

# 第9章 虚拟内存： 动态内存分配 ——高级主题

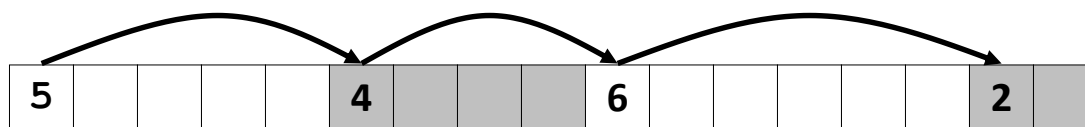
教 师： 郑贵滨  
计算机科学与技术学院  
哈尔滨工业大学

# 主要内容

- 显式空闲链表(Explicit free lists)
- 分离的空闲链表(Segregated free lists)
- 垃圾收集(Garbage collection)
- 内存相关的风险和陷阱(Memory-related perils and pitfalls)

# 跟踪空闲块

- 方法 1: **隐式空闲链表** 通过头部中的大小字段隐含地连接空闲块

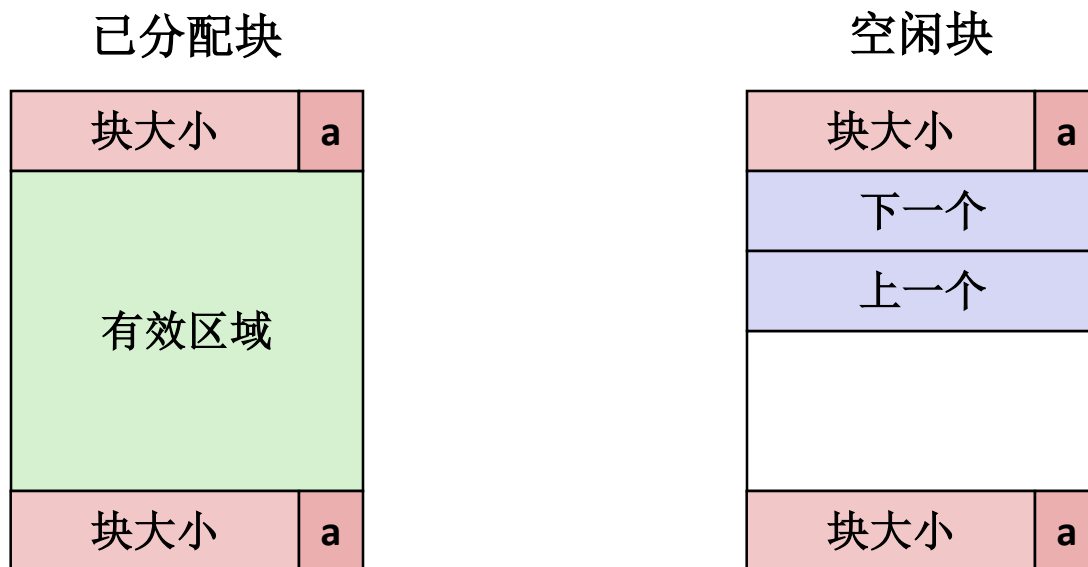


- 方法 2: **显式空闲链表** 在空闲块中使用指针连接空闲块



- 方法 3: **分离的空闲链表**
  - 每个大小类的空闲链表包含大小相等的块
- 方法 4: **按照尺寸排序的块**  
可以使用平衡树（例如红黑树），在每个空闲块中有指针，尺寸作为键。

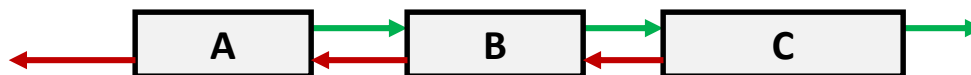
# 显式空闲链表



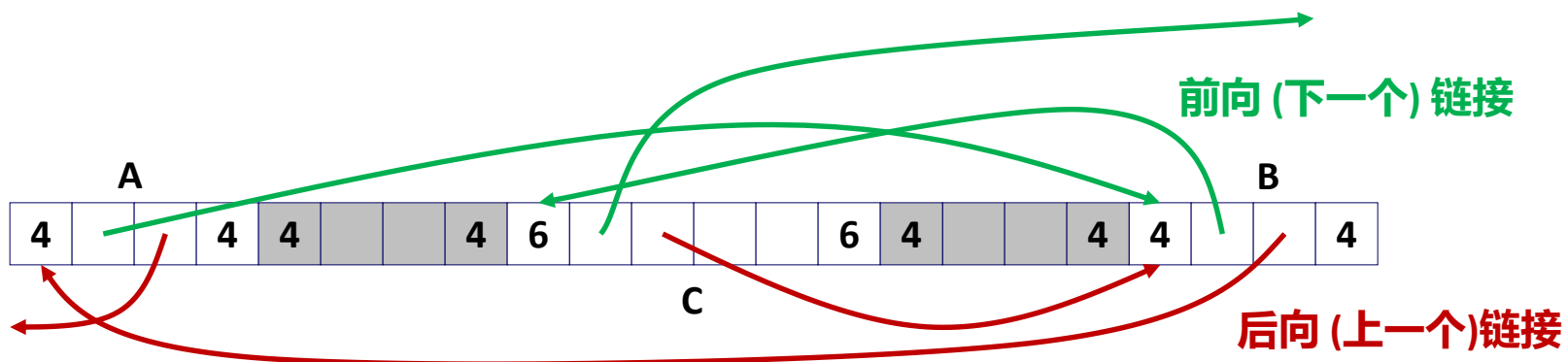
- 维护 **空闲块** 链表, 而不是 **所有块**
  - “下一个” 空闲块可以在任何地方
    - 因此需要存储前/后指针, 而不仅仅是大小 (size)
  - 还需要边界标记, 用于块合并
  - 幸运的是, 只需跟踪空闲块, 因此可以使用有效载荷区域。

