

宋焕章 王保恒 张春元

计算机原理与设计

存储与外设

(下册)

国防科技大学出版社

计算机原理与设计(下册) 存储与外设

宋焕章

王保恒

张春元

目

30
2

版二

计算机原理与设计(下册)

——存储与外设

宋焕章 王保恒 张春元 编著

国防科技大学出版社

·长沙·

图书在版编目(CIP)数据

计算机原理与设计 下册:存储与外设/宋焕章等编著.长沙:国防科技大学出版社,
1999.7

ISBN 7-81024-560-0

I. 计… II. 宋… III. ①电子计算机-基础理论②电子计算机-外部设备③电子数字
计算机-存储器 IV. TP303

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 23224 号

内 容 简 介

本书分上、下两册,上册为中央处理机,下册为存储与外设。

下册共六章,内容包括半导体存储器结构与原理,半导体存储器测试与逻辑设计,磁表面存储器,存储系统原理与设计,输入输出设备和输入输出控制。

本书主要用作高等院校计算机专业的教材,也可作为有关专业和科技人员的参考书以及计算机专业类高等教育自学考试用书。

国防科技大学出版社出版发行

电话:(0731)4555681 邮政编码:410073

E-mail:gfkdcbs@public.cs.hn.cn

责任编辑:黄 煌 责任校对:黄八一

新华书店总店北京发行所经销

国防科技大学印刷厂印装

*

787×1092 1/16 印张:17.75 字数:410 千
1999年7月第1版第1次印刷 印数:1—5000册

*

定价:22.00 元

前 言

计算机原理与设计或计算机组成原理是高等院校计算机科学与技术学科重要的专业基础课。它主要讨论传统的存储程序计算机(又称为冯·诺依曼计算机)的结构组成、工作原理与部件的设计方法。通过本课程的学习,主要了解计算机是什么,它是怎样通过运行程序来完成计算和信息处理的,计算机硬件系统的各部件是怎样设计的……

国防科技大学是国内最早建立计算机学科的重点大学之一。40多年来,先后研制了电子管、晶体管、集成电路和超大规模集成电路等几十种类型的计算机。其中如441-B晶体管计算机,151大型通用计算机,银河-I型、II型、III型巨型计算机等都填补了当时国内计算机领域的空白,为发展民族计算机产业和赶超世界先进水平作出了巨大贡献。《计算机原理与设计》是计算机学院老中青三代教师几十年教学与科研的结晶。

本书自1984年出版以来,曾修订再版,先后印刷十多次,受到了广大读者的欢迎。随着计算机科学技术的快速发展,重新编著本书势在必行。这次出版,在全书组织结构和内容更新上都作了较大的努力,以使本书结构更精炼,内容更具有时代感。

本书大纲及内容组织系集体讨论确定。上册第一、三章,下册第三、五、六章由宋焕章编写;上册第二、四、五章由张春元编写;下册第一、二、四章由王保恒编写;全书由宋焕章负责统编定稿。

计算机科学技术日新月异,本书谬误之处敬请读者指正为盼。

编 者

1999年6月于国防科大计算机学院

目 录

第一章 半导体存储器

1.1 存储器总论	1
1.1.1 计算机中的存储器	1
1.1.2 存储器的分类	2
1.1.3 主存的主要技术指标	5
1.2 半导体 RAM 存储位元电路	7
1.2.1 双极型存储位元电路	7
1.2.2 MOS 静态存储位元电路	8
1.2.3 MOS 动态存储位元电路	10
1.3 半导体 RAM 结构及工作原理	12
1.3.1 主存储器的组成	12
1.3.2 存储矩阵与选址	13
1.3.3 双极型 RAM	15
1.3.4 MOS 动态 RAM(DRAM)	16
1.4 RAM 存储芯片	19
1.4.1 存储芯片的基本输入输出引脚	19
1.4.2 双极型 RAM 存储芯片	20
1.4.3 MOS 型 RAM 存储芯片	21
1.4.4 新型半导体 RAM 芯片和铁电 RAM	26
1.5 按内容寻址存储器 CAM	32
1.5.1 概 述	32
1.5.2 CAM 存储位元电路	33
1.5.3 CAM	34
1.6 半导体只读存储器 ROM	36
1.6.1 固定掩模型只读存储器 MROM	36
1.6.2 一次可编程只读存储器 PROM	38
1.6.3 光擦除电可编程只读存储器 EPROM	40
1.6.4 电擦除电可编程只读存储器 EEPROM(E ² PROM)	44
1.6.5 快擦写存储器(Flash Memory)	50
习 题	58

第二章 半导体存储器的设计

2.1 半导体存储器的测试	60
2.1.1 概 述	60
2.1.2 功能测试	61

2.2 半导体存储器设计概述.....	68
2.2.1 设计存储器的一般原则和方法.....	69
2.2.2 存储器的逻辑设计.....	69
2.3 存储器逻辑设计举例.....	72
2.3.1 ECL 高速缓存 Cache 逻辑设计	73
2.3.2 DRAM 主存的设计	75
2.4 存储模块.....	82
2.4.1 内存条的类型.....	82
2.4.2 内存条的应用.....	84
2.5 DRAM 的刷新	87
2.5.1 DRAM 刷新的有关参数	88
2.5.2 刷新方法.....	88
习 题	93

