第9章 虚拟内存: 动态内存分配

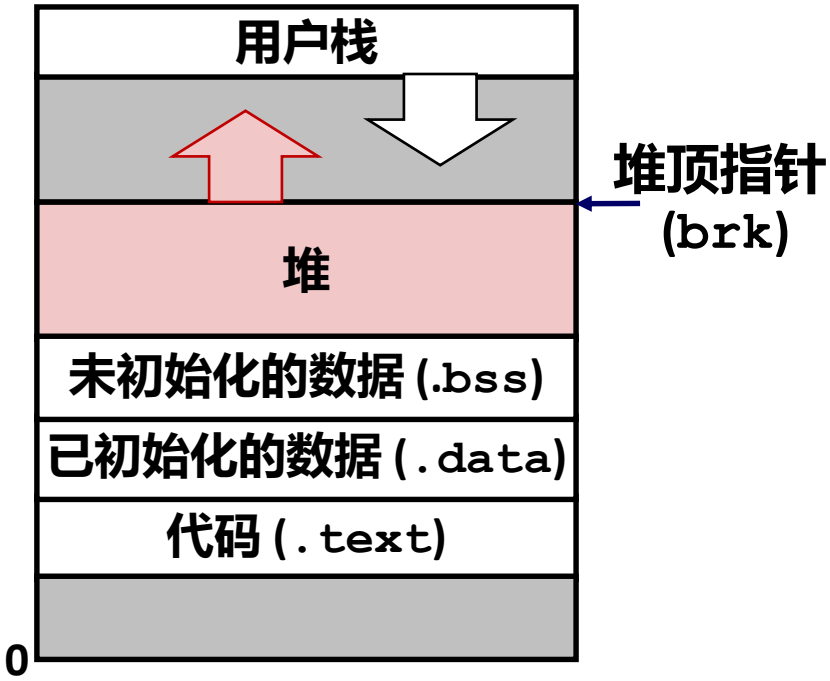
教　师：　郑贵滨
计算机科学与技术学院
哈尔滨工业大学

主要内容

- 动态内存分配(Dynamic Memory Allocation)
- 基本概念
- 隐式空闲列表

动态内存分配

- 在程序运行时程序员使用*动态内存分配器*(比如 malloc)获得虚拟内存
  - 数据结构的大小只有运行时才知道
- 动态内存分配器维护着进程的一个虚拟内存区域，称为*堆*



动态内存分配

- 分配器将堆视为一组不同大小 *块(blocks)*的集合，每个块要么是已分配的，要么是空闲的。
- 分配器的类型
  - **显式分配器**：要求应用显式地释放任何已分配的块
    - 例如，C语言中的 `malloc` 和 `free`
  - **隐式分配器**：应用检测到已分配块不再被程序所使用，就释放这个块
    - 比如Java，ML和Lisp等高级语言中的垃圾收集 (garbage collection)
- ★讨论显式分配器的设计和实现

malloc程序包

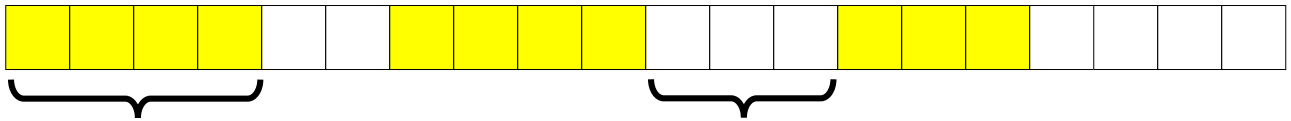
- #include <stdlib.h>
- void *malloc(size_t size)
  - 成功：返回已分配块的指针，块大小至少 size 字节，对齐方式依赖编译模式：8字节（32位模式），16字节（64位模式）。若size == 0, 返回值非NULL (0)
  - 出错: 返回 NULL ，同时设置 errno
- void free(void *p)
  - 将p指向的块归还给可用内存池
  - p 必须来自之前对 malloc、 realloc或calloc的调用，指向已分配块的起始地址
- 其他函数
  - calloc : malloc的另一版本，将已分配块初始化为0
  - realloc: 改变之前分配块的大小
  - sbrk : 分配器隐含地扩展或收缩堆

malloc示例

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

void foo(int n) {
    int i, *p;

    /* Allocate a block of n ints */
    p = (int *) malloc(n * sizeof(int));
    if (p == NULL) {
        perror("malloc");
        exit(0);
    }

    /* Initialize allocated block */
    for (i=0; i<n; i++)
            p[i] = i;

