

陈益新 徐高钺等 编著

光计算

上海交通大学出版社

责任编辑：宋永明

封面设计：朱天明

ISBN7-313-00260-2/TN · 2 科目：217-341

定价：2.35 元

光 计 算

陈益新 徐高钺等 编著

上海交通大学出版社

内 容 提 要

随着科学技术向更高阶段的发展,电子计算机已面临着新的挑战。由于电子计算存在着物理上固有的局限,而光子与电子相比在速度、平行处理能力及不易相互作用等方面显示出的优越性,近年来对光计算的研究引起了越来越多的关注。本书全面概要地论述了光计算的物理基础和基本概念;光计算的发展背景及研究现状;还分章深入地讨论了光计算的系统结构和算法,光计算系统应用的逻辑器件和存储器件,以及光计算中的互连和通信。这是我国第一本全面系统论述光计算的专著。本书可作为有关专业研究生和高年级大学生的教学用书,也可供有关领域专业科技人员阅读。

光 计 算

出 版:上海交通大学出版社
(淮海中路1984弄19号)

发 行:新华书店上海发行所

印 刷:常熟市印刷二厂印刷

开 本:787×1092(毫米) 1/16

印 张:12

字 数:294000

版 次:1990年3月 第1版

印 次:1990年3月 第1次

印 数:1—1000

科 目:217—341

ISBN7—313—00260—2/TN·2

定价:2.35元

前 言

1984年10月在西安召开的中国光学学会下属纤维光学和集成光学专业委员会成立大会期间,在中国光学学会名誉理事长龚祖同教授积极倡议下,成立了“中国光计算研究促进会”。其宗旨在于介绍当前国际上光计算机研究蓬勃发展的新情况,为我国技术决策部门提供信息和咨询,以引起对光计算研究的重视,以及推动国内热心和有志于光计算研究的单位和个人进行学术交流、互通情报,并加强与国际上有关学术会议、团体和专家的联系和合作,从而促进我国光计算研究的迅速发展。

最近三、四年来,国际上关于光计算的研究又有了许多新的发展。国内的情况也发生令人鼓舞的变化。由于已把光计算的研究列入了国家自然科学基金的申请指南,特别是在我国高技术发展计划中对光计算的研究已引起相当重视。这就大大促进了一些单位和个人从事光计算研究的积极性。上海交通大学应用物理系已将《光计算》列为研究生的选修课程。可是至今尚没有一本系统论述光计算的专著可供阅读。本着上述“中国光计算机研究促进会”的宗旨,我作为发起人之一感到有责任编写一本能系统介绍光计算的基础和原理、系统和结构、器件和材料、现状和动向以及应用和局限等方面的书,也作为对已故的龚祖同教授热心倡导光计算研究的缅怀。在我校几位同事的响应和支持下,参照我几次报告的提纲,合作编写了这本《光计算》,可以作为选修本课的研究生和高年级大学生的教学参考书,也可供从事光计算研究的科技人员阅读。

本书编写的分工如:下第一章导论由本人执笔;第二章和第三章是模拟和数字光计算的算法和结构,由徐高钺副教授执笔;第四章是光计算中的逻辑器件,由徐敬舆副教授执笔;第五章是光计算中的存储器件,由郭嘉荣副教授执笔;第六章是光计算中互连和通信,由许政权副教授执笔。高德荫副教授为第一章提供了一部分素材;陈永年教授对第一章内容提出过有益的评论。

由于本书内容涉及的领域比较广,就光计算学科本身而言也尚不成熟和完整。虽然本书的编著者都正在从事这一领域的研究,但终究只是很小的局部。主要内容多数是取材于近年来国际上较有影响的期刊和会议文集。因为这是一门正在发展中的学科,毫不奇怪,者的学术观点和实验结果并不都是一致的。本书力求能较客观地反映出光计算研究已取得的成就及今后努力的目标。因此,本书的编写不能不说是一次大胆的尝试。错误和不足之处希望能得到读者和同行的批评和指教。

陈益新

1988年1月于上海交通大学

目 录

第一章 导论	(1)
第一节 电子计算机的进展及极限.....	(1)
第二节 光子计算的特点.....	(9)
第三节 光计算研究的进展和趋向.....	(14)
参考文献.....	(26)
第二章 模拟光计算算法与结构	(27)
第一节 引言.....	(27)
第二节 模拟光计算的概念.....	(28)
第三节 矩阵处理器.....	(29)
第四节 线性代数方程组的双模(Bimodal)光计算方法.....	(38)
第五节 偏微分方程的光学模拟解.....	(40)
第六节 蒙特卡洛(Monte Carlo)方法的光计算.....	(48)
参考文献.....	(53)
第三章 数字光计算算法和结构	(55)
第一节 数字光计算的特点.....	(55)
第二节 光学编码和逻辑.....	(55)
第三节 数字光学加法器.....	(63)
第四节 用光学卷积的数字乘法器.....	(68)
第五节 数字光学矩阵乘法器.....	(69)
第六节 矩阵乘法的集成光学结构.....	(76)
第七节 余数算法及其结构.....	(82)
第八节 余数算法在数字光计算中的应用.....	(92)
参考文献.....	(96)
第四章 二进制光逻辑器件	(98)
第一节 二进制光逻辑.....	(98)
第二节 光学平行逻辑器件及列阵.....	(100)
第三节 集成光学逻辑器件.....	(115)
第四节 光学双稳态逻辑器件.....	(121)
参考文献.....	(129)
第五章 光计算中的光存储器件	(131)
第一节 引言.....	(131)
第二节 光盘存储器.....	(133)
第三节 光全息存储器.....	(141)
参考文献.....	(167)

第六章 光互连和通信	(168)
第一节 概述.....	(168)
第二节 电子计算系统中的光互连.....	(171)
第三节 光计算系统中的光互连和通信.....	(175)
第四节 几种光互连系统.....	(181)
参考文献.....	(185)

第一章 导 论

光计算在本世纪60年代初就是一个有着巨大吸引力的课题,这是由于用光子作为信息的载体具有一系列电子所不能比拟的优点。长期以来对光计算的研究更多的是看作一项潜在技术。可是在今天,越来越多的人认识到,光计算将光子技术用于计算已成为实际应用要求所推动的新技术了,最终它将显示出在计算速度、数据容量、实时性、人工智能等许多性能方面胜过电子计算。

本章简要回顾了电子计算机发展过程中几个主要阶段所取得的进步,指出平行处理方法的采用不仅使电子计算机的性能有了很大提高,同时也孕育着光计算的萌芽。从实际应用对计算机的要求,分析了电子计算具有的固有限制及光计算的特长。简要介绍了光计算研究的历程。从系统、器件及材料加工三方面概括了光计算研究的现状。最后讨论了光计算所追求和可能达到的战略目标。光子计算的竞争并不是为了完全取代电子计算,而是可弥补电子计算之所不足和所不能,两者相辅相成,各献其长。

第一节 电子计算机的进展及极限

1. 电子计算机的演变^[1,1,1,2]

从1946年第一台电子管计算机问世以来,电子计算机在不到半个世纪内已几经演变,当今人们正在为未来的第五代计算机而竞争。由于新器件的发明对电子计算机功能的提高起着决定性作用,通常就以此作为电子计算机历代划分的依据,即由电子管构成的为第一代,晶体管为第二代,采用中、小规模集成电路(SSI和MSI)的为第三代,发展到由大规模集成(LSI)和超大规模集成(VLSI)电路构成的为第四代。未来的第五代电子计算机除了采用集成度更高的VLSI或其他新器件以外,更重要的标志在于其智能化程度的大大提高。

电子计算机功能的提高除了上述器件的因素外,计算机系统结构(Computer architecture)的改进也是十分重要的。计算机系统由硬件(hardware)和软件(software)组成。硬件是计算机系统实体装置,它主要包括中央处理器、存储器、输入输出、外部设备及它们之间的通信互连装置等。软件一般指的是一组程序(如编译程序、监督程序、控制程序和应用程序等)及与操作有关的各种信息及使用维护手册、说明书及框图等。软件是计算机不可缺少的组成部分,它的作用是便于计算机的操作,提高效率 and 扩大硬件的功能。计算机的系统结构是包括硬件和软件在内的计算机系统整体的总称,它可与描述具有一定式样和风格的建筑物总称(architecture)相比拟。实际上,系统结构这个名词在计算机术语中是70年代从建筑学中移植过来而得到广泛使用的。

从应用的角度,或从性能和价格的观点,可以对电子计算机进行分型。目前,电子计算机通常可分成巨型机、大型机、中型机、小型机和微型机等五种类型。这种分型的根据不能按体积尺寸的大小,也不能根据某一种特性参数的高低来确定,而且随着技术的进步,分型

的标准也随之提高。过去需要占几个房间的机器的功能还不如现在一个机柜的小型机，过去十五年到二十年前的所谓大型机其主频和运算速度还比不上现有的小型机，甚至微型机。

一般来说，计算机根据同一时期综合性能的高低来分型。所谓综合性能，在硬件方面包括计算速度、字长、数据的类型(目前微型机只有定点表示，小型机已增加浮点表示，而大型机、巨型机则不仅有定、浮点表示，还有向量、矩阵表示)、存储系统及容量、输入/输出能力(包括 I/O 处理器的处理能力和能连接的 I/O 设备数量)以及指令系统等。在软件方面，巨型机和大型机比小型机和微型机配备更多种高级语言，更完善的操作系统、数据库、知识库网络通信软件和更多的用户程序包。大型机还具备其它许多功能如纠错编码和诊断技术等各种提高计算机的可靠性所采用的措施。下面，我们以电子计算机的两极，微型机和巨型机为例就可清楚地看到电子计算技术的发展是何等迅速。

大家知道，1946年诞生的第一台电子计算机 ENIAC 是一个庞然大物，共用 18,000 个真空管，重量近 30t，电力消耗 150kW，占地面积约 170m²。其加法运算的速度为每次 0.2 ms，乘法运算为每次 0.8ms。而 70 年代像雨后春笋般出现的微型机，其全套电路集成在一片或几片像小孩指甲大小的硅片上，一台完整的微型机与打字机差不多，功耗仅数瓦，而运算速度却比 ENIAC 高出几十倍或几百倍，微型机一出现就引起极大重视，掀起了计算机大普及的热潮，在短短的十多年内获得了巨大发展，并经历了四代技术更新，如表 1.1 所示。

巨型机的研制是现代科学技术，特别是国防尖端技术和高技术发展的需要。核武器设计、星球大战系统、空间技术、气体动力学、长期天气预报、石油勘探、粒子束模拟计算、实时图像识别、机器人视觉和人工智能等许多问题都要求计算机不仅有很高速度，并且有很大容量。现有的一般大型通用计算机已远远不能满足要求。下面列举两例说明之。

表1.1 微型机的技术更新

序号	年 代	工艺技术	字长 (位)	指令周期 (ms)	时 钟 (MHz)	集 成 度 器件/芯片	产品实例
1	1971~1973	PMOS	4-8	20	0.7~0.8	2k	Intel 4004 Intel 8008
2	1973~1977	NMOS	8	2	2~5	5k-10k	Intel 8080 M6800、Z80
3	1978~1980	HMOS	16	0.5	5~10	30k	Intel 8086 M 68000 Z 8000
4	1981~	HMOS CMOS	32	0.3	8~18	100k -500k	Intel 80386 Z 80000 HP-32

以往研制飞机和航天器都要进行大量的风洞试验以采集设计数据，例如对航天飞机需要大约 45,000 小时的风洞试验，十分费时费钱。现在利用计算机模拟技术进行空气动力学计算，对整个航天飞机作三维形状的模拟，这类计算要求计算机具有 10BFLOPS 的运算速度。BFLOPS 是 Billion Floating Logic Operation Per Second 的缩写，即每秒十亿(或 10⁹)次浮点逻辑运算。

在长期天气预报中，如果在经度方向取 100 点，纬度方向取 50 点，高度方向取 10 点，即总共取 5×10⁴ 个空间位置，计算时间间隔取 5 分钟，这样要想得到一年后的气象数据，需进行 10⁶ 次计算。当要求这种计算能在若干小时内完成时，计算机的运算速度必须超过 100 BFLOPS。

随着科学技术的进步所提出的许多新的计算问题,要求计算的速度比上面所举的例子更高。目前研究开发的巨型机或超级计算机的运算速度已超过每秒十亿次,但离开实际的需要还有很大差距。

2. 诺依曼机的基本结构^[1,191,291,9]

最早的电子计算机 ENIAC(这是 Electronic Numerical Integrator and Computer 的缩写,意即电子数值积分器与计算机)与以前的所有计算器械相比,最大的特点是采用了电子线路来执行算术运算、逻辑运算和数据存储。机器采用十进制制,它有二十个加法器,每个加法器由十组环形计数器组成,可以保存一个字长十位的十进制数。它还有乘法器以及除法和开方装置供执行其它运算。这台计算机是在第二次世界大战期间美国为了要能迅速算出炮弹弹道轨迹批准研制的。

虽然这是世界上第一台能实际运行的大型电子计算机,但它的基本结构和以往的机电式计算机没有本质差别。ENIAC只是初步显示了电子元件在提高运算速度方面具有的优越性,却尚未最大限度地实现采用电子技术可能提供的巨大潜力。存在的主要缺陷,一是存储容量太小,至多只能储存二十个字长十位的十进制数;另一是它的程序是用线路连接方式实现的,为了进行几分钟的数字计算,程序准备工作要化几小时甚至1~2天。要想简单地采用增加存储器的办法来克服存储容量的不足不仅不经济,而且在当时也不现实,因为 ENIAC 的存储器储存一个字长十位的十进制数需用一个十位环形计数器,而这类计数器使用的真空管达 600 个之多。至于如何简化复杂的开关程序操作,也只有改变计算机的基本结构才能真正解决。

对后来电子计算机有决定性影响的一个结构方案是由著名的数学家冯·诺依曼(Von Neumann)及其合作者(大部分是 ENIAC 的研究组成员)在 1945 年提出来的。这一结构方案名称为 EDVAC (Electronic Discret Variable Automatic Computer,意为离散变量自动电子计算机。)这个方案有两个意义重大的改进:一是为了充分发挥电子元件的高速度而采用了二进制,二是提出了“存储程序”的概念,即能够自动地从一个程序指令进到下一个程序指令,其操作顺序可以通过一种称为“条件转移”的指令而自动完成。这个概念被誉为计算机史上的一个里程碑。后来,人们就把这种基本结构称为诺依曼机。这种机器由五部分组成(如图 1.1 所示),包括处理器、控制器、存储器、输入装置和输出装置。诺依曼机的主要特点是:

- (1) 计算机用二进制表示,采取二进制运算。
- (2) 系统结构以处理器为中心,输入/输出设备与存储器之间的数据传输都通过处理器,处理器、存储器和输入/输出设备的操作及其通信都由控制器集中控制。
- (3) 存储器是顺序线性编址的一维结构,操作时按坐标对每一个编址单位寻址。其运算速度与访问主存的次数有密切关系。
- (4) 指令由操作码和地址码组成。操作码代表指令的操作类型,最基本的操作是算术运算,地址码代表操作数的地址。指令在存储器中是按执行顺序而存储,由指令计数规定每条指令所在单元的地址。每执行完一条指令,指令计数器自动顺序加 1,操作只能是顺序的。

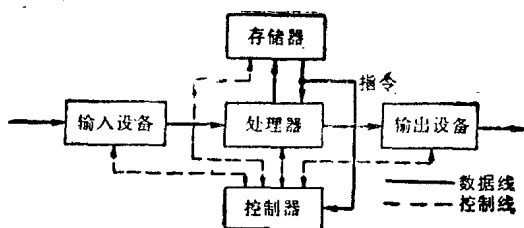


图1.1 诺依曼计算机系统结构

由于诺依曼机中引进了对存储单元按地址寻址的机制，从而使处理器与存储器之间的数目大大减少。在这以前的计算机包括 ENIAC 在内可统称经典有限态机 (Classical finite state machine)，其结构原理如图 1.2(a)所示，由一个组合逻辑单元、若干个存储单元以及输入/输出和各种互连器件所构成。所有的存储单元都平行地操作不需要寻址，但当需要增

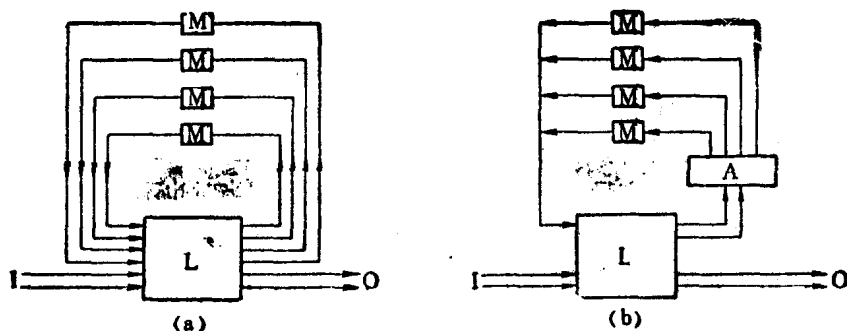


图1.2 经典有限态机(a)与诺依曼机(b)的比较

加大量存储单元时，在逻辑单元和存储单元之间完成大数 N 个互连已不现实，正如前面所指出的，需要耗用大量电子元件。在诺依曼机(见图 1.2(b))中，由于采用了寻址机制和二进制编码方式，使从逻辑单元到存储器的输出端从 N 个互连减少到 $\log_2 N$ 个，同时还利用公共回线大大减少了存储器和逻辑单元输入端的互连。这一结构的改进对电子计算机的发展有着极为重要的意义。虽然三十多年来诺依曼机已有了许多发展和改进，但至今绝大多数电子计算机仍是建立在这个基本结构特点上的。

3 计算机平行结构的发展^[1, 2, 3, 4]

富有戏剧性的事件出现了，曾对电子计算机的发展有巨大推动作用的诺依曼结构后来却又成为它进一步提高速度和扩大容量的主要障碍，被称为诺依曼“瓶颈(bottleneck)”。从图 1.2(b)可以看出，由于诺依曼机的操作要通过顺序寻址，在一个时间内只能对一个数据按一个指令进行操作，即只能串行操作。而经典有限态机由于不存在寻址机制，在处理器与存储器之间是直接互连的，可以同时进行运算，或称为并行操作。显然，比较一下 N 位串行计算机 (Serial Computer) 和 N 位并行计算机 (Parallel Computer) 的运算速度，不难看到，在元件具有同样性能的条件下，后者的速度差不多可以提高 N 倍。

随着科学技术的迅速发展，每秒运算数百万次的通用大型机仍远远不能满足实际的需要。突破传统的顺序处理的计算机应运而生，它采用了并行结构，也称为并行处理机。这种计算机的速度可以突破每秒十亿次计算，其它功能也大大增强，故列为巨型机。巨型机的成

功其物质基础主要归因于 VLSI 的出现, 在一个不到一平方厘米的硅单晶芯片上可以集成数十万个晶体管、二极管、电阻和电容元件, 从计算机发展的阶段而言, 属于第四代计算机。前面介绍的 ENIAC 机实际上是可看作现代并行机的前身。

现代并行处理机中应用的并行性(parallelism)概念有多重含义。主要有两种实现途径, 较直观的是设备重复或资源重复(resource-replication)的概念, 即采用大量相同的设备同时运算来提高速度。另一种是采用时间交错(time-interleaving)或设备共用或资源共享(resource sharing)的方法使设备在时间上充分利用, 使速度和效率增加。

早在本世纪 20 年代, 就有人为了解决气象预报中大量的数值计算, 想让 64000 人坐在一个圆形剧场中同时进行计算, 体现了朴素的并行计算思想。40 年代, 美国原子能委员会曾组织了几千个台式计算机操作员同时进行核反应计算。这种利用大量重复设备的并行计算方案由于硬件价格昂贵的限制在早期的电子计算机系统结构中不可能普遍采用。随着 VLSI 技术的成熟和成本大幅度下降, 设备重复的并行处理机, 例如多存储单元的关联处理机(associative processor)、多操作单元的陈列处理机(array processor)等, 近年来已获得迅速发展。

时间交错的概念是将多个处理过程在时间上互相错开, 以便交替使用同一套硬件设备, 以增加设备利用率来提高计算速度。流水线处理机(pipeline processor)就是这一类。与现代工厂中流水线生产的基本思想相类似, 在这种处理机中将复杂的运算分解为基本的子运算。被运算的数或数对依次通过子运算单元, 最后完成复杂的运算。由于各子运算单元可以同时操作, 使运算速度成倍提高。例如, 执行一条指令一般可粗略地分为取指令、指令译码、取操作数和执行指令四步。在非流水线的顺序处理计算机中, 执行的时序如图 1.3(a) 所示。

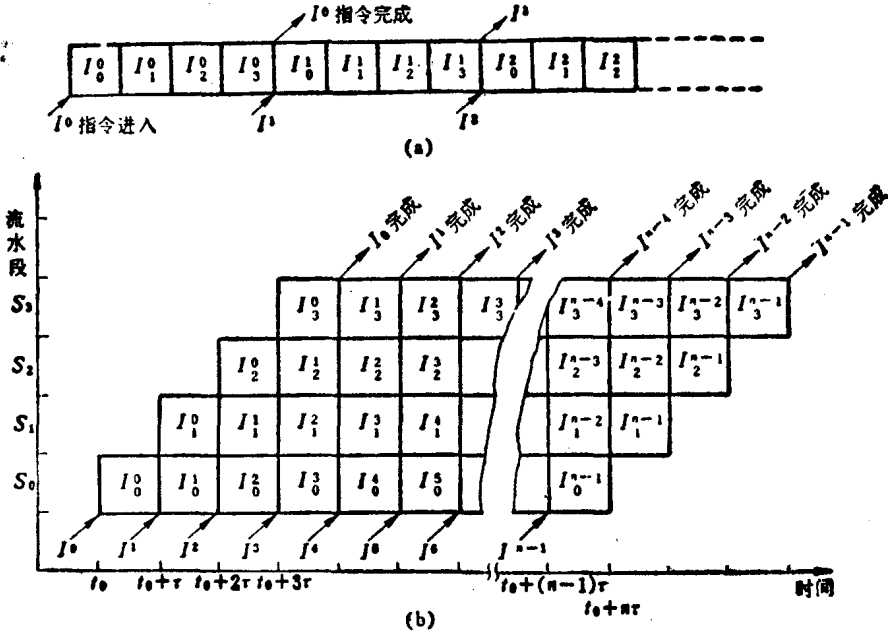


图 1.3 顺序处理指令执行过程(a)与流水线处理过程(b)的比较

在流水线处理机中指令执行过程如图 1.3(b) 所示。图中 I 表示指令, 右上角数字为指令序号, 右下角的数字为指令执行的序号, 在流水线处理机中也就是流水段序号。由图中不难看出两者的区别。在顺序处理机中必须等第一指令全部执行完成后才能执行第二指令, 在流水线处理机中只要第一指令在第一流水段执行完成进入第二流水段时, 第二指令就可以进入第一

流水段，这样依次类推，每隔一个流水段时间 τ ，就能输出一条指令结果，所以流水线分得越多，处理的速度也就越快。由于流水线上的各单元没有设备的重复，只是通过时间上的交错使设备得到了充分利用，所以这种系统有较高的性能价格比。但这种系统的平行性和速度提高是受限制的，不少计算机因而采用多重流水线，即不仅采用时间交错，也同时采用设备重复。实际上，有许多并行处理机中都综合利用了多种并行机制。流水线处理机中比较著名的例子如 Cray-1，1976 年提供产品，机器字长 64 位，最高能得到每秒 100 兆次浮点运算。

下面我们讨论并行处理机的分类。从计算机的系统结构来看，可按在其不同层次引入并行性来分类。例如，上面提到的多存储单元的关联处理机是存储器操作这一级的并行处理。一般来说，存储器的寻址是按照给定的几何坐标地址读出对应存储单元的数码，这就是按坐标寻址。有一种内部包括信息处理功能的存储器，它可按给定的信息内容的全部或部分特征把所有存储单元中内容与此特征相符合的全部数码一次判别出来。这种内容寻址存储器也称关联存储器(associative memory)。以关联存储器为核心，配备必要的运算部件、指令存储器、控制器和输入/输出接口就构成一台以存储器操作并行为特征的关联处理机，其结构框图如图 1.4 所示。它与普通顺序处理机结构的主要不同在于用关联存储器替代了坐标寻址存储器。由于每个存储单元不仅可存储信息，而且还有处理信息的功能。来自控制器的一条指令能对许多数据同时执行逻辑运算，完成并行操作。尽管关联存储器的信息处理速度可能比顺序操作的中央处理器的速度低，但由于它是大量重复设置而并行工作的，故其运算总的速度可以随关联存储器的并行数增加而提高。美国两种军用的巨型计算机系统 STARAN 和 PEPE 都是属于关联处理机一类，建造于 70 年代初期。

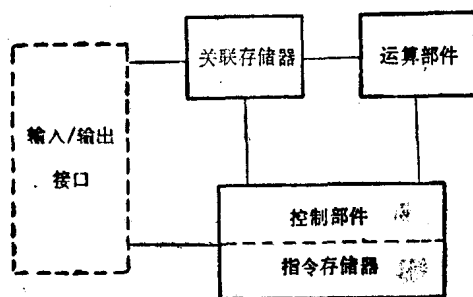


图 1.4 关联处理机

前面介绍的流水线处理机则是在处理器操作步骤这一层次上引入并行机制。更高层次的并行还有处理器级的并行，例如列阵处理机和多处理机系统等。

对并行处理计算机另一种较常用的分类方法是弗林(M.J.Flynn)分类法，即将数据流和指令流的并行性作为分类依据，关键在于系统能否实现指令级并行。数据流(data stream)表示待处理的数据组，包括输入数据和运算的中间结果；指令流(instruction stream)是计算机执行的指令组。Flynn 的分类方案是按数据流(D)和指令流(I)的并行性将计算机系统结构分为下列两类：

- (1) 单指令流单数据流(SISD)；
- (2) 单指令流多数据流(SIMD)；
- (3) 多指令流单数据流(MISD)；
- (4) 多指令流多数据流(MIMD)。

第一类单指令流单数据流系统(SISD)实际上就是传统的顺序处理计算机，其系统结构如图 1.5(a)所示。这类系统由于瓶颈效应使速度受到限制。至于多指令流单数据流(MISD)系统，即指令级并行，而数据级是串行的，可以把单一流水线处理机列为这一类，图 1.5(c)表示其系统结构。

已开发的并行处理机多数是属于 SIMD 和 MIMD 结构，其系统结构如图 1.5(b),(d)所

示, 因为它们能更高程度地发挥并行结构的优越性。上面讨论的关联处理机是更高层次的 SIMD 系统。其中将处理单元排成一行或列阵并无原则区别。由指令存储器提供的一条指令由指令单元同时送到各处理单元。各处理单元可以从数据存储器取不同的数据。列阵处理机的典型代表是 60 年代末美国依里诺大学设计的 ILLIAC IV 系统, 它的 64 个处理单元在平面上排列成 8×8 的正方形列阵。

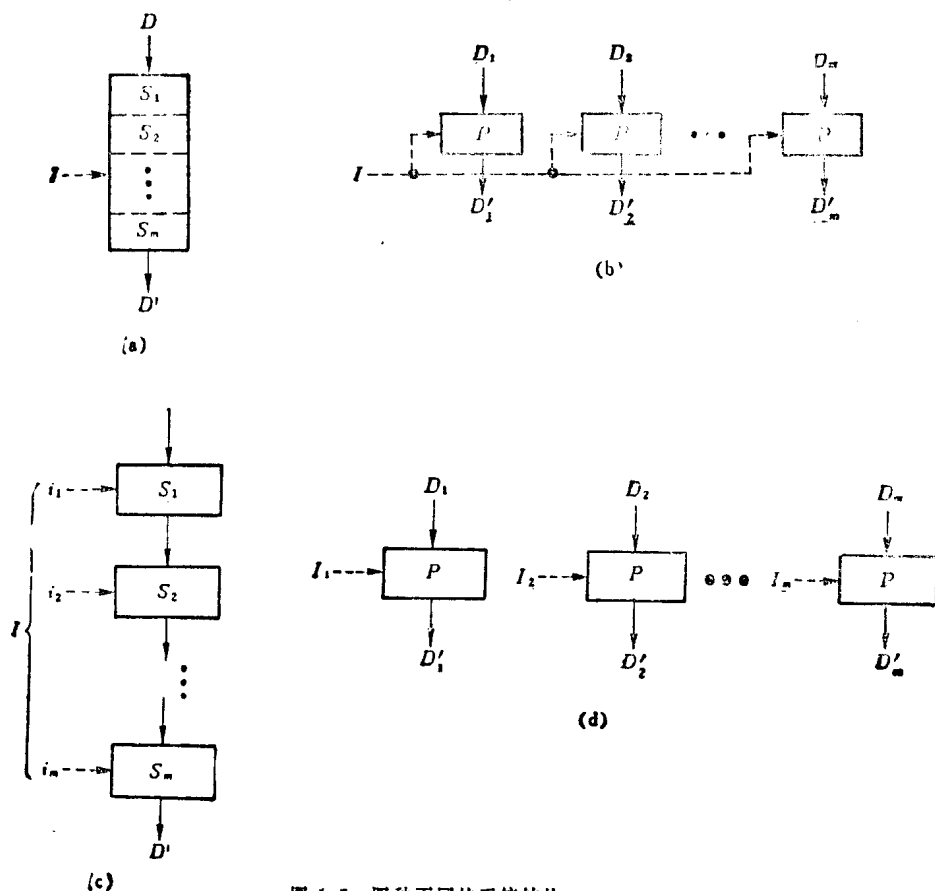


图 1.5 四种不同的系统结构

- (a) 简单的 m 级顺序处理机, SISD 结构;
- (b) 单指令流的 m 平行处理机, SIMD 结构;
- (c) m 段流水线处理机, MISD 结构;
- (d) 多指令流的 m 平行处理机, MIMD 结构。

在 MIMD 结构中, 主要包括多处理机 (multiprocessor) 和分布处理系统 (distributed processing system)。多处理机一般可分为两类, 一类是由相同类型的多个处理机组成的单一处理机系统, 这称为同型 (homogeneous) 多处理机。另一类是由不同类型的多个处理机组成的计算机系统, 称为异型 (heterogeneous) 多处理机。

在同型多处理机中, 按照 MIMD 模式实现程序一级或任务一级的并行处理, 将一道程序分解为若干相互独立的程序段或任务, 分配到各处理机同时并行执行。这种并行任务在处理机之间可随机进行调度, 因此要求各处理机应具有同等功能。这类处理机是建立在设备重复原理的基础上以极大提高处理速度为目标。

在异型多处理机中, 它划分程序操作的原则与同型机明显不一样, 不是分解为并行成分, 而是依靠流水线原理来提高全系统的处理效率, 分配给不同的处理机的是性质不同的任务, 即

各处理机是专业化的,因而要求各处理机具有不同的功能。例如1979年由美国Burroughs公司和依里诺大学联合开发成功的科学处理机BSP就是由专门完成数组运算、标量运算和系统管理等功能的三台处理机共同组成的系统,它的最高处理速度可达每秒五千万(5×10^7)次浮点运算。

分布处理系统则是更大范围的并行处理,但至今没有一个比较统一的定义。一般来说,这种系统具有如下共同特点:(1)具有多套设备,不是集中而是分布的;(2)各设备具有相对独立性,但由通信网络相互作用;(3)具有统一的操作系统。这种系统既具备多处理机的特点,又与计算机网的特征很相似。这种系统的优点主要是可以实现全系统的设备共用,包括程序和数据的共用,因而具有较高的性能价格比,同时系统的可靠性比单机系统高。近年来这种系统发展得很快。图1.6表示了并行处理机的运算速度随年代提高的情况。

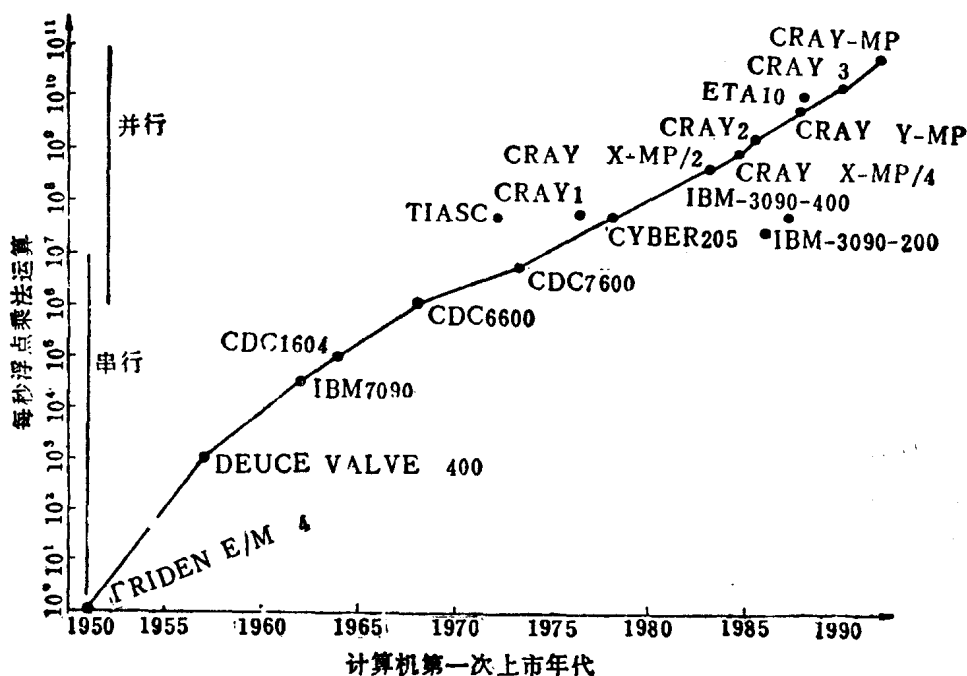


图1.6 计算机速度的进展

近年来国内外正在研制被认为是新一代计算机的,目的在于处理知识信息的智能计算机,即更接近于人脑功能的计算机。它有以下几个特点:能高效率地支持非数值操作,能使用自然语言进行人机交互,能进行复杂的人工智能问题求解,能实行高速并行处理。

智能计算机主要由三个部分组成,即:包括自然语言理解、语音、图像和图形输入输出等的应用系统;包括知识库、推理和智能接口三个子系统等的软件系统;包括知识库、推理机和智能接口机等硬件系统。

智能计算机的一个特点是容量大,为了有效地支持知识库的工作,存储器的容量应在100至1000千兆字节。它的另一特点是运算速度快,在10至1000千兆次/秒。处理这样大的存储器容量和进行这样高速的运算不借助于并行处理是不可能实现的。

近几年来,人工智能技术已有了较大的进展。英国通信公司研究出声音应答自动翻译系统,它能翻译英、法、德和西班牙四种语言。专家系统已进入实用阶段,机器人的手脚已能灵活地自由活动,医疗界正在大力开发计算机诊断系统,模仿人脑的神经网络计算机也正在

研究中。

4. 电子计算面临的新困境及其限度^[1.6, 1.8]

由于 VLSI 技术的高度和并行处理系统结构的采用使电子计算机摆脱了诺依曼瓶颈的困境，而又获得了新的发展。但由于电子电路的固有局限性使 VLSI 和并行性的潜力不能充分发挥，这主要是互连和通信的障碍。

任何连接导线都不可避免存在一定的电阻 R 和电容 C ，因而信号通过导线的时间常数 RC 往往超过了晶体管的开关时间，这就大大限制了互连带宽的提 高并造成了时钟扭歪 (clock skew)。这互连通信问题不仅是各功能单元之间的连接，即使 VLSI 芯片内部的连接以及芯片之间的连接都成了难于逾越的障碍。

采用 VLSI 技术虽有很大优点，根据现有的技术，可以在单个硅片上制造出具有 10^{10} 个有源器件的系统，每个器件的开关速度可达 10^{-10} 秒。但遗憾的是这一惊人的容量不能与其通信带宽相匹配，连接导线拥塞，没有足够空间来排列。在 VLSI 芯片中，随着元件几何尺寸按比例缩小，导线的长度缩短了 α ，而其截面减小了 α^2 ，因而导线的电阻增加了 α ，电容减小了 α ，结果是导线的时间常数 RC 乘积并没有变化。根据 VLSI 的参数可以估算出，信号在其中传输的速度只有光速的 0.5% 左右。

在电子计算机中，由于在不同通道中传输的信号存在不同的时延，因而不能同时到达同一个逻辑门，或指令不能同时到达各操作单元，这就是通常所谓的时钟扭歪。当这种时钟扭歪超过一定范围时，运算和操作产生误码。为了使电子计算机系统的各种层次互连的时钟扭歪能保持在一定的允许范围内，需要采取措施使不同长度的互连通过某种附加的延迟加以补偿。例如 CRAY-1 处理机，在电路板上最长的互连长度为 15.42cm，短于这个长度的互连必须通过门的延迟加以补偿，以使传输时间与互连最长的相同，使处理器的设计大大复杂化了。系统一级的互连，为保持信号上升前沿和下降前沿所需要的梯度及通信带宽，往往需要采用体积大、成本高的同轴电缆系统。

