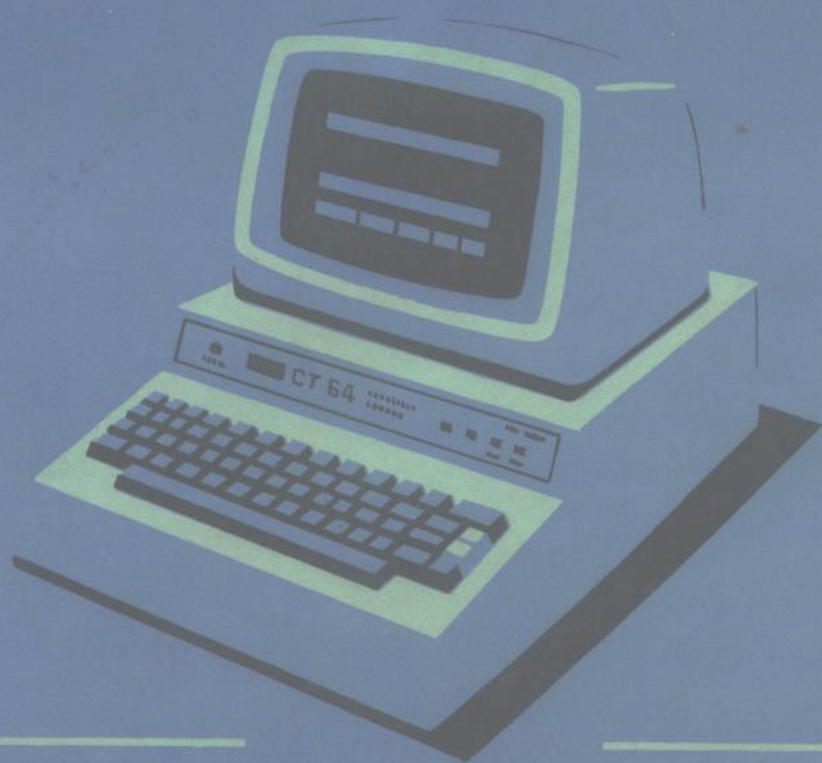


微处理器和 微型计算机系统

〔美〕 G. V. 雷 奥 著

科 学 出 版 社



73.576
710
201

微处理器和微型计算机系统

〔美〕 G. V. 雷奥 著

丁兆璋 王其藩 程瑜荣 译

吴企渊 校

科学出版社

1983

内 容 简 介

本书是一本全面介绍微处理器和微型电子计算机的技术资料专著。内容包括制造工艺、硬件、软件、固件以及微型计算机的应用。

全书共分十四章。第一章概述了微处理器和微型计算机的范围、结构和现状。第二章至第七章和第十章介绍了微型计算机的主要硬件。附录A和附录B中列举了场效应管、MOS场效应晶体管和 I^2L 工艺。第十二章介绍了外部设备显示器。第八章叙述了软件和固件。第十一章介绍了微型计算机的应用。附录C中列举了微型计算机在卫星通信中的应用。第九章以表格形式列出了现有微处理器和微型计算机的性能指标特点。最后介绍了中、大规模集成电路微处理器的可靠性。

全书附有大小插图和表格共175幅,包括1978年前各种微型计算机的新型元器件、结构特点和先进技术。所介绍的微处理器和微型计算机系统达几十种。

本书资料丰富,内容新颖,叙述简洁。可供微处理器和微型计算机的研制人员和使用人员阅读,也可供有关院校师生参考。书中大量科技资料可供有关人员查阅。

Guthikonda V. Rao

MICROPROCESSORS AND MICROCOMPUTER SYSTEMS

Van Nostrand Reinhold Company, 1978

微处理器和微型计算机系统

[美] G. V. 雷奥 著

丁兆璋 王其藩 程瑜荣 译

吴企渊 校

责任编辑 唐友群 孙月湘

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

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

*

1983年3月第一版 开本:787×1092 1/16

1983年3月第一次印刷 印张:16

印数:0001—12,160 字数:368,000

统一书号:15031·479

本社书号:2967·15—8

定价: 2.50 元

译者序

自从1971年美国Intel公司的第一台微处理器(Intel 4004)问世以来,短短几年的时间,微处理器得到了迅猛的发展。微处理器与存储器、输入/输出等器件组合在一起,就能构成一台微型计算机。它不仅可以代替某些小型计算机,而且还为计算机的应用开辟了更加广阔的领域。据有关人士估计,这种器件不仅能推动当前数字电子领域的革命化,还将对这一代人以及下一代人的生活方式带来深刻的影响。

本书比较全面地收集了1978年前有关微处理器和微型计算机方面的大量资料,汇集了170余幅的图表。作者对元器件的制造工艺、各种微处理器的性能特点以及微型计算机的构成和应用等有关微处理器的重要概念均作了详细阐述。作者是新工艺I²L的发明人,所以对I²L器件、大规模集成电路、软硬件的开发和固件等新技术都作了重要的介绍。从一般性名词术语到系统构成和原理也作了概括性的归纳。由于微处理器的应用涉及面很广,本书篇幅有限,因此每一部分不可能很深入,全书统一性也稍差。但鉴于国内这方面资料的不足,所以本书仍不愧为一本很有价值的参考学习资料。

由于全书涉及的技术面很广,原文名和译名有些难于统一,有时同一词在不同行业中有不同译义,加之我们的技术水平和翻译水平有限,一定存在不少错误缺点,欢迎读者批评指正。在全书译校中,得到不少有关方面同志的大力帮助和指正,特别是王继中、詹尔震和林定基等同志,特在此表示衷心感谢。全书由吴企渊同志校阅整理。

