第 8 章　代码优化（optimization）

第 8 章　代码优化（optimization）

8.1.1　代码优化概述

8.1.2　优化技术分类

8.1.3　具优化功能编译器的组织

第 8 章　代码优化（optimization）

8.2.1　基本块定义与划分

8.2.2　程序的控制流图

8.2.3　基本块的DAG表示与应用

- **代码优化**

在不改变程序运行效果的前提下，对被编译的程序进行等价变换，使之能生成更加高效的目标代码。

空间效率和时间效率

- **优化整体过程**
  - 等价：不改变程序执行效果；
  - 变换：引起程序形式上的变动；

- **优化目的**

  产生高效的目标代码。

  - **时间**：源程序运行时间尽可能短；
  - **空间**：程序及数据所占空间尽可能少；

- **改进、提高程序途径**

  (1) 改进算法；

  (2) 在源程序级上等价变换；

  (3) 充分利用系统提供的程序库；

  (4) 编译时优化等。

- **为什么要实施优化**
  - 优化程度是编译器的一个重要技术、质量目标；
  - 无法苛求用户对源语言的掌握，编程技巧，编写源程序的优化；
  - 编译程序固有的缺陷：不是面对一个或一类具体问题的程序，而是统一处理该语言的各种源程序，无法尽善尽美。

例如，

```
int  a[25][25] , b[25][25];
  …
a[i][j] = b[i][j];
  …
```

对 `a[i][j] = b[i][j]` 翻译的目标代码：

- **优化原则**

等价: 是指不改变程序的运行结果；

有效: 主要指优化后的目标代码运行时间较短，以及占用的存储空间较小。

合算: 应尽可能以较低的代价取得较好的优化效果。

- **优化的时机及分类**

优化可在编译的各个阶段进行。主要时机是在语法、语义分析生成中间代码之后，另一类优化则是在生成目标程序时进行的。

前者优化不依赖于具体的计算机而取决于语言的结构，后者依赖于具体目标机。

一. 优化所涉及的源程序的范围

- 局部优化 — 基本块内优化；
- 循环优化 — 隐式、显式循环体内优化；
- 全局优化 — 源程序大范围内优化；

二. 优化相对于编译逻辑功能实现的阶段

中间代码级 — 目标代码生成前的优化；

目标代码级 — 目标代码生成后的优化。

三. 优化具体实现技术的角度

1. Constant folding and propagation

Before optimization	After optimization
X = 2;	X = 2;
Y = X + 10;	Y = 12;
Z = 2 * Y;	Z = 24;

常量合并、传播

2 . Common subexpression elimination

Before optimization

```
d = e + f + g;
y = e + f + z;
```

After optimization

```
x = e + f ;
d = x + g;
y = x + z;
```

3. Loop invariant code motion

Before optimization

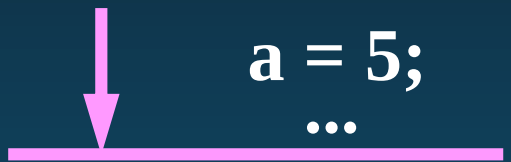
```
b = c;
for(i=0; i<3; i++)
    d[i] =2 * b + 1;
```

After optimization

```
b = c;
z= 2 * b + 1;
for(i=0; i<3;i++)
    d[i] = z ;
```

4. Dead storage/assignment elimination

Before optimization



After optimization

```
a = 7;
```

5. Jump-to-jump elimination

Before optimization

```
if(x)
  ...
  else  goto J1;
J1:  goto J2;
```

After optimization

```
if(x)
  ...
  else  goto  J2;
```

6. Dead code elimination

Before optimization

```
char c;
if (c >300)  a = 1;
else
    a = 2 ;
```

After optimization

```
a = 2;
```

永假式

7. Function embed

Before optimization

```
int Check(int x);
    {
   return  (x>10);
    }
  void main()
{
    if  check(y))
      a=5;
}
```

After optimization

```
void main()
  {
      if  (y>10)  a=5;
  }
```

8. Loop transformation(强度削弱) - simple loop

C source code

```
int table[100];
step =  1;
for(i=0; i<100;  i+=step)
table[i]  = 0;
```

before optimization

```
    i  = 0;
L1:  t1 =  i * 4;
     table[t1]=0;
     i++;
     if(i<100)  goto L1
```

Loop

after optimization

```
i =  0;
t1 = i* 4;
L1: table[t1]  = 0 ;
    t1 = t1+ 4;
    i++;
    if(i<100) goto L1
```

9. Loop transformation - dynamic loop

C source code

```
step = step_table[1];
for(i=0; i<MAX; i+=step)
table[i] = 0;
```

(i + step)*4
= i*4 + step*4
t1 t2

before optimization

```
step = step_table[1];
i = 0;
L1: t1 = i * 4;
    table[t1] = 0;
    i = i + step;
    if(i<MAX) goto L1
```

after optimization

```
i = 0;
step = step_table[1];
t1 = i * 4;
t2 = step * 4;
L1: table[t1] = 0;
    t1 = t1 + t2;
    i = i + step;
    if(i<MAX) goto L1
```

10. Loop transformation - composed variables

C source code

```
int  table[100];
for(i=0, j=0; j<10; i++, j++)
        table[ 10 * i + j ] = i ;
```

```
table[ 0 ]  = 0
table[ 11 ] = 1
table[ 22 ] = 2
……
table[ 99 ] = 9
```

before optimization

```
    i = 0;  j = 0;
    t1 = i * 10;
L1: t2 = t1 + j;
    t3 = t2 * 4;          /* address */
    table[t3] = i;
    i = i + 1;
    t1 = t1 + 10;
    j = j + 1;
    if(j < 10) goto L1
```

after optimization

```
i = 0; j = 0;
t1 = i * 10;
t2 = t1 + j;
t3 = t2 * 4;   /*t3=0*/
Repeat 10 times:
table[t3] = i;
i = i + 1;
t3 = t3 + 44;
```

