

图 (Graph)

@M了个J

<https://github.com/CoderMJLee>

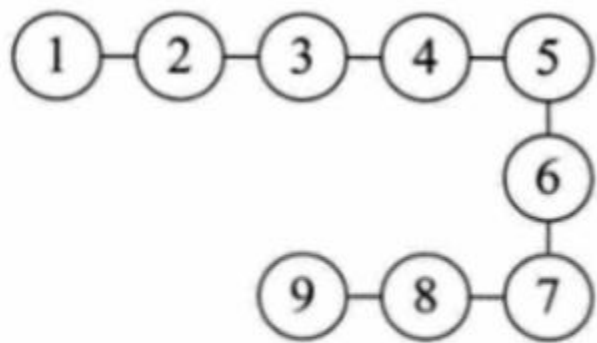
<http://cnblogs.com/mjios>

码拉松



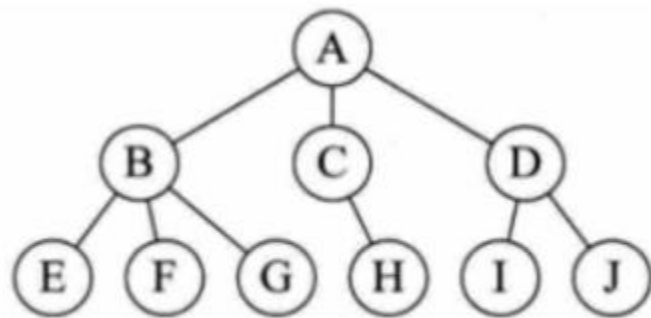
实力IT教育 www.520it.com

数据结构回顾



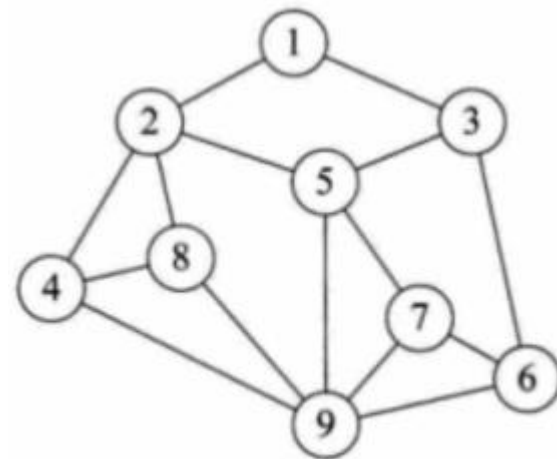
线性结构

数组、链表、
栈、队列、
哈希表



树形结构

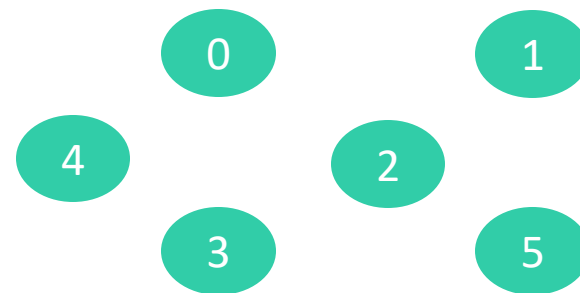
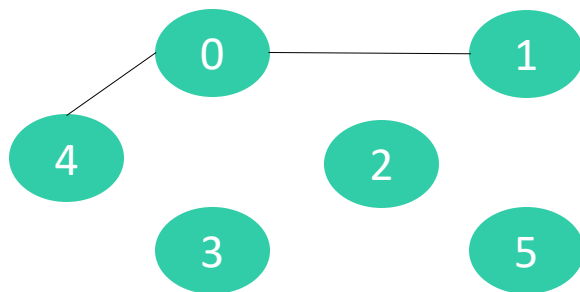
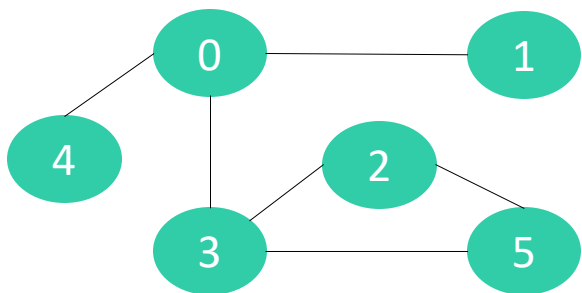
二叉树、B树、
堆、Trie、
哈夫曼树、并查集



图形结构

图 (Graph)

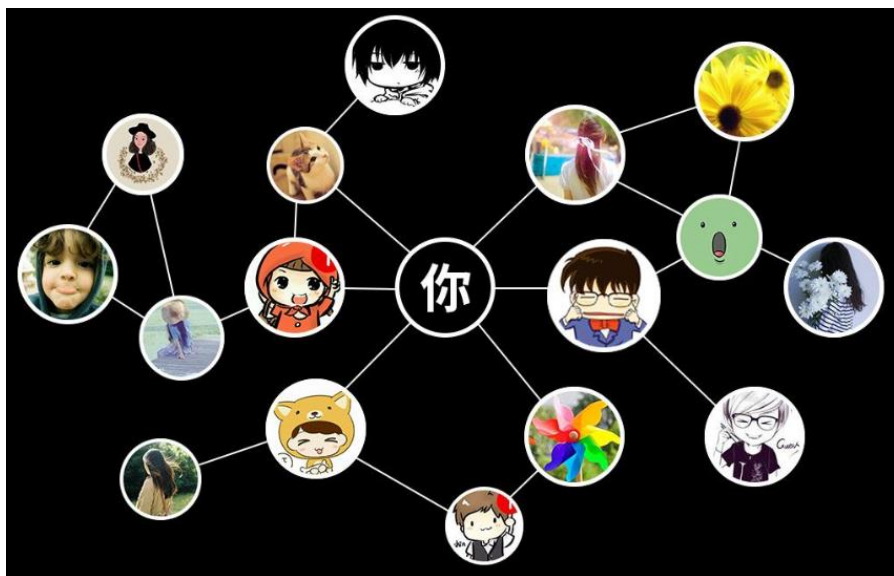
- 图由**顶点** (vertex) 和**边** (edge) 组成, 通常表示为 $G = (V, E)$
- G 表示一个图, V 是顶点集, E 是边集
- 顶点集 V 有穷且非空
- 任意两个顶点之间都可以用边来表示它们之间的关系, 边集 E 可以是空的



图的应用举例

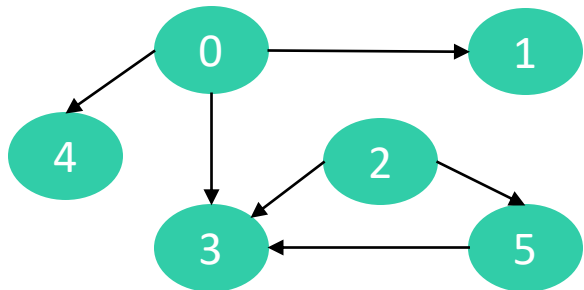
■ 图结构的应用极其广泛

- 社交网络
- 地图导航
- 游戏开发
-



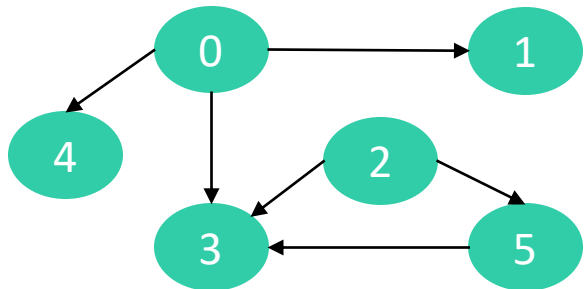
有向图 (Directed Graph)

■ 有向图的边是有明确方向的

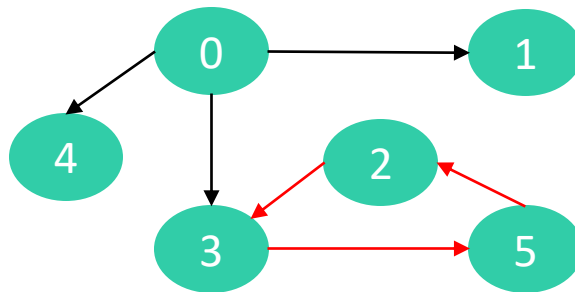


■ 有向无环图 (Directed Acyclic Graph, 简称 DAG)

□ 如果一个有向图，从任意顶点出发无法经过若干条边回到该顶点，那么它就是一个有向无环图



无环



有环

出度、入度

■ 出度、入度适用于有向图

■ 出度 (Out-degree)

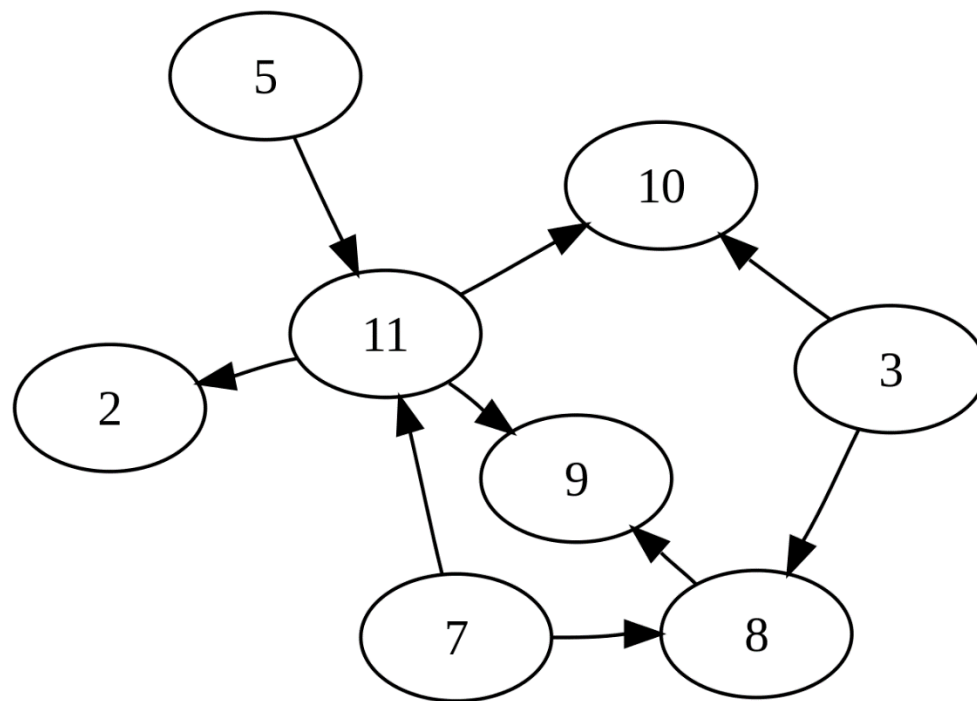
□ 一个顶点的出度为 x , 是指有 x 条边以该顶点为起点

□ 顶点11的出度是3

■ 入度 (In-degree)

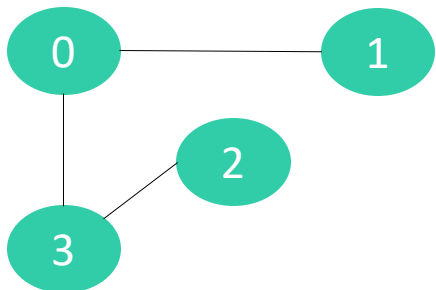
□ 一个顶点的入度为 x , 是指有 x 条边以该顶点为终点

□ 顶点11的入度是2

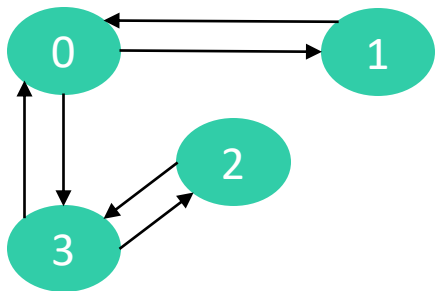


无向图 (Undirected Graph)

■ 无向图的边是无方向的

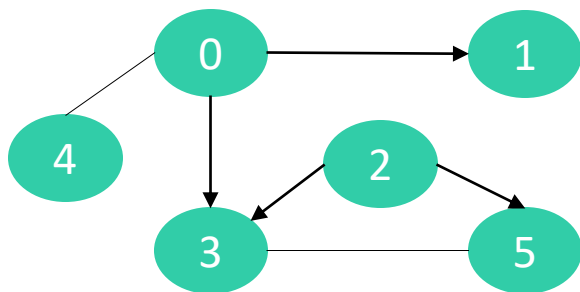


■ 效果类似于下面的有向图



混合图 (Mixed Graph)

- 混合图的边可能是无向的，也可能是有向的



简单图、多重图

■ 平行边

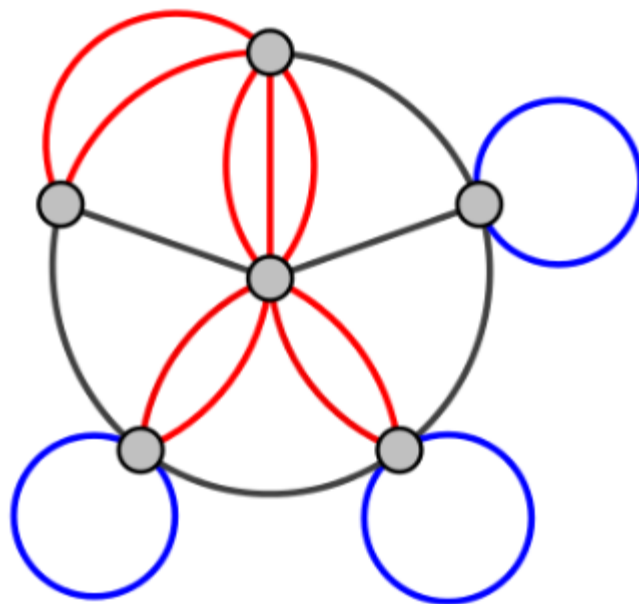
- 在无向图中，关联一对顶点的无向边如果多于1条，则称这些边为平行边
- 在有向图中，关联一对顶点的有向边如果多于1条，并且它们的方向相同，则称这些边为平行边

■ 多重图 (Multigraph)

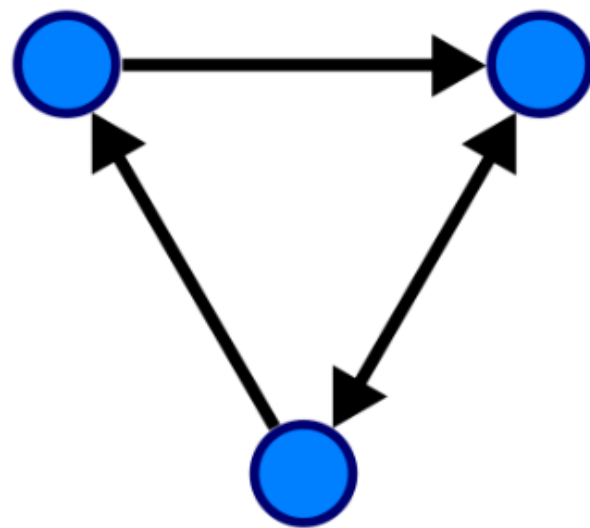
- 有平行边或者有自环的图

■ 简单图 (Simple Graph)

- 既没有平行边也没有自环的图
- 课程中讨论的基本都是简单图



多重图



简单图

无向完全图 (Undirected Complete Graph)

■ 无向完全图的任意两个顶点之间都存在边

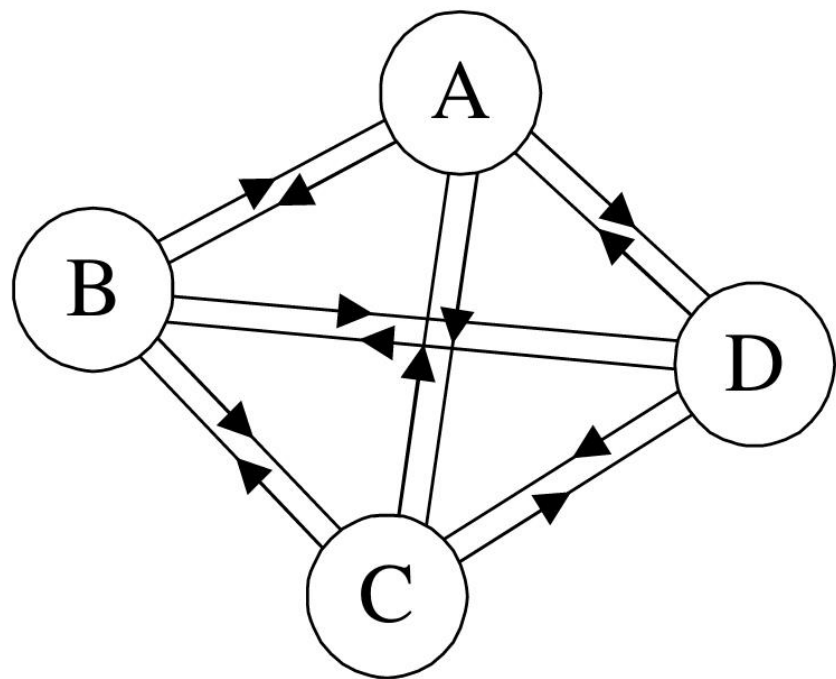
□ n 个顶点的无向完全图有 $n(n-1)/2$ 条边

✓ $(n-1) + (n-2) + (n-3) + \dots + 3 + 2 + 1$

K_1	K_2	K_3	K_4
K_5	K_6	K_7	K_8

有向完全图 (Directed Complete Graph)

