



清华大学
Tsinghua University

第三单元 层次存储器系统

第五讲 磁表面存储设备

刘卫东

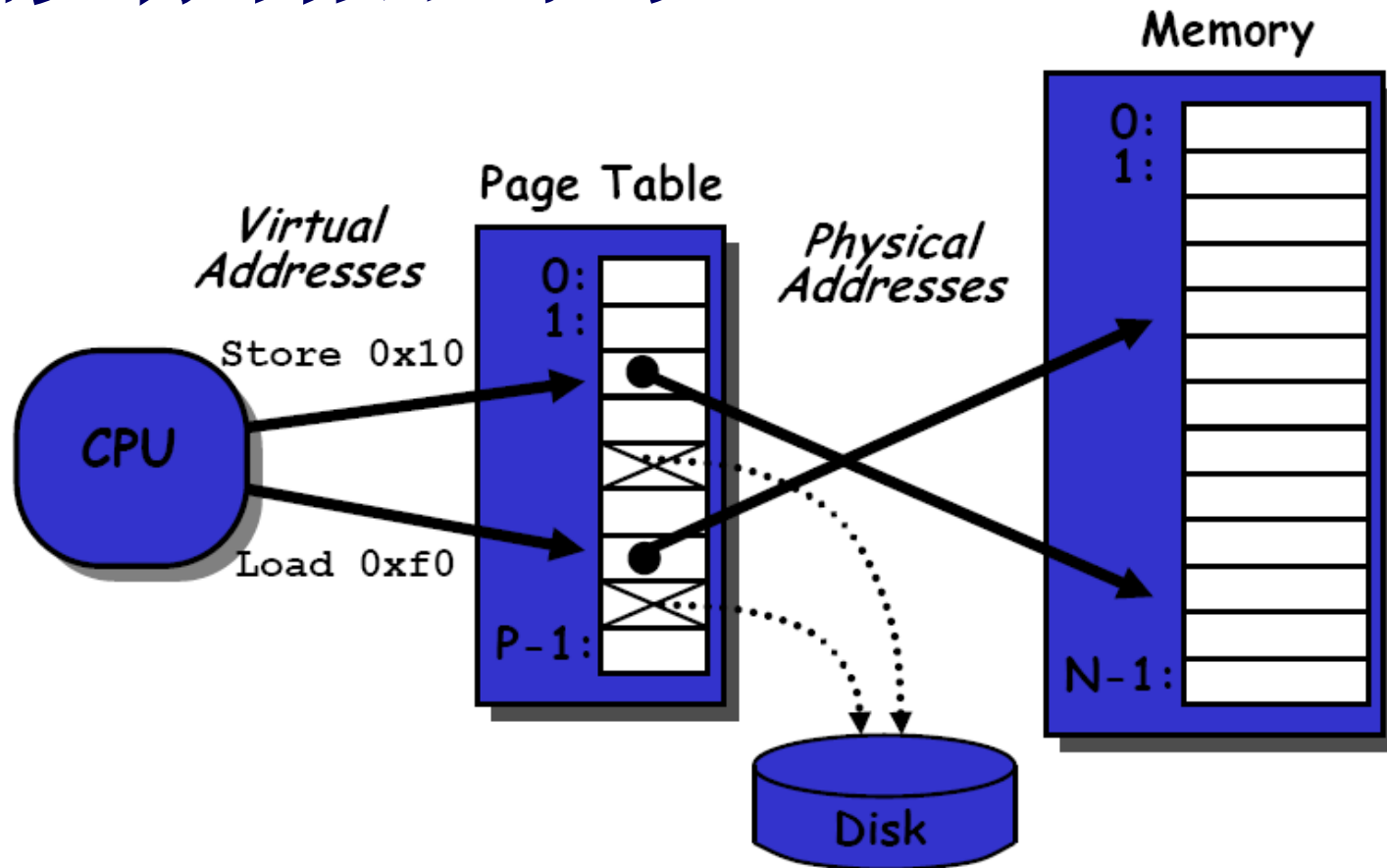
计算机科学与技术系

内容提要



- 磁表面存储原理简介
- 磁记录方式
- 磁盘访问过程
- RAID技术

虚拟存储器系统



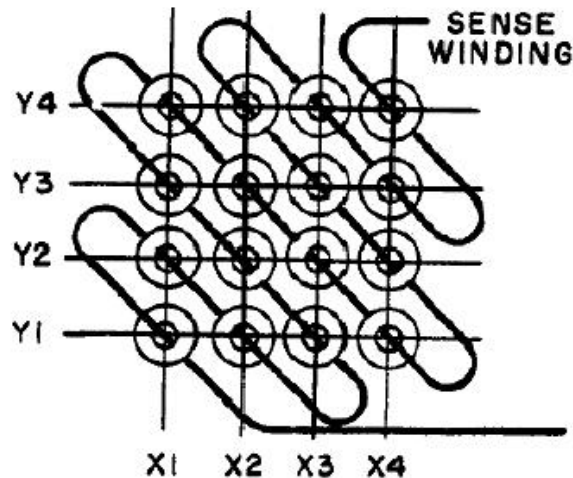
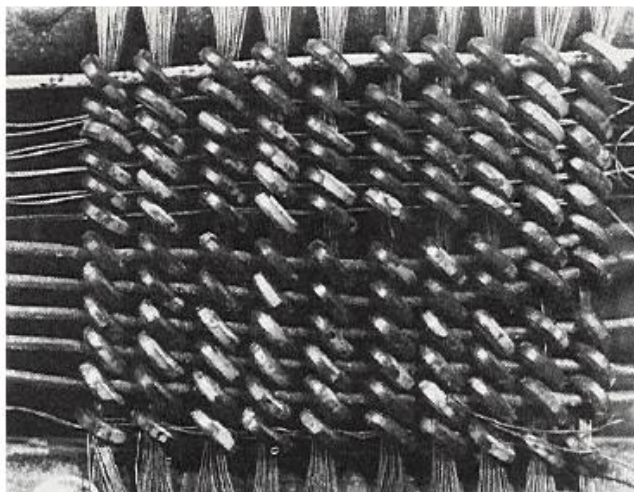
对存储介质的要求：

- 大容量、低成本、可靠性
- 非电易失性

磁芯存储器



- 圆柱型陶瓷上涂磁粉
- 手工穿线，水手结
- 消磁后重写
- 存储原理简单
- 工艺复杂
- 可靠性低
- 大存储容量
- 成本低廉
- 断电后保存数据



磁表面存储设备



- ❖ 磁颗粒的不同偏转方向来区分不同的状态
- ❖ 主存中存放CPU要立即访问的程序和数据
- ❖ 辅助存储器中存放CPU不立即使用的信息，在需要时再调入主存中
 - ❖ 一般为磁盘、光盘等
 - ❖ 容量大、成本低、断电后还可以保存信息，能脱机保存信息，弥补了主存的不足
 - ❖ 串行访问、数据交换频率低、数据交换量大

随机访问和串行访问



❖ 随机访问

- ❑ 随机访问任何单元，访问时间与信息存放位置无关
- ❑ 每一位都有各自的读写设备

❖ 串行访问

- ❑ 顺序地一位一位地进行，访问时间与存储位的物理位置有关
- ❑ 共用一个读写设备
- ❑ 顺序访问和直接访问

主要指标



❖ 存储密度

- ❖ 单位长度（磁带）或单位面积（磁盘）磁层表面所存储的
二进制信息量

❖ 存储容量

- ❖ 磁表面存储器所能存储的二进制信息的总量，以字节为
单位

❖ 寻址时间

❖ 数据传输率

❖ 误码率

❖ 价格

磁表面存储设备



✚ 如何保存?

