

BINGXINGCHULIJIISHU

并·行·处·理·技·术·

张德富 编著

国家自然科学基金资助项目

南京大学出版社

(苏)新登字第 011 号

内 容 简 介

本书系统地介绍了并行处理技术的基本概念,基本原理和方法,以及新近研究成果。全书分绪论、向量处理、多处理机系统和 VLSI 计算结构等四章,每章都含有结构、软件和算法等内容,有些内容是作者及其合作者的研究成果。

本书取材新颖,结构严谨,深入浅出,便于学习。它既可作为大学高年级学生和研究生
的教科书,也可供有关科技人员自学参考。

并 行 处 理 技 术

张德富 编著

*

南京大学出版社出版

(南京大学校内)

江苏省新华书店发行 江苏省常熟市印刷二厂印刷

*

开本 787×1092 1/16 印张 14 字数 341 千

1992 年 2 月第 1 版 1992 年 2 月第 1 次印刷

印数 1—2000

ISBN 7-305-01264-5/TP·36

定价: 7.50 元

序

随着电子器件的发展,计算机的处理速度有了很大提高,但是科学技术在不断进步,计算机应用领域在日益扩大,对计算机处理速度的要求越来越高,仅从器件的改进来提高计算机处理速度已经不能满足客观的需要,还需从计算机系统结构等方面来考虑如何提高计算机的处理速度。并行处理就是人们考虑的最主要的一种方法。所谓并行处理是指计算机同时处理多条指令,多个数据或多个任务。要实现对一个问题的并行处理光有可并行处理的硬件结构是不够的,还必须有支持并行处理的软件和处理问题的并行算法。现代并行处理技术包含并行的系统结构,支持并行处理的软件和实现并行处理的并行算法等方面的内容。近几年并行处理技术有了很大的发展,由成千上万台微型处理机组成的大规模并行处理系统已成为商品,并行处理技术的研究和开发不再局限于理论和样机。人们越来越清楚地看到并行处理技术的重要性以及它在计算机科学技术中的作用。现在并行处理技术已成为计算机技术领域中最重要分支之一。

张德富教授编著的“并行处理技术”一书系统地介绍了并行处理技术的基本概念、基本原理和方法,以及新近的研究成果。该书取材新颖,对近几年兴起的一些重要研究方向如VLSI并行计算结构,并行分布处理技术及其应用,并行结构与并行算法的关系等作了介绍和探讨。该书结构合理,系统性强。全书分绪论,向量处理,多处理机系统和VLSI计算结构等四章,每章都涉及结构,软件和算法等内容,以便读者统盘考虑并行处理结构、软件、算法和应用等方面的问题。该书深入浅出,注意了理论联系实际,有些内容取材于实用的并行处理系统和作者等人的研究成果。

“并行处理技术”一书不仅可用来作为大学本科学学生和研究生们的教科书,还可供有关科技人员自学参考。我期望这本书将会对发展并行处理技术作出贡献。

孙钟秀

1991年11月于南京

前 言

最近20多年,并行处理技术一直是计算机科学技术领域内的重大研究课题之一。由于它对提高计算机的性能有着重大作用和应用前景非常广泛,现在世界各国计算机工作者都非常重视这项技术的研究。

并行处理技术发展很快,新的文献浩如烟海,给人以应接不暇之感。本书力求取材新颖,以浅显易懂的语言介绍并行处理技术的基本概念、基本原理和方法,以及值得研究的几个基本问题。全书分四章,每章都包含并行处理计算机结构,并行处理计算机软件和并行算法等方面的有关内容,其中有些内容是作者及其合作者盛蓝、须成忠、顾卫刚、刘弘、吴巧泉、袁道华、王小军、孙进林等人共同的研究成果。

本书初稿写成于1982年,经过多次教学试用,在1989年和1990年作了较大修改和补充,才成此书。它既可作为大学高年级学生和研究生的教材,也可供有关科技人员自学参考。如果读者在计算机系统结构、程序设计及其语言、操作系统和计算方法等方面具有一定的基础知识,学习本书将不会有太大的困难。

在编写本书的过程中得到了孙钟秀教授等的鼓励、支持和帮助,在此谨向他和前面提到的盛蓝等八位同志致以诚挚的谢意。限于作者水平,书中欠妥及谬误之处敬请读者指正。

作 者

1990年9月

目 录

第一章 绪 论	1
第一节 并行处理	1
1. 什么叫并行处理.....	1
2. 为什么要研究并行处理.....	3
3. 并行处理应用.....	3
4. 并行处理中的几个难题.....	6
5. 研究并行处理应考虑的几个问题.....	7
第二节 并行处理计算机	8
1. 并行处理计算机的发展和分类.....	8
2. 多处理机的发展和分类.....	11
第三节 并行处理计算机软件	13
1. 并行程序设计语言.....	13
2. 提高并行程序设计自动化的程度.....	14
3. 操作系统.....	15
第四节 并行算法	16
1. 什么叫并行算法.....	16
2. 并行算法的发展.....	16
3. 并行算法的分类.....	17
4. 计算问题的并行性.....	18
5. 并行计算.....	19
第二章 向量处理	26
第一节 流水线处理机和并行处理机	26
1. 流水线处理机.....	26
2. 并行处理机.....	31
第二节 向量处理基础	33
1. 基本概念.....	33
2. 多向量任务调度.....	37
3. 向量处理方式.....	40
第三节 现代向量处理机	41
1. CRAY-1 的结构.....	41
2. CRAY-1 的向量处理.....	44
3. CRAY X-MP和CRAY-2.....	50
4. 多任务处理.....	52
第四节 向量化和优化方法	55
1. 用于向量处理的并行语言.....	55
2. 向量化编译程序的设计.....	58

