中山大學
SUN YAT-SEN UNIVERSITY

国家超级计算广州中心
NATIONAL SUPERCOMPUTER CENTER IN GUANGZHOU

DCS290

Compilation Principle

编 译 原 理

第六章 中间代码生成（1）

郑馥丹
zhengfd5@mail.sysu.edu.cn

CONTENTS

目 录

1. 中间代码生成[Intermediate Code Generation]

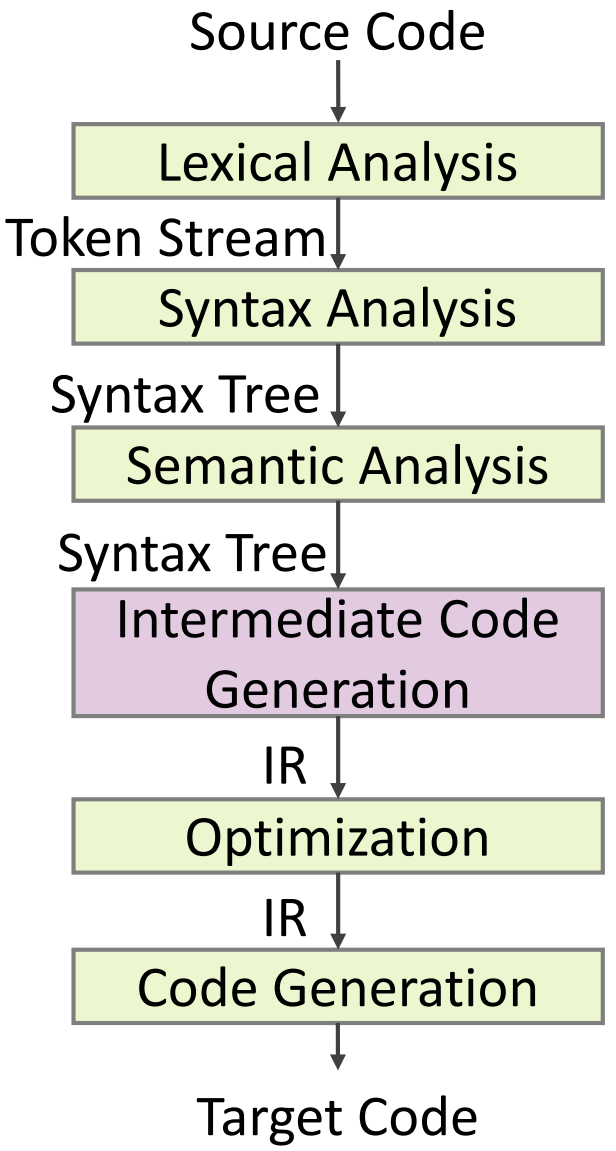
——从这里开始真正做翻译工作

- 初步翻译，生成**等价**于源程序的中间表示（IR）
  - 输入：语法树，输出：IR
  - 建立源和目标语言的桥梁，易于翻译过程的实现， 利于实现某些优化算法
  - IR形式：通常为**三地址码（TAC）**

```
void main()
{
    int arr[10], i, x = 1;

    for (i = 0; i < 10; i++)
        arr[i] = x * 5;
}
```

```
i := 0
loop:
    t1 := x * 5
    t2 := &arr
    t3 := sizeof(int)
    t4 := t3 * i
    t5 := t2 + t4
    *t5 := t1
    i := i + 1
    if i < 10 goto loop
```

