实验3

个人信息

- 数据科学与计算机学院
- 2018级 软工3班
- 18342075
- 米家龙

目录

实验名称

实验3 物理内存管理

实验目的

- 理解基于段页式内存地址的转换机制
- 理解页表的建立和使用方法
- 理解物理内存的管理方法

实验内容

- 了解如何发现系统中的物理内存
- 了解如何建立对物理内存的初步管理，即了解连续物理内存的管理
- 了解页表的相关操作，即如何建立页表实现虚拟内存到物理内存之间的映射，对段页内存管理机制有一个比较全面的了解

> 本实验里面实现的内存管理还是非常基本的，并没有涉及到对实际机器（如 cache）的优化

实验要求

- 练习0：填写已有实验
- 练习1：实现 **first-fit** 连续物理内存分配算法（*需要编程*）
- 练习2：实现寻找虚拟地址对应的页表项（*需要编程*）
- 练习3：释放某虚拟地址所在的页并取消对应二级页表项的映射（*需要编程*）

实验环境

使用老师提供的 `mooc-os-2015.vdi`，在虚拟机中创建 64 位的 Ubuntu 虚拟机并加载该 vdi，获得了版本为：

```
Linux moocos-VirtualBox 3.13.0-24-generic #46-Ubuntu SMP Thu Apr 10 19:11:08 UTC 2014
x86_64 x86_64 x86_64 GNU/Linux
```

的虚拟机操作系统

并且使用 vscode 配合 Remote SSH 插件，实现通过远程终端在 windows 环境的对文件的编辑

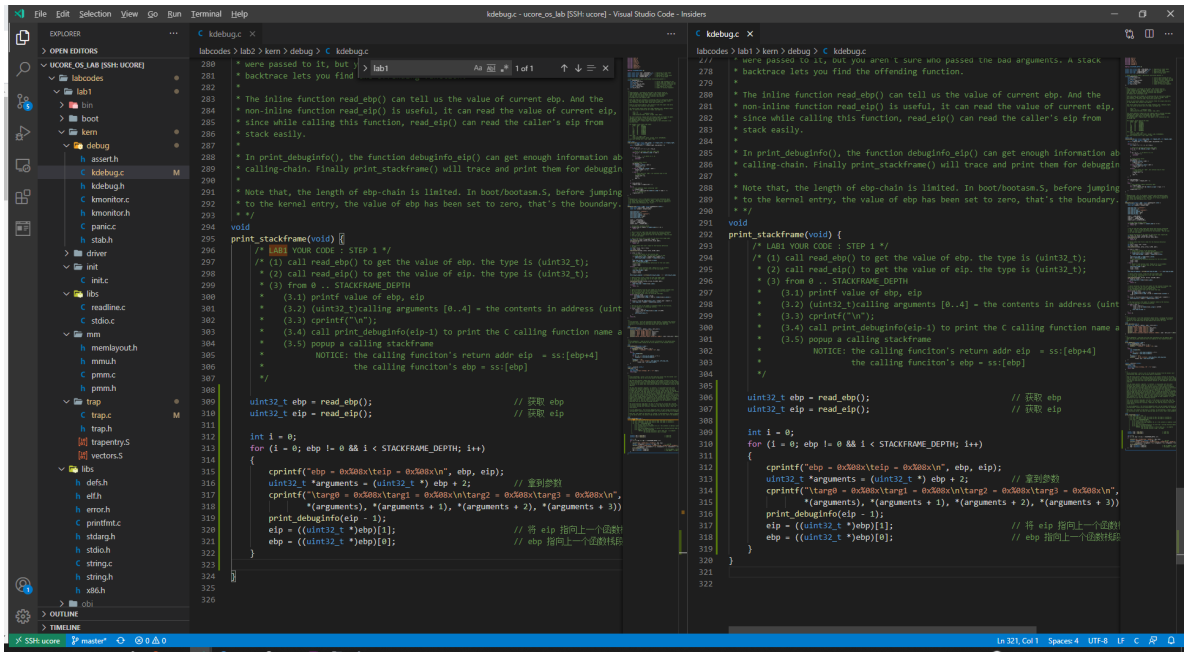
实验过程

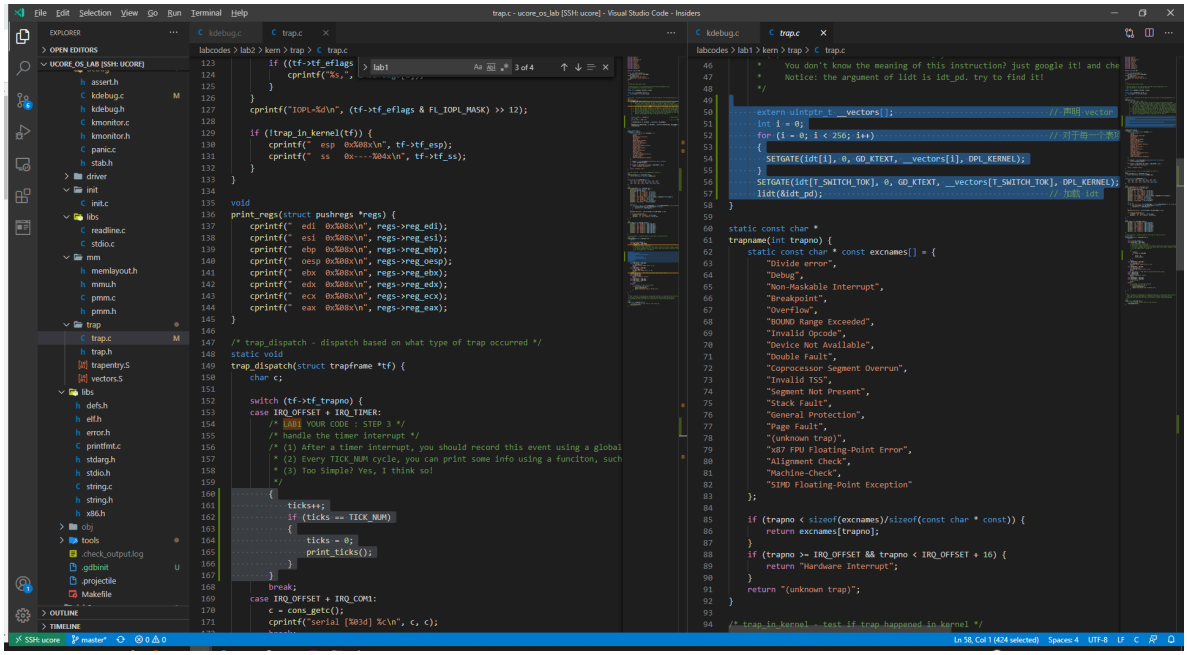
练习0：填写已有实验

将实验2的代码填入本实验代码中有 **LAB1** 的注释相应部分

已知在实验2中被修改过的文件为 `kern/debug/kdebug.c` 和 `kern/trap/trap.c`，因此主要注意这两个文件即可

修改如图





练习1：实现 first-fit 连续物理内存分配算法

首次适应算法从空闲分区表的**第一个表目**起查找该表，把**最先能够满足要求**的空闲区分配给作业，这种方法目的在于**减少查找时间**。

- 优先利用内存**中低址部分**的空闲分区，从而保留了高址部分的大空闲区，为后续作业留下了大空间
- 减少了查找时间
- 会造成**外部碎片**

> 可能会修改 default_pmm.c 中的 default_init，default_init_memmap，default_alloc_pages，default_free_pages 等相关函数，需要仔细查看和理解 default_pmm.c 的注释

