

放大与整流設備講义

(第三册 晶体管放大器)

成都电訊工程学院选編

北京科学教育編輯室

1962.1

放大与整流设备讲义
第三册 晶体管放大器

*

出版者：北京科学教育编辑室

印刷者：中国人民解放军535工厂

787×1092毫米 $\frac{1}{16}$ ，印张7 $\frac{1}{8}$

1961年8月第一版

1962年1月第二次印刷

定价：~~1.20~~元
0.99

目 录

第一章 晶体管放大器概論

§ 1-1 晶体管放大器的指标和分类	(1)
(一) 晶体管放大器的指标	(1)
(二) 晶体管放大器的分类	(2)
§ 1-2 三种基本放大电路类型的分析	(2)
(一) 共发射极放大电路的分析	(3)
(二) 共基极放大电路的分析	(7)
(三) 共集电极放大电路的分析	(8)
§ 1-3 晶体管电路和电子管电路的类比	(10)
(一) 管子特性之間的类比	(10)
(二) 基本电路的类比	(11)
§ 1-4 直流偏置电路	(13)
(一) 工作点的选择	(14)
(二) 固定偏流电路	(14)
(三) 有电压負回授的偏流电路	(15)
(四) 有电流負回授的偏流电路	(17)
(五) 反向飽和电流 I_{co} 对工作点稳定性影响	(18)

第二章 前置放大器

§ 2-1 阻容耦合放大器	(21)
(一) 阻容耦合放大器的綫路	(21)
(二) 阻容耦合放大器的特性分析	(21)
(三) 阻容耦合放大器的頻率特性	(24)
(四) 自偏电路	

(五) 晶体管阻容耦合放大器的設計.....	(25)
(六) 晶体管阻容耦合放大器的效率.....	(29)
§ 2-2 变压器耦合放大器.....	(30)
§ 2-3 控制电路.....	(31)
§ 2-4 倒相电路.....	(33)
§ 2-5 晶体管放大器中的回授.....	(34)
(一) 基本原理.....	(34)
(二) 常用的回授电路.....	(36)

第三章 脉冲放大器与直流放大器

引 言.....	(39)
§ 3-1 脉冲放大器的級間联接法.....	(40)
§ 3-2 脉冲放大器的补偿.....	(41)
(一) 低頻补偿.....	(41)
(二) 高頻补偿.....	(43)
§ 3-3 脉冲放大器的暂态分析.....	(51)
(一) 暂态过程的物理基础.....	(51)
(二) 暂态特性.....	(53)
§ 3-4 晶体管直流放大器.....	(54)
(一) 基本特点.....	(54)
(二) 晶体管直流放大器的分析.....	(55)
(三) 漂移补偿的方法.....	(57)
(四) 电源的稳定性問題.....	(61)

第四章 晶体管功率放大器

引 言.....	(62)
§ 4-1 晶体管单管功率放大器.....	(62)
(一) 共基极单管功率放大器.....	(62)
(二) 共发射极单管功率放大器.....	(67)

(三) 共集电极功率放大器	(69)
(四) 单管功率放大器的设计	(71)
(五) 结合型晶体三极管单管末级放大器的图解设计举例	(75)
§ 4-2 推挽功率放大器	(73)
(一) 推挽功率放大器概述	(78)
(二) B类推挽放大器	(79)
(三) 结合型晶体三极管推挽级的图解法举例	(85)

附 录

I 晶体三极管的静特性曲线	(90)
(一) 共基极接法的特性曲线	(91)
(二) 共发射极接法的特性曲线	(93)
(三) 点触型三极管的静特性曲线	(93)
II 晶体三极管的静参量	(97)
(一) y 参量系 (导纳参量系)	(97)
(二) z 参量系 (阻抗参量系)	(97)
(三) h 参量系 (混合参量系)	(100)
(四) $[Y]$ 、 $[Z]$ 和 $[H]$ 之间的关系	(103)
(五) 晶体管参数的测量	(104)
(六) 参量的运用条件	(106)
III 晶体管的低频等效电路	(109)
(一) 共发射极的等效电路	(109)
(二) 共基极 T型等效电路	(113)
(三) 共集电极 T型等效电路	(116)
IV 对使用晶体管的指示	(118)

