

● 研 究 生 用 书 ●

PARALLEL DISTRIBUTED
PROGRAMMING

华中理工大学出版社



刘 键

并行分布式程序设计

并行分布式程序设计

刘 键

华中理工大学出版社



393814

程序设计

(鄂)新登字第 10 号

图书在版编目(CIP)数据

并行分布式程序设计/刘键

武汉:华中理工大学出版社, 1997 年 7 月

ISBN 7-5609-1565-5

I. 并…

I. 刘…

Ⅲ. 电子计算机-软件-程序设计

N. TP311

· 研究生用书 ·

并行分布式程序设计

刘 键

责任编辑 陈少华

华中理工大学出版社出版发行

(武昌关山口 430074)

新华书店湖北发行所经销

武汉市汉桥印刷厂印刷

开本:850×1168 1/32 印张:11.125 插页:2 字数:292 000

1997 年 7 月第 1 版 1997 年 7 月第 1 次印刷

印数:1—3 000 定价:14.80 元

ISBN 7-5609-1565-5/TP·223

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

ND26 124

内 容 提 要

并行程序设计是当前计算机科学前沿研究的一个热点。为了适应这种形势的需要,本书系统地分析研究国内外近 10 年在并行分布式程序设计方面所发表的大量文献,同时着重总结作者研制的 Fortran 并行化系统 HZ-PARA- I 和 HZPARA- II 的经验。在此基础上,进一步明确阐述并行分布式程序设计特别是并行化编译的数学模型、基本理论、基本方法以及该学科的基本结构。主要面向高性能大型科学与工程计算,重点是论述并行划分、可执行条件生成、算法映射以及调度算法,并全面系统地论述并行化编译系统实现中主要步骤及其设计方法以及并行程序设计环境的若干问题。

Abstract

So far, parallel programming is one of the hot points of computer science frontier. As a consequence, this book systemly presents and analyses amount of papers on parallel distributed programming, issued in the last decade. It especially emphasises the experience of Fortran paralleliying system HZPARA and HZPARA- I , which are developed by ourselves. Then, it provides the accurate concept and contents of parallel distributed programming, and the mathematic model, fundmental theory, methodology and framework of the science of parallelizing compilation. It faces to the high performance computing for science and engineering. It covers contents about parallel partitioning, executable condition generating, algorithm mapping and scheduling. The book also presents in details the main steps of parallelizing compiler implimentation and several problems on parallel programming enviroment.

“研究生用书”总序

研究生教材建设是提高研究生教学质量的重要环节,是具有战略性的基本建设。各门课程必须有高质量的教材,才能使学生通过学习掌握各门学科的坚实的基础理论和系统的专门知识,为从事科学研究工作或独立担负专门技术工作打下良好的基础。

我校各专业自 1978 年招收研究生以来,组织了一批学术水平较高,教学经验丰富的教师,先后编写了公共课、学位课所需的多种教材和教学用书。有的教材和教学用书已正式出版发行,更多则采用讲义的形式逐年印发。这些讲义经过任课教师多年教学实践,不断修改、补充、完善,已达到出书的要求。因此,我校决定出版“研究生用书”,以满足本校各专业研究生教学需要,并与校外单位交流,征求有关专家学者和读者的意见,以促进我校研究生教材建设工作,提高教学质量。

“研究生用书”以公共课和若干门学位课教材为主,还有教学参考书和学术专著,涉及的面较广,数量较多,准备在今后数年内分批出版。编写“研究生用书”总的要求是从研究生的教学需要出发,根据各门课程在教学过程中的地位和作用,在内容上求新、求深、求精,每本教材均应包括本门课程的基本内容,使学生能掌握必需的基础理论和专门知识;学位课教材还应接触该学科的发展前沿,反映国内外的最新研究成果,以适应目前科学技术知识更新很快的形势;学术专著则应充分反映作者的科

研硕果和学术水平,阐述自己的学术见解。在结构和阐述方法上,应条理清楚,论证严谨,文字简炼,符合人们的认识规律。总之,要力求使“研究生用书”具有科学性、系统性和先进性。

我们的主观愿望虽然希望“研究生用书”的质量尽可能高一些,但由于研究生的培养工作为时尚短,水平和经验都不够,其中缺点、错误在所难免,尚望校内外专家学者及读者不吝指教,我们将非常感谢。

华中理工大学研究生院院长

陳 珽 黃樹槐

1989.11.

