

本节内容

页面置换算 法

王道考研/CSKAOYAN.COM

知识总览

请求分页存储管理与基本分页存储管理的主要区别：

在程序执行过程中，当所访问的信息不在内存时，由操作系统负责将所需信息从外存调入内存，然后继续执行程序。

若内存空间不够，由操作系统负责将内存中暂时用不到的信息换出到外存。

用页面置换算法
决定应该换出哪
个页面

页面置换算法

最佳置换算法 (OPT)

先进先出置换算法 (FIFO)

最近最久未使用置换算法 (LRU)

时钟置换算法 (CLOCK)

改进型的时钟置换算法

页面的换入、换出需要磁盘 I/O，会有较大的开销，因此好的页面置换算法应该追求更少的缺页率

王道考研/CSKAOYAN.COM

最佳置换算法 (OPT)

最佳置换算法 (OPT, Optimal)：每次选择淘汰的页面将是以后永不使用，或者在最长时间内不再被访问的页面，这样可以保证最低的缺页率。

例：假设系统为某进程分配了三个内存块，并考虑到有一下页面号引用串（会依次访问这些页面）：

7, 0, 1, 2, 0, 3, 0, 4, 2, 3, 0, 3, 2, 1, 2, 0, 1, 7, 0, 1

访问页面	7	0	1	2	0	3	0	4	2	3	0	3	2	1	2	0	1	7	0	1
内存块1	7	7	7	2		2		2		2		2		2		7				
内存块2		0	0	0		0		4		0		0		0		0		0		
内存块3			1	1		3		3		3		3		1		1		1		
是否缺页	✓	✓	✓	✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		

选择从 0, 1, 7 中淘汰一页。按最佳置换的规则，往后寻找，最后一个出现的页号就是要淘汰的页面

整个过程缺页中断发生了9次，页面置换发生了6次。

注意：缺页时未必发生页面置换。若还有可用的空闲内存块，就不用进行页面置换。

$$\text{缺页率} = 9/20 = 45\%$$

王道考研/CSKAOYAN.COM

最佳置换算法 (OPT)

最佳置换算法 (OPT, Optimal)：每次选择淘汰的页面将是以后永不使用，或者在最长时间内不再被访问的页面，这样可以保证最低的缺页率。

最佳置换算法可以保证最低的缺页率，但实际上，只有在进程执行的过程中才能知道接下来会访问到的是哪个页面。操作系统无法提前预判页面访问序列。因此，最佳置换算法是无法实现的。

王道考研/CSKAOYAN.COM

先进先出置换算法 (FIFO)

先进先出置换算法 (FIFO)：每次选择淘汰的页面是最早进入内存的页面

实现方法：把调入内存的页面根据调入的先后顺序排成一个队列，需要换出页面时选择队头页面即可。队列的最大长度取决于系统为进程分配了多少个内存块。

例：假设系统为某进程分配了三个内存块，并考虑到有以下页面号引用串：

3, 2, 1, 0, 3, 2, 4, 3, 2, 1, 0, 4

访问页面	3	2	1	0	3	2	4	3	2	1	0	4
内存块1	3	3	3	0	0	0	4			4	4	
内存块2		2	2	2	3	3	3			1	1	
内存块3			1	1	1	2	2			2	0	
是否缺页	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓	



分配三个内存块时，缺页次数：9次

王道考研/CSKAOYAN.COM

先进先出置换算法 (FIFO)

先进先出置换算法 (FIFO)：每次选择淘汰的页面是最早进入内存的页面

实现方法：把调入内存的页面根据调入的先后顺序排成一个队列，需要换出页面时选择队头页面即可。队列的最大长度取决于系统为进程分配了多少个内存块。

例：假设系统为某进程分配了四个内存块，并考虑到有以下页面号引用串：

3, 2, 1, 0, 3, 2, 4, 3, 2, 1, 0, 4

访问页面	3	2	1	0	3	2	4	3	2	1	0	4
内存块1	3	3	3	3			4	4	4	4	0	0
内存块2		2	2	2			2	3	3	3	3	4
内存块3			1	1			1	1	2	2	2	2
内存块4				0			0	0	0	1	1	1
是否缺页	✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓	✓	✓	✓

分配四个内存块时，
缺页次数：10次
分配三个内存块时，
缺页次数：9次

Belady 异常——当为进程分配的物理块数增大时，缺页次数不减反增的异常现象。

只有 FIFO 算法会产生 Belady 异常。另外，FIFO 算法虽然实现简单，但是该算法与进程实际运行时的规律不适应，因为先进入的页面也有可能最经常被访问。因此，算法性能差