- 考虑目标机指令系统特点

Before optimization

```
int x, y, z;
  x=1;
  y=x;
  z=1;
```

After optimization

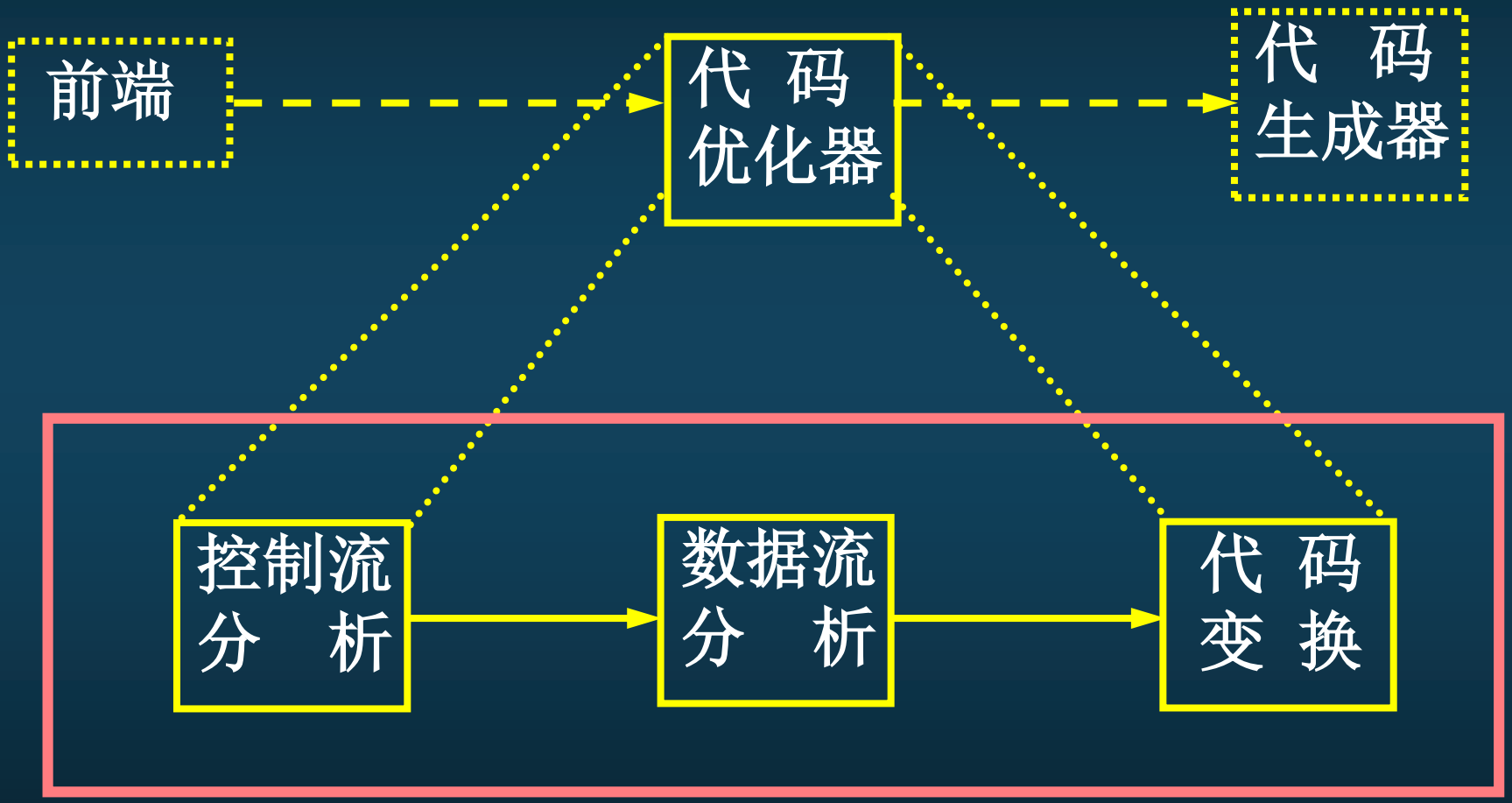
```
int x, y, z;
  x=1;
  z=1;
  y=x;
```

C source code

```
int foo(int n)
{  int x;
    for (int i=0;i<n;i++)
          x++;
     return x;
 }
```

After optimization

```
int foo(int n)
{  int x;
    for ( int i=0; i<n/4;i++ )
         {  x++;
            x++;
            x++;
            x++;
         }
     for ( int i=0; i<n%4;i++ )
            x++;
     return x;
 }
```


前端
代 码
优化器
代 码
生成器
控制流
分 析
数据流
分 析
代 码
变 换

- **局部优化**

  指在程序的一个**基本块**内进行的优化。

- **基本块**

  一**顺序**执行的语句序列，只有**惟一入口**和**惟一出口**，且分别对应该序列的第一个语句和最后一个语句 。

- **基本块特点**

  基本块内的语句是顺序执行的，没有转进转出，分叉汇合 。

- **基本块划分**

第1步：确定每个基本块的入口语句。

根据基本块的结构特点，它的入口语句是下述三种类型的语句之一：

(1) 程序的第一个语句；

(2) 由条件转移语句或无条件转移语句转移到的语句；

(3) 紧跟在条件转移或无条件转移后面的语句。

第2步：根据确定的基本块的入口语句，构造其所属的基本块。即：

(1) 由该入口语句直到下一个入口语句（不包含下一个入口语句）之间的所有语句构成一个基本块；

(2) 由该入口语句到一转移语句（含该转移语句）之间的所有语句构成一个基本块；或到程序中的停止或暂停语句（包含该停止或暂停语句）之间的语句序列组成的。

第3步：凡是未包含在基本块中的语句，都是程序的控制流不可到达的语句，直接从程序中删除。

例8.1 对如下程序段实施基本块的划分。

```
(1)   read ( limit );
(2)   i=1;
(3)   if  (i>limit)  goto (11);
(4)   read(j)
(5)   if  (i=1) goto (8);
(6)   sum=sum+j;
(7)   goto (9);
(8)   sum=j;
(9)   i + +;
(10)  goto (3);
(11)  write(sum);
```

