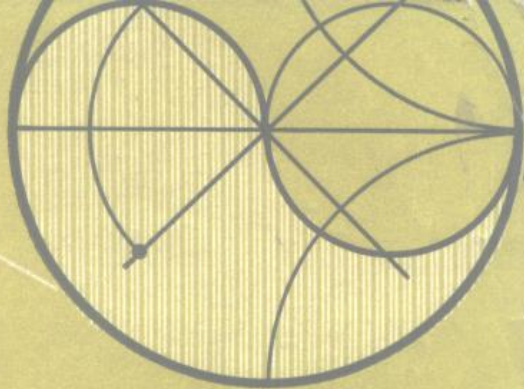
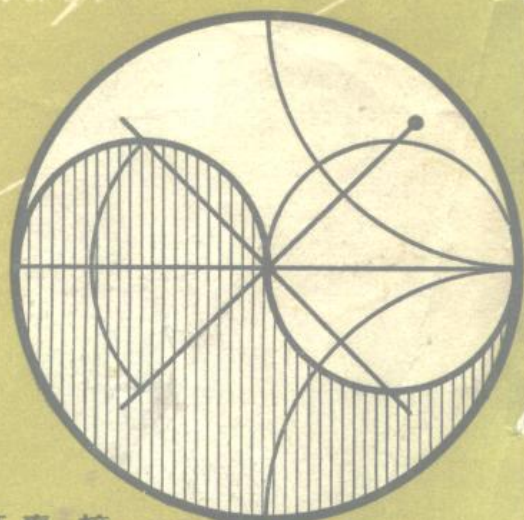


[美] R·S·卡逊 著

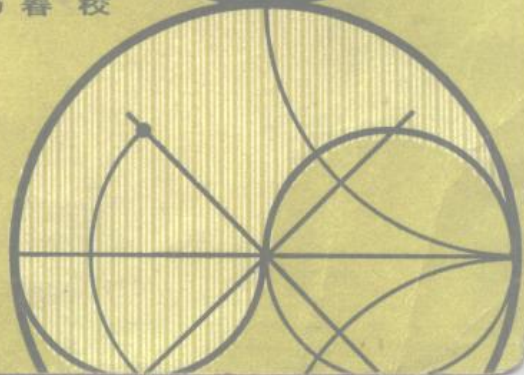


高频放大器

Gaopin Fangdaji



赵志美 廖承恩 译 吴万春 校



73.7634
162

高频放大器

【美】R.S.卡逊 著
赵志美 廖承恩 译
吴 万 春 校



人民邮电出版社

1109396

D-16/B
HIGH-FREQUENCY AMPLIFIERS

Ralph S. Carson

内 容 简 介

本书较系统地介绍高频晶体管小信号放大器的原理，着重讲述用导纳参数和散射参数的设计方法，特别强调导抗圆图的应用，并举出大量计算例题。

本书可供从事微波技术的工作人员参考，也可用作高等院校有关专业的教学参考书。

高 频 放 大 器

[美]R.S.卡逊 著

赵志美 廖承恩 译

吴 万 春 校

•
人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

河北省邮电印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

•
开本：787×1092 1/32 1981年2月 第一版

印张：7 24/32 页数：124.1981年2月河北第一次印刷

字数：175 千字 印数：1—11,500 册

统一书号：15045·总2393—无6101

定价：0.81 元

译者序

本书比较系统地阐述了高频双极晶体管小信号放大器的原理和设计，特别引用了史密斯圆图及散射参数作为设计工具，讲解简明，浅近易懂，并附有大量例题和习题，是一本较好的参考书。但该书对宽频和低噪声放大器的原理和设计，场效应晶体管的应用，都没有涉及。