3. 向量优化技术	60
4. 存储分配	63
第五节 向量计算	65
1. 矩阵乘法	65
2. 递归问题的计算	69
3. 解线性代数方程组	77
4. 解稀疏线性代数方程组	80
第三章 多处理机系统	84
第一节 多处理机系统结构	84
1. 提高计算机结构并行性的两种主要方法	84
2. 紧耦合系统和松耦合系统	85
3. 互连方式	87
第二节 互连网络	92
1. 通用连接网络	93
2. 一些基本排列	93
3. 排列代数	96
4. 单级互连网络	97
5. 单级互连网络的特性	99
6. 多级互连网络	101
第三节 超立方体多处理机系统	106
1. 超立方体结构和特性	106
2. NCUBE 超立方体多处理机系统	108
第四节 MIMD 并行算法	111
1. 宏流水线并行算法	111
2. 同步并行算法	118
3. 异步并行算法	123
第五节 任务分配	125
1. 概述	125
2. 任务静态分配算法	126
3. 动态负载平衡算法	132
第六节 并行结构与并行算法的关系	140
1. 概述	140
2. 虚拟算法	141
3. 结构模型	142
4. 算法特征	143
5. 实例	146
第四章 VLSI 并行计算结构	151
第一节 VLSI 阵列结构	151
1. 一维线性阵列算法	151
2. 二维线性阵列算法	155
3. VLSI 阵列结构的特性	159
4. 可重构处理器阵列	160

第二节 VLSI 阵列算法的自动生成技术	162
1. Systolic 阵列算法的设计	162
2. VLSI 阵列模型和算法模型	163
3. 算法变换	165
4. 实例	167
第三节 VLSI 矩阵运算处理器	169
1. VLSI 运算模块	169
2. 分块矩阵算法及其性能分析	173
第四节 Transputer 和 Occam 语言	179
1. Transputer 计算机	180
2. Transputer 网络	186
3. Occam 语言	187
第五节 在 Transputer 并行处理系统上模拟 PDP 模型解组合优化问题	195
1. 一种 PDP 模型——玻尔兹曼网络模型	196
2. 旅行商问题	198
3. 任务安排算法	206

第一章 绪 论

并行处理是一门综合性较强的学科,它涉及的内容包括结构、软件和算法等多个方面,这些方面相互联系,互为条件,互为保证。本章讨论这几个方面的研究现状和发展动向。

第一节 并行处理

1. 什么叫并行处理

随着电子管、晶体管和集成度日益提高的集成电路的出现,元器件技术的不断进步,计算机的速度不断提高,性能不断增强,但是由于电子信号的最大传输速度是有限的,仅靠提高电子部件的速度来改善计算机的性能以满足用户对计算机愈来愈高的要求是不可能的。提高计算机性能的另一重要途径就是采用并行处理技术。

定义 并行处理是一种有效的强调开发计算过程中并行事件的信息处理方式。

定义中的信息处理具有通常数据处理、信息处理、知识处理和智能处理等四种含义。从计算机处理的角度来看,这四种处理的领域如图 1.1 所示。数据是客观对象的表示,数据处理空间最大,它包括不同格式的数字处理和字符处理。数据空间中的数据对象相互没有联系。数据处理是计算机的主要任务。信息是数据及其含意。一个信息项是一个通过语法特征相联系的数据对象的集合。随着越来越多的数据结构被研制成功,计算机用于信息处理的范围不断扩大。信息处理是数据处理的一个子空间,但它不包含规律性的处理。知识是人们对客观对象规律性的认识,它是由加上了一些语义的信息项组成的。知识处理包括知识表示、知识获取和处理规则(推理)。智能是从知识项的集合中引伸出来的,它体现了人们在认识、改造自然过程中脑的能力。智能处理包括定理证明、逻辑推理、创造性思维...等等。随着现代科学技术的发展,以上四个方面对计算机并行性的要求越来越高。

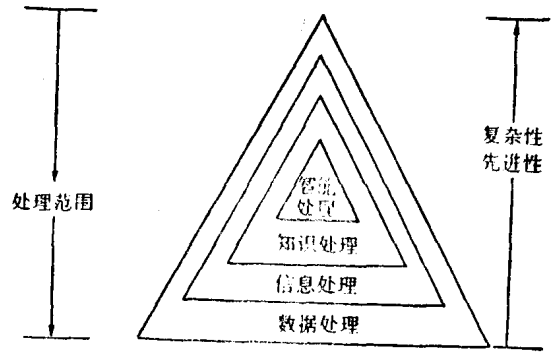


图 1.1 四种处理

并行性有三种含义:一是同时性,指两个或多个事件在同一时刻发生在多个资源中;二是并发性,指两个或多个事件在同一时间间隔内发生在多个资源中;三是流水线,指两个或多个事件发生在可能重叠的时间段内。开发问题中的并行性是为了设法予以并行处理,提高并行处理计算机的使用效率。一般说来,有计算并行性、搜索并行性和逻辑并行性等三类性质不同的并行性。计算并行性与算法设计及算法的表示密切相关。在数值计算中,经常使用的计算模式有表达式求值和递归两种。例如,求以下两个向量

