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-III

《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

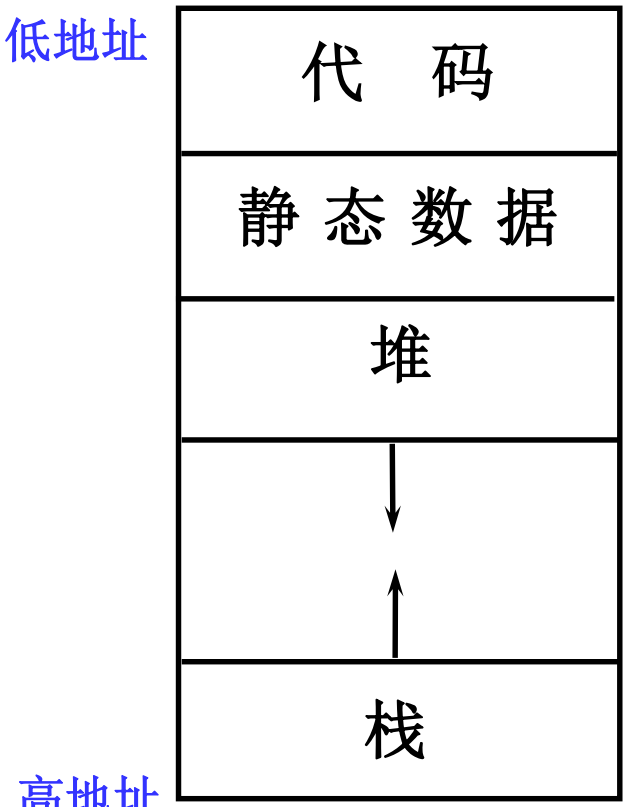
计算机科学与技术学院

3. 非局部名字的访问

- 静态数据区、堆
- 静态作用域：无过程嵌套的（C）、有过程嵌套的（Pascal）
- 动态作用域（Lisp、JavaScript）

非局部数据的存储

- 静态数据区
  - 全局变量、静态局部变量
- 堆
  - C：malloc、free
    glibc 的ptmalloc, Doug Lea’s dlmalloc
    高效的并发内存分配器 jemalloc,
    TBBmalloc,TCMalloc (gperftools)
  - Java: new、Garbage Collection
    Richard Jones's the Garbage Collection Page
  - JavaScript等动态类型绑定的语言
    变量的空间采用隐式的堆分配



静态作用域

- 无过程嵌套定义时，如C语言
  - 非静态的局部变量的访问：位于栈顶的活动记录，通过基址指针 *base_sp* 来访问
  - 过程体中的非局部引用、静态局部变量：直接用静态确定的地址（位于静态数据区中的数据）
  - 过程可以作为参数来传递，也可以作为结果来返回
  - 无须访问链
- 有过程嵌套定义时

  如Ada、JavaScript、Pascal、Python、Fortran 2003+
  - 需要构建访问链，并通过访问链访问在外围过程中声明的非局部名字

有过程嵌套定义的静态作用域

- 非局部名字的访问：访问链
- 过程作为参数产生的问题和解决
- 过程作为返回值产生的问题

过程嵌套定义的程序举例

图6.14

sort

readarray

exchange

quicksort

partition

过程嵌套定义程序举例

图6.14

- 过程(定义)的嵌套深度

sort	1
readarray	2
exchange	2
quicksort	2
partition	3

- 变量的嵌套深度：以它的声明所在的过程的嵌套深度作为该名字的嵌套深度

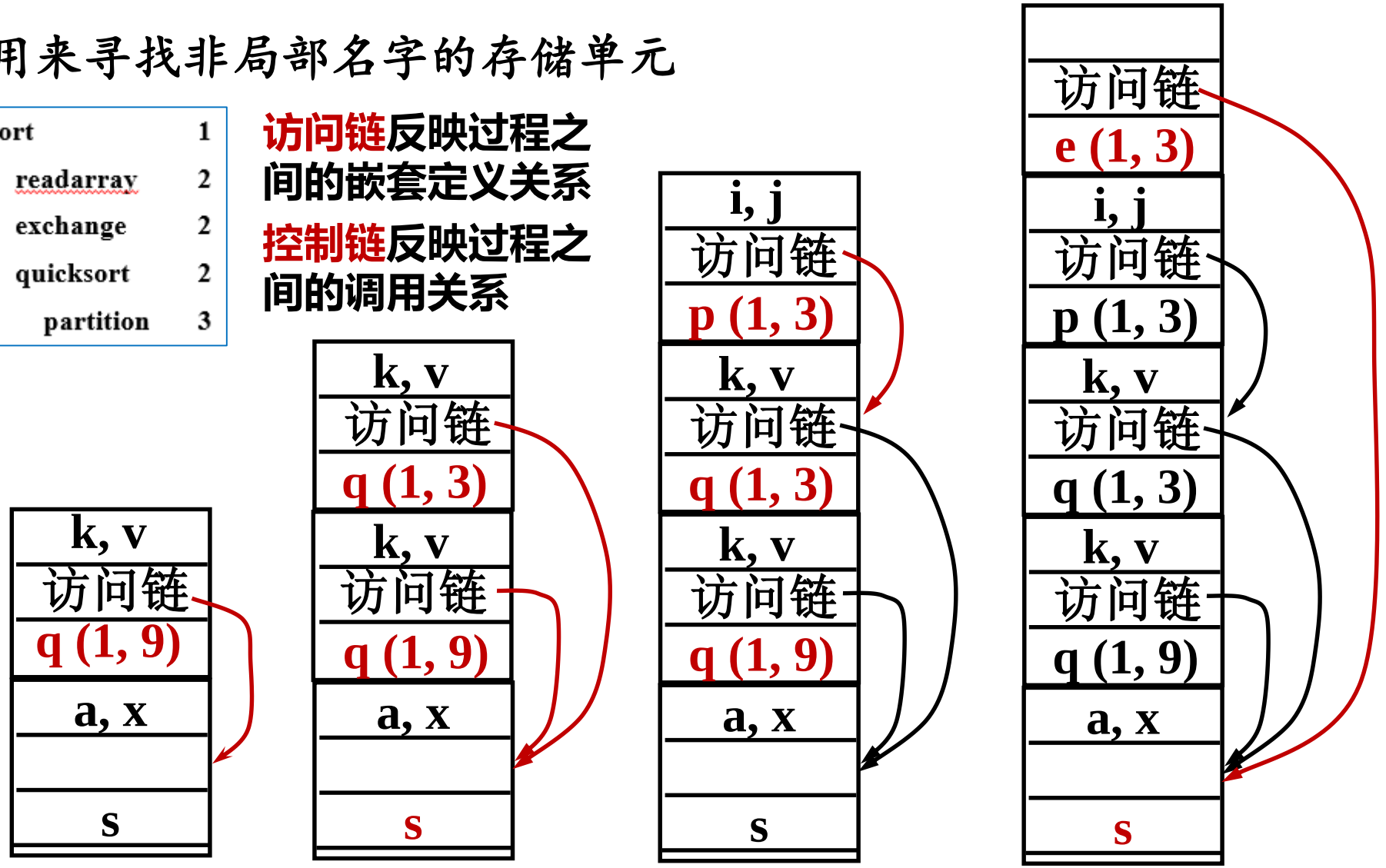
访问链

- 用来寻找非局部名字的存储单元

sort	1
readarray	2
exchange	2
quicksort	2
partition	3

访问链反映过程之间的嵌套定义关系

控制链反映过程之间的调用关系



针对访问链的两个关键问题

- 通过访问链访问非局部引用

  假定过程p的嵌套深度为n_p，它引用嵌套深度为n_a的变量a，$n_a \le n_p$，如何访问a的存储单元

- 访问链的建立

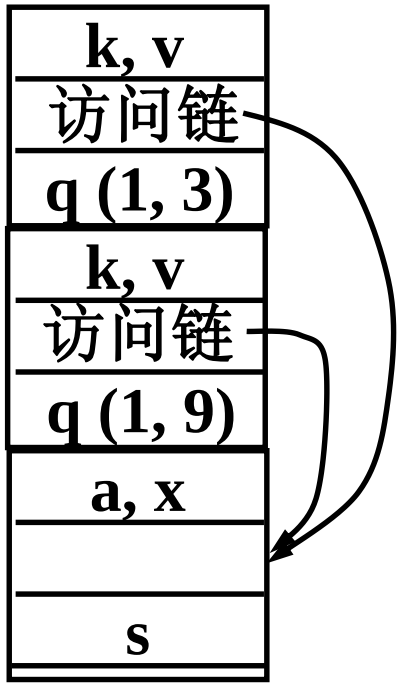
  假定嵌套深度为n_p的过程p调用嵌套深度为n_x的过程x，分别考虑 (1) $n_p < n_x$，(2) $n_p \ge n_x$ 的情况

