第九章　外排序

张铭　主讲
采用教材：张铭，王腾蛟，赵海燕 编写
高等教育出版社，2008. 6 （“十二五”国家级规划教材）

http://jpk.pku.edu.cn/course/sjjg/
https://www.icourse163.org/course/PKU-1002534001

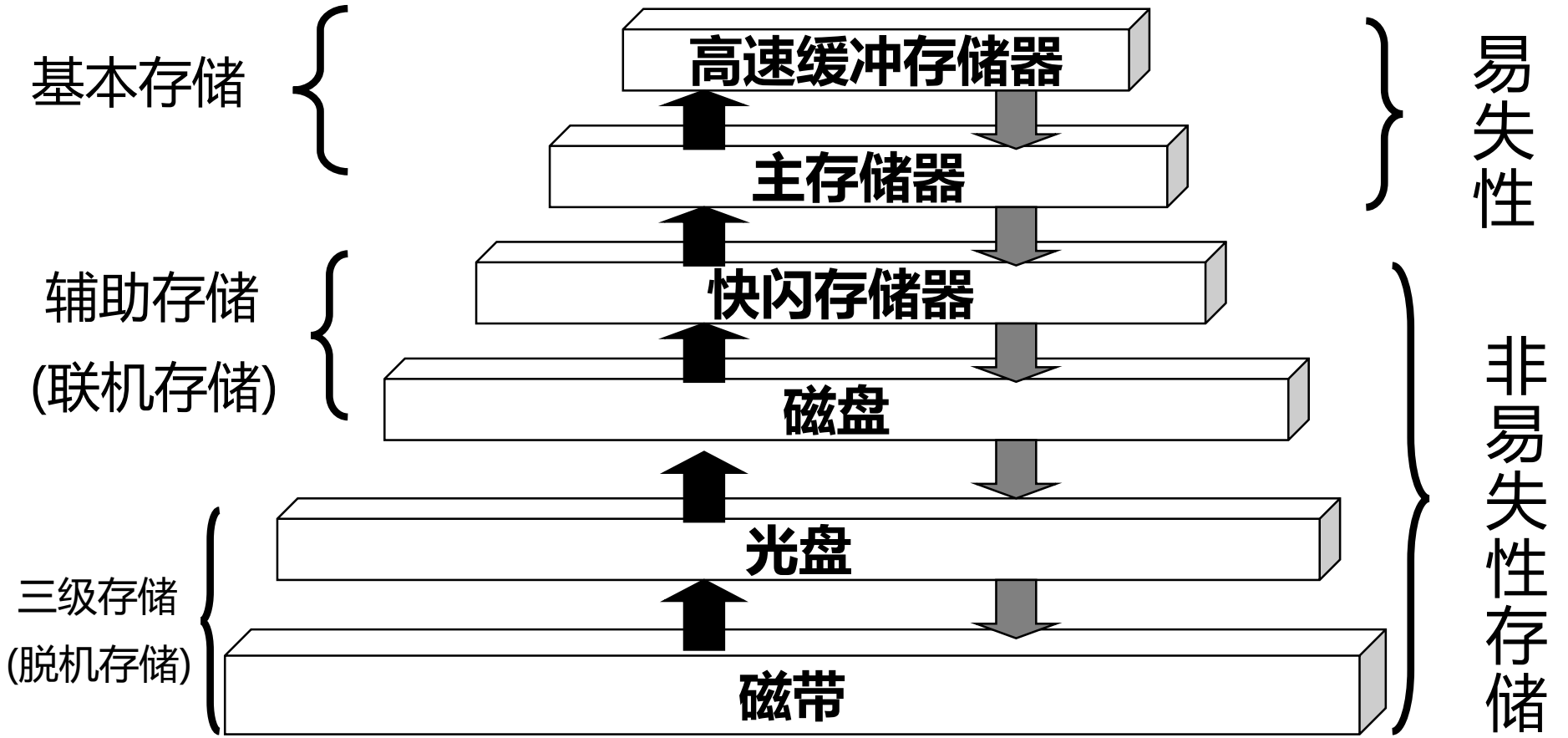
第9章 文件管理和外排序

- 9.1 主存储器和外存储器
- 9.2 文件的组织和管理
  - 9.2.1 文件组织
  - 9.2.2 C++ 的流文件
- 9.3 外排序

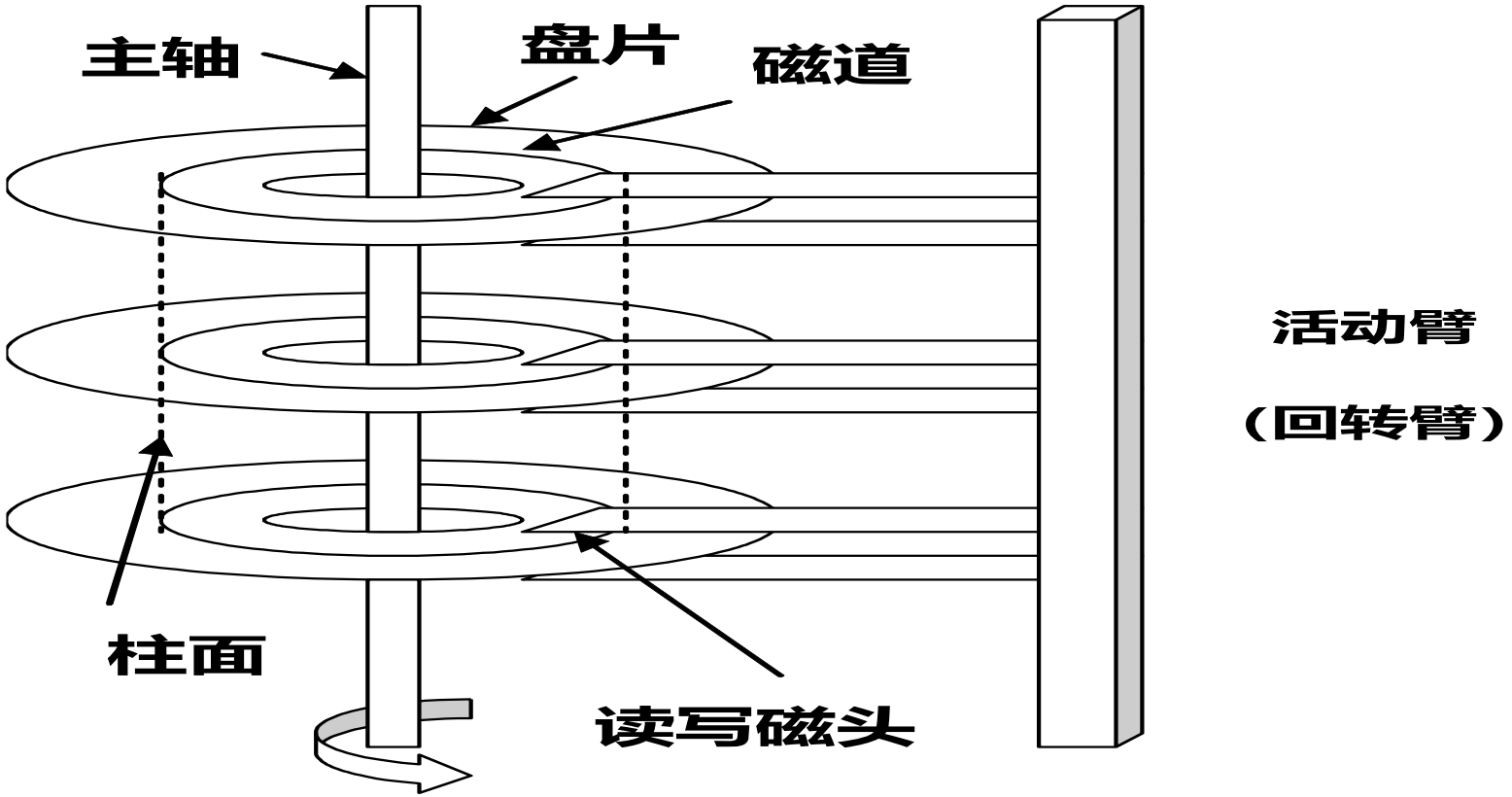
主存储器和外存储器

- 计算机存储器主要有两种：
  - 主存储器（primary memory 或者 main memory，简称“内存”，或者“主存”）
    - 随机访问存储器（Random Access Memory，即 RAM）
    - 高速缓存（cache）
    - 视频存储器（video memory）
  - 外存储器（peripheral storage 或者 secondary storage，简称“外存”）
    - 硬盘（几百G - 几百T，10^{12}B）
    - 磁带（几个P，10^{15}B）

