

Lecture 4.1

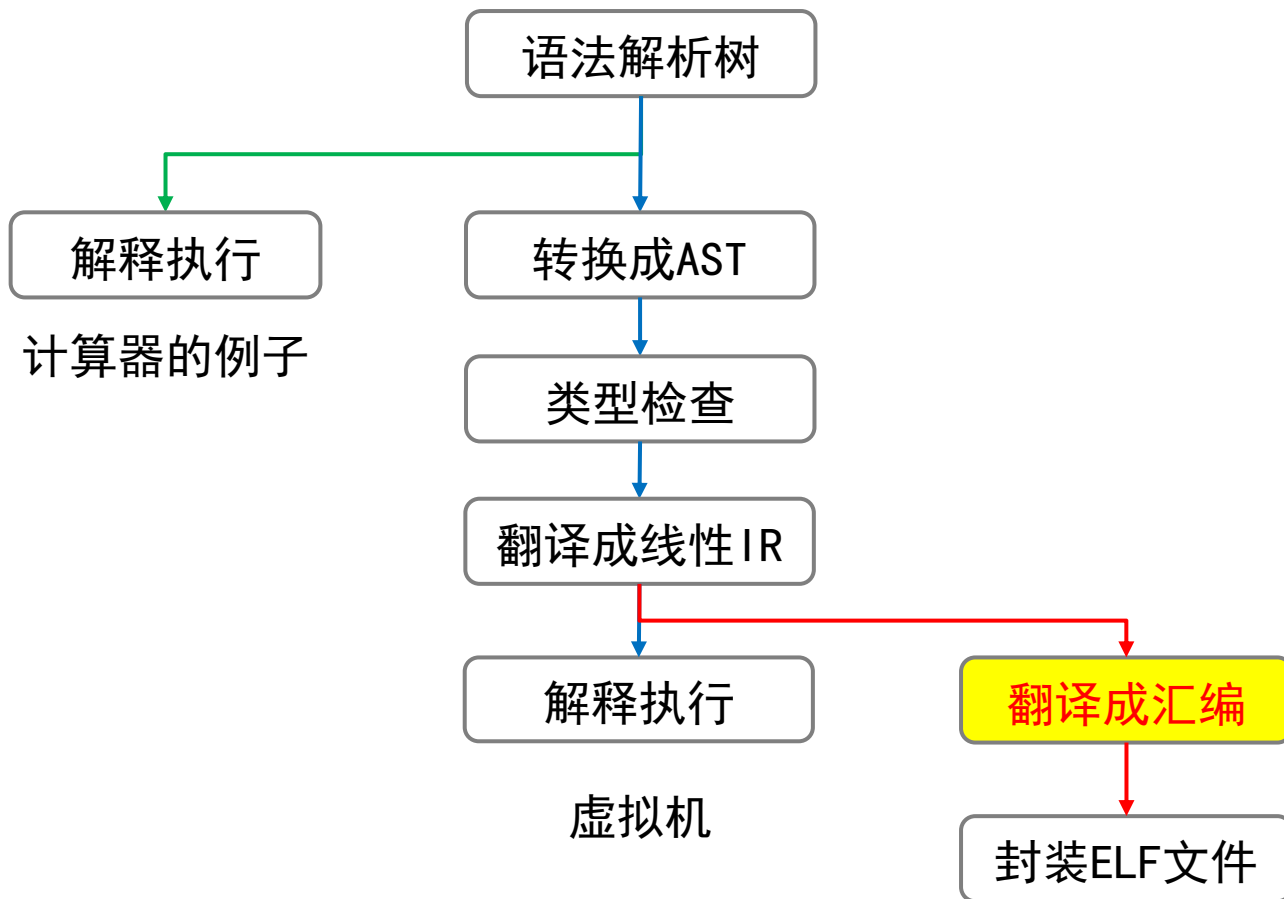
指令选择和调度

徐 辉

xuh@fudan.edu.cn



编译地图



大纲

- 一、指令集和汇编代码
- 二、指令选择和翻译
- 三、指令调度算法

IR => 汇编代码

- IR指令=>汇编指令
- 变量=>寄存器和栈

```
define i32 @foo(i32 %a, i32 %b) {  
    %a = stackalloc i32;  
    %b = stackalloc i32;  
    store i32 %-1, %a;  
    store i32 %-2, %b;  
    %1 = load i32 %a;  
    %2 = icmp ne i32 %1, 0  
    cjmp i1 %2, %BB1, %BB2  
  
%BB1 :  
    %3 = load i32 %b;  
    %4 = add i32 %3, 1  
    store i32 %4, %b  
    jmp %BB2  
  
%BB2:  
    %5 = load i32 %b;  
    ret i32 %5;  
}
```

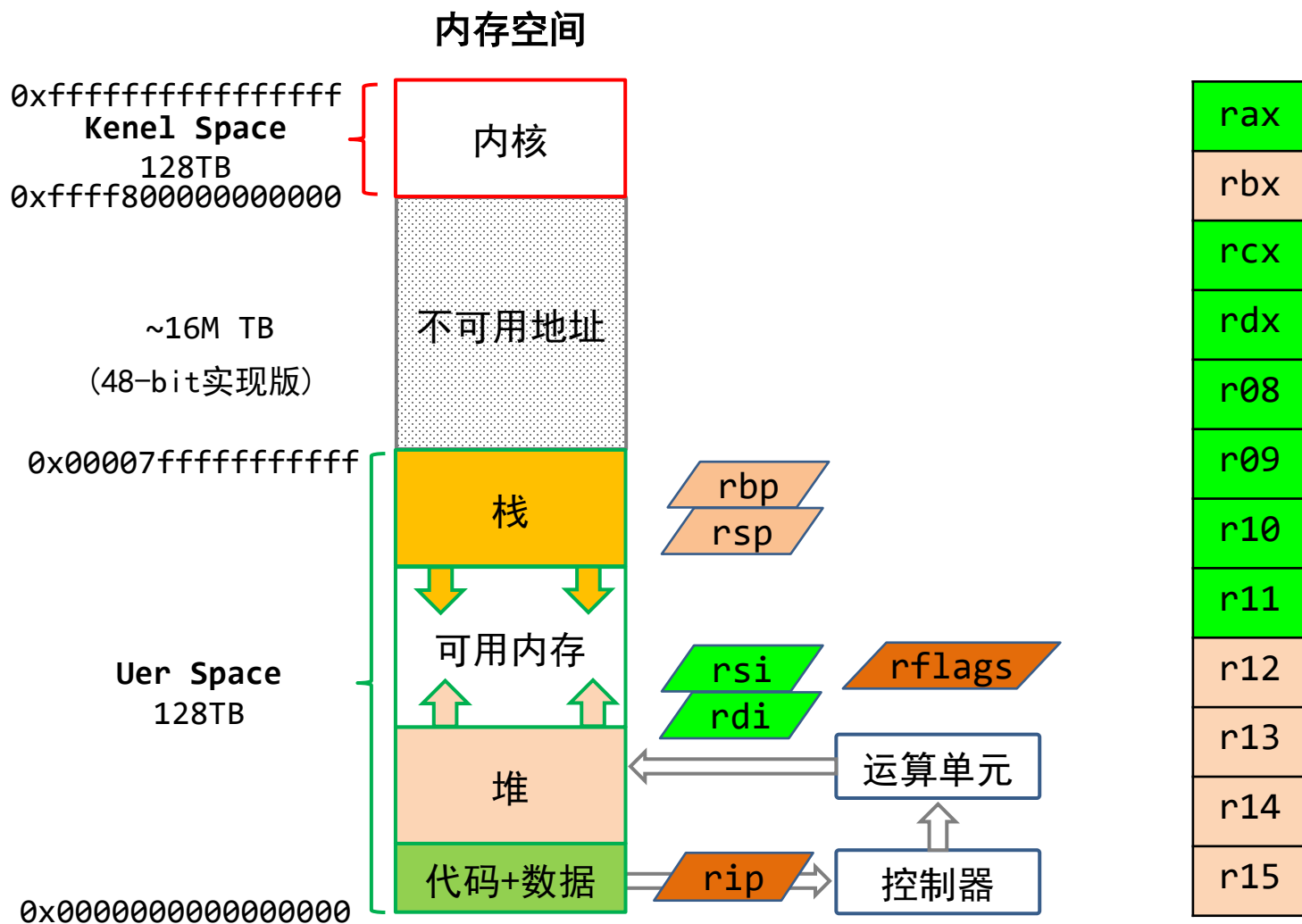


```
# %bb.0:  
    PUSHQ    %rbp  
    PUSHQ    %rsp, %rbp  
    MOVL     %edi, -4(%rbp)  
    MOVL     %esi, -8(%rbp)  
    CMPL     $0, -4(%rbp)  
    JE       .LBB0_2  
  
# %bb.1:  
    MOVL     -8(%rbp), %eax  
    ADDL     $1, %eax  
    MOVL     %eax, -8(%rbp)  
  
.LBB0_2:  
    MOVL     -8(%rbp), %eax  
    POPQ     %rbp  
    RETQ
```

指令集架构：Instruction Set Architecture

- 精简指令集（RISC）
 - 每条指令只做一件事
 - ARM、RISC-V
- 复杂指令集（CISC）
 - 一条指令可以包含多个底层操作（load-add-store）
 - X86(Intel IA-32)、X86-64架构（AMD64）
- 其它
 - VLIW: Very long instruction word (Intel IA-64)
 - EPIC: Explicitly parallel instruction computing

X86-64内存空间图解



寻址模式（AT&T风格）

- 直接寻址：MOVL 1, 0x604892
- 间接寻址：MOVL 1, (%eax)
 - 带位移：MOVL 1, -24(%rbp)
 - 地址 = %rbp-24
 - 带索引：MOVL 1, (%rbp, %rcx, 8)
 - 地址 = %rbp+%rcx*8
 - 带索引和位移的：MOVL \$1, 8(%rsp, %rdi, 4)
 - 地址 = %rbp+%rdi*4+8

不同的汇编语法风格

	AT&T 风格(Linux)	Intel风格(Windows)
寄存器前缀	<code>PUSHL %eax</code>	<code>PUSH EAX</code>
立即操作数	<code>PUSHL \$1</code>	<code>PUSH 1</code>
源目的顺序	<code>ADDL \$1, %eax</code>	<code>ADD EAX, 1</code>
操作数字长	<code>MOVB val, %al</code>	<code>MOV AL, byte ptr val</code>
寻址方式	<code>MOVL -4(%ebp), %eax</code> <code>MOVB \$4, %FS:(%eax)</code>	<code>MOV EAX, [EBP - 4]</code> <code>MOV FS:EAX, 4</code>