    /* Return allocated block to the heap */
    free(p);
}
```

本节中的假定

- 内存以字为单位
- 字是int类型，1字=4字节



Allocated block
(4 words)

Free block
(3 words)

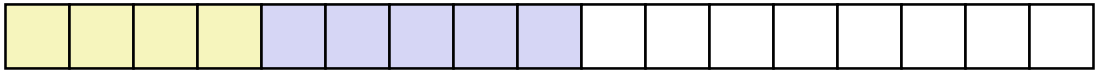
Free word

Allocated word

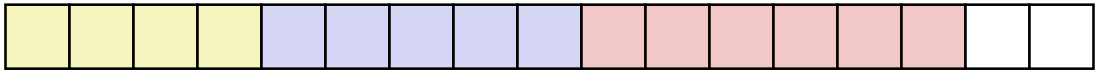
内存分配的例子

p1 = malloc(4)

p2 = malloc(5)



p3 = malloc(6)



free(p2)

p4 = malloc(2)

限制条件

- 应用
  - 可以处理任意的分配(malloc)和释放(free)请求序列
  - 只能释放已分配的块
- 分配器(Allocators)
  - 无法控制分配块的数量或大小
  - 立即响应 malloc 请求
    - 不允许分配器重新排列或者缓冲请求
  - 必须从空闲内存中分配块
  - 必须对齐块，使它们可以保存任何类型的数据对象
    - 在 Linux 上：8字节 (x86) or 16字节 (x86-64) 对齐
  - 只能操作或改变空闲块
  - 一旦块被分配，就不允许修改或移动它了
    - 压缩已分配块的技术是不允许使用的

性能目标：吞吐量(Throughput)

- 假定n个分配和释放请求的某种序列:
  - $R_0, R_1, ..., R_k, ... , R_{n-1}$
- 目标: 最大化吞吐量，最大化内存利用率
  - 这些目标经常是互相矛盾的
- 吞吐量(Throughput)
  - 单位时间内完成的请求数
  - 例如:
    - 10秒内完成5,000个分配请求和5,000个释放请求
    - 吞吐量是 1,000次操作/秒

性能目标：最大化内存利用率

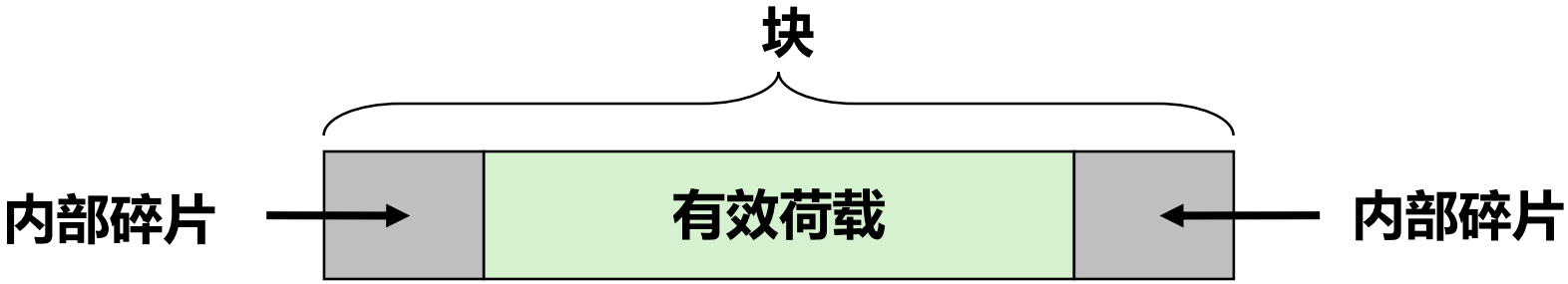
