一、图的基本概念

图的定义

- 有向图
- 无向图

节点和边的关系

无向图

$G = \langle V, E, \Psi \rangle$，e, e1, e2 ∈ E 且v1, v2 ∈V

- 如果$\Psi(e) =\{v1,v2\}$，则称e 与 v1 （或v2）互相**关联**（incident）
- e 连接 v1和 v2，v1和 v2 既是 e 的起点，也是 e 的终点，也称 **v1 和 v2 邻接**
- 如果两条不同边 e1 和 e2 与同一个结点关联，则称 **e1 和 e2 邻接**

有向图

有向图 $G = \langle V, E, \Psi \rangle$，e, e1, e2 ∈ E且v1, v2 ∈V

- 如果$\Psi(e) =\langle v1,v2\rangle$，则称e 与 v1 （或v2）互相**关联**（incident）
- e 连接 v1和 v2，v1是 e 的起点，v2是 e 的终点，称 **v1 和 v2 邻接**

自圈，平行边,简单图

设图 $G = \langle V, E, \Psi \rangle$， e1 和 e2 是 G 的两条不同边。

- 如果与e1关联的两个结点相同，则称 e1为**自圈**(self loop)
- 如果 $\Psi(e1) = \Psi(e2)$，则称 e1 与 e2 **平行**
- 如果图 G 没有自圈，也没有平行边，则称G为**简单图**

节点的度

定义1.5 设 v 是图 G 的结点。

(1) 如果 G 是无向图，G中与 v 关联的边数目之和称为 v 的度，记为 $d_G(v)$。

(2) 如果 G 是有向图，

G中以 v 为起点的边的数目称为 v 的出度，记为$d_G^+(v)$；

G中以 v 为终点的边的数目称为v的入度，记为$d_G^-(v)$；

v 的出度与入度之和称为 v 的度，记为 $d_G(v)$.

- 注意：
  - 在计算无向图中结点的度时，一个自圈要计算两次
  - 每增加一条边，都使图中所有结点的度数之和增加 2

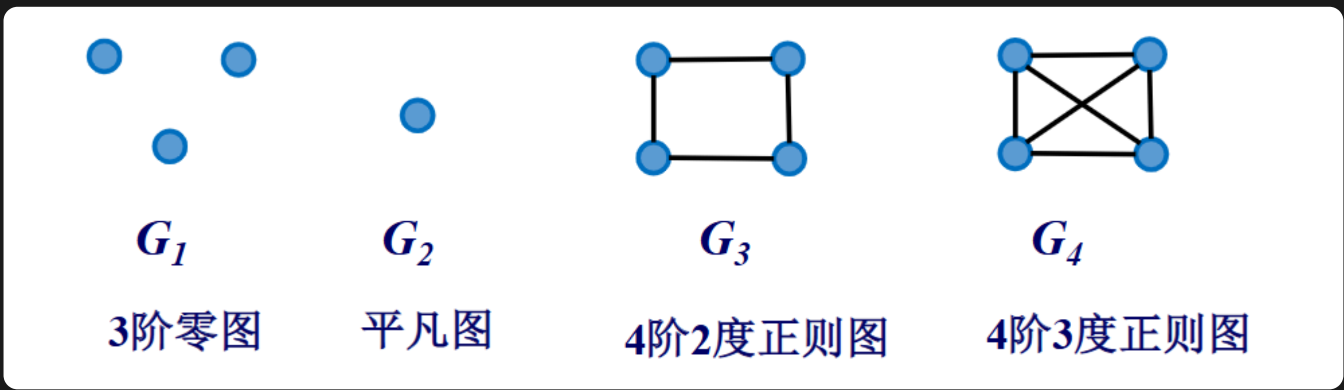
- 度为奇数的节点成为**奇节点**
- 度为偶数的节点成为**偶节点**
- 度为0的节点成为**独/孤立点**
- 度为1的节点成为**端点**
- **任何图中都有偶数个奇节点**（定理1.3）

握手定理

- 设无向图 G = <V, E, Ψ >有m条边，则$\sum_{v\in V} d_{G(v)} = 2m$
- 设有向图 G = <V, E, Ψ > 有 m 条边， 则$\sum_{v\in V} d^+_{G(v)} = \sum_{v\in V} d^-_{G(v)} = m$且$\sum_{v\in V} d_{G(v)} = 2m$.

