



中国计算机学会教育专业委员会 推荐
全国高等学校计算机教育研究会 出版
高等学校教材

Petri网原理

袁崇义 著

计算机学科教学计划1993



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

URL: <http://www.phei.com.cn>

1
TS157.103

高等学校教材

Petri 网原理

袁崇义 著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

内 容 简 介

Petri 网是一种适合于描述异步并发现象的计算机系统模型,起源于德国 Carl Adam Petri 1962 年的博士论文。

Petri 网既有严格的形式定义,又有直观的图形表示,既有丰富的系统描述手段和系统行为分析技术,又为计算机科学提供坚实的概念基础。

本书是作者多年研究和讲授 Petri 网的结果,由上下两篇构成。上篇介绍各种应用模型的定义和分析技术,包括基本网系统,P/T 系统,高级网系统和自控系统。下篇为通用网论,包括同步论,并发论,网拓扑,网逻辑和信息流结构。本书以理论为指导,以应用为目标,包含大量实例和图示,适合于计算机系及通信、自控等专业高年级学生和研究生作教材和自学参考书,也可供教师和工程技术人员参考。

丛 书 名:高等学校教材

书 名:Petri 网原理

著 者:袁崇义

责任编辑:张凤鹏

特约编辑:天 马

排版制作:电子工业出版社计算机排版室

印 刷 者:冶金印刷厂

出版发行:电子工业出版社出版、发行 URL:<http://www.phei.com.cn>

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036 发行部电话 68214070

经 销:各地新华书店经销

开 本:787×1092 1/16 印张:13.25 字数:339.2 千字

版 次:1998 年 4 月第 1 版 1998 年 4 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 7-5053-4439-0
G·346

定 价:16.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责调换

版权所有·翻印必究

出版说明

中国计算机学会教育专业委员会和全国高等学校计算机教育研究会(以下简称“两会”),为了适应培养我国 21 世纪计算机各类人材的需要,根据学科技术发展的总趋势,结合我国高等学校教育工作的现状,立足培养的学生能跟上国际计算机科学技术发展水平,于 1993 年 5 月参照 ACM 和 IEEE/CS 联合教程专题组 1990 年 12 月发表的《Computing Curricula 1991》,制定了《计算机学科教学计划 1993》,并组织编写与其配套的首批 18 种教材。现推荐给国内有关院校,作为组织教学的参考。

《计算机学科教学计划 1993》是从计算机学科的发展和社会需要出发提出的最基本的公共要求,不是针对某一具体专业(如计算机软件或计算机及应用专业),因此它适用于不同类型的学校(理科、工科及其他学科)、不同专业(计算机各专业)的本科教学。各校可以根据自己的培养目标和教学条件有选择地组织制定不同的教学计划,设置不同的课程。本教学计划的思想是将计算机学科领域的知识,分解为九个主科目(算法与数据结构、计算机体系结构、人工智能与机器人学、数据库与信息检索、人-机通信、数值与符号计算、操作系统、程序设计语言、软件方法学与工程)作为学科的公共要求;对计算机学科的教学归结为理论(数学)、抽象(实验)和设计(工程)三个过程,并强调专业教学一定要与社会需要相结合。另外,还提出了贯穿于计算机学科重复出现的十二个基本概念,在深层次上统一了计算机学科,对这些概念的理解和应用能力,是本科毕业生成为成熟的计算机学科工作者的重要标志。

为了保证这套教材的编审和出版质量,两会成立了教材编委会,制定了编写要求和编审程序。编委会对编者提出的编写大纲进行了讨论,其中一些关键性和难度较大的教材还进行了多次讨论。并且组织了部分编委对教材的质量和进度分片落实,有的教材在编审过程中召开了部分讲课教师座谈会,广泛听取意见。参加这套教材的编审者都是在该领域第一线从事教学和科研工作多年,学术水平较高,教学经验丰富,治学态度严谨的教师。这套教材的出版得到了电子工业出版社的积极支持。他们把这套教材列为出版社的重点图书出版,并制定了专门的编审出版暂行规定和出版流程,组织了专门的编辑和协调机构。

这套教材的编审出版凝聚了参加这套教材编审教师和关心这套教材的教师、参与编辑和出版工作者、以及编委会成员的汗水,他们为此作出了努力。

这套教材还得到电子工业部计算机专业教学指导委员会的支持,其中 11 本被选入 1996~2000 年全国工科电子类专业规划教材。

限于水平和经验,这套教材肯定还会有缺点和不足,希望使用教材的单位、教师和学生积极提出批评建议,共同为提高教学质量而努力。

**中国计算机学会教育专业委员会
全国高等学校计算机教育研究会**

教材编审委员会成员名单

- 主任：王义和 哈尔滨工业大学计算机系
副主任：杨文龙 北京航空航天大学计算机系(兼北京片负责人)
委员：朱家镗 东北大学计算机系(兼东北片负责人)
 龚天富 电子科技大学计算机系(兼成都片负责人)
 邵军力 南京通信工程学院计算机系(兼南京片负责人)
 张吉锋 上海大学计算机学院(兼上海福州片负责人)
 李大友 北京工业大学计算机系
 袁开榜 重庆大学计算机系
 王明君 电子工业出版社
 朱 毅 电子工业出版社(特聘)

前 言

1962年联邦德国的 Carl Adam Petri 在他的博士论文《用自动机通信》中首次使用网状结构模拟通信系统。这种系统模型后来以 Petri 网为名流传。现在 Petri 网一词既指这种模型,又指以这种模型为基础发展起来的理论。有时又把 Petri 网称为网论(net theory)。

