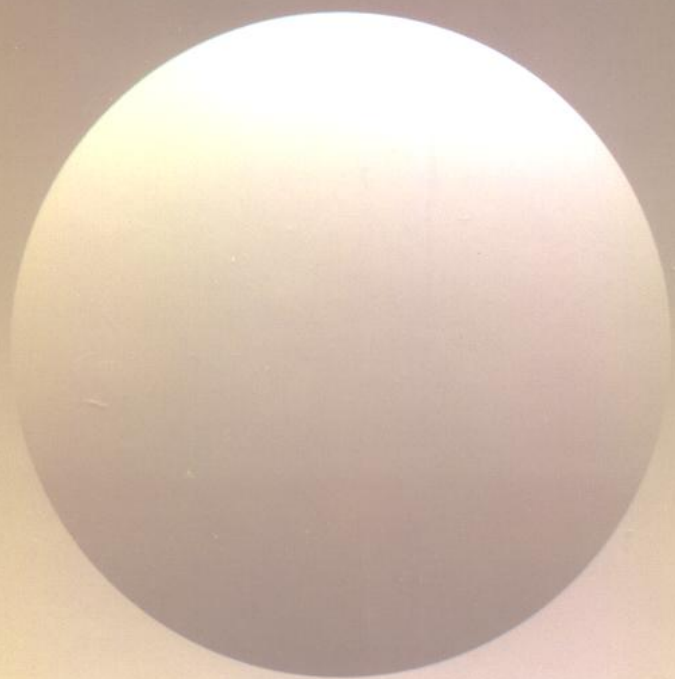


● 研 究 生 用 书 ● THE METHODOLOGY
OF APPLICATION ORIENTED
PARALLEL PROGRAMMING
华中理工大学出版社



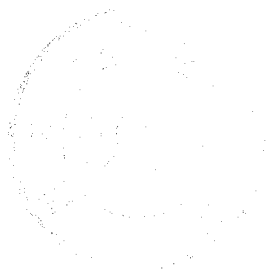
刘 键

并行程序设计方法学

并行程序设计方法学

刘 健

华中理工大学出版社



图书在版编目(CIP)数据

并行程序设计方法学/刘 键
武汉:华中理工大学出版社, 2000年1月
ISBN 7-5609-1955-3

- I. 并…
- II. 刘…
- III. 并行程序设计-程序设计方法
- IV. TP311.11

并行程序设计方法学

刘 键

责任编辑:余涛 陈少华
责任校对:熊九龄

封面设计:刘 卉
监 印:张正林

出版发行:华中理工大学出版社

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87542624

经销:新华书店湖北发行所

录排:华中理工大学出版社照排室

印刷:武汉市青联彩印厂

开本:850×1168 1/32 印张:10.5 插页:2 字数:240 000
版次:2000年1月第1版 印次:2000年1月第1次印刷 印数:1—1 500
ISBN 7-5609-1955-3/TP·332 定价:16.00元

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行科调换)

内 容 提 要

本书重点讨论了面向应用的并行程序设计方法学,系统地阐述了关于并行程序设计的理论、观点、方法和技术。主要内容包括非交错并行计算模型(包括数据驱动/相关驱动计算模型与实时/非实时分布式状态机模型)、抽象相关分析技术、并行分解技术(包括论域分解、对象分解、计算分解与控制分解)、并行软件工程以及可重用并行软件开发环境等问题,其中许多内容是第一次发表的。

Abstract

In this book, the methodology of application-oriented parallel programming is discussed in detail. The theory, point of views, methods and techniques of parallel programming are systematically expounded. The main contents of this book include noninterleaving parallel computing models (such as data driven computing model, dependent-driven computing model, distributed state machine, distributed real-time state machine etc.), abstract dependent analysis techniques, parallel decomposition techniques (such as domain decomposition, object-decomposition, computation decomposition and control decomposition etc.), parallel software engineering and reusable parallel software development, environment, etc.. Many of them are the first publication.

