中央广播电视大学电气工程
新技术继续教育用书

网络分析与综合导论学习指导

陈天麒　黄香馥　李西平
合　编

中　国　铁　道　出　版　社

内容提要

本书是中央广播电视大学“电气工程新技术继续教育”教材《网络分析与综合导论》的配套学习指导书；是辅导教师贯彻本课程的依据，同时又是自学者学习本课程的参考书。各章由基本要求、基本内容和例题分析与解答三部分组成，基本概念与论述立论清晰、层次分明，对培养初学者分析问题的能力是大有俾益的。

中央广播电视大学电气工程新技术继续教育用书
网络分析与综合导论学习指导
陈天麒　黄香馥　李西平　合编
中国铁道出版社出版、发行
中国铁道出版社印刷厂印
开本：787×1092毫米 1/32　印张：11.75　字数：268 千
1989年4月　第1版　第1次印刷
印数：0001—5000册　定价：3.00 元

前　言

本书是中央广播电视大学“电气工程新技术继续教育”教材《网络分析与综合导论》的配套学习指导书，是辅导教师贯彻本课程的教学要求和组织辅导课的依据，同时又是自学者学习本课程的主要参考书。

本书的编排顺序与教材相符，各章由基本要求、基本内容和例题分析与解答三部份组成。基本要求是为读者提供各章应掌握的程度的标准。基本内容将各章的基本概念和论述概括归纳，力求立论清晰、层次分明。例题分析与解答着力于讲清解题步骤，引导初学者建立解题思路和掌握解题方法，这对培养初学者分析问题的能力是大有俾益的。

由于时间仓促，误漏和欠妥之处在所难免，恳请读者指正。

编　者

1988.8

目　　录

第一章　导　论

一、　基 本 要 求

电网络是由有限个相互连接的元件组成的。学习电网络理论，首先要了解电网络元件的特性和数学模型，从而了解电网络的整体性能。本章介绍网络元件和网络的基本概念和特性。要求掌握的基本内容是：

