

数据相关性理论 及其在并行处理中的应用

范植华 著

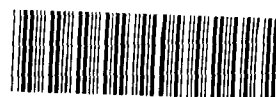
科学出版社

416109

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

数据相关性理论及其在 并行处理中的应用

范植华 著



00416109

科学出版社

1999

内 容 简 介

本书是数据相关性理论领域的专著,也是作者科研成果的结晶。全书共11章,内容涉及硬件并行设施、语言并行机制、数据相关视图、语句视图和依赖片断、变量视图、元素视图、控制依赖向数据依赖的转换、多岔控制转移的结构化重构、分部并行与循环分布、变序点分割、递归分割与并行划分等方面。

本书可供计算机系统研制人员和计算机技术工作者阅读。

图书在版编目(CIP)数据

数据相关性理论及其在并行处理中的应用/范植华著. —北京:科学出版社,1999.1

ISBN 7-03-007086-0

I. 数… II. 范… III. 数据相关-应用-并行处理 IV. TP274

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 32373 号

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1999 年 1 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

1999 年 1 月第一次印刷 印张:27

印数:1—2 000 字数:618 000

定价:45.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

序 言

在人类文明的发展史上,“计算”(“操作”是其推广)与“数据”(或径直称其为“数”)相辅相成,业已伴随人类智力的进步走过几千年的漫长历程。如同人们对计算及其相关性的研究一样,人们对数据——从零、自然数(包括奇数、偶数、素数等)、负数到有理数(真分数是其特例)、无理数、实数、复数直至代数数、超越数,等等——及其相关性的研究也贯穿于人类文明的始终,形成算术、代数、数论、实变函数和复变函数(特别是其中的超越函数与高级超越函数)等等日益复杂的数学分支。自现代电子数字计算机问世以来,程序设计作为一门科学,从其诞生的那天起就把研究对象——程序(或者广义地说,软件)定义作“计算(操作)与数据的结合”,使得对数据及其相关性的研究从一开始就在计算机科学与软件工程中占据着举足轻重的位置。时至今日,我们已经全面地进入结构化与面向对象的崭新阶段。程序和软件从“以计算为中心”前进到“以数据为中心”(控制依赖向数据依赖的转换更加强了数据的中心地位),对数据及其相关性的研究更加蓬勃、更加深入。

在计算机科学与软件工程的领域里,数据结构是一门相对“古老”的分支,它研究同一结构的同一出现内部数据之间的“逻辑关系”和“存储关系”。本书的内容则是其全面的拓宽与延展:它不限于“同一结构的同一出现内部”,而且扩展到“外部”,扩展到“同一结构的不同出现”之间,以及“不同结构的(当然是不同)出现”之间;它还不仅研究“逻辑关系”与“存储关系”,而且研究“操作关系”。串行操作的先后性与并行操作的同時性,都把“时序”(时序逻辑、时序层次等等)引入数据相关性理论。本书主要采用时序逻辑语言描述由数据相关性所导致的时序关系,这样做不仅为系统的逐步求精设计奠定可靠的基础,而且使得整个系统的性质可以根据时序逻辑语言中有关并发(并行与并发略有差异:前者多半用于微观,用于运算、操作;后者多半用于宏观,用于程序、进程、线程。在大多数情况下,本书只把它们当作具有修辞价值的两个同义语)进程的验证规则加以形式化的证明。局部数据流分析和全局数据流分析、程序简化和程序优化、程序变换和程序重构、人工智能和知识处理、……,都是数据相关性的传统应用范围。特别是各种并行性(比如各种逻辑程序的并行执行、各种图形图像的并行可视化)的发掘,离开数据相关性可谓寸步难行!而并行性的最大需求,来自超级计算。尽管犹如抽象的数学适合人类涉及数与形的方方面面一样,数据相关性理论在返回众多实际应用领域的时候,其基本原理也是互通的;顾名思义,在数据相关性与并行处理之间存在着异乎寻常的联系:数据相关性的研究,主要受超级计算中的并行处理所驱动;反过来如俗语所说“种瓜得瓜,种豆得豆”,超级计算中的并行处理又是数据相关性研究的主要受惠者。

伴随社会生产力的不断进步,超级计算的重要性日益提高。继理论分析和科学实验之后,超级计算业已成为科学技术发展的主要手段。

70年代以来,由于半导体和集成工艺的飞速发展,高性能的计算机如雨后春笋般地涌现出来。其中有一类机器应超级计算之运而生,在提高运算速度方面不断取得突破,使得单位时间(秒)内的峰值运算次数如天文数字般地增长,从起步时的千万,到一亿、十亿、

