清華大學
Tsinghua University

2024秋季

计算机系统概论

Introduction to Computer Systems

内存分配

韩文弢

hanwentao@tsinghua.edu.cn

目录

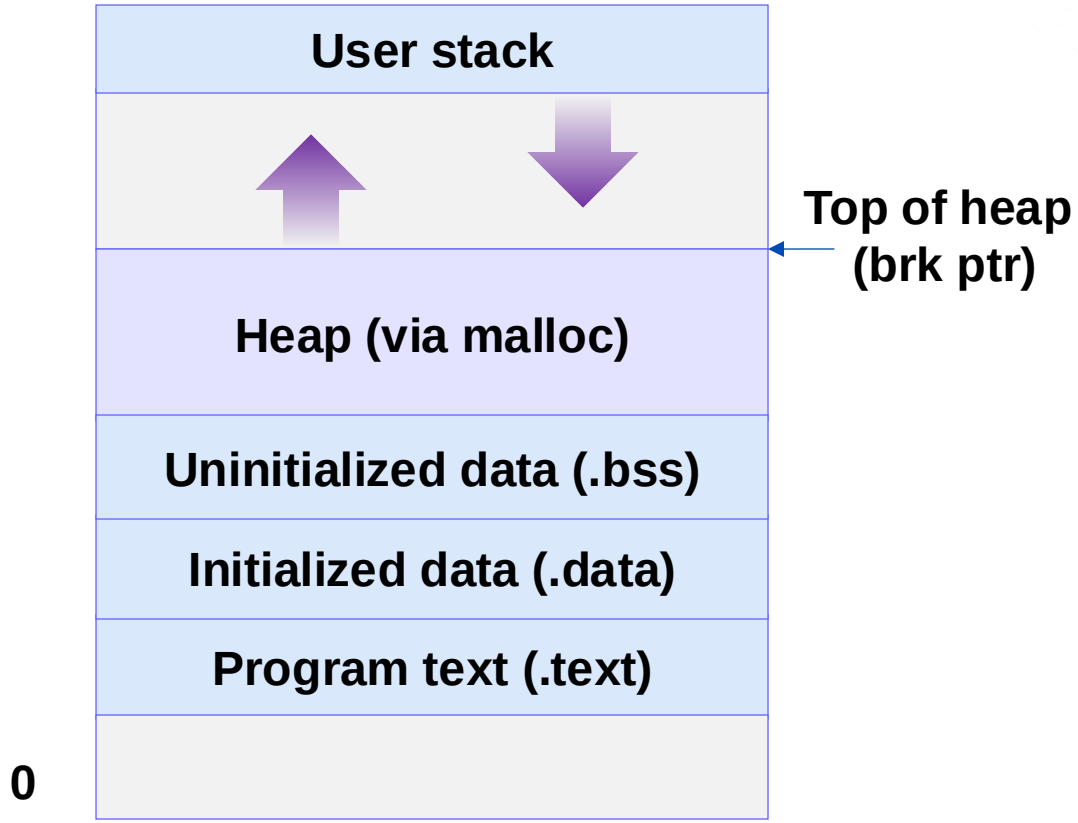
CONTENTS

（用户层的）动态内存分配

- **程序员使用动态内存分配器(如malloc)在运行时获取虚存（VM）**

  有些数据结构只有在运行时才知道大小

- **动态内存分配器管理一个称为堆（heap）的进程虚拟内存区。**



Linux系统提供了名为brk的系统调用，用于设定堆顶，有兴趣同学可以搜索下Linux system call: *brk*

动态内存分配

- **动态内存分配器将堆视作不同大小的内存块的集合——这些块要么是已分配的，要么是空闲的**

- **分配器类型**
  - **显式分配:由应用程序直接分配与释放内存**
    - **比如，C语言里的malloc / free**
  - **隐式分配:** 应用程序分配，但不释放
    - 例如，Java、ML和Lisp等语言中的垃圾收集

C函数`malloc` .....

```
#include <stdlib.h>
void *malloc(size_t size)
```

- Successful:
  - Returns a pointer to a memory block of at least `size` bytes (typically) aligned to 8-byte boundary
  - If `size == 0`, returns NULL
- Unsuccessful: returns NULL (0) and sets `errno`

```
void free(void *p)
```

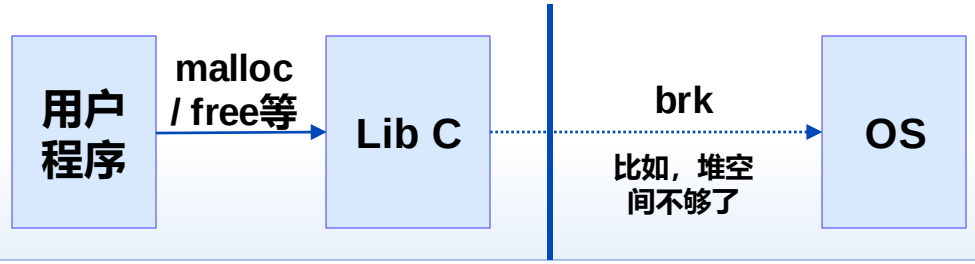
- Returns the block pointed at by `p` to pool of available memory
- `p` must come from a previous call to `malloc` or `realloc`

Other functions

- `calloc`: Version of `malloc` that initializes allocated block to zero.
- `realloc`: Changes the size of a previously allocated block.
- `sbrk`: Used internally by allocators to grow or shrink the heap

