

# 编译原理与技术

## 第7章：运行环境

王吴凡

北京邮电大学计算机学院

主页：[cswwf.github.io](https://cswwf.github.io)

邮箱：[wufanwang@bupt.edu.cn](mailto:wufanwang@bupt.edu.cn)

# 教学内容、目标与要求

## ■ 教学内容

- 程序运行时的存储组织
- 存储分配策略
- 非局部名的访问
- 参数传递机制

## ■ 教学目标与要求

- 了解程序运行空间的划分和组织；
- 理解活动记录的内容及其空间组织；
- 掌握栈式存储分配策略；
- 理解调用序列和返回序列的主要功能；
- 理解访问链的作用、建立过程和使用方法；
- 掌握参数传递机制的实现方法。

# 内容目录

7.1 程序运行时的存储组织

7.2 存储分配策略

7.3 非局部名字的访问

7.4 参数传递机制

小 结

# 7.1 程序运行时的存储组织

- 程序运行时需要内存空间来存放它的指令序列、所处理的数据对象、及其运行环境信息等。
- 存储组织与管理
  - 早期的计算机上，存储管理工作是由程序员自己来完成。
  - 有了高级语言之后，程序运行空间的组织和管理由编译程序来实现。  
比如，程序中使用的存储单元都由标识符表示，它们对应的内存地址由编译程序在编译时或由其生成的目标程序在运行时进行分配。
- 程序运行时，其相关信息怎样存储、如何访问？
- 本节内容
  1. 过程与活动
  2. 程序运行空间的划分
  3. 活动记录与控制栈
  4. 名字的作用域及名字绑定

# 1. 过程与活动

## ■ 过程的定义

- `procedure p(...);...;begin ... end;`
- `function f(...):real;...;begin...end;`
- `void proc(...){...}`
- `int func(...){...}`

## ■ 过程的分类

- 过程：没有返回值
- 函数：有返回值

## ■ 过程引用

- 过程调用，语句序列中的可执行语句
- 函数调用，表达式中的运算对象

## ■ 参数

- 形参、实参

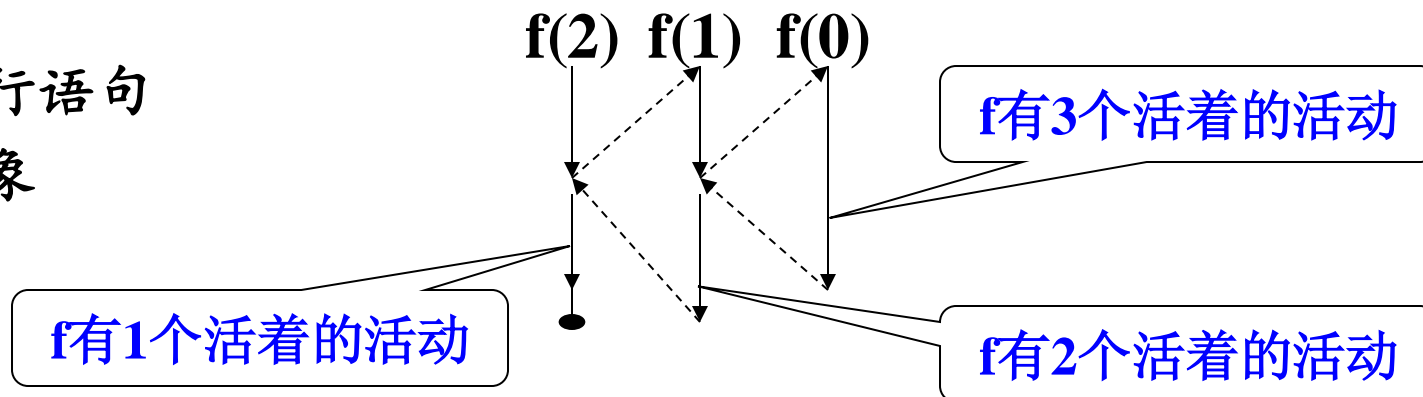
```
int f(int n) {  
    if (n==0) return 1;  
    else return n*f(n-1);  
}
```

## ■ 活动

- 一个过程的每次执行
- 正在执行中的过程，称为**活着的**。

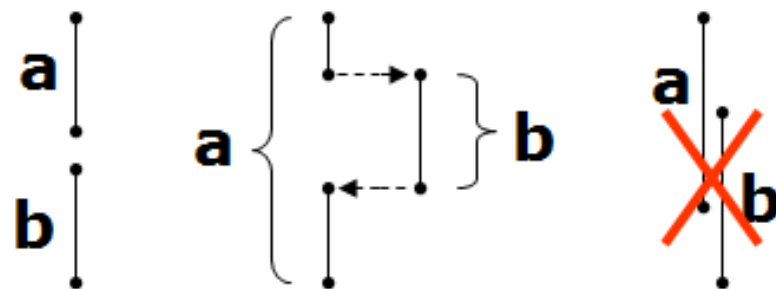
## ■ 过程与活动

- 过程：静态概念，活动：动态概念。
- 过程与活动的关系，1:1或者1:m
- 递归过程：同时有多个活着的活动。
- 活动有自己独立的存储空间/数据空间。



# 活动的生存期

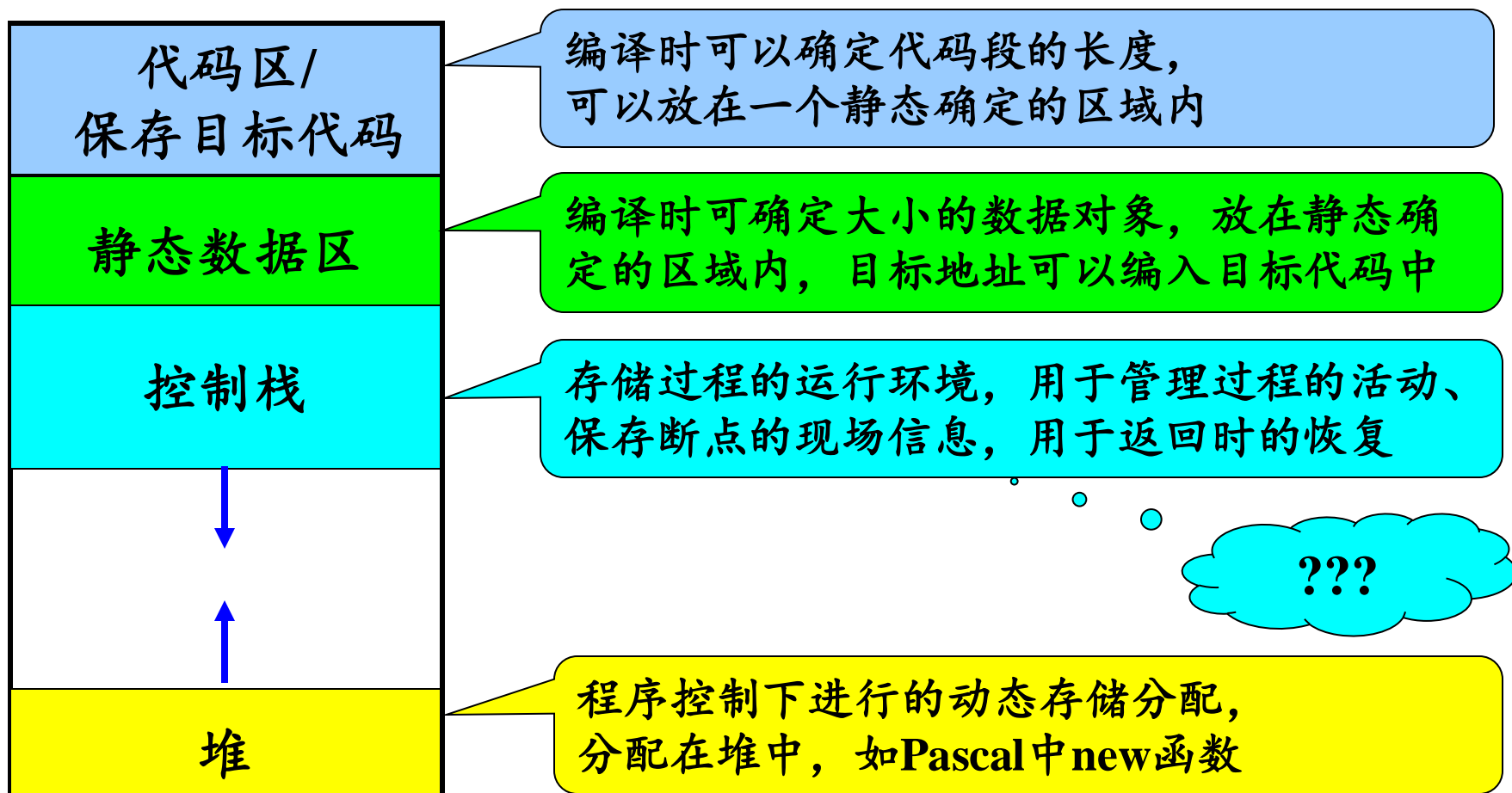
- 程序执行时，过程之间的控制流是连续的。
  - 过程的每一次执行都是从过程体的起点开始，最后控制返回到直接跟随本次调用点的位置。
- 活动的生存期
  - 过程体的执行中，第一步和最后一步之间的一系列步骤的执行时间。
  - 过程P的一次活动的生存期，包括执行过程P所调用的过程的时间，以及这些过程所调用的过程的时间。
  - 如果a和b是过程的活动，那么它们的生存期要么是不重叠，要么是嵌套的。



- 递归过程
  - 如果一个过程，它的不同活动的生存期可以嵌套，则这个过程是递归的。
  - 直接递归、间接递归。

## 2. 程序运行空间的划分

- 编译程序在编译源程序时，向操作系统申请一块内存区域，以便被编译程序在其中运行。



### 3. 活动记录与控制栈

### 活动记录的内容与组织

- 允许过程递归调用的语言（如Pascal、C等），过程块的活动空间不能静态分配。

- 某段时间内，一个递归过程可能有多个活着的活动。

```
int f(int n) {  
    if (n==0) return 1;  
    else return n*f(n-1);  
}
```

- 需要为过程的每次活动分配不同的存储空间。
- 通常采用栈式存储分配策略。

- 活动记录：一个连续的存储块

- 记录过程在一次执行中所需要的信息。

返回值
实参区域
控制链域
访问链域
机器状态域
局部数据区
临时数据区

恢复调用者环境。  
指向调用过程的活动记录。

对非局部名字的访问。  
直接外围过程最新活动记录

断点环境，寄存器、PSW等

在本次活动中，局部变量的  
存储空间

- (1) 所需空间大小的确定时间早：中间 晚：两头
- (2) 用于通信：前面 自己用的：后面



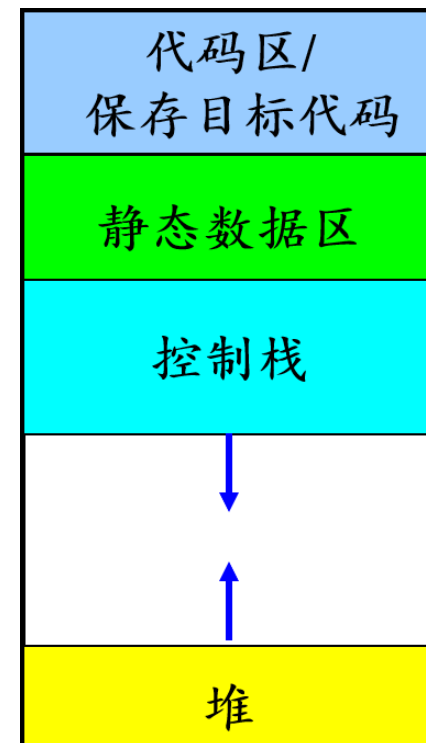
# 控制栈与活动记录

## ■ 控制栈：

- 程序运行空间中的存储区域，以栈的形式组织和管理
- 记录活动的生存踪迹及活动的运行环境
- 当前活着的所有活动的活动记录

## ■ 栈空间的分配和回收

- 活动记录的入栈和出栈（像Pascal、C）
- 调用过程时，被调用过程的一次新的活动开始，在栈顶为该活动创建一个新的活动记录来保存其环境信息；
- 活动结束后，控制从被调用过程返回，释放其活动记录，恢复调用过程的执行环境，使调用过程的活动记录成为栈顶活动记录。



# 局部数据的安排

## ■ 常识

- 程序运行时使用连续的存储空间
- 内存可编址的最小单位是字节
- 一个机器字由若干个字节组成
- 一个名字所需存储空间的大小由其类型决定
- 需多个字节表示的数据对象，存放在连续字节的存储块中，第一个字节的地址作为它的地址

## ■ 局部数据的安排

- 局部数据区是在编译过程中处理声明语句时安排的
- 长度可变的数据对象，放在该区域之外

## ■ 数据对象的存储安排受目标机器编址限制的影响

# 编址限制的影响

- 多数机器都有地址对齐的要求。如：整数加法指令可能要求整数的地址能够被4整除。
- 例如，有机器M，它的每个字节都有一个地址，一个字节有8位，为char数据对象分配一个字节，int数据对象分配4个字节，float数据对象分配4个字节，double数据对象分配8个字节，整型和实型数据对象的存储地址须能够被4整除。

```
struct {  
    char c1;  
    int i;  
    char c2;  
    float x;  
}a;
```

理论：10B  
实际：16B

```
struct {  
    char c1;  
    int i;  
    char c2;  
    double x;  
}a1;
```

理论：14B  
实际：24B

```
struct {  
    char c1;  
    char c2;  
    int i;  
    float x;  
}b;
```

实际：12B

- 为求分配上的全局统一，而多余出来的无用空间叫做填塞（padding）

## 4. 名字的作用域及名字绑定

- 声明是一个把信息与名字联系起来的语法结构
  - 显式声明（如PASCAL中的声明：`var i:integer`）
  - 隐含声明（如FORTRAN程序）
- 在一个程序的不同部分可能有对同一个名字的相互独立的声明。
- 一个声明起作用的程序部分称为该声明的作用域。
- 语言的作用域规则决定了当这样的名字在程序正文中出现时应该使用哪一个声明。
- Pascal、C等中的名字遵循“最近嵌套原则”
- 编译过程中，名字的作用域信息记录在符号表中。

# 名字的作用域示例

下面程序的输出？

```
main()
{  int a=0;
   int b=0;
   {  int b=1;
      {  int a=2;
         printf("%d %d\n", a, b);
      }
      {  int b=3;
         printf("%d %d\n", a, b);
      }
      printf("%d %d\n", a, b);
   }
   printf("%d %d\n", a, b);
}
```

2, 1

0, 3

0, 1

0, 0

再如程序，输出？

```
int i=100, sum=0;
{ for (int i=0; i!=10; i++)
    sum+=i;
    printf ("i=%d\n", i);
    printf ("sum=%d\n", sum);
}
```

