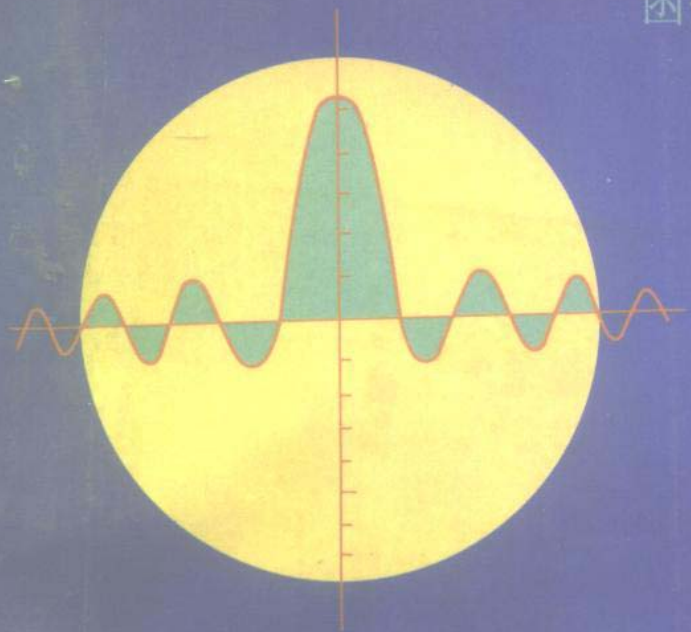


函授教材



电工原理 (下册)

秦杏荣 张金龙 编著

同济大学出版社

7265 / A1

内 容 提 要

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)》编写的电力、自动化专业函授教材。

全书共14章,分上、下两册出版。上册包括电路的基本概念、基本定理和分析方法,电路的等效变换及网络定理,网络的一般分析法和矩阵分析法,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;下册包括双口网络,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,磁路和交流铁心线圈。

本书可作为全日制高等学校、电视大学和职工大学等同类专业的教学参考用书。

责任编辑 张平官

封面设计 李志云

电工原理(下册)

(函授教材)

秦杏荣 张金龙编著

同济大学出版社出版

(上海四平路1239号 邮编 200092)

新华书店上海发行所发行

南京理工大学激光照排公司照排

青浦任屯印刷厂印刷

开本:787×1092 1/32 印张:18.375 字数:440千字

1996年4月第1版 1996年4月第1次印刷

印数:1—3000 定价:14.80元

ISBN7-5608-1655-X/TM·28

前 言

本书下册共有六章,是与上册配套使用的教材,与上册有相同的编写形式,即:每章前都有内容提要、学习要求、重点和难点的说明,在每章末都有小结,可帮助读者整理总结已学的内容。下册由秦杏荣和张金龙共同编写。张金龙编写前两章;秦杏荣编写后四章。上海大学顾敏芳同志参加了部分编写工作。

本书能顺利出版,致使上、下册配套,编者衷心感谢同济大学函授与继续教育学院和同济大学出版社给予的大力支持。同济大学熊炳焜教授、陆明达教授严格而细致地审阅了本书的原稿,曾提出了许多极其宝贵的修改意见,在此,一并致以谢意。

由于学识有限,必有疏漏不妥之处,殷切期望得到读者的批评指正。

编者

1995 年于同济大学

目 录

前言

第九章 双口网络	1
§ 9-1 双口网络	2
§ 9-2 双口网络的方程与参数	4
§ 9-3 双口网络的等效电路	23
§ 9-4' 双口网络的联接	30
§ 9-5 双口网络的特性参数	41
§ 9-6 回转器	55
§ 9-7 运算放大器	59
小结	67
习题	70
第十章 线性电路的时域分析	74
§ 10-1 动态电路及其方程 初始条件的确定	75
§ 10-2 一阶电路的零输入响应和零状态响应	83
§ 10-3 一阶电路的全响应——三要素法	106
§ 10-4 一阶电路接通于正弦电源时的响应	120
§ 10-5 阶跃函数、冲激函数及它们的响应	126
§ 10-6 二阶电路的零输入响应	140
§ 10-7 二阶电路的阶跃响应和冲激响应	156
§ 10-8 卷积积分	167