丁兆璋 王其藩 程瑜荣

1980年9月

前 言

这本有关微处理器和微型计算机专题技术的发展水平分析专著,汇集了目前所能得到的大量资料,在数字计算机这个课题中,这些资料反映了该领域发展方向的最新状况。

大约用了将近二十五年时间,经历了短短的难以预测的技术变革阶段,数字计算机以突飞猛进的速度向前发展。从继电器到真空管,从真空管到对温度很敏感的分立固态锗晶体管、参量二极管、隧道二极管,从分立晶体管到稳定的硅单片集成电路(IC),又从IC缩小到小规模、中规模集成电路(SSI、MSI),最近再从MSI发展到大量生产的大规模集成方式的微电子产品LSI高级技术,终于在一块片子上得到了功能很强的专用微型计算机,与最初的真空管计算机相比,微型计算机在速度性能方面提高了四、五个数量级。

随着缩小尺寸的每一个进展,数字计算机逐步实现了工作的高可靠性。在灵活性和计算能力方面,微型计算机比五十年代占整个房间那样大的第一代、第二代数字计算机的功能更强。

作者对现有的微处理器和微型计算机系统,以及有关的LSI硬件、固件均作了分析,同时确立了微电子学技术。在编写中,作者选择的各种课题不仅有助于硬件和软件专家之间,而且也有助于销售人员和培训人员之间交换信息。鉴于不可避免地要涉及到专有名词,为了更好地掌握硬件和软件方面的术语,对两者都作了完整的介绍。

作者对AMECOM(Litton系统)的Charles Hofmann、John Margosian、Allan Baron、John Schumm、Edward Gutierrez和Norman C. Dickerson, Jr.、对McGraw-Hill电子学杂志的执行编辑Samuel Weber、对McGraw-Hill科学、工程和管理图书公司的主编Tyler G. Hicks等,对他们在本书的写作过程中给予的关心和鼓励表示最真诚的感谢。感谢这些作者在电子学杂志和其他几种专业性杂志以及产品介绍方面最早提供了这些新器件的资料。

G. V. 雷奥

目 录

第一章	微处理器和微型计算机系统导论	1
第二章	大规模集成电路 (LSI)	8
第三章	固态 LSI 存储器	31
第四章	微型计算机系统的大容量存储库	49
第五章	通过内部寄存器的存储器传送	57
第六章	I/O (输入/输出)接口	61
第七章	LSI 微处理器及单片微型计算机	70
第八章	软件和固件	105
第九章	微处理器和微型计算机系统参考数据(表格式)	137
第十章	微处理器的有关硬件	144
第十一章	微处理器的应用	176
第十二章	显示器: 固态、气体放电和阴极射线管 (CRT)	198
第十三章	MSI/LSI 微处理器的可靠性	206
第十四章	结束语	209
附录 A	场效应晶体管 (FET) 和 MOSFET 简介——1966 年到 1977 年期间的工艺 状况	211
附录 B	最早的分立双极型晶体管 PL (1960) 和最近的 LSI 双极型 PL 技术 (1977)	222
附录 C	微处理器在所有卫星数据通信系统中起着主要作用	225

第一章 微处理器和微型计算机系统导论

1.1 范 围

依靠存储程序控制的新的数字计算机系统,由于采用了微处理器、可程序只读存储器 (PROM) 和随机存取读/写存储器 (RAM), 因此能以廉价获得较强的功能和灵活性, 并且只需要很小的空间和功率。甚至外表上只是一个小的台式系统就具有交互式计算机终端的能力。同时, 又由于经过光导纤维小型波导管索, 采用光通信技术, 今天在商业、国防和通信系统中大容量、局间或系统间的数据交换已成为可行的事情。在一个片子上的微型计算机确实是一种新型的功能强的微型工具, 在性能上它可以同某些原来的小型计算机相媲美。

微处理器使下述事件成为可能:

1. 面向总线的结构。这样便需要极少的硬件作为外围支持件。
2. 成本效率设计。考虑用可扩展的, 高密度、快速存取、大规模集成 (LSI) 的半导体 RAM 作为工作存储器, 取代了现有大容量的磁盘、磁鼓和磁心随机存取存储器, 在没有任何复杂的外部硬件情况下, 又增加了辅助性能。
3. 成为“聪明的”或“智能”终端。它能在内部安放的可扩展只读存储器 (ROM) 的命令控制下完成一系列的指令。

在下述实时和脱机数字计算机应用方面, 最近的发展, 要求加快改进固态 LSI 工艺的进程:

1. 大型数据通信网络。
2. 通过无线电、卫星、海底电缆、陆地通信线和联合信息转换系统, 进行小规模或大规模的编码信息转换。
3. 运输和导航方面, 专用的便携式数字计算机。
4. 自动化过程和数字控制, 生产和制造中的设备, 包括计算机模拟。
5. 国防通用数字计算机系统。
6. 商业、统计和有关的数据处理系统。
7. 医学、化学分析及诊断。
8. 教育、娱乐和印刷。
9. 能源和污染的研究, 预报和优选。
10. 高等院校的基础研究工作, 诸如为生产研究部门的复杂问题建立数学模型等等。

LSI 本身又促进了越来越完善的微处理器、可程序逻辑阵列 (PLA) 以及高密度、高速度的半导体存储器的发展。PLA 替代了原来的和目前正在使用的中、小规模集成电路的硬线逻辑。这些新 LSI 显然比相应领域中原有的可选择技术的工作性能好、售价低, 并且大大扩展了其性能, 在更新的应用领域中开创了大规模的使用前景。售价相当低、功耗相当小的台式微型计算机系统具有相当强的能力, 借助于相应的接口, 能在近期替代某

些原来比较简单的、出租的、售价高的以及正在运行的中型通用数字计算机系统。这些新系统依靠插入固件的方法,可以具备很大的灵活性,适应常规软件的要求。装配在仪器中的某些微处理器不仅提供了外部和内部的控制功能,而且由于提供了辅助的内部错误诊断、自检、自校准等功能,还降低了仪器的维护成本。最新的专用单片微型计算机可以被压缩在一片 200 平方密耳的基片上,而且需要的功率不大于几百毫瓦。所有这一切都发生在极短暂的十五年里。在边长小于四分之一英寸的硅片上可以集成两万个以上的固态器件。每个功能器件的成本已减少到千分之一以下,从几美元降到 30 美分,不久就会降到零点几美分。

