

基于微分 Petri 网的民机航迹演化通用模型构建

韩云祥 汤新民 韩松臣 张明

(南京航空航天大学民航学院, 南京, 210016)

摘要:为实现对未来大流量、高密度、小间隔条件下的空域实施管理,在战略航迹规划阶段,提出了一种模块化的战略航迹演化通用模型。建立了不同航段之间航空器状态动态切换的一类宏观 Petri 网演化模型,以及同一航段内航空器速度和高度两种特征参数值连续变化的 3 类微观 Petri 网演化模型。根据航空器特征参数值转化的 4 种不同形式并基于航空器全飞行剖面的混杂运行特性,运用微分 Petri 网理论,定义了航空器的 4 种演化模式,通过组合各种演化模式得到了 3 种航空器基本演化模型。在满足航空器性能约束的前提下,通过设定 10 个航段及 15 个高度和速度预设值,得到了全飞行剖面下各特征参数的演化图。结果表明,所设计的演化模型增强了航迹预测模型的通用性,能够反映航空器在水平剖面 and 垂直剖面内的状态变化。

关键词:空中交通管制;航迹预测;演化模型;混杂 Petri 网;微分 Petri 网

中图分类号: V355 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2014)02-0322-07

Construction of Civil Aircraft Trajectory Evolution General Model Based on Differential Petri-Net

Han Yunxiang, Tang Xinmin, Han Songchen, Zhang Ming

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: To resolve the problem of future airspace management under the condition of great traffic flow, high density, and small separation, a modular evolution model is built during the process of aircraft trajectory strategic planning. A state switch macroscopic Petri-net evolution model and three microscopic Petri-net evolution models accompanied with the continuous change of aircraft speed and height in the same segment based on the aerodynamics models are presented. According to the different forms of aircraft characteristic parameter conversion and the hybrid evolution characteristics, four evolution models using differential Petri-net theory and three evolution modes using the combination of various evolution models are defined. The 4-D trajectory evolution graphs with aircraft performance constraints can be obtained by setting 10 flight segments and 15 defaults of height and speed. Theoretical analysis and simulation results demonstrate that the proposed models can enhance the versatility of trajectory prediction model and reflect the aircraft horizontal and vertical trajectory profiles precisely.

Key words: air traffic control; trajectory prediction; evolution model; hybrid Petri-net; differential Petri nets

随着全球航空运输业快速发展与空域资源有限矛盾的日益突出,在空中交通流密集的复杂空

基金项目:国家自然科学基金(61174180,71271113)资助项目;江苏省自然科学基金(BK2010502)资助项目;江苏省产学研联合创新资金-前瞻性联合研究(BY2012014)资助项目;江苏省普通高校研究生科研创新计划(CXLX11-0210)资助项目;中国博士后科学基金(2014M550291)资助项目。

收稿日期: 2012-11-23; **修订日期:** 2013-10-08

通信作者: 汤新民,男,副教授, E-mail: tangxinmin@nuaa.edu.cn。

域,仍然采用飞行计划结合空管调配的空中交通管理方式逐渐显示出其落后性,基于 4-D 航迹的运行可以控制航空器通过特定航路点的时间窗以显著减少航空器航迹的不确定性,提高空域和机场资源的安全性及利用率^[1-2]。国内外在“航迹预测”研究中出现的算法主要分为以下 2 种:(1)基于卡尔曼滤波或神经网络等估计算法的无参方法。文献[3~6]运用数据挖掘方法来实现完整的 4-D 航迹预测。(2)建立航空器模型,进行飞行模拟。文献[7~10]通过拟合一系列简化的“点阵方程”来获取水平航迹和垂直航迹,其没有考虑飞行中燃油的消耗所产生的相关影响及航空器地速数值的变化,精确性有待于进一步提高。文献[11]主要讨论了爬升和下降进场的 4-D 航迹控制技术与优化。文献[12]采用飞行性能手册中的爬升时间表实施航空器航迹推测。为了克服以往研究的不足,本文在考虑航空器重量变化以及精确的航空器速度转化关系的前提下,对航空器全飞行剖面航迹进行了分解,在不失航迹预测精度并能够增强航空器航迹预测模型通用性的前提下,通过指定航空器的运行剖面参数,利用航空器动力学模型构造了航空器在不同航段之间进行切换、而同一航段内状态连续变化的混杂演化模型。