全书共分七章。第一章概述晶体管双端口参数及其互换关系，介绍了参数计算方法。第二章讨论了线性有源晶体管的阻抗和增益特性，论述了绝对稳定性和潜在不稳定性条件。第三章介绍了高频晶体管放大器的设计工具，包括史密斯圆图、导抗匹配技术及微带。第四章专门讨论了单向放大器和共发—共基放大器电路。第五章论述高频晶体管放大器的设计技术。第六章介绍了散射参数及其与其它参数的变换关系式，讨论了有源和无源的准则、潜在不稳定性、不定散射矩阵及定向耦合器。第七章专门讨论了用散射参数进行放大器设计的问题与设计技术。

对原书中的一些明显错误，已予改正，并列表附在本书后面。

由于我们的水平有限，译文中难免有不妥和错误之处，希望读者批评指正。

译者 1979年9月

目 录

第一章 晶体管参数	(1)
1-0 引言	(1)
1-1 晶体管双端口参数	(1)
1-11 开路阻抗参数 $[z]$	(3)
1-12 短路导纳参数 $[y]$	(4)
1-13 混合参数 $[h]$	(5)
1-2 不定导纳矩阵	(7)
1-3 偏差微积	(11)
1-31 偏差微积法则	(12)
1-32 晶体管参数变换	(14)
1-4 有源和无源	(17)
1-5 混合 π 型晶体管模型	(22)
1-51 混合 π 型模型的简化	(22)
1-52 混合 π 型不定导纳矩阵.....	(23)
1-53 最大振荡频率	(25)
习题.....	(27)
第二章 稳定性与放大器设计	(29)
2-0 引言	(29)
2-1 负阻的性质	(31)
2-2 稳定性和不稳定性	(33)
2-3 绝对稳定性条件	(34)
2-31 林维尔稳定系数	(37)

2-4 功率增益	(38)
2-41 工作功率增益	(39)
2-411 最佳源阻抗	(42)
2-412 双共振匹配条件	(45)
2-42 转换功率增益	(48)
2-43 广义设计关系式	(50)
2-5 单向功率增益	(52)
2-6 调谐性	(53)
2-7 带宽	(54)
习题	(58)
第三章 电路设计工具	(60)
3-0 引言	(60)
3-1 史密斯圆图	(60)
3-11 导抗的互逆	(65)
3-12 负电阻	(66)
3-2 导抗匹配	(67)
3-21 其它常用的匹配网络	(73)
3-3 微带	(76)
3-31 用微带进行导抗匹配	(78)
习题	(82)
第四章 单向放大器	(85)
4-0 引言	(85)
4-1 共发——共基放大器电路	(85)
4-2 一些电路关系式	(88)
4-21 Q值	(88)
4-22 串联—并联变换	(89)
4-3 带宽考虑	(96)

4-4	具有特定带宽的最佳源终端	(99)
4-5	功率增益在史密斯圆图上的表示	(101)
4-6	电压和电流增益在史密斯圆图上的表示	(105)
	习题	(108)
第五章	高频放大器设计	(111)
5-0	引言	(111)
5-1	功率增益与负载导纳的关系	(111)
5-2	调谐性	(116)
5-3	史密斯圆图上的输入导纳	(117)
5-31	等 $G_{in} = 0$ 线	(121)
5-32	归一化输入导纳	(123)
5-4	用潜在不稳定晶体管的设计	(126)
5-41	失配技术	(128)
5-42	发射极电路引起的不稳定性	(138)
	习题	(148)
第六章	散射参数	(151)
6-0	引言	(151)
6-1	单端口网络	(152)
6-2	n 端口网络	(155)
6-3	归一化散射参数	(159)
6-31	参数互换	(161)
6-4	散射参数的计算	(162)
6-5	物理意义	(170)
6-6	潜在不稳定性	(174)
6-7	散射参数的测量	(175)
6-71	定向耦合器	(177)
6-8	不定散射矩阵	(180)