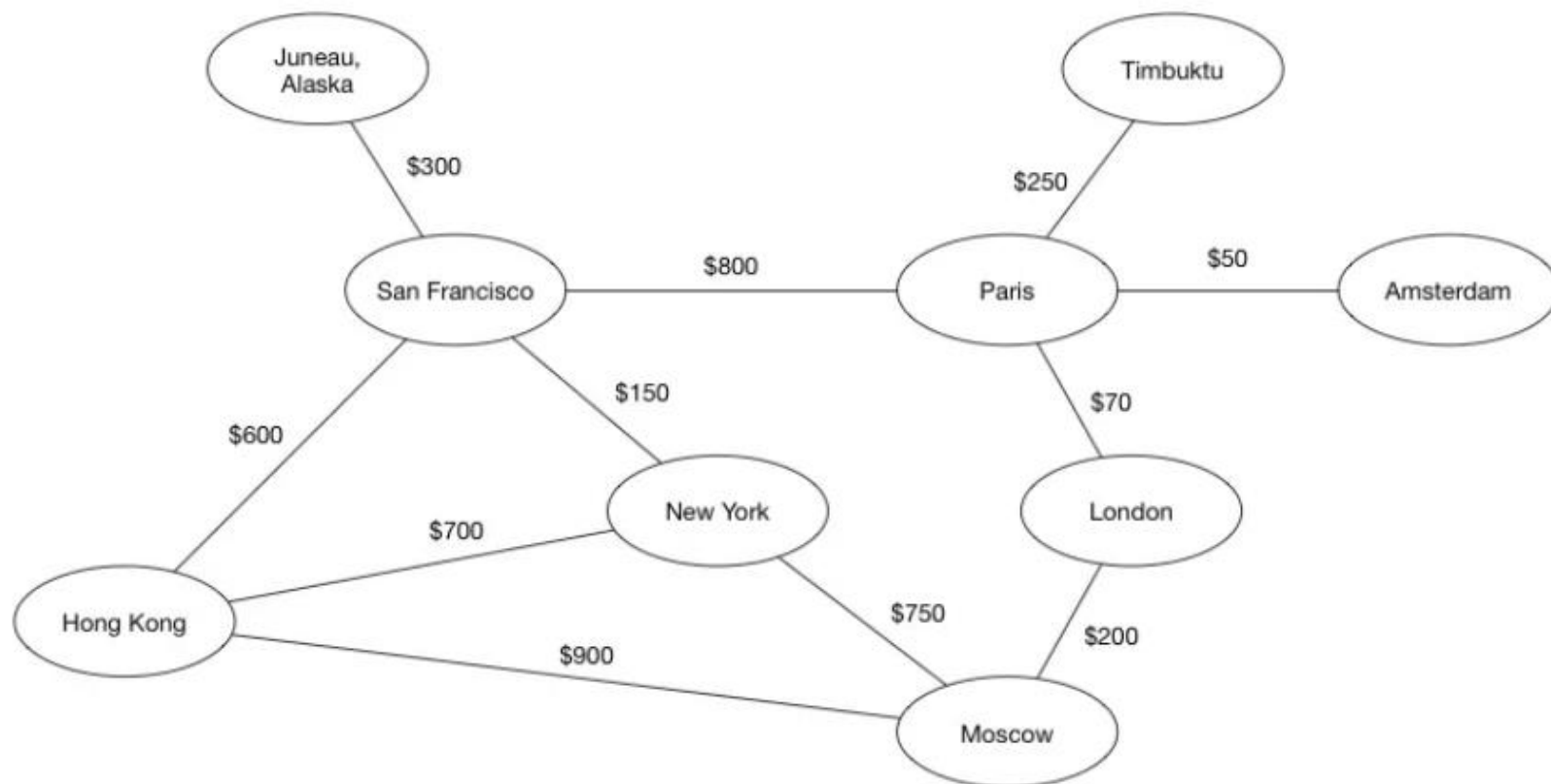
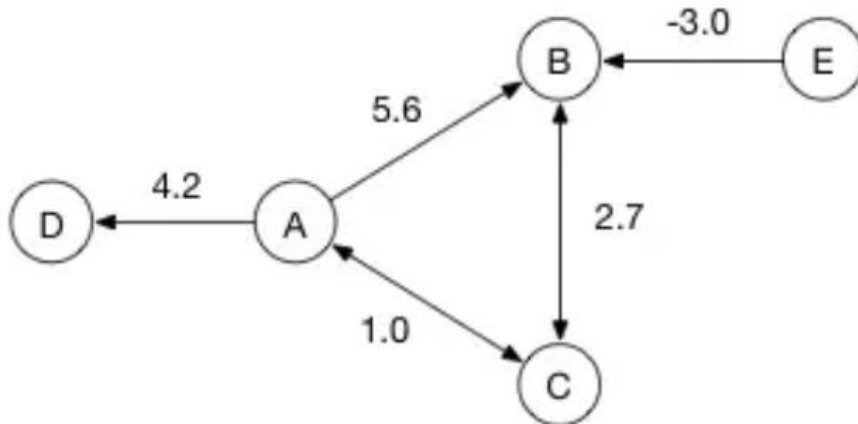
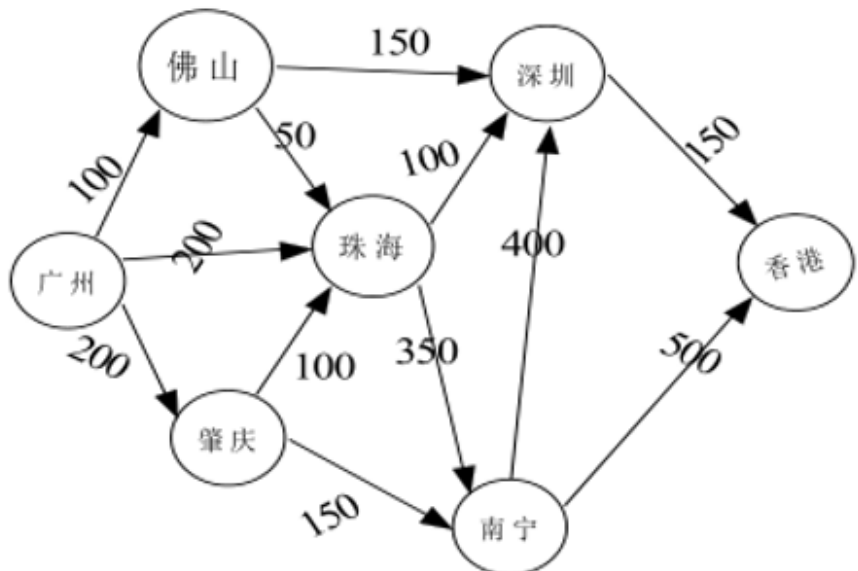
- 有向完全图的任意两个顶点之间都存在方向相反的两条边
- n 个顶点的有向完全图有 $n(n - 1)$ 条边



- 稠密图 (Dense Graph) : 边数接近于或等于完全图
- 稀疏图 (Sparse Graph) : 边数远远少于完全图

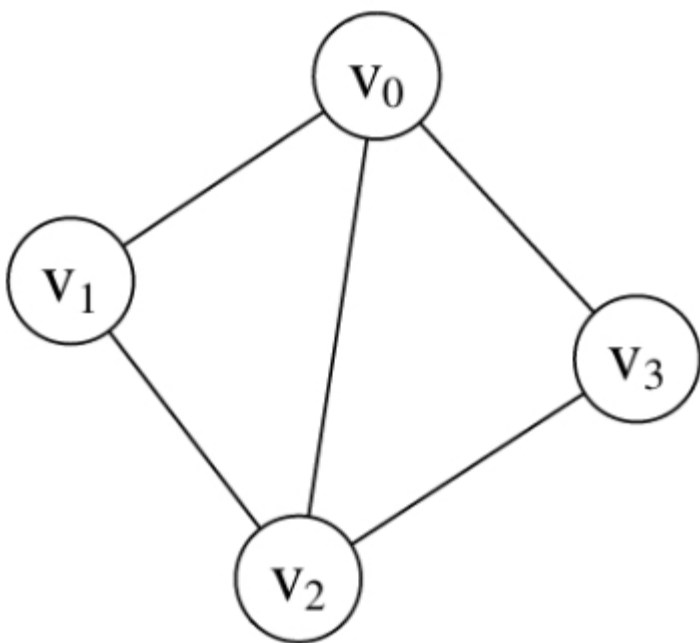
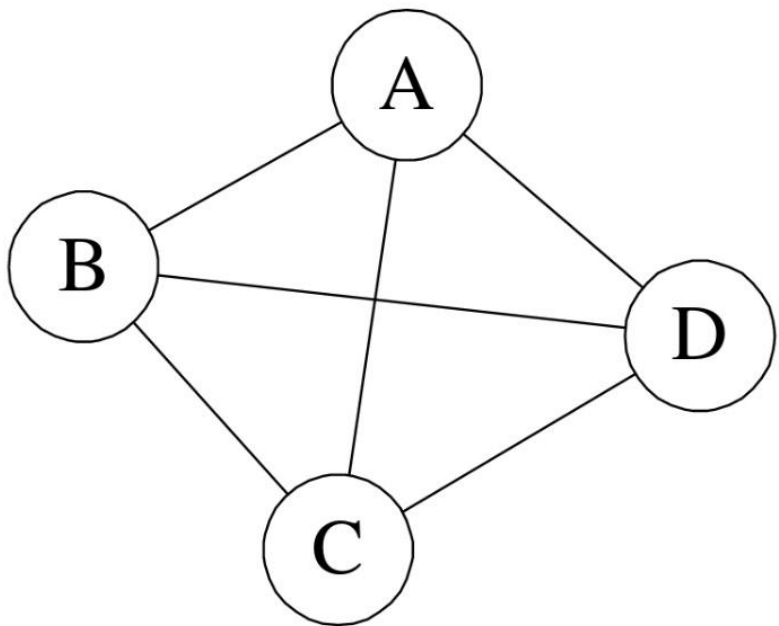
有权图 (Weighted Graph)

■ 有权图的边可以拥有权值 (Weight)



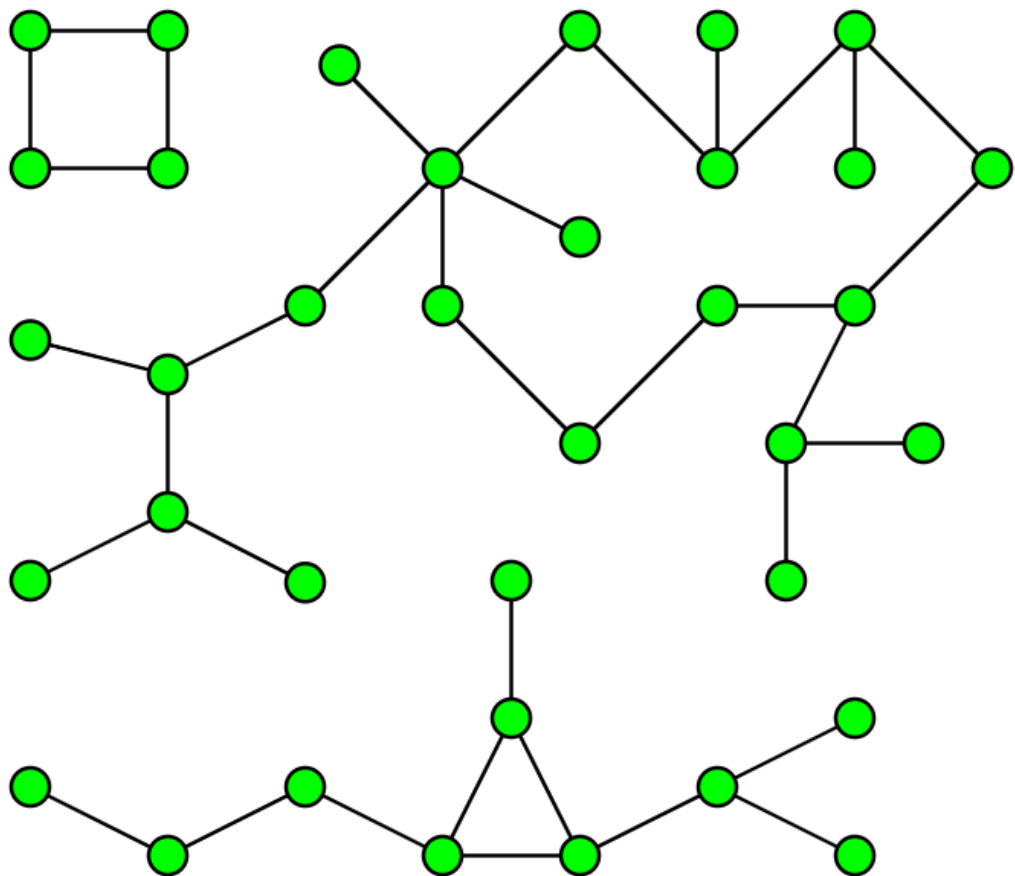
连通图 (Connected Graph)

- 如果顶点 x 和 y 之间存在可相互抵达的路径（直接或间接的路径），则称 x 和 y 是连通的
- 如果无向图 G 中任意2个顶点都是连通的，则称 G 为连通图



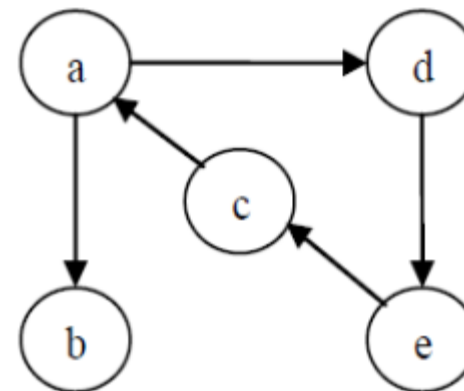
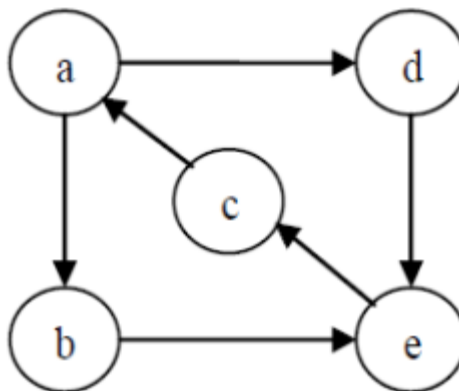
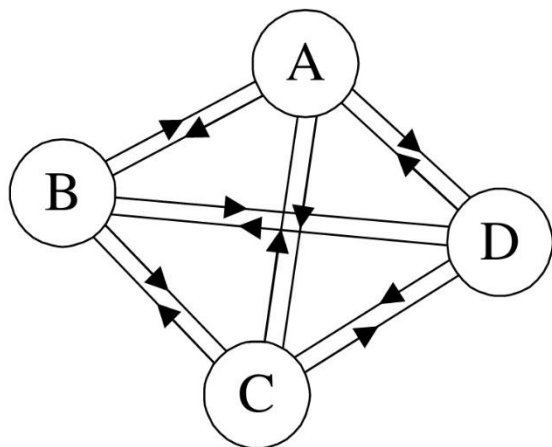
连通分量 (Connected Component)

- 连通分量：无向图的极大连通子图
- 连通图只有一个连通分量，即其自身；非连通的无向图有多个连通分量
- 下面的无向图有3个连通分量



强连通图 (Strongly Connected Graph)

■ 如果有向图 G 中任意2个顶点都是连通的，则称 G 为**强连通图**

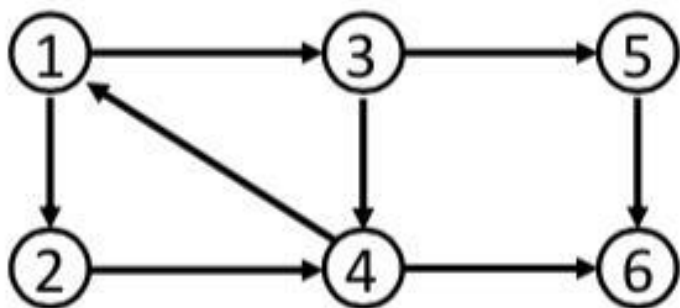


不是强连通图

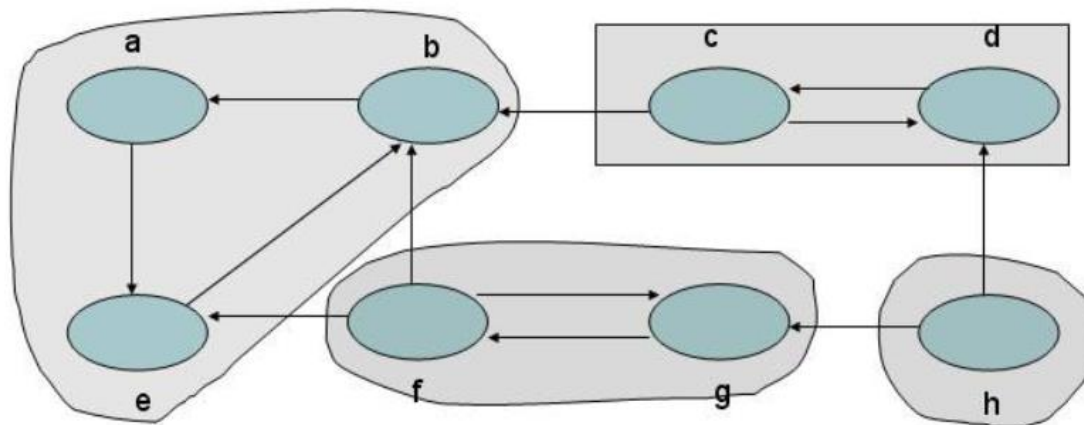
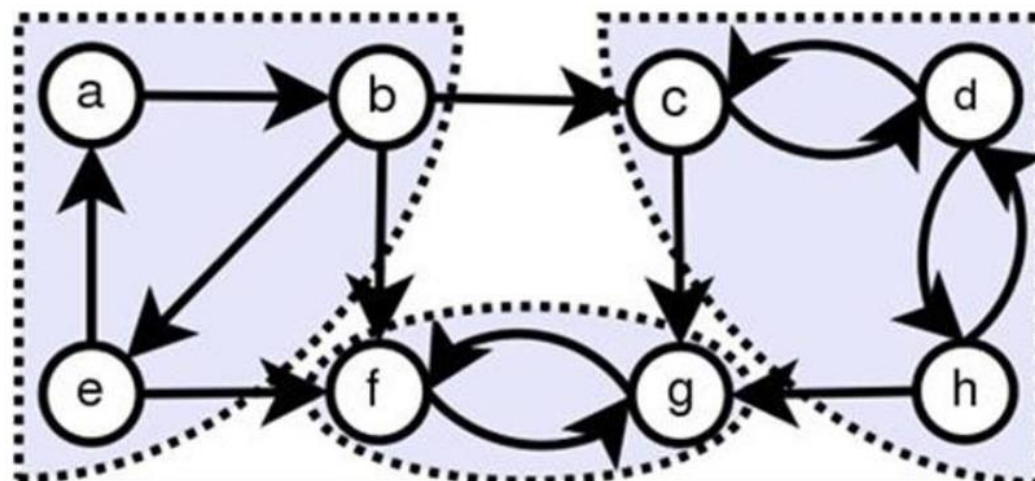
强连通分量 (Strongly Connected Component)