1
2
3
4
5
6
7

基本块的确定

Step1: 求四元式序列各基本块的入口语句；

Step2: 对求出每一个的入口语句构造相应的基本块；

Step3: 凡不属于某一基本块中的语句，皆是程序控制流程无法到达的语句，直接删除；

程序的控制流图

具有惟一首结点的有向图。流图G为

$$G = (N, E, n_0)$$

其中：

N： 是流图的所有的结点组成的集合。流图中的结点为基本块。

n_0： 是流图的首结点。

E： 是流图的所有的有向边组成的集合。

- **流图中的有向边E_i的形成：**

设有结点i到结点k（或说从结点i到结点k由有向边E_i相连）可表示为

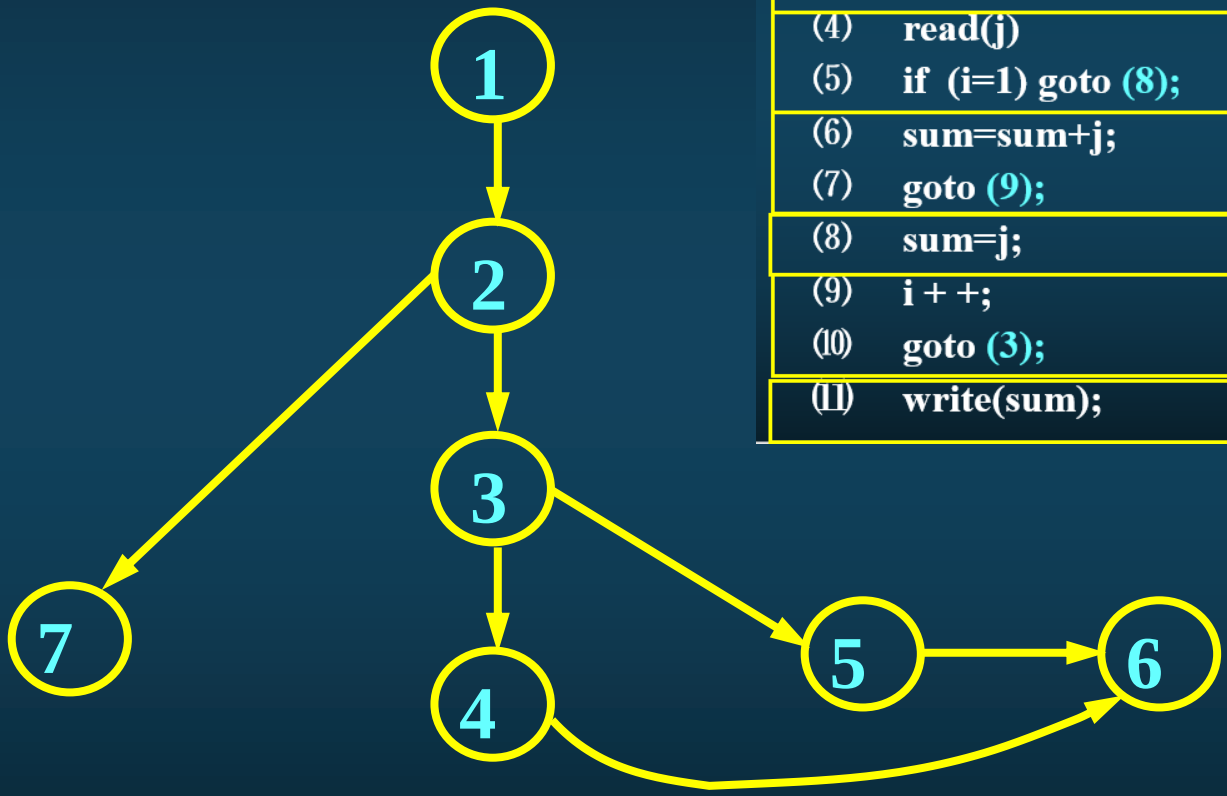
其条件是

① 基本块k在流图中的位置紧跟在基本块i之后且i的出口语句不是无条件转移或停语句；

② 基本块i的出口语句是goto (s)或if...goto (s)且(s)是基本块k的入口语句。

例8.1 程序的流图。

```
(1)  read ( limit );          → 1
(2)  i=1;
(3)  if (i>limit) goto (11);  → 2
(4)  read(j)                  → 3
(5)  if (i=1) goto (8);
(6)  sum=sum+j;               → 4
(7)  goto (9);
(8)  sum=j;                   → 5
(9)  i + +;                   → 6
(10) goto (3);
(11) write(sum);              → 7
```



小结

- **局部优化**

  指在程序的一个**基本块**内进行的优化。

- **基本块特点**

  基本块内的语句是顺序执行的，没有转进转出，分叉汇合 。

- **基本块：**单入口单出口的程序段。

- **程序流图：**以**基本块**为结点的有向图，有向边表示程序执行的流程。

例8.2 对如下程序段划分基本块，给出流图。

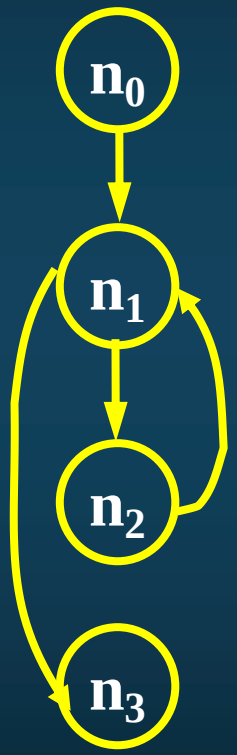
① read x
② read y
③ R=x / y
④ if R=0 goto 8
⑤ x = y
⑥ y = R
⑦ goto 3
⑧ write y
⑨ halt

n_0
```
read x
read y
```

n_1
```
R=x / y
if R=0 goto 8
```

n_2
```
x = y
y = R
goto 3
```

n_3
```
write y
halt
```



- **DAG（Directed Acyclic Graph）**

  无环路的有向图。

- **定义8.1**

设G是由若干结点构成的有向图，从结点n_i到结点n_j的有向边用$n_i \rightarrow n_j$表示。

① 若存在有向边序列$n_{i1} \rightarrow n_{i2} \rightarrow \ldots \rightarrow n_{im}$，则称结点$n_{i1}$与结点$n_{im}$之间存在一条路径，或称$n_{i1}$与$n_{im}$是连通的。路径上有向边的数目为**路径的长度**；

