中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

运行时存储空间的组织与管理-II

《编译原理和技术(H)》、《编译原理(H)》

张昱

0551-63603804，yuzhang@ustc.edu.cn

中国科学技术大学

计算机科学与技术学院

本章内容

术语

- 过程的活动(activation): 过程的一次执行
- 活动记录

  过程的活动需要可执行代码和
  存放所需信息的存储空间, 后者称为活动记录

本章内容

- 一个活动记录中的数据布局
- 程序执行过程中，所有活动记录的组织方式
- 非局部名字的管理、参数传递方式、堆管理
- 几种典型的编译运行时系统（新增）

中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

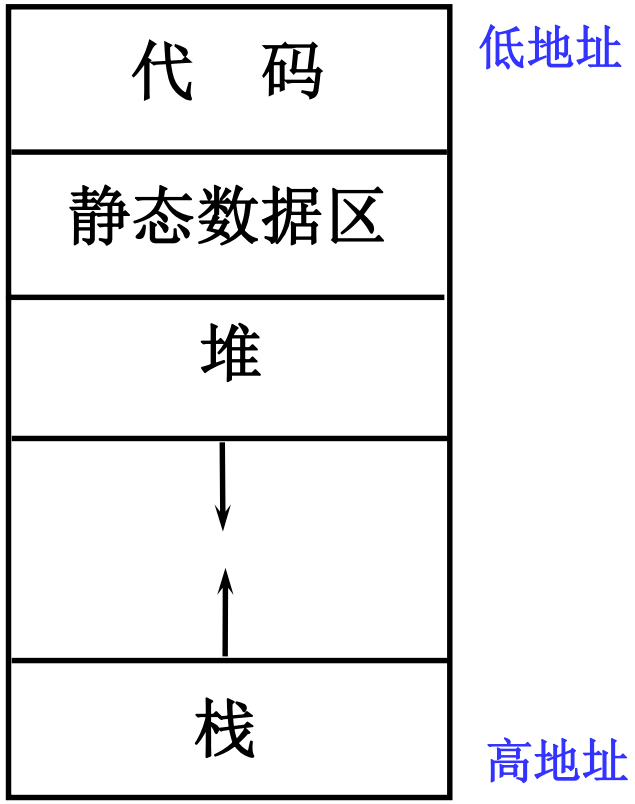
6.2 全局栈式存储分配

- 运行时内存的划分
- 活动树和运行栈
- 调用序列
- 栈上可变长度数据、悬空引用

运行时内存空间的划分

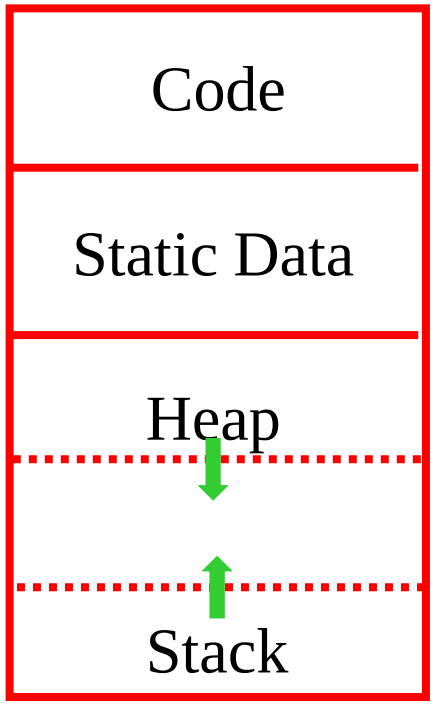
逻辑地址空间（OS：进程地址空间）

- **代码区**：存储可执行代码
  加载时静态分配，只读，一般可共享
- **静态数据区**：分初始化数据、未初始化数据
  加载时静态分配，大小在编译和链接时确定
- **堆**：用于动态内存分配
  动态分配，从低地址向高地址增长，
  大小在运行期间可变，OS通过sbrk或mmap管理
- **栈**：用于存储活动记录
  动态分配，从高地址向低地址增长，
  大小根据函数调用的深度在运行期可变
- **共享库**：加载程序运行时需要的动态链接库
  通过mmap动态加载，随机放置，可与其他进程共享



Linux的地址布局

32位Linux系统



低地址 0x080480000

- 4GB
- 用户空间：低3GB
  0 ~ 0xBFFFFFFF
- 内核空间：1GB
  0xc0000000-0xFFFFFFFF
- 栈的大小
  RLIMIT_STACK 通常为8MB

高地址 0xC0000000
TASK_SIZE

64位Linux系统

低地址 0x0000000000400000

- 使用低48位虚拟地址(256TB)
  48-63位必须与47位一致
- 用户空间：低128TB
  0 ~ 0x7FFFFFFFFFFF
- 内核空间：64TB
  0xFFFF880000000000-
  0xFFFFc7FFFFFFFFFF

高地址 0x00007FFFFFFF0000
TASK_SIZE

Linux 通常启用了**ASLR（地址空间布局随机化）**，这会在进程每次运行时随机化堆、栈、共享库等内存区域的起始地址，增加程序安全性，防止攻击者利用已知的内存地址进行缓冲区溢出攻击等漏洞利用。

C语言的存储分配

- 声明在函数外面
  - 外部变量extern -- 静态分配
  - 静态外部变量static -- 静态分配

    （改变作用域）
- 声明在函数里面
  - 静态局部变量static -- 也是静态分配

    （改变生存期）
  - 自动变量auto -- 在活动记录中

C程序举例、问题与分析

1. 当执行到f1(0)时，有几个f1的活动记录？
2. f1(3)的值是多少？f2(3)呢？
3. 怎么解释在某些系统下f2(3)为0？
4. 对f3(n)编译会报错吗？为什么？
5. 如果编译不报错，执行f3(n) 运行时会产生什么现象？怎么解释这种现象？

请补齐右边的三段程序，成为三个独立的C程序，然后用gcc –m32 -S编译之，产生汇编码并理解和分析。

```
int  f1(int n){
  if (n==0) return 1;
  else return n*f1(n-1);
}
… print ( f1(3) ); …
```

```
int  f2(int n){
  static int m; m = n;
  if (m==0) return 1;
  else return m*f2(m-1);
}
… print ( f2(3) ); …
```

```
int n=3;
int  f3(){
  if (n==0) return 1;
  else return n*f3(n-1);
}
… print ( f3(n) ); …
```

C程序举例、问题与分析

1. 当执行到f1(0)时，有几个f1的活动记录？
   f1(3), f1(2),f1(1),f1(0) -- 运行栈
2. f1(3)的值是多少？f2(3)呢？
   6；6或0
3. 怎么解释在某些系统下f2(3)为0？
   表达式的代码生成(寄存器分配策略)
4. 对f3(n)编译会报错吗？为什么？
   不会，主要做函数值的类型检查
5. f3(n) 运行时会产生什么现象？
   Segmentation fault

```
int  f1(int n){
  if (n==0) return 1;
  else return n*f1(n-1);
}
… print ( f1(3) ); …
```

```
int  f2(int n){
  static int m; m = n;
  if (m==0) return 1;
  else return m*f2(m-1);
}
… print ( f2(3) ); …
```

```
int n=3;
int  f3(){
  if (n==0) return 1;
  else return n*f3(n-1);
}
… print ( f3(n) ); …
```

中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

6.2 全局栈式存储分配

- 运行时内存的划分
- 活动树和运行栈
- 调用序列
- 栈上可变长度数据、悬空引用

活动树和运行栈

C程序

```
1  int a[11];
2  void readArray() {/* Reads 9 integers into a[1],…,a[9].*/
3     int i;    ...
5  }
6  int partition(int k,  int n) {
7     /* Picks a separator value v, and partitions a[m..n] so that a[k..p-l] are less than v,
         a[p]=v, and a[p+1..n] are equal to or great than v. Returns p.*/
8     ...
9  }
10 void quickSort(int k, int n) {
11    int i;
12    if( n>m){
13       i=partition(k,n);
14       quickSort(k,i-1);
15       quickSort(i+1,n);
16     }
17  }
18  main() {
19     readArray();
20     a[0]=-9999;
21     a[10]=9999;
22     quickSort(1,9);
23 }
```

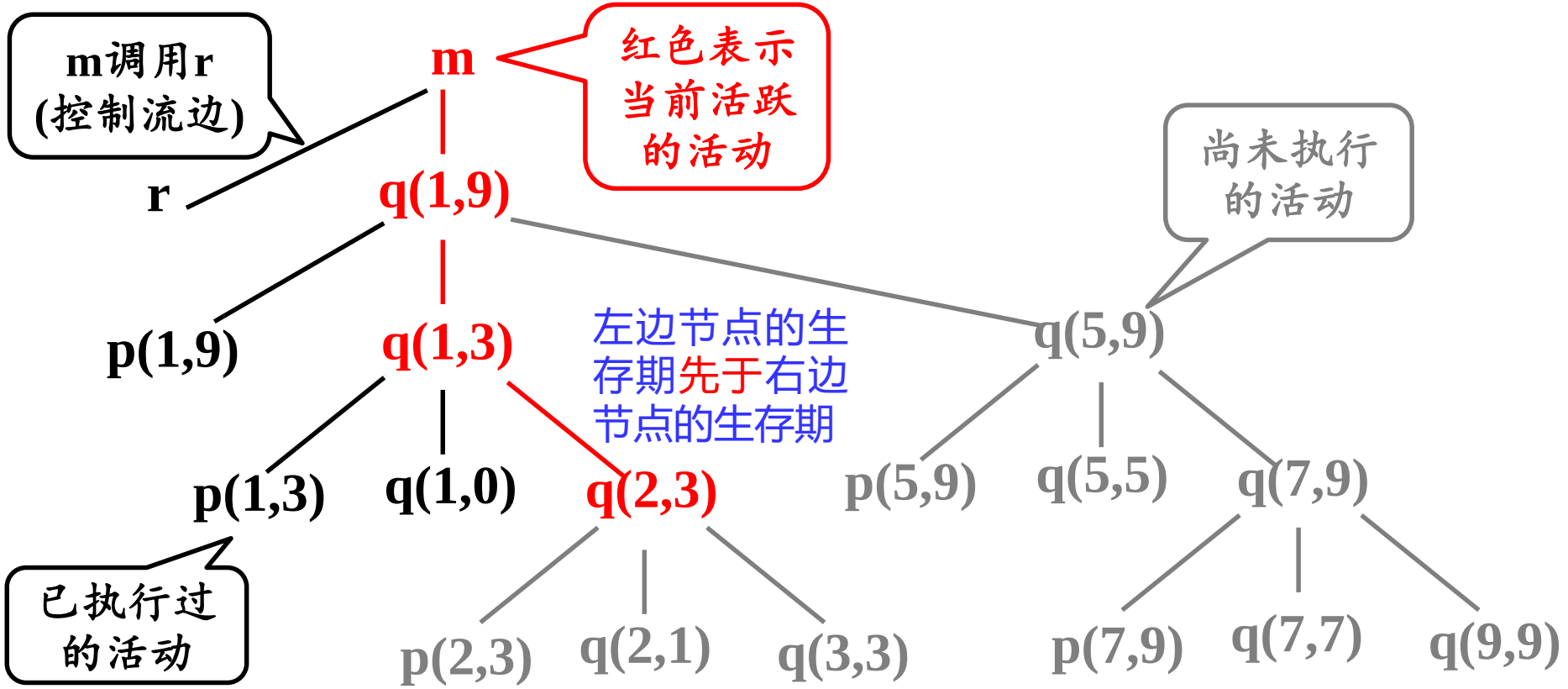
sort

- **readArray**
- **exchange**
- **partition**
- **quicksort**

活动树和运行栈

- 活动树：用树来描绘控制进入和离开活动的方式
- 运行栈：当前活跃的活动保存在一个栈中

对任意两个过程，其生存期或者嵌套，或者无重叠



活动树和运行栈

活动树的特点

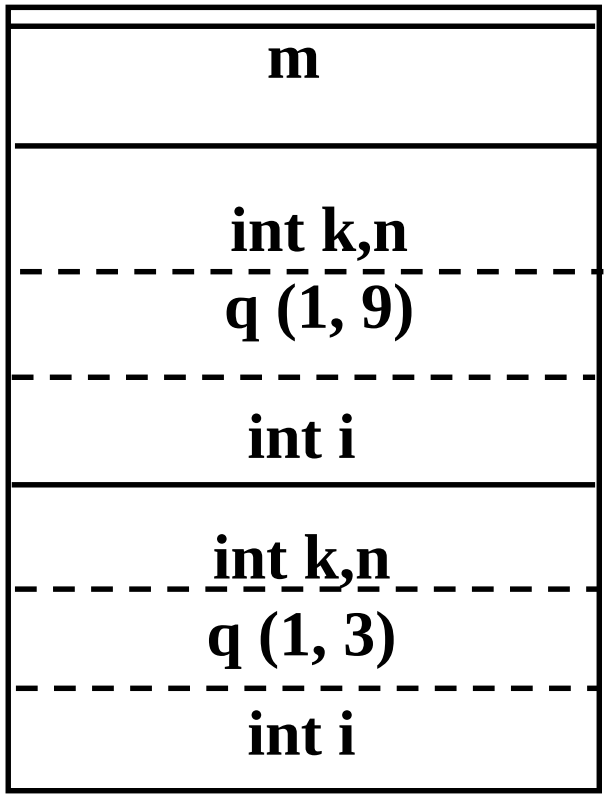
- 每个**结点**代表某过程的一个**活动**
- **根结点**代表**主程序的活动**
- 结点a是结点b的父结点，当且仅当控制流从a的活动进入b的活动
- 结点a处于结点b的左边，当且仅当a的生存期**先于**b的生存期

