

MULTI— MICROPROCESSOR SYSTEMS

多微处理器系统

【英】Y. 柏 克 著
古 新 生 张 振 译
胡 正 家 校

西安交通大学出版社

多 微 处 理 器 系 统

〔英〕Y. 柏 克 著

古新生 张 振 译

胡正家 校

西安交通大学出版社

内 容 提 要

“多微处理器系统”是英国数据处理系列丛书之一。作者是中心伦敦区理工学院 Y·柏克。本书是他在实时、并行分布计算机系统方面多年研究工作的总结。

微处理器已成为促使信息技术进步的关键性的器件，将多个微处理器加以组合构成多微处理器系统，可以改善系统的性能，使运行方便、灵活，并能进一步提高系统的可靠性。本书叙述了为建立多微处理器系统的主要问题，侧重于系统的结构方法、建立互连方案以及有关软件。本书采用了一组新的符号用以表示系统内的各种基本部件，使全书结构一目了然。

本书对从事微计算机及微计算机应用的有关专业的大学生、研究生、教师、研究人员、工程技术人员均有参考价值。

Multi-microprocessor Systems

Y·Paker

Academic Press

多 微 处 理 器 系 统

[英] Y·柏 克 著

古新生 张 振 译

胡正家 校

责任编辑 房立民

*

西安交通大学出版社出版

(西安市咸宁路28号)

西安交通大学出版社印刷厂印装

陕西省新华书店发行 各地新华书店经售

*

开本 787×1092 1/32 印张 8.5 字数 178 千
1986 年 12 月第 1 版 1986 年 12 月第 1 次印刷
印数: 2000 册
统一书号: 15340·009 定价: 1.90 元

前 言

目前技术先进的社会，几乎在生活的各个方面：中央和地方政府机关、工业、商业、国防、甚至业余休息，都越来越多地依赖于计算机，因此对更高速、性能更好、更可靠且成本更低的计算机(有时则不考虑成本)的寻求正在不懈地进行着。计算机不仅代替了某些传统的活动，例如装配线上的人工操作，而且还能使工业产品开创出全新的局面。

虽然当代计算机系统是在短短的三十年内发展起来的，但就完成数据存贮、检索处理以及输入-输出等方面而言，其软件和硬件的基本概念与早期的计算机模型相比，尚无很大的进展。对下一代新的计算机，人们期望它能处理更复杂的系统，除了数字外，还能识别处理声音和图象，运转全自动化工厂，操纵难以驾驭的飞行器，管理自动化办公室等等。除此之外，还能通过语音和图象与人通信。人们公认，下一代计算机系统，即所谓智能，基于知识的系统，在利用电路技术所有功能的同时，将在系统结构方面寻求新的方法。

十年来，微处理器已成为促使信息技术进步的关键性器件。若把计算机型谱的低端延伸到微处理器，则可以说微处理器已使计算机缩小成了电路器件，从而开拓了极其广泛的应用领域，又因为它造价低廉，实际上人人都能使用，这就大大促进了计算机和通信技术的结合，计算机不再是彼此孤立的资源，在地方区域或全球范围内的互连正以崭新的规模

出现,就使得所出现的新型结构能更好地适用于地方区域和全球范围的互连应用。

微处理器及其辅助电路为设计者提供了宽广的选择范围,即从简单的单片微型机到功能和复杂程度可与常用的大型计算机相比拟的微型机。虽然基础的电路工艺技术还在继续向前发展,然而已有迹象表明其进步的速率有所减慢。三十多年来积累的计算机实践经验已成为现代微处理器设计的基础,并使微处理器成为功能极其多样的器件,这些器件既可用于构成各种计算机,也可用于构成种类繁多的计算机系统。

微处理器作为一种功能强、成本低、体积小、功耗低的器件,给人们提供了新的设计选择途径,即可将这些器件加以组合从而适应某一给定的应用。这种微处理器的组合结构就成为多微处理器系统。