第三章 外存储器

3.1 磁记录原理.....	96
3.1.1 磁记录介质.....	96
3.1.2 磁 头.....	97
3.1.3 信息存取原理.....	98
3.1.4 脉冲拥挤效应	100
3.1.5 磁表面存储器性能参数	100
3.2 数字磁记录方式	102
3.2.1 基本记录方式	102
3.2.2 记录方式评定方法	104
3.2.3 游程长度受限码	105
3.2.4 RLLC 分析与设计	109
3.3 磁盘存储器	115
3.3.1 HDD 的分类及特点	115
3.3.2 硬磁盘存储器的构成	116
3.3.3 磁头定位驱动系统	117
3.3.4 硬盘记录格式	122
3.3.5 HDD 设备级接口标准.....	124
3.3.6 软盘及其驱动器	125
3.3.7 磁盘阵列 RAID	129
3.4 光盘存储器	135
3.4.1 光盘分类	136
3.4.2 光盘记录介质	137
3.4.3 光盘读写原理	138
3.4.4 光盘驱动器	140

3.4.5	光盘数据格式	143
3.4.6	CD-ROM 驱动器的使用与安装	144
3.4.7	DVD 及大容量光盘存储设备	145
	习 题	147
第四章 存储系统		
4.1	并行主存系统	150
4.1.1	单体多字并行主存系统	150
4.1.2	多体交叉编址并行主存系统	151
4.2	存储系统及其层次结构	153
4.2.1	两级存储系统	154
4.2.2	三级存储系统	154
4.3	高速缓冲存储器 Cache	156
4.3.1	Cache 的基本组成及工作原理	156
4.3.2	Cache 替换算法	158
4.3.3	地址映像与变换	159
4.4	虚拟存储器	164
4.4.1	虚拟存储器概述	164
4.4.2	页式虚拟存储器	166
4.4.3	段式虚拟存储器	171
4.4.4	段页式虚拟存储器	173
	习 题	175
第五章 输入输出设备		
5.1	外围设备概述	176
5.1.1	外设的分类	176
5.1.2	外设的地位与作用	177
5.1.3	外设的现状与发展	178
5.2	常用输入设备	181
5.2.1	键 盘	181
5.2.2	鼠标器	183
5.2.3	触摸屏	186
5.2.4	扫描仪	188
5.2.5	数字化仪	193
5.3	显示器	196
5.3.1	CRT 显示器概述	196
5.3.2	CRT 及其扫描技术	199
5.3.3	CRT 字符显示器	202
5.3.4	液晶显示器 LCD	205
5.3.5	发光二极管显示 LED	208

5.4	输出印刷设备	209
5.4.1	打印机概述	209
5.4.2	针式打印机	210
5.4.3	激光打印机	215
5.4.4	喷墨式打印机	220
5.4.5	其它类型打印机	222
5.5	绘图机	225
5.5.1	绘图机分类及性能参数	226
5.5.2	笔式绘图机	228
5.5.3	无笔式绘图机	231
	习 题	236
第六章 输入/输出(I/O)控制		
6.1	I/O 控制的基本概念	238
6.1.1	I/O 设备与 I/O 操作	238
6.1.2	I/O 组织的基本原则与功能	239
6.1.3	I/O 控制的类型	241
6.1.4	输入输出接口	242
6.2	程序直接控制传送	245
6.2.1	无条件传送方式	245
6.2.2	程序查询传送方式	245
6.3	中断及程序中中断控制传送	247
6.3.1	中断的基本概念	247
6.3.2	中断系统的结构组成	249
6.3.3	程序中中断控制传送及其接口	253
6.4	DMA	256
6.4.1	DMA 的功能和特性	256
6.4.2	DMA 工作方式	257
6.4.3	DMA 接口组成	258
6.4.4	DMA 传送过程	259
6.4.5	DMA 举例	260
6.5	I/O 通道	262
6.5.1	I/O 通道的功能与特点	263
6.5.2	通道种类	263
6.5.3	通道流量计算	266
6.5.4	通道命令和通道程序	267
	习 题	270
附录 计算机集成电路常见英文缩略语、全称及中文参考译名		
参考文献		

第一章 半导体存储器

1.1 存储器总论

1.1.1 计算机中的存储器

存储器是具有记忆功能的部件,用来存放程序和数据,是计算机不可缺少的重要组成部分。目前绝大多数计算机硬件系统仍然是冯·诺依曼(John Von Neumann)“存储程序”式结构。“存储程序”思想的核心是将编好的程序和要加工处理的数据预先存入主存储器(Main Memory),然后启动计算机工作,计算机在不需人工干预的情况下,高速自动地从主存储器中取出指令执行,从而完成数值计算或非数值处理。计算机(Computer)则需人工干预才能工作,因此速度很慢。计算机与计算器最主要的区别就是计算机有使之自动运算和处理的关键部件——主存储器。

