

计算机辅助电路 分析与设计

下 册

电工教研室

余庆健 编

华东工程学院

一九八二年五月

下 册 目 录

第十三章 符号网络函数的产生	1
§ 13—1 概述	1
§ 13—2 讯号流图法	2
§ 13—3 列数树法	20
§ 13—4 参数抽取法	28
§ 13—5 外代数在生成符号网络函数中的应用	40
§ 13—6 增量符号网络函数	48
第十四章 网络的最优化设计	64
§ 14—1 最优化方法的一些基本概念	64
§ 14—2 最速下降法	74
§ 14—3 非线性最小二乘法	82
§ 14—4 拟 Newton 方法	89
§ 14—5 直接搜索法	101
§ 14—6 统计试验法	104
§ 14—7 有约束条件的极值问题	108
§ 14—8 多目标函数的极小值问题	117
§ 14—9 电路的统计设计	129
第十五章 电路的故障诊断	155
§ 15—1 概述	155
§ 15—2 由测量导纳传递函数决定电路元件的参数	158
§ 15—3 伴随网络法在故障诊断中的应用	172
§ 15—4 最优化方法在故障诊断中的应用	182
附录一 ASTAP 程序介绍	189
附录二 自由格式输入	241
附录三 国外主要程序介绍	252

第十三章 符号网络函数的产生

§ 13-1 概 述

迄今为止，我们所知道的网络分析方法可以归结为以下两种类型：

1. 数值分析方法，
2. 符号分析方法。

前一种方法是本书中主要介绍的内容，也是目前计算机辅助网络分析的主要方法。后一种方法是手算分析时使用的主要方法之一，它是通过对于网络进行解析运算得到网络函数的解析表达式，即得到符号网络函数。这种分析方法与数值分析方法相比有如下优点：

1. 符号网络函数能够直接显示出网络响应的特征，参量对于网络响应的影响等等。例如，对于一个RC串联网络，在零初始条件下其单位阶跃响应为

$$v_C(t) = 1 - e^{-\frac{t}{RC}}$$

从这个表达式立即可知道 $v_C(t)$ 的形状及影响该曲线形状的参量。如果要通过数值分析来得到同样的结论，则要通过多次改变R和C的数值进行运算并对计算结果作复杂的数据处理以后才能得到。

2. 符号网络函数便于进行灵敏度分析。这时，我们只需对该函数的表达式作求导运算即可，而不象数值分析方法那样需要对伴随网络或灵敏度网络进行分析计算。

3. 运用符号网络函数便于进行参数的迭代运算。例如计算一个线性网络的频率响应，如果已经求得该网络的频率响应的解析表达式 $A(\omega)$ ，则只需将 $\omega = \omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ 代入该表达式进行计算就可以得到在各个频率下的网络响应的值，而不象数值分析方法那样要作n次网络分析。

4. 运用符号网络函数可以避免数值计算中引入的一些计算误差，例如舍入误差和有效数字丢失产生的误差等等。例如一个电导 G_1 和另一个电导 G_2 并联的电路，当输入电流为I时， G_1 中的电流

$$I_1 = \frac{G_1}{G_1 + G_2} I$$

如果 $I = 1 \text{ A}$ ， $G_1 = 1 \text{ S}$ ， $G_2 = 10^{-6} \text{ S}$ ，计算机字长能表示十进制六位有效数字，则

$$G_1 + G_2 = 1.000001$$

在计算机中将被表示为1.00000，于是算出 I_1 为1 A。但是如果我们用上述解析式进行计算，

则可采取如下算法得到更为精确的结果:

$$I_1 = \frac{I}{1 + (G_2/G_1)} \approx I(1 - G_2/G_1) = 0.999999A$$

网络的符号分析法虽然有如上一些优点,但是一般来说,它只适用于规模很小的网络的计算。当网络规模增加时,用计算机产生符号网络函数所需的工作量急剧增加,因而这个方法目前尚无法应用到规模较大的网络,这是它与数值分析方法相比的一个主要缺点。另一方面,这种方法一般只适用于线性网络,对于非线性网络通常是无能为力的。

我们在本章中讨论的符号网络函数是指 V_{out}/V_{in} , V_{out}/I_{in} , V_{in}/I_{in} , V_{out}/I_{ou} 这样一类函数。这类函数按其表达式中符号情况的不同可分为三种。

1. 全符号网络函数

例如图13—1—1所示网络,

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{S^2LC + SCR + 1} \quad (13-1-1)$$

其中 $S = \sigma + j\omega$ 为复频率。在 (13—1—1) 中,网络的全部参量及复频率均出现在函数表达式中。

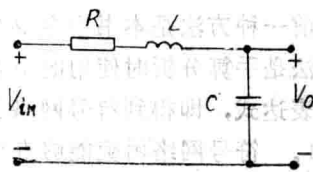


图13—1—1

2. 部分符号网络函数

如果在 (13—1—1) 中, $R=10$ 保持不变, 则可得

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{S^2LC + 10SC + 1} \quad (13-1-2)$$

