



光计算机

GUANG JI SUAN JI

秦秉坤 孙雨南 朱伟利 编

北京理工大学出版社

参 335 · 9

光 计 算 机

秦秉坤 孙雨南 朱伟利 编

徐大雄 审

北京理工大学出版社

内 容 简 介

本书介绍了近十年来光计算领域内的最新进展,包括光计算机的优越性,光学数字计算和模拟计算,空间光调制器和光学互连,光学数字计算的实例——光学矩阵运算,光学智能机的实例——光学神经网络和光学推理机,以及光学存储。本书内容由浅入深,既可供光学、电子学和计算机专业人员和学生阅读,也可供非本专业的科技人员、管理人员及研究生、大、中学生阅读。

光 计 算 机

秦秉坤 孙雨南 朱伟利 编

徐大雄 审

北京理工大学出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京密云华都印刷厂印刷

787×1092毫米 32开本 8.875印张 197千字

1989年12月第一版 1989年12月第一次印刷

ISBN 7-81013-288-1/TP·21

印数: 1—2100册

定价: 3.85元

前 言

光计算机是近十年来，国际、国内广大科学工作者密切注视和关心瞩目的新课题。欧美等发达国家拨了相当款项研究制造光计算机。我国也正在开展这方面的研究。但至今尚无系统介绍光计算机书籍。这对广大具有大专以上文化程度的科技人员，教师，学生和管理干部比较完整地了解光计算机有相当大的困难。为此，我们编写这本科技读物，并力图做到由浅入深，使广大读者能对光计算机有一个清晰的概念和概貌的了解，起到引路入门的作用。

全书共分八章，并在每章后附有参考文献。

第一章对电子计算机的局限性和光计算机的优点进行讨论；第二、三章分别介绍数字光计算机和光学模拟计算；第四章介绍光计算的主要器件——空间光调制器；第五、六、七章分别介绍了光学互连、光学矩阵运算和光学智能机；第八章简要地介绍了光盘作为计算机外存。

本书由北京理工大学秦秉坤副教授、孙雨南和中央民族学院朱伟利共同编写。秦秉坤编写第一、二、八章；孙雨南编写第四、五章；朱伟利编写第三、六、七章。另外，在编写第二章时，得到长春物理所金锋、范俊青两位付研究员的同意，参考了他们未出版的“集成光学入门”文章的手稿，特此致谢！

全书由中国光学学会理事、全息和光信息处理专业委员

会副主任、北京邮电学院教授徐大雄审定。在此深表感谢！

由于我们水平有限，书中难免有不妥之处，望读者批评指正。

编者

1989年于北京

目 录

第一章 光计算机的提出	(1)
§ 1-1 电子计算机的局限性.....	(3)
§ 1-2 光计算机的提出.....	(9)
第二章 光学数字计算机	(15)
§ 2-1 程序控制式光学数字计算机.....	(16)
§ 2-2 逻辑回路.....	(18)
§ 2-3 光学双稳器件的基本原理.....	(22)
§ 2-4 分支光波导光学双稳态装置.....	(29)
§ 2-5 定向耦合型光学双稳态装置.....	(35)
§ 2-6 半导体光学双稳器件.....	(40)
§ 2-7 光电反馈式光学多稳态器件.....	(43)
§ 2-8 利用光晶体管做各种逻辑门.....	(46)
§ 2-9 光波导逻辑门.....	(50)
§ 2-10 利用复合半导体激光器组成逻辑门.....	(63)
§ 2-11 模数 (A/D) 和数模 (D/A) 转换器.....	(70)
第三章 光学模拟计算	(81)
§ 3-1 图像的相乘运算.....	(82)
§ 3-2 光学傅里叶变换.....	(83)
§ 3-3 图像的相关和卷积运算.....	(92)
§ 3-4 图像的相加和相减运算.....	(95)
§ 3-5 图像的微分运算.....	(104)
§ 3-6 光学梅林变换.....	(106)
第四章 空间光调制器	(112)
§ 4-1 SLM 的基本结构.....	(113)

