

半导体手册
第7编



半导体 电路理论



科学出版社

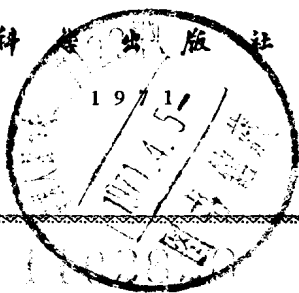
725
152
1

《半导体手册》第7編

半导体电路理論

《半导体手册》翻译组译

科学出版社



《半导体手册》第7编
半导体电路理论

《半导体手册》翻译组译

*

科学出版社出版

北京西直门外三里河路2号

北京市书刊出版业营业许可出字第061号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1971年1月第一版 开本：787×1092 1/32

1971年1月第一次印刷 印张：5 3/4

字数：127,000

统一书号：15031·288

本社书号：3647·15-7

定价：0.45元

毛主席语录

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

打破洋框框，走自己工业发展道路。

外国有的，我們要有，外国沒有的，我們也要有。

对于外国文化，排外主义的方針是錯誤的，应当尽量吸收进步的外国文化，以为发展中国新文化的借鏡；盲目搬用的方針也是錯誤的，应当以中国人民的实际需要为基础，批判地吸收外国文化。

譯者的話

本书是根据〔日〕半导体手册编委会编《半导体手册》1963年初版本译出。内容包括半导体物理学、半导体材料、晶体二极管和晶体三极管的工作原理、晶体二极管和晶体三极管、特种半导体器件、晶体二极管和晶体三极管特性、半导体电路理论、线性放大、振荡、调制与解调、脉冲电路、数字电路、电源、微波电路、参量放大器、数据等16编。

本书于1966年已全部译完，因工作量较大，未能及时出版。最近，我们征求读者意见，认为做为一般了解和查阅半导体电子技术的参考书，还应出版。我们遵照毛主席关于“**洋为中用**”的教导，为适应读者的要求，又继续进行审查校对，现将其单行出版。

本书主要特点是将半导体基础知识和应用技术综合汇编在一起的半导体电子技术的资料性参考书。书中在基础知识方面涉及的范围较为广泛，在应用技术方面介绍的比较全面，各编重点不一样，仅供读者参考。

原书中主要缺点表现在：有些编的内容尚有形式化的数学推导较多，物理分析较少；有些编在讲解概念和理论分析上有些模糊；有些编在文字和数字上有错误；有些编则为一些资产阶级学术权威和厂商吹嘘、捧场；有些编内容是从别的资料中传抄过来的，未经过实践验证。我们遵照伟大领袖毛主席“一切外国的东西，如同我们对于食物一样，必须经过自己的口腔咀嚼和胃肠运动，送进唾液胃液肠液，把它分解为精华和糟粕两部分，然后排泄其糟粕，吸收其精华，才能对我们的身体有益，决不能生吞活剥地毫无批判地吸收”的教导，加以删

节和校正。

本书在译校过程中，很多工厂、学校、科研单位给予了很大的支持和热情帮助，并提出不少宝贵意见，我们对这些单位表示衷心的感谢。

由于外文、专业知识的限制，在文字翻译及技术概念的表达上不免会有错误，又由于我们毛泽东思想学习的不够好，所以对原书中的其他错误观点及存在的问题，未能指出和很好的批判，恳切希望广大读者批评指正。

目 录

第一章 基本电路理论	(1)
1.1 晶体三极管电路	(1)
1.1.1 线性电路	(1)
1.1.2 非线性电路	(48)
1.2 晶体二极管电路及其他电路	(58)
1.2.1 普通晶体二极管	(58)
1.2.2 隧道二极管	(61)
1.2.3 SCR.....	(77)
第二章 应用电路理论	(81)
2.1 放大电路	(81)
2.1.1 偏压电路	(81)
2.1.2 匹配条件和增益	(81)
2.1.3 高输出放大电路	(92)
2.1.4 高频放大电路	(95)
2.1.5 反馈放大电路	(95)
2.1.6 非线性放大电路	(100)
2.1.7 分布放大电路	(100)
2.2 振荡电路.....	(102)
2.2.1 正弦波振荡电路	(102)
2.2.2 非正弦波振荡电路	(118)
2.3 调制电路.....	(120)
2.3.1 调制和解调	(120)
2.3.2 晶体二极管调制电路	(121)
2.3.3 利用变容二极管的调频	(127)