几类特殊的图

- 结点都是孤立点的图称为**零图**
- 一阶零图称为**平凡图**
- 所有结点的度均为自然数 d 的无向图称为 **d 度正则图**

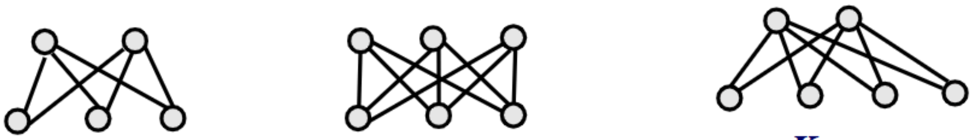


- 设 n ∈ I+， 如果 n 阶简单无向图 G 是 n-1 度正则图，则称 G 为 **完全无向图**，记为K_n
- 设 n ∈I+， 每个结点的出度和入度均为 n-1 的 n 阶简单
  有向图称为 **完全有向图**
- 设 G是n阶简单无向图（n∈I+），若n 个结点恰形成一个圈，则称 G 为**圈图**
- 设 G是n阶简单无向图（n∈I+），若n-1 个结点恰形成一个圈图，且第n个结点与圈图上的每个结点邻接，则称G 为**轮图**

- 二分图

二分图与完全二分图

- 设 G是n 阶简单无向图，其结点集$V = V_1 \cup V_2$，$V_1 \cap V_2 = \emptyset$，若对于任意边$(u, v) \in E$，则有$u \in V_1$且$v \in V_2$，称G是二分图或偶图，记为$G = (V_1, V_2; E)$.
- 若二分图$G = (V_1, V_2; E)$满足V_1（V_2）中的每个结点与V_2（V_1）中所有结点均邻接，则称 G 为完全二分图，记为 $K_{m,n}$.



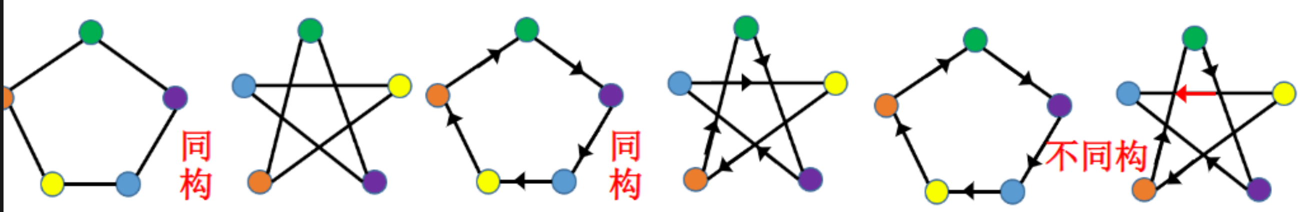
$K_{2,3}$ $K_{3,3}$ $K_{2,4}$

同构

定义1.9 设图 $G=<V, E, \Psi>$ 和 $G'=<V', E', \Psi'>$。如果存在双射 $f: V \to V'$ 和双射 $g: E \to E'$，使得对于任意 $e \in E$ 及 $v_1, v_2 \in V$ 都有：

$$\Psi'(g(e)) = \begin{cases} \{f(v_1), f(v_2)\}, \text{若 } \Psi(e) = \{v_1, v_2\} \\ <f(v_1), f(v_2)>, \text{若 } \Psi(e) = <v_1, v_2> \end{cases}$$

则称 G 与G' 同构，记做 $G \cong G'$，并称f和 g 为 G 与 G'之间的同构映射，简称同构。



二、子图

子图 真子图 生成子图

定义2.1 设 $G=<V,E,\Psi>$, $G'=<V',E',\Psi'>$为图。

(1) 如果 $V'\subseteq V$，$E'\subseteq E$，$\Psi'\subseteq\Psi$，则称G'是G的子图，记为 $G'\subseteq G$，并称 G 是 G'的母图。

(2) 如果 $V'\subseteq V$，$E'\subset E$，$\Psi'\subset\Psi$，则称G'是G的真子图，记为 $G'\subset G$。

(3) 如果 $V'=V$，$E'\subseteq E$，$\Psi'\subseteq\Psi$，则称G'是G的生成子图(Spanning Subgraph)。