主要X86-64指令：二元运算

- 将参数一和参数二对应的值运算后保存到参数二中
 - 参数一可以是立即数、寄存器或内存地址
 - 参数二可以是寄存器或内存地址
 - 两个参数不能同时是内存地址
- 主要指令
 - 四则运算：ADD/SUB/IMUL/MUL/IDIV/DIV/...
 - 除法运算借助rax寄存器，只需要1个参数
 - 位运算：AND/OR/NOT/XOR
 - 位移运算：SHL/SHR/SAR
 - 浮点数运算有单独的指令集（X87/SSE）

```
ADD src, dst  
AND src, dst  
SHL count, dst
```

主要X86-64指令：数据拷贝

- MOV：将数据从一个地址拷贝到另外一个地址
 - 参数可以是立即数、寄存器、或内存地址
 - 两个参数不能同时是内存地址

- 等量内容拷贝：

- MOVB：1 byte
- MOVW：2 bytes
- MOVL：4 bytes
- MOVQ：8 bytes

```
MOV $0, %eax
```

```
MOV 8(%rsp), %eax
```

← 对应IR load

```
MOVB %al, 0x409892
```

← 对应IR store

- 拷贝到大空间：

- MOVZBL：将1字节内容拷贝到4字节空间，使用0填充
- MOVSBL：将1字节内容拷贝到4字节空间，符号扩展

主要X86-64指令：取地址

- LEA：将参数一的地址保存到参数二中。

```
LEA 0x20(%rsp), %rdi
```

```
# %rdi = %rsp + 0x20
```

```
LEA (%rdi,%rdx,1), %rax
```

```
# %rax = %rdi + %rdx
```

对应IR `getptr`

主要X86-64指令：比较和跳转

- 比较指令：CMPL/TEST，改写EFLAGS中对应的标志位

- ZF: zero flag
- SF: sign flag
- OF: overflow flag, signed
- CF: carry flag, unsigned

CMPL op2, op1

#op1-op2, 设置SF

TEST op2, op1

#op1&op2, 设置ZF

- 直接跳转：JMP

- 比较跳转：

- JE: ZF = 1
- JZ: ZF = 1
- JG: ZF = 0 and SF = OF
- JL: SF != OF
- JA: 无符号大于, CF=0 and ZF=0
- JB: 无符号小于, CF=1

- JNE: ZF = 0
- JNZ: ZF = 0
- JGE: SF = OF;
- JLE: ZF = 1, SF != OF
- JAE: 无符号大于等于, CF=0
- JBE: 无符号小于等于, CF=1 or ZF=1

其它与eflags标志位有关的指令

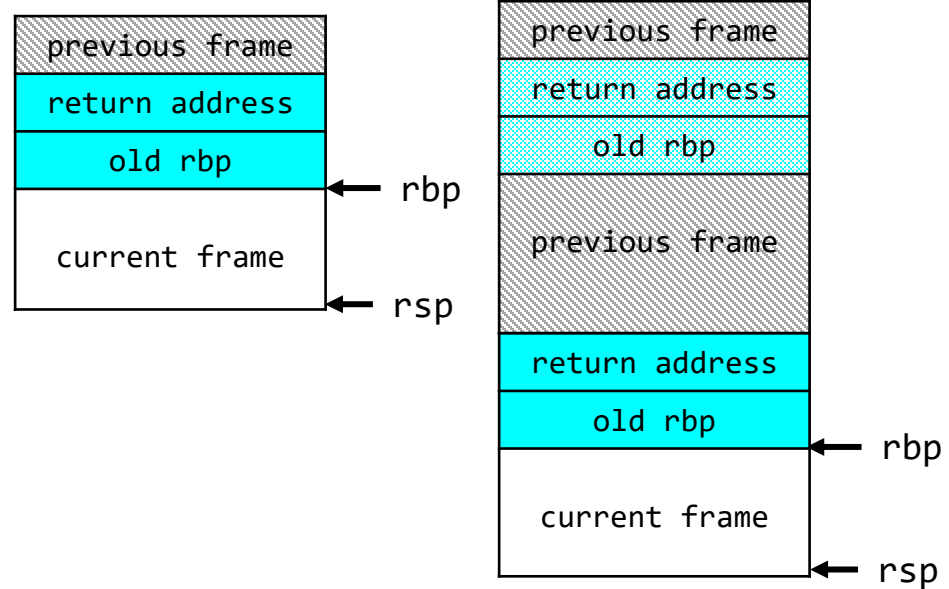
- 条件移动：
 - CMOV/CMOVNE/CMOVLE/CMOVL/CMOVZ/CMOVNZ/...
 - 源地址和目的地址必须都是寄存器
- 根据条件将目标寄存器设置0或1
 - SETE/SETNE/SETLE/SETL/SETZ/SETNZ/...
 - 寄存器只能是1byte的子寄存器，如al寄存器

```
SETE dst  
SETGE dst  
CMOVLE src, dst
```

调用规约 (System V AMD64 ABI)

```
PUSHQ    %rbp
MOVQ     %rsp, %rbp
SUBQ     $32, %rsp
MOVL     $0, -4(%rbp)
MOVL     %edi, -8(%rbp)
MOVQ     %rsi, -16(%rbp)
MOVL     $7, -20(%rbp)
MOVL     -20(%rbp), %edi
CALLQ    fibonacci
MOVL     %eax, -24(%rbp)
MOVL     -24(%rbp), %eax
ADDQ     $32, %rsp
POPQ     %rbp
RETQ
```

```
int main(int argc, char** argv){
    int n = 7;
    int r = fibonacci(n);
    return r;
}
```



- 参数传递使用的寄存器：
 - rdi/rsi/rdx/rcx/r8/r9
 - 超过6个放栈上
 - 浮点数参数使用xmm0-7
- 返回值使用的寄存器
 - rax/rdx (超过64bit)
 - 浮点数使用xmm0-1
- callee-saved寄存器
 - 用完必须还原
 - rbx/rbp/rsp/r12/r13/r14/r15

数据在内存中的管理

- 常量数据：放在数据区，可直访问
 - `int a[5] = {1,2,3,4,5}`
 - `char* s = "const chars"`
- 栈：函数中变量，函数退出自动销毁
 - `int i = 1;`
 - `int *j;`
 - `int a[5] = {1,2,3,4,5}`
 - `char* s = "const chars"`
- 堆：如malloc申请的空间，需主动free释放

例子

```
char *global_var = "global chars";
void mem(int x){
    int i = 1;
    int* j = &i;
    int a[] = {1,2,3,4,5};
    char *local_var = "local chars";
    local_var = global_var;
    int* k = (int *) malloc (sizeof(int));
    *k = 3;
}
```



```
PUSHQ    %rbp
MOVQ     %rsp, %rbp
SUBQ     $64, %rsp
MOVL     %edi, -4(%rbp)
MOVL     $1, -8(%rbp)
LEAQ     -8(%rbp), %rax
MOVQ     %rax, -16(%rbp)
MOVQ     .L__const.mem.a, %rax
MOVQ     %rax, -48(%rbp)
MOVQ     .L__const.mem.a+8, %rax
MOVQ     %rax, -40(%rbp)
MOVL     .L__const.mem.a+16, %ecx
MOVL     %ecx, -32(%rbp)
MOVABSQ  $.L.str.1, %rax
MOVQ     %rax, -56(%rbp)
MOVQ     global_var, %rax
MOVQ     %rax, -64(%rbp)
MOVL     $4, %edi
CALLQ    malloc
MOVQ     %rax, -64(%rbp)
MOVQ     -64(%rbp), %rax
MOVL     $3, (%rax)
ADDQ     $64, %rsp
POPQ     %rbp
RETQ
```


数据分布

```
PUSHQ    %rbp
MOVQ     %rsp, %rbp
SUBQ     $64, %rsp
MOVL     %edi, -4(%rbp)
MOVL     $1, -8(%rbp)
LEQA     -8(%rbp), %rax
MOVQ     %rax, -16(%rbp)
MOVQ     .L__const.mem.a, %rax
MOVQ     %rax, -48(%rbp)
MOVQ     .L__const.mem.a+8, %rax
MOVQ     %rax, -40(%rbp)
MOVL     .L__const.mem.a+16, %ecx
MOVL     %ecx, -32(%rbp)
MOVABSQ  $.L.str.1, %rax
MOVQ     %rax, -56(%rbp)
MOVQ     global_var, %rax
MOVQ     %rax, -64(%rbp)
MOVL     $4, %edi
CALLQ    malloc
MOVQ     %rax, -64(%rbp)
MOVQ     -64(%rbp), %rax
MOVL     $3, (%rax)
ADDQ     $64, %rsp
POPQ     %rbp
RETQ
```

```
.type    .L.str,@object          # @.str
.section .rodata.str1.1,"aMS",@progbits,1
.L.str:
.asciz   "global chars"
.size    .L.str, 13

.type    global_var,@object      # @global_var
.data
.globl   global_var
.p2align 3
global_var:
.quad    .L.str
.size    global_var, 8

.type    .L__const.mem.a,@object # @__const.mem.a
.section .rodata,"a",@progbits
.p2align 4
.L__const.mem.a:
.long    1                      # 0x1
.long    2                      # 0x2
.long    3                      # 0x3
.long    4                      # 0x4
.long    5                      # 0x5
.size    .L__const.mem.a, 20

.type    .L.str.1,@object        # @.str.1
.section .rodata.str1.1,"aMS",@progbits,1
.L.str.1:
.asciz   "local chars"
.size    .L.str.1, 12
```

函数调用和栈操作

- 函数调用：CALL/CALLQ
- 函数返回：RET/RETQ
- 入栈：PUSH/PUSHQ
 - 将参数如栈，同时修改%rsp地址
 - SUB \$0x04, %rsp
- 出栈：POP/POPQ
 - 将参数出栈，同时修改%rsp地址
 - ADD \$0x04, %rsp