1 航空器宏观和微观演化模型构建

航空器运行状态的演化,从宏观角度来讲,表现为航空器在空间航路点之间的动态切换过程,航路点分布如图 1 所示。图 1 中,点 O 表示各个航路点, N 表示正北方向,各航路点之间的连线为航段, ψ 表示空间中各航段的磁航迹角。在切换过程中,表征航空器动态行为的特征参数如航程 D 、高度 H 及速度 V 是连续变化的。遵循如图 2 所示的航空器状态演化原则,从宏观到微观方面对航空器的演化模型进行分解,共分为“全飞行剖面演化模型—航段演化模型—状态演化模型—切换单元演化模型”共 4 类演化形式。

1.1 宏观演化模型

为便于描述,首先从宏观上建立离散状态下航空器航段转移模型。

定义 1 定义 Petri 网 $PN_1 = (P_1, T_1, F_1, W_1, K_1, M_1, J_1)$ 为航空器航段转移模型,其中 $P_1 = \{p_{11}, p_{12}, \dots, p_{1m}\}$ 表示非空的飞行航段集, $T_1 = \{t_{11}, t_{12}, \dots, t_{1n}\}$ 表示非空的飞行状态参数(航向)转换集, $P_1 \cap T_1 = \emptyset, F_1 \subseteq (P_1 \times T_1) \cup (T_1 \times P_1)$ 为有向弧集,它表示航段和航路点的前后向连

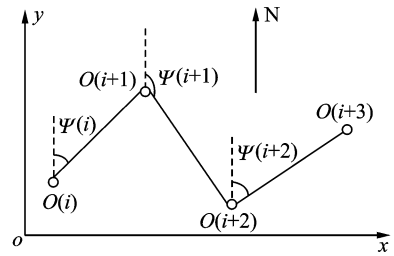


图 1 空间航路点布局

Fig. 1 Layout of waypoints

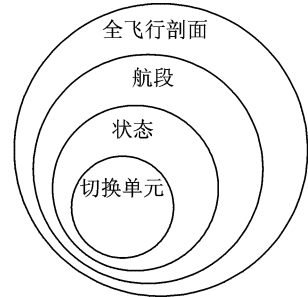


图 2 航空器航迹演化宏观-微观关系

Fig. 2 Macroscopic-microscopic relation of aircraft trajectory evolution

接关系, $W_1: F_1 \rightarrow N^+$ 表示有向弧的权函数, $K_1: P_1 \rightarrow N^+$ 表示航段的容量, $M_1: P_1 \rightarrow N^+$ 表示初始状态标识,即航空器在初始时刻所处的航段, $J_1: T_1 \rightarrow C_1 (C_1 = \{D=d_i\})$ 为变迁激发结束条件集合,其中 d_i 表示各个航段累加的预定航程,航空器状态演化过程如图 3 所示。

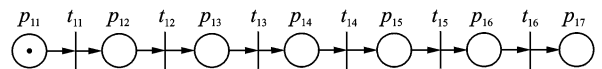


图 3 航空器状态演化模型

Fig. 3 State evolution model of aircraft

1.2 微观演化模型

航空器从前一航段转移到后一航段的宏观过程是离散的,而航空器在单一航段内的状态演变过程是连续的,也即航空器在各个航段内存在多种运行状态,如爬升、平飞、下降或三者的组合等。由于定义 1 将各个航段视为独立的库所,它侧重于从最上层宏观层面上对航空器的运行状态进行描述,为了描述单一航段内的航空器运行状态切换,对单一航段内航空器的运行状态进行进一步的细分,可以运用图 4 描述二者之间的关系,其中库所 p_{11} 及 p_{12} 中的各个子网表示航空器在该航段内的多种运行状态,航空器在单一航段内状态演化过程的形式化定义如下。