写在 1995 年

在今天,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。

显然,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,就没有伟威雄壮的科技局面,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。

“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的经验,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 珽教授就为之写了《“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”。第二任研究生院院长，也就是当时我校的校长黄树槐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，这套用书已出版了 6 批共 30 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 8 种分获国家级、部省级图书奖，有 13 种一再重印，久销不衰，有的印刷总数已近万册。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，正是江南初春，“最是一年春好处”。华工园内，

红梅怒放，迎春盛开，柳枝抽绿，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，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。

诗云：“嘤其鸣矣，求其友声。”这是我们的心声。

中国科学院院士
华中理工大学校长
兼研究生院院长

杨叔子
于华工园内
1995年3月7日

前 言

气象预报、石油勘探、飞机船舶设计、核电站设计、卫星遥感信息处理、航空航天飞行控制等几乎所有设计和工业部门,都离不开大型数据处理与科学计算,都要求作高速计算。特别是大型实时处理系统,对高计算速度的要求更加严峻。因此,高性能计算机的性能高低,是一个国家的科学技术水平高低和国力强弱的重要标志。在美国等一些工业发达的国家,这种高性能并行计算机硬件的设计生产,已无多大问题,已由 80 年代中期的第一代发展到当前的第三代,技术比较成熟,当前的问题是软件,特别是并行化编译,还处于初级阶段。1993 年由世界各大计算机厂家、应用部门和研究部门共同制订的一高性能 Fortran(HPF)语言,象征着并程序程序设计语言及其编译的最高技术水平,但这仍然是一个要由程序员作数据划分的半自动并行化语言,用户用起来十分困难。因此,并行化编译仍然是一个待解决的严重问题。

1990 年华中理工大学计算机系研制成功了一个全自动的并行化编译系统 HZPARA,现在又正在实现 HZPARA- I,该研究结果提出的理论方法,和国外当前流行的方法大不相同,是建立在分配相关的理论基础上的,即对迭代空间进行等价分类从而同时完成数据划分与计算划分。国外最流行的方法(如 Fortran D 编译所用的方法)是由用户作数据划分,然后由编译作计算划分,其原则是“数据在哪里,计算就分配到哪里”。经验证明,我们提出的方法理论更加完善,性能更加优越,正引起国外同行的注意。

为了培养并行分布式处理软件方面的高级科学技术人才,加速学术交流,促进学科发展,特撰写本书,总结现有成果,进行理论概括,指出研究方向,促进应用推广。

本书编写的原则是:

(1)系统地分析研究国内外近 10 年在并行分布式计算方面所

发表的大量文献,特别着重总结我们自己研制的 Fortran 并行化系统 HZPARA 和 HZPARA-Ⅱ的经验。在此基础上,进一步明确阐述并行分布式程序设计特别是并行化编译的数学模型、基本理论、基本方法以及该学科的基本结构。

(2)主要讨论高性能大型科学计算的并行分布式程序设计方法,重点是论述并行划分、可执行条件生成、算法映射以及调度算法。在此基础上,全面系统地论述并行化编译系统实现中主要步骤的设计方法以及并行程序设计环境的若干问题。

由于时间紧迫,书中有许多内容是第一次发表的,虽然已经在系统上实现,但表达不切,总结不当之处,恐在所难免,希望读者批评指正。

本书是在作者所领导的科研组长期探索实践的基础上总结提高写成的,第四章和第五章部分内容分别利用了我的学生李文毅和谢卫的硕士论文,其它许多地方也参考了国内外文献 100 多篇,特向这些作者致谢。

