北京航空航天大学
Beijing University of Aeronautics and Astronautics

《操作系统》课程

第三章 内存管理

授课教师：孙海龙

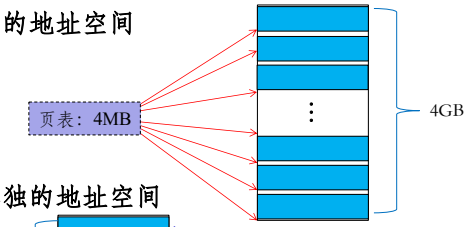
82339063，sunhl@buaa.edu.cn

2023年春季，北航计算机学院

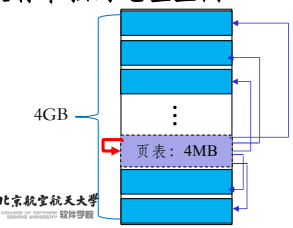
1

思考：页表的虚拟地址如何布局?

- 以一级页表为例：页号：20位 | 偏移：12位
- Case 1: 页表有单独的地址空间



- Case 2: 页表没有单独的地址空间

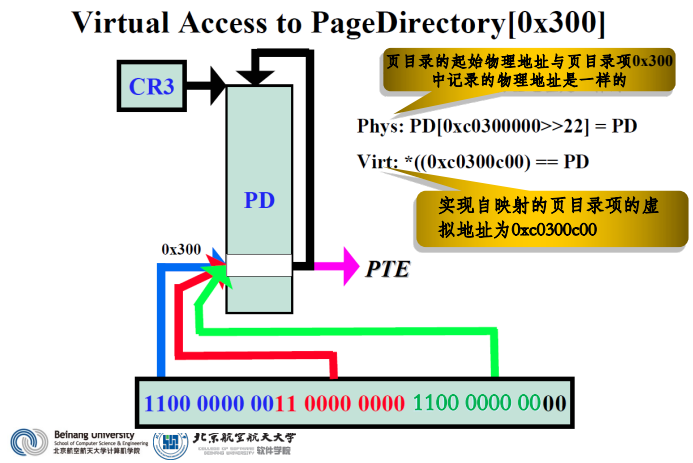


Beihang University 北京航空航天大学

2

2

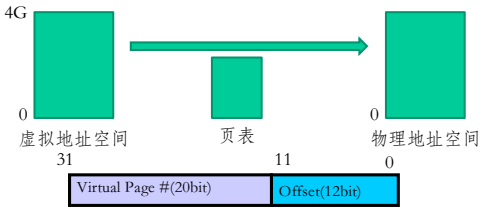
专题：页目录自映射



3

回顾：页式内存管理

- 页表的作用是将虚拟地址空间映射到物理地址空间

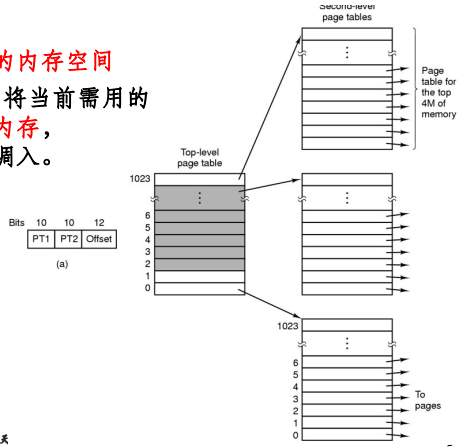


- 32位地址：可寻址空间为4GB
- 采用12位页内偏移，表明内存页大小为4KB
- 每个页表项负责记录1页（4KB）的地址映射关系
- 整个4GB地址空间被划分为4GB/4KB=1M页，所以需要1M个页表项来记录逻辑-物理映射关系

4

多级页表

- 多级页表的动机
  - 节省页表所占用的内存空间
  - 动态调入页表: 只将当前需用的部分页表项调入内存，其余的需用时再调入。
- 例：二级页表
  - 32位地址空间
  - 4K页面大小
  - 1M+1K页表项
  - 地址结构
    - 10 10 12



