电 网 络 理 论

邱关源 编著

科 学 出 版 社

1 9 8 8

内 容 简 介

本书介绍线性电路理论的基础知识，主要内容涉及无源和有源电路的分析、综合和设计，包括电路的基本性质、图论、电路方程、撕裂法、无源网络综合、有源 *RC* 电路、有源 *RC* 滤波器、开关电容滤波器. 每章后还附有习题

本书可供电类(不包括通信类)专业研究生阅读，也可供高等工科院校电类专业的教师、高年级学生，以及有关专业的工程技术人员参考.

电 网 络 理 论

邱关源 编著

责任编辑 李雪芹 范铁夫

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1988年6月第一版 开本：850×1168 1/32

1988年6月第一次印刷 印张 10 1/2

印数 0001—4,200 字数 274,000

ISBN 7-03-000364-0/TM·6

定价： 3.30 元

目　　录

试读结束：需要全本请在线购买： www.ertongbook.com

第一章　电路的基本性质

§1-1　线性和非线性

电路或系统是器件的一种相互联接． 随着电子技术的发展，器件本身越来越复杂了．大规模和超大规模集成电路、大型网络、电子计算机的发展及其日益广泛的应用，对电路理论的发展起着极大的促进作用，引起了电路理论的深刻变化．

本章介绍有关(线性)电路理论的某些基本性质，其中包括线性和非线性，无源性和有源性，时变和非时变等．

一般讲，如果叠加定理对一个电路成立，此电路就是线性的．对一个一端口(网络)，设激励为电压 $v(t)$，所产生的响应为电流 $i(t)$ [也可以设激励为 $i(t)$，响应为 $v(t)$]，则此一端口的线性性质可以表达如下:

当 $$v(t) \to i(t)$$

意思是“$v(t)$ 意味着 $i(t)$” 时，将有

$$\alpha v^{(1)}(t) + \beta v^{(2)}(t) \to \alpha i^{(1)}(t) + \beta i^{(2)}(t)$$

其中

$$v^{(1)}(t) \to i^{(1)}(t)$$

$$v^{(2)}(t) \to i^{(2)}(t)$$

α 和 β 为任意常数．$v^{(1)}(t)$ 和 $v^{(2)}(t)$ 为二个激励信号．

这里包含着两种性质:

一为“齐性”性质，即当

$$v(t) \to i(t)$$

将有

$$\alpha v(t) \to \alpha i(t)$$

二为“加法”性质，即当

$$v^{(1)}(t) \to i^{(1)}(t), \quad v^{(2)}(t) \to i^{(2)}(t)$$

将有

$$v^{(1)}(t) + v^{(2)}(t) \to i^{(1)}(t) + i^{(2)}(t)$$

对一个 n 端口(网络)，设第 k 端口的电压和电流的参考方向如图 1-1 所示，且分别以 v_k 和 i_k 来表示，$k=1,2,\cdots,n$. 当 v_k 和 i_k 服从由端口 k 所限定的约束时，则称 v_k 和 i_k 为允许信号对. 从外部的性状来研究一个 n 端口，且假设任一端口的电压和电流均为允许的. 令端口电压和电流列向量为

$$\boldsymbol{v}(t) = [v_1(t), v_2(t), \cdots, v_n(t)]^T$$

$$\boldsymbol{i}(t) = [i_1(t), i_2(t), \cdots, i_n(t)]^T$$

另设列向量

$$\boldsymbol{x}(t) = [x_1(t), x_2(t), \cdots, x_n(t)]^T$$

$$\boldsymbol{y}(t) = [y_1(t), y_2(t), \cdots, y_n(t)]^T$$

$\boldsymbol{x}(t)$ 表示 n 个输入或激励，$\boldsymbol{y}(t)$ 表示 n 个输出或响应，$x_k(t)$ 可以是电压或电流，而相应的 $y_k(t)$ 将是电流或电压. 例如，设

$$\boldsymbol{x}(t) = [v_1(t), v_2(t), \cdots, v_k(t), i_{k+1}(t), \cdots, i_n(t)]^T$$

为输入或激励信号，则

$$\boldsymbol{y}(t) = [i_1(t), i_2(t), \cdots, i_k(t), v_{k+1}(t), \cdots, v_n(t)]^T$$

将是输出或响应信号.