建立多微处理器系统可有各种不同的目的,譬如为了便利使用、为改善性能、提高可靠性等等。以改善性能为例,基本上,电路工艺的进步已能通过提高时钟速率(速度)和加宽数据通道(提高门的集成度)的方法来获得较优的性能指标。为了改善性能,还可在现有工艺水平上,通过设计技巧在单芯片上更好的安排一定数量的逻辑门和/或将许多同类型芯片以某种方式互连使其并行工作。对于后者,是假定其应用场合为一些并行过程的组合。为提高可靠性,应用冗余备用微处理器是有利于多微处理器方法的一种有前途的想法。因此,采用同类型微处理器或多种类型微处理器适当互连,是一种重要的设计选择途径。特别是在电路集成度接近极限从而限制了单个微处理器的能力时,这一点将显得更为

重要。

当初，已建立了的多微处理器结构看来很有吸引力，但实践中却遇到了一些问题。主要的困难来自于微型计算机的原理，正如所有存贮程序的计算机一样，微型计算机也是按时序工作的。换言之，它们的工作是建立在每次执行一种操作的基础上。这意味着每种应用无论多么复杂，都必须排列成一种指令序列，并由一操作系统来管理，而这个操作系统本身又是许多同类型的指令所组成。这些基本的步骤是以极高的速度一个接一个地执行，给人的印象似乎是同时执行各种操作。另一方面，当许多微处理器同时工作以处理某一给定的任务时，亦即要将并行性引入基本结构，这对一个时序系统并非是轻而易举的事。反之，模拟机本质上就是并行机，因而比较容易适应某些应用功能上的要求。

在构成能更好地适合于给定任务所要求的计算机系统时，多微处理器不仅在初期构成新颖结构方法上表现出某种重要的优越性，而且还能在系统的整个寿命期限内能适应情况的变化。半导体制造厂已意识到这一点。较新型的微处理器已具有通过公共总线实现彼此互连的特性。最近局部地区网络的研究工作就是在提供一种结构以连接许多微处理器。但是在建成这种系统以利用模块化的优点时，尚缺乏一致的方法。多微处理器系统可能仍被认为停留在实验研究阶段。

本书叙述了在建立多微处理器系统中遇到的主要问题。同时考虑了当前技术的现状和将来的发展。采用市场上销售的微处理器作为基本的结构功能块。人们公认，超大规模集成电路为在单芯片上引入并行性提供了许多方便。遗憾的是，这种途径仅能用于那些能够利用超大规模集成电路的设计和

生产手段的少数单位。本书主要论述系统结构这一级的问题，不过多地深入到电路设计方面的细节。对主要的结构方法、互连方案以及有关软件问题则作了较详细的讨论。为了说明所引入的概念，引用了许多机器作为实例。同时，也注意到能均衡地从各方面进行描述，而不使某一特殊的实例贯穿全书。由我和我的同事们共同研究出的一种结构方法，可变拓扑的多计算机较其他方法叙述得要多一些。

本书提出一组新的符号用以表示多微处理器系统的各种基本元件，如单个微处理器、存储器、总线等等。所有这些符号可参阅图 1-9。希望这种新的表示法能使读者一看就能识别每个方框的功能和主要的结构特征，而不需要在图中详细地注解。必须指出，所选择的这些符号或是用于流程图，或是那些图形的组合。目的是能用易于得到的标准流程图绘图板即可画出这些图形。期望这种规定将有助于读者更好地理解所提出的各种结构的图形表示。我希望这种表示法将能更广泛地被微计算机设计者所接受并采用。

本书一开始综述了现有的微处理器及分类，并对许多熟知的微处理器主要结构特性进行了对比性介绍。第二章举例说明了微处理系统的研制历史背景，然后叙述了多微处理器结构的分类。第三章深入地讨论了建立多微处理器系统的主要目的和各种可能的结构途径。第四章涉及互连和通信方面的问题。较详细地论述了多总线(MULTIBUS)那样的公用总线和以太网(ETHERNET)那样的争用总线、剑桥环那样的环路以及象可变拓扑多计算机那样的网络结构。第五章讨论了在建立多微处理器系统时系统设计者的观点、主要的问题和可供选择的途径。第六章阐述重要的软件问题。它们有

许多不同的方法而又很少有一般可循的规则。软件问题还包括讨论操作系统、通信和语言方面的问题，提出了许多语言的例子如 MICRO、CHORUS、MEDUSA 及其它等等。最后，利用多微处理器系统所固有的冗余度的优点来建立高可靠性计算机的问题构成了第七章。包括软件和硬件的冗余问题以及能承受某些故障的可重新配置系统，后者能在失去某些性能的情况下继续运行。