交换指令

- 交换两个操作数：XCHG
 - 参数可以是2个寄存器或1个寄存器+1个内存地址
 - 原子操作
 - 用于实现锁
- 比较并交换操作数：CMPXCHG
 - 将al\ax\eax\rax中的值与首操作数比较：
 - 相等则将参数2的装载到参数1，zf置1；
 - 不等则参数1装载到al\ax\eax\rax，并将zf清0；
 - 实现原子操作需要lock前缀：lock cmpxchg

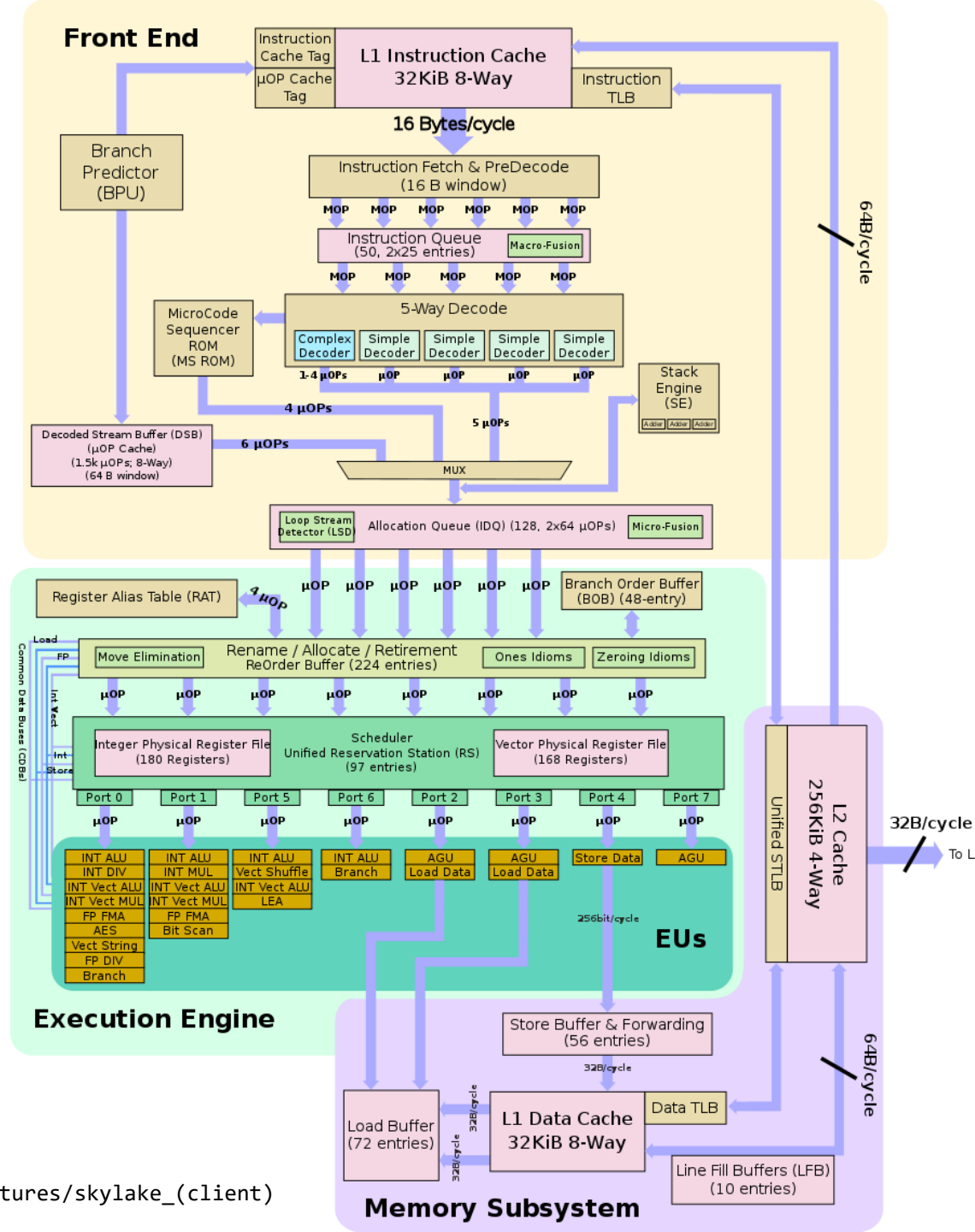
XCHG dst, src

```
int val = 1;
do{
    __asm__("xchg %0, %1" : "+q" (val), "+m" (count));
} while(val - count == 0)
```

指令执行时间开销 (SkylakeX)

	参数	时钟	参数	时钟	参数	时钟
MOV	r, r	0.25	m, r32/r64	0.5	r, m	1
LEA	m, r32/r64	0.5	m, r16	1		
ADD/SUB	r, r	0.25	m, r	0.5	r, m	1
AND/OR/XOR	r, r	0.25	m, r	0.5	r, m	1
SHL/SHR	i, r	0.5	i, m	2	cl, r	4
IMUL	r32	1	m32	2	r, r	1
MUL	r32	1	m32	2	r, r	
IDIV	r32	6	r64	24-90		
DIV	r32	6	r64	21-83		
SHL/SHR	i, r	1	i, m	2		
JMP	near/short	1-2	r	2	m	2
JE/JGE/JL	near/short	0.5-2				
CALL	near	3	r	2	m	3
RET		1	i	2		
PUSH	r/m/i	1				
POP	r	0.5	m	1	stack ptr	3
XCHG	r, r	1	m, r	20		

X86-64图解 (Skylake)



大纲

- 一、指令集和汇编代码
- 二、指令选择和翻译
- 三、指令调度算法

如何将中间代码翻译为汇编代码？

- 基本思路：模式匹配

```
define i32 @foo(i32 %a) {  
  %a = stackalloc(i32);  
  %1 = load i32 %a;  
  %2 = load i32, @gvar;  
  %3 = add i32 %1, %2  
  %4 = mul i32 %3, 2  
  ret i32 %4  
}
```



```
PUSHQ    %rbp  
MOVQ     %rsp, %rbp  
MOVL     %edi, -4(%rbp)  
MOVL     -4(%rbp), %eax  
ADDL     .gvar, %eax  
SHLL     $1, %eax  
MOVL     %eax, -8(%rbp)  
MOVL     -8(%rbp), %eax  
POPQ     %rbp  
RETQ
```

```
define void @bar(i64 %a) {  
  %a = stackalloc(i32);  
  %1 = load i32 %a;  
  %b = stackalloc [100 x i32];  
  %2 = getptr i32*, %b, %1;  
  store i32 99, %2;  
  ret void  
}
```



```
PUSHQ    %rbp  
MOVQ     %rsp, %rbp  
SUBQ     $288, %rsp  
MOVL     %edi, -4(%rbp)  
MOVSLQ   -4(%rbp), %rax  
MOVL     $99, -416(%rbp,%rax,4)  
ADDQ     $288, %rsp  
POPQ     %rbp  
RETQ
```

指令选择的目标和挑战

- 将IR代码翻译为功能等价的汇编代码
 - 性能：代码体积小，运行速度快
- 单条IR指令如何选择对应的汇编指令？
- 一组IR指令应如何分割或合并翻译？
- 不考虑CPU流水线、乱序执行等因素

load指令

IR指令模式	汇编指令	开销	备注
load(%1)	MOV (%1), %r	1	
load(%a)	MOV -a(%rbp), %r	1	
load(@a)	MOV i, %r	1	
load(add(%1,i))	MOV i(%1), %r	1	
load(add(%1,%2))	MOV %1(%2), %r	1	
load(add(mul(%1,i),%2))	MOV (%2,%1,i), %r	1	i=1/ 2/4/ 8
load(add(add(mul(%1,i),%2),j))	MOV j(%2,%1,i), %r	1	i=1/ 2/4/ 8
...			

store指令

IR指令模式	汇编指令	开销	备注
store(i,%a)	MOV i, -a(%rbp)	1	
store(i,add(%1,j))	MOV i, j(%1)	1	
store(i,add(mul(%1,i),%2))	MOV i, (%2,%1,i)	1	
store(i,add(add(mul(%1,j),%2),k))	MOV i, k(%2,%1,j)	1	
store(%1,%a)	MOV %1, -x(%rbp)	1	
store(%1,add(%2,j))	MOV %1, j(%2)	1	
store(%1,add(mul(%2,i),%3))	MOV %1, (%3,%2,i)	1	
store(%1,add(add(mul(%2,j),%3),k))	MOV %1, k(%3,%2,j)	1	
store(load(%1),%a)	MOV (%1), -a(%rbp)	1	
...			

add指令

IR指令模式	汇编指令	开销	备注
add(%1,%2)	MOV %1, %r ADD %2, %r	2	
	LEA (%1,%2), %r	1	
add(%1,i)	MOV %1, %r ADD i, %r	2	
	LEAL i(%1), %r	1	
add(load(%a),%1)	MOV -a(%rbp), %r ADD %1, %r	2	
add(load(%a),i)	MOV -a(%rbp), %r ADD i, %r	2	
add(load(%a),load(%b))	MOV -a(%rbp), %r ADD -b(%rbp), %r	2	
add(mul(%1,i),%2)	LEA (%2,%1,i), %r	1	i=1/2/4/8
add(add(mul(%1,i),%2),j)	LEA j(%2,%1,i), %r	1	i=1/2/4/8
...			

mul/div指令

IR指令模式	汇编指令	开销	备注
mul(%1,%2)	MOV %1, %r1 MOV %2, %r2 MUL %r2	5	低位: %r2 高位: %r1
mul(%1,i)	MOV i, %r1 MOV %1, %r2 MUL %r2	5	
div(%1,%2)	MOV %1, %r1 MOV 0, %r2 MOV %2, %r3 DIV %r3	10	商: %r1 余数: %r2
...			