当
$$\boldsymbol{x}(t) \to \boldsymbol{y}(t)$$

而

$$\alpha\boldsymbol{x}(t) \to \alpha\boldsymbol{y}(t)$$

时，称此 n 端口为按端口齐性的网络.

同样，如果当 $\boldsymbol{x}(t) \to \boldsymbol{y}(t)$, $\hat{\boldsymbol{x}}(t) \to \hat{\boldsymbol{y}}(t)$

有
$$\boldsymbol{x}(t) + \hat{\boldsymbol{x}}(t) \to \boldsymbol{y}(t) + \hat{\boldsymbol{y}}(t)$$

则这种性质称为按端口可加性质.

如果一个 n 端口具有齐性和可加性，则称为按端口线性的网络.

通常，由线性元件和独立电源构成的电路称为线性电路. 这个定义与“按端口线性”是有一定的区别的. 如图 1-2(a) 所示电路

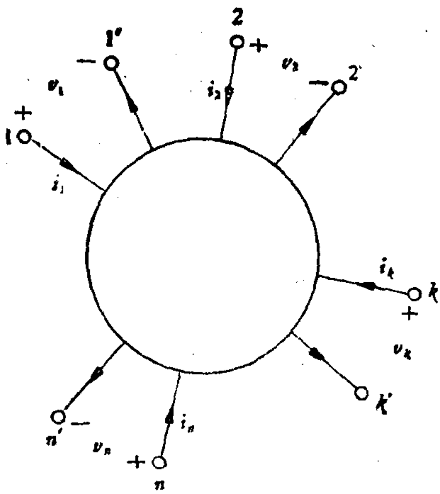


图 1-1 n端口网络

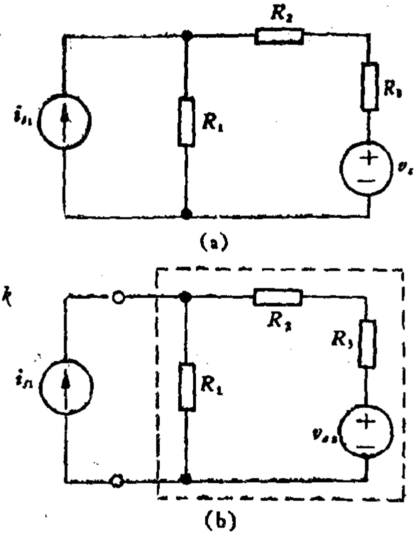


图 1-2 线性电路和“按端口线性”

是线性电路，这是因为任一支路中的响应是各个激励单独作用时所产生的响应之叠加。但是，如果把图 1-2(b) 虚线所示框中的电路看作是一个一端口，此一端口不是按端口线性的，因为在该端口齐性和可加性均不成立。这两个定义之所以有差别，主要是对于端口网络来说，电路“可达”的部分仅在端口，而要验证一个电路是否线性或非线性则必须了解电路的全部内容。特殊情况下，内部含非线性元件的端口网络有可能是按端口线性的。

§1-2 时变和非时变

一个不含时变元件的电路称为非时变电路，否则就称为时变电路。

关于 n 端口的时变和非时变性质，“按端口”的时变和非时变根据以下定义来考虑。设对一个 n 端口的激励和响应有

$$\boldsymbol{x}(t) \to \boldsymbol{y}(t), \quad \hat{\boldsymbol{x}}(t) \to \hat{\boldsymbol{y}}(t)$$

