



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
高等学校规划教材

Petri网 原理与应用

袁崇义 著

计算机学科教学计划2001



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

内 容 简 介

Petri 网是一种适合于描述异步并发现象的系统模型,它既有严格的数学定义,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。

本书是对《Petri 网原理》一书的修订,增加了大量 Petri 网应用的内容。电梯控制系统是一个完整的应用实例,充分展示了 Petri 网描述异步并发特征的作用。Petri 网与计算机程序系统的差异阻碍了 Petri 网在计算机科学中的应用。针对这一差异引入的变量类状态元素和相应的变迁规则,使扩充后的 Petri 网成为系统规范和程序系统语义描述的工具。这一工具与同步论的结合,在 workflow 应用和 workflow 工具开发中已有很好的应用。

本书是作者多年讲授和研究 Petri 网的结果。全书分为 4 篇:入门篇介绍 Petri 网基本观点及基本定义;系统篇介绍三种网系统,并分别定义事件间的基本现象(顺序、并发、冲突、冲撞等),给出网系统的分析技术和层次化技术;理论篇包括条件/事件系统,同步论,网逻辑,信息流结构,网拓扑和并发论;应用篇包括电梯控制系统, C-net, workflow 模型。坚实的理论基础是 Petri 网区别于其他系统模型的主要特征。

本书以理论为指导,以应用为目标,包含大量实例和图示,适合计算机及通信、自控等专业高年级学生和研究生用作教材和自学参考书,也可供教师、科研人员及工程技术人员参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵犯必究。

图书在版编目(CIP)数据

Petri 网原理与应用/袁崇义著. —北京:电子工业出版社,2005.3

高等学校规划教材

ISBN 7-121-00970-6

I. P… II. 袁… III. 计算机网络—高等学校—教材 IV. TP393

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 013487 号

策划编辑:童占梅

责任编辑:童占梅

印 刷:北京李史山胶印厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:18.75 字数:473 千字

印 次:2005 年 3 月第 1 次印刷

印 数:4000 册 定价:32.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话:(010)68279077。质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

新版说明

由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(简称“两会”)组织和推荐,自1996年起电子工业出版社出版了基于CC1991教程的15本系列教材。该系列教材受到高校师生和读者的普遍欢迎和肯定,其中有11本入选1996—2000年全国工科电子类专业“九五”国家规划教材。

几年过去了,计算机学科又有了很大发展。IEEE-CS/ACM联合计算教程专题组,组织世界各国150多位专家,历时3年多,在美、欧、亚召开了一系列会议,在CC1991的基础上,发布了“Computing Curricula 2001-Computer Science Final Report”(简称CC2001)。专家们认为:随着计算(机)学科技术的迅速发展,使得现有的任何一所学校的计算机专业都很难再像CC1991所提到的那样,能够覆盖计算(机)学科的所有知识领域。所以,需按市场需求将计算(机)学科划分为4个主要分支:计算机科学、计算机工程、软件工程和信息系统。其中计算机科学是各分支的基础,CC2001正是基于计算机科学制定的。我国“两会”追踪CC2001,经过3年多的工作,最后以中国计算机科学与技术教程2002研究组的名义推出了“China Computing Curricula 2002”(简称CCC2002)。CC2001与CC1991比较有以下几个方面的变化:

(1) 将CC1991确定的11个主领域扩展为14个主领域:离散结构、编程基础、算法与复杂性、计算机组织与体系结构、操作系统、网络计算、编程语言、人-机交互、图形学与可视化计算、智能系统、信息管理、职业与社会问题、软件工程、数值计算。对各主领域的名称、核心内容及选学内容都进行了调整和扩充。

(2) 提出了课程的组织结构和实现策略。课程分为3类:入门(基础)课程、核心(必修)课程和附加(选修)课程。入门课程可按编程、算法和硬件优先等多种方式组织,使学生能够接触到计算机系统的设计、构造和应用,为学生提供实用性的技能训练,同时还应提高学生的兴趣和智慧;核心课程的组织可按传统、压缩、系统或网络方法进行,特别强调贯彻CC1991提出的3个过程、12个重复概念、职业与社会的关系等方法论思想;此外,还应设置一些介绍热门或前沿技术的附加课程。

