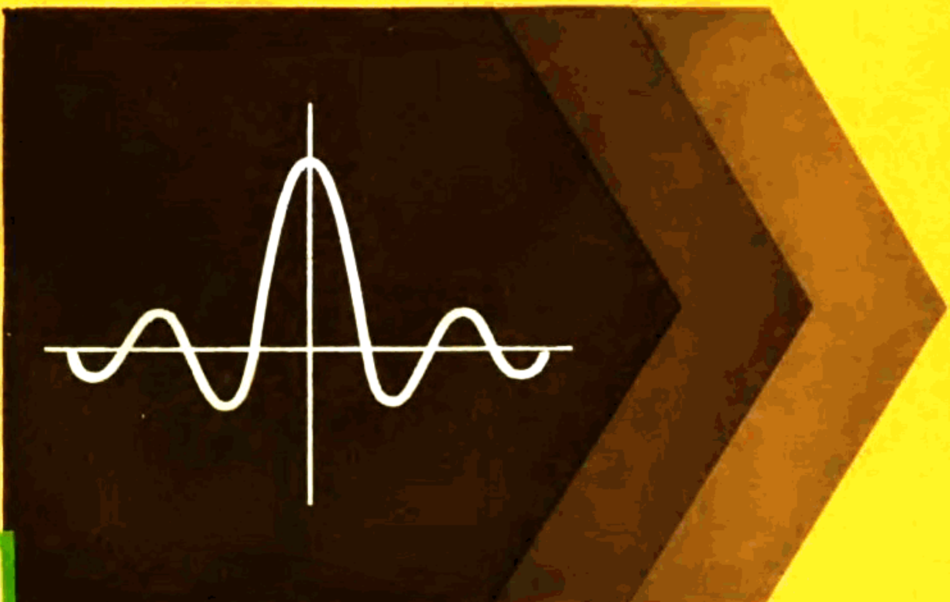
XIAN XING WANG LUO
YU XIN HAO FEN XI

线性网络
与信号分析

张永瑞　杨林耀　刘振起



西安电子科技大学出版社

前　　言

本书是参照1987年高等工业学校各课程教学指导委员会(小组)全体会议审订通过的“信号与系统”课程教学基本要求，并根据大学专科的特点，为电子、通讯、计算机等专业编写的教材。全书共五章，其内容为双口网络、网络的频率特性、傅里叶分析、拉普拉斯变换、离散信号和系统分析。实施本课程大约需要60～70学时，书中标有“＊”号的内容为选学内容。

本课程是继电路分析基础课后又一门重要的技术基础课。它为进一步学习网络理论、通讯理论、控制理论、信号处理与检测等打下必要的基础。我们在教材内容的选择上注意了以下两点：(1) 教材内容的完整性和系统性。例如，双口网络和网络的频率特性(含谐振电路)这两章，无论是在后续课程中，还是在实际工作中，都很重要。因此，有关内容都系统、完整地编入了本教材。(2) 既考虑大学专科的特点，内容要少而精，又考虑到当前电子技术的飞速发展，要把一些新器件、新内容介绍给读者，因此，本教材还讲述了回转器、负阻抗变换器、离散傅里叶变换、快速傅里叶变换(FFT)等内容。

在本教材的编写中，力求做到通俗易懂，由浅入深，避免单纯的数学推导，注意对物理意义的阐述。全书配置了丰富的例题，以便读者能更好地理解和掌握基本理论和分析方法。在每节之后配有练习题，每章之后配有习题和自检题。读者通过这些练习，能够更好地巩固和掌握所学的知识。每章的小结对各章内容作了系统的、完整的归纳。

本教材也可作为大学本科生的教学参考书。

本书的第一、二章由张永瑞同志编写，第三、四章由杨林耀同志编写，刘振起同志编写了第五章。吴大正教授指导了本书的编写工作，审阅了全书，并提出了许多宝贵意见。在此谨表示衷心的感谢。

限于编者的水平，书中还会存在一些缺点和错误，恳请读者批评、指正。

编　者

1989年6月

目　录

第一章　双口网络

随着集成电路技术的发展，越来越多的实用电路被集成在很小的芯片上，经封装以后使用在机器设备中。这犹如将整个网络装在“黑盒”内，只引出若干端子与其它网络或电源或负载相联接。对于这样的网络，人们往往只关注它的外部特性，而对其内部情况并不感兴趣。

一般来讲，若网络 N 有 n 个端子，如图 1.0−1(a)所示，则称为 n 端子网络；若网络的外部端子中，两两成对构成端口，如图 1.0−1(b)所示的网络有 n 个端口，则称为 n 端口网络。对于 n 端口网络，其构成端口的一对端钮中流过的电流是同一电流。也就是说，在任意时间 t 流入端口一端子的电流，等于流出该端口的另一端子的电流。如图 1.0−1(b)中，$i_1=i_1'$，…，$i_n=i_n'$。在电子技术中，多端子网络与多端口网络都有应用，但单口网络和双口网络的应用更为普遍。单口网络比较简单，任何二端子元件就是最简单的单口网络。本章主要讨论线性双口网络的描述及其分析方法。在具体讨论双口网络方程、参数之前，对所涉及的双口网络有以下几点约定：(1) 双口网络的端口电压、电流参考方向关联，如图 1.0−2 所示。为了方便，采用正弦稳态频域相量模型。(2) 双口网络 N 中只包含线性时不变电路元件，如有动态元件，其初始状态为零，且在网络 N 中不含任何独立电源。(3) 双口网络的一个端口接输入信号(称输入端口)，另一端口接负载(称输出端口)，输入端口的各相量及参数用下脚标“1”表示，输出端口的各相量及参数用下脚标“2”表示。