事实上,那些在六十年代被称为小型计算机的台式中央处理部件 (CPU), 由于使用混合集成电路和中规模集成电路 (MSI) 的方法,开始了微电子学革命。它们是以相应的薄膜及单片固态电路工艺为基础的。今天,对于较复杂的、羽毛丰满的微型计算机操作系统,转化工作已完成。对于高级语言而言,该系统使用了装在内部的汇编程序和编译程序(当插上盒式磁带或随机存取软磁盘辅助存储库时),以及小型 CRT 显示、带小型打印机的键盘作为外部设备。使用机内小型 CRT、有关联的键盘以及 TV 适配器的 IBM-5100 便携式计算机和 DEC (数字设备公司)的 PDP-11/03 “LSI-11” 微型计算机系统,从价格和联机操作方便性的观点来看,它占据了这些微型计算机系统的高档。为了比较它们的结构和器材,在分析中涉及到这些系统和目前可得到的其他微型计算机系统的简要数据。在第九章中的相互参照表对各种微处理器的特性和功能提供了一组可供比较的参考数据。

1.2 结 构

作为 CPU 单片微处理器的典型结构以及目前和它一起装在一块印刷电路板上构成专用的微型计算机系统的支持结构分别如图 1.1 和图 1.2 所示。原来划分通用数字计算机的情况,即:

1. 大型中央计算机系统;
2. 出租的中型计算机系统;
3. 小型计算机。

主机这个词在商业上用来表示 CPU。

从 ROM 中取出所存储的控制程序的指令经译码和控制单元译码,然后由其他一些电路执行。晶体控制的时钟发生器给系统的大部分提供定时信号和同步信号。算术和逻辑单元 (ALU) 执行算术和逻辑运算。寄存器作为可存取的工作存储堆栈,便于从磁带或软磁盘到内部暂存数据寄存器之间传送管理程序和数据。完成这些功能采用了快速存取的读/写 RAM,在某些情况下这些 RAM 可以是微处理器片子中的一部分。I/O (输入/输出)缓冲器提供定时和多路传送的功能。缓冲器是双向的,即它们可以从键盘或者从 PROM (可编程序 ROM) 中读入指令和数据,送微处理器内部的 RAM,或者在 RAM (或者是外部扩充的大规模 RAM) 中写入数据和指令,并且传送到外部盒式磁带或软磁盘、CRT 显示器、电传打印机 (TTY),由所用外部设备而定。微处理器通常可认为是 ALU 加上控制部分 (两者构成 CPU),而微型计算机还需另外具备输入设备、输出设备和

