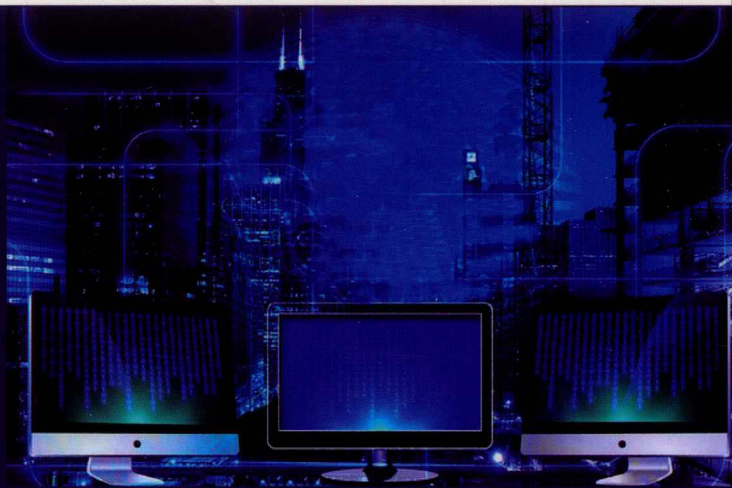


Petri网并行化理论与并行算法

李文敬 元昌安 闭应洲 著



科学出版社

Petri 网并行化理论与并行算法

李文敬 元昌安 闭应洲 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

Petri 网是复杂系统运行过程中并发、互斥、同步最直接、自然和精确的表示,已成为描述物理世界的异步并发现象并揭示其可计算规律的重要理论和模型。由于 Petri 网系统具有并发、同步的特点,同时存在状态空间爆炸的问题,要借助 Petri 网模拟复杂系统的并行运行或动画演示,以实现 Petri 网系统行为与功能的分析与验证,成为人们亟须解决的问题。以并行计算和 Petri 网系统并行化为核心的 Petri 网系统并行算法成为模拟复杂系统的并行运行和系统验证的研究热点,受到许多学科领域的关注。本书全面系统地介绍 Petri 网并行化的基本理论和方法,重点介绍 Petri 网并行化划分理论和并行算法、Petri 网的研究现状和国内外的新发展。

本书可供分布式并行计算、Petri 网、系统工程、柔性制造、最优化问题、演化计算、数据挖掘、 workflow、交通网络、高性能计算等专业领域的研究人员阅读,也可供研究生及高年级本科生参考。

图书在版编目(CIP)数据

Petri 网并行化理论与并行算法/李文敬,元昌安,闭应洲著. —北京:科学出版社,2018. 11

ISBN 978-7-03-057715-3

I. ①P… II. ①李…②元… ③闭… III. ①Petri 网-研究 IV. ①TP393

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 122894 号

责任编辑:张艳芬 纪四穗 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 伟 / 封面设计:蓝 正

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 11 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2018 年 11 月第一次印刷 印张:19 1/4

字数:373 000

定价:120.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

Petri 网是异步并发系统建模与分析的一种重要工具,于 1962 年由 Petri 在其博士论文中首先提出,后流传于欧美一些国家和地区,现已成为计算机和自动化领域的热门研究方向。Petri 网完全从过程的角度出发,为复杂系统的描述与分析设计提供一种有效的建模工具,用于描述有因果关系的并发系统,它具有严密的图论、代数学和形式化语言的数学理论基础,能够自然地描述并发、冲突、同步、资源竞争等复杂系统的特性和控制机制。Petri 网作为一种有完备自动化理论的形式描述语言,既有严格的数学表述方式,也有直观的图形表达方式。目前,Petri 网得到了长足发展,在理论上形成体系,在各领域也得到了广泛应用。

50 多年来,人们从 Petri 网并发行为的特性向纵深发展,创建了更为基础、抽象的条件/事件(C/E)网、库所/变迁(P/T)网、高级网(包括谓词/变迁网、颜色网等)等理论模型,建立了 Petri 网的并发公理系统。从 Petri 网的结构模型出发,运用拓扑学和代数学研究 Petri 网的分析方法,建立了基于可达树的图分析方法、基于状态方程的代数分析方法、归纳分析方法。从语义出发对 Petri 网并发行为特性进行研究,创建了 Petri 网语言。从网系统物理层参数出发对 Petri 网进行拓展性研究,建立了含时间、随机变量、受控、连续、持续等因素的多种 Petri 网拓展模型。同时,Petri 网在并程序序设计、协议验证、柔性制造系统、工作流等计算机以及自动化、机械制造等领域得到了广泛应用。