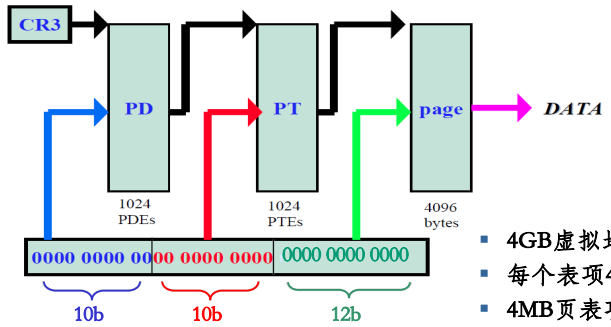
Beihang University 北京航空航天大学 软件学院

5

5

多级页表

Virtual Address Translation



- 4GB虚拟地址空间
- 每个表项4个字节
- 4MB页表项(PTE)
- 4KB页目录表项(PDE)

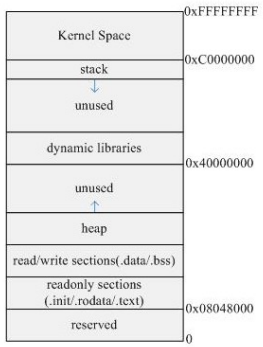
Beihang University 北京航空航天大学 软件学院

6

6

页表管理

- 谁来管理（填写）页表?
  - 当然是OS
- 填写页表目的?
  - 反映内存布局
- 如何填写、修改页表?
  - 读写页表所在内存
  - 用虚拟地址还是物理地址？虚拟地址。



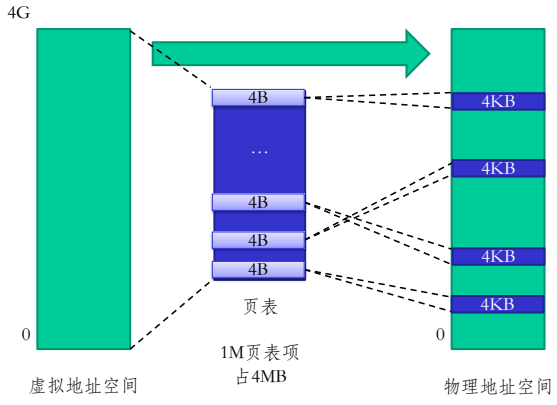
7

```
o                    |      Invalid memory      |   /|\
o                    +--------------------------+----|-------Physics Memory Max
o                    |          ...             |  kseg0
o  VPT,KSTACKTOP-----> +--------------------------+----|-------0x8040 0000-------end
o                    |      Kernel Stack        |    | KSTKSIZE            /|\
o                    +--------------------------+----|------                |
o                    |      Kernel Text         |    |                    PDMAP
o      KERNBASE -----> +--------------------------+----|-------0x8001 0000    |
o                    |   Interrupts & Exception |   \|/                    \|/
o      ULIM      -----> +--------------------------+--------------0x8000 0000-------
o                    |        User VPT          |    PDMAP              /|\
o      UVPT      -----> +--------------------------+--------------0x7fc0 0000    |
o                    |         PAGES            |    PDMAP              |
o      UPAGES    -----> +--------------------------+--------------0x7f80 0000    |
o                    |         ENVS             |    PDMAP              |
o  UTOP,UENVS    -----> +--------------------------+--------------0x7f40 0000    |
o  UXSTACKTOP -/     |     user exception stack |    BY2PG              |
o                    +--------------------------+--------------0x7f3f f000    |
o                    |      Invalid memory      |    BY2PG              |
o      USTACKTOP ----> +--------------------------+--------------0x7f3f e000    |
o                    |     normal user stack    |    BY2PG              |
o                    +--------------------------+--------------0x7f3f d000    |
a                    |                          |                       |
a                    ----------------------------                       |
a                    .                          .                       |
a                    .                          .                     kuseg
a                    .                          .                       |
a                    |--------------------------|                       |
a                    |                          |                       |
o       UTEXT     -----> +--------------------------+                       |
o                    |                          |    2 * PDMAP           \|/
a     0 ------------>  +--------------------------+ ------------------------
o
*/
```

