

时间 Petri 网模拟能力的研究^{*}

翟正利^{1,2} 吴哲辉³ 杨 扬¹

(北京科技大学信息工程学院 北京 100083)¹ (临沂师范学院信息学院 临沂 276005)²

(山东科技大学信息工程学院 泰安 271019)³

摘 要 模型的模拟能力一直是系统建模方面的一个重要研究课题。本文先用一个直观的“零检验”例子说明时间 Petri 网的模拟能力比传统 Petri 网要强,并首次证明了时间 Petri 网与计算科学的最高模型——图灵机有相等的模拟能力;最后给出了另外一种含时间因素的时延 Petri 网向时间 Petri 网的转换方法,这说明了时间 Petri 网虽然形式上较为简单,但其模拟能力却并不比其它含时间因素的 Petri 网逊色,同时为时延 Petri 网的研究提供了另外一种有效方法。

关键词 时间 Petri 网,模拟能力,图灵机,时延 Petri 网,转换方法

Study on Modeling Power of Time Petri Net

ZHAI Zheng-Li^{1,2} WU Zhe-Hui³ YANG Yang¹

(Information Engineering School, Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083)¹

(College of Information, Linyi Normal University, Linyi 276005)²

(Information Science and Engineering School, Shandong University of Science and Technology, Taian 271019)³

Abstract The modeling power of a system model is always one of the most important research issues in system modeling. The basic concepts of time Petri net are firstly introduced in this paper. Then the modeling power of time Petri net is discussed. Following an example of “Zero Examination” which illustrates that modeling power of time Petri net is superior to that of classic Petri net, for the first time we give a proof that shows that time Petri net has the same modeling power as the Top Model of computing science——Turing Machine. Finally, we present a method of transforming a timed Petri net, another Petri net which has time factors, to a time Petri net; this indicates that time Petri net is not inferior to other Petri nets with time factors despite its simple structure. This also presents another efficient method of studying timed Petri net as well.

Keywords Time Petri net, Modeling power, Turing machine, Timed Petri net, Transforming method

1 引言

Petri 网是 1962 年德国的 C. A. Petri 博士在其博士论文“Communication with Automata”中首先提出的,它是用来研究信息系统及其相互关系的数学模型。对一个系统,如果能够构造出它的 Petri 网模型,并对这个 Petri 网模型进行分析,就可以揭示被模拟系统在结构和动态行为方面的许多重要信息。这些信息可用于对系统的性能评估或对系统提出改进的建议。

为了刻画同系统行为密切相关的时间因素,又定义和研究了各种含时间因素的 Petri 网。这类 Petri 网的提出,丰富了 Petri 网理论的内容,扩大了 Petri 网理论的应用范围。可以说, Petri 网现在已经应用在社会各个领域,并且其应用领域还在不断扩大。

本文首先讨论时间 Petri 网(变迁上赋有时间区间,且遵循瞬时语义)的模拟能力,先用一个直观的例子说明时间 Petri 网的模拟能力比传统 Petri 网强,然后证明了时间 Petri 网具有与图灵机同等的模拟能力,最后给出另外一种含时间因素的时延 Petri 网(变迁上赋有时间区间,但不遵循瞬时语义)

到时间 Petri 网的转换方法,为时延 Petri 网的研究提供另外一种有效方法。

2 基本知识

由于篇幅关系,这里只给出同本文密切相关的概念, Petri 网的其它概念可参考文[1~3]。

定义 2.1 一个四元组 $\Sigma = (P, T; F, M)$ 称为 Petri 网,其中 P 和 T 是两个不相交的集合,分别称为库所集和变迁集; F 是 P 和 T 之间的弧集,称为网 N 的流关系; $M: P \rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}$ 是 Σ 的一个标识。