希望本书有助于计算机结构的学生和研究人员以及工业界的设计工程师和经理更好地掌握构成微处理器系统的基本原理、条件和存在的问题。这是一个变化异常迅速的领域。随着每一个新微处理器的产生，大量使用它们的要求愈来愈多。多微处理器在满足下一代计算机的要求方面，起着重要的作用。

本书是我在实时并行分布计算机系统方面多年工作的最高成果，这项工作由英国科学与工程研究参议会、美国欧洲研究局、中心伦敦区理工学院以及法国兰尼斯大学所资助。我衷心感谢我所得到的这一切资助。1978年我和 INRIA 在中心伦敦区理工学院组织了国际多微处理器系统研讨会，与欧洲和美国的各种研究组织安排了许多议程和会议、访问和讨论，这次会议对本书的完成有很大的帮助。为此，我要感谢许多直接或间接帮助我写这本书的人们。我特别要提出 M. Bozyigit 博士的贡献，他与我一起研究可变拓扑多计算机课题。最后，中心伦敦区理工学院电教部 Carol Hughes 作了大量精致而质量很高的插图工作。

Y. Paker

1983年2月于伦敦

目 录

第一章 微处理器引论

- 1.1 微处理器技术及其发展趋势综述..... (1)
- 1.2 微处理器的分类..... (5)
- 1.3 微处理器结构..... (8)
- 1.4 输入-输出和通信功能..... (25)
- 参考资料..... (30)

第二章 多微处理器引论

- 2.1 历史背景..... (32)
- 2.2 多微处理器系统..... (36)
- 2.3 多微处理器互连方案..... (40)
- 参考资料..... (52)

第三章 多微处理器结构

- 3.1 建立多微处理器系统结构方面的促进因素..... (55)
- 3.2 影响设计选择的因素..... (64)
- 3.3 紧耦合系统..... (72)
- 3.4 松耦合系统..... (79)
- 3.5 层次系统..... (98)
- 参考资料..... (100)

第四章 互联与通信

- 4.1 引言..... (103)

4.2 并行总线结构·····	(104)
4.3 串行总线结构·····	(119)
4.4 争用总线结构·····	(124)
4.5 点对点通信·····	(128)
参考资料·····	(133)
第五章 系统设计基础	
5.1 引言·····	(135)
5.2 通信的类型·····	(136)
5.3 进程的协调和优先级·····	(140)
5.4 进程—处理器配置·····	(142)
5.5 网络的透明度·····	(144)
5.6 控制方法·····	(146)
5.7 同步·····	(149)
参考资料·····	(151)
第六章 软件	
6.1 综述·····	(153)
6.2 分布式操作系统·····	(156)
6.3 进程间的通信·····	(175)
6.4 语言问题·····	(185)
参考资料·····	(198)
第七章 可靠性与容错体系结构	
7.1 概述·····	(205)
7.2 硬件冗余度·····	(211)
7.3 软件冗余度·····	(224)
7.4 可重行组配的多微处理器系统·····	(246)
参考资料·····	(261)

第一章 微处理器引论

1.1 微处理器技术及其发展趋势综述

由于可以获得低价格及其功能越来越强的微处理器和高密度集成电路,因而正在不断地开拓出崭新的应用领域,这个局面在几年以前是不可想象的。在微电子学方面,我们所见到的飞速的技术进步已成为计算机工业的主要推动力,至今其发展的速率未见减低,预期到八十年代中期,也可能更晚,将继续以同样的速率发展^[1]。通常用表明一个芯片上元件(或晶体管)数量的图表来描述这种发展。年代从1959年开始是因为第一个平面晶体管是在这一年制成的。被称为莫尔(Moore)定律的这种直线图表是很值得注意的^[2],它表明在一个芯片上能够做出的元件数每年增长一倍;在人类技术发展史上这是罕见的(图1-1)。