只有4MB，一级页表（即页目录）的4KB去哪里了？

8

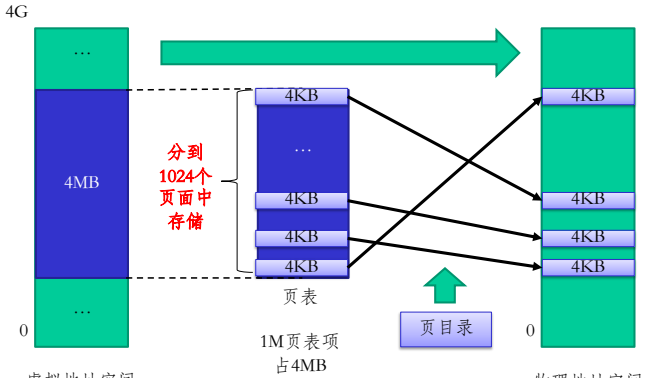
页表映射关系



9

9

页目录-页表映射关系

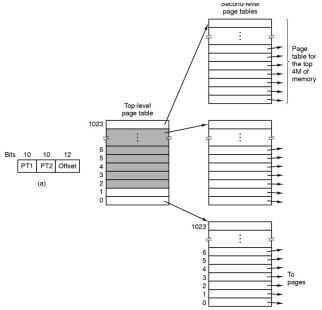


10

10

页目录

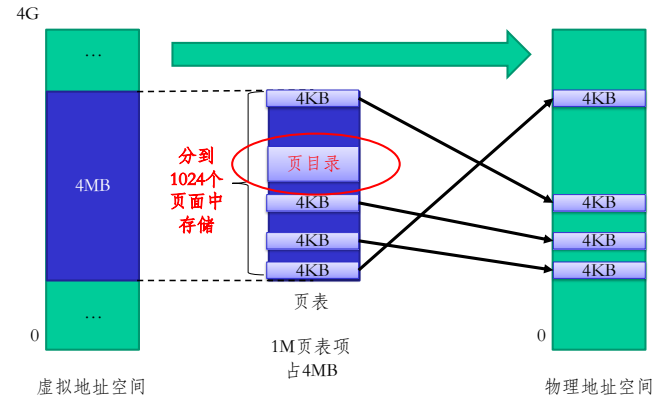
- 页目录定义：页表页的地址映射
  - 1024个页表页逻辑上连续，物理上可以分散，其对应逻辑-物理映射关系记录在页目录中
  - 页目录占1页（4KB）空间，有1024项（页目录项），每一项指向一个页表页
  - 每一页目录项对应4MB内存，1024个页目录项正好对应4GB内存（整个地址空间）
  - 页目录和页表一共应该占据：4KB + 4MB地址空间



页目录自映射

- 关键点
  - 存储页表的4MB地址空间中是整个4GB虚拟地址空间中的一部分，OS设计者可规定其所在位置（4MB对齐）
  - 一方面根据页目录的定义：记录这4MB（连续）地址空间到物理地址空间映射关系的，是一个4KB的页目录
  - 另一方面根据页表页的定义：记录这4MB（连续）地址空间到物理地址空间映射关系的，是一个4KB的页表页（当然，它属于整个4MB页表的一部分）
  - 所以，页目录和上述页表页内容相同，页目录无需额外分配单独的存储空间
    - 4MB + 4KB→4MB?

