

基于带抑制弧的 Petri 网描述的嵌入式系统模型组合与性质分析

夏传良 王壮壮 郭脉波

(山东建筑大学计算机科学与技术学院 山东 济南 250101)

摘要 为了有效满足嵌入式系统的建模需求,提出基于带抑制弧的 Petri 网描述的嵌入式系统模型(PIRES + 网)。当采用 PIRES + 网对大规模复杂嵌入式系统进行建模时,会遇到“状态空间爆炸”问题,为了有效缓解该问题,提出 PIRES + 网的两种组合方法;就组合网对活性和有界性的保持问题进行研究,最后以移动终端网络通信系统的建模和分析为例,表明了所提组合方法的有效性。

关键词 Petri 网 系统建模 抑制弧 组合 活性

中图分类号 TP3

文献标志码 A

DOI:10.3969/j.issn.1000-386x.2024.09.040

SYNTHESIS AND PROPERTY ANALYSIS OF EMBEDDED SYSTEM MODEL BASED ON PETRI NET WITH INHIBITION ARCS

Xia Chuanliang Wang Zhuangzhuang Guo Maibo

(School of Computer Science and Technology, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, Shandong, China)

Abstract In order to meet the modeling requirements of embedded system effectively, the embedded system model based on Petri net with inhibition arcs is proposed. However, the PIRES + encountered the "state space explosion" problem when modeling the large-scale complex embedded systems. In order to effectively alleviate this problem, this paper proposed two kinds of synthesis methods of PIRES +, and the preservation of liveness and boundedness of the synthesis net were investigated. The modeling and analysis of the network communication system of a mobile terminal was taken as an example to show the effectiveness of the proposed synthesis methods.

Keywords Petri net System modeling Inhibition arcs Synthesis Liveness

0 引言

嵌入式系统在 5G 芯片、移动通信、汽车电子、智能家居、工业物联网等多个领域得到广泛应用,其地位也变得越来越重要,对嵌入式系统的可靠性、正确性、实时性提出了更高的要求^[1],迫切需要一套规范的形式化建模分析方法来满足嵌入式系统优化设计的需求。

国内外使用较多的形式化建模方法主要包括:有限自动机方法、数据流图方法^[2]、通信进程方法^[3]、Petri 网方法^[4]、实体-关系图方法和面向对象的 UML 方法等。这些形式化建模方法从不同的侧面描述嵌入式系统的特征,并没形成统一的标准。相比较而言,

Petri 网方法具有形式化的数学定义和严格规范的推导规则,是一种比较完善的形式化建模方法。

一般 Petri 网可以对具有并发、冲突和不确定性等特点的系统进行描述,但是在嵌入式系统建模中存在以下不足:一般 Petri 网没有层次结构,没有考虑时间因素和对数据流的描述能力有限。为了克服一般 Petri 网在嵌入式系统建模中的缺点,国内外学者研究并提出了多种 Petri 网扩展形式,如着色 Petri 网^[5]、时间 Petri 网、混杂 Petri 网、面向对象 Petri 网、PRES + 网^[6]等,这些 Petri 网扩展形式从不同应用需求出发,提高了对嵌入式系统进行建模和分析的能力。其中 PRES + 网(Petri net based Representation for Embedded Systems)不仅继承了一般 Petri 网的优点,而且具有层次结构和对数据流的分析能力,通过变迁上附着的时滞和 token

中的时间戳可以捕获实时特征,适合描述嵌入式系统。

关于 PRES + 网理论和应用研究方面,Cortés 等^[6]给出了 PRES + 网的概念。Karlsson 等^[7]对一个移动手机系统采用 PRES + 网进行了精确建模和验证。Bandyopadhyay 等^[8]对于 PRES + 网的后继标识,给出了一个形式化定义。Xia 等^[9]提出了两个 PRES + 网具有相同可达性、功能性和实时性的概念,还对资源共享嵌入式系统进行了建模和分析^[10]。

PRES + 网可以在不同层次上表示嵌入式系统,可以捕获嵌入式系统的实时信息,还可以对系统的非确定性进行描述。但是该模型无法描述事件的优先顺序,不能充分表达复杂的数据流和控制流。

在 Petri 网中加入抑制弧,可以提高 Petri 网的建模能力,得到带抑制弧的 Petri 网^[11],带抑制弧的 Petri 网不仅具备零检测能力还能模拟任意的随机存取机。抑制弧可以用来控制变迁的发生顺序,描述事件之间的优先关系。在使用 PRES + 为嵌入式系统建模时,某些变迁在特定条件下,具有先后发生的关系,对数据流和控制流的表达产生影响,因此为了提高 PRES + 网的建模和分析能力,在 PRES + 网中加入抑制弧,得到基于带抑制弧的 Petri 网描述的嵌入式系统模型 PIREs + 网(Petri net with Inhibitor arcs based Representation for Embedded Systems),PIRES + 将有效满足嵌入式系统中对任务优先级要求的建模需求。

但是在运用 PIREs + 网为大规模复杂的嵌入式系统建模时,PIRES + 网中库所、变迁和令牌数量的增长会导致可达标识数呈指数增长,进而导致“状态空间爆炸”问题,这严重影响了 PIREs + 的建模和分析能力。“状态空间爆炸”问题是 NP-难的,没有办法彻底解决,但是可以通过性质保持变换得到缓解。

在文献中,许多学者运用 Petri 网变换方法来解决“状态空间爆炸”爆炸问题。Petri 网的三种常用的变换方法分别是细化^[12-14]、化简^[15-17]和组合^[18-23]。

Petri 网组合操作方法由于具有支持集成建模和降低分析复杂度等方面的优势,一直受到理论界和工业界的高度关注。组合操作方面,对于有界自由选择网的组合^[18]、Petri 网类组合算法^[19]、一般 Petri 网共享子网组合对动态和结构性质的保持^[20-21]、监督器组合^[22]、Web 服务组合^[23]等方面进行了研究。对于 PRES + 网,Xia 等^[9]提出了一种组合操作方法,并对该组合操作对原网的活性和有界性的保持问题进行了研究,并应用于嵌入式控制系统的组合建模和分析。

为了缓解 PIREs + 网状态空间爆炸问题,实现对复杂嵌入式系统的建模和分析,首先论文提出了 PIREs + 网共享变迁集组合方法,并对该组合操作对活性和有

界性的保持问题进行了分析。然后给出了共享变迁型子网组合方法,并采用由 PIREs + 网“抽象化”到“精细化”的描述方法,借助共享变迁集组合方法,对相关性质保持问题进行了研究。最后将组合方法应用于移动终端网络通信系统的建模和分析,以表明所提方法的可行性和有效性。

1 相关概念

在本节中,首先介绍 PRES + 网和带抑制弧的 Petri 网,然后给出 PIREs + 网的基本概念。

定义 1 一个 PRES + 网是一个五元组 $N = (P, T, I, O, M_0)$,其中 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ 是一个有限非空库所集合; $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ 是一个有限非空变迁集合; $I \subseteq P \times T$ 是一个有限的非空输入弧集合,它定义了库所和变迁之间的流关系; $O \subseteq T \times P$ 是一个有限的非空输出弧集合,它定义了变迁和库所之间的流关系; M_0 是该网的初始标识, $k = \langle v, r \rangle$ 是一个托肯,其中 v 代表托肯值, r 代表托肯时间。

在 PRES + 网中,对于 $\forall t \in T$,都存在一个与之关联的变迁函数 f 。对于每个变迁 $t \in T$,都存在一个最小变迁时延 d^- 和最大变迁时延 d^+ ,其中 $d^- \geq d^+$ 且都为非负实数,代表变迁函数执行时间的下限和上限。

定义 2 带抑制弧的 Petri 网是一个五元组 $N = (P, T, F, I, M)$,其中 (P, T, F) 代表一个网, M 为网的标识, $I \subseteq P \times T$ 为抑制弧集。

例如,图 1 为一个带抑制弧的 Petri 网,在该图中有两条抑制弧,即 $I = \{(p_4, t_2), (p_5, t_1)\}$ 。在图 1 中,该网的初始标识为 $[2, 0, 0, 1, 0]^T$,在初始标识 M_0 下,对于变迁 t_1 和 t_2 ,都有 $\forall p \in t_i: M(p) \geq 1, i \in \{1, 2\}$ 。但是由于 $M_0(p_4) = 1$ 且 $(p_4, t_2) \in I$,即 t_2 在 M_0 不具有发生权;另一方面,虽然, $t_1 \in I$,但是 $M_0(p_5) = 0$,此时 t_1 在 M_0 具有发生权。

