

航班延误波及链的有色出现网模型

王珊珊¹ 王建东¹ 丁建立²

(南京航空航天大学信息科学与技术学院 南京 210016)¹

(中国民航大学计算机科学与技术学院 天津 300300)²

摘要 针对基本 Petri 网的出现网在描述有色 Petri 网动态行为时的局限性,在基本出现网的基础上定义了一种扩展的出现网,即有色出现网,直观地反映了有色 Petri 网系统中资源流动及变化之间的顺序和并发关系,也大大减小了图形的复杂程度。同时,将有色 Petri 网和这种有色出现网应用于航班延误波及链的建模中,反映了航班执行时所需的多种资源的分布及流动情况,描述了航班在执行过程中与机场之间的相互影响及延误的链式波及反应。

关键词 Petri 网,有色 Petri 网,出现网,航班延误

Colored Occurrence Net Model of Flight Delay Propagation Chain

WANG Shan-shan¹ WANG Jian-dong¹ DING Jian-li²

(College of Information Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)¹

(College of Computer Science and Technology, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)²

Abstract An extended occurrence net, colored occurrence net, was defined to overcome the shortcoming of traditional occurrence net for describing the dynamic behaviors of colored Petri net. The colored occurrence net can reflect the sequential and concurrent relationship of the transitions of colored Petri net system compactly. Besides, colored Petri net and colored occurrence net were applied to model the delay propagation in civil aviation networks, illustrating the distribution and movement of the network resources, and describing the interrelation between flights and airports in flight operating processes and the propagation chain of flight delays.

Keywords Petri net, Colored Petri net, Occurrence net, Flight delay

1 引言

Petri 网是一种适合描述异步并发系统的图形工具和数学工具,具有直观的图形表示和严密的数学基础。它从两个层面上对并发系统的行为进行充分描述,不仅直接展现了物理结构层次及资源状态的初始分布情况,而且在 Petri 网引发规则的作用下间接展现出该并发系统的动态行为机理。Petri 网提供的系统信息丰富,分析深刻,多用在并行、异步等问题上的研究。出现网作为 Petri 网系统行为刻画的一种手段,客观地记录了系统中变迁的发生和引起的状态改变,能够在如实反映资源流动情况的同时,直观反映系统变迁之间的顺序关系和并发关系。

由于传统 P/T 网系统表示能力较弱,稍微复杂一点的系统就要用到大量的库所和变迁,使得 Petri 网图形往往难以理解和掌握。有色 Petri 网的引入很好地解决了这一难题,它用抽象的方法把“同类”功能的库所和变迁合并,大大减少了库所和变迁的个数。但当前刻画有色 Petri 网系统行为时,以传统的出现网为工具仍会面临图形较为复杂难懂这一问题。本文以出现网为基础,提出了一种更适合描述有色 Petri 网行为的扩展的出现网,称为有色出现网,用以简洁地刻画有色 Petri

网系统的行为;同时以有色 Petri 网为基础建立航班延误波及链的模型,并通过这种有色出现网清晰地反映出各航班和机场之间的延误波及关系,以便及时进行预警处理。

2 Petri 网的基本理论

2.1 Petri 网定义

定义 2.1 四元式 $PN=(P, T; F, M_0)$ 称作 Petri 网^[1] (PN) 当且仅当:

- (1) $N=(P, T; F)$ 是一个网;
- (2) $M: P \rightarrow Z$ (非负整数集) 为标识函数,其中 M_0 是初始标识;
- (3) 引发规则: a) 变迁 $t \in T$ 当且仅当: $\forall p \in \cdot t: M(p) \geq 1$, 记作 $M[t >$; b) 在 M 下是使能的变迁 t 可以引发得到后继表示 M' , 则

$$M'(p) = \begin{cases} M(p) + 1, & p \in t \cdot - \cdot t \\ M(p) - 1, & p \in \cdot t - t \cdot \\ M(p), & \text{其他} \end{cases} \text{ 记作 } M[t > M'.$$