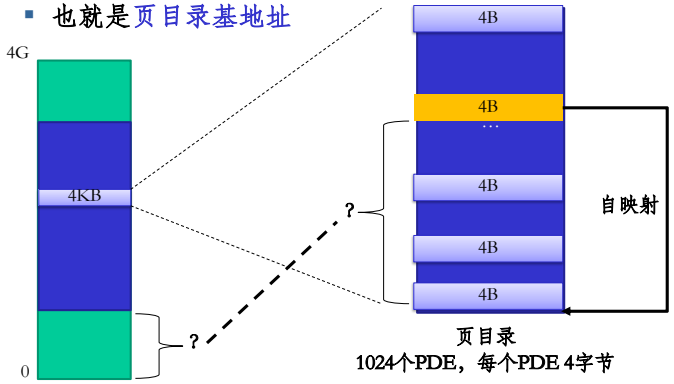
页目录自映射



13

页目录自映射

- 自映射：页目录中有一条PDE指向自身物理地址
- 也就是页目录基地址



14

构建方法

1. 给定一个页表基址PT_{base}，该基址需4M对齐，即：

   $PT_{base} = ((PT_{base}) >> 22) << 22;$

   不难看出，PT_{base}的低22位全为0。

2. 页目录表基址PD_{base}在哪里？

   $PD_{base} = PT_{base} | (PT_{base})>>10$

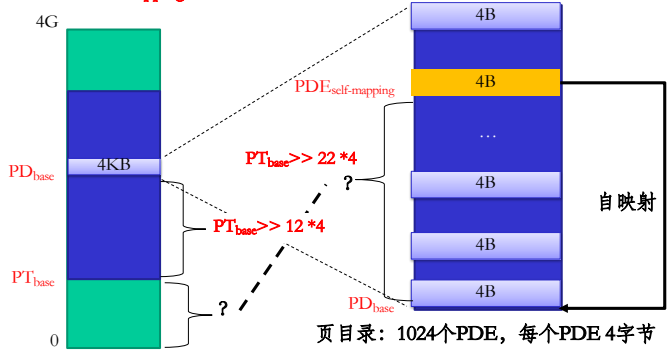
3. 自映射目录表项$PDE_{self\text{-}mapping}$在哪里？

   $PDE_{self\text{-}mapping} = PT_{base} | (PT_{base})>>10 | (PT_{base})>>20$

15

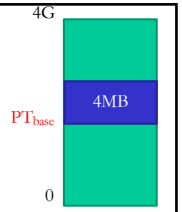
页目录自映射

- $PD_{base} = PT_{base} | (PT_{base})>>10$
- $PDE_{self\text{-}mapping} = PT_{base} | (PT_{base})>>10 | (PT_{base})>>20$



16

思考



- 是不是一定要4M对齐？
- 如果仅考虑映射关系，不是必须的。
- 采用4M对齐，可使页目录表单独地存在于一个页面（页表）中，从使用方便性的角度，是必须的。
- 采用4M对齐，还可以简化计算，各部分地址可以采取“拼接”的方式。
- 思考：4MB对齐的地址有什么特点？以下哪个地址是4MB对齐的
  - 0x7fc0 0000，0x7fd0 0000，0x8020 0000，0x1000 0000

特别强调

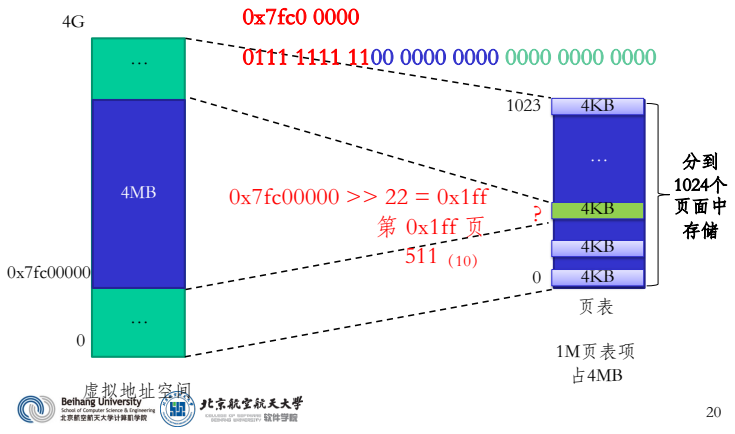
- 只要给定4M对齐的页表基址（虚拟地址），就可以得到所有页表项对应的地址，也就包括页目录表基址和自映射页目录项在页目录表中的位置。因此页目录表基址和自映射页目录项在虚空间中是计算出来的。
- 页表主要供OS使用的，因此页表和页目录表通常放置在OS空间中（如Win的高2G空间）；
- “页目录自映射”的含义是页目录包含在页表当中，是我们采用的映射（或组织）方法的一个特征，是虚拟地址空间内的映射，与虚拟地址到物理地址的映射无关！
- 支持“页目录自映射”可节省4K（虚拟地址）空间

