北京大学计算机学院

2026 年春季学期　　《编译原理(实验班)》

第六讲 运行时环境（基础版）

Runtime Environments

主要内容

- 运行时环境的作用
- 运行时环境的设计
- 运行时环境的实现

- 对应龙书章节：第 7 章

主要内容

- 运行时环境的作用
- 运行时环境的设计
- 运行时环境的实现

下面的三地址代码如何运行？

```
int fib(int n) {
  int a; a = 1;
  int b; b = 1;
  while (!(n == 0)) {
    int t;
    t = a + b; a = b; b = t;
    n = n - 1;
  }
  return a;
}

int main() {
  return fib(10);
}
```

```
  a  = 1
  b  = 1
L1:
  if n == 0 goto L0
  goto L2
L2:
  t0 = a + b
  t  = t0
  a  = b
  b  = t
  t1 = n - 1
  n  = t1
  goto L1
L0:
  return a
```

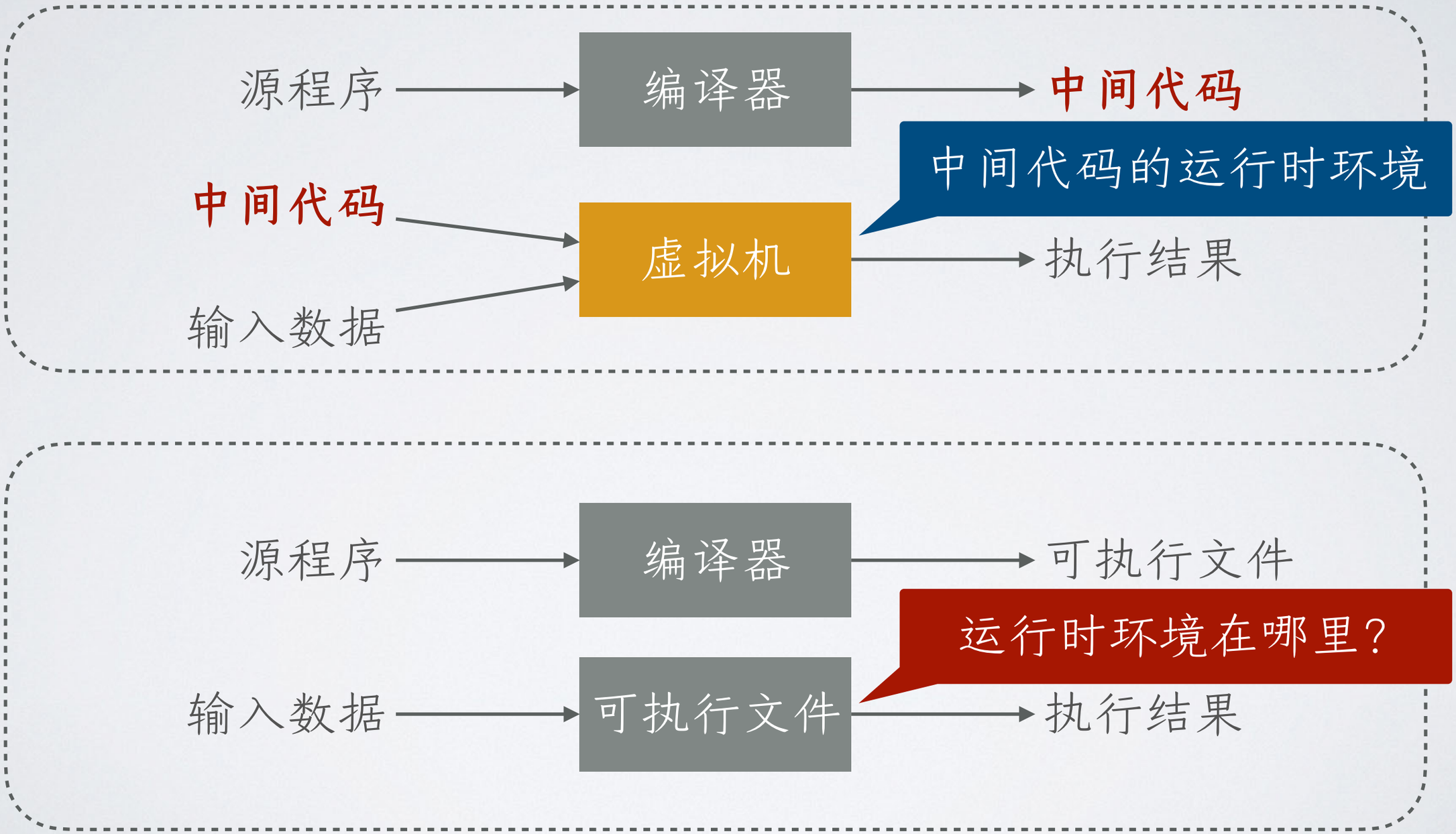
数据如何进行存储和访问？

过程/函数如何进行调用和返回？

```
  param 10,1
  t0 = call fib,1
  return t0
```

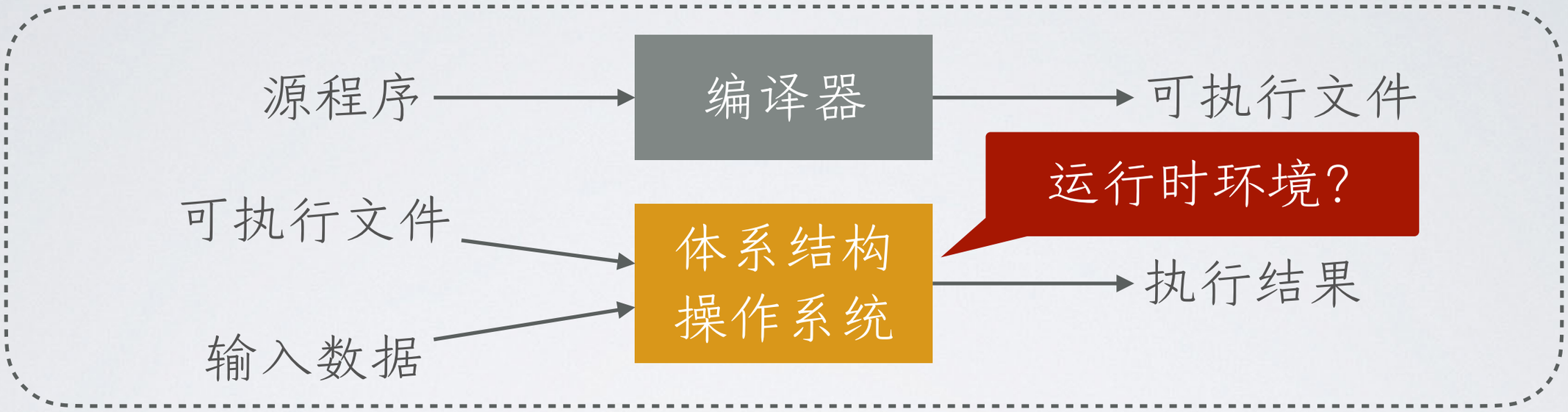
运行时环境

- 运行时环境的主要作用是实现**存储组织**和**过程抽象**



运行时环境

- 运行时环境的主要作用是实现**存储组织**和**过程抽象**



- **问题：运行时环境需要考虑源语言本身的特性**
  - 比如：面向对象语言需要处理类之间的继承关系、虚函数表等

- **可执行文件 =**
  源程序代表的计算 + 通过体系结构/操作系统接口实现的运行时环境

一个运行三地址代码的虚拟机

代码

```
(1)   call main,0
(2)   halt
(3)   param 10,1
(4)   call fib,1
(5)   retval t0
(6)   return t0
(7)   a  = 1
(8)   b  = 1
(9)   if n == 0 goto (18)
(10)  goto (11)
(11)  t0 = a + b
(12)  t  = t0
(13)  a  = b
(14)  b  = t
(15)  t1 = n - 1
(16)  n  = t1
(17)  goto (9)
(18)  return a
```

虚拟机实现的接口：

- vm_get(name)
- vm_set(name, value)
- vm_param(value, idx)
- vm_call(name, nargs)
- vm_ret(value)

```
1.  vm_call("main",0)
2.  vm_param(10,1)
3.  vm_call("fib",1)
4.  vm_set("n",10)
5.  vm_set("a",1)
6.  vm_set("b",1)
7.  vm_get("n")  // 10
8.  vm_get("a")  // 1
9.  vm_get("b")  // 1
10. vm_set("t0",2)
11. vm_get("t0") // 2
12. vm_set("t",2)
13. vm_get("b")  // 1
```

```
14. vm_set("a",1)
15. vm_get("t")  // 2
16. vm_set("b",2)
17. vm_get("n")  // 10
18. vm_set("t1",9)
19. vm_get("t1") // 9
20. vm_set("n",9)
21. ...
22. vm_get("a")  // 89
23. vm_ret(89)
24. vm_set("t0",89)
25. vm_get("t0") // 89
26. vm_ret(89)
```

一个运行三地址代码的虚拟机

代码

```
(1) ...
(2) ...
(3) ...
(4) ...
```

状态

pc	(1)
ra	[]
a0	0
st	[]

当前指令下标

返回地址栈

函数返回值

函数参数栈

数据

变量	值
a	0
b	0
n	0
t	0
t_0	0
t_1	0

函数	位置	形参
main	(3)	[]
fib	(7)	[n]

虚拟机实现的接口：

- vm_get(name)
- vm_set(name, value)
- vm_param(value, idx)
- vm_call(name, nargs)
- vm_ret(value)

