

并行与分布计算技术丛书

数字系统并行 CAD 技术

Parallel CAD Technologies
for Digital Systems

李思思 曹卫红 曹献军 彭中行 著

国防工业出版社

并行与分布计算技术丛书

数字系统
并行 CAD 技术
Parallel CAD Technologies
for Digital Systems

李思昆 曾芷德 著
曾献君 彭宇行

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

数字系统并行 CAD 技术/李思昆等著. —北京:国防工业出版社, 2000. 8

(并行与分布计算技术丛书)

ISBN 7-118-02236-5

I. 数… II. 李… III. 数字系统-并行算法-算法设计 IV. TP301.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 13739 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京奥隆印刷厂印刷

新华书店经售

开本 787×1092 1/16 印张 14 3/4 317 千字

2000 年 8 月第 1 版 2000 年 8 月北京第 1 次印刷

印数: 1—2000 册 定价: 29.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。
4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。
5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金

评审委员会



**国防科技图书出版基金
第三届评审委员会组成人员**

名誉主任委员 怀国模

主任委员 黄 宁

副主任委员 殷鹤龄 高景德 陈芳允 曾 铎

秘书长 崔士义

委 员 于景元 王小谟 尤子平 冯允成
(以姓氏笔划为序)

刘 仁 朱森元 朵英贤 宋家树

杨星豪 吴有生 何庆芝 何国伟

何新贵 张立同 张汝果 张均武

张涵信 陈火旺 范学虹 柯有安

侯正明 莫梧生 崔尔杰

并行与分布计算技术丛书编委会名单

主 编 卢锡城

副 主 编 周兴铭 汪成为 李国杰

主 审 陈火旺

编委委员 施伯乐 康继昌 尤晋元 康立山

沈隆均 李晓梅 朱传琪 王志英

杨学军 杨晓东 李思昆 王怀民

常务秘书 肖 政

总 序

并行与分布计算技术是实现高性能计算的重要技术途径。高性能计算机技术是现代科学研究、工程技术开发和大规模数据处理的关键支撑技术。没有高性能计算机,大量复杂问题的计算和事务处理就无法在合理的时间内完成。利用高性能计算机还可以解决一些仅靠理论及实验方法无法解决的问题,分析处理靠传统技术无法应付的海量数据,例如核爆炸模拟、宇宙的形成及演变过程研究、中长期天气预报、石油地质勘探、数字地球和大规模事务处理等。人类对高性能计算能力的需求永无止境。计算速度、存储容量、通信带宽是衡量高性能计算能力的重要技术指标。一些推动人类文明和社会信息化的重大挑战性问题需要百万亿次每秒、千万亿次每秒以上的计算速度,需要万亿字节以上的存储容量和万亿位每秒以上的通信能力。人们已经认识到,高性能计算与网络通信技术是战略技术,是科技创新体系的基础技术,是反映一个国家综合实力的重要标志之一。

由于种种因素的制约及使用计算机方式的改变,在单台计算机系统的性能与功能难以满足应用需求的情况下,由多个计算节点经专门设计的互连网络紧密耦合而构成的大规模并行处理计算机系统,以及由多个自主的高性能计算节点经计算机网络连接组成的分布处理环境,将成为高性能计算机领域的两大重要研究方向。并行计算和分布计算是既有区别又联系密切的两个概念,前者重在发掘计算过程中的并行性,后者则重在有效组织管理各类异构资源,挖掘功能上的并发性。随着基于先进计算机网络的分布并行计算概念的发展,并行计算与分布计算在很多应用领域正面临共同的追求目标和技术挑战,如高效、实用的计算模型、计算方法、并行机制等。

90年代以来,随着高性能计算和网络计算技术的普及,并行与分布计算技术正渗透到现代社会的各个领域,用户通过高性能网络使用各类计算资源提供的服务已成为信息化社会中计算机应用的一种重要形式。事实上,各类基于并行与分布计算的应用系统正在工业、交通、金融、科研、政府、国防等部门支撑着现代社会的高效运行。

20多年来,我国科技人员依靠自己的力量,勇于开拓,奋勇拼搏,研制成功了多种型号序列的高性能计算机系统。国防科学技术大学计算机学院是我国研制高性能计算机系统的重要基地,多种巨型计算机的研制成功及推广应用,打破了国外对我国的技术封锁,缩短了我国同发达国家技术水平上的差距,为推动我国高性能计算机及并行与分布计算技术的发展作出了重要贡献。

