

目 录

绪言	(1)
第一章 半导体二极管和三极管的特性	(3)
第一节 半导体二极管	(3)
第二节 半导体三极管	(8)
小结	(28)
思考题和习题	(30)
第二章 放大器基础	(34)
第一节 放大器的基本原理	(34)
第二节 图解分析法	(43)
第三节 等效电路分析法	(53)
第四节 偏置电路	(61)
第五节 多级放大器的一般问题	(66)
第六节 共集电极放大器	(74)
第七节 共基极放大器	(79)
小结	(82)
思考题和习题	(84)
第三章 反馈和振荡	(89)
第一节 反馈的基本概念和分类	(89)
第二节 负反馈对放大器性能的影响	(98)
第三节 负反馈放大器的基本分析方法	(106)
第四节 振荡的基本原理	(110)
第五节 正弦波振荡器举例	(114)
小结	(123)
思考题和习题	(125)

第四章 模拟集成电路的单元电路	(130)
第一节 直接耦合放大器的特殊性	(131)
第二节 晶体管恒流源电路	(136)
第三节 电位移动电路	(141)
第四节 差动放大器	(144)
第五节 输出级电路	(155)
小结	(168)
思考题和习题	(170)
第五章 典型模拟集成电路	(173)
第一节 集成运算放大器	(173)
第二节 集成直流稳压器	(193)
小结	(216)
思考题和习题	(218)
第六章 数字电路基础	(222)
第一节 脉冲常识	(222)
第二节 二进制数	(224)
第三节 基本逻辑	(231)
第四节 逻辑代数的基本定理	(240)
小结	(245)
思考题和习题	(247)
第七章 集成门电路和触发器	(249)
第一节 对门电路的基本要求	(249)
第二节 TTL 门电路	(256)
第三节 ECL 门电路	(273)
第四节 MOS 门电路	(281)
第五节 触发器的基本原理	(295)
第六节 改进型触发器	(309)
小结	(331)
思考题和习题	(334)

第八章 基本逻辑部件	(338)
第一节 加法器	(338)
第二节 计数器	(342)
第三节 寄存器	(350)
第四节 译码器	(355)
第五节 存贮器	(362)
小结	(371)
思考题和习题	(373)
第九章 电子计算机的简单知识	(376)
第一节 基本组成	(376)
第二节 计算过程简例	(382)
第三节 用途和优越性	(384)
第四节 微处理机介绍	(388)
小结	(392)
思考题和习题	(393)
附录一 JT-1 型晶体管特性图示仪的使用	(394)
附录二 OTL 扩音机的装配和调试	(417)

绪 言

在《电工基础》中，我们已经学习了各种基本的直流电路和交流电路。这些电路由电阻器、电感线圈和电容器等元件组成，其中并不包括二极管、晶体管和场效应管等半导体器件。电路一旦包括了这些器件，它便叫做半导体线路或晶体管线路。

半导体线路的功能比电工线路强得多。它能对电信号进行多种形式的放大，特别是能把直流电源的能量转移给用电器；它能利用半导体器件的非线性，对电信号进行各种频率变换（整流、调制、变频和检波等）和波形变换（限幅和箝位等）；它还可以用来产生周期性变化的电信号（正弦信号和脉冲信号）。因此，它成了电子计算机和许多自动控制系统的“神经中枢”，成为整个电子工业的基础。它的应用几乎遍及国民经济和社会生活的每个领域。

早期的半导体线路是由分立元器件组装而成的。六十年代初，世界上首次出现了把电阻器、电容器和半导体器件集中制作在同一块半导体基片上并在内部实现互连的电路——半导体集成电路。它的出现冲破了元器件制作和线路装接相互分家的传统观念，把两者巧妙地结合起来了。一小块集成电路的功能往往不亚于一台庞大的由分立元器件所组装的设备。目前，半导体集成电路的制造技术已达到相当惊人的水平：一台电子计算机可以制作在一小块半导体基片上；数块甚至一块集成电路可以包括一台电视机线路的绝大部分……。