查看 default_pmm.c 相关代码

查看注释，了解到需要修改如下函数

- default_init()
- default_init_memmap()
- default_alloc_pages()
- default_free_pages()

根据注释提示，查看其他相关代码

list.h 中的相关数据结构和函数

双链表 list_entry 数组结构，用于储存地址结构

```
struct list_entry {
    struct list_entry *prev, *next;
};

typedef struct list_entry list_entry_t; // 为什么要重命名，没有想明白
```

并存在这些函数

- list_init() 初始化一个 list_entry 双链表
- list_add() / list_add_after() 两者等价，将新元素插入到**列表元素**与**列表元素的下一个**之间
- list_add_before() 将新元素插入到**列表元素前一个**和**列表元素**之间

- list_del() 将传入的条目删除
- list_del() 从列表中删除一个条目并且重新初始化它
- list_empty() 判断列表是否为空
- list_next() 获取列表的后一项
- list_prev() 获取列表的前一项
- __list_add() 列表增加的具体实现
- __list_del() 列表删除的具体实现

查看 memlayout.h 中的相关代码

先查看结构体 `Page` 的定义

```
struct Page {
    int ref;                        // 映射此物理页的虚拟页个数（该物理页被引用的次数）
    uint32_t flags;                 // 物理页的标志
    unsigned int property;          // first-fit manager 的空闲块数量
    list_entry_t page_link;         // 双向链表，用于连接各个页
};
```

查看 `le2page()` 函数

```
// 将列表转换成页
#define le2page(le, member)                 \
    to_struct((le), struct Page, member)
```

1. 修改 default_init() 函数

根据注释提醒的内容，需要

- 设定 frea_list 为0
- 设定 nr_free 为0

查看 default_init()，发现该函数可以直接使用

```
free_area_t free_area;

#define free_list (free_area.free_list)
#define nr_free (free_area.nr_free)

static void
default_init(void) {
    list_init(&free_list);
    nr_free = 0;
}
```

在 `memlayout.h` 中查询到 `free_area_t` 结构体的相关定义

```
/* 双向链表，用于储存未使用的页 */
typedef struct {
    list_entry_t free_list;         // 列表头
    unsigned int nr_free;           // 未被使用的页的数量
} free_area_t;
```

2. 修改 default_init_memmap() 函数

相关调用为：

1. kern_init

2. pmm_init
3. page_init
4. init_memmap
5. pmm_manager
6. init_memmap

该函数是用于**初始化空闲块**；而为了初始化一个块，则需要初始化该块的**每页**，具体操作为：

1. 设置 `p->flags` 中的 `PG_property` 位（可以参考 `pmm_init` 中设定 `p->flags` 的 `PG_reserved` ）

- 如果该页为空，并且不是空闲块的第一页，那么 `p->property` 应为0
- 如果该页为空，是空闲块的第一页，那么 `p->property` 应为该块中**页的总数**

2. 设置 `p->ref` 为0，因为页是空闲并且无引用
3. 使用 `p->page_link()` 函数将该页与 `free_list` 链接起来
4. 更新空闲内存页的总数 `nr_free += n`

在 `memlayout.h` 中找到了相关的定义和函数，可以使用这些函数来设置 `p->flags`

```
/* Flags describing the status of a page frame */
#define PG_reserved                 0       // if this bit=1: the Page is reserved for kernel, cannot be used in alloc/free_pages; otherwise, this bit=0
#define PG_property                 1       // if this bit=1: the Page is the head page of a free memory block(contains some continuous_addrress pages), and can be used in alloc_pages; if this bit=0: if the Page is the the head page of a free memory block, then this Page and the memory block is alloced. Or this Page isn't the head page.

// 检查是否为保留页
#define PageReserved(page)          test_bit(PG_reserved, &((page)->flags))
// 设置为保留页
#define SetPageProperty(page)       set_bit(PG_property, &((page)->flags))
```

原函数为：

```
static void
default_init_memmap(struct Page *base, size_t n) {
    assert(n > 0);
    struct Page *p = base;
    for (; p != base + n; p ++) {
        assert(PageReserved(p));
        p->flags = p->property = 0;
        set_page_ref(p, 0);
    }
    base->property = n;
    SetPageProperty(base);
    nr_free += n;
    list_add(&free_list, &(base->page_link));
}
```

修改后为：

```
static void
default_init_memmap(struct Page *base, size_t n) {
    assert(n > 0); // 计算表达式，如果结果为假，则通过 stderr 打印出错信息，然后调用 abort 中止程序
    struct Page *p = base;
```

```
    for (; p != base + n; p ++) {
        assert(PageReserved(p)); // 检查是否为保留页，是则中止
        p->flags = p->property = 0;
        SetPageProperty(p); // 设置为保留页
        set_page_ref(p, 0); // 设置 p->ref 为0
        list_add_before(&free_list, &(p->page_link)); // 插入空闲列表，此处参照注释

    }
    base->property = n; // 这是第一页，因此 property 需要设置为总页数
    // SetPageProperty(base); // 在循环中已经设置好了
    nr_free += n; // 空闲内存页的总数变化
    // list_add(&free_list, &(base->page_link));
}
```

3. 修改 default_alloc_pages() 函数

该函数是为了搜索 free_list 中的空闲的块（块大小大于等于 n），如果找到，则重新设置大小，并且返回块的地址，步骤如下：

1. 循环搜索检查 `p->property` 是否大于 n

- 如果找到 `p`，意味着找到了空闲的、页数量大于等于 n 的块，设置 `PG_reserved` 为1，`PG_property` 为0，并且将这个页从链表中断开
    - 如果 `p->property` > n 那么我们需要从新计算剩下的页的数量
- 重新计算 `nr_free` 的数量
- 返回 `p`

2. 无法找到对应的块（块大小 >= n），返回 `NULL`

原函数为：

```
static struct Page *
default_alloc_pages(size_t n) {
    assert(n > 0);
    if (n > nr_free) {
        return NULL;
    }
    struct Page *page = NULL;
    list_entry_t *le = &free_list;
    while ((le = list_next(le)) != &free_list) {
        struct Page *p = le2page(le, page_link);
        if (p->property >= n) {
            page = p;
            break;
        }
    }
    if (page != NULL) {
        list_del(&(page->page_link));
        if (page->property > n) {
            struct Page *p = page + n;
            p->property = page->property - n;
            list_add(&free_list, &(p->page_link));
    }
        nr_free -= n;
        ClearPageProperty(page);
    }
    return page;
```

```
}
```

修改后为

```
static struct Page *
static struct Page *
default_alloc_pages(size_t n) {
    assert(n > 0);
    if (n > nr_free) {
        return NULL;
    }
    // struct Page *page = NULL; // 用不到了
    list_entry_t *le = &free_list;
    while ((le = list_next(le)) != &free_list) { // 遍历
        list_entry_t *tmp;
        struct Page *p = le2page(le, page_link); // 转换为页
        if (p->property >= n) { // 找到对应的页
            int i = 0;
            for (i; i < n; i++) // 将前 n 页从链表中断开
            {
                tmp = list_next(le);
                struct Page *page = le2page(le, page_link); // 转换成页
                SetPageReserved(page); // 将 PG_reserved 设置为1
                ClearPageProperty(page); // 将 PG_property 设置为0
                list_del(le); // 删除该节点
                le = tmp;
            }
            if (p->property > n) // 需要分割页块
            {
                le2page(le, page_link)->property = p->property - n; // 分割页块
            }
            SetPageReserved(p); // 设置 p
            ClearPageProperty(p);
            nr_free -= n;
            return p;
        }
    }
    return NULL;
}
```

