



流图中的循环

Part1：概念、识别方法和应用

李 诚

国家高性能计算中心(合肥)、信息与计算机国家级实验教学示范中心

计算机科学与技术学院

2023年11月22日

- 理解循环的重要意义
- 循环的一些基本概念
 - 支配结点
 - 深度优先排序
 - 回边
- 自然循环及其识别

■ 标识循环并对循环专门处理的重要性

- 程序执行的大部分时间消耗在循环上
- 循环会影响程序分析的运行时间
- 改进循环性能优化会对程序执行产生显著影响

□ loop unrolling(循环展开)

- 通过将循环体内的代码复制多次，增加**loop**每一次迭代的步长
- 减少循环分支指令执行的次数
- 增大处理器指令调度的空间（指令并行、流水线）
- 增加了寄存器的重用

```
for (i = 0; i < N; i++) {  
    for (j = 0; j < N; j++) {  
        A[i][j] = A[i][j] + B[i][j] * C[i][j];  
    }  
}
```

对j层进行循环展开

```
for (i = 0; i < N; i++) {  
    for (j = 0; j < N; j+=4) {  
        A[i][j] = A[i][j] + B[i][j] * C[i][j];  
        A[i][j+1] = A[i][j+1] + B[i][j+1] * C[i][j+1];  
        A[i][j+2] = A[i][j+2] + B[i][j+2] * C[i][j+2];  
        A[i][j+3] = A[i][j+3] + B[i][j+3] * C[i][j+3];  
    }  
}
```

□ loop unrolling(循环展开)

- 通过将循环体内的代码复制多次，增加**loop**每一次迭代的步长
- 减少循环分支指令执行的次数
- 增大处理器指令调度的空间（指令并行、流水线）
- 增加了寄存器的重用

```
for (i = 0; i < N; i++) {  
    for (j = 0; j < N; j++) {  
        A[i][j] = A[i][j] + B[i][j] * C[i][j];  
    }  
}
```

对j层进行循环展开

```
for (i = 0; i < N; i++) {  
    for (j = 0; j < N; j+=4) {  
        A[i][j] = A[i][j] + B[i][j] * C[i][j];  
        A[i][j+1] = A[i][j+1] + B[i][j+1] * C[i][j+1];  
        A[i][j+2] = A[i][j+2] + B[i][j+2] * C[i][j+2];  
        A[i][j+3] = A[i][j+3] + B[i][j+3] * C[i][j+3];  
    }  
}
```

在代码尺寸和性能之间做了权衡

举例——循环展开



❑ **clang 含有循环计算的源代码.c -O1 -funroll-loops -emit-llvm -S -Rpass=loop-unroll**

选项	功能
-funroll-loops	打开循环展开
-fno-unroll-loops	关闭循环展开
-mllvm -unroll-max-count	为部分和运行时展开设置最大展开次数
-mllvm -unroll-count	确定展开次数
-mllvm -unroll-threshold	设置循环展开的成本限制
-mllvm -unroll-remainder	允许循环展开后有尾循环
-Rpass=loop-unroll	显示循环展开的优化信息
-Rpass-missed=loop-unroll	显示循环展开失败的信息

- 理解循环的重要意义
- 循环的一些基本概念
 - 支配结点
 - 深度优先排序
 - 回边
- 自然循环及其识别

支配结点(Dominators)

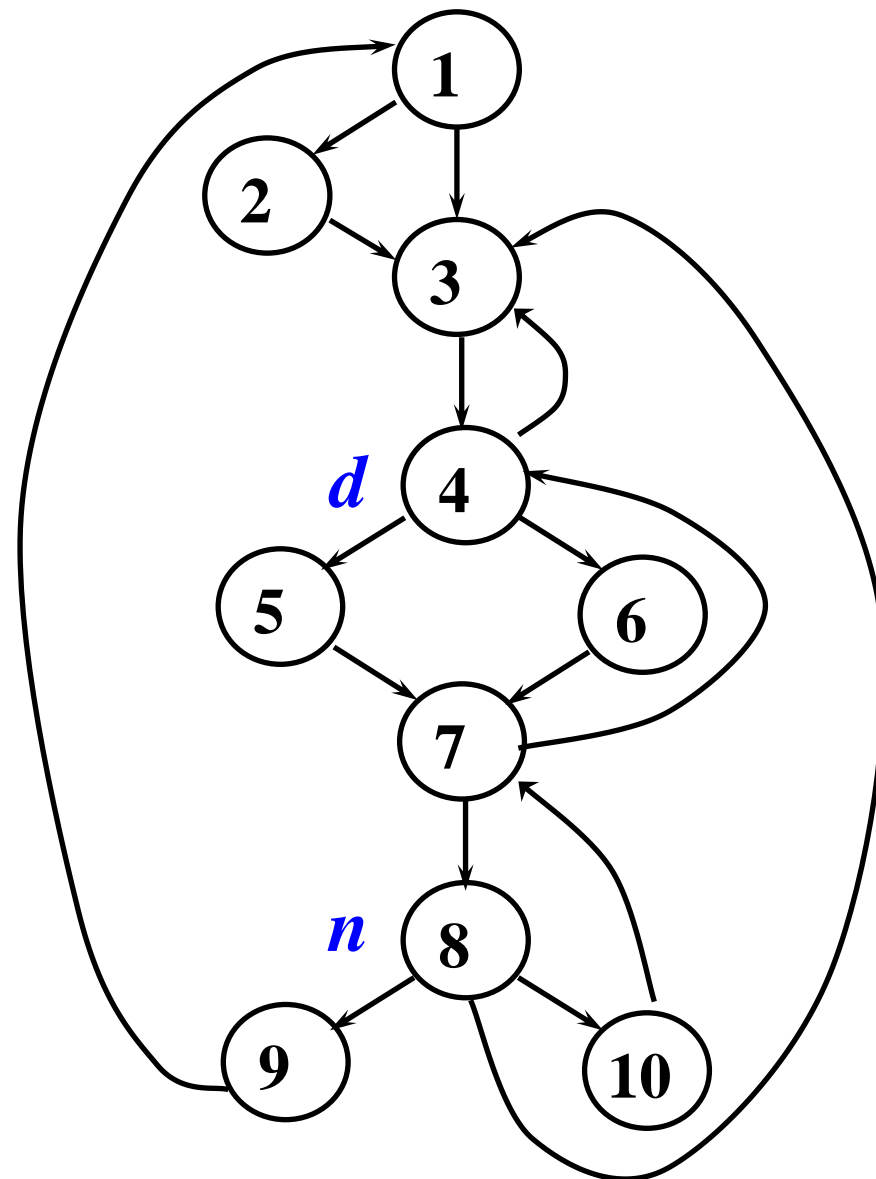


□ d 是 n 的支配结点:

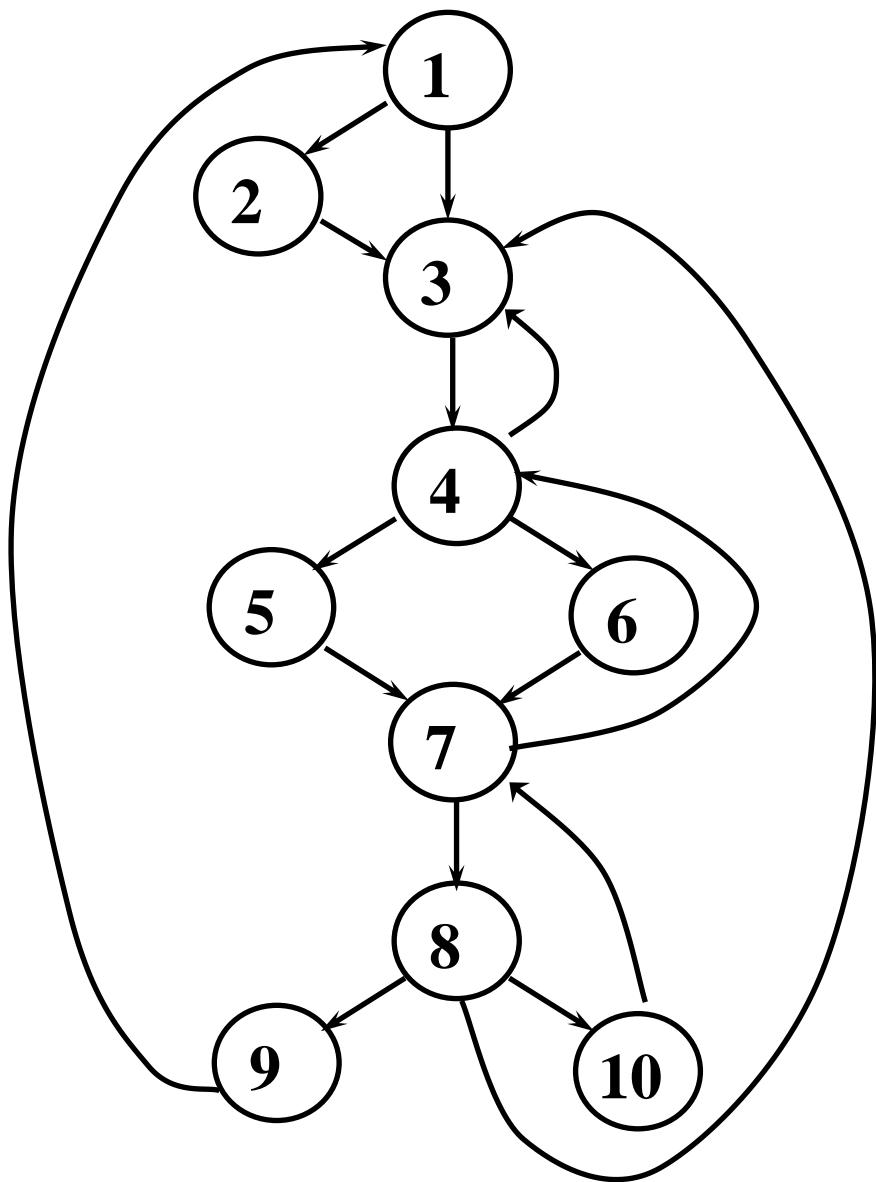
- 若从初始结点起，每条到达 n 的路径都要经过 d ，写成 $d \text{ dom } n$