通过访问链访问非局部引用

假定过程 p 的嵌套深度为 n_p，它引用嵌套深度为 n_a 的变量 a，$n_a \le n_p$，如何访问 a 的存储单元

- 从栈顶的活动记录开始，追踪访问链 $n_p - n_a$ 次
- 到达 a 的声明所在过程的活动记录
- 访问链的追踪用间接操作就可完成

```
sort              1
    readarray     2
    exchange      2
    quicksort     2
        partition 3
```



非局部名字引用的表示

过程p对变量a访问时，a的地址由下面的二元组表示：

（$n_p - n_a$，a在活动记录中的偏移）

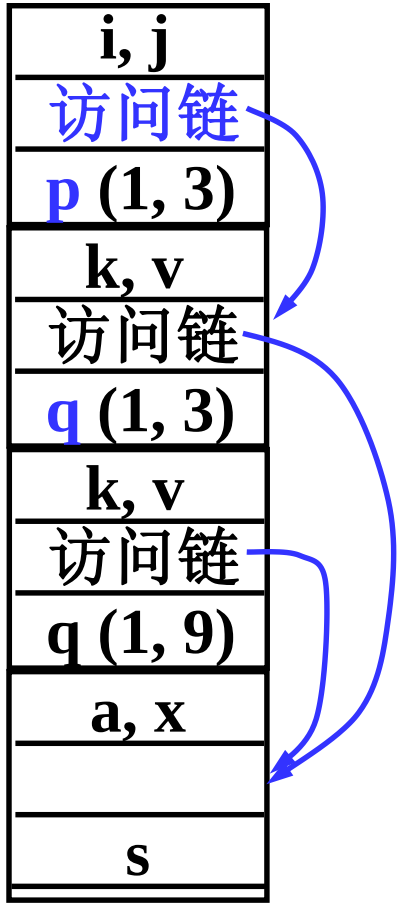
访问链的建立

假定嵌套深度为n_p的过程 p调用嵌套深度为n_x的过程 x

1. $n_p < n_x$的情况　　这时 x 肯定就声明在p中

- 被调用过程的访问链须指向调用过程的活动记录的访问链
- sort调用quicksort、quicksort调用partition

```
sort                1
    readarray       2
    exchange        2
    quicksort       2
        partition   3
```

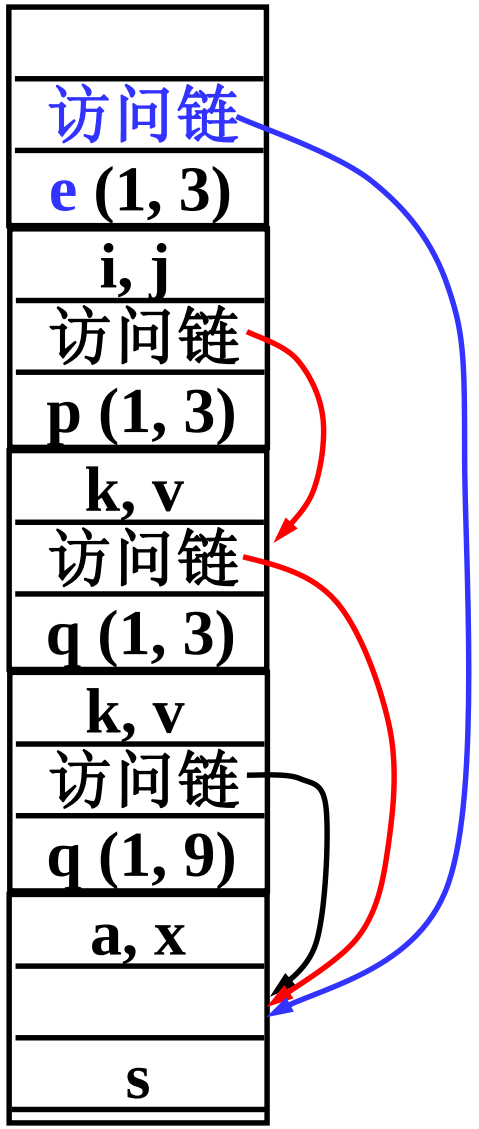


访问链的建立

2. $n_p \geq n_x$的情况　　*p*和 *x* 有公共的外围过程

- 追踪访问链 $n_p - n_x + 1$次,到达静态包围x和p且离它们最近的那个过程的最新活动记录
- 所到达的活动记录就是*x*的活动记录中的访问链应该指向的那个活动记录
- partition调用exchange

```
sort                1
    readarray       2
    exchange        2
    quicksort       2
        partition   3
```



有过程嵌套定义的静态作用域

- 非局部名字的访问：访问链
- 过程作为参数产生的问题和解决
- 过程作为返回值产生的问题

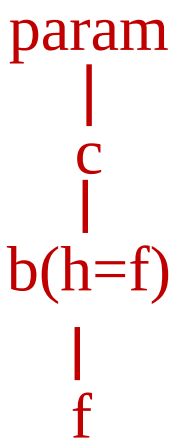
过程作为参数

```
program param(input, output);（过程作为参数）
    procedure b(function h(n: integer): integer);
        begin writeln(h(2)) end {b};
    procedure c;
        var m: integer;
        function f(n: integer): integer;
            begin f := m+n end {f};
        begin m := 0; b(f) end {c};
begin
    c
end.
```

静态的嵌套定义关系

param	1
b	2
c[m]	2
f	3

动态的调用关系



要先理解每个过程和函数的类型

b: (integer→integer) →void
c: void →void
f: integer →integer

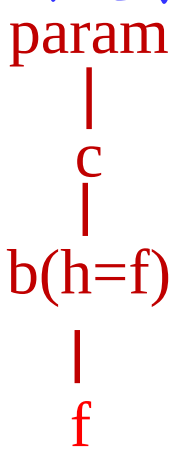
过程作为参数

```
program param(input, output);（过程作为参数）
    procedure b(function h(n: integer): integer);
        begin writeln(h(2)) end {b};
    procedure c;
        var m: integer;
        function f(n: integer): integer;
            begin f := m+n end {f};
        begin m := 0; b(f) end {c};
begin
    c
end.
```

静态的嵌套定义关系

param	1
b	2
c[m]	2
f	3

调用关系



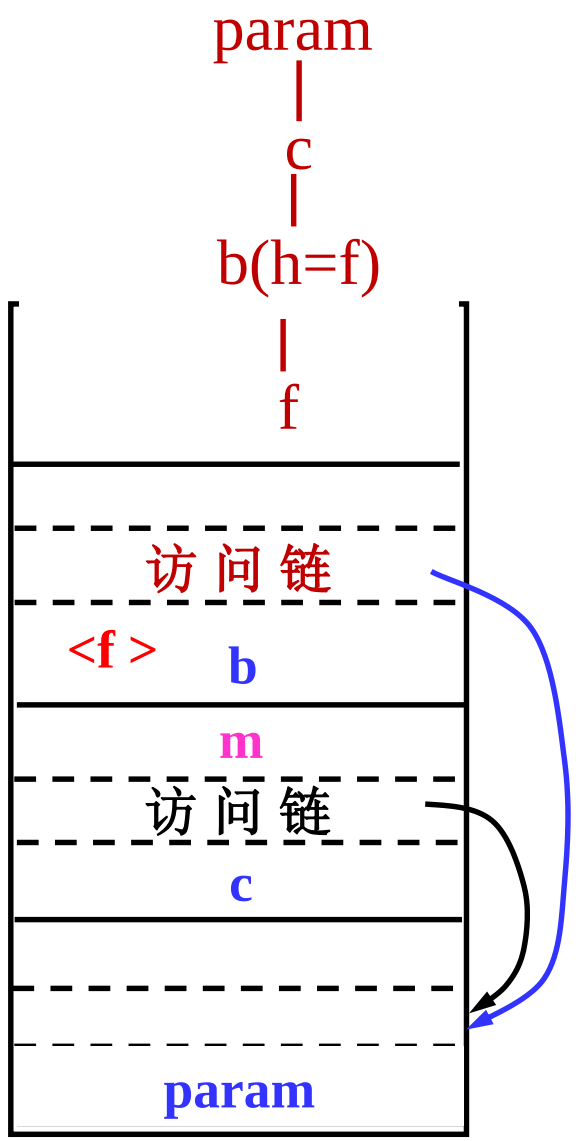
作为参数传递时，怎样在 f 被激活时建立它的访问链，以便访问非局部名字m？

过程作为参数

```
program param(input, output);（过程作为参数）
    procedure b(function h(n: integer): integer);
        begin writeln(h(2)) end {b};
    procedure c;
        var m: integer;
        param
            b
            c[m]
                f
        f(n: integer): integer;
        := m+n end {f};
        := 0; b(f) end {c};
begin
    c
end.
```

