基于 CPN Tools 的抑制弧改进方法研究

王 红[1a,1b,2]，张 涛[1b]

(1. 中国科学院 a. 光电研究院；b. 空间应用工程与技术中心，北京 100094；2. 中国科学院研究生院，北京 100049)

摘 要：在 Petri 网模型中，抑制弧用于表示除输入库所条件外，仅当指定库所为空时变迁才可以触发的情况，可以应用于各类 Petri 网中。在广泛使用的 Petri 网模型工具 CPN Tools 中没有直接提供抑制弧，仅给出了两种等价处理方法。通过对抑制弧的问题进行分析，提出在 CPN Tools 使用 List 解决抑制弧问题的改进方法。此方法具有良好的通用性和易用性，并且仅通过修改 DropOneInList 函数的内容就可以实现随机、栈方式、队列方式、优先级等各种令牌提取方法。

关键词：Petri；有色 Petri 网工具；抑制弧；列表；令牌

中图分类号：TP311 **文献标志码**：A **文章编号**：1001-3695(2012)11-4210-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.11.052

Research on improvement method of inhibitor arcs by CPN Tools

WANG Hong[1a,1b,2], ZHANG Tao[1b]

(1. *a. Academy of OPTO-Electronics, b. Technology & Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100094, *China*; 2. *Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)

Abstract: In a Petri net, the executability of a transition only depends on the presence of enough tokens in its input places. Adding inhibitor arcs means that one can also test whether some specific places are empty, which is widely useful for all kinds of Petri nets model. CPN Tools does not natively support inhi-bitor arcs, it is however possible to simulate the behavior of inhibitor arcs. Through the analysis, the article put forward an improved method to solve the problem of inhibitor arcs using List. And by modifing the body of function DropOneInList, it can achieve random, stack, queue, prioprity way of extracing tokens.

Key words: Petri; CPN Tools; inhibitor arcs; list; token

0 引言

20 世纪 60 年代初德国的 Petri 博士在其博士论文中首次系统地提出 Petri 网理论[1]。Petri 网适合于描述异步的、并发的计算机系统模型，它既有严格的数学表述方式，也具有直观的图形表达方式。经典 Petri 网是简单的过程模型，它由库所(place)、变迁(transition)、有向弧(arc)和令牌(token)组成。在 Petri 网中，当一个变迁的所有输入库所中包含了足够的令牌时，变迁才可触发。抑制弧表示除了输入库所外，还需要考虑仅当指定库所为空时，变迁才可触发的情况，抑制弧在通信协议和性能分析中非常有用[2]。在 Petri 网的发展过程中，为了使 Petri 网能够更好地描述实际系统，根据不同侧重点扩展出各种高级 Petri 网模型，如时间 Petri 网、随机 Petri 网、有色 Petri 网、优先级 Petri 网等[3~9]。带有抑制弧的 Petri 网是对 Petri 网在一个变迁是否受其他库所限制方面的扩展，因此抑制弧既可以应用在经典 Petri 网中，也可以应用于各种高级 Petri 网中。

扩展概念的引入增强了 Petri 网的描述能力，但对实际系统而言，需要性能良好的仿真和模型检验工具对系统进行验证才具有应用价值。CPN Tools 是一个可以编辑、模拟和分析有色 Petri 网(CPN 或 CP-net)的重要工具[10]。它的引入使 Petri 网在实际系统中的应用越来越广泛[11~14]。如何使用 CPN Tools 描述抑制弧成为 Petri 网模型需要解决的一个重要问题。目前版本的 CPN Tools 并不直接支持抑制弧，只能通过对模型进行修改从而达到抑制弧的等效功能。

文献[15]提出了一种在 CPN Tools 中描述抑制弧的方法。修改弧函数为 p;ps，并增加了两条弧，但是这种处理方法在发出抑制弧的库所中选择令牌时不具有随机性，与带有抑制弧的 Petri 网模型不等价。在 CPN Tools 的帮助中给出了两种抑制弧的等价处理方法[16]。一种是 List 方法，通过修改相关库所的颜色类型和增加弧实现等价的抑制弧，但该方法比较复杂，且仿真结束时存在运行错误。另一种是计数库所方法，通过增加一个计数库所和若干条弧实现等价的抑制弧，但是此方法中仅可实现随机提取令牌，不能实现栈、队列等其他提取令牌的方法。

本文基于对上述两种方法的改进，提出使用 List 结构但更易于理解的方法构建抑制弧等价模型。在算法中使用 CPN ML 编程语言定义通用的 DropOneInList 函数实现随机令牌提取，并且仅通过修改函数内容即可快速实现多种令牌提取方法。

1 抑制弧和 CPN Tools

1.1 抑制弧

文献[2]给出了带抑制弧 Petri 网的形式定义，本文仅使用

收稿日期：2012-04-19；**修回日期**：2012-06-04

作者简介：王红(1978-)，女，辽宁铁岭人，博士，主要研究方向为高可靠软件、模型检验(wh@ncepu.edu.cn)；张涛(1972-)，男，研究员，博导，博士，主要研究方向为高可靠系统开发与评测.