□ 结点是他本身的支配结点

□ 循环的入口是循环中所有结点的支配结点

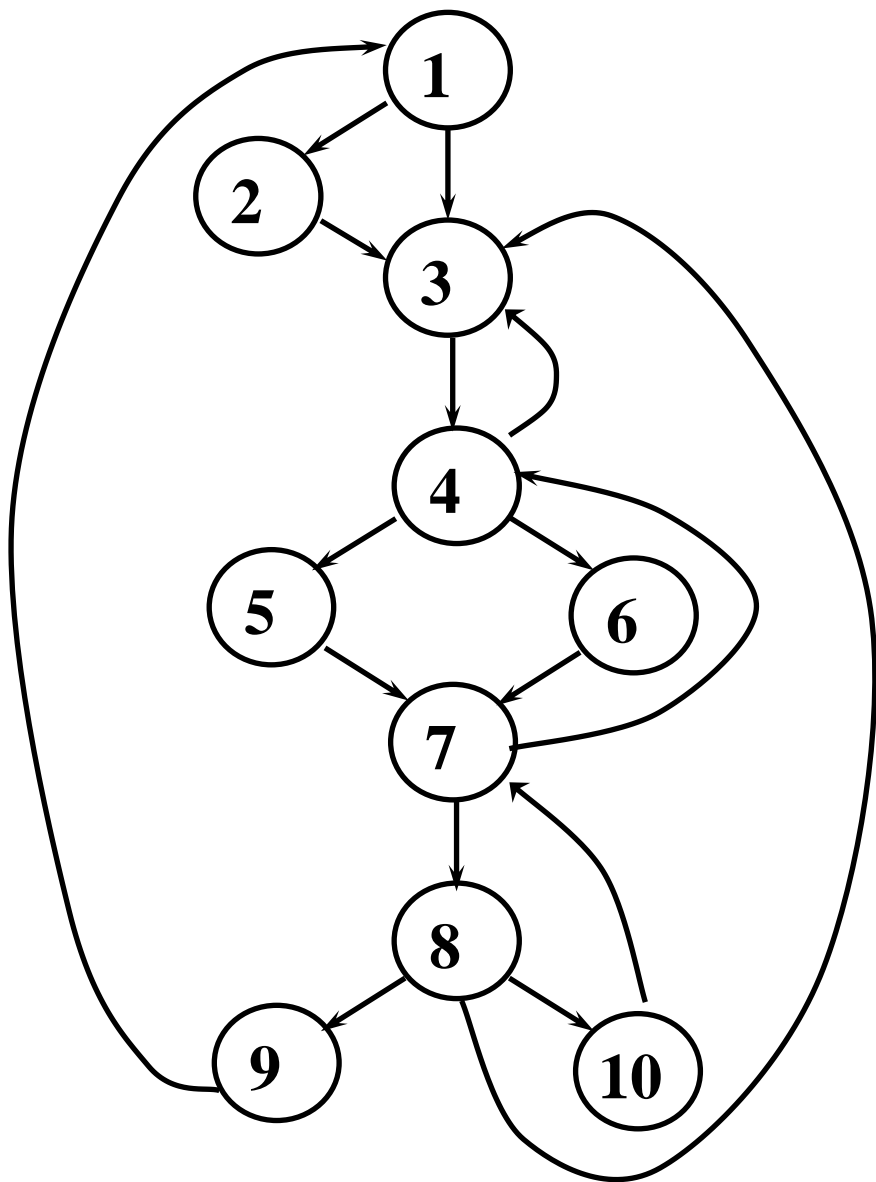


支配结点(Dominators)-举例

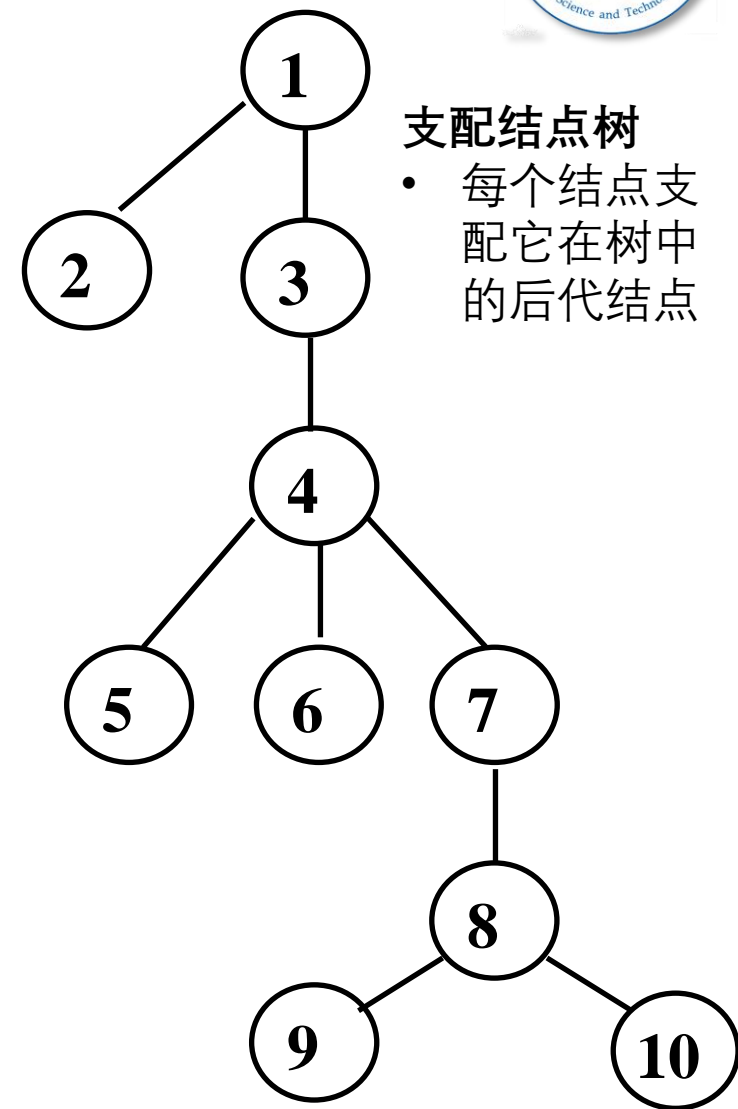


支配结点	支配对象
1	1-10
2	2
3	3-10
4	4-10
5	5
6	6
7	7-10
8	8-10
9	9
10	10

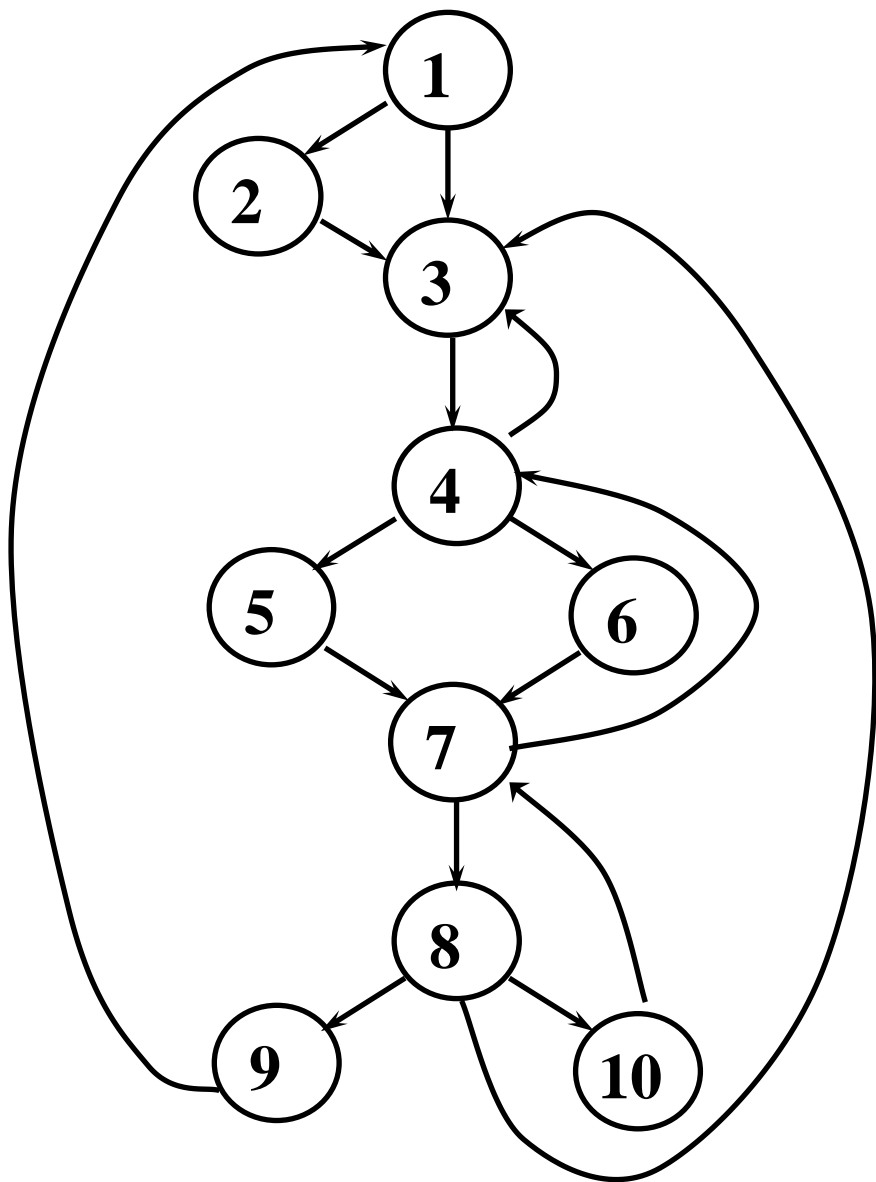
支配结点(Dominators)-举例



支配结点	支配对象
1	1-10
2	2
3	3-10
4	4-10
5	5
6	6
7	7-10
8	8-10
9	9
10	10



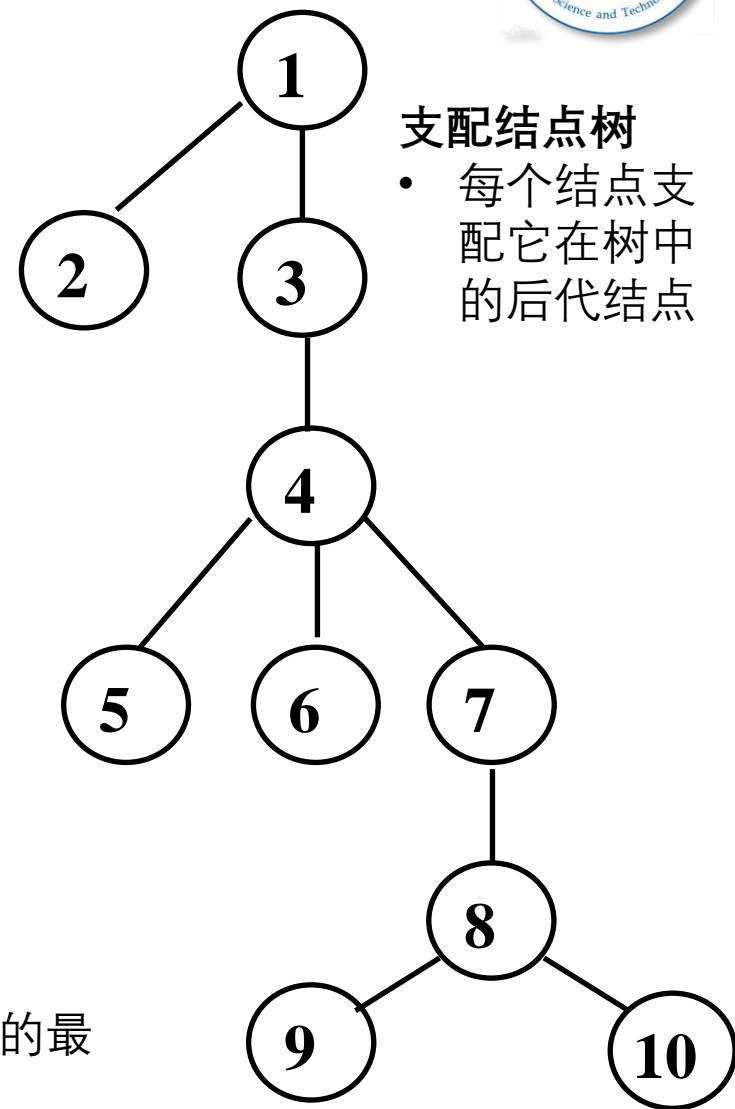
支配结点(Dominators)-举例



支配结点	支配对象
1	1-10
2	2
3	3-10
4	4-10
5	5
6	6
7	7-10
8	8-10
9	9
10	10

直接支配结点 (immediate dominator)

