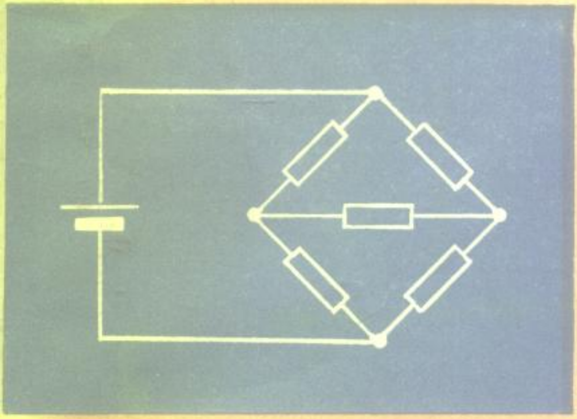
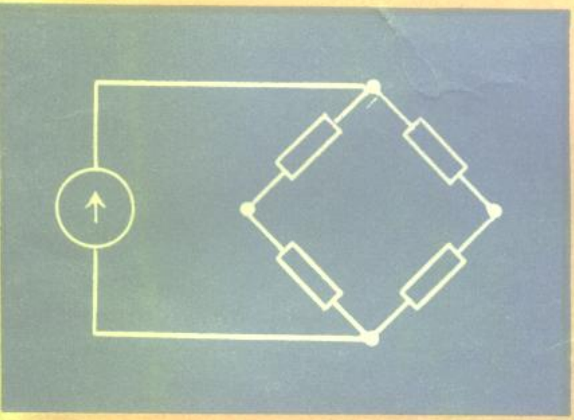
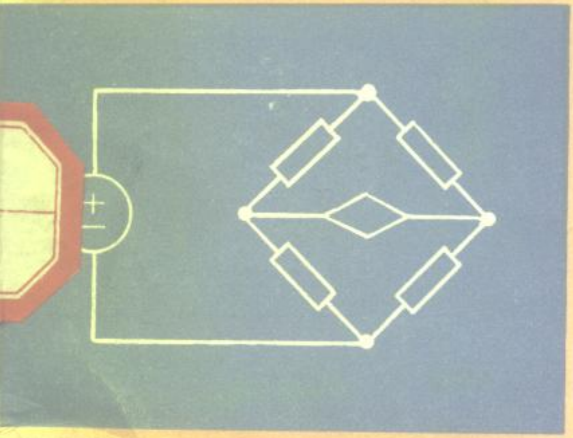






电路原理

周孔章 编

下册

高等教育出版社

高等学校函授教材
(兼作高等教育自学用书)

电 路 原 理

下 册

周孔章 编

高等教育出版社

内 容 简 介

本书是根据1981年12月审订的《高等工业学校电工原理函授教学大纲》(草案)编写的，作为高等工业学校函授教材，供电力、自动化类专业函授使用。

本书分上、下两册出版，上册包括八章，即电路的基本概念和基本定律、简单电路的分析、网络分析的一般方法、简单非线性电阻电路的分析、正弦交流电路和相量法、互感与谐振、三相电路、非正弦周期电流电路和信号的频谱。下册包括六章，即双口网络、网络图论、线性电路的时域分析、线性电路的复频域分析、网络分析的状态变量法、分布参数电路。

本书各章开头均有内容提要、学习要求，章末有小结。节后一般都配有习题或思考题，章后有总习题，书末有习题答案。此外，全书还配有阶段测验题。

(京)112号

高等学校函授教材
(兼作高等教育自学用书)

电 路 原 理

下 册

周孔章 编

高等教育出版社出版
新华书店北京发行所发行
河北省香河县印刷厂印装

开本 850×1168 1/32 印张 13.625 字数 329 000
1984年8月第1版 1992年8月第9次印刷
印数48 571—52 781
ISBN7-04-000483-6/TM·31
定价 4.25 元