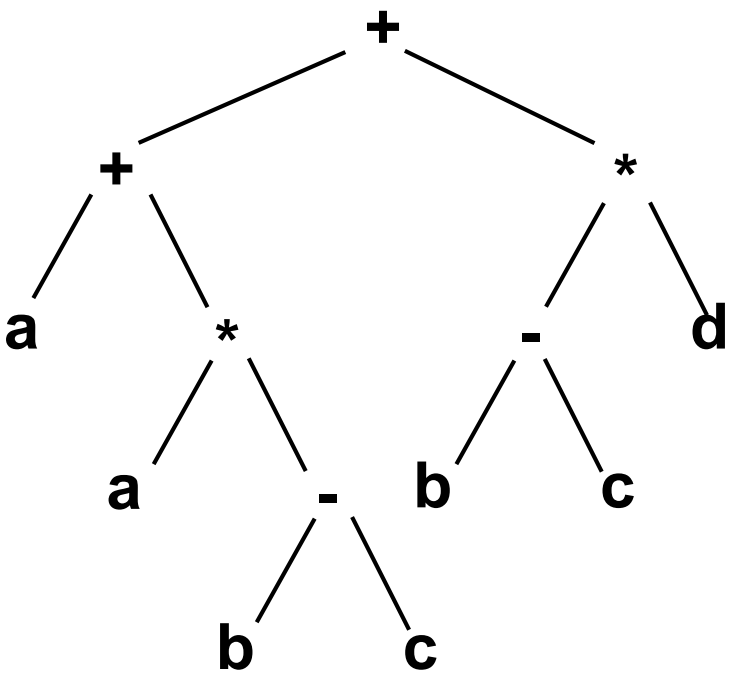


2. 中间表示[Intermediate Representation, IR]

- 高级中间表示
  - AST(Abstract Syntax Tree, 抽象语法树)和DAG(Directed Acyclic Code, 有向无环图)
  - 适用于静态类型检查等任务
- 低级中间表示
  - **3-地址码(Three-Address Code, TAC)**：x = y op z
  - 适用于依赖于机器的任务，如寄存器分配和指令选择。
- IR的选择/设计都是针对具体应用的
  - LLVM IR：通用
  - TensorFlow XLA IR：专门针对机器学习计算图优化
  - 常用C语言（AT&T贝尔实验室高级C++）

2. 中间表示[Intermediate Representat

- AST和DAG
  - 例：算术表达式a+a*(b-c)+(b-c)*d

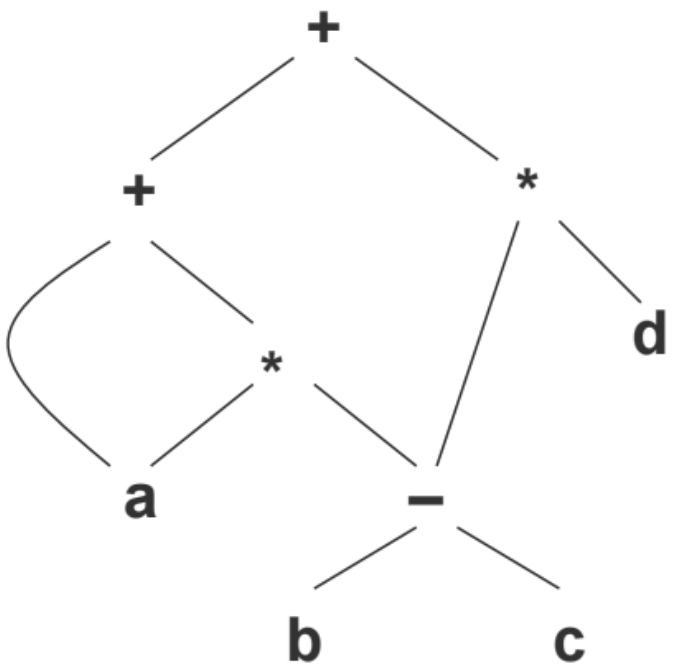


AST

(1) p1 = **new** Leaf(**id**, entry-a)
(2) **p2 = new Leaf(id, entry-a)**
(3) p3 = **new** Leaf(**id**, entry-b)
(4) p4 = **new** Leaf(**id**, entry-c)
(5) p5 = **new** Node('–', p3 , p4)
(6) p6 = **new** Node('*', p2 , p5)
(7) p7 = **new** Node('+', p1 , p6)
(8) **p8 = new Leaf(id, entry-b)**
(9) **p9 = new Leaf(id, entry-c)**
(10) **p10 = new Node('–', p8 , p9)**
(11) p11 = **new** Leaf(**id**, entry-d)
(12) p12 = **new** Node('*', p10, p11)
(13) p13 = **new** Node('+', p7 , p12)

No.	Productions	Semantic Rules
1	E → E_1 + T	E.node = **new** Node('+', E_1.node, T.node)
2	E → E_1 – T	E.node = **new** Node('–', E_1.node, T.node)
3	E → T	E.node = T.node
4	T → **(** E **)**	T.node = E.node
5	T → **id**	T.node = **new** Leaf(**id**, **id**.entry)
6	T → **num**	T.node = **new** Leaf(**num**, **num**.val)

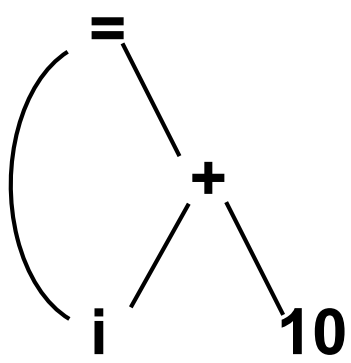
SDD



DAG

2. 中间表示[Intermediate Representation, IR]