如果对所有 t_0，当 $\hat{\boldsymbol{x}}(t) = \boldsymbol{x}(t - t_0)$ 时，有 $\hat{\boldsymbol{y}}(t) = \boldsymbol{y}(t - t_0)$，则

称此 n 端口为"按端口非时变"网络。这等于说，对一个非时变 n 端口，不论激励是在什么时间施加的，其响应均是相同的。由非时变元件构成的 n 端口且初始条件均为零值，将是按端口非时变的．在特殊情况下，由时变元件构成的 n 端口有可能是按端口非时变的。

§1-3　无源性和有源性

对于图 1-3 所示一端口 N，输入该网络的功率

$$p(t) = v(t)i(t)$$

从任何初始时刻 t_0 到 t，该网络的总能量

$$W(t) = W(t_0) + \int_{t_0}^{t} v(\tau)i(\tau)d\tau$$

式中 $W(t_0)$ 为在初始时刻 t_0 时该一端口所储存的能量。

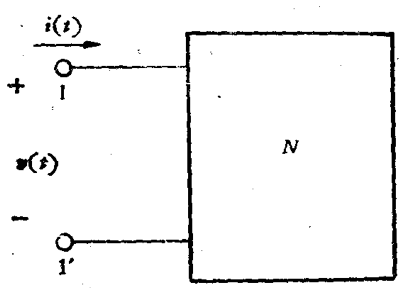


图 1-3　一端口 N

如果对任何一对允许信号，对所有 t_0 以及所有时间 $t \geqslant t_0$，有

$$W(t) \geqslant 0, \quad \forall v(t), \quad i(t) \tag{1-1}$$

则此一端口 N 为无源的．如果一端口不是无源的，它就是有源的．就是说，当且仅当对某个激励和某一初始时间 t_0 以及某一时间 $t \geqslant t_0$，有 $W(t) < 0$，则此一端口就是有源的。换句话说，如果一个一端口是有源的，就一定能找到某一个激励以及至少某一时间 t，式(1-1)对这个一端口不能成立。

在以上有关无源性的定义中必须计及初始储存能量 $W(t_0)$. 例如,对非时变的线性电容元件,设它的电容值为 C, 则有

$$W(t)=W(t_0)+\int_{t_0}^{t}v(\tau)i(\tau)d\tau=W(t_0)+C\int_{v(t_0)}^{v(t)}vdv$$

$$=W(t_0)+\frac{1}{2}Cv^2(t)-\frac{1}{2}Cv^2(t_0)$$

$$=\frac{1}{2}Cv^2(t)$$

式中 $W(t_0)=\frac{1}{2}Cv^2(t_0)$. 所以当 $C>0$ 时, 电容元件为无源的,而当 $C<0$ 时(线性负电容), 则为有源的. 但是, 如不计及式中的初始能量项,则

$$W(t)=\frac{1}{2}Cv^2(t)-\frac{1}{2}Cv^2(t_0)$$

这样即使 $C>0$, $W(t)$ 在某些时间将小于零. 事实上充电的电容有可能向外释放所储存的能量,但如计及初始能量,它不可能释放多于它原先储存的能量.

为了考虑这种情况,引入了有关“无损性”的概念. 设一端口的所有允许信号对 $v(t)$, $i(t)$ 从 t_0—∞ 为“平方可积”,即有

$$\int_{t_0}^{\infty}v^2(t)dt<\infty,\quad \int_{t_0}^{\infty}i^2(t)dt<\infty$$

如果对任何初始时间 t_0, 下式成立:

$$W(t)=W(t_0)+\int_{t_0}^{\infty}v(t)i(t)=0 \tag{1-2}$$

其中 $W(t_0)$ 为 t_0 时的初始能量,则称此一端口为无损网络.

以上关于 $v(t)$ 和 $i(t)$ “平方可积”的条件,也即

$$v(\infty)=v(-\infty)=i(\infty)=i(-\infty)=0$$

就是说,一端口在 $t=\infty$ 和 $t=-\infty$ 时均为松弛的.