(3) 更加强调学生的专业实践,要求把专业实践放在重要位置,并贯穿于教学的全过程。

这次对系列教材的全面修版,力求反映计算(机)学科发展的最新成就,并力争符合CC2001和CCC2002所提出的要求及高校课程和教学改革的需要。这套教材的对象为本科生、研究生和高职高专生(通过删减使用),信息技术领域的从业人员也可使用。

为了保证编审和出版质量,编委会进行了调整,电子工业出版社成立了编辑出版小组。在原教材工作的基础上,编委会对教材大纲逐一进行了认真讨论和评审,其中一些关键性和难度较大的教材还进行了多次讨论和修改。

限于水平和经验,教材中还会存在缺点和不足,希望读者提出中肯的批评和建议。读者可以通过电子工业出版社华信教育资源网站 <http://www.hxedu.com.cn> 反馈信息并发表意见,我们在此表示衷心的感谢!

教材编委会

教材编委会

主任	杨文龙	北京航空航天大学
常委	张吉锋	上海大学
	朱家铿	东北大学
	龚天富	电子科技大学
	袁开榜	重庆大学
委员	陈传波	华中科技大学
	傅清祥	福州大学
	俸远祯	电子科技大学
	古天龙	桂林电子工业学院
	李建中	哈尔滨工业大学
	刘乃琦	电子科技大学
	王文辉	东北大学
	陆 枫	华中科技大学
	王晓东	福州大学
	王永军	东北大学
	王玉龙	北方工业大学
	徐 洁	电子科技大学
	徐炜民	上海大学
	杨心强	解放军理工大学
	袁崇义	北京大学
	张 璟	西安理工大学
	章振业	北京航空航天大学
	朱一清	东南大学
	童占梅	电子工业出版社
	胡先福	电子工业出版社

前 言

本书之基础是电子工业出版社 1998 年出版的《Petri 网原理》一书。新书除原理外,突出了 Petri 网应用,特别是理论指导下的应用。

Petri 网的成功应用要求使用者有两方面的造诣:对 Petri 网原理及技术准确而深入的理解和把握,对应用领域及应用问题细致而深入的认识和分析。

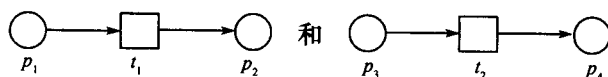
本书应用篇包括 N 部电梯的控制问题和工作流领域的模型、分析和实现。与传统的全局控制不同,Petri 网的局部确定思想和异步并发特点在电梯控制系统的设计与分析中表现出自己特有的优势和魅力。电梯控制系统还充分揭示了 Petri 网系统对细节的精确描述带来的负面效果:节点过多,系统繁琐而不易分析。针对特定领域定义专用的概念和结构以屏蔽细节不仅是可能的,也是必须的。没有细节就没有正确性,所以细节正确是屏蔽的前提。

工作流领域的工作是作者与北京大学软件工程中心(及其公司)合作研究的结果。研究的基础是他们已经完成并投入使用的北京市属某局的工作流系统。他们在工作实践中提出了问题,特别是如何使用荷兰学者 Aalst 等定义的工作流网(WF-net)的问题。在我们的讨论班上我熟悉了工作流,也熟悉了工作流网,我们不仅发现了工作流网及其相关概念的若干不合理之处,后来还在 Aalst 和他的同事 K. van Hee 共同撰写的《Workflow Management》一书中找到了这些不合理之处的症结所在。