写在“研究生用书”出版 10 周年

在今天,面对科技的迅速发展,知识经济的已见端倪,国际竞争也日趋激烈,显然,国家之间的竞争是国家综合实力的竞争,国家综合实力的竞争关键是经济实力的竞争,而经济实力的竞争关键又在于科技(特别是高科技)的竞争,科技(特别是高科技)的竞争归根结底是人才(特别是高层次人才)的竞争,而人才(特别是高层次人才)的竞争基础又在于教育。“百年大计,教育为本;国家兴亡,人才为基。”十六个字、四句话,确是极其深刻的论断。目前,国际形势清楚表明:我们国家的强大与民族的繁荣,主要立足于自己,以“自力更生”为主;把希望寄托于他人,只是一种不切实际的幻想。这里,我们决不是要再搞“闭关锁国”,搞“自我封闭”,因为那是没有出路的;我们强调的是要“自信,自尊,自立,自强”,要“自力更生”为主,走自己发展的道路。

显然,知识经济最关键的是人才,是高层次人才的培养,而作为高层次人才培养的研究生教育就在一个国家的方方面面的工作中,占有十分重要的战略地位。可以说,没有研究生教育,就没有威伟雄壮的科技局面,就没有国家的强大实力,就没有国家在国际上的位置,就会挨打,就会受压,就会被淘汰,还说什么知识与国家强大?!

“工欲善其事,必先利其器。”教学用书是教学的重要

基本工具与条件。这是所有从事教育的专家所熟知的事实。所以,正如许多专家所知,也正是原来的《“研究生用书”总序》中所指出,研究生教材建设是保证与提高研究生教学质量的重要环节,是一项具有战略性的基本建设。没有研究生的质量,就没有研究生教育的一切。

我校从1978年招收研究生以来,即着力从事于研究生教材与教学用书的建设。积十多年建设与实践经验,我校从1989年起,正式分批出版“研究生用书”。第一任研究生院院长陈珏教授就为之写了《“研究生用书”总序》,表达了我校编写这套用书的指导思想与具体要求,“要力求‘研究生用书’具备科学性、系统性、先进性”。后三任研究生院院长,也就是各任校长黄树槐教授、我本人和周济教授完全赞同这一指导思想与具体要求,从多方面对这套用书加以关心与支持。

我是十分支持出版“研究生用书”的。早在1988年我在为列入这套书中的第一本,即《机械工程测试·信息·信号分析》写“代序”时就提出:一个研究生应该博览群书,博采百家,思路开阔,有所创见。但这不等于他在一切方面均能如此,有所不为才能有所为。如果一个研究生的主要兴趣与工作不在“这一特定方面”,他也可以选择一本有关的书作为了解与学习这方面专业知识的参考;如果一个研究生的主要兴趣在“这一特定方面”,他更应选择一本有关的书作为主要学习用书,寻觅主要学习线索,并缘此展开,博览群书。这就是我赞成为研究生编写系列教学用书的原因。

目前,这套书自第一本于1990年问世以来,已经渡

过了10个春秋,出版了8批共49种,初步形成规模,逐渐为更多读者所认可。在已出版的书中,有15种分获国家级、部省级图书奖,有16种一再重印,久销不衰。采用此套书的一些兄弟院校教师纷纷来信,赞誉此书为研究生培养与学科建设作出了贡献,解决了他们的“燃眉之急”。我们感谢这些赞誉与鼓励,并将这些作为对我们的鞭策与鼓励,“衷心藏之,何日忘之?!”

现在,正是江南春天,“最是一年春好处”。华工园内,红梅怒放,迎春盛开,柳枝油绿,梧叶含苞,松柏青翠,樟桂换新,如同我们的国家正在迅猛发展、欣欣向荣一样,一派盎然生机。尽管春天还有乍寒时候,我们国家在前进中还有种种困难与险阻,来自国内与来自国外的阻挠与干扰,有的还很严峻;但是,潮流是不可阻挡的,春意会越来越浓,国家发展会越来越越好。我们教师所编的、所著的、所编著的这套教学用书,也会在解决前进中的种种问题中继续发展。然而,我们十分明白,这套书尽管饱含了我们教师的辛勤的长期的教学与科研工作的劳动结晶,作为教学用书百花园中的一丛鲜花正在怒放,然而总会有这种或那种的不妥、错误与不足,我衷心希望在这美好的春日,广大的专家与读者,不吝拔冗相助,对这套教学用书提出批评建议,予以指教启迪,为这丛鲜花除害灭病,抗风防寒,以进一步提高质量,提高水平,更上一层楼,我们不胜感激。我们深知,“一个篱笆三个桩”,没有专家的指导与支持,没有读者的关心与帮助,也就没有这套教学用书的今天。我衷心祝愿在我们学校第三次大发展的今天,在百年之交与千年之交的时候,这套教学用书会以更

