

一种基于 Petri 网原理的数据流模型研究^{*})

赵 阳 易先清 罗雪山

(国防科技大学信息系统与管理学院 C⁴ISR 国防科技重点实验室 长沙 410073)

摘 要 数据是系统信息资源的主要表现形式,在信息系统的系统设计和系统分析过程中,数据流建模是一个不可缺少的核心环节。从分析数据资源的特点出发,重点介绍了一种基于 Petri 网原理的新型的数据流程建模方法——数据流 Petri 网(DSPN),给出了数据流 Petri 网模型的形式化定义和图形表示,并以求解斐波那契数列第 n 项数值为例,详细说明了数据流 Petri 网模型在数据流程建模上的表达能力和建模特点。

关键词 数据资源,数据流, Petri 网,建模

Research on Dataflow Modeling with Petri Net

ZHAO Yang YI Xian-qing LUO Xue-shan

(C⁴ISR Key Laboratory of Defense Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract The dataflow modeling is indispensable in the process of information system designing and analyzing. Based on the data characteristic analyzing, a new method for dataflow modeling named DSPN was expounded particularly and the formalization and schema of the DSPN method were defined in detail. The speciality and ability of the DSPN were expanded with an example of getting the value of the fifth item of the Fibonacci numbers series.

Keywords Data resource, Dataflow, Petri net, Modeling

1 引言

数据是系统信息资源的主要表现形式。在信息系统的系统设计和系统分析过程中,数据流建模是一个不可缺少的核心环节。数据作为信息系统中的一种特殊资源,具有以下特点:首先,数据资源不能够独立存在,其存在依赖于具体的数据存储介质;在数据资源使用上,同一数据资源可以在同一时刻为多个用户提供服务,且理论上用户的数量可不受限制;数据资源本身是系统内部产生的,所以系统具有对数据资源进行修复和再生的能力。由于以上特点,在复杂的信息系统,尤其是分布式系统当中,其内部的数据操作和处理常出现死锁、活锁,以及同一数据重复处理和使用过期数据等现象。由此,在系统分析和设计阶段,有必要对系统当中的数据处理流程进行建模,从而发现和解决系统当中因数据操作而产生的系统安全问题。然而,目前的数据流模型主要体现在系统概念层,其模型框架不具备表达数据资源特点的能力,当然也无法对因数据操作产生的各种问题进行检验。本文基于信息系统中的数据资源特点以及在系统分析和设计过程中对数据处理流程建模的具体需求,在原有 Petri 网的基础上,设计了一种新的数据流建模方法。该方法不但能够将数据资源的上述特点表达出来,同时由于采用了 Petri 网的方法,可以使用较为成熟的 Petri 网分析技术对所建模型进行安全性和可靠性分析,从而实行了系统分析和设计过程中对数据处理流程的安全性检验。

2 Petri 网基本原理

Petri 网的概念最早是在 1962 年 Carl Adam Petri 的博士

论文中提出来的。从 1980 年召开第一次 Petri 网理论和应用的国际研讨会以来,每年一次的国际研讨会连续不断, Petri 网理论和应用在不断的充实和完善^[1]。下面简单介绍一下 Petri 网的基本原理^[2]。

在原型 Petri 网中,任何系统都是由两类元素组成:表示状态的元素 S (Place, 称为“库所”)和表示状态变化的元素 T (transition, 称为“变迁”)。两者之间存在依赖关系用 F (flow relation), 称之为流关系。这样由三元组 $N=(S, T, F)$ 构成了一个有向网(directed net)。在此基础上,进一步为每个库所 S 建立容量函数(capacity function) K , 为每个流关系 F 确定权函数 W , 以及给出所有有向网 N 的初始标识(initial marking) M_0 , 这样六元组 $\Sigma=(S, T, F, K, W, M_0)$ 就构成了基本 Petri 网系统。在 Petri 网系统中,变迁 T 根据与其关联的库所状态(库所中所容纳的标记数量)确定本变迁是否触发,而当一个变迁被触发后,与其关联的库所将根据流关系 F 的权函数改变其所容纳的标记数量,这样一个具有初始标识的 Petri 网系统将会自动处理运作起来。

