

HIGH TECHNOLOGY

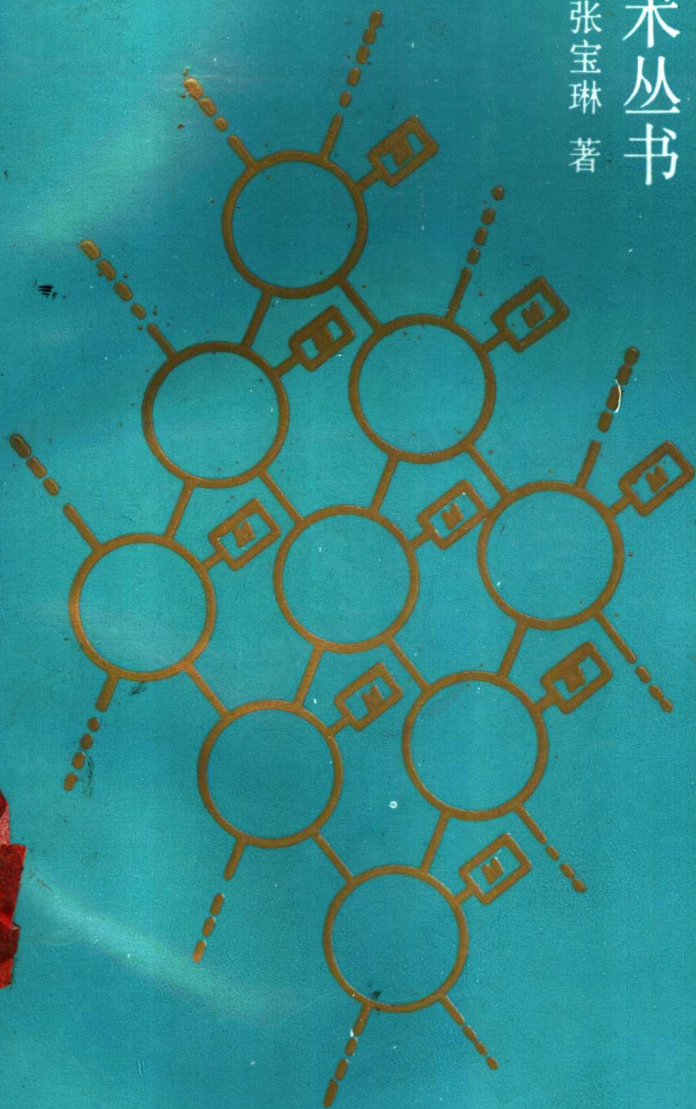
H.Tech

# 并行计算系统

王淦昌 主编

高技术丛书

陈景良 张宝琳 著



四川教育出版社

GAOJISHUCONGSHU

# 并行计算系统

陈景良  
张宝琳 著

高技术丛书  
王淦昌 主编

异算法

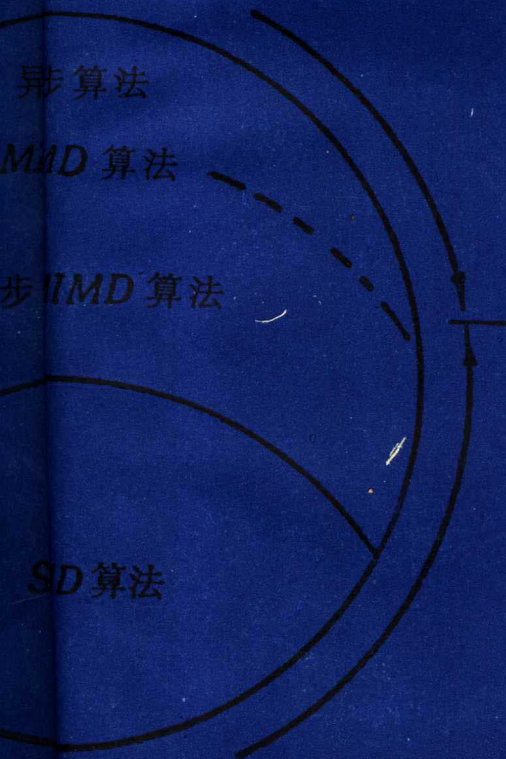
异算法

MID 算法

步 IMD 算法

SD 算法

算法



责任编辑：陈卫平  
封面设计：邹小工  
版面设计：王 凌

高技术丛书  
**并行计算系统**

陈景良 著  
张宝琳

四川教育出版社出版发行 (成都盐道街三号)  
四川省新华书店经销 四川新华印刷厂印刷

开本850×1168毫米 1/32 印张6.5 插页6 字数154千  
1990年10月第一版 1990年10月第一次印刷  
印数：1—700册

ISBN7—5408—1240—0/G·1206 定价：3.35元

张宝琳，1938年生。1964年毕业于北京大学数学力学系。1967年至今在北京应用物理与计算数学研究所从事数值分析方法的应用与研究。1986年赴联邦德国短期工作一年。1980年以来，在全国性学术刊物上发表数值逼近与并行算法研究论文9篇。现任该所副研究员，主要研究并行计算数值方法。

