



# Petri 网 的行为理论及其应用

---

Behavior Theory and Applications of Petri Net

蒋昌俊



高等教育出版社  
HIGHER EDUCATION PRESS



# Petri 网 的行为理论及其应用

Behavior Theory and Applications of Petri Net

蒋昌俊



高等教育出版社

HIGHER EDUCATION PRESS

## 内 容 提 要

本书着重介绍 Petri 网的顺序行为理论和并发性理论,包括 Petri 网重要特性的网语言刻画、分析及控制手段,以及 Petri 网连接、同步和共享操作等过程中的语言关系等内容。研究了同步合成 Petri 网的进程语言公式,以及进程的切、片、线在 Petri 网同步合成过程中的对应关系,讨论了 Petri 网的进程语义性质,揭示出 Petri 网的动态不变性,包括状态不变性和行为不变性及其关系。描述了 Petri 网的行为相关性,包括可控相关性、一致相关性、交换相关性和互斥相关性,讨论了相关性的保持条件和相互关系,提出行为相关性分析算法。介绍了发射序列的测试和可达性判定的若干有效算法,研究了并发控制器的综合过程及相关算法,且基于 Petri 网的行为理论,讨论了并发程序的验证与分析方法,介绍了并发验证系统的原理及实现。

本书可作为计算机、通信工程、系统工程、自动控制、管理、机械制造和应用数学等专业的研究生和本科高年级学生的教材或辅导书,也可作为相关领域科技人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

Petri 网的行为理论及其应用/蒋昌俊. —北京:  
高等教育出版社,2003.1

ISBN 7-04-011566-2

I. P... II. 蒋... III. 计算机网络 IV. TP393

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 097703 号

---

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010—64054588
社 址	北京市东城区沙滩后街 55 号	免费咨询	800—810—0598
邮政编码	100009	网 址	<a href="http://www.hep.edu.cn">http://www.hep.edu.cn</a>
传 真	010—64014048		<a href="http://www.hep.com.cn">http://www.hep.com.cn</a>

经 销 新华书店北京发行所  
排 版 高等教育出版社照排中心  
印 刷 高等教育出版社印刷厂

开 本	787×960 1/16	版 次	2003 年 1 月第 1 版
印 张	11.75	印 次	2003 年 1 月第 1 次印刷
字 数	210 000	定 价	19.30 元
插 页	1		

---

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

**版权所有 侵权必究**

## 前 言

三十多年前,德国科学家 C. A. Petri 先生在其博士学位论文中创立了一种用于并发通信机理描述的新型“自动机”模型,即今天被称之为“Petri 网”的并发系统模型。众所周知,传统的自动机模型适于描述顺序行为的状态空间问题,而 Petri 网则适于描述异步并发行为的系统问题。如果说自动机是对顺序系统行为机理的直接描述,那么 Petri 网则在两个层面上对并发系统的行为机理给予充分的描述。首先, Petri 网直接展现并发系统的物理结构层次及资源状态的初始分布状况。其次,在 Petri 网引发规则的作用下将间接展现出该并发系统的动态行为机理。这两个层面相互关联,形成了一个集物理结构和行为机理于一体的集成模型。同传统的自动机模型相比, Petri 网所提供的系统信息要丰富得多,其分析在理论上也更为深刻。因此,它被广泛地应用于人造系统模型,是跨越通信科学、计算机科学、控制科学和系统科学的交叉研究领域,有着广泛的应用背景。例如,信息高速通信网、计算机集成制造系统、分布式并行处理系统等。

尽管国内外已陆续出版了一些有关 Petri 网方面的教材或著作,但从 Petri 网的行为机理角度讨论模型及其分析理论是本书的特色。本书是在我们学习与工作体会的基础上(特别是在作者的博士学位论文和博士后出站报告的基础上),总结了十多年来的研究成果,着重介绍 Petri 网的顺序行为理论和并发行为理论,包括 Petri 网重要特性的网语言刻画、分析及控制手段,以及 Petri 网连接、同步和共享操作等过程中的语言关系等内容。研究了同步合成 Petri 网的进程语言公式,以及进程的切、片、线在 Petri 网同步合成过程中的对应关系,讨论了 Petri 网的进程语义性质,揭示出 Petri 网的动态不变性,包括状态不变性和行为不变性,讨论了它们之间的关系。描述了 Petri 网的行为相关性,包括可控相关性、一致相关性、交换相关性和互斥相关性,讨论了相关性的保持条件和相互关系,提出行为相关性分析算法。介绍了发射序列的测试和可达性判定的若干有效算法,研究了并发控制器的综合过程及相关算法,且基于 Petri 网的行为理论,讨论了并发程序的验证与分析方法,介绍了并发验证系统的原理及实现。书中