并行性有三种含义:一是同时性,指两个或多个事件在同一时刻发生在多个资源中;二是并发性,指两个或多个事件在同一时间间隔内发生在多个资源中;三是流水线,指两个或多个事件发生在可能重叠的时间段内。开发问题中的并行性是为了设法予以并行处理,提高并行处理计算机的使用效率。一般说来,有计算并行性、搜索并行性和逻辑并行性等三类性质不同的并行性。计算并行性与算法设计及算法的表示密切相关。在数值计算中,经常使用的计算模式有表达式求值和递归两种。例如,求以下两个向量

$$V_1 = \{X_1, X_2, \dots, X_n\} \quad (1.1)$$

$$V_2 = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_n\} \quad (1.2)$$

的内积,可以用表达式求值的模式

$$R = V_1 * V_2 = (X_1 Y_1 + X_2 Y_2 + \dots + X_n Y_n), \quad (1.3)$$

也可以采用线性递归模式

$$R = \begin{cases} Z_0 = 0, \\ Z_i = X_i Y_i + Z_{i-1}, & 1 \leq i \leq n. \end{cases} \quad (1.4)$$

这两种不同的计算模式,分别揭示了两种不同的计算并行性。第一种模式提供了按树状结构进行处理的可能性(图 1.2);第二种模式则可以用流水线方式来处理(图 1.3)。所谓搜索是指按

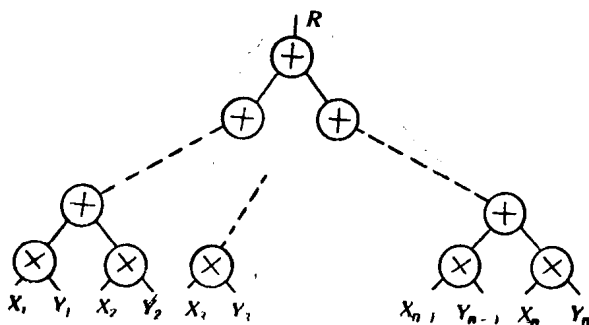
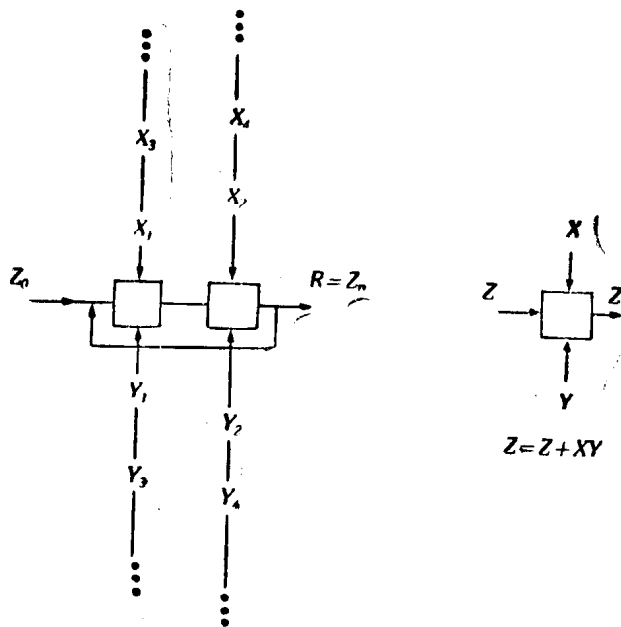


图 1.2 树状结构



若 n 为奇数,令 $X_{n+1} = Y_{n+1} = 0$, 则 $Z_{n+1} = Z_n$.

图 1.3 流水线结构

给定键值(或模式)从存储空间检索出与键值匹配的有关内容。对于线性存储空间最自然的搜索算法是顺序查找。为了提高按地址访问存储空间的检索效率,配合各种不同的文件结构设计了许多不同的搜索算法,如分块法、二分法、索引法等。然而,从本质上讲,由于按地址访问的单端口存储结构只能一个单元一个单元地顺序访问,因此上述所有的改进搜索算法只是为

了缩小搜索范围,减少或避免不必要的测试性检索,而不是着眼于如何开发搜索的并行性。为了实现真正的并行搜索,必须从根本上改变存储结构。关联存储器就是这样的一种存储结构,搜索键并行地与所有记录键值进行比较,同时给出所有匹配信号,一次检索出所有其键值与搜索键匹配的记录,实现并行检索。逻辑并行性主要是指对问题空间或状态空间进行搜索时存在的各种并行性,特别是 AND 并行性和 OR 并行性。

并行事件可以在计算机系统中的不同处理级获得。按照程序概念有四个处理级:一是作业或程序级;二是任务或进程级;三是指令级,它涉及数据相关、循环语句和向量等;四是指令内部操作级,由计算机硬件实现。前两者需要开发并行处理算法(简称并行算法),它们的实现依赖于解大型问题的多个程序所需要的硬件和软件资源的有效安排,以便多个程序并行执行,所以并行算法不仅仅是一个数学问题。