2.4	开关电路	(129)
2.4.1	门电路	(130)
2.4.2	放大电路	(130)
2.4.3	多谐振荡器	(130)
2.5	参量电路	(146)
2.5.1	非线性电容电路	(146)
2.5.2	非线性电阻电路	(152)
2.6	负阻电路	(156)
2.6.1	负阻电路及其应用	(156)
2.6.2	负阻变换电路 (NIC)	(161)
参考资料		(170)

第一章 基本电路理论

1.1 晶体三极管电路

1.1.1 线性电路 当所讨论的晶体三极管中的信号振幅比它的直流偏压和静态特性曲线小得多的时候,便能适用线性电路理论。

[1] 等效电路和矩阵 和电子管电路中的电子管参数一样,晶体三极管也有各种电路参数。这些参数是当把晶体三极管看作如图 7.1 所示的四端网络时用来确定其电路性能的,根据这些参数可以算出晶体管电路的输入输出阻抗、电流和电压放大系数、功率增益等等。根据不同的人和不同的

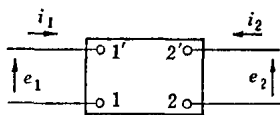


图 7.1 有源四端网络

用途,有各种不同的参数,大致可以归纳成表 7.1 那样的分类,不过参数能够经常互变,所以每次可选用适宜的一种参数。

(a) T 参数及其等效电路^[1] 对于图 7.2(a) 所示的共基极晶体三极管来说,根据用电压源或电流源来表示晶体三极管的有源作用,可分为 (b)、(c) 所示的电压源等效电路和电流源等效电路。图中 r_e 、 r_b 、 r_c 分别表示等效发射极电阻、等效基极电阻、等效集电极电阻。设电压和电流方向与图示方向一致,则得:

$$\frac{i_c}{i_e} = -\frac{r_m + r_b}{r_c + r_b} = \alpha. \quad (7.1)$$

表 7-1 晶体三极管参数的分类

晶 体 三 极 管 参 数	器件参数是根据晶体三极管的结构规定的, 物理含义明确, 容易理解。	T 参数
		杂系 π 参数
		其他高频参数
	电路参数是用四端常数来表示的, 这种参数便于计算, 特别便于用行列式来进行复合电路的计算	Z 参数
		Y 参数
		h 参数
		g 参数
		a 参数
b 参数		

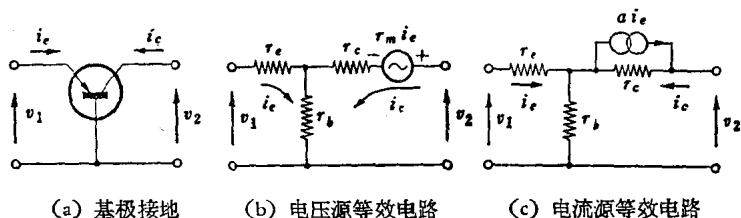


图 7.2 共基极 T 型等效电路

这个比值 α 称为共基极集电极电路短路电流放大系数, r_m 具有电阻的量纲, 称为发射极-集电极变换电阻。如果如下的关系式成立

$$\alpha = \frac{r_m}{r_c} \quad (7.2)$$

则图(b)和(c)所示的电路是完全等效的, 这个 α 称为电流放大系数。在实际的晶体三极管中, 由于 $r_b \ll r_c, r_b \ll r_m$, 所以 $\alpha \approx -a$, 往往同它的符号一起无区别地使用。

图 7.3 是共发射极 T 型等效电路, 可以很容易从共基极的等效电路推导出来, 两者的关系可由下式表示。

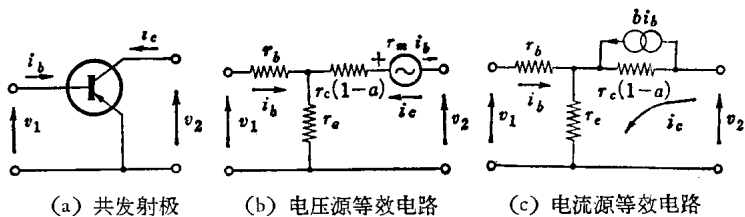


图 7-3 共发射极 T 型等效电路

$$\left. \begin{aligned}
 b &= \frac{r_m}{r_c - r_m} = \frac{r_m}{r_c(1-a)} \\
 &= \frac{a}{(1-a)} \\
 a &= \frac{b}{1+b}
 \end{aligned} \right\} \quad (7.3)$$

b 称为共发射极集电极电路短路电流放大系数。

此外，也同样可以推导出象图 7.4 那样的共集电极等效电路。

上述 T 参数及其等效电路，简单明了，已被人们普遍使用，但不适于高频计算。

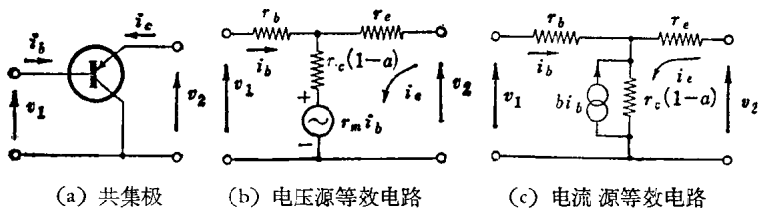


图 7.4 共集电极 T 型等效电路

(b) 杂系 π 参数及其等效电路^[5] 这个电路最初是阐明了合金结型晶体三极管从低频到高频的物理现象后用导纳参

数给出的。这个电路如图 7·5 所示，各参数都是用物理常数表示的^[5]，不仅能够了解工作点或温度的影响，并且还能给出高频特性的较精确的近似式，所以已被人们普遍使用。

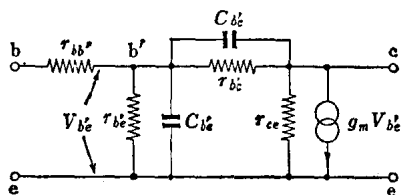


图 7·5 杂系 π 等效电路

(c) 其他的等效电路 除上述以外，还有引入高频参数的高频等效电路(参阅第六编和本编第 1·1 节以及第八编)。

(d) 电路参数及其等效电路 这是把晶体三极管看作图 7·1 所示的四端网络而用各种四端常数来表示的电路，这个电路，不但能够用矩阵表示，并且能在各种电路合成上进行矩阵运算。

$$\left. \begin{array}{ll}
 \begin{array}{l}
 Z \text{ 参数} \\
 \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} \\
 h \text{ 参数} \\
 \begin{bmatrix} e_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ e_2 \end{bmatrix} \\
 a \text{ 参数} \\
 \begin{bmatrix} e_1 \\ i_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_2 \\ -i_2 \end{bmatrix}
 \end{array} &
 \begin{array}{l}
 y \text{ 参数} \\
 \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} \\
 g \text{ 参数} \\
 \begin{bmatrix} i_1 \\ e_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ i_2 \end{bmatrix} \\
 b \text{ 参数} \\
 \begin{bmatrix} e_2 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ i_1 \end{bmatrix}
 \end{array}
 \right\} (7.4)$$