在一个含时间因素的 Petri 网模型中,时间的概念可依据所描述问题的需要关联到 Petri 网的不同元素上,变迁的使能和发生规则及时间限制也有所不同。

本文中主要研究的是最早由 Merlin^[4] 提出,后来由 Berthomieu, Menasche, Diaz 和 Popova 等人^[5~7] 对其时间区间的含义进行修改的时间 Petri 网(Time Petri Net, 记为 TPN)。

定义 2.2 一个五元组 $Z = (P, T; F, M_0, D)$ 称作时间 Petri 网(TPN)当且仅当:

^{*} 基金项目:国家自然科学基金重大研究计划重点项目(90412012)、国家自然科学基金项目(60173053)。翟正利 博士研究生,讲师,研究方向为 Petri 网理论与应用、网络计算;吴哲辉 博士生导师;杨 扬 教授,博士生导师。

① $\Sigma = (P, T; F, M_0)$ 是一个 Petri 网, 称为 Z 的源网,
 ② $I: T \rightarrow Q^+ \times (Q^+ \cup \{\infty\})$, 其中, Q^+ 表示非负有理数,
 $\forall t \in T, I(t) = [eft(t), lft(t)], eft(t) \leq lft(t)$ 。
 I 称作 Z 的时间函数, $eft(t)$ 和 $lft(t)$ 分别称作 t 的最早发生时间 (earliest firing time) 和最晚发生时间 (latest firing time)。

时间 Petri 网是对传统 Petri 网中的每个变迁 t 都关联上一个时间区间 $[eft(t), lft(t)]$ 。时间 $eft(t)$ 和 $lft(t)$ 是相对于变迁 t 最近一次使能时刻的相对时间。假定变迁 t 在时刻 τ 最近一次使能, 那么变迁 t 只能在区间 $[\tau + eft(t), \tau + lft(t)]$ 中发生, 并且最迟在时刻 $\tau + lft(t)$ 发生 (除非它在时刻 $\tau + lft(t)$ 之前被另外的变迁的发生取消了使能)。变迁的发生不占用时间, 是瞬时的。因此, 时间 Petri 网 (TPN) 的基本思想是: 当一个变迁使能, 一般情况下并不立即发生, 但经过一段时间, 到达区间的末端点时就必须发生 (即变迁发生的强制性)。当区间的末端点是无穷时, 变迁发生的强制性就没有了。

3 时间 Petri 网的模拟能力

虽然时间 Petri 网结构较为简单, 但是 TPN 确实比传统 Petri 网的模拟能力强, 下面笔者先以零检验的例子进行说明, 然后证明 TPN 的模拟能力等价于图灵机。

库所的零标识 (即“零检验”) 问题^[2], 对有界库所来说, 在传统 Petri 网中可通过对所检验的有界库所增加一个动态补库所^[2], 通过检查补库所中的标识数是否等于待检验库所的容量来检验待检验库所中的标识数是否为零, 对于无界库所, 则不能使用这一方法。而利用时间 Petri 网 TPN 可以很容易地解决“零检验”问题。

在时间 Petri 网的运行过程中, 如果在某个时刻要检验某库所中的标识数是否为零, 这时只要暂停网的运行, 对待检验库所加入图 1 中这样一个装置即可。如果在库所 p_1 中得到一个标识, 则待检验库所中标识数为零, 如果在库所 p_2 中得到一个标识, 则待检验库所中标识数不为零。

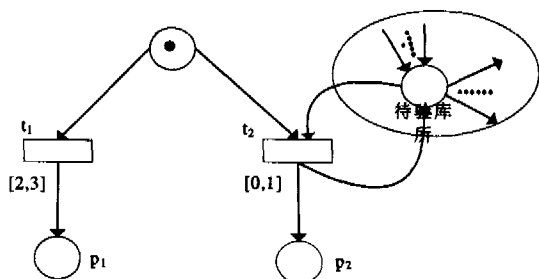


图 1 “零检验”能力示意图

定理 3.1 时间 Petri 网 TPN 的模拟能力等价于图灵机。

证明: Shepardson 和 Sturgis^[9] 已经证明, 带有下列指令的一个寄存器机等价于一个图灵机。

- ① $E(n)$: 使寄存器 n 加 1;
- ② $D(n)$: 使寄存器 n 减 1;
- ③ $J(n)[s]$: 如果寄存器 n 为零, 转到语句 s 。