抑制弧的直观定义[15]。在如图 1 所示的 Petri 网模型中,有一条从库所 p_1 到变迁 t_2 的弧,其终端不是箭头而是一个圆点,这条带圆点的弧表示当库所 p_1 中有令牌时,变迁 t_2 不能发生。因此,从库所 p_1 到变迁 t_2 的带圆点的弧被称为抑制弧(inhibitor arc)。

1.2 CPN Tools

长期以来,Petri 网作为一种有效的离散事件建模工具,建立了许多仿真模型,但是由于缺少一种可靠的、易用的仿真平台对其进行有效的支撑,使得其仿真模型仅限于理论研究的层面,CPN Tools 的出现改变了这一局面。CPN Tools 的前身是 UNIX 系统下的 Design/CPN,是由丹麦 Aarhus 大学的 CPN 工作组和美国的 Meta 软件公司合作开发的。

CPN Tools 作为一种先进的仿真工具,在国际上主要被美国和澳大利亚军方用于开发军用仿真平台,目前已经开发导弹目标分配方法仿真软件以及数据通信协议的仿真软件等。CPN Tools 可以实现对有色 Petri 网的仿真,还可以对有色 Petri 网的性能进行分析,是一个应用广泛的有色 Petri 网分析工具。

由于 CPN Tools 在新版本中增加了对优先级、时间等的支持,许多 Petri 网模型都可使用 CPN Tools 建立模型,进行模拟、仿真和性能分析。

2　抑制弧的 List 改进方法和示例

给出图 2 所示的带抑制弧的 Petri 网模型,p_{10} 和 p_{30} 初始各具有九个令牌,使用 CPN Tools 构造其 Petri 网模型。

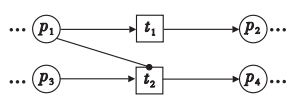

图1　带有抑制弧的 Petri网模型

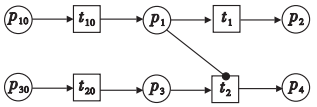

图2　带有抑制弧的实际 Petri网模型

上述例题中给出的模型是带抑制弧的经典 Petri 网,根据有色 Petri 网的定义,可以使用 CPN Tools 先构造出不带抑制弧的 Petri 网模型,如图 3 所示。

```
colset PACKAGE = int;
var p:PACKAGE;
```

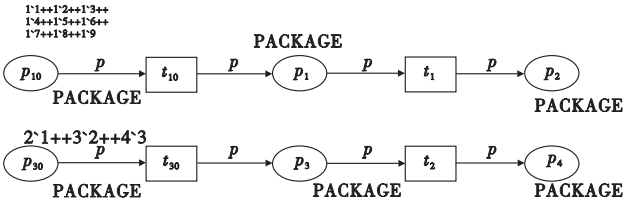

图3　不带抑制弧的CPN Tools模型

然后使用如下步骤在模型中增加等效的抑制弧:

a)增加新的 List 类型的颜色集和该类型的变量。假设发出抑制弧的库所其颜色集为 PACKAGE,则增加新的 List 类型的颜色集 PACKAGEs,并增加两个 PACKAGEs 类型的变量 *ps* 和 rest。

```
closet PACKAGEs = List PACKAGE;
var ps,rest:PACKAGEs
```

b)修改发出抑制弧库所的颜色类型,并设置初始值。发出抑制弧的库所为 p_1,将 p_1 的颜色类型由 PACKAGE 修改为 PACKAGEs,初始值设为一个空的 List 类型"[]"。

c)若发出抑制弧的库所具有输入弧,则修改输入弧的弧函数;否则,直接到 d)。将原输入弧的弧函数从 *p* 改为 *p*::*ps*,其中,*p* 的类型为 PACKAGE,*ps* 的颜色类型为 PACKAGEs,并增加一个相反方向的新弧,其弧函数为 *ps*。