Petri 网理论经过 40 多年的发展,已经形成一门系统的、独立的学科分支,拥有较为完善的模型体系和分析方法。其纵向发展表现为:从基本的条件/事件网,经过位置变迁网,发展到高级网。其横向发展表现为:从没有参数的网,发展到时间 Petri 网和随机 Petri 网;从一般有向弧发展到禁止弧和可变弧;从自然数标记个数到概率标记个数;从原子变迁发展到谓词变迁和子网变迁^[3-6]。

由于 Petri 网严谨的形式化表示和完整的技术体系,使得它在计算机科学技术(如操作系统、并行编译、网络协议、软件工程、形式语言、人工智能等)、自动化科学技术(如离散事件

^{*})国防预研基金(51406020401KG01)。赵 阳 博士研究生,主要研究方向为 C⁴ISR 系统、空间信息栅格、复杂系统建模与仿真;易先清 博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向为 C⁴ISR 系统分析与设计、空间信息栅格;罗雪山 博士,教授,博士生导师,主要研究方向为 C⁴ISR 系统、计算机建模与仿真等。

动态系统、混杂系统),机械设计与制造(如柔性制造系统)以及其他许多科学技术领域的应用也十分广泛^[7-14]。各应用领域在基本 Petri 网原理的基础上,根据自身领域的需求和特性,通过对原型 Petri 网添加其他“元”,或者添加多种限制条件,演变出多种适应特殊领域需求的 Petri 网变形模型。例如由 A. Ichikawa 提出的受控 Petri 网(controlled Petri net)^[15],以及 David 等人提出的连续 Petri 网(continuous Petri net,简称为 CPN)^[15]等。

本文所研究的一种基于 Petri 网的数据流模型就是在原型 Petri 网系统之上,对库所和变迁进行分类处理,并对不同种类库所的容量以及不同种类库所与变迁之间流关系的权值进行特殊设定,从而构建出一种适合描述系统数据处理流程的新型 Petri 网系统,称之为数据流 Petri 网(Data Stream Petri Net,简称 DSPN)。

3 数据流 Petri 网模型

首先,给出数据流 Petri 网模型的形式化定义:

定义 六元组 $\Sigma = (S, T, F, K, W, M)$ 称为一个数据流 Petri 网(DSPN)系统,其中,

(1) $S = S_1 \cup S_2 \cup S_3$, 其中, S_1 为辅助控制库所集合, S_2 为数据驻留站库所集合, S_3 为数据回收站库所集合;

(2) $T = T_1 \cup T_2 \cup T_3$, 其中, T_1 为辅助控制变迁集合, T_2 为数据拷贝引用操作变迁集合, T_3 为数据对象引用操作变迁集合;

(3) $S \cap T = \phi \wedge S_2 \neq \phi \wedge T_2 \neq \phi$;

(4) $F \subseteq ((S_1 \cup S_2) \times T) \cup ((T_2 \cup T_3) \times S) \cup (T_1 \times S_1)$;

(5) $dom(F) \cup cod(F) = S \cup T$, 其中

$dom(F) = \{x \in S \cup T \mid \exists y \in S \cup T: (y, x) \in F\}$

$cod(F) = \{x \in S \cup T \mid \exists y \in S \cup T: (x, y) \in F\}$;

(6) $K: S \rightarrow \{1, \infty\}$ 称为库所 S 的容量函数, 其中 $\forall s \in S_2, K(s) = 1 \wedge \forall s \in S_1 \cup S_3, K(s) = \infty$;

(7) $W: F \rightarrow \{0, 1\}$ 称为 F 权函数, 其中

$$\begin{cases} W((s, t)) = 1, \forall (s, t) \in F \wedge s \in S_1 \wedge t \in T \\ W((s, t)) = 0, \forall (s, t) \in F \wedge s \in S_2 \wedge t \in T_1 \cup T_2 \\ W((s, t)) = 1, \forall (s, t) \in F \wedge s \in S_2 \wedge t \in T_3 \\ W((t, s)) = 1, \forall (t, s) \in F \end{cases};$$

