

文章编号: 100 20920(2007) 022013205

基于精炼操作的 Petri 网建模及其分析方法

丁志军^{1,2}, 蒋昌俊¹

(1. 同济大学 计算机科学与工程系, 上海 201804; 2. 山东科技大学 信息科学与工程学院, 山东 青岛 266510)

摘 要: 针对复杂系统的 Petri 网建模及其分析问题, 定义了 Petri 网的精炼操作及其相关的 Petri 网模型. 基于序列投影, 建立精炼 Petri 网与原网、子网间的动态行为关联关系, 并分析了该精炼操作的相关动态性质, 得到一组性质保持判据. 最后, 基于该方法实现了一个顺序资源共享系统的应用案例的建模及其分析. 所提出的方法不仅为复杂系统的 Petri 建模提供了新的思路, 而且有助于复杂 Petri 网模型的分析 and 验证.

关键词: Petri 网; 精炼; 复杂系统

中图分类号: TP14 文献标识码: A

Petri nets modeling and analysis method based on the refinement operation

DING Zhijun^{1,2}, JIANG Changjun¹

(1. Department of Computer Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. College of Information Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, China. Correspondent: DING Zhijun, E-mail: zhijun_ding@hotmail.com)

Abstract: The refinement operation of Petri nets is provided for modeling and analyzing complex system. Based on the sequences projection, the behavior relationship between refined Petri nets and original nets or subnets is established, at the same time, the dynamic properties of refinement operation are discussed in detail. As a result, conditions and theories under which a subnet can take the place of a single transition while preserving properties such as liveness and boundedness are presented. Finally, the usability of the research results presented is illustrated by an example of sequent resource shared systems. Refinement technique can be used as a top down approach for synthesizing Petri net model of complex system simultaneously and reduce the complexity of model analysis.

Key words: Petri nets; Refinement; Complex system

1 引言

复杂系统的 Petri 网建模及其分析理论已经成为近年来的研究热点, 主要包括 3 类方法: 精炼和抽象^[1]、组合和分解^[2]、网化简方法^[3]. 此外高级网系统^[4]由于具有更强的建模能力和表达能力, 也被应用于复杂系统的建模及其分析中.

精炼操作由于具有支持层次建模和降低分析复杂度两方面的优势, 已越来越受到研究者的重视. 一部分工作是面向系统设计和分析, 讨论基于精炼操作的系统建模方法和设计规范. He 等^[5]讨论了谓词/变迁网的合成和求精操作及其组合建模, 以实现系统的有效设计. Jensen^[6]研究了基于求精思想的

有色 Petri 网的层次化建模方法, 开发了复杂系统的设计工具 Design/CPN. 文献[7]讨论了在随机 Petri 网中, 利用精炼操作逐步求精以构建一个可靠性模型的方法. 另外一部分工作则主要集中于讨论 Petri 网精炼操作及其性质保持性判据, 为分析复杂系统提供理论保证. Suzuki^[8]研究了 Petri 网的精炼操作, 提出了精炼网的定义, 并研究了精炼网的动态性质(如有界性、活性等)保性关系. Brauer 等^[9]从性质等价性和语义等价性(如失败语义)两个方面对 Petri 网精炼操作进行了分析和综述. Huang 等^[10]定义了两类 Petri 网的精炼操作, 并对包括结构性质(如不变量、可重复性等)和动态性质在内的 19 种

收稿日期: 20051027; 修回日期: 20060228.
基金项目: 国家自然科学基金项目(60534060, 60473094, 90412013); 国家 973 计划项目(2003CB316902); 上海市优秀学科带头人计划项目(04XD14016).
作者简介: 丁志军(1974), 男, 江苏泰兴人, 讲师, 博士生, 从事 Petri 网理论及其应用、并行处理等研究; 蒋昌俊(1962), 男, 安徽安庆人, 教授, 博士生导师, 从事软件形式化、并行处理等研究.

性质的保性关系进行了较全面的论述和分析。

在借鉴上述研究成果的基础上, 本文对文献[10]中的模型进行扩展, 研究模型的行为和动态性质, 给出了相应的保性判据, 并基于该方法实现了一个顺序资源共享系统的建模及其分析。

2 Petri 网^[4,11] 的精炼操作

首先对精炼中的子网进行定义。

定义 1 设 Petri 网 $2 = (N, M_0)$, 其中网 $N = (P, T; F)$ 有两个特殊的库所 i 和 o . 库所 i 是一个初始(入口)库所, 即 $i^\# = \leq$; 库所 o 是一个终止(出口)库所, 即 $o^\# = \leq$ 称 N 为 SISO(单输入单输出)网, 若在 N 中加入一个新的变迁 t , 使 t 连接库所 i 与 o , 即 $t^\# = \{o\}, t^\# = \{i\}$, 则得到网 N 的扩展网 $\hat{N}$. 称 $\hat{2} = (N, M_0)$ 为 2 的扩展 Petri 网, 其中 $M_0 = M_0$.