特别要感谢加拿大 McGill 大学高光荣教授,我 1993 年应邀到该校访问期间,曾得到高教授多方面的帮助,这对本书的写作起到直接的推动作用。

此外,还要感谢研究生院和出版社的大力支持,感谢责任编辑陈少华同志认真负责的编辑工作。

刘 键

1995 年 10 月

目 录

第一章 并行分布式计算与并行化编译系统

§ 1.1 并行分布式计算机系统	(1)
§ 1.1.1 需要——大型科学与工程计算	(1)
§ 1.1.2 提高计算机系统性能的基本途径	(3)
§ 1.1.3 几种基本的并行结构	(4)
§ 1.2 并行性与并行计算	(8)
§ 1.2.1 并行计算举例	(8)
§ 1.2.2 并行处理	(8)
§ 1.2.3 并行性	(10)
§ 1.3 并行分布式程序设计	(14)
§ 1.3.1 一般程序设计	(14)
§ 1.3.2 并行分布式程序设计的一般过程	(16)
§ 1.3.3 并行分布式程序的特点	(17)
§ 1.3.4 并程序设计的特殊困难	(19)
§ 1.3.5 并程序设计的基木问题与基本途径	(20)
§ 1.4 并程序设让语言的一般特性	(21)
§ 1.4.1 总体设计时必须耍考虑的问题	(21)
§ 1.4.2 并程序设让语言特性	(25)
§ 1.5 自动并行划分与并行化编译	(27)
§ 1.5.1 自动并行划分的目标与任务	(27)

§ 1.5.2 并行化编译的基本问题·····	(29)
本章小结·····	(31)
习题与思考题·····	(32)

第二章 并行计算模型

§ 2.1 并行计算模型与并行语义·····	(34)
§ 2.1.1 转移系统·····	(35)
§ 2.1.2 Mazurkiewicz Trace 语言·····	(36)
§ 2.1.3 事件结构·····	(38)
§ 2.1.4 异步转移系统·····	(42)
§ 2.1.5 语义问题·····	(42)
§ 2.2 数据驱动(并行计算)模型·····	(43)
§ 2.2.1 模型·····	(43)
§ 2.2.2 预备知识·····	(44)
§ 2.2.3 主要定理·····	(45)
§ 2.3 并行性的度量·····	(51)
§ 2.3.1 并行度及其概示图·····	(51)
§ 2.3.2 调和平均性能·····	(52)
§ 2.4 数据驱动模型下的加速比估计式·····	(53)
§ 2.4.1 复杂性度量·····	(54)
§ 2.4.2 不考虑通信开销时的加速比估计式·····	(54)
§ 2.5 考虑通信开销时的加速比估计式·····	(58)
§ 2.5.1 模型·····	(58)
§ 2.5.2 加速比估计式·····	(58)

§ 2.5.3 几点结论·····	(60)
本章小结 ·····	(61)
习题与思考题 ·····	(62)

第三章 程序并行化的一般理论

§ 3.1 并行分解概论 ·····	(63)
§ 3.1.1 并行分解问题的提出·····	(63)
§ 3.1.2 并行性的分级·····	(64)
§ 3.1.3 并行分解的困难性·····	(66)
§ 3.1.4 并行分解的一般原则·····	(68)
§ 3.1.5 经验与启发·····	(71)
§ 3.2 图的最优划分 ·····	(73)
§ 3.2.1 数学模型——化为分配问题·····	(73)
§ 3.2.2 构造初始分配算法·····	(75)
§ 3.2.3 最优分配算法·····	(76)
§ 3.2.4 不保证子图连通的划分算法·····	(77)
§ 3.2.5 确保子图连通的算法·····	(78)
§ 3.2.6 推广·····	(79)
§ 3.2.7 实例·····	(80)
§ 3.3 相关图的划分 ·····	(85)
§ 3.3.1 问题的提出·····	(85)
§ 3.3.2 问题的解决途径·····	(87)
§ 3.4 DO—LOOP 的并行划分 ·····	(91)
§ 3.4.1 DO—LOOP 语句 ·····	(91)
§ 3.4.2 层次相关图·····	(92)

