



2026年春季学期

# 数据库系统概论

## An Introduction to Database Systems

### 第十章 关系查询处理和查询优化

中国科学技术大学

人工智能与数据科学学院

黄振亚, [huangzhy@ustc.edu.cn](mailto:huangzhy@ustc.edu.cn)



## 二、连接操作的实现

21

- 连接操作是查询处理中最耗时的操作之一
- 本节只讨论等值连接(或自然连接)最常用的实现算法
- [例10.2] **SELECT \***  
**FROM Student, SC**  
**WHERE Student.Sno = SC.Sno;**



# 连接操作的实现（续）

22

- 1. 嵌套循环方法(nested loop)
- 2. 排序-合并方法(sort-merge join 或merge join)
- 3. 索引连接(index join)方法
- 4. Hash Join方法



# 连接操作的实现（续）

23

## 1. 嵌套循环方法(nested loop)

- 对外层循环(Student)的每一个元组(s)，检索内层循环(SC)中的每一个元组(sc)
- 检查这两个元组在连接属性(sno)上是否相等
- 如果满足连接条件，则串接后作为结果输出，直到外层循环表中的元组处理完为止

```
[例10.2] SELECT *  
          FROM Student, SC  
          WHERE Student.Sno=SC.Sno;
```



# 连接操作的实现（续）

## 2. 排序-合并方法(sort-merge join 或merge join)

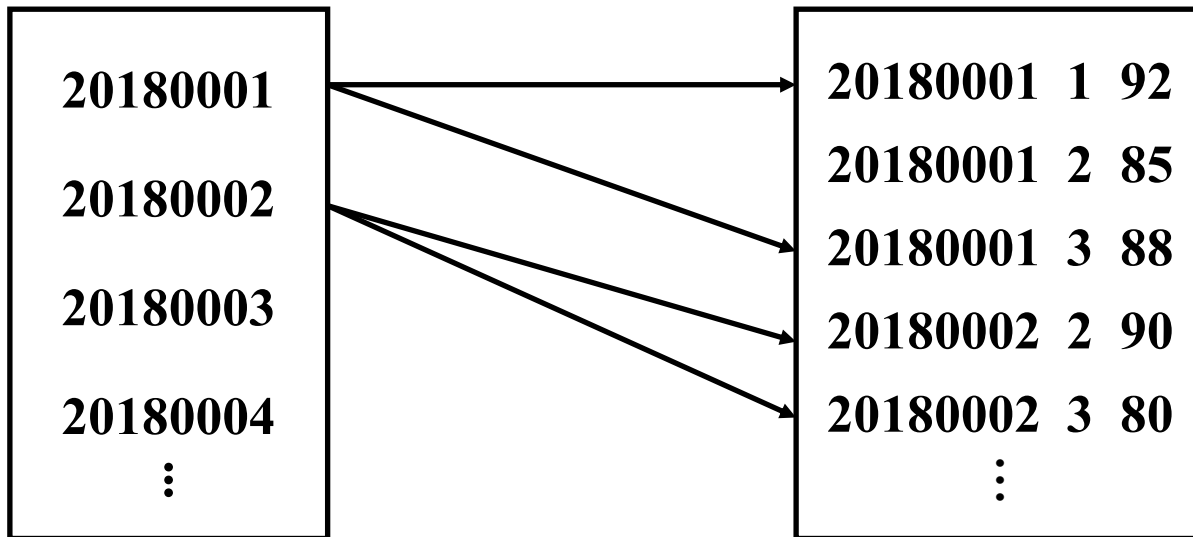
- 适合连接的诸表已经排好序的情况
- 排序—合并连接方法的步骤：
  - **Sort:** 如果连接的表没有排好序，先对Student表和SC表按**连接属性Sno**排序
  - **Merge:** 取Student表中第一个Sno，依次扫描SC表中具有相同Sno的元组
  - 当扫描到Sno不相同的第一个SC元组时，返回Student表扫描它的下一个元组，再扫描SC表中具有相同Sno的元组，把它们连接起来
  - 重复上述步骤直到Student 表扫描完

[例10.2] **SELECT \***  
**FROM Student, SC**  
**WHERE Student.Sno=SC.Sno;**



# 连接操作的实现（续）

25



排序-合并连接方法示意图



# 连接操作的实现（续）

26

- 说明
  - Student表和SC表都只要扫描一遍
  - 如果2个表原来无序，执行时间要加上对两个表的排序时间
  - 对于2个大表，先排序后使用排序-合并（**sort-merge join**）方法执行连接，总的时间一般仍会大大减少
  - 排序方法，参考《数据结构》



## 连接操作的实现（续）

27

### 3. 索引连接(index join)方法

#### □ 步骤:

- ① 在SC表上建立属性Sno的索引，如果原来没有该索引
- ② 对Student中每一个元组，由Sno值通过SC的索引查找相应的SC元组
- ③ 把这些SC元组和Student元组连接起来

循环执行②③，直到Student表中的元组处理完为止

```
[例10.2] SELECT *  
          FROM Student, SC  
          WHERE Student.Sno=SC.Sno;
```