三十多年来 Petri 网应用和 Petri 网理论都有了长足的进步。其发展过程大体可分为三个阶段。

60年代, Petri 网的研究以孤立的网系统为对象,以寻求分析技术和应用方法为目标。这些内容统称为特殊网论(special net theory)。此处“特殊”是与“一般”或“通用”比较而言,指的就是孤立的网系统个体。

通用网论(general net theory)的研究始于70年代初。以 C. A. Petri 为核心的一批科学家以网系统的全体作为对象,研究其分类及各类网之间的关系,发展了以并发论(concurrency),同步论(synchrony),网逻辑^①(enlogy)和网拓扑(net topology)为主要内容的理论体系。1979年的首届夏季培训班是对1962年以来的研究成果的总结,讲稿集结成书,由 Spring-Verlag 出版社以 LNCS 84 的形式出版发行。至今此书仍有重要参考价值。现在称为国际 Petri 网学术交流会,当时称为欧洲交流会的学术年会就从次年开始,至今已第十七届了。

80年代开始为 Petri 网综合发展阶段,以理论与应用的结合及计算机辅助工具的开发为主要内容。1986年的第二届夏季培训班是又一次阶段性总结,讲稿集结为 LNCS 254 和 255 两卷。

好的系统模型不仅要有充分的模拟能力和丰富的分析方法,还应该便于使用。越来越多的人转而采用 Petri 网,原因就在于此。

已证明 Petri 网的模拟能力与图灵机(Turing machine)等价。Petri 网应用已涉及计算机科学的各个领域,例如线路设计,网络协议,软件工程,人工智能,形式语义,操作系统,并行编译,数据管理等等。Petri 网与 OO 技术和多媒体技术的结合也具有很大的潜力。

Petri 网是一种可用图形表示的组合模型,具有直观、易懂和易用的优点,对描述和分析并发现象有它独到的优越之处。

Petri 网又是严格定义的数学对象,借助数学开发的 Petri 网分析方法和技术既可用于静态的结构分析,又可用于动态的行为分析。

Petri 网的目标并不是在众多的系统模型中添加一个新成员。Petri 网丰富而深刻的理论使它有别于任何其他的系统模型。W. Brauer 教授在庆祝 C. A. Petri 教授 60 岁生日的演讲中指出, Petri 网的发展必将为信息论奠定坚实的理论基础。

但有不少人只是被 Petri 网的图形表示所吸引,匆匆忙忙拿来应用。由于不了解 Petri 网

^① “enlogy”曾译为“赋逻辑论”

的基本原理,许多应用都是从定义自己的所谓新型 Petri 网入手。有针对性地定义特定领域的专用 Petri 网不仅是可以的,而且是应该的。但这种定义须在基本原理的指导下进行。

本书围绕 Petri 网基本原理分上下两篇介绍应用和理论两方面的基础知识。上篇以应用为背景,从实例入手,引入 Petri 网的基本思想和网系统的基本要素,然后按照从具体到抽象的层次介绍基本网系统,库所/变迁系统,高级网系统和自控系统。各种系统均从非形式的叙述开始,然后给出形式化的定义及实例。网系统的分析技术,包括可达树算法,可达图,变迁序列及进程则分别在不同的系统中详细介绍,以避免重复。理论、抽象和设计这三个过程体现在各章之中。偏工程的院校可以用上篇作为 Petri 网的教材,大约需要 20 个学时。虽然没有就 93 教程列出的九个科目领域一一指出如何和 Petri 网联系在一起,也没有就十二个重复出现的基本概念明确做出说明,但是由于 Petri 网固有的通用性及其异步并发的特点,从全局着眼从局部入手的方法,读者应该可以自己体会这些科目领域及基本概念与 Petri 网的关系。教师则可以结合实例加以讲解。

下篇是理论部分,主要内容为同步论,网逻辑,网拓扑,并发论及信息流结构。这些理论其实都与应用密切相关。网逻辑不仅为以推理为基础的计算机应用提供新方法,而且为逻辑系统提供直观的语义框架。同步论为各种同步现象提供定量的描述,与网逻辑结合使用是一种很有力的系统规范工具,即可用于系统设计,也可用于系统分析。因此,工科院校有可能的话,也应该讲授这些内容。这就要求授课教师对这些内容有深入的理解,才能抓住要点,在不多的学时内完成有深度的教学。

计算机的许多概念建筑在直观认识的基础之上,欠缺理论深度。并发论,网拓扑及信息流结构等则是寻求计算机科学理论基础的结果。理科院校计算机本科高年级学生及研究生应该学习这些内容。目前开设的其他计算机理论课还没有与它相似的内容。这些章节大约需要 10~15 学时。

本书的前身是东南大学出版社出版的《Petri 网》一书。作者在几年的教学实践中充实了各章节的内容,增加了这段时间在国家自然科学基金项目中的研究成果,按照中国计算机学会教育专业委员会和全国高等学校计算机教育研究会编写的“93 教程”教学计划的要求,改写成本书。为适应教材的需要,还增加了练习。练习以两种形式给出,少量是附在正文之后的练习题,更多的是正文中随时提出的。后者可以减少对正文的重复,以节省篇幅。

C. A. Petri 曾为《Petri 网》一书撰写了序言,其主要内容对正确理解 Petri 网有重要的指导意义。因此作为本书的附录,节选在后面(英文及译文)。读者可以反复阅读并思考 Petri 教授的这些话。书后的另一附录则是 Petri 网的术语表,这是 80 年代中为统一网论术语而努力的结果。希望能为统一 Petri 网中文术语提供一个基础。