导出子图

节点集导出子图

设图 G =<V, E, Ψ >，V'是V的子集 且 $V'\neq$ 空集。
(1) 以 V'为结点集合，以所有起点和终点均在V' 中的边的全体为边集合的 G 的子图，称为**由V'导出的G的子图，记为 G[V']**。
(2) 若 V'真包含于V，**导出子图 G[V–V'] 记为 G –V'**
直观理解

- G[V']：以 V' 为结点集合的**最大子图**
- G – V′：从 G 中去掉 V′ 中的**结点**以及**与这些结点关联的所有边**而得到的G的子图

由边集导出的子图

- 以 E' 为边集合的 G 的**子图**称为由 E′导出的子图，记为 G[E']

性质

- G 的子图是 G 的一部分,也可能就是G
- G 的真子图的边比 G 的边少
- G 的生成子图与 G 有**相同的结点**
- G 的导出子图 G[V']是 G的以V'为结点集合的**最大子图**

三、图的运算

可运算

设 G = <V, E, Ψ >， G' = <V', E', Ψ' >同为无向图或同为有向图。

- 如果对于任意 e ∈ $E\cap E'$，均有 Ψ(e) = Ψ'(e)，则称 G 和 G'是**可运算**的,**也就是说公共边所关联的点相同**
- 如果$V\cap V'$ = $E\cap E'$=空集，则称 G 和 G'是**不相交的,**也就是说没**有公共点**
- 如果 $E\cap E'$ = 空集，则称 G 和 G'是**边不相交**的

交,并,环和

设图G1 = <V1, E1, Ψ1>和G2 = <V2, E2, Ψ2> **可运算**, 这是前提

图的交

- G1∩G2 = <V1∩V2，E1∩E2，Ψ1∩Ψ2 >
- 也就是节点,边,对应关系的交集

图的并

- G1∪G2 = <V1∪V2，E1∪E2，Ψ1∪Ψ2 >
- 也就是节点,边,对应关系的并集

图的环和

$$G_1 \oplus G_2 =< V_1 \cup V_2，E_1 \oplus E_2，(\Psi_1 \cup \Psi_2)_{E_1 \oplus E_2} >$$

- 节点集**取并集**
- 边集**取对称差**
- 关系根据边集变化

唯一性

- 三种运算均具有唯一性

$G - E'$

- G - E'是从 G 中去掉 E' 中的边所得到的G的子图
- 与 E'中的边相关联的结点并不去掉

$G + E'_{\Psi'}$

设图 G = <V , E , Ψ> 和 G' = <V , E', Ψ'>同为无向图或同为有向图，**若G 和 G' 边不相交，且 G'无孤立点**

- $G + E'_{\Psi'}$是由 G 增加 E' 中的边所得到的图

补图

设 n 阶无向图 G = < V, E , Ψ> 是 **n 阶完全无向图** K_n 的生成子图，则称 $K_n - E$为G 的 **补图**，记为 $\overline{G}$

四、路径与回路

路径定义

- $v_0e_1v_1e_2...v_{n-1}e_nv_n$为图 G 中从$v_0$至$v_n$ 的路径，n 称为该路径的长度
- 如果 $v_0 = v_n$，则称该路径为**闭的**，否则称为**开的**
- 如果各条边互不相同，则称该路径为**简单的**
- 如果各个节点互不相同，则称该路径为**基本的**
- 从路径中去掉闭路径，能够**得到基本路径**
- n 阶图中的**基本路径的长度小于 n**

$$\text{设图}G =< V, E, \Psi > \text{，} v, v' \in V \text{，如果存在从}v\text{至}v'\text{的路径} \\ \text{则存在从}v\text{至}v'\text{的基本路径} \tag{定理3.1}$$

其他

可达

若存在从 v1 至 v2 的路径，则称**在G中从v1可达v2**，或从v1到v2 可达； 否则称在G 中从 v1 不可达 v2 或从v1到v2 不可达。对于图G的结点v， 用 R(v) 表示从v可达的全体结点的集合 。

$$\text{设图}G =< V, E, \Psi > \text{，} v_1, v_2 \in V \text{，从}v_1\text{可达}v_2 \\ \text{当且仅当存在从}v_1\text{至}v_2\text{的基本路径} \tag{定理3.3}$$