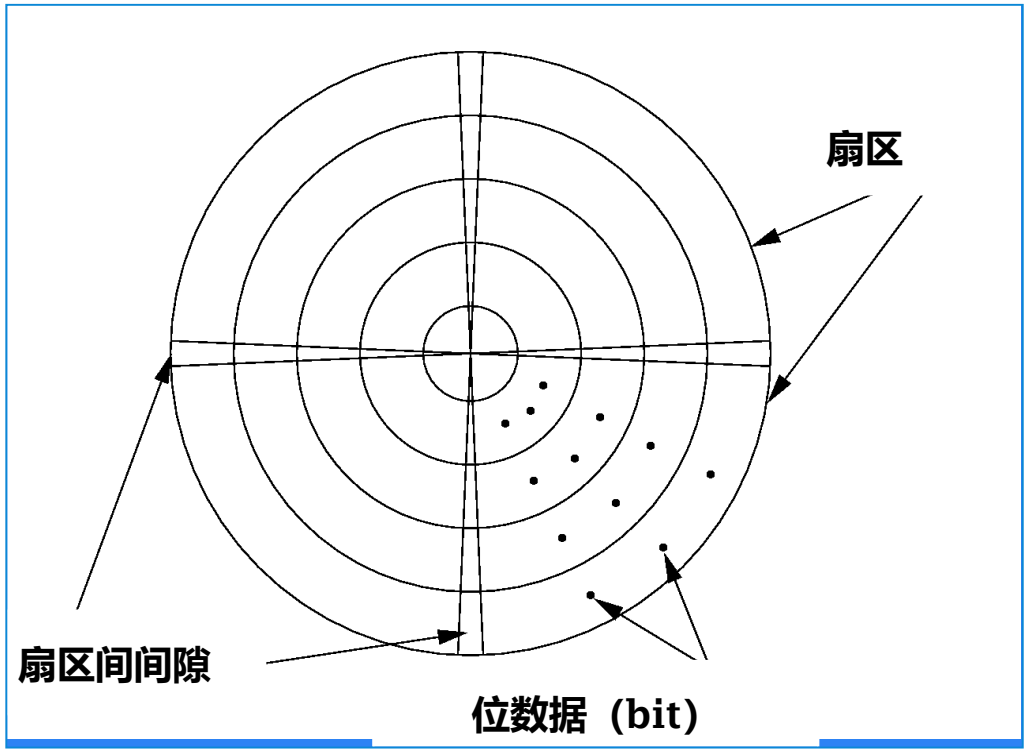
物理存储介质概览


基本存储
辅助存储
(联机存储)
三级存储
(脱机存储)
高速缓冲存储器
主存储器
快闪存储器
磁盘
光盘
磁带
易失性
非易失性存储

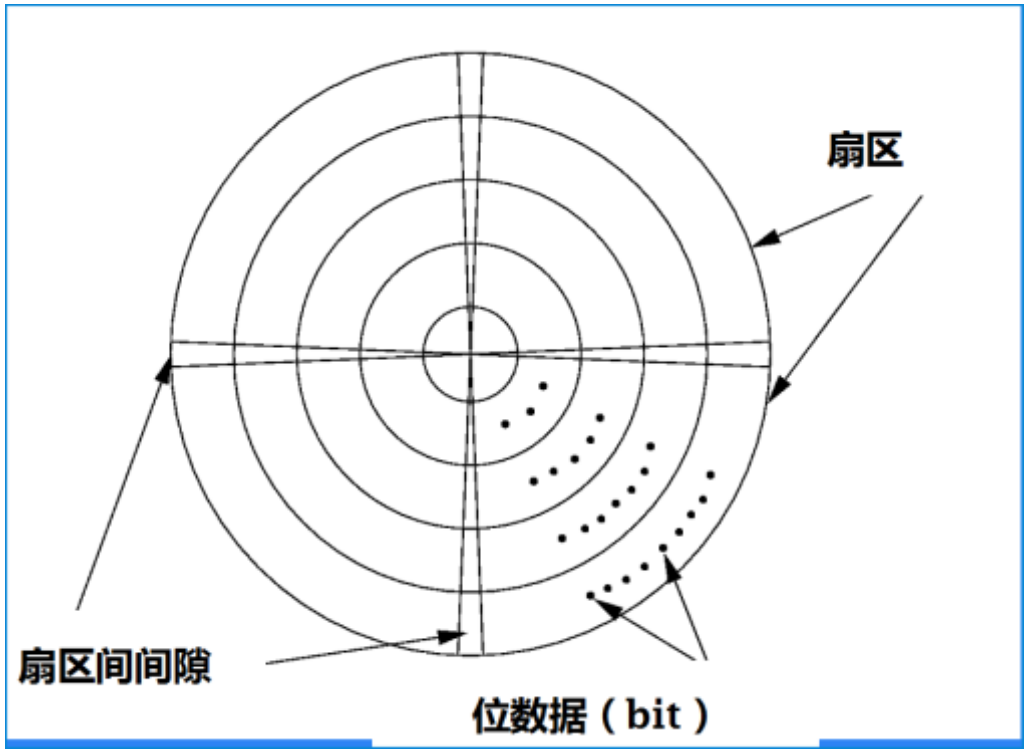
磁盘的物理结构



磁盘盘片的组织(操作系统决定)

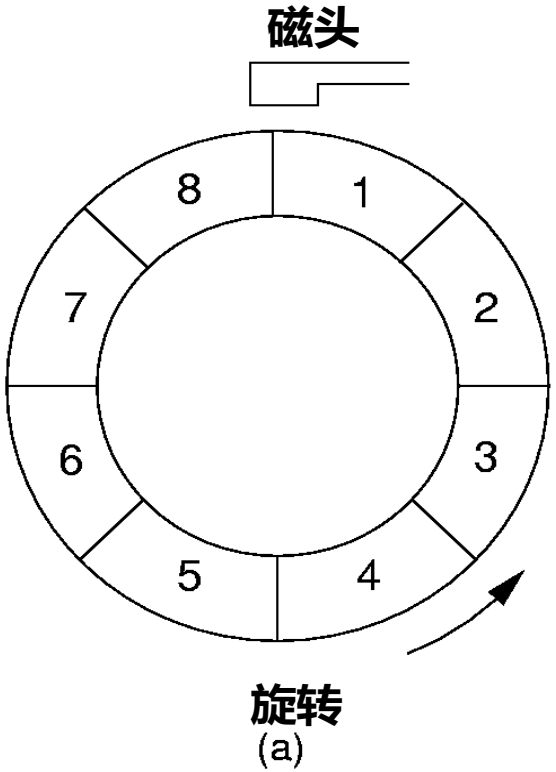


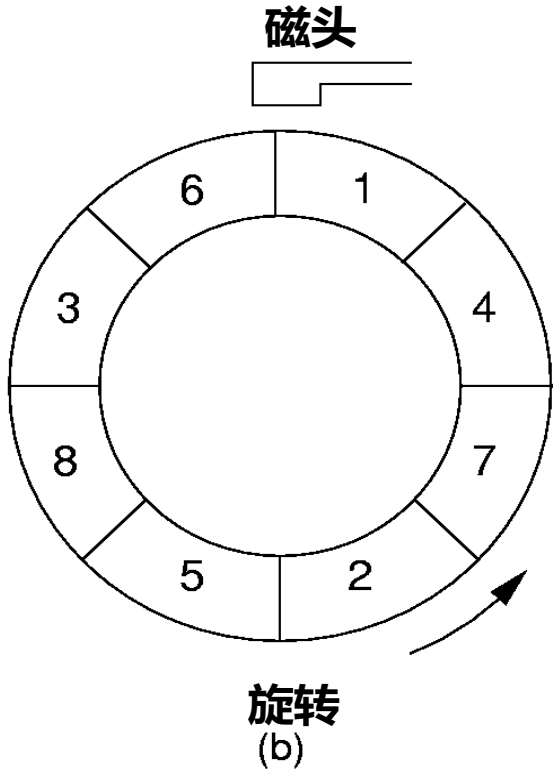
分区记录（Zoned Recording）



磁盘磁道的组织（交错法）

- 每页 512 字节 或 1024 字节





（a）没有扇区交错；　　（b）以 3 为交错因子

内存的优缺点

- 优点：访问速度快
- 缺点：造价高，存储容量小，断电丢数据
- CPU 直接与主存沟通，对存储在内存地址的数据进行访问时，所需要的时间可以看作是一个很小的常数

外存的优缺点

- 优点：价格低、信息不易失 、便携性
- 缺点：存取速度慢
  - 一般的内存访问存取时间的单位是 **纳秒**（1 纳秒 = 10^{-9} 秒）
  - 外存一次访问时间则以 **毫秒**（1 毫秒 = 10^{-3} 秒）或秒为数量级
- 牵扯到外存的计算机程序应当尽量 **减少外存的访问次数**， 从而减少程序执行的时间

9.1 主存储器和外存储器

- KB (kilo byte)　　10^3B (页块)
- MB (mega byte)　　10^6B (高速缓存)
- GB (giga)　　10^9B (内存、硬盘)
- TB (tera)　　10^{12}B (磁盘阵列)
- PB (peta)　　10^{15}B (磁带库)
- EB = 10^{18}B；ZB = 10^{21}B；YB = 10^{24}B
- Googol 是 10 的 100 次方

文件的逻辑结构

- 文件是记录的汇集
  - 一个文件的各个记录按照某种次序排列起来，各纪录间就自然地形成了一种线性关系
- 因而，文件可看成是一种线性结构

文件的组织和管理

- 逻辑文件(logical file)
  - 对高级程序语言的编程人员而言
  - 连续的字节构成记录，记录构成逻辑文件
- 物理文件(physical file)
  - 成块地分布在整个磁盘中
- 文件管理器
  - 操作系统或数据库系统的一部分
    - 文件的记录无结构，数据库文件是结构型记录
  - 把逻辑位置映射为磁盘中具体的物理位置

文件组织

- 文件逻辑组织有三种形式：
  - 顺序结构的定长记录
  - 顺序结构的变长记录
  - 按关键码存取的记录
- 常见的物理组织结构：
  - 顺序结构——顺序文件
  - 计算寻址结构——散列文件
  - 带索引的结构——带索引文件
    - 倒排是一种特殊的索引