页目录自映射

- 举例：页目录在哪？
  - 给定页表虚拟地址起始位置，例如0x7fc00000
  - 可知，从这个地址开始的4MB是存储页表的空间
  - 这4MB地址空间是整个4GB地址空间中第（0x7fc00000>>22）个4MB地址空间，因此其逻辑-物理映射关系应该记录在第（0x7fc00000>>22）个页表页中

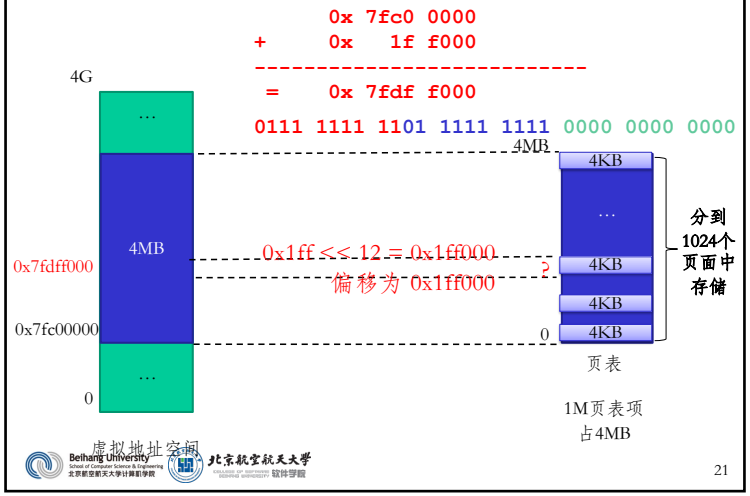
19

页目录自映射



20

页目录自映射



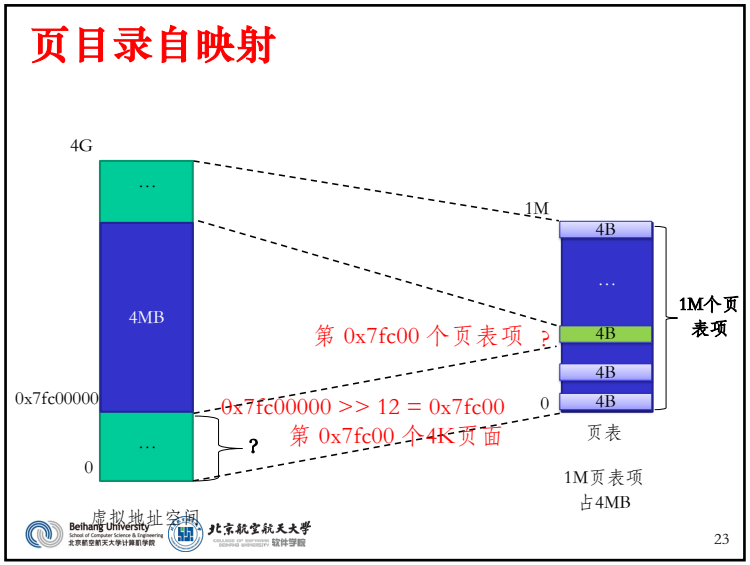
21

页目录自映射

- 页目录在哪？（第二种理解、计算方式）
  - 给定页表虚拟地址起始位置，例如0x7fc00000
  - 将整个4GB地址空间划分为1M个4KB页
  - 上述地址对应于第（0x7fc00000>>12）个4KB页，因此其逻辑-物理映射关系应该记录在第（0x7fc00000>>12）个页表项中
  - 每个页表项4个字节，所以该页表项对于的地址偏移为（0x7fc00000>>12）*4 = 0x1ff000