计算机工作是通过执行程序实现的,程序是有序的指令集合。计算机每执行一条指令至少访问一次主存储器,有的指令甚至多次访问主存储器,所以主存储器的速度决定了计算机的速度。要增强计算机的解题能力,扩大应用领域,提高工作效率并为用户提供灵活的界面,主存储器除存放当前用户的程序外,还要存放系统程序和其它所需程序及数据,故希望主存储器容量大、速度快、造价低,而现有主存储器都不能完全满足这样的要求。因此,研制新型结构的主存储器和改进已有主存储器结构仍然是计算机工作者的主要研究课题之一。从整个计算机技术发展来看,一方面主存储器的工作速度总是落后于CPU,通常至少慢一个数量级。就CPU芯片与存储芯片相比,前者速度以每年60%的速度增长,而后者仅以每年7%的速度递增。另一方面主存储器容量总是落后于软件的需求。因此为了提高主存储器速度而研制出双端口、多端口主存储器,为扩充容量并提高速度而研制出单体多字并行、多体并行和多体交叉并行主存储器。

计算机广泛应用于国民经济各个领域和人民生活诸方面,因而对存储器速度要求越来越快,对容量要求越来越大,单从改进主存技术很难达到上述要求。实际上在现代计算机中不仅设置主存储器,在CPU中还设置高速暂存存储器和高速缓冲存储器(Cache),在外围设

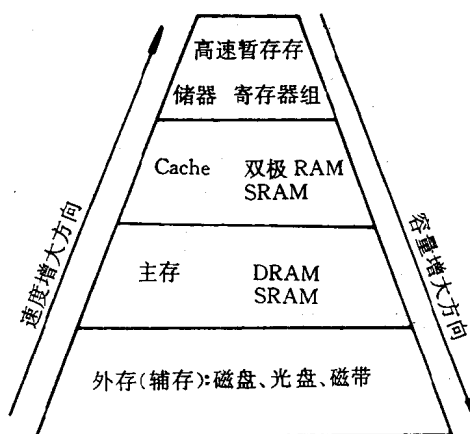


图 1.1 计算机中的存储系统

备中设置辅助存储器(Auxiliary Storage/Memory),亦称外存储器(External Storage/Memory)。它们和主存储器构成存储系统,以满足对存储器的各种需求,见图1.1。

存储器在计算机中是无处不在的,其存储速度越快,存储容量越大,存放的信息越多,处理和解决问题的能力就越强。

1.1.2 存储器的分类

计算机问世 50 多年来,存储技术发展很快,不断出现新的存储介质和存储元器件。称记录一位二进制信息的存储介质区域或存储元器件为存储位元(Memory Cell)。从初期的汞、镍延迟线,到目前广泛使用的超大规模集成电路存储芯片,近几年又出现了光存储技术、铁电存储技术和其它正处于研制阶段的新存储技术。随着计算机的广泛应用和发展,计算机存储器种类不断增加、功能不断增强、容量大幅度提高。不仅存取方式多种多样,而且速度差异悬殊,保存信息的方式和手段更是千差万别。下面从四个不同的角度对存储器进行分类。

1. 按存储器在计算机中的作用分类

(1)高速暂存存储器(Scratch-pad Storage),亦称便笺式存储器,是由寄存器构成的,在速度上与 CPU 匹配,因此有的文献上称其为寄存器型存储器。它们用来暂时存放即刻要执行指令的、马上要使用的数据或得到的处理结果。这种类型的存储器容量一般不超过 2kB,寄存器的位数与机器字长相同,它属于 CPU 的组成部分,如 CPU 中的先行寄存器组、后行寄存器组、指令流队列和通用寄存器组等。

(2)高速缓冲存储器(Cache)。这个存储器属于 CPU,位于主存和 CPU 之间,存放当前正在执行程序的部分程序段或数据,以便向 CPU 快速提供即刻要执行的指令或马上要处理的数据。目前 Cache 一般采用双极型半导体存储器,也有采用 CMOS 半导体存储器的。速度可与 CPU 匹配,存取时间在几个 ns 到十几个 ns 之间,存储容量一般在几 kB 到几百 kB 之间。

(3)主存储器。主存储器存放当前处于活动状态的程序和有关数据,它包括操作系统的常驻部分和当前正在运行的程序和要处理的数据。它与 CPU 的关系最密切,CPU 通过指令可直接访问它。存储容量比 Cache 大得多,一般在几百 kB 到几百 MB 之间。如我国自行设计自行制造的 YH-1 巨型机主存为 32MB,YH-2 巨型机主存为 256MB。目前主存储器大多为 MOS 半导体存储器,存取速度比 CPU 慢一个数量级,一般为几十到几百 ns。因主存属于主机范畴,所以常称它为内存(Internal Memory)。对于主存,从物理结构上看,若干个存储位元组成一个存储单元(Memory Location)。一个存储单元可存放一个机器字(Word)或一个字节(Byte)。存放一个机器字的存储单元,称字存储单元。存放一个字节的存储单元,称字节存储单元。

