

CHAPTER 09 三极管与三极管电路

目标 你完成本单元后，应能：

- 了解三极管的结构、三极管的类型与三极管各电极电流的形成
- 理解掌握三极管的电流放大作用、三极管三个电极电流之间的关系
- 了解三极管的特性曲线、主要参数
- 了解三极管的直流等效模型，理解掌握共发射极放大电路的基本组成、三极管放大所需的偏置条件
- 理解三极管电路中三极管各电极电压与电流之间的直流关系
- 理解三极管放大电路是如何实现电压放大的
- 了解掌握三极管开关电路的特点与基本应用，掌握三极管开关电路的基本分析
- 了解特殊三极管及其相关电路
- 掌握三极管的检测方法

9.1 三极管的结构与类型

三极管是电子技术应用中很重要的半导体器件，三极管也被称为晶体管（transistor）、晶体三极管、双极型晶体管（Bipolar Junction Transistor, BJT）。

三极管的应用非常广泛，如放大电路、振荡电路、开关电路、电源电路、稳压电路，以及各种数字逻辑电路。图9.1所示的就是常见的一些不同封装尺寸的三极管。第一排的左边两个为小功率三极管，第一排的右边两个为大功率三极管。第二排的四个为SMD三极管。

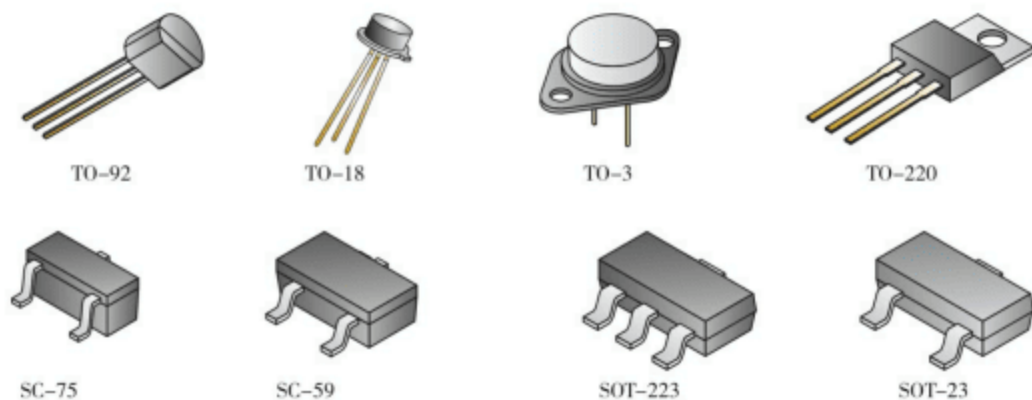


图9.1 不同封装尺寸的三极管

在一块半导体基片上用不同的掺杂方式制作出三个不同的掺杂区，形成两个背靠背的PN结，从每个区分别引出一个电极并封装起来，就得到一个三极管。三极管有合金、合金扩散、外延平面等结构，图9.2所示的是外延平面工艺制成的NPN型硅材料三极管的结构图。将TO-3封装的三极管2N3055外壳撬开，即可看到图9.3所示的该三极管的内部结构。

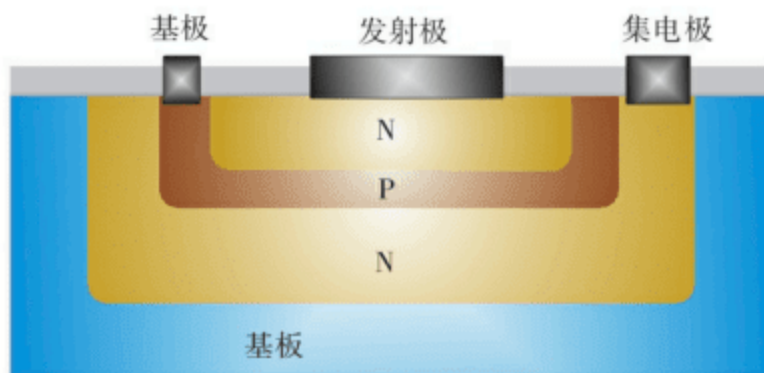


图9.2 外延平面工艺制成的NPN型硅三极管结构图

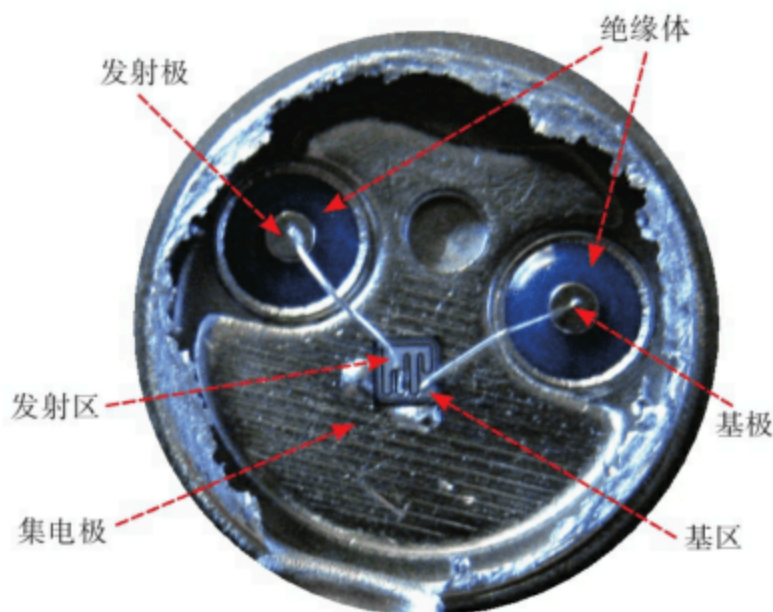


图9.3 三极管内部结构

图9.2所示的外延平面NPN型硅三极管的结构图中，中间的P区被称为**基区**，由基区引出的电极被称为**基极**，用字母**B**标识。结构图上层的N区被称为**发射区**，由发射区引出的电极被称为**发射极**，用字母**E**标识。结构图下层的N区被称为**集电区**，由集电区引出的电极被称为**集电极**，用字母**C**标识。注意**极**与**结**的区别（参见后面的各示意图）。

三极管分为NPN与PNP两大类，图9.4中①、②所示的分别是NPN型与PNP型三极管的结构示意图和电路图形符号。

NPN型有两个N区、一个P区；PNP型有两个P区、一个N区。由第8章知识已知，P区与N区的交界处会形成一个PN结。从下面结构示意图可知，三极管有两个PN结。发射区与基区间的PN结被称为**BE结**或**发射结**；基区与集电区间的PN结被称为**BC结**或**集电结**。