本书全面系统地介绍 Petri 网并行化的基本理论和方法,重点介绍 Petri 网并行化划分理论和并行算法、Petri 网的研究现状和国内外的新发展。全书共 10 章。第 1 章论述 Petri 网的产生与发展、Petri 网的国内外研究现状和应用领域,以及 Petri 网并行化问题的提出与研究思路。第 2 章论述并行计算模型、并程序序设计方法。第 3 章论述 Petri 网的图形结构模型和代数模型。第 4 章探讨 Petri 网系统并行化预处理问题。第 5 章讨论 Petri 网系统并行化子网的求解方法。第 6 章研究 Petri 网系统并行化子网划分理论。第 7 章研究多核机群的 Petri 网并行模型及其算法。第 8 章讨论工作流 Petri 网系统的并行算法。第 9 章研究基于 Petri 网的变数交通网络建模及其最短路径加权 S-图算法。第 10 章探讨 Petri 网并行算法在多个领域的应用。附录提供 Petri 网并行算法仿真系统的部分代码。

本书是作者在近年来潜心学习和研究国内外并行计算、Petri 网理论的基础上,融合两者特点和各自在处理复杂系统方面的优势,所开展的基于多核机群的 Petri 网并行化及其并行算法与应用研究成果的一个总结。本书得到了广西师范学院学术著

作出版基金、广西高校重点实验室——科学计算与智能信息处理重点实验室、国家自然科学基金项目(编号:61741203;61163012;61363037;61650102)、广西自然科学基金项目(编号:2016GXNSFAA380243)、广西创新驱动发展专项资金项目(编号:桂科AA17204091)、广西科学研究与技术开发计划项目(合同编号:1598010-3;1599005-2-13)、广西壮族自治区教育厅中青年教师基础能力提升项目(编号:KY2016YB278)的资助。另外,在撰写本书过程中,参考了大量的相关文献,在此向文献的作者致以诚挚的谢意。

本书涉及的研究内容和范围很广,近年的研究成果不断涌现。限于作者的学识和水平,书中难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。

作者

2018年4月于南宁

目 录

前言

第 1 章 Petri 网并行化的研究背景	1
1.1 Petri 网的研究现状	1
1.2 Petri 网并行化理论与关键技术问题	5
1.3 基于多核机群的功能并行算法	5
1.4 Petri 网的并行计算	6
1.5 基于多核机群的 Petri 网并行算法的研究思路	8
参考文献	11
第 2 章 MPI+OpenMP+STM 并行编程模型	17
2.1 并行计算机的分类	17
2.1.1 按指令流和数据流分类	17
2.1.2 按数据的存储方式分类	18
2.2 并行计算模型	20
2.2.1 并行计算模型的要素	20
2.2.2 共享存储并行计算模型	20
2.2.3 分布式存储并行计算模型	21
2.2.4 存储层次并行计算模型	22
2.3 并行程序设计	23
2.3.1 并行编程模型	23
2.3.2 共享变量编程模型	24
2.3.3 消息传递编程模型	27
2.3.4 多线程编程和多进程编程	28
2.4 多核机群的并行计算	29
2.4.1 MPI+OpenMP 混合编程模式	29
2.4.2 MPI+OpenMP+STM 三级混合编程模式	31
2.4.3 MPI+OpenMP+STM 并行算法	34
2.5 基于多核 PC 的人工蜂群并行算法	35
2.5.1 ABC 算法	36
2.5.2 改进的 ABC 算法	36
2.5.3 并行算法的分析与设计	38