王道考研/CSKAOYAN.COM

最近最久未使用置换算法 (LRU)

最近最久未使用置换算法 (LRU, least recently used)：每次淘汰的页面是最近最久未使用的页面。
实现方法：赋予每个页面对应的页表项中，用访问字段记录该页面自上次被访问以来所经历的时间t。
当需要淘汰一个页面时，选择现有页面中t值最大的，即最近最久未使用的页面。

页号	内存块号	状态位	访问字段	修改位	外存地址
----	------	-----	------	-----	------

例：假设系统为某进程分配了四个内存块，并考虑到有以下页面号引用串
1, 8, 1, 7, 8, 2, 7, 2, 1, 8, 3, 8, 2, 1, 3, 1, 7, 1, 3, 7

该算法的实现需要专门的硬件支持，虽然算法性能好，但是实现困难，开销大

访问页面	1	8	1	7	8	2	7	2	1	8	3	8	2	1	3	1	7	1	3	7
内存块1	1	1	1	1	1						1							1		
内存块2	8		8		8						8							7		
内存块3			7		7						3							3		
内存块4				2							2							2		
缺页否	✓	✓	✓	✓	✓						✓							✓		

在手动做题时，若需要淘汰页面，可以逆向检查此时在内存中的几个页面号。在逆向扫描过程中最后一个出现的页号就是要淘汰的页面。

王道考研/CSKAOYAN.COM

时钟置换算法 (CLOCK)

最佳置换算法性能最好，但无法实现；先进先出置换算法实现简单，但算法性能差；最近最久未使用置换算法性能好，是最接近OPT算法性能的，但是实现起来需要专门的硬件支持，算法开销大。

时钟置换算法是一种性能和开销较均衡的算法，又称CLOCK算法，或最近未用算法 (NRU, Not Recently Used)

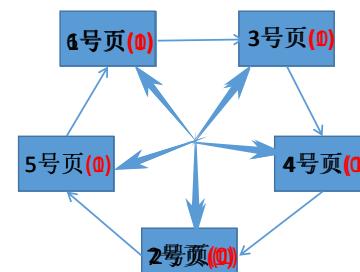
简单的CLOCK算法实现方法：为每个页面设置一个访问位，再将内存中的页面都通过链接指针链接成一个循环队列。当某页被访问时，其访问位置为1。当需要淘汰一个页面时，只需检查页的访问位。如果是0，就选择该页换出；如果是1，则将它置为0，暂不换出，继续检查下一个页面，若第一轮扫描中所有页面都是1，则将这些页面的访问位依次置为0后，再进行第二轮扫描（第二轮扫描中一定会有访问位为0的页面，因此简单的CLOCK算法选择一个淘汰页面最多会经过两轮扫描）

页号	内存块号	状态位	访问位	修改位	外存地址
----	------	-----	-----	-----	------

访问位为1，表示最近访问过；
访问位为0，表示最近没访问过

例：假设系统为某进程分配了五个内存块，并考虑到有以下页面号引用串：

1, 3, 4, 2, 5, 6, 3, 4, 7



王道考研/CSKAOYAN.COM

改进型的时钟置换算法

简单的时钟置换算法仅考虑到一个页面最近是否被访问过。事实上，如果被淘汰的页面没有被修改过，就不需要执行I/O操作写回外存。只有被淘汰的页面被修改过时，才需要写回外存。

因此，除了考虑一个页面最近有没有被访问过之外，操作系统还应考虑页面有没有被修改过。在其他条件都相同时，应优先淘汰没有修改过的页面，避免I/O操作。这就是改进型的时钟置换算法的思想。

修改位=0，表示页面没有被修改过；修改位=1，表示页面被修改过。

为方便讨论，用（访问位，修改位）的形式表示各页面状态。如（1, 1）表示一个页面近期被访问过，且被修改过。

算法规则：将所有可能被置换的页面排成一个循环队列

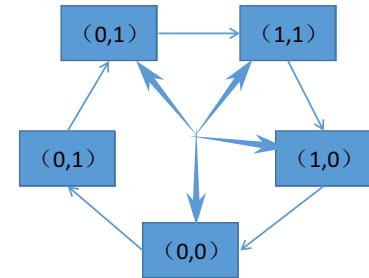
第一轮：从当前位置开始扫描到第一个（0, 0）的帧用于替换。本轮扫描不修改任何标志位