(8) $M: S \rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}$ 是 Σ 的一个标识, 满足条件: $\forall s \in S: M(s) \leq K(s)$;

(9) Σ 满足变迁发生规则

①对于 $t \in T, M|t >$ 的条件为

$$\left. \begin{aligned} &\forall s \in \cdot t: M(s) > 0 \\ &\forall s \in \cdot t: M(s) \geq W(s, t) \\ &\forall s \in \cdot t - t': M(s) + W(t, s) \leq K(s) \\ &\forall s \in \cdot t \cap t': M(s) + W(t, s) - W(s, t) \leq K(s) \end{aligned} \right\};$$

②若 $M|t > M'$, 则对于 $\forall s \in S$,

$$M'(s) = \begin{cases} M(s) - W(s, t), & \text{若 } s \in \cdot t - t' \\ M(s) + W(t, s), & \text{若 } s \in t' - \cdot t \\ M(s) + W(t, s) - W(s, t), & s \in \cdot t \cap t' \\ M(s), & \text{其他} \end{cases};$$

其中,

$\cdot t = \{x \mid x \in S \cup T \wedge (x, t) \in F\}$

$t \cdot = \{x \mid x \in S \cup T \wedge (t, x) \in F\}$;

在上述的数据流 Petri 网系统中,所有库所被分成辅助控制库所、数据驻留站库所和数据回收站库所三类,其图形化表

示如图 1 所示。辅助控制库所是用于数据流 Petri 网模型中的系统控制;数据驻留站库所是用于表示数据的逻辑驻留区,在引言中已经阐述,数据资源的第一个特点就是不能够独立存在,必须依赖与具体的存储设备,在数据流 Petri 网系统中,数据存储设备就被抽象为数据驻留站库所;系统在运行过程中不断产生新的数据,同时也导致了大量过时数据,为了系统分析验证的需要,在数据流 Petri 网系统中设计了数据回收站库所,专门用于回收过时数据,与系统分析使用。

在上述的数据流 Petri 网系统中,所有的变迁也被分成了三类,分别是辅助控制变迁、数据拷贝引用操作变迁、数据对象引用操作变迁,其图形化表示如图 1 所示。辅助控制变迁同辅助控制库所的职责相同,也是用于数据流 Petri 网模型中的系统控制。在数据使用上,数据流 Petri 网系统将数据操作分成了拷贝引用和对象引用两类,其区别在于数据拷贝引用不改变数据状态,在该操作所使用的数据资源只是原有数据的副本,而数据对象引用则恰恰相反,其操作所使用的数据资源就是原有数据本身,其操作将改变原有数据内容和状态。数据拷贝引用操作变迁和数据对象引用操作变迁分别代表着这两种不同的数据引用方式。

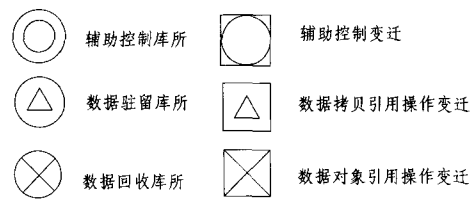


图 1 数据流 Petri 网系统中库所与变迁的图形化表示

结合数据流 Petri 网系统的定义,由于所有辅助控制变迁和数据拷贝引用操作不改变原有数据的内容和状态,因此所有由数据驻留站库所到辅助控制变迁和数据拷贝引用操作变迁的流关系 F 的权值均为零,这样多个数据拷贝引用操作在对同一数据的使用上就不会出现资源竞争的问题,实行了数据资源的多用户共享。

