

上海市工人业余学校课本

电子技术

(试用本)

第二册



说 明

在毛主席无产阶级革命路线的指引下，本市工人业余教育蓬勃开展。为了培养“又红又专”的工人阶级技术队伍的需要，我们组织有关单位编写了这套电子技术教材。

电子技术教材共分五册。前三册是基础部分：第一册讲述直流、交流和整流电路；第二册讲述晶体三极管、低频放大器、功率放大器；第三册讲述直流放大器、稳压电源、正弦波振荡器、场效应晶体管电路。为了帮助学员掌握和运用所学过的内容，在各册后面均附有实验、习题及附录。后二册分别讲述脉冲电路和可控硅及其应用，供学过基础部分的同志选读。

这套教材是试用本，适合具有一定生产实践经验和相当于初中文化水平的工人使用。各单位在教学时可根据实际情况选用，也可穿插自编教材。

编写新教材，是教育革命的一个重要组成部分。由于我们缺乏经验，这套教材一定存在很多缺点和问题，希望广大学员和教师在试用中提出批评和修改意见。

上海市工人业余学校教材编写组

1973年2月

目 录

第一章 晶体三极管	1
第一节 晶体三极管的结构和放大原理	2
第二节 晶体三极管的特性曲线及参数	9
第三节 晶体三极管的使用	23
小 结	37
习 题	38
第二章 低频放大器	40
第一节 低频放大器的基本原理	42
第二节 放大电路的分析方法	45
第三节 直流偏置稳定电路	61
第四节 多级放大器	71
第五节 晶体管反馈放大器	87
第六节 放大器的调整、测试	100
小 结	107
习 题	111
第三章 功率放大器	115
第一节 甲类功率放大器	116
第二节 推挽功率放大器	132
第三节 无输出变压器的推挽功率放大器	142
第四节 功放管的损坏和保护	149
第五节 应用举例	152
小 结	167
习 题	169

实验	一、测试晶体三极管的特性曲线及其	
	电流放大系数·····	170
	二、光电继电器的安装·····	171
	三、单管低频放大器·····	174
	四、推挽功率放大器·····	177
	五、无输出变压器推挽功率放大器·····	180
习题答案	·····	184
附录	一、音讯-1 甲型音频信号发生器使用方法 ·····	186
	二、GB-9 型电子管电压表使用方法 ·····	188
	三、JT-1 型晶体管特性图示器简介 ·····	189
	四、常用晶体三极管参数表·····	199

第一章 晶体三极管

伟大领袖毛主席指出：“在生产斗争和科学实验范围内，人类总是不断发展的，自然界也总是不断发展的，永远不会停止在一个水平上。”电子技术的发展充分证明了这一伟大真理。

1948年具有放大作用的点接触晶体三极管的问世被认为是电子学的一次革命。由于晶体管具有体积小、重量轻、坚固耐震、无需灯丝加热、可在低压下工作、功率消耗小、寿命长等电子管不可比拟的优点，二十几年来发展极为迅速。目前在电子管的世袭领域里，已大部为晶体管所取代。近年来，由于制造工艺的不断改进，晶体三极管的频率、功率、开关速度、噪声、耐压和稳定性等各项指标都有大幅度的提高，因而，应用日趋广泛。但是，“客观现实世界的变化运动永远没有完结，人们在实践中对于真理的认识也就永远没有完结。”由于电子学的飞跃发展，晶体管正朝向更高频率，更大功率，更快开关速度，更低噪声，更高耐压和更加稳定可靠的方向发展。

我国晶体管的生产是大跃进的1958年开始的。十几年来，在毛主席的无产阶级革命路线指引下，从无到有，从少到多，发展非常迅速，特别是经过无产阶级文化大革命的战斗洗礼，广大革命群众排除了刘少奇一类骗子所推行的“电子中心”论的干扰，坚持毛主席“以钢为纲”的伟大方针，使我国的半导体器件的生产获得了突飞猛进的发展，填补了许多电子工业上的空白点，为我国的社会主义建设事业作出了很大的贡献。

毛主席教导我们：“对于物质的每一种运动形式，必须注

意它和其他各种运动形式的共同点。”“任何运动形式，其内部都包含着本身特殊的矛盾。这种特殊的矛盾，就构成一事物区别于他事物的特殊的本质。”我们已经学习了有关晶体二极管的知识，现在，我们再来研究晶体三极管的构造、放大原理、特性、参数及其应用。