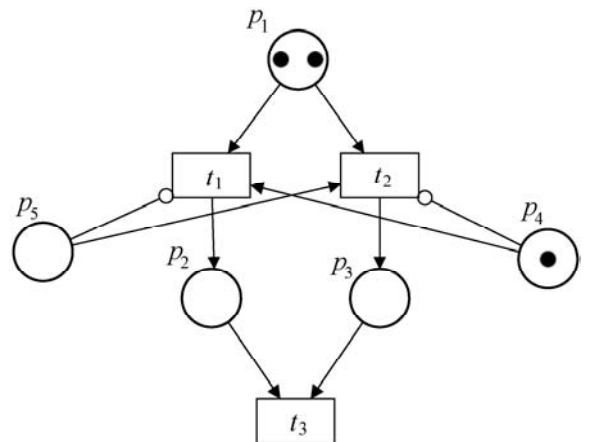


图 1 一个带抑制弧的 Petri 网示例

抑制弧的作用是对具备发生权的变迁是否允许发生起控制作用,前集库所中的标识对变迁t的发生起抑制作用。

在PRES+网中加入抑制弧,得到带抑制弧的PRES+网——PIRES+网。

定义3 一个PIRES+网是一个六元组, $N = (P, T, F_I, F_O, I, M_0)$, 其中 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ 是一个非空的有限库所集合; $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ 是一个非空的有限变迁集合。 $F_I \subseteq P \times T$ 是一个非空的有限输入弧集合, 它定义了库所和变迁之间的流关系。 $F_O \subseteq T \times P$ 是一个有限的非空输出弧集合, 用以定义变迁和库所之间的流关系。 $I \subseteq P \times T$ 为抑制弧集。

图2是一个简单的PIRES+网,在该PIRES+网中, $P = \{p_1, p_2, p_3, p_4\}$, $T = \{t_1, t_2, t_3, t_4\}$, $I = \{(p_2, t_2)\}$, $F_I = \{(p_1, t_1), (p_3, t_2), (p_3, t_3), (p_4, t_4)\}$, $F_O = \{(t_1, p_2), (t_1, p_3), (t_2, p_4), (t_3, p_4), (t_4, p_3)\}$ 。

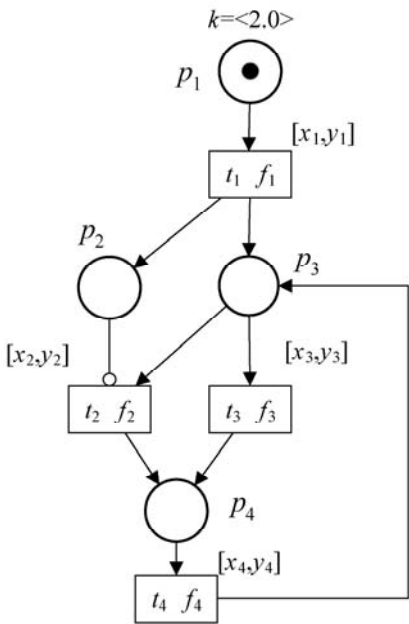


图2 一个PIRES+网示例

定义4 对于 $\forall t \in T$, 都存在一个与之关联的变迁函数 f 。对于每个变迁 $t \in T$, 都存在一个最小变迁时延 d^- 和最大变迁时延 d^+ , 其中 $d^- \leq d^+$ 且都为非负实数, 代表与变迁函数执行时间的下限和上限。 M_0 是该网的初始标识, $k = \langle v, r \rangle$ 是一个托肯, 其中 v 代表托肯值, r 代表托肯时间。

在图2中 f_1, f_2, f_3, f_4 分别为变迁 t_1, t_2, t_3, t_4 的变迁函数, $[x_1, y_1]$ 为变迁 t_1 的变迁时延, 其中 $d^- = x_1, d^+ = y_1$ 。 $M_0(p_2) = M_0(p_3) = M_0(p_4) = \emptyset, M_0(p_1) = \langle 2, 0 \rangle$ 。

定义5 $S = (M_v, J)$ 被称为PIRES+网 $N = (P, T, F_I, F_O, I, M_0)$ 的一个状态, 其中 M_v 为标识 M 在托肯值部分的投影, $J: T \rightarrow R^+ \cup \{\#\}$ (其中 $\#$ 是一个描述不可

用状态的符号) 为标识 M 在托肯时间部分的投影, $S_0 = (M_{i0}, J_0)$, 其中:

$$J_0(t) = \begin{cases} 0 & M_{i0}(p) \geq W(p, t) \quad \forall p \in \cdot t \\ \# & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $W(p, t)$ 是弧 (p, t) 上的权重函数被称为 N 的初始状态。

定义6 假设 $Z = (P, T, F_I, F_O, I)$ 是 $N = (P, T, F_I, F_O, I, M_0)$ 的骨架。 $\Sigma = (Z, S_0)$ (其中 $S_0 = (M_{i0}, J_0)$) 被称为对应于 N 的PIRES+网系统。

定义7 活性: 假设 $\Sigma = (Z, S_0)$ 是一个PIRES+网系统, 对于状态 S , 若:

- 1) 若 $\forall S' (S' \in R_N(S) \rightarrow S'' (S'' \in R_N(S') \wedge S \xrightarrow{t} S''))$

式中: $S \xrightarrow{t}$ 表示为变迁 t 在状态 S 有发生权, 则变迁 t 为活的。

2) $\forall t \in T, t$ 都是活的, 则该网系统 $\Sigma = (Z, S_0)$ 是活的网系统。

定义8 有界性: 假设 $\Sigma = (Z, S_0)$ 是一个PIRES+网系统, S_0 为该系统的初始状态, 若:

- 1) 对于每个状态 $S \in R_N(S_0)$, 都存在一个自然数 $K > 0$ 且 $M_v(p) \leq K$, 则库所 $p \in P$ 是有界的。
- 2) 若 $\forall p \in P$ 都是有界的, 则称该网系统 $\Sigma = (Z, S_0)$ 是有界的。

定义9 设 $\Sigma = (Z, S_0)$ 是一个PIRES+网系统, 若 $T = T_1 \cup T_2$ 且 $T_1 \cap T_2 = \emptyset$, 假设存在 $t_1, t_2 \in T_1$, 变迁序列 $\sigma \in T_2^*, \sigma = \emptyset$, 使得 $t_1 \sigma t_2$ 为 Σ 的一个可引发变迁序列, 则称 (t_1, t_2) 是 Σ 关于 T_1 的可引发变迁序偶。

2 PIRES+网的组合操作及性质分析

在PRES+网中加入抑制弧得到带抑制弧的PRES+网——PIRES+网, 当运用PIRES+网为大规模复杂的嵌入式系统建模时会遇到“状态空间爆炸”问题, 因此本节提出了PIRES+网共享变迁集组合操作和PIRES+共享变迁型子网组合操作, 并对组合后的网系统的主要性质活性和有界性的保持进行了证明。无死锁性是系统建模中的一个十分重要的性质, 它对应着PIRES+网系统的活性。PIRES+网的有界性反映被建模系统运行过程中对有关资源的容量要求。

2.1 PIRES+网共享变迁集

2.1.1 PIRES+网共享变迁集组合操作

本节将给出PIRES+网共享变迁集组合操作, 并对其活性和有界性的保持性进行研究。

定义 10 设 $N_1 = (P_1, T_1, F_{N_1}, F_{O_1}, I_1, M_{1,0})$ 和 $N_2 = (P_2, T_2, F_{N_2}, F_{O_2}, I_2, M_{2,0})$ 为两个 PIREs + 网, $N = (P, T, F_I, F_O, I, M_0)$ 被称为 N_1 和 N_2 的共享变迁集组合网, 当且仅当:

1) $P_1 \cap P_2 = \emptyset, T_1 \cap T_2 = T_m \neq \emptyset$ (T_m 为 N_1 和 N_2 的共享变迁集)。