并行处理系统是由 n 台处理机(器)或 n 台等效处理机(器)组成的,受统一的操作系统控制,解一个问题,系统硬件的价格不能大于单个处理机(器)硬件价格的 n 倍,系统的运算速度不能远小于单个处理机(器)速度的 n 倍。这体现了定义中的“有效”的含意。

通过以上这些对“并行处理”定义的解释,说明并行处理是一门综合性较强的学科,它涉及到算法、语言、操作系统和系统结构等方面的知识,这些方面相互联系,互为条件,互为保证。

2. 为什么要研究并行处理

由于并行性蕴涵着提高信息处理速度和解决大规模问题的巨大潜力,展现出由多个处理机组成更大的计算机系统以及由超大规模集成电路(VLSI)组成计算机的前景,因此对并行处理技术的研究在最近 20 多年一直是计算机科学技术领域内的重大课题之一。美国国防部尖端研究规划总署 1982 年初在纽约召开的一次会议上明确地提出提高目前计算机系统性能的办法是“大量地并行”。尽可能地从一切方面引入并行处理技术是计算机科学技术及其应用技术发展的必然趋势。

3 并行处理应用

对应用者来说,使用并行处理计算机具有较好的性能价格比,可维性,可用性,可靠性,可扩展性以及较高的处理速度。因此并行处理的应用非常广泛。下面阐述一些有代表性的并行处理应用领域。

(1) 气象、海洋和天体物理

大气、地球环境、外层空间等多维模型的构筑已经成为全世界科学家关注的主要问题,为了在有效的时间内得到计算模拟的结果,需要使用超高速的并行处理计算机。

1° 气象数值预报

为了进行短期气象数值预报和长期的诸如洪涝、干旱和环境污染等不测事件的预测,需要建立气象模型。如果把地球从南到北分成 2° 一格,沿赤道分成 4° 一格,再将大气层分为 20 层,形成一个三维网格。设每个网格上的计算量为 3000 次。若取时间步长为 2 分钟,则当需要给出一天的气象预报时,总的计算量约为 3.5×10^{11} 次,在像 CRAY-1 这样每秒 1 亿次浮点运算的计算机上需要计算 1 小时左右。若网格边长减少一半,则需要一台计算速度比原来高 8 倍的计算机。

2° 海洋学

和大气研究相比,海洋学研究中使用较小的网格和较长的时间间隔。如以 1° 为一网格,对太平洋的 50 年作一次完整的模拟,在 Cyber-205 计算机上计算需要 1000 小时。

3° 天体物理

太阳系中地球等行星的形成过程可以用计算机模拟。天体物理学研究的动态范围非常广泛,从几个毫秒到几十亿年,研究对象是三维的, N 个天体构成一整体。ILLIAC-IV 阵列处理机曾用于这方面的研究。

(2) 遥测地球资源数据处理

遥测(例如通过人造卫星)得到的地球资源数据,经过计算机的处理,可以了解农业、森林、地理、水利等方面的许多情况。在这些应用中,有大量图像信息需要处理。例如,陆地探测卫星的一张图像有 3 千万个字节,覆盖美国 Alabama 州需要 13 幅这样的图像,并且每 15 天需要产生一套新的完整的整个地球表面的图像,其计算量极大。美国航天局已订购了一台巨型并行处理计算机 MPP 用于地球资源卫星的图像处理,该机的最高运算速度是每秒 60 亿次 8 位整数运算,当探测器与情景有交互作用时,它基本上能提供实时的、按时间变化的情景分析。

(3) 石油开采和管理

在石油和天然气的开采、管理中使用并行处理计算机可以降低生产成本,提高生产率。

1° 地震探测

许多石油公司正在投资使用并行处理计算机进行地震数据处理。例如 1985 年,我国南海西部石油公司向美国并行计算机公司订购一台 PE3230MPS 并行处理计算机。用于地震数据处理的费用约占石油地震勘探费用的 10%。地震探测用爆炸或向地中打入一个重型水泵,利用计算机控制发出振动,产生声波;并在其周围分布着数千个接收器检测回声,用回收的数据画出二维的横切面图,以显示出地下的几何气层;然后使用重构技术确定可能含有石油的气层类型。这样的地震探测完全可以使用分布式计算机系统实时控制和实时处理,从而减少许多钻探,节省大量费用,大幅度地提高生产率。欲处理的地震数据是很多的,据统计,仅 1979 年,就有 10^{16} 位地震数据被处理。在美国休斯顿一家地球物理公司存档的地震数据约有 200 万个磁带卷,内有 30 万卷等待处理。并行处理技术在这个领域应用的前景是非常宽广的。

2° 贮油层模型的建立

例如 SOHIO 石油公司用 Cyber-203 建立了波罗的海湾油田的数值模拟器,它包括 1000 口油井。一个需要一年模拟实验的工作量,用 Cyber-203 计算只需要 33 分钟。

(4) 磁聚变和核反应堆

美国国家磁聚变能计算中心曾用两台 CRAY-1 和一台 CDC-7600 控制等离子体聚变实验。有关研究工作者正在倾向使用比现有的计算机性能高 100 倍的计算机来构筑等离子体动力学的模型。