# 显式空闲链表

## ■ 逻辑层面



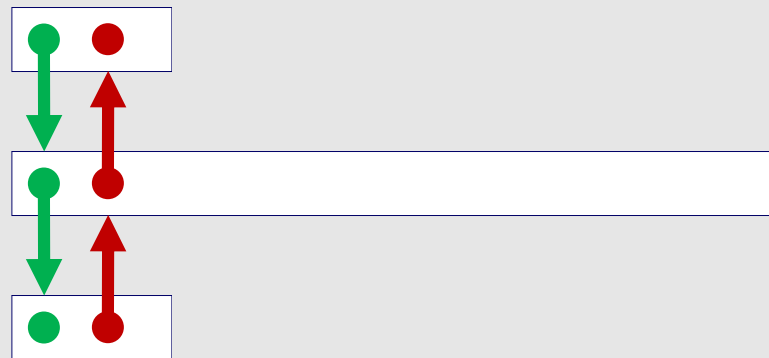
## ■ 物理层面: 块的顺序是任意的



# 显式空闲链表——分配

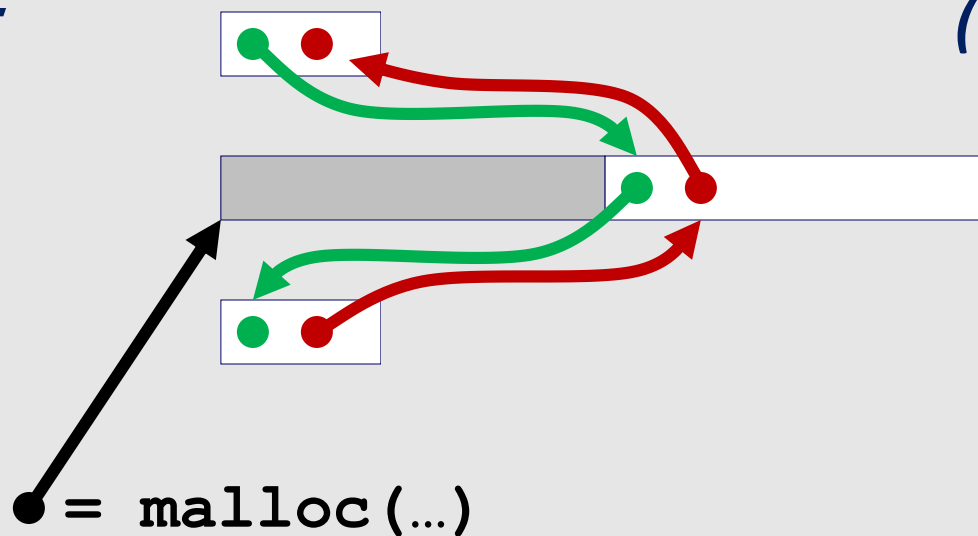
分配示意图

分配前



分配后

(带分割的分配)



# 显式空闲链表——释放

## ■ *插入原则:*

一个新释放的块放在空闲链表的什么位置？

## ■ LIFO (last-in-first-out) 策略：后进先出法

- 将新释放的块放置在链表的开始处
- *优点:* 简单，常数时间
- *缺点:* 研究表明碎片比地址顺序法更糟糕

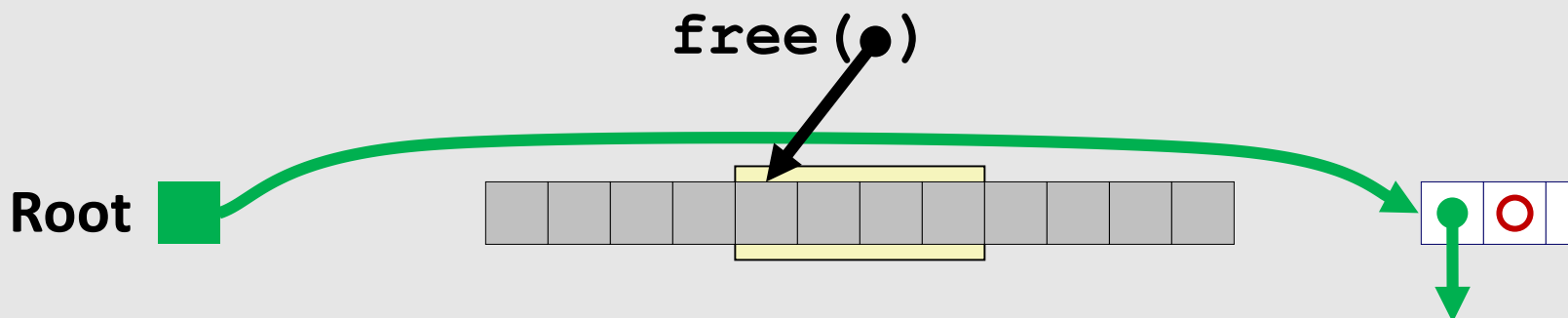
## ■ 地址顺序法(Address-ordered policy)

- 按照地址顺序维护链表:  
 $addr(\text{前一个块}) < addr(\text{当前回收块}) < addr(\text{下一个块})$
- *优点:* 研究表明碎片要少于LIFO (后进先出法)
- *缺点:* 需要搜索