2.5.4	实验结果与分析	40
2.6	基于多核机群的人工鱼群并行算法	44
2.6.1	相关工作	44
2.6.2	基于动态权衡与小生境技术的串行式 AFSA	46
2.6.3	基于 MPI+OpenMP 的人工鱼群并行算法实现	47
2.6.4	实验结果与分析	50
2.7	基于多核机群的混合群智能并行算法	54
2.7.1	相关工作	55
2.7.2	混合群智能两阶段处理方法	59
2.7.3	MPI+OpenMP+STM 并行模型	60
2.7.4	混合群智能并行算法	63
2.7.5	实验环境及参数设置	64
2.7.6	实验结果与分析	65
	参考文献	68
第 3 章	Petri 网系统的数学模型	74
3.1	Petri 网的基本概念	74
3.2	Petri 网系统分析方法	79
3.3	Petri 网的图形结构模型	82
3.4	Petri 网的代数模型	85
	参考文献	88
第 4 章	Petri 网系统并行化预处理	89
4.1	Petri 网的选择	89
4.1.1	高级 Petri 网与 P/T 网的特点	90
4.1.2	高级 Petri 网与 P/T 网的内在机理	90
4.2	结构模型的转化方法	90
4.3	代数模型的并行化预处理方法	92
4.3.1	转换过程与验证	92
4.3.2	P/T 网与颜色 Petri 网的形式化表示	94
4.3.3	颜色 Petri 网关联矩阵分析	95
4.3.4	颜色 Petri 网并行化预处理自动转换算法	96
4.3.5	颜色 Petri 网转换成 P/T 网的算法	96
4.4	实验结果与分析	97
4.5	谓词/变迁网转换成 P/T 网的方法	98
	参考文献	100

第 5 章 P-不变量求解算法与 T-图子网划分方法	102
5.1 P -不变量求解	102
5.1.1 Petri 网的形式化过程	102
5.1.2 P -不变量的求解过程	102
5.1.3 P -不变量及其支集的求解算法	105
5.1.4 实验结果与分析	106
5.2 T -图的求解方法	107
5.2.1 T -图的定义	107
5.2.2 T -图的求解算法	110
5.2.3 算法的形式化	111
5.2.4 T -图划分的应用示例	112
5.2.5 实验结果与分析	113
参考文献	113
第 6 章 Petri 网系统并行化子网划分理论	115
6.1 Petri 网并行化子网划分方法比较	115
6.1.1 基于 P -不变量的子网划分条件	115
6.1.2 两种划分方法的分析与评价	117
6.2 Petri 网并行进程划分的判定定理	118
6.3 Petri 网并行化进程划分的完备性理论	120
6.3.1 子网库所标识全为零的情况	120
6.3.2 子网间存在共享库所的情况	122
6.3.3 无法划分为并行子网的情况	124
6.3.4 子网划分的完备性定理	126
6.4 Petri 网并行化子网划分算法	126
6.5 Petri 网并行化子网划分算法的应用	127
6.5.1 ATM 存取款系统转换成 P/T 网模型	127
6.5.2 各种高级 Petri 网模型子网划分实例	128
6.5.3 实验结果与分析	128
6.6 Petri 网的并行性分析	132
6.6.1 Petri 网子网内部的并行性分析	132
6.6.2 Petri 网子网之间的并行性分析	133
6.7 消息传递平台的 Petri 网系统并行算法	133
6.8 Petri 网系统并行算法的验证	134
参考文献	135