不论是NPN还是PNP，基区很薄（几微米至几十微米），且掺杂浓度很低。发射区的掺杂浓度高于集电区。集电区的面积比发射区大。因此，发射区、集电区并不是对称的。三极管的外特性与三个区的上述特点紧密相关。

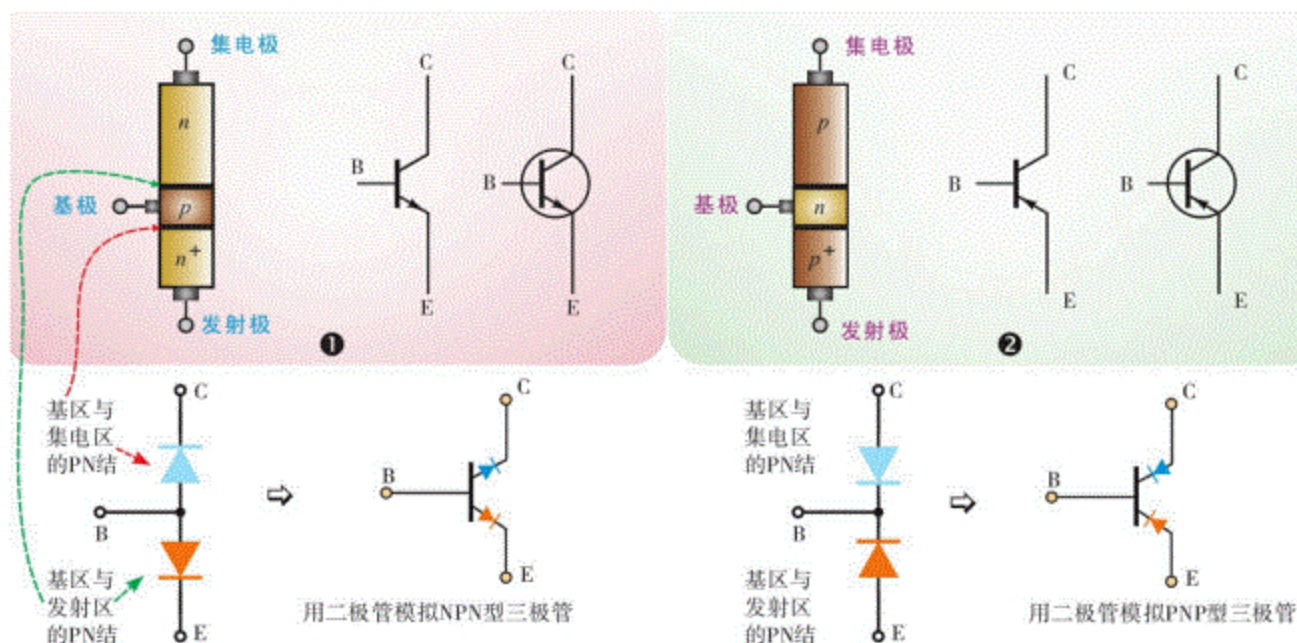


图9.4 三极管结构图和电路图形符号

一个PN结就是一个二极管。由上面的结构示意图可知，三极管有两个PN结，因此可暂时简单地用两个二极管来模拟三极管。需注意的是，三极管绝不是两个二极管的简单组合。如此模拟，主要是为了便于初学者理解后面即将讲到的三极管各电极间的电压关系、三极管的检测等。这里介绍一点三极管结构知识的目的在于，使读者容易理解三极管的放大作用，而不是让读者学习三极管是如何制造的。

9.2 三极管的电流放大作用

三极管与二极管的最大不同之处在于，三极管具有放大作用。

由于两个PN结的紧密结合，它们之间相互影响，使它们表现出不同于单个PN结的特性，即电流放大能力。由于这一特性，晶体三极管获得了广泛应用。

9.2.1 放大的条件

三极管基区薄、掺杂浓度低，发射区掺杂浓度高，集电区面积大是三极管放大作用的内部条件。但三极管不是放大镜，不是任意一个三极管拿来即可以放大。要实现三极管的放大作用，需要有合适的外部条件即**发射结要正偏，集电结要反偏**。

以NPN型三极管为例：

要发射结正偏，需基极电压>发射极电压（参见8.1.6节）。为此，给三极管的基极接电源正极，给发射极接电源负极，如图9.5中的❶所示。

要集电结反偏，需集电极电压>基极电压（参见8.1.6节）。发射结正偏与集电结反偏是并存的。由于基极已有一个高电位，需集电极有一个更高的电位，集电结才会反偏，如图9.5中的❷所示。如果仅是给集电结加上反偏电压，但反偏电压不够高，如图9.5中的❸所示，三极管也不能实现放大作用。

