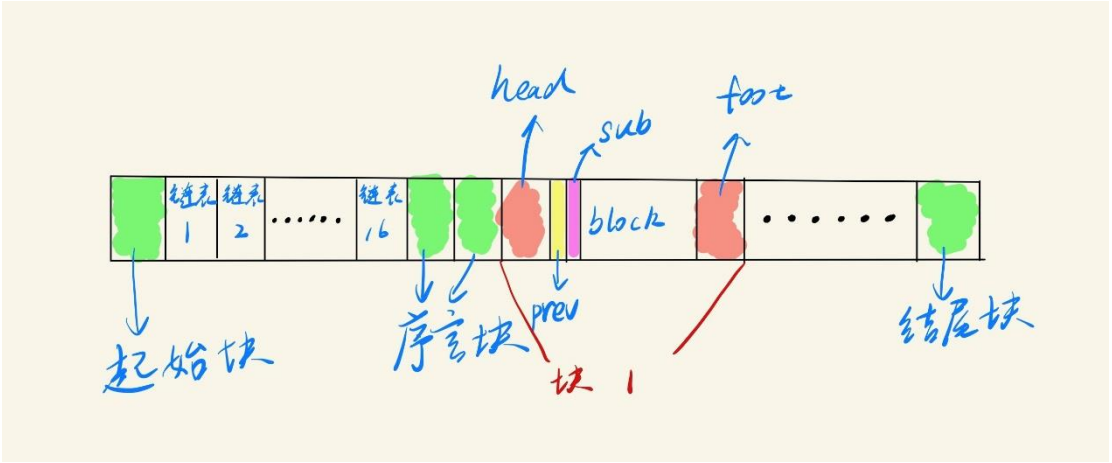
本次实验要求我们完成一个简易的内存分配器，我采用了显示的分离式链表管理内存，下面为实现该内存管理器所在 mm.c 中构建的函数。

我采用起始块到序言块之间的 16*4 个字节用于存放空闲链表头，每一类的块的大小范围为 2^(n-1)~2^n，其中 n 为链表的序号，至于为什么为 16 个，经过测试发现，最大的空闲块出现在第九个测试 trace，小于 2^16，因此 16 个类别足矣。每一个块的头标签后的前两个 WSIZE，第一个用于存放前一个空闲块的 bp 指针，第二个用于存放后一个空闲块的 bp 指针，即前驱和后继，这样构建了一个基本的链表。

下图为堆的结构图



各个基本函数的介绍

int mm_init(void)

该函数用于初始化堆，申请 20*WSIZE 字节用于堆的构建，具体结构为上图所示随后我们初始化每一个基本结构，随后进行一次默认的拓展堆，完成对于堆的初始化。我们可以注意到，bp 即有效载荷指针指向的是 prve。

void *extend_heap(size_t words)

该函数用于拓展堆，首先我们要对于传入的 words 数进行双字对齐，随后申请对应大小的堆空间，最后封装好新申请的空间为空闲块，并封装新的结尾块，将新空闲块插入空闲链表，返回该空闲块的有效载荷指针。

void *coalesce(void *bp)

该函数用于合并空闲块，首先获得前后块的分配情况，然后当周围有空闲块时合并周围的空闲块，最后插入到空闲链表，然后返回该新空闲块的指针。

void insert(void *bp)

该函数用于插入空闲块，我们首先获得空闲块的大小和通过 search 函数获得空闲块所对应的链表序号，随后根据块大小将该块插入到合适的位置，使得所有链表的块都是从小到大排序的，有利于提高空间利用率。

void delete(void *bp)

该函数用于删除指定的空闲块，即更新该块前驱的后继和后继的前驱。

int search(size_t v)

该函数用于计算 v 大小对应的链表序号。步骤为下

确定 v 的大小类： 通过一系列的位移操作，代码将输入值 v 的二进制表示中第一个非零位之前的位全部置零，然后将得到的值用于确定 v 的大小类。这是通过将不同位上的比特位移到高位，然后进行按位或运算的方式来实现的。

计算 x： 根据确定的大小类，计算 x 的值。x 被初始化为(int)r - 4，其中 r 是通过上述位移操作得到的大小类。

调整 x：根据 x 的大小调整 x，使得 x 落于设定好的范围内。

这个方法可以在 O(lg(N)) 运算中求出 N 位整数的以 2 为底的对数，方法来自于 https://graphics.stanford.edu/~seander/bithacks.html#IntegerLogLookup

void *mm_malloc(size_t size)

该函数用于分配内存，主要步骤为对齐 size，寻找合适的空闲块，若没有合适的空闲块就拓展堆，最后调用 place 函数填充块，返回 bp 指针。

void *find_fit(size_t asize)

该函数用于寻找合适的空闲块，找到后返回对应的指针，否则返回 NULL

void place(void *bp, size_t asize)

该函数用于分离空闲块，以减少内存碎片。

void mm_free(void *ptr)

释放内存

void *mm_realloc(void *ptr, size_t size)

该函数用于重新分配内存，为了提高内存的利用率，添加了向后合并的算法。

函数时间复杂度分析

mm_init:
时间复杂度：O(1)
初始化函数分配了一个固定大小的堆，并初始化了数据结构。时间复杂度是常数。

extend_heap:
时间复杂度：O(1)
此函数通过从操作系统请求额外的内存来扩展堆。时间复杂度是常数，因为它涉及单个内存分配。

coalesce:

时间复杂度：O(1)
coalesce 函数在释放操作后合并相邻的空闲块。它涉及更新自由链表中的指针。由于受影响的空闲块数量是常数，时间复杂度为 O(1)。

insert：
时间复杂度：O(1)
insert 函数将一个块插入到分离的自由链表中，保持基于块大小的排序顺序。时间复杂度是 O(1)，因为它涉及更新链表中的指针。

delete：
时间复杂度：O(1)
delete 函数从分离的自由链表中删除一个块。由于它涉及更新链表中的指针，因此时间复杂度是 O(1)。

search：
时间复杂度：O(1)
search 函数用于确定空闲块的大小类。由于其操作是基于位移和常数级别的运算，时间复杂度是 O(1)。

mm_malloc：
时间复杂度：取决于 find_fit 和 place 函数
mm_malloc 函数分配内存，其中 find_fit 的时间复杂度取决于搜索合适的空闲块，而 place 的时间复杂度是 O(1)。因此，整体的时间复杂度取决于 find_fit 函数。

find_fit：
时间复杂度：O(k)，其中 k 是大小类的数量
find_fit 函数在不同的大小类中查找合适的空闲块。它的时间复杂度取决于搜索过程，最坏情况下可能需要遍历整个链表。因此，时间复杂度是 O(k)，其中 k 是大小类的数量。

place：
时间复杂度：O(1)
place 函数用于将内存块分割或标记为已分配。由于它涉及更新自由链表中的指针，时间复杂度是 O(1)。

mm_free：
时间复杂度：O(1)
mm_free 函数释放内存块并调用 coalesce 函数以合并空闲块。由于 coalesce 的时间复杂度是 O(1)，因此整体的时间复杂度是 O(1)。

mm_realloc：
时间复杂度：取决于内部操作
mm_realloc 函数重新分配内存块，其中一些情况下需要调用 mm_malloc 和 mm_free。整体的时间复杂度取决于内部的操作，可能是 O(1)或 O(k)的级别，取决于具体的情况。

函数执行过程

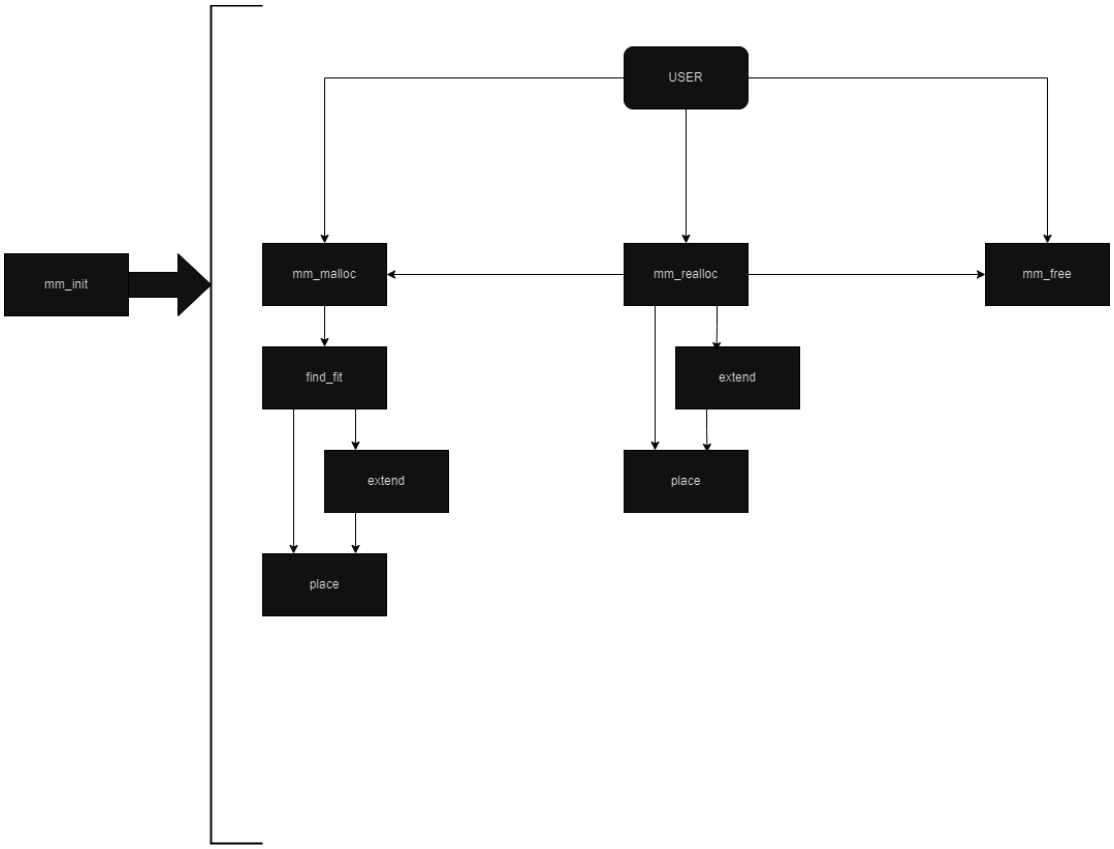
mm_init:
分配一块固定大小的堆空间。
初始化各个大小类的链表头指针为 NULL。
创建序言块和结尾块，并设置为已分配状态。
调用 extend_heap 函数扩展堆空间，初始化堆的数据结构。

mm_malloc:
调用 find_fit 函数在合适的大小类中查找空闲块。
如果找到合适的块，调用 place 函数分割或标记该块为已分配状态。
如果未找到合适的块，调用 extend_heap 函数扩展堆，并再次调用 place 函数。

mm_free:
将指定内存块的头部和尾部标记为未分配状态。
调用 coalesce 函数合并相邻的空闲块，以避免碎片化。

mm_realloc:
如果 ptr 为 NULL，等同于 mm_malloc(size)，返回新分配的内存块。
如果 size 为 0，等同于 mm_free(ptr)，释放原先分配的内存块。
如果新大小等于原先大小，直接返回原先的内存块。
根据先前块和后继块的情况，可能会进行内存块的合并、分割或扩展。
最终调用 mm_malloc 分配新大小的内存，将数据从旧内存复制到新内存，然后调用 mm_free 释放旧内存。

执行过程图如下



对于 util 的小优化

我们知道内存利用率主要取决于内存碎片和单个块的大小，优化单个块的大小较为困难，这需要修改内存管理器整体的逻辑，本次 lab 主要以减少内存碎片为优化目标。

链表的管理：

我们可以在插入新的空闲块时，将新插入的块根据 size 插入，使得每个链表的空闲块都是从小到大排序的，这样做可以使得我们在 find_fit 函数中，遇到的第一个大小大于等于所需大小的块就是所有块里面的最优块，这样即可尽量减小内存碎片。

Place 的逻辑：

我们在 place 时，会将较大的空闲块分割为两块来进行操作，那么如何设定分割的阈值对于减小较小的内存碎片是很有影响的，经过实验发现，当阈值设定为 32*DSIZE 时对于我们的输入 trace 样例效果最优，但是事实上这个阈值是和输入数据的特征密切相关的。

realloc 内存的逻辑：

realloc 内时，我们可以检测前后的内存是否为空闲块，若合并完周围空闲块后可以满足 realloc 的大小需求，我们可以合并前后的块，并移动数据，但是由于前合并需要改变指针和移动数据，并且 trace 输入中对于前移的 realloc 极少，对于实验结果几乎没有影响，因此没有完成前合并。

而对于后合并，还有三种情况，一种为后面为结尾块，我们直接扩展所差的大小再分配即可，另两种为后面为空闲块，一种为空闲块的大小够重新分配，直接合并并分配，另一种为后面的空闲块不够，但是空闲块后面为结尾块，扩展所差大小再分配即可。

修改初始化堆大小：

初始化堆时，我们不需要初始化过于大的内存块，因为这样容易造成大量的内存被空闲，我们将 CHUNKSIZE 修改为 1<<8 即可得到良好的效果。

本次实验对于 debug 的要求有些困难，因为一个函数的错误往往会引起其他函数的内存访问错误，因此需要对于函数的调用栈和整体的逻辑有较为清晰的理解。

最终实验完成如下

```
Results for mm malloc:
trace  valid  util     ops      secs  Kops
 0       yes   99%    5694  0.000597  9539
 1       yes  100%    5848  0.000354 16501
 2       yes   99%    6648  0.000697  9538
 3       yes  100%    5380  0.000531 10126
 4       yes   96%   14400  0.000982 14661
 5       yes   96%    4800  0.001375  3490
 6       yes   95%    4800  0.001313  3654
 7       yes   55%   12000  0.001098 10926
 8       yes   51%   24000  0.002114 11355
 9       yes  100%   14401  0.000701 20552
10       yes   81%   14401  0.000454 31741
Total          88%  112372  0.010217 10999

Perf index = 53 (util) + 40 (thru) = 93/100
harry@ubuntu22:~/Code/CSAPP-LAB/malloclab-handout$ ./mdriver
Team Name:SJF
Member 1 :SJF:10225501403@stu.ecnu.edu.cn
Using default tracefiles in /home/harry/Code/CSAPP-LAB/malloclab-handout/traces/
Perf index = 53 (util) + 40 (thru) = 93/100
harry@ubuntu22:~/Code/CSAPP-LAB/malloclab-handout$
```

对于要取得更高的分数，可能需要从块的结构和空闲内存的管理入手，即删除不必要的结构，如已分分配块的 foot，转而用 head 的第 31 位记录前一块的分配情况，再或者是用堆来管理空闲内存。