b：(integer→integer)→void

从b的访问链难以建立f的访问链

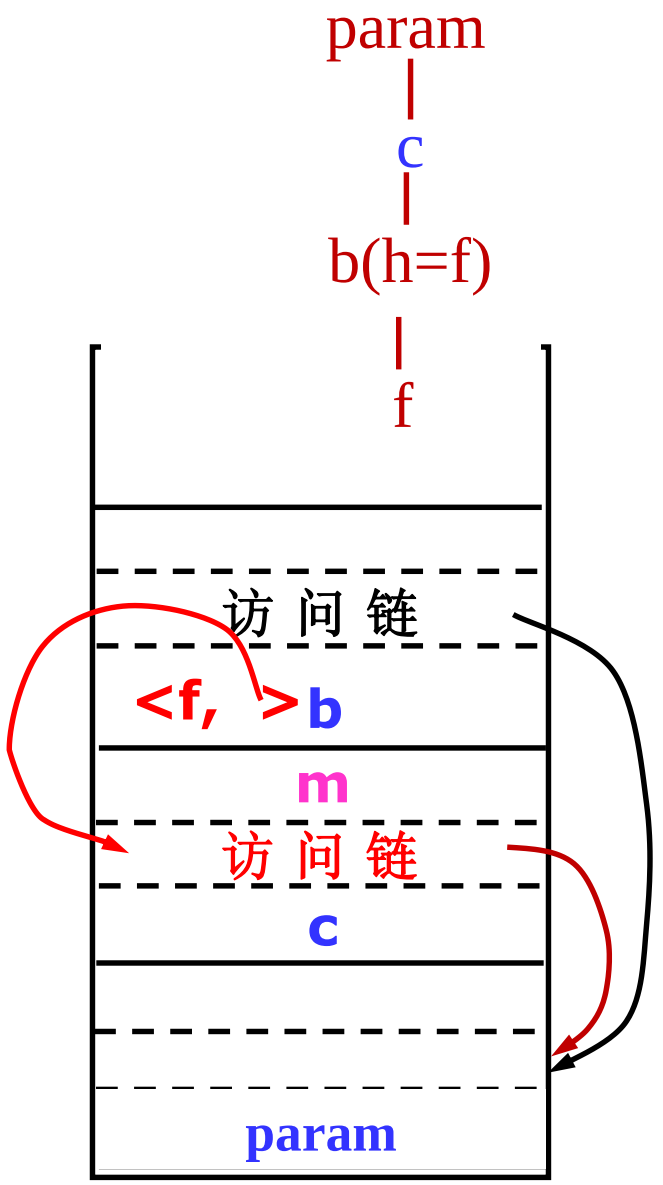


过程作为参数

```
program param(input, output);（过程作为参数）
    procedure b(function h(n: integer): integer);
        begin writeln(h(2)) end {b};
    procedure c;
        var m: integer;
        function f(n: integer): integer;
            begin m := m+n end {f};
        begin m := 0; b(f) end {c};
begin
    c
end.
```

param
b
c[m]
f

f作为参数传递时，它的起始地址连同它的访问链一起传递

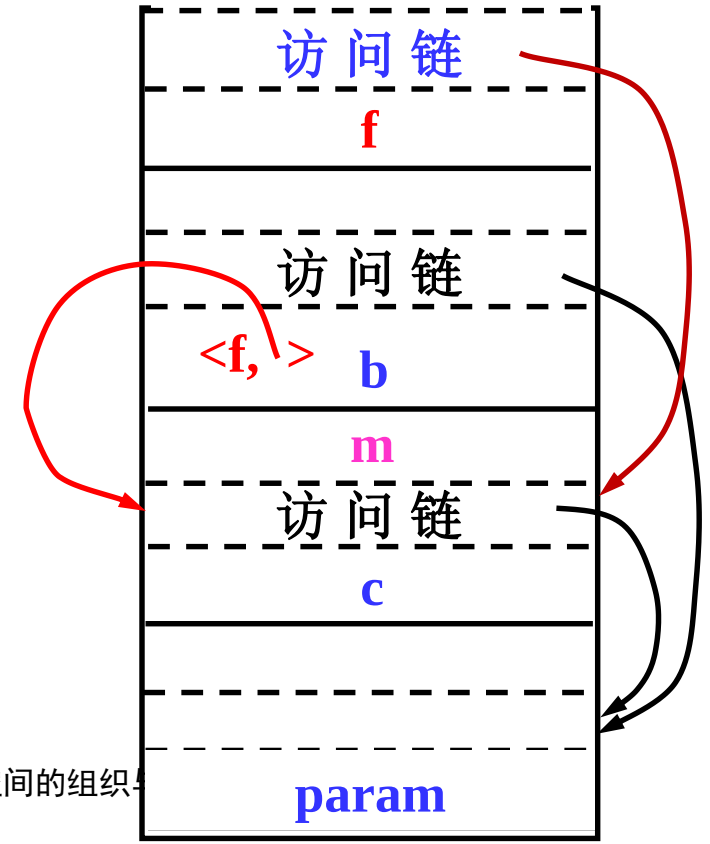


过程作为参数

```
program param(input, output);（过程作为参数）
    procedure b(function h(n: integer): integer);
        begin writeln(h(2)) end {b};
    procedure c;
        var m: integer;
        function f(n: integer): integer;
            begin f := m+n end {f};
        begin m := 0; b(f) end {c};
begin
    c
end.
```

param
c
b(h=f)
f

b调用f 时，用传递过来的访问链来建立f 的访问链

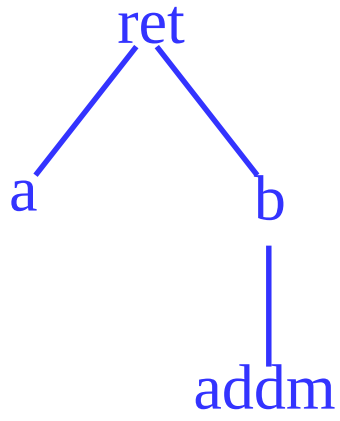


有过程嵌套定义的静态作用域

- 非局部名字的访问：访问链
- 过程作为参数产生的问题和解决
- 过程作为返回值产生的问题

过程作为返回值

```
program ret (input, output);（过程作为返回值）
    var f: function (integer): integer;
      function a: function (integer): integer;
         var m: integer;
        function addm (n: integer): integer;
            begin return m+n end;
        begin m:= 0; return addm end;
    procedure b (g: function (integer): integer);
        begin writeln (g(2)) end;
    begin
        f := a; b(f)
    end.
```



这里是对a的调用

要理解每个过程和函数的类型

a: integer→integer ?

addm: integer→integer

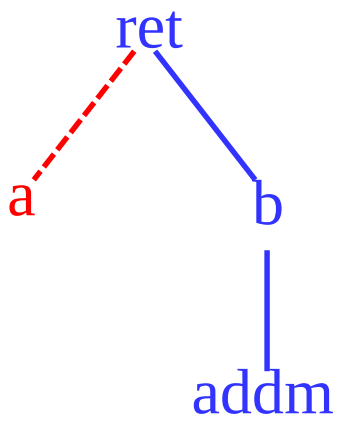
b: (integer→integer) →void

a: void →(integer→integer)

过程作为返回值

```
program ret (input, output);（过程作为返回值）
    var f: function (integer): integer;
      function a: function (integer): integer;
         var m: integer;
        function addm (n: integer): integer;
            begin return m+n end;
        begin m:= 0; return addm end;
    procedure b (g: function (integer): integer);
        begin writeln (g(2)) end;
    begin
        f := a; b(f)
    end.
```