在文献[8]中为了保证精炼操作的有效性及其性质保持性, 要求子网应满足 $k2WB$ 性质. 相应地, 根据 $k2WB$ 性质的 3 个条件, 在 SISO 网的基础上提出了 $k2$ 有序网的概念。

定义 2 设 Petri 网 $2 = (N, M_0)$, 其中 $N = (P, T; F)$ 是一个 SISO 网, 且有 $M_0(i) = k, M_0(o) = 0, \hat{2} = (N, M_0)$ 为 2 的扩展 Petri 网. 当且仅当满足下述 3 个条件, 称 $\hat{2}$ 是 $k2$ 有序的:

- 1) $PM \in R(\hat{2}), \forall M' \in R(M), \forall t \in i^\#,$ 有 $M' \in t4;$
- 2) $PR \in L(\hat{2}),$ 有 $\#(R, i^\#) \setminus \#(R^\#, o);$
- 3) $PR \in L(\hat{2}),$ 若有 $\#(R, i^\#) > \#(R^\#, o),$ 那么一定存在 $R \in (T - \{i^\#\})^*,$ 使得 $R \# R \in L(\hat{2}),$ 且 $\#(R \# R, i^\#) = \#(R \# R^\#, o).$

定义 1 从结构上对精炼子网进行描述和定义, 而定义 2 的 3 个条件则从行为上对子网进行约束和限定. 条件 1) 表明子网在入口处是不会发生阻塞的; 条件 2) 要求网系统的出口动作总是发生在入口动作之后, 而且受到入口动作的约束; 条件 3) 表明无论何种情况, 出口动作总能独立完成, 并/赶上 0 入口动作。

文献[8]证明了 $k2WB$ 性质的可满足性与活性性质的可满足性是递归等价的, 因而是可判定的, 该结果也适用于 $k2$ 有序网. 由于实际应用中的 Petri 网模型大多是有界的, 而判定有界 Petri 网是否是 $k2$ 有序网可以通过对网语言进行枚举检测来确定. 如图 1 所示的 Petri 网 $\overline{PN}$ 就不是 $k2$ 有序网, 因为 $R = t_1 t_2 t_3 t_4 t_0 t_1 \in L(\overline{PN})$ 且 $\#(R, i^\#) > \#(R^\#, o),$ 其中 $\#(R, i^\#) = 3, \#(R^\#, o) = 1.$ 然而执行序列 R 后, $\overline{PN}$ 进入死锁状态, 因此不存在 $R \in (T -$

$\{i^\#\})^*,$ 使得 $R \# R \in L(\overline{PN})$ 且 $\#(R \# R, i^\#) = \#(R \# R^\#, o),$ 即不满足 $k2$ 有序网的条件 3)。

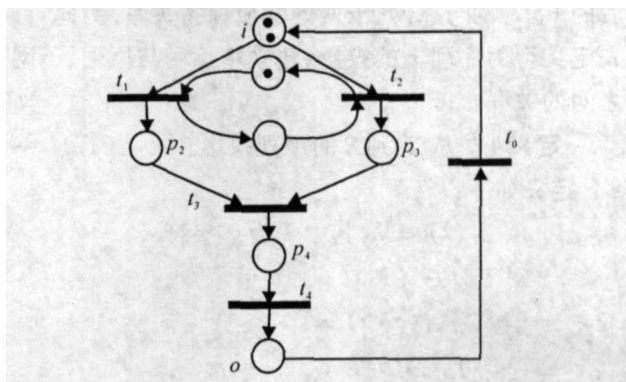


图 1 Petri 网 $\overline{PN} = (P, T; F, M_0)$

定义 3 设 Petri 网 $2 = (P, T; F, M_0), 2c = (Pc, Tc; Fc, M_0c), tr \in T$ 是非 $(k+1)2$ 使能的, 且有 $r_i^\# = \{tr\} = \#r_o, |tr| = |tr^\#| = 1, 2c$ 是 $2c$ 的扩展 Petri 网(t_0 为增加的变迁), $\hat{2}c$ 是 $k2$ 有序的. 用 $2c$ 代替 2 中的变迁 tr 得到新的 Petri 网 $2d = (Pd, Td; Fd, M_0d),$ 其中

- 1) $Pd = P \setminus G Pc \setminus G \{p_i, p_o\} - \{r_i, r_o, i, o\};$
- 2) $Td = T \setminus G Tc - \{tr\};$
- 3) $Fd = F \setminus G Fc \setminus G (\{(p_i, x) \mid x \in i^\#\} \setminus G \{(x, p_o) \mid x \in i^\#o\} \setminus G \{(x, p_i) \mid x \in i^\#r_i\} \setminus G \{(p_o, x) \mid x \in i^\#r_o\}) - (\{(r_i, tr), (tr, r_o)\} \setminus G \{(x, r_i) \mid x \in i^\#r_i\} \setminus G \{(r_o, x) \mid x \in i^\#r_o\} \setminus G \{(i, x) \mid x \in i^\#\} \setminus G \{(x, o) \mid x \in i^\#o\});$
- 4) $M_0d(p_i) = M_0(r_i), M_0d(p_o) = M_0(r_o), Pp \in P - \{r_i, r_o\}$ 有 $M_0d(p) = M_0(p), Pp \in Pc - \{i, o\}$ 有 $M_0d(p) = M_0c(p).$