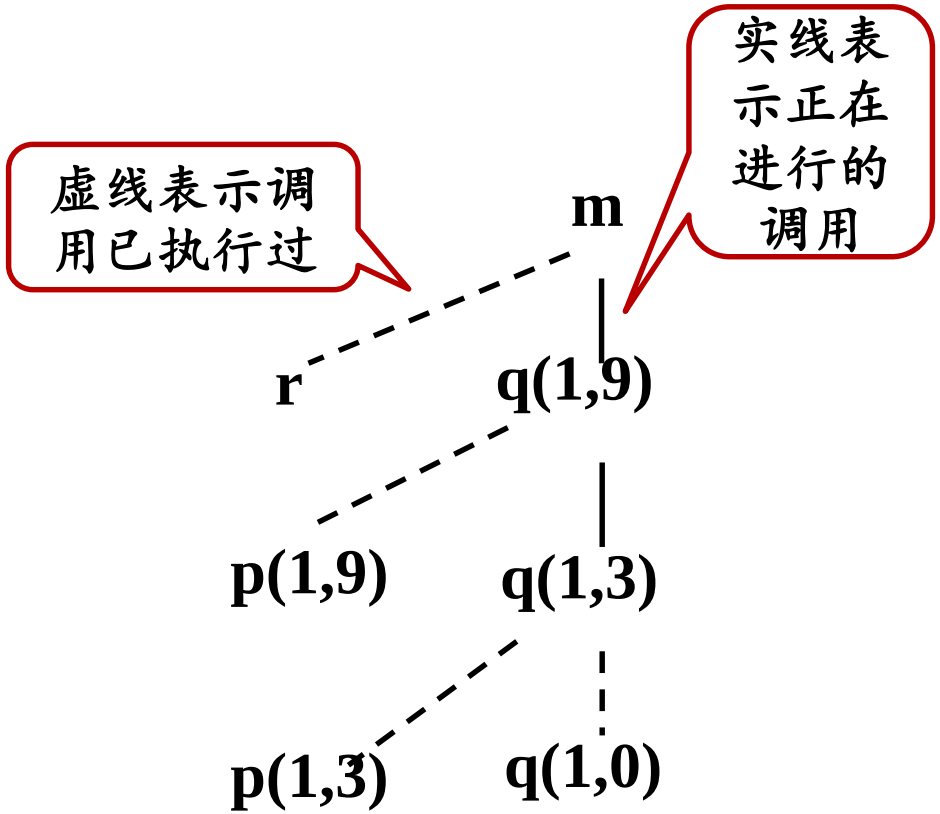
运行栈

- 把控制栈中的信息拓广到包括过程活动所需的所有局部信息（即**活动记录**）

运行栈举例

静态数据区
int a[11];





中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

6.2 全局栈式存储分配

- 运行时内存的划分
- 活动树和运行栈
- 调用序列
- 栈上可变长度数据、悬空引用

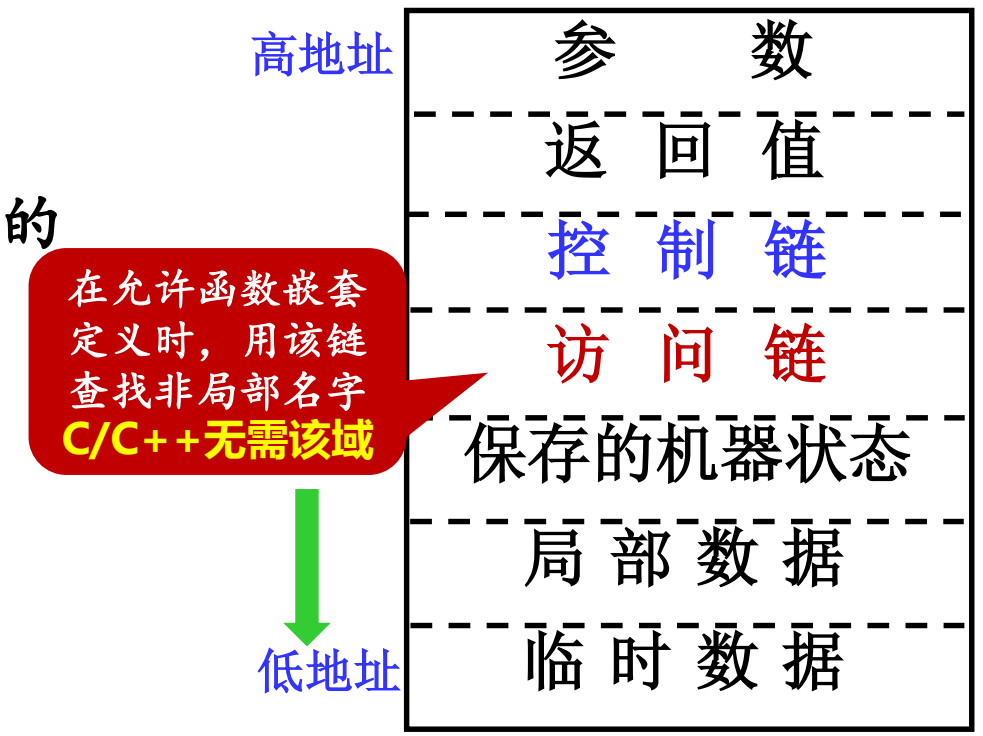
过程调用与返回和活动记录的设计

活动记录的具体组织和实现不唯一

即使是同一种语言，过程调用序列、返回序列和活动记录中各域的排放次序，也会因实现而异

设计的一些原则

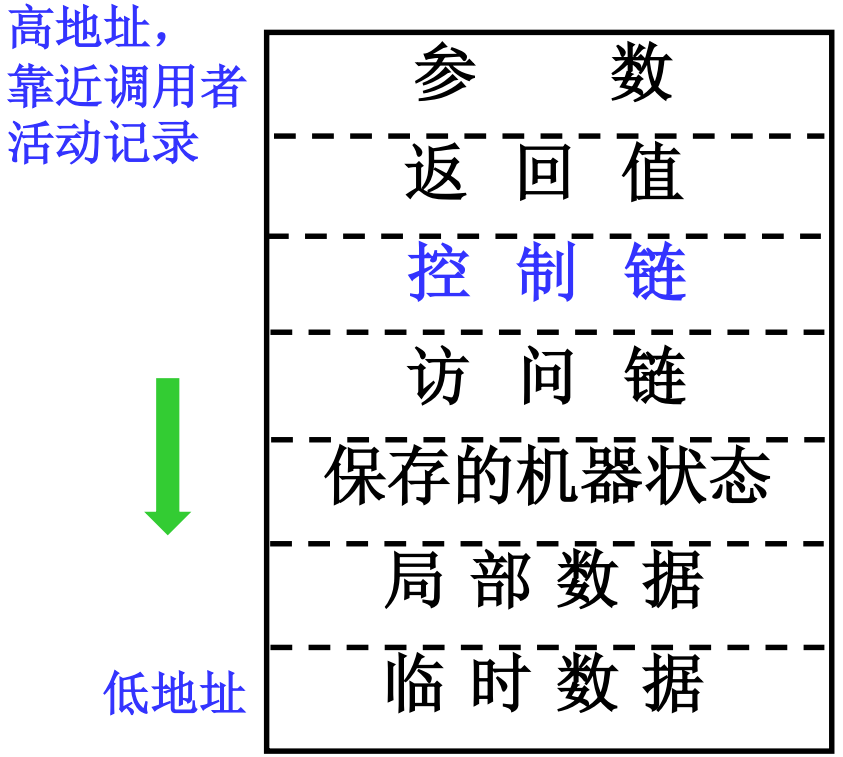
- 以活动记录(大小不确定)中间的某个位置作为基地址（一般是控制链）
- 长度能较早确定的域放在活动记录的中间
- 一般把临时数据域放在局部数据域的后面



过程调用与返回和活动记录的设计

设计的一些原则

- 以活动记录中间的某个位置作为基地址（一般是控制链）
- 长度能较早确定的域放在活动记录的中间
- 一般把临时数据域放在局部数据域的后面

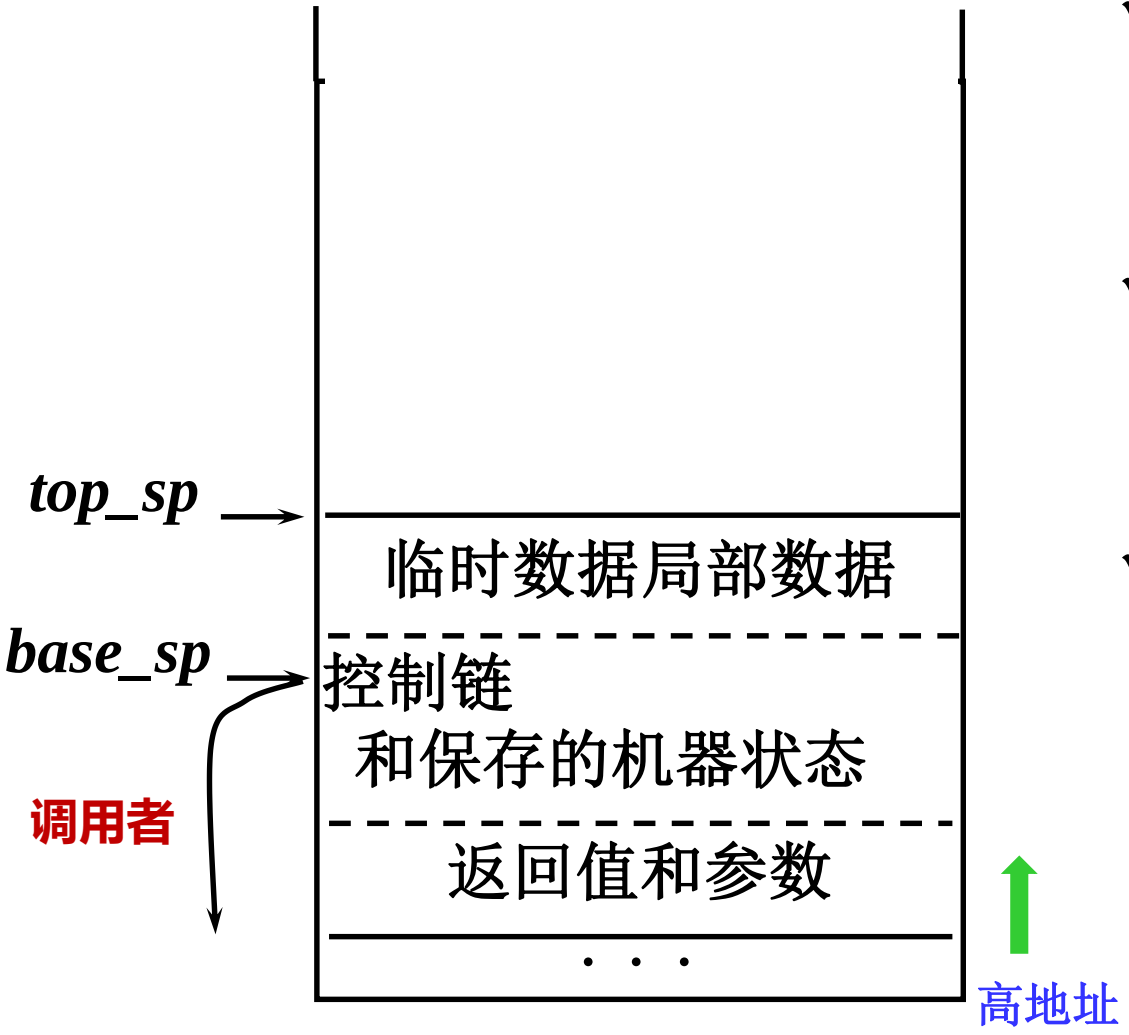


- 把参数域和可能有的返回值域放在紧靠调用者活动记录的地方

【有的用寄存器传参数和返回值—提升时空性能】

- 用同样的代码来执行各个活动的保存和恢复

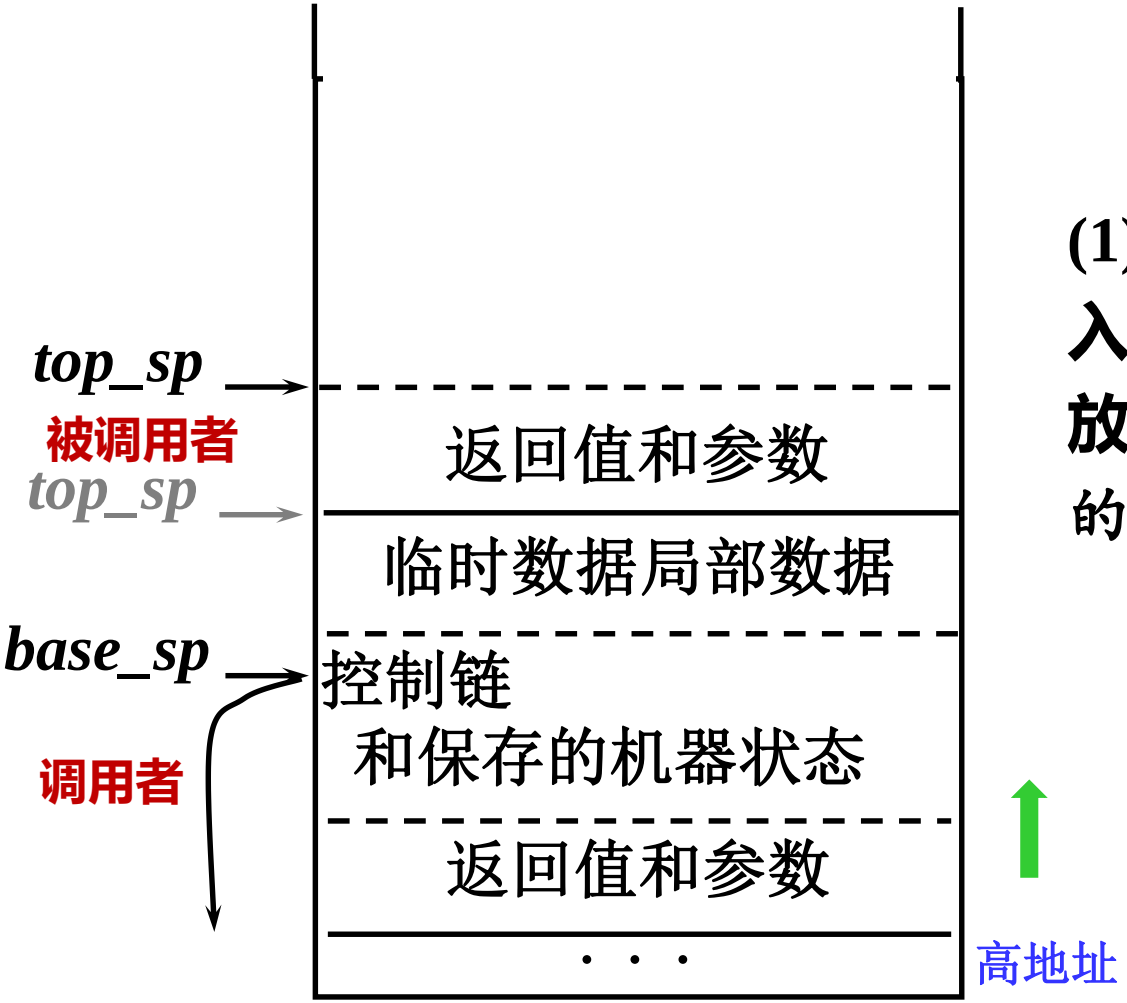
过程调用序列：p调用q



- ✓ *top_sp*: 栈顶寄存器
  - x86: esp、rsp
  - ARM: SP
- ✓ *base_sp*: 基址寄存器
  - x86: ebp、rbp
  - ARM: FP
- ✓ PC: 程序计数器
  - x86: eip、rip
  - ARM: PC