第二轮：若第一轮扫描失败，则重新扫描，查找第一个（0, 1）的帧用于替换。本轮将所有扫描过的帧访问位设为0

第三轮：若第二轮扫描失败，则重新扫描，查找第一个（0, 0）的帧用于替换。本轮扫描不修改任何标志位

第四轮：若第三轮扫描失败，则重新扫描，查找第一个（0, 1）的帧用于替换。

由于第二轮已将所有帧的访问位设为0，因此经过第三轮、第四轮扫描一定会有一页被选中，因此改进型CLOCK置换算法选择一个淘汰页面最多会进行四轮扫描



王道考研/CSKAOYAN.COM

改进型的时钟置换算法

简单的时钟置换算法仅考虑到一个页面最近是否被访问过。事实上，如果被淘汰的页面没有被修改过，就不需要执行I/O操作写回外存。只有被淘汰的页面被修改过时，才需要写回外存。

因此，除了考虑一个页面最近有没有被访问过之外，操作系统还应考虑页面有没有被修改过。在其他条件都相同时，应优先淘汰没有修改过的页面，避免I/O操作。这就是改进型的时钟置换算法的思想。

修改位=0，表示页面没有被修改过；修改位=1，表示页面被修改过。

为方便讨论，用（访问位，修改位）的形式表示各页面状态。如（1, 1）表示一个页面近期被访问过，且被修改过。

算法规则：将所有可能被置换的页面排成一个循环队列

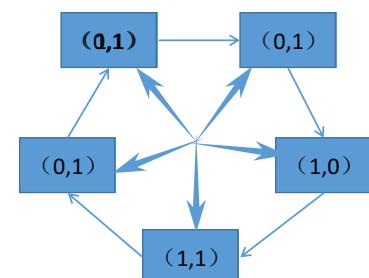
第一轮：从当前位置开始扫描到第一个（0, 0）的帧用于替换。本轮扫描不修改任何标志位

第二轮：若第一轮扫描失败，则重新扫描，查找第一个（0, 1）的帧用于替换。本轮将所有扫描过的帧访问位设为0

第三轮：若第二轮扫描失败，则重新扫描，查找第一个（0, 0）的帧用于替换。本轮扫描不修改任何标志位

第四轮：若第三轮扫描失败，则重新扫描，查找第一个（0, 1）的帧用于替换。

由于第二轮已将所有帧的访问位设为0，因此经过第三轮、第四轮扫描一定会有一页被选中，因此改进型CLOCK置换算法选择一个淘汰页面最多会进行四轮扫描



王道考研/CSKAOYAN.COM

改进型的时钟置换算法

简单的时钟置换算法仅考虑到一个页面最近是否被访问过。事实上，如果被淘汰的页面没有被修改过，就不需要执行I/O操作写回外存。只有被淘汰的页面被修改过时，才需要写回外存。

因此，除了考虑一个页面最近有没有被访问过之外，操作系统还应考虑页面有没有被修改过。在其他条件都相同时，应优先淘汰没有修改过的页面，避免I/O操作。这就是改进型的时钟置换算法的思想。

修改位=0，表示页面没有被修改过；修改位=1，表示页面被修改过。

为方便讨论，用（访问位，修改位）的形式表示各页面状态。如（1, 1）表示一个页面近期被访问过，且被修改过。

算法规则：将所有可能被置换的页面排成一个循环队列

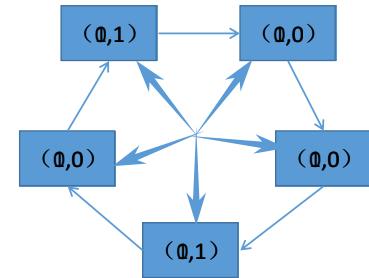
第一轮：从当前位置开始扫描到第一个（0, 0）的帧用于替换。本轮扫描不修改任何标志位

第二轮：若第一轮扫描失败，则重新扫描，查找第一个（0, 1）的帧用于替换。本轮将所有扫描过的帧访问位设为0

第三轮：若第二轮扫描失败，则重新扫描，查找第一个（0, 0）的帧用于替换。本轮扫描不修改任何标志位

第四轮：若第三轮扫描失败，则重新扫描，查找第一个（0, 1）的帧用于替换。

由于第二轮已将所有帧的访问位设为0，因此经过第三轮、第四轮扫描一定会有一页被选中，因此改进型CLOCK置换算法选择一个淘汰页面最多会进行四轮扫描



王道考研/CSKAOYAN.COM

改进型的时钟置换算法

简单的时钟置换算法仅考虑到一个页面最近是否被访问过。事实上，如果被淘汰的页面没有被修改过，就不需要执行I/O操作写回外存。只有被淘汰的页面被修改过时，才需要写回外存。

