

## 6. 计算机存储结构

### 6.1 常见存储器简介



常见存储器分类

存储器按其存储介质特性主要分为“易失性存储器”和“非易失性存储器”两大类。其中的“易失/非易失”是指存储器断电后，它存储的数据内容是否会丢失的特性。由于一般易失性存储器存取速度快，而非易失性存储器可长期保存数据，它们都在计算机中占据着重要角色。在计算机中易失性存储器最典型的代表是内存，非易失性存储器的代表则是硬盘。

#### ① RAM-易失性存储器

RAM 是“Random Access Memory”的缩写，被译为随机存储器。所谓随机存取，指的是当存储器中的消息被读取或写入时，所需要的时间与这段信息所在的位置无关。这个词的由来是因为早期计算机曾使用磁鼓作为存储器，磁鼓是顺序读写设备，而 RAM 可随读取其内部任意地址的数据，时间都是相同的，因此得名。根据 RAM 的存储机制，又分为动态随机存储器 DRAM(Dynamic RAM)以及静态随机存储器 SRAM(Static RAM)两种。

- 动态随机存储器 DRAM

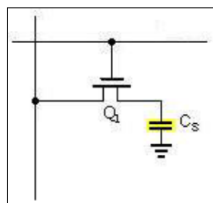


图 22-2 DRAM 存储单元

表 22-1 DRAM 与 SRAM 对比

特性	DRAM	SRAM
存取速度	较慢	较快
集成度	较高	较低
生产成本	较低	较高
是否需要刷新	是	否

动态随机存储器 DRAM 的存储单元以电容的电荷来表示数据，有电荷代表 1，无电荷代表 0。但时间一长，代表 1 的电容会放电，代表 0 的电容会吸收电荷，因此它需要定期刷新操作，这就是“动态(Dynamic)”一词所形容的特性。刷新操作会对电容进行检查，若电量大于满电量的 1/2，

则认为其代表 1，并把电容充满电；若电量小于 1/2，则认为其代表 0，并把电容放电，藉此来保证数据的正确性。

**SDRAM**：根据 DRAM 的通讯方式，又分为同步（SDRAM，Synchronous DRAM）和异步两种，这两种方式根据通讯时是否需要使用时钟信号来区分。图 22-3 是一种利用时钟进行同步的通讯时序，它在时钟的上升沿表示有效数据。由于使用时钟同步的通讯速度更快，所以同步 DRAM 使用更为广泛，这种 DRAM 被称为 SDRAM(Synchronous DRAM)。

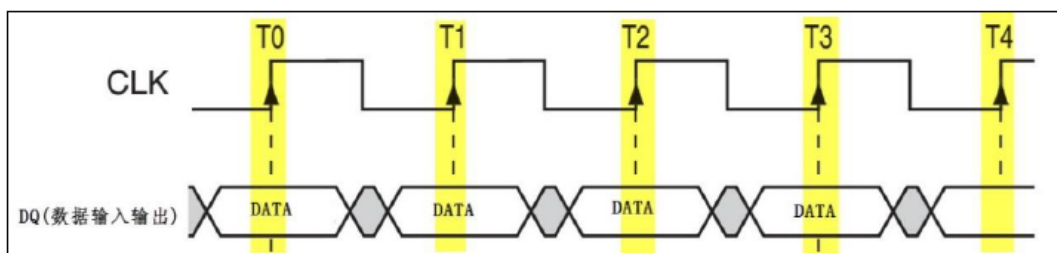


图 22-3 同步通讯时序图

**DDR SDRAM**：为了进一步提高 SDRAM 的通讯速度，人们设计了 DDR SDRAM 存储器 (Double Data Rate SDRAM)。它的存储特性与 SDRAM 没有区别，但 SDRAM 只在上升沿表示有效数据，在 1 个时钟周期内，只能表示 1 个有数据；而 DDR SDRAM 在时钟的上升沿及下降沿各表示一个数据，也就是说在 1 个时钟周期内可以表示 2 数据，在时钟频率同样的情况下，提高了一倍的速度。至于 DDRII 和 DDRIII，它们的通讯方式并没有区别，主要是通讯同步时钟的频率提高了。

- 静态随机存储器 SRAM

静态随机存储器 SRAM 的存储单元以锁存器来存储数据，见图 22-4。这种电路结构不需要定时刷新充电，就能保持状态(当然，如果断电了，数据还是会丢失的)，所以这种存储器被称为“静态(Static)”RAM。同样地，SRAM 根据其通讯方式也分为同步(SSRAM)和异步 SRAM，相对来说，异步 SDRAM 用得较多。

