

# 基于历史轨迹集的四维轨迹预测方法

宋雷亮

(四川大学 计算机学院 国家空管自动化系统技术重点实验室, 四川 成都 610064)

**摘要:**针对传统空气动力学模型在预测飞机四维轨迹时误差较大的问题,提出了一种基于历史轨迹集的四维轨迹预测方法。首先,该方法运用空管基础数据、运动学模型、气象模型、管制意图计算创建历史轨迹集,然后使用实时的雷达航迹配对信息、气象信息、空中位置报、移交预达报等激励信息通过算法对历史轨迹集进行更新。最后,通过查询历史轨迹集预测完整的飞机四维飞行轨迹。仿真试验表明该方法比传统的空气动力学模型具有更好的实用性、准确性。

**关键词:**四维轨迹预测;历史轨迹集;运动模型;气象模型;管制意图

**中图分类号:**TP391.9

**文献标识码:**A

**文章编号:**1673-629X(2012)12-0011-04

## A 4-D Trajectory Prediction Method Based on Set of Historical Trajectory

SONG Lei-liang

(National Key Laboratory of Air Traffic Control Automation System Technology,  
College of Computer Science, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

**Abstract:** In order to improve the large errors of traditional aerodynamic 4-D trajectory prediction models, a method based on the set of historical trajectory was proposed. Firstly, the method makes use of the air traffic management basic data, a kinematic model, a meteorologic model and control intention to establish the set of historical trajectory. Then, utilizing the radar tracks information, the aerodynamic information, ARP, EST to update it. Lastly, the whole 4-D trajectory was got by the set of historical trajectory. Simulation proves the availability and accuracy of this method.

**Key words:** 4-D trajectory prediction; historical trajectory set; kinematic model; meteorologic model; control intention

## 0 引言

四维轨迹预测是指对飞机在未来经过的航路点序列的经度(longitude)、纬度(latitude)、高度(height)、过点时间(time)进行计算预测。四维轨迹预测目的主要有两方面:首先,通过四维轨迹预测,可以避免不同航班之间的冲突,增强空中交通安全;其次,通过精确的四维轨迹预测,可以对所有飞机的飞行情况进行总体的把握,从而可以对航班进行合理的安排,增加空中交通流量<sup>[1]</sup>。鉴于四维轨迹预测在空中交通中的重要作用,国内外学者对其进行了大量研究。文献[2~4]从起飞爬升阶段对四维轨迹进行阐述分析。文献[5~7]从终端区方向对四维轨迹进行了研究优化,文献[8]阐述了运用神经网络的四维轨迹预测方法,文献[9,10]则从数据挖掘的角度对四维轨迹预测进行了

分析计算。然而,上述模型存在飞机飞行过程中未考虑气象和管制意图的影响,计算误差较大,或者模型的建模过程数据计算量和存储空间较大的问题。

文中将阐述一种基于历史轨迹集的四维轨迹预测方法,该方法首先建立有效的运动学模型、气象模型、管制意图。综合运用上述模型计算和空管基础数据(包括机场数据字典、地理数据字典、飞行数据字典等),建立并初始化历史轨迹集。然后通过实时的激励信息(如雷达航迹配对信息、气象更新信息、空中位置报、移交预达报等)对历史轨迹集进行更新处理,最后,通过一定时间聚集的历史轨迹数据,可以较准确地预测航班的四维轨迹信息。

## 1 历史轨迹集的初始化

### 1.1 轨迹预测相关数据定义

(1)领航计划报(FPL)由空中交通服务单位根据航空器运营商提交的飞行计划数据,拍发给沿航路所有相关的空中交通服务单位的电报<sup>[11]</sup>。FPL报包含航空器标识、起降机场、预计起飞时间、机型、航路串、

收稿日期:2012-03-12;修回日期:2012-06-15

基金项目:国家自然科学基金重点项目(60572175);国家“863”高技术发展计划项目(2006AA12A104)