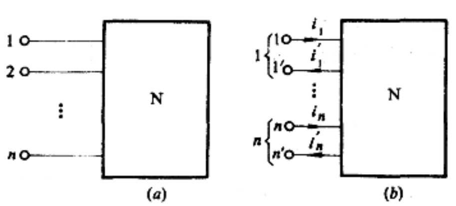


图 1.0−1　n 端子网络与 n 端口网络

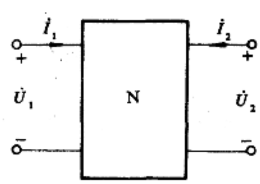


图 1.0−2　端口电压、电流参考方向关联之双口网络

§ 1.1　双口网络的方程与参数

双口网络共有四个端口相量，即$\dot{I}_1$、$\dot{U}_1$、$\dot{I}_2$、$\dot{U}_2$。若其中任意两个作自变量，另外两个作因变量，可组成 6 种不同形式的方程，与此相应有 6 种不同的网络参数。下面讨论较常用的 Z 方程、Z 参数，Y 方程、Y 参数，A 方程、A 参数和 H 方程、H 参数。

一、Z 方程与 Z 参数

如果以电流 $\dot{I}_1$、$\dot{I}_2$ 作等效电流源对双口网络激励，其响应为$\dot{U}_1$、$\dot{U}_2$，如图 1.1−1 所

示，则根据叠加原理可得

$$\dot{U}_1 = Z_{11}\dot{I}_1 + Z_{12}\dot{I}_2 \tag{1.1-1 a}$$

$$\dot{U}_2 = Z_{21}\dot{I}_1 + Z_{22}\dot{I}_2 \tag{1.1-1 b}$$

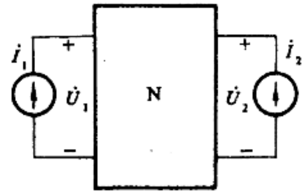


图 1.1−1　推导双口网络 Z 方程用图

式(1.1−1)中$\dot{I}_1$、$\dot{I}_2$前面的系数$Z_{kj}(k,\ j=1,\ 2)$称为双口网络的 Z 参数，它们具有阻抗的量纲。该方程称为 Z 方程。Z 参数可由 Z 方程式(1.1−1)分别令$\dot{I}_2=0$、$\dot{I}_1=0$求得，即

$$Z_{11} = \left.\frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1}\right|_{\dot{I}_2=0} \tag{1.1-2 a}$$

$$Z_{21} = \left.\frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_1}\right|_{\dot{I}_2=0} \tag{1.1-2 b}$$

$$Z_{12} = \left.\frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_2}\right|_{\dot{I}_1=0} \tag{1.1-2 c}$$

$$Z_{22} = \left.\frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_2}\right|_{\dot{I}_1=0} \tag{1.1-2 d}$$

式(1.1−2)表明了各参数的物理意义及其求取方法。Z_{11}表示输出端口开路时输入端口的电压相量与电流相量的比，即输出端口开路时的输入阻抗。Z_{21}表示输出端口开路时的正向传输阻抗。Z_{12}表示输入端口开路时的反向传输阻抗。Z_{22}表示输入端口开路时的输出阻抗。四个 Z 参数都是在某端口开路情况下定义的，所以 Z 参数又叫开路阻抗参数。这组参数便于用实验方法测得；如果知道网络的内部结构，根据式(1.1−2)进行计算也是容易的。

无源、线性时不变网络遵守互易特性，即满足

$$\left.\frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_2}\right|_{\dot{I}_1=0} = \left.\frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_1}\right|_{\dot{I}_2=0} \tag{1.1-3}$$

所以，比较式(1.1−3)与式(1.1−2 b)、式(1.1−2 c)，可知

$$Z_{12} = Z_{21} \tag{1.1-4}$$

这就是说，对于互易双口网络(又称可逆双口网络)，四个 Z 参数中只有三个参数是相互独立的。

如果将双口网络的输入端口与输出端口对调后，其各端口电流、电压均不改变，则称其为对称双口网络，这种网络从联接结构看也是对称的。若双口网络是互易的，且又是对称的，则有

$$\left.\begin{aligned} Z_{12} &= Z_{21} \\ Z_{11} &= Z_{22} \end{aligned}\right\} \tag{1.1-5}$$

根据互易、对称双口网络的含义，联系 Z 方程式(1.1−1)，理解式(1.1−5)是容易的。在这种情况下，四个 Z 参数中只有两个是相互独立的。

将 Z 方程写为矩阵形式，即

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

上式可简记为

$$\dot{\boldsymbol{U}} = \boldsymbol{Z}\dot{\boldsymbol{I}} \tag{1.1-6}$$

式中，$\dot{\boldsymbol{U}}$、$\dot{\boldsymbol{I}}$都是列向量，$\boldsymbol{Z}$称为 Z 参数矩阵，即

$$\boldsymbol{Z} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \tag{1.1-7}$$