- ✚ 磁颗粒的不同磁化偏转方向

✚ 如何表示?

- ✚ 磁记录方式

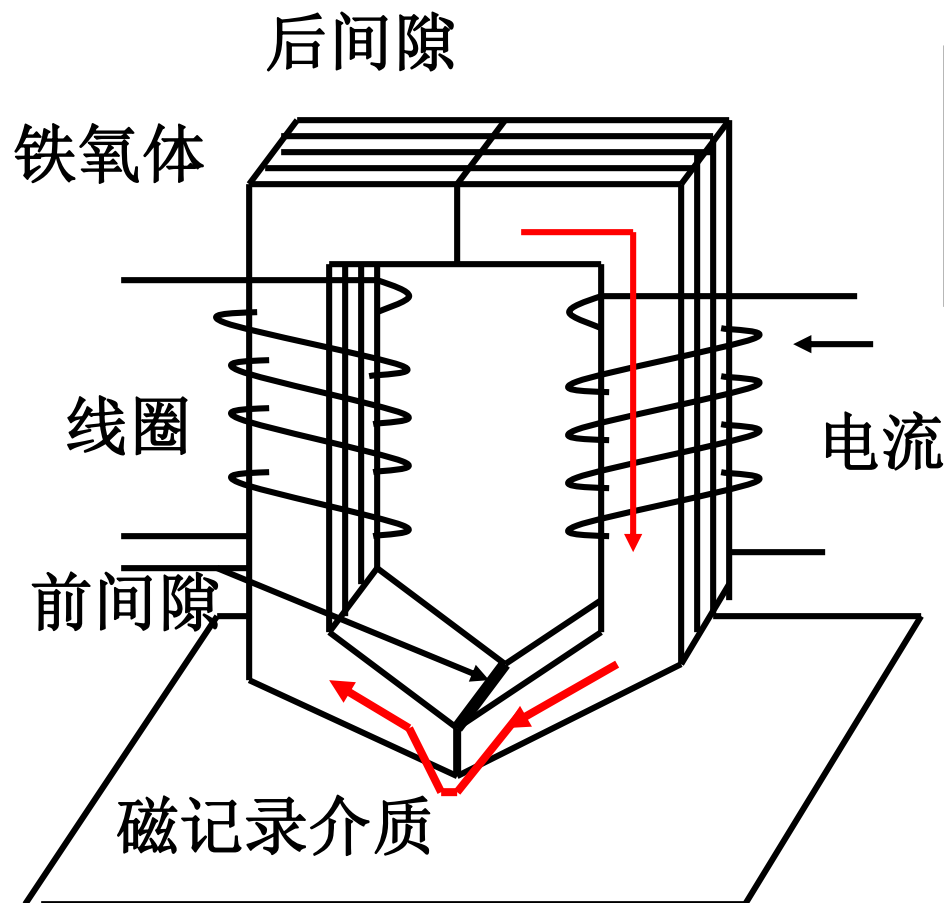
✚ 如何组织?

- ✚ 扇区、磁道、柱面、硬盘

✚ 如何管理?

- ✚ 操作系统的文件系统

磁记录原理



磁头，软磁材料
导磁率高，饱和磁感应强度大
矫顽力小，剩余磁感应强度小

磁记录材料，硬磁材料
记录密度高，记录信息时间长
输出信号幅度大，噪声低
表面组织紧密、光滑、无麻点
薄厚均匀，温度、湿度影响小

磁头结构和电磁转换示意图

磁记录方式

指一种编码方法，即如何将一串二进制信息，通过读写电路变换成磁层介质中的磁化翻转序列。

评价标准

编码效率

表示一个二进制位数据需要使用多少个磁颗粒？

自同步能力

读写时准确定位二进制数据位的能力

读写可靠性



磁记录方式

❖ 归零制 (RZ)

- ❖ 线圈中正脉冲为“1”，负脉冲表示“0”，两位信息位之间线圈中电流为零。

❖ 不归零制 (NRZ)

- ❖ 线圈中一直有正或负脉冲（包括两位信息位之间）。

❖ 见1翻转的不归零制 (NRZ1)

- ❖ 只有见到“1”才改变电流的方向



磁记录方式

⊕ 调相制 (PM)

- ⊞ 用脉冲的边沿来表示“0”和“1”

⊕ 调频制 (FM)

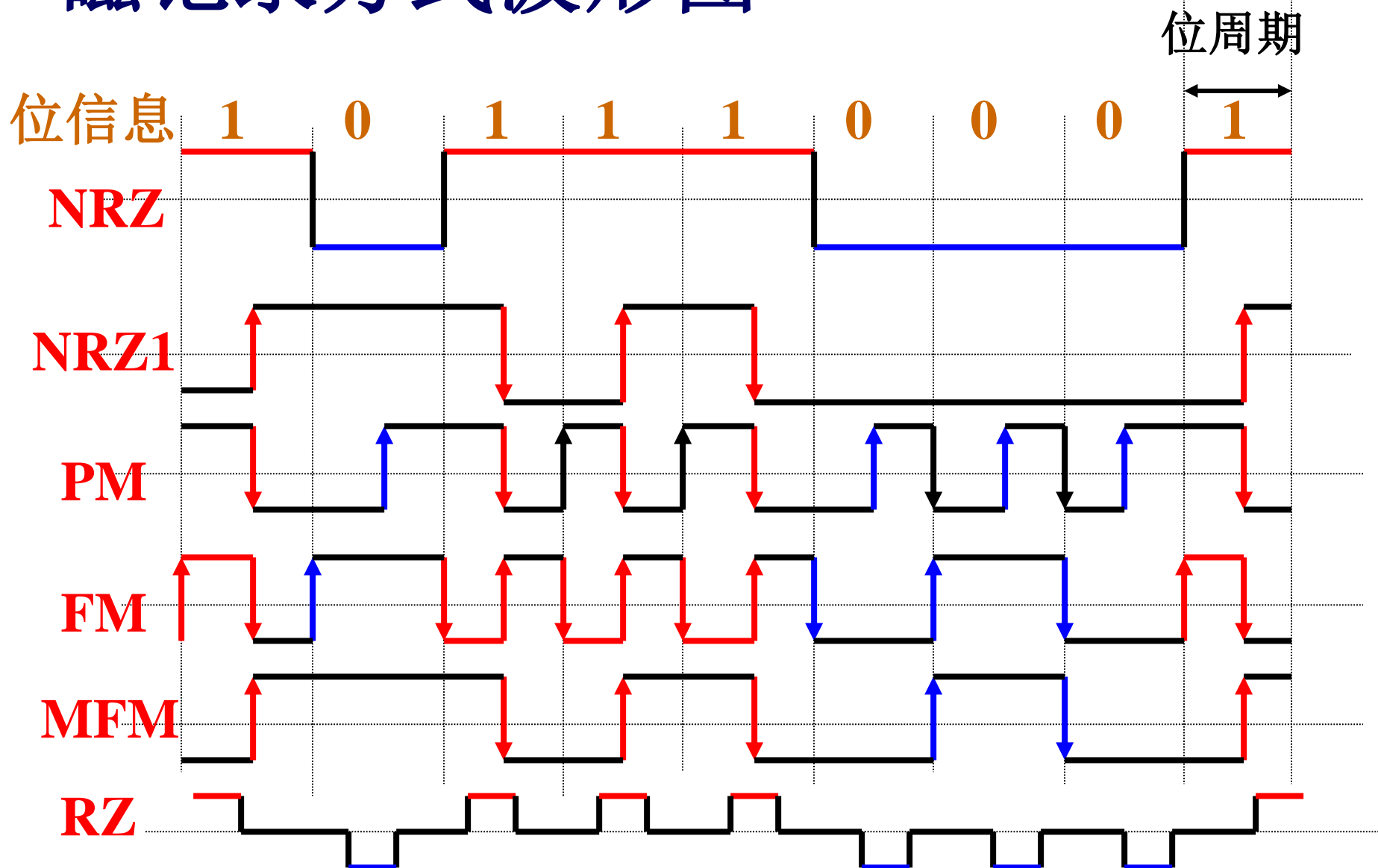
- ⊞ “1”：位周期中心和位与位之间都翻转
- ⊞ “0”：位周期中心不翻转，位与位之间翻转

