

1. 阐述现代计算机系统需要存储器层级的原因。

要同时构建高速和大容量的存储器是无法完成的工作，而使用存储器可以缓解内存墙对处理器性能的影响。计算机系统可以通过存储器层级在不同存储器件的成本与性能之间获得平衡的选择，还可以利用两种局部性原理，即时间局部性（temporal locality）和空间局部性（spatial locality）。在构建存储器层级，使得以最低的价格提供最大的存储，同时访问速度与最快的存储相当。

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？

页过大：可能会造成内存浪费，产生内部碎片。

页过小：则页内偏移量小，相应的页号长度和页表条目则会增加，导致页表过大，甚至无法装入内存，地址映射的开销也会增加。

3. 从虚到实：

(1) V位：决定该表项其余部分是否有效

R, W, X位：分别表示此页是否可读取、写入、执行

U位：表示该页是否为用户页面， $U=0$ 说明U模式不可访问

G位：表示这个映射是否对所有虚拟空间有效

A位：表示自上次A位被清除以来该页面是否被访问过

D位：表示从上次清除D位以来页面是否被写入（如写入）

(2) 如果用户自由修改自己的页表，则内存空间的安全性和进程保护等都会出现问题，这可能造成用户进程修改页表后访问不属于其进程

的内存空间，甚至修改操作系统的内核，使得存储空间无法继续被安全地共享，甚至引发系统崩溃。

(3) 如果 R, W, X 3位都是 0，表示这个页表项是指向下一級页表的指针。

4. PMP的X/W/R位与页表有相似功能，但页表的X/W/R位仅控制对虚拟内存的访问权限，而PMP的权限位则控制了实际对物理内存的访问，二者在不同层次确保了访问的安全性。

(2) L位：Locked，当L位被设置，对应的PMP条目将被锁定而无法修改，除非系统重启

A位：Address Matching，定义了PMP的地址匹配类型，根据类型不同可以表示普通PA、NAPOT、NAP、TOR等匹配模式。

5. (1) 若页表大小为9KiB，则 $4\text{KB} = 2^{12}$ ，页偏置为12位，虚拟页号为 $69 - 12 = 57$ 位，因此页表项数为 2^{57} ，而每个页表项为8个字节64位宽，因此所需存储空间为 $2^{57} \times 8 = 2^{55} \text{ B} = 32 \text{ PiB}$

2) 当虚拟地址为48位时，表项为 2^{36} 个， $2^{36} \times 8 = 2^{39} \text{ B} = 0.5 \text{ TiB}$

3) 使用多级页表时，每一层的页表都很小，例如对(2)中的情况使用4级页表，转换每步都使用9位虚拟地址来查找下一级表，则一个表仅需512个表项就可以填充一个9KiB的页，使内存占用减少。