4. 修改 default_free_pages() 函数

该函数作用在于重新将页链接回 free_list ，或者将小的空闲块合并进大块里，步骤如下：

1. 根据块中的基址，在 free_list 中搜索到它正确的位置，然后插入到页中
2. 重置页的位置，相关参数为 `p->ref` 和 `p->flags`
3. 尝试合并块（需要正确修改 `p->property` ）

思路为：遍历链表，从中找到第一页地址**大于**释放的第一页的地址

- 判断 *所释放的页的基地址 + 所释放的页的数量* 是否等于 *找到的地址*
    - 如果是，进行合并
- 找到该页之前的第一个 `p->property` > 0 的页，判断该页和上一页是否连续
    - 如果是，进行合并

原函数为：

```
static void
```

```
default_free_pages(struct Page *base, size_t n) {
    assert(n > 0);
    struct Page *p = base;
    for (; p != base + n; p ++) {
        assert(!PageReserved(p) && !PageProperty(p));
        p->flags = 0;
        set_page_ref(p, 0);
    }
    base->property = n;
    SetPageProperty(base);
    list_entry_t *le = list_next(&free_list);
    while (le != &free_list) {
        p = le2page(le, page_link);
        le = list_next(le);
        if (base + base->property == p) {
            base->property += p->property;
            ClearPageProperty(p);
            list_del(&(p->page_link));
        }
        else if (p + p->property == base) {
            p->property += base->property;
            ClearPageProperty(base);
            base = p;
            list_del(&(p->page_link));
        }
    }
    nr_free += n;
    list_add(&free_list, &(base->page_link));
}
```

修改后为:

```
static void
default_free_pages(struct Page *base, size_t n) {
    assert(n > 0);
    assert(PageReserved(base)); // 检车需要释放的页块是否已经被分配
    struct Page *tmp;
    list_entry_t *le = &free_list; // 用于寻找到释放位置
    while((le = list_next(le)) != &free_list) // 遍历，用于寻找到位置
    {
        tmp = le2page(le, page_link);
        if (tmp > base) break; // 找到
    }

    struct Page *p = base;
    for (; p != base + n; p ++) {
        list_add_before(le, &(p->page_link)); // 从找到的位置开始，插入空闲页
    }
    base->flags = 0; // 重置参数
    base->property = n; // 设置块大小
    set_page_ref(base, 0); // 清空修改引用次数，设置为0
    ClearPageProperty(base); // 清空页 property，似乎可以不用这个
    SetPageProperty(base); // 再设置

    // 开始合并

    p = le2page(le, page_link);
    // 如果是高位，则向高位合并
```

```
    // 假如 base + n = p ，那么决定向后合并
    // 如果能够合并，那么设置 base->property += p->property ，并将 p->property 设置为0
    if (base + n == p)
    {
        base->property += p->property;
        p->property = 0;
    }
    // 如果无法合并，那么 p->property 本来就为0，上述操作不产生影响


    // 否则向前合并
    // 向前合并需要：如果前一页为空，则之前所有都为空、可以合并的页
    le = list_prev(&(base->page_link));
    p = le2page(le, page_link);
    if(le != &free_list && tmp == base + 1) // 如果前一页为空闲页
    {
        while (le != &free_list) { // 开始遍历
            if (p->property != 0)
            {
                p->property += base->property; // 更新该页的值
                base->property = 0;
                break;
            }
            le = list_prev(le); // 往前查询
            p = le2page(le, page_link);
        }
    }
    nr_free += n;
    return;
}
```

查看运行结果

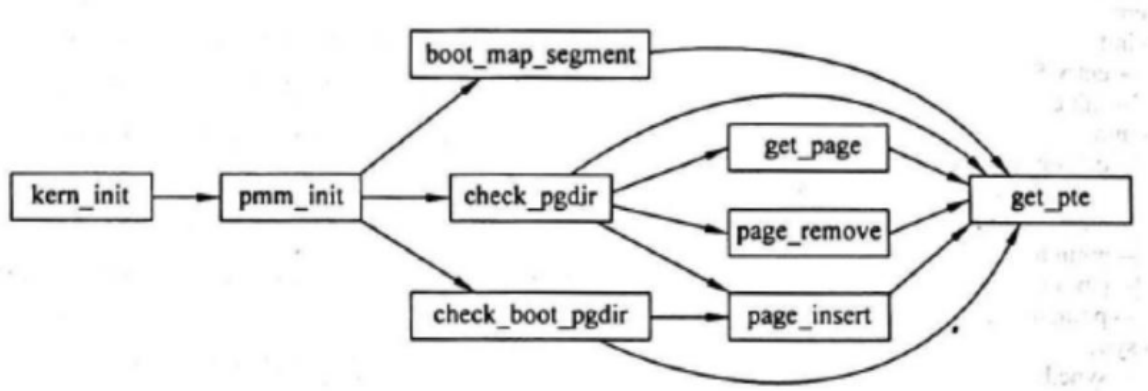
```
mijialong$>make qemu-nox
(THU.CST) os is loading ...

Special kernel symbols:
  entry  0xc0100036 (phys)
  etext  0xc0105d70 (phys)
  edata  0xc011a000 (phys)
  end    0xc011af28 (phys)
Kernel executable memory footprint: 108KB
ebp = 0xc0116f38        eip = 0xc01009dd
        arg0 = 0x00010094       arg1 = 0x00000000
        arg2 = 0xc0116f68       arg3 = 0xc01000c8
    kern/debug/kdebug.c:310: print_stackframe+22
ebp = 0xc0116f48        eip = 0xc0100cd0
        arg0 = 0x00000000       arg1 = 0x00000000
        arg2 = 0x00000000       arg3 = 0xc0116fb8
    kern/debug/kmonitor.c:129: mon_backtrace+10
ebp = 0xc0116f68        eip = 0xc01000c8
        arg0 = 0x00000000       arg1 = 0xc0116f90
        arg2 = 0xffff0000       arg3 = 0xc0116f94
    kern/init/init.c:49: grade_backtrace2+33
ebp = 0xc0116f88        eip = 0xc01000f1
        arg0 = 0x00000000       arg1 = 0xffff0000
        arg2 = 0xc0116fb4       arg3 = 0x0000002a
    kern/init/init.c:54: grade_backtrace1+38
ebp = 0xc0116fa8        eip = 0xc010010f
        arg0 = 0x00000000       arg1 = 0xc0100036
        arg2 = 0xffff0000       arg3 = 0x0000001d
    kern/init/init.c:59: grade_backtrace0+23
ebp = 0xc0116fc8        eip = 0xc0100134
        arg0 = 0xc0105d9c       arg1 = 0xc0105d80
        arg2 = 0x00000f28       arg3 = 0x00000000
    kern/init/init.c:64: grade_backtrace+34
ebp = 0xc0116ff8        eip = 0xc010008b
        arg0 = 0xc0105f60       arg1 = 0xc0105f68
        arg2 = 0xc0100c56       arg3 = 0xc0105f87
    kern/init/init.c:29: kern_init+84
memory management: default_pmm_manager
e820map:
  memory: 0009fc00, [00000000, 0009fbff], type = 1.
  memory: 00000400, [0009fc00, 0009ffff], type = 2.
  memory: 00010000, [000f0000, 000fffff], type = 2.
  memory: 07efe000, [00100000, 07ffdfff], type = 1.
  memory: 00002000, [07ffe000, 07ffffff], type = 2.
  memory: 00040000, [fffc0000, ffffffff], type = 2.
check_alloc_page() succeeded!
kernel panic at kern/mm/pmm.c:478:
    assertion failed: get_pte(boot_pgdir, PGSIZE, 0) == ptep
stack trackback:
ebp = 0xc0116f18        eip = 0xc01009dd
        arg0 = 0xc0106094       arg1 = 0xc0116f5c
        arg2 = 0x000001de       arg3 = 0xc0103af8
    kern/debug/kdebug.c:310: print_stackframe+22
ebp = 0xc0116f48        eip = 0xc0100d41
        arg0 = 0xc0106964       arg1 = 0x000001de
        arg2 = 0xc0106989       arg3 = 0xc0106ae4
    kern/debug/panic.c:27: __panic+105
ebp = 0xc0116f88        eip = 0xc01047ff
        arg0 = 0x00000000       arg1 = 0xffff0000
        arg2 = 0xc0116fb4       arg3 = 0x0000002a
    kern/mm/pmm.c:478: check_pgdir+605
ebp = 0xc0116fc8        eip = 0xc010433c
```

```
        arg0 = 0xc0105d9c       arg1 = 0xc0105d80
        arg2 = 0x00000f28       arg3 = 0x00000000
    kern/mm/pmm.c:294: pmm_init+90
ebp = 0xc0116ff8        eip = 0xc0100090
        arg0 = 0xc0105f60       arg1 = 0xc0105f68
        arg2 = 0xc0100c56       arg3 = 0xc0105f87
    kern/init/init.c:31: kern_init+89
Welcome to the kernel debug monitor!!
Type 'help' for a list of commands.
help - Display this list of commands.
kerninfo - Display information about the kernel.
backtrace - Print backtrace of stack frame.
Unknown command 'q'
Unknown command 'exit'
K>
```