假设一端口在 $t=-\infty$ 时无任何储存能量, 则无源性可按下式定义:

$$W(t)=\int_{-\infty}^{t}v(\tau)i(\tau)d\tau\geqslant 0,\quad \forall v(t),\quad i(t),\quad t\geqslant -\infty \tag{1-3}$$

以上有关无源性的定义可以推广到 n 端口。如果全部端口的允许信号对是真实的，且对所有 t 输入端口的总能量为非负的，则此 n 端口为无源的，即对全部 $t \geqslant -\infty$，有

$$W(t)=\int_{-\infty}^{t} \boldsymbol{v}^T(\tau)\boldsymbol{i}(\tau)d\tau \geqslant 0 \tag{1-4}$$

这里设 $t=-\infty$ 时，$\boldsymbol{v}(-\infty)=\mathbf{0}$，$\boldsymbol{i}(-\infty)=\mathbf{0}$。

如果对某些允许信号，且对某些 $t>-\infty$，有

$$W(t)=\int_{-\infty}^{t} \boldsymbol{v}^T(\tau)\boldsymbol{i}(\tau)d\tau < 0$$

则此 n 端口为有源的。

如果对所有平方可积有限值允许信号对，有

$$W(t)=\int_{-\infty}^{\infty} \boldsymbol{v}^T(\tau)\boldsymbol{i}(\tau)d\tau = 0$$

则此 n 端口为无损的。一个无损的 n 端口将最终把输入其端口的能量全部返回。

§1-4 无源元件和有源元件

线性(正)电阻元件、电容元件和电感元件均为无源元件。例如，对电阻元件，按式(1-3)有

$$W(t)=\int_{-\infty}^{t} v(\tau)i(\tau)d\tau=\int_{-\infty}^{t} Ri^2(\tau)d\tau$$
$$=R\int_{-\infty}^{t} i^2(\tau)d\tau$$

可见，只要 $R>0$，对所有 t，$W(t)$ 总是非负的。同理，对于非零的 $v(t)$ 和 $i(t)$，$W(t)$ 将是 t 的单调非递减正值函数，因此当 $t=\infty$ 时，$W(t)$ 不可能是零值。所以线性电阻元件是非无损的。

线性负电阻元件、电容元件和电感元件是有源的。

对于理想变压器［图 1-4(a)］，有

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & n \\ -n & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ v_2 \end{bmatrix}$$

按式(1-4)

试读结束：需要全本请在线购买： www.ertongbook.com

$$W(t)=\int_{-\infty}^{t}\{v_1(\tau)i_1(\tau)+v_2(\tau)i_2(\tau)\}d\tau=0$$

所以理想变压器是无源的且是无损的。

对理想回转器［图 1-4(b)］，有

$$\begin{bmatrix}v_1\\v_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0 & -r\\r & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_1\\i_2\end{bmatrix}$$

或

$$\begin{bmatrix}i_1\\i_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0 & g\\-g & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}v_1\\v_2\end{bmatrix}$$

式中 r 和 g 分别称为回转电阻和回转电导，统称为回转常数。按式(1-4)有

$$W(t)=\int_{-\infty}^{t}\{v_1(\tau)i_1(\tau)+v_2(\tau)i_2(\tau)\}d\tau$$
$$=\int_{-\infty}^{t}\{gv_1(\tau)v_2(\tau)-gv_1(\tau)v_2(\tau)\}d\tau=0$$

所以理想回转器也是无源的且是无损的。

对于图 1-5 中的理想负阻抗转换器 (NIC)，有

$$\begin{bmatrix}v_1\\i_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0 & k\\k & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_1\\v_2\end{bmatrix}$$