- 从入口结点到达n的所有路径上，结点n的最后一个支配结点



支配结点计算的数据流分析



□ 正向数据流分析

□ 支配结点计算的数据流方程

■ $IN[B]$: 在基本块 B 入口处的支配结点集合

■ $OUT[B]$: 在基本块 B 出口处的支配结点集合

□ 边界条件: $OUT[Entry] = \{Entry\}$

□ 初始化条件: $OUT[B] = N$

■ 除了 $Entry$ 以外的 B , N 为支配结点的全集

□ 约束方程

■ $OUT[B] = IN[B] \cup \{B\}$ (B not Entry)

■ $IN[B] = \bigcap_{P \text{ 是 } B \text{ 的前驱}} OUT[P]$ (B not Entry)

支配结点计算的数据流分析



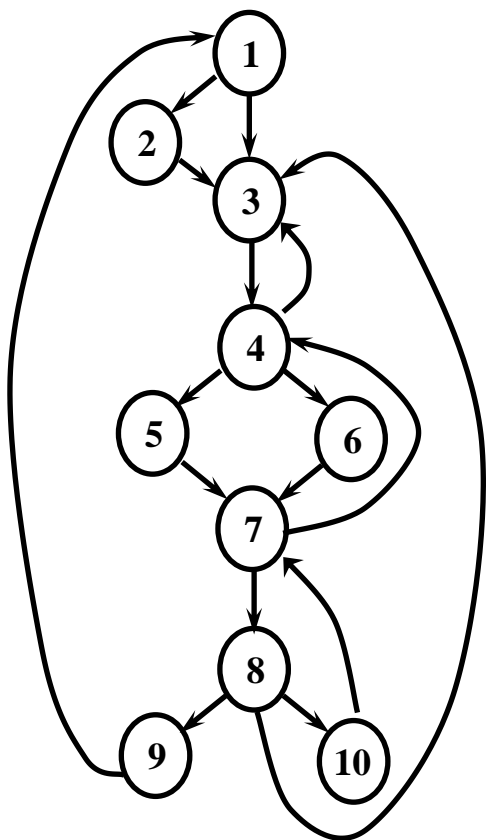
- ❑ 目标：寻找支配结点
- ❑ 输入：流图G，G的结点集N
- ❑ 输出：每个N中的结点n，支配n的所有结点的集合D(n)
- ❑ 边界条件：OUT[Entry] = {Entry}, 初始化：OUT[B] = N
- ❑ 正向分析

```
while(某个OUT值变化){  
    for(除Entry外的块B){  
        IN[B] =  $\cap_{P \text{ 是 } B \text{ 的前驱}} (\text{OUT}[P])$  //交集  
        OUT[B] = {B}  $\cup$  IN[B]  
    }  
}
```

支配结点计算的数据流分析



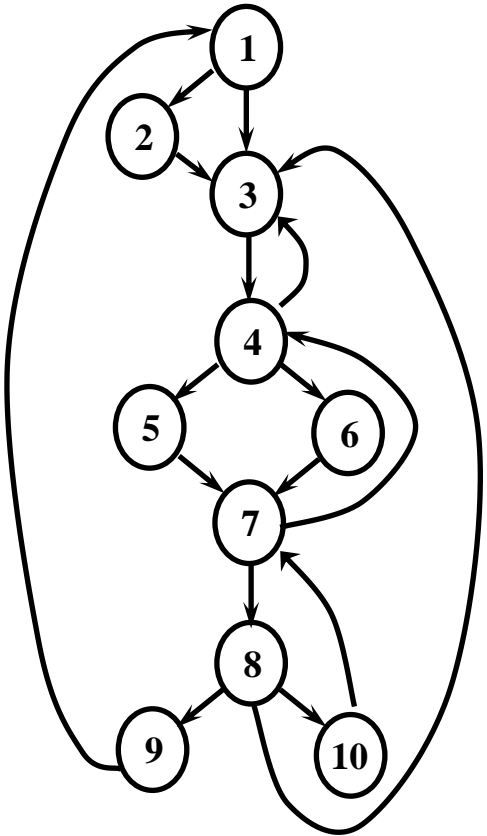
```
while(某个OUT值变化){  
  for(除Entry外的块B){  
     $IN[B] = \bigcap_{P \text{ 是 } B \text{ 的前驱}} (OUT[P])$  //交集  
     $OUT[B] = \{B\} \cup IN[B]$   
  }  
}
```



支配结点计算的数据流分析



```
while(某个OUT值变化){
  for(除Entry外的块B){
    IN[B] =  $\cap_{P \text{ 是 } B \text{ 的前驱}} (OUT[P])$  //交集
    OUT[B] = {B}  $\cup$  IN[B]
  }
}
```



	OUT ⁰ [B]	IN ¹ [B]	OUT ¹ [B]
Entry	{Entry}		
1	N	{Entry}	{Entry, 1}
2	N	{Entry, 1}	{Entry, 1, 2}
3	N	{Entry, 1}	{Entry, 1, 3}
4	N	{Entry, 1, 3}	{Entry, 1, 3, 4}
5	N	{Entry, 1, 3, 4}	{Entry, 1, 3, 4, 5}
6	N	{Entry, 1, 3, 4}	{Entry, 1, 3, 4, 6}
7	N	{Entry, 1, 3, 4}	{Entry, 1, 3, 4, 7}
8	N	{Entry, 1, 3, 4, 7}	{Entry, 1, 3, 4, 7, 8}
9	N	{Entry, 1, 3, 4, 7, 8}	{Entry, 1, 3, 4, 7, 8, 9}
10	N	{Entry, 1, 3, 4, 7, 8}	{Entry, 1, 3, 4, 7, 8, 10}

