

# 北京大学暑期课《ACM/ICPC竞赛训练》

北京大学信息学院 郭炜

[guo\\_wei@PKU.EDU.CN](mailto:guo_wei@PKU.EDU.CN)

<http://weibo.com/guoweiofpku>

课程网页: [http://acm.pku.edu.cn/summerschool/pku\\_acm\\_train.htm](http://acm.pku.edu.cn/summerschool/pku_acm_train.htm)



# 强连通分支、桥和割点

北京大学信息学院 郭炜

本讲义部分内容参考北京大学信息学院实验班袁洋、陈科吉同学讲义，  
特此致谢

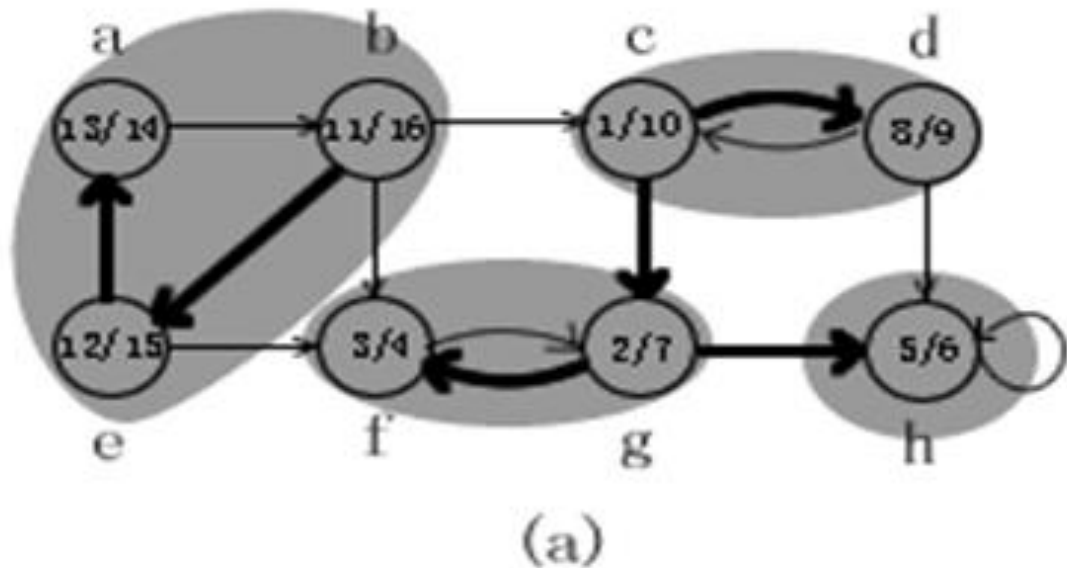
# 定义

- 在有向图 $G$ 中，如果任意两个不同的顶点相互可达，则称该有向图是强连通的。有向图 $G$ 的极大强连通子图称为 $G$ 的强连通分支。
- 转置图的定义：将有向图 $G$ 中的每一条边反向形成的图称为 $G$ 的转置 $G^T$ 。（注意到原图和 $G^T$ 的强连通分支是一样的）

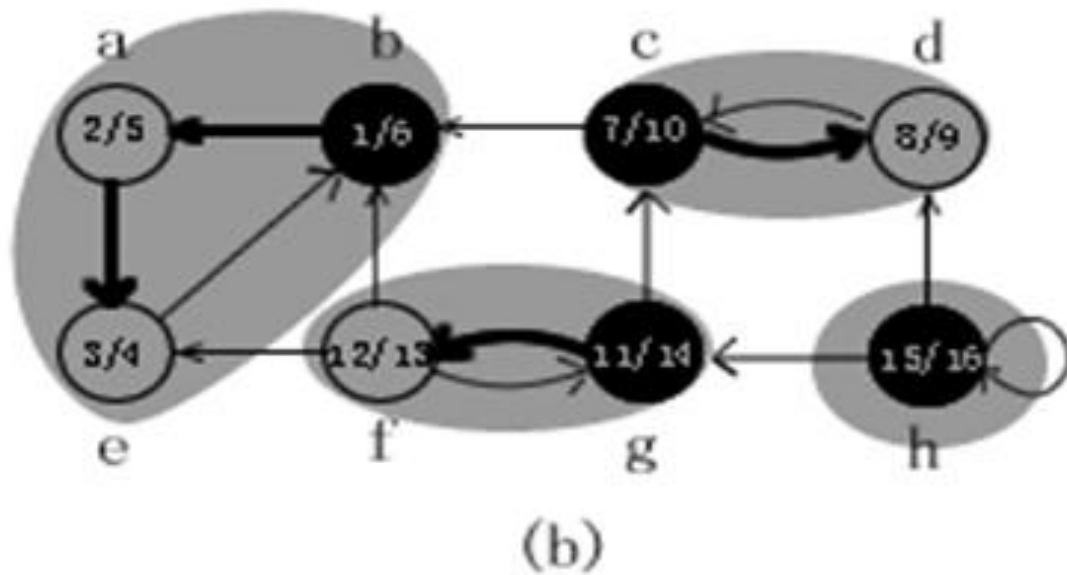
# Korasaju算法求有向图强连通分支

- procedure Strongly\_Connected\_Components(G);
- begin
- 1.深度优先遍历G，算出每个结点u的结束时间f[u],起点如何选择无所谓。
  - 2.深度优先遍历G的转置图 $G^T$ ，**选择遍历的起点时，按照结点的结束时间从大到小进行**。遍历的过程中，一边遍历，一边给结点做分类标记，每找到一个新的**起点**，分类标记值就加1。
- 3. 第2步中产生的标记值相同的结点构成深度优先森林中的一棵树，也即一个强连通分量
- end;
- **证明参考：**  
<http://www.bioisland.com/Algorithm/ShowArticle.asp?ArticleID=58>

(a) 为有向图G，其中的阴影部分是G的强连通分支，对每个顶点都标出了其发现时刻与完成时刻，黑色边为深度优先搜索的树枝；



(b)  $G^T$  依次以b, c, g, h为起点做DFS，得到4个强连通分量



# 算法复杂度分析

- 深度优先搜索的复杂度:  $\Theta(V + E)$
- 计算  $G^T$  的复杂度: 0 或者  $\Theta(V + E)$  (邻接表)
- 所以总的复杂度为:  $\Theta(V + E)$
- 非常好的算法!

# POJ2186:Popular Cows

- 给定一个有向图，求有多少个顶点是由任何顶点出发都可达的。
- 顶点数  $\leq 10,000$ , 边数  $\leq 50,000$

# 有用的定理:

有向无环图中唯一出度为0的点，一定可以由任何点出发均可达（由于无环，所以从任何点出发往前走，必然终止于一个出度为0的点）



# POJ2186: 解题思路

- 1. 求出所有强连通分量
- 2. 每个强连通分量缩成一点，则形成一个有向无环图DAG。
- 3. DAG上面如果有唯一的出度为0的点，则该点能被所有的点可达。那么该点所代表的连通分量上的所有的原图中的点，都能被原图中的所有点可达，则该连通分量的点数，就是答案。
- 4. DAG上面如果有不止一个出度为0的点，则这些点互相不可达，原问题无解，答案为0

# POJ2186: 解题思路

- 缩点的时候不一定要构造新图，只要把不同强连通分量的点染不同颜色，然后考察各种颜色的点有没有连到别的颜色的边即可（即其对应的缩点后的DAG图上的点是否有出边）。

# POJ1236: Network of Schools

- 题目大意：  $N(2 < N < 100)$  各学校之间有单向的网络，每个学校得到一套软件后，可以通过单向网络向周边的学校传输，问题1：初始至少需要向多少个学校发放软件，使得网络内所有的学校最终都能得到软件。2，至少需要添加几条传输线路(边)，使任意向一个学校发放软件后，经过若干次传送，网络内所有的学校最终都能得到软件。

# ACM1236: Network of Schools

- 给定一个有向图，求：
  - 1) 至少要选几个顶点，才能做到从这些顶点出发，可以到达全部顶点
  - 2) 至少要加多少条边，才能使得从任何一个顶点出发，都能到达全部顶点
- 顶点数  $\leq 100$

# 有用的定理:

有向无环图中所有入度不为0的点，一定可以由某个入度为0的点出发可达。

(由于无环，所以从任何入度不为0的点往回走，必然终止于一个入度为0的点)

# ACM1236: 解题思路

- 1. 求出所有强连通分量
- 2. 每个强连通分量缩成一点，则形成一个有向无环图DAG。
- 3. DAG上面有多少个入度为0的顶点，问题1的答案就是多少

# ACM1236: 解题思路

- 在DAG上要加几条边，才能使得DAG变成强连通的，问题2的答案就是多少
- 加边的方法：
- 要为每个入度为0的点添加入边，为每个出度为0的点添加出边
- 假定有  $n$  个入度为0的点， $m$ 个出度为0的点， $\max(m, n)$  就是第二个问题的解(证明难，略)



# 有向图强连通分支的Tarjan算法

- 做一遍DFS，用 $dfn[i]$ 表示编号为 $i$ 的节点在DFS过程中的访问序号(也可以叫做开始时间)。在DFS过程中会形成一搜索树。在搜索树上越先遍历到的节点，显然 $dfn$ 的值就越小。 $dfn$ 值越小的节点，就称为越“早”。

- 用 $low[i]$ 表示从 $i$ 节点出发DFS过程中 $i$ 下方节点(开始时间大于 $dfn[i]$ ，且由 $i$ 可达的节点)所能到达的最早的节点的开始时间。初始时 $low[i]=dfn[i]$

- DFS过程中，碰到哪个节点，就将哪个节点入栈。栈中节点只有在其所属的强连通分量已经全部求出时，才会出栈。

- 如果发现某节点 $u$ 有边连到栈里的节点 $v$ ，则更新 $u$ 的 $low$  值为 $\min(low[u], dfn[v])$ ，若 $low[u]$ 被更新为 $dfn[v]$ ，则表明目前发现 $u$ 可达的最早的节点是 $v$ 。