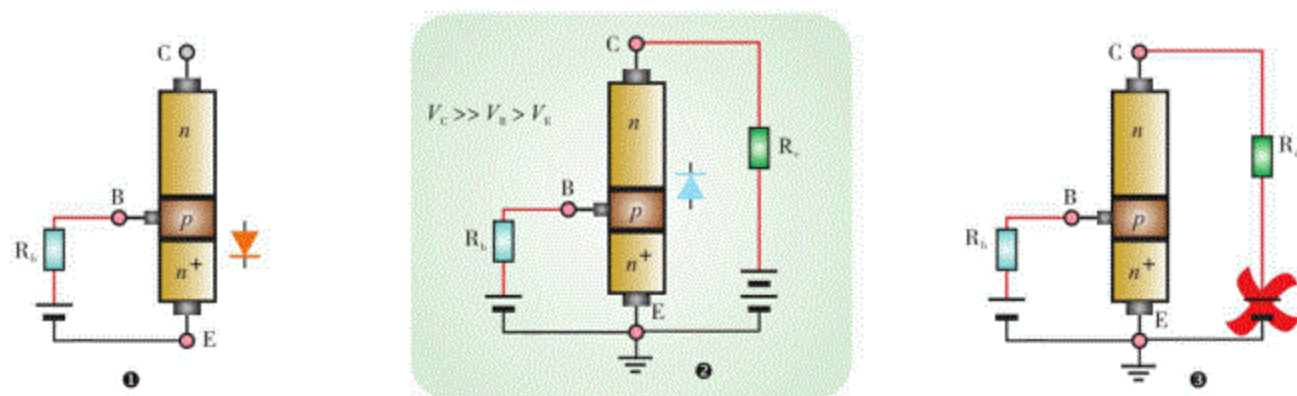


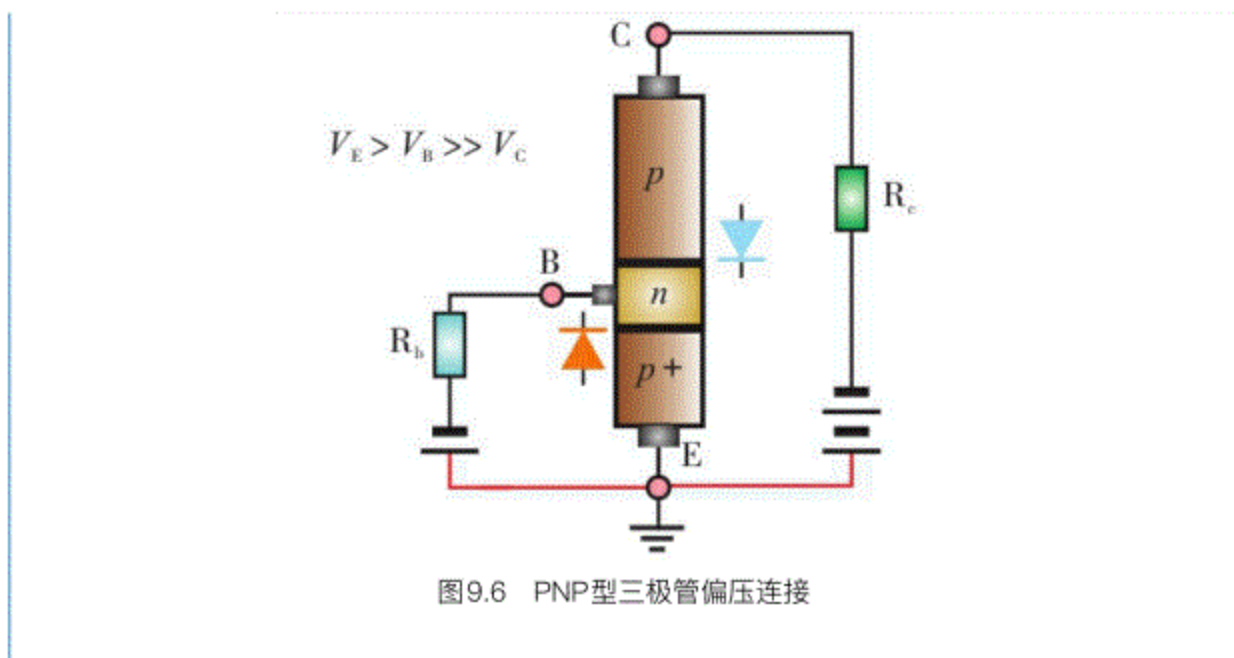
图9.5 以NPN型三极管为例讲解放大条件

给三极管加偏置电压的目的，是要使三极管的**发射结正偏，集电结反偏**。结合第8章PN结的相关知识，你会很容易理解图9.5中❷所示的NPN型三极管的偏压连接方式。那么，PNP型的偏压应如何连接呢？

PN

对于一个PN结：P端接电源正极、N端接负极为正偏；P接负、N接正为反偏。很明显，PNP型三极管的偏压连接应如图9.6所示。

原创力文档
max.book118.com
预览与源文档一致 下载高清无水印



想一想，为什么要用 R_b 、 R_c （见第8章内容）？

以上所示的NPN与PNP型三极管的偏压连接仅仅是一个示意图。从电路图上看，它们如图9.7中的①、②所示。

这里要注意了：其中的 V_{BB} 指的是基极电源， V_{CC} 指的是集电极电源。后面电路中的 V_B 指的是基极的对地电压， V_C 指的是集电极的对地电压。

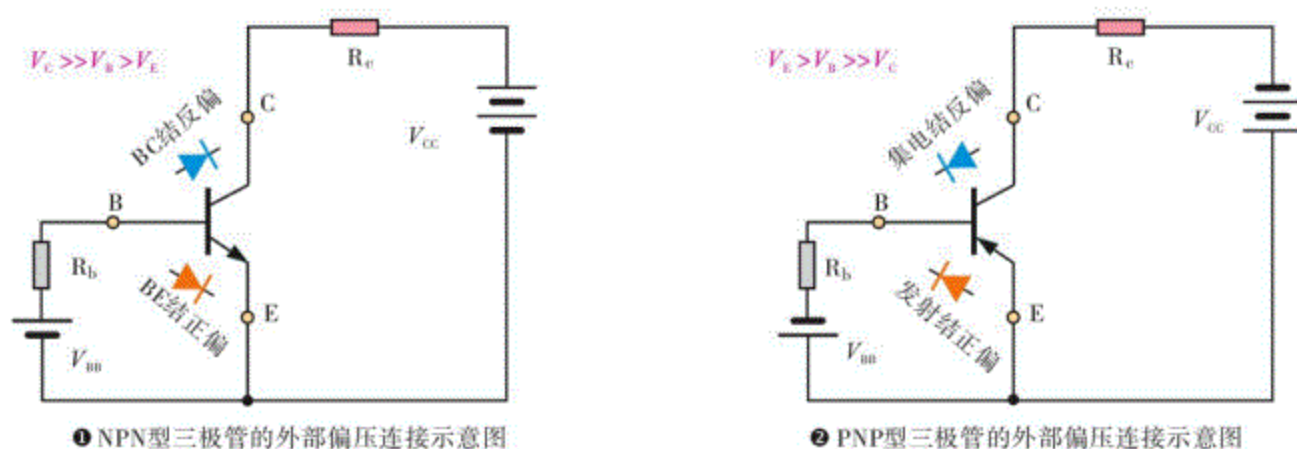


图9.7 电路图中的偏压连接

应注意三极管**电极对地电压**与**极间电压**的区别，如图9.8所示。例如， U_{BE} （或 u_{BE} 、 V_{BE} 、 v_{BE} ）指的是三极管基极与发射极之间的电压。