雄健的步伐,走向更美好的未来。

诗云:“嚶其鸣矣,求其友声。”这是我们的心声。

中国科学院院士

华中理工大学学术委员会主任

杨叔子

于华工园内

1999年5月15日

前 言

高性能计算技术的飞跃发展及其日益广泛深入的普及应用将从根本上改变人们的工作方式、生活方式与思维方式,改变人们从事科学研究、工程设计、教育培训、战略决策、事务处理甚至文化艺术创作的方式方法,也将从根本上改变人类社会的结构。高性能计算技术影响的重大深远意义,怎么估计也不过分。机器的出现延长了人们的手脚,新能源的出现加强了人们利用机械改造自然的威力,现代化信息传输加工手段的出现,大大地加强了人们视觉、听觉、触觉等感觉器官的能力,计算机特别是高性能计算机的出现,又将大大地加强人们的大脑功能。用计算机下象棋,可以战胜世界象棋冠军。用计算机作复杂事务的决策,比个人考虑问题更加全面更加深入。当然,计算机本身并无智能,它是根据人们编写的程序来工作,但它计算速度快,能够解决人们空手无法解决的问题。许多问题的解决,不但计算量大,而且还有时间性。因此,对计算机性能的要求越来越高。美国能源部主持的 ASCI 计划,为解决虚拟核试验及核武器储备管理的问题,计划在 2002 年左右研制出每秒 100 万亿次浮点运算(100Teraflops)的超级计算机。美国政府甚至还支持一个千万亿次浮点运算计算机(Petaflops Computing)的前瞻性研究计划。这里所谓的高性能计算机或超级计算机,当然都是并行计算机。

并行处理不但能够提高性能,而且能够加强功能。就像交响乐一样,单件乐器独奏,就奏不出交响乐队那样的曲调。一个疑难病症,单个单科医生很难确诊,多个单科医生会诊,就可以很容易确诊。

并行处理技术要实用化,要推广应用,关键是并行软件技术,即所谓的并行程序设计方法学。能否实用,能否使非计算机专业人员也能使用,用得好不好,问题解决得深不深,关键在于并行程序

设计方法。遗憾的是,目前并行软件技术远跟不上应用的需要。可以说,当前并行程序设计方法学还远未成熟。因此,大力研究并行程序设计方法学,及时交流这方面的研究成果,研制开发相应的并行软件开发工具,就是一个十分重要而又迫切的任务。

本书是作者另一本书《并行分布式程序设计》(华中理工大学出版社 1997)的姐妹篇。《并行分布式程序设计》也讨论了并行程序设计的一般问题,但重点是讨论全自动并行化编译和并行操作系统的设计方法。本书重点讨论面向应用的并行程序设计方法学,主要讨论的问题有:

- 并行性、并行语义及其分类,
- 并行算法结构与分类,
- 非交错并行计算模型(包括数据驱动/相关驱动并行计算模型与实时/非实时分布式状态机模型),
- 抽象相关分析技术,
- 并行分解技术(包括论域分解、基于对象分解、计算分解、控制分解以及顺序算法并行转换等方法),
- 进程合作与同步通信,
- 算法映射与进程调度,
- 程序执行控制模式,
- 并行程序性能估计,
- 并行软件开发过程,
- 可重用并行软件开发环境。

围绕这些问题,本书较系统地阐述了关于并行程序设计的理论、观点、方法和技术。

我们关于并行程序设计方法的观点可扼要叙述如下:在问题说明级,对说明进行抽象相关分析,然后进行并行分解,并经过进一步的具体化就可得到一适当抽象级的数据驱动的抽象相关图。根据该抽象相关图可得到一并行模块接口图(相当于设计蓝图)。根据模块接口图,或者通过程序员手工设计,或者利用可重用并行

软件构件组装,就可得到满足用户基本需求的并行软件代码,再经过代码优化、测试即可成为软件产品。这个软件开发过程,从始至终都是以一个数据驱动的并行计算模型(抽象相关图、并行模块接口图)为指导。这个模型是可分析的,它能提供关于正确性证明、性能估计与复杂性分析的简便有效的工具支持(见 § 1.9, § 2.4)。

