

# 第9章 虚拟内存: 系统

教 师: 史先俊  
计算机科学与技术学院  
哈尔滨工业大学

# 主要内容

- 一个小内存系统示例
- 案例研究: **Core i7/Linux** 内存系统
- 内存映射

# Review of Symbols 符号回顾

## ■ 基本参数

- $N = 2^n$ : 虚拟地址空间中的地址数量
- $M = 2^m$ : 物理地址空间中的地址数量
- $P = 2^p$ : 页的大小 (bytes)

## ■ 虚拟地址组成部分

- TLBI: TLB索引
- TLBT: TLB 标记
- VPO: 虚拟页面偏移量 (字节)
- VPN: 虚拟页号

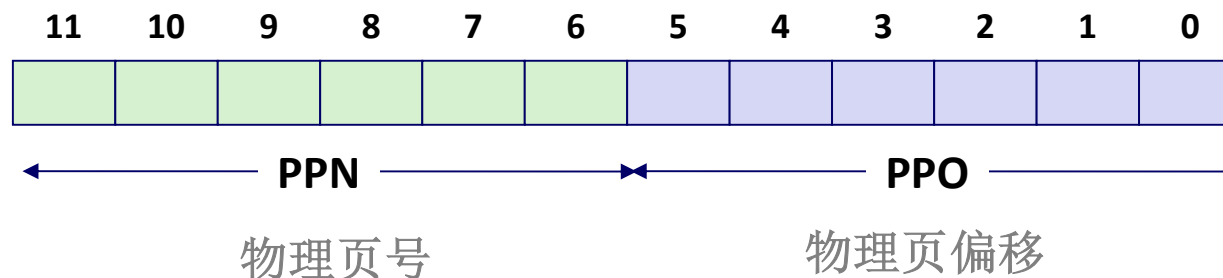
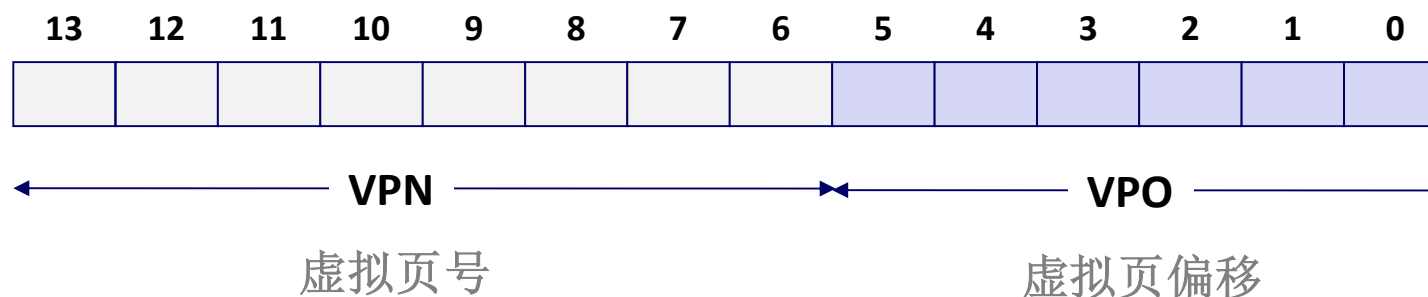
## ■ 物理地址组成部分

- PPO: 物理页面偏移量 (same as VPO)
- PPN: 物理页号
- CO: 缓冲块内的字节偏移量
- CI: Cache 索引
- CT: Cache 标记

# 一个小内存系统示例

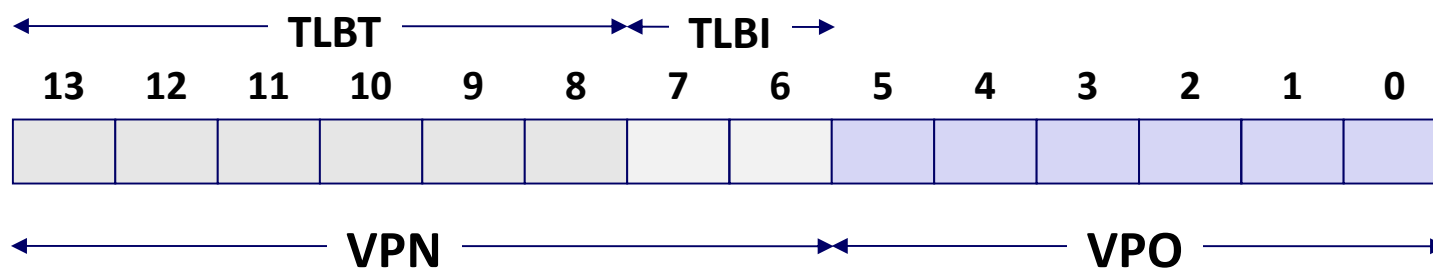
## ■ 地址假设

- 14位虚拟地址 ( $n=14$ )
- 12位物理地址 ( $m=12$ )
- 页面大小64字节 ( $P=64$ )



# 1. 小内存系统的 TLB

- 16 entries 16个条目
- 4-way associative 4路组相联



组	标记	PPN	有效位	标记	PPN	有效位	标记	PPN	有效位	标记	PPN	有效位
0	03	—	0	09	0D	1	00	—	0	07	02	1
1	03	2D	1	02	—	0	04	—	0	0A	—	0
2	02	—	0	08	—	0	06	—	0	03	—	0
3	07	—	0	03	0D	1	0A	34	1	02	—	0

## 2. 小内存系统的页表

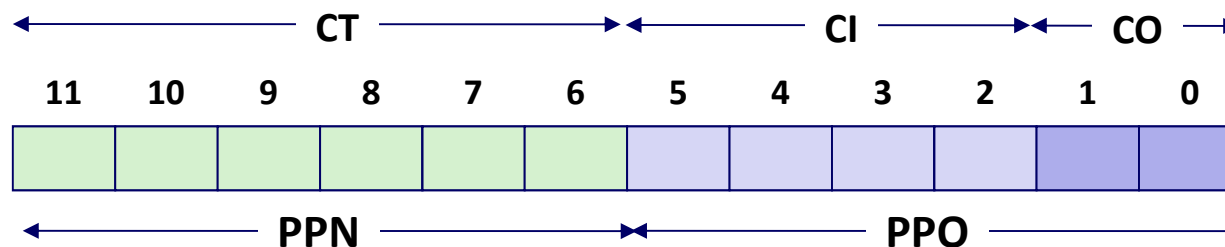
只展示了前16个PTE (out of 256)

<i>VPN</i>	<i>PPN</i>	<i>有效位</i>
<b>00</b>	<b>28</b>	<b>1</b>
<b>01</b>	—	<b>0</b>
<b>02</b>	<b>33</b>	<b>1</b>
<b>03</b>	<b>02</b>	<b>1</b>
<b>04</b>	—	<b>0</b>
<b>05</b>	<b>16</b>	<b>1</b>
<b>06</b>	—	<b>0</b>
<b>07</b>	—	<b>0</b>

<i>VPN</i>	<i>PPN</i>	<i>有效位</i>
<b>08</b>	<b>13</b>	<b>1</b>
<b>09</b>	<b>17</b>	<b>1</b>
<b>0A</b>	<b>09</b>	<b>1</b>
<b>0B</b>	—	<b>0</b>
<b>0C</b>	—	<b>0</b>
<b>0D</b>	<b>2D</b>	<b>1</b>
<b>0E</b>	<b>11</b>	<b>1</b>
<b>0F</b>	<b>0D</b>	<b>1</b>

### 3. 小内存系统的 Cache

- 16个组，每块为4字节
- 通过物理地址中的字段寻址
- 直接映射

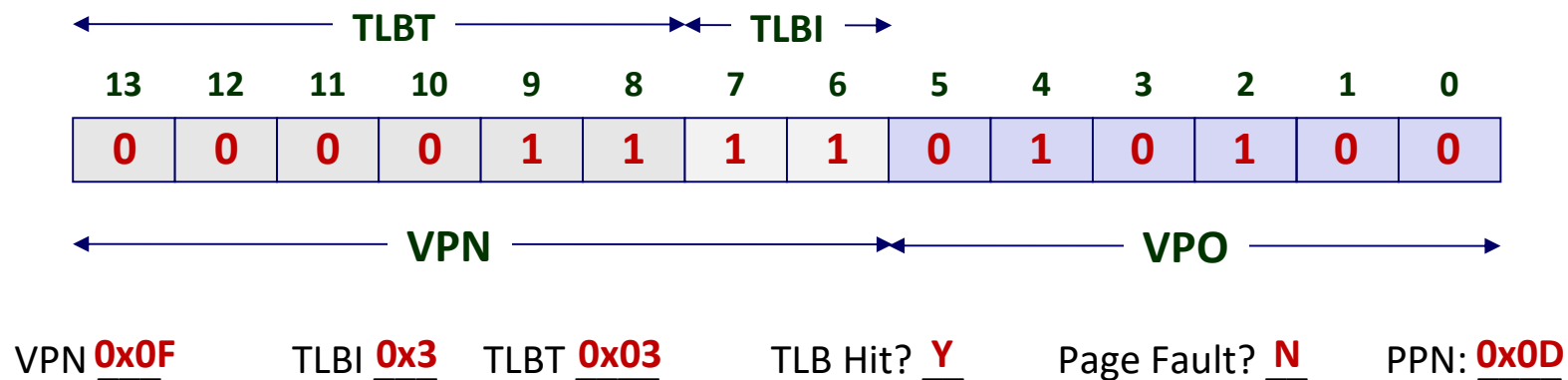


索引	标记位	有效位	块0	块1	块2	块3
0	19	1	99	11	23	11
1	15	0	—	—	—	—
2	1B	1	00	02	04	08
3	36	0	—	—	—	—
4	32	1	43	6D	8F	09
5	0D	1	36	72	F0	1D
6	31	0	—	—	—	—
7	16	1	11	C2	DF	03