# 连接操作的实现（续）

28

## 4. Hash Join方法

- 把连接属性作为hash码，用同一个hash函数把R和S中的元组散列到同一个hash文件中
- 步骤：
  - 划分阶段(building phase):
    - 对包含较少元组的表(比如Student)进行一遍处理
    - 把它的元组按hash函数分散到hash表的桶中
  - 试探阶段(probing phase) 或 连接阶段(join phase)
    - 对另一个表(SC)进行一遍处理
    - 把SC的元组散列到适当的hash桶中
    - 把元组与桶中所有来自Student并与之相匹配的元组连接起来

```
[例10.2] SELECT *  
          FROM Student, SC  
          WHERE Student.Sno=SC.Sno;
```



## 连接操作的实现（续）

29

- 上面hash join算法前提：假设两个表中较小的表在第一阶段后可以完全放入内存的hash桶中
- 以上的算法思想可以推广到更加一般的多个表的连接算法上



# 第十章 关系系统及其查询优化

30

**10.1 关系数据库系统的查询处理**

**10.2 关系数据库系统的查询优化**

**10.3 代数优化**

**10.4 物理优化**

**\*10.5 查询计划的执行**

**10.6 小结**



## 10.2 关系数据库系统的查询优化

- 查询优化在关系数据库系统中有着非常重要的地位
- 关系查询优化是影响RDBMS性能的关键因素
- 由于关系表达式的语义级别很高，使关系系统可以从关系表达式中分析查询语义，提供了执行查询优化的可能性



## 10.2 关系数据库系统的查询优化

32

- 10.2.1 查询优化概述
- 10.2.2 一个实例



# 查询优化概述（续）

33

## □ 关系系统

- 减轻了用户选择存取路径的负担
- 用户提出“干什么”，不必指出“怎么干”

## □ 非关系系统

- 用户使用过程化的语言表达查询要求，执行何种记录级的操作，以及操作的序列是由用户来决定的
- 用户必须了解存取路径，系统要提供用户选择存取路径的手段，查询效率由用户的存取策略决定
- 如果用户做了不当的选择，系统是无法对此加以改进的



# 查询优化概述（续）

34

- 查询优化的优点
  - 用户不必考虑如何最好地表达查询以获得较好的效率
  - 系统可以比用户程序的“优化”做得更好
    - (1) 优化器可以从数据字典中获取许多统计信息（元组数、索引等），而用户程序则难以获得这些信息
    - (2) 如果数据库的物理统计信息改变了，系统可以自动对查询重新优化以选择相适应的执行计划。在非关系系统中必须重写程序，而重写程序在实际应用中往往是不太可能的。



## 查询优化概述（续）

35

- (3) 优化器可以考虑数百种不同的执行计划，程序员一般只能考虑有限的几种可能性。
- (4) 优化器中包括了很多复杂的优化技术，这些优化技术往往只有最好的程序员才能掌握。系统的自动优化相当于使得所有人都拥有这些优化技术



# 查询优化概述（续）

36

- **RDBMS**通过某种代价模型计算出各种查询执行策略的执行代价，然后选取代价最小的执行方案
  - **集中式数据库**
    - 执行开销主要包括：
      - 磁盘存取块数(I/O代价)
      - 处理机时间(CPU代价)
      - 内存开销
    - **I/O代价是最主要的**
  - **分布式数据库**
    - 总代价 = I/O代价 + CPU代价 + 内存代价 + 通信代价



## 查询优化概述（续）

37

- 查询优化的总目标：
  - 选择有效的策略
  - 求得给定关系表达式的值
  - 使得查询代价最小(实际上是较小)
  - 实际上：找较优，避免最差



## 10.2 关系数据库系统的查询优化

38

- 10.2.1 查询优化概述
- 10.2.2 一个实例



## 10.2.2 一个实例

39

- 一个关系查询可以对应不同的执行方案，其效率可能相差非常大

[例10.3] 求选修了2号课程的学生姓名。用SQL表达：

```
SELECT Student.Sname
```

```
FROM Student, SC
```

```
WHERE Student.Sno = SC.Sno AND SC.Cno = '2';
```

- **假设：**学生-课程数据库中
  - 有1000个学生(Student)记录，10000个选课记录(SC)
  - 其中，选修2号课程的选课记录为50个
  - 每秒读写内存块数量为20块



## 一个实例（续）

40

- 系统可以用多种等价的关系代数表达式来完成这一查询

$$Q_1 = \pi_{Sname}(\sigma_{Student.Sno = SC.Sno \wedge SC.Cno='2'}(Student \times SC))$$

$$Q_2 = \pi_{Sname}(\sigma_{SC.Cno='2'}(Student \bowtie SC))$$

$$Q_3 = \pi_{Sname}(Student \bowtie \sigma_{SC.Cno='2'}(SC))$$

```
SELECT Student.Sname
FROM Student, SC
WHERE Student.Sno=SC.Sno AND SC.Cno='2';
```



# 一个实例（续）

41

## 一、第一种情况

$$Q_1 = \pi_{Sname}(\sigma_{Student.Sno = SC.Sno \wedge SC.Cno='2'} (Student \times SC))$$