一组IR指令的翻译问题

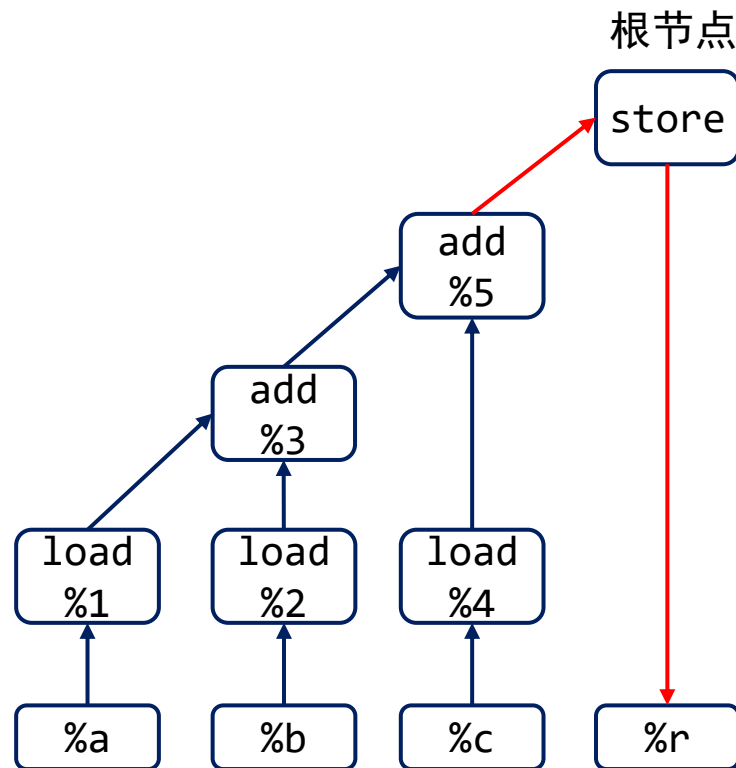
- 输入中间代码块
 - 表达式图：有向无环图DAG
- 输出汇编代码，性能目标：
 - 指令少
 - 运算快

IR=>DAG

- 将IR转换为表达式树
- 合并表达式树的共同节点得到表达式图DAG

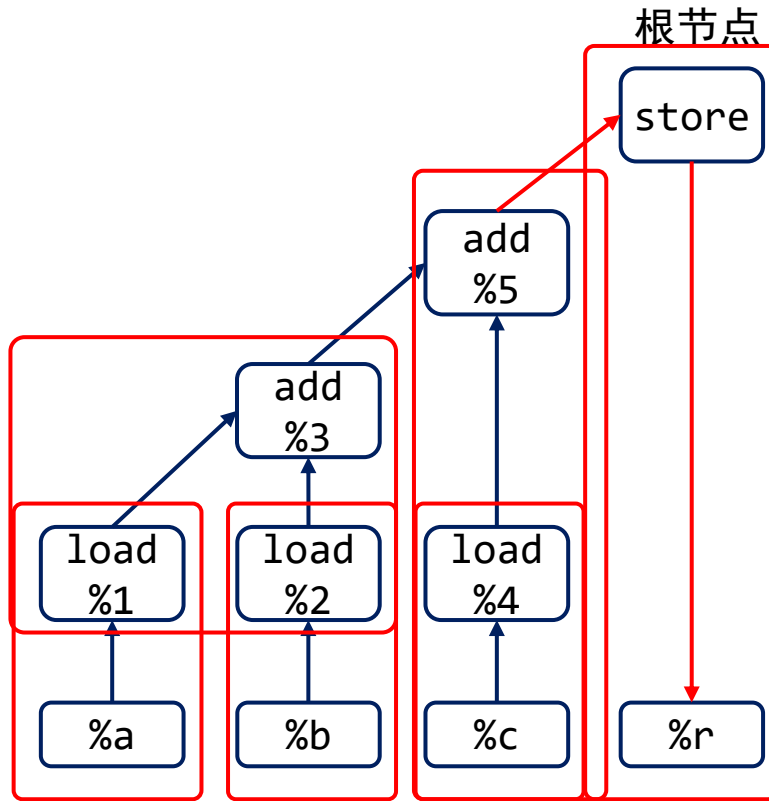
```
r = a + b + c;
```

```
%1 = load i32 %a;  
%2 = load i32 %b;  
%3 = add i32 %1, %2;  
%4 = load i32 %c;  
%5 = add i32 %3, %4;  
store i32 %5, %r;
```



表达式DAG

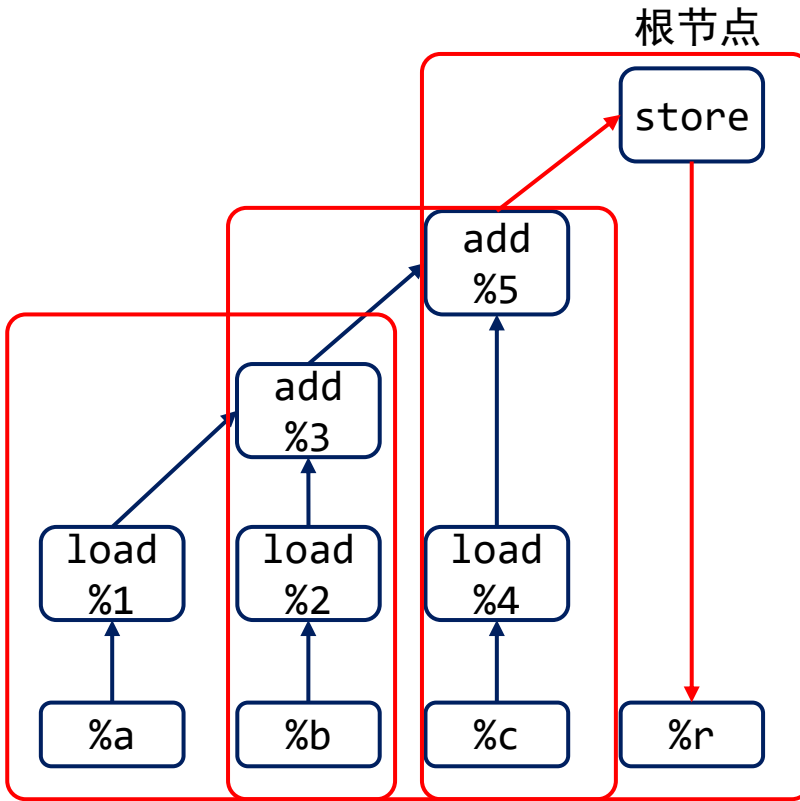
指令选择=>铺树问题



表达式DAG

```
MOV -a(%rbp), %r1
MOV -b(%rbp), %r2
ADD %r1, %r2
MOV -c(%rbp), %r3
ADD %r2, %r3
MOVE %r3, -r(%rbp)
```

指令选择=>铺树问题



表达式DAG

```
MOV -a(%rbp), %r1  
ADD -b(%rbp), %r1
```

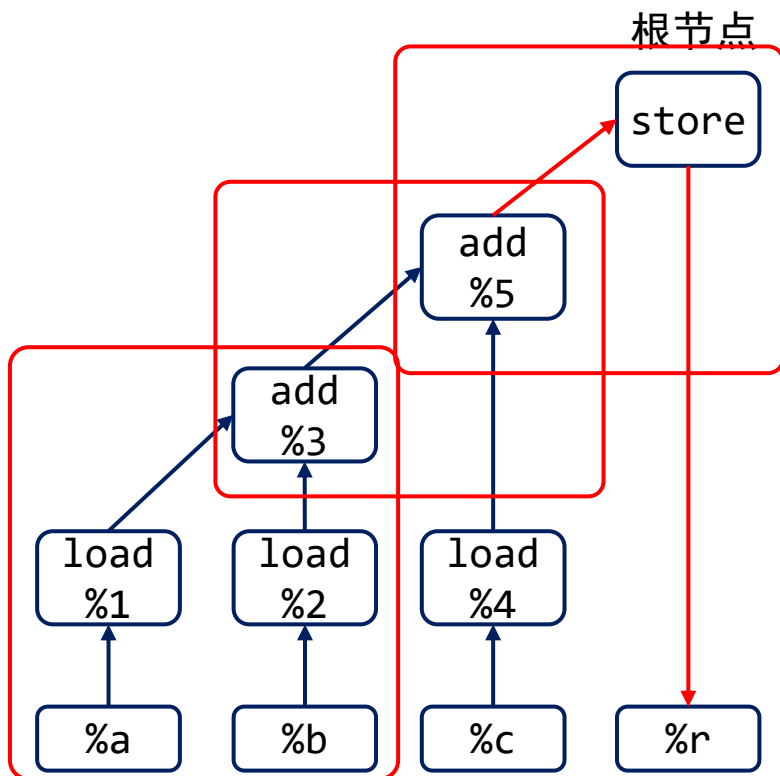
```
MOV -c(%rbp), %r2  
ADD %r1, %r2
```

```
MOV %r2, -r(%rbp)
```


铺树问题

- 如何铺树使得最终的汇编代码：
 - 体积小（指令数少）
 - 运算快
- 贪心算法：Maximal Munch
 - 从树根开始，每次选择覆盖节点最多、开销最低的规则
 - 逆序生成汇编指令
 - 局部最优
- 动态规划
 - 从树根开始，递归搜索每个节点的最优方案

Maximal Munch



表达式DAG

```
MOV -a(%rbp), %r1  
ADD -b(%rbp), %r1
```

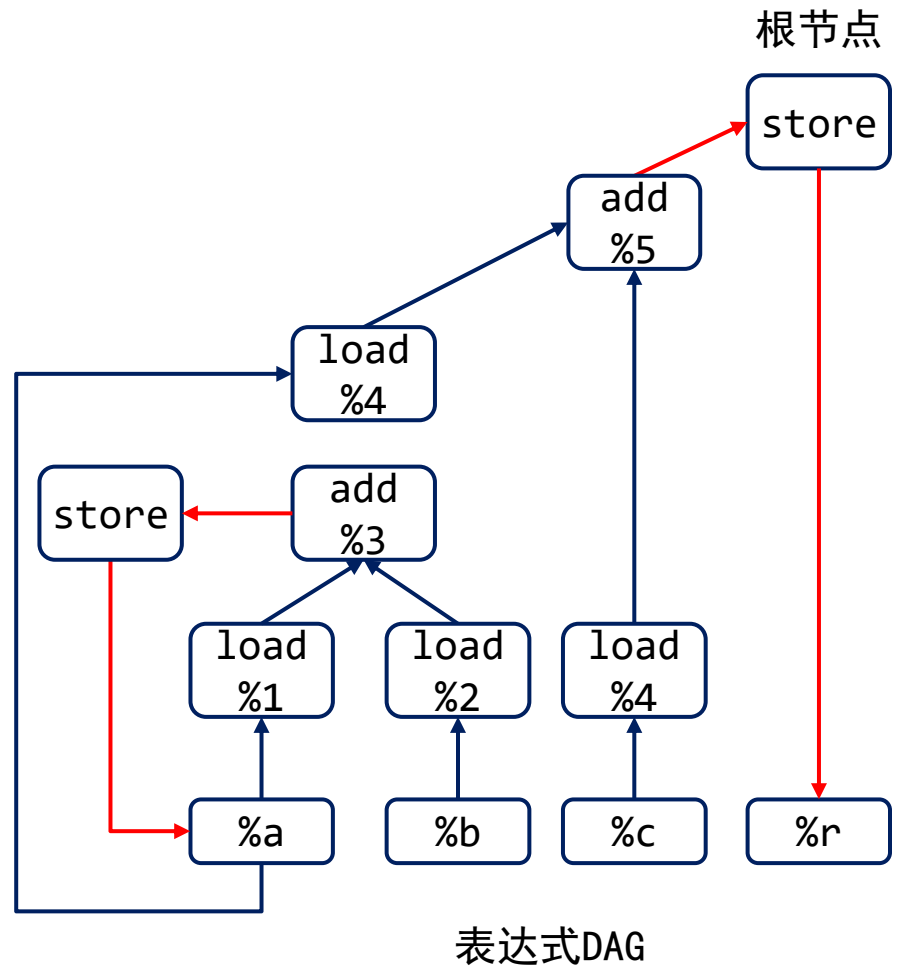
```
MOV -c(%rbp), %r2  
ADD %r1, %r2
```

```
MOV %r2, -r(%rbp)
```