② 如果存在一条路径，其长度≥2，且该路径起始和结束于同一个结点，则称该路径是一个**环路**；

③ 如果有向图G中任一条路径都不是环路，则称G为**无环路有向图**。

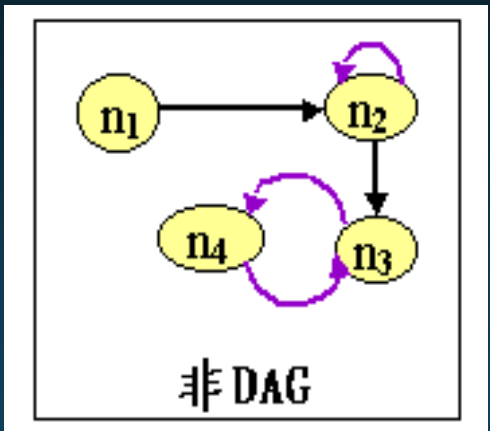
基本块的DAG表示

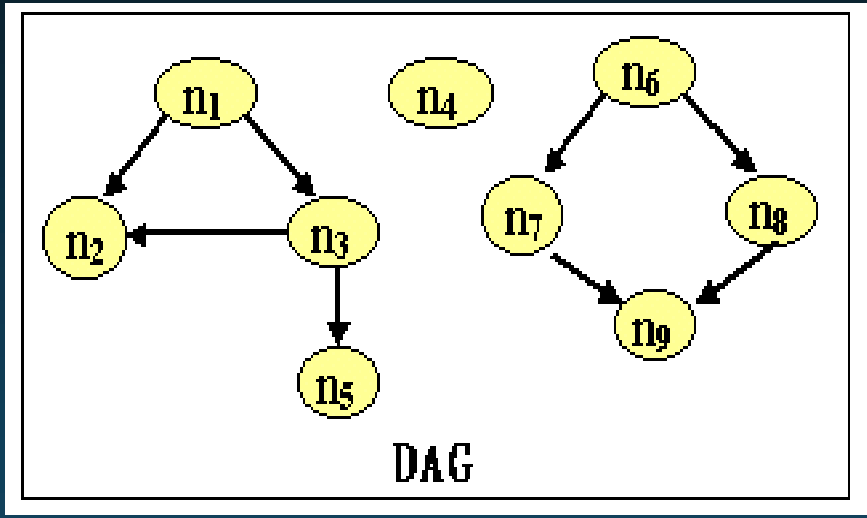
基本块的DAG是结点上带有下列标记的DAG

① 叶结点用标识符或常量作为其惟一的标记，当叶结点是标识符时，代表名字的初值可加下标0；

② 内部结点用运算符标记，同时也表示计算的值；

③ 各结点上可以附加一个或多个标识符，附加在同一结点上的多个标识符具有相同的值。





DAG图中结点的特点：

1. 叶结点

标记: 标识符名(变量名)或常数, 写在结点下面；

代表: 该结点代表该变量或常数的值。

通常将其标识符加上下标0,表示该变量的初值。

2. 内部结点

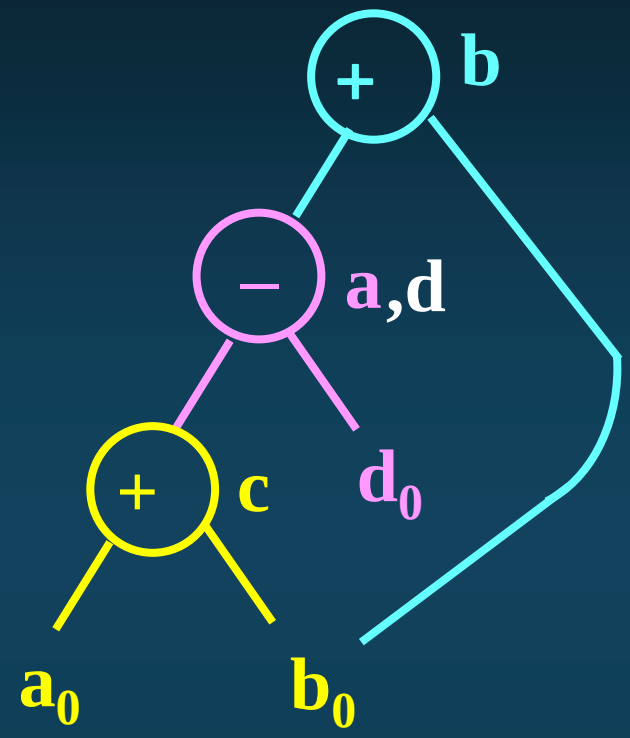
标记: 一个运算符号。写在结点下面。

代表: 利用后续结点运算出来的值。

3. 图中各个结点可能附加一个或多个标识符,表示这些标识符具有该结点所代表的值。写在结点右面。

例8.3 设有基本块如下

+	a	b	c
–	c	d	a
+	a	b	b
–	c	d	d



★ **注意：**

流图的一个结点是一个基本块，可用DAG表示。流图确认的是基本块之间的关系，DAG确认的是基本块内各四元式间的关系。

- 常见四元式与DAG结点对应关系 P231

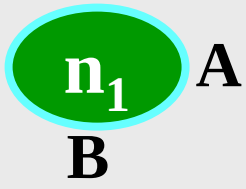
0型 → 一个结点(定值语句)

1型 → 二个结点 (单目运算且定值)

2型 → 三个结点(双目运算、取数组元素且定值，条件句)

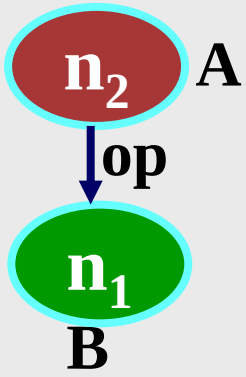
A= B

0型



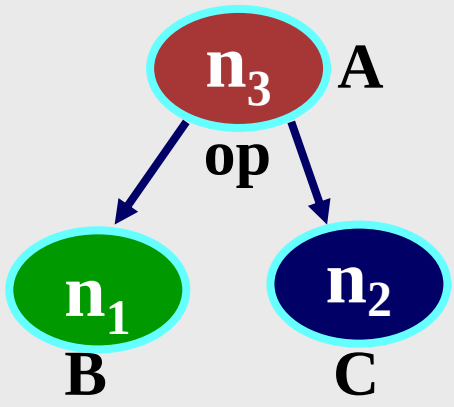
A= op B

1型



A= B op C

2型



- 常见四元式简化为下述三种情况

(1) A = B 0型

(2) A = op B 1型

(3) A = B op C 2型

- **算法8.1 （基本块的DAG的构造算法）**

  //初始化，置DAG为空。仅考虑0型、1型和2型

  输入： 一个基本块 B_i

  输出： 含有下列信息的基本块B_i 的DAG：

  (1) 叶结点、内部结点按统一标记；

  (2) 每个结点有一个标识符表（可空）；

  算法：

  对基本块中每一四元式依次执行以下步骤

  1. 构造叶结点；
  2. 捕捉已知量，合并常数； //删除原常数结点
  3. 捕捉公共子表达式； //删除冗余的公共子表达式
  4. 捕捉可能的无用赋值； //删除

