哈尔滨工业大学

<<数据库系统>>

实验报告三

(2024 年度秋季学期)

姓名:	郑书航
学号:	2022113601
学院:	计算学部
教师:	郑书航

实验三

一、实验目的

1. 关系连接算法的实现：掌握关系连接操作的实现算法，理解算法的 I/O 复杂性，使用高级语言实现重要的关系连接操作算法。

2. 查询优化算法的设计：掌握关系数据库中查询优化的原理，理解查询优化算法在执行过程中的时间开销和空间开销，使用高级语言实现重要的查询优化算法。

二、实验环境

Windows 10 操作系统、MySQL 关系数据库管理系统、VSCODE、Python 语言，C 语言、pyqt5 框架

三、实验过程及结果

3.1 实验过程

3.1.1 关系连接算法实现

（1）数据准备

要求：

关系 R 具有两个属性 A 和 B，其中 A 和 B 的属性值均为 int 型（4 个字节）， A 的值域为[1, 40]，B 的值域为[1, 1000]。

关系 S 具有两个属性 C 和 D，其中 C 和 D 的属性值均为 int 型（4 个字节）。 C 的值域为[20, 60]，D 的值域为[1, 1000]。

使用 ExtMem 程序库建立两个关系 R 和 S 的物理存储。关系的物理存储形式 为磁盘块序列 B1, B2, …, Bn，其中 Bi 的最后 4 个字节存放 Bi+1 的地址。

R 和 S 的每个元组的大小均为 8 个字节。 块的大小设置为 64 个字节，缓冲区大小设置为 512+8=520 个字节（每一块前有一个 bit 做表示位，表示该块是否被占用）。这样，每块可存放 7 个元组和 1 个后继磁盘块地址，缓冲区内可最多存放 8 个块。 编写程序，随机生成关系 R 和 S，使得 R 中包含 16 7 = 112 个元组，S 中 包含 32 7 = 224 个元组。

```
1.  void generate_relation(Buffer buf, unsigned int start_addr, int
      block_count, int value_a_min, int value_a_max, int value_b_min, int
      value_b_max) {
2.      unsigned int addr = start_addr;
```

```
3.
4.      for (int i = 0; i < block_count; i++) {
5.          // 获取新块
6.          unsigned char block = getNewBlockInBuffer(buf);
7.          if (!block) {
8.              printf("Failed to allocate block\n");
9.              return;
10.         }
11.
12.         unsigned char ptr = block;
13.
14.         // 在块内写入元组
15.         for (int j = 0; j < (BLOCK_SIZE - sizeof(int)) / TUPLE_SIZE; j++)
      {
16.             int attr1 = value_a_min + rand() % (value_a_max - value_a_min
      + 1);
17.             int attr2 = value_b_min + rand() % (value_b_max - value_b_min
      + 1);
18.
19.             memcpy(ptr, &attr1, sizeof(int));
20.             ptr += sizeof(int);
21.             memcpy(ptr, &attr2, sizeof(int));
22.             ptr += sizeof(int);
23.         }
24.
25.         // 写入下一个块的地址到最后 4 个字节
26.         if (i < block_count - 1) {
27.             int next_addr = addr + 1;
28.             memcpy(block + BLOCK_SIZE - sizeof(int), &next_addr,
      sizeof(int));
29.         } else {
30.             int end_addr = 0; // 表示链表结束
31.             memcpy(block + BLOCK_SIZE - sizeof(int), &end_addr,
      sizeof(int));
32.         }
33.
34.         // 打印当前块内容
35.         printf("Generated content for block %d:\n", addr);
36.         print_block_content(block, addr);
37.
38.         // 写入磁盘
39.         if (writeBlockToDisk(block, addr, buf) != 0) {
40.             printf("Failed to write block %d\n", addr);
41.             return;
42.         }
43.         addr++;
44.     }
45.
46.     printf("Generated %d blocks starting from address %d\n",
      block_count, start_addr);
47. }
```

这段代码主要功能是生成两个关系 R 和 S，每个关系由一系列随机生成的元组组成，并将它们存储在模拟的磁盘块内。首先，为每个关系分配一定数量的块，然后在每个块内填充元组，元组包含随机生成的属性值。每块的最后四个字节存储指向下一个块的地址，最后通过 writeBlockToDisk 函数将块写入磁盘。代码同时提供了块内容打印功能，以便验证生成数据的正确性。

```
Generated content for block 126:
Block 126:
  Tuple (49, 460)
  Tuple (42, 439)
  Tuple (37, 389)
  Tuple (58, 234)
  Tuple (41, 682)
  Tuple (24, 359)
  Tuple (20, 700)
  Next block: 127
```

```
Generated content for block 127:
Block 127:
  Tuple (55, 840)
  Tuple (55, 364)
  Tuple (58, 795)
  Tuple (46, 848)
  Tuple (38, 463)
  Tuple (54, 391)
  Tuple (60, 792)
  Next block: 128
```

```
Generated content for block 128:
Block 128:
  Tuple (20, 116)
  Tuple (54, 158)
  Tuple (48, 492)
  Tuple (33, 952)
  Tuple (55, 22)
  Tuple (57, 741)
  Tuple (29, 31)
  Next block: 129
```

在磁盘块中的表现形式：

```
shuhang@shuhang-virtual-machine:~/database$ od -t dI -An 126.blk
          49         460          42         439
          37         389          58         234
          41         682          24         359
          20         700           0         127
shuhang@shuhang-virtual-machine:~/database$ od -t dI -An 127.blk
          55         840          55         364
          58         795          46         848
          38         463          54         391
          60         792           0         128
shuhang@shuhang-virtual-machine:~/database$ od -t dI -An 128.blk
          20         116          54         158
          48         492          33         952
          55          22          57         741
          29          31           0        _129
```

（2）选择操作

要求：

实现关系选择算法：基于 ExtMem 程序库，使用高级语言实现关系选择算法，选出 R.A=40 或 S.C=60 的元组，并将结果存放在磁盘上。

核心代码：

```
48. while (current_addr != 0) {
49.     // 读取磁盘块到缓冲区
50.     block = readBlockFromDisk(current_addr, buf);
51.     if (!block) {
52.         printf("Failed to read block %d\n", current_addr);
53.         return;
54.     }
55.
56.     unsigned char ptr = block;
57.
58.     // 遍历块内的元组
59.     for (int i = 0; i < (BLOCK_SIZE - sizeof(int)) / 8; i++) {
60.         int attr_value;
61.         memcpy(&attr_value, ptr + rel->attr_offsets[attr_index],
       sizeof(int)); // 获取指定属性值
62.
63.         if (attr_value == query_value) {
64.             // 输出到控制台
```

```
65.             int attr1, attr2;
66.             memcpy(&attr1, ptr, sizeof(int));
67.             memcpy(&attr2, ptr + 4, sizeof(int));
68.             printf("| %-8d | %-8d |\n", attr1, attr2);
69.
70.             // 如果结果块为空或已满，分配新块
71.             if (result_block == NULL || result_count == (BLOCK_SIZE -
      sizeof(int)) / 8) {   // result_count ->[0,(BLOCK_SIZE - sizeof(int))
      / 8 - 1]
72.                 if (result_block != NULL) {
73.                     // 写入结果块的后继地址
74.                     int next_addr = result_addr + 1;
75.                     memcpy(result_block + BLOCK_SIZE - sizeof(int),
      &next_addr, sizeof(int));
76.                     writeBlockToDisk(result_block, result_addr, buf);
77.                     freeBlockInBuffer(result_block, buf);
78.                     result_addr++;
79.                 }
80.
81.                 // 分配新结果块
82.                 result_block = getNewBlockInBuffer(buf);
83.                 if (!result_block) {
84.                     printf("Buffer full while allocating result
      block!\n");
85.                     return;
86.                 }
87.                 memset(result_block, 0, BLOCK_SIZE);
88.                 result_count = 0;
89.             }
90.
91.             // 将满足条件的元组写入结果块
92.             memcpy(result_block + result_count  8, ptr, 8);
93.             result_count++;
94.         }
95.
96.         ptr += 8; // 移动到下一个元组
97.     }
98.
99.     // 获取当前块的后继地址
100.        memcpy(&current_addr, block + BLOCK_SIZE - sizeof(int),
      sizeof(int));
101.        freeBlockInBuffer(block, buf);
102.    }
103.
```

设计思路

高效地从存储介质中提取数据，结合条件筛选和磁盘块管理。首先，它根据提供的地址逐步读取数据块，直到没有更多可读数据。对于每个读取的数据块，程序会逐一检查其中的记录，提取特定属性的值，并与输入的查询值进行比较。当找到匹配的记录时，程序会将相关信息打印到控制台，并暂时存储在结果区域。

为了管理存储结果的空间，程序会检查当前的结果区域是否已满。如果已满或尚未分配，

它会创建新的结果区域，并在必要时写入之前的结果。每个结果区域都有专门的地址指向，以确保可以顺利地访问后续的结果，同时还会进行相应的内存管理，以避免资源浪费。这样，整体逻辑清晰，能够高效地处理大量数据并提取所需的信息，非常适合对大数据集进行分析与操作的应用场景。

（3）投影操作

要求：

实现关系投影算法：基于 ExtMem 程序库，使用高级语言实现关系投影 算法，对关系 R 上的 A 属性进行投影，并将结果存放在磁盘上。

核心代码

```
104.   if (result_set[attr_value] == 0) { // 如果该值尚未被投影
105.       result_set[attr_value] = 1; // 标记为已投影
```