(4)辅助存储器。前面已经谈到,辅存即外存,属于外围设备的范畴。辅存与主存的最大区别在于它不能由 CPU 的指令直接访问,必须通过专门的程序或专门的通道把所需的信息与主存进行成批交换,调入主存后才能使用。外存储器用来存放需要联机保存但暂不使用的程序和数据。计算机系统能提供丰富的软件资源,如操作系统、各种语言的翻译或解释程序、编辑程序、链接装配程序、调试程序以及各种软件工具等。某个用户程序可能只

需使用其中的一部分,如某种语言的翻译程序;或者在工作的某一阶段只用其中的一部分,如编程时仅需编辑程序,编译时只用解释程序,链接装配时只需链接装配程序,调试时则只应用调试程序等。通常,都是将所有软件以文件的形式存入辅存,需要时再调入主存。对于大的用户程序,需要运行的程序量很大,程序涉及的数据可能也很多,而 CPU 在某一段时间里,运行的程序和要处理的数据只是其中的一部分,暂不运行的程序和数据也先存入辅存。同主存相比,辅存容量相当大,通常在几十 MB(2^{20} B)到几百 GB(2^{30} B)之间,有的甚至达到几个 TB(2^{40} B)。辅存取速度比主存至少慢两个数量级,通常为若干个 ms。

(5)其它功能的存储器。微程序控制的计算机和微程序控制的输入输出设备中,都必须设置存储微程序代码的控制存储器 CM。通常要求 CM 容量尽量小,速度尽可能快。为了加快处理速度,高性能计算机 CPU 中还设置各种表格存储器,通过查表实现各种计算功能,如三角函数表、对数表、倒数表等。有了倒数表,可以不设计除法部件,大大简化了 CPU 设计。在显示和印刷输出设备中,通常都设有字库和数据缓冲存储器。如图形图像显示缓冲存储器既要求容量大,又要求速度快;西文字库容量较小,不超过 2kB;汉字简写字库容量可达几百 kB,繁体字字库达 4MB。

2. 按存储介质分类

凡仅有两种稳定的物理状态,能方便地检测出属于哪种稳定状态,两种稳定状态又容易相互转换的物质或元器件,都可以用来记忆二进制代码“1”和“0”,称这样的物质或元器件为存储介质或记录介质。存储介质不同,存储信息的机理也不同,因此,又把按存储介质分类称为按存储机理分类。存储介质种类繁多,下面仅就目前计算机中广泛使用的和我们认为很有发展前途的几种作简单介绍。

(1)半导体存储器 SCM(Semiconductor Memory)

早期的 SCM 采用典型的晶体管触发器作为存储位元,加上选择、读写等电路构成存储器。现代的 SCM 采用超大规模集成电路工艺制成存储芯片,每个芯片中包含相当数量的存储位元,再由若干芯片构成存储器。

从集成电路类型的角度,SCM 分为晶体管双极(Bipolar)型和场效应管 MOS(Metal Oxide Semiconductor)型。双极型又分射极耦合逻辑即 ECL(Emitter Coupled Logic),晶体管晶体管逻辑即 TTL(Transistor Transistor Logic)和集成注入逻辑即 I²L(Integrated Injection Logic)三种类型。从制造工艺看,MOS 型有 PMOS(P channel MOS)、NMOS(N channel MOS)和 CMOS(Complementary MOS)三类,目前广泛采用的是后两类 MOS。从加电后能否长时间保持所存信息的角度,SCM 又有静态存储器和动态存储器之分,前者存储位元电路是双稳态触发器,后者存储位元电路的关键部件是电容;前者只要电源电压正常供电,信息则长期保存,后者即使电源电压正常供电,信息也只能保持几个或十几个 ms,因此必须在规定时间内刷新。若电源电压不正常或断电,两者信息都丢失。双极型存储器都是静态存储器,而 MOS 型存储器则有静态、动态之分。

双极型存储器速度快,通常比 MOS 存储器至少高一个数量级,但功耗大,集成度低,适用于快速小容量存储器,如高速暂存存储器和 Cache。NMOS 静态存储器制造工艺简单、集成度高、单片容量大,主要用作快速主存。CMOS 静态存储器功耗最小,速度比 NMOS 快,集成度比双极型高得多,可靠性高,虽然制造工艺复杂,目前仍用得广泛,主

要用作快速主存和 Cache。动态 MOS 存储器内部结构最简单,在各类 SCM 中集成度最高,功耗很小,速度虽比静态 MOS 和双极型存储器低一些,但其仍被广泛用作主存。

(2)磁表面存储器 MSM(Magnetic Surface Memory)

磁表面存储器是用非磁性金属或塑料作基体,在其表面涂敷、电镀、沉积或溅射一层很薄的高导磁率、硬磁材料的磁面,用磁层的两种剩磁状态记录信息“1”和“0”。基体和磁层合称为磁记录介质。依记录介质形状可分别称磁卡存储器、磁带存储器、磁鼓存储器和磁盘存储器。计算机中目前广泛使用的 MSM 是磁盘和磁带存储器。