文件上的操作

- 检索：在文件中寻找满足一定条件的记录
- 修改：是指对记录中某些数据值进行修改。若对关键码值进行修改，这相当于删除加插入
- 插入：向文件中增加一个新记录
- 删除：从文件中删去一个记录
- 排序：对指定好的数据项，按其值的大小把文件中的记录排成序列，较常用的是按关键码值的排序

C++ 的标准输入输出流类

- 标准输入输出流类
  - istream 是通用输入流和其它输入流的基类，支持输入
  - ostream 是通用输出流和其它输出流的基类，支持输出
  - iostream 是通用输入输出流和其它输入输出流的基类，支持输入输出
- 3个用于文件操作的文件类
  - ifstream 类，从 istream 类派生，支持从磁盘文件的输入
  - ofstream 类，从 ostream 类派生，支持向磁盘文件的输出
  - fstream 类，从 iostream 类派生，支持对磁盘文件的输入和输出

fstream类的主要成员函数

文件指针 **定位**；在当前文件指针位置 **读取**；向当前文件指针位置 **写入**

```
#include <fstream.h>                          // fstream = ifstream + ofstream
void fstream::open(char*name, openmode mode);
                                              // 打开文件
fstream::read(char*ptr, int numbytes);  // 从文件当前位置读入字节
fstream::write(char*ptr, int numbtyes); // 向文件当前位置写入字节
                              // seekg和seekp：在文件中移动当前位置
                              // 以便在文件中的任何位置读出或写入字节
fstream::seekg(int pos);                      // 输入时用于设置读取位置
fstream::seekg(int pos, ios::curr);
fstream::seekp(int pos);                      // 设置输出时的写入位置
fstream::seekp(int pos, ios::end);
void fstream::close();                        // 处理结束后关闭文件
```

缓冲区和缓冲池

- 目的：减少磁盘访问次数的
- 方法：缓冲（buffering）或缓存（caching）
  - 在内存中保留尽可能多的块
  - 可以增加待访问的块已经在内存中的机会
- 存储在一个缓冲区中的信息经常称为一页（page），往往是一次 I/O 的量
- 缓冲区合起来称为缓冲池（buffer pool）

替换缓冲区块的策略

- 新的页块申请缓冲区时，把最近最不可能被再次引用的缓冲区释放来存放新页
  - “先进先出”（FIFO）
  - “最不频繁使用”（LFU）
  - “最近最少使用”（LRU）

思考

1. 查询内存、硬盘、磁带、高速缓存等设备每字节的价格
2. 查询当前主流硬盘的性能指标
   - 容量（G）
   - 磁盘旋转速度（rpm）
   - 交错因子
   - 寻道时间
   - 旋转延迟时间

第9章 文件管理和外排序

- 9.1 主存储器和外存储器
- 9.2 文件的组织和管理
- 9.3 外排序
  - 9.3.1 置换选择排序
  - 9.3.2 二路外排序
  - 9.3.3 多路归并——选择树

磁盘文件的排序

- 对外存设备上(文件)的排序技术
- 待排的文件非常大，内存放不下，只能分段处理
- 通常由两个相对独立的阶段组成：
  - 文件形成尽可能长的初始顺串（run）
    - 作为待归并段，将来处理
  - 处理顺串，最后形成对整个数据文件的排列文件

外排序的基本过程

① 置换选择排序

- 目的：把外存文件初始化为尽可能长的顺串集

② 归并排序

- 目的：把顺串集逐趟归并排序，形成全局有序的外存文件

外排序的时间组成

I. 产生初始顺串的内排序所需时间

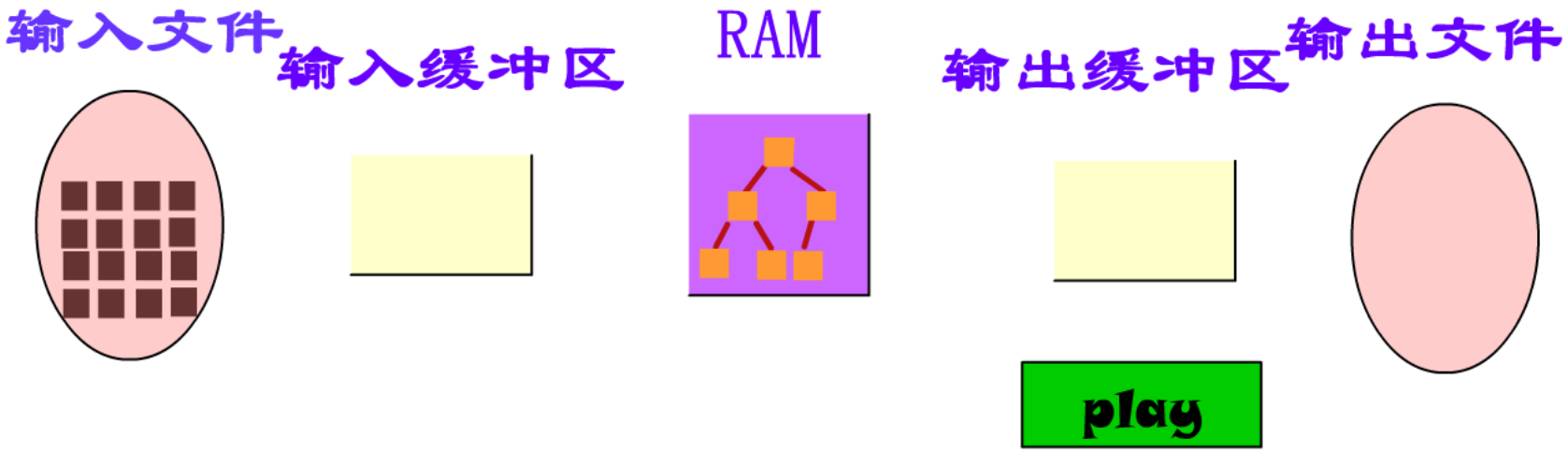
II. 初始化顺串和归并过程所需的读写（I/O）时间

III. 内部归并所需要的时间

- 减少外存信息的读写（I/O）次数是提高外部排序效率的关键

9.3 外排序

置换选择排序



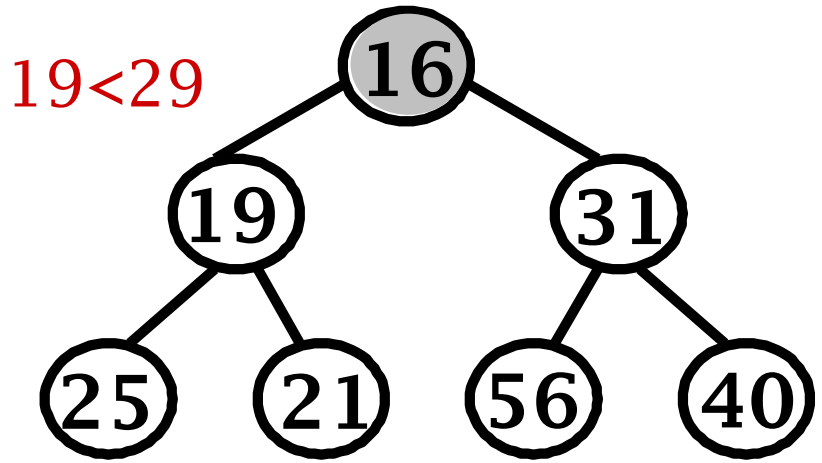
- 目的：将文件生成若干初始顺串（顺串越长越好，个数越少越好）
- 实现：借助在RAM中的堆来完成

置换选择示例

输出16插入29

重新排列堆

>16

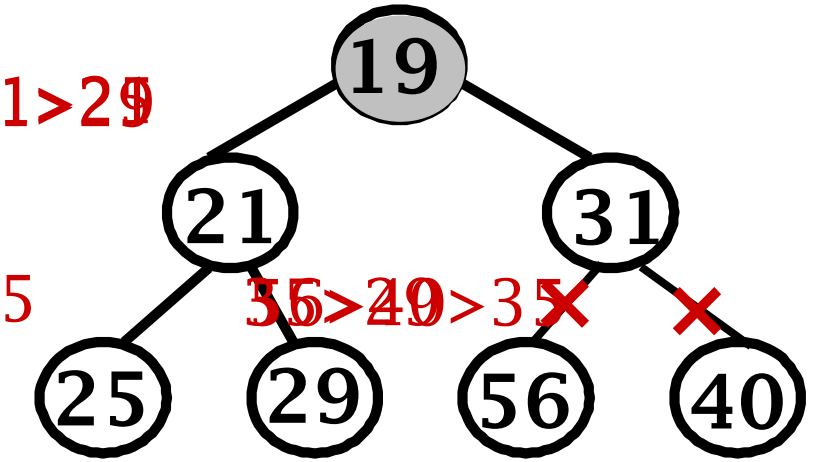
输入	存储	输出
29 14 35 13		12

置换选择示例

输入

14
35
13

存储



输出

16
12

置换选择算法

1. 初始化最小堆：目的是提高RAM中排序的效率

(a) 从缓冲区读M个记录放到数组RAM中

(b) 设置堆尾标志：LAST = M - 1

(c) 建立一个最小值堆

置换选择算法(续)