百亿、千亿、万亿,并正在向更加令人瞠目结舌的量级迈进。这一类机器,通常被人们称作“超高速计算机”。

向量巨型机(包括由它衍生而来的小型、微型巨机)以及大规模和超大规模并行计算机,在计算机发展史上都是(或曾经是)超高速计算机,是某一时期实施超级计算的基础设备。它们合在一起,成为国民经济发展以及国家安全和国防建设不可或缺的计算工具。70年代和80年代是单指令流多数据流的向量计算机(比如国产757,KJ8920,YH-1等)的鼎盛期,构成各类巨型机占绝对多数的主流形式;进入90年代,多机结构逐渐成熟,不过在初始过渡阶段,作为其构件的结点机大部分依然是向量机(比如国产YH-2);到90年代中后期,从阵列式的SIMD/SPMD到MIMD并行计算机(比如国产SG-1000、SG-2000、YH-3,以及整个SZ序列)逐渐盛行开来,并且伴随高性能网络计算的迅猛发展而大有一统天下之势。网络计算是指由分布在不同地点的多个计算主体,通过网络传递信息以并行协同地完成预定任务的计算现象。在网络计算中,用户可以分布在全国乃至全球范围内,从相对而言弱功能的终端进入集团性强功能网络(这样的网络由于太大了,被称作网络“云”),依赖网络服务器[正在从“客户机/服务器计算”(Client/Server Computing)向以“三层客户/服务计算模型”(3-Tier Client/Server Model)为开端的“n层客户/服务计算模型”(n-Tier Client/Server Model)演化]特别是群件(group ware)技术去调动网络上海量的他人暂时闲置的(诸如计算、存储、I/O等等)海量的能力,主要依靠各种并行的方式求解相对而言大型的(甚至只有时下各种巨型机才能求解或还不能求解的)科学或商务问题。不言而喻,与上述向量机、并行机和网络云硬件相伴而生的各种并行化理论,以及作为其工程实现的软件产品(实现向量方式并行的向量识别器、实现多机方式并行的并行重构器、实现混合方式并行的向量多机识别重构器,以及实现网络云高性能计算的网络服务器和群件),已经成为过去20年,并且跨世纪地还将继续作为超高速计算方向上最重要的软件课题之一。向量化和并行化软件大致由三个部分组成:从数学上提供尽量多可并行性的并行算法、自动识别与自动改写成为机器可并行执行形式的并行处理、便于并行程序设计和人机对话的并行可视化。本书将以第二部分为主,向读者展示三者无不以数据相关性的研究贯穿始终。

“任何一种理论都能够增进我们对某一学科领域的了解,使我们对该领域的知识系统化。”著者在30余年软件工程、尤其是最近十几年并行处理和实时处理的理论研究和工程实践的基础上,首创一整套全新的元素视图理论。它与变量视图、语句视图(含指令视图)以及最后自然而然地达到的迭代视图合在一起,构成人类在(从高级到低级的)计算机语言水平上对数据相关性的完整理解。沿着这根主干线,并行软件将全面展开。这是本书的主要内容,其中的许多材料尚属首次公开发表。

全书共分11章。第一章“硬件并行设施”和第二章“语言并行机制”,分别介绍数据相关性理论的主要发展背景及与之相关的硬件和软件基本概念。第三章是五种相关视图的总论,与各属于语句、变量、元素(三大发展阶段的)视图之一的后续三章一起构成基础部分,主要介绍三种分析模型的基本范畴并运用于整体并行所获得的丰硕成果。作为语句视图的自然推广,第四章容纳了指令视图,从而把语句相关的基本原理应用于指令级的并行优化。紧接着的两章是元素视图的延伸:第七章“控制依赖向数据依赖的转换”,描述以元素为结点解剖二值和三值逻辑控制结构的方法;第八章“多值逻辑控制转移的结构化重

构”,则专门献给目标更多、组合更复杂的情形。第九至十一章归属“分布与分割”,主要介绍数据相关性用于非整体并行和局部并行的成果;第九章“循环分布”,描述削弱整体数据相关性的方法之一(纵向);第十章“循环分割”,描述削弱整体数据相关性的方法之二(横向);递归依赖是并行处理的天敌,第十一章“递归分割与并行划分”则阐述循环分割消除递归关系之功效。作为横向分割循环区间的自然推广,第十一章容纳了迭代视图,从而把区间分割的基本原理应用于多机并行划分。

诸如计算空气动力学、石油工程、能源开发、经济决策等科学领域,以及卫星图像处理、中长期天气预报、社会现象模拟等等研究专题,尤其是像战略相控雷达和星载合成孔径雷达这一类实时信号处理系统,都面临高速海量数据流,错综复杂的数据相关性无例外地存在于其中。起源于并行处理的三种显数据依赖关系理论与算法,荟萃了各种数据相关性剖析技术之精华,其基本原理和具体技巧均可移植过去,广泛运用。

数据相关性(理论、技术、知识等)作为人类最新的自然科学精神财富之一,一方面可望使人们不同程度地从中受益,另一方面其本身又不断地在发展、深化与完善之中。本书的内容基本上是作者多年科研成果的积累,由于水平所限,加之公务繁忙,书中错误与疏漏之处在所难免,躬请读者朋友和计算机同仁不吝赐教。