注意malloc等是C函数，而非系统调用

- C运行时库通过**brk**等系统调用开辟**堆**空间，在其中初始化了相应的数据结构（如链表）来实现动态内存分配



malloc 示例

```
void foo(int n, int m) {
    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 p to the heap */
    free(p);
}
```

一些假设

内存按‘字’编址
(指针长度等于字长)

Allocated block
(4 words)

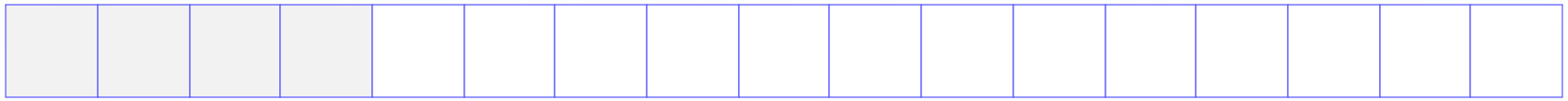
Free block
(3 words)

Free word

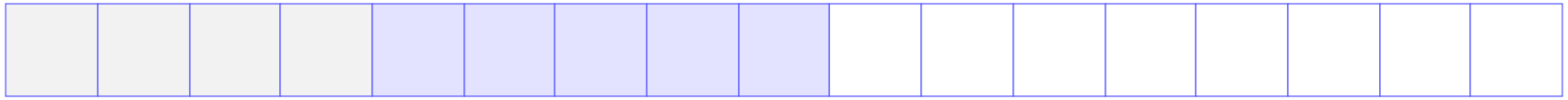
Allocated word

内存分配示例

p1 = malloc(4)

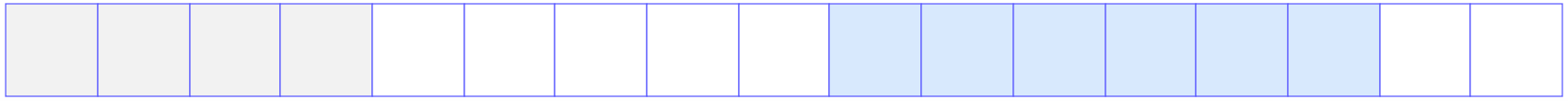


p2 = malloc(5)



p3 = malloc(6)

free(p2)



p4 = malloc(2)

一些约束条件

应用

- 可以发出任意序列的malloc和free请求
- free的必须是事先malloc的块

内存分配器

- 块的数量或大小可以是任意的
- 必须立即响应malloc请求
  - 也就是说，不能重新排序或缓存请求
- 必须从空闲内存中分配块
- 块地址必须满足对齐要求
  - Linux系统上malloc (C运行时库的malloc)是8字节对齐的
- 只能操作和修改空闲内存
- 不能移动已经分配出去的块
  - 即，不能整理内存

目标: 吞吐率

针对一系列的malloc与free请求

- $R_0, R_1, ..., R_k, ..., R_{n-1}$

目标: 最大化吞吐率 与 峰值内存利用率

- 这两个目标有时候是冲突的

吞吐率（Throughput ）

- 定义：单位时间内完成的请求数
- 示例:
  - 在10秒内完成5000个malloc和5000个free
  - 相应的吞吐量为1000次操作/秒

目标: 峰值内存利用率

针对一系列的malloc与free请求

- $R_0, R_1, ..., R_k, ..., R_{n-1}$

定义1:总负载P_k

- **malloc(p)** 返回一块有效负载为p字节的内存
- 在请求R_k完成后，P_k是当前已分配的有效负载的总和

定义2: 运行时堆的大小H_k

- 假设H_k是单调非递减的

定义3: 峰值内存利用率（完成k个请求后）

- $U_k = (max_{i<k} P_i) / H_k$

碎片化问题

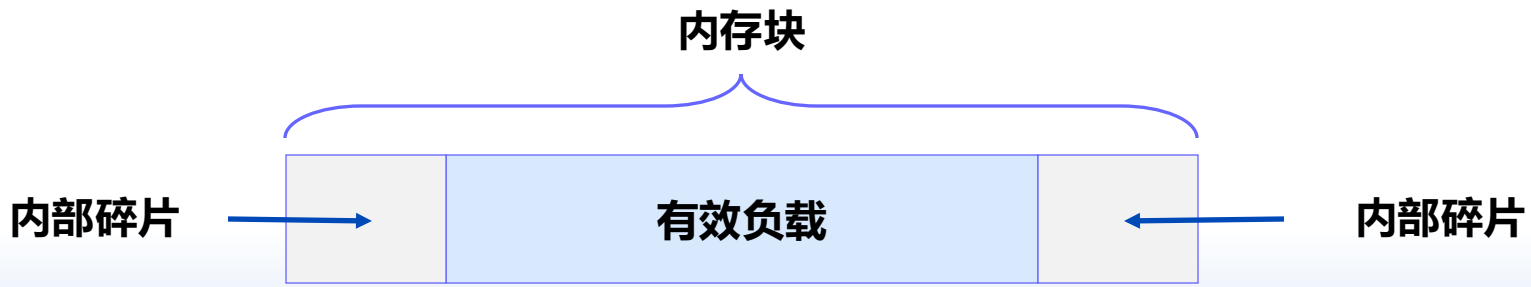
碎片问题导致内存利用率低下

internal fragmentation
(内部碎片化)

external fragmentation
(外部碎片化)