陈景良，1937年生。1958年毕业于北京大学数学力学系。此后一直在清华大学任教，并从事计算数学科研工作。现任应用数学系副教授。1979年开始研究并行算法。主要著作有：《并行数值方法》、《近代分析数学概要》等，并发表若干论文。

# 序 言

当今世界上，一个强大的和生机勃勃的高技术群体，正在给人类带来震撼。这些凝聚着文明与智慧的先进科学技术，对各国的经济发展，政治变革，思维认识以及在国际大家庭中的地位和作用，都将愈来愈具有决定性的影响。

1983年，美国提出了“星球大战”计划，3年后公布了“战略防御计划”，其实质是一个以高技术为中心，带动国民经济、科学技术和国防的全面发展，并凭借技术优势来谋求战略与政治目标的计划。1985年，欧洲共同体通过了“尤里卡计划”，企图通过发展高技术来加强企业与科研机构的合作，振兴欧洲的经济。同年，日本也公布了“人类新领域研究计划”，力求从本质上弄清生物体的各种技能。同期还有许多国家都在制定或加紧实施自己的高技术发展规划。不难断言，即将到来的21世纪是高科技世纪！

用战略眼光来认识国情和迎接21世纪的挑战，我国坚定不移地把加速高技术的发展放在相当重要的地位。1986年3月，我国制订了面向21世纪的“高技术研究发展计划纲要”，确定在生物技术、航天技术、信息技术、自动化技术、能源技术和新材料技术



等方面，对严格选择的目标进行研究和跟踪。最近，邓小平同志指出：“任何时候，中国都必须发展自己的高科技，在世界高科技领域中占有一席之地。高科技的发展和成就，反映了一个国家和民族的能力，也是国家兴旺发达的标志。”我国在高技术研究中起步略晚，基础薄弱。现在经过一批中、老年科技工作者的努力，我国的高技术取得了可喜的进展，有些项目已跻身世界先进行列。这样，把现有的成果展示出来，从而带动和加速我国高技术的发展，我们组织撰写了“高技术丛书”。

这套丛书的作者是活跃在我国高技术前沿的专家、学者。他们在自己的论著中，阐释有关科学原理，介绍最新研究成就。这些论著，既可供同行参考，又可为有志从事高技术研究的青年学者打开高技术之门。

目前，国内外高技术研究涉及的学科很广，内容丰富，发展迅速，时不我待。要充分反映出最新的研究成果和信息绝非易事，而集中地把我国在高技术领域取得的成就编辑出版，更是尝试。虽然我们与出版社的同志竭尽全力，但仍有惶惑之感，我们真心诚意地恳请读者赐教和匡正。

王淦昌

1989年3月

# 前 言

本世纪40年代中期至50年代初，第一台电子计算机和第一批存储程序计算机即冯诺伊曼计算机相继问世。此后，计算机新陈代谢异常迅速，大约每隔5年运算速度增加10倍。计算机应用进展日新月异，成就显著。传统的计算机已在人类的各个领域延拓和深入，随之发展而来的是人类步入并行计算机的年代。

50年代的计算机是串行结构，每一时刻只能按一条指令对一个数据进行操作。为了克服这种传统结构对提高运算速度的限制，满足处理规模日益扩展的求解问题的需要，从60年代起人们开始研究将并行性引入计算机的结构设计以及计算机系统结构的革新。1972年阵列处理机 Illiac IV 投入运行；1976年向量计算机 Cray-1 投入运行。从此各种各样的并行计算系统不断出现，形成今天的局面。

并行计算机的发展推动了数值计算问题与非数值计算问题并行处理的研究。传统的串行算法正在经历着并行性改造，探索新的并行算法的研究工作正在引起越来越多的人，特别是数值分析工作者的兴趣。在美国和其他一些国家已经和正在出现“并行算法热”，我国目前也有不少人转入并行算法的研究。