2.2 有色 Petri 网

Petri 网作为一种用图形表示的数学模型,直观、易懂且易用,对描述和分析并发现象有独到之处。但对复杂的过程

到稿日期:2008-04-01 本文受国家高技术研究发展(863)计划(2006AA12A106)资助。

王珊珊 硕士研究生,研究方向为机器学习与知识工程, E-mail: wangshanshanfly@sohu.com; 王建东 教授, 博导, 研究方向为数据挖掘、机器学习与知识工程、人工智能; 丁建立 教授, 博士, 主要研究方向为智能仿生算法、智能决策、信息安全。

建模时,需要使用大量的库所和变迁,使得网图难以让人理解和掌握。为了建模的需要,将经典 Petri 网的托肯赋予一定的颜色以代表不同的事物,形成了有色 Petri 网。有色 Petri 网大大减少了库所和变迁的数目,应用也更加广泛。

定义 2.2 七元式 $(P, T; F, C, I_-, I_+, M_0)$ 称作有色网^[2] (CPN) 当且仅当:

(1) $(P, T; F)$ 为有向网,称为基网;

(2) $C: P \cup T \rightarrow \varphi(D)$, $\varphi(D)$ 为颜色集 D 的幂集合,使得对 $\forall p \in P, C(p)$ 是库所 p 上可能的托肯色(资源类)之集合,对 $\forall t \in T, C(t)$ 是变迁 t 上可能的出现色之集合;

(3) I_- 和 I_+ 分别是 $P \times T$ 上的负函数和正函数,使得对所有 $(p, t) \in P \times T$:

$I_-(p, t) \in [C(t)_{MS} \rightarrow C(p)_{MS}]_L$, 且 $I_-(p, t) = 0$ 当且仅当 $(p, t) \notin F$;

$I_+(p, t) \in [C(t)_{MS} \rightarrow C(p)_{MS}]_L$, 且 $I_+(p, t) = 0$ 当且仅当 $(t, p) \notin F$;

其中,从非空集合 S 到非负整数集的函数叫作 S 上的多重集。多重集中允许同一元素出现多次, S_{MS} 表示集合 S 上所有有限多重集组成的集合。 $[S \rightarrow R]_L$ 表示集合 S 到集合 R 的所有线性函数的集合。

(4) $M_0: P \rightarrow D_{MS}$, 称为初始标识,必须满足对 $\forall p \in P: M_0(p) \in C(p)_{MS}$ 。

2.3 出现网

对于系统中变迁的发生和引起的状态改变进行客观记录和分析是 Petri 网的一种分析手段。尽管变迁的发生具有同时或先后的关系,但网论不用全局时间轴做观察记录。网论认为,系统中每个资源自身的发展痕迹成一条线,而这在时间上是全序的。两个资源的两条轨迹线是两个时间系统,只有当它们相交时,即两个资源共同参与同一变化时,两个时间系统才是“同时”的。网论的这一思想就是以出现网为模型来实现的。

尽管每类资源都可用于多个变迁(即允许 $|s^*| > 1$),也可由多个变迁产生(即允许 $|s| > 1$),但每个具体资源的每次消耗或产生只能由一次变迁来完成。初始资源不由系统变迁产生,未消耗资源也不被系统变迁使用,由此得到基本网的出现网的定义。

定义 2.3 $(B, E; F)$ 称作出现网^[2,3] 的条件是:

$$Net(B, E; F) \wedge \forall p \in P: (|s^* p| \leq 1 \wedge |p^*| \leq 1) \wedge F^+ \cap (F^{-1})^+ = \phi$$

其中 $Net(B, E; F)$ 要求 $(B, E; F)$ 为有向网,第二项要求每个 S 元至多有一个输入和输出。初始资源不由系统变迁产生,未消耗资源也不被系统变迁使用,故出现网中允许 $|s^*| = 0$ 及 $|s| = 0$ 。第三项要求网 $(B, E; F)$ 中不含有向圈,即从一个节点 $x(P \cup T$ 中元素)沿 F 中有向弧到达任何另一节点 y ,就不可能从 x 沿 F^{-1} 的有向弧(即 F 中有向弧的反向弧)也到达 y 。

出现网的元素(变迁和库所元素)构成一个偏序集。若把有向弧的方向看作时间流动方向,那么出现网给出的是偏序时间。偏序集中没有顺序关系的两个元素是并发的。偏序集中每个最大全序子集代表某一资源的活动轨迹,两条轨迹的交点代表两个资源共同参与的同一变化。由此可见,出现网可以直观地反映出系统中资源的分配和流动情况,以及变迁