集成电路技术的不断发展对半导体器件的制造者提出了更

高的要求。他们不仅应该在半导体基础理论和工艺理论方面打好坚实的基础,而且必须掌握丰富的线路知识。如果对于线路知识非常贫乏甚至一窍不通,那是难以胜任所从事的工作的,也是决计制造不出优质、低成本的半导体器件来的。本课程开设的主要目的,正是在于培养半导体器件工人理解半导体线路的能力,同时还帮助他们了解半导体器件的某些应用,有利于搞好质量管理中的信息反馈。

本课程的学习对象主要是半导体器件生产线上的操作工人。他们应该在学习《电工基础》和《半导体器件基础》等课程以后学习本课程。学完后,要求达到四级工的《应知》标准。

具体地说,通过本课程的学习,应该达到如下要求:

1. 能识别各种常见的单元电路,知道它们的功能和特点;
2. 懂得各种常见单元电路的工作原理;
3. 对一般的集成块线路会进行粗浅的分析,并了解其主要参数的意义。

根据专业特点和培训目标,本书把重点放在半导体线路基础理论的阐述和集成电路中常见单元电路的分析上。在各类放大器中,加重了直接耦合放大器的份量。在讲解数字电路时,把集成门电路和触发器作为主要的逻辑单元。

从内容上看,本书可分为四个主要部分:半导体线路的基础理论(第一、二、三章);模拟集成电路(第四、五章);数字集成电路(第六、七、八章);电子计算机(第九章)。书末的两个附录提供实验资料,各办学单位可根据条件酌情安排这些实验。

第一章 半导体二极管和三极管的特性

在《半导体器件基础》一书中，我们已经学习了半导体二极管和三极管内部的工作原理。本章主要介绍这些管子的应用特性。

第一节 半导体二极管

一、结构

二极管有两个电极，一个叫做正极，另一个叫做负极。

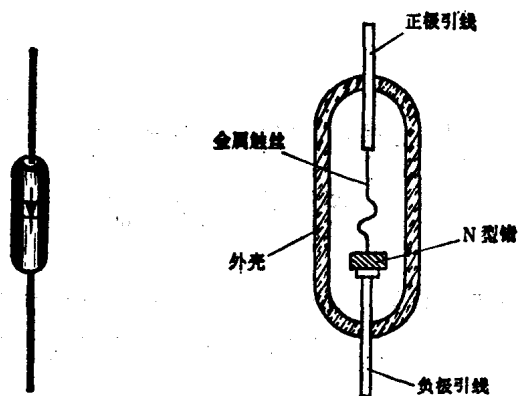
按照内部结构，二极管分为点接触型和面接触型两类。图 1-1 表示的就是这两种二极管典型的外形和内部结构。

由图可见，面接触管的内部存在着一个 PN 结；点接触管的内部实际上也有一个 PN 结，只是这个结不便图示罢了。一般地说，半导体二极管的核心就是一个 PN 结。二极管的正极与 PN 结的 P 区相连；负极与 N 区相连。

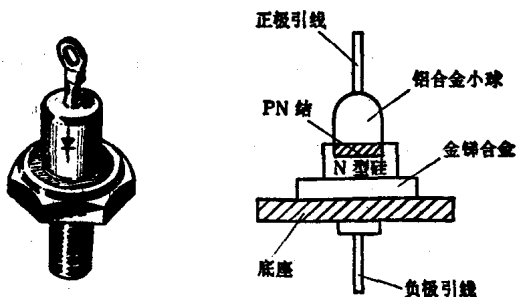
普通二极管的符号如图 1-2 所示。

二、特性

1. 单向导电特性 先来做一个实验。把一个二极管、一个电池和一个电珠组成串联回路。如果象图 1-3(a)所示的那样，让二极管正极的电位高于负极，则这种连接就叫做正向连接或正偏。这时电珠发亮。这说明：正向时，二极管(PN 结)导通，电