小结	171
习题	174
第五次测验作业	179
第十一章 线性电路的复频域分析	181
§ 11-1 拉普拉斯变换	182
§ 11-2 拉普拉斯变换的基本性质	187
§ 11-3 拉普拉斯反变换	201
§ 11-4 线性电路的复频域模型	219
§ 11-5 线性电路的复频域分析法	231
§ 11-6 网络函数、零点与极点	245
§ 11-7 卷积定理	260
小结	265
习题	271
第十二章 线性电路的状态变量分析法	276
§ 12-1 电路的状态变量与状态方程	277
§ 12-2 状态方程的直观编写法	281
§ 12-3 状态方程的解	297
小结	313
习题	315
第六次测验作业	318
第十三章 分布参数电路	320
§ 13-1 电路参数的分布性和分布参数电路	321
§ 13-2 均匀传输线的微分方程及其正弦稳态解	325
§ 13-3 均匀传输线上的行波及其传输特性	339
§ 13-4 终端接有不同负载时的均匀传输线	352

§ 13-5	无损耗线	367
§ 13-6	均匀传输线的集总参数等效电路及其电压、 电流计算	389
§ 13-7	无损耗传输线的过渡过程	408
	小结	422
	习题	431
第十四章	磁路和交流铁芯线圈	434
§ 14-1	磁场的基本概念	435
§ 14-2	磁性材料的性能	443
§ 14-3	磁路及其基本定律	463
§ 14-4	直流磁路的计算	476
§ 14-5	交变磁通磁路	508
§ 14-6	铁芯线圈的电路模型和变压器	523
	小结	543
	习题	547
	第七次测验作业	550
附录 I	部分常用软磁材料的磁特性	552
附录 II	部分常用硬磁材料的磁特性	567
附录 III	部分磁介质的温度系数	570
	习题答案	571
	参考文献	579

第九章 双口网络

本章将介绍双口网络。所谓双口网络就是一个网络对外引出四个端子,且两个端子构成一口(一端口),即它的流进和流出的电流是同一的,四个端子就成为双口,其中一个端口作为输入口,另一端口作为输出口。本章将建立其端口上的电压、电流关系,引出双口网络的方程及其参数,介绍它的等值电路,各种联接的形式以及它的特征参数。在工程实际中都存在着双口网络形式的电路,例如最简单的双线传输线路,除了它的始端电源输入端和终端负载端外,其中间的输电线部分用一虚线框框起来,其虚线框就是一双口网络。又如空心变压器,同样把它用虚线框框起来,那它对外的原、副方端口,也就是一个双口网络。随着集成技术的发展,出现许多新的器件,例如本章将介绍的回转器、运算放大器等,它们对外都具有输入、输出端口,都可作为一个双口网络来分析,并建立起它们端口的电压、电流关系。因此熟悉和掌握双口网络的分析方法不仅具有实用意义,而且也是在前已学过的内容基础上,用建立端口电量关系来分析网络,这将对前学内容的一种深化认识。

本章内容共有7节,包括四个部分:1. 双口网络的方程及其参数和它的等值电路;2. 双口网络的联接形式;3. 双口网络的特征参数;4. 回转器和运算放大器。

学习本章的基本要求:

1. 熟悉双口网络方程的建立,充分理解各种参数的物

理意义,会计算一般双口网络的参数。会作出双口网络的等值电路。

2. 了解几个双口网络会有各种不同联接形式,会对复合双口网络进行分析和参数计算。

3. 了解双口网络的特征参数——特性阻抗和传播常数及其计算。

4. 对含有理想运算放大器的电路能进行分析、计算。

5. 了解电路新元件——回转器,并对含回转器电路能进行分析、计算。

学习本章应重点理解:

对双口网络的分析,主要是以端口为着眼点,建立二端口上的电压、电流关系,而在建立其端口电量关系时,可完全在不知道网络内部的结构组成形式和参数值大小,仅仅依据在其端口上的电量测量而得到,这不同于上册中所学的各种分析方法。根据端口测得表征双口网络的参数,就能作出它的相应的等值电路或者与之连接,并相匹配的外部电路的条件。当然在分析双口网络时,也不排斥已知网络内部参数、结构时通过计算方法来得到表征双口网络的参数。