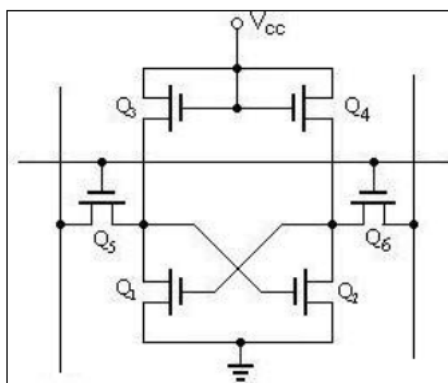


图 22-4 SRAM 存储单元

## ② 非易失性存储器

非易失性存储器种类非常多，半导体类的有 ROM 和 FLASH，而其它的则包括光盘、软盘及机械硬盘。

- ROM 存储器

ROM 是“Read Only Memory”的缩写，意为只能读的存储器。由于技术的发展，后来设计出了可以方便写入数据的 ROM，而这个“Read Only Memory”的名称被沿用下来了，现在一般用于指代非易失性半导体存储器，包括后面介绍的 FLASH 存储器，有些人也把它归到 ROM 类里边。

**MASK ROM:** MASK(掩膜) ROM 就是正宗的“Read Only Memory”，存储在它内部的数据是在出厂时使用特殊工艺固化的，生产后就不可修改，其主要优势是大批量生产时成本低。当前在生产量大，数据不需要修改的场合还有应用。

**OTPROM:** OTPROM(One Time Programmable ROM)是一次可编程存储器。这种存储器出厂时内部并没有资料，用户可以使用专用的编程器将自己的资料写入，但只能写入一次，被写入过后，它的内容也不可再修改。在 NXP 公司生产的控制器芯片中常使用 OTPROM 来存储密钥；STM32F407 系列的芯片内部也包含有一部分的 OTPROM 空间。

**EPROM:** EPROM(Erasable Programmable ROM)是可重复擦写的存储器，它解决了 PROM 芯片只能写入一次的问题。这种存储器使用紫外线照射芯片内部擦除数据，擦除和写入都要专用的设备。现在这种存储器基本淘汰，被 EEPROM 取代。

**EEPROM:** EEPROM(Electrically Erasable Programmable ROM)是电可擦除存储器。EEPROM 可以重复擦写，它的擦除和写入都是直接使用电路控制，不需要再使用外部设备来擦写。而且可以按字节为单位修改数据，无需整个芯片擦除。现在主要使用的 ROM 芯片都是 EEPROM。

- FLASH 存储器

FLASH 存储器又称为闪存，它也是可重复擦写的存储器，部分书籍会把 FLASH 存储器称为 FLASH ROM，但它的容量一般比 EEPROM 大得多，且在擦除时，一般以多个字节为单位。如有的 FLASH 存储器以 4096 个字节为扇区，最小的擦除单位为一个扇区。根据存储单元电路的不同，FLASH 存储器又分为 NOR FLASH 和 NAND FLASH，见表 22-2。

表 22-2 NOR FLASH 与 NAND FLASH 特性对比

特性	NOR FLASH	NAND FLASH
同容量存储器成本	较贵	较便宜
集成度	较低	较高
介质类型	随机存储	连续存储
地址线和数据线	独立分开	共用
擦除单元	以“扇区/块”擦除	以“扇区/块”擦除
读写单元	可以基于字节读写	必须以“块”为单位读写
读取速度	较高	较低
写入速度	较低	较高
坏块	较少	较多
是否支持 XIP	支持	不支持

NOR 与 NAND 的共性是在数据写入前都需要有擦除操作，而擦除操作一般是以“扇区/块”为单位的。而 NOR 与 NAND 特性的差别，主要是由于其内部“地址/数据线”是否分开导致的。

由于 NOR 的地址线和数据线分开，它可以按“字节”读写数据，符合 CPU 的指令译码执行要求，所以假如 NOR 上存储了代码指令，CPU 给 NOR 一个地址，NOR 就能向 CPU 返回一个数据让 CPU 执行，中间不需要额外的处理操作。而由于 NAND 的数据和地址线共用，只能按“块”来读写数据，假如 NAND 上存储了代码指令，CPU 给 NAND 地址后，它无法直接返回该地址的数据，所以不符合指令译码要求。表 22-2 中的最后一项“是否支持 XIP”描述的就是这种立即执行的特性(eXecute In Place)。