感觉自己代码逻辑比较混乱，暂时只能按照注释的提示来进行编写

练习2：实现寻找虚拟地址对应的页表项

从参考资料中得到 get_pte() 函数的调用关系图



通过设置页表和对应的页表项，可建立虚拟内存地址和物理内存地址的对应关系。其中的 get_pte 函数是设置页表项环节中的一个重要步骤。此函数找到一个虚地址对应的二级页表项的内核虚地址，如果此二级页表项不存在， 则分配一个包含此项的二级页表。本练习需要补全 kern/mm/pmm.c 中的 get_pte 函数，实现其功能。请仔细查看和理解 get_pte 函数中的注释。

> x86 体系中，内存地址分成 **逻辑地址**（又称**虚拟地址**）、**线性地址**和**物理地址**
>
> 这三者的关系为：程序产生逻辑地址；逻辑地址加上对应的段偏移量（基地址）变成线性地址；线性地址在分页机制下经过变换产生物理地址

查看给出的注释

在注释中，给出了一些宏和函数

- PDX(la) 返回虚拟地址 la 的页目录索引
- KADDR(pa) : 返回物理地址 pa 对应的虚拟地址
- set_page_ref(page,1) : 设置该页被引用**1**次
- page2pa(page): 得到 page 所管理的那一页的物理地址
- struct Page * alloc_page() : 分配一页
- memset(void *s, char c, size_t n) : 设置 s 指向地址的前 n 个字节的值为 c

其他定义：

- `PTE_P 0x001` 对应地址的物理内存页存在
- `PTE_W 0x002` 对应地址的物理内存页可写
- `PTE_U 0x004` 对应地址的物理内存页可读

查询 `pte` 数据结构，得到

```
typedef uintptr_t pte_t;
typedef unsigned int uint32_t;
typedef uint32_t uintptr_t;
```

可以得到 `pte_t` 本质上就是 `unsigned int`

补充 get_pte() 函数

通过查阅老师给的资料，阅读 `mmu.h` 中的注释，可以得到，32 位线性地址被分为3部分：

```
190   // A linear address 'la' has a three-part structure as follows:
191   //
192   // +--------10------+-------10-------+---------12----------+
193   // | Page Directory |   Page Table    | Offset within Page  |
194   // |      Index     |      Index      |                     |
195   // +----------------+-----------------+---------------------+
196   //  \--- PDX(la) --/ \--- PTX(la) --/ \---- PGOFF(la) ----/
197   //  \---------- PPN(la) -----------/
198   //
199   // The PDX, PTX, PGOFF, and PPN macros decompose linear addresses as shown.
200   // To construct a linear address la from PDX(la), PTX(la), and PGOFF(la),
201   // use PGADDR(PDX(la), PTX(la), PGOFF(la)).
202
203   // page directory index
204   #define PDX(la) ((((uintptr_t)(la)) >> PDXSHIFT) & 0x3FF)
205
206   // page table index
207   #define PTX(la) ((((uintptr_t)(la)) >> PTXSHIFT) & 0x3FF)
208
209   // page number field of address
210   #define PPN(la) (((uintptr_t)(la)) >> PTXSHIFT)
211
212   // offset in page
213   #define PGOFF(la) (((uintptr_t)(la)) & 0xFFF)
214
215   // construct linear address from indexes and offset
216   #define PGADDR(d, t, o) ((uintptr_t)((d) << PDXSHIFT | (t) << PTXSHIFT | (o)))
217
218   // address in page table or page directory entry
219   #define PTE_ADDR(pte)   ((uintptr_t)(pte) & ~0xFFF)
220   #define PDE_ADDR(pde)   PTE_ADDR(pde)
```

- Directory，一级页表，存在高10位中，可以通过 `PDX(la)` 获取
- Table，二级页表，存在中间10位中，可以通过 `PTX(la)` 获取
- Offset，偏移量，存在低12位中，可通过 `PGOFF(la)` 获取

从而可以发现，每页大小为 $2^{12} = 4096$ b，即 4kb

补充 `get_pte()` 函数之后为：

```
pte_t *
get_pte(pde_t *pgdir, uintptr_t la, bool create) {
#if 0
    pde_t *pdep = NULL;   // (1) find page directory entry
    if (0) {              // (2) check if entry is not present
```

```
                        // (3) check if creating is needed, then alloc page for page
table
                        // CAUTION: this page is used for page table, not for common
data page
                        // (4) set page reference
        uintptr_t pa = 0; // (5) get linear address of page
                        // (6) clear page content using memset
                        // (7) set page directory entry's permission
    }
    return NULL;          // (8) return page table entry
#endif
// 上面的东西没有动

    pte_t *pdir = &pgdir[PDX(la)]; // 获取一级页表位置
    if (!((*pdir) & PTE_P)) // 如果不存在，则需要判断是否需要创建二级页表
    {
        struct Page *p;
        // 如果 create 为0，则返回 NULL
        // 如果 create 不为0，则创建页表：
        //                              如果失败，返回 NULL
        //                              如果创建成功，返回对应二级页表的线性地址
        if (create == 0 || (p = alloc_page()) == NULL) // 利用短路实现
            return NULL;
        set_page_ref(p, 1);                 // 设置该页表引用次数 +1
        uintptr_t pa = page2pa(p);          // 得到物理地址
                                            // 但是没有找到对应的函数，只能先通过获取物理地址
再转化
        memset(KADDR(pa), 0, PGSIZE);       // 将物理地址转化为虚拟地址，
                                            // 并且由于该页虚拟地址未被映射，因此需要初始化
        // *pdir = pa | PTE_P;              // 设置存在
        // *pdir = *pdir | PTE_U;           // 设置可读
        // *pdir = *pdir | PTE_W;           // 设置可写
        *pdir = pa | PTE_P | PTE_U | PTE_W; // 统一设置更加方便
    }

    return &((pte_t *)KADDR(PDE_ADDR(*pdir)))[PTX(la)]; // 得到二级页表对应的线性地址
}
```

使用 make 进行编译，出现了如下报错

```
kern/mm/pmm.c: In function ‘get_pte’:
kern/mm/pmm.c:365:30: error: ‘false’ undeclared (first use in this function)
     if (((*pdir) & PTE_P) == false) // 如果不存在，则需要判断是否需要创建二级页表
                              ^
kern/mm/pmm.c:365:30: note: each undeclared identifier is reported only once for each
function it appears in
kern/mm/pmm.c: At top level:
kern/mm/pmm.c:265:1: warning: ‘boot_alloc_page’ defined but not used [-Wunused-
function]
 boot_alloc_page(void) {
 ^
```

了解到 pte_t 并不能够通过 false 进行判断，因此改为 `if (!((*pdir) & PTE_P))` 作为判断，修改后函数如下：

```
pte_t *
get_pte(pde_t *pgdir, uintptr_t la, bool create) {
#if 0
```

```
    pde_t *pdep = NULL;   // (1) find page directory entry
    if (0) {              // (2) check if entry is not present
                          // (3) check if creating is needed, then alloc page for page
table
                          // CAUTION: this page is used for page table, not for common
data page
                          // (4) set page reference
        uintptr_t pa = 0; // (5) get linear address of page
                          // (6) clear page content using memset
                          // (7) set page directory entry's permission
    }
    return NULL;          // (8) return page table entry
#endif
// 上面的东西没有动

    pte_t *pdir = &pgdir[PDX(la)]; // 获取一级页表位置
    if (!((*pdir) & PTE_P)) // 如果不存在，则需要判断是否需要创建二级页表
    {
        struct Page *p;
        // 如果 create 为0，则返回 NULL
        // 如果 create 不为0，则创建页表：
        //                              如果失败，返回 NULL
        //                              如果创建成功，返回对应二级页表的线性地址
        if (create == 0 || (p = alloc_page()) == NULL) // 利用短路实现
            return NULL;
        set_page_ref(p, 1);                  // 如果要查找该页表，则需要设置该页表引用次数 +1
        uintptr_t pa = page2pa(p);           // 得到物理地址
                                             // 但是没有找到对应的函数，只能先通过获取物理地址
再转化
        memset(KADDR(pa), 0, PGSIZE);        // 将物理地址转化为虚拟地址，
                                             // 并且由于该页虚拟地址未被映射，因此需要初始化
        // *pdir = pa | PTE_P;               // 设置存在
        // *pdir = *pdir | PTE_U;            // 设置可读
        // *pdir = *pdir | PTE_W;            // 设置可写
        // *pdir = pa | PTE_P | PTE_U | PTE_W; // 统一设置更加方便
        *pdir = pa | PTE_USER
    }

    return &((pte_t *)KADDR(PDE_ADDR(*pdir)))[PTX(la)]; // 得到二级页表对应的线性地址
}
```

回答问题

1. 请描述页目录项（Page Directory Entry）和页表项（Page Table Entry）中每个组成部分的含义以及对ucore而言的潜在用处。

查阅 `mmu.h` 可以得到如下代码

```
/* page table/directory entry flags */
#define PTE_P           0x001                   // Present
#define PTE_W           0x002                   // Writeable
#define PTE_U           0x004                   // User
#define PTE_PWT         0x008                   // Write-Through
#define PTE_PCD         0x010                   // Cache-Disable
#define PTE_A           0x020                   // Accessed
#define PTE_D           0x040                   // Dirty
#define PTE_PS          0x080                   // Page Size
#define PTE_MBZ         0x180                   // Bits must be zero
#define PTE_AVAIL       0xE00                   // Available for software use
                                                // The PTE_AVAIL bits aren't used by
the kernel or interpreted by the
                                                // hardware, so user processes are
allowed to set them arbitrarily.
```

可以得到如下表格

名称	地址所在位	作用
PTE_P	0	存在位
PTE_W	1	可写
PTE_U	2	访问该页所需要的特权级
PTE_PWT	3	是否使用 write-through
PTE_PCD	4	是否使用缓存，1位不使用
PTE_A	5	是否被使用过
PTE_D	6	脏位
PTE_PS	7	页大小
PTE_MBZ	8	必须为0
PTE_AVAIL	9~11	内核和中断无效，用户可以设置

而对于 PTE 和 PDE，他们的前20位分别表示

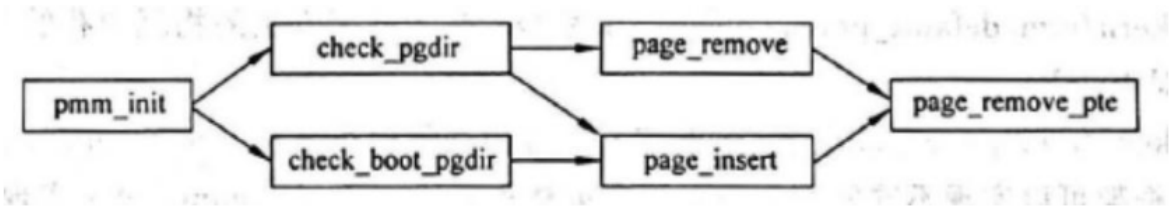
- PTE 前20位表示该 PTE 条目指向的**物理页的物理地址**
- PDE 前20位表示该 PDE 对应的页表起始位置，即**物理地址**

2. 如果ucore执行过程中访问内存，出现了页访问异常，请问硬件要做哪些事情?

1. 将引发异常的地址储存在 `cr2` 寄存器中
2. 判断特权级
    - 如果是内核态，将 `EFLAGS`、`CS` 和 `EIP` 以及页访问代码 `error code` 依次压入**中断栈**中
    - 如果是用户态，需要先压入 `ss` 和 `esp`，在压入上面三种，然后切换到内核态
3. 引发页错误，根据**中断描述符表**查询并且跳转到对应页错误的 `ISR` 处执行，然后将该页错误交给软件处理

练习3：释放某虚拟地址所在的页并取消对应二级页表项的映射

- 当释放一个包含某虚地址的物理内存页时，需要让对应此物理内存页的管理数据结构Page做相关的清除处理，使得此物理内存页成为空闲；
- 另外还需把表示虚地址与物理地址对应关系的二级页表项清除。
- 请仔细查看和理解 `page_remove_pte()` 函数中的注释。为此，需要补全在 `kern/mm/pmm.c` 中的 `page_remove_pte()` 函数。



阅读注释，可以了解到相关的宏的函数：

- struct Page *page pte2page(*ptep): 从 ptep 指针中得到对应的页
- free_page : 释放一个页
- page_ref_dec(page) : 减少引用次数，但需要注意：当次数为0时，需要释放该页
- tlb_invalidate(pde_t *pgdir, uintptr_t la) : 使 TLB 的条目失效，但该页表需处于处理器当前正在使用的页表中