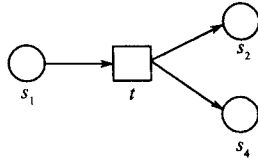
Wil van der Aalst 等人的工作代表了 20 世纪 90 年代以来 Petri 网应用的主要成就之一,因为全世界目前基于 Petri 网的工作流研究几乎没有不受其影响的。Aalst 等人研究工作的特点是:以传统的 Petri 网系统为基础,提出针对特定领域的网模型,借助原有的系统性质(活性、有界性等)来定义新的性质(如 WF-net 的 soundness),借助原有分析技术来完成分析(如计算 T-不变量等)。可惜 Aalst 等人对 Petri 网的基本原理不甚熟悉,也不了解通用网论,他们的工作也就欠缺了理论的指导。由于其着眼点集中在技术层面上作研究,使得他们的研究成果(WF-net 及相关概念)带有先天的不足和概念上的模糊。

作者 2004 年 2 月底曾有幸见到 Aalst 本人,当时他来华参加清华大学出版社为他的《Workflow Management》一书中译本出版举行的首发式。清华大学王健民教授组织了一个一天的工作流研讨会,使我有机会与他交谈。当我问到他对同步论等通用网论分支的看法时,发现他对这些并无了解,自然也就谈不上以此作为指导。熟悉工作流的读者应该熟悉 Aalst 的工作流网,不妨与本书对工作流的建模、分析和实现作一个比较。同样是以 Petri 网为基础,得到了完全不同的结果。不能说我们的工作就没有毛病,但是我们在理论的指导下至少已经避免了只着眼于技术必然会产生的一些错误。重要的并不是我们在工作流方面已经取得的成果,而是以理论为指导的方法。理论的作用有时候体现在你对问题的认识深度和分析方法上,而不是把公式或者公理写在你的论文里。

着眼于技术层面的研究方法是 20 世纪 90 年代以来 Petri 网发展的主流。例如现在文献中流行的有色网系统的定义实质是把



映射成



即 $p_1, p_3 \rightarrow s_1$, $p_2 \rightarrow s_2$, $p_4 \rightarrow s_4$, $t_1, t_2 \rightarrow t$ 。这一映射不是折叠,而且其逆映射是不连续(网拓扑定义下)的。作者认为,可以把这种映射看成屏蔽细节的结构变换,而有色网的定义还是以 P/T-系统的折叠为宜。这就是作者没有从众修改书中有色网定义的原因。

2003年10月,Carl Adam Petri教授本人来华访问,在香山饭店作了一周的学术演讲和一周的自由交流。Carl Adam是中国人民真正的朋友,年近80的Carl Adam将他多年的科研成果,特别是尚未发表成果首先在中国宣讲,让中国人先知道,这实在令我们感动。可惜作者水平有限,也不能在他本人发表之前将他的研究成果收在本书中。作者仅以此书作为庆祝他80诞辰(生于1926年2月26日)的礼物,提前敬献在他面前,以表达感激之情。

本书分为4篇,除前面提到的应用篇外,系统篇和理论篇基本上与《Petri网原理》一书相同,只是作了一些文字上的修正和补充。入门篇增加了阐述基本观点的第1章,还包括原书中介绍网系统实例的一章。基本观点是理解Petri网的基础,也是文献和Petri网书刊中几乎不讨论的内容。《Petri网原理》一书中将这些观点分散在各章节,这次集中在一起,并以作者多年教学的新体会加以丰富。不熟悉Petri网的读者不妨从第2章入手,到读完系统篇以后再体会第1章的观点。

计算机程序系统的状态元素是变量。变量的值是数据,数据有结构。Petri网的状态元素是库所(place),库所的“值”是托肯(token),托肯只计个数,没有结构(有色托肯也没有结构)。从数据的角度看,库所的“值”为非负整数;从运算的角度看,库所只允许非负整数的加和减。库所的这些特点与变量允许的丰富的数据结构和数学运算相差甚远,限制了Petri网描述程序系统的能力。此外,变量允许读、写两种操作,而且允许并行读同一个变量;库所只允许一种访问形式:对托肯个数的加和减,都只考虑托肯数量的限制,不考虑计算机存储器的限制。P/T-系统的伴随库所从数值变化的角度可以描述读操作,但这种“读”不允许并行(参看变迁规则)。总之,要描述程序变量,库所不是合适的选择。本书在介绍 workflow 模型时,定义了一种 C-net,用于描述异步并发的程序系统,其中字母 C 代表 computing。由于 Petri 网系统分析技术中所包含的覆盖树、不变量等,不能直接用于 C-net,所以没有把 C-net 放在高级网系统一章来介绍。C-net 的研究和应用还需要进一步的努力。