第 7 章 多核机群的 Petri 网并行模型及其算法	136
7.1 Petri 网的并行模型	136
7.1.1 引言	136
7.1.2 Petri 网并行几何模型	137
7.1.3 Petri 网并行代数模型	139
7.2 基于多核 PC 的 Petri 网并行算法	140
7.2.1 基于多核 PC 的多线程编程模式	140
7.2.2 基于多核 PC 的多线程 Petri 网并行算法	141
7.2.3 应用示例与顺序程序	141
7.2.4 基于多核 PC 的 Petri 网并行算法流程分析	144
7.2.5 基于多核 PC 的 Petri 网并行算法伪代码	145
7.2.6 并行算法与实例验证	147
7.3 基于多核机群的 Petri 网并行模型	148
7.4 多核机群的 Petri 网并行算法	150
7.4.1 多核机群的 Petri 网并行子网划分算法	151
7.4.2 基于多核机群的 Petri 网并行算法	151
7.4.3 实例分析	153
7.4.4 实验环境	160
7.4.5 串行实验结果	161
7.4.6 MPI 实验结果	162
7.4.7 OpenMP 实验结果	163
7.4.8 MPI+OpenMP+STM 实验结果	164
7.4.9 实验结果与分析	165
参考文献	166
第 8 章 workflow Petri 网系统的并行算法	169
8.1 国内外研究现状及发展趋势	169
8.1.1 引言	169
8.1.2 国外研究现状	170
8.1.3 国内研究现状	170
8.1.4 存在的不足	171
8.2 workflow 概述	171
8.3 workflow 模型与 Petri 网的映射关系	172
8.4 基于 Petri 网的 workflow 模型建模	173
8.5 workflow 基本模式的 Petri 网模型及其并行性分析	173
8.5.1 workflow 基本模式的 Petri 网模型	173

8.5.2 workflows Petri 网并行模型	178
8.6 基于多核 PC 的工作流并行算法	180
8.7 算法应用与实验分析	181
8.7.1 工作流实例	181
8.7.2 实例的 Petri 网建模	183
8.7.3 系统的性能分析结果	185
8.7.4 实例的求解过程	185
8.7.5 基于多核 PC 的工作流并行算法的实验结果与分析	191
参考文献	196
第 9 章 基于 Petri 网的变数交通网络建模及其最短路径加权 S-图算法	199
9.1 变数交通及最短路径研究现状	199
9.1.1 研究意义	199
9.1.2 国外研究现状	200
9.1.3 国内研究现状	201
9.1.4 最短路径问题及其应用	201
9.2 静态交通网络建模及其最短路径算法	202
9.2.1 引言	202
9.2.2 S-图的定义	203
9.2.3 静态交通网络的抽象与建模	203
9.2.4 基于加权 S-图的最短路径算法	205
9.2.5 改进的加权 S-图算法	209
9.3 变数交通网络建模及其最短路径算法	212
9.3.1 引言	212
9.3.2 变数交通网络的抽象与建模	213
9.3.3 基于 Petri 网的变数交通网络最短路径算法	215
9.3.4 变数交通网络最短路径算法实现	220
9.3.5 静态与动态实验的比较分析	221
参考文献	222
第 10 章 Petri 网并行算法的应用	224
10.1 满秩 Petri 网可达性判定算法	224
10.1.1 满秩 Petri 网	224
10.1.2 满秩 Petri 网可达性判定算法设计	225
10.1.3 VC++ 验算	227
10.1.4 讨论	229
10.2 Petri 网共享合成及其在并行系统中的应用	230

10.2.1	Petri 网共享合成运算的概念	230
10.2.2	共享合成运算的推广	232
10.2.3	共享合成运算构建 MPI 并行程序 Petri 网模型算法	235
10.2.4	应用实例	236
10.3	无约束最优化问题的 BFGS 并行算法设计与分析	239
10.3.1	无约束最优化问题的定义及 BFGS 算法	240
10.3.2	BFGS 算法并行处理	242
10.3.3	数值实验	247
10.4	无约束最优化问题的 BFGS 松弛异步并行算法	248
10.4.1	无序松弛异步迭代	248
10.4.2	无约束最优化问题松弛异步并行算法	249
10.4.3	实验结果与分析	252
10.5	基于 GEP 的多数据流分类并行算法	253
10.5.1	按时序划分的模型	253
10.5.2	按数据属性划分的模型	254
10.5.3	GEP 概述	254
10.5.4	GEP 的算法流程	257
10.5.5	一种 MSA-GEP 分类并行算法的实现	258
10.5.6	GEP 的分类原理	259
10.5.7	引入粒度分析的属性合并	260
10.5.8	MSA-GEP 串行算法	262
10.5.9	GEP 的并行结构选取	262
10.5.10	MSA-GEP 并行算法	263
10.5.11	实验结果与分析	265
10.6	基于 GEP 的多数据流压缩并行算法	267
10.6.1	GEP 的函数发现原理	268
10.6.2	引入两种协调机制	269
10.6.3	串行 FR-GEP 算法	271
10.6.4	并行 FR-GEP 算法	271
10.6.5	实验结果与分析	273
10.7	基于 MSA-GEP 与 PFR-GEP 的多数据流分类压缩	275
10.7.1	基于 GEP 的分类压缩过程设计	276
10.7.2	基于 GEP 的分类压缩并行算法实现	278
10.7.3	RSS-GEP 串行算法的步骤	282
10.7.4	RSS-GEP 分类压缩并行算法	283