■ 强连通分量：有向图的极大强连通子图

□ 强连通图只有一个强连通分量，即其自身；非强连通的有向图有多个强连通分量



强连通分量：{1,2,3,4}、{5}、{6}



图的实现方案

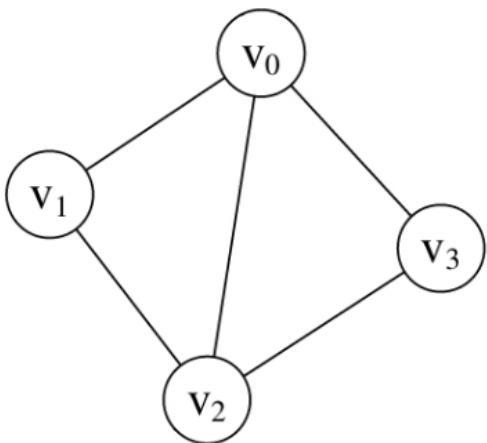
■ 图有2种常见的实现方案

□ 邻接矩阵 (Adjacency Matrix)

□ 邻接表 (Adjacency List)

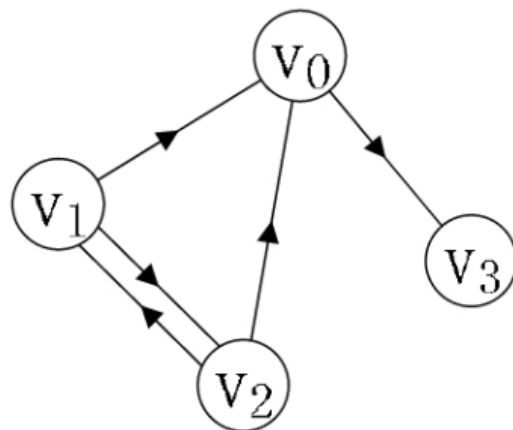
邻接矩阵 (Adjacency Matrix)

- 邻接矩阵的存储方式
 - 一维数组存放顶点信息
 - 二维数组存放边信息
- 邻接矩阵比较适合稠密图
 - 不然会比较浪费内存



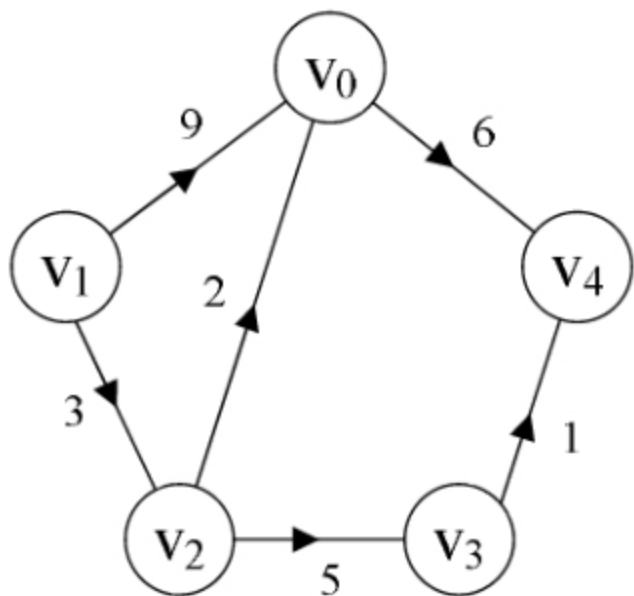
顶点数组			
v_0	v_1	v_2	v_3

边数组				
	v_0	v_1	v_2	v_3
v_0	0	1	1	1
v_1	1	0	1	0
v_2	1	1	0	1
v_3	1	0	1	0



边数组				
	v_0	v_1	v_2	v_3
v_0	0	0	0	1
v_1	1	0	1	0
v_2	1	1	0	0
v_3	0	0	0	0

邻接矩阵 – 有权图



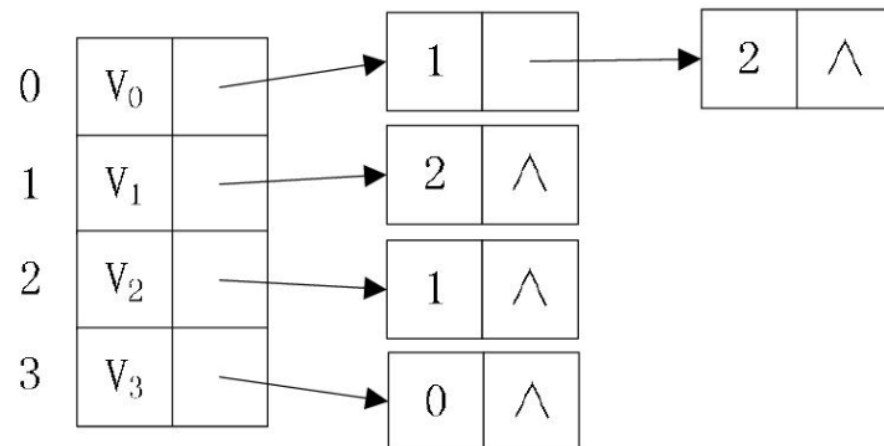
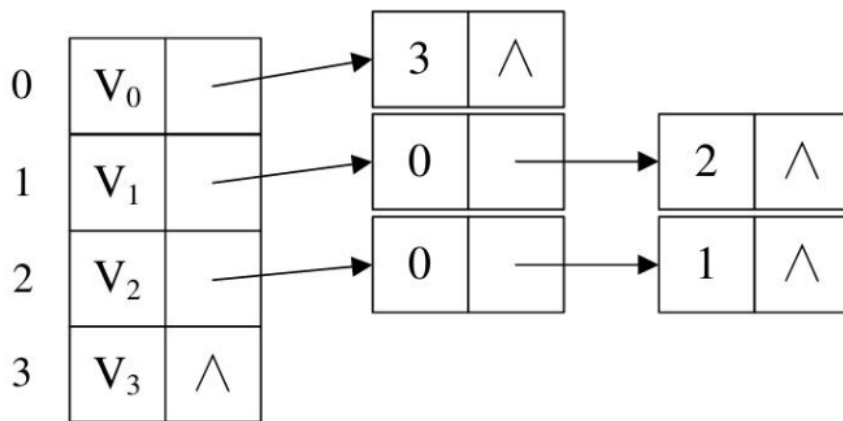
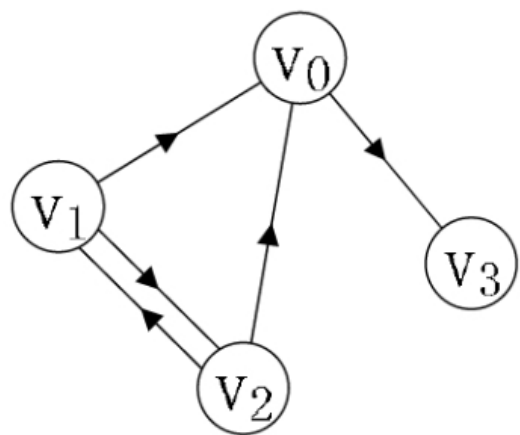
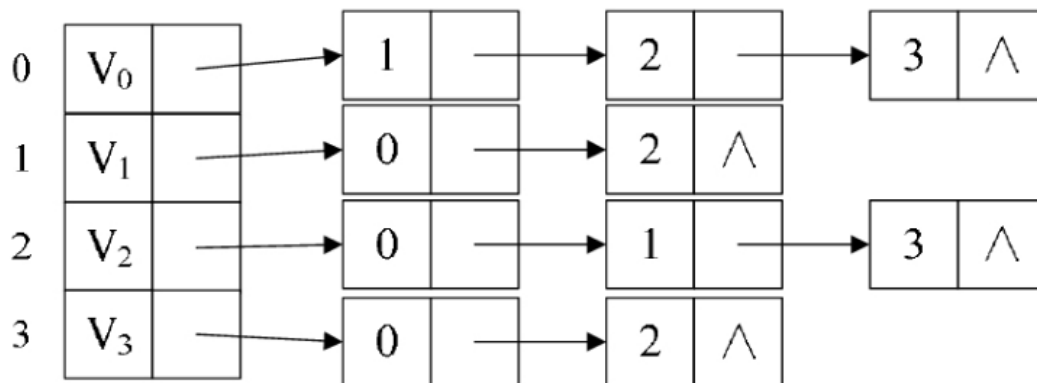
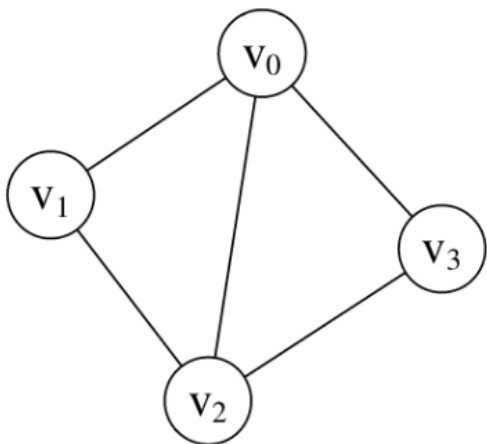
顶点数组

v_0	v_1	v_2	v_3	v_4
-------	-------	-------	-------	-------

边数组

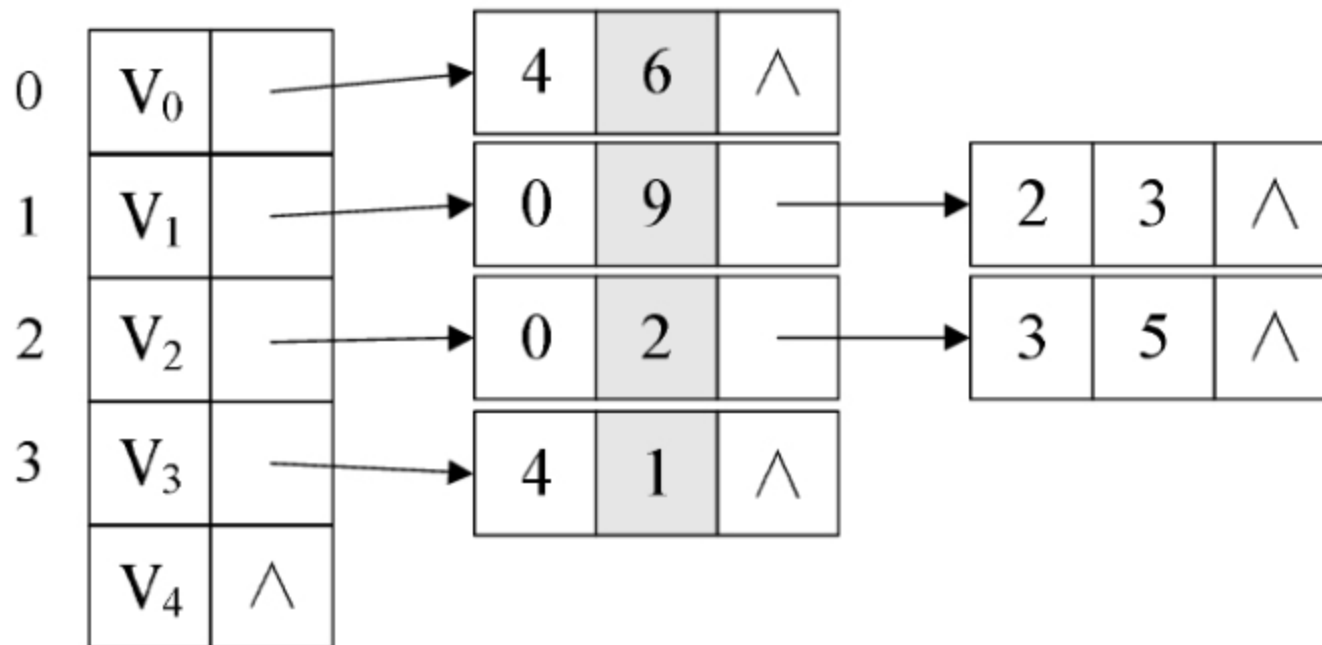
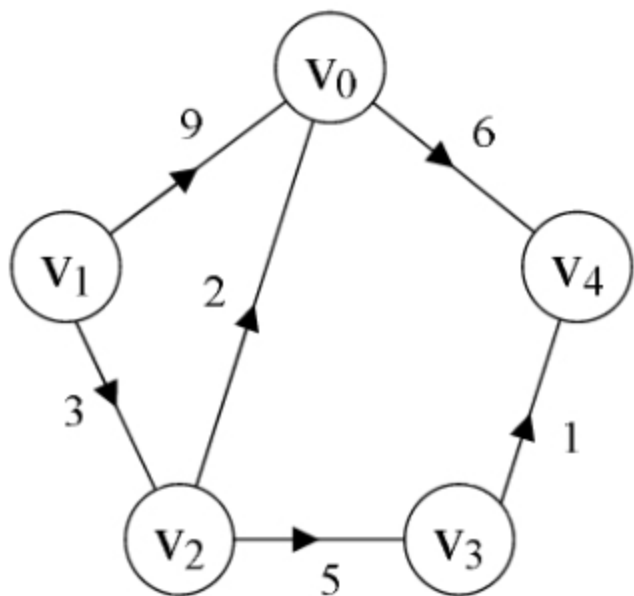
	v_0	v_1	v_2	v_3	v_4
v_0	∞	∞	∞	∞	6
v_1	9	∞	3	∞	∞
v_2	2	∞	∞	5	∞
v_3	∞	∞	∞	∞	1
v_4	∞	∞	∞	∞	∞

邻接表 (Adjacency List)



逆邻接表

邻接表 - 有权图



```
int verticesSize();
int edgesSize();

void addVertex(V v);
void removeVertex(V v);

void addEdge(V fromV, V toV);
void addEdge(V fromV, V toV, E weight);
void removeEdge(V fromV, V toV);
```

顶点的定义

```
private static class Vertex<V, E> {  
    V value;  
    Set<Edge<V, E>> inEdges = new HashSet<>();  
    Set<Edge<V, E>> outEdges = new HashSet<>();  
    Vertex(V value) {  
        this.value = value;  
    }  
    @Override  
    public boolean equals(Object obj) {  
        return Objects.equals(value, ((Vertex<V, E>) obj).value);  
    }  
    @Override  
    public int hashCode() {  
        return value == null ? 0 : value.hashCode();  
    }  
}
```

边的定义

```
private static class Edge<V, E> {  
    Vertex<V, E> from;  
    Vertex<V, E> to;  
    E weight;  
    public boolean equals(Object obj) {  
        Edge<V, E> edge = (Edge<V, E>) obj;  
        return from.equals(edge.from) && to.equals(edge.to);  
    }  
    public int hashCode() {  
        return from.hashCode() * 31 + to.hashCode();  
    }  
}
```


■ 图的遍历

□ 从图中某一顶点出发访问图中其余顶点，且每一个顶点仅被访问一次

■ 图有2种常见的遍历方式（有向图、无向图都适用）

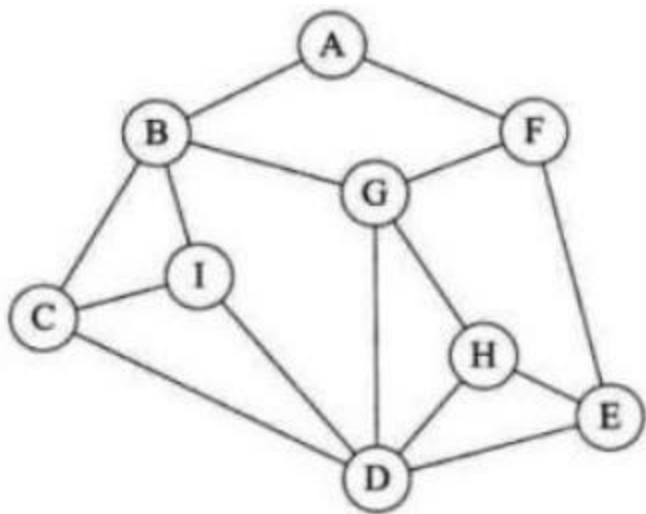
□ 广度优先搜索（Breadth First Search, BFS），又称为宽度优先搜索、横向优先搜索