第一章 晶体管放大器概論

在半导体器件中我們已討論了晶体三极管的特性曲綫、靜參量和等效电路（为了参考方便起見，我們將这些内容列于本书附录中）。下面我們就要討論具体的晶体管电路和它們的运用。在低頻范圍內，晶体三极管主要用作前置放大器和功率放大器。前面講过晶体三极管的放大作用，依靠这种作用，就可以将晶体管当作控制元件，在放大电路中，它能够将直流电能轉換为交流电能。这一点和电子管的控制作用是一样的。应当指出，在研究晶体管电路时，我們都是将晶体管当作一个电流控制元件，而电子管則是作为电压控制元件来使用，这是晶体管与电子管一个很重要的区别。我們將晶体管当作电流控制元件，是由于下面两个原因：（1）在晶体管电路中，只有輸入电流对輸出电流的控制規律，才是一个很理想的綫性关系；（这一点很容易从靜特性曲綫中看出来）（2）晶体管的輸入端存在着低的輸入电阻，工作时总是有功率損耗。另外做为前置放大时，輸出端的功率損耗也不小。因此，电流問題是一个需要着重考虑的因素。正是因为这样，所以，在晶体管电路中，不論是前置放大器还是功率放大器，談得更多的是电流增益，功率增益，而不是电压增益。同样，我們只称为前置放大而不称为电压放大，也是由于这个原因。

在研究具体的前置放大器和功率放大器之前，我們先討論一些帶共同性的問題，为后面的研究打下基础。这些問題就是：晶体管放大器的指标和分类、三种基本电路类型的分析、与电子管的类比、以及在晶体管电路中較突出的直流偏置电路等。下面我們就分別来討論。

§ 1-1 晶体管放大器的指标和分类

（一）晶体管放大器的指标

1.（1）放大倍数——电流放大倍数、电压放大倍数和功率放大倍数。它們都代表在动态运用时，輸出端与輸入端各相同物理量之間的比值。若用分貝表示，那么它們就称为电流增益、电压增益和功率增益。

（2）阻抗——輸入阻抗、輸出阻抗以及为了得到最大輸出功率的匹配阻抗。

（3）頻率响应特性——頻率失真系数。

(4) 非线性失真系数。

(5) 线性运用的限制范围。

(6) 功率容量。

上面各指标的意义和电子管放大器中所讨论的基本一致。对于不同用途的晶体管放大器，只考虑某些主要的指标。等到讨论具体电路时，我们再来进一步阐明这些指标与电路参量之间的关系。

(二) 晶体管放大器的分类

2. (1) 按晶体管电路的接法分为：共发射极、共基极和共集电极三种放大器。由于电路的接法不同，在动态运用时，他们的特性也不一样。

(2) 按工作状态可分为 A 类、B 类、AB 类和 C 类。这几种工作状态是指在集电极特性即 $i_c - U_c$ 特性的运用范围而言的。和电子管电路一样，晶体管放大器在低频范围内，只使用 A 类、B 类和 AB 类。

(3) 按用途可以分为前置放大（电流放大）和功率放大。

(4) 按级间耦合的特性可以分为阻容耦合、变压耦合和阻抗耦合。

通常晶体管前置放大器主要使用阻容耦合电路；而功率放大器多使用变压器耦合电路，以便得到阻抗匹配。

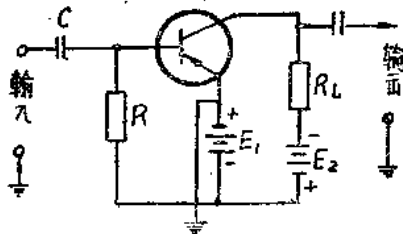
3. 研究晶体管放大器，也有两种基本分析方法，就是等效电路法和图解法。这两种方法的基本原理，和在电子管放大器中所讨论的完全一样。不需要再作专门讨论，在研究小信号的前置放大器时，我们主要采用等效电路法；在研究大信号的功率放大器时，主要采用图解法。

最后我们指出，在低频放大器中使用的晶体管，主要是面结合型。因为这种晶体管的噪声低，此外，面结合型晶体管放大器还有增益较高、功率容量大以及特性曲线均匀等一些优点。

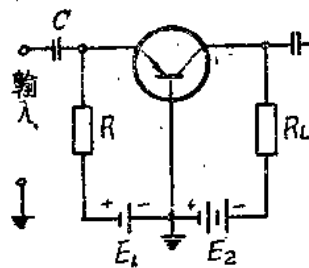
§ 1-2 三种基本放大电路类型的分析

1. 前面讲过，晶体管放大器有共发射极、共基极和共集电极三种基本电路（图 2-1）。其中以共发射极电路用得最多，这是因为它的功率增益最高，并且能同时得到电流和电压放大。因此，以后我们就以共发射极电路作为典型来分析。

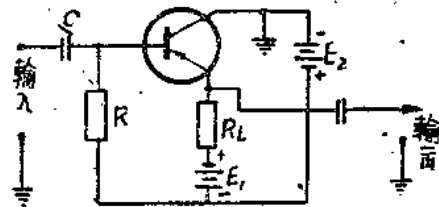
在图 1-1 所示的三种电路中，直流电源连接的方法都遵循同一个原则，就是发射结为通流方向而集电结为阻流方向。以后假如没有特别声明，我们认为在电路中所使用的晶体管都