总体设计思路和关系选择操作类似，将属性的条件对比改成提取指定的属性。

（4）循环嵌套连接

算法

```
for S的每个元组s do
  for R的每个元组r do
    if r和s满足连接条件 then
      连接r和s，并将结果写入输出缓冲区
```

```
106.       while (R_addr != 0) {
107.           R_block = readBlockFromDisk(R_addr, buf);
108.           if (!R_block) {
109.               printf("Failed to read block %d of R\n", R_addr);
110.               return;
111.           }
112.
113.           // 对于每个 R 的块，遍历关系 S 的所有块
114.           S_addr = S->start_addr;
115.           while (S_addr != 0) {
116.               S_block = readBlockFromDisk(S_addr, buf);
117.               if (!S_block) {
118.                   printf("Failed to read block %d of S\n", S_addr);
119.                   return;
120.               }
121.
122.               // 遍历 R 块中的每个元组
123.               unsigned char R_ptr = R_block;
124.               for (int i = 0; i < MAX_TUPLES_PER_BLOCK; i++) {
125.                   int R_A, R_B;
126.                   memcpy(&R_A, R_ptr, sizeof(int));    // 获取 R.A
127.                   memcpy(&R_B, R_ptr + 4, sizeof(int)); // 获取 R.B
128.                   R_ptr += 8;  // 移动到下一个元组
129.
130.                   // 遍历 S 块中的每个元组
131.                   unsigned char S_ptr = S_block;
132.                   for (int j = 0; j < MAX_TUPLES_PER_BLOCK; j++) {
133.                       int S_C, S_D;
```

```
                    memcpy(&S_C, S_ptr, sizeof(int));    // 获取 S.C
                    memcpy(&S_D, S_ptr + 4, sizeof(int)); // 获取 S.D
                    S_ptr += 8;  // 移动到下一个元组

                    // 检查是否满足连接条件 R.A = S.C
                    if (R_A == S_C) {
                        // 连接成功，输出到结果
                        if (result_block == NULL || result_count == (BLOCK_SIZE - sizeof(int)) / 16) {
                            // 写入结果块
                            if (result_block != NULL) {
                                int next_addr = result_addr + 1;
                                memcpy(result_block + BLOCK_SIZE - sizeof(int), &next_addr, sizeof(int));
                                writeBlockToDisk(result_block, result_addr, buf);
                                freeBlockInBuffer(result_block, buf);
                                result_addr++;
                            }
                            // 分配新结果块
                            result_block = getNewBlockInBuffer(buf);
                            if (!result_block) {
                                printf("Buffer full while allocating result block!\n");
                                return;
                            }
                            memset(result_block, 0, BLOCK_SIZE);
                            result_count = 0;
                        }

                        // 将连接结果写入结果块
                        memcpy(result_block + result_count  16, &R_A, sizeof(int));  // R.A
                        memcpy(result_block + result_count  16 + 4, &R_B, sizeof(int)); // R.B
                        memcpy(result_block + result_count  16 + 8, &S_C, sizeof(int)); // S.C
                        memcpy(result_block + result_count  16 + 12, &S_D, sizeof(int)); // S.D
                        result_count++;
                        total_join_num++;

                        // 打印连接结果
                        printf("| %-4d | %-4d | %-4d | %-4d |\n", R_A, R_B, S_C, S_D);
                    }
                }
            }

            // 获取下一个 S 块
```

```
175.             memcpy(&S_addr, S_block + BLOCK_SIZE - sizeof(int),
      sizeof(int));
176.             freeBlockInBuffer(S_block, buf);
177.         }
178.         // 获取下一个 R 块
179.         memcpy(&R_addr, R_block + BLOCK_SIZE - sizeof(int),
      sizeof(int));
180.         freeBlockInBuffer(R_block, buf);
181.     }
182.
```

设计思想：

高效地实现两个数据集之间的连接操作。核心在于从存储介质（磁盘）中逐块读取数据，依次检查两个数据集的记录。首先，程序从数据集 R 中读取块，并遍历 R 块中的所有记录。在此过程中，对于 R 中的每一条记录，程序会进行内部循环，读取数据集 S 的所有块，并检查 S 中的每条记录。

对于每对 R 和 S 中的记录，比较 R 的某个属性与 S 的对应属性。如果两个记录满足连接条件，则将它们组合成一条连接结果，并存储到结果区域中。当结果区域满时，将当前结果写入磁盘，并从缓冲区中分配新的结果区域以继续存储后续结果。同时，为了确保内存的有效使用，在读取每个块后都会释放之前使用的内存，以避免内存泄漏。

（5）哈希连接

算法

1: // 哈希分桶
2: 将R的元组哈希到$M-1$个桶$R_1, R_2, \ldots, R_{M-1}$中(哈希键为$R.Y$)
3: 将S的元组哈希到$M-1$个桶$S_1, S_2, \ldots, S_{M-1}$中(哈希键为$S.Y$)
4: // 逐桶连接
5: **for** $i = 1, 2, \ldots, M-1$ **do**
6: 使用一趟连接(one-pass join)算法计算$R_i \bowtie S_i$，并将结果写入输出缓冲区

```
183.  // 哈希表节点
184.  typedef struct BucketNode {
185.      int key;                // 存储哈希值，连接的左侧属性值
186.      unsigned char result_block;
187.      int result_count;
188.      unsigned int addr;
189.      unsigned int result_addr;
190.  } BucketNode;
191.
192.  // 哈希函数：简单的模哈希
193.  unsigned int bucket(int key) {
194.      return key % PARTITION_COUNT;
195.  }
196.
197.  // 哈希分区
198.  void partition(Buffer buf, Relation rel, int attr_index, BucketNode
      bucketTable[PARTITION_COUNT]) {
199.      unsigned char block;
200.      unsigned int current_addr = rel->start_addr;
201.
```

```
202.      // 将 R 分区
203.      printf("Partitioning relation ...\n");
204.      while (current_addr != 0) {
205.          // 读取磁盘块到缓冲区
206.          block = readBlockFromDisk(current_addr, buf);
207.          if (!block) {
208.              printf("Failed to read block %d\n", current_addr);
209.              return;
210.          }
211.
212.          unsigned char ptr = block;
213.
214.          // 遍历块内的元组
215.          for (int i = 0; i < (BLOCK_SIZE - sizeof(int)) / 8; i++) {
216.              int attr_value;
217.              int bucket_value;
218.              memcpy(&attr_value, ptr + rel->attr_offsets[attr_index],
      sizeof(int)); // 获取指定属性值
219.              bucket_value = bucket(attr_value);
220.
221.              // 如果结果块为空或已满，分配新块
222.              if (bucketTable[bucket_value].result_block == NULL ||
      bucketTable[bucket_value].result_count >= MAX_TUPLES_PER_BLOCK) {
223.                  if (bucketTable[bucket_value].result_block != NULL) {
224.                      // 写入结果块的后继地址
225.                      int next_addr = bucketTable[bucket_value].result_addr +
      1;
226.                      memcpy(bucketTable[bucket_value].result_block + BLOCK_SIZE
      - sizeof(int), &next_addr, sizeof(int));
227.                      writeBlockToDisk(bucketTable[bucket_value].result_block,
      bucketTable[bucket_value].result_addr, buf);
228.                      freeBlockInBuffer(bucketTable[bucket_value].result_block,
      buf);
229.                      bucketTable[bucket_value].result_addr++;
230.                  }
231.
232.                  // 分配新结果块
233.                  bucketTable[bucket_value].result_block =
      getNewBlockInBuffer(buf);
234.                  if (!bucketTable[bucket_value].result_block) {
235.                      printf("Buffer full while allocating result block!\n");
236.                      return;
237.                  }
238.                  memset(bucketTable[bucket_value].result_block, 0,
      BLOCK_SIZE);
239.                  bucketTable[bucket_value].result_count = 0;
240.              }
241.
242.              // 将满足条件的元组写入结果块
243.              memcpy(bucketTable[bucket_value].result_block +
      bucketTable[bucket_value].result_count  8, ptr, 8);
```

```
244.                 bucketTable[bucket_value].result_count++;
245.
246.                 ptr += 8; // 移动到下一个元组
247.             }
248.
249.             // 获取当前块的后继地址
250.             memcpy(&current_addr, block + BLOCK_SIZE - sizeof(int), sizeof(int));
251.             freeBlockInBuffer(block, buf);
252.         }
253.         // 写入最后一个结果块
254.         for(int i = 0; i < PARTITION_COUNT; i++) {
255.             if (bucketTable[i].result_count > 0) {
256.                 int end_addr = 0;
257.                 memcpy(bucketTable[i].result_block + BLOCK_SIZE - sizeof(int),
      &end_addr, sizeof(int));
258.                 writeBlockToDisk(bucketTable[i].result_block,
      bucketTable[i].result_addr, buf);
259.                 freeBlockInBuffer(bucketTable[i].result_block, buf);
260.             }
261.         }
262.     }
```

设计思路:

上面的程序实现对数据集的哈希分区，以便于后续的处理和查询。首先，定义了一个结构体用于存储哈希表节点的信息，包括存储的哈希值、结果块、记录计数等。哈希函数采用简单的模运算，以将属性值映射到特定的分区。

程序的核心在于 partition 函数，负责读取数据集的块并将其分配到相应的哈希分区。首先从指定的起始地址读取数据块，然后遍历块中的每条记录。对于每条记录，提取指定属性的值，并计算出对应的哈希分区。若当前分区的结果块为空或已满，程序会分配新的结果块并处理之前的结果块，确保数据的有效存储。

在处理完所有块后，程序会将最后一个结果块写入磁盘，以确保所有数据都被正确保存。整个过程强调了内存管理和数据的高效分配，适合用于需要对大规模数据进行分区处理的场景。

对每个桶内的元组使用循环嵌套连接。

哈希分区过程中的磁盘块内部情况：

```
shuhang@shuhang-virtual-machine:~/database$ od -t dI -An 330.blk
          18         916           3          28
          13         737           8         430
          23         531          23         124
          28         136           0         331
shuhang@shuhang-virtual-machine:~/database$ od -t dI -An 331.blk
          23          59          23         171
          23         546           8         809
          13          61          28         602
          18         903           0         332
shuhang@shuhang-virtual-machine:~/database$ od -t dI -An 332.blk
          38         493          13         757
          18         772           8         857
          18         354          13         830
          28         857           0         333
shuhang@shuhang-virtual-machine:~/database$ od -t dI -An 333.blk
          28         366          33         552
          38         229          38         997
          13         726           0           0
           0           0           0           0
```