应该说明的是为什么本书没有介绍时间网和随机网的内容。时间网假定任何系统都有一个全局时间,与 Petri 网以时钟读数为(局部)时间的基本观点不一致。随机网则对每个变迁都设定一个发生概率,并假定了全局性正态分布的事实,而没有指出这种概率和分布的依据。这与 Petri 网对概率的基本认识和尊重自然规律,以系统实现为最终目标的态度不一致。基于这些考虑,本书作者认为以不涉及这些内容为宜。文献中有不少研究或应用这两类网的文章,以本书为基础的读者不难自学这些文章。偏工科的院校学生更可以在教师的指导下学习。

作者十分感谢中国计算机学会教育专业委员会和全国高等学校计算机教育研究会将本书收入“93 教程”,感谢电子工业出版社支持它的出版,感谢东南大学出版社对 Petri 网研究的一贯支持,感谢国家自然科学基金委的一贯支持。北京航空航天大学计算机系杨文龙教授对本

书的推荐,对书稿的审阅和建议更是作者铭记在心的。

正值 Carl Adam Petri 70 周岁之际,作者谨以此书献给这位尊敬的导师和亲爱的朋友。

袁崇义
1997 年 6 月

上篇 Petri 网系统

一般系统模型均由两类元素构成:表示状态的元素和表示变化的元素。例如用于描述程序系统的程序设计语言用变量表示状态;用语句,特别是赋值语句表示变化。Petri 网系统也不例外。它的状态元素和变化元素分别称为 S_元素和 T_元素,或简称为 S_元和 T_元。

怎样把两类元素联系起来构成完整的系统呢?不同的模型采用不同的方法。

有限自动机用系统的全局状态刻画变化:对每个可能的全局状态指明可能发生的变化及变化后产生的新的全局状态。有限自动机的全局状态指的是它各个状态元素之状态的总和。

用全局状态刻画变化至少有两点不合适之处。首先,尽管有限状态机的状态元素只有有限多个,当这个数字足够大时,全局状态仍然不是实时可知的,从而无从实时确定什么变化可以发生。其次就每个变化而言,它发生前后的两个全局状态并不能完整的刻画它:催化剂是某些化学反应必不可少的,却不能在反应前后的差异中体现出来。换言之,对于变化前后没有改变的状态元素,你无法确定该变化是与它有关还是无关。此外,用全局状态描述变化发生的条件很可能是不必要的:一个变化一般只涉及几个而不是全部状态元素。

有些系统用所谓控制流把变化硬性安排成全序。其实控制流是人脑思维方式的反映,分时系统也不过是对意识流的模拟。物理世界的变化取决于自然规律,具有异步并发的特点。很难想像把通信网络上的一切活动顺序化会是什么样子。

控制或控制流是属于具体应用系统的,不应该以统一的方式出现在通用的系统模型中。无论是全局顺序化,还是把系统分成几个互相并行的顺序进程,只要这种顺序不属于被模拟的应用系统,就都是带有主观色彩的控制。

若以传统的时间概念来思考,两个变化要么同时发生,要么有先有后,似乎顺序化是很自然的事。其实不然。两个变化若没有相互依赖关系(直接的或间接的),则它们是同时发生还是有先有后往往依赖于观察:观察者的位置,使用的工具,甚至他的主观愿望都可能影响观察结果。无直接或间接依赖关系的事件在时间上是不可比较先后的。事实上,时间只是对客观变化的度量。没有日月星辰的运动也就没有地球上的年月日,没有计时器也就没有我们周围的时分秒。

计时器可以作为系统的组成部分出现在系统中。计时器给出的时间只是局部时间。计时器是有误差的,需要维修的。

Petri 网系统中的变化元素又称变迁(transition)。变迁之能否发生及发生的影响完全取决于自然规律,不带主观性。用 Petri 网描述已有的物理系统,观察员有责任把系统中的变迁作正确的描述;用 Petri 网设计系统,设计者必须保证每个变迁是可实现的。这样,Petri 网理论就能保证整个网系统是可实现的,而且具有网系统描述的性质。

Petri 网中没有任何形式的固有控制。既没有 von Neumann 计算机上的那种控制流,也不用全局状态或全局时间变相控制。自然规律决定了每个变迁与哪些状态元素有关及其相关方式,变迁之间的联系也就通过它们对状态元素的共享而建立起来了。显然,若计时器或某种形式的控制是系统的一部分,它们必然会与系统中其他的物质资源和信息资源一样出现在系统

的 Petri 网模型中。

以自然规律刻画变迁及变迁间的联系,使 Petri 网具有区别于其他模型的许多特点。例如 Petri 网适合于在各种抽象级别上描述异步并发系统,而且有一整套自己的理论。本篇介绍 Petri 网系统,一方面向应用领域的读者介绍各种适合应用的模型,另一方面也介绍基本网系统,为学习下篇的网理论奠定基础。

为行文简洁,本书中往往把 Petri 网简称为网,例如第一章的标题是“网和网系统”。

第一章 网和网系统

第一节 实 例

用 Petri 网描述的系统有一个共同的特征:系统的动态行为表现为资源(物质资源和信息资源)的流动。

一、生产流水线

这是典型的物质资源流动:半成品在流水线上移动,每个生产环节再组装上一两个部件,直到产生成品。显然,生产环节是系统中的 T_元素,亦即变迁元素;而代表半成品、部件等等种类和数量的是状态元素,即 S_元素。图 1-1 画的是从流水线上截取的两个相连的环节及相关资源的流水线片段 Σ_1 。