通过对大量具有实际背景的例题进行分析,进一步加深了对理论和方法的理解。

本书适合于计算机、通信工程、系统工程、自动控制、管理、机械制造和应用数学等专业的教师、研究生和本科高年级学生阅读,也可作为相关领域科技人员的参考书。

作者在求学过程中,先后得到几位导师的指导和帮助,他们是:山东科技大学的吴哲辉教授、中国科学院自动化研究所的郑应平教授和疏松桂教授以及中国科学院计算技术研究所的李国杰院士。在此谨向他们表示诚挚的谢意!

作者的研究工作先后得到国家自然科学基金、国家 973 计划、国家 863 计划、国家重点科技攻关计划、国防科技创新基金、教育部优秀青年教师教学科研奖励计划、上海市科技发展基金等项目的支持,本书的出版得到教育部优秀博士论文出版基金的资助,特在此一并表示感谢。

由于时间和水平有限,书中的疏漏和缺点在所难免,恳请读者批评指正。

作者

2002 年 10 月

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 引言 .....	1
1.2 Petri 网研究现状 .....	1
1.2.1 Petri 网理论研究 .....	2
1.2.2 Petri 网应用研究 .....	6
1.2.3 Petri 网工具研制 .....	7
1.3 CSP 与 CCS .....	8
1.4 迹语言与偏序语言 .....	9
1.5 PN 机 .....	10
1.6 内容安排 .....	11
参考文献 .....	12
<b>第 2 章 基本知识</b> .....	19
2.1 Petri 网基本概念 .....	19
2.2 Petri 网基本分析技术 .....	21
2.3 Petri 网基本性质 .....	24
2.4 Petri 网的进程 .....	25
2.5 Petri 网的合成 .....	26
参考文献 .....	27
<b>第 3 章 Petri 网的顺序行为关系</b> .....	29
3.1 引言 .....	29
3.2 基于 Petri 网语言的活性刻划 .....	29
3.3 活性控制 .....	33
3.4 连接操作的语言关系 .....	38
3.5 连接操作的行为不变性 .....	46
3.6 应用 .....	47
3.7 本章小结 .....	49
参考文献 .....	50

<b>第 4 章 Petri 网的偏序行为关系</b> .....	52
4.1 引言 .....	52
4.2 同步合成 PN 的进程语言公式 .....	52
4.3 Petri 网的进程语义性质 .....	58
4.4 本章小结 .....	63
参考文献 .....	63
<b>第 5 章 Petri 网的动态不变性</b> .....	65
5.1 引言 .....	65
5.2 动态不变性 .....	65
5.3 一个柔性装配单元的分析 .....	71
5.4 本章小结 .....	74
参考文献 .....	74
<b>第 6 章 Petri 网的行为相关性</b> .....	78
6.1 引言 .....	78
6.2 行为相关性 .....	79
6.3 行为相关性分析 .....	85
6.4 应用 .....	88
6.5 本章小结 .....	91
参考文献 .....	91
<b>第 7 章 Petri 网顺序序列的测试与判定</b> .....	94
7.1 引言 .....	94
7.2 发射序列测试 .....	94
7.3 合法发射序列的判定 .....	97
7.3.1 算法基础 .....	97
7.3.2 判定算法 .....	101
7.3.3 算法复杂性 .....	102
7.3.4 例子 .....	103
7.4 测试算法及其复杂性 .....	105
7.5 一个实际系统的分析 .....	108
7.6 本章小结 .....	115
参考文献 .....	115
<b>第 8 章 并发控制器设计的 Petri 网方法</b> .....	118
8.1 引言 .....	118
8.2 控制器综合算法 .....	118
8.3 三类异常现象的处理 .....	120
8.3.1 死锁现象 .....	120
8.3.2 溢出现象 .....	122
8.3.3 行为异变现象 .....	123