4 实例演示

本示例说明的是使用数据流 Petri 网来描述和演示求解斐波那契数列的过程。斐波那契数列是以意大利数学家斐波那契(1175—1259年)命名的,该数列的表现为:1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, ..., 其规律为连续两项之和等于第三项。根据这一规律设计一个简单的斐波那契数列计算器,用于计算位置大于 2(小于 2 的项值就是 1)的任何一项数列的值。该计算器内部的核心部件应包括存储器、加法器和控制器三部分,其中加法器用于求和计算;控制器用于控制求和计算的次数,也就是求解项位置;储存器用来保存用于计算第三项数列值的前两项数列的数值。同时该计算器还需要一个输入,用以确定求解项的位置。假设用该计算器计算第 n 项斐波那契数列的值,首先存储其中有两个初始数据 1 和 1(斐波那契数列的前两项),加法器对这两个数据进行加法运算,然后用所得结果将原有的一个数据更新,然后再对更新后的数据进行加法运算,用得到的结果对存储器两个数据中较早产生的数据进行更新,这样循环交替更新数据,循环求和,直到进行完第 $n-2$ 次加法运算为止,该次运算得到的结果即是第 n 项斐波那契数列的值。下面就给出这样一个斐波那契数列计算器的数据流 Petri 网模型,如图 2 所示。

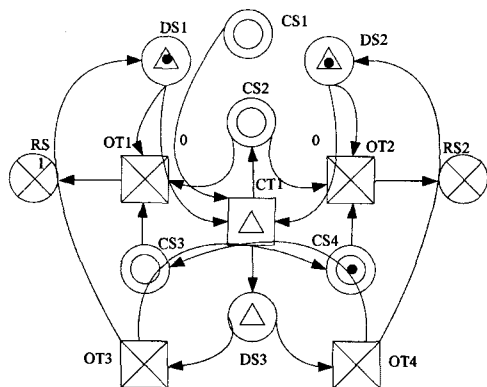


图2 斐波那契数列计算器的数据流 Petri 网模型

在图2所给出的斐波那契数列计算器数据流 Petri 网模型中,数据驻留站库所 DS1, DS2, DS3 表示存储器;数据拷贝引用操作变迁 OT1 表示加法器;辅助控制库所 CS1 表示控制器;数据对象引用操作 OT1 和 OT2 负责清除存储区当中的过时数据,而数据对象引用操作 OT3 和 OT4 负责将新产生的数据复制到相应的存储区当中。根据数据流 Petri 网系统的定义,各种库所与变迁之间的流关系权已经是确定的,但为了阅读方便,在图中没有标识的流关系的权为 1,标识为“0”的权为零。下面以求解第 5 项斐波那契数列的值为例,简单说明斐波那契数列计算器数据流 Petri 网模型系统的运行过程。表 1 中的系统标识列表(有关 Petri 网标识的相关理论请参考文献[2])记录了斐波那契数列计算器数据流 Petri 网模型的完整运行过程。

表 1 斐波那契数列计算器数据流 Petri 网模型标识列表

M	CS1	CS2	CS3	CS4	DS1	DS2	DS3	RS1	RS2
0	3	0	0	1	1/1	1/1	0	0	0
1	2	1	0	1	1/1	1/1	1/2	0	0
2	2	0	0	0	1/1	0	1/2	0	1
3	2	0	1	0	1/1	1/2	0	0	1
4	1	1	1	0	1/1	1/2	1/3	0	1
5	1	0	0	0	0	1/2	1/3	1	1
6	1	0	0	1	1/3	1/2	0	1	1
7	0	1	0	1	1/3	1/2	1/5	1	1
8	0	0	0	0	1/3	0	1/5	1	2
9	0	0	1	0	1/3	1/5	0	1	2

如表 1 所示,求解第 5 项斐波那契数列的数据流 Petri 网模型在 CS1(5-2=3)的控制下,系统经历了 9 个状态的变化,完成了三次求和运算。如果将数值 1 带入 DS1, DS2 的初始状态中(a/b, a 代表标识数, b 代表数值),经过三次求和计算,得到第 5 项斐波那契数列的数值—“5”。

结束语 本文从分析数据资源的特点出发,重点介绍了一种基于 Petri 网原理的新型的数据流程建模方法——数据

流 Petri 网,给出了数据流 Petri 网模型的形式化定义和图形表示,并以求解斐波那契数列第 n 项数值为例,详细说明了数据流 Petri 网模型在数据流程建模上的表达能力和建模特点。数据流 Petri 网是一种新型的数据流建模方法,基于数据流 Petri 网模型的数据流分析和系统检测等相关技术将成为进一步研究的重点。