- 理解循环的重要意义
- 循环的一些基本概念
 - 支配结点
 - 深度优先排序
 - 回边
- 自然循环及其识别



- **深度优先搜索**

- 先序遍历（先左后右）

- 1,3,4,6,7,8,10,9,5,2

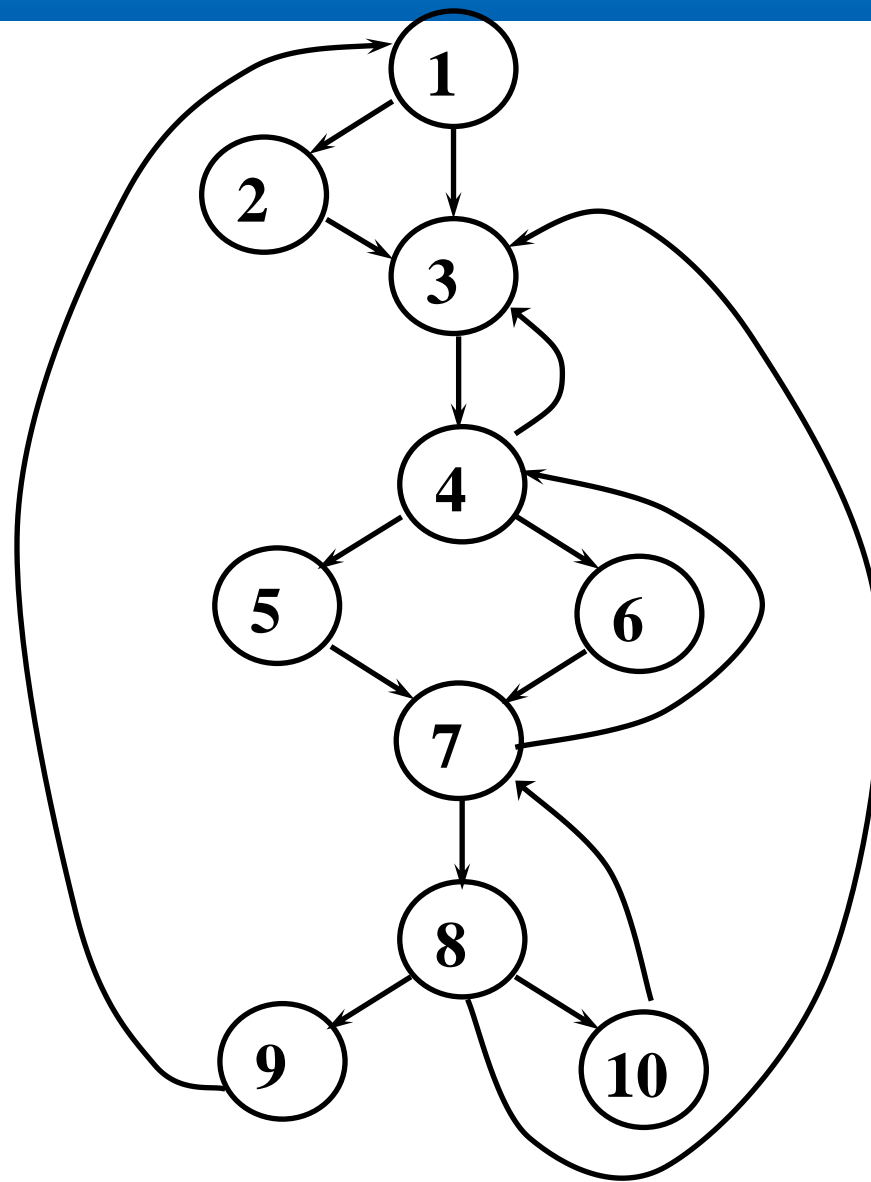
- 后序遍历

- 10,9,8,7,6,5,4,3,2,1

- **深度优先排序正好与后序遍历相反**

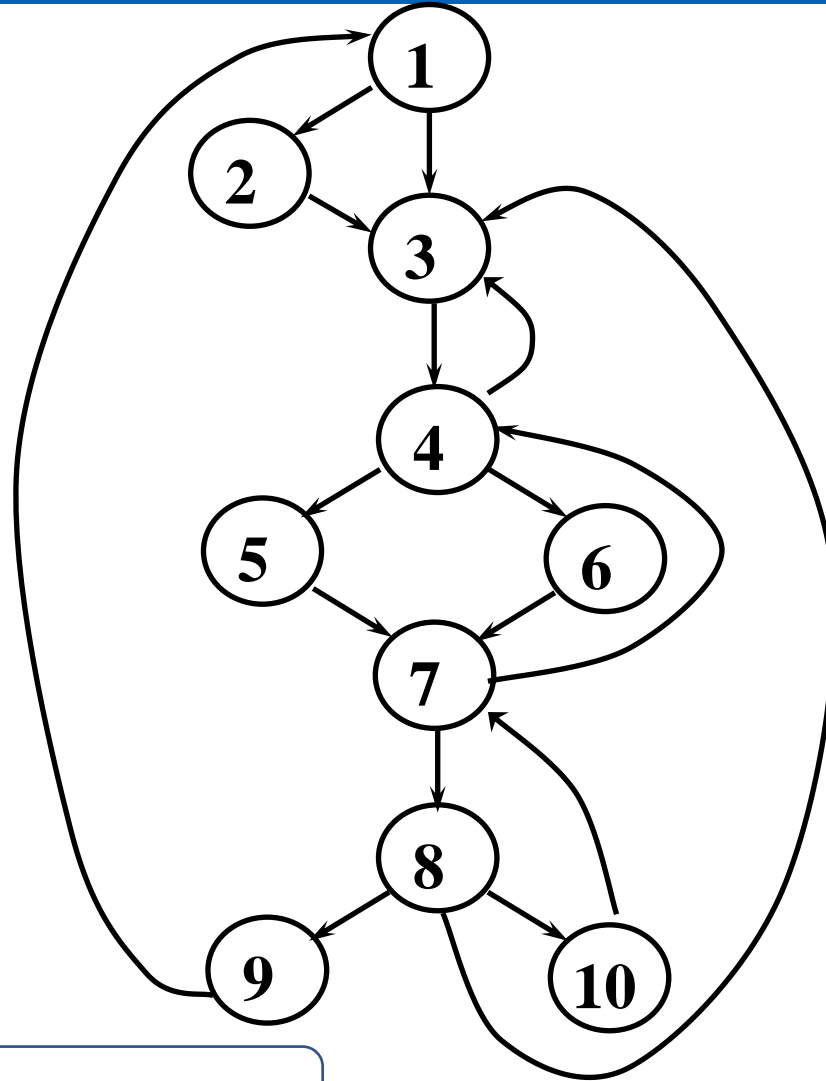
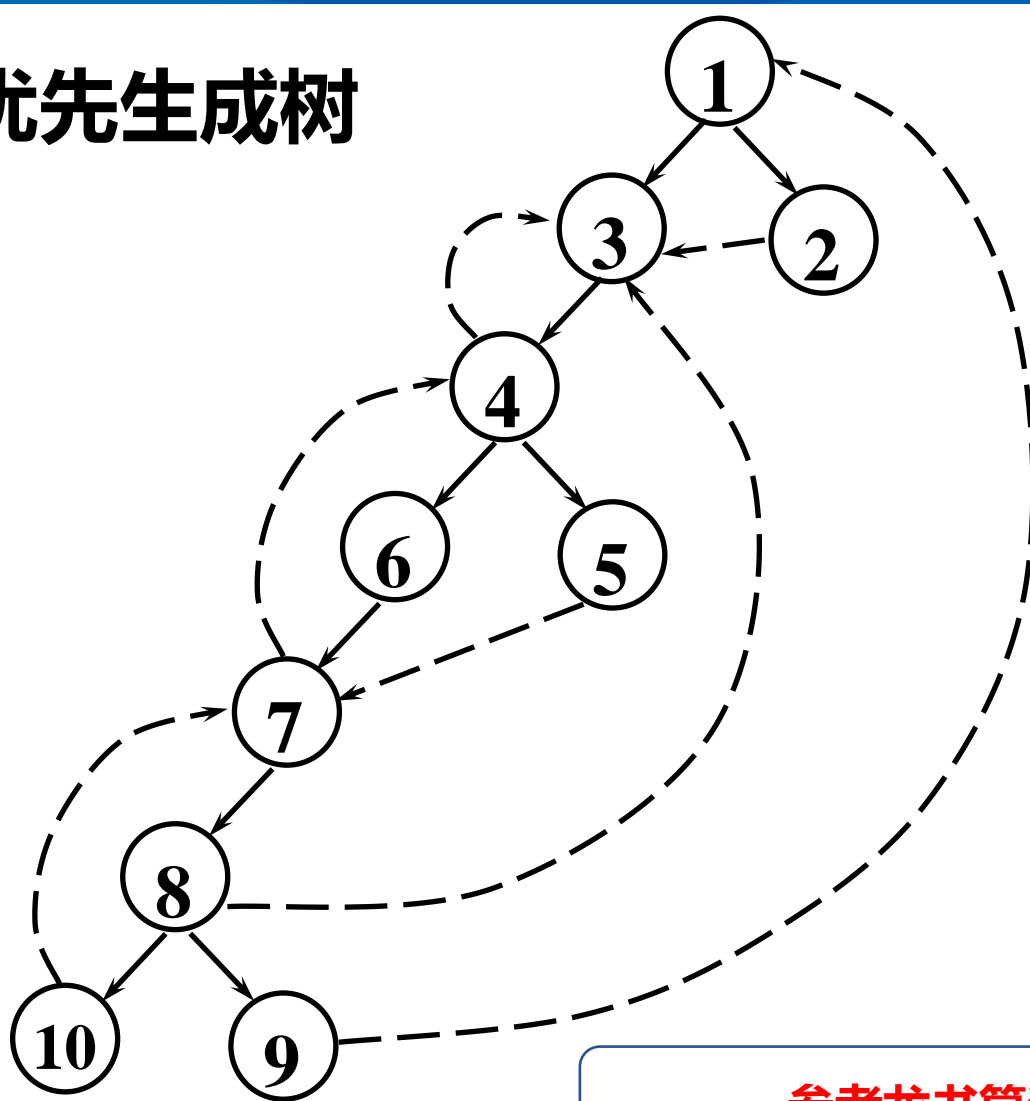
- 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10