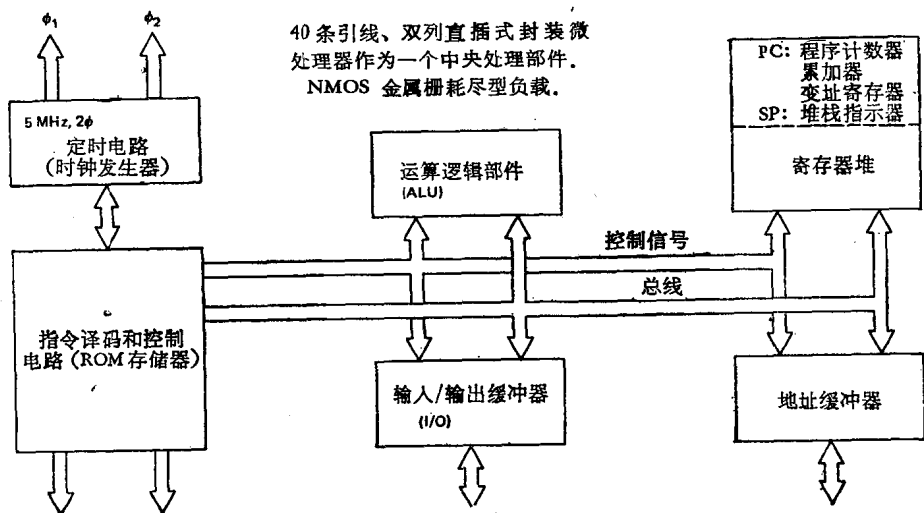


图 1.1 典型的微处理器结构

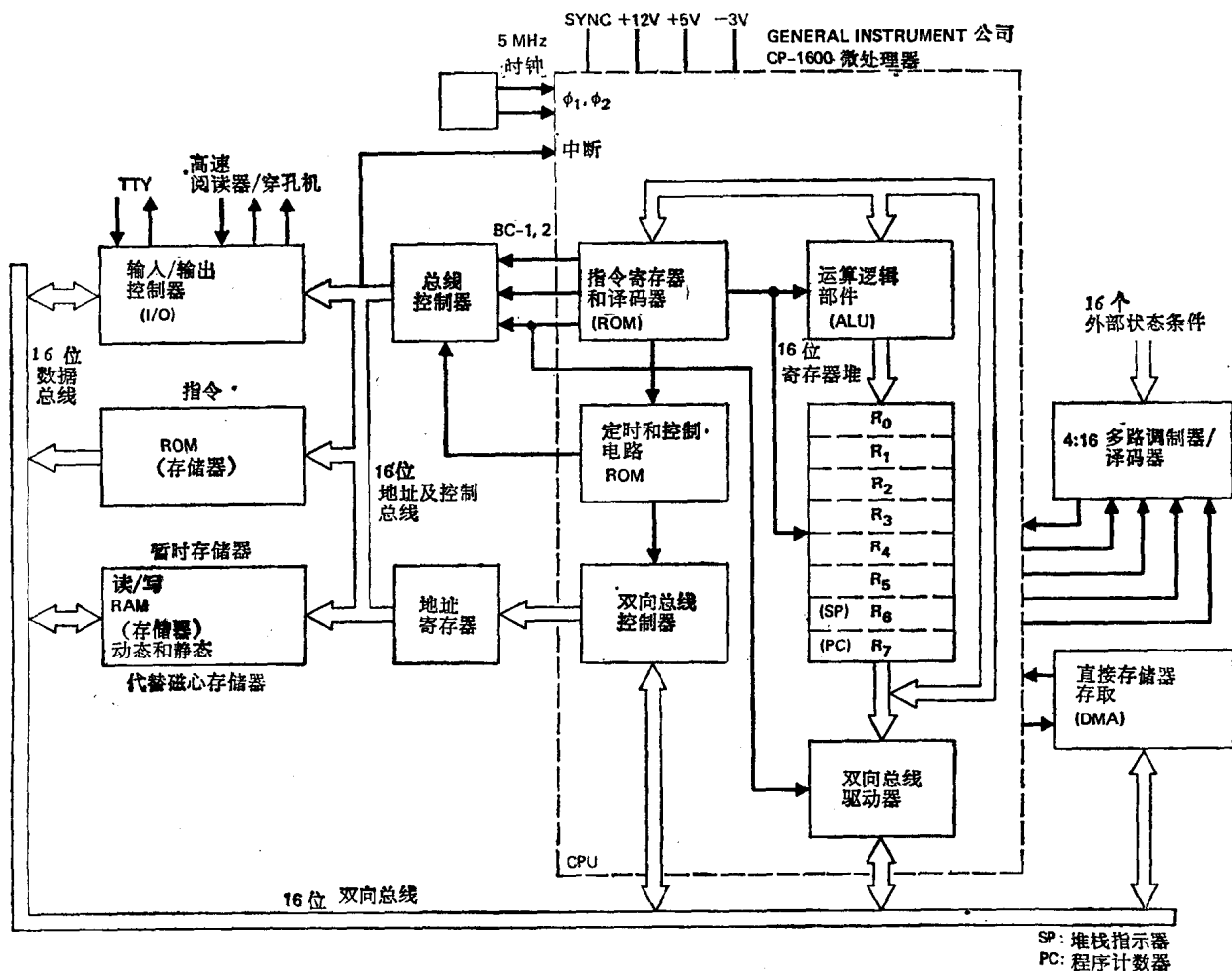


图 1.2 典型的微处理器系统

ROM/RAM 存储器部分才构成专门的计算机系统。内部的 RAM 一般被看成微型计算机的主存储器。

累加器是同 ALU 紧密联系在一起的特殊寄存器,作为 ALU 的数据源寄存器,又作为 ALU 结果的直接暂存地点。例如,在专门的 Hughes 宇航微型计算机中,八个程序设计寄存器编成两个变址寄存器、四个累加器、一个堆栈指示器和一个程序计数器。其中堆栈指示器是供四个累加器为先进先出(FIFO)或为后进先出(LIFO)而设置的。地址缓冲器使存储器接口能给控制存储器 RAM 提供取下一条指令的地址。某些微处理器系统给各种类型的 I/O 操作提供接口适配器。在某些情况下,由于操作的需要,为了改变程序流程,以及为了执行特殊类型的操作,中断 CPU 操作需要附加一些 IC(集成电路)。有时,一个微型计算机系统可以横跨几种工艺,如 PMOS、NMOS、CMOS、双极型 TTL、ECL 和 PL。此外,为了适应某些问题,例如电平、传输时间等问题需要专门的接口片子。例如,在某些系统中,编排在 ROM 中的 80 条指令如同在内部或外部的 RAM 中一样可以操纵 I/O 信息。

在 ALU 中进行的运算采用二进制运算机器语言来完成的。通常把实际的计算过程设计成一种“算法”。而汇编程序的编码通常是采用八或十六进制代码方式。

1.2.1 介绍一种微处理器结构例子

通用仪器公司(GIC)的 CP-1600 NMOS 微处理器(如图 1.1 所示)及其附加系统,或者是电传打字机或高速纸带读出机或凿孔机,一起构成一个微型计算机系统。(如图 1.2 所示)。CP-1600 是生产的第一种功能强的单片 16 位 CPU,按第三代小型计算机的结构设计,使用了八个高速通用 16 位寄存器。售价 38.50 美元。16 位字长、四种寻址方式,能够有效地对 64K 字节的存储器进行存取。这可以通过存放在 ROM 中的程序来完成,而数据存储在 RAM 或外围设备中。对 I/O 数据的管理类似于对存储器数据的管理,通过 87 条指令在 1.6 至 4.8 μs 的时间内完成。使用存储器的 16 位加法执行时间为 3.2 μs 。非易失性的 ROM 存储器可扩充到 16K 位,采用单个 5V 电源,而可买到的易于扩充的静态 RAM 存储器被限制在 4K 位的容量范围。这种微型计算机系统和用来开发成一个简单的小型计算机型式的交叉汇编程序包完全兼容。辅助检查输出的联机调整程序、文本编辑程序、汇编程序、浮动链接装配程序、存储器信息转储程序、监控程序、应用程序、微处理器语言生成包和子程序库等均可买到。在台式微型计算机部件中,由于这些附加软件包,因此需要附加几块板。虽然 ALU 是 8 位功能,但对程序员来说这种微处理器提供了 16 位的结构。

1.3 微型计算机与小型计算机的结构比较

一般来说,微型计算机系统的下列硬件和软件的性能是和同一个工厂生产的较早的小型计算机系统兼容的。也就是说,连接同一工厂生产的较贵的外围设备的任务变得很容易。

1. 第三代小型计算机结构。
2. 高速通用 16 位寄存器。

3. 16 位字长。
4. 四种寻址方式, 允许对 64K 字节的存储器以程序、数据存储或外围设备等中的任意组合方式进行存取。
5. I/O 管理类似于存储器管理。
6. 大约 100 条指令。
7. 堆栈和程序中中断的层次无限制。
8. 容量从 4K 至 16K 位的外部 ROM 提供 8 位密度的 16 位计算能力。
9. 作为工作存储器的静态 RAM 的容量从 1K 至 4K 位。
10. 可编程接口控制器的 LSI 片子, 供 TTY、高速纸带机、串行打印机和盒式磁带机等外围设备用。
11. 丰富的驻留软件。
12. 与制造厂商的原有小型计算机兼容的交叉软件包。
13. 联机调试程序。
14. 文本编辑程序。
15. 浮动链接编辑程序。
16. 存储器信息转储程序。
17. 监控程序和应用程序。
18. 微处理器和语言生成包。
19. 扩充的应用子程序库。