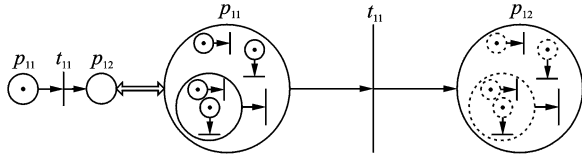


图4 航空器状态演化宏观-微观关系

Fig. 4 Macroscopic-microscopic relation of aircraft state evolution

定义 2 定义 Petri 网 $PN_2 = (P_2, T_2, F_2, W_2, M_2, J_2)$ 为单一航段内的航空器状态转移模型, 其中 $P_2 = \{p_{21}, p_{22}, \dots, p_{2m}\}$ 表示非空的航空器飞行状态集, $T_2 = \{t_{21}, t_{22}, \dots, t_{2n}\}$ 表示非空的飞行状态转换节点集, $P_2 \cap T_2 = \emptyset, F_2 \subseteq (P_2 \times T_2) \cup (T_2 \times P_2)$ 为有向弧集, 它表示航空器各状态间转移的顺序关系, $W_2: F_2 \rightarrow \mathbf{N}^+$ 表示有向弧的权函数, $M_2: P_2 \rightarrow \mathbf{N}^+$ 表示初始状态标识, 即表示当前航空器的运行状态(如爬升、平飞和下降等), $J_2: T_2 \rightarrow C_2 (C_2 = \{H = h_j, V = v_k\})$ 为变迁激发结束条件集合。在建立了航空器航段间和航段内状态转移模型后, 下面着重讨论航空器在垂直剖面内的运行情况, 其状态转移过程如图 5, 6 所示, 其中 h 表示高度, O' 表示与高度剖面相对应的位置点。

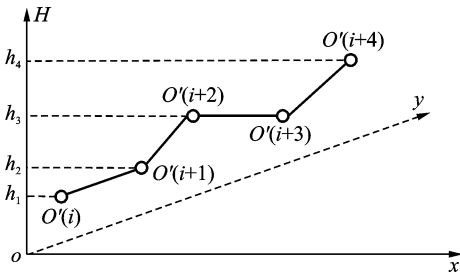


图5 垂直剖面内航空器的状态演化

Fig. 5 State evolution of aircraft in vertical profile

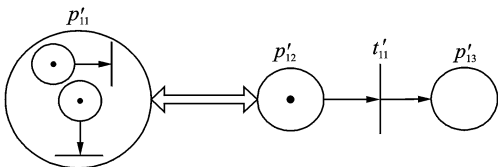


图6 航空器爬升/下降过程分解

Fig. 6 Decomposition of aircraft climb/descent

以上所定义的 Petri 网模型均为航空器在航段间、航段内以及单一状态下的离散演化, 而所有这些离散演化本质上均可归结为一个切换单元的连续演化, 各离散演化过程和连续演化过程的关系如图 7 所示, 图中的“填充圆环”和“填充矩形框”

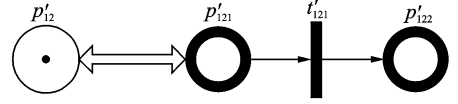


图7 离散演化过程和连续演化过程

Fig. 7 Relationship between discrete evolution and continuous evolution

分别表示连续库所和连续变迁, 由此对连续 Petri 网进行定义。

定义 3 定义连续 Petri 网 $CPN_1 = (CP_1, CT_1, CF_1, CW_1, CV_1, CM_1)$ 为航空器在单一切换单元内的转移模型, 其中 CP_1 表示非空的连续库所, 也即航空器动态行为的特征参数值, CT_1 表示非空的连续变迁, 也即航空器动态行为特征参数的激发行, $CP_1 \cap CT_1 = \emptyset, CF_1 \subseteq (CP_1 \times CT_1) \cup (CT_1 \times CP_1)$ 为有向弧集, 它表示航空器动态行为特征参数值转变的前后向连接关系, $CW_1: CF_1 \rightarrow \mathbf{R}^+$ 表示有向弧的权函数, $CV_1: CT_1 \rightarrow \mathbf{R}^+$ 表示连续变迁的激发速度, $CM_1: CP_1 \rightarrow \mathbf{R}^+$ 表示初始状态标识, 即当前航空器动态行为的特征参数值, 包括航空器累积的航程、高度以及速度的转变等。

为了突出离散 Petri 网和连续 Petri 网二者的优势, 下文将建立一种包含离散 Petri 网元素和连续 Petri 网元素在内的混杂微分 Petri 网模型来描述航空器全飞行剖面运行时的状态演化。

2 航空器全飞行剖面混杂微分 Petri 网模型构建

微分 Petri 网 (Differential Petri nets, DPN) 是对基本混杂 Petri 网的一种扩展, 它通过引入微分位置、微分变迁和适当的演化规则, 可以对具有连续变量动态过程和离散事件动态过程的混杂系统进行建模和分析。