距离与直径

- 若从 v1 可达 v2，则称从 v1 至 v2 的**路径中长度最短者**为从 v1 至 v2 的 **测地线**，并称该测地线的长度为从 v1 至 v2 的**距离**，记作 d(v1, v2)
- 若从 v1 不可达 v2，则称v1 至 v2 的距离 d(v1, v2)为 无穷∞

$$\text{图}G =< V, E, \Psi > \text{的直径定义为} \\ \boldsymbol{max}_{v, v' \in V} d(v, v') \tag{定义3.4}$$

加权图

设图 G = <V, E, Ψ > 。若存在W : E → R + （R + 是正实数集）， 则称<G，W >为**加权图**

- 若 e∈ E ，称 W(e) 为**边 e 的加权长度**
- 路径中所有边的加权长度之和称为该**路径的加权长度**
- 从结点v至结点v'的路径中, 加权长度最小的称为**从v至v'的最短路径**
- 若从v可达v'，则称从v 至v'的最短路径的加权长度为**从v至v'的加权距离**

Dijkstra算法

- emmm……只会算，本蒟蒻总结不好，PPT上的看不懂😇

五、连通性

无向图的连通性

- 如果无向图 G 的**任意两个结点都互相可达**，则称**G是连通**的；否则称G是非连通的
- 无向图 G = <V, E, Ψ >是连通的 当且仅当对于**任意v∈V , 皆有 R(v) = V**

连通分支

- 设G′是图G的具有某性质 P 的子图，并且对于G的具有该性质的任意子图 G″，只要G′包含于G″就有 G′ = G″，则称 G′相对于该性质是 G 的 极大子图
- 无向图G的极大的连通子图称为G 的连通分支，简称分支
- 连通无向图恰有一个分支
- 非连通无向图的分支多于一个

有向图的连通性

基础图

设有向图 G = <V, E, Ψ >， 如下定义**Ψ′**：E → { {v1, v2} |v1∈V ∧ v2∈V }， 使得，对任意 e ∈E 和 v1, v2∈V，若 Ψ(e) = < v1, v2 >，则 **Ψ′**(e) = {v1, v2}。称无向图 ***G′*** = <V, E, **Ψ′** >为有向图 G 的**基础图**

三种连通性

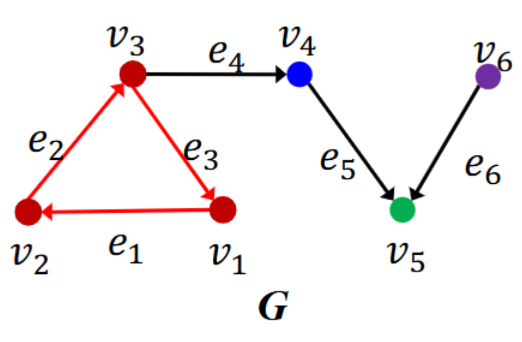
设G是有向图

- 如果G中任意两个结点都**互相可达**，则称G是**强连通**的
- 如果对于G的任意两结点，必有一个结点可达另一结点， 则称 G 是**单向连通**的
- 如果 G 的基础图是连通的，则称 G 是**弱连通**的

三种分支

设G是有向图

- G 的 极大强连通子图 称为 G 的**强（连通）分支**
- G 的 极大单向连通子图 称为 G 的**单向分支**
- G 的 极大弱连通子图 称为 G 的**弱分支**



- 4 个强分支：
  $G[\{v_1,v_2,v_3\}]$, $G[\{v_4\}]$, $G[\{v_5\}]$, $G[\{v_6\}]$
- 2 个单向分支：
  $G[\{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}]$， $G[\{v_5, v_6\}]$
- 1 个弱分支：G

- 强连通（单向连通，弱连通）有向图**恰有一个**强分支（单向分支，弱分支）
- 非强连通（非单向连通，非弱连通）有向图**有一个以上**强分支（单向分支，弱分支）

六、回路、半回路、有向回路

半路径

- 设 G′是有向图 G = <V, E, Ψ >的 基础图，G′中的路径称为 G 中的半路径
- 设 $v_0e_1v_1...v_{m-1}e_mv_m$是G中的半路径。对每个i (1≤i≤m)，
  - 如果Ψ$(e_i) =< v_{i-1}, v_i >$，则称 e_i 是该半路径中的**正向边**
  - 如果Ψ$(e_i) =< v_i, v_{i-1} >$，则称 e_i 是该半路径中的**反向边**
- 有向图中的半路径是路径 当且仅当该半路径中的边都是正向边