1）电阻、电容、电感、互感元件等集总元件的特性和模型；

2）独立源和受控源的特性和模型；

3）晶体管和运算放大器的特性和理想模型；

4）奇异元件零子和不定子的特性，它们在网络分析与综合中的作用；

5）网络的分类：线性与非线性，时变与非时变，有源与无源等概念的定义和数学描述。

二、基 本 内 容

为了复习的方便，现将本章的基本内容和重要结论归纳如下：

1）电阻器、电容器、电感器和理想变压器的特性和数学描述

i）电阻器

电阻器代表网络中的损耗元件（它消耗信号功率）。它的特性可用它的电压（v）和电流（i）的关系来描述。其一般函数关系为

$$i = f(v) \qquad 或 \qquad v = g(i) \tag{1—1}$$

如果电阻器的 v - i 特性是通过 v - i 平面原点的一条直线，则此电阻器是线性的。式（1—1）可表示为

$$i = Gv \qquad 或 \qquad v = Ri \tag{1—2}$$

式中 G 和 R 是常数，G 和 R 分别是电阻器的电导和电阻。

ii）电容器

电容器是一个储能元件，它只储存而不消耗信号功率。它的特性可用其两端电压（v）与其电荷（q）的函数来描述：

$$q = f(v) \qquad 或 \qquad v = \psi(q) \tag{1—3}$$

如果电容器的特性是通过 $v = q$ 平面原点的一条直线，则此电容器是线性的。式（1—3）的函数可表示为

$$q = Cv \tag{1—4}$$

式中 C 是一个常数，称为电容器的电容。

在线性电容器中，电流 i 与电荷 q 或电压 v 的关系为

$$i = \frac{dq}{dt} = C\frac{dv}{dt} \tag{1—5}$$

线性电容器中的储存的电能可用下式计算：

$$w(t) = \frac{1}{2}\frac{q^2(t)}{C} = \frac{1}{2}Cv^2(t) \tag{1—6}$$

iii）电感器

电感器是一个储能元件，它只储存而不消耗信号能量。它的电流 i 与磁通 ϕ 的关系一般可表示为

$$\phi = f(i) \quad 或\ i = \psi(\phi) \tag{1—7}$$

如果电感器的 i -ϕ 特性是通过 i -ϕ 平面原点的一条直线，则此电感是线性的。式（1—7）可表示为

$$\phi = Li \tag{1—8}$$

式中 L 是一个常数，它是电感器的电感。对于一个线性电感

器来说，其两端电压 v 与磁通 ϕ 或电流 i 的关系为

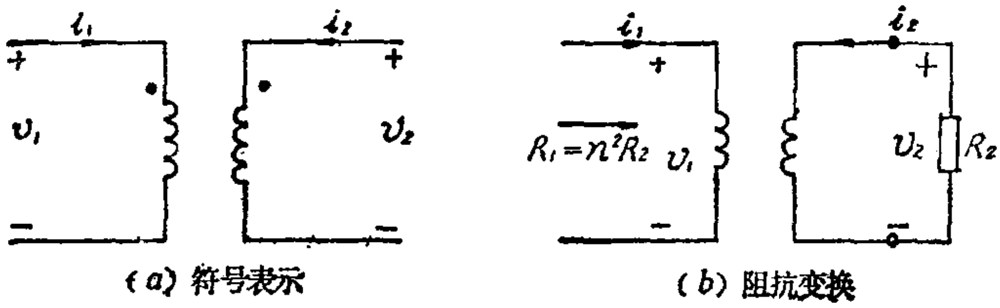
$$v=\frac{d\phi(t)}{dt}=L\frac{di}{dt} \qquad (1-9)$$

线性电感器中储存的磁能可用下式计算：

$$W(t)=\frac{1}{2}\frac{\phi^2(t)}{L}=\frac{1}{2}Li^2(t) \qquad (1-10)$$

iv）理想变压器

变压器是常用的四端元件，理想变压器是变压器的理想模型，它的符号表示如图 1 — 1 所示。



（a）符号表示　　　（b）阻抗变换

图 1 — 1　理想变压器

理想变压器具有下列 $v-i$ 关系：

$$\left.\begin{aligned} v_1&=nv_2 \\ i_2&=-ni_1 \end{aligned}\right\} \qquad (1-11)$$

式中 n 是初级和次级线圈的匝数比，上式的矩阵形式为

$$\begin{pmatrix} v_1 \\ i_2 \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} 0 & n \\ -n & 0 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} i_1 \\ v_2 \end{pmatrix} \qquad (1-12)$$

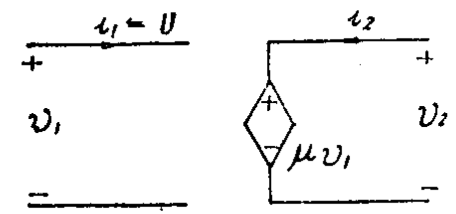
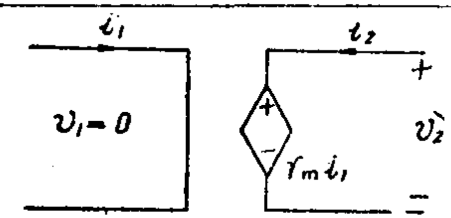
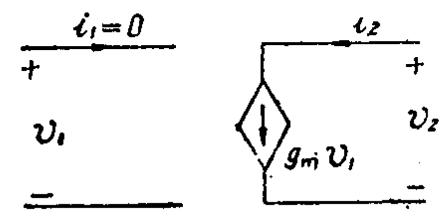
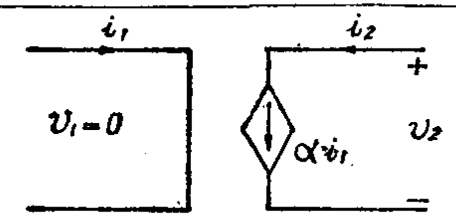
2）受控电源

受控电源是有源网络的基本元件，它是有源器件，如晶体管和运算放大器等的理想模型。四种可能的受控源的符号和电压-电流关系如表 1 — 1 所示。

3）奇异元件与晶体管及运算放大器理想模型

在网络理论中，为了分析与综合的方便，常常引入两个

表1—1　四种受控电源符号和u-i关系

器　　件	符　　号	n-i关系
电压控制电压源 (VCVS)	VCVC 	$\begin{pmatrix} i_1 \\ v_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ \mu & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ i_2 \end{pmatrix}$
电流控制电压源 (CCVS)	CCVS 	$\begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ r_m & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \end{pmatrix}$
电压控制电流源 (VCCS)	VCCS 	$\begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ g_m & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \end{pmatrix}$
电流控制电流源 (CCCS)	CCCS 	$\begin{pmatrix} v_1 \\ i_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ \alpha & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_1 \\ v_2 \end{pmatrix}$