6-9 有源和无源	(182)
习题	(184)
第七章 用散射参数的设计	(187)
7-0 引言	(187)
7-1 广义散射参数的计算	(188)
7-2 单向放大器	(190)
7-21 情况A: $ S_{ii} < 1$	(193)
7-22 情况B: $ S_{ii} > 1$	(197)
7-23 宽带设计	(201)
7-24 单向优值	(205)
7-3 非单向放大器	(206)
7-31 绝对稳定性条件	(207)
7-32 功率增益圆	(213)
7-33 双共轭匹配	(217)
7-34 用潜在不稳定晶体管的设计	(219)
习题	(222)
附录A 广义散射参数	(225)
附录B 散射参数不等式	(233)
文献目录	(235)
原书勘误表	(238)

第一章 晶体管参数

1-0 引言

晶体管是三端器件。在应用时，其中一端为输入、输出电路的公共端。这就形成众所周知的三种电路结构：共基电路（CB）、共发电路（CE）和共集电路（CC）。公共端往往还要接到参考地上。

公共端可与其余两端中的任一端组成一个端对。每一端对称为一个端口，基本的共基、共发、共集电路结构中，都有两个端对。故这些电路称为双端口网络。两个端口通常都可作为输入端口和输出端口，但集电极除了某些特定应用外，一般不用作输入端。常用的晶体管连接方式列于图1-1中。

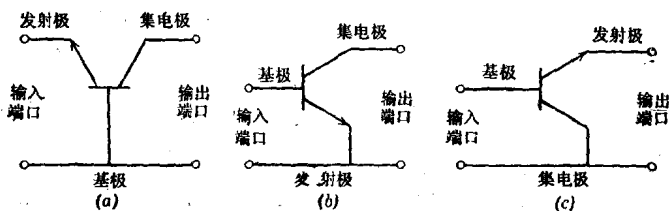


图 1-1 晶体管基本电路
(a)共基极；(b)共发射极；(c)共集电极。

1-1 晶体管双端口参数

电子电路主要是用来处理信息的。原始信息可能是非电

1109396

的，例如热、声、压力或湿度。在此情况下，先要用变换器将信息转换成等效的电量，然后使晶体管工作。电信息称为信号，它以信号电流、信号电压和信号功率的形式存在。

晶体管的信号处理能力取决于信号的大小。即使晶体管的输入—输出信号关系本质上是非线性的，但在信号非常小的情况下，仍可以适当地用线性双端口器件来描述。大信号可能使晶体管进入截止和饱和区。因此，当晶体管被看成线性双端口网络时，常要对它规定某些小信号参数。

图 1-2 所示的晶体管双端口网络有几组小信号参数，这取决于在信号电压和电流中，以哪一个作为自变量，以哪一个作为因变量。对于小信号正弦波，电压和电流可以表示成为信息矢量，而参数可表示成为频率的函数，或者都可以通过拉普拉斯变换来表示。



图 1-2 晶体管双端口网络

在表 1-1 中列出了几个参数组，表中 Φ_{i1} 和 Φ_{i2} 是两个自变量， Φ_{d1} 和 Φ_{d2} 是两个因变量， k_i , k_r , k_f 和 k_o 是特定的一组参数。

表 1-1

Φ_{i1}	Φ_{i2}	Φ_{d1}	Φ_{d2}	k_i	k_r	k_f	k_o
I_1	I_2	V_1	V_2	z_i	z_r	z_f	z_o
V_1	V_2	I_1	I_2	y_i	y_r	y_f	y_o
I_1	V_2	V_1	I_2	h_i	h_r	h_f	h_o
V_1	I_2	I_1	V_2	g_i	g_r	g_f	g_o
V_2	$-I_2$	V_1	I_1	A	B	C	D
V_1	$-I_1$	V_2	I_2	\mathcal{A}	\mathcal{B}	\mathcal{C}	\mathcal{D}

各因变量、自变量和参数之间的关系可以用矩阵形式表示为：

$$\begin{bmatrix} \Phi_{d1} \\ \Phi_{d2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_i & k_r \\ k_t & k_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{i1} \\ \Phi_{i2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