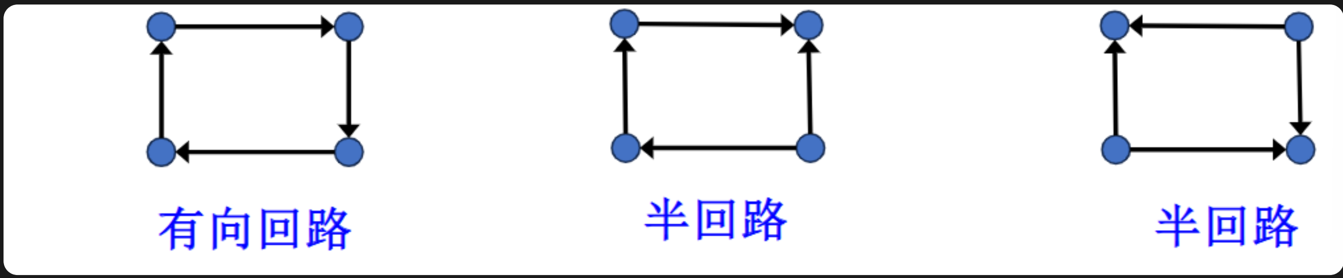
定义

- 连通2度正则图称为回路

> ⓘ **Note**
> 回路的节点的度一定为2

- 基础图是回路的有向图称为半回路
- 每个结点的出度和入度均为 1 的弱连通有向图称为有向回路

- 回路 (半回路，有向回路)边的数目称为**回路** (半回路，有向回路)**的长度**



定理3.6
设 v 是图G的任意结点，**G是回路**（或有向回路），当且仅当
(1) G的**阶与边数相等**，且
(2) 在G中存在一条 v到v的闭路径，使得**除了v在该闭路径中出现两次外，其余结点和每条边都在该闭路中恰出现一次**

有回路，非循环图

定义

- 如果回路 (有向回路，半回路) C 是图 G的子图，则称 G **有回路** (有向回路，半回路) C
- 没有回路的无向图和没有半回路的有向图称为非循环图

有向回路判断

- 如果有向图 G 有子图 G′，使得 对于 G′的任意结点 v，皆有 $\boldsymbol{d}^{+}_{G'}(v)$或$\boldsymbol{d}^{-}_{G'}(v) > 0$，则 G 有有向回路
- 从G中去掉 v 和与之关联的边得到有向图 G-{v}的过程称为 W-过程
  - **G 有有向回路当且仅当 G – {v} 有有向回路**
  - 若 n 阶有向图 G **没有有向回路**，则经过 n–1 次W-过程得到**平凡图**

非循环图的判断

- 图 G 不是非循环图当且仅当 G 有子图 G′，使得对**于G′ 的任意结点 v，皆有 $d_{G'}(v)$> 1**

七、连通性的强与弱

连通度

- 点连通度：为了**破坏连通性**，至少需要删除多少个顶点?
- 边连通度：为了**破坏连通性**，至少需要删除多少条边?

点割集

设无向图G= <V, E, Ψ >为连通图，若有非空点集V1真包含于V,
使图G删除了V1的所有结点后，所得的子图是不连通图
而删除了V1的任意真子集后，所得到的子图仍是连通图，则称 V1是G的一个点割集

- 点割集具有极小性
- 若某一个结点构成一个点割集，则称该结点为**割点**

图的连通度

- 设G是无向图，k(G) = **min**{ |V1| | V1是 G 的点割集 }是**G的点连通度**，也称作连通度
- 连通度k(G)表示为了产生一个不连通图所需要删除的点的最少数目
- **非连通图的连通度等于0，存在割点的连通图的连通度为1，n阶完全图的连通度为n-1**
- 连通度k(G)表示图G的连通程度， **k(G)大表示连通性强**，即需要删除更多的点才能使图从连通变为非连通

边割集

大同小异，懒得敲了

- 边割集
- 割边
- 边连通度

充要条件

- 一个连通无向图G中的结点v是割点 ⇔ 存在结点u和w，使得连接u和w的**每条路都经过v**
- 一个连通无向图G中的边e是割边 ⇔ 存在结点u和w，使得连接u和w的**每条路都经过e**