参考文献

- [1] 乐晓波, 陈黎静. Petri 网应用综述[J]. 长沙交通学院学报, 2004, 20(2): 51-55
- [2] 袁崇义. Petri 网原来与应用[A]. 电子工业出版社, 2005
- [3] Lee J, Member S. Modeling Uncertainty Reasoning With Possibilistic Petri Nets[J]. IEEE Transaction on Systems man and Cybernetics-Part B: CYBERNETICS, 2003, 33(2)
- [4] Shen R L. Reinforcement Learning for High - Level Fuzzy Petri Nets [J]. IEEE Transaction on Systems Man and Cybernetics-Part B: Cybernetics, 2003, 33(2)
- [5] Adamyan A, He D. Sequential Failure Analysis Using Counters of Petri Vet models[J]. IEEE Transaction on Systems man and Cybernetics-Part A: Systems and Humans, 2003, 33(1)
- [6] Zhang Zhiming, Wang Yue, Tao Ran, et al. Resource Allocation Using Timed Petri Vets and Heuristic Search[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2000(9):148-154
- [7] 罗军舟, 顾冠群, 谢俊清. Petri 网的协议分析器[J]. 计算机学报, 1997(3):206-212
- [8] 丁正已, 谢磊. Petri 网在多处理器系统性能分析中的应用[J]. 信息工程大学学报, 2000(12):58-60
- [9] 丁彩虹, 黄文虎, 姜兴渭. Petri 网在基于规则系统一致性问题的检查中的应用[J]. 机械强度, 1999(9):170-173
- [10] 周必水, 倪慧莉. Petri 网在时序建模中的应用[J]. 杭州电子工业学院学报, 2000(8):1-8
- [11] 曹阳, 张维明, 沙基昌, 等. Petri 网在通信网络仿真建模中的应用[J]. 计算机仿真, 2001(5):38-41
- [12] 李慧芳, 范玉顺. 基于 Petri 网仿真的批处理过程动态调度[J]. 系统仿真学报, 2002(7):928-931
- [13] 陈胜, 程景云. 基于 Petri 网的工作流建模及仿真[J]. 计算机辅助工程, 2000(5):34-37
- [14] 田国会, 贾磊, 路飞, 等. 离散事件系统的面向对象实时时态着色 Petri 网模型[J]. 系统工程理论方法应用, 2001(10):206-208
- [15] Ichikawa A, Yokoyama K, Kurogi S. Control of Event - Driven Systems-Reachability and Control of Conflict-Free Petri Nets. Trans. Soc. Instrum. Control. Eng. (Japan), 1985, 21(4): 324-330
- [16] David R, Alla H. Continuous Petri Nets // Proceedings of 8 th European Workshop on Application and Theory of Petri Nets. Zaragoza, Spain, 1987:275-294

(上接第 125 页)

原型转化为实际应用时需要进一步研究的问题。

参考文献

- [1] Case J, Fedor M, Schoffatal M. A simple network management protocol(SNMP)[S]. RFC1157, 1990
- [2] 张国鸣, 唐树才, 薛刚逊. 网络管理实用技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002
- [3] 杨家海, 任宪坤, 王沛瑜. 网络管理原理与实现技术[M]. 北京:

清华大学出版社, 2000

- [4] Pham V A, Karmouch A. Mobile software agent: an overview [J]. IEEE Communication Magazine, 1998, 36(7): 26-37
- [5] Wooldrige M. Intelligent Agents: Theory and Practice[J]. The Knowledge Engineering Review, 1995, 10(2): 115-152
- [6] 郭学理, 肖岗, 曹成里. 基于智能代理的网络管理系统研究[J]. 小型微型计算机系统, 2001, 22(9):1051-1054
- [7] 谢希仁. 计算机网络(第四版)[M]. 电子工业出版社, 2003