本书是在中国科学院软件研究所宽松的科研环境里完成的,其出版过程得到国家科学技术委员会、国家自然科学基金委员会和科学出版社的大力支持和热情帮助。作者向这四个单位表示衷心的感谢。国防科学技术大学计算机系兼研究所潘填正教授试算过若干例题,作者向他致谢。作者还感谢国防大学外语教研室陆佑珊教授,她的辛勤劳动充溢于本书的字里行间。范戟、樊莹和范路承担大部分计算机录入和校对任务,作者也向他们道谢。

谨献给生我、养我、关心我、支持我的慈母余秀英三周年祭,
在南京雨花台大定坊的一个偏僻山坳里,
愿她老人家安息。

范植华

1998年4月16日

于北京中国科学院软件研究所

目 录

序 言

第一章 硬件并行设施	1
1.1 计算机并行性的发展	1
1.1.1 流水线方式	2
1.1.2 多功能部件和多机方式	3
1.1.3 阵列方式	3
1.1.4 数据流方式	6
1.1.5 网络分布式	7
1.2 巨型计算机	8
1.3 向量计算机.....	14
1.4 小微巨型机.....	19
1.5 向量指令系统.....	23
1.6 向量汇编语言.....	25
1.7 紧耦合多机系统.....	26
1.8 松耦合多机系统.....	28
第二章 语言并行机制	34
2.1 VFORTRAN 语言	34
2.2 三元挑选符与下标对应规则.....	36
2.3 向量函数.....	37
2.4 向量过程.....	40
2.5 流水线处理.....	41
2.6 向量链接.....	44
2.7 向量屏蔽.....	47
2.7.1 屏蔽的作用	47
2.7.2 屏蔽硬件.....	48
2.7.3 低级语言中的屏蔽机制	49
2.7.4 条件向量赋值语句	52
2.8 数组运算.....	54
2.8.1 无条件数组运算举例	54
2.8.2 数组的逻辑片断	55
2.8.3 条件数组运算举例	56
2.8.4 压缩与还原	57
2.9 PFORTRAN 语言	58
2.10 HPF 语言	61

2.11	BXC 语言	63
2.12	时序算子	66
2.13	控制结构	69
第三章	显数据相关性的三种视图	71
3.1	并行处理的三种粒度	71
3.2	相关依赖等价条件下的并行处理	73
3.3	单层赋值循环的适应性	77
3.4	临时变量与归纳变量	78
3.5	三种赋值与限制条件	80
3.6	繁衍层次	83
3.7	结合链与同体链	86
3.8	元素间的优先关系	87
3.9	数据相关与输入相关	90
第四章	语句视图与依赖片断	94
4.1	语句间的相关依赖	94
4.2	语句图与并行性判别	97
4.3	解析判别法与非整除规则	99
4.4	变序点	102
4.5	A0 型循环的层次片断	106
4.6	计算实例	108
4.7	A1 型和 A 型循环的层次片断	111
4.8	循环体的最简形式	114
4.9	同态定理	116
4.10	指令级的并行性	119
4.11	加权汇编语句图	122
第五章	变量视图	125
5.1	坐标方法	125
5.1.1	研究对象	125
5.1.2	平面上的次序与增量	127
5.1.3	增量集合的计算	129
5.1.4	退化映射	131
5.1.5	传递闭包	134
5.2	超平面方法	136
5.2.1	坐标变换	137
5.2.2	可供延伸的并行性	138
5.2.3	典型例题分析	141
5.2.4	倾斜分划算法	142
5.3	相关分析方法	145
5.3.1	相关点对的依赖关系	145

5.3.2	相关点对举例	146
5.3.3	数组出现对的相关性	147
5.3.4	相关依赖的数学推导	149
5.3.5	算法步骤	150
5.4	图论方法	153
5.4.1	数论求解丢番图方程	153
5.4.2	例题	155
5.4.3	回路的图论判定	158
5.5	推广的解析判别法	160
5.5.1	超限规则	160
5.5.2	跳跃规则	161
5.5.3	综合举例	163
5.6	拓扑排序	165
5.7	临时数组与暂存语句	167
5.7.1	逆序的成因	168
5.7.2	传统的添加办法	169
5.7.3	元素观点带来的进步	170
5.8	改写算法	172
第六章	元素视图	180
6.1	以元素为结点的困难和片断的概念	180
6.2	有待跨越的“鸿沟”	181
6.3	等价变换	183
6.4	标准形与判别准则	184
6.5	等价类与 R-P 逆对所引起的暂存	187
6.6	时序层次等价类的数学抽象	189
6.7	结点的数学抽象	191
6.8	循环间包含关系的直观含义	192
6.9	生存带的胀缩	194
6.10	包含关系的数学表示	196
6.11	强化定理	199
6.12	偏序结构	201
6.13	比较判别法及其在循环体上的应用	204
6.14	比较判别法在取值点集合上的应用	209
6.15	离散层次及其应用	211
6.16	离散性的应用(续)	215
第七章	控制依赖向数据依赖的转换	222
7.1	不定因素与参数集	222
7.2	I0 型循环及其闭体	224
7.3	I0 型循环的并行处理	228