MSM 通过磁记录介质作高速旋转或平移,借助于软磁材料制作的磁头实现读写。由于是机械运动方式,所以存取速度远低于 SCM,为 ms 级。MSM 的存储位元是磁层上非常小的磁化区域,可以小至 $20\mu\text{m}^2$,所以存储容量可以很大,与 SCM 相比,每位价格低得多,因此广泛用作辅存。

(3)光盘存储器 ODM(Optical Disk Memory)

和 MSM 类似,ODM 也是将用于记录的薄层涂敷在基体上构成记录介质。不同的是基体的圆形薄片由热传导率很小,耐热性很强的有机玻璃制成。在记录薄层的表面再涂敷或沉积保护薄层,以保护记录面。记录薄层有非磁性材料和磁性材料两种,前者构成光盘介质,后者构成磁光盘介质。

ODM 是目前辅存中记录密度最高的存储器,存储位元区域可小至 $1\mu\text{m}^2$,存储容量很大且盘片易于更换。缺点是存储速度比硬盘低一个数量级。现已生产出与硬盘速度相近的 ODM,不久会成为重要的辅存。

(4)铁电存储器 FeM(Ferroelectric Memory)

20 世纪 80 年代末,由于铁电薄膜技术的突破,铁电存储器发展很快,它是用两种极化状态表示信息“1”和“0”,因其所需电压低,存取速度快,加之可高密度集成,有望成为动态存储器的替代品。

3. 按存储方式分类

(1)随机存取存储器 RAM(Random Access Memory)

这种存储器是以存储单元为单位组织信息和提供访问的,CPU 通过指令可随机写入或读出信息。所谓随机是指对存储器的任何存储单元都可随时访问且访问所需时间都是相同的,与存储单元所处的物理位置无关。原因是这种存储器对每个存储单元都有唯一的、由电子线路构成的寻址机构。

这类存储器的特点是速度快、访问时间是 ns 级,用作 cache 和主存。目前广泛使用的是 SCM。

(2)按内容寻址存储器 CAM(Content Addressed Memory)

亦称相联存储器 AM(Associative Memory),也是一种随机存取存储器。除按地址可随机读写外,还有比较功能。可按信息内容寻址,然后再按地址访问,且主要是这种工作方式。这类存储器首先要求的是速度,常用于逻辑比较和快速查找等场合,智能计算机中的推理存储器和存储管理时地址变换的快表都使用这种存储器。

(3)只读存储器 ROM(Read Only Memory)

这种存储器除正常工作时只能随机读出信息、不能随机写入信息外,其它特征均同

RAM。ROM 中的信息是在正常工作前事先写入的,信息一旦写入后,便可长期保存。目前广泛使用的是半导体大规模集成电路 ROM。用户要求不同,写入方式也存在很大差异。依写入方式 ROM 分为三类。第一类是固定掩模型 ROM (Fixed Mask ROM), 缩写为 MROM, 它是在制造时使用掩模工艺将信息写入存储器,用户不能作任何改动,只能从中读出信息。第二类是一次可改写 ROM,即 PROM(Programmable ROM)。生产厂家在制造存储器时,就写入全“1”或全“0”,用户依需要在使用前作一次且只能作一次改写。第三类是可多次改写的 ROM,生产厂家在制造这种 ROM 时,也是写入全“1”或全“0”,用户根据自己需要可多次擦除和改写。

ROM 在计算机中得到广泛应用,主要用来存放管理、监控程序,成熟的用户程序,固定表格和常数,字库和微程序库等。

(4) 顺序存取存储器 SAS(Serial Access Storage)

这种存储器中的信息按文件组织,一个文件可包含若干个数据块,一个数据块又包含若干字节,它们顺序地记录在存储介质上,存取时以块为单位,只能顺序查找块号,找到后即成块顺序读写,所以存取时间与信息所处的物理位置关系极大。

这类存储器速度慢、容量大、成本低,常作为后援辅存。磁带存储器属此类,其存储时间为秒级。CCD(Charge Couple Device)和磁泡也属于顺序存储器,其速度比磁带虽快得多,但近几年发展十分缓慢,几乎处于停滞状态。

(5) 直接存取存储器 DAS/DAM(Direct Access Storage/Direct Access Memory)

这种存储器信息的组织同 SAS,存取信息也是以块为单位。它是介于随机存取和顺序存取之间的一种存储器。对信息的存取分两步进行,首先随机指向存储器的一个区域,如磁、光道,然后对这一部分区域进行顺序存取。磁盘、光盘属于此类存储器,其存取时间为 ms 级。

4. 按信息的可保存性分类

(1) 挥发性存储器(Volatile Memory)和非挥发性存储器(Non-volatile Memory)

挥发性存储器亦称易失性存储器,这种存储器的特点是断电后信息即丢失。非挥发性存储器亦称非易失性或永久性存储器,这种存储器特点是断电后信息不丢失。半导体随机存取存储器为挥发性存储器,半导体只读存储器、磁表面存储器和光盘存储器都是非挥发性存储器。

(2) 破坏性读出存储器(Destructive Read Memory)和非破坏性读出存储器(Non-destructive Read Memory)