如何实现接口？

一个运行三地址代码的虚拟机

代码

```
(1) ...
(2) ...
(3) ...
(4) ...
```

状态

pc	(1)
ra	[]
a0	0
st	[]

数据

变量	值
a	0
b	0
n	0
t	0
t_0	0
t_1	0

函数	位置	形参
main	(3)	[]
fib	(7)	[n]

vm_get(name):

- 查变量表读取变量值

vm_set(name,value):

- 更改变量表中的值

vm_param(value,idx):

- 把参数值压入参数栈

vm_call(name,nargs):

- 把函数返回后的下一条指令的下标压入返回地址栈
- 查函数表找到函数入口的第一条指令
- 根据函数表中的形参信息从参数栈弹出相应的参数值并设置变量表

vm_ret(value):

- 设置 a0 为返回值
- 从 ra 弹出返回后的指令位置

一个运行三地址代码的虚拟机

代码

```
(1)   call main,0
(2)   halt
(3)   param 10,1
(4)   call fib,1
(5)   retval t0
(6)   return t0
(7)   a  = 1
(8)   b  = 1
(9)   if n == 0 goto (18)
(10)  goto (11)
(11)  t0 = a + b
(12)  t  = t0
(13)  a  = b
(14)  b  = t
(15)  t1 = n - 1
(16)  n  = t1
(17)  goto (9)
(18)  return a
```

数据

变量	值
a	0
b	0
n	0
t	0
t_0	0
t_1	0

函数	位置	形参
main	(3)	[]
fib	(7)	[n]

状态

pc	(1)
ra	[]
a0	0
st	[]

```
1.  vm_call("main",0)
```

一个运行三地址代码的虚拟机

代码

```
(1)   call main,0
(2)   halt
(3)   param 10,1
(4)   call fib,1
(5)   retval t0
(6)   return t0
(7)   a  = 1
(8)   b  = 1
(9)   if n == 0 goto (18)
(10)  goto (11)
(11)  t0 = a + b
(12)  t  = t0
(13)  a  = b
(14)  b  = t
(15)  t1 = n - 1
(16)  n  = t1
(17)  goto (9)
(18)  return a
```

数据

变量	值
a	0
b	0
n	0
t	0
t_0	0
t_1	0

函数	位置	形参
main	(3)	[]
fib	(7)	[n]

状态

pc	(3)
ra	[(2)]
a0	0
st	[]

```
1.  vm_call("main",0)
2.  vm_param(10,1)
```

一个运行三地址代码的虚拟机

代码

```
(1)   call main,0
(2)   halt
(3)   param 10,1
(4)   call fib,1
(5)   retval t0
(6)   return t0
(7)   a  = 1
(8)   b  = 1
(9)   if n == 0 goto (18)
(10)  goto (11)
(11)  t0 = a + b
(12)  t  = t0
(13)  a  = b
(14)  b  = t
(15)  t1 = n - 1
(16)  n  = t1
(17)  goto (9)
(18)  return a
```

数据

变量	值
a	0
b	0
n	0
t	0
t_0	0
t_1	0

函数	位置	形参
main	(3)	[]
fib	(7)	[n]

状态

pc	(4)
ra	[(2)]
a0	0
st	[10]

```
1.  vm_call("main",0)
2.  vm_param(10,1)
3.  vm_call("fib",1)
4.  vm_set("n",10)
```

一个运行三地址代码的虚拟机

代码

```
(1)   call main,0
(2)   halt
(3)   param 10,1
(4)   call fib,1
(5)   retval t0
(6)   return t0
(7)   a  = 1
(8)   b  = 1
(9)   if n == 0 goto (18)
(10)  goto (11)
(11)  t0 = a + b
(12)  t  = t0
(13)  a  = b
(14)  b  = t
(15)  t1 = n - 1
(16)  n  = t1
(17)  goto (9)
(18)  return a
```

数据

变量	值
a	0
b	0
n	10
t	0
t_0	0
t_1	0

函数	位置	形参
main	(3)	[]
fib	(7)	[n]

状态

pc	(7)
ra	[(2),(5)]
a0	0
st	[]

```
1.  vm_call("main",0)
2.  vm_param(10,1)
3.  vm_call("fib",1)
4.  vm_set("n",10)
5.  vm_set("a",1)
```

一个运行三地址代码的虚拟机

代码

```
(1)   call main,0
(2)   halt
(3)   param 10,1
(4)   call fib,1
(5)   retval t0
(6)   return t0
(7)   a  = 1
(8)   b  = 1
(9)   if n == 0 goto (18)
(10)  goto (11)
(11)  t0 = a + b
(12)  t  = t0
(13)  a  = b
(14)  b  = t
(15)  t1 = n - 1
(16)  n  = t1
(17)  goto (9)
(18)  return a
```

数据

变量	值
a	1
b	0
n	10
t	0
t_0	0
t_1	0

函数	位置	形参
main	(3)	[]
fib	(7)	[n]

状态

pc	(8)
ra	[(2),(5)]
a0	0
st	[]

```
1.  vm_call("main",0)
2.  vm_param(10,1)
3.  vm_call("fib",1)
4.  vm_set("n",10)
5.  vm_set("a",1)
6.  vm_set("b",1)
```

一个运行三地址代码的虚拟机

代码

```
(1)   call main,0
(2)   halt
(3)   param 10,1
(4)   call fib,1
(5)   retval t0
(6)   return t0
(7)   a  = 1
(8)   b  = 1
(9)   if n == 0 goto (18)
(10)  goto (11)
(11)  t0 = a + b
(12)  t  = t0
(13)  a  = b
(14)  b  = t
(15)  t1 = n - 1
(16)  n  = t1
(17)  goto (9)
(18)  return a
```

数据

变量	值
a	1
b	1
n	10
t	0
t_0	0
t_1	0

函数	位置	形参
main	(3)	[]
fib	(7)	[n]

状态

pc	(9)
ra	[(2),(5)]
a0	0
st	[]

```
1.  vm_call("main",0)
2.  vm_param(10,1)
3.  vm_call("fib",1)
4.  vm_set("n",10)
5.  vm_set("a",1)
6.  vm_set("b",1)
7.  vm_get("n")  // 10
```

一个运行三地址代码的虚拟机

代码

```
(1)   call main,0
(2)   halt
(3)   param 10,1
(4)   call fib,1
(5)   retval t0
(6)   return t0
(7)   a  = 1
(8)   b  = 1
(9)   if n == 0 goto (18)
(10)  goto (11)
(11)  t0 = a + b
(12)  t  = t0
(13)  a  = b
(14)  b  = t
(15)  t1 = n - 1
(16)  n  = t1
(17)  goto (9)
(18)  return a
```

数据

变量	值
a	1
b	1
n	10
t	0
t_0	0
t_1	0

函数	位置	形参
main	(3)	[]
fib	(7)	[n]

状态

pc	(10)
ra	[(2),(5)]
a0	0
st	[]

```
1.  vm_call("main",0)
2.  vm_param(10,1)
3.  vm_call("fib",1)
4.  vm_set("n",10)
5.  vm_set("a",1)
6.  vm_set("b",1)
7.  vm_get("n")  // 10
```

一个运行三地址代码的虚拟机

代码

```
(1)   call main,0
(2)   halt
(3)   param 10,1
(4)   call fib,1
(5)   retval t0
(6)   return t0
(7)   a  = 1
(8)   b  = 1
(9)   if n == 0 goto (18)
(10)  goto (11)
(11)  t0 = a + b
(12)  t  = t0
(13)  a  = b
(14)  b  = t
(15)  t1 = n - 1
(16)  n  = t1
(17)  goto (9)
(18)  return a
```

数据

变量	值
a	1
b	1
n	10
t	0
t_0	0
t_1	0

函数	位置	形参
main	(3)	[]
fib	(7)	[n]

状态

pc	(11)
ra	[(2),(5)]
a0	0
st	[]

```
1.  vm_call("main",0)
2.  vm_param(10,1)
3.  vm_call("fib",1)
4.  vm_set("n",10)
5.  vm_set("a",1)
6.  vm_set("b",1)
7.  vm_get("n")  // 10
8.  vm_get("a")  // 1
9.  vm_get("b")  // 1
10. vm_set("t0",2)
```

一个运行三地址代码的虚拟机

代码

```
(1)   call main,0
(2)   halt
(3)   param 10,1
(4)   call fib,1
(5)   retval t0
(6)   return t0
(7)   a  = 1
(8)   b  = 1
(9)   if n == 0 goto (18)
(10)  goto (11)
(11)  t0 = a + b
(12)  t  = t0
(13)  a  = b
(14)  b  = t
(15)  t1 = n - 1
(16)  n  = t1
(17)  goto (9)
(18)  return a
```

数据

变量	值
a	1
b	1
n	10
t	0
t_0	2
t_1	0

函数	位置	形参
main	(3)	[]
fib	(7)	[n]

状态

pc	(12)
ra	[(2),(5)]
a0	0
st	[]

```
1.  vm_call("main",0)
2.  vm_param(10,1)
3.  vm_call("fib",1)
4.  vm_set("n",10)
5.  vm_set("a",1)
6.  vm_set("b",1)
7.  vm_get("n")  // 10
8.  vm_get("a")  // 1
9.  vm_get("b")  // 1
10. vm_set("t0",2)
11. vm_get("t0") // 2
12. vm_set("t",2)
```

一个运行三地址代码的虚拟机

代码

```
(1)   call main,0
(2)   halt
(3)   param 10,1
(4)   call fib,1
(5)   retval t0
(6)   return t0
(7)   a  = 1
(8)   b  = 1
(9)   if n == 0 goto (18)
(10)  goto (11)
(11)  t0 = a + b
(12)  t  = t0
(13)  a  = b
(14)  b  = t
(15)  t1 = n - 1
(16)  n  = t1
(17)  goto (9)
(18)  return a
```