本书的目的是向读者系统而扼要地介绍并行计算硬件系统的分类及其特征，各类并行处理机及其基本结构；介绍并行算法研究概况，其中包括并行算法的分类方法和各类算法的基本特征。向人们展示并行计算系统对各个学科领域的影响及发展前景。

在并行机的研制和发展方面，美国处于领先地位，其他许多国家包括我国在内都在奋力追赶。本书所提到的大多数计算机型号出自美国。本书介绍的并行算法，不是停留在对一些算法的一般描述上，而是强调建立适合各类并行机的算法的基本原则，突出若干观点新颖的技巧，并勾画算法发展的轮廓。

本书在保证学术性和资料性的同时，注意了可读性。基本概念和原理的论述力求清晰、严谨，论述反映了作者的观点和理解。书中还收集了多种机器型号，以供查考。本书对于有关读者和专业人员有较高的参考价值。我们热诚欢迎读者提出宝贵意见。

作者 1989年12月



# 目录

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 前言 .....                | 1  |
| <b>第一章 概论</b> .....     | 1  |
| 1.1 计算机系统的分代 .....      | 1  |
| 1.2 单处理机系统并行化 .....     | 2  |
| 1.3 发展多处理机系统 .....      | 7  |
| 1.4 计算机系统的分类 .....      | 8  |
| 1.5 并行处理系统分布的部分情况 ..... | 12 |
| 1.6 并行算法概述 .....        | 13 |
| 1.7 并行处理的应用 .....       | 15 |
| <b>第二章 流水线计算机</b> ..... | 20 |
| 2.1 线性流水线的原理 .....      | 20 |
| 2.2 流水线的分类 .....        | 21 |
| 2.3 流水线处理机的主要性能 .....   | 26 |
| 2.4 向量并行处理 .....        | 28 |
| 2.5 ASC 系统 .....        | 30 |

|                    |                                     |            |
|--------------------|-------------------------------------|------------|
| 2.6                | STAR-100                            | 30         |
| 2.7                | Cyber-200 系列                        | 33         |
| 2.8                | Cray 系列                             | 36         |
| 2.9                | 日本的向量计算机                            | 42         |
| 2.10               | 流水线附属处理机                            | 45         |
| <b>第三章 阵列处理机</b>   |                                     | <b>48</b>  |
| 3.1                | 阵列处理机的组成                            | 48         |
| 3.2                | Illiac IV 系统                        | 53         |
| 3.3                | BSP 系统                              | 58         |
| 3.4                | DAP 系统                              | 62         |
| 3.5                | PROPA L-2 系统                        | 64         |
| 3.6                | MPP 系统                              | 66         |
| 3.7                | 关联阵列处理                              | 69         |
| 3.8                | PEPE 系统和 STARAN 系统                  | 74         |
| <b>第四章 多处理机</b>    |                                     | <b>78</b>  |
| 4.1                | 多处理机的结构原理和分类问题                      | 78         |
| 4.2                | S-1                                 | 83         |
| 4.3                | Denelcor HEP                        | 86         |
| 4.4                | Cray X-MP                           | 89         |
| 4.5                | C <sub>mmp</sub> 和 C <sub>m</sub> * | 93         |
| 4.6                | EGPA                                | 96         |
| 4.7                | 若干 MIMD 网络系统简介                      | 97         |
| 4.8                | 若干开关 MIMD 系统简介                      | 103        |
| <b>第五章 并行算法的分类</b> |                                     | <b>111</b> |
| 5.1                | 解法与算法                               | 112        |

|                              |                    |            |
|------------------------------|--------------------|------------|
| 5.2                          | 串行计算与并行计算          | 115        |
| 5.3                          | 作业层与进程             | 117        |
| 5.4                          | 并行算法的结构模型及分类法      | 121        |
| <b>第六章 SIMD 算法</b>           |                    | <b>123</b> |
| 6.1                          | 基本特征和假设            | 124        |
| 6.2                          | 一维阵列的算法            | 127        |
| 6.3                          | 二维阵列的算法            | 129        |
| 6.4                          | 结合扇入原理             | 131        |
| 6.5                          | 线性递推问题             | 133        |
| 6.6                          | 向量和矩阵的运算           | 136        |
| 6.7                          | 线性代数方程组的直接解法       | 138        |
| 6.8                          | 解偏微分方程的有限差分方法      | 143        |
| <b>第七章 同步 MIMD 算法</b>        |                    | <b>154</b> |
| 7.1                          | 基本特征和假设            | 154        |
| 7.2                          | 奇偶归并排序算法           | 155        |
| 7.3                          | 一般算术表达式值的计算        | 157        |
| 7.4                          | 一维热传导方程隐式差分格式的并行计算 | 159        |
| 7.5                          | 同步迭代算法             | 163        |
| <b>第八章 异步算法</b>              |                    | <b>165</b> |
| 8.1                          | 基本特征和假设            | 165        |
| 8.2                          | 异步迭代算法             | 166        |
| 8.3                          | 解偏微分方程的区域分裂法       | 169        |
| <b>第九章 VLSI 算法处理机和数据流计算机</b> |                    | <b>172</b> |
| 9.1                          | 并行计算的新概念和新途径       | 172        |