10.7.5 实验结果与分析	285
参考文献	288
附录 A 基于多核 PC 的 Petri 网并行算法的自动物料处理仿真系统	
部分代码	291
附录 B 基于多核机群三级并行模型的 Petri 网自动物料并行处理仿真系统	
部分代码	294

第 1 章 Petri 网并行化的研究背景

本章从五个方面对 Petri 网的研究现状进行分析,提出 Petri 网并行化的问题、多核机群和功能并行与 Petri 网并行化的关系,研究 Petri 网与并行计算的结合,并给出基于多核机群 Petri 网并行算法的研究思路。

1.1 Petri 网的研究现状

1962 年,德国学者 Petri 在其博士论文中提出了 Petri 网模型的概念^[1]。Petri 网基于系统各部件采取异步和并行操作,并用图或网来表示各部件之间的关系。它也是一种构造模型的工具,用于模拟一些特殊类型的问题,即同时事件或并行事件的离散事件系统。正因为如此,他的论文成为 Petri 网理论发展与应用研究的奠基石。

Petri 网的思想引起了 ADRI 公司(Applied Data Research Inc.)研究小组的注意,他们在 Holt 的领导下,对多部件系统及其并行、冲突等行为的分析和表示方法进行研究,提出了 Petri 网的早期理论、符号及表示方法,并将 Petri 网应用于并行过程的系统模拟及分析。Holt 在与 Dennis 领导的麻省理工学院(Massachusetts Institute of Technology, MIT)计算结构小组合作时,将 Petri 网模型概念介绍给该小组。MIT 计算结构小组主要对与自动机理论紧密相关的 Petri 网的数学理论进行研究,在 Petri 网拓扑结构、标记和执行,计算机系统软硬件故障模型描述, Petri 网的可达树、可判定性和复杂性, Petri 网语言, Petri 网代数模型, Petri 网模型的扩充及子类等方面取得了重要的理论成果。基于 ADRI 公司和 MIT 对 Petri 网并行系统结构和信息流的基本性质及其控制的研究,学术界建立了以拓朴学、自动机为基础的系统理论,称为“网理论”, Petri 网的基本理论、性质与应用得以广泛传播^[2]。Petri 网先流传于欧美一些国家和地区,现已成为计算机、自动化等很多领域的热门研究方向。

50 多年来,人们主要从如下方面对 Petri 网进行研究^[3]。

(1) 从 Petri 网并发行为的特性向纵深发展,创建了更为基础、抽象的网模型:条件/事件(C/E)网、位置/变迁(P/T)网、高级网(包括谓词/变迁网、颜色网等)等理论模型,建立了 Petri 网的并发公理系统^[4,5]。在此基础上,Devillers^[6]对并发语义刻画,Janicki^[7]对系统并发行为、序列行为的等价关系,Reisig^[8]对并发与冲突行为的关系,Lauer^[9]对并发系统的构造, Peteka 等^[10]对 Petri 网的并发系统与 CSP、