作者曾考虑在本书增加时间网和随机网两种系统的内容,但还是放弃了。原因是,一来作者对这两种系统没有深入的了解,不敢悍然动笔;二则实在还看不出如何解决这两种系统的实现问题;再者,本书的目标只是 Petri 网理论和应用基础,不可能将涉及 Petri 网的内容全部包括在内。

正如《Petri网原理》一书前言中所表达的,作者十分感谢电子工业出版社、国家自然科学基金委员会及东南大学对 Petri 网研究一贯的支持。北京航空航天大学杨文龙教授对书稿的推荐、审阅及建议是作者一直铭记在心的。

作者还要特别感谢北京大学国家软件工程中心,感谢王立福、张世琨、赵文等同事和同学,正是与他们的合作,使作者完成了 workflow 的研究。感谢北京大学信息科学学院软件研究所理

论研究室的屈婉玲、王捍贫等同事及周国富、余鹏、黄雨、霍金健等同学的支持,感谢清华大学软件学院王健民、计算机系王生原的支持和协作。感谢中科院数学所陆汝钤、韦梓楚等老同事长期的帮助和支持。

作者衷心感谢 Carl Adam Petri 教授,没有他 30 多年来的帮助和指导,就不会有这本反映作者大半生成就(如果能称为成就的话)的著作。

关于本书的最新勘误表请访问 <http://www.theory.cs.pku.edu.cn/ycy/>。

袁崇义

2004 年 11 月于北京大学

原《Petri 网原理》一书前言

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)。

30 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。

20 世纪 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 20 世纪 70 年代初。以 Carl Adam Petri 为核心的一批科学家以网系统的全体为对象,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(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。

20 世纪 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。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 网是一种可用图形表示的数学对象,借助数学开发的 Petri 网分析方法和技术既可以用于静态的结构分析,又可以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 Carl Adam 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 的图形表示所吸引,匆匆忙忙拿来应用。由于不了解 Petri 网的基本原理,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。但这种定义需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、高级网系统和自控网系统。各种系统均从非形式化的叙述开始,然后给出形式化的定义和实例。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 学时。虽然没有就 93 系列教材列出的九个科目领域——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作出明确说明,但是由于 Petri 网固有的通用性及其异步并发的特点,以及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。网逻辑不仅为以推测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,既可用于系统设计,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立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。

Carl Adam Petri 曾为《Petri 网》一书撰写序言,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,将序言节选放在后面(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 20 世纪 80 年代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。基于这些思考,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 月于北京大学

目 录

第 1 篇 入 门 篇

第 1 章 引子:基本观点	(2)
第 2 章 网和网系统	(8)
2.1 实例	(9)
2.1.1 生产流水线	(9)
2.1.2 救火队	(10)
2.1.3 救火记录	(12)
2.1.4 无固定容量的 FIFO 栈	(13)
2.1.5 四季系统	(14)
2.1.6 不加解释的系统	(16)
2.2 基本定义	(18)
2.2.1 网和网的图形表示	(18)
2.2.2 网系统	(21)
2.2.3 网系统分类	(24)
2.2.4 系统性质	(29)

第 2 篇 系 统 篇

第 3 章 基本网系统	(32)
3.1 定义和变迁规则	(32)
3.2 事件间的基本关系	(35)
3.3 S-补和 T-补	(38)
3.4 T-图、S-图和活性定理	(40)
3.5 应用	(43)
3.5.1 哲学家就餐——共享资源的管理	(43)
3.5.2 并行编译	(47)
3.5.3 容量不定的先进先出栈	(53)
3.5.4 错在哪里	(56)
第 4 章 库所/变迁系统(P/T-系统)	(58)
4.1 可达标识集	(58)
4.1.1 定义和系统性质	(58)
4.1.2 覆盖树	(61)
4.1.3 覆盖图	(63)
4.2 出现序列和变迁序列	(66)