当读出某单元信息时,如果破坏了原存信息,称这样的存储器为破坏性读出存储器;若读出时,不破坏原存信息,这样的存储器为非破坏性读出存储器。破坏性读出存储器信息读出后必须马上有一个重写操作,亦称之为再生,以恢复被破坏的信息。非挥发性存储器、半导体静态存储器都是非破坏性读出存储器。半导体动态存储器和铁电存储器则属于破坏性读出存储器。

1.1.3 主存的主要技术指标

如前所述,主存亦称内存,用于存放当前处于活动状态的程序和数据。换句话说,主存

是 CPU 可直接访问的存储器,要求其容量足够大、速度尽量与 CPU 匹配。这不仅是设计人员追求的目标,也是评价主存性能的主要技术指标。

1. 存储容量(Memory Capacity)

主存的存储容量指的是主存所能容纳的二进制位(bit)个数的总和,即构成主存的存储位元的总和。存储容量等于存储单元个数与每个存储单元包含的存储位元个数之积。对于字节编址计算机,以字节(Byte,简称为 B)数表示存储容量;对于字编址计算机,用二进制位(bit,简称为 b)数表示存储容量。现代计算机存储容量很大,用 B 或 b 作单位很小,加之字长均为字节的整数倍,故常用 kB、MB、GB 表示存储容量。

$$1\text{kB} = 2^{10}\text{B} = 1024\text{B}; \quad 1\text{MB} = 2^{20}\text{B} = 1024\text{kB}; \quad 1\text{GB} = 2^{30}\text{B} = 1024\text{MB}$$

2. 存取时间 MAT(Memory Access Time)

存取时间亦称访问时间,指的是从启动一次存储器操作到完成该操作所用时间。如从发出读命令到将数据送入数据缓冲寄存器所用时间,或从发出写命令到将数据缓冲寄存器内容写入相应存储单元所用时间,用 T_A 表示。 T_A 是反映存储器速度的指标,其值取决于存储介质的物理特性及其使用的读出机构类型。 T_A 决定了 CPU 进行一次读或写操作必须等待的时间。目前主存的存取时间为 ns 级。

3. 存储周期 MCT(Memory Cycle Time)

存储周期亦称存取周期、访问周期、读写周期。指的是连续两次启动同一存储器进行存取操作所需的最小时间间隔,用 T_M 表示。因为对任一种主存,当进行一次访问后,存储介质和有关控制线路都需要恢复时间,若是破坏性读出,还需重写时间,因此通常 $T_M > T_A$ 。 T_A 通常主要用来表示 CPU 发出读命令后要等待多长时间才能获得数据,这对 CPU 的设计有着非常重要的意义。如果考虑计算机与访存有关的工作周期,则会涉及到 T_M 。

4. 可靠性(Reliability)

计算机的一切工作都是通过运行程序实现的,而正在运行的程序和要加工处理的数据都存放在主存中,因此,主存的可靠性处于非常重要的地位。通常用平均无故障时间 MTBF(Mean Time Between Failures)来衡量主存的可靠性,MTBF 表示两次故障之间的平均时间间隔。显然,MTBF 越大,可靠性越高。为了加大 MTBF,主存采用容错技术。所谓容错,就是在存储器出现故障时,能够纠正错误,使之正常工作,或者至少能报告错误,以便人工排除。通常通过增加冗余位实现,如 YH-2 巨型机,CPU 字长 64 位,而存储器字长为 72 位,多用 8 位可纠正一位错误、检测出两位错误,这样大大提高了主存的可靠性。

5. 功耗与集成度(Power Loss and Integration Level)

功耗反映了存储器件耗电多少,集成度标识单个存储芯片的存储容量。一般希望功耗小、集成度高,但两者是矛盾的,因此除设计和制作存储芯片时要同时考虑两者之外,用芯片构成主存时也应当考虑它们。对于 SCM,有维持功耗和工作功耗之分,通常要求维持功耗尽量小。

对于高密度组装的高速主存,则应采用风冷、液冷等强化散热措施,否则主存将不会稳定工作,甚至有烧毁的危险。

6. 性能价格比(Cost Performance)

性能价格比是一个综合性指标,性能主要包括存储容量、存储周期、存取时间和可靠性等。价格包括存储芯片和外围电路的成本。通常要求性能价格比要高。

7. 存取宽度(Access Width)

存取宽度亦称存储总线宽度,即 CPU 或 I/O 一次访存可存取的数据位数或字节数。存取宽度由编址方式决定。字节编址存取宽度为 8 位,字编址存取宽度为机器的字长,它一般是字节的整倍数。如银河-1 巨型机存取宽度为 64 位。低档微机存取宽度为 8 位、16 位。高档微机存取宽度为 32 位、64 位。