例 1.1−1 求常用 T 形双口网络(图 1.1−2)的 Z 参数矩阵。

解 由图，根据求 Z 参数公式(1.1−2)可求得

$$Z_{11} = \left.\frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1}\right|_{\dot{I}_2=0} = Z_1 + Z_2$$

$$Z_{21} = \left.\frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_1}\right|_{\dot{I}_2=0} = Z_2$$

$$Z_{12} = \left.\frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_2}\right|_{\dot{I}_1=0} = Z_2$$

$$Z_{22} = \left.\frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_2}\right|_{\dot{I}_1=0} = Z_2 + Z_3$$

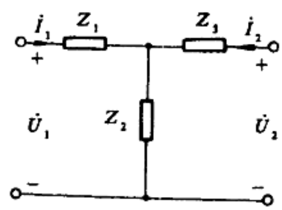


图 1.1−2 T 形双口网络

所以，该双口网络的 Z 参数矩阵为

$$\boldsymbol{Z} = \begin{bmatrix} Z_1 + Z_2 & Z_2 \\ Z_2 & Z_2 + Z_3 \end{bmatrix}$$

二、Y 方程与 Y 参数

在图 1.1−3 的双口网络中，若$\dot{U}_1$、$\dot{U}_2$作为等效电压源激励($\dot{U}_1$、$\dot{U}_2$看作自变量)，$\dot{I}_1$、$\dot{I}_2$作为响应相量(看作因变量)，它们的参考方向如图上所标示，由叠加原理，可得方程

$$\dot{I}_1 = Y_{11}\dot{U}_1 + Y_{12}\dot{U}_2 \tag{1.1-8 a}$$

$$\dot{I}_2 = Y_{21}\dot{U}_1 + Y_{22}\dot{U}_2 \tag{1.1-8 b}$$

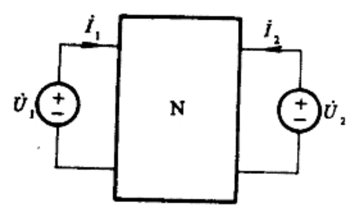


图 1.1−3 推导双口网络 Y 方程用图

式(1.1−8)中，$\dot{U}_1$、$\dot{U}_2$前面的系数Y_{kj}(k，j=1，2)称为双口网络的 Y 参数，具有导纳量纲。该组方程称为 Y 方

程。Y 参数可分别令 $\dot{U}_1=0$(输入端口短路)、$\dot{U}_2=0$(输出端口短路)代入 Y 方程式(1.1−8)求得，即

$$Y_{11}=\left.\frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_1}\right|_{\dot{U}_2=0} \tag{1.1-9 a}$$

$$Y_{21}=\left.\frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_1}\right|_{\dot{U}_2=0} \tag{1.1-9 b}$$

$$Y_{12}=\left.\frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_2}\right|_{\dot{U}_1=0} \tag{1.1-9 c}$$

$$Y_{22}=\left.\frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_2}\right|_{\dot{U}_1=0} \tag{1.1-9 d}$$

式(1.1−9)表明了各 Y 参数的物理意义及计算方法。Y_{11} 表示输出端口短路时的输入导纳。Y_{21} 表示输出端口短路时的正向传输导纳。Y_{12} 表示输入端口短路时的反向传输导纳。Y_{22} 表示输入端口短路时的输出导纳。四个 Y 参数都是在某个端口短路时定义的，所以 Y 参数又称为短路导纳参数。若网络是互易的，则根据互易特性也应满足

$$\left.\frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_1}\right|_{\dot{U}_2=0}=\left.\frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_2}\right|_{\dot{U}_1=0} \tag{1.1-10}$$

对照式(1.1−10)与式(1.1−9 *b*)、式(1.1−9 *c*)可知

$$Y_{12}=Y_{21} \tag{1.1-11}$$

这说明，在互易双口网络的 Y 参数中，也只有三个参数是相互独立的。同样，由互易、对称双口网络的含义，对照 Y 方程式(1.1−8)，不难得到

$$\left.\begin{array}{l} Y_{12}=Y_{21} \\ Y_{11}=Y_{22} \end{array}\right\} \tag{1.1-12}$$

所以互易、对称双口网络也仅有两个 Y 参数相互独立。

将 Y 方程写成矩阵形式，即

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

上式简记为

$$\dot{\boldsymbol{I}}=\boldsymbol{Y}\dot{\boldsymbol{U}} \tag{1.1-13}$$

式中，$\dot{\boldsymbol{I}}$、$\dot{\boldsymbol{U}}$分别为端口电流、电压构成的列向量，$\boldsymbol{Y}$称为 Y 参数矩阵，即

$$\boldsymbol{Y}=\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \tag{1.1-14}$$

例 1.1−2　图 1.1−4 为常用的 Π 形双口网络，求它的 Y 参数矩阵。

解　由图及求 Y 参数公式(1.1−9)可求得

$$Y_{11}=\left.\frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_1}\right|_{\dot{U}_2=0}=\frac{1}{Z_a}+\frac{1}{Z_b}=\frac{Z_a+Z_b}{Z_aZ_b}$$

$$Y_{21}=\left.\frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_1}\right|_{\dot{U}_2=0}=-\frac{1}{Z_b}$$

