

并行计算系列丛书

并行计算

——结构·算法·编程

(修订版)

陈国良 编著



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

并行计算系列丛书

并行计算

——结构·算法·编程
(修订版)

陈国良 编著

高等教育出版社

内 容 提 要

本书初版是教育部“高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划”的研究成果,是面向 21 世纪课程教材和教育部理科计算机应用“九五”规划教材。

本书以并行计算为主题,主要讨论并行计算的硬件基础——当代并行计算机系统及其结构模型,并行计算的核心内容——并行算法设计与并行数值算法以及并行计算的软件支持——并行政程序的设计原理与方法。本书强调融并行机结构、并行算法和并行编程为一体,着重讨论并行算法的设计方法和并行数值计算算法,力图反映本学科的最新成就和发展趋势。

全书共十五章,分为四篇:第一篇包括并行计算机的系统结构模型、当代对称多处理机、大规模并行处理机、机群系统和并行计算的性能评测;第二篇包括并行算法的一般设计策略、基本设计技术和一般设计过程;第三篇包括矩阵运算、稠密与稀疏线性方程组的求解和快速傅里叶变换;第四篇包括并行政程序设计基础、共享存储与分布存储系统并行编程以及并行政程序设计环境与工具。

从并行计算的角度,本书体系完整,内容丰富,取材新颖,可作为高等学校计算机及相关专业的本科高年级学生和研究生的教学用书,也可供计算科学与工程(Computational Science and Engineering)学科的研究生和科技人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

并行计算:结构、算法、编程/陈国良编著. —2 版.
北京:高等教育出版社,2003.8(2004 重印)
(并行计算系列丛书)
ISBN 7-04-013307-5

I. 并... II. 陈... III. 并行计算机-高等学校-
教材 IV. TP338.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 058265 号

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100011
总 机 010-82028899

购书热线 010-64054588
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店北京发行所
印 刷 北京中科印刷有限公司

开 本 787×1092 1/16
印 张 29.5
字 数 570 000

版 次 1999 年 10 月第 1 版
2003 年 8 月第 2 版
印 次 2004 年 7 月第 2 次印刷
定 价 36.50 元

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

作者介绍



陈国良,中国科学技术大学教授,博士生导师,中国科学院院士,1938年6月生于安徽省颍上县,1961年毕业于西安交通大学无线电系计算机专业。1981—1983年在美国普度大学作访问学者,1984年至今曾多次应邀赴东京大学、普度大学、澳大利亚国立大学、新南威尔士大学、昆士兰大学、格里福斯大学、堪萨斯城市大学、依阿华大学、威斯康星大学、Maharish 国际大学、香港理工大学、澳门大学、北京大学、国防科技大学等讲学交流。现任国家高性能计算中心(合肥)主任,国际高性能计算(亚洲)常务理事,中国计算机学会开放系统专业委员会副主任,中国数学会计算数学并行计算专业委员会委员。曾任国家教育部高等学校计算机科学与技术教学指导委员会副主任,全国高等教育电子、电工和信息类专业自考指导委员会副主任,安徽省高校计算机基础课程教学指导委员会副主任,中国计算机学会理事,安徽省计算机学会理事长,全国自然科学名词审定委员会委员,中国科学技术大学计算机系主任。

陈国良教授长期从事计算机科学技术的研究与教学工作。主要研究领域为并行算法、并行计算机体系结构和智能计算等。先后承担 10 多项国家 863 计划、国家攀登计划、国家自然科学基金、国家 973 计划、教育部博士点基金等科研项目。取得了多项被国内外广泛引用、达国际先进水平的科研成果,发表论文 200 多篇,出版著作 9 部、译著 5 部,参与主编计算机类辞典、词汇 5 部,主审、主编计算机类各种教材 8 部。曾获国家科技进步二等奖、国家级教学成果二等奖、国家教育部科技进步一等奖、中国科学院科技进步二等奖和自然科学三等奖、全国优秀教材一等奖、全国学术著作优秀奖、安徽省科技进步二等奖、国家科委高技术研究与发展计划三等奖、国家教委科技进步三等奖共 18 项,并获 2001 年度“国家 863 计划 15 周年先进个人重要贡献奖”。