本章后续各节将重点讲述目前广泛使用的以半导体为存储介质的 RAM、ROM 和 CAM 的存储位元结构、存储器的组成及工作原理,简单介绍铁电存储器。

1.2 半导体 RAM 存储位元电路

SCM 最小逻辑单位是存储位元,它存储一位二进制信息。稍大些的逻辑单位是存储单元,它由若干存储位元构成,存储一个或多个字节。再大些的逻辑单位是存储芯片(Memory Ship),它除包含一定数量(一般为 2 的整数次幂)的存储单元外,还包括对存储单元操作的外围线路,如译码器、驱动器、读出放大器和写入电路等。若干存储芯片构成 SCM。对于大容量 SCM,为提高速度、减小功耗和方便控制,通常又分成多个存储体(Memory Bank),每个体由一定数量的存储芯片构成。

下面分别介绍双极型存储位元电路, MOS 静态存储位元电路和 MOS 动态存储位元电路。

1.2.1 双极型存储位元电路

双极型存储位元电路式样繁多,至少有十几种,它的基本结构是双稳态触发器。我们仅介绍二极管开关集电极阻抗存储位元电路,掌握了这种存储位元电路,遇到其它双极型存储位元电路即可触类旁通了。

二极管开关集电极阻抗存储位元电路是利用二极管的变阻抗(非线性)特性来改变触发器集电极负载阻抗,使存储位元处于维持状态时是小电流,工作状态时是大电流。另外在电路设计和工艺上也采取了相应措施,使位元电路面积和交叉漏流都明显地减少。

1. 位元电路的组成及其工作原理

这种存储位元电路如图 1.2 所示。它由两只晶体管 T_1 、 T_2 和负载电阻 R_{C1} 、 R_{C2} , 二极管 D_1 、 D_2 , 电阻 r_1 、 r_2 组成。其中 T_1 的一个射极和 T_2 的一个射极连接在一起,接到维持恒流源,另外两个射极分别接到位线 D 和 \bar{D} , 电阻 R_{C1} 、 r_1 、 R_{C2} 和 r_2 接于驱动线 X 。此外,还有两个抗饱和肖特基二极管,在图 1.2 中的管 T_1 和 T_2 符

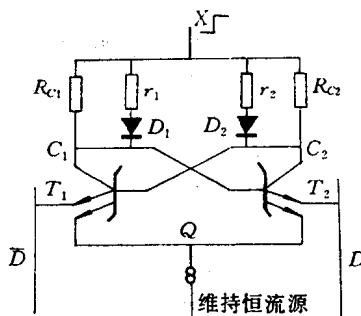


图 1.2 二极管开关集电极阻抗存储位元电路

号中已有表示,没有再单独画出。这种位元电路最适合匹配ECL外围电路,下面就以ECL电路作其外围电路来说明存储位元电路的工作原理。先假定 T_1 通导, T_2 截止为“1”状态;反之, T_2 通导, T_1 截止为“0”状态。为了说明方便,分为三种状态来讨论。

(1)保持:在存储位元处于保持状态时,驱动线 X 是低电位($-1.7V$),两边位线 \bar{D} 和 D 都处于中间电位($-1.9V$)。这时,触发器必然是一个管通导、一个管截止且总电流通过 Q 点(V_Q 为 $-2.7V$)流入维持恒流源,此恒流源吸收约 $100\mu A$ 电流,使触发器能维持原有的稳定状态,保持已存的信息。值得注意的是存储位元处于保持状态时,集电极负载电阻所并联的二极管 D_1 、 D_2 都不通导,由于负载电阻很大,所以维持电流很小,维持功耗亦很小。

(2)写入:写入就是当存储位元被选时,将欲写入的信息(“1”或“0”)写入存储位元。假如是写“1”,首先驱动线 X 来正脉冲($-0.8V$),位线 \bar{D} 加 $-2.4V$,位线 D 加 $-1.5V$ 。显然,在驱动线 X 电位变高的瞬间,并联二极管 D_1 、 D_2 将会通导,使负载电阻变小、电流增大。但由于触发器的下端是接维持恒流源,限制了电流增加, Q 点电位将升高。当高过两边位线上的电位时,由于位线上的电位不平衡,位线 \bar{D} 电位低,位线 D 电位高,迫使 T_1 通导, T_2 截止,触发器变为“1”状态,即写入了“1”,当驱动脉冲去掉后,驱动线 X 上的电位变为 $-1.7V$,存储位元保持已写入的“1”状态。

写“0”和写“1”的过程相同,只是位线 \bar{D} 和 D 所加的电压调换即可,不再赘述。

(3)读出:读出时两边位线 \bar{D} 和 D 都是中值电位(约 $-1.9V$),驱动线 X 来正脉冲($-0.8V$),在驱动线 X 上的电位变高的同时,并联二极管 D_1 、 D_2 瞬间通导, Q 点电位升高(因有维持恒流源存在),使通导管有较大的电流流往位线。假如存储位元存信息为“1”,则必定是 T_2 截止, T_1 通导,且有较大电流从位线 \bar{D} 流出,位线 D 上无电流,代表读出“1”;如果存储位元原存信息为“0”,则 T_1 截止, T_2 通导,位线 D 上有电流,而位线 \bar{D} 上无电流,代表读出“0”。当驱动线 X 的电位再度变低时,存储位元继续保持其原存信息状态。所以它是不破坏读出。