8.4 本章小结	124
参考文献	124
<b>第9章 并发程序验证 Petri 网方法</b>	<b>125</b>
9.1 引言	125
9.2 同步合成运算的概念及性质	126
9.3 Ada 程序的 Petri 网模型	128
9.4 Ada 网的同步合成运算及其可达图求解	132
9.5 基于 Petri 网语言的 Ada 程序分析	137
9.5.1 Ada 程序的安全性	137
9.5.2 活性	139
9.6 PVM 程序的 Petri 网模型	140
9.7 PVM 程序到 Petri 网模型的转换	142
9.8 PVM 程序验证算法	146
9.9 举例说明	151
9.10 本章小结	153
参考文献	153
<b>第10章 并发验证系统的原理与实现</b>	<b>157</b>
10.1 引言	157
10.2 SFC 与 Petri 网的对应关系	158
10.2.1 SFC 简介	158
10.2.2 SFC 与 Petri 网的对应关系	159
10.3 系统模型及主要算法	159
10.3.1 SFC 到 Petri 的自动转化	159
10.3.2 验证算法	161
10.4 系统开发环境及实验情况	161
10.5 系统实现的若干关键技术	165
10.5.1 安全 Petri 网及其可视化运行的图形表示	165
10.5.2 可视化运行的设计	167
10.5.3 系统中操作向导的设计与实现	169
参考文献	176



# 第 1 章

## 绪 论

### 1.1 引 言

随着科学技术的进步,人类社会进入 21 世纪,计算机科学技术得到迅猛发展。从单 CPU 的串行计算机系统到多 CPU 的并行计算机系统;从单纯的文本处理到集文本、图形、图像和语音等于一体的多媒体处理;从基于单机环境下的操作到基于网络并行环境下的机群操作;如此种种,其基本理论模型可以归结为从串行处理的串/演系统(如经典自动机模型、 $\lambda$ -演算模型、Post-系统模型等)到并行处理的并发系统(Petri 网、CSP、CCS 等)。由此足见,并发系统是当今计算机科学技术中一项重要的基础研究课题之一。

并发模型的出现,可以追溯到 20 世纪 30 年代。神经网络可谓是早期的并发模型,它以多结点的网络机制模拟人的神经网络系统,各神经元结点除了自身的信息处理活动之外,还要进行神经元结点之间的信息传输和协调,由此呈现整个网络系统的并行处理活动。神经网络系统从本质上来说,属于数值信息处理,主要集中在计算这一特征上;其网络中的通信处理不甚明显。随着对多处理机系统通信要求的提高,出现了一系列反映通信机制的并发模型。Petri 网、CSP 和 CCS 便是其中颇具代表性的几个模型,它们成为当今研究并发系统的主要工具。

### 1.2 Petri 网研究现状

Petri 网是 1962 年由德国科学家 C. A. Petri 先生在其博士学位论文“用自

动机通信”中首次建立的。Petri 先生当初建立的模型实际上是一类特殊网——安全网,并理解作为一种新的自动机模型,主要用于刻划通信机制,后经 Petri 本人及其追随者们的不断努力,使之逐渐形成一门崭新的学科分支<sup>[1,2]</sup>。在此发展过程中,几个关键时期应该被指出。起点当然是 1962 年 Petri 先生的博士论文,20 世纪 60 年代末至 70 年代初,美国 ADR 公司信息系统理论组的 A. W. Holt 及其同事们将此模型引入美国,并进一步丰富和发展相应的理论、记号及表示法。与此同时,MIT(麻省理工学院)的 J. B. Dennis 教授领导的计算机结构课题组在 Petri 网理论方面做了许多工作,包括几篇博士论文。1970 年的 Woods Hole 会议和 1975 年的 MIT 会议是两次早期的与 Petri 网有关的重要学术会议,对 Petri 网知识的传播起到了重要作用。随着并发现象逐渐为计算机科学家们所认识和重视,Petri 网也被广泛引起注意,成为计算机界、自动化界的热门研究课题。

### 1.2.1 Petri 网理论研究

自 Petri 先生开创性的工作之后,网论得到了长足进展,至今已形成了具备相当规模的研究领域。在理论方面,Petri 网模型和分析技术的研究取得了许多有价值的成果,Petri 网作为一种全新的自动机被开发出来,研究者对此充满了希望,认为 Petri 网比下推自动机有用,原因是它不存在图灵机所具有的那些可判定问题。在此期间,MIT 出现的许多博士论文都是以 Petri 网为专题的。于是,人们也像发现 FSM 自动机与普通语言之间的关系一样展开了对 Petri 网语言的研究,研制出了一些复杂的译码方法,并且定义了一些使其证明较易构造的 Petri 网子类。由于 Petri 网自身也存在一些可判定问题,许多研究者转而寻找其他形式的自动机,比如线性有界自动机、多栈下推自动机等。然而,Petri 网的理论研究仍在许多大学和科研机构中进行着。许多系统设计者仍试图用 Petri 网或经过改进的 Petri 网来适合他们专用领域的需要。虽然,基本 Petri 网模型存在一些可判定问题,但是有界 Petri 网的性质却很好,对应用者来说并没有面临理论家们所碰到的难题。不过问题并没有那么简单。事实上,Petri 网的可达集在网的规模上是以指数规律递增的,从而引起了麻烦,尽管模型可能有界,但是界限已超出了目前计算机的运算能力。继续从事 Petri 网理论研究的专家们开始扩充这个模型,他们对 Petri 网所做的工作影响着其建模能力、模型的表达能力以及从模型中可获得的计量单位。具有代表性的 Petri 网模型介绍如下。

#### 一、抑制弧 Petri 网模型(Inhibitor Arcs Petri Net Model)<sup>[44]</sup>

首先对 Petri 网模型的重要扩充就是附加一些新型的弧线。早期模型的引发规则是当有一个以上的标记(token)驻留在每一个输入位置时,相应的变迁就可以引发,从而改变模型的状态(这里的输入位置是由从位置到变迁的弧来定义

的)。抑制弧的定义则相反,当输入位置无标记时变迁可以引发。抑制弧的引进使 Petri 网具备了零检验能力。

## 二、高级 Petri 网 (High-level Petri Net)<sup>[53,54]</sup>

Petri 网面临的另一个问题是,为了某一个特别的操作建立模型从而必须建立复杂的编码。一些学者认为,如果以某种方式来区别标记(token),可使复杂编码容易实现。目前的着色网(Colored Petri Net)和谓词变迁网(Predicate Transition Petri Net)就是这种思想的具体体现。

## 三、时间/时延 Petri 网 (Time/Timed Petri Net)<sup>[57,58]</sup>

随着系统逻辑层分析的进一步深入,必然进行物理层的处理,时间是系统物理层上的一个重要参数。建立含时间因素的系统分析模型对实际系统来说是非常必要的。在过去十年中,出现了两类含时间因素的基本 Petri 网模型。一类是时延 Petri 网模型,它是由 Ramchandani<sup>[57]</sup>提出的。这类 Petri 网模型规定每个变迁都具有有限的引发时延,其引发规则被修改为:

- (1) 每一个引发变迁都有一个时延过程;
- (2) 一个变迁一旦使能就必须立即引发。

时延 Petri 网主要用于系统的评估方面。另一类是时间 Petri 网模型,它是由 Merlin<sup>[58]</sup>提出的。这类 Petri 网模型规定每个变迁都对应着一个时间区间 $[a, b]$ ,任何一个变迁,当它使能之后,它在时间区间 $[a, b]$ 内便具有连续使能权。使用这种网 Merlin 讨论了一些计算机系统和通信进程中的可达性问题。应该说时间 Petri 网比时延 Petri 网更为一般,一个时延 Petri 网可以表达成一个时间 Petri 网,反之不行。关于时间(延)Petri 网的一些分析方法可从参考文献[57,58]得到。

## 四、随机 Petri 网 (Stochastic Petri Net)<sup>[52]</sup>

时延 Petri 网中的时延值如果是一个随机变量,便得到随机 Petri 网模型,它是由 Molloy<sup>[52]</sup>首先提出的,参考文献[52]中考察的是有界随机 Petri 网,其随机变量服从负指数分布,从而证明了 Petri 网状态可达图同构于一个马氏链,借助马氏理论可得到系统的有关性能指标。Marsan 等人<sup>[59]</sup>推广了 Molloy 的工作,提出一种广义随机 Petri 网(General Stochastic Petri Net,简称 GSPN)模型,此模型包括了某些变迁为立即变迁(无时延)的情形。Dugan 等人<sup>[60]</sup>从另一角度推广了 Molloy 的工作,提出一种增广随机 Petri 网(Extensive Stochastic Petri Net,简称 ESPN)模型,该模型包含了抑制弧的情况。然而,这些工作均未突破负指数分布的限制。参考文献[61]等分别从不同角度试图取消负指数分布的限制,但仍有待进一步努力。无论时间(延)Petri 网,还是随机 Petri 网,目前的分析手段基本上是在一可达图上操作的,由此产生的状态复杂性是难以克服的。为此,寻求新的分析途径,拓广应用领域是这一方向的进一步研究目标。

### 五、对象 Petri 网 (Object Petri Net)<sup>[55]</sup>

对象 Petri 网是由内部结构和外部结构,以及对象与对象之间的消息传递形成的实际系统模型的控制结构组成的。对象内部包含了该对象自身的属性以及处理这些数据的方法。在对象 Petri 网模型中,对象的属性(即数据结构或数据类型)是由位置表示的,处理这些数据的方法是由变迁表示的,位置中的数据是由 token 表示的。对象的外部结构是消息接口,位置是对象中惟一与外界(其他对象实体)进行消息传输的接口,其中包括消息接收接口和消息发送接口。对象的消息接收接口和消息发送接口是成对出现的,分别与对象内的某个方法的输入弧和输出弧相连。消息值隐藏在消息传递接口位置中的 token 中,如果不同的对象同时向一个对象发送同一个消息,则在此对象的该消息接收接口中形成一个消息队列。同理,在该对象的消息发送接口中也有可能产生一个消息队列。对象 Petri 网系统通过对对象间的控制结构协调各对象间的消息传递,对象控制结构有一类具有特殊含义的变迁和位置实现。