2) $P = P_1 \cup P_2, T = T_1 \cup T_2, F_I = F_{N_1} \cup F_{N_2}, F_O = F_{O_1} \cup F_{O_2}, I = I_1 \cup I_2,$

$$M_0'(p) = \begin{cases} M_{10}(p) & p \in P_1 \\ M_{20}(p) & p \in P_2 \end{cases} \quad (3)$$

定义 11 若 $T_{s_1} = \{t_{11}, t_{12}, \dots, t_{1k}\}$ 为 N_1 的一个变迁集合, $T_{s_2} = \{t_{21}, t_{22}, \dots, t_{2k}\}$ 为 N_2 的一个变迁集合, 在共享变迁集组合过程中, 满足如下条件:

1) 网 N_1 和网 N_2 中相同类型的变迁集 T_{s_1} 和 T_{s_2} 组合成网 N 中的一个新的变迁集 T_m 。

2) f_{1i} 为 $t_{1i} \in T_{s_1} (1 \leq i \leq k)$ 的功能函数, f_{2i} 为 $t_{2i} \in T_{s_2} (1 \leq i \leq k)$ 的功能函数, 且 $f_{1i} = f_{2i}, f_{mi} = f_{1i} (1 \leq i \leq k)$ 。

3) $[d_{1i}^-, d_{1i}^+]$ 为 $t_{1i} \in T_{s_1} (1 \leq i \leq k)$ 的变迁时延, $[d_{2i}^-, d_{2i}^+]$ 为 $t_{2i} \in T_{s_2} (1 \leq i \leq k)$ 的变迁时延, 且 $[d_{1i}^-, d_{1i}^+] = [d_{2i}^-, d_{2i}^+], [d_{mi}^-, d_{mi}^+] = [d_{1i}^-, d_{1i}^+] (1 \leq i \leq k)$ 。

2.1.2 PIREs + 网共享变迁集组合活性和有界性分析

本节将对组合后的 PIREs + 网系统的活性和有界性的保持性进行分析。

定理 1 假设 PIREs + 网系统 $\Sigma = (Z, S_0)$ 是由活的、有界的 PIREs + 网系统 $\Sigma_1 = (Z_1, S_{10})$ 和 $\Sigma_2 = (Z_2, S_{20})$ 经过共享变迁集组合而得, 则 $\forall t \in T_m, t$ 是活的当且仅当 $\Sigma = (Z, S_0)$ 是活的。

证明 必要性: 因为 $\forall t \in T_m, t$ 是活的, 所以 T_m 是活的。对于 $T - T_m$ 中的每个变迁 t 和 $R_N(S_0)$ 的每个状态 S , 不失一般性, 若 $t \in T_1$, 因为网系统 Σ_1 是活的, 则存在状态 $S(P_1) \in R_N(S')$ (其中 $S(P_1)$ 表示为 S 在 P_1 上的投影) 和 $S(P_1') \in R_N(S | P_1), S(P_1') \xrightarrow{t}, \exists \sigma_1 \in T_1^*, S(P_1) \xrightarrow{\sigma_1, \tau_1} S(P_1')$ 。 $\forall t' \in \sigma_1, t' \notin T_m$, 假定 $S_1 = (S(P_1'), S(P_2))$, 则 $S_1 \in R_N(S)$ 且 $S_1 \xrightarrow{t}$ 。若存在 $t_i \in \sigma_1, t_i \in T_m, T_m$ 和 Σ_2 都是活的, 存在 $\sigma_2 \in T_2^*$ 且 $[d_{mi}^-, d_{mi}^+] = [d_{1i}^-, d_{1i}^+], [d_{1i}^-, d_{1i}^+] = [d_{2i}^-, d_{2i}^+], d_{1ie} = d_{2ie}, d_{mie} = d_{1ie}, d_{1il} = d_{2il}, d_{mil} = d_{1il}, f_{1i} = f_{2i}, f_{mi} = f_{1i}$, 则 $S(P_2) \xrightarrow{\sigma_2, \tau_2} S(P_2')$ 。若 $S_1 = (S(P_1'), S(P_2'))$, 存在 $S_1 \in R_N(S)$, 则 $S_1 \xrightarrow{t}$, 即 Σ 是活的。

充分性: 若 $\Sigma = (Z, S_0)$ 是活的, $T_m \subseteq T$, 则对于 T_m 中的每个变迁 t, t 都是活的。

定理 2 假设 PIREs + 网系统 $\Sigma = (Z, S_0)$ 为由活

的和有界的网系统 $\Sigma_1 = (Z_1, S_{10})$ 和 $\Sigma_2 = (Z_2, S_{20})$ 经过共享变迁集组合所得, $\Sigma_1 = (Z_1, S_{10})$ 和 $\Sigma_2 = (Z_2, S_{20})$ 关于 T_m 具有相同的可引发变迁序偶集, 如果存在 $S_0 \in R_N(S_0), t \in T_m, S \xrightarrow{t}$, 则 $\Sigma = (Z, S_0)$ 为活的有界的 PIREs + 网系统。

证明 因为 $\Sigma_1 = (Z_1, S_{10})$ 和 $\Sigma_2 = (Z_2, S_{20})$ 是活的、有界的 PIREs + 网系统, $T_m = \{t_1, t_2, \dots, t_x\}$ 为共享变迁集合, 假设存在 $\Sigma_1 = (Z_1, S_{10})$ 和 $\Sigma_2 = (Z_2, S_{20})$ 关于 T_m 的可引发变迁序偶集合 $\{(t_1, t_2), (t_2, t_3), \dots, (t_n, t_x)\}$ 。在 $\Sigma_1 = (Z_1, S_{10})$ 中, $\exists S_{11} \in R_N(S_{10}), S_{11} \xrightarrow{t_k}$;

在 $\Sigma_2 = (Z_2, S_{20})$ 中, $\exists S_{21} \in R_N(S_{20}), S_{21} \xrightarrow{t_k}$; 若 $S_0 = (S_0(P_1), S_0(P_2))$, 其中 $S_0(P_1) = S_{11}, S_0(P_2) = S_{21}$ 。对于变迁时延 $[d_{1i}^-, d_{1i}^+] = [d_{2i}^-, d_{2i}^+] = [d_{2i}^-, d_{2i}^+]$, 最早触发时间 $d_{ie} = d_{1ie} = d_{2ie}$, 最晚触发时间 $d_{il} = d_{1il} = d_{2il}$,

变迁函数 $f_i = f_{1i} = f_{2i}$, 则 $S_0 \xrightarrow{t_k}$ 。因为 (t_i, t_j) 是 $\Sigma_1 = (Z_1, S_{10})$ 和 $\Sigma_2 = (Z_2, S_{20})$ 关于 T_m 的可引发变迁序偶,

在 $\Sigma_1 = (Z_1, S_{10})$ 和 $\Sigma_2 = (Z_2, S_{20})$ 中, $\exists \sigma_1 \in (T_1 - T_m)^*, \exists \sigma_2 \in (T_2 - T_m)^*, t_i \sigma_1 t_j, t_i \sigma_2 t_j$ 分别为 $\Sigma_1 = (Z_1, S_{10})$ 和 $\Sigma_2 = (Z_2, S_{20})$ 的可引发变迁序列, 因此变迁时延 $[d_{1j}^-, d_{1j}^+] = [d_{2j}^-, d_{2j}^+] = [d_{2j}^-, d_{2j}^+]$, 最早触发时间 $d_{je} = d_{1je} = d_{2je}$, 最晚触发时间 $d_{jl} = d_{1jl} = d_{2jl}$, 变迁函

数 $f_j = f_{1j} = f_{2j}$, 所以 $\exists S_j \in R_N(S_0), S_j \xrightarrow{t_j}, \{(t_1, t_2), (t_2, t_3), \dots, (t_n, t_x)\}$ 和 (t_x, t_1) 为 $\Sigma_1 = (Z_1, S_{10})$ 和 $\Sigma_2 = (Z_2, S_{20})$ 关于 T_m 的可引发变迁序列, 因此, $\exists M_{ik} \in R_N(M_0), M_{ik} \xrightarrow{t_k}, k = 1, 2, \dots, x$, 则 T_m 为活的。根据定理 1, 得 $\Sigma = (Z, S_0)$ 为活的、有界的网系统。