定义 4 定义微分 Petri 网 $DPN = (P, T, Pre, Post, F, M, J)$, 其中 $P = P_{DF} \cup P_D = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ 为库所的非空有限集, P_{DF} 和 P_D 分别表示微分库所集和离散库所集; $T = T_{DF} \cup T_D = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ 为变迁的非空有限集, T_{DF} 和 T_D 分别表示微分变迁集和离散变迁集; 本文中, 微分库所和微分变迁分别用“非填充圆环”和“非填充矩形框”表示^[13-14]。

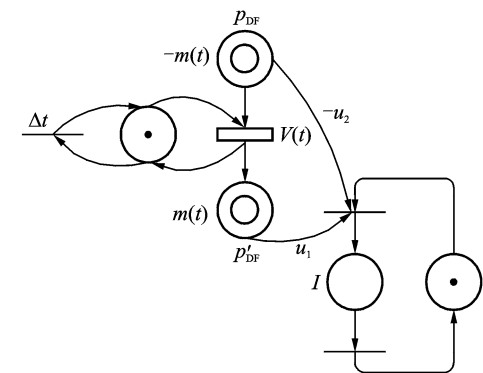
2.1 4 种基本演化模式构建

根据前面各种 Petri 网的定义, 结合航空器运行的实际情况, 总体上讲, 航空器动态行为特征参数值的转化可以分为 4 种模式, 分别运用 $U, S_1,$

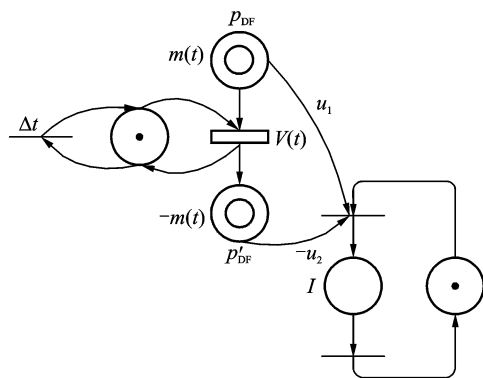
S_2, S_3 及 S_4 代表某类特征参数值和以上所述的 4 种模式,那么它们可以表述如下:

(1) S_1 : 航空器的特征参数值 U 在区间 $[u_1, u_2]$ ($0 \leq u_1 \leq u_2$) 之内,即 $u_1 \leq U \leq u_2$ 。

根据 U 进入该区间方式的不同,该类演化可以用图 8 来表示,它们分别为“左进模式” S_{11} 和“右进模式” S_{12} ,图 8 中 Δt 表示该离散变迁的时间延迟(下同), $m(t)$ 表示 t 时刻微分库所 p_{DF} 的标识(下同), $V(t)$ 表示微分变迁的最大激发速度(下同),库所 I 为观测库所(下同),通过判断其中是否存在标识可获取特征参数值 U 的演化动态。



(a) 左进模式



(b) 右进模式

图 8 航空器特征参数值区间内演化模型

Fig. 8 Evolution model of aircraft characteristic parameter values in range of $[u_1, u_2]$

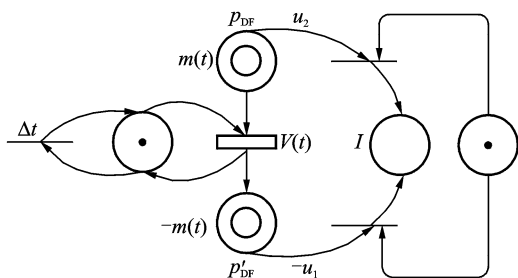
(2) S_2 : 航空器的特征参数值 U 在区间 $[u_1, u_2]$ 之外,即 $U < u_1$ 或 $U > u_2$ 。