电压标识的下标中电极在前的，接万用表红表笔。

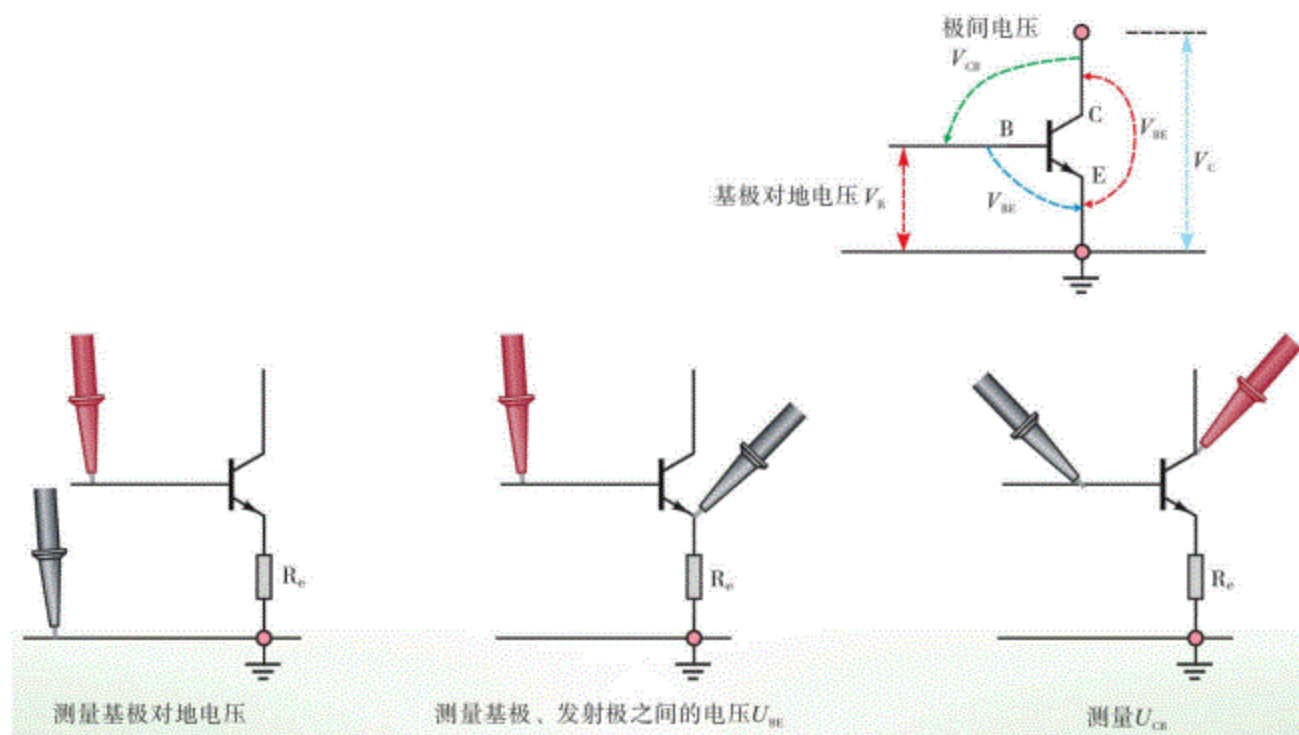


图9.8 三极管电极对地电压与极间电压的区别

9.2.2 三极管的电流

P区的多数载流子是空穴，N区的多数载流子是自由电子。PN结正偏利于多子扩散，PN结反偏利于少子漂移（见8.1.6节）。

给基区与发射区的PN结（**发射结** [注意，不是发射极Rb]）加上一个大于开启电压 U_{on} 的正偏电压时，发射结导通。基区的自由电子为少数载流子。由于发射区本身自由电子的浓度很高，自由电子通过**扩散运动**涌入到基区（见图9.9）。

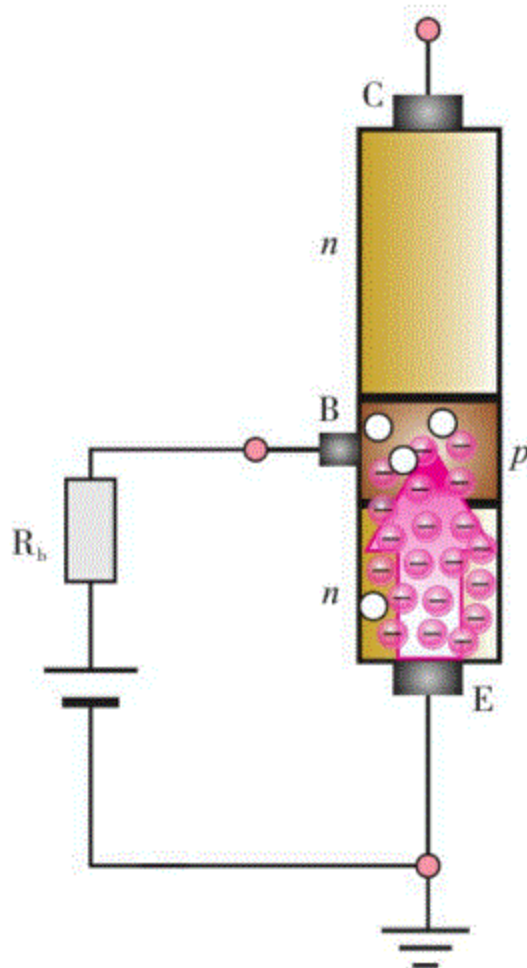


图9.9 自由电子扩散涌入基区

扩散到基区的大量自由电子，会与基区的多数载流子（空穴）复合。但由于基区薄、掺杂浓度低，多数载流子空穴的浓度低，自由电子与空穴复合的数量很少。

由发射区涌入的、余下的大量自由电子有足够的能量继续向前运动。

但如果**集电结**没有加反偏压（见图9.9），由PN结的知识可知，**集电结**的内电场小，不利于少数载流子（即自由电子）的运动，基区内余下的大量自由电子将被集电结阻挡，没有足够的能量穿越集电结。

原创力文档

max.book118.com

预览与源文档一致 下载高清无水印

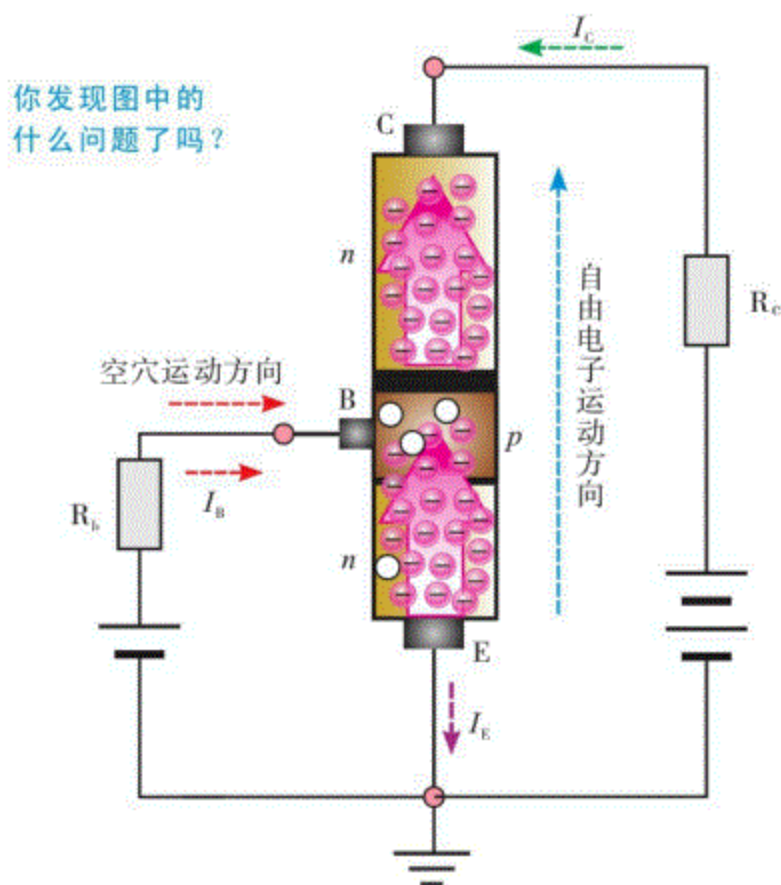


图9.10 给集电结加上大的反偏压

如果给集电结加上很大的反偏压，如图9.10所示，即三极管内的集电结产生了**强大的内电场**。内电场利于基区内少数载流子的漂移运动。基区内的大量自由电子由内电场获取到足够的能量，穿过集电结进入集电区。