- 先右后左





• 深度优先生成树



参考龙书算法9.41



• 前进边

- 深度优先生成树的边

• 后撤边

- 指向祖先节点

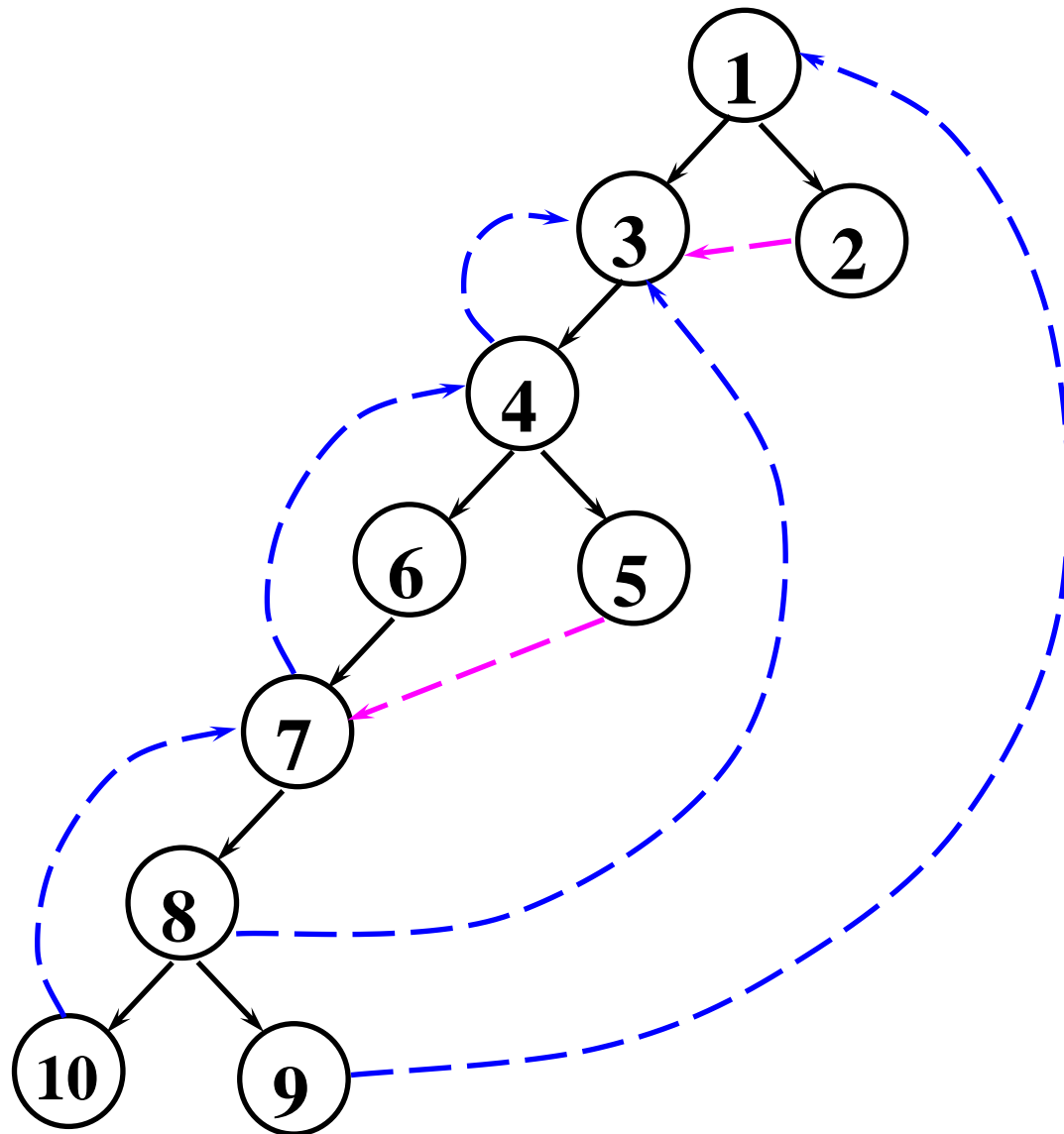
$4 \rightarrow 3$ 、 $7 \rightarrow 4$ 、 $10 \rightarrow 7$ 、