称 $2d$ 为精炼 Petri 网, tr 为精炼变迁. 2 为原网系统, $2c$ 为子网系统. 图 2 是 Petri 网的精炼过程。

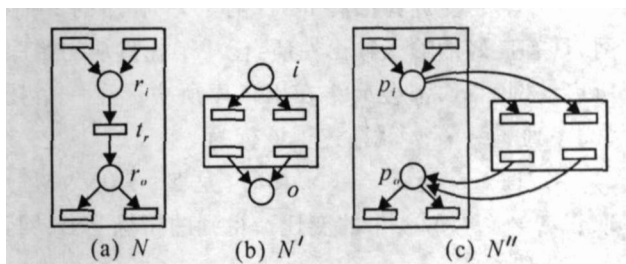


图 2 Petri 网的精炼操作

定义 3 是在精炼网模型^[10] 的基础上进行扩展得到的, 它要求原网变迁 tr 是非 22 使能的, 即要求库所 r_i 是安全的. 本文则将条件放宽至 tr 是非 $(k+1)2$ 使能的. 相应地, 子网的初始标识要求有 $M_0c(i) = 1^{[10]},$ 本文则要求 $M_0c(i) = k.$ 显然当 $k = 1$ 时, 即为文献[10] 的模型. 本文的扩展使得模型的描述、建模能力有所增强, 从而适用范围更广。

3 精炼 Petri 网的动态性质

在 Petri 网的精炼过程中, 主要关注的是精炼后的 Petri 网与原网、子网的性质保持关系. 为此, 首先定义行为序列上的投影, 建立精炼网与原网、子网之间的关联:

定义 4 从 $\mathcal{A}$ 到 $\mathcal{B}$ 的序列投影 $\#_{\text{Idy T}}: (\text{Td})^* \rightarrow \text{T}^*$ 定义如下:

- 1) $\#_{\text{Idy T}}(\mathcal{K}) = \mathcal{K}$ 其中 $\mathcal{K}$ 为空字符.
- 2) 对于 $\mathcal{R} \mathcal{I} (\text{Td})^*$,
- $$\#_{\text{Idy T}}(\mathcal{R} \# \mathcal{t}) = \begin{cases} \#_{\text{Idy T}}(\mathcal{R}), \mathcal{t} \mathcal{I} \text{Tc} - \# \text{p}_o; \\ \#_{\text{Idy T}}(\mathcal{R} \# \mathcal{t}, \mathcal{t} \mathcal{I} \text{T} - \{\mathcal{t}_r\}; \\ \#_{\text{Idy T}}(\mathcal{R} \# \mathcal{t}, \mathcal{t} \mathcal{I} \# \text{p}_o. \end{cases}$$

$\mathcal{A}$ 到 $\mathcal{B}$ 的序列投影 $\#_{\text{Idy Tc}}: (\text{Td})^* \rightarrow (\text{Tc})^*$ 定义如下:

- 1) $\#_{\text{Idy Tc}}(\mathcal{K} \# \mathcal{t}) = \mathcal{K}$ 其中 $\mathcal{K}$ 为空字符.
- 2) 对于 $\mathcal{R} \mathcal{I} (\text{Td})^*$,
- $$\#_{\text{Idy Tc}}(\mathcal{R} \# \mathcal{t}) = \begin{cases} \#_{\text{Idy Tc}}(\mathcal{R}), \mathcal{t} \mathcal{I} \text{T} - \{\mathcal{t}_r\}; \\ \#_{\text{Idy Tc}}(\mathcal{R} \# \mathcal{t} \# \mathcal{t}_o, \mathcal{t} \mathcal{I} \# \text{p}_o; \\ \#_{\text{Idy Tc}}(\mathcal{R} \# \mathcal{t}, \mathcal{t} \mathcal{I} \text{Tc} - \{\mathcal{t}_o\}) \mathcal{G} \# \text{p}_o. \end{cases}$$

相应地, 称 $\#_{\text{Idy T}}(\mathcal{L}(\mathcal{A}))(\#_{\text{Idy Tc}}(\mathcal{L}(\mathcal{A})))$ 为从 $\mathcal{A}$ 到 $\mathcal{B}$ 的投影语言.

引理 1 设 $\mathcal{A}$ 是 $\mathcal{B}$ 的扩展 Petri 网, 若 $\mathcal{A}$ 是 k_2 有序的, 则 $\forall \mathcal{R} \mathcal{I} \mathcal{L}(\mathcal{A})$, 有 $\mathcal{R} = \mathcal{R} \# \mathcal{R} \#$, $\# \mathcal{R}_{i-1} \# \mathcal{R}_i \#$, , 使得

$$\#(\mathcal{R}_{i-1}, i^\#) = 1, \#(\mathcal{R}_{i-1}, \# \text{p}_o) = 0,$$

$$\#(\mathcal{R}_i, i^\#) = 0, \#(\mathcal{R}_i, \# \text{p}_o) = 1.$$

由定义 2 的 3 个条件直接证明即可.

引理 1 表明其扩展 Petri 网是 k_2 有序的 Petri 网, 具有良好的输入输出性质: 任一个托肯从初始库所启动网运行, 都会最终在出口库所中产生一个托肯. 序列 $\mathcal{R}_{i-1} \# \mathcal{R}_i$ 就描述了该行为.