4.2.1	基本定义	(67)
4.2.2	原子行为及交叉语义	(69)
4.3	进程	(70)
4.3.1	出现网	(70)
4.3.2	进程的定义与应用	(71)
4.3.3	进程块	(78)
4.4	不变量	(79)
4.4.1	关联矩阵	(79)
4.4.2	S-不变量	(80)
4.4.3	T-不变量	(81)
4.4.4	其他结构性质	(82)
4.4.5	层次模拟和忽略细节	(82)
第5章	高级网系统	(84)
5.1	谓词/变迁系统(Pr/T-系统)	(85)
5.1.1	从库所到谓词	(85)
5.1.2	定义和变迁规则	(86)
5.1.3	谓词/变迁系统的行为	(92)
5.2	有色网系统	(97)
5.3	自控网系统	(103)
5.3.1	定义和变迁规则	(104)
5.3.2	不变量	(108)

第3篇 理论篇

第6章	条件/事件系统(C/E-系统)	(114)
6.1	定义和完全可达关系	(114)
6.2	公理和基本现象	(116)
6.3	完备化	(118)
第7章	同步论	(120)
7.1	同步的各种形式	(120)
7.2	同步距离	(121)
7.2.1	S-元素作为观察窗口	(121)
7.2.2	同步距离的定义和性质	(122)
7.3	同步距离与系统行为	(125)
7.3.1	基本集合与同步结构	(125)
7.3.2	加权同步距离	(129)
7.4	同步距离的计算	(129)
7.5	同步距离的应用	(135)
第8章	网逻辑	(138)
8.1	变迁形式分类——网逻辑结构	(138)
8.2	事实、命题和推理规则	(140)

8.3	网与命题逻辑	(142)
8.4	网与一阶谓词逻辑	(151)
8.5	网与程式逻辑及职责逻辑	(154)
8.6	网与时态逻辑	(155)
第9章	信息流结构	(159)
9.1	信息流图	(160)
9.2	信息流图的网表示	(163)
9.3	实例	(166)
第10章	网拓扑	(169)
10.1	传统拓扑	(169)
10.2	网拓扑	(170)
10.3	网射	(172)
10.4	范畴	(175)
第11章	并发论	(178)

第4篇 应用篇

第12章	电梯控制系统	(188)
12.1	电梯问题	(188)
12.1.1	用户需求	(188)
12.1.2	需求分析	(188)
12.2	系统设计	(189)
12.2.1	变迁	(190)
12.2.2	变迁的外延——状态元素	(190)
12.2.3	按钮解释	(191)
12.2.4	变迁 $u_stop(i)$	(194)
12.2.5	按钮变迁和变迁 $u_close(i)$	(195)
12.2.6	改变方向的变迁 $u_d(i)$	(196)
12.3	系统组装	(196)
12.4	正确性分析	(198)
12.5	有色网模型	(200)
12.5.1	为什么节点多	(200)
12.5.2	库所组合有色网	(201)
12.5.3	电梯系统的有色网模型	(207)
12.6	小结	(212)
第13章	C-net	(213)
13.1	S-元和V-元	(213)
13.2	变迁状态和V-元外延	(214)
13.3	变迁规则	(215)
13.4	C-net的形式化定义	(216)
13.5	实例	(218)

13.6	读写冲突及系统性质	(219)
13.7	汉诺塔问题	(221)
第 14 章	 workflow 模型	(225)
14.1	形式化方法	(225)
14.2	Aalst 的 WF-net	(226)
14.3	workflow 和 workflow 管理系统	(229)
14.4	workflow 逻辑网	(230)
14.5	化简规则	(236)
14.6	workflow 语义	(243)
14.7	workflow 引擎	(250)
14.7.1	workflow 管理逻辑	(250)
14.7.2	引擎核	(255)
14.8	角色的层次结构	(256)
14.9	多案例处理和性能	(258)
附录 A	原《Petri 网》一书序言节选(附译文)	(259)
附录 B	Petri 网术语	(262)
附录 C	电梯控制系统 UNITY 程序	(280)
参考文献	(283)