- 1. 计算广义笛卡尔积
- 把Student和SC的每个元组连接起来的作法：
  - 1. 在内存中尽可能多地读入某个表(如Student表)的若干块，留出一块读另一个表(如SC表)的元组
  - 2. 把SC中的每个元组和Student中每个元组连接，连接后的元组装满一块后就写到中间文件上
  - 3. 再读入若干块Student元组，读入一块SC元组
  - 重复上述处理过程，直到把Student表处理完



## 一个实例（续）

42

$$Q_1 = \pi_{Sname}(\sigma_{Student.Sno = SC.Sno \wedge SC.Cno='2'} (Student \times SC))$$

- Student表有1000个学生，SC表有10000个选课记录
- 假设：一个块能装10个Student元组或100个SC元组，在内存中存放5块Student元组和1块SC元组，则读取总块数为

$$\frac{1000}{10} + \frac{1000}{10 \times 5} \times \frac{10000}{100} = 100 + 20 \times 100 = 2100 \text{ 块}$$

- 其中，读Student表100块。读SC表20遍，每遍100块。
- 读取Student和SC，需读取2100块。若每秒读写20块，则总计需要花105s (2100/20)
- 执行笛卡尔积连接后的元组数： $10^3 \times 10^4 = 10^7$ 。设每块能装10个元组，则 $10^7/10 = 10^6$ 块（中间元组），写出这些块要用 $10^6/20 = 5 \times 10^4$ s



## 一个实例（续）

43

$$Q_1 = \pi_{Sname} (\sigma_{Student.Sno = SC.Sno \wedge SC.Cno='2'} (Student \times SC))$$

### □ 2. 作选择操作

- 依次读入连接后的元组，按照选择条件选取满足要求的记录，读入 $10^6$ 块
- 假定内存处理时间忽略。读取中间文件花费的时间(同写中间文件一样)，需 $5 \times 10^4$ s
- 假设满足条件的元组仅50个，均可放在内存

### □ 3. 作投影操作

- 把第2步的结果在Sname上作投影输出，得到最终结果
- 所有内存处理时间均忽略不计
- ❖ 执行查询的总读写数据块= $2100 + 10^6 + 10^6$
- ❖ 执行查询的总时间  $\approx 105 + 2 \times 5 \times 10^4 \approx 10^5$ s



# 一个实例（续）

44

## □ 二、第二种情况

$$Q_2 = \pi_{Sname} (\sigma_{SC.Cno='2'} (Student \bowtie SC))$$

### 1. 计算自然连接

- 执行自然连接，读取Student和SC表的策略不变，总的读取块数仍为2100块，花费105 s
- 自然连接的结果比第一种情况大大减少，为 $10^4$ 个(中间元组)
- 写出 $10^4/10 = 10^3$ 块，写元组时间为 $10^3/20 = 50s$ ，为第一种情况的千分之一（每秒20块，每块10个元组）

2. 执行选择运算：读取中间文件块 $10^3$ 块，花费时间也为50s

3. 执行投影：把第2步结果投影输出。

- 总的读写数据块 =  $2100 + 10^3 + 10^3$ 块
- 总的执行时间  $\approx 105 + 50 + 50 \approx 205s$
- 执行代价大约是第一种情况的488分之一



## 一个实例（续）

45

### □ 三、第三种情况

$$Q_3 = \pi_{Sname} (\text{Student} \bowtie \sigma_{SC.Cno='2'}(\text{SC}))$$

- 1. 先对SC表作选择运算，只需读一遍SC表，存取100块，花费时间为5s。因满足条件的元组仅50个，不必使用中间文件
  - 2. 读取Student表，把读入的Student元组和内存中的SC元组作连接。只需读一遍Student表共100块，花费时间为5s。
    - （50个SC元组只需要少于1块内存）
  - 3. 把连接结果投影输出
- 总读取块 =  $100 + 100 = 200$ 块
  - 总的执行时间  $\approx 5 + 5 \approx 10$ s
  - 执行代价约是第一种的五分之一，是第二种的20分之一



## 一个实例（续）

46

- 对于第三种情况： $Q_3 = \pi_{Sname} (\text{Student} \bowtie \sigma_{SC.Cno='2'}(SC))$
- 假如SC表的Cno字段上有索引
  - 第一步：不必读取所有的SC元组而只需读取Cno='2'的那些元组(50个)
  - 存取的索引块和SC中满足条件的数据块大约总共3~4块
- 若Student表在Sno上也有索引
  - 第二步也不必读取所有的Student元组
  - 因为满足条件的SC记录仅50个，涉及最多50个Student记录
  - 读取Student表的块数也可大大减少
- 总的存取时间将进一步减少到数秒



## 一个实例（续）

47

- 把代数表达式 $Q_1$ 变换为 $Q_2$ 、 $Q_3$ ,

$$\begin{array}{l} Q_1 = \pi_{Sname}(\sigma_{Student.Sno = SC.Sno \wedge SC.Cno='2'}(Student \times SC)) \\ \downarrow \\ Q_2 = \pi_{Sname}(\sigma_{SC.Cno='2'}(Student \bowtie SC)) \\ \downarrow \\ Q_3 = \pi_{Sname}(Student \bowtie \sigma_{SC.Cno='2'}(SC)) \end{array}$$