### 六、时序 Petri 网 (Temporal Petri Net)<sup>[67~69]</sup>

1985 年, Suzuki 提出一种新网子类:时序 Petri 网,引入了时序逻辑操作,如  $\bigcirc$ (next)、 $\square$ (henceforth)、 $\diamond$ (eventually)和 until 等,通过时序逻辑公式控制或限定 Petri 网的变迁引发序列,描述系统事件之间的时序关系,并且反映出系统的基本性质。因此,时序 Petri 网特别适合作为并发系统的建模、分析和验证工具。

### 七、被控 Petri 网 (Controlled Petri Net)<sup>[56]</sup>

被控 Petri 网是在 Petri 网中引入一组外部输入的位置,这些外部输入位置中的 token 数决定变迁的发生或限制变迁的发生次数控制的状态为输入位置中的 token 数,由反馈策略决定。反馈控制是基于外部输入位置的离散事件动态系统协调反馈控制综合,根据需求规范和原系统的 Petri 网模型,综合出附加的控制器 Petri 网模型,同原 Petri 网合成便形成了满足需求的受控 Petri 网模型。

### 八、混合 Petri 网 (Hybrid Petri Net)<sup>[37]</sup>

混合控制系统是由实时决策子系统与实时数值(闭环或开环)子系统组成的复杂的控制系统。实时决策子系统确定分布系统(全局的或局部的)控制模态的转移;每一个控制模态下,实现特定活动功能的实时数值控制子系统与被控对象、传感器和执行器组成传统的数值控制回路。但由于混合系统的复杂性,使得每一个控制模态下的状态特征量不仅仅是被控对象向数值控制器的连续量或数值量反馈,还有来自被控对象的符号量或离散事件特征量,这些量组成此模态下的混合状态。

混合 Petri 网基于离散 Petri 网模型(即传统 Petri 网模型)和连续 Petri 网模型。在一个混合 Petri 网模型中,其位置集和变迁集分为离散与连续两部分,这

就构成一个混合 Petri 网,位置与变迁之间由有向弧连接。连续位置的标识是一个实数,离散位置的标识是一个整数。如果混合 Petri 网的全部结点是离散的结点,则混合 Petri 网模型就退化为一个离散 Petri 网;如果混合 Petri 网的全部结点是连续的结点,则混合 Petri 网模型就退化为一个连续 Petri 网。混合 Petri 网的发射规则综合了传统 Petri 网的离散发射规则和连续 Petri 网的实值发射规则。

在 Petri 网模型的基础上,其分析技术的研究也取得了长足进展,有代表性的技术包括:

### 一、代数分析技术<sup>[3,27~29]</sup>

代数分析技术主要以关联矩阵的形式对一个网系统的结构给与刻划,然后建立状态可达的线性系统关系。这种分析途径首先由 Peterson<sup>[3]</sup>提出, Murata<sup>[27~29]</sup>的工作最为出色。它的优点在于可以借助线性代数的有关结果,简洁地展现 Petri 网的一些性质,尤其是结构性质。当然,其作用是有限的,难以很好地刻划动态特征。一般来说,它对可达性的刻划只是一个必要条件而非充分条件,只有针对无冲突的子类才是充要的。最近,参考文献[33]试图作出努力,取得一些进展,但仍未很好地解决。

### 二、图分析技术<sup>[3,14,33,34]</sup>

图分析技术是以一个有限的有向图(树),直接展现一个网系统的运行机制,类似于一个状态机。Karp 和 Miller<sup>[14]</sup>首先提出这一思想,它的优点是能反映一个网系统的动态行为和一些特征。特别地,对一个有界 Petri 网,它是一个准确刻划,而且对应一个有限状态机。然而,对无界 Petri 网,它只能部分反映。最近,参考文献[98]提出一个通项可达森林的工具,企图以一组通项化的可达树准确刻划一个网系统(包括有界、无界)。这是一个有吸引力的研究方向。