7.4	关于 I0 型循环并行的充要条件	231
7.5	识别改写优化链	232
7.6	I1 型循环及其闭体	239
7.7	三岔控制转移的完备形式及其 $\langle t1, t2, m, t3, n \rangle$ 型组合方式	241
7.8	$\langle t1, t2, t3, m, n \rangle$ 型组合方式	245
7.9	$\langle t1, t2, t3, n, m \rangle$ 型组合方式	247
7.10	条件判别的离散性应用	250
第八章	多岔控制转移的结构化重构	255
8.1	简单多岔控制转移	255
8.2	简单多岔控制转移的并行处理	257
8.3	多岔控制转移的完备形式	260
8.4	双阶律	262
8.5	完备形式多岔控制转移的结构化变换	264
8.6	GN 型计算实例	267
8.7	结构化的多岔控制转移	272
8.8	GNS 型计算实例	274
第九章	分部并行与循环分布	278
9.1	从并行的本质把握分部并行	278
9.2	分部并行的两种手段	280
9.3	循环分布与局部并行	282
9.4	从元素视图考察循环分布	285
9.5	语句团	287
9.6	语句团顺序	290
9.7	语句团的复杂组合	293
9.8	孤立非线性下标“奇异”团	297
9.9	向控制结构的分布	300
9.10	向句内成分的分布	305
9.11	其他“奇异”现象举例	310
第十章	变序点分割	316
10.1	先分布后分割	316
10.2	变序点概念的精确描述	322
10.3	第一类实变序点	325
10.4	第二类实变序点	327
10.5	第三类实变序点	330
10.6	变序点的重叠	334
10.7	变序点的组合	339
10.8	变序点的萎缩	349
10.9	控制结构的变序点分割	352
10.10	综合实例	357

第十一章 递归分割与并行划分	364
11.1 递归关系及其对并行性的否定.....	364
11.2 循环中递归的成因.....	366
11.3 递归的分割.....	369
11.4 等长递归分割算法.....	373
11.5 变长的递归分割.....	378
11.6 完善的关键边组析取算法.....	382
11.7 全程递归分割算法.....	385
11.8 片断分割与稳态目标搜索算法.....	389
11.9 片断递归分割算法.....	392
11.10 片断递归分割举例	395
11.11 控制结构的递归分割	400
11.12 并行划分中的次序与迭代视图	409
11.13 迭代结点与并行划分举例	411
参考文献	414

第一章 硬件并行设施

近 20 年来,主要受益于芯片集成度与并行处理技术的进步而不断更新换代的巨型计算机(包括向量巨型机及其演变而来的小型、微型巨机,以及大规模和超大规模多机并行系统、高性能网络分布式系统)如雨后春笋般地涌现,把人类推入计算机技术向国民经济、国防建设和人民生活各领域全面渗透的新纪元。作为数据相关性研究的基本驱动力之一,本章主要介绍由向量巨型机开创,正日复一日地向小巨型机和微巨型机、大规模和超大规模多机与网络分布式系统转移的硬件并行设施。由于跟指令系统密不可分,本属于下一章的汇编语言也例外地划入此章;而由于非高级语言讲解不清,本属于此章的链接和屏蔽又例外地归入下一章。

1.1 计算机并行性的发展

伴随社会生产力的不断进步,人类开发与利用大自然的欲望是永无止境的。今天他们满意的东西,明天也许不再满意,后天甚至很不满意。

18 世纪蒸汽机的广泛使用,是近代技术革命的主要标志;然而在 19 世纪的一百年里,电动机、内燃机开始取代蒸汽机;进入 20 世纪,大规模淘汰蒸汽机的时代终于来临:时至今日在绝大多数场合,蒸汽机业已变成令人讨厌的怪物。

计算机的发展历史亦然。1945 年,世界上第一台电子数字计算机问世。它作为人类智力解放道路上的重大里程碑,曾经令人欢歌笑语。但是,人们很快从喜悦中清醒过来,发现其笨重、昂贵、高耗、低效等众多缺欠,为改进其性能进行不懈的努力,与日俱增的并行性首当其冲。并行处理技术发展至今,已经跟芯片并驾齐驱,成为当代计算机领域最重要的技术支柱之一。从微机、服务器和 workstation,到小、中、大型,直至各类巨机、网络,都普遍求助于并行处理,以多方面地提高系统指标。