根据 U 离开该区间方式的不同,该类演化可以用图 9 来表示,它们分别为“左出模式” S_{21} 和“右出模式” S_{22} 。

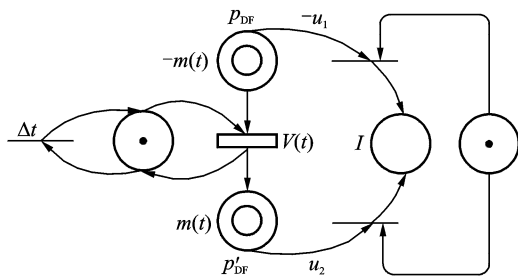
(3) S_3 : 航空器的特征参数值 U 增大到某个非负值 u 。

(4) S_4 : 航空器的特征参数值 U 减小到某个非负值 u 。

以上两类演化模型可以用图 10 表示。



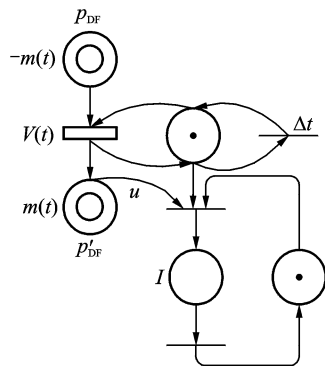
(a) 左出模式



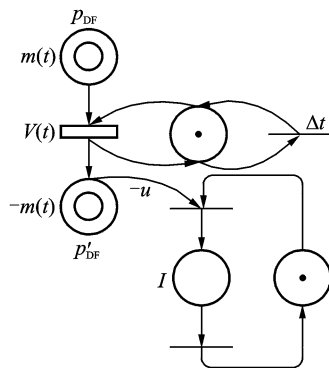
(b) 右出模式

图 9 航空器特征参数值区间外演化模型

Fig. 9 Evolution model of aircraft characteristic parameter values out of range of $[u_1, u_2]$



(a) 增大情形



(b) 减小情形

图 10 航空器特征参数值增大/减小至某特定值演化模型

Fig. 10 Evolution model of aircraft characteristic parameter increased/decreased to specific value

2.2 3种典型演化模型构建

根据以上讨论的4种基本演化模式,可以构建以下3种航空器的典型运行状态演化模型,包括航空器由前一航段切换到下一航段、航空器在两个高度层间连续爬升/下降(不包含水平加速段)及航空器在两个高度层间连续爬升/下降(包含水平加速段),设以上3种演化模型分别为 G_1, G_2 及 G_3 ,运用以上所定义的4种模式,可将 G_1, G_2 及 G_3 分别用以

下3式进行简要表示:(1) $G_1 = S_1 \oplus S_1$; (2) $G_2 = S_1 \oplus S_1$; (3) $G_3 = S_1 \oplus S_3 \oplus S_1$; 其中符号“ \oplus ”表示逻辑与,航空器由前一航段切换到下一航段的状态演化过程如图11所示,航段 p_{11} 和航段 p_{12} 累加的预定航程分别位于区间 $[d_1, d_2]$ 和 $[d_2, d_3]$ 内,设离散变迁 t_1, t'_1, t_2 和 t'_2 的激发优先级分别为 Q_1, Q'_1, Q_2 和 Q'_2 ,规定 $Q_1 \gg Q'_1$ 并且 $Q_2 \gg Q'_2$ 。设微分变迁 p_{DF1} 的激发结束时刻为 t_f, p_{DF2} 的激发开始时刻为 t_o ,令 $m'(t_o) = m(t_f)$ 。

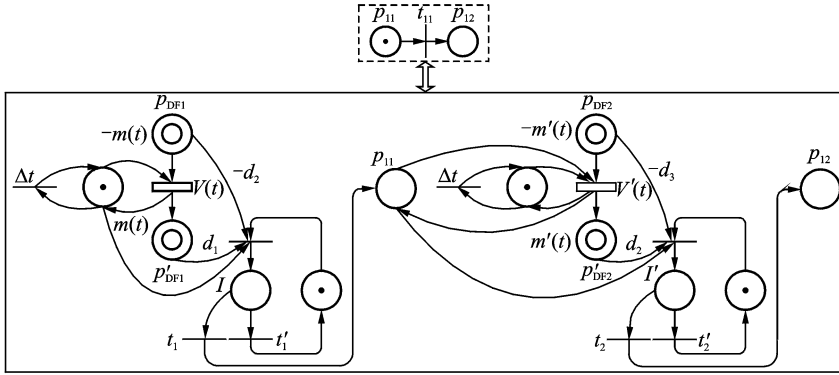


图 11 航段转移混杂模型

Fig. 11 Hybrid model of segment transition

在讨论完航空器航段的演化模型之后,图12给出不包含水平加速段时航空器连续爬升两个高度层 h_1 和 h_2 的状态演化模型,也即航空器首先到达高度 h_1 ,然后到达高度 h_2 。离散变迁 t_1, t'_1 优先级分别为 Q_1, Q'_1 ,与前文类似,规定 $Q_1 \gg Q'_1$,设微分变迁 p_{DF1} 的激发结束时刻为 t_f, p_{DF2} 的激发开始时刻为 t_o ,令 $m'(t_o) = m(t_f)$ 。

