

Petri 网分解方法及应用综述

刘 聪¹, 鲁法明¹, 曾庆田^{1,2}, 段 华³

- (1. 山东科技大学信息科学与工程学院, 山东青岛 266590;
2. 山东科技大学电子通信与物理学院, 山东青岛 266590;
3. 山东科技大学数学与系统科学学院, 山东青岛 266590)

摘要: 综述了当前 Petri 网的主要分解方法, 包括基于库所指标分解、基于变迁指标分解、和分解、并分解、公平分解、守恒分解、流分解、最小功能子网分解等国内外的研究现状, 回顾了针对不同分解方法的进一步研究情况, 分析了分解方法在系统建模分析过程中的应用情况。最后, 结合 Petri 网理论的研究现状, 提出 Petri 网分解理论体系架构, 以及在分解方面的进一步研究方向。

关键词: 信息科学与系统科学基础学科; Petri 网; 综述; 分解方法; Petri 网应用

中图分类号: TP311 文献标识码: A 文章编号: 1674-2850(2015)04-0305-11

Review on Petri nets decomposition methods and application

LIU Cong¹, LU Faming¹, ZENG Qingtian^{1,2}, DUAN Hua³

- (1. College of Information Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;
2. College of Electronic, Communication and Physics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;
3. College of Mathematics and Systems Science, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: This research summarized several mainstream decomposition methods of Petri nets, including decomposition method based on the index of places, decomposition method based on the index of transitions, union decomposition, fair decomposition, conservative decomposition, string decomposition, and open decomposition. The comparison of different decomposition methods in terms of applicable conditions, structural property and dynamic property were obtained. Applications of decomposition theory in physical systems were summarized. Finally, by considering the state of art, some new research orientations are given.

Key words: basic subject of information science and system science; Petri nets; review; decomposition method; Petri nets application

0 引言

Petri 网是 1962 年由联邦德国科学家 PETRI 在他的博士论文中首先提出^[1]。20 世纪 70 年代初, Petri 网的概念和思想方法得到欧美学者的广泛关注, 经过多年的发展, Petri 网理论已经形成一门系统、独立的学科分支, 并在计算机和自动化等领域广泛应用。Petri 网在处理并发和冲突方面具有强大的能力, 在

基金项目: 国家自然科学基金 (61170079, 61202152); 高等学校博士学科点专项科研基金 (20103718110007); 公益性行业 (农业) 科研专项 (201303107); 教育部网络时代的科技论文快速共享研究项目 (2012107); 青岛市科技计划基础研究项目 (13-1-4-153-jch); 山东科技大学杰出青年基金 (2010KYJQ101); 山东科技大学研究生科技创新基金项目 (YC140106)

作者简介: 刘聪 (1990—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: Petri 网理论与应用、应急处置流程建模与分析、流程挖掘等

通信联系人: 曾庆田, 教授, 主要研究方向: Petri 网理论与应用、个性化信息服务、应急处置管理等. E-mail: qtzeng@163.com

复杂系统建模、分析过程中应用广泛。Petri 网分解理论是将结构复杂的 Petri 网按照某种方式分解成结构简单的子网,它是复杂 Petri 网系统建模过程中一种重要的自顶向下的建模方法,适用于分析结构复杂 Petri 网的动态性质和结构性质。

在 Petri 网模型的基础上,分析技术的研究取得了很大进展,其中包括可达标识图与可覆盖树、关联矩阵与状态方程、Petri 网语言和 Petri 网进程等。复杂网系统在分析过程中产生的状态组合爆炸问题是 Petri 网在实际系统应用中的最大障碍。针对这一问题,国内外的许多学者做了大量工作,他们提出网化简,网运算等思想,定义了化简子网、逐次化简、以及针对特殊子网、特殊结构的化简方法^[1-2]。总体来说,有两个思路:1)通过简单子网合成复杂的网系统,主要合成方法包括同步合成和共享合成;2)作为合成的逆过程,分解在对复杂网系统进行分析的过程中也起着同等重要的作用。把结构复杂的网系统按照一定的分解方法,分解成结构简单的子网,因为子网的性质通常比较容易进行分析,所以,可以根据子网与原网系统之间的性质保持关系对原网系统进行分析。

这里重点介绍当前几种主流的分解技术,并详细阐述每种技术研究现状和具体应用,最终指出 Petri 网分解的研究方向。

1 Petri 网的基本概念

假定读者对 Petri 网的概念有所了解,否则可参见参考文献^{[1]~[5]}。以下列出文中出现的基本概念和术语。

定义 1^[2] 满足下列条件的三元组 $N = \{P, T; F\}$ 称作一个网。

- 1) $P \cap T = \emptyset, P \cup T \neq \emptyset$;
- 2) $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$;
- 3) $\text{Dom}(F) \cup \text{Cod}(F) = P \cup T$;

其中,

$$\text{Dom}(F) = \{x \in P \cup T \mid \exists y \in P \cup T : (x, y) \in F\},$$

$$\text{Cod}(F) = \{x \in P \cup T \mid \exists y \in P \cup T : (y, x) \in F\}.$$

定义 2^[2] 设 $N = \{P, T; F\}$ 为一个网,对于 $x \in P \cup T$, 记

- 1) $\bullet x = \{y \mid y \in P \cup T \wedge (y, x) \in F\}$,
- 2) $x^\bullet = \{y \mid y \in P \cup T \wedge (x, y) \in F\}$,

称 $\bullet x$ 为 x 的前集或输入集, x^\bullet 为 x 的后集或输出集。

定义 3^[2] 设 $\Sigma = \{P, T; F, M_0\}$ 是一个 Petri 网,其中 $M_0 : P \rightarrow \mathbb{Z}^+$ 为 Σ 的初始标识。 M 的可达标识集 $R(M_0)$ 定义为满足下列 2 个条件的最小集合:

- 1) $M_0 \in R(M_0)$;
- 2) 若 $M \in R(M_0)$, 且存在 $t \in T$, 使得 $M[t > M'$, 则 $M' \in R(M_0)$.