- 给定n个分配和释放请求的某种顺序:
  - $R_0, R_1, ..., R_k, ... , R_{n-1}$
- 定义: 聚集有效载荷 *(Aggregate payload)* P_k
  - **malloc(p)** 结果是一个有效载荷p字节的块
  - 请求 R_k 完成后, ***聚集有效载荷*** P_k 为当前全部已分配块的有效载荷之和
- 定义: 堆的当前大小 H_k
  - 假设 H_k 是单调非递减的
    - 只有分配器使用**sbrk**时堆才会增大
- 定义: 前 k+1 个请求的峰值利用率(Peak Memory Utilization)：$U_k = (\max_{0 \le i \le k} P_i) \ / \ H_k$

碎片(Fragmentation)

- 碎片化导致内存利用率低
  - 内部 碎片
  - 外部 碎片

内部碎片

- 对一个给定块, 当有效荷载小于块的大小时会产生内部碎片——块内的碎片



- 产生原因
  - 维护数据结构产生的开销
  - 增加块大小以满足对齐的约束条件
  - 显式的策略决定(Explicit policy decisions)
    例如： 返回一个大块以满足一个小的请求
- 只取决于之前 分配请求的模式
  - 易于量化

外部碎片

- 虽然空闲内存合起来足够满足一个分配请求，却没有足够大的独立空闲块能满足分配请求——有外部碎片。

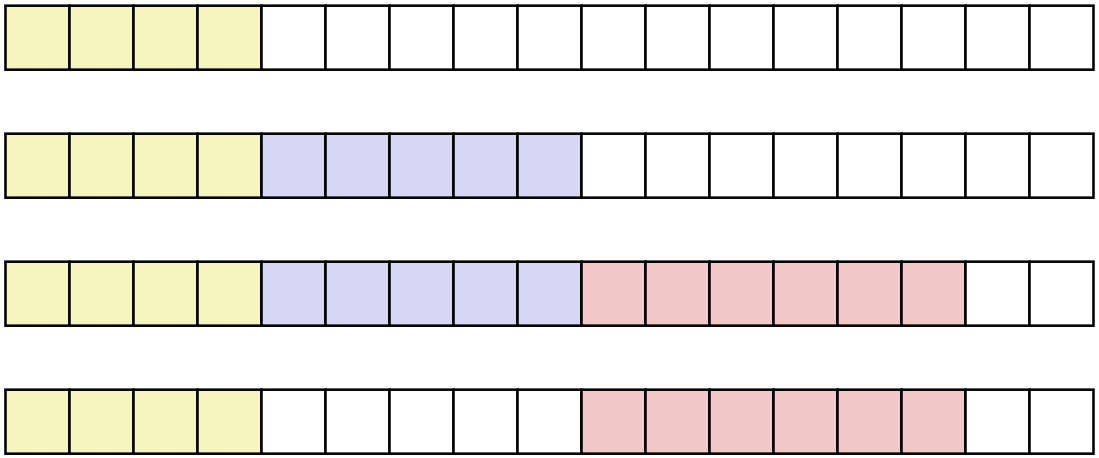
p1 = malloc(4)

p2 = malloc(5)

p3 = malloc(6)

free(p2)

p4 = malloc(6) ***将会发生什么？***



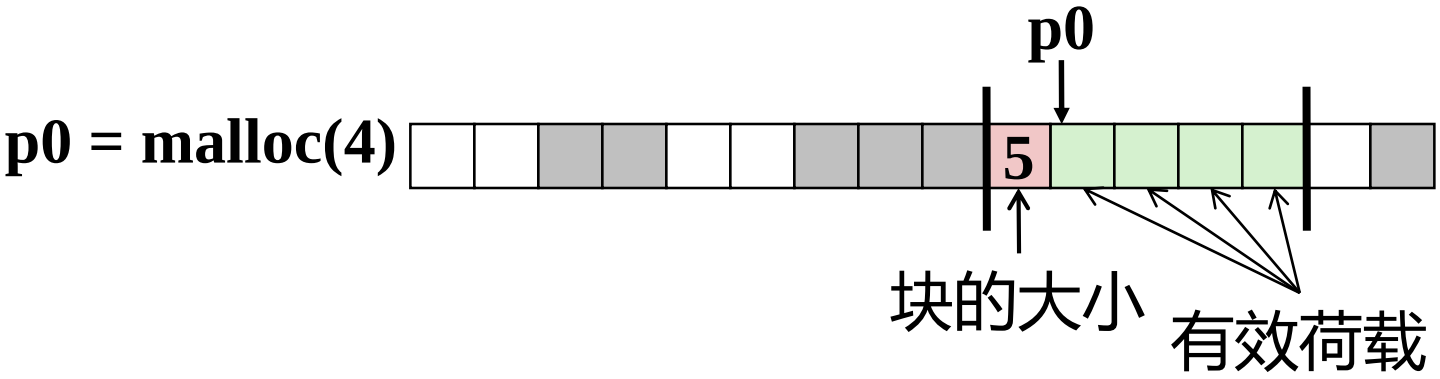
- 取决于将来请求的模式
  - 难以量化

实现问题(Implementation Issues)

- 如何知道一个指针可以释放多少内存?
- 如何记录空闲块?
- 将一个新分配的块放置到某个比较大的空闲块后，如何处理这个空闲块中的剩余部分?