⊕ 改进的调频制 (MFMM)

- ⊞ 只有连续两个或以上的“0”时，才在位周期的起始位置翻转



磁记录方式波形图





磁盘

目的

- ❑ 长期存储、断电后存储
- ❑ 容量大、价格低廉，但速度慢
- ❑ 可用在层次存储器的最底层

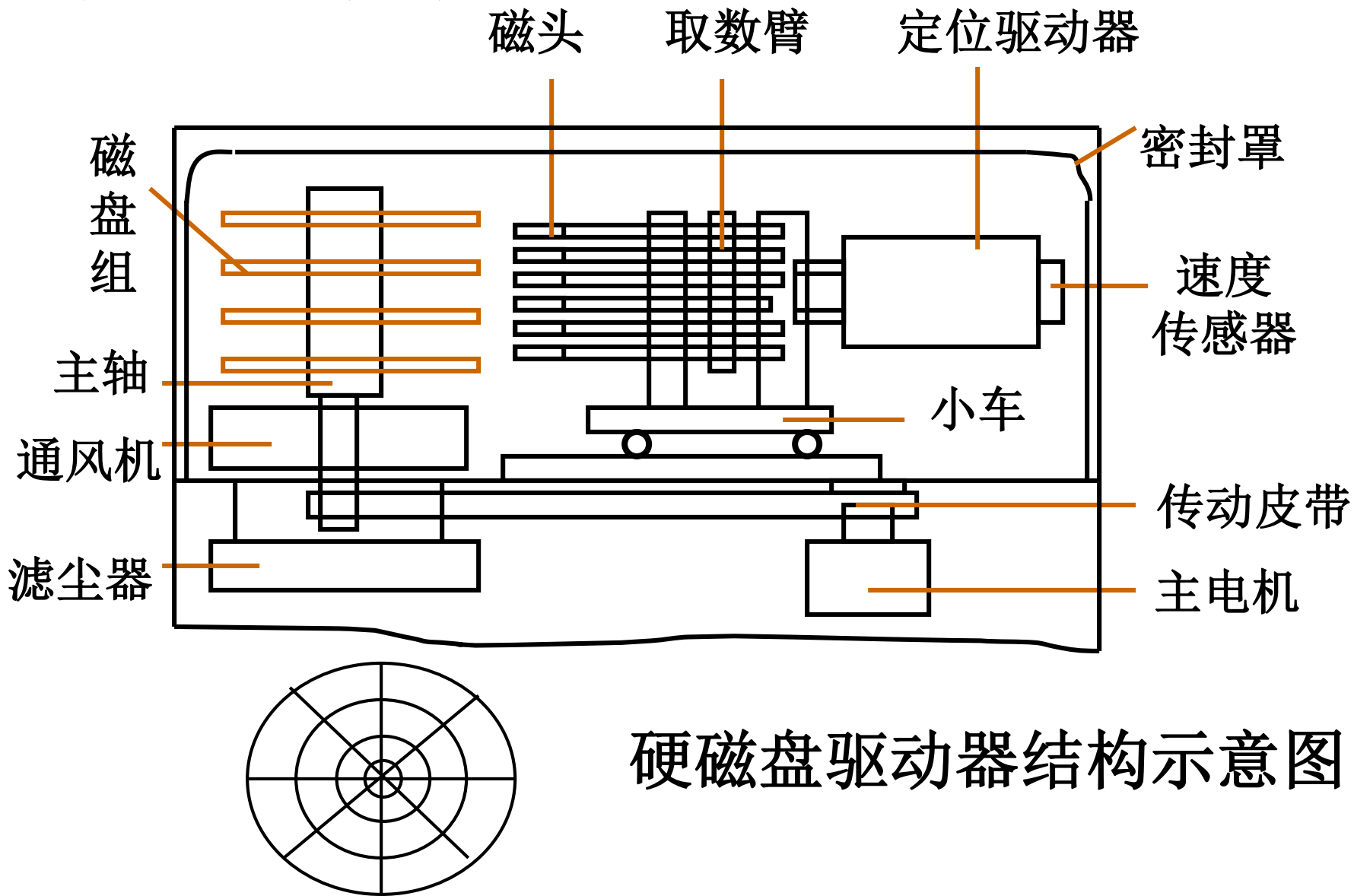
特点

- ❑ 使用旋转托盘上的表面磁颗粒来存储数据
- ❑ 可移动的读/写头来访问磁盘

硬盘、软盘比较

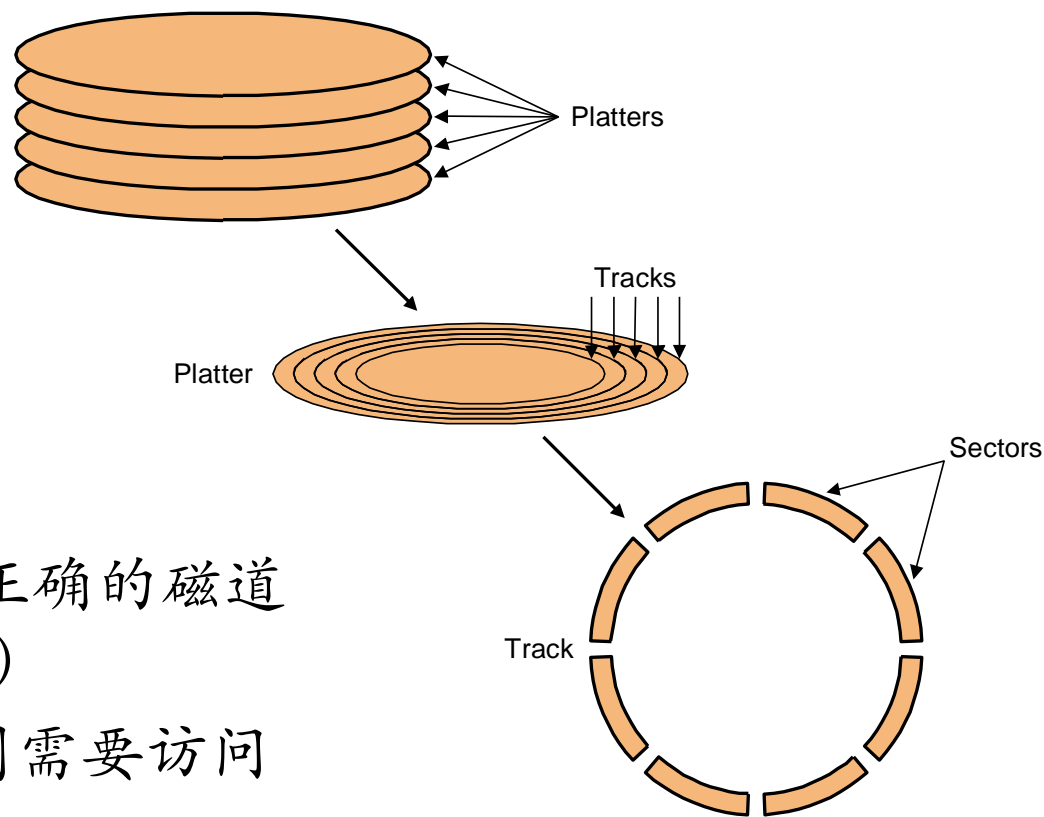
- ❑ 硬质托盘（金属铝），面积可以比较大；
- ❑ 由于可被精确控制，密度可以更高
- ❑ 旋转速度快，传输率高
- ❑ 可以多个盘片组合