2 Petri 网的分解方法综述

2.1 基于库所指标的分解方法

定义 4^[3] 设 $\Sigma = (P, T; F, M_0)$ 为一个 Petri 网,函数 $f : P \rightarrow \{1, 2, \dots, k\}$ 满足: $\forall p_1, p_2 \in P, \exists t \in T$, 使得

$\{p_1, p_2\} \subseteq \bullet t$ 或 $\{p_1, p_2\} \subseteq t^\bullet$, 则 $f(p_1) \neq f(p_2)$, 称 f 为 Σ 的库所指标函数, $f(p)$ 为库所 p 的指标。

定义 5^[3] 设 $\Sigma = (P, T; F, M_0)$ 为一个 Petri 网, 函数 $f: P \rightarrow \{1, 2, \dots, k\}$ 为 Σ 的库所指标函数, 称 $\Sigma_i = (P_i, T_i; F_i, M_{0i}) (i \in \{1, 2, \dots, k\})$ 为 Σ 基于库所指标的分解网 Σ_i 满足:

- 1) $P_i = \{p \in P \mid f(p) = i\}, (i \in \{1, 2, \dots, k\});$
- 2) $T_i = \{t \in T \mid \exists p \in P_i, t \in \bullet p \cup p^\bullet\}, (i \in \{1, 2, \dots, k\});$
- 3) $F_i = \{(P_i \times T_i) \cup (T_i \times P_i)\} \cap F, (i \in \{1, 2, \dots, k\});$
- 4) $M_{0i} = \Gamma_{P \rightarrow P_i} M_0$ (其中, $\Gamma_{P \rightarrow P_i} M_0$ 为 M_0 在 P_i 上的投影, $\forall p \in P_i, M_{0i}(p) = M_0(p)$).

文献[3]通过定义库所的指标函数, 给出了一种基于库所指标的 Petri 网分解方法, 通过分解得到结构简单的子网系统满足: $|\bullet t| \leq 1$ 且 $|t^\bullet| \leq 1$, 原网系统的状态和语言与子网系统之间存在着一种投影关系, 通过子网的同步合成可以得到原网系统的性质和行为。文献[4]给出了一个基于库所指标的 Petri 网分解算法并分析了其时间复杂性为多项式阶, 为结构复杂 Petri 网的基于库所指标的分解提供了具体可行的实现方法。

2.2 并分解 I

定义 6^[6] 设 $\Sigma = (P, T; F, M_0)$ 为 Petri 网, $T_1, T_2 \in T$ 且 $T_1 \cup T_2 = T$, $P_1 = \bullet T_1 \cup T_1^\bullet$, $P_2 = \bullet T_2 \cup T_2^\bullet$. 令 $\Sigma_i = (P_i, T_i; F_i, M_{0i}) (i = 1, 2)$, 其中 $F_i = F \cap ((P_i \times T_i) \cup (T_i \times P_i))$, $\forall p \in P_i, M_{0i}(p) = M_0(p)$, 上述过程称为把 Σ 分成 2 个子网 Σ_1 和 Σ_2 , 满足: $\Sigma_1 \cup \Sigma_2 = \Sigma$.

这种把网通过变迁集的划分而分解成两个 (或者几个) 子网的分解称为 Petri 网的并分解 I.

2.3 并分解 II

定义 7^[6] 设 $\Sigma = (P, T; F, M_0)$ 为一个 Petri 网, 取 $P_1, P_2 \subseteq P$ 且 $P_1 \cup P_2 = P$, $T_1 = \bullet P_1 \cup P_1^\bullet$, $T_2 = \bullet P_2 \cup P_2^\bullet$. 令 $\Sigma_i = (P_i, T_i; F_i, M_{0i}) (i = 1, 2)$, 其中 $F_i = F \cap [(P_i \times T_i) \cup (T_i \times P_i)]$, $\forall p \in P_i, M_{0i}(p) = M_0(p)$, 上述过程称为把 Σ 分成 2 个子网 Σ_1 和 Σ_2 , 满足: $\Sigma_1 \cup \Sigma_2 = \Sigma$.

这种把网通过库所集的划分而分解成两个 (或者几个) 子网称为 Petri 网的并分解 II.

文献[6]给出了 Petri 网并分解的定义, 并从结构有界性、守恒性、可重复性和相容性等结构性性质方面, 讨论了通过这种分解原网与子网在结构性性质方面之间的关系。文献[7]在已有并分解理论研究基础上, 证明了经过相同变迁序列的触发后, 并分解 II 的子网中库所托肯的数目与原网一致, 为通过子网分析原网的动态性质提供了新的思路。

2.4 基于变迁指标的分解方法

定义 8^[8] 设 $\Sigma = (P, T; F, M_0)$ 为一个 Petri 网, 函数 $f: T \rightarrow \{1, 2, \dots, k\}$ 满足: $\forall t_1, t_2 \in T, \exists p \in P$, 使得 $\{t_1, t_2\} \subseteq \bullet p$ 或 $\{t_1, t_2\} \subseteq p^\bullet$, 则 $f(t_1) \neq f(t_2)$, 称 f 为 Σ 的变迁指标函数, $f(t)$ 为变迁 t 的指标。