数据

变量	值
a	1
b	1
n	10
t	2
t_0	2
t_1	0

函数	位置	形参
main	(3)	[]
fib	(7)	[n]

状态

pc	(13)
ra	[(2),(5)]
a0	0
st	[]

```
1.  vm_call("main",0)
2.  vm_param(10,1)
3.  vm_call("fib",1)
4.  vm_set("n",10)
5.  vm_set("a",1)
6.  vm_set("b",1)
7.  vm_get("n")  // 10
8.  vm_get("a")  // 1
9.  vm_get("b")  // 1
10. vm_set("t0",2)
11. vm_get("t0") // 2
12. vm_set("t",2)
13. vm_get("b")  // 1
```

```
14. vm_set("a",1)
```

一个运行三地址代码的虚拟机

代码

```
(1)   call main,0
(2)   halt
(3)   param 10,1
(4)   call fib,1
(5)   retval t0
(6)   return t0
(7)   a  = 1
(8)   b  = 1
(9)   if n == 0 goto (18)
(10)  goto (11)
(11)  t0 = a + b
(12)  t  = t0
(13)  a  = b
(14)  b  = t
(15)  t1 = n - 1
(16)  n  = t1
(17)  goto (9)
(18)  return a
```

数据

变量	值
a	1
b	1
n	10
t	2
t_0	2
t_1	0

函数	位置	形参
main	(3)	[]
fib	(7)	[n]

状态

pc	(14)
ra	[(2),(5)]
a0	0
st	[]

```
1.  vm_call("main",0)
2.  vm_param(10,1)
3.  vm_call("fib",1)
4.  vm_set("n",10)
5.  vm_set("a",1)
6.  vm_set("b",1)
7.  vm_get("n")  // 10
8.  vm_get("a")  // 1
9.  vm_get("b")  // 1
10. vm_set("t0",2)
11. vm_get("t0") // 2
12. vm_set("t",2)
13. vm_get("b")  // 1
```

```
14. vm_set("a",1)
15. vm_get("t")  // 2
16. vm_set("b",2)
```

一个运行三地址代码的虚拟机

代码

```
(1)   call main,0
(2)   halt
(3)   param 10,1
(4)   call fib,1
(5)   retval t0
(6)   return t0
(7)   a  = 1
(8)   b  = 1
(9)   if n == 0 goto (18)
(10)  goto (11)
(11)  t0 = a + b
(12)  t  = t0
(13)  a  = b
(14)  b  = t
(15)  t1 = n - 1
(16)  n  = t1
(17)  goto (9)
(18)  return a
```

数据

变量	值
a	1
b	2
n	10
t	2
t_0	2
t_1	0

函数	位置	形参
main	(3)	[]
fib	(7)	[n]

状态

pc	(15)
ra	[(2),(5)]
a0	0
st	[]

```
1.  vm_call("main",0)
2.  vm_param(10,1)
3.  vm_call("fib",1)
4.  vm_set("n",10)
5.  vm_set("a",1)
6.  vm_set("b",1)
7.  vm_get("n")  // 10
8.  vm_get("a")  // 1
9.  vm_get("b")  // 1
10. vm_set("t0",2)
11. vm_get("t0") // 2
12. vm_set("t",2)
13. vm_get("b")  // 1
```

```
14. vm_set("a",1)
15. vm_get("t")  // 2
16. vm_set("b",2)
17. vm_get("n")  // 10
18. vm_set("t1",9)
```

一个运行三地址代码的虚拟机

代码

```
(1)   call main,0
(2)   halt
(3)   param 10,1
(4)   call fib,1
(5)   retval t0
(6)   return t0
(7)   a  = 1
(8)   b  = 1
(9)   if n == 0 goto (18)
(10)  goto (11)
(11)  t0 = a + b
(12)  t  = t0
(13)  a  = b
(14)  b  = t
(15)  t1 = n - 1
(16)  n  = t1
(17)  goto (9)
(18)  return a
```

数据

变量	值
a	1
b	2
n	10
t	2
t_0	2
t_1	9

函数	位置	形参
main	(3)	[]
fib	(7)	[n]

状态

pc	(16)
ra	[(2),(5)]
a0	0
st	[]

```
1.  vm_call("main",0)
2.  vm_param(10,1)
3.  vm_call("fib",1)
4.  vm_set("n",10)
5.  vm_set("a",1)
6.  vm_set("b",1)
7.  vm_get("n")  // 10
8.  vm_get("a")  // 1
9.  vm_get("b")  // 1
10. vm_set("t0",2)
11. vm_get("t0") // 2
12. vm_set("t",2)
13. vm_get("b")  // 1
```

```
14. vm_set("a",1)
15. vm_get("t")  // 2
16. vm_set("b",2)
17. vm_get("n")  // 10
18. vm_set("t1",9)
19. vm_get("t1") // 9
20. vm_set("n",9)
```

一个运行三地址代码的虚拟机

代码

```
(1)   call main,0
(2)   halt
(3)   param 10,1
(4)   call fib,1
(5)   retval t0
(6)   return t0
(7)   a  = 1
(8)   b  = 1
(9)   if n == 0 goto (18)
(10)  goto (11)
(11)  t0 = a + b
(12)  t  = t0
(13)  a  = b
(14)  b  = t
(15)  t1 = n - 1
(16)  n  = t1
(17)  goto (9)
(18)  return a
```

数据

变量	值
a	1
b	2
n	9
t	2
t_0	2
t_1	9

函数	位置	形参
main	(3)	[]
fib	(7)	[n]

状态

pc	(17)
ra	[(2),(5)]
a0	0
st	[]

```
1.  vm_call("main",0)
2.  vm_param(10,1)
3.  vm_call("fib",1)
4.  vm_set("n",10)
5.  vm_set("a",1)
6.  vm_set("b",1)
7.  vm_get("n")  // 10
8.  vm_get("a")  // 1
9.  vm_get("b")  // 1
10. vm_set("t0",2)
11. vm_get("t0") // 2
12. vm_set("t",2)
13. vm_get("b")  // 1
```

```
14. vm_set("a",1)
15. vm_get("t")  // 2
16. vm_set("b",2)
17. vm_get("n")  // 10
18. vm_set("t1",9)
19. vm_get("t1") // 9
20. vm_set("n",9)
```

一个运行三地址代码的虚拟机

若干轮循环后

一个运行三地址代码的虚拟机

代码

```
(1)   call main,0
(2)   halt
(3)   param 10,1
(4)   call fib,1
(5)   retval t0
(6)   return t0
(7)   a  = 1
(8)   b  = 1
(9)   if n == 0 goto (18)
(10)  goto (11)
(11)  t0 = a + b
(12)  t  = t0
(13)  a  = b
(14)  b  = t
(15)  t1 = n - 1
(16)  n  = t1
(17)  goto (9)
(18)  return a
```

数据

变量	值
a	89
b	144
n	0
t	144
t_0	144
t_1	0

函数	位置	形参
main	(3)	[]
fib	(7)	[n]

状态

pc	(18)
ra	[(2),(5)]
a0	0
st	[]

```
1.  vm_call("main",0)
2.  vm_param(10,1)
3.  vm_call("fib",1)
4.  vm_set("n",10)
5.  vm_set("a",1)
6.  vm_set("b",1)
7.  vm_get("n")  // 10
8.  vm_get("a")  // 1
9.  vm_get("b")  // 1
10. vm_set("t0",2)
11. vm_get("t0") // 2
12. vm_set("t",2)
13. vm_get("b")  // 1
```

```
14. vm_set("a",1)
15. vm_get("t")  // 2
16. vm_set("b",2)
17. vm_get("n")  // 10
18. vm_set("t1",9)
19. vm_get("t1") // 9
20. vm_set("n",9)
21. ...
22. vm_get("a")  // 89
23. vm_ret(89)
```

一个运行三地址代码的虚拟机

代码

```
(1)   call main,0
(2)   halt
(3)   param 10,1
(4)   call fib,1
(5)   retval t0
(6)   return t0
(7)   a  = 1
(8)   b  = 1
(9)   if n == 0 goto (18)
(10)  goto (11)
(11)  t0 = a + b
(12)  t  = t0
(13)  a  = b
(14)  b  = t
(15)  t1 = n - 1
(16)  n  = t1
(17)  goto (9)
(18)  return a
```

数据

变量	值
a	89
b	144
n	0
t	144
t_0	144
t_1	0

函数	位置	形参
main	(3)	[]
fib	(7)	[n]

状态

pc	(5)
ra	[(2)]
a0	89
st	[]

```
1.  vm_call("main",0)
2.  vm_param(10,1)
3.  vm_call("fib",1)
4.  vm_set("n",10)
5.  vm_set("a",1)
6.  vm_set("b",1)
7.  vm_get("n")  // 10
8.  vm_get("a")  // 1
9.  vm_get("b")  // 1
10. vm_set("t0",2)
11. vm_get("t0") // 2
12. vm_set("t",2)
13. vm_get("b")  // 1
```

```
14. vm_set("a",1)
15. vm_get("t")  // 2
16. vm_set("b",2)
17. vm_get("n")  // 10
18. vm_set("t1",9)
19. vm_get("t1") // 9
20. vm_set("n",9)
21. ...
22. vm_get("a")  // 89
23. vm_ret(89)
24. vm_set("t0",89)
```