定理 1 若 $\mathcal{A} = (\text{Nd}, \text{Md})$ 是 $\mathcal{B} = (\text{Nc}, \text{Md})$ 取代 $\mathcal{B} = (\text{N}, \text{Mo})$ 中的变迁 $\mathcal{t}_r$ 得到的精炼 Petri 网, $\mathcal{A} = (\text{Nc}, \text{Mo})$ 是 $\mathcal{B}$ 的扩展 Petri 网, 则 $\mathcal{P} \mathcal{R} \mathcal{I} \mathcal{L}(\mathcal{A})$, 有 $\#_{\text{Idy T}}(\mathcal{R}) \mathcal{I} \mathcal{L}(\mathcal{B})$, $\#_{\text{Idy Tc}}(\mathcal{R}) \mathcal{I} \mathcal{L}(\mathcal{B})$, 且 $\text{Md} \leq \text{Md} \upharpoonright \mathcal{R} \mathcal{I} \mathcal{M}$, 有

$$\text{Mo} \upharpoonright \#_{\text{Idy T}}(\mathcal{R}) \mathcal{I} \mathcal{M}, \text{Mo} \upharpoonright \#_{\text{Idy Tc}}(\mathcal{R}) \mathcal{I} \mathcal{M}.$$

其中

$$\text{M}(\mathcal{r}_i) = \text{Md}(\mathcal{p}_i) + \sum_j \text{M}(\mathcal{r}_o) = \text{Md}(\mathcal{p}_o);$$

$$\mathcal{P} \mathcal{P} \mathcal{I} \mathcal{P} - \{\mathcal{r}_i, \mathcal{r}_o\}, \text{M}(\mathcal{p}) = \text{Md}(\mathcal{p});$$

$$\text{Mc}(\mathcal{i}) = k - \sum_j \text{Mc}(\mathcal{o}) = 0;$$

$$\mathcal{P} \mathcal{P} \mathcal{I} \mathcal{P} - \{\mathcal{i}, \mathcal{o}\}, \text{Mc}(\mathcal{p}) = \text{Md}(\mathcal{p});$$

$$\text{V} = \#(\mathcal{R}, \mathcal{p}_i^\#) - \#(\mathcal{R}, \# \text{p}_o).$$

该引理的证明可参考文献[8, 10], 限于篇幅, 这里不作证明. 定理 1 给出了精炼 Petri 网与原网、子网在可达标识和行为序列上的保持关系. 因此有如下推论:

推论 1 若 $\mathcal{A} = (\text{Nd}, \text{Md})$ 是 $\mathcal{B} = (\text{Nc}, \text{Mo})$ 取代 $\mathcal{B} = (\text{N}, \text{Mo})$ 中的变迁 $\mathcal{t}_r$ 得到的精炼 Petri 网, $\mathcal{A} = (\text{Nc}, \text{Mo})$ 是 $\mathcal{B}$ 的扩充 Petri 网, 则 $\#_{\text{Idy T}}(\mathcal{L}(\mathcal{A})) \mathcal{A} \mathcal{L}(\mathcal{B})$, $\#_{\text{Idy T}}(\mathcal{L}(\mathcal{A})) \mathcal{A} \mathcal{L}(\mathcal{B})$.

定理 2 若 $\mathcal{A} = (\text{Nd}, \text{Md})$ 是 $\mathcal{B} = (\text{Nc}, \text{Mo})$ 取代 $\mathcal{B} = (\text{N}, \text{Mo})$ 中的变迁 $\mathcal{t}_r$ 得到的精炼 Petri 网, 则 $\mathcal{L}(\mathcal{A}) \mathcal{A} \#_{\text{Idy T}}(\mathcal{L}(\mathcal{A}))$.

证明 根据引理 1 可知, $\forall \mathcal{R} \mathcal{I} \mathcal{L}(\mathcal{B})$, 有 $\mathcal{R} = \mathcal{R} \# \mathcal{R} \#$, $\# \mathcal{R}_{i-1} \# \mathcal{R}_i \#$, , 使得 $\#(\mathcal{R}_{i-1}, i^\#) = 1$, $\#(\mathcal{R}_{i-1}, \# \text{p}_o) = 0$, $\#(\mathcal{R}_i, i^\#) = 0$, $\#(\mathcal{R}_i, \# \text{p}_o) = 1$. 因此对于 $\mathcal{P} \mathcal{R} \mathcal{I} \mathcal{L}(\mathcal{A})$, 可以构造 $\mathcal{R}$, 即将 $\mathcal{R}$ 中的第 i 个 $\mathcal{t}_r$ 用 $\mathcal{R}_{i-1} \# \mathcal{R}_i$ 代替. 显然有 $\mathcal{R} \mathcal{I} \mathcal{L}(\mathcal{A})$, 所以有 $\mathcal{L}(\mathcal{A}) \mathcal{A} \#_{\text{Idy T}}(\mathcal{L}(\mathcal{A}))$.

定理 2 表明原网的行为都可在精炼网中得到刻画. 综合定理 2 和推论 1 可以知道, 原网的行为与精炼网的行为之间存在着——对应关系, 表现为如下推论:

推论 2 若 $\mathcal{A} = (\text{Nd}, \text{Md})$ 是 $\mathcal{B} = (\text{Nc}, \text{Mo})$ 取代 $\mathcal{B} = (\text{N}, \text{Mo})$ 中的变迁 $\mathcal{t}_r$ 得到的精炼 Petri 网, 则 $\mathcal{L}(\mathcal{A}) = \#_{\text{Idy T}}(\mathcal{L}(\mathcal{A}))$.

引理 2 对于 $\mathcal{P} \mathcal{R} \mathcal{I} \mathcal{L}(\mathcal{A})$, 一定有 $\forall \mathcal{R} \mathcal{I} (\text{Tc} - \{i^\#\})^*$, 使得 $\mathcal{R} \# \mathcal{R} \mathcal{I} \mathcal{L}(\mathcal{A})$, 且 $\#(\mathcal{R}, i^\#) = \#(\mathcal{R} \# \mathcal{R}, \# \text{p}_o)$.

证明 设 $\mathcal{R} \mathcal{I} \mathcal{L}(\mathcal{A})$. 由定理 1 可知 $\#_{\text{Idy Tc}}(\mathcal{R}) \mathcal{I} \mathcal{L}(\mathcal{B})$, 而根据定义 2 条件 3) 可知存在 $\mathcal{R} \mathcal{I} (\text{Tc} - \{i^\#\})^*$ 有 $\#_{\text{Idy Tc}}(\mathcal{R}) \# \mathcal{R} \mathcal{I} \mathcal{L}(\mathcal{B})$, $\#(\#_{\text{Idy Tc}}(\mathcal{R}), i^\#) = \#(\#_{\text{Idy Tc}}(\mathcal{R}) \# \mathcal{R}, \# \text{p}_o)$. 而根据定理 1 中标识的对应关系, 显然有 $\mathcal{R} \# \mathcal{R} \mathcal{I} \mathcal{L}(\mathcal{A})$, 且 $\#(\mathcal{R}, i^\#) = \#(\#_{\text{Idy Tc}}(\mathcal{R}), i^\#) = \#(\#_{\text{Idy Tc}}(\mathcal{R}) \# \mathcal{R}, \# \text{p}_o) = \#(\mathcal{R} \# \mathcal{R}, \# \text{p}_o)$.

定理 3 若 $\mathcal{A}$ 是 md 有界的, 那么 $\mathcal{B}$ 是 md 有界的.

证明 根据引理 2 和定理 2 可知, $\mathcal{P} \mathcal{R} \mathcal{I} \mathcal{L}(\mathcal{A})$, $\forall \mathcal{R} \mathcal{I} \mathcal{L}(\mathcal{A})$, 使得 $\#_{\text{Idy T}}(\mathcal{R}) = \mathcal{R}$ 且 $\#(\mathcal{R}, \mathcal{p}_i^\#) = \#(\mathcal{R}, \# \text{p}_o)$. 设 $\text{Mo} \upharpoonright \mathcal{R} \mathcal{I} \mathcal{M}$, $\text{Md} \upharpoonright \mathcal{R} \mathcal{I} \mathcal{M}$, 则根据定理 1, $\mathcal{P} \mathcal{P} \mathcal{I} \mathcal{P}$, 有 $\text{M}(\mathcal{p}) = \text{Md}(\mathcal{p}) \upharpoonright \text{md}$, 因而, $\mathcal{B}$ 是 md 有界的. $\mathcal{t}$

定理 4 若 $\mathcal{B}$ 和 $\mathcal{B}$ 是有界的, 则 $\mathcal{A}$ 也是有界的.

证明 分别设 $\mathcal{B}$ 和 $\mathcal{B}$ 的界是 m 和 mc , 则 $\mathcal{A}$ 的

扩充 Petri 网 $\tilde{2c}$ 的界也是 mc . 设 $R \in L(2d)$, $Md[R]M$, 则根据定理 1 有

$$M_0[\#_{\text{Idy } T}(R)]4M, M_0[\#_{\text{Idy } Tc}(R)]4Mc, \\ \#(R, p_i^\#) \setminus \#(R, p_o^\#),$$

因而对于 $P \in P$, 有 $Md(p) \leq M(p) \leq m$. 同样对于 $P \in Pc - \{i, o\}$, 有 $Md(p) = Mc(p) \leq mc$, 因而对于 $P \in Pd$, 有 $Md(p) \leq \max(m, mc)$, $2d$ 是有界的, 其界 $md = \max(m, mc)$. t

定理 5 若 $2d$ 是活的, 那么 2 是活的.

证明 设 $R \in L(2)$, 根据定理 2, 一定存在 $R \in L(2d)$, 有 $\#_{\text{Idy } T}(R) = R$ 因为 $2d$ 是活的, 因此 $P \in T$, 一定存在 $R \in (Td)^*$, 使得 $R \# R \# t \in L(2d)$. 显然根据定理 1 和投影定义可知, $\#_{\text{Idy } T}(R \# R \# t) = R \# \#_{\text{Idy } T}(R) \# t \in L(2)$, 因而 2 是活的. t

定理 6 若 2 和 $\tilde{2c}$ 是活的, 且 $P \in R(2)$, 存在 M_1 和 $R \in T^*$, 有 $M[R]M_1$, 且 $M_1(r_i) = k$, 那么 $2d$ 也是活的.