目　录

第九章 双口网络

本章的主要内容有：1. 双口网络的方程和参数；2. 双口网络的等效电路；3. 双口网络的级联；4. 具有端接的双口网络；5. 网络函数；6. 运算放大器与回转器。

通过学习，要求：

1. 充分理解双口网络各种参数的物理意义，并能依此计算一般网络和较简单的含受控源电路的各种参数。

2. 会进行双口网络各种参数之间的换算。

3. 当几个双口网络级联时，会对复合的双口网络进行分析。

4. 了解特性复阻抗、传播常数、相位常数、衰减常数和奈培、分贝的意义。

5. 了解网络函数的意义。会计算有端接的双口网络的输入复阻抗和输出复阻抗。

6. 会对含有理想运算放大器的简单电路进行分析。

7. 对回转器有一定的了解。

§9-1 双口网络及其端口条件

第三章中曾经指出，二端网络又叫单口网络。一个电路不论怎样复杂，如果它只通过两个端钮与外部电路相联接，则对外部电路而言，就是一个单口网络，它可以用一个单口框图来代替。在这种情况下，它内部的工作状态不是我们所感兴趣的，而我们关心的只是它两个端钮间的电压以及从它的一个端钮流入并从另一个端

钮流出的电流。因为两个端钮间只有一个电压，而从一个端钮流入的电流必然等于从另一个端钮流出的电流，所以这样一对端钮叫做一个端口。因此，二端网络又叫做单口网络。如果一个网络具有两个端口，通常其中一个端口是接向电源的，叫做输入端口或入口；另外一个端口是接到负载的，叫做输出端口或出口。或者说，一个网络通过两个端口与外部电路相联系，在入口提供激励，而在出口产生响应。当我们只研究响应与激励之间的关系时，就可以把这两个端口之间的网络用一个方框括起来（不管方框内的网络是简单的还是复杂的），把它叫做双口网络，如图 9-1 所示。

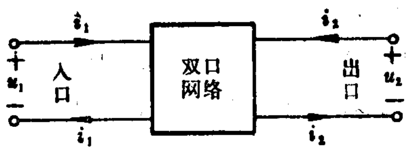


图 9-1　双口网络

必须注意双口网络与四端网络之间的区别。显然，对于一个双口网络，在任一端口上，由一端钮流入的电流必然等于同一端口上从另一端钮流出的电流，这叫做双口网络的端口条件。而对于一个四端网络，四个端钮可与外部电路任意联接，当然就没有上述的条件限制。因此，双口网络是四端网络的一种特殊情况。

本章所讨论的双口网络，其内部没有独立电源，而且所有元件（电阻、电感、电容、变压器及受控源）都是线性的。

习惯上，总是以电路图左边的端口作为入口，右边的端口作为出口。双口网络的入口电压 u_1、出口电压 u_2 和入口电流 i_1、出口电流 i_2 之间的关系，可以用一些参数来表示，这些参数的数值既与组成网络的元件的参数和网络本身的结构有关，也与在 u_1、i_1、u_2、i_2 四个变量中选取哪两个作为自变量有关。因为在 u_1、i_1、u_2、i_2 四个变量中，任选其中两个作为自变量（即已知量），另外两个作

为因变量(即待求量), 共有六种可能①, 所以可以有六种不同的参数来表征双口网络。下面, 我们将分别来讨论这六种参数。

§9-2 双口网络的参数

1. 短路复导纳参数

假设双口网络是由正弦信号激励的, 现在已知它两个端口的电压相量 $\dot{U}_1$ 和 $\dot{U}_2$, 要求出它两个端口的电流相量 $\dot{I}_1$ 和 $\dot{I}_2$。电压相量的参考极性和电流相量的参考方向如图 9-2 所示。