- 构造DAG的值编码方法
  - 语法树或DAG中的结点存放在一个记录数组中
  - 数组的每一行表示一个记录，即一个结点
  - 每个记录中，都有结点编号
  - 叶子结点：一个附加字段，存放标识符的词法值lexval
  - 内部结点：两个附加字段，分别指明其左右结点
  - 例：i=i+10



DAG

1	id	i	
2	num	10	
3	+	1	2
4	=	1	3
5	…	…	…

值编码

随堂练习（1）

- 为下列表达式构造DAG，并指出其值编码，假定+是左结合的。

  (1) a+b+(a+b)

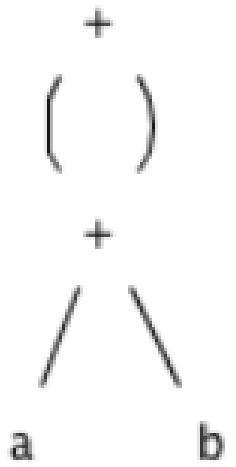
  (2) a+b+a+b

  (3) a+a+(a+a+a+(a+a+a+a))

随堂练习（1）

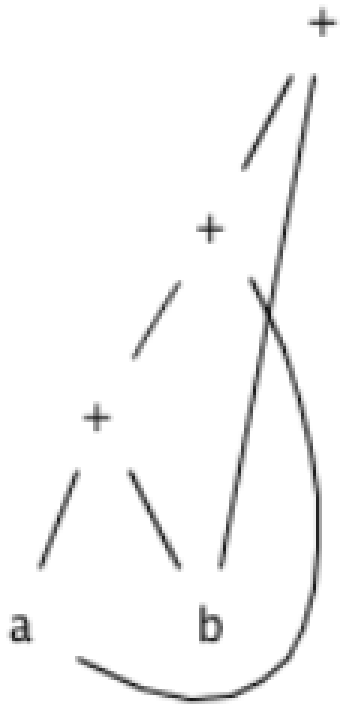
- 参考答案

(1) a+b+(a+b)



1	id	a	
2	id	b	
3	+	1	2
4	+	3	3

(2) a+b+a+b



1	id	a	
2	id	b	
3	+	1	2
4	+	3	1
5	+	4	2

随堂练习（1）

- 参考答案

(3) a+a+(a+a+a+(a+a+a+a))

1	id	a	
2	+	1	1
3	+	2	1
4	+	3	1
5	+	3	4
6	+	2	5

2. 中间表示[Intermediate Representation, IR]

- 三地址码[Three-Address Code, **TAC**]
  - 三地址码中，**一条指令右侧最多有一个运算符**，即，不允许出现组合的算术表达式
  - 像x + y * z，需翻译成如下三地址指令序列：
    - t1 = y * z
    - t2 = x + t1
  - 例：算术表达式a+a*(b-c)+(b-c)*d

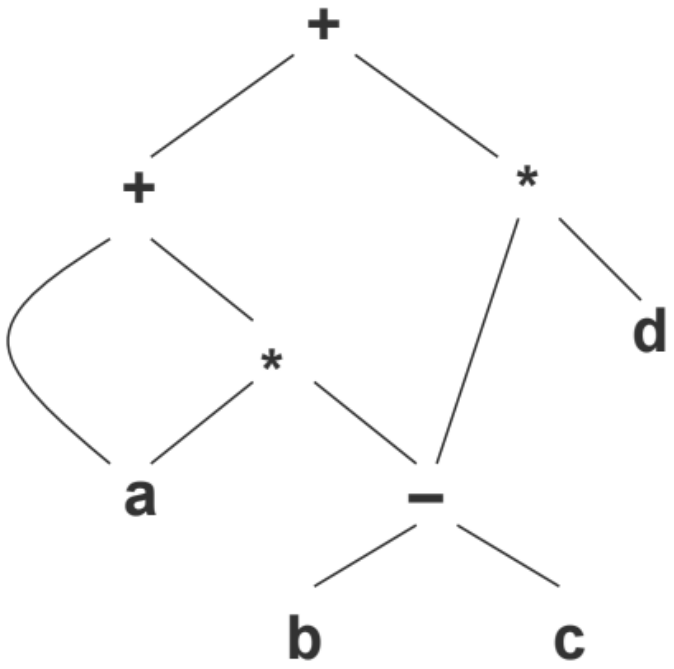
t1 = b – c

t2 = a * t1

t3 = a + t2

t4 = t1 * d

t5 = t3 + t4



DAG

2. 中间表示[Intermediate Representation, IR]