习惯上对集成电路发展阶段的划分如表1.1所示。表中给出的数字应看作是数值的量级。每一发展阶段在数字电子学和计算机设计中都具有决定性的意义。例如,小规模集成(SSI)提供了基本的逻辑功能,这样的逻辑功能以前只得用一些分立元件(晶体管和电阻)来实现。进而,中规模集成(MSI)提供了包含有若干个逻辑功能的功能块。每前进一个阶段,可靠性都有所改善,完成一个逻辑功能的价格和功

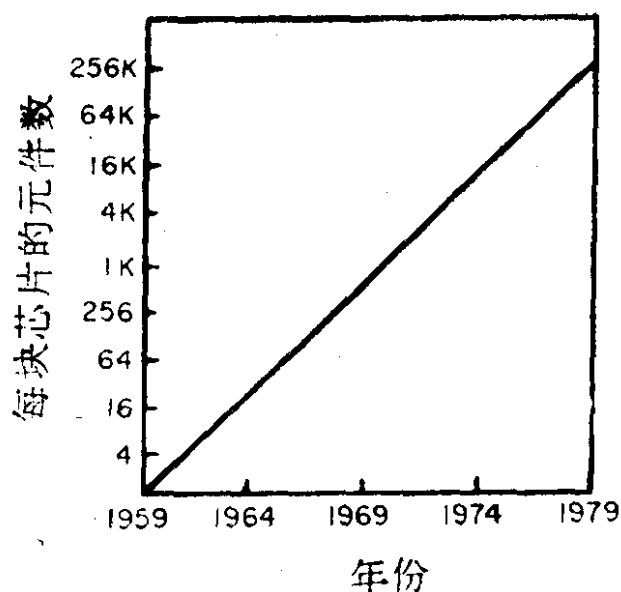


图 1-1 芯片上的元件数随时间的变化

耗都有所降低。这就有可能采用功能块来设计和构成越来越复杂的电路。

然而，当向大规模集成(LSI)过渡时，就不能以相同的方式发展。MSI技术能制造出一整套能互相配套的电路（功能块）以满足制造计算机或复杂的数字系统的绝大部分要求。事实上已经出现了许多工艺技术如TTL（晶体管-晶体管逻辑）、ECL（射极耦合逻辑）及其它电路以满足性能、

表 1.1 集成电路的发展

	元件/芯片	年代
小规模集成(SSI)	1-10	1960~1965
中规模集成(MSI)	10-1,000	1965~1970
大规模集成(LSI)	1,000-100,000	1970~1980
超大规模集成(VLSI)	100,000-(1,000,000)	1980~

速度和其它特定要求。

另一方面，大规模集成(LSI)及随后出现的超大规模集成(VLSI)使得有可能在一块芯片上制成一个完整的数字系统。为保证某种型式的电路得到尽可能广泛的应用，这是半导体制造厂实现大批量生产的主要目标，这些电路应尽可能具有通用性。这一原则证明了微处理器的成功，在这种情况下，只要简单地改变存入存贮器的程序，就可以使一种芯片适用于许多不同的用途，由此可以看出，虽然用户特定的电路从技术上说厂家是能够制造的，但由于成本甚高，故仅对用量大的用户，如汽车及通信工业，才有可能制造。无论如何，其发展的主要趋向，还是进行标准化并减少超大规模集成工业产品的类型，特别是微处理器、存贮器和辅助电路的类型。很少几种微处理器标准型式所获得的巨大市场使其生产批量不断增加，从而降低了成本。于是，在设计和构成大部分数字系统时，微处理器已成为标准的超大规模集成电路元件，开拓着崭新的和从未探索过的应用领域。

当前用于制造微处理器的最成功的工艺技术是MOS(金属、氧化物、硅半导体)工艺，它是一片硅晶片作为衬底来制作晶体管，采用了光刻，掺杂以及金属蒸发等工艺。对超大规模集成电路芯片功能的一种度量是单个芯片上门的数目乘以每个门的时钟速率。目前这个数的量级是 10^{11} 门·赫兹。美国国防部规划近期内要达 10^{13} 门·赫兹^[3]。硅制造工艺技术的改进，增加芯片面积(更易制造)，采用新型电路，缩小门和互连线的尺寸使这一指标达到了当前的量级。上述规划的目标，到1986年将能生产含有250,000个门，至少能在25MHz的时钟速率下工作，每秒能完成几百万次到几十