作者简介:宋雷亮(1989-),男,山东潍坊人,硕士研究生,主要研究方向为雷达信息处理、空中交通管理。

巡航高度、巡航速度等静态数据。每条 FPL 报对应由轨迹标识 TID = 起飞机场+降落机场+机型+航路串唯一标识的四维轨迹。

(2) 航路点定义:  $P_n = (C_n(\text{long}, \text{lat}), H_n, T_n)$ , 其中  $n$  为航路点的个数, 可通过 1.3.1 航路解析求得,  $C_n(\text{long}, \text{lat})$  为航路点  $P_n$  的经纬度坐标,  $H_n$  为过点高度(相对于  $P_1$  过点高度),  $T_n$  为过点时间(相对于  $P_1$  过点时间), 四维轨迹定义:  $\text{Trajectory} = (\text{TID}, (P_1, P_2, \dots, P_n))$ 。

(3) 历史轨迹集, 按 TID 存储和查询计划历史四维轨迹信息的 XML 格式文件。格式如下:

```
<? xml version="1.0" encoding="gb2312"? >
< HistoricalTrajectorySet><! 一历史轨迹集-->
<Trajectory><! 一四维轨迹-->
<TID></TID><! 一四维轨迹标识-->
<Point><! 一航路点-->
<Pos></Pos><! 一航路点经纬度坐标-->
<Height><! 一航路点相对于  $P_1$  的过点高度
-->
  <  $H_1$  > </ $H_1$  > <! 一每个航路点保留 10 个历史过点高度 -->
  <  $H_2$  > </ $H_2$  >
  ...
  <  $H_{10}$  > </ $H_{10}$  >
  </Height>
  < Time > <! 一航路点相对于  $P_1$  的过点时间
-->
  <  $T_1$  > </ $T_1$  > <! 一每个航路点保留 10 个历史过点时间 -->
  <  $T_2$  > </ $T_2$  >
  ...
  <  $T_{10}$  > </ $T_{10}$  >
</Time>
</Point>
...<! 一四维轨迹中其他航路点信息-->
< Point >
</ Point >
</ Trajectory >
...<! 一历史轨迹集中其他轨迹-->
< Trajectory >
...
</ Trajectory >
</ HistoricalTrajectorySet >
```

## 1.2 历史轨迹集初始化流程图

历史轨迹集初始化流程图如图 1 所示。

系统收到 FPL 报, 构建 TID 并查询历史轨迹集。

如果存在匹配项, 则通过 4-D 历史轨迹管理器计算返回此条计划对应的四维轨迹信息; 如果无匹配项, 则通过电报预处理, 生成结构化的轨迹预测所需数据 TCD (Trajectory Calculate Data),  $\text{TCD} = (\text{TID}, A_{\text{dep}}, A_{\text{dest}}, T_{\text{edep}}, A_{\text{type}}, \text{Route}, H_{\text{cruise}}, V_{\text{cruise}})$ , 其中,  $A_{\text{dep}}$  为起飞机场,  $A_{\text{dest}}$  为降落机场,  $T_{\text{edep}}$  为预计起飞时间,  $A_{\text{type}}$  为机型,  $\text{Route}$  为航路串,  $H_{\text{cruise}}$  为巡航高度,  $V_{\text{cruise}}$  为巡航速度。然后通过运动学模型、气象模型、管制意图计算得到此条计划的四维轨迹信息。同时, 通过 4-D 历史轨迹管理器写入历史轨迹集。

