



面向 21 世纪 课程 教材  
Textbook Series for 21st Century

# 并行计算

—— 结构 · 算法 · 编程

陈国良 编著



高等教育出版社  
HIGHER EDUCATION PRESS

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

# 并行计算

—— 结构 · 算法 · 编程

陈国良 编著



高等教育出版社  
HIGHER EDUCATION PRESS

图书在版编目(CIP)数据

并行计算——结构·算法·编程/陈国良编著. - 北京:  
高等教育出版社, 1999.10(2001 重印)

21 世纪课程教材

ISBN 7 - 04 - 007739 - 6

I. 并… II. 陈… III. 并行算法 - 高等学校 - 教材 IV. T  
P301.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 37258 号

并行计算——结构·算法·编程  
陈国良 编著

---

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市东城区沙滩后街 55 号

邮政编码 100009

电 话 010 - 64054588

传 真 010 - 64014048

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

经 销 新华书店北京发行所

印 刷 北京地质印刷厂

开 本 787 × 960 1/16

版 次 1999 年 10 月第 1 版

印 张 28.25

印 次 2001 年 5 月第 2 次印刷

字 数 520 000

定 价 23.70 元

---

凡购买高等教育出版社图书,如有缺页、倒页、脱页等  
质量问题,请在所购图书销售部门联系调换。

**版权所有 侵权必究**

## 作者简介



**陈国良**,中国科学技术大学教授,博士生导师,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。现任国家高性能计算中心(合肥)主任,国家教育部高等学校计算机科学技术教学指导委员会副主任,全国高等教育电子、电工与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,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,中国计算机学会数据通信与计算机网络专业委员会委员,全国自然科学名词审定委员会委员。曾任中国科学技术大学计算机系主任和安徽省计算机学会理事长。享受国家政府特殊津贴。

陈国良教授长期从事计算机科学技术的教学与研究。主要研究领域为并行算法、计算机体系结构、计算机网络和神经计算等。先后主持完成了10多项国家863计划、国家攀登计划、国家自然科学基金、教育部博士基金等科研项目。取得了多项被国内外广泛引用的、达到国际先进水平的科研成果,发表论文100多篇,出版著作7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。曾获国家级二等奖以及部、省、院级一等、二等、三等奖共10项。

十几年来,陈国良教授先后指导计算机专业硕士研究生40余名和博士研究生30余名,率先创建了我国第一个国家高性能计算中心,为我国培养了一批在国内外从事算法研究的高级人才。

# 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,并最终审定**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、吴名桥、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



责任编辑 鲍 湧  
封面设计 张 楠  
版式设计 鲍 湧 周顺银  
责任校对 马桂兰  
责任印制 宋克学

# 目 录

## 第一篇 并行计算硬件基础

|  |    |
|--|----|
| <b>第一章 并行计算机系统及其结构模型</b> .....           | 3  |
| 1.1 并行计算与高端并行计算机 .....                   | 3  |
| 1.1.1 并行计算与计算科学 .....                    | 3  |
| 1.1.2 当代科学与工程问题的计算需求 .....               | 4  |
| * 1.1.3 万亿次高端并行机 .....                   | 7  |
| 1.2 并行计算机系统互连 .....                      | 9  |
| 1.2.1 系统互连 .....                         | 9  |
| 1.2.2 静态互连网络 .....                       | 10 |
| 1.2.3 动态互连网络 .....                       | 13 |
| 1.2.4 宽带互连网络 .....                       | 17 |
| 1.3 并行计算机系统结构 .....                      | 21 |
| 1.3.1 并行计算机结构模型 .....                    | 21 |
| 1.3.2 并行计算机访存模型 .....                    | 25 |
| * 1.3.3 并行计算机存储组织 .....                  | 29 |
| 1.4 小结和导读 .....                          | 33 |
| 习题 .....                                 | 34 |
| <b>第二章 当代并行机系统:SMP、MPP 和 COW</b> .....   | 38 |
| 2.1 对称多处理机 SMP .....                     | 38 |
| 2.1.1 SMP 和 CC-NUMA 结构特性 .....           | 38 |
| * 2.1.2 SGI/Cray Origin 2000 超级服务器 ..... | 40 |
| 2.2 大规模并行机 MPP .....                     | 47 |
| 2.2.1 MPP 结构特性 .....                     | 47 |
| * 2.2.2 机群型大规模并行机 SP2 .....              | 51 |
| 2.3 工作站机群 COW .....                      | 57 |
| 2.3.1 COW 的基本原理与技术 .....                 | 58 |
| * 2.3.2 Berkeley 的 NOW 计划 .....          | 61 |