定义 9^[8] 设 $\Sigma = (P, T; F, M_0)$ 为一个 Petri 网, 函数 $f: T \rightarrow \{1, 2, \dots, k\}$ 为 Σ 的变迁指标函数, 称 $\Sigma_i = (P_i, T_i; F_i, M_{0i}) (i \in \{1, 2, \dots, k\})$ 为 Σ 基于变迁指标的分解网 Σ_i 满足:

- 1) $T_i = \{t \in T \mid f(t) = i\}, (i \in \{1, 2, \dots, k\});$
- 2) $P_i = \{p \in P \mid \exists t \in T, p \in \bullet t \cup t^\bullet\}, (i \in \{1, 2, \dots, k\});$
- 3) $F_i = \{(P_i \times T_i) \cup (T_i \times P_i)\} \cap F, (i \in \{1, 2, \dots, k\});$

$$4) M_{0i} = \Gamma_{P \rightarrow P_i} M_0.$$

文献[8]通过定义变迁指标函数,给出了一种基于变迁指标的 Petri 网分解方法,通过分解所得结构简单的子网系统满足: $|s| \leq 1$ 且 $|s^*| \leq 1$, T-网,同时分析了分解过程中所满足的结构性质和动态性质,并指出通过子网的共享合成可以得到原网系统的性质和行为。文献[9]~[10]给出了一个基于变迁指标的 Petri 网分解算法并分析了其时间复杂性为多项式阶,为结构复杂 Petri 网的基于变迁指标的分解方法提供了具体可行的实现方法。文献[11]分析了基于库所指标的分解方法在什么条件下满足子网与原网之间不会增加不合理的行为和状态,并给出了子网保持原网性质(行为和状态)不变的充要条件及其判定算法。文献[12]分析了分解后的子网(S-网)所满足的语言性质,给出了求取他们语言性质的算法。文献[13]通过引入语言的同步交运算,分析了基于库所指标分解过程中所满足的语言性质。文献[14]通过分析基于库所指标的分解方法,给出了结构复杂 Petri 网语言行为的描述方法。文献[15]讨论了分解后子网的活性问题,并给出了各类 S-网的活性判定定理和判定算法。文献[16]分析了分解后子网(S-网)活性判定的充要条件和公平性判定定理。文献[17]给出了基于库所指标的分解过程中子网对原网结构性质的保持关系,并给出了几种通过子网直接判定原网性质的方法。文献[18]讨论了基于变迁指标分解得到的 T-网的活性问题,给出了各类 T-网的活性判定定理和判定算法。文献[19]分析了基于变迁指标的 Petri 网得到的子网的结构性质,以及子网与原网间的性质保持关系,得到了判定原网结构的方法和结论,并且给出了判定原网系统活性的一个条件。文献[20]分析了基于变迁指标的分解方法在什么条件下满足子网与原网之间不会增加不合理的行为和状态,并给出了子网保持原网性质(行为和状态)不变的充要条件及其判定算法。文献[21]总结了基于变迁指标和基于库所指标的分解方法,同时指出基于库所指标和基于变迁指标的 Petri 网分解方法是在分析结构复杂 Petri 网过程中两个对称的分析方法:基于库所指标的分解方法适于分析系统行为的同步,基于变迁指标分的 Petri 网适于分析系统资源的共享。

2.5 公平分解

定义 10^[22] 把一个网 $N = (P, T; F)$ 分解成 k 个公平子网 (k 为正整数),使网 N 等于这 k 个公平子网的并,这种分解称为网 N 的公平分解。

2.6 守恒分解

定义 11^[22] 把一个网 $N = (P, T; F)$ 分解成 k 个守恒子网 (k 为正整数),使网 N 等于这 k 个守恒子网的并,这种分解称为网 N 的守恒分解。

文献[22]提出了公平分解和守恒分解的概念并给出了达到公平分解和守恒分解的具体方法,同时证明了利用这种分解方法,子网保持原网的一些结构性性质,例如:公平分解和守恒分解过程中,原网是结构有界可重复的则分解得到的公平子网是相容守恒的;网 N_1, N_2 是结构有界的可重复网 N 通过守恒分解方法分解成的两个相容守恒子网,若 N_1, N_2 是公平网,则 N 也是公平网。这极大地方便了对子网性质的分析。

2.7 于功能子网的分解方法

定义 12^[23] 设 $Z = (N, X, Y)$ 为一个功能网,其中 $N = (P, T; F)$ 是一个 Petri 网, $X \subseteq P$ 是输入库所, $\forall p \in X: p = \emptyset$, $Y \subseteq P$ 是输出库所, $\forall p \in Y: p^* = \emptyset$ 且满足 $X \cap Y = \emptyset$. 库所集 $Q = P - (X \cup Y)$ 称为中间库所。同样定义功能网 $Z = (X, Q, Y, T, F)$ 表示 Petri 网 N 的结构元素。

2.8 流分解

定义 13^[24] 设 $N=(P,T;F)$ 为一个网, $t \in T$. 若 $|\bullet t| \geq 2$ 且 $|t \bullet| \geq 2$, 则说 t 为一个可裂变迁, 即对它可实施分裂操作. 对变迁 t 实施分裂操作是把他分裂两个变迁 t_1 和 t_2 , 使得: 1) $\forall i \in \{1,2\}$, 都有 $|\bullet t_i| \geq 1$ 且 $|t_i \bullet| \geq 1$; 2) $\bullet t_1 \cup \bullet t_2 = \bullet t$ 且 $t_1 \bullet \cup t_2 \bullet = t \bullet$; 3) $\bullet t_1 \cap \bullet t_2 = \emptyset$ 且 $t_1 \bullet \cap t_2 \bullet = \emptyset$.