发生的顺序和并发关系,对系统的实际行为有着客观的反映。

3 有色出现网

在传统出现网中,每个库所最多只允许含有一个托肯,我们称之为基本出现网。而有色网系统作为一种常用的高级网系统,一个库所可能含有多个托肯,一个变迁的发生可能同时需要多个个性托肯的参与。目前对有色 Petri 网的行为进行描述时仍以基本出现网为基础,使得在刻画这类高级网系统的动态行为时,图形因为有较强的库所和变迁而较为复杂难懂。因此,本文对基本出现网进行扩展,使其可以直观而简洁地应用于有色 Petri 网的行为描述,且不改变网中原有的个性托肯和变迁,直观而简洁地反映有色 Petri 网中各类资源的分布和流动情况,以及变迁发生的顺序和并发关系,这种扩展的出现网我们称为有色出现网。

3.1 有色出现网的定义

有色 Petri 网中,尽管每类资源都可以用于多个变迁,也可由多个变迁产生,多类资源也可以以“或”的方式用于一次变迁,但每个具体资源的每次消耗或产生只能由一次变迁来完成,一次变迁只能消耗特定的一类资源或多类资源的组合。由于有色 Petri 网中每个托肯对应一种颜色,下面给出颜色的前集和后集的定义。

定义 3.1 对 $\forall p \in P, c \in C(p)$ 为 p 中某一托肯色,则

(1) $c^* = \{t \mid (t, p) \in F \wedge c \in C(t)\}$ 称为颜色 c 的前集(或输入);

(2) $c^* = \{t \mid (p, t) \in F \wedge c \in C(t)\}$ 称为颜色 c 的后集(或输出)。

定义 3.2 $(P, T; F, C, I_-, I_+, M_0)$ 称为有色出现网的条件是:

$$Net(P, T; F, C, I_-, I_+, M_0) \wedge \forall p \in P, c \in C(p): (|c^*| \leq 1 \wedge |c^*| \leq 1) \wedge F^+ \cap (F^{-1})^+ = \phi$$

其中 $Net(P, T; F, C, I_-, I_+, M_0)$ 要求 $(P, T; F, C, I_-, I_+, M_0)$ 是有色 Petri 网。由于每个托肯对应一种颜色,故第二项要求每个有色托肯有至多一个输入和至多一个输出。初始资源不由系统产生,未消耗资源也不被变迁使用,所以有色出现网中允许出现 $|c^*| = 0$ 及 $|c^*| = 0$ 。项 $F^+ \cap (F^{-1})^+ = \phi$ 中, $F^+ = F \cup F \cdot F \cup F \cdot F \cdot F \cup \dots$, $F^{-1} = \{(x, y) \mid (y, x) \in F\}$, $(F^{-1})^+ = F^{-1} \cup F^{-1} \cdot F^{-1} \cup F^{-1} \cdot F^{-1} \cdot F^{-1} \cup \dots$, 要求网 $(P, T; F, C, I_-, I_+, M_0)$ 中不含有向圈,即从一个节点 $x(P \cup T$ 中元素)沿 F 中有向弧到达任何另一节点 y ,就不可能从 x 沿 F^{-1} 的有向弧(即 F 中有向弧的反向弧)也到达 y 。

3.2 有色出现网与基本出现网的等价性

有色 Petri 网系统作为高级网系统的一种,我们把其中满足条件:对任何 $p \in P, t \in T, |C(p)| = |C(t)| = 1$ 的高级网系统称为最低网系统。由于 P/T 网系统可以看作托肯和变迁只有一种颜色的特殊高级网系统,所以 P/T 网系统是一种最低网系统,由此得到的基本出现网也是一种最低网系统。

令 $\bar{P} = \{ \langle p, c \rangle \mid p \in P, c \in C(p) \}$, $\bar{T} = \{ \langle t, c \rangle \mid t \in T, c \in C(t) \}$, 则 $I_-, I_+; \bar{P} \times \bar{T} \rightarrow N^{\mathbb{N}^4}$ 。