用并行处理计算机模拟核反应堆可以为核反应堆的设计和安全控制提供反应堆条件的联机分析,对正常和异常操作进行自动控制,模拟训练操作员,以及快速估计潜在事故的调节过程。这些操作都是实时性的,对计算速度的要求较高。

(5) 生物和医学

现在已经可以在超级计算机上模拟生物系统。近年来遗传工程发展迅速，分子生物和结晶学的研究都离不开计算机。例如 Michigan 环境研究所已研制成一台叫做细胞计算机的高度流水线的机器，用来处理生物、医学图像，研究遗传变异，做父母和孩子间的基因匹配模拟。

在美国 Minnesota 州的 Rochester 的 Mayo 诊所，正在研究计算机辅助 x 射线断层照相技术 (CAT) 扫描器生成人体心脏不动和横向运动的三维视图；在 Courant 数学研究所，研究人员正在寻找合适的阵列处理机设计心脏中按时间顺序血液流动的三维模型，以便研制人造心脏。类似的研究可以用来实时地揭示人体其他器官的秘密。在目前 CAT 扫描器中，人体解剖图像的重建是二维的，产生的速度太慢，给人一种错觉，似乎心脏、肺等器官的运动停止了，Mayo 诊所的超级 CAT 扫描器预期有每秒 200 亿—300 亿浮点操作的速度，在几秒内产生跳动心脏的三维图像。该图像由 60—240 个细小相邻横切面堆积而成。由于处理和曝光时间短，使得生成跳动心脏的三维图像成为可能，并可以用注射色素来跟踪血液流动。

(6) 工程计算

水坝、桥梁、船只、超音速飞机、高层建筑以及太空飞行器的设计求解大型偏微分方程组和代数方程组。传统使用的预开发软件包(书写成顺序代码)需要相当长的解题周期。现在许多研究工作者正试图用并行处理计算机更有效地进行有限元分析操作，以便大幅度地提高设计效率。

并行处理计算机对空气动力学的贡献也是巨大的。美国航天局 Ames 研究中心用新的超级计算机做风洞试验的三维模拟。称为“数值航空动力学模拟设备”(NASF)的二台 10 亿次超级计算机已由 Burroughs 公司和 CDC 公司推出，它们能够为美国政府和商业飞机公司模拟完整的飞机设计。

(7) 社会经济学和政府部门

计量经济学、社会工程、政府人口普查、犯罪控制以及 2000 年世界经济模型的构造对大型计算机的需要量很大。诺贝尔奖金获得者 W. W. Leontief 1980 年提出一个世界经济输入-输出模型，在 CDC 科学计算机上进行了运算，并认为一个以部份裁军为特征的国际性经济关系系统可以缩小富裕国家和贫穷国家之间的差距。该项目受到了联合国的支持。

在美国使用大型计算机控制犯罪、收税和审计，进行人口普查和民意测验。据估计，在过去美国制造的大型计算机，有 57% 由美国政府使用。

(8) 国防

到目前为止，军事研究部门使用着现存的大部份超级计算机，例如用 CRAY-1 进行多弹头核武器设计，在关联处理机上为反弹道导弹程序处理雷达信号，用 S-1 多处理机系统做反潜艇战的海洋监视等。并行处理技术在这方面的应用前景非常美好。

(9) 人工智能

将来用图像、声音、文字等和人直接进行通信的超级计算机、智能 I/O 接口是必不可少的。下面是一些要求并行处理的人工智能课题：

- 图像处理
- 模式识别
- 计算机视觉

- 自然语言理解
- 机器推理
- 计算机辅助设计/计算机辅助制造/计算机辅助教学/办公自动化
- 智能机器人学
- 计算机专家系统
- 知识工程

(10) 基础研究

上面提到的许多应用领域和基础科学研究有关。下面是另外几个需要使用并行处理计算机的基础研究领域。

- 计算化学
- 计算物理学
- VLSI 的辅助设计

我国对并行处理技术及其应用的研究刚刚开始不久,随着国民经济建设的发展,需要使用并行处理计算机的单位愈来愈多,这方面的研究和使用的将会得到很大的发展。

4. 并行处理中的几个难题

近 20 多年尤其是最近 10 年并行处理技术取得了很大的进展,但也存在下面几个主要难题。

(1) 任务分配非常困难

在处理机数目很多的情况下,要把任何一个问题分成足够多的并行过程是非常困难的,并且这也不是所有问题都能做到这一点的。在分布式计算系统中,由于分布式算法(属于MIMD并行算法)具有分散的通信结构和相对独立的模块,在衡量一个算法好坏时,除了考虑时间复杂性和空间复杂性还要计算模块间通信量IMC,因而分布计算比其他的并行计算更加复杂。在分布计算中如何充分利用计算的局部性原理和寻找任务最优分配算法以减少过程之间(即模块间,或协作处理机之间)的通信量和获得高的性能,这是一个至今仍未解决的问题。在分布处理环境下的任务分配算法主要有图论法、计算的方法、启发式方法。在一般情况下,前二个方法是NP问题,而第三个方法并不追求最优化。