硬磁盘设备



硬磁盘驱动器结构示意图

硬盘内部结构



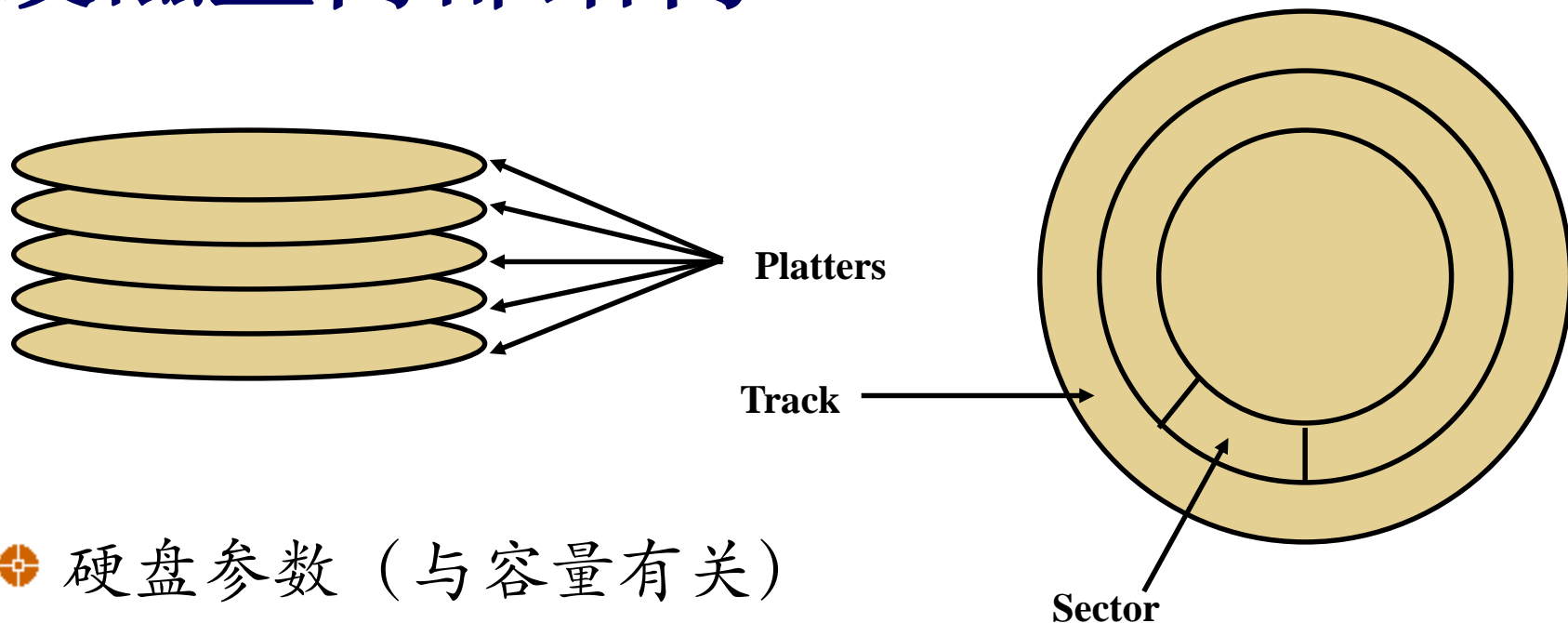
磁盘访问过程:

寻道: 将读写磁头 移动到正确的磁道上 (平均需要8 to 20 ms)

寻找扇区: 等待磁盘旋转到需要访问的扇区 ($.5 / \text{RPM}$)

数据传输: 读写数据 (1个或多个扇区) (2 to 15 MB/sec)

硬盘内部结构



✿ 硬盘参数（与容量有关）

- ✚ 500 至 2,000 磁道（每面）

- ✚ 32 至 128 个扇区（每个磁道）

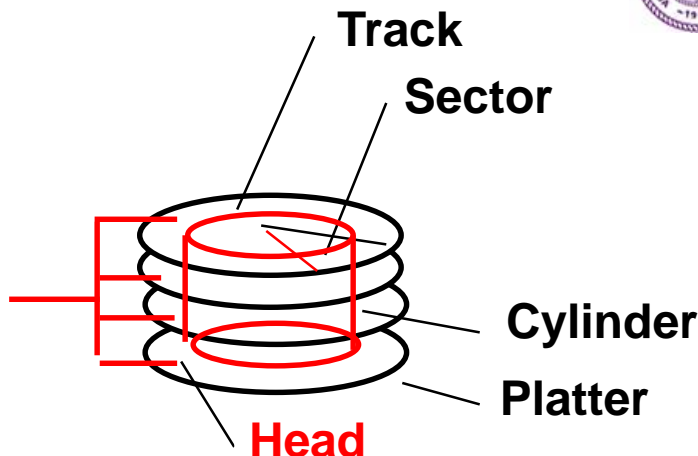
- ◆ 扇区是磁盘访问的最小单位

✿ 早期硬盘上每个磁道上的扇区数是一样的

✿ 增加容量

- ✚ 位密度不变：外磁道比内磁道扇区数多一些

硬盘参数



- ❁ 柱面： 位于同一半径的磁道集合
- ❁ 读/写数据的三个步骤：
 - ❑ 寻道时间： 将磁头移动到正确的磁道上
 - ❑ 旋转延迟： 等待磁盘上扇区旋转到磁头下
 - ❑ 传输时间： 真正的数据读/写时间
- ❁ 当前平均寻道时间：
 - ❑ 一般为 8 至 12 ms