例8.4 设有一个基本块的语句序列如下

(1) $T_0 = 3.14$

(2) $T_1 = 2*T_0$

(3) $T_2 = R+r$

(4) $A = T_1 * T_2$

(5) $B = A$

(6) $T_3 = 2 * T_0$

(7) $T_4 = R+r$

(8) $T_5 = T_3 * T_4$

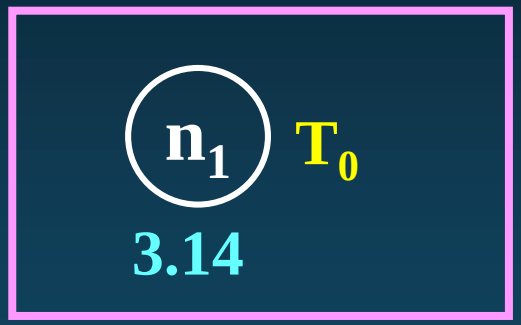
(9) $T_6 = R - r$

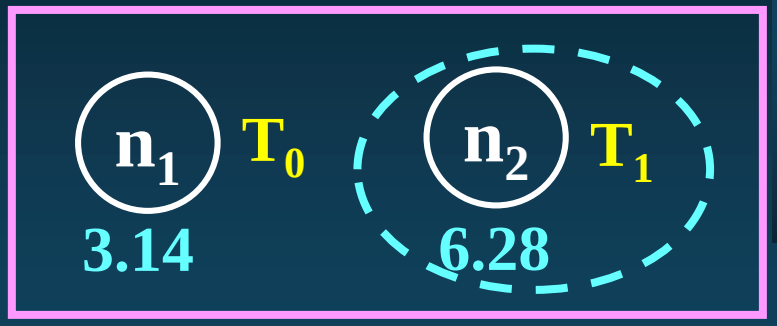
(10) $B = T_5 * T_6$

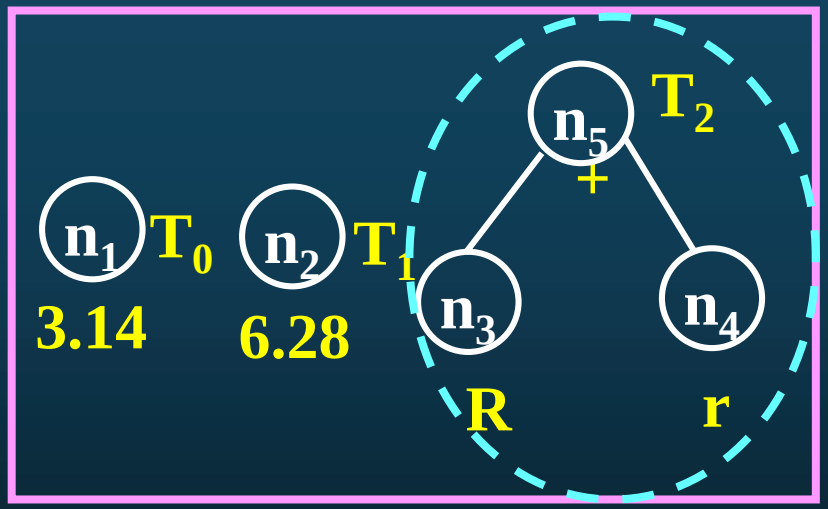
P233_ 例8.4

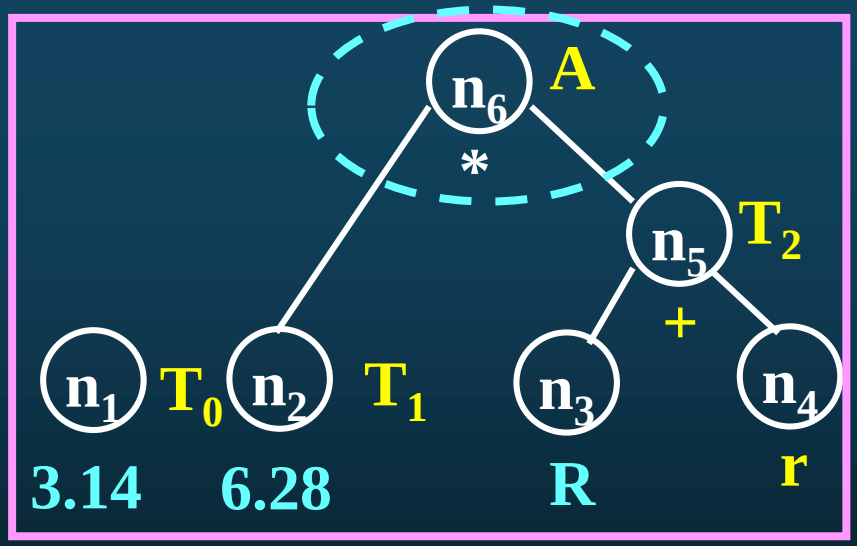
(1) $T_0 = 3.14$
(2) $T_1 = 2*T_0$
(3) $T_2 = R+r$
(4) $A = T_1 * T_2$
(5) $B = A$
(6) $T_3 = 2 * T_0$
(7) $T_4 = R+r$
(8) $T_5 = T_3 * T_4$
(9) $T_6 = R - r$
(10) $B = T_5 * T_6$