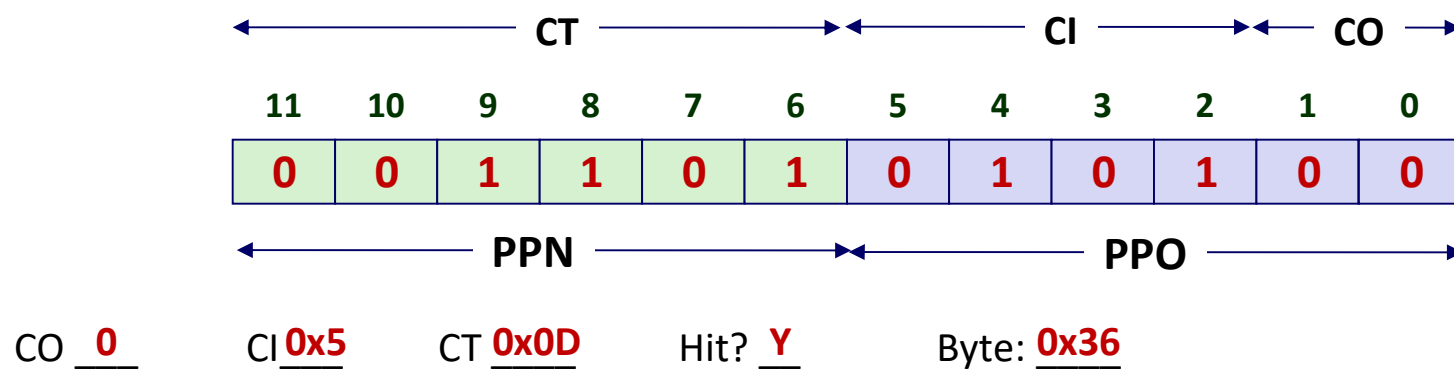
Idx	Tag	Valid	B0	B1	B2	B3
8	24	1	3A	00	51	89
9	2D	0	—	—	—	—
A	2D	1	93	15	DA	3B
B	0B	0	—	—	—	—
C	12	0	—	—	—	—
D	16	1	04	96	34	15
E	13	1	83	77	1B	D3
F	14	0	—	—	—	—