因此, 如果可以把一个寄存器机变换成 TPN, 就知道 TPN 同图灵机是等价的。

为了把一个寄存器机表示成一个 TPN, 我们用 n 个库所 $p'_1, p'_2, \dots, p'_n$ 分别表示一个程序中用到的 n 个寄存器。用

$s+1$ 个库所 $p_1, p_2, \dots, p_{s+1}$ 来表示在一个有 s 个语句的程序中指计数器指针, 它们分别表示在语句 1 之前 (初始标识) 和语句 i 之后 ($i=1, 2, \dots, s$) 的位置。程序中的每一条指令用一个变迁表示。图 2 说明上面的三条指令各自怎样表示成为 TPN 中的一个变迁。

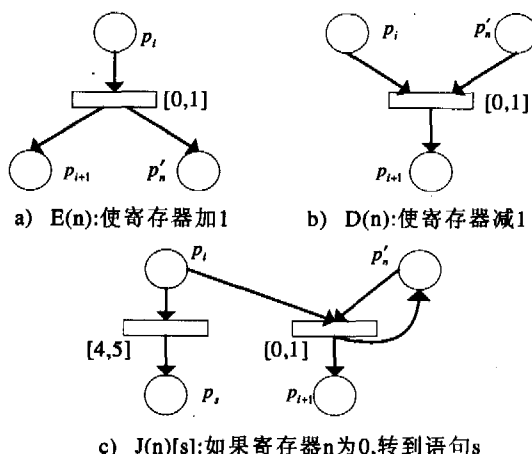


图 2 把寄存器机的第 i 条指令变换成 TPN 的变迁

这样就说明了一个寄存器机可以变换成一个时间 Petri 网 TPN, 因而 TPN 同图灵机是等价的。

当然, 同图灵机的等价性说明对 TPN 进行分析的许多问题的不可决定性, 因为这些问题对于图灵机来说都是不可决定的。

4 时延 Petri 网及其向 TPN 的转换

Hack^[8] 已证明带抑制弧的 Petri 网或加优先级的 Petri 网的模拟能力等价于图灵机。这说明带抑制弧的 Petri 网或加优先级的 Petri 网都可以用时间 Petri 网来模拟。实际上, 大部分含时间因素的 Petri 网 (时间流 Petri 网 TSPN 除外) 也都能被时间 Petri 网 TPN 所模拟。

下面就简单介绍最早由 C. Ramchandani^[10] 提出的时延 Petri 网 (Timed Petri Net, 简记为 TdPN) 的概念, 并给出 TdPN 向 TPN 转换的一种方法, 这也说明了时间 Petri 网虽然形式上较为简单, 但其模拟能力却并不比其它含时间因素的 Petri 网差。

4.1 时延 Petri 网的概念

时延 Petri 网 (简记为 TdPN) 的定义最早是由 C. Ramchandani^[10] 提出的, N. G. Leveson^[11] 对这个定义进行了扩展, 这里讨论的是扩展后的定义。

定义 4.1 一个五元组 $D = (P, T; F, M_0, DI)$ 称为时延 Petri 网当且仅当

- (1) $\Sigma = (P, T; F, M_0)$ 是一个 Petri 网
- (2) $DI: T \rightarrow Q^+ \times Q^+$

其中 $\forall t \in T, DI(t) = [a_t, b_t], a_t \leq b_t$, 分别称作最短持续时间 (Shortest Delay Time, 简记为 sdt) 和最长持续时间 (Longest Delay Time, 简记为 ldt)。