一个运行三地址代码的虚拟机

代码

```
(1)   call main,0
(2)   halt
(3)   param 10,1
(4)   call fib,1
(5)   retval t0
(6)   return t0
(7)   a  = 1
(8)   b  = 1
(9)   if n == 0 goto (18)
(10)  goto (11)
(11)  t0 = a + b
(12)  t  = t0
(13)  a  = b
(14)  b  = t
(15)  t1 = n - 1
(16)  n  = t1
(17)  goto (9)
(18)  return a
```

数据

变量	值
a	89
b	144
n	0
t	144
t_0	89
t_1	0

函数	位置	形参
main	(3)	[]
fib	(7)	[n]

状态

pc	(6)
ra	[(2)]
a0	89
st	[]

```
1.  vm_call("main",0)
2.  vm_param(10,1)
3.  vm_call("fib",1)
4.  vm_set("n",10)
5.  vm_set("a",1)
6.  vm_set("b",1)
7.  vm_get("n")  // 10
8.  vm_get("a")  // 1
9.  vm_get("b")  // 1
10. vm_set("t0",2)
11. vm_get("t0") // 2
12. vm_set("t",2)
13. vm_get("b")  // 1
```

```
14. vm_set("a",1)
15. vm_get("t")  // 2
16. vm_set("b",2)
17. vm_get("n")  // 10
18. vm_set("t1",9)
19. vm_get("t1") // 9
20. vm_set("n",9)
21. ...
22. vm_get("a")  // 89
23. vm_ret(89)
24. vm_set("t0",89)
25. vm_get("t0") // 89
26. vm_ret(89)
```

一个运行三地址代码的虚拟机

代码

```
(1)   call main,0
(2)   halt
(3)   param 10,1
(4)   call fib,1
(5)   retval t0
(6)   return t0
(7)   a  = 1
(8)   b  = 1
(9)   if n == 0 goto (18)
(10)  goto (11)
(11)  t0 = a + b
(12)  t  = t0
(13)  a  = b
(14)  b  = t
(15)  t1 = n - 1
(16)  n  = t1
(17)  goto (9)
(18)  return a
```

数据

变量	值
a	89
b	144
n	0
t	144
t_0	89
t_1	0

函数	位置	形参
main	(3)	[]
fib	(7)	[n]

状态

pc	(2)
ra	[]
a0	89
st	[]

```
1.  vm_call("main",0)
2.  vm_param(10,1)
3.  vm_call("fib",1)
4.  vm_set("n",10)
5.  vm_set("a",1)
6.  vm_set("b",1)
7.  vm_get("n")  // 10
8.  vm_get("a")  // 1
9.  vm_get("b")  // 1
10. vm_set("t0",2)
11. vm_get("t0") // 2
12. vm_set("t",2)
13. vm_get("b")  // 1
```

```
14. vm_set("a",1)
15. vm_get("t")  // 2
16. vm_set("b",2)
17. vm_get("n")  // 10
18. vm_set("t1",9)
19. vm_get("t1") // 9
20. vm_set("n",9)
21. ...
22. vm_get("a")  // 89
23. vm_ret(89)
24. vm_set("t0",89)
25. vm_get("t0") // 89
26. vm_ret(89)
```

一个运行三地址代码的虚拟机

代码

```
(1) ...
(2) ...
(3) ...
(4) ...
```

状态

当前指令下标

返回地址栈

函数返回值

函数参数栈

pc	(1)
ra	[]
a0	0
st	[]

数据

变量	值
a	0
b	0
n	0
t	0
t_0	0
t_1	0

函数	位置	形参
main	(3)	[]
fib	(7)	[n]

这个设计有什么问题？

所有变量都处于同一个全局作用域中！

- 可能与源语言的作用域规则不一致
- 也不支持递归过程/函数的实现

为支持存储组织和过程抽象，需要对运行时环境进行细致的设计

从三地址代码到目标代码

- **可执行文件 =**

  源程序代表的计算 + 通过体系结构/操作系统接口实现的运行时环境

```
(1)   call main,0
(2)   halt
(3)   param 10,1
(4)   call fib,1
(5)   retval t0
(6)   return t0
(7)   a  = 1
(8)   b  = 1
(9)   if n == 0 goto (18)
(10)  goto (11)
(11)  t0 = a + b
(12)  t  = t0
(13)  a  = b
(14)  b  = t
(15)  t1 = n - 1
(16)  n  = t1
(17)  goto (9)
(18)  return a
```

RISC-V 汇编

```
  .data
a:
  .zero 4
b:
  .zero 4
n:
  .zero 4
...
```

数据段：存储全局变量

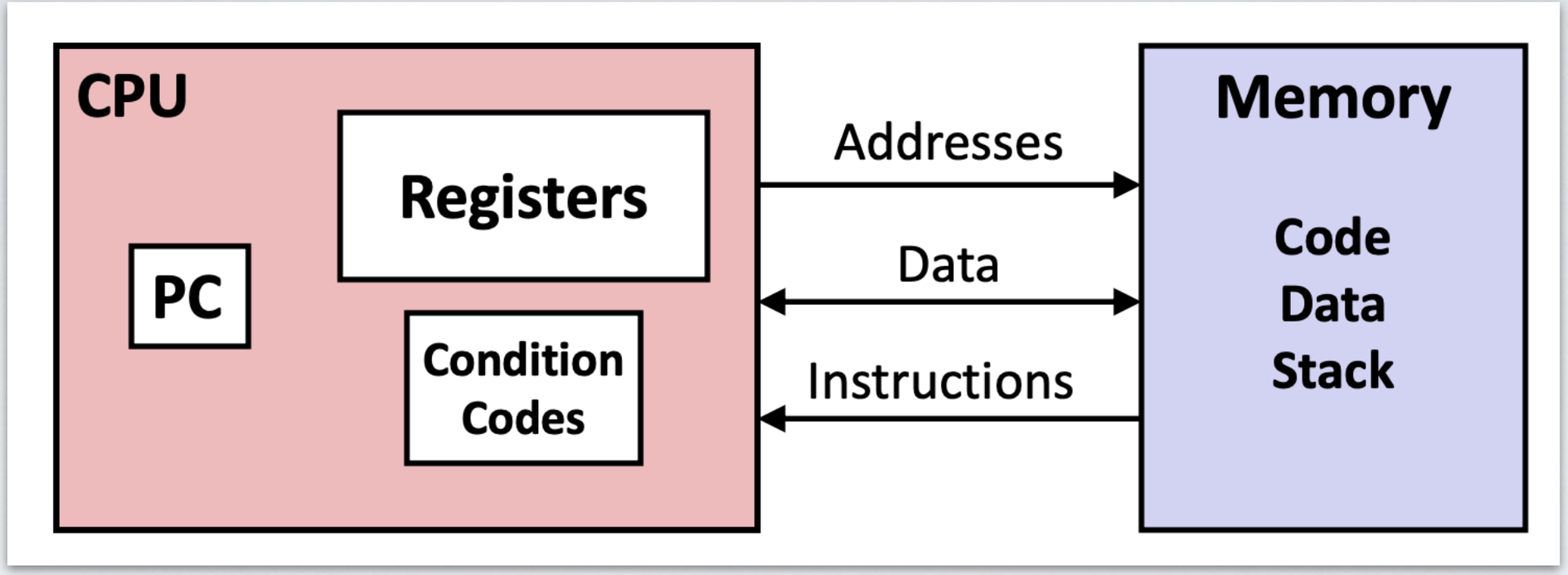
```
  .text
main:
  li a0, 10
  call fib
  ret
fib:
  la t6, n
  sw a0, 0(t6)
...
```

代码段：存储程序代码

RISC-V 调用约定：寄存器 a0 被用来传递第一个参数以及返回值

RISC-V 体系结构：寄存器 ra 被用来记录函数的返回地址

从三地址代码到目标代码



- 体系结构和操作系统提供了**非常底层**的操作
- 运行时环境用这些操作来实现数据存储和过程调用
- **需要在生成的目标代码中插入这些底层操作**
  - 本地(native)运行 ≈ 用机器指令「模拟」虚拟机

「机器无关」的运行时环境

- 本章内容**不限定**本地运行或虚拟机运行，也**不限定**具体的体系结构或操作系统
- 本章内容着重介绍设计和实现运行时环境的**通用技术**
- **重点：存储组织和过程抽象**

主要内容

- 运行时环境的作用
- **运行时环境的设计**
- 运行时环境的实现

存储组织

- 在代码生成前，编译器需要进行**目标运行环境的设计**和**数据空间的分配**

- 编译器在操作系统/虚拟机规定的区域中存储生成的**目标代码**与代码运行时的**数据空间**
  - 比如 RISC-V 中，.text 段存储代码，.data 段存储全局变量等

- 需要存储空间的对象：
  - 源代码声明的各种类型的数据对象
  - 用来保留中间结果和传递参数的临时数据对象
  - 过程调用时需要记录的上下文信息
  - ……

静态和动态存储分配

- **难点：**区分程序的**编译**时刻和**运行**时刻
- 编译时刻对应**静态分配**
  - 编译器通过程序文本即可做出分配决定
  - 例如：常量、全局变量、静态变量(C 中的 static 变量)
- 运行时刻对应**动态分配**
  - 程序在运行过程中才能做出分配决定
  - 例如：局部变量、动态变量(C 中的 malloc 函数分配的数据)
- **注意：**静态确定的存储空间大小**并不意味**静态分配
  - 很多时候空间大小可以由类型信息得出