CCS 在语义上的关系等进行了深入的研究,取得了诸多重要成果。

(2) 从 Petri 网的结构模型出发,运用拓扑学和代数学研究 Petri 网的分析方法,建立了基于可达树的图分析方法、基于状态方程的代数分析方法、基于化简分解的归纳分析方法^[3,11-17],以及 Petri 网模型自动生成算法与工具。Karp 等^[13]首先提出了可达树的图分析方法,该方法类似于一个状态机,用一个有限的有向树,直接展现一个网系统的运行机制。它能准确刻画一个有界 Petri 网的动态行为和—些特征,且对应一个有限状态机。但是,仅能部分刻画无界 Petri 网。可达性是 Petri 网最基本的性质之一,其分析的方法有状态方程、库所不变量及可达树等。Petri 网的有界性、覆盖性、可逆性、活性、死锁等性质都可以通过可达性来分析。文献[18]提出一个通项可达森林的工具,以一组通项化的可达树准确刻画一个网系统;文献[19]和[20]提出极小可达树、可达树化简,给出加权 T -图的几种化简运算,证明几种运算对于网的某些结构性性质保持不变,从而为加权 T -图的化简及综合提供了有效途径。基于状态方程的代数分析方法由 Peterson^[11] 提出, Murata^[12] 做了出色贡献。该方法通过关联矩阵来刻画 Petri 网的结构,展现 Petri 网的结构性质,建立状态可达的线性系统关系。但是,在刻画 Petri 网的动态特征方面显得不足。基于化简分解的归纳分析方法则是通过化简和分解两种不同的思路对状态复杂难以分析的 Petri 网进行简化分解,将一个较复杂的 Petri 网在保留一些性质不变的情况下,简化成一个比较简单的 Petri 网或者分解成若干个较为简单子网的过程。Murata 针对加权 T -图提出了若干简化方法,讨论了 Petri 网的活性和安全性的保持条件。Willson 等^[21] 提出了加权 T -图的化简方法和结构性质的保持条件。许安国等^[22] 研究了加权 T -图的保性变换,提出对加权 T -图的另一类保性化简,这些化简运算可以保持网的结构活性和公平性。Lee 等^[23] 研究了 Petri 网的递阶化简;Berthelot 等^[17] 将并行程序化简规则移植到 Petri 网。与分解方法相反的是合成方法,合成方法是以建立满足一定性质(活性、有界性、安全性、可逆性等)的小型 Petri 网开始,通过一组子网的某些共享库所、某些共享变迁或公共子网按合成规则综合成复杂网系统,且保持子网系统的某些性质不变的过程,形成了共享合成、同步合成和分享合成三种方法。蒋昌俊等^[18] 教授针对 P/T 网提出一系列合成方法。曾庆田等^[24] 提出了 Petri 网分解的保性条件分析。Souissi^[25] 研究了共享合成 Petri 网系统的活性保持问题。庞善臣等^[26] 研究了共享合成 Petri 网的性质。Ferrarini 等^[27-30] 提出了逻辑控制系统 Petri 网模型的三种连接操作,即同步合成、自环连接和抑制弧连接,并讨论了它们的不变量、可达性、回归性及活性保持问题。文献[31]通过引入 Fork 算子,建立分享合成,其子网中任何与分享库所无关的变迁序列在合成后保持不变,子网内由分享库所引发的变迁序列也保持不变。Carmona 等^[32] 提出了一个基于一般域(general region)理论的从变迁系统生成有界 Petri 网的算法。van der Werf 等^[33] 给出了一种基于域理论的流

程发掘算法,由系统的执行日志生成 Petri 网模型。文献[34]和[35]展示了一个由场景合成 Petri 网的工具。

(3) 从语义出发对 Petri 网并发行为特性进行研究,创建了 Petri 网语言。Hack 和 Peterson 最早从事这方面的研究, Peterson 研究 Petri 网语言的封闭性以及经典形式语言的关系; Hack^[36]研究了网模型的计算能力,指出带抑制弧的增广 Petri 网与图灵机在计算能力上是等价的,充分显示出 Petri 网模型的表达能力。文献[37]给出了 Petri 网语言与形式语言关系的一个清楚刻画,分别从各个角度研究了 Petri 网语言的性质。Mazurkiewicz^[38]和 Grabowski^[39]分别提出迹语言和偏序语言作为系统行为的新的表示工具。袁崇义^[40,41]研究了 Petri 网和代数并发语义、并行程序与状态序列——交叉语义约定的研究。Petri 网的步语义(step semantics)是一种有效的建模方法,它与顺序语义(sequence semantics)相比对实际行为的描述更为详尽,而与偏序技术相比更贴近实际。由于步语义可能引起状态爆炸以及缺乏对行为协调的有效支持, Darondeau 等^[42]引入了步触发策略,限制 Petri 网并发行为,以改进步语义的执行和建模特征。Jantzen 等^[43]定义了 Petri 网通过步、最大步、多步和最大多步语义生成的语言,构建了一个在多步中多次使用变迁的语言体系。曾庆田等^[44]和吴哲辉等^[45]对 Petri 网的进程网系统进行研究,提出了 Petri 网进程网系统的概念,讨论了求取任意 Petri 网的基本进程段的算法。吴哲辉等研究了 Petri 网的进程文法和进程语言,提出了 Petri 网进程文法的概念,证明了当 Σ 为一个有界 Petri 网或无界公平 Petri 网时, Σ 的进程语言 $PL(\Sigma)$ 都可以表示出 Σ 的全部进程的集合等,在基于规则推理的 Petri 网语义检索若干关键技术研究方面取得了丰富的成果。