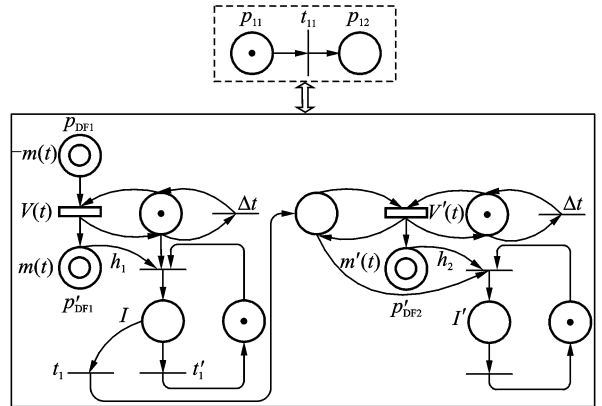


图 12 不包含水平加速段高度层转换混杂模型

Fig. 12 Flight level transition hybrid model excluding level acceleration

根据以上所构建的模型,当在航空器连续爬升两个高度层 h_1 和 h_2 并且含有水平加速段时,构建该类状态下的演化模型如图13所示,其中 v 表示加速终止速度,离散变迁 t_1, t'_1, t_2 和 t'_2 的激发优先级设置同上。

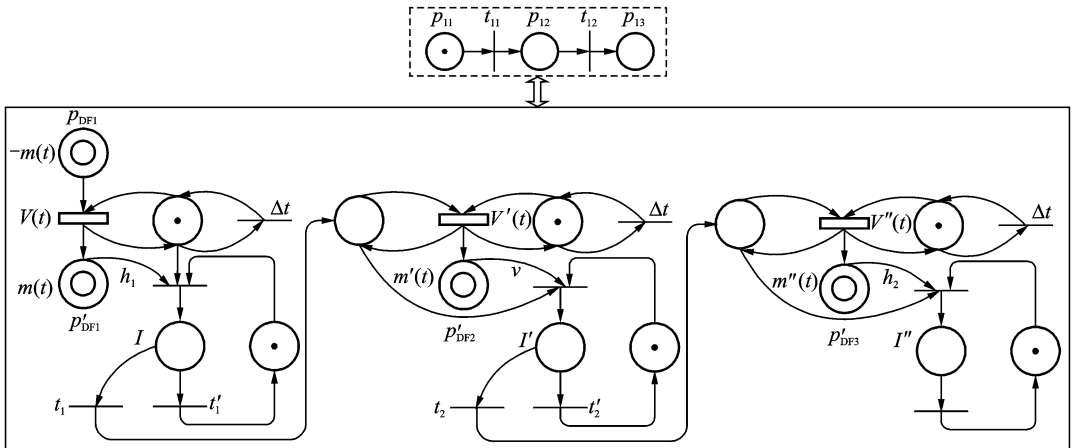


图 13 包含水平加速段的高度层转换模型

Fig. 13 Flight level transition hybrid model including level acceleration

3 案例分析

以机型 A319 为例,探讨成都双流机场(ZUUU)02号跑道至西安咸阳机场(ZLXY)05跑道的航空器航迹演化过程。基本输入信息如下:航空器起飞质量为 60 000 kg,巡航高度为 9 500 m,航空器离场程序为 JTG-01D,减推力起飞,离场后直接加入 G212 航路,主要航路点名称和航程如表 1 所示($m=n=10$),表 1 中第二列为航线上特定的位置点,进场程序为 NSH-04A,假设修正海压为 1 013.2 hPa。根据前文所建立 Petri 网模型及表 2 中

表 1 航路点及航程参数

Tab. 1 Parameters of flight waypoints and voyage

序号	航路/定位点	经度/(°)	纬度/(°)	航程/km
1	CTU	103.94	30.58	0
2	D3.0CTU	103.99	30.61	5.56
3	OMGUS	104.13	30.64	16.50
4	JTG	104.39	30.87	36.00
5	VENON	104.70	31.07	37.04
6	SUBUL	106.71	32.33	235.20
7	NSH	108.31	33.32	185.20
8	ZS	108.86	34.22	112.00
9	FNH	108.63	34.56	42.00
10	D11.3FNH	108.59	34.42	20.90
11	ZLXY	108.75	34.45	18.70