陈国良教授在中国科学技术大学执教 30 多年。长期以来,围绕着并行算法的教学与研究,逐渐形成了一套完整的“算法理论—算法设计—算法实现—算法应用”的并行算法学科体系,营造了我国并行算法类的教学基地。他先后指导培养研究生 100 多名,其中博士生 60 名,为我国培养了一批在国内外从事算法研究的高级人才。曾荣获 1998 年度安徽省教育系统劳动模范、安徽省优秀教师称号、2001 年度宝钢教育基金优秀教师特等奖和 2003 年度第一届高等学校教学名师奖。

陈国良教授是我国非数值并行算法研究的学科带头人。他率先创建的我国第一个国家高性能计算中心是我国并行算法研究、环境科学与工程计算软件的重要基地,在学术界和教育界有一定的影响和地位。

序 言

高性能计算机是一个国家经济和科技实力的综合体现,也是促进经济、科技发展,社会进步和国防安全的重要工具,已成为世界各国竞相争夺的战略制高点。一些发达国家纷纷制定战略计划,提出很高目标,投入大量资金,加速研究开发步伐。多年来,随着大规模集成电路技术的不断进步,以多 CPU 为基础的高性能并行计算机得到了迅速的发展,其高端系统正向百万亿次、千万亿次迈进。我国近十年来,对高性能并行计算的研究开发也给予了很大重视,取得了长足进步和可贵经验,研制出了具有相当水平的并行机系统,但与发达国家相比,差距仍然甚大,在高性能并行计算的应用开发与相关的人才培养教育方面尤显不足。如何使高性能并行机系统深入充分地 in 国民经济、科研和社会应用的发展中发挥作用,实为当务之急,引起人们的普遍关心。

由中国科技大学陈国良教授主编的这套丛书,正适应了我国高性能并行计算研究、开发、应用、教育之需。本丛书由《并行算法的设计与分析》、《并行计算机体系结构》和《并行算法实践》三大部分组成,而以《并行计算——结构·算法·编程》为全丛书之提要。该丛书以并行计算为主题,对并行计算的硬件平台(当代主流并行计算机系统)、并行计算的理论基础(并行算法的设计与分析)和并行计算的软件支撑(并行程序设计)全面系统地展开了讨论,内容丰富,取材新近,具有相当的深度和广度,涵盖了并行计算机体系结构和并行算法的理论、设计和实践的各个方面,是国内外不多见的优秀著作。

陈国良教授是国家高性能计算中心(合肥)主任,长期从事并行算法和并行计算机体系结构的研究,本套丛书是作者几十年从事教学与科研工作的结晶,是目前国内该领域内容涵盖最为全面的系列著作。它的出版必将对进一步推动我国并行计算学科的发展与应用推广产生深远的影响。

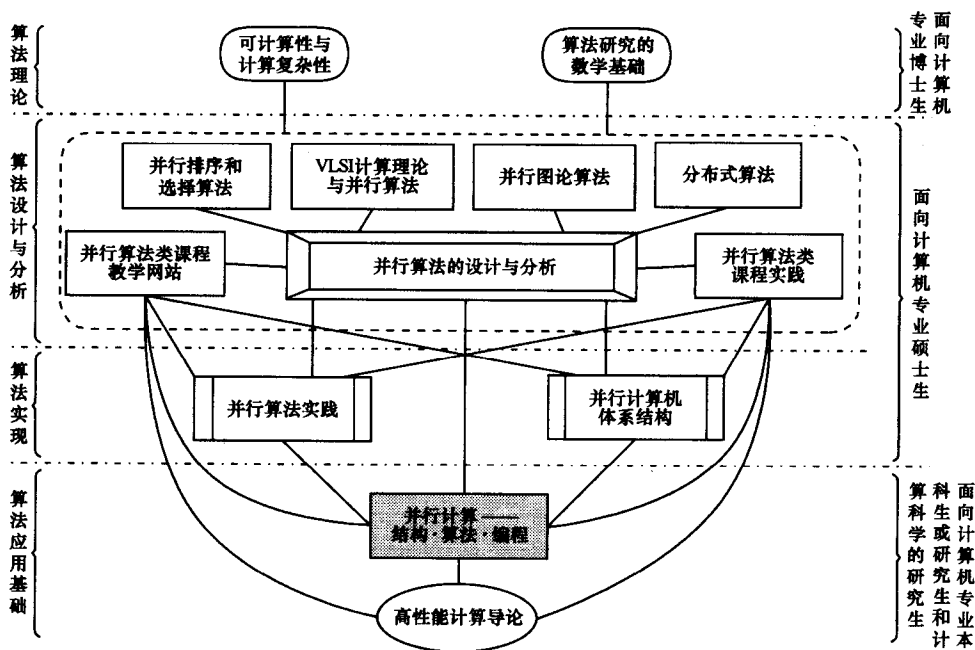
张致祥

2002 年 8 月

修订版前言

并行计算系列丛书 并行计算系列丛书包括《并行计算——结构·算法·编程》(修订版)、《并行算法的设计与分析(修订版)》、《并行计算机体系结构》和《并行算法实践》。

该丛书是并行算法类教学体系中的核心内容,而《并行计算——结构·算法·编程》处于并行算法类教学体系中的算法应用基础层次,面向计算机专业本科高年级学生或从事计算科学的研究生,是并行计算丛书中的第一本。