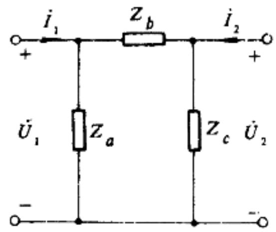


图 1.1−4　Π 形双口网络

此双口网络是无源双口网络，所以遵从互易性，有 $Y_{12}=Y_{21}$，已知 Y_{21} 就不必再求 Y_{12} 了。

$$Y_{22}=\left.\frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_2}\right|_{\dot{U}_1=0}=\frac{1}{Z_b}+\frac{1}{Z_c}=\frac{Z_b+Z_c}{Z_bZ_c}$$

故得 Y 参数矩阵为

$$Y=\begin{bmatrix}\dfrac{Z_a+Z_b}{Z_aZ_b} & -\dfrac{1}{Z_b}\\[2ex] -\dfrac{1}{Z_b} & \dfrac{Z_b+Z_c}{Z_bZ_c}\end{bmatrix}$$

三、A 方程与 A 参数

在信号传输中，双口网络方程常是将输入端口电压 $\dot{U}_1$、电流 $\dot{I}_1$ 与输出端口电压 $\dot{U}_2$ 和电流 $\dot{I}_2$ 联系起来的。按照一般习惯，接于输出端口的负载电流应由网络流出，但为了不改变前面的约定，仍设电流 $\dot{I}_2$ 流入网络，如图 1.1−5 所示。这样，A 方程可写为

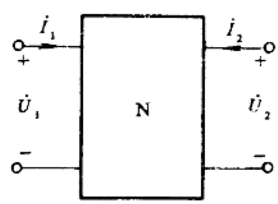


图 1.1−5　推导双口网络 A 方程用图

$$\dot{U}_1=A_{11}\dot{U}_2+A_{12}(-\dot{I}_2) \qquad (1.1-15a)$$

$$\dot{I}_1=A_{21}\dot{U}_2+A_{22}(-\dot{I}_2) \qquad (1.1-15b)$$

式(1.1−15)中，$\dot{U}_2$、$\dot{I}_2$ 前面的系数 $A_{kj}(k,\ j=1,\ 2)$ 称为双口网络的 A 参数。在四个 A 参数中，有的有量纲，有的无量纲，它们各自的物理含义可根据下列参数定义式理解，即

$$A_{11}=\left.\frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2}\right|_{(-\dot{I}_2)=0} \qquad (1.1-16a)$$

$$A_{21}=\left.\frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_2}\right|_{(-\dot{I}_2)=0} \qquad (1.1-16b)$$

$$A_{12}=\left.\frac{\dot{U}_1}{(-\dot{I}_2)}\right|_{\dot{U}_2=0} \qquad (1.1-16c)$$

$$A_{22}=\left.\frac{\dot I_1}{(-\dot I_2)}\right|_{\dot U_2=0} \tag{1.1-16 d}$$

A_{11}是输出端口开路时的反向传输电压比，无量纲．A_{21}是输出端口开路时的反向传输导纳，其单位为S(西门子)．A_{12}是输出端口短路时的反向传输阻抗，其单位为Ω(欧姆)．A_{22}是输出端口短路时的反向传输电流比，无量纲．

将A方程写成矩阵形式，有

$$\begin{bmatrix}\dot U_1\\ \dot I_1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}A_{11} & A_{12}\\ A_{21} & A_{22}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot U_2\\ (-\dot I_2)\end{bmatrix} \tag{1.1-17}$$

由此可得A参数矩阵为

$$A=\begin{bmatrix}A_{11} & A_{12}\\ A_{21} & A_{22}\end{bmatrix}$$

对于互易双口网络，可以证明$|A|=1$，即

$$A_{11}A_{22}-A_{12}A_{21}=1 \tag{1.1-18}$$

若网络是互易的，且又是对称的，则有

$$\left.\begin{aligned}A_{11}A_{22}-A_{12}A_{21}=1\\ A_{11}=A_{22}\end{aligned}\right\} \tag{1.1-19}$$

由式(1.1−18)、式(1.1−19)可知，在互易网络中有三个A参数是相互独立的．在互易、对称网络中，有两个A参数相互独立．

例 1.1−3 求图1.1−6所示X形双口网络的A参数矩阵．

解 由式(1.1−16)可求得

$$A_{11}=\left.\frac{\dot U_1}{\dot U_2}\right|_{(-\dot I_2)=0}=\frac{\dot U_1}{\dfrac{Z_2}{Z_1+Z_2}\dot U_1-\dfrac{Z_1}{Z_1+Z_2}\dot U_1}=\frac{Z_1+Z_2}{Z_2-Z_1}$$

$$A_{21}=\left.\frac{\dot I_1}{\dot U_2}\right|_{(-\dot I_2)=0}=\frac{\dot I_1}{\dfrac{\dot I_1}{2}Z_2-\dfrac{\dot I_1}{2}Z_1}=\frac{2}{Z_2-Z_1}$$

$$A_{12}=\left.\frac{\dot U_1}{(-\dot I_2)}\right|_{\dot U_2=0}=\frac{\dfrac{2Z_1Z_2}{Z_1+Z_2}\times\dot I_1}{\dfrac{Z_2}{Z_1+Z_2}\dot I_1-\dfrac{Z_1}{Z_1+Z_2}I_1}=\frac{2Z_1Z_2}{Z_2-Z_1}$$

$$A_{22}=\left.\frac{\dot{I}_1}{(-\dot{I}_2)}\right|_{\dot{U}_2=0}=\frac{\dot{I}_1}{\frac{Z_2}{Z_1+Z_2}\dot{I}_1-\frac{Z_1}{Z_1+Z_2}\dot{I}_1}=\frac{Z_1+Z_2}{Z_2-Z_1}$$