|                                |           |
|--------------------------------|-----------|
| 2.4 国产曙光系列并行机系统 .....          | 67        |
| 2.4.1 全对称共享存储多处理机系统:曙光1号 ..... | 68        |
| 2.4.2 大规模并行处理系统:曙光-1000 .....  | 72        |
| *2.4.3 超级并行计算机系统:曙光-2000 ..... | 75        |
| 2.5 小结和导读 .....                | 80        |
| 习题 .....                       | 81        |
| <b>第三章 并行计算性能评测</b> .....      | <b>83</b> |
| 3.1 加速比性能定律 .....              | 83        |
| 3.1.1 Amdahl 定律 .....          | 83        |
| 3.1.2 Gustafson 定律 .....       | 85        |
| 3.1.3 Sun 和 Ni 定律 .....        | 85        |
| 3.1.4 有关加速的讨论 .....            | 87        |
| 3.2 可扩展性评测标准 .....             | 88        |
| 3.2.1 并行计算的可扩展性 .....          | 88        |
| 3.2.2 等效率度量标准 .....            | 89        |
| 3.2.3 等速度度量标准 .....            | 91        |
| 3.2.4 平均延迟度量标准 .....           | 95        |
| 3.2.5 有关可扩展性标准的讨论 .....        | 97        |
| *3.3 基准测试程序 .....              | 99        |
| 3.3.1 基本测试程序 .....             | 99        |
| 3.3.2 数学库测试程序 .....            | 100       |
| 3.3.3 并行测试程序 .....             | 101       |
| 3.4 小结和导读 .....                | 102       |
| 习题 .....                       | 102       |

## 第二篇 并行算法的设计

|                            |            |
|----------------------------|------------|
| <b>第四章 并行算法的设计基础</b> ..... | <b>107</b> |
| *4.1 并行算法的基础知识 .....       | 107        |
| 4.1.1 并行算法的定义和分类 .....     | 107        |
| 4.1.2 并行算法的表达 .....        | 108        |
| 4.1.3 并行算法的复杂性度量 .....     | 109        |
| 4.1.4 并行算法中的同步与通信 .....    | 110        |
| 4.2 并行计算模型 .....           | 112        |
| 4.2.1 PRAM 模型 .....        | 112        |
| 4.2.2 异步 PRAM 模型 .....     | 113        |

---

|            |                    |            |
|------------|--------------------|------------|
| 4.2.3      | BSP 模型             | 114        |
| 4.2.4      | logP 模型            | 116        |
| 4.2.5      | C <sup>3</sup> 模型  | 118        |
| 4.2.6      | 对 BSP 和 logP 的评注   | 121        |
| 4.3        | 小结和导读              | 123        |
|            | 习题                 | 124        |
| <b>第五章</b> | <b>并行算法的一般设计方法</b> | <b>129</b> |
| 5.1        | 串行算法的直接并行化         | 129        |
| 5.1.1      | 设计方法描述             | 129        |
| 5.1.2      | 快排序算法的并行化          | 130        |
| 5.2        | 从问题描述开始设计并行算法      | 132        |
| 5.2.1      | 串匹配算法              | 132        |
| * 5.2.2    | KMP 串行串匹配算法        | 133        |
| 5.2.3      | 并行串匹配算法的设计思路       | 136        |
| 5.3        | 借用已有算法求解新问题        | 137        |
| 5.3.1      | 设计方法描述             | 137        |
| 5.3.2      | 利用矩阵乘法求所有点对间最短路径   | 138        |
| 5.4        | 小结和导读              | 141        |
|            | 习题                 | 141        |
| <b>第六章</b> | <b>并行算法的基本设计技术</b> | <b>144</b> |
| 6.1        | 划分设计技术             | 144        |
| 6.1.1      | 均匀划分技术             | 144        |
| 6.1.2      | 方根划分技术             | 146        |
| 6.1.3      | 对数划分技术             | 146        |
| 6.1.4      | 功能划分技术             | 148        |
| 6.2        | 分治设计技术             | 149        |
| 6.2.1      | 双递归并网络             | 149        |
| 6.2.2      | 凸壳问题               | 151        |
| 6.3        | 平衡树设计技术            | 153        |
| 6.3.1      | 求取最大值              | 153        |
| 6.3.2      | 计算前缀和              | 154        |
| 6.4        | 倍增设计技术             | 155        |
| 6.4.1      | 表序问题的计算            | 155        |
| 6.4.2      | 求森林的根              | 156        |
| 6.5        | 流水线设计技术            | 158        |