表 2 全飞行剖面变迁激发结束条件集合

Tab. 2 Collection of transition firing completion of full flight profile

序号	航程/km	垂直剖面			状态
		高度/m	速度/($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	加减速段终止速度/($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	
1	0	0	259.28		q_1
2	5.56	600.00	259.28	268.54	q_3/q_1
3	16.50	900.00	268.54	305.58	q_3/q_1
4	36.00	1 200.00	305.58	361.14	q_3/q_1
5	37.04	1 500.00	361.14	398.18	q_3/q_1
6	235.20	1 800.00	398.18	463.00	q_3/q_1
7	185.20	3 000.00	463.00	574.12	q_3/q_1
8	112.00	9 500.00	574.12		q_5
9	42.00	5 100.00	574.12	555.60	q_1/q_6
10	20.90	3 000.00	555.60	463.00	q_1/q_6
11	18.70	2 100.00	463.00	388.92	q_1/q_6
12		1 800.00	388.92		q_2
13		1 200.00	388.92	351.88	q_1/q_6
14		900.00	351.88	333.36	q_1/q_6
15		0	333.36		q_6

注: q_1 :爬升; q_2 :平飞; q_3 :平飞加速; q_4 :平飞减速; q_5 :巡航; q_6 :下降。

所列出的变迁激发结束条件(包括特定高度和速度),取仿真步长 $\Delta\tau=4\text{ s}$,得到航空器各种演化模型分别见图 14~16。图 14~16 中,纵坐标所对应的数值如表 2 所示。以航空器航程演化图为例,根据航空器的性能模型,当航空器的航程从起飞机场累积到某个特定的数值时(如:5.56),那么与该航程相对应的标识就会转移到下一航段中(如:5.56+16.5),同理可以得到航空器的高度演化图。通过设置不同的变迁激发结束条件,结合水平面内和垂直面内的航空器状态演化,可以得到多种航空器全飞行剖面演化过程。

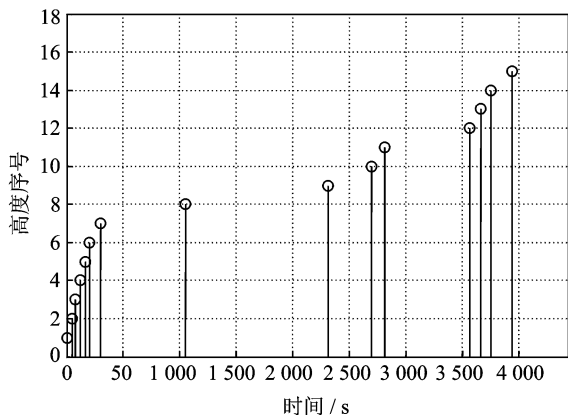


图 14 航空器高度演化图

Fig. 14 Evolution model of aircraft altitude

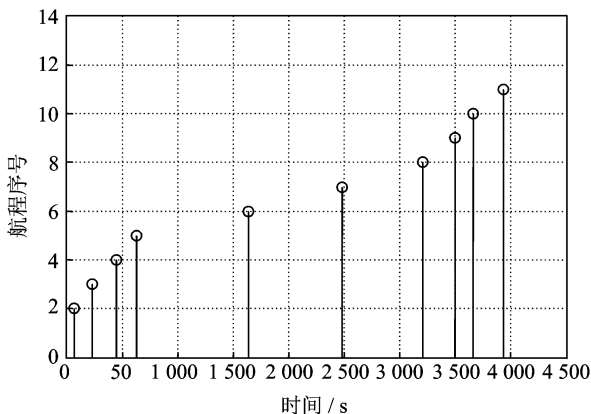


图 15 航空器航程演化图

Fig. 15 Evolution model of voyage

4 结束语

本文针对新一代空管自动化系统中的航空器航迹预测,研究了给定飞行剖面时不同飞行阶段内的航空器状态动态切换模型,以及航空器在不同飞行阶段之间状态切换转移的混杂演化模型。为了增强航迹预测模型的通用性,提出利用航迹宏观演化模型和微观演化模型将航空器航迹演化模型进