2. 重复以下步骤，直至堆空（结束条件） （即LAST < 0）

(a) 把具有最小关键码值的记录(根结点)送到输出缓冲区

(b) 设R是输入缓冲区中的下一条记录

i. 如果R的关键码不小于刚输出的关键码值，则把R放到根结点

ii. 否则，使用数组中LAST位置的记录代替根结点，然后把R放到LAST位置（等待下一顺串处理），设置LAST = LAST-1

(c)重新排列堆，筛出根结点

置换选择算法的实现

```
// 模板参数 Elem 代表数组中每一个元素的类型
// A 是从外存读入 n 个元素后所存放的数组
// in 和 out 分别是输入和输出文件名
template <class Elem>
void replacementSelection(Elem * A, int n, const char * in, const char * out) {
Elem mval;                                  // 存放最小值堆的最小值
Elem r;                                     // 存放从输入缓冲区中读入的元素
FILE * inputFile;                           // 输入、输出文件句柄
FILE * outputFile;
Buffer<Elem> input;                         // 输入、输出buffer
Buffer<Elem> output;                        // 初始化输入输出文件
initFiles(inputFile, outputFile, in, out);
initMinHeapArry(inputFile, n, A);     // 建堆
MinHeap<Elem> H(A, n, n);
initInputBuffer(input, inputFile);
```

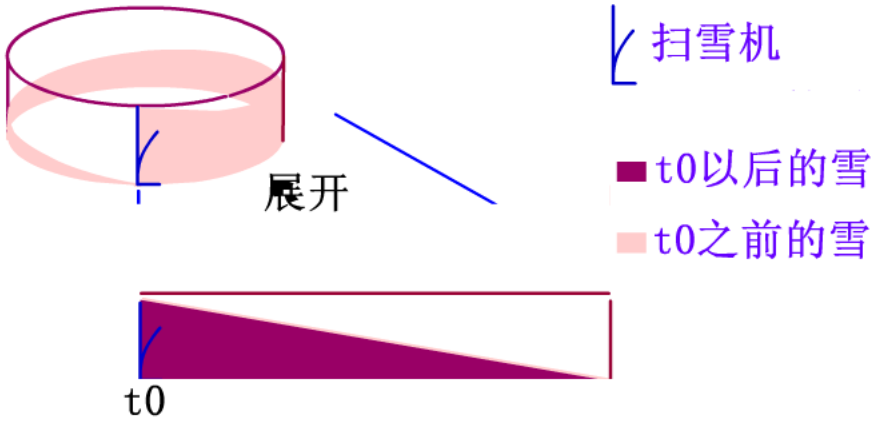
9.3 外排序

```
for(int last = (n-1); last >= 0;){
    mval = H.heapArray[0];                    // 最小值
    sendToOutputBuffer(input, output,
    inputFile, outputFile, mval);
    input.read(r);                            // 从输入缓冲区读入一个记录
    if (!less(r, mval))
        H.heapArray[0] = r;                   // r放到根结点
    else {                                    // last记录代替根结点，r放到last位置
        H.heapArray[0] = H.heapArray[last];
        H.heapArray[last] = r;
        H.setSize(last--);
    }
    H.SiftDown(0);                            // 调整根结点
}                                             // for
endUp(output, inputFile, outputFile);
}
```

置换选择算法的效果

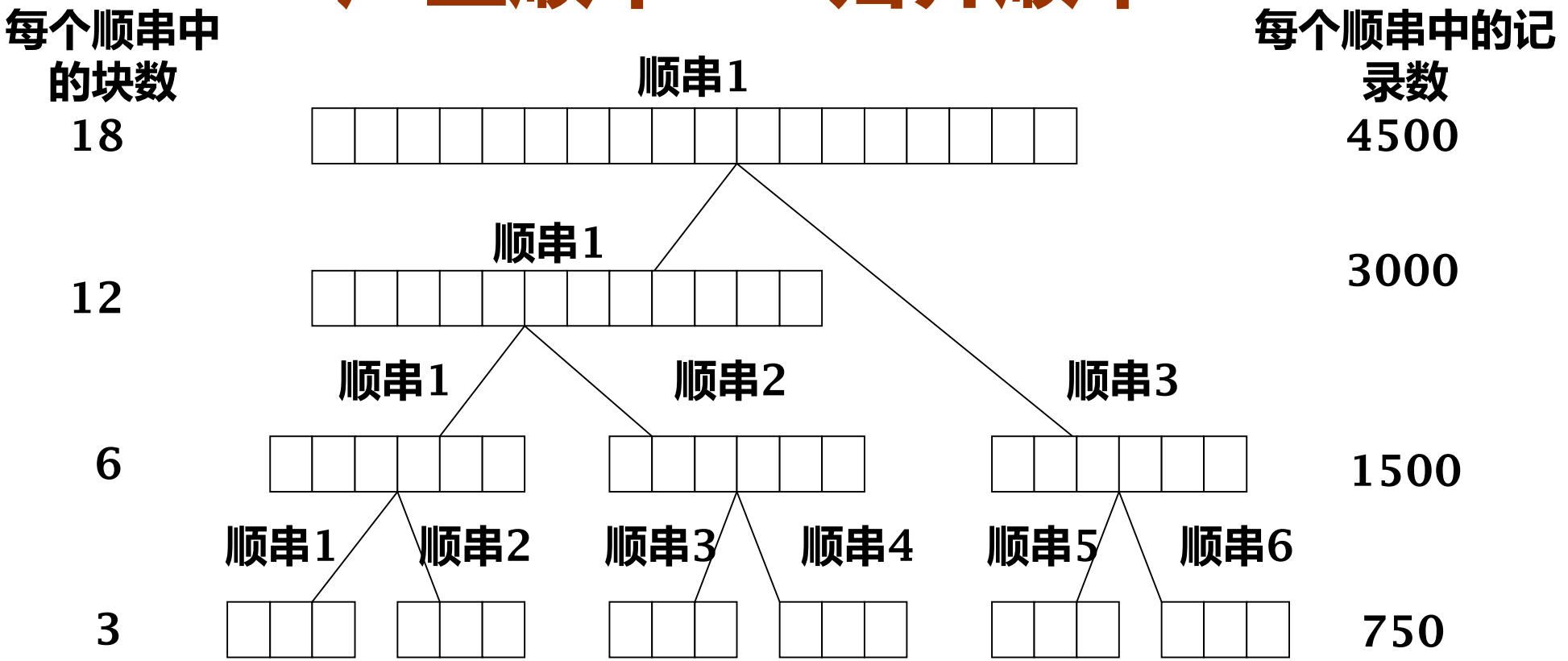
- 堆的大小 M，算法得到的**顺串长度并不相等**
- 如果一个顺串的**最小长度就是 M** 个记录
  - 至少原来在堆中的那些记录将成为顺串的一部分
- **最好的情况**下，例如输入为**正序**，有可能一次就把**整个文件生成为一个顺串**
- **平均情况下**，置换选择排序算法可以形成**长度为 2M** 的顺串

扫雪机模型



click me

产生顺串 -> 归并顺串

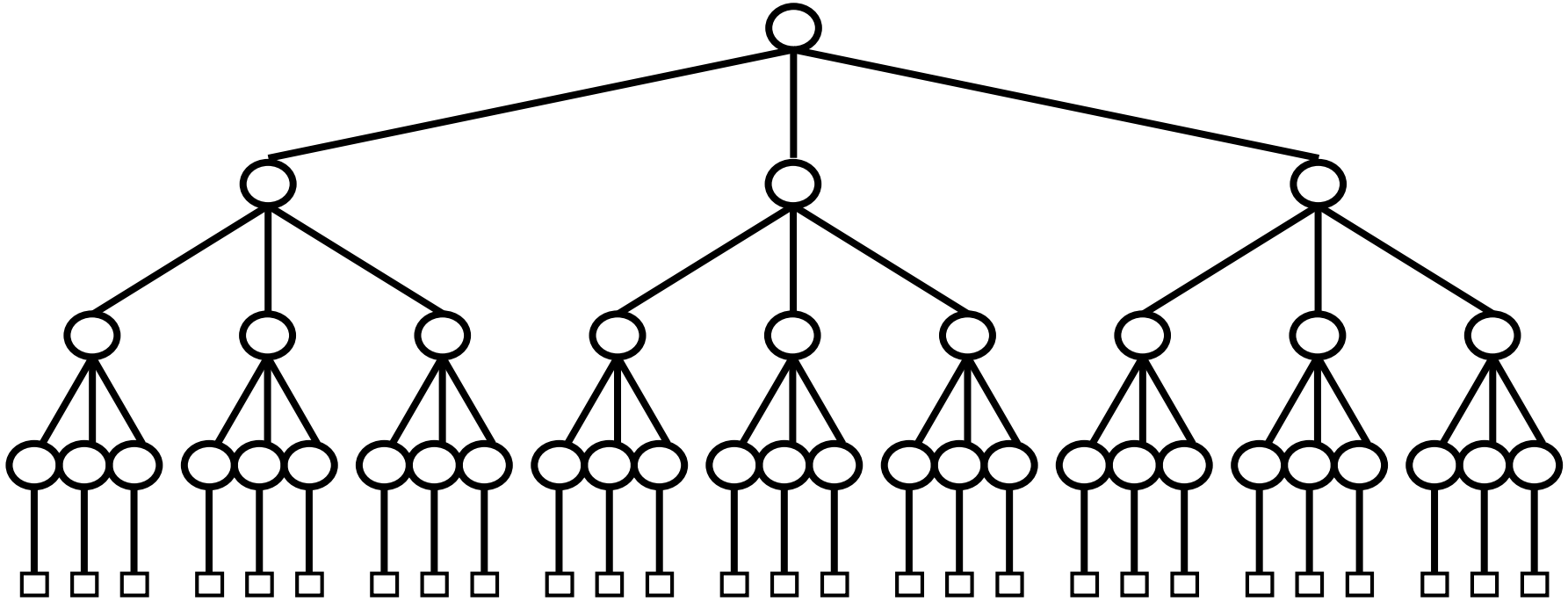


读写各：3*6 + 6*2 + （12 +6）= 48 次

二路外排序

- 归并原理：把第一阶段所生成的顺串加以合并(例如通过若干次二路合并)，直至变为一个顺串为止，即形成一个已排序的文件
- 为一个待排文件创建**尽可能大的初始顺串**，可以大大减少扫描遍数和外存读写次数
- 归并顺序的安排也能影响读写次数，把初始顺串长度作为权，其实质就是 **Huffman 树最优化**问题