执行addm时，a的活动记录已不存在，取不到m的值



C语言中的函数

- 不能嵌套定义
- 当前激活的函数要访问的数据分成两种情况
  - 非静态局部变量（包括形式参数）：分配在活动记录栈顶的那个活动记录中
  - 外部变量（包括定义在其它源文件之中的外部变量）和静态的局部变量：都分配在静态数据区
  - C语言允许函数（的指针）作为返回值

其他语言

- 采用静态作用域的语言
  - 无嵌套过程：如 C++、Java、C#
  - 嵌套过程：如 Python、JavaScript、Ruby
- 闭包 （closure）
  - 解决过程作为返回值时要面对的问题

```
function add(x) {
    return function(y) {
        return x + y;
    }
}
var add3 = add(3);      // add3是闭包对象，包含函数(上述划线处)及其
                        // 声明时的环境{x=3}
alert(add3(4));
```

其他语言

闭包 （closure）

- 解决过程作为返回值时要面对的问题
- 过程作为参数时也存在相似的问题

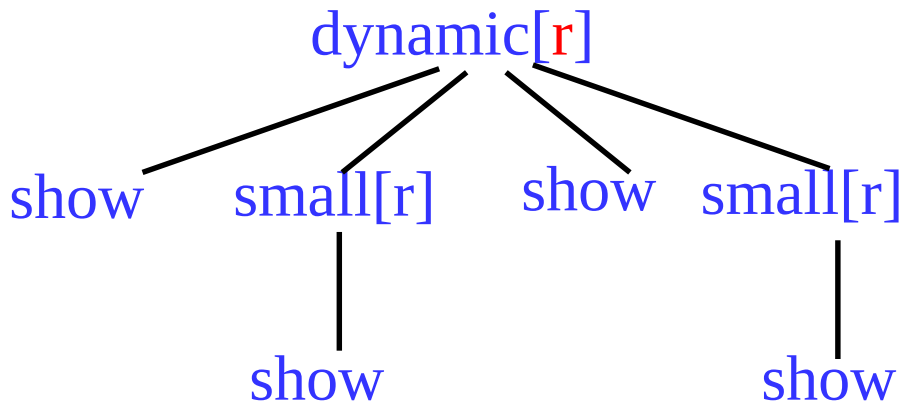
```
function do10times(fn)
   for i = 0,9 do
   fn(i)
   end
end
sum = 0
function addsum(i)
   sum = sum + i
end
do10times(addsum)
print(sum)
```

动态作用域

- 基于运行时的调用关系来确定非局部名字引用的存储单元
- 过程调用时，仅为被调用过程的局部名字建立新的绑定（在活动记录中）
- 实现动态作用域的方法
  - 深访问、浅访问

示例：基于静态作用域时


```
program dynamic(input, output);
   var r: real;
   procedure show;
      begin write(r: 5: 3) end;
   procedure small;
      var r: real;
      begin r := 0.125; show end;
   begin
      r := 0.25;
      show; small; writeln;
      show; small; writeln
   end.
```



show在dynamic中定义，
show中访问的r 是
dynamic中定义的

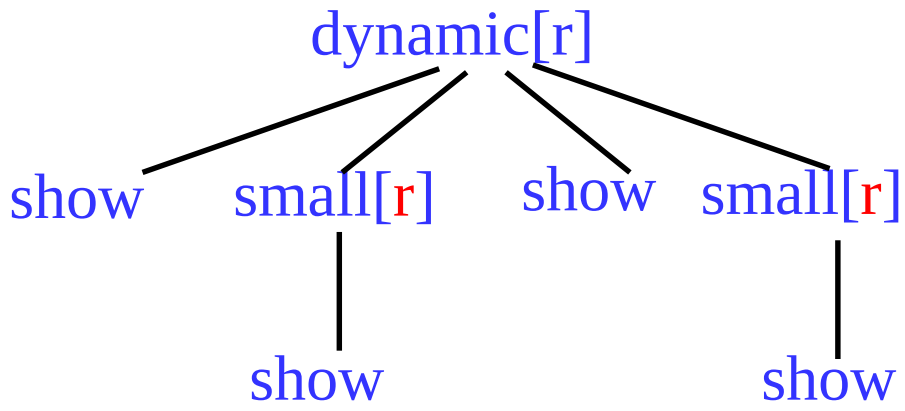
执行后输出：

0.250 0.250

0.250 0.250

示例：基于动态作用域时


```
program dynamic(input, output);
  var r: real;
  procedure show;
    begin write(r: 5: 3) end;
  procedure small;
    var r: real;
    begin r := 0.125; show end;
  begin
    r := 0.25;
    show; small; writeln;
    show; small; writeln
  end.
```



- dynamic中调用的show所访问的r 是dynamic中定义的
- small中调用的show所访问的r 是small中定义的

执行后输出：

0.250 0.125

0.250 0.125

动态作用域

- 使用动态作用域的语言
  - Pascal、Emacs Lisp、Common Lisp(兼有静态作用域)、 Perl（兼有静态作用域）、Shell语言（bash, dash, PowerShell）
- 其他
  - 宏展开

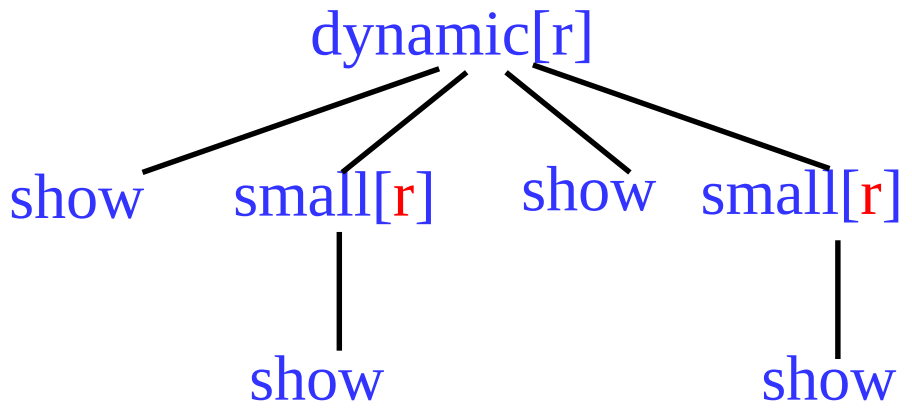
https://en.wikipedia.org/wiki/Scope_(computer_science)

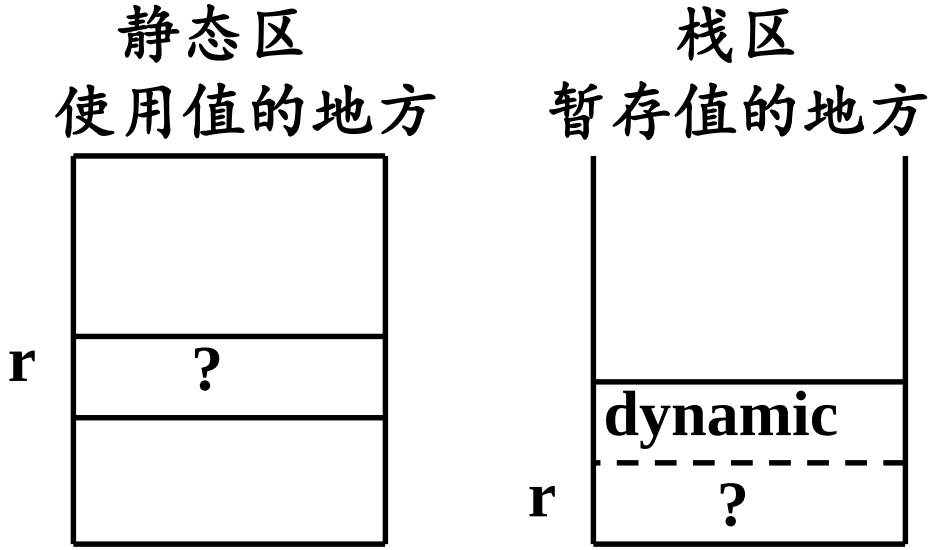
实现动态作用域的方法

- 深访问
  - 用控制链搜索运行栈，寻找包含该非局部名字的第一个活动记录
- 浅访问
  - 为每个名字在静态分配的存储空间中保存它的当前值
  - 当过程p的新活动出现时，p的局部名字*n*使用在静态数据区分配给*n*的存储单元。*n*的先前值保存在p的活动记录中，当p的活动结束时再恢复

