的其他顶点，其(*Dep, Des, Tsd, Tsa, Res*)属性值已知 (*Ter, EPD, Ted, Tea, DFlag*)属性需计算求得。

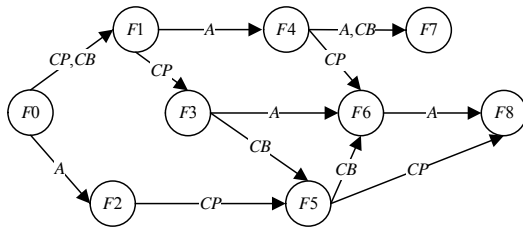


图 1 初始延误航班涉及的下游航班 DAG

## 2 航班延误预警 Web 服务的设计与实现

基于上述航班延误波及模型设计的延误预警组件将作为民航某信息平台的通用服务，目标客户包括民航总局、航空公司、机场以及空中管制部门等，这就要求该组件能够支持广域网、跨平台的服务请求，将航班延误预警组件设计为 Web 服务是一种理想的选择。Web 服务是当今互联网分布式计算的标准构造单元，允许在不同的平台上以不同的语言编写的各种程序以标准方式相互通信。Web 服务提供的服务一般以 XML 描述数据，以 WSDL 定义接口，以 UDDI 进行注册，以 SOAP 进行访问。Web 服务公开的服务可以被不同种类的客户端程序所请求。航班延误预警 Web 服务采用 XML 作为输入和输出介质。XML 是由 W3C 制定的一种标准的数据描述标记语言，可用作跨系统、跨平台的数据传输和交换，保证航班延误预警 Web 服务具有良好的开放性和互操作性<sup>[5-6]</sup>。

### 2.1 Web 服务接口

Web 服务主要开放了 3 个 WebMethod：

(1) CalcSingleInitialDelay：用于计算由一个初始延误航班所导致的所有下游航班的各属性值及综合延误指标；

(2) CalcMultiInitialDelay：为考察同一个初始延误航班在多个不同的初始延误时间下所导致的主要波及信息提供直接的计算方式；

(3) CalcMultiPlanDelay：为考察多个初始延误航班在不同的初始延误时间下所导致的主要波及信息提供直接的计算方式。典型的使用场景为，一个因天气等原因发生了多个初始延误航班的机场，在恢复运营后应该如何最佳化地调度这些初始延误航班离港。

CalcSingleInitialDelay 方法是 CalcMultiInitialDelay 和 CalcMultiPlanDelay 的基础。出于效率的考虑，后者并非简单地调用 CalcSingleInitialDelay 多次，而是进行了必要的优化，见 2.2 节算法描述。

CalcSingleInitialDelay 的接口设计如下：

```
[WebMethod] public void CalcSingleInitialDelay(XmlDocument
```

```
xdFlightPlan, double dInitialDelay, bool bSorted, out XmlDocument
xdFlightProperties, out XmlDocument xdDelayIndexes)
```

作为输入参数的航班计划，xdFlightPlan 格式如下：

```
<Flights>
...
<Flight>
  <F></F>
  <Dep></Dep>
  <Des></Des>
  <Tsd></Tsd>
  <Tsa></Tsa>
  <TT></TT>
  <Resources>
    <Res></Res>
  ...
</Resources>
</Flight>
...
</Flights>
```

xdFlightPlan 本质上就是初始延误航班所涉及的全体下游航班 DAG 的 XML 表现形式，每一个 Flight 元素对应 DAG 中的一个顶点。笔者设计的前端系统自动将用户输入的航班计划转换为 XML 格式。任何需要请求该服务的第三方系统也可以按照 Web 服务的接口规范提供指定格式的航班计划 XML。这样可以省去在内存中使用程序语言构建 DAG 的不便(因为现在只需处理载入内存的 xdFlightPlan XML)，同时也利于简化和优化算法。初始延误时间 *dInitialDelay* 以分钟为单位。*bSorted* 是航班计划 xdFlightPlan 中的 Flight 元素是否已按计划离港时间 *Tsd* 排序的标识，已排序为 true，否则为 false。航班计划 xdFlightPlan 在传入 CalcSingleInitialDelay 方法后，若 *bSorted* 为 false，则按 *Tsd* 从小到大(即从早到晚)的顺序对 Flight 元素进行排序。在笔者实现的前端系统中，用户输入(或从关系型数据库读取)的航班计划数据在被转化为 XML 时，Flight 元素被自动按 *Tsd* 排序，但第三方系统提供的航班计划 XML 虽然格式有效但未必按 *Tsd* 排序。对于已排序的航班计划 xdFlightPlan，CalcSingleInitialDelay 直接计算各航班属性值和综合指标值，效率高；对于未排序 xdFlightPlan，需首先对其进行排序，这是保证算法正确性的前提。