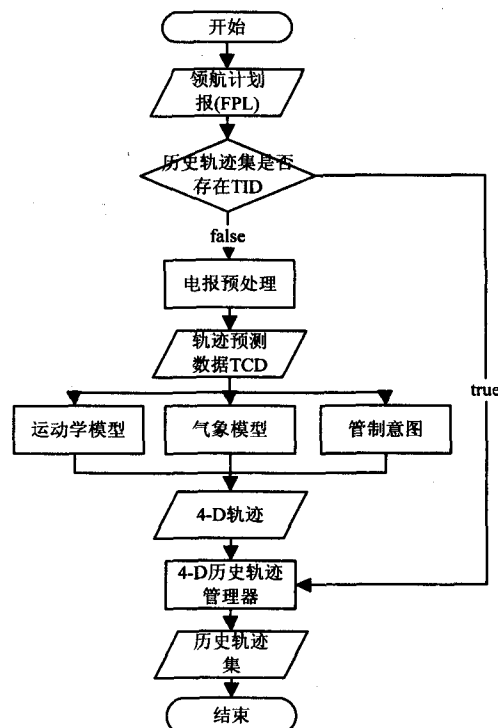


图 1 历史轨迹集初始化流程图

## 1.3 模型定义

### 1.3.1 运动模型

飞机简化运动轨迹包括爬升阶段、巡航阶段、下降阶段。由运动的叠加原理可知, 在水平方向上, 爬升阶段, 飞机从机场以起飞速度匀加速到巡航速度; 巡航阶段, 飞机以巡航速度做匀速运动; 下降阶段, 飞机从巡航速度匀减速到飞机着陆速度。

运动模型的算法过程如下:

#### (1) 航路解析。

a) 初始化空管基础数据, 加载机场的进离港程序字典、机场字典、机型字典、航线字典、固定点字典等静态数据。

b) 通过 TCD 获取起降机场、航路串。

c) 将起降机场、机场的进离港程序、航路串解析成航路点(如机场、固定点、航路点), 如果航路串中包含航线, 则需先查询空管基础数据, 提取航线段与航路串的重叠部分。最后通过字典判断航路点的有效性。

## (2) 轨迹计算。

a) 根据空管基础数据,获取有效航路点的经纬度坐标  $C_n(\text{long}, \text{lat})$ 。通过  $P_1$  和  $P_n$  两个航路点经纬度易计算得  $P_n$  距离  $P_1$  水平距离  $S_n$  和整个航路的水平距离  $S_{\text{total}}$ 。

b) 根据 TCD 中的机型  $A_{\text{type}}$ ,通过空管基础数据获取飞机的爬升距离  $S_{\text{up}}$ 、下降距离  $S_{\text{down}}$ 、起飞速度  $V_{\text{takeoff}}$ 、触地速度  $V_{\text{landing}}$ 、巡航速度  $V_{\text{cruise}}$ 、巡航高度  $H_{\text{cruise}}$  等静态数据。

c) 根据飞机简化运动模型可知:

若  $S_n \leq S_{\text{up}}$ , 飞机处于爬升阶段。采用“前推剖面”,根据运动学原理,从起飞机场开始计算相关数据。由公式(1)知水平方向的平均速度,由公式(2)知爬升时间,由公式(3)知爬升加速度  $A_{\text{up}}$ ,由公式(4)可知  $P_n$  的过点高度  $H_n$ ,由公式(5)可求得  $P_n$  的过点时间  $T_n$ 。

$$V_{\text{average\_up}} = \frac{V_{\text{takeoff}} + V_{\text{cruise}}}{2} \quad (1)$$

$$T_{\text{up}} = \frac{S_{\text{up}}}{V_{\text{average\_up}}} = \frac{2 \times S_{\text{up}}}{V_{\text{takeoff}} + V_{\text{cruise}}} \quad (2)$$

$$A_{\text{up}} = \frac{V_{\text{cruise}} - V_{\text{takeoff}}}{T_{\text{up}}} \quad (3)$$

$$H_n = \frac{H_{\text{cruise}} \times S_n}{S_{\text{up}}} \quad (4)$$

$$T_n = \frac{-V_{\text{takeoff}} + \sqrt{V_{\text{takeoff}}^2 - 2 \times A_{\text{up}} \times S_n}}{2} \quad (5)$$