基区复合掉的空穴由基极电源补充，形成基极电流 I_B 。发射区因扩散运动失去的自由电子也由电源补充，形成发射极电流 I_E 。集电区在外电场的作用下不断获得大量漂移过来的自由电子，形成集电极电流 I_C 。

在图9.10中，你会发现基极电流 I_B 与空穴运动方向一致，但集电极电流 I_C 、发射极电流 I_E 与自由电子相反。

虽然因自由电子的定向移动才形成电流，在8.1.6中已讲到，人们规定的电流方向与自由电子的运动方向相反。因此，NPN三极管的各电极电流方向如图9.11所示。由前面的内容可很容易想到PNP三极管的各电极电流方向（见图9.11）。

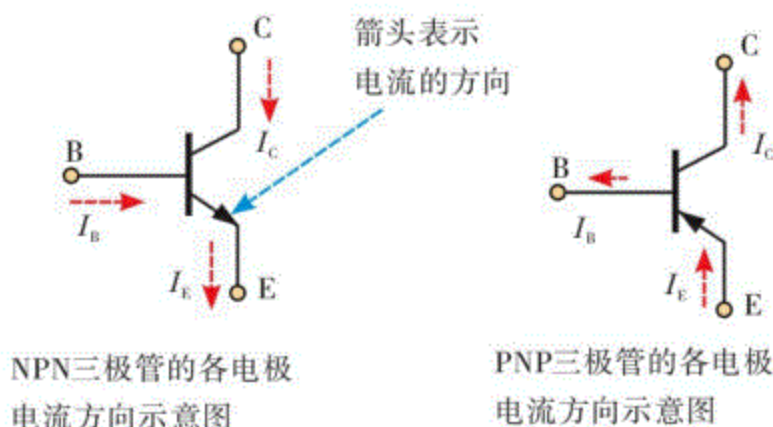


图9.11 三极管各电极电流方向

同时注意，NPN三极管中，发射区的多数载流子（自由电子）扩散到基区后，虽然它的数量很多，但由于基区是P型半导体，自由电子变为少数载流子。正是自由电子扩散到基区由多子特性转换为少子，才使得自由电子在集电结内电场的作用下漂移到集电区成为可能。因为PN结反偏时内电场增强，内电场有利于少子运动，不利于多子运动。

由上述内容可知，三极管的三个电极电流是由不同的运动形成的：基极电流是由复合运动形成的，发射极电流是由扩散运动形成的，集电极电流是由漂移运动形成的。

以上所述的仅是三极管电流的主要方面。由PN结的知识可知，在一个PN结中，扩散运动与漂移运动是同时存在的，只不过看哪一种运动是主要的。

NPN三极管基区的空穴也会漂移到发射区，但由于基区掺杂浓度低，所以空穴形成的电流非常小；与此同时，集电区与基区的平衡少子也参与漂移运动，但它的数量很小。在近似分析时，两者都常被忽略。

以上内容介绍了三极管电流是如何形成的，这有利于理解后面三极管各电极电流间的关系。由上述内容可得到这样的信息：

如果没有 V_{BE} ，且 $V_{BE} \geq U_{on}$ ，发射区的自由电子就不能扩散到基区，从而形成发射极电流；自由电子若不能扩散到基区，就不会有自由电子-空穴复合，从而形成集电极电流 I_C 。

如果没有 V_{CE} ，且 $V_{CE} \gg V_{BE}$ ，基区内余下的自由电子就不能漂移到集电区，从而形成集电极电流 I_C 。

9.2.3 电流分配关系与放大

你看9.2.2节的内容时有没有比较过三个电极的电流啊？它们之间有什么样的关系啊？

基极电流很小，发射极与集电极电流很大。呃，其他的.....

如果你仔细阅读9.2.2节内容，会发现以下几点：

- ①发射极电流由发射区的自由电子扩散形成，发射极电流的大小取决于扩散到基区的自由电子的数量。
- ②基区内空穴与自由电子的复合形成基极电流，基极电流的大小取决于复合的空穴数量。
- ③集电极电流是基区内余下自由电子漂移形成的（参见图9.12所示的示意图），集电极电流的大小取决于漂移到集电区的自由电子数量。