为促进并行与分布计算技术领域的研究,国防工业出版社组织国防科技大学计算机学院有关专家、教授撰著了本套丛书。本丛书以并行与分布计算机系统组成为纲,结合作者多年科研与工程实践以及当前研究的热点问题,涵盖了计算机系统结构、计算机网络、系统软件、应用软件、计算方法等多方面内容。本丛书由以下9本专著组成:《并行计算机体系结构技术》论述并行计算机研究和设计的理论及工程问题;《先进计算机网络技术》论

述高性能网络计算的各种关键技术;《并行操作系统原理与技术》论述并行操作系统的机制、基本原理和主要实现技术;《并行编译方法》论述并行编译系统理论、编译器的设计方法;《分布计算——网络化软件新技术》论述分布计算技术的基本概念和关键技术;《分布式数据库技术》论述统一逻辑分布式数据库技术;《数字系统并行 CAD 技术》论述数字系统并行 CAD 的理论和技術;《可扩展并行算法的设计与分析》论述可扩展并行算法的设计与分析的理论和方法;《并行与分布式可视化技术与应用》论述并行与分布式可视化的各种技术及其应用。本丛书既介绍了当前国际上该领域的最新技术发展,又汇集了作者多年的研究成果和工程经验。丛书注重可读性,适合从事该领域工作和学习的科技人员、高等院校高年级学生及研究生作为工作和学习的参考书。

本丛书被列入“九五国家重点图书选题规划”,并获得国防科技出版基金的资助。愿本丛书的出版能为并行与分布计算技术研究园地增添一朵花絮,为以后的研究工作提供有价值的参考。因时间和能力所限,书中不足之处,恳请读者指正。

并行与分布计算技术丛书编委会

前 言

并行 CAD 所研究的是应用并行计算机的超级计算功能辅助进行工程设计的技术。随着并行计算机技术和现代工程设计方法的发展,在高技术产品工程设计领域中,并行计算机的应用需求越来越迫切,应用范围越来越广泛。并行 CAD 技术的核心是并行 CAD 算法。并行算法分为数值并行算法和非数值并行算法两大类。航空飞行器设计、核武器设计、汽车设计等领域的并行 CAD 技术主要研究和应用数值并行算法。数字系统设计领域的并行 CAD 技术,主要研究和应用非数值并行算法。国际上,非数值并行算法研究和应用的深度和广度至今仍落后于数值并行算法。

数字系统,包括数字集成电路及其构成的计算机和电子设备,是信息电子类产品的主导,其发展影响到各行各业。由于集成电路的规模和复杂度急剧增长,数字系统的设计计算复杂性也急剧增大,迫切需要并行计算机的支持。早在 20 世纪 70 年代初,通用并行计算机尚未问世时,一些电子公司就开发了多种类型的并行 CAD 专用机,如并行逻辑模拟机、并行布线机等,取得了显著的应用效益。20 世纪 80 年代初以来,多种类型的通用并行计算机进入市场,虽然这些并行计算机主要面向并行数值计算应用,但是,由于数字系统 CAD 研究者以极大的热忱对数字系统并行 CAD 理论和技术进行了深入研究,提出大量并行 CAD 算法,推动了通用并行计算机在数字系统 CAD 领域的应用,促进了非数值并行算法的技术发展。

本书系统地介绍了数字系统并行 CAD 技术的理论和技术,侧重于超大规模集成电路并行 CAD 算法。力求反映国际上这一领域的最新研究成果和研究发展方向,并融合了作者的研究成果和见解。希望能对学习和研究数字系统并行 CAD 技术有所帮助。

本书首先对并行 CAD 技术发展做了综述,介绍了并行 CAD 基础知识,然后依次讲述了并行逻辑综合、并行逻辑模拟、并行电路模拟、并行测试生成、并行故障模拟、并行布局、并行布线和并行版图验证等的典型算法原理、实验结果和分析,最后,介绍了并行 CAD 技术的研究发展动向。编写时,我们注意了理论方法和专门技术并重,力求讲清并行 CAD 技术基本概念,典型算法的基本原理,以及算法应用分析。

本书第 1、3、4、7、9 章由李思昆撰写,第 5、6 章由曾芷德撰写,第 2 章由曾献君撰写,第 8 章由彭宇行撰写。全书由李思昆统稿。

感谢并行与分布处理技术丛书编委会主任卢锡城教授及全体委员的关心和指教。感谢陈书明教授向作者推荐美国依利诺易斯大学 Prithviraj Banerjee 教授的有关著作。感谢博士研究生杨强、李曦、刘逢侠、郭阳、何连跃,硕士研究生熊志辉、曹贺锋、徐春蕾、黎铁军等协助作者做的资料收集和整理工作。感谢国防工业出版社的具体指导和大力支持。