2.2 PIREs + 网共享变迁型子网

2.2.1 PIREs + 网共享变迁型子网组合操作

本节将给出 PIREs + 网共享变迁型子网组合操作, 并对其活性和有界性的保持性进行研究。

定义 12 设 $N = (P, T, F_I, F_O, I, M_0)$ 是一个 PIREs + 网, 如果满足下列条件, 则称 $N_T = (P_T, T_T, F_{IT}, F_{OT}, I_T, M_{T,0})$ 为网 N 的一个变迁型子网。

1) $P_T \subseteq P, T_T \subseteq T, P_T \neq \emptyset, T_T \neq \emptyset, P_T \cup P_T \subseteq T_T, F_{IT} = F_I \cap (P_T \times T_T), F_{OT} = F_O \cap (T_T \times P_T), I_T \subseteq I$ 。

2) N_T 是连通的, 存在 $t_{in} \in T_T, t_{out} \in T_T$, 其中 t_{in}, t_{out} 分别为 N_T 唯一的输入变迁和输出变迁。

3) 对于 N_T 中的每个变迁 t , 都存在变迁函数 f , 和变迁时延 $[d_i^-, d_i^+]$ ($d^- \leq d^+$)。

假定 1 子网 N_T 满足:

1) 在一个执行过程中, 当且仅当 t_{in} 被触发了, t_{out}

才会被触发。

2) 初始状态时,若子网 N_T 中不存在托肯,则引发结束以后该网中也不存在托肯。

3) $\forall t \in T_T - \{t_{in}, t_{out}\}$, 在 t_{in} 被触发前和 t_{out} 被触发后, t 不处于使能状态。

定义 13 PIRES + 闭网:对于子网 N_T ,从 $\cdot t_{in}$ 到 $t_{out} \cdot$ 增加一个变迁 t_T (其中 $d_{t_T}^- = \max\{d_i^- \mid t \in \cdot(t_{in}) \wedge t \in T'\}$, $d_{t_T}^+ = \min\{d_i^+ \mid t \in (t_{out} \cdot) \cdot \wedge t \in T'\}$, f_{t_T} 为该变迁的变迁函数)和有向弧 $\{(p, t_T) \mid p \in t_{out} \cdot\} \cup \{(t_T, p) \mid p \in \cdot t_{in}\}$, 得到 PIRES + 闭网 $\bar{N} = (\bar{P}, \bar{T}, \bar{F}_I, \bar{F}_O, \bar{I}, \bar{M}_0)$ 。与闭网 \bar{N} 对应的闭网系统为 $\bar{\Sigma} = (\bar{Z}, \bar{S}_0)$ 。

定义 14 $N_1 = (P_1, T_1, F_{I1}, F_{O1}, I_1, M_{1,0})$ 和 $N_2 = (P_2, T_2, F_{I2}, F_{O2}, I_2, M_{2,0})$ 是两个 PIRES + 网, 则称 PIRES + 网 $N = (P, T, F_I, F_O, I, M_0)$ 为 N_1 和 N_2 的共享变迁型子网组合网, 当且仅当:

1) $P = P_1 \cup P_2, T = T_1 \cup T_2, F_I = F_{I1} \cup F_{I2}, F_O = F_{O1} \cup F_{O2}, I = I_1 \cup I_2$ 。

2) 若 $p \in P_1 \cap P_2$, 则 $M_{1,0}(p) = M_{2,0}(p), M_0(p) = \begin{cases} M_{1,0}(p) & p \in P_1 \\ M_{2,0}(p) & p \in P_2 \end{cases}$ 。

图 3 给出了一个共享变迁型子网集合组合示意图。

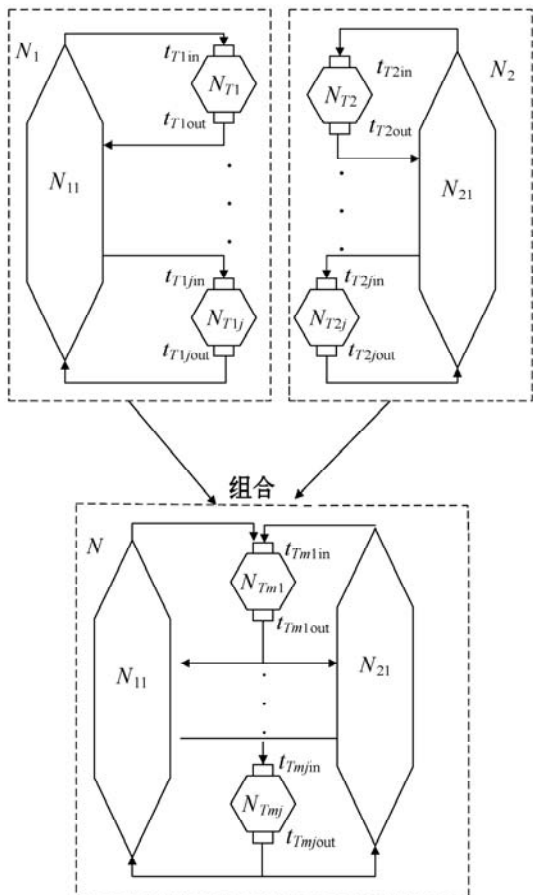


图 3 共享变迁型子网集合组合操作示意图

假定 2 假设网 N_1 和网 N_2 满足以下条件:

1) N_1 和 N_2 有着相同类型的变迁子网集合 $N_{T1} = (N_{T11}, N_{T12}, \dots, N_{T1j})$ 和 $N_{T2} = (N_{T21}, N_{T22}, \dots, N_{T2j})$ 。

2) $\cdot t_{T1in} \cap \cdot t_{T1hin} = \emptyset, t_{T1out} \cdot \cap t_{T1hout} \cdot = \emptyset (i \neq h, 1 \leq i, h \leq j)$ (这里 t_{T1in} 和 t_{T1out} 分别为 N_{T1i} 的输入变迁和输出变迁 ($1 \leq i \leq j$))。同样对于 N_{T2i} 满足: $\cdot t_{T2in} \cap \cdot t_{T2hin} = \emptyset, t_{T2out} \cdot \cap t_{T2hout} \cdot = \emptyset (i \neq h, 1 \leq i, h \leq j)$ 。

定义 15 子网组合操作:

1) 子网 $N_{T1} = (N_{T11}, N_{T12}, \dots, N_{T1j})$ 和子网 $N_{T2} = (N_{T21}, N_{T22}, \dots, N_{T2j})$ 进行组合操作, 得变迁子网 $N_{Tm} = (N_{Tm1}, N_{Tm2}, \dots, N_{Tmj})$ 。

2) 假设 $f_{T1i} (1 \leq i \leq j)$ 为 N_{T1} 中 t_{T1i} 的变迁函数, $f_{T2i} (1 \leq i \leq j)$ 为 N_{T2} 中 t_{T2i} 的变迁函数, 则 $f_{T1i} = f_{T2i}, f_{Tmi} = f_{T1i}, 1 \leq i \leq j$ 。

3) 假设 $[d_{T1i}^-, d_{T1i}^+]$ 为 N_{T1} 中 $t_{T1i} (1 \leq i \leq j)$ 的变迁时延, $[d_{T2i}^-, d_{T2i}^+]$ 为子网 N_{T2} 中 $t_{T2i} (1 \leq i \leq j)$ 的变迁时延, 则 $d_{T1i}^- = d_{T2i}^-, d_{T1i}^+ = d_{T2i}^+, d_{T1i}^- = d_{Tmi}^-, d_{T1i}^+ = d_{Tmi}^+$ 。

4) 假设 I_{T1} 为子网 N_{T1} 的抑制弧集, I_{T2} 为子网 N_{T2} 的抑制弧集, 则 $I_{T1} = I_{T2}, I_{T1} = I_{Tm}$ 。