- 有很多合适的块，如何选择一个空闲块去分配？
- 如何处理一个刚刚被释放的块?

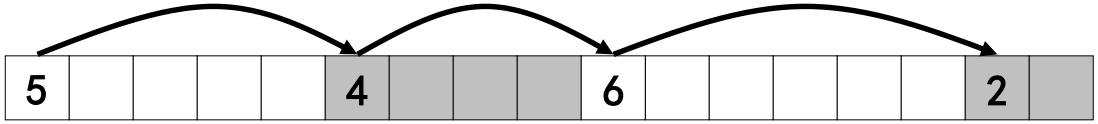
释放一个块，怎么知道它多大？

- 标准方法
  - 在块的前端放置一个字(word)，记录该块的长度
    - 这个字称为 头部
    - 每个已分配块都需要一个这样的头部

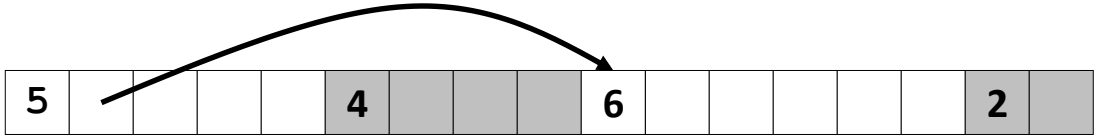


记录空闲块

- 方法 1: *隐式空闲链表 (Implicit list)* 通过头部中的长度字段—隐含地链接所有块



- 方法 2: *显式空闲链表 (Explicit list)* 在空闲块中使用指针



- 方法 3: *分离的空闲列表 (Segregated free list)*
  - 按照尺寸大小size分类/组，每个类/组使用一个空闲链表
- 方法 4: *块按大小排序*
  - 使用平衡树(如红黑树)，在每个空闲块中保存指针，并用长度(块大小)作为key值

主要内容

- 基本概念
- 隐式空闲链表

方法1: 隐式空闲链表(Implicit List)

- 每个块都需要记录块的大小和分配状态
  - 虽然可以存储在两个 words 中: 浪费内存!
- 标准技巧（Standard trick ）
  - 如果块是对齐的，那么块大小的一些低位值总是0
  - 不存储这些0位，将它作为已分配/未分配的标志
  - 读大小字段时，必须将其屏蔽掉

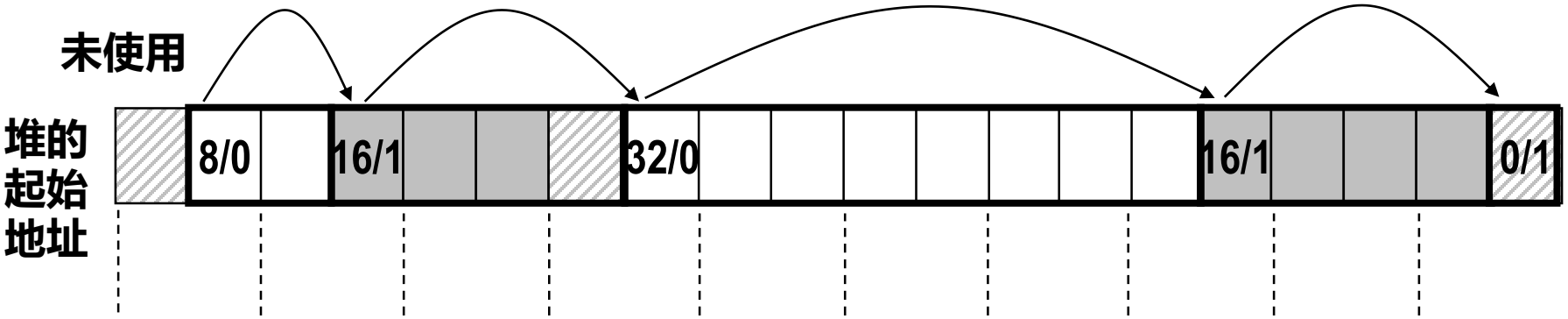
已分配块、空闲块的格式

a = 1: 已分配块
a = 0: 空闲块

块的大小block size=
头部 +有效荷载+填充

载荷: 应用数据，仅限已分配块

隐式空闲链表法细节的示例



双字对齐处

已分配块: 阴影
空 闲 块: 无阴影的
头 部: 大小(字节数)/已分配位

隐式空闲链表：找到一个空闲块

- 首次适配(First fit):
  - 从头开始搜索空闲链表，选择第一个合适的空闲块:

```
p = start;
while (  (p < end) && \\ not passed end
       ((*p & 1) ||     \\ already allocated
        (*p  <= len)) ) \\ too small, could be  ( (*p & -8)<=len)?
 p = p + (*p & -2);      \\ goto next block (word addressed)
```

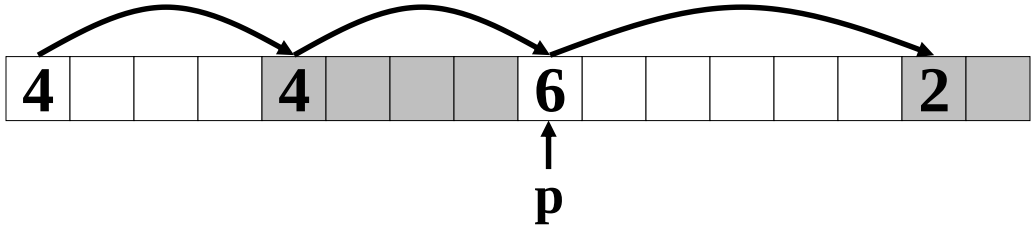
  - 搜索时间：与总块数 (包括已分配和空闲块) 是线性关系
  - 倾向在靠近链表起始处留下小空闲块的 “碎片”
    - 增加对较大块的搜索时间

隐式空闲链表：找到一个空闲块

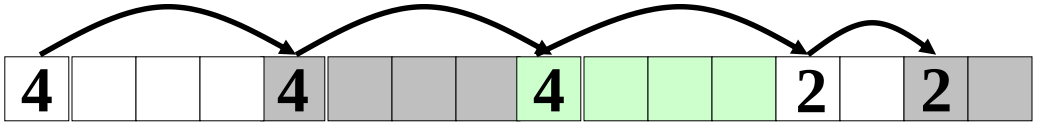
- 下一次适配(Next fit):
  - 和首次适配相似，只是从链表中上一次查询结束的地方开始
  - 比首次适应更快: 避免重复扫描那些无用块
  - 一些研究表明，下一次适配的内存利用率要比首次适配低得多
- 最佳适配 (Best fit):
  - 查询链表，选择一个最好的空闲块： 适配，剩余空闲空间最少
  - 保证碎片最小——提高内存利用率
  - 运行速度通常会慢于首次适配

隐式空闲链表： 分配空闲块

- 分配空闲块:分割(splitting)
  - 申请空间比空闲块小——可以把空闲块分割成两部分