原创力文档

max.book118.com

预览与源文档一致 下载高清无水印

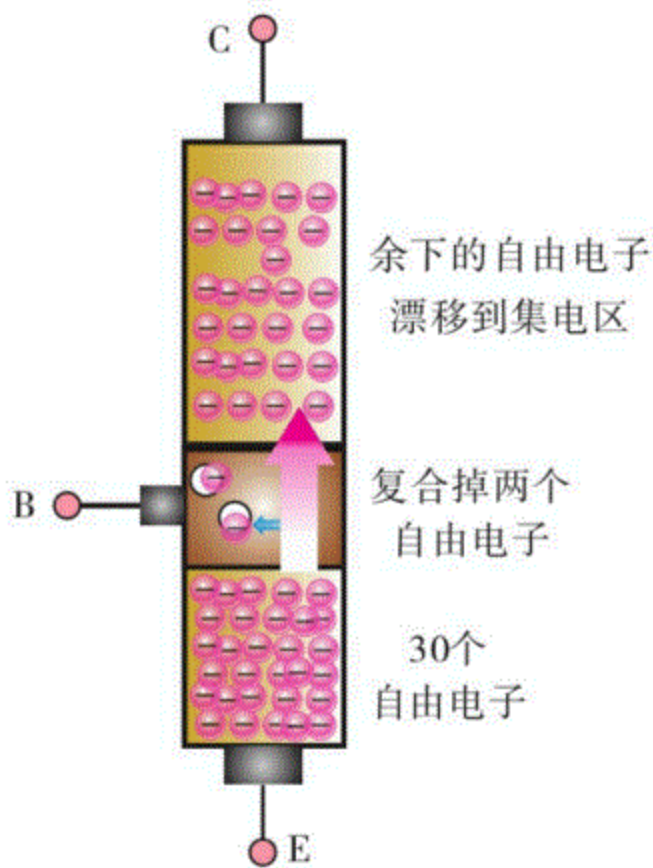


图9.12 三极管电流关系示意图

由上述三点可得出以下结论：

- 发射极电流 I_E 最大；
- 基极电流 I_B 最小；
- 集电极电流 $I_C = I_E - I_B$ ，或 $I_E = I_C + I_B$ 。

没错，从9.2.2节内容可以得出上面的结论，可它与三极管的放大作用有什么关系呢？我急……

别着急，若没有前面的铺垫，你最多知道三极管具有放大作用，是很难理解为什么说三极管具有电流放大作用的。

三极管具有电流放大作用，这是由三极管的内部结构与外部工作条件所决定的。前面的

内容已涉及三极管的电流放大作用，换个角度去理解会更清晰：

■ 首先，必须给三极管的B、E极加上正偏才会有 I_B 、 I_E 。

■ 基于 V_{BE} 电源的连接方式，通常认为 I_B 为三极管的输入。

■ 从外部看，正是因为有 I_B ，才会有 I_C ，而 $I_C \gg I_B$ ，集电极电流就像放大的基极电流。因此，三极管被认为具有小量控制大量的**电流放大作用**。

再来看三极管的电流（内部与外部，参见图9.13所示的示意图）：

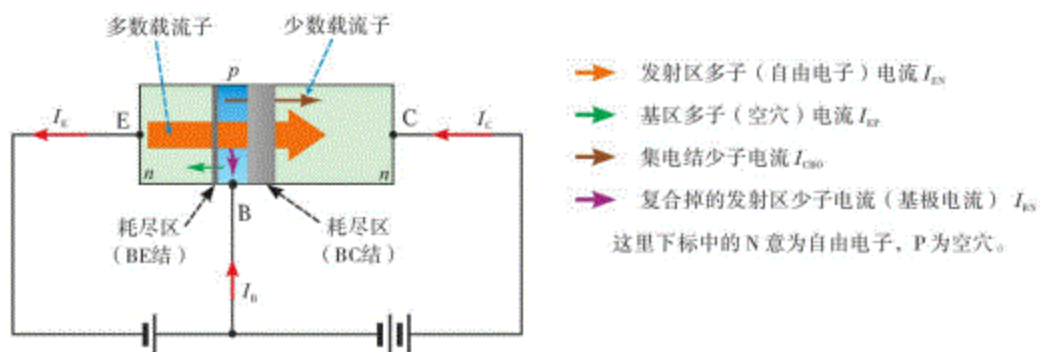


图9.13 了解三极管的电流

发射结正偏，利于多数载流子扩散运动。发射区的多子（自由电子）扩散到基区的同时，基区的多子（空穴）也向发射区扩散。

从前面的相关知识可知，电流方向被定义为与自由电子运动方向相反，与空穴运动方向相同，因此有发射极电流 $I_E = I_{EN} + I_{EP}$ 。

发射区扩散出去的多子在穿越基区时，会有少部分在基区因复合而消失。因此，穿过集电结到达集电区的发射区的多子电流 $I_{CN} = I_{EN} - I_{BN}$ ，即发射极电流 $I_E = I_{CN} + I_{BN} + I_{EP}$ 。

由PN结的知识可知，虽然PN结反偏截止，但因少数载流子的漂移运动，仍然有反向电流。图9.13中的 I_{CBO} 是指发射极开路时，集电结的反向饱和电流，即集电区少数（空穴）、基区少数（自由电子）的漂移运动产生的电流。 I_{CBO} 只与温度有关，在一定温度下是个常数。 I_{CBO} 与 I_{CN} 的方向相同，因此有 $I_C = I_{CN} + I_{CBO}$ 。

从基极看，则基极电流有 $I_B = I_{BN} + I_{EP} - I_{CBO}$ 。仅从外部看，则有 $I_E = I_C + I_B$ 。

也可这样来看三极管基极电流的控制作用：

■ 三极管的BE结相当于一个二极管。 V_{BE} 相当于二极管的正偏压。由二极管的知识可

知，正偏压越大，二极管电流越大，二极管导通程度也就越大（参见图9.14）。

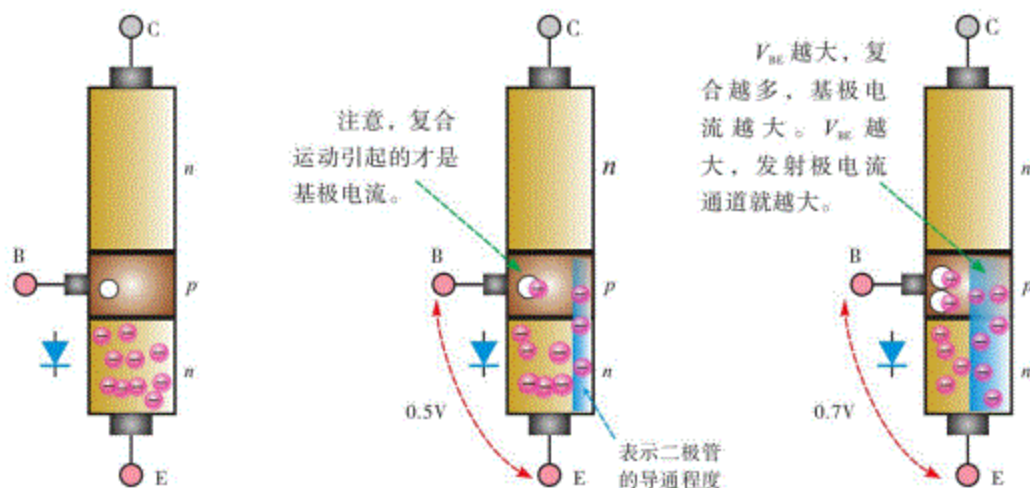


图9.14 三极管的BE结相当于一个二极管

还记得8.2.4节中二极管的折线模型吗（参见图9.15）？二极管端电压越大，二极管的电流就越大。

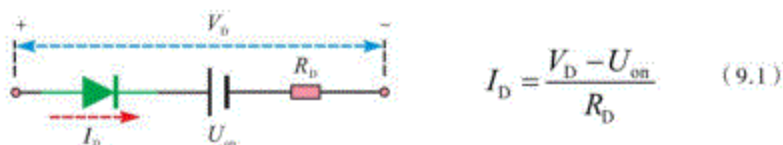


图9.15 折线模型等效电路

结合前面所述内容，你可以将三极管的BE结想象成为一个受基极电流控制的电流通路。

V_{BE} 越大，基极电流越大，BE结导通程度就越大，即发射极电流通路越大；反之，则发射极电流通路越小。由前面的内容可知，发射极电流变大或变小，自然会导致集电极电流变化。