纯静态存储分配

- 所有分配决定都在编译时得到
- **优点：不需要运行时的支持**
- **缺点：不支持递归调用过程，不能动态建立数据结构**

- 案例：标准 Fortran 语言使用纯静态存储分配

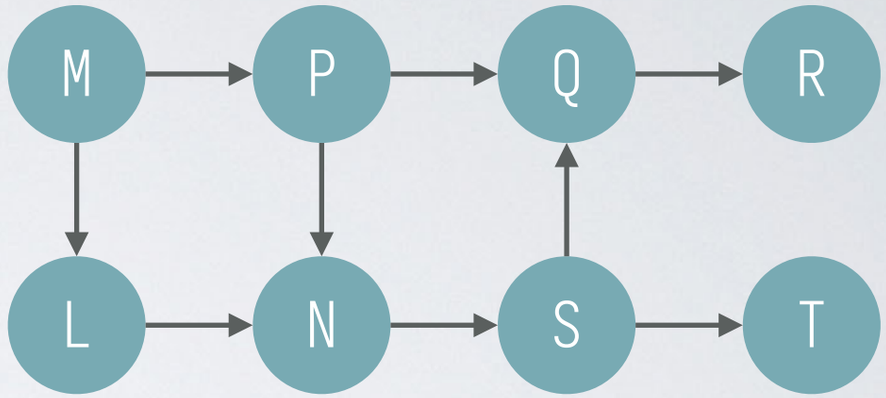
Fortran 语言的存储组织

过程列表

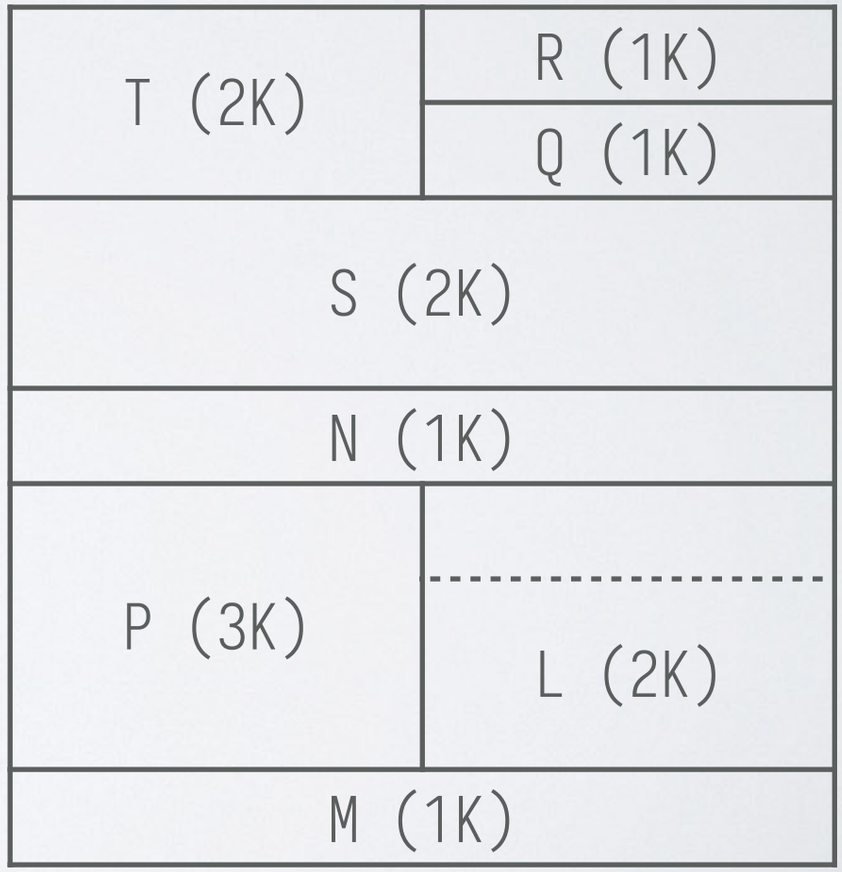
过程名	空间大小
M	1K
P	3K
Q	1K
R	1K
L	2K
N	1K
S	2K
T	2K

M 为主过程

调用关系



存储分配



分时复用！

如何支持递归调用过程？

- 过程调用的次数一般不能静态确定，所以需要**动态分配**
- 过程调用在时间上总是嵌套的
  - 后调用的先返回(last-in-first-out, LIFO)
  - 适合使用**栈(stack)**来管理过程活动的存储空间
  - 例如：过程的局部变量、形式参数等，这些值**与过程的生命周期相同**
- **栈式存储管理**

如何支持动态建立数据结构？

- 动态数据结构的大小一般不能静态确定，所以需要**动态分配**
- 其生命周期可能并不和某个过程的调用/返回相匹配
  - 数据对象可能比创建它的过程调用更长寿
  - **非词法作用域(non-lexical scope)**

- **堆(heap)式存储管理**
  - 不是数据结构中的堆
  - 可以理解为**「可用内存池」**

过程抽象

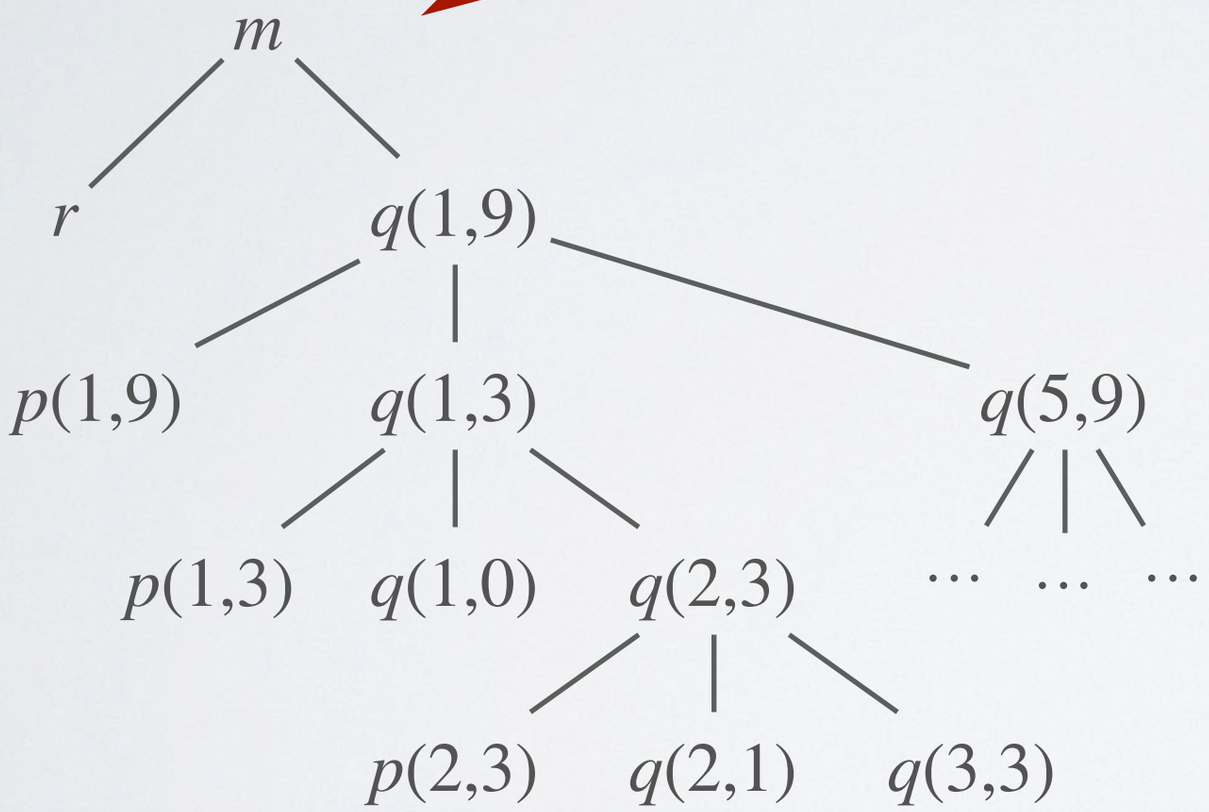
- **所谓「抽象」，不过是隐藏一定的「细节」**

- 多数现代编程语言都提供了过程抽象
  - 通过定义过程/函数的形式隐藏其代表的计算的**细节**
  - 每个过程/函数对外部提供的**抽象**则是其名字、参数、类型声明等

- **活动树**(activation tree)：程序运行的过程活动可以用树表示
  - 每个结点对应于一个过程活动
  - 根结点对应于主过程(或入口过程)的活动
  - 过程 p 的某次活动对应的结点的所有子结点：此次活动所调用的各个过程活动(从左到右，表示调用的先后顺序)