文献[24]通过定义可列变迁的分裂操作, 实现了网与网系统的流分解运算. 通过对关联矩阵的分析, 得到了 S -不变量与 T -不变量的计算公式. 从有界性, 可重复行, 协调性, 活性, 公平性方面讨论了流分解运算对 Petri 网的各种动态性质和结构性质的良好保持性.

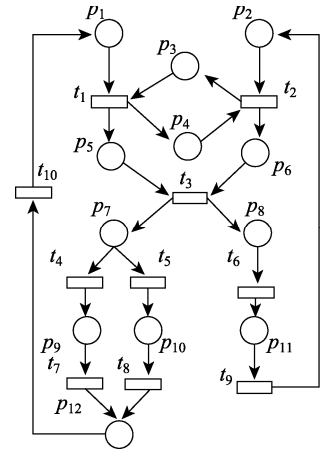


图 1 原网 Σ
Fig. 1 Original Petri nets Σ

3 Petri 网的分解实例分析

3.1 Petri 网的分解实例

图 1 中给出了一个相对较复杂的 Petri 网系统. 下面给出各种分解方法的具体事例.

3.1.1 基于功能子网的分解

定义输入库所集 $X = \{p_1, p_2\}$, 输出库所集 $Y = \{p_{11}, p_{12}\}$, 则 Σ 基于功能子网的分解如图 2 所示.

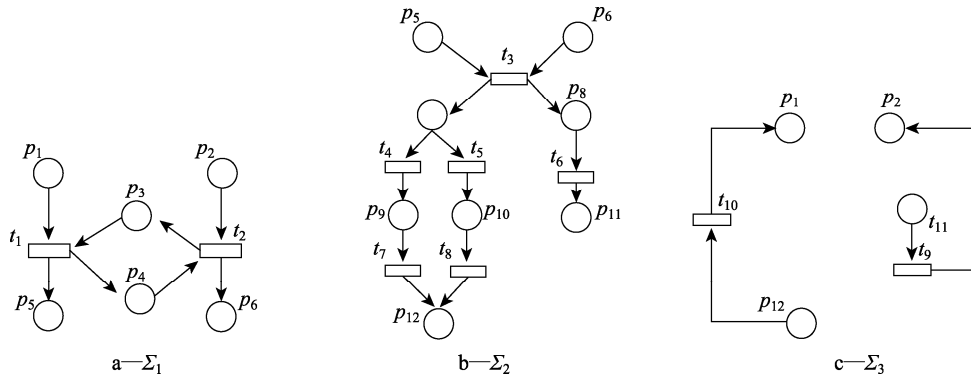


图 2 基于功能子网的分解子网
Fig. 2 Decomposed nets with functional decomposition method

3.1.2 基于库所指标的分解

图 3 中 $\Sigma_1, \Sigma_2, \Sigma_3$ 是 Σ 基于库所指标的分解子网, 其中库所指标函数为

$$f(p_1) = f(p_5) = f(p_7) = f(p_9) = f(p_{10}) = f(p_{12}) = 1,$$

$$f(p_3) = f(p_4) = 2,$$

$$f(p_2) = f(p_6) = f(p_8) = f(p_{11}) = 3.$$

3.1.3 流分解

由流分解的定义可知: $|\bullet t_1| \geq 2, |t_1 \bullet| \geq 2; |\bullet t_2| \geq 2, |t_2 \bullet| \geq 2; |\bullet t_3| \geq 2, |t_3 \bullet| \geq 2$, 所以 t_1, t_2, t_3 为可裂变迁, 对其进行分裂操作, 得到分解子网 $\Sigma_1, \Sigma_2, \Sigma_3$, 如图 3 所示.

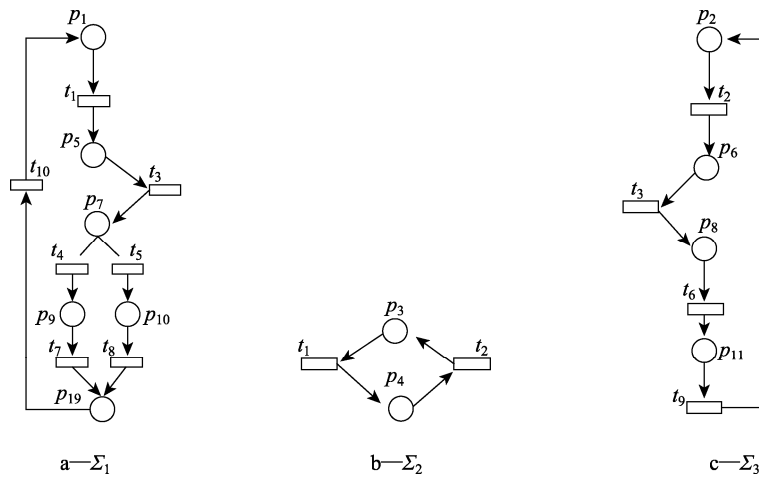


图3 基于库所指标和基于流分解的分解子网

Fig. 3 Decomposed nets with place index and string decomposition methods

3.1.4 基于变迁指标的分解

图4中 Σ_1, Σ_2 是 Σ 基于变迁指标的分解子网, 其中变迁指标函数为

$$f(t_1) = f(t_2) = f(t_3) = f(t_4) = f(t_6) = f(t_7) = f(t_9) = f(t_{10}) = 1, f(t_5) = f(t_8) = 2.$$