|            |                   |     |
|------------|-------------------|-----|
| 9.2        | 心脏收缩阵列处理机.....    | 173 |
| 9.3        | VLSI 矩阵运算处理机..... | 179 |
| 9.4        | 数据流计算模式.....      | 187 |
| 9.5        | 数据流结构的基本模型.....   | 189 |
| 参考文献 ..... |                   | 193 |

# 第一章 概 论

## 1.1 计算机系统的分代

1946年2月世界上第一台电子数字计算机 ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Computer) 问世。大约在1950年前后包括 EDVAC (Electronic Discrete Variable Automatic Computer) 在内的第一批存储程序计算机即冯·诺伊曼 (Von Neumann) 计算机制成。这是第一代电子计算机。计算机系统依据元件的工艺技术、系统结构、处理方式和使用的语言来分代。现在正处于第4代。已过去的3代，每代经历10来年的时间，相继的代可有几年重叠。下一代机器在逐渐具体化，人们预计90年代的计算机可作为第5代。表1.1给出了计算机系统分代简况。表中 TRADIC (Transistorized Digital Computer) 是第一台晶体管数字计算机。表中 SSI (Small-Scale Integrated) 是小规模集成，MSI (Medium-Scale Integrated) 是中规模集成，LSI (Large-Scale Integrated) 是大规模集成，VLSI (Very-Large-Scale Integrated) 是超大规模集成。在第3代期间人们开始研制实现并行计算的高性能计算机，并有若

于此类机器于70年代前期投入使用。计算机发展到第4代，商售巨型计算机的高度流水线化与多处理化已很显著，而且提出了一些新的计算机系统的概念。

## 1.2 单处理机系统并行化

具有单个中央处理机 CPU (Central Processor Unit) 的计算机，称为单处理机系统。最早的计算机是“针荷包”结构的单处理机系统(见图1.1)，主存储器 MM (Main Memory)、输入/输出装置 I/O (Input/Output)、外围设备等像许多“针”，插在 CPU 这个“荷包”上，一切操作由 CPU 直接指挥，只能“一时一事”地串行工作。

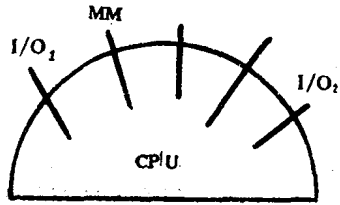


图1.1

为了提高运算速度，引起了计算机结构的改革。一条线索是在单处理机内部，利用资源重复、时间重叠、资源共享3种基本途径，发展并行性。关于单处理机的若干并行处理系统已经研制，可以分为下面讨论的6类情况。

(1) 多重功能部件 早期的计算机在 CPU 中只有一个运算部件 ALU (Arithmetic-Logic Unit)，而且 ALU 一时只能实现一种功能。实际上，ALU 的许多功能可以分布到能并行操作的重复设置的与专用的功能部件中去，这种多功能单处理机的好例子是 CDC-6600 (1964年设计) 与 IBM 360/91 (1968年设计)。

CDC-6600 的 CPU 有10个相互独立可同时操作的功能部件，而且有24个寄存器，记分牌用于跟踪功能部件和寄存器的可利用性(见图1.2)。这样，指令流出速率有较大增长。

IBM 360/91 的 CPU 有两个并行执行部件(见图1.3)：一个是定点运算。另一个是浮点运算。浮点执行部件有两个功能部

表1.1

| 代 年             | 第 1 代   | 第 2 代                         | 第 8 代   | 第 4 代  | 第 5 代 |
|-----------------|---|-------------------------------|---|--|-------|
|                 | 1938—1953   | 1952—1963                     | 1962—1975   | 1972—  |       |
|                 | 第一台电子模拟<br>计算机(1938)                                      | TRADIC(1954)<br>IBM1620(1960) | CDC-6600<br>CDC-7600<br>IBM360/91<br>Illiacc IV<br>TI-ASC<br>Cyber-175<br>STAR-100<br>C.mmp | Cray-1(1976)<br>Cyber-205(1982)<br>Univac1100/80(1976)<br>Fujitsu M382(1981)<br>IBM 370/168 Mp<br>IBM 3081(1980)<br>Burroughs B-7800<br>(1978)<br>Cray X-MP(1983)<br>MPP(1982)<br>S-1<br>HEP(1983)<br>Cray-2(1986) |       |
|                 | ENIAC(1946)<br>EDVAC(1950)<br>EDSAC(1949)<br>IBM701(1952) |                               |   |  |       |
| 计算机<br>系统模<br>型 |   |                               |   |  |       |