从 330 开始的连续 4 个块中 A 属性的值都是模 5 余 3 的。

（6）归并连接

算法

```
// 创建归并段
将R划分为⌈B(R)/M⌉个归并段(每个归并段按R.Y进行排序)
将S划分为⌈B(S)/M⌉个归并段(每个归并段按S.Y进行排序)
// 归并
读入R和S的每个归并段的第1页
repeat
  找出输入缓冲区中元组Y属性的最小值y
  for R中满足R.Y = y的元组r do
    for S中满足S.Y = y的元组s do
      连接r和s，并将结果写入输出缓冲区
  任意输入缓冲页中的元组若归并完毕，则读入其归并段的下一页
until R或S的所有归并段都已归并完毕
```

步骤一：生成归并段

```
263.  int sortRelation(Buffer buf, Relation rel, unsigned int segs[]) {
264.      unsigned int current_addr = rel->start_addr, result_addr;
265.      unsigned char block;
266.      int seg_count = 0;                          // 当前段计数
267.      int block_count = 0;                        // 当前段的块计数
268.      unsigned char segment_buffer[MAX_SEGMENT] = {NULL}; // 段缓冲区
269.      unsigned char segment_ptr[MAX_SEGMENT] = {NULL};    // 指向段缓冲
      区的指针
270.      unsigned char result_block = NULL;         // 结果块
271.      int result_count = 0;                       // 结果元组计数
272.
273.      printf("Sorting relation %s...\n", rel->rel_name);
274.
275.      // 处理每个块
276.      while (current_addr != 0) {
277.          block = readBlockFromDisk(current_addr, buf);
278.          if (!block) {
279.              printf("Failed to read block %d\n", current_addr);
280.              return -1;
281.          }
282.
283.          // 排序当前块
284.          qsort(block, MAX_TUPLES_PER_BLOCK, rel->tuple_size,
      compareTuples);
285.
286.          // 将块存入段缓冲区
287.          if (block_count < MAX_SEGMENT) { // 确保不越界
288.              segment_ptr[block_count] = block;
289.              segment_buffer[block_count] = block;
290.              block_count++;
291.          } else {
```

```
292.             printf("Block count exceeded MAX_SEGMENT\n");
293.             freeBlockInBuffer(block, buf); // 清理内存
294.             break; // 退出循环
295.         }
296.
297.         // 获取下一个块地址
298.         memcpy(&current_addr, block + BLOCK_SIZE - sizeof(int),
    sizeof(int));
299.
300.         // 如果到达归并段的块个数或到达最后一个块
301.         if (block_count == MAX_SEGMENT || current_addr == 0) {
302.             // 初始化这个归并段的起始地址
303.             result_addr = segs[seg_count];
304.             while(1) {
305.                 // 找到几个段中最小的元组
306.                 int min_seg = -1;
307.                 int min_value = INT_MAX;
308.
309.                 for (int i = 0; i < block_count; i++) {
310.                     if (segment_ptr[i]) {
311.                         int value;
312.                         memcpy(&value, segment_ptr[i],
    sizeof(int));
313.                         if (value < min_value && value != 0) {
314.                             min_value = value;
315.                             min_seg = i;
316.                         }
317.                     }
318.                 }
319.
320.                 // 如果没有找到有效值，归并结束
321.                 if (min_seg == -1) break;
322.
323.                 // 如果缓冲区满则写入缓存并添加新的缓冲区
324.                 if (result_block == NULL || result_count >= (BLOCK_SIZE
    - sizeof(int)) / 8) {
325.                     if (result_block != NULL) {
326.                         int next_addr = result_addr + 1;
327.                         memcpy(result_block + BLOCK_SIZE -
    sizeof(int), &next_addr, sizeof(int));
328.                         writeBlockToDisk(result_block, result_addr,
    buf);
329.                         freeBlockInBuffer(result_block, buf);
330.                         result_addr++;
331.                     }
332.
333.                     result_block = getNewBlockInBuffer(buf);
334.                     if (!result_block) {
335.                         printf("Buffer full while allocating result
    block!\n");
336.                         return -1; // 修正返回值
```

```
337.                     }
338.
339.                     memset(result_block, 0, BLOCK_SIZE);
340.                     result_count = 0;
341.                 }
342.
343.                 // 把最小的元组写入缓冲区
344.                 memcpy(result_block + result_count  rel->tuple_size,
    segment_ptr[min_seg], rel->tuple_size);
345.                 result_count++;
346.                 segment_ptr[min_seg] += rel->tuple_size; // 假设每个
    元组大小是 rel->tuple_size
347.                 if (segment_ptr[min_seg] >= segment_buffer[min_seg] +
    BLOCK_SIZE - sizeof(int)) {
348.                     segment_ptr[min_seg] = NULL;
349.                 }
350.             }
351.
352.             // 写最后一个结果块
353.             if (result_count > 0) {
354.                 int end_addr = 0;
355.                 memcpy(result_block + BLOCK_SIZE - sizeof(int),
    &end_addr, sizeof(int));
356.                 writeBlockToDisk(result_block, result_addr, buf);
357.                 freeBlockInBuffer(result_block, buf);
358.                 result_block = NULL; // 清空指针方便后续重用与检测
359.             }
360.
361.             // 清理段缓冲区
362.             for (int k = 0; k < block_count; k++) {
363.                 freeBlockInBuffer(segment_buffer[k], buf);
364.                 segment_buffer[k] = NULL;
365.                 segment_ptr[k] = NULL;
366.             }
367.
368.             printf("Segment %d Merging completed.\n", seg_count);
369.             seg_count++; // 增加段计数
370.             block_count = 0; // 重置块计数以处理下一个段
371.         }
372.     }
373.
374.     return seg_count; // 返回段计数
375. }
376.
```

对关系数据进行排序，并将排序结果存储到指定的段中：

1. 初始化：程序开始时定义了一些变量，包括当前地址、结果块、段缓冲区等。每个段可以存储多个块，以便于后续的归并排序。

2. 读取和排序：通过循环读取数据块，使用 qsort 对每个块内的元组进行排序。排序完成后，程序将排序后的块存入段缓冲区，确保不超过最大段数。

3. 归并过程：当达到最大段数或读取到最后一个块时，程序进入归并阶段。它会查找当前

段中最小的元组，并将其写入结果块中。如果结果块已满，则会将其写入磁盘并分配新的结果块。

4．更新指针：在写入最小元组后，程序更新指向该段的指针，以便继续处理下一个元组。如果当前段的指针超出块的范围，则将其置为 NULL。

5．清理：完成归并后，程序会释放段缓冲区的内存，以避免内存泄漏，并更新段计数以准备处理下一个段。

6．返回结果：最后，程序返回处理过的段的数量，表明排序和归并操作的完成。

创建归并段后的磁盘块内部情况：

```
shuhang@shuhang-virtual-machine:~/database$ od -t dI -An 600.blk
          1         730           2         676
          3          28           4         927
          4         751           4         652
          5         328           0         601
shuhang@shuhang-virtual-machine:~/database$ od -t dI -An 601.blk
          5         896           5         620
          7         730           7         442
          8         430           8         809
          8         857           0         602
shuhang@shuhang-virtual-machine:~/database$ od -t dI -An 602.blk
         10         422          10         803
         11          60          12         369
         12          43          12         981
         13         737           0         603
shuhang@shuhang-virtual-machine:~/database$ od -t dI -An 603.blk
         13          61          13         757
         14         527          15         368
         15         540          17         506
         18         916           0         604
```