□ 深度优先搜索（Depth First Search, DFS）

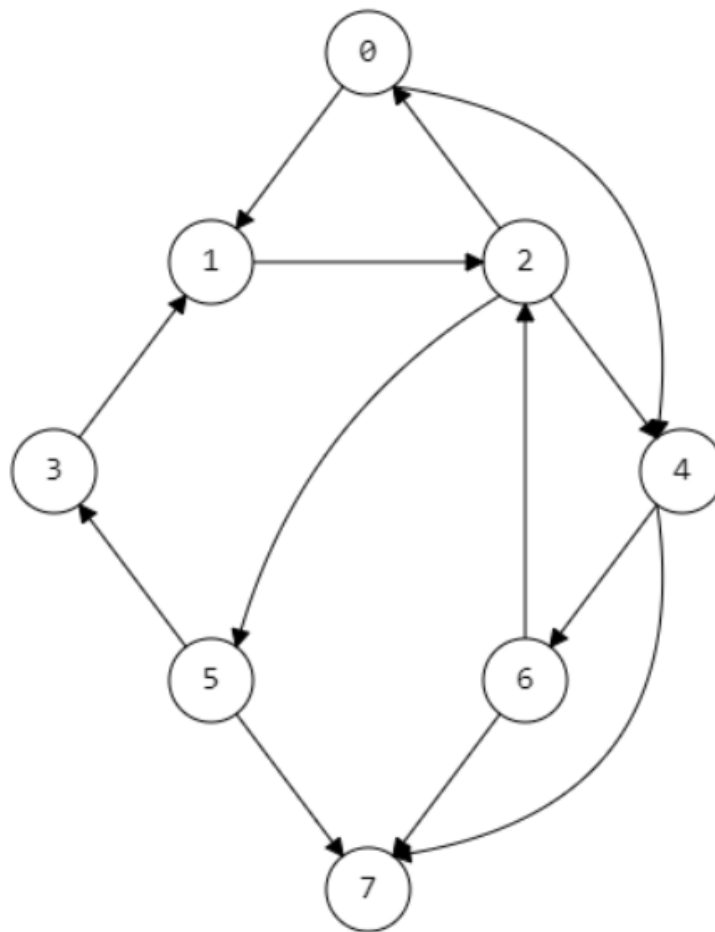
✓ 发明“深度优先搜索”算法的2位科学家在1986年共同获得计算机领域的最高奖：图灵奖

广度优先搜索 (Breadth First Search)

■ 之前所学的二叉树层序遍历就是一种广度优先搜索

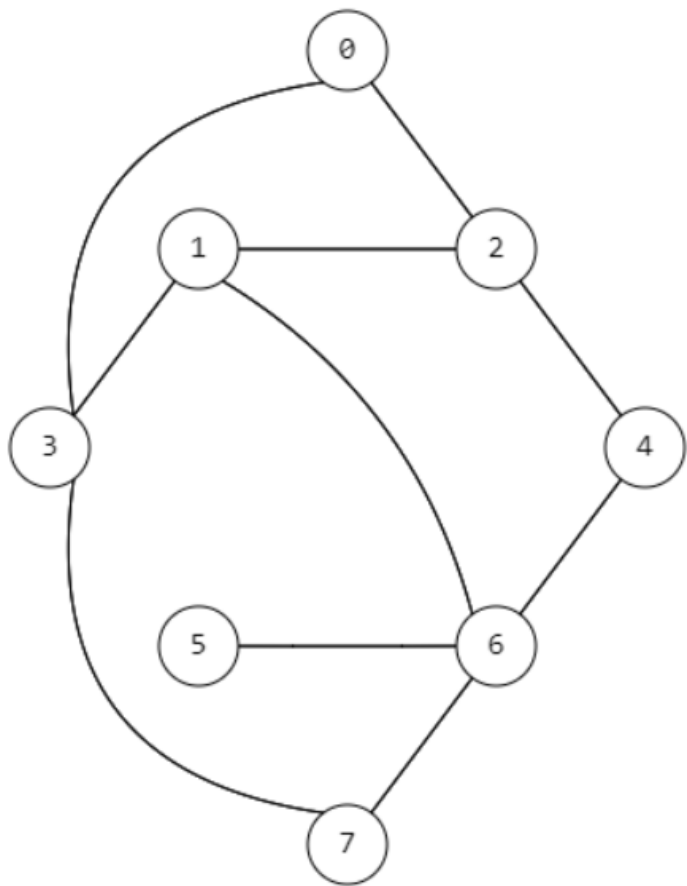


第1层	A
第2层	B、F
第3层	C、I、G、E
第4层	D、H

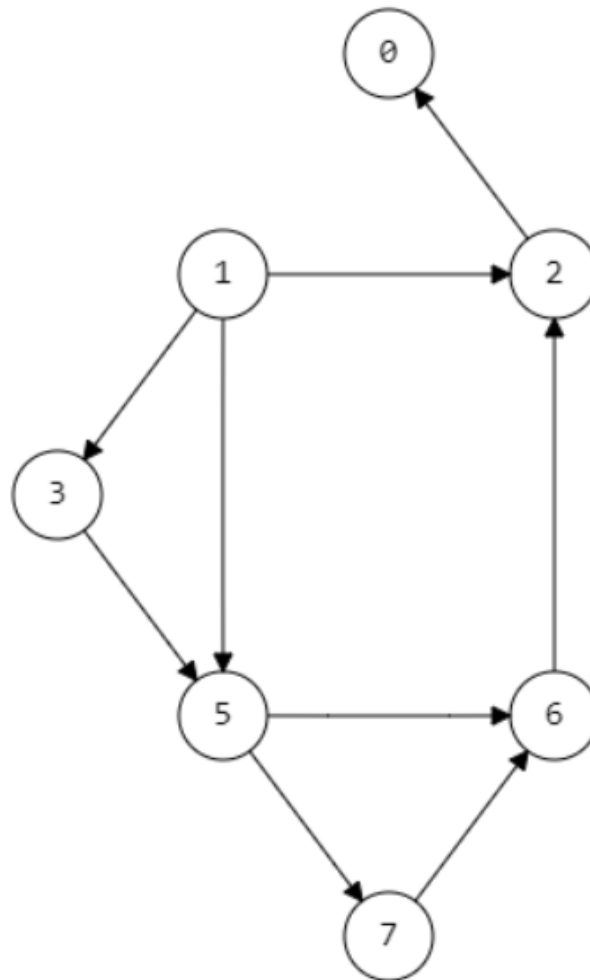


第1层	0
第2层	1、4
第3层	2、6、7
第4层	5
第5层	3

广度优先搜索

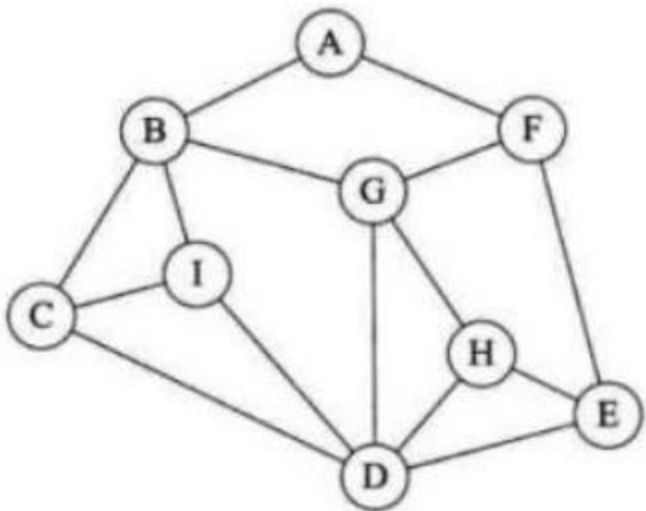


第1层	0
第2层	3、2
第3层	7、1、4
第4层	6
第5层	5



第1层	5
第2层	7、6
第3层	2
第4层	0

广度优先搜索 - 思路



← A

←

← B、F

←

← F、C、I、G

←

← C、I、G、E

←

← I、G、E、D

←

← G、E、D

←

← E、D、H

←

← D、H

←

← H

←

←

←

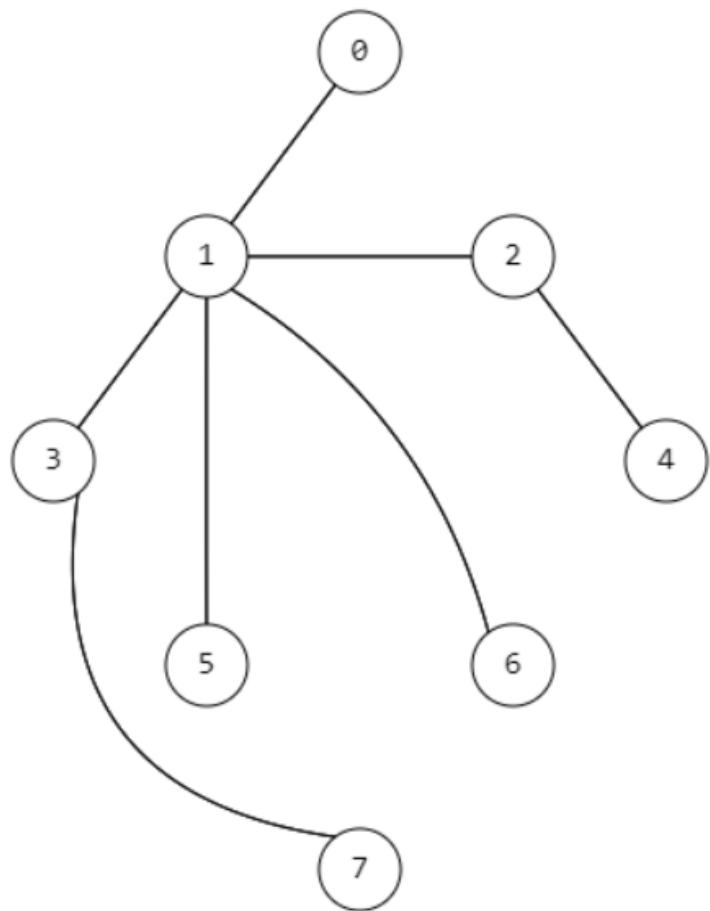
广度优先搜索 – 实现

```
private void bfs(Vertex<V, E> beginVertex) {
    Set<Vertex<V, E>> visitedVertices = new HashSet<>();
    Queue<Vertex<V, E>> queue = new LinkedList<>();
    queue.offer(beginVertex);
    visitedVertices.add(beginVertex);
    while (!queue.isEmpty()) {
        Vertex<V, E> vertex = queue.poll();
        System.out.println(vertex.value);

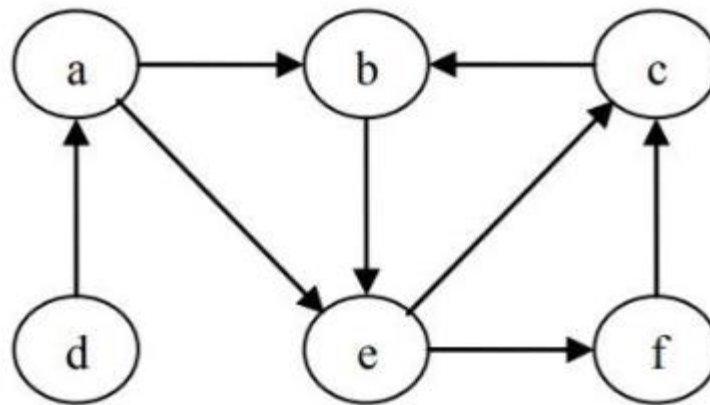
        for (Edge<V, E> edge : vertex.outEdges) {
            if (visitedVertices.contains(edge.to)) continue;
            queue.offer(edge.to);
            visitedVertices.add(edge.to);
        }
    }
}
```

深度优先搜索 (Depth First Search)

■ 之前所学的二叉树前序遍历就是一种深度优先搜索



1、3、7、5、6、2、4、0



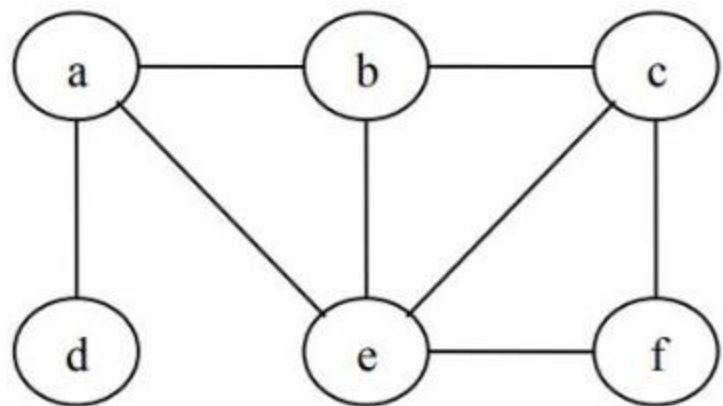
a、e、f、c、b

a、e、c、b、f

a、b、e、f、c

a、b、e、c、f

深度优先搜索



e、f、c、b、a、d

e、c、f、b、a、d

e、c、b、a、d、f

e、b、c、f、a、d

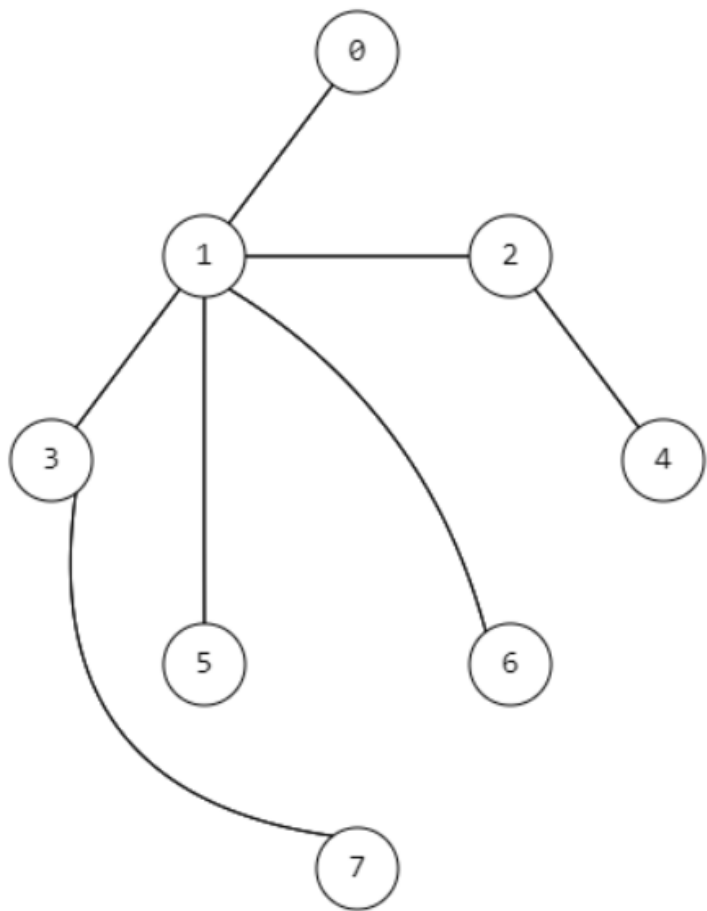
e、a、b、c、f、d

e、a、d、b、c、f

深度优先搜索 – 递归实现

```
private void dfs(Vertex<V, E> vertex, Set<Vertex<V, E>> visitedVertices) {  
    System.out.println(vertex.value);  
    visitedVertices.add(vertex);  
  
    for (Edge<V, E> edge : vertex.outEdges) {  
        if (visitedVertices.contains(edge.to)) continue;  
        dfs(edge.to, visitedVertices);  
    }  
}
```


深度优先搜索 - 非递归思路



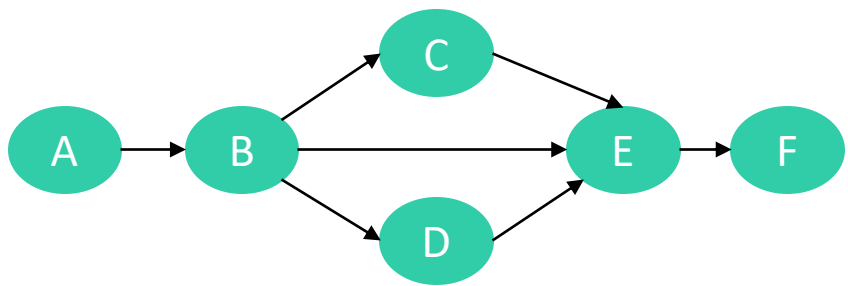
1		3	1	7	3		
		1	1	1	1	1	
5			6				
1	1		1	1			
2		4					
1	1	1	2		1		
0							
1	1						

深度优先搜索 – 非递归实现

```
private void dfs(Vertex<V, E> beginVertex) {  
    Set<Vertex<V, E>> visitedVertices = new HashSet<>();  
    Stack<Vertex<V, E>> stack = new Stack<>();  
    stack.push(beginVertex);  
    visitedVertices.add(beginVertex);  
    System.out.println(beginVertex.value);  
  
    while (!stack.isEmpty()) {  
        Vertex<V, E> vertex = stack.pop();  
        for (Edge<V, E> edge : vertex.outEdges) {  
            if (visitedVertices.contains(edge.to)) continue;  
            stack.push(edge.from);  
            stack.push(edge.to);  
            visitedVertices.add(edge.to);  
            System.out.println(edge.to.value);  
            break;  
        }  
    }  
}
```

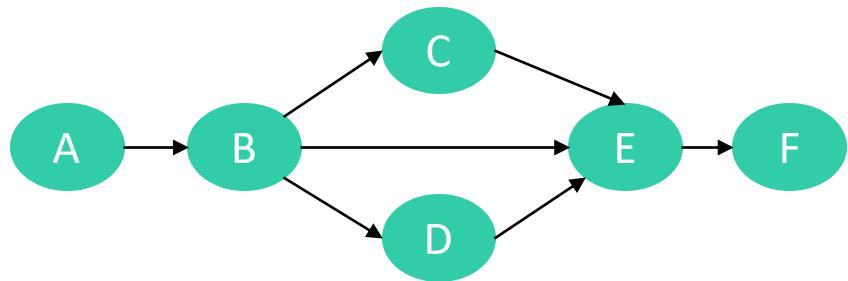
AOV网 (Activity On Vertex Network)