$8 \rightarrow 3$ 和 $9 \rightarrow 1$

□ 交叉边

- 在树中互不为祖先

$2 \rightarrow 3$ 和 $5 \rightarrow 7$



主要内容



□ 理解循环的重要意义

□ 循环的一些基本概念

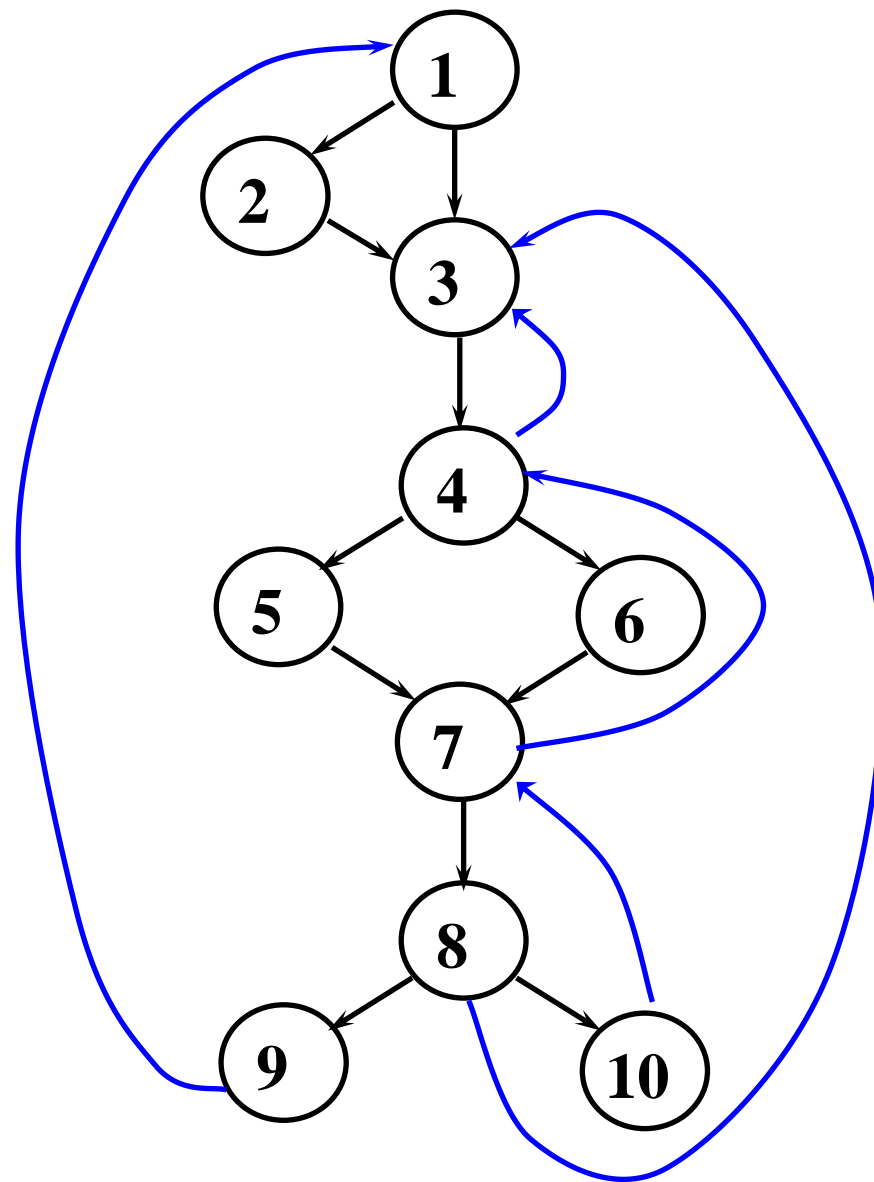
- 支配结点
- 深度优先排序
- 回边

□ 自然循环及其识别



• 回边

- 如果有 $a \text{ dom } b$, 那么边 $b \rightarrow a$ 叫做回边





• 回边

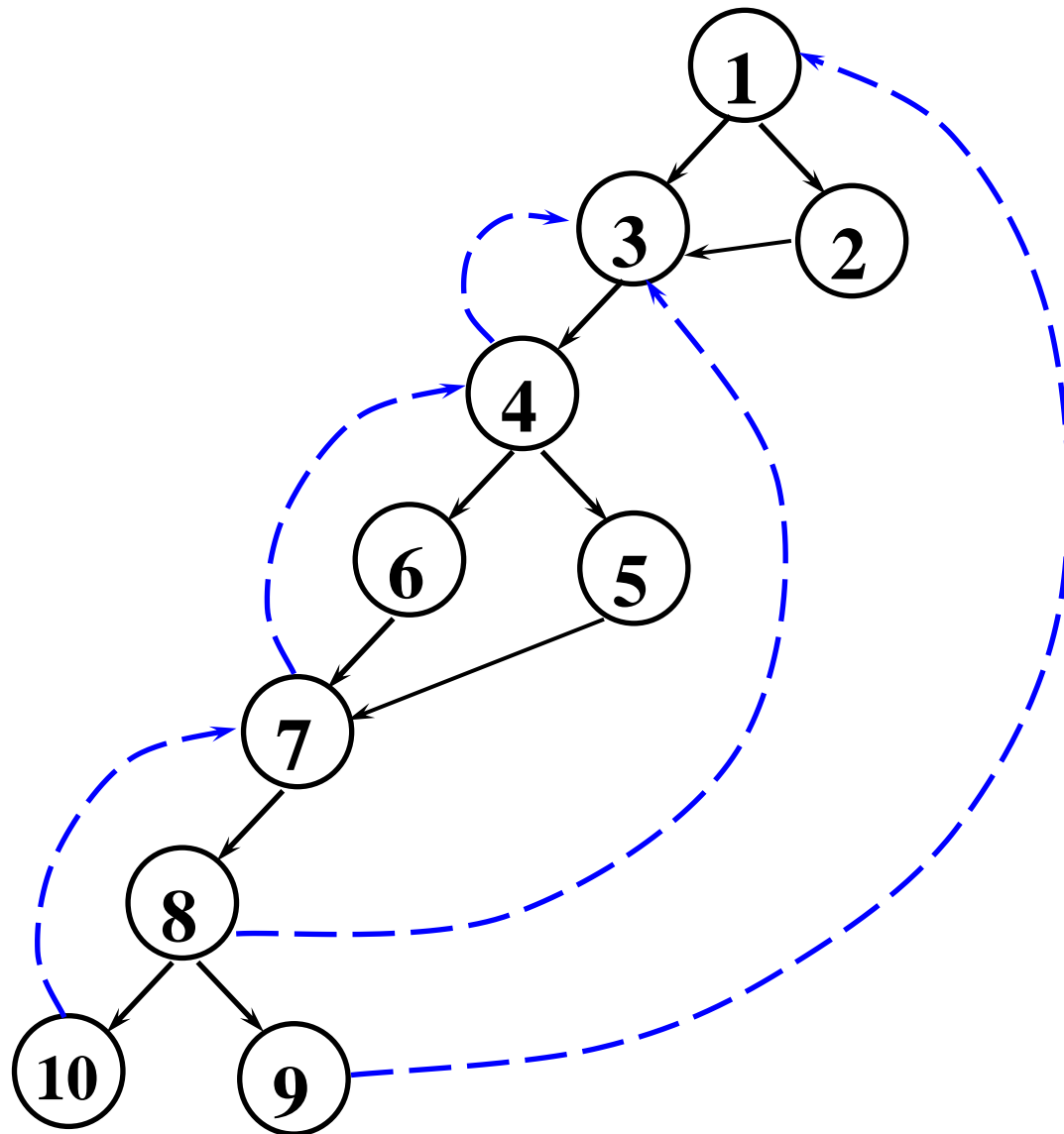
- 如果有 $a \text{ dom } b$, 那么边 $b \rightarrow a$ 叫做回边
- 如果流图可归约, 则后撤边正好就是回边

后撤边集合

$4 \rightarrow 3$ 、 $7 \rightarrow 4$ 、 $10 \rightarrow 7$ 、 $8 \rightarrow 3$ 和 $9 \rightarrow 1$

回边集合

$4 \rightarrow 3$ 、 $7 \rightarrow 4$ 、 $10 \rightarrow 7$ 、 $8 \rightarrow 3$ 和 $9 \rightarrow 1$



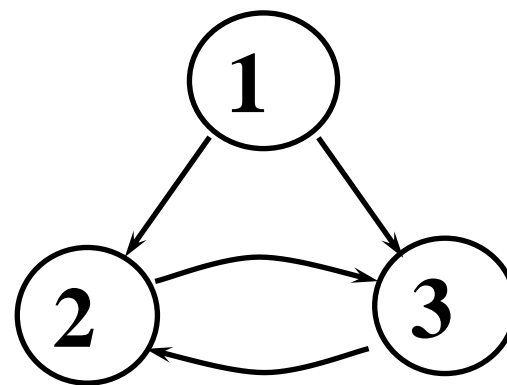


• 可归约流图

- 如果把一个流图中所有回边删掉后，剩余的图无环

• 例：不可归约流图

- 开始结点是1
- $2 \rightarrow 3$ 和 $3 \rightarrow 2$ 都不是回边
- 该图不是无环的
- 从结点2和3两处都能进入由它们构成的环



- 理解循环的重要意义
- 循环的一些基本概念
 - 支配结点
 - 深度优先排序
 - 回边
- 自然循环及其识别



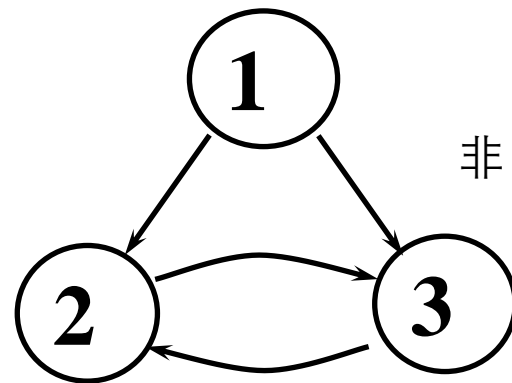
- **在源程序中，循环可以用多种形式描述**
 - for, while, goto 等
- **但从程序分析的角度来看，循环的代码形式并不重要，重要的是它是否具有一些易于优化的性质。**
 - 如果循环的入口结点唯一，那么我们就可以假设某些初始条件在循环的每一次迭代开头成立。