作为直接比较, 在图 1.3 中所示的典型的一般小型计算机功能结构表明, 有关微程序设计的控制器和两个总线数据指令转换结构的安排方式是相同的。CPU、I/O、主存储器功能部件接受从原来总线来的中断, 处理并送回信息, 而第二条总线在寄存器和 ALU 之间存储传送的同时提供通信通道。从它们相同的结构上可注意到, 现代微型计算机系统,

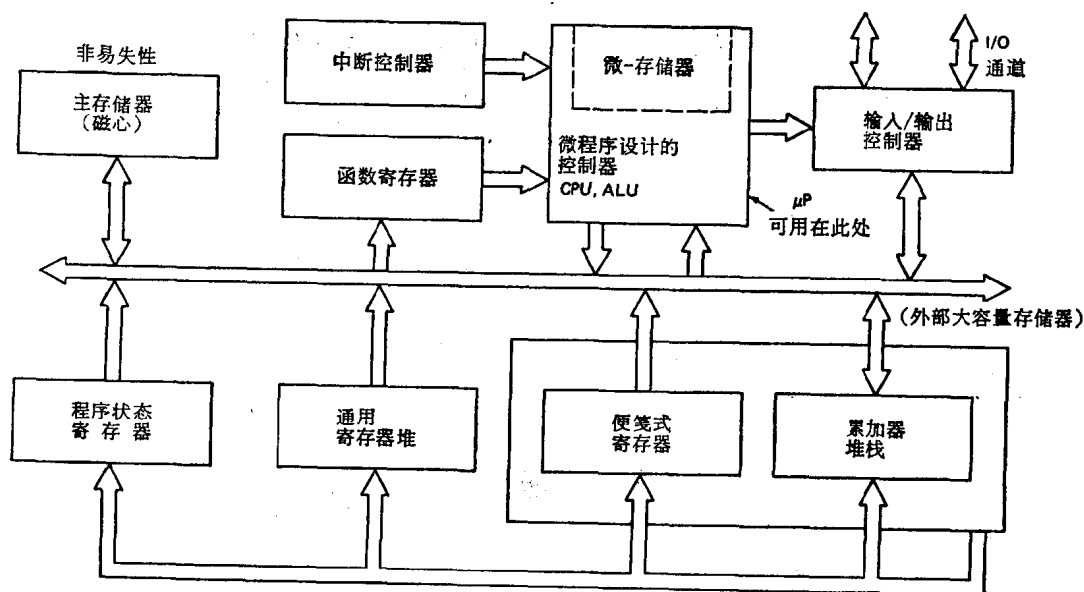


图 1.3 典型的小型计算机结构

同原来的高价小型计算机操作系统比较,是何等类似和有用. 诸如实验性系统中,分时汇编程序、独立汇编程序、编辑程序、分时仿真程序/调试程序、独立调试程序、最小限度 64 K 字的寻址能力、全部按严格标准的性能(价格另加)、单个 5V 电源、运行功率极小、片子上具有直接存储器存取 (DMA)/中断/直接装配程序功能等等,所有这一切都使微型计算机在各种应用中与目前正运行的小型计算机同样有功效. 甚至外围设备,例如一个交互式 CRT 终端,带有 64 个字符 ASCII 码的键盘,每行 40/80 字符 16 行显示,以 2.4K 波特/秒的速率进行“调制解调”供数据应用,价格 1650 美元可买到,尺寸为 16 英寸×19 英寸×6 英寸 (Digi-log 公司). 在一单板上使用几片附加的 MSI 集成电路作接口,或采用另一方案,用一片另外定做的 LSI 片子,就能够把一个微型计算机系统转变成完整的操作系统.

典型的价格昂贵的小型计算机性能如下. 说明目前可买到的微型计算机系统设计正在逐步达到这些性能,如果微型计算机系统设计还没有达到这些性能,那么通过专门的系统设计技术可以达到这一点(一般说来,大约用三片 LSI 微处理器片子就可达到这些功能).

1. 主机 (CPU): 相当于实际上的微处理器.
2. 内部和外部 I/O 控制器.
3. 主存储器: 64K 字节的非易失性磁心存储器. (对于大多数应用来说,固定磁心存储器在价格高、功耗大以及体积较大等方面对微型计算机都不合适. 在与大容量的存储器相接时,例如,与随机存取软盘或脱机盒式磁带系统相接时,使用静态 RAM 作主存储器更合适一些. 多年来,最新的 LSI 金属-氮化物-氧化物半导体存储器是非易失性的,在不久的将来就可以作为主存储器用于某些应用中,由于它的写时间为低速毫秒级.)
4. 16 位或 32 位双字长, 8 位字节. 77 条指令的指令系统. 数学包: 1×24 (16 个 ROM). 微程序设计的 ROM: 512 字, 每个字 32 位 (16 个 ROM, 每个 1024 存储单元).
5. 五种指令字格式,使用 4 位字母, 8 位字节以及 16 位或 32 位字.
6. 单字长执行时间: 65ns. (指令: 读/中断、操作数、读/完成).
7. 主存储器周期时间: 750ns, 读/复原时间. 宏指令: 2.25 至 0.75ns.
8. 浮点算术运算用 4 位十六进制数. 引导程序地址: 192 字容量的 ROM.
9. I/O 控制: 16 字程序. 可寻址的异步并行 I/O 通道: 16 个, 时钟 4MHz (在开始时由同步电路提供脉宽调制).
10. 通用寄存器: 18 个, 串行 I/O 通道: 4 个.
11. 内部时钟: 对低速接口为 1KHz, 对于高速接口 1MHz 和 4MHz. 外部时钟: 0.55KHz.
12. 取数(输出)、微处理器中断、时钟脉冲优先权和 DMA 接口.