它只含有网络的部分参量及复频率 S 。

3. 网络的频率函数

如在 (13—1—2) 中, $L=1H$, $C=1\mu F$, 则得

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{10^{-8}S^2 + 10^{-5}S + 1} \quad (13-1-3)$$

上述三类符号网络函数, 第三类可以用 § 8—9 所述的方法形成, 因而本章中我们只讨论第一类和第二类符号网络函数的计算机形成方法。

§ 13—2 讯号流图法

一、讯号流图法的基本概念

讯号流图法是分析线性网络的一种拓扑方法, 也是形成线性网络符号函数的一种常用方法。

我们知道, 线性网络的方程组一般可表为

$$A x = b$$

$$(13-2-1)$$

讯号流图就是用图形来描述线性方程组的一种拓扑方法。为了了解它的概念，我们以一个三元一次线性方程组为例加以说明。

设有方程组

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 = b_1$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 = b_2$$

$$(13-2-2)$$

$$a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{33}x_3 = b_3$$

我们将 (13-2-2) 改写为如下形式

$$x_1 = c_{11}x_1 + c_{12}x_2 + c_{13}x_3 + d_1$$

$$x_2 = c_{21}x_1 + c_{22}x_2 + c_{23}x_3 + d_2$$

$$(13-2-3)$$

$$x_3 = c_{31}x_1 + c_{32}x_2 + c_{33}x_3 + d_3$$

其中 $c_{ii} = 1 - a_{ii} \quad (i = 1, 2, 3)$

$$c_{ij} = -a_{ij} \quad (i, j = 1, 2, 3, i \neq j)$$

$$d_i = b_i \quad (i = 1, 2, 3)$$

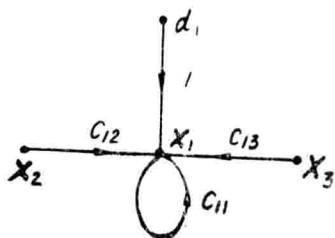


图13-2-1

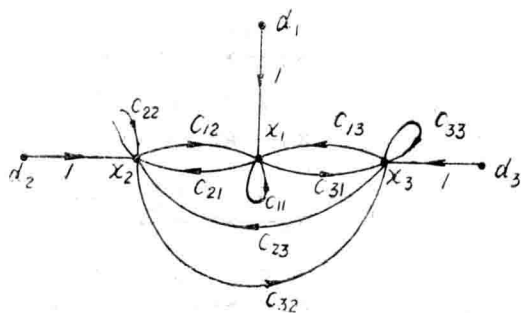


图13-2-2

(13-2-3) 中第一个方程可用图13-2-1所示图形来表示，(13-2-3) 的全部方程则由图13-2-2所示图形来表示。图中标有 x_1 、 x_2 、 x_3 和 d_1 的点称为节点，连接各节点间的有向线段称为支路。节点的变量即为对应的方程中的未知量或常数项，而支路的权（称为该支路的传输）即为方程中相应的系数。由该图可见讯号流图由如下规则给出：

节点变量 = $\sum$ 进入该节点的支路传输 $\times$ 该支路的起始节点变量。

在讯号流图中，只与输出支路相连的节点称为源节点，如图13-2-2中的 d_1 、 d_2 和 d_3 ，具有若干输入支路的节点称为非独立节点，如图13-2-2中的 x_1 、 x_2 和 x_3 ，其中仅含输入支路的非独立节点称为沟节点，例如在图13-2-2中当 $c_{13} = c_{23} = c_{33} = 0$ 时， x_3 就成为沟节点。由上述讯号流图的作图规则可知，源节点变量与方程组右向量中各分量相对应，而非独立节点变量则与方程组的未知量相对应。

应当说明，由一个讯号流图可以建立起与之对应的一组线性方程，但是反过来，给定一个线性方程组，可能建立起若干形状不同的讯号流图。

二、讯号流图的几个术语

1. 通路

沿着支路所示的方向，从某个节点 x_i 出发到另一个节点 x_j 的一条或若干条支路的集合称为由 x_i 至 x_j 的一条通路。在通路中任何节点只经过一次。

例如图13—2—2中连接 d_2 与 x_1 的通路有两条： $d_2 \xrightarrow{1} x_2 \xrightarrow{c_{12}} x_1$ 及 $d_2 \xrightarrow{1} x_2 \xrightarrow{c_{32}} x_3 \xrightarrow{c_{13}} x_1$ 。