(a) 点接触型二极管的外形和结构

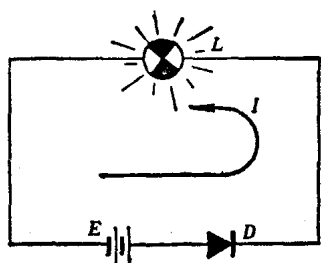


(b) 面接触型二极管的外形和结构

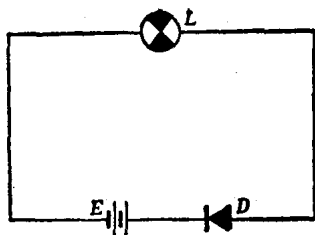
图 1-1 二极管典型的外形和内部结构



图 1-2 二极管的符号



(a) 正向连接



(b) 反向连接

图 1-3 二极管的两种连接

阻很小。而如果象图 1-3(b)那样,让二极管正极的电位低于负极,则这种连接叫做反向连接或反偏。这时电珠不亮。这说明:反向时,二极管(PN结)截止,电阻极大。

总之,二极管只在正向时导电,这种性质叫做单向导电特性。它是二极管(PN结)的基本特性。

2. 电压-电流特性 单向导电特性只能粗略地描述二极管。要作深入一步的了解,必须研究它的电压与电流之间的具体关系。这种关系叫做电压-电流特性,简称伏安特性。反映这个关系的图象叫做伏安特性曲线。

可以用图 1-4 所示的实验线路获得伏安特性。在这个线路中,加在二极管两端的电压依靠电位器 W 调节。把电源 E 反接,二极管可由正偏变为反偏。

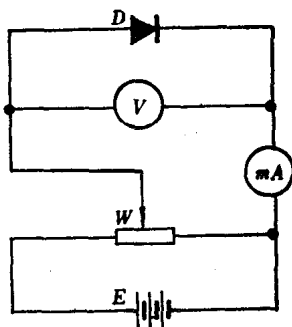


图 1-4 伏安特性的测试线路

对于某一个确定的电压值 v , 就有一个确定的电流值 i 与之对应, 于是就得到一对确定的对

应值。根据这对数值，在 $v-i$ 直角坐标系中可以找到一个确定的对应点。改变 v 的值，重复上述步骤，则可得到若干个这样的对应点。把这些点连起来，便得到如图 1-5 所示的伏安特性曲线。

上述获得特性曲线的方法叫做逐点测试法。这种方法虽然比较准确，但太费时。目前在实际工作中，大都用图示仪直接显示。

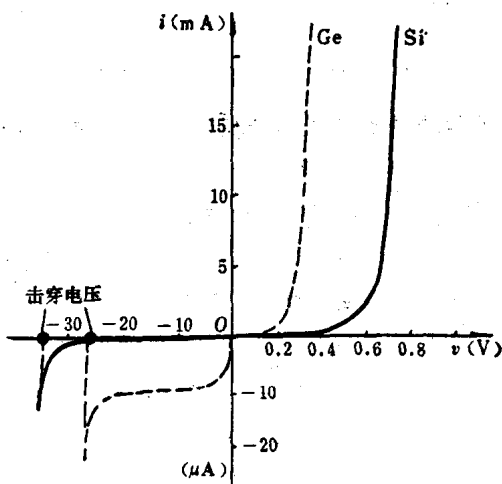


图 1-5 伏安特性示例

由图可知，二极管的伏安特性有以下几个特点：

(1) 当正向电压低于某个值(硅管约为 0.6 伏，锗管约为 0.2 伏)时，电流很小。一旦正向电压超过这个值，电流便随着电压的增高而显著地增大。常把正向电压的这个临界值叫做**阈值电压**(或称为阀电压、门坎电压、开启电压等)。确切地讲，只有在正向电压高于阈值电压时，二极管才算真正导通。