2.2.2 PIRES + 网由“抽象化”到“精细化”的描述方法

由于直接对 PIRES + 网共享变迁型子网组合操作的相关性质的保持性进行分析存在困难, 于是提出了由“抽象化”到“精细化”的描述方法, 借助 PIRES + 网共享变迁集组合操作来研究相关性保持问题。首先分别将参与组合的两个 PIRES + 网中的相同类型的变迁型子网进行“抽象化”, 抽象化为相关变迁, 得到两个“抽象化”网, 然后对这两个网进行共享变迁集组合, 最后对组合后的 PIRES + 网进行“精细化”操作, 得到共享变迁子网组合 PIRES + 网。通过研究抽象化操作、共享变迁集组合操作和精细化操作中对性质保持分析得到的若干条件, 可保证 PIRES + 网共享变迁型子网组合对相关性质的保持关系。

定义 16 变迁型子网抽象化操作: 假设 $N_T = (P_T, T_T, F_{IT}, F_{OT}, I_T, M_{T,0})$ 为 PIRES + 网 $N = (P, T, F_I, F_O, I, M_0)$ 的变迁型子网, 将子网 N_T 抽象化为一个变迁 \bar{i} , 即用 \bar{i} 替换子网 N_T , 得 PIRES + 网 $N_T' = (P_T', T_T', F_{IT}', F_{OT}', I_T', M_{T,0}')$, 其中:

1) $P_T' = (P - P_T)$ 。

2) $T_T' = T \cup \{\bar{i}\} - T_T$ 。

3) 若 $(p, t) \in F_I - F_{IT}$, 则 $(p, \bar{i}) \in F_I'$, $(p, t) \in F_I'$ 其中 $(p \in \cdot t_{in})$; 若 $(t, p) \in F_O - F_{OT}$, 则 $(\bar{i}, p) \in F_O'$, $(t, p) \in F_O'$, 其中 $(p \in t_{out} \cdot)$ 。

- 4) $M_0'(p) = M_0(p)$, 其中 $p \in P - P_T$ 。
 5) $f_t = f_{out} \circ f_s \circ f_{in}$ (\circ 为复合运算符)。
 6) $d_i^- = d_{in}^- + d_s^- + d_{out}^-$, $d_i^+ = d_{in}^+ + d_s^+ + d_{out}^+$ 。
 7) $I_T' = I - I_T$ 。

定义 17 变迁型子网精细化操作: 设 $N_T = (P_T, T_T, F_{IT}, F_{OT}, I_T, M_{T,0})$ 为变迁型子网, 使用子网 N_T 替换 PIRES + 网 $N = (P, T, F_I, F_O, I, M_0)$ 中的变迁 \bar{t} , 得到网 $N_T' = (P_T', T_T', F_{IT}', F_{OT}', I_T', M_{T,0}')$, 其中:

- 1) $P_T' = P \cup P_T$, $T_T' = T \cup T_T - \{\bar{t}\}$; $I_T' = I \cup I_T$ 。
 2) 若 $(p, t) \in F_T \cup F_{IT}$, 则 $(p, t) \in F_{IT}'$; 若 $(t, p) \in F_O \cup F_{OT}$, 则 $(t, p) \in F_{OT}'$ 。
 3) 若 $(p, \bar{t}) \in F_I$, 则 $(p, t_{in}) \in F_{IT}'$; 若 $(\bar{t}, p) \in F_O$, 则 $(t_{out}, p) \in F_{OT}'$ 。
 4) $f_{out} \circ f_s \circ f_{in} = f_i$ (其中 f_i 为 \bar{t} 的变迁函数)。

$$5) M_0'(p) = \begin{cases} M_0(p) & \forall p \in P \\ M_{T,0}(p) & \forall p \in P_T \end{cases}$$

$$6) d_{in}^- + d_s^- + d_{out}^- = d_i^- + d_s^+ + d_{out}^+ = d_i^+。$$

引理 1 假设 PIRES + 网系统 $\Sigma' = (Z', S_0')$ 是由 PIRES + 网系统 $\Sigma = (Z, S_0)$ 经过精细化操作而得到的, 即用子网 $N_T = (P_T, T_T, F_{IT}, F_{OT}, I_T, M_{T,0})$ 去替换网系统 Σ 中的变迁 t , 则网系统 Σ' 是活的当且仅当网系统 Σ 和与 N_T 对应的闭网系统 Σ_T 都是活的。

证明 1 充分性: 因为 Σ 和与 N_T 对应的闭网系统 Σ_T 都是活的, 因此存在 S_0 , 使得网系统 Σ 是活的, 存在 S_{T_0} , 使得网系统 Σ_T 是活的。对于 $\forall t' \in T'$, 则 $t' \in T - \{\bar{t}\}$, $t' \in T_T - \{t_{in}, t_{out}\}$, $t' \in \{t_{in}, t_{out}\}$, $\forall S' = R(S_0')$, 令 $S' = [S, S_T]$, 则存在 $S \in R(S_0)$, $S_T \in R(S_{T_0})$ 。

1) 若 $t' \in T - \{\bar{t}\}$, 由定义 7 知, $\exists \bar{S} \in R(S)$ 使得 $S \xrightarrow{t'}$, 令 $S_0 \xrightarrow{\sigma_0, \tau_0} S \xrightarrow{\sigma, \tau} \bar{S} \xrightarrow{t'}$ 。(1) 当 $\bar{t} \in \sigma_0 \cup \sigma$ 时, $S_0' = [S_0, \theta_T]$ (其中 θ_T 为对应标识的 θ 向量), $\bar{S}' = [\bar{S}, \theta_T]$, 设 $\bar{t} \in \sigma$ 时, $S_0 \xrightarrow{\sigma_0, \tau_0} S \xrightarrow{\sigma_1 \bar{t} \sigma_2, \tau_1 \tau_2} \bar{S} \xrightarrow{t'}$, 由定义 17 和定义 7 知, $S_0' \xrightarrow{\sigma_0, \tau_0} S' \xrightarrow{\sigma_1 t_{in} \sigma_2, \tau_1 \tau_2} S_T' \xrightarrow{t'}$ (其中 σ_T 为 T_T 的变迁序列), 则 t' 为活的。(2) 当 $\bar{t} \notin \sigma_0 \cup \sigma$ 时, 由定义 17 知, 存在 $S_0' \xrightarrow{\sigma_0, \tau_0} S' \xrightarrow{\sigma, \tau} \bar{S}' \xrightarrow{t'}$, 则 t' 在网系统 Σ' 中也是活的。

2) 若 $t' \in T_T - \{t_{in}, t_{out}\}$, 设 $S_{T_0} \xrightarrow{\sigma_{T_0}, \tau_{T_0}} S_{T_0}$ 。(1) 若 $\bar{t} \notin \sigma_{T_0}$, 由定义 7 可知, $\exists \bar{S}_T \in R(M_T)$ 使得 $S_{T_0} \xrightarrow{\sigma_{T_0}, \tau_{T_0}} \bar{S}_T \xrightarrow{t'}$, 进而可得 $[S_0, \theta_T] \xrightarrow{\sigma_0, \tau_0} [S_2, S_{T_0}] \xrightarrow{\theta_{T_0}} [S_2, S_T] \xrightarrow{\sigma_T, \tau_T} [S_2, \bar{S}_T] \xrightarrow{t'}$, 因此 t' 在网系统 Σ' 中是活

的。(2) 若 $t' \in \sigma_{T_0}$ 时, 由活性定义得, $[S_0, \theta_T] \xrightarrow{\sigma_T t_{in}, \tau_0} [S_1, S_{T_0}] \xrightarrow{\theta_{T_0}} [S_1, S_T] \xrightarrow{\sigma_1, \tau_1} [S_2, S_T] \xrightarrow{\sigma_{1T} t_{out}, \tau_{1T}} [S_3, \theta_T] \xrightarrow{\sigma_2 t_{out}, \tau_2} [S_1, S_{T_0}] \xrightarrow{\sigma_T, \tau_T} [S_1, S_T] \xrightarrow{t'}$, 其中 σ_T 为 σ_{T_0} 的子串, 故 t' 在网系统 Σ' 上是活的。