活动树示例

问：前序遍历和后序遍历分别对应什么？

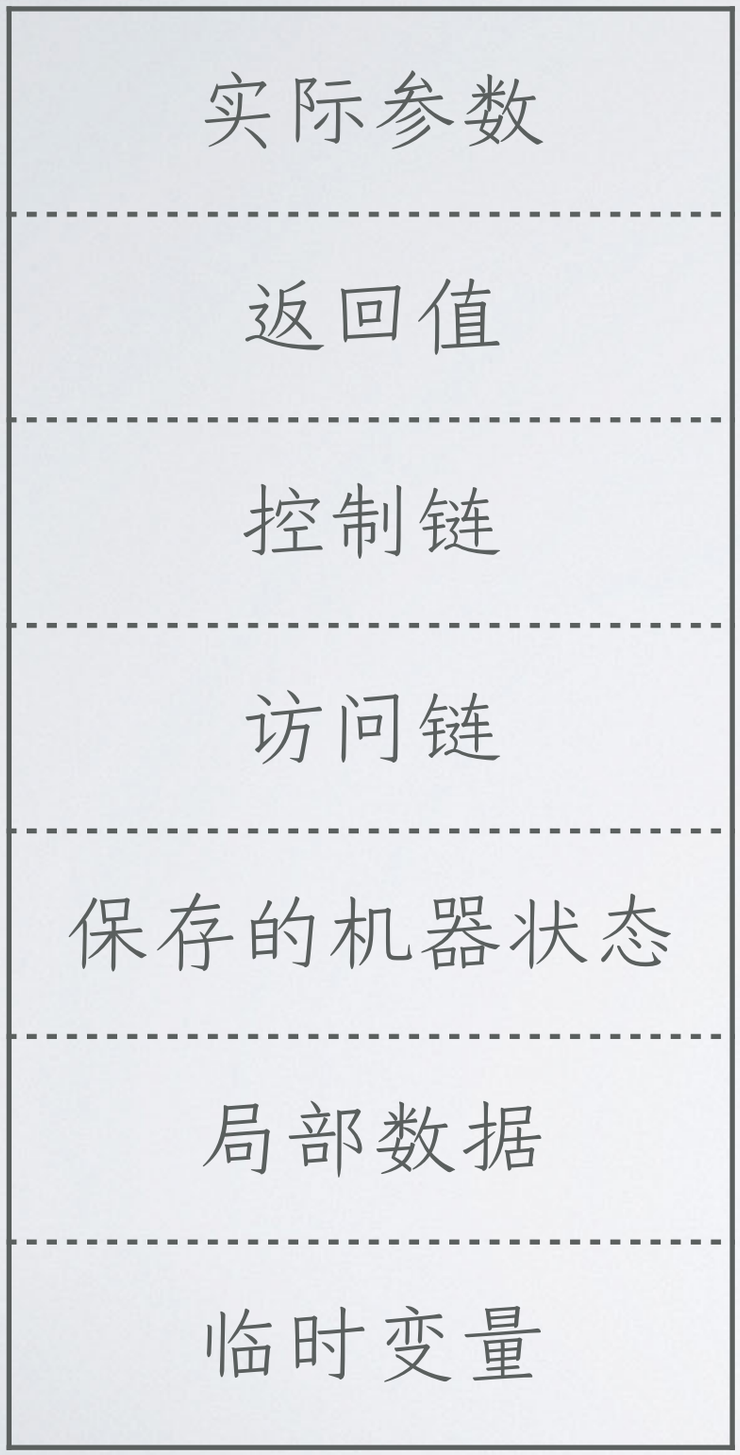



```
enter main()
  enter readArray()
  leave readArray()
  enter quickSort(1,9)
    enter partition(1,9)
    leave partition(1,9)
    enter quickSort(1,3)
      …
    leave quickSort(1,3)
    enter quickSort(5,9)
      …
    leave quickSort(5,9)
  leave quickSort(1,9)
leave main()
```

活动记录

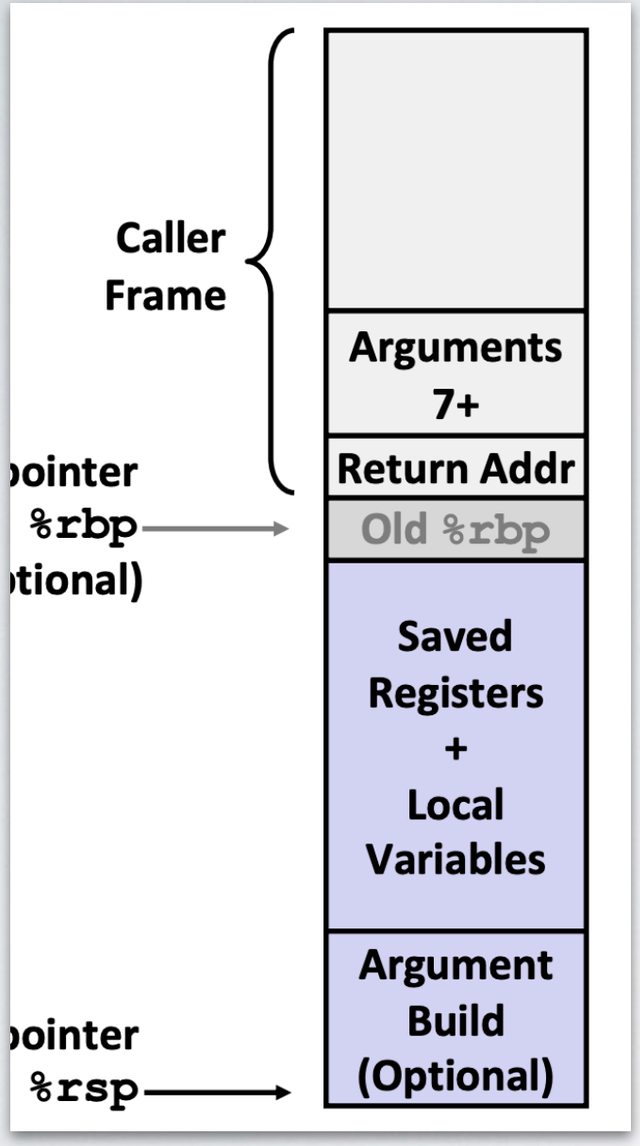
- 子程序(过程或函数)的一次运行(由于被调用而引发),称为子程序的一次**活动(activity)**
- 子程序运行时所用到的局部信息(比如局部变量)存储在一个地址连续的存储块内,这个存储块称为**活动记录(activation record)**,又称**帧(frame)**
- 本地运行:
  - 现代体系结构通常提供**栈式**活动记录管理,比如 x86、RISC-V 等
    - **栈帧(stack frame)**
- 虚拟机运行:
  - 虚拟机自身通过数据结构进行**栈式或堆式**管理,比如 Java、Lua 等

活动记录的结构



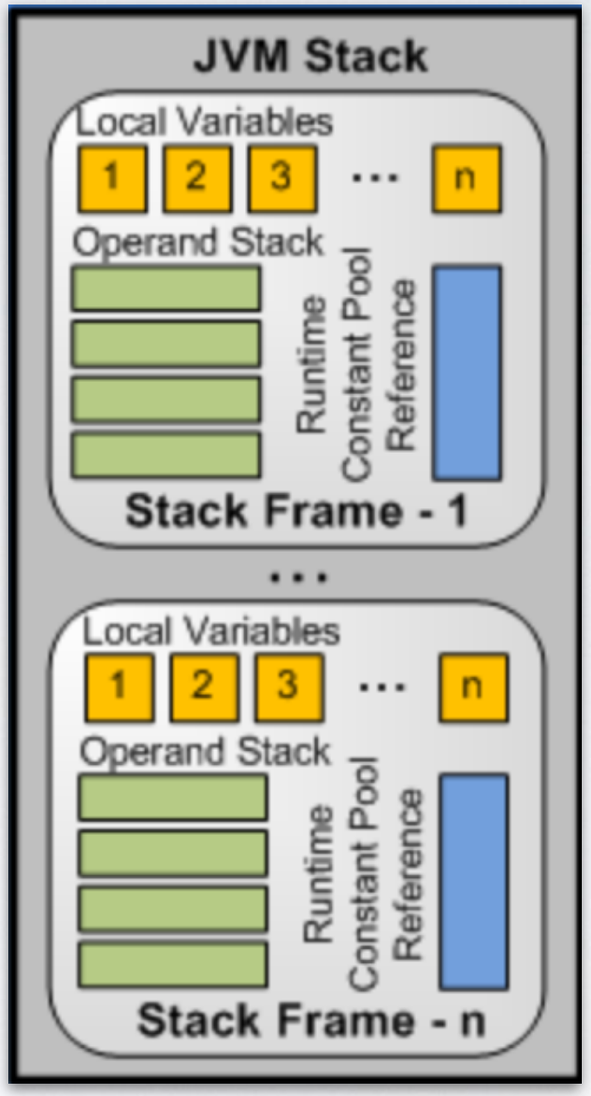
- **保存的机器状态:** 此次调用之前的机器状态信息，包括**返回地址**
- **局部数据:** 过程中声明和使用的局部变量
- **临时变量:** 中间代码或目标代码生成时产生的临时值
- **控制链:** 指向调用者的活动记录
- **访问链:** 指向过程中要访问的**非局部数据**所在的活动记录
  - 后续考虑在专题中讲