可以看出 A 属性的值是在磁盘块中存储是不断递增的。

步骤二：归并排序

```
377.  while (1) {
378.          int min_R = INT_MAX, min_S = INT_MAX;
379.
380.          // 找到 R 和 S 的当前最小值
381.          for (int i = 0; i < R_count; i++) {
382.              if (R_blocks[i] && R_indices[i] < MAX_TUPLES_PER_BLOCK) {
383.                  if (R_values[i][0] < min_R) {
384.                      min_R = R_values[i][0];
385.                  }
386.              }
387.          }
388.          for (int i = 0; i < S_count; i++) {
389.              if (S_blocks[i] && S_indices[i] < MAX_TUPLES_PER_BLOCK) {
390.                  if (S_values[i][0] < min_S) {
391.                      min_S = S_values[i][0];
392.                  }
393.              }
394.          }
395.
396.          // 如果都没有可用元组，结束
397.          if (min_R == INT_MAX || min_S == INT_MAX) break;
398.
```

```
399.          // 如果 R 和 S 的最小值相等，处理匹配
400.          if (min_R == min_S) {
401.              S_buffer_size = 0;
402.
403.              // 缓存所有等于 min_S 的 S 元组
404.              for (int i = 0; i < S_count; i++) {
405.                  while (S_blocks[i] && S_indices[i] <
      MAX_TUPLES_PER_BLOCK && S_values[i][0] == min_S) {
406.                      S_buffer[S_buffer_size][0] = S_values[i][0];
407.                      S_buffer[S_buffer_size][1] = S_values[i][1];
408.                      S_buffer_size++;
409.
410.                      // 移动 S 的指针
411.                      S_indices[i]++;
412.                      if (S_indices[i] == MAX_TUPLES_PER_BLOCK) {
413.                          unsigned int next_addr;
414.                          memcpy(&next_addr, S_blocks[i] + BLOCK_SIZE -
      sizeof(int), sizeof(int));
415.                          freeBlockInBuffer(S_blocks[i], buf);
416.                          if (next_addr != 0) {
417.                              S_blocks[i] =
      readBlockFromDisk(next_addr, buf);
418.                              S_indices[i] = 0;
419.                              getTuple(S_blocks[i], 0, &S_values[i][0],
      &S_values[i][1]);
420.                          } else {
421.                              S_blocks[i] = NULL;
422.                          }
423.                      } else {
424.                          getTuple(S_blocks[i], S_indices[i],
      &S_values[i][0], &S_values[i][1]);
425.                      }
426.                  }
427.              }
428.
429.              // 遍历所有等于 min_R 的 R 元组，与 S_buffer 中的元组连接
430.              for (int i = 0; i < R_count; i++) {
431.                  while (R_blocks[i] && R_indices[i] <
      MAX_TUPLES_PER_BLOCK && R_values[i][0] == min_R) {
432.                      for (int j = 0; j < S_buffer_size; j++) {
433.                          // 输出匹配的结果
434.                          if (result_count == (BLOCK_SIZE - sizeof(int))
      / (2  TUPLE_SIZE)) {
435.                              int next_addr = result_addr + 1;
436.                              memcpy(result_block + BLOCK_SIZE -
      sizeof(int), &next_addr, sizeof(int));
437.                              writeBlockToDisk(result_block,
      result_addr, buf);
438.                              freeBlockInBuffer(result_block, buf);
439.                              result_block = getNewBlockInBuffer(buf);
440.                              result_count = 0;
```

```
441.                         }
442.
443.                         memcpy(result_block + result_count  16,
      &R_values[i][0], sizeof(int));
444.                         memcpy(result_block + result_count  16 + 4,
      &R_values[i][1], sizeof(int));
445.                         memcpy(result_block + result_count  16 + 8,
      &S_buffer[j][0], sizeof(int));
446.                         memcpy(result_block + result_count  16 + 12,
      &S_buffer[j][1], sizeof(int));
447.                         // 打印连接结果
448.                         printf("| %-4d | %-4d | %-4d | %-4d |\n",
      R_values[i][0], R_values[i][1], S_buffer[j][0], S_buffer[j][1]);
449.                         result_count++;
450.                         total_join_num++;
451.                     }
452.
453.                     // 移动 R 的指针
454.                     R_indices[i]++;
455.                     if (R_indices[i] == MAX_TUPLES_PER_BLOCK) {
456.                         unsigned int next_addr;
457.                         memcpy(&next_addr, R_blocks[i] + BLOCK_SIZE -
      sizeof(int), sizeof(int));
458.                         freeBlockInBuffer(R_blocks[i], buf);
459.                         if (next_addr != 0) {
460.                             R_blocks[i] =
      readBlockFromDisk(next_addr, buf);
461.                             R_indices[i] = 0;
462.                             getTuple(R_blocks[i], 0, &R_values[i][0],
      &R_values[i][1]);
463.                         } else {
464.                             R_blocks[i] = NULL;
465.                         }
466.                     } else {
467.                         getTuple(R_blocks[i], R_indices[i],
      &R_values[i][0], &R_values[i][1]);
468.                     }
469.                 }
470.             }
471.         } else {
472.             // 如果 min_R 和 min_S 不相等，移动较小值的指针
473.             if (min_R < min_S) {
474.                 for (int i = 0; i < R_count; i++) {
475.                     if (R_blocks[i] && R_indices[i] <
      MAX_TUPLES_PER_BLOCK && R_values[i][0] == min_R) {
476.                         R_indices[i]++;
477.                         if (R_indices[i] == MAX_TUPLES_PER_BLOCK) {
478.                             unsigned int next_addr;
479.                             memcpy(&next_addr, R_blocks[i] +
      BLOCK_SIZE - sizeof(int), sizeof(int));
480.                             freeBlockInBuffer(R_blocks[i], buf);
```

```
481.                             if (next_addr != 0) {
482.                                 R_blocks[i] =
      readBlockFromDisk(next_addr, buf);
483.                                 R_indices[i] = 0;
484.                                 getTuple(R_blocks[i], 0,
      &R_values[i][0], &R_values[i][1]);
485.                             } else {
486.                                 R_blocks[i] = NULL;
487.                             }
488.                         } else {
489.                             getTuple(R_blocks[i], R_indices[i],
      &R_values[i][0], &R_values[i][1]);
490.                         }
491.                     }
492.                 }
493.             } else {
494.                 for (int i = 0; i < S_count; i++) {
495.                     if (S_blocks[i] && S_indices[i] <
      MAX_TUPLES_PER_BLOCK && S_values[i][0] == min_S) {
496.                         S_indices[i]++;
497.                         if (S_indices[i] == MAX_TUPLES_PER_BLOCK) {
498.                             unsigned int next_addr;
499.                             memcpy(&next_addr, S_blocks[i] +
      BLOCK_SIZE - sizeof(int), sizeof(int));
500.                             freeBlockInBuffer(S_blocks[i], buf);
501.                             if (next_addr != 0) {
502.                                 S_blocks[i] =
      readBlockFromDisk(next_addr, buf);
503.                                 S_indices[i] = 0;
504.                                 getTuple(S_blocks[i], 0,
      &S_values[i][0], &S_values[i][1]);
505.                             } else {
506.                                 S_blocks[i] = NULL;
507.                             }
508.                         } else {
509.                             getTuple(S_blocks[i], S_indices[i],
      &S_values[i][0], &S_values[i][1]);
510.                         }
511.                     }
512.                 }
513.             }
514.         }
515.     }
516.
517.     // 写入最后的结果块
518.     if (result_count > 0) {
519.         int end_addr = 0;
520.         memcpy(result_block + BLOCK_SIZE - sizeof(int), &end_addr,
      sizeof(int));
521.         writeBlockToDisk(result_block, result_addr, buf);
522.         freeBlockInBuffer(result_block, buf);
```

```
523.      }
524.
```

对归并段进行多路归并连接：

1．初始化：程序定义了一些变量，用于存储 R 和 S 的当前最小值、缓冲区和索引状态等。

2．查找最小值：在两个关系 R 和 S 中分别寻找当前有效元组的最小值。这个过程使用了两个循环来遍历每个关系的块，确保只考虑当前处于有效范围内的元组。

3．判断连接条件：

- 相等情况：如果 min_R 和 min_S 相等，程序将缓存所有等于 min_S 的 S 元组，并找到的 R 元组与这些 S 元组进行连接。

  • 当找到一个新的元组时，检查结果块是否已满。如果已满，则将当前结果块写入磁盘并创建一个新的结果块。

  • 然后，将 R 和 S 的所有相关元组复制到结果块，并打印连接的结果。

- 不相等情况：如果 min_R 和 min_S 不相等，程序会相应地移动较小值的指针。具体来说：

  • 如果 min_R 小，则移动 R 的指针并获取下一个元组。

  • 如果 min_S 小，则移动 S 的指针并获取下一个元组。

  • 如果该块元组都访问过了，根据块的最后四个 bit 查看下一个磁盘块的地址，并加载。

4．写入最后的结果块：在所有的连接操作完成后，如果还有未写入的结果，程序会将这些结果写入一个最终的结果块并释放相关资源。

3.1.2 查询优化算法设计

任选下列查询语句中的三条，将其转化为对应的查询执行树，并且根据设计的查询优化算法，对生成的查询执行树进行优化。

• SELECT [ENAME = ’Mary’ & DNAME = ’Research’] (EMPLOYEE JOIN DEPARTMENT) PROJECTION [BDATE] (SELECT [ENAME = ’John’ & DNAME = ’ Research’] (EMPLOYEE JOIN DEPARTMENT))

• SELECT [ESSN = ’01’] (PROJECTION [ESSN, PNAME] (WORKS_ON JOIN PROJECT))

• PROJECTION [ENAME] (SELECT [SALARY < 3000] (EMPLOYEE JOIN SELECT [PNO = ’P1’] (WORKS_ON JOIN PROJECT))

• PROJECTION [DNAME, SALARY] (AVG [SALARY] (SELECT [DNAME = ’ Research’] (EMPLOYEE JOIN DEPART MENT))

本实验选择下面三句：

```
525.  queries = [
526.          "SELECT [ ENAME = 'Mary' & DNAME = 'Research' ] ( EMPLOYEE JOIN
      DEPARTMENT )",
527.          "PROJECTION [ BDATE ] ( SELECT [ ENAME = 'John' & DNAME =
      'Research' ] ( EMPLOYEE JOIN DEPARTMENT ) )",
528.          "SELECT [ ESSN = '01' ] ( PROJECTION [ ESSN, PNAME ] ( WORKS_ON
      JOIN PROJECT ) )"
529.      ]
```

具体执行步骤如下：

（1） 初始查询执行树形成

每条查询语句首先被解析为初始的查询执行树。在生成的初始执行树中，SELECT、PROJECTION 和 JOIN 等操作按照查询语句的书写顺序排列，但并未进行优化。例如，对于查询 3，其初始执行树是 SELECT 操作位于最外层，直接作用于 PROJECTION，而 PROJECTION 再作用于 JOIN 操作。这里需要考虑查询执行树生成的结构，一开始考虑使用文本形式，但这样树状的形势不太好展示，因此通过了解使用了 graphviz 图形库进行可视化展示，这样效果更好。具体部分代码如下：

```
from graphviz import Digraph  type: ignore

class QueryNode:
    def __init__(self, operator, children=None, attributes=None, condition=None):
        self.operator = operator
        self.children = children if children else []
        self.attributes = attributes
        self.condition = condition
        self.id = id(self)   唯一标识符

    def __repr__(self):
        desc = self.operator
        if self.attributes:
            desc += f" [{', '.join(self.attributes)}]"
        if self.condition:
            desc += f" [Condition: {self.condition}]"
        return desc

    def to_graphviz(self, graph):
        label = self.__repr__()
        graph.node(str(self.id), label)
        for child in self.children:
            graph.edge(str(self.id), str(child.id))
            child.to_graphviz(graph)

    def visualize(self, filename='query_tree'):
        graph = Digraph(comment='Query Execution Tree')
        self.to_graphviz(graph)
        graph.render(filename, view=True)
```