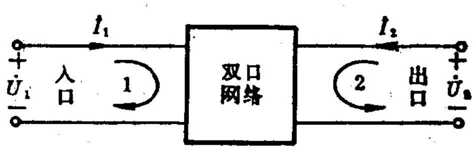


图 9-2 在正弦信号激励下的双口网络

我们应用回路电流法对这个电路进行分析。取回路 1、2 如图中所示, 使得回路 1 的电流相量就是入口电流相量 $\dot{I}_1$, 回路 2 的电流相量就是出口电流相量 $\dot{I}_2$, 当网络内部既无独立电源、也无受控电源时, 可得回路方程组如下(设独立回路数为 l):

$$
\begin{aligned}
&Z_{11}\dot{I}_1+Z_{12}\dot{I}_2+\cdots+Z_{1l}\dot{I}_l=\dot{U}_1\\
&Z_{21}\dot{I}_1+Z_{22}\dot{I}_2+\cdots+Z_{2l}\dot{I}_l=\dot{U}_2\\
&Z_{31}\dot{I}_1+Z_{32}\dot{I}_2+\cdots+Z_{3l}\dot{I}_l=0\\
&\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\\
&Z_{l1}\dot{I}_1+Z_{l2}\dot{I}_2+\cdots+Z_{ll}\dot{I}_l=0
\end{aligned}
$$

式中, 除回路 1 和回路 2 外, 其余所有回路的回路电动势相量都等于零。由上式解出

---

① 按组合公式, $C_4^2=\frac{4!}{2!2!}=6$。

$$\left.\begin{aligned}\dot{I}_1&=\frac{\Delta_{11}}{\Delta}\dot{U}_1+\frac{\Delta_{21}}{\Delta}\dot{U}_2=Y_{11}\dot{U}_1+Y_{12}\dot{U}_2\\ \dot{I}_2&=\frac{\Delta_{12}}{\Delta}\dot{U}_1+\frac{\Delta_{22}}{\Delta}\dot{U}_2=Y_{21}\dot{U}_1+Y_{22}\dot{U}_2\end{aligned}\right\}\qquad(9\text{-}1)$$

其中

$$\Delta=\begin{vmatrix}Z_{11}&Z_{12}&\cdots&Z_{1l}\\Z_{21}&Z_{22}&\cdots&Z_{2l}\\\vdots&\vdots&&\vdots\\Z_{l1}&Z_{l2}&\cdots&Z_{ll}\end{vmatrix}$$

Δ_{11}、Δ_{21}、Δ_{12}、Δ_{22}是行列式Δ的代数余子式，例如，Δ_{21}是在Δ中划去第2行和第1列后剩下来的子行列式，再乘以$(-1)^{2+1}$。

式(9-1)叫做双口网络的Y参数方程。参数Y_{11}、Y_{12}、Y_{21}、Y_{22}都是复常数，叫做双口网络的Y参数。这些参数仅由网络的结构、元件参数及激励源的频率所决定，而与激励源的大小无关，因而可用这些参数来描述网络本身的特性。

四个Y参数可以按照下述方法进行计算或试验测得。当在入口施加电压$\dot{U}_1$，出口短路即$\dot{U}_2=0$时[图9-3(a)]，根据式(9-1)得

$$Y_{11}=\left.\frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_1}\right|_{\dot{U}_2=0}$$

$$Y_{21}=\left.\frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_1}\right|_{\dot{U}_2=0}$$

而在出口施加电压$\dot{U}_2$，入口短路即$\dot{U}_1=0$时[图9-3(b)]，有

$$Y_{12}=\left.\frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_2}\right|_{\dot{U}_1=0}$$

$$Y_{22}=\left.\frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_2}\right|_{\dot{U}_1=0}$$

由上列各式可见，Y_{11}是出口短路时入口的输入复导纳（简称为短路输入复导纳），Y_{22}是入口短路时出口的输出复导纳(简称为短路输出复导纳)。而Y_{12}是入口短路时入口对出口的转移复导纳；Y_{21}