一个计算机系统如图 1.1 所示,它涉及处理机和电子式外部设备的电子活动,机械式外设的机械活动和人的思维活动等三种具有本质差异的过程,其时间量级分别约为微秒

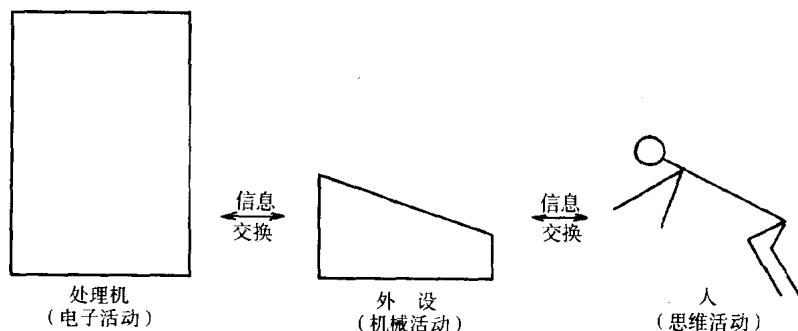


图 1.1 计算机系统三种活动

乃至纳秒级,毫秒级和秒级,每一档至少要差 10^3 倍!从三种活动时间量级上的不匹配,人们觉察到早期的计算机全是懒汉:它们手脚敏捷,但不主动,稍稍一干就睡大觉,等待反应“迟钝”的人的命令。上述分析孕育着最初的并行性思想。

为了挖掘计算机的内在潜力,外设与主机、外设与外设、各操作步骤、各功能部件,乃至多处理机、多计算机之间的并行性相继出现,经历了“宏观串行,微观串行”(操作系统诞生以前)、“宏观并行,微观串行”(分时系统)和“宏观并行,微观并行”(现代并行处理计算机)三个阶段。按照美国 M. J. Flynn 的分类法,前二阶段均属单指令流单数据流之列,第三阶段又细分为单指令流多数据流 SIMD(Single-Instruction and Multi-Data,如单流水向量运算等)和多指令流多数据流 MIMD(Multi-Instruction and Multi-Data,如多功能部件、多向量阵列、多处理机、多计算机等),再加上最新的单程序流多数据流 SPMD(Single-Program and Multi-Data)等类型。当今世界,计算机犹如封建大家族里公用的奴仆,不仅同时受多个用户支配,而且同时承办每个用户的多项业务,每时每刻都像艺高胆大的杂技演员那样左手玩枪,右手舞棒,头上还顶着坛子转哩!

并行性是指多于一个事件在同一时刻发生,例如多机多功异步并行;也指多于一个事件在部分重叠的时间内出现,例如流水线向量运算;还指多于一个事件在同一(相对而言不太长的)时间间隔内发生,例如分时系统。显然,在并行性的概念上,前二者皆高于(利用人脑关于电脑“思维”方面的时间差,貌似“同时”的)后者。今天的并行处理计算机,能够真正同时执行多个任务或多条(不同的)指令,如多功能部件、多处理机和多计算机等;或者能够真正同时对多个数据项进行操作,如向量运算和阵列多处理器同步并行等。它们都属于“多于一个事件在同一时刻发生”或“多于一个事件在部分重叠的时间内出现”的高级情形。很多高性能的计算机系统将它们统一到同一体系结构之中,把并行性推向登峰造极的地步,致使计算机界普遍认为,在电子范畴内硬件已无太多潜力可挖,人类又向崭新的领域——光计算机、化学计算机、生物计算机等进军。

现阶段直至新世纪可预见的几十年内,并行处理计算机(系统)的结构主要有流水线方式、多功能部件方式、多机方式、阵列方式、数据流方式和网络分布式。

1.1.1 流水线方式

“流水线”是起源于制造业的规模化工业生产的一项成熟技术,比如说汽车制造流水线。在第三产业盛行的今天,服务业也普遍地采用流水线处理。例如在洗衣房中,把洗衣服务全过程分解为洗、漂和甩三段流水。当第一批衣物经过洗而进入漂时,第二批开始洗;当第一批经过洗和漂而进入甩时,第二批经过洗而进入漂,第三批开始洗。从此刻起,构成洗衣流水线的洗、漂、甩三段可长期地保持并行。并且,每过一段的时间间隔,收获一批干净衣物。显然,流水线所含段数越多(比如再把烘干纳入洗衣流水),划分段越细(比如把一遍长时间的漂分成两遍短时间的漂),则并行度越高。在计算机领域,这些原理都得到最充分的利用。

类似地,把许多指令所重复的时序过程分解为若干共有的段,交由各段专用的功能块去重叠执行。一条指令顺序流过所有段,这条指令即执行完毕并获得结果。当本条指令在本段处理完毕而流入下段时,后续指令便可流入本段,无须等待前条指令整个地执行完毕。因此,在一条流水线上可以同时处理多条指令。设各段的执行时间均为一个时钟节拍,

则经过几个节拍短暂的初始阶段之后,每拍可以输出一个结果,从而把指令执行时间压缩到段执行时间,藉以开发时间并行性。

图 1.2 是将指令操作划分成取指令、译码、取操作数、执行等四段的示意性流水线结构。其中,方框里的数的整数部分为指令序号,小数部分为段序号。从第五拍起,每拍输出一个结果。