# 地址翻译 Example #1

虚拟地址: 0x03D4



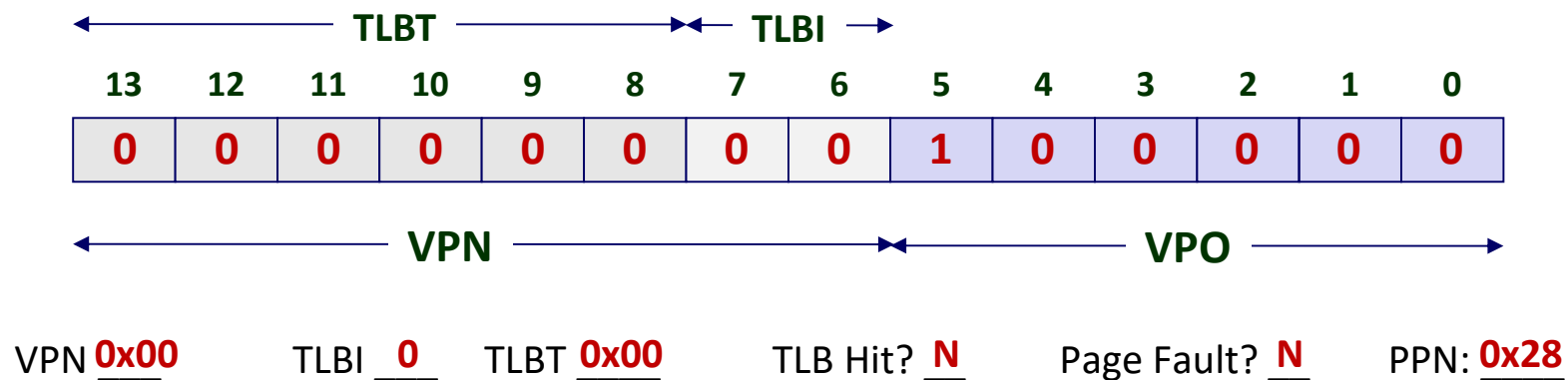
物理地址



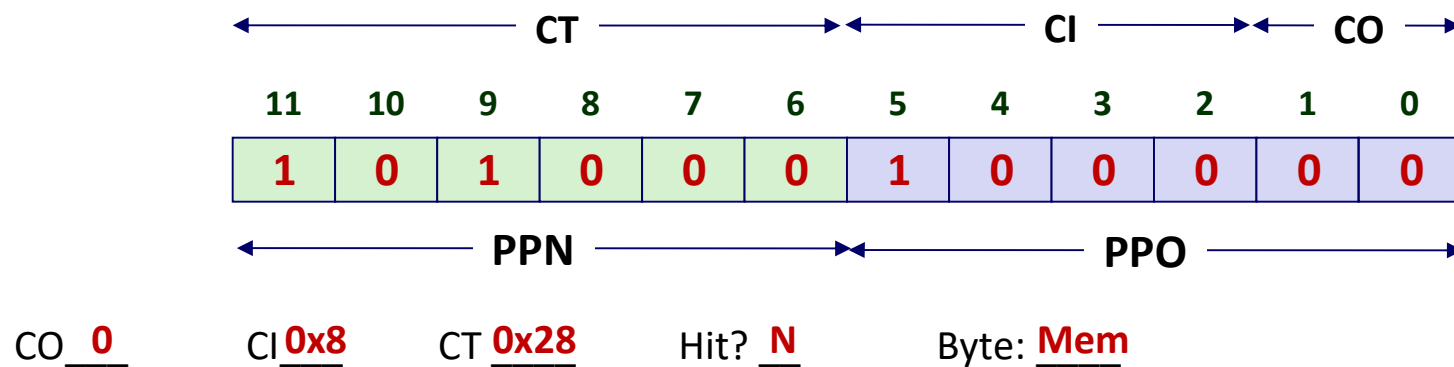


# 地址翻译 Example #2

虚拟地址: 0x0020

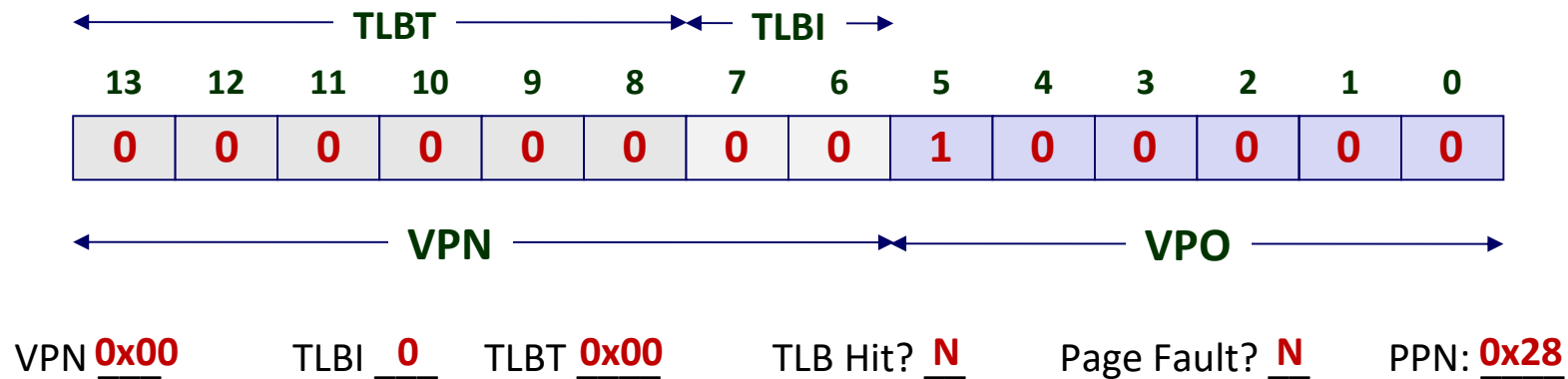


物理地址

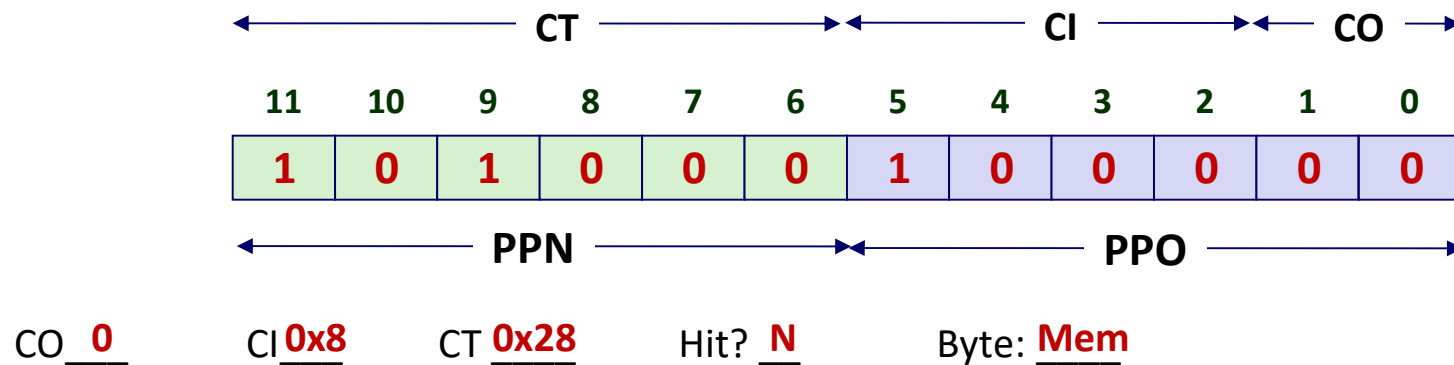


# 地址翻译 Example #3

虚拟地址: 0x0020



物理地址

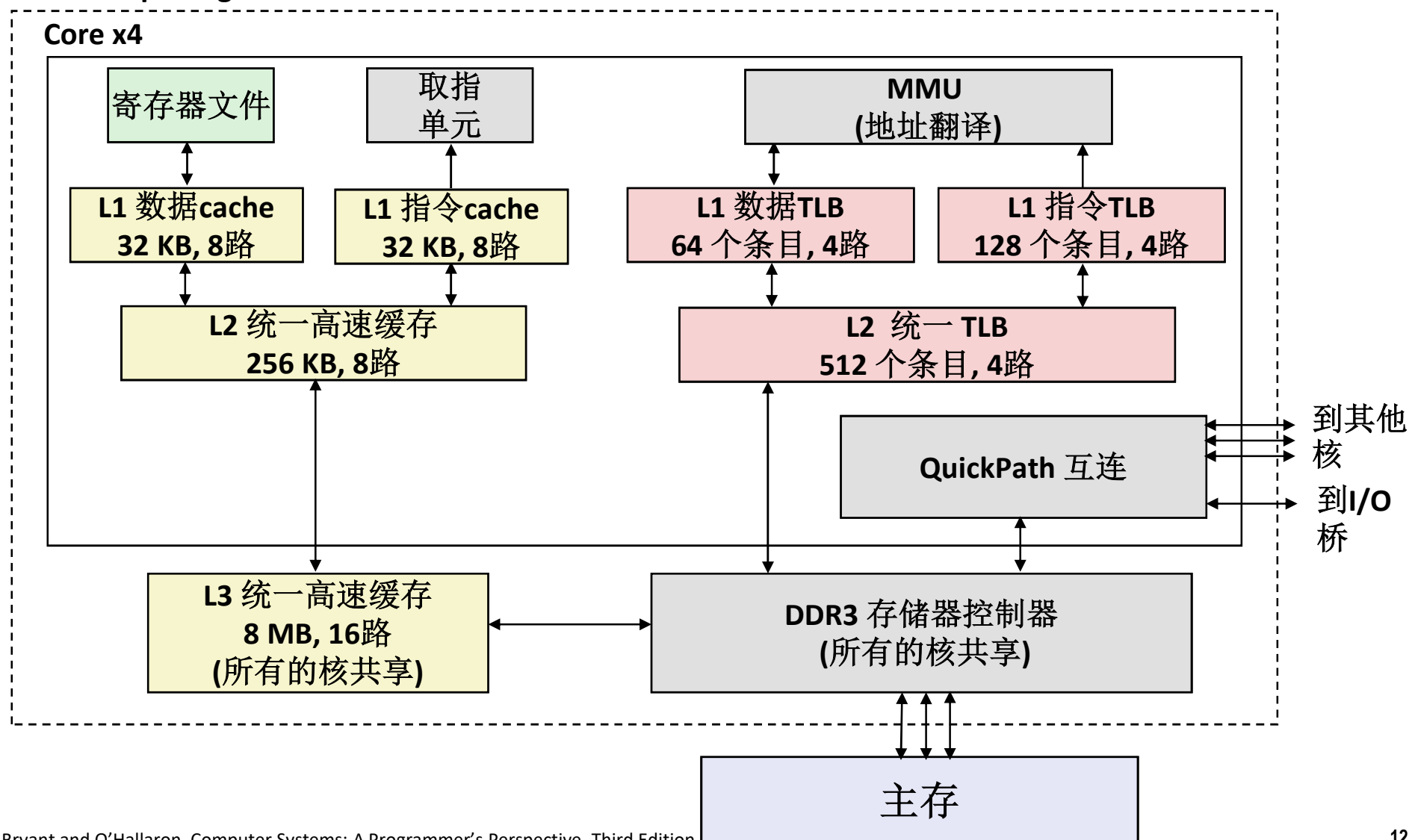


# 主要内容

- 一个小内存系统示例
- 案例研究: **Core i7/Linux** 内存系统
- 内存映射

# Intel Core i7 内存系统

## Processor package



# Review of Symbols 符号回顾

## ■ 基本参数

- $N = 2^n$ : 虚拟地址空间中的地址数量
- $M = 2^m$ : 物理地址空间中的地址数量
- $P = 2^p$ : 页的大小 (bytes)

