

图论

- 图论
 - Flood Fill
 - 基础:
 - BFS 写法
 - DFS 写法
 - 变式
 - BFS
 - 拓扑排序
 - 基础
 - 变式
 - 有向无环图的构造
 - Dijkstra
 - 基础
 - 朴素 Dijkstra
 - 堆优化 Dijkstra
 - 变式
 - 将其余点映射到虚拟节点
 - 构建虚拟节点 | 只更新部分点到起点的距离
 - SPFA
 - 基础
 - SPFA 求最短路
 - SPFA 判断是否存在负环
 - 变式
 - Floyd
 - 基础
 - 变式
 - 最小生成树
 - 基础
 - Prim 算法
 - Kruskal 算法
 - 变式
 - 最近公共祖先
 - 基础
 - 二分图
 - 基础
 - 染色法判断是否为二分图
 - 二分图的最大匹配（匈牙利算法）

Flood Fill

算法用途：找到某个点所在的**连通块**

基于不同的用途，可以额外维护更多的信息，比如**连通块中点的个数**

基本实现有两种：BFS 与 DFS

时间复杂度均为 $O(n + m)$ ，其中 n 为点数， m 为边数

基础：

原题链接：[AcWing 1113. 红与黑](#)

BFS 写法

- `st[i][j]` 表示 (i, j) 已经遍历过
- 只要当前点没有出界、没有被遍历过、当前点在连通块内，我们就将当前点加入到队列中去
- 如果我希望统计连通块中点的数量，那么我需要在**每次遍历一个新的点时就统计一次**，即在 `for` 循环内统计
- 如果我希望统计连通块的数量，那么在 Flood Fill 的入口出进行通统计

完整代码：

```
#include <iostream>
#include <cstring>
#include <queue>

#define x first
#define y second

using namespace std;
typedef pair<int, int> PII;
const int N = 25;

char g[N][N];
bool st[N][N];

int dx[4] = {1, 0, -1, 0}, dy[4] = {0, 1, 0, -1};

int n, m;

void bfs(int sx, int sy, int& sum)
{
    queue<PII> q;
    q.push({sx, sy});
    st[sx][sy] = true;

    while(q.size())
    {
        auto it = q.front();
        q.pop();
        int x = it.x, y = it.y;
        for(int i = 0; i < 4; i++)
        {
            int nx = x + dx[i], ny = y + dy[i];
            if(nx < 0 || ny < 0 || nx >= m || ny >= n) continue;
```

```

        if(st[nx][ny]) continue;
        if(g[nx][ny] == '#') continue;

        q.push({nx, ny});
        st[nx][ny] = true;
        sum++;
    }
}

int main()
{
    while(cin >> n >> m, n || m)
    {
        memset(g, 0, sizeof g);
        memset(st, false, sizeof st);
        for(int i = 0; i < m; i++)
            cin >> g[i];
        int cnt = 0;
        for(int i = 0; i < m; i++)
            for(int j = 0; j < n; j++)
                if(g[i][j] == '@')
                {
                    int sum = 0;
                    bfs(i, j, sum);
                    cnt += sum;
                }
        cout << cnt + 1 << endl;
    }

    return 0;
}

```

DFS 写法

```

#include <iostream>
#include <cstring>

using namespace std;
typedef pair<int, int> PII;
const int N = 25;

char g[N][N];
bool st[N][N];

int dx[4] = {1, 0, -1, 0}, dy[4] = {0, 1, 0, -1};

int n, m;

```

```

int dfs(int sx, int sy)
{
    st[sx][sy] = true;
    int cnt = 1;

    for(int i = 0; i < 4; i++)
    {
        int nx = sx + dx[i], ny = sy + dy[i];
        if(nx < 0 || ny < 0 || nx >= m || ny >= n) continue;
        if(g[nx][ny] == '#') continue;
        if(st[nx][ny]) continue;

        cnt += dfs(nx, ny);
    }
    return cnt;
}

int main()
{
    while(cin >> n >> m, n || m)
    {
        memset(g, 0, sizeof g);
        memset(st, false, sizeof st);
        for(int i = 0; i < m; i++)
            cin >> g[i];
        int cnt = 0;
        for(int i = 0; i < m; i++)
            for(int j = 0; j < n; j++)
                if(g[i][j] == '@')
                {
                    cnt += dfs(i, j);
                }
        cout << cnt << endl;
    }

    return 0;
}

```

变式

原题链接: [AcWing 1233. 全球变暖](#)

对于每一块连通块（陆地），我们 BFS 时统计出连通块中点的数量 cnt ，同时再统计边界的数量 $bount$ （只要某个点上下左右存在海洋，那么就是边界）

只要 $cnt == bount$ 那么这块陆地将会被淹没，我们统计所有不会被淹没的陆地即可

完整代码：

```

#include <iostream>
#include <queue>

```

```
#define x first
#define y second

using namespace std;

const int N = 1e3 + 10;
typedef pair<int, int> PII;

char g[N][N];
bool st[N][N];

int n;

int dx[4] = {1, 0, -1, 0}, dy[4] = {0, 1, 0, -1};

void bfs(int sx, int sy, int& cnt, int& bound)
{
    queue<PII>q;
    q.push({sx, sy});
    st[sx][sy] = true;
    while(q.size())
    {
        auto t = q.front();
        q.pop();

        st[t.x][t.y] = true;
        cnt++;

        bool is_bount = false;

        for(int i = 0; i < 4; i++)
        {
            int nx = t.x + dx[i], ny = t.y + dy[i];
            if(nx >= 0 && ny >= 0 && nx < n && ny < n)
            {
                if(st[nx][ny]) continue;
                if(g[nx][ny] == '.') is_bount = true;
                else
                {
                    q.push({nx, ny});
                    st[nx][ny] = true;
                }
            }
        }
        if(is_bount) bound++;
    }
}

int main()
{
    cin >> n;
    for(int i = 0; i < n; i++)
        cin >> g[i];
}
```

```

int ans = 0;
for(int i = 0; i < n; i++)
    for(int j = 0; j < n; j++)
        if(!st[i][j] && g[i][j] == '#')//当前点没有被遍历过并且是陆地
        {
            int cnt = 0, bound = 0;//cnt表示陆地数量, bound表示会被淹没的数量
            bfs(i, j, cnt, bound);
            if(cnt == bound) ans++;
        }
cout << ans << endl;
return 0;
}