第一节 晶体三极管的结构和放大原理

晶体三极管是用半导体材料(通常是硅和锗)制成的，所以又叫做半导体三极管，一般简称晶体管。与二极管的共同点是以 PN 结为基础构成的，它的工作原理也是基于 PN 结的单向导电性；但晶体三极管比晶体二极管有着质的飞跃，主要表现在它具有放大作用。常见的晶体三极管外形如图 1—1 所示。

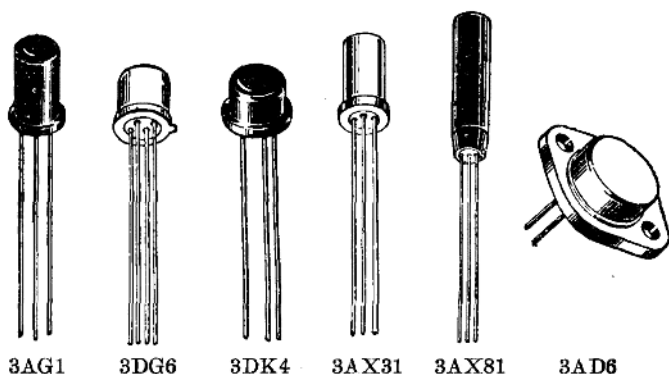
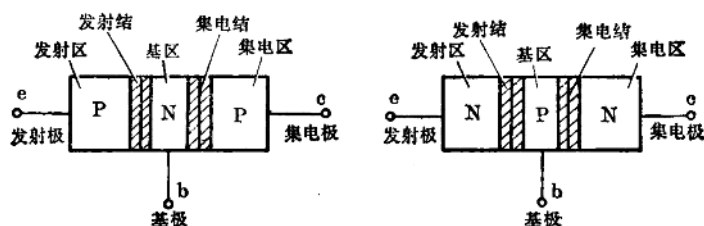


图 1-1 常见晶体三极管的外形图

一、基本结构

晶体三极管是由两个 PN 结组成的，中间有一层很薄的基区联系着。根据组合方式的不同，分为 PNP 型和 NPN 型

两大类,可用图 1—2(a)的示意图表示。



(a) 三极管结构示意图



(b) 三极管符号

图 1—2 晶体管结构示意图及其表示法

由图 1—2(a)可以看出,晶体管由三个不同的导电区域构成:发射区、基区和集电区。对应三个区域引出的三个电极,分别称为发射极(以 e 表示),基极(以 b 表示),集电极(以 c 表示)。它具有二个 PN 结:发射结(发射区与基区间的 PN 结),集电结(集电区与基区间的 PN 结,又叫收集结)。

在电路中三极管的表示方法如图 1—2(b) 所示。箭头向内的一种是 PNP 型,箭头向外的一种是 NPN 型。箭头表示电流的流动方向。常见的三极管内部结构主要有两种:

第一种,平面管结构。图 1—3(a) 示出了硅平面管结构,在 N 型硅片氧化膜上,光刻一窗口,进行硼杂质扩散,获得 P 型基区;然后在 P 型半导体上再光刻一个窗口,进行高浓度磷扩散,获得 N 型发射区,N 型基片用做集电极。由于发射结

和集电结同在硅片一个表面上，所以被称为平面晶体管。一般 NPN 型硅管，如 3D G 6、3D K 4 等均属这种结构。

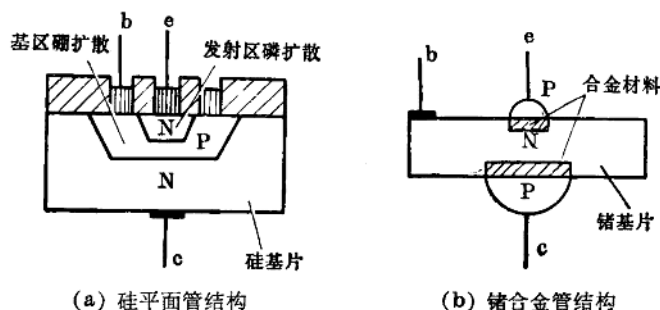


图 1-3 三极管结构

另一种是合金管。图 1—3(b)示出了锗合金管的结构。在高温下，在很薄的 N 型锗片两边分别烧结两个 PN 结，浓度大的 P 型区做发射极，另一面积大的 P 型区做集电极，很薄的基区（几微米到几十微米）做基极。例如 3A X31、3A X81 均属于这种结构。