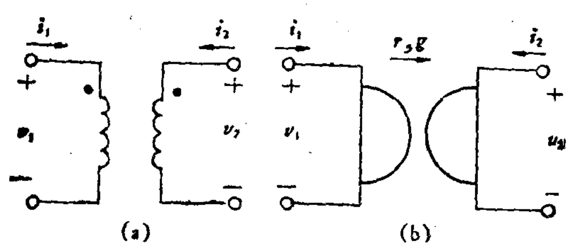


图 1-4　理想变压器和回转器

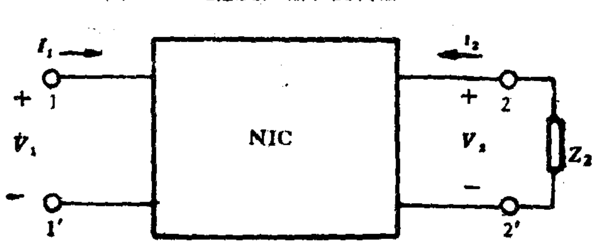


图 1-5　NIC

其中 $k(>0)$ 为实常数，称为 NIC 的增益。或写为

$$\begin{bmatrix} V_1(s) \\ I_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & k \\ k & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1(s) \\ V_2(s) \end{bmatrix}^{1)}$$

设端口 2-2′ 接有阻抗 $Z_2(s)$，则此时有

$$V_2(s) = -I_2(s)Z_2(s)$$

在正弦稳态情况下，输入 NIC 的总功率为

$$\bar{S} = P + jQ = \dot{V}_1\overset{*}{I}_1 + \dot{V}_2\overset{*}{I}_2$$

其中 $\overset{*}{I}_1$ 和 $\overset{*}{I}_2$ 分别为电流相量 $\dot{I}_1$ 和 $\dot{I}_2$ 的共轭。$\bar{S}$ 在一般情况下为复数，其实部为二端口内消耗的有功功率。因此若 $P<0$，此二端口为有源的，有

$$P = -2\mathrm{Re}[Z_2|\dot{I}_2|^2]$$

所以 NIC 是有源的。

以上有关无源性、无损性和有源性主要针对线性电路而言的。非线性电路的无源性和有源性的一般定义较为复杂，可参阅有关文献。

参考文献

[1] N. Balabanian, T. A. Bickart, Electrical Network Theory, §1-4, §1-5, John Wiley & Sons, Inc., 1969.

[2] B. Peikari, Fundamentals of Network Analysis and Synthesis, Chapter 1, 2, Prentice-Hall, Inc., 1974.

[3] W. K. Chen, Active Network and Feedback Amplifier Theory, §1-1, §1-2, §1-3 McGraw-Hill Book Company, 1980.

习　　题

1-1 一个电容元件的电荷与电压之间有如下关系：$v = q - q^3$. 此元件是有源的还是无源的?

1-2 一个二端电路元件的电压与电流关系可写为

$$i(t) = D\frac{d^2v(t)}{dt^2}$$

1) 为简化起见，有时略去记号 “(s)”。

试证明这个元件是有源的.

1-3 附图所示为一个晶体管的等效电路模型. 此二端口是有源的还是无源的? 在什么条件下?

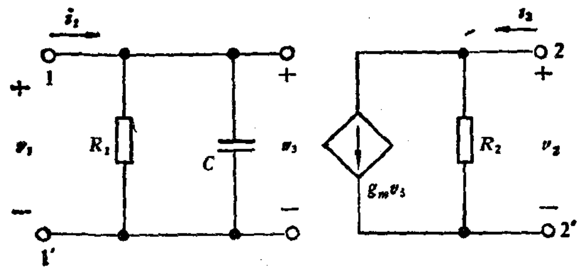


图 1-6

1-4 附图所示两个电路都是线性电路,但是否都是按端口线性的? 为什么?