10, 45

```
int i=100, sum=0;
{ for (int i=0; i!=10; i++)
    sum+=i;
}
printf ("i=%d\n", i);
printf ("sum=%d\n", sum);
```

100, 45

# 名字绑定

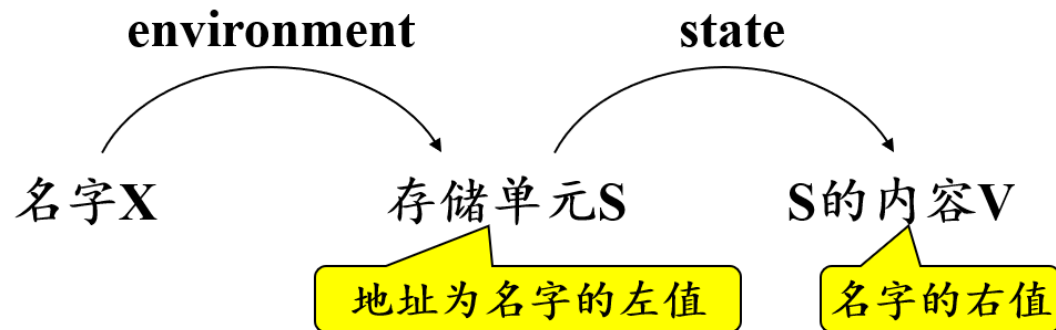
- 把名字映射到存储单元的过程。
- 静态作用域规则下，名字的存储空间安排在其声明所在过程的活动记录中。
- 名字与存储单元的对应关系
  - 1:1, 1:m
  - 不同名字被绑定到不同存储单元。
  - 递归过程中声明的名字，同一个名字也可能映射到不同的存储空间。

```
int fun(int n) {  
    int f=1;  
    f=f*n;  
    return f;  
}
```

```
int fun(int n) {  
    int f;  
    if (n=1) f=1;  
    else f=n*fun(n-1);  
    return f;  
}
```

- 程序运行期间，名字的值有左右之分。

- 左值：其存储空间的地址
- 右值：其存储空间的内容。



- 赋值语句的执行仅改变名字的右值，不改变其左值。如：
  - $X=10$

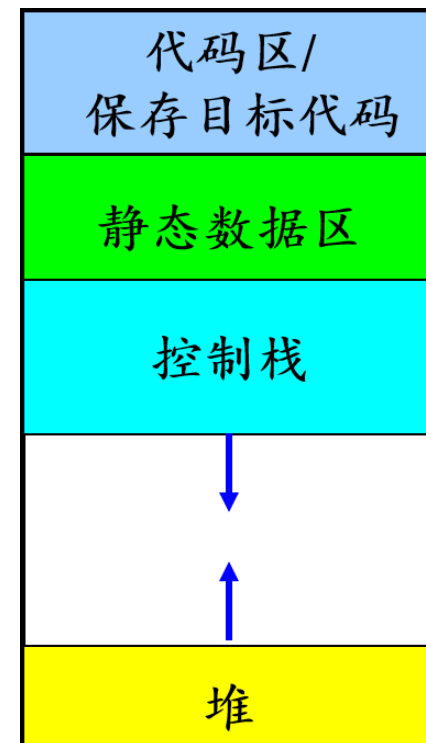
# 与存储组织与管理有关的其他问题

- 名字的存储空间如何组织、名字绑定的方法等取决于语言的性质。
- 主要取决于对以下问题的回答：
  - 过程是否可递归？
  - 当控制从过程的一次活动返回时，对局部名字的值如何处理？
  - 过程是否可以引用非局部的名字？
  - 过程调用时如何传递参数？
  - 过程是否可以作为参数传递？可否作为结果被返回？
  - 存储空间能否在程序控制下进行动态分配？
  - 存储空间是否必须显式地归还？



## 7.2 存储分配策略

- 运行时刻存储空间的划分：
- 三种数据空间采用不同的存储分配策略
  - 静态存储分配：编译时对所有数据对象分配存储空间。
  - 栈式存储分配：运行时把存储空间组织成栈进行管理，数据对象分配在栈中。
  - 堆式存储分配：运行时把存储空间组织成堆进行管理。
- 本节内容
  1. 静态存储分配
  2. 栈式存储分配
  3. 堆式存储分配





# 1. 静态存储分配

## ■ 条件:

源程序中声明的各种数据对象所需存储空间的大小在**编译时都可以确定**。

## ■ 存储分配:

编译时, 分配**固定的**存储空间。

- 每个过程的活动记录的大小及位置
- 活动记录中每一个名字所占用存储空间的大小及位置
- 数据对象的地址可以生成在目标代码中。

## ■ 地址绑定:

程序装入内存时进行。

## ■ 运行期间:

名字的左值保持不变。

- 过程每次执行, 同一名字都使用相同的存储空间。
- 活动结束后, 局部名字的值保留下来。当控制再次进入时, 局部名字的值即上次离开时的值。

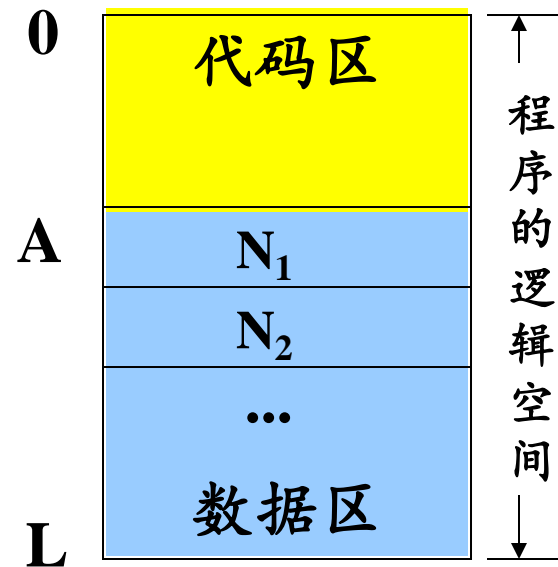
## ■ 对源语言的限制:

- 数据对象的大小和它们在内存中的位置必须在编译时都能够确定。
- 不允许过程递归调用
- 不能建立动态数据结构

# 静态存储分配策略的实现

- 编译程序处理声明语句时，每遇到一个变量名就创建一个符号表条目，填入相应的属性，包括名字、类型、存储地址等。
- 每个变量所需存储空间的大小由其类型确定，并且在编译时是已知的。
- 根据名字出现的先后顺序，连续分配空间。

name	type	address	...	length
$N_1$		0		$n_1$
$N_2$		$n_1$		$n_2$
$N_3$		$n_1+n_2$		$n_3$
...	...	...		



# Fortran程序示例

**PROGRAM cmain**

**CHARACTER \*50 buff**

**INTEGER next**

**CHARACTER c, **prc****

**DATA next /1/, buff /' '/**

**6**

**c=prc()**

**buff (next:next)=c**

**next=next+1**

**IF (c .NE. ' ') GOTO 6**

**WRITE (\*, '(A)') buff**

**END**

**CHARACTER FUNCTION **prc**()**

**CHARACTER \*80 buffer**

**INTEGER next**

**SAVE buffer, next**

**DATA next /81/**

**IF (next .GT. 80) THEN**

**READ (\*, '(A)') buffer**

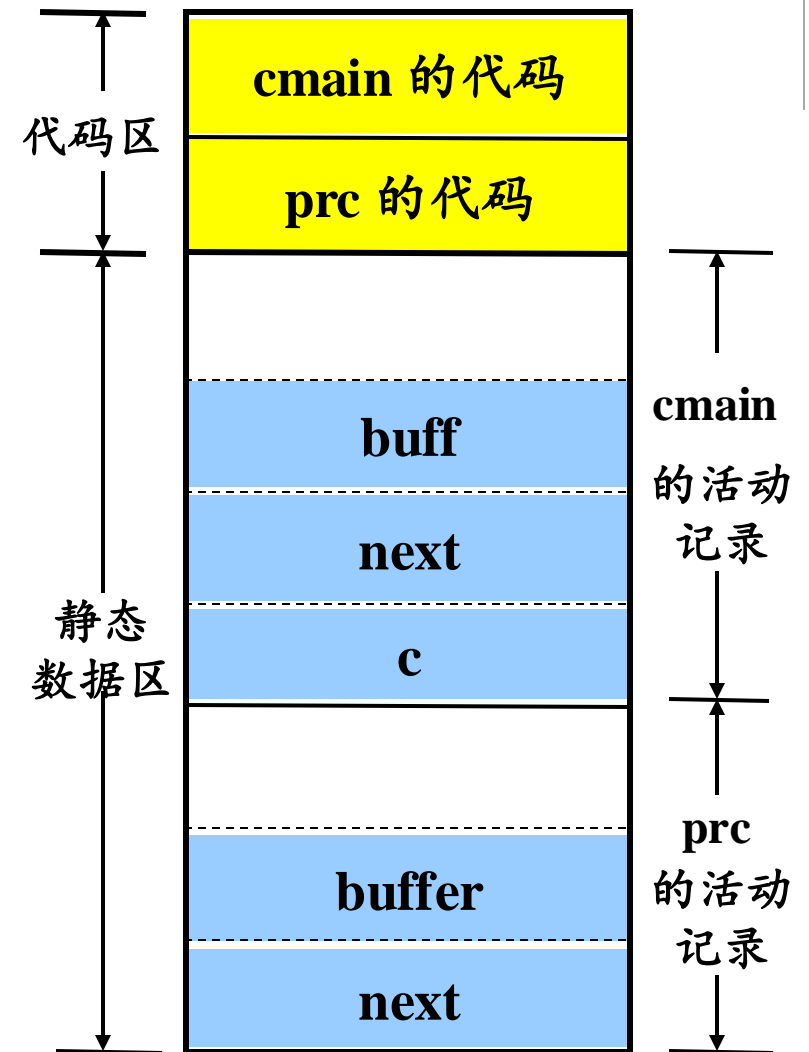
**next=1**

**END IF**

**prc=buffer(next:next)**

**next=next+1**

**END**



## 2. 栈式存储分配

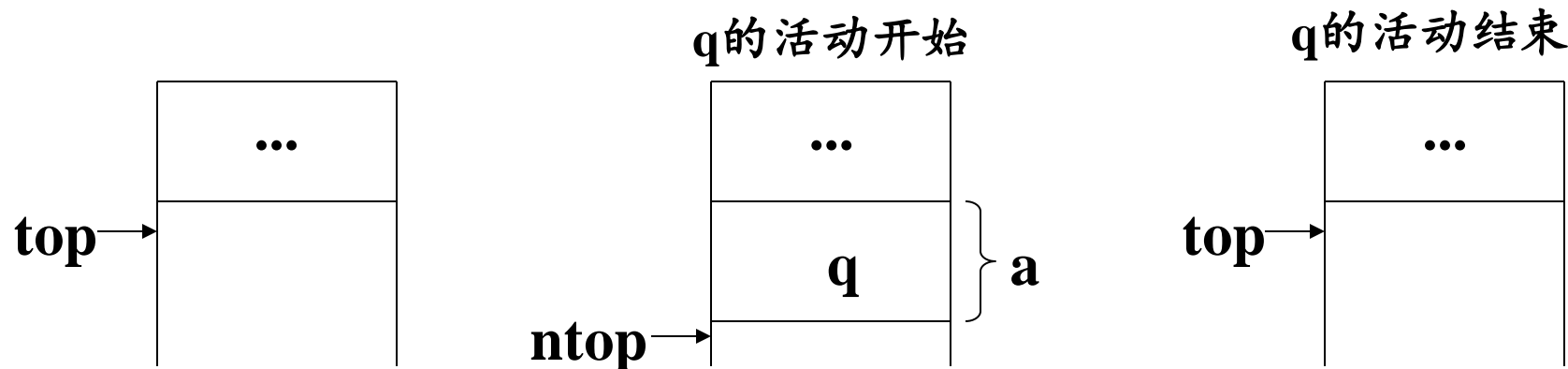
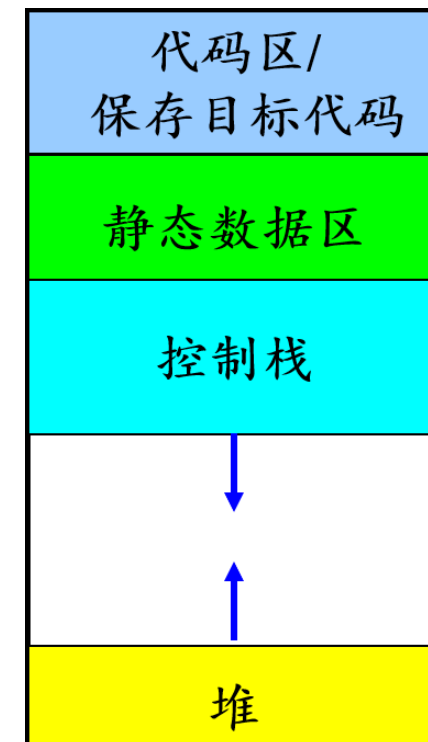
- 存储空间被组织成栈

- 存储管理

- 活动开始时，与活动相应的活动记录入栈。局部变量的存储空间分配在活动记录中，同一过程中声明的名字在不同的活动中被绑定到不同的存储空间。

- 活动结束时，活动记录出栈。

分配给局部名字的存储空间被释放。名字的值将丢失，不可再用。



# PASCAL 排序程序

```
program sort(input, output);  
  var a: array[0..10] of integer;  
      x: integer;
```

```
  procedure readarray;  
    var i: integer;  
  begin  
    for i:=1 to 9 do read(a[i])  
  end;
```

```
  prcedure exchange(i, j: integer);  
  begin  
    x:=a[i]; a[i]:=a[j]; a[j]:=x  
  end;
```