沿着一条通路的所有支路传输的积称为该通路的传输。例如上述两条通路的传输分别为

$$P_1 = c_{12}$$

和

$$P_2 = c_{32}c_{13}$$

2. 回路

一个始端与终端重合的通路称为回路。回路中所有支路传输的积称为该回路的传输。例如图13—2—2中有如下回路：

$$x_1 \xrightarrow{c_{21}} x_2 \xrightarrow{c_{12}} x_1$$

$$x_1 \xrightarrow{c_{31}} x_3 \xrightarrow{c_{13}} x_1$$

$$x_2 \xrightarrow{c_{32}} x_3 \xrightarrow{c_{23}} x_2$$

$$x_2 \xrightarrow{c_{12}} x_1 \xrightarrow{c_{31}} x_3 \xrightarrow{c_{23}} x_2$$

$$x_3 \xrightarrow{c_{13}} x_1 \xrightarrow{c_{21}} x_2 \xrightarrow{c_{32}} x_3$$

它们的回路传输分别为

$$L_1 = c_{21}c_{12}, L_2 = c_{31}c_{13}, L_3 = c_{32}c_{23},$$

$$L_4 = c_{23}c_{31}c_{12}, L_5 = c_{32}c_{21}c_{13}$$

在回路中，只含一条支路者称为自回路。如图13—2—2中传输为 c_{11} ， c_{22} 和 c_{33} 的支路各自构成一个自回路。

3. n 阶回路

n 个不相接触的回路构成一个 n 阶回路。如图13—2—3中回路 bc 和回路 fg 组成一个二阶回路，该二阶回路的传输定义为这两个回路传输之积，即 $bcfg$ 。

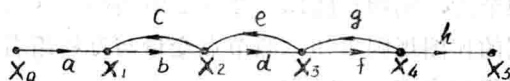


图13—2—3

三、Mason公式

对于线性方程组 (13—2—3)，我们将它写成矩阵向量表达式

$$\mathbf{x} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D} \quad (13-2-4)$$

于是其解为

$$\mathbf{x} = (\mathbf{I} - \mathbf{C})^{-1}\mathbf{D} \quad (13-2-5)$$

由线性方程组的迭加性质， $\mathbf{x}$ 中的任一分量 x_i 可表为 $\mathbf{D}$ 中各分量的线性组合，即

$$x_i = T_{i1}d_1 + T_{i2}d_2 + \cdots + T_{in}d_n \quad (13-2-6)$$

因此只要求出 T_{ij} ($i, j = 1, 2, \dots, n$) 就可用上式求得 x_i ($i = 1, 2, \dots, n$)。

Mason给出了利用讯号流图求 T_{ij} 的公式如下，

$$T_{ij} = \frac{\sum_k P_k \Delta_k}{\Delta} \quad (13-2-7)$$

式中

$$\Delta = 1 - \sum P_{m1} + \sum P_{m2} - \sum P_{m3} + \cdots \quad (13-2-8)$$

上述两式中符号的意义为：

P_k ：自节点 d_j 至 x_i 间第 k 条通路的传输。

P_{mn} ：讯号流图中第 m 个 n 阶回路的传输。(13—2—8) 中的 $\sum$ 是表示对所有存在的 n 阶回路的传输求代数数和。

Δ_k ：在讯号图中与通路 P_k 不接触的余图所对应的 Δ ，它可用 (13—2—8) 式求出。

例 1.

如 13—2—4 所示讯号流图，可以算出

$$\frac{x_4}{x_0} = \frac{abc + g(1 - be)}{1 - ad - be - cf - defg + adcf}$$

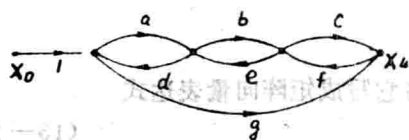
Mason公式可以证明如下。

由方程组 (13—2—1)， T_{ij} 可表为

$$T_{ij} = \frac{\Delta_{ji}}{\Delta} \quad (13-2-9)$$

其中

$$\Delta = |A| = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix} \quad (13-2-10)$$



(13-2-4)



(13-2-5)



(13-2-6)



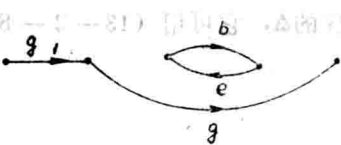
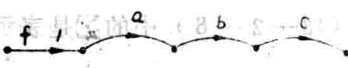
(13-2-7)



(13-2-8)



(13-2-9)



$$\begin{aligned}
 & \left. \begin{aligned} & ad \\ & be \\ & cf \end{aligned} \right\} \Sigma P_{m_1} \\
 & \left. \begin{aligned} & defg \\ & adcf \end{aligned} \right\} \Sigma P_{m_2} \\
 & \frac{\Sigma P_{m_1} + \Sigma P_{m_2}}{\Delta} = 1
 \end{aligned}$$

图13-2-4

Δ_{ji} 是 a_{ji} 的代数余子式，即

$$\Delta_{ji} = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & 0 & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & 0 & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{i1} & a_{i2} & \cdots & 1 & \cdots & a_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & 0 & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix} \quad (13-2-11)$$