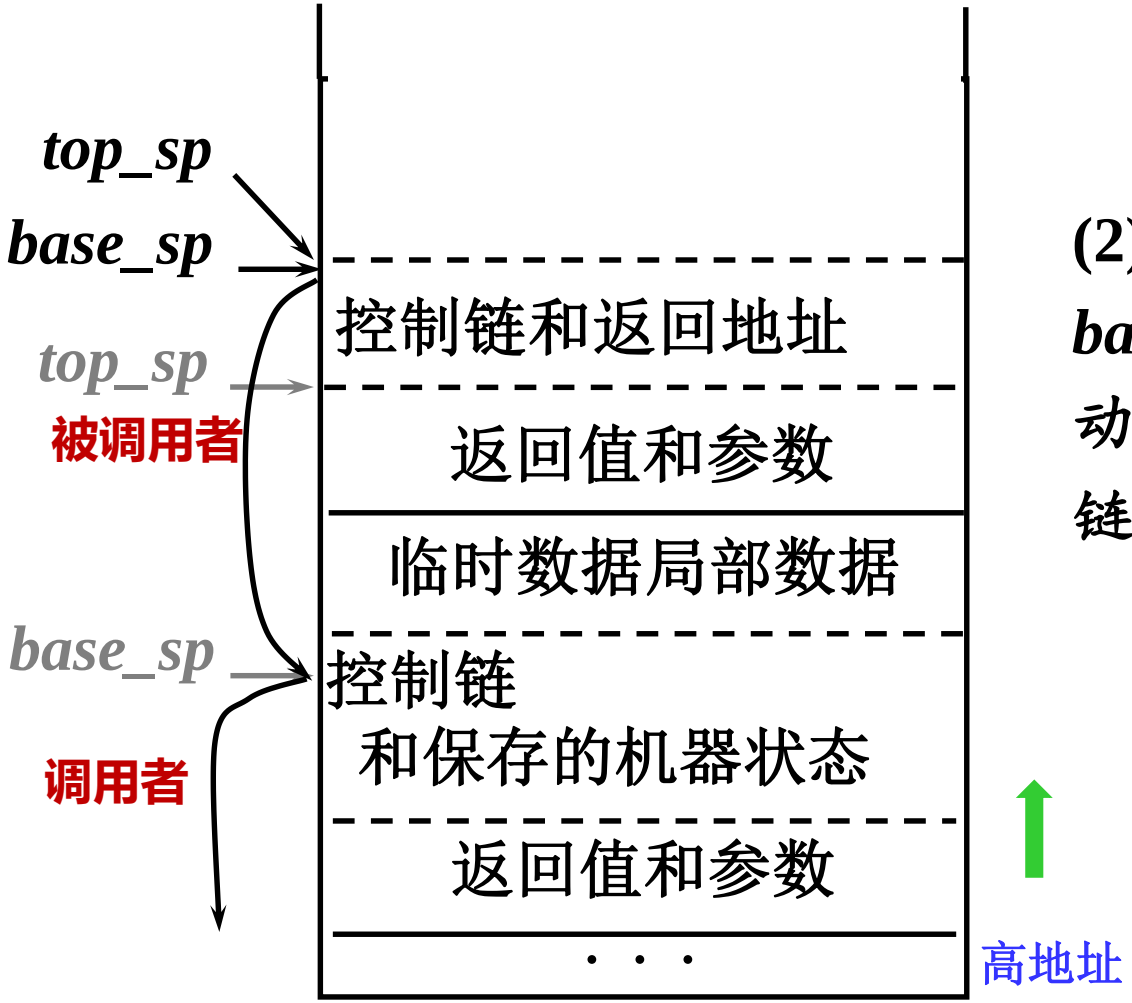
ARM: LR连接寄存器(保存子程序返回地址)

过程调用序列：p调用q



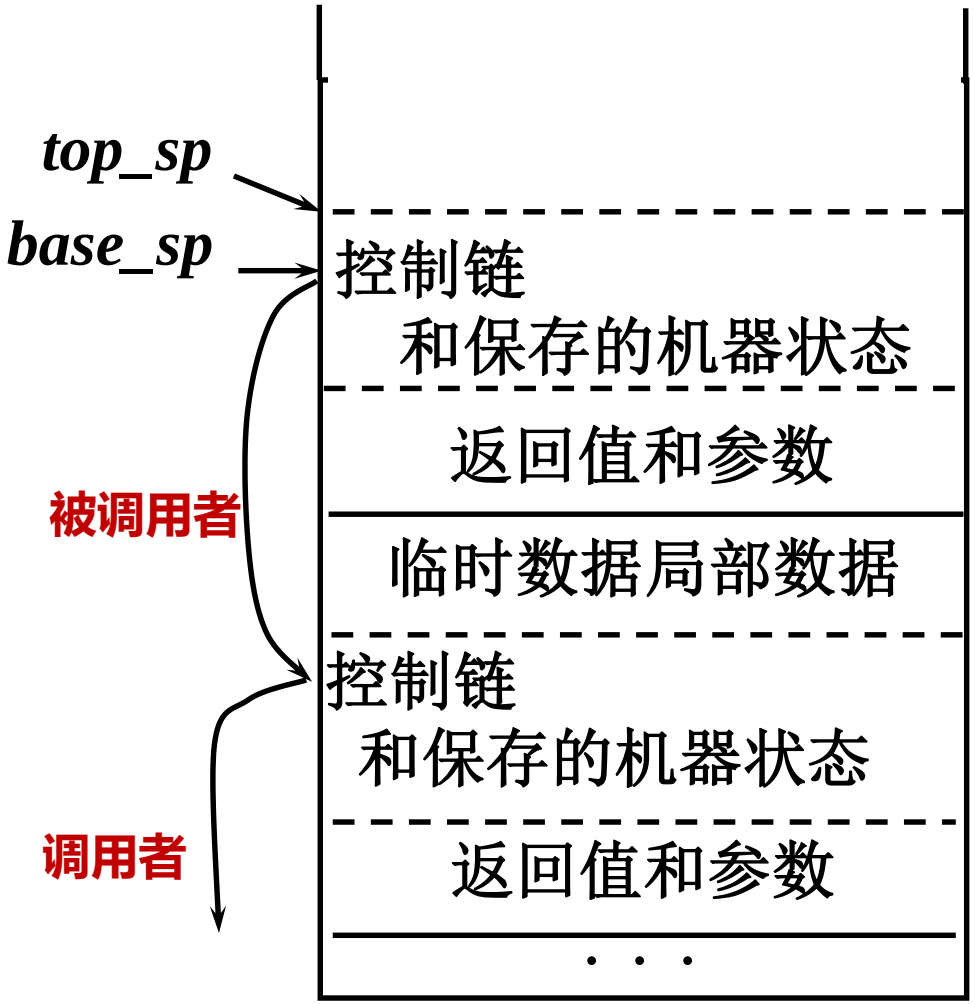
(1) p计算实参，依次放入栈顶，并在栈顶留出放返回值的空间。*top_sp*的值在此过程中被改变

过程调用序列：p调用q



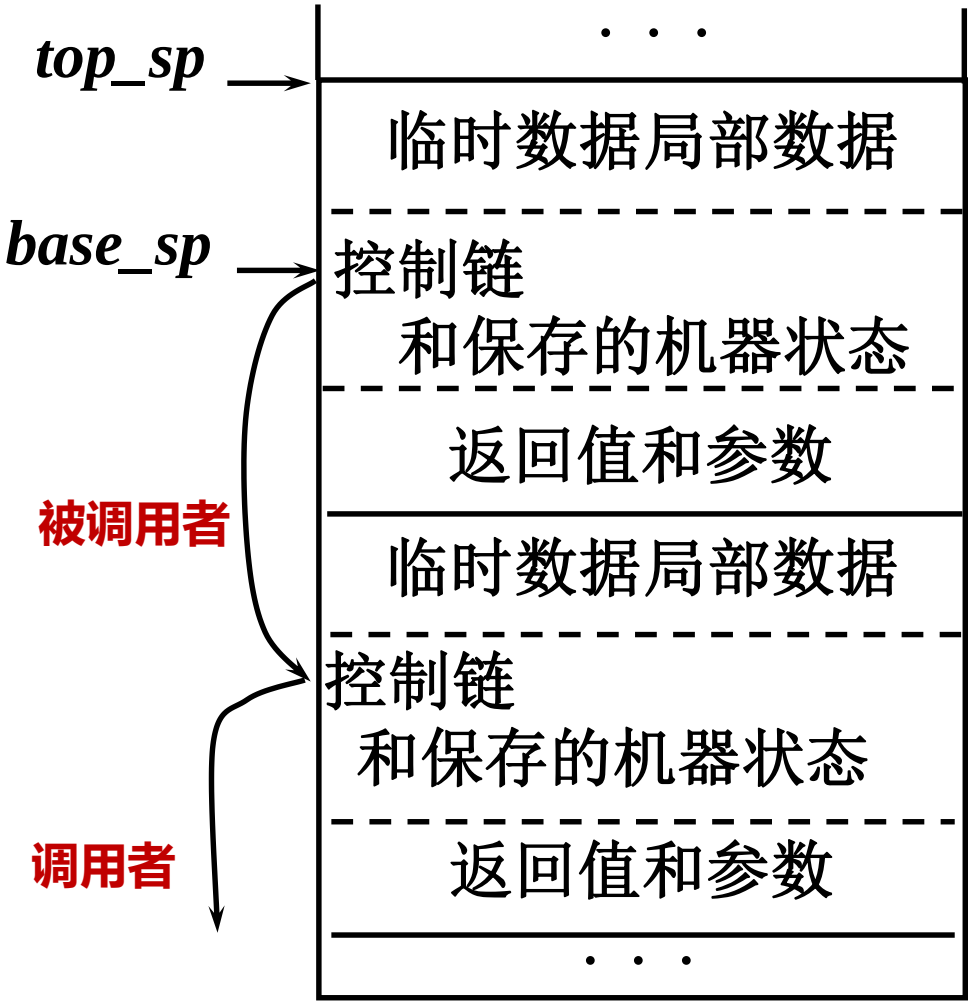
(2) p把**返回地址和当前*base_sp*的值**存入q的活动记录中，建立q的访问链，增加*base_sp*的值