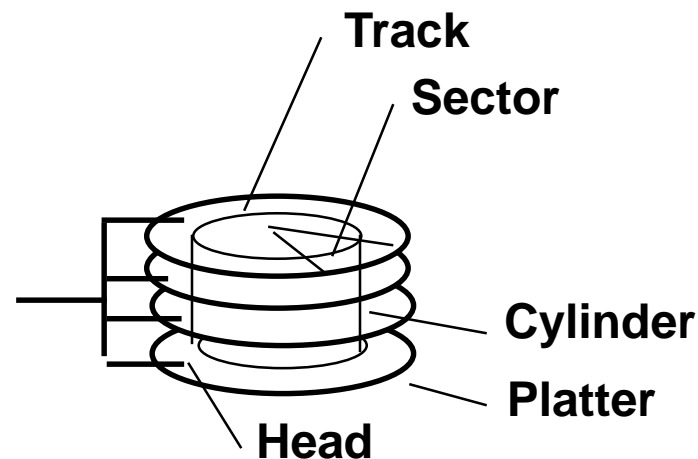
硬盘参数

✚ 旋转延迟:

- ✚ 旋转速度: 3600至7200 RPM
- ✚ 旋转时间: 16 ms至8 ms每转
- ✚ 平均寻址时间8ms至4ms

✚ 访问速度:

- ✚ 数据量 (通常为1个扇区) : 1 KB / sector
- ✚ 旋转速度: 3600 RPM至7200 RPM
- ✚ 存储密度: 磁道上单位长度存储的位数
- ✚ 磁盘直径: 2.5至 5.25 in
- ✚ 一般为: 2 至12 MB每秒





硬盘访问时间

❊ 磁盘访问时间 = 寻道时间 + 旋转延迟 + 传输时间 + 磁盘控制器延迟

❊ 举例：

- ❖ 平均寻道时间 = 12ms;
- ❖ 旋转速度 = 5400rpm
- ❖ 磁盘控制器延迟： 2ms
- ❖ 传输速度 = 5MB
- ❖ 扇区大小 = 512 bytes
- ❖ 读取一页（8KB）需要多少时间？

❊ 旋转延迟： 平均旋转延迟应为磁盘旋转半周的时间。

❊ 旋转1周 = 1/5400 minutes

❖ $= 11.1\text{ms} \Rightarrow \frac{1}{2} \text{周} : 5.6\text{ms}$

❊ 读1个扇区时间 = 12ms + 5.6ms + .5K/5MB + 2ms

❖ $= 12 + 5.6 + .1\text{ms} + 2\text{ms}$

❖ $= 19.7\text{ms}$

❊ 读1页的时间=

❖ $= 12\text{ms} + 5.6\text{ms} + 8\text{K}/5\text{MB/s} + 2\text{ms}$

❖ $= 12\text{ms} + 5.6\text{ms} + 1.6\text{ms} + 2\text{ms}$

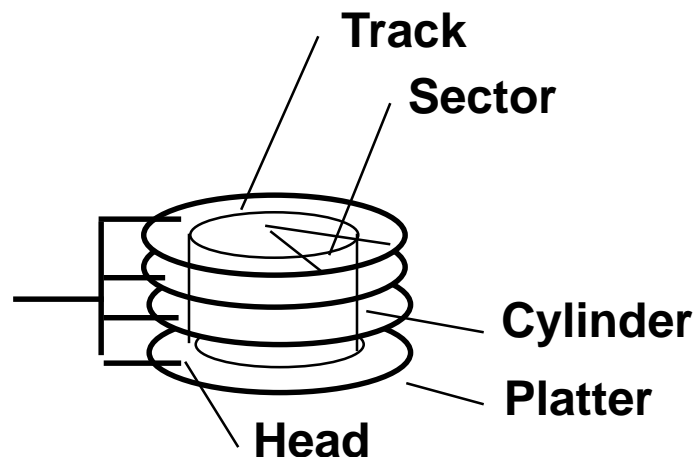
❖ $= 21.2\text{ms}$

对磁盘访问的思考

页容量大，为什么扇区却如此小呢？

- 理由 #1： 可靠性。
可以在扇区物理损坏时不再使用该扇区。
- 理由 #2： 还是可靠性。
检错纠错码分布在每个扇区，扇区容量小，检错速度快，效率高。
- 理由 #3： 灵活性。 支持不同的操作系统，不同的页面大小。

- 采用流水方式和大容量传输方式克服磁盘控制器延迟
- 大容量传输： 每次读取多个扇区，可以节约时间。
- 也可以分担部分总线延迟...
- 并行 #1： 并行读多个层面
- 并行 #2： 并行读多个磁盘



结论



应该记住以下两点：

- 额外开销在总开销中比例较大 \Rightarrow 一次传输大量数据比较有效
- 将页面存放在相邻扇区中可以避免额外的寻道开销



磁盘访问过程

- ❖ 对磁盘的访问总是由缺页引起的：
 - ❖ CPU给出地址，需要访问某存储单元；
 - ❖ 进行TLB查找和cache查找；
 - ❖ TLB查找后声明没有找到；
 - ❖ 停止并行查找，并通知操作系统处理；
 - ❖ 操作系统检查页表，发现该页不在内存中，需要从硬盘调入。应该如何进行呢？
- ❖ 操作系统从主存中选择一页准备换出，为调入的页安排存放空间；
- ❖ 若被换出的页是“脏”页，需要将其写回磁盘存储；
- ❖ 操作系统申请I/O总线；
- ❖ 获得批准后，发送写命令给I/O设备（磁盘）。紧跟着传送需要写回的页的全部数据。
- ❖ I/O控制器发现发给自己的写命令，加入到握手协议，并接受数据。
- ❖ 根据数据要写入的地址，读/写头移动到正确的柱面，同时，将数据接收到缓冲区。
- ❖ 寻道结束后，等待相应的扇区旋转到磁头下面，将数据写入扇区中。
- ❖ 在写入数据间隙，计算校验码并写入扇区中。



磁盘访问过程

- ❖ 下一步，操作系统继续申请总线（如果还保持总线控制权，则不必申请）。
- ❖ 得到授权后，向磁盘发出读命令。
- ❖ 然后，磁盘识别地址，并转换为相应的地址段。
- ❖ 寻道，将读/写头移动到指定位置。
- ❖ 从指定扇区中读取数据，并进行校验。
- ❖ 磁盘申请I/O总线。
- ❖ 得到授权后，将数据通过总线送到内存。



可靠性和可用性

两个经常混用的词汇：

- 可靠性 (reliability)：设备出现故障的几率来衡量。
- 可用性 (availability)：系统能正常运行的几率来衡量。

可用性可以增加硬件冗余来提高：

- 例如：在存储器中增加校验码。

可靠性只能通过下面途径提高：

- 改善使用环境
- 提高各部件的可靠性
- 减少组成部件

◆ 可用性的提高可能带来可靠性的降低

RAID的提出



- ✚ CPU性能在过去的十年中有了极大地提高，几乎是每18个月翻一番。但磁盘的性能却没能跟上。在70年代，小型机磁盘的平均查找时间为50到100毫秒，现在是10毫秒。在许多行业（如汽车或航空业），如果性能的提高能达到这个速度，即20年内提高5到10倍，那就会是头条新闻，但对计算机行业，这却成了一个障碍。因为CPU性能和磁盘性能间的差距这些年来越来越大。