修订说明 《并行计算——结构·算法·编程》自初版以来受到了全国计算机专业和面向科学与工程计算专业广大读者的欢迎。根据这几年的具体教学实践和计算机科学技术的发展,考虑到整个系列丛书的内容统一协调,同时借本书重新排版之际对该书做了简单的修订。主要修订部分为:①改写了第一篇的第一章、第二章和第三章,其中删去了第一章的1.1.3节,并在1.2.2节中加入了静态互连网络的嵌入一小节;将第二章的2.2.2节“机群型大规模并行机 SP2”代之以“Intel ASCI Option Red MPP 系统”,而将其内容移至修订后的第2.3节“机群系

统”中,同时将第 2.4 节“国产曙光系列并行计算机系统”的内容移至丛书之《并行计算机体系结构》的第 1.6 节中;在第三章中增加了“并行计算机的一些基本性能指标”(第 3.1 节),同时将原 3.2 节“可扩放性评测标准”进行了精简,更详细的内容请参见丛书之《并行计算机体系结构》的第 2.3.2 节。② 在第二篇中,将第四章中第 4.2.5 节“C³ 模型”的内容移至丛书之《并行算法的设计与分析》的第 1.2.2 节中。③ 改写了第四篇的第十二章、第十三章和第十五章,其中将原第十三章的 13.1.1 节“五种并行编程风范”移至第十二章的 12.1 节之下,以及将 13.2 节“并行程序设计模型”移至第十二章而变为 12.6 节,同时仍保留了进程、线程、同步和通信的内容;第十三章的标题改为“共享存储系统并行编程”,除保留了原第十三章的共享存储并行编程和 ANSI X3H5 和 POSIX 内容外,重新改写和充实了 OpenMP 编程内容,同时在章末给出了“OpenMP 运行库例程”附录;对于第十五章,除了保留原有内容外,重新改写和充实了“并行程序调试”和“并行程序性能分析”的内容。④ 补充了某些新的参考文献和“专业术语中英对照及索引”,并对全书的错误进行了改正,但有些错误可能仍然存在。

修订后的建议讲授章节及其学时分配如下:

章节名	建议讲授节次	建议学时
第一章	1.1.2,1.2.2,1.2.3,1.2.4,1.3.1,1.3.2	4
第二章	2.1.1,2.2.1,2.3.1,2.3.2	4
第三章	3.2,3.3	4
第四章	4.2	4
第五章	5.1.1,5.2.1,5.2.3,5.3.2	2
第六章	6.1,6.2.1,6.3.1,6.4.1,6.5.1	4
第七章	7.1,7.2,7.3,7.4.1,7.5	2
第八章	8.1,8.3	2
第九章	9.1,9.4.1,9.4.2,9.4.3,9.4.4	4
第十章	10.3.1,10.3.2,10.3.3,10.4.2,10.4.3,10.4.4,10.4.5,10.4.6	6
第十一章	11.1.2,11.1.4,11.3.1,11.3.2	4
第十二章	12.1.3,12.3,12.6	2
第十三章	13.1.1,13.2.2,13.3	4
第十四章	14.2,14.5	6
第十五章	15.2,15.3,15.4,15.5	4

中国科学技术大学计算机系的徐云副教授以及曾修读过该课程的一些同学多次参加了修订本书的讨论,提出了很多宝贵的意见。孙广中博士和钟诚博士具体帮助我修订了此书,对于他们的良好愿望和辛勤的劳动,作者在此一并表示感谢。

陈国良

中国科学技术大学 计算机系
国家高性能计算中心(合肥)