(2) 很难摆脱串行处理方式的约束

现有的软件产品绝大多数是按串行算法研制的。为了继承发扬人类的这笔财富,在原来的应用领域内研究并行处理技术时不得不考虑如何利用这笔财富,因此现有的并行算法绝大部分是从串行算法改造过来的。既然现有的并行算法多数是由串行算法发展而来的,一个很重要,也是很困难的问题就是如何摆脱传统串行的思维和处理方式方法的约束,创造出崭新的适用于现代并行处理系统的算法。

(3) 现有的算法语言对并行性的限制很大

算法是通过算法语言实现的。20多年来程序设计语言的发展虽然相当迅速,从Fortran, Cobol, Algol到Pascal,从Simula, 并发Pascal, Modula到Ada,但是它们都是以Von Neumann式的计算机为其物质基础的。它们对并行性的限制是非常严重的。例如在传统的程序设计语言中,变量对应于计算机的存储位置,控制语句对应于计算机中的转移指令等,因此语句的执行就和一些顺序执行结果的状态紧密相关。再如大量的赋值语句中的赋值功能对应于计

计算机系统中处理器与存储器之间频繁信息交换，这是无实际运算操作意义的，从而使传统程序设计语言效率很低。后来随着 SIMD 和 MIMD 并行处理系统的出现，产生了向量化 Fortran 和并发 Pascal 等，但是它们都是针对特定的机器，在满足特定的条件下才比较有效。也就是说，这些语言是非自然的，用它们所表示的程序只是紧密地反映了其计算机系统的特点。

(4) Von Neumann 模式一直伴随着并行处理计算机

现行的 SIMD 和 MIMD 系统结构仍然没有摆脱传统的以指令流为主导的 Von Neumann 模式。由于指令相关和地址空间相关等矛盾的出现，使并行性受到制约。SIMD 系统只是在单指令流的控制下为提高并行性力图增加能同时处理的数据流数目。它仍属于 Von Neumann 模式。并行处理机适于处理与向量有关的问题，但对数据存储方式有严格要求。流水线处理机对长的数组处理有利，但对短的数组处理一般不能忽略启动流水线的时间。MIMD 系统为提高并行性力图增加能同时处理的处理器数目，但是这些处理器却是 Von Neumann 模式的，并且与此同时却大大增加了信息交换、资源共享等问题的复杂性。这类机器高速度的并行性的获得都是以牺牲程序的通用性为代价的，要求用户编程序时尽量减少数据相关，这样就给并行算法的设计和实现带来巨大的困难。

(5) 处理器之间的通信开销有可能使并行处理技术得不偿失

伦敦帝国学院计算机系的 John Darling ton 说：“如果我们在要做这一切时仍然遵循 Von Neumann 模式，尤其是试图执行在本质上是顺序式的以 Von Neumann 为基础的语言，那么我们将会遇到严重的困难。因为在各个处理器之间需要保持广泛的联系和通信，以保证程序的不同部分以上述顺序方式执行。而这带来的麻烦马上就会超过能得到的好处。”当然这只是问题的一个方面，但这也足以说明在采用并行处理技术时不能不考虑到处理器之间的通信开销，有时它会成为实现并行处理技术的拦路虎。

(6) 并行处理技术的主要难题是软件

在串行机中，对于同一种给定的计算机，由于软件写得好坏而使该计算机执行工作中性能上的差别只有 2—3 倍，最多 5—10 倍。但是在并行处理计算机中，由于软件好坏而表现出的性能高低可能相差 50—100 倍。对于含有大量处理器的并行处理结构，软件对系统的影响更大，其性能差距可达几个数量级。软件的关键在于如何高效地进行存储管理和机间通信。软件中最难的是并行编译程序。

5 研究并行处理应考虑的几个问题

(1) 并行处理技术是一门综合性较强的技术。并行算法和程序是与并行处理计算机的结构和软件密切相联系的(图 1.4)。设计和分析并行算法和程序时，必须考虑它们的实现和实现它们的计算机硬件和软件；同样在设计和研制并行处理计算机时，也必须考虑应用背景和并行应用软件。从总体来说，需要考虑下列一些问题。

1° 对于一些特定的计算机，怎样设计最有效的软件。

2° 对于一个给定的程序，如何使之数据结构化，以便在给定的计算机上进行最优处理。

3° 对于一个特定的计算机和一组应用软件，怎样设计语言和编译系统。

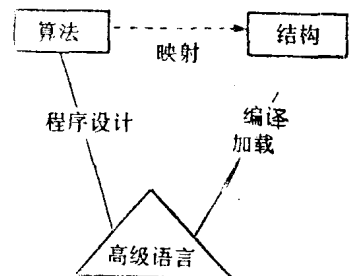


图 1.4 算法、语言、结构间的关系

- 4° 对于给定的计算机、程序设计语言和编译系统,如何设计算法和程序。
- 5° 如何构成一个并行处理计算机系统,使之最有效地实现特定的并行算法和程序。
- 6° 怎样确定不同的并行处理计算机的拓扑结构适于不同的计算任务。

这些问题的研究对于提高计算速度,增加处理能力和在并行处理计算机上有效地完成计算任务是很重要的。

(2) 面向应用,综合平衡,统筹开发并行处理计算机系统、软件和算法。并行处理技术比串行处理技术有许多优点,但是在通用性方面前者不如后者。现有的许多并行处理系统都是针对特定的应用对象研制的。根据某类或几类用户的需要设计并行处理计算机是很重要的。设计计算机是容易的,但是要知道应该设计什么样的计算机却是困难的。