3) 若 $t' \in \{t_{in}, t_{out}\}$, 令 $t' = t_{in}$, $S' \in R(S_0')$, $S' = [S, S_T]$, $S \in R(S_0)$, $S_T \in R(S_{T_0})$ 。(1) 设 $S_T = \theta_T$, 则由活性定义知, $\exists \sigma$ 使得 $S \xrightarrow{\sigma, \tau} \bar{S} \xrightarrow{\bar{t}}$, $\cdot \bar{t} = \cdot t'$, 故在网系统 Σ' 中 $\exists \bar{S}' = [\bar{S}, \theta_T]$, 使得 $S_0' \xrightarrow{\sigma_0, \tau_0} S' \xrightarrow{\sigma, \tau} \bar{S}' \xrightarrow{t'}$, 即 t' 在网系统 Σ' 上是活的。(2) 设 $S_T \neq \theta_T$, 由活性定义得: $\exists \sigma_T$ 使得 $S_T \xrightarrow{\sigma_T, \tau_T} S_{IT}$, $\exists \sigma_0$, 使得 $\bar{S}_{IT} \xrightarrow{t_{out} \sigma_0, \tau_0} \bar{S} \xrightarrow{\bar{t}}$, $\cdot \bar{t} = \cdot t'$, 从而在网系统 Σ' 中有 $S_0' \xrightarrow{\sigma_0', \tau_0'} S' \xrightarrow{\sigma_T t_{out} \sigma_0, \tau_T \tau_0} \bar{S}' \xrightarrow{t'}$ (其中 $\bar{S}' = [\bar{S}, \theta_T]$), 即 t' 在网系统 Σ' 上为活的。

综上 1)、2)、3) 可得, t' 在网系统 Σ' 上为活的, 因为任意的 $t' \in T'$ 都是活的, 所以 Σ' 是活的网系统。

证明 2 必要性, 因为 Σ' 是活的, 故存在 M_0' 使得 $\Sigma' = (Z', S_0')$ 是活的, 假设 $\forall S_0'' \in R(S_0')$, Σ' 中的 Σ 不是活的网系统, 即存在 $S \in R(S_0)$, $\exists t \in T$, $\forall \bar{S} \in R(S)$ 都有 $\neg (\bar{S} \xrightarrow{t})$ 。 S_0'' 在 Σ 上的映射为 S_0 , 则 $S_0 \xrightarrow{\sigma, \tau} S \xrightarrow{\bar{\sigma}, \bar{\tau}} \bar{S}$, 其中 $\sigma \bar{\sigma} \in T''$, 使用 $t_{in} \sigma_T t_{out}$ 分别替换 $\sigma \bar{\sigma}$ 中的 \bar{t} , 得 $\sigma'' \sigma'' \in T''$, 由定义 17、定义 7 可得, $S_0' \xrightarrow{\sigma', \tau'} \bar{S}' \xrightarrow{\bar{\sigma}', \bar{\tau}'} \bar{S}''$, S'' 在 Σ 上的映射为 S , \bar{S}'' 在 Σ 上的映射为 \bar{S} , 则 $\exists S'' \in R(S_0'')$, $\exists t' \in T''$ 使得 $\forall \bar{S} \in R(S)$ 有 $\forall \bar{S}'' \in R(S'')$, 因为 $\neg (\bar{S} \xrightarrow{t})$, 所以 $\neg (\bar{S}'' \xrightarrow{t'})$, 即 Σ' 不是活的网系统, 这与 Σ' 是活的网系统的事实矛盾, 所以 Σ 是活的网系统。同理与 N_T 对应的封闭网系统 Σ_T 也是活的。

引理 2 假设 PIRES + 网系统 $\Sigma' = (Z', S_0')$ 是由 PIRES + 网系统 $\Sigma = (Z, S_0)$ 通过精细化操作而得到的, 即用子网 $N_T = (P_T, T_T, F_{IT}, F_{OT}, I_T, M_{T,0})$ 去替换网系统 Σ 中的变迁 \bar{t} , 则 Σ' 也是有界的当且仅当网系统 Σ 和与 N_T 对应的封闭网系统 Σ_T 都是有界的。

证明 充分性: 因为网系统 Σ 是有界的, 所以 $\forall p \in P$, $\exists k_1$ 使得 $M_v(p) \leq k_1$, $\forall S \in R(S_0)$, 则 $\forall p \in P - \{\bar{p}\}$, $M_v(\frac{p}{\bar{p}})(p) \leq k_1$ (其中 $M_v(\frac{p}{\bar{p}})$ 为 M_v 中不包括 \bar{p} 对应分量以外的分量)。因为 Σ_T 有界, $\forall p_T \in P_T$, $\exists k_2$ 使得 $M_v(p_T) \leq k_2$, $\forall \bar{S}_T \in R(\bar{S}_{T_0})$, 设 $k = k_1 + k_2$, 由定义 10 知, $\forall p \in P$, $M_v'(p) = [M_v(\frac{p}{\bar{p}}), M_p](p) \leq k$, $\forall S' \in R(S_0')$, 故 $\exists k$, 使得 $M_v'(p) \leq k$, 即网系统 Σ' 是有界的。

必要性: 假设网系统 $\Sigma = (Z, S_0)$ 无界, 则 $\exists p \in P$,

$\forall k > 0, M_v(p) > k$, 由定义8知, $\forall k > 0, M_v'(p) > k$, 这与 Σ' 的活性矛盾, 即网系统 $\Sigma = (Z, S_0)$ 是有界的, 同理 Σ_T 对应的封闭网系统 $\bar{\Sigma}_T$ 也是有界的。

引理3 假设 PIRES + 网系统 $\Sigma' = (Z', S_0')$ 是由 PIRES + 网系统 $\Sigma = (Z, S_0)$ 通过抽象化操作而得到的, 即用变迁 \bar{i} 去替换网 $\Sigma = (Z, S_0)$ 中的子网 $N_T = (P_T, T_T, F_{IT}, F_{OT}, I_T, M_{T,0})$, 则 Σ' 是活的当且仅当网系统 Σ 和与 N_T 对应的闭网系统 $\bar{\Sigma}_T$ 都是活的。

引理4 假设 PIRES + 网系统 $\Sigma' = (Z', S_0')$ 是由 PIRES + 网系统 $\Sigma = (Z, S_0)$ 通过抽象化操作而得到的, 即用变迁 \bar{i} 去替换网 $\Sigma = (Z, S_0)$ 中的子网 $N_T = (P_T, T_T, F_{IT}, F_{OT}, I_T, M_{T,0})$, 则 Σ' 是有界的当且仅当网系统 Σ 和与 N_T 对应的闭网系统 $\bar{\Sigma}_T$ 都是有界的。

引理3、4的证明过程与引理1、2的证明过程相反。

2.2.3 PIRES + 网共享变迁型子网组合活性和有界性保持分析

本节将会对共享变迁型子网的组合网的活性和有界性保持问题进行探究。

定理3 假设 PIRES + 网系统 $\Sigma = (Z, S_0)$ 是由活的、有界的 PIRES + 网系统 $\Sigma_1 = (Z_1, S_{10})$ 和 $\Sigma_2 = (Z_2, S_{20})$ 经过共享变迁型子网集合 $N_T = (N_{T1}, N_{T2}, \dots, N_{Tk})$ 组合得到的。 T_m' 是由子网集合 N_T 抽象化操作得到的变迁集合, $\Sigma_1'(\Sigma_2')$ 是由 $\Sigma_1(\Sigma_2)$ 经过精细化操作得到的, Σ' 是由 PIRES + 网系统 Σ_1', Σ_2' 共享变迁集组合而得到的, 并且 $\forall p \in \cdot t_{jm}, M_v'(p) \geq W'(p, t_{jm})$ (其中 t_{jm} 是 N_{Tj} 的输入变迁 $j = 1, 2, \dots, k$)。若 $\forall t' \in T_m', t'$ 都是活的, 则 PIRES + 网系统 Σ 也是活的。