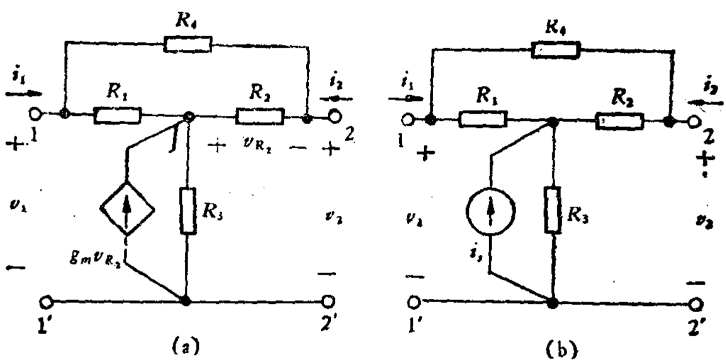


图 1-7

1-5 附图所示电路中的二极管是理想的. 设输入为电压源 $v(t)$, 输出为通过电阻 R 的电流 i_R. 此电路是否为按端口线性的?

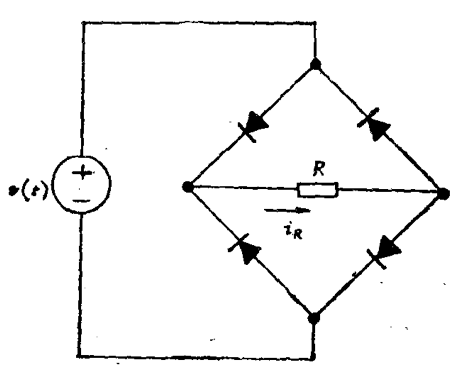


图 1-8

第二章　图　论

§2-1　图的基本概念

任何一个电路都可以用一个图G来说明其结构的特点．从直觉上说，一个图是一些点和线段的集合，其中每一线段联接两个不同的点（或一个相同的点）．

（1）　一个图G可定义为点（称为节点或顶点）和线段（称为支路或边）的一个集合，每条支路恰好联接两个节点，除了节点以外，支路上没有任何公共点．也就是说，各支路除了它们所联接的节点以外，若再相交（画在平面上时），这些交点不算为节点．

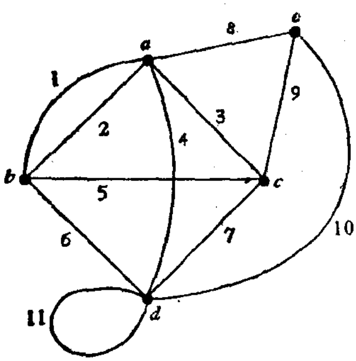


图 2-1　图 G

图 2-1 中所示的一个图 G，节点的集合为（a，b，c，d，e），支路的集合为（1，2，3，4，5，6，7，8，9，10，11）．支路 1 联接节点 a 和 b，我们说支路 1 与节点 a 和 b 有关联，或者说节点 a，b 与支路 1 有关联．同样，支路 4 与节点 a 和 d 有关联，等等．支路 11 关联的只有一个节点 d（即它关联的两个节点重合），这种支路称为自环．支路 4 和支路 5 相交，但它们的交点不是节点．一般说来，画图时，关键是节点和支路的关联性质，节点的位置并不重要，而支路是用连续线段来表示的，它可以被画成曲线或直线．

一个图G可以用　$G=(V, E)$　来表示，其中V表示节点集合，E表示支路集合．当一条支路 e 与两个节点 v 和 w 有关联，把 v 和 w 称为 e 的端点．如果 $v=w$，则 e 就是自环．为了叙述方

便，以节点 v 和 w 做端点的支路可记为 $e=[v, w]$，其中 $[v, w]$ 为节点 v 和 w 的无序偶。

(2) 图 $G=(V, E)$ 的子图 $G_s=(V_s, E_s)$，其 V_s 和 E_s 分别为 V 和 E 的子集。如果 V_s 和 E_s 分别为 V 和 E 的真子集，则 G_s 称为 G 的真子图。如果 $V_s=V$，则子图 G_s 称为 G 的生成子图。