对于原来多数的应用,很容易用微型计算机来取代,而最新的高速实时小型计算机又有达到原有中型数字计算机的性能以及适应多方面标准要求的趋势.

1.4 数字计算机现状

表 1.1 提供了各类计算机状况比较。由于微型计算机在价格和性能方面都处于中间地位,在极其广泛的应用中,它具有可以支配尚未解决状况的巨大潜力。

微处理器允许用插入新的 ROM 改变程序的方法简化软件设计的变动(部分改变或全部改变)。这种变动固件的办法仅仅需要少量器件。与硬线逻辑相比较,微处理器通过相应 ROM 中按顺序执行的程序步骤使逻辑易于实现。在大量数据处理的应用中,如果指令系统受到限制的话,势必要增加指令周期时间和减慢执行时间。那么,对于较大吞吐量、已经能够得到具有较强指令系统的微处理器,使执行时间较慢问题缩减到最少。例如,原来 16 位加法时间为 15 至 20 μ s,用某种新型的微处理器 16 位加法时间可减少到 3 至 5 μ s。微处理器原来被限制在很少量的应用中,原因是由于它们采用速度较慢的 P 沟道金属氧化物半导体 (PMOS) 电路。现在较高速度的 N 沟道金属氧化物半导体 (NMOS) 微处理器以及做在蓝宝石衬底上的、速度相当高的、毫瓦级功率的互补对称金属氧化物半导体 (CMOS) 微处理器,按竞争价格很容易买到,它们将在低档、较低的中档小型计算机的应用中开始替代小型计算机,而同时产生越来越多的“智能”消费品,即将出现的高速度、高密度、低电压的双极型集成注入逻辑(I²L)微处理器片子,以真正竞争方式为新旧数据处理系统的系统设计者提供新的标准部件。目前已可买到采用 I²L 片子的低功耗的液晶显示手表。现在正在推广定做的单片微型计算机,在大量的消费性产品的应用领域里将占统治地位。

目前大多数可买到的微处理器是按 4 位或 8 位并行方式进行处理,由于 4 位二进制可代表 1 位十进制数,所以这些器件可按串行方式进行十进制数运算,以并行方式进行二进制算术运算。在处理普通的扩展二进制编码的十进制交换码 (EBCDIC) 和在处理美国标准信息交换码 (ASCII) 的“智能”终端中,以 7 位或者 8 位的形式处理二进制数和字母数字信息。通过位片技术,大多数部件现在都可处理较长的 32 位和 24 位字长。

表 1.1 数字计算机的现状

项 目	硬线逻辑	逻辑阵列 (FPLA)	计算器	微型计算机	小型计算机	大、中型计算机
价格(美元)	10 至 100	10 至 500		50 至 3500	5 千至 2.5 万	10 万至 300 万
字 长	1 位	2, 4 位	4 位	16, 8, 4 位	16, 32, 64 位(可变)	64 位以上 (可变)
程 序	只读 (ROM)	只 读	只读和程序	只读, 可重写	只读, 可重写	多数可重写
速 度	实 时	低、中速	低	中速、实时	中速、实时	高速、实时(与吞吐量有关)
设 计	逻 辑	逻辑和微程序		微程序和宏程序	微程序和宏程序	宏指令和高级软件
应用和存储	控制等: 10 字	控制等: 2 至 20 字或更多		专用 10 至 2 × 10 ⁶ 字	专用 1000 至 5 × 10 ⁶ 字	高性能, 1 兆至几千兆字

第二章 大规模集成电路(LSI)

2.1 半导体物理化学概述

2.1.1 量子论和电子学

硅和锗这类材料称为半导体,电阻率处于低电阻率的导体和高电阻率的绝缘体或介质之间。根据通用元素周期表,金刚石(碳)、硅、锗处于非金属元素的 4A 族之列(见表 2.1)。

在晶状半导体中,电的传导动力同电子运动有关,即与负电荷和“空穴”有关。空穴是由于电子在外加电压作用下运动而留在晶状半导体原子聚集间的空位。之所以称为“空穴”,是取其语义,它呈正电,并且移动的迁移率比电子低,可以通过量子力学进行定量分析。在解释微观原子现象的独立量子状态时,量子论仅仅指出,原子在所施加的环境条件下,呈现出特定的能量状态,即不是处于“中性”、“受激”就是处于“过渡共振”状态时,在一定的体积内将发现具有波状性质的运动电子的概率。能级用电子伏特(eV)表示。一个原子的能级是根据分光测量原子从一个状态跃迁到另一个状态时激发的谱线的波长来确定的。光子是在这个转换过程中电磁辐射的一个量子。

由于量子论涉及到概率和统计,用它来解释半导体晶体中载流子的动态特性,数学上太麻烦。一般我们是结合量子论和牛顿经典力学来了解这种现象的。这方面典型的例子是具有负阻特性的半导体 PN 结型隧道二极管中载流子的隧道效应,即:假如势垒层足够薄,“一个很小的但不为零的概率”允许一个其能量不足以爬过势垒层的电子由隧道通过势垒层。