基于浅访问实现动态作用域

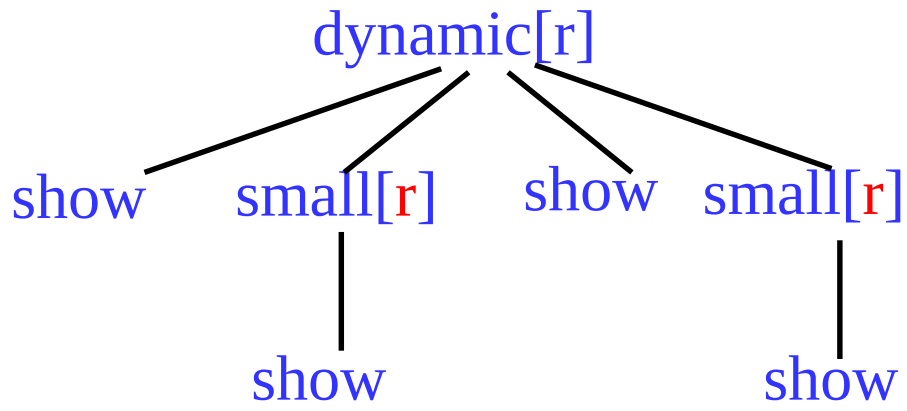

```
program dynamic(input, output);
   var r: real;
   procedure show;
      begin write(r: 5: 3) end;
   procedure small;
      var r: real;
      begin r := 0.125; show end;
   begin(蓝色表示已执行部分)
      r := 0.25;
      show; small; writeln;
      show; small; writeln
   end.
```

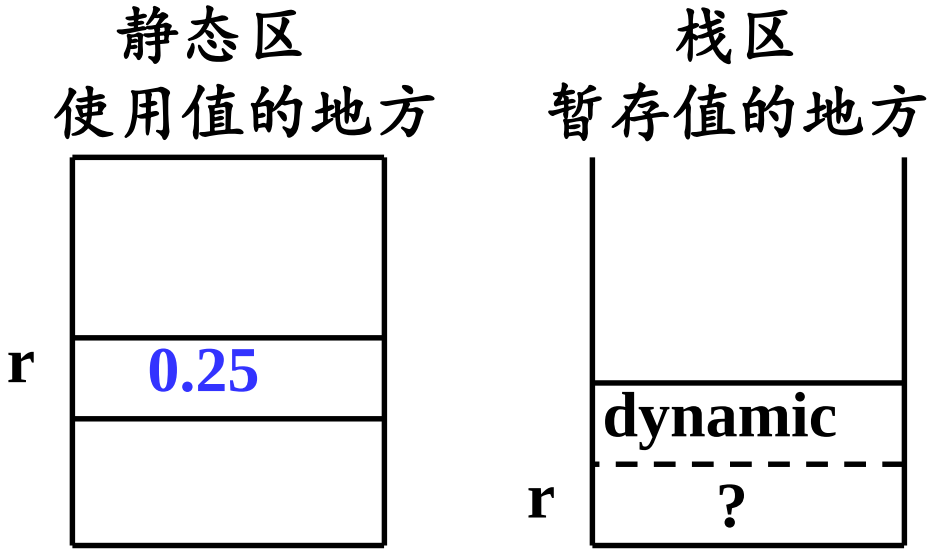




基于浅访问实现动态作用域

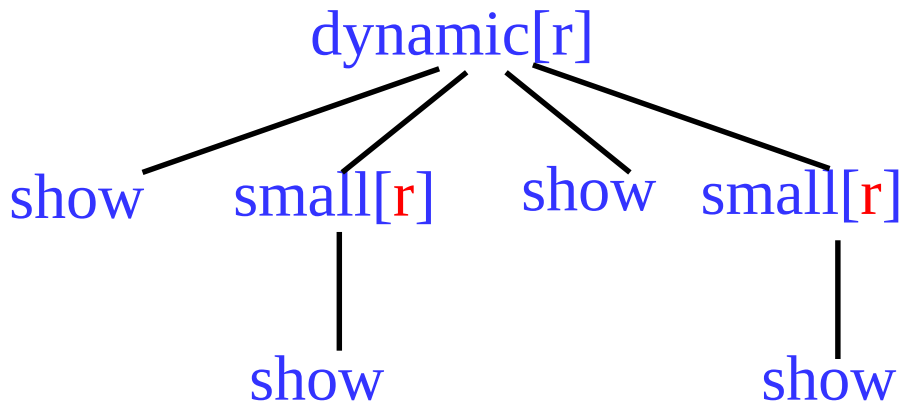

```
program dynamic(input, output);
   var r: real;
   procedure show;
      begin write(r: 5: 3) end;
   procedure small;
      var r: real;
      begin r := 0.125; show end;
   begin(蓝色表示已执行部分)
      r := 0.25;
      show; small; writeln;
      show; small; writeln
   end.
```

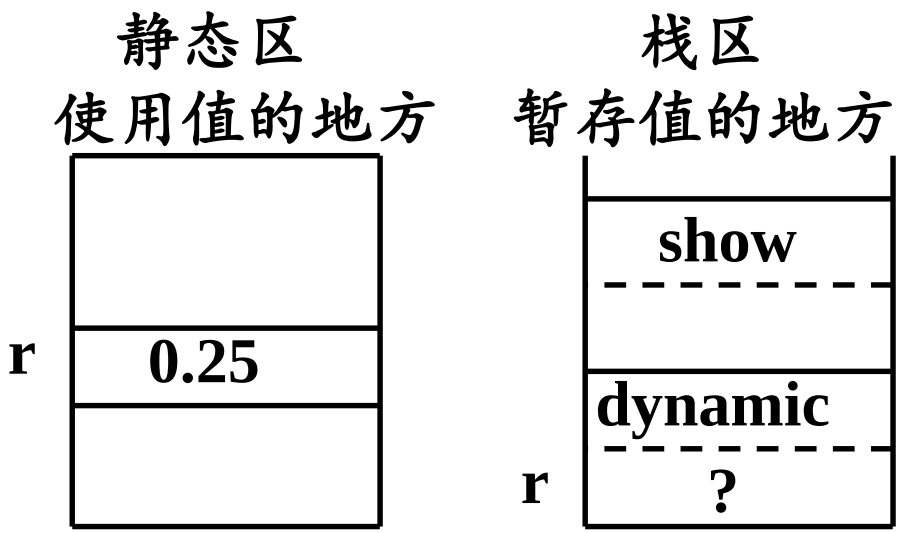




基于浅访问实现动态作用域

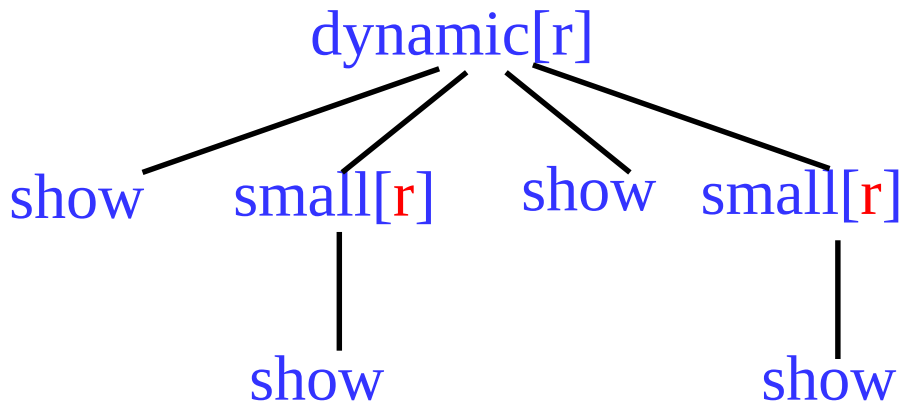

```
program dynamic(input, output);
   var r: real;
   procedure show;
      begin write(r: 5: 3) end;
   procedure small;
      var r: real;
      begin r := 0.125; show end;
   begin(蓝色表示已执行部分)
      r := 0.25;
      show; small; writeln;
      show; small; writeln
   end.
```