内部碎片化

对于给定的内存块，如果有效负载小于块大小，则会发生内部碎片



可能的原因

- 维护堆结构的开销
- 地址对齐用的数据填充（padding）
- 与分配策略相关的额外开销
  - (例如，返回一个大块来满足一个小请求)

仅取决于以往的请求序列

- 因此易于衡量

外部碎片化

当堆内有足够多的空闲内存总和，但没有一个单一的足够大的空闲块

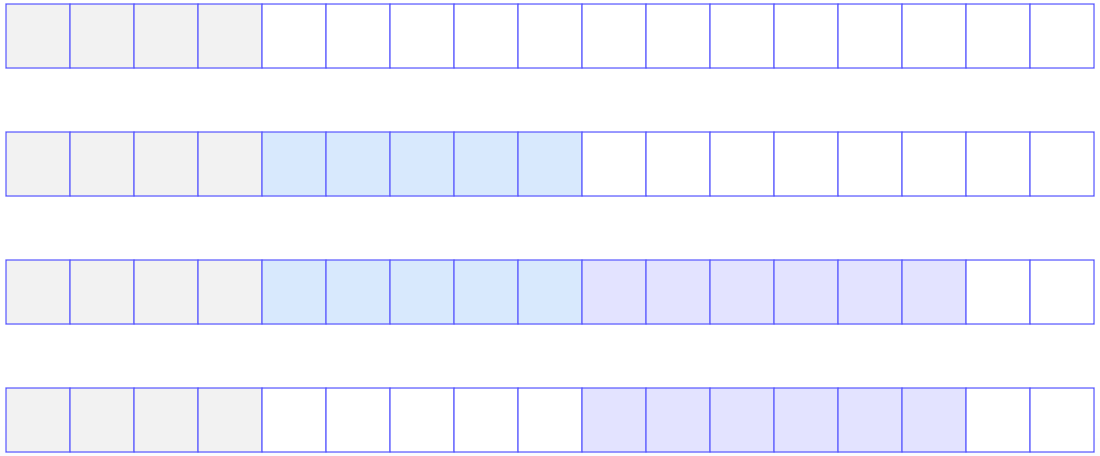
p1 = malloc(4)

p2 = malloc(5)

p3 = malloc(6)

free(p2)

p4 = malloc(6)



这时会发生什么情况?

取决于未来的请求

- 因此难以衡量

一些实现方面的问题

01 释放给定的一个指针，具体需要释放多少内存?

02 如何跟踪空闲块?

03 当从一个空闲块中分配比该块尺寸小的数据结构时，如何处理多余空间?

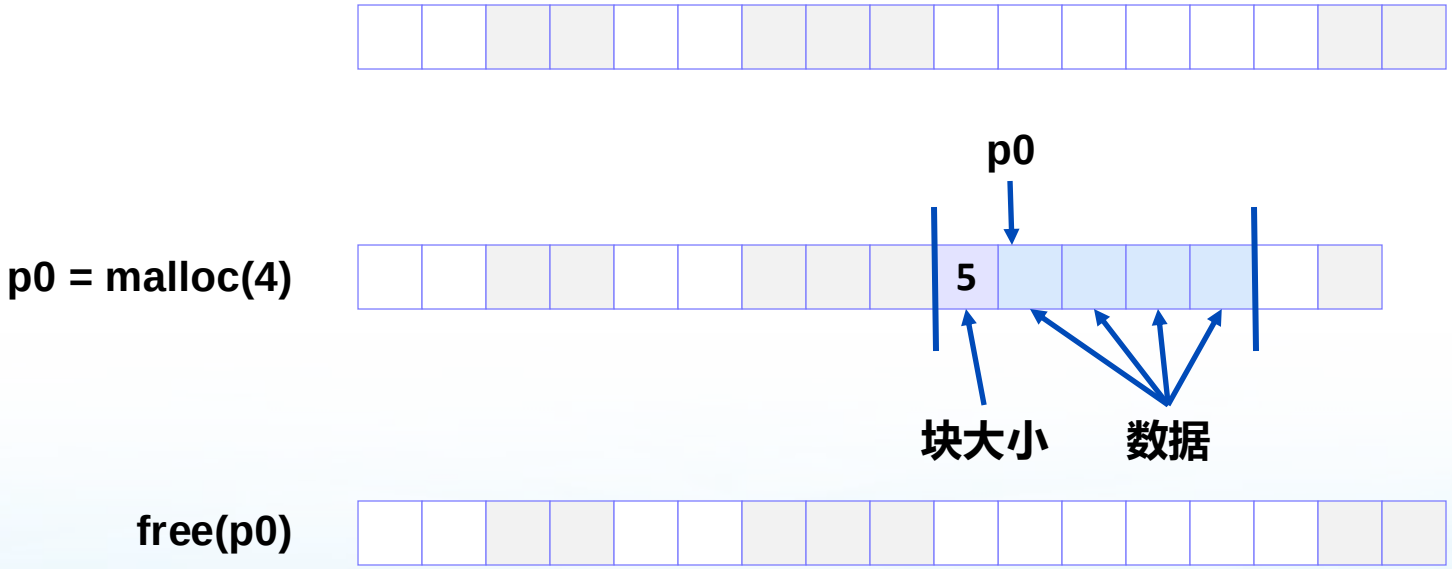
04 如何选择用于分配的空闲块（可能有许多块的大小都能满足）?

