

1. 简述现代计算机需要层级储存的原因

- 1) 处理器的运算速度远远高于内存的读写速度，如果处理器直接访问内存，会造成极大的性能瓶颈。为了弥补处理器与内存速度之间的差距，我们需要通过增加更快的存储器层级来提供更高的访问速度。
- 2) 越快的存储器通常越昂贵，容量也更小。与此同时，存储器容量的需求也在不断增加。为了在成本和容量之间找到平衡，我们需要采用层级存储，以便将数据按照其访问频率和大小分层次地存储在不同的存储器层级中。通过这种方式，我们可以最大限度地减少计算机成本，并获得足够的存储容量和较高的性能。

2. 在页式储存中，页过大过小会产生什么问题？

如果页过大，可能会导致以下问题：

- 1) 内存利用率低：因为每个进程所需的内存总量是不确定的，如果页大小过大，可能会出现内存浪费的情况，因为一些进程只使用了页的一部分，但整个页都要被分配。
- 2) 内部碎片：当进程所需的内存小于一个页时，分配给该进程的整个页中可能有很多空闲空间，这些空闲空间无法被其他进程利用，造成内部碎片。
- 3) 缺页率高：如果页大小过大，每次访问一个新的页时，可能会导致更多的页错误，因为需要将更多的页从磁盘读入内存。

如果页过小，可能会导致以下问题：

- 1) 内存开销增加：如果页大小过小，需要更多的页来管理同样数量的内存，这将导致更多的内存开销。
- 2) 上下文切换开销增加：当一个进程的工作集大小大于一个页时，这个进程将会有很多页错误，这会导致频繁的上下文切换，因为当一个进程被抢占时，它的所有页表项必须保存在内存中，以便它再次运行时可以继续使用。

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：

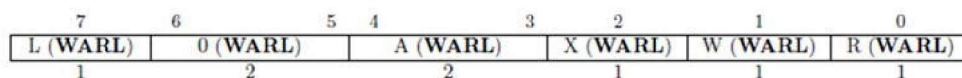
31	20	19	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
PPN[1]												PPN[0]	
RSW												D	A
												G	U
												X	W
												R	V
												1	1

- 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) Valid (位 0)：指示该页表项对应的物理页是否存在，若为 0 则表示该页未分配或已被回收。
Read (位 1)：指示是否允许读取该页。
Write (位 2)：指示是否允许写入该页。
eXecute (位 3)：指示是否允许在该页中执行指令。
User (位 4)：指示是否允许用户级别的程序访问该页。
Global (位 5)：指示该页是否被标记为全局页，即该页被所有进程共享。
Accessed (位 6)：指示该页是否已被访问过，当该页被访问时，该位会被自动置 1。
Dirty (位 7)：指示该页是否已被修改过，当该页被写入时，该位会被自动置 1。
- 2) 如果用户能够自由修改自己的页表，那么可能会出现安全问题。例如，用户可以将别的

进程的页表项指向自己的页框，这样就可以获取该进程的私有数据。因此，在实际的操作系统中，页表一般由操作系统内核来管理，用户无法直接修改页表。

- 3) 如果一个页表项的 X/W/R 位全部为 0，则表示该页表项无效，访问该页会触发一个异常。在 RISC-V 中，当访问一个无效页表项时，会触发一个页错误异常 (page fault)，操作系统内核会根据页错误异常的原因进行处理，例如，将相应的物理页分配给该页表项。

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) 在页表项中，X/W/R 位是用于描述该页的可读可写可执行权限。而在 PMP 机制中，X/W/R 位则是用于描述该物理内存区域的可读可写可执行权限。当一个硬件线程访问该物理内存区域时，PMP 机制会与页表项中的权限进行比较，以确定是否有访问权限。
 - 2) PMP 配置寄存器中的 L、A 位分别有以下作用：
 L (Lock): 该位表示该 PMP 配置是否可被软件修改。当该位为 1 时，软件无法修改该配置。
 A (Address): 该位表示该 PMP 配置是否启用。当该位为 0 时，该配置不起作用，硬件线程可以访问该物理内存区域。

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) 如果每个页表项使用 8 字节，一个 4KB 大小的页可以包含 512 个页表项，因此一个单级页表系统最多可以寻址 512 个 4KB 的页面。因此，一个单级页表系统需要的空间为： $4KB * 512 = 2MB$ 。
 - 2) 如果一个 64 位系统仅使用 48 位作为有效的访存空间，那么一个单级页表系统最多可以寻址 2^{48} 个页面。由于一个 4KB 页面需要 12 位的寻址位，因此一个单级页表系统可以寻址的页面数为 $2^{(48-12)} = 2^{36}$ ，需要的空间为 $4KB * 2^{36} = 64GB$ 。
 - 3) 多级页表可以降低虚拟内存系统的存储开销，因为它可以将页面表分为多个小的页面表，并将这些小页面表放在内存的不同位置。这样，虚拟内存系统可以将不活跃的页面表从内存中移除，并将活跃的页面表保留在内存中。因此，多级页表可以降低虚拟内存系统中需要保留的页面表数量，从而降低存储开销。