我们用有色 Petri 网的概念如下定义两个高级网系统的等价性。

定义 3.3 设有两个高级网系统:

$$N_1 = (P_1, T_1; F_1, C_1, I_1^-, I_1^+, M_0^1), N_2 = (P_2, T_2; F_2,$$

C_2, I_-, I_+, M_0^2),

如果满足下述条件,则称 N_1 和 N_2 等价。

(1) 在 $\overline{P_1}$ 和 $\overline{P_2}$ 之间有一一对应关系 σ_p ;

(2) 在 $\overline{T_1}$ 和 $\overline{T_2}$ 之间有一一对应关系 σ_t ;

(3) 对任何 $\overline{p_1} \in \overline{P_1}, \overline{t_1} \in \overline{T_1}, \overline{p_2} \in \overline{P_2}, \overline{t_2} \in \overline{T_2}$,

若 $\sigma_p(\overline{p_1}) = \overline{p_2}, \sigma_t(\overline{t_1}) = \overline{t_2}$, 则 $I_-^{-1}(\overline{p_1}, \overline{t_1}) = I_-^{-2}(\overline{p_2}, \overline{t_2})$,

$I_+^{-1}(\overline{p_1}, \overline{t_1}) = I_+^{-2}(\overline{p_2}, \overline{t_2})$;

(4) 对任何 $\overline{p_1} \in \overline{P_1}, \overline{p_2} \in \overline{P_2}$, 若 $\sigma_p(\overline{p_1}) = \overline{p_2}$, 则 $M_0^1(\overline{p_1}) = M_0^2(\overline{p_2})$ 。

容易证明这样定义的等价关系满足自反性、对称性和传递性,也反映了 Petri 网系统最基本的动态特征的等价^[5]。

由于基本出现网系统可看作托肯和变迁只有一种颜色的高级网系统,可将其表示成最低网系统的形式。设存在有色网 $(P', T'; F', C', I_-, I_+, M_0')$, 刻画其行为的基本出现网系统 $(P, T; F, C, I_-, I_+, M_0)$, 其中 $(|C(p)| = |C(t)| = 1)$ 。我们在出现网的库所和变迁元素的集合上分别定义如下两个关系:

$$R_p = \{ \langle p_1, p_2 \rangle \mid p_1, p_2 \in P, p' \in P' \wedge C(p_1), C(p_2) \in C(p') \wedge C(\cdot p_1), C(\cdot p_2) \in C(\cdot p') \wedge C(p_1'), C(\cdot p_2) \in C(p') \}$$

$$R_t = \{ \langle t_1, t_2 \rangle \mid t_1, t_2 \in T, t' \in T' \wedge C(t_1), C(t_2) \in C(t') \wedge C(\cdot t_1), C(\cdot t_2) \in C(\cdot t') \wedge C(t_1'), C(t_2') \in C(t') \}$$

从上述定义的关系可以看出,基本出现网中由有色网同一库所转化而来的那些库所被合并为一类,由有色网中同一变迁转化而来的那些变迁被合并为一类,并且在由 P, T 得到的子集族 π_1, π_2 中, $\pi_1(\pi_2)$ 不含空集,其中任意两元素不交,所有元素并集等于 $P(T)$, 根据集合划分的定义,在 R_p, R_t 关系下得到的 π_1, π_2 即为 P, T 的一个划分。

定理 3.1 有色 Petri 网的任何一个基本出现网系统,对其 P, T 元素分别按以上 R_p, R_t 关系得到划分 P_1, T_1 , 都可构造与其等价的以 P_1, T_1 为库所集和变迁集的高级网系统。

证明: 设 $N = (P, T, C, I_-, I_+, M_0)$ 是一个有色 Petri 网系统, $N' = (P', T'; F', C', I_-, I_+, M_0')$ 是对其进行客观行为描述的一个基本出现网系统, P_1, T_1 为 N' 中 P', T' 的划分。我们按以下方法构造一个与 N' 等价的高级网系统 $N'' = (P'', T''; F'', C'', I_-, I_+, M_0'')$:

(1) $P'' = P_1, T'' = T_1$;