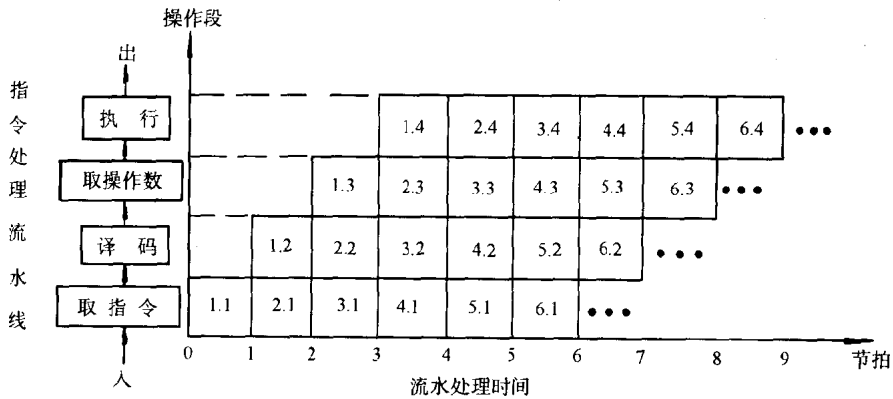


图 1.2 流水线上的指令“流水”示意

最早实现流水线设计的计算机系统有 IBM/360-91、IBM/360-195、CDC-6600 和 CDC-7600。我国 80 年代由中国科学院计算技术研究所主持研制的 757 千万次级大型机,和由国防科学技术大学主持研制的 YH-1 亿次级巨型机,也成功地采用了流水线构造。

1.1.2 多功能部件和多机方式

一台机器配置多个功能部件取代各种运算共用的运算器,此乃多功能部件方式。面对数据海洋,诸如浮点加、定点加、浮点乘、浮点除、逻辑操作、移位操作等功能部件,可以无冲突地给予并行的处置,使得机器本质上就有能力同时执行若干条指令。与此相类似,把多台机器(含处理器)耦合在一起,它们共享主存储器,受统一的操作系统指挥,此乃(紧耦合)多处理机方式。也有一些(松耦合)多机系统,各计算机皆有自己的主存储器,由各自的操作系统加以管理,通过共享的输入输出系统进行通信。无论多个功能部件,或多台处理机/处理器,或多台计算机,它们都通过一组共享资源(存储器,数据库等),相互作用,以获取异步并行性。

我国 70 年代由国防科学技术大学和华北计算技术研究所分别独立(相互备份,以保证战略任务的完成)主持研制成功的 151-4 大型计算机(图 1.3),是一个拥有双机四功能部件的多处理机多功能部件系统。就当时的总体技术水准而言,在通用状态下,其并行度很高;在实时状态下,双机又可动态备份,增强可靠性。1980 年,该机曾在太平洋海域为我国某项重大的科学实验作出贡献。

1.1.3 阵列方式

在初期的阵列方式里,一台计算机由多个相同的处理单元和一个统一的控制器组成。这个控制器解释指令并传送操作命令至所有处理单元,各处理单元按照控制器的命令同时进行同样的操作(不过操作对象各异,这一点与单流水向量运算相似)。阵列处理机又可