2003 年 4 月

初 版 前 言

写作背景 近几年来,世界上和我国高性能并行计算机的发展取得长足进展,每秒数百亿次、数千亿次乃至数万亿次计算能力的高端并行机已相继研制成功,使得以前许多无法求解和研究的问题现在已经成为可能。随着计算技术和计算方法的飞速发展,当今几乎所有学科均趋向量化和精确化,从而产生了诸如计算物理学、计算化学、计算材料学、计算力学、计算生物学、计算气象学和计算电子学等新兴学科,在世界上逐渐形成了所谓计算科学与工程 CSE(Computational Science and Engineering)的计算性学科分支。计算,增强了人们从事科学研究的能力,拓宽了人们洞察自然的视野,加速了科技转化为生产力的过程,深刻地改变着人类认识世界和改造世界的方法和途径。计算科学(Computational Sciences),已经和传统的理论科学与实验科学并列成为第三门学科,它们彼此相辅相成地推动着人类科技发展和社会进步。

在此情况下,为了适应高性能并行机迅速发展的形势,满足国家培养面向 21 世纪高科技人才的需求,在高校开设高性能并行计算(High-Performance Parallel Computing)课程已提到了议事日程。为此,国家教育部高等学校计算机科学技术教学指导委员会经过多次讨论,把《并行计算》这本教材列为国家“九五”教材规划,并最后审定为“面向 21 世纪课程教材”。

篇章内容 本书以并行计算为主题,主要讨论并行计算的硬件基础——当代并行计算机系统及其结构模型,并行计算的核心内容——并行算法设计与并行数值算法以及并行计算的软件支持——并行程序的设计原理与方法。本书强调融并行机结构、并行算法和并行编程为一体,着重讨论并行算法的设计方法和并行数值算法,力图反映本学科的最新成就和发展趋势。

全书共十五章,分为四篇:第一篇为并行计算硬件基础,包括并行计算机系统及其结构模型(第一章),当代并行机系统 SMP、MPP 和 COW(第二章),并行计算性能评测(第三章);第二篇为并行算法的设计,包括并行算法的设计基础(第四章),并行算法的一般设计方法(第五章),并行算法的基本设计技术(第六章),并行算法的一般设计过程(第七章);第三篇为并行数值算法,包括基本通信操作(第八章),稠密矩阵运算(第九章),线性方程组的求解(第十章),快速傅里叶变换(第十一章);第四篇为并行程序设计,包括并行程序设计基础(第十二章),并行程序设计模型和共享存储系统编程(第十三章),分布存储系统并行编程(第十四章),并行程序设计环境与工具(第十五章)。书中取材新颖,内容丰富,体系完整,基本上包括了并行计算学科中的主要研究内容和主要研究方面。

使用方法 国家教育部计算机科学与技术教学指导委员会,将并行计算课程定位在高等学校计算机及相关专业本科高年级学生和研究生层次上。学生应在学习过计算机体系

结构、操作系统、编译原理以及最好学习过算法设计与分析(至少应学习过数据结构和图论)等课程之后学习本课程。全书内容可根据不同的教学对象进行不同的组合。但根据本课程的定位,作为必须讲授和最低 60 学时的教学要求,建议讲授章节和相应的学时分配如下:

章 名	建议讲授节次	建议学时
第一章	1.1.1,1.1.2,1.2.2,1.2.3,1.2.4,1.3.1,1.3.2	4
第二章	2.1.1,2.2.1,2.3.1,2.4.1,2.4.2	4
第三章	3.1,3.2	4
第四章	4.2.1~4.2.6	4
第五章	5.1.1,5.2.1,5.2.3,5.3.2	2
第六章	6.1,6.2,6.5	4
第七章	7.1,7.2,7.4.1,7.5	2
第八章	8.1,8.3,8.4	2
第九章	9.1,9.3,9.4	4
第十章	10.1,10.2,10.3,10.4.2~10.4.4,10.4.6	6
第十一章	11.1.2~11.1.4,11.3.1,11.3.2,11.3.4	4
第十二章	12.1.1,12.1.3,12.3,12.5.3	2
第十三章	13.1.2,13.2,13.3.2	4
第十四章	14.2,14.5	6
第十五章	15.2,15.3.1,15.3.2	4

书中其余部分的内容可由任教老师任选,而带 * 号的章节是建议阅读的,它们或是预备性知识(希望不熟悉的读者课前预习),或是深入研究性内容(鼓励面向研究的读者深入阅读)。每章之末均有小结和导读(指导读者进一步追踪阅读),并附有适量的、密切结合课文的以及拓宽讲授内容的综合性习题。