案例：本地运行和虚拟机运行的帧



- 前 6 个参数通过寄存器传递，更多的则放在调用者的栈帧里
- 返回地址也放在调用者的栈帧里
- 返回值通过寄存器传递
- 当前栈帧可能存放的 Old %rbp 可认为是实现了控制链

x86-64/Linux

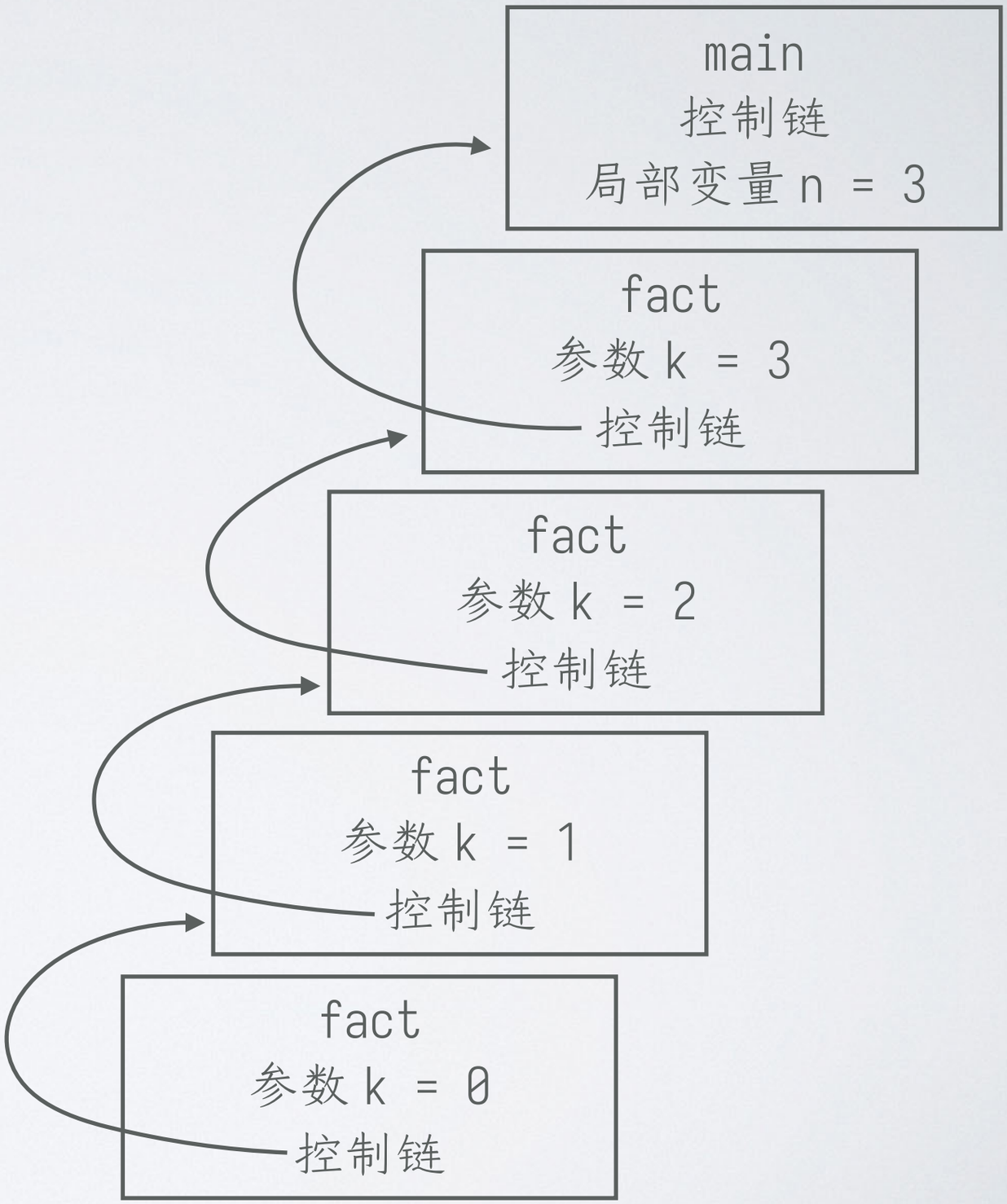


- JVM 没有寄存器，运算通过栈帧中的操作数栈(operand stack)进行
- 返回值会在返回后压入调用者的操作数栈
- 栈帧中还存储了一些跟动态链接相关的数据结构

Java VM

活动记录示例

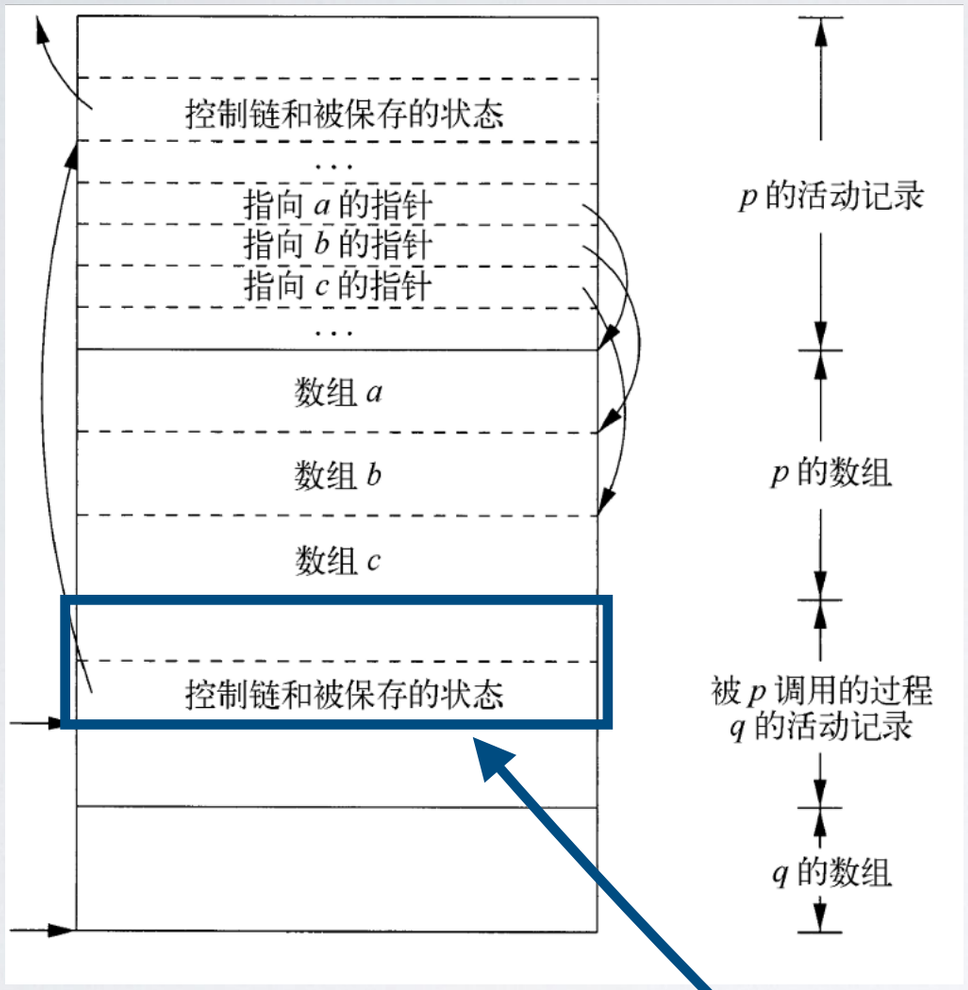
```
int fact(int k) {
  if (k == 0)
    return 1;
  else
    return k * fact(k - 1);
}

void main() {
  int n;
  printf("Enter a number:");
  scanf("%d", &n);
  printf("Results = %d\n",
         fact(n));
}
```



活动记录指针

- 运行时环境中通过**活动记录指针**(activation-record pointer)指向正在运行的当前过程的活动记录
- 可以设计 ARP 为指向活动记录中**固定长度**数据的末端
  - 编译器可静态计算得出长度
  - 生成的代码可以根据相对 ARP 的偏移来获取这些数据(比如参数、控制链等)
- 这样的设计也支持运行时**动态确定局部数据的长度**

栈帧中的变长局部数据



栈式活动记录管理：运行时环境通常会维护一个栈顶指针 **TOP**

- 如果数据对象的生命周期局限于过程活动的生命周期，就可以分配在运行时刻栈中
- **变长数组**也可以放在栈中
- **问：**被调用过程 q 返回时，如何恢复调用过程 p 对应的 **ARP** 和 **TOP** 指针？
  - **ARP**：读取控制链存放的指针
  - **TOP**：把（未恢复的）**ARP** 与被调用过程 q 的**固定长度字段**的长度相加

数据的存储与访问

常量、全局变量的存储与访问

- 运行时环境中开辟一块存储空间来存取这些数据
- 虚拟机可以维护常量表，并设计读取常量表的指令
- RISC-V 支持 .data 段放全局变量，并配合 la/lw/sw 等指令进行存取

过程活动中局部变量的存储与访问

- 活动记录中的局部数据块可用于存储局部变量的数据
- 虚拟机可以在活动记录中维护变量名到值的映射表，并设计读取局部变量表的指令
- RISC-V、x86 等采取栈式活动记录管理，在栈上存储局部变量，访问可以通过相对 **ARP** 或 **TOP** 的偏移来进行

主要内容

- 运行时环境的作用
- 运行时环境的设计
- **运行时环境的实现**

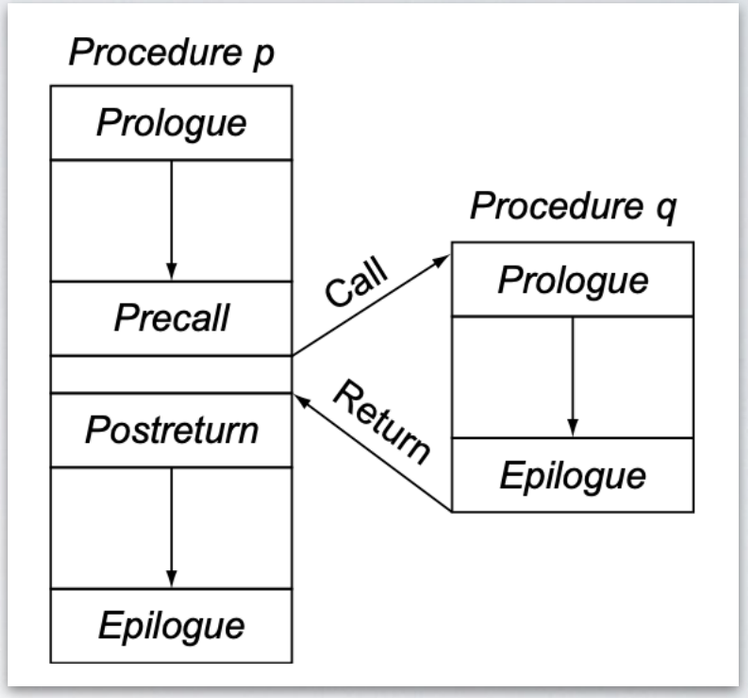
过程抽象的实现

- **问题：如何创建和维护活动记录？**
- 如果是实现虚拟机……
  - 你想怎么实现就怎么实现！
- 如果是需要生成目标代码？
  - **需要和操作系统和体系结构达成一致**
  - 在目标代码中插入指令实现运行时环境

- **总体策略：**
  - **调用代码序列：**调用者中的 precall 和被调用者的 prologue
  - **返回代码序列：**被调用者的 epilogue 和调用者中的 postreturn

过程链接

- **调用代码序列**：给被调用过程的活动记录分配空间，填写记录中的信息
  - 分割为 precall 和 prologue
- **返回代码序列**：释放被调用过程的活动记录，恢复机器状态，返回到调用过程中继续执行
  - 分割为 epilogue 和 postreturn
- 根据源语言、体系结构、操作系统的规定，可以有不同的分割方案
  - **如果调用者做得多**：生成的代码会比较长
    - 每处调用都需要重复生成
  - **如果被调用者做得多**：可能会有冗余的存储操作
    - 考虑被调用者保存(callee-saved)寄存器



一种调用代码序列的设计

- 调用者中的 precall：
  - 计算实际参数的值，并存入被调用者的活动记录
  - 保存机器状态信息(比如 caller-saved 寄存器)
  - 将返回地址和原来的 ARP 指针存入被调用者的活动记录，并更新 ARP 指向被调用者的活动记录
- 被调用者的 prologue：
  - 保存机器状态信息(比如 callee-saved 寄存器)
  - 初始化其局部数据并开始执行
- **问：上述过程与 x86-64/Linux 的规定有什么异同？**

一种返回代码序列的设计

- 被调用者的 epilogue：
  - 在自己的活动记录的返回值字段中放一个返回值
  - 利用保存的控制链和机器状态的信息，恢复 **ARP** 和其它相关状态(比如 callee-saved 寄存器)
  - 按照返回地址转移到调用者的代码之中
- 调用者中的 postreturn：
  - 从被调用者的活动记录中获取返回值
  - 利用保存的机器状态的信息恢复相关状态(比如 caller-saved 寄存器)
- **问：上述过程与 x86-64/Linux 的规定有什么异同？**

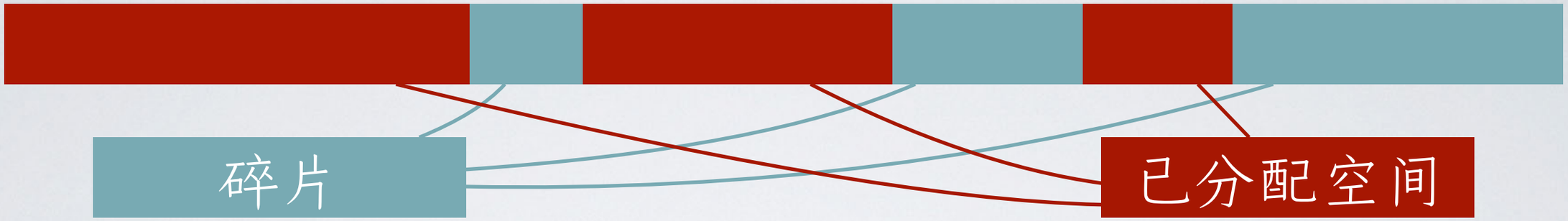
栈式存储管理的实现

- 如果是实现虚拟机……
  - 你想怎么实现就怎么实现！
- 如果是需要生成目标代码？
  - **现有的体系结构和操作系统基本都提供了方便的栈式存储管理**
  - 比如：RISC-V 的栈指针 sp、帧指针 fp，过程调用 call、返回 ret

堆式存储管理的实现

- 需要实现的基本功能：分配/回收堆区空间
  - **分配：**为每个内存请求分配一块连续的、适当大小的堆空间
    - 必要时请求操作系统增加堆空间
  - **回收：**把被回收的空间返回空闲空间缓冲池，以满足后续的内存请求
- 评价存储管理器的特性：
  - **空间效率：**使程序需要的堆空间最小，即减少**碎片**
  - **程序效率：**充分利用存储层次结构，提高效率
  - **额外开销：**使分配/回收内存的操作尽可能高效
- **问：程序效率和额外开销的区别是什么？**

堆空间的碎片问题



- 随着运行时分配/回收内存，堆区被逐渐割裂成为若干空闲存储块(「窗口」，hole)和已用存储块的交错
- 对于一个分配请求，通常是使用一个足够大的窗口的一部分，其余部分成为更小的窗口
- 对于一个回收请求，被释放的存储块被放回缓冲池，通常需要把连续的窗口**接合(coalesce)**成更大的窗口

堆存储分配策略

- 假设分配请求的大小为 N 字节
- **最佳适配(best-fit)**：把长度大于或等于 N 的空闲存储块中的长度最小者作为待分配块
- **首先适配(first-fit)**：把构成堆中的空闲存储块中第一个长度大于或等于 N 的作为待分配块
  - **下次适配(next-fit)**：从上次分配的位置开始寻找待分配块
- **最大适配(largest-fit)**：把长度大于或等于 N 的空闲存储块中的长度最大者作为待分配块
- **问：什么场景适合最大适配？**

人工存储管理的问题

- 内存泄漏(memory leak)
  - 一直未能删除不能被访问的数据

```
void f() {
  int *a = malloc(sizeof(int));
  return;
}
```

- 悬空指针解引用(dangling-pointer dereference)
  - 解引用已经被删除的数据

```
int *a = malloc(sizeof(int));
free(a);
…
int b = *a;
```

现代存储管理机制

- **静态机制**
  - 静态推导对象的生命周期(lifetime)、对象的所有者(ownership)等
  - RUST: Regions, Uniqueness, Ownership & Types (链接)
- **动态机制**
  - 智能指针(smart pointers)
  - **垃圾回收**
- 后续考虑在专题中讲

主要内容

- 运行时环境的作用
- 运行时环境的设计
- 运行时环境的实现

- **实践演示**

玩具语言

- C 语言，但只有主函数，只有 int 类型，只有直线代码

```c
int main() {
  int x = 10;
  int y = x + 1 * x;
  int z = x * (y + 1);
  return z % 66;
}
```

```c
int main() {
  int y;
  y = 1;
  int main;
  main = y + 1;
  return main;
}
```

```c
int main() {
  int a = 1;
  {
    a = a + 2;
    int a = 3;
    a = a + 4;
  }
  a = a + 5;
  return a;
}
```

```c
int main() {
  int a = 1;
  int b = a + 2;
  {
    b = a + b;
    {
      int a = 3;
      b = b + a;
      { int b = 1; }
      { return b; }
    }
    int b = 1;
  }
}
```

玩具语言的类三地址 IR

「纯」表达式

「三」地址指令

函数体是指令列表

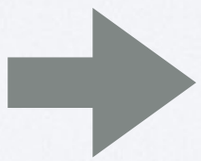
$$R ::= \texttt{id}(x) \mid \texttt{num}(i) \mid \texttt{add}(R_1, R_2) \mid \texttt{sub}(R_1, R_2) \mid \texttt{mul}(R_1, R_2)$$

$$I ::= \texttt{move}(x, R) \mid \texttt{div}(x, R_1, R_2) \mid \texttt{mod}(x, R_1, R_2) \mid \texttt{ret}(R) \mid \texttt{label}(\ell)$$

$$F ::= \texttt{func}(x, \vec{I})$$

$$P ::= \texttt{prog}(F)$$

```
prog(
 func(main,
  decl(x,
   seq(assign(x, 10),
       decl(y,
        seq(assign(y, x + (1 * x)),
            decl(z,
             seq(assign(z, x * (y + 1)),
                 ret(z % 66)))))))))
```



```
main:
// label("main")
x.1 <- 10
// move(x.1, num(10))
y.2 <- x.1 + (1 * x.1)
// move(y.2, add(id(x.1), mul(num(1), id(x.1))))
z.3 <- x.1 * (y.2 + 1)
// move(z.3, mul(id(x.1), add(id(y.2), num(1))))
%t.4 <- z.3 % 66
// mod(%t.4, id(z.3), num(66))
ret %t.4
// ret(id(%t.4))
```

本讲小结

- 运行时环境的作用
  - 实现代码运行所需的存储组织和过程抽象
- 运行时环境的设计
  - 存储组织：纯静态存储管理、栈式存储管理、堆式存储管理
  - 过程抽象：活动记录、控制链
- 运行时环境的实现
  - 过程抽象：调用代码序列、返回代码序列、寄存器的保存和恢复
  - 栈式存储管理、堆式存储管理
- **后续可能讲的专题：**
  - **过程嵌套、闭包、垃圾回收、基于区域的存储管理等**

思考问题

- 为什么编译过程需要设计运行时环境?
- 运行时环境中需要保留和维护编程语言的哪些信息?
- 虚拟机考虑的代码形式通常都是线性的(比如各种字节码),这是为什么呢?可以设计成图状的代码形式吗?
- 虚拟机实现难度相对低,但是直接生成的目标机器代码的效率相对高,有没有什么方法可以结合两者的优点?
- 面向对象语言、函数式语言的运行时环境需要考虑哪些设计问题?你能想象出什么实现难点?
- 人工智能时代,是否能够面向机器学习代码设计虚拟机?