- **代数优化**：即有选择和连接操作时，先做选择操作。这样参加连接的元组就可以大大减少
- 在 $Q_3$ 中
  - SC表的选择操作算法有全表扫描和索引扫描2种方法，经过初步估算，索引扫描方法较优
  - **物理优化**：对于Student和SC表的连接，利用Student表上的索引，采用index join代价也较小



# 第十章 关系系统及其查询优化

48

**10.1 关系数据库系统的查询处理**

**10.2 关系数据库系统的查询优化**

**10.3 代数优化**

**10.4 物理优化**

**\*10.5 查询计划的执行**

**10.6 小结**



## 10.3 代数优化

49

- 10.3.1 关系代数表达式等价变换规则
- 10.3.2 查询树的启发式优化



## 10.3.1 关系代数表达式等价变换规则

50

- 代数优化策略：通过对关系代数表达式的等价变换来提高查询效率
- 关系代数表达式的等价：指用相同的关系代替两个表达式中相应的关系所得到的**结果是相同的**
- 两个关系表达式 $E_1$ 和 $E_2$ 是等价的，可记为 $E_1 \equiv E_2$



# 关系代数表达式等价变换规则（续）

## □ 常用的等价变换规则：

### 1. 连接、笛卡尔积交换律

设 $E_1$ 和 $E_2$ 是关系代数表达式， $F$ 是连接运算的条件，则有

$$E_1 \times E_2 \equiv E_2 \times E_1$$

$$E_1 \bowtie E_2 \equiv E_2 \bowtie E_1$$

$$E_1 \bowtie_F E_2 \equiv E_2 \bowtie_F E_1$$

### 2. 连接、笛卡尔积的结合律

设 $E_1, E_2, E_3$ 是关系代数表达式， $F_1$ 和 $F_2$ 是连接运算的条件，则有

$$(E_1 \times E_2) \times E_3 \equiv E_1 \times (E_2 \times E_3)$$

$$(E_1 \bowtie E_2) \bowtie E_3 \equiv E_1 \bowtie (E_2 \bowtie E_3)$$

$$(E_1 \bowtie_{F_1} E_2) \bowtie_{F_2} E_3 \equiv E_1 \bowtie_{F_1} (E_2 \bowtie_{F_2} E_3)$$



# 关系代数表达式等价变换规则（续）

52

## 3. 投影的串接定律

$$\Pi_{A_1 A_2 \dots A_n} (\Pi_{B_1 B_2 \dots B_m} (E)) \equiv \Pi_{A_1 A_2 \dots A_n} (E)$$

这里， $E$ 是关系代数表达式， $A_i (i=1, 2, \dots, n)$ ， $B_j (j=1, 2, \dots, m)$ 是属性名且 $\{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ 构成 $\{B_1, B_2, \dots, B_m\}$ 的子集。

## 4. 选择的串接定律

$$\sigma_{F_1} (\sigma_{F_2} (E)) \equiv \sigma_{F_1 \wedge F_2} (E)$$

这里， $E$ 是关系代数表达式， $F_1$ 、 $F_2$ 是选择条件。

选择的串接律说明选择条件可以合并。这样一次就可检查全部条件。



# 关系代数表达式等价变换规则（续）

53

## 5. 选择与投影操作的交换律

$$\sigma_F(\Pi_{A_1 A_2 \dots A_n}(E)) \equiv \Pi_{A_1 A_2 \dots A_n}(\sigma_F(E))$$

➤ 选择条件F只涉及属性 $A_1, \dots, A_n$

若F中不属于 $A_1, \dots, A_n$ 的属性 $B_1, \dots, B_m$ 则有更一般的规则：

$$\Pi_{A_1, A_2, \dots, A_n}(\sigma_F(E)) \equiv \Pi_{A_1, A_2, \dots, A_n}(\sigma_F(\Pi_{A_1, A_2, \dots, A_n, B_1, B_2, \dots, B_m}(E)))$$



# 关系代数表达式等价变换规则（续）

54

## 6. 选择与笛卡尔积的交换律

如果F中涉及的属性都是 $E_1$ 中的属性，则

$$\sigma_F(E_1 \times E_2) \equiv \sigma_F(E_1) \times E_2$$

如果 $F=F_1 \wedge F_2$ ，并且 $F_1$ 只涉及 $E_1$ 中的属性， $F_2$ 只涉及 $E_2$ 中的属性，则由上面的等价变换规则1，4，6可推出：

