

1. 简述现代计算机系统需要存储层级的原因。

1. 存储器价格和速度的差异：随着存储技术的不断发展，存储器的价格和速度存在很大的差异。高速存储器的价格昂贵，而且容量较小，而低速存储器的价格相对较低，容量较大。

2. 访问时间的差异：不同级别的存储器访问时间存在很大的差异。高速存储器的访问时间非常短，而低速存储器的访问时间较长。

2. 在页式虚拟存储中，过大或过小的页分别会引起什么问题？

答：① 过大的页：当页大小过大时，一个进程所需要的地址空间可能只包含很少的页数。同时，当一个进程只需要访问地址空间中的一部分时，由于一个页的大小过大，系统不得不将整个页调入内存，这会浪费内存空间。

② 过小的页：每个进程所需要的页数变得很多，这会增加表的大小，并且可能导致页表所需的内存空间超出系统的限制。同时，由于一个页大小过小，每个进程需要访问的地址空间可能会包含更多个页，这会增加缺页中断的次数，降低系统的性能。

3. 页表条目除了保存物理页号外，一般还包含各种状态和权限标记位。它们为内存访问提供了各种细粒度的控制。例如，RISC-V 指令集的 Sv32 页表条目具有如下的形式：

31	20	19	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0			
PPN[1]				PPN[0]				RSW	D	A	G	U	X	W	R	V
12				10				2	1	1	1	1	1	1	1	1

- 1) 查阅 RISC-V 规范，简要描述上述条目中的位 7 至位 0 具有什么功能。
- 2) 结合上述功能讨论：如果用户进程能够自由修改自己的页表，会发生什么问题？
- 3) 在 RISC-V 的虚拟内存管理中，一个 X/W/R 位全部为 0 的有效页表条目有什么含义？

解：(1) D-Dirty，表示该页是否被改写；为 1 时，表示被改写。

A-Accessed，表示该页是否可访问；为 1 时，表示可被访问。

G-Global，表示是否为共享页面；为 1 时，表示为共享页面；

U-User，表示用户模式是否可访问；为 1 时，表示用户模式可访问。

X-是否可执行，W-是否可写，R-是否可读。

V-Valid，表示物理页在内存中是否分配好；为 1 时，表示已分配好。

(2) 若用户进程能够修改页表，则可能导致上述标志位发生错误地改变，使得页发生错误，影响进程的正常工作。

(3) 如果 X/W/R 均为 0，意味着 pointer to next level of page table (指向页表下一级的指针)

4. RISC-V 的物理内存保护 (PMP) 机制允许硬件线程为特定的物理内存区域指定访问权限, 其配置寄存器有如下的形式:

7	6	5	4	3	2	1	0
L (WARL)	0 (WARL)	A (WARL)	X (WARL)	W (WARL)	R (WARL)		
1	2	2	1	1	1		

查阅 RISC-V 规范, 回答以下问题:

- 1) 在页表条目中已经存在 X/W/R 位的情况下, PMP 控制寄存器中的 X/W/R 位有什么作用?
- 2) 说明 PMP 配置寄存器中的 L 和 A 位有什么作用。

解: (1) 页表条目中的 X/W/R 表示该页的可执行性、可读性和可写性。

PMP 配置寄存器中的 X/W/R 表示表项匹配地址的可执行、可写性和可读性。

(2) A: 表项的匹配模式:

00: OFF, 无效表项;

01: TOR, 使用相邻表项的地址作为匹配区间的模式

10: NA4, 区间大小为 4 字节的匹配模式

11: NAPOT, 区间大小为 2 的幂次方的匹配模式, 至少为 4KB。

L: 表项的 Lock 使能位

0: 机器模式的访问都将成功, 系统模式/用户模式的访问根据 R/W/X 判定是否成功。

1: 表项被锁住, 无法对相邻表项进行修改, 若为 TOR 模式, 则其前一个表项的地址寄存器也无法修改。

5. 回答以下问题:

- 1) 如果页大小为 4KB, 每个页表条目使用 8 字节空间, 内存系统按字节寻址。则使用完整的 64 位虚拟地址时, 一个单级页表系统需要多大的空间用于存储页表?
- 2) 实际上, 多数真实系统仅限制使用 64 位系统的一部分位作为有效的访存空间, 例如 Sv48 即仅使用 48 位的虚拟地址空间, 则保持其他假设不变时, 一个单级页表系统存储页表所需要的空间被降低到多少?
- 3) 多级页表为什么可以降低虚拟内存系统的实际页表存储开销?

解: (1) $2^{64} \div 2^{12} = 2^{52}$ 页

页表有 2^{52} 个表项 $2^{52} \times 8 \text{Byte} \div 4 \text{KB} = 2^{43} = 8 \text{TB}$

(2) $2^{48} \div 2^{12} = 2^{36}$ 页

$2^{36} \times 8 \text{B} \div 4 \text{KB} = 2^{21} = 512 \text{MB}$

(3) 多级页表 将寻找页的次数增加为几次;将页表分割成多个较小的部分来降低每个页表的大小;从而减少存储所需的内存空间;

在单级页表中,操作系统需要维护一个包含所有虚拟地址和物理地址之间映射关系的大型页表,其中每个虚拟地址都需要对应一个物理地址。这意味着页表的大小需要与虚拟内存的大小相同,因此大型系统中,页表可能需要占用相当大的内存空间。

相比之下,多级页表将页表分为多个较小的部分,每个部分只包含一部分虚拟地址映射关系;每个部分比单级页表小得多。