```
addblock(p, 4)
```



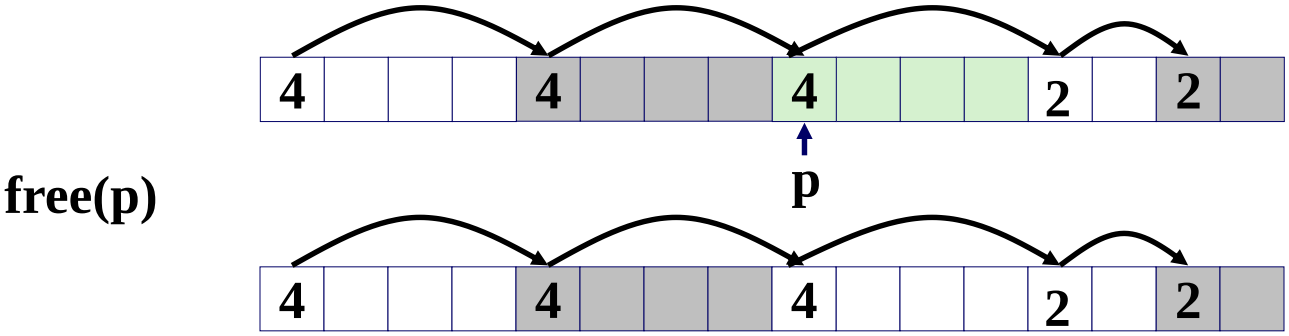

```
void addblock(ptr p, int len) {
  int newsize = ((len + 1) >> 1) << 1;  // round up to even
  int oldsize = *p & -2;                // mask out low bit
  *p = newsize | 1;                     // set new length
  if (newsize < oldsize)
    *(p+newsize) = oldsize - newsize;   // set length in remaining
}                                       // part of block
```

隐式空闲链表：释放一个块

- 最简单的实现:
  - 清除 “已分配 (allocated)” 标志

    void free_block(ptr p) { *p = *p & -2 }

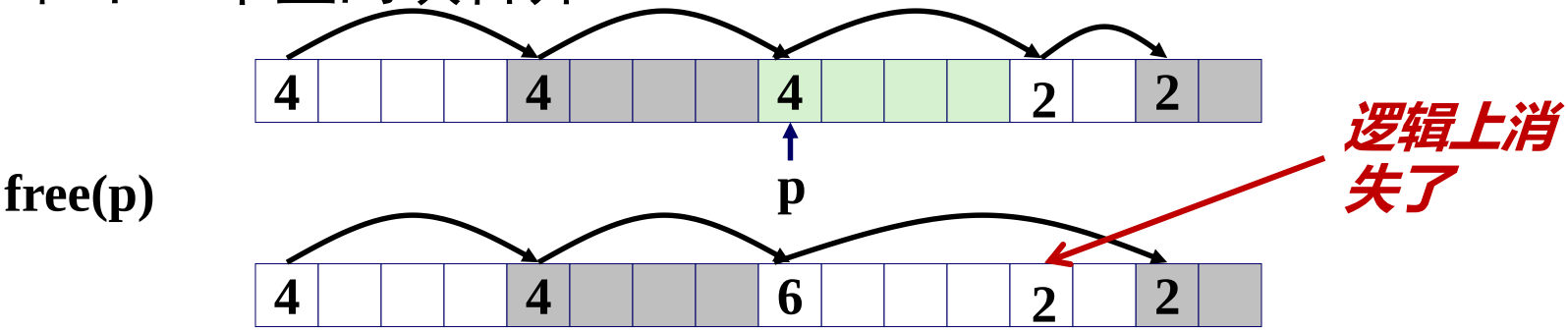
  - 但有可能会产生 “假碎片 (false fragmentation)”



有足够空间，但分配器却无法找到它！

隐式空闲链表： 合并(Coalescing)

- 合并 (coalesce) ： 合并相邻的空闲块
  - 和下一个空闲块合并

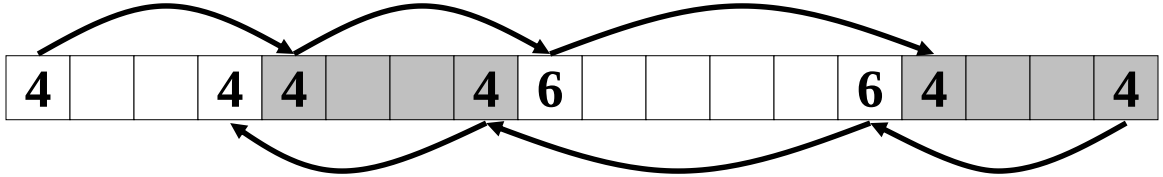


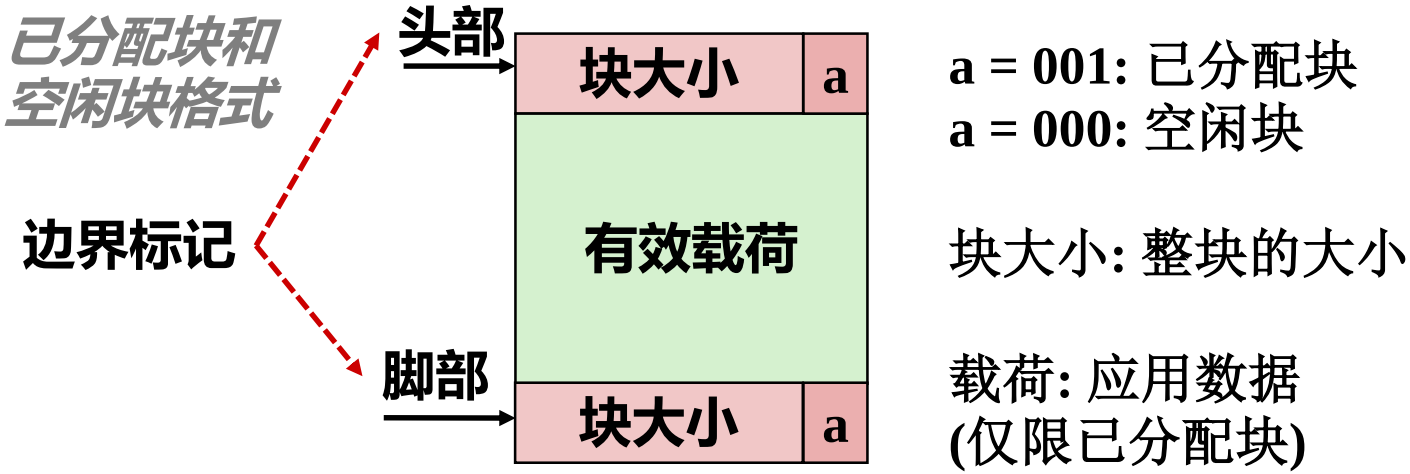