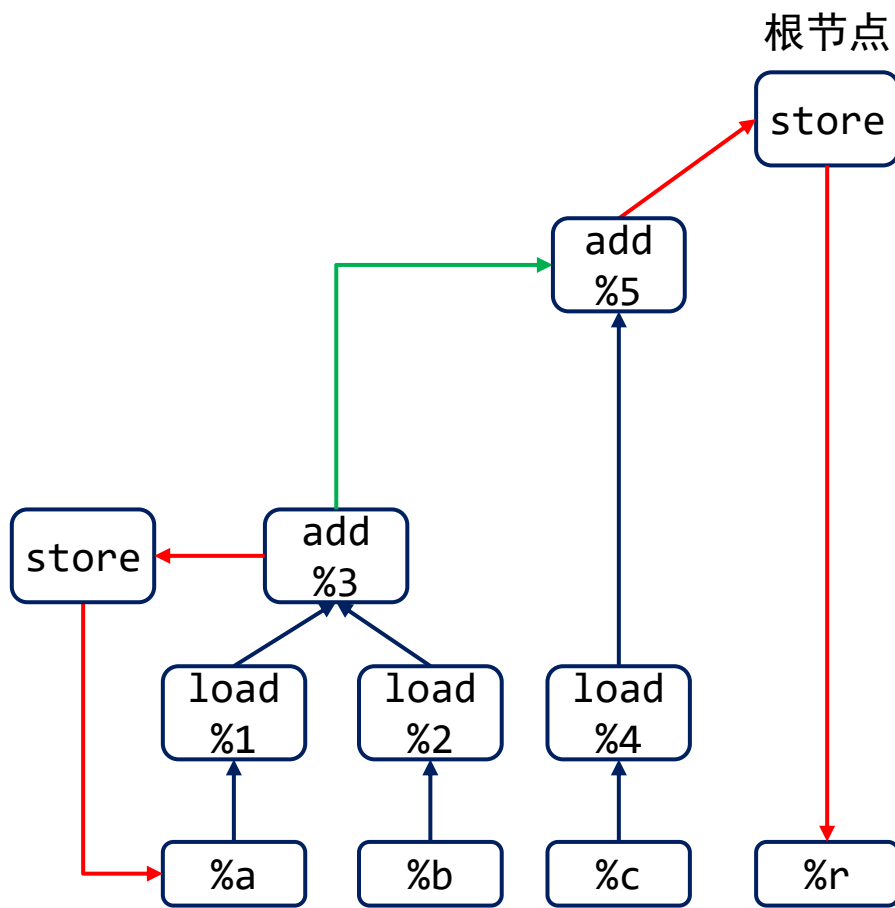
多个load的情况

```
a = a + b;  
r = a + c;
```

```
%1 = load i32 %a;  
%2 = load i32 %b;  
%3 = add i32 %1, %2;  
store i32 %3, %a;  
%4 = load i32 %a;  
%5 = load i32 %c;  
%6 = add i32 %4, %5;  
store i32 %6, %r;
```



多个load的情况



表达式DAG

控制流

```
if(a==0)
    a = a + b;
int r = a + c;
```

%BB0:

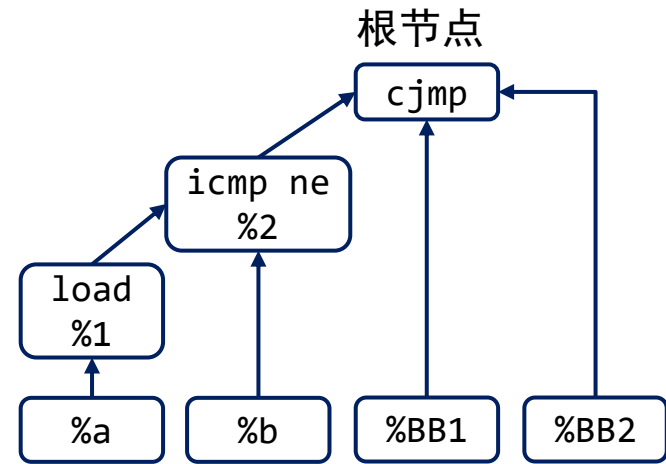
```
%1 = load i32, i32* %a;
%2 = icmp eq i32 %1, 0;
cjmp i1 %2, %BB1, %BB2;
```

%BB1:

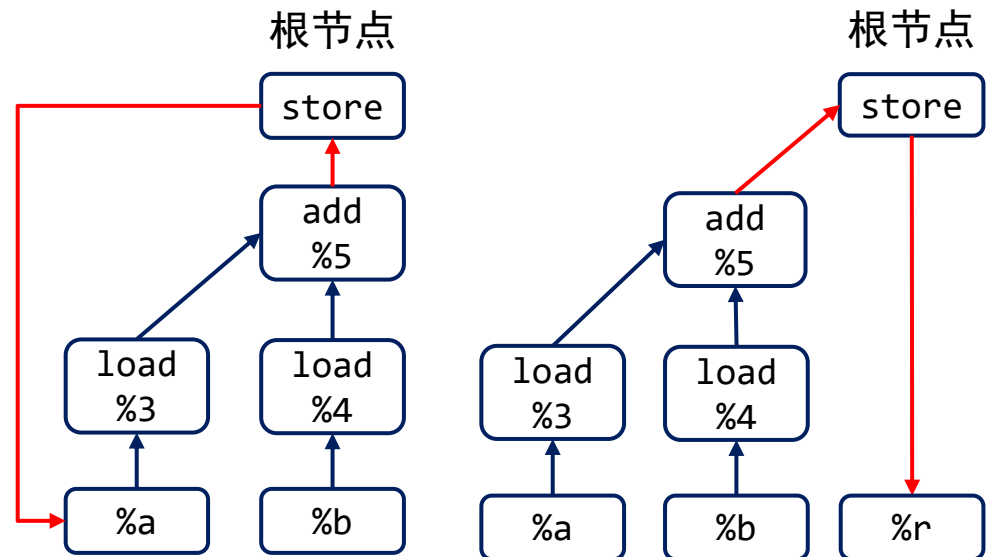
```
%3 = load i32, i32* %a;
%4 = load i32, i32* %b;
%5 = add i32 %3, %4;
store i32 %5, %a;
jmp %BB2;
```

%BB2:

```
%6 = load i32, %a;
%7 = load i32, %b;
%8 = add i32 %6, %7;
store i32 %8, %r;
```



%BB0表达式DAG



%BB1表达式DAG

%BB2表达式DAG

指针

```
int a[];  
int* b;  
...  
a[i] = *b;
```

```
%1 = load i32, %i;  
%2 = getptr i32* %a, %1;  
%3 = getptr i32* %b, 0;  
%4 = load i32 %3  
store i32 %4, %2;
```

IR指令模式	汇编指令	开销	备注
getptr i8* %a, %1;	MOV -a(%rbp), %r ADD %1, %r	2	
getptr i32* %a, %1;	MOV -a(%rbp), %r MUL %1, %r ADD %1, %r		
	MOV -a(%rbp), %r LEA (%r,%1,4), %r	2	
...			

大纲

- 一、指令集和汇编代码
- 二、指令选择和翻译
- 三、指令调度算法

指令调度问题

- 指令的执行时间与其执行顺序密切相关
 - 满足数据依赖
 - CPU并行处理能力
- 编译器的指令调度一般只考虑数据依赖关系
- 指令调度的目标：
 - 在单位时间内执行更多的操作
 - 使用更少的寄存器

流水线 (Instruction pipelining)

- 经典5-stage流水线
 - Instruction Fetch
 - Instruction Decode
 - Execute
 - Memory Access
 - Write Back

Stage	Clock Cycles					
	1	2	3	4	5	6
Fetch	ADD	SUB				
Decode		ADD	SUB			
Execute			ADD	SUB		
Access				ADD	SUB	
Write					ADD	SUB