- 一项大的工程常被分为多个小的子工程
 - ✓ 子工程之间可能存在一定的先后顺序，即某些子工程必须在其他的一些子工程完成后才能开始
- 在现代化管理中，人们常用有向图来描述和分析一项工程的计划和实施过程，子工程被称为活动 (Activity)
 - ✓ 以顶点表示活动、有向边表示活动之间的先后关系，这样的图简称为 AOV 网
- 标准的AOV网必须是一个有向无环图 (Directed Acyclic Graph, 简称 DAG)



- B依赖于A
- C依赖于B
- D依赖于B
- E依赖于B、C、D
- F依赖于E

拓扑排序 (Topological Sort)



- 前驱活动：有向边起点的活动称为终点的前驱活动
- 只有当一个活动的前驱全部都完成后，这个活动才能进行
- 后继活动：有向边终点的活动称为起点的后继活动

■ 什么是拓扑排序？

- 将 AOV 网中所有活动排成一个序列，使得每个活动的前驱活动都排在该活动的前面
- 比如上图的拓扑排序结果是：A、B、C、D、E、F 或者 A、B、D、C、E、F（结果并不一定是唯一的）

拓扑排序 - 思路

■ 可以使用卡恩算法（Kahn于1962年提出）完成拓扑排序

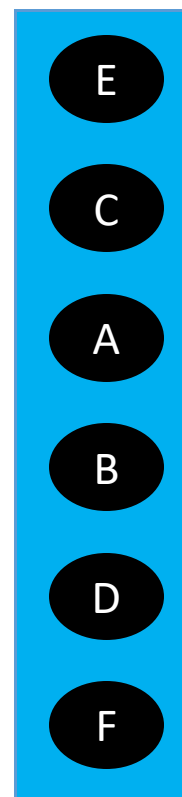
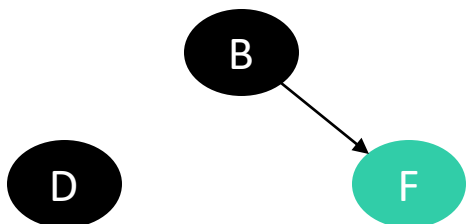
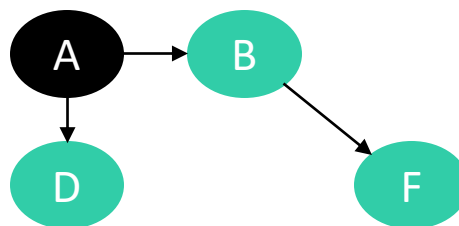
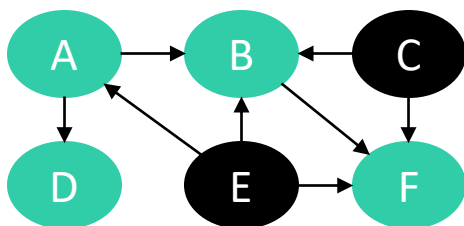
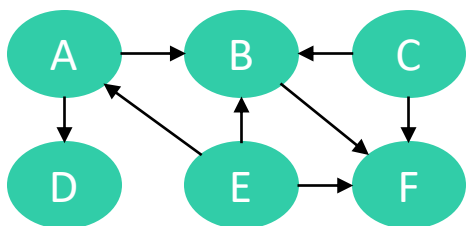
□ 假设 L 是存放拓扑排序结果的列表

① 把所有入度为 0 的顶点放入 L 中，然后把这些顶点从图中去掉

② 重复操作 ①，直到找不到入度为 0 的顶点

□ 如果此时 L 中的元素个数和顶点总数相同，说明拓扑排序完成

□ 如果此时 L 中的元素个数少于顶点总数，说明原图中存在环，无法进行拓扑排序



拓扑排序 - 实现

```
List<V> list = new ArrayList<>();
Queue<Vertex<V, E>> queue = new LinkedList<>();
Map<Vertex<V, E>, Integer> ins = new HashMap<>();
vertices.forEach((V key, Vertex<V, E> vertex) -> {
    Integer in = vertex.inEdges.size();
    if (in == 0) {
        queue.offer(vertex);
    } else {
        ins.put(vertex, in);
    }
});
```

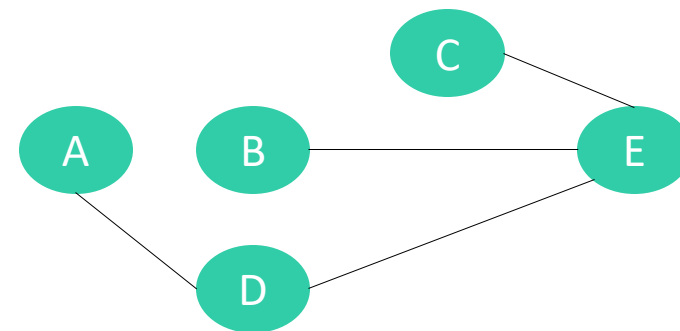
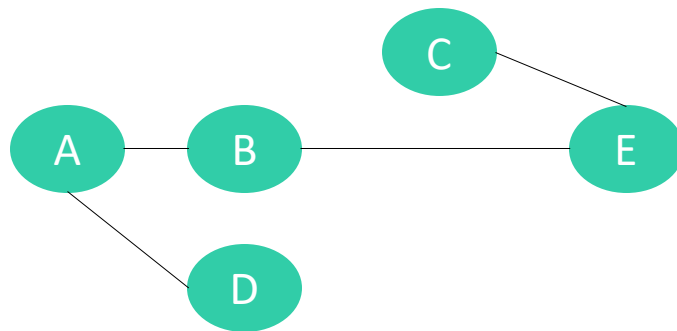
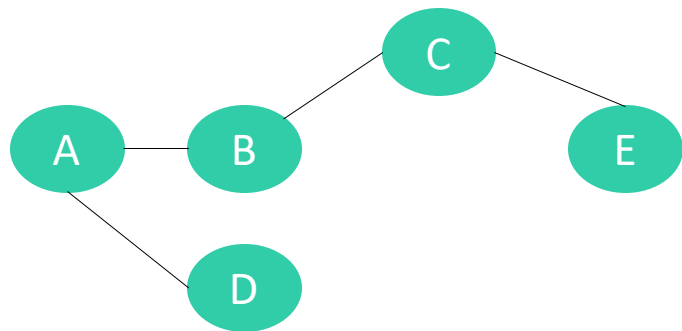
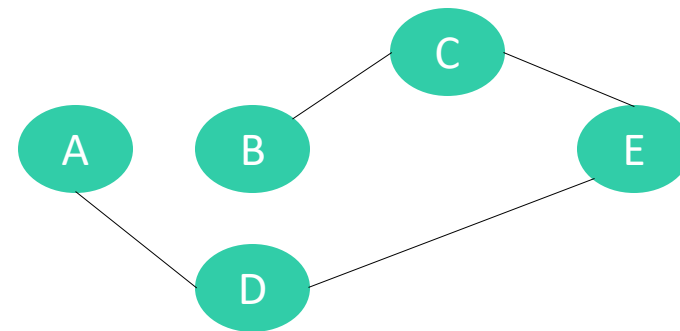
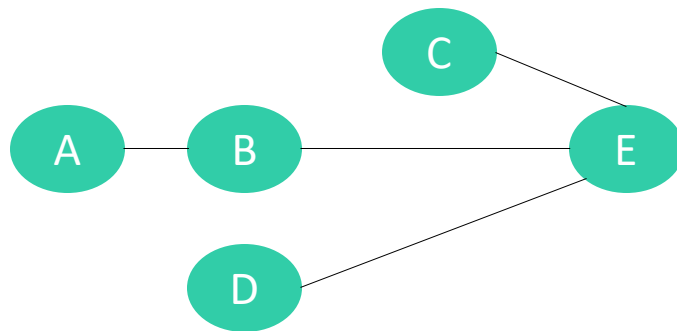
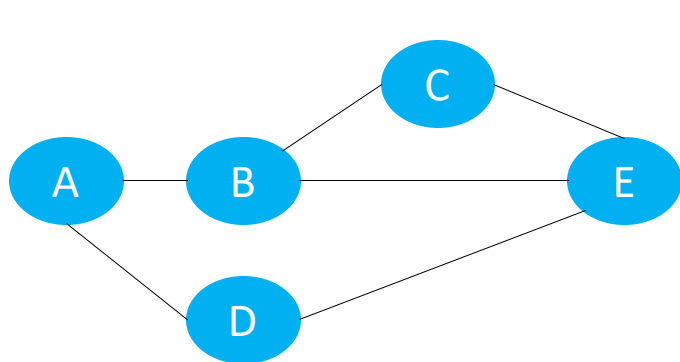
```
while (!queue.isEmpty()) {
    Vertex<V, E> vertex = queue.poll();
    list.add(vertex.value);
    for (Edge<V, E> edge : vertex.outEdges) {
        Integer in = ins.get(edge.to) - 1;
        if (in == 0) {
            queue.offer(edge.to);
        } else {
            ins.put(edge.to, in);
        }
    }
}
```

- 自学《AOE网络》
- 课程表 II
- <https://leetcode-cn.com/problems/course-schedule-ii/>

生成树 (Spanning Tree)

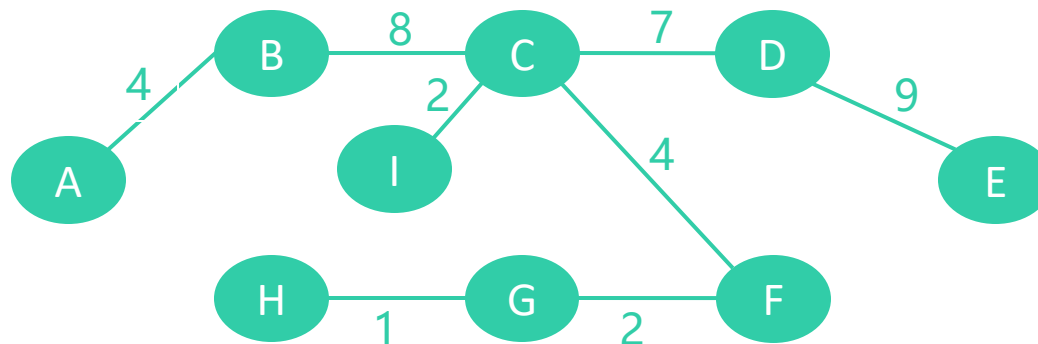
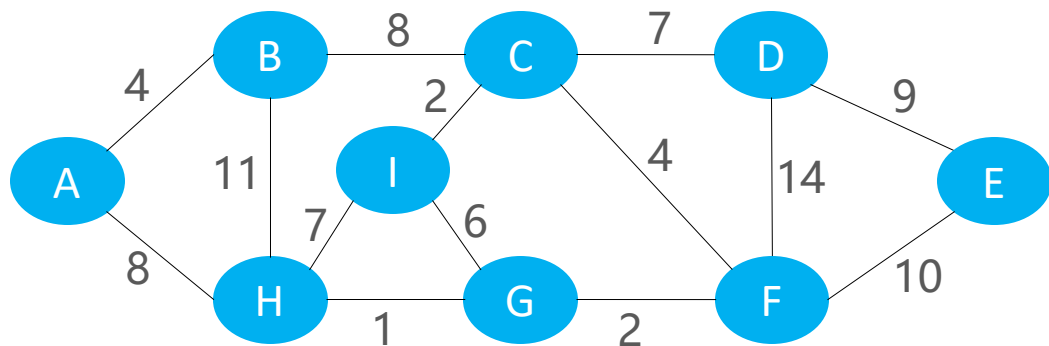
■ 生成树 (Spanning Tree)，也称为支撑树

□ 连通图的极小连通子图，它含有图中全部的 n 个顶点，恰好只有 $n - 1$ 条边



最小生成树 (Minimum Spanning Tree)

- 最小生成树 (Minimum Spanning Tree, 简称MST)
- 也称为最小权重生成树 (Minimum Weight Spanning Tree)、最小支撑树
- 是所有生成树中，总权值最小的那棵
- 适用于**有权**的**连通**图 (无向)



最小生成树

- 最小生成树在许多领域都有重要的作用，例如
 - 要在 n 个城市之间铺设光缆，使它们都可以通信
 - 铺设光缆的费用很高，且各个城市之间因为距离不同等因素，铺设光缆的费用也不同
 - 如何使铺设光缆的总费用最低？

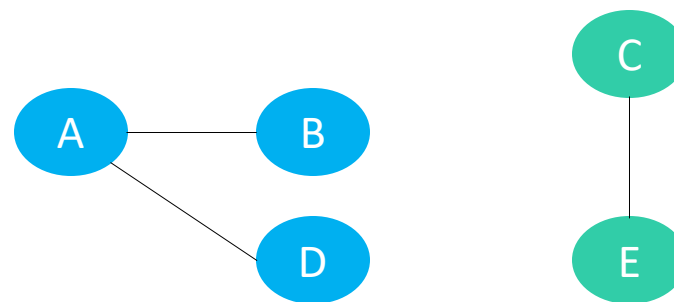
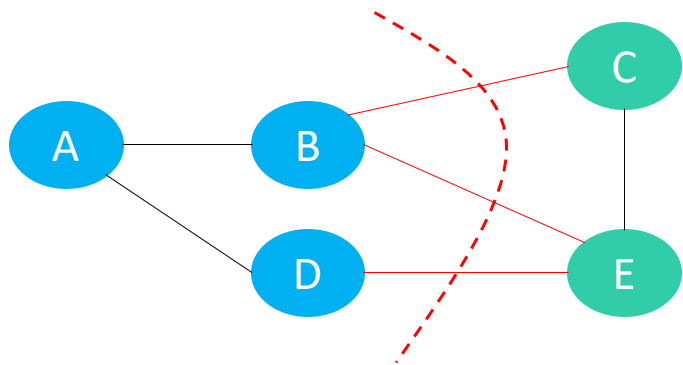
- 如果图的每一条边的权值都互不相同，那么最小生成树将只有一个，否则可能会有多个最小生成树

- 求最小生成树的2个经典算法
 - Prim (普里姆算法)
 - Kruskal (克鲁斯克尔算法)

切分定理

■ 切分 (Cut) : 把图中的节点分为两部分, 称为一个切分

■ 下图有个切分 $C = (S, T)$, $S = \{A, B, D\}$, $T = \{C, E\}$



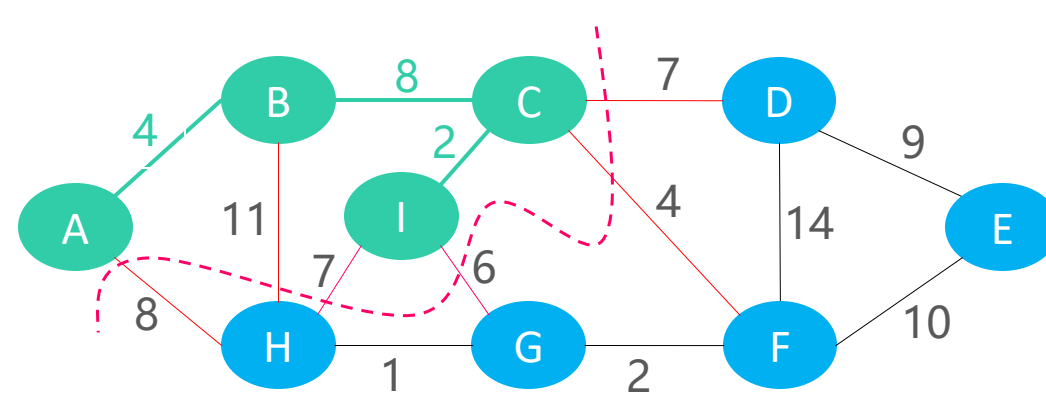
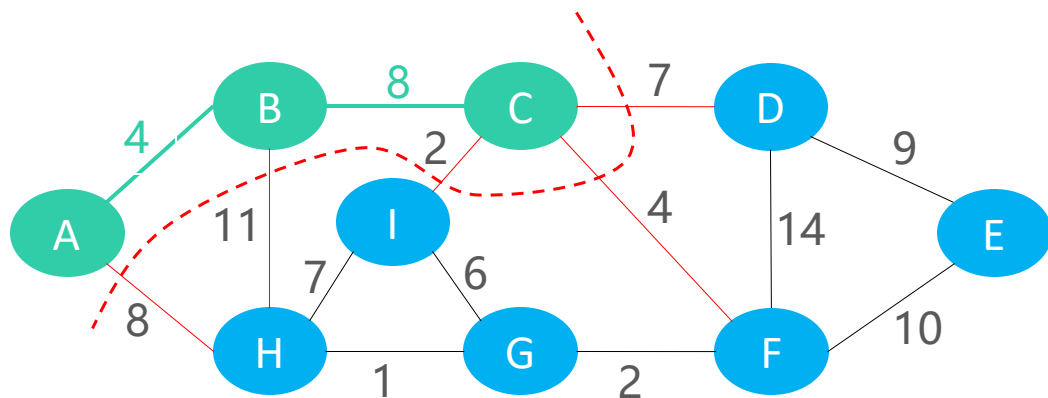
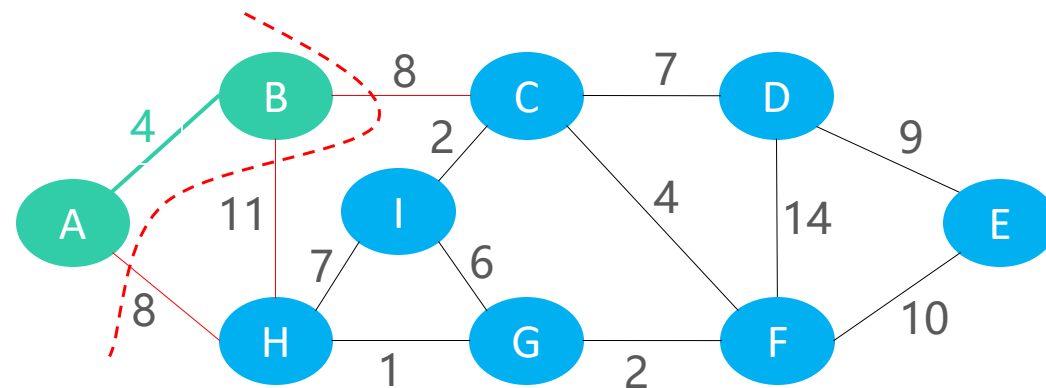
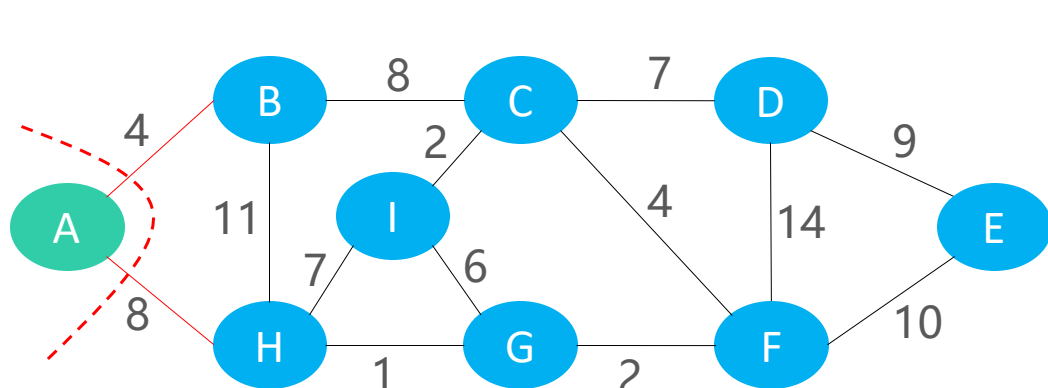
■ 横切边 (Crossing Edge) : 如果一个边的两个顶点, 分别属于切分的两部分, 这个边称为横切边

□ 比如上图的边 BC、BE、DE 就是横切边

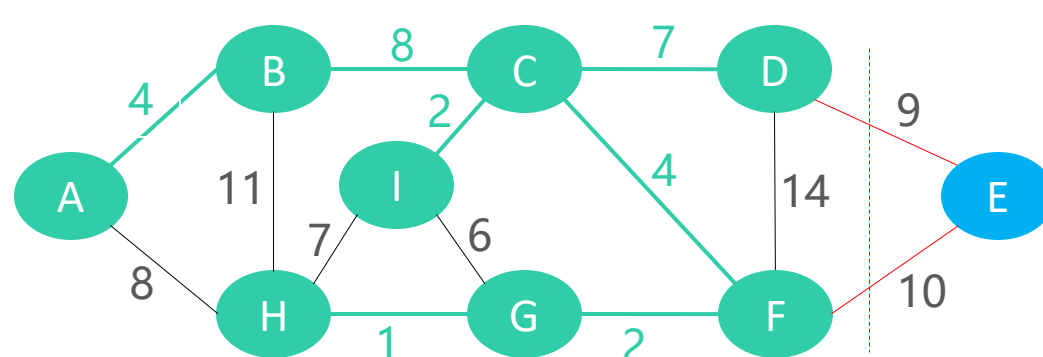
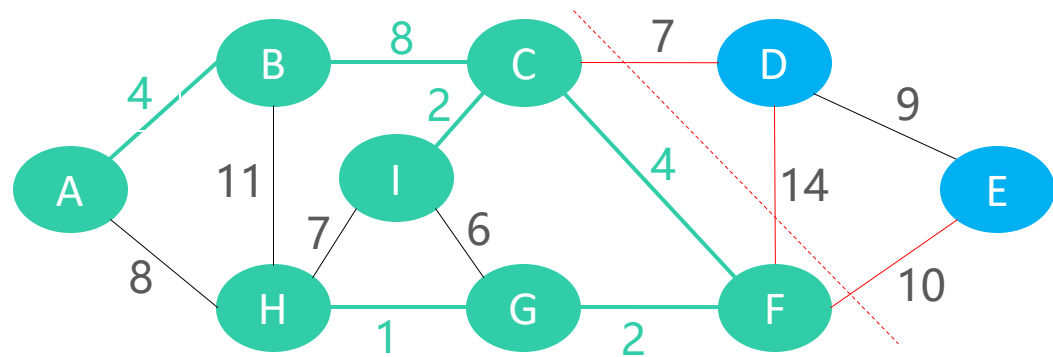
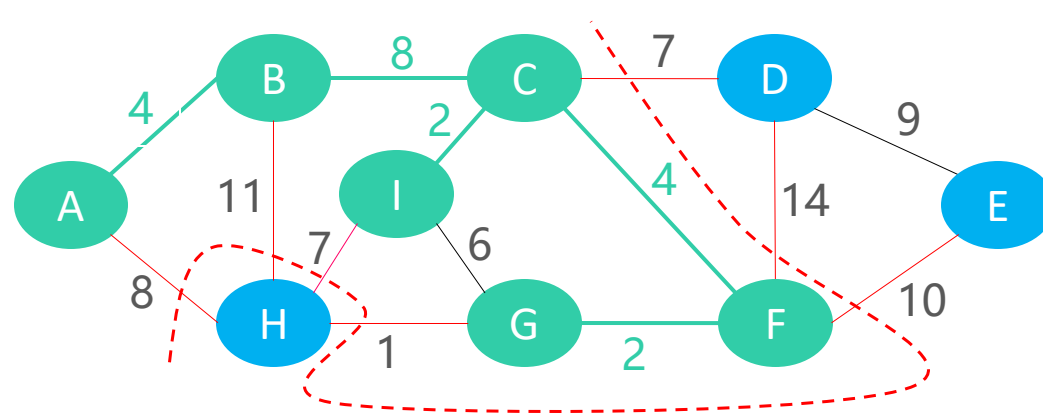
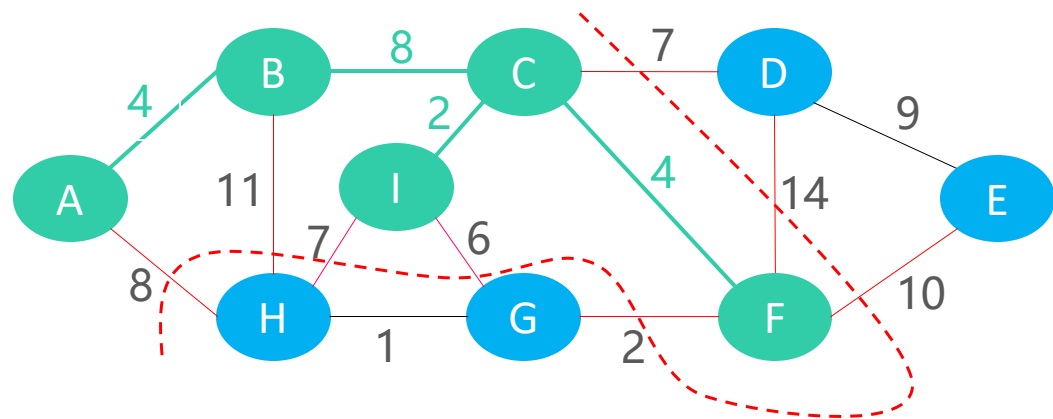
■ 切分定理: 给定任意切分, 横切边中权值最小的边必然属于最小生成树

Prim算法 – 执行过程

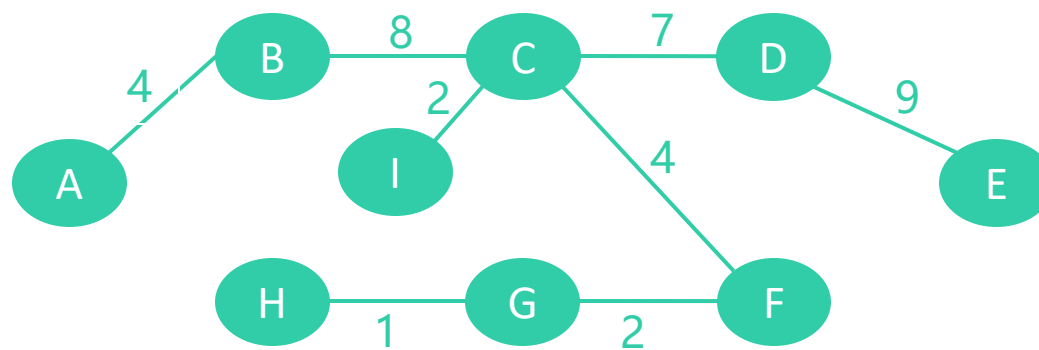
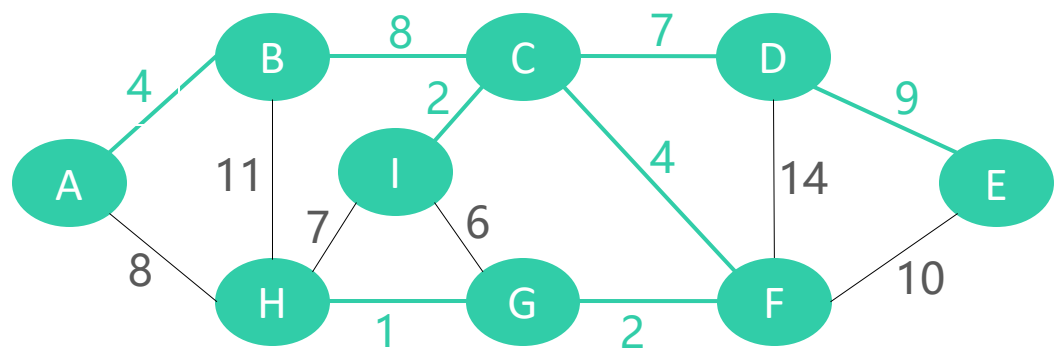
- 假设 $G = (V, E)$ 是有权的连通图（无向）， A 是 G 中最小生成树的边集
- 算法从 $S = \{u_0\}$ ($u_0 \in V$)， $A = \{\}$ 开始，重复执行下述操作，直到 $S = V$ 为止
- ✓ 找到切分 $C = (S, V - S)$ 的最小横切边 (u_0, v_0) 并入集合 A ，同时将 v_0 并入集合 S



Prim算法 – 执行过程



Prim算法 - 执行过程

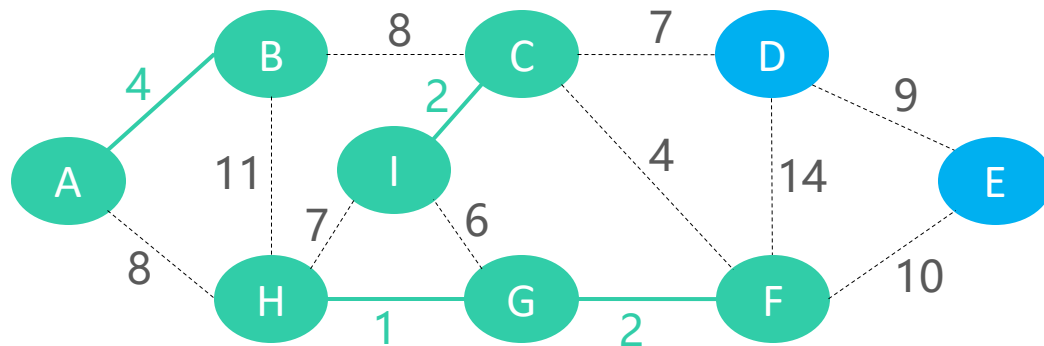
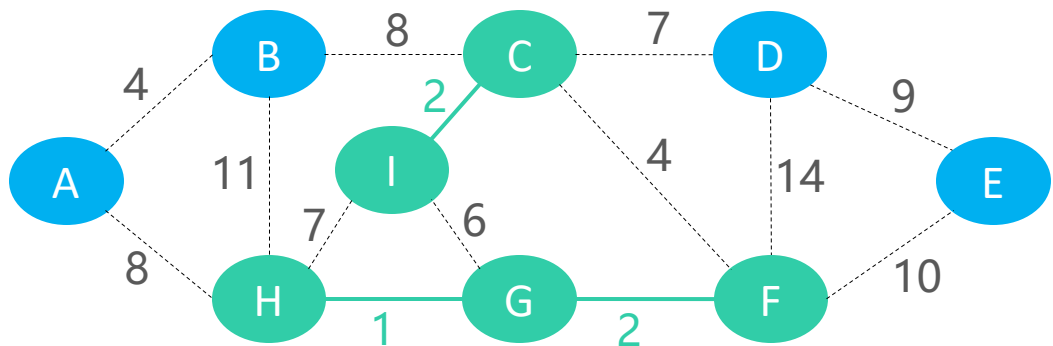
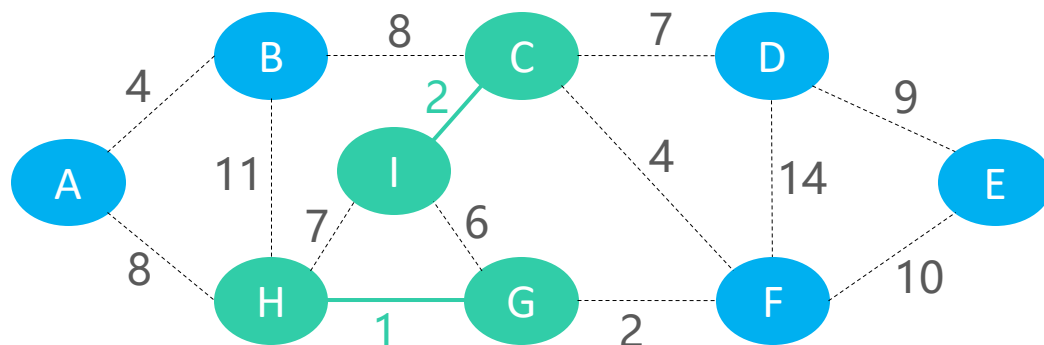
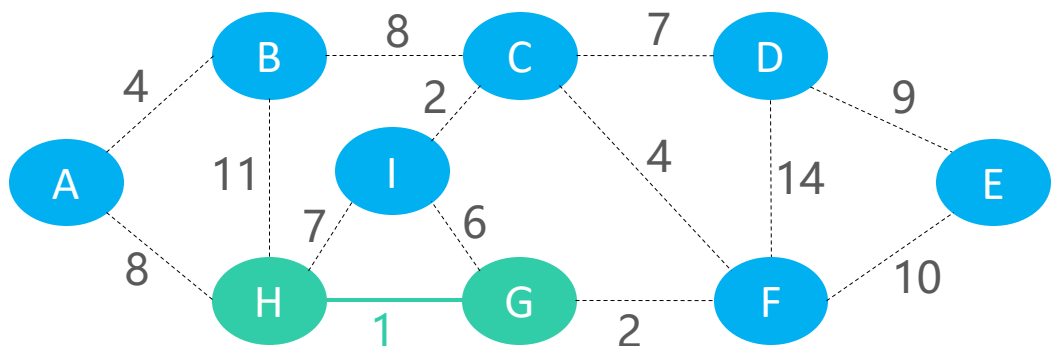