由行列式的定义，(13-2-10)可表为

$$\Delta = \sum (-1)^{i+j} (a_{ia} a_{jb} a_{\gamma\gamma'} \cdots a_{nn'}) \quad (13-2-12)$$

其中 I 和 I' 各为序列 $\{\alpha, \beta, \gamma, \dots, n\}$ 和 $\{\alpha', \beta', \gamma', \dots, n'\}$ 中逆序的个数(序号由小至大排列为顺序, 反之为逆序。 I 也就是将序列 $\{\alpha, \beta, \gamma, \dots, n\}$ 重新排为顺序时需要进行的数交换的次数)。

现在来研究(13—2—12)中含任意元素 a_{ij} 的项。由于(13—2—12)每一项中各元素的符号均不相同, 故对应于该元素必有 i 行的一个元素, 这个元素或者是 a_{ji} 或者是 a_{ik} ($k \neq i$)。如果是前者, 则该项中第三个元素必为 a_{kl} ($k, l \neq i, j$); 如果是后者, 那么该项中第三个元素可能为 a_{ki} 或 a_{kl} 。按上述方式推理, 可见经过适当地改变排列次序, 可写出一个或几个封闭的序列:

$$ij, jk, kl, lx, \dots, yp, pi \quad (13-2-13)$$

$$ij, ji, \dots, nm, mp, pn, \dots, qu, uq \quad (13-2-14)$$

这时 $I' = I + n - k$, 其中 n 是每项中因式的数目, k 是封闭序列的个数。

现在来研究(13—2—4), 它可写成

$$[I - C] X = D$$

或

$$A = I - C = \begin{pmatrix} 1 - c_{11} & -c_{12} & \dots & -c_{1n} \\ -c_{21} & 1 - c_{22} & \dots & -c_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ -c_{n1} & -c_{n2} & \dots & 1 - c_{nn} \end{pmatrix} \quad (13-2-15)$$

将(13—2—13)和(13—2—14)应用于(13—2—15), 并将含主对角线元素的项展开, 可得如下表达式

$$c_{ij}c_{jk}c_{kl}c_{lx}\dots c_{yp}c_{pi} \quad (13-2-16)$$

$$c_{ij}c_{ji}\dots 1\dots c_{nm}c_{mp}c_{ph}\dots c_{qu}c_{uq} \quad (13-2-17)$$

$$c_{ij}c_{ji}\dots c_{rr}\dots c_{nm}c_{mp}c_{pn}\dots c_{qu}c_{uq} \quad (13-2-18)$$

考虑到(13—2—15)中 c_{ij} 前面有负号, 故上述各式前的符号由 $(-1)^{I+I'+n}$ 决定, 即由

$$(-1)^{I+(I+n-k)+n} = (-1)^k$$

决定。(13—2—16)–(13—2—18)可看作是回路传输或是多阶回路的传输, 因为这些项中由若干序列组成, 每一个序列从一个节点号开始而终止于另一个节点号。若一项中包含多个这样序列的话, 各个序列间没有公共的节点, 故它们对应的回路互不接触, 构成多阶回路, 而 $(-1)^k$ 中的 k 正好是项中对应的回路的阶数。因此, 如果我们将(13—2—15)主对角元素乘积中的1取出, 再将所得各项重新整理, 就可得

$$\Delta = 1 - \sum p_{m1} + \sum p_{m2} - \sum p_{m3} + \dots$$

现在来研究 Δ_{ji} 。应用上述同样的分析方法，可知 Δ_{ji} 中包含如下形式的项

$$1 \cdot a_{ik} a_{k1} \dots a_{yp} a_{pi} \quad (13-2-19)$$

$$\text{及} \quad 1 \cdot a_{ij} \dots a_{nm} a_{mp} a_{pn} \dots a_{rr} \dots a_{qu} a_{uq} \quad (13-2-20)$$

由(13-2-15)知 Δ_{ji} 中含有如下项：

$$c_{ik} c_{k1} \dots c_{yp} c_{pi} \quad (13-2-21)$$

$$c_{ij} \dots c_{nm} c_{mp} c_{pn} \dots c_{rr} \dots c_{qu} c_{uq} \quad (13-2-22)$$

$$c_{ij} \dots c_{nm} c_{mp} c_{pn} \dots 1 \dots c_{qu} c_{uq} \quad (13-2-23)$$