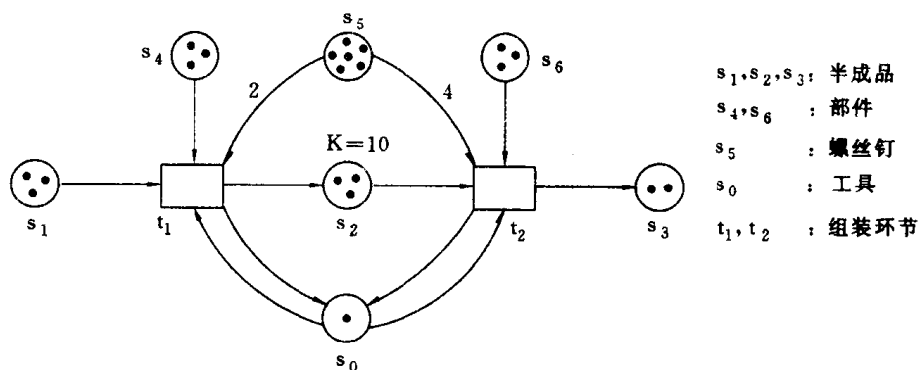


图 1-1 流水线片段 Σ_1

图中 T_元和 S_元分别用方框□和圆圈○表示,每个○代表一种资源,其中黑点个数表示该种资源的数量,这种黑点叫做托肯(token)。

Σ_1 中的箭头代表资源流动的方向,箭头上的数字则代表组装所需或产生该种资源的数量,称为弧上的权,没有写出来的数字均为 1。例如组装环节 t_1 用两个螺丝钉(s_5)把一个部件(s_4)装配到半成品(s_1)上产生一个新的半成品(s_2)。现在 s_0 中只有一个托肯,所以 t_1 和 t_2 不能同时组装:它们竞争共享的资源。网论中把这种竞争关系称为冲突(conflict),实际的流水线上当然不会出现两个环节竞争一把工具的情况, Σ_1 只是想说明竞争现象在网中的描述方式。

Σ_1 中 t_1 和 t_2 处于平等竞争的地位,流水线上没有确定的占用规则,因此有可能 t_1 和 t_2 中某一个连续占用多次,而另一个没有机会使用,所以网论中又把冲突称为不确定(nondeterminism),如果不考虑 Σ_1 所示 t_1, t_2 的其他资源,就工具的占用而言,这种不确定性会导致饥饿(starvation)现象,资源被一方无限占用,另一方则“饿死”。 Σ_1 不会出现饥饿,因为 s_2 上面标明的 $K=10$ 指出了 s_2 的容量:它至多可以容纳 10 个半成品。于是 t_1 至多可以连续发生 10 次,就不能再组装了,从而 t_2 总有机会使用工具。就 Σ_1 而言,每个 S_元都应该有个确定的容量,只

是为保证图形简洁,只以 s_2 为例提到 S_- 元的容量。显然 Σ_1 中除 s_2, s_3 以外其他 S_- 元素的容量不会对 t_1 或 t_2 的发生构成限制,所以又可以假定它们的容量为无穷。传统上,凡不明确给出的容量均为无穷。

生产流水线的管理者不会允许像 Σ_1 这样以不确定的方式让 t_1 和 t_2 竞争工具。换言之,流水线上应有消解冲突的办法。实践中的解决办法是增加一个工具,让 t_1 和 t_2 各有专用工具,冲突自然也就消失了。这时工具已经不是影响 t_1 和 t_2 能否发生的因素,所以可以从 Σ_1 中删掉(即删去 s_0 及相关的箭头),得到这种无竞争的流水线的网表示。事实上,流水线是少不了工人的, Σ_1 中并没有给出工人和 t_1, t_2 的关系,因为一般流水线的每个环节都有专人负责,就像专用工具一样,不是约束性因素,不必明确描述。

让我们假定只有一把工具,应该怎样消解冲突呢? 由于 t_1 发生一次产生一个 s_2 类半成品, t_2 发生一次则消耗一个这种半成品,所以较合理的办法是 t_1, t_2 交替使用,而且由 t_1 先使用,如图 1-2(a) 所示。不过这时 s_2 的容量为 $K = 10$ 就是一种浪费,容量为 1 就足够了。换言之,在 t_1 和 t_2 之间根本不需要临时存放待加工的半成品的地方,从而 t_1 和 t_2 可以看成是一个组装环节,而唯一的工具由这一环节专用,如图 1-2 中(b) 所示。显然,(b) 中的 s_0 可以删去。比较(a)和(b)不难看出(a) 中的 t_1, s_2, t_2 是(b)中 t' 的细节(detail)。

