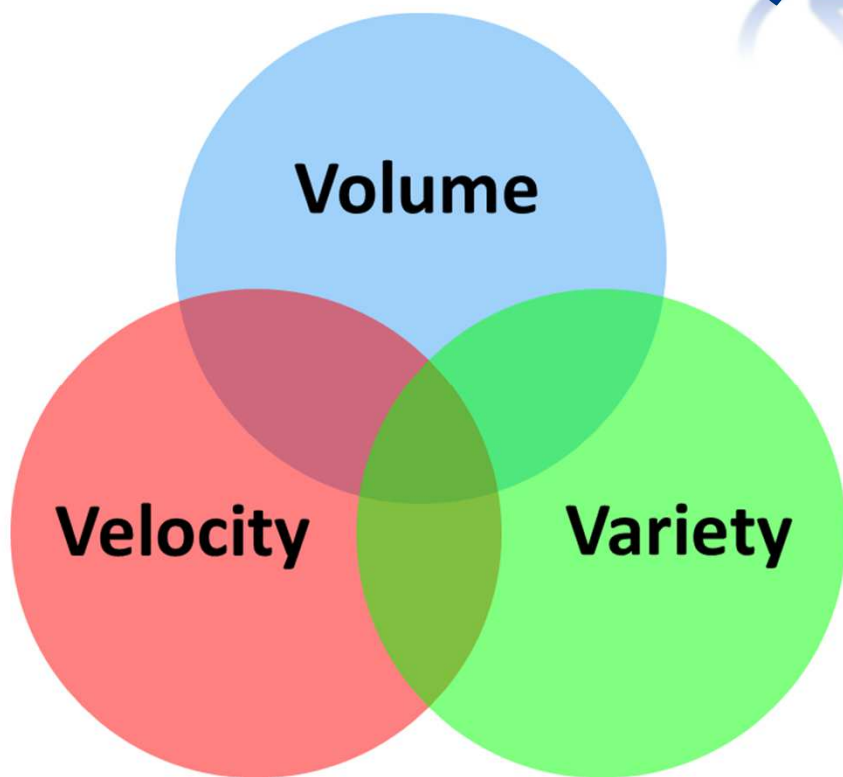


大数据系统与大规模数据分析

关系型数据库管理系统 (2)



陈世敏

中科院计算所
计算机体系结构
国家重点实验室

©2015-2017 陈世敏

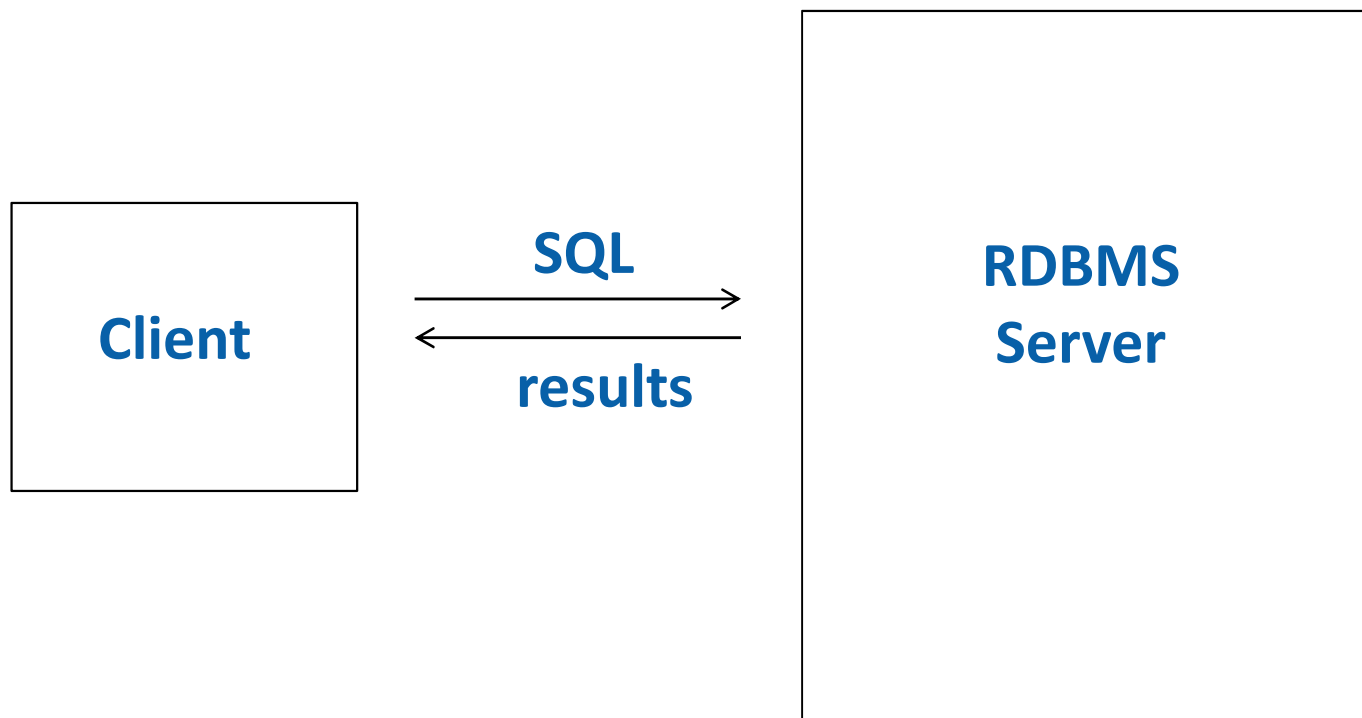
Outline

- 数据库系统架构
- 数据存储与访问
 - 数据表
 - 索引
 - 缓冲池
- 运算的实现
 - Operator tree
 - Selection & Projection
 - Join

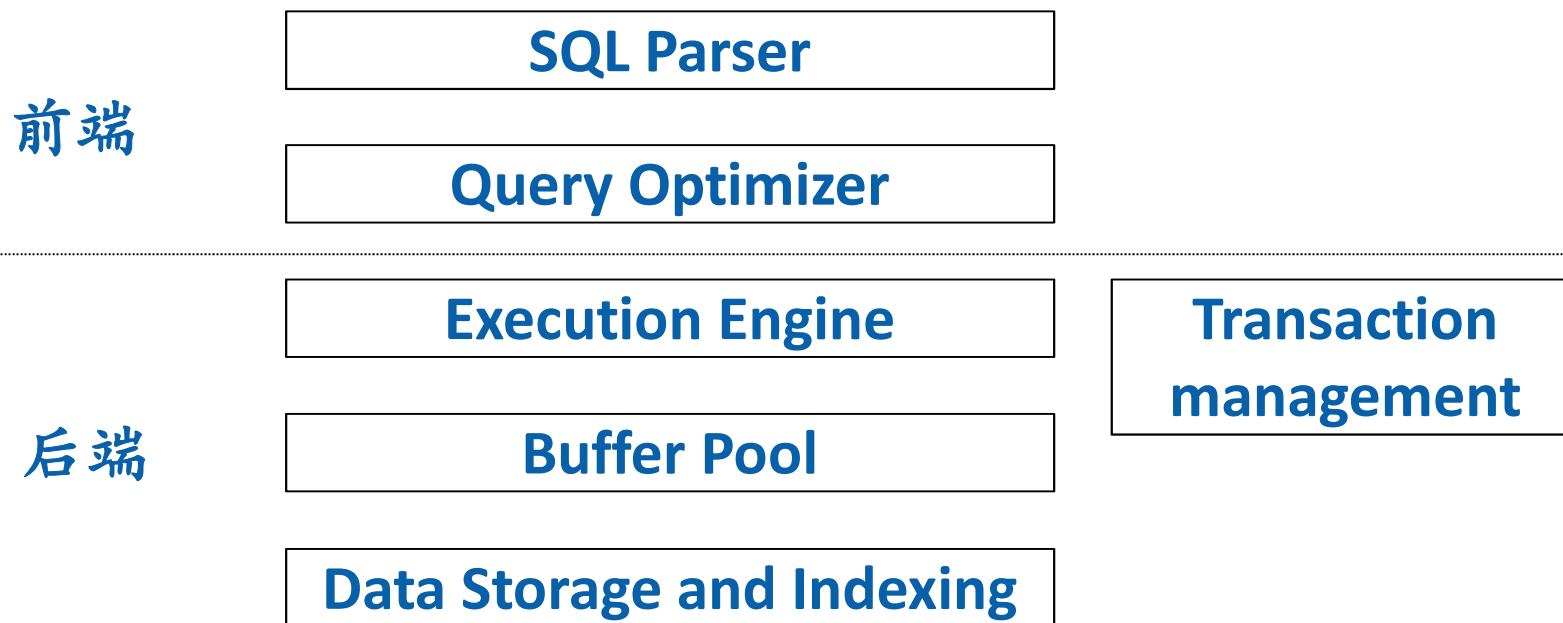
DBMS

- Database Management System
(数据库管理系统)
- RDBMS: Relational Database Management System
(关系型数据库系统)
- 目前的三大主流商用系统
 - Oracle, Microsoft SQL Server, IBM DB2
- 开源数据库系统
 - PostgreSQL, MySQL
 - Library: sqlite

通常的系统为典型的Client / Server

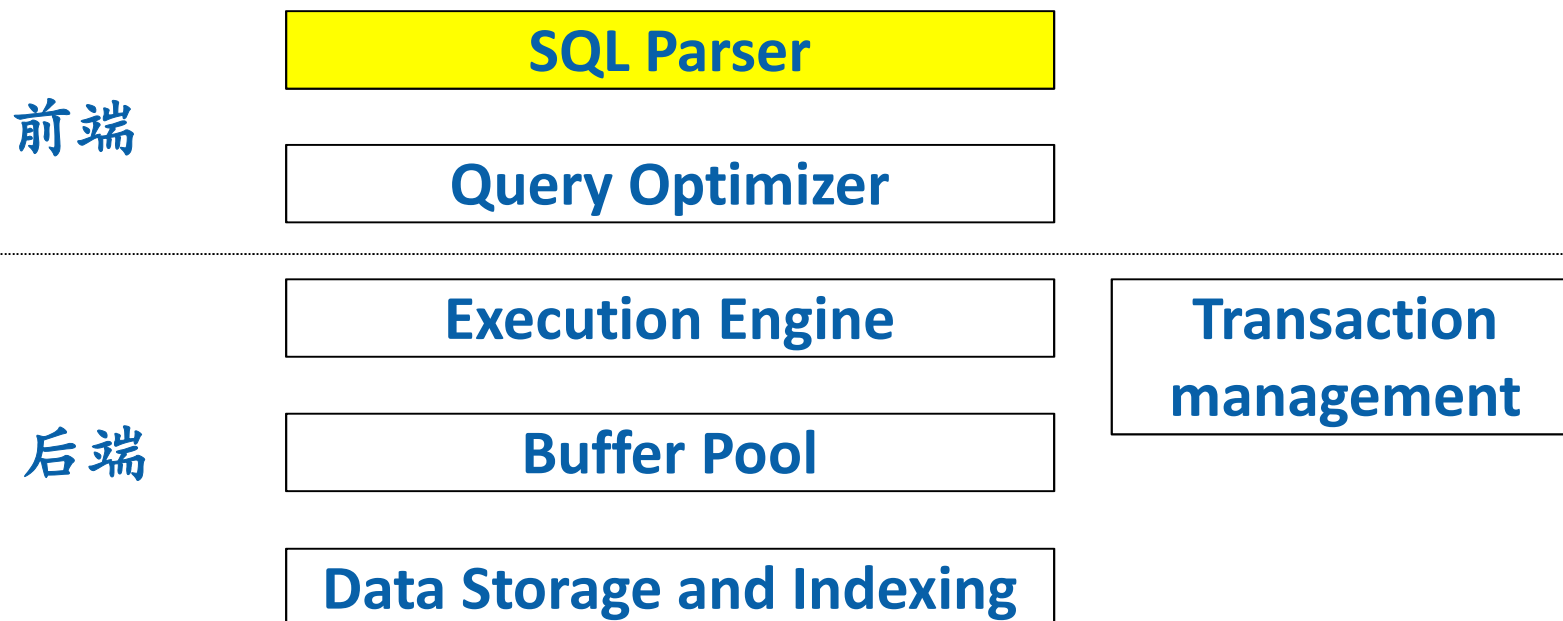


RDBMS的系统架构(单机)



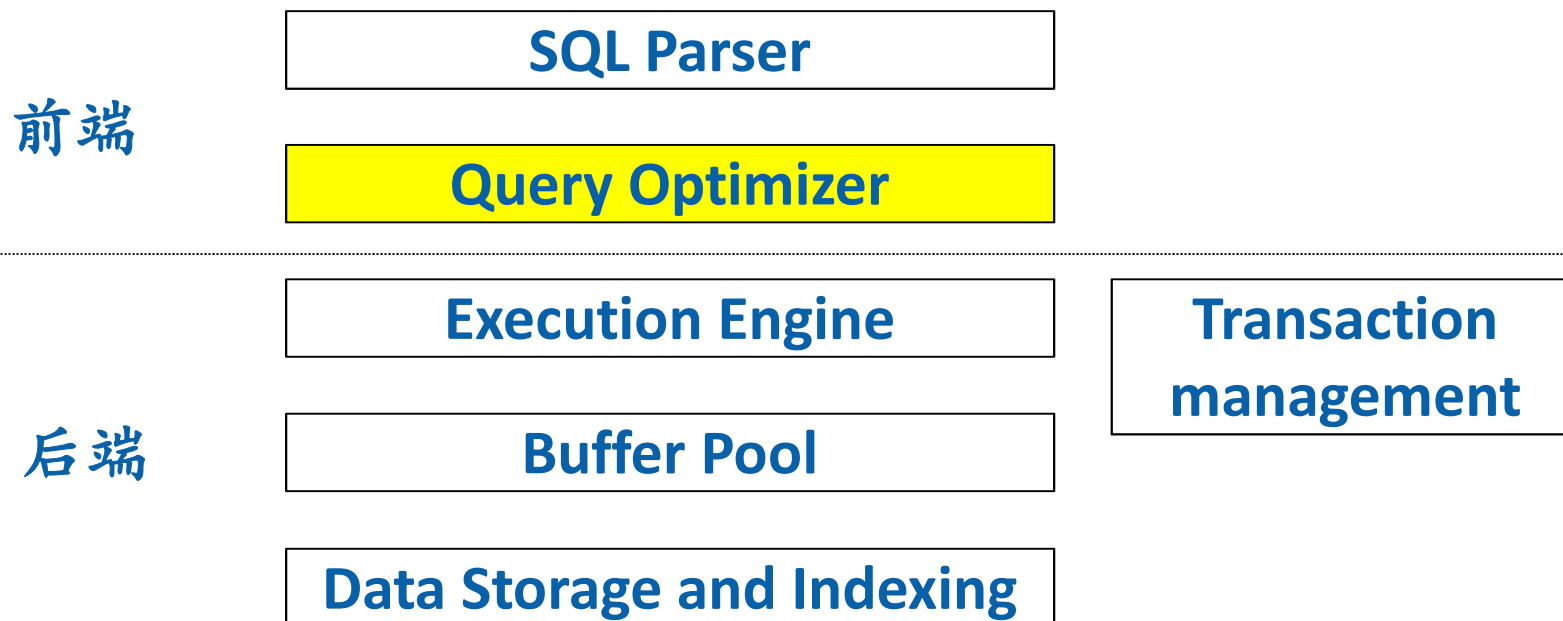
RDBMS的系统架构

- SQL 语句的程序 → 解析好的内部表达
(例如: parsing tree)
 - 语法解析, 语法检查, 表名、列名、类型检查



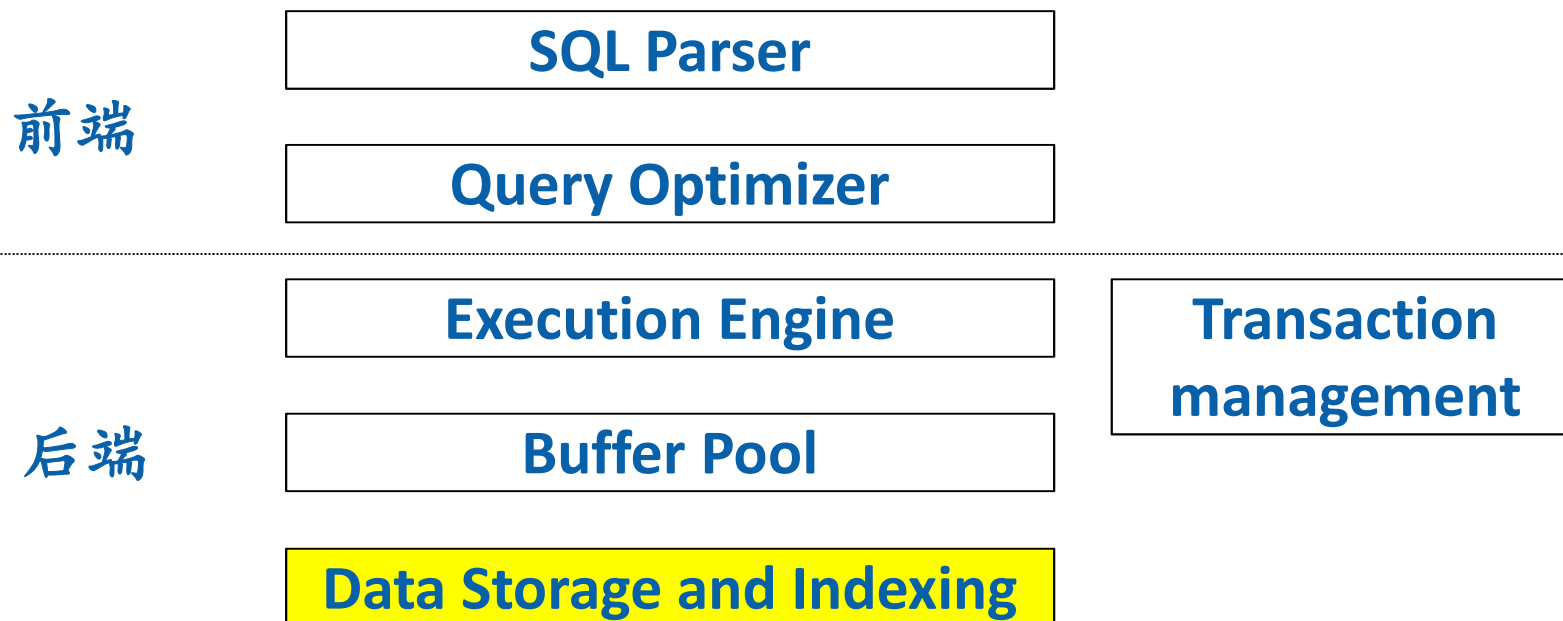
RDBMS的系统架构

- SQL内部表达 → Query Plan (执行方案)
 - 产生可行的query plan
 - 估计query plan的运行时间和空间代价
 - 在多个可行的query plans中选择最佳的query plan



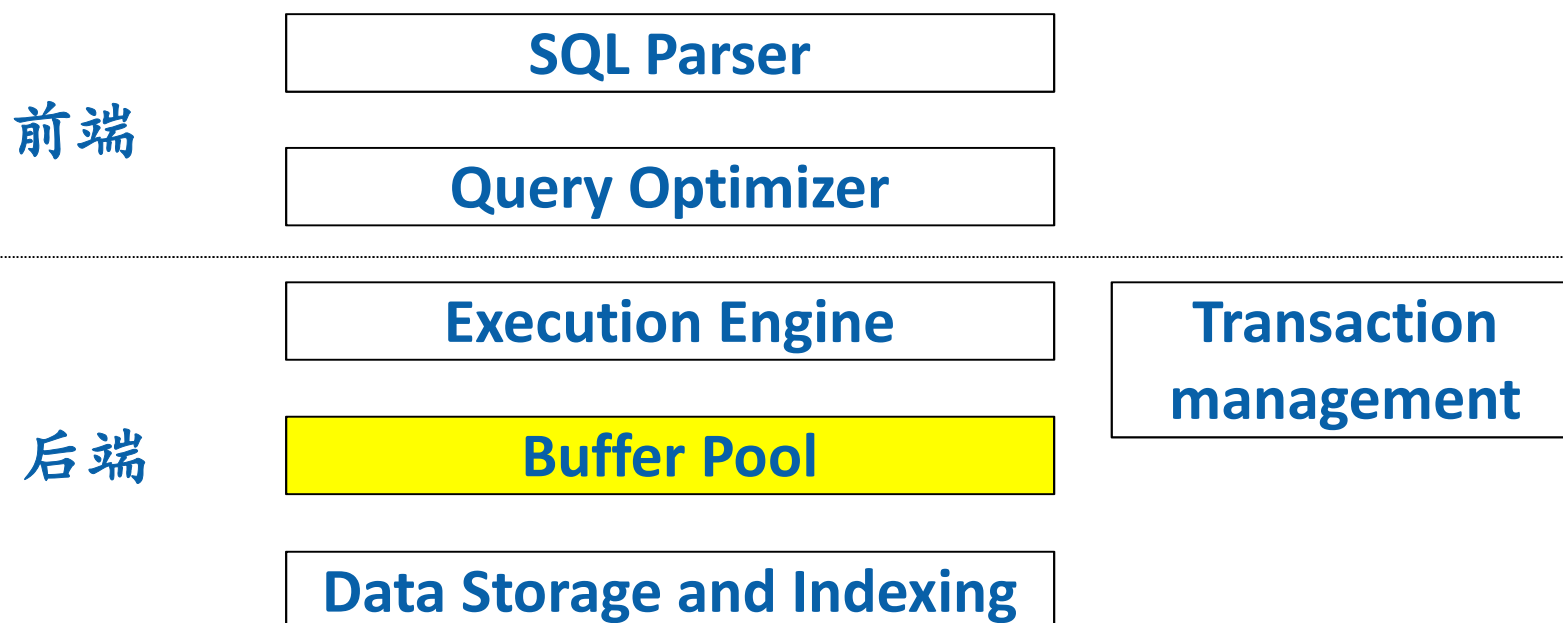
RDBMS的系统架构

- Data storage and indexing
 - 如何在硬盘上存储数据
 - 如何高效地访问硬盘上的数据



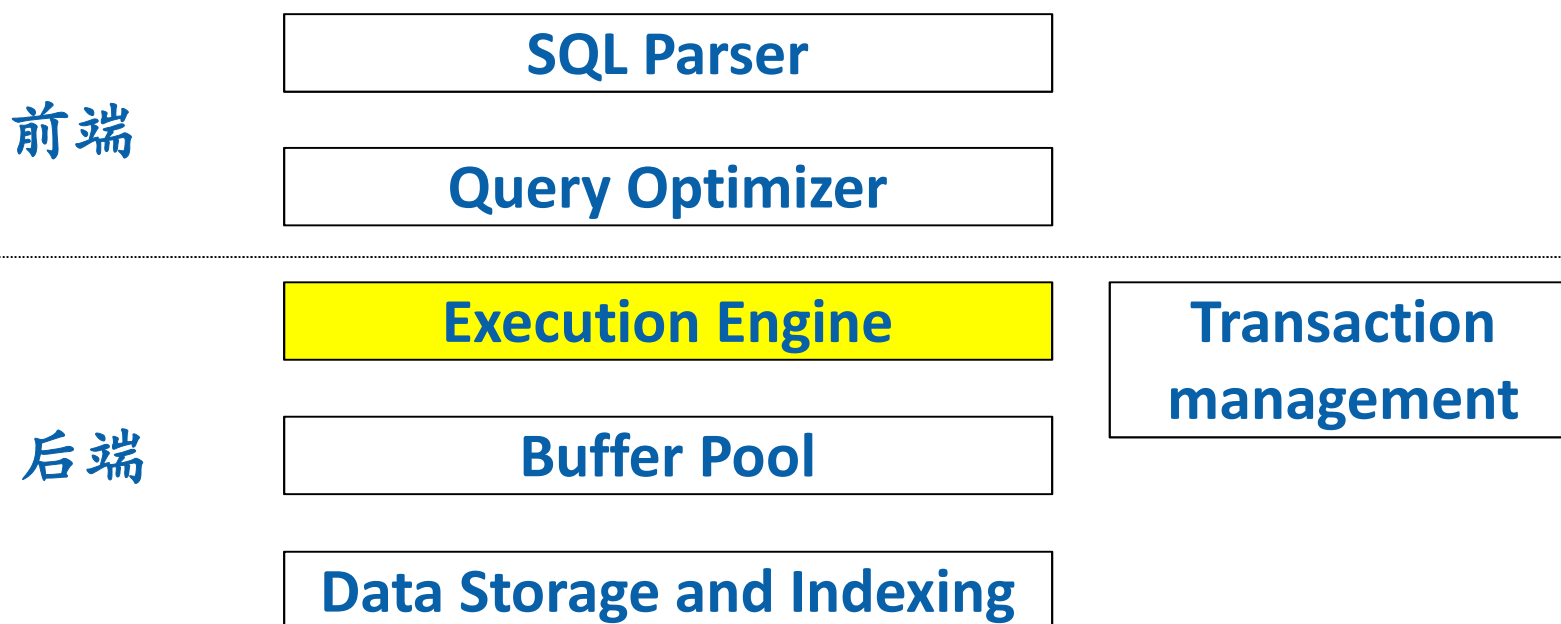
RDBMS的系统架构

- Buffer pool: 在内存中缓存硬盘的数据



单机RDBMS的系统架构

- query plan → SQL语句的结果
 - 根据query plan, 完成相应的运算和操作
 - 数据访问
 - 关系型运算的实现



RDBMS的系统架构

- Transaction management: 事务管理

- 目标是实现ACID
- 进行logging写日志, locking加锁
- 保证并行transactions事务的正确性

前端

SQL Parser

Query Optimizer

后端

Execution Engine

Buffer Pool

Data Storage and Indexing

Transaction
management

Outline

- 数据库系统架构
- 数据存储与访问
 - 数据表(Table)
 - 索引(Index)
 - 缓冲池(Buffer pool)
- 运算的实现
 - Operator tree
 - Selection & Projection
 - Join

数据库 vs. 文件系统（数据存储角度比较）

• 文件系统

- 存储文件(file)
- 通用的，存储任何数据和程序
- 文件是无结构的，是一串字节组成的
- 操作系统内核中实现
- 提供基本的编程接口
 - Open, close, read, write

• 共同点

- 数据存储在外存（硬盘）
- 根据硬盘特征，数据分成定长的数据块

• 数据库

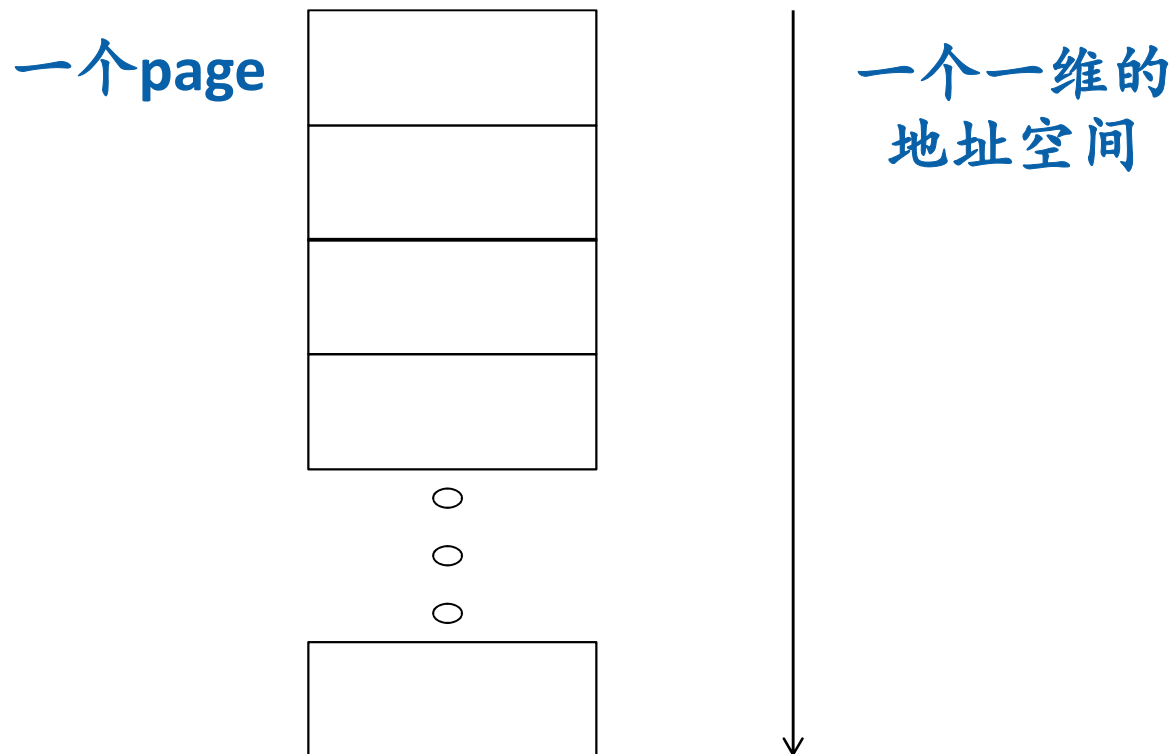
- 存储数据表(table)
- 专用的，针对关系型数据进行存储
- 数据表由记录组成，每个记录由多个属性组成
- 用户态程序中实现
- 提供SQL接口

数据在硬盘上的存储

- 硬盘最小存储访问单位为一个扇区：512B
- 文件系统访问硬盘的单位通常为：4KB
- RDBMS最小的存储单位是database page size
 - Data page size 可以设置为1~多个文件系统的 page
 - 例如，4KB, 8KB, 16KB, ...
- 我们下面用page简称database page

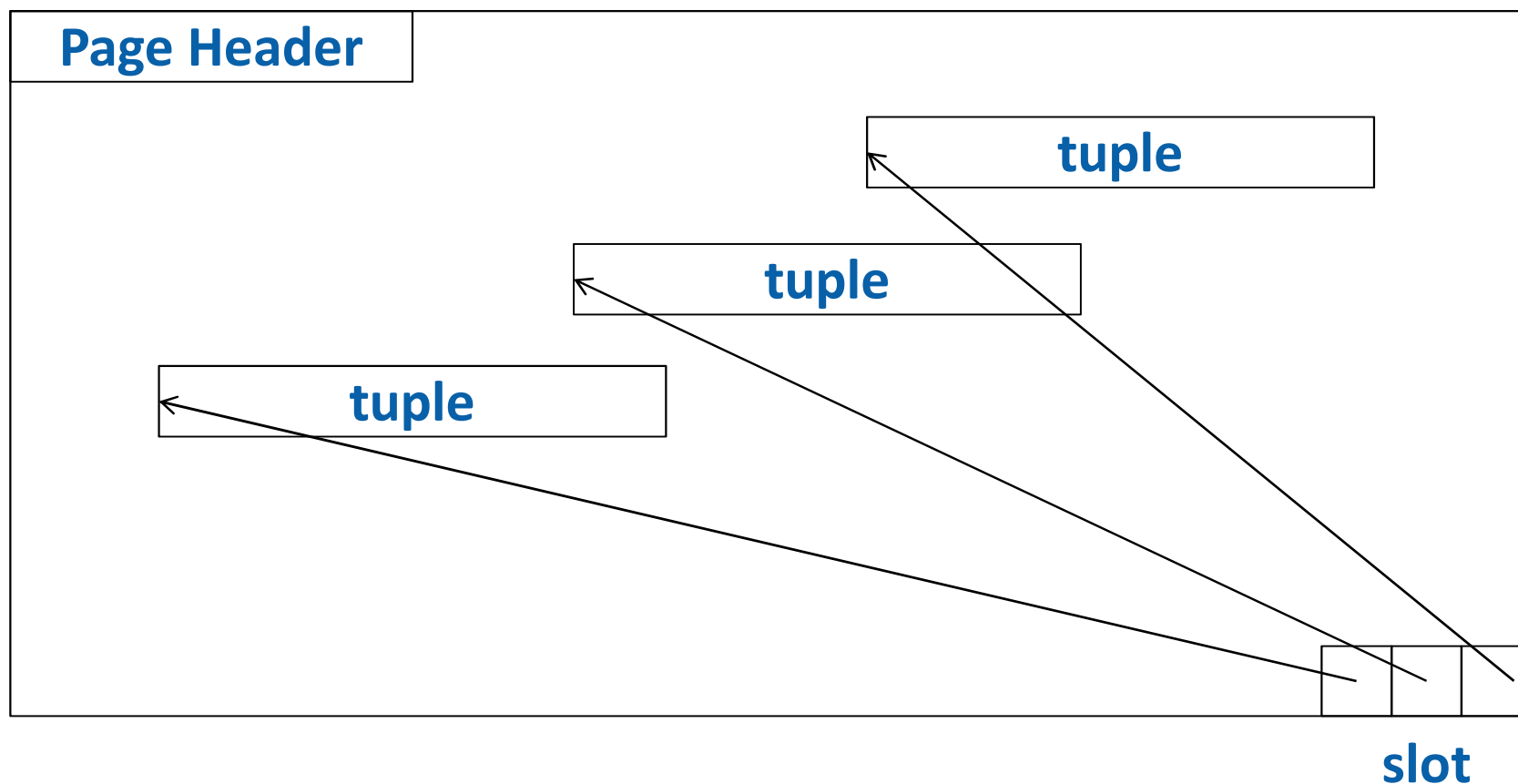


数据在硬盘上的存储



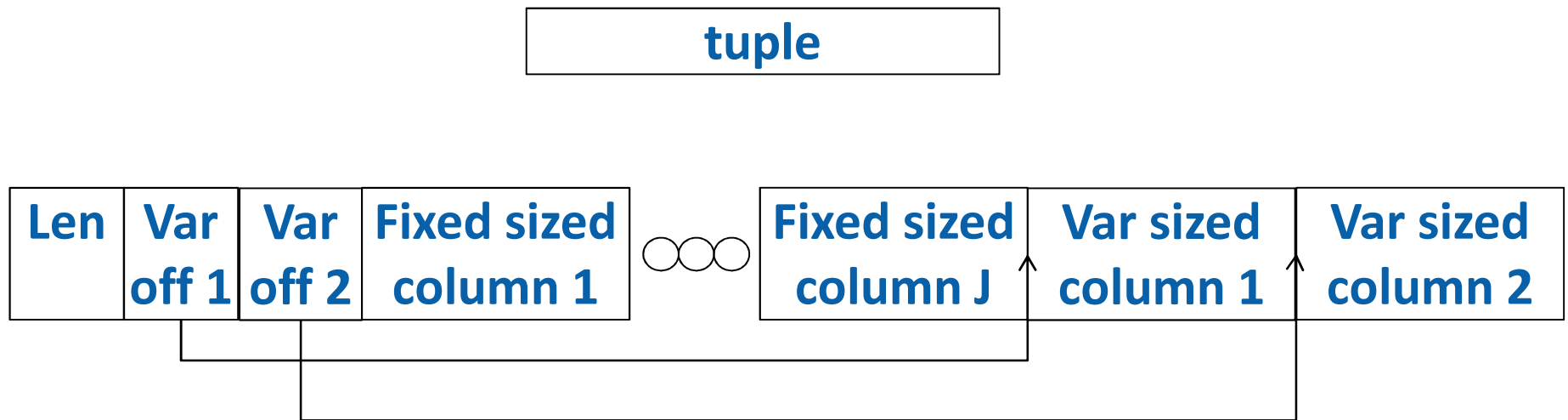
- Raw partition或file

Page内部结构



- 方便存储变长的记录
- 记录超出页面大小就需要特殊处理

Tuple的结构



- 举例：有两个变长的列

举例

ID	Name	Birthday	Gender	Major	Year	GPA
131234	张飞	1995/1/1	男	计算机	2013	85

create table *Student* (
 ID integer NOT NULL, *Name* varchar(20), *Birthday* date,
 Gender enum(M, F), *Major* varchar(20), *Year* year, *GPA* float,
 primary key (*ID*));

0	2	4	6	10	14	15	19	23	27	33
33	23	27	131234	1995/1/1	男	2013	85	张飞	计算机	
2B	2B	2B	4B	4B	1B	4B	4B	4B	6B	

数据的顺序访问

```
select Name, GPA  
from Student  
where Major = '计算机';
```

- 顺序读取Student表的每个page
- 对于每个page，顺序访问每个tuple
- 检查条件是否成立
- 对于成立的读取Name和GPA
- 有什么性能问题吗？ 如果全校有100个系会怎么样？

Selective Data Access (有选择性的访问)

- 使用index(索引)

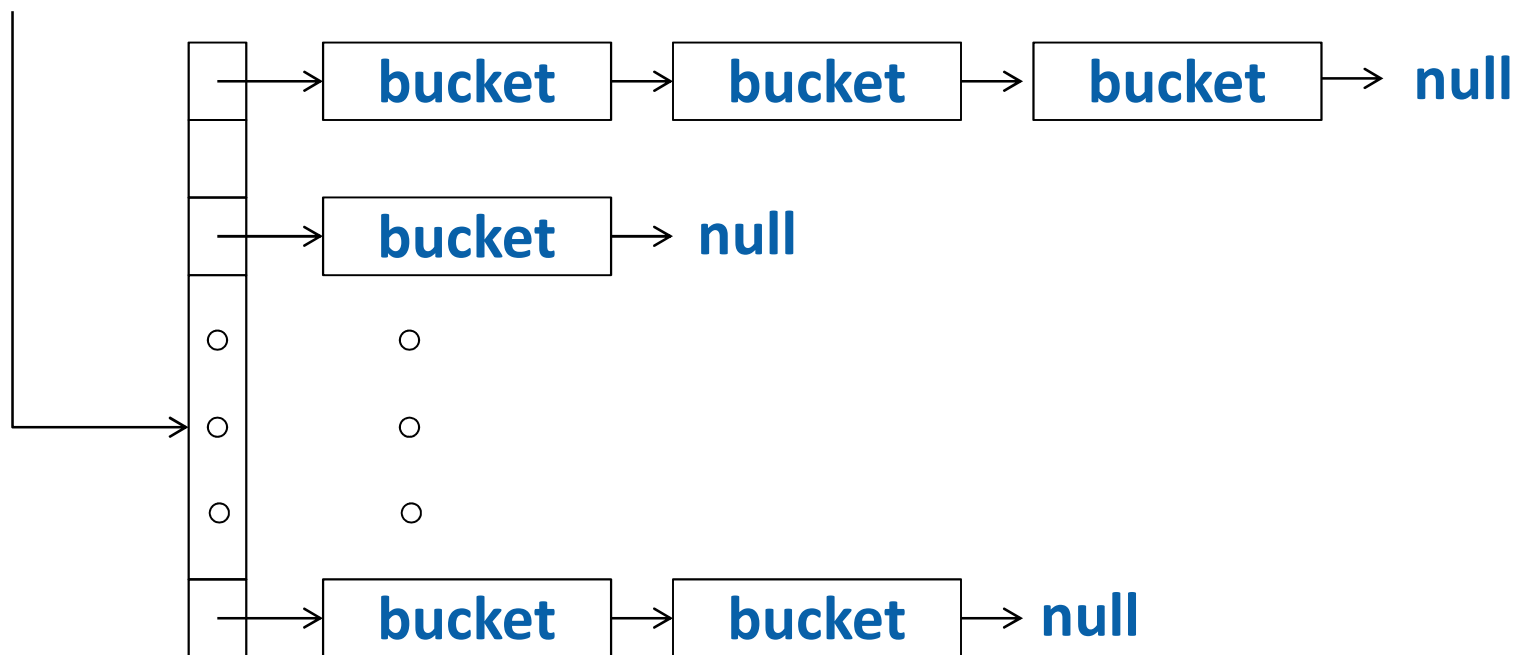
- ☐ Tree based index
- ☐ Hash based index

- 有什么不同?

- ☐ Tree based: 有序, 支持点查询和范围查询
- ☐ Hash based: 无序, 只支持点查询

Chained Hash Table

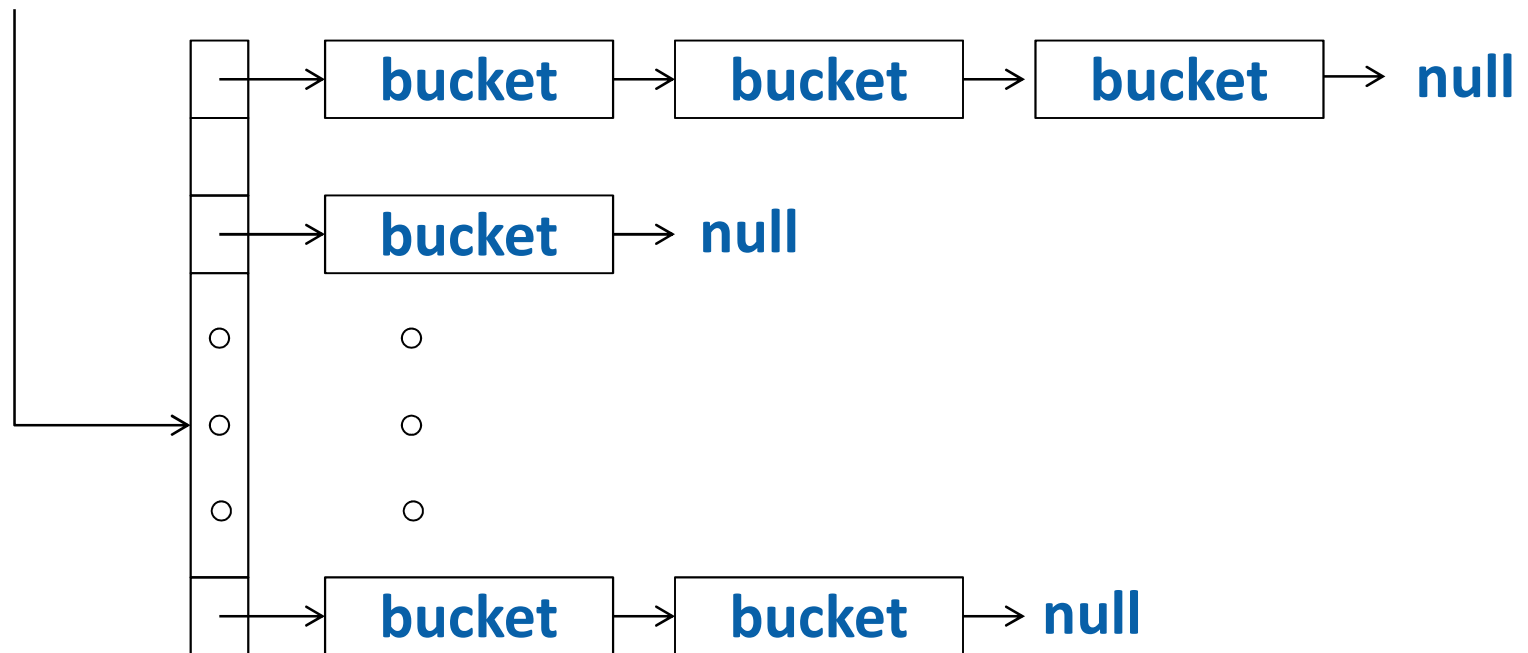
$h(\text{key}) \% \text{size}$



- $h(\text{key})$ 对key进行位运算产生一个整数
- size是hash table的header数组的元素个数

Chained Hash Table on Disk

$h(\text{key}) \% \text{size}$



在硬盘上怎么存？

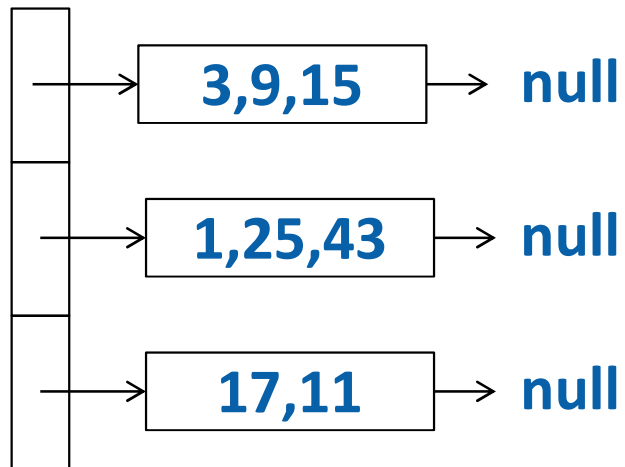
bucket = page

当chain上平均bucket数太多时，需要增大size，重新hashing

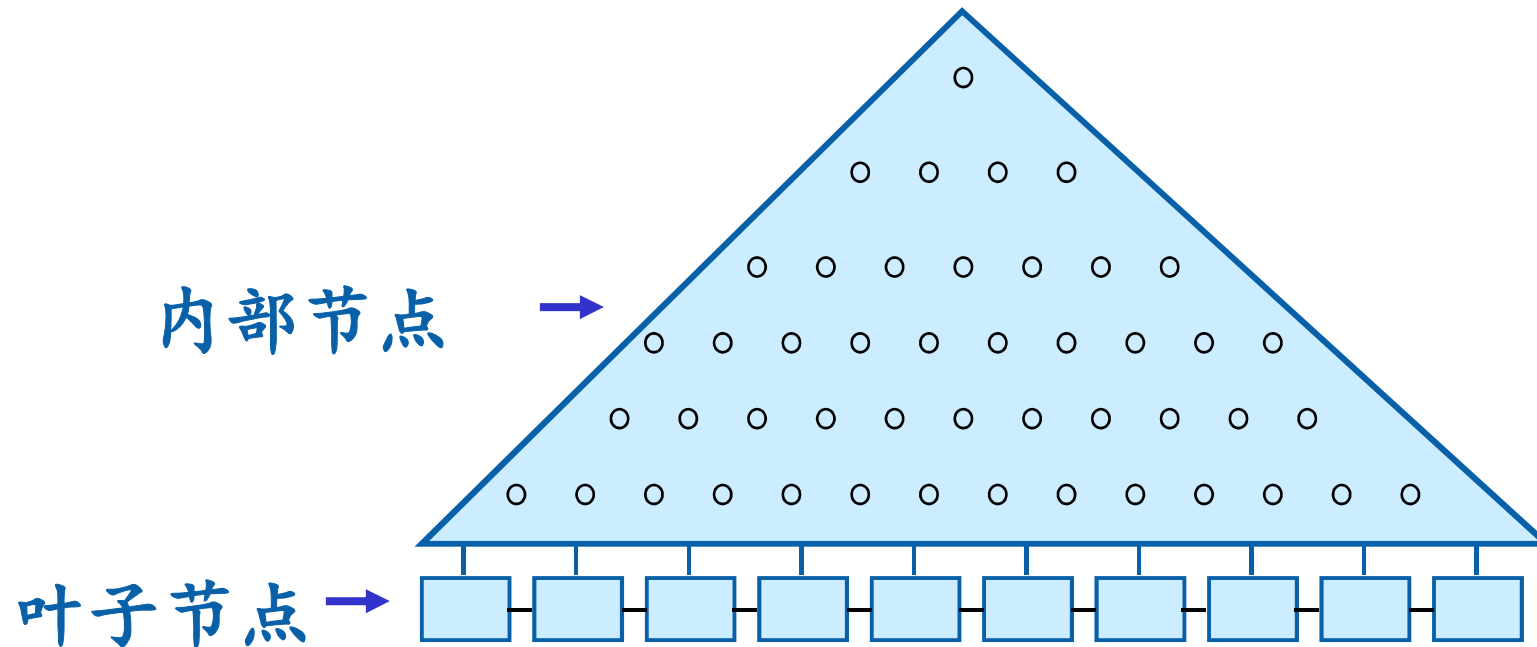
（存在hash table design可以降低re-hashing的代价）

举例

- Key: 1, 3, 25, 17, 9, 11, 43, 15
- $h(\text{key}) = \text{key}$
- Size = 3

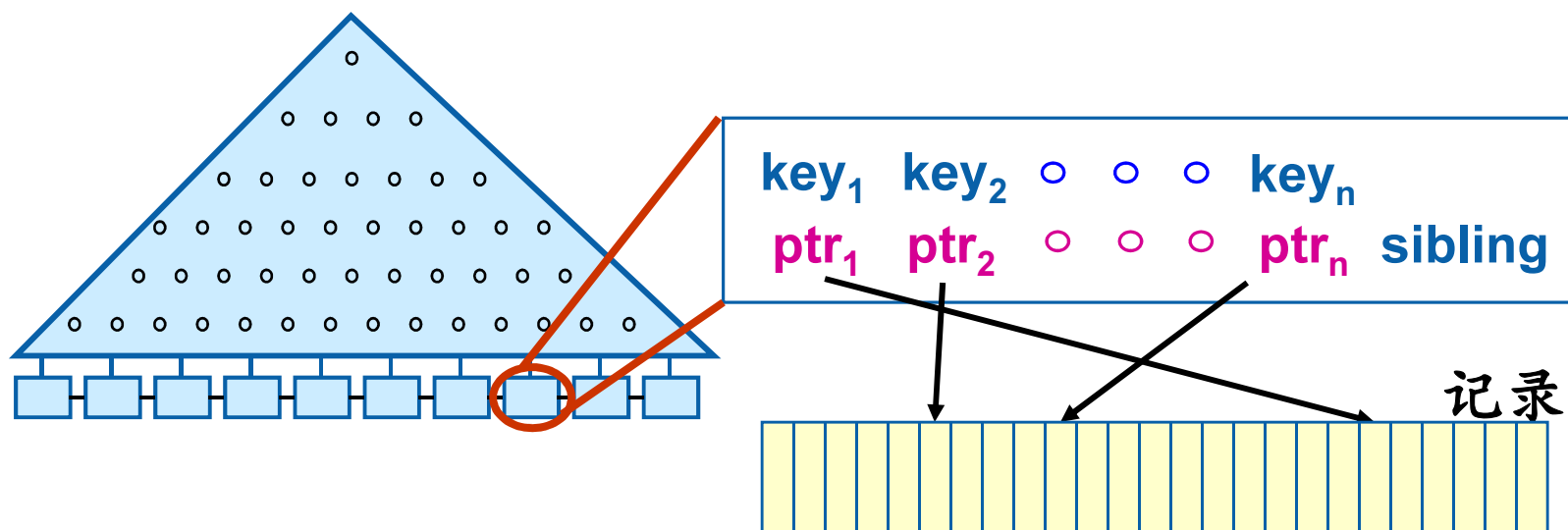


B⁺-Trees



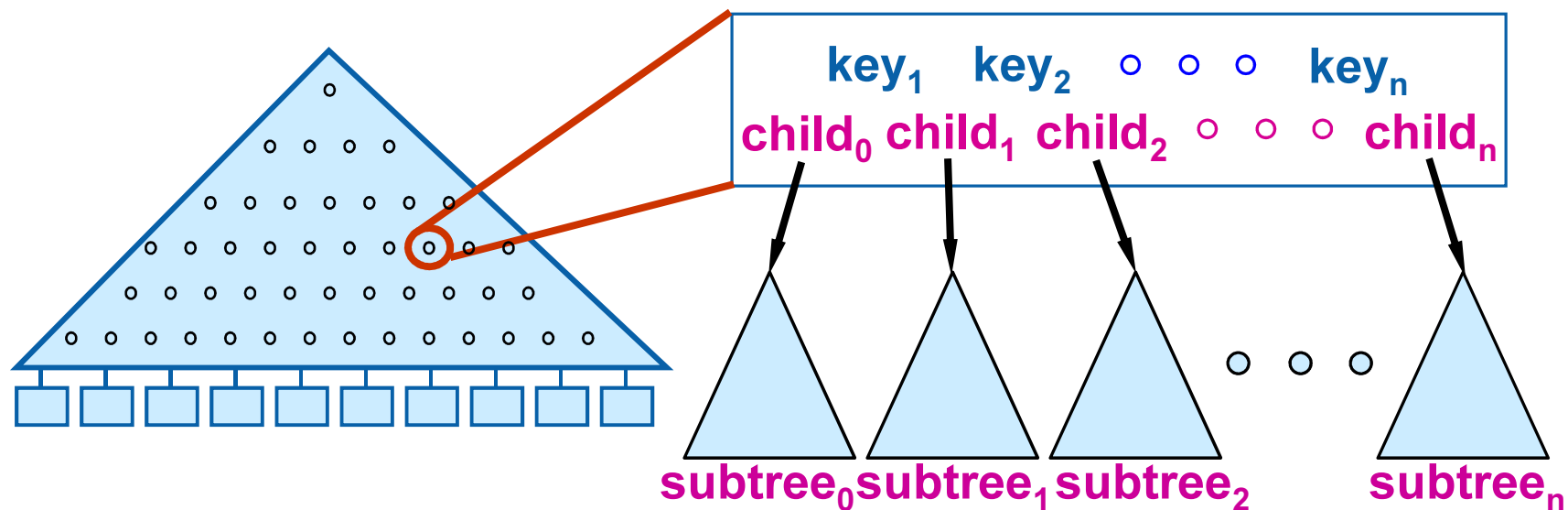
- 每个节点是一个page
- 所有key存储在叶子节点
- 内部节点完全是索引作用

叶子节点



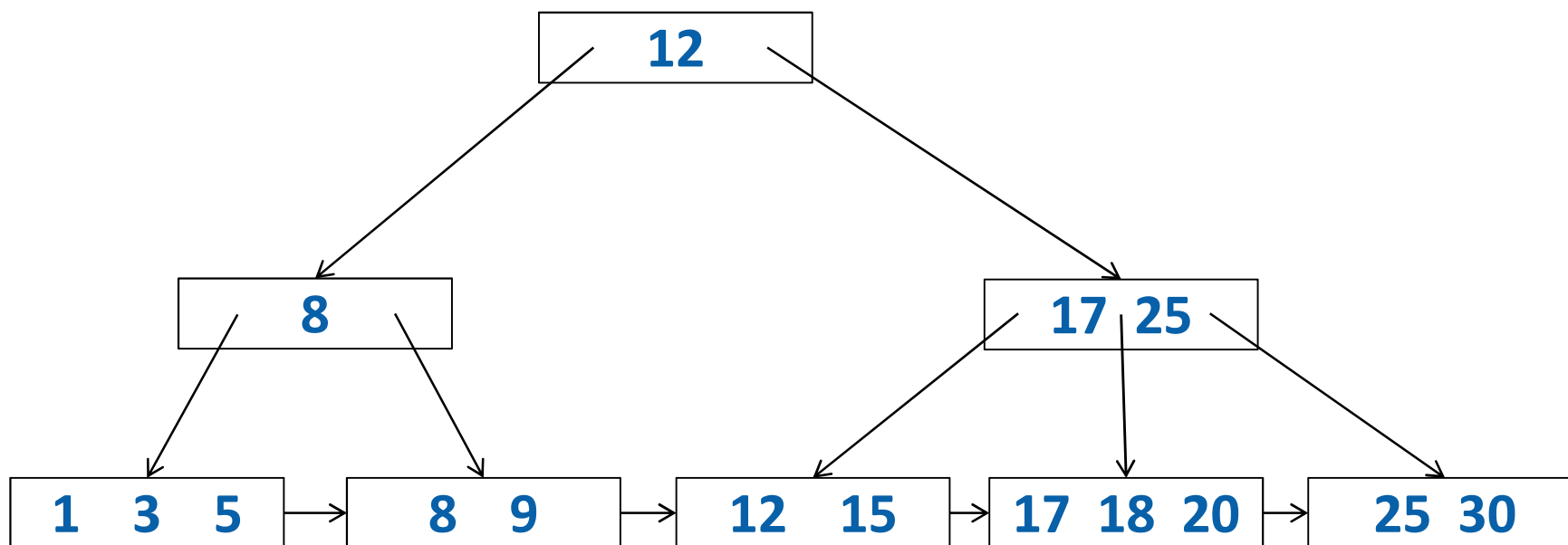
Keys 按照从小到大顺序排列: $key_1 < key_2 < \dots < key_n$
叶节点自左向右也是从小到大排序, 以sibling pointer链起来
(ptr= record ID; sibling = page ID)

内部节点



$$\text{subtree}_0 < \text{key}_1 \leq \text{subtree}_1 < \text{key}_2 \cdots < \text{key}_n$$

举例

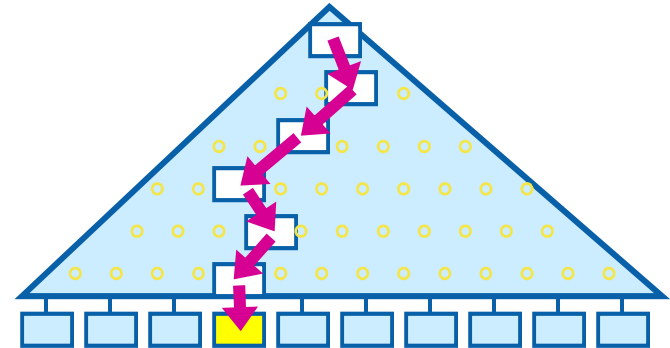


假设每个节点的child/pointer个数为 $B=3$

B⁺-Tree: Search

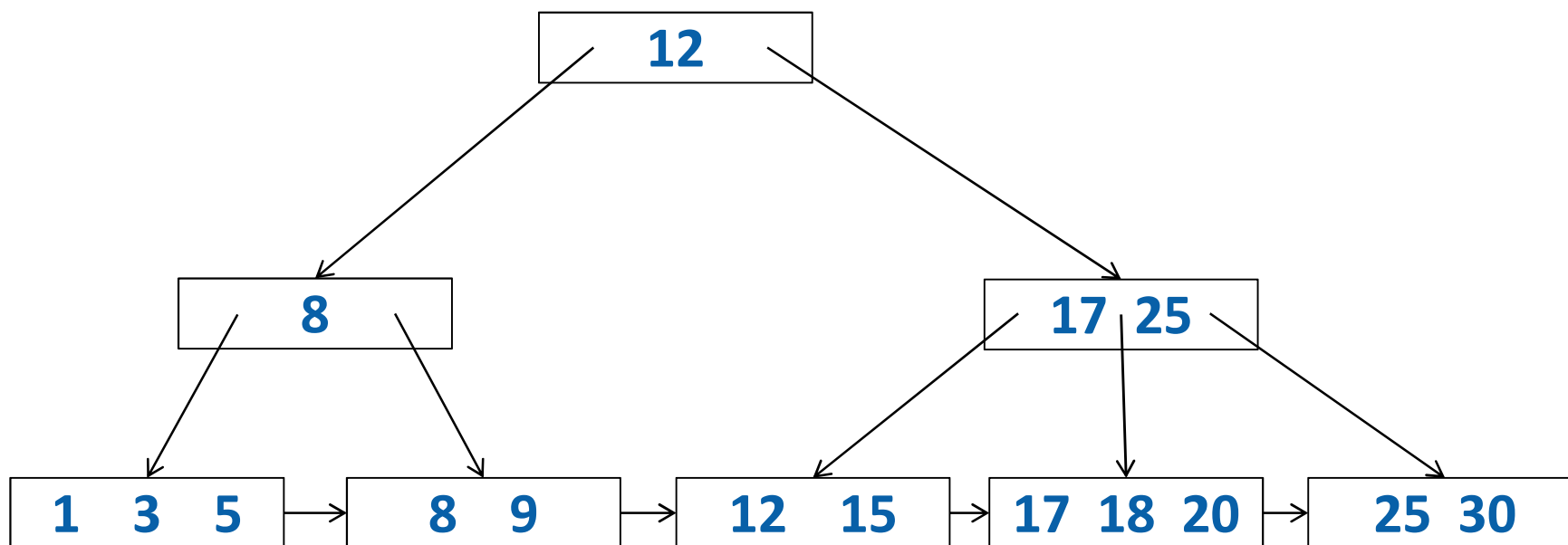
Search:

- 从根节点到叶节点
- 每个节点中进行二分查找
 - 内部节点：找到包括search key的子树
 - 叶节点：找到匹配



举例

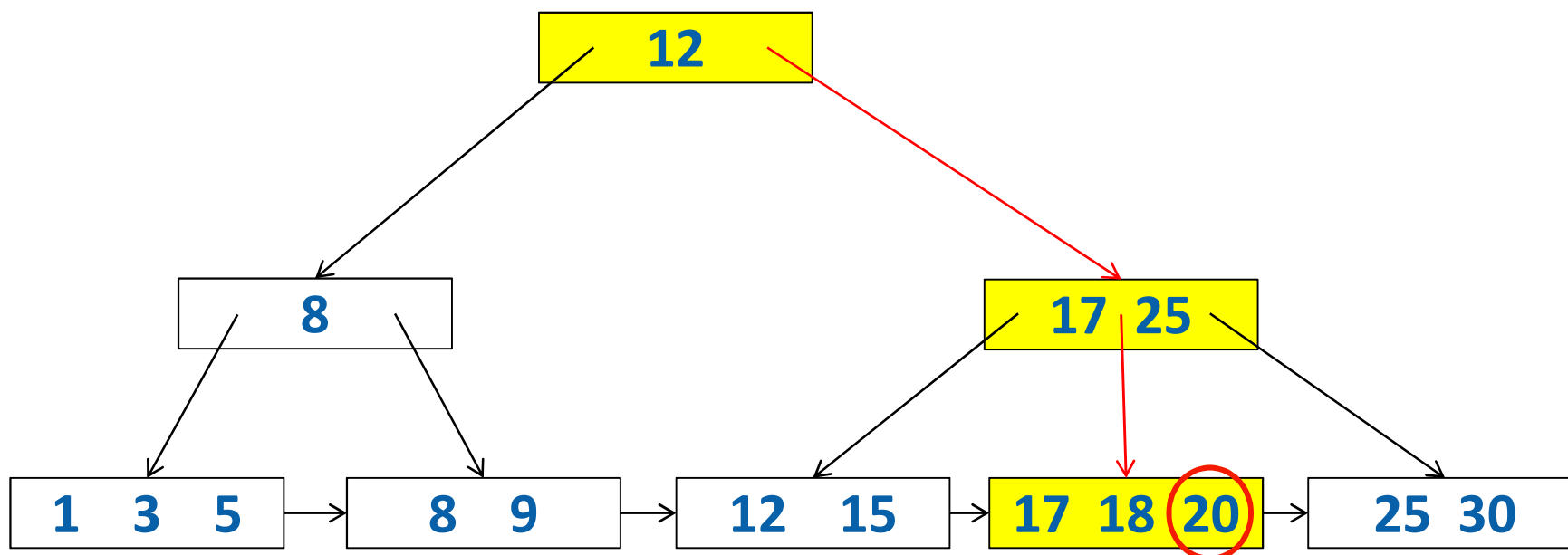
Search(20)



假设每个节点的child/pointer个数为 $B=3$

举例

Search(20)

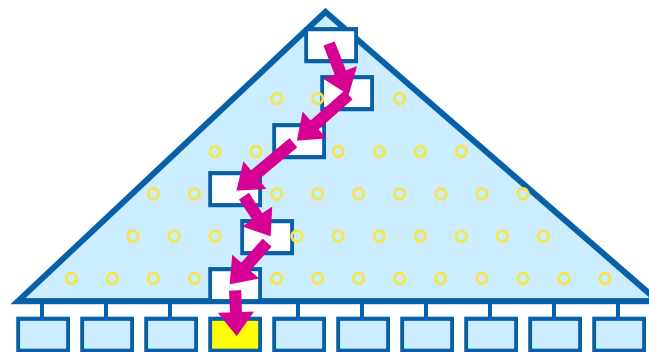


假设每个节点的child/pointer个数为 $B=3$

B⁺-Tree: Search

Search代价

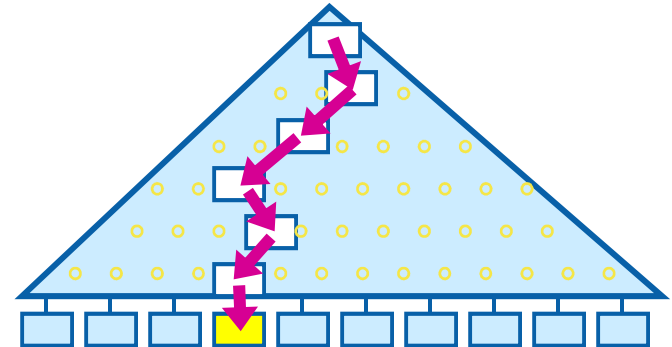
- 共有N个key
- 每个节点的child/pointer个数为B
- 总I/O次数=树高: $O(\log_B N)$
- 总比较次数
 - 每个节点内部二分查找: $O(\log_2 B)$
 - $O(\log_B N) \times O(\log_2 B) = O(\log_2 N)$



B⁺-Tree: Insertion

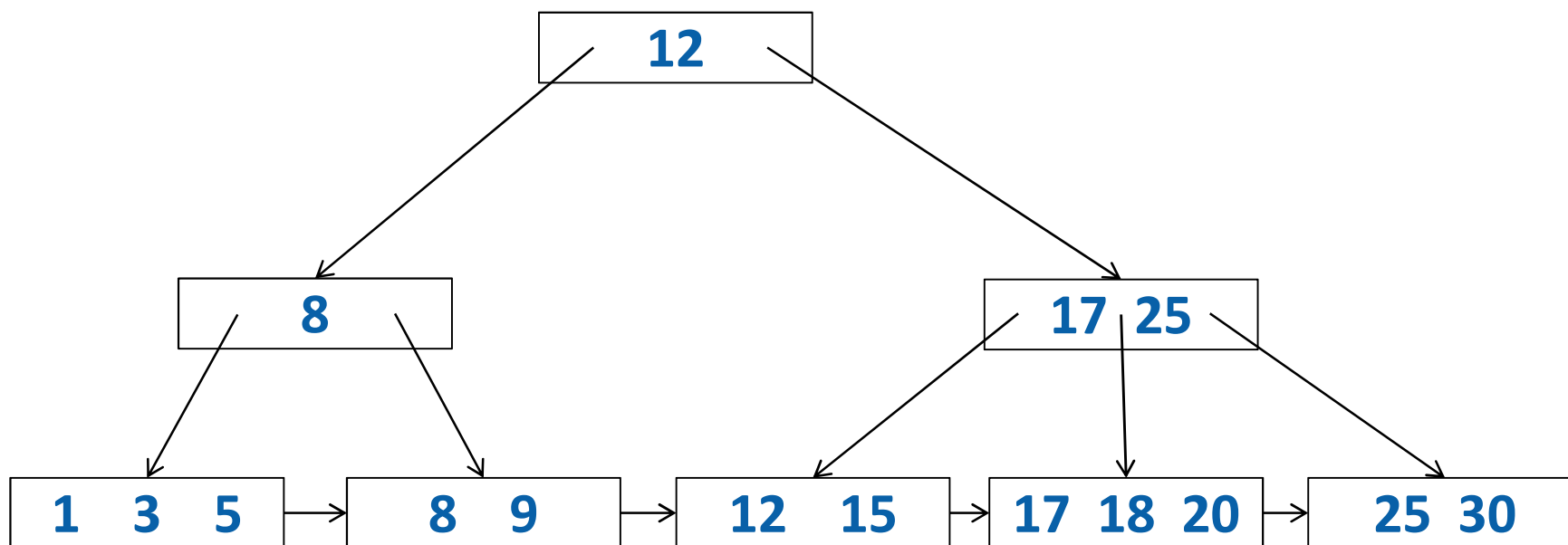
Insertion

- Search 然后在节点中插入
- 叶节点未滿，插入叶节点
- 叶节点满了，node split(节点分裂)



举例

Insert(14)

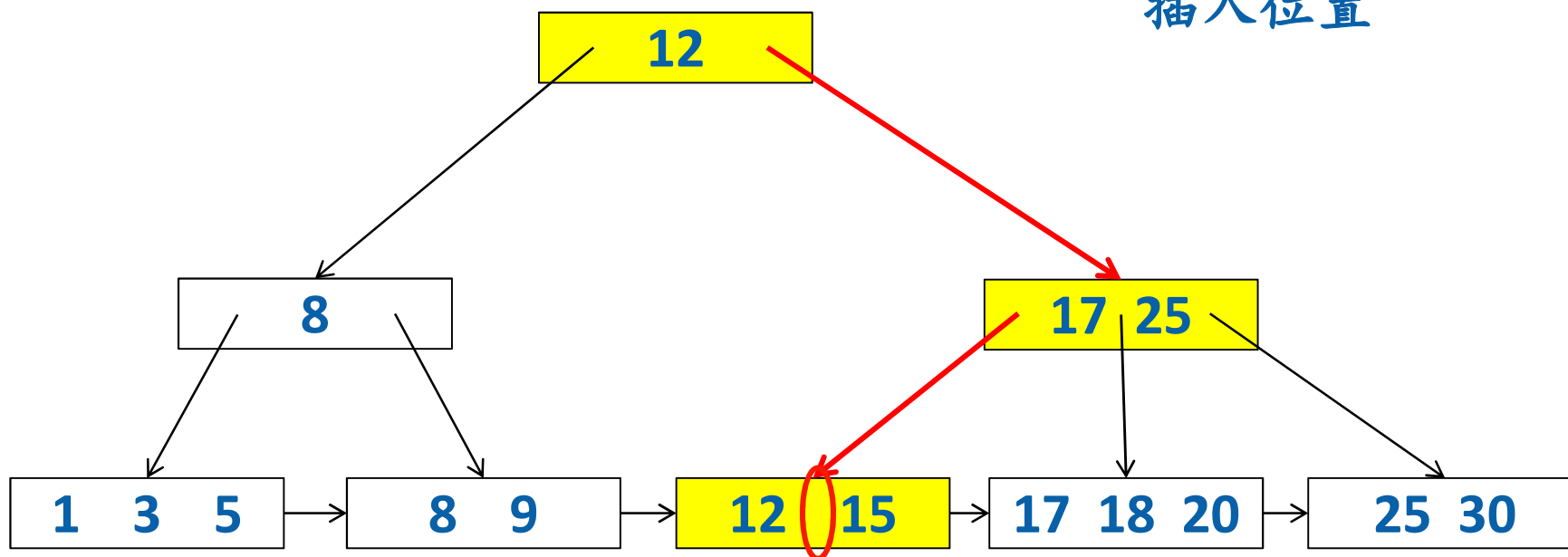


假设每个节点的child/pointer个数为 $B=3$

举例

Insert(14)

通过search找到
插入位置

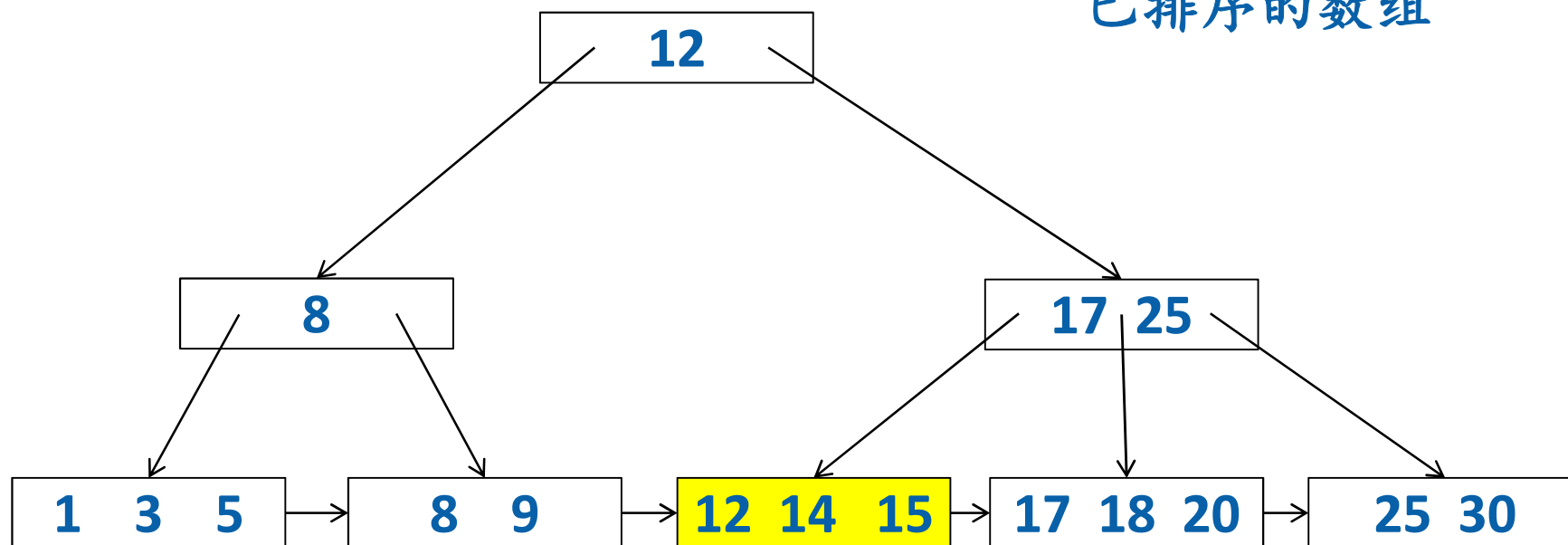


假设每个节点的child/pointer个数为 $B=3$

举例

Insert(14)

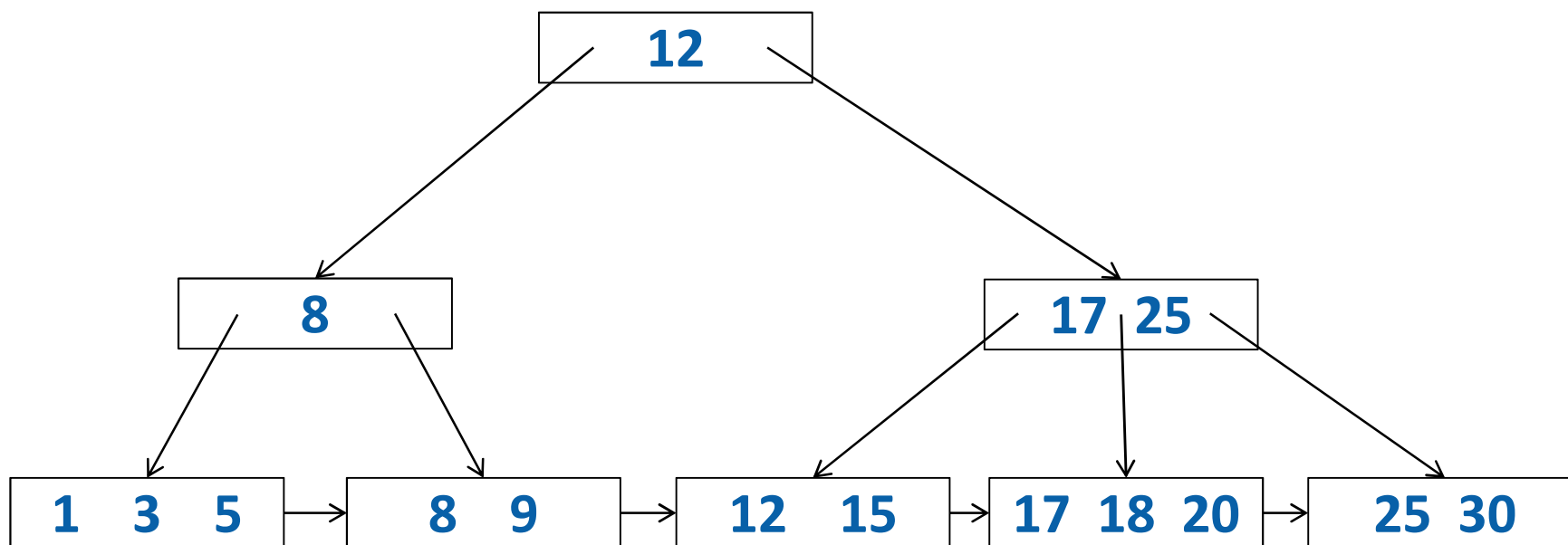
叶子未满，插入
已排序的数组



假设每个节点的child/pointer个数为 $B=3$

举例

Insert(19)

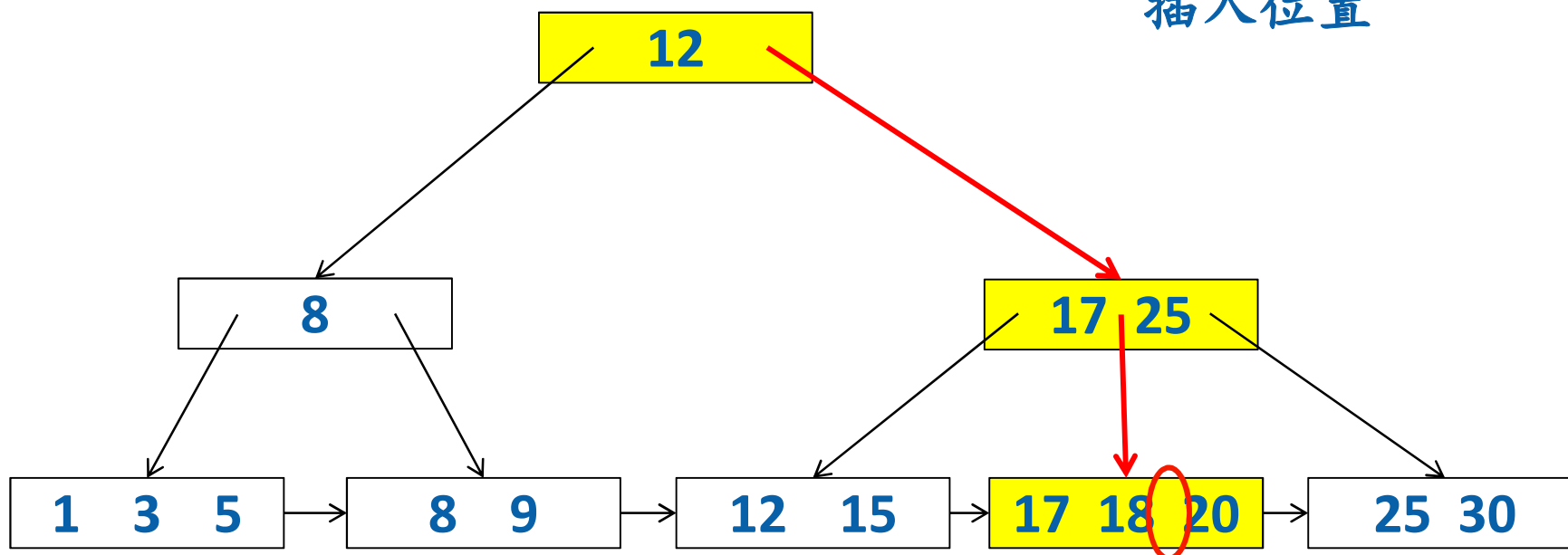


假设每个节点的child/pointer个数为 $B=3$

举例

Insert(19)

通过search找到
插入位置



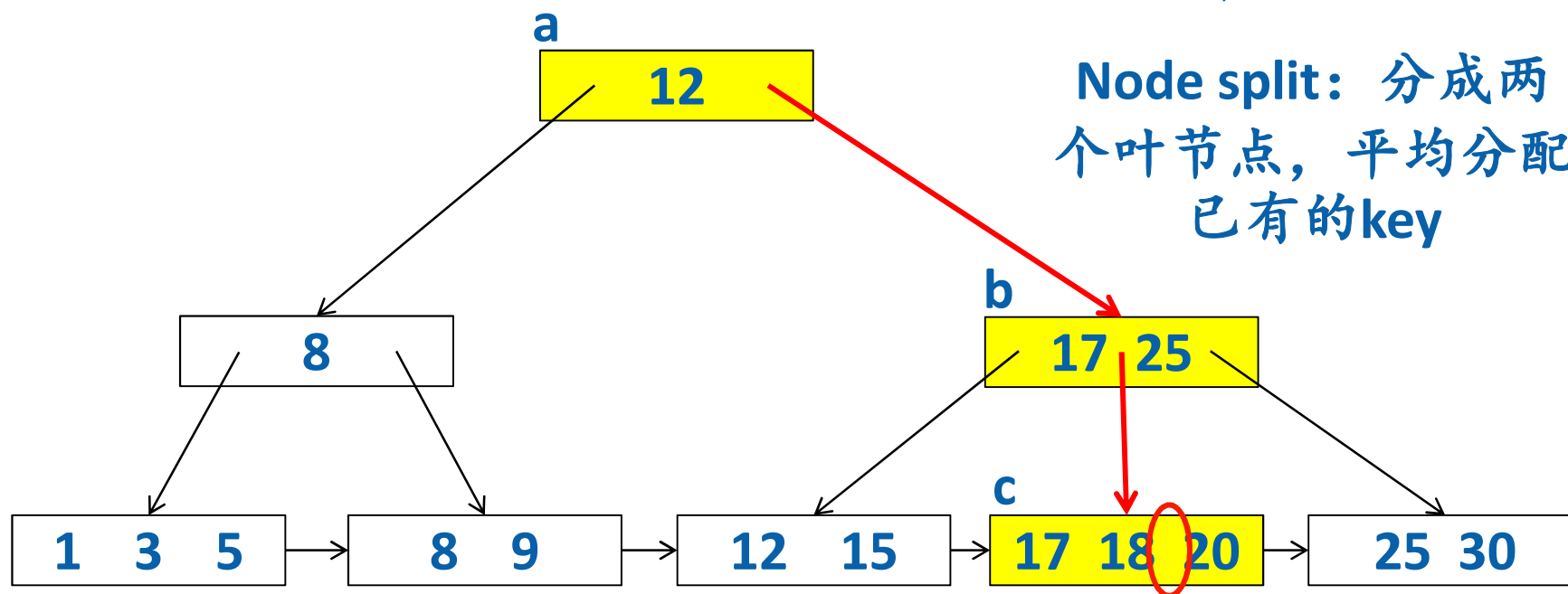
假设每个节点的child/pointer个数为 $B=3$

举例

Insert(19)

叶节点满了！

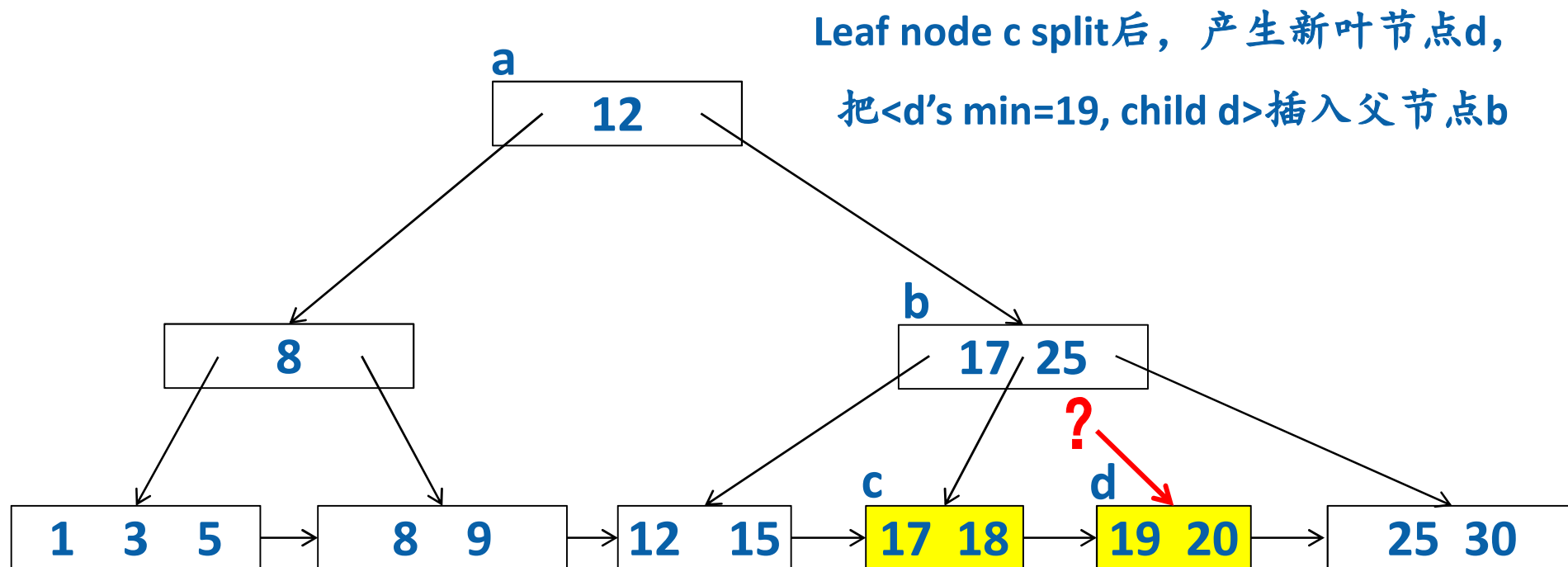
Node split: 分成两个叶节点，平均分配已有的key



假设每个节点的child/pointer个数为 $B=3$

举例

Insert(19)

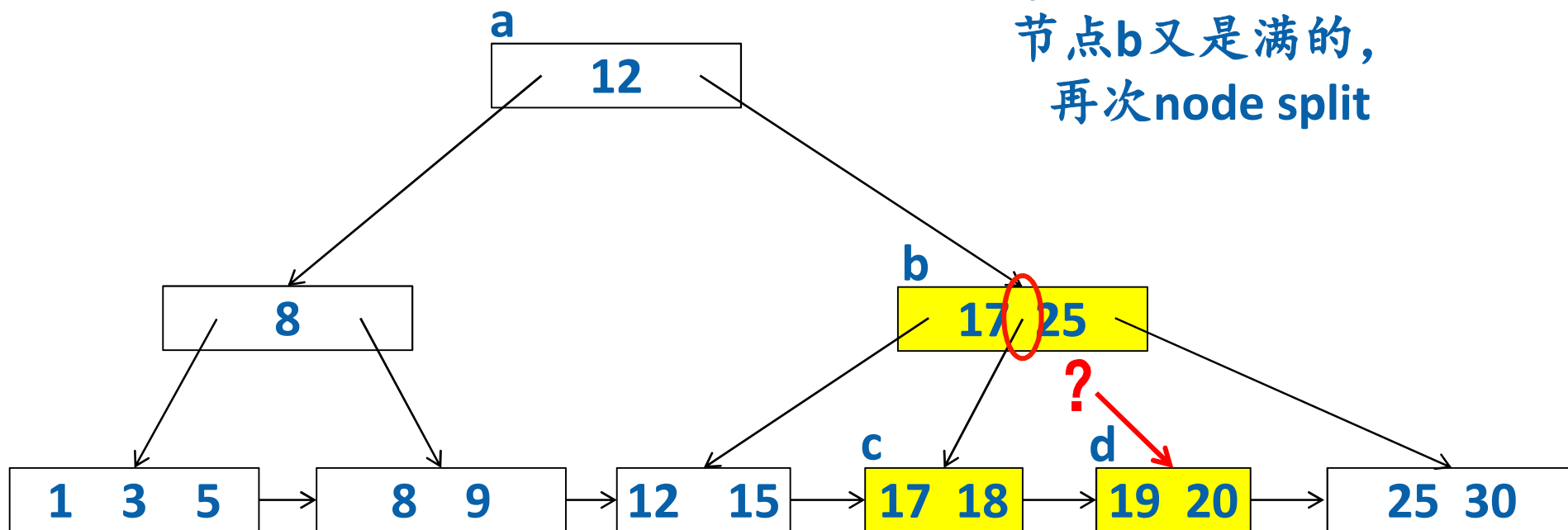


假设每个节点的child/pointer个数为B=3

举例

Insert(19)

把<19, child d>插入父节点b
节点b又是满的，
再次node split



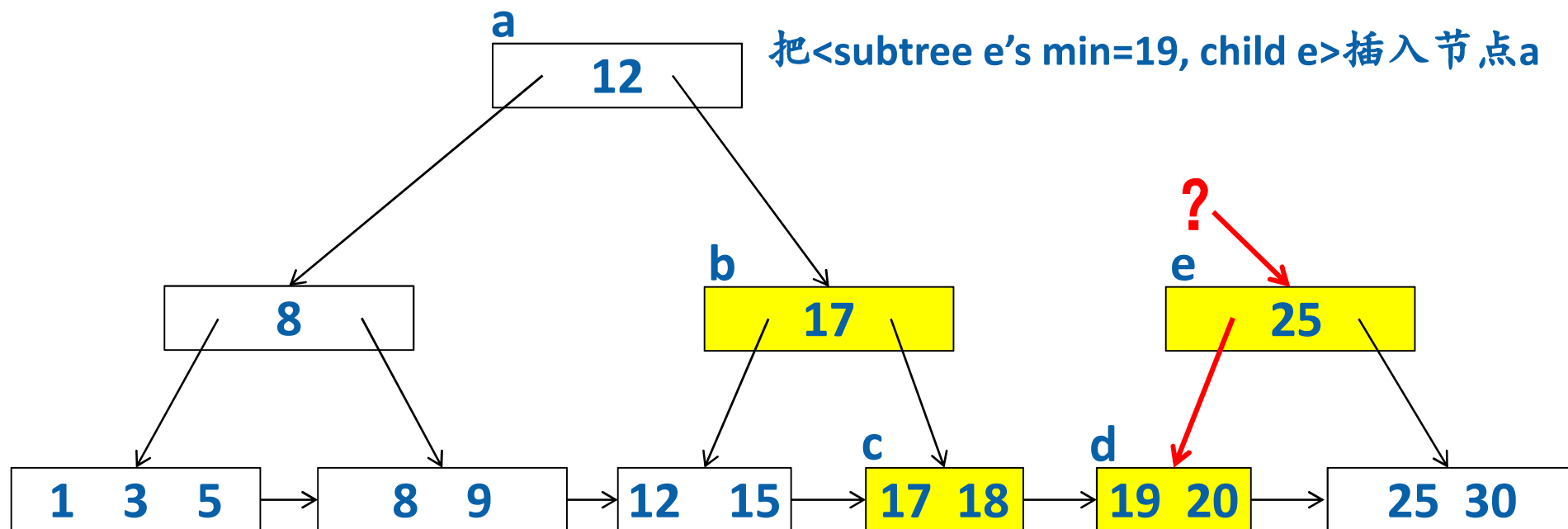
假设每个节点的child/pointer个数为 $B=3$

举例

Insert(19)

b 经过node split分裂出e

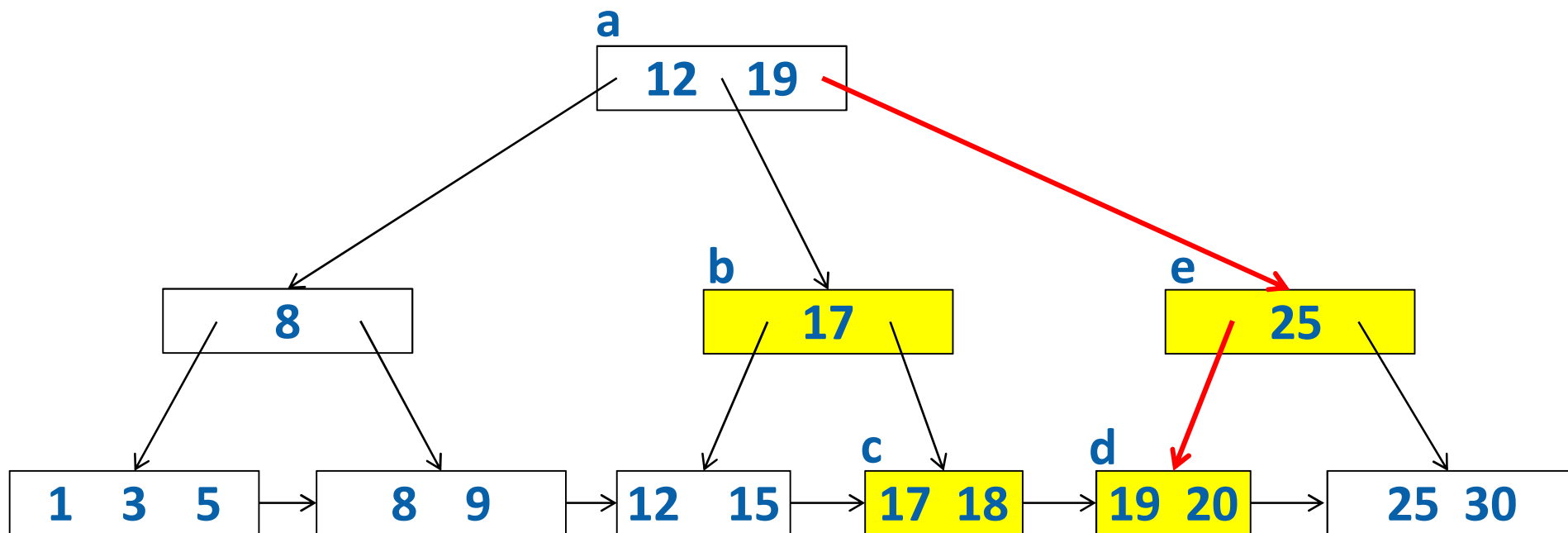
把<subtree e's min=19, child e>插入节点a



假设每个节点的child/pointer个数为B=3

举例

Insert(19)

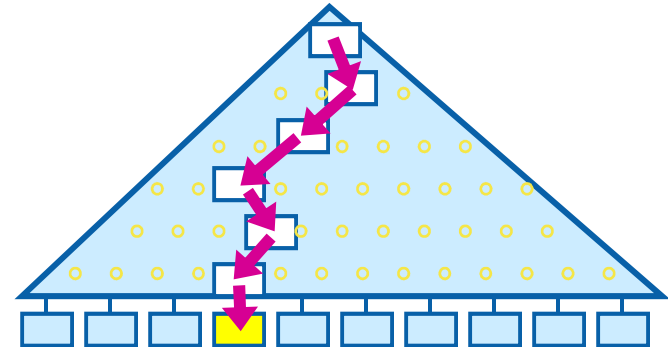


假设每个节点的child/pointer个数为 $B=3$

B⁺-Tree: Deletion

Deletion

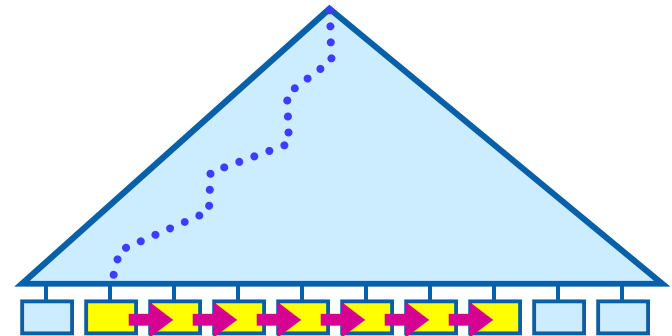
- Search 然后在节点中删除
- node merge?
 - 原设计：当节点中key个数小于一半
 - 实际实现：数据总趋势是增长的
可以只有节点为空时才node merge
或者完全不进行node merge



B⁺-Tree: Range Scan

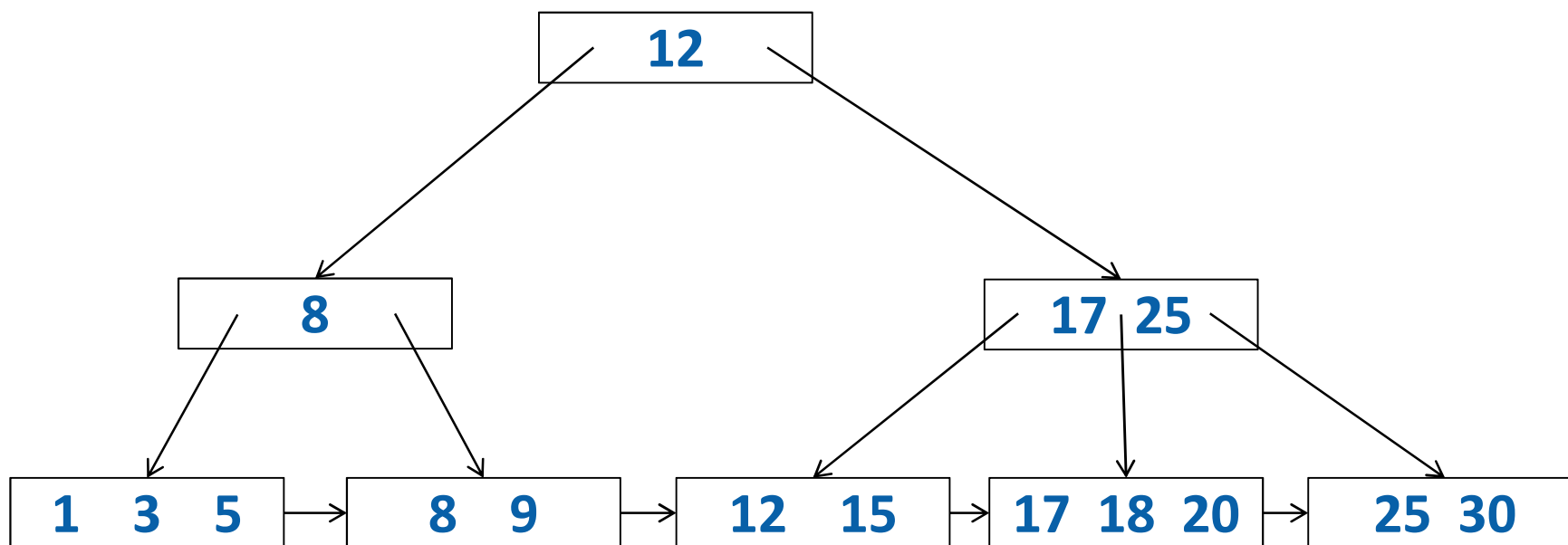
Range Scan

- ❑ 找到起始叶结点，包括范围起始值
- ❑ 沿着叶的链接读下一个叶结点
- ❑ 直至遇到范围终止值



举例

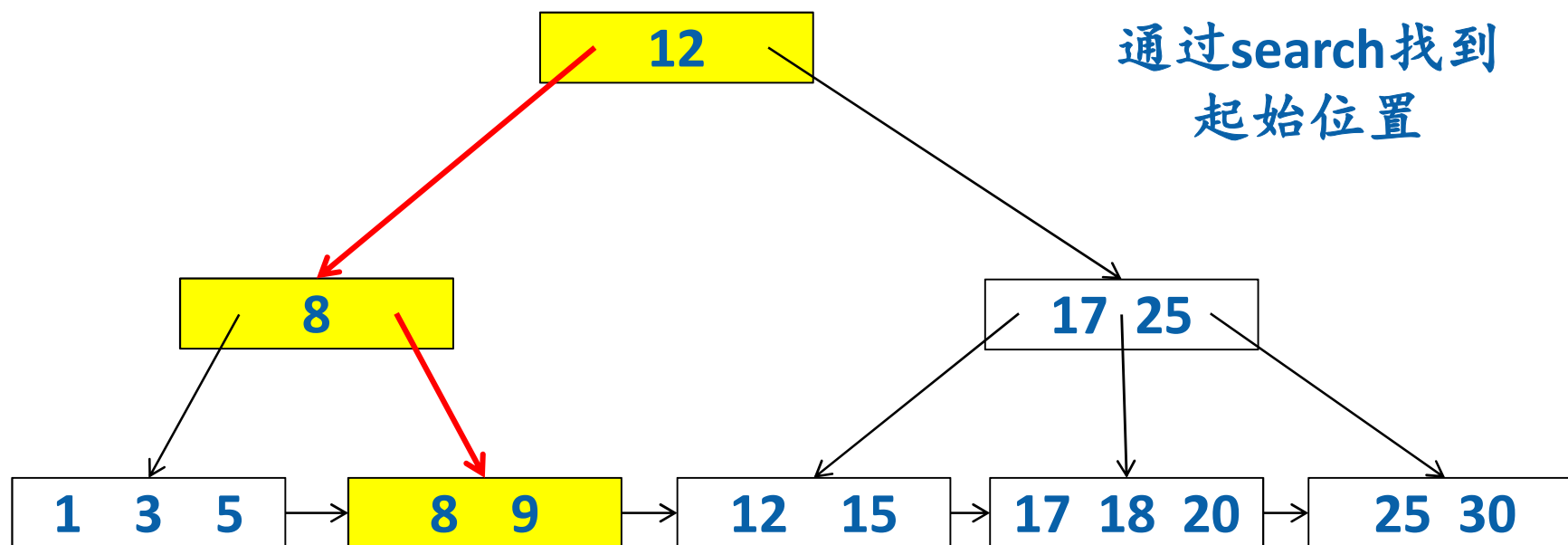
Range scan (9, 20):
获取[9, 20]区间的index entry



假设每个节点的child/pointer个数为B=3

举例

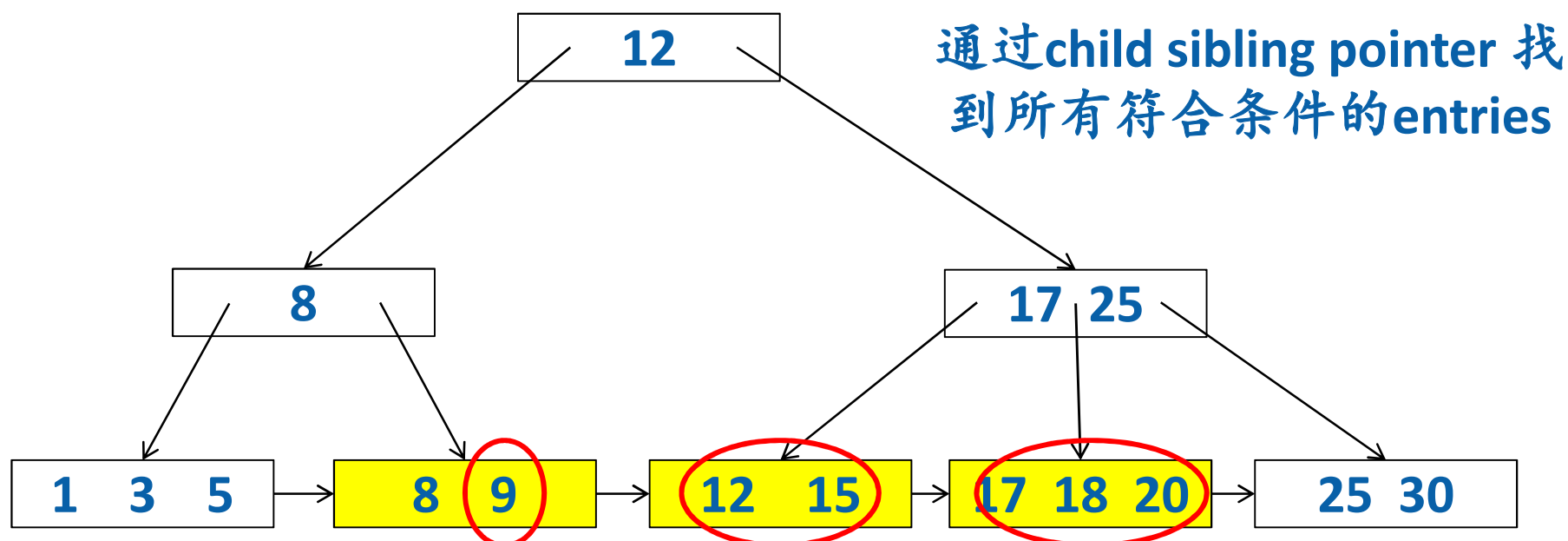
Range scan (9, 20):
获取[9, 20]区间的index entry



假设每个节点的child/pointer个数为B=3

举例

Range scan (9, 20):
获取[9, 20]区间的index entries



假设每个节点的child/pointer个数为 $B=3$

Selective Data Access (有选择性的访问)

- 使用index(索引)

- Tree based: 有序, 支持点查询和范围查询
 - Hash based: 无序, 只支持点查询

- Clustered index(主索引)与 Secondary index(二级索引)

- Clustered: 记录就存在index中, 记录顺序就是index顺序
 - Secondary: 记录顺序不是index顺序, index中存储page ID和in-page tuple slot ID.

索引数据访问

```
select Name, GPA  
from Student  
where Major = '计算机';
```

假设已经建立了以
Major为key的二级索引

- 在二级索引中搜索 *Major* = '计算机'
- 对于每个匹配项，访问相应的tuple
- 读取Name和GPA

比较顺序访问与二级索引访问

- 顺序访问

- 需要处理每一个记录
- 顺序读每一个page

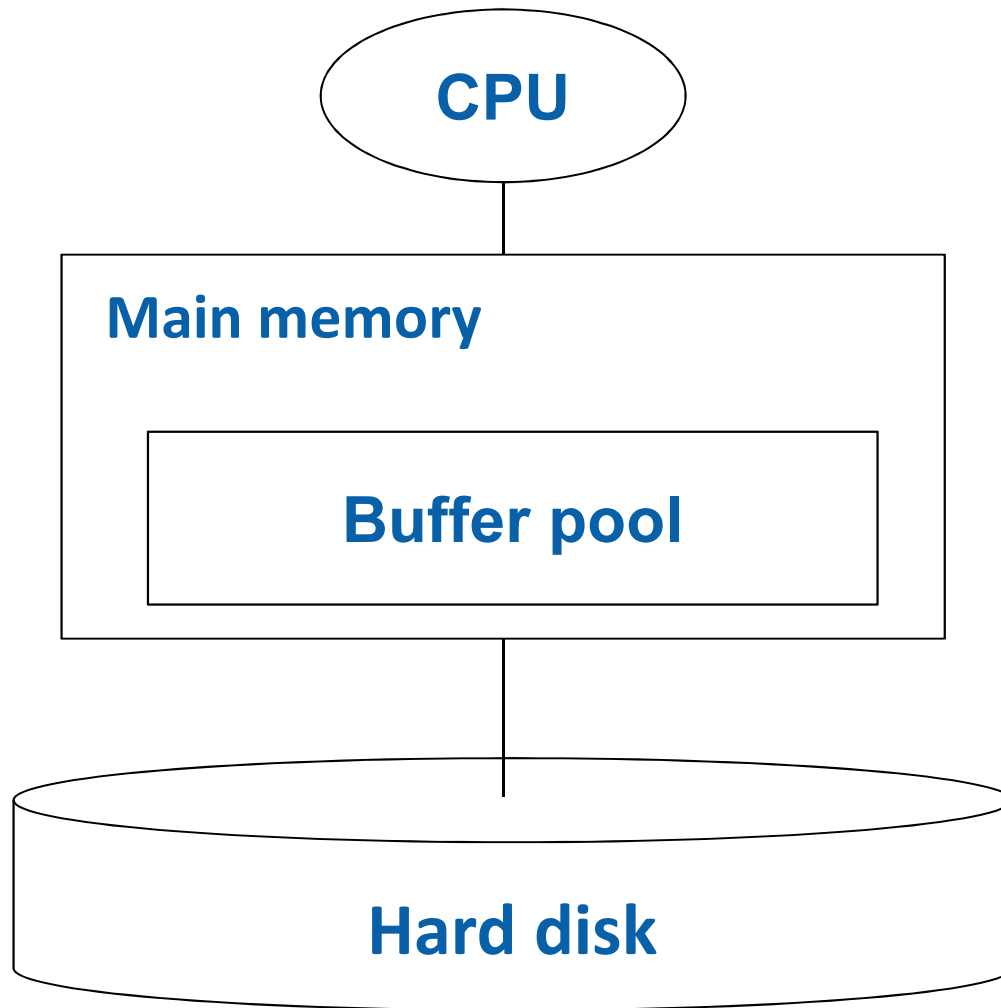
- 二级索引访问

- 有选择地处理记录
- 随机读相关的page

到底应该采用哪种方式呢？

- 由最终选中了多大比例的记录决定：selectivity
- 可以根据预测的selectivity、硬盘顺序读和随机读的性能，估算两种方式的执行时间
- 选择时间小的方案
- 这就是query optimizer的一个任务

什么是Buffer Pool?



为什么需要Buffer pool?
每次访问直接读写硬盘
会有什么问题吗?

提高性能, 减少I/O

数据访问的局部性(locality)

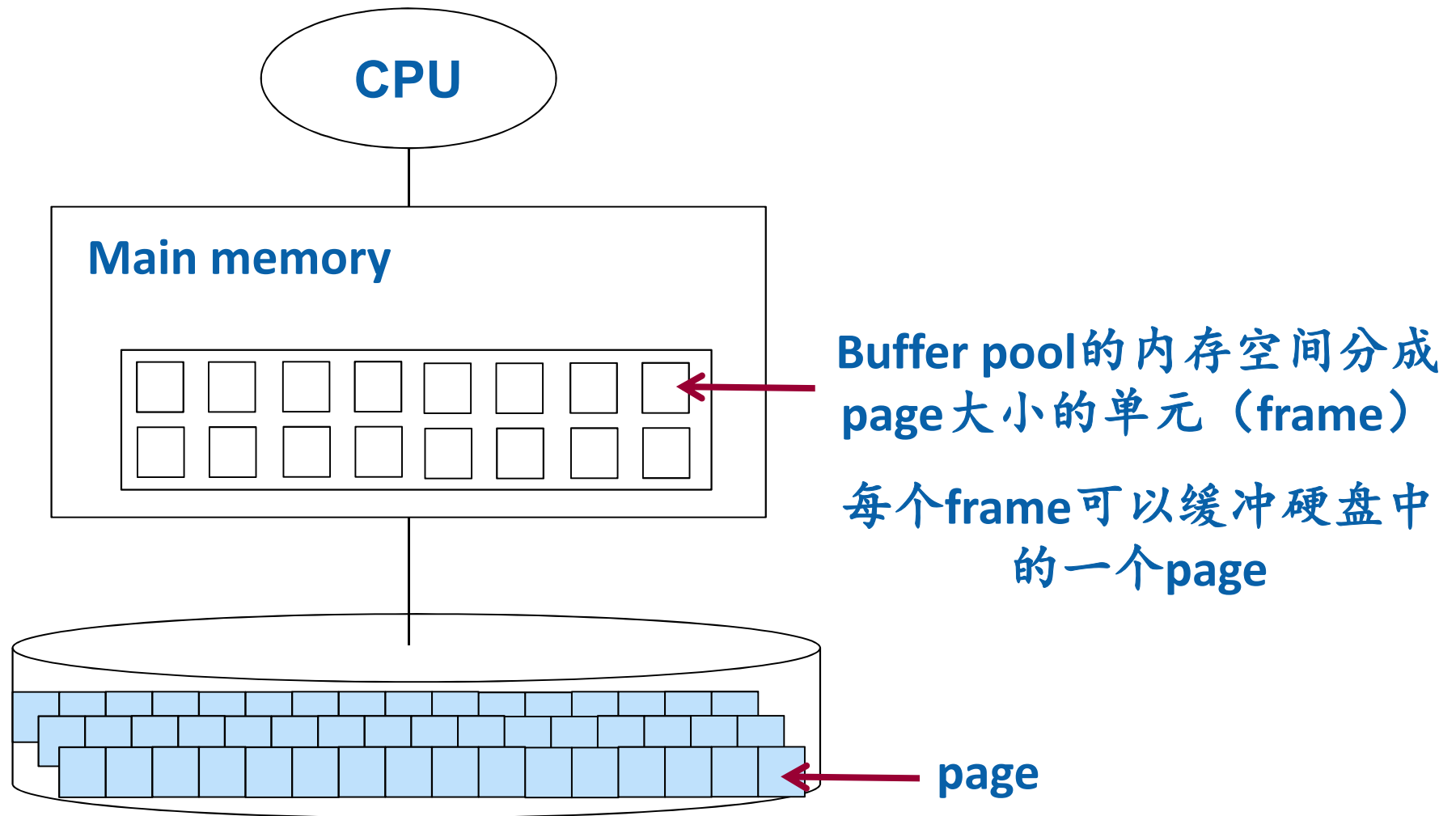
- Temporal locality (时间局部性)

- 同一个数据元素可能会在一段时间内多次被访问
- ☞ Buffer pool

- Spatial locality (空间局部性)

- 位置相近的数据元素可能会被一起访问
- ☞ Page为单位读写

Buffer Pool的组成



访问一个Page A

- 检查Page A是否在buffer pool之中
- 是：buffer pool hit
 - 直接访问buffer pool中的page A
 - 节省了I/O操作
- 否：buffer pool miss
 - 在buffer pool中找到一个可用的frame
 - 从硬盘读page A，放入这个frame

Replacement (替换)

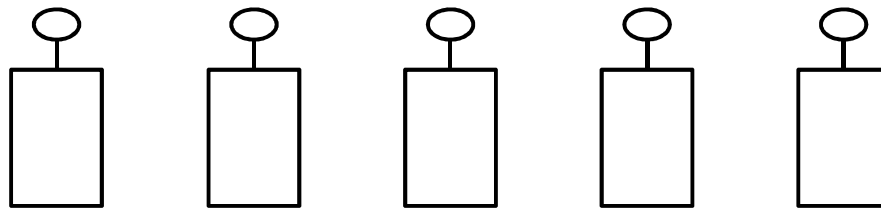
- 如果没有空闲的frame, 那么怎么办?
- 需要找一个已缓存的page, 替换掉
 - 这个page被称作Victim page
 - 如果这个page 被修改过, 那么需要写回硬盘
- 替换策略? (如何选择Victim?)
 - 目标: 尽量减少I/O代价, 希望Victim在近期不可能被访问
 - 算法: 通常是LRU (Least Recently Used) 的某种变形

Replacement Policies(替换策略)

- 操作系统课应该讲，常见的替换策略有
 - Random: 随机替换
 - FIFO(First In First Out): 替换最老的页
 - LRU (Least Recently Used): 最近最少使用
- 我们围绕LRU介绍数据库中常见的算法

LRU (Least Recently Used)

- LRU的实现方法1

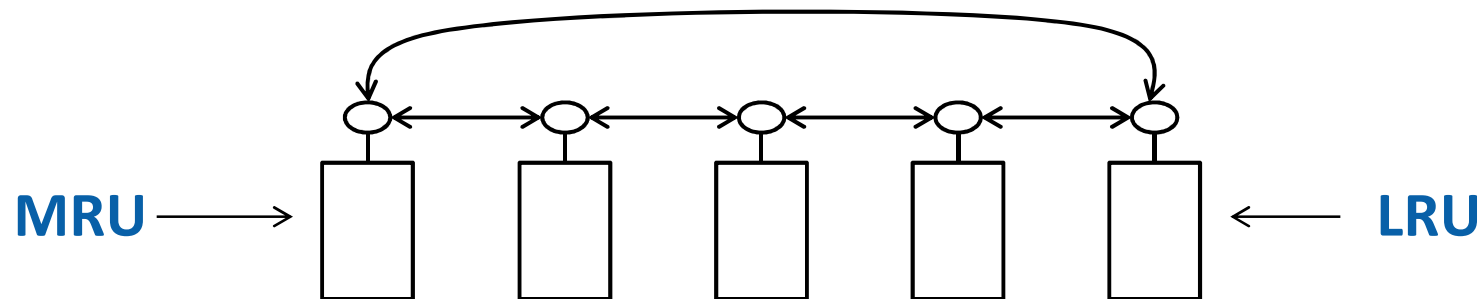


- Buffer head记录访问时间戳
- 替换：找到时间戳最早（小）的页为Victim
- 问题：替换操作是 $O(N)$!



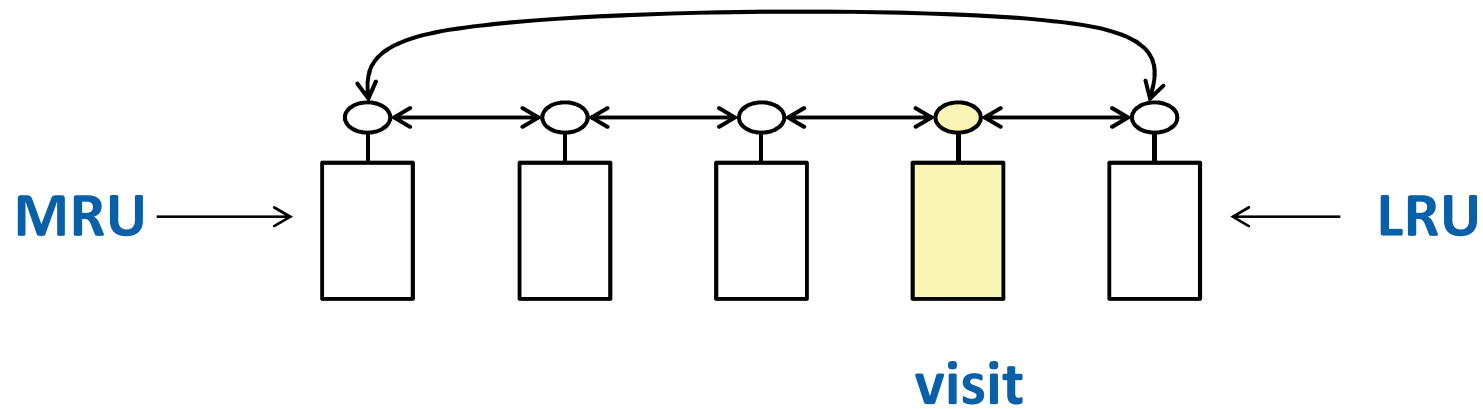
LRU (Least Recently Used)

- LRU的实现2



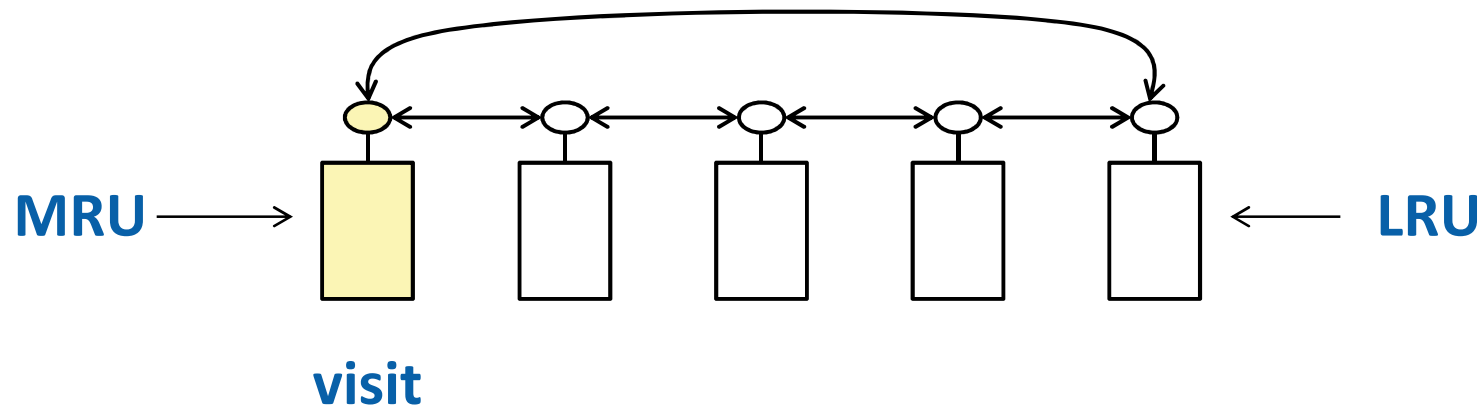
LRU (Least Recently Used)

- LRU的实现2



LRU (Least Recently Used)

- LRU的实现2

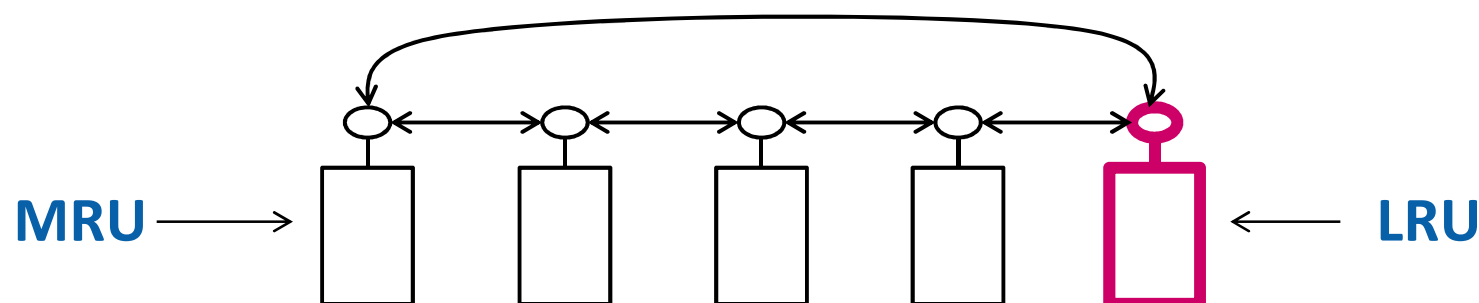


当一页被访问时，把它移动到最前端



LRU (Least Recently Used)

- LRU的实现2



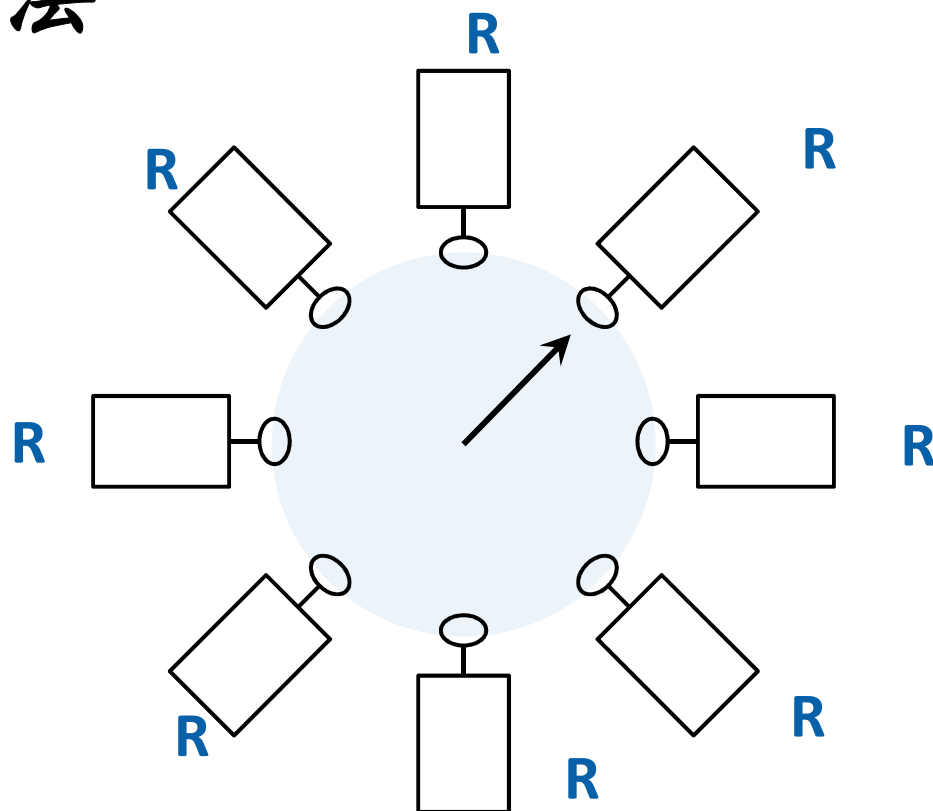
替换：总是选择最后一个Page为Victim

$O(1)$ 代价😊

但是：修改队列的代价，多线程共享队头

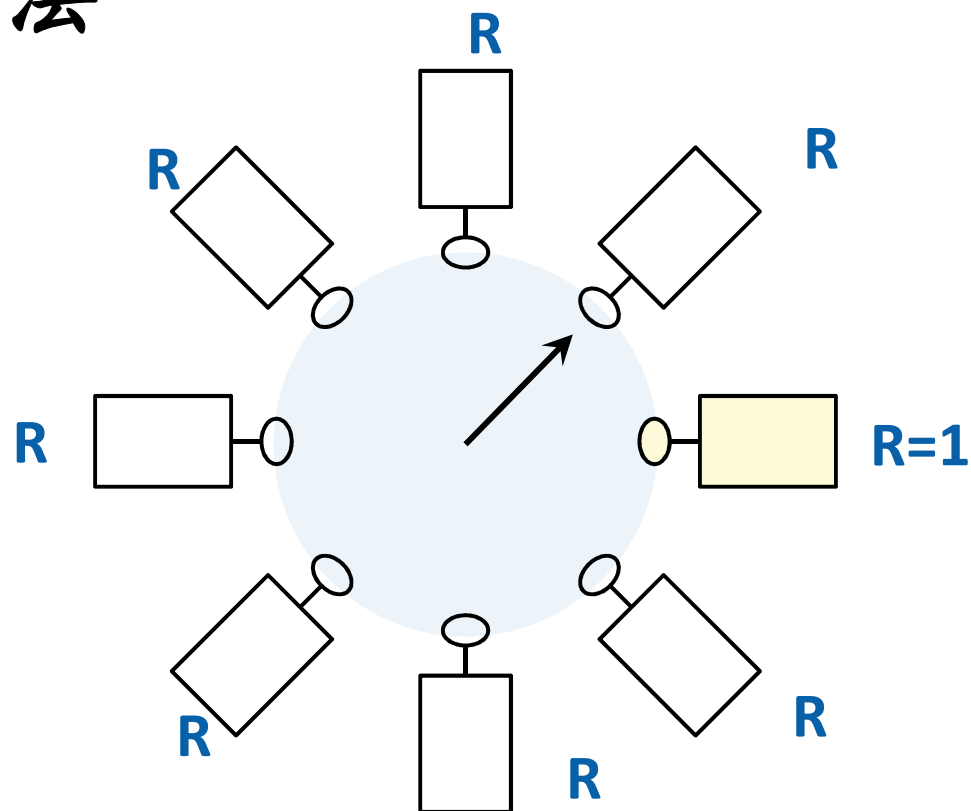


Clock算法



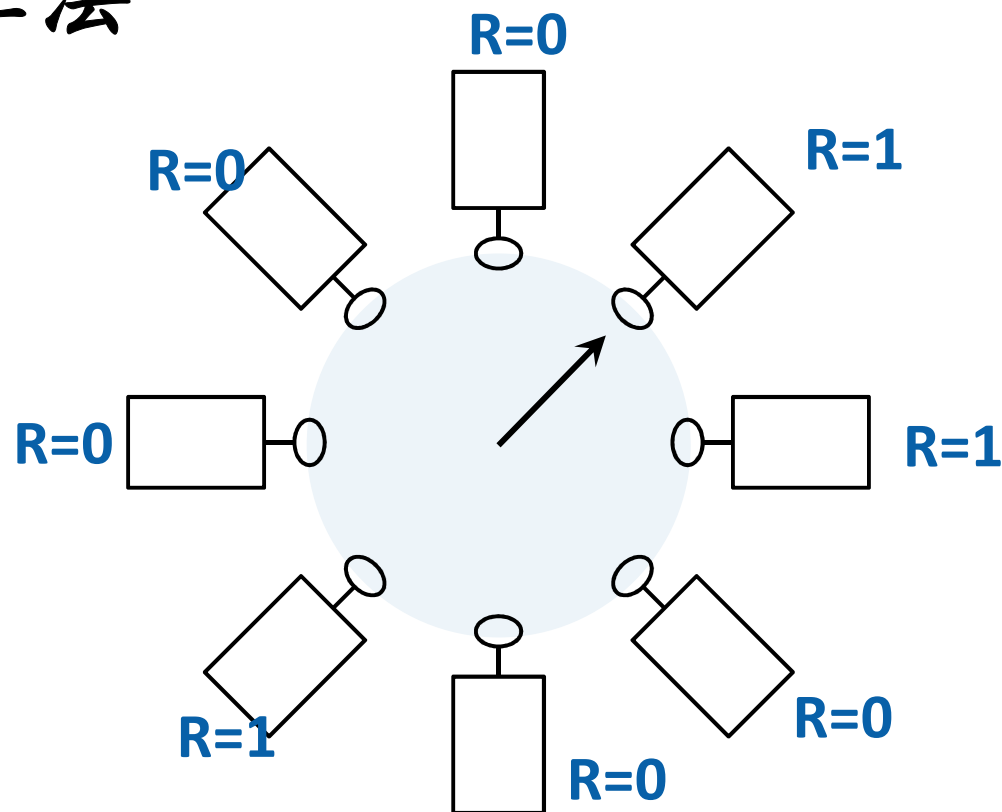
- 数据结构：Buffer head记录R，取值为0或1

Clock算法



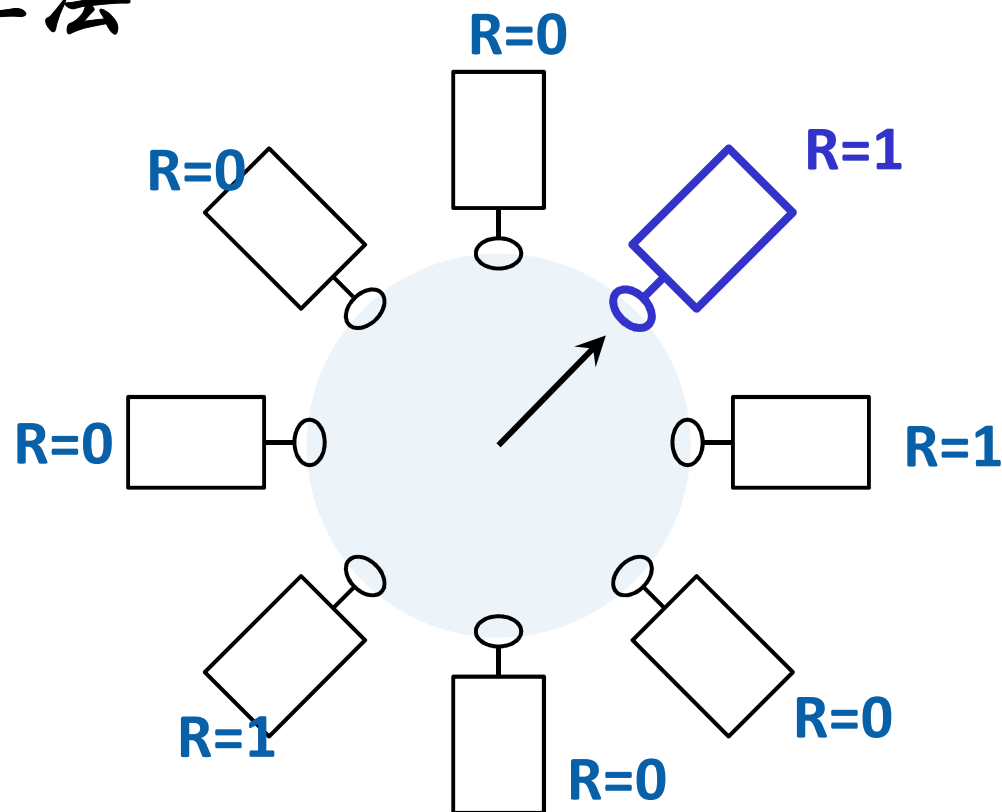
- 访问一个页：赋值 $R=1$

Clock算法



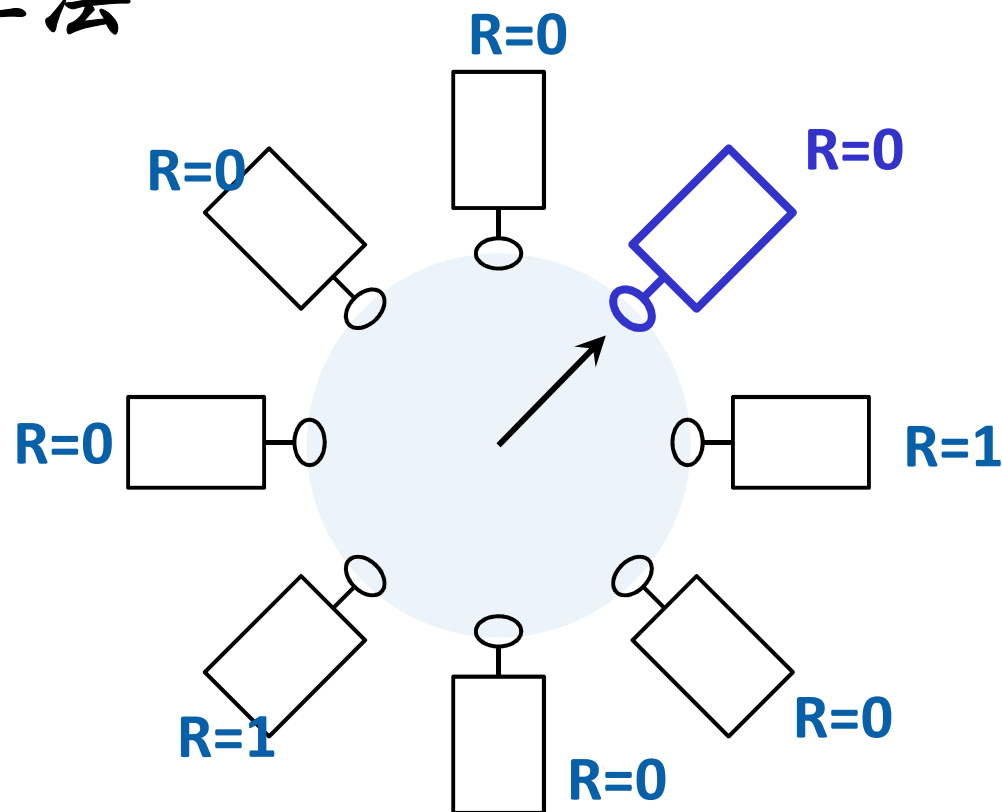
- 替换，顺时针旋转，依次查看下一个页
- if ($R == 1$) then { $R=0$; 继续旋转;}

Clock算法



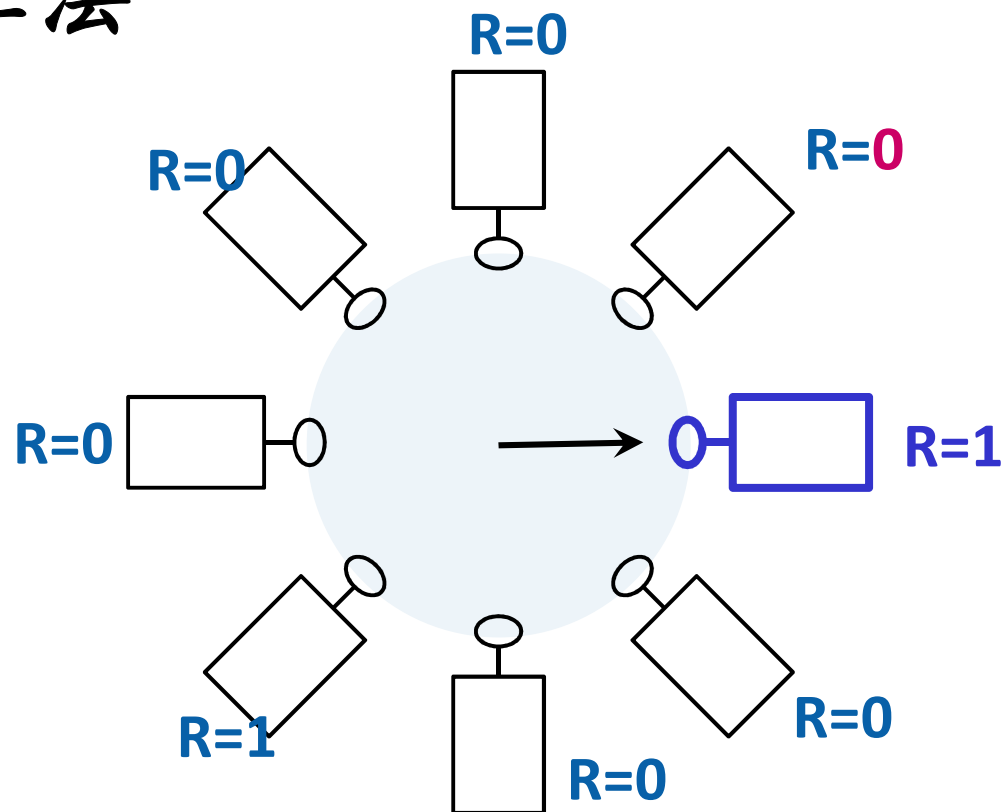
- 替换，顺时针旋转，依次查看下一个页
- if ($R == 1$) then { $R=0$; 继续旋转;}

Clock算法



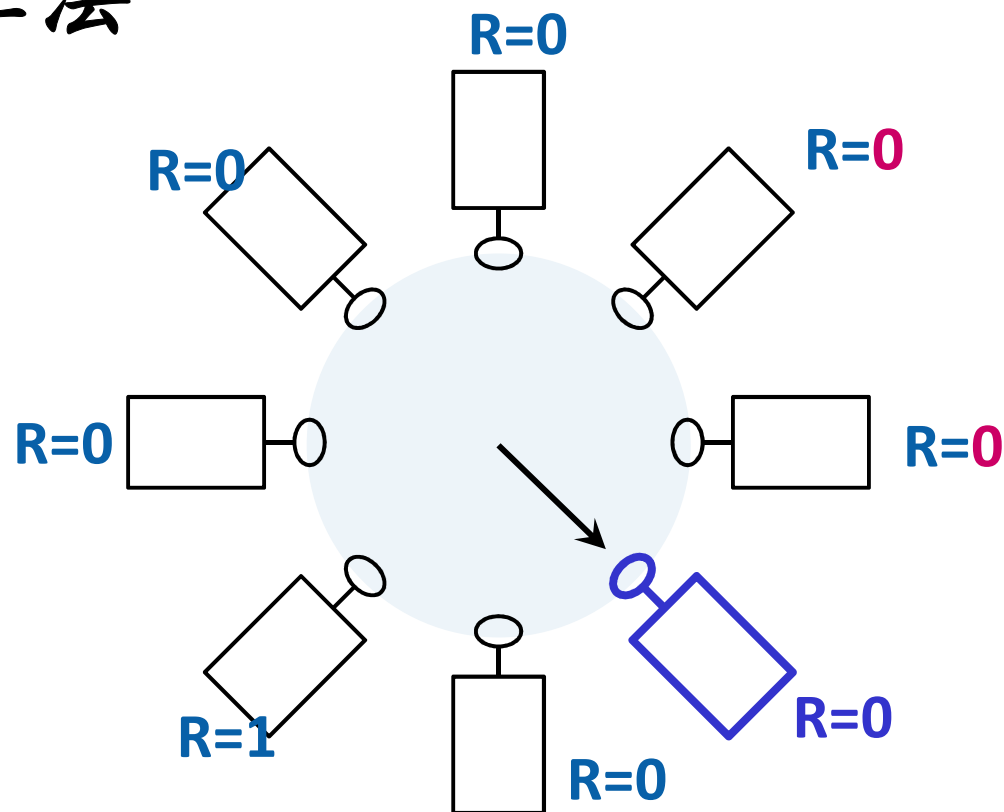
- 替换，顺时针旋转，依次查看下一个页
- if ($R == 1$) then { $R=0$; 继续旋转;}

Clock算法



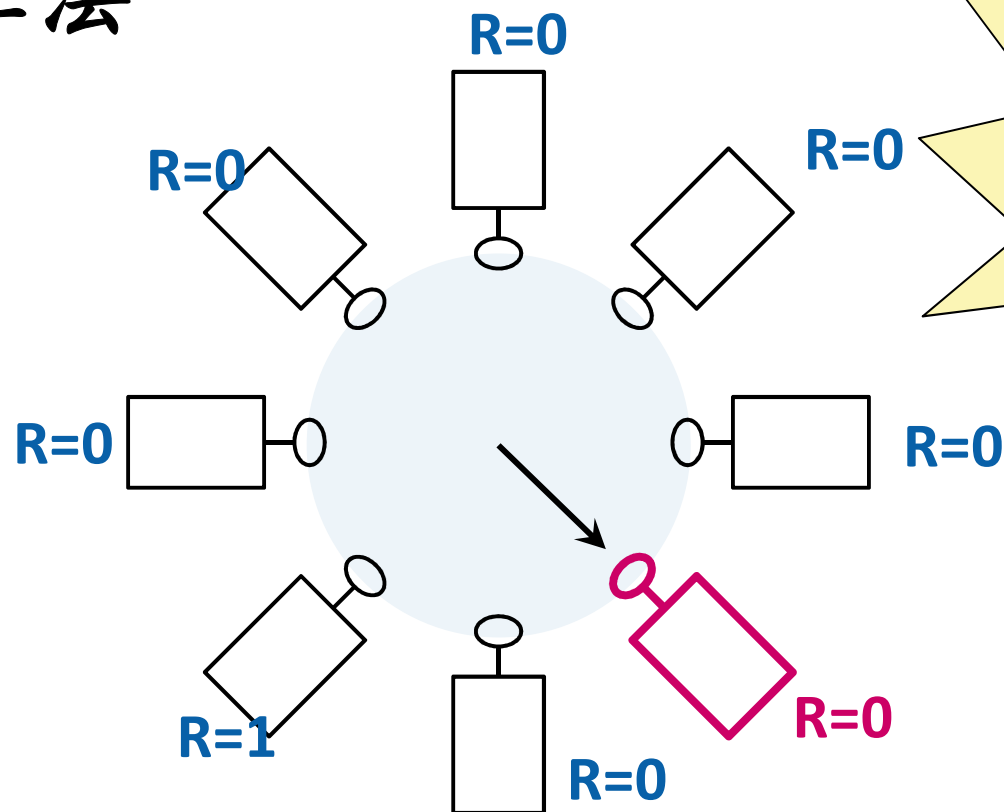
- 替换，顺时针旋转，依次查看下一个页
- if ($R == 1$) then { $R=0$; 继续旋转;}

Clock算法



- 替换，顺时针旋转，依次查看下一个页
- if ($R == 1$) then { $R=0$; 继续旋转;}
- if ($R == 0$) then 选中为Victim

Clock算法



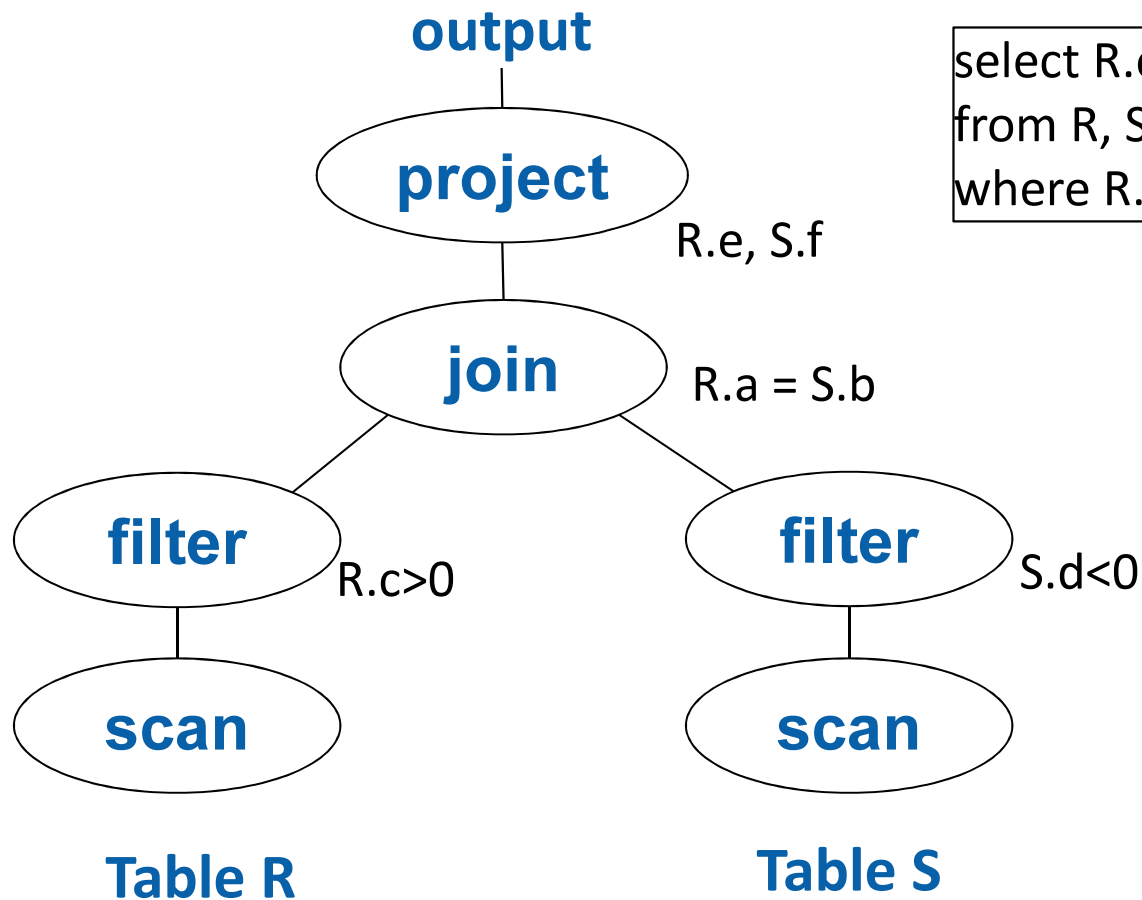
- 替换, 顺时针旋转, 依次查看下一个页
- if ($R == 1$) then { $R=0$; 继续旋转;}
- if ($R == 0$) then 选中为Victim

Outline

- 数据库系统架构
- 数据存储与访问
 - 数据表
 - 索引
 - 缓冲池
- 运算的实现
 - Operator tree
 - Selection & Projection
 - Join

Operator Tree

- Query plan 最终将表现为一棵Operator Tree



```
select R.e, S.f
from R, S
where R.a = S.b and R.c > 0 and S.d < 0;
```

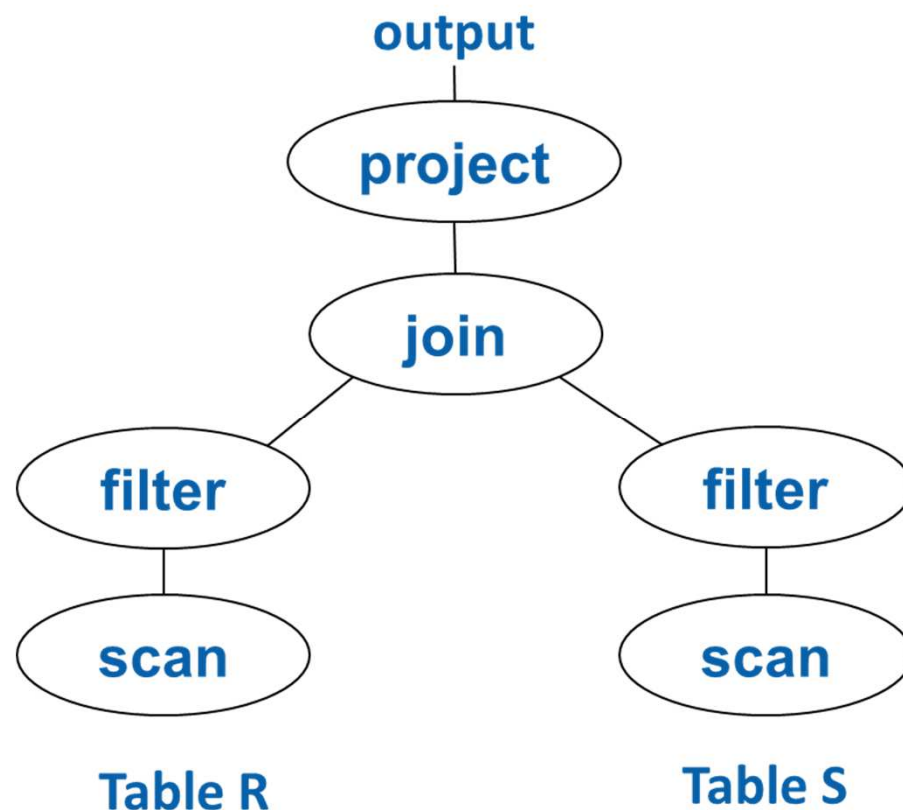
Operator Tree

- Query plan 最终将表现为一棵Operator Tree

- 每个节点代表一个运算
- 运算的输入来自孩子节点
- 运算的输出送往父亲节点

- 实现方法

- 依次完全执行每个节点
- Pull
 - 父节点调用子节点的 next() 取得下一个输入
- Push
 - 多线程
 - 子节点把输出放入中间结果缓冲，然后通知父节点去读



Selection & Projection

- Selection: 行的过滤

- 支持多种数据类型：数值类型，字符串类型等
- 实现比较操作、数学运算、逻辑运算

- Projection: 列的提取

- Query plan生成时，同时产生中间结果记录的schema
- 主要功能：从一个记录中提取属性，生成一个结果记录

Join的实现

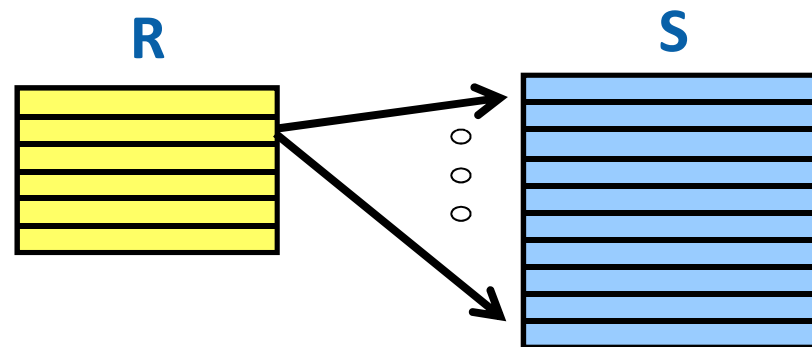
- 三种思路

- ☐ Nested loop
- ☐ Hashing
- ☐ Sorting

Nested Loop Join

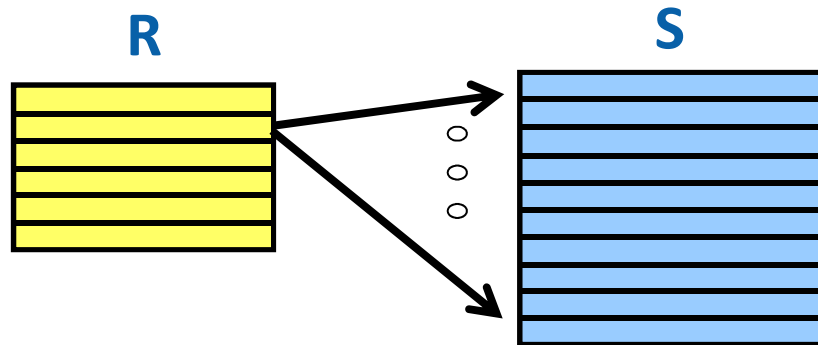
$$R \bowtie_{R.a = S.b} S$$

```
foreach tuple  $r \in R$  {  
    foreach tuple  $s \in S$  {  
        if ( $r.a = s.b$ ) output( $r, s$ );  
    }  
}
```



Nested Loop Join性能分析

$$R \bowtie_{R.a = S.b} S$$



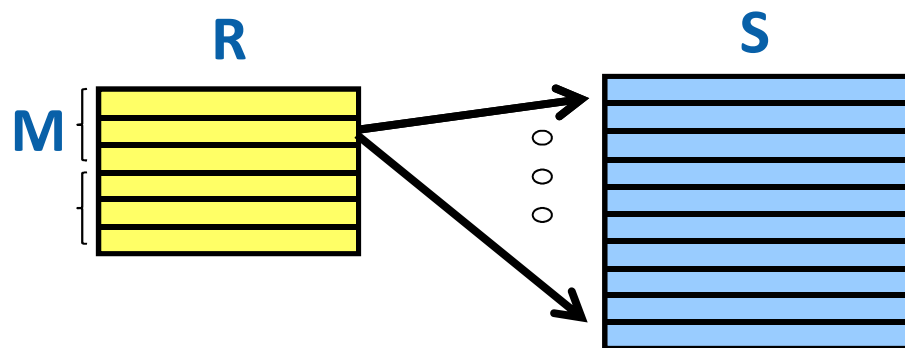
R有 M_R 个Page
S有 M_S 个Page
每个Page有B个记录

- 外循环读R
 - 读了一遍R
- 内循环读S
 - 对于R的每一个记录读所有的S
 - 总共读了 BM_R 遍S
- 总共读的page数: $M_R + BM_RM_S$



Block Nested Loop Join

$$R \bowtie_{R.a = S.b} S$$



内存大小为M

外循环每次读入M页的R,
而不是一条R的记录

内循环读一遍S

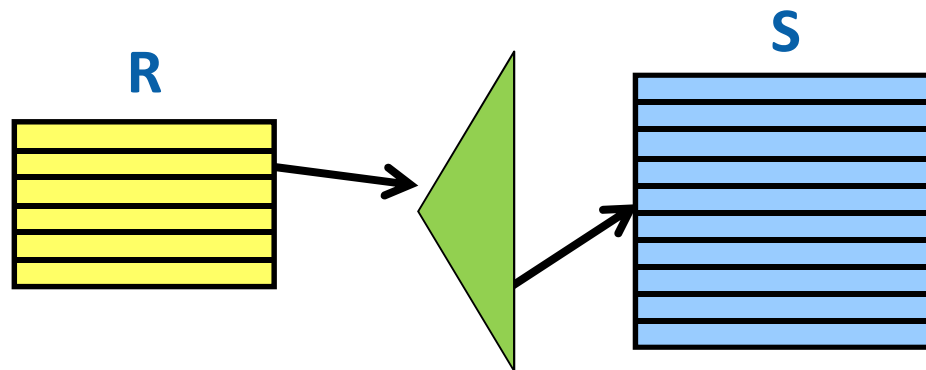
- 外循环读R
 - 读了一遍R
- 内循环读S
 - 总共读了 M_R/M 遍S
- 总共读的page数: $M_R + M_R M_S / M$

有进步,
但仍然是
2次的!

Index Nested Loop Join

$$R \bowtie_{R.a = S.b} S$$

```
foreach tuple  $r \in R$  {  
    lookup index to look for match  $s$  in  $S$   
    if (found) output( $r, s$ );  
}
```

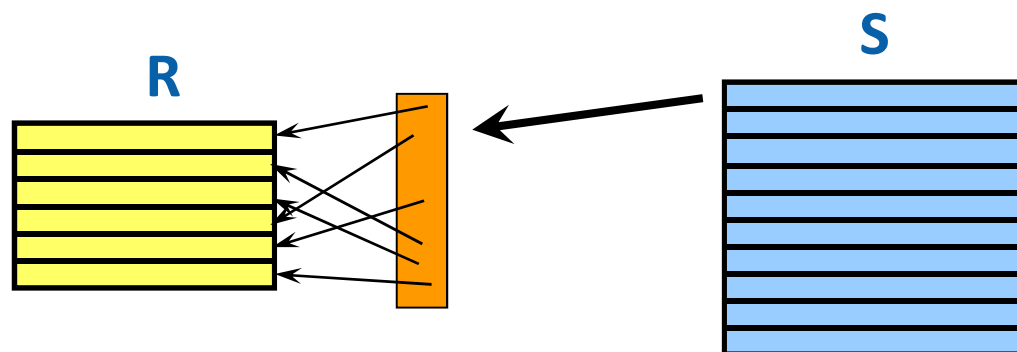


经常被使用，尤其是当很少有匹配时，效率很高

Hash Join

$$R \bowtie_{R.a = S.b} S$$

- Simple hash join

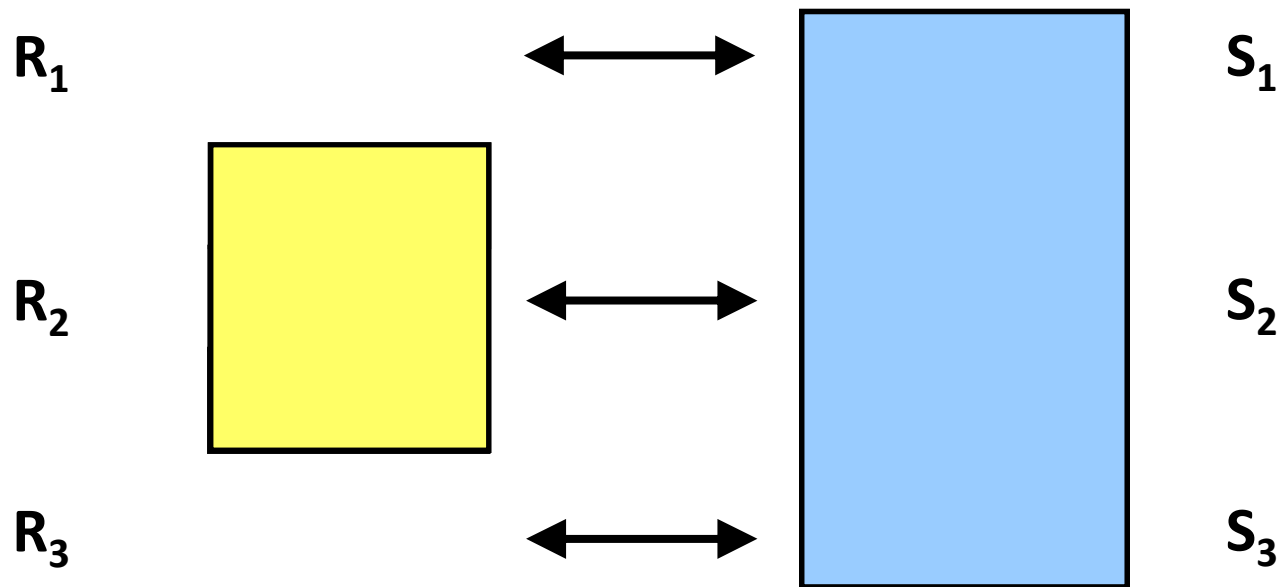


读R建立hash table;

读S访问hash table找到所有的匹配;

👉 R比内存大怎么办?

I/O Partitioning



- 思路：把 R 和 S 划分成小块
 - $\text{PartitionID} = \text{hash}(\text{join key}) \% \text{PartitionNumber}$
- R_j 中记录的匹配只存在于相应的 S_j 中
 - 为什么？ 匹配的记录 $\text{hash}(\text{join key})$ 必然相同

GRACE Hash Join

$$R \bowtie_{R.a = S.b} S$$

- 对R进行I/O partitioning
- 对S进行I/O partitioning
- for (j=0; j< ParitionNumber; j++) {
 simple hash join 计算 $R_j \bowtie S_j$;
}

GRACE Hash Join性能分析

- 对R进行I/O partitioning
 - 读 M_R 个Page, 写 M_R 个Page
- 对S进行I/O partitioning
 - 读 M_S 个Page, 写 M_S 个Page
- Simple hash join计算所有的 $R_j \bowtie S_j$
 - 读 $M_R + M_S$ 个Page
- 总代价（不考虑输出）
 - 读 $2M_R + 2M_S$ 个Page, 写 $M_R + M_S$ 个Page

R有 M_R 个Page
S有 M_S 个Page
每个Page有B个记录

**I/O成本
是线性的!**

Sort Merge Join

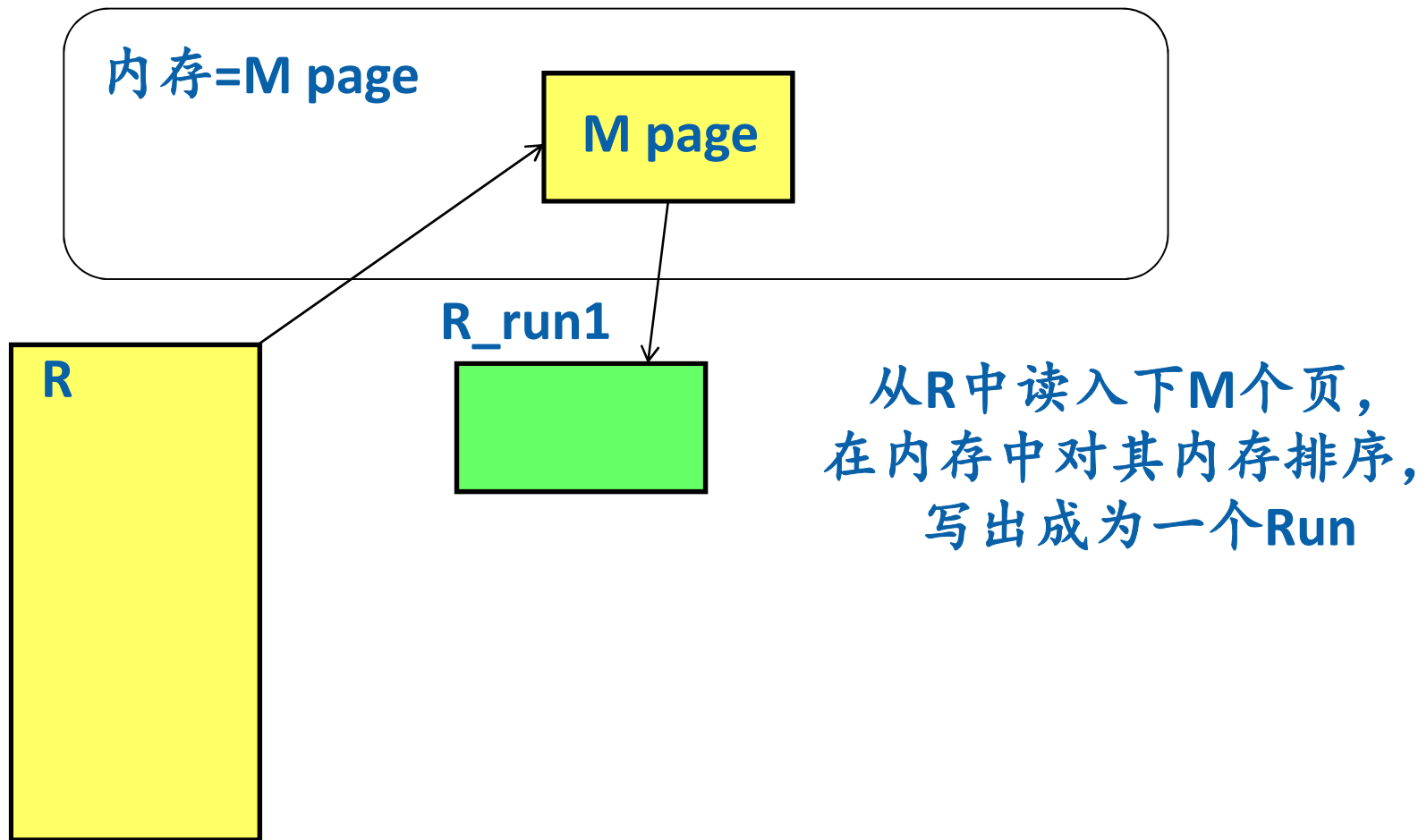
$$R \bowtie_{R.a = S.b} S$$

- 思路

- 如果把R按照R.a的顺序排序
- 如果把S按照S.b的顺序排序
- 那么可以Merge(归并)找出所有的匹配

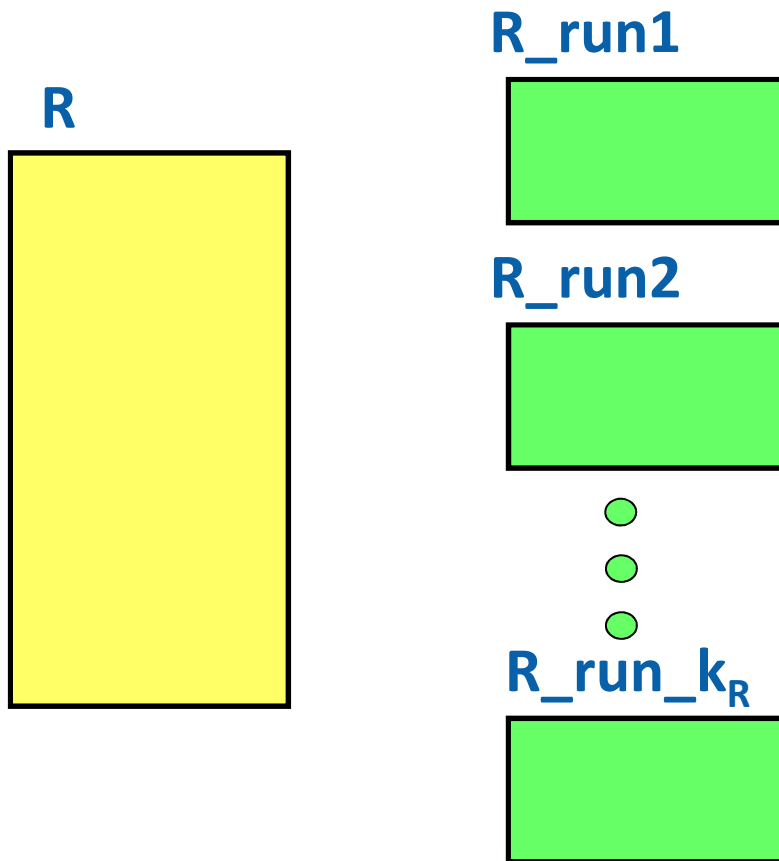
Run Generation

$$R \bowtie_{R.a = S.b} S$$



Run Generation

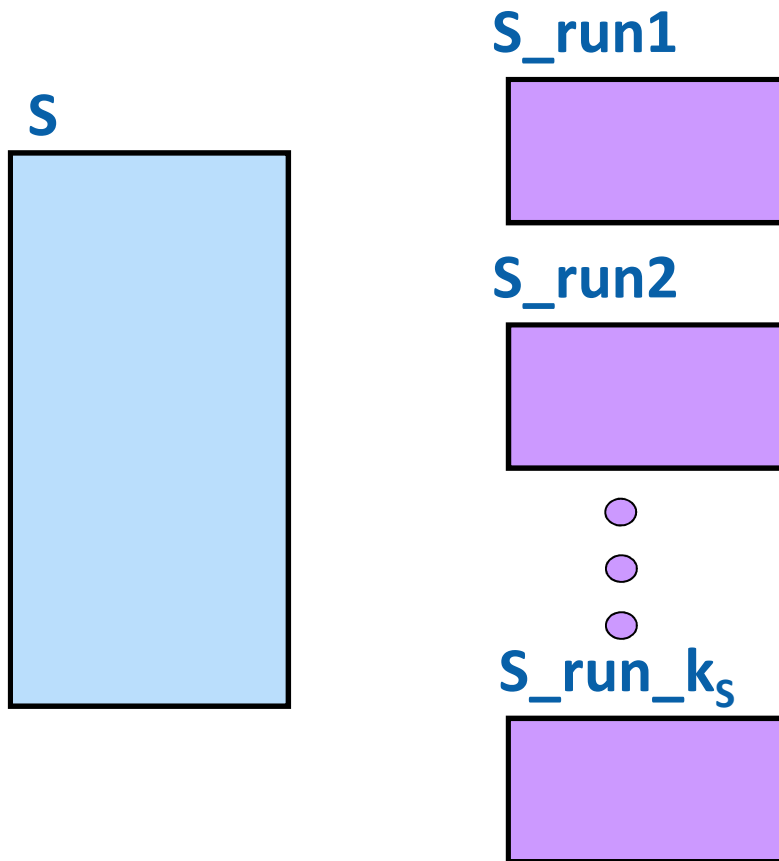
$$R \bowtie_{R.a = S.b} S$$



$$k_R = M_R / M$$

Run Generation

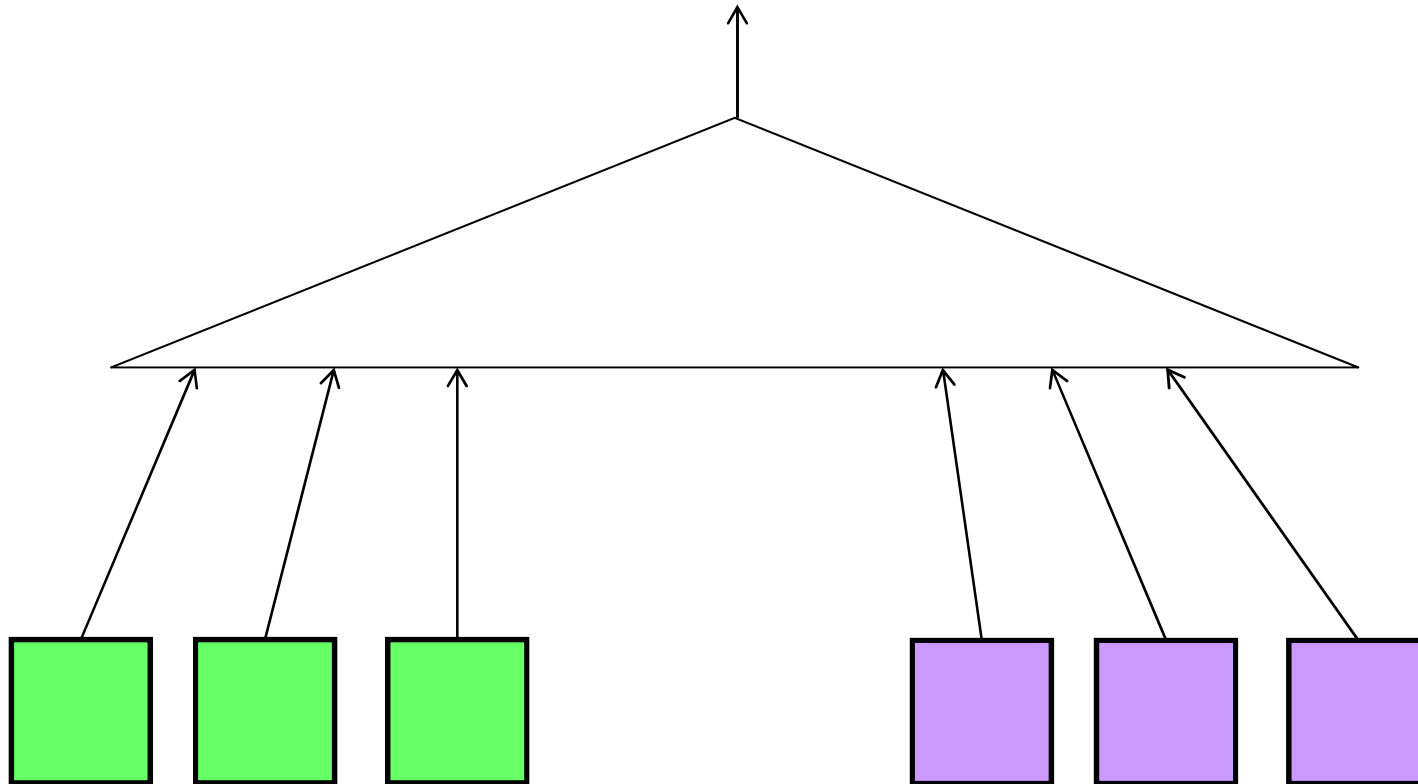
$$R \bowtie_{R.a = S.b} S$$



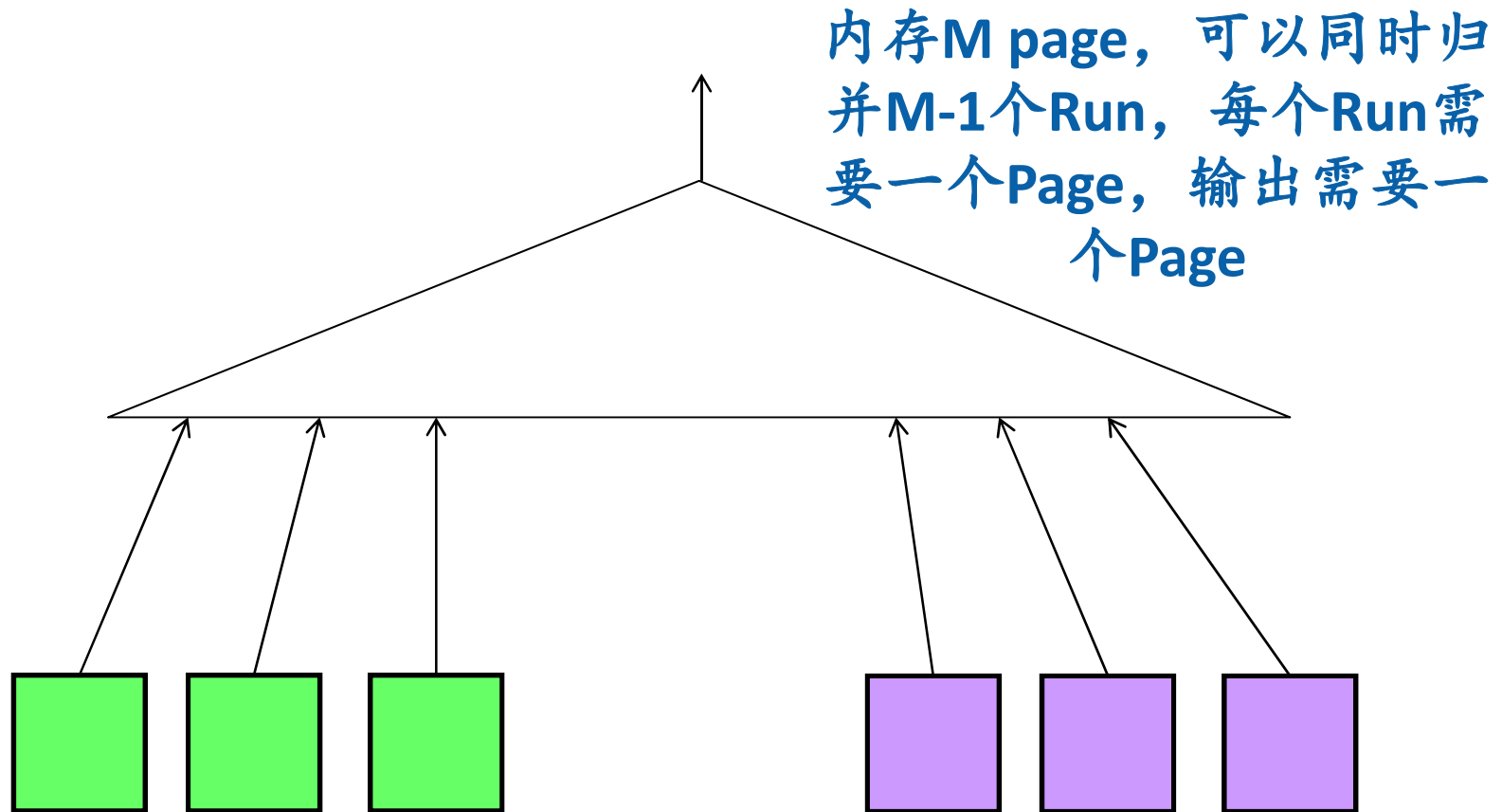
$$k_s = M_s / M$$

Merge

堆方式归并



Merge



需要多少层归并？

- 共有 $\frac{M_R}{M} + \frac{M_S}{M}$ 个Run
- 所以需要 $\log_{M-1}(\frac{M_R}{M} + \frac{M_S}{M})$ 层才能完成全部归并
- 另一个角度：
 - 如果希望只使用一次归并
 - 那么： $M_R + M_S \leq M(M-1) \approx M^2$

Sort Merge Join

$$R \bowtie_{R.a = S.b} S$$

- 比较

- 通常代价比Hash Join稍差
- 当一个表已经有序的情况下，会被使用

Query Optimization(查询优化)

- 依据

- 统计信息

- 优化内容

- 访问方式
 - 实现的算法
 - 多个连接的先后次序
 - 等等

前端

SQL Parser

Query Optimizer

后端

Execution Engine

Buffer Pool

Data Storage and Indexing

Transaction
management

小结

- 数据库系统架构
- 数据存储与访问
 - 数据表
 - 索引
 - 缓冲池
- 运算的实现
 - Operator tree
 - Selection & Projection
 - Join