§ 3.4.3	并行划分问题·····	(94)
§ 3.5	具有约束条件的相关方程的解·····	(97)
§ 3.5.1	一维情形·····	(97)
§ 3.5.2	多维情形 ·····	(100)
§ 3.5.3	线性函数的上下界 ·····	(102)
§ 3.6	强并行划分 ·····	(105)
§ 3.6.1	强并行划分算法 ·····	(105)
§ 3.6.2	相关区域的确定 ·····	(106)
§ 3.6.3	相关链接图的构造 ·····	(108)
§ 3.6.4	并行划分与程序重构 ·····	(109)
§ 3.6.5	迭代变量可分离情形的 DO 并行划分 ·····	(113)
§ 3.7	弱并行划分问题与超平面法 ·····	(116)
§ 3.7.1	超平面法原理 ·····	(116)
§ 3.7.2	通信费用最小的划分 ·····	(117)
§ 3.8	线性变换法 ·····	(123)
§ 3.8.1	数学模型 ·····	(123)
§ 3.8.2	静态分解 ·····	(128)
§ 3.9	循环变换与并行优化 ·····	(136)
§ 3.9.1	初等变换 ·····	(136)
§ 3.9.2	么模变换的性质与循环变换 ·····	(139)
§ 3.9.3	特殊情况 ·····	(143)
§ 3.9.4	适当么模变换的存在性 ·····	(146)

§ 3.10 迭代空间的分块·····	(151)
§ 3.10.1 问题与定义·····	(151)
§ 3.10.2 实现·····	(152)
§ 3.10.3 非正方形迭代空间的分块·····	(154)
§ 3.11 同态变换法·····	(155)
§ 3.11.1 理论·····	(156)
§ 3.11.2 算法·····	(159)
§ 3.12 启发式搜索法·····	(166)
本章小结·····	(170)
习题与思考题·····	(171)

第四章 算法映射

§ 4.1 算法结构与系统结构的匹配 ·····	(173)
§ 4.1.1 问题的提法 ·····	(173)
§ 4.1.2 网络拓扑判别准则 ·····	(175)
§ 4.1.3 常见的几种规则网络拓扑 ·····	(176)
§ 4.2 网结构到超立方结构的映射 ·····	(180)
§ 4.2.1 拓扑映射 ·····	(180)
§ 4.2.2 环映射到超立方结构 ·····	(181)
§ 4.2.3 网映射到超立方结构 ·····	(182)
§ 4.2.4 二维网结构映射的改进方法 ·····	(183)
§ 4.2.5 多维网格情形 ·····	(187)
§ 4.3 树结构到超立方结构的映射 ·····	(187)
§ 4.3.1 双根二叉完全树到超立方的映射 ·····	(187)

§ 4.3.2	三叉完全树的映射	(190)
§ 4.3.3	四叉完全树的映射	(192)
§ 4.4	任意二叉树到超立方结构的映射	(195)
§ 4.4.1	概念与记号	(195)
§ 4.4.2	算法描述	(197)
§ 4.4.3	镜象折叠算法	(201)
本章小结		(206)

第五章 程序并行化的实现

§ 5.1	程序并行化的一般过程	(209)
§ 5.1.1	引论	(209)
§ 5.1.2	HZPARA 的总体框架	(210)
§ 5.1.3	HZPARA 中相关分析器的结构	(212)
§ 5.2	程序的过程调用图——CALL 图	(218)
§ 5.2.1	基本概念	(218)
§ 5.2.2	简单 CALL 图的构造	(219)
§ 5.2.3	基于 CALL 图的相关分析	(221)
§ 5.3	过程作为参数时 CALL 图的构造	(224)
§ 5.4	程序的中间表示及其构造	(230)
§ 5.4.1	基本概念	(231)
§ 5.4.2	程序 PDG 图及其构造	(234)
§ 5.4.3	程序的系统相关图 SDG	(241)
§ 5.5	程序的局部相关分析	(242)
§ 5.5.1	基本概念和定义	(243)