若代码存储在 NAND 上，可以把它先加载到 RAM 存储器上，再由 CPU 执行。所以在功能上可以认为 NOR 是一种断电后数据不丢失的 RAM，但它的擦除单位与 RAM 有区别，且读写速度比 RAM 要慢得多。

另外，FLASH 的擦除次数都是有限的(现在普遍是 10 万次左右)，当它的使用接近寿命的时候，可能会出现写操作失败。由于 NAND 通常是整块擦写，块内有一位失效整个块就会失效，这被称为坏块，而且由于擦写过程复杂，从整体来说 NOR 块块更少，寿命更长。由于可能存在坏块，所以 FLASH 存储器需要“探测/错误更正(EDC/ECC)”算法来确保数据的正确性。

由于两种 FLASH 存储器特性的差异，NOR FLASH 一般应用在代码存储的场合，如嵌入式控制器内部的程序存储空间。而 NAND FLASH 一般应用在大数据量存储的场合，包括 SD 卡、U 盘以及固态硬盘等，都是 NAND FLASH 类型的。

## 6.2 寄存器 (Register)

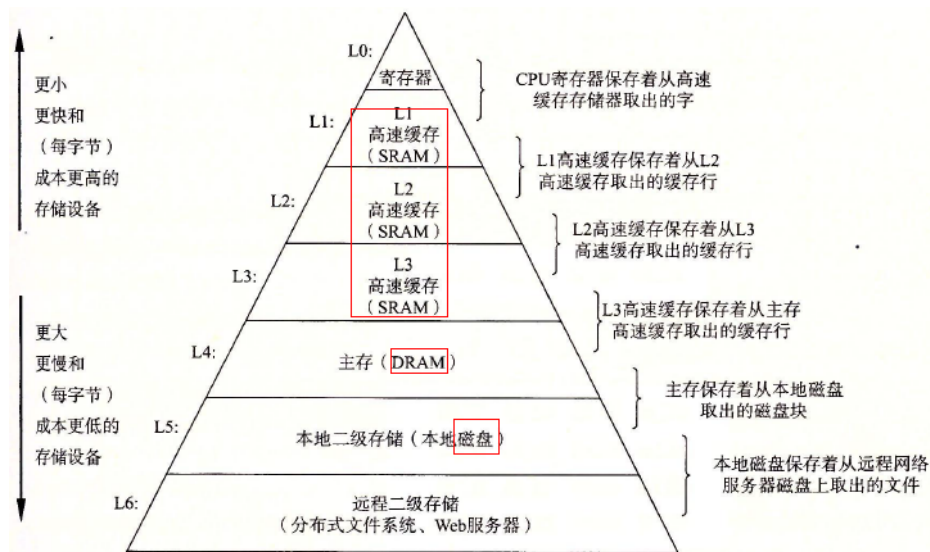
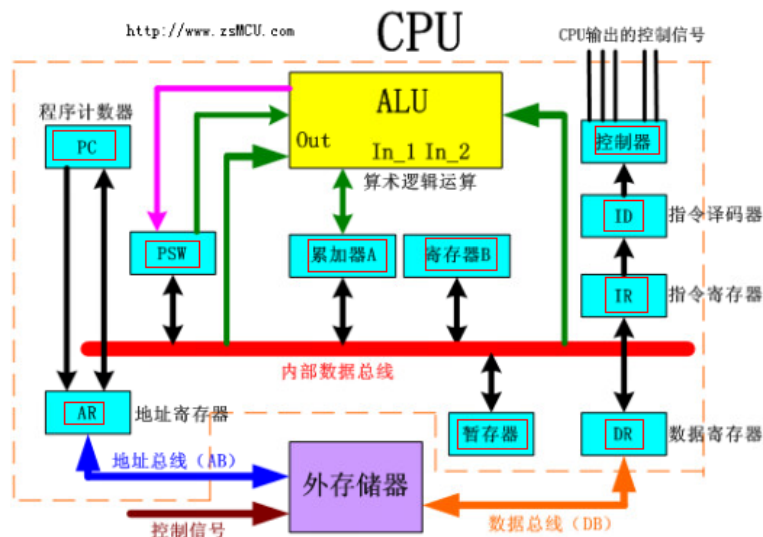