# LIFO (后进先出) 回收策略 (情况1)

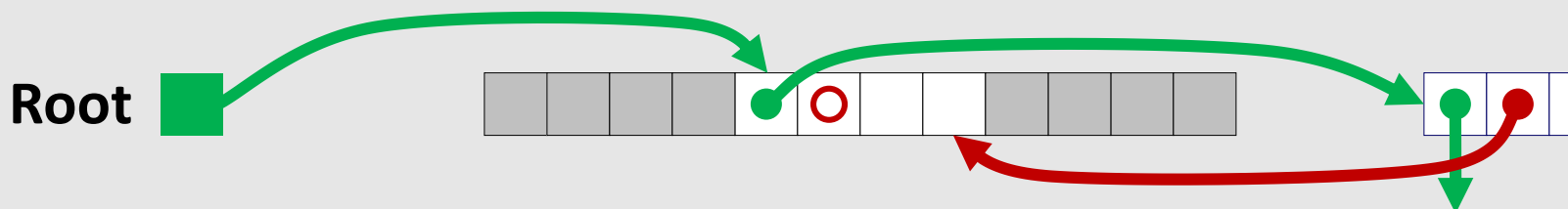
概念图

回收前



- 将新释放的块放置在链表的开始处

回收后

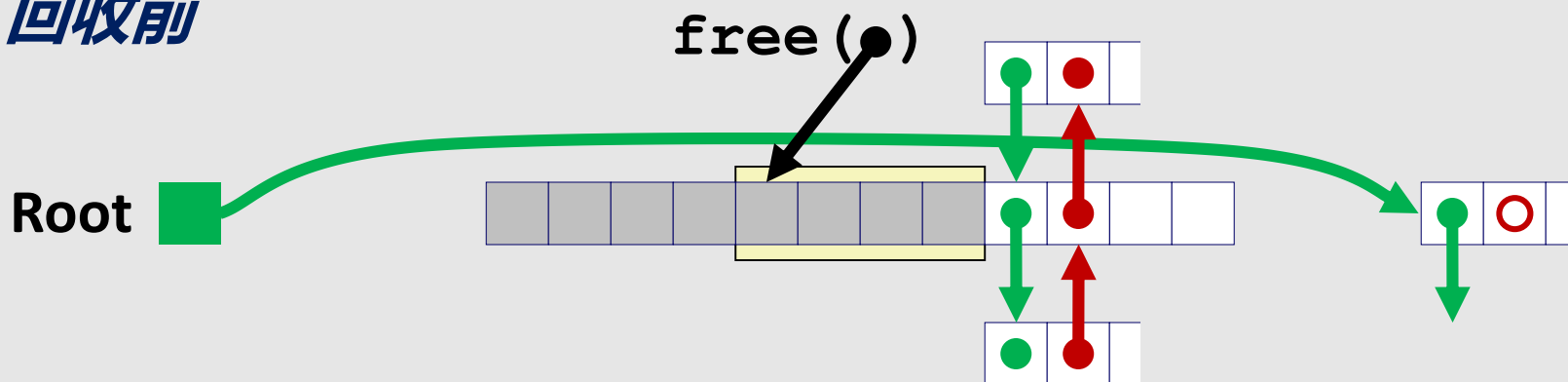




# LIFO (后进先出) 回收策略 (情况2)

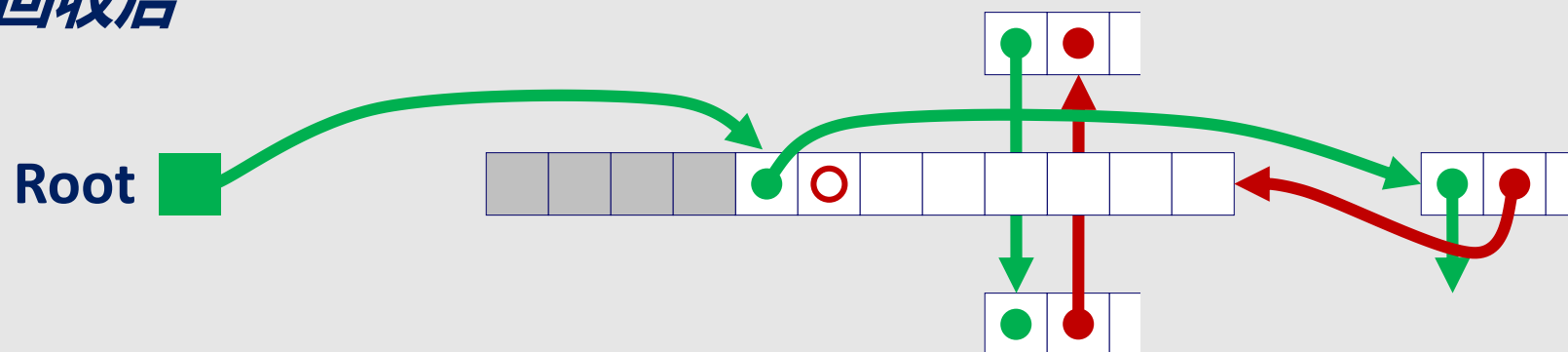
概念图

回收前



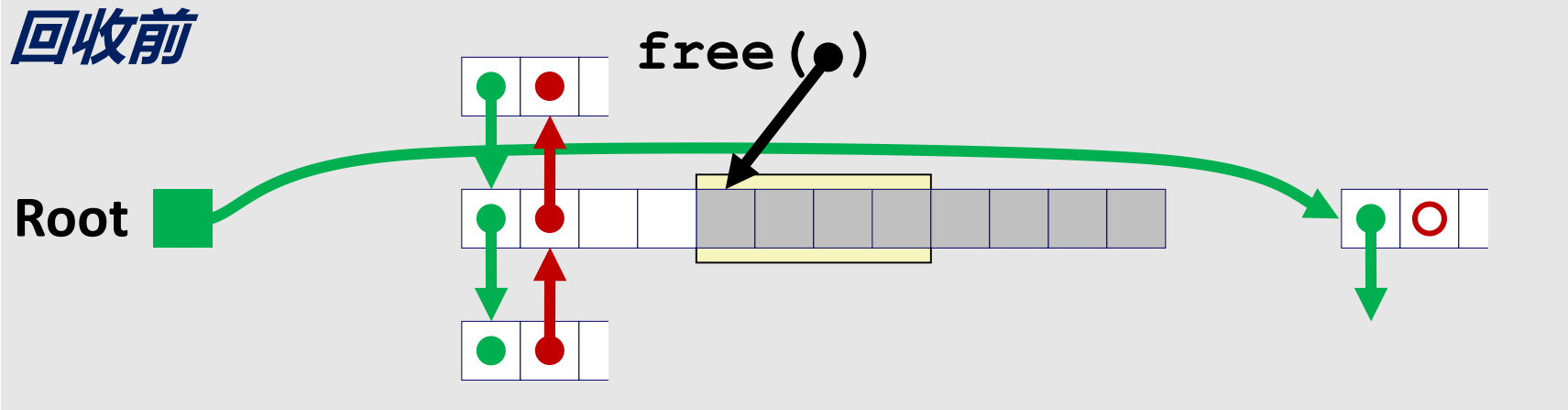
- 与后继块合并成一个新块（2块合并），并插入到链接表的开始处

回收后

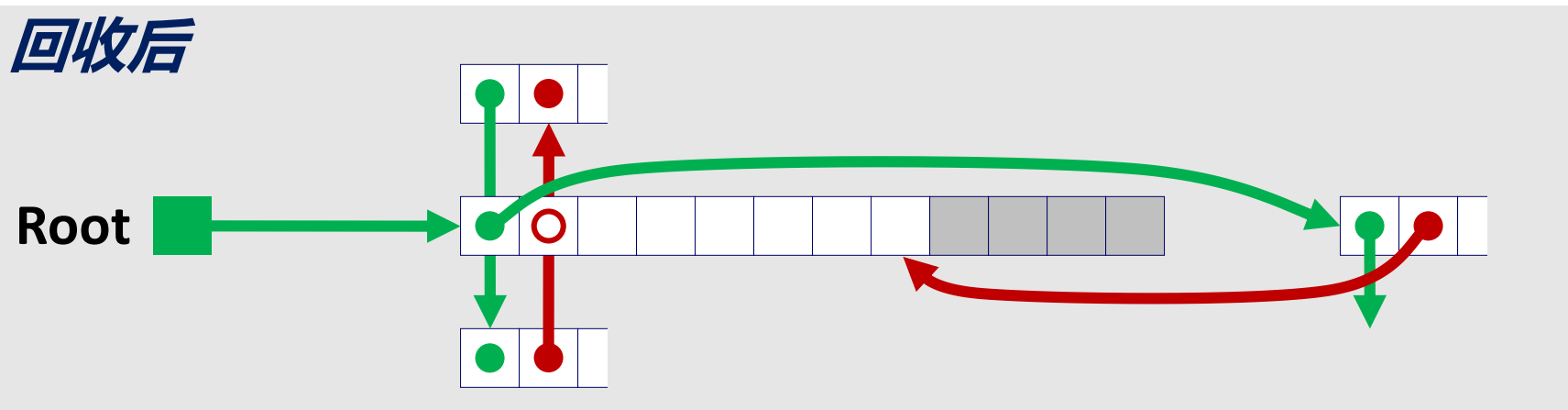


# LIFO (后进先出) 回收策略 (情况3)

概念图



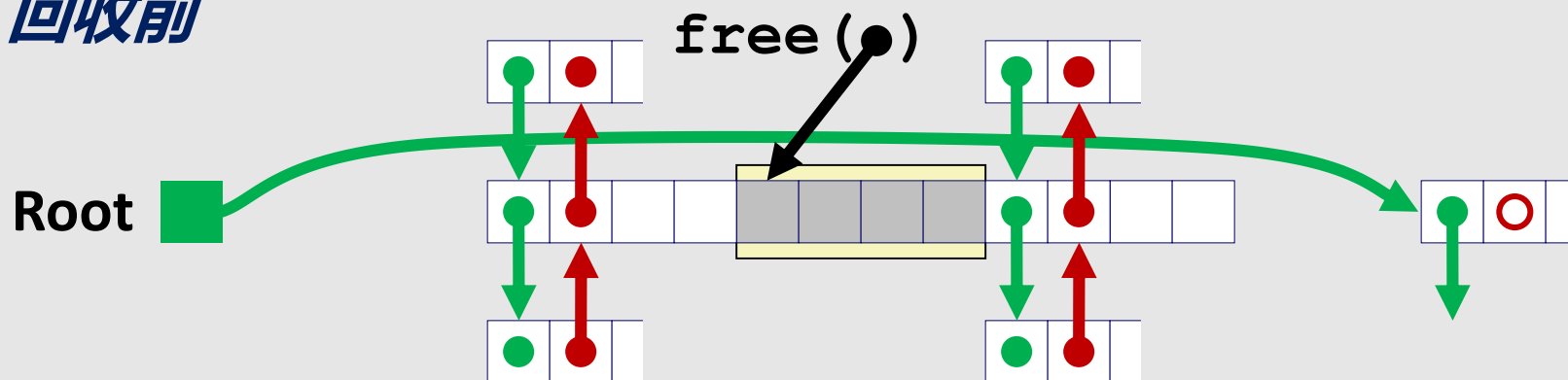
- 与前序空闲块合并成一个新空闲块（2块合并），并插入到空闲链表的开始处



# LIFO (后进先出) 回收策略 (情况4)

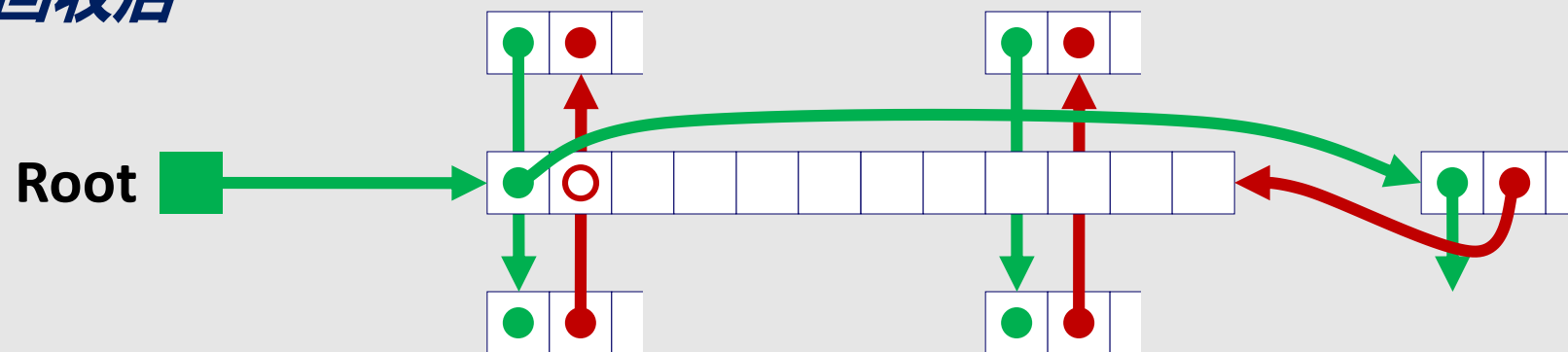
概念图

回收前



- 与前块和后继块合并成一个新空闲块（3块合并），插入到链表的开始