过程调用序列：p调用q



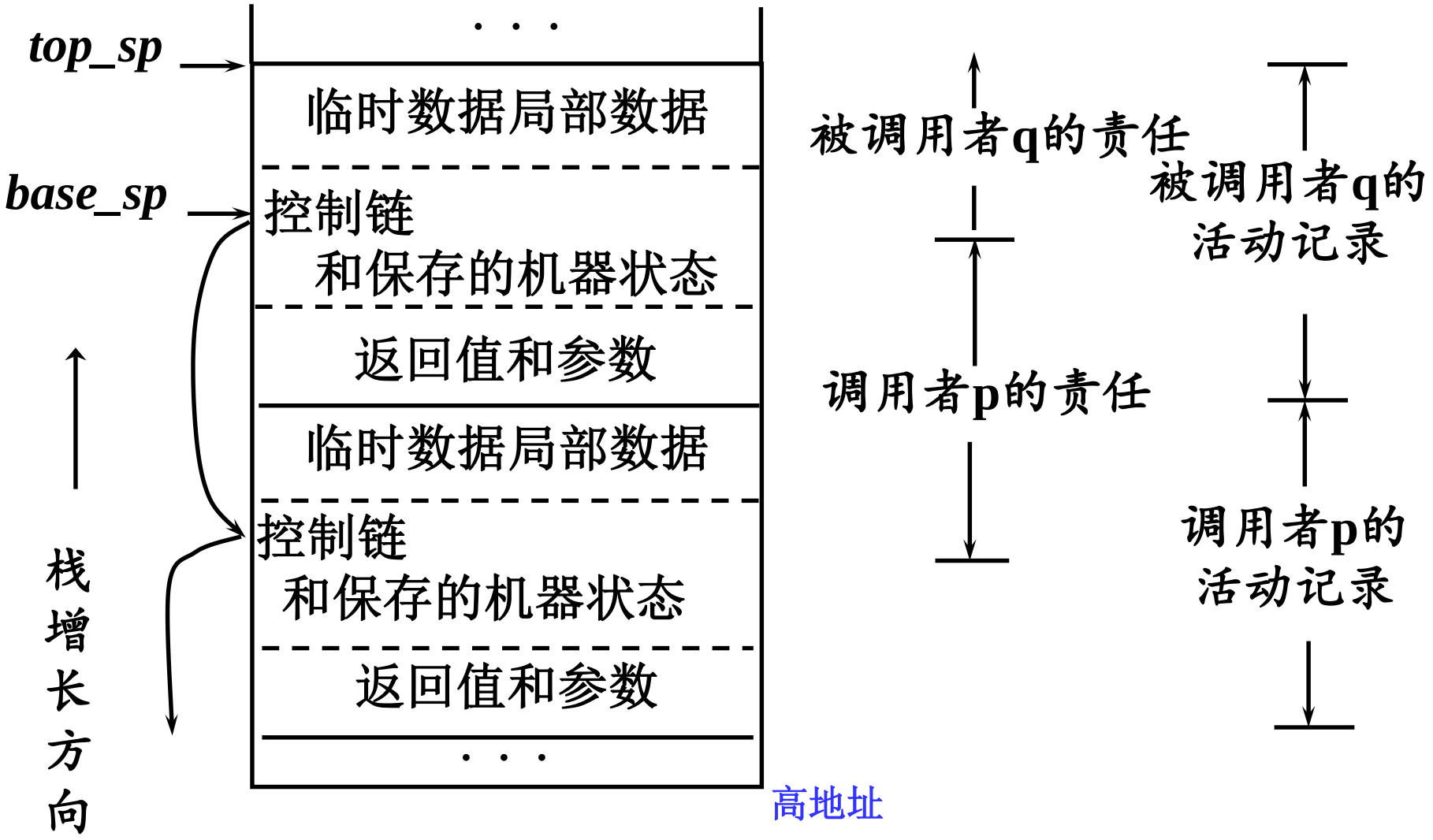
(3) q保存寄存器的值和其他机器状态信息

过程调用序列：p调用q

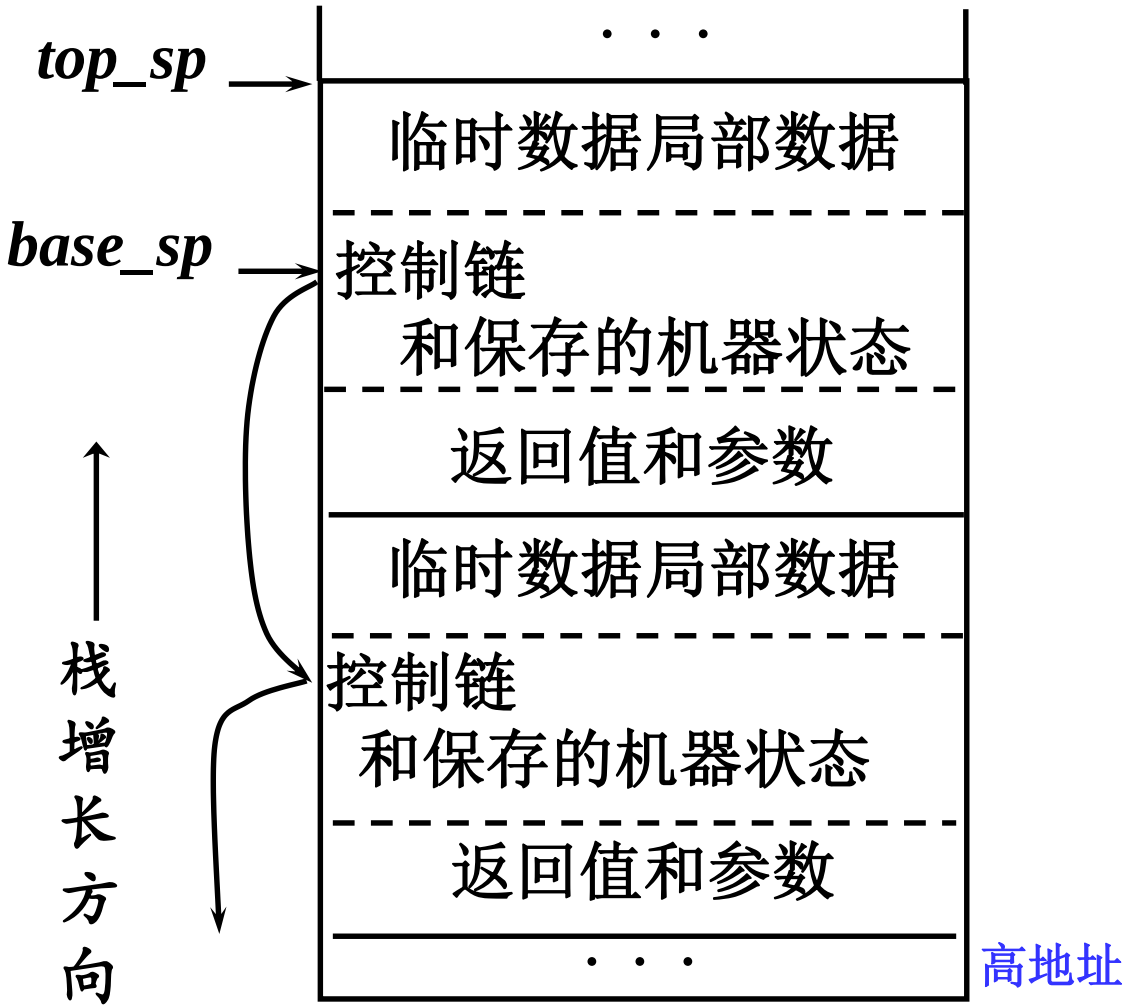


(4) q根据局部数据域和临时数据域的大小增加*top_sp*的值（**分配局部变量和临时数据的空间**），初始化它的局部数据，并开始执行过程体

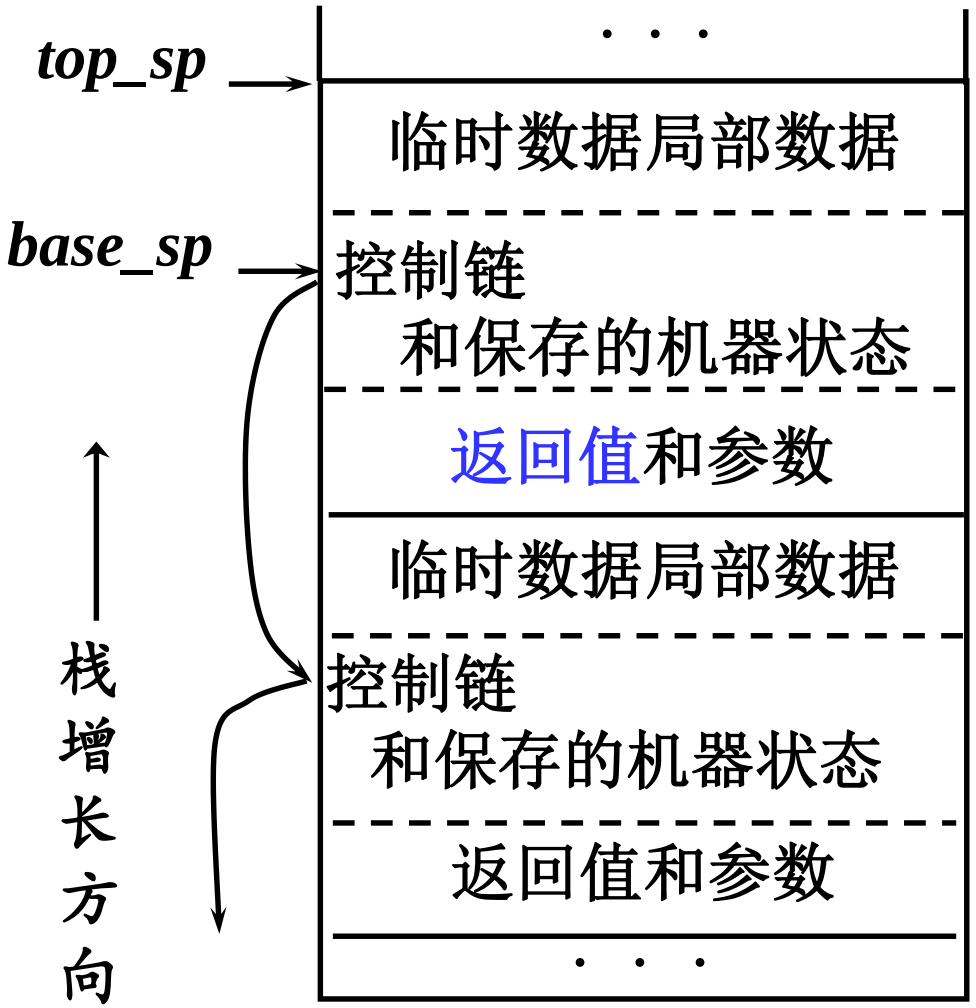
调用者p和被调用者q的任务划分



过程返回序列：p调用q


top_sp
base_sp
. . .
临时数据局部数据
控制链
和保存的机器状态
返回值和参数
临时数据局部数据
控制链
和保存的机器状态
返回值和参数
. . .
栈增长方向
高地址

过程返回序列：p调用q



(1) q把**返回值置入邻近调用者p**的活动记录的地方

参数个数可变场合难以确定存放返回值的位置，因此**通常用寄存器传递返回值**

通过寄存器传递返回值

- **X86-32位系统**
  - 32位整型返回值： eax
  - 64位整型返回值： 低32位 eax，高32位 edx
  - 浮点类型的返回值：浮点寄存器 st(0)
- **X86-64位系统**
  - 整型： rax
  - 浮点型：浮点寄存器 st(0)
- **ARM 呢？**
  - **ATPCS：ARM-Thumb procedure call standard**
    AAPCS：ARM Architecture procedure call standard， 2007，是ATPCS的改进版
  - **小于或等于4字节的：r0；**
  - **双字：r0和r1；　　128位的向量通过r0~r3**