$$\sigma_F(E_1 \times E_2) \equiv \sigma_{F_1}(E_1) \times \sigma_{F_2}(E_2)$$

若 $F_1$ 只涉及 $E_1$ 中的属性， $F_2$ 涉及 $E_1$ 和 $E_2$ 两者的属性，则仍有

$$\sigma_F(E_1 \times E_2) \equiv \sigma_{F_2}(\sigma_{F_1}(E_1) \times E_2)$$

部分选择在笛卡尔积前先做

6/2/2026



# 关系代数表达式等价变换规则（续）

55

## 7. 选择与并的分配律

设 $E=E_1 \cup E_2$ ,  $E_1, E_2$ 有相同的属性名, 则

$$\sigma_F(E_1 \cup E_2) \equiv \sigma_F(E_1) \cup \sigma_F(E_2)$$

## 8. 选择与差运算的分配律

若 $E_1$ 与 $E_2$ 有相同的属性名, 则

$$\sigma_F(E_1 - E_2) \equiv \sigma_F(E_1) - \sigma_F(E_2)$$

## 9. 选择对自然连接的分配律

$$\sigma_F(E_1 \bowtie E_2) \equiv \sigma_F(E_1) \bowtie \sigma_F(E_2)$$

$F$ 只涉及 $E_1$ 与 $E_2$ 的公共属性



# 关系代数表达式等价变换规则（续）

56

## 10. 投影与笛卡尔积的分配律

设 $E_1$ 和 $E_2$ 是两个关系表达式， $A_1, \dots, A_n$ 是 $E_1$ 的属性， $B_1, \dots, B_m$ 是 $E_2$ 的属性，则

$$\Pi_{A_1 A_2 \dots A_n B_1 B_2 \dots B_m} (E_1 \times E_2) \equiv \Pi_{A_1 A_2 \dots A_n} (E_1) \times \Pi_{B_1 B_2 \dots B_m} (E_2)$$

## 11. 投影与并的分配律

设 $E_1$ 和 $E_2$ 有相同的属性名，则

$$\Pi_{A_1 A_2 \dots A_n} (E_1 \cup E_2) \equiv \Pi_{A_1 A_2 \dots A_n} (E_1) \cup \Pi_{A_1 A_2 \dots A_n} (E_2)$$



## 10.3 代数优化

57

- 10.3.1 关系代数表达式等价变换规则
- 10.3.2 查询树的启发式优化



## 10.3.2 查询树的启发式优化

58

### □ 典型的启发式规则：

#### 1. 选择运算应尽可能先做

- 在优化策略中这是**最重要、最基本**的一条

#### 2. 把投影运算和选择运算同时进行

- 如有若干投影和选择运算，并且它们都对同一个关系操作，则可以在扫描此关系的同时完成所有的这些运算以避免重复扫描关系



## 查询树的启发式优化（续）

59

3. 把投影同其前或其后的双目运算结合起来
  - 无需为了去掉某些字段而扫描一遍关系
4. 把某些选择同在它前面要执行的笛卡尔积结合起来成为一个连接运算
5. 找出公共子表达式
  - 如果这种重复出现的子表达式的结果不是很大的关系
  - 从外存中读入这个关系比计算该子表达式的时间少得多，则先计算一次公共子表达式并把结果写入中间文件是合算的
  - 当查询的是视图时，定义视图的表达式就是公共子表达式的情况



## 查询树的启发式优化（续）

60

- 遵循这些启发式规则，应用10.3.1的等价变换公式来优化关系表达式的算法。

算法：关系表达式的优化

输入：一个关系表达式的查询树

输出：优化的查询树

方法：

- **(1) 选择分解：**利用等价变换**规则4**把形如  $\sigma_{F_1 \wedge F_2 \wedge \dots \wedge F_n}(E)$  变换为  $\sigma_{F_1}(\sigma_{F_2}(\dots(\sigma_{F_n}(E))\dots))$
- **(2) 下推选择：**对每一个选择，利用等价变换**规则4~9**尽可能把它移到树的叶端

规则4：选择的串接定律

$$\sigma_{F_1}(\sigma_{F_2}(E)) \equiv \sigma_{F_1 \wedge F_2}(E)$$

规则4：合并或分解选择运算

规则5-9：选择运算与其他运算交换



## 查询树的启发式优化（续）

61

- **(3) 下推投影：**对每一个投影，利用等价变换规则3, 5, 10, 11中的一般形式尽可能把它移向树的叶端。
- 注意：
  - 等价变换**规则3**使一些投影消失
  - **规则5**把一个投影分裂为两个，其中一个有可能被移向树的叶端
  - 投影成的中间关系无索引

**规则3：** 合并或分解投影运算

**规则5,10,11：** 投影运算与其他运算交换



## 查询树的启发式优化（续）

62

- **(4) 选择投影串接合并：** 利用等价变换**规则3~5**把选择和投影的串接合并成单个选择、单个投影或一个选择后跟一个投影。使多个选择或投影能同时执行，或在一次扫描中全部完成
  - 可能违背“投影尽可能早做”原则，但效率更高