其次需要考虑如何进行分析生成查询执行树，这里使用的是 python 的 PLY 库构建了语法分析器，定义了基本的词法和语法规则，能够将查询语句划分为词，并且通过语法分析识别 SELECT、PROJECTION 等操作，具体设计代码如下：

```
 parser.py

import ply.lex as lex
import ply.yacc as yacc
from query_tree import QueryNode

 定义保留字
reserved = {
    'SELECT': 'SELECT',
    'PROJECTION': 'PROJECTION',
```

```
    'JOIN': 'JOIN',
    'AVG': 'AVG',
}

 词法分析器
tokens = [
    'LPAREN',
    'RPAREN',
    'LBRACKET',
    'RBRACKET',
    'COMMA',
    'AND',
    'EQUALS',
    'LT',
    'IDENT',
    'STRING',
    'NUMBER'
] + list(reserved.values())

 定义简单的符号
t_LPAREN    = r'\('
t_RPAREN    = r'\)'
t_LBRACKET  = r'\['
t_RBRACKET  = r'\]'
t_COMMA     = r','
t_AND       = r'&'
t_EQUALS    = r'='
t_LT        = r'<'

t_ignore = ' \t'

 定义字符串
def t_STRING(t):
    r'\'[^\']\''
    t.value = t.value.strip('\'')
    return t

 定义数字
def t_NUMBER(t):
    r'\d+'
    t.value = t.value
    return t

 定义标识符和保留字
def t_IDENT(t):
    r'[A-Za-z_][A-Za-z0-9_]'
    t.type = reserved.get(t.value.upper(), 'IDENT')   保留字优先
    return t

 跳过换行符
def t_newline(t):
```

```
620.      r'\n+'
621.      pass
622.
623.   处理非法字符
624.  def t_error(t):
625.      print(f"Illegal character '{t.value[0]}'")
626.      t.lexer.skip(1)
627.
628.  lexer = lex.lex()
629.
630.   定义运算符优先级
631.  precedence = (
632.      ('left', 'AND'),
633.      ('left', 'JOIN'),
634.      ('left', 'SELECT', 'PROJECTION', 'AVG'),
635.  )
636.
637.   语法分析器
638.
639.  def p_query(p):
640.      '''query : operation'''
641.      p[0] = p[1]
642.
643.  def p_operation_select(p):
644.      '''operation : SELECT LBRACKET condition RBRACKET LPAREN operation
      RPAREN'''
645.      node = QueryNode('SELECT', children=[p[6]], condition=p[3])
646.      p[0] = node
647.
648.  def p_operation_projection(p):
649.      '''operation : PROJECTION LBRACKET attributes RBRACKET LPAREN
      operation RPAREN'''
650.      node = QueryNode('PROJECTION', children=[p[6]], attributes=p[3])
651.      p[0] = node
652.
653.  def p_operation_avg(p):
654.      '''operation : AVG LBRACKET IDENT RBRACKET LPAREN operation
      RPAREN'''
655.      node = QueryNode('AVG', children=[p[6]], attributes=[p[3]])
656.      p[0] = node
657.
658.  def p_operation_join(p):
659.      '''operation : operation JOIN operation'''
660.      left = p[1]
661.      right = p[3]
662.      node = QueryNode('JOIN', children=[left, right])
663.      p[0] = node
664.
665.  def p_operation_table(p):
666.      '''operation : IDENT'''
667.      node = QueryNode('TABLE', attributes=[p[1]])
```

```
668.      p[0] = node
669.
670.  def p_condition_and(p):
671.      '''condition : condition AND condition'''
672.      p[0] = f"{p[1]} & {p[3]}"
673.
674.  def p_condition_equals(p):
675.      '''condition : IDENT EQUALS value'''
676.      p[0] = f"{p[1]} = {p[3]}"
677.
678.  def p_condition_lt(p):
679.      '''condition : IDENT LT value'''
680.      p[0] = f"{p[1]} < {p[3]}"
681.
682.  def p_value(p):
683.      '''value : STRING
684.               | NUMBER'''
685.      p[0] = p[1]
686.
687.  def p_attributes_multiple(p):
688.      '''attributes : attributes COMMA IDENT'''
689.      p[0] = p[1] + [p[3]]
690.
691.  def p_attributes_single(p):
692.      '''attributes : IDENT'''
693.      p[0] = [p[1]]
694.
695.  def p_error(p):
696.      if p:
697.          print(f"Syntax error at '{p.value}'")
698.      else:
699.          print("Syntax error at EOF")
700.
701.  parser = yacc.yacc()
```

1. 词法分析

在处理查询过程中，首先进行的是词法分析，这一部分负责将输入字符串拆分成一个个记号（tokens）。这项工作是通过 PLY（Python Lex-Yacc）库实现的。

- 识别的记号：在查询中的每一个部分都会被识别为一个特定的记号。例如，对于 PROJECTION [DNAME, SALARY] (AVG [SALARY] (SELECT [DNAME = 'Research'] (EMPLOYEE JOIN DEPARTMENT)))，会产生记号如 PROJECTION、LBRACKET、IDENT、COMMA 等。

- 输入的示例记号：
  - PROJECTION: 被识别为 PROJECTION。
  - [DNAME, SALARY]: 被拆分为 LBRACKET、IDENT、COMMA、IDENT、RBRACKET 等。

2. 语法分析

完成记号化之后，语法分析器会继续对记号序列进行验证，确保它符合定义的文法规则，并构建出一个解析树。

- 定义的操作：
    - SELECT 操作：SELECT [condition] (operation)
    - PROJECTION 操作：PROJECTION [attributes] (operation)
    - AVG 操作：AVG [IDENT] (operation)
    - JOIN 操作：operation JOIN operation

- 解析树构建：解析器在处理记号时，会利用 QueryNode 创建树结构，每个操作会形成树中的一个节点。

3.查询步骤分析

处理查询 PROJECTION [DNAME, SALARY] (AVG [SALARY] (SELECT [DNAME = 'Research'] (EMPLOYEE JOIN DEPARTMENT))) 的过程如下：

i. 顶层操作：
- 首先处理 PROJECTION [DNAME, SALARY] (...)。
- 创建一个 QueryNode 类型的节点，表示 PROJECTION，并将属性设置为 DNAME 和 SALARY。

ii. 内层操作：
- 然后处理 AVG [SALARY] (SELECT [DNAME = 'Research'] (EMPLOYEE JOIN DEPARTMENT))。
- 这又创建一个 QueryNode 类型的节点，表示 AVG，属性为 SALARY。

iii. 处理 SELECT 操作：
- 处理 SELECT [DNAME = 'Research'] (EMPLOYEE JOIN DEPARTMENT)。
- 在这个操作中，会建立一个 condition 节点（即 DNAME = 'Research'）和一个 JOIN 操作节点。

V. JOIN 操作：
- 对 EMPLOYEE JOIN DEPARTMENT 进行处理。
- 这里已经形成了另一个 QueryNode，表示两个表的连接。

最终解析树结构

最终生成的解析树将体现查询的结构，每个操作会作为树中的一个节点：

- 根节点是 PROJECTION。
  - 它的子节点为 AVG 操作。
    - AVG 节点又有 SELECT 操作作为子节点。
      - SELECT 节点有两个子节点：条件和 JOIN 操作节点。
        - JOIN 节点则有 EMPLOYEE 和 DEPARTMENT 表作为子节点。

代码运行时：

1. 词法分析器将输入拆分成记号，并将其传递给语法分析器。
2. 语法分析器遵循文法规则构建出树形结构。
3. 解析树中的每个操作可以根据查询的语义进行执行，最终返回结果集。

（2） 优化规则的应用

针对生成的初始查询执行树，我们结合课上所学以及这里特异的几条查询语句，从各种优化规则进行选择，实现了基于选择下推和条件分解的优化规则。对于简单条件（如 ENAME = 'Mary'），我们将其直接下推到与之相关的表子树中。对于复合条件（如 ENAME = 'Mary' & DNAME = 'Research'），我们进一步分解条件并分别下推到相关表的子树上。

在优化查询 3 时，扩展了优化逻辑，使 SELECT 操作能够穿透 PROJECTION，直接下推到 JOIN 的左右子节点，确保选择操作尽量靠近数据源，从而减少中间结果的规模。

```
# optimizer.py

from query_tree import QueryNode

def split_conditions(condition):
    """将复杂条件字符串按 '&' 拆分为单个条件的列表。"""
    return condition.split('&')

def optimize(node):
    if node is None:
        return None

    # 优化子节点
    optimized_children = [optimize(child) for child in node.children]
    node.children = optimized_children

    # 实现选择下推并分解复杂选择条件
    if node.operator == 'SELECT' and len(node.children) == 1:
        child = node.children[0]

        # 处理 SELECT -> PROJECTION 的情况
        if child.operator == 'PROJECTION':
            grandchild = child.children[0]
            if grandchild.operator == 'JOIN':
                # 下推 SELECT，尝试作用于 JOIN 的左右子节点
                select_condition = node.condition
                left_child, right_child = grandchild.children

                # 分配选择条件到 JOIN 的左、右子节点
                left_conditions = [cond for cond in
    split_conditions(select_condition) if "ESSN" in cond]
                right_conditions = [cond for cond in
    split_conditions(select_condition) if "PNAME" in cond]

                if left_conditions:
                    left_select_condition = " &
    ".join(left_conditions)
                    left_child = QueryNode('SELECT',
    children=[left_child], condition=left_select_condition)
                if right_conditions:
                    right_select_condition = " &
    ".join(right_conditions)
```

```
739.                     right_child = QueryNode('SELECT',
    children=[right_child], condition=right_select_condition)
740.
741.                 # 更新 JOIN 节点
742.                 optimized_join = QueryNode('JOIN',
    children=[left_child, right_child])
743.                 # 保留 PROJECTION 操作
744.                 node = QueryNode('PROJECTION',
    children=[optimized_join], attributes=child.attributes)
745.             else:
746.                 # 如果 PROJECTION 的子节点不是 JOIN，无法下推，保留原结
    构
747.                 node.children = [optimize(child)]
748.
749.         # 处理 SELECT -> JOIN 的情况
750.         elif child.operator == 'JOIN':
751.             conditions = split_conditions(node.condition)
752.             left_child, right_child = child.children
753.
754.             # 分配选择条件到 JOIN 的左、右子节点
755.             left_conditions = [cond for cond in conditions if "ESSN"
    in cond or "ENAME" in cond]
756.             right_conditions = [cond for cond in conditions if "PNAME"
    in cond or "DNAME" in cond]
757.
758.             if left_conditions:
759.                 left_select_condition = " & ".join(left_conditions)
760.                 left_child = QueryNode('SELECT',
    children=[left_child], condition=left_select_condition)
761.             if right_conditions:
762.                 right_select_condition = " & ".join(right_conditions)
763.                 right_child = QueryNode('SELECT',
    children=[right_child], condition=right_select_condition)
764.
765.             # 更新 JOIN 节点的子节点为优化后的选择子节点
766.             node = QueryNode('JOIN', children=[left_child,
    right_child])
767.
768.     return node
```