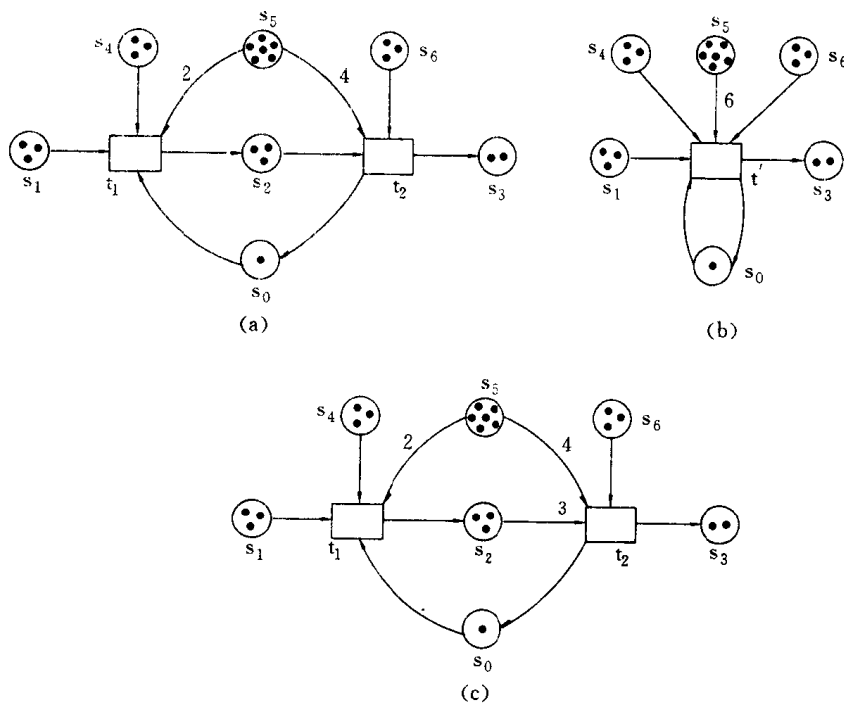


图 1-2 消解冲突

- (a) 交替使用
- (b) 交替使用的等价模型
- (c) 新问题

图 1-2(c) 是流水线上的另外两个环节,其中 t_2 是把 t_1 产生的三个半成品组装在一起,并加上一个部件(s_6)。如图, t_1 和 t_2 仍旧共享一把工具。显然交替使用不能有效消解冲突,因为这样的话,冲突是没有了,流水线也不能运转了: t_1 发生一次,产生一个 s_2 半成品,就失去工具使用权,而占有使用权的 t_2 却没有足够的 s_2 半成品可用:死锁!

就物质资源来说,盛放它们的 S_1 元具有仓库的性质:只能存放一定种类的资源且有一定的容量。但 S_1 元和仓库又不完全一样,仓库有固定的位置,而 S_1 元在网中的位置则无意义,不管把它们画在什么位置,网系统的含义不变。为体现 S_1 元这种类似仓库又不同于仓库的性质,我们把这种 S_1 元称为库所(place),相应的 T_1 元则称为变迁。

练习:1. 设计图 1-2(c) 中共享工具(s_0)引起的冲突的消解方案(提示:用 s_0 中的托肯表示工具使用证,工具只有一把,使用证可以有几张)

2. 消解冲突后,(c)中的 t_1 和 t_2 能否合并成一个组装环节? s_2 的容量以多大为好?

二、救火队

图 1-3 给出了火场和水源。救火队员除人手一桶外,无其他设备可用。

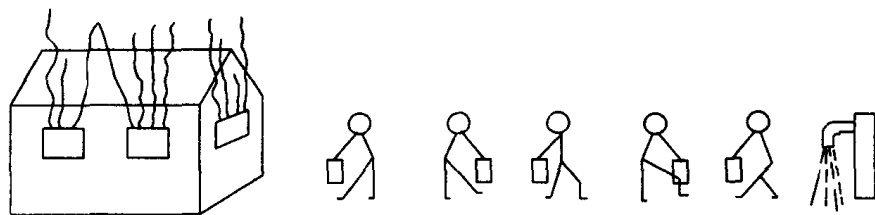


图 1-3 火场、水源及救火队

“救火系统”中实际流动的是三类“物质”资源:人,桶和水。人从水源往火场运水,再从火场往水源运桶,于是人只有两种状态:运水或运桶。桶和水依附于人,因而在系统模型中不必单独描述。三类资源的流动体现为人的状态改变:从运水到运桶,或从运桶到运水。如果把人的状态看成信息,那么系统模型中流动的就是信息:代表着物质资源的信息资源。

图 1-4(a) 给出了一个救火队员状态改变的网表示,图中的托肯说明此人正处于运水状态。

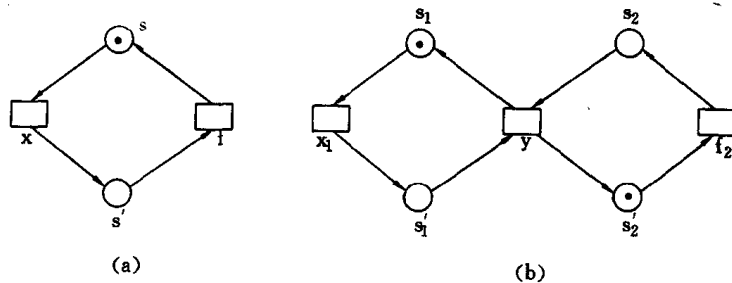


图 1-4 (a) 救火队员的状态改变: s 为运水态, s' 为运桶态

(b) 两人接力:变迁 y 是 f_1 和 x_2 的合成,双方交换水桶,同时改变状态

现在的问题是如何把救火队员组织成救火“系统”。

如果火场近,不妨人自为战。那么几个互不相连的图 1-4 (a) 所成的网系统即为救火队的模型。此时变迁 x 和 f 分别是泼水和接水。

如果火场虽近,老人及体弱者仍无力直接运水到火场,那么他们可以接力,如图 1-4 (b) 所示:变迁 y 由第一人的 f_1 (“接水”)和第二人的 x_2 (“泼水”)合并而成:双方交换水桶并改变行走方向。

