



面向21世纪课程教材
Textbook Series for 21st Century

并行计算系列丛书

并行计算

——结构·算法·编程

(第3版)

陈国良编著



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

内容提要

本书是并行计算系列丛书之开篇,它以并行计算为主题,围绕并行计算机、并行算法和并行程序设计展开讨论,强调融并行计算机体系结构、数值与非数值并行算法设计以及并行程序设计为一体,着力构建并行计算“结构—算法—编程—应用”完整的学科体系与系统的课程框架,在着重讨论并行计算学科基础核心内容的同时,也力图反映本学科的新近成就和发展趋势。

全书内容按照“并行结构—并行算法—并行编程—并行应用”的整体框架进行规划,分为四篇。第一篇为并行计算硬件平台:并行计算机,包括并行计算与计算机科学、并行计算机结构模型、系统互连与基本通信操作、典型并行计算机系统介绍和并行计算性能评测。第二篇为并行计算理论基础:并行算法,分为上篇和下篇,其中上篇为并行算法设计,包括并行算法的基础知识与并行计算模型、并行算法基本设计策略、常用设计技术和一般设计过程;下篇为并行数值算法,包括稠密矩阵运算、线性方程组求解、快速傅里叶变换和数值计算的基本支撑技术。第三篇为并行计算软件支撑:并行编程,包括并行程序设计基础、共享与分布存储系统并行编程以及并行程序设计环境与工具。附录篇为并行计算发展动力:并行应用,包括并行应用相关知识、大气模型应用综合练习、数值计算软件包和工具以及三维傅里叶变换、并行图像特征提取和水平井射孔渗流计算等三个应用实例。

本书体系完整,框架清晰,内容丰富,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教学用书,也可供从事高性能并行计算工作的科技人员阅读参考。

本书初版曾获 2000 年度中国高校科学技术进步一等奖,该课程教学曾获 2009 年度国家级教学成果二等奖。

图书在版编目(CIP)数据

并行计算:结构·算法·编程/陈国良编著.—3版.—北京:高等教育出版社,2011.6

(并行计算系列丛书)

ISBN 978-7-04-033742-6

I. ①并… II. ①陈… III. ①并行算法-高等学校-教材

IV. ①TP301.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 179505 号

策划编辑 张海波

责任编辑 张海波

封面设计 张 志

版式设计 王艳红

责任校对 张小楠

责任印制 朱学忠

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 100120

印 刷 涿州市星河印刷有限公司

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 37.5

字 数 720 千字

插 页 1

购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

<http://www.hep.com.cn>

网上订购 <http://www.landraco.com>

<http://www.landraco.com.cn>

版 次 2003 年 8 月第 1 版

2011 年 6 月第 3 版

印 次 2011 年 6 月第 1 次印刷

定 价 56.00 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

物 料 号 33742-00



面向 21 世纪课程教材

本书初版曾获 2000 年度中国高校科学技术进步一等奖

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,首届高等学校国家教学名师。1938年6月生于安徽省颍上县,1961年毕业于西安交通大学计算数学与计算仪器专业。1981—1983年在美国普渡大学做访问学者,1984年至今曾多次应邀赴东京大学、京都大学、普渡大学、澳大利亚国立大学、格里福斯大学、堪萨斯城市大学、艾奥瓦大学、香港城市大学、香港理工大学、澳门大学等讲学交流。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,教育部高等学校计算机基础课程教学指导委员会主任,中国计算机学会理事和高性能计算专业委员会主任等。

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等。

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和高性能计算及其应用等。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。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、全国优秀教材一等奖、水利部大禹一等奖、安徽省科技进步二等奖等20余项,并获2001年度“国家863计划15周年先进个人重要贡献奖”和2009年度安徽省重大科技成就奖。

长期以来,陈国良教授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**”的并行算法学科体系,提出了“**并行机结构—并行算法—并行编程—并行应用**”一体化的并行计算研究方法,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,为我国培养了一批在国内外从事算法研究和教学的高级人才。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、2003年度第一届高等学校教学名师奖。所带领的“并行计算相关课程教学团队”2009年被评为国家级教学团队。