发生规则可主要考虑为三阶段发生:

- ① 当变迁开始发生时, 相应数目的 token 从输入库所移走;
- ② 在变迁发生过程 (时间消耗) 中, 变迁持有 token;
- ③ 在变迁发生结束时, 相应数目的 token 被放入输出库所。

(下转第 283 页)

书: $\{ PKC^{(0)} \parallel PKC^{(1)} \dots \parallel PKC^{(i)}, AC^{(i)} \}$ 。

(2)第 $i-1$ 层 AA_{i-1} 负责向它所辖服务区域内的代理授权服务器 PS 签发授权证书: $\{ PKC^{(0)} \parallel PKC^{(1)} \dots \parallel PKC^{(i)}, AC_{PS}^{(i)} \}$ 。

2. 建立用户授权证书 网络中域用户 u 的初始授权证书由所在域从属的 AA_i 签发,并发布到全网各个 AA_i : $\{ PKC^{(0)} \parallel PKC^{(1)} \dots \parallel PKC^{(i)}, AC_u \}$ 。

用户 u 的授权证书 AC_u 包含以下内容:用户名,用户的全局角色模板 R_0 的值(包括系统、部门、单位、级别、职务,扩展项 R 等),其中扩展项 R 为空值。

3. 角色权限注册 应用系统向本域(设为 D 域)代理授权服务器注册角色集 $R_{D,app}$ 、权限集 $P_{D,app}$ 及角色-权限分配集 $PA_{D,app}$ 等。

4. 代理授权服务器建立关联角色 在扩展项 R 中设置关联的应用角色,形成关联角色后提交到从属的 AA 签发,保存在代理授权服务器的访问控制判决支持数据库中。

5. 应用授权 代理授权服务器为 D 域中的各个应用 app 进行授权,建立 app 角色集 $R_{D,app}$ 到权限集 $P_{D,app}$ 的关联,即 $PA_{D,app}$ 。

6. 访问控制 App 根据 PS 提交的访问请求判决应答,决定是否响应用户 u 的访问,若 PS 提供的应答为 True,则

App 响应用户 u 的请求,否则拒绝。

4 模型分析及应用情况

该模型具有以下优点:(1)通过建立统一的授权框架,使多域环境下的多个应用可以进行集中和分散相结合的授权管理,不需要再为每个应用都建立一个授权系统,简化了授权管理,实现了多域多应用的安全互操作;(2)可扩展性强;(3)易维护,应用系统不用修改,只需调用代理授权服务器的功能;(4)通过对角色、权限等进行形式化描述,授权访问控制操作实现速度快。

该方案具有很强的实用性,目前已在全国性大型网络中得到实际应用,取得了很好的应用效果。

参考文献

- 1 Sandhu R. Role based access control models. IEEE Computer, 1996, 29(2):38~47
- 2 段素娟,洪帆,骆婷. 多域应用安全互操作的授权模型. 华中科技大学学报, 2003, 11
- 3 洪帆,黎成兵. 多域结盟环境下基于角色的访问控制. 计算机工程与科学, 2004, 11
- 4 Chadwick D, Otenko A. The PERMIS X. 509 Role Based Privilege Management Infrastructure. In: Proc. of SACMAT Conf. ACM Press, 2002, 135~140

(上接第 235 页)

时延 Petri 网是对传统 Petri 网中的每个变迁 t 都关联了一对非负有理数 a_t 和 b_t , 分别为变迁 t 的发生持续时间的最小值和最大值。当一个变迁使能时,立即发生,但其发生要占用一定的时间。