**规则3：合并或分解投影运算**

**规则4：合并或分解选择运算**

**规则5：投影运算与选择运算交换**



## 查询树的启发式优化（续）

63

- (5) 内节点分组：把上述得到的语法树的内节点分组
  - 每一双目运算( $\times$ ,  $\bowtie$ ,  $\cup$ ,  $-$ )和它所有的直接祖先为一组(这些直接祖先是( $\sigma$ ,  $\Pi$ 运算))
  - 如果其后代直到叶子全是单目运算，则也将它们并入该组
  - 但当双目运算是笛卡尔积( $\times$ ), 而且后面不是与它组成等值连接的选择时，则不能把选择与这个双目运算组成同一组，把这些单目运算单独分为一组



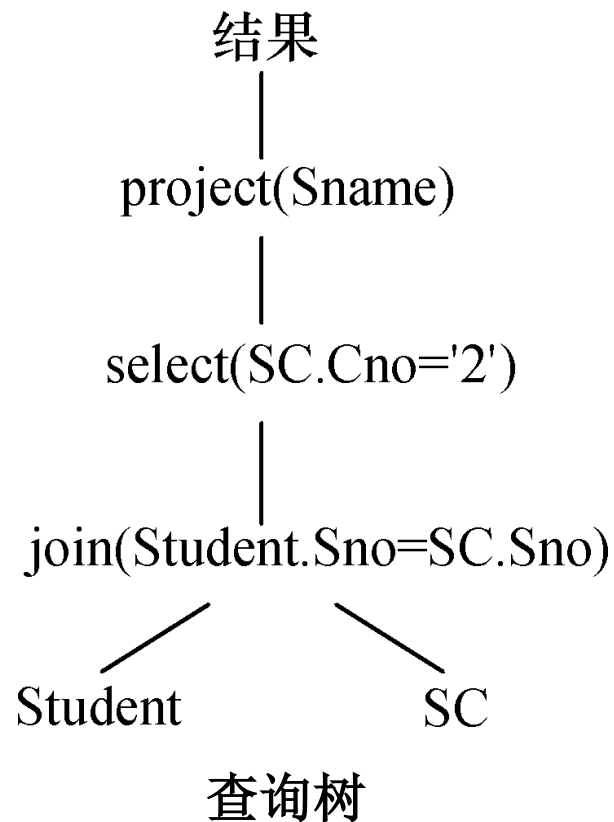
# 查询树的启发式优化（续）

[例10.4] 下面给出 [例10.3] 中 SQL语句的代数优化示例。

(1) 把SQL语句转换成查询树，如下图所示

```
SELECT Student.Sname  
FROM Student, SC  
WHERE Student.Sno=SC.Sno AND SC.Cno= '2';
```

$$Q_1 = \pi_{Sname}(\sigma_{Student.Sno = SC.Sno \wedge SC.Cno='2'}(Student \times SC))$$



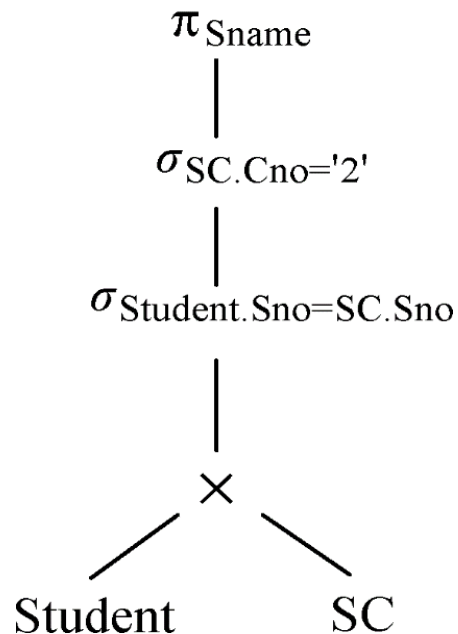


# 查询树的启发式优化 (续)

- 为了使用关系代数表达式的优化法，假设内部表示是关系代数语法树，则上面的查询树如下图所示

```
SELECT Student.Sname
FROM Student, SC
WHERE Student.Sno=SC.Sno AND SC.Cno= '2';
```

$$Q_1 = \pi_{Sname}(\sigma_{Student.Sno = SC.Sno \wedge SC.Cno='2'}(Student \times SC))$$



关系代数语法树



# 查询树的启发式优化（续）

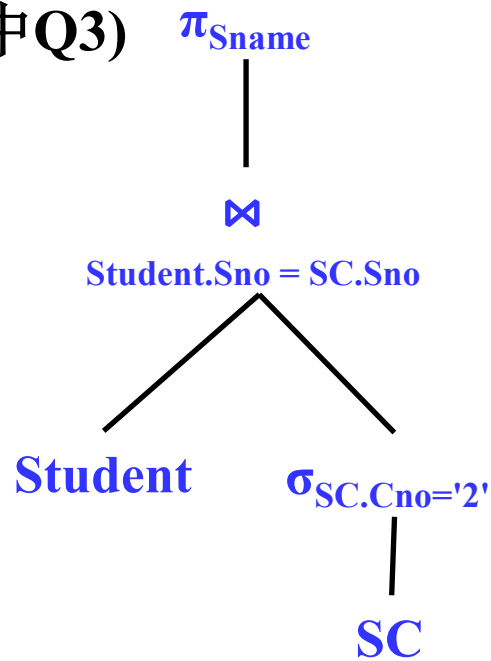
## (2) 对查询树进行优化

- 利用规则4、6把选择 $\sigma_{SC.Cno='2'}$ 移到叶端
- 启发式规则4：选择+笛卡尔积结合成为连接
- 查询树便转换成下图所示的优化的查询树(10.2.2中Q3)

$$Q_1 = \pi_{Sname}(\sigma_{Student.Sno = SC.Sno \wedge SC.Cno='2'}(Student \times SC))$$



$$Q_3 = \pi_{Sname}(Student \bowtie \sigma_{SC.Cno='2'}(SC))$$



优化后的查询树



# 第十章 关系系统及其查询优化

67

**10.1 关系数据库系统的查询处理**

**10.2 关系数据库系统的查询优化**

**10.3 代数优化**

**10.4 物理优化**

**\*10.5 查询计划的执行**

**10.6 小结**



## 10.4 物理优化

68

- 代数优化改变查询语句中操作的次序和组合，不涉及底层的存取路径
  
- 对于一个查询语句有许多存取方案，它们的执行效率不同，仅仅进行代数优化是不够的
  
- 物理优化：选择高效合理的操作算法或存取路径，求得优化的查询计划
  - 选择
  - 连接



# 物理优化（续）

69

## □ 选择的方法：

### □ 基于规则的启发式优化

- 启发式规则是指那些在大多数情况下都适用，但在不是每种情况下都是适用的规则

### □ 基于代价估算的优化

- 优化器估算不同执行策略的代价，并选出具有最小代价的执行计划

### □ 两者结合的优化方法

- 常常先使用启发式规则，选取若干较优的候选方案，减少代价估算的工作量
- 然后分别计算这些候选方案的执行代价，较快地选出最终的优化方案



## 10.4 物理优化

70

- 10.4.1 基于启发式规则的存取路径选择优化
- 10.4.2 基于代价的优化



## 10.4.1 基于启发式规则的存取路径选择优化

71

- 一、选择操作的启发式规则
- 二、连接操作的启发式规则



# 基于启发式规则的存取路径选择优化(续)

72

## 一、选择操作的启发式规则:

- 对于小关系, 使用全表顺序扫描 (即使选择列上有索引)
- 对于大关系, 启发式规则有:
  - (1) 对于选择条件是“主码=值”的查询
    - 查询结果最多是一个元组, 可以选择主码索引
    - 一般的RDBMS会自动建立主码索引
  - (2) 对于选择条件是“非主属性=值”的查询, 并且选择列上有索引
    - 要估算查询结果的元组数目
    - 如果比例较小(<10%)可以使用索引扫描方法
    - 否则还是使用全表顺序扫描



# 基于启发式规则的存取路径选择优化(续)

73

## 一、选择操作的启发式规则:

□ 对于大关系，启发式规则有:

■ (3) 对于选择条件是属性上的非等值查询或者范围查询，并且选择列上有索引

- 要估算查询结果的元组数目
- 如果比例较小(<10%)可以使用索引扫描方法
- 否则还是使用全表顺序扫描



# 基于启发式规则的存取路径选择优化(续)

74

## 一、选择操作的启发式规则:

### □ 对于大关系，启发式规则有:

#### ■ (4) 对于用AND连接的合取选择条件

##### ■ 如果有涉及这些属性的组合索引

##### ■ 优先采用组合索引扫描方法

##### ■ 如果某些属性上有一般的索引，可以用索引扫描方法

##### ■ 通过分别查找满足每个条件的指针，求指针的交集

##### ■ 通过索引查找满足部分条件的元组，然后在扫描这些元组时判断是否满足剩余条件 [例10.1-C4]

##### ■ 其他情况：使用全表顺序扫描

#### ■ (5) 对于用OR连接的析取选择条件，一般使用全表顺序扫描



# 基于启发式规则的存取路径选择优化(续)

75

## 二、连接操作的启发式规则：

1. 如果2个表都已经按照**连接属性排序**

- 选用排序-合并方法

2. 如果一个表在**连接属性上有索引**

- 选用索引连接方法

3. 如果上面2个规则都不适用，其中**一个表较小**

- 选用Hash join方法



# 基于启发式规则的存取路径选择优化(续)

76

## 二、连接操作的启发式规则：

4. 可以选用嵌套循环方法，并选择其中较小的表，确切地讲是占用的块数( $b$ )较少的表，作为外表(外循环的表)。

- 设连接表R与S分别占用的块数为 $B_r$ 与 $B_s$
- 连接操作使用的内存缓冲区块数为 $K$
- 分配 $K-1$ 块给外表
- 如果R为外表，则嵌套循环法存取的块数为 $B_r + (B_r/K - 1)B_s$
- 显然这样可以降低所需块数与I/O数，应该选块数小的表作为外表



## 10.4 物理优化（续）

77

- 10.4.1 基于启发式规则的存取路径选择优化
- 10.4.2 基于代价的优化



## 10.4.2 基于代价的优化

78

- 启发式规则优化是定性的选择，适合解释执行的系统
  - 解释执行的系统，优化开销包含在查询总开销之中
- 编译执行的系统中查询优化和查询执行是分开的
  - 可以采用精细复杂一些的基于代价的优化方法