- 三地址码[Three-Address Code, TAC]
  - 两个基本概念：地址和指令
  - 地址：
    - ✓ 名字：源程序的名字作为三地址码中的地址：源程序名字被替换为指向符号表条目的指针，关于该名字的所有信息均存放在该条目中
    - ✓ 常量：需考虑表达式中的类型转换问题
    - ✓ 编译器生成的临时变量

2. 中间表示[Intermediate Representation, IR]

- 三地址码[Three-Address Code, TAC]
  - 指令
    - ✓ x = y *op* z // 双目运算或逻辑运算，x、y、z为地址
    - ✓ x = *op* y // 单目运算：单目减(取负)、逻辑非、转换运算(整数转成浮点数等)
    - ✓ x = y // 赋值运算
    - ✓ **goto** L // 无条件跳转
    - ✓ **if** x **goto** L // 有条件跳转
    - ✓ **ifFalse** x **goto** L // 有条件跳转
    - ✓ **if** x *op* y **goto** L // 关系运算跳转

2. 中间表示[Intermediate Representation, IR]

- 三地址码[Three-Address Code, TAC]
  - 指令
    - ✓ **param** x_1 // 参数传递
    - ✓ **param** x_2
    - ✓ …
    - ✓ **param** x_n
    - ✓ **call** p, n // 过程调用
    - ✓ y = **call** p, n // 函数调用
    - ✓ **return** y // 返回值

2. 中间表示[Intermediate Representation, IR]

- 三地址码[Three-Address Code, TAC]
  - 指令
    - ✓ x = y[i]　　// 带下标的赋值指令，**注意i代表内存单元位置，而非数组位置**
    - ✓ x[i] = y　　// 同上
    - ✓ x = &y　　// 取y变量的地址赋值给x
    - ✓ x = *y　　// 取y指针中的内容赋值给x
    - ✓ *x = y　　// 取y的值赋值给x指针所指空间

2. 中间表示[Intermediate Representation, IR]

- 三地址码[Three-Address Code, TAC]
  - 例：源码 **do** i=i+1;
    while(a[i]>v);

带符号标号的三地址码：

```
L: t1 = i + 1
   i = t1
   t2 = i * 8 //假设数组中每个元素
              //占8个存储单元
   t3 = a[t2]
   if t3 < v goto L
```

带位置号的三地址码：

```
100: t1 = i + 1
101: i = t1
102: t2 = i * 8
103: t3 = a[t2]
104: if t3 < v goto 100
```

2. 中间表示[Intermediate Representation, IR]

- 三地址码[Three-Address Code, TAC]
  - ① 三元式[triple]
  - ② 间接三元式[indirect triple]
  - ③ 四元式[quadruple]

2. 中间表示[Intermediate Representation, IR]

- 三地址码[Three-Address Code, TAC]

① 三元式[triple]

✓ 三个字段：**op, arg1, arg2**

✓ 用运算x op y的位置来表示其结果，而不是用一个显式的临时名字

✓ 带括号的数字表示指向相应三元式结构的指针

2. 中间表示[Intermediate Representation, IR]

- 三地址码[Three-Address Code, TAC]

① 三元式[triple]

✓ 例：源码 a = b * – c + b * – c

三地址码：

t1 = **minus** c
t2 = b * t1
t3 = **minus** c
t4 = b * t3
t5 = t2 + t4
a = t5

三元式：

	op	arg_1	arg_2
0	**minus**	c	
1	*	b	(0)
2	**minus**	c	
3	*	b	(2)
4	+	(1)	(3)
5	=	a	(4)
…	…		

对运算结果的引用是通过位置完成的，因此如果改变一条指令的位置，则引用该指令结果的所有指令都要相应修改！

2. 中间表示[Intermediate Representation, IR]

- 三地址码[Three-Address Code, TAC]
  - ② 间接三元式[indirect triple]
    - ✓ 同样三个字段：**op, arg1, arg2**
    - ✓ 包含**一个指向三元式的指针的列表**，而不是列出三元式序列本身，从而化解了前述三元式由于指令改变所引起的问题

2. 中间表示[Intermediate Representation, IR]