§ 9-1 双口网络

双口网络又称为二端口网络,它的概念是从一端口网络所引伸的。上册中所研究的二端网络,不论其网络内部是有源或无源的,它对外只有两个端钮,如图 9-1 所示,由 KCL 可知,图中 $i = -i'$ 以及 $11'$ 之间只存在一个电压 $u_{11'}$,也即只有两个变量 i 和 $u_{11'}$ 。因此任一的二端网络总是一端口网络,所谓一端口网络或称单口网络,就是流进网络的电流必等于网

络流出的电流。

一个网络若对外引出四个端钮,就称之为四端网络,如图 9-2(a)所示,对任一个四端网络,由 KCL 和 KVL 知,总存在下列关系:

和

$$u_{11'} + u_{1'2'} - u_{22'} + u_{2'1} = 0$$

也即四个电流和四个电压量中总要满足上式方程,因此它们中只有三个是独立的。据此类推,对于一个对外引出 n 个端钮的 n 端网络,它也只有 $n-1$ 个独立电流变量和 $n-1$ 个独立电压变量。

$$i_1 + i_1' + i_2 + i_2' = 0$$

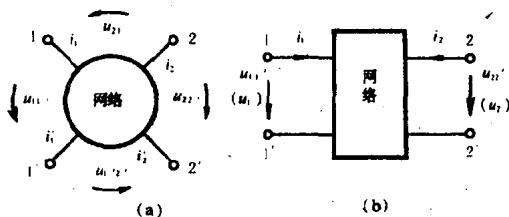


图 9-2 四端网络和双口网络

如果四端网络在连接外电路时,使得其中 $i_1 = -i_1'$ 和 $i_2 = -i_2'$ 以及在 1 和 2 及 1' 和 2' 之间没有外部电的连接,并只研究 11' 之间和 22' 之间存在的电压 $u_{11'}$ 和 $u_{22'}$, 这样一来,就可以把图 9-2(a)改画成图 9-2(b)的网络,虽然图 9-2(b)对外仍引出四个端钮,但其流入 1 端电流等于流出 1' 端的电流;流入 2 端的电流等于流出 2' 端电流,有了这个约束(又称之端口

图 9-1 二端网络

定义),参照单口网络的定义,称此四端网络为双口网络(或称二端口网络)。

在双口网络中有四个独立变量 u_1, i_1 和 u_2, i_2 ($u_{11'}, u_{22'}$ 分别记作 u_1, u_2), 为了今后统一起见, 四个变量的假定正方向规定如图 9-2(b) 所示。上述四个变量 u_1, i_1 和 u_2, i_2 中, 当双口网络内部参数、结构已知时, 就可以根据给定的两个变量电压或电流, 求出另外两个参量电流或电压。只要四个变量中已知任意两个, 就可求出另外两个, 这样排列就有六种可能, 即分别已知 $u_1, i_1; u_1, u_2; i_1, i_2; u_1, i_2; u_2, i_1$ 以及 U_2, i_2 , 求相应的另外两个, 从而可以得到双口网络六种不同方程及其参数。在讨论和建立双口网络方程时, 假定双口网络内部元件是线性的、不含独立电源以及储能元件 (L, C) 中不具备初始储能, 即 $i_L(0_-), u_C(0_-)$ 都等于零, 但网络内部可以存在受控源。当不含受控源时, 双口网络称之无源线性双口网络。

§ 9-2 双口网络的方程与参数

1. 用短路导纳参数表示的双口网络方程

图 9-3 所示的无源线性双口网络, 是由正弦信号激励的, 现已知它两个端口的电压相量为 $\dot{U}_1$ 和 $\dot{U}_2$, 要求出它的两个端口电流 $\dot{I}_1$ 和 $\dot{I}_2$ 。因为网络是无源线性的, 可以应用叠加原理分别求出由 $\dot{U}_1$ 和 $\dot{U}_2$ 单独作用时产生的电流 $\dot{I}_1', \dot{I}_2'$ 和 $\dot{I}_1'', \dot{I}_2''$ 。