|                              |            |
|------------------------------|------------|
| 6.5.1 一维心动阵列上的 DFT 计算 .....  | 158        |
| 6.5.2 一维心动阵列上的卷积计算 .....     | 159        |
| 6.6 小结和导读 .....              | 161        |
| 习题 .....                     | 162        |
| <b>第七章 并行算法的一般设计过程 .....</b> | <b>164</b> |
| 7.1 PCAM 设计方法学 .....         | 164        |
| 7.2 划分 .....                 | 165        |
| 7.2.1 域分解 .....              | 166        |
| 7.2.2 功能分解 .....             | 166        |
| 7.2.3 划分判据 .....             | 167        |
| 7.3 通信 .....                 | 167        |
| 7.3.1 局部通信 .....             | 168        |
| 7.3.2 全局通信 .....             | 169        |
| 7.3.3 非结构化、动态和异步通信 .....     | 170        |
| 7.3.4 通信判据 .....             | 170        |
| 7.4 组合 .....                 | 171        |
| 7.4.1 增加粒度 .....             | 171        |
| 7.4.2 保持灵活性和减少软件工程成本 .....   | 174        |
| 7.4.3 组合判据 .....             | 174        |
| 7.5 映射 .....                 | 175        |
| 7.5.1 负载均衡算法 .....           | 175        |
| 7.5.2 任务调度算法 .....           | 177        |
| 7.5.3 映射判据 .....             | 177        |
| 7.6 小结和导读 .....              | 178        |
| 习题 .....                     | 179        |

### 第三篇 并行数值算法

|                           |            |
|---------------------------|------------|
| <b>第八章 基本通信操作 .....</b>   | <b>185</b> |
| 8.1 选路方法与开关技术 .....       | 185        |
| 8.1.1 选路方法 .....          | 185        |
| 8.1.2 开关技术 .....          | 187        |
| 8.2 单一信包一到一传输 .....       | 189        |
| 8.3 一到多播送 .....           | 190        |
| 8.3.1 使用 SF 进行一到多播送 ..... | 190        |
| 8.3.2 使用 CT 进行一到多播送 ..... | 191        |

|                            |            |
|----------------------------|------------|
| 8.4 多到多播送 .....            | 193        |
| 8.4.1 使用 SF 进行多到多播送 .....  | 193        |
| 8.4.2 使用 CT 进行多到多播送 .....  | 195        |
| 8.5 小结和导读 .....            | 196        |
| 习题 .....                   | 198        |
| <b>第九章 稠密矩阵运算 .....</b>    | <b>203</b> |
| 9.1 矩阵的划分 .....            | 203        |
| 9.1.1 带状划分 .....           | 203        |
| 9.1.2 棋盘划分 .....           | 204        |
| 9.2 矩阵转置 .....             | 205        |
| 9.2.1 棋盘划分的矩阵转置 .....      | 205        |
| 9.2.2 带状划分的矩阵转置 .....      | 208        |
| 9.3 矩阵-向量乘法 .....          | 209        |
| 9.3.1 带状划分的矩阵-向量乘法 .....   | 210        |
| 9.3.2 棋盘划分的矩阵-向量乘法 .....   | 211        |
| 9.4 矩阵乘法 .....             | 213        |
| 9.4.1 简单并行分块乘法 .....       | 214        |
| 9.4.2 Cannon 乘法 .....      | 215        |
| 9.4.3 Fox 乘法 .....         | 218        |
| 9.4.4 DNS 乘法 .....         | 218        |
| 9.5 小结和导读 .....            | 223        |
| 习题 .....                   | 224        |
| <b>第十章 线性方程组的求解 .....</b>  | <b>227</b> |
| 10.1 三角形方程组的求解 .....       | 227        |
| 10.1.1 基本术语 .....          | 227        |
| 10.1.2 上三角方程组的求解 .....     | 228        |
| 10.2 三对角方程组的求解 .....       | 230        |
| 10.2.1 三对角方程组直接求解法 .....   | 230        |
| 10.2.2 三对角方程组奇偶归约求解法 ..... | 232        |
| 10.3 稠密线性方程组的求解 .....      | 233        |
| 10.3.1 有回代的高斯消去法 .....     | 233        |
| 10.3.2 无回代的高斯-约旦法 .....    | 237        |
| 10.3.3 迭代求解的高斯-赛德尔法 .....  | 239        |
| 10.4 稀疏线性方程组的求解 .....      | 241        |
| 10.4.1 稀疏矩阵的存储方式 .....     | 241        |