故得 X 形双口网络的 A 参数矩阵为

$$A=\begin{bmatrix}\frac{Z_1+Z_2}{Z_2-Z_1} & \frac{2Z_1Z_2}{Z_2-Z_1}\\ \frac{2}{Z_2-Z_1} & \frac{Z_1+Z_2}{Z_2-Z_1}\end{bmatrix}$$

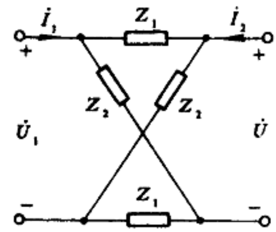


图 1.1–6 X 形双口网络

本题的 X 形双口网络也是互易、对称网络，因而 $A_{11}=A_{22}$，故在求出A_{11}之后就不必再由定义式求A_{22}了。至于求得A_{11}、A_{22}、A_{21}(或A_{12})之后，还可应用$|A|=1$的关系式，求出A_{12}(或A_{21})。

四、H 方程与 H 参数

在分析晶体管电路时，常以$\dot{I}_1$、$\dot{U}_2$为自变量，而以$\dot{U}_1$、$\dot{I}_2$为因变量。这时双口网络的 H 方程可写为

$$\dot{U}_1=H_{11}\dot{I}_1+H_{12}\dot{U}_2 \qquad (1.1-20\,a)$$

$$\dot{I}_2=H_{21}\dot{I}_1+H_{22}\dot{U}_2 \qquad (1.1-20\,b)$$

式中，$H_{kj}(k,\ j=1,\ 2)$称为双口网络的 H 参数(又叫混合参数)。令$\dot{U}_2=0$(输出端口短路)、$\dot{I}_1=0$(输入端口开路) 代入式(1.1–20)便可求得各 H 参数，即

$$H_{11}=\left.\frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1}\right|_{\dot{U}_2=0} \qquad (1.1-21\,a)$$

$$H_{21}=\left.\frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1}\right|_{\dot{U}_2=0} \qquad (1.1-21\,b)$$

$$H_{12}=\left.\frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2}\right|_{\dot{I}_1=0} \qquad (1.1-21\,c)$$

$$H_{22}=\left.\frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_2}\right|_{\dot{I}_1=0} \qquad (1.1-21\,d)$$

由式(1.1–21)可看清各 H 参数的物理意义。H_{11}是输出端口短路时的输入阻抗，单位为Ω。H_{21}是输出端口短路时的正向传输电流比，无量纲。H_{12}是输入端口开路时的反向传输电压比，无量纲。H_{22}是输入端口开路时的输出导纳，单位为 S。

H 方程也可写成矩阵形式，即

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{U}_2 \end{bmatrix} \tag{1.1-22}$$

由此可得 H 参数矩阵为

$$\boldsymbol{H}=\begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix}$$

若网络是互易的，可以证明

$$H_{12}=-H_{21} \tag{1.1-23}$$

这说明 H 参数中只有三个参数是相互独立的。若网络是互易的且又是对称的，则有

$$\left.\begin{aligned} H_{12} &= -H_{21} \\ |\boldsymbol{H}| &= 1 \end{aligned}\right\} \tag{1.1-24}$$

式(1.1−24)说明只有两个 H 参数是相互独立的。

例 1.1−4　图 1.1−7 是一晶体管放大器的等效电路，试求它的各 H 参数。

解　将图 1.1−7 输出端口短路，如图 1.1−8 所示。由图 1.1−8 求得

$$H_{11}=\left.\frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1}\right|_{\dot{U}_2=0}=R_1$$

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

将图 1.1−7 输入端口开路，如图 1.1−9 所示。由图 1.1−9 可求得

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

$$H_{22}=\left.\frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_2}\right|_{\dot{I}_1=0}=\frac{1}{R_c}$$

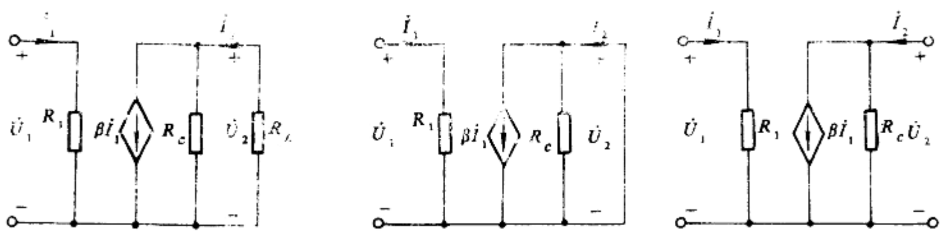


图 1.1−7　晶体管放大器的等效电路　　图 1.1−8　　图 1.1−9

故得 H 参数矩阵

$$\boldsymbol{H}=\begin{bmatrix} R_1 & 0 \\ \beta & \dfrac{1}{R_c} \end{bmatrix}$$

以上介绍了双口网络常用的四种方程与参数，它们都可以用来描述同一个双口网络的特性。不同类型的参数只是由于对输入、输出端口四个相量选用不同的自变量、因变量造成的。但无论哪一组参数，它们都是仅决定于网络本身内部结构、元件参数及信号源频率的量，它们与信号源的幅度大小、负载情况无关。既然各组网络参数都可以客观地描述同一个双口网络的特性，那么对同一个双口网络来说，只要它的各组参数有定义，它们之间一定可以相互转换。推导参数间相互转换关系的基本思路是：由已知参数方程，解出用已知参数表示的所要转换的参数方程，对照、比较相应的系数，即可得参数间相互转换关系。例如，由 A 参数转换为 Z 参数的关系式可作如下推导：由式(1.1−15 b)得

$$\dot{U}_2=\frac{1}{A_{21}}\dot{I}_1+\frac{A_{22}}{A_{21}}\dot{I}_2 \tag{1.1-25}$$

将式(1.1−25)代入式(1.1−15 a)，即得

$$\dot{U}_1=\frac{A_{11}}{A_{21}}\dot{I}_1+\frac{A_{11}A_{22}-A_{12}A_{21}}{A_{21}}\dot{I}_2 \tag{1.1-26}$$

式(1.1−25)与式(1.1−26)就是用 A 参数表示的 Z 方程，将这两式与式(1.1−a)、式(1.1−b)对照比较，即得

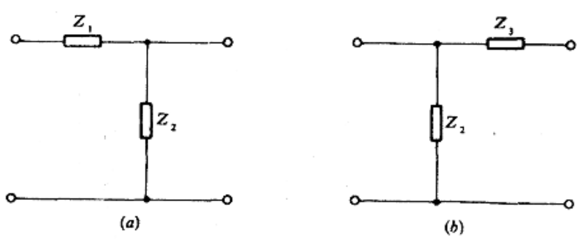
$$\left.\begin{aligned} Z_{11}&=\frac{A_{11}}{A_{21}} \qquad & Z_{12}&=\frac{A_{11}A_{22}-A_{12}A_{21}}{A_{21}} \\ Z_{21}&=\frac{1}{A_{21}} \qquad & Z_{22}&=\frac{A_{22}}{A_{21}} \end{aligned}\right\} \tag{1.1-27}$$

由式(1.1−27)并分别考虑互易网络、互易且对称网络 Z 参数特点，即可得出式(1.1−18)与式(1.1−19)所表述的这两种网络 A 参数的特点。

表 1−1 给出了四种常用参数的相互转换关系，可供读者使用时查阅。

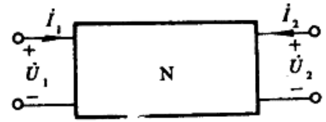
练 习 题

1.1−1 求图示双口网络的 Z 参数、Y 参数和 A 参数。



练习题 1.1−1 图

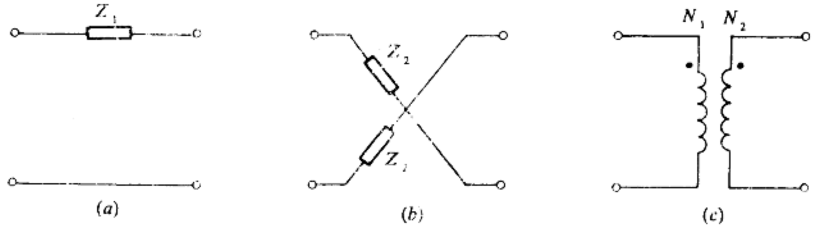
表 1-1　双口网络四种方程和参数关系



	方　程	可　逆	可　逆 对　称	用 Z 表 示	用 Y 表 示	用 A 表 示	用 H 表 示
Z	$\dot U_1 = Z_{11}\dot I_1 + Z_{12}\dot I_2$ $\dot U_2 = Z_{21}\dot I_1 + Z_{22}\dot I_2$	$Z_{12} = Z_{21}$	$Z_{12} = Z_{21}$ $Z_{11} = Z_{22}$	$\begin{matrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{matrix}$	$\begin{matrix} Y_{22}/\lvert\mathbf{Y}\rvert & -Y_{12}/\lvert\mathbf{Y}\rvert \\ -Y_{21}/\lvert\mathbf{Y}\rvert & Y_{11}/\lvert\mathbf{Y}\rvert \end{matrix}$	$\begin{matrix} A_{11}/A_{21} & \lvert\mathbf{A}\rvert/A_{21} \\ 1/A_{21} & A_{22}/A_{21} \end{matrix}$	$\begin{matrix} \lvert\mathbf{H}\rvert/H_{22} & H_{12}/H_{22} \\ -H_{21}/H_{22} & 1/H_{22} \end{matrix}$
Y	$\dot I_1 = Y_{11}\dot U_1 + Y_{12}\dot U_2$ $\dot I_2 = Y_{21}\dot U_1 + Y_{22}\dot U_2$	$Y_{12} = Y_{21}$	$Y_{12} = Y_{21}$ $Y_{11} = Y_{22}$	$\begin{matrix} Z_{22}/\lvert\mathbf{Z}\rvert & -Z_{12}/\lvert\mathbf{Z}\rvert \\ -Z_{21}/\lvert\mathbf{Z}\rvert & Z_{11}/\lvert\mathbf{Z}\rvert \end{matrix}$	$\begin{matrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{matrix}$	$\begin{matrix} A_{22}/A_{12} & -\lvert\mathbf{A}\rvert/A_{12} \\ -1/A_{12} & A_{11}/A_{12} \end{matrix}$	$\begin{matrix} 1/H_{11} & -H_{12}/H_{11} \\ H_{21}/H_{11} & \lvert\mathbf{H}\rvert/H_{11} \end{matrix}$
A	$\dot U_1 = A_{11}\dot U_2 + A_{12}(-\dot I_2)$ $\dot I_1 = A_{21}\dot U_2 + A_{22}(-\dot I_2)$	$\lvert\mathbf{A}\rvert = 1$	$\lvert\mathbf{A}\rvert = 1$ $A_{11} = A_{22}$	$\begin{matrix} Z_{11}/Z_{21} & \lvert\mathbf{Z}\rvert/Z_{21} \\ 1/Z_{21} & Z_{22}/Z_{21} \end{matrix}$	$\begin{matrix} -Y_{22}/Y_{21} & -1/Y_{21} \\ -\lvert\mathbf{Y}\rvert/Y_{21} & -Y_{11}/Y_{21} \end{matrix}$	$\begin{matrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{matrix}$	$\begin{matrix} -\lvert\mathbf{H}\rvert/H_{21} & -H_{11}/H_{21} \\ -H_{22}/H_{21} & -1/H_{21} \end{matrix}$
H	$\dot U_1 = H_{11}\dot I_1 + H_{12}\dot U_2$ $\dot I_2 = H_{21}\dot I_1 + H_{22}\dot U_2$	$H_{12} = -H_{21}$	$H_{12} = -H_{21}$ $\lvert\mathbf{H}\rvert = 1$	$\begin{matrix} \lvert\mathbf{Z}\rvert/Z_{22} & Z_{12}/Z_{22} \\ -Z_{21}/Z_{22} & 1/Z_{22} \end{matrix}$	$\begin{matrix} 1/Y_{11} & -Y_{12}/Y_{11} \\ Y_{21}/Y_{11} & \lvert\mathbf{Y}\rvert/Y_{11} \end{matrix}$	$\begin{matrix} A_{12}/A_{22} & \lvert\mathbf{A}\rvert/A_{22} \\ -1/A_{22} & A_{21}/A_{22} \end{matrix}$	$\begin{matrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{matrix}$

说明：(1) 表中$\lvert\mathbf{Z}\rvert = Z_{11}Z_{22} - Z_{12}Z_{21}$，$\lvert\mathbf{Y}\rvert$、$\lvert\mathbf{A}\rvert$、$\lvert\mathbf{H}\rvert$的表达式与$\lvert\mathbf{Z}\rvert$类似. (2) 本表所列参数均约定电流$\dot I_2$的参考方向为流入网络，有的教材中规定以流出网络的$\dot I_2$为参考方向，这时表中与$\dot I_2$有关的参数均相差一负号.

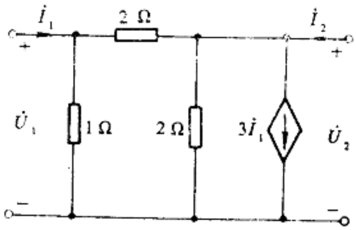
1.1-2　求图示双口网络的 A 参数。



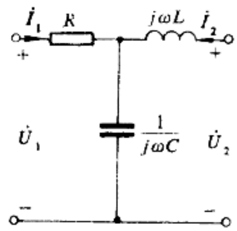
练习题 1.1-2 图

1.1-3　求图示双口网络的 Y 参数矩阵与 Z 参数矩阵。

1.1-4　求图示双口网络的 H 参数。



练习题 1.1-3 图



练习题 1.1-4 图

§ 1.2　双口网络的联接

双口网络的联接比单口网络(即二端钮网络)的联接复杂，它不但有串联、并联，而且还有串并联、并串联、级联等多种形式。这一节仅介绍常用的双口网络联接形式，即串联、并联与级联。在讨论这三种双口网络联接形式之前，应先明确双口网络联接的有效性概念。若双口网络在作各种联接以后，仍能保持流入一个端子的电流等于同一端口上另一个端子上流出的电流，则称为有效性联接。研究双口网络的有效性联接是有意义的，下面对双口网络的串联、并联、级联的讨论是在认定有效性联接条件下进行的。至于双口网络联接有效性的检验将在本节最后作介绍。

一、串联

两双口网络的输入端口和输出端口分别作串联联接，称两双口网络串联。相串联的两双口网络通常称为子双口网络，串联后构成的大双口网络称为复合双口网络，如图 1.2-1 所示。

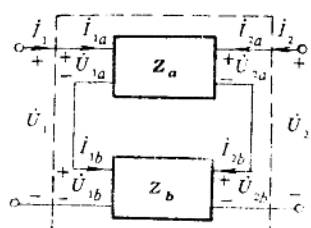


图 1.2-1　双口网络的串联

对于双口网络的串联，采用 Z 参数分析比较方便。图 1.2-1 中，$\boldsymbol{Z}_a$、$\boldsymbol{Z}_b$ 分别表示相串联的两个子双

口网络的 Z 参数矩阵，虚线框内为两子双口网络串联后构成的复合双口网络。各端口的电压、电流相量如图中所标示。

由图 1.2−1 可见：

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_{1a} \\ \dot{I}_{2a} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_{1b} \\ \dot{I}_{2b} \end{bmatrix}$$

即

$$\dot{\boldsymbol{I}} = \dot{\boldsymbol{I}}_a = \dot{\boldsymbol{I}}_b \tag{1.2-1}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_{1a} \\ \dot{U}_{2a} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{U}_{1b} \\ \dot{U}_{2b} \end{bmatrix}$$

即

$$\dot{\boldsymbol{U}} = \dot{\boldsymbol{U}}_a + \dot{\boldsymbol{U}}_b \tag{1.2-2}$$

由双口网络 Z 方程，可知

$$\dot{\boldsymbol{U}}_a = \boldsymbol{Z}_a \dot{\boldsymbol{I}}_a \tag{1.2-3 a}$$

$$\dot{\boldsymbol{U}}_b = \boldsymbol{Z}_b \dot{\boldsymbol{I}}_b \tag{1.2-3 b}$$

将式(1.2−3 *a*)与式(1.2−3 *b*)代入式(1.2−2)，并考虑式(1.2−1)得

$$\dot{\boldsymbol{U}} = (\boldsymbol{Z}_a + \boldsymbol{Z}_b)\, \dot{\boldsymbol{I}} \tag{1.2-4}$$

设此复合双口网络可以用一个等效双口网络代替，并设其阻抗参数矩阵为 Z，则应有

$$\dot{\boldsymbol{U}} = \boldsymbol{Z} \dot{\boldsymbol{I}} \tag{1.2-5}$$

比较式(1.2−4)与式(1.2−5)得

$$\boldsymbol{Z} = \boldsymbol{Z}_a + \boldsymbol{Z}_b \tag{1.2-6}$$

由式(1.2−6)可见，由两个双口网络串联而成的复合双口网络的阻抗参数等于相串联的两子双口网络的阻抗参数之和。

二、并联

若两双口网络的输入端口、输出端口分别并联，则称两双口网络并联，如图 1.2−2 所示。图中 $\boldsymbol{Y}_a$、$\boldsymbol{Y}_b$ 分别为相并联的两子双口网络的导纳参数矩阵，虚线框内为两子双口网络并联后构成的复合双口网络。各端口的电压、电流相量标示于图上。

对于双口网络的并联，采用导纳参数分析比较方便。由图 1.2−2 可看出：

$$\dot{\boldsymbol{U}} = \dot{\boldsymbol{U}}_a = \dot{\boldsymbol{U}}_b \tag{1.2-7}$$

$$\dot{\boldsymbol{I}} = \dot{\boldsymbol{I}}_a + \dot{\boldsymbol{I}}_b \tag{1.2-8}$$

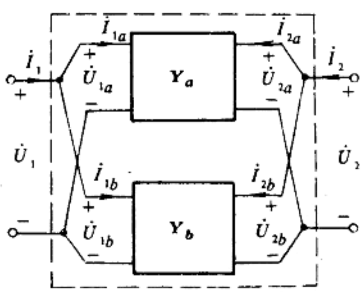


图 1.2−2　双口网络的并联

由双口网络的 Y 参数方程可知

$$\dot{I}_a = Y_a \dot{U}_a \tag{1.2-9 a}$$

$$\dot{I}_b = Y_b \dot{U}_b \tag{1.2-9 b}$$

将式(1.2−9 a)与式(1.2−9 b)代入式(1.2−8)，并考虑式(1.2−7)得

$$\dot{I} = (Y_a + Y_b)\dot{U} \tag{1.2-10}$$

设此复合双口网络可以用一个等效双口网络代替，并设其导纳参数矩阵为 **Y**，则应有

$$Y = Y_a + Y_b \tag{1.2-11}$$

式(1.2−11)告诉我们，由两个双口网络并联而成的复合双口网络的导纳参数等于相并联的两双口网络的导纳参数之和。

三、级联

图 1.2−3 为两双口网络的级联形式。级联时，第一个双口网络的输出端口是与第二个双口网络的输入端口相联的。图中，A_a、A_b 分别为相级联的两子双口网络的 A 参数矩阵，虚线框内为两双口网络级联后构成的复合双口网络。各端口的电压、电流相量标示于图上。

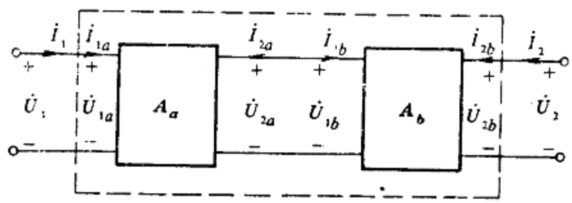


图 1.2−3　双口网络的级联

对于双口网络的级联，采用 A 参数分析比较方便。由图 1.2−3 显然有：

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_{1a} \\ \dot{I}_{1a} \end{bmatrix} \tag{1.2-12}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{2b} \\ -\dot{I}_{2b} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ -\dot{I}_2 \end{bmatrix} \tag{1.2-13}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{2a} \\ -\dot{I}_{2a} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_{1b} \\ \dot{I}_{1b} \end{bmatrix} \tag{1.2-14}$$

再由双口网络 A 方程可知：

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{1b} \\ \dot{I}_{1b} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11b} & A_{12b} \\ A_{21b} & A_{22b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_{2b} \\ -\dot{I}_{2b} \end{bmatrix} \tag{1.2-15}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{1a} \\ \dot{I}_{1a} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11a} & A_{12a} \\ A_{21a} & A_{22a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_{2a} \\ -\dot{I}_{2a} \end{bmatrix} \tag{1.2-16}$$

将式(1.2−14)、式(1.2−15)代入式(1.2−16)，得