如果火场远,人员少,不妨把所有的人排成一队,接力运水。图 1-5 所示为五人接力队。

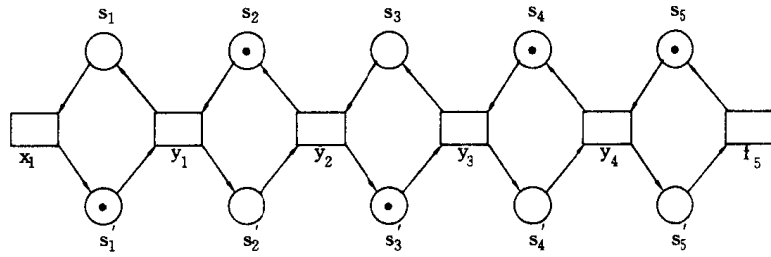


图 1-5 五人接力队 Σ_2 : s_i 和 s'_i 分别是第 i 个人 P_i 的运水态和运桶态

图中的 $y_i (i=1, \dots, 4)$ 和图 1-4(b) 中 y 一样, 分别由救火队员 P_i 和 P_{i+1} 的两个变迁 f_i 和 x_{i+1} 合并而成。

如图所示, Σ_2 中 y_3 可以发生: 运水的 p_4 和运桶的 p_3 相遇, 可以交换水桶, 调转方向, 观状态改变。和 y_3 一样, Σ_2 中的所有变迁都是在其发生条件具备时自然发生, 没有任何形式的控制, 既无需现场指挥部, 又没有时间限制, 这是个完全由自然规律支配的系统: 体壮的多走点, 体弱的少走点, 何时相遇何时交换水桶。

Σ_2 中除 y_3 以外, y_1 也可以发生: y_1 和 y_3 并发。一方面 p_1 和 p_2 , p_3 和 p_4 交换水桶, 另一方面 p_5 则继续运水, 这些动作之间互不相关, 是异步行为。

救火队伍是从救火队员的个体行为合并变迁而来。图 1-1 中的生产流水线则是两个生产环节由它们共享的 s_0, s_2 和 s_3 连接而成。显然, 网模型既适合于描述个体, 也适合于描述由个体组成的整体。

三、救火记录

把图 1-5 中五人接力救火的一段过程记录下来, 可以得到图 1-6 所示的网结构。

图 1-6 中 $s_i, s'_i, y_{i-1} (i=1$ 时为 $x_1)$ 和 $y_i (i=5$ 时为 $f_5), i=1, \dots, 5$, 分别表示救火队员 p_i 的状态及参与的变迁, 每个 p_i 不止一次参与变迁, 不止一次改变状态, 所以相应的状态元素和变迁元素会在记录中出现多次。注意图中 y_2 第二次出现以后, 处于运桶状态 (s_3) 的 p_3 从图中消失了 (以鼠尾状线表示), 于是接力自然地由 p_2 和 p_4 来完成, 这就是图中的 y_2' 。

图中的箭头代表着资源流动的方向: 空间上的和时间上的。不难看出: 只含 s_i, s'_i 这两个 S -元的有向路径代表着 p_i 的时空运动, 而由 x_1 出发到 f_5 终止, 只含 s'_1, s'_2, s'_3, s'_4 和 s'_5 的有向路径是空桶的运动轨迹, 由 f_5 出发到 x_1 , 只含 s_5, s_4, s_3, s_2 和 s_1 的是一桶水的轨迹。

图 1-5 和图 1-6 中都没有明确引入时间的概念, 时间就体现在图 1-6 中的有向路径上: 路径起点为先, 终点为后。凡不能用有向路径连接的, 时间上分不出先后: 它们是并发的, 例如图 1-6 中 y_1 和 y_3 的第一次出现 (最上层的 y_1 和 y_3)。

也许有读者会问: 观察者明明可以观察到 y_1 和 y_3 谁先发生, 为什么说它们分不出先后? 不错, 的确有这种可能。不过这时观察者作为一个“资源”参与了系统的活动: 观察者眼光的轨迹就是一条连接 y_1 和 y_3 的有向路径。还是那句话: 没有路径连接的点 (状态或变迁) 是并发的, 分不出先后。这是一种可以观察却不依赖观察的性质。