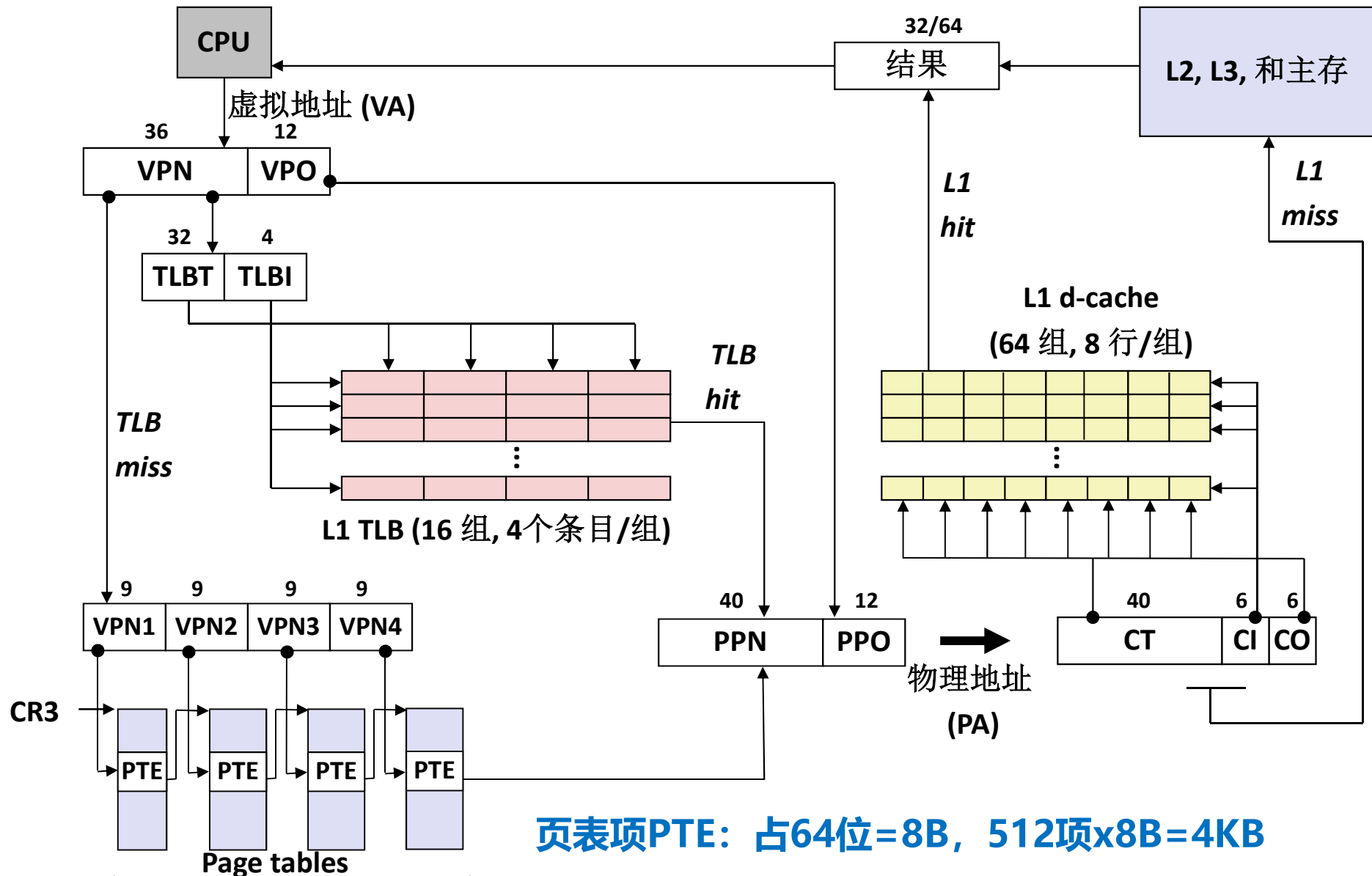
## ■ 虚拟地址组成部分

- TLBI: TLB索引
- TLBT: TLB 标记
- VPO: 虚拟页面偏移量 (字节)
- VPN: 虚拟页号

## ■ 物理地址组成部分

- PPO: 物理页面偏移量 (same as VPO)
- PPN: 物理页号
- CO: 缓冲块内的字节偏移量
- CI: Cache 索引
- CT: Cache 标记

# Core i7 地址翻译 (VA48位PA52位)



# Core i7 1-3级页表条目格式

63	62	52	51	12	11	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
XD	未使用	页表物理基地址				未使用	G	PS		A	CD	WT	U/S	R/W	P=1
OS可用 (磁盘上的页表位置)															P=0

## 每个条目引用一个 4KB子页表:

**P:** 子页表在物理内存中 (1)不在 (0).

**R/W:** 对于所有可访问页, 只读或者读写访问权限.

**U/S:** 对于所有可访问页, 用户或超级用户 (内核)模式访问权限.

**WT:** 子页表的直写或写回缓存策略.

**A:** 引用位 (由MMU 在读或写时设置, 由软件清除).

**PS:** 页大小为4 KB 或 4 MB (只对第一层PTE定义).

**Page table physical base address:** 子页表的物理基地址的最高40位 (强制页表4KB 对齐)

**XD:** 能/不能从这个PTE可访问的所有页中取指令.

对照书  
p578

# Core i7 第 4 级页表条目格式

63	62	52	51	12	11	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
XD	未使用	页表物理基地址				未使用	G		D	A	CD	WT	U/S	R/W	P=1
OS可用 (磁盘上的页表位置)															P=0

## 每个条目引用一个 4KB子页表:

**P:** 子页表在物理内存中 (1)不在 (0).

**R/W:** 对于所有可访问页, 只读或者读写访问权限.

**U/S:** 对于所有可访问页, 用户或超级用户 (内核)模式访问权限.

**WT:** 子页表的直写或写回缓存策略.

**A:**引用位 (由MMU 在读或写时设置, 由软件清除).

**D:** 修改位 (由MMU 在读和写时设置, 由软件清除)

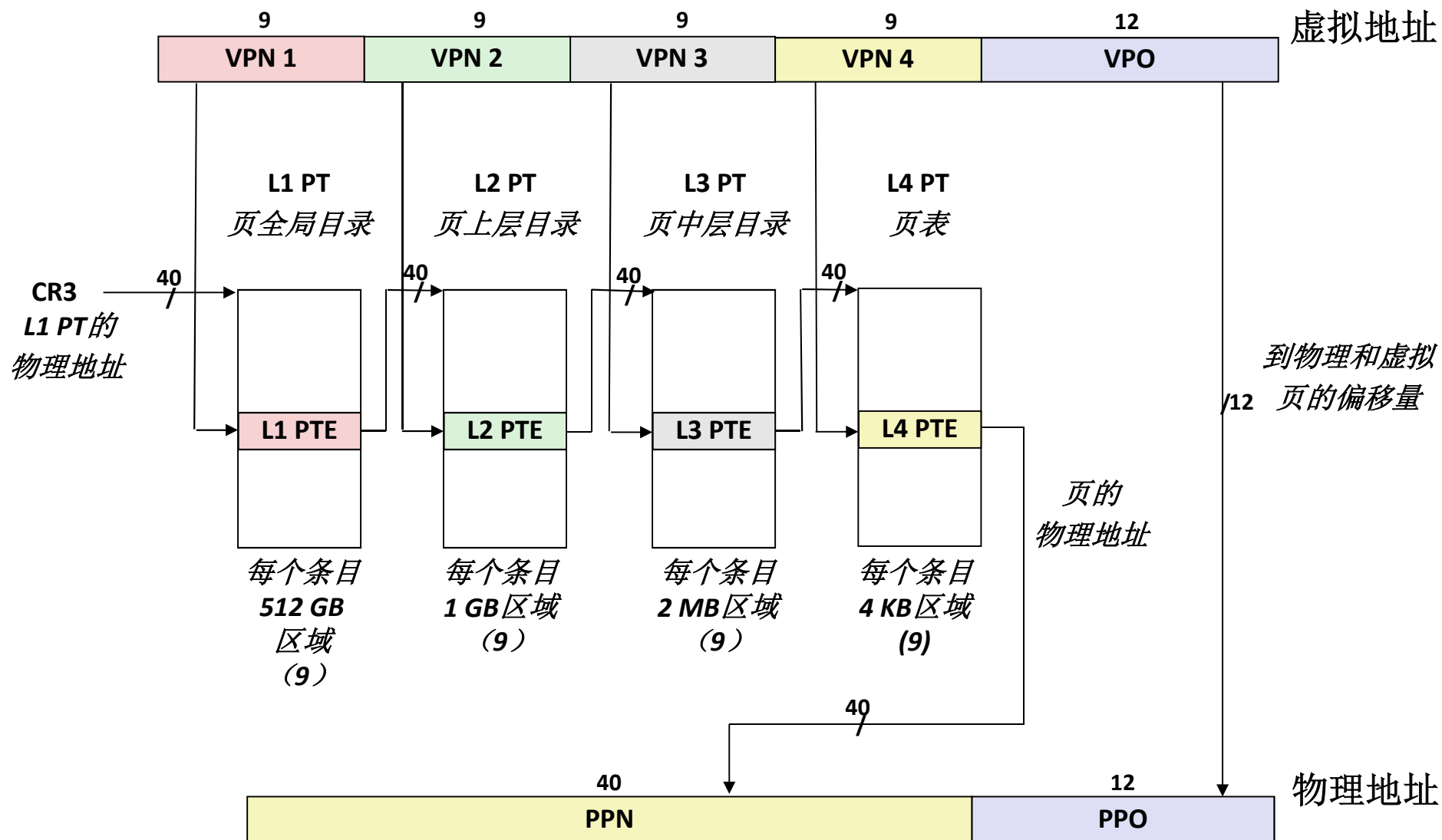
**Page table physical base address:** 子页表的物理基地址的最高40位 (强制页表 4KB 对齐)