证明 因为 $N_T = (N_{T1}, N_{T2}, \dots, N_{Tk})$ 为变迁型子网集, 对 PIRES + 网系统 Σ_1, Σ_2 进行抽象化操作得 Σ_1', Σ_2' , 对变迁子网集 N_T 进行抽象化操作得变迁集 $T_m' = \{\bar{i}_1, \bar{i}_2, \dots, \bar{i}_k\}$, 同时得 $\forall p \in \cdot \bar{i}_j, M_v'(p) \geq W'(p, t_{jm})$ $j = 1, 2, \dots, k$, 因为 PIRES + 网系统 Σ_1, Σ_2 是活的、有界的, 根据引理3、引理4得, Σ_1', Σ_2' 为活的、有界的网系统, 且闭网系统 $\bar{\Sigma}_{N_{T1}} = (\bar{Z}_{T1}, \bar{S}_{T10}), \dots, \bar{\Sigma}_{N_{Tk}} = (\bar{Z}_{Tk}, \bar{S}_{Tk0})$ 也为活的、有界的。因为 Σ' 是由 PIRES + 网系统 Σ_1', Σ_2' 共享变迁集组合而得到的, 根据定理1得, 对于 T_m' 中的任意 t' 是活的, 则 Σ' 是活的。网系统 $\Sigma = (Z, S_0)$ 是由网系统 $\Sigma' = (Z', S_0')$ 精细化操作所得, 即用子网集 $N_T = (N_{T1}, N_{T2}, \dots, N_{Tk})$ 替换变迁集 $T_m' = \{\bar{i}_1, \bar{i}_2, \dots, \bar{i}_k\}$ 。因为 $\bar{\Sigma}_{N_{T1}} = (\bar{Z}_{T1}, \bar{S}_{T10}), \dots, \bar{\Sigma}_{N_{Tk}} = (\bar{Z}_{Tk}, \bar{S}_{Tk0})$

是活的、有界的, 根据引理2和定理1得, $\forall t' \in T_m', t'$ 是活的, 则 PIRES + 网系统 Σ 也是活的。

定理4 假设 PIRES + 网系统 $\Sigma = (Z, S_0)$ 是由活的、有界的网系统 $\Sigma_1 = (Z_1, S_{10})$ 和 $\Sigma_2 = (Z_2, S_{20})$ 经过共享变迁型子网集 $N_T = (N_{T1}, N_{T2}, \dots, N_{Tk})$ 组合而得到的。 T_m' 是由子网 N_T 经过抽象化操作得到的, $\Sigma_1'(\Sigma_2')$ 是由 $\Sigma_1(\Sigma_2)$ 精细化操作得到的, Σ' 是由 Σ_1', Σ_2' 共享变迁集组合而得到的, 并且 $\forall p \in \cdot t_{jm}, M_v'(p) \geq W'(p, t_{jm})$, 其中 t_{jm} 是 N_{Tj} 的输入变迁, $j = 1, 2, \dots, k, \Sigma_1', \Sigma_2'$ 关于 T_m' 有相同的可引发变迁序偶集。如果 $\exists S' \in R_N(S_0'), \exists t' \in T_m'$, 使得 $S' \xrightarrow{t'}$, 则 PIRES + 网系统 Σ 是活的、有界的。

证明过程参照定理3。

3 应用实例

随着通信技术的快速发展, 通信技术革新换代的频率也逐渐加快, 目前5G建设已经成为我国基础设施建设的“领头羊”, 5G作为新一代蜂窝移动网络以其优秀的广域覆盖性、良好的移动性正好与WLAN的低廉价格、较高的共享性等优点形成优势互补。

目前的实际网络中, 蜂窝通信网络和WLAN是两套独立运行的系统。为了有效实现移动终端设备可以在不同的接入技术的无线网络之间进行漫游, 实现异构网络之间的真正融合, 本节将上文提出的PIRES + 网的组合方法应用到移动终端网络通信系统的建模和分析, 使得组合后的网系统能够有效实现异构网络的融合和准确反映该系统工作流程, 同时也便于日后对该系统的改进和迁移。下面将分别对移动终端网络通信系统中蜂窝移动通信模型和WLAN网络模型进行建模和分析。

图4是蜂窝移动通信的PIRES + 网模型, 该模型有效简化了蜂窝网络架构的复杂性, 更好地模拟了信号传输过程, 蜂窝移动信号的接收是基于终端内部的射频网卡进行的。可以看出, t_0 : 结束当前信号处理, 系统初始化; t_1 : 天线接收由基站发出的电磁波信号; t_2 : 将电磁波信号转化成交流电信号; t_3 : 经滤波器调节, 得到基带信息。子网 N_{T1} 为数字信号处理部分; t_4 为移动终端其它组件信号处理部分; t_5 : 音频调节; t_6, t_7 : 人机交互。在子网 N_{T1} 中 $\{t_{10}, t_{11}, \dots, t_{16}\}$ 等变迁为采集、滤波、变换、谱分析、估计、识别等一系列的信号处理过程。

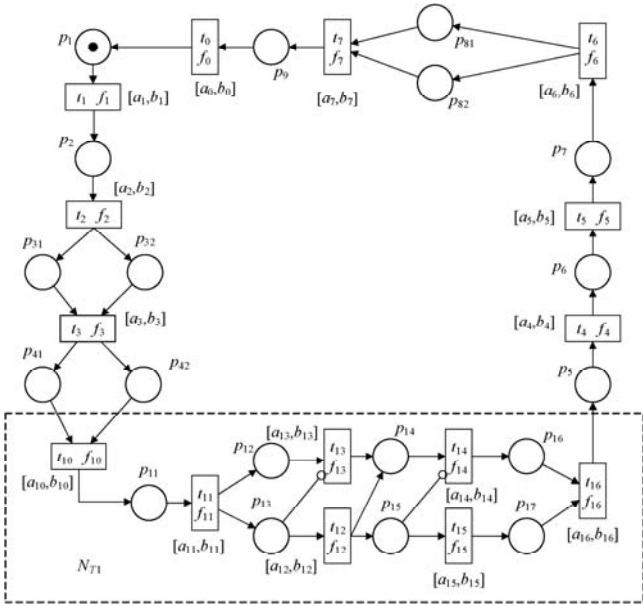


图4 接收蜂窝移动通信网络信号的通信系统 PIRES + 网模型 (Σ₁)

图5为接收WLAN信号的PIRES+网模型,该模型直观地表示了信号接收和传递过程。接收WLAN信号是基于终端内部WLAN网卡进行的,在移动终端内部射频网卡和WLAN网卡是两个独立的部件。可以看出,t₀' :结束当前信号处理,系统初始化;t₁' :终端接收不同源头的WLAN信号;t₂' :将天线接收到的信号转化为交流电信号;t₃' 为与t₃相同的经滤波器调节部分;子网N_{T2}为与N_{T1}相同的数字信号处理部分;t₄' 为与t₄相同的移动终端其他组件信号处理部分;t₅' :共享网络热点部分;t₆' :人机交互。

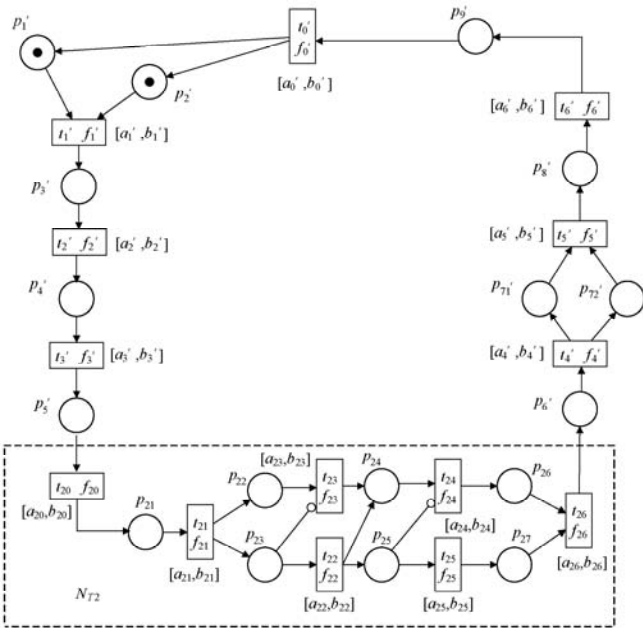


图5 接收WLAN网络信号的通信系统 PIRES + 网模型 (Σ₂)

在图4和图5中,子网N_{T1}和N_{T2}是相同类型的变迁型子网,变迁t₃与变迁t₃'是相同类型的变迁,t₄'与变迁t₄是相同类型的变迁。按照上述提出的PIRES+

网组合方法,将子网N_{T1}和N_{T2}组合成子网N_{Tm},变迁t₃与变迁t₃'组合成变迁t₇₁,变迁t₄'与变迁t₄组合成变迁t₇₂,得到Σ₁=(Z₁,S₁₀)、Σ₂=(Z₂,S₂₀)的组合PIRES+网系统Σ=(Z,S₀),由定义13,这里令t₇₁的变迁时延为[a₃,b₃],t₇₂的变迁时延为[a₄,b₄],如图6所示。