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。

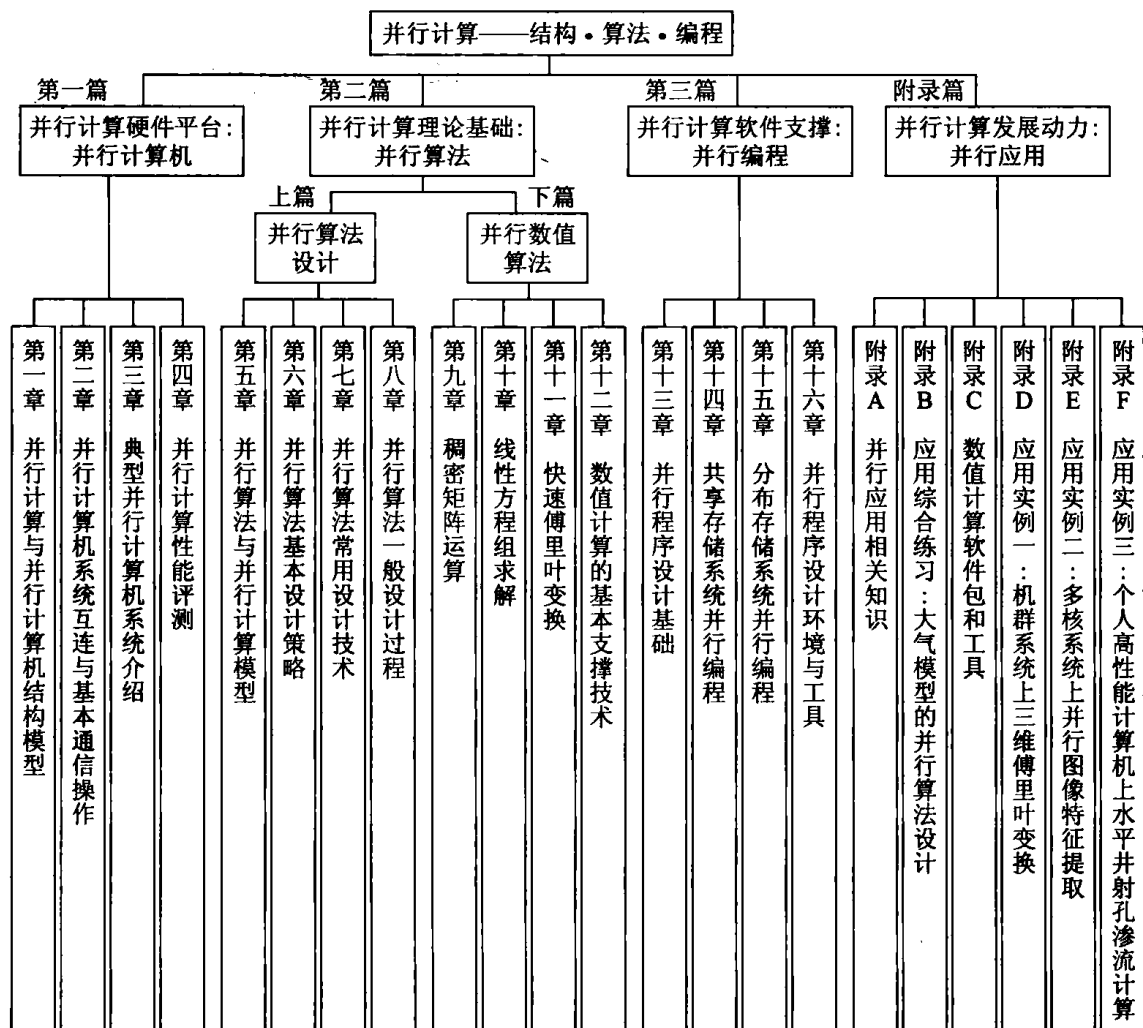
陈国良教授是国家高性能计算中心(合肥)主任,长期从事并行算法和并行计算机体系结构的研究,本套丛书是作者几十年从事教学与科研工作的结晶,是目前国内该领域内容涵盖最为全面的系列著作。它的出版必将对进一步推动我国并行计算学科的发展与应用推广产生深远的影响。

張致祥

2002年8月

第3版前言

总体框架 《并行计算——结构·算法·编程》从修订版至今已经八年有余。随着并行计算学科的发展和并行计算课程经过多年的教学实践,以及结合作者从事并行应用的亲身体验,我们逐渐地形成了如下所示的并行计算课程篇、章层次清晰的总体框架:



该框架清晰地反映了并行计算“结构—算法—编程—应用”的完整学科体系。由于应用和具体应用领域密切相关,作为并行计算基础教材难以将其与结构、算法和编程对等地进行介绍,所以只将“结构·算法·编程”作为并行计算教材的副标题标示在封面上。我们认为,尽管随着学科的发展和时间的推移,教材中某些章节的具体内容可能会变化和更新,

但是该课程的体系和总体的框架会相对稳定而不会变化太大。

内容规划 第3版篇章的总体规划使得全书框架结构更加清晰,内容布局更加合理。全书分为四篇,共十六章和六个附录。第一篇为并行计算硬件平台:并行计算机,包括并行计算与并行计算机结构模型(第一章)、并行计算机系统互连与基本通信操作(第二章)、典型并行计算机系统介绍(第三章)、并行计算性能评测(第四章)。第二篇为并行计算理论基础:并行算法,分为上篇和下篇,其中上篇为并行算法设计,包括并行算法与并行计算模型(第五章)、并行算法基本设计策略(第六章)、并行算法常用设计技术(第七章)和并行算法一般设计过程(第八章);下篇为并行数值算法,包括稠密矩阵运算(第九章)、线性方程组求解(第十章)、快速傅里叶变换(第十一章)和数值计算的基本支撑技术(第十二章)。第三篇为并行计算软件支撑:并行编程,包括并行程序设计基础(第十三章)、共享存储系统并行编程(第十四章)、分布存储系统并行编程(第十五章)和并行程序设计环境与工具(第十六章)。附录篇为并行计算发展动力:并行应用,包括并行应用相关知识(附录A)、应用综合练习(附录B)、数值计算软件包和工具(附录C)、机群系统上三维傅里叶变换(附录D)、多核系统上并行图像特征提取(附录E)和个人高性能计算机上水平井射孔渗流计算(附录F)。

修订说明 第3版对前一版做了大幅度的修改。除了按照本书的总体规划规范和格式化了各篇之篇名外,具体修订如下:第一篇中重写了第一章;整合了原书第1.2节(并重写了第1.2.4节)和第八章内容变成了第二章;改写了原书之第二章,将其新编号为第三章;原第三章内容未变,只是新编号为第四章。第二篇(上)中除了作了个别修改外,原书第四、五、六和七章依次变为第五、六、七和八章,其中第五章中还增加了第5.2.6节和5.2.7节。第二篇(下)中第九章内容保持未变;重写了第十章的第10.2.2节(三对角方程组奇偶归约求解法),在第10.4.2节中补充了求解拉普拉斯方程的稀疏矩阵部分内容;在第十一章的第11.2.2节中补充了算法11.2的数学之原理;新增加了数值计算的基本支撑技术,命名为第十二章。第三篇中第十三章将原12.2节和12.3节合在一起,并重新改写为13.2节,原12.4节和12.5节合在一起,并重新改写为13.3节,新增加了第13.4节和第13.5节,原12.6节内容未变,只是新编号为第13.6节;第十四章中删去了原第13.2.1节之ANSI X3H5的内容,重新改写了原书13.3节之OpenMP并行编程简介并新编号为14.3节;第十五章中重新改写了原书第14.2节之MPI并行编程内容并新编号为15.2节,删去了原14.3节之PVM并行编程,改写了原第14.5节之HPF并行编程并新编号为15.4节;第十六章中,删去了原书15.3.3节,新增加了并程序性能分析工具一节并新编号为16.4.3节和基于模式的可视化并行编程环境CO2P3S一节并新编号为16.5.3节。新增加了附录篇(包括附录A~附录F)。此外,对各章的小结和导读的内容也做了相应的修改,并补充了某些新的参考文献和专业术语中英对照以及一些习题。

使用方法 作为必须讲授内容和最低 60 学时的教学要求,建议讲授章节及其学时分配如下:

章 名	建议讲授节次	建议学时
第一章	1.1, 1.4, 1.5	2
第二章	2.1.2, 2.1.3, 2.2, 2.4	2
第三章	3.1.1, 3.2.1, 3.3.1, 3.4	4
第四章	4.2, 4.3	3
第五章	5.2	4
第六章	6.1.1, 6.2.3, 6.3.2	2
第七章	7.1, 7.2, 7.3.1, 7.4.1, 7.5.1	4
第八章	8.1, 8.2, 8.3, 8.4, 8.5	2
第九章	9.1, 9.4.1, 9.4.2, 9.4.3, 9.4.4	4
第十章	10.2.2, 10.3.1, 10.3.2, 10.3.3, 10.4.2, 10.4.3, 10.4.6	6
第十一章	11.1.2, 11.1.4, 11.2.2, 11.3.2	4
第十二章	12.1, 12.2, 12.3	4
第十三章	13.1.3, 13.2, 13.4, 13.5	3
第十四章	14.1.1, 14.2.1, 14.3	4
第十五章	15.2, 15.4	4
第十六章	16.2, 16.3, 16.4, 16.5	4