**XD:** 能/不能从这个PTE可访问的所有页中取指令.

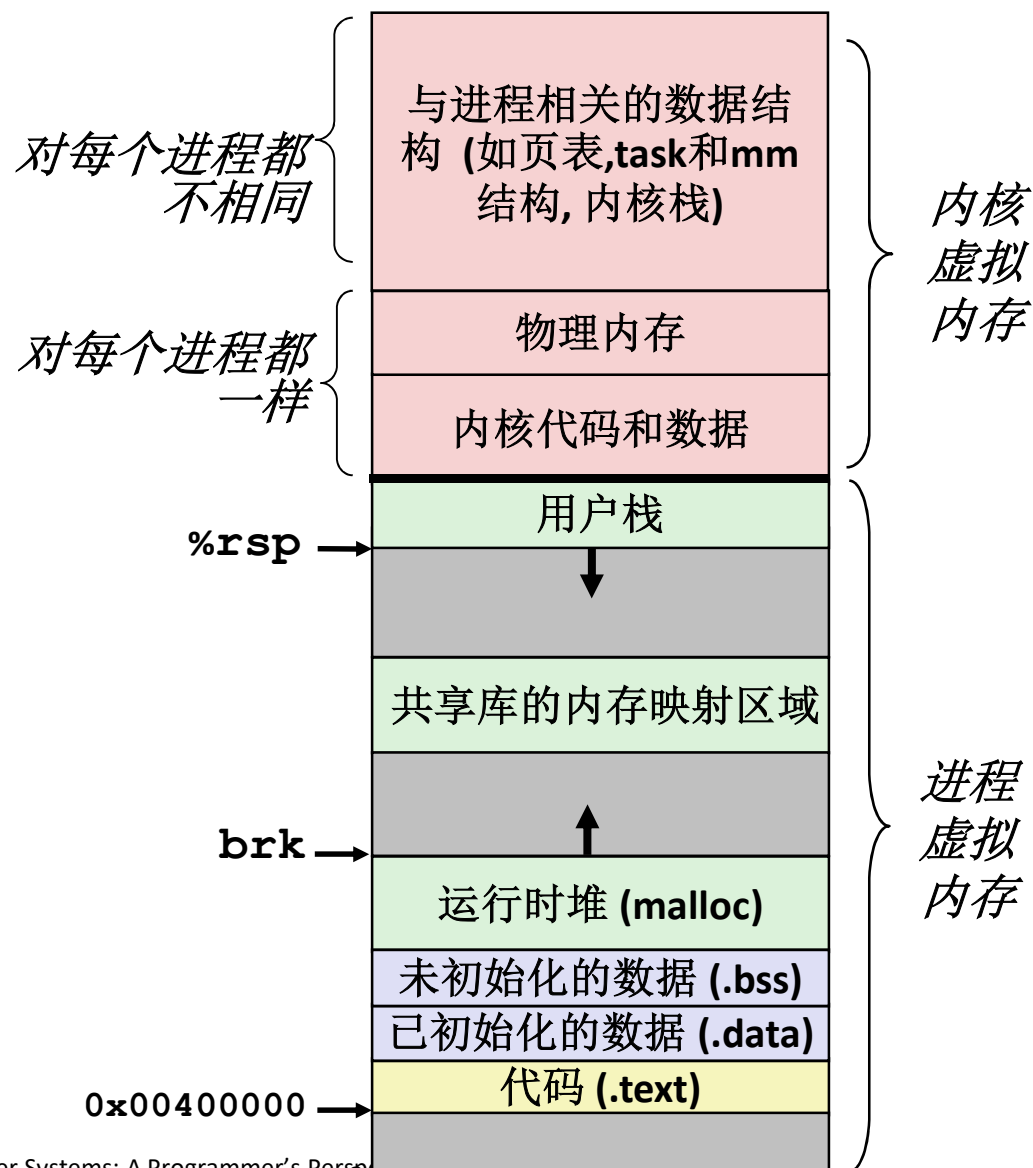
对照书  
p578



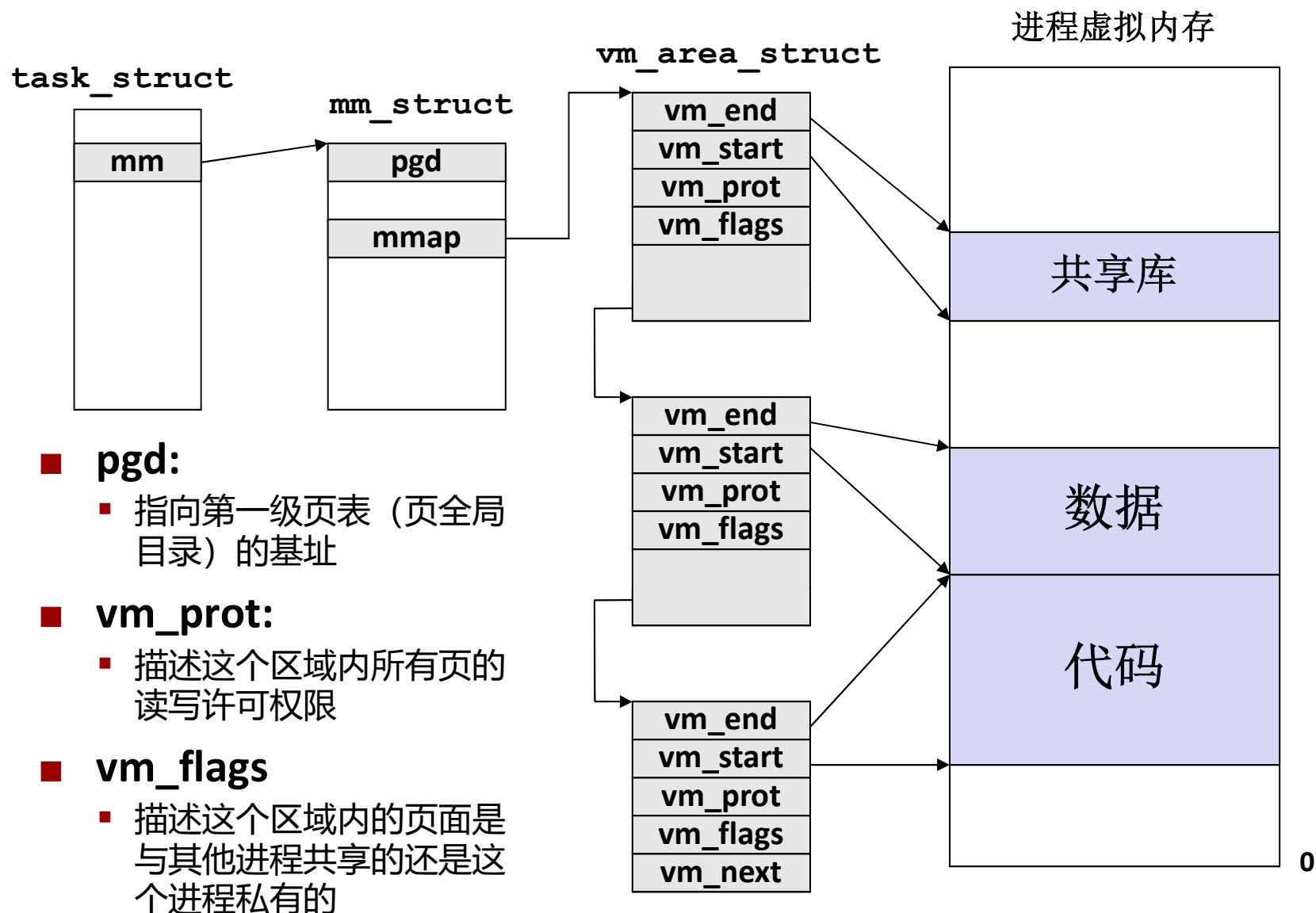
# Core i7 页表翻译



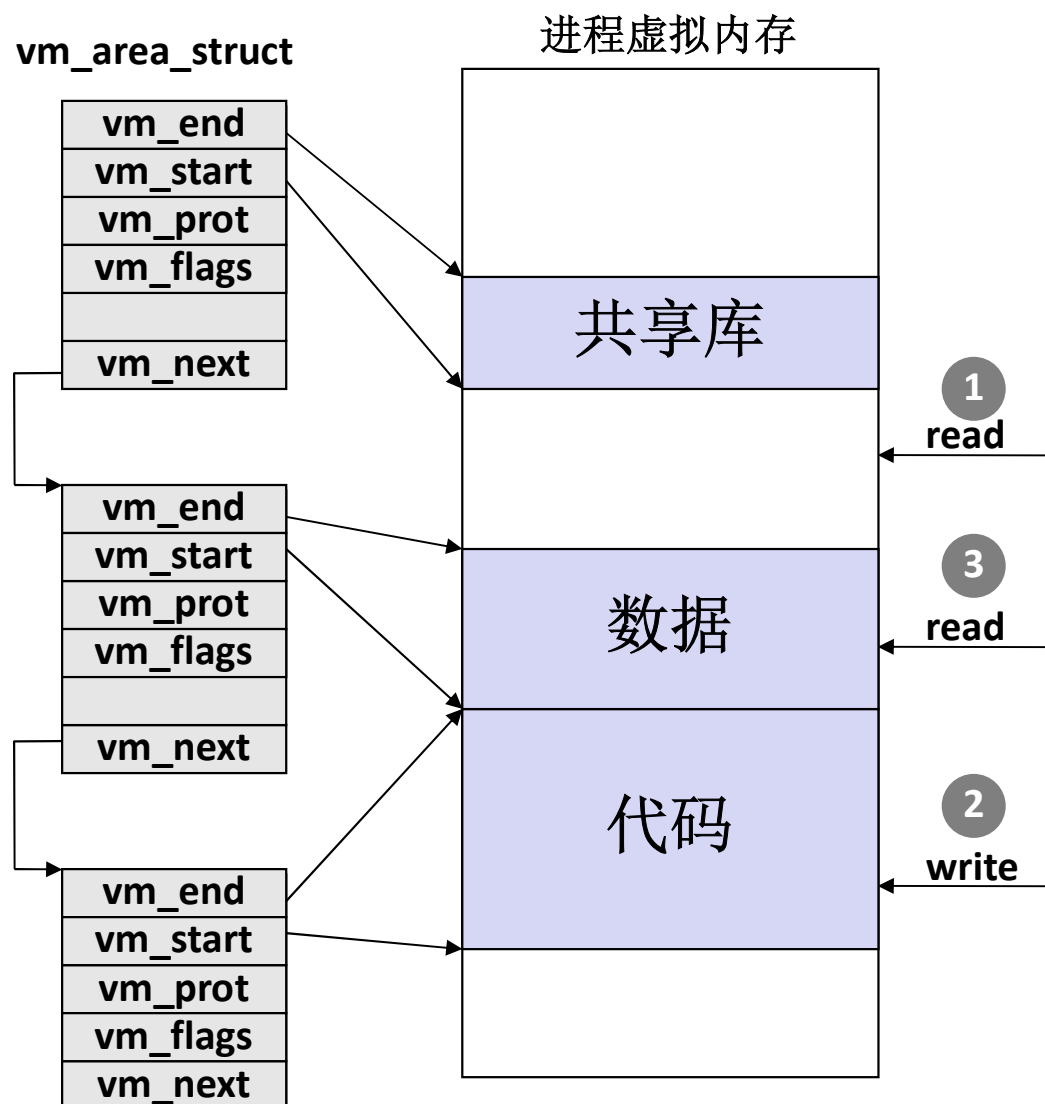
# 一个Linux进程的虚拟地址空间



# Linux将虚拟内存组织成一些区域的集合



# Linux缺页处理



段错误:

访问一个不存在的页面

正常缺页

保护异常:

例如,违反许可, 写一个只读的页面(Linux 报告 Segmentation fault)

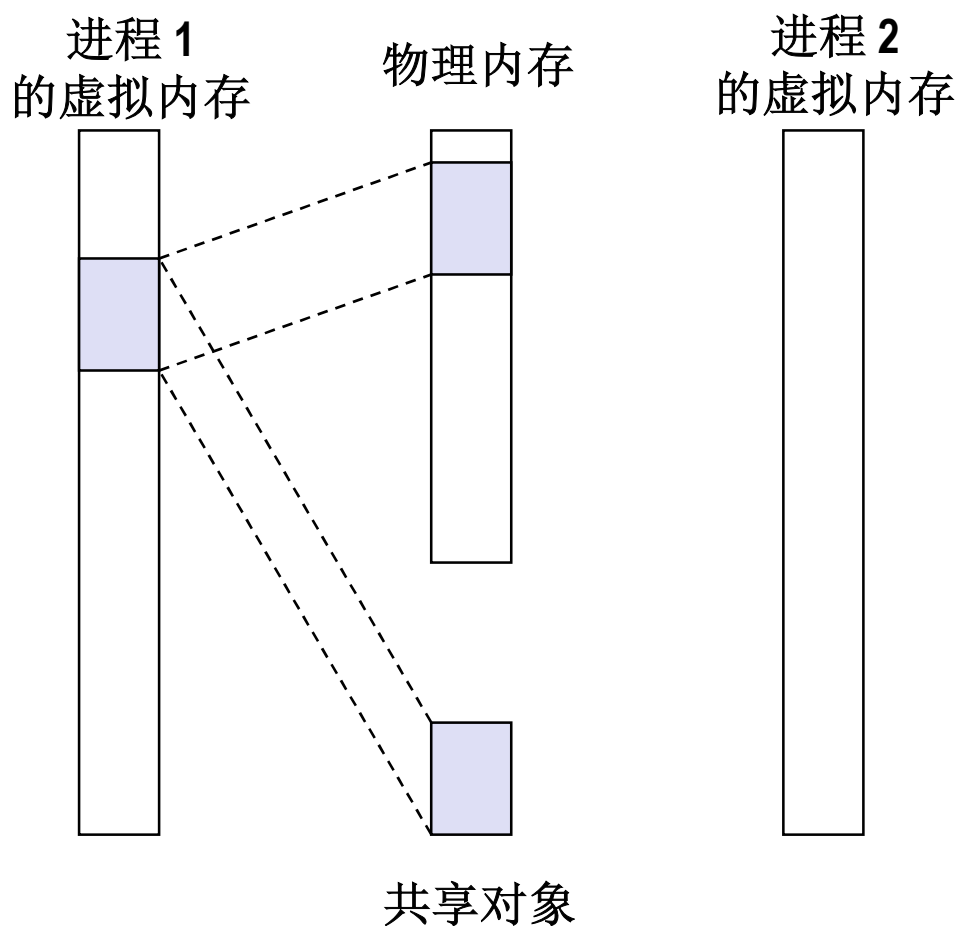
# 主要内容

- 一个小内存系统示例
- 案例研究: **Core i7/Linux** 内存系统
- 内存映射

# 内存映射

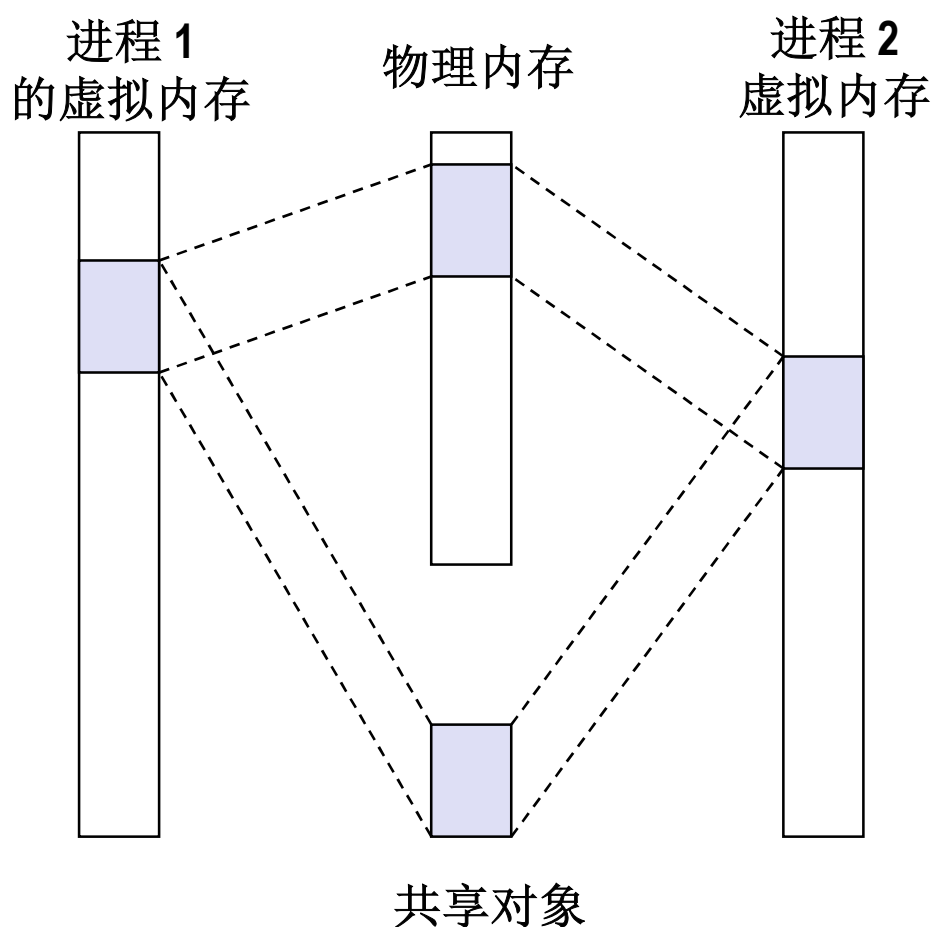
- **Linux**通过将虚拟内存区域与磁盘上的对象关联起来以初始化这个虚拟内存区域的内容。
  - 这个过程称为内存映射 (*memory mapping*) .
- 虚拟内存区域可以映射的对象 (根据初始值的不同来源分):
  - **磁盘上的普通文件** (e.g., 一个可执行目标文件)
    - 文件区被分成页大小的片, 对虚拟页面初始化
  - **匿名文件** (内核创建, 全是二进制零)
    - 第一次引用该区域内的虚拟页面时分配一个全是零的物理页 (*demand-zero page 请求二进制零的页*)
    - 一旦该页面被修改, 即和其他页面一样
- 初始化后的页面在内存和交换文件 (*swap file*) 之间换来换去