(2) 二极管在一定正向电流下的电压叫做**正向压降**。由于

曲线在大于阈值电压的部分较陡,只要正向电流的变化不大,正向压降就基本不变,可近似认为常量。通常,硅二极管的正向压降约为0.7伏;锗二极管的正向压降约为0.3伏。

(3) 当反向电压(绝对值,下同)不很大时,电流(绝对值,下同)很小。硅管与锗管相比则更小,正常硅管的反向电流在0.1微安以下。同时,反向电流几乎不随电压变化而变化,这种现象叫做饱和。

(4) 当反向电压升高到一定值时,电流随电压的升高而急剧增大,这种现象叫做击穿。发生击穿时的电压(一般指绝对值)叫做击穿电压。例如与图1-5相应的硅管,其击穿电压为34伏。

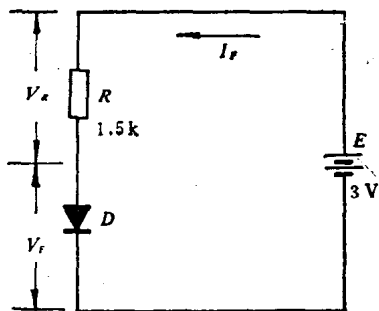


图1-6 二极管正向连接示例

例1-1 在图1-6所示的电路中,设电源 E 的电压等于3V, D 为硅二极管。求流过 D 的电流。

解 根据电路的形式, D 正偏。由于电源电压 E 大于 D 的阈值电压,故 D 导通,其正向压降 V_F 约为0.7V。于是

$$E = I_F R + V_F$$

所以
$$I_F = \frac{E - V_F}{R} = \frac{3\text{V} - 0.7\text{V}}{1.5\text{k}\Omega} = 1.53\text{mA}$$

这个式子表明,在 E 一定时,增大 R ,则 I_F 减小(当然 V_F 也有所减小,但很不明显)。这就是说,可以通过改变 R 来调节 I_F 。

三、主要参数

下面分别介绍二极管的四个主要参数。

1. 最大整流电流 I_{FM} 当二极管正向导通时, 管内的 PN 结要发热。电流越大, 则发热越甚。所以, 为了防止 PN 结过热烧毁, 必须对电流值有个限制。最大整流电流就是指允许长时间通过二极管的正向平均电流的最大值, 用 I_{FM} 表示。

面接触二极管的 PN 结面积大, 所以它的 I_{FM} 比点接触管大。

2. 正向压降 V_F 二极管在规定电流下的正向电压叫做正向压降, 用 V_F 表示。

如前所述, 当电流变化不大时, 二极管的 V_F 一般约为 0.7 伏(硅管)或 0.3 伏(锗管)。大电流的整流管, V_F 可达 1 伏左右。肖特基二极管的 V_F 约为 0.5 伏。

3. 反向击穿电压 BV_R 二极管在规定电流下的反向电压(一般指绝对值)叫做反向击穿电压, 用 BV_R 表示。

如果实际的反向电压超过击穿电压, 则二极管因电流过大而管温显著升高, 严重的还会将管子烧坏。为了安全起见, 产品手册上的最高反向工作电压限制在击穿电压以下(例如为击穿电压的一半)。

4. 反向电流 I_R 二极管在规定电压下的反向电流(一般指绝对值)叫做反向电流, 用 I_R 表示。

I_R 越大, 则二极管的单向导电特性越差。另外, 当温度升高时, I_R 会显著增大, 所以 I_R 越大, 管子工作时的稳定性就越差。

第二节 半导体三极管

半导体三极管简称晶体管, 它可分为双极型管和场效应管(单极型管)两类。在习惯上, 晶体管这个名称单指双极型三极管, 本节只介绍这一类管子。场效应管的特性放在第七章介绍。

一、结构

晶体管的三个电极分别叫做发射极(E, e)、基极(B, b)、和集电极(C, c)。图 1-7 列出了三种常见的晶体管的外形及管脚排列。

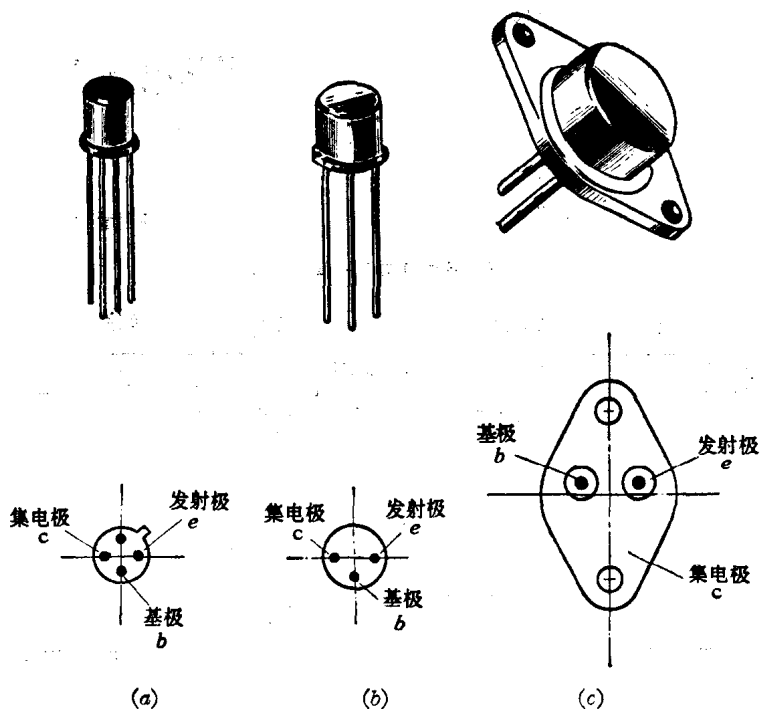
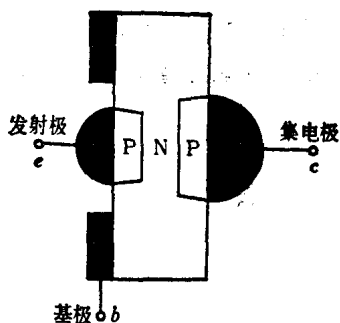
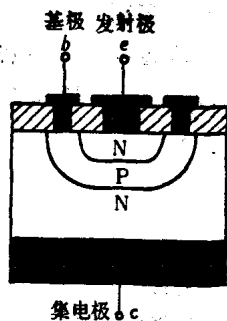


图 1-7 常见晶体管的外形和管脚排列

图 1-8 表示晶体管两种典型的管芯结构。由图可见，发射极、基极和集电极分别与管内半导体芯片中的三个区相连，这三个区分别叫做发射区、基区和集电区。因为相邻两个区的导电类型都不同，所以管芯中存在着两个 PN 结：发射区和基区之间的发射结；集电区和基区之间的集电结。

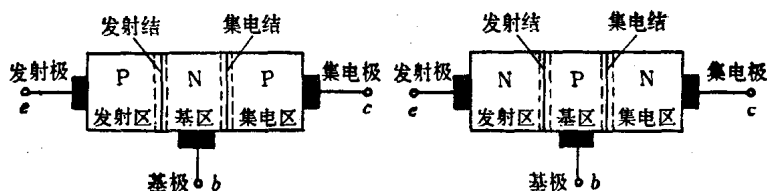


(a) 合金管



(b) 平面管

图 1-8 晶体管典型的管芯结构



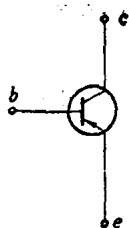
(a) PNP 型

(b) NPN 型

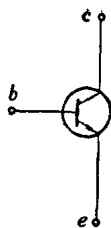
图 1-9 两种导电类型的管芯结构示意图

图 1-9(a) 和 (b) 分别是图 1-8(a) 和 (b) 所示的两种管芯的结构示意图。稍作对比就可以发现，两种管芯对应的三个区的导电类型正好都相反。按照发射区-基区-集电区的顺序，图(a)所示的那种管子叫做 PNP 型晶体管；图(b)所示的则叫做 NPN 型晶体管。目前，硅管以 NPN 型见多，锗管则反之。图 1-10 是这两种管子的符号。