通过寄存器传递参数

- **微软x86-64调用约定**

  使用RCX, RDX, R8, R9四个寄存器用于存储函数调用时的4个参数(从左到右)，使用XMM0, XMM1, XMM2, XMM3来传递浮点变量

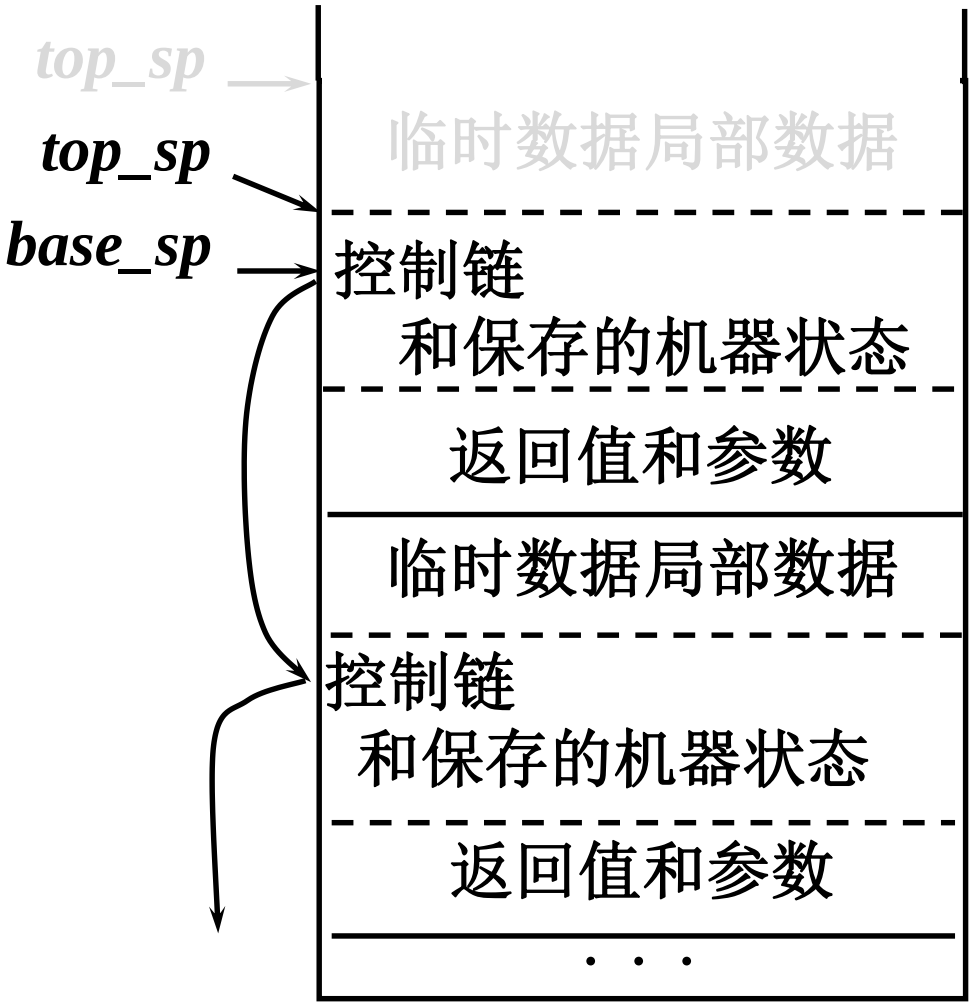
- **Linux等的64位系统调用约定**

  头六个整型参数放在寄存器RDI, RSI, RDX, RCX, R8和R9上；同时XMM0到XMM7用来放置浮点变量。对于系统调用，R10用来替代RCX

- **ARM：AAPCS**
  - **用r0~r3和栈传参**

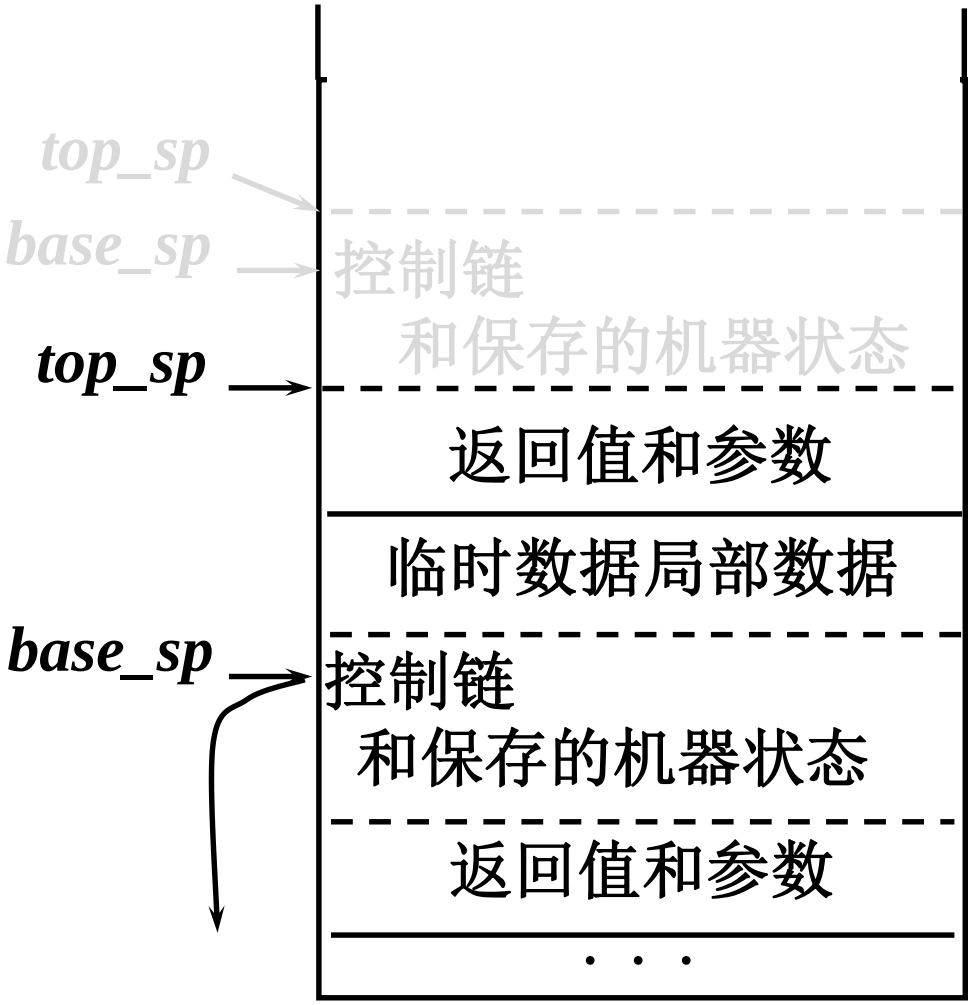
- **gcc 对整型和浮点型参数传递的汇编码生成特点分析**

过程返回序列：p调用q



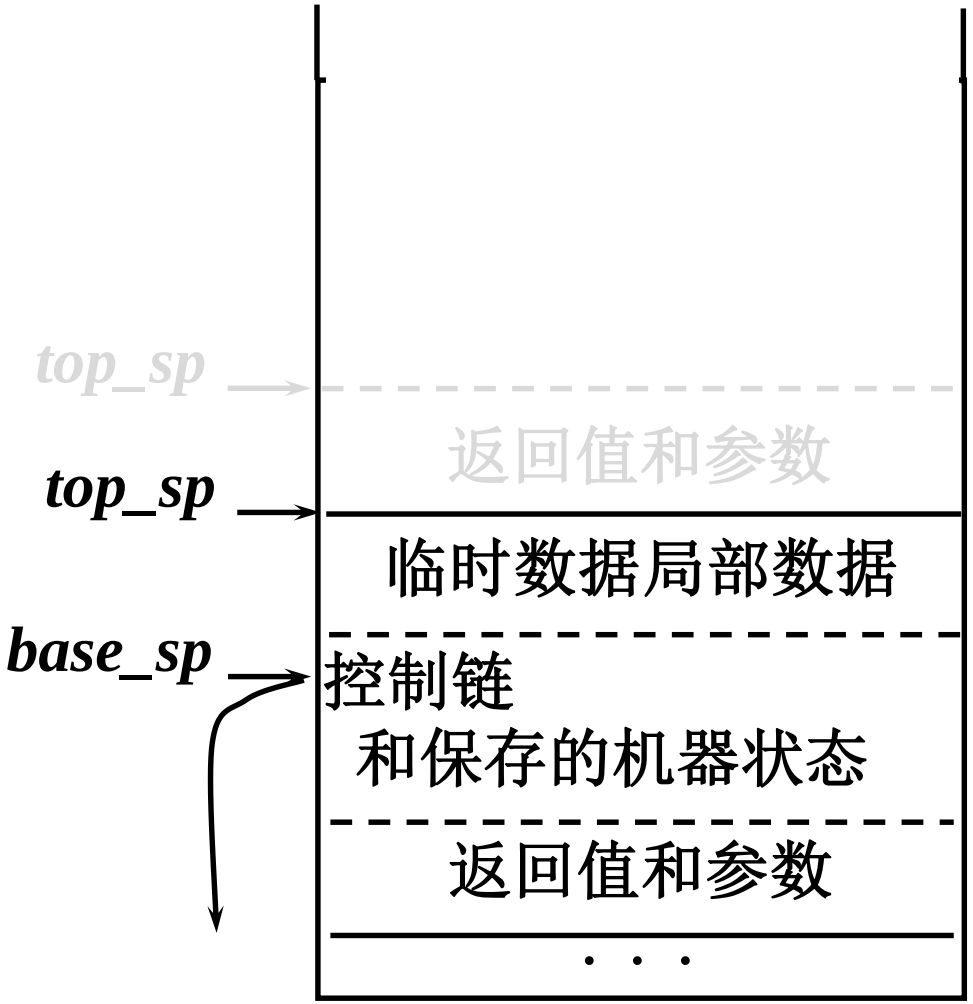
(2) q对应调用序列的步骤(4)，减小*top_sp*的值（**释放局部变量和临时数据的空间**）

过程返回序列：p调用q



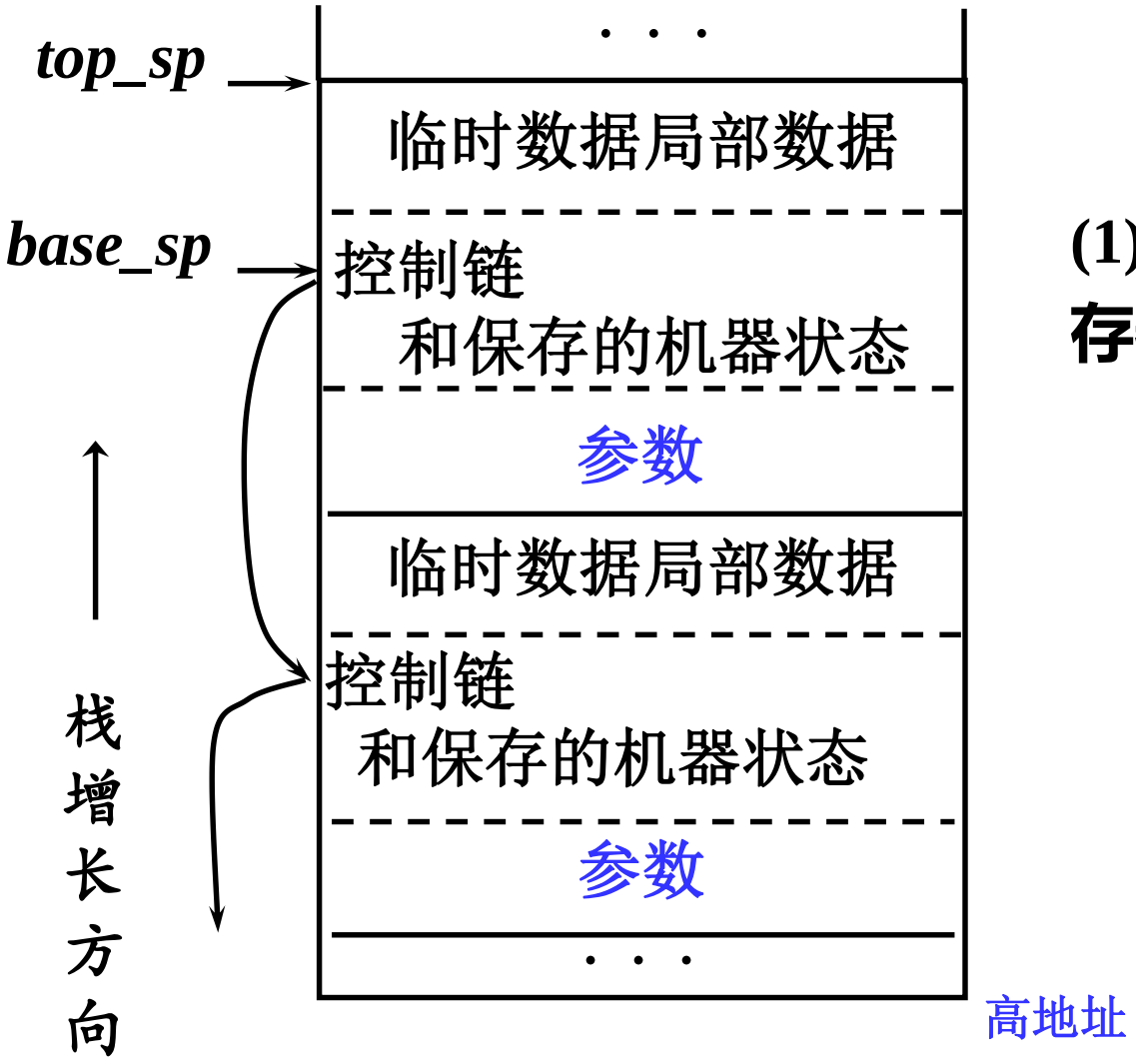
(3) q恢复寄存器(包括*base_sp*)和机器状态，返回p

过程返回序列：p调用q



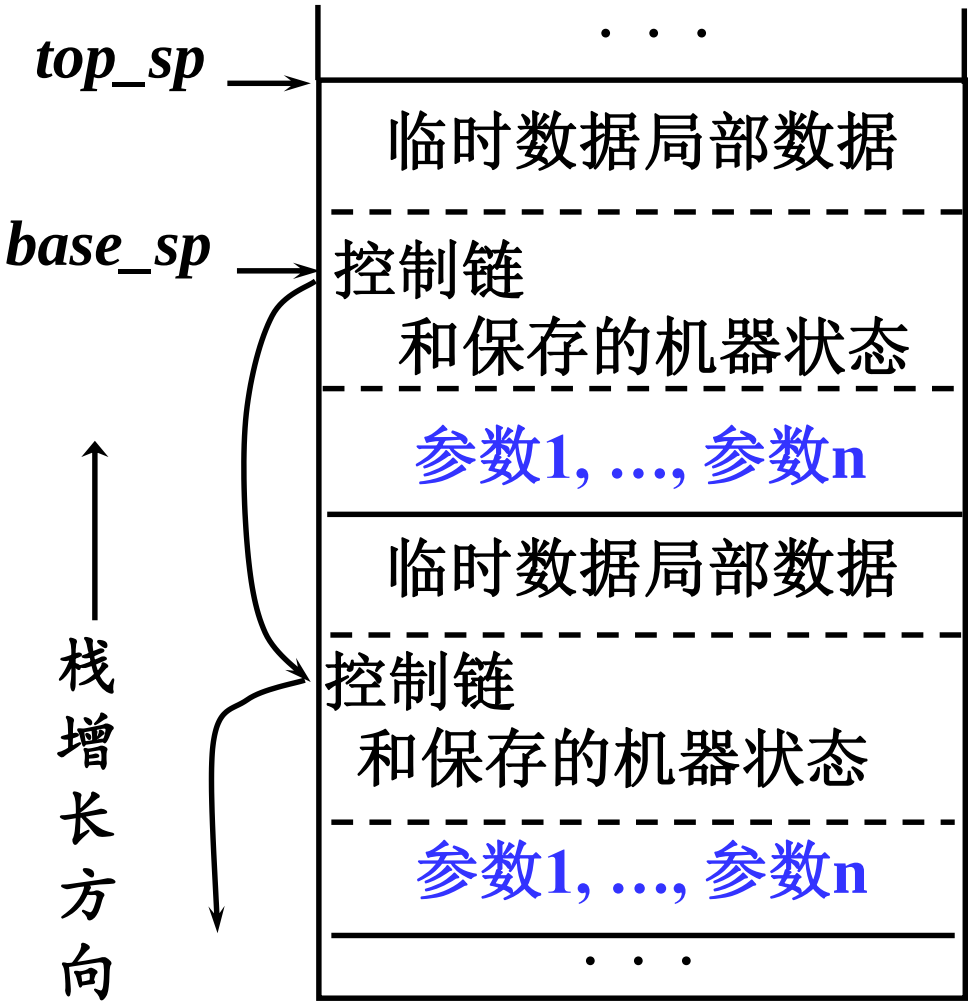
(4) p根据参数个数与类型和返回值调整 *top_sp*（**释放参数空间**）,然后**取出返回值**

过程的参数个数可变的情况



(1) 函数返回值改成**用寄存器传递**

过程的参数个数可变的情况



(2) 编译器产生将**实参表达式逆序计算**并将结果进栈的代码

自上而下依次是参数1, …, 参数n

(3)被调用者能准确地知道第一个参数的位置

(4)被调用函数根据第一个参数到栈中取第二、第三个参数等等

例： printf(“%d, %d,\n”);

中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

6.2 全局栈式存储分配

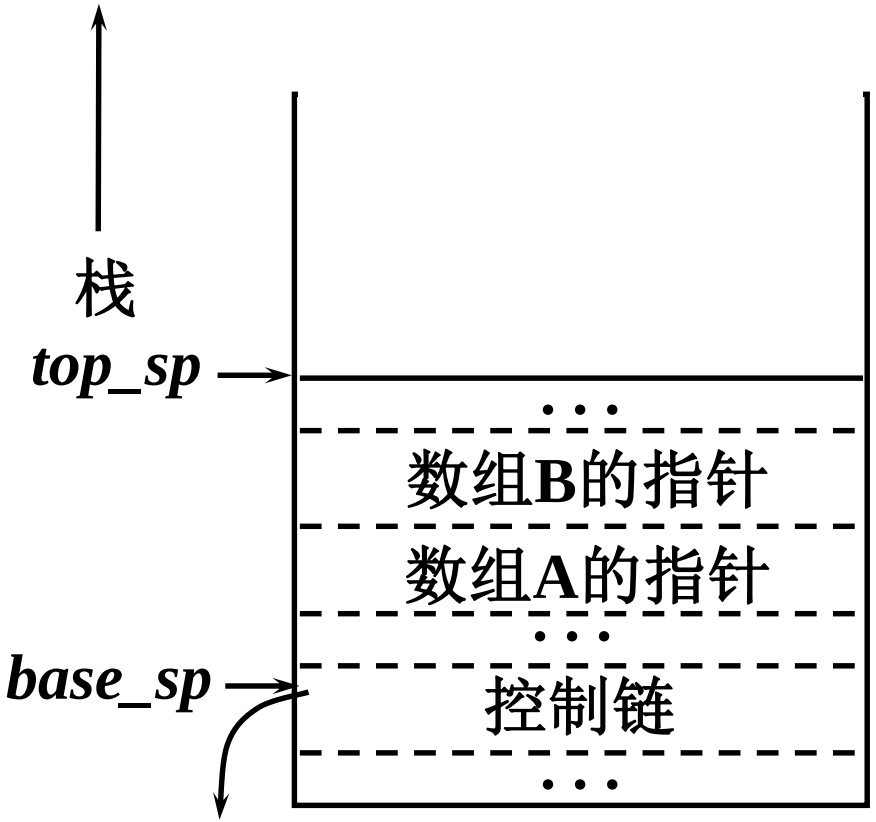
- 运行时内存的划分
- 活动树和运行栈
- 调用序列
- 栈上可变长度数据、悬空引用

栈上存储可变长的数据

- 可变长度的数组
  - C ISO/IEC9899：2011 n1570.pdf
    (http://www.open-std.org/jtc1/sc22/wg14/www/docs/n1570.pdf)
    - 6.7.6.2(P132)： int a[n][6][m];
    - 6.10.8.3(P177)： __STDC_NO_VLA__宏为1时不支持可变长数组
    - 局部数组：在栈上分配
  - Java
    - int[ ] a = new int[n];
    - 在堆上分配
- 如何在栈上布局可变长的数组？
  - 先分配存放数组指针的单元，对数组的访问通过指针间接访问
  - 运行时，这些指针指向分配在栈顶的数组存储空间