目前，我国生产的硅管多为 NPN 型，锗管多为 PNP 型。以后将以 PNP 型为例来阐明晶体管的工作原理。

二、放大工作原理

毛主席教导我们：“事物发展的根本原因，不是在事物的外部而是在事物的内部，在于事物内部的矛盾性。”

要说明三极管的工作过程，应先了解电流在晶体管内部究竟是怎样流动的？这里从晶体三极管三个极电源接法谈起。

1. 工作电压

晶体三极管是构成放大器的最基本的器件，那么晶体三极管是在什么条件下工作的呢？要使晶体三极管能够工作，

必须在其二个 PN 结上加上一定极性的电源电压，这个电压的接法是十分重要的。如果三极管的工作电压接错，管子不但不能工作，有时甚至会损坏管子。那么，三极管工作电压的正确接法是怎样的呢？通常不管是 PNP 型还是 NPN 型三极管，欲使它们正常工作发射结上必须加以正向电压（P 接正，N 接负），集电结上必须加以反向电压（P 接负，N 接正）。图 1-4 示出了晶体三极管的电压接法。这个三极管赖以工作的条件，大家必须熟记。

如果从电位角度来看，对于 PNP 型三极管而言，发射极的电位高于基极电位，而基极电位又高于集电极电位；对于 NPN 型三极管则相反，即集电极电位高于基极电位，而基极电位又高于发射极电位。

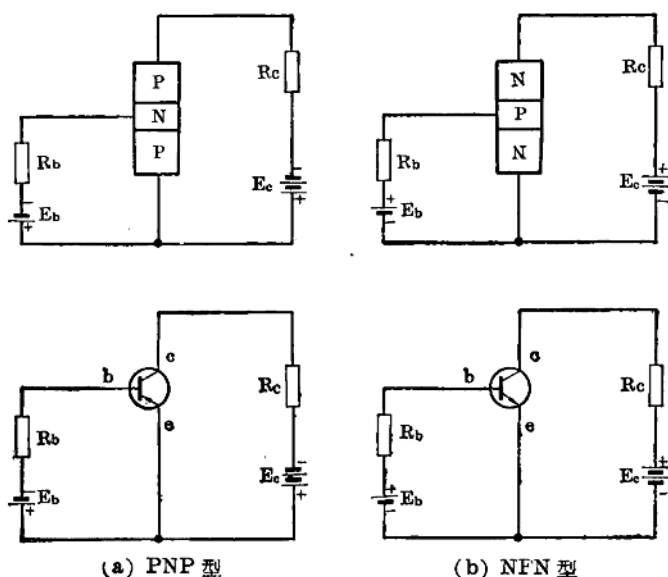


图 1-4 晶体三极管工作电压接法

发射极和基极之间所加的正向工作电压很小，通常约为零点几伏，发射极与集电极之间所加的工作电压一般为几伏到十几伏。

2. 电流分配

当我们在晶体三极管上加上了工作电压以后，到底电流在晶体管内部是怎样流动的呢？下面我们用 3AG1 型晶体管做个实验来加以说明，电路接法如图 1—4(a) 所示。在电路中有三个电流流过晶体管，流过发射极的电流用 I_e 表示，流过基极的电流用 I_b 表示，流过集电极的电流用 I_c 表示。那么，发射极电流 I_e ，基极电流 I_b ，集电极电流 I_c 三者之间的关系是怎样的呢？

我们在图 1—4(a) 的电路中串联接入三个电流表（如图

1—5 所示）来测量晶体管的三个电流。

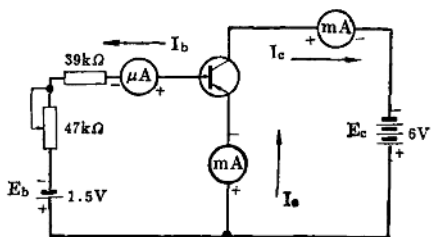


图 1—5 晶体管三个电流的测量

在此，图 1—4(a) 中的 R_b 用一只 $47\text{ k}\Omega$ 的电位器串联一只 $39\text{ k}\Omega$ 的电阻来代替，电位器用作调节基极电流；电阻用来限制基极电流，

防止电位器调到低阻值时基极电流过大而烧毁管子。负载电阻 R_c 就用串接在集电极回路中的毫安表内阻来代替。

调节 $47\text{ k}\Omega$ 电位器改变基极电流 I_b 的大小，便可相应地得到一组集电极电流 I_c 和发射极电流 I_e 的数值，现将测得的数据列入表 1—1。