（3） 优化后查询执行树的生成

通过优化后，每条查询的执行树结构得到了简化。优化后的执行树体现了选择下推的规则，并在逻辑上更贴近实际的数据库执行策略。

接下来我们来结合具体的运行结果进行讲解，运行 main.py 之后可得到如下，分别是终端的运行结果和图形库自动生成的 pdf 文件，分别是查询 1、2、3 未优化和优化后的结果。

3.2 实验结果

（1）关系查询操作

```
shuhang@shuhang-virtual-machine:~/database$ ./query_relation
Select relation (R/S), attribute (e.g., A/B/C/D), and value (e.g., 10), or 'exit': R A 10 200
Query results for A = 10:
+----------+----------+
| A        | B        |
+----------+----------+
| 10       | 422      |
| 10       | 803      |
| 10       | 918      |
+----------+----------+
Query results written to disk starting from block 200
Select relation (R/S), attribute (e.g., A/B/C/D), and value (e.g., 10), or 'exit': S C 30 200
Query results for C = 30:
+----------+----------+
| C        | D        |
+----------+----------+
| 30       | 931      |
| 30       | 895      |
| 30       | 430      |
| 30       | 628      |
| 30       | 951      |
+----------+----------+
Query results written to disk starting from block 200
Select relation (R/S), attribute (e.g., A/B/C/D), and value (e.g., 10), or 'exit':
```

操作过程的消耗情况：

```
Buffer Statistics:
+------------------------+---------------------+
| Parameter              | Value               |
+------------------------+---------------------+
| Number of I/O          | 50                  |
| Buffer size (bytes)    | 520                 |
| Block size (bytes)     | 64                  |
| Total blocks           | 8                   |
| Free blocks            | 10                  |
+------------------------+---------------------+
```

（2）关系投影操作

```
shuhang@shuhang-virtual-machine:~/database$ ./project_relation
Select relation (R/S), attribute (e.g., A/B/C/D) or 'exit': R A 200
Projecting attribute A on relation:
+----------+
| A        |
+----------+
| 24       |
| 18       |
| 34       |
| 27       |
| 10       |
| 3        |
| 11       |
| 4        |
| 21       |
| 13       |
| 12       |
| 8        |
| 23       |
| 28       |
| 30       |
| 22       |
| 25       |
| 39       |
| 36       |
| 14       |
| 37       |
| 26       |
| 5        |
| 17       |
| 7        |
| 15       |
| 35       |
| 29       |
| 20       |
| 38       |
| 1        |
| 32       |
| 2        |
| 9        |
| 31       |
| 19       |
| 33       |
+----------+
Projection results written to disk starting from block 200
```

操作过程的消耗情况：

```
Buffer Statistics:
+----------------------+--------------------+
| Parameter            | Value              |
+----------------------+--------------------+
| Number of I/O        | 19                 |
| Buffer size (bytes)  | 520                |
| Block size (bytes)   | 64                 |
| Total blocks         | 8                  |
| Free blocks          | 11                 |
+----------------------+--------------------+
```

（3）循环嵌套连接

```
Performing Nested-Loop Join (R.A = S.C)
+------+------+------+------+
|  R.A |  R.B |  S.C |  S.D |
+------+------+------+------+
| 34   | 336  | 34   | 805  |
| 24   | 887  | 24   | 37   |
| 24   | 887  | 24   | 341  |
| 34   | 336  | 34   | 600  |
| 34   | 336  | 34   | 905  |
| 24   | 887  | 24   | 206  |
| 24   | 887  | 24   | 260  |
| 27   | 493  | 27   | 755  |
| 27   | 493  | 27   | 747  |
| 27   | 493  | 27   | 34   |
| 24   | 887  | 24   | 310  |
| 24   | 887  | 24   | 359  |
| 27   | 493  | 27   | 140  |
| 34   | 336  | 34   | 935  |
| 23   | 531  | 23   | 72   |
| 23   | 124  | 23   | 72   |
| 23   | 531  | 23   | 777  |
| 23   | 531  | 23   | 256  |
| 23   | 124  | 23   | 777  |
| 23   | 124  | 23   | 256  |
| 23   | 531  | 23   | 28   |
| 23   | 124  | 23   | 28   |
| 23   | 531  | 23   | 698  |
| 23   | 124  | 23   | 698  |
| 23   | 531  | 23   | 484  |
| 23   | 124  | 23   | 484  |
| 34   | 457  | 34   | 805  |
| 23   | 59   | 23   | 72   |
| 28   | 136  | 28   | 982  |
| 30   | 168  | 30   | 931  |
| 30   | 168  | 30   | 895  |
| 30   | 374  | 30   | 931  |
| 30   | 374  | 30   | 895  |
| 28   | 136  | 28   | 108  |
| 28   | 136  | 28   | 256  |
| 28   | 136  | 28   | 812  |
| 34   | 457  | 34   | 600  |
| 34   | 457  | 34   | 905  |
| 23   | 59   | 23   | 777  |
| 23   | 59   | 23   | 256  |
| 23   | 59   | 23   | 28   |
| 28   | 136  | 28   | 903  |
| 23   | 59   | 23   | 698  |
| 30   | 168  | 30   | 430  |
| 30   | 374  | 30   | 430  |
| 30   | 168  | 30   | 628  |
| 30   | 374  | 30   | 628  |
| 23   | 59   | 23   | 484  |
| 30   | 168  | 30   | 951  |
| 34   | 457  | 34   | 935  |
| 30   | 374  | 30   | 951  |
| 22   | 920  | 22   | 423  |
| 36   | 371  | 36   | 811  |
| 39   | 325  | 39   | 627  |
| 36   | 371  | 36   | 132  |
| 25   | 538  | 25   | 774  |
| 36   | 371  | 36   | 543  |
| 22   | 920  | 22   | 211  |
| 25   | 538  | 25   | 419  |
| 39   | 325  | 39   | 10   |
| 39   | 325  | 39   | 43   |
| 25   | 538  | 25   | 156  |
| 36   | 371  | 36   | 582  |
| 37   | 874  | 37   | 5    |
| 25   | 538  | 25   | 885  |
| 39   | 325  | 39   | 909  |
| 25   | 538  | 25   | 334  |
| 22   | 920  | 22   | 498  |
| 22   | 920  | 22   | 189  |
| 37   | 874  | 37   | 730  |
| 37   | 874  | 37   | 461  |
| 25   | 538  | 25   | 233  |
| 39   | 325  | 39   | 118  |
| 37   | 874  | 37   | 570  |
| 25   | 538  | 25   | 762  |
| 37   | 874  | 37   | 368  |
| 22   | 920  | 22   | 553  |
| 22   | 920  | 22   | 594  |
| 25   | 538  | 25   | 81   |
| 39   | 325  | 39   | 291  |
| 36   | 371  | 36   | 970  |
| 39   | 325  | 39   | 315  |
| 39   | 325  | 39   | 730  |
| 37   | 874  | 37   | 389  |
| 39   | 325  | 39   | 326  |
| 36   | 371  | 36   | 912  |
| 34   | 858  | 34   | 805  |
| 23   | 171  | 23   | 72   |
| 34   | 858  | 34   | 600  |
```

操作过程的消耗情况：

```
Total Join tuple numbles: 287

Buffer Statistics:
+----------------------+--------------------+
| Parameter            | Value              |
+----------------------+--------------------+
| Number of I/O        | 624                |
| Buffer size (bytes)  | 520                |
| Block size (bytes)   | 64                 |
| Total blocks         | 8                  |
| Free blocks          | 104                |
+----------------------+--------------------+
```

（4）哈希连接

```
Joining partition 0...
| 30 | 168 | 30 | 931 |
| 30 | 168 | 30 | 895 |
| 30 | 168 | 30 | 430 |
| 30 | 168 | 30 | 628 |
| 30 | 168 | 30 | 951 |
| 30 | 374 | 30 | 931 |
| 30 | 374 | 30 | 895 |
| 30 | 374 | 30 | 430 |
| 30 | 374 | 30 | 628 |
| 30 | 374 | 30 | 951 |
| 25 | 538 | 25 | 774 |
| 25 | 538 | 25 | 419 |
| 25 | 538 | 25 | 156 |
| 25 | 538 | 25 | 885 |
| 25 | 538 | 25 | 334 |
| 25 | 538 | 25 | 233 |
| 25 | 538 | 25 | 762 |
| 25 | 538 | 25 | 81 |
| 20 | 13 | 20 | 787 |
| 20 | 13 | 20 | 700 |
Joining partition 1...
| 36 | 371 | 36 | 811 |
| 36 | 371 | 36 | 132 |
| 36 | 371 | 36 | 543 |
| 36 | 371 | 36 | 582 |
| 36 | 371 | 36 | 970 |
| 36 | 371 | 36 | 912 |
| 26 | 926 | 26 | 499 |
| 26 | 926 | 26 | 359 |
| 36 | 571 | 36 | 811 |
| 36 | 571 | 36 | 132 |
| 36 | 571 | 36 | 543 |
| 36 | 571 | 36 | 582 |
| 36 | 571 | 36 | 970 |
| 36 | 571 | 36 | 912 |
| 26 | 690 | 26 | 499 |
| 26 | 690 | 26 | 359 |
| 31 | 369 | 31 | 625 |
| 31 | 369 | 31 | 997 |
| 31 | 369 | 31 | 659 |
| 31 | 369 | 31 | 796 |
Joining partition 2...
| 27 | 493 | 27 | 755 |
| 27 | 493 | 27 | 747 |
| 27 | 493 | 27 | 34 |
| 27 | 493 | 27 | 140 |
| 22 | 920 | 22 | 423 |
| 22 | 920 | 22 | 211 |
| 22 | 920 | 22 | 498 |
| 22 | 920 | 22 | 189 |
| 22 | 920 | 22 | 553 |
| 22 | 920 | 22 | 594 |
| 37 | 874 | 37 | 5 |
| 37 | 874 | 37 | 730 |
| 37 | 874 | 37 | 461 |
| 37 | 874 | 37 | 570 |
| 37 | 874 | 37 | 368 |
| 37 | 874 | 37 | 389 |
| 37 | 282 | 37 | 5 |
| 37 | 282 | 37 | 730 |
| 37 | 282 | 37 | 461 |
| 37 | 282 | 37 | 570 |
```

操作过程的消耗情况：

```
Total Join tuple numbles: 287

Buffer Statistics:
+-----------------------+--------------------+
| Parameter             | Value              |
+-----------------------+--------------------+
| Number of I/O         | 1096               |
| Buffer size (bytes)   | 520                |
| Block size (bytes)    | 64                 |
| Total blocks          | 8                  |
| Free blocks           | 156                |
+-----------------------+--------------------+
```

（5）归并连接

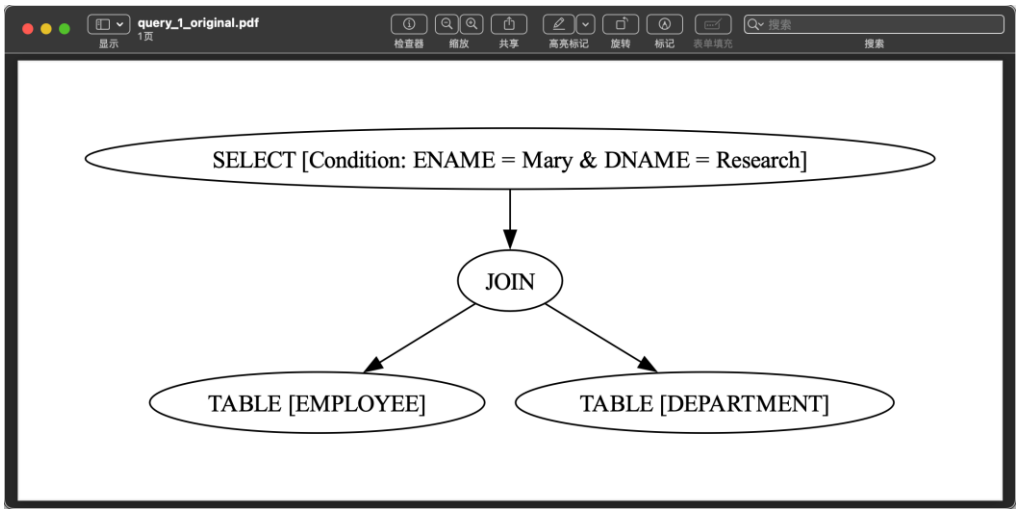
```
+------+------+------+------+
| R.A  | R.B  | S.C  | S.D  |
+------+------+------+------+
| 20   | 13   | 20   | 787  |
| 20   | 13   | 20   | 700  |
| 20   | 13   | 20   | 116  |
| 20   | 625  | 20   | 787  |
| 20   | 625  | 20   | 700  |
| 20   | 625  | 20   | 116  |
| 20   | 489  | 20   | 787  |
| 20   | 489  | 20   | 700  |
| 20   | 489  | 20   | 116  |
| 20   | 937  | 20   | 787  |
| 20   | 937  | 20   | 700  |
| 20   | 937  | 20   | 116  |
| 22   | 920  | 22   | 423  |
| 22   | 920  | 22   | 211  |
| 22   | 920  | 22   | 498  |
| 22   | 920  | 22   | 189  |
| 22   | 920  | 22   | 553  |
| 22   | 920  | 22   | 594  |
| 22   | 281  | 22   | 423  |
| 22   | 281  | 22   | 211  |
| 22   | 281  | 22   | 498  |
| 22   | 281  | 22   | 189  |
| 22   | 281  | 22   | 553  |
| 22   | 281  | 22   | 594  |
| 23   | 531  | 23   | 72   |
| 23   | 531  | 23   | 777  |
| 23   | 531  | 23   | 256  |
| 23   | 531  | 23   | 28   |
| 23   | 531  | 23   | 698  |
| 23   | 531  | 23   | 484  |
| 23   | 124  | 23   | 72   |
| 23   | 124  | 23   | 777  |
| 23   | 124  | 23   | 256  |
| 23   | 124  | 23   | 28   |
| 23   | 124  | 23   | 698  |
| 23   | 124  | 23   | 484  |
| 23   | 59   | 23   | 72   |
| 23   | 59   | 23   | 777  |
| 23   | 59   | 23   | 256  |
| 23   | 59   | 23   | 28   |
| 23   | 59   | 23   | 698  |
| 23   | 59   | 23   | 484  |
| 23   | 171  | 23   | 72   |
| 23   | 171  | 23   | 777  |
| 23   | 171  | 23   | 256  |
| 23   | 171  | 23   | 28   |
| 23   | 171  | 23   | 698  |
| 23   | 171  | 23   | 484  |
| 23   | 546  | 23   | 72   |
| 23   | 546  | 23   | 777  |
| 23   | 546  | 23   | 256  |
| 23   | 546  | 23   | 28   |
| 23   | 546  | 23   | 698  |
| 23   | 546  | 23   | 484  |
| 24   | 887  | 24   | 37   |
| 24   | 887  | 24   | 341  |
| 24   | 887  | 24   | 206  |
| 24   | 887  | 24   | 260  |
| 24   | 887  | 24   | 310  |
| 24   | 887  | 24   | 359  |
| 24   | 20   | 24   | 37   |
| 24   | 20   | 24   | 341  |
| 24   | 20   | 24   | 206  |
| 24   | 20   | 24   | 260  |
| 24   | 20   | 24   | 310  |
| 24   | 20   | 24   | 359  |
| 24   | 492  | 24   | 37   |
| 24   | 492  | 24   | 341  |
| 24   | 492  | 24   | 206  |
| 24   | 492  | 24   | 260  |
| 24   | 492  | 24   | 310  |
| 24   | 492  | 24   | 359  |
| 24   | 12   | 24   | 37   |
| 24   | 12   | 24   | 341  |
| 24   | 12   | 24   | 206  |
| 24   | 12   | 24   | 260  |
| 24   | 12   | 24   | 310  |
| 24   | 12   | 24   | 359  |
| 25   | 538  | 25   | 774  |
| 25   | 538  | 25   | 419  |
| 25   | 538  | 25   | 156  |
| 25   | 538  | 25   | 885  |
| 25   | 538  | 25   | 334  |
| 25   | 538  | 25   | 233  |
| 25   | 538  | 25   | 762  |
| 25   | 538  | 25   | 81   |
| 25   | 819  | 25   | 774  |
| 25   | 819  | 25   | 419  |
| 25   | 819  | 25   | 156  |
| 25   | 819  | 25   | 885  |
| 25   | 819  | 25   | 334  |
| 25   | 819  | 25   | 233  |
| 25   | 819  | 25   | 762  |
```

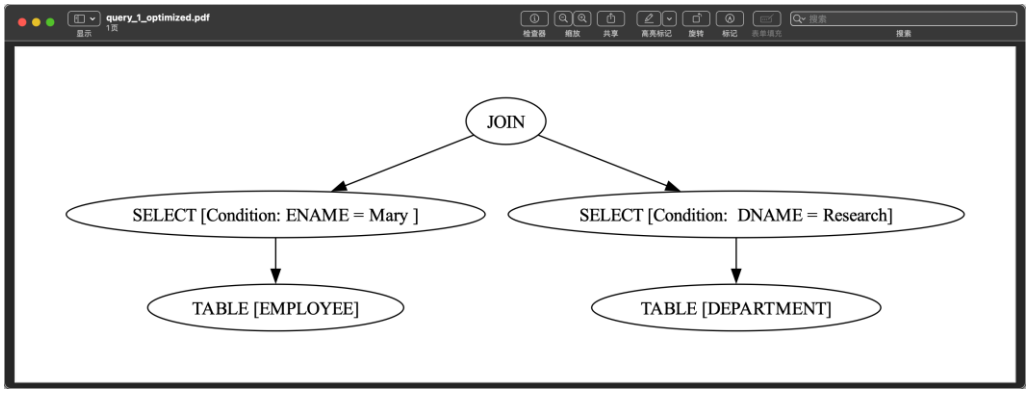
操作过程的消耗情况：

```
Total Join tuple numbles: 287

Buffer Statistics:
+----------------------+--------------------+
| Parameter            | Value              |
+----------------------+--------------------+
| Number of I/O        | 225                |
| Buffer size (bytes)  | 780                |
| Block size (bytes)   | 64                 |
| Total blocks         | 12                 |
| Free blocks          | 152                |
+----------------------+--------------------+
```