§ 4-2	空间光调制器的基本功能和应用	(115)
§ 4-3	电光SLM的性能极限	(119)
§ 4-4	SLM实例	(123)
第五章	光学互连	(139)
§ 5-1	光学互连的类型	(140)
§ 5-2	用于时钟分布的光学互连结构	(144)
§ 5-3	用于数据通信的光学互连结构	(150)
§ 5-4	光学互连网络	(160)
第六章	光学矩阵运算	(187)
§ 6-1	矩阵运算	(188)
§ 6-2	光学矩阵运算原理	(191)
§ 6-3	光学矩阵运算系统举例	(193)
§ 6-4	光学矩阵运算应用举例	(204)
第七章	光学智能机	(209)
§ 7-1	生物神经网络的基本功能	(211)
§ 7-2	Hopfield神经网络物理模型	(214)
§ 7-3	神经网络模型的光学模拟系统	(226)
§ 7-4	光学推理机	(246)
第八章	光学外存——光盘	(263)
§ 8-1	不可擦除光盘	(264)
§ 8-2	不可擦除光盘系统的基本结构	(266)
§ 8-3	可擦除光盘	(270)
§ 8-4	可擦除光盘系统的特点	(274)

第一章 光计算机的提出

当今，已进入一个以计算机为核心的信息时代。信息的获取、传输、处理和存贮推动着科学技术的不断发展。而其中电子计算机最为得力，发展极为迅速，它仅30多岁，已经历了几次大变革。随着电子元件的发展，由电子管计算机变成晶体管计算机，后又变成集成电路计算机，乃至超大规模集成电路的电子计算机。即体积和重量愈来愈小，愈来愈轻。且运算速度和信息存贮能力愈来愈高，愈来愈大。人们对电子计算机愈来愈熟悉，已成为科学研究，经济管理，日常生活，甚至政治上的决策诸方面不可缺少的工具。

信息时代的不断发展对计算机提出了愈来愈高的要求，以致使现有的计算机远不能满足要求。例如：在气象预报方面，要想准确完成几个月，甚至一年内的气象预报，其数据量之大，要求计算机的运算速度达 10^{15} 次/秒；再如地震预报，不但要考虑地面上所见的种种征兆，还要考虑到天体的运行及地球的内部状态，数据量很大，尤其是在经济繁华区，一次错报或误报，都会造成巨大的经济损失，这就要求计算机的运算速度快，准确率高；又如在国防上，当敌方发射的重返大气层多弹头导弹多于1000枚时，我方必须在数分钟内作出准确的寻的、识别和跟踪，并通过快速计算，果断地指令反导弹系统在对方导弹发射后3分钟至29分钟内分四个阶段拦截，直到确认目标已被摧毁为止，这样艰巨的任务要求计算机的运算速度超过 10^{15} 次/秒；在仿生学研究方面

也具有完成超大信息量的研究和计算任务，例如：要想研制高智能机器人，达到大脑的计算速度，利用现有电子计算机是无能为力的。有人作了一种估算，当一个人在横穿马路时必须左顾右盼才能避免被车辆撞上，这对于普通人来说是十分容易做到的事情。若用电子计算机来计算，则由于信息量之大不得不动用数量可观的计算机才能在短时间内算出精确结果。如果把所用计算机排列起来，粗略估计可排满我国国土的 $1/14$ ，相当于一个青海省的面积。然而在信息爆炸时代对计算机的要求比横穿马路这类事情要复杂得多。人们总渴望能实现人工智能。用计算机来模仿人所具有的采集、组合、从中选择、理解、领会和识判的能力。

为了更好地了解电子计算机的弊病，先让读者了解一点人脑的特点。首先，人脑具有并行处理信息的能力。所谓并行处理，就是在同一瞬时，可以处理若干个不同的信息。例如：老师在课堂上讲课，一边口述，一边在黑板上书写。学生一边听课，一边看黑板，有时还记笔记。

其次，人脑具有巨大的存贮信息记忆能力。人脑靠什么“元件”把信息记忆下来，我们并不关心，但是我们可以估算出人脑的容量。人刚生下来时，是“无知”的。即无存入任何信息。如果我们把人脑作为一种标准接收器，每秒可接收14个不同数字（假设每个数字都是二进制的14位）。 10^{10} 个神经细胞就是 10^{10} 个接收器，则每秒的信息总输入为 14×10^{10} 位。人随着年龄增长，不断地按上述的信息量进入脑海中，且假设都能记忆下来，永不遗忘。到60岁时，相当于渡过了 2×10^9 秒，其可推算出人脑的总容量约为 2.8×10^{20} 位。而现在电子计算机的容量最大也未超过 10^7 位。