(a) 共发射极



(b) 共基极

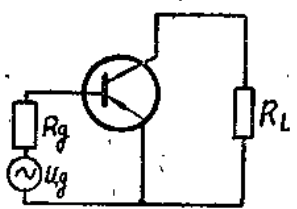


(c) 共集电极

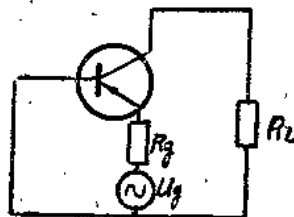
图 1-1

是以P-N-P面结合型为例。在这种情况下，直流电压总是使发射极的电位高于基极的电位；而集电极的电位低于基极的电位。加直流偏压的作用和在电子管中一样，是要建立适当的工作点，使晶体管的动态运用处于特性曲线的线性范围内。

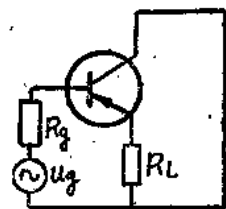
假如只考虑交流成份，那么可以将电路简化成如图1-2所示的样子。下面我们分别来讨论这三种电路在动态运用时的基本特性。



(a) 共发射极



(b) 共基极



(c) 共集电极

图 1-2

(一) 共发射极放大电路的分析

3. 在附录中我们引出了共发射极 h 参数的等效电路 (见附录图7-9)，这个电路在实际中应用得最多，因此我们就从这个等效电路开始分析。在这个等效电路中接上输入信号电源和输出端的负载阻抗 Z_L 以后 (图1-3) 便是动态运用时的情形。根据克氏定律，便可列出它的电压电流方程组

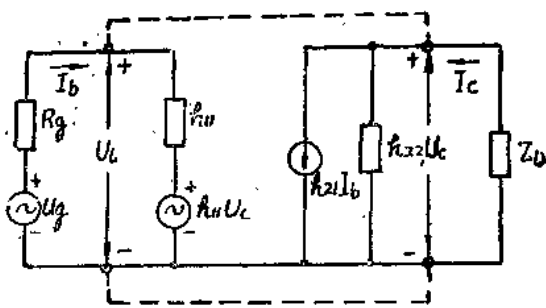


圖 1-3

$$U_g - I_b Z_g - I_b h_{11} - h_{12} U_c = 0 \quad (1-1)$$

$$I_b h_{21} + h_{22} U_c + \frac{1}{Z_L} U_c = 0 \quad (1-2)$$

解这个方程组，便可以得到一些动态电指标与电路参数之间的关系。

输入阻抗

$$Z_i = \frac{U_b}{I_b} = h_{11} - \frac{h_{12} h_{21}}{h_{22} + Y_L} \quad (1-3)$$

式中 Y_L 是负载导纳， $Y_L = \frac{1}{Z_L}$ 。可以看出，当 Z_L 增大时， Z_i 就减少。

输出阻抗

$$Z_o = \frac{U_c}{I_c} = \frac{1}{h_{22} - \frac{h_{12} h_{21}}{h_{11} + Z_g}} \quad (1-4)$$

输出导纳

$$y_o = \frac{1}{Z_o} = h_{22} - \frac{h_{12} h_{21}}{h_{11} + Z_g} \quad (1-5)$$

在求输出阻抗（导纳）时，我们是将输入端短路，即 $U_g = 0$ 的情况下得到的。可以看出， Z_o 随 Z_g 增大而减小。

电流放大倍数

$$K_i = \frac{I_c}{I_b} = \frac{h_{21} Y_L}{h_{22} + Y_L} \quad (1-6)$$

电压放大倍数

$$K_v = \frac{U_c}{U_b} = \frac{-h_{21} Z_L}{h_{11} + Z_L (h_{11} h_{22} - h_{22} h_{21})} \quad (1-7)$$

上式的负号说明输出电压与输入电压是反相的。可以看出，当 Z_L 增大时， K_i 减小而 K_v 增大。

功率放大倍数

$$K_p = K_i K_v \quad (1-8)$$

随着负载电阻 Z_L 的增大， K_p 开始先增大，而后就减少。如在电路中满足

$$Z_i = Z_g, \quad Z_o = Z_L$$

那么便达到阻抗匹配，这时 K_p 最大。在这种情况下，利用以上公式可以求得

$$R_{im} = Z_g = h_{11} \sqrt{1 - \frac{h_{12}h_{21}}{h_{11}h_{22}}} \quad (1-9)$$

$$G_{om} = y_L = h_{22} \sqrt{1 - \frac{h_{12}h_{21}}{h_{11}h_{22}}} \quad (1-10)$$

$$K_{im} = \frac{h_{o1}}{h_{11}h_{22}} \cdot \frac{1}{\left(1 + \sqrt{1 - \frac{h_{12}h_{21}}{h_{11}h_{22}}}\right)^2} \quad (1-11)$$