|             |                                     |            |
|-------------|-------------------------------------|------------|
| 10.4.2      | 雅可比迭代法 .....                        | 243        |
| 10.4.3      | 高斯-赛德尔迭代法 .....                     | 247        |
| 10.4.4      | 超松弛迭代法 .....                        | 249        |
| 10.4.5      | 多重网格法 .....                         | 249        |
| 10.4.6      | 共轭梯度法 .....                         | 251        |
| 10.5        | 小结和导读 .....                         | 256        |
|             | 习题 .....                            | 257        |
| <b>第十一章</b> | <b>快速傅里叶变换 .....</b>                | <b>260</b> |
| 11.1        | 离散傅氏变换 .....                        | 260        |
| * 11.1.1    | 预备知识 .....                          | 260        |
| 11.1.2      | 离散傅里叶变换 .....                       | 261        |
| 11.1.3      | 离散傅里叶逆变换 .....                      | 263        |
| 11.1.4      | 离散傅氏变换的蝶式计算 .....                   | 263        |
| * 11.2      | 快速傅氏变换串行算法 .....                    | 265        |
| 11.2.1      | 串行 FFT 迭代算法 .....                   | 265        |
| 11.2.2      | 串行 FFT 递归算法 .....                   | 267        |
| 11.3        | 并行 FFT 算法 .....                     | 269        |
| 11.3.1      | SIMD-MC <sup>2</sup> 上 FFT 算法 ..... | 269        |
| 11.3.2      | SIMD-BF 上 FFT 算法 .....              | 272        |
| 11.3.3      | SIMD-CC 上 FFT 算法 .....              | 273        |
| 11.3.4      | MIMD-DM 上 FFT 算法 .....              | 275        |
| 11.4        | 小结和导读 .....                         | 278        |
|             | 习题 .....                            | 279        |

## 第四篇 并行程序设计

|             |                       |            |
|-------------|-----------------------|------------|
| <b>第十二章</b> | <b>并行程序设计基础 .....</b> | <b>283</b> |
| 12.1        | 并行程序设计概述 .....        | 283        |
| 12.1.1      | 串行程序设计与并行程序设计 .....   | 283        |
| 12.1.2      | 并行程序设计环境 .....        | 285        |
| 12.1.3      | 并行程序设计方法 .....        | 285        |
| * 12.2      | 进程 .....              | 287        |
| 12.2.1      | 进程的基本概念 .....         | 287        |
| 12.2.2      | 进程的并行执行 .....         | 290        |
| 12.2.3      | 进程的相互作用 .....         | 291        |
| 12.3        | 线程 .....              | 292        |