再次，人脑具有实时处理问题的能力。人的神经细胞响应时间大约在 10^{-2} 秒的数量级，响应速度并不快。但因人有并行处理信息和巨大记忆能力，所以综合起来，人对一些熟悉的信息可及时地作出判别。

综上所述，计算机要满足信息社会的需要，成为智能机，必须具有超高速、极大容量和并行处理的能力。而目前的电子计算机存在着不可克服的局限性。即使有些智能功能，也是单功能的，或者低能的，不可能象人那样的“全才”。因此，为了能够实现高级的人工智能，必须冲破现有电子计算机的框框，研究新型计算机。其途径有二：一是发展新型的电子计算机；二是研究光计算机。本书主要介绍第二条途径——光计算机。

§1-1 电子计算机的局限性

目前电子计算机有着不可克服的弊病：（1）冯诺依曼“瓶颈”问题；（2）寄生电容问题；（3）时钟歪斜问题；（4）互连带宽问题等。

一、冯诺依曼“瓶颈”问题

电子计算机能发展起来，冯诺依曼提出的基本原理起到了决定性的作用，成为目前电子数字计算机的重要依据。其中最重要的是采用二进制和串行结构，尽量减少互连的数目。

计算机主要由中央处理器、存储器、接口电路和外部设备组成。互连的总线主要有三根：地址总线、控制总线和双

向数据总线（如图1-1-1）。

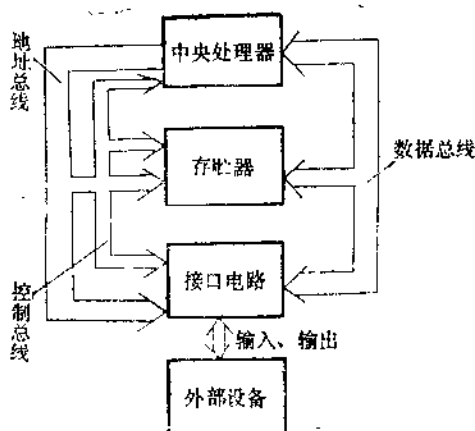


图1-1-1 电子计算机结构框图

首先研究一下如何存和取。例如：有一列数：001, 010, 100, 110, 011等输入，且存到存储器中。它们不是随便“入座”，而是对号“入座”。也不是同时“入座”，而是顺序“入座”。先根据程序安排。001放入A0，在中央处理器中有一个寻址装置，确定该地址是A0。然后，通过地址总线到存储器中一个接一个找A0单元。找到后，经数据总线把001放入A0单元。接着再按同样的方法，把010, 100, 110, 011分别放到B0, C0, D0, E0存储单元中。这样做的目的由并行改为串行，地址总线数可大大减少。最原型计算机，地址总线是并行连接，互连线需要 N 根。改用寻址方式（即串行方案），采用二进制编码，地址总线可减到 $\log_2 N$ 根。使之目前厚膜电路、薄膜电路以及普通的印刷电路技术能够实现。

另外，中央处理器含逻辑装置、寄存器、运算器等。往往由几个模块组成。模块之间互连线数目也是相当可观， M 个模块需要 $M(M-1)$ 根连接。以致用目前的电子技术无法实现。也只能用串行结构，通过延长时间以减少互连数目。

再次，为了减少存储器芯片的输入、输出线，也同样采用二进制编码的方法，将 l 个输入减到 $\log_2 l$ 。

使互连线减下来，便带来新的问题，严重地降低了系统的性能。可以作一个比喻，不管瓶中的水多满，水只能从瓶口中慢慢地流出，时间就延长了。这就是所谓的冯诺依曼“瓶颈”。按这原理设计的电子计算机不可能具有实时处理问题的能力。解决这问题的唯一途径，是从“瓶颈”中跳出来，由串行结构改为并行结构。

二、运算速度受限

众所周知，电子计算机内有大量的电子元件和连线。而每个元件均存在着响应时间。例如：双稳态触发器是电子计算机中最基本的器件之一。图1-1-2是一个最典型的双稳态触发器。假设输出 V_{out} 处于低电位（设为“0”态），即 T_2 处于通的状态。而当输入端 V_{in} 给一个负脉冲。 A_2 电位下降， T_2 的压降增大， V_{out} 增高。随之， A_1 点的电位提高， T_1 的压降下降。导致 A_2 点进一步下降， V_{out} 进一步升高。经过这一个正反馈系统，产生了雪崩现象，导致 V_{out} 由低电位变到高电位（设为“1”状态）。由“0”变到“1”，由于电阻，电容以及寄生电容存在，它不可能实现瞬时转换，需要上升时间 t_1 （如图1-1-3所示）。反之，“1”变到“0”也需要下降时间 t_2 。也就是说，任何一个电子线路均可等效