因此，除了考虑一个页面最近有没有被访问过之外，操作系统还应考虑页面有没有被修改过。在其他条件都相同时，应优先淘汰没有修改过的页面，避免I/O操作。这就是改进型的时钟置换算法的思想。

修改位=0，表示页面没有被修改过；修改位=1，表示页面被修改过。

为方便讨论，用（访问位，修改位）的形式表示各页面状态。如（1, 1）表示一个页面近期被访问过，且被修改过。

算法规则：将所有可能被置换的页面排成一个循环队列

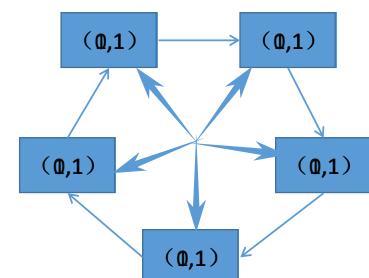
第一轮：从当前位置开始扫描到第一个（0, 0）的帧用于替换。本轮扫描不修改任何标志位

第二轮：若第一轮扫描失败，则重新扫描，查找第一个（0, 1）的帧用于替换。本轮将所有扫描过的帧访问位设为0

第三轮：若第二轮扫描失败，则重新扫描，查找第一个（0, 0）的帧用于替换。本轮扫描不修改任何标志位

第四轮：若第三轮扫描失败，则重新扫描，查找第一个（0, 1）的帧用于替换。

由于第二轮已将所有帧的访问位设为0，因此经过第三轮、第四轮扫描一定会有一页被选中，因此改进型CLOCK置换算法选择一个淘汰页面最多会进行四轮扫描



王道考研/CSKAOYAN.COM

改进型的时钟置换算法

简单的时钟置换算法仅考虑到一个页面最近是否被访问过。事实上，如果被淘汰的页面没有被修改过，就不需要执行I/O操作写回外存。只有被淘汰的页面被修改过时，才需要写回外存。

因此，除了考虑一个页面最近有没有被访问过之外，操作系统还应考虑页面有没有被修改过。在其他条件都相同时，应优先淘汰没有修改过的页面，避免I/O操作。这就是改进型的时钟置换算法的思想。修改位=0，表示页面没有被修改过；修改位=1，表示页面被修改过。

为方便讨论，用（访问位，修改位）的形式表示各页面状态。如（1, 1）表示一个页面近期被访问过，且被修改过。

算法规则：将所有可能被置换的页面排成一个循环队列

第一轮：从当前位置开始扫描到第一个（0, 0）的帧用于替换。本轮扫描不修改任何标志位

第一优先级：最近没访问，且没修改的页面

第二轮：若第一轮扫描失败，则重新扫描，查找第一个（0, 1）的帧用于替换。本轮将所有扫描过的帧访问位设为0

第二优先级：最近没访问，但修改过的页面

第三轮：若第二轮扫描失败，则重新扫描，查找第一个（0, 0）的帧用于替换。本轮扫描不修改任何标志位

第三优先级：最近访问过，但没修改的页面

第四轮：若第三轮扫描失败，则重新扫描，查找第一个（0, 1）的帧用于替换。

第四优先级：最近访问过，且修改过的页面

由于第二轮已将所有帧的访问位设为0，因此经过第三轮、第四轮扫描一定会有一页被选中，因此改进型CLOCK置换算法选择一个淘汰页面最多会进行四轮扫描

王道考研/CSKAOYAN.COM

知识回顾与重要考点

	算法规则	优缺点
OPT	优先淘汰最长时间内不会被访问的页面	缺页率最小，性能最好；但无法实现
FIFO	优先淘汰先进入内存的页面	实现简单；但性能很差，可能出现Belady异常
LRU	优先淘汰最近最久没访问的页面	性能很好；但需要硬件支持，算法开销大
CLOCK (NRU)	循环扫描各页面 第一轮淘汰访问位=0的，并将扫描过的页面访问位改为1。若第一轮没选中，则进行第二轮扫描。	实现简单，算法开销小；但未考虑页面是否被修改过。
改进型CLOCK（改进型NRU）	若用（访问位，修改位）的形式表述，则 第一轮：淘汰（0, 0） 第二轮：淘汰（0, 1），并将扫描过的页面访问位都置为0 第三轮：淘汰（0, 0） 第四轮：淘汰（0, 1）	算法开销较小，性能也不错

王道考研/CSKAOYAN.COM