22

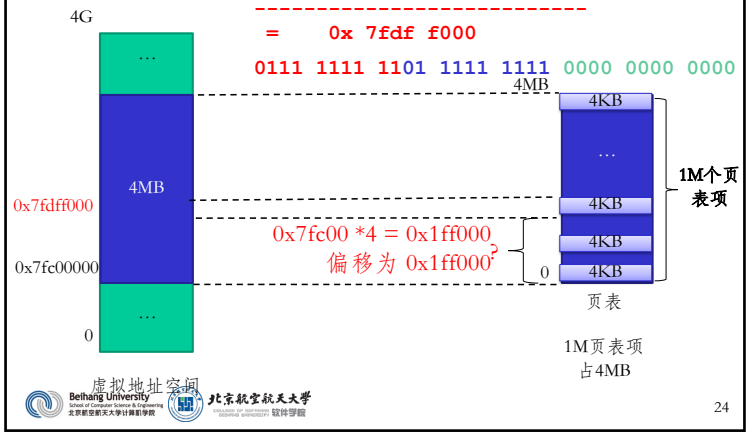
页目录自映射



23

页目录自映射

```
        0x 7fc0 0000
+       0x   1f f000
----------------------------
 =      0x 7fdf f000
0111 1111 1101 1111 1111 0000 0000 0000
```



24

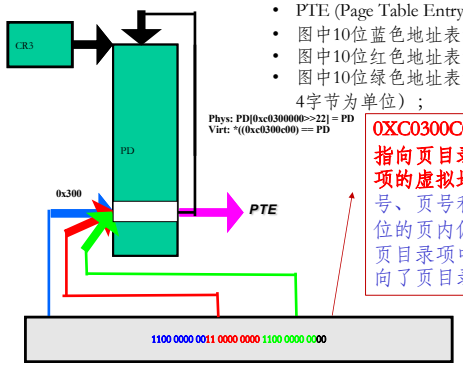
页目录自映射

- 简化计算
  - 对于32位地址字长，2级页表，4KB页面大小
  - 给定页表起始地址（虚拟地址，4MB对齐）b
  - 页目录起始地址 = b+(b>>10) = b+b/1024
- 练习：
  - 页表起始地址0x80000000，页目录起始地址=?
  - 0x80000000 + 0x200000 = 0x80200000
- 反过来：如果给定页目录起始地址，求页表起始地址?
  - E.g. 页目录起始地址0xC0300000，页表起始?

//低22位均为0； 即0XC0000000

自映射机制（X86）

- CR3中存放当前页目录的物理地址；
- PD (Page Directory):页目录；
- PTE (Page Table Entry):页表项；
- 图中10位蓝色地址表示页目录项；
- 图中10位红色地址表示虚拟页号；
- 图中10位绿色地址表示页内偏移（以4字节为单位）；



0XC0300C00这个地址是指向页目录自身的页目录项的虚拟地址，其页目录号、页号和以4字节为单位的页内偏移是相同的，页目录项中的物理页框指向了页目录的物理基地址。

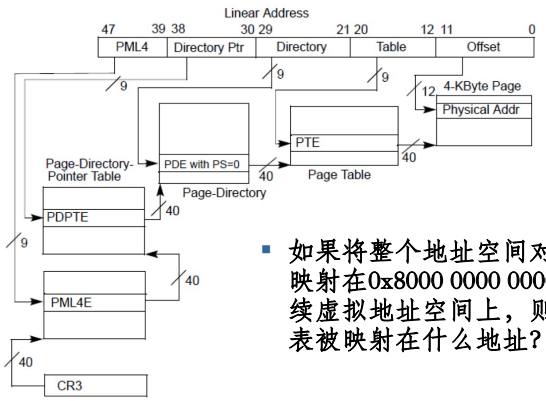
请参考：http://i-web.i.u-tokyo.ac.jp/edu/training/ss/msprojects/data/07-ProcessesThreadsVM.pdf

Windows下地址转换举例：

- 给定一个虚拟地址va = 0x0012F980，如何访问对应物理内存中的内容。
  1. 转换成二进制：va = 0b 00000000 00 010010 1111 1001 10000000
  2. 页目录索引 = 0x0, 页表索引 = 0x12F，偏移 = 0x980
  3. 页表项基地址PTE_BASE = 0xC0000000 （虚地址）
  4. va对应的页表项虚地址=PTE_BASE + 页目录索引*4KB + 页表索引*4 = 0xC00004BC（相当于PTE_BASE + va>>12<<2，注意：va>>12<<2 与va >>10不同）
  5. 假定从0xC00004BC中得到的内容为0x09DE9067，其中低12位为状态标志，高20位为页框号（即0x09DE9）
  6. va对应的物理地址为 (0x09DE9 << 12) + 0x980 = 0x09DE9980