在 pmm.h 中找到 PADDR 的相关定义

```
static inline struct Page *
pte2page(pte_t pte) {
    if (!(pte & PTE_P)) {
        panic("pte2page called with invalid pte");
    }
    return pa2page(PTE_ADDR(pte));
}

static inline int
page_ref_dec(struct Page *page) {
    page->ref -= 1;
    return page->ref;
}

// invalidate a TLB entry, but only if the page tables being
// edited are the ones currently in use by the processor.
void
tlb_invalidate(pde_t *pgdir, uintptr_t la) {
    if (rcr3() == PADDR(pgdir)) {
        invlpg((void *)la);
    }
}

/* *
 * PADDR - takes a kernel virtual address (an address that points above KERNBASE),
 * where the machine's maximum 256MB of physical memory is mapped and returns the
 * corresponding physical address.  It panics if you pass it a non-kernel virtual
address.
 * */
#define PADDR(kva) ({                                                   \
            uintptr_t __m_kva = (uintptr_t)(kva);                       \
            if (__m_kva < KERNBASE) {                                   \
                panic("PADDR called with invalid kva %08lx", __m_kva);  \
```

```
            }                                                           \
            __m_kva - KERNBASE;                                         \
        })
```

其他声明

- `PTE_P           0x001` 控制位，表示存在

具体步骤：

1. 检查页表条目是否存在
2. 找到 pte 相关的页
3. 减少该页的引用次数
4. 当引用次数变为0时，释放该页
5. 清除二级页表条目
6. 刷新 tlb

补充后函数为：

```
//page_remove_pte - free an Page sturct which is related linear address la
//                - and clean(invalidate) pte which is related linear address la
//note: PT is changed, so the TLB need to be invalidate
static inline void
page_remove_pte(pde_t *pgdir, uintptr_t la, pte_t *ptep) {
#if 0
    if (0) {                      //(1) check if this page table entry is present
        struct Page *page = NULL; //(2) find corresponding page to pte
                                  //(3) decrease page reference
                                  //(4) and free this page when page reference reachs
0
                                  //(5) clear second page table entry
                                  //(6) flush tlb
    }
#endif

    if ((*ptep) & PTE_P) // 只有存在的时候才会进后续
    {
        struct Page *p = pte2page(*ptep); // 获取到页
        if (page_ref_dec(p) == 0) // 减少引用次数，同时判断次数是否为0
            free_page(p); // 如果只被上一级页表引用一次，那么可以直接释放页和对应的二级页表
        // 如果引用超过1次，那么不能释放页表，但是可以取消二级页表的映射
        // 无论是否释放页，都要取消二级页表的映射

        *ptep = 0;
        tlb_invalidate(pgdir, la);
    }

    // 如果不存在，什么都不干
    return;
}
```

实验结果

使用 `make qemu-nox` 在终端查看运行结果

```
mijialong$>make qemu-nox
(THU.CST) os is loading ...

Special kernel symbols:
  entry  0xc0100036 (phys)
  etext  0xc0105f0c (phys)
  edata  0xc011a000 (phys)
  end    0xc011af28 (phys)
Kernel executable memory footprint: 108KB
ebp = 0xc0116f38        eip = 0xc01009dd
        arg0 = 0x00010094       arg1 = 0x00000000
        arg2 = 0xc0116f68       arg3 = 0xc01000c8
    kern/debug/kdebug.c:310: print_stackframe+22
ebp = 0xc0116f48        eip = 0xc0100cd0
        arg0 = 0x00000000       arg1 = 0x00000000
        arg2 = 0x00000000       arg3 = 0xc0116fb8
    kern/debug/kmonitor.c:129: mon_backtrace+10
ebp = 0xc0116f68        eip = 0xc01000c8
        arg0 = 0x00000000       arg1 = 0xc0116f90
        arg2 = 0xffff0000       arg3 = 0xc0116f94
    kern/init/init.c:49: grade_backtrace2+33
ebp = 0xc0116f88        eip = 0xc01000f1
        arg0 = 0x00000000       arg1 = 0xffff0000
        arg2 = 0xc0116fb4       arg3 = 0x0000002a
    kern/init/init.c:54: grade_backtrace1+38
ebp = 0xc0116fa8        eip = 0xc010010f
        arg0 = 0x00000000       arg1 = 0xc0100036
        arg2 = 0xffff0000       arg3 = 0x0000001d
    kern/init/init.c:59: grade_backtrace0+23
ebp = 0xc0116fc8        eip = 0xc0100134
        arg0 = 0xc0105f3c       arg1 = 0xc0105f20
        arg2 = 0x00000f28       arg3 = 0x00000000
    kern/init/init.c:64: grade_backtrace+34
ebp = 0xc0116ff8        eip = 0xc010008b
        arg0 = 0xc0106100       arg1 = 0xc0106108
        arg2 = 0xc0100c56       arg3 = 0xc0106127
    kern/init/init.c:29: kern_init+84
memory management: default_pmm_manager
e820map:
  memory: 0009fc00, [00000000, 0009fbff], type = 1.
  memory: 00000400, [0009fc00, 0009ffff], type = 2.
  memory: 00010000, [000f0000, 000fffff], type = 2.
  memory: 07efe000, [00100000, 07ffdfff], type = 1.
  memory: 00002000, [07ffe000, 07ffffff], type = 2.
  memory: 00040000, [fffc0000, ffffffff], type = 2.
check_alloc_page() succeeded!
check_pgdir() succeeded!
check_boot_pgdir() succeeded!
-------------------- BEGIN --------------------
PDE(0e0) c0000000-f8000000 38000000 urw
  |-- PTE(38000) c0000000-f8000000 38000000 -rw
PDE(001) fac00000-fb000000 00400000 -rw
  |-- PTE(000e0) faf00000-fafe0000 000e0000 urw
  |-- PTE(00001) fafeb000-fafec000 00001000 -rw
--------------------- END ---------------------
++ setup timer interrupts
100 ticks
End of Test.
kernel panic at kern/trap/trap.c:18:
    EOT: kernel seems ok.
stack trackback:
```

```
ebp = 0xc0116ee0        eip = 0xc01009dd
        arg0 = 0xc0106234       arg1 = 0xc0116f24
        arg2 = 0x00000012       arg3 = 0xc0116f5c
    kern/debug/kdebug.c:310: print_stackframe+22
ebp = 0xc0116f10        eip = 0xc0100d41
        arg0 = 0xc01062ee       arg1 = 0x00000012
        arg2 = 0xc01062d8       arg3 = 0x00000003
    kern/debug/panic.c:27: __panic+105
ebp = 0xc0116f30        eip = 0xc01018d4
        arg0 = 0xc0116f68       arg1 = 0xc0100343
        arg2 = 0xc01002f5       arg3 = 0xc0116f5c
    kern/trap/trap.c:18: print_ticks+65
ebp = 0xc0116f60        eip = 0xc0101d70
        arg0 = 0xc0116f8c       arg1 = 0xc0100366
        arg2 = 0xc0106264       arg3 = 0xc0116fa4
    kern/trap/trap.c:165: trap_dispatch+97
ebp = 0xc0116f80        eip = 0xc0101e2e
        arg0 = 0xc0116f8c       arg1 = 0x00000001
        arg2 = 0x00000000       arg3 = 0xc0116ff8
    kern/trap/trap.c:203: trap+16
ebp = 0xc0116ff8        eip = 0xc0101e46
        arg0 = 0xc0106100       arg1 = 0xc0106108
        arg2 = 0xc0100c56       arg3 = 0xc0106127
    kern/trap/trapentry.S:24: <unknown>+0
Welcome to the kernel debug monitor!!
Type 'help' for a list of commands.
K> 
```