2.1.2 元素周期表和硅

早期的门捷列夫元素周期表(1869)只有63种元素,经过不断修正,现在有 103 种元素。周期表是按每种元素的原子序数排列的,原子序数取决于绕壳层中的原子核旋转的电子数。元素有一到七个主壳层,每个主壳层可有一到四个次壳层。核本身又由等量的带正电荷的质子(Z),加上数量相等或大致相等的中子('N')组成,这二者构成元素处于稳定状态时的原子量或总质量 $A(= 'N' + Z)$ 。从氢(1)开始,紧接氦(2),...碳(6),...硅(14),...锗(32),...铀(92; 它的不稳定的核出现裂变或自发蜕变),...直到镅(103),所有这些元素按它们的物理性质、化学性质及周期,分成十八个族(两族轻金属,十族重金属,五族非金属,一族惰性气体)。在半导体技术中所碰到的元素在表 2.1 中处于 3A 族到 5A 族,它们的位置在非金属一类中。表 2.2 给出了所考虑的元素同原子结构有关的其他数据。

2.1.3 碳和金刚石

元素在本征状态时呈电中性。在元素周期表中,靠左边的列和靠上边的行的元素原

表 2.1 周期表“一瞥”

非 金 属							轻金属		惰性气体*
周期	3A	4A	5A	6A	周期	1A	2A	...	-0-
2	11 B 5	12 C 6	14 N 7	16 O 8	1	2 H 1			4 He 2
3	27 Al 13	28 Si 14	31 P 15	32 S 16	2				20 Ne 10
4	70 Ga 31	72 Ge 32	75 As 33		3		24 Mg 12	“关键”元素 五种固体,五种气体.	
5	115 In 49	119 Sn 50	121 Sb 51		4		40 Ca 20		

B: 硼

Al: 铝

Ga: 镓

In: 铟

S: 硫

碳-14: 半衰期为 5600 年, 所有生物从二氧化碳中吸收碳-14, 因此用生物残骸中含有的(放射性)同位素碳-14, 就可以精确地计算出生物残骸的年代。放射性碳有两个过剩中子, 所以可用作放射性同位素指示剂。

氢的三个同位素:

H: 氢, ${}^1\text{H}$

HH: 重氢, ${}^2\text{H}$ (从海水 H_2O 中分离出来的) 氘, ${}^2\text{H}$; (不稳定)

He: 氦, ${}^4\text{He}$ O: 氧 Ne: 氖

十种“关键”元素:

(Z = 1, 2, 6, 7, 8, 10, 12, 14, 16, 20)

注: 在上述 10 个原子序数中, 二倍数用粗体字排印。

质子: ${}^1\text{H}$ (氢原子核)

C: 碳

Si: 硅 (SiO_2 , 砂中的二氧化硅是绝缘体);

硅的能级稳定, 最适于制作 LSI.

Ge: 锗(能级不够稳定)

Sn: 锡(能级非常不稳定)

碳-14 还清楚地证明一些“关键”元素的高度稳定性。

N: 氮

P: 磷

As: 砷

Sb: 锑

Mg: 镁

Ca: 钙

另一些数据的例子:

1. 氮-氟激光器的平均无故障时间(MTBF)为一万二千小时, 而氮-镉激光器只有一千五百小时。
2. 仙童公司的(塑料) PROM 额定 MTBF 为二千小时, 而在造价低的塑料封装中, 若用氮化硅 (Si_3N_4) 作防止污染的隔离层时, MTBF 可达一万三千小时。

Z = 原子序数

左下标

A = 原子量

= 'N' + Z ('N' = 原子核中的中子数), 右上标

注: 作者建议用重氢代替氢同位素 ${}^2\text{H}$ (因为 ${}^2\text{H}$ 与质子的符号完全一样), ${}^2\text{H}$ 作为标准元素列入周期表 1A 族内。表中所列的氢和表中所有其他元素不同, 是唯一的宇宙结构单元; 在氢核中没有中子, 氢存在于自然界, 而很稳定的重氢则不然。

子序数较小, 物理和化学性能逐渐趋于稳定和更可预测。元素一般被看作是“无机物”, 而碳则例外。碳这种进化过程所选择的“有机元素”, 是通过碳原子两个侧链, 即胺基 (NH_2)、碳和羧基 (COOH) 决定生物化学或生命过程的关键元素。这三者在若干化合物中组合在一起, 再与其他类似原子结合, 产生氨基酸, 作为从“无生命”转变到“有生命”

的一个步骤。其中有十九种氨基酸是在大量聚集的分子中，即在产生和维持生命的蛋白质中发现的。细菌是从单细胞微生物开始其分子进化的。

表 2.2 有关原子的“自由价电子”¹⁾

	H	HH	He	O ²⁾	B	C	N	Al	Si	P	Ga	Ge	As	In
原子序数(Z)	1	1	2	8	5	6	7	13	14	15	31	32	33	49
原子量(A)	1	2	4	16	11	12	14	27	28	31	70	72	75	115
K层, 电子 ³⁾	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
L层, 电子	—	—	—	6	3	4	5	8	8	8	8	8	8	8
M层, 电子	—	—	—	—	—	—	—	3	4	5	18	18	18	18
N层, 电子	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3	4	5	18
O层, 电子	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3
过剩的“N”中子	—	0	0	0	1	0	0	1	0	1	8	8	9	17

原子的稳定性: ←

根据半导体硅的表 2.2 可以得出下列结论:

1. 从原子的稳定性和可靠性的观点出发, 最好用硼、氮化物和磷作为半导体硅的掺杂物。例如, 金属-氮化物-氧化物半导体 (MNOS) 存储器终究会证明, 它是一种很成功的非易失性随机存取存储器 (RAM)。

2. 在硅原子核中没有过剩中子, 其质子数和中子数相等, 并且保持平衡, 所以对于固体晶体管的可靠工作来说, 便成了非常好的和令人满意的半导体材料; 唯一的一种代用材料是高稳定的人造金刚石, 但是人造金刚石也象其他半导体材料一样, 要消除共价键中的电子, 需很高的能级(5.3 电子伏特, 而硅只需 1.1 电子伏特), 所以很难加工。