## 再看共享对象



- 进程 1 映射了共享对象

# 再看共享对象

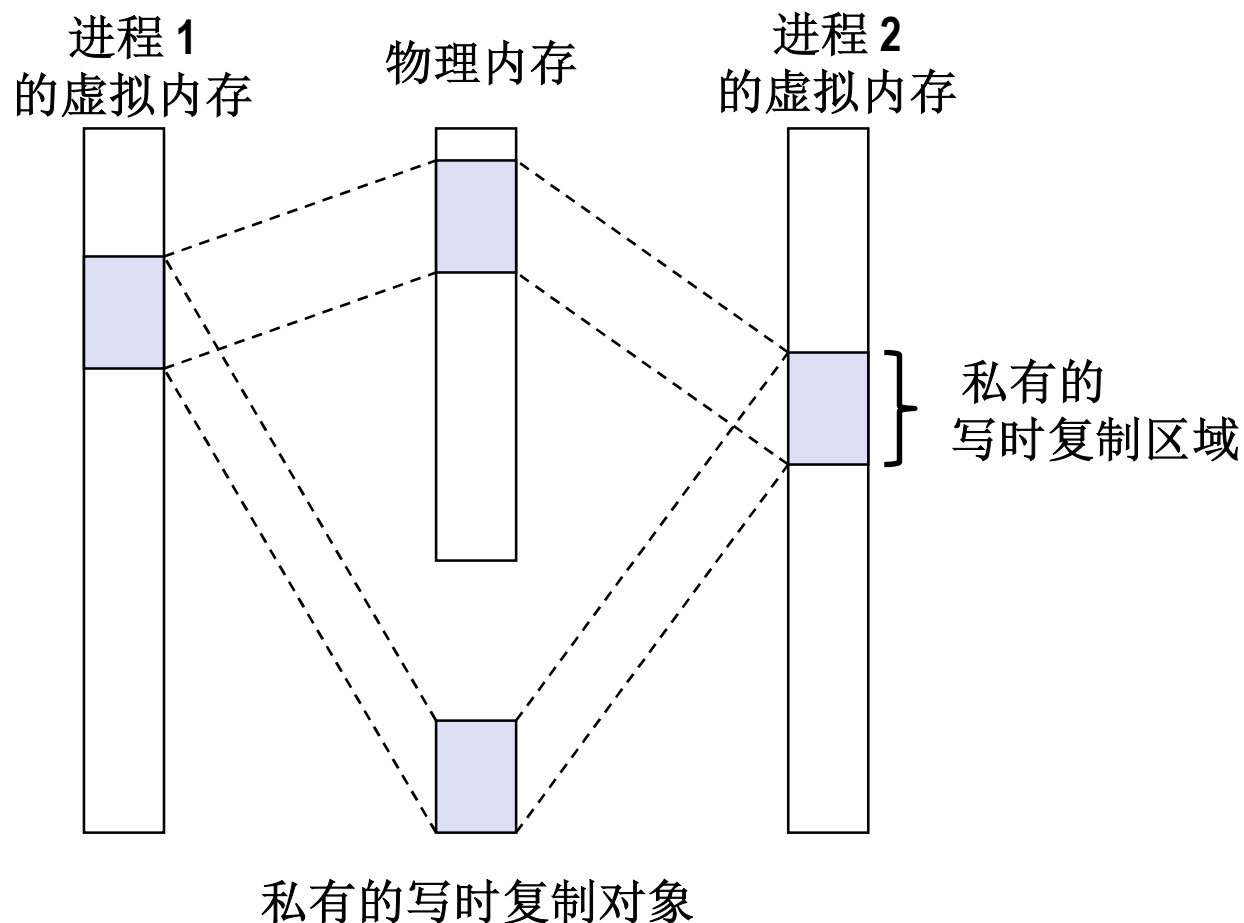


- 进程 2 映射了同一个共享对象.
- 两个进程的虚拟地址可以是不同的



# 共享对象：堆栈、数据、堆区、寄存器

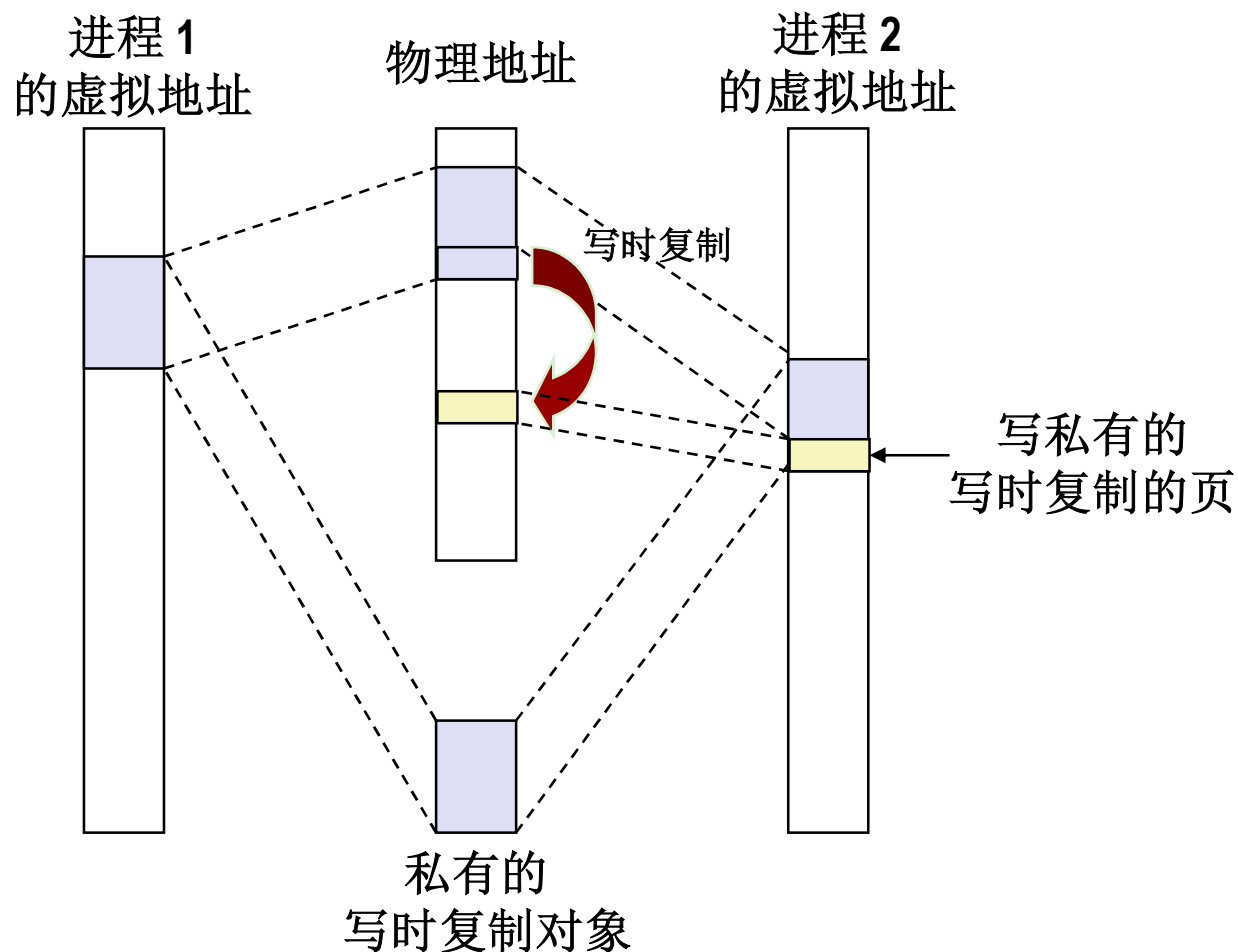
## 私有的写时复制（**Copy-on-write**）对象



- 两个进程都映射了私有的写时复制对象
- 区域结构被标记为私有的写时复制
- 私有区域的页表条目都被标记为只读

# 共享对象:

## 私有的写时复制 (**Copy-on-write**) 对象



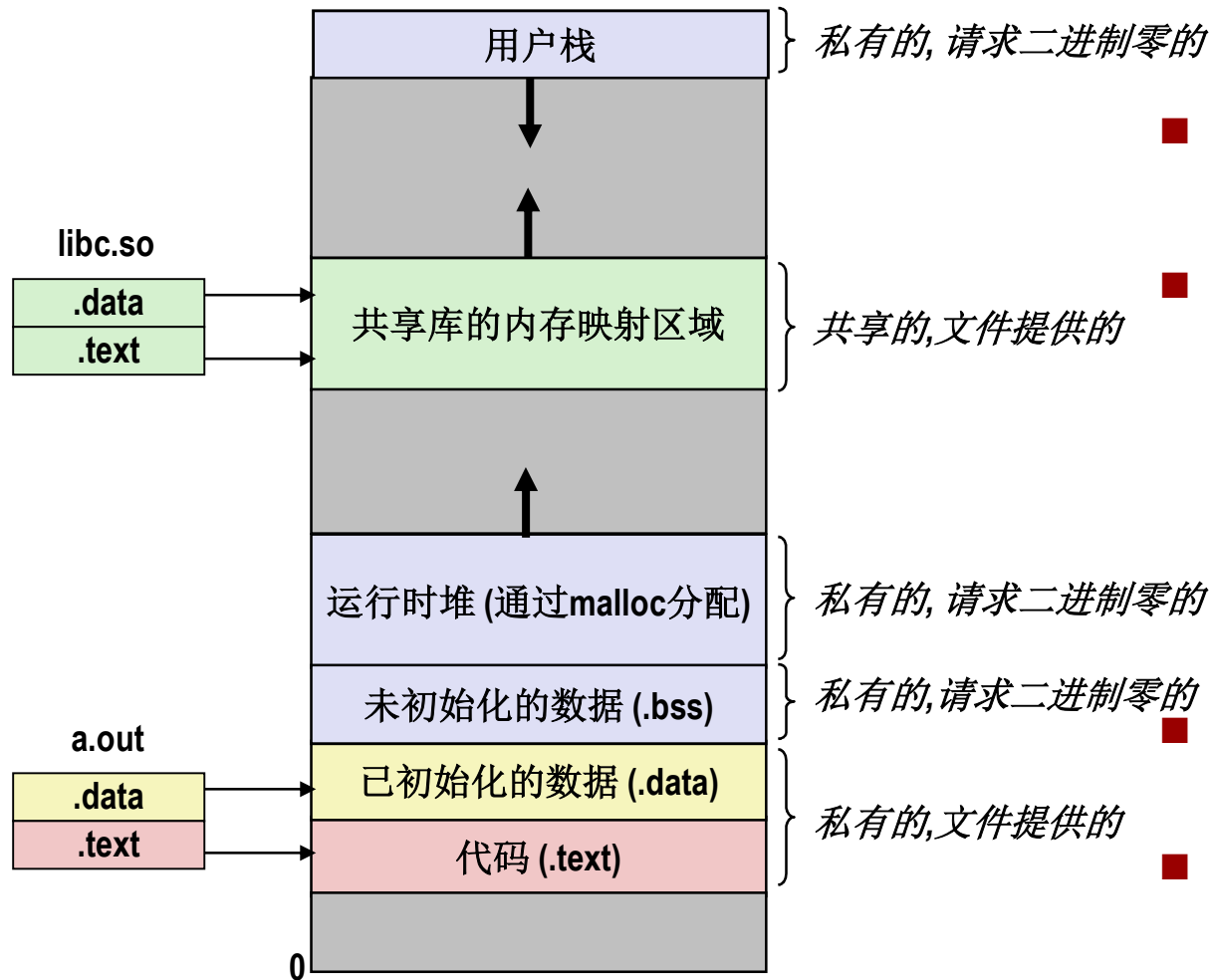
- 写私有页的指令触发保护故障
- 故障处理程序创建这个页面的一个新副本，更新**PTE**条目，且可写
- 故障处理程序返回时重新执行写指令
- 尽可能地延迟拷贝（创建副本）充分利用物理内存

## 再看 **fork** 函数

- 虚拟内存和内存映射解释了**fork**函数如何为每个新进程提供私有的虚拟地址空间.
- 为**新进程**创建虚拟内存
  - 创建**当前进程**的的`mm_struct`, `vm_area_struct`和页表的原样副本.
  - 两个进程中的每个页面都标记为只读
  - 两个进程中的每个区域结构 (`vm_area_struct`) 都标记为私有的写时复制 (COW)
- 在新进程中返回时, 新进程拥有与调用**fork**进程相同的虚拟内存
- 随后的写操作通过写时复制机制创建新页面

# 再看 `execve` 函数

`execve`函数在当前进程中加载并运行新程序 `a.out` 的步骤:



- 删除已存在的用户区域
- 创建新的区域结构
  - 私有的、写时复制
  - 代码和初始化数据映射到 `.text` 和 `.data` 区 (目标文件提供)
  - `.bss` 和栈堆映射到匿名文件, 栈堆的初始长度0
- 共享对象由动态链接映射到本进程共享区域
- 设置 **PC**, 指向代码区域的入口点
  - Linux 根据需要换入代码和数据页面

# 用户级内存映射

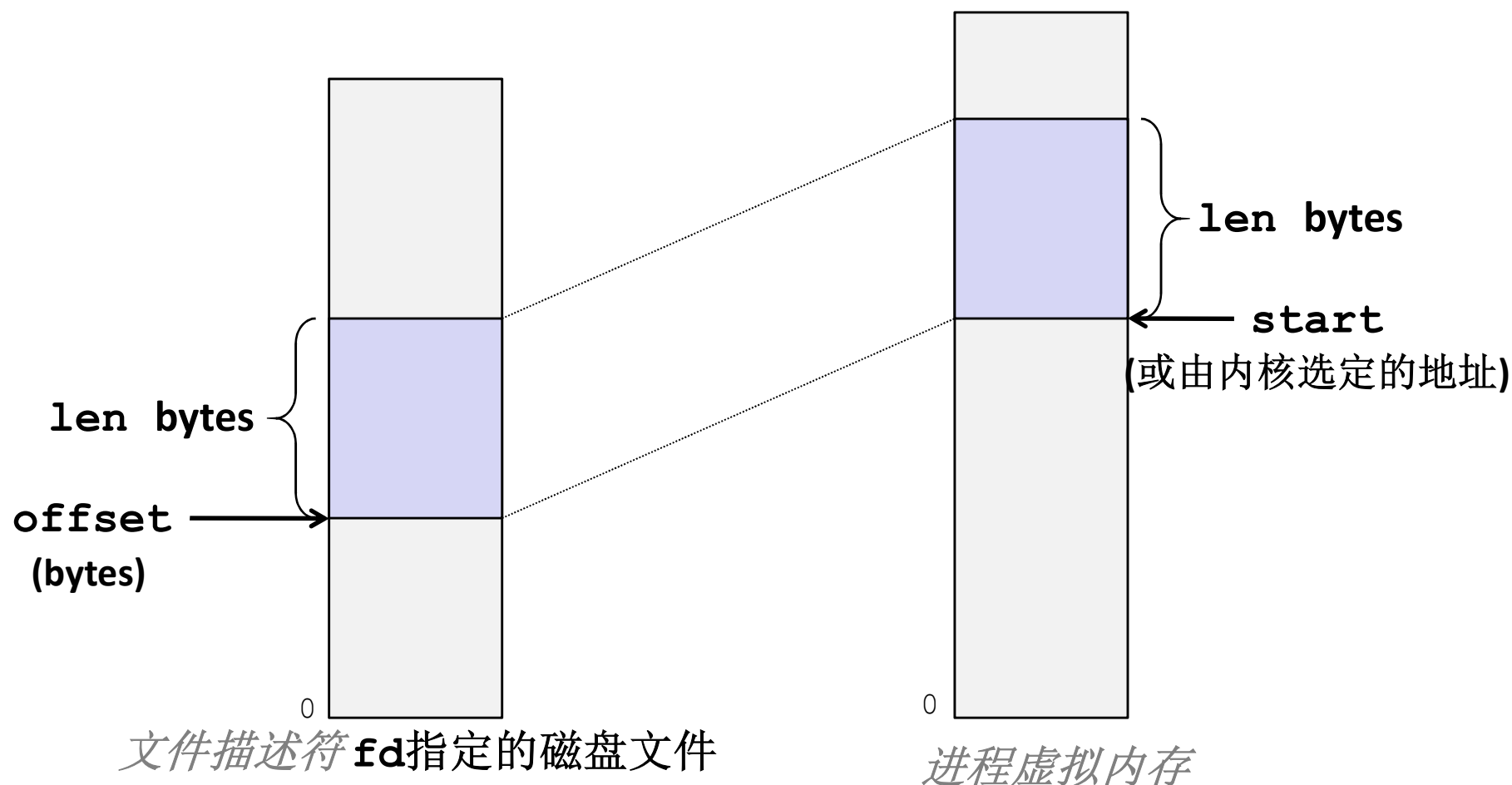
```
void *mmap(void *start, int len,  
           int prot, int flags, int fd, int offset)
```

创建新的新的虚拟内存区域，并将对象映射到这些区域