(4) 从网系统物理层参数出发对 Petri 网进行拓展性研究,建立了含时间因素、随机变量、受控、连续、持续等多种 Petri 网拓展模型。Janssens 等^[46]提出了时延 Petri 网模型,规定每个变迁都按照引发规则具有有限的引发时延。Merlin 等^[47]提出了时间 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,在时间区间 $[a, b]$ 内便具有连续使能权。翟正利等^[48]对时间 Petri 网模拟能力进行研究,首次证明了时间 Petri 网与计算科学的最高模型——图灵机有相等的模拟能力,给出了另外一种含时间因素的时延 Petri 网向时间 Petri 网的转换方法,这说明时间 Petri 网虽然形式上较为简单,但其模拟能力却并不比其他含时间因素的 Petri 网逊色。Molloy^[49]首次提出了随机 Petri 网模型,证明了如果时延 Petri 网中的时延值是一个随机变量,那么此网便是随机 Petri 网模型。文献[50]提出了有界随机 Petri 网模型,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。Marsan 等^[51]提出了某些变迁为立即变迁的广义随机 Petri 网模型。Dugan 等^[52]提出了包含抑制弧的增广随机 Petri 网模型。文献[53]和[54]通过研究在控变迁上引入控制位置及其令牌

数来影响系统的行为,从而研究序列及状态控制问题等受控 Petri 网模型。张继军等^[55]对时序逻辑电路设计的 Petri 网方法进行研究,利用 Petri 网的模拟能力和性质,提出了一种新的时序电路设计方法。宋爱波等^[56]讨论了一类受控 Petri 网的反馈控制,对受控 Petri 网的一个子类(非受控变迁子集的外延子网为 TC 网)讨论控制综合问题,给出求这类受控网中实现禁止状态避免的最大允许反馈控制的一个算法。David 等^[57]首先提出了在库所的标识数中引入实数概念的连续 Petri 网(continuous Petri net, CPN)。Balduzzi 等^[58]提出了基于一阶混杂 Petri 网的混杂系统优化与控制方法,正确构造演变图是最优求解的基础和关键,而正确判定改变 Macro 状态事件是正确构造演变图的核心问题。廖伟志等^[59]定义了一种新的混杂 Petri 网模型——广义混杂 Petri 网,增强了混杂 Petri 网模型的描述能力,并克服了一阶混杂 Petri 网模型语义错误的问题。文献[60]的研究对象是持续 Petri 网(persistent Petri net, PPN),得出了对于有界可逆的持续 Petri 网,可达图中的环能够分解为更小的、不相交的环的结论。Hiraishi^[61]基于连续 Petri 模型提出了一种新的连续 Petri 网——路由时间连续 Petri 网(routing time continuous Petri net, RTCPN)。RTCPN 用于近似一般化随机 Petri 网(generalized stochastic Petri net, GSPN)的离散状态空间,并将这个新的网模型用于 workflow 数量性能的分析上,结果显示新模型不受 workflow 实例个数的限制,扩展性更强。Janicki 等^[62]提出了使用商半群进行并发的一种新的建模理论。