由于作者研究并行 CAD 技术经验不足,水平有限,错误和不足在所难免,恳请读者批评指正。

作 者

2000 年 3 月

内 容 简 介

本书论述数字系统并行 CAD 的理论和技術,侧重于超大规模集成电路并行 CAD 算法。全书共 9 章。第 1 章对并行 CAD 概念及技術发展做了综述,介绍了并行 CAD 基础知识。第 2 章至第 8 章依次讲述了并行逻辑综合、并行逻辑模拟、并行电路模拟、并行测试生成、并行故障模拟、并行布局、并行布线和并行版图验证等的基本原理和典型算法,实验结果及分析。第 9 章介绍了并行 CAD 技术发展方向。

并行处理是计算机发展的必然。并行 CAD 技术是工程设计各专业领域的科技人员都应熟悉的一门技术。本书可作为并行计算机及其应用相关专业领域科技人员的参考书或研究生教材。

This book aims to discuss the theories and technologies of parallel CAD for digital systems and emphasizes on the parallel algorithms for VLSI CAD. It includes 9 chapters. Chapter 1 begins with an introduction to the basic knowledge of parallel CAD and gives a summary of the concept and technology development of parallel CAD. Chapter 2 through 8 cover parallel logic synthesis, parallel logic simulation, parallel circuit simulation, parallel test generation, parallel fault simulation, parallel placement, and parallel routing respectively. For each topic, we mainly discuss the basic theory, typical algorithm, experiment results, and analysis. Chapter 9 is devoted to discussion of the future direction of parallel CAD technology.

Parallel process is inevitable with the development of computer. Parallel CAD is a key technology that engineers in computer and electric industry must master. This book may be used as a reference book for engineers or as a textbook for graduates in parallel computer design and related fields.

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 数字系统并行 CAD 的研究意义	2
1.3 数字系统并行 CAD 研究发展概况	3
1.3.1 并行 CAD 专用机的研究发展	3
1.3.2 并行 CAD 算法的研究发展	4
1.3.3 并行 CAD 开发环境的研究发展	4
1.4 数字系统设计方法论	5
1.4.1 设计描述	5
1.4.2 设计流程	6
1.4.3 VLSI 系统设计方法	7
1.5 并行体系结构基本知识	9
1.5.1 共享主存 MIMD 体系结构	10
1.5.2 分布主存 MIMD 体系结构	10
1.5.3 SIMD 并行体系结构	10
1.5.4 工作站集群体系结构	11
1.6 并行程序设计基本知识	11
1.6.1 数据并行与功能并行	11
1.6.2 细粒度并行与粗粒度并行	12
1.6.3 SIMD 和 MIMD 程序设计模型	12
1.6.4 共享主存 MIMD 程序设计基本知识	13
1.6.5 分布主存 MIMD 程序设计基本知识	14
1.6.6 SIMD 程序设计基本知识	16
1.7 并行算法基本知识	16
1.7.1 加速比	17
1.7.2 Amdahl 定律	17
1.7.3 负载平衡和调度	18
第 2 章 并行逻辑综合	20
2.1 引言	20
2.2 二级逻辑综合	20
2.2.1 二级逻辑极小化的优化目标	20
2.2.2 ESPRESSO 极小化算法	21
2.3 共享主存的并行 ESPRESSO 算法	23
2.3.1 COMPLEMENT(F, D)求反过程的并行化	23

2.3.2 并行立方扩展	25
2.3.3 REDUCE 过程的并行化	26
2.3.4 冗余项去除过程 IRREDUNDANT() 的并行化	27
2.3.5 并行 ESPRESSO 算法	27
2.4 多级逻辑综合的任务及主要方法	28
2.5 基于逻辑结构划分的并行综合方式	29
2.5.1 子逻辑结构划分原则	30
2.5.2 基于有向图的划分方式	31
2.5.3 基于无关项集合的划分	32
2.5.4 基于负载均衡的划分方式	32
2.5.5 分布主存的基于划分的并行综合算法	33
2.6 多级逻辑综合算法的并行化	35
2.6.1 基本定义	35
2.6.2 MIS 综合算法的逻辑变换过程	36
2.6.3 MIS 综合算法的并行化	37
2.7 小结	54
第 3 章 并行逻辑模拟	56
3.1 概 述	56
3.2 功能并行模拟	57
3.3 数据并行模拟	57
3.4 结构划分映射方法	58
3.4.1 概述	58
3.4.2 利用预模拟信息的电路划分方法	59
3.5 并行编译模拟方法	61
3.6 同步事件驱动并行模拟方法	61
3.6.1 概述	61
3.6.2 共享主存 MIMD 并行同步事件驱动模拟算法	62
3.7 异步事件驱动并行模拟方法	64
3.7.1 概述	64
3.7.2 保守的异步并行模拟算法	68
3.7.3 分布主存优化的异步并行模拟算法	69
3.7.4 共享主存优化的异步并行模拟算法	71
3.8 结构并行模拟方法分析	72
3.9 VHDL 并行模拟	74
3.9.1 概述	74
3.9.2 分布主存 MIMD 并行 VHDL 模拟算法	74
3.9.3 VHDL 并行模拟器 QuestII	75
第 4 章 并行电路模拟	78
4.1 引言	78
4.2 电路模拟方法	78
4.2.1 电路模拟问题	78