(2) $\forall p'' \in P'', C''(p'') = \{ p' \mid p' \in p'' \}, \forall t'' \in T'', C''(t'') = \{ t' \mid t' \in t'' \}$;

(3) 由于 N' 是一个最低网系统,所以 $\overline{P'}$ 与 $P', \overline{T'}$ 与 T' 均一一对应。对每个 $\overline{p''} \in \overline{P''}$, 定义 $\sigma_p: \overline{P'} \rightarrow \overline{P'}$, $\sigma_p(\overline{p''}) = \langle \text{pro}_2(\overline{p''}), \sim \rangle$, 对每个 $\overline{t''} \in \overline{T''}$, 定义 $\sigma_t: \overline{T'} \rightarrow \overline{T'}$, $\sigma_t(\overline{t''}) = \langle \text{pro}_2(\overline{t''}), \sim \rangle$, 其中, $\text{pro}_2(\langle x, y \rangle) = y$;

(4) 对 $\forall \overline{p''} \in \overline{P''}, \overline{t''} \in \overline{T''}$, 令 $I_-''(\overline{p''}, \overline{t''}) = I_-'(\sigma_p(\overline{p''}), \sigma_t(\overline{t''}))$, $I_+''(\overline{p''}, \overline{t''}) = I_+'(\sigma_p(\overline{p''}), \sigma_t(\overline{t''}))$;

(5) 对 $\forall \overline{p''} \in \overline{P''}$, 令 $M_0'' = (\overline{p''}) = M_0'(\sigma_p(\overline{p''}))$ 。

显然,由定义 3.3 可知 N' 与 N'' 是等价的^[6]。

可以看出,对有色 Petri 网进行行为描述的任一基本出现网(最低网系统),都存在一个高级网系统与其等价,即有色出现网定义下的高级网系统,并且在这种定义下可由有色 Petri

网直接构造出其有色出现网,图形也更直观简洁。基本出现网可以看作有色出现网的一种特殊情况,即各库所最多只有一个托肯,各变迁也只有一种出现色。

4 有色 Petri 网及其出现网在航班延误中的应用

4.1 基于有色 Petri 网的航班延误波及链模型

民用航空交通是当今社会交通系统的重要组成部分,极大地方便了旅客,缓解了路面交通。但航空交通的特殊性也引起了由航班延误所带来的恶劣影响,航班延误已成为困扰航空公司和旅客的世界性难题。引起航班延误的因素有很多,如天气、空中交通管制、机场保障、旅客等。针对目前大多数航空公司把工作重点放在延误后如何处理的现状,我们建立一种反映航班延误的链式波及反应的模型,用来对航班延误进行预警和采取对策。

由于机场和航空公司对有限飞行资源的安排,一架飞机在一天中可能要执行多个航班,各航班之间存在前后衔接关系。同时,航班执行时所使用的机组可能成为另一架航班执行所需的机组资源。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。在引起航班延误的诸多因素中,飞机和机组资源是航班执行最重要的资源,也是造成延误波及的主要因素^[7,8]。同时,这两者也是利用代价最为昂贵的两类资源。因此,本文结合飞机和机组两个方面,建立基于有色 Petri 网的航班延误波及链模型,描述由这两种关键资源所引起的航班延误的链式波及情况。

库所 P 表示机场名,变迁 T 表示执行一架航班,托肯 a_i, c_i 既对应飞机和机组,也对应相应的颜色,表示当前机场所提供的飞机和机组资源,两种资源可以机场自己提供,也可以来源于其他机场,此处不作详细讨论。显然, $P \cup T \neq \phi, P \cap T = \phi$ 。 (p, t) 表示航班 t 从机场 p 离港; (t, p) 表示航班 t 抵达机场 p 。变迁上的标识表示执行该航班时所使用的飞机和机组。

定义 $\Sigma = (P, T; F, C, I_-, I_+, M_0)$ 为航班延误波及链模型:

(1) $(P, T; F)$ 为基本网;

(2) $D = \{ a_i \cup c_i, i = 1, 2, 3, \dots \}$, 每架飞机对应颜色 a_i , 每个机组对应颜色 c_i , $C: P \cup T \rightarrow \varphi(D)$, $\varphi(D)$ 为颜色集 D 的幂集合, 对 $\forall p \in P, C(p)$ 是库所 p 上可能的托肯色(资源类)之集合, 对 $\forall t \in T, C(t)$ 是变迁 t 上可能的出现色之集合;