采用 XML 作为输出参数提供 2 个输出：

(1) 初始航班涉及的所有下游航班属性计算结果 xdFlightProperties，格式如下：

```
<Flights>
...
<Flight>
  <F></F>
  <Dep></Dep>
  <Des></Des>
  <Tsd></Tsd>
  <Tsa></Tsa>
  <TT></TT>
  <Ter></Ter>
  <EPD></EPD>
  <Ted></Ted>
  <Tea></Tea>
  <DFlag></DFlag>
</Flight>
```

...

</Flights>

(2)各综合延误指标  $xdDelayIndexes$  其中只有一个 Flight 元素, 格式如下:

<Flights>

<Flight ID=XX>

<TPD></TPD>

<TPT></TPT>

<IDF></IDF>

<IDT></IDT>

</Flight>

</Flights>

采用 XML 作为输出的好处是, 前端系统(或第三方系统)可以根据需要自由解析和呈现 XML, 例如以表格或 DAG 图形方式呈现, 也可以供第三方系统进一步计算使用, 甚至离线计算。

CalcMultiInitialDelay 的接口设计如下:

[WebMethod] public void CalcMultiInitialDelay(XmlDocument xdFlightPlan, double[] dInitialDelay, bool bSorted, out XmlDocument xdFlightMajorProperties, out XmlDocument xdDelayIndexes)

输入参数航班计划  $xdFlightPlan$  格式同前文所述; 多个初始延误时间  $dInitialDelays$  以数组传入; 航班计划是否已按计划离港时间  $Tsd$  排序标识  $bSorted$  含义同前。采用输出参数提供 2 个输出:

(1)初始延误航班涉及的所有下游航班主要属性计算结果  $xdFlightMajorProperties$ , 格式如下:

<Flights>

...

<Flight ID= XX>

<F></F>

<EPD></EPD>

<DFlag></DFlag>

<Tea></Tea>

</Flight>

...

</Flights>

(2)用于存放波及延误综合指标计算结果的  $xdDelayIndexes$ , 其 Flight 元素格式同前所述, 同 CalcSingleInitialDelay 输出的  $xdDelayIndexes$  的区别在于, 现在的 XML 含有与初始延误时间数目相同的 Flight 元素, 可能为一个或多个。

CalcMultiPlanDelay 的接口设计如下:

[WebMethod] public void CalcMultiPlanDelay(XmlDocument[] xdFlightPlans, double[] dInitialDelays, bool[] bSorted, out XmlDocument xdFlightsMajorProperties, out XmlDocument xdMultiDelayIndexes)

一个因天气等原因发生了多个初始延误航班的机场, 在开放机场后开始调度这些初始延误航班离港时, 可以通过考察每一个初始延误航班的波及延误情况决定航班的最佳离港顺序, CalcMultiPlanDelay 为此调度决策需求, 提供了直接的定量分析途径。输入参数  $xdFlightPlans$  为 XmlDocument 数组, 存储以每一个初始延误航班为起点的航班计划。dInitialDelays 为数组, 因为每一个初始延误航班的延误时间并不相同, 需要分别对待。bSorted 为 bool 数组, 这种设计主要是为了使 CalcMultiPlanDelay 具有更大的弹性, 视传入的每一个航班计划  $xdFlightPlan$  已排序与否区别对待。输出参数  $xdFlightsMajorProperties$  和  $xdMultiDelayIndexes$  均为

XML, 分别存储各航班主要属性值和综合指标值。

## 2.2 Web 服务算法

CalcSingleInitialDelay 用于考察单个初始延误航班在给定的初始延误时间下所导致的波及延误情况, 它所使用的算法也是 CalcMultiInitialDelay 和 CalcMultiPlanDelay 的基础算法。限于篇幅, 实现代码略, 以下给出该算法的描述:

(1)若航班计划 XML  $xdFlightPlan$  未按计划离港时间  $Tsd$  排序, 则按  $Tsd$  对各 Flight 元素进行排序。这就保证当计算每一个下游航班的预计准备就绪时间  $Ter$  时, 其所依赖的各上游航班的预计实际到达下一机场时间  $Tea$  属性值均已求得。

(2)按顺序遍历航班计划 XML 元素, 直至完成如下处理:

1)若 Resources 元素为空, 说明该航班不使用任何上游资源, 即该航班为初始延误航班, 其属性值  $Ted$  和  $Tea$  分别为  $Ted = Tsd + ID, Tea = Tsa + ID$ 。

2)若 Resources 元素不为空, 则说明该航班属于一个下游航班, 遍历其各嵌套元素  $Res$  值, 获取每一个直接上游航班资源的  $Tea$  值, 取其最大者作为当前航班的  $Ter$  计算依据, 并在此基础上计算  $Ted, Tea, EPD$  的值。计算方法为:  $Ter = \max(\text{Prior } Tea) + TT; Ted = \max(Ter, Tsd); Tea = \max(Ted + (Tsa - Tsd), Tsa); EPD = Ter - Tsd; DFlag = (EPD > ADT) ? 1 : 0$ 。

3)每一个航班属性值完成计算后即生成相应的 XML Flight 元素, 算法执行完毕即生成计算结果  $xdFlightProperties$  XmlDocument。

$TPD, TPT, IDF$  和  $IDT$  等综合指标以及存放这些指标值的 XML  $xdDelayIndexes$  可以作为上述算法的副作用一并产生, 其中  $TPT = \sum EPDi, (i=1, 2, \dots); IDF = TPD/TP; IDT = TPT/ID$ 。

由于 CalcMultiInitialDelay 和 CalcMultiPlanDelay 的计算结果仅包括  $EPD, DFlag, Tea$  等在内的主要属性值, 通过简单地多次调用 CalcSingleInitialDelay 方法会导致不必要的低效(因为中间伴随不必要的 XML 元素生成)。

实现时将算法进行了分解, 通用核心算法 KernalCalc 及对航班计划 XML 元素进行排序的 SortFlightPlan 方法等被封装成独立的方法, CalcSingleInitialDelay, CalcMultiInitialDelay 和 CalcMultiPlanDelay 分别调用 SortFlightPlan 和 KernalCalc 方法等, 以及各自拥有的其他方法(如生成所需的 XML 元素的方法)。

## 3 仿真计算

假定某航空公司的部分航班计划简化如表 1 所示(以初始延误航班为起点), 现在考察因空中管制原因导致  $F0$  延误 60 min 时所造成的下游航班波及延误情况。

表 1 简化的航班计划

航班	起飞 机场 (Dep)	到达 机场 (Des)	起飞时间 (Tsd)	到达时间 (Tsa)	周转时间 (TT)	使用资源(RFi)
F0	X	A	8:00	9:25		
F1	A	B	10:00	12:30	30	(F0, (CP, CB))
F2	A	C	10:15	12:20	35	(F0, A)
F3	B	D	13:10	14:40	30	(F1, CP)
F4	B	D	13:20	15:35	40	(F1, A)
F5	C	D	16:00	17:18	30	((F2, CP), (F3, CB))
F6	D	E	17:55	19:30	30	((F3, A), (F4, CP), (F5, CB))
F7	D	A	16:35	19:00	40	(F4, (A, CB))
F8	E	F	20:50	22:45	30	(F5, CP), (F6, A)

据此计划表可以生成 CalcSingleInitialDelay 所需要的航班计划 xdFlightPlan XmlDocument, 如下所示, 限于篇幅, 仅显示 F6 元素。

```
<Flights>
...
<Flight>
  <F>F6</F>
  <Dep>D</Dep>
  <Des>E</Des>
  <Tsd>17:55</Tsd>
  <Tsa>19:30</Tsa>
  <TT>30</T>
  <Resources>
    <Res>F3|A</Res>
    <Res>F4|CP</Res>
    <Res>F5|CB</Res>
  </Resources>
</Flight>
...
```