更重要的是在许多应用场合如图像识别、人工智能、机器人视觉等，不仅要求运算速度高，并且要能同时对大量数据进行并行处理，有时要求处理的信息本身就是一个二维或三维巨大的数据流。在这种情况下，往往要 10^6 数量级的并行通道同时操作，在电子计算机系统中要达到如此高度并行的互连，实际上是难以实现的。

第二节 光子计算的特点

1. 光子与电子计算的物理特性比较^[1.6, 1.8, 1.9, 1.14]

用光子作为信息的载体与电子相比在传输方面带来的优点已在光纤通信上充分显示。今后，毋庸置疑，电缆通信即使不是全部也将是绝大部分被光纤通信所取代。把光子用于信息处理和计算方面的潜在作用在某种意义上说将比光子用于通信更为杰出。这是由于光子与电子的物理本质及特性所决定的。

首先，光子不像电子那样带有电荷。电子之间通过电磁场而相互作用，导致了电子信号很容易自身干扰或受外界干扰。光子之间很难相互作用，因此光信号可以沿各自的通道传

播, 不论其通道互相平行或互相交叉都不会产生干扰, 这就造成光学的固有并行性, 这特性对信息的并行处理和并行计算恰好配合, 是电子学无法比拟的。

其次, 光子不具静质量, 它可以在真空中传播, 也可以在介质中传播, 并且很容易通过真空和介质的界面, 不仅以光速传播, 而且传播过程中能量损耗极小。电子一般限制在金属导线内传输, 上面已经提到, 由于存在电阻 R 和电容 C 的限制, 电流的传输速度往往只有光速的千分之几, 而且它的传输带宽也受到 RC 的限制。光具有很高频率, 并且传输带宽不会有类似 RC 这种弛豫过程的限制。光学系统的空间带宽和时间带宽积很大, 能够容纳大量独立的信道完成所需的各种操作。这一特性与上面光子互相不作用的特性结合起来解决计算系统中各级的互连和通信也将大大胜过电子学。

最后, 光子很难相互作用既是很大优点, 但同时也是光子的一个严重缺点, 因为很难用光子来控制光子。电子由于容易相互影响, 所以可以很方便地实现电子开关功能。自从发现某些材料具有很大的光学非线性系数后, 情况有了根本改观。过去认为难于实现光开关和光逻辑操作的问题不再是光计算的壁垒。利用光子与某些材料相互作用所具有的三次非线性效应所设计的光双稳器件, 其开关时间已低达毫微(10^{-9})秒量级, 预期的理论极限在微微秒或亚微微秒($10^{-12} \sim 10^{-13}$)范围, 即为当今硅开关器件速度的 1000 倍。每个光脉冲开关能量现在能做到 $< 4\text{pJ}$ (微微焦耳), 理论值预期可低于 1fJ (飞焦耳即 10^{-15} 焦耳), 相当于数千光子的能量。操作的光功率在 mW (毫瓦)的水平。这说明过去大家担心的光器件的能量消耗现在已能与最好的电子器件的能耗相接近。这样, 利用光的高并行性 ($> 10^9$) 及快响应 ($< 10^{-9}\text{s}$), 未来全光计算机的速度可以超过 10^{16}bit/s 的运算。这将是研究中的巨型计算机 CRAY-3 运算速度的一万(10^4)倍。

2. 光并行处理的潜力^[1, 7, 1.8, 1.9, 1.14]

从上述电子计算机发展的过程已清楚地看到并行处理对提高计算机功能的重要作用。近年来人们正在逐步揭开人脑神经系统之谜, 它可看作是天然的并行结构的多处理器系统。下面我们不妨在大脑与并行处理机之间作一个有趣的类比, 可以进一步看到高度并行对提高计算机功能是何等重要。大家很清楚, 现阶段的电子计算机在实现智能操作诸如推理和图像识别等方面所表现的能力是无法与人脑相比的。但实际上, 就电子器件的开关速度而言比组成人脑的开关元件的速度至少快一百万(10^6)倍。作为生物开关的神经细胞, 其响应时间一般在毫秒量级或更长。所不同的是生物开关具有高度并行性和高度互连。据现在研究的结果可知, 一个神经网络大约有一千亿(10^{11})个神经细胞, 每个神经细胞能有高达一万(10^4)个突触(synapse), 即生物连接器。而今天的电子计算机中的电子开关一般只与其它少数几个开关相连接, 要像神经细胞那样众多的互连, 在技术上是无法实现的。这充分说明, 人脑高度的处理能力是由神经细胞的高度并行和高度互连所决定的, 弥补了开关速度之不足。

未来的计算机能否达到如此的巨量并行性(massive parallelism)和高度互连呢? 在光学上, 一个好的透镜、棱镜或反射镜所传播的图像能够分解出 $10^7 \sim 10^8$ 个可分辨的光斑(spot)如果采用透镜列阵, 几乎可以没有限制。在光处理或光计算系统中, 每一光斑就表示一个带宽极高的通道。这对二维和三维数据流的并行处理是非常有效的。当并行性下降到 10^4 个通道以下时, 电子学就能与光学相竞争, 而且常常可以优于光学。

根据并行处理机系统中每个处理单元, 也称结点(node)的数量以及每个结点的复杂度