为了配合讲授内容,有条件的学校应开设 SMP 平台、MPP 平台和 COW 平台上的实验课程,每种平台至少安排 2~3 个小型综合练习程序,并提倡利用 Internet 浏览本书末提供的有关 Web 网址中的内容。确有困难的学校,应至少安排 COW 环境下的分布计算练习程序。

为了增强本书的好用性,撰写时尽量分点叙述、纲目清晰。全书除了提供必要的参考文献外,还开列了并行和分布计算 Web 网址、算法清单、示范程序清单以及术语中-英对照及索引。尽管后者在使用上尚不如英文索引来得方便,但毕竟在一定程度上方便了读者的查阅。

相关读物 本书在撰写时力图自成完备系统,但由于本书内容涉及面较广,所以读者

参阅必要的相关教材是有益处的。特别是,在可缩放并行计算方面,建议配合阅读 Kai Hwang 和 Zhiwei Xu 的新著 **Scalable Parallel Computing: Technology, Architecture, Programming**(McGraw-Hill,1998);在并行算法方面,建议配合阅读陈国良编著的《并行算法的设计与分析》(高等教育出版社,1994);在设计和构造并行程序方面,建议配合阅读 I. Foster 的著作 **Designing and Building Parallel Programs: Concepts and Tools for Parallel Software Engineering** (Addison-Wesley,1995);在数值并行算法方面,建议配合阅读 M. J. Quinn 的著作 **Parallel Computing: Theory and Practice** (McGraw-Hill,1994)和 V. Kumar 等的著作 **Introduction to Parallel Computing: Design and Analysis of Algorithms**(Benjamin/Cummings,1994)。

感谢 本书在撰写中,曾直接或间接地引用了许多专家、学者的文献,特别是对我国计算机学科发展卓有贡献的世界著名计算机结构学家黄铠教授,他非常关心国内计算机教育事业,及时向我们提供了他和徐志伟教授的著名新作 **Scalable Parallel Computing**,从而丰富了本书的内容,作者尤为感谢。书稿付梓前承蒙清华大学王鼎兴教授抱病进行了审校,作者倍加感谢。他的严谨治学作风和顽强拼搏精神激励和鞭策作者努力把书稿写好、改好。

中国科学技术大学计算机系纪金龙老师、安虹和计永昶博士为本书的第十四章和第十五章的写作提供了丰富的素材,并帮助我完成第四篇的教学工作,作者甚为感谢。

中国科学技术大学计算机系的历届学生们,在听取我的讲授中,曾提出过很多可贵意见,不断充实和完善了书稿的内容,特别是张青山、孙伟、严宝拾、吴明桥、侯海龙和陈志辉等同学完成了本书的计算机绘图工作。对于他们的辛勤劳动和良好的愿望,作者深感欣慰和谢意。

最后,感谢国家高性能计算中心(合肥)和中国科学技术大学计算机系为本书的写作提供了良好的条件。

国家教育部将《并行计算》一书审定为“面向 21 世纪课程教材”,作者感到荣幸。但并行计算涉及学科很多,内容十分广泛,加上作者学识有限,写作时间仓促,书中错误和片面之处在所难免,恳请读者不吝批评指正。

陈国良

中国科学技术大学计算机系
国家高性能计算中心(合肥)

1999 年 5 月

目 录

第一篇 并行计算硬件基础

第一章 并行计算机系统及其结构模型	(3)	2.3.2 工作站机群 COW	(64)
1.1 并行计算	(4)	* 2.3.3 Berkeley 的 NOW 计划	(68)
1.1.1 并行计算与计算科学	(4)	2.4 小结和导读	(73)
1.1.2 当代科学与工程问题的 计算需求	(4)	习题	(75)
1.2 并行计算机系统互连	(8)	第三章 并行计算性能评测	(77)
1.2.1 系统互连	(8)	3.1 并行计算机的一些基本 性能指标	(78)
1.2.2 静态互连网络	(9)	3.1.1 CPU 和存储器的某些基本 性能指标	(78)
1.2.3 动态互连网络	(13)	3.1.2 通信开销	(80)
1.2.4 标准互连网络	(17)	3.1.3 机器的成本、价格与 性能/价格比	(81)
1.3 并行计算机系统结构	(22)	3.2 加速比性能定律	(83)
1.3.1 并行计算机结构模型	(22)	3.2.1 Amdahl 定律	(83)
1.3.2 并行计算机访存模型	(26)	3.2.2 Gustafson 定律	(84)
* 1.3.3 并行计算机存储组织	(30)	3.2.3 Sun 和 Ni 定律	(86)
1.4 小结和导读	(34)	3.2.4 有关加速的讨论	(87)
习题	(35)	3.3 可扩展性评测标准	(88)
第二章 当代并行计算机系统介绍	(39)	3.3.1 并行计算的可扩展性	(88)
2.1 共享存储多处理机系统	(40)	3.3.2 等效率度量标准	(89)
2.1.1 对称多处理机 SMP 结构特性	(40)	3.3.3 等速度度量标准	(90)
* 2.1.2 CC- NUMA Origin 2000 超级 服务器	(41)	3.3.4 平均延迟度量标准	(92)
2.2 分布存储多计算机系统	(48)	3.3.5 有关可扩展性标准的讨论	(94)
2.2.1 大规模并行处理机 MPP 结构特性	(49)	* 3.4 基准测试程序	(95)
* 2.2.2 ASCI Option Red MPP 系统	(53)	3.4.1 基本的测试程序	(95)
2.3 机群系统	(57)	3.4.2 数学库测试程序	(96)
2.3.1 大规模并行处理系统 MPP 机群 SP2	(58)	3.4.3 并行测试程序	(97)
		3.5 小结和导读	(98)
		习题	(99)