05 如何重新插入被释放的块?

如何知道需要释放多少内存

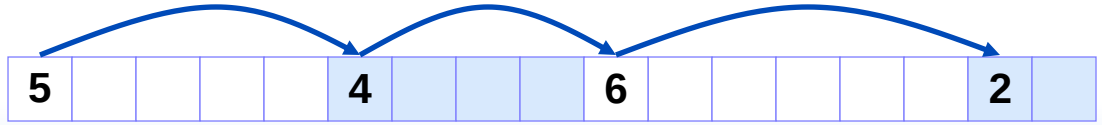
常规方法

- 将块长度信息存于在该块之前
  - 记录该信息的字（word）被称为header field 或 header
- 每个分配的块需要一个额外的字（word）

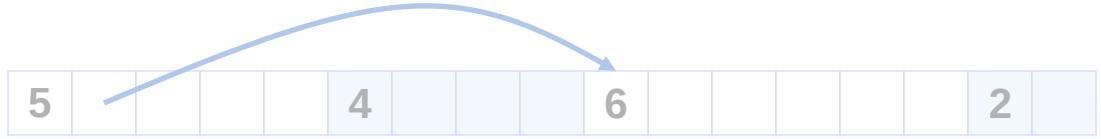


跟踪空闲块

方法1：Implicit list 通过块长度将所有块链接起来



方法2：使用指针，显式地链接空闲块



目录

CONTENTS

Implicit List

对于每个块，需要知道其大小和分配状态

- 显然，用两个字（word）来存储这些信息是很浪费的~

一种常规的技巧

- 如果块是对齐的，那么表示块大小的数值的低位总是0
- 这样可以将这些位作为分配/空闲标志
- 注意：在读取大小时，必须屏蔽掉这一位

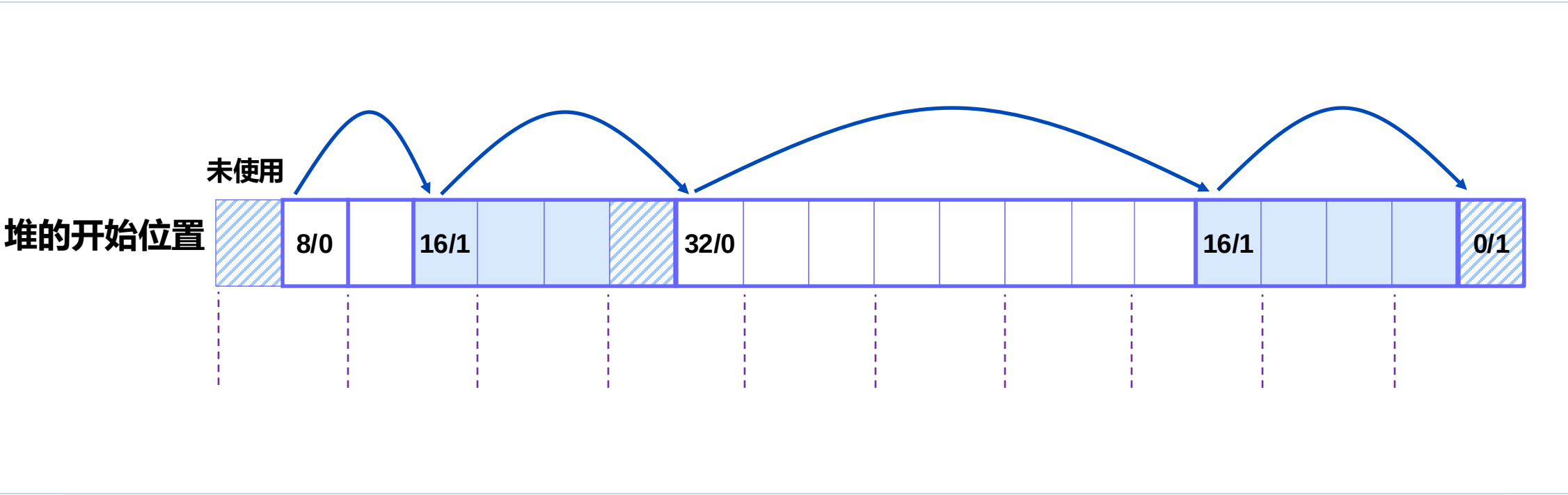
a = 1: 已分配的块
a = 0: 空闲块

大小：块的大小

有效负载：应用程序数据（仅对于已分配的块）

已分配和空闲的块的格式

一个具体示例



双字对齐位置

已分配的块：蓝色
空闲的块：白色
块的头部：块的大小（单位：字节）以及分配标志位

如何选择用于分配的空闲块

First fit

- 从头搜索“链表”，选择第一个适合的空闲块:

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

- 时间复杂度：与总块数（包括已分配的与空闲的）呈线性关系
- 在实际操作中，会在链表的起始处引起“碎片化”

Next fit

- 与first fit类似，不同之处在于本次搜索从上次搜索结束的地方开始
- 通常比first fit更快：因为避免重新扫描无用的块
- 但有研究表明，碎片化更糟糕