(3) I_- 和 I_+ 分别是 $P \times T$ 上的负函数和正函数,使得对所有 $(p, t) \in P \times T$:

$I_-(p, t) \in [C(t)_{MS} \rightarrow C(p)_{MS}]_{\perp}$, 且 $I_-(p, t) = 0$ 当且仅当 $(p, t) \notin F$;

$I_+(p, t) \in [C(t)_{MS} \rightarrow C(p)_{MS}]_{\perp}$, 且 $I_+(p, t) = 0$ 当且仅当 $(t, p) \notin F$;

(4) $M_0: P \rightarrow D_{MS}, \forall p \in P: M_0(p) \in C(p)_{MS}$ 。

分析某一天内由初始航班 t_1 所引起的延误波及: 初始航班 t_1 从机场 p_1 起飞, 到达机场 p_2 , 使用飞机 a_1 和机组 c_1 ; 在机场 p_2 , 飞机和机组分离, c_1 和 a_1 分别与 p_2 机场的 a_2 和 c_2 组合执行各自的后续航班 t_2, t_3 , 并到达机场 p_3, p_4 ; 在机场 p_3 , 机组 c_1 结束任务, a_2 和 p_3 机场的 c_3 结合执行航班 t_4 到达机场 p_5 ; 而在机场 p_4 , 机组 c_2 结束任务, a_1 和 p_4 机场的 c_4 结合执行航班 t_5 到达机场 p_6 ; 在机场 p_5 , 飞机和机组不分

离,短暂停留后继续执行航班 t_6 , 到达机场 p_1 。在到达 p_1 之后由同一飞机机组执行航班 t_7 , 到达机场 p_7 , 至此结束当天任务。

图 1 所示的 t_m, t_n 为两类特殊变迁, 表示标识的资源结束当天任务, 并将于以后执行飞行任务, 目的地暂时未知, 用 p_m, p_n 保存托肯。航班的执行顺序和使用资源如图所示, 每架航班的执行都需要使用前一架航班的某一资源, 前一架航班的延误, 必然使后续航班的执行受到影响。图中展现了初始航班 t_1 的机组和飞机两种资源对后续航班的影响范围, 而 $(p_1)t_1(p_2)t_3(p_4)t_5(p_6)$ 则反映了飞机 a_1 在单机执行多航班时产生的链式波及延误情况。

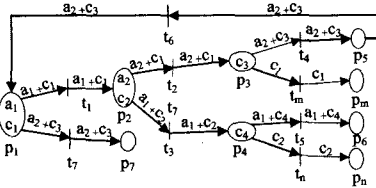


图 1 基于 CPN 的航班延误波及链模型

4.2 有色出现网的应用模型

为观察航班执行的先后顺序和并发情况, 以及某架航班的延误对后续航班的影响, 我们对上述模型进行动态行为的描述, 以出现网的形式反映由一架航班的延误带来的影响。

以 t_1 作为初始变迁为例, 得到图 2 所示的一个有色出现网, 该出现网反映了一天內 t_1 所使用的资源对后续航班的全部影响。其中 $(p_1)t_1(p_2)t_3(p_4)t_5(p_6)$ 则反映了初始飞机 a_1 在单机执行多航班的情况下其延误将对下游航班产生的影响。

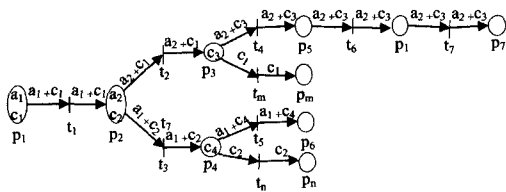


图 2 航班延误波及链模型的一个有色出现网

我们把有向弧的方向看作时间流动方向, 该出现网给出的是偏序时间。网中没有顺序关系的两架航班是并发的。这种有色出现网直观地反映了机组和飞机资源的分配和流动情况, 航班执行的顺序和并发关系, 以及一架航班的延误对其他航班的影响, 客观地反映了航班执行过程中的相互关系和延