第二篇 并行算法的设计

第四章 并行算法的设计基础	(103)	6.2 分治设计技术	(144)
* 4.1 并行算法的基础知识	(104)	6.2.1 双递归并网络	(145)
4.1.1 并行算法的定义和分类	(104)	6.2.2 凸壳问题	(146)
4.1.2 并行算法的表达	(105)	6.3 平衡树设计技术	(149)
4.1.3 并行算法的复杂性度量	(105)	6.3.1 求取最大值	(149)
4.1.4 并行算法中的同步与通信	(107)	6.3.2 计算前缀和	(149)
4.2 并行计算模型	(108)	6.4 倍增设计技术	(151)
4.2.1 PRAM 模型	(109)	6.4.1 表序问题的计算	(151)
4.2.2 异步 PRAM 模型	(110)	6.4.2 求森林的根	(152)
4.2.3 BSP 模型	(111)	6.5 流水线设计技术	(153)
4.2.4 logP 模型	(113)	6.5.1 一维心动阵列上的 DFT 计算	(154)
4.2.5 对 BSP 和 logP 的评注	(115)	6.5.2 一维心动阵列上的 卷积计算	(155)
4.3 小结和导读	(117)	6.6 小结和导读	(156)
习题	(118)	习题	(158)
第五章 并行算法的一般设计策略	(123)	第七章 并行算法的一般设计过程	(160)
5.1 串行算法的直接并行化	(124)	7.1 PCAM 设计方法学	(161)
5.1.1 设计策略描述	(124)	7.2 划分	(162)
5.1.2 快排序算法的并行化	(124)	7.2.1 域分解	(162)
5.2 从问题描述开始设计并行算法	(127)	7.2.2 功能分解	(163)
5.2.1 串匹配算法	(127)	7.2.3 划分判据	(163)
* 5.2.2 KMP 串行串匹配算法	(128)	7.3 通信	(164)
5.2.3 并行串匹配算法的 设计思路	(130)	7.3.1 局部通信	(164)
5.3 借用已有算法求解新问题	(131)	7.3.2 全局通信	(166)
5.3.1 设计策略描述	(131)	7.3.3 非结构化、动态和 异步通信	(167)
5.3.2 利用矩阵乘法求所有点对间 最短路径	(132)	7.3.4 通信判据	(167)
5.4 小结和导读	(135)	7.4 组合	(167)
习题	(136)	7.4.1 增加粒度	(168)
第六章 并行算法的基本设计技术	(139)	7.4.2 保持灵活性和减少软件 工程成本	(170)
6.1 划分设计技术	(140)	7.4.3 组合判据	(171)
6.1.1 均匀划分技术	(140)	7.5 映射	(171)
6.1.2 方根划分技术	(141)	7.5.1 负载均衡算法	(172)
6.1.3 对数划分技术	(142)	7.5.2 任务调度算法	(173)
6.1.4 功能划分技术	(143)		

7.5.3 映射判据	(174)	习题	(175)
7.6 小结和导读	(174)		