为一个 RC 电路，就有滞后效应。其称为响应时间，一般在毫微秒量级上。

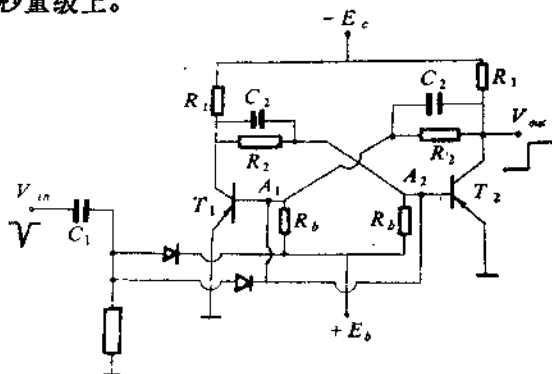


图1-1-2 双稳态触发器

另外，连线很多，而平行的连线间就可以形成分布电容，或者连线对地也可形成寄生电容。而这些连线都有一定的电阻值。故构成了 RC 电路。同样要产生滞后效应。

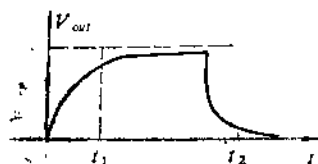


图1-1-3 滞后效应的示意图

综上所述，由于电子计算机中的电子元件和连线存在着 RC 问题， RC 电路的时间常数 τ 等于其等效电阻和电容的乘积。因此，不可能有很高的响应速度。限制了计算机的运算速度。

人们力图从器件和线路设计方面进一步减小 RC 的影响，但也是有限的。

三、时钟歪斜

电子计算机是一部由数以万计的电子器件构成的整体，

要想保证它迅速而又准确地工作，必须使这些器件及各部分功能单元按指定时间统一协调地工作。尤如全国的铁路系统，要想保证所有列车正常运行，不仅要让列车的运行方向、经过路线和到达地点十分明确，而且还必须规定到达各站的时间，因而全国铁路系统必须有一个绝对一致的时钟——同步钟来控制上述的一切有关时间。计算机内部有一个钟源，它不断产生时钟脉冲信号发往各部件，用以指挥和控制各部件的同步运行。信号的同步十分重要，也就是说信号必须同时到达，处理器才能准确无误地进行运算。一旦有的信号迟到，则运算就会出现错误。但是，芯片上逻辑门数量很大。目前的超大规模集成电路中，一个MOS芯片上的逻辑门就有 $10^5 \sim 10^6$ 量级，芯片的面积达厘米量级，这就使逻辑门到钟源的距离远近差别很大。为了照顾同步，先到的信号必须等待所有信号到达后才能送入处理器。互连长度愈大，这种维持同步的等待时间便愈长。这种现象被称为时钟歪斜（简称钟歪）。为了解决这一问题，必须尽可能缩短等待时间，以免影响运算速度。为此，只能对互连长度加以限制，如美国现有的超大型计算机CRA Y-1型处理机就把互连长度限制在15.24cm以内。随着信息量的增大，这一限度不得不被突破，这时，电子学将无力解决钟歪问题。

四、互连带宽问题

互连带宽是指互连通信线所允许的频带宽度。脉冲信号在任何通讯线路上传输时，一般都会出现畸变，如脉冲宽度（脉宽）展宽，前后沿下降等，其中高频部分尤甚。当频率超出一定范围时，因畸变太大致使两个脉冲信号无法分辨，

这一频率范围称为带宽，也就是频带宽度。要想加快运算速度，必须缩短系统的工作周期，这就要求信号脉冲间隔尽可能小。但脉冲间隔过小又会使脉冲信号相重迭而彼此分辨不清，降低运算精度。一个折衷的方案是要求脉冲宽度愈窄愈好。但是从频谱分析的原理可知，脉宽愈窄，频宽就会展宽（即高频分量增加），这就意味着通信线路的带宽制约了运算速度。然而，我们都知道，电子线路的带宽是十分有限的，目前已有的最大同轴电缆的带宽虽然已居电子线路之首，其传输速率也不过只有每秒几十兆比特。而我们所希望的却远远超过这样的速率，而要想使电子线路的带宽增大到适应 10^{12} b/s的传输率，似乎是不可能的。这样，互连带宽问题便成为电子计算机速度受限的又一障碍。