因为在时延 Petri 网中,变迁不再有瞬时语义,即其发生不再是瞬时的,为了同遵循瞬时语义的变迁相区别,在画图时,一般用实心矩形来表示这种变迁。

有关时延 Petri 网的其它定义和有关性质可参阅相关文献,笔者下面给出时延 Petri 网到 TPN 的转换方法。

4.2 时延 Petri 网到 TPN 的转换方法

按照图 3 给出的方法,转换对原网中的每个变迁都增加两个库所和一个立即变迁(即使能后立即发生的变迁),因此,时延 Petri 网可以认为是只允许立即变迁为冲突变迁(如果有,如图 3 b)所示 t_1 和 t_2)的 TPN 子集。

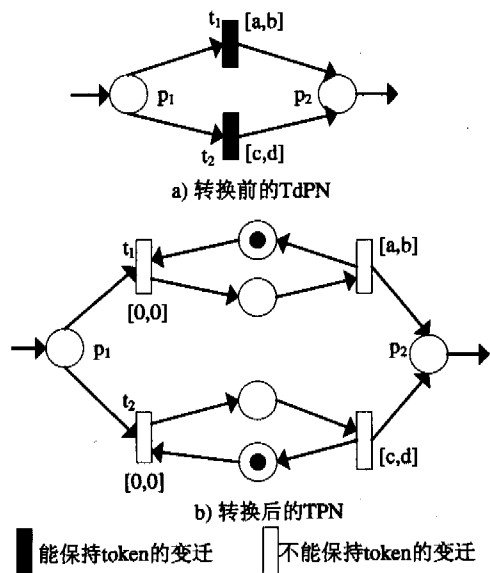


图 3 时延 Petri 网向 TPN 的转换方法

当然,把时延 Petri 网转换成时间 Petri 网后,网模型的规模会有一些的增长,为克服“状态爆炸”,这时可以利用一些时间 Petri 网的化简规则进行化简。有关 Petri 网的化简已经有很多成熟的理论和工具,这里不再详述,可参考有关文献。

结束语 模型的模拟能力一直是系统建模方面的一个重要研究课题。时间 Petri 网虽然结构较为简单,但本文首次证明了时间 Petri 网与图灵机具有同样的模拟能力。从时延 Petri 网到时间 Petri 网的转换方法为研究时延 Petri 网提供了另外一种途径,即通过结构较为简单的 TPN 来研究。时间 Petri 网的相关性质(如有界性、活性、可达性等)以及其它各种高级 Petri 网(如带抑制弧的 Petri 网、优先级 Petri 网等)向时间 Petri 网的转换方法是笔者准备进一步研究的课题内容。

参考文献

- 1 Murata T. Petri nets - properties, analysis, and applications. Proceedings of IEEE, 1989, 77(11):541~580
- 2 袁崇义. Petri 网原理. 北京:电子工业出版社, 1998
- 3 Peterson J 著,吴哲辉译. Petri 网理论与系统模拟. 北京:中国矿业大学出版社, 1989
- 4 Merlin P M, Farber D J. Recoverability of communication protocols - implications of a theoretical study. IEEE Transaction on Communications, 1976, 24(9):1036~1049
- 5 Berthomieu B, Diaz M. Modeling and Verification of Time Dependent Systems Using Time Petri Nets, IEEE Transaction on Software Engineering, 1991, 17(3):259~273
- 6 Berthomieu B, Menasche M. An Enumerative Approach for Analyzing Time Petri Nets, IEEE Transaction on Software Engineering, 1983, 17(3):41~67
- 7 Popova L. On Time Petri Nets. J. Inform. Process. Cybern. 1991, 27(4):227~244
- 8 Hack M. Petri net languages, Technique Report, Computation structures Group, MIT, Project MAC, Memo 124, June 1975
- 9 Shepardson J, Sturgis H. Computability of Recursive Functions. Journal of the ACM, 1963, 10(2):217~255
- 10 Ramchandani C. Analysis of asynchronous concurrent systems by timed Petri nets; [Technique Report, MAC-TR-120], MIT, Cambridge MA, 1974
- 11 Leveson N G. Safety Analysis using Petri Nets. IEEE Transaction on Software Engineering, 1987, SE-13(3):386~397