这里，下标 m 是指在阻抗匹配的情况，需要指出的是，公式 (1-11) 只有在低频条件下，电路中的参数全是纯电阻时才是正确的。

4. 根据附录的 (II-18) 式、(III-5) 式和表 II-2。我们可以将 h 参量用下式表示

$$\left. \begin{aligned} h_{11} &= \frac{1}{y_{11}} = r_b + r_m - \frac{(r_m - r_e)r_d}{r_d + r_e} \approx r_b \\ h_{12} &= \frac{r_{12}}{r_{22}} = \mu_{12} = \mu_{bc} \\ h_{21} &= -\frac{r_{21}}{r_{22}} \approx -\frac{r_m}{r_d} \approx \alpha_{cb} \\ h_{22} &= \frac{1}{r_{22}} - \frac{1}{r_d + r_e} \approx \frac{1}{r_d} = y_c \end{aligned} \right\} (1-12)$$

与 (1-12) 式相应的电路如图 1-4 所示，

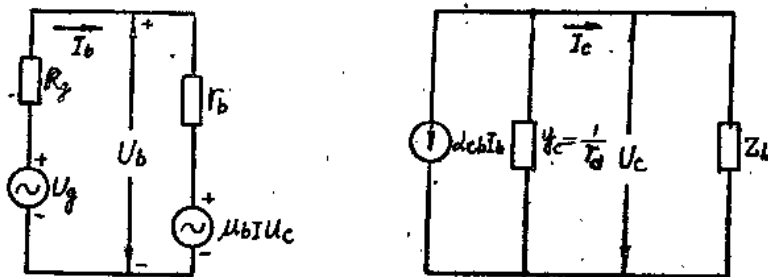


图 1-4

将 (1-12) 式各参量代入以上各式便得

$$Z_i = r_b - \frac{\mu_{bc}\alpha_{cb}}{y_c + y_L} \quad (1-13)$$

$$Y_o = y_c - \frac{\mu_{bc}\alpha_{bc}}{r_b + Z_g} \quad (1-14)$$

$$K_i = \frac{\alpha_{cb}y_L}{y_c + y_L} \quad (1-15)$$

$$K_v = \frac{-\alpha_{cb} Z_L}{r_b + Z_L(r_b y_c - \mu_{bc} \alpha_{cb})} \quad (1-16)$$

$$Z_{im} = r_b \sqrt{1 - \frac{\mu_{bc} \alpha_{cb}}{r_b y_c}} \quad (1-17)$$

$$y_{om} = y_c \sqrt{1 - \frac{\mu_{bc} \alpha_{cb}}{r_b y_c}} \quad (1-18)$$

$$K_{vm} = \frac{\alpha_{cb}}{r_b y_c} \cdot \frac{1}{\left(1 + \sqrt{1 - \frac{\mu_{bc} \alpha_{cb}}{r_b y_c}}\right)^2} \quad (1-19)$$