3.1.5 并分解 I

取 $P_1 = \{p_1, p_3, p_4, p_5, p_7, p_9, p_{10}, p_{12}\}$, $P_2 = \{p_2, p_6, p_8, p_{11}\}$ 则 $T_1 = \bullet P_1 \cup P_1^\bullet$, $T_2 = \bullet P_2 \cup P_2^\bullet$, Σ 分成2个子网 Σ_1 和 Σ_2 , 如图5所示。

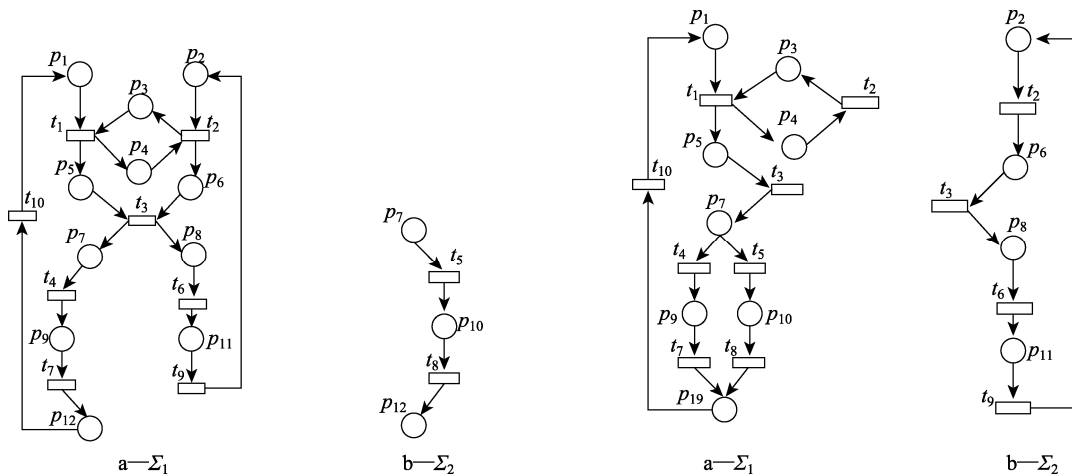


图4 基于变迁指标分解的分解子网

图5 基于并分解 I 的分解子网

Fig. 4 Decomposed nets with transition index decomposition method

Fig. 5 Decomposed nets with union I decomposition method

3.1.6 并分解 II

$T_1 = \{t_1, t_3, t_4, t_5, t_7, t_8, t_{10}\}$ $T_2 = \{t_2, t_6, t_9\}$, 则 $P_1 = \bullet T_1 \cup T_1^\bullet$, $P_2 = \bullet T_2 \cup T_2^\bullet$, Σ 分成2个子网 Σ_1 和 Σ_2 如图6所示。

3.1.7 公平分解, 守恒分解

图7中 $\Sigma_1, \Sigma_2, \Sigma_3, \Sigma_4$ 既是公平子网又是守恒子网。

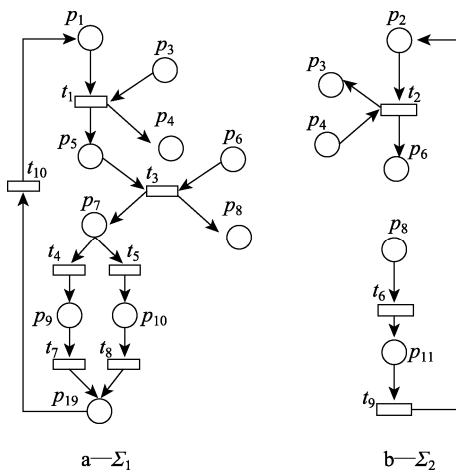


图 6 基于并分解 II 的分解子网
Fig. 6 Decomposed nets with union II decomposition method

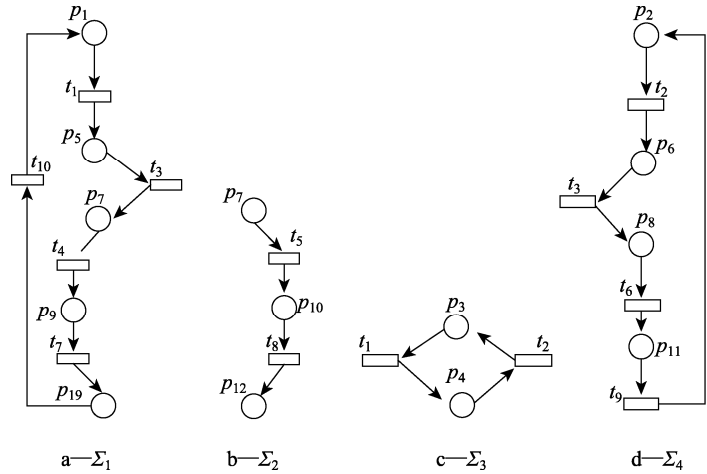


图 7 基于公平分解和守恒分解的分解子网
Fig. 7 Decomposed nets with fair and conservative decomposition methods