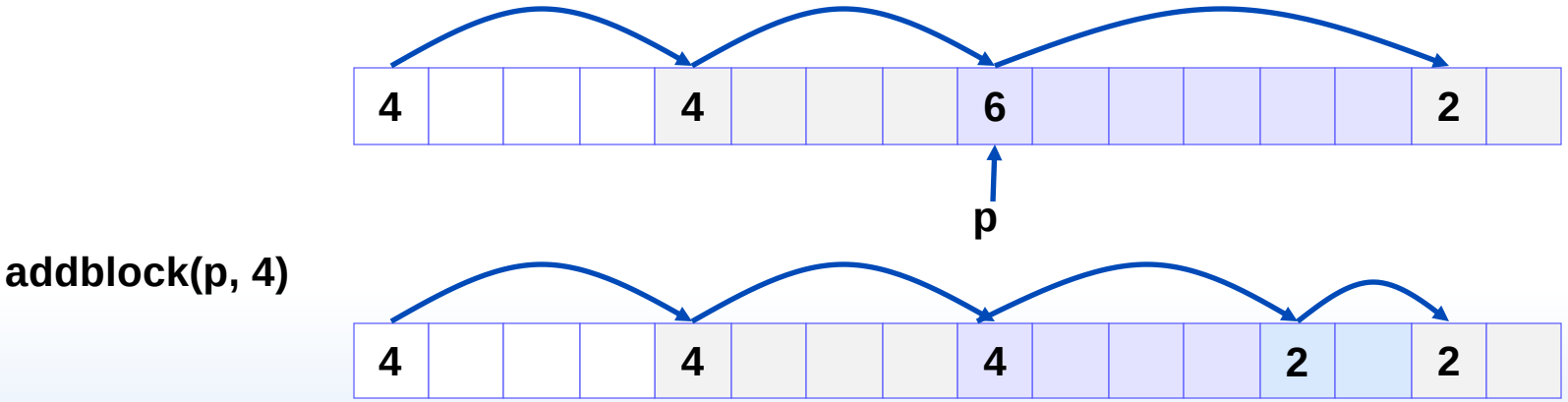
Best fit

- 搜索列表，选择最合适的空闲块，即分配后该块的剩余字节最少
- 这种策略会产生大量难以利用的“小外部碎片”
- 通常比first fit要慢

分配时如何处理多余空间

切分（splitting）

- 由于分配的空间小于空闲空间，所以需要分割该块

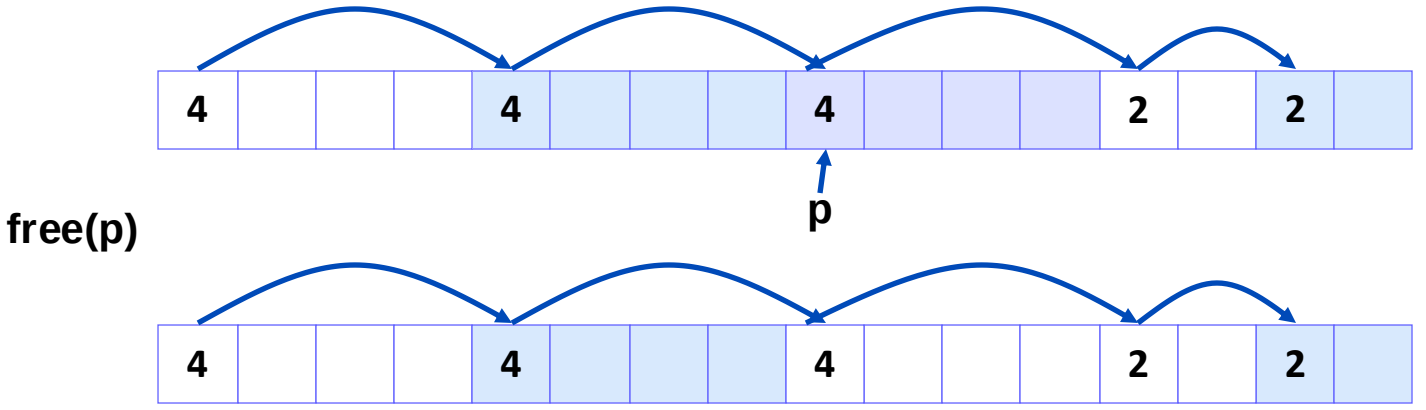



```
void addblock(ptr p, int len) {
  int newsize = ((len + 1) >> 1) << 1;    // round up to even
  int oldsize = *p & -2;                  // mask out low bit
  *p = newsize | 1;                       // set new length
  if (newsize < oldsize)
    *(p+newsize) = oldsize - newsize;     // set length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

如何释放块

一种简单的实现方式

- 仅仅清除“已分配”标志
  - void free_block(ptr p) { *p = *p & -2 }
- 但会导致“伪碎片化”



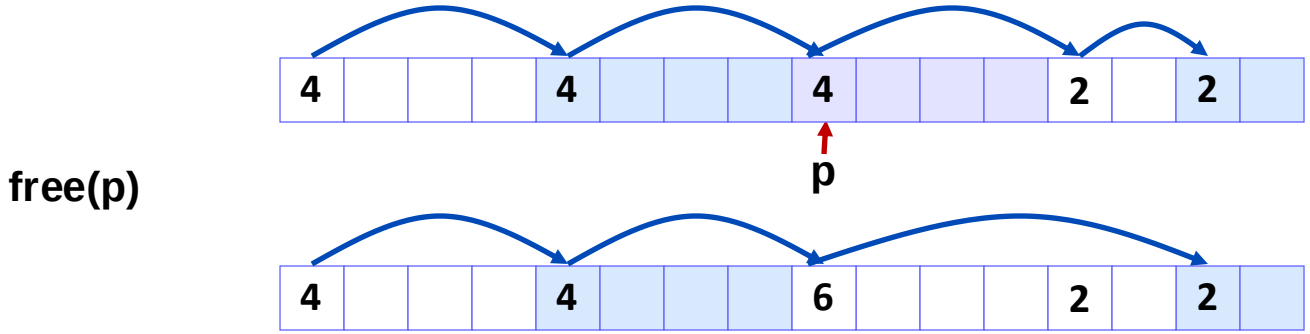
malloc(5) *Oops!*

有足够的空闲空间，但分配器却无法使用它们！

解决方法：合并

合并空闲的前（后）块

- 示例：与后块合并



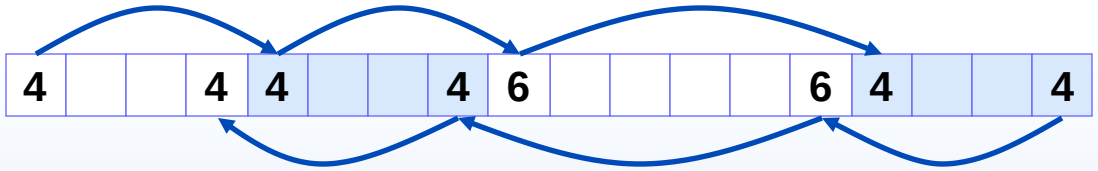