# 有向图强连通分支的Tarjan算法

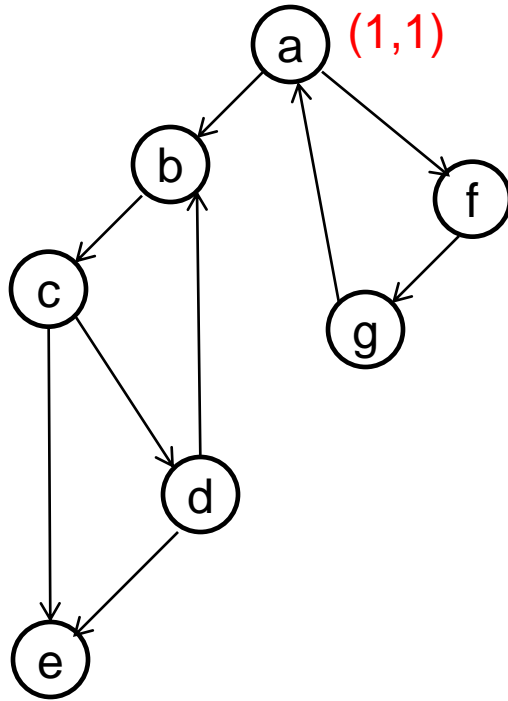
- 对于u的子节点v，从v出发进行的DFS结束回到u时，使得  $\text{low}[u] = \min(\text{low}[u], \text{low}[v])$ 。因为u可达v，所以v可达的最早的节点，也是u可达的。
- 如果一个节点u，从其出发进行的DFS已经全部完成并回到u，而且此时其low值等于dfn值，则说明u可达的所有节点，都不能到达任何比u早的节点 - --- 那么该节点u就是一个强连通分量在DFS搜索树中的根。
- 此时，显然栈中u上方的节点，都是不能到达比u早的节点的。将栈中节点弹出，一直弹到u(包括u)，弹出的节点就构成了一个强连通分量。

## 有向图强连通分支的Tarjan算法

```
void Tarjan(u) {  
    dfn[u]=low[u]=++index  
    stack.push(u)  
    for each (u, v) in E {  
        if (v is not visted) {  
            tarjan(v)  
            low[u] = min(low[u], low[v])  
        }  
        else if (v in stack) {  
            low[u] = min(low[u], dfn[v])  
        }  
    }  
    if (dfn[u] == low[u]) { //u是一个强连通分量的根  
        repeat  
            v = stack.pop  
            print v  
        until (u== v)  
    } //退栈，把整个强连通分量都弹出来  
} //复杂度是O(E+V)的
```

(dfn,low)

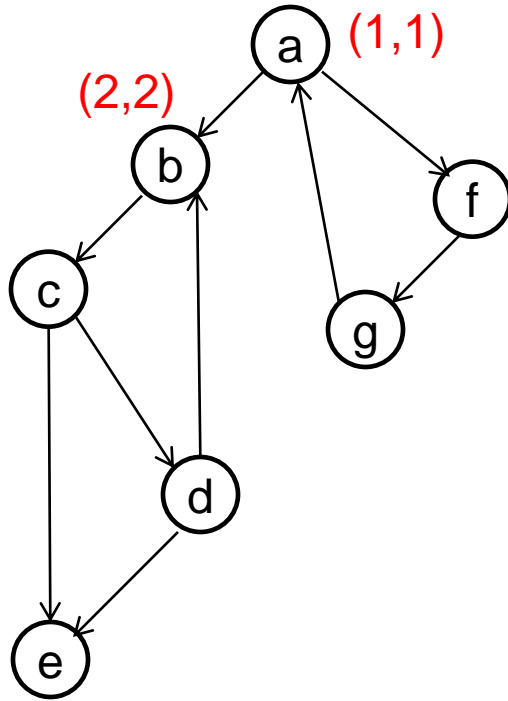
栈



a

(dfn,low)

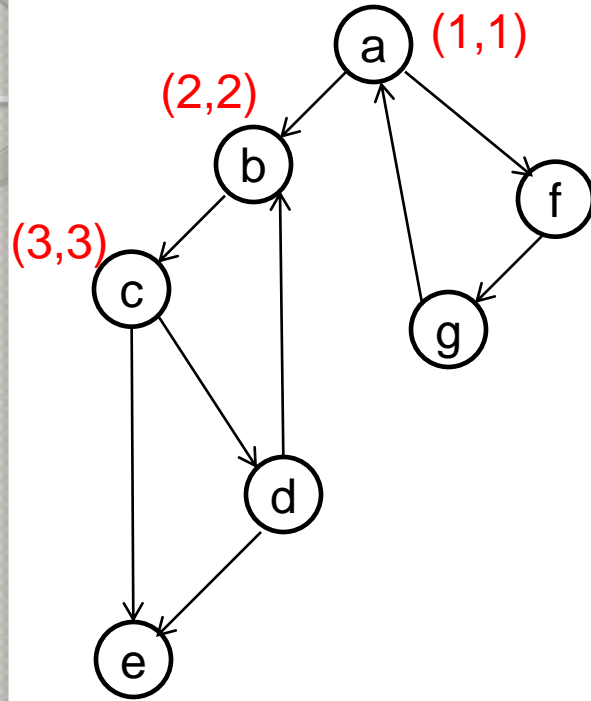
栈



b
a

(dfn,low)

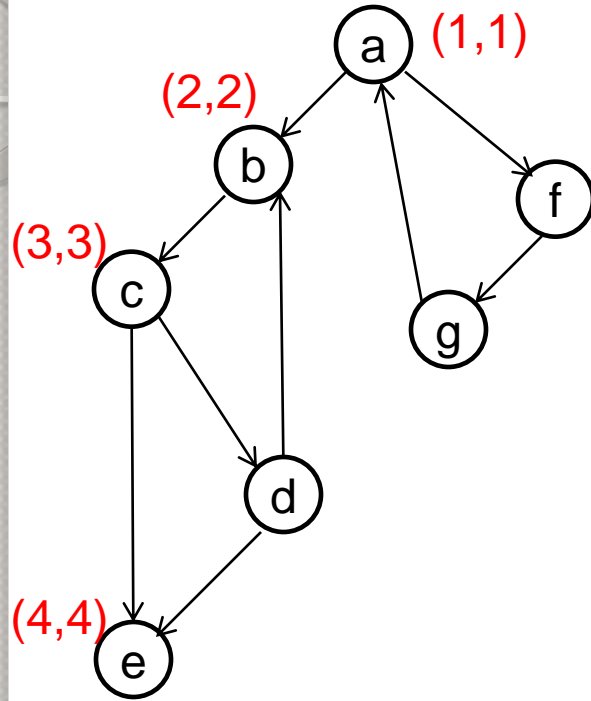
栈



c
b
a

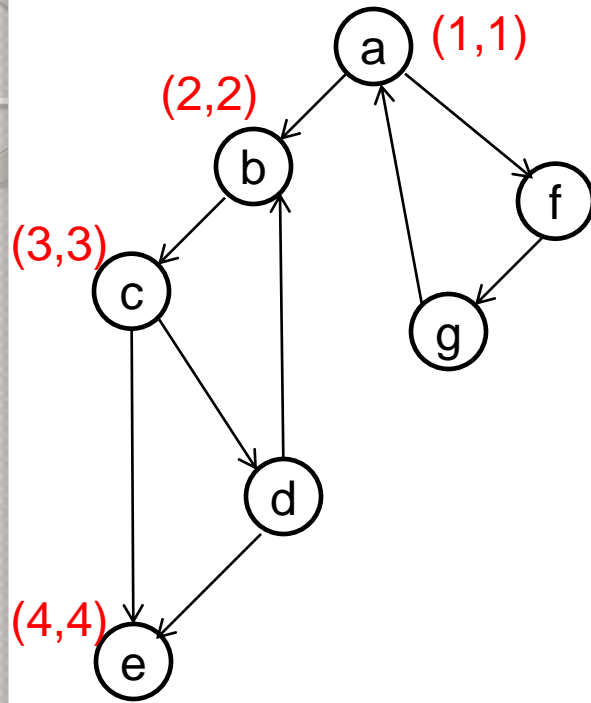
(dfn,low)

栈



e
c
b
a

(dfn,low)



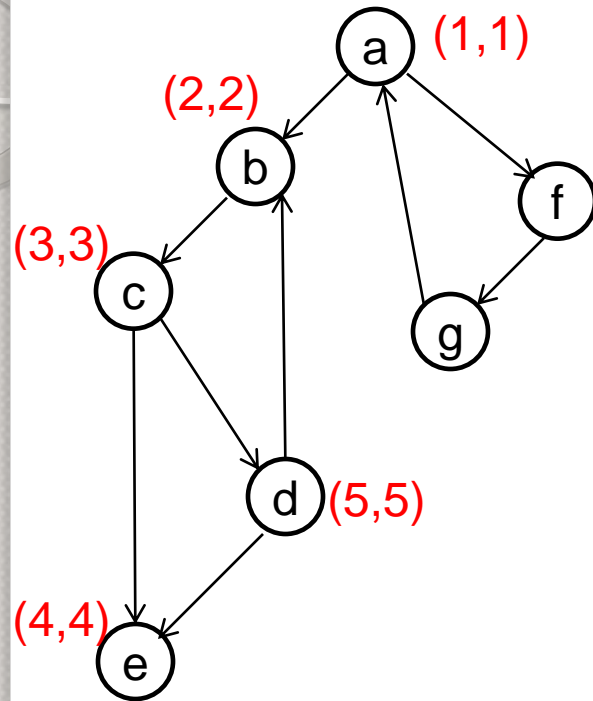
栈

强连通分量:

{e}

c
b
a

(dfn,low)



栈

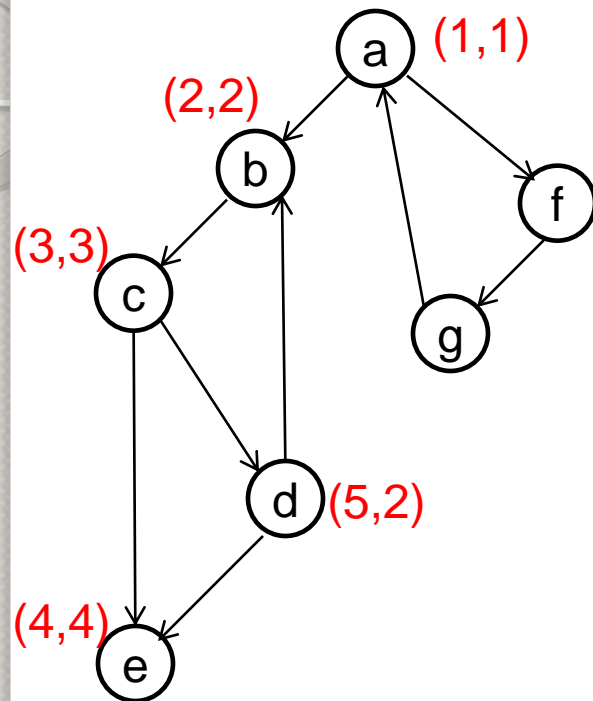
强连通分量:

{e}

d
c
b
a



(dfn,low)