奇异（病态）二端元件，分别称为零子（nullator）和不定子（norator），它们的符号和定义如图 1 — 2 所示。

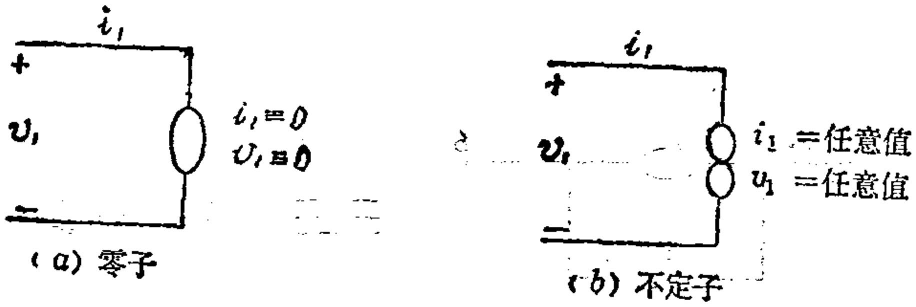


图 1 — 2　零子和不定子的符号和定义

零子同时具有开路（$i_1\equiv 0$）和短路（$v_1\equiv 0$）特性；不定子的电流i_1和电压v_1可为任意值，即它们的端电压和通过它的电流值取决于外接电路。

由零子和不定子的特性，我们可得出下列等效关系（图 1 — 3）。

利用零子和不定子可将双极晶体管（BJT），场效管（FET）和运算放大器的理想等效模型表示出来，如图 1 — 4 所示。

4）网络的分类

i）线性和非线性网络

一个网络如果满足叠加原理，则它是线性的，否则它就是非线性的。在数学上，线性网络的定义如下：

设某个网络的输入x_i与输出y_i的函数为

$$F(x_i)=y_i \tag{1—13}$$

则此网络为线性网络的必要而充分的条件是：

$$\begin{aligned}F(a_1x_1+a_2x_2)&=a_1F(x_1)+a_2F(x_2)\\&=a_1y_1+a_2y_2\end{aligned} \tag{1—14}$$