(3) 第四代计算机的并行处理技术与新一代计算机的并行处理技术是相辅相成的,后者是在前者的基础上发展而成的。新一代计算机以知识处理和智能处理为目标,以并行检索知识和并行推理为主。第四代计算机中的并行处理技术主要用于数据处理和信息处理。控制流计算机不太适应知识处理和智能处理,而数据流计算机可以较有效地进行高速推理和知识库管理操作。在新一代计算机中数据流计算机将占有一定的比例,但是要完全取代指令流计算机是很难的,至少最近时期内不可能。前面叙述的以指令流计算机为实体的并行处理技术的一些难题,相应地在数据流计算机的并行处理技术中也存在。在研究新一代计算机的并行体系结构时,应从具体情况出发,不要一味地强调数据流计算机或指令流计算机。很可能采用两者兼而有之的并行处理结构,如美国研究的具有两级分组的Cedar处理机,在单个处理机中采用控制流原理,各组之间采用数据流控制。新一代计算机也要进行数据处理和信息处理,而第四代计算机也要对动态问题和不确定问题进行处理,它们可以相互借鉴。第四代计算机的并行处理技术相对来说比较具体、实际,它的研究和发 展对新一代计算机的并行处理技术无疑是一个推动。新一代计算机的并行处理技术,尤其是具有智能化的一些措施,对解决第四代计算机并行处理技术中的难题也肯定会有帮助。

并行处理技术正在蓬勃发展,方兴未艾,前途光明。在1989年第11届世界计算机大会上,D.J.Kuck曾对并行处理技术的发展做了一个冷静客观的估计。他认为并行处理的时代真正的开始是在80年代前半期,目前是处在“并行处理时代”中硬件工具建设阶段的中期,其软件工具建设只是刚刚开始;预计90年代将是并行处理软件工具建设的富有进展的十年,到2000年才能达到真正解决并行处理技术问题的阶段。我们生活在一个需要并行行动的世界,并行处理技术充满了美好的前景。

第二节 并行处理计算机

1. 并行处理计算机的发展和分类

并行处理计算机并不是凭空产生的,而是反映了单处理机向高指标发展的自然趋势。现代使用的单处理机结构是John Von Neumann式的,由单个程序计数器控制其执行顺序,在任何时刻,只有一条程序指令起作用,如图1.5所示。今天几乎所有的程序设计语言也都是遵循这一顺序模式。Von Neumann存储程序的计算机也称为控制流计算机,由于它的通用性,已经证明是一个强有力的工具,但是它存在下列问题。

(1) 机器的串行运算性质对于高速处理来说是一个严重障碍。由于信息传输速度 c 约等于每毫微秒 30 厘米, 物理尺寸受氢原子直径 d_H 的限制 ($d_H/c = 0.3 \times 10^{-28}$ 秒), 单处理机运算速度的提高是有限的。现在实际中存在的许多大规模和超大规模问题用传统单处理机是不能解决的。

(2) 现实需要具有能进行地区性分散处理、功能分散处理以及更加容易使用的计算机结构。单处理机是集中式的, 不能满足这些要求, 无法提供最佳的或者有效的经济效果, 达不到快速响应和高可靠的目的。

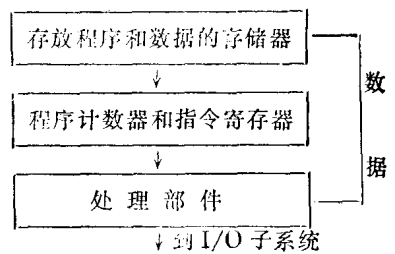


图 1.5 Von Neumann 结构

(3) Von Neumann 型计算机的设计思想, 对采用超大规模集成电路不太合适。

(4) 软件开发和维护费用日益增高。

(5) 不能直接处理符号、文字、图像、景物、自然语言等非数值信息。正因为不能直接感知二维、三维模式信息, 所以人机通信很不方便, 影响了计算机进一步应用和普及。

现在进行大规模信息处理采取的主要策略是克服 Von Neumann 模式的缺点和把工作分散到许多单处理机中, 尽可能高速度、高效率地进行并行处理, 即发展并行处理技术。

图 1.6 示意地表示了从单处理机和多计算机两极向现代并行处理系统发展的过程。在单处理机范围内采取时间重叠、资源重复、资源共享三大计算机结构学措施发挥并行性, 以提高处理速度和系统使用效率。这些措施仅停留在功能部件一级, 即在单处理机内部千方百计改进各种功能部件 (例如使用流水线处理部件, 多处理单元, 关联存储器等)。系统并行性的进一步提高, 必然向多计算机系统发展。把多台独立离散的计算机相连, 相互协调和配合, 各尽其用, 以及重复设置多台计算机, 引入程序和任务一级的并行性, 可以获得更高的系统效率和处理速度, 达到并行处理的更高水平。即采取功能专用化, 机间互连和网络化三项基本技术措施, 促使多计算机系统向并行处理系统发展。图 1.6 中代表发展过程的箭头, 分别从单处理机和多计算机两级引向同构型多处理机、异构型多处理机和分布式处理系统等三种类型的多处理机系统。