上述参数中使用最多的是 h 、 y 、 Z 、 g 参数，这些参数的

等效电路在任何情况下,也都象图 7·6 那样,可用两个电源和两个导抗来表示。

就图 7·1 的网络来说,由于进入 1' 的电流等于从 1 出来的电流、进入 2' 的电流等于从 2 出来的电流的基础上写成矩阵的,因而具有这样的优点,即只要两个网络互相连接时,进入 1' 和 2' 的电流分别等于从 1 和 2 出来的电流,那么对于图 7·7—7·11 所示的互相连接,就能进行非常简明的合成计算。

反之,将 Z 矩阵象式(7·5)那样加以分解,能得到图 7·12 的包括单向阻抗元件的等效电路^[1],象式(7·6)那样加以分

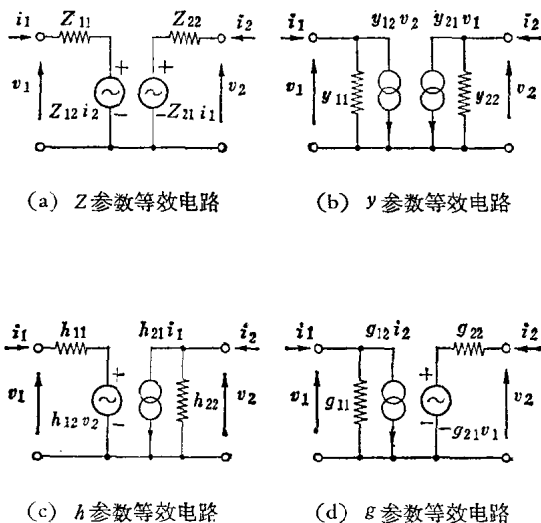
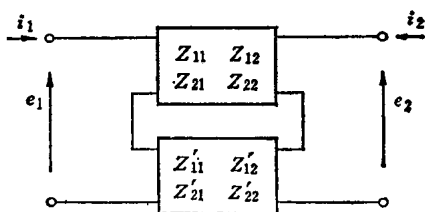


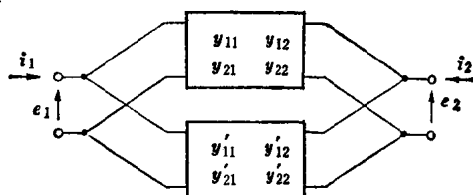
图 7·6 用电路参数构成的等效电路

解,则能得到图 7·13 的包括回转器的等效电路^[1]。或者可以表示为包括理想电压放大器、理想电流放大器和图 7·14 所示



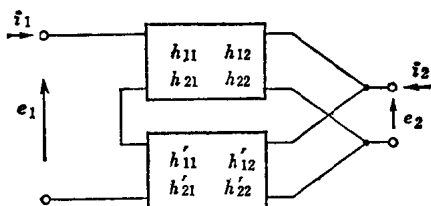
$$\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} + Z'_{11} & Z_{12} + Z'_{12} \\ Z_{21} + Z'_{21} & Z_{22} + Z'_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix}$$

图 7.7 两个网络的串联



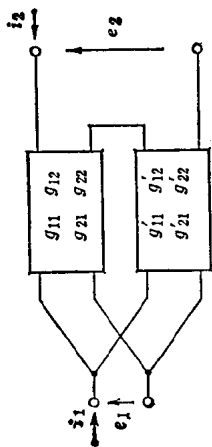
$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} + y'_{11} & y_{12} + y'_{12} \\ y_{21} + y'_{21} & y_{22} + y'_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix}$$

图 7.8 两个网络的并联



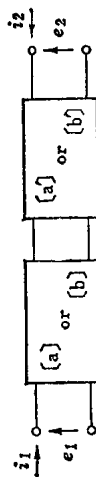
$$\begin{bmatrix} e_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} + h'_{11} & h_{12} + h'_{12} \\ h_{21} + h'_{21} & h_{22} + h'_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ e_2 \end{bmatrix}$$

图 7.9 两个网络的串并联



$$\begin{bmatrix} i_1 \\ e_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11} + g'_{11} & g_{12} + g'_{12} \\ g_{21} + g'_{21} & g_{22} + g'_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ i_2 \end{bmatrix}$$