若  $S_{\text{up}} < S_n < (S_{\text{total}} - S_{\text{down}})$ , 飞机处于巡航阶段。高空风主要作用在飞机的巡航阶段,根据 1.3.2 的气象模型,获取风速  $V_{\text{wind}}$ 。由公式(6)和(7)确定巡航阶段  $P_n$  的过点速度  $V_n$  和过点高度  $H_n$ 。则易得公式(8)巡航阶段  $P_n$  与  $P_{n-1}$  之间的时间差  $T_{n+1} - T_n$ 。通过时间依次累加,即得巡航阶段  $P_n$  的过点时间  $T_n$ 。

$$V_n = V_{\text{cruise}} + V_{\text{wind}} \quad (6)$$

$$H_n = H_{\text{cruise}} \quad (7)$$

$$T_{n+1} - T_n = \frac{S_{n+1} - S_n}{V_n} \quad (8)$$

若  $(S_{\text{total}} - S_{\text{down}}) \leq S_n$ , 飞机处于下降阶段,是爬升阶段的逆过程。采用“倒推剖面”,从降落机场开始计算下降阶段上的航路点信息,计算方法同爬升阶段。

d) 如果  $H_n < H_{\text{cruise}}$  且  $H_{n+1} = H_{\text{cruise}}$ ,则在航路点  $P_n$  与  $P_{n+1}$  之间计算插入姿态变化点 TOC(Top of Climb),即最高爬升点。姿态变化点距离为  $S_{\text{loc}} = S_{\text{up}} - S_n$ ,根据  $P_n$  与  $P_{n+1}$  两点经纬度坐标和  $S_{\text{loc}}$  可得  $C_{\text{loc}}(\text{long}, \text{lat})$ ,  $P_{\text{loc}}$  过点时间和过点高度的计算方法与巡航阶段航路点相同。同理计算 TOD(Top of

Descent),即最高下降点。

由此,计算得  $P_n = (C_n(\text{long}, \text{lat}), H_n, T_n)$  构成的完整的 Trajectory = (TID, ( $P_1, P_2, \dots, P_n$ )),最后将计算的轨迹信息写入到历史轨迹集。

### 1.3.2 气象模型

高空风是影响轨迹预测的主要气象因素,而其他的恶劣气象如对流天气等会引起航班改航、绕飞或者取消,轨迹的可预测性不大<sup>[1]</sup>。

目前常用的稳定的高空风数据源是美国的高空风气象报 (GRIB)。该报由气象机构发布,分别提供次日 6h 有效、12h 有效和 24h 有效的 3 种气象预报。高空风气象报描述了指定高度层内经纬度网格里的高空风属性,包括风速、风向等<sup>[12]</sup>。此处只考虑高空风对飞机航路方向的影响。通过两个航路点的经纬度坐标求得航向  $\theta$ ,通过高空风提取风向计算的风向  $\varphi$ ,风速为  $V_w$ 。计算公式如下:

$$V_{\text{wind}} = V_w \cos(\theta - \varphi) \quad (9)$$

在预测过程中,通过巡航高度和航路点的经纬度判断航路点所在的高空风网格,然后提取高空风的风速和风向,把气象模型叠加到运动模型中。

### 1.3.3 管制意图

由于每天的航班计划几乎一样,因此发生流量增大的时间和原因基本相同,管制员对同一航班采取的措施基本相同<sup>[8]</sup>,文中轨迹预测方法是基于历史轨迹集数据,可以侧面反映出管制意图规律。

## 2 历史轨迹集的更新

历史轨迹集通过历史轨迹管理器依据激励信息来进行维护更新。流程图如图 2 所示:

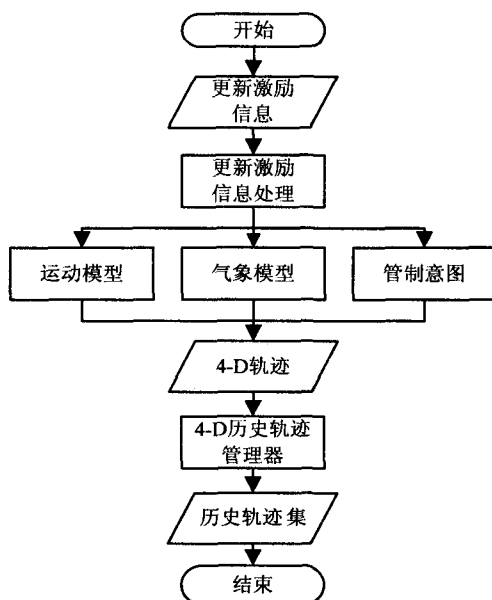


图2 历史轨迹集更新流程图

在飞机起飞以后,如果收到更新激励信息如雷达

航迹配对信息、气象更新信息、空中位置报、移交预达报,提取雷达航迹中的位置信息、气象更新信息中的高空风速和风向、空中位置报中的航空器位置、移交预达报中的入界点高度和过点时间,按照运动模型、气象模型、管制意图对当前航路点之后的轨迹进行重新计算,同时更新历史轨迹集。历史轨迹集通过历史轨迹管理器依据激励信息来进行维护更新,为了减少数据存储量和计算量,历史轨迹集中每个航路点保存 10 个历史过点时间,  $P_n$  的历史过点时间为  $(t_n^1, t_n^2, \dots, t_n^i)$  ( $1 \leq i \leq 10$ ), 当有新数据加入更新时,任取 10 个数据利用公式(11)计算组合的方差  $S$ , 方差最小的那组数据更新到历史轨迹集。过点高度的更新原理同时间一样。通过方差筛选,数据波动性最小,反映了管制意图的稳定性。

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} [(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2]} \quad (\bar{x} \text{ 为平均数}) \quad (10)$$

### 3 仿真实验

根据系统收到的 FPL 报构建航迹 TID, 获取预计起飞时间  $T_{\text{edep}}$  和起飞机场的标高  $H_{\text{adep}}$ 。然后查询 XML 文件。如果有匹配的 TID, 则直接加载四维轨迹信息, 其中, 由于航班飞行受季节的影响, 对每个航路点的历史过点时间和过点高度按公式(11) 时间权值  $w_i$  加权平均, 由公式(12) 可得航路点  $P_n$  的过点时间。如果无匹配项, 则计算此条计划的四维轨迹信息, 并写回历史轨迹集。同理计算  $P_n$  的高度  $H_n$ 。运算过程中, 使用的过点高度和过点时间都是相对于起飞机场  $P_1$  而言, 真实的预测结果则需分别加上  $H_{\text{adep}}$  和  $T_{\text{edep}}$ 。

$$w_i = \frac{i}{\sum_{i=1}^n i} = \frac{2}{n(n+1)} \quad (11)$$

$$T_n = \sum_{i=1}^{10} w_i \times t_n^i = \sum_{i=1}^{10} \frac{2t_n^i}{n(n+1)} \quad (12)$$

文中仿真实验的对象为成都到西昌航班 CA4465, 机型为空客 A319, ZUUU 的标高为 490m, 预计起飞时间为 16:20:00。FPL 报的航路串为 ZYG W24 YBN H88 SB, 其中 W24 和 H88 为航线段, 经过计算两个航线段与航路串的重叠段分别为 ZYG-YBN 和 YBN-SB, 由 1.3.1 构建得 TID=ZUUU ZUXC A319 TOC ZYG YBN TOD SB。历史轨迹集为从 2008 年 5 月 4 日到 2008 年 8 月 4 日通过文中预测方法得到的历史轨迹集。文中分别比较历史轨迹集初始化预测结果和经过一段时间聚集的历史轨迹集预测结果两者与实际结果的误差。预测此次航班 8 月 5 日的四维轨迹, 结果如表 1、表 2 所示。

表 1 过点时间结果比较

航路点	历史轨迹集初始化预测时间/	误差(秒)
	历史轨迹集预测时间/	
	实际时间	
ZUUU	16:20:00/16:20:13/16:20:33	33/20
TOC	16:29:15 /16:29:39/16:30:24	69/45
ZYG	16:29:37/16:30:10/16:30:49	72/39
YBN	16:42:07/16:42:30/16:43:12	65/42
TOD	16:53:32/16:53:55/16:54:50	78/55
SB	17:04:21/17:04:40/17:05:50	89/70
ZUXC	17:25:02/17:25:33/17:26:17	75/44