数据驱动模型虽然不是一个很普遍的并行计算模型,但用于系统说明、系统设计、概要设计等较高抽象级的设计与分析是足够的。如果必须引入控制相关,还可容易地扩展到兼有控制相关与数据相关的相关驱动图。这个模型和数据驱动模型一样是可分析的(有某些问题要稍微复杂一些)。

我们将非交错的并行系统分为两类:一类是保功能并行(主观并行)系统,即要求并行执行与交错执行、顺序执行的结果相同,如通常的科学与工程计算、建筑施工等都属于这一类;另一类是变功能并行(客观并行)系统,如各种合成生产线,反导弹系统等属于这一类,这类系统的特点是:在现实世界中,系统本身就是一并行系统,通常还是一分布式计算系统,这类系统的行为和交错执行、顺序执行的行为(执行结果)都不相同,甚至对交错执行、顺序执行来谈系统就没有意义,它们根本不是原来的系统。第二章、第三章主要讨论主观并行系统,数据驱动模型/相关驱动模型主要用于主观并行系统。第四章讨论客观并行系统,主要讨论了分布式状态机模型和分布式实时状态机模型。第五章讨论了可重用并行软件开发环境,主要以数据驱动并行计算模型为背景与理论指导,所以主要用于科学与工程计算(数值)软件的开发。

本书编写的指导思想是坚持科学性与实用性。不追求非现实的普遍性,但要求现实的通用性;不追求纯形式系统的严格性,但要求方法的科学性与结论的正确性。考虑到便于非计算机专业使用,本书尽量不使用艰深的数学,而使用较为易懂的数学工具。要做到这一点,当然很不容易,本书也只能作一些初步的探索。

由于本学科分支尚未成熟,本书陈述的内容是研究性的、探索性的,只能算是一家之言。书中大部分内容是作者自己至今尚未发表的研究成果,包括几个国家自然科学基金资助项目、几个研制开发的预研项目特别是“分布式实时处理软件的形式开发技术”、“全自动并行化编译系统 HZPARA”的部分理论成果与实践经验。当然,也参阅了国内外有关的大量文献。为了总结提高已有成果,促进学术交流,培养新生力量,推广普及应用,作者不揣冒昧,予以公开出版,期求抛砖引玉之效。由于许多内容系初次发表,一定会有不当甚至错误之处,敬请海内外读者批评指正。

孙永强教授详细地审阅了本书,提出了许多宝贵的修改意见,使本书增色不少,特此向孙教授表示衷心的感谢。

本书能及时出版,要特别感谢湖北省建设银行以及华中理工大学研究生院和华中理工大学出版社的大力支持。

刘 键

1997年12月

目 录

第一章 概 论

§ 1.1 并行计算与并行程序设计方法学	(1)
1.1.1 高科技问题与并行计算	(1)
1.1.2 并行程序设计方法的特点	(4)
§ 1.2 并行计算机系统	(6)
1.2.1 流水线操作	(6)
1.2.2 并行操作 SIMD 结构	(9)
1.2.3 MIMD 系统、多处理机系统	(9)
1.2.4 分布式存储并行计算机系统	(12)
1.2.5 发展趋势	(13)
§ 1.3 网络拓扑与通信模式	(14)
1.3.1 网络拓扑判别准则	(14)
1.3.2 常见的几种规则网络拓扑	(16)
§ 1.4 并行计算	(19)
1.4.1 并行计算	(19)
1.4.2 并行性与并行语义	(22)
1.4.3 并行科学计算中的并行性	(25)
§ 1.5 并行算法结构	(29)
1.5.1 为什么要研究算法结构	(29)
1.5.2 算法结构的各组成部分与属性	(30)
1.5.3 并行算法结构的分类	(36)