或者表示为:

$$(\Phi_d) = (k)(\Phi_i) \quad (2)$$

式中 (Φ_d) 和 (Φ_i) 是列矩阵, (k) 是参数方矩阵。

表1-1的六个参数组中, 只有三组广泛地用来描述晶体管双端口电路, 它们是 z 参数、 y 参数和 h 参数。表1-1中未列出散射参数, 因为它们与电压和电流没有直接关系。但它们在100兆赫以上时却非常有用。散射参数的详细讨论见第六章。

1-11 开路阻抗参数 $[z]$

如果电流为自变量, 则因变量电压为:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_i & z_r \\ z_t & z_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

或者

$$\begin{cases} V_1 = z_i I_1 + z_r I_2 \\ V_2 = z_t I_1 + z_o I_2 \end{cases} \quad (4)$$

对于某一特定的晶体管, 在其工作点和一定的信号频率上, z 参数是一组常数。只要信号振幅足够小, 能够保证线性工作, 这组参数就与信号振幅无关。令任一个自变量电流等于零, 即可测出这组常数。

把输出电路开路, 使信号电流 $I_2 = 0$, 然后求出信号电压 V_1 产生的电流 I_1 , 就可求得 z_i 值, 即 $z_i = V_1 / I_1$, 称为开路输入阻抗。如果在开路输出端求出信号电流 I_1 产生的电压 V_2 , 则 $z_t = V_2 / I_1$, 称为开路正向转移阻抗。

同样, 把输入电路开路, 使信号电流 $I_1 = 0$, 然后求出信号电流 I_2 在开路输入端产生的电压 V_1 , 则 $z_r = V_1 / I_2$, 称为开

路反向转移阻抗。如果在输出端求出电流 I_2 产生的电压 V_2 ，则 $z_o = V_2/I_2$ ，称为开路输出阻抗。

开路阻抗参数的实验室测量要求对信号电流开路，而不是对直流电流开路，晶体管还必须有适当的偏置。实际上，只要在电路开路处串入一个大电感，就可使信号电流开路。如果电路阻抗在加电感之前是很小的话，则这种方法是可取的，但是这个条件对正向偏置的发射结来说，可近似满足，而对反向偏置的集电结来说，是不能满足的。故在宽频带范围内精确测量开路阻抗参数必定存在着某些困难的问题。

在晶体管发展的初期，开路阻抗参数在一定范围内使用过。当信号频率高到几兆赫时只偶尔采用过，此时参数存在着小的电抗分量。由于晶体管制造工艺方面的进展以及其它参数的使用，开路阻抗参数已不再作为晶体管的技术规格了。

1-12 短路导纳参数〔 y 〕

如果电压为自变量，则因变量电流由下式给出：

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_i & y_r \\ y_f & y_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

或者

$$\begin{cases} I_1 = y_i V_1 + y_r V_2 \\ I_2 = y_f V_1 + y_o V_2 \end{cases} \quad (6)$$

式中

$$y_i = \left. \frac{I_1}{V_1} \right|_{V_2=0} = \text{短路输入导纳}$$

$$y_r = \left. \frac{I_1}{V_2} \right|_{V_1=0} = \text{短路反向转移导纳}$$

$$y_f = \frac{I_2}{V_1} \Big|_{V_2=0} = \text{短路正向转移导纳}$$

$$y_o = \frac{I_2}{V_2} \Big|_{V_1=0} = \text{短路输出导纳}$$

导纳参数可以是实数或复数，它们取决于晶体管的类型和信号的频率。在实验室测量导纳参数时，把所需短路的端子间跨接一个大电容器，使 V_1 和 V_2 等于零，可获得有效的短路。如果电路阻抗已经很高，象反向偏置的集—基电路那样，这个方法就特别有效；但如果该电路阻抗低，象正向偏置的发—基电路那样，该方法的效果就不怎么好了。