```
void free_block(ptr p) {
    *p = *p & -2;          // clear allocated flag
    next = p + *p;         // find next block
    if ((*next & 1) == 0)
      *p = *p + *next;     // add to this block if
}                          // not allocated
```

- 但是如何与前块合并?

双向合并

Boundary tags（边界标记） [Knuth73]

- 在空闲块的“底部”(即末尾)再存一份信息（大小/分配状态）
- 这样就可以向前遍历列表



a = 1: 已分配的块
a = 0: 空闲块

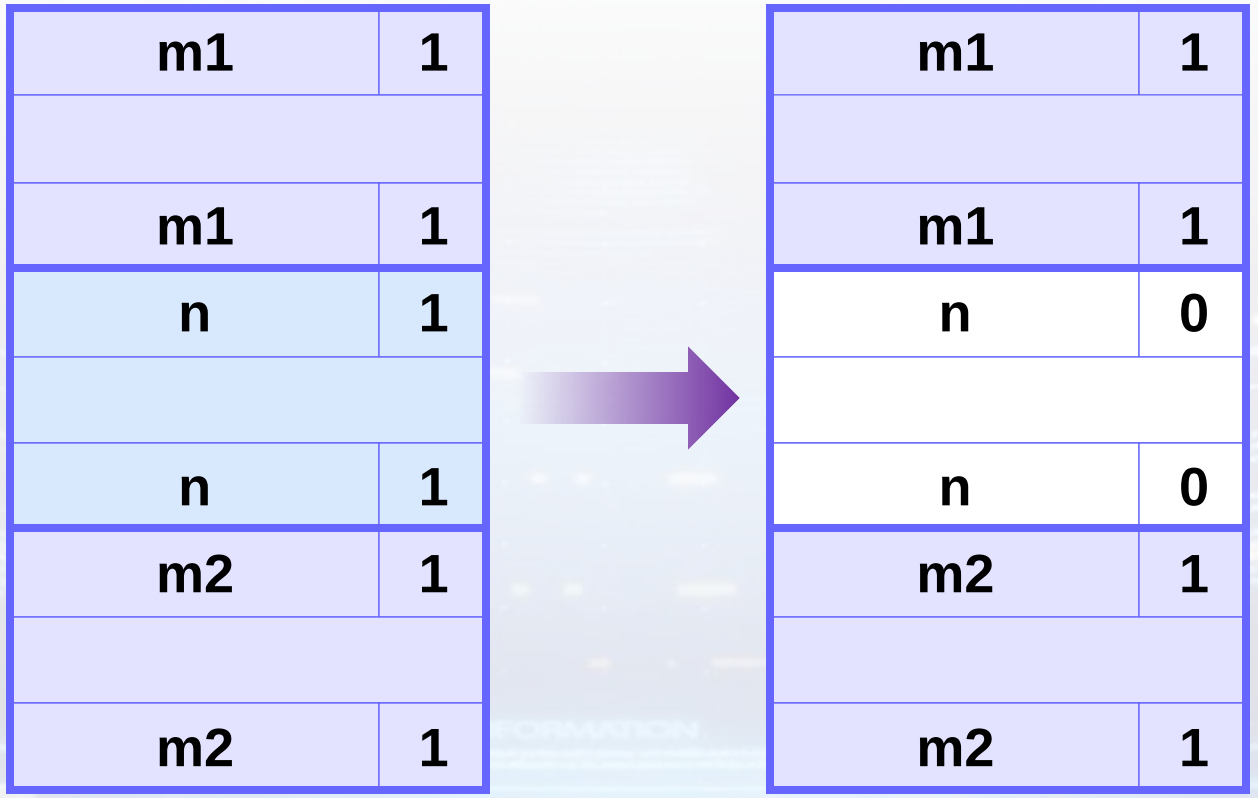
大小：总的块大小

有效负载：应用程序数据（仅对于已分配的块）

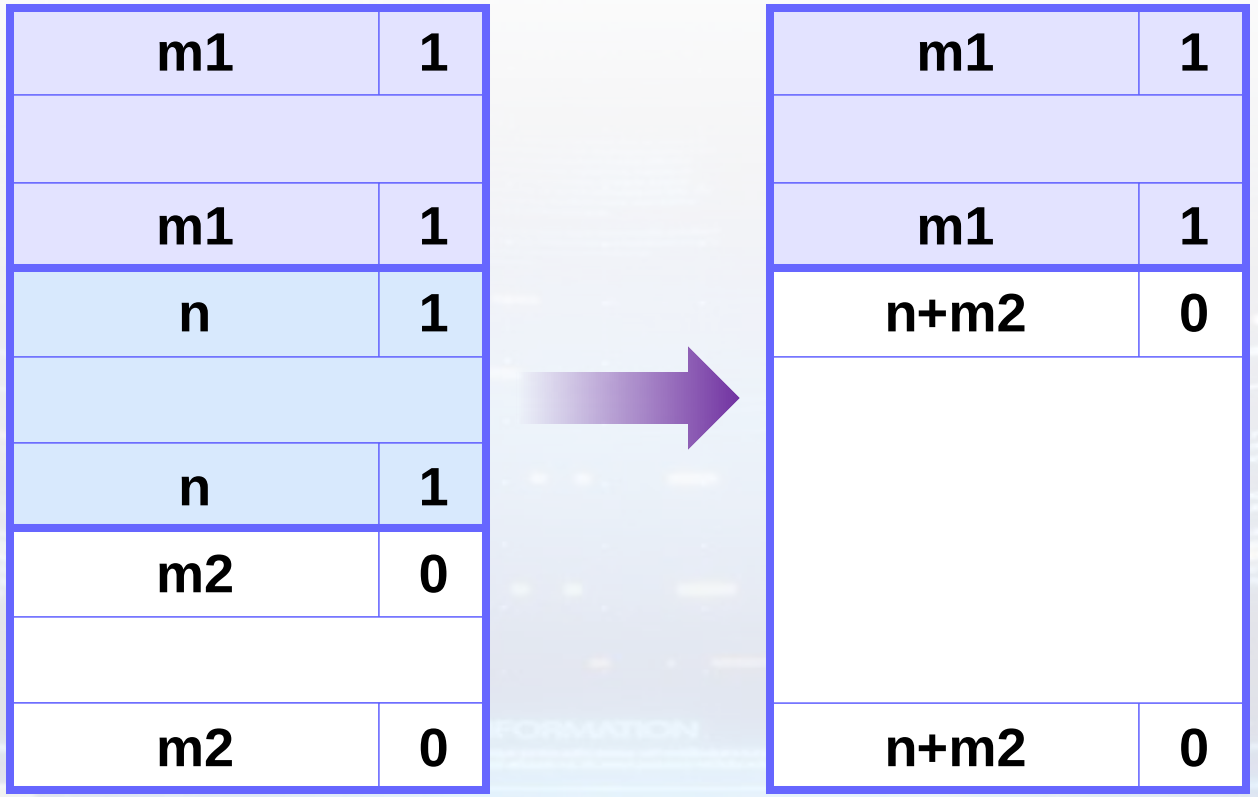
块格式

合并操作的时间复杂度：常数

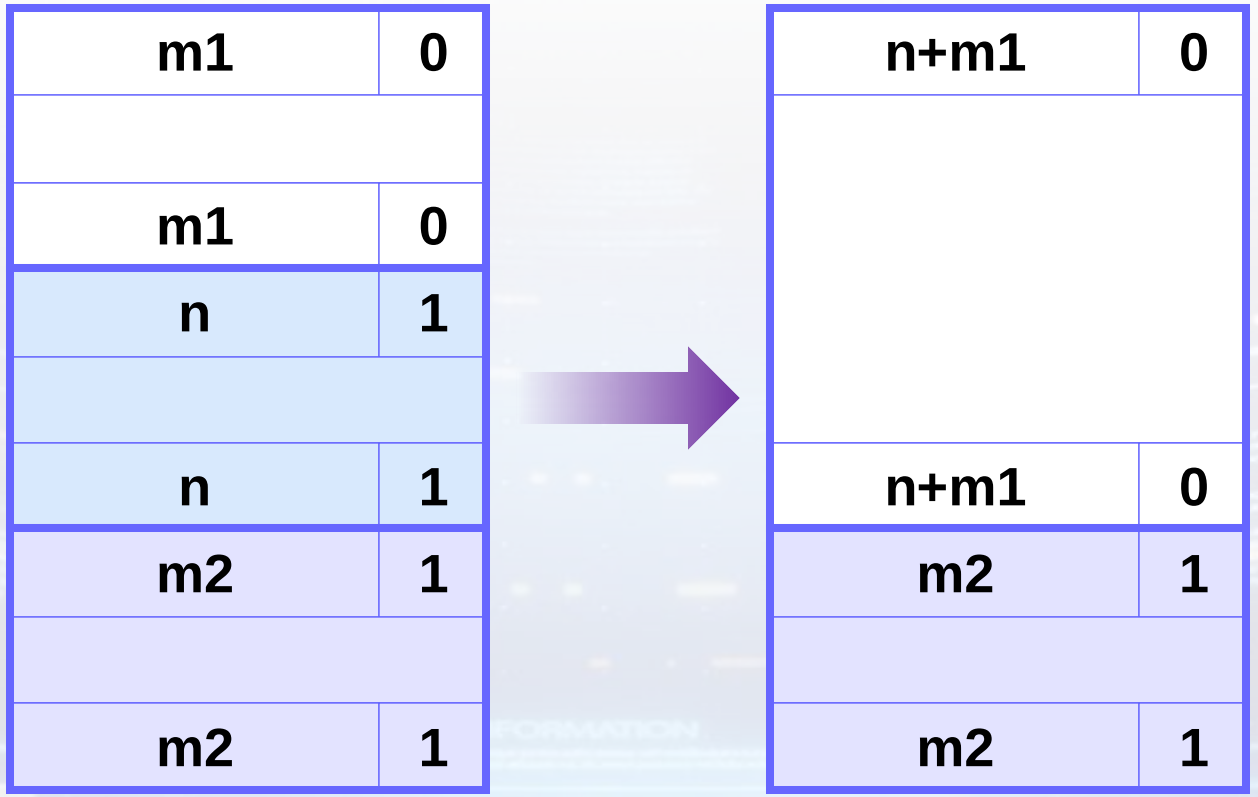
合并操作的时间复杂度：常数



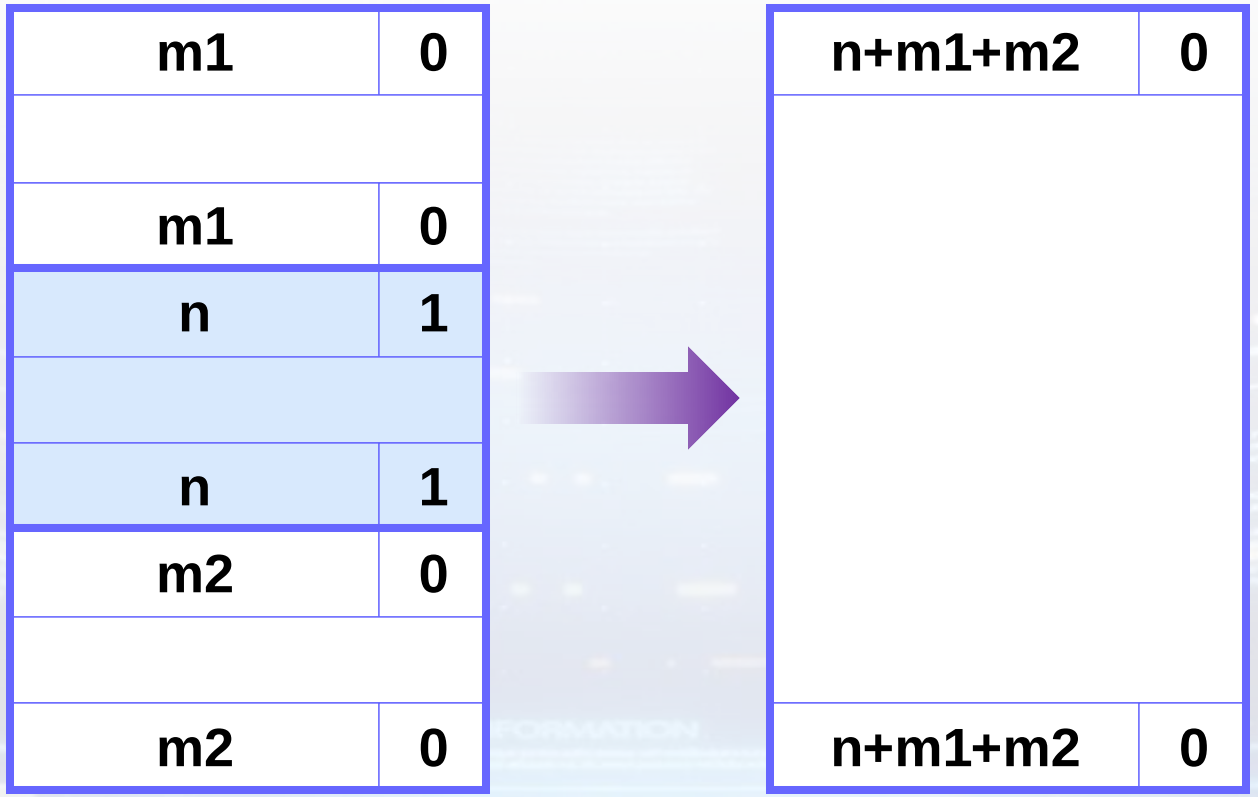
合并操作的时间复杂度：常数



合并操作的时间复杂度：常数



合并操作的时间复杂度：常数



“边界标记”方法的不足

内部碎片化

如何优化?

- 哪些块需要尾部标记?
- 这意味着什么?

“边界标记”会产生内部碎片。
但实际上，已分配出去的块不需要设置尾部标记，因为不会被合并。
为了确定前一个块是已分配的或是空闲的，可以在头部记录前一块的分配信息：
头部有3个位是0（一般是8字节对齐或更高），目前只用了一位，剩下2个可用。

Implicit Lists: 小结

实现：非常简单

分配的时间开销

- 线性复杂度

释放的时间开销

- 常数复杂度
- 包括发生前后合并的情况

内存利用率

- 取决于如何选择用于分配的空闲块
- First-fit / next-fit / best-fit

但是实践中不会应用Implicit Lists这类技术，因为线性复杂度还是太高

但是，分配时的切分以及基于边界标记的合并等概念是通用的