当 22' 短接, $\dot{U}_1$ 单独作用时

$$\dot{I}_1' \propto \dot{U}_1$$

$$\dot{I}_2' \propto \dot{U}_1$$

其比例系数应由网络参数、结构而定,但应具有导纳量纲,可记作为

$$\dot{I}_1' = Y_{11}\dot{U}_1, \quad \dot{I}_2' = Y_{21}\dot{U}_1$$

同样,当 $11'$ 端短路, $\dot{U}_1$ 单独作用时,则由 $\dot{U}_2$ 产生的电流分别可记作为

$$\dot{I}_1'' = Y_{12}\dot{U}_2, \quad \dot{I}_2'' = Y_{22}\dot{U}_2$$

在图 9-3 所假设方向下,则

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

式中 Y_{11}, Y_{22}, Y_{21} 和 Y_{12} 称为双口网络短路导纳参数,具有导纳的量纲,它的大小与双口网络内部元件和结构有关。其中 Y_{11}, Y_{22} 又称之为自导纳,它反映了由端口电压 $\dot{U}_1$ (或 $\dot{U}_2$) 在本端口产生的电流 $\dot{I}_1$ (或 $\dot{I}_2$) 的大小; Y_{12}, Y_{21} 称之为互导纳 (或称转移导纳),它反映了由一端口电压 $\dot{U}_1$ (或 $\dot{U}_2$) 在另一端口产生的电流 $\dot{I}_2$ (或 $\dot{I}_1$) 的大小。

由式 (9-1) 可见,上述的短路导纳参数可以通过短路试验求得。当 $22'$ 短路时,即 $\dot{U}_2 = 0$,由测量 $\dot{U}_1$ 在二端口产生的电流 $\dot{I}_1, \dot{I}_2$ 可得:

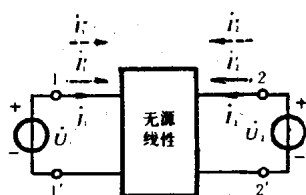


图 9-3 无源线性双口网络的电压、电流关系

$$Y_{11} = \left. \frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_1} \right|_{\dot{U}_2=0}, Y_{21} = \left. \frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_1} \right|_{\dot{U}_2=0}$$

同样,当 11' 端短路,即 $\dot{U}_1=0$,而测量由 $\dot{U}_2$ 在 11' 和 22' 端产生的电流 $\dot{I}_1$ 和 $\dot{I}_2$,可得到

$$Y_{22} = \left. \frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_2} \right|_{\dot{U}_1=0}, Y_{12} = \left. \frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_2} \right|_{\dot{U}_1=0}$$

下面举一个内部结构较为简单的双口网络作为例子来说明之。

例 9-1 试用短路试验来计算如图 9-1 所示双口网络的短路导纳参数。

解 22' 端短接,在 11' 端加电压 $\dot{U}_1$,如图中虚线所示,可见 Y_c 为短路线短接,因此此时电流:

$$\dot{I}_1 = \dot{U}_1 Y_a + \dot{U}_1 Y_b$$

$$\dot{I}_2 = -\dot{U}_1 Y_b$$

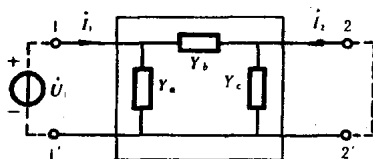


图 9-4 例 9-1 双口网络

所以可求得:

$$Y_{11} = \left. \frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_1} \right|_{\dot{U}_2=0} = \frac{\dot{U}_1(Y_a + Y_b)}{\dot{U}_1} = Y_a + Y_b$$

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

同样, 11' 端短接, 在 22' 端加一电压 $\dot{U}_2$, 则可求得:

$$\dot{I}_2 = \dot{U}_2 Y_c + \dot{U}_2 Y_b$$

$$\dot{I}_1 = -\dot{U}_2 Y_b$$

所以有

$$Y_{22} = \left. \frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_2} \right|_{\dot{U}_1=0} = \frac{\dot{U}_2 (Y_c + Y_b)}{\dot{U}_2} = Y_c + Y_b$$

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

通过上例, 可以看到:

(1) 无源线性双口网络具有互易性, 具体反映在

$$Y_{12} = Y_{21} = -Y_b$$

说明加在 11' 端的电源电压在 22' 端产生的电流大小是与此电源电压加在 22' 端, 而在 11' 端产生的电流一样的。此虽从上述简单网络中得到的, 但其适用任一线性、无源的复杂双口网络, 因此对于一个无源线性双口网络, 只有三个独立参数: 即 Y_{11} , Y_{22} 和 $Y_{12} = Y_{21}$ 就可描写。

(2) 如果无源线性双口网络中, 满足 $Y_{11} = Y_{22}$, 则称之为对称的双口网络, 也即这种网络从 11' 端和从 22' 端看进去将完全一样, 此时网络只具有两个独立参数, 即: $Y_{11} = Y_{22}$, $Y_{12} = Y_{21}$ 。读者可令图 9-4 中的 $Y_c = Y_a$ 得到对称双口网络。

式(9-1)也可用矩阵形式表示为:

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

若将电流、电压用列阵表示,则上式可写成为:

$$[\dot{I}] = [Y][\dot{U}] \quad (9-3)$$

式中

$$[Y] = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \quad (9-4)$$

称之短路导纳矩阵。

当双口网络内部含有受控源时,则短路导纳矩阵不再是对称的,即 $Y_{12} \neq Y_{21}$ 。

2. 用开路阻抗参数表示的双口网络方程

假若已知双口网络两个端口电流相量 $\dot{I}_1, \dot{I}_2$, 而求其二端口的电压相量 $\dot{U}_1$ 和 $\dot{U}_2$, 则可以通过对上式(9-1)求解得到, 按行列式求解, 则有

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= \frac{\begin{vmatrix} \dot{I}_1 & Y_{12} \\ \dot{I}_2 & Y_{22} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{vmatrix}} = \frac{Y_{22}}{\Delta_Y} \dot{I}_1 - \frac{Y_{12}}{\Delta_Y} \dot{I}_2 \\ \dot{U}_2 &= \frac{\begin{vmatrix} Y_{11} & \dot{I}_1 \\ Y_{21} & \dot{I}_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{vmatrix}} = -\frac{Y_{21}}{\Delta_Y} \dot{I}_1 + \frac{Y_{11}}{\Delta_Y} \dot{I}_2 \end{aligned} \right\} \quad (9-5)$$

式中

$$\Delta Y = Y_{11}Y_{22} - Y_{12}Y_{21}$$

而 $\frac{Y_{22}}{\Delta Y}$, $\frac{-Y_{12}}{\Delta Y}$, $\frac{-Y_{21}}{\Delta Y}$ 和 $\frac{Y_{11}}{\Delta Y}$ 都具有阻抗量纲, 分别用 Z_{11} , Z_{12} , Z_{21} 和 Z_{22} 表示, 则式(9-5)可表示为

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= Z_{11}\dot{I}_1 + Z_{12}\dot{I}_2 \\ \dot{U}_2 &= Z_{21}\dot{I}_1 + Z_{22}\dot{I}_2 \end{aligned} \right\} \quad (9-6)$$

式中 Z_{11} , Z_{22} , Z_{12} 和 Z_{21} 称为双口网络的开路阻抗参数, 它的大小同样是与双口网络内部元件和结构有关。其中 Z_{11} , Z_{22} 称为自阻抗, 它反映了端口电流 $\dot{I}_1$ (或 $\dot{I}_2$) 在本端口产生的电压 $\dot{U}_1$ (或 $\dot{U}_2$) 的大小; Z_{12} , Z_{21} 称之为互阻抗 (或转移阻抗), 它反映了由一端口电流 $\dot{I}_1$ (或 $\dot{I}_2$) 在另一端口产生的电压 $\dot{U}_2$ (或 $\dot{U}_1$) 的大小。

同理, 由式(9-6)可见, 上述的开路阻抗参数可以通过开路试验求得。当 $22'$ 开路时, 即 $\dot{I}_2 = 0$, 由测量电流 $\dot{I}_1$ 在二端口产生的电压 $\dot{U}_1$, $\dot{U}_2$ 大小, 可求得

$$Z_{11} = \left. \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} \right|_{\dot{I}_2=0}, \quad Z_{21} = \left. \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_1} \right|_{\dot{I}_2=0}$$