RAID的提出



在提高CPU性能方面，并行处理技术已得到广泛使用。这些年来，许多人意识到，并行I/O也是一个提高磁盘性能的好办法。1988年，Patterson et al.在他的一篇文章中建议用6个特定的磁盘组织来提高磁盘的性能或可靠性，或两方面都同时提高。这个建议很快就被采用，并导致了一种新的I/O设备的诞生，这就是**RAID盘**。Patterson et al.把RAID定义为**廉价磁盘的冗余阵列**（Redundant Array of Inexpensive Disks），但工业界把“I”由“廉价的（Inexpensive）”替换成“独立的（Independent）”。

❖ RAID 定义

- ❖ 廉价磁盘的冗余阵列 (Redundant Arrays of Inexpensive Disks)
- ❖ 用 N 个低价磁盘构成一个统一管理的阵列，以取代特贵单一磁盘

❖ RAID 目标

- ❖ N 个磁盘的
- ❖ $1/N$ 的访问
- ❖ 更高的性价比
- ❖ 采用冗余技术提高存储信息的可用性

RAID0: Data Striping

RAID1: Drive Mirroring

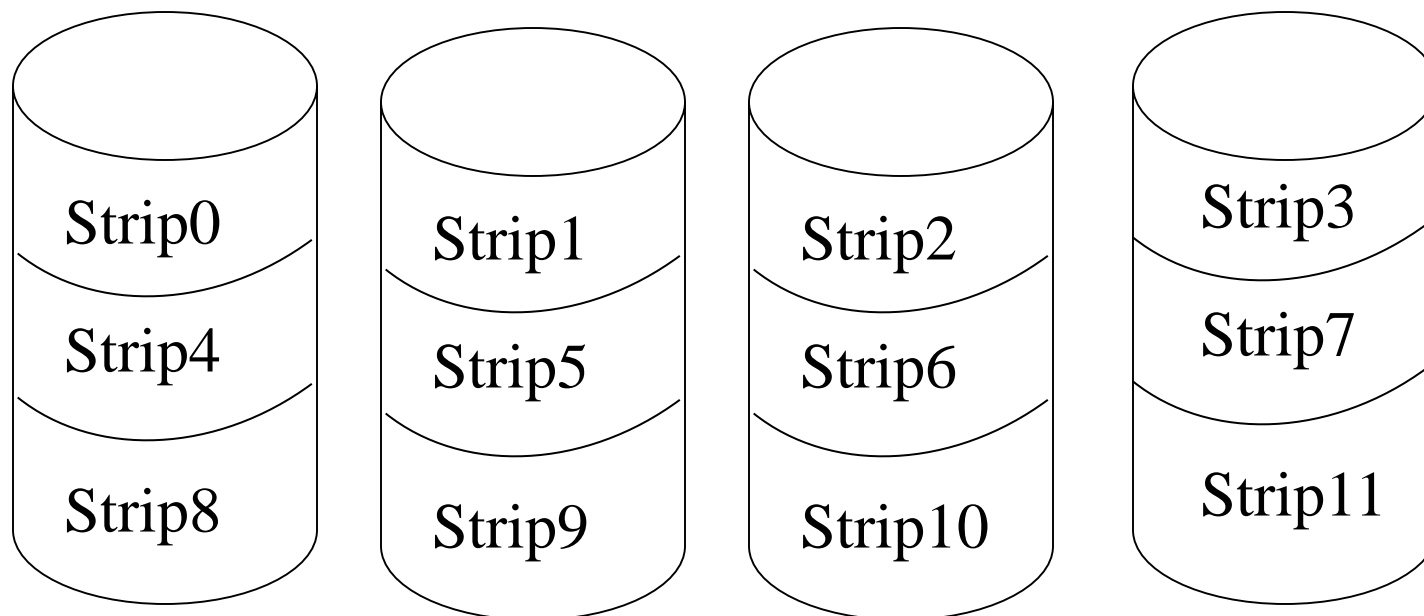
RAID4: Data Guarding

RAID5: Distributed Data Guarding

❁ RAID0将由RAID模拟的单个虚拟磁盘划分成带（strip），每带 k 个扇区。第0带为第0到第 $k - 1$ 扇区，第1带为第 k 扇区到第 $2k - 1$ 扇区，等等。对 $k=1$ ，每个带为1个扇区；对 $k=2$ ，每带有2个扇区；等等。RAID 0以交叉循环的方式将数据写到连续的带中，下图描述的就是有4个磁盘驱动器的RAID盘。这种在多个驱动器上分布数据的方式叫作**条带化**。如果软件发出从带的边界开始读四个连续带的数据块的命令，RAID控制器将把这个命令分解成四个单独的读命令，四个驱动器每个一个，让它们并行执行。这样，就实现了对软件透明的并行I/O操作。



RAID0

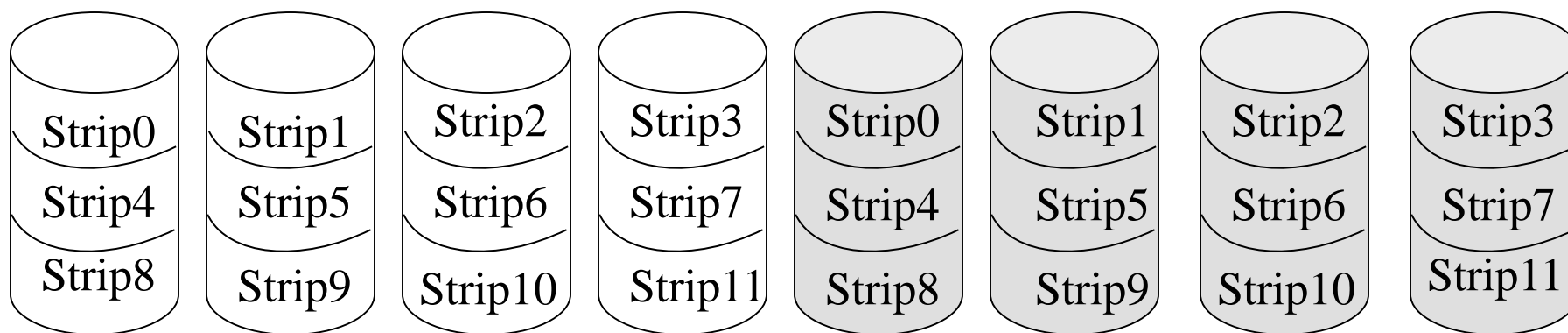


1. 适合数据请求量比较大的情况
2. 没有冗余，可靠性差，不算真正的**RAID**

- ❖ 它复制了所有的磁盘，所以有四块主磁盘和四块辅助磁盘。每个对磁盘的写操作都进行两次，而每次读操作则可以读任意一个备份，把负载均衡分布到不同的驱动器上。这样，写操作的性能并不比单个磁盘好，但读磁盘的性能却比单个磁盘高了两倍。容错性能就更好了，如果一个驱动器崩溃的话，只要简单的用备份驱动器代替就行了。恢复整个磁盘的操作包括两个步骤：装上一个新的驱动器，然后将整个备份驱动器的内容拷贝到新的驱动器上。