利用前端系统调用 CalcSingleInitialDelay, 并输入初始延误时间 ID 60 min(初始延误航班 F0 的  $Ted=Tsd+ID$ , 为 9:00;  $Tea=Tsa+ID$ , 为 10:25), 得到输出 xdFlightProperties, 如下所示, 限于篇幅, 仅显示 F1 元素。

```
<Flights ID="60">
  <Flight>
    <F>F1</F>
    <Dep>A</Dep>
    <Des>B</Des>
    <Tsd>10:00</Tsd>
    <Tsa>12:30</Tsa>
    <TT>30</T>
    <Ter>10:55</Ter>
    <EPD>55</EPD>
    <Ted>10:55</Ted>
    <Tea>13:25</Tea>
    <DFlag>1</DFlag>
  </Flight>
...
```

得到输出 xdDelayIndexes 如下所示:

```
<Flights>
  <Flight ID="60">
    <TPD>5</TPD>
    <TPT>215</TPT>
    <IDF>0.62</IDF>
    <IDT>3.58</IDT>
  </Flight>
...
```

</Flights>

前端系统解析 XML 后将数据呈现在表 2 所示的表格中。其中,  $TPD=5$ ,  $TPT=215$ ,  $IDF=0.62$ ,  $IDT=3.58$ 。可以看到, 在 F0 延误 60 min 的情况下, F1, F2, F3, F4, F7 分别被波及延误 55 min, 45 min, 45 min, 45 min, 25 min, 因此波及延误航班总数 TPD 等于 5, 波及延误总时间 TPT 为 215 min, 延误航班指数 IDF 为 0.62, 延误时间指数为 3.58。

表 2 航班运行数据与综合延误指标计算结果

航班	起飞机场 (Dep)	到达机场 (Des)	计划起飞时间 (Tsd)	计划到达时间 (Tsa)	周转时间 (TT)	预计就绪时间 (Ter)	延误时间 (EPD)	预计实际离港时间 (Ted)	预计实际到达时间 (Tea)	是否波及延误 (DFlag)
F0	X	A	8:00	9:25				9:00	10:25	
F1	A	B	10:00	12:30	30	10:55	55	10:55	13:25	1
F2	A	C	10:15	12:20	35	11:00	45	11:00	13:05	1
F3	B	D	13:10	14:40	30	13:55	45	13:55	15:25	1
F4	B	D	13:20	15:35	40	14:05	45	14:05	16:20	1
F5	C	D	16:00	17:18	30	15:55	-5	16:00	17:18	0
F6	D	E	17:55	19:30	30	17:48	-7	17:55	19:30	0
F7	D	A	16:35	19:00	40	17:00	25	17:00	19:25	1
F8	E	F	20:50	22:45	30	20:00	-50	20:50	22:45	0

利用 CalcMultiInitialDelay 可以便利地计算出该航班计划在不同的延误时间下的波及延误情况, 利用 CalcMultiPlan Delay 可计算多个初始延误航班的波及延误情况, 为对这些初始延误航班的离港调度提供明确的决策依据。

#### 4 结束语

基于单个初始延误航班考察波及延误情况, 是对航班延误预警分析的重要手段, 并且是研究多个初始延误航班最佳离港调度的基础。

本文从关键飞行资源出发设计和实现的航班延误预警 Web 服务可以方便地用于计算航班运行数据及延误综合指标, 为航班延误预警及延误航班离港调度提供了有效的辅助决策工具。下一步将在此 Web 服务的基础上设计和实现更加完善的航班延误预警系统平台。

#### 参考文献

- [1] 樊军, 王莉莉. 基于 Hopfield 网络的单机场地面等待优化算法[J]. 中国民航学院学报, 2004, 22(3): 11-13.
- [2] 马正平, 崔德光. 机场航班延误优化模型[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2004, 44(4): 474-477, 484.
- [3] 王莉莉, 史忠科. 单机场地面等待问题遗传算法设计[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(4): 894-896, 912.
- [4] 石丽娜. 多等级模糊评价方法在航班延误中的应用[J]. 上海工程技术大学学报, 2006, 20(3): 276-279.
- [5] Chappell D. .NET 大局观[M]. 2 版. 荣耀, 译. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [6] 荣耀, 李昕. 企业级 AJAX 框架设计与实现[J]. 南京师范大学学报: 工程技术版, 2007, 7(3): 64-69.