八、欧拉图

欧拉路径

- 图G中包含其**所有边的简单开路径**称为 G 的**欧拉路径**
- 图G中包含其**所有边的简单闭路径**称为 G 的**欧拉闭路**

定义

- 每个结点都是偶结点的无向图称为欧拉图
- **每个结点的出度和入度都相等的有向图称为欧拉有向图**

欧拉定理

- 设 G 是连通无向图，G是欧拉图当且仅当G有欧拉闭路
- 设 G 为弱连通的有向图。G 是欧拉有向图当且仅当 G有欧拉闭路

欧拉路径判断

- 设 G ＝<V, E, Ψ> 为 **连通无向图**， v1，v2∈V 且v1 != v2 。则G 有一条从 v1 至 v2 的欧拉路径当且仅当 G **恰有两个奇结点 v1 和 v2**
- 设G为**弱连通有向图**。v1 和v2为G的两个不同结点，G有一条从 v1 至 v2 的欧拉路径 当且仅当 $d_G^+(v_1)=d_G^-(v_1)+1$，$d_G^+(v_2)=d_G^-(v_2)-1$,且**对其他节点，二者相等**

- 如果 G1 和 G2是可运算欧拉图，则G1⊕G2 是欧拉图

九、哈密顿图

定义

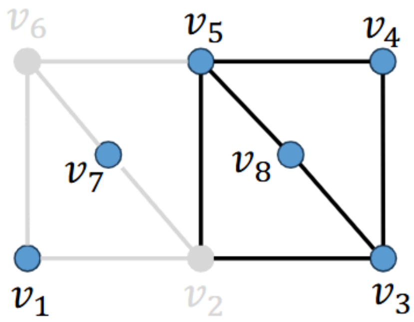
- 如果 回路 (有向回路) C 是图 G 的生成子图 ，则称 C 为 G的**哈密顿回路**（哈密顿有向回路）
- 图G中 包含它的所有结点的基本路径 称为G的**哈密顿路径**
- 有**哈密顿回路（哈密顿有向回路）的图称为哈密顿图**（哈密顿有向图）

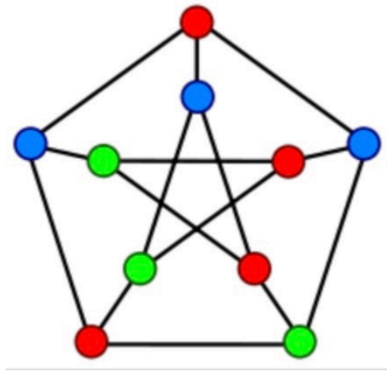
必要条件

用黑白两种颜色 给图中的点着色，使相邻点的颜色不同

- G有**哈密顿回路**，则G中白色结点与黑色结点个**数一定相等**
- G有**哈密顿路径**，则G中白色结点与黑色结点**个数相等或相差1**
- 设G=<V, E,Ψ>是哈密顿图，则对V的任意非空真子集 V1 有 **W(G-V1) <=|V1|**，其中W(G-V1)为G-V1的分支的个数