(5) 将 Petri 网理论应用于各领域,形成了 Petri 网的应用研究,产生了若干新型 Petri 网及相关验证理论。Petri 网最先应用在计算机领域,例如,应用 Petri 网描述操作系统和分布式数据库系统以及对通信网络的协议进行验证与分析,利用 Petri 网研究并发程序的描述与验证、知识的 Petri 网表示以及面向对象的 Petri 网模型等。人们在应用 Petri 网解决实际问题的同时,还创建了 Petri 网模型检测理论,它提供了一个完整的系统属性的验证框架,采用状态空间搜索的方法来检测一个给定的计算模型是否满足某个用时序逻辑公式表示的特定属性。模型检测的 Büchi 自动机算法是 ω 有限自动机的一种,它包含若干初始状态和若干接收状态,每条弧上都标记有命题 p 。Bouroulet 等^[63]介绍了一个构架,用于描述和验证安全协议的属性。Lay 等^[64]利用 CPN 建模分析了一个面向事务的用于在 Internet 上初始化、修改和终止多媒体会话的会话初始协议(session initiation protocol, SIP)。Kristian 等^[65]应用 CPN 模型和分析工具建模和验证了一个路由协议 DYMO(dynamic MANET on-demand)。赵文等^[66]提出了一种 P/T 网系统的工作流过程模型过程网,给出了一组化简规则,用于验证过程模型中的死锁和同步两种结构冲突。此外, Petri 网还广泛应用于自动化、机械制造、军事指挥等学科领域,开展了基于 Petri 网的系统控制、自动化车间的建模与调度控制、自动制造系统的 Petri 网建模与分析、柔性制造系统、安全系统、商业流程、物流系统、Web 服务应用和其他各种软件系统等方面的研究。

1.2 Petri 网并行化理论与关键技术问题

Petri 网是一种可用图形表示的组合模型,具有直观、易懂的优点,对描述和分析并发现象具有独到之处。它是一种适用于多种系统的图形化、数学化建模工具,为描述和研究具有并行、异步、分布式和随机性等特征的信息加工系统提供了强有力的手段^[67-70]。由于 Petri 网是复杂系统运行过程中并发、互斥、同步最直接、自然和精确的表示,已成为描述物理世界的异步并发现象并揭示其可计算规律的重要理论和模型。但是,目前所建立的基本 Petri 网、高级 Petri 网、随机 Petri 网、时间 Petri 网等各种网系统及其理论,都着重对其结构、行为、功能、性质的静态分析与描述;而能够体现 Petri 网系统行为与功能的系统运行、模拟实现、动画演示等理论、算法与工具甚少。因此,对 Petri 网并行化进行研究,并创建其并行算法以模拟网系统的运行,具有重要的科学意义和实用价值。同时,在各领域应用 Petri 网对复杂系统进行建模日益广泛,如何应用计算机借助 Petri 网模拟复杂系统的运行或动画演示,以实现对其系统的行为与功能进行分析与验证,成为亟须解决的问题。

Petri 网系统具有并发、同步的特点,同时存在状态空间爆炸的问题,要模拟网系统的快速运行,需要解决如下关键理论与技术问题:①Petri 网系统并发过程中各部件的并行化理论;②采用哪种计算机体系结构能满足快速模拟 Petri 网系统的并行运行;③创建新的功能并行计算模型,构建 Petri 网的并行算法。随着多核计算机的发展,多核机群成为高性能计算平台及研究的重要方向,其体系结构更适合于 Petri 网系统的并发运行与仿真。对多核技术、多线程、多进程与多线程混合编程方法及其应用也是目前研究的热点。所以,对多核机群的 Petri 网系统并行算法进行研究,并将其应用到实际的 Petri 网的并行编程与实现,是本书重点研究的内容。

1.3 基于多核机群的功能并行算法

多核处理器的出现,对并行计算领域的发展带来了新的机遇和挑战。现在,当人们把程序拿到多核 CPU 上运行时,性能得不到应有的提高,甚至还有个别性能下降情况出现,多核计算机的性能没有得到真正的发挥。首先,如何有效地利用多核技术,成为多核计算机平台上程序设计人员的一个重要问题,尤其在多核机群系统上,为了使其并行程序性能达到比较理想的效果,并行编程模型和性能优化技术成为重点研究的内容;其次,多核体系结构具有多级缓存存储模型,可在并行程序编程中实现核与核之间高效的通信和计算;再次,多核计算机的多线程编程方法、