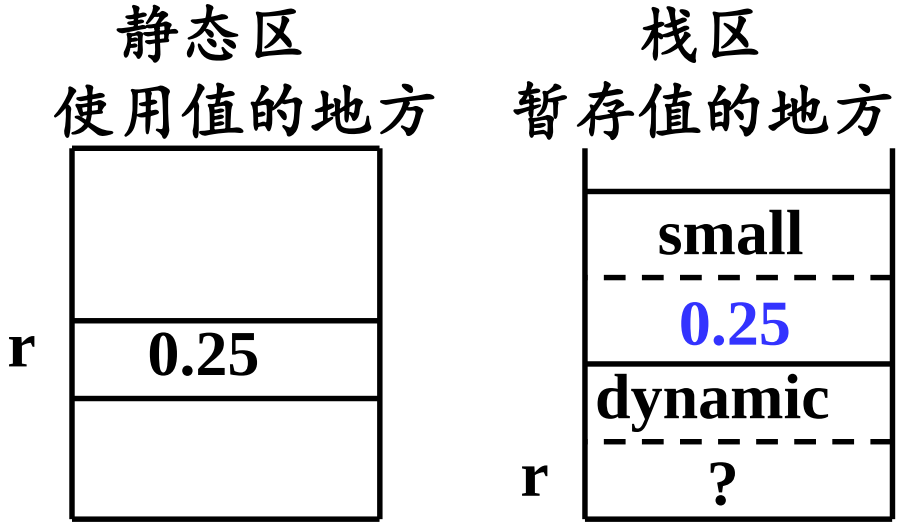




基于浅访问实现动态作用域

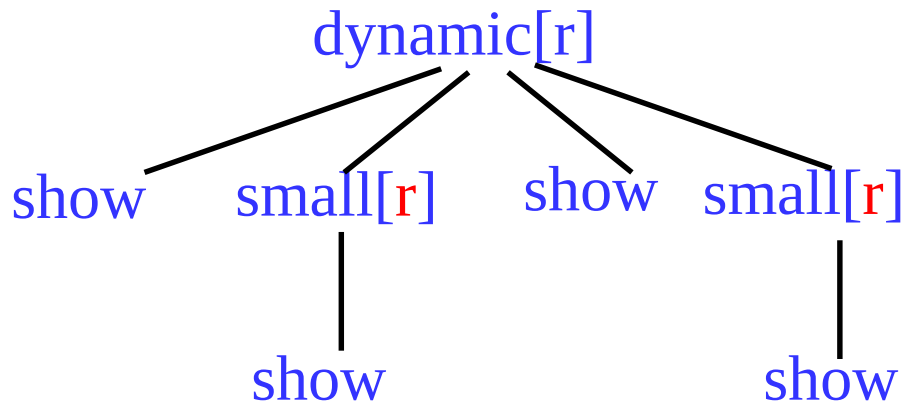

```
program dynamic(input, output);
    var r: real;
    procedure show;
        begin write(r: 5: 3) end;
    procedure small;
        var r: real;
        begin r := 0.125; show end;
    begin(蓝色表示已执行部分)
        r := 0.25;
        show; small; writeln;
        show; small; writeln
    end.
```

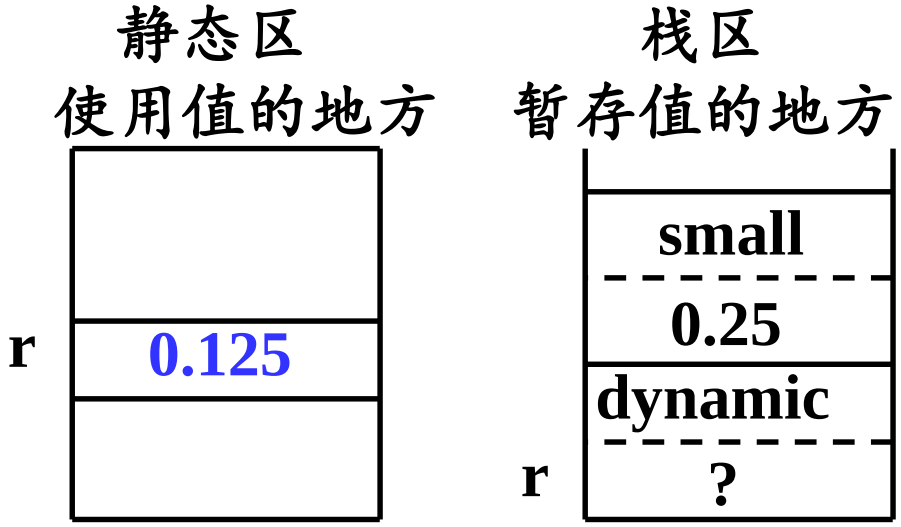




基于浅访问实现动态作用域

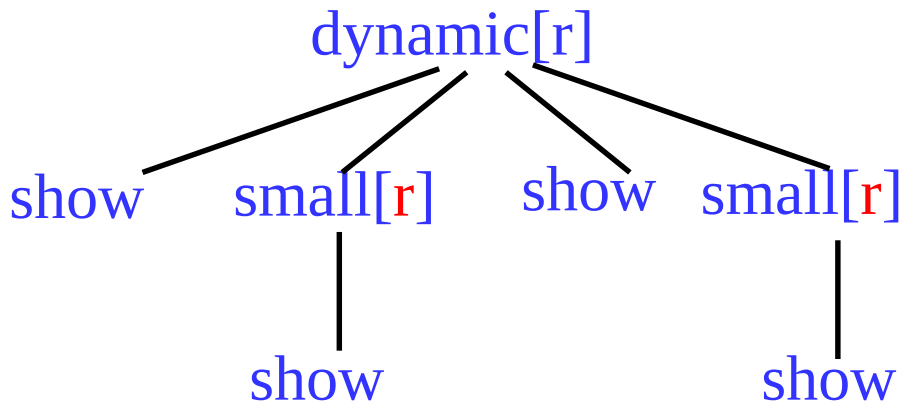

```
program dynamic(input, output);
    var r: real;
    procedure show;
        begin write(r: 5: 3) end;
    procedure small;
        var r: real;
        begin r := 0.125; show end;
    begin(蓝色表示已执行部分)
        r := 0.25;
        show; small; writeln;
        show; small; writeln
    end.
```

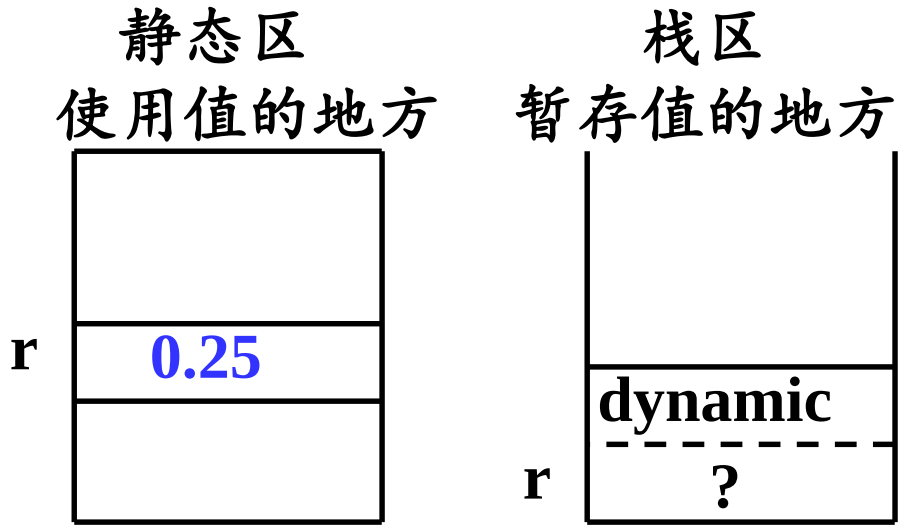




基于浅访问实现动态作用域


```
program dynamic(input, output);
   var r: real;
   procedure show;
      begin write(r: 5: 3) end;
   procedure small;
      var r: real;
      begin r := 0.125; show end;
   begin(蓝色表示已执行部分)
      r := 0.25;
      show; small; writeln;
      show; small; writeln
   end.
```





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

4. 参数传递

- 值调用
- 引用调用
- 换名调用

值调用(call by value)

- 特点
  - 实参的右值传给被调用过程
- 值调用的可能实现方法
  - 把形参当作所在过程的局部名看待，形参的存储单元在该过程的活动记录中
  - 调用过程计算实参，并把其右值放入被调用过程形参的存储单元中

引用调用(call by reference)