(13-2-21) — (13-2-23) 包含一个自节点*j*至节点*i*的传输以及若干回路传输之积，而这些回路与该*j*至*i*之间的通路互不接触。再应用前面所得之符号规则，即证得

$$\Delta_{ji} = \sum_k p_k \Delta_k$$

于是Mason公式得证。

利用上述Mason公式计算 T_{ij} ，分子分母的计算要用两种不同的规则。从计算机计算程序简便统一这一角度出发，我们设法作一个简单的变化使我们能用统一的规则来计算 Δ 和 Δ_{ji} 。为此，我们在讯号流图中自节点 x_i 出发至节点 d_j 增设一个传输为 $-F$ 的支路。这样构成的讯号流图称为闭合讯号流图。对于这个闭合讯号流图，其行列式 Δ_c 可表为

$$\Delta_c = D + CF \quad (13-2-24)$$

上述新的传输支路的加入使得(13-2-4)中第*j*个方程由

$$x_j = c_{j1} x_1 + \dots + c_{ji} x_i + \dots + c_{jn} x_n + d_j$$

$$\text{加上条件} \quad d_j = -F x_i$$

而成为

$$x_j = c_{j1} x_1 + \dots + (c_{ji} - F) x_i + \dots + c_{jn} x_n$$

于是由(13-2-15)知与该闭合讯号流图对应的行列式为

$$\Delta_c = \begin{vmatrix} 1 - c_{11} & -c_{12} & \dots & -c_{1i} & \dots & -c_{1n} \\ -c_{21} & 1 - c_{22} & \dots & -c_{2i} & \dots & -c_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -c_{j1} & -c_{j2} & \dots & -c_{ji} + F & \dots & -c_{jn} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -c_{n1} & -c_{n2} & \dots & -c_{ni} & \dots & -c_{nn} \end{vmatrix}$$

$$= \begin{vmatrix} 1 - c_{11} & -c_{12} & \dots & -c_{1i} & \dots & -c_{1n} \\ -c_{21} & 1 - c_{22} & \dots & -c_{2i} & \dots & -c_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -c_{j1} & -c_{j2} & \dots & -c_{ji} & \dots & -c_{jn} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -c_{n1} & -c_{n2} & \dots & -c_{ni} & \dots & -c_{nn} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 1 - c_{11} & -c_{12} & \dots & 0 & \dots & -c_{1n} \\ -c_{21} & 1 - c_{22} & \dots & 0 & \dots & -c_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -c_{j1} & -c_{j2} & \dots & F & \dots & -c_{jn} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -c_{n1} & -c_{n2} & \dots & 0 & \dots & -c_{nn} \end{vmatrix} = \Delta + F\Delta_{ji} \quad (13-2-25)$$

比较 (13-2-24) 与 (13-2-25) 可知

$$\Delta = D$$

$$\Delta_{ji} = C$$

这样，我们求出了闭合讯号流图的行列式再经过整理即可求得 Δ 和 Δ_{ji} 并由此决定 T_{ji} 的符号表达式。

例 2.

对于图 13-2-4 所示讯号流图，由 x_4 至 x_0 加上一条传输为 $-F$ 的支路得到如图 13-2-5-a 所示闭合讯号流图。这个图除了含有图 13-2-4 (a) — (e) 的四个一阶回路和一

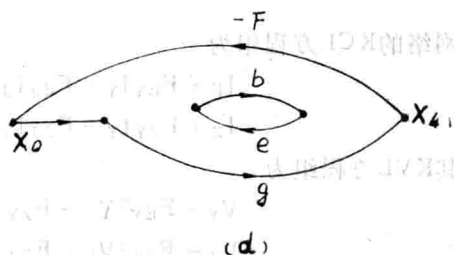
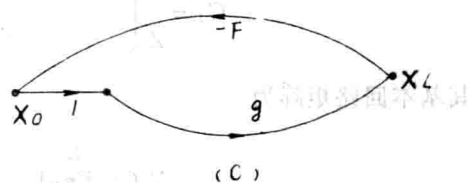
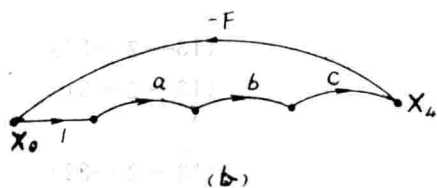
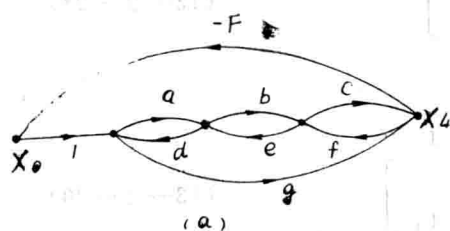


图 13-2-5

个二阶回路外，还有图13—2—5中b、c、d所示一阶及二阶回路，于是图13—2—5—a所示讯号流图的行列式为

$$\Delta_c = 1 - (ad + be + cf + defg) + adcf - abc(-F) - g(-F) + g(-F)be \\ = [1 - (ad + be + cf + defg) + adcf] + F[abc + g(1 - be)]$$

于是 $\Delta = 1 - (ad + be + cf + defg) + adcf$

$$\Delta_{40} = abc + g(1 - be)$$

$$\frac{x_4}{x_0} = \frac{\Delta_{40}}{\Delta} = \frac{abc + g(1 - be)}{1 - (ad + be + cf + defg) + adcf}$$