RAID1

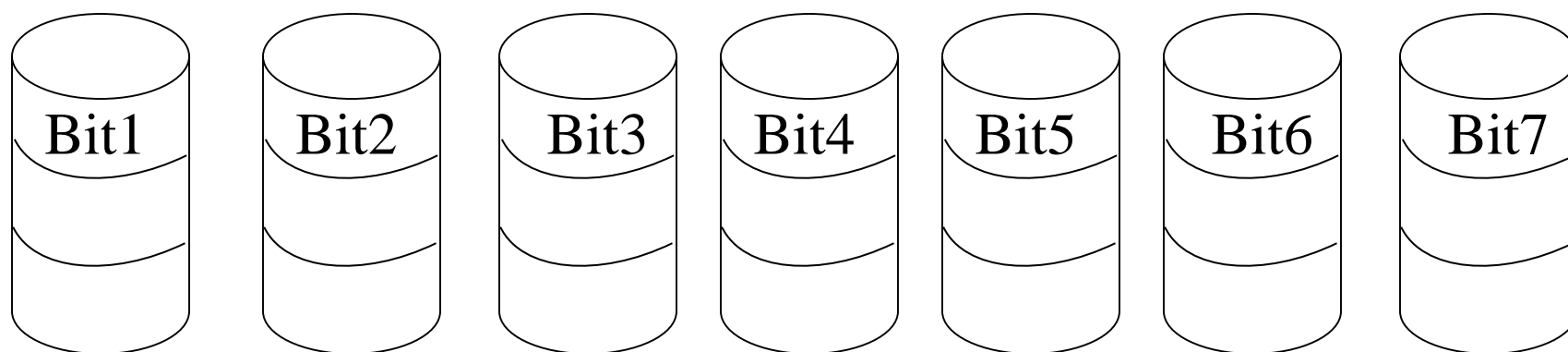


1. 冗余备份，可靠性高
2. 写性能不高，但读性能却提高了两倍
3. 成本较高

- ❁ RAID 2的工作单位为字，可能的话甚至可以是字节。首先我们可以想象将单个虚拟磁盘上的字节分解成一对4位的半字节，对每个半字节加上3位海明码形成7位字，即其中1、2、4位做校验位。然后，用下图所示的七个驱动器的磁头和旋转同步，就可能将整个海明码字写在七个驱动器上，每个驱动器一位。



RAID2



1. 驱动器必须同步旋转
2. 驱动器个数要足够多
3. 需要多个控制器

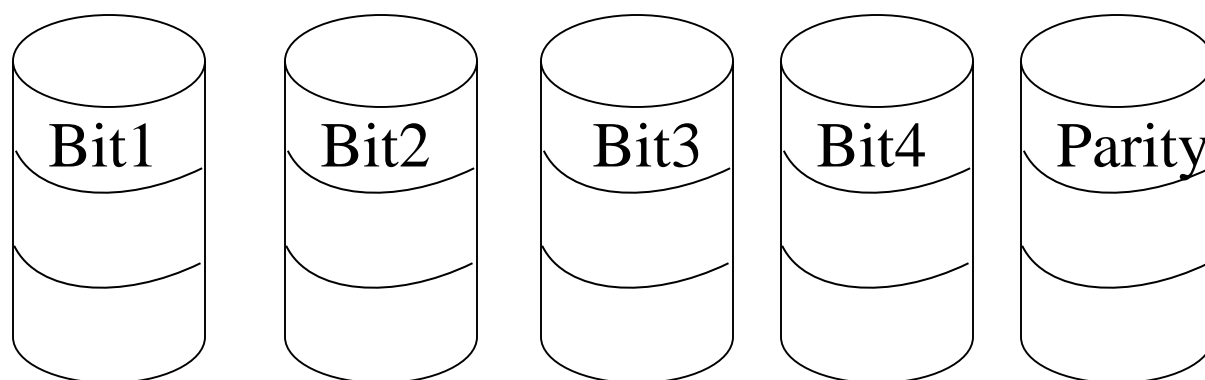
RAID3



- ✿ RAID 3是RAID 2的一个简化版本，它只需对每个字计算一个校验位，写到一个校验驱动器上。和RAID 2相同，驱动器之间必须严格同步，因为一个字被分布到多个驱动器中。



RAID3

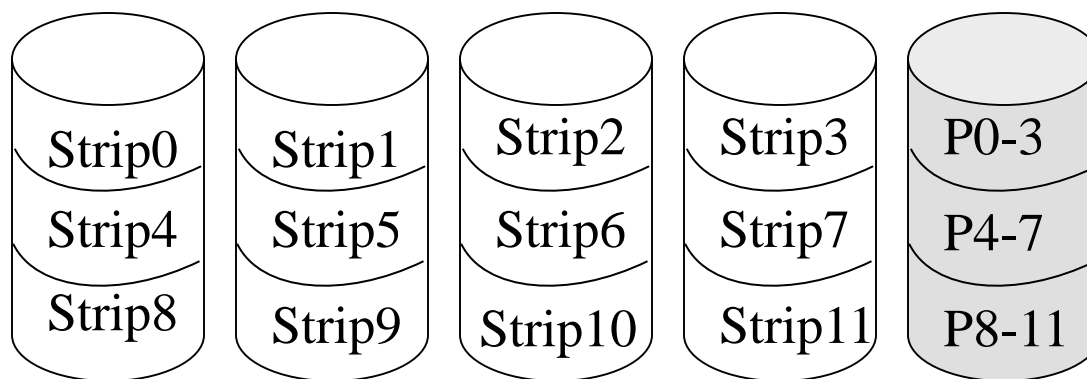


1. 驱动器之间要严格同步
2. 对整个磁盘崩溃的错误，能够进行恢复

- ✚ RAID 4和RAID 0类似，将对带的校验写在额外的驱动器上。例如，若带的长度是 k 个字节，将所有的带异或到一起，产生一个 k 字节长的校验带。如果其中一块磁盘崩溃的话，它的内容可以从校验磁盘上重新计算出来。