4.2.2 电路模拟的直接求解法	79
4.3 并行模型求解方法	82
4.3.1 概述	82
4.3.2 共享主存 MIMD 并行算法	83
4.3.3 分布主存 MIMD 并行算法	85
4.4 基于行划分的线性方程并行求解方法	86
4.4.1 概述	86
4.4.2 共享主存 MIMD 并行算法	86
4.4.3 分布主存 MIMD 并行算法	88
4.5 非线性松弛并行电路模拟方法	90
4.5.1 概述	90
4.5.2 共享主存 MIMD 并行算法	91
4.5.3 分布主存 MIMD 并行算法	93
4.6 波形松弛并行电路模拟方法	95
4.6.1 概述	95
4.6.2 共享主存 MIMD 并行算法	97
4.6.3 分布主存 MIMD 并行算法	98
4.7 小结	100
第 5 章 并行测试生成	102
5.1 串行测试生成算法	102
5.1.1 组合电路串行测试生成算法	102
5.1.2 时序电路串行测试生成算法	107
5.1.3 降低自动测试生成(ATPG)时间复杂性的对策	111
5.2 并行测试生成理论概述	113
5.2.1 基于故障诊断目标划分的并行测试生成方法	113
5.2.2 基于 ATPG 过程分解的并行测试生成方法	115
5.2.3 ATPG 算法并行化的困难	117
5.3 故障并行测试生成算法	119
5.3.1 关于故障并行的加速比	119
5.3.2 三种故障划分方法	120
5.3.3 实验结果及结论	123
5.4 电路并行测试生成算法	124
5.4.1 适于电路输出扇入锥划分的递归最小二分法	124
5.4.2 基于大功能块划分的并行算法	128
5.5 搜索空间并行 ATPG 算法	130
5.5.1 基于 PODEM 算法的搜索空间并行算法	130
5.5.2 基于 G-F 二值算法的搜索空间并行	131
第 6 章 并行故障模拟	134
6.1 经典故障模拟方法概述	134
6.1.1 字并行故障模拟	134
6.1.2 演绎故障模拟	136

6.1.3 同时故障模拟	137
6.2 经典故障模拟方法的可并行性分析	138
6.2.1 可能的基本并行模式	138
6.2.2 ATPG 与 FS 紧耦合系统	138
6.2.3 ATPG 与 FS 松耦合系统	139
6.3 基于故障并行的故障模拟算法	139
6.3.1 故障分类和划分方法	139
6.3.2 分布主存和共享主存 MIMD 并行故障模拟算法	140
6.4 测试模式并行的故障模拟算法	141
6.4.1 组合电路的测试模式并行	141
6.4.2 时序电路的测试模式并行	143
6.5 电路并行的故障模拟算法	143
6.5.1 概述	143
6.5.2 分布主存 MIMD 并行算法	143
6.5.3 共享主存 MIMD 并行算法	145
6.5.4 输出锥并行的故障模拟方法	146
6.5.5 大功能块并行的故障模拟方法	146
6.6 结论与展望	147
6.6.1 关于测试生成的并行化	147
6.6.2 关于故障模拟的并行化	148
6.6.3 展望	148
第 7 章 并行布局	150
7.1 概述	150
7.1.1 布局问题	150
7.1.2 串行布局方法	151
7.1.3 布局代价函数	151
7.1.4 定时驱动布局	152
7.1.5 并行布局方法	153
7.2 模拟退火并行布局算法	155
7.2.1 模拟退火法布局原理	155
7.2.2 模拟退火布局算法的并行方法	156
7.2.3 共享主存 MIMD 并行模拟退火布局算法	157
7.2.4 分布主存 MIMD 并行模拟退火布局算法	162
7.3 遗传并行布局算法	164
7.3.1 遗传布局原理	164
7.3.2 分布主存 MIMD 并行遗传布局算法	165
7.3.3 共享主存 MIMD 并行遗传布局算法	166
7.4 并行分级布局算法	167
7.4.1 分级布局原理	167
7.4.2 共享主存 MIMD 并行分级布局算法	167
7.4.3 分布主存 MIMD 并行分级布局算法	169
7.5 并行版图规划	170