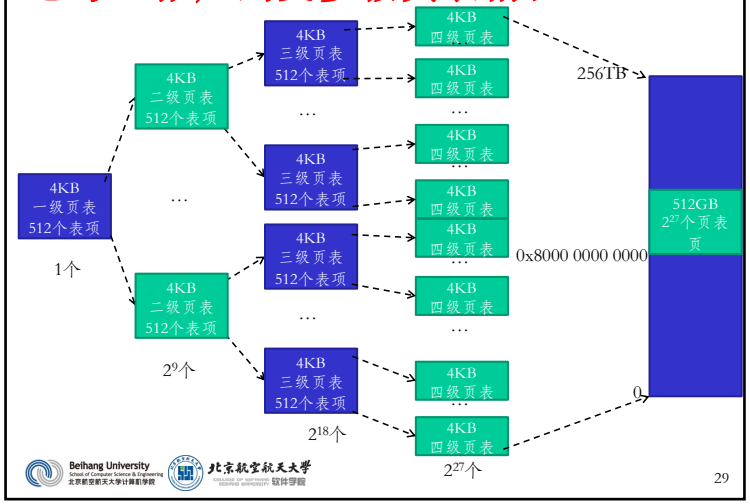
思考：推广到更多级页表情况

- 一个48位页式存储系统，采用4级页表：



- 如果将整个地址空间对应的页表映射在0x8000 0000 0000起始的连续虚拟地址空间上，则第一级页表被映射在什么地址？

思考：推广到更多级页表情况



29

思考：推广到更多级页表情况

- 整个地址空间大小：256 TB = 2^{48} B
- 页大小4KB，每个页表项占8字节
- 页表数量：共有1个一级页表，2^9个二级页表，2^{18}个三级页表，2^{27}个四级页表
- 2^{27}个四级页表映射在整个地址空间中一段连续的2^9GB地址空间上，起始地址是0x8000 0000 0000
- 实际上，2^{18}个三级页表也是连续的，是四级页表的一个子集；2^9个二级页表也是连续的，是三级页表的一个子集（当然也是整个四级页表的子集）；1个一级页表是上述二级页表的子集（当然最终也是整个四级页表的子集）。也就是说，那个一级页表是整个2^{27}个四级页表中的一个。问题是：是哪个？

30

思考：推广到更多级页表情况

- 因为：页表映射起始地址是0x8000 0000 0000

```
    0x 8000 0000 0000     x
+   0x   40 0000 0000     x >> 9
+   0x      2000 0000     x >> 18
+   0x        10 0000     x >> 27
----------------------
=   0x 8040 2010 0000     页目录基址
```

31

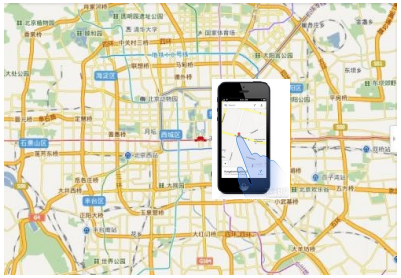
小结

- 自映射是Windows操作系统对内存管理的一种实现机制
- 对于32位地址空间来说：
  - 前10位用于指定页目录号，因此一共有1个页目录，其中包括1024个页目录项，即对应1024个页表；页目录一共占1024*4 = 4KB空间。
  - 中间10位用于指定页号，因此每个页表有1024个页表项，一共有1024*1024个页表项；页表一共占1024*1024*4 = 4MB空间。
  - 在自映射机制下，从4GB地址空间中拿出4MB空间存放1024个页表；同时，从1024个页表中拿出一个页表用于存放页目录；这样页目录和页表一共占4MB，而这4MB空间又是4GB空间的一部分，不必单独分配4MB + 4KB来存放页目录和页表。
- 核心问题：1024个页表中哪个页表用来存放页目录？页目录中的哪个页目录项指向页目录自身？
  - 要求：保证虚拟地址是线性、连续的