亿次操作的处理器。CMOS(互补金属氧化物硅半导体)电路被看作是MOS工艺技术之极限,它能在400mV电源电压下工作,最小的线条宽度为 $0.25\mu\text{m}$, $50\times 50\text{mm}^2$ 可集成1亿个门的芯片,其工作频率为100兆赫时仅消耗1瓦的电能^[4]。当前,可以得到一个典型的微处理器是莫托洛拉MC68000,它含有七万个晶体管,在8MHz下工作。

讲到这里,我们就可以给微处理器下一个定义。微处理器是一个单片的集成电路,它包含有存贮程序式数字计算机的中央处理器(CPU)的全部功能。对微处理器来说,要使它成为可以工作的部件,其最低要求是配备存贮器和输入-输出电路。微处理器与存贮器和输入-输出电路一起构成了数字计算机,通常这样的数字计算机就称为微型计算机,如图1-2所示。注意,对不同的功能部件,要采用不同的形状来表示。如果单片集成电路就包含这三个部件(微处理器、存贮

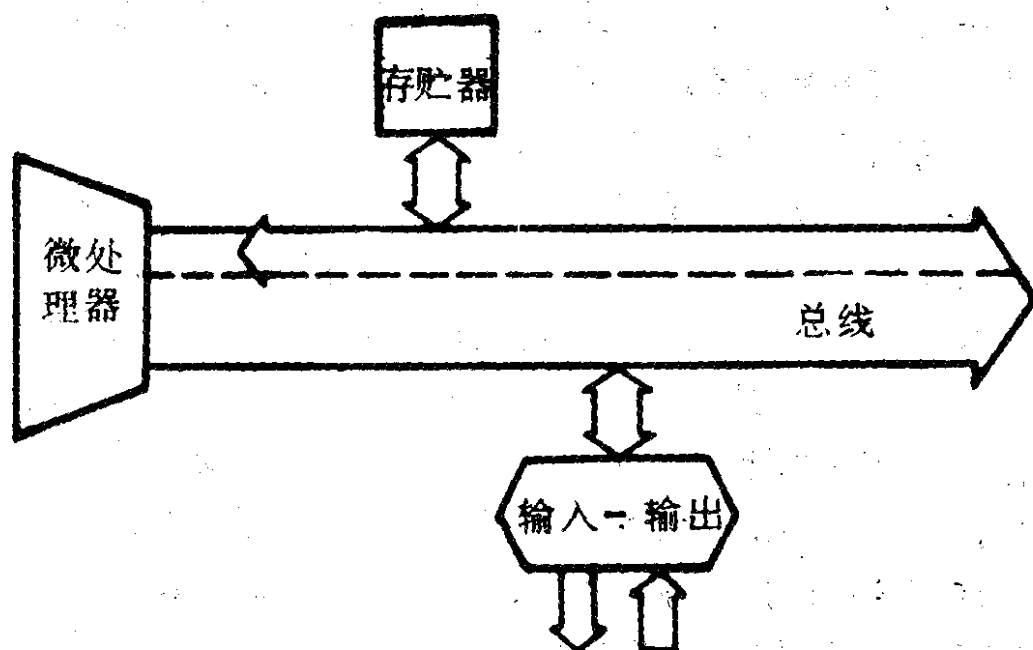


图 1-2 微型计算机的结构

器和输入-输出电路), 那就称为单片微型计算机。还有称为位片机的另一种途径, 其中央处理器是用一套大规模集成电路和存贮器构成。通常, 它们是微程序编程的处理器; 由用户来定义微代码, 这些微代码存贮在微程序存贮器内。在这种情况下, 这种位片式处理器并不符合上面给出的微处理器的定义。和位片处理器不同, 用通常的微处理器是不能访问内部控制信号, 也不能改动它, 例如不能加上额外的指令等。微处理器与外界相互作用的唯一途径就是外部总线。