三极管的BE结好比水龙头。基极电流控制水龙头的水阀，发射极电流通路好比水龙头的水流通路。水龙头通过水阀来控制水龙头的水流，三极管则通过基极电流来控制集电极电流。

在接下来的内容中，你随时可能看到**共发射极**、**共基极**或**共集电极**等描述，这里有必要先简单介绍一下。所谓三极管的共什么极，是针对交流回路而言的。三极管电路有输入（回路）和输出（回路）。如果三极管的某个电极既不是输入端，又不是输出端，但同时出现在输入、输出回路中，则被称为共这个极。三极管有三种基本的电路形式，分别为共发射极、共基极和共集电极电路。图9.16所示的是它们的示意图。

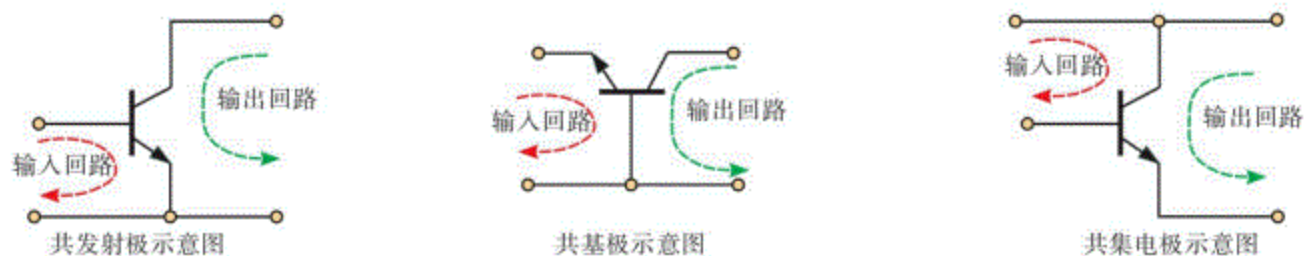


图9.16 三极管三种基本电路形式示意图

9.2.4 电流放大系数

9.2.3节已介绍了三个电极电流之间的关系。既然说三极管具有电流放大作用，就应对其电流放大的量作一个定义。通常，以三极管的共射电流放大系数来表述三极管的电流放大能力（放大倍数）。在相关的资料中，你可能会看到两种三极管电流放大系数的介绍：共射电流放大系数、共基电流放大系数。

■三极管的共射电流放大系数

三极管的共射电流放大系数又包括直流电流放大系数 $\bar{\beta}$ 、交流电流放大系数 β 。它们分别由式（9.2）和式（9.3）定义：

$$\bar{\beta} = \frac{I_C - I_{CBO}}{I_B + I_{CBO}} \quad (9.2)$$

$$\beta = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B} \quad (9.3)$$

注意，式中的 I_C 与 I_B ，字母是大写，下标也是大写，它们指的是三极管在直流条件下（没有交流）的集电极电流、基极电流。

$\bar{\beta}$ 会受到集电结反向饱和电流 I_{CBO} 的影响， I_{CBO} 通常很小，小功率锗管的 I_{CBO} 为1~10 μ A，而硅管的 I_{CBO} 通常是纳安（nA）级，故通常忽略 I_{CBO} 的影响，认为三极管的直流电流放大系数 $\bar{\beta}$ 近似等于集电极电流与基极电流的比值，即

$$\bar{\beta} \approx I_C \div I_B \quad (9.4)$$

由 $\bar{\beta}$ 的公式可推演出另外两个式子，如式（9.5）所示：

$$I_C \approx \bar{\beta} I_B, I_E \approx (1 + \bar{\beta}) I_B \quad (9.5)$$

在许多资料中，三极管的直流电流放大系数又被标识为 H_{FE} （或 h_{FE} ）。

一旦三极管的直流工作点确定，在一定条件下，三极管的基极与集电极的直流电流是不变的。三极管的基极有信号（指交流）输入时，就会有动态电流 Δi_B 叠加在 I_B 上，当然，也会有动态电流 Δi_C 叠加在 I_C 上。 Δi_C 与 Δi_B 之比被称为共射交流电流放大系数，用 β 标识。

$$\beta = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B} \quad (9.6)$$

通常认为三极管在一定范围内 $\beta \approx \bar{\beta}$ ，因此在近似分析中不对 β 与 $\bar{\beta}$ 加以区分，即 $i_C \approx \beta i_B$ 。三极管的 β 通常在几十至三四百之间。小功率三极管的 β 值大，大功率三极管的 β 值小。

■三极管的共基电流放大系数

共射电流放大系数是基于三极管基极输入，三极管集电极输出的，如图9.17所示。

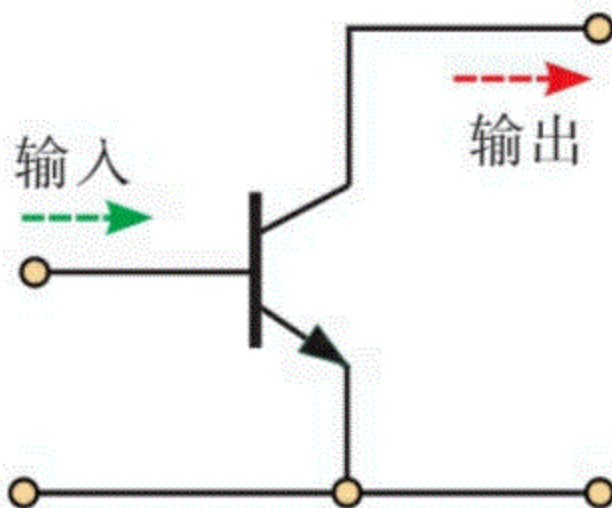


图9.17 共射电流放大系数

若以三极管的发射极为输入，集电极为输出，如图9.18所示，则输出与输入电流之比

是共基电流放大系数。直流共基电流放大系数用 $\bar{\alpha}$ 标识；交流共基电流放大系数用 α 标识。



图9.18 共基电流放大系数

很明显，共基电流放大系数是小于近似等于1的，即 $\alpha \approx 1$ 。为什么？请结合9.2.3节的内容自己分析理解一下。

例9.1：测得一个放大电路中三极管的基极电流为 $50\mu\text{A}$ ，集电极电流为 4.5mA ，请问该三极管的放大倍数、发射极电流是多少？

解：

$$\beta \approx \frac{I_C}{I_B} = \frac{4.5\text{mA}}{50\mu\text{A}} = 90$$

$$I_E = I_C + I_B = 4.5\text{mA} + 50\mu\text{A} = 4.55\text{mA}$$

习题9.1：已知一个三极管的 β 为130，当其基极电流为 $40\mu\text{A}$ 时，该三极管的集电极电流、发射极电流是多少？请自行计算。

原创力文档
max.book118.com
预览与源文档一致 下载高清无水印

9.3 三极管的特性曲线

前面已介绍，三极管有三种电路连接方式（或称三种电路组态）。不论是哪一种电路组态，都可将三极管看作一个二端口网络。将三极管放进一个**电路黑盒子**，如图9.19所示，不论黑盒子内结构如何，黑盒子的两边都是有二个端口ab与cd。从外部看，ab与cd都是黑盒子的端口。