### 三、归纳分析技术<sup>[28~31,35~37]</sup>

归纳分析技术是针对 Petri 网的状态复杂性而提出的。一般来说,一个规模不大的系统,可能会出现状态组合爆炸的危险,从而给分析带来困难,对此人们提出化简和分解的思想。化简是将一个较复杂的 Petri 网简化成一个比较简单的 Petri 网而又要保留一些性质不变的同态变换过程,这个过程减少了可达状态空间,通过对简单网的分析,能为理解原网性质提供充分的信息。

分解的思想即是“分而治之”,是将一个复杂的网系统分解成若干较为简单的网系统,分解过程也要保持一些性质不变。这样,通过分析简单的子网系统便可了解复杂网系统。这方面的研究是近年来 Petri 网领域中的主流方向之一,但是大多数工作都局限在保性研究上,而且条件过强,很难普适。保持行为的化简,分解研究,减弱条件,提高适应性将是进一步努力的目标。

Petri 网理论研究的另一主流方向是建立在通用网论基础之上的并发行为

的特性研究。通用网论是从更为基础、更为抽象的网模型(如 C/E 系统、EN 系统)上探讨系统的特性,其中最为重要的就是并发性。Petri 先生自 20 世纪 70 年代以来一直从事这方面的工作,其中最为著名的就是他所建立的并发公理系统<sup>[1,2]</sup>。在此基础上,许多研究者开展了并发语义的刻划<sup>[38]</sup>,系统并发行为、序列行为的等价关系<sup>[39]</sup>,并发、冲突的关系<sup>[40]</sup>,并发系统的构造<sup>[41]</sup>,以及基于 Petri 网的并发系统与 CSP、CCS 在语义上的关系<sup>[16,42]</sup>等等研究,取得了一些有深度的结果。然而,这方面的研究工作仍有待进一步发展,如对并发行为表达层次的划分与实现,对这些理论结果真正付之应用的研究,等等。

Petri 网语言也是 Petri 网中的一个重要研究方向,Hack<sup>[43]</sup>和 Peterson<sup>[3]</sup>最早从事这方面的研究。将一个 Petri 网所有可能的引发序列的集合视为该网产生的语言,参考文献[38,39]研究了语言的封闭性,以及与经典形式语言的关系。Hack 在参考文献[44]中还讨论了网模型的计算能力,指出带抑制的增广 Petri 网与著名的图灵机在计算能力上是等价的,从而充分显示出 Petri 网模型的表达能力。另外,Rozenberg 等人<sup>[45]</sup>在事件多重集上讨论了子集语言的类似问题,参考文献[46]给出了 Petri 网语言的一个很好综述,这以后的工作还有参考文献[97]给出了 Petri 网语言与形式语言关系的一个清楚刻划。参考文献[47]分别从各个角度研究了 Petri 网语言的性质。然而,同经典形式语言相比,Petri 网语言还显得不那么成熟。首先,没有建立 Petri 网语言的表达层次及相应的文法关系,只将 Petri 网看成是语言的产生器,而没有考察作为识别器的可能。还有,就 Petri 网讨论的一些重要性质(如活性等)则缺少以语言的形式加以刻划和分析。这方面的问题既反映出 Petri 网语言研究的不成熟性,同时也为人们展现出新的极具吸引力的研究方向。

### 1.2.2 Petri 网应用研究

在 Petri 网应用方面,出现了许多可喜的成果。早期的工作主要涉及计算机科学的相关领域,如参考文献[48,58]将 Petri 网用于通信网络的协议验证与分析;参考文献[49]讨论了操作系统的 Petri 网描述;参考文献[50]研究了 Petri 网在分布式数据库系统中的应用;参考文献[51]考察了 Petri 网在实时系统中的应用,出现了加时间因素的 Petri 网;参考文献[52]为研究系统性能分析,提出了随机 Petri 网。此外,为浓缩系统描述的规模,参考文献[53]引入了着色 Petri 网;参考文献[54]提出了谓词变迁网等新网种。近些年来,Petri 网的应用渗透到计算机科学的新领域,如参考文献[29]利用 Petri 网研究了并发程序的描述与验证,参考文献[29]研究了知识的 Petri 网表示,参考文献[55]讨论了面向对象的 Petri 网模型。同时,Petri 网也广泛地用于自动化、机械制造、军事指挥等学科领域,尤其热门的是基于 Petri 网的系统控制研究,参考文献[56]首先引入受控