```
void free_block(ptr p) {
    *p = *p & -2;          // clear allocated flag
    next = p + *p;         // find next block
    if ((*next & 1) == 0)
      *p = *p + *next;     // add to this block if
}                          //    not allocated
```

  - 如何与前一块合并?

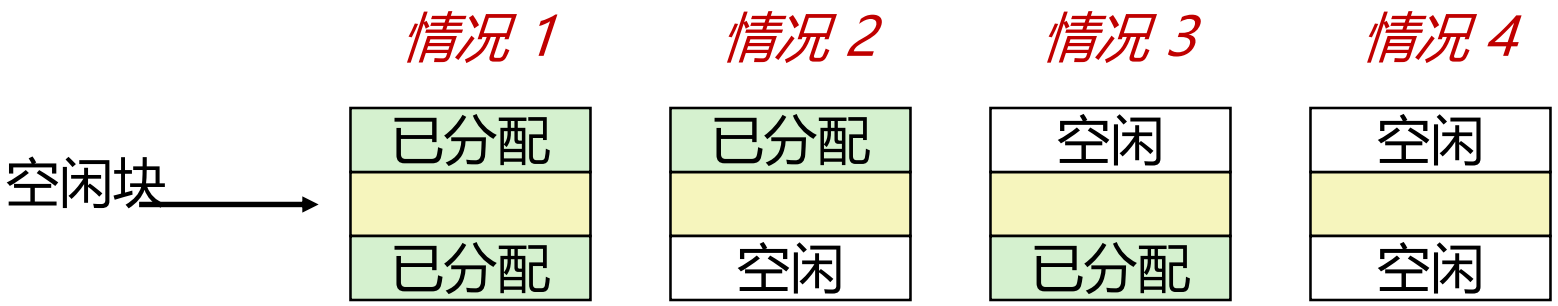
隐式空闲链表：双向合并 (Bidirectional Coalescing)

- *边界标记 (Boundary tags)* [Knuth73]
  - 在块的“脚部（footer）”标记 “大小/已分配”
  - 可以反查 “链表”，但需要额外的空间
  - 重要且普遍的技术!

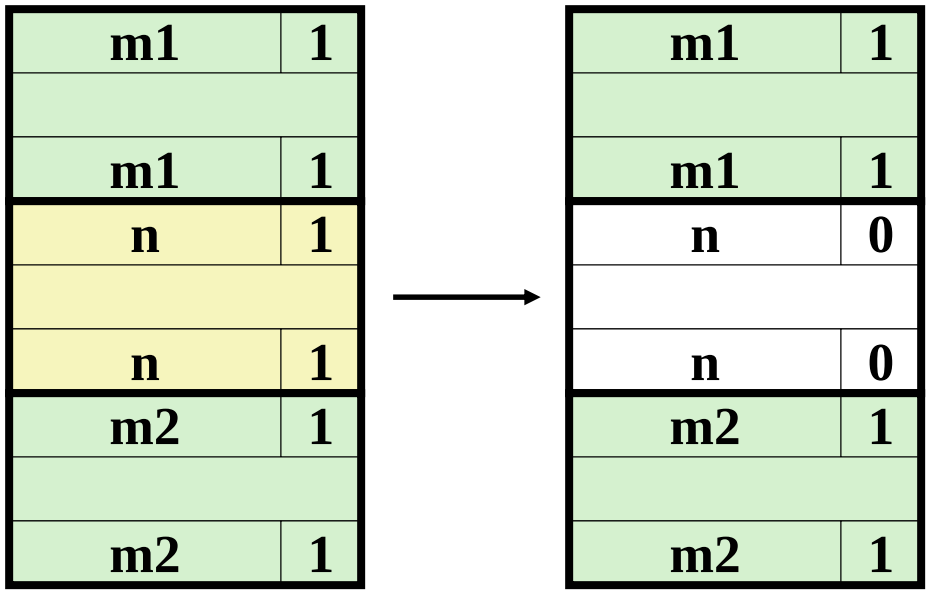




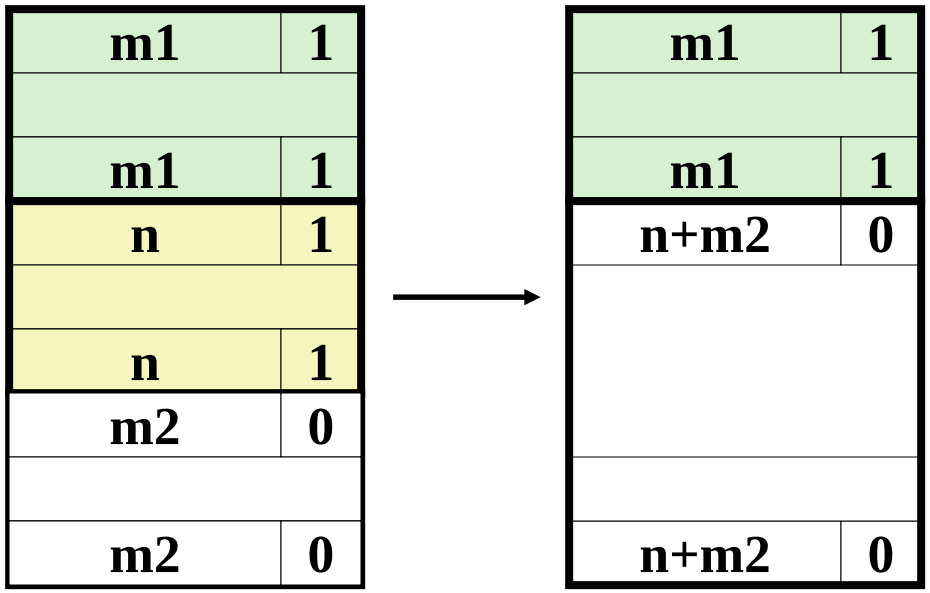
常数时间的合并Constant Time Coalescing



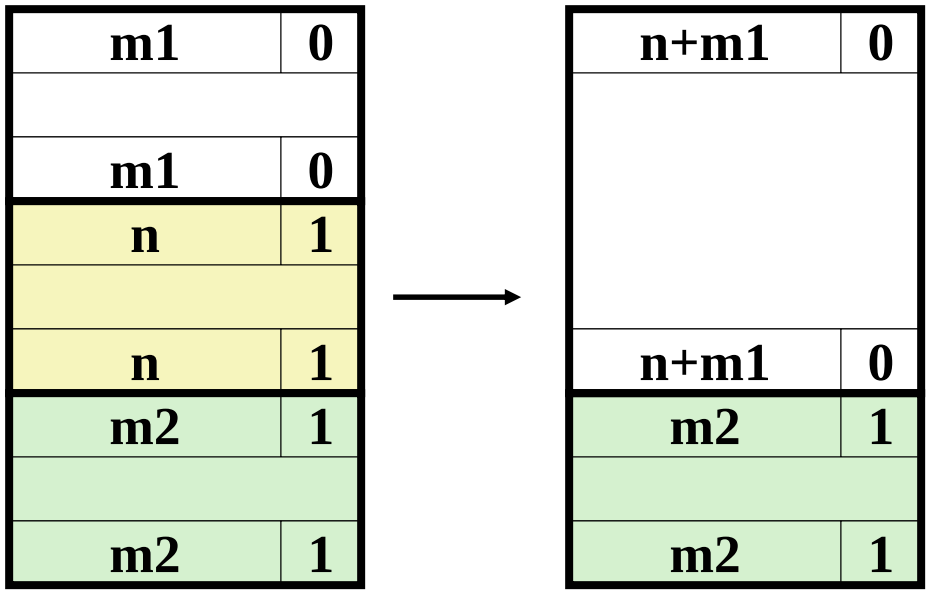
常数时间的合并(情况 1)



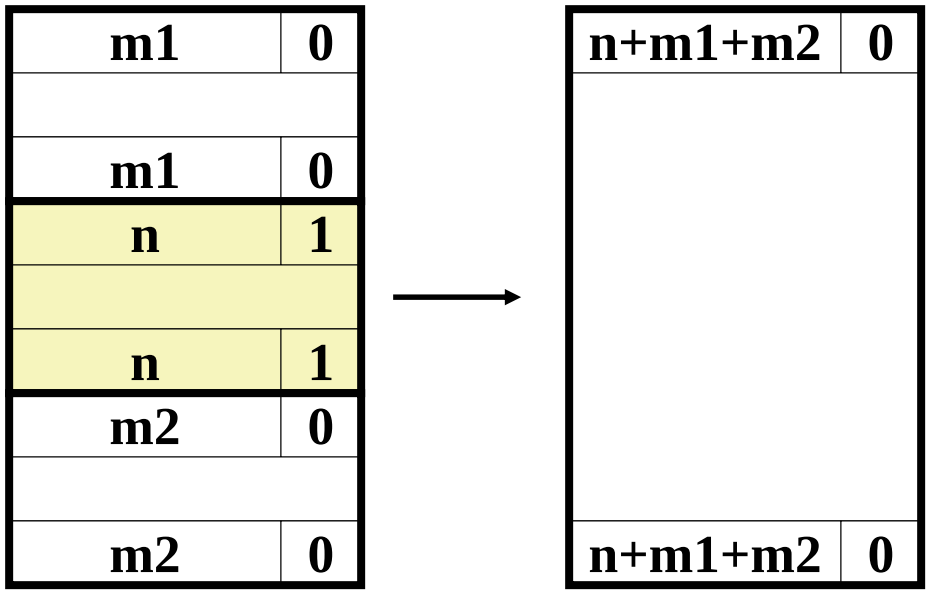
常数时间的合并(情况 2)



常数时间的合并(情况 3)