1.2 微处理器的分类

为了理解和掌握今天所用的各种不同的微处理器类型, 有必要考察自1971年以来的历史进程。当时, 英特尔(Intel)公司推出了作为计算器用的四位机4004^[5]。它是按照串行二进制编码的十进制数(BCD)的运算来进行设计。大约在同时, 英特尔(Intel)公司还致力于另一种8位处理器8008, 于1972年推出。它具有简单的结构: 字节处理设备, 一个不大于16K字节的存贮空间及一个小规模指令系统, 这个指令系统仅有几种操作数的寻址方式。8080于1974年推出, 它仍是一种八位机, 但具有64K字节的存贮空间、扩大了指令系统、增加了堆栈处理能力、以及有更完善的寻址方式, 还包括有限的16位字长的处理能力。1975年齐洛克(Zilog)公司推出了Z-80微处理器, 它与8080兼容。其它半导体公司亦制造出类似的微处理器, 如莫托洛拉公司(Motorola)、国家半导体公司(National Semiconductor)、德克萨斯仪器公司(Texas Instrument)以及其它公司。1978年英特尔

(Intel)公司研制成16位的 8086 微计算机，而德克萨斯仪器公司的9900作为一种 16 位微处理器又超过了8086。1979 年齐洛克公司又推出了 Z-8000，而在 1980 年莫托洛拉公司也推出了 MC68000，两种都是 16 位微处理器。目前，半导体制造厂正致力于研制 32 位机，有些已研制出样机，八十年代中期可能会被广泛采用。

我们可将微处理器划分成下面三种基本类型：

单片微计算机

单片微计算机是完整的微计算机。处理器、存贮器、输入-输出电路以及辅助电子电路如时钟振荡器，均集成于同一块芯片上。它们沿袭了四位微处理器的传统。高水平的工艺所提供可能用的硅片面积是用来集成更多的功能，如存贮器、输入-输出，而不是增强处理器的性能及其结构上的复杂程度。这种电路形式的计算机，一般含有64至 256 字节的小型数据存贮器和一个大约 2K 字节的程序存贮器（ROM，只读存贮器）。程序存贮器是在制造阶段就写好，因此，在制掩膜阶段就得确定它的内容。这种办法花钱较多，仅适用于需要量大的用户。英特尔公司为用量较少的用户生产出价钱更贵的具有 EPROM 存贮器的微型计算机。头一批这种单片微型计算机(MCS-48)由英特尔公司在 1976 年后期公诸于世^[6]。最近，齐洛克公司生产出类似的 Z-8 微型机，而莫托洛拉公司则生产出 MC6081 单片微计算机。

单片微计算机适用于价格低、需要量大的应用场合，例如家用设备、荧屏游戏、汽车等等。

在构成多微处理器条件下，尽管有成本低的优点（在需大量使用这种单片机来构成机器时，这个优点是很重要的），

但由于单片机有限的输入-输出设施，存贮器容量及其计算能力，使单芯片微计算机在多微处理器的应用中无太大的吸引力。单片机对于完成具有很明确的功能要求的任务是很理想的，只要这些功能要求能与有限的处理能力以及这种电路所提供的存贮器相适应。本书将不再讨论这种单片微计算机。

通用微处理器

通用微处理器是八位微处理器，当前，它们的结构已达到相当完美的程度。它们的成本低、而且有相当强的计算能力，还有适应范围很广的通用微处理器市场。在一般情况下，已经有了精心组成的系列，如各种类型的存贮器，串行与并行输入-输出电路，时钟与直接存贮器存取(DMA)电路，所以，设计者就具有按设计要求而进行组合的灵活性。英特尔(Intel)8085，齐洛克Z-80以及莫托洛拉MC6800都是这类通用微处理器的典型例子。这些机器亦有大量的软件积累。

高性能微处理器

高性能微处理器是应用最先进工艺的16位机，旨在达到小型机的性能指标。从8位转向16位处理器，对制造厂家来说，标志着一个很有份量的飞跃，有些制造厂家宁愿有一个新的开端，不愿因兼容性方面的考虑而限制其设计方法。16位微处理器的一个共同点是能处理大的存贮空间，以及采用一个附加电路而引入了存贮器管理技术(图1-3)。例如Z8000能直接存取8兆字节的地址空间，有6个不同的地址空间分配给不同的用途，如用作指令、数据、堆栈等等。除更强的指令系统和数据处理能力外，这类微处理器将系统状态