3.2 Petri 网的分解方法总结

通过第 2 节的综述和 3.1 节给出的综合例子, 可以综合比较各种不同分解方法的异同之处, 如表 1 所示。

表 1 Petri 网的分解方法比较
Tab. 1 Comparison on Petri net decomposition

分解方法	适用条件	结构性性质分析	动态性质分析	相关工作
并分解 I	无	有界性、守恒性、相容性	无	文献[6]
并分解 II	无	有界性、守恒性、可重复性、相容性	经过相同的变迁序列, 子网库所中托肯数目与原网一致	文献[6]、文献[7]
最小功能子网分解	库所可按实际意义分成输入库所和输出库所	分解的个功能子网中变迁集不相交	无	文献[23]
基于库所指标的分解	存在变迁的前集库所或后集库所数>1	有界性、守恒性、S-不变量、公平性、可重复性、结构活性	子网(S-网)活性和公平性、语言性质、行为性质	文献[3]、文献[11]、文献[12]、文献[14]、文献[15]、文献[16]、文献[17]
基于变迁指标的分解	存在库所的前集变迁或后集变迁数>1	可重复性、有界性、公平性、结构活性	子网(T-网)活性和公平性、语言性质、行为性质	文献[8]、文献[18]、文献[19]、文献[20]
公平分解	原网满足公平性	相容性、有界性、可重复性、公平性	无	文献[22]
守恒分解	原网满足守恒性	相容性、守恒性、有界性、可重复性、	无	文献[22]
流分解	适用于存在可裂变迁的 Petri 网	S-不变量、T-不变量、有界性、可重复性、协调性、守恒性	活性、公平性、有界性	文献[24]

4 Petri 网分解方法的应用

Petri 网作为系统建模、分析的重要工具已被广泛应用于各个方面, 主要体现在如下系统: 柔性制造系统, workflows、物流等的建模, 人工智能, 离散系统的建模和仿真, 通讯中协议的描述、验证和设计, 计算机系统和软件系统模型, 数据库系统。其中, 分解理论的应用主要体现在以下几个方面。

4.1 Petri 网分解应用于 workflow、物流等系统的建模

文献[25]提出了一种基于变迁指标和库所指标融合的 Petri 网分解方法,得到融合了 T -网和 S -网特征的最小子网,对该最小子网进行性质分析,得出 Petri 网模型的活性和有界性,据此推断出自动化物流系统任务规划的合理性。此法大大减少了直接分析子网或原 Petri 网模型的计算量,又避免了全局或局部死锁。文献[26]在针对面向过程的资源配置基础上,分析了基于 Petri 网的复合 workflow 模型的建模步骤,根据分层和分块原则,提出了复杂 workflow 模型的简化策略。文献[27]在对 workflow 网进行结构分析的基础上,提出了一种 workflow 的自由选择子网分解算法,通过分解得到包含了开始库所和结束库所所有自由选择子网的集合,其中,每个自由选择子网对应一种业务实例的处理过程。

4.2 Petri 网分解应用于柔性制造系统

文献[28]基于柔性制造系统实例,分析了分解过程中语言行为的描述和进程的对应关系,并且分别给出了 Petri 网语言和进程的求取方法。文献[29]针对动态制造最小完备单元图的 Petri 网模型,通过提出单元关系度分解技术,建立单元之间关系度准则,得到了针对动态制造联盟复杂 Petri 网模型的分解结果。

4.3 Petri 网分解应用于其他离散系统的建模和仿真

文献[30]以生产者-消费者系统和多处理机系统为例,讨论了基于库所指标和基于变迁指标 Petri 网分解方法在系统分析中的作用,分析了分解后的子系统和原系统在结构和行为方面的对应关系。文献[31]对 Petri 网的并分解技术进行了研究,并根据并分解技术提出一种将无环路、多输出库所网,分解成若干个单一库所子网的新技术,适用于多输入集系统的应用。文献[32]在 Petri 网并分解技术的基础上,提出了一种无环路、多输出库所网分解为若干个单一输出库所子网的新技术,并将其应用于电路故障诊断,为 Petri 网应用于大型电网的故障诊断提供了一条可行的思路。文献[33]分析了电网故障诊断 Petri 网的特点,提出了一种无环多输出库所 Petri 网的分解方法,并将其应用于电网故障诊断,同时提出了基于并分解的电网故障诊断算法。文献[34]提出了基于 Petri 网的机电一体化产品功能分解模型,对机电一体化产品概念设计中的功能分解过程进行分析,建立了产品功能分解单元模型,以喷墨打印机为例,建立了该产品的功能分解单元模型。

综上所述, Petri 网的分解理论在柔性制造系统、 workflow 物流建模和离散系统的建模仿真方面有较好的应用。但是,在人工智能、网络通讯协议描述、计算机软件和数据库系统方面的应用较少。

5 结论与展望

Petri 网的分解技术是对复杂系统进行分析的有效手段。介绍了当前几种主流的 Petri 网分解技术的概念和适用条件,并详细阐述了每种方法的研究现状,用一个综合例子给出了各种分解方法的范例。最后,结合实际应用指出 Petri 网分解的研究方向。

当前对和分解、并分解、公平分解、守恒分解、流分解和最小功能子网分解方法的绝大多数研究还局限于结构性质的分析,而对在 Petri 网进行建模分析过程中更常用的动态性质(状态和行为)却没有较为深入的研究。即使在结构性质的研究方面,也是在较强的约束条件下对某一种或几种性质保持关系的分析,不利于实际系统的具体应用。

对基于库所和变迁指标的分解方法的研究相对较充分,具体的研究涵盖了:分解算法的具体实现,分解得到子网(S -网或 T -网)活性的判定,分解过程中保性的充要条件分析和判定算法,原网和子网对应的结构性质的探讨,原网语言性质的求解方法等。这无疑为 Petri 网分解理论的具体应用提供了较好的

理论支持。

同时,考虑同步合成和共享合成 2 种研究相对全面的 Petri 网合成方法,基于库所指标分解方法可以作为同步合成的逆过程,基于变迁指标的分解方法可作为共享合成的逆过程,形成图 8 的理论体系。



图 8 Petri 网分解理论体系

Fig. 8 Petri Net decomposition theory framework

综上,对于 Petri 网的分解国内外学者已做了大量研究,并且取得了积极的成果。但是要将该理论更好的应用到真实系统的分析和建模中,理论方面仍然需要不断深入,主要体现在以下几个方面:

1) 对前面提到的“合成-分解”理论体系仍然需要继续完善。比如,结构性方面,分解过程原网与子网的 S 不变量和 T 不变量的保持关系;动态性质方面,在不满足文[11]和[20]中提到的动态保性条件时,原网和子网在状态和语言方面的关系应如何确定。

2) Petri 网的保性分解。对于满足某种性质的复杂 Petri 网,按照某种分解方法,分解的子网保持一种或几种原网的性质。比如公平分解,原网的公平性在子网中仍然可以保持。可以考虑其他一种(或多种)性质的保性分解。

3) 如何更好地将当前的理论研究成果应用到系统的分析过程中,为实际提供更好的理论支持。

4) 将几种分解方法进行组合应用。例如,对一个复杂网系统,先进行流分解,处理 $|t| \geq 2$ 且 $|t^*| \geq 2$ 的变迁,再利用基于库所指标的分解,分解 $|t| \geq 2$ 或 $|t^*| \geq 2$ 的变迁,从而,一步一步进行分级分解。再如,先利用基于功能子网的分解方法,得到对应的功能子网,然后对功能子网进行分解。

[参考文献] (References)

- [1] PETRI C A. Communication with automata[R]. Princeton, 1966.
- [2] 吴哲辉. Petri 网导论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
WU Z H. Introduction to Petri nets[M]. Beijing: China Mechanical Press, 2006. (in Chinese)
- [3] 曾庆田, 吴哲辉. 基于库所指标的 Petri 网分解方法[J]. 计算机科学, 2002, 29 (4): 15-17.
ZENG Q T, WU Z H. A decomposition method of Petri net based on index of places[J]. Computer Science, 2002, 29(4): 15-17. (in Chinese)
- [4] ZENG Q T, HU X W, ZHU J, et al. A polynomial-time decomposition algorithm for a Petri net based on indexes of places[J]. Journal of Applied Sciences, 2008, 8(24): 4668-4673.
- [5] 王培良. P/T 系统的和分解[J]. 计算机科学, 1999, 26 (增): 2147-2151.
WANG P L. P / T and the decomposition of the system[J]. Computer Science, 2005, 26(Suppl.): 2147-2151. (in Chinese)
- [6] 王培良, 赵义军, 叶志宝. Petri 网的并分解[J]. 控制理论与应用, 2001, 18 (1): 116-118.
WANG P L, ZHAO Y J, YE Z B. Union decomposition of Petri nets[J]. Control Theory and Applications, 2001, 18(1): 116-118. (in Chinese)
- [7] 匡迎春, 沈岳, 旷海兰. Petri 网并分解动态性质的进一步研究[J]. 湖南科技学院学报, 2007, 28 (12): 59-61.
KUANG Y C, SHEN Y, KUANG H L. Petri nets and further study of the dynamic nature of the decomposition[J]. Journal of Hunan University of Science and Engineering, 2007, 28(12): 59-61. (in Chinese)

- [8] 曾庆田. 基于变迁指标的 Petri 网分解方法[J]. 计算机科学, 2006, 33 (1): 144-146.
ZENG Q T. A decomposition method for Petri net based on the index of transitions[J]. Computer Science, 2006, 33(1): 144-146. (in Chinese)
- [9] ZENG Q T. A polynomial-time decomposition algorithm for Petri nets based on indexes of transitions[J]. Information Technology Journal, 2011, 10(4): 856-862.
- [10] 王琦, 韩江洪, 王青山. Petri 网合成理论及应用综述[J]. 计算机仿真, 2008, 25 (12): 8-11.
WANG Q, HAN J H, WANG Q S. A survey of theories and application of synthesis techniques for Petri nets[J]. Computer Simulation, 2008, 25(12): 8-11. (in Chinese)
- [11] 曾庆田, 吴哲辉. Petri 网分解的保性条件分析[J]. 小型微型计算机系统, 2004, 25 (9): 1671-1675.
ZENG Q T, WU Z H. Research on invariant decomposition technology for Petri net based on the index of places[J]. Mini-Micro Systems, 2004, 25(9): 1671-1675. (in Chinese)
- [12] 曾庆田, 吴哲辉. 类 S-图的语言性质分析[J]. 计算机科学, 2002, 29 (5): 120-122.
ZENG Q T, WU Z H. The language characters analysis of analogous S-graph[J]. Computer Science, 2002, 29(5): 120-122. (in Chinese)
- [13] 曾庆田, 吴哲辉. Petri 网语言的同步交运算[J]. 小型微型计算机系统, 2004, 25 (2): 216-219.
ZENG Q T, WU Z H. Synchronous intersection operation of Petri net languages[J]. Mini-Micro Systems, 2004, 25(2): 216-219. (in Chinese)
- [14] 曾庆田, 吴哲辉. 基于分解的结构复杂 Petri 网的语言行为描述[J]. 系统工程学报, 2004, 19 (3): 300-306.
ZENG Q T, WU Z H. Language behavior description of structure-complex Petri net based on decomposition[J]. Journal of Systems Engineering, 2004, 19(3): 300-306. (in Chinese)
- [15] 段华, 曾庆田. S-网的活性分析[J]. 小型微型计算机系统, 2004, 25 (11): 1975-1978.
DUAN H, ZENG Q T. Analysis on the liveness of S-net[J]. Mini-Micro Systems, 2004, 25(11): 1975-1978. (in Chinese)
- [16] 曾庆田. 基于库所指标分解的 Petri 网活性与公平性的分析[J]. 小型微型计算机系统, 2005, 26 (2): 226-229.
ZENG Q T. Analysis of liveness and fairness of Petri net decomposed on the index of places[J]. Mini-Micro Systems, 2005, 26(2): 226-229. (in Chinese)
- [17] 祝军, 曾庆田. 基于库所指标分解的 Petri 网结构性质分析[J]. 计算机科学与探索, 2009, 3 (1): 91-97.
ZHU J, ZENG Q T. Structural property analysis of Petri nets based on decomposition according to index of places[J]. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2009, 3(1): 91-97. (in Chinese)
- [18] 段华, 曾庆田. T-网的活性分析及其判断算法[J]. 小型微型计算机系统, 2005, 26 (12): 2131-2134.
DUAN H, ZENG Q T. Decision algorithm for the liveness of T-nets[J]. Mini-Micro Systems, 2005, 26(12): 2131-2134. (in Chinese)
- [19] 祝军, 曾庆田. 基于变迁指标分解的 Petri 网性质分析[J]. 计算机科学与探索, 2010, 4 (8): 761-768.
ZHU J, ZENG Q T. Property analysis of Petri nets based on decomposition according to index of transitions[J]. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2010, 4(8): 761-768. (in Chinese)
- [20] LIU C, ZENG Q T, ZOU J, et al. Invariant decomposition conditions for Petri nets based on the index of transitions[J]. Information Technology Journal, 2012, 11(7): 768-774.
- [21] ZENG Q T. Two symmetrical decomposition methods for structure-complex Petri nets and their applications[C]//Eighth ACIS International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking, and Parallel/Distributed Computing, 2007. New York: IEEE, 2007: 1101-1106.
- [22] 王培良, 赵义军. Petri 网的公平分解和守恒分解[J]. 系统仿真学报, 2003, 15 (增): 43-45.
WANG P L, ZHAO Y J. Fair decomposition and conservative decomposition for Petri nets[J]. Journal of System Simulation, 2003, 15(Suppl.): 43-45. (in Chinese)
- [23] ZAITSEV D A. Decomposition of Petri nets[J]. Cybernetics and Systems Analysis, 2004, 40(5): 739-746.