表 2 过点高度结果比较

航路点	历史轨迹集初始化预测高度/	误差(米)
	历史轨迹集预测高度/	
	实际高度(米)	
ZUUU	490/490/490	0/0
TOC	7200/7220/7270	70/50
ZYG	7200/7250/7240	40/10
YBN	7200/7210/7250	50/40
TOD	7200/7210/7220	20/10
SB	2750/2770/2830	80/50
ZUXC	1550/1550/1550	0/0

通过结果比对, 通过一定时间迭代的历史轨迹集预测方法可以比较准确地预测航班完整的四维轨迹。

### 4 结束语

文中阐述了一种简单实用基于历史轨迹集的四维轨迹预测方法, 适用于实时性较高的空管和流量系统。仿真实验表明该方法较准确地预测出四维轨迹。但是该方法也存在一定问题, 轨迹的预测准确性与历史轨迹集更新的次数相关。当历史轨迹更新的次数较少时, 可能导致预测的结果误差相对较大。

#### 参考文献:

- [1] 靳学梅, 祁伟. 4D 轨迹预测应用系统关键技术研究[J]. 指挥信息系统与技术, 2010(1): 37-40.
- [2] Lambrecht M, Slater G L. Departure Trajectory Modeling for Air Traffic Control Automation Tools[C]//Proc of AIAA GNC Conference. [s. l.]: AIAA, 1999.
- [3] 韩峰, 赵巍飞, 张鹏. 飞机起飞爬升四维轨迹合成计算[J]. 中国民航飞行学院学报, 2006, 24(21): 10-12.
- [4] Richard A. Coppenbarger: climb trajectory prediction enhancement using airline flight-planning information[C]//Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation and Control Conference. [s. l.]: AIAA, 1999: 1077-1087.
- [5] 任倩倩, 陈治怀. 终端区四维飞行航迹的计算[J]. 中国民航飞行学院学报, 2007, 18(2): 11-14.
- [6] 杜实, 郝佳欢, 张楠. 终端区四维轨迹到达实践的控制与计算[J]. 中国民航大学学报, 2011, 29(1): 1-4.

(下转第 20 页)

能正常调用服务。

当流程实例执行过程中发生了资源异常,可以使用重试、替换、调用外部服务的基本 FaultHandler 服务进行处理。在文中案例中,假定在流程实例 shop\_instance 执行过程中发生了服务资源不可用的异常, SUPPLIER 的服务提供者更新了发布服务的 URI,使得服务调用者无法获取其服务描述信息,可以通过重试(再次调用 SUPPLIER 服务)、或替换(使用功能与 SUPPLIER 相同的服务来代替 SUPPLIER 的执行)完成异常的处理。

当流程实例执行过程中发生了应用异常,可以使用重试、替换、补偿、报警、调用外部服务的基本 FaultHandler 服务进行处理。如果以上基本 FaultHandler 不能正确处理异常,需要定制流程 FaultHandler 服务。在文中案例中,假定在流程实例 shop\_instance 执行过程中发生了应用异常, SUPPLIER 服务的 CheckAnd-Reserve 和 LOCALSHOP 服务的 CaculateTotalCost 服务在交互的过程中发生了交互参数错误,在使用重试、替换的基本 FaultHandler 无法正确处理流程实例异常的情况下,对该流程的此类参数错误应用异常定制 FaultHandler。

## 5 结束语

文中按照服务层、流程层对面向服务的异常行为进行分类,并根据异常源头进行进一步细分,对每种异常类型进行特征描述,并通过案例进行了说明。在此基础上,针对每种异常类型分别提出了处理方法。这种分类的异常处理方法,能够分别在服务层和流程层提供更好的健壮性。下一步的工作,主要从框架技术支撑和形式化验证两方面展开:

①根据文中的异常行为的分类及其处理的基本思想,设计细化分层的异常处理框架对面向服务的异常进行处理,实现异常处理框架中的基本异常处理动作算法,并提供支撑面向服务的异常处理开发的可视化工具,为用户自定义异常处理服务提供平台支撑。

②通过形式化的方法验证文中提出的异常处理方法能够保证每类异常都能够得到处理,从而保证每个异常都能够得到处理或者终止流程。

## 参考文献:

- [1] 范贵生,虞慧群,陈丽琼,等. 基于 Petri 网的服务组合故障诊断与处理[J]. 软件学报,2010,21(2):231-247.
- [2] An L, Qing L, Liusheng H. FACTS: A Framework for Fault-tolerant Composition of Transactional Web Services[J]. IEEE Transactions on Services Computing,2010,3(1):46-59.
- [3] 夏永霖. 复合服务自恢复关键技术研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2010.
- [4] Ardagna D, Cappiello C, Fugini M, et al. Faults and Recovery Actions for Self-healing Web Services[C]//Proceedings of the 15th International Conference on World Wide Web. New York, NY, USA: ACM, 2006.
- [5] Friedrich G, Fugini M, Mussi E, et al. Exception Handling for Repair in Service-based Processes[J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 2010, 36(2):198-215.
- [6] Jensen M. A Fault Propagation Approach for Highly Distributed Service Compositions[C]//SCC 08. Honolulu, HI: IEEE, 2008:507-510.
- [7] Moser O, Rosenberg F, Dusdar S. Non-Intrusive Monitoring and Service Adaptation for WS-BPEL[C]//Proceedings of the 17th International Conference on World Wide Web. New York, NY, USA: ACM, 2008:815-824.
- [8] Christos K, Costas V, Panayiotis G. Enhancing BPEL Scenarios with Dynamic Relevance-based Exception Handling[C]//IC-WS 2007. Salt Lake City, UT: IEEE, 2007:751-758.
- [9] 李东来, 韩燕波, 王建武, 等. 面向服务应用中服务可用性及其引发的异常处理研究[J]. 计算机研究与发展, 2004, 41(12):2104-2107.
- [10] Zeng L, Lei H, Jeng J, et al. Policy-driven exception-management for composite Web services[C]//CEC 2005. [s. l.]: IEEE, 2005:355-363.
- [11] Baresi L, Guinea S. Self-supervising BPEL Processes[J]. IEEE Transaction on Software Engineering, 2011, 37(2):247-263.
- [12] Modafferi S, Mussi E, Pernici B. SH-BPEL-A Self-healing Plug-in for WS-BPEL Engines[C]//Proceedings of the 1st Workshop on Middleware for Service Oriented Computing. New York, NY, USA: ACM, 2006:48-53.
- [13] Hamadi R, Benatallah B. Recovery nets: towards self-adaptive workflow systems[C]//Proceedings of the 5th International Conference on Web Information Systems Engineering (WISE'04). Berlin Heidelberg: Springer, 2004:439-453.

(上接第 14 页)

- [7] Wichman I. 4D-Trajectory Enabled Continuous Descent Approaches[R]. Arlington Virginia: Smiths Aerospace FAA New Technologies Workshop I, 2007.
- [8] 王大海, 苏彬, 杨俊. 终端区域 4D 导引的高度剖面与速度剖面研究[J]. 飞行力学, 2000, 18(1):14-18.
- [9] 吴鹏, 潘薇. 基于数据挖掘的四维飞行轨迹预测模型

[J]. 计算机应用, 2007, 27(11):2637-2639.

- [10] 陈巧雅. 北京管制区域飞行流量仿真原型系统研究与开发[D]. 北京:清华大学, 2004.
- [11] 中国民用航空总局. MH4007-2006 民用航空飞行动态固定电报格式[S]. 北京:中国标准出版社, 2006.
- [12] 张荣, 祁伟, 许坚, 等. 高空风 GRIB 报文解析及精度分析[J]. 空中交通管理, 2010(4):17-20.