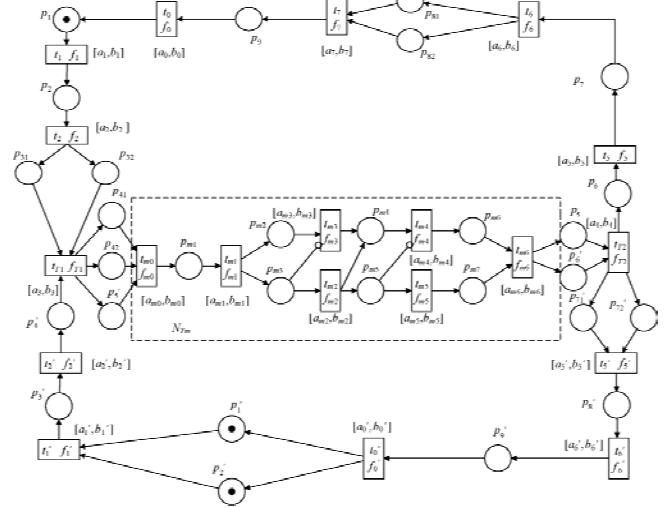


图6 PIRES + 网组合模型 (Σ)

根据活性和有界性定义易得Σ₁=(Z₁,S₁₀)、Σ₂=(Z₂,S₂₀)都为活的有界的网系统,对Σ₁=(Z₁,S₁₀)、Σ₂=(Z₂,S₂₀)进行抽象化操作得Σ₁'=(Z₁',S₁₀')、Σ₂'=(Z₂',S₂₀')。子网N_{Tm}抽象化为t_{7m},则网系统Σ₁'=(Z₁',S₁₀')、Σ₂'=(Z₂',S₂₀')关于{t₇₁,t_{7m},t₇₂}具有相同的可引发变迁序偶集{(t₇₁,t_{7m}),(t_{7m},t₇₂),(t₇₁,t₇₂)},所以Σ=(Z,S₀)为活的和有界的网系统。

4 结 语

嵌入式系统在5G芯片、移动通信、汽车电子、智能家居、工业物联网等多个领域得到广泛应用,为了提高PRES+网的建模和分析能力,给出了带抑制弧的PRES+网——PIRES+网。但是PIRES+在对大规模复杂的嵌入式系统建模时,会遇到“状态空间爆炸”问题,为有效缓解该问题,该文提出了PIRES+网共享变迁集组合方法和共享变迁型子网组合方法,并证明了组合后的网系统能够保持原系统的活性、有界性。该文的实例说明了上述组合方法的有效性及其实用性。

下一步的研究工作为对于PIRES+网的更一般的组合或细化操作方法进行研究。

参 考 文 献

[1] 陈刚,关楠,吕鸣松,等.实时多核嵌入式系统研究综述[J].软件学报,2018,29(7):2152-2176.

- [2] Stoutchini A, Benini L. StreamDrive: A dynamic dataflow framework for clustered embedded architectures[J]. *Journal of Signal Processing Systems*, 2019, 91(3): 275 – 301.
- [3] Xie G C, Ye J, Li S N, et al. Research on evaluation method of communication module field test results based on analytic hierarchy process [C]//12th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, 2020: 100 – 104.
- [4] Offutt J, Thumala S. Testing concurrent user behavior of synchronous web applications with Petri nets[J]. *Software and Systems modeling*, 2019, 18: 913 – 936.
- [5] 张生财, 张静. 基于赋时层次着色 Petri 网的流控制传输协议连接建模与分析[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(26): 10840 – 10847.
- [6] Cortés L A, Eles P, Peng Z B. Modeling and formal verification of embedded systems based on a Petri net based representation[J]. *Journal of Systems Architecture*, 2003, 49(12 – 15): 571 – 598.
- [7] Karlsson D, Eles P, Peng Z B. Formal verification of component-based designs[J]. *Design Automation for Embedded Systems*, 2007, 11(1): 49 – 90.
- [8] Bandyopadhyay S, Sarkar D, Mandal C. Equivalence checking of Petri net models of programs using static and dynamic cut-points[J]. *Acta Informatica*, 2019, 56(4): 321 – 383.
- [9] Xia C L. Property preservation of refinement for petri net based representation for embedded systems [J]. *Cluster Computing*, 2016, 19(3): 1373 – 1384.
- [10] Xia C L, Shen B, Zhang H L, et al. Liveness and boundedness preservations of sharing synthesis of Petri net based representation for embedded systems[J]. *International Journal of Computer Systems Science & Engineering*, 2018, 33(5): 345 – 350.
- [11] 苏庆, 何凡, 伍乃骐. 基于带抑止弧的 Petri 网的软件保护技术应用序列构建方法[J]. *工业工程*, 2017, 20(6): 77 – 83.
- [12] Giesekeing M, Olderog E R, Würdemann N. Solving high-level Petri games[J]. *Acta Informatica*, 2020, 57(3): 591 – 626.
- [13] Xia C L. Property preservation of refinement for Petri net based representation for embedded systems [J]. *Cluster Computing*, 2016, 19(3): 1373 – 1384.
- [14] Lacheheb M N, Hameurlain N, Maamri R. Resources consumption analysis of business process services in cloud computing using Petri net[J]. *Journal of King Saud University: Computer and Information Sciences*, 2020, 32(4): 408 – 418.
- [15] Shah S A, Bohez E L, Shah K, et al. Colored Petri net model for significant reduction of invariants in flexible manufacturing systems[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 88(5 – 8): 1775 – 1787.
- [16] Berthomieu B, Botlan D, Zilio S. Counting Petri net markings from reduction equations[J]. *International Journal on Software Tools for Technology Transfer*, 2019, 22: 163 – 181.
- [17] Berthomieu B, Botlan D L, Zilio S D. Petri net reductions for counting markings [C]//International Symposium on Model Checking Software, 2018: 65 – 84.
- [18] Best E, Devillers R, Schlachter U. Bounded choice-free Petri net synthesis: Algorithmic issues[J]. *Acta Informatica*, 2018, 55(7): 575 – 611.
- [19] Wolf K. Petri net synthesis with Union/Find[C]//International Conference on Applications and Theory of Petri Nets and Concurrency, 2018: 60 – 81.
- [20] Erofeev E, Tredup R. Occupancy number restricted Boolean Petri net synthesis: A fixed-parameter algorithm[C]//International Colloquium on Theoretical Aspects of Computing, 2020: 143 – 160.
- [21] Best E, Devillers R, Erofeev E. A new property of choice – free Petri net systems[C]//International Conference on Applications and Theory of Petri Nets and Concurrency, 2020: 89 – 108.
- [22] Liu G Y, Li P, Li Z W, et al. Robust deadlock control for automated manufacturing systems with unreliable resources based on Petri net reachability graphs[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 2018, 49(7): 1371 – 1385.
- [23] 韩敏, 孙国庆, 郑丹晨, 等. 一种基于时变 Petri 网的服务组合质量检验方法[J]. *软件学报*, 2019, 30(8): 2453 – 2469.
- ~~~~~
- (上接第 272 页)**
- [13] 闫旭, 叶春明, 姚远远. 量子鲸鱼优化算法求解作业车间调度问题[J]. *计算机应用研究*, 2019, 36(4): 975 – 979.
- [14] 徐小平, 杨转, 刘龙. 求解物流配送中心选址问题的蜘蛛猴算法[J]. *计算机工程与应用*, 2020, 56(1): 150 – 157.
- [15] Chen H, Li W D, Yang X. A whale optimization algorithm with chaos mechanism based on quasi-opposition for global optimization problems [J]. *Expert Systems with Applications*, 2020, 15(8): 1 – 26
- [16] Wang S, Jia H, Peng X. Modified Salp swarm algorithm based multilevel thresholding for color image segmentation [J]. *Mathematical Biosciences and Engineering: MBE*, 2019, 17(1): 700 – 724.
- [17] Khriissi L, Akkad N E, Satori H, et al. Clustering method and sine cosine algorithm for image segmentation[J]. *Evolutionary Intelligence*, 2021, 20(1): 1 – 14.