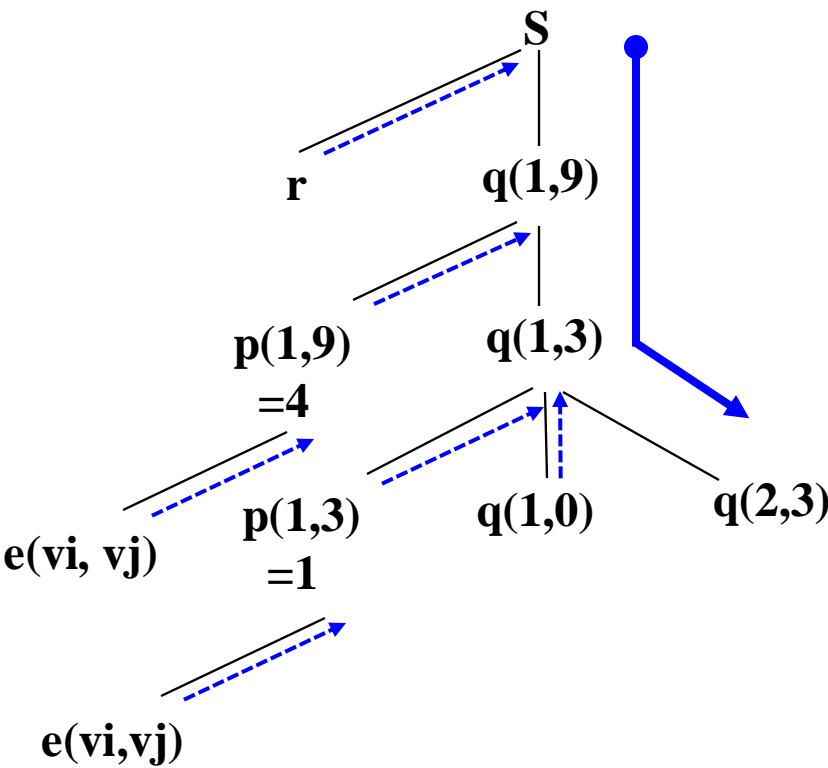
```
  procedure quicksort(m, n: integer);  
    var k, v: integer;
```

```
    function partition(y, z: integer): integer;  
      var i, j: integer;  
    begin  
      ... a ...; //引用名字a  
      ... v ...; //引用名字v  
      exchange(i, j);  
    end;
```

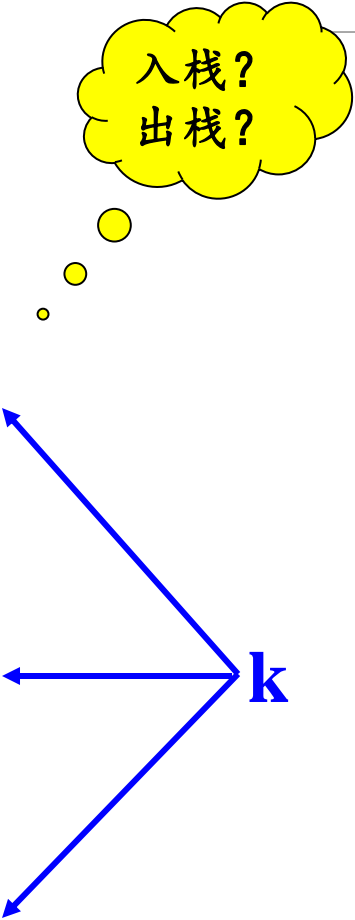
```
  begin  
    if (n>m) then begin  
      i:=partition(m, n);  
      quicksort(m,i-1);  
      quicksort(i+1, n)  
    end  
  end {quicksort};
```

```
begin a[0]:=-999; a[10]=999;  
      readarray; quicksort(1, 9)  
end {sort}.
```

# 程序运行期间控制栈的变化举例



<b>S</b>
<b>a : array</b>
<b>x : integer</b>
<b>q(1,9)</b>
<b>k : integer</b>
<b>v : integer</b>
<b>q(1,3)</b>
<b>k : integer</b>
<b>v : integer</b>
<b>q(2,3)</b>
<b>k : integer</b>
<b>v : integer</b>
<b>e(v<sub>i</sub>, v<sub>j</sub>)</b>



# 调用序列和返回序列

## ■ 调用序列：

目标程序中实现控制从调用过程进入被调用过程的一段代码。

- 功能：实现活动记录的入栈和控制的转移。
- 其中有调用过程和被调用过程各自需要完成的任务。如：
  - 调用者：准备并传递实参，为被调用者创建访问非局部名字的环境等。
  - 被调用者：保存调用点环境、初始化局部变量等。

## ■ 返回序列：

目标程序中实现控制从被调用过程返回到调用过程的一段代码。

- 功能：实现活动记录的出栈和控制的转移。
- 其中有调用过程和被调用过程各自需要完成的任务。

返回值
实参区域
控制链域
访问链域
机器状态域
局部数据区
临时数据区

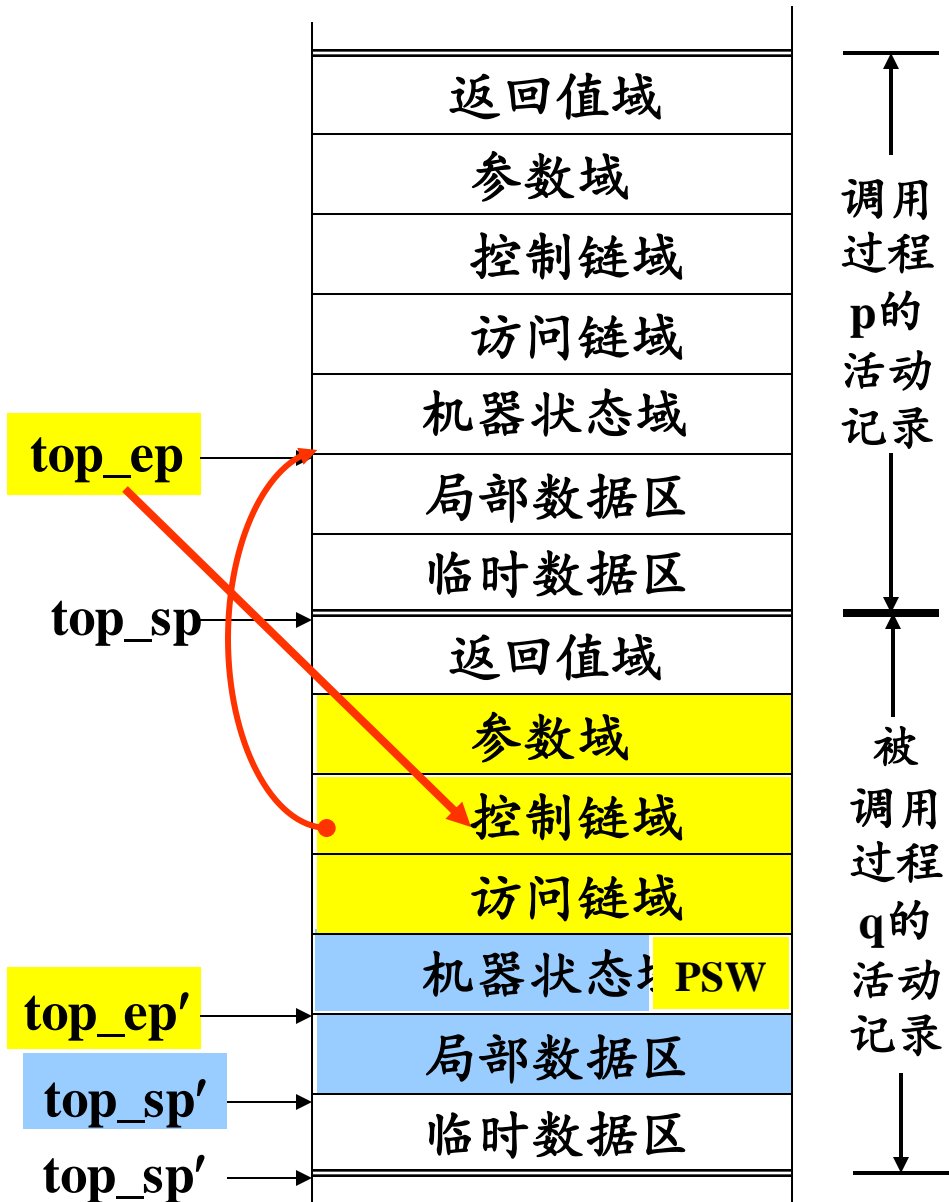
# 调用序列—实现活动记录的入栈

C1: 控制链域 + 访问链域 + 机器状态域

C2: 返回值域 + 参数域

$\text{top\_ep}' = \text{top\_sp} + \text{C2} + \text{C1}$

$\text{top\_sp} = \text{top\_ep}' - \text{C1} - \text{C2}$

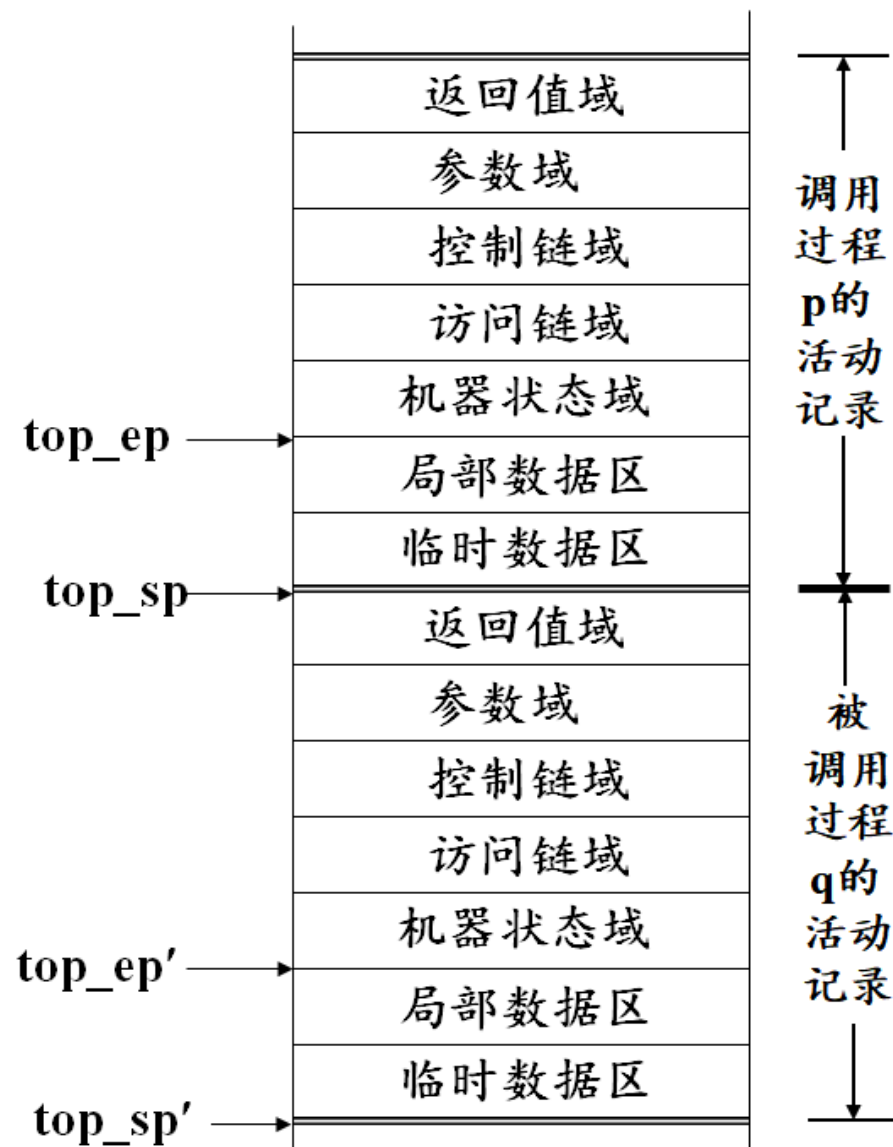


- P准备实参，传入q的活动记录；
  - p将返回地址写入q的活动记录；
  - p将当前top\_ep的值写入q的活动记录；
  - p为q建立访问链；
  - P计算并重置top\_ep的值；
  - 进入q的代码(goto语句)
- q保存寄存器的值、机器状态信息；
  - q增加top\_sp的值，初始化局部变量；
  - q开始执行



# 返回序列—实现活动记录的出栈

- q把返回值写入自己活动记录的返回值域；
- q恢复调用点状态
  - 寄存器的值；
  - top\_ep的值；
  - 计算并重置top\_sp的值；
- 返回到p的代码中
  - 根据保存的返回地址(goto语句)
- P取回返回值
- p继续执行



# 调用序列与活动记录

## ■ 区别：

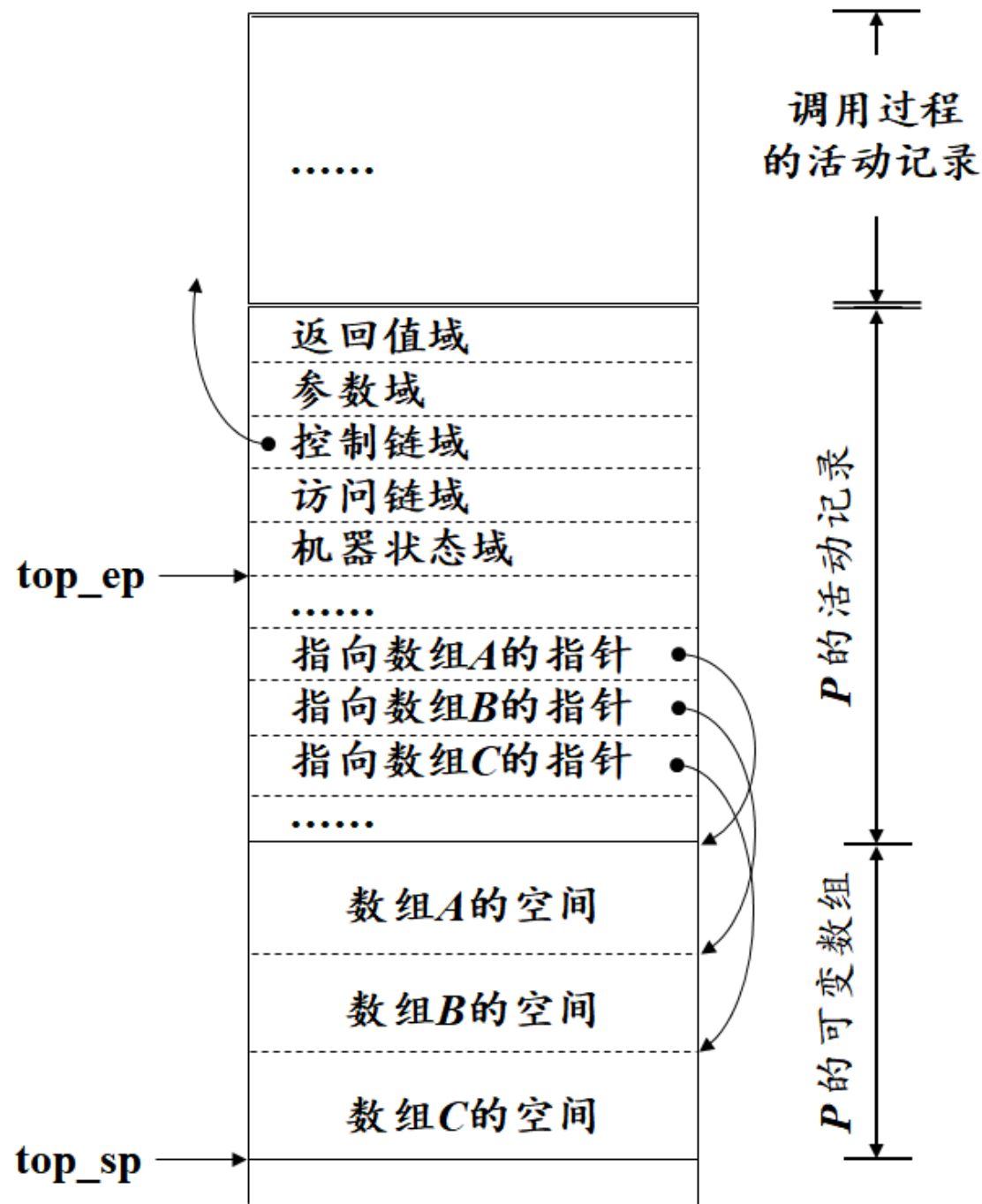
- 活动记录是一块连续的存储区域，保存一个活动所需的全部信息，与活动一一对应。
- 调用序列是一段代码，完成活动记录的入栈，实现控制从调用过程到被调用过程的转移。
- 调用序列逻辑上是一个整体，物理上被分成两部分，分属于调用过程和被调用过程。