现代并行处理系统——多处理机系统的产生和发展不是偶然的, 而是计算机科学技术、特别是应用技术不断向前发展的必然结果。多处理机系统的主要优点是:

(1) 具有很高的性能价格比。1975—1977 年生产的计算机性能价格比与计算机规模的关系曲线, 如图 1.7 所示。曲线表示单处理机的性能价格比随其规模增大呈现下降趋势远远大于多处理机。

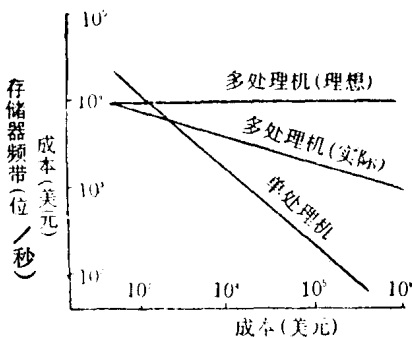


图 1.7 性能价格与规模的关系

曲线表示单处理机的性能价格比随其规模增大呈现下降趋势远远大于多处理机。

(2) 由于多处理机系统的模块性, 系统易于维护、检修, 具有很好的可维性和可用性。

(3) 具有很高的可靠性。系统包含大量同类型计算机, 使它具有很高的冗余度, 可在系统结构一级重新组织, 以适应容错的需要。

(4) 具有很高的处理速度。

(5) 具有很好的结构灵活性。

(6) 便于用超大规模集成电路实现。

同构型多处理机系统和异构型多处理机系统是指由一组紧密相联的多个处理机构成的单

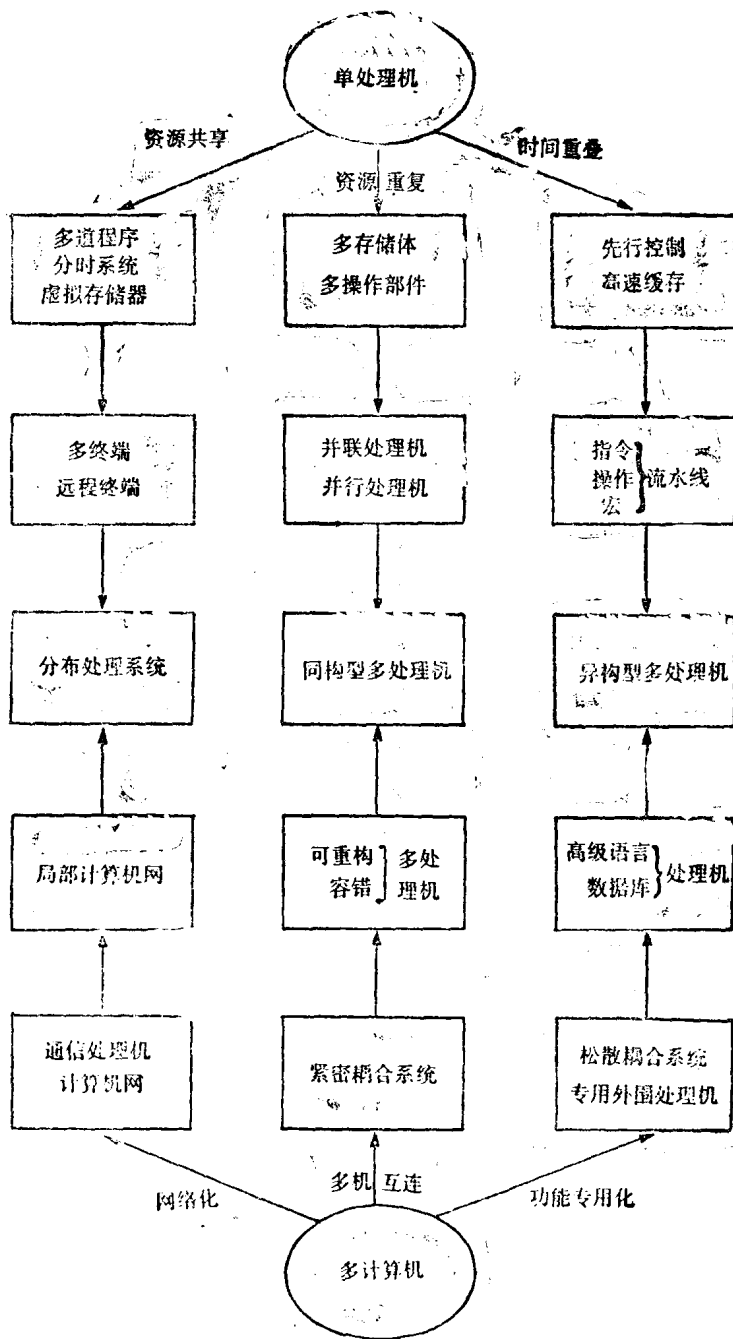


图 1.6 并行处理系统的发展

一计算机系统，它们在任务一级实现并行处理，以求解一个公共问题。这两种多处理机系统在互连网络、模块结构、可靠性设计、多任务操作系统、程序并行性分解等许多方面与分布式计算机系统有相似之处，但它们一般不具有以自治性为特征的分布控制。正因为如此，分布式计算机系统除了具有上述多处理机系统的优点以外，还具有每个局部点上的计算机都能与当地用户需求相匹配和快速响应等优点。