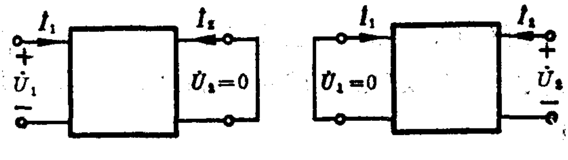


图 9-3　Y 参数的测定

是出口短路时出口对入口的转移复导纳。如果网络中只有一个激励源作用，激励源所在点就叫做策动点。策动点复阻抗（或复导纳）是策动点的电压（或电流）相量与电流（或电压）相量之比；而转移复阻抗（或复导纳）则是策动点的电压（或电流）相量与非策动点的电流（或电压）相量之比。因此，Y_{11} 也可以叫做出口短路时入口的策动点复导纳，Y_{22} 也可以叫做入口短路时出口的策动点复导纳。

这些 Y 参数都是在一个端口短路的情况下，通过计算或测试而求得的复常数，而且都具有导纳的量纲，所以也叫做短路复导纳参数。

当行列式 Δ 是依以自复阻抗形成的对角线而对称时，$\Delta_{21}=\Delta_{12}$，于是有

$$Y_{21}=Y_{12}$$

凡是满足这个条件的双口网络叫做互易双口网络（或可逆的双口网络），因为这时

$$\left.\frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_1}\right|_{\dot{U}_2=0}=\left.\frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_2}\right|_{\dot{U}_1=0}$$

即在图 9-3(a)和(b)中，如果 $\dot{U}_2=\dot{U}_1$，则 $\dot{I}_1=\dot{I}_2$。也就是，电源由入口搬到出口后，入口的短路电流等于电源在入口时出口的短路电流。或者说，激励和响应可以互易位置。

显然，一般既无独立源、也无受控源的线性无源双口网络都是

互易网络。对于互易网络，在四个 Y 参数中只有三个是独立的。

如果双口网络的入口和出口互换位置后，其相应端口的电压和电流均不改变，这种双口网络就叫做对称双口网络。对于对称双口网络，有

$$\left.\frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_1}\right|_{\dot{U}_2=0}=\left.\frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_2}\right|_{\dot{U}_1=0}$$

即

$$Y_{11}=Y_{22}$$

也就是，这时在四个 Y 参数中只有两个是独立的。

式(9-1)可用矩阵形式表示如下：

$$\begin{bmatrix}\dot{I}_1\\ \dot{I}_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}Y_{11} & Y_{12}\\ Y_{21} & Y_{22}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{U}_1\\ \dot{U}_2\end{bmatrix} \tag{9-2}$$

把电流和电压列阵用列向量 $\dot{\mathbf{I}}$ 和 $\dot{\mathbf{U}}$ 表示，上式可改写为

$$\dot{\mathbf{I}}=\mathbf{Y}\dot{\mathbf{U}} \tag{9-3}$$

其中

$$\mathbf{Y}=\begin{bmatrix}Y_{11} & Y_{12}\\ Y_{21} & Y_{22}\end{bmatrix} \tag{9-4}$$

叫做短路复导纳矩阵。

如果网络内部含有受控源，由第三章所述可知，式(9-1)中的行列式 Δ 一般便不再是依主对角线而对称了，因而 $\Delta_{21}\neq\Delta_{12}$，于是 $Y_{21}\neq Y_{12}$，即网络不再成为互易网络。

2. 开路复阻抗参数

如果双口网络两个端口的电流相量 $\dot{I}_1$ 和 $\dot{I}_2$ 是已知的，而两个端口的电压相量 $\dot{U}_1$ 和 $\dot{U}_2$ 是待求的，则应当从式 (9-1)解出 $\dot{U}_1$ 和 $\dot{U}_2$：

$$\dot{U}_1=\frac{\begin{vmatrix}\dot{I}_1 & Y_{12}\\ \dot{I}_2 & Y_{22}\end{vmatrix}}{\begin{vmatrix}Y_{11} & Y_{12}\\ Y_{21} & Y_{22}\end{vmatrix}}=\frac{Y_{22}}{\Delta_Y}\dot{I}_1-\frac{Y_{12}}{\Delta_Y}\dot{I}_2$$

$$\dot{U}_2=\frac{\begin{vmatrix}Y_{11} & \dot{I}_1\\ Y_{21} & \dot{I}_2\end{vmatrix}}{\begin{vmatrix}Y_{11} & Y_{12}\\ Y_{21} & Y_{22}\end{vmatrix}}=-\frac{Y_{21}}{\Delta_Y}\dot{I}_1+\frac{Y_{11}}{\Delta_Y}\dot{I}_2$$

式中

$$\Delta_Y=Y_{11}Y_{22}-Y_{12}Y_{21}$$

若令$\frac{Y_{22}}{\Delta_Y}=Z_{11}$、$-\frac{Y_{12}}{\Delta_Y}=Z_{12}$、$-\frac{Y_{21}}{\Delta_Y}=Z_{21}$、$\frac{Y_{11}}{\Delta_Y}=Z_{22}$，则有

$$\left.\begin{aligned}\dot{U}_1=Z_{11}\dot{I}_1+Z_{12}\dot{I}_2\\ \dot{U}_2=Z_{21}\dot{I}_1+Z_{22}\dot{I}_2\end{aligned}\right\} \tag{9-5}$$

式(9-5)叫做双口网络的Z参数方程。参数Z_{11}、Z_{12}、Z_{21}和Z_{22}叫做双口网络的Z参数。

这四个Z参数可以按照下述方法进行计算或试验测得。当在入口施加电流$\dot{I}_1$，出口开路、即$\dot{I}_2=0$时，有

$$Z_{11}=\left.\frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1}\right|_{\dot{I}_2=0}$$

$$Z_{21}=\left.\frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_1}\right|_{\dot{I}_2=0}$$

而在出口施加电流$\dot{I}_2$，入口开路、即$\dot{I}_1=0$时，有

$$Z_{12}=\left.\frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_2}\right|_{\dot{I}_1=0}$$

$$Z_{22}=\left.\frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_2}\right|_{\dot{I}_1=0}$$

Z_{11}是出口开路时入口的输入复阻抗（简称为开路输入复阻抗）或入口的策动点复阻抗；Z_{22}是入口开路时出口的输出复阻抗（简称为开路输出复阻抗）或出口的策动点复阻抗；Z_{12}是入口开路时入口对出口的转移复阻抗；Z_{21}是出口开路时出口对入口的转移复阻抗。

因为这些Z参数都是在一个端口开路的情况下，通过计算或

测试而求得的复常数，而且都具有阻抗的量纲，所以也叫做开路复阻抗参数。

将式(9-5)用矩阵形式表示，则为

$$\begin{bmatrix}\dot{U}_1\\\dot{U}_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}Z_{11} & Z_{12}\\Z_{21} & Z_{22}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{I}_1\\\dot{I}_2\end{bmatrix} \tag{9-6}$$

或

$$\dot{\mathbf{U}}=\mathbf{Z}\ \dot{\mathbf{I}} \tag{9-7}$$

其中

$$\mathbf{Z}=\begin{bmatrix}Z_{11} & Z_{12}\\Z_{21} & Z_{22}\end{bmatrix} \tag{9-8}$$

叫做开路复阻抗矩阵。

根据式(9-2)，利用矩阵演算也可以得出式(9-6)。具体步骤如下：将式(9-2)两端各左乘$\mathbf{Y}$的逆矩阵$\mathbf{Y}^{-1}$（如果$\mathbf{Y}^{-1}$存在的话），得

$$\begin{bmatrix}\dot{U}_1\\\dot{U}_2\end{bmatrix}=\mathbf{Y}^{-1}\begin{bmatrix}\dot{I}_1\\\dot{I}_2\end{bmatrix}$$

其中

$$\mathbf{Y}^{-1}=\frac{1}{\Delta_Y}\begin{bmatrix}Y_{22} & -Y_{12}\\-Y_{21} & Y_{11}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}Z_{11} & Z_{12}\\Z_{21} & Z_{22}\end{bmatrix}$$

故

$$\begin{bmatrix}\dot{U}_1\\\dot{U}_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}Z_{11} & Z_{12}\\Z_{21} & Z_{22}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{I}_1\\\dot{I}_2\end{bmatrix}=\mathbf{Z}\begin{bmatrix}\dot{I}_1\\\dot{I}_2\end{bmatrix}$$

对于互易网络，由于$Y_{12}=Y_{21}$，故$Z_{12}=Z_{21}$。当网络对称时，还有$Z_{11}=Z_{22}$。

应当指出，开路复阻抗与短路复导纳之间不存在简单的倒数关系，即

$$Z_{11}\neq\frac{1}{Y_{11}}\qquad Z_{22}\neq\frac{1}{Y_{22}}$$

$$Z_{12} \neq \frac{1}{Y_{12}} \qquad Z_{21} \neq \frac{1}{Y_{21}}$$

但是，开路复阻抗矩阵 **Z** 和短路复导纳矩阵 **Y** 却是互为逆矩阵的（当两者都存在时），即

$$\mathbf{Z}=\mathbf{Y}^{-1} \qquad \mathbf{Y}=\mathbf{Z}^{-1}$$

3. 混合参数

当研究入口和出口的某些问题时，已知量不一定是 $\dot{U}_1$ 和 $\dot{U}_2$，也不一定是 $\dot{I}_1$ 和 $\dot{I}_2$，这时就还有必要建立其他的网络方程。

如果取 $\dot{I}_1$ 和 $\dot{U}_2$ 作为自变量（即 $\dot{I}_1$、$\dot{U}_2$ 是已知量，$\dot{U}_1$、$\dot{I}_2$ 是待求量），则双口网络的方程是

$$\left.\begin{aligned} \dot{U}_1 &= H_{11}\dot{I}_1 + H_{12}\dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 &= H_{21}\dot{I}_1 + H_{22}\dot{U}_2 \end{aligned}\right\} \tag{9-9}$$

式中

$$H_{11}=\left.\frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1}\right|_{\dot{U}_2=0}$$

$$H_{21}=\left.\frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1}\right|_{\dot{U}_2=0}$$

$$H_{12}=\left.\frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2}\right|_{\dot{I}_1=0}$$

$$H_{22}=\left.\frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_2}\right|_{\dot{I}_1=0}$$

叫做 H 参数或混合参数。可以看出，H_{11} 的量纲是阻抗，H_{22} 的量纲是导纳，H_{12} 和 H_{21} 是没有量纲的电压比和电流比。

将式(9-9)用矩阵表示，则为

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{U}_2 \end{bmatrix} = \mathbf{H} \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{U}_2 \end{bmatrix} \tag{9-10}$$

其中

$$\mathbf{H}=\begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} \tag{9-11}$$

叫做混合参数矩阵。

如果独立变量换成$\dot{U}_1$和$\dot{I}_2$，则得到的网络方程是

$$\left.\begin{aligned}\dot{I}_1=G_{11}\dot{U}_1+G_{12}\dot{I}_2\\ \dot{U}_2=G_{21}\dot{U}_1+G_{22}\dot{I}_2\end{aligned}\right\}\tag{9-12}$$

G_{11}、G_{12}、G_{21}，G_{22}叫做G参数或逆混合参数。G_{11}具有导纳的量纲，G_{22}具有阻抗的量纲，而G_{12}和G_{21}则是没有量纲的电流比和电压比。

将式(9-12)用矩阵表示，则为

$$\begin{bmatrix}\dot{I}_1\\ \dot{U}_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}G_{11} & G_{12}\\ G_{21} & G_{22}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{U}_1\\ \dot{I}_2\end{bmatrix}=\mathbf{G}\begin{bmatrix}\dot{U}_1\\ \dot{I}_2\end{bmatrix}\tag{9-13}$$

其中

$$\mathbf{G}=\begin{bmatrix}G_{11} & G_{12}\\ G_{21} & G_{22}\end{bmatrix}\tag{9-14}$$

是逆混合参数矩阵。

显然，混合参数矩阵和逆混合参数矩阵是互为逆矩阵的，即

$$\mathbf{G}=\mathbf{H}^{-1}\qquad \mathbf{H}=\mathbf{G}^{-1}$$

4. 传输参数

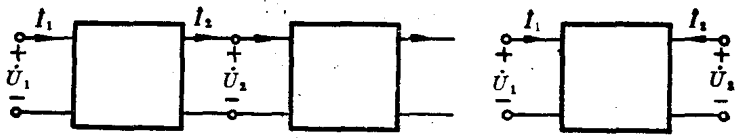
在电力和电信传输中，采用传输参数方程来分析双口网络常较为方便。这时，采用$\dot{U}_2$和$(-\dot{I}_2)$作为自变量，从而有

$$\left.\begin{aligned}\dot{U}_1=A\dot{U}_2+B(-\dot{I}_2)\\ \dot{I}_1=C\dot{U}_2+D(-\dot{I}_2)\end{aligned}\right\}\tag{9-15}$$

上式叫做双口网络的传输参数方程。其中$\dot{I}_2$前面为什么有一个负号呢？这是因为用传输参数方程分析问题时，按照习惯上把$\dot{I}_2$的参考方向规定为流出网络比较方便，而我们现在为了和前面一致把$\dot{I}_2$的参考方向规定为流入网络①。也就是当$\dot{I}_2$的参考方向

① 这是对上面一个端钮来说的。对下面一个端钮来说，则$\dot{I}_2$的参考方向是流出网络。因为对于双口网络，一定满足端口条件，故只要说清楚一个端钮中的电流的方向就可以了。通常所说双口网络的电流方向，都是对上面一个端钮来说的。

规定为流出网络时，传输参数方程中 $\dot{I}_2$ 前面用正号[图 9-4(a)]；而当 $\dot{I}_2$ 的参考方向规定为流入网络时，传输参数方程中 $\dot{I}_2$ 前面用负号[图 9-4(b)]，或者说，这时用 $(-\dot{I}_2)$ 代替 $\dot{I}_2$。



$\dot{U}_1=A\dot{U}_2+B\dot{I}_2$

$\dot{I}_1=C\dot{U}_2+D\dot{I}_2$

(a)

$\dot{U}_1=A\dot{U}_2+B(-\dot{I}_2)$

$\dot{I}_1=C\dot{U}_2+D(-\dot{I}_2)$

(b)

图 9-4 传输参数方程与 $\dot{I}_2$ 参考方向的关系

式(9-15)用矩阵表示，则为

$$\begin{bmatrix}\dot{U}_1\\ \dot{I}_1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}A & B\\ C & D\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{U}_2\\ -\dot{I}_2\end{bmatrix}=\mathbf{T}\begin{bmatrix}\dot{U}_2\\ -\dot{I}_2\end{bmatrix} \tag{9-16}$$

其中

$$\mathbf{T}=\begin{bmatrix}A & B\\ C & D\end{bmatrix} \tag{9-17}$$

叫做双口网络的传输参数矩阵。

$$A=\left.\frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2}\right|_{\dot{I}_2=0}$$

是出口开路时的电压比，

$$B=\left.\frac{\dot{U}_1}{-\dot{I}_2}\right|_{\dot{U}_2=0}$$

是出口短路时的转移复阻抗，

$$C=\left.\frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_2}\right|_{\dot{I}_2=0}$$

是出口开路时的转移复导纳，

$$D=\left.\frac{\dot{I}_1}{-\dot{I}_2}\right|_{\dot{U}_2=0}$$