解：构造DAG的过程如下：

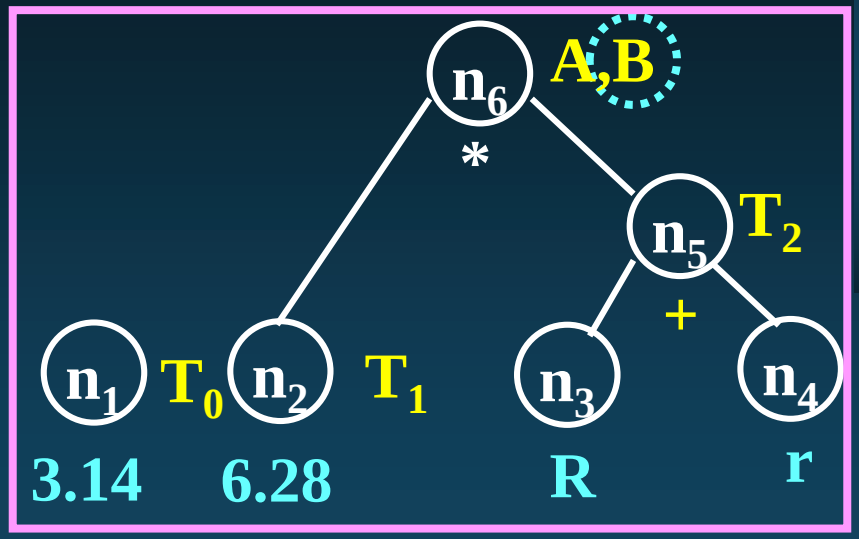


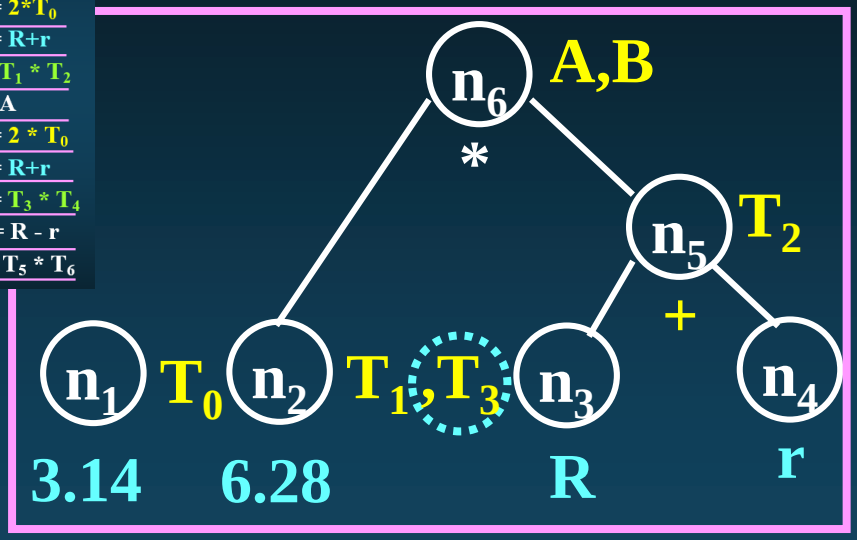


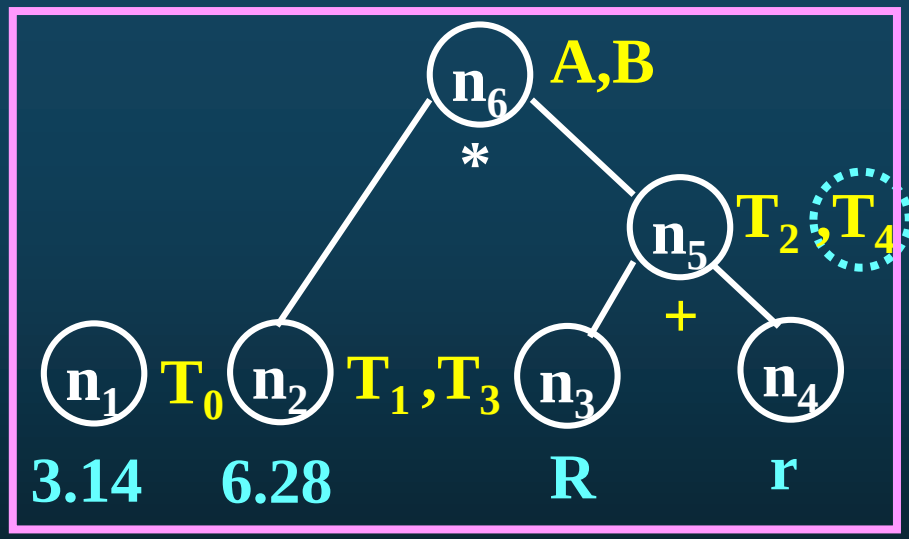


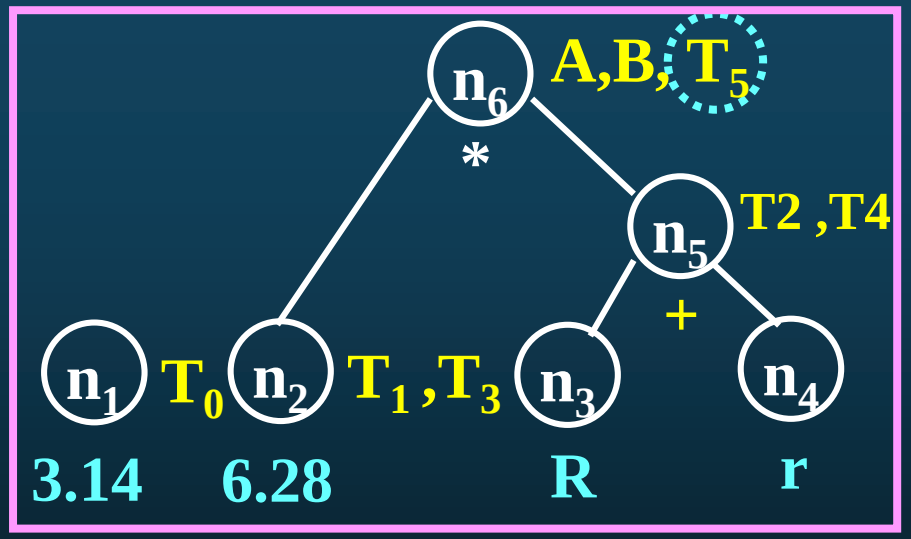


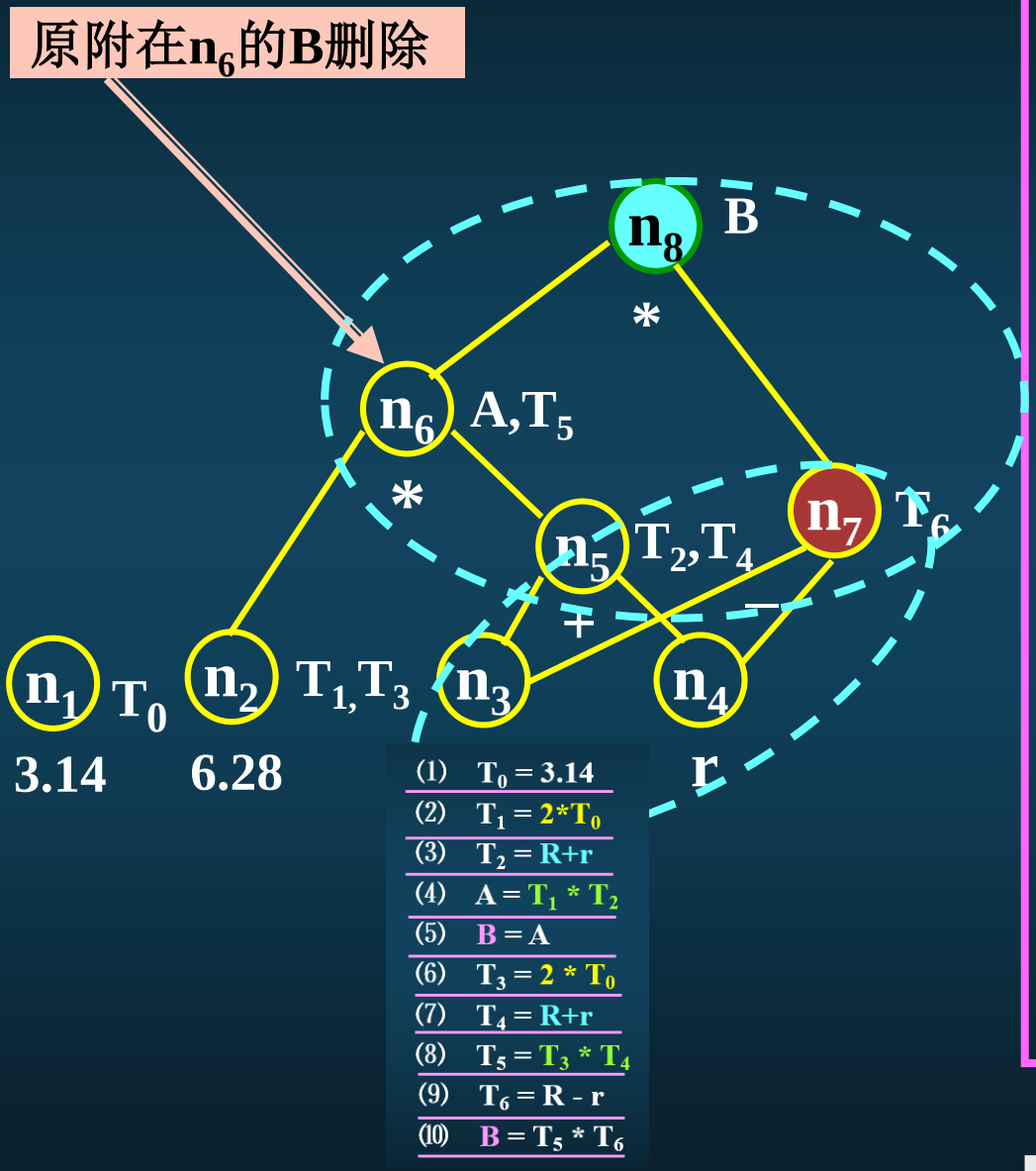
(1) $T_0 = 3.14$
(2) $T_1 = 2*T_0$
(3) $T_2 = R+r$
(4) $A = T_1 * T_2$
(5) $B = A$
(6) $T_3 = 2 * T_0$
(7) $T_4 = R+r$
(8) $T_5 = T_3 * T_4$
(9) $T_6 = R - r$
(10) $B = T_5 * T_6$