使用 `make grade` 进行测试，结果如下

```
mijialong$>make
+ cc kern/mm/pmm.c
kern/mm/pmm.c:265:1: warning: ‘boot_alloc_page’ defined but not used [-Wunused-function]
 boot_alloc_page(void) {
 ^
+ ld bin/kernel
+ ld bin/kernel_nopage
10000+0 records in
10000+0 records out
5120000 bytes (5.1 MB) copied, 0.0381416 s, 134 MB/s
1+0 records in
1+0 records out
512 bytes (512 B) copied, 0.000356908 s, 1.4 MB/s
240+1 records in
240+1 records out
123260 bytes (123 kB) copied, 0.00104936 s, 117 MB/s
mijialong$>make grade
Check PMM:              (2.6s)
  -check pmm:                                 OK
  -check page table:                          OK
  -check ticks:                               OK
Total Score: 50/50
mijialong$>
```

实验总结

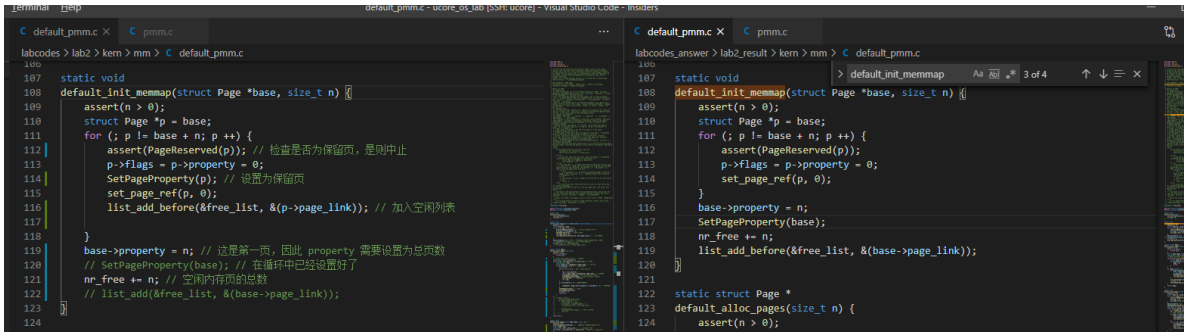
完成实验后，请分析ucore_lab中提供的参考答案，并请在实验报告中说明你的实现与参考答案的区别

练习1

1. default_init()

该函数不需要修改

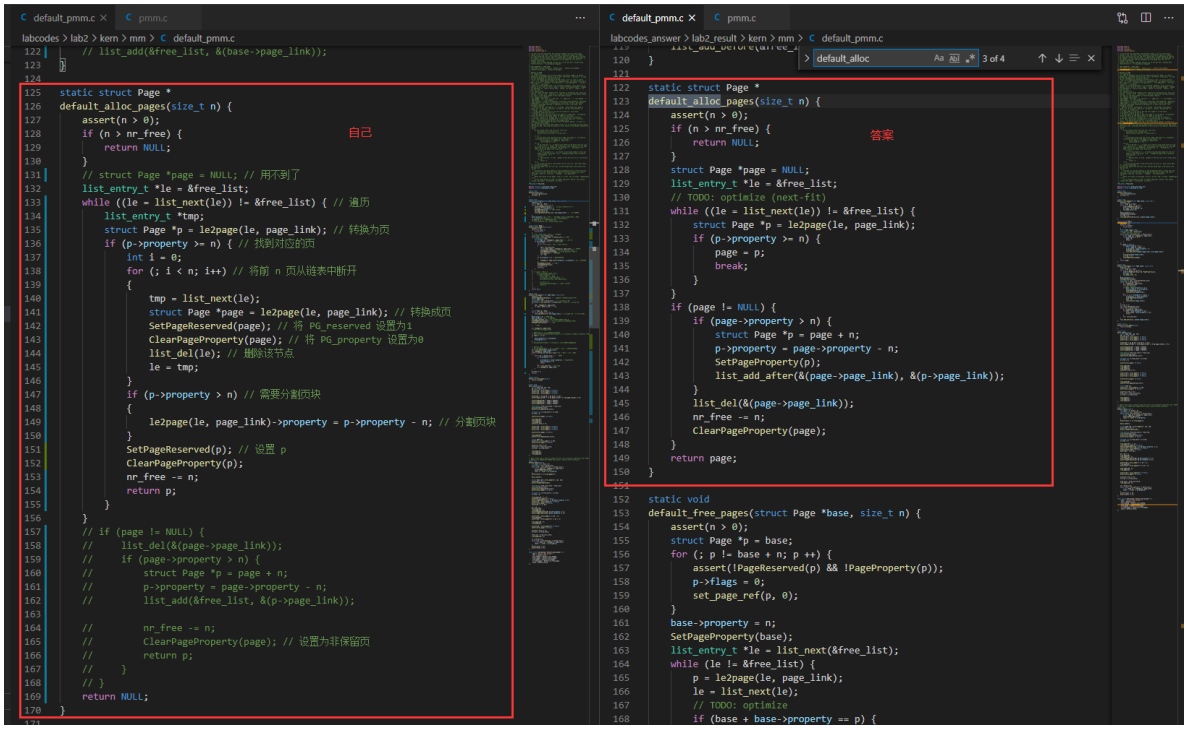
2. default_init_memmap()



区别：

- 答案是在结尾才将页链接上去
- 我是每次都对页进行初始化，并且加入列表

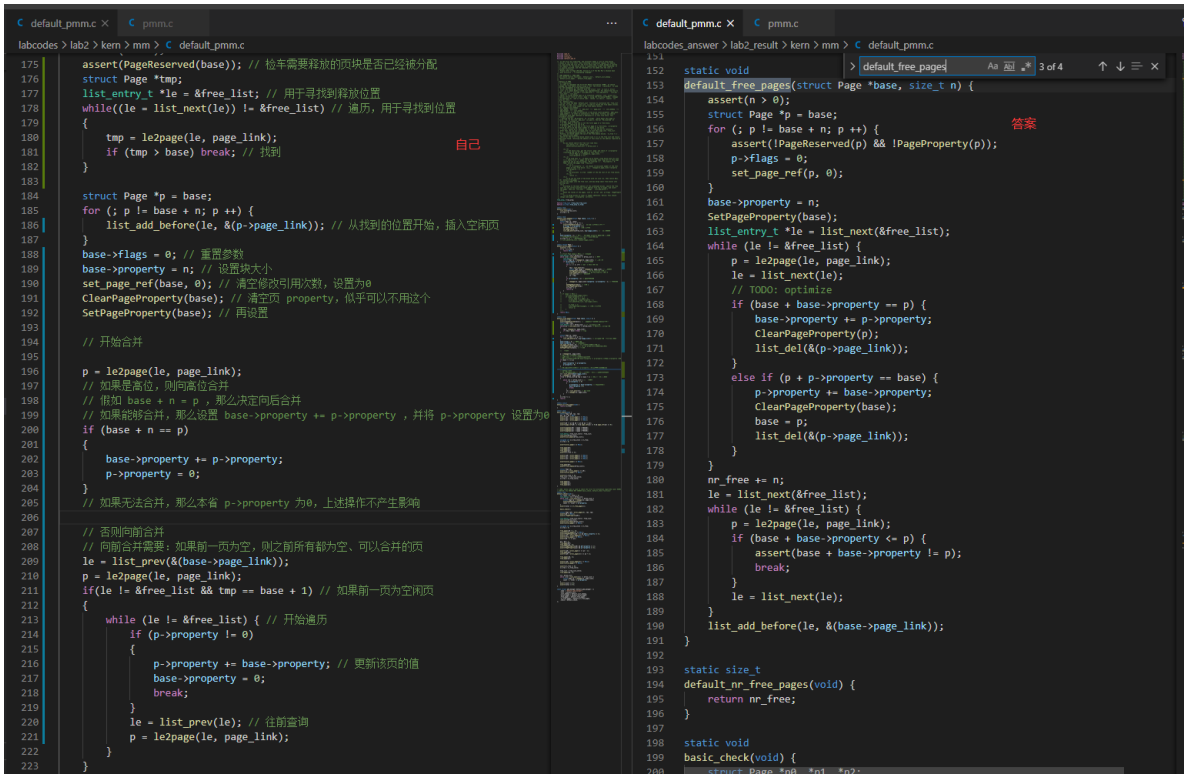
3. default_alloc_pages()