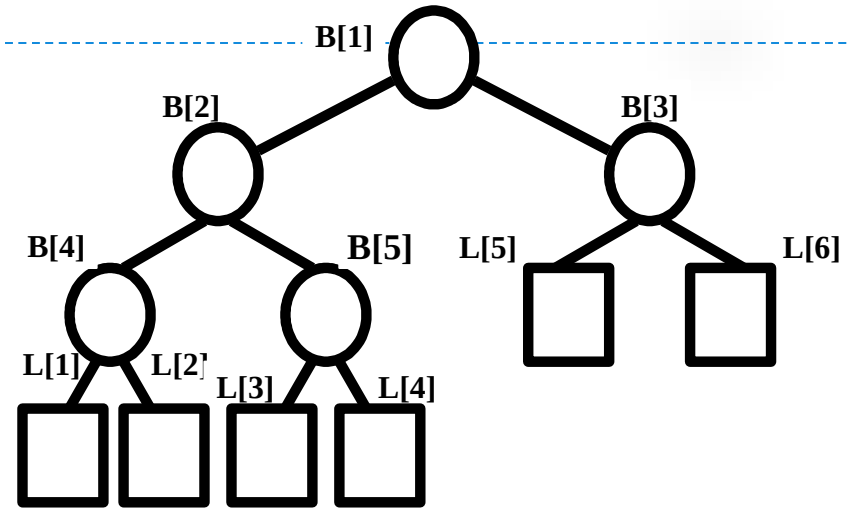
多路归并



多路归并——选择树

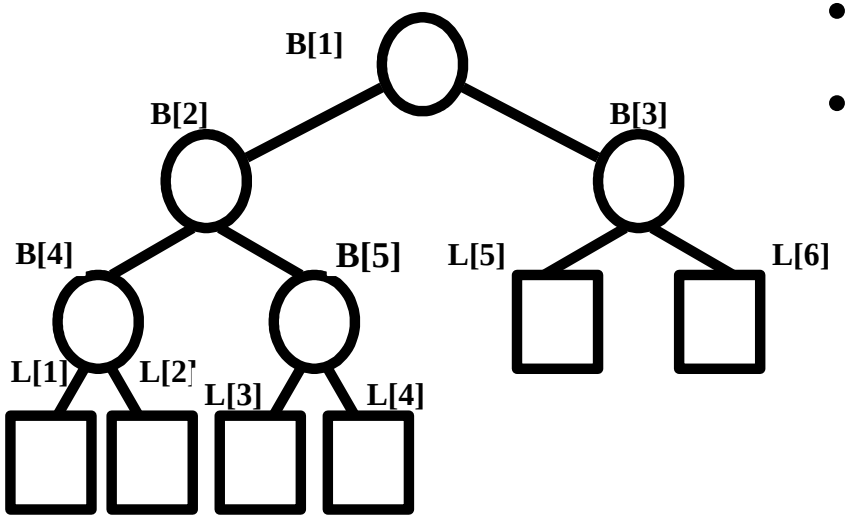
- k 路归并时，实质就是找最小
  - 如果用对 k 个顺串用 k-1 次比较来找最小，代价较大
- 采用选择树，可以保存 k 个待排数曾经比较过的中间结果
  1. 赢者树
  2. 败方树
- 目的：提高在k个归并串的当前值中找到最小值的效率

赢者树



- **叶子结点**用数组 **L[1..n]**表示
  - 代表各顺串在合并过程中的当前记录
- **分支结点**用数组 **B[1..n-1]**表示
  - 每个分支结点代表其两个儿子结点中的赢者(关键码值较小的)所对应数组L的索引
- **根结点 B[1]** 是树中的最终赢者的索引，即为下一个要输出的记录结点
- 如果一个选手L[i]的分数值改变了，可以很容易地修改这棵赢者树
  - 只需要沿着从L[i]到根结点的路径修改二叉树，而不必改变其它比赛的结果

赢者树与数组的对应关系

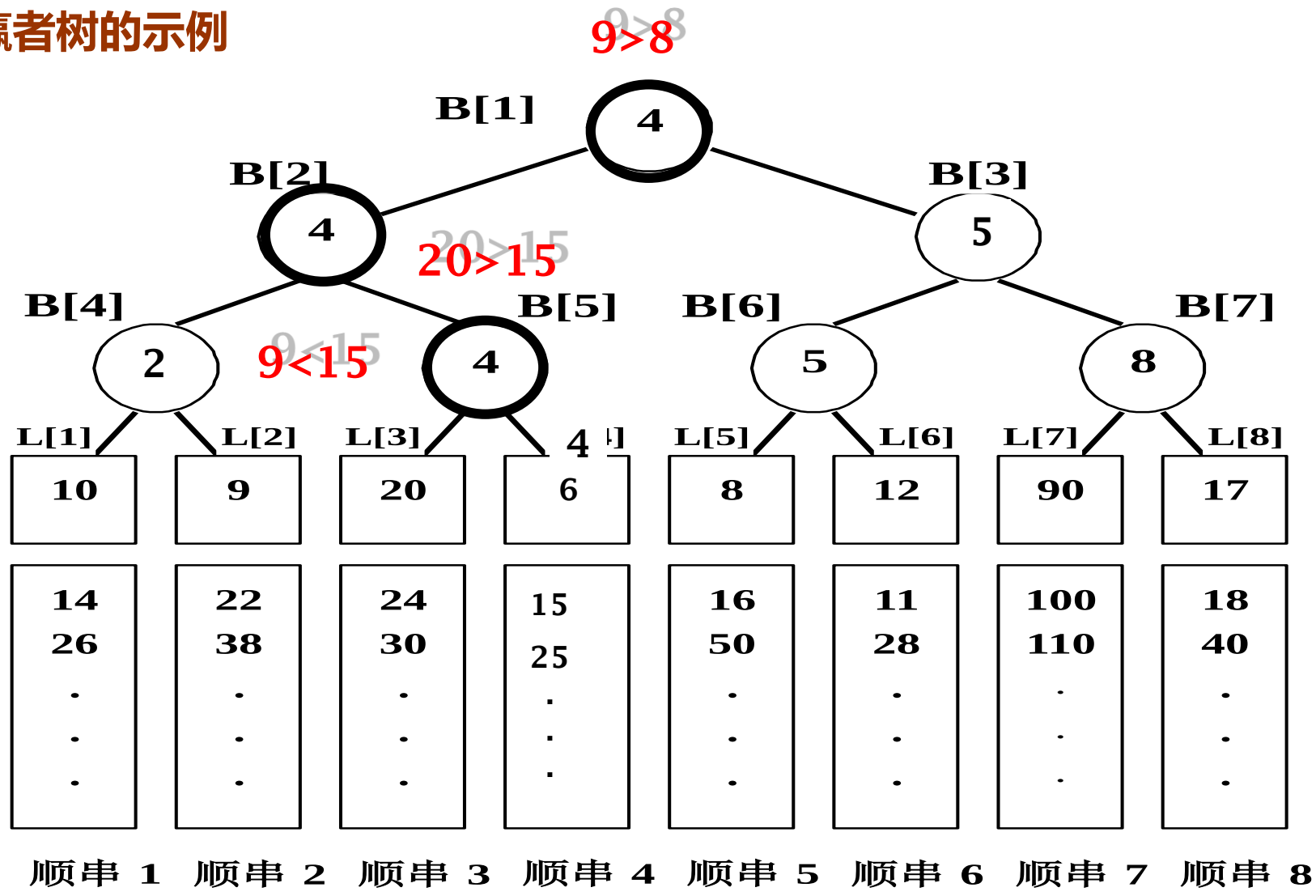


- n=6, LowExt=4, Offset=7
- LowExt + Offset = 2n-1

外部结点的数目为 n，LowExt 代表最底层的外部结点数目； offset 代表最底层外部结点之上(内部+LowExt之外的外部)所有结点数目。每一个外部结点L[i]所对应的内部结点B[p]，i和p之间存在如下的关系：

$$p = \begin{cases} (i + offset)/2 & i \le LowExt \\ (i - LowExt + n - 1)/2 & i > LowExt \end{cases}$$

赢者树的示例



B 存储的顺串 L 的编号

L 存正在比较的关键码

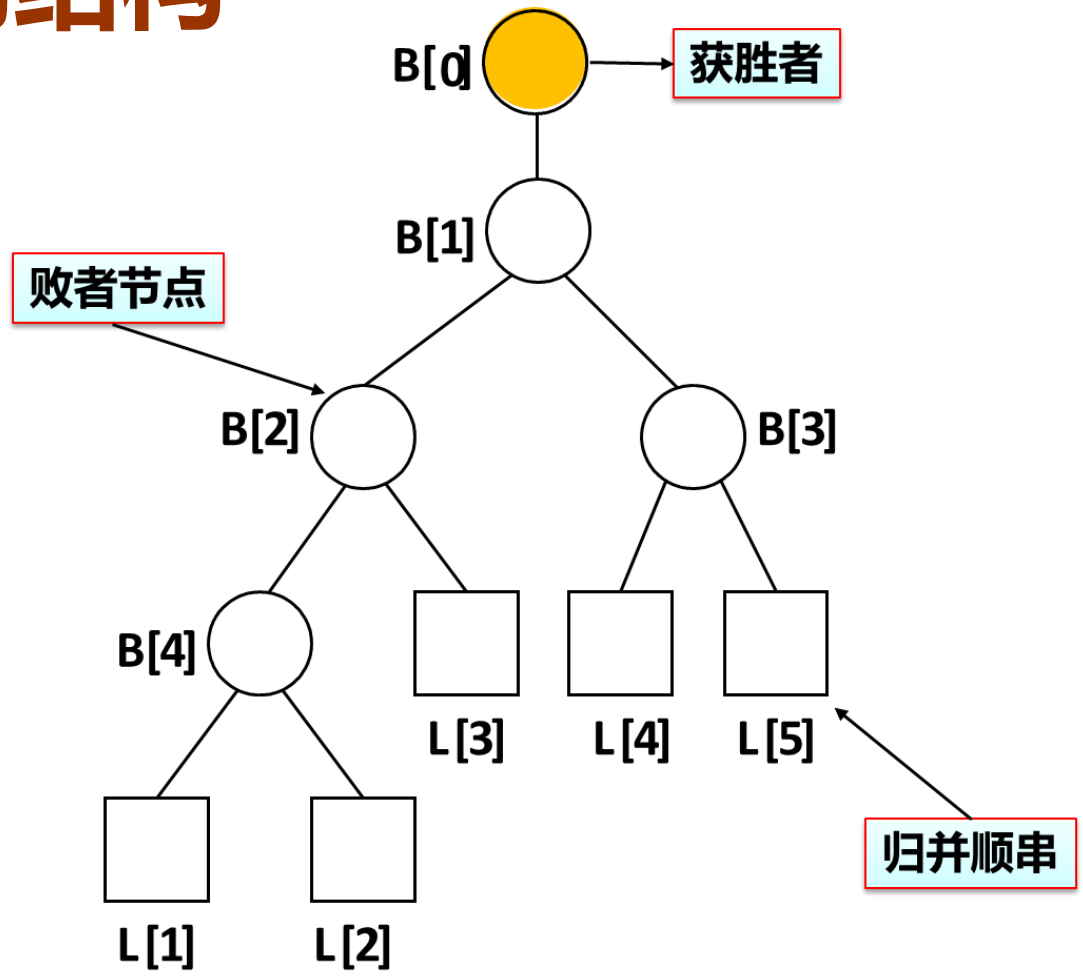
正在归并的8个顺串

重构后的赢者树，改动的结点用较粗的框显示出来。为了重构这棵树，只须沿着从结点 L[4] 到根结点的路径重新进行比赛。

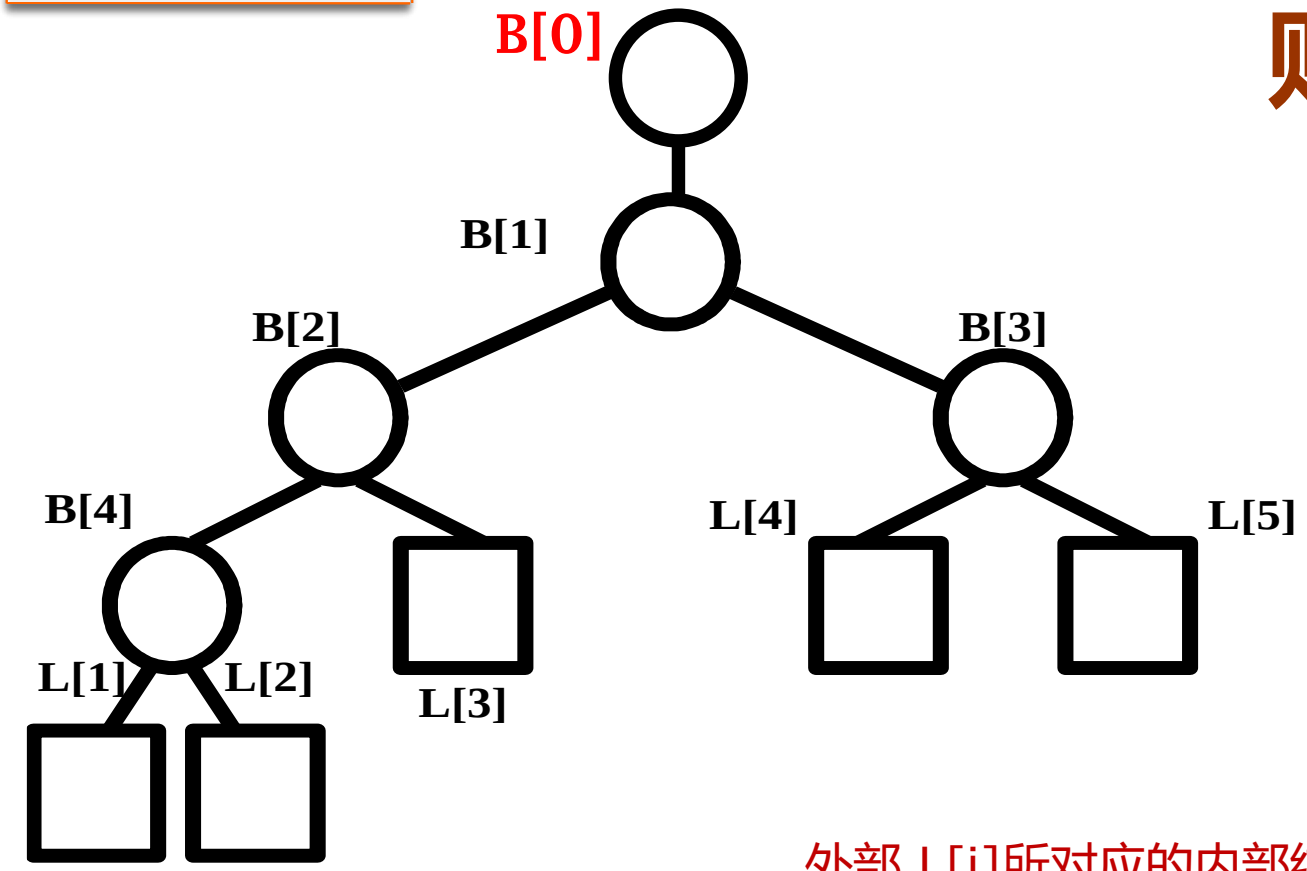
败方树

- 是赢者树的一种变体
- 在败方树中，用父结点记录其左右子结点进行比赛的败者，而让获胜者去参加更高阶段的比赛
- 新增根结点B[0]，来记录整个比赛的全局胜者
- 败方树是为了简化重构过程，树结构未变

败方树的结构



9.3 外排序



败方树示例

- 外部结点数 n=5
- 最底层LowExt=2
- 最底层之上Offset=7

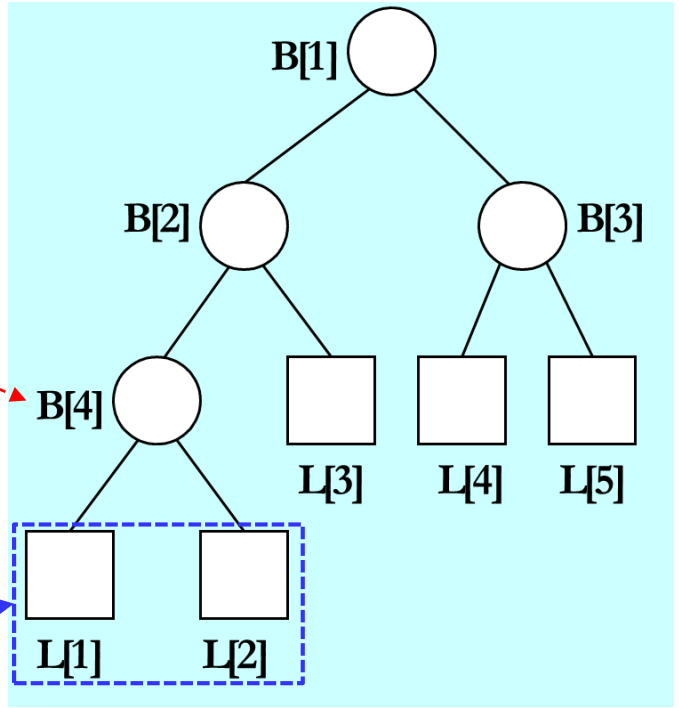
外部 L[i]所对应的内部结点B[p]，i 和 p之间存在如下的关系：

$$p = \begin{cases} (i + offset)/2 & i \le LowExt \\ (i - LowExt + n - 1)/2 & i > LowExt \end{cases}$$