五、其他问题

由于电子学互连的导线分布密度很高，线与线间的间隔很小，因而当运算速度加快时，线间的串音机会大大增多，干扰了计算机的运算，甚至出现错误。为了保证精度，必须减小串音机会，这只能减少互连密度从而牺牲速度。

由于互连数的增加，互连线占据了芯片上的绝大部分面积，使芯片利用率大大降低。为尽可能提高芯片的利用率，必须在线路设计上花费相当大的代价，以使互连线路排列规则，互连数尽量减少，互连长度尽量缩短。

外界电磁场的干扰也是电子线路无法排除的一个令人烦恼的问题。为抑制干扰，往往需提高信号强度，但这样做，结果却又使线路的功耗增加。当运算速度愈快，产生热量就愈多，机器的散热便成为一个突出的矛盾。如能降低信号功

率，可使散热问题得到缓解，但低功率信号却更易淹没于外界干扰信号之中。因此，唯一的出路又只能是牺牲速度。

由上可知，目前电子计算机存在着“瓶颈”、运算速度有限、时钟歪斜、互连带宽受限等缺点。严重地影响了它的性能。实现智能化是非常困难的。

为克服目前电子计算机的局限性，提出了两个途径：

(1) 摆脱“瓶颈”问题，采用全并行系统的结构。但互连数大大增加。导致集成块的管脚大为增多，故实现全并行系统仍是困难的。另外，全并行系统并不能解决 RC 问题，运算速度仍难以提高。

(2) 彻底解决电子计算存在的问题，最有效的途径是研究全新型计算机——光计算机。

§1-2 光计算机的提出

光计算机是利用光的一些基本特性。因此，它有电子计算机无法比拟的优点：

(1) 具有并行传输和处理信息的能力。由于光波的干涉条件是很苛刻的。两束光能发生干涉，必须是波长相同，振动方向一致（同一偏振态）和有确定不变的初始位相差。因此，同一光波导中能并行地传输很多很多个不同波长或不同偏振态的光波，它们之间不会发生干扰。

另外，光波能以不同的波长，不同的偏振态，不同的波型，即以不同模式在光波导中传输。其中有的是导模（可以是正向导模或反向导模），有的是辐射模；有的产生非线性效应，有的未发生非线性效应。因此，可在同一个光器件中

设计成几个不同性能的功能件。例如：同一光器件，在某一波长下是“与”门；而在另一波长下却是“或”门。所以，具有并行处理不同信息的能力。如输入/输出、逻辑运算、数据存贮、数/模和模/数变换等均能进行二维以上的并行处理。这不仅可消除“瓶颈”问题，而且采用这种高度并行方式的互连，还有希望开拓新的更有效的算法。

(2) 无 RC 问题，运算速度快。传输光的介质，如光纤，光波导不存在寄生电容和电阻。光在其中传导的光波速度 V 为真空中的光速($3 \times 10^8 \text{ m/s}$)除以该介质的折射率 n 。一般 n 值在1~3之间。 V 值为光速的 $1/3 \sim 1$ 倍。而电子线路受 RC 影响，电信号的传输速度只达光速的千分之几。这说明在光波导中传导的光信号速度要比电子线路中传导的电信号速度要高数百倍。

其次，因光器件无 RC 问题。所以，开关速度也要比电子器件的开关速度大得多。例如：计算机的核心器件之一——光学双稳态器件，其开关速度根据理论计算可达亚飞秒(10^{-15} 秒)级。而目前，在实验室中已达纳秒(10^{-9} 秒)级，乃至皮秒(10^{-12} 秒)级。这是电子器件根本无法达到的，至少要比光器件低1~3数量级。

(3) 可采用非二进制。光数字计算机与电子计算机一样，可采用双稳态器件，实现二进制，而光器件已突破双稳态，出现三稳态器件。日本工业技术学院技术综合研究所光电研究室的渡边正信等人最近研制成光多稳元件，则可采用三进制、四进制等。它们的表示方法见表1-2-1。从表中可知：同一个数，其位数往往比二进制少，这样可提高运算速度。例如：做加法运算，比二进制大约快58%；作乘法运