证明 设 $R \in L(2d)$, 根据引理 2, 一定 $v \in R \in (Tc - \{i^\#\})^*$, 使得 $R \# R \in L(2d)$, 且 $\#(R, p_i^\#) = \#(R \# R, p_o^\#)$. 下面分两种情况讨论:

1) 根据定理 1 可知, $\#_{\text{Idy } T}(R \# R) \in L(2)$. 因为 2 是活的, 所以 $P \in T - \{t_r\}$, 有 $\#_{\text{Idy } T}(R \# R) \# R \# t \in L(2)$, 其中 $R \in T^*$. 而根据定理 3, 一定存在 $R \in (Td)^*$, 使得 $R \# R \# R \in L(2d)$, 且 $\#_{\text{Idy } T}(R \# R \# R) \in L(2)$. 再根据定理 1, 可知 $P \in P - \{r_i\}$, 有 $Md(p) = M(p)$, 其中 $Md[R \# R \# R]4M$, $M_0[\#_{\text{Idy } T}(R \# R \# R)]4M$, 因而 $Md[t_4]$, 即有 $R \# R \# R \# t \in L(2d)$, t 在 $2d$ 中是活的.

2) 根据定理 1 可知, $\#_{\text{Idy } T}(R \# R) \in L(2)$. 而由定理条件, 存在 $R \in T^*$, 使得 $\#_{\text{Idy } T}(R \# R) \# R \# t \in L(2)$, 且有 $M_1(r_i) = k$, 其中 $M_0[\#_{\text{Idy } T}(R, R \# R)]4M_1$. 同理, 根据 1) 中的证明, 一定有 $R \in (Td)^*$, 使得 $R \# R \# R \in L(2d)$, 且 $\#_{\text{Idy } T}(R \# R \# R) \in L(2)$, $\#(R \# R \# R, p_i^\#) = \#(R \# R \# R, p_o^\#)$. 设 $Md[R \# R \# R]4M$, 则 $Md(p_i) = M_1(r_i) = k$. 令 $R = \#_{\text{Idy } Tc}(R \# R \# R)$, 根据定理 1 有 $R \in L(\tilde{2c})$, 又因为 $\tilde{2c}$ 是活的, 因而对于 $P \in Tc$, 一定存在 $R \in (Tc)^*$, 使得 $R \# R \# tc \in L(\tilde{2c})$. 假设 $R = R_1 \# t_0 \# R_2 \# t_0 \# \dots \# R_i \# R_{i+1}$, 其中 $R_i \in (Tc - \{t_0\})^*$, 显然, $\#(R_i, p_i^\#) \leq k$. 又因为 $Md(p_i) = k$, 即在 $2d$ 中 R_i 是可引发的. 同样因为 2 是活的, 每个 t_0 的引发可以由 2 中的变迁序列 R_i 来模拟. 存在 $\#_{\text{Idy } Tc}(R) = R$, 使得 $R \# R \# R \# R \# tc \in L(2d)$,

即 tc 在 $2d$ 中是活的.

综上所述, $2d$ 是活的. t

这一节的分析表明, 精炼 Petri 网与原网和子网之间具有良好的行为和性质对应关系. 因而可以借助这些结果, 实现复杂系统的建模与分析.

4 实 例

一个顺序资源共享系统^[12] 中包括了 6 类资源 R_i 和两个工作 Job_1, Job_2 . 其中: R_1, R_2 是 Job_1 和 Job_2 的共享资源; R_3, R_4 是 Job_1 的私有资源; R_5, R_6 是 Job_2 的私有资源. Job_1 顺序包括 8 道工序, Job_2 顺序包括 7 道工序, 其中每道工序所需的资源类和数量如表 1 所示. 其中 $aR_{i,1} + bR_{i,2} + \dots$ 表示共需要用到 a 个 $R_{i,1}$ 类资源, b 个 $R_{i,2}$ 类资源, $\dots$. Job_1 和 Job_2 的 2, 3 道工序是一组选择工序, 6, 7 道工序是一组选择工序. 现假设系统中的各类资源的资源数目为 $R_1 = 4, R_2 = 3, R_3 = 4, R_4 = 3, R_5 = 4$ 和 $R_6 = 3$. Job_1 和 Job_2 中分别有 3 个加工工件等待加工.

表 1 Job_1 和 Job_2 所需资源

工序	Job_1 所需资源	Job_2 所需资源
1	$1R_1$	$1R_2$
2	$1R_1 + 1R_3$	$1R_2 + 1R_5$
3	$1R_1 + 1R_4$	$1R_2 + 1R_6$
4	$1R_1 + 1R_3 + 1R_4$	$1R_2 + 1R_5 + 1R_6$
5	$1R_1$	$1R_2$
6	$1R_1$	$1R_1$
7	$1R_1 + 1R_2$	$1R_2$
8	$1R_1$	

下面对该系统进行 Petri 网建模和分析, 其中变迁表示资源的分配和释放, 库所则表示工作中的工序. 图 3 是该系统的 Petri 网模型 2, 该模型反映了系统中的资源共享机制, 即模型中只出现了共享资源 R_1, R_2 及其在 Job_1, Job_2 中的分配情况, 没有刻画私有资源及其相应的工序, 图中变迁 t_{12}, t_{22} 分别表示 Job_1, Job_2 中使用私有资源的部分, 分别包含 Job_1, Job_2 中的第 2, 3 和 4 道工序. 图 4 表示由这 3 道工序组成的子过程及其私有资源的分配机制的 Petri 网模型 $\tilde{2c}$. 图 5 是 $\tilde{2c}$ 的扩展网 $\tilde{2c}$. 图 6 是利用本文定义的精炼操作, 将图 4 中的 Petri 网代替图 3 中的 t_{12} 和 t_{22} 得到的精炼 Petri 网模型 $2d$. $2d$ 给出了该资源共享系统的精确刻画, 完整地刻画了系统中两个工作使用各类资源的情况. 上述建模过程表明: 精炼操作能够为设计者或建模者提供多层次的模型, 如图 3 侧重于反映系统中资源共享机制, 而图 6 在此基础上, 进一步描述了系统中全部资源的使用机制.