- 特点
  - 实参的左值传给被调用过程
- 引用调用的可能实现方法
  - 把形参当作所在过程的局部名看待，形参的存储单元在该过程的活动记录中
  - 调用过程计算实参，把实参的左值放入被调用过程形参的存储单元
  - 在被调用过程的目标代码中，任何对形参的引用都是通过传给该过程的指针来间接引用实参

换名调用(call by name)

特点

- 用实参表达式对形参进行正文替换,然后再执行

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

例如：　　调用swap(i, a[i])

替换结果：

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

交换两个数据的程序
并非总是正确

5. 其他

- 堆：分配与回收
- 计算机内存分层
- 局部性：时间、空间

堆管理

堆

存放生存期不确定的数据

- **C：malloc、free**
  glibc 的ptmalloc, Doug Lea's dlmalloc;
  高效的并发内存分配器 jemalloc, TBBmalloc,TCMalloc (gperftools)
- **C++: new、delete**
  "Foundations of the C++ Concurrency Memory Model"(PLDI2008)
- **Java: new、Garbage Collection**
  Richard Jones's the Garbage Collection Page
- **Go: new、Garbage Collection**
  The Go Memory Model
- **Rust：ownership; new、drop/dealloc**
  https://doc.rust-lang.org/book/ch04-01-what-is-ownership.html

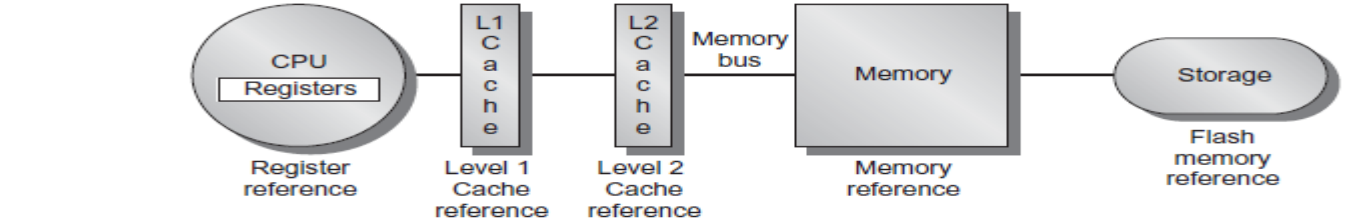
内存管理器

- 内存管理器,也称内存分配器(allocator)
  - 维护的基本信息：堆中空闲空间、...
  - 重点要实现的函数：分配、回收
- 内存管理器应具有下列性质
  - **空间有效性**：极小化程序需要的堆空间总量
  - **程序有效性**：较好地利用内存子系统，使得程序能运行得快一些
  - **低开销**：分配和回收操作所花时间在整个程序执行时间中的比例尽量小

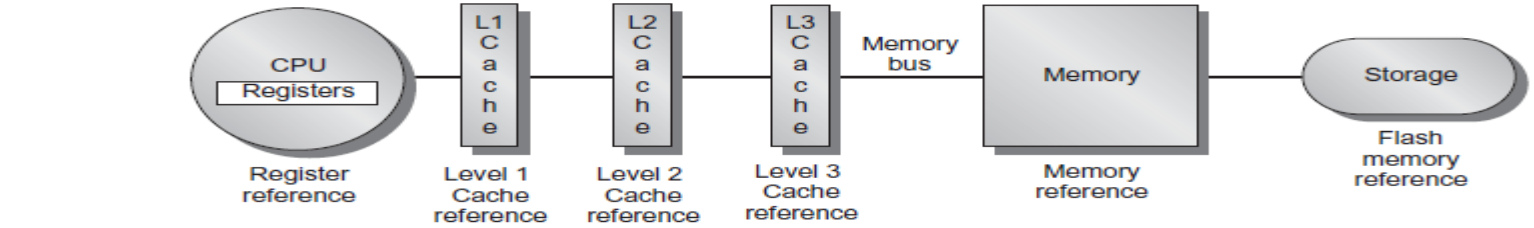
计算机内存分层

https://item.jd.com/12553439.html 第6版

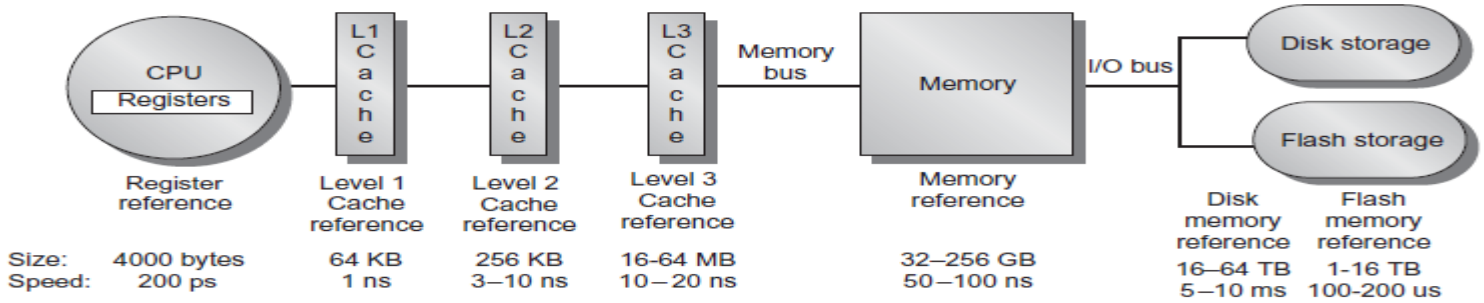
Computer Architecture, Sixth Edition: A Quantitative Approach, 2019