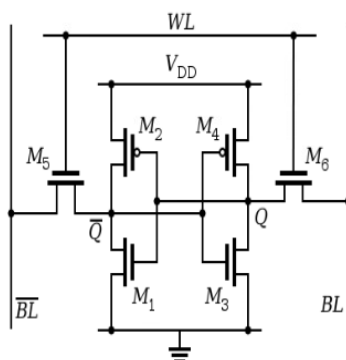
图 6-21 存储器层次结构

寄存器是存储器中存取最快的部分。寄存器是 CPU 的内部组成单元，是 CPU 运算时取指令和数据最快的地方。它可以用来暂存指令、数据和地址。在 CPU 的控制部件中，包含的寄存器有指令寄存器 (IR) 和程序计数器 (PC)。CPU 的算术逻辑部件中，包含的寄存器有累加器 (ACC)。下图中蓝色小框里面，全是寄存器。



### 6.3 高速缓存 (Cache) 与主存

高速缓存和主存都是 RAM (Random-Access Memory, 随机访问存储器), 它分为静态的 (SRAM) 和动态的 (DRAM), 分别对应高速缓存和主存。SRAM 只要存储器保持通电, 里面储存的数据就可以保持不变。我们也把它叫做双稳定态, 即使有干扰, 当干扰消除的时候, 电路就会恢复稳定值。它的每个单元都是由六个晶体管电路来实现。如下图。



DRAM 每个单元是由一个电容和一个访问晶体管组成的, 每一位存储就是对一个电容充电。利用电容内部存储电荷的多少来代表这一位是 0 还是 1。但是由于电容有漏电的现象, 当有干扰存在时, 可能会导致电压被扰乱, 从而使数据丢失。所以它需要周期性的充电。由于多种原因导致的漏电, DRAM 单元会在 10 ~ 100 毫秒时间内失去电荷。例如由于电容暴露在阳光下会导致电压的改变, 利用这一特性, 数码相机和摄像机的传感器本质就是 DRAM 的单元阵列。下表是 SRAM 和 DRAM 的对比。

	每位晶体管数	相对访问时间	持续的?	敏感的?	相对花费	应用
SRAM	6	1×	是	否	1000×	高速缓存存储器
DRAM	1	10×	否	是	1×	主存, 帧缓冲区



## 6.4 ROM (read flash memory)

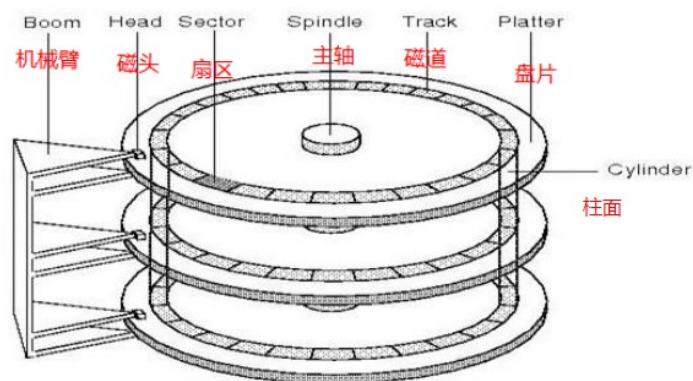
ROM(Read Only Memory, 只读存储器)有的类型是可以读也可以写,但是由于历史原因,统称为只读存储器。它存放的数据非常稳定,断电后所存的数据也不会改变,它的结构相对较简单,读出方便,因而常用于存储各种固定程序与数据。存放在 ROM 设备中的程序通常称为固件(firmware)。比如我们计算机的 BIOS,就是存放在 ROM 中的。

PROM(Programmable ROM, 可编程 ROM)只能被编程一次。PROM 的每个存储器单元有一种熔丝,它只能用高电流熔断一次。

EPROM(Erasable Programmable ROM, 可擦写可编程 ROM)有一个透明的石英窗口,允许光到达存储单元。紫外线光通过窗口照射进来,EPROM 单元就被清楚为 0。EEPROM(Electrically Erasable ROM, 电子可擦写 ROM)类似于 EPROM,但是它不需要一个物理上独立的编程设备,因此可以直接在印制电路卡上编程。