四、讯号流图的形成

由网络图形成对应的讯号流图，首先要决定选什么变量作为网络方程组的未知量，不同的未知量对应的讯号流图是不同的。下面介绍一种便于计算机程序形成的讯号流图，它是以网络的支路法方程组为基础形成的。

首先讨论不含受控源的RLC网络的运算等效电路。设网络内不含纯电压源回路和纯电流源割集，于是我们可以选择一个树，使之包含全部独立电压源而不包含任何独立电流源。这时我们将支路分为如下四类：

E —— 树独立电压源，

Z —— 树阻抗支路，

Y —— 链导纳支路，

J —— 链独立电流源。

设网络的基本割集矩阵为

$$C_f = \begin{bmatrix} E & Z & Y & J \\ I_E & & F_{EY} & F_{EJ} \\ & I_Z & F_{ZY} & F_{ZJ} \end{bmatrix} \quad (13-2-28)$$

其基本回路矩阵为

$$B_f = \begin{bmatrix} E & Z & Y & J \\ Y & -F_{EY}^T & -F_{ZY}^T & I_Y \\ J & -F_{EJ}^T & -F_{ZJ}^T & I_J \end{bmatrix} \quad (13-2-29)$$

网络的KCL方程组为

$$I_E + F_{EY}I_Y + F_{EJ}I_J = 0 \quad (13-2-30)$$

$$I_Z + F_{ZY}I_Y + F_{ZJ}I_J = 0 \quad (13-2-31)$$

其KVL方程组为

$$V_Y - F_{EY}^T V_E - F_{ZY}^T V_Z = 0 \quad (13-2-32)$$

$$V_J - F_{EJ}^T V_E - F_{ZJ}^T V_Z = 0 \quad (13-2-33)$$

网络的支路特性方程组为

$$V_E = E \quad (13-2-34)$$

$$I_J = J \quad (13-2-35)$$

$$V_Z = Z I_Z \quad (13-2-36)$$

$$I_Y = Y V_Y \quad (13-2-37)$$

将 (13-2-31) 及 (13-2-35) 代入 (13-2-36) 得

$$V_Z = Z(-F_{ZY} I_Y - F_{ZJ} I_J) = -Z F_{ZY} I_Y - Z F_{ZJ} J \quad (13-2-38)$$

将 (13-2-32) 及 (13-2-34) 代入 (13-2-37) 得

$$I_Y = Y(F_{EY}^T V_E + F_{ZY}^T V_Z) = Y F_{EY}^T E + Y F_{ZY}^T V_Z \quad (13-2-39)$$

将 (13-2-35) 代入 (13-2-30), 将 (13-2-34) 代入 (13-2-32), 得

$$I_E = -F_{EY} I_Y - F_{EJ} J \quad (13-2-40)$$

$$V_J = F_{EJ}^T E + F_{ZJ}^T V_Z \quad (13-2-41)$$

由 (13-2-38) - (13-2-41) 可画出相应的讯号流示意图如图13-2-6所示。

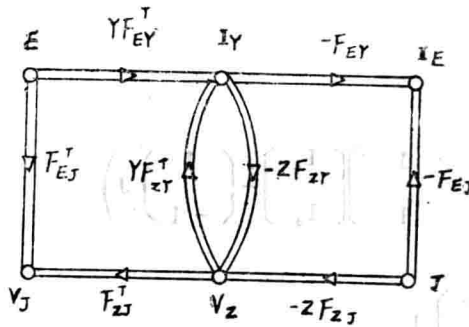


图13-2-6

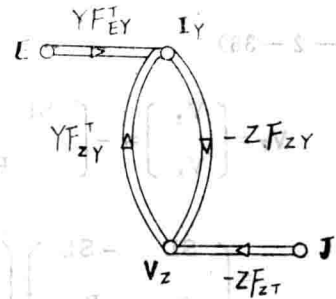


图13-2-7

在图13-2-6中, V_J 和 I_E 为沟节点, 去掉这两组节点不影响其他节点变量的计算, 因而实际上对于RLC网络, 只要由 (13-2-38) 和 (13-2-39) 构成如图13-2-7的讯号流示意图即可。

例3.

如图13-2-8-a所示网络, 其网络线图如图13-2-8-b所示。选 b_1 、 b_2 、 b_3 为树支路, 则

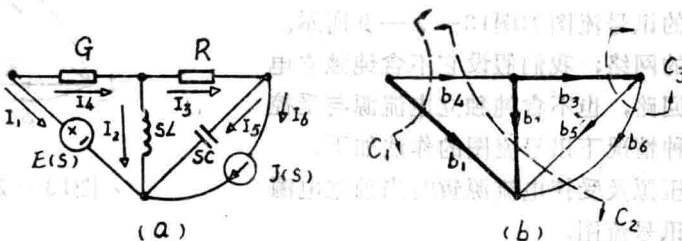


图13-2-8

$$C_f = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & & & 1 & & \\ & 1 & & -1 & 1 & 1 \\ & & 1 & & -1 & -1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

于是

$$F_{EY} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$F_{EJ} = 0$$

$$F_{ZY} = \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$F_{ZJ} = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}$$

由 (13-2-38)

$$\begin{aligned} V_z = \begin{bmatrix} V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} &= - \begin{bmatrix} SL & \\ & R \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} -1 & 1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_4 \\ I_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} J \right) \\ &= \begin{bmatrix} SL & -SL \\ 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_4 \\ I_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -SL \\ R \end{bmatrix} J \end{aligned}$$

由 (13-2-39)

$$\begin{aligned} I_Y = \begin{bmatrix} I_4 \\ I_5 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} G & \\ & SC \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} E \right) \\ &= \begin{bmatrix} -G & 0 \\ SC & -SC \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G \\ 0 \end{bmatrix} E \end{aligned}$$

由此可画出该网络的讯号流图如图13-2-9所示。

对于含受控源的电路，我们假设它不含纯独立电压源及受控电压源回路，也不含纯独立电流源与受控电流源割集。在这种情况下讯号流图的作法如下。

1. 将受控电压源及受控电流源暂时当独立电源处理，作出相应的讯号流图。

2. 如果受控源的控制变量或所求的输出变量不是树支路电压或链支路电流，则由

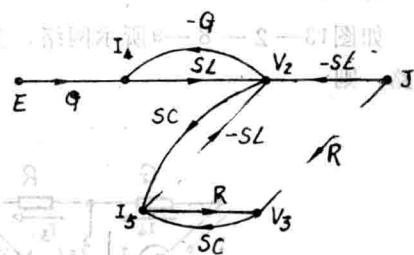


图13-2-9

KVL或KCL方程组将它们表为树支路电压或链支路电流的线性组合，並作出讯号流图的相应支路。

3. 将所有受控源的特性方程在讯号流图上表出。

例4.

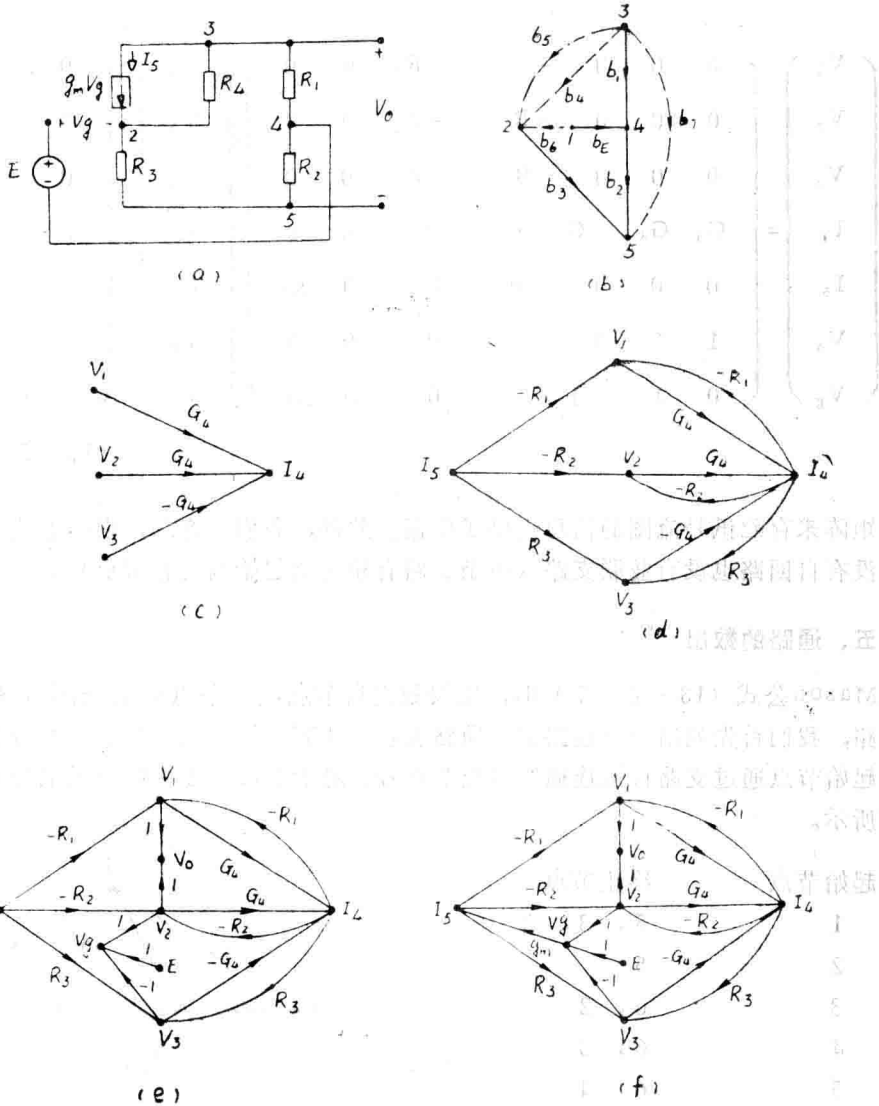


图13—2—10

如图13—2—10—*a*所示网络，其网络线图如图13—2—10—*b*所示，其中 b_E (电压源支路) 和 $b_1 \sim b_3$ 选为树支路，其余为链支路， b_4 为 R_4 支路， b_5 为 $g_m V_g$ 支路 (我们暂设其电