ADD %r1, %r2
SUB %r1, %r3

数据依赖和乱序执行

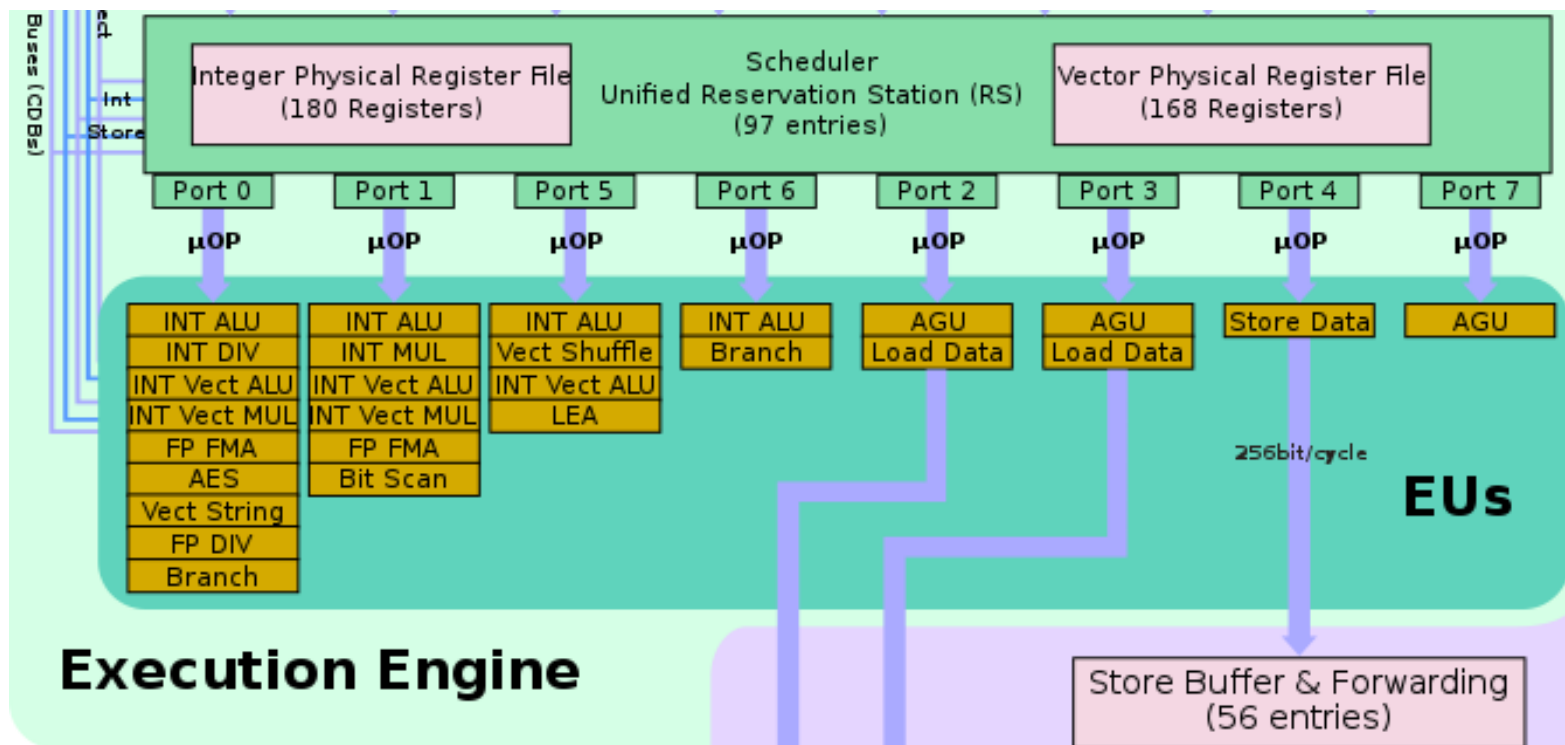
- 防止数据依赖造成的CPU空闲，可以优先执行后面的指令。
- CPU级别的指令调度机制

ADD %r1, %r2
SUB %r2, %r3
MUL %r1, %r4

Stage	Clock Cycles								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Fetch	ADD	SUB	MUL						
Decode		ADD	SUB	MUL					
Execute			ADD			SUB	MUL		
Access				ADD			SUB	MUL	
Write					ADD			SUB	MUL

超标量处理器 (superscalar)

- 指令级并行 (Instruction-level Parallel)
 - 一个周期可以分派多条指令
 - 流水线stages数量15~20
- 每个指令由多个微指令 (μOP) 组成
- 通过调度器和一组ports实现
 - 不同ports支持的微指令存在一定区别



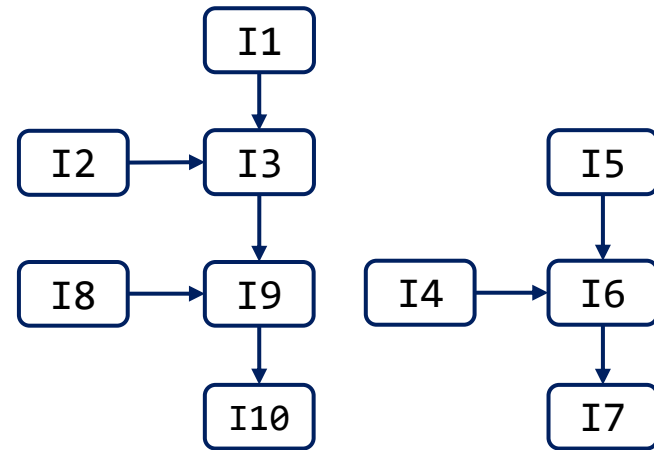
影响性能的因素

- 数据依赖关系 (data dependency)
 - 写-读依赖 (true-dependency)
 - 读-写反依赖 (anti-dependency)
- 结构性影响 (structural hazard)
 - 一条指令由多条微指令组成
 - 相邻指令的微指令可能会竞争ports的使用
- 控制流影响 (control hazard)
 - 条件跳转或分支预测

指令依赖关系

- 场景：单个程序块，无跳转指令
- 如果指令I2使用I1的结果，那么I2依赖I1
- 叶子节点没有任何依赖，可以尽早执行
 - I1、I2、I4、I7

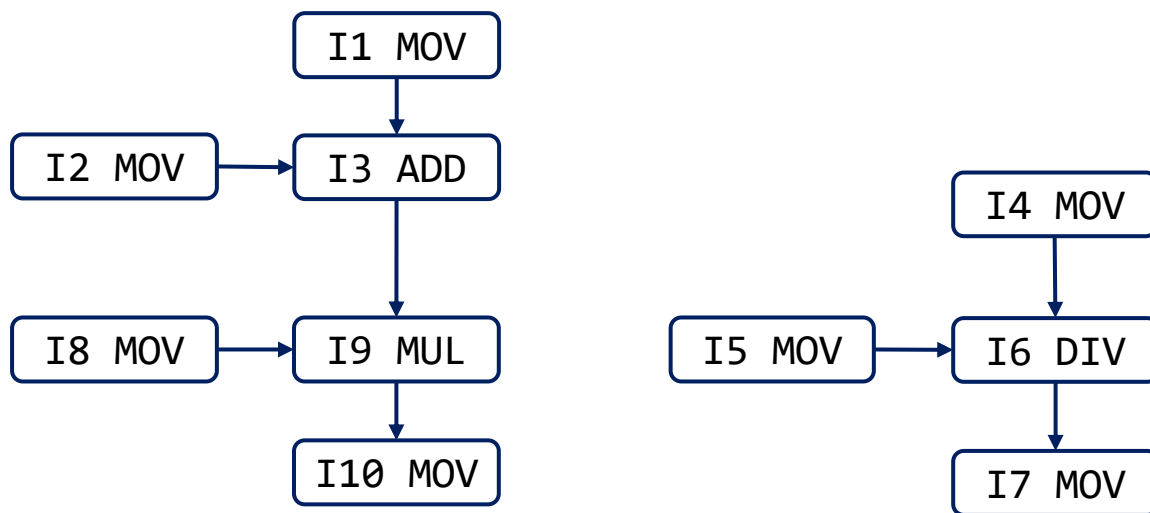
I1	MOV -12(%rsp), %r1
I2	MOV -16(%rsp), %r2
I3	ADD %r2, %r1
I4	MOV -20(%rsp), %r2
I5	MOV -24(%rsp), %eax
I6	DIV %r2, %eax
I7	MOV %eax, -24(%rsp)
I8	MOV -28(%rsp), %r2
I9	MUL %r1, %r2
I10	MOV %r2, -28(%rsp)



指令依赖关系

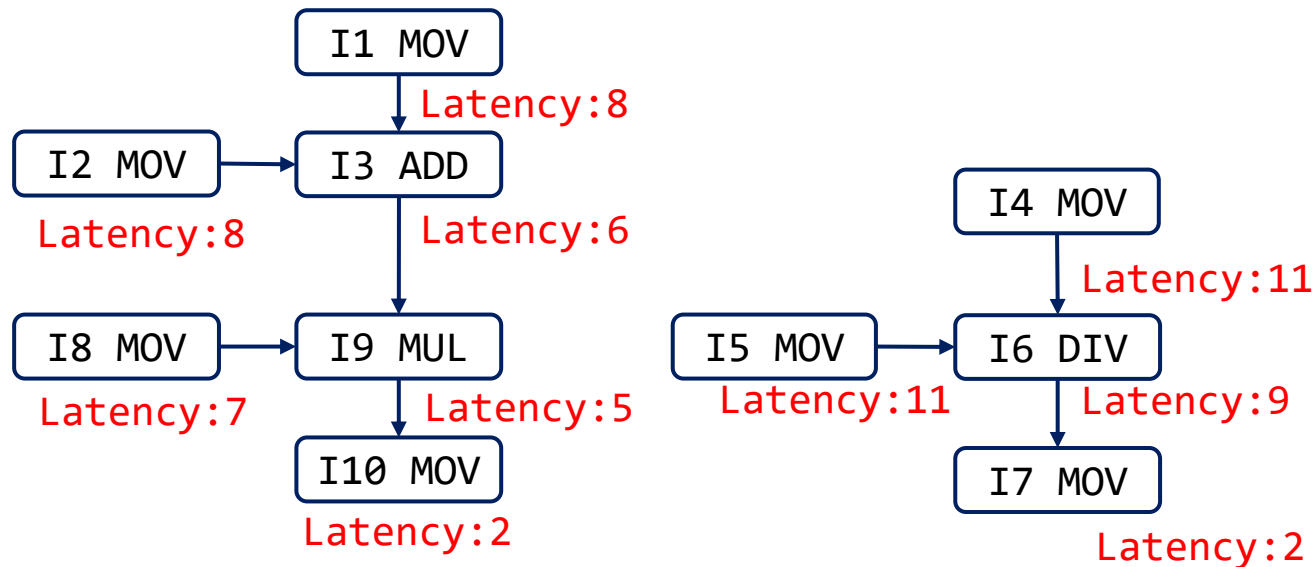
编译器的指令调度问题

- 假设每个cycle可以发射一条指令，多条指令可以并行
- 假设指令开销如下，应如何确定最佳的指令执行序列？
 - MOV 2
 - ADD 1
 - MUL 3
 - DIV 7
- 指令执行序列应满足指令依赖关系