讲授者可根据授课对象的专业要求和具体情况,对上述讲授内容及建议学时自行增删。

诚挚感谢 此次邀请了中国科学技术大学计算机科学与技术学院、深圳大学计算机与软件学院和北京应用物理与计算数学研究所的几位老师参加有关章节的修订工作,他(她)们(按修改章节内容顺序排列)是:吴俊敏教授和随秀峰博士(第 2.1.4 节和第三章),莫则尧研究员和徐小文、安恒斌、刘旭、郭红、高兴誉副研究员(第十二章),徐云教授和杨矫云博士(附录 C 和修改第 12.3 节),陆克中副教授(第 12.5 节、第 13.2 节至第 13.5 节),孙广中副教授和方维博士(第 16.5.3 节、附录 D、附录 E 和部分习题)以及卢德唐教授和李道伦、董兰芳副教授(附录 F)等。王海涛老师负责全部书稿的电子文档整理和有关资料收集等工作,最后由王海涛、刘刚、陆克中、罗秋明和冯禹洪等老师共同协助我完成了全书的清稿和定稿工作。对于他(她)们的辛勤劳动和密切配合,作者尤为感谢。作者也非常感谢国家自

然基金委(61033009)给予的资助和高等教育出版社对本书的修订和出版工作给予的大力支持。

在第3版写作期间,我也十分感谢家人们对我工作的理解、鼓励和配合,正是她们的热忱支持才使这种繁杂、耗时且似为枯燥的修订工作变成了一种自娱自乐和无上的精神享受。

尽管我们尽了最大的努力修订此书,但随着学科的发展和限于作者的业务能力,加之修订时间仓促,书中仍有些内容尚待进一步的修订,作者为此亦感歉意。对于书中的错误和不妥之处,作者恳请广大读者不吝批评指正。

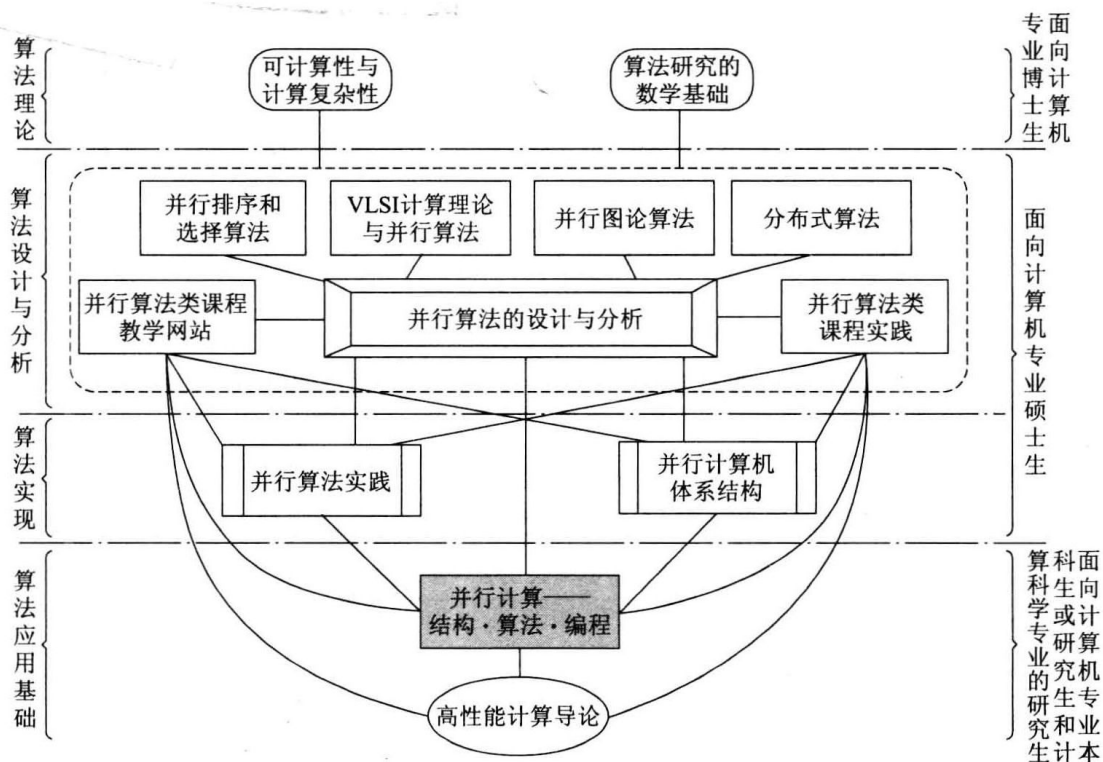
陈国良

2011年1月21日于深圳大学

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》、《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 节中加入了静态互联网的嵌入一小节;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“可扩展性评测标准”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,对于他们的美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定量化和精确化,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磁学等新兴学科,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 浏览本书未提供的有关 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,在可扩充并行计算方面,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 L. 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 并行计算硬件平台：并行计算机

第一章 并行计算与并行计算机结构模型

1.1 计算与计算机科学	(4)
1.1.1 科学发现的第三支柱： 计算科学	(4)
1.1.2 计算科学与计算机科学	(5)
*1.2 单处理机与指令级并行	(6)
1.2.1 加快 CPU 执行速度	(6)
1.2.2 减少存储延迟	(7)
1.2.3 改善输入和输出以及 网络性能	(8)
*1.3 多核处理器与线程级并行	(9)
1.3.1 单核处理器结构设计	(9)
1.3.2 多核处理器结构设计	(10)
1.3.3 多核处理器实例	(11)
1.4 并行计算机体系结构	(13)
1.4.1 并行计算机结构模型	(13)
1.4.2 并行计算机访存模型	(17)
*1.4.3 并行计算机存储组织	(21)
1.5 并行计算概述	(25)
1.5.1 关于并行计算	(25)
*1.5.2 并行计算研究现状	(28)
1.6 小结和导读	(32)
习题	(34)

第二章 并行计算机系统互连与基本通信操作

2.1 并行计算机互连网络	(37)
---------------	------

2.1.1 系统互连	(37)
2.1.2 静态互连网络	(38)
2.1.3 动态互连网络	(43)
2.1.4 标准互连网络	(46)
2.2 选路方法与开关技术	(52)
2.2.1 选路方法	(52)
2.2.2 开关技术	(54)
2.3 单一信包一到一传输	(56)
2.4 一到多播送	(56)
2.4.1 使用 SF 进行一到多播送	(57)
2.4.2 使用 CT 进行一到多播送	(58)
2.5 多到多播送	(59)
2.5.1 使用 SF 进行多到多播送	(59)
2.5.2 使用 CT 进行多到多播送	(62)
2.6 小结和导读	(62)
习题	(65)

第三章 典型并行计算机系统介绍

3.1 共享存储多处理机系统	(73)
3.1.1 对称多处理机 SMP 结构 特性	(73)
*3.1.2 SGI Challenge 系统	(74)
3.2 分布存储多计算机系统	(77)
3.2.1 大规模并行处理机 MPP 结构特性	(77)
*3.2.2 ASCI Option Red MPP 系统	(82)
3.3 分布共享存储计算机系统	(86)

3.3.1 分布共享存储计算机系统 特性	(87)	4.2 加速比性能定律	(123)
*3.3.2 SGI Origin 2000 系统	(90)	4.2.1 Amdahl 定律	(123)
3.4 机群系统	(96)	4.2.2 Gustafson 定律	(125)
3.4.1 大规模并行处理系统 MPP 机群 SP2	(96)	4.2.3 Sun 和 Ni 定律	(125)
3.4.2 工作站机群 COW	(103)	4.2.4 有关加速的讨论	(127)
*3.4.3 Berkeley 的 NOW 计划	(107)	4.3 可扩展性评测标准	(128)
3.5 小结和导读	(112)	4.3.1 并行计算的可扩展性	(128)
习题	(114)	4.3.2 等效率度量标准	(129)
第四章 并行计算性能评测	(117)	4.3.3 等速度度量标准	(130)
4.1 并行计算机的一些基本性能 指标	(118)	4.3.4 平均延迟度量标准	(132)
4.1.1 CPU 和存储器的某些基本 性能指标	(118)	4.3.5 有关可扩展性标准的 讨论	(133)
4.1.2 通信开销	(120)	*4.4 基准测试程序	(134)
4.1.3 机器的成本、价格与性能价 格比	(121)	4.4.1 基本的测试程序	(135)
		4.4.2 数学库测试程序	(136)
		4.4.3 并行测试程序	(137)
		4.5 小结和导读	(138)
		习题	(139)

第二篇 并行计算理论基础;并行算法(上)

——并行算法设计

第五章 并行算法与并行计算模型	(145)	5.3 小结和导读	(167)
*5.1 并行算法的基础知识	(146)	习题	(168)
5.1.1 并行算法的定义和分类	(146)	第六章 并行算法基本设计策略	(173)
5.1.2 并行算法的表达	(147)	6.1 串行算法的直接并行化	(174)
5.1.3 并行算法的复杂性度量	(147)	6.1.1 设计策略描述	(174)
5.1.4 并行算法中的同步与通信	(149)	6.1.2 快排序算法的并行化	(174)
5.2 并行计算模型	(150)	6.2 从问题描述开始设计并行 算法	(177)
5.2.1 PRAM 模型	(151)	6.2.1 串匹配算法	(177)
5.2.2 异步 PRAM 模型	(152)	*6.2.2 KMP 串行串匹配算法	(178)
5.2.3 BSP 模型	(153)	6.2.3 并行串匹配算法的设计 思路	(180)
5.2.4 LogP 模型	(155)	6.3 借用已有算法求解新问题	(181)
5.2.5 对 BSP 和 LogP 的评注	(158)		
5.2.6 层次存储模型	(160)		
5.2.7 分层并行计算模型	(163)		

6.3.1 设计策略描述	(182)	7.6 小结和导读	(205)
6.3.2 利用矩阵乘法求所有点 对间最短路径	(182)	习题	(207)
6.4 小结和导读	(185)		
习题	(186)		
第七章 并行算法常用设计技术	(189)	第八章 并行算法一般设计过程	(209)
7.1 划分设计技术	(190)	8.1 PCAM 设计方法学	(210)
7.1.1 均匀划分技术	(190)	8.2 划分	(211)
7.1.2 方根划分技术	(191)	8.2.1 域分解	(211)
7.1.3 对数划分技术	(192)	8.2.2 功能分解	(212)
7.1.4 功能划分技术	(193)	8.2.3 划分判据	(212)
7.2 分治设计技术	(194)	8.3 通信	(213)
7.2.1 双调归并网络	(195)	8.3.1 局部通信	(213)
7.2.2 凸壳问题	(196)	8.3.2 全局通信	(214)
7.3 平衡树设计技术	(198)	8.3.3 非结构化、动态和异步 通信	(215)
7.3.1 求取最大值	(198)	8.3.4 通信判据	(216)
7.3.2 计算前缀和	(199)	8.4 组合	(216)
7.4 倍增设计技术	(200)	8.4.1 增加粒度	(217)
7.4.1 表序问题的计算	(200)	8.4.2 保持灵活性和减少软件 工程成本	(219)
7.4.2 求森林的根	(201)	8.4.3 组合判据	(219)
7.5 流水线设计技术	(203)	8.5 映射	(220)
7.5.1 一维脉动阵列上的 DFT 计算	(203)	8.5.1 负载平衡算法	(221)
7.5.2 一维脉动阵列上的卷积 计算	(204)	8.5.2 任务调度算法	(222)
		8.5.3 映射判据	(223)
		8.6 小结和导读	(223)
		习题	(224)

第二篇 并行计算理论基础:并行算法(下)

——并行数值算法

第九章 稠密矩阵运算	(229)	9.3 矩阵-向量乘法	(236)
9.1 矩阵的划分	(230)	9.3.1 带状划分的矩阵-向量 乘法	(236)
9.1.1 带状划分	(230)	9.3.2 棋盘划分的矩阵-向量 乘法	(237)
9.1.2 棋盘划分	(231)	9.4 矩阵乘法	(239)
9.2 矩阵转置	(231)	9.4.1 简单并行分块乘法	(240)
9.2.1 棋盘划分的矩阵转置	(232)		
9.2.2 带状划分的矩阵转置	(235)		