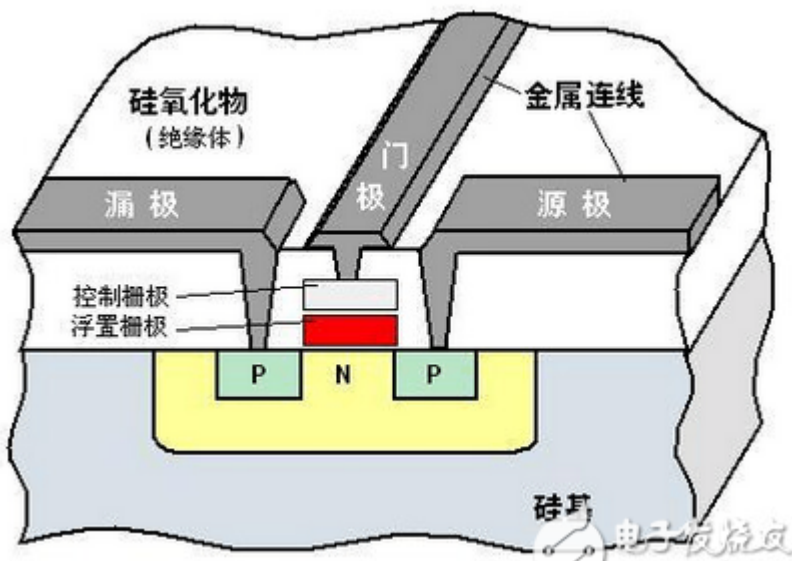
## 6.5 磁盘 (Disk)

磁盘包括硬盘和软盘,这里我们以硬盘为例,硬盘是我们最长接触到的存储器之一。它是由盘片、磁头、盘片主轴、控制电机、磁头控制器、数据转换器、接口、缓存等部分组成的。



## 6.6 闪存 (flash) 和固态硬盘 (SSD)

闪存(flash memory)是一类非易失性存储器,基于 EEPROM,可以对块的存储器单元进行擦写和再编程。任何闪存器件的写入操作只能在空或已擦除的单元内进行,所以在大多数情况下,在进行写操作实现必须先执行擦除。闪存的存储单元为三端器件,与场效应管有相同的名称:源极、漏极和栅极。如下图。



Flash 我们分为 NOR 和 NAND，这两者的区别是什么呢？NAND 型闪存的擦和写均是基于隧道效应，电流穿过浮置栅极与硅基层之间的绝缘层，对浮置栅极进行充电(写数据)或放电(擦除数据)。而 NOR 型闪存擦除数据仍是基于隧道效应(电流从浮置栅极到硅基层)，但在写入数据时则是采用热电子注入方式(电流从浮置栅极到源极)。NOR 的读速度比 NAND 稍快一些。NAND 的写入速度比 NOR 快很多。由于 NAND 的擦除单元更小，相应的擦除电路更少。而大多数写入操作需要先进行擦除操作。所以 NAND 的 4ms 擦除速度远比 NOR 的 5s 快得多。

固态硬盘(Solid State Disk, SSD)是一种基于闪存的存储技术(参见 6.1.1 节)，在某些情况下是传统旋转磁盘的极有吸引力的替代产品。图 6-13 展示了它的基本思想。SSD 封装插到 I/O 总线上标准硬盘插槽(通常是 USB 或 SATA)中，行为就和其他硬盘一样，处理来自 CPU 的读写逻辑磁盘块请求。一个 SSD 封装由一个或多个闪存芯片和闪存翻译层(flash translation layer)组成，闪存芯片替代传统旋转磁盘中的机械驱动器，而闪存翻译层是一个硬件/固件设备，扮演与磁盘控制器相同的角色，将对逻辑块请求翻译成对底层物理设备的访问。

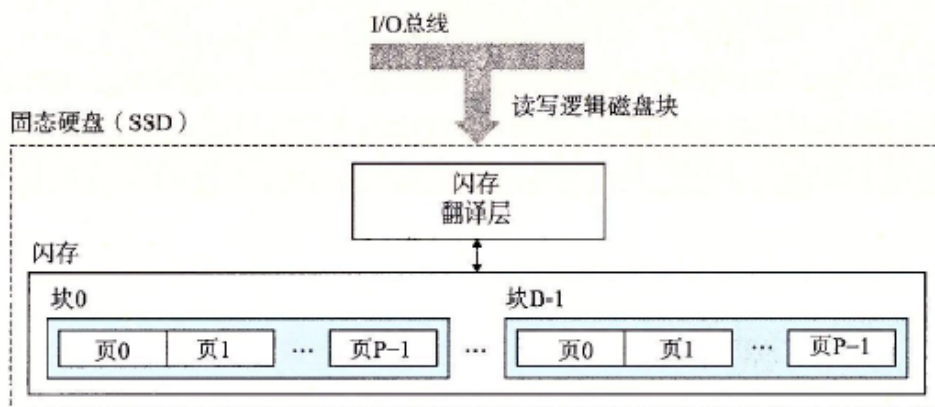


图 6-13 固态硬盘(SSD)