图 7-10 两个网络的并联



$$\begin{bmatrix} e_1 \\ i_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}a'_{11} + a_{12}a'_{21} & a_{11}a'_{12} + a_{12}a'_{22} \\ a_{21}a'_{11} + a_{22}a'_{21} & a_{21}a'_{12} + a_{22}a'_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_2 \\ -i_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} e_2 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b'_{11}b_{11} + b'_{12}b_{21} & b'_{11}b_{12} + b'_{12}b_{22} \\ b'_{21}b_{11} + b'_{22}b_{21} & b'_{21}b_{12} + b'_{22}b_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ -i_1 \end{bmatrix}$$

图 7-11 两个网络的串联

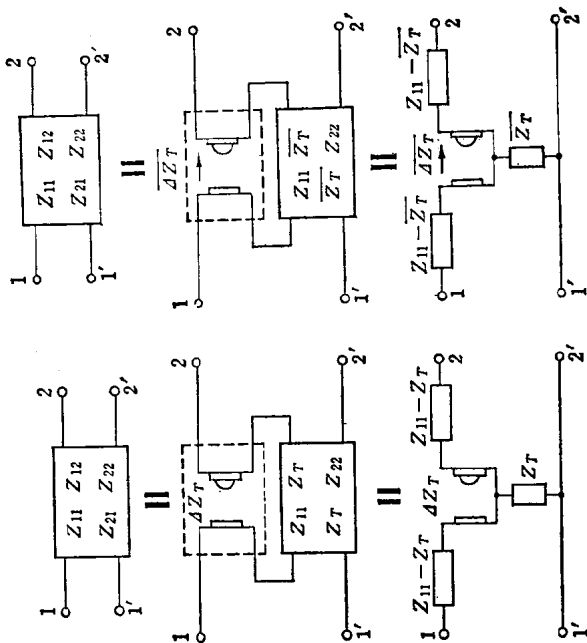


图 7-12 用单向阻抗元件和双向四端网络构成的晶体三极管等效电路

图 7-13 用通转器和双向四端网络构成的晶体三极管等效电路

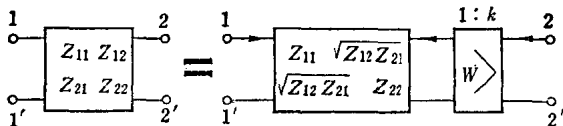


图 7-14 包含理想功率放大器的等效电路

表 7-2 矩阵的变换

自 至	→ [Z]	[y]	[h]	[g]	[a]	[b]
[Z]	Z_{11} Z_{12}	$\frac{y_{22}}{\Delta^y}$ $-\frac{y_{12}}{\Delta^y}$	$\frac{\Delta^h}{h_{22}}$ $\frac{h_{12}}{h_{22}}$	$\frac{1}{g_{11}}$ $-\frac{g_{12}}{g_{11}}$	$\frac{a_{11}}{a_{21}}$ $\frac{\Delta^a}{a_{21}}$	$\frac{b_{22}}{b_{21}}$ $\frac{1}{b_{21}}$
	Z_{21} Z_{22}	$-\frac{y_{21}}{\Delta^y}$ $\frac{y_{11}}{\Delta^y}$	$-\frac{h_{21}}{h_{22}}$ $\frac{1}{h_{22}}$	$\frac{g_{21}}{g_{11}}$ $\frac{\Delta^g}{g_{11}}$	$\frac{1}{a_{21}}$ $\frac{a_{22}}{a_{21}}$	$\frac{\Delta^b}{b_{21}}$ $\frac{b_{11}}{b_{21}}$
[y]	$\frac{Z_{22}}{\Delta^Z}$ $-\frac{Z_{21}}{\Delta^Z}$	y_{11} y_{12}	$\frac{1}{h_{11}}$ $-\frac{h_{12}}{h_{11}}$	$\frac{\Delta^g}{g_{22}}$ $\frac{g_{12}}{g_{22}}$	$\frac{a_{22}}{a_{12}}$ $-\frac{\Delta^a}{a_{12}}$	$\frac{b_{11}}{b_{12}}$ $-\frac{1}{b_{12}}$
	$-\frac{Z_{21}}{\Delta^Z}$ $\frac{Z_{11}}{\Delta^Z}$	y_{21} y_{22}	$\frac{h_{21}}{h_{11}}$ $\frac{\Delta^h}{h_{11}}$	$-\frac{g_{21}}{g_{22}}$ $\frac{1}{g_{22}}$	-1 $\frac{a_{11}}{a_{12}}$	$-\frac{\Delta^b}{b_{12}}$ $\frac{b_{22}}{b_{12}}$
[h]	$\frac{\Delta^Z}{Z_{22}}$ $\frac{Z_{12}}{Z_{22}}$	$\frac{1}{y_{11}}$ $-\frac{y_{12}}{y_{11}}$	h_{11} h_{12}	$\frac{g_{22}}{\Delta^g}$ $-\frac{g_{12}}{\Delta^g}$	$\frac{a_{12}}{a_{22}}$ $\frac{\Delta^a}{a_{22}}$	$\frac{b_{12}}{b_{11}}$ $\frac{1}{b_{11}}$
	$-\frac{Z_{21}}{Z_{22}}$ $\frac{1}{Z_{22}}$	$\frac{y_{21}}{y_{11}}$ $\frac{\Delta^y}{y_{11}}$	h_{21} h_{22}	$-\frac{g_{21}}{\Delta^g}$ $\frac{g_{11}}{\Delta^g}$	-1 $\frac{a_{21}}{a_{22}}$	$-\frac{\Delta^b}{b_{11}}$ $\frac{b_{21}}{b_{11}}$
[g]	$\frac{1}{Z_{11}}$ $-\frac{Z_{12}}{Z_{11}}$	$\frac{\Delta^y}{y_{22}}$ $\frac{y_{12}}{y_{22}}$	$\frac{h_{22}}{\Delta^h}$ $-\frac{h_{12}}{\Delta^h}$	g_{11} g_{12}	$\frac{a_{21}}{a_{11}}$ $-\frac{\Delta^a}{a_{11}}$	$\frac{b_{21}}{b_{22}}$ $-\frac{1}{b_{22}}$
	$\frac{Z_{21}}{Z_{11}}$ $\frac{\Delta^Z}{Z_{11}}$	$-\frac{y_{21}}{y_{22}}$ $\frac{1}{y_{22}}$	$-\frac{h_{21}}{\Delta^h}$ $\frac{h_{11}}{\Delta^h}$	g_{21} g_{22}	$\frac{1}{a_{11}}$ $\frac{a_{12}}{a_{11}}$	$\frac{\Delta^b}{b_{22}}$ $\frac{b_{12}}{b_{22}}$
[a]	$\frac{Z_{11}}{Z_{21}}$ $\frac{\Delta^Z}{Z_{21}}$	$-\frac{y_{22}}{y_{21}}$ $-\frac{1}{y_{21}}$	$-\frac{\Delta^h}{h_{21}}$ $-\frac{h_{11}}{h_{21}}$	$\frac{1}{g_{21}}$ $\frac{g_{22}}{g_{21}}$	a_{11} a_{12}	$\frac{b_{22}}{\Delta^b}$ $\frac{b_{12}}{\Delta^b}$
	$\frac{1}{Z_{21}}$ $\frac{Z_{22}}{Z_{21}}$	$-\frac{\Delta^y}{y_{21}}$ $-\frac{y_{11}}{y_{21}}$	$-\frac{h_{22}}{h_{21}}$ $-\frac{1}{h_{21}}$	$\frac{g_{11}}{g_{21}}$ $\frac{\Delta^g}{g_{21}}$	a_{21} a_{22}	$\frac{b_{21}}{\Delta^b}$ $\frac{b_{11}}{\Delta^b}$
[b]	$\frac{Z_{22}}{Z_{12}}$ $\frac{\Delta^Z}{Z_{12}}$	$-\frac{y_{11}}{y_{12}}$ $-\frac{1}{y_{12}}$	$\frac{1}{h_{12}}$ $\frac{h_{11}}{h_{12}}$	$-\frac{\Delta^g}{g_{12}}$ $-\frac{g_{22}}{g_{12}}$	$\frac{a_{12}}{\Delta^a}$ $\frac{a_{12}}{\Delta^a}$	b_{11} b_{12}
	$\frac{1}{Z_{12}}$ $\frac{Z_{11}}{Z_{12}}$	$-\frac{\Delta^y}{y_{12}}$ $-\frac{y_{22}}{y_{12}}$	$\frac{h_{22}}{h_{12}}$ $\frac{\Delta^h}{h_{12}}$	$-\frac{g_{11}}{g_{12}}$ $-\frac{1}{g_{12}}$	$\frac{a_{21}}{\Delta^a}$ $\frac{a_{11}}{\Delta^a}$	b_{21} b_{22}