(3) 对于图 G 的 m 条支路 $e_1, e_2, \cdots, e_m$，如果存在 $(m+1)$ 个节点序列 $v_0, v_1, \cdots, v_m$ 使得 $e_k=[v_{k-1}, v_k]$, $k=1, 2, \cdots, m$，则这些支路构成了一个支路序列，每一支路 e_k 和 e_{k-1} 以一个端点相衔接，和 e_{k+1} 以另一端点相衔接。如果支路序列中每个节点的出现不超过一次(显然，这时用到的支路都将相异)且 $v_0 \neq v_m$，则这种支路序列称为一条路。当 $v_0=v_m$ 时，路是闭合的，这种闭合的路称为回路。所以图 G 的一个回路是 G 的一个子图，它的每个节点上恰好有两条支路与它有关联。

(4) 如果一个图的每两个相异节点之间至少存在自一个节点联到另一个节点的一条路(注意支路本身也构成一条路)，则这个图是连通的。一个非连通图可以看作是由几个连通的部分组成的，每一个这种连通部分称为该图的一个分离部分或简称为一个部分。一个孤立节点也可算作一个部分。

(5) 如果一个连通图 G 的一个子图满足下列条件就称为 G 的一个树：(a) 连通的；(b) 没有回路；(c) 包含 G 的全部节点。按照这个定义的树称为 G 的生成树，因为它包含了 G 的全部节点。

在一个图里，若只有一条支路与节点 x 关联，则节点 x 称为悬挂点。一个树至少有两个悬挂点。

一个非连通图的各个部分各自有它们的树，这样就构成一个林。一个由 k 个分离的连通部分组成的且不包含任何回路的图，称为一个具有 k 个树的林。

对于图 G 的一个树 T，凡属于此树的支路称为树支，凡不属于 T 的支路则称为连支。

可以证明：(a) 具有 n_t 个节点的任何树的支路数恰好等于

$n_t - 1$. （b）一个具有 n_t 个节点和 b 条支路的连通图的连支数为 $l = b - n_t + 1$.

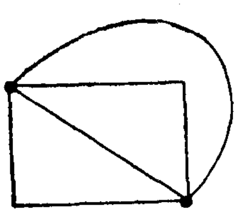
（6）任选图 G 的一个树 T，G 的每一连支与相应的树支将构成一个回路，这种只含有一条连支，其余均为树支的回路称为基本回路或单连支回路. 按树 T 定出的一组基本回路称为基本回路组，它的回路数为 $(b - n_t + 1)$.

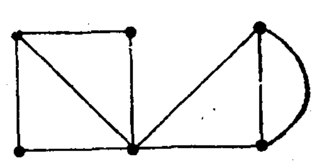
（7）割集是连通图 G 的一个支路集合，把这些支路移去将使 G 分离为二个部分，但是如果少移去其中一条支路，图仍将是连通的.

连通图 G 的一个割集 Q 至少包含 G 的一条树支. 通过 G 的一个树 T 的任一树支可以把 G 的节点划分为两个集合 W 和 W'. 按照 W 和 W' 可以定义 G 的一个割集，它包含该树支且包含那些联接 W 和 W' 的连支. 这种割集称为基本割集或单树支割集. 任选 G 的一个树 T 可以定出 $(n_t - 1)$ 个基本割集，称为基本割集组.

可以证明：如果 T 是连通图 G 的一个树，由 T 的一条树支确定的基本割集应当恰好包含 G 的那些连支，每一这种连支构成的基本回路中含有该树支.

（8）在一个连通图 G 里，把一个节点 x_0 移去（把一个节点移去意味着把它以及与它关联的全部支路移去）后所得的子图 $H = (G - x_0)$. 若不再连通，则节点 x_0 称为断点. 如果图 G 是连通且没有断点，则 G 称为不可断图. 如果 G 至少有一个断点，则称为可断图. 图 2-2(a) 为不可断图，图 2-2(b) 为可断图，断点为 x_0.


(a)



(b)

图 2-2　不可断图和可断图

试读结束：需要全本请在线购买： www.ertongbook.com