32

自映射的数学意义

- 地图的比喻
  - 手持北京地图在北京
  - 必有地图上一点与其表示的地理位置与该点的实际地理位置重合



- 不动点：f(x) = x
  - 压缩映像

Beihang University 北京航空航天大学计算机学院 北京航空航天大学 软件学院

33

33

北京航空航天大学 Beijing University of Aeronautics and Astronautics

Q&A

微信群/课程中心论坛

sunhl@buaa.edu.cn

34

34

基本功练习1

- 1 KB = 1024 B = 2^{10} B
- 4 KB = 4096 B = 2^{12} B
- 1MB = 2^{20} B
- 4MB = 2^{22} B

以下用最大字节单位

- 2^{16} B = 64KB
- 2^{32} B = 4GB
- 2^{64} B = 16EB

- 2^{10} B = 1KB
- 2^{20} B = 1MB
- 2^{30} B = 1GB
- 2^{40} B = 1TB
- 2^{50} B = 1PB
- 2^{60} B = 1EB
- 2^{70} B = 1ZB

Beihang University 北京航空航天大学 35

35

基本功练习2

- 十六进制数0x12345678转成二进制有 29 位
- 0x12345678 >> 12 = 0x12345
- 0x80000000 >> 22 = 0x200
- 0x1000 = 4096 (10) = 4 K
- 16K = 0x 4000 ; 64K = 0x 10000
- 1M = 0x 100000 ; 4M = 0x 400000
- 1G = 0x 40000000 ; 2G = 0x 80000000
- 3G = 0x C0000000 ; 4G = 0x 100000000

Beihang University 北京航空航天大学 36

36

页目录自映射

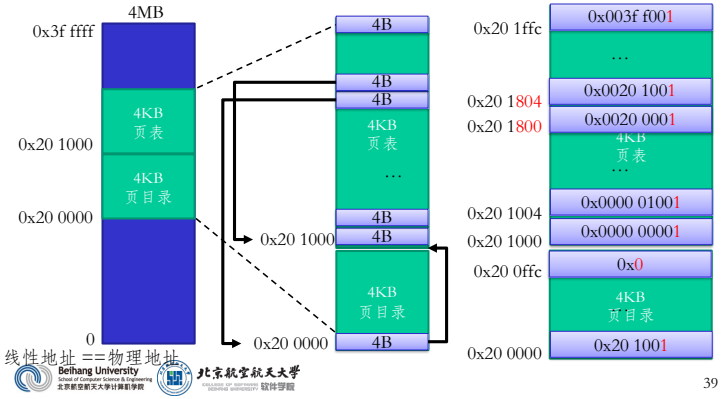
- 页表在虚拟地址空间中映射
  - 每个页表项需要4字节，所以1M个页表项需要4MB，所以整个页表占用的地址空间大小就是4MB
  - 4MB页表也要分页存储，共需要4MB/4KB=1024个页面存储（页表页）
  - 每一页中存储4KB/4B=1024项页表项
  - 由于1个页表项对应4KB内存，所以每1个页表页对应1024*4KB=4MB内存

X86初始系统页表建立

- X86 CPU引导时处于实模式。
- 开启分页（Enable Paging）前，CPU使用物理地址寻址
- 进入保护模式后，可以开启分页，此时CPU将开始使用线性地址寻址。线性地址需要由MMU根据页表翻译成物理地址。
- 问题：怎么实现切换?
- 一个思路：事先构造页表，初始化一部分线性地址空间，使得该空间内的虚拟地址等于物理地址。
  - 例如:虚拟地址0x0000 0000～ 0x0040 0000（4MB）直接映射到物理地址0x0000 0000～ 0x0040 0000 （4MB）
  - 页表怎么构造?

X86初始系统页表建立

- 在0x20 0000地址处分配2个4K页面，存储页目录和页表。启用分页后，如下页表保证线性地址 == 物理地址 （4MB以内）



39