d)若发出抑制弧的库所除抑制弧外还有其他输出弧,则修改其输出弧的弧函数;否则,直接到 e)。将输出弧的弧函数从 *p* 改为 *ps*,并加入一个反方向的新弧,它将变量 rest 送回该库所。

e)使用 CPN ML 语言[17]定义 DropOneInList 函数。此函数可以在任何 CPN 模型中使用。该函数的功能是从列表中随机提取一个元素。函数结果包含两部分,即被提取的元素和提取后的三剩余列表。

```
(* 注释仅为了说明语句的功能,CPN Tools 目前不支持中文 *)
fun DropOneInList(ps:PACKAGEs) =
let
    val length = List.length(ps)          (*获得列表的长度*)
in
    if length>1 then
      (*若列表的长度,即至少有两个元素
      则从0..length-1 获取 1 个随机值
      注:discrete(m,n)函数,若 m<n 正确,若 m=n 则有 Bug
      删掉任意第 index(下标从 0 开始)的元素,
      将其前面和后面的组合起来 *)
      let
          val index = discrete(0, length-1)
      in
          (List.nth(ps, index),
          List.take(ps,index)^^List.drop(ps,index+1))
      end
    else
      (* 否则,就选取当前列表 ps 中唯一一个元素 *)
      (List.nth(ps, 0), List.drop(ps, 1))
end
```

f)修改输出弧到达变迁的监视函数,表明仅当列表不为空时才能触发该变迁。为变迁 t_1 增加监视函数 List.length(*ps*) > 0,即当列表 *ps* 的元素不为空的时候,才可以发生此变迁。

注意:若不作此限定,因为 List 类型中"1`[]"也是一个令牌,也会使变迁 t_1 触发,所以需要保证非空 List 时才可以触发。

g)为输出弧到达变迁增加如下代码。

本例中发出抑制弧的库所 p_1 仅有一个输出弧到达 t_1,所以仅在 t_1 中增加如下代码。

```
input (ps);          (* 需要的输入 *)
output (p,rest);     (* 需要的输出,即变迁绑定了 rest *)
action
DropOneInList(ps);
```

h)在模型中增加抑制弧,将其设置为一个双向弧,并且弧函数定义为"[]",表明仅当列表为空,即仅当发出抑制弧的库所没有令牌时,才可触发变迁 t_2。

经过上述步骤后,带抑制弧的 CPN Tools 模型如图 4 所示。

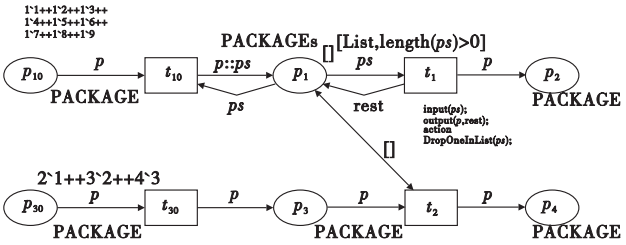

图4 带抑制弧的CPN Tools模型

3 各种令牌提取功能

3.1 栈方式提取令牌

由于发出抑制弧的库所其输入弧的弧函数修改为 p::ps，即在原有令牌队列的前面插入了一个新的令牌，则只要提取令牌队列的第一个元素，即可完成栈方式提取令牌。函数定义修改如下：

```
fun DropOneInList(ps:PACKAGEs) =
    (List.nth(ps, 0),List.drop(ps, 1))
```

3.2 队列方式提取令牌

提取队列中的最后一个元素即为队列方式提取令牌。函数定义如下：

```
fun DropOneInList(ps:PACKAGEs) =
let
  val length = List.length(ps)
in
  if length>1 then
      (List.nth(ps, length-1), List.take(ps, length-1))
  else
      (List.nth(ps, 0),List.drop(ps, 1))
end
```

3.3 优先级方式提取令牌

由于 CPN ML 中的控制语句仅包含 if 和 case，而不包含循环，则在新令牌进入时就需要按其优先级顺序插入到列表中，即先按照优先级的顺序排列好，然后从中选择优先级高的进行提取。本例中的颜色集为简单颜色集 int 类型，只要根据整型值的大小来确定优先级。若需要复杂的颜色集只要在颜色集中再植入优先级元素即可。

若按照优先级从高到低排列，则栈顶的令牌就是优先级最高的令牌，所以可以使用栈方式提取令牌中所定义的 DropOneInList 函数。修改弧函数 p::ps 为 InsertIntoList(p,ps) 即可，如图 5 所示，函数定义如下：

```
fun InsertIntoList(p,[]) = [p]
|InsertIntoList(p:PACKAGE, q::ps) =
  if p>q then p::q::ps
  else q::(InsertIntoList (p,ps))
```

