

## 第十一周作业

### 1. 简述现代计算机系统需要存储层级的原因。

随着现代处理器性能的不断攀升，处理器和内存之间的速度差距不断扩大，形成了“内存墙”的问题。因此现代计算机引入多级分层存储结构和缓存系统，利用数据的时间局部性和空间局部性来改善访存性能。可以将数据存储在层级不同的存储介质中，可以根据数据的访问频率和访问速度要求，选择合适的存储介质，比如 Cache 最快，而内存较慢。

### 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？

(1) 过大：导致内存浪费和内部碎片的产生。如果页的大小过大，每个进程所需要的页数减少，导致内存浪费。如果进程所需的内存不足一页，会出现内部碎片，浪费内存空间。

(2) 过小：每个进程所需要的页数增加，导致内存中产生空闲块。同时，每个进程需要的页表增加，从而增加了页表的维护成本。

### 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？

(1) 页表条目的 0-7 位分别有如下功能：

位 0 (V)：有效位，表示该页表条目是否有效。如果该位为 0，则表示该页表条目无效，否则为有效。

位 1 (R)：读取权限位，表示该页表条目是否具有读取权限。如果该位为 0，则表示该页表条目没有读取权限，否则为有读取权限。

位 3 (X)：执行权限位，表示该页表条目是否具有执行权限。如果该位为 0，则表示该页表条目没有执行权限，否则为有执行权限。

位 4 (U)：用户/内核权限位，表示该页表条目是否具有用户权限。如果该位为 0，则表示该页表条目只能被内核访问，否则为可被用户访问。

位 5 (G)：全局位，表示该页表条目是否为全局页表条目。如果该位为 1，则表示该页表条目是全局页表条目，否则为非全局页表条目。

位 6 (A)：访问位，表示该页表条目是否被访问过。如果该位为 1，则表示该页表条目被访问过，否则为未被访问过。

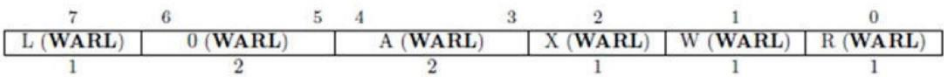
位 7 (D)：脏位，表示该页表条目是否被修改过。如果该位为 1，则表示该页表条目被

修改过，否则为未被修改过。

(2) 如果用户进程能够修改页表，会出现安全性和系统稳定性问题。首先，修改页表可能可以获取系统中其他进程的内存数据，这会导致系统的安全性受到威胁。其次，修改页表可能会破坏系统的内核数据和结构，破坏系统的稳定性。因此，为了保证系统的安全性和稳定性，操作系统需要对用户进程的页表进行严格的控制和管理，防止用户进程对系统造成损害。

(3) 一个 x/w/r 位全部为 0 的有效页表条目表示该页表条目不能被用户读取、写入或执行，没有任何访问权限，只能被内核进程访问。通常出现在操作系统内核区域的页表中，因为内核区域的页表通常不允许用户进程进行任何访问。这样是为了保护系统的安全性和稳定性，防止用户进程对内核区域进行非法访问或修改。

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：



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。

(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 位的作用是：进一步限制对页表条目的访问权限，从而提高系统的安全性和稳定性；实现内存保护和隔离，防止不同进程之间的内存相互干扰。

(2) RISC-V 的 PMP 配置寄存器中的 L 位和 A 位是用来控制内存保护的。  
L 位：决定是否启用对应的物理内存段保护。当 L 位被设置为 1 时，对应的物理内存段将被保护，当 L 位被设置为 0 时，则表示该内存段没有被保护。  
A 位：通过不同的取值来实现不同的内存保护策略，如只读、只执行、读写等。具体的保护策略可以通过不同 A 位取值的组合来进行配置。

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？

(1) 一个页表可以存储  $4\text{KB} / 8\text{B} = 512$  个页表条目。

一个 64 位虚拟地址可以表示  $2^{64}$  个不同的地址，需要  $2^{64}$  个页表条目来映射所有可能的地址。

一个单级页表系统需要存储的页表大小为  $2^{64} * 8\text{B} = 2^{67}\text{B}$

(2)  $2^{48} * 8 = 2^{51}\text{B}$

(3) 多级页表可以降低虚拟内存的时机页表存储开销，主要因为它采用了分层递进的方式进行地址映射。

多级页表把虚拟地址的一部分用作主索引，指向更大的目录表；目录表中的项指向更小的页表，直到最后一级页表中的项直接指向物理内存。因此，每级页表仅需要存储当前级别的页表所占用的内存块的指针和标志位，而不需要存储整个虚拟地址所对应的页表项，这大大降低了虚拟地址所对应的页表存储开销。

同时，多级页表还可以减小页面大小对页表开销的影响，因为在更高的级别中，每个内存页能够映射更多虚拟地址空间，从而不需要增加更多的目录表或页表，这使得虚拟内存管理更加高效。

多级页表虽然需要更多的地址转换步骤，但是通过分层递进的方式降低了每级页表的存储开销，在实际应用中提高了虚拟内存的管理效率。