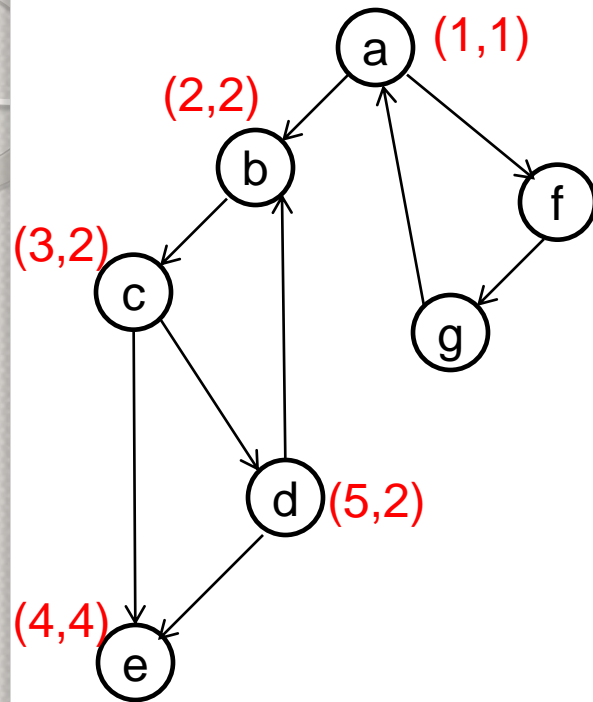
栈

强连通分量:

{e}

d
c
b
a

(dfn,low)



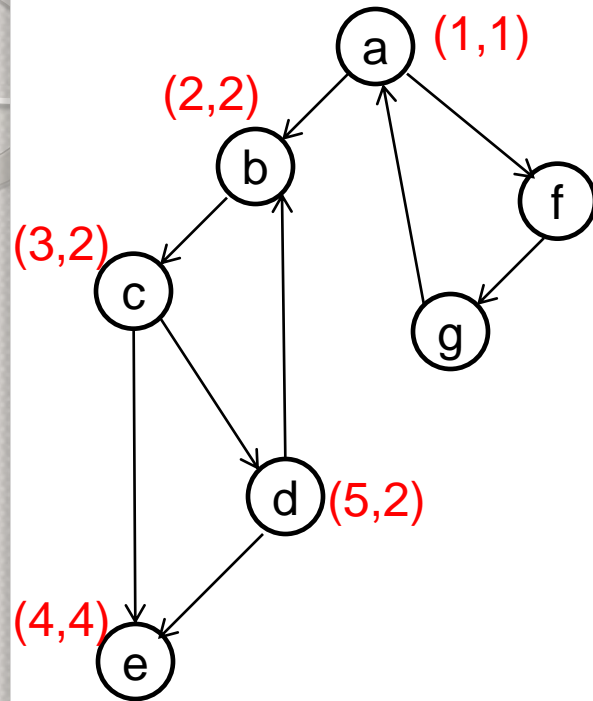
栈

强连通分量:

{e}

d
c
b
a

(dfn,low)



栈

强连通分量:

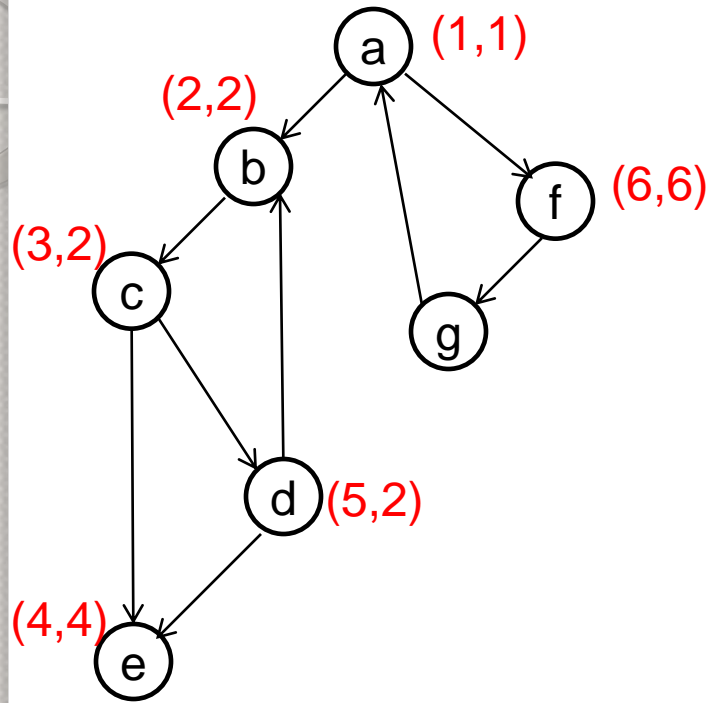
{e}

{b c d}

a

(dfn,low)

栈



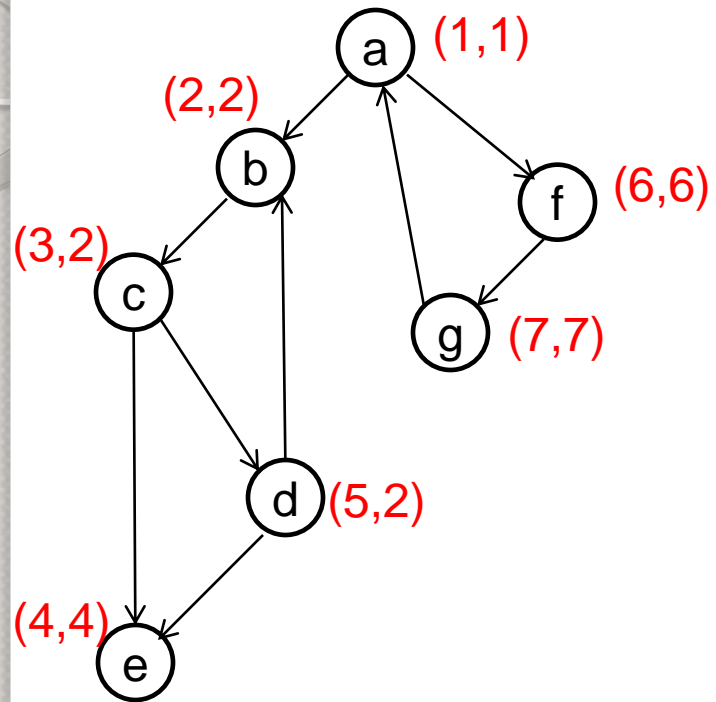
强连通分量:

{e}

{b c d}

f
a

(dfn,low)



栈

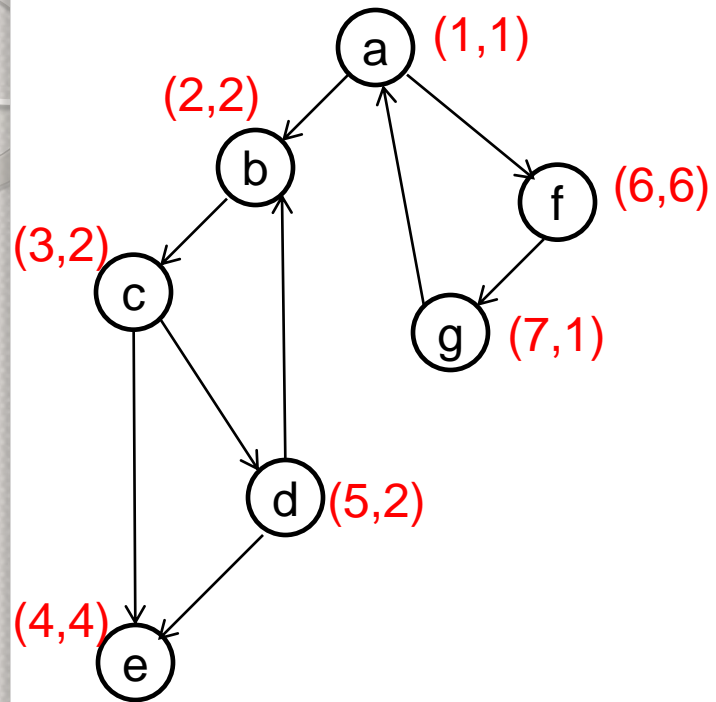
强连通分量:

{e}

{b c d}

g
f
a

(dfn,low)



栈

g
f
a

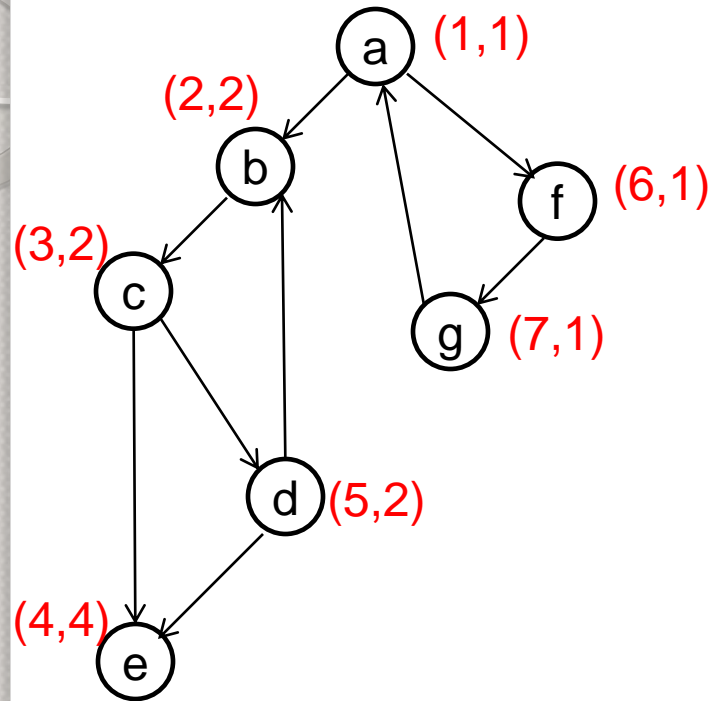
强连通分量:

{e}

{b c d}

(dfn,low)

栈



强连通分量:

{e}

{b c d}

{a f g}

# 有向图强连通分支的Tarjan算法

为什么从 $u$ 出发的DFS全部结束回到 $u$ 时，若 $dfn[u]=low[u]$ ，此时将栈中 $u$ 及其上方的节点弹出，就找到了一个强连通分量？

此时所有节点分成以下几类：

- 1) 还没被访问过的节点
- 2) 栈中比 $u$ 早的节点(在 $u$ 下方)
- 3) 栈中比 $u$ 晚的节点(在 $u$ 上方)
- 4) 栈中的 $u$
- 5) 曾经入栈（访问过），又出了栈的节点

要证明1) 2) 5) 三类节点，都是要么从 $u$ 不可达，要么不可达 $u$ ，且 3) 4) 类节点互相可达



# 有向图强连通分支的Tarjan算法

此时所有节点分成以下几类：

- 1) 还没被访问过的节点(显然由 $u$ 不可达)
- 2) 栈中比 $u$ 早的节点 (由 $u$ 不可达, 因为 $low[u]=dfn[u]$ )
- 3) 栈中比 $u$ 晚的节点 (由 $u$ 可达)
- 4) 栈中的 $u$
- 5) 曾经入栈 (访问过), 又出了栈的节点 (不可达 $u$ )

要证明：

1. 第5)类节点不可达 $u$
2. 第3)类节点可达 $u$

# 有向图强连通分支的Tarjan算法

1. 证第5)类节点不可达 $u$

此类节点分成两部分：

1) 早于 $u$ 的

2) 晚于 $u$ 的

早于 $u$ 的不可达 $u$ 。若可达的话，它此时应该还在栈里面， $u$ 的下面 ---导致矛盾。

第2类中，任取节点 $x$ ,假设 $x$ 可达的最早节点是 $y$ ，则 $y$ 一定晚于 $u$ , 即  $x$ 不可达 $u$ .

# 有向图强连通分支的Tarjan算法

第2类中，任取节点 $x$ 。 $x$ 之所以已经被弹出栈，一定是因为最终  $\text{low}[x] = \text{dfn}[x]$ ，或 $x$ 位于某个 $y$ 节点上方，由 $y$ 可达，且 $y$ 满足条件：最终的  $\text{low}[y] = \text{dfn}[y]$ 。因为 $y$ 曾经出现在 $u$ 的上方，所以 $y$ 一定晚于 $u$ 。因为 $\text{low}[x]$ 不可能小于等于 $\text{dfn}[u]$ （否则 $\text{low}[y]$ 就也会小于等于 $\text{dfn}[u]$ ，这和 $\text{low}[y] = \text{dfn}[y]$ 矛盾），所以 $x$ 到达不了 $u$ 及比 $u$ 早的节点。

1. 证第5)类节点不可达 $u$  证毕

# 有向图强连通分支的Tarjan算法

## 2. 第3)类节点可达u

若有此类节点x不可达u，则考虑最终的 $\text{low}[x]$ ：

$\text{low}[x] < \text{dfn}[u]$       不可能，否则有  $\text{low}[u] < \text{dfn}[u]$

$\text{low}[x] = \text{dfn}[u]$       x可达u

其他：

寻找x所能到达的最早的，栈里面的节点y,则y必然比u晚。而且有  $\text{low}[y] = \text{dfn}[y]$ （若此条不成立，则x还能到达比y更早的节点，矛盾）。而若  $\text{low}[y] = \text{dfn}[y]$ ，则y应该已经被弹出栈了，y上方的x当然也已经不再栈中，这和x是第3类节点矛盾。

# 无向连通图求割点和桥

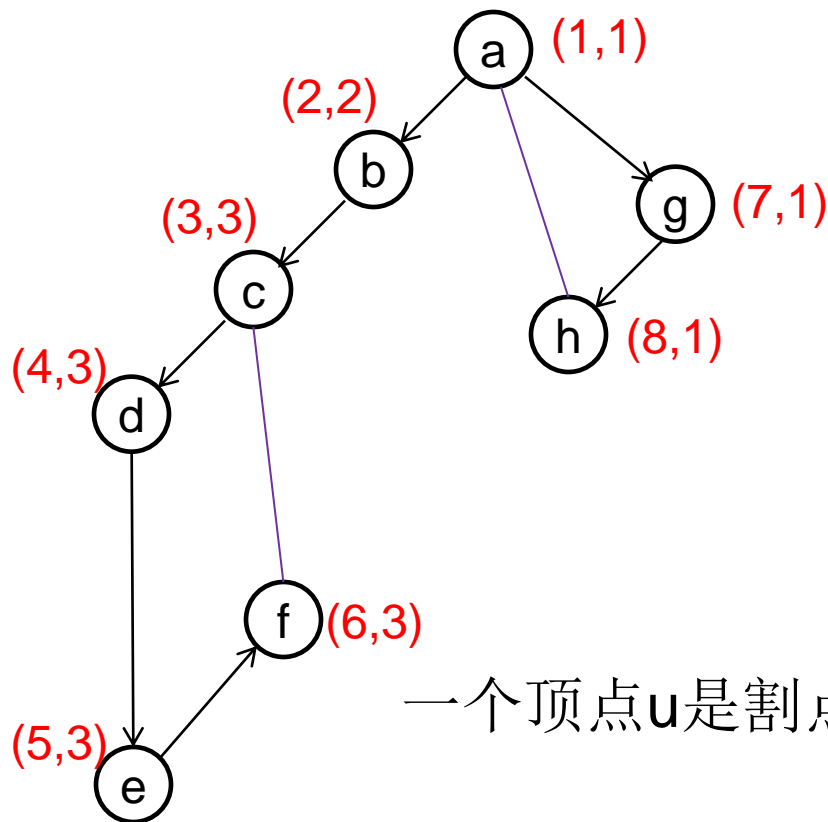
- 无向连通图中，如果删除某点后，图变成不连通，则称该点为割点。
- 无向连通图中，如果删除某边后，图变成不连通，则称该边为桥。

# 求桥和割点的Tarjan算法

思路和有向图求强连通分量类似

在深度优先遍历整个图过程中形成的一棵搜索树

$dfn[u]$ 定义和前面类似，但是 $low[u]$ 定义为u或者u的子树中能够通过非父子边(父子边就是搜索树上的边)追溯到的最早的节点的DFS开始时间



割点:

c b a

桥

ab

bc

一个顶点 $u$ 是割点，当且仅当满足(1)或(2)

(1)  $u$ 为树根，且 $u$ 有多于一个子树。

(2)  $u$ 不为树根，且存在 $(u,v)$ 为树枝边(或称父子边，即 $u$ 为 $v$ 在搜索树中的父亲)，使得 $dfn(u) \leq low(v)$ 。

非树枝边不可能是桥

一条边 $(u,v)$ 是桥，当且仅当 $(u,v)$ 为树枝边，且满足 $dfn(u) < low(v)$ （前提是其没有重边）。

# 求桥和割点的Tarjan算法

- $low[u]$  定义为  $u$  或者  $u$  的子树中能够通过非父子边追溯到的最早的节点的DFS开始时间
- 如果下面程序没有：  
**if( $v$  不是  $u$  的父节点)**  
则求不出桥了



## 求桥和割点和桥的Tarjan算法

```
Tarjan(u) {  
    d[u]=low[u]=++index  
    for each (u, v) in E {  
        if (v is not visted)  
            tarjan(v)  
            low[u] = min(low[u], low[v])  
             $d[u] < low[v] \Leftrightarrow (u, v) \text{ 是桥}$   
        }  
        else {  
             $\text{if}(v \text{ 不是 } u \text{ 的父节点})$   
                low[u] = min(low[u], d[v])  
        }  
    }  
    if (u is root)  
        u 是割点  $\Leftrightarrow$  u 有至少两个子节点  
    else  
        u 是割点  $\Leftrightarrow$  u 有一个子节点v, 满足  $d[u] \leq low[v]$   
}
```

# Tarjan's algorithm

- 也可以先用Tajan()进行dfs算出所有点的low和dfn值，并记录dfs过程中每个点的父节点，然后再把所有点看一遍，看其low和dfn,以找出割点和桥。
- 找桥的时候，要注意看有没有重边。有重边，则不是桥。

# 无重边连通无向图求割点和桥的程序 给出点数和所有的边，求割点和桥

Input: (11点13边)

11 13

1 2

1 4

1 5

1 6

2 11

2 3

4 3

4 9

5 8

5 7

6 7

7 10

11 3

output:

1

4

5

7

5,8

4,9

7,10

//无重边连通无向图求割点和桥的程序

```
#include <iostream>
```

```
#include <vector>
```

```
using namespace std;
```

```
#define MyMax 200
```

```
typedef vector<int> Edge;
```

```
vector<Edge> G(MyMax);
```

```
bool Visited[MyMax] ;
```

```
int dfn[MyMax] ;
```

```
int low[MyMax] ;
```

```
int Father[MyMax]; //DFS树中每个点的父节点
```

```
bool blsCutVetext[MyMax]; //每个点是不是割点
```

```
int nTime; //Dfs时间戳
```

```
int n,m; //n是点数，m是边数
```

```
void Tarjan(int u, int father) //father 是u的父节点
{
    Father[u] = father;
    int i,j,k;
    low[u] = dfn[u] = nTime ++;
    for( i = 0;i < G[u].size() ;i ++ ) {
        int v = G[u][i];
        if( ! dfn[v]) {
            Tarjan(v,u);
            low[u] = min(low[u],low[v]);
        }
        else if( father != v ) //连到父节点的回边不考虑,
        否则求不出桥
            low[u] = min(low[u],dfn[v]);
    }
}
```

```
void Count()
```

```
{ //计算割点和桥
```

```
    int nRootSons = 0;          int i;
```

```
    Tarjan(1,0);
```

```
    for( i = 2;i <= n;i ++ ) {
```

```
        int v = Father[i];
```

```
        if( v == 1 )
```

```
            nRootSons ++; //DFS树中根节点有几个子树
```

```
        else {
```

```
            if( dfn[v] <= low[i])
```

```
                blsCutVetext[v] = true;
```

```
        }
```

```
    }
```

```
    if( nRootSons > 1)
```

```
        blsCutVetext[1] = true;
```

```
    for( i = 1;i <= n;i ++ )
```

```
        if( blsCutVetext[i] )
```

```
            cout << i << endl;
```

```
    for( i = 1;i <= n;i ++ ) {
```

```
        int v = Father[i];
```

```
        if(v >0 && dfn[v] < low[i])
```

```
            cout << v << ", " << i << endl;
```

```
    }
```

```
}
```

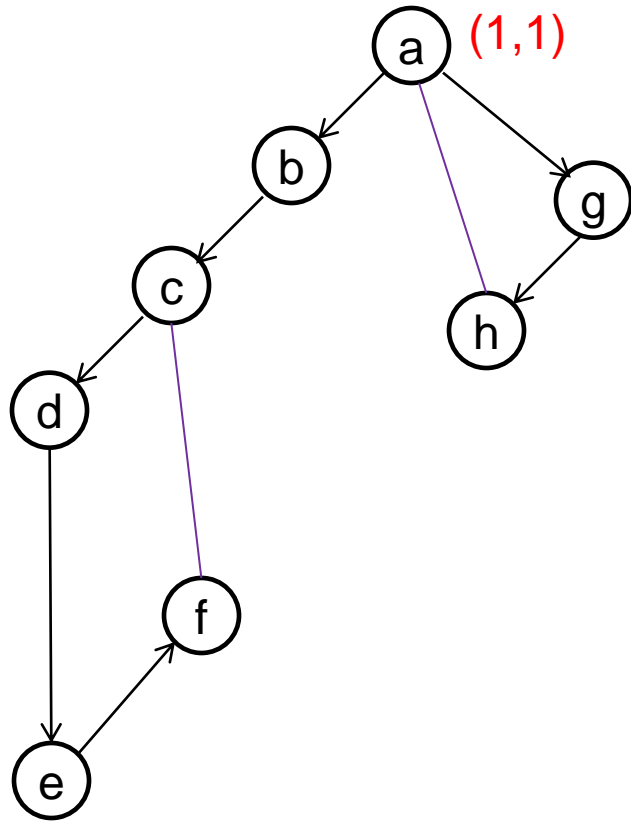
```
int main()
{
    int u,v;
    int i;

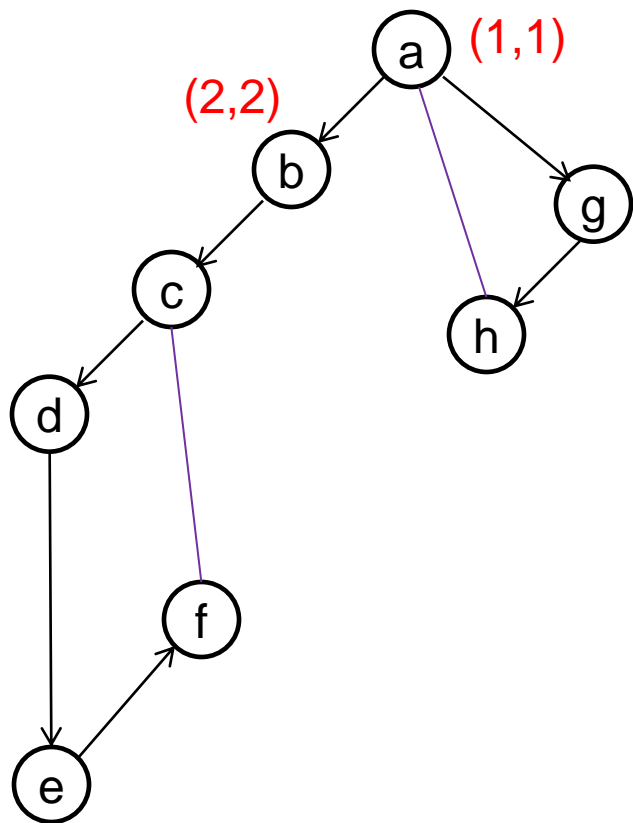
    nTime = 1;
    cin >> n >> m ; //n是点数， m是边数
    for( i = 1;i <= m;i ++ ) {
        cin >> u >> v; //点编号从1开始
        G[v].push_back(u);
        G[u].push_back(v);
    }
    memset( dfn,0,sizeof(dfn));
    memset( Father,0,sizeof(Father));
    memset( blsCutVetext,0,sizeof(blsCutVetext));
    Count();
    return 0;
}
```

# 求无向图连通图点双连通分支(不包含割点的极大连通子图)：

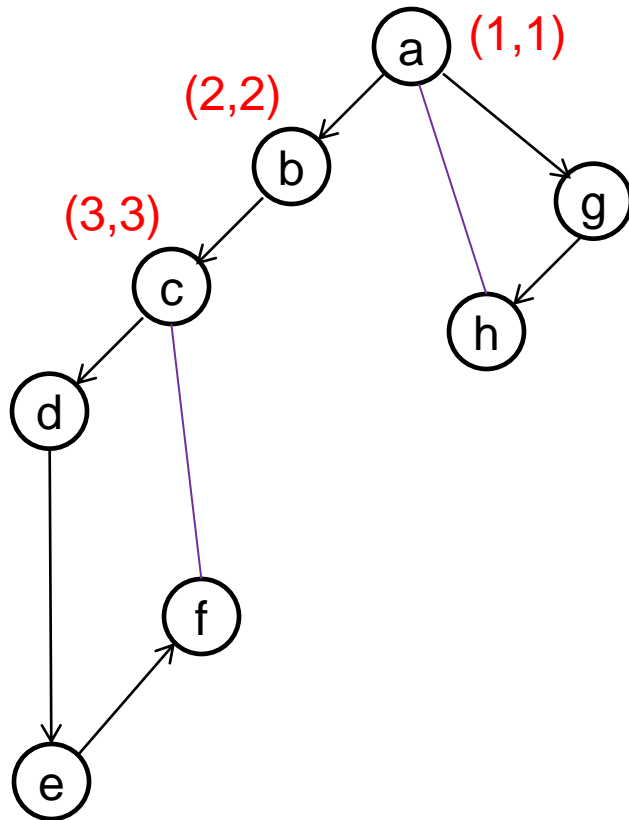
- 对于点双连通分支，实际上在求割点的过程中就能顺便把每个点双连通分支求出。建立一个栈，存储当前双连通分支，在搜索图时，每找到一条树枝边或反向边(连到树中祖先的边)，就把这条边加入栈中。如果遇到某树枝边  $(u,v)$  满足  $dfn(u) \leq low(v)$ ，说明  $u$  是一个割点，此时把边从栈顶一个个取出，直到遇到了边  $(u,v)$ ，取出的这些边与其关联的点，组成一个点双连通分支。割点可以属于多个点双连通分支，其余点和每条边只属于且属于一个点双连通分支。



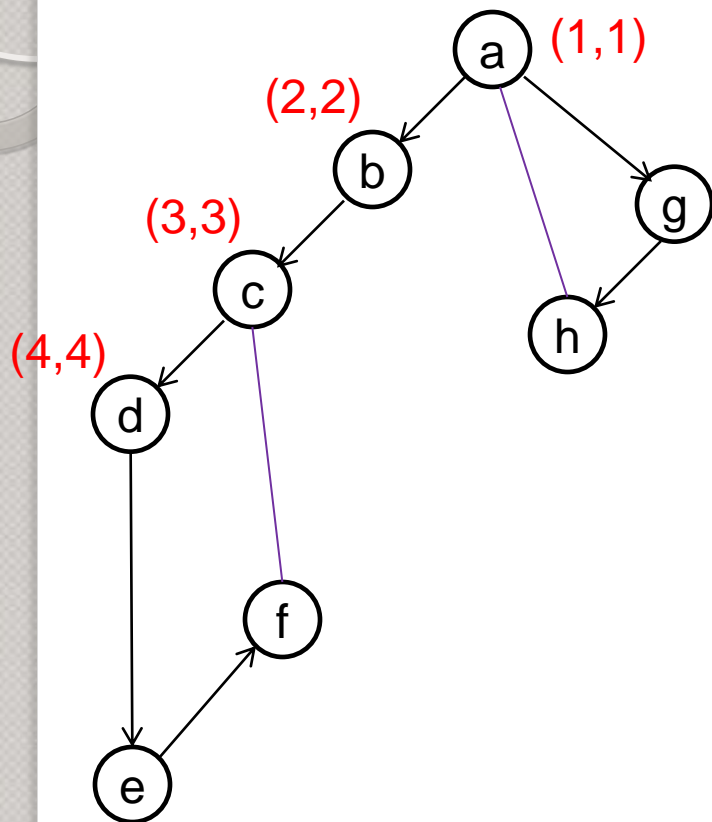




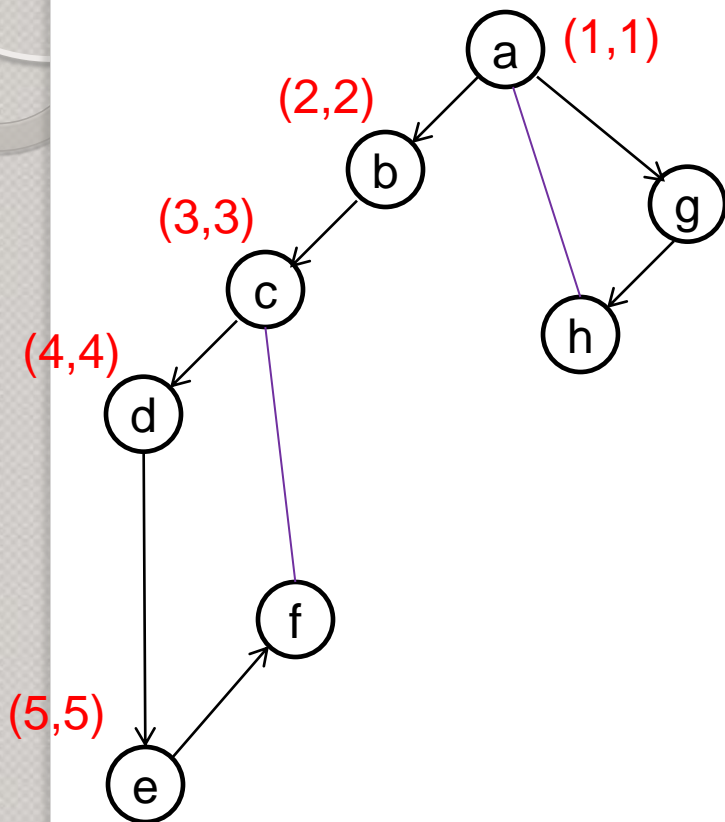
ab



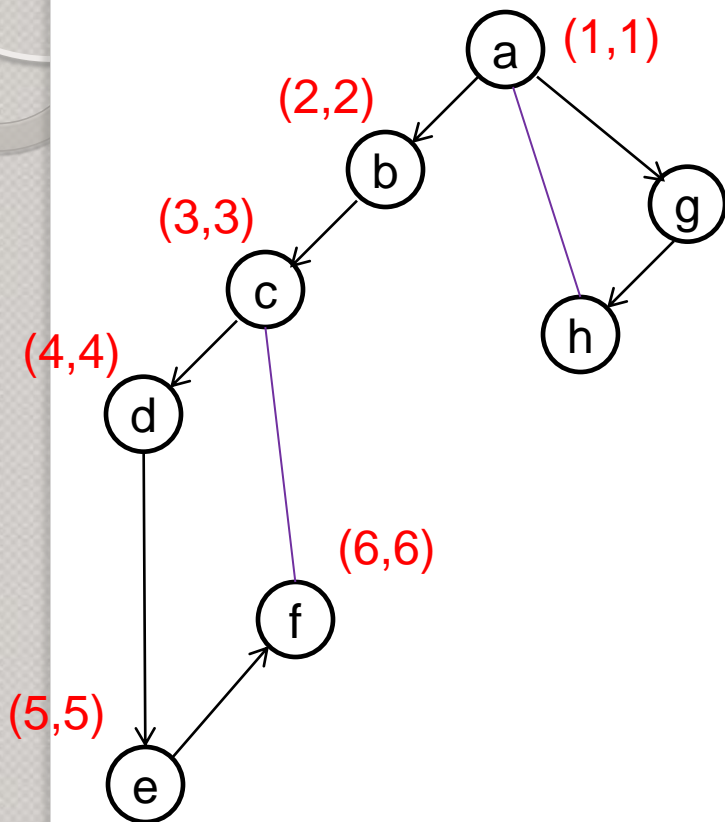
bc
ab



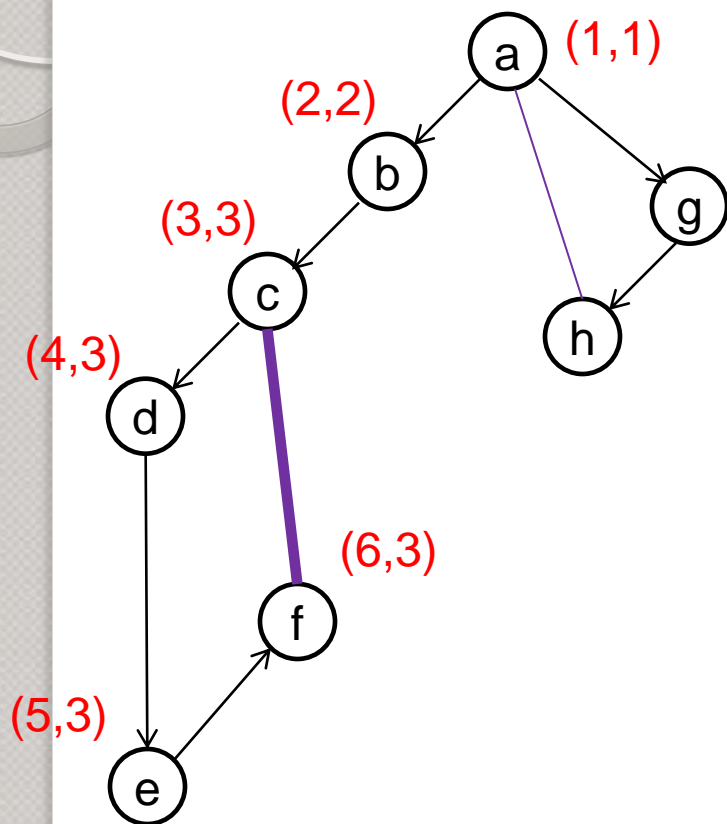
cd
bc
ab



de
cd
bc
ab

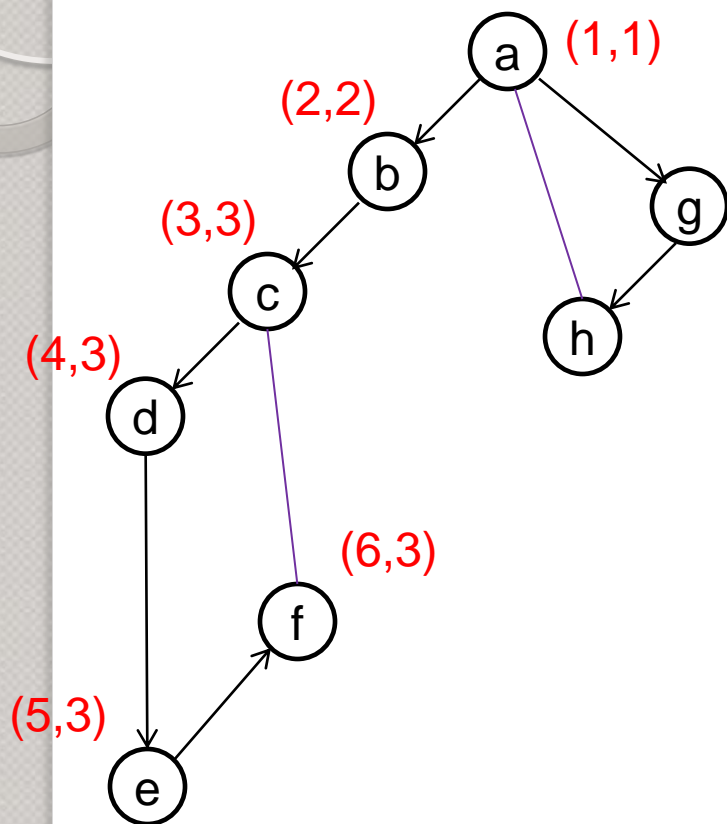


ef
de
cd
bc
ab



fc
ef
de
cd
bc
ab

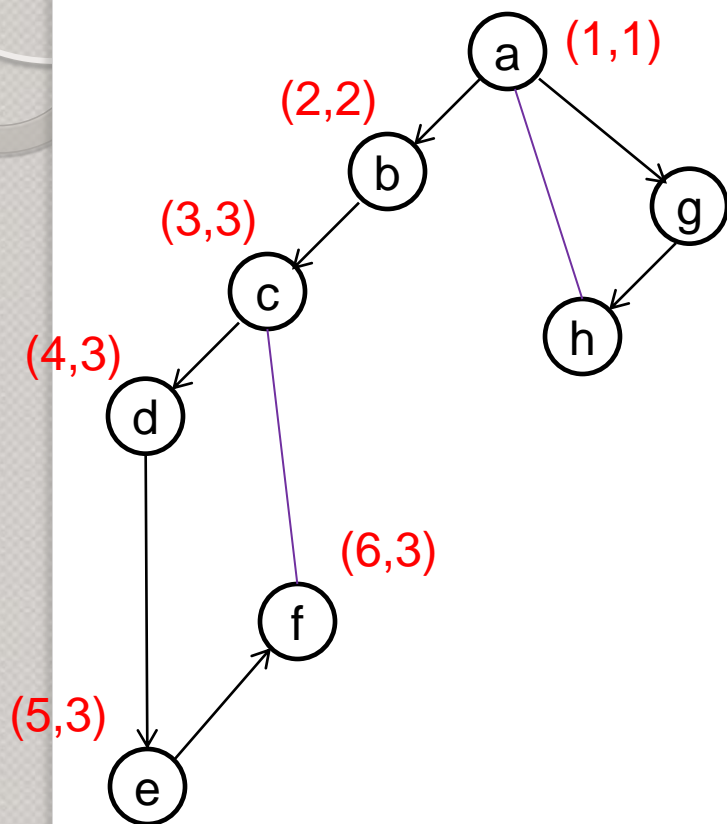
不要让 **fc** 入栈两次！



点双连通分量:  
 $\{ fc, ef, de, cd \}$

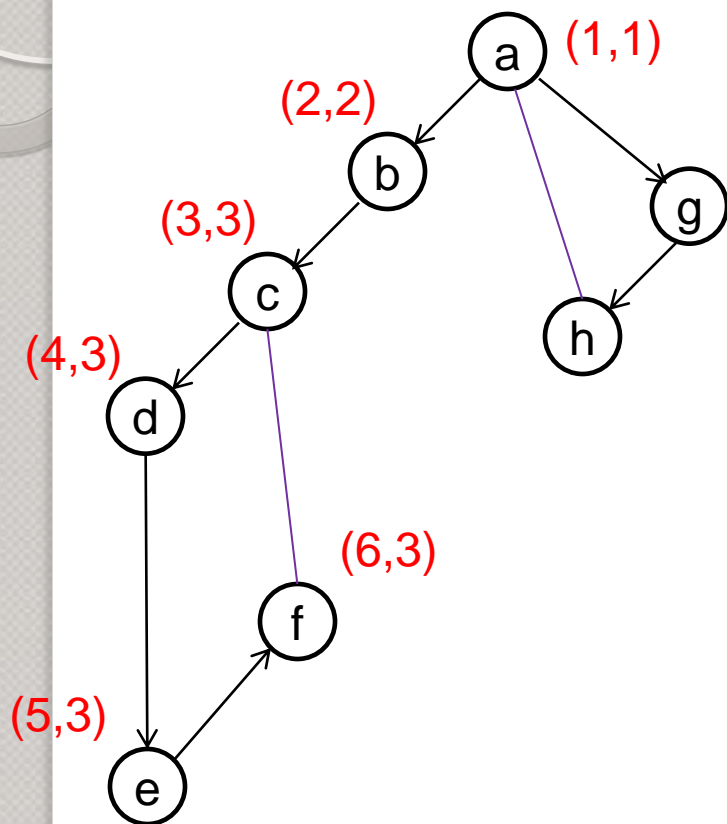
bc
ab



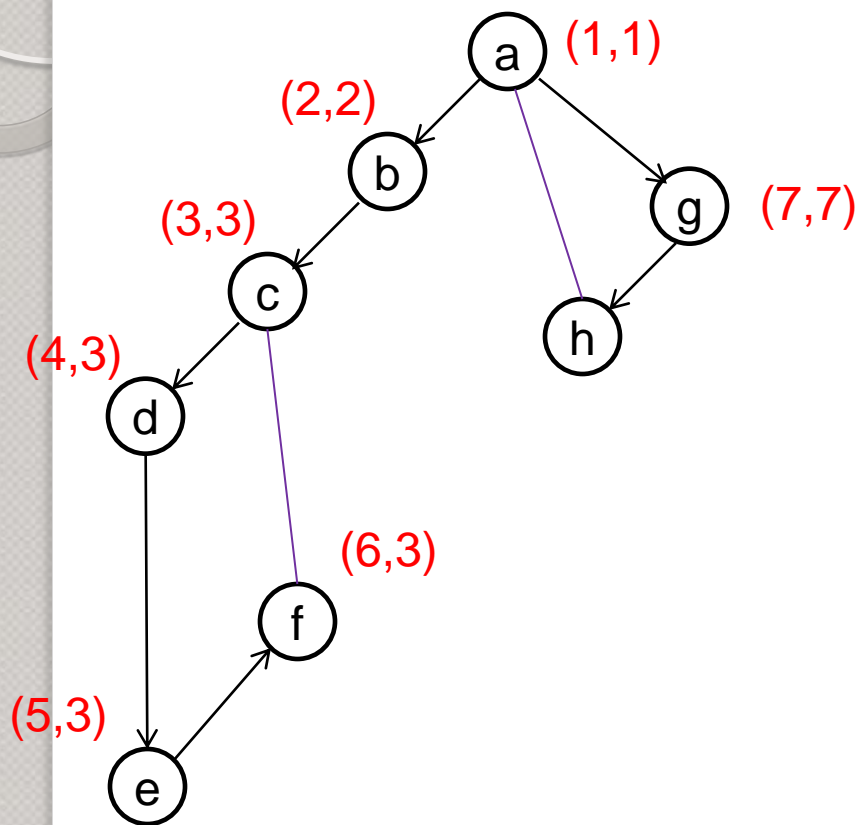


点双连通分量:  
{ fc,ef,de,cd }  
{bc }

ab

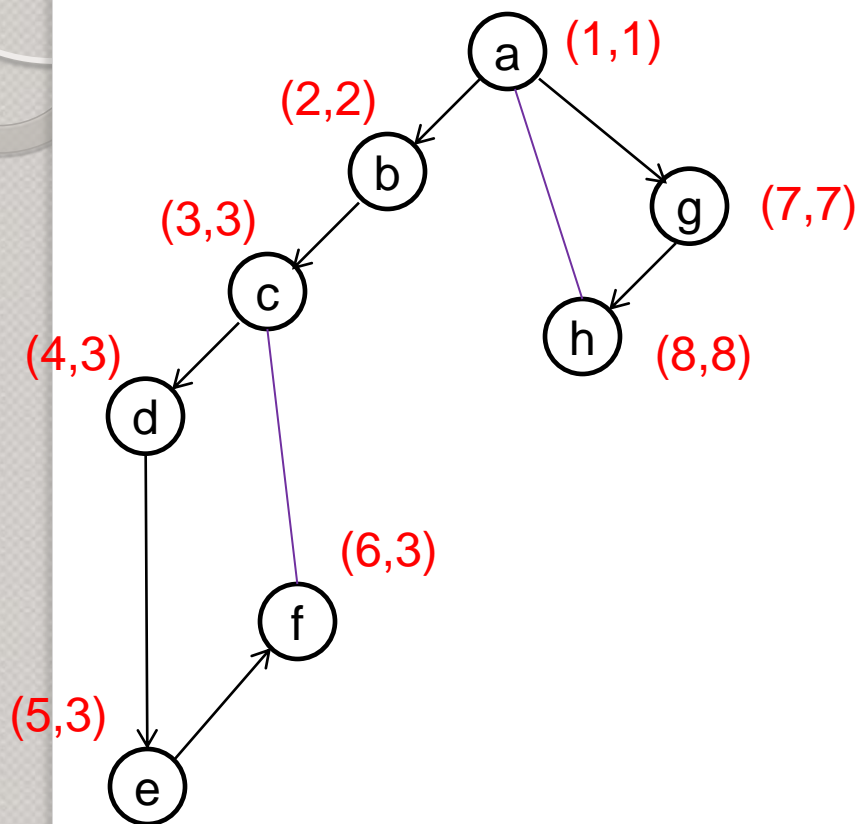


点双连通分量:  
{ fc,ef,de,cd }  
{ bc }  
{ab}



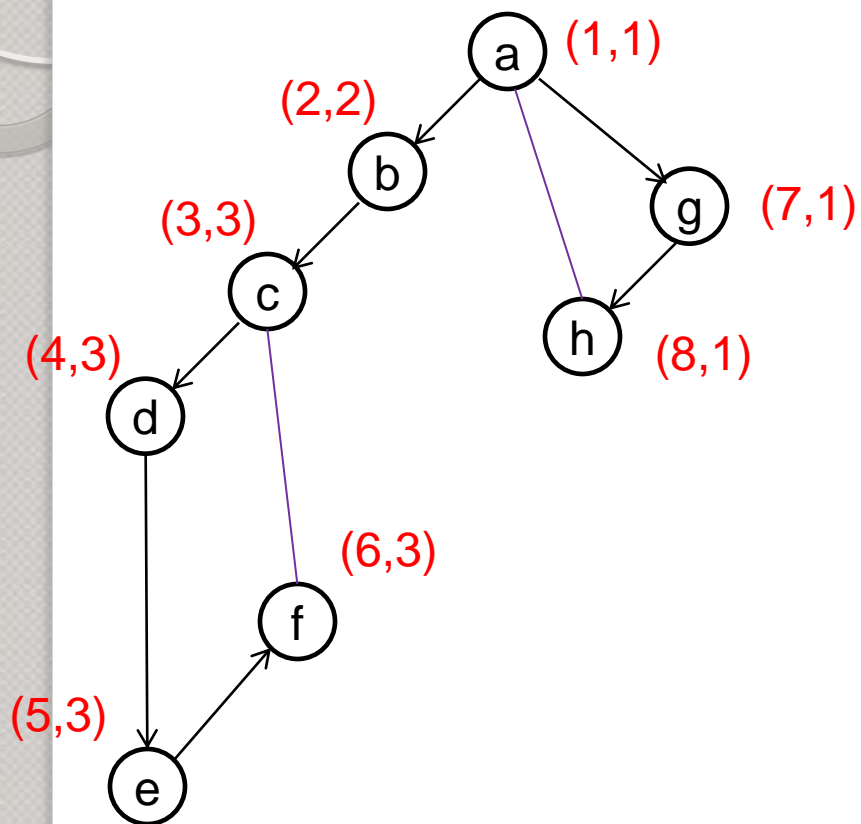
点双连通分量:  
{ fc,ef,de,cd }  
{ bc }  
{ab}

ag



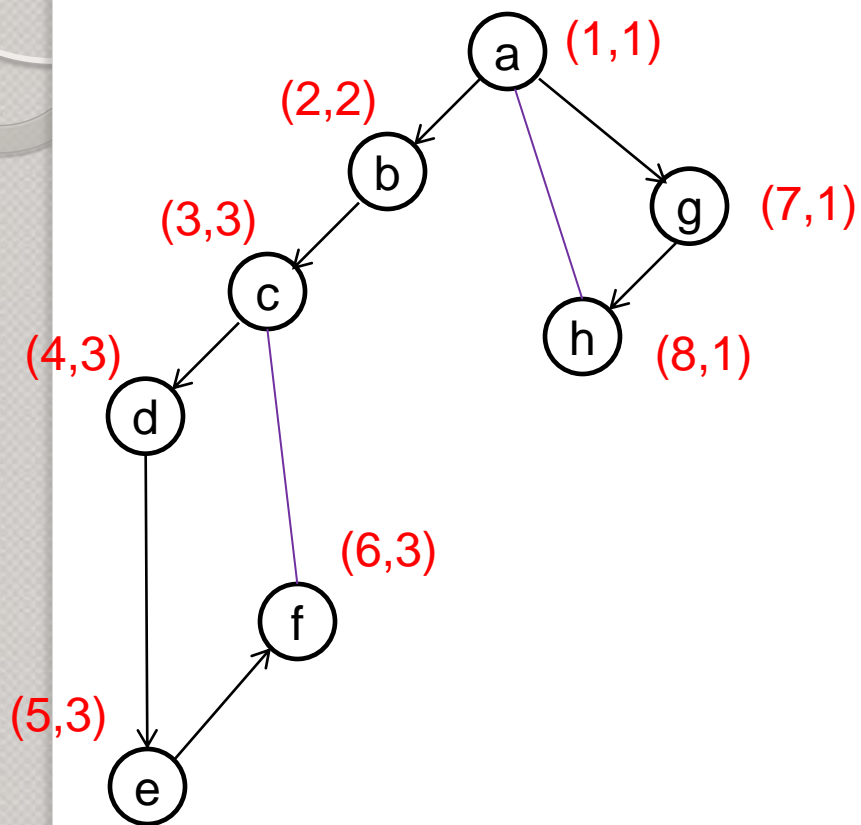
点双连通分量:  
 { fc,ef,de,cd }  
 { bc }  
 {ab}

gh
ag



点双连通分量:  
 { fc,ef,de,cd }  
 { bc }  
 {ab}

ha
gh
ag



点双连通分量:  
{ fc,ef,de,cd }  
{ bc }  
{ab}  
{ha,gh,ag}

求无向连通图点双连通分量（没有割点的连通分量），假定没有重边

Input: (11点13边)

output:

11 13

Block No: 1

1 2

4,9

1 4

Block No: 2

1 5

4,1

1 6

3,4

2 11

3,2

2 3

11,3

4 3

2,11

4 9

1,2

5 8

Block No: 3

5 7

5,8

6 7

Block No: 4

7 10

7,10

11 3

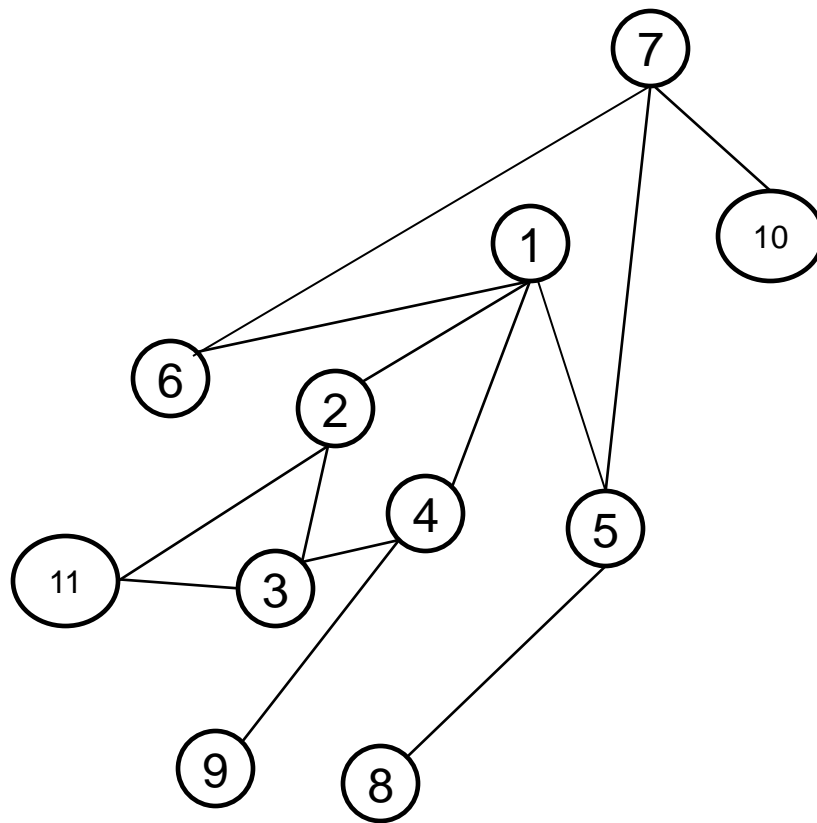
Block No: 5

6,1

7,6

5,7

1,5





求无向连通图点双连通分量（没有割点的连通分量），假定没有重边

Input: （8点9边）

output:

8 9

Block No: 1

1 2

7,4

1 3

8,7

1 5

6,8

3 5

4,6

2 4

Block No: 2

4 6

2,4

4 7

Block No: 3

6 8

1,2

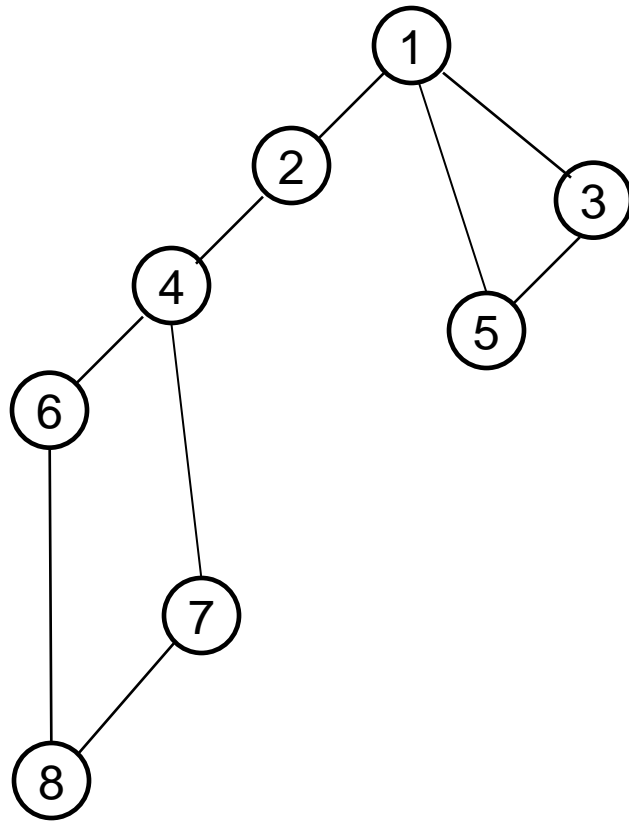
7 8

Block No: 4

5,1

3,5

1,3



//求无向连通图点双连通分量（没有割点的连通分量）,假定没有重边

```
#include <iostream>
#include <vector>
#include <queue>
using namespace std;
#define MyMax 200
typedef vector<int> Edge;
vector<Edge> G(MyMax);
int dfn[MyMax] ;
int low[MyMax] ;
int nTime;
int n,m; //n是点数，m是边数
struct Edge2
{
    int u;
    int v;
    Edge2(int u_,int v_):u(u_),v(v_) { }
};
deque<Edge2> Edges;
int nBlockNo = 0;
```

```

void Tarjan(int u, int father)
{
    int i,j,k;
    low[u] = dfn[u] = nTime ++;
    for( i = 0; i < G[u].size() ; i ++ ) {
        int v = G[u][i];
        if( ! dfn[v]) { //v没有访问过
            //树边要入栈
            Edges.push_back(Edge2(u,v));
            Tarjan(v,u);
            low[u] = min(low[u],low[v]);
            Edge2 tmp(0,0);
            if(dfn[u] <= low[v]) {
                //从一条边往下走，走完后发现自己是割
                //点，则栈中的边一定全是和自己在一个双连通分量里面
                //根节点总是和其下的某些点在同一个双连通分量
                //里面
            }
        }
    }
    cout << "Block No: " << ++ nBlockNo
    << endl;
}

```

```

do {
    tmp = Edges.back();
    Edges.pop_back ();
    cout << tmp.u << "," <<
        tmp.v << endl;
}while ( !(tmp.u == u &&
        tmp.v == v) );
}
} // 对应if( ! dfn[v]) {
else {
    if( v != father ) { // u连到父节点的回边不考虑
        low[u] = min(low[u],dfn[v]);
        if( dfn[u] > dfn[v])
            // 连接到祖先的回边要入栈，
            // 但是连接到儿子的边，此处肯定已经入过栈了，不能再入栈
            Edges.push_back(Edge2(u,v));
    }
}
} // 对应 for( i = 0; i < G[u].size() ; i ++ ) {
}

```

```
int main()
{

    int u,v;
    int i;
    nTime = 1;
    cin >> n >> m ; //n是点数， m是边数
    nBlockNo = 0;
    for( i = 1;i <= m;i ++ ) {
        cin >> u >> v; //点编号从1开始
        G[v].push_back(u);
        G[u].push_back(v);
    }
    memset( dfn,0,sizeof(dfn));
    Tarjan(1,0);
    return 0;
}
```

# 求无向连通图边双连通分支(不包含桥的极大连通子图)：

只需在求出所有的桥以后，把桥边删除，原图变成了多个连通块，则每个连通块就是一个边双连通分支。桥不属于任何一个边双连通分支，其余的边和每个顶点都属于且只属于一个边双连通分支。

# POJ 3352 Road Construction

- 给你一个图，要求你加入最少的边，使得最后得到的图为一个边双连通分支。所谓的边双连通分支，即不存在桥的连通分支。
- 可以求出所有的桥，把桥删掉。然后把所有的连通分支求出来，显然这些连通分支就是原图中的双连通分支。把它们缩成点，然后添上刚才删去的桥，就构成了一棵树。在树上添边使得树变成一个双连通分支即可。



# POJ 3352 Road Construction

- 本题只要求输出一共需要添加多少条边，而不要求具体的方案。其实可以统计度为1的叶子节点（设共有 $x$ 个），然后直接输出 $(x+1)/2$ 即可

命题：一棵有 $n(n \geq 2)$ 个叶子结点的树，至少(只需)要添加 $\text{ceil}(n/2)$ 条边，才(就)能转变为一个没有桥的图。或者说，使得图中每条边，都至少在一个环上。

证明：

这里只证明 $n$ 为偶数的情况。 $n$ 为奇数的证明类似。

先证明添加 $n/2$ 条边一定可以达成目标。

$n=2$ 时，显然只需将这两个叶子间连一条边即可。命题成立。  
设 $n=2k(k \geq 1)$ 时命题成立，即 $\text{AddNum}(2k)=k$ 。下面将推出 $n=2(k+1)$ 时命题亦成立

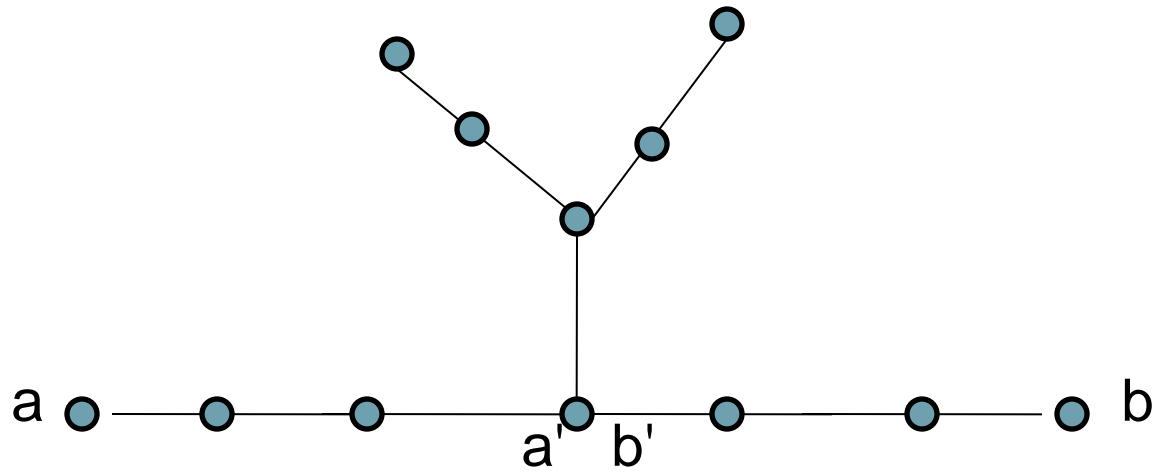
$n=2k+2$ 时，选取树中一条迹(无重复点的路径)，设其端点为 $a, b$ ；并设离 $a$ 最近的度 $\geq 3$ 的点为 $a'$ ，同理设 $b'$ 。

(关于 $a'$ 和 $b'$ 的存在性问题：由于 $a$ 和 $b$ 的度都为1，因此树中其它的树枝必然从迹 $\langle a, b \rangle$ 之间的某些点引出。否则整棵树就是迹 $\langle a, b \rangle$ ， $n=2 < 2k+2$ ，不可能。)

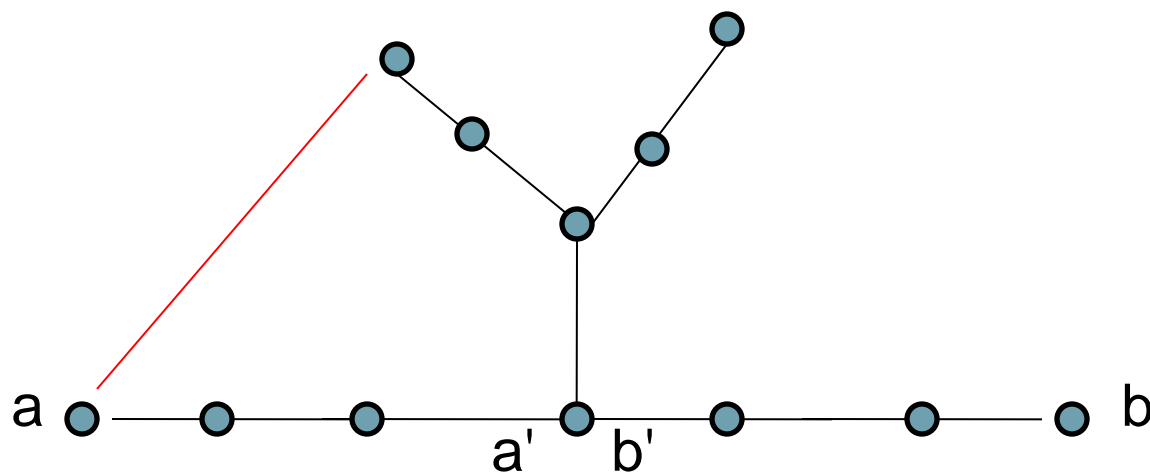
**a' b'不重合时:**

在 $a, b$ 间添一条边, 则迹 $\langle a, b \rangle$ 上的所有边都已不再是桥。这时, 将刚才添加的边, 以及 $aa'$ 之间,  $bb'$ 之间的边都删去, 得到一棵新的树。因为删去的那些边都已经符合条件了, 所以在之后的构造中不需要考虑它们。由于之前 $a'$ 和 $b'$ 的度 $\geq 3$ , 所以删除操作不会使他们变成叶子。因此新的树必然比原树少了两个叶子 $a, b$ , 共有 $2k$ 个叶子。由归纳知需要再加 $k$ 条边。因此对 $n=2k+2$ 的树, 一共要添加 $k+1$ 条边。

a' b' 重合时:



$a'$   $b'$  重合时:



将 $a$ 和一个非 $b$ 的叶子节点 $x$ 连上，然后将环缩点至 $a'$ 。  
因为叶子节点是偶数，所以必然还存在一个非 $b$ 非 $x$ 的叶子节点不在环上，因此 $a'$ 不会变成叶子节点，于是新图比原图少2个叶子节点。

再证明 $n/2$ 是最小的解。

显然，只有一个叶子结点被新加的边覆盖到，才有可能使与它相接的那条边进入一个环中。而一次加边至多覆盖2个叶子。因此 $n$ 个叶子至少要加 $n/2$ 条边。  
证毕。

# 其他题目

- acm1236, acm3180, acm2762 (强连通+拓扑排序), acm2553, acm3114 (强连通+di jkstra), acm3160 (强连通+DP)