§ 1.6	程序设计的一般概念	(38)
1.6.1	程序的本质与特点	(38)
1.6.2	程序设计的本质与特点	(40)
1.6.3	程序设计方法的主要原则	(42)
§ 1.7	并行程序设计方法的基本原则	(46)
1.7.1	并行程序设计的特殊困难	(46)
1.7.2	并行程序设计方法的基本原则	(51)
1.7.3	并行程序设计的一般步骤	(52)
1.7.4	几点注意事项	(53)
§ 1.8	常见的几种同步互斥机制	(56)
1.8.1	PCF Fortran 中的同步机制	(56)
	• Lock-unlock 机制	
	• Critical Section (临界段)	
	• 事件同步	
	• 序列同步	
1.8.2	CSP 中的同步通信机制	(63)
1.8.3	Ada 中的同步通信机制	(65)
§ 1.9	并行程序设计的性能考虑	(70)
1.9.1	数据驱动的并行计算模型	(70)
1.9.2	加速比估计式	(71)
1.9.3	$\log p$ 模型	(74)
1.9.4	考虑 $\log p$ 因素的进程流程图的调度	(79)
第一章	小结	(83)

第二章 并行计算理论初步

§ 2.1	抽象数据类型与并行模块化	(85)
-------	--------------	------

2.1.1	什么叫并行模块化	(85)
2.1.2	如何并行模块化	(86)
2.1.3	数据抽象的说明方法	(87)
2.1.4	过程抽象的说明	(90)
2.1.5	模块的说明	(91)
§ 2.2	对象式程序设计概念	(94)
2.2.1	对象式程序设计概念	(94)
2.2.2	类	(95)
2.2.3	对象	(96)
2.2.4	继承	(97)
2.2.5	允引关系	(98)
2.2.6	对象系统的行为特征	(102)
§ 2.3	抽象相关分析	(103)
2.3.1	现实世界中的执行相关关系	(103)
2.3.2	抽象相关概念	(104)
2.3.3	对象模型中的相关关系	(105)
2.3.4	抽象相关图	(110)
§ 2.4	基于数据驱动模型的并行程序构造	(111)
2.4.1	具有断言的数据驱动模型	(111)
2.4.2	程序说明的并行分解	(113)
2.4.3	并行程序的优化	(116)
2.4.4	并行程序的测试	(118)
§ 2.5	基于数据驱动模型的并行程序设计	(121)
2.5.1	数据驱动模型的优点	(121)
2.5.2	基于数据驱动模型程序设计的主要步骤	(122)

§ 2.6	软件开发过程的计划	(128)
2.6.1	问题的提出	(128)
2.6.2	软件过程模型	(130)
2.6.3	软件开发计划说明	(133)
§ 2.7	并行程序执行控制模式	(134)
2.7.1	并行程序执行控制模式概念	(135)
2.7.2	现有几种执行控制模式	(136)
2.7.3	数据驱动/相关驱动的执行控制模式	(138)
第二章	小结	(142)

第三章 并行分解技术

§ 3.1	并行分解技术概论	(143)
3.1.1	问题及其解的结构	(143)
3.1.2	说明性定义与构造性定义	(147)
3.1.3	问题定义的并行分解	(148)
3.1.4	同步与合作问题	(153)
§ 3.2	论域分解之一	(155)
3.2.1	并行 Schwarz 交替法	(155)
3.2.2	D-N 交替法	(157)
3.2.3	容量矩阵法	(160)
3.2.4	有限元法	(161)
§ 3.3	论域分解之二	(162)
3.3.1	空中交通管制问题	(162)
3.3.2	确定问题论域	(162)
3.3.3	对象识别	(163)
3.3.4	问题分解与过程抽象	(164)

3.3.5	模块调用图	(165)
§ 3.4	对象分解方法	(166)
3.4.1	基于对象程序设计	(166)
3.4.2	并行对象程序设计	(167)
§ 3.5	计算分解	(171)
3.5.1	一阶线性递归计算	(172)
3.5.2	三对角线方程组直接解法	(175)
§ 3.6	控制分解	(178)
3.6.1	问题的特点	(178)
3.6.2	管理员/工人执行控制方法	(178)
第三章	小结	(182)

第四章 分布式反应系统

§ 4.1	分布式反应系统与形式开发方法	(184)
4.1.1	分布式反应系统特点	(184)
4.1.2	形式开发方法	(186)
4.1.3	形式方法的选择	(191)
§ 4.2	传统 Petri 网与扩充 Petri 网	(193)
4.2.1	传统 Petri 网	(193)
4.2.2	分析技术	(195)
4.2.3	扩充的 PN 模型	(199)
§ 4.3	分布式状态机模型	(201)
4.3.1	问题的提出	(201)
4.3.2	非形式描述	(202)