3. PMOS: 只含“受主”杂质, 用空穴作为从硼、铝、镓、铟到硅的多数载流子。空穴只能单向通过, 所以可作单极器件。空穴: 3—4: -1(正电荷)

4. NMOS: 只含“施主”杂质, 用电子作为从磷、砷和氮化物到硅的多数载流子。电子只能单向通过, 所以可作单极器件。电子: 5—4: 1(负电荷)

5. PL: 双极型。既有受主杂质, 又有施主杂质, 分别用空穴作为从硼、铝、镓和铟到硅的多数载流子和用电子作为从磷、砷到硅的多数载流子。电子和空穴同时双向快速通过, 使双极型器件具有很大的优越性。

1) 有关原子用黑体排印。

2) 氧 (O) 从紧靠氮 (N) 的一列移前。

3) 壳层: 能态级用量子数 1, 2, 3, 4, ……。

遗传基因是最复杂、能再生的人体细胞中 23 对染色体的组成部分; 基因数以几万计。基因实际上一半是蛋白质, 一半是核酸。后者以 DNA/RNA 而闻名。它们又包含有四个字母编码的核苷酸信息, 核苷酸由 H—C—OH 原子链的五个碳糖分子组成, 这些遗传密码的长度约为 100 亿个原子, 在原子级的微观世界中, 巨大的蛋白质分子的组成可以用 X 射线绕射技术照下来。因此原子可以作为光点图形在涂层上进行观察。微观分子可以同以几十亿光年计的宏观世界中的银河系作一个惊人的对比。复杂的有机物微观分子同宇宙中的银河系相似, 而原子相当于太阳系, 围绕核旋转的电子相当于行星。因此, 这两个极端之间的连续性是可以观察的。在微处理器中, 电荷载流子的基本运动是以微秒和毫微秒的数量级在原子层上发生的, 可用阴极射线管 (CRT) 示波器的电子束进行物理测量。

金刚石这种碳所固有的立方点阵晶体形式, 是自然界中最坚硬和最稳定的结构。作为一种半导体, 它的电子迁移率为 $1800\text{cm}^2/\text{伏秒}$, 而在硅的立方点阵晶体中, 电子迁移率为 $1500\text{cm}^2/\text{伏秒}$ 。将来, 用可以控制的工艺, 通过掺入带有三至五个自由价电子的杂质, 也许可以象现在处理单晶硅生长片一样来处理人造金刚石片, 以便制成人造金刚石微处理器, 作为一种可行的移植物, 来代替大脑的损伤部分以及体内的末梢功能。它们自然会

同一百亿独特的神经细胞“超计算机网络”，即人脑和贯穿全身的神经传递系统逐渐相适应。

在交换逻辑的神经系统中，包含了模拟和时间调制数字信号处理，这个系统利用钠、钾离子以及其他电化学过程。一般呈负电的独特的多功能脑细胞、神经细胞以及脊髓轴突和纤维状树突，一旦破坏就不能再生，它们象遭到破坏的任何微处理器一样，而不同于可再生的机体细胞。每个独立的神经细胞同它相邻的神经细胞由蛋白质和钠离子通过极小的染色体结合间隙传递信息。神经细胞同含氧血液是分开的，它靠六碳葡萄糖($C_6H_{12}O_6$)通过在正常的血液循环系统中它所特有的10到20个供应葡萄糖的神经胶质细胞提供养料。从神经逻辑信息观点来看，这些细胞是孤立的。交换过程多半是在毫秒以下的低速情况下并行发生的。如果由于麻醉剂或者有害药物的作用，神经胶质细胞变迟钝或不供给葡萄糖，那么神经细胞在几分钟内就会死亡。然而它的功能必定要由邻近的一个剩余神经细胞来执行。额外的能量消耗及对部分大脑的作用，取决于是否有感官(感受器)或运动神经(效应基因)，或者比较丰富的信息和数据处理类型的内神经。大脑短期的和长期持续的大容量存储系统，由密码原子链层组成，它们使人联想起微型计算机系统目前所用的RAM和PROM固态存储器。由于对神经系统中非常复杂的数据处理有了新的认识，所以脑电图显示(EEG)、意识状态、催眠和生命回授便成为当前研究中的一些课题。顺便说一说，这些可以使用微型计算机片以多道程序的方式作并行处理(现代的电子显微镜使上述多数现象可以观察到。近代的科学研究逐渐移植了对生物界的基本现象进行思索、推测而得出的一些发现)。

2.2 硅,半导体材料的选择

从前有人曾偶而提到过用金刚石做半导体工作器件。这在理论上虽然是成立的，但完全是一种假设。金刚石、硅和锗都有一个相同的立方点阵晶格结构。每一个原子核通过共用一对价电子以及晶格内相邻晶粒的原子核“共价键合”于其他四个原子核(称为四面键合结构)。在最近十年内，理想的硅单晶片逐渐代替了从前采用的、稳定性较差的锗晶片。在周期表中，锗的位置要靠后得多，在“能级”中其原子的稳定性也低得多。实际上，这种不稳定的锗原子可以有三种同位素同时出现，每种同位素的中子数都不一样(42, 40或38)。而各方面都处于平衡的硅，在高温和低温下，无论在物理学上和电学上它的性能都是稳定可靠的；硅的性能和可靠性都达到了很高标准。实际上，现代空间技术的成就，也许可以部分归因于空间电子学及时选用了硅这种材料。

单晶硅的原子结构以及其在周期表中的独特位置，使硅在计算机技术发展的可以预见的未来，仍将保持其作为标准源元素的稳定地位。锗和砷这两种元素的混合基片只适用于有限的器件，例如GaAs FET(砷化镓场效应晶体管)，以便在较高的微波频率下，得到较大的电子迁移率。但是，单晶硅半导体的地位，就象在生物化学分子形成过程中的碳元素的地位一样，在未来几十年间，在线性和数字系统的无限广阔的领域内，是无与伦比的和不可缺少的，因为据认为它的稳定性仅次于金刚石。例如，硅-蓝宝石技术仅仅是一种使互补对称金属氧化物半导体微处理器获得高速度的、经过改进的生产工艺。蓝宝石实际上是一种“刚玉”——碱性氧化铝。