栈上可变长数据

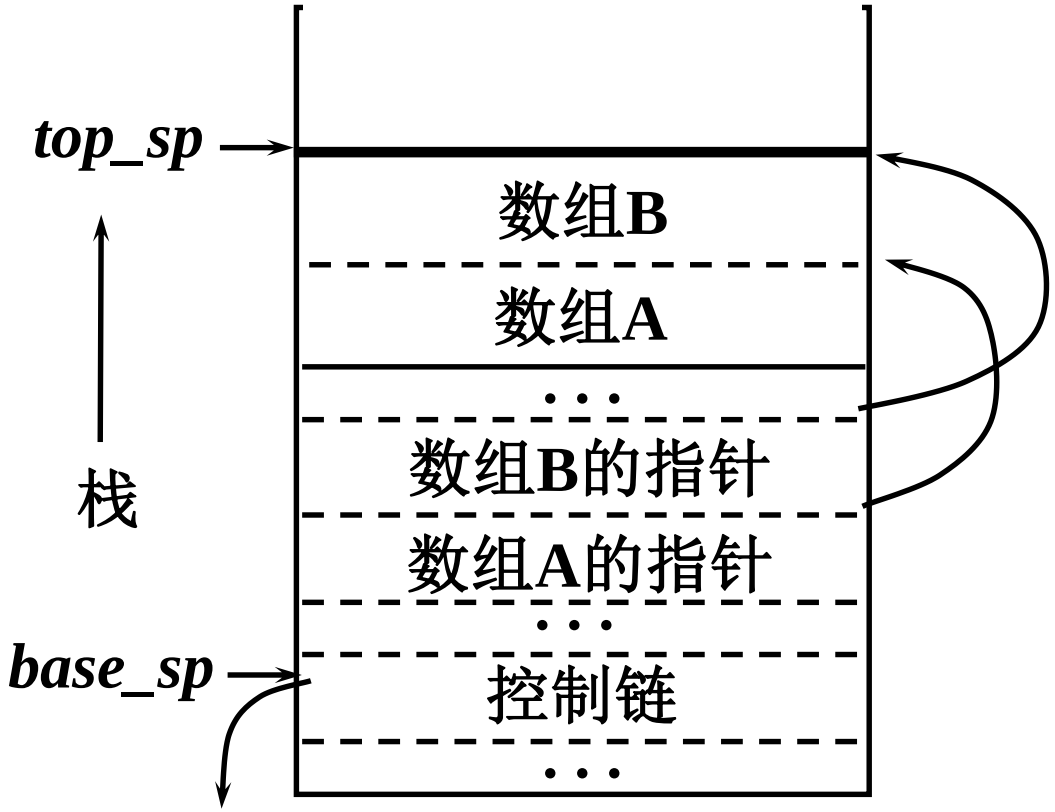
访问动态分配的数组



(1) 编译时，在活动记录中为这样的数组分配存放**数组指针**的单元

栈上可变长数据

- 访问动态分配的数组



(2) 运行时，这些指针指向分配在栈顶的数组存储空间（**数组实际空间在运行时分配**）

(3) 运行时，对数组A和B的访问都要**通过相应指针来间接访问**（数组访问指令是编译时生成）

中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

C程序应用举例

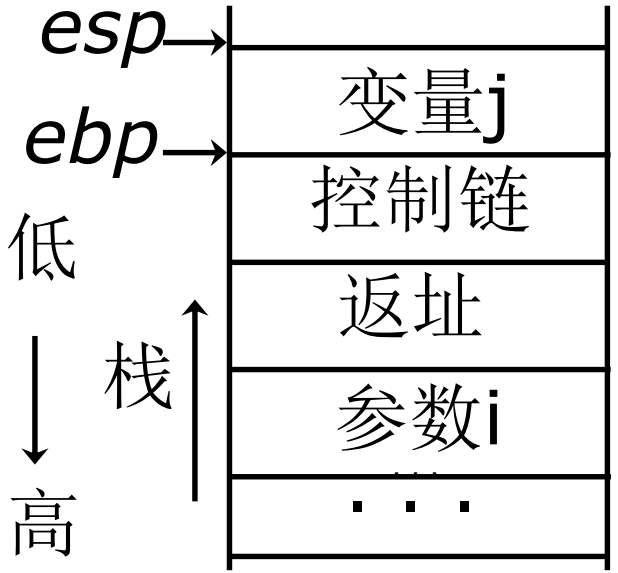
- 缺省用 gcc v7.5.0

例题2 函数调用与返回

gcc –S
注意早期的编译器版本：通过栈传参

```
func(i)
long i;
{
    long j;
    j= i -1;
    func(j);
}
```

```
func:
    pushl %ebp  老的基地址指针压栈
        movl %esp,%ebp修改基地址指针
        subl $4,%esp          为j分配空间
        movl 8(%ebp),%edx  取i到寄存器
        decl %edx                    i – 1
        movl %edx,-4(%ebp)     i – 1 ⇒ j
        movl -4(%ebp),%eax
        pushl %eax          把实参j的值压栈
        call func                  函数调用
        addl $4,%esp        恢复栈顶指针
L1:
    leave  即 mov ebp, esp; pop ebp
    ret    即 pop eip(下条指令地址）
```

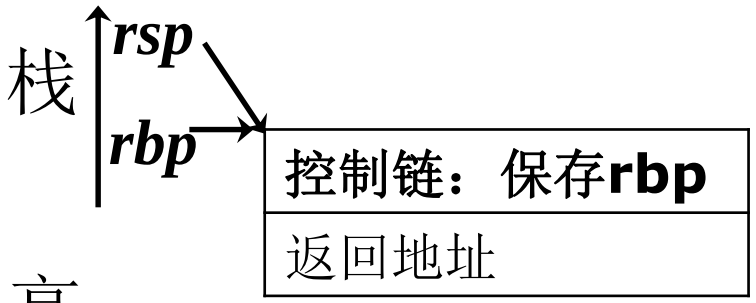


例题2 函数调用与返回


```
void func(long i)
{
        long j;
        j = i - 1;
        func(j);
}
```

gcc –S –fno-pie
-fno-pie 用于关闭地址随机化

低



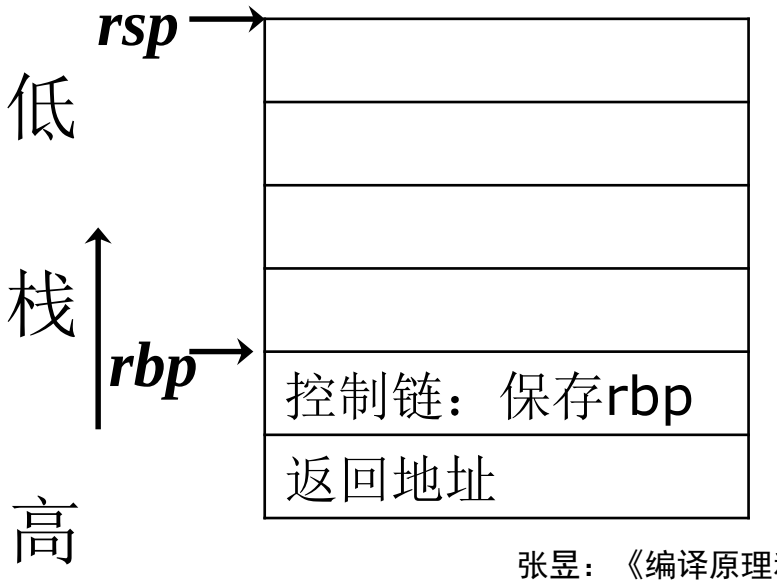
高

```
func:
        pushq   %rbp        老的基址指针压栈
        movq    %rsp, %rbp  修改基址指针
        subq    $32, %rsp
        movq    %rdi, -24(%rbp)
        movq    -24(%rbp), %rax
        subq    $1, %rax
        movq    %rax, -8(%rbp)
        movq    -8(%rbp), %rax
        movq    %rax, %rdi
        call    func
        nop
        leave
        ret
```

例题2 函数调用与返回


```
void func(long i)
{
        long j;
        j = i - 1;
        func(j);
}
```

gcc –S



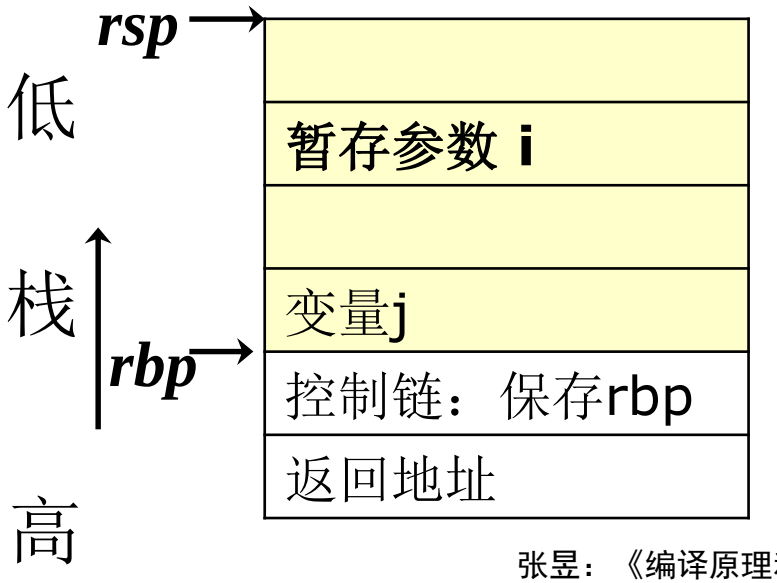

```
func:
        pushq   %rbp        老的基址指针压栈
        movq    %rsp, %rbp  修改基址指针
        subq    $32, %rsp   分配32字节空间
        movq    %rdi, -24(%rbp)
        movq    -24(%rbp), %rax
        subq    $1, %rax
        movq    %rax, -8(%rbp)
        movq    -8(%rbp), %rax
        movq    %rax, %rdi
        call    func
        nop
        leave
        ret
```

GCC 自4.5 版本开始，栈上的数据必须按16字节对齐，之前按4字节对齐

例题2 函数调用与返回


```
void func(long i)
{
        long j;
        j = i - 1;
        func(j);
}
```

gcc –S



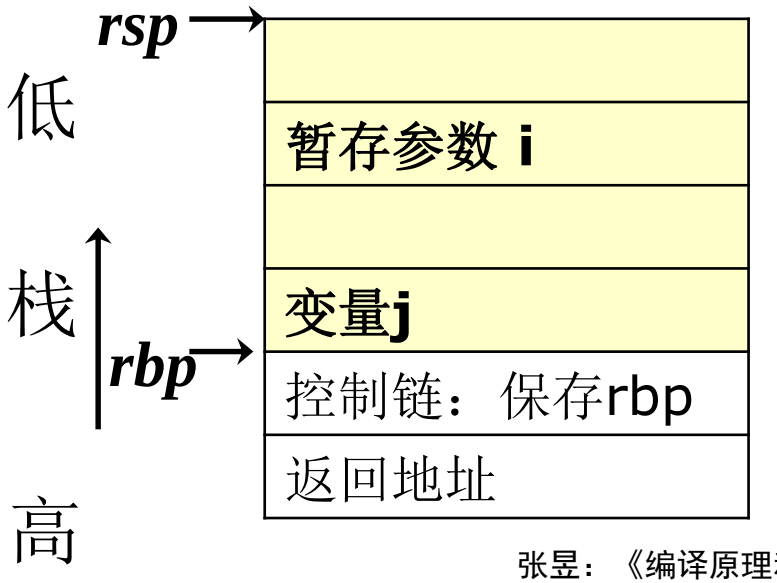

```
func:
        pushq   %rbp        老的基址指针压栈
        movq    %rsp, %rbp  修改基址指针
        subq    $32, %rsp   分配32字节空间
        movq    %rdi, -24(%rbp)  参数i 暂存到栈
        movq    -24(%rbp), %rax
        subq    $1, %rax
        movq    %rax, -8(%rbp)
        movq    -8(%rbp), %rax
        movq    %rax, %rdi
        call    func
        nop
        leave
        ret
```

参数i通过寄存器rdi传递

例题2 函数调用与返回


```
void func(long i)
{
        long j;
        j = i - 1;
        func(j);
}
```

gcc –S

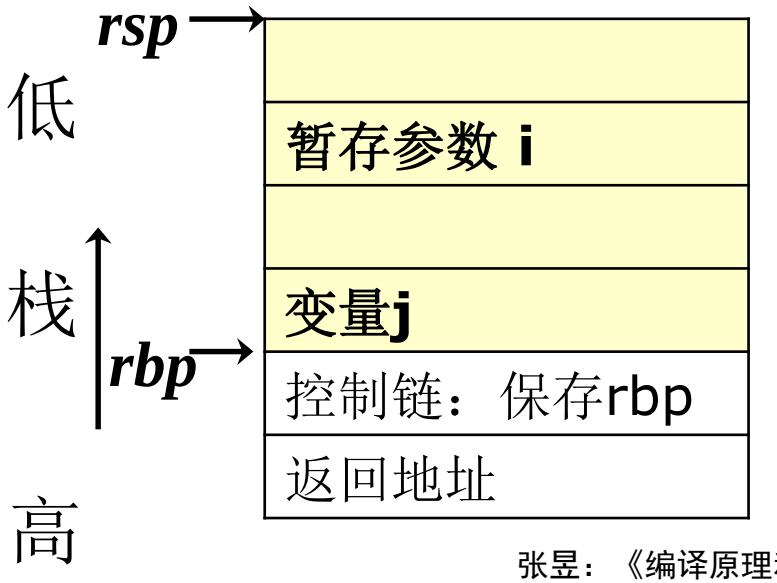



```
func:
        pushq   %rbp        老的基址指针压栈
        movq    %rsp, %rbp  修改基址指针
        subq    $32, %rsp   分配32字节空间
        movq    %rdi, -24(%rbp)  参数i 暂存到栈
        movq    -24(%rbp), %rax  i加载到寄存器rax
        subq    $1, %rax         i-1=>rax
        movq    %rax, -8(%rbp)   i-1存入变量j
        movq    -8(%rbp), %rax
        movq    %rax, %rdi
        call    func
        nop
        leave
        ret
```