从(1-15)式可知, 由于存在着导纳 y_c 的分流作用, 因此 K_i 总是小于 α_{cb} 的。

5. 以上所列出的各种动态特性与负载电阻的关系称为负载特性, 图 1-5 画的是 $\Pi 6 \Gamma$ 型晶体管的实际负载特性。

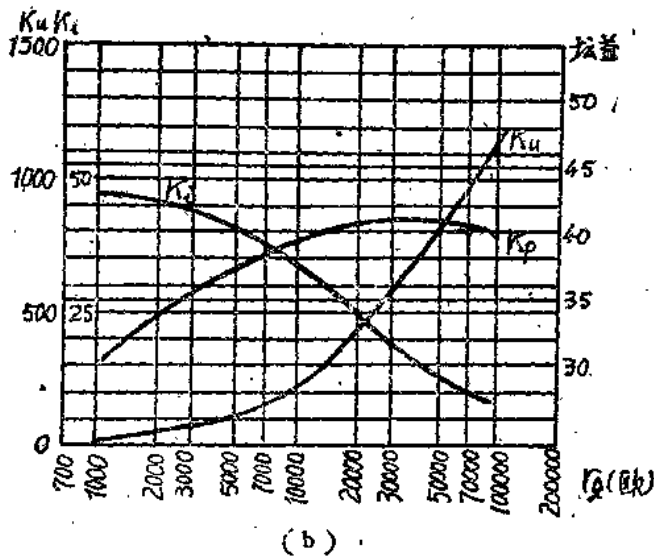
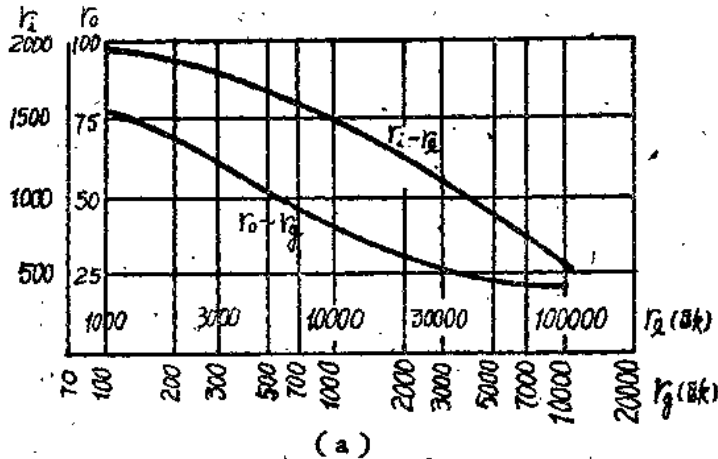


图 1-5

(二) 共基极放大电路的分析

6. 由图1-2, b 可以很明显的看出, 共基极电路中负载电流全部流过信号电源电路, 与电子管电路相类比, 我们便知道, 这种情况就是百分之百的电流负反馈。因此, 它的电流放大倍数是不可能大于1的 (电压放大倍数与共发射极的差不多)。我们知道, 负反馈电路具有增益稳定和失真小的优点。

利用共基极 h 参量的等效电路 (图1-6) 可以求得各动态特性与电路各参量的基本关系式。

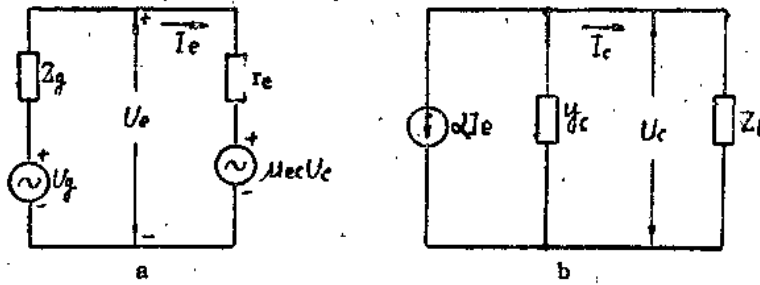


图 1-6

输入阻抗

$$Z_i = \frac{U_g}{I_g} = r_e + \frac{\mu_{ec}\alpha}{y_c + y_L} \quad (1-20)$$

输出阻抗

$$Z_o = \frac{r_e + Z_g}{r_e y_c + \mu_{ec}\alpha + y_c Z_g} \quad (1-21)$$

输出导纳

$$Y_o = y_c + \frac{\mu_{bc}\alpha}{r_e + Z_g} \quad (1-22)$$

电流放大倍数

$$K_i = \frac{-\alpha y_L}{y_c + y_L} \quad (1-23)$$

由上式同样可以看出, 由于导纳 y_c 的分流作用, K_i 总是小于 α 的。

电压放大倍数

$$K_v = \frac{\alpha Z_L}{r_e + Z_L(r_b y_c + \mu_{ec}\alpha)} \quad (1-24)$$

功率放大倍数

$$K_p = K_i K_v$$

同样，当阻抗匹配时，有

$$R_{im} = \sqrt{\frac{r_e}{y_c}} \cdot \sqrt{r_b y_c + \mu_{ec} \alpha} \quad (1-25)$$

$$R_{om} = \sqrt{\frac{r_k}{y_c}} \cdot \frac{1}{\sqrt{r_e y_c + \mu_{ec} \alpha}} \quad (1-26)$$

$$K_{pm} = \frac{\alpha^2 R_{om}}{(r_e + R_{im})(1 + y_c R_{om})} \quad (1-27)$$

7. 图 1-7 繪出了各动态特性与负载电阻的关系曲线。

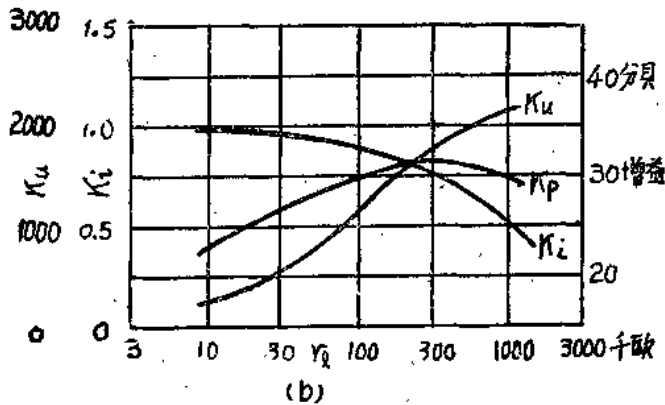
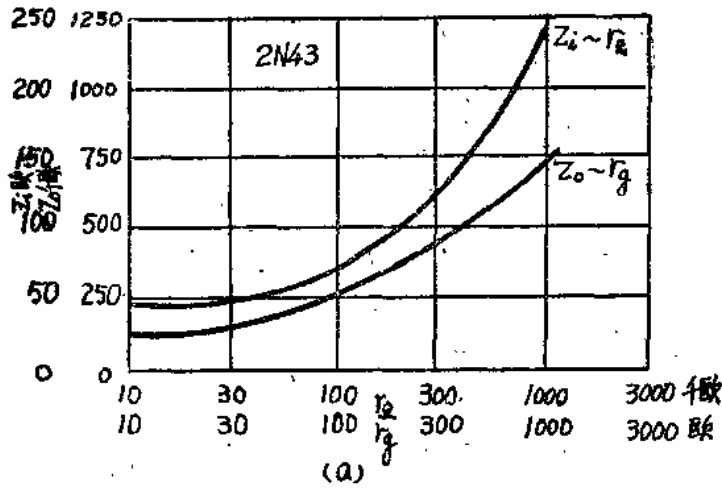


图 1-7

(三) 共集电极放大电路的分析

8. 由图 1-2, C 可以看出，在共集电极电路中，全部输出电压都与输入电源串联，可见它是一个百分之百的电压负反馈。因此它的电压放大倍数总是小于 1 的。这种电路只能做电流或功率放大。下面我们只给出共集电极的各种负载特性的曲线（图 1-8），

9. 上面我們只是根据三种基本电路的等效电路，写出各电气指标在动态运用时的基本公式，在以后討論具体的电路問題时，就可以利用这些基本公式作进一步的研究。綜合以上的討論，和所給的負載特性曲綫，我們可以将三种基本类型的放大器电路的特点与它們的用途归納如下：