在高到几百兆赫的整个宽频带范围内进行测量时，要在很宽的频带内实行短路是很难做到的。在这样高的频率上，调整到适当长度的调谐短截线能够实现所需的短路。但信号频率的每一变化都需要重调短截线，故精确测量短路导纳参数往往是困难而繁琐的。但是 y 参数却非常有用。晶体管制造厂有时会给出 y 参数随频率变化的情况。

1-13 混合参数〔 h 〕

已经指出，在阻抗很小的电路中，能最有效地实现开路；而在阻抗很大的电路中，则能最有效地实现短路。对于晶体管来说，其共基和共发电路的输出端口的阻抗高，所以在输出端进行短路参数测量将是精确的；其输入端口的阻抗低，故在输入端进行开路参数测量将是精确的。利用混合参数可以得到这些优点。

如果 I_1 和 V_2 选为自变量，则因变量 V_1 和 I_2 由下式给出：

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_i & h_r \\ h_f & h_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

或者

$$\begin{cases} V_1 = h_i I_1 + h_r V_2 \\ I_2 = h_f I_1 + h_o V_2 \end{cases} \quad (8)$$

式中

$$\begin{aligned} h_i &= \left. \frac{V_1}{I_1} \right|_{V_2=0} && = \text{短路输入阻抗} \\ h_r &= \left. \frac{V_1}{V_2} \right|_{I_1=0} && = \text{开路反向电压增益} \\ h_f &= \left. \frac{I_2}{I_1} \right|_{V_2=0} && = \text{短路正向电流增益} \\ h_o &= \left. \frac{I_2}{V_2} \right|_{I_1=0} && = \text{开路输出导纳} \end{aligned}$$

因为它们具有不同的量纲，故称为混合 h 参数。对于共基和共发射极晶体管电路，将高阻抗的集电极电路或输出电路短路，即可使 $V_2 = 0$ ，而使低阻抗的发射极—基极电路或输入电路开路，即可使 $I_1 = 0$ 。混合 g 参数和 $ABCD$ 参数都不满足这些电路阻抗条件，因而没有广泛用作晶体管的技术规格。

h 参数可以是实数或复数，它取决于晶体管和信号频率。但由于量纲的不同，对它们的实部和虚部没有统一的标准和习惯的表示法。由于 z 、 r 和 x 都以欧姆来量度，故可用 $r + jx$ 来方便地表示 z 参数。 y 、 g 和 b 都以姆欧来量度，故可用 $g + jb$ 来方便地表示 y 参数。 h 参数在此方面最好的表示，是用 R_e 和 I_m 分别代表它们的实部和虚部**。

h 参数是最广泛应用的参数组之一。 z 、 y 和 h 参数之间的换算关系列于表1-2中。

** 译注， R_e 取英文 *Real*（实数）之头两字母， I_m 则取自 *Imaginary*（虚数）之头两字母。

表 1-2

各种参数之间的换算*

由 至	z		y		h	
z	z_i	z_r	$\frac{y_o}{D_y}$	$-\frac{y_r}{D_y}$	$\frac{D_h}{h_o}$	$\frac{h_r}{h_o}$
	z_i	z_o	$-\frac{y_i}{D_y}$	$\frac{y_i}{D_y}$	$-\frac{h_i}{h_o}$	$\frac{1}{h_o}$
y	$\frac{z_o}{D_z}$	$-\frac{z_r}{D_z}$	y_i	y_r	$\frac{1}{h_i}$	$-\frac{h_r}{h_i}$
	$-\frac{z_i}{D_z}$	$\frac{z_i}{D_z}$	y_i	y_o	$\frac{h_r}{h_i}$	$\frac{D_h}{h_i}$
h	$\frac{D_x}{z_o}$	$\frac{z_r}{z_o}$	$\frac{1}{y_i}$	$-\frac{y_r}{y_i}$	h_i	h_r
	$-\frac{z_i}{z_o}$	$\frac{1}{z_o}$	$\frac{y_i}{y_i}$	$\frac{D_y}{y_i}$	h_i	h_o