的理想功率放大器的等效电路^[11,15,38]。

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_T \\ Z_T & Z_{22} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \Delta Z_T & 0 \end{bmatrix} \quad (7.5)$$

式中 $Z_{12} = Z_T$, $Z_{21} = Z_T + \Delta Z_T$

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & \bar{Z}_T \\ \bar{Z}_T & Z_{22} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\overline{\Delta Z_T} \\ \overline{\Delta Z_T} & 0 \end{bmatrix} \quad (7.6)$$

式中 $\bar{Z}_T = (Z_{21} + Z_{12})/2$

$\overline{\Delta Z_T} = (Z_{21} - Z_{12})/2$

(e) 参数的互相变换 即使不知道式(7.4)所列举的全部参数,对这些参数也能够进行表7.2和7.3^[1,3]的线性互换。

这些电路参数和 T 参数的关系示于表7.4^[1,3]。

此外,最常用的 h 参数、 T 参数、杂系 π 参数的关系,示于表7.5—7.7^[9,10,17]。

表7.3 行列式变换表

自 至	$\rightarrow \Delta Z$	Δy	Δh	Δg	Δa	Δb
$\downarrow \Delta Z$	ΔZ	$\frac{1}{\Delta y}$	$\frac{h_{11}}{h_{22}}$	$\frac{g_{22}}{g_{11}}$	$\frac{a_{12}}{a_{11}}$	$\frac{b_{12}}{b_{21}}$
Δy	$\frac{1}{\Delta Z}$	Δy	$\frac{h_{22}}{h_{11}}$	$\frac{g_{11}}{g_{22}}$	$\frac{a_{21}}{a_{12}}$	$\frac{b_{21}}{b_{12}}$
Δh	$\frac{Z_{11}}{Z_{22}}$	$\frac{y_{22}}{y_{11}}$	Δh	$\frac{1}{\Delta g}$	$\frac{a_{11}}{a_{22}}$	$\frac{b_{22}}{b_{11}}$
Δg	$\frac{Z_{22}}{Z_{11}}$	$\frac{y_{11}}{y_{22}}$	$\frac{1}{\Delta h}$	Δg	$\frac{a_{22}}{a_{11}}$	$\frac{h_{11}}{b_{12}}$
Δa	$\frac{Z_{12}}{Z_{21}}$	$\frac{y_{12}}{y_{21}}$	$-\frac{h_{12}}{h_{21}}$	$-\frac{g_{12}}{g_{21}}$	Δa	$\frac{1}{\Delta b}$
Δb	$\frac{Z_{21}}{Z_{12}}$	$\frac{y_{21}}{y_{12}}$	$-\frac{h_{21}}{h_{12}}$	$-\frac{g_{21}}{g_{12}}$	$\frac{1}{\Delta a}$	Δb