从表 1—1 所测得的数据中不难看出，表格纵向都满足下面的关系式：

表 1—1

$I_e(\text{mA})$	0	0.05	0.5	1
$I_c(\text{mA})$	0.001	0.05	0.49	0.982
$I_b(\text{mA})$	-0.001	0	0.01	0.018

$$I_e = I_c + I_b \quad (1-1)$$

这一关系式清楚地表明了三极管的电流分配关系，即发射极电流等于基极电流与集电极电流之和。还可以用图 1—6 形象地描述这一关系。为什么晶体管的三个极的电流有上述的分配关系呢？首先看发射极

e 和基极 b 之间，由于发射极是 P 型半导体，基极是 N 型半导体（好象具有一个 PN 结的二极管一样），相当于二极管上加正向电压，因此就有较大的正向电流由 P 型半导体流向 N 型半导体，即有较大的电流由发射极流向基极，又因为基区做得很薄，而且在集电极上加

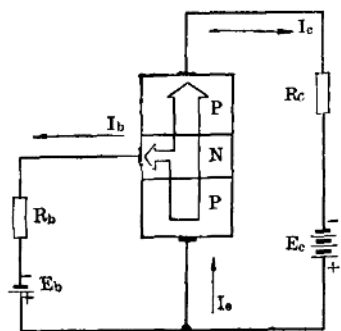


图 1-6 三极管内部电流

有较高的负电压，所以流到基区的电流就很容易地穿过基区而为集电极所收集，其中只有很少的一部分（约 1—10%）才经基极引线流出来构成基极电流 I_b ，绝大部分（90%以上）从集电极引线流出来形成集电极电流，从而得到了上面的分配关系。电流方向如图 1—6 中空心箭头所示。

这一电流分配关系与外加电压的大小和负载电阻 R_c 的关系不大，只是由晶体管本身的内在特性所决定的。

3. 放大作用

表 1—1 的实验数据不仅表明了晶体管内部电流的分配关系，更重要的是表达出了晶体三极管比二极管有着质的飞跃——电流放大作用。

从表 1—1 中不难看出，当基极电流 I_b 从 0.01 mA 变化到 0.018 mA 时， $\Delta I_b = 0.018 \text{ mA} - 0.01 \text{ mA} = 0.008 \text{ mA}$ (Δ 表示微小变化量)，集电极电流 I_c 却从 0.49 mA 变化到 0.982 mA，即 $\Delta I_c = 0.982 \text{ mA} - 0.49 \text{ mA} = 0.492 \text{ mA}$ ，这表明了输入电流(此处为基极电流 I_b)的微小变化会引起输出电流(此处为集电极电流 I_c)较大的变化，这就是通常所说的电流放大作用。

把上面这二个变化量的比值：

$$\frac{\Delta I_c}{\Delta I_b} = \frac{0.492}{0.008} = 62$$

叫做共发射极电流放大系数 β (下一节将会讲到)，在这里通过三极管的放大作用使集电极电流 I_c 的变化为基极电流 I_b 的变化的 62 倍。从表 1—1 还可以看出，基极电流的或大或小就直接影响到集电极电流的或大或小，这就表明了晶体三极管的基极对集电极有控制作用，依据这一特性和放大作用，晶体管可用来作放大、开关、振荡等多种用途。

晶体管在实际应用中除了象前面所说的那样来获得电流放大外，还常常用来放大交流信号的电压和功率。

如果从电压的角度来看，当有外加输入电压使基极电压改变 ΔU_b 时，它必然引起基极电流的变化 ΔI_b ，基极电流的变化引起集电极电流 I_c 的变化 ΔI_c ，而 ΔI_c 在 R_c 上面产生很大的电压变化 $\Delta U_c = \Delta I_c \cdot R_c$ (R_c 要选择足够大)，因此 ΔU_c 比 ΔU_b 大了许多倍，这就是电压放大作用。