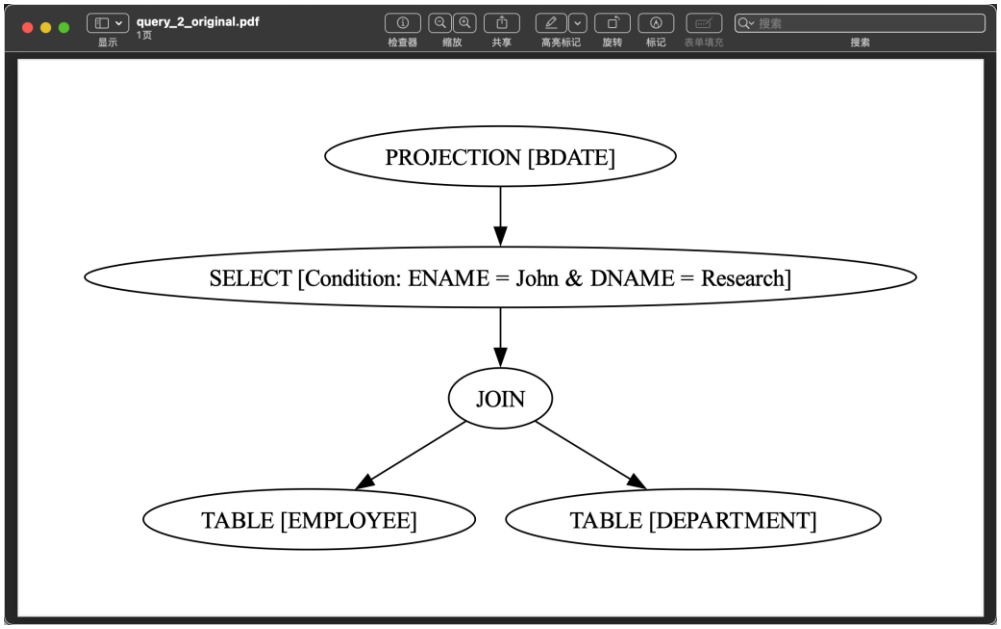
（5）优化后的查询执行树

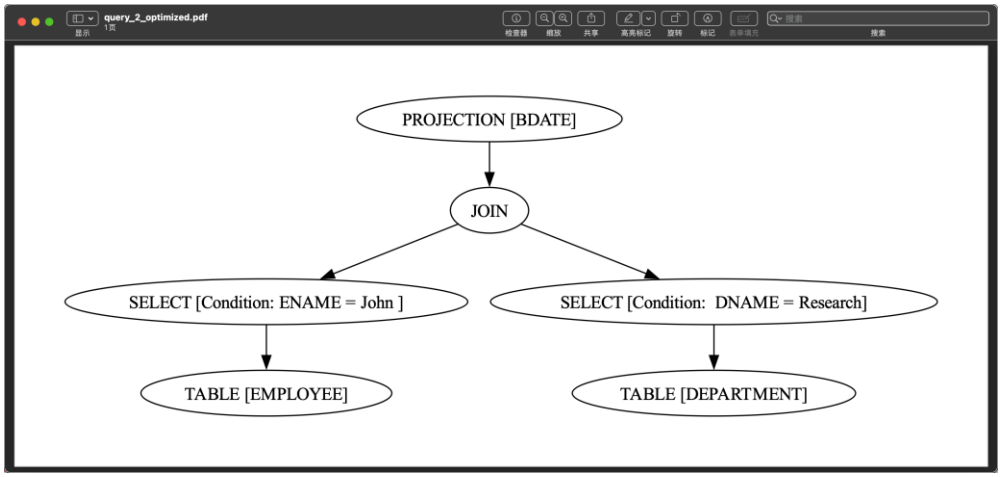
```
--- 查询 1 ---
原始查询语句:
SELECT [ ENAME = 'Mary' & DNAME = 'Research' ] ( EMPLOYEE JOIN DEPARTMENT )

原始查询执行树:
└─ SELECT [Condition: ENAME = Mary & DNAME = Research]
   └─ JOIN
      ├─ TABLE [EMPLOYEE]
      └─ TABLE [DEPARTMENT]

优化后的查询执行树:
└─ JOIN
   └─ SELECT [Condition:  DNAME = Research]
      └─ TABLE [DEPARTMENT]
```



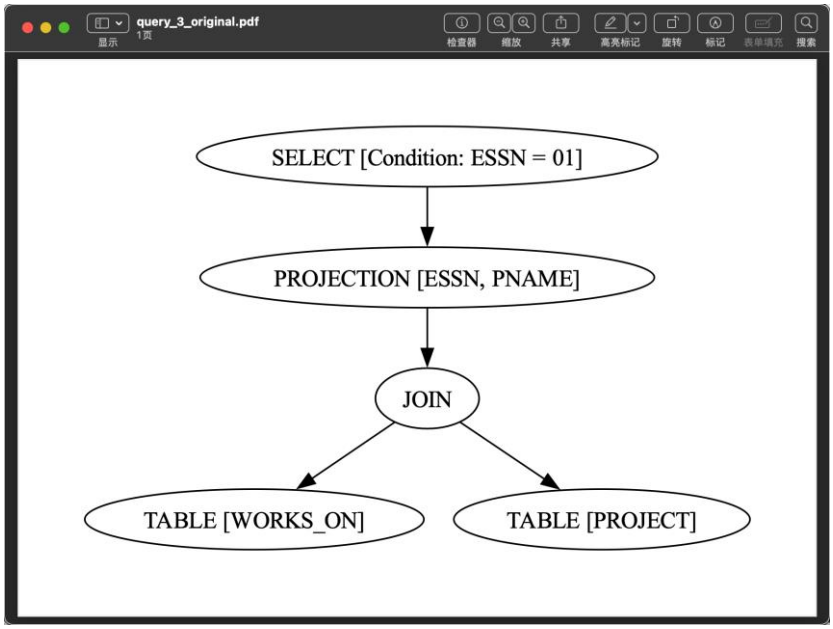


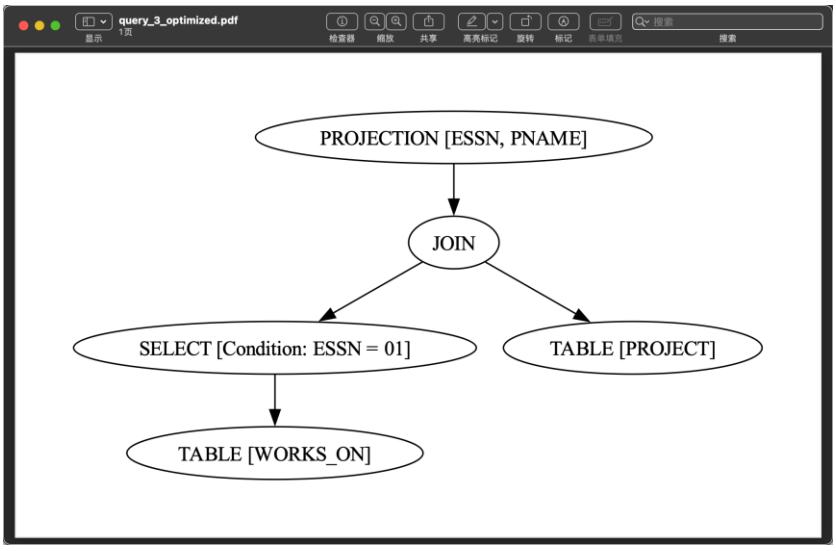
```
--- 查询 2 ---
原始查询语句:
PROJECTION [ BDATE ] ( SELECT [ ENAME = 'John' & DNAME = 'Research' ] ( EMPLOYEE JOIN DEPARTMENT ) )

原始查询执行树:
└─ PROJECTION [BDATE]
   └─ SELECT [Condition: ENAME = John & DNAME = Research]
      └─ JOIN
         ├─ TABLE [EMPLOYEE]
         └─ TABLE [DEPARTMENT]

优化后的查询执行树:
└─ PROJECTION [BDATE]
   └─ JOIN
      ├─ SELECT [Condition: ENAME = John ]
      │  └─ TABLE [EMPLOYEE]
      └─ SELECT [Condition:  DNAME = Research]
         └─ TABLE [DEPARTMENT]
```





```
--- 查询 3 ---
原始查询语句:
SELECT [ ESSN = '01' ] ( PROJECTION [ ESSN, PNAME ] ( WORKS_ON JOIN PROJECT ) )

原始查询执行树:
└─ SELECT [Condition: ESSN = 01]
   └─ PROJECTION [ESSN, PNAME]
      └─ JOIN
         ├─ TABLE [WORKS_ON]
         └─ TABLE [PROJECT]

优化后的查询执行树:
└─ PROJECTION [ESSN, PNAME]
   └─ JOIN
      ├─ SELECT [Condition: ESSN = 01]
      │  └─ TABLE [WORKS_ON]
      └─ TABLE [PROJECT]
```





四、实验心得

在此次实验中，我深入学习并实践了关系连接和查询优化算法的实现过程。通过编写代码，生成数据集并在模拟磁盘环境中存储，我加深了对关系型数据库物理存储和块操作的理解。在关系连接部分，我实现了多种连接方法，包括嵌套循环连接、哈希连接和归并连接。通过对比其 I/O 复杂性和运行效率，明确了不同连接方式的适用场景。

在查询优化实验中，我设计并生成了查询执行树，学习了选择下推和条件分解等优化策略的实际应用。这些优化在减少中间结果规模、提升查询效率方面效果显著。同时，通过引入 Python 的 PLY 库进行语法解析，以及 Graphviz 库对查询执行树的可视化，我体会到了工具在复杂逻辑展示和实现中的重要作用。

实验让我认识到理论与实践相结合的重要性，也增强了我分析问题和设计解决方案的能力。在未来的学习中，我将进一步探索更复杂的优化算法，努力提升对数据库系统性能优化的掌握程度。