式中a_1和a_2是任意常数，而x_1和x_2是任意的两个许可的输入。如果式（1 — 14）成立，则可判断网络是线性的。否则，该网络是非线性的。

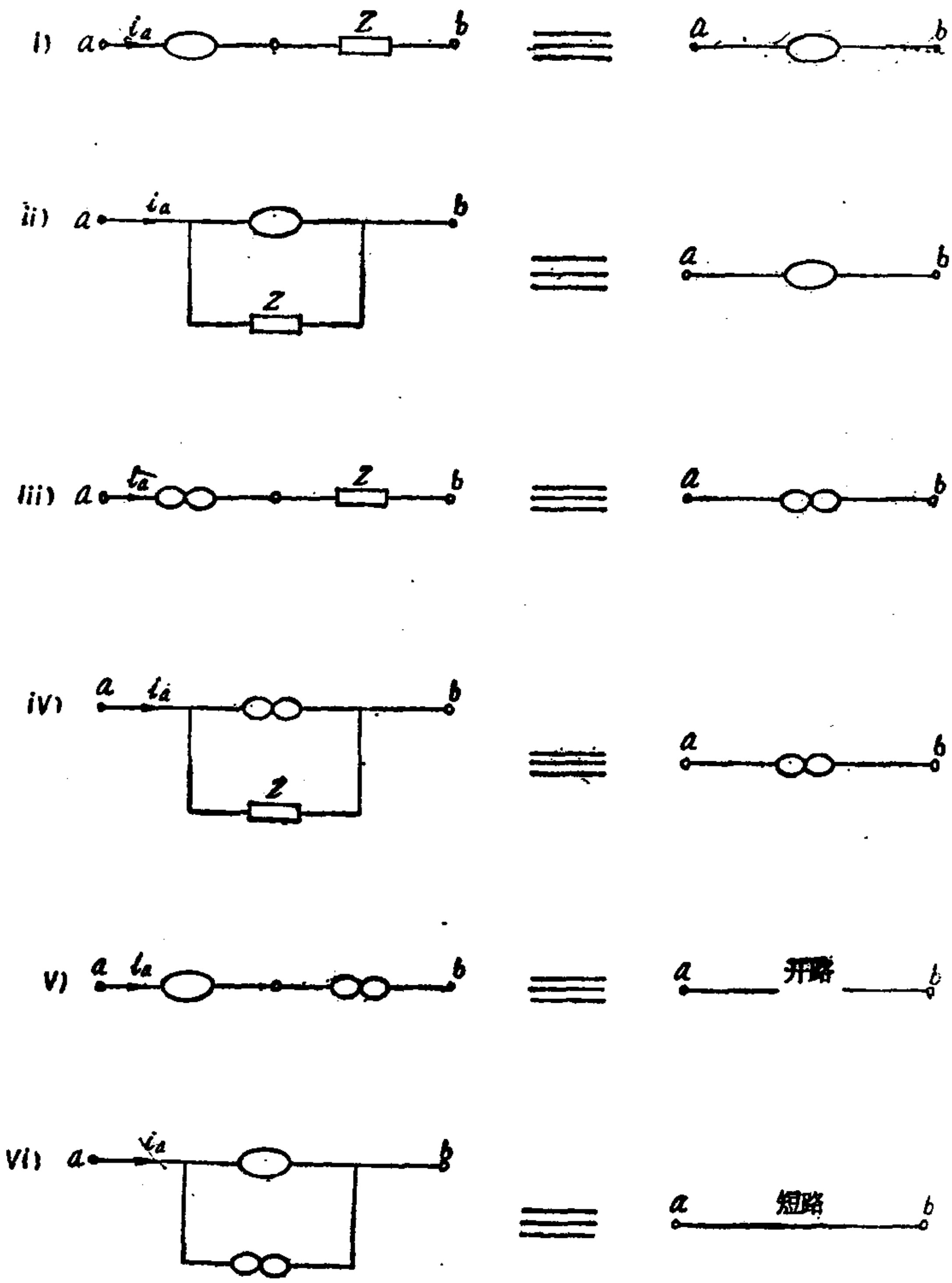


图1—8　奇异元件的等效关系

ii）时变和时不变

一个时不变网络可用常系数方程式来描述，而时变网络方程式的系数则是时变的。在数学上可将时不变性质表

述如下：

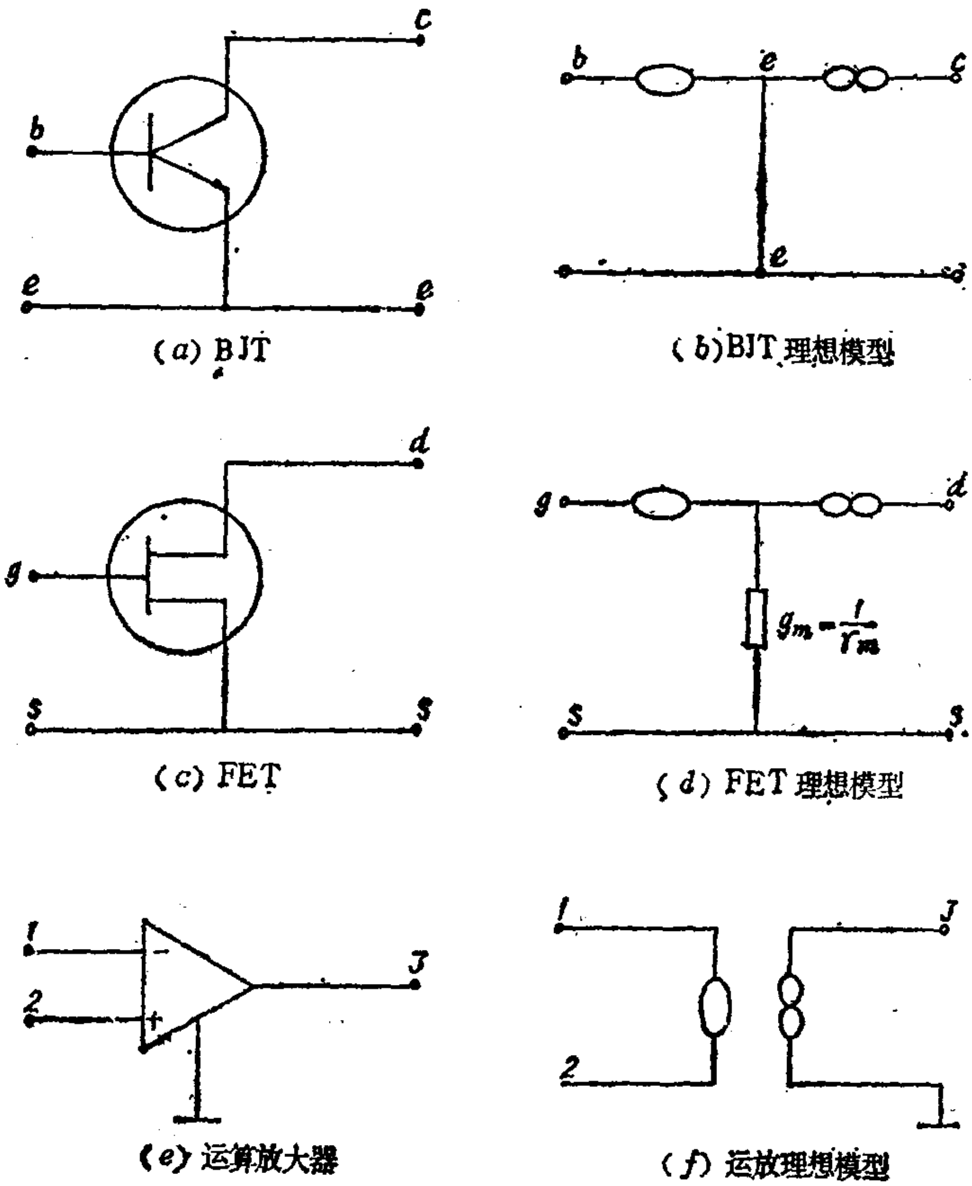


图1—4　双极晶体管（BJT），场效应管（FET）和运放的理想等效模型

设网络的响应$y(t)$与激励$x(t)$的关系为

$$F[x(t)]=y(t) \tag{1—15}$$

如果对所有$x(t)$和所有$t_0>0$，都有

$$F[x(t-t_0)]=y(t-t_0) \tag{1—16}$$

则该网络是时不变的。这就是说，对时不变网络而言，响应

$y(t)$只与激励$x(t)$的形状有关，而与激励加入的时间无关。例如由线性电阻器，线性电容器和线性电感器等元件组成的网络是时不变网络。

iii）有源与无源网络以及无耗网络

如果输入网络的能量大于或等于网络的输出能量，则该网络是无源的，否则网络就是有源的。无源网络不具有功率放大的能力，它对输入功率只产生损耗，至多是无损耗地传送输入功率。由R，L，C等线性元件组成的网络是无源网络的一个例子。

在数学上对n口网络无源性的定义如下：

令$v_K(t)$和$i_K(t)$代表网络端口K的电压和电流，于是输送到n口网络的总能量为

$$W(t,t_0)=\int_{t_0}^{t}\sum_{K=1}^{n}v_K(\tau)i_K(\tau)\mathrm{d}\tau \tag{1—17}$$

一个n口网络为无源网络的必要而充分的条件是，对所有t和t_0以及对所有的$v_K(t)$和$i_K(t)$都有

$$W(t,t_0)+E(t_0)\geqslant 0 \tag{1—18}$$

式中$E(t_0)$是网络在t_0时刻的初始能量。当$t_0=-\infty$时，$E(-\infty)=0$，即$t_0=-\infty$时网络不可能有储能。

式（1—18）就是判断网络无源性的能量准则。

为了从无源性定义导出无耗性的定义，要求网络端口电压$v(t)$和端口电流$i(t)$是平方可积的，即

$$\int_{-\infty}^{\infty}v^2(t)\mathrm{d}t<\infty \tag{1—19}$$

$$\int_{-\infty}^{\infty}i^2(t)\mathrm{d}t<\infty \tag{1—20}$$

实际上，这意味着

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

(1 —21)