|             |                                |            |
|-------------|--------------------------------|------------|
| 12.3.1      | 线程的基本概念 .....                  | 293        |
| 12.3.2      | 线程的管理 .....                    | 293        |
| 12.3.3      | 线程的同步 .....                    | 295        |
| * 12.4      | 同步 .....                       | 295        |
| 12.4.1      | 原子与互斥 .....                    | 295        |
| 12.4.2      | 高级同步结构 .....                   | 296        |
| 12.4.3      | 低级同步原语 .....                   | 297        |
| 12.5        | 通信 .....                       | 299        |
| 12.5.1      | 影响通信系统性能的因素 .....              | 300        |
| 12.5.2      | 低级通信支持 .....                   | 301        |
| 12.5.3      | TCP/IP 通信协议组简介 .....           | 302        |
| 12.6        | 小结和导读 .....                    | 306        |
| 习题          | .....                          | 306        |
| <b>第十三章</b> | <b>并行程序设计模型和共享存储系统编程 .....</b> | <b>309</b> |
| 13.1        | 并行编程风范和样本程序 .....              | 309        |
| 13.1.1      | 五种并行编程风范 .....                 | 309        |
| 13.1.2      | 计算 $\pi$ 样本程序 .....            | 310        |
| 13.2        | 并行程序设计模型 .....                 | 312        |
| 13.2.1      | 隐式并行模型 .....                   | 312        |
| 13.2.2      | 数据并行模型 .....                   | 313        |
| 13.2.3      | 消息传递模型 .....                   | 314        |
| 13.2.4      | 共享变量模型 .....                   | 316        |
| 13.2.5      | 并行程序设计模型比较 .....               | 317        |
| 13.3        | 共享存储并行编程 .....                 | 318        |
| 13.3.1      | ANSI X3H5 共享存储模型 .....         | 320        |
| 13.3.2      | POSIX 线程模型 .....               | 322        |
| 13.3.3      | Open MP 标准 .....               | 323        |
| 13.4        | 小结和导读 .....                    | 326        |
| 习题          | .....                          | 327        |
| <b>第十四章</b> | <b>分布存储系统并行编程 .....</b>        | <b>332</b> |
| 14.1        | 基于消息传递的并行编程 .....              | 332        |
| 14.1.1      | SPMD 并行程序 .....                | 333        |
| 14.1.2      | MPMD 并行程序 .....                | 334        |
| 14.2        | MPI 并行编程 .....                 | 335        |
| 14.2.1      | 最基本的 MPI .....                 | 336        |



|             |                                 |            |
|-------------|---------------------------------|------------|
| 14.2.2      | 群体通信 .....                      | 338        |
| 14.2.3      | 通信体 .....                       | 340        |
| 14.2.4      | 导出数据类型 .....                    | 342        |
| 14.2.5      | 点到点通信 .....                     | 343        |
| * 14.3      | PVM 并行编程 .....                  | 348        |
| 14.3.1      | PVM 概貌 .....                    | 348        |
| 14.3.2      | PVM 消息传递库 .....                 | 349        |
| 14.4        | 基于数据并行的并行编程 .....               | 352        |
| 14.4.1      | 数据并行模型的特点 .....                 | 352        |
| 14.4.2      | 数据并行编程的基本问题 .....               | 352        |
| 14.5        | HPF 并行编程 .....                  | 353        |
| 14.5.1      | HPF 的语言特点 .....                 | 354        |
| 14.5.2      | HPF 的数据并行机制 .....               | 354        |
| 14.5.3      | HPF 使用中的若干问题 .....              | 359        |
| 14.6        | 小结和导读 .....                     | 361        |
|             | 习题 .....                        | 362        |
|             | 附录一 MPI 的函数的 C 语言说明 .....       | 366        |
|             | 附录二 MPI 的函数的 Fortran 语言说明 ..... | 368        |
| <b>第十五章</b> | <b>并行程序设计环境与工具 .....</b>        | <b>371</b> |
| * 15.1      | 软件工具与环境 .....                   | 371        |
| 15.1.1      | 编码工具 .....                      | 371        |
| 15.1.2      | 软件工程工具 .....                    | 372        |
| 15.1.3      | 集成工具 .....                      | 372        |
| 15.1.4      | 将来的工具与环境 .....                  | 373        |
| 15.2        | 并行编译器 .....                     | 374        |
| 15.2.1      | 编译及其并行化 .....                   | 375        |
| 15.2.2      | 相关分析 .....                      | 377        |
| 15.2.3      | 代码优化 .....                      | 379        |
| 15.2.4      | 代码生成 .....                      | 384        |
| 15.3        | 并行程序调试和性能分析 .....               | 384        |
| 15.3.1      | 并行程序的调试 .....                   | 384        |
| 15.3.2      | 并行程序的性能分析 .....                 | 387        |
| 15.3.3      | 并行程序的可视化设计环境与工具 .....           | 389        |
| 15.4        | 小结和导读 .....                     | 390        |
|             | 习题 .....                        | 391        |