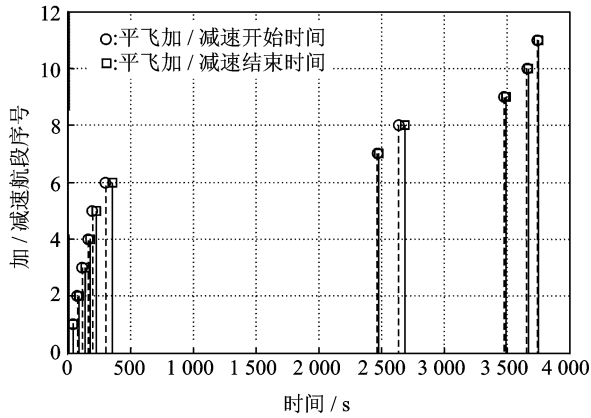


图16 航空器加减速演化图

Fig. 16 Evolution model of aircraft acceleration and deceleration

行层层分解,得到了一类宏观 Petri 网演化模型和 3 类微观 Petri 网演化模型。基于航空器全飞行剖面的混杂运行特性及航空器特征参数值转化的不同形式,定义了 4 种演化模式并由此得到了 3 种航空器基本演化模型,管制人员可以根据航迹演化模型的不同使用场合,灵活地预先设定特定的捕捉状态变量值。通过对单航空器混杂模型融合,下一步将建立空域内多航空器的混杂系统模型,生成多航空器无冲突 4D 航迹,为优化飞行计划和实施流量管理奠定基础。

参考文献:

[1] 汤新民,韩云祥,韩松臣. 基于混杂系统模型的航空器 4D 航迹推测[J]. 南京航空航天大学学报,2012,44(1):105-112.
Tang Xinmin, Han Yunxiang, Han Songchen. Aircraft 4D trajectory estimation based on hybrid system model[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics,2012,44(1):105-112.

[2] 伊群. 美国新一代空中交通管理系统运行概念[J]. 中国民用航空,2007(8):27-31.
Yi Qun. Concepts of US new-generation ATM system[J]. China Civil Aviation,2007(8):27-31.

[3] 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.
Wu Kun, Pan Wei. 4D trajectory prediction model based on data mining[J]. Computer Applications, 2007,27(11):2637-2639.

[4] Wu Kun, Pan Wei. A 4-D trajectory prediction model based on radar data[C]// Proceedings of the 27th Chinese Control Conference. Kunming: IEEE, 2008: 591-594.

[5] Lin Xi, Zhang Jun, Zhu Yanbo, et al. Simulation study of algorithms for aircraft trajectory prediction based on ADS-B technology[C]//ASIA Simulation Conference—7th International Conference on System Simulation and Scientific Computing. Beijing: IEEE, 2008: 322-327.

[6] Gong C, McNally D. A methodology for automated trajectory prediction analysis[C]// AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Providence, RI: AIAA, 2004:1-14.

[7] Slattery R A, Zhao Yiyuan. En-route descent trajectory synthesis for air traffic control automation [C]// Proceedings of the American Control Conference. Seattle: IEEE, 1995: 3430-3434.

[8] Slattery R A. Terminal area trajectory synthesis for air traffic control automation[C]//Proceedings of the American Control Conference. Seattle: IEEE, 1995: 1206-1210.

[9] Prevot T, Leei P, Smith N, et al. ATC technologies for controller-managed and autonomous flight operations[C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. San Francisco: AIAA, 2005:1-43.

[10] Robinson J E, Isaacson D R. Development of a closed-loop testing method for a next-generation terminal area automation system[C]// Proceedings of the American Control Conference. Anchorage, AK: IEEE, 2002: 1325-1330.

[11] 吴树范,郭锁凤. 基于四维导引的飞机纵向飞行剖面的解算与综合[J]. 航空学报,1993,14(5):A261-A268.
Wu Shufan, Guo Suofeng. Synthesis of aircraft vertical flight profile based on four-dimensional guidance in terminal airspace [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1993,14(5):A261-A268.

[12] Schuster W, Ochieng W, Porretta M. High-performance trajectory prediction for civil air craft[C]// 29th Digital Avionics Systems Conference. Salt Lake City: IEEE, 2010: 1. C. 3-1-1. C. 3-9.

[13] David R, Alla H. On hybrid Petri nets[J]. Discrete Event Dynamic Systems, 2001,11(1):9-40.

[14] Demongodin I, Koussoulas N T. Differential Petri nets: Representing continuous systems in a discrete-event world [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1998,43(4):573-579.