事实上, 精炼操作不仅提供了层次化和逐步求

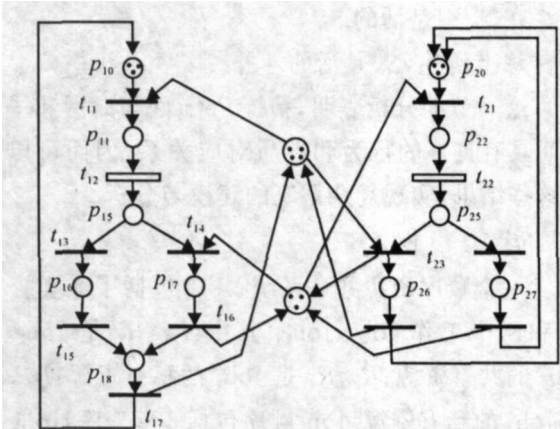


图 3 系统资源共享机制的 Petri 网模型 2

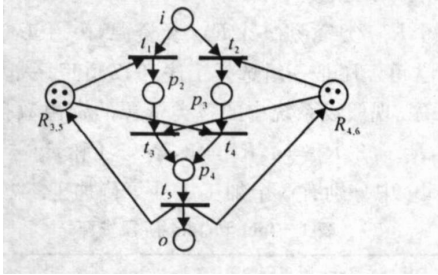


图 4 子网2c

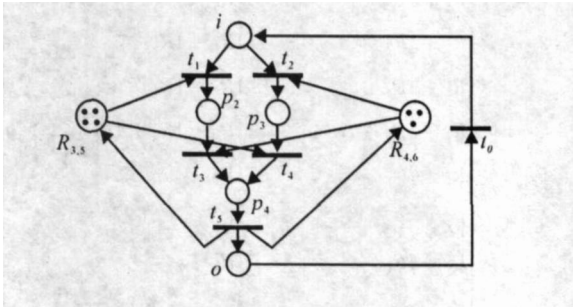


图 5 扩展子网 $\bar{2}c$

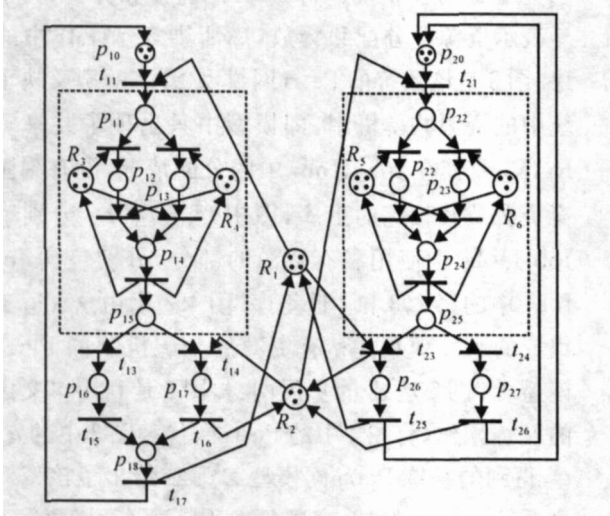


图 6 顺序资源共享系统的 Petri 网模型 2d

精的建模方法,而且如前文中所述,它还有助于模型的分析 and 验证.对于图2中的模型,易证 2 是活的和

有界的, $2c$ 是有界的且 2 的扩展网 $\bar{2}c$ 是活的.基于本文中的相关定义及定理,可以得到如下结论:

- 1) 2 中的变迁 t_{12} 和 t_{22} 是 32 使能的,但不是 42 使能的;
- 2) $2c$ 的扩展网 $\bar{2}c$ 是 32 有序的;
- 3) $2d$ 是有界的;
- 4) $PMIR(2)$, 存在 M_1 和 RIT^* , 有 $M[R4M_1]$, 且 $M_1(p_{11}) = 3$;
- 5) $PMIR(2)$, 存在 M_2 和 RIT^* , 有 $M[R4M_2]$, 且 $M_2(p_{21}) = 3$;
- 6) $2d$ 是活的.

上述结论表明了 $2d$ 是活的和有界的,验证了该资源系统的共享机制是正确无误的,可以实现有效的资源共享,保证工作的顺利进行.

5 结 语

本文定义了一类 Petri 网的精炼操作,并分析了该精炼操作的相关性质,建立了精炼 Petri 网与原网、子网间的动态行为上的关联,给出了一组性质分析判据.本文的工作不仅为复杂系统的 Petri 建模提供了新的方法,而且有助于复杂 Petri 网模型的分析 and 验证.

参考文献(References)

[1] Zhou M C, McDermott K, Patel P A. Petri net synthesis and analysis of a flexible manufacturing system cell[J]. IEEE Trans on System, Man, Cybern, 1993, 23(2): 523-531.

[2] 蒋昌俊. 离散事件动态系统的 PN 机理论[M]. 北京: 科学出版社, 2000.