- 从**fd**指定的磁盘文件的**offset**处映射**len**个字节到一个新创建的虚拟内存区域，该区域从地址**start**处开始
  - **start**: 虚拟内存的起始地址，通常定义为NULL
  - **prot**: 虚拟内存区域的访问权限，PROT\_READ, PROT\_WRITE, ...
  - **flags**: 被映射对象的类型，MAP\_ANON（匿名对象），MAP\_PRIVATE（私有的写时复制对象），MAP\_SHARED（共享对象），...
- 返回一个指向映射区域开始处的指针

# 用户级内存映射

```
void *mmap(void *start, int len,  
           int prot, int flags, int fd, int offset)
```



## Example: 使用 `mmap` 函数拷贝文件

- 拷贝一个文件到 `stdout` （数据没有传输到用户空间）

```
#include "csapp.h"

void mmapcopy(int fd, int size)
{
    /* Ptr to memory mapped area */
    char *bufp;

    bufp = Mmap(NULL, size,
                PROT_READ,
                MAP_PRIVATE,
                fd, 0);
    Write(1, bufp, size);
    return;
}                                     mmapcopy.c
```

```
/* mmapcopy driver */
int main(int argc, char **argv)
{
    struct stat stat;
    int fd;

    /* Check for required cmd line arg */
    if (argc != 2) {
        printf("usage: %s <filename>\n",
               argv[0]);
        exit(0);
    }
    /* Copy input file to stdout */
    fd = Open(argv[1], O_RDONLY, 0);
    Fstat(fd, &stat);
    mmapcopy(fd, stat.st_size);
    exit(0);
}                                     mmapcopy.c
```