指令调度思路

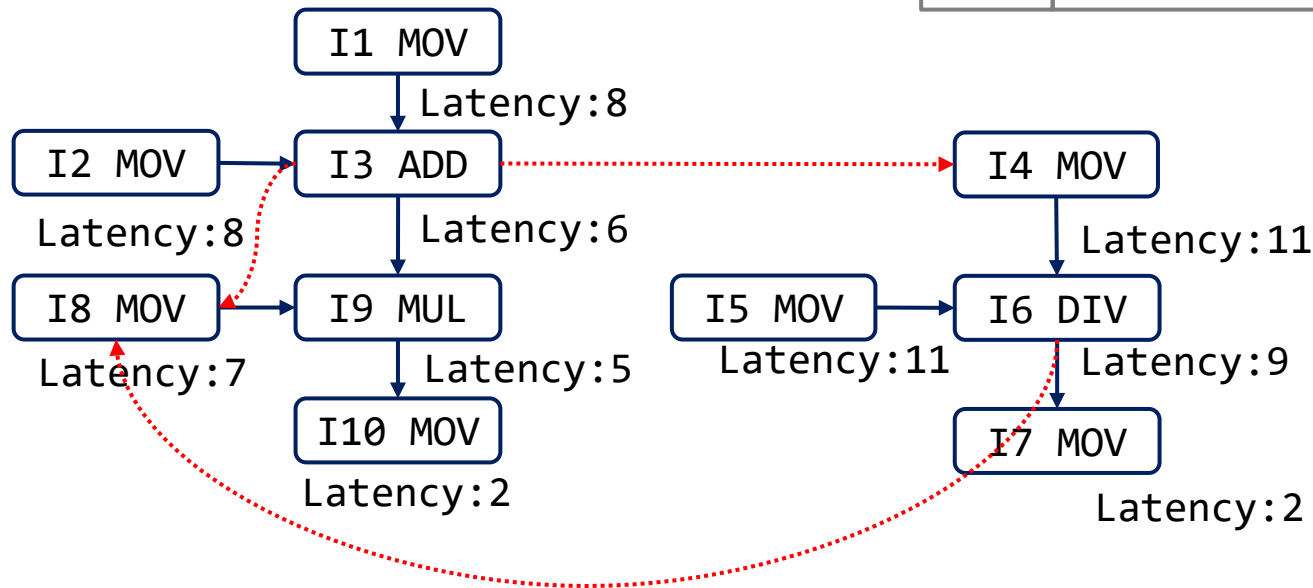
- 搜索需要尽早执行的关键指令
- 计算每条指令开始执行后，序列执行结束所需时间 (latency)
 - 假设 $i = v.next$, $L(v) = E_v + L(i)$
- 优先执行Latency大的指令
 - 根据latency从大到小对指令进行排序
 - $I4=I5 > I6 > I1=I2 > I8 > I3 > I9 > I7=I10$



读-写反依赖问题

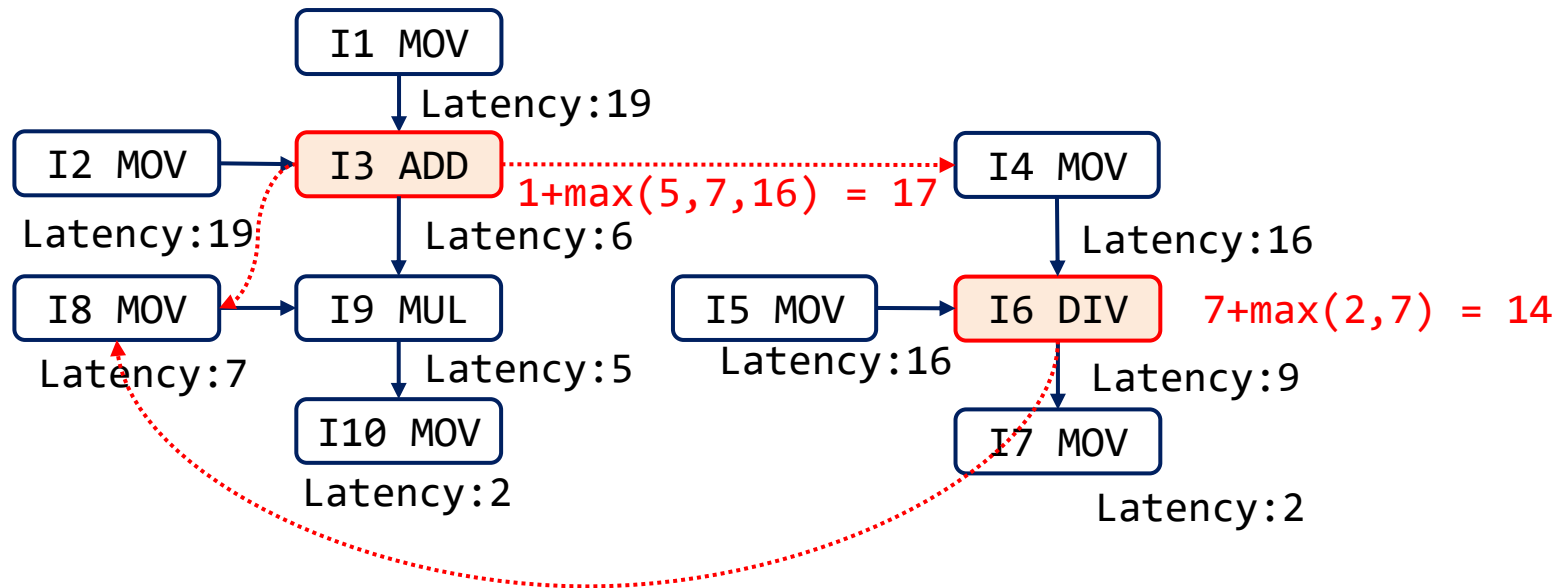
- I3执行完I4和I8才能执行
 - 否则会影响I3的计算结果
- I6执行完才能执行I8

I1	MOV -12(%rsp), %r1
I2	MOV -16(%rsp), %r2
I3	ADD %r2, %r1
I4	MOV -20(%rsp), %r2
I5	MOV -24(%rsp), %eax
I6	DIV %r2, %eax
I7	MOV %eax, -24(%rsp)
I8	MOV -28(%rsp), %r2
I9	MUL %r1, %r2
I10	MOV %r2, -28(%rsp)



更新Latency和执行序列

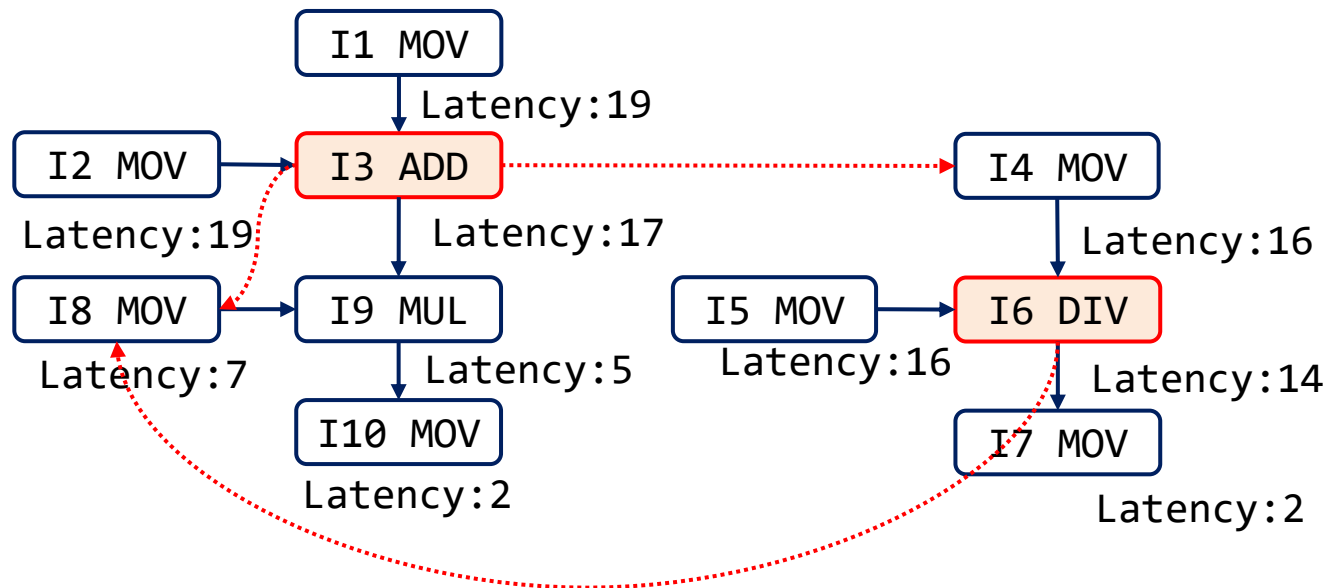
- $\forall i \in v.next, L(v) = E_v + \text{Max}(L(i))$
- 新序列: I1=I2>I3>I4=I5>I6>I8>I9>I7=I10



调度方案开销

- I1=I2>I3>I4=I5>I6>I8>I9>I7=I10
 - 开销: 21

开始	结束	指令	
1	2	I1	MOV -12(%rsp), %r1
2	3	I2	MOV -16(%rsp), %r2
4	4	I3	ADD %r2, %r1
5	6	I4	MOV -20(%rsp), %r2
6	7	I5	MOV -24(%rsp), %eax
8	14	I6	DIV %r2, %eax
15	16	I8	MOV %eax, -24(%rsp)
17	19	I9	MOV -28(%rsp), %r2
18	19	I7	MUL %r1, %r2
20	21	I10	MOV %r2, -28(%rsp)