- 三地址码[Three-Address Code, TAC]

② 间接三元式[indirect triple]

✓ 例：源码 a = b * – c + b * – c

三地址码：

```
t1 = minus c
t2 = b * t1
t3 = minus c
t4 = b * t3
t5 = t2 + t4
a = t5
```

间接三元式：

35	(0)
36	(1)
37	(2)
38	(3)
39	(4)
40	(5)
…	…

	op	arg_1	arg_2
0	**minus**	c	
1	*	b	(0)
2	**minus**	c	
3	*	b	(2)
4	+	(1)	(3)
5	=	a	(4)
…	…		

优化编译器可以通过对指令列表的重新排序来移动指令位置，而不影响三元式本身。

2. 中间表示[Intermediate Representation, IR]

- 三地址码[Three-Address Code, TAC]

③ 四元式[quadruple]

✓ 四个字段：**op, arg1, arg2, result**

✓ 一些特例：

- 形如x=minus y的单目运算符指令和赋值指令x=y，不使用arg2
- 像param这样的运算既不使用arg2，也不使用result
- 条件或非条件转移指令将目标标号放入result字段

2. 中间表示[Intermediate Representation, IR]

- 三地址码[Three-Address Code, TAC]

③ 四元式[quadruple]

✓ 例：源码 a = b * – c + b * – c

三地址码：

```
t1 = minus c
t2 = b * t1
t3 = minus c
t4 = b * t3
t5 = t2 + t4
a = t5
```

四元式：

	op	arg_1	arg_2	result
0	**minus**	c		t_1
1	*	b	t_1	t_2
2	**minus**	c		t_3
3	*	b	t_3	t_4
4	+	t_2	t_4	t_5
5	=	t_5		a
…	…			

相对于三元式的优势：当移动一个计算临时变量t的指令时，那些使用t的指令不需要做任何改变

随堂练习（2）

- 对于以下的表达式，分别给出三元式和四元式序列

  (1) a=b[i]+c[j]

  (2) a[i]=b*c-b*d

  (3) x=f(y+1)+2

  (4) x=*p+&y

  (5) -(a+b)*(c+d)-(a+b+c)

随堂练习（2）

- 参考答案

(1) a=b[i]+c[j]

#	OP	ARG1	ARG2
1	=[]	b	i
2	=[]	c	j
3	+	(1)	(2)
4	=	a	(3)

三元式

#	OP	ARG1	ARG2	RESULT
1	=[]	b	i	t1
2	=[]	c	j	t2
3	+	t1	t2	t3
4	=	t3	—	a

四元式

随堂练习（2）

- 参考答案

(2) a[i]=b*c-b*d

#	OP	ARG1	ARG2
1	*	b	c
2	*	b	d
3	-	(1)	(2)
4	[]=	a	i
5	=	(4)	(3)

三元式

#	OP	ARG1	ARG2	RESULT
1	*	b	c	t1
2	*	b	d	t2
3	-	t1	t2	t3
4	[]=	a	i	t4
5	=	t3	—	*t4

四元式

随堂练习（2）

- 参考答案

(3) x=f(y+1)+2

#	OP	ARG1	ARG2
1	+	y	1
2	param	(1)	—
3	call	f	1
4	+	(2)	2
5	=	x	(3)

三元式

#	OP	ARG1	ARG2	RESULT
1	+	y	1	t1
2	param	t1	—	—
3	call	f	1	t2
4	+	t2	2	t3
5	=	t3	—	x

四元式

随堂练习（2）

- 参考答案

(4) x=*p+&y

#	OP	ARG1	ARG2
1	*	p	—
2	&	y	—
3	+	(1)	(2)
4	=	x	(3)

三元式

#	OP	ARG1	ARG2	RESULT
1	*	p	—	t1
2	&	y	—	t2
3	+	t1	t2	t3
4	=	t3	—	x

四元式

随堂练习（2）

- 参考答案

(5) -(a+b)*(c+d)-(a+b+c)

#	OP	ARG1	ARG2
1	+	a	b
2	@	—	(1)
3	+	c	d
4	*	(2)	(3)
5	+	a	b
6	+	(5)	c
7	-	(4)	(6)

三元式

#	OP	ARG1	ARG2	RESULT
1	+	a	b	t1
2	@	t1	—	t2
3	+	c	d	t3
4	*	t2	t3	t4
5	+	a	b	t5
6	+	t5	c	t6
7	-	t4	t6	t7

四元式