图 1-6 中这种记录系统行为的网称为出现网 (occurrence net)。

四、无固定容量的 FIFO 栈

栈 (stack) 中流动的是数据。栈的一个存储单元可容纳一个数据, 栈的容量便是这存储单

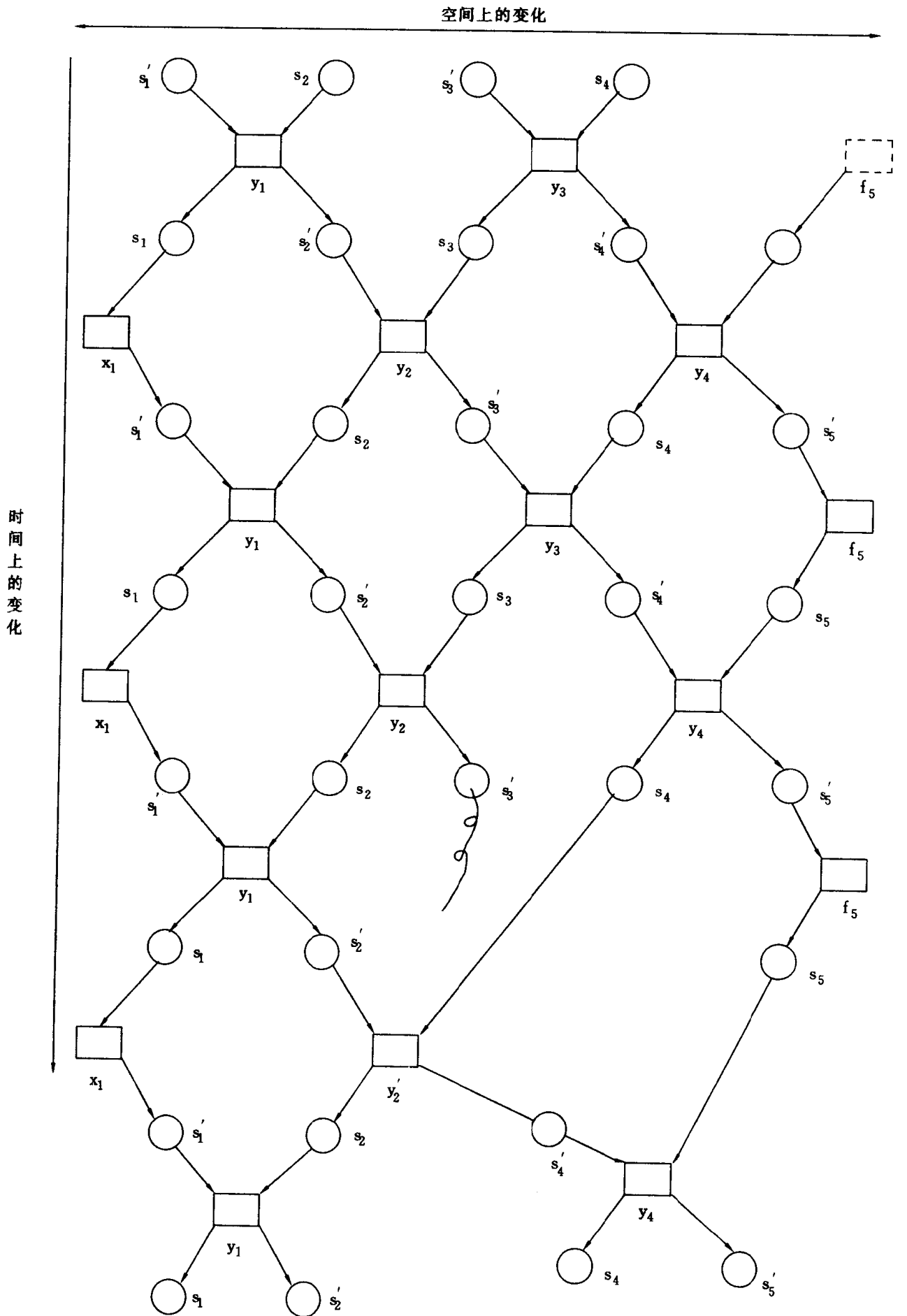


图 1-6 用网作救火记录

元的个数。我们不关心数据的结构,只关心如何把这些存储单元组织在一起构成一个先进先出(FIFO:First In First Out)的栈。

最简单直观的组织方法是把这些单元排成一个队列(queue),一头入,一头出,队中的数据依次从入口向出口移动,顺序不能改变。

如果栈的容量是固定的,那么使用它的应用程序可以在固定的地址处理数据的入栈和出栈,而把数据在队中的移动留给栈管理程序去做,这是优点。缺点是每个数据都得穿过整个队列才能从入口到达出口。

改造应用程序以适应应用环境的改变是经常发生的事。为保证程序正确,这种改变是越少越好。环境改了,程序不必改最好。

用队列来实现 FIFO 显然不是最好的:当栈的容量改变时,它的入口地址或出口地址必须改变,从而应用程序也须做相应的改变。

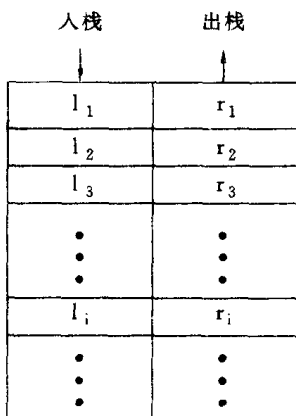


图 1-7 无固定容量的 FIFO 栈

有没有办法把 FIFO 栈重新组织,使得容量改变时应用程序不必变呢? 有。图 1-7 给出的就是这种组织方法的示意。图中 $l_1, l_2, \dots, l_i, \dots$ 和 $r_1, r_2, \dots, r_i, \dots$ 均为存储单元, l_1 和 r_1 分别为入栈口和出栈口,它们是固定的。 $l_1, l_2, \dots, l_i, \dots$ 和 $r_1, r_2, \dots, r_i, \dots$ 分别组成栈的左半部和右半部,或入栈部和出栈部。这两个半部都没有“底”,所以栈容量是不定的。数据在栈中的运动方式如下:入栈数据不在 l_1 停留;若右半部无待出栈数据,则直接平移到 r_1 等待出栈;若右半部有数据,则从 l_1 一个一个单元下推直到 l_i ,使得 r_1 为右半部所有数据后的第一个空单元,平移入 r_1 。所以左半部 l_i 中数据有两个可能的变迁:平移或下推。