第 1 篇 入 门 篇

Petri 网是一种可以用网状图形表示的系统模型。不幸的是,人们往往把 Petri 网和它的图形表示等同起来。涉及 Petri 网的学术论文一般都会给出它的数学定义,可这种定义又往往被当作提高论文档次的装饰品。其实 Petri 网不仅仅是一种可以用图形表示的数学对象,它首先是一种物理对象,因为它把尊重自然规律作为第一要义。Petri 网的概念都是在尊重自然规律的前提下精心定义的,以确保以 Petri 网为模型描述的系统都是可以实现的(参看本书附录 Carl Adam Petri 为作者第一本 Petri 网专著所写序言的节选)。本篇将在第 1 章阐述与尊重自然规律相关的若干基本观点,并在第 2 章给出在这些观点指导下得到的 Petri 网及 Petri 网系统的定义。初学者可以先读第 2 章。

第1章 引子:基本观点

Petri网起源于1962年Carl Adam Petri(德国)的博士论文^[50]。目前的状况是:几乎所有与信息科学有关的学术期刊及会议文集中都能见到涉及Petri网的论文;每年都有以Petri网理论和应用为主题的国际会议和专题会议;许多高校在教授Petri网课程;每年都有Petri网学术著作问世。40余年的发展足以证明Petri网的生命力。

Petri网的魅力何在?

人们通常称赞Petri网描述异步并发的能力和它的图形表示。Petri网的这两个特点来源于它的网状结构。网状结构产生偏序,使描述异步并发成为可能,使图形表示更符合异步并发的实际。

但网状结构并非Petri网的出发点,而是它尊重自然规律的必然结果:大千世界正是由一张张有形的和无形的网构成,万事万物在这些网上变化着,影响着,依赖着。Petri网反映的正是这种事物间的依赖关系。Petri网与物理学、化学等学科不同,它不直接描述自然规律本身,只描述由这种规律产生的依赖关系。

一个好的系统模型不能只存在于纸面上,活跃于论文中。它必须能够用来描述物理世界的客观存在,使客观存在成为论文的研究对象。它还必须保证,凡是用它描述的系统都能够转换为客观存在。前者称为系统模型的仿真性,后者即是系统模型的可实现性。

如果笼统地说:符合自然规律的模型就可以实现,不符合自然规律的模型就不能实现,不会有人反对。但这种大实话对实践没有什么指导作用。这一章给出的基本观点是与自然规律相关的若干具体而又被许多系统模型忽视的东西。正是这些东西构成了Petri网的物理基础,产生了Petri网的理论。如果没有称为通用网论(general net theory)的理论部分,Petri网也就失去了存在的价值,因为Petri网无意在众多的系统模型中增加一个平凡的成员。

也许应该把可实现性列为Petri网关于系统模型的第一个基本观点。下列讨论的其他基本观点都是为可实现性服务的。

对可实现性的破坏往往来源于随意引入系统模型的各种控制手段。这些随意引入的手段来源于人的主观愿望。计划经济、献礼项目及政绩工程都是主观愿望的“范例”,事与愿违则是它们共同的终点。Petri网的基本观点正是来源于对这些随意的控制手段的分析和扬弃之上的。

作者水平有限,不可能对所有内容都给出完备而又准确的阐述。读者应该有自己的见解,才能真正把Petri网变成自己的。

1. 全局控制流

早期的程序设计语言都是顺序语言,也就是说,全局控制流是程序语言的固有成分。语言中的全局控制流反映的是冯·诺依曼计算机的全局控制流。当时的应用问题几乎全是科学计算,即给定一组初始数据,计算出另一组数据作为其结果。只要最终结果与初始数据有符合要求的对应关系,计算即为正确,中间的计算过程是无关正确性的。这一切协调地共存,也符合数学家及需要数值计算的科学家的思维方式。