（1） $T_0=3.14$

（2） $T_1=6.28$

（3） $T_3=6.28$

（4） $T_2=R+r$

（5） $T_4=T_2$

（6） $A=6.28*T_2$

（7） $T_5=A$

（8） $T_6=R-r$

（9） $B=A*T_6$

- **本节思路**
  - **循环优化的重要性：** 循环是程序中反复执行的代码序列，实施循环优化，将高效提高目标代码质量。
  - **循环优化的技术准备：** 循环查找；控制流和数据流分析。
  - 通过控制流分析查找循环。

- **构成循环条件**

具有下列性质的结点序列为一个循环：

1. **强连通性。**

流图中若存在任意两个节点之间必有一条通路，则通路上的任何节点都属于该循环。

2. **入口惟一。**

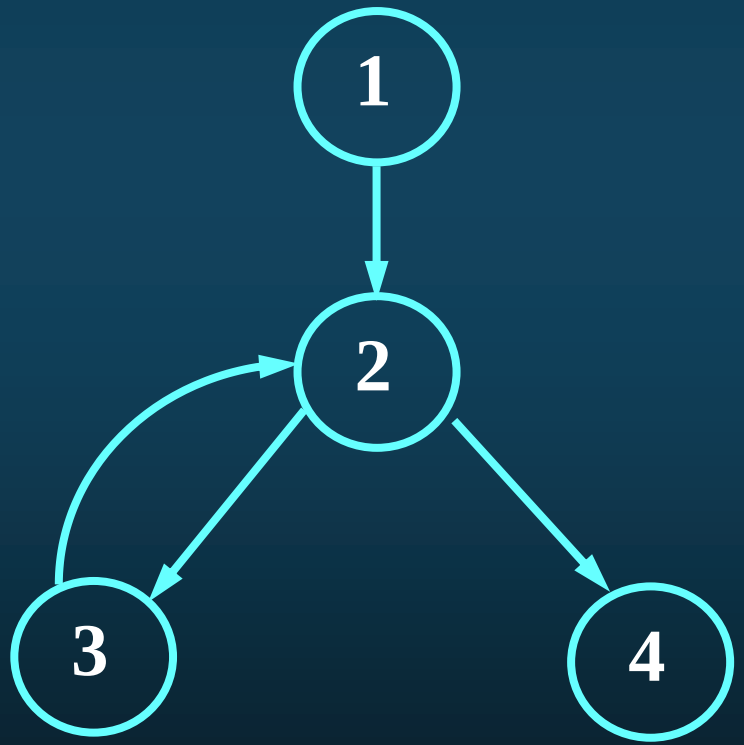
入口是流图的首结点或结点序列外某结点有一条有向边引到它。

- **定义8.2　（循环）**

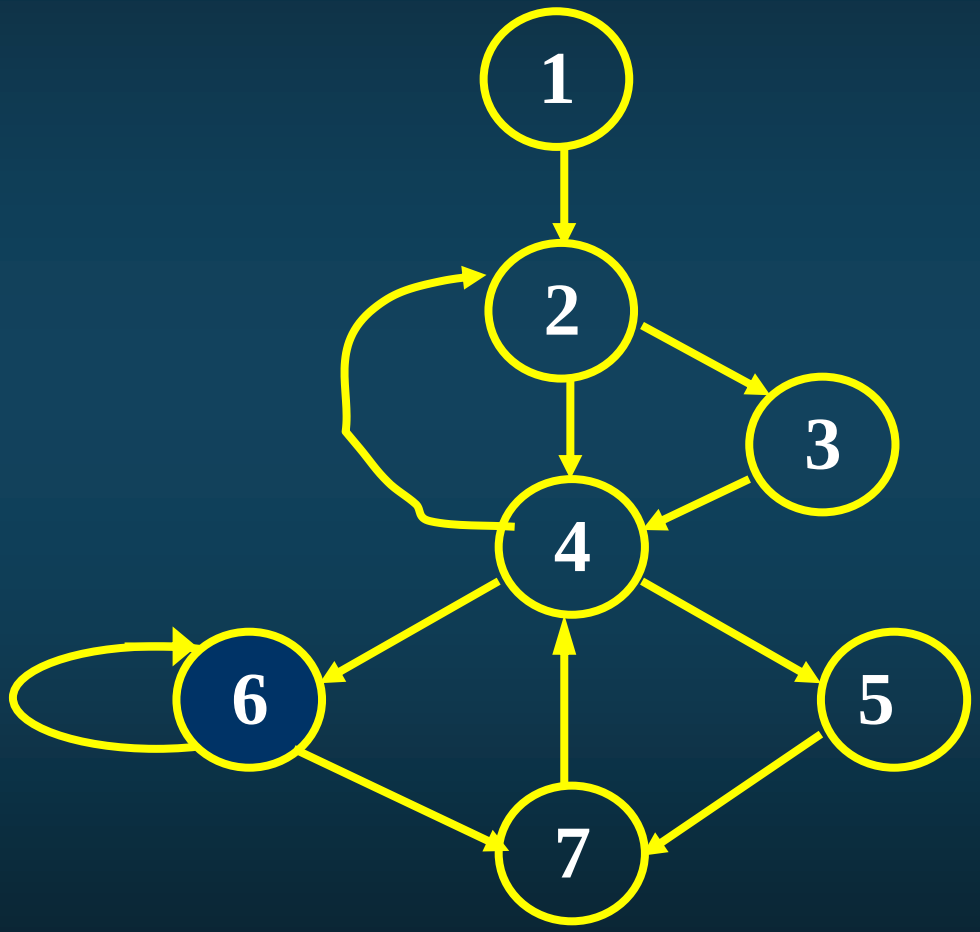
　　程序流图中具有惟一入口结点的强连通子图。

例如右图，

{2, 3}是循环
- 强连通性成立
- 惟一结点2



例如下图，



循环：

{6} 强连通/入口6

{4,5,6,7} 强连通/入口4

{2,3,4,5,6,7} 强连通/入口2

非循环：

{2,4} 强连通/入口2,4

{2,3,4} 强连通/入口2,4

{4,6,7} 强连通/入口4,7

必经结点、必经结点集与回边

- **定义8.3 （必经结点）**

在程序流图G中，n_i和n_j为任意结点。若从n_0出发，到达n_j的任何一条通路都必经过n_i，则称n_i是n_j的必经结点，记作n_i **DOM** n_j。