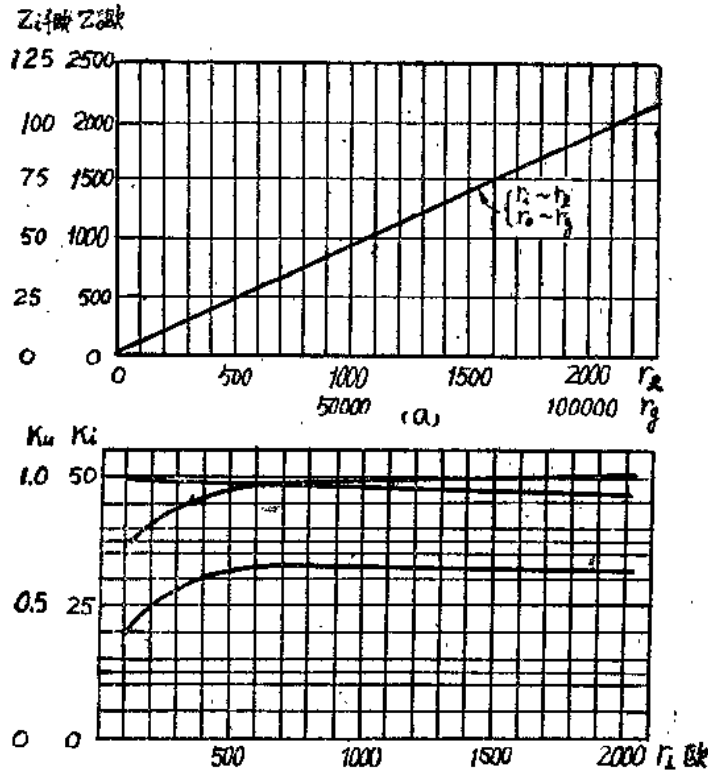


圖 1-8

(1) 共发射极电路的电流和电压放大倍数都比較大，輸入和輸出阻抗处在其他两种电路的中間数值。

(2) 共基极电路的电流放大倍数小于 1，功率放大倍数比共发射极电路的低。它的輸入阻抗低而輸出阻抗高。

(3) 共集电极电压放大倍数小于 1，功率放大倍数最低，輸入阻抗最高而輸出阻抗最低。这一点和电子管阴极输出器相似。

因此，通常都是使用共发射极电路。当要求輸入端有低阻抗和輸出端有高阻抗时，就使用共基极电路。反之，若要求有高的輸入阻抗和低的輸出阻抗时，就使用共集电极电路。

§ 1-3 晶体管电路和电子管电路的类比

1. 晶体管和电子管（主要是指真空三极管）都是属于电子器件。从外部来看，它们之间有許多类似之处。但是它们工作的物理基础则有根本的区别。例如在电子管中是依靠从固体金属（阴极）里释放出电子，控制其在各电极间的真空中的运动来工作的；而晶体管则是依赖于不同性质的电荷载流子（即电子与空穴）在固体中的运动。此外晶体管和电子管在其它方面还有许多重要的区别。这里为了能够更好地掌握晶体管的工作，我们将它和电子管及其外部特性作一些类比。

(一) 管子特性之间的类比

2. 电子器件的特性，都可以用各极电压电流之间的关系来说明。我们知道，电子管是一个电压控制的器件，它的阳极电流或阳极电路中的交变电压是由栅极电压和阳极电压决定的。而晶体管则是电流控制的器件，即它的集电极输出电流或电压是由基极到发射极电路间的电流来决定的，这个电流也决定于加在这个电路上的电压。另外，由于晶体管存在着内部反馈的关系，因此集电极的输出电流还与输出端的电压和电流有密切的关系。由上述可见晶体管中的电流就相当于电子管中的电压。

3. 就特性曲线方面来说，电子管通常都是在负栅压的情况下工作的，因此只需要一族特性曲线来表明它的特性就够了；例如只用阳极特性曲线。但是，晶体管的三个电极都有电流，因此，需要输出特性输入特性两族曲线来同时表明它的特性。

从特性曲线的形状来看，点触型晶体管与真空三极管相似，而面结合型与五极管的相似。

从图 1-9 中可以看出，使发射极流过不同的正偏流 I_e 就相当于把集电极特性曲线沿着

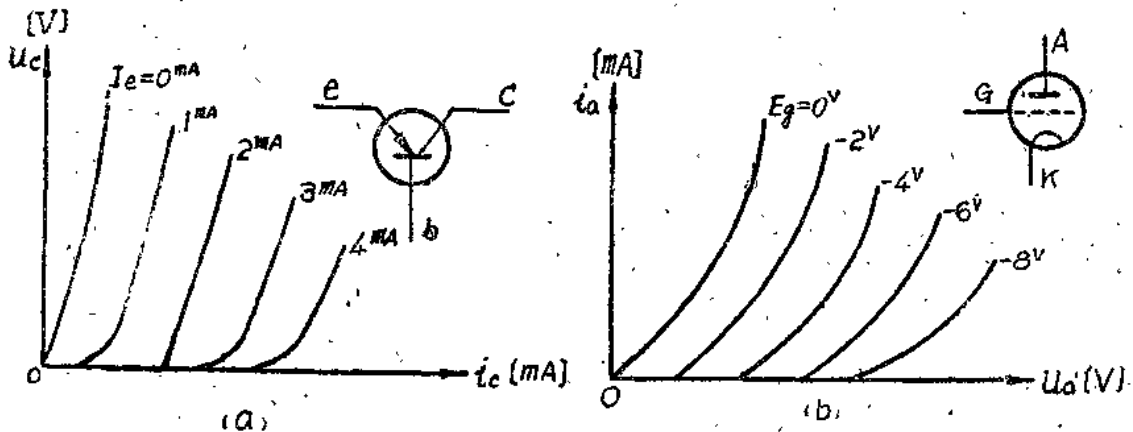


图 1-9

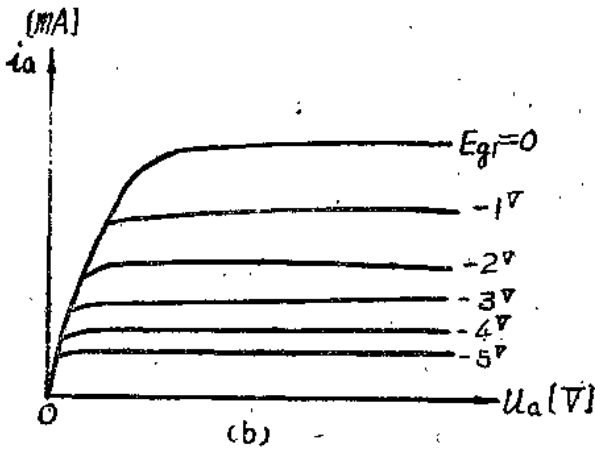
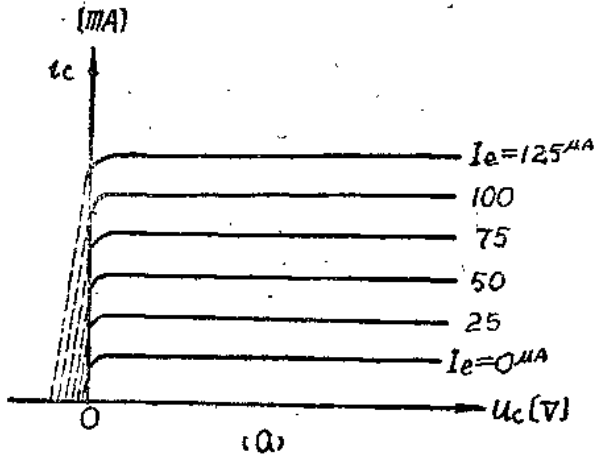