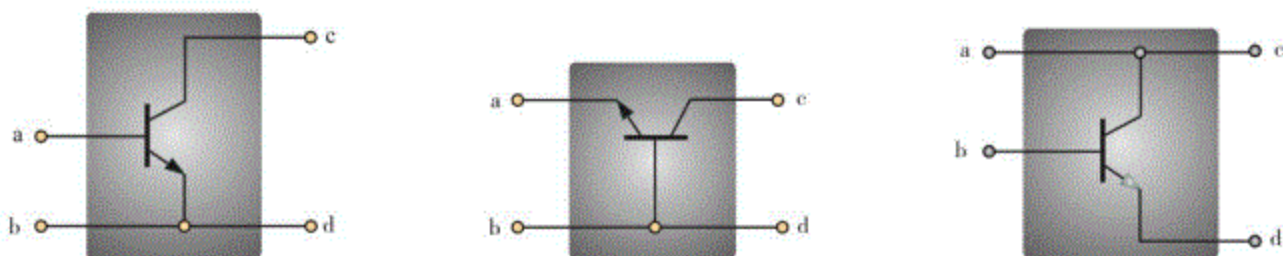


图9.19 三极管的连接方式

图中的ab为**输入端口**，cd为**输出端口**，如图9.20所示。ab端的电压与电流被称为输入电压、输入电流，cd端的电压与电流被称为输出电压、输出电流。这种**黑盒子法**对于许多电路的分析、检修都是有用的。

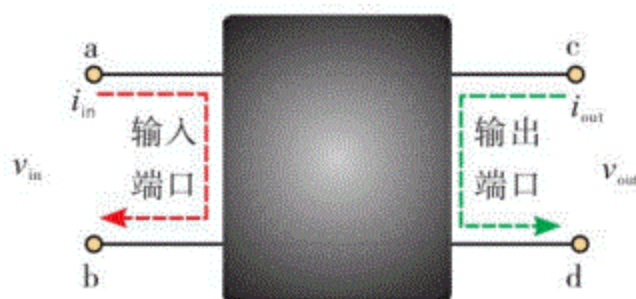


图9.20 黑盒子法

在工程上，通常用三极管的**输入与输出特性曲线**来描述三极管的伏安特性。

由上面的图可以看到，三极管在不同的组态会有不同的端电压与电流，因此它们的伏安特性曲线各不相同。通常都会介绍**共发射伏安特性曲线**，这里也不例外。共集电极的特性曲线可以参考这部分内容，共基极的特性曲线则请参阅相关文献。

9.3.1 输入特性曲线

三极管的输入特性曲线是指，集电极与发射极之间的电压 V_{CE} 固定于某一值时，基极电流 i_B 与基极-发射极电压 V_{BE} 之间的关系曲线（参见图9.21）。用函数表示为

$$i_B = f(V_{BE}) \mid V_{CE} = \text{常数}$$

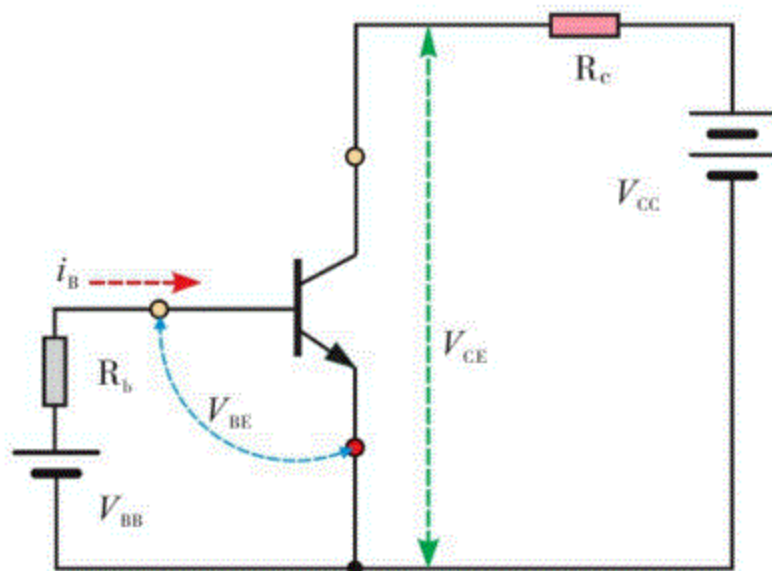


图9.21 三极管的输入特性曲线

即使你看不明白上面的函数，也没什么大不了，只要你能看懂下面的内容就好。

这里以NPN三极管为例。

❶当三极管的 $V_{CE}=0V$ 时，三极管的发射结、集电结都正偏，三极管的发射极与集电极之间等效短路。再结合9.2.1节的内容，此时的三极管相当于两个二极管并联，如图9.22所示，其输入特性曲线相当于两个二极管并联的正向特性，如图9.23所示。

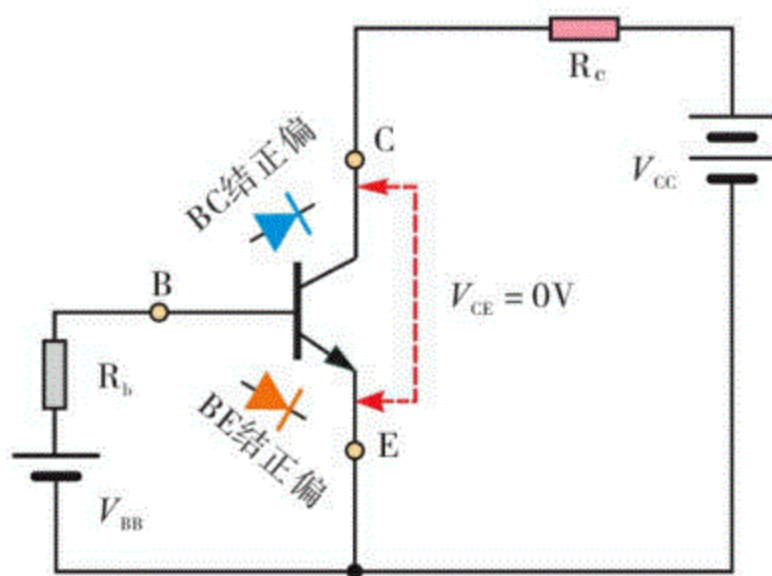


图9.22 三极管相当于两个二极管并联