- **定义8.4 （必经结点集）**

在程序流图G中，结点n的全部必经结点，称为结点n的必经结点集，记作D(n)。

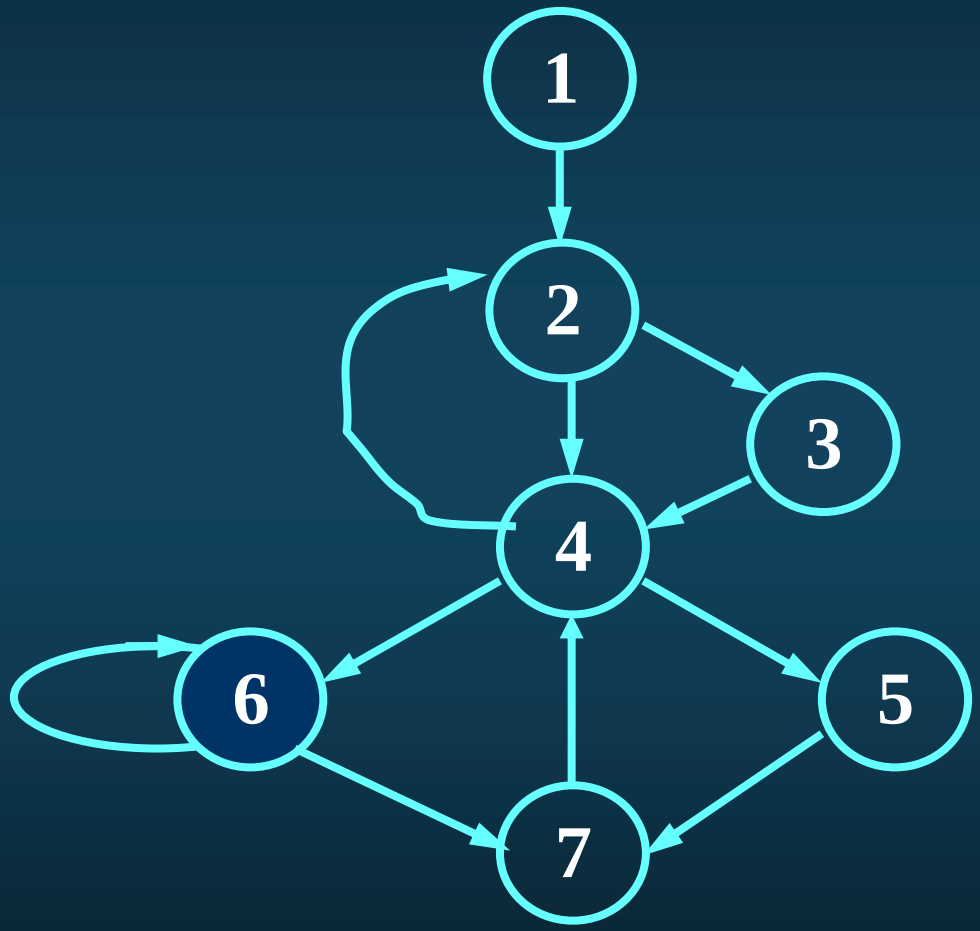
- **DOM是流图结点集上一个偏序关系：**

  (1) **自反性：** a DOM a

  (2) **传递性：** 如果a DOM b, b DOM c，
  则有： a DOM c 。

  (3) **反对称性：** 若有 a DOM b, b DOM a,
  则有： a = b。

例8.5 设有如下流图



D(1) = {1}

D(2) = {1,2}

D(3) = {1, 2, 3}

D(4) = {1, 2, 4}

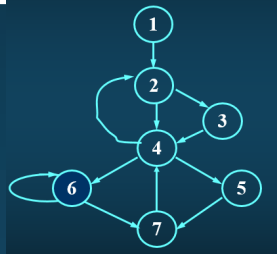
D(5) = {1, 2, 4, 5}

D(6) = {1, 2, 4, 6}

D(7) = {1, 2, 4, 7}

- **定义8.5　（回边）**

设a→b是流图G中一条有向边，如果b DOM a，则称 a→b 是流图G中的一条回边。记作 <a, b>。



例7.5 流图中存在有向边6→6，7→4和4→2。

皆为回边

并且有

D(6) = { 1, 2, 4, 6 }　　则　6 DOM 6，

D(7) = { 1, 2, 4, 7 }　　则　4 DOM 7，

D(4) = { 1, 2, 4 }　　则　2 DOM 4。

- **利用回边求出流图中的循环：**

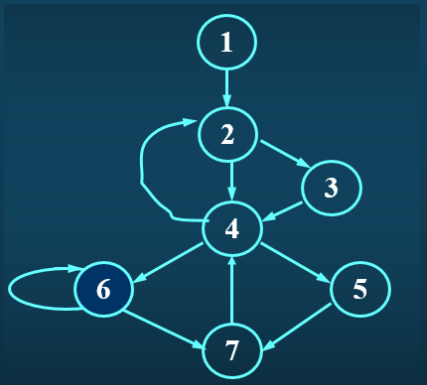
若<n, d>是一回边，则由结点d、结点n以及所有通路到达n而该通路不经过d的所有结点序列构成一个循环L，d是循环L的惟一入口。

例8.5 流图中的循环：

<6, 6>$_{loop}$ = { 6 }

<7, 4>$_{loop}$ = { 4, 5, 6, 7 }

<4, 2>$_{loop}$ = { 2, 3, 4, 5, 6, 7 }



例

- **summary** (查找循环步骤)

1. 确定G的D(n);
2. 由D(n)找回边;
3. 通过回边确定循环。

一．局部优化

1. 基本块定义 { 入口 / 出口

2. 实施 — DAG { 构造：中间code ⟶ DAG ; 重建：已优化 code ⟵ DAG }

二. 循环优化

技术准备 { 控制流分析；数据流分析

控制流分析 ⟶ Loop

中间code ⟶ 基本块 ⟶ G ⟶ D(n) ⟶ 回边

数据流分析：中间code + 控制流 ⟹（采集）优化所需信息