## ■ 联系：

- 调用序列的实现与活动记录中内容的安排有密切关系。

# 可变数组的存储分配

- 某些语言允许由实参的值决定被调用过程中局部数组的大小——可变数组。
  - 编译时无法确定可变数组所需存储空间的大小。
- 编译时可以确定可变数组的个数。
- 活动记录中只设置相应于可变数组的指针。
  - 不包括这些数组的数据空间。
  - 可变数组的数据空间放在活动记录之外。



### 3. 堆式存储分配

- 具体存储需求在编译时刻可以确定  
——采取**静态存储分配**策略
- 编译时不能确定存储需求，在程序执行期间，在过程调用点可以知道  
——采用**栈式存储分配**策略
- 栈式存储分配策略不能处理：
  - 活动停止时，局部名字的值必须被保存下来；
  - 被调用过程的生存期超过调用过程的生存期；
  - 某些动态数据结构（如链表、树）的存储需求。  
**共性：**活动记录的释放不需要遵循先进后出的原则

#### ■ 动态链表：

```
type ptr=↑T;  
T=record  
    ch: char;  
    next: ptr  
end;
```

```
procedure insert(var base: ptr; c: char);  
    var q: ptr;  
    begin  
        new(q);  
        q↑.ch:=c;  
        q↑.next:=base;  
        base:=q  
    end;
```

# ★ 课堂练习1--控制栈和活动记录

有如下C语言程序：

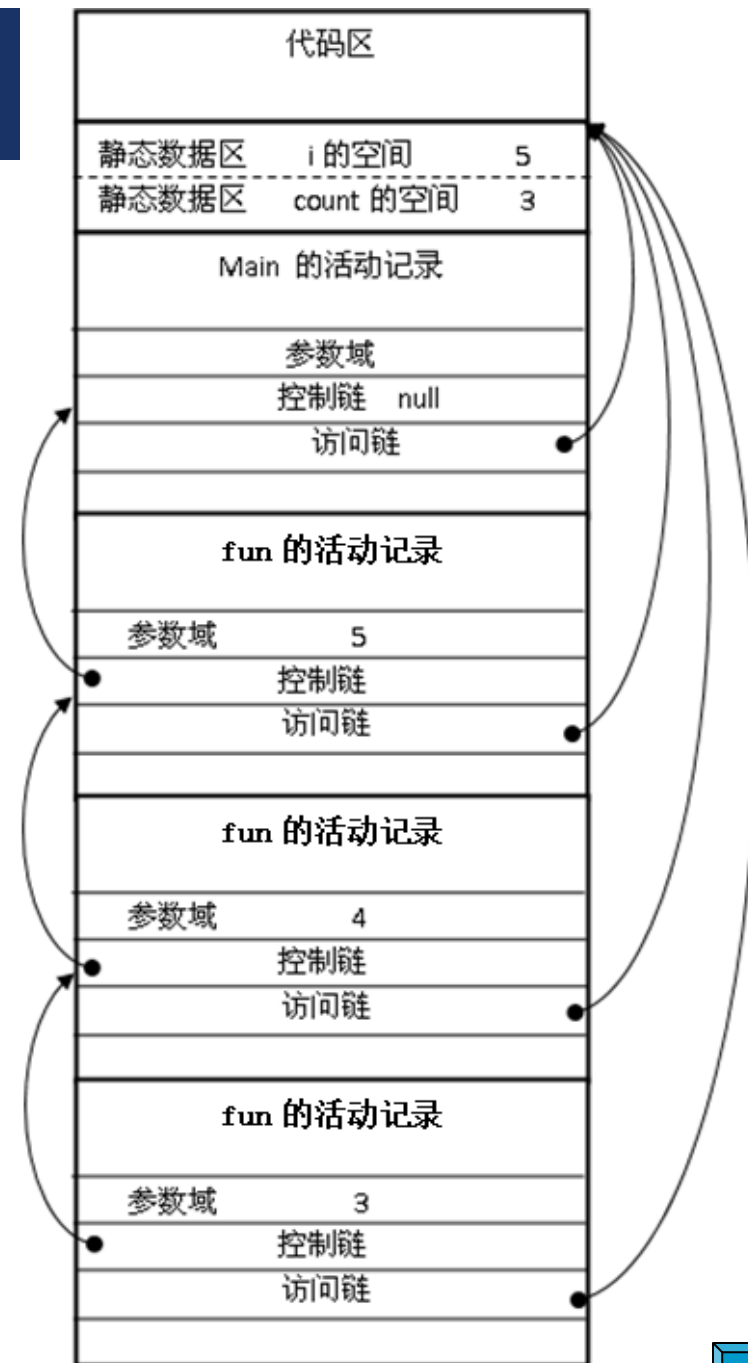
```
include<stdio.h>
include<stdlib.h>
int i;
int count;
int fun (int i) {
    count++;
    if (i==1) return 1;
    else return i*fun(i-1);
};
int main() {
    i=5;
    count=0;
    printf( "%d", fun(i) );
}
```

问题：

画出该程序运行时存储空间的组织示意图，并画出该程序运行过程中，当count=3时，控制栈中活动记录的示意图。

要求：

画出每个活动记录中的控制链域和访问链域，并给出参数域的值



## 7.3 非局部名字的访问

- 如何处理对非局部名字的引用取决于作用域规则
  - 静态作用域规则：词法作用域规则、最近嵌套规则。由程序中名字声明的位置决定。
  - 动态作用域规则：由运行时最近的活动决定应用到一个名字上的声明。
- 对非局部名字的访问通过访问链实现。
- 关键：访问链如何创建、使用、维护
- 本节内容
  1. 程序块
  2. 静态作用域规则下非局部名字的访问
  3. 动态作用域规则下非局部名字的访问

# 1. 程序块

## ■ 复合语句，基本结构：

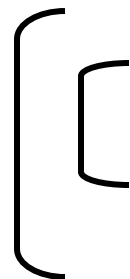
**begin**

声明语句序列（可选）；

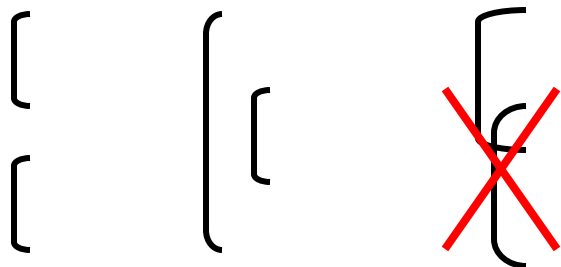
语句序列；

**end**

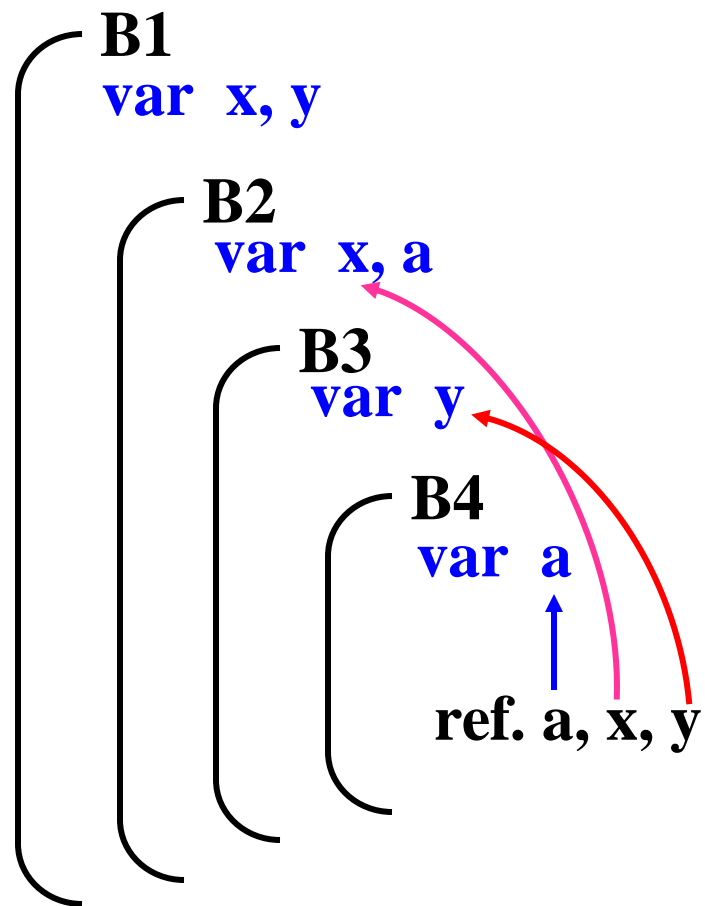
## ■ 块可以嵌套



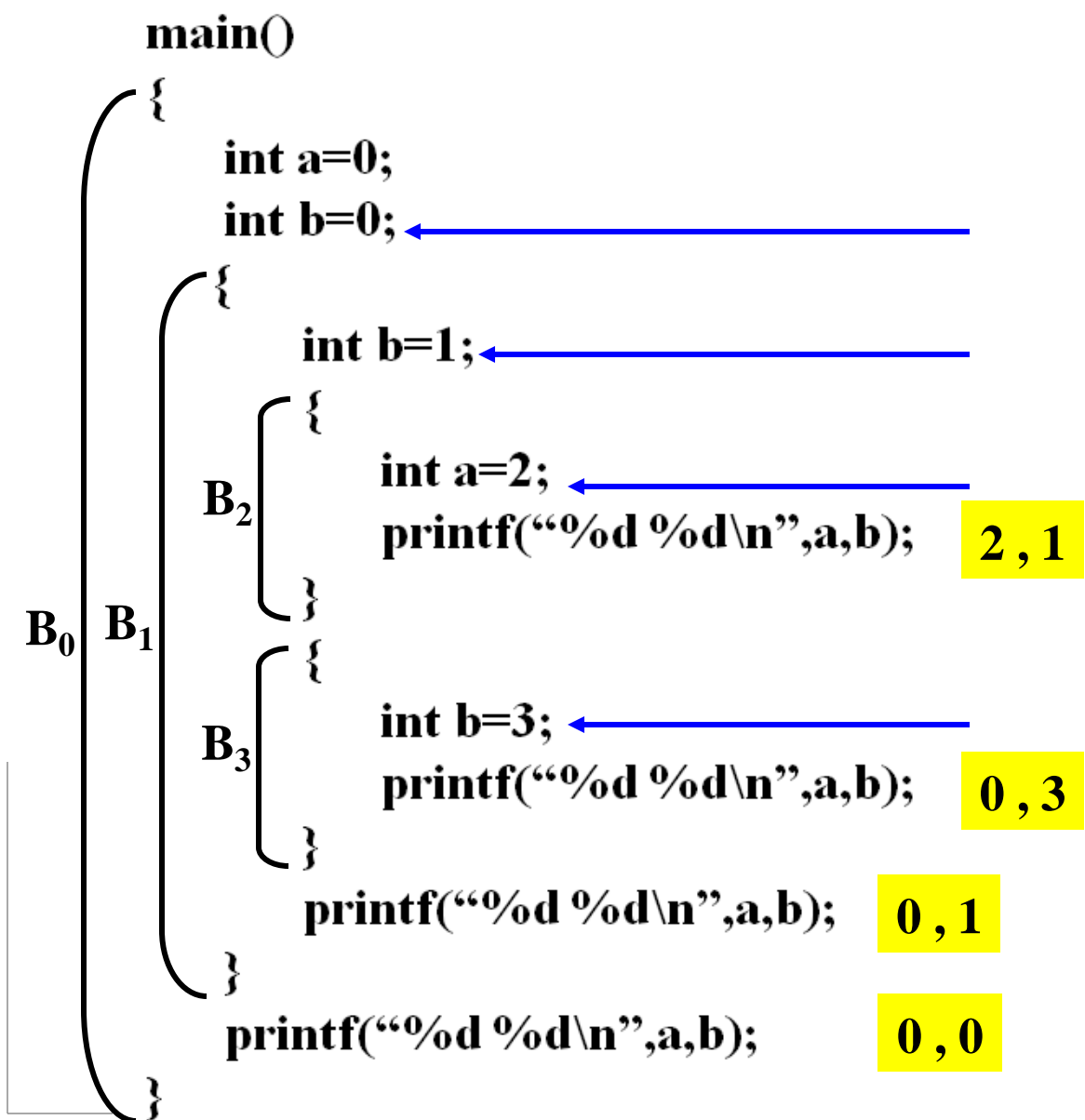
## ■ 块之间的关系



## ■ 最近嵌套规则



# 静态作用域示例



## 名字的作用域

块	声 明	作 用 域
$B_0$	<code>int a=0</code>	$B_0-B_2$
$B_0$	<code>int b=0</code>	$B_0-B_1$
$B_1$	<code>int b=1</code>	$B_1-B_3$
$B_2$	<code>int a=2</code>	$B_2$
$B_3$	<code>int b=3</code>	$B_3$

## 栈式存储分配

<b>a=0</b>
<b>b=0</b>
<b>b=1</b>
<b>b=3</b>



## 2. 静态作用域规则下非局部名字的访问

- 块结构语言分为两类：

- 非嵌套过程语言：

- 过程定义不允许嵌套，即一个过程定义不能出现在另一个过程定义之中。

- 语言代表：C语言

- 嵌套过程语言

- 程定义允许嵌套

- 语言代表：Pascal语言

- 程序运行时刻数据空间的分配有差别

- 对非局部名字访问的实现方式不同

# (1) 非嵌套过程

- 过程定义不允许嵌套
  - 独立的
  - 顺序的
- 声明语句的位置
  - 过程/函数内部
  - 所有过程之外
- 在一个过程中引用的名字
  - 局部的
  - 全局的

```
int a[11];  
int x;
```

```
void readarray ( )  
{ int i; ... a ... }
```

```
void exchange ( int i, int j )  
{ ... a ...; ... x ... }
```

```
int partition ( int y, int z ) {  
    int i, j;  
    ... a ...;  
    exchange(i, j);  
    ...  
}
```

```
void quicksort ( int m, int n ) {  
    int i;  
    ...  
    i=partition(m, n);  
    quicksort(m, i-1);  
    quicksort(i+1, n);  
}
```

```
void main ( )  
{ readarray(); quicksort(0,10); }
```

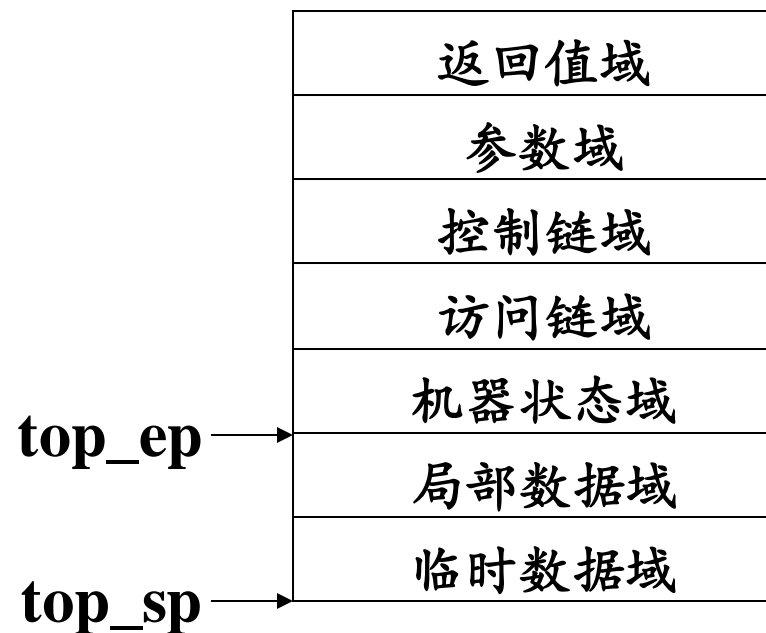
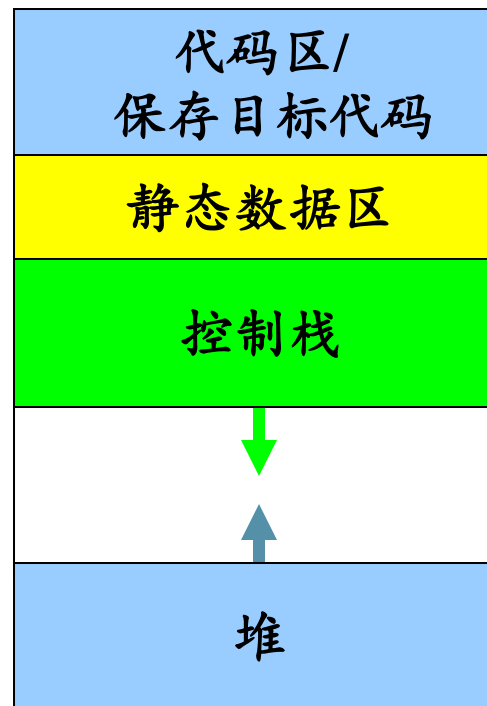
# 变量的存储分配

## ■ 全局变量

- 静态地进行分配
- 分配在静态数据区中
- 编译时知道它们的位置，可以将全局变量对应的存储单元的地址编入目标代码中

## ■ 局部变量

- 动态地进行分配
- 分配在活动记录中
- 栈式存储分配
- 通过对栈指针的偏移访问当前活动记录中的局部名字



# ★静态变量

- 有两个容易混淆的定义：
  - 语言无关的通用定义：与程序有着相同生命周期（Object lifetime）的变量；
  - C族语言特有的定义：以 static 存储类声明的变量。
- 静态局部变量，采用静态存储方式。
  - 在函数内定义，作用域与函数内定义的自动变量一样，但生存期为整个源程序。
    - 离开定义它的函数后不能使用，但如再次调用定义它的函数时，它又可继续使用，并且保存了前次被调用后留下的值。
    - 当多次调用一个函数且要求在调用之间保留某些变量的值时，可考虑采用静态局部变量。
  - 允许对构造类静态局部量赋初值。若未赋初值，则由系统自动赋值。  
数值型变量自动赋初值0，字符型变量赋空字符。
  - 对基本类型的静态局部变量，若在说明时未赋初值，则系统自动赋予0值。  
而对自动变量不赋初值，其值是不定的。
- 静态全局变量，与普通全局变量相比，作用域不同。

# ★ 静态变量示例

如何实现?

```
#include<stdio.h>
int fun(int n)
{
    int f=1;
    f=f*n;
    return f;
}
void main()
{
    int i;
    for(i=1;i<=5;i++)
        printf("fun(%d)=%d\n", i, fun(i));
}
```

fun(1)=1  
fun(2)=2  
fun(3)=3  
fun(4)=4  
fun(5)=5

执行结果?

```
#include<stdio.h>
int fun(int n)
{
    static int f=1;
    f=f*n;
    return f;
}
void main()
{
    int i;
    for(i=1;i<=5;i++)
        printf("fun(%d)=%d\n", i, fun(i));
}
```

fun(1)=1  
fun(2)=2  
fun(3)=6  
fun(4)=24  
fun(5)=120

执行结果?

静态变量

# ★ 过程作为参数传递、作为结果返回

- 对非局部名字采用静态存储分配

- 前提（源语言）

  - 静态作用域规则

  - 过程定义不允许嵌套

- 效果

  - 一个过程的非局部名，对其他过程也是非局部的

  - 非局部名字的存储空间由编译程序静态地进行分配

  - 它的静态地址在所有的过程中都可以引用

  - 过程对非局部名字的引用与过程是如何激活的无关

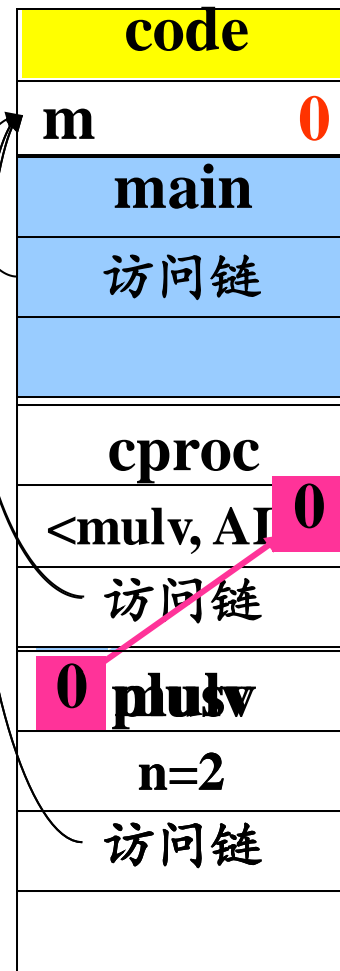
- 结果

  - 无论过程作为参数传递、还是作为结果返回，其中对非局部名字的引用，都是对静态分配给它的存储单元进行访问。

# ★ 示例

执行结果?

```
int m;  
int plusv( int n)  
{ return m+n; }  
int mulv( int n)  
{ return m*n; }  
void cproc( int pform( int n) )  
{ printf("%d\n", pform(2)); }  
void main( ) {  
    m=0;  
    cproc(plusv);  
    cproc(mulv);  
}
```



## 2. 嵌套过程

```
program sort(input, output);  
  var a: array[0..10] of integer;  
      x: integer;
```

```
  procedure readarray;  
    var i: integer;  
    begin  
      for i:=1 to 9 do read(a[i])  
    end;
```

```
  prcedure exchange(i, j: integer);  
    begin  
      x:=a[i]; a[i]:=a[j]; a[j]:=x  
    end;
```

- 过程定义允许嵌套
- 最近嵌套规则

```
procedure quicksort(m, n: integer);  
  var k, v: integer;
```

```
  function partition(y, z: integer): integer;  
    var i, j: integer;  
    begin  
      ... a ...; //引用名字a  
      ... v ...; //引用名字v  
      exchange(i, j);  
    end;
```

```
  begin  
    if (n>m) then begin  
      i:=partition(m, n);  
      quicksort(m,i-1);  
      quicksort(i+1, n)  
    end  
  end {quicksort};
```

```
begin a[0]:=-999; a[10]=999;  
      readarray; quicksort(1, 9)  
end {sort}.
```



# 过程及名字的嵌套关系

主程序sort

嵌套深度: 1

声明变量: a, x

调用过程: readarray

调用过程: quicksort

过程 readarray

嵌套深度: 2

声明变量: i

引用变量: a

过程 exchange

嵌套深度: 2

形式参数: i, j

引用变量: a

引用变量: x

过程 quicksort

嵌套深度: 2

形式参数: m, n

声明变量: k, v

调用过程: partition

调用过程: quicksort

函数 partition

嵌套深度: 3

形式参数: y, z

声明变量: i, j

引用变量: a

引用变量: v

调用过程: exchange

## ■ 嵌套深度

- 主程序: 1

- 每进入一个过程, 深度加1

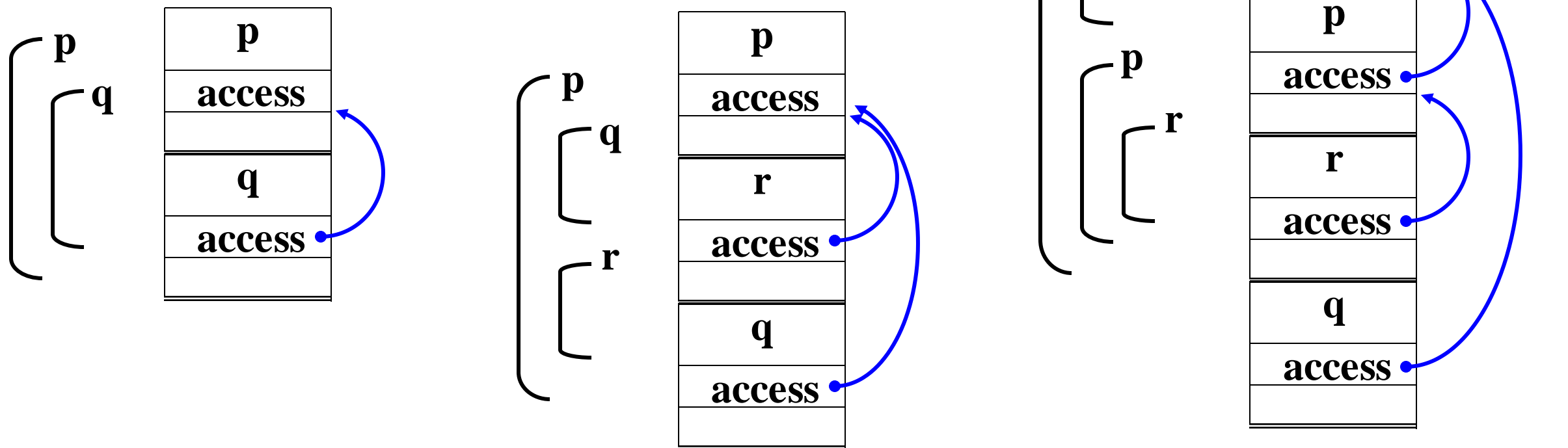
## ■ 名字的嵌套深度

- 声明时所在过程的嵌套深度

## ■ 最近嵌套规则同样适用于过程名。

# 访问链

- 实现嵌套过程的静态作用域规则
- 通过访问链可以实现对非局部名字的访问



- 被调用过程活动记录的访问链  
指向 其直接外层过程的最新活动的活动记录！

# 访问链的使用

- 过程 $p$ 引用非局部名字 $a$ ，嵌套深度分别为 $n_p$ ,  $n_a$  ( $n_a \leq n_p$ )

- 当控制处于 $p$ 中时， $p$ 的活动记录在栈顶

- 访问链的使用

- 从栈顶活动记录出发，沿访问链前进  $n_p - n_a$  步

该值在编译时可以计算出来

- 到达 $a$ 的声明所在过程的最新活动记录

- 在该活动记录中，相对于数据区起点偏移某个固定值，即 $a$ 的存储位置

该值在编译时可以确定

- 符号表中，变量名字的目标地址：

- $\langle \text{嵌套深度}, \text{偏移量} \rangle$

- $p$ 中非局部名字 $a$ 的地址：

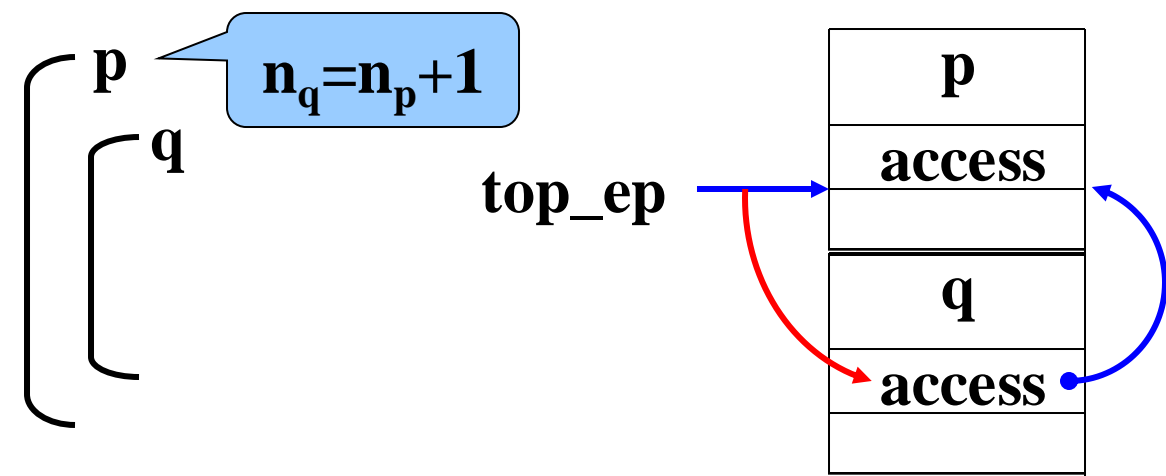
- $\langle n_p - n_a, a \text{在活动记录中相对于数据区起点的偏移量} \rangle$

# 访问链的建立

## q嵌套在p中—— $n_q = n_p + 1$

- 调用序列中，由调用过程 p 为被调用过程 q 创建访问链。
- 过程 p 和 q 的嵌套深度分别为  $n_p$  和  $n_q$
- q 的活动记录中访问链的建立方式依赖于 q 与 p 的关系
  - q 直接嵌套在 p 中
    - $n_q = n_p + 1$
  - q 不嵌套在 p 中
    - $n_q = n_p$
    - $n_q < n_p$

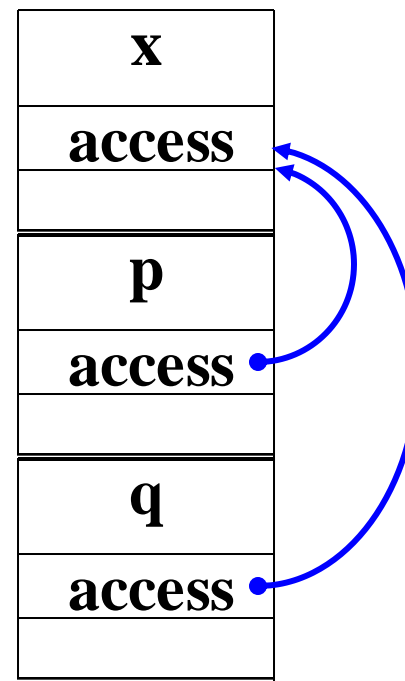
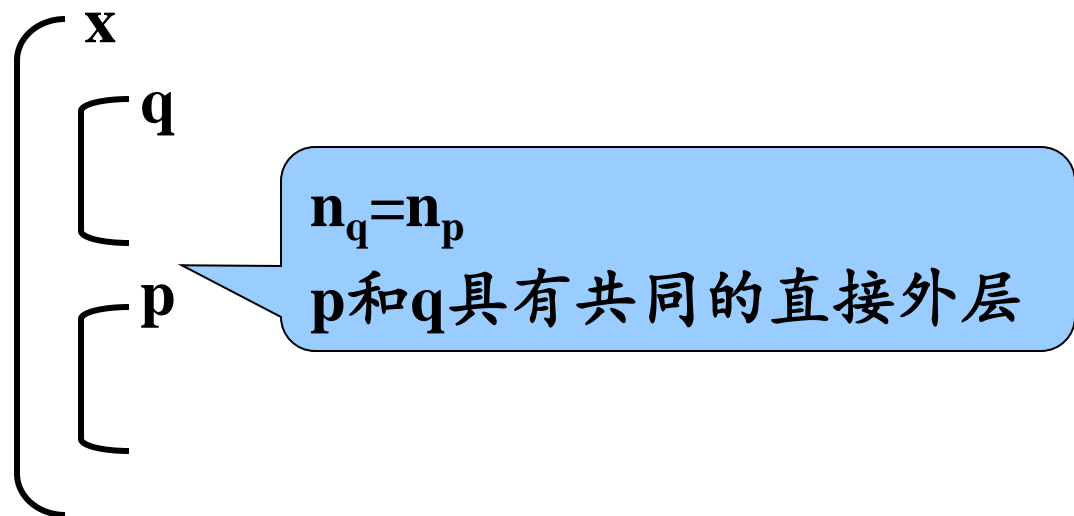
- 静态文本中 q 与 p 的关系：



- q 的访问链指向栈中刚好在其前面的 p 的活动记录。
- 调用序列中，p 把 top-ep 的值写入 q 的访问链域即可。

# q不嵌套在p中—— $n_q = n_p$

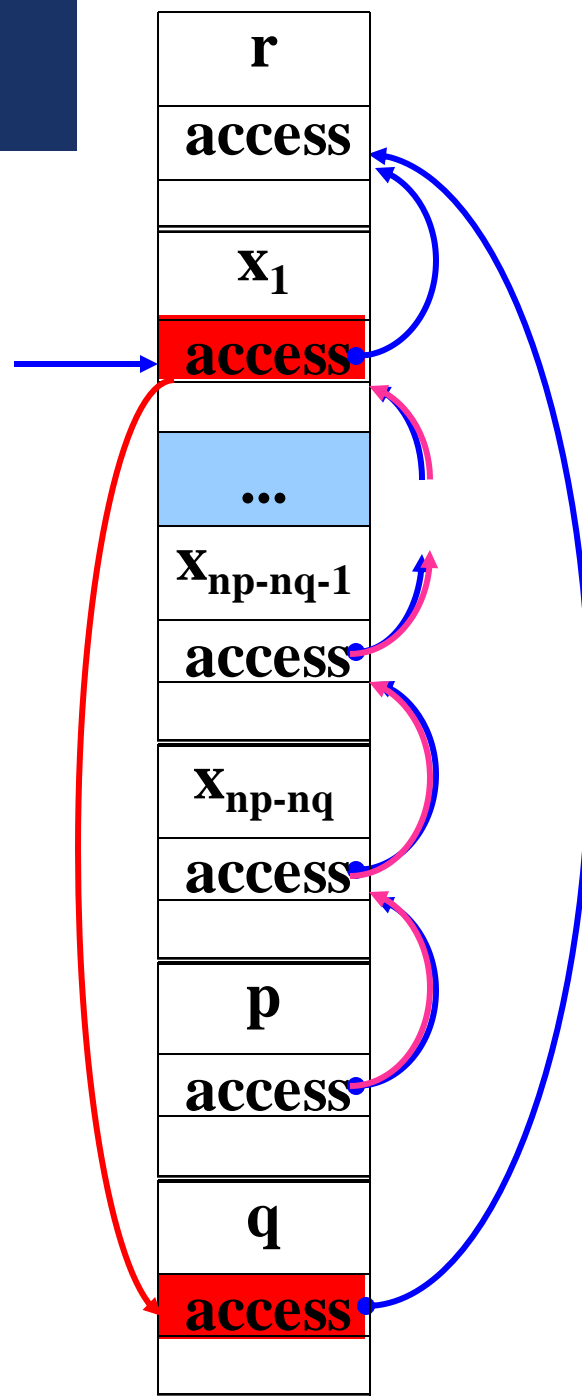
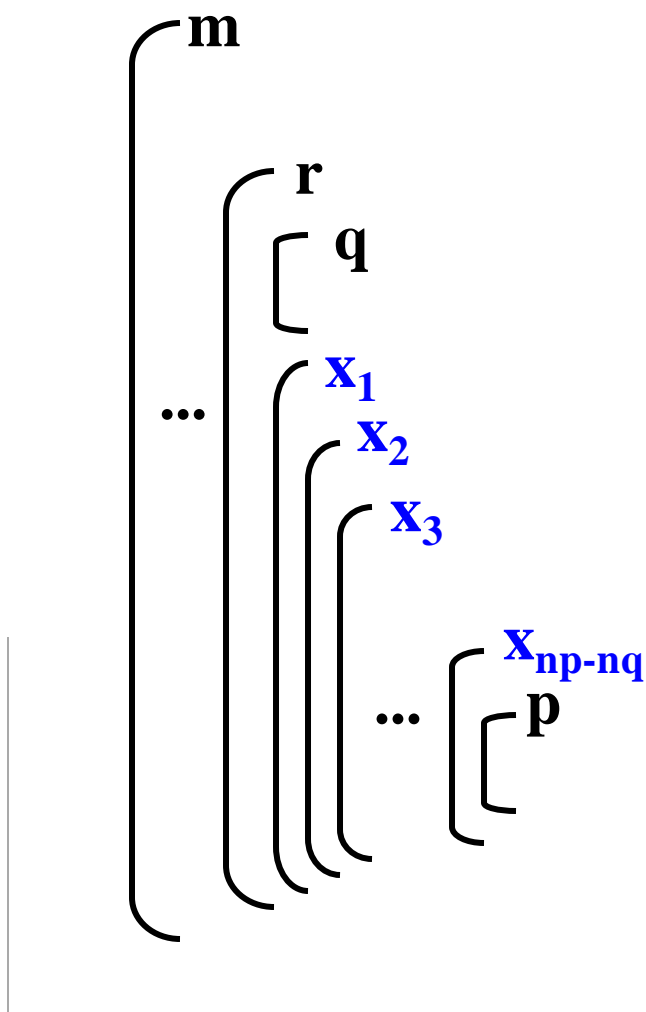
- 静态文本中 q 与 p 的关系：



- q 的访问链与 p 的访问链一样，指向栈中刚好在 p 前面的 x 的活动记录。
- 调用序列中，p 把自己的访问链域的值复制到 q 的访问链域即可。

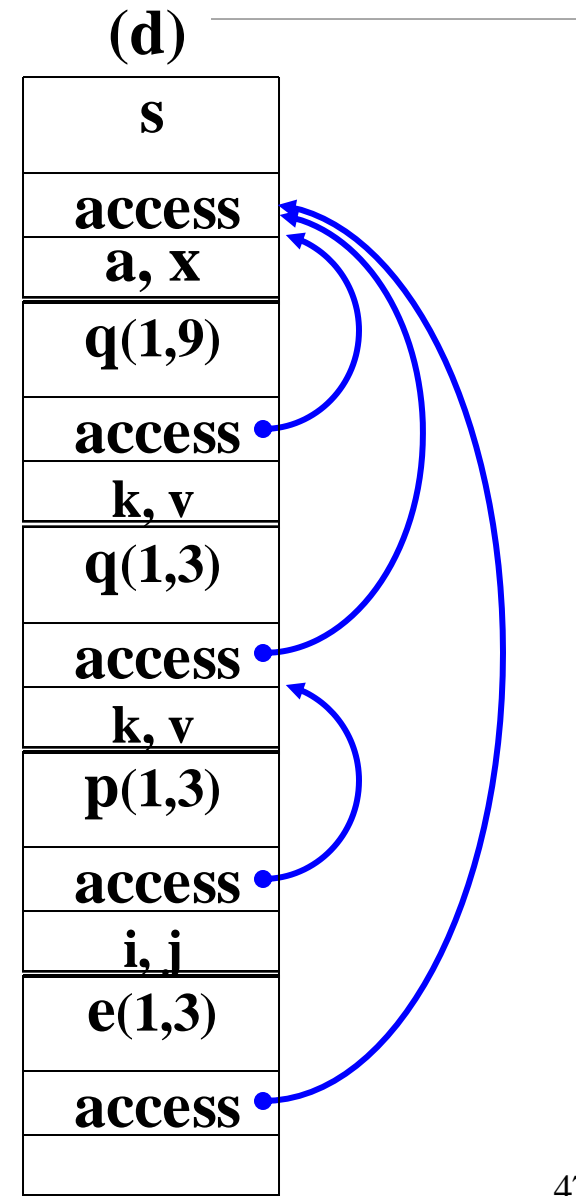
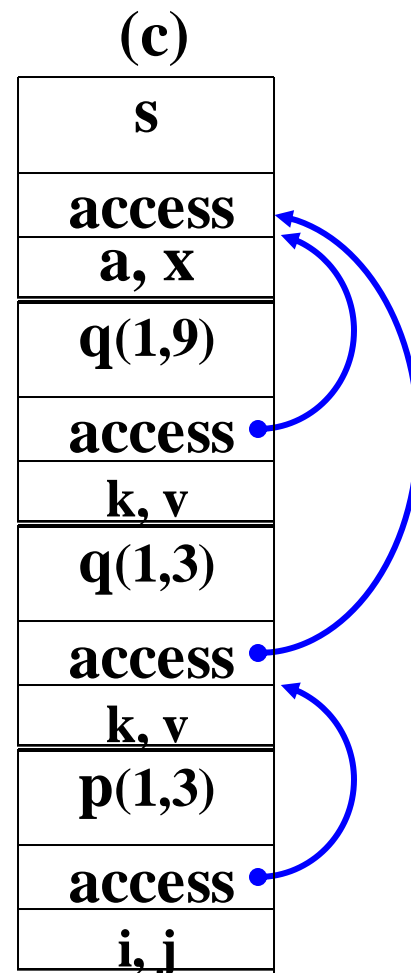
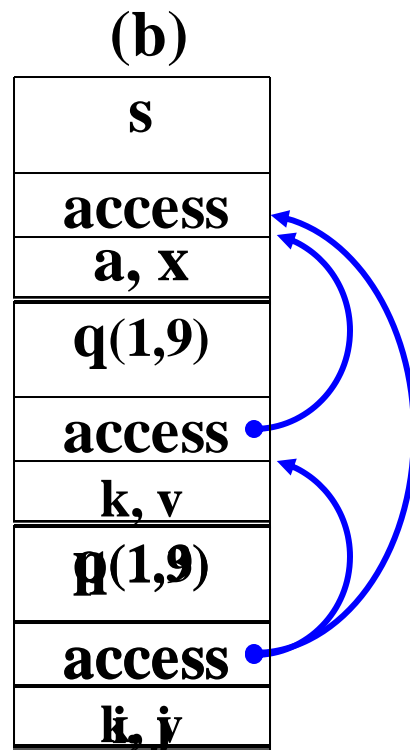
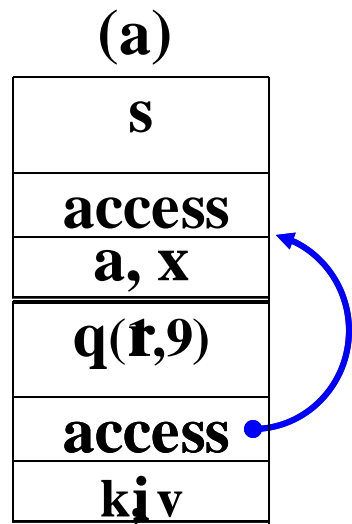
# q不嵌套在p中—— $n_q < n_p$

## ■ 静态文本中q与p的关系：



- 从  $p$  的活动记录出发，沿访问链前进  $n_p - n_q$  步；
- 找到  $x_1$  的活动记录；
- 把  $x_1$  的访问链域的值复制到  $q$  的访问链域。

# 访问链举例



# display表：提高访问非局部名字的速度

## ■ display表（简称d表）

- 指针数组
- $d[i]$ 指向嵌套深度为 $i$ 的过程的最新活动的活动记录
- 全程数组
  - 元素个数，根据过程的最大嵌套深度确定
  - 静态存储分配