上式表明网络在$t=-\infty$时没有任何初始储能，在 $t=\infty$时也没有任何剩余能量。

在这些条件下，网络无耗性定义如下：一个 n 口网络为**无耗网络的必要而充分条件是，对所有平方可积的 $v_k(t)$ 和 $i_k(t)$，都有**

$$W(\infty)=\sum_{k=1}\int_{-\infty}^{\infty} v_k(t)i_k(t)\mathrm{d}t=0$$

(1 —22)

由L、C储能元件构成的网络满足无耗性条件，它是无耗网络。

三、例题分析与解答

下面列举一些例题，以使读者较好地掌握上面介绍的基本内容。这些例题包括网络元件性质，奇异元件的运用，网络的分类判别等方面的问题。

【例 1 — 1】 推导表 1 — 1 中电流控制电压源(CCVS)和电压控制电流源（VCCS）的 $v-i$ 关系。

【解】 因为受控源是四端元件，它的 $v-i$ 关系由控制（输入）支路和受控（输出）支路的 $v-i$ 关系组成。分别写出这些关系，然后将它们表成矩阵形式就可求得所需的方程。

i）CCVS

CCVS的符号表示如图 1 — 5 所示：

由图 1 — 5 可见，在控制支路中，我们有

$$v_1=0=0\times i_1+0\times i_2$$

在受控支路中，可得出

$$v_2 = r_m i_1 + 0 \times i_2$$

将上两式表成矩阵形式，就可得出CCVS的 v－i 的关系为

$$\begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ r_m & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \end{pmatrix}$$

注意，对于CCVS，因为受控电源为$r_m i_1$，所以只能选择i_1，i_2作独立变量。

ii）VCCS

VCCS的符号表示如图1—6所示：

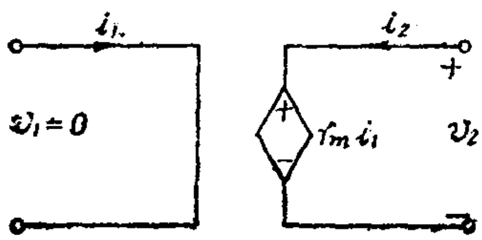


图1—5　CCVS电路

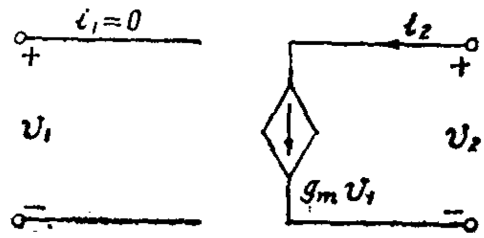


图1—6　VCCS电路

同样我们写出两支路的 v－i 方程如下：

$$i_1 = 0 = 0 \times v_1 + 0 \times v_2 \qquad \text{(控制支路)}$$

$$i_2 = g_m v_1 + 0 \times v_2 \qquad \text{(受控支路)}$$

将上两式写成矩阵形式，可得

$$\begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ g_m & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \end{pmatrix}$$