2. 位元电路的特点

(1)由于采用了二极管开关集电极阻抗,使工作、维持电流比得到改善,显著地降低了存储位元电路的保持功耗,同时又具有较高工作速度,与ECL外围电路配合,更能发挥其快速性的优点。

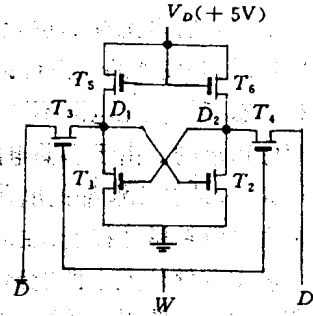
(2)由于存储位元电路的维持电流很小,只有几十微安。另外又加了肖特基二极管抗饱和措施,晶体管基区积存的少数载流子大量减少,使多射极间的交叉漏流要减小一个数量级。当然,抗饱和措施也对提高速度有利。

1.2.2 MOS 静态存储位元电路

双极型存储位元电路采用的是触发器形式,因为触发器具有两种不同的稳定状态,用它所处不同的稳定状态来代表一位二进制信息。当没有外界信号作用时,触发器可以长久保持其所处的某种稳定状态,所以通常把这种存储位元电路叫做静态存储位元电路。不言而喻,以MOS晶体管触发器构成的存储位元电路,就是MOS静态存储位元电路。

1. 普通六管静态存储位元电路

如图 1.3 所示,它实际上是由两个 NMOS 晶体管反相器直接耦合而成。为了和外围电路传递信息,增设两个门控管 T_3 和 T_4 ,这两个管的栅极连在一起引出一根线,叫做字驱动线,用 W 表示。 T_3 和 T_4 的源极引出分别接至位线(有的也称数据线),用 \bar{D} 和 D 表示。



假设 T_1 通导, T_2 截止为“1”状态; T_1 截止, T_2 通导为“0”状态,分三种状态讨论。

(1)保持:平时字驱动线 W 处于低电位(近于 0V),使门控管 T_3 和 T_4 都关闭,切断了触发器和位线的电联系。触发器自身处于保持状态。

(2)写入:当写入时,字驱动线 W 来正脉冲(近于 V_D),打开 T_3 和 T_4 ,如果要写“1”,则位线 \bar{D} 加低电位(近于 0V),位线 D 加高电位(近于 V_D),此时,不管触发器原来处于何种状态,一定是 T_1 通导, T_2 截止,成为“1”状态。如果要写“0”,则位线 \bar{D} 加高电位,位线 D 加低电位,迫使 T_2 通导, T_1 截止,变为“0”状态。在字驱动脉冲消失后, T_3, T_4 被关闭,触发器保持刚写入的信息状态。

图 1.3 六管静态存储位元电路

(3)读出:读出时,假定两边位线的负载是平衡的。只要字驱动线 W 加一正脉冲,打开门控管 T_3 和 T_4 ,这时触发器所存的信息(D_1 和 D_2 点电位),就可通过 T_3 和 T_4 传送到位线上,即被读出。如果原存信息是“1”,则因 T_1 通导, T_2 截止, D_1 点为低电位, D_2 点为高电位。所以经过 T_3 加到位线 \bar{D} 上是低电位,经过 T_4 加到位线 D 上是高电位,代表读出是“1”。如果原存信息是“0”,在读出时,位线 \bar{D} 上得到的是高电位,位线 D 上得到的是低电位,代表读出是“0”,当字驱动脉冲消失后,门控管 T_3 和 T_4 关闭,触发器仍保持原来状态。

不难看出,在读出过程中,触发器的状态并未破坏,原存信息仍然存在,故这种存储位元电路也是不破坏读出的。

2. 静态互补存储位元电路

根据普通静态六管位元电路的构成原理,也可以用两个互补反相器组成互补存储位元电路,如图 1.4 所示。在电路中是以 P 沟增强型 T_5 和 T_6 作负载,而以 N 沟增强型 T_1 和 T_2 作开关管。 T_1, T_5 的栅极与 T_2, T_6 的漏极相连, T_2, T_6 的栅极与 T_1, T_5 的漏极相连。 T_5, T_6 的源极接电源 V_D , T_1, T_2 的源极接地。N 沟增强型 T_3 和 T_4 作为门控管, T_3 漏极与 T_1, T_5 漏极相连接, T_4 漏极与 T_2, T_6 漏极相连接,而 T_3, T_4 源极则分别与位线 \bar{D} 和 D 相接,两管的栅极都接于字驱动线 W 。

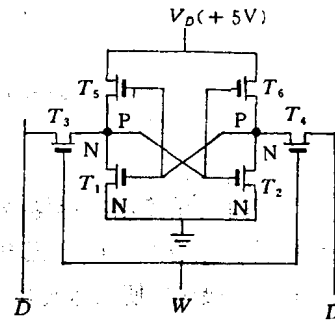


图 1.4 静态互补存储位元电路

关于它的工作原理和普通六管静态存储位元电路是一样的,不再赘述。需要指出的是,这种存储位元电路只是在转换过程中才有较大的电流,而平时反相器的两只晶体管总是一个通导,一个截止。所以它的功耗小,速度