```

BFS

BFS 中, 每个点只会被遍历一次, 因此时间复杂度为 $O(n + m)$, 其中 n 为点数, m 为边数

BFS 需要额外记录点的坐标, 因此需要用 `pair<int, int>` 来存储 其次, 我们还需要确定哪些点已经遍历过, 因此需要用 `st[i][j]` 来标记 (i, j) 这个点是否已经遍历过

在初始化时, 我们将**起点**压入队列, 并用 `st` 标记**起点**

原题链接: [AcWing 1562](#). [微博转发](#)

如果 A 关注了 B , 那么 A 便会转发 B 的帖子, 因此我们建立一条从 B 指向 A 的**有向边**

由于层数最大为 L 层, 因此我们需要统计**所有路径长度不超过 L 的点的数量**

由于点的边权全部都是 1, 因此我们直接用 BFS 来统计即可

- 点的边权不同, 我们考虑 SPFA
- 如果点的边权只有 0 和 1, 考虑双端队列
- 如果点的边权只有 1, 考虑 BFS

完整代码:

```

#include <iostream>
#include <cstring>
#include <queue>

using namespace std;

const int N = 1e5 + 10;

int h[N], e[N], ne[N], idx;
bool st[N];

void add(int a, int b)
{
    e[idx] = b, ne[idx] = h[a], h[a] = idx++;
}

```

```
}

int n, L;

int bfs(int u)
{
    memset(st, false, sizeof st);

    queue<int>q;
    q.push(u);
    st[u] = true;

    int cnt = 0;

    for(int i = 1; i <= L; i ++)//由于我们需要遍历 L 层，因此在队列遍历的时候只能遍历
    本层的节点，因此需要取队列的大小
    {
        int sz = q.size();
        while(sz--)
        {
            int t = q.front();
            q.pop();
            for(int j = h[t]; j != -1; j = ne[j])
            {
                int k = e[j];
                if(!st[k])
                {
                    st[k] = true;
                    q.push(k);
                    cnt++;
                }
            }
        }
    }
    return cnt;
}

int main()
{
    memset(h, -1, sizeof h);
    cin >> n >> L;
    for(int i = 1; i <= n; i ++){
        int cnt = 0;
        cin >> cnt;
        for(int j = 1; j <= cnt; j ++){
            int x;
            cin >> x;
            add(x, i);
        }
    }
    int k;
    cin >> k;
```

```

while(k--)
{
    int q;
    cin >> q;
    cout << bfs(q) << endl;
}
return 0;
}

```

拓扑排序

基础

只有有向图才有拓扑排序，无向图是没有拓扑排序的，算法思路如下：

1. 统计所有点的入度数，将入度为 0 的点加入队列中
2. 取队头元素 cur ，枚举 cur 所有出边指向的点 j ，将点 j 的入度减一
3. 如果 j 的入度为 0，那么将其加入队列中
4. 最后统计队列中的元素，是否恰好为 N 个，即可知道是否存在拓扑排序

原题链接：[AcWing 848. 有向图的拓扑序列](#)

代码如下：

```

#include <iostream>
#include <cstring>

using namespace std;

const int N = 1e5 + 10;

int h[N], e[N], ne[N], idx;
int q[N], d[N]; // q为队列，d用于记录每个点的入度数
               // 对于孤立的点，入度数直接为0

void add(int a, int b)
{
    e[idx] = b, ne[idx] = h[a], h[a] = idx++;
}

int n, m;

bool topsort()
{
    int hh = 0, tt = -1;
    for(int i = 1; i <= n; i++) // 先将入度为0的点加入队列
    {
        if(d[i] == 0) q[++tt] = i;
    }
    while(hh <= tt)
    {

```



```

        int t = q[hh++];
        for(int i = h[t]; i != -1; i = ne[i])//每次删除一个点及其所有出边，如果出现入
        度为0的点，则将其加入队列中
        {
            int j = e[i];
            if(--d[j] == 0) q[++tt] = j;
        }
    }
    return tt == n - 1;//只需要检验队列中的元素是否达到n个即可
}

int main()
{
    memset(h, -1, sizeof h);
    cin >> n >> m;
    for(int i = 1; i <= m; i++)
    {
        int a, b;
        cin >> a >> b;
        add(a, b);
        d[b]++;//统计点的入度数
    }

    if(topsort())
    {
        for(int i = 0; i < n; i++) cout << q[i] << " ";
    }
    else cout << "-1" << endl;

    return 0;
}

```

变式

有向无环图的构造

原题链接：[AcWing 3696. 构造有向无环图](#)

看到 DAG(DirectedAcyclicGraph)，马上反应出是拓扑排序

在一个既包含无向边又包含有向边的图中，如果有向边本身构成环，那么不可能会有拓扑排序

如果有向边没有构成环，对于每一条无向边而言，只要**从前指向后**，就同样能保证不会构成环（构成环的条件为**至少存在一条边从后指向前**）

也就是说，如果有向边构成的图本身存在拓扑排序，那么整个图就一定存在拓扑排序，对于无向边而言，只需要从前指向后即可（在拓扑排序中的前后关系）

在代码实现上，我们需要一个数组 `pos[i]` 来记录拓扑排序中第 i 个点的编号，即拓扑排序的顺序

```
#include <iostream>
#include <cstring>

using namespace std;

const long long N = 2e5 + 10, M = N;

int h[N], e[M], ne[M], idx;

int q[N], d[N], pos[N];

void add(int a, int b)
{
    e[idx] = b, ne[idx] = h[a], h[a] = idx++;
}

struct Edge
{
    int a, b;
}edge[M];

int n, m;

bool topsort()
{
    int hh = 0, tt = -1;
    for(int i = 1; i <= n; i++)
    {
        if(!d[i]) q[++tt] = i;
    }
    while(hh <= tt)
    {
        int t = q[hh++];
        for(int i = h[t]; i != -1; i = ne[i])
        {
            int j = e[i];
            if(--d[j] == 0) q[++tt] = j;
        }
    }
    return tt == n - 1;
}

int main()
{
    int T;
    cin >> T;
    while(T--)
    {
        memset(h, -1, sizeof h);
        memset(d, 0, sizeof d);
        idx = 0;
        scanf("%d%d", &n, &m);
        int cnt = 0;
```

```

    for(int i = 1; i <= m ; i ++){
        int t, a, b;
        scanf("%d%d%d", &t, &a, &b);
        if(!t) edge[cnt++] = {a, b};
        else
        {
            add(a, b);
            d[b]++;
        }
    }
    if(!topsort()) cout << "NO" << endl;
    else
    {
        cout << "YES\n";
        for(int i = 1; i <= n; i ++){
            for(int j = h[i]; j != -1; j = ne[j])
                printf("%d %d\n", i, e[j]);
            for(int i = 0; i < n; i ++){
                pos[q[i]] = i;
            }
            for(int i = 0; i < cnt; i ++){
                int x = edge[i].a, y = edge[i].b;
                if(pos[x] > pos[y]) swap(x, y);
                printf("%d %d\n", x, y);
            }
        }
    }
    return 0;
}