第三篇 并行数值算法

第八章 基本通信操作	(183)	10.1 三角形方程组的求解	(227)
8.1 选路方法与开关技术	(184)	10.1.1 基本术语	(227)
8.1.1 选路方法	(184)	10.1.2 上三角方程组的求解	(228)
8.1.2 开关技术	(186)	10.2 三对方程组的求解	(230)
8.2 单一信包一到一传输	(188)	10.2.1 三对方程组直接 求解法	(230)
8.3 一到多播送	(188)	10.2.2 三对方程组奇偶归约 求解法	(231)
8.3.1 使用 SF 进行一到多播送	(188)	10.3 稠密线性方程组的求解	(233)
8.3.2 使用 CT 进行一到多播送	(190)	10.3.1 有回代的高斯消去法	(233)
8.4 多到多播送	(191)	10.3.2 无回代的高斯-约旦法	(237)
8.4.1 使用 SF 进行多到多播送	(192)	10.3.3 迭代求解的 高斯-赛德尔法	(239)
8.4.2 使用 CT 进行多到多播送	(193)	10.4 稀疏线性方程组的求解	(241)
8.5 小结和导读	(195)	10.4.1 稀疏矩阵的存储方式	(241)
习题	(197)	10.4.2 雅可比迭代法	(243)
第九章 稠密矩阵运算	(201)	10.4.3 高斯-赛德尔迭代法	(247)
9.1 矩阵的划分	(202)	10.4.4 超松弛迭代法	(249)
9.1.1 带状划分	(202)	10.4.5 多重网格法	(249)
9.1.2 棋盘划分	(202)	10.4.6 共轭梯度法	(251)
9.2 矩阵转置	(204)	10.5 小结和导读	(256)
9.2.1 棋盘划分的矩阵转置	(204)	习题	(257)
9.2.2 带状划分的矩阵转置	(207)		
9.3 矩阵-向量乘法	(208)	第十一章 快速傅里叶变换	(260)
9.3.1 带状划分的矩阵-向量 乘法	(208)	11.1 离散傅氏变换	(261)
9.3.2 棋盘划分的矩阵-向量 乘法	(210)	* 11.1.1 预备知识	(261)
9.4 矩阵乘法	(212)	11.1.2 离散傅里叶变换	(262)
9.4.1 简单并行分块乘法	(212)	11.1.3 离散傅里叶逆变换	(263)
9.4.2 Cannon 乘法	(214)	11.1.4 离散傅氏变换的 蝶式计算	(264)
9.4.3 Fox 乘法	(217)	* 11.2 快速傅氏变换串行算法	(266)
9.4.4 DNS 乘法	(217)	11.2.1 串行 FFT 迭代算法	(266)
9.5 小结和导读	(222)	11.2.2 串行 FFT 递归算法	(267)
习题	(223)	11.3 并行 FFT 算法	(270)
第十章 线性方程组的求解	(226)		

11.3.1 SIMD-MC ² 上 FFT 算法	(270)	11.3.4 MIMD-DM 上 FFT 算法	(275)
11.3.2 SIMD-BF 上 FFT 算法	(272)	11.4 小结和导读	(279)
11.3.3 SIMD-CC 上 FFT 算法	(274)	习题	(280)

第四篇 并行程序设计

第十二章 并行程序设计基础	(285)	习题	(319)
12.1 并行程序设计概述	(286)	第十三章 共享存储系统并行编程	(322)
12.1.1 串行程序设计与并行 程序设计	(286)	13.1 基于共享变量的共享存储 并行编程	(323)
12.1.2 并行程序设计环境与 工具	(287)	13.1.1 共享存储并行编程的 基本问题	(323)
12.1.3 并行程序设计方法	(288)	13.1.2 共享存储编程环境	(324)
12.1.4 并行编程风范	(290)	13.2 早期共享存储并行编 程模型	(324)
* 12.2 进程	(291)	13.2.1 ANSI X3H5 共享 存储模型	(324)
12.2.1 进程的基本概念	(291)	13.2.2 POSIX 线程模型	(327)
12.2.2 进程的并行执行	(294)	13.3 OpenMP 编程简介	(328)
12.2.3 进程的相互作用	(295)	13.3.1 OpenMP 概述	(329)
12.3 线程	(297)	13.3.2 OpenMP 编程风格	(329)
12.3.1 线程的基本概念	(297)	13.3.3 OpenMP 编程要素	(330)
12.3.2 线程的管理	(298)	13.3.4 OpenMP 计算实例	(339)
12.3.3 线程的同步	(299)	13.3.5 运行库例程与环境变量	(341)
* 12.4 同步	(299)	13.4 小结和导读	(341)
12.4.1 原子与互斥	(300)	习题	(342)
12.4.2 高级同步结构	(300)	附录 OpenMP 运行库例程	(345)
12.4.3 低级同步原语	(302)	第十四章 分布存储系统并行编程	(348)
12.5 通信	(303)	14.1 基于消息传递的并行编程	(349)
12.5.1 影响通信系统性能的 因素	(304)	14.1.1 SPMD 并行程序	(349)
12.5.2 低级通信支持	(305)	14.1.2 MPMD 并行程序	(350)
12.5.3 TCP/IP 通信协议组简介	(307)	14.2 MPI 并行编程	(351)
12.6 并行程序设计模型	(310)	14.2.1 最基本的 MPI	(352)
12.6.1 计算 π 样本程序	(310)	14.2.2 群体通信	(355)
12.6.2 隐式并行模型	(311)	14.2.3 通信体	(357)
12.6.3 数据并行模型	(313)	14.2.4 导出数据类型	(358)
12.6.4 消息传递模型	(314)	14.2.5 点到点通信	(359)
12.6.5 共享变量模型	(315)		
12.6.6 并行程序设计模型比较	(317)		
12.7 小结和导读	(318)		