同样, 当 $11'$ 端开路, 即 $\dot{I}_1 = 0$, 而测量由 $\dot{I}_2$ 在二端口产生的电压 $\dot{U}_1$, $\dot{U}_2$, 可得到

$$Z_{22} = \left. \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_2} \right|_{\dot{I}_1=0}, \quad Z_{12} = \left. \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_2} \right|_{\dot{I}_1=0}$$

对于无源线性双口网络, 总有 $Z_{12} = Z_{21}$, 因此也只有三个

独立参数 Z_{11} , Z_{22} 和 $Z_{12}=Z_{21}$ 来表述该网络。

式(9-6)可写成矩阵形式表示,即

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} \quad (9-7)$$

当电压、电流用其列阵表示,则上式可写成

$$[\dot{U}] = [Z][\dot{I}] \quad (9-8)$$

式中

$$[Z] = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \quad (9-9)$$

称之为开路阻抗矩阵。

上面介绍了双口网络的两种参数所表达的电压、电流之间方程表示式,这两种表示式都是描述同一个双口网络,因此它们的参数矩阵之间必然存在某一互换关系。如果对式(9-3)两边左乘 $[Y]$ 的逆阵 $[Y]^{-1}$, 则式(9-3)可化为:

$$[\dot{U}] = [Y]^{-1}[\dot{I}]$$

上式与式(9-8)比较,可得到

$$[Z] = [Y]^{-1}$$

或者

$$[Y] = [Z]^{-1}$$

可见,短路导纳矩阵与开路阻抗矩阵之间正好满足求逆的关系。应当指出的,两矩阵中的元素并不存在互为倒数关系,即

$$Z_{11} \neq \frac{1}{Y_{11}}, Z_{22} \neq \frac{1}{Y_{22}}, Z_{12} \neq \frac{1}{Y_{12}} \text{ 和 } Z_{21} \neq \frac{1}{Y_{21}}$$

3. 用混合参数表示的双口网络方程

所谓混合参数表示,就是在双口网络中已知一端口电流(例如 $\dot{I}_1$)和另一端口电压(例如 $\dot{U}_2$),要求一端口的电压 $\dot{U}_1$ 和另一端口的电流 $\dot{I}_2$ 。这种混合参数表示的双口网络方程是晶体管电路常用的表示方法。例如,将上册中图 1-34 所示的晶体管共射极接法的电路,将晶体管用虚线框框起来,它就是一个双口网络。在这种网络中,通常已知量是 11' 端的电流 i_b (基极电流) 和 22' 端的电压 U_{ce} (集电极电压),而求 11' 端电压 U_{be} (基极电压) 和 22' 端电流 i_c (集电极电流),撇开晶体管电

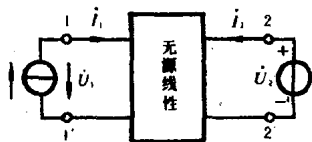


图 9-5 混合参数表示双口网络

路中的变量,仍用双口网络规定的变量,则图 1-34 就可以表示成图 9-5 所示。要指出的是,晶体管本身是一个非线性元件,而本节所讨论的双口网络仍为无源线性的。

混合参数在式中用其英语单词(Hybrid)的第一个字母 H 表示,又称之 H 参数。当已知量为 $\dot{I}_1$ 和 $\dot{U}_2$,待求量为 $\dot{U}_1$ 和 $\dot{I}_2$ 时,同样,在图 9-5 中应用叠加原理后,可表示为:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= H_{11}\dot{I}_1 + H_{12}\dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 &= H_{21}\dot{I}_1 + H_{22}\dot{U}_2 \end{aligned} \right\} \quad (9-10)$$

式中 H 参数可以通过开路、短路试验求得。当 22' 端短路时,测得电流 $\dot{I}_1$ 在二端口上的电压 $\dot{U}_1$ 和电流 $\dot{I}_2$,可得到:

$$H_{11} = \left. \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} \right|_{\dot{U}_2=0}, H_{21} = \left. \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1} \right|_{\dot{U}_2=0}$$