例题2 函数调用与返回


```
void func(long i)
{
        long j;
        j = i - 1;
        func(j);
}
```

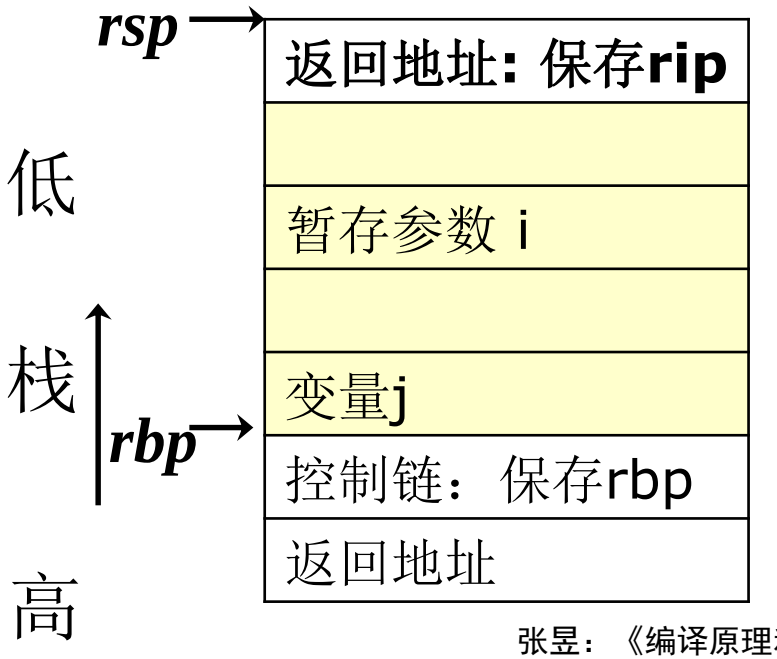
gcc –S




```
func:
pushq   %rbp        老的基址指针压栈
movq    %rsp, %rbp  修改基址指针
subq    $32, %rsp   分配32字节空间
movq    %rdi, -24(%rbp)  参数i 暂存到栈
movq    -24(%rbp), %rax  i加载到寄存器rax
subq    $1, %rax         i-1=>rax
movq    %rax, -8(%rbp)   i-1存入变量j
movq    -8(%rbp), %rax   加载j到寄存器rax
movq    %rax, %rdi       通过rdi传参
call    func
nop
leave
ret
```

例题2 函数调用与返回

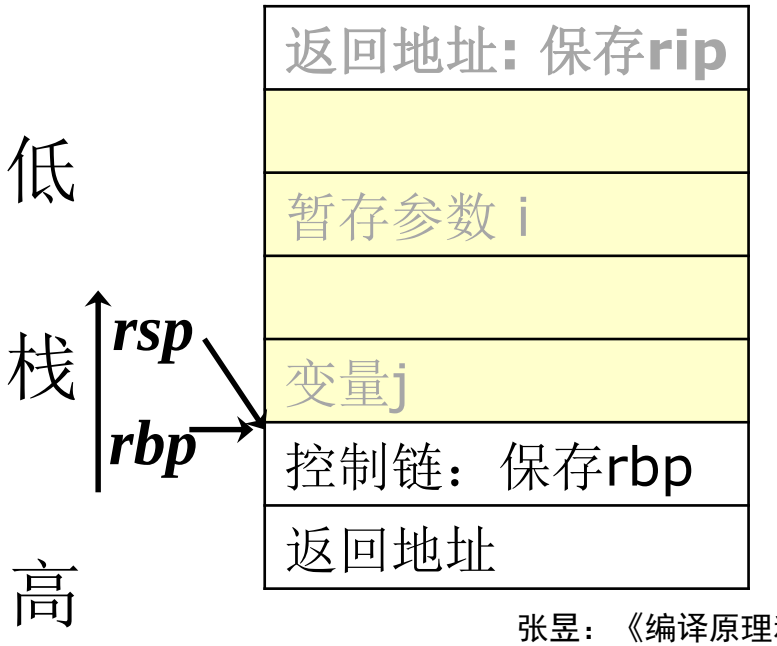

```
void func(long i)
{
        long j;
        j = i - 1;
        func(j);
}
```




```
func:
pushq   %rbp        老的基址指针压栈
movq    %rsp, %rbp  修改基址指针
subq    $32, %rsp   分配32字节空间
movq    %rdi, -24(%rbp)  参数i 暂存到栈
movq    -24(%rbp), %rax  i加载到寄存器rax
subq    $1, %rax         i-1=>rax
movq    %rax, -8(%rbp)   i-1存入变量j
movq    -8(%rbp), %rax   加载j到寄存器rax
movq    %rax, %rdi       通过rdi传参
call    func             保存返回地址并跳转到func
nop
leave
ret
```

例题2 函数调用与返回

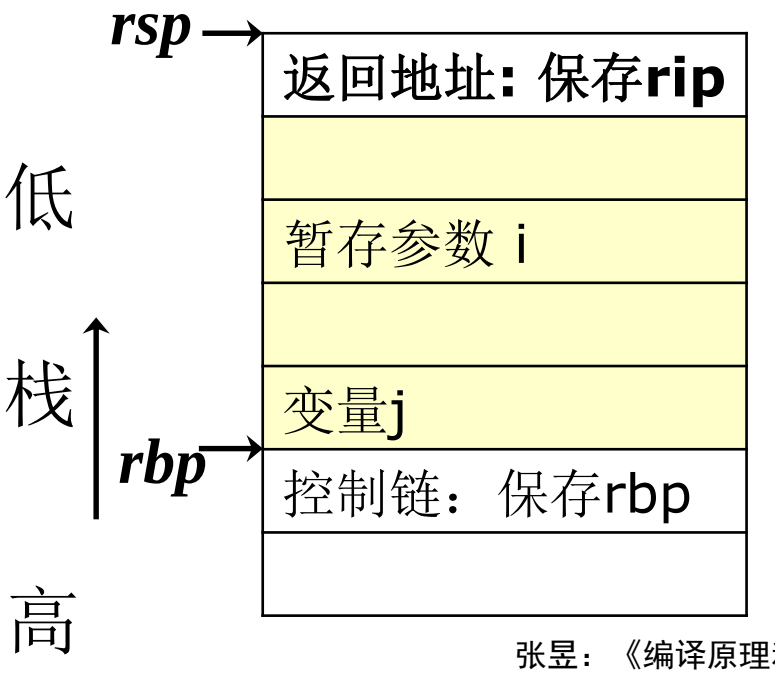
```
void func(long i)
{
        long j;
        j = i - 1;
        func(j);
}
```




```
func:
        pushq   %rbp        老的基址指针压栈
        movq    %rsp, %rbp  修改基址指针
        subq    $32, %rsp   分配32字节空间
        movq    %rdi, -24(%rbp)  参数i 暂存到栈
        movq    -24(%rbp), %rax  i加载到寄存器rax
        subq    $1, %rax         i-1=>rax
        movq    %rax, -8(%rbp)   i-1存入变量j
        movq    -8(%rbp), %rax   加载j到寄存器rax
        movq    %rax, %rdi       通过rdi传参
        call    func             保存返回地址并跳转到func
        nop
        leave   即 movq %rbp, %rsp; popq %rbp
        ret
```

例题2 函数调用与返回

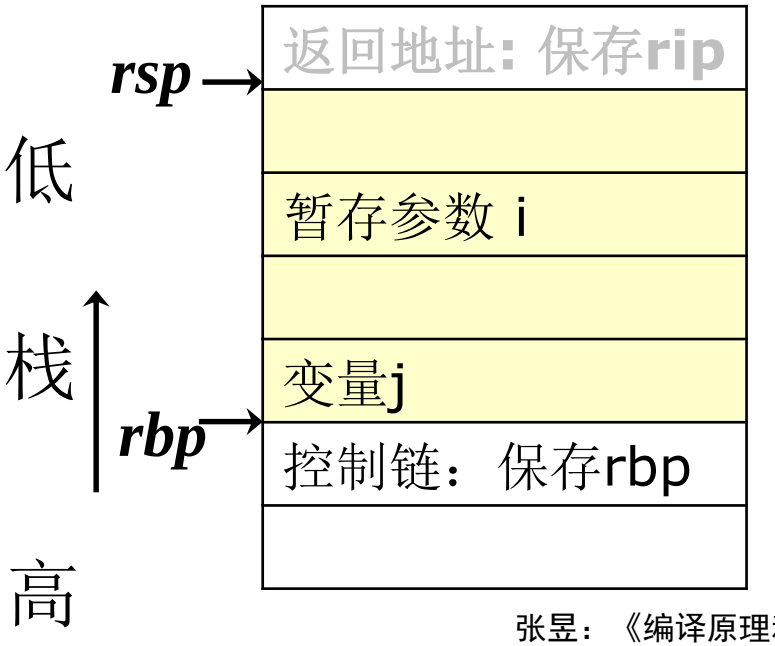

```
void func(long i)
{
        long j;
        j = i - 1;
        func(j);
}
```




```
func:
pushq   %rbp        老的基址指针压栈
movq    %rsp, %rbp  修改基址指针
subq    $32, %rsp   分配32字节空间
movq    %rdi, -24(%rbp)  参数i 暂存到栈
movq    -24(%rbp), %rax  i加载到寄存器rax
subq    $1, %rax         i-1=>rax
movq    %rax, -8(%rbp)   i-1存入变量j
movq    -8(%rbp), %rax   加载j到寄存器rax
movq    %rax, %rdi       通过rdi传参
call    func             保存返回地址并跳转到func
nop
leave   即 movq %rbp, %rsp; popq %rbp
ret
```

例题2 函数调用与返回


```
void func(long i)
{
        long j;
        j = i - 1;
        func(j);
}
```




```
func:
pushq   %rbp        老的基址指针压栈
movq    %rsp, %rbp  修改基址指针
subq    $32, %rsp   分配32字节空间
movq    %rdi, -24(%rbp)  参数i 暂存到栈
movq    -24(%rbp), %rax  i加载到寄存器rax
subq    $1, %rax         i-1=>rax
movq    %rax, -8(%rbp)   i-1存入变量j
movq    -8(%rbp), %rax   加载j到寄存器rax
movq    %rax, %rdi       通过rdi传参
call    func             保存返回地址并跳转到func
nop
leave   即 movq %rbp, %rsp; popq %rbp
ret     即 popq %rip
```

例题2 函数调用与返回


```
void func(int i)
{
        int j;
        j = i - 1;
        func(j);
}
```

参数i的类型由long改为int

1) rdi => edi

2) -24(%rbp) =>-20(...)

3) rax => eax

4) -8(%rbp) =>-4(...)

```
func:
        pushq   %rbp        老的基址指针压栈
        movq    %rsp, %rbp  修改基址指针
        subq    $32, %rsp   分配32字节空间
        movq    %edi, -20(%rbp)  参数i 暂存到栈
        movq    -20(%rbp), %eax  i加载到寄存器rax
        subq    $1, %eax         i-1=>eax
        movq    %eax, -4(%rbp)   i-1存入变量j
        movq    -4(%rbp), %eax   加载j到寄存器eax
        movq    %eax, %edi       通过edi传参
        call    func             保存返回地址并跳转到func
        nop
        leave   即 movq %rbp, %rsp; popq %rbp
        ret     即 popq %rip
```

例题2 函数调用与返回


```
int func(long i)
{
        long j;
        j = i - 1;
        return i+func(j);
}
```

返回类型由 void 改为int

返回值为表达式

1) rax传递返回值

2) 加式：先计算函数调用

3) 去除nop

```
func:
        pushq   %rbp        老的基址指针压栈
        movq    %rsp, %rbp  修改基址指针
        subq    $32, %rsp   分配32字节空间
        movq    %rdi, -24(%rbp)  参数i 暂存到栈
        movq    -24(%rbp), %rax  i加载到寄存器rax
        subq    $1, %rax         i-1=>rax
        movq    %rax, -8(%rbp)   i-1存入变量j
        movq    -8(%rbp), %rax   加载j到寄存器rax
        movq    %rax, %rdi       通过rdi传参
        call    func             保存返回地址并跳转到func
        movl    %eax, %edx       返回值保存到edx
        movq -24(%rbp), %rax 加载 i 的值到rax
        addl    %edx, %eax       eax存放i+func(j)
        nop
        leave   即 movq %rbp, %rsp; popq %rbp
        ret     即 popq %rip
```

例题2 函数调用与返回

```
void func(i)
long i;
{
        long j;
        j = i - 1;
        func(j);
}
```

按老的参数声明方式

将该函数视为返回 int 型

事先将存放返回值的eax清0

```
func:
        pushq   %rbp        老的基址指针压栈
        movq    %rsp, %rbp  修改基址指针
        subq    $32, %rsp   分配32字节空间
        movq    %rdi, -24(%rbp)  参数i 暂存到栈
        movq    -24(%rbp), %rax  i加载到寄存器rax
        subq    $1, %rax         i-1=>rax
        movq    %rax, -8(%rbp)   i-1存入变量j
        movq    -8(%rbp), %rax   加载j到寄存器rax
        movq    %rax, %rdi       通过rdi传参
        movl    $0, %eax
        call    func        保存返回地址并跳转到func
        nop
        leave   即 movq %rbp, %rsp; popq %rbp
        ret     即 popq %rip
```

例题2 函数调用与返回


```
void func(i)
int i;
{
        long j;
        j = i - 1;
        func(j);
}
```

按老的参数声明方式

参数i的类型由long改为int

1) **cltq: 类型提升**
2) **事先将存放返回值的eax清0**

```
func:
        pushq   %rbp        老的基址指针压栈
        movq    %rsp, %rbp  修改基址指针
        subq    $32, %rsp   分配32字节空间
        movq    %edi, -20(%rbp)  参数i 暂存到栈
        movq    -20(%rbp), %eax  i加载到寄存器rax
        subq    $1, %eax         i-1=>eax
        cltq            类型提升 int=>long
        movq    %rax, -8(%rbp)   i-1存入变量j
        movq    -8(%rbp), %rax   加载j到寄存器rax
        movq    %rax, %rdi       通过rdi传参
        movl    $0, %eax
        call    func保存返回地址并跳转到func
        nop
        leave   即 movq %rbp, %rsp; popq %rbp
        ret     即 popq %rip
```

例题2 函数调用与返回


```
void func(long i)
{
        long j;
        j = i - 1;
        func(j);
}
```