RAID4

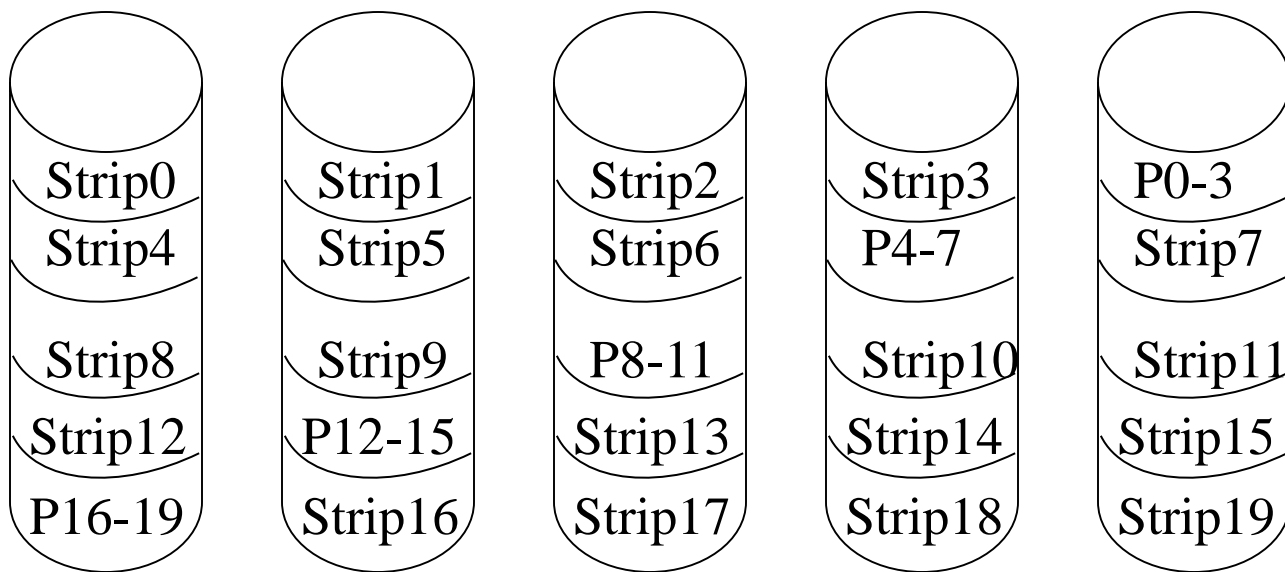


1. 不对字节进行校验，也不需要驱动器同步
2. 可以防止整块盘崩溃，但对盘上部分字节数据出错的纠错性能相当差
3. 校验盘负载沉重

RAID5



- RAID 5为减少校验盘的负载，将校验位循环均匀分布到所有的驱动器上。



如果RAID 5的磁盘崩溃的话，修复磁盘内容的将是一个复杂的过程。

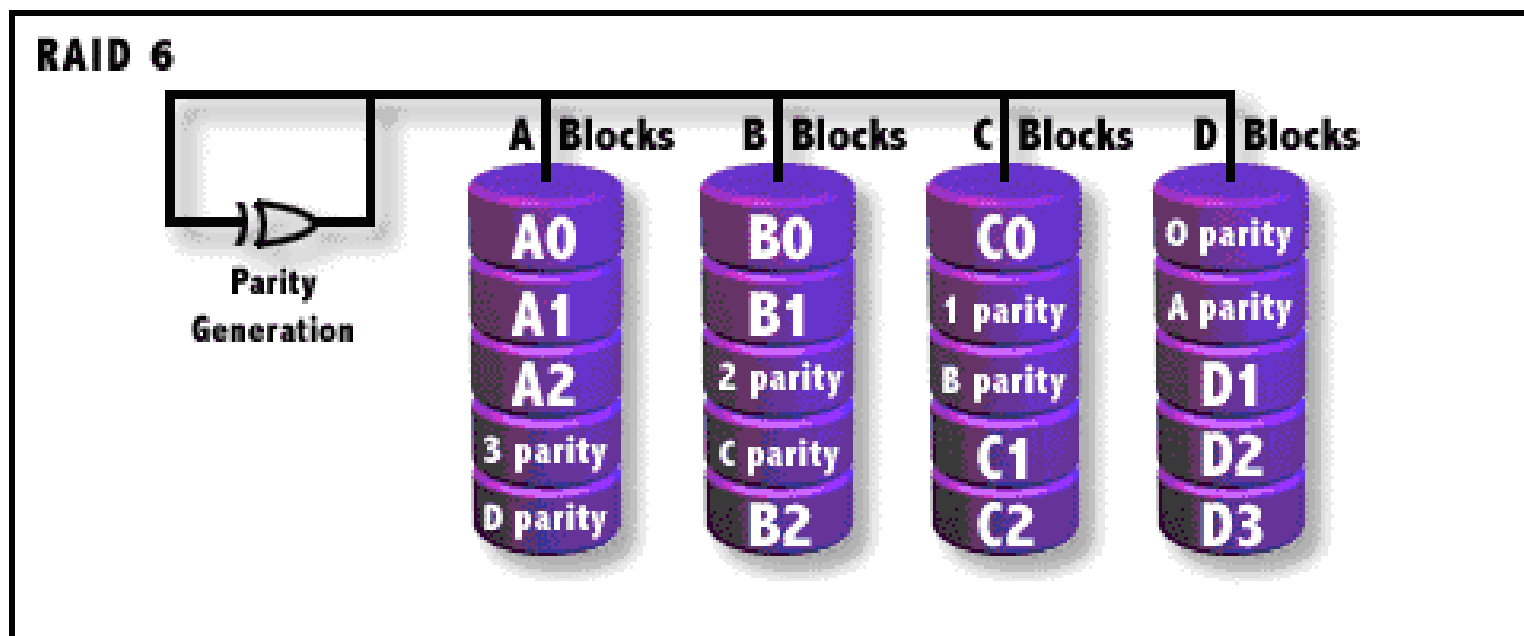
RAID6



❊ 如果两个磁盘出错呢？

❊ Independent Data disks with two independent distributed parity schemes

❊ 二维校验



RAID7

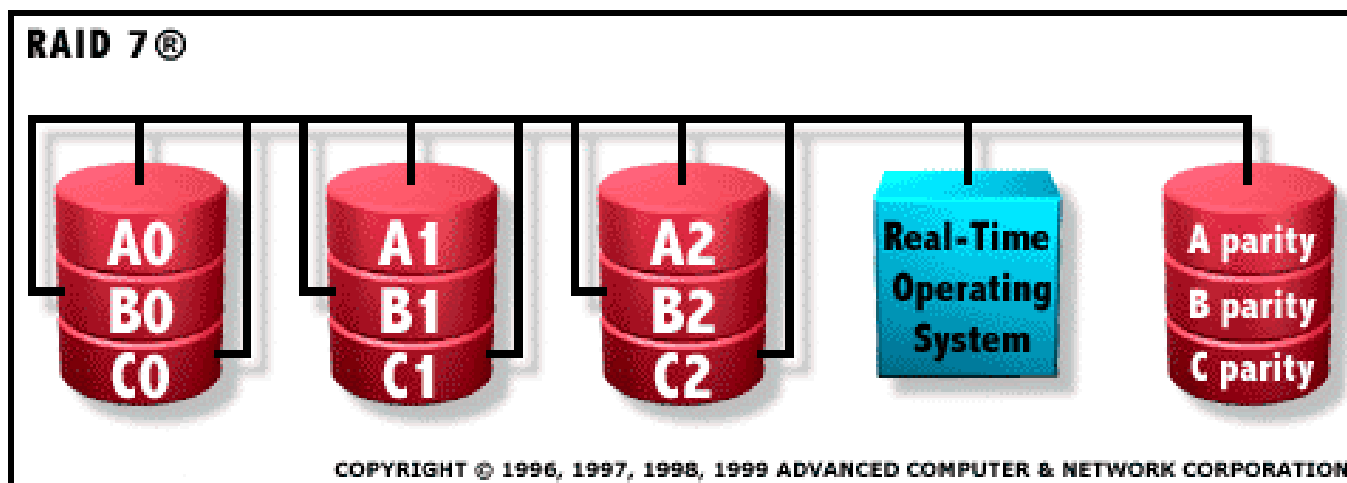


❊ 如果进一步提高性能？

❊ Storage Computer Operating System

❊ 实时事件操作系统

❊ 采用Cache技术提高访问速度，并在Cache中完成校验



磁表面存储设备

- 用磁颗粒的不同磁化方向表示0和1
- 弥补了主存的不足
- 磁盘存储原理及磁记录方式

磁盘的访问过程

- 寻道、寻找扇区、访问

RAID技术

- 提高磁盘的可用性和性能

❁ 阅读

- ❏ 教材相关章节
- ❏ 自学Flash存储原理

❁ 思考

- ❏ 磁表面存储设备的原理和特点，它在层次存储器系统中的地位和作用
- ❏ 如何将文件分布在扇区使访问速度加快？

❁ 实践

- ❏ 本单元作业