## ■ 控制栈中，嵌套深度相同活动记录，从靠近栈顶的最新活动记录开始，通过访问链链成一个链表

- d表存各链表的头指针。

## ■ d表的维护

- 调用序列和返回序列的功能之一。
- 通过追踪访问链可以完成对d表的更新。

## ■ 假设：过程 $p$ （深度为 $n_p$ ）调用过程 $q$ （深度为 $n_q$ ）

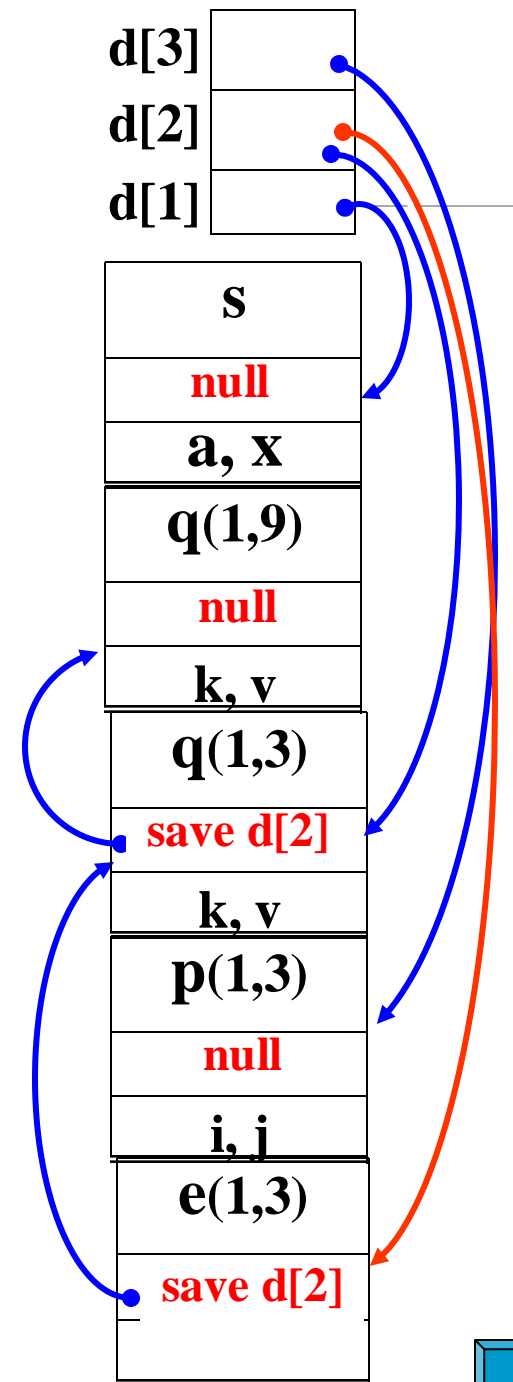
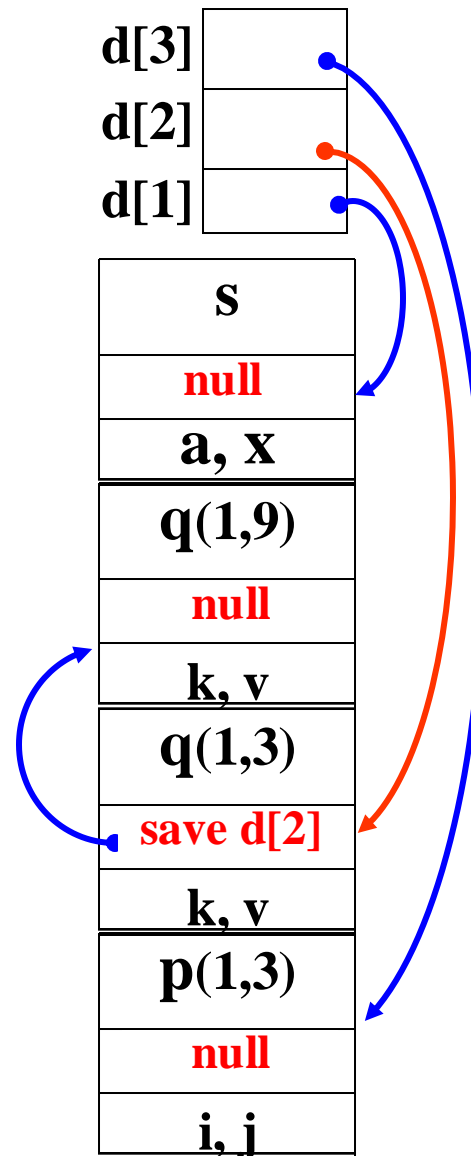
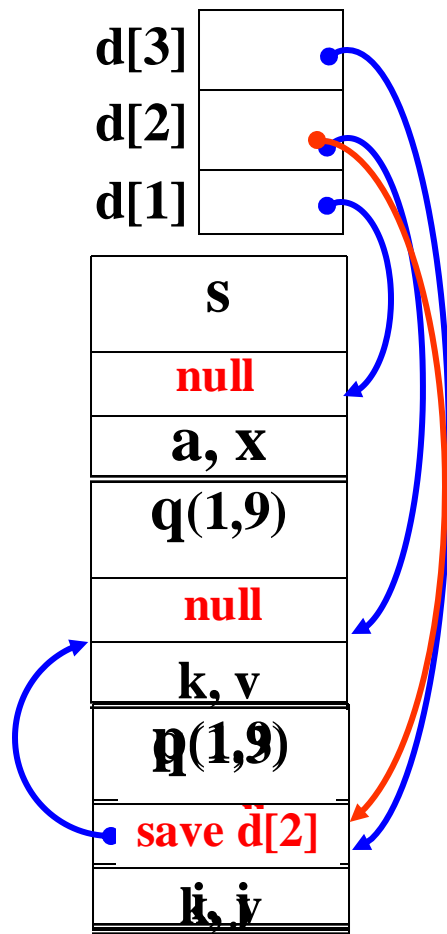
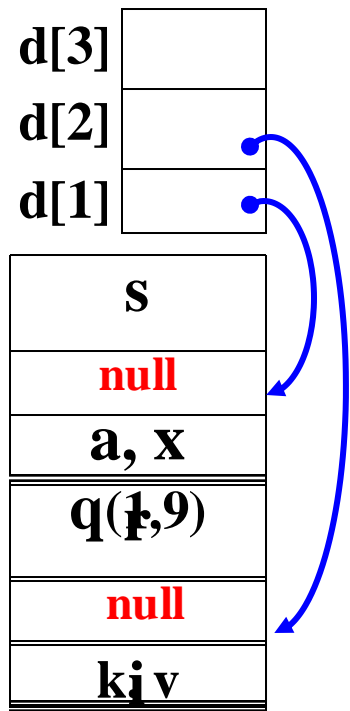
## ■ 过程调用时，调用序列中

- 将 $q$ 的最新活动记录压入栈顶，并将其插入到 $d[n_q]$ 所指链表中，使其成为该链表的首结点。

## ■ 活动结束后，返回序列中

- 删除 $d[n_q]$ 链表的首结点。





display表应用举例



## 7.4 参数传递机制

### ■ 过程之间传递数据的方式：

- 非局部名字
- 参数
- 如：

```
procedure exchange(i, j: integer);  
    var x: integer;  
    begin  
        x:=a[i]; a[i]:=a[j]; a[j]:=x  
    end;
```

### ■ 表达式代表的含义，如：a[i]:=a[j]; a:=b;

- a[i]、a 代表存储单元的地址，即左值。
- a[j]、b 代表存储单元的内容，即右值。

### ■ 实参代表的是右值、左值、还是实参的名字本身？

### ■ 参数传递机制：

传值调用、引用调用、复制恢复、传名调用。

# 1. 传值调用 (call-by-value)

- 最一般、最简单的参数传递方法。
- 先计算出实参的值，然后将其右值传递给被调用过程。
- 参数值在被调用过程执行时如同常数。
- 用相应的实参的值替代过程体中出现的所有形参。
- 如： `int max(int x, int y) { return x>y? x : y ; }`
  - `max(5, 3+4):`
  - 将`x`替换为5，`y`替换为7，得到：`5>7? 5:7`。
- 函数式语言中唯一的参数传递机制。  
C++、Pascal语言的内置机制。C语言、Java语言唯一的参数传递机制。
- 在这些语言中，参数被看作是过程的局部变量，初值由调用过程提供的实参给出。
- 在过程中，形参和局部变量一样可以被赋值，但其结果不影响过程体之外的变量的值。

# 传值调用的实现

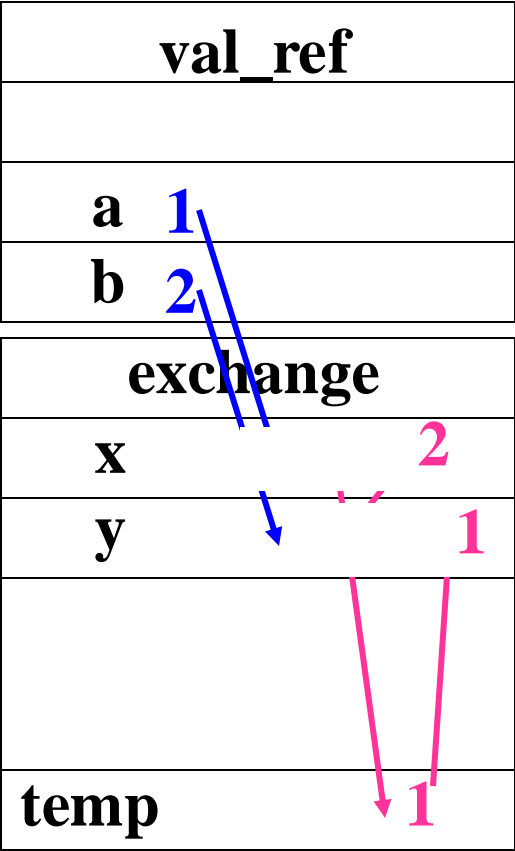
- 把形参当作过程的局部名字看待。
- 形参的存储单元分配在被调用过程的活动记录中（即参数域）。
- 调用过程先对实参求值，发生过程调用时，由调用序列把实参的右值写入被调用过程活动记录的参数域中。（调用序列的功能之一）
- 被调用过程执行时，对形参的操作在其活动记录的参数域上进行。

# 传值调用示例

参数的使用会不会影响  
过程体外变量的值?

```
program val_ref(input,output);
  var a, b: integer;
  procedure exchange(x, y: integer);
    var temp: integer;
  begin
    temp:=x;
    x:=y;
    y:=temp
  end;
begin
  a:=1; b:=2;
  exchange(a, b);
  writeln('a=', a);
  writeln('b=', b)
end.
```

语句	全局变量		形参		局部变量
	a	b	x	y	temp
a:=1; b:=1;	1	2			
exchange(a, b)			1	2	
temp:=x					1
x:=y			2		
y:=temp				1	
返回后	1	2			
writeln('a=', a); writeln('b=', b)	1	2			



# 参数是指针类型的情况

- 传值调用并不意味着参数的使用一定不会影响过程体外变量的值。

- 如果参数的类型为指针，参数的值就是一个地址

- 通过它可以改变过程体外部的内存值。如，有C语言函数

- ```
void init_ptr(int *p) { *p=3; }
```

- 对参数p的直接赋值不会改变过程体外的实参的值。如：

- ```
void init_ptr(int *p) { p=(int *) malloc(sizeof(int)); }
```

- 在一些语言中，某些值是隐式指针

- 如C语言中的数组是隐式指针（指向数组空间的起始位置）

- 可以使用数组参数来改变存储在数组中的值。如：

- ```
void init_array_0(int p[]) { p[0]=0; }
```

## 2. 引用调用（call-by-reference）

- FORTRAN语言唯一的参数传递机制。

- Pascal语言，通过在形参前加关键字var来指定采用引用调用机制。

```
procedure inc_1(var x: integer);
```

```
begin x:=x+1 end;
```

- C++中，通过在形参的类型关键字后加符号‘&’指明采用引用调用机制，如：

```
void inc_1(int &x) { x++ ; }
```

- 原则上要求：实参必须是已经分配了存储空间的变量。
- 调用过程把实参存储单元的地址传递给被调用过程的相应形参（即一个指向实参存储单元的指针）。
- 被调用过程执行时，通过形参间接地引用实参。
- 可以把形参看成是实参的别名，对形参的任何引用都是对相应实参的引用。

# 引用调用

- C语言只有传值调用机制，但可以通过传递引用或显式指针来实现引用调用的效果。
- C语言使用 ‘&’ 指示变量的地址，使用操作 ‘\*’ 撤销引用指针。

■ 如：

```
int a;
```

```
void inc_1(int *x)
```

```
// C
```

```
    模拟引用调用
```

```
    { (*x)++; }
```

```
.....
```

```
inc_1(&a);
```

# 引用调用的实现

- 调用过程对实参求值。
- 若实参是具有左值的名字或表达式，则传递这个左值本身。
- 若实参是没有左值的表达式（如 a+b 或 2 等），则为它申请一临时数据空间，计算出表达式的值并存入该单元，然后传递这个存储单元的地址。
- 把实参的左值写入被调用过程活动记录中相应形参的存储单元中。
- 被调用过程执行时，通过形参间接地引用实参。

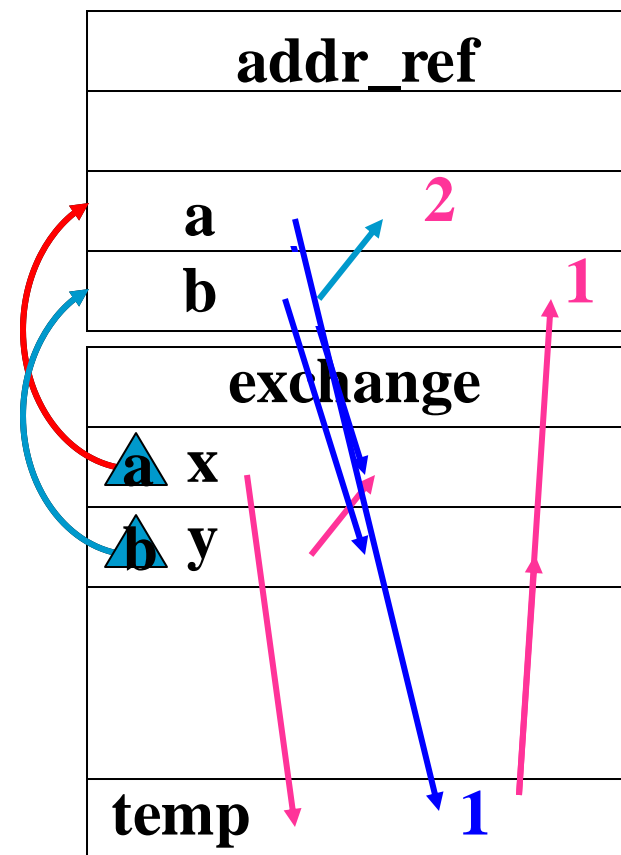


# 引用调用示例

```

program addr_ref(input, output);
  var a, b: integer;
  procedure exchange(var x, y: integer);
    var temp: integer;
  begin
    temp:=x;
    x:=y;
    y:=temp
  end;
begin
  a:=1; b:=1;
  exchange(a, b)
  temp:=x
  x:=y
  y:=temp
  返回后
  writeln('a=', a);
  writeln('b=', b)
end.
  