Prim算法 – 实现

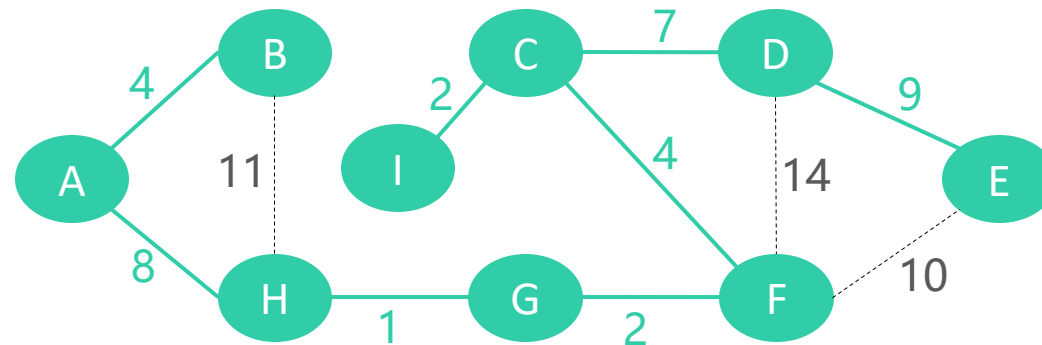
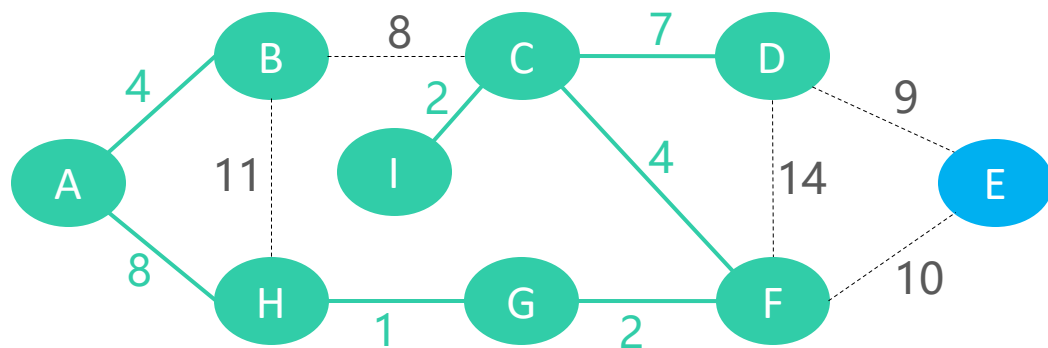
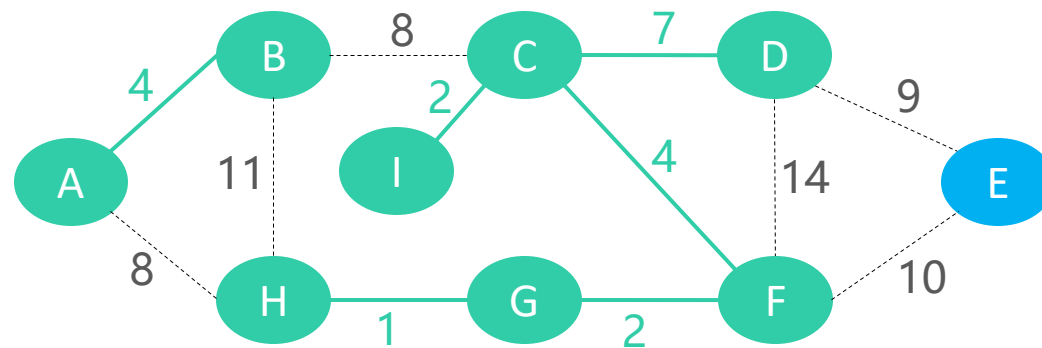
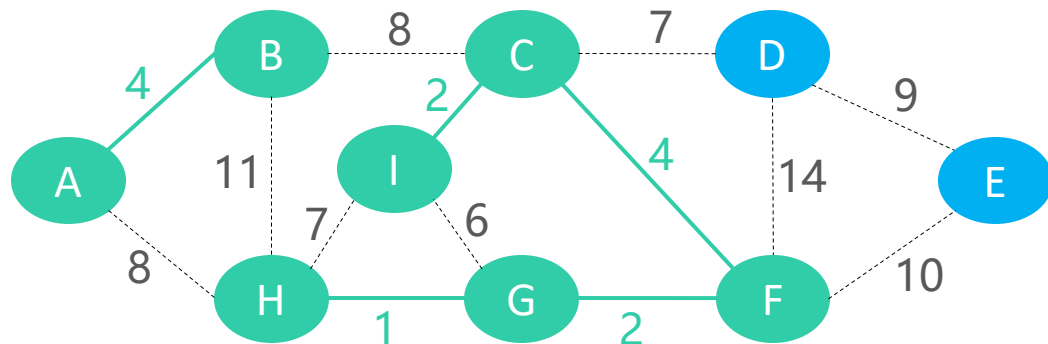
```
private Set<EdgeInfo<V, E>> prim() {
    Iterator<Vertex<V, E>> it = vertices.values().iterator();
    if (!it.hasNext()) return null;
    Vertex<V, E> vertex = it.next();
    Set<EdgeInfo<V, E>> edgeInfos = new HashSet<>();
    Set<Vertex<V, E>> addedVertices = new HashSet<>();
    addedVertices.add(vertex);
    MinHeap<Edge<V, E>> heap = new MinHeap<>(vertex.outEdges, edgeComparator);
    int verticesSize = vertices.size();
    while (!heap.isEmpty() && addedVertices.size() < verticesSize) {
        Edge<V, E> edge = heap.remove();
        if (addedVertices.contains(edge.to)) continue;
        edgeInfos.add(edge.info());
        addedVertices.add(edge.to);
        heap.addAll(edge.to.outEdges);
    }
    return edgeInfos;
}
```

Kruskal算法 – 执行过程

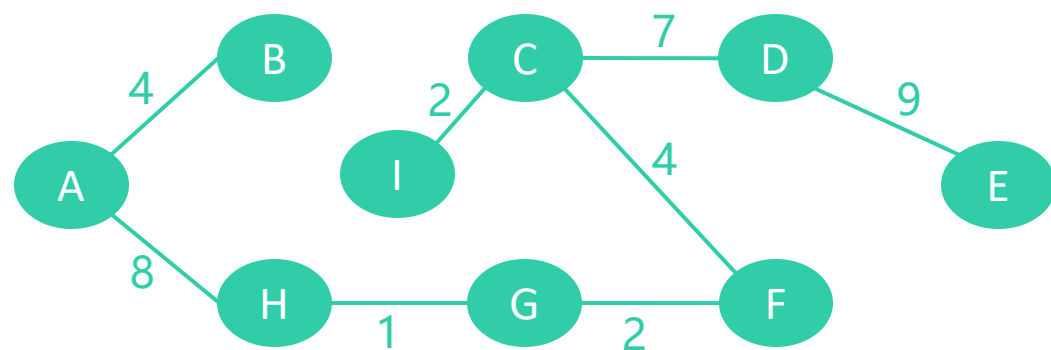
- 按照边的权重顺序（从小到大）将边加入生成树中，直到生成树中含有 $V - 1$ 条边为止（ V 是顶点数量）
- 若加入该边会与生成树形成环，则不加入该边
- 从第3条边开始，可能会与生成树形成环



Kruskal算法 – 执行过程



Kruskal算法 – 执行过程



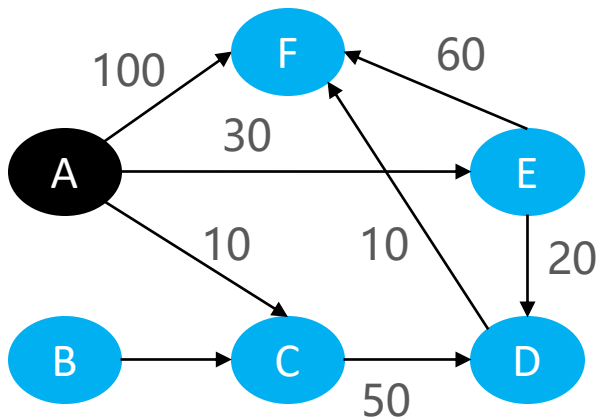
Kruskal算法 – 实现

```
private Set<EdgeInfo<V, E>> kruskal() {
    int edgeSize = vertices.size() - 1;
    if (edgeSize == -1) return null;
    Set<EdgeInfo<V, E>> edgeInfos = new HashSet<>();
    MinHeap<Edge<V, E>> heap = new MinHeap<>(edges, edgeComparator);
    UnionFind<Vertex<V, E>> uf = new UnionFind<>();
    vertices.forEach((V v, Vertex<V, E> vertex) -> {
        uf.makeSet(vertex);
    });
    while (!heap.isEmpty() && edgeInfos.size() < edgeSize) {
        Edge<V, E> edge = heap.remove();
        if (uf.isSame(edge.from, edge.to)) continue;
        edgeInfos.add(edge.info());
        uf.union(edge.from, edge.to);
    }
    return edgeInfos;
}
```

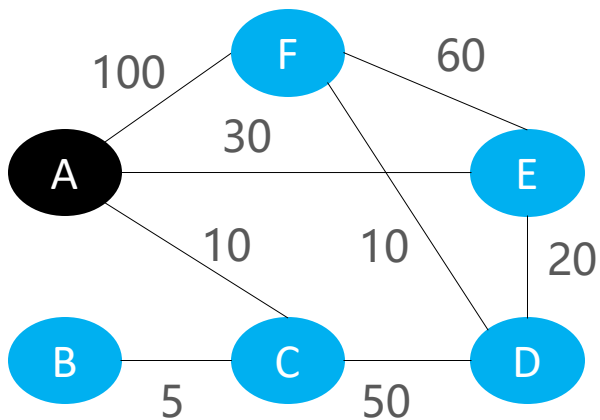
■ 时间复杂度: $O(E \log E)$

最短路径 (Shortest Path)

■ 最短路径是指两顶点之间权值之和最小的路径（有向图、无向图均适用，不能有负权环）



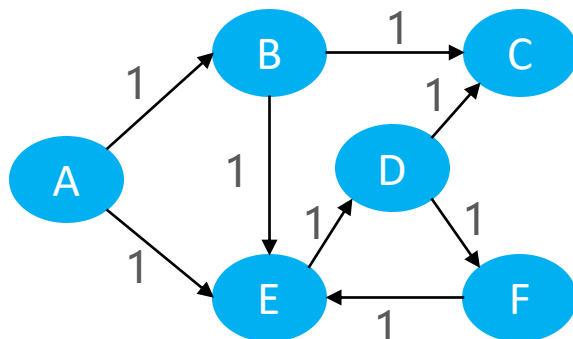
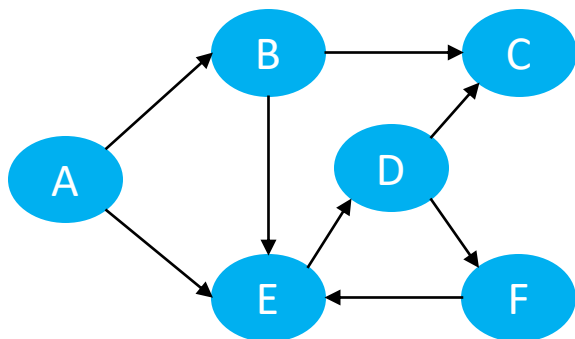
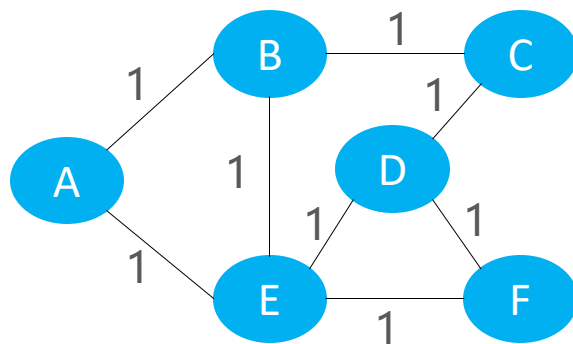
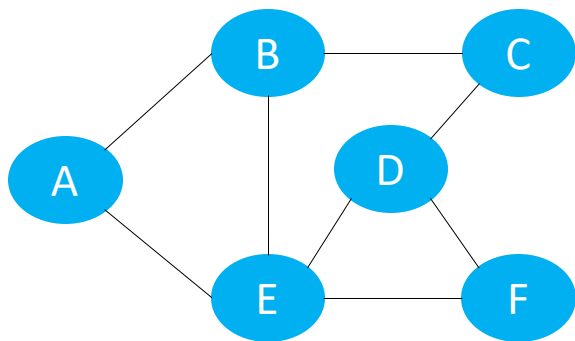
源点	终点	最短路径	路径长度
A	B		∞
	C	$A \rightarrow C$	10
	D	$A \rightarrow E \rightarrow D$	50
	E	$A \rightarrow E$	30
	F	$A \rightarrow E \rightarrow D \rightarrow F$	60



源点	终点	最短路径	路径长度
A	B	$A \rightarrow C \rightarrow B$	15
	C	$A \rightarrow C$	10
	D	$A \rightarrow E \rightarrow D$	50
	E	$A \rightarrow E$	30
	F	$A \rightarrow E \rightarrow D \rightarrow F$	60

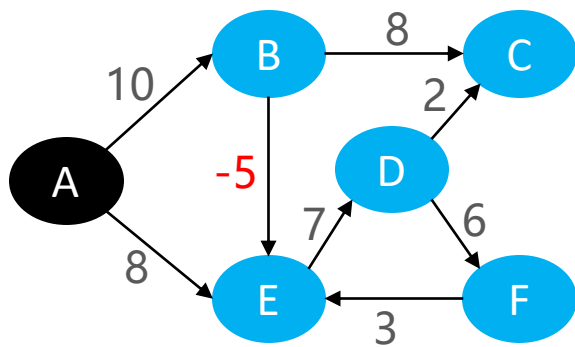
最短路径 - 无权图

■ 无权图相当于是全部边权值为1的有权图



最短路径 - 负权边

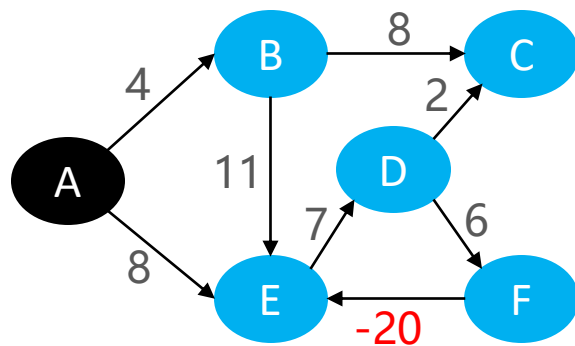
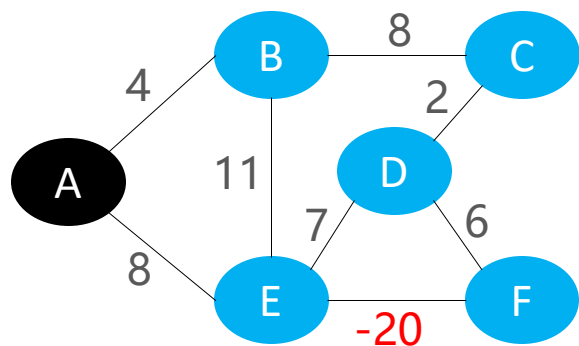
- 有负权边，但没有负权环时，存在最短路径



- A到E的最短路径是：A → B → E

最短路径 - 负权环

■ 有负权环时，不存在最短路径



■ 通过负权环，A到E的路径可以无限短

□ $A \rightarrow E \rightarrow D \rightarrow F \rightarrow E \rightarrow D \rightarrow F \rightarrow E \rightarrow D \rightarrow F \rightarrow E \rightarrow \dots$

■ 最短路径的典型应用之一：路径规划问题

■ 求解最短路径的3个经典算法

□ 单源最短路径算法

✓ Dijkstra（迪杰斯特拉算法）

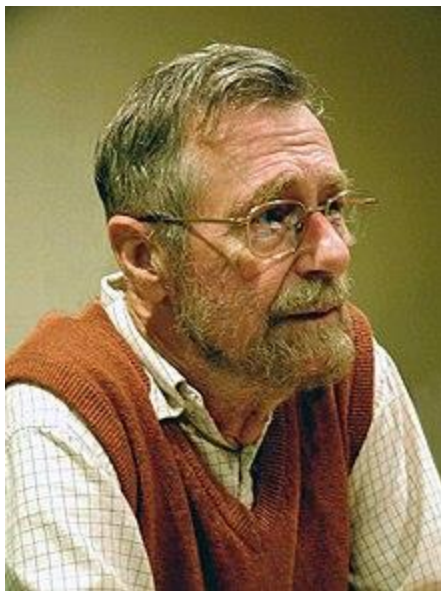
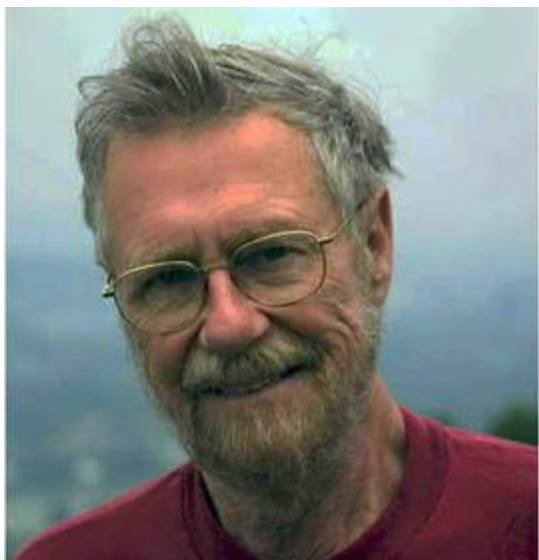
✓ Bellman-Ford（贝尔曼-福特算法）

□ 多源最短路径算法

✓ Floyd（弗洛伊德算法）

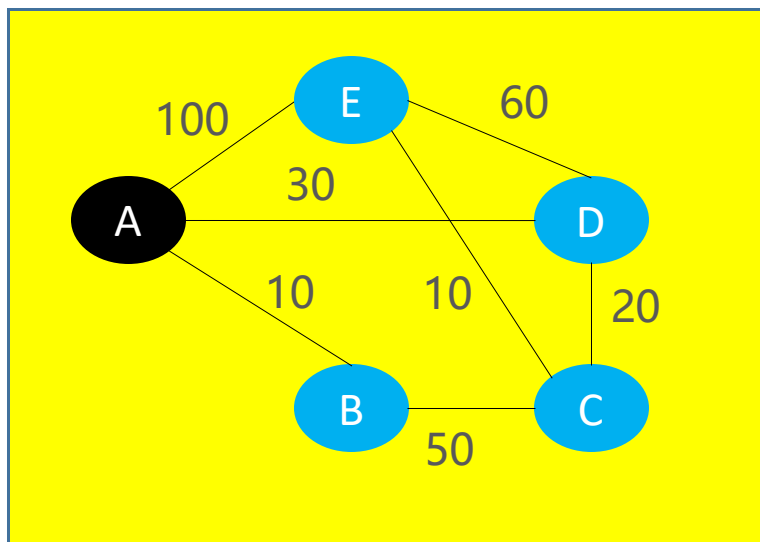
Dijkstra

- Dijkstra 属于单源最短路径算法，用于计算一个顶点到其他所有顶点的最短路径
- 使用前提：不能有负权边
- 时间复杂度：可优化至 $O(E \log V)$ ， E 是边数量， V 是节点数量
- 由荷兰的科学家 Edsger Wybe Dijkstra 发明，曾在1972年获得图灵奖