Petri 网的网种,并用于自动化车间的建模与调度控制;参考文献[36,37,61,70,78]研究了自动制造动系统的 Petri 网建模与分析;参考文献[95]基于时序 Petri 网对证券交易系统进行了模拟、描述和正确性验证,参考文献[74]讨论了 Petri 网在电子商务中的应用,参考文献[71~73]研究了基于 Petri 网的工作流问题,参考文献[62,63]利用 Petri 网对并发程序进行了分析和验证。然而,由于 Petri 网缺乏描述变量变化的手段,因此,Petri 网主要讨论基于分布式系统(基于消息传递机制)的并发语言设计的程序,如 Ada 程序<sup>[64,65]</sup>,对集中式系统(基于共享内存)论述较少。另一方面,Petri 网缺乏对事件之间从属和时序关系描述的能力,所以,其更多的是应用于分析和验证能够利用网结构直接反映的诸如死锁、互斥等安全性质,而对程序的活性性质讨论较少(此处并发程序所指的安全性和活性性质与 Petri 网中的安全性和活性内涵不同)。还有一部分学者致力于利用公理系统或逻辑系统进行并发程序的分析及验证,如时序逻辑被认为是较为有效的分析方法和验证手段,它不仅可用于描述程序的功能需求,而且可用于分析程序的动态执行过程。参考文献[66]就利用时序逻辑分析和验证了并发程序的活性性质,参考文献[96]基于时序逻辑提出一种新的并发程序设计工具 XYZ 系统。然而,由于逻辑演绎本身所需要的缜密及并发程序执行的多态性,使得时序逻辑的推理过程过于繁杂,而且,缺乏对“并发”的有效描述。参考文献[67~69]引用一种新的 Petri 网子类——时序 Petri 网,利用其对 Petri 网难以描述的并发程序进行建模,进而对并发程序的安全性和活性进行了分析和验证。该方法利用时序逻辑扩充了 Petri 网缺乏描述变量变化的局限性,同时又发挥了 Petri 网具有对系统并发和物理结构的有效描述及分析的优势,参考文献[126,127]的结果表明时序 Petri 网模型是状态演绎机制融合的一种很好典范。参考文献[128]基于连续 Petri 网模型和混合 Petri 网模型研究了电网系统异常现象控制器综合过程与算法。

### 1.2.3 Petri 网工具研制

基于 Petri 网的分析工具的研制也得到广泛重视<sup>[75]</sup>,各国学者在研究理论和分析技术的同时,也注重研究、开发相关的软件分析工具。由捷克 Brno 技术大学计算机工程系开发的 PESIM 系统,运行在 Windows 环境下,直接利用图形元素编辑 Petri 网,得到网图,可以分析可达图、S-不变量、T-不变量等。由赫尔辛基技术数字实验室开发的 Pr/T 网分析工具,可在 UNIX 或 DOS 环境下工作,它较好地解决了状态空间的爆炸问题,但使用较繁琐,需要将网转化为使用描述语言写成的 NET 文件,并对 NET 文件分析。加拿大渥太华大学开发的 UO-GLOTOS 是一个集成化的辅助设计工具,它对协议进行描述、验证、测试。该系统的实现环境为基于 Unix 和 Windows 环境的工作站,曾用于 TCP/IP 的描

述。对并行程序(PVM 或 MPI)的分析工具较少且功能不完善。本课题致力于开发一个基于 PN 机的 PVM 或 MPI 并行程序分析工具。

### 1.3 CSP 与 CCS

CSP 与 CCS 都是为处理分布式系统而设计的演算工具,其目标是给出在不同描述程度上构造和比较不同模型的框架,它们都是以表达式的基本语法为起点。

CSP 是由英国科学家 C. A. Hoare 于 1978 年提出的一个命令式语言。一个 CSP 程序就是一个进程,每个进程可以平行地分解为许多子进程,子进程之间以进程运算符相联,子进程又可进一步分解为更深一层的子进程,这种进程嵌套可达到任一深度。

CSP 的最大特点是有一对通信原语,用以沟通进程之间的联系。CSP 还提供了一组比较丰富的不确定和平行运算操作,其中包括不确定选择符、变进程运算符或进程运算符、选择进程运算符、并发进程运算符。

为了增强描述能力,CSP 还有一些其他设备,如递归定义的进程、限制进程、屏蔽进程、换名进程等。

CCS 是由美国科学家 R. Milner 于 1980 年提出的一个函数式语言,它的基本成分项,或称动程,含自由变量的动程称作动程表达式。动程的组合仍是动程,其组合深度也可以是任意的。

CCS 也有一对通信原语,它由两组标号组成。其中一组是名字的集合,常表为  $\Delta = \{\alpha, \beta, \gamma, \dots\}$ ;另一组是加上横线的名字子集合,常表为  $\bar{\Delta} = \{\bar{\alpha}, \bar{\beta}, \bar{\gamma}, \dots\}$ 。 $\Delta$  称为输入港口集, $\bar{\Delta}$  称为输出港口集,它们是互补的。动程间通信时并不指定对方动程的名字,只指定对方港口的名字,只有相同名字的输入和输出(不考虑上横线)之间才可以通信。