- [24] 吴振寰, 高莹, 吴哲辉. Petri 网的流分解[J]. 系统仿真学报, 2009, 20 (增 2): 33-37.
WU Z H, GAO Y, WU Z H. Petri net string decomposition[J]. Journal of System Simulation, 2009, 20(Suppl. 2): 33-37. (in Chinese)
- [25] 侯媛彬, 李倩. 基于 Petri 网分解技术的自动化物流系统建模分析[J]. 计算机应用研究, 2010, 27 (11): 4133-4135.
HOU Y B, LI Q. Modeling and analysis of automatic logistics system based on decomposition of Petri nets techniques[J]. Application Research of Computers, 2010, 27(11): 4133-4135. (in Chinese)
- [26] 窦万春, 蔡士杰. 基于 Petri 网的工作流技术复合建模与系统分解[J]. 计算机集成制造系统, 2002, 8 (5): 361-365.
DOU W C, CAI S J. Combinative modeling and systemic decomposition of workflow based on Petri net[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2002, 8(5): 361-365. (in Chinese)
- [27] 秦凯, 姜浩. 一种基于 Petri 网的工作流模型分解方法[J]. 计算机技术与发展, 2008, 18 (1): 97-100.
QIN K, JIANG H. A approach of decomposition of workflow models based on Petri net[J]. Computer Technology and Development, 2008, 18(1): 97-100. (in Chinese)
- [28] ZENG Q T, DUAN H. Behavior description for complex flexible manufacturing system based on decomposition of Petri net[J]. International Journal of Computer Systems Science and Engineering, 2007, 22(6): 359-363.
- [29] 顾元勋. 基于单元关系度技术的 Petri 网模型分解[J]. 系统工程学报, 2003, 18 (6): 491-497.
GU Y X. Decompose complex Petri net based on degree of cell' relation[J]. Journal of Systems Engineering, 2003, 18(6): 491-497. (in Chinese)
- [30] 唐素勤, 刘红翼, 王驹, 等. 基于 Petri 网分解的系统范例分析[J]. 广西师范大学学报: 自然科学版, 2008, 26 (2): 97-101.
TANG S Q, LIU H Y, WANG J. Counterexample decomposition analysis system based on Petri nets[J]. Journal of Guangxi Normal University: Natural Science Edition, 2008, 26(2): 97-101. (in Chinese)
- [31] 汪林, 乐晓波, 陈国平. Petri 网化简技术的研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19 (增): 110-113.
WANG L, YUE X B, CHEN G P. The research of Petri net's simplified technology[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(Suppl.): 110-113. (in Chinese)
- [32] 陈曦, 周彦, 乐晓波, 等. Petri 网化简新技术研究[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48 (5): 47-50.
CHEN X, ZHOU Y, YUE X B, et al. Research about new technology for Petri net's simplification[J]. Computer Engineering and Applications, 2012, 48(5): 47-50. (in Chinese)
- [33] 匡迎春, 沈岳, 罗日成. 基于 Petri 网并分解技术的电网故障诊断[J]. 电力系统及其自动化学报, 2008, 20 (1): 57-60.
KUANG Y C, SHEN Y, LUO R C. Fault diagnosis of power system based on union decomposition technology of Petri net[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2008, 20(1): 57-60. (in Chinese)
- [34] 周小勇, 李萍. 基于 Petri 网的机电产品功能分解单元模型研究[J]. 计算机工程与设计, 2008, 29 (21): 5662-5664.
ZHOU X Y, LI P. Research on function decomposition unit of mechatronics product based on Petri net[J]. Computer Engineering and Design, 2008, 29(21): 5662-5664. (in Chinese)