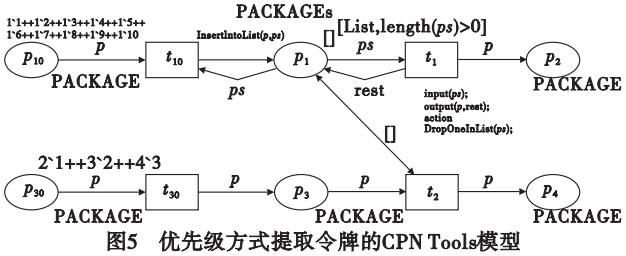

图5 优先级方式提取令牌的CPN Tools模型

4 结束语

本文中使用的改进 List 方法比 CPN Tools 中所提供的 List 方法简单，更易于理解，并改正了原方法中存在的错误；而且通过对 DropOneInList 函数的修改可以实现在库所中随机、栈、队列、优先级等各种选择令牌的方法。此方法具有通用性，可以普遍应用于各种抑制弧处理方法中。同时，在不存在抑制弧的模型中，若有多种提取令牌的需求也可以使用类似方法。

参考文献：

[1] 吴维敏，董利达，苏宏业，等. 基于抑制弧 Petri 网的离散事件系统的监控理论综述[J]. 浙江大学学报：工学版，2003，37(1)：42-46.

[2] KLEIJN H C M，KOUTNY M. Causality semantics of Petri nets with weighted inhibitor arcs[C]//Proc of the 13th International Conference on Concurrency Theory. London：Springer-Verlag，2002：531-546.

[3] 林闯，魏丫丫. 随机进程代数与随机 Petri 网[J]. 软件学报，2002，13(2)：203-213.

[4] POPOVA L. On time Petri net [J]. Elektron Inform verarb Kybern，1991，27(4)：227-244.

[5] BERTHOMIEU B，DIM M. Modeling and verification of time dependent systems using time Petri nets [J]. IEEE Trans on Software Engineering，1991，17(3)：259-273.

[6] 周月明，杜玉越，刘伟. 基于 Petri 网的容错系统分层建模[J]. 计算机工程，2010，36(2)：39-41.

[7] WESTERGAARD M，VERBEEK H M W. Efficient implementation of prioritized transitions for high-level Petri nets[C]//Proc of International Workshop on Petri Nets and Software Engineering. [S. l.]：CEUR Workshop Proceedings，2011：27-41.

[8] KLEIJN H C M，KOUTNY M. Process semantics of general inhibitor nets [J]. Information and Computation，2004，190(1)：18-69.

[9] RATZER A V，WELLS L，LASSEN H M，*et al*. CPN tools for editing，simulating，and analysing coloured Petri nets[C]//Proc of the 24th International Conference on the Application and Theory of Petri Nets. Berlin：Springer-Verlag，2003：450-462.

[10] JENSEN K，KRISTENSEN L M，WELLS L. Coloured Petri nets and CPN tools for modelling and validation of concurrent systems [J]. International Journal on Software Tools for Technology Transfer，2007，9(3-4)：213-254.

[11] ZAITSEV D A. Switched LAN simulation by colored Petri nets [J]. Mathematics and Computers in Simulation，2004，65(3)：245-249.

[12] CAI Li-zhi，ZHANG Juan，LIU Zheng-yu. Generating test cases using colored Petri net[C]//Proc of the 2nd International Symposium on Information Engineering and Electronic Commerce. [S. l.]：IEEE Press，2010：1-5.

[13] 刘经宇，朱煜，尹文生. 基于 CPN 的嵌入式 RTOP 任务调度建模[J]. 计算机工程，2010，36(21)：1-3.

[14] VOROBIYENKO P P，GULIAIEV K D，ZAITSEV D A，*et al*. PBB efficiency evaluation via colored Petri net models [J]. Communications and Network，2010，2(2)：113-124.

[15] 王胜德，胡望斌，徐宗昌. 优先级 Petri 网的 CPN Tools 仿真模型研究 [J]. 系统仿真学报，2008，20(3)：814-816.

[16] CPN Tools homepage[EB/OL]. https://cpntools.org.

[17] CHRISTENSEN S，HAAGH T B. Design/CPN overview of CPN ML syntax，version 3.0 [R]. 1996.