对于VCCS，受控电流源为$g_m v_1$，我们只能选v_1，v_2作为独立变量。

【例1—2】 证明图1—7中零子和不定子支路的等效关系。

【解】 在支路I）中，零子与不定子串联。由零子和不定子的定义可知，支路ab中的电流$I_a = 0$，而$V_{ab} \neq 0$，因此支路ab相当于开路。

在支路Ⅱ）中，零子与不定子并联。由定义可知，零子两端电压$V_{ab}=0$，而流过不定子的电流为任意值，即I_a可为任意值，因此支路ab相当于短路。

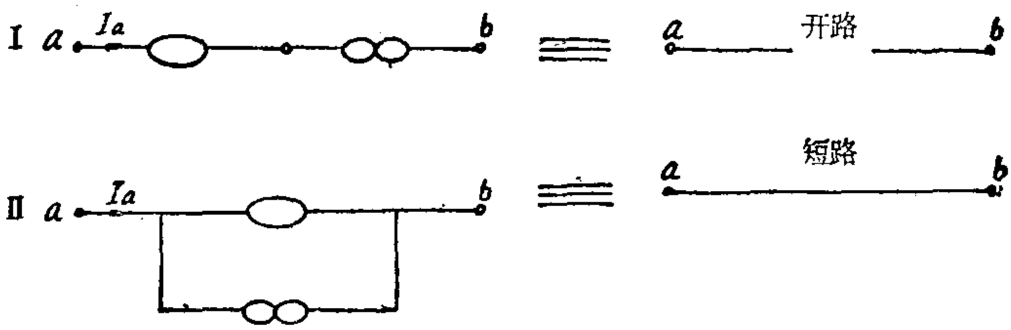


图1－7　零子不定子支路的等效关系

【例1—3】图1－8代表达林顿晶体管对、试绘出它的零子和不定子等效电路图,并求出R_1和R_2的电流和它们的端电压。

【解】根据图1－4中晶体管（BJT）的零子和不定子等效电路可绘出图1－8的等效电路如下：

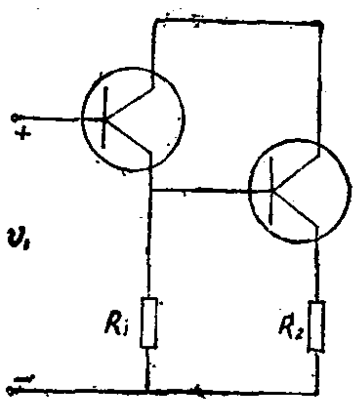


图1－8　达林顿晶体管对

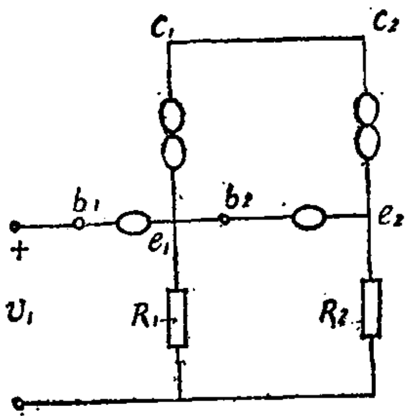


图1－9　达林顿晶体管对的零子和不定子等效电路

由零子定义知，b_1和e_1之间电压为零，e_1和e_2之间电压为零。因此R_1和R_2上的端电压均等于输入电压v_i。由此可求出通过R_1的电流为$I_{R_1}=v_i/R_1$，通过R_2的电流

$I_R = v_1/R_2$。

【例 1—4】一个系统的输出$y(t)$与输入$x(t)$的关系为$y(t)=[x(t)]^3$，此系统是线性的吗？是时不变的吗？为什么？

【解】因为$y(t)=[x(t)]^3$是非线性函数，不服从式(1—14)的叠加原理，即

$$[a_1x_1(t)+a_2x_2(t)]^3=a_1^3x_1^3(t)+a_2^3x_2^3(t)+3a_1^2a_2x_1^2(t)x_2(t)+3a_1a_2^2x_1(t)x_2^2(t)\neq a_1y_1(t)+a_2y_2(t)=a_1x_1^3(t)+a_2x_2^3(t)$$

因此，此系统是非线性的。

另一方面，由于$y(t)=[x(t)]^3$是常系数方程式，对于所有$x(t)$和t_0，它满足$y(t-t_0)=[x(t-t_0)]^3$，因此此系统是时不变的。

【例 1—5】检验图 1—10所示的单口网络是否为线性网络？

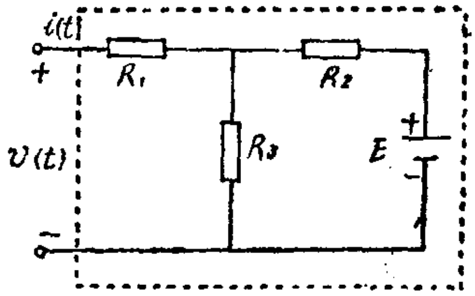


图 1—10　含独立电源的单口网络

【解】首先列出图 1—10端口电压$v(t)$与端口电流$i(t)$的方程式，容易求得

$$v(t)=(R_1+\frac{R_2R_3}{R_2+R_3})i(t)+\frac{ER_3}{R_2+R_3}$$

其次，我们用叠加原理检验此网络是否为线性。为此设两个激励电流$i(t)=1\text{A}$，$i_2(t)=1\text{A}$，同时为了简单起见，又设$a_1=a_2=1$，于是与激励$i(t)$和$i_2(t)$相对应的响应$v_1(t)$和$v_2(t)$可由上式求得为