但是,并行机问世了,计算机网络问世了,管理型的应用问题在计算机应用中所占比例越

来越大。在并行环境中已经不存在全局控制流,管理型应用不仅关心终态(也许根本不存在终态,例如操作系统),而且更关心过程。全序化的管理过程显然不符合应用的要求(例如数据库管理)。全局控制流不应该继续成为系统模型固有的成分。

Petri 网没有全局控制流,没有中央控制,从来就没有。Petri 网只描述事物之间的依赖关系,包括因果关系,包括存在于物理系统中的控制机制(如交通控制),但 Petri 网中没有任何形式的固有的控制流。

现在,许多系统模型中都有固有的控制流。并行系统往往是顺序进程间的通信,描述语义的形式模型更是如此,因而在刻画并行系统的语义时要借助交叉语义假设(interleaving assumption)。其实,交叉语义假设只适合于不关心中间过程的科学计算,不适合于管理型应用问题;只能描述最终结果数据与初始数据的对应关系,不能描述系统的性能(例如占用资源的多少,耗时的长短等)。

全局控制流的概念仍然极大地束缚着程序员的思维。例如,幼儿园的儿童在排队时绝不会像程序员们习惯的气泡法那样“顺序操作”,即“排头兵”逐一与队中成员比较,成员高于自己时与之交换,由高者继续比下去,直到排尾,从而最高者站在队尾;然后再从排头兵开始重复这一过程直到队尾前一名成为次高者,……可不可这样说,从来就没有控制流这一固有成分的 Petri 网使其应用者可以像幼儿园的儿童那样自由地思维,而不陷入全盘顺序化的定势。

2. 全局状态

“全国一盘棋”是对用全局状态实现控制的很准确的描述。有限自动机则是借助全局状态控制系统变化的形式模型。

听起来全国一盘棋显然比各自为政好。但问题是,对于稍微大一点的系统,其全局状态往往不是实时可知的。谁知道互联网上现在的全局状态?谁也不知道。不要说网上的状态瞬息万变,就是把互联网“冻结”在某一瞬间,恐怕也没有人能弄明白它在那一瞬间的状态。其实,各自为政是客观存在,自然界是如此,互联网是如此,各级政府也是如此。自然界有自然规律,各自为政自然是良性的。互联网上没有大家都遵守的规矩,各自为政的个体(程序系统)又有先天的不足(各种 bug),所以黑客不断,问题多多。各级政府应该受法律法规的约束,可惜法律法规不完善,官员们又不遵守,各自为政也就多有弊端。

全局状态实现控制不仅是不可能的,而且还不能完整描述系统变化。有限自动机用全局状态描述变化:变化发生前的状态及终止时的状态。但是这两个状态的差异并不能正确反映变化的全貌。例如化学反应中的催化剂,在反应前后的量没有变化,却是反应中不可缺少的。

Petri 网承认系统全局状态的存在,也认识到全局状态的不可实时可知性,因而依自然界各自为政的方式描述系统中的变化。Petri 网的变迁规则用局部确定的方式明确指出变化发生的局部条件,包括催化剂的存在,也明确指出变化引起的局部变化。局部确定是大自然的客观规律。

3. 全局时间

“向国庆十周年献礼”是用全局时间进行控制的范例。其实,时间并不具有确保进度的功能。不少献礼项目最终成为“豆腐渣工程”即是证明。时间控制并不总是可实现的。

如果用年、月、日计时,那么世界上大多数国家通用的公历可以看成是世界全局时间的实现,因为大家对年、月、日有统一的认识和度量(包括时差),也能容忍以小时计的误差。

如果用时、分、秒度量,全局时间就很难实现了。火车时间表虽然只计时和分,已经很难实现。谁见过完全准点的火车?人们接受火车时间表,因为他们不在乎几分钟的误差。长时间晚点或者取消车次也只能无奈地承受,因为这是用时间表实现同步必须付出的代价。

全局时间的不可实现有两层含义:不存在一个全局共享的时钟,也不能用时钟控制实现同步。

系统模型中往往用实数作为全局时间,从而时间具有连续、稠密、全序及均匀的性质。且不说“天上方一旦,世上已千年”的神话及相对论关于时间和速度的关系,这些都表明时间不是均匀的,谁又能造一台以实数计时的钟呢?