* 14.3 PVM 并行编程	(364)	15.2.4 代码生成	(403)
14.3.1 PVM 概貌	(365)	15.3 并行程序调试	(403)
14.3.2 PVM 消息传递库	(365)	15.3.1 并行程序调试的方法与 步骤	(404)
14.4 基于数据并行的并行编程	(368)	15.3.2 并行程序的调试技术	(406)
14.4.1 数据并行模型的特点	(368)	15.3.3 并行程序的性能调试	(407)
14.4.2 数据并行编程的 基本问题	(369)	15.4 并行程序性能分析	(408)
14.5 HPF 并行编程	(370)	15.4.1 并行程序的性能预测	(408)
14.5.1 HPF 的语言特点	(370)	15.4.2 并行程序的性能监控	(410)
14.5.2 HPF 的数据并行机制	(371)	15.4.3 并行程序的性能可视化	(411)
14.5.3 HPF 使用中的若干问题	(375)	15.5 图形化并行程序集成 开发环境	(413)
14.6 小结和导读	(378)	15.5.1 并行程序的可视化 设计环境与工具	(413)
习题	(379)	15.5.2 图形应用开发环境 GRADE 的组成	(414)
附录一 MPI 的函数的 C 语言说明	(384)	15.5.3 GRADE 中开发并行 程序过程	(414)
附录二 MPI 的函数的 Fortran 语言 说明	(386)	15.6 小结和导读	(416)
第十五章 并行程序设计环境与工具	(389)	习题	(417)
* 15.1 软件工具与环境	(390)	算法索引	(420)
15.1.1 编码工具	(390)	表格索引	(422)
15.1.2 软件工程工具	(391)	示范程序索引	(423)
15.1.3 集成工具	(391)	参考文献	(424)
15.1.4 将来的工具与环境	(392)	并行与分布计算 Web 网址	(434)
15.2 并行编译器	(393)	专业术语中英对照及索引	(440)
15.2.1 编译及其并行化	(394)		
15.2.2 相关分析	(396)		
15.2.3 代码优化	(398)		

第一篇 并行计算硬件基础

第一章 并行计算机系统及其结构模型

第二章 当代并行计算机系统介绍

第三章 并行计算性能评测

这一篇主要研究并行计算的硬件基础,包括并行计算机系统及其结构模型(第一章)、当代并行计算机系统(第二章)以及并行计算的性能评测(第三章)。但它与高级计算机体系结构课程不一样,本篇只是从并行计算的角度,介绍一些与并行计算直接相关的并行计算机系统方面的知识,欲深入学习并行计算机体系结构的读者可参阅丛书之三《并行计算机体系结构》[193]。

本篇的第一章,首先从当代科学与工程问题的计算需求出发,简单介绍并行计算与计算科学;接着讨论并行系统互连方式与技术;最后落实到并行计算机的结构模型与存储模型的介绍上,希望这些抽象的模型能够成为计算工作者与工程师的界面。第二章,将从并行机中抽出当代流行的一类可扩放的并行机加以简单介绍,它们包括共享存储的多处理机系统和分布存储的多计算机系统以及机群系统,这些都是并行计算工作者的最基本的硬件环境。第三章,将讨论并行计算性能评测问题,包括并行机基本性能评测、衡量并行计算性能的加速比、可扩放性以及基准测试程序,它们都是计算工作者、计算机厂商和计算机用户共同感兴趣的问题,而且能被一致认可和普遍接受。