- **自然循环的性质**

- 有唯一的入口结点，叫做首结点，首结点支配该循环中所有结点
- 至少存在一条回边进入该循环首结点

- **自然循环是一种适合于优化的循环。**



非自然循环

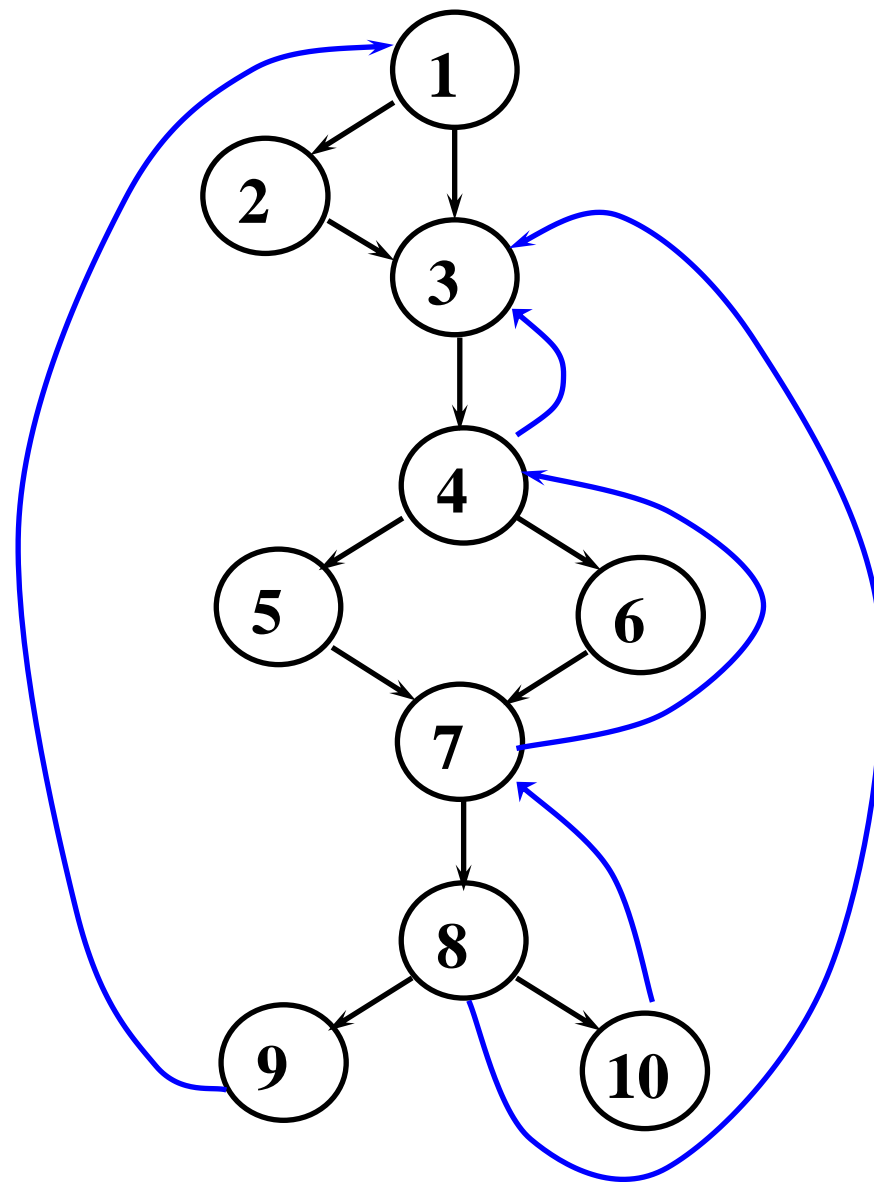


• 回边

- 如果有 $a \text{ dom } b$, 那么边 $b \rightarrow a$ 叫做回边

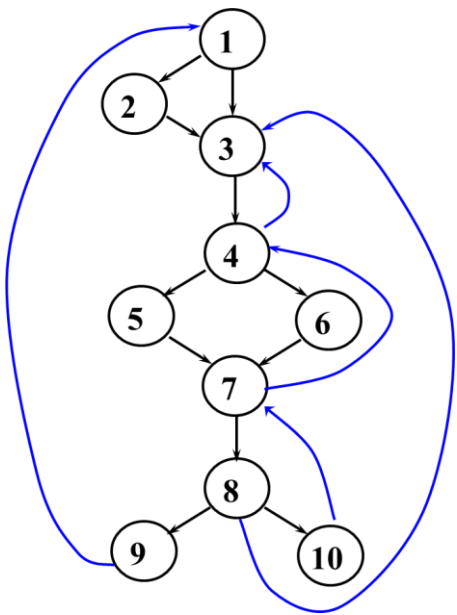
• 回边 $n \rightarrow d$ 确定的自然循环

- d 加上不经过 d 能到达 n 的所有结点
- 结点 d 是该循环的首结点





- 给定一条回边 $n \rightarrow d$ ，它所对应自然循环包含 d 加上不经过 d 能到达 n 的所有结点，且结点 d 是该循环的首结点



回边	自然循环
$4 \rightarrow 3$	{3,4,5,6,7,8,10}
$7 \rightarrow 4$	{4,5,6,7,8,10}
$8 \rightarrow 3$	{3,4,5,6,7,8,10}
$9 \rightarrow 1$	{1-10}
$10 \rightarrow 7$	{7,8,10}



自然循环识别的算法



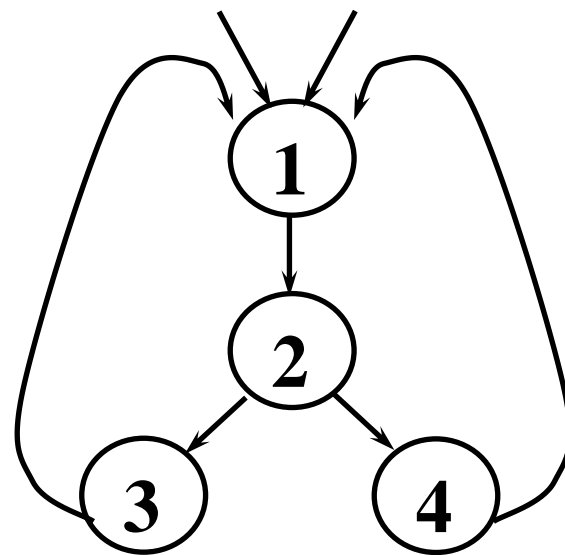
- 输入：流图 G 和回边 $n \rightarrow d$
- 输出：回边对应的自然循环的所有结点集合
- 算法：

```
stack = {}; loop = {n, d}; push(stack, n);
while(stack != {}){
    m = top(stack); pop(stack);
    for(p: p是m的前驱){
        if(p not in loop){
            loop = loop U {p};
            push(stack, p);
        }
    }
}
```



• 内循环

- 若一个循环的结点集合是另一个循环的结点集合的子集
- 两个循环有相同的首结点, 但并非一个结点集是另一个的子集, 则看成一个循环





一起努力 打造国产基础软硬件体系！

李 诚

国家高性能计算中心(合肥)、信息与计算机国家级实验教学示范中心

计算机科学与技术学院

2023年11月22日