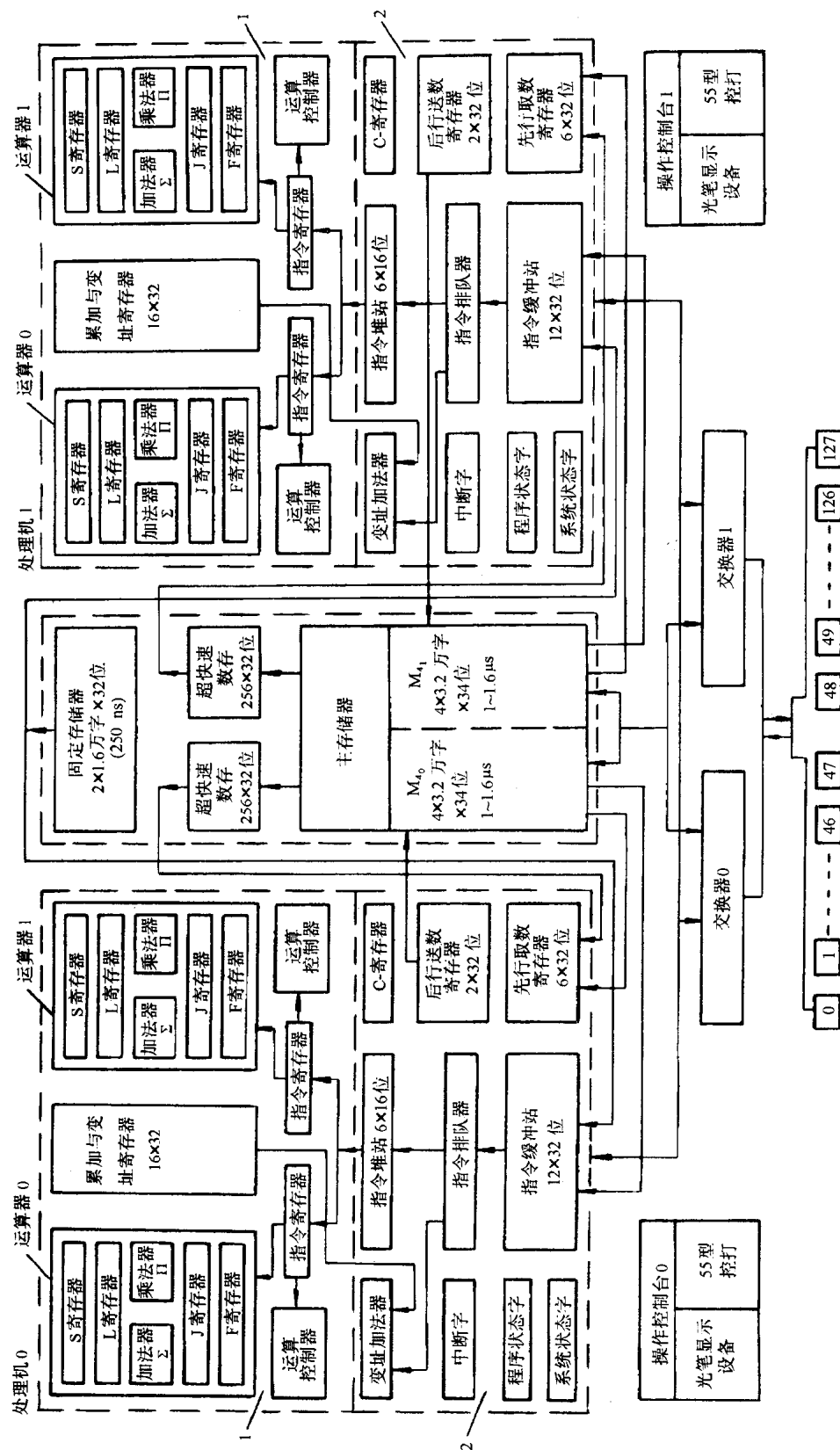
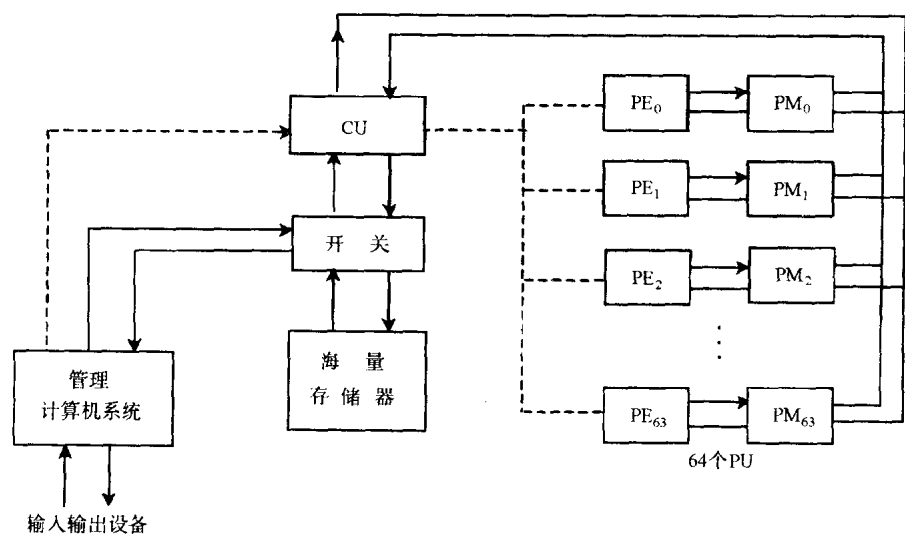


图 1.3 151-4 数字计算机的总体框图

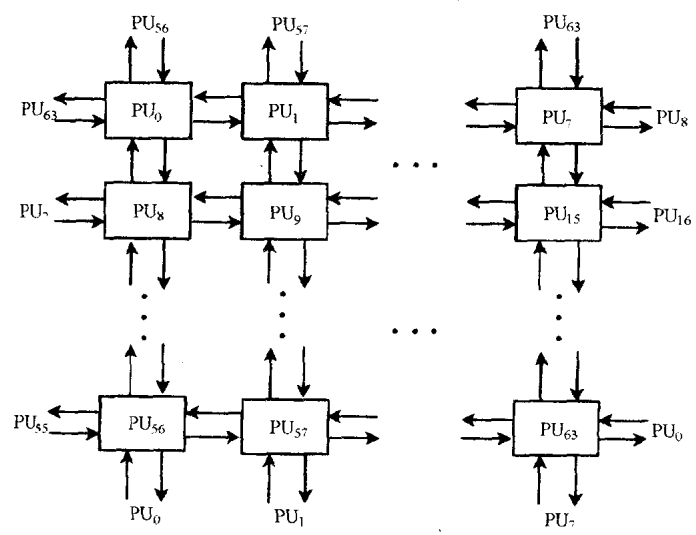
(1——运算控制部件; 2——指令控制部件.)