右半部的数据只有一种变迁:上推,包括从 r_1 上推出栈。当一个数据从 r_1 出栈后,会引起右半部所有数据依次上推一个单元。

这样的 FIFO 显然没有固定的容量,但有固定的入栈口和出栈口。而且数据的下推,上推次数只与栈中实有数据个数有关。例如第一个人栈的数据只需平移一次,即可等待出栈,而不必穿过容量固定的整个队列从入口到出口等待。

应用程序只须关心入栈口和出栈口地址,数据在栈中的下推、上推和平移仍由栈管理程序完成,而且显然可以实现上、下推及平移的并行。

与前两个例子不同,FIFO 栈是先有了整体设计思想,再来寻找构成整体的平移下推和上推等动作的准确描述。虽然 Petri 网不能直接为我们提供设计方案,却可以帮助我们完成设计:一旦我们用 Petri 网把平移等动作准确地表示出来,就可以根据它们之间自然的依赖关系把它们连在一起,构成整体设计,进而可以用 Petri 网分析工具来证明设计符合要求,或发现设计上的毛病。

不定长 FIFO 栈的网表示将在第二章介绍基本网系统时给出,以便结合网系统分析技术证明其正确性。有兴趣的读者不妨先试试。到现在你对 Petri 网已经有了感性的认识,虽不严格,却可以用用了。如果你一时还无从下手,也可以用你熟悉的任何别的工具(程序语言,自动机等等)试试,完成上述设计思想给出的 FIFO 栈,并在学习第二章时把它和 FIFO 的 Petri 网模型做比较。

五、四季系统

四季变化的规律是人们对客观现实长期感受和观察的总结。从观察记录抽象出系统模型,也是 Petri 网应用领域之一。

正如救火记录可用网表示一样,人们可以观察到的系统行为无不表现为状态的变化,因而都可以用出现网表示。四季的变化也不例外。

人们首先感受到的可能是气温的变化,首先观察到的则可能是植物的生长。

气温变化的记录应该是 $\cdots \rightarrow$ 温暖 \rightarrow 炎热 \rightarrow 温暖 \rightarrow 寒冷 \rightarrow 温暖 $\rightarrow \cdots$,这里“ \rightarrow ”代表着变化,用 Petri 网术语,即为变迁。

单从状态特征来看,两个“温暖”不好区分,但从变化趋势看,两个“温暖”又应该是不同的。把气温的变化和对植物的观察结合起来,就可以相对完整的对季节改变作出记录: $\cdots \rightarrow$ 温暖花开 \rightarrow 炎热 \rightarrow 温暖花落 \rightarrow 寒冷 \rightarrow 温暖花开 $\rightarrow \cdots$ 用 Petri 网的图形表示法,这一记录可用图 1-8(a)表示,其 S_元素 s_1, s_2, s_3, s_4 分别代表温暖花开,炎热,温暖叶落和寒冷。把 $s_i (i=1, \cdots, 4)$ 的不同出现重叠起来,就得到图 1-8(b) 的 Petri 网,这就是四季变化的网模型, s_1 中的托肯表示正处于温暖花开的春季。

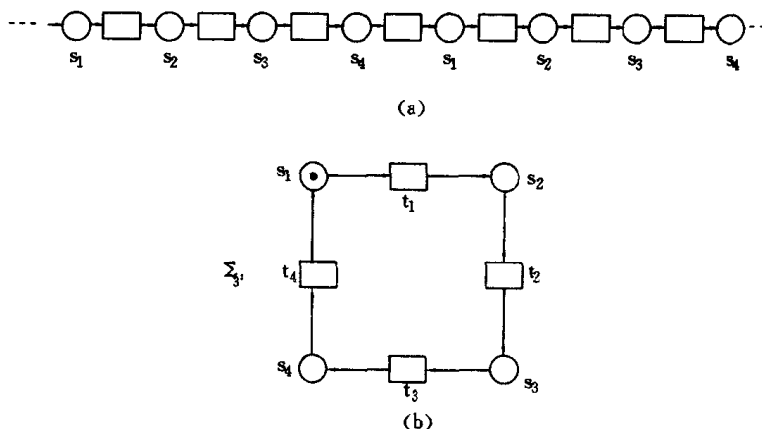


图 1-8 (a) 四季变化的观察记录: s_1 为温暖花开, s_2 为炎热, s_3 为温暖叶落, s_4 为寒冷
(b) 四季系统 Σ_3 : 正处于温暖花开的春季

图 1-8 (a) 的观察记录只涉及气温和植物生长两个因素,就能相对完整的构造出(b) 中的季节变化模型。地球上与季节变化有关的因素不胜枚举,人们只能观察其中的一小部分,因而完整性只能是相对的。系统模型只是从实际系统生存的“宇宙”中“切”下来的相对完整的一部分。换言之,每个系统模型 Σ 都有与之相关的环境 $Env(\Sigma), \Sigma \cup Env(\Sigma)$ 才构造完整的“宇宙”。

为什么我们能够从宇宙中分离出相对独立和完整的系统来? 因为宇宙中每个变迁并不依赖宇宙的全局状态,而只依赖少数局部于该变迁的因素——它的外延,于是可以从外延中选择一部分来刻画变迁。例如春季的状态特征至少包含气温、湿度、风、雨、植物等等因素,我们只需选择几项能与其他几个季节区分开的就行了。春季的状态特征加上夏季的状态特征就构成春变夏这一变迁的外延。

季节的变化自然离不开时间,但图 1-8(b) 的系统 Σ_3 并没有用时间来描述。相反,时间体现在 Σ_3 的季节变化之中。如果用时间描述四季,那就必须回答:季节的变化是瞬间的吗? 如