(Jiang C J. PN machine theories of discrete event systems[M]. Beijing: Science Press, 2000.)

[3] Murata T, Shenker B, Shatz S M. Detection of adastatic deadlocks using Petri net invariants[J]. IEEE Trans on Software Engineering, 1989, 15(3): 314-326.

[4] 袁崇义. Petri 网原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.

(Yuan C Y. Principle and its application of Petri nets [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005.)

[5] He X D, Lee J A N. A methodology for constructing predicate transition net specifications [J]. Software practice and Experience, 1991, 21(8): 845-875.

[6] Jensen K. Colored petri nets: Basic concepts, analysis methods and practical use [C]. Basic Concepts, Monographs in Theoretical Computer Science. Berlin: Springer-Verlag, 1997.

(下转第 147 页)

知识化制造环境下预测自学习的基本思想. 将市场扩散模型融入知识化制造系统, 必将为知识化制造系统赋予更加丰富的内涵.

参考文献(References)

[1] 严洪森, 刘飞. 知识化制造系统))) 新一代先进制造系统[J]. 计算机集成制造系统, 2001, 7(8): 7211.
(Yan H S, Liu F. Knowledgeable manufacturing system) A new kind of advanced manufacturing system [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2001, 7(8): 7211.)

[2] Bass F M. A new product growth model for consumer durables[J]. Management Science, 1969, 15(5): 212-227.

[3] Steffens P R, Murphy D N. A mathematical model for new product diffusion: The influence of innovators and imitators[J]. Mathematical and Computer Modeling, 1992, 16(4): 112-126.

[4] Tanny S M, Derzko N A. Innovators and imitators in innovation diffusion Modeling [J]. J of Forecasting, 1988, 7(4): 225-234.

[5] 张彬, 杨国英, 荣国辉. 产品扩散模型在 internet 采用者分析中的应用[J]. 中国管理科学, 2004, 10(2): 52-56.
(Zhang B, Yang G Y, Rong G H. Application of diffusion models for internet consumer analysis [J]. Chinese J of Management Science, 2004, 10(2): 52-56.)

[6] Steffens P R. A model of multiple unit ownership as a diffusion process [J]. Technological Forecasting and Social Change, 2003, 70(9): 902-917.

[7] 王海云, 尚志田. 重复购买产品的产品生命周期模型研究[J]. 中国管理科学, 2002, 10(2): 24-29.
(Wang H Y, Shang Z T. The research on repurchasing product life cycle model [J]. Chinese J of Management

Science, 2002, 10(2): 24-29.)

[8] 乔忠, 王福华, 刘巍. 经常购买模型及其参数的极大似然估计[J]. 系统工程, 2004, 22(6): 252-258.
(Qiao Z, Wang F H, Liu W. Frequent purchased models and maximum likelihood estimation for its parameters[J]. Systems Engineering, 2004, 22(6): 252-258.)

[9] 艾兴政, 唐小我. 广告媒介下两种产品竞争与扩散模型研究[J]. 管理工程学报, 2000, 14(3): 19-22.
(Ai X Z, Tang X W. Study of competition and diffusion models about two products in advertisement[J]. J of Industrial Engineering / Engineering Management, 2000, 14(3): 19-22.)

[10] 万福才, 汪定伟, 李彦平. 微粒群优化算法在相关新产品组合投入的应用[J]. 控制与决策, 2004, 19(5): 520-524.
(Wan F C, Wang D W, Li Y P. Particle swarm optimization of correlative product combinatorial introduction model[J]. Control and Decision, 2004, 19(5): 520-524.)

[11] 胡知能, 徐玖平. 创新产品扩散的多阶段动态模型[J]. 系统工程理论与实践, 2005, 25(4): 152-156.
(Hu Z N, Xu J P. Multistage dynamical model of innovation product diffusion[J]. Systems Engineering: Theory and Practice, 2005, 25(4): 152-156.)

[12] 马知恩, 周义仓. 常微分方程定性及稳定性方法[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
(Ma Z E, Zhou Y C. Qualitative and stability theory of ordinary differential equation [M]. Beijing: Science Press, 2001.)

[13] 蒋中一. 数理经济学的基本方法[M]. 北京: 商务印书馆, 2003.
(Chiang A C. Fundamental methods of mathematical economics[M]. Beijing: Commercial Press, 2003.)

(上接第 142 页)

[7] Betous Almeida C, Kanoun K. Construction and stepwise refinement of dependability models [J]. Performance Evaluation, 2004, 56(1): 272-306.

[8] Suzuki I, Murata T. A method for stepwise refinement and abstraction of petri nets[J]. J of Computer and System Science, 1983, 27(1): 51-76.

[9] Brauer W, Gold R, Vogler W. A survey of behaviour and equivalence preserving refinements of petri nets[J]. Lecture Notes in Computer Science, 1990, 483: 124-146.

[10] Huang H J, Cheung T Y, Mak W M. Structure and

behavior preservation by Petri net based refinements in system design [J]. Theoretical Computer Science, 2004, 328(3): 242-269.

[11] Murata T. Petri nets: Properties, analysis and applications[J]. Proc of the IEEE, 1989, 77(4): 541-580.

[12] Park J, Reveliotis S. Deadlock avoidance in sequential resource allocation systems with multiple resource acquisitions and flexible routings[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2001, 46(10): 1572-1583.