分为浮点阵列和位片式阵列两类。它们都借助于多个同步工作的算术运算和逻辑运算部件来实现空间并行性。

美国 1973 年投入营运的第一代开拓性巨型机 ILLIAC-IV, 属于单指令流多数据流的浮点阵列机。它包括 64 个完全相同的结点机(PU)和一个公共的控制部件(CU)。每个结点机拥有一个能执行 64 位浮点操作的处理单元(PE)和一个容量等于 2×1024 字节的存储器(PM)。64 个结点机排成 8×8 阵列, 每个均与四邻有直接的数据通路(图 1.4)。它被计算机界公认为是如今红红火火的大规模和超大规模并行机的先驱。



(a) 机器构成



(b) 处理部件间的数据通路

图 1.4 ILLIAC-IV 的机器构成和数据通路

我国 80 年代通过国家鉴定的 SZ-1 亿次卫星图像处理专用机, 也成功地采用了阵列技术。

近 10 年来, 阵列部件数目骤增, 其构造也从单指令成功地迈向多指令。80 年代中期,

日本筑波大学研制的偏微分方程数值求解专用机 PAXS-128,把 128 台处理器纳入阵列(图 1.5),是一个多指令流多数据流的并行系统。美国 Goodyear 宇航公司研制的卫星图像处理专用机 MPP,其阵列部件数高达 16384,是一个单指令流多数据流的并行系统。90 年代并行处理技术逐渐向微机渗透,一块单片上能够集成 10^3 个结点, 10^6 个处理器能够阵列于逻辑推理计算机之中。

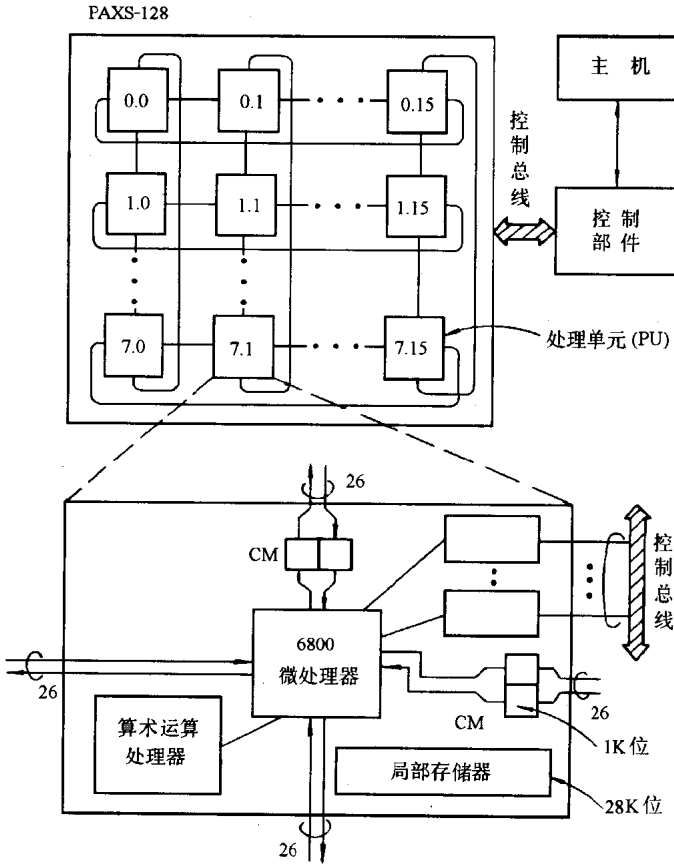


图 1.5 筑波大学研制的 PAXS-128 机,128 个处理器设置成 8×16 阵列状,面向用偏微分方程表示的连续体和场模拟

1.1.4 数据流方式

数据流机器,是受到人们重视的高度并行计算机。它虽然保留了存储程序的作法,但在主要原理上已有别于冯·诺依曼计算机的结构。它不遵循程序计数器指出的执行顺序,只要所需操作数齐备,指令即可被执行,亦即运算不由控制流驱动,而由数据流驱动。

数据流处理机以语言为基础,使用数据流程图作为用户语言与计算机结构之间的接口。数据流程图用能动框表示,每个能动框包含多个域,分别存放操作码、操作数和目标地址。数据流程图以能动框集合的方式保存在能动存储器中。数据流处理机不设共享存储器,不设程序计数器,也不设控制定序器,其并行性理论上仅受应用程序中的数据相关性制约。任意一条当前的数据相关性容许执行的指令出现,相应的能动框地址立即(若出现多条,则并行地)送入指令排队器。读取部件按地址从存储器中(同样地,若存在多条,