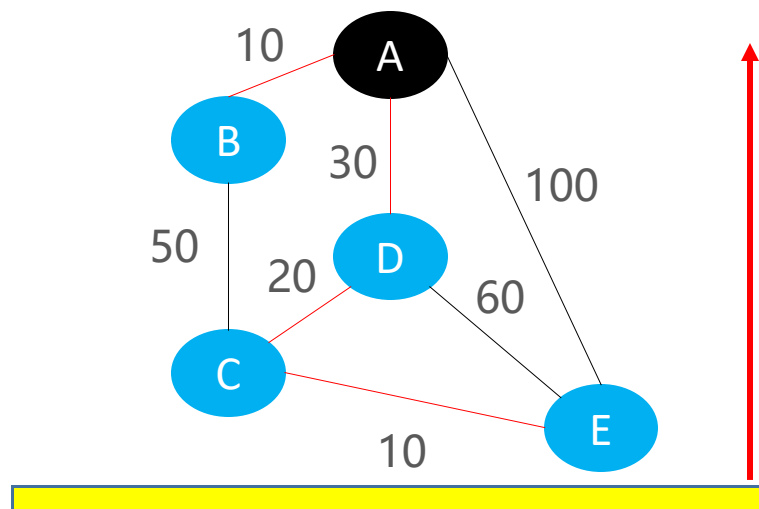


Dijkstra – 等价思考

- Dijkstra 的原理其实跟生活中的一些自然现象完全一样
- 把每个顶点想象成是1块小石头
- 每1条边想象成是1条绳子，每一条绳子都连接着2块小石头，边的权值就是绳子的长度
- 将小石头和绳子平放在一张桌子上（下图是一张俯视图，图中黄颜色的是桌子）

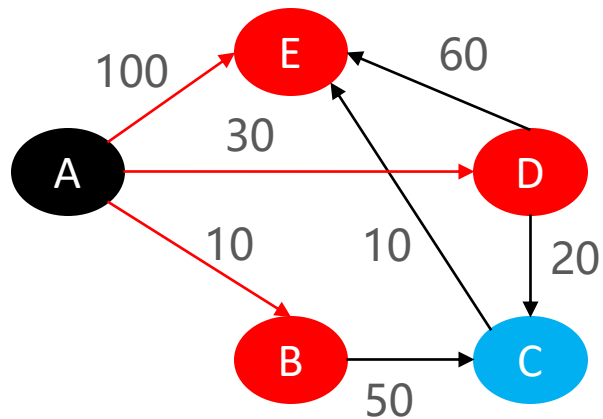


- 接下来想象一下，手拽着小石头A，慢慢地向上提起来，远离桌面
- B、D、C、E会依次离开桌面
- 最后绷直的绳子就是A到其他小石头的最短路径

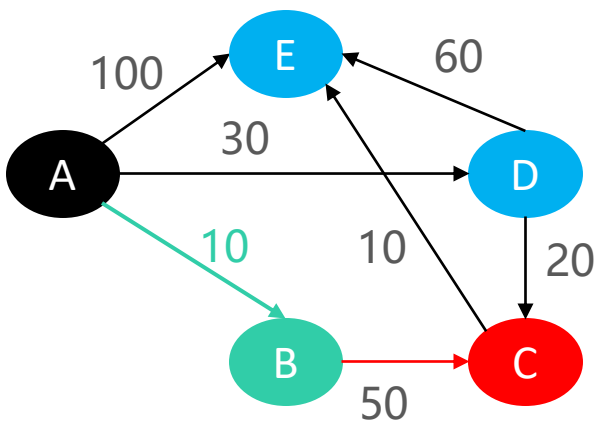


- 有一个很关键的信息
- 后离开桌面的小石头
- ✓ 都是被先离开桌面的小石头拉起来的

Dijkstra – 执行过程



源点	终点	最短路径	路径长度
A	B	A → B	10
	C		∞
	D	A → D	30
	E	A → E	100



源点	终点	最短路径	路径长度
A	B	A → B	10
	C	A → B → C	60
	D	A → D	30
	E	A → E	100

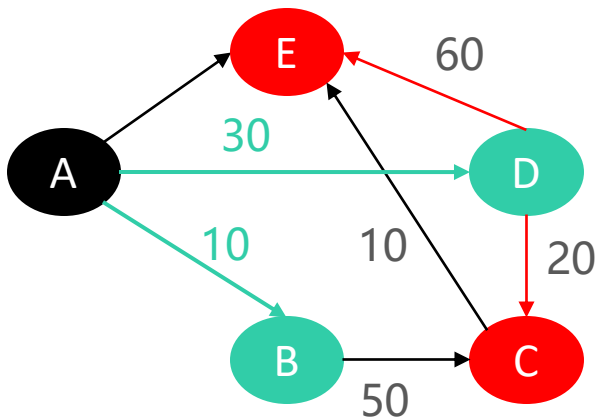
■ 绿色

□ 已经“离开桌面”

□ 已经确定了最终的最短路径

■ 红色：更新了最短路径信息

Dijkstra – 执行过程



源点	终点	最短路径	路径长度
A	B	A → B	10
	C	A → D → C	50
	D	A → D	30
	E	A → D → E	90

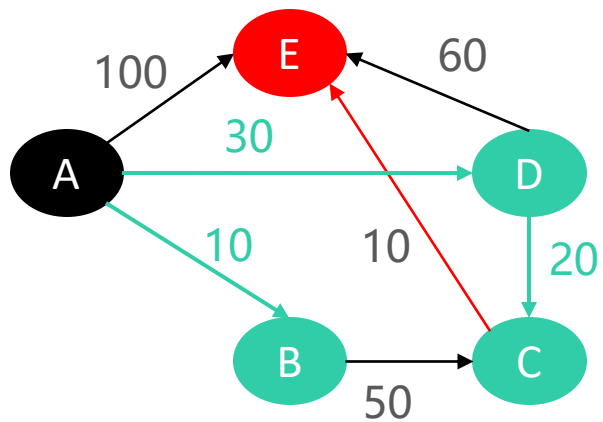
■ 松弛操作 (Relaxation)：更新2个顶点之间的最短路径

□ 这里一般是指：更新源点到另一个点的最短路径

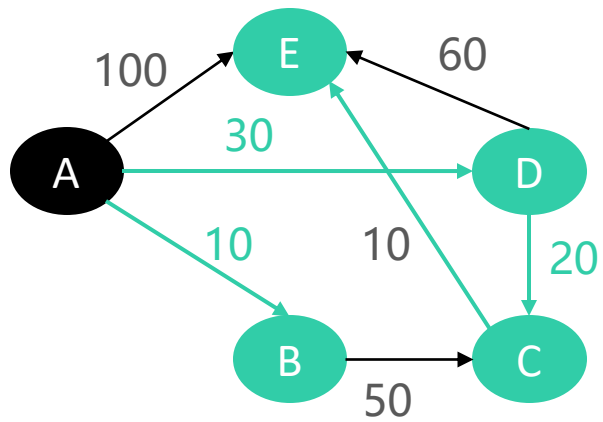
□ 松弛操作的意义：尝试找出更短的最短路径

■ 确定A到D的最短路径后，对DC、DE边进行松弛操作，更新了A到C、A到E的最短路径

Dijkstra – 执行过程



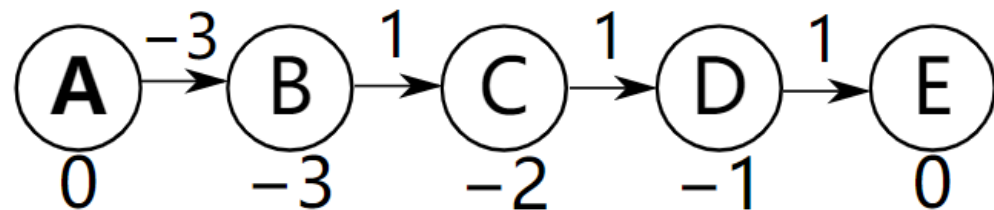
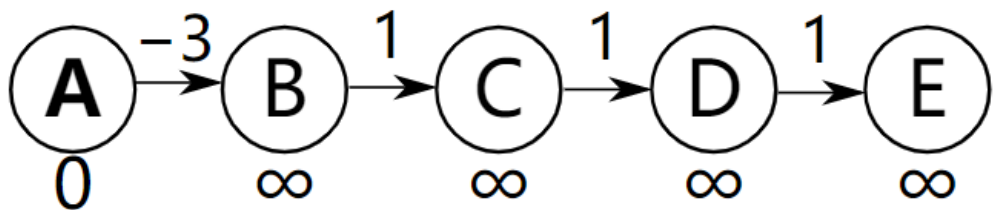
源点	终点	最短路径	路径长度
A	B	$A \rightarrow B$	10
	C	$A \rightarrow D \rightarrow C$	50
	D	$A \rightarrow D$	30
	E	$A \rightarrow D \rightarrow C \rightarrow E$	60



源点	终点	最短路径	路径长度
A	B	$A \rightarrow B$	10
	C	$A \rightarrow D \rightarrow C$	50
	D	$A \rightarrow D$	30
	E	$A \rightarrow D \rightarrow E$	60

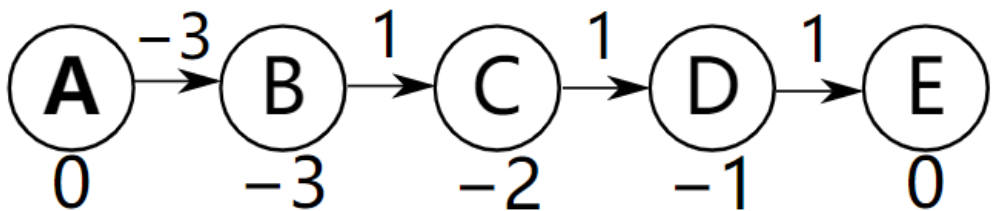
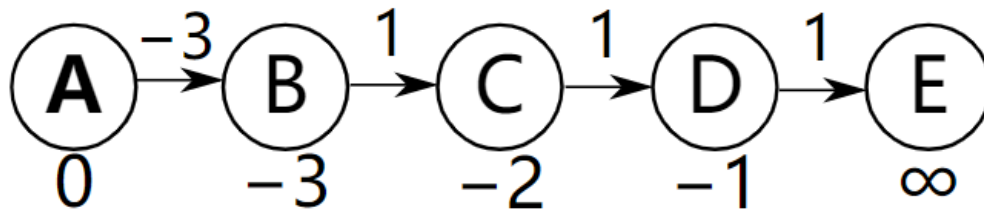
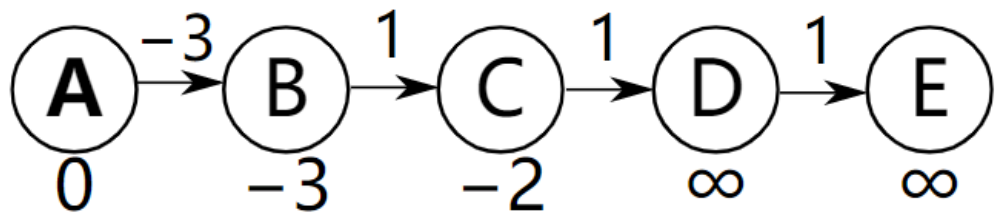
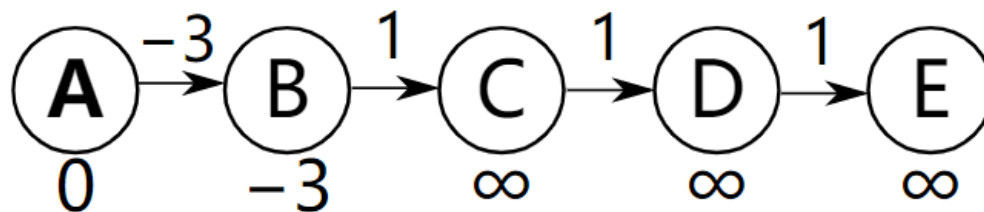
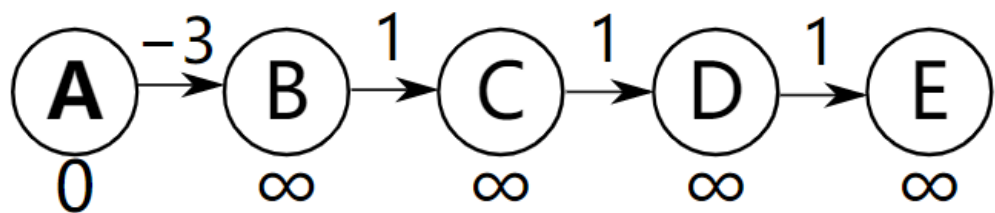
Bellman-Ford

- Bellman-Ford 也属于单源最短路径算法，支持负权边，还能检测出是否有负权环
- 算法原理：对所有的边进行 $V - 1$ 次松弛操作（ V 是节点数量），得到所有可能的最短路径
- 时间复杂度： $O(EV)$ ， E 是边数量， V 是节点数量
- 下图的最好情况是恰好从左到右的顺序对边进行松弛操作
- 对所有边仅需进行 1 次松弛操作就能计算出A到达其他所有顶点的最短路径

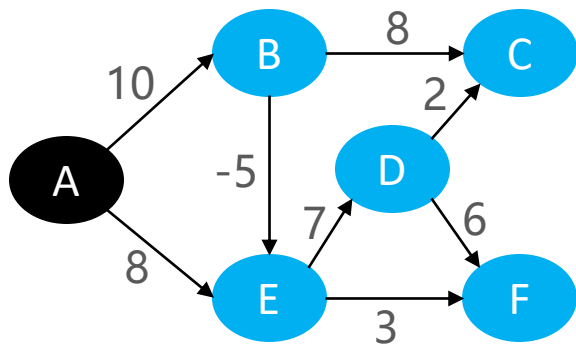


Bellman-Ford

- 最坏情况是恰好每次都从右到左的顺序对边进行松弛操作
- 对所有边需进行 $V - 1$ 次松弛操作才能计算出A到达其他所有顶点的最短路径



Bellman-Ford – 实例



■ 一共8条边

■ 假设每次松弛操作的顺序是：DC、DF、BC、ED、EF、BE、AE、AB

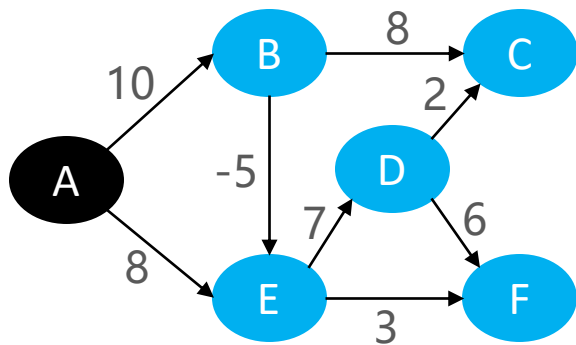
第1次松弛操作

源点	终点	最短路径	路径长度
A	B	$A \rightarrow B$	10
	C		∞
	D		∞
	E	$A \rightarrow E$	8
	F		∞

第2次松弛操作

源点	终点	最短路径	路径长度
A	B	$A \rightarrow B$	10
	C	$A \rightarrow B \rightarrow C$	18
	D	$A \rightarrow E \rightarrow D$	15
	E	$A \rightarrow B \rightarrow E$	5
	F	$A \rightarrow E \rightarrow F$	11

Bellman-Ford – 实例

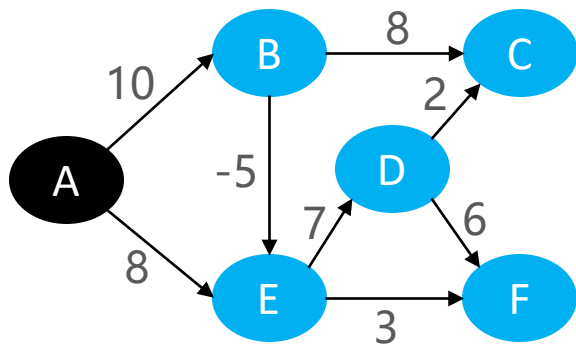


■ 每次松弛操作的顺序是：DC、DF、BC、ED、EF、BE、AE、AB

第2次松弛操作			
源点	终点	最短路径	路径长度
A	B	A → B	10
	C	A → B → C	18
	D	A → E → D	15
	E	A → B → E	5
	F	A → E → F	11

第3次松弛操作			
源点	终点	最短路径	路径长度
A	B	A → B	10
	C	A → E → D → C	17
	D	A → B → E → D	12
	E	A → B → E	5
	F	A → B → E → F	8

Bellman-Ford – 实例



■ 每次松弛操作的顺序是：DC、DF、BC、ED、EF、BE、AE、AB

第3次松弛操作			
源点	终点	最短路径	路径长度
A	B	A → B	10
	C	A → E → D → C	17
	D	A → B → E → D	12
	E	A → B → E	5
	F	A → B → E → F	8

第4次松弛操作			
源点	终点	最短路径	路径长度
A	B	A → B	10
	C	A → B → E → D → C	14
	D	A → B → E → D	12
	E	A → B → E	5
	F	A → B → E → F	8

■ 不难分析出，经过4次松弛操作之后，已经计算出了A到其他所有顶点的最短路径

Floyd

■ Floyd 属于多源最短路径算法，能够求出任意2个顶点之间的最短路径，支持负权边

□ 时间复杂度： $O(V^3)$ ，效率比执行 V 次 Dijkstra 算法要好（ V 是顶点数量）

■ 算法原理

□ 从任意顶点 i 到任意顶点 j 的最短路径不外乎两种可能

① 直接从 i 到 j

② 从 i 经过若干个顶点到 j

□ 假设 $\text{dist}(i, j)$ 为顶点 i 到顶点 j 的最短路径的距离

□ 对于每一个顶点 k ，检查 $\text{dist}(i, k) + \text{dist}(k, j) < \text{dist}(i, j)$ 是否成立

✓ 如果成立，证明从 i 到 k 再到 j 的路径比 i 直接到 j 的路径短，设置 $\text{dist}(i, j) = \text{dist}(i, k) + \text{dist}(k, j)$

✓ 当我们遍历完所有结点 k ， $\text{dist}(i, j)$ 中记录的便是 i 到 j 的最短路径的距离

```
for (int k = 0; k < V; k++) {  
    for (int i = 0; i < V; i++) {  
        for (int j = 0; j < V; j++) {  
            if (dist(i, k) + dist(k, j) < dist(i, j)) {  
                dist(i, j) = dist(i, k) + dist(k, j);  
            }  
        }  
    }  
}
```