常数时间的合并(情况 4)



边界标记法的缺陷

- 缺陷：脚部会增加内部碎片
- 能否优化？
  - 哪些块需要脚标?
    - 空闲块
  - 有什么作用?
    - 与之前块、之后的块合并时使用
  - 优化方法
    - 将前面块的已分配/空闲位存放在当前块中多出来的低位中
    - 仅空闲块添加脚部、已分配块不需要脚部➔提高有效载荷

关键分配策略总结

- 放置策略(Placement policy)
  - 首次适配, 下一次适配, 最佳适配, 等等.
  - 减少碎片以提高吞吐量
- 分割策略(Splitting policy)
  - 什么时候开始分割空闲块?
  - 能够容忍多少内部碎片?
- 合并策略(Coalescing policy)
  - ***立即合并 (Immediate coalescing):*** 每次释放都合并
  - ***延迟合并 (Deferred coalescing):*** 延迟合并，直到需要才合并，提高释放的性能。例如:
    - 为 **malloc**扫描空闲链表时合并
    - 外部碎片达到阈值时合并

隐式链表总结

- 实　　现: 非常简单
- 分配开销: 最坏情况——线性时间
- 释放开销: 最坏情况——常数时间 (即使有合并)
- 内存使用:
  - 取决于放置策略
  - 首次适配(First-fit)、下一次适配(next-fit)或最佳适配（best-fit）
- 由于分配是线性时间的，没有实际用于malloc/free
  - 用于许多特殊目标的应用
- 分割和边界标记合并的概念对于所有的分配器来说都是通用的