在x86-64机器上用交叉编译器产生ARM代码

- **sudo apt install gcc-aarch64-linux-gnu**
- **aarch64-linux-gnu-gcc -S**

x29	帧指针寄存器	FP, Frame Pointer	保存函数调用者的栈帧指针
x30	链接寄存器	LR, Link Registe	保存函数调用的返回地址
sp	栈顶寄存器	Stack Pointer	保存栈顶指针

"GCC 11.4.0: (ubuntu1~22.04)"

```
        .arch armv8-a
        ....
        .align  2
        .global func        .type   func, %function
func:
        stp     x29, x30, [sp, -48]!
                将x29和x30的值压栈，sp减去 48 并更新sp
        mov     x29, sp             设置x29为新的sp
        str     x0, [sp, 24]        将寄存器x0(参数i)的值存入sp+4单元
        ldr     x0, [sp, 24]        将sp+4单元的值加载到x0
        sub     x0, x0, #1          x0=x0-1，即x0=i-1
        str     x0, [sp, 40]        存入sp+40（局部变量j）
        ldr     x0, [sp, 40]        加载sp+40单元的值到x0
        bl      func                跳转到func函数，返回地址保存到x30
        nop
        ldp     x29, x30, [sp], 48  从栈中恢复FP和LR
        ret
        .size   func, .-func
.section        .note.GNU-stack,"",@progbits
```

例题3 参数数目可变的函数


```
void print()
{
    printf("%d,%d,%d");
}
```

程序运行时会输出**3**个整数

X86-64

```
.LC0:
        .string "%d,%d,%d"
print:
        pushq   %rbp
        movq    %rsp, %rbp
        movl    $.LC0, %edi
        movl    $0, %eax
        call    printf
        nop
        popq    %rbp
        ret
```

ARMv8-a

```
.LC0:
    .string "%d,%d,%d"
print:
    stp    x29, x30, [sp, -16]!
    mov    x29, sp
    adrp   x0, .LC0
    add x0, x0, :lo12:.LC0
    bl  printf
    nop
    ldp x29, x30, [sp], 16
    ret
```

```
$ gcc -S print.c
print.c: In function ‘print’:
print.c:3:5: warning: implicit declaration of function ‘printf’ [-Wimplicit-function-declaration]
    printf("%d,%d,%d");
    ^~~~~~
print.c:3:5: warning: incompatible implicit declaration of built-in function ‘printf’
print.c:3:5: note: include ‘<stdio.h>’ or provide a declaration of ‘printf’
print.c:3:14: warning: format ‘%d’ expects a matching ‘int’ argument [-Wformat=]
    printf("%d,%d,%d");
             ~^
……
```

例题4 参数与局部变量

gcc v11.4.0

ubuntu1~22.04

```
func(short i, short j, float f, float e)
{
    short i1,j1; float f1,e1;
    printf("%p,%p,%p,%p\n", &i,&j,&f,&e);
    printf("%p,%p,%p,%p\n", &i1,&j1,&f1,&e1);
}
main()
{
    short i,j; float f,e;
    func(i,j,f,e);
}
```

输出：

0x7ffdd906376c,0x7ffdd9063768,0x7ffdd9063764,0x7ffdd9063760
0x7ffdd906377c,0x7ffdd906377e,0x7ffdd9063780,0x7ffdd9063784

例题4 参数与局部变量


```
func(short i, short j, float f, float e)
{
    short i1,j1; float f1,e1;
    printf("%p,%p,%p,%p\n", &i,&j,&f,&e);
    printf("%p,%p,%p,%p\n", &i1,&j1,&f1,&e1);
}
main()
{
    short i,j; float f,e;
    func(i,j,f,e);
}
```

输出：

0x7ffdd906376c,
0x7ffdd9063768,
0x7ffdd9063764,
0x7ffdd9063760

```
subq    $48, %rsp
movl    %edi, %edx
movl    %esi, %eax
movss   %xmm0, -44(%rbp)
movss   %xmm1, -48(%rbp)
movw    %dx, -36(%rbp)
movw    %ax, -40(%rbp)
movq    %fs:40, %rax
movq    %rax, -8(%rbp)
xorl    %eax, %eax
leaq    -48(%rbp), %rsi
leaq    -44(%rbp), %rcx
leaq    -40(%rbp), %rdx
leaq    -36(%rbp), %rax
movq    %rsi, %r8
```

寄存器传参;
short提升为
int传递

例题4 参数与局部变量


```
func(short i, short j, float f, float e)
{
    short i1,j1; float f1,e1;
    printf("%p,%p,%p,%p\n", &i,&j,&f,&e);
    printf("%p,%p,%p,%p\n", &i1,&j1,&f1,&e1);
}
main()
{
    short i,j; float f,e;
    func(i,j,f,e);
}
```

输出：

0x7ffdd906376c,
0x7ffdd9063768,
0x7ffdd9063764,
0x7ffdd9063760

```
subq    $48, %rsp
movl    %edi, %edx
movl    %esi, %eax
movss   %xmm0, -44(%rbp)
movss   %xmm1, -48(%rbp)
movw    %dx, -36(%rbp)
movw    %ax, -40(%rbp)
movq    %fs:40, %rax
movq    %rax, -8(%rbp)
xorl    %eax, %eax
leaq    -48(%rbp), %rsi
leaq    -44(%rbp), %rcx
leaq    -40(%rbp), %rdx
leaq    -36(%rbp), %rax
movq    %rsi, %r8
```

取short参数压入栈中，按4字节对齐

相对于rbp的偏移地址及其暂存的变量值

-36 i
-40 j
-44 f
-48 e

例题4 参数与局部变量


```
func(short i, short j, float f, float e)
{
    short i1,j1; float f1,e1;
    printf("%p,%p,%p,%p\n", &i,&j,&f,&e);
    printf("%p,%p,%p,%p\n", &i1,&j1,&f1,&e1);
}
main()
{
    short i,j; float f,e;
    func(i,j,f,e);
}
```

输出：

0x7ffdd906376c,
0x7ffdd9063768,
0x7ffdd9063764,
0x7ffdd9063760

```
movq    %fs:40, %rax
movq    %rax, -8(%rbp)
xorl    %eax, %eax
leaq    -48(%rbp), %rsi
leaq    -44(%rbp), %rcx
leaq    -40(%rbp), %rdx
leaq    -36(%rbp), %rax
movq    %rsi, %r8
movq    %rax, %rsi
movl    $.LC0, %edi
movl    $0, %eax
call    printf
```

参数逆序
存入寄存器

相对于rbp的
偏移地址及其
暂存的变量值

-36 i
-40 j
-44 f
-48 e

例题4 参数与局部变量

```
func(short i, short j, float f, float e)
{
    short i1,j1; float f1,e1;
    printf("%p,%p,%p,%p\n", &i,&j,&f,&e);
    printf("%p,%p,%p,%p\n", &i1,&j1,&f1,&e1);
}
main()
{
    short i,j; float f,e;
    func(i,j,f,e);
}
```

输出：

0x7ffdd906376c,
0x7ffdd9063768,
0x7ffdd9063764,
0x7ffdd9063760

```
movq    %fs:40, %rax
movq    %rax, -8(%rbp)
xorl    %eax, %eax
leaq    -48(%rbp), %rsi
leaq    -44(%rbp), %rcx
leaq    -40(%rbp), %rdx
leaq    -36(%rbp), %rax
movq    %rsi, %r8
movq    %rax, %rsi
movl    $.LC0, %edi
movl    $0, %eax
call    printf
```

存放返回值的寄存器清0，调用printf

例题4 参数与局部变量


```
func(short i, short j, float f, float e)
{
    short i1,j1; float f1,e1;
    printf("%p,%p,%p,%p\n", &i,&j,&f,&e);
    printf("%p,%p,%p,%p\n", &i1,&j1,&f1,&e1);
}
main()
{
    short i,j; float f,e;
    func(i,j,f,e);
}
```

```
leaq    -12(%rbp), %rsi
leaq    -16(%rbp), %rcx
leaq    -18(%rbp), %rdx
leaq    -20(%rbp), %rax
movq    %rsi, %r8
movq    %rax, %rsi
movl    $.LC0, %edi
movl    $0, %eax
call    printf
```

参数逆序存入寄存器

输出：

0x7ffdd906376c,
0x7ffdd9063768,
0x7ffdd9063764,
0x7ffdd9063760

相对于rbp的偏移地址及其暂存的变量值

-12 e1
-16 f1
-18 j1
-20 i1

例题4 参数与局部变量

gcc v11.4.0

ubuntu1~22.04

```
func(i, j, f, e)
short i; short j; float f; float e;
{
    short i1,j1; float f1,e1;
    printf("%p,%p,%p,%p\n", &i,&j,&f,&e);
    printf("%p,%p,%p,%p\n", &i1,&j1,&f1,&e1);
}
main()
{
    short i,j; float f,e;
    func(i,j,f,e);
}
```

输出：

0x7ffd5859463c,0x7ffd58594638,0x7ffd58594630,0x7ffd58594628
0x7ffd5859464c,0x7ffd5859464e,0x7ffd58594650,0x7ffd58594654

0x7ffdd906376c,0x7ffdd9063768,0x7ffdd9063764,0x7ffdd9063760
0x7ffdd906377c,0x7ffdd906377e,0x7ffdd9063780,0x7ffdd9063784

例题4 参数与局部变量

```
func(i, j, f, e)
short i; short j; float f; float e;
{
    short i1,j1; float f1,e1;
    printf("%p,%p,%p,%p\n", &i,&j,&f,&e);
    printf("%p,%p,%p,%p\n", &i1,&j1,&f1,&e1);
}
main()
{
    short i,j; float f,e;
    func(i,j,f,e);
}
```

输出：

0x7ffd5859463c,
0x7ffd58594638,
0x7ffd58594630,
0x7ffd58594628

```
subq    $64, %rsp
movl    %edi, %edx
movl    %esi, %eax
movw    %dx, -36(%rbp)
movw    %ax, -40(%rbp)
cvtsd2ss  %xmm0, %xmm0
movss   %xmm0, -48(%rbp)
cvtsd2ss  %xmm1, %xmm0
movss   %xmm0, -56(%rbp)
movq    %fs:40, %rax
movq    %rax, -8(%rbp)
xorl    %eax, %eax
leaq    -56(%rbp), %rsi
leaq    -48(%rbp), %rcx
leaq    -40(%rbp), %rdx
```

寄存器传参;
short提升为
int传递

寄存器传参;
float提升
为double
传递

cvtsd2ss将双精度转换成形参的单精度类型

例题4 参数与局部变量


```
func(i, j, f, e)
short i, short j, float f, float e;
{
    short i1,j1; float f1,e1;
    printf("%p,%p,%p,%p\n", &i,&j,&f,&e);
    printf("%p,%p,%p,%p\n", &i1,&j1,&f1,&e1);
}
main()
{
    short i,j; float f,e;
    func(i,j,f,e);
}
```

输出：

0x7ffd5859463c,
0x7ffd58594638,
0x7ffd58594630,
0x7ffd58594628

```
cvtsd2ss  %xmm0, %xmm0
movss   %xmm0, -48(%rbp)
cvtsd2ss  %xmm1, %xmm0
movss   %xmm0, -56(%rbp)
movq    %fs:40, %rax
movq    %rax, -8(%rbp)
xorl    %eax, %eax
leaq    -56(%rbp), %rsi
leaq    -48(%rbp), %rcx
leaq    -40(%rbp), %rdx
leaq    -36(%rbp), %rax
movq    %rsi, %r8
movq    %rax, %rsi
movl    $.LC0, %edi
movl    $0, %eax
```

寄存器传参

相对于rbp的偏移地址及其暂存的变量值

-36 i
-40 j
-48 f
-56 e

低版本的gcc (如3.x, 2.x)


```
func(i,j,f,e)
short i,j; float f,e;
{
    short i1,j1; float f1,e1;
    printf(&I,&j,&f,&e);
    printf(&i1,&j1,&f1,&e1);
}
int main()
{
    short I,j; float f,e;
    func(I,j,f,e);
}
```

Sizes of short, int, long, float, double = 2, 4, 4, 4, 8
（在SPARC/SUN工作站上）

1、参数通过栈传递，由左到右逆序入栈， i, j, f, e 地址升序

2、局部变量按声明的先后次序排列， i1, j1, f1, e1 地址降序

Address of i,j,f,e = ...36, ...42, ...44, ...54（八进制数）

Address of i1,j1,f1,e1 = ...26, ...24, ...20, ...14

例题4 参数与局部变量

现代GCC编译器如何布局局部变量？

```
func(short i, short j, float f, float e)
{
    short i1,j1; float f1,e1;
    printf("%p,%p,%p,%p\n", &i,&j,&f,&e);
    printf("%p,%p,%p,%p\n", &i1,&j1,&f1,&e1);
}
main()
{
    short i,j; float f,e;
    func(i,j,f,e);
}
```

1、参数通过寄存器传递，暂存在栈中，暂存地址在局部变量之后（地址值比局部变量的地址小）

2、局部变量 未 按声明的先后次序排列？i1, j1, f1, e1 地址升序

输出：

0x7ffdd906376c,0x7ffdd9063768,0x7ffdd9063764,0x7ffdd9063760
0x7ffdd906377c,0x7ffdd906377e,0x7ffdd9063780,0x7ffdd9063784

例题4 参数与局部变量

- 现代GCC编译器如何布局局部变量？

```
func(short i, short j, float f, float e)
{
    short i1=1, j1=2, j3[4]={5,6,7,8};
    float f1=9, e1=10;
    printf("%p,%p,%p,%p\n", &i,&j,&f,&e);
    short i2=3, j2=4;
    printf("%p,%p,%p,%p\n", &i1,&j1,&f1,&e1);
}
main()
{
    short i,j; float f,e;
    func(i,j,f,e);
}
```

```
movw    $1, -32(%rbp)
movw    $2, -30(%rbp)
movw    $5, -16(%rbp)
movw    $6, -14(%rbp)
movw    $7, -12(%rbp)
movw    $8, -10(%rbp)
movw    $3, -28(%rbp)
movw    $4, -26(%rbp)
movss   .LC0(%rip), %xmm0
movss   %xmm0, -24(%rbp)
movss   .LC1(%rip), %xmm0
movss   %xmm0, -20(%rbp)
.align 4
.LC0:
.long   1091567616
.align 4
.LC1:
.long   1092616192
```

局部变量按类型分别排列，
相同类型的逆序布局➔
类型在编译器中日趋重要

中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

下期预告：非局部名字的访问