外部结点L[i]与内部父结点B[p]关系

- 最底层最左端内部结点编号为2^s
  - $s = \lceil \log_2 n \rceil - 1 = \lceil \log_2 5 \rceil - 1 = 2$
  - 如右图，B[4]= 2^2=4
- 最底层的内部结点数为n-2^s
  - 如右图，n-2^s=5-4=1
- 最底层的外部结点个数(LowExt)为

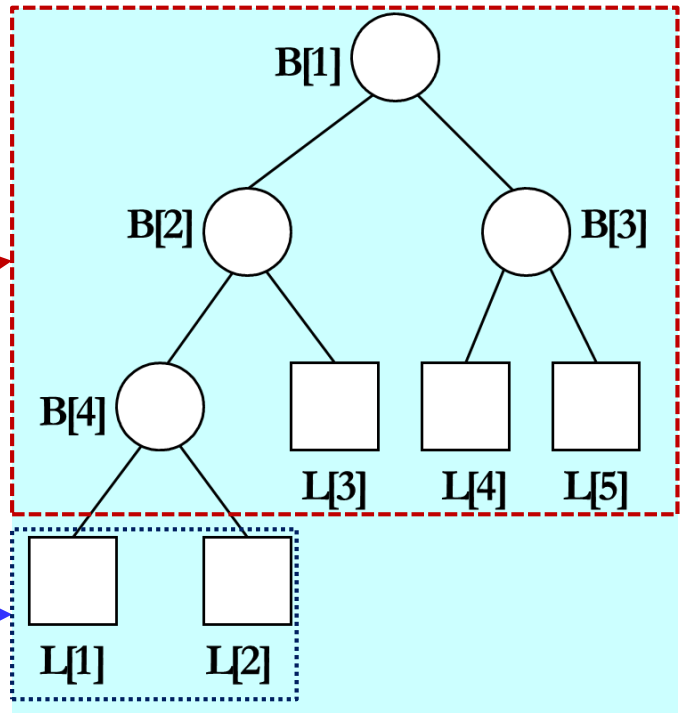
  最底层内部结点数的2倍
  - 即：LowExt = 2*(n-2^s)=2*1=2

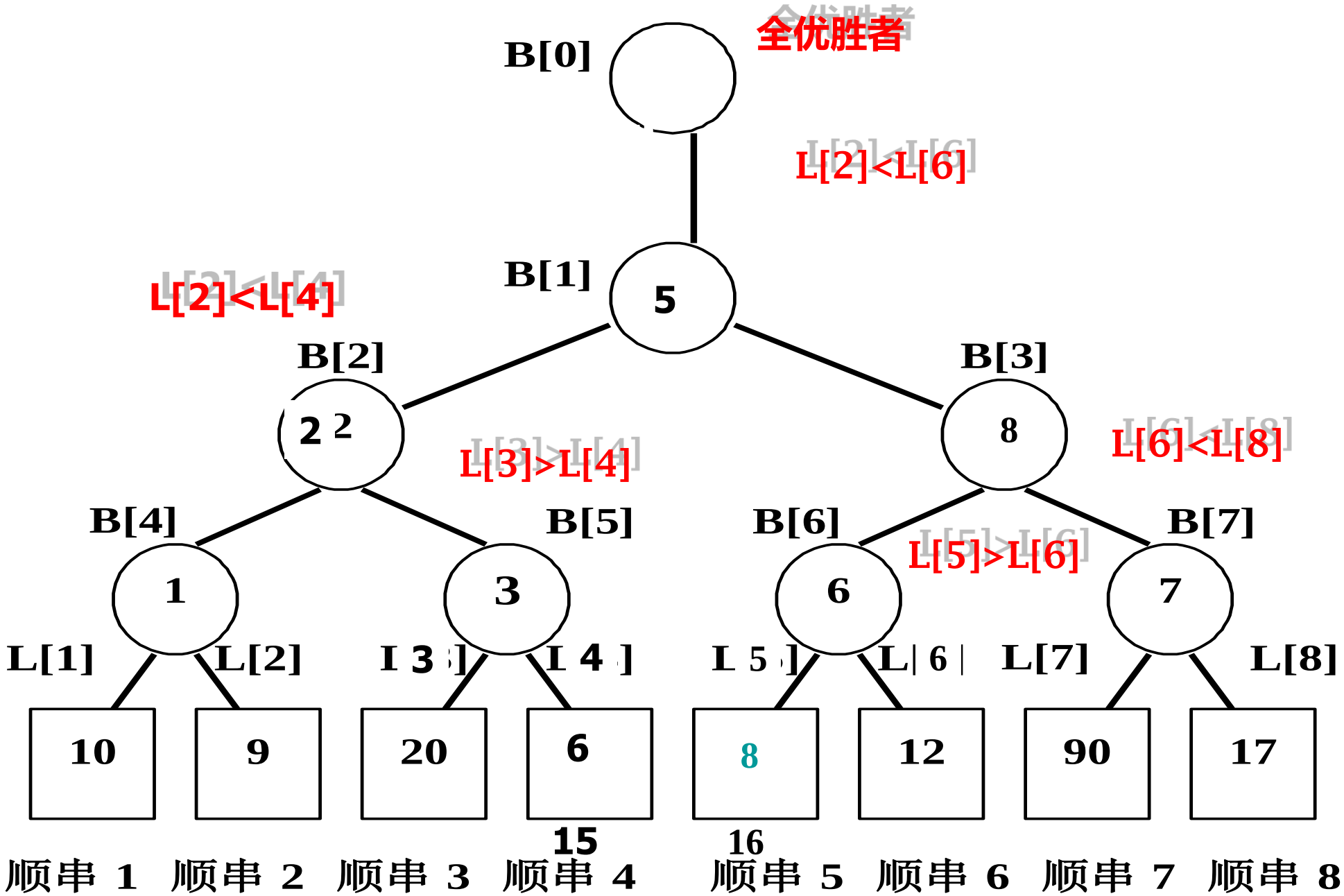


外部结点L[i]与内部父结点B[p]关系

- 最底层外部结点之上的所有(内+外)结点数目（offset）
  - offset = 2^(s+1)-1
  - 如右图，offset=2^(2+1)-1=7
- 外部结点L[i]与内部父结点B[p]关系可以表示如下：

$$p=\begin{cases}(i+offset)/2, & i \le LowExt \\ (i-LowExt+n-1)/2, & i > LowExt\end{cases}$$




全优胜者
B[0]
L[2]<L[6]
B[1]
5
L[2]<L[4]
B[2]
2 2
B[3]
8
L[3]>L[4]
L[6]<L[8]
B[4]
1
B[5]
3
B[6]
6
L[5]>L[6]
B[7]
7
L[1]
L[2]
I 3]
I 4]
I 5]
L| 6 |
L[7]
L[8]
10
9
20
6
8
12
90
17
15
16
顺串 1
顺串 2
顺串 3
顺串 4
顺串 5
顺串 6
顺串 7
顺串 8

败方树 ADT

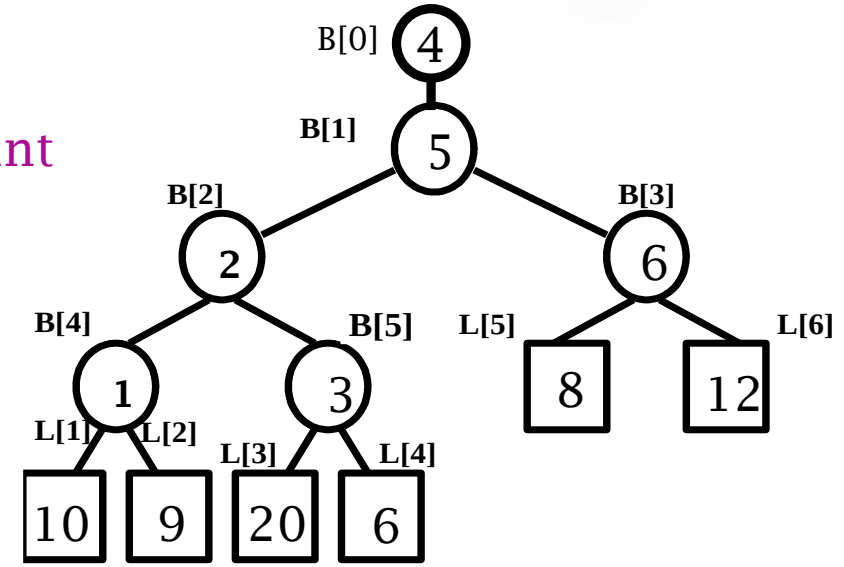
```
template<class T>
class LoserTree{
private:
    int MaxSize;          // 最大选手数
    int n;                // 当前选手数
    int LowExt;           // 最底层外部结点数
    int offset;           // 最底层外部结点之上的结点总数
    int * B;              // 败方树数组，实际存放的是下标
    T * L;                // 元素数组
    void Play(int p,int lc,int rc,int(*winner)(T A[],int b,int c));
```

败方树ADT（续）

```
public:
LoserTree(int Treesize = MAX);
~LoserTree(){delete [] B;}
void Initialize(T A[], int size,int (*winner)(T A[], int b, int c),
int(*loser)(T A[], int b, int c));          // 初始化败方树
int Winner();                               // 返回最终胜者索引
void RePlay(int i, int(*winner)(T A[], int b, int c), int (*loser)(T A[], int
b, int c));                                 // 位置 i 的选手改变后重构败方树
};
// 成员函数Winner，返回最终胜者 B[0] 的索引
template<class T>
int LoserTree<T>::Winner(){
        return (n)?B[0]:0;
}
```