7.5.1 概述	170
7.5.2 模拟退火并行版图规划算法	171
7.5.3 遗传并行版图规划算法	173
7.5.4 分枝限界并行版图规划算法	175
7.6 小结	178
第 8 章 并行布线与并行版图验证	179
8.1 引言	179
8.1.1 两点间布线	179
8.1.2 总体布线	179
8.1.3 通道布线	180
8.1.4 版图验证	181
8.2 并行迷路布线算法	181
8.2.1 基本思想	181
8.2.2 分布主存的 MIMD 并行算法	182
8.2.3 共享主存 MIMD 并行算法	184
8.3 通道并行布线	185
8.3.1 贪婪法	185
8.3.2 共享主存 MIMD 并行算法	185
8.3.3 共享主存 MIMD 开关盒并行布线迭代改善法	187
8.4 总体布线并行迭代法	188
8.4.1 基本思想	188
8.4.2 共享主存 MIMD 并行算法	189
8.4.3 分布主存 MIMD 并行算法	191
8.5 几何设计规则检验	192
8.5.1 基本算法	192
8.5.2 分布主存 MIMD 并行算法	193
8.5.3 共享主存 MIMD 并行算法	194
8.6 并行网表提取	194
8.6.1 问题描述	194
8.6.2 分布主存 MIMD 并行算法	195
8.6.3 共享主存 MIMD 并行算法	196
8.7 并行参数提取	197
8.7.1 问题描述	197
8.7.2 分布主存 MIMD 并行算法	198
8.7.3 共享主存 MIMD 并行算法	201
8.8 总结与展望	201
8.8.1 并行布线策略	202
8.8.2 并行版图验证策略	202
8.8.3 今后的研究方向	203
第 9 章 并行 CAD 研究发展方向	204
9.1 数字系统并行 CAD 技术发展的主要问题	204
9.2 并行 CAD 算法的可移植性研究进展	205

9.2.1 PVM 和 MPI	205
9.2.2 ProperCAD 系统	206
9.2.3 几种方法的比较	207
9.3 并行 CAD 未来发展	208
参考文献	209

Contents

CHAPTER 1 PREFACE	1
1.1 INTRODUCTION	1
1.2 MOTIVATION FOR PARALLEL CAD OF DIGITAL SYSTEM	2
1.3 RESEARCH STATUS OF PARALLEL CAD FOR DIGITAL SYSTEM	3
1.3.1 Research Status of Special Computers for Parallel CAD	3
1.3.2 Research Status of Parallel CAD Algorithms	4
1.3.3 Research Status of Parallel CAD Developing Environment	4
1.4 DESIGN METHODOLOGIES OF DIGITAL SYSTEM	5
1.4.1 Design Specification	5
1.4.2 Design Process	6
1.4.3 Design Methodologies of VLSI Systems	7
1.5 PARALLEL ARCHITECTURE BASICS	9
1.5.1 Shared Memory MIMD Architectures	10
1.5.2 Distributed Memory MIMD Architectures	10
1.5.3 SIMD Parallel Architectures	10
1.5.4 Workstation Cluster Architectures	11
1.6 PARALLEL PROGRAMMING BASICS	11
1.6.1 Data versus Functional Parallelism	11
1.6.2 Fine-grain versus Coarse-grain Parallelism	12
1.6.3 SIMD versus MIMD Programming Model	12
1.6.4 Shared Memory MIMD Programming Basics	13
1.6.5 Distributed Memory MIMD Programming Basics	14
1.6.6 SIMD Programming Basics	16
1.7 PARALLEL ALGORITHM BASICS	16
1.7.1 Speedup	17
1.7.2 Amdahl's Law	17
1.7.3 Load Balancing and Scheduling	18
CHAPTER 2 PARALLEL LOGIC SYNTHESIS	20
2.1 INTRODUCTION	20
2.2 TWO-LEVEL SYNTHESIS	20
2.2.1 Optimal Goal in Two-Level Logic Minimization	20
2.2.2 Minimization using ESPRESSO approach	21
2.3 SHARED MEMORY PARALLEL ESPRESSO ALGORITHM	23