# 基于代价的优化（续）

79

1. 统计信息
2. 代价估算示例
3. 优化方法



# 基于代价的优化（续）

80

## 一、统计信息

- 基于代价的优化方法要计算各种操作算法的执行代价，与数据库的状态密切相关
- 数据字典中存储的优化器需要的统计信息：
  - 1. 对每个基本表
    - 该表的元组总数(**N**)
    - 元组长度(**l**)
    - 占用的块数(**B**)
    - 占用的溢出块数(**BO**)



# 基于代价的优化（续）

81

- 2. 对基表的每个列
  - 该列不同值的个数( $m$ )
  - 该列最大值
  - 该列最小值
  - 该列上是否已经建立了索引
  - 索引类型(B+树索引、Hash索引、聚集索引)
  - 计算选择率( $f$ )
    - 如果不同值的分布是均匀的,  $f=1/m$ , 实际中做法
    - 如果不同值的分布不均匀, 则每个值的选择率=具有该值的元组数/ $N$



# 基于代价的优化（续）

82

- 3. 对索引(如B+树索引)
  - 索引的层数(L)
  - 不同索引值的个数
  - 索引的选择基数S(有S个元组具有某个索引值)
  - 索引的叶结点数(Y)



# 基于代价的优化（续）

83

## 二、代价估算示例

### □ 1. 全表扫描算法的代价估算公式

- 如果基本表大小为**B**块，全表扫描算法的代价  $\text{cost} = B$
- 如果选择条件是**码=值**，那么平均搜索代价  $\text{cost} = B/2$



# 基于代价的优化（续）

84

## □ 2. 索引扫描算法的代价估算公式

### □ 如果选择条件是“码=值”

- 如 [例10.1-C2]，则采用该表的**主索引**
- 若为B+树，层数为L，需要存取B+树中从根结点到叶结点L块，再加上基本表中该元组所在的那一块，所以 $cost=L+1$

### □ 如果选择条件涉及**非码属性**

- 如 [例10.1-C3]，若为B+树索引，选择条件是相等比较，S是索引的选择基数(有S个元组满足条件)
- 最坏的情况下，满足条件的元组可能会保存在不同的块上，此时， $cost=L+S$

[例10.1] `Select * from student where <条件表达式>`;

考虑<条件表达式>的几种情况

C1: 无条件;

C2: `Sno='20180003'`;

C3: `Sage>20`;

C4: `Sdept='CS' AND Sage>20`;



# 基于代价的优化（续）

85

- 2. 索引扫描算法的代价估算公式
  - 如果比较条件是  $>$ ,  $>=$ ,  $<$ ,  $<=$  操作
    - 假设有一半的元组满足条件，就要存取一半的叶结点
    - 通过索引访问一半的表存储块
    - $Cost = L + Y/2 + B/2$
    - 如果可以获得更准确的选择基数，可以进一步修正  $Y/2$  与  $B/2$

基本表占用的块数(B)、索引的叶结点数(Y)、索引的层数(L)



# 基于代价的优化（续）

86

## □ 3. 嵌套循环连接算法的代价估算公式

### □ 嵌套循环连接算法的代价（10.4.1）

$$\text{cost} = B_r + B_s / (K-1) B_r$$

➤ 如果需要把连接结果写回磁盘，

$$\text{cost} = B_r + B_s / (K-1) B_r + (F_{rs} * N_r * N_s) / M_{rs}$$

➤  $F_{rs}$ 为连接选择性，表示连接结果元组数的比例

➤  $M_{rs}$ 是存放连接结果的块因子，表示每块中可以存放的结果元组数目



# 基于代价的优化（续）

87

- 4. 排序-合并连接算法的代价估算公式
  - 如果连接表已经按照连接属性排好序，则
$$\text{cost} = B_r + B_s + (F_{rs} * N_r * N_s) / M_{rs}。$$
  - 如果必须对文件排序
    - 需要在代价函数中加上排序的代价
    - 对于包含B个块的文件排序的代价大约是
$$(2 * B) + (2 * B * \log_2 B)$$



# 第十章 关系系统及其查询优化

88

**10.1 关系数据库系统的查询处理**

**10.2 关系数据库系统的查询优化**

**10.3 代数优化**

**10.4 物理优化**

**\*10.5 查询计划的执行**

**10.6 小结**



## 10.6 小结

89

- 查询处理是RDBMS的核心，查询优化技术是查询处理的关键技术
- 本章讲解的优化方法
  - 启发式代数优化
  - 基于规则的存取路径优化
  - 基于代价的优化
- 本章的目的：掌握查询优化方法的概念和技术



## 小结 (续)

90

- 比较复杂的查询，尤其是涉及连接和嵌套的查询
  - 不要把优化的任务全部放在RDBMS上
  - 应该找出RDBMS的优化规律，以写出适合RDBMS自动优化的SQL语句
- 对于RDBMS不能优化的查询需要重写查询语句，进行手工调整以优化性能