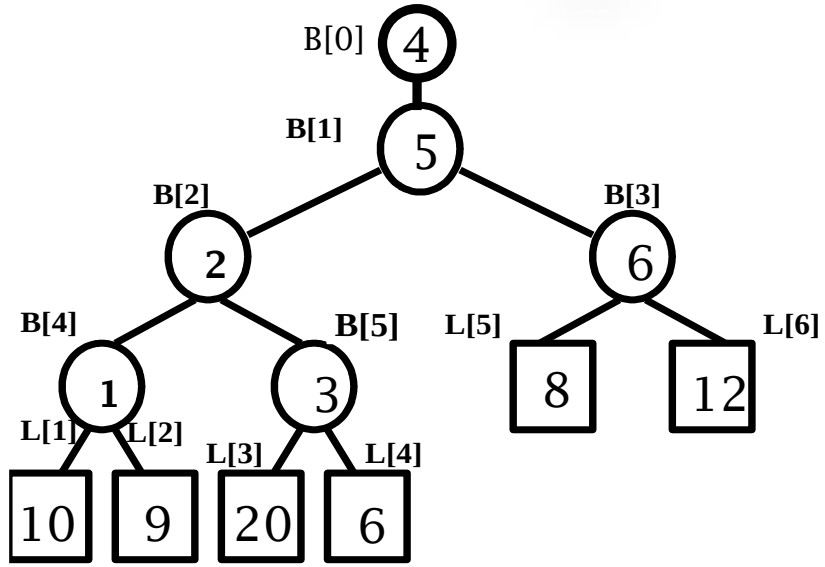
9.3 外排序

```
template<class T>                                   // 初始化败方树
void LoserTree<T>::Initialize(T A[], int size, int(*winner)(T A[], int
b, int c), int(*loser)(T A[], int b, int c)) {
    if (size > MaxSize || size < 2) {
        cout<<"Bad Input!"<<endl<<endl;    return;  }
    n = size;  L = A;                               // 初始化成员变量
    int i,s;                                        // 计算s=2^log(n-1)
    for (s = 1; 2*s <= n-1; s+=s);
    LowExt = 2*(n-s);  offset = 2*s-1;
    for (i = 2; i <= LowExt; i+=2)                  // 底层外部
        Play((offset+i)/2, i-1, i, winner, loser);
    if (n%2) {                                      // n奇数，内部和外部比赛
        Play(n/2,B[(n-1)/2],LowExt+1,winner,loser);  i = LowExt+3;
    }  else i = LowExt+2;
    for (; i<=n; i+=2)                              // 剩余外部结点的比赛
            Play((i-LowExt+n-1)/2, i-1, i, winner, loser);
}}
```



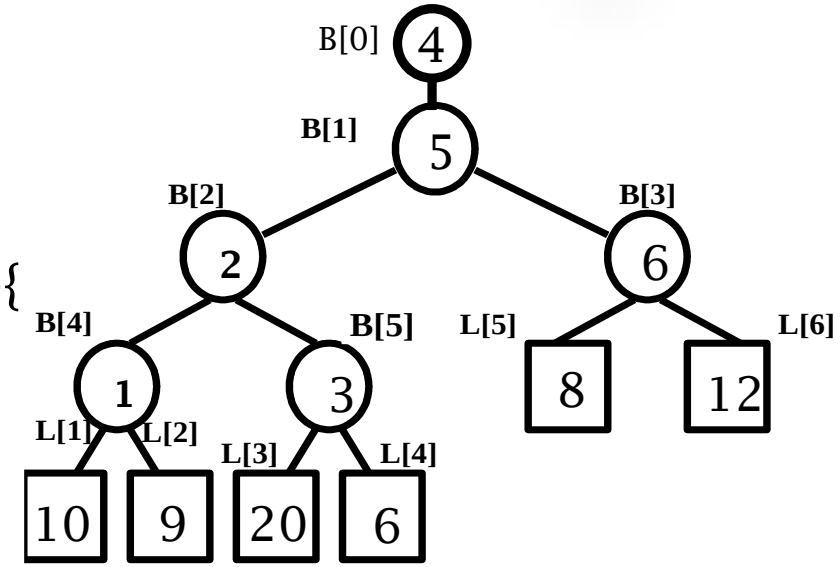
Play 比赛

```
template<class T>
void LoserTree<T>::Play(int p, int lc, int rc, int(* winner)(T
A[], int b, int c), int(* loser)(T A[], int b, int c)){
    B[p] = loser(L, lc, rc);        // 败者索引放在B[p]
    int temp1, temp2;
    temp1 = winner(L, lc, rc);// p处的胜者索引
    while(p>1 && p%2) {         // 内部右，要沿路向上比赛
        temp2 = winner(L, temp1, B[p/2]);
        B[p/2] = loser(L, temp1, B[p/2]);
        temp1 = temp2;
        p/=2;
    }    // B[p]是左孩子，或者B[1]
    B[p/2] = temp1;
}
```



RePlay重构

```
template<class T> void LoserTree<T>::RePlay(int i, int
(*winner)(T A[], int b, int c), int (*loser)(T A[], int b, int c)){
    if (i <= 0 || i > n)  {
          cout<<"Out of Bounds!"<<endl<<endl;  return; }
    if (i <= LowExt)                  // 确定父结点的位置
          int  p = (i+offset)/2;
       else p = (i-LowExt+n-1)/2;
   B[0] = winner(L, i, B[p]);    B[p] = loser(L, i, B[p]);
   for(; (p/2)>=1; p/=2) {       // 沿路径向上比赛
      int temp = winner(L,B[p/2], B[0]);
      B[p/2] = loser(L,B[p/2], B[0]);
      B[0] = temp;
 } }
```



外排序效率考虑

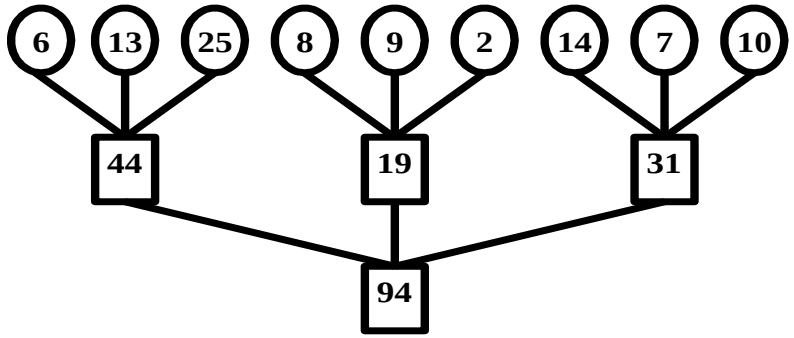
- 对同一个文件而言，进行外排序所需读写外存的次数与归并趟数有关系
- 假设有 m 个初始顺串，每次对 k 个顺串进行归并，归并趟数为 $\lceil \log_k m \rceil$
- 为了减少归并趟数，可以从两个方面着手：
  - 减少初始顺串的个数m
  - 增加同时归并的顺串数量k

多路归并的效率

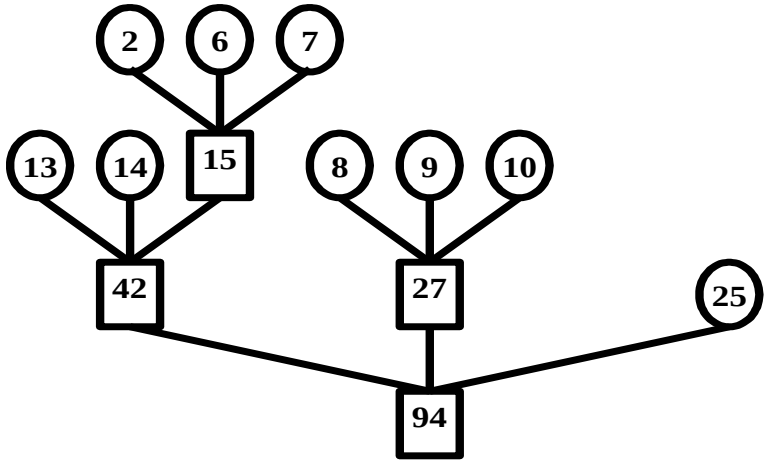
假设对k个顺串进行归并

- **原始方法**：找到每一个最小值的时间是Θ(k)，产生一个大小为n的顺串的总时间是 $\Theta(k \cdot n)$
- **败方树**方法
  - 初始化包含k个选手的败方树需要Θ (k)的时间
  - 读入一个新值并重构败方树的时间为$\Theta(log\ k)$
  - 故产生一大小为n的顺串的总时间为 $\Theta(k+n \cdot log\ k)$

最佳归并树



(a)一棵普通的归并树



(b)最佳归并树

读写总次数次376

读写总次数次356

思考

- 败方树的访外次数比赢者树少吗?
- 是否可以用赢者树或败方树形成初始顺串?
- 是否可以用堆进行多路归并?

数据结构与算法

谢谢聆听

国家精品课“数据结构与算法”

http://jpk.pku.edu.cn/course/sjjg/

https://www.icourse163.org/course/PKU-1002534001

张铭，王腾蛟，赵海燕

高等教育出版社，2008.6。“十二五”国家级规划教材