```

| 语句                                    | 全局变量 |   | 形参 |   | 局部变量 |
|---------------------------------------|------|---|----|---|------|
|                                       | a    | b | x  | y | temp |
| a:=1; b:=1;                           | 1    | 2 |    |   |      |
| exchange(a, b)                        |      |   | a  | b |      |
| temp:=x                               |      |   |    |   | 1    |
| x:=y                                  | 2    |   |    |   |      |
| y:=temp                               |      | 1 |    |   |      |
| 返回后                                   | 2    | 1 |    |   |      |
| writeln('a=', a);<br>writeln('b=', b) | 2    | 1 |    |   |      |



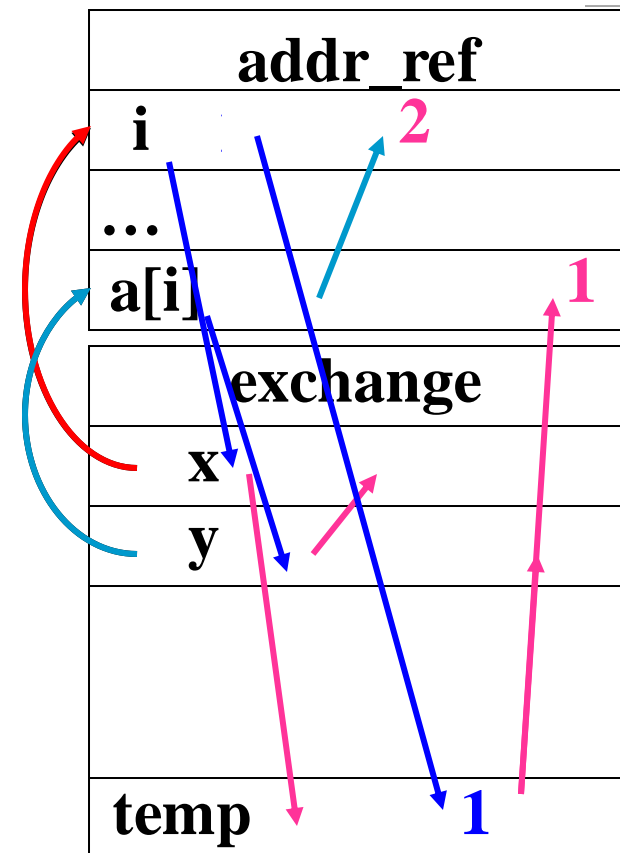
# 引用调用练习

执行结果??

■ `exchange(i, a[i])`

```
procedure exchange(var x, y: integer);  
  var temp: integer;  
begin  
  temp:=x;  
  x:=y;  
  y:=temp  
end;
```

实参: `i=1, a[1]=2`



执行结果

`i=2`

`a[1]=1`

### 3. 复制恢复 (copy-restore)

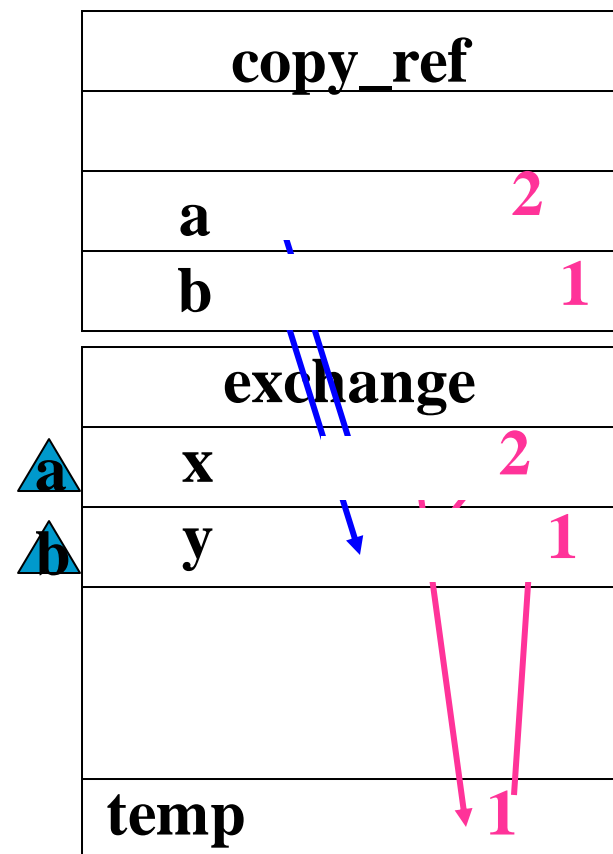
- 传值调用和引用调用的一种混合形式
- copy-in/copy-out
- 复制恢复机制的实现
  - 过程调用时，调用过程对实参求值，将实参的右值传递给被调用过程，写入其活动记录的参数域中(copy in)，并记录与形参相应的实参的左值。
  - 被调用过程执行时，对形参的操作在自己的活动记录的参数域空间上进行。
  - 控制返回时，被调用过程根据所记录的实参的左值把形参的当前值复制到相应实参的存储空间中(copy out)。当然，只有具有左值的那些实参的值被复制出来。

# 复制恢复调用示例

```

program copy_ref(input, output);
  var a, b: integer;
  procedure exchange(var x, y: integer);
    var temp: integer;
  begin
    temp:=x;
    x:=y;
    y:=temp
  end;
begin
  a:=1; b:=2;
  exchange(a,b);
  writeln('a=',a);
  writeln('b=',b)
end.
  
```

| 语句                                    | 全局变量 |   | 形参    |       | 局部变量 |
|---------------------------------------|------|---|-------|-------|------|
|                                       | a    | b | x     | y     | temp |
| a:=1; b:=1;                           | 1    | 2 |       |       |      |
| exchange(a, b)                        |      |   | 1 / a | 2 / b |      |
| temp:=x                               |      |   |       |       | 1    |
| x:=y                                  |      |   | 2     |       |      |
| y:=temp                               |      |   |       | 1     |      |
| 返回后                                   | 2    | 1 |       |       |      |
| writeln('a=', a);<br>writeln('b=', b) | 2    | 1 |       |       |      |



# 复制恢复调用练习

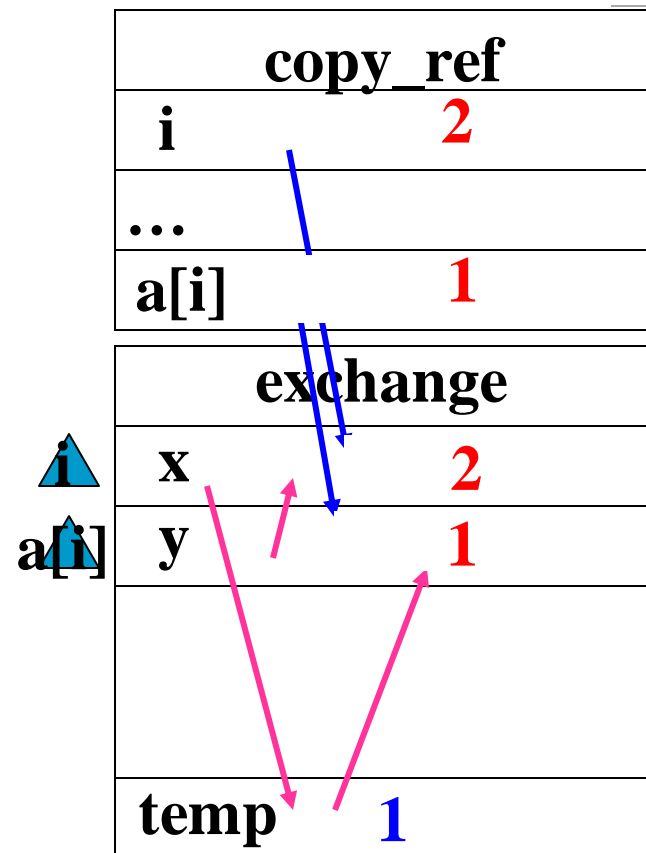
执行结果??

## ■ exchange(i, a[i])

```
procedure exchange(var x, y: integer);  
  var temp: integer;  
begin  
  temp:=x;  
  x:=y;  
  y:=temp  
end;
```

实参: i=1, a[1]=2

复制恢复和引用调用,  
执行结果总是一样吗?



执行结果

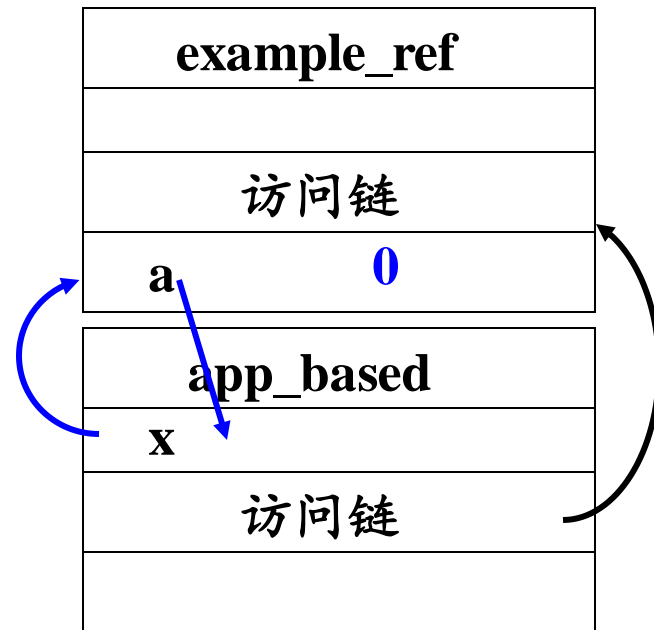
i=2

a[1]=1

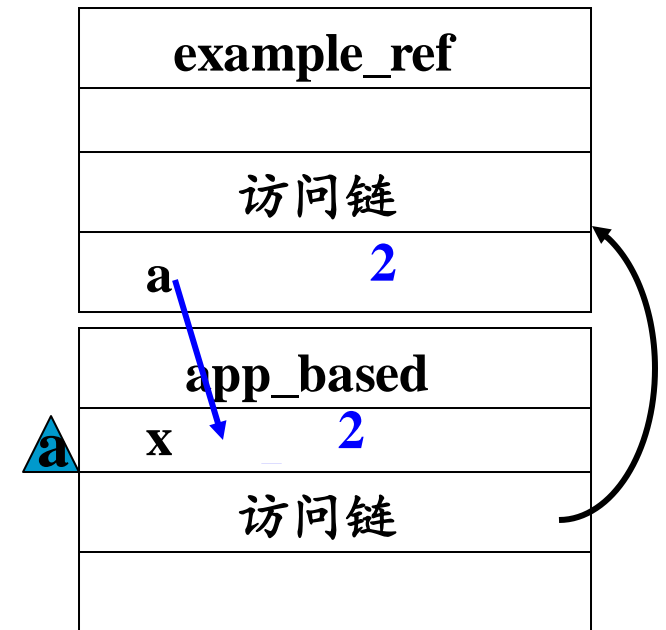
# 引用调用与复制恢复的区别示例1

```
program example_ref(input,output);  
  var a: integer;  
  procedure app_based(var x: integer);  
    begin  
      x:=2;  
      a:=0  
    end;  
  begin  
    a:=1;  
    app_based(a);  
    writeln('a=', a)  
  end.
```

## ■ 引用调用



## ■ 复制恢复



# 引用调用与复制恢复的区别示例2

```
program cmp_example(input,  
    output);  
var a: integer;  
procedure inc_1(x, y: integer);  
    begin x:=x+1; y:=y+1 end;  
begin  
    a:=1;  
    inc_1(a, a);  
    printf(“a=%d\n”, a);  
end.
```

- 引用调用： a=3
- 复制恢复： a=2

# 复制恢复机制

- 如被调用过程以多种方式访问实参存储单元的话，引用调用和复制恢复的执行结果不一样。
- 复制恢复机制没有规定的问题
  - 按什么顺序把形参的当前值复制回实参？
  - 实参的地址是不是仅在过程的入口处计算？
  - 实参的地址需不需要存储？
  - 实参的地址在过程的出口处需不需要重新计算？



## 4. 传名调用 (call-by-name)

- Algol 60语言定义的一种特殊的参数传递方式。
- 传名调用机制
  - 把过程当作“宏”处理
  - 在调用出现的地方，用被调用过程的过程体替换调用语句，并用实参的名字替换相应的形参。
  - 这种文字替换称为宏扩展。
- 被调用过程中的局部名字不能与调用过程中的名字重名。
  - 在做宏扩展之前，对被调用过程中的每一个名字都系统地重新命名，即给以一个不同的新名字。
  - 为保持实参的完整性，可以用括号把实参的名字括起来。

```
procedure exchange(var x, y: integer);  
  var temp: integer;  
  begin  
    temp:=x;  
    x:=y;  
    y:=temp  
  end;
```

exchange(a, b);  
将被展开为：

```
temp:=a;  
a:=b;  
b:=temp;
```

exchange(i, a[i]);  
将被展开为：

```
temp:=i;  
i:=a[i];  
a[i]:=temp;
```



# ★练习:

```
int i;
int B[2];
void P(int m)
{
    i=0; m=m+10; B[i]=10;
    i=1; m=m+10; B[i]=10;
}
main()
{
    B[0]=10; B[1]=20;
    i=0; P(B[i]);
    printf("B[0]=d%, B[1]=d%", B[0], B[1]);
}
```

■ 传值调用

■ 引用调用

■ 复制恢复

■ 传名

## ★ 课堂练习2--参数传递机制

有如下C语言程序：

```
int i;
int b[4];
void Q(int x; int y) {
    i=1;
    x=x+2;  b[i]=15;
    y=y+3;  b[i]=20;
}
main() {
    for (i=0;i<4;i++) b[i]=i;
    i=1;
    Q(b[i], b[i+1]);
    for (i=0; i<4; i++)
        printf("b[%d]=%d ", i, b[i]);
}
```

假定采用下面的参数传递机制，该程序的执行结果分别是什么？

(1) 传值调用

(2) 引用调用

(3) 复制恢复

要求：描述程序执行过程的主要步骤。

# 本章小结

## ■ 基本概念

- 过程、活动
- 活动的生存期、活动树、活动记录
- 运行时内存的划分
- 声明的作用域、名字的结合

## ■ 存储分配策略

- 静态存储分配
- 栈式存储分配
  - 控制链
  - 访问链
  - 调用序列
  - 返回序列
- 堆式存储分配

## ■ 非局部名字的访问

- 静态作用域规则
- 非嵌套过程的作用域规则、存储分配策略
- 嵌套过程的作用域规则
  - 嵌套深度
  - 访问链的指向、使用、建立

## ■ 参数传递

- 传值调用、引用调用
- 复制恢复
  - 引用调用与复制恢复的不同
- 传名调用

# 学习任务

## ■ 作业要求

- 参数传递机制的应用
- 程序运行期间的空间组织及控制栈的状态其变化过程

## ■ 研究性学习

- 比较Pascal语言程序和C语言程序在运行时的空间组织、访问链。