```

Dijkstra

基础

Dijkstra 算法只能适用于边权为正的情况

朴素 Dijkstra

朴素 Dijkstra 算法只能用在稠密图当中，用邻接矩阵存储，即边数是点数的平方

时间复杂度为 $O(n^2)$ ，因为会将所有点全部遍历一次

用于求某个点到其余所有点的最短距离，这里以 1 号点为例

定义集合 S 表示当前为确定最短距离的点的集合， $dist_i$ 表示第 i 号点到起点的最短距离，算法步骤如下：

1. 初始化 $dist$ 数组，全部为正无穷，并将起点初始化成 0
2. 循环 n 次，每次找到一个不在集合 S 中并且距离起点最短的点 t
3. 将 t 加入集合内，并用 t 更新其余点到起点的距离
4. 考察终点是否为正无穷，进而可以得到起点到终点的最短距离

完整代码如下：

```
const int N = 510;
int g[N][N];
bool st[N]; // 当前点是否在已确定最短距离
int dist[N]; // 当前点到起点的距离
int n;
int dijkstra()
{
    memset(dist, 0x3f, sizeof dist); // 先初始化dist数组
    dist[1] = 0; // 以1作为起点，因此初始化1的距离

    for(int i = 1; i <= n; i++) // 迭代n次
    {
        int t = -1;
        // 每次找不在集合中并距离起点最短的点
        for(int j = 1; j <= n; j++)
        {
            if(!st[j] && (t == -1 || dist[j] < dist[t])) t = j;
        }
        // 将当前点加入到集合内，表示当前点已确定最短距离
        st[t] = true;
        // 用t更新其他点到起点的距离
        for(int i = 1; i <= n; i++)
            dist[i] = min(dist[i], dist[t] + g[t][i]);
    }
    if(dist[n] == 0x3f3f3f3f) return -1;
    return dist[n];
}
```

使用时需要先对 $g[i][j]$ 初始化，全部初始化成 INF ， $g[i][i]$ 初始化成 0

堆优化 Dijkstra

用于稀疏图，即点数与边数同数量级，用邻接表存储，时间复杂度为 $O(n \log m)$

朴素版 Dijkstra 内，每次找距离起点最近的点都需要遍历一次所有点，这里的时间复杂度为 $O(n^2)$ ，考虑用堆来优化，此处时间复杂度变为 $O(1)$

在用点 t 更新其他点的距离时，相当于遍历了 t 的所有出边，原先时间复杂度为 $O(nm)$ ，此时由于是在堆中修改，因此变为 $O(n \log m)$

代码如下：

```
typedef pair<int, int> PII;
int dist[N]; // 到1号点的距离
bool st[N]; // 该点是否已确认过最短距离

int dijkstra()
{
    // ... (rest of the code) ...
}
```

```

memset(dist, 0x3f, sizeof dist);
priority_queue<PII, vector<PII>, greater<PII>>q;
q.push({0, 1}); // 顺序一定是：距离，点的编号
d[1] = 0;

while(q.size())
{
    auto t = q.top();
    q.pop();

    int ver = q.second, dis = q.first;
    if(st[ver]) continue; // 如果当前点重复，直接跳过
    st[ver] = true;
    for(int i = h[ver]; i != -1; i = ne[i])
    {
        int j = e[i]; // e[i]表示点的编号，w[i]表示ver到e[i]的距离
        if(dist[j] > dis + w[i]) // 如果从1到j的距离大于从1到ver加上从ver到j的距
            离，就更新d[j]
        {
            dist[j] = dis + w[i];
            q.push({d[j], j});
        }
    }
}
if(d[n] == 0x3f3f3f3f) return -1;
return d[n];
}

```

变式

将其余点映射到虚拟节点

原题链接：[AcWing 1488. 最短距离](#)

本题很明显是求单源最短路，但有一个问题是，我们需要对每个点都执行一次 Dijkstra 时间上一定会超时

由于点的编号从 1 开始，因此我们可以将所有商店都映射到编号为 0 的点，这样在求每个点到最近商店的距离时只需求该点到 0 号点的距离即可

具体地，我们从编号为 0 的点连一条**长度为 0 的边到各个商店**，这样就相当于将各个商店都映射到 0 这个点了

需要注意的是，此时的边数变为 $3N$ ，因为每条无向边需要连 $2N$ ，还需要额外再连 N 条从 0 指向各个商店的边

完整代码：

```

#include <iostream>
#include <cstring>
#include <queue>
#include <unordered_map>

```

```
using namespace std;

const int N = 1e5 + 10;

int h[N], e[3 * N], w[3 * N], ne[3 * N], idx;

typedef pair<int, int> PII;

int d[N];
bool st[N];

void add(int a, int b, int c)
{
    e[idx] = b, w[idx] = c, ne[idx] = h[a], h[a] = idx++;
}

int n, m;

void dijkstra()
{
    memset(d, 0x3f, sizeof d);
    memset(st, false, sizeof st);
    d[0] = 0;
    priority_queue<PII, vector<PII>, greater<PII>>q;
    q.push({0, 0});

    while(q.size())
    {
        auto t = q.top();
        q.pop();

        int ver = t.second, dis = t.first;
        if(st[ver]) continue;
        st[ver] = true;

        for(int i = h[ver]; i != -1; i = ne[i])
        {
            int j = e[i];
            if(d[j] > dis + w[i])
            {
                d[j] = dis + w[i];
                q.push({d[j], j});
            }
        }
    }
}

int main()
{
    memset(h, -1, sizeof h);
    cin >> n >> m;
    while(m--)
    {
```

```

        int a, b, c;
        cin >> a >> b >> c;
        add(a, b, c);
        add(b, a, c);
    }
    cin >> m;
    while(m--)
    {
        int x;
        cin >> x;
        add(0, x, 0); // 设定0为指向各个商店，距离为0的标点
    }
    dijkstra();
    cin >> m;
    while(m--)
    {
        int x;
        cin >> x;
        cout << d[x] << endl;
    }
    return 0;
}

```

构建虚拟节点 | 只更新部分点到起点的距离

原题连接: [AcWing 903. 昂贵的聘礼](#)

设点数为 n ，地位限制为 m

先不考虑地位，如果求 1 号点到其他所有点的最小距离，这个时候直接**购买这个点本身的花费**很难表示，所以转变思路：

新建一个虚拟节点（设其编号为 0），该节点指向原先的 n 个节点，路径长度为直接购买第 i 个节点的花费

此时问题转化成，求从虚拟节点到 1 号点的最短距离（由于边的指向是从虚拟节点开始，因此**起点要从 1 号点变为虚拟节点**）

然后接着考虑地位的问题，设第 i 号点的地位为 $level[i]$ ，由于与 $level[1]$ 的差距不能超过 m ，因此以 1 号点为中心，区间大小为 $[level[1] - m, level[1] + m]$ 内的点都可以被选择

具体地，用 i 循环 $[level[1] - m, level[1]]$ ，每次所表示的区间大小为 $[i, i + m]$ ，此时便可以遍历所有的区间

只要下个点的等级处于区间范围内，便可以**更新从起点到下个点的距离**

由于加入虚拟点后，点的个数变为 $n + 1$ ，因此需要循环 $n + 1$ 次，并且在更新距离时，也需要将虚拟节点算入（也就是从 0 开始）

完整代码：

```

#include <iostream>
#include <cstring>

using namespace std;

const int N = 110, INF = 0x3f3f3f3f;

int n, m;
int w[N][N], level[N];
int dist[N];
bool st[N];

int dijkstra(int l, int r)
{
    memset(dist, 0x3f, sizeof dist);
    memset(st, false, sizeof st);
    dist[0] = 0; //以虚拟点为起点

    for(int i = 1; i <= n + 1; i++)
    {
        int t = -1;
        for(int j = 0; j <= n; j++)
            if(!st[j] && (t == -1 || dist[j] < dist[t])) t = j;

        st[t] = true;

        for(int j = 0; j <= n; j++)
            if(level[j] >= l && level[j] <= r) dist[j] = min(dist[j], dist[t] +
w[t][j]);
    }
    return dist[1]; //以1号为终点
}

int main()
{
    cin >> m >> n;

    memset(w, 0x3f, sizeof w); //w需要初始化
    for(int i = 0; i <= n; i++)
        w[i][i] = 0;
    for(int i = 1; i <= n; i++)
    {
        int price, cnt;
        cin >> price >> level[i] >> cnt;
        w[0][i] = min(w[0][i], price); //从虚拟节点连到当前节点
        while(cnt--)
        {
            int id, cost;
            cin >> id >> cost;
            w[id][i] = min(w[id][i], cost); //连一条边
        }
    }
}

```



```

    int ans = INF;
    for(int i = level[1] - m; i <= level[1]; i ++)//这里枚举小于酋长地位的，下面再加上m就可以枚举到大于酋长地位的
        ans = min(ans, dijkstra(i, i + m)); //酋长地位没说是最大的
    cout << ans << endl;
    return 0;
}

```

SPFA

基础

SPFA 求最短路

只要图中没有负环，就可以使用 SPFA 来求最短路问题（有负环就不存在最短路了）

既可以适用于边权为正，也可以适用于边权为负，时间复杂度一般是 $O(m)$ ，最坏是 $O(nm)$

SPFA 需要用邻接表来存储

算法思路：在用点来更新距离时，如果这个点到起点的距离本身被更新过，就用该点去更新其他点，否则忽视掉该点，具体思路如下：

$st[i]$ 表示点 i 是否在队列中， $dist[i]$ 表示点 i 到起点的距离

- 初始化： $dist[1] = 0$ ， $st[1] = true$ ，起点入队
- 取队头元素 t 并将其出队，此时有 $st[t] = false$
- 遍历 t 的所有出边指向的点 j ，如果 $dist[j]$ 距离变小并且点 j 不在队列中，将 j 加入队列中

完整代码：

```

const int N = 1e5 + 10;
int h[N], e[N], w[M], ne[N], idx;
int dist[N];
bool st[N];

bool spfa()
{
    memset(dist, 0x3f, sizeof dist);
    queue<int> q;
    q.push(1);
    st[1] = true;

    while(q.size())
    {
        int t = q.front();
        q.pop();

        st[t] = false;

        for(int i = h[t]; i != -1; i = ne[i])

```

```

    {
        int j = e[i];
        if(dist[j] > dist[t] + w[i])
        {
            dist[j] = dist[i] + w[i];
            if(!st[j])
            {
                q.push(j);
                st[j] = true;
            }
        }
    }
}
//边权为负，此时最大值可能会减小
return d[n] > 0x3f3f3f3f / 2 ? false : true;
}

```

相关题目：[AcWing 851. spfa求最短路](#)

SPFA 判断是否存在负环

在一个**只有** n 个点的有向图中（允许边权为负），如果从起点到点 i 的最短路径中有 n 条边，那么说明这条最短路径当中一共有 $n + 1$ 个点，根据抽屉原理可知，一定至少有两个点是重合的，此时说明一定存在环

由于这条路径为**当前最短路径**，说明环的权值一定为负，否则不可能出现最短路径长度变小（事实上存在负环的图是没有最短路径的）

因此只需要在 SPFA 的基础上，新加一个 `cnt[i]` 数组，表示从起点到点 i 最短路径当中边的个数，只要存在 `cnt[i] >= n`，此时说明一定存在负环

在初始化时，需要将所有点全部入队而不能将起点入队，这是因为从起点到各个点的最短路径中，不一定包含负环

而对于距离的初始化而言，初始化起点的距离为 0，其余点为 INF，因为需要以起点作为基准来考察其余点到起点的距离是否发生改变

完整代码：

```

const int N = 1e5 + 10;
int h[N], e[N], w[N], ne[N], idx;
int dist[N]; //表示起点到当前点的距离
int cnt[N]; //表示从起点到当前点最短路径中的边的数量
bool st[N]; //表示当前点是否在队列中

bool spfa()
{
    memset(dist, 0x3f, sizeof dist);
    d[1] = 0; //以1号点作为起点

    queue<int> q;
}

```

```

for(int i = 1; i <= n; i++)
{
    q.push(i);
    st[i] = true;
}

while(q.size())
{
    int t = q.front();
    q.pop();

    st[t] = false;

    for(int i = h[t]; i != -1; i = ne[i])
    {
        int j = e[i];
        if(dist[j] > dist[t] + w[i])
        {
            dist[j] = dist[t] + w[i];
            cnt[j] = cnt[t] + 1;
            if(cnt[j] >= n) return true;
            if(!st[j])
            {
                q.push(j);
                st[j] = true;
            }
        }
    }
}

return false;
}

```

相关题目: [AcWing 852. spfa判断负环](#)

变式

原题连接: [AcWing 3305. 作物杂交](#)

这道题本质上基于 SPFA 的推导

设 $f(i, j)$ 表示所有在 i 步以内生成 j 的方法的集合, 属性为时间最小值

设最后一步中, 任意两个作物 x, y 生成 j , 此时有:

j 的时间为从起点到 x 的时间与从起点到 y 的时间取较大值, 再加上最后一步的时间($w[i]$ 表示 i 生成对应作物的时间), 即:

$$f(i, j) = \max(f(i-1, x), f(i-1, y)) + \max(w[x], w[y])$$

由于 i 的状态只依赖于 $i-1$, 因此可以将第一维优化掉, 设 $f(j)$ 表示生成 j 的方法的集合, 属性为时间最小值, 有

$$f(j) = \max(f(x), f(y)) + \max(w[x], w[y])$$

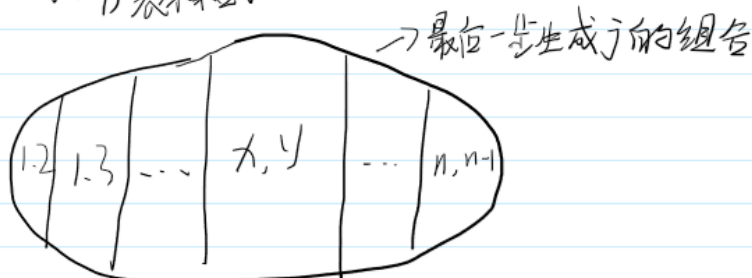
这几乎就是 SPFA 了，仿照 SPFA 的优化思路，只将当前更新过距离的点加入到队列中，这道题便也就结束了

有一个细节的地方需要注意的是，由于有两个点生成第三个点，因此在存图的时候，邻接表的表头表示 x ，邻接表引出的点表示 y ，还需要一个额外数组 `target` 表示由 x 与 y 生成的对应点，并且由于对称性，**边需要存两倍**

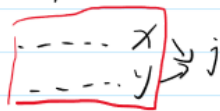
$f(i, j)$ 所有在 i 步以内生成 j 的集合

最终结果: $f(n-1, j)$

$f(i, j)$ 表示集合为:

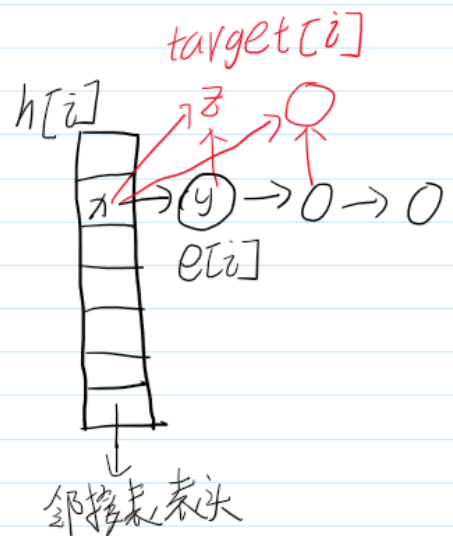


本质上是对最后一步进行划分，设最后一步生成 j 的任意两作物为 x, y ，有：



$$\max\{f(i-1, x), f(i-1, y)\} + \max(T_x, T_y)$$

前面生成 x, y 共有 $i-1$ 步。



完整代码如下：

```
#include <iostream>
#include <cstring>
#include <queue>

using namespace std;

const int N = 2010, M = 2e5 + 10;

int h[N], e[M], ne[M], w[N], target[M], idx;
queue<int> q;
int dist[N]; // 从起点到i点的最小时间
bool st[N]; // 当前队列当中是否存在该元素

void add(int a, int b, int c)
{
    e[idx] = b, target[idx] = c, ne[idx] = h[a], h[a] = idx++;
}
```

```
}

void spfa()
{
    while(q.size())
    {
        int x = q.front();
        q.pop();

        st[x] = false;

        for(int i = h[x]; i != -1; i = ne[i])
        {
            int y = e[i], z = target[i];
            if(dist[z] > max(dist[x], dist[y]) + max(w[x], w[y]))
            {
                dist[z] = max(dist[x], dist[y]) + max(w[x], w[y]);
                if(!st[z])
                {
                    q.push(z);
                    st[z] = true;
                }
            }
        }
    }
}

int n, m, k, T;

int main()
{
    memset(h, -1, sizeof h);
    memset(dist, 0x3f, sizeof dist);
    scanf("%d%d%d%d", &n, &m, &k, &T);
    for(int i = 1; i <= n; i++) cin >> w[i];
    while(m--)
    {
        int x;
        cin >> x;
        q.push(x);
        dist[x] = 0; //初始化距离, 这些都是起点
        st[x] = true;
    }
    while(k--)
    {
        int a, b, c;
        scanf("%d%d%d", &a, &b, &c);
        add(a, b, c);
        add(b, a, c);
    }
    spfa();
    cout << dist[T] << endl;
    return 0;
}
```

Floyd

基础

用于求解多源汇最短路问题，对**边权没有要求**，负权也可以使用

时间复杂度为 $O(n^3)$

采用**邻接矩阵存储**，设 $d[i][j]$ 表示图中从 i 到 j 的距离，当做完一遍 Floyd 之后， $d[i][j]$ 表示图中从 i 到 j 的**最短距离**

算法步骤如下

```
void Floyd()
{
    for(int k = 1; k <= n; k++) // n为点数
        for(int i = 1; i <= n; i++)
            for(int j = 1; j <= n; j++)
                d[i][j] = min(d[i][j], d[i][k] + d[k][j]);
}
```

Floyd 本质上基于动态规划，设 $f(k, i, j)$ 表示从 i 出发，**只经过**点 $1, 2, 3, \dots, k$ 这些点到底 j 的最短距离
设最后一个点经过 k ，那么有：

$$f(k, i, j) = f(k-1, i, k) + f(k-1, k, j)$$

实际含义为：先从 i 走 $1, 2, 3, \dots, k-1$ 这些点到达 k ，再从 k 出发，走 $1, 2, 3, \dots, k-1$ 这些点到达 j

由于第 k 层的状态只取决于 $k-1$ 层，因此可以将第一维优化掉，得到三重循环，这便是 Floyd 算法的思路

相关题目：[AcWing 854. Floyd求最短路](#)

变式

原题链接：[AcWing 4074. 铁路与公路](#)

这道题我们需要建两个图，铁路一个公路一个，然后分别求最短路即可

但这题还有一个限制：中间的任何一个城市两辆车不能同时到达，我们需要考虑这个问题

注意到，这是一个完全图，因此从 1 到 n 一定存在一条路，要么是铁路要么是公路

假设是铁路，那么火车可以直接到达而汽车不行（二者不能走同一条路），因此汽车中途经过的点必然不可能与火车相同（火车中途没有经过的点）

公路也是同理，在此不过多赘述

也就是说，「中间任何一个城市两辆车不能同时到达」这个条件，在最优解当中是必然满足的，直接忽略即可

然后求两遍 1 到 n 的最短路即可（要注意道路是双向的）

Floyd 求法

```
#include <iostream>
#include <cstring>

using namespace std;

const int N = 410, INF = 0x3f3f3f3f;

int g[N][N], d[N][N];

int n, m;

void Floyd()
{
    for(int k = 1; k <= n; k++)
        for(int i = 1; i <= n; i++)
            for(int j = 1; j <= n; j++)
            {
                g[i][j] = min(g[i][j], g[i][k] + g[k][j]);
                d[i][j] = min(d[i][j], d[i][k] + d[k][j]);
            }
}

int main()
{
    cin >> n >> m;
    memset(g, 0x3f, sizeof g);
    memset(d, 0x3f, sizeof d);
    while(m--)
    {
        int x, y;
        cin >> x >> y;
        g[x][y] = g[y][x] = 1; //道路是双向的
    }
    for(int i = 1; i <= n; i++)
        for(int j = 1; j <= n; j++)
            if(g[i][j] == INF) d[i][j] = d[j][i] = 1;
    Floyd();
    cout << (max(g[1][n], d[1][n]) == INF ? -1 : max(g[1][n], d[1][n])) << endl;
    return 0;
}
```

SPFA 求法

这里需要建两个图，因此表头需要两个

```
#include <iostream>
#include <cstring>
```

```
#include <queue>

using namespace std;

const int N = 410, M = N * N, INF = 0x3f3f3f3f;

int h1[N], h2[N], e[M], ne[M], idx; // h1表示铁路, h2表示公路

void add(int h[], int a, int b)
{
    e[idx] = b, ne[idx] = h[a], h[a] = idx++;
}

int n, m;
int g[N][N]; // 用于判断哪些点之间有铁路
int dist[N];
bool st[N];

int spfa(int h[], bool flag) // flag 表示是否为铁路
{
    if(flag && g[1][n] || !flag && !g[1][n]) return 1;

    memset(dist, 0x3f, sizeof dist);

    queue<int> q;
    q.push(1);
    dist[1] = 0;
    st[1] = true;

    while(q.size())
    {
        int t = q.front();
        q.pop();

        st[t] = true;
        for(int i = h[t]; i != -1; i = ne[i])
        {
            int j = e[i];
            if(dist[j] > dist[t] + 1)
            {
                dist[j] = dist[t] + 1;
                if(!st[j])
                {
                    q.push(j);
                    st[j] = true;
                }
            }
        }
    }

    return dist[n];
}

int main()
{

```



```

cin >> n >> m;
memset(h1, -1, sizeof h1);
memset(h2, -1, sizeof h2);
while(m--)
{
    int x, y;
    cin >> x >> y;
    g[x][y] = g[y][x] = true;
    add(h1, x, y), add(h1, y, x);
}
for(int i = 1; i <= n; i++)
    for(int j = 1; j < i; j++)
        if(!g[i][j])
            add(h2, i, j), add(h2, j, i);
int ans = max(spfa(h1, true), spfa(h2, false));
cout << (ans == INF ? -1 : ans) << endl;
return 0;
}

```

最小生成树

基础

Prim 算法

定义集合 S 为**当前所有在连通块内的点**，点 x 到集合的最小距离为：为 x 到集合中所有点的距离当中的最小值

Prim 算法对边权无要求（允许负权边），对是否有重边与自环均无要求（允许重边与自环），图用**邻接矩阵存储**，算法步骤如下：

- 只初始化距离数组 `dist[i]` 用来表示所有点到集合的距离为正无穷，然后迭代 n 次
- 找到**不在集合中且与集合距离最小的点** t
- 用 t 更新其他所有点到集合当中的距离，并把 t 加入到集合中去

由于每一次都是用集合当中的点去更新不在集合当中的点到集合的距离，因此对于当前不在集合当中的点而言，设集合大小为 sz ，那么它到集合的距离最多会被更新 sz 次

完整代码如下：

```

const int N = 1e3, INF = 0x3f3f3f3f;
int g[N][N]; // 邻接矩阵存储图
int dist[N]; // 点到集合的距离
bool st[N]; // 点是否在集合中

int prim() // 返回最小生成树中边权之和
{
    memset(dist, 0x3f, sizeof dist);
    int ans = 0; // 表示边权之和
    for(int i = 1; i <= n; i++)

```

```

{
    int t = -1;
    for(int j = 1; j <= n; j++)
        if(!st[j] && (t == -1 || dist[j] < dist[t]))
            t = j;
    if(i != 1 && dist[t] == INF)//找到的不是第一个点并且该点无法到达，说明没有最小
生成树
        return INF;
    if(i != 1)//不是第一个点，将其边权加入ans中
        ans += dist[t];
    st[t] = true;
    for(int j = 1; j <= n; j++)//这个必须写在ans+=dist[t]的后面，因为如果存在自
环的话会更新本身
        dist[j] = min(dist[j], g[t][j]); //用这个点更新其余点到集合的距离
}
return ans;
}

```

相关题目：[AcWing 858. Prim算法求最小生成树](#)

Kruskal 算法

本算法的操作对象是**边**，因此需要**定义结构体来存储每条边**

算法步骤如下：

- 将每条边**按权重从小到大排序**
- 枚举每条边，两端点为 a, b 权重为 w
- 找到 a 与 b 所在的连通块，如果二者不连通，则将两连通块联通，每次**记录当前已联通的边数**
- 最后检查当前已记录的边数，考察是否等于 $n - 1$

由于涉及连通块问题，因此需要用并查集

算法整体时间复杂度为 $O(m \log m)$

完整代码如下：

```

const int N = 1e5 + 10, M = 2e5 + 10, INF = 0x3f3f3f3f;

int p[N];

int find(int x)
{
    if(x != p[x]) p[x] = find(p[x]);
    return p[x];
}

struct Edge
{
    int a, b, w; //边的两个端点以及权重
    bool operator<(const Edge& W) const

```

```

    {
        return w < W.w;
    }
}edges[M];

int n, m;

int kruskal()
{
    sort(edges, edges + m); //对边权进行排序

    for(int i = 1; i <= n; i++) p[i] = i; //初始化并查集

    int ans = 0, cnt = 0; //ans表示边权之和, cnt表示当前最小生成树中边的数量

    for(int i = 0; i < m; i++) //枚举每条边
    {
        int a = edges[i].a, b = edges[i].b, w = edges[i].w;
        int pa = find(a), pb = find(b);
        if(pa != pb) //a与b所在的连通块没有交集
        {
            p[pa] = pb;
            cnt++; //边数加一
            ans += w;
        }
    }

    if(cnt < n - 1) return INF;
    else return ans;
}

```

变式

最近公共祖先

基础

下面给出这种题目的解法

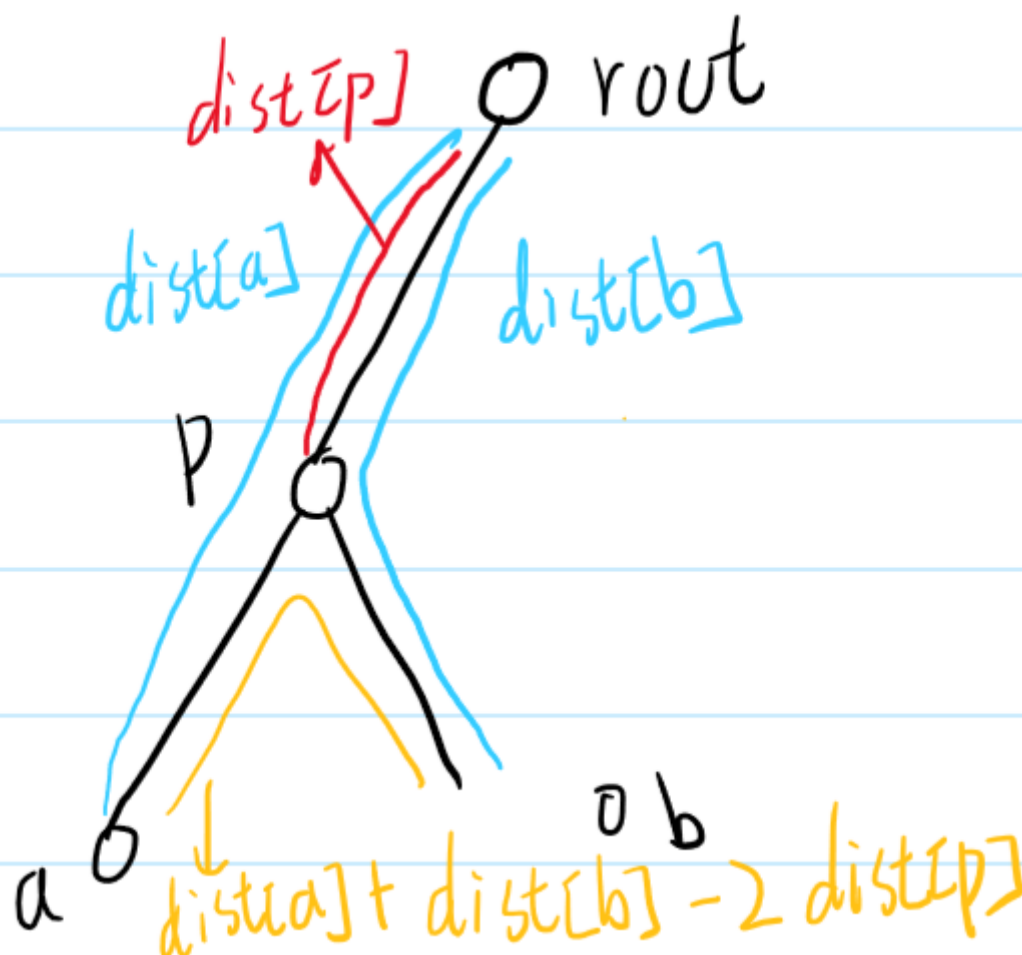
- 爬山法——时间复杂度: $O(n)$
 - 先 DFS 一遍, 求出每个点到根节点的距离 (深度) $dist[i]$
 - 对于两个节点 a, b 而言, 设 a 在上, b 在下, 先将 b 爬到与 a 相同的高度, 随后二者一起向上爬
 - 如果此时点相同, 说明该点为 a, b 的公共祖先

原题链接: [AcWing 3555. 二叉树](#)

求两个节点之间的最短路径, 本质上是**求两个节点到公共祖先的距离之和**

设两个点分别为 a, b , 公共祖先为 p , 到第 i 个节点到根节点的距离为 $dist[i]$

那么 a 与 b 之间的距离为二者与公共祖先的距离之和, 即: $dist[a] + dist[b] - 2 \times dist[p]$



```

#include <iostream>
#include <cstring>

using namespace std;

const int N = 1e3 + 10;

int l[N], r[N], p[N]; // 表示第i个点的左儿子、右儿子、父节点
int dist[N]; // 每个点到根节点的距离

int n, m;

void dfs(int u, int d) // u为当前节点, d为当前节点距离根节点的深度
{
    dist[u] = d;
    if(l[u] != -1) dfs(l[u], d + 1);
    if(r[u] != -1) dfs(r[u], d + 1);
}

int get_lca(int a, int b)
{
    if(dist[a] > dist[b]) swap(a, b); // 默认a在上面, 也就是a的深度更小
    while(dist[a] < dist[b]) b = p[b]; // 将两个点的高度变为相同
    while(a != b) a = p[a], b = p[b]; // 同时向上走, 考察二者是否重合
}

```

```

        return b;
    }

    int main()
    {
        int T;
        cin >> T;
        while(T--)
        {
            memset(l, -1, sizeof l);
            memset(r, -1, sizeof r);
            cin >> n >> m;
            for(int i = 1; i <= n; i++)
            {
                int a, b;
                cin >> a >> b;
                l[i] = a, r[i] = b;
                if(a != -1) p[a] = i; //子节点的父节点是i
                if(b != -1) p[b] = i;
            }
            dfs(1, 0);
            while(m--)
            {
                int a, b;
                cin >> a >> b;
                int lca = get_lca(a, b);
                cout << dist[a] + dist[b] - 2 * dist[lca] << endl;
            }
        }
        return 0;
    }

```

二分图

基础

二分图：将图中的点分别划分到两个集合，使得集合内部不存在边

二分图有两点性质：

一个图是二分图当且仅当图中不含有奇数环（环的边数为基数）

用染色法遍历整个图，如果未出现矛盾，说明该图一定是二分图

染色法判断是否为二分图

具体步骤：

- 遍历所有点，若当前点未染色，则对其染色并遍历所有与其相邻的点，对于相邻点，递归此过程
- 若整个染色过程没有出现矛盾，说明这个图是二分图

完整代码：

```

const int N = 1e5 + 10, M = 2e5 + 10; // 点数与边数
int h[N], e[M], ne[M], idx;

int color[M]; // 当前点的颜色, 0为未染色, 1、2均为两种不同颜色

bool dfs(int u, int c) // u为当前遍历到的点, c为当前点的颜色
{
    color[u] = c; // 对当前点染色
    for(int i = h[u]; i != -1; i = ne[i]) // 遍历当前点的所有出边
    {
        int j = e[i];
        if(!color[j]) // 当前点未染色, 对其染色, 颜色从1变为2
            if(!dfs(j, 3 - c)) // 染色失败, 返回false
                return false;
        else if(color[j] == c) // 当前点已被染色, 考察是否出现矛盾 (若当前点的颜色与u的颜色相同, 则返回false)
            return false;
    }
    return true;
}

bool check()
{
    bool flag = true;
    for(int i = 1; i <= n; i++)
    {
        if(!color[i])
            if(!dfs(i, 1))
            {
                flag = false;
                break;
            }
    }
    return flag;
}

```

二分图的最大匹配 (匈牙利算法)

先给出几个基本概念

二分图的匹配: 求一组边, 使得边的两个端点处于不同的两个集合中并且任意两条边没有相同的顶点

二分图的最大匹配: 求匹配数量的最大值 (即满足条件的边数的最大值)

定义:

设两组点的个数分别为 n_1 和 n_2

- $st[i]$ 表示此次遍历中, 是否对 n_2 中编号为 i 的点遍历过

- $match[i]$ 表示在**整次**遍历中, n_2 中编号为 i 的点匹配的对象

算法思路:

- 遍历 n_1 中所有点, 每次遍历先清空 $st[i]$ 数组, 表示此轮遍历还未对 n_2 中的点遍历过
- 设 n_1 中当前遍历点为 x , 遍历 x 的所有出边 (也就是 n_2 中的点), 考虑如下思路:
 - 如果当前点没有遍历过, 则遍历当前点
 - 如果当前点没有匹配, 则将其与 x 相匹配
 - 如果当前点已匹配, 递归当前点匹配的对象 ($match[j]$) 期望该对象能够改变匹配对象

匈牙利算法既可以用于邻接表, 也可用于邻接矩阵

邻接表:

```
const int N = 510, M = 1e5 + 10;
int h[N], e[M], ne[M], idx;

int match[N];
bool st[N];

bool find(int x)
{
    for(int i = h[x]; i != -1; i = ne[i])
    {
        int j = e[i];
        if(!st[j])//如果当前点没有被遍历过, 则遍历当前点
        {
            st[j] = true;
            if(match[j] == 0 || find(match[j]))//如果当前点还没有匹配或者匹配的对象允许放弃这个点
            {
                match[j] = x;
                return true;
            }
        }
    }
    return false;
}

//遍历
int ans = 0;//表示最大匹配数量
for(int i = 1; i <= n1; i++)
{
    memset(st, false, sizeof st);//先清空
    if(find(i)) ans++;
}
cout << ans << endl;
```

相关题目: [AcWing 861. 二分图的最大匹配](#)

邻接矩阵:

```
const int N = 210;
bool g[N][N]; //表示i指向j有一条边
bool st[N]; //表示第二维当中的点
int match[N]; //表示第二维当中的点

int n, m; //n表示第一个集合的点数, m表示第二个集合的点数

bool find(int x)
{
    for(int i = 1; i <= m; i++)
    {
        if(g[x][i] && !st[i])
        {
            st[i] = true;
            if(match[i] == 0 || find(match[i]))
            {
                match[i] = x;
                return true;
            }
        }
    }
    return false;
}

int ans = 0;
for(int i = 1; i <= n; i++)
{
    memset(st, false, sizeof st);
    if(find(i)) ans++;
}
cout << ans << endl;
```

相关题目: [AcWing 1394. 完美牛棚](#)