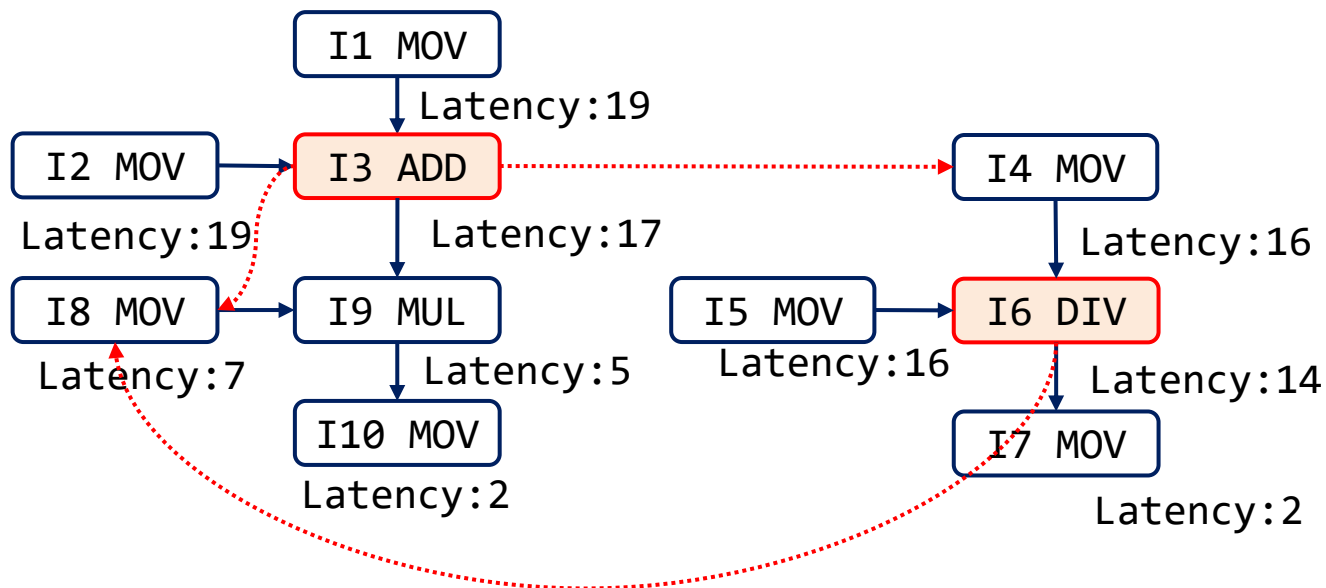


消除反依赖：重命名

I1	MOV -12(%rsp), %r1
I2	MOV -16(%rsp), %r2
I3	ADD %r2, %r1
I4	MOV -20(%rsp), %r2
I5	MOV -24(%rsp), %eax
I6	DIV %r2, %eax
I7	MOV %eax, -24(%rsp)
I8	MOV -28(%rsp), %r2
I9	MUL %r1, %r2
I10	MOV %r2, -28(%rsp)



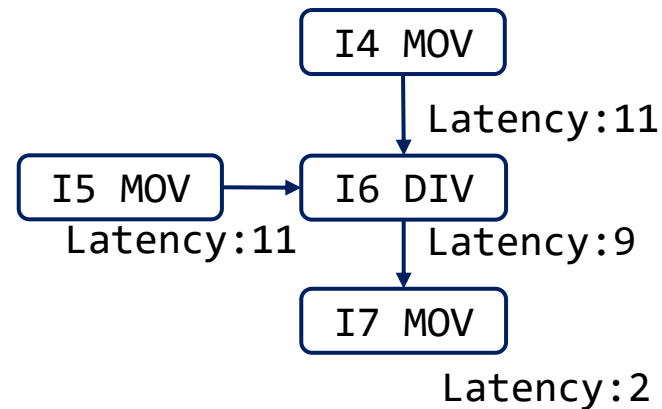
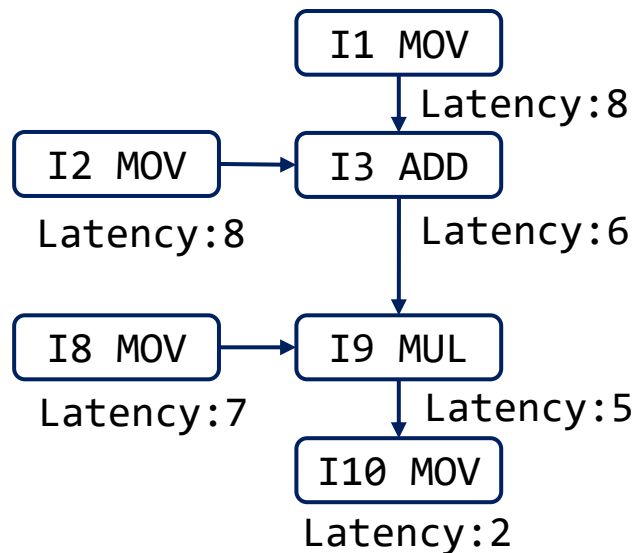
I1	MOV -12(%rsp), %r1
I2	MOV -16(%rsp), %r2
I3	ADD %r2, %r1
I4	MOV \$-20(%rsp), %r3
I5	MOV \$-24(%rsp), %eax
I6	DIV %r3, %eax
I7	MOV %eax, -24(%rsp)
I8	MOV -28(%rsp), %r4
I9	MUL %r1, %r4
I10	MOV %r4, -28(%rsp)



调度方案开销

- I4=I5>I6>I1=I2>I8>I3>I9>I7=I10
 - 开销: 14

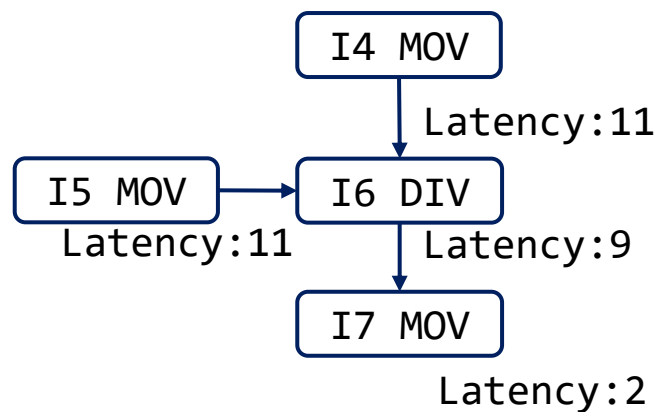
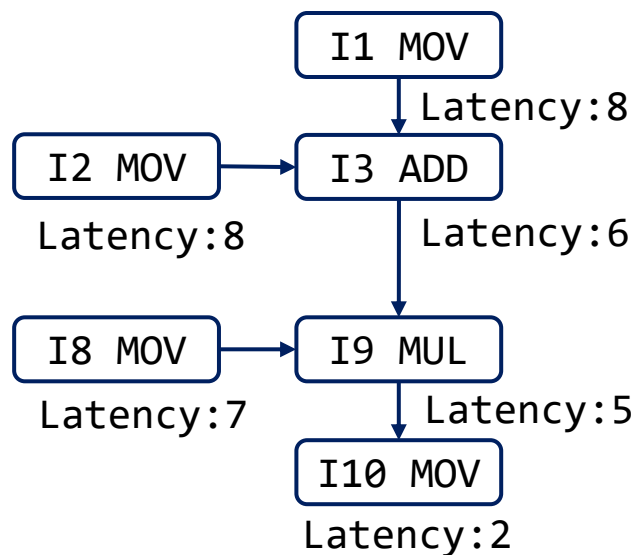
开始	结束	指令	
1	2	I4	MOV -20(%rsp), %r3
2	3	I5	MOV -24(%rsp), %eax
4	10	I6	DIV %r3, %eax
5	6	I1	MOV -12(%rsp), %r1
6	7	I2	MOV -16(%rsp), %r2
8	8	I3	ADD %r2, %r1
9	10	I8	MOV -28(%rsp), %r4
11	13	I9	MUL %r1, %r4
12	13	I7	MOV %eax, -24(%rsp)
13	14	I10	MOV %r4, -28(%rsp)



进一步优化

- 可尽早执行已经满足了依赖的指令
- I1和I6互换, I7和I9互换
 - 开销: 12

开始	结束	指令
1	2	I4 MOV -20(%rsp), %r3
2	3	I5 MOV -24(%rsp), %eax
4	10	I6 DIV %r3, %eax
5	6	I1 MOV -12(%rsp), %r1
6	7	I2 MOV -16(%rsp), %r2
8	8	I3 ADD %r2, %r1
9	10	I8 MOV -28(%rsp), %r4
11	13	I9 MUL %r1, %r4
12	13	I7 MOV %eax, -24(%rsp)
13	14	I10 MOV %r4, -28(%rsp)



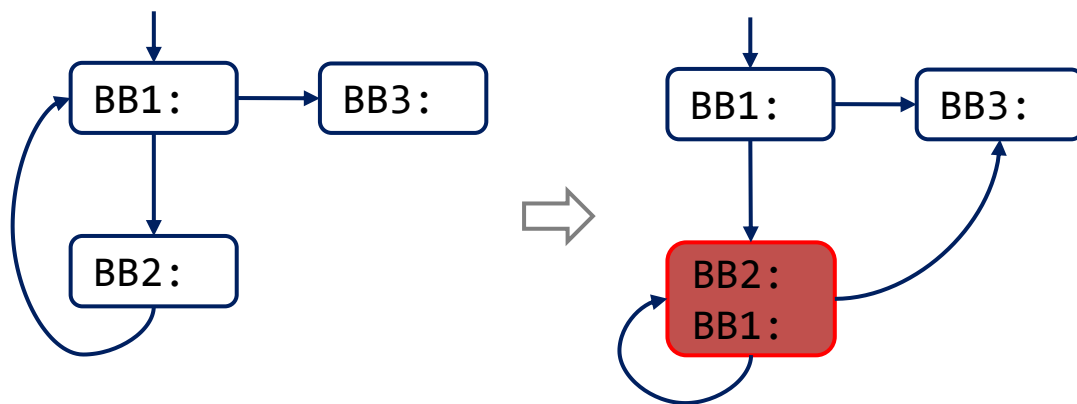
表调度算法

- 假设：
 - 线性代码
 - 无反依赖
- 两张表：
 - Ready表记录已满足数据依赖的指令
 - Active表记录正在执行的指令
- 算法：
 - 每个Clock尽量执行一条新的指令
 - 如果Active表有指令执行完成，将指令的next指令加入Ready

```
Clock = 1
Ready = {指令依赖图的所有叶子节点}
Active = {}
While (Ready  $\cup$  Active  $\neq \emptyset$ ){
    foreach I in Active {
        if Start(I) + Cost(I) < Clock {
            remove I;
            foreach C in I.next {
                if C isReady
                    Ready.add(C);
            }
        }
    }
    if (Ready  $\neq \emptyset$ ){
        Ready.remove(any I);
        Start(I) = Clock;
        Active.add(I);
    }
    Clock = Clock + 1;
}
```

算法局限性

- 局部优化：代码块内部，未考虑全局信息
- 跨代码块的指令调度？
 - 思路举例：复制代码块，牺牲程序体积，提升运行速度



总结

- 中间代码翻译为汇编代码
- 指令选择：铺树问题
- 指令调度：不破坏数据依赖重排指令