相对说来,CCS 的复合操作比较少,只有一个并行操作,相当于 CSP 的并发操作,以及一个选择操作,相当于 CSP 的或进程运算,但这并不等于说 CCS 的描述能力不如 CSP 强。有人证明,存在着确定的算法,可以把 CSP 的程序翻译成 CCS 的程序。因此,CCS 的复合操作数少只是某种意义上表明 CCS 运算的粒度比较小。

与 CSP 相似,CCS 也有一些辅助性设备,如递归定义的动程、换名、屏蔽等。

关于 CSP 和 CCS 方面的研究主要集中在它们的各项语义下的行为关系<sup>[15]</sup>以及操作系统的规范说明语言<sup>[17]</sup>。

尽管 CSP 和 CCS 具有很强的描述能力,也有一定的分析演算能力,但它们仍然存在着以下不足。



(1) 如同形式语言自动机一样,其处理是针对系统运行机制的,没有反映系统物理结构信息,不便于系统结构设计和处理。

(2) 由于其表达形式较自动机的语言更为繁杂,不便于控制操作。

(3) 尽管对并发有一定的刻划<sup>[10,12]</sup>,但仍不能很好地反映真并发行为。

最近十多年来,并发系统的研究已取得丰富的结果,关于 CSP 和 CCS 方面的研究主要集中在它们的各项语义下的行为关系(包括等价性和双模拟性等)<sup>[15]</sup>以及操作系统的规范说明语言<sup>[17]</sup>。 $\pi$ 演算是基于 CCS 上发展起来的一类进程演算模型, $\pi$ 演算的语法和语义的研究目前较为活跃。Petri 网作为并发系统的重要工具之一已得到广泛重视,每两年一次的国际学术会议上已反映这一领域的重要进展,Petri 网的语义的研究一直受到重视<sup>[5]</sup>。

尽管 CSP、CCS、 $\pi$ 演算和 Petri 网具有很好的模拟能力和分析演算能力,但它们仍然存在着以下不足。CSP、CCS 和  $\pi$ 演算如同形式语言自动机一样,其处理是针对系统运行机制的,没有反映系统物理结构信息,不便于系统结构设计和处理;由于其表达形式较自动机的语言更为繁杂,不便于控制操作;CSP、CCS 和  $\pi$ 演算所刻划的并发是交叠式语义,而非真并发语义。Petri 网是刻划真并发语义的一种有效工具,Petri 网侧重于系统的物理结构描述和性质分析,而 CSP 和 CCS 则强调系统行为机制的描述和构造,它们缺乏对结构与行为的统一考虑;对系统表达能力虽有考虑,但不够完备,没有形成严格的体系;系统模型缺乏一个具体的结构,如加标图,尽管 Petri 网相对好些,但一个基本的上下文无关语言有时不存在一个 Petri 网产生器,这样不利于必要的操作,如加控操作等。

## 1.4 迹语言与偏序语言

迹语言是由波兰人 A. Mazurkiewicz<sup>[18]</sup>于 1977 年提出的,是试图通过并发系统的序列观察来刻划系统的非序列行为的一种工具。

对于一个并发系统  $G$ ,设  $\Sigma$  是  $G$  的事件表, $D \subseteq \Sigma \times \Sigma$  代表  $\Sigma$  中相互依赖的事件偶集, $I = \Sigma \times \Sigma - D$  为  $\Sigma$  中独立的事件偶集。二元组  $\Gamma = (\Sigma, D)$  称作并事件表。设  $\equiv_r$  是自由模  $(\Sigma^*, \cdot, \epsilon)$  中的最小同余关系(其中,“ $\cdot$ ”是连接运算, $\epsilon$  是空串),使得  $\forall a, b \in \Sigma$ ,若  $(a, b) \in I$ ,则  $ab \equiv_r ba, \equiv_r$  的等价类被称作  $\Gamma$  上的迹。

迹语言的研究主要集中在两个方面:一方面涉及到迹的图表示理论和图文法理论<sup>[19]</sup>。参考文献[20]试图通过无向结点标号图产生语言,给出图文法处理的一个精巧数学框架 NLC 文法,参考文献[21]以类似于正规串文法的途径形式化处理 NLC 文法,从而导出所谓的 BNLC 文法。参考文献[22]通过有向图产生语言,给出 NLC 文法的一个变种,即 RDNLC 文法。参考文献[23]讨论了由