以实数为时间模型自然有其优越之处,特别是从理论上研究物理量的变化,可以借助微积分得到漂亮的公式。但是这种模型不能直接用于计算机系统,于是产生了各种用于数值计算的算法。对于管理型的应用问题来说,实数时间既不可能实现,也不实用,而且会产生理论上的误导。如果采用实数时间,那么必定可将一切变化映射到时间轴上,从而任意两种变化要么同时,要么有先后,于是并发就成了同时的同义语。同时是有传递性的,即 a 与 b 同时, b 与 c 同时,必有 a 与 c 同时。于是作为同义语的并发也有传递性。可是客观存在的并发没有传递性。例如你可以边唱边跳,也可以边说边跳,却不能边唱边说。因为说和唱共同用一张嘴,只能交替发生。Carl Adam Petri 给出的并发公理准确地刻画了并发的性质。

物理世界发生的事情并非不同时即可分出先后。许多事情既不同时,又分不出先后,因为断言同时或有先后必借助参照物,而参照物并不一定存在。时间是什么?时间是对变化的度量。没有日月星辰的转动也就没有人间的年、月、日,没有时钟也就没有生活中的时、分、秒。Petri 网里没有全局时间,只有变化及变化间的依赖关系。依赖关系产生先后次序。如果需要计时,那么时钟可以作为一种资源出现在 Petri 网里。时钟的读数即为共享此钟的范围内的局部时间。只有在 Petri 网系统足够小,可以共享同一个物理时钟时,该时钟的读数才成为该系统的全局时间。Petri 网尊重物理时钟有误差,并需要维护的特征。

很容易在系统模型中引入全局逻辑时钟。除非系统很小,否则很难在现实中实现这样的逻辑时钟(逻辑时钟没有误差,不需要维护)。Petri 网不采用这种时间模式。

有一种网系统称为时间 Petri 网,它为变迁和库所中的托肯加上时间限制,例如变迁 t 的 (a, b) , $a < b$, 即 t 在获得发生权(由托肯决定)以后必须等待至少 a 个时间单位才能发生,但若在 b 个时间单位之内还未发生,则失去发生权。就大多数应用问题而言,上述时间限制都只涉及局部时间。Petri 网采用 Clock_reading(时钟读数)处理局部时间,可以满足许多应用问题的建模需要。Petri 网的变迁规则只要求资源达到需求的数量,不能在数量过多时使变迁失去发生权,在刻画超过 b 个单位时间,即失去发生权这一要求时会有困难。不过这种困难不限于时间处理上。Petri 网的托肯不能准确描述计算机程序系统中的变量,因为变量的值不限于正整数,变量值的运算也不限于加和减,而且变量中的数据还可以有复杂的结构。针对 Petri 网与程序系统的这种根本差异,我们在第 13 章引入了 C-net,将变量引入网系统,并保留 Petri 网局部确定、异步并发的特征。C-net 完全胜任上述时间约束的描述,也就没有必要专门介绍时间网了。要特别指出的是,C-net 中只允许局部时间,因为全局时间无法实现。其实作者认为,在对变迁 t 的时间约束 (a, b) 背后,往往有某种物理因素制约 t 的发生。时间也许可以控制学校里上、下课(有误差!拖堂并不少见)的活动,但不能准确控制像火车运行这样的活动,因为只要学生和老师在,上、下课可以随时发生,火车却不是随时可以开动的。

4. 概率

概率给出的是统计规律,即在大量重复试验中呈现出来的规律。例如暗箱中有黑球 10