### 摘要

| 年代               | 第 1 代   | 第 2 代   | 第 3 代   | 第 4 代  | 第 5 代                                    |
|------------------|---|---|---|--|--|
| 年                | 1938—1953   | 1952—1963   | 1962—1975   | 1972—  |  |
| 基<br>本<br>元<br>件 | 40年代用继电器作开关装置, 50年代用真空管, 因元件昂贵, 用位-串行结构, 通过一个全加速按位完成运算。IBM-701用Williams管存储器, 并用磁鼓、磁带。 | 1948年晶体管问世, 采用积木式元件。印刷电路出现。磁芯存储器研制成功。1963年引入换可式磁盘组。出现能与其他一、二个处理部件并行操作的I/O处理器。 | 用SSI与MSI电路作基本积木式元件。采用多层印刷电路。一些机器用固态存储器代替磁芯, 60年代后期能用分时操作系统。研究了多道程序设计 and 虚拟存储器。 | 将LSI电路用于逻辑与存储部分。高密度组装出现。大多操作系统是分时的, 使用虚拟存储器。 | VLSI小晶片与高密度积木式设计同时使用。运算速度可超过1000MFL OPS。 |
| 语<br>言           | 最早机器使用二进制编码机器语言。EDVAC标志使用系统软件的开端。计算机硬件成本占支配地位, 软件-语言比较原始。                             | 汇编语言一直使用到高级语言研制成功。Fortran (1956) Algol (1960) Cobol (1959)                    | 高级语言与灵活的编译程序有很大的提高。   | 高级语言推广到同时可以处理标量与向量数据, 如许多向量处理机中推广的Fortran语言。 |  |

件：一个是浮点加-减法，另一个是浮点乘-除法。IBM 360/91 是一台高度流水线化的多功能的科学单处理机。

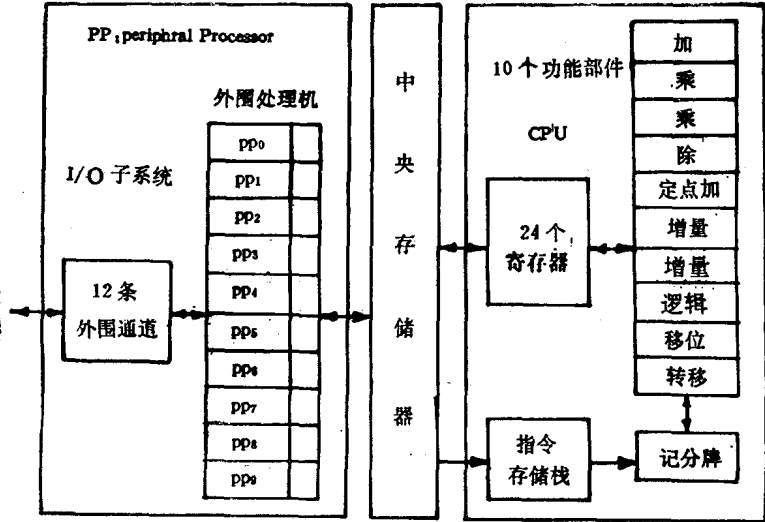


图1.2

几乎所有现代计算机和附连处理机都装配了多重功能部件，以执行并行的或同时的算术逻辑操作。这种功能专用化并加以分布的措施已推广到阵列处理机和多处理机。

(2) CPU 内部并行化和流水线化 第一代计算机使用位-串行加法器。现在，采用诸如先行进位和进位存储这类技术的并行加法器已装在几乎所有的 ALU 中。运用多重功能部件也是 CPU 并行化的一种形式。大多数商售单处理机系统在其 CPU 中已流水线化，时钟频率在 10 至 500ns (即  $10^{-9}$  秒) 之间，指令执行和运算都可采用流水线。

(3) 重叠 CPU 与 I/O 的操作 利用单独的 I/O 控制器、通道或 I/O 处理机，可以使 I/O 操作与 CPU 计算同时执行。