误波及情况。

这种有色出现网不仅保留了有色 Petri 网的优点, 清楚地反映了飞机和机组资源的出处、流动情况和航班的执行细况, 也遵循了网论在时间系统上的观点, 使航班执行的先后和并发顺序一目了然, 避免了因大量库所和变迁给 Petri 网模型的描述和理解带来的复杂性。

结束语 有色 Petri 网作为描述异步并发系统的一种高级网系统, 图形简洁但函数关系复杂。用出现网对其动态行为进行刻画, 可以清楚地展现各种资源的分布和流动情况, 以及各个变迁的顺序和并发关系。鉴于基本出现网在描述高级网系统时带来的图形复杂性, 本文在基本出现网的基础上提出了一种有色出现网, 对库所容量和托肯、变迁的颜色进行扩充, 使之更适合直观简洁地记录有色 Petri 网这种高级网系统的客观行为。本文利用有色 Petri 网对航班延误的链式波及情况进行建模, 并构造了它的一个有色出现网, 简洁而清晰地展现了各航班执行时所需的资源在机场的分布和流动情况, 以及一架航班的执行情况对后续航班的链式影响, 同时, 出现网提供的偏序时间关系也使得各航班执行的顺序和并发关系一目了然。可见, 这种有色出现网能够对基于有色 Petri 网的模型进行更加简洁和直观的行为记录。

参考文献

- [1] 蒋昌俊. Petri 网的行为理论及其应用. 第一版. 北京: 高等教育出版社, 2003: 19-21
- [2] 袁崇义. Petri 网原理与应用. 第一版. 北京: 电子工业出版社, 2005: 97-103
- [3] Lomazova I. On Occurrence Net Semantics for Petri Nets with Contacts. *Fundamentals of Computation Theory*, 1997, 1279: 317-328
- [4] Kurt J. Colored Petri Nets and The Invariant-method. *Theoretical Computer Science*, 1981, 14: 317-336
- [5] 唐培和. 着色网到基本网的等价变换. *广西工学院学报*, 1995, 6(3): 53-57
- [6] 郝克刚, 葛玮. 论高级 Petri 网系统的等价谱系. *计算机学报*, 1993, 16(7): 553-558
- [7] Schaefer L, Wojcik L. Flight Connections and Their Impacts on Delay Propagation// *Digital Avionics Systems Conference*. 2003, 1: 5. B. 4-5. 1-9
- [8] Ahmad B S, Cphn A, Guan Yihan. Analysis of the Potential for Delay Propagation in Passenger Aviation Flight Networks. *Sloan Industry Studies Working Papers*, WP-2007-11. 2007
- [9] Vogts K, Pope N. Generating compact rough cluster descriptions using an evolutionary algorithm// *Proceedings of the 6th Annual Genetic and Evolutionary Computation Conference*. Heidelberg, Germany; Springer Verlag, 2004: 1332-1333
- [10] Voges K E, Pope N K, Brown M R. Heuristics and Optimization for Knowledge Discovery. chapter Cluster Analysis of Marketing Data Examining On-Line Shipping Orientation: A Comparison of k-Means and Rough Clustering Approaches. Hershey PA: Idea Group Publishing, 2002: 207-224
- [11] 涂文燕, 李德毅. 一种基于数据场的层次聚类方法. *电子学报*, 2006(2): 68-72
- [12] Xie Feng, Bai Shou. Detecting Novel Network Attacks with a Data Field. *Springer Berlin, Heidelberg*, Volume 3917. 2006: 66-72
- [13] Sheng Weiguo, Liu Xiaohui. A genetic k-medoids clustering algorithm. *Journal of Heuristics*, 2006, 12: 447-466
- [14] Davies D L, Bouldin D W. A cluster separation measure. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1979, 1: 224-227
- [15] Mitra S, Banka H, Pedrycz W. Collaborative Rough Clustering. *Rough Sets, Case-Based Reasoning and Knowledge Discovery*, 2005, 3776: 768-773
- [16] Peters G, Lampart M. A Partitive Rough Clustering Algorithm. *Rough Sets and Current Trends in Computing*, 2006, 4259: 657-666