* D表示参数行列式的值, 例如

$$D_h = h_i h_o - h_r h_i$$

1-2 不定导纳矩阵

无论将晶体管的发射极、基极或集电极作为公共参考端, 都不是绝对必要的, 完全可以选择外部其它点作为公共参考端, 如图 1-3 所示。图中端点 1、2 和 3 对应于基极、发射极和集电极, 整个电路的作用象一个三端口网络。如果信号电压是自变量, 则因变量电流可由下式给出:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & y_{13} \\ y_{21} & y_{22} & y_{23} \\ y_{31} & y_{32} & y_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad (9)$$

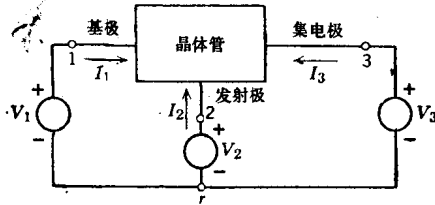


图 1-3 具有外部参考点 r 的晶体管

因为不定导纳矩阵任一行或任一列之和都等于零，所以它是非常有用的。

为了证明其任一列之和等于零，在图 1-3 中的参考点 r 上应用克希荷夫电流定律，有

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0 \quad (10)$$

由于式(9)对任意小的信号电压值都是成立的，故可令 $V_2 = V_3 = 0$ ，则式(9)变为：

$$I_1 = y_{11}V_1 \quad I_2 = y_{21}V_1 \quad I_3 = y_{31}V_1 \quad (11)$$

将式(11)代入式(10)得到：

$$(y_{11} + y_{21} + y_{31})V_1 = 0 \quad (12)$$

由于未假定 V_1 为零，故

$$y_{11} + y_{21} + y_{31} = 0 \quad (13)$$

这就证明了第一列之和等于零。同样，令 $V_2 \neq 0$ ， $V_1 = V_3 = 0$ ，可证明第二列之和等于零；而令 $V_3 \neq 0$ ， $V_1 = V_2 = 0$ ，可证明第三列之和等于零。

为了证明其任一行之和等于零，令三个信号电压都等于 V_0 。晶体管各端对节点 r 的电压相同，其上不可能有电流。这

样，由于 $V_1=V_2=V_3=V_0$ ，电流 $I_1=I_2=I_3=0$ 。由式(9)

$$I_1 = y_{11}V_1 + y_{12}V_2 + y_{13}V_3$$

或者

$$0 = (y_{11} + y_{12} + y_{13})V_0 \quad (14)$$

由于未假定 V_0 为零，故

$$y_{11} + y_{12} + y_{13} = 0 \quad (15)$$

或者说第一行之和等于零。由式(9)写出 I_2 和 I_3 的方程式，同样可证明第二行以及第三行之和也等于零。

如果不定导纳矩阵的9个参数中有4个是已知的(但其中3个不在同一行或同一列中)，使任一行或任一列之和等于零，就可以计算出其它参数。这说明对晶体管电路可以很方便地进行测量，并且测量所要求的信号短路一般是在高阻抗电路中。

假定已知共发电路的4个短路导纳参数，并计算出其它5个参数后，按照基极、发射极和集电极的数字顺序，将它们排在不定导纳矩阵的行和列中，于是共基电路的 y 参数就可从交叉去掉对应于基极数字的行和列而剩下的数求得；共集电路的 y 参数就可从交叉去掉对应于集电极数字的行和列而剩下的数求得。

例1-1

一晶体管的共发 y 参数为：

$$y_{ie} = (2 + j2) \times 10^{-3} \quad y_{re} = (-2 - j20) \times 10^{-6}$$

$$y_{fe} = (20 - j3) \times 10^{-3} \quad y_{oe} = (20 + j60) \times 10^{-6}$$

求共基和共集参数。

解答

想象去掉不定导纳矩阵中对应于发射极的行和列后(如图1-4a所示)，将已知的参数填入适当空位，然后计算出其它5