回收后



# 显式空闲链表小结

## ■ 与隐式链表相比较:

- 分配时间: 从块总数的线性时间减少到空闲块数量的线性时间
  - 当大量内存被占用时 **快得多**
  - 需要在链表中拼接块, 释放和分配稍显复杂一些

## ■ 额外的链接空间开销: 每个空闲块需要2个额外的字

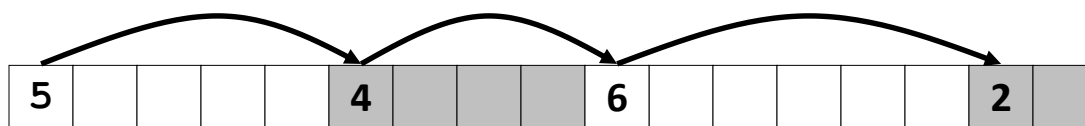
- 空闲块需要更大的最小块大小
- 潜在地提高了内部碎片的程度

## ■ 最常用的链表: 分离的空闲链表

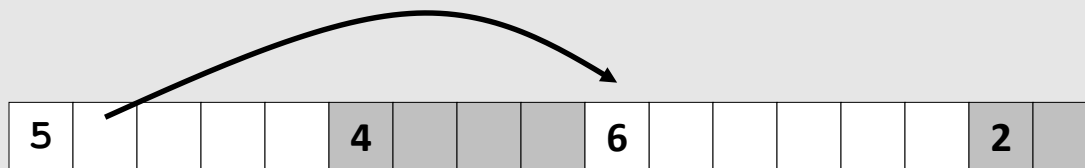
- 维护多个空闲链表, 每个链表中的空闲块尺寸大致相等, 或者是不同对象类型。

# 跟踪空闲块

- 方法 1: **隐式空闲链表** 通过头部中的大小字段隐含地连接空闲块



- 方法 2: **显式空闲链表** 在空闲块中使用指针连接空闲块



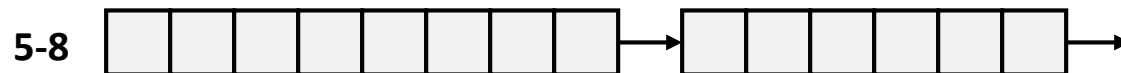
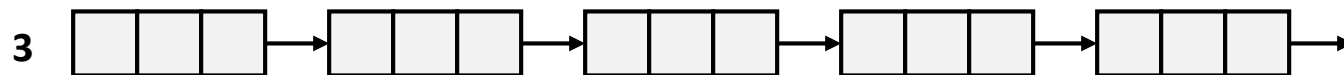
- 方法 3: **分离的空闲链表**
  - 空闲块按尺寸size分类/组，每个类/组使用一个空闲链表。
- 方法 4: **按照尺寸排序的块**
  - 可以使用平衡树（例如红黑树），在每个空闲块中有指针，尺寸作为键。

# 主要内容

- 显示空闲链表(Explicit free lists)
- 分离的空闲链表(Segregated free lists)
- 垃圾收集 (Garbage collection)
- 内存相关的风险和陷阱(Memory-related perils and pitfalls)

# 分离空闲链表分配器

- 每个 *尺寸类* (*size class*) 中的块，构成一个空闲链表



- 通常每个小的尺寸/size，都是一个单独的类
- 对于大的尺寸/size：按照2的幂分类

# 分离适配

- 分配器维护一个空闲链表数组，每个空闲链表和一个大小类关联，*链表是显式或隐式的*。
- 当分配器需要一个大小为 $n$ 的块时：
  - 搜索相应的空闲链表，其大小要满足 $m > n$
  - 如果找到了合适的块：
    - 拆分块，并将剩余部分插入到适当的可选列表中
  - 如果找不到合适的块，就搜索下一个更大的大小类的空闲链表
  - 直到找到为止。
- 如果空闲链表中没有合适的块：
  - 向操作系统请求额外的堆内存（使用`sbrk()`）
  - 从这个新的堆内存中分配出  $n$  字节
  - 将剩余部分放置在适当的大小类中