图 1-10

- i_c 轴平行向右移动，这与真空三极管加不同负栅压的作用相似。如果将电子管电压与晶体管电流相比时，这两种曲线族可以相互对应替换。在晶体管曲线族中每条间隔的变化是由电流放大系数 α 来决定的。这样，晶体管中的电流放大系数 α 相当于真空管中的电压放大系数 K 。

从图 1-10 可以看出，面结合型晶体三极管的集电极特性曲线族与真空五极管的阳极特性曲线族相似，而且还比真空五极管曲线的形状更均匀。从 1-10, a 可以看出：(1) 特性曲线的水平范围较大（即转入水平部分很快），而且平直得多；(2) 曲线的变化基本上是上下均匀的，不象五极管那样上疏下密。这样，晶体管可应用于电流或电压很小的情况下仍不致于引起失真。

4. 从输入输出阻抗方面来看，由于电子管通常是在负栅压情况下工作，它控制

的是阳极特性的正向部分（即阳极电压为正）；而加给晶体管的正偏流则影响集电极特性曲线的反向部分，因为集电极电位是负的。所以真空管的输入阻抗很高，而输出阻抗相当低，它实质上是一个电压放大的器件；晶体管则是输入阻抗很低而输出阻抗很高，因此它实质上是一个电流放大的器件。

由上述可知，我们可以将晶体管看做“双向器件”而将电子管看做“单向器件”。

5. 在放大能力方面，任何电子器件的放大作用都是用输入电路中的小功率来控制输出电路中的大功率。在电子管中，电子没有栅流；所以功率放大倍数可达 10,000-100,000；而晶体管因为有输入电流，所以只能放大 100-1,000 倍。

(二) 基本电路的类比

6. 当把晶体三极管和真空管接成基本的放大电路时，它们之间可以互相对应起来。通常

是把晶体管共发射极放大器与电子管共阴极电路相对应并作为“标准”类型；共基极的与栅极接地的放大器相对应；共集电极的则与阴极输出器相对应。我们把这三种对应电路和它们的等效电路，列表如下：

表 1-1

电路名称	晶体管的连接图	等效电路	相应的电子管电路图
共基极线路			
共发射极线路			
共集电极线路			

从上表可以看出，共基极电路与电子管的共栅放大器一样，存在着电流负反馈。共集电极电路则和电子管的阴极输出器一样，存在着电压负反馈。至于共发射电路，由于发射极电阻 r_e 很小，可以认为没有反馈作用，这样，它和电子管共阴极电路的情形也是一样的。

7.为了更好地理解一个晶体管的特点，我们试将一个共发射极晶体管的典型等效电路（图 1-11）化成相应的电子管电路（图 1-12）

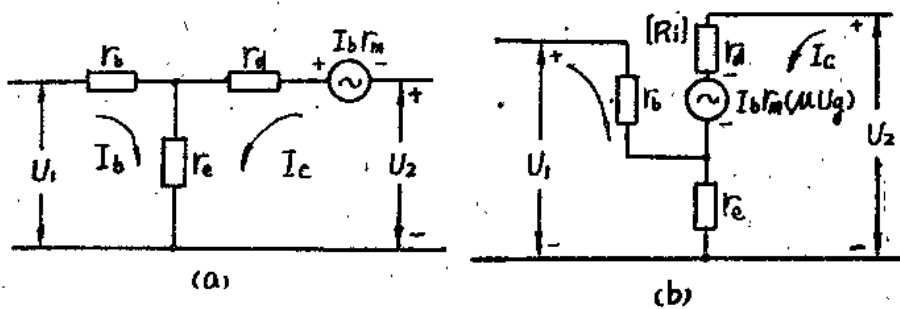


图 1-11

由图 1-11, b 的电路与等效的电子管电路的参量之间存在着下列关系。