区别：

- 答案的循环只用于寻找到对应的页，找到后进行 `break` 操作，再做后续操作，比较简洁
- 我是在大循环中对每个页进行操作，比较繁琐，需要多个判断，并且 `while` 循环中还有一个 `for` 循环，比较耗费操作时间

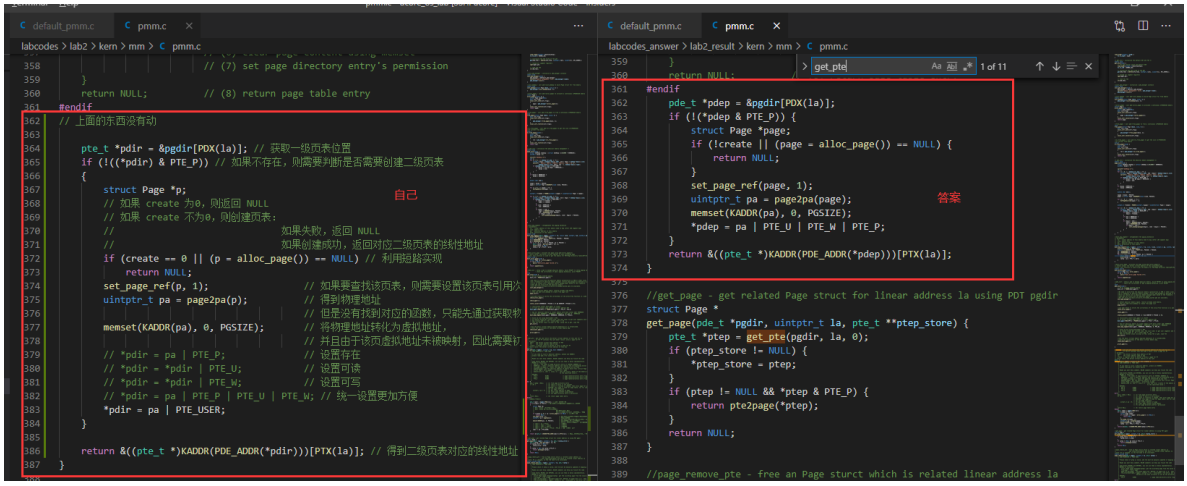
4. default_free_pages()



区别：

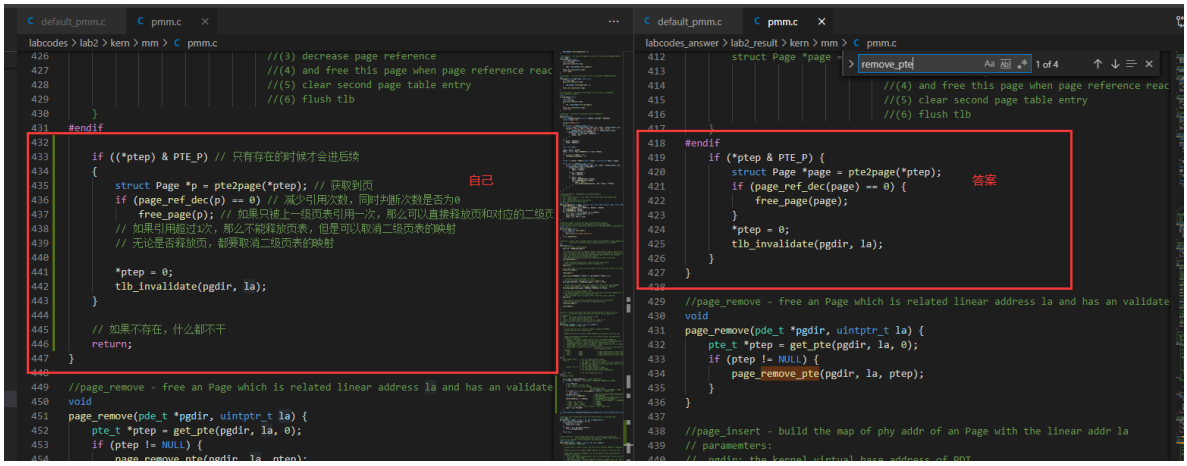
- 和上一个函数相反，我使用了循环配合 `break` 寻找对应的位置
- 答案则在循环中完成了大部分操作，并且答案善于使用 `absort()` 宏简化操作

练习2



思路一致，我使用了 `PTE_USER` 使代码可读性更强

练习3



思路一致，无区别

列出你认为本实验中重要的知识点，以及与其对应的OS原理中的知识点，并简要说明你对二者的含义，关系， 差异等方面的理解（也可能出现实验中的知识点没有对应的原理知识点）

本次实验涉及到

- CPU 段页式内存管理
- CPU 进入页机制的方法
- 连续物理内存分配方法 first-fit
- 虚拟地址（逻辑地址），线性地址和物理地址三者之间的关系和转换方法

对应到 os 原理中：

- 内存页管理
- 连续物理内存管理

理解：

- 实验中的知识点是原理中的具体应用，需要考虑到具体的操作，会更加的复杂繁琐
- 前者为后者提供具体的内存管理功能的详细操作和底层支持
- 前者涉及到了除开操作系统之外的一些知识，比如说数据结构和算法，使得实现起来稍微麻烦一些

列出你认为OS原理中很重要，但在实验中没有对应上的知识点

- 其他两种内存分配算法：best-fit 和 worst-fit ，但是如果要实现这两种算法，花费时间可能会更长，并且一个文件的代码无法同时测试三种算法
- 虚拟内存的创建、实现和管理
- 出现了页错误时，软件具体如何处理
- 对于多线程/进程的创建、管理和调度，以及进程之间的互斥

总结

本次实验是从比较基本的 first-fit 算法开始进行实现，使我更加直观地了解了段页式内存的地址转换机制，页表及其条目的建立和使用，以及物理内存的管理；实现起来还是有点难度，而且工作量并不小，需要查看其他的文件的代码比较多，容易混淆；所幸每个练习的注释都十分的详细，按照注释的步骤和提示查阅资料，从而一步一步理解代码，最终实现了对应的功能，还是比较开心的。