# 分离适配

## ■ 释放块

- 合并，并将结果放置到相应的空闲链表中

## ■ 分离适配的优势

- 更高的吞吐量
  - 2的幂size class(尺寸类)，对数时间
- 更高的内存使用率
  - 分离空闲链表 + 简单的首次适配，其内存利用率近似于对整个堆做最佳适配搜索。
  - 极端情况：如果每个块都属于它本身尺寸的大小类，那么就相当于最佳适应算法。

# 关于分配器的更多信息

- D. Knuth, “*The Art of Computer Programming*”, 2<sup>nd</sup> edition, Addison Wesley, 1973
  - 动态存储分配的经典参考
- Wilson et al, “*Dynamic Storage Allocation: A Survey and Critical Review*”, Proc. 1995 Int’l Workshop on Memory Management, Kinross, Scotland, Sept, 1995.
  - 全面的综述
  - 可以从 CS:APP student site ([csapp.cs.cmu.edu](http://csapp.cs.cmu.edu)) 获取

# 主要内容

- 显示空闲链表(Explicit free lists)
- 分离的空闲链表(Segregated free lists)
- 垃圾收集 (Garbage collection)
- 内存相关的风险和陷阱(Memory-related perils and pitfalls)

# 隐式内存管理——垃圾收集

- **垃圾收集**: 自动回收堆存储的过程——应用从不显式释放——爽?

```
void foo() {  
    int *p = malloc(128);  
    return; /* p block is now garbage */  
}
```

- 常见于多种动态语言中:
  - Python, Ruby, Java, Perl, ML, Lisp, Mathematica
- C 和 C++ 有变种的垃圾收集器——保守的垃圾收集器
  - 因为保守, 不能确保收集所有的垃圾

# 垃圾收集

## ■ 内存管理器怎么知道何时可以释放内存？

- 一般我们不知道将来会用到什么，因为这取决于具体条件
- 但可以确定：

如果没有指针指向一个块，那这个块就不能被使用——想用也用不了啊

## ■ 必须做些关于指针的假设

- 内存管理器可以区分指针和非指针
- 所有指针都指向一个块的起始地址
- 无法隐藏指针  
(例如：将指针强制转换成int，然后再转换成指针)

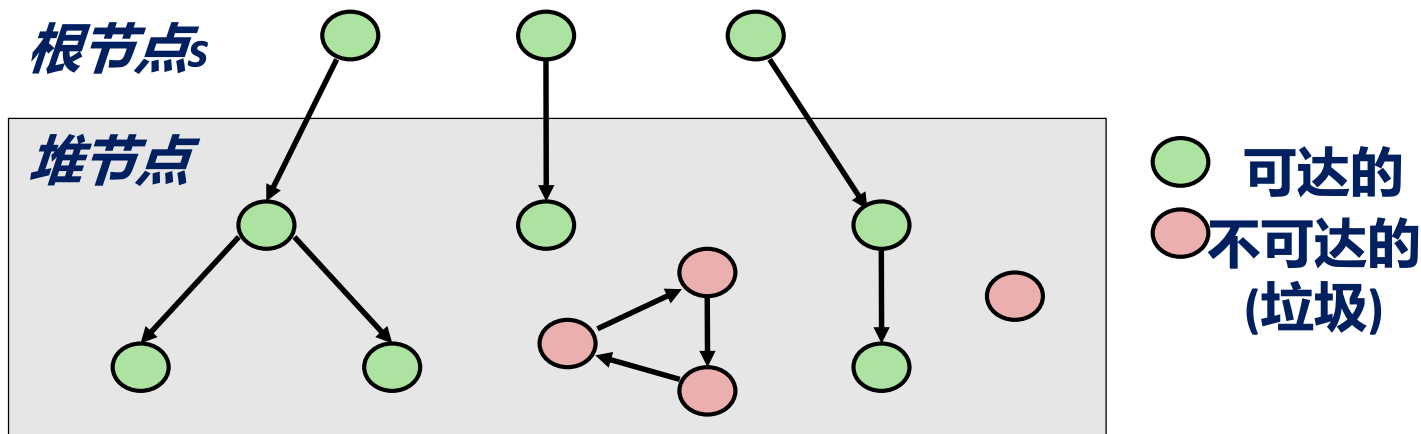
# 经典的垃圾收集算法

- 标记&清除(Mark&Sweep )垃圾收集器(McCarthy, 1960)
  - 不移动块 (除非要 “压缩”)
- 引用计数Reference counting (Collins, 1960)
  - 不移动块 (不讨论)
- 复制收集Copying collection (Minsky, 1963)
  - 移动块 (不讨论)
- Generational Collectors (Lieberman and Hewitt, 1983)
  - 基于生命期的收集
    - 大部分已分配块，很快就会变成垃圾
    - 因此，回收工作的重点是刚刚分配的内存区域
- 获得更多信息:  
Jones and Lin, “*Garbage Collection: Algorithms for Automatic Dynamic Memory*”, John Wiley & Sons, 1996.

# 将内存视为有向图

## ■ 将内存看作一张有向图

- 每个块是图中的一个节点
- 每个指针是图中的一个边
- 根节点：不在堆中，但保存着指向堆中的指针的位置，可以是寄存器、栈里的变量，全局变量。



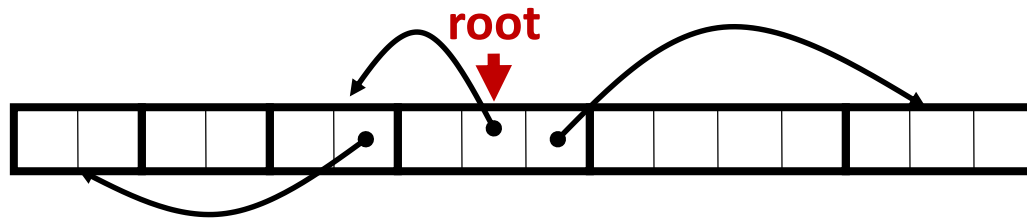
**可达**节点(块)：存在一条从某个根节点出发并到达该节点的有向路径

不可达节点是**垃圾**（不能被应用程序再次使用）

# 标记&清除垃圾收集器

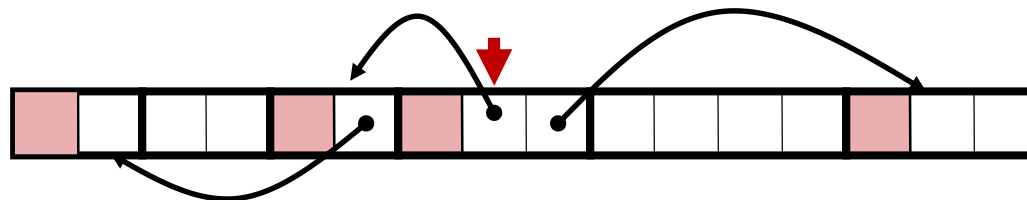
- 可以建立在已有的malloc包基础之上
  - 使用malloc分配，直到“用完了空间”
- 当“用完了空间”：
  - 在块的头部中使用额外的**标记位** (*mark bit*)
  - **标记**: 从根节点开始标记所有可达块的**标记位**
  - **清除**: 扫描所有块，释放没有被标记的块

标记前



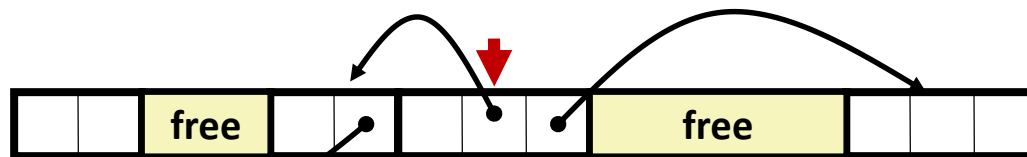
注意：箭头表示内存引用，而不是空闲链表指针

标记后



■ 标记位设置

清除后





# 简单实现的假设

## ■ 应用程序

- **new(n)**: 返回指向新块的指针
- **read(b,i)**: 读取 **b** 块位置 **i** 的内容到寄存器
- **write(b,i,v)**: 将内容 **v** 写入到 **b** 块位置 **i**

## ■ 每个块都会有一个包含一个字的头部

- 对于块**b**，头部可用 **b[-1]**寻址
- 用在不同的收集器中，用途不同

## ■ 垃圾收集器使用的函数

- **is\_ptr(p)**: 判断**p**是不是指针
- **length(b)**: 返回块**b**的以字为单位的长度（不包括头部）
- **get\_roots()**: 返回所有根节点

# 标记&清除...

## Mark (标记) 使用内存图的深度优先遍历

```
ptr mark(ptr p) {
    if (!is_ptr(p)) return;    // 不是指针则什么都不做
    if (markBitSet(p)) return; // 检查是否已标记
    setMarkBit(p);            // 设置标记位
    for (i=0; i < length(p); i++) // 调用mark标记块中
        mark(p[i]);            // 的每个字 (可能是指针)
    return;
}
```

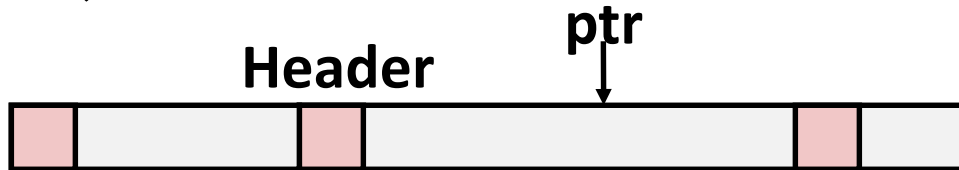
## Sweep (清除) 使用长度查找下一个块

```
ptr sweep(ptr p, ptr end) {
    while (p < end) {
        if markBitSet(p)
            clearMarkBit();
        else if (allocateBitSet(p))
            free(p);
        p += length(p);
    }
}
```

# C语言：保守的Mark & Sweep

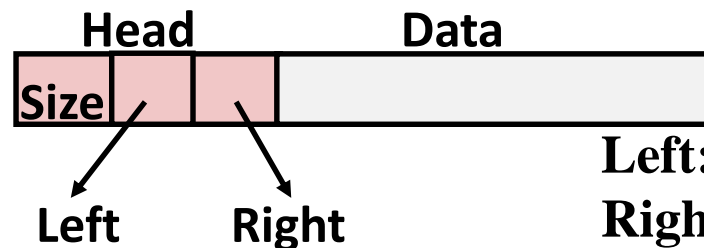
## ■ C程序的“保守的”垃圾收集器

- `is_ptr()` :通过检查某个字是否指向已分配的内存块来确定该字是否为指针
- 但是，在C语言中指针可以指向一个块的中间位置



## ■ 如何找到块的起始位置？

- 可以使用平衡二叉树跟踪所有分配的块
- 平衡树指针可以存储在每个已分配块的头部（使用两个额外的字left和right）



**Left:** 较小的地址  
**Right:** 较大的地址

# 主要内容

- 显示空闲链表(Explicit free lists)
- 分离的空闲链表(Segregated free lists)
- 垃圾收集 (Garbage collection)
- 内存相关的风险和陷阱(Memory-related perils and pitfalls)

# 内存相关的风险和陷阱

- 解引用（间接引用）坏指针
- 读未初始化的内存
- 覆盖内存
- 引用不存在的变量
- 多次释放内存
- 引用空闲堆块中的数据
- 释放内存失败

# C 运算符

- $\rightarrow$ ,  $()$ ,  $[]$  有高优先级,  $*$  和  $\&$  次之
- 一元  $+$ ,  $-$ ,  $*$  比二元形式有更高的优先级

## 运算符

$() [] \rightarrow \cdot$   
 $! \sim ++ -- + - * \& (\text{type}) \text{sizeof}$   
 $* / \%$   
 $+ -$   
 $<< >>$   
 $< <= > >=$   
 $== !=$   
 $\&$   
 $\wedge$   
 $|$   
 $\&\&$   
 $||$   
 $?:$   
 $= += -= *= /= \% = \& = \wedge = != << = >> =$   
 $,$

## 结合性

从左到右  
 从右到左  
 从左到右  
 从左到右  
 从左到右  
 从左到右  
 从左到右  
 从左到右  
 从左到右  
 从左到右  
 从右到左  
 从右到左  
 从左到右

# C 指针的使用: 来做个自测吧!

<code>int *p</code>	p is a pointer to int
<code>int *p[13]</code>	p is an array[13] of pointer to int
<code>int *(p[13])</code>	p is an array[13] of pointer to int
<code>int **p</code>	p is a pointer to a pointer to an int
<code>int (*p)[13]</code>	p is a pointer to an array[13] of int
<code>int *f()</code>	f is a function returning a pointer to int
<code>int (*f)()</code>	f is a pointer to a function returning int
<code>int (*( *f()) [13])()</code>	f is a function returning ptr to an array[13] of pointers to functions returning int
<code>int (*( *x[3])()) [5]</code>	x is an array[3] of pointers to functions returning pointers to array[5] of ints

# 间接引用坏指针

## ■ 经典的scanf错误

```
int val;  
  
...  
  
scanf("%d", val);
```



# 读未初始化的内存

- 常见的错误是假设堆内存被初始化为零

```
/* return y = Ax */  
int *matvec(int **A, int *x) {  
    int *y = malloc(N*sizeof(int));  
    int i, j;  
  
    for (i=0; i<N; i++)  
        for (j=0; j<N; j++)  
            y[i] += A[i][j]*x[j];  
    return y;  
}
```

# 覆盖内存

## ■ 分配（可能）错误大小的对象

```
int **p;  
  
p = malloc(N*sizeof(int));  
  
for (i=0; i<N; i++) {  
    p[i] = malloc(M*sizeof(int));  
}
```

假设指向对象的指针和它们所指向的对象是相同大小的

# 覆盖内存

## ■ Off-by-one error 错位错误

```
int **p;  
  
p = malloc(N*sizeof(int *));  
  
for (i=0; i<=N; i++) {  
    p[i] = malloc(M*sizeof(int));  
}
```

# 覆盖内存

## ■ 不检查输入串的大小

```
char s[8];  
int i;  
  
gets(s);  /* reads "123456789" from stdin */
```

## ■ 经典缓冲区溢出攻击的基础

# 覆盖内存

## ■ 误解指针运算

```
int *search(int *p, int val) {  
    while (*p && *p != val)  
        p += sizeof(int);  
  
    return p;  
}
```

# 覆盖内存

## ■ 引用指针而不是它所指向的对象

```
int *BinheapDelete(int **binheap, int *size) {  
    int *packet;  
    packet = binheap[0];  
    binheap[0] = binheap[*size - 1];  
    *size--;  
    Heapify(binheap, *size, 0);  
    return(packet);  
}
```

# 引用不存在的变量

- 忘记当函数返回时局部变量将消失

```
int *foo () {  
    int val;  
  
    return &val;  
}
```

# 多次释放

## ■ 很讨厌!

```
x = malloc(N*sizeof(int));  
    <manipulate x>  
free(x);  
  
y = malloc(M*sizeof(int));  
    <manipulate y>  
free(x);
```



# 引用空闲堆块中的数据

## ■ 太邪恶!

```
x = malloc(N*sizeof(int));  
    <manipulate x>  
free(x);  
    ...  
y = malloc(M*sizeof(int));  
for (i=0; i<M; i++)  
    y[i] = x[i]++;
```

# 释放失败（内存泄漏）

## ■ 慢性、长期的杀手！

```
foo() {  
    int *x = malloc(N*sizeof(int));  
    ...  
    return;  
}
```

# 释放失败（内存泄漏）

## ■ 释放部分数据

```
struct list {  
    int val;  
    struct list *next;  
};  
  
foo() {  
    struct list *head = malloc(sizeof(struct list));  
    head->val = 0;  
    head->next = NULL;  
    <create and manipulate the rest of the list>  
    ...  
    free(head);  
    return;  
}
```

# 处理内存bug

- 调试器: gdb
  - 有利于发现间接引用坏指针
  - 很难检测其他内存bug
- 数据一致性检查
  - 安静运行, 仅在错误时打印消息
  - 用作探针, 以发现并消除错误
- 二进制转换器valgrind
  - 强大的调试和分析技术
  - 重写可执行目标文件的文本段
  - 运行时检查每个引用
    - 坏指针、覆盖写、引用已分配块之外的内容

# 处理内存bug

## ■ GNU标准库(glibc)的内存检查

- 通过环境变量MALLOC\_CHECK\_, 设定内置的调试特性, 对动态内存进行调试。
- 在默认情况下是不设定的, 在老的版本默认这个值为0, 新的版本默认值为2, 但有一个矛盾, 如果设定为空, 它将会打印出长长的跟踪信息, 这比设为2更详细。
- MALLOC\_CHECK\_有三种设定:
  - MALLOC\_CHECK\_=0 ——关闭所有检查。
  - MALLOC\_CHECK\_=1 ——当有错误被探测到时, 在标准错误输出(stderr)上打印错误信息。
  - MALLOC\_CHECK\_=2 ——当有错误被探测到时, 不显示错误信息, 直接进行中断。