(A) Memory hierarchy for a personal mobile device

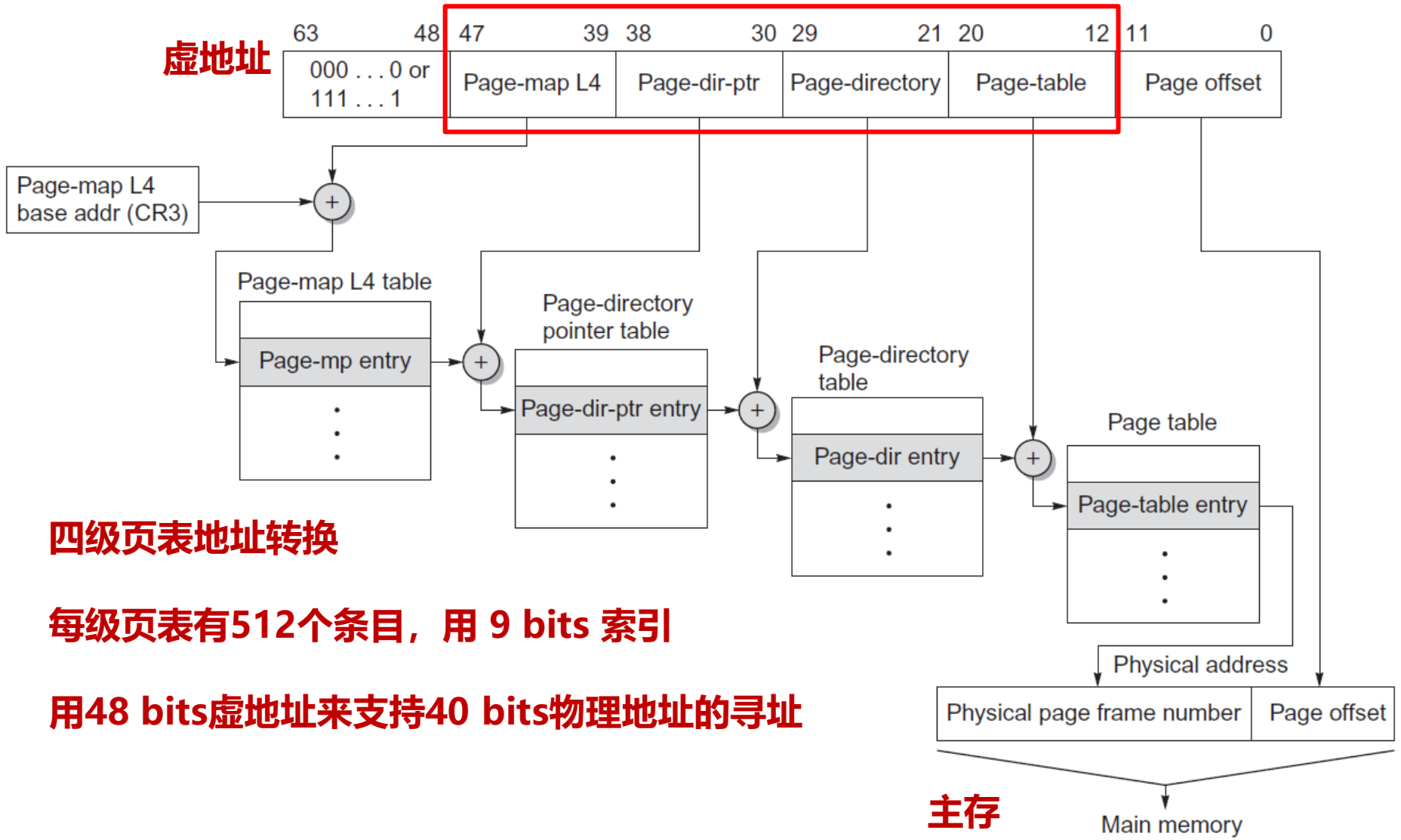


(B) Memory hierarchy for a laptop or a desktop



(C) Memory hierarchy for server

AMD Opteron 皓龙虚地址映射



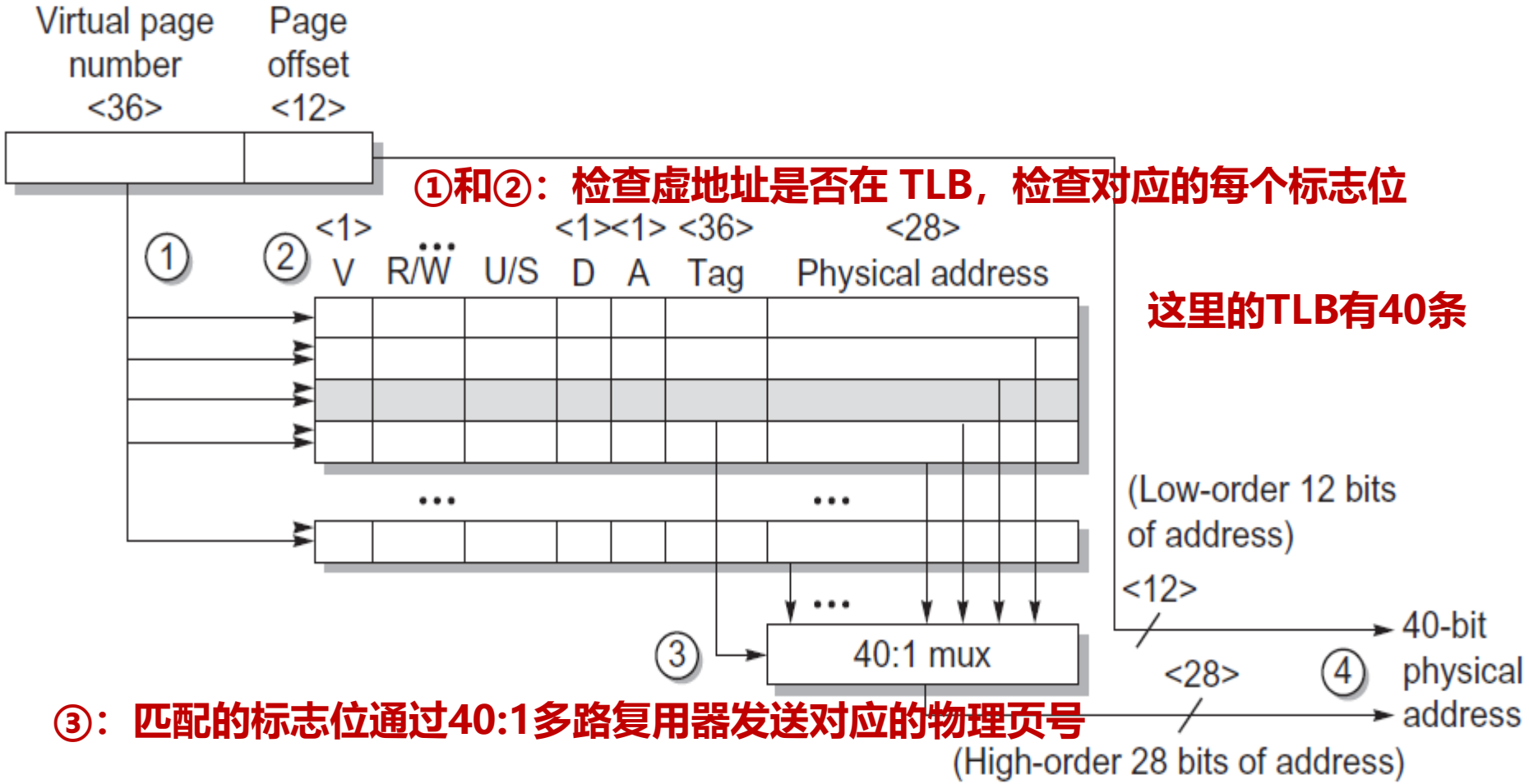
四级页表地址转换

每级页表有512个条目，用 9 bits 索引

用48 bits虚地址来支持40 bits物理地址的寻址

Opteron数据TLB的操作

- 快表（TLB, Translation look aside buffer）



Intel Core i7

峰值内存带宽：25 GB/s；使用48位虚拟地址、36位物理地址；两级 TLB

Characteristic	Instruction TLB	Data DLB	Second-level TLB
Size	128	64	512
Associativity	4-way	4-way	4-way
Replacement	Pseudo-LRU	Pseudo-LRU	Pseudo-LRU
Access latency	1 cycle	1 cycle	6 cycles
Miss	7 cycles	7 cycles	Hundreds of cycles to access page table

TLB 结构

Characteristic	L1	L2	L3
Size	32 KB I/32 KB D	256 KB	2 MB per core
Associativity	4-way I/8-way D	8-way	16-way
Access latency	4 cycles, pipelined	10 cycles	35 cycles
Replacement scheme	Pseudo-LRU	Pseudo-LRU	Pseudo-LRU but with an ordered selection algorihtm

三级 cache 结构

程序局部性(locality)

大多数程序的大部分时间在执行一小部分代码，并且仅涉及一小部分数据

- **时间局部性(temporal locality)**

  程序访问的内存单元在很短的时间内可能再次被程序访问

- **空间局部性(spatial locality)**

  毗邻被访问单元的内存单元在很短的时间内可能被访问

- **有效利用缓存**
  - Cache容量有限、最近使用的指令保存在cache中
  - 改变数据布局或计算次序=>改进程序局部性

举例: 改变计算次序


```
void copyij (int src[2048][2048],
             int dst[2048][2048])
{
  int i,j;
  for (i = 0; i < 2048; i++)
    for (j = 0; j < 2048; j++)
      dst[i][j] = src[i][j];
}
```

```
void copyji (int src[2048][2048],
             int dst[2048][2048])
{
  int i,j;
  for (j = 0; j < 2048; j++)
    for (i = 0; i < 2048; i++)
      dst[i][j] = src[i][j];
}
```

上述两个函数功能、算法一样，但执行时间一样吗?

```
int a[2048][2048] = {1, 1};
int b[2048][2048];
int main( )
{
  copyij(a, b);
  // copyji(a, b);
}
```

```
$ time ./copyij
real    0m0.046s
user    0m0.037s
sys     0m0.008s
```

```
$ time ./copyji
real    0m0.404s
user    0m0.384s
sys     0m0.020s
```

举例: 改变计算次序

```
int a[2048][2048] = {1, 1};
int b[2048][2048];
int main( )
{
  copyij(a, b);
  // copyji(a, b);
}
```

```
int a[2048][2048] = {1, 1};
int main( )
{
  int b[2048][2048];
  copyij(a, b);
  // copyji(a, b);
}
```

上述功能一样，但执行会有什么变化呢?

Segmentation fault (core dumped) ☹

Why ?

操作系统、编译器： 进程地址空间布局: 栈大小有限, 如为8MB

2048*2048*4 = 16MB

举例: 改变数据布局

例： 一个结构体大数组分拆成若干个数组

```
struct student {
int num;
char name[20];
…     …
}
struct  student st[10000];
```

```
int num[10000];
char name[10000][20];
…     …
```

- 若是顺序处理每个结构体的多个域，左边的数据局部性较好
- 若是先顺序处理每个结构的num域，再处理每个结构的name域，…，则右边的数据局部性较好
- 最好是按左边编程，由编译器决定是否需要将数据按右边布局