考虑到集成电路中的晶体管都是硅管，所以后面的分析以 NPN 管为主要对象。



(a) PNP 型管



(b) NPN 型管

图 1-10 晶体管的符号

二、电流放大作用

1. 工作电压和电极电流 要使晶体管工作,就必须在它的各个电极之间加上一定的电压。PNP 管和 NPN 管工作电压的接法分别如图 1-11(a)和(b)所示。基极电源 V_{BE} 的极性使发射结正偏;集电极电源 V_{CC} 的极性使集电结反偏。

对比图 1-11(a)和(b)可知,管子的导电类型不同,则对应的工作电压的极性都相反。

只要发射结正向电压 $|V_{BE}|$ (这里等于 V_{BE}) 略大于阈值电压,发射结就导通。其电流即为基极电流 I_B 。根据晶体管的工

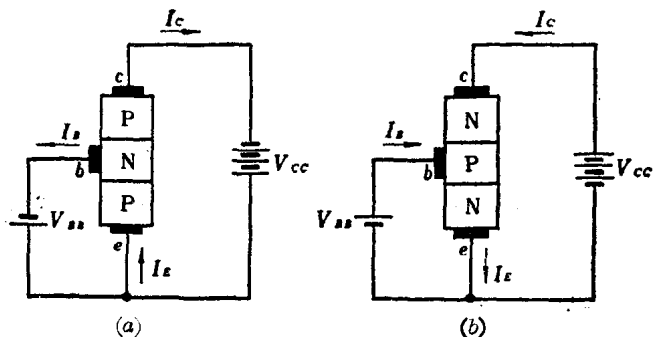


图 1-11 晶体管的工作电压和电极电流

作原理,基极一旦有电流形成,集电极电流 I_C 和发射极电流 I_E 也同时形成,管子便处在导通状态。

三个电极电流的方向也在图 1-11 中给出。由图可见,管子的导电类型不同,则对应的电极电流的方向都相反。

2. 电流放大作用 把晶体管按图 1-12 所示的方式接入电路。

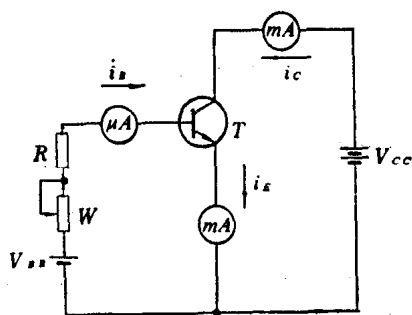


图 1-12 电流放大作用的实验线路

三个电流表分别与管子的三个电极相串接。电源 V_{BB} 和 V_{CC} 的极性与图 1-11(b) 中所示的保持一致。电位器 W 作为可变电阻。 R 为限流保护电阻。

根据例题 1-1 所得出的结论,改变 W 的阻值即可改变基极电流 i_B 。对于

i_B 的某个确定的值,发射极电流 i_E 和集电极电流 i_C 都有一个确定的值与之对应。改变 i_B , 可以测得若干组这样的对应值,如表 1-1 所示。

表 1-1 晶体管电流放大作用实验数据示例

i_B (μA)	0	10	18	26
i_C (mA)	0	0.49	0.982	1.474
i_E (mA)	0	0.50	1.0	1.5

不难发现,表内每一列的三个电流值之间存在如下的关系:

$$i_E = i_B + i_C \quad (1-1)$$

上式符合基尔霍夫第一定律。

另外,比较这三个电流值的大小,得

$$i_B \ll i_E, i_C \quad (1-2)$$

这个式子表明, 由一个较小的电流 i_B , 可以得到一个较大的电流 i_C 或 i_E , 即晶体管能放大电流。

此外, 从相邻两列的数据, 我们可以分别得到三个电极电流的变化量 Δi_B 、 Δi_C 、 Δi_E 。以第 2、第 3 列为例:

$$\Delta i_B = 18 \mu\text{A} - 10 \mu\text{A} = 8 \mu\text{A} = 0.008 \text{ mA}$$

$$\Delta i_C = 0.982 \text{ mA} - 0.49 \text{ mA} = 0.492 \text{ mA}$$

$$\Delta i_E = 1.0 \text{ mA} - 0.5 \text{ mA} = 0.5 \text{ mA}$$

显然,

$$\Delta i_E = \Delta i_B + \Delta i_C \quad (1-3)$$

$$\Delta i_B \ll \Delta i_C, \Delta i_E \quad (1-4)$$

(1-4)式表明, 基极电流值有一个微小的变化, 就能引起集电极电流值或发射极电流值较大的变化。也就是说, 晶体管不仅能放大电流的本身(直流放大), 更重要地, 它还能放大电流的变化(交流放大)。

电流放大是晶体管最重要的作用。所以, 晶体管在本质上是一种电流控制器件。

3. 放大的条件 前面讲过, 晶体管的工作电压使发射结正偏、集电结反偏, 这实际上是晶体管进行放大特别是进行交流放大的条件。

为了满足这个条件, 三个电极的电位之间应该满足一定的关系。对于 NPN 管, 基极电位应高于发射极电位, 且两者之差应等于发射结的正向压降, 集电极电位则应比基极更高, 即

$$v_C > v_B > v_E$$

而对于 PNP 管, 基极电位应低于发射极电位, 且两者之差应等于发射结正向压降, 集电极电位则应比基极更低, 即

$$v_C < v_B < v_E$$

三、特性

用晶体管进行放大,总得有信号输进去,因此要有两个电极作为输入端;经过放大后,信号总得输出来,因此还要有两个电极作为输出端。三个电极构成四个端子,必定要有一个电极作为输入、输出的公共端。据此,晶体管可有三种基本接法:以基极为公共端的共基极接法、以发射极为公共端的共发射极接法和以集电极为公共端的共集电极接法。图 1-13(a), (b), (c) 分别表示这三种接法。

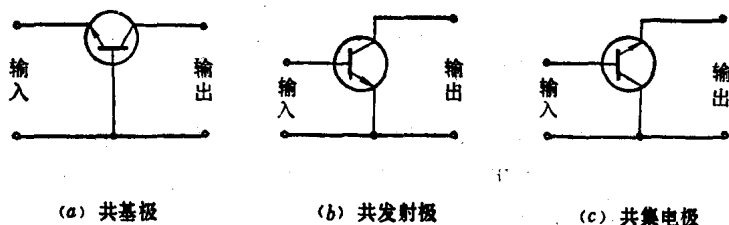


图 1-13 晶体管的三种接法

晶体管三个电流值之间的关系由(1-1)式给出;三个极间电压之间的关系如下:

$$v_{CE} = v_{BE} + v_{CB} \quad (1-5)$$

由(1-1), (1-5)两个式子可知,在三个电流和三个电压中,只要进一步了解两个电流、两个电压的关系就够了。对于共发射极接法,通常取 v_{BE} , i_B , v_{CE} , i_C 这四个量作为分析的对象。它们之间的关系叫做晶体管的共发射极特性。反映这些关系的函数图象叫做共发射极特性曲线。

当然,除了共发射极特性,晶体管还有共基极特性和共集电极特性。后两种特性应该分别取哪四个量作为分析对象,请读者自己思考。下面,我们只讨论共发射极特性。

晶体管的特性曲线可用逐点测试法获得,图 1-14 所示的