例：说明图G不是哈密顿图。





解：取$V_1=\{v_2, v_6\}$，则$G-V_1$有3个连通分图，得

$$W(G-V_1) > |V_1|。$$

因此，图G 不是哈密顿图。

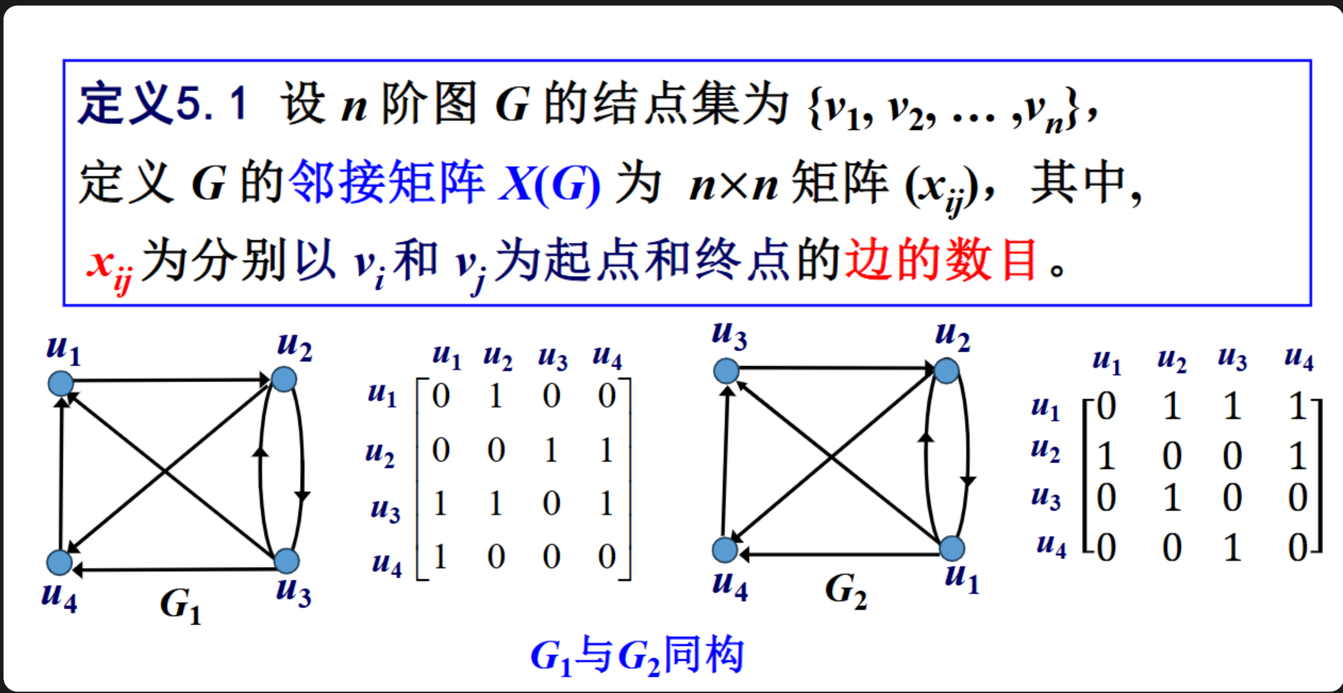
充分条件

- 哈密尔顿图**一定不存在悬挂边**，至多存在哈密尔顿路径
- 哈密尔顿图中**不存在孤立顶点**
- n≥2时，K_n是哈密尔顿图，K_n表示n阶完全图
- 只要图G中有足够多边，那么图就是哈密尔顿图
- 假设G是一个n（n≥3）阶简单图，如果G中**任意顶点的度都至少是n/2**，则G是**哈密尔顿图**（狄拉克定理）
- 假设G是一个n（n≥2）阶简单图，如果G中任意一对顶点u和v，都满足$d_G(u) + d_G(v)$ **≥ n-1**,则G中存在**哈密尔顿路径**(欧尔定理)

十、图的矩阵表示

邻接矩阵

定义



- 如果G2和G2是两个**同构的图**，则首先交换X(G1)的一些行，然后交换相应的列，就可由X(G1)得到X(G2)

性质

- **无向图**G的邻接矩阵 X(G) 是**对称的**
- 图 G **没有平行边** ⇔ X(G)的**元素都是0和1**
- 图G有**自圈** ⇔ X(G)的**对角线有非零元素**
- 图G是**简单图** ⇔ X(G)的元素都是0和1,并且对角线元素都为0
- 图G是**零图** ⇔ X(G)是**零矩阵** (即所有元素都是0的矩阵)
- 若图G是**无向图**，$d_G(v_i) = x_{ii} + \sum_{j=1}^{n} x_{ij}$
- 若图G是**有向图**，$d_G^+(v_i) = \sum_{j=1}^{n} x_{ij}, d_G^-(v_i) = \sum_{j=1}^{n} x_{ji}, d_G(v_i) = \sum_{j=1}^{n}(x_{ij} + x_{ji})$

幂

- 对于矩阵 X，m∈N，令 x_{ij}^m 表示 X^m 的第 i 行第 j 列元素
- n 在 X(G) 中，若 x_{ij} = r，则**说明从 vi 至 vj 存在 r 条长度为 1 的路径**
- 设 m∈I+，n 阶图G的 V = {v1, v2, ..., vn}，若 X是G的邻接矩阵且1 ≤ i, j ≤ n，则 x_{ij}^m 等于 G 中从 vi 至 vj的长度为 m 的路径数目

可达性矩阵

定义

设 n 阶图 G 的全部结点为 $v_1, v_2, \ldots, v_n$，定义图G的路径矩阵为 n×n 矩阵 P =(p_{ij})，其中p_{ij}=1,从v_i可达v_j,为0则不可达
路径矩阵也称为可达性矩阵

求解

- 设G为n阶简单图，结点集为$\{ v_1, v_2, \ldots, v_n\}$
  - 如何判断 v_i到v_j可达？
- v_i可达v_j $\Leftrightarrow \exists k\in\{0, 1,\ldots,n-1\}$, 有$v_i$到$v_j$的长度为 k 的路径
  - v_i到 v_j存在长度为 0 的路径 $\Leftrightarrow i=j$
  - v_i到 v_j存在长度为 1 的路径 $\Leftrightarrow$ v_i与 v_j邻接$\Leftrightarrow x_{ij}=1$
  - v_i到 v_j存在长度为 2 的路径$\Leftrightarrow p_{ij}^2=1$
  - v_i到 v_j存在长度为 3 的路径 $\Leftrightarrow p_{ij}^3=1$
  - v_i到 v_j存在长度为 k 的路径 $\Leftrightarrow p_{ij}^{(k)}=1$

$$p_{ij}^{(k)}=\vee_{l=1}^{n} p_{il}^{(k-1)} \wedge x_{lj}=p_{i1}^{(k-1)} \wedge x_{1j} \vee p_{i2}^{(k-1)} \wedge x_{2j} \vee \cdots \vee p_{in}^{(k-1)} \wedge x_{nj}$$

v_i可达v_j $\Leftrightarrow$

$$(i=j) \vee (x_{ij}=1) \vee (p_{ij}^{(2)}=1) \vee (p_{ij}^{(3)}=1) \vee \ldots \vee (p_{ij}^{(n-1)}=1)$$

298

由邻接矩阵求路径矩阵

定理 5.2 设 X 和 P 分别是 n 阶简单图 G 的邻接矩阵和路径矩阵，记 $X^{(0)}=I_n$（I_n是 n 阶单位矩阵)。

$$X^{(k+1)}=X^{(k)}\otimes X\ (k=0,\ 1,\ 2,\ \ldots,\ n),$$

则 $P=\sum_{k=0}^{n-1} X^{(k)}$。

（$X^{(1)}=X$， $X^{(k)}=(p_{ij}^{(k)})$ ）

- $p_{ij}^{(k+1)}=\vee_{l=1}^{n}(p_{il}^{(k)}\wedge x_{lj})$
- $p_{ij} \Leftrightarrow (i=j) \vee x_{ij} \vee p_{ij}^{(2)} \vee p_{ij}^{(3)} \vee \ldots \vee p_{ij}^{(n-1)}$

- 其实也就是求出G的各阶矩阵，再或一下

距离矩阵

定义

- 设 n 阶图 G 的全部结点为 $v_1, v_2, \ldots, v_n$,称n×n 矩阵 D =(d_{ij})为G的**距离矩阵**，其中d_{ij}表示vi到vj的距离
- 如果vi到vj不连通，则为∞

关联矩阵

定义

- 设**无自圈的无向图** G 的结点集和边集分别为$v_1, v_2, ..., v_n$ 和$e_1, e_2, ..., e_m$ ，定义 G 的关联矩阵 A(G)为 n×m 矩阵(a_{ij})，其中a_{ij}=1,if e_j和v_i关联，若不关联则为0
- **无自圈的有向图**，其中a_{ij}=1,if v_i是e_j起点，其中a_{ij}= -1,if v_i是e_j终点，不关联则为0

联系

- G是**零图** ⇔ A(G) 是空矩阵 (即没有任何元素的矩阵
- **无向图** G 的关联矩阵 A(G) 的每列元素之和为 2(每条边过2个结点)
- **有向图** G 的关联矩阵 A(G) 的每列元素之和为 0
- ei 和 ej 是 G 的**平行边** ⇔ A(G)的第 i 列与第 j 列相同
- 若G是无向图，则 $d_G(v_i) = \sum_{j=1}^{m} a_{ij}$ (i = 1，2，…，n)
- 若G是有向图，(i = 1, 2, …, n):
  - $d_G^+(v_i)$为 A(G) 的第 i 行中**值为 1** 的元素个数
  - $d_G^-(v_i)$为 A(G) 的第 i 行中**值为 −1** 的元素个数
  - $d_G(v_i)$为 A(G) 的第 i 行中 **非零** 元素个数

总结

- **图的路径矩阵和距离矩阵不能给出图的全部信息**
- 图的邻接矩阵可以给出图的全部信息
- **无自圈图的关联矩阵可以给出无自圈图的全部信息**