为 I_5), b_6 , b_7 是与受控源控制电压 v_5 及网络输出电压 v_0 相对应的开路支路。

链支路 b_4 的电流与树支路电压的关系由图13—2—10—c表示。树支路电压 v_1 、 v_2 、 v_3 与链支路电流 I_4 及 I_5 的关系示于图13—2—10—d中。输出电压 v_0 及控制电压 v_5 与树支路电压 v_1 、 v_2 、 v_3 及 E 的关系示于图13—2—10—e中。最后,在图13—2—10—f中加上了受控源的特性方程 $I_5 = g_m v_g$ 。

我们注意到,图13—2—10—f的讯号流图是下述方程组的图形表示:

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ V_0 \\ V_g \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & -R_1 & -R_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -R_2 & -R_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_3 & R_3 & 0 & 0 \\ G_4 & G_4 & -G_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & g_m \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ V_0 \\ V_g \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} E \quad (13-2-42)$$

这就为用矩阵来存贮讯号流图的信息提供了依据。此外,我们注意到,根据上述方法作出的讯号流图没有自回路也没有并联支路(两条支路有相同的起始与终止节点)。

五、通路的数出

在用Mason公式(13—2—7)时,需要数出自节点 x_i 至节点 x_i 的全部通路。为了列出这些通路,我们首先列出一个通路表。通路表包含两列,第一列中为某起始节点号,第二列中为该起始节点通过支路直接连通的终止节点号。对于图13—2—11所示讯号流图,其通路表如下所示。

起始节点	终止节点
1	5, 3, 2
2	5
3	6, 2
4	6, 3
5	6, 4

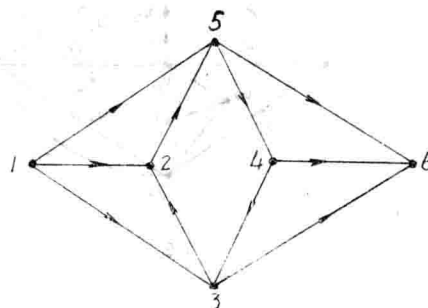


图13—2—11

实际上,如果我们象(13—2—42)那样写出讯号流图对应的方程组的矩阵表示式,则从其各列对应的非零元素的行标直接得到上述通路表的第二列元素。

如果我们要找到自节点I至节点J的全部通路，则可用以下方法进行：

从节点I出发，由通路表找到与I直接相连的最高节点号。每得到一个节点号，按以下规则进行下一步搜索：

1. 若该节点为J，则已找到一条通路。记下该通路，然后应用规则4。
2. 若该节点不是J，且在目前这条通路中是第一次出现，则继续从这个节点经未走过的支路进入一个最大号的节点，如果后者不存在，应用规则4。
3. 若该节点不是J，且在目前这条通路中是第二次出现，则应用规则4。
4. 从目前这条支路返回到上一个节点，然后依一条新的支路通向一个新的次大号节点。如果这样的支路不存在，则继续按照上法向后返回并搜索新的节点。如果最终自与I直接相连的最低号节点返回I，表明自I出发的所有通到J的通路已搜索完毕。

例5.

找出图13—2—11自节点1至节点6的全部通路。

首先从节点1找到节点5，由节点5找到节点6，得到第一条通路 P_1 。然后应用规则4，由节点6返回节点5，再由节点5找到节点4，由节点4找到节点6得到第二条通路。再应用规则4，由节点4找到节点3，由节点3找到节点6得到第3条通路。再应用规则4，由节点6返回节点3，由节点3找到节点2，由节点2找到节点5。由于节点5已是第二次出现，故应用规则4由节点5返回节点2，再返回节点3、4、5、1，再从节点1找到节点3，到节点6得到第四条通路，这样搜索的结果一共可得到如下九条通路：

P_1	1	5	6			
P_2	1	5	4	6		
P_3	1	5	4	3	6	
P_4	1	3	6			
P_5	1	3	2	5	6	
P_6	1	3	2	5	4	6
P_7	1	2	5	6		
P_8	1	2	5	4	6	
P_9	1	2	5	4	3	6

图13—2—12显示了上述通路的搜索过程，其中F表示自该点向下搜索失败，返回上面的节点开始新的支路搜索。

按照上述规则数出全部通路的算法如下，算法中所用的符号的意义为：

- I：通路的起始节点，
L：通路的终止节点，