大家知道，功率是电压和电流的乘积，不言而喻，电压、电

流或二者同时得到了放大，功率就得到了放大。由于晶体管对电流或电压都有放大作用，因而，对功率也有放大作用。

第二节 晶体三极管的特性曲线及参数

为了正确地运用晶体管，仅仅了解它的一般工作原理是不够的。我们还必须熟悉那些直观地表达晶体管性能的特性曲线，以及一些常用的参数，作为使用晶体管的依据。

一、晶体三极管的特性曲线

所谓晶体三极管的特性曲线就是描述输入端和输出端电压与电流之间的相互关系的曲线。它能形象地表达电压与电流之间的变化关系。晶体三极管在电路中根据公共端的不同可分为共发射极、共基极、共集电极三种不同的接法，如图1—7所示。

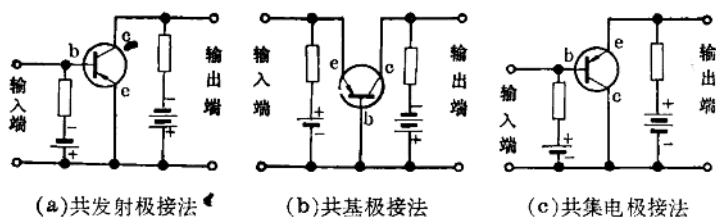


图 1-7 晶体管的三种基本接法

图 1—7(a)所示称为共发射极接法，以基极为输入端，集电极为输出端，发射极为输出和输入的公共端；图 1—7(b)所示为共基极接法，以发射极为输入端，集电极为输出端，基极为输出和输入的公共端；图 1—7(c)所示为共集电极接法，以基极为输入端，发射极为输出端，集电极为输出和输入的公

共端。

必须指出,输出与输入的公共端是对变化量而言的,有时隔着一个旁路电容或一个电池,也还可以认为是公共端,这里为了初学者看起来清楚起见,没有引入更多的元件。

共发射极电路是应用最广泛的一种电路,下面就以共发射极电路为例来讨论晶体三极管的输入、输出静态特性曲线。所谓静态就是指没有交流信号时的特性曲线。

共发射极接法的晶体管特性曲线测试电路如图 1—8 所示,其输入电压为 U_{eb} , 输出电压为 U_{ec} ; 输入电流为 I_b , 输出电流为 I_c 。*

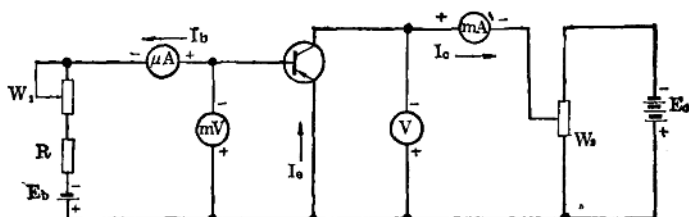


图 1-8 晶体管特性测试电路

从图 1—8 中可以看到,调节电位器 W_1 就可以改变晶体管的输入电压 U_{eb} 和输入电流 I_b , 调节电位器 W_2 就可以改变输出电压 U_{ec} 和输出电流 I_c , 从而可以测出在不同情况下的 U_{eb} 、 I_b 和 U_{ec} 、 I_c 四个变量之间的关系。

四个变量可以组成六组特性,而常用的只有二组,它们是:

* 在晶体管手册中,PNP 型晶体管输入特性和输出特性曲线中所标的 U_{ce} 、 U_{be} 、 I_c 、 I_b 均有负号,这里为分析方便起见,将电压下标对调一下,记作 U_{ec} 、 U_{eb} ,电流仍记作 I_c 、 I_b ,因而避免了负号,请大家注意。

输入特性:

$$I_b = f(U_{eb}) \Big|_{U_{ec} = \text{常数}} \quad (1-2)$$

表示 U_{ec} 为一固定值时, I_b 随 U_{eb} 的变化关系;

输出特性:

$$I_c = f(U_{ec}) \Big|_{I_b = \text{常数}} \quad (1-3)$$

表示 I_b 为一固定值时, I_c 随 U_{ec} 的变化关系。

注意式中“ f ”与 U_{eb} 、 U_{ec} 不是相乘,而是表示 I_b 与 U_{eb} , I_c 与 U_{ec} 之间的变化关系。

下面我们着重分析最常见的共发射极接法的输入和输出特性。

1. 输入特性曲线

如果我们测 3AX31 的输入特性,按图 1—8 那样连接即可。先调整电位器 W_2 使 U_{ec} 固定于某一数值(例如: $U_{ec} = 0$ 伏,即将集电极与发射极短接),然后逐次改变电位器 W_1 的阻值,就可得到一组 U_{eb} 和 I_b 的数值,对应一个 U_{eb} 就有一个 I_b ,列表如下:

(1)当 $U_{ec} = 0$ 伏时

$U_{eb}(\text{mV})$	40	60	80	110	125
$I_b(\mu\text{A})$	4	10	20	40	60

如果用直角坐标来表示,以 U_{eb} 为横坐标, I_b 为纵坐标可以逐点描绘出一条曲线,如图 1—9 中曲线(1)。

刚才我们是将 U_{ec} 固定于 0 伏来描绘曲线(1)的,现在我们重新调整 W_2 使 U_{ec} 分别固定于 1 伏、5 伏,再逐次改变 W_1 ,测得的输入电流与输入电压的数据如下:

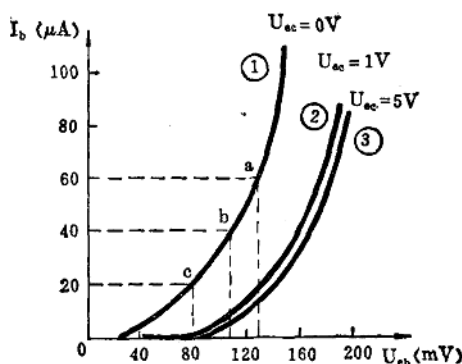


图 1-9 共发射极接法输入特性曲线

(2) 当 $U_{ec} = 1$ 伏时

$U_{be}(\text{mV})$	40	80	110	125	140
$I_b(\mu\text{A})$	0	4	8	14	34

(3) 当 $U_{ec} = 5$ 伏时

$U_{be}(\text{mV})$	80	110	125	140	150
$I_b(\mu\text{A})$	0	3	6	24	38

根据这些数据在图 1-9 上可以分别绘出曲线(2)和(3), 它们分别表示在 $U_{ec} = 1$ 伏和 $U_{ec} = 5$ 伏时的输入特性。

从上面得到的一组曲线中,我们可以看出:

(1) 当集电极电压 U_{ec} 从 0 变化到 1 伏时,基极电流变化较显著,但当 U_{ec} 从 1 伏变化到 5 伏时,曲线就非常靠近了。这表明集电极电压对输入特性有影响,但在 $U_{ec} > 1$ 伏之后,集电极电压对输入特性的影响就极小了。实际上, U_{ec} 在

1—20 伏范围内变化时,输入特性几乎重合,因此,在晶体管手册中给出的输入特性曲线往往只有一、二条,而我们在应用输入特性曲线时,如果 $U_{ec} > 1$ 伏的话,就只要应用 $U_{ec} = 1$ 伏的那条曲线就行了。

(2) 当 $U_{ec} = 0$ 时的 $I_b \sim U_{eb}$ 关系曲线是非线性的(意即不是一条直线),与二极管的正向伏安特性相似。实际上,因为 $U_{ec} = 0$ 意味着发射极与集电极已经短路,所以,该曲线是集电结与发射结两个正向二极管并联的伏安特性。

(3) 晶体管正常工作时,基极电压 U_{eb} 很小,只有零点几伏。如果过大, I_b 将急剧增加,并导致 I_c 变得很大,会使管子发热而烧毁,这是使用管子时必须注意的。

2. 输出特性曲线

同分析输入特性曲线的方法相类似,仍用图 1—8 所示的测试电路。先调节电位器 W_1 , 使输入电流 I_b 保持一个固定值,然后调节 W_2 逐次改变输出电压 U_{ec} 相应地得到一组 I_c 的数据,根据这些数据可以绘成一条 I_c 随 U_{ec} 变化的特性曲线;再固定一个 I_b 值,又得到一组 U_{ec} 、 I_c 数据,也可以绘成一条曲线。继续下去就可以获得一族 I_c 随 U_{ec} 变化的曲线,这就是我们要讨论的输出特性曲线,如图 1—10 所示。

从输出特性上可以看出:

(1) 当 U_{ec} 为一定值时,输入电流 I_b 的微小变化就能引起 I_c 较大的变化,这就用曲线的形式表明了基极对集电极的控制作用与晶体管的放大作用。例如当 $U_{ec} = 6\text{ V}$ 时 I_b 由 $60\mu\text{A}$ 变化到 $80\mu\text{A}$, I_c 将从 1 mA 变化到 1.5 mA (由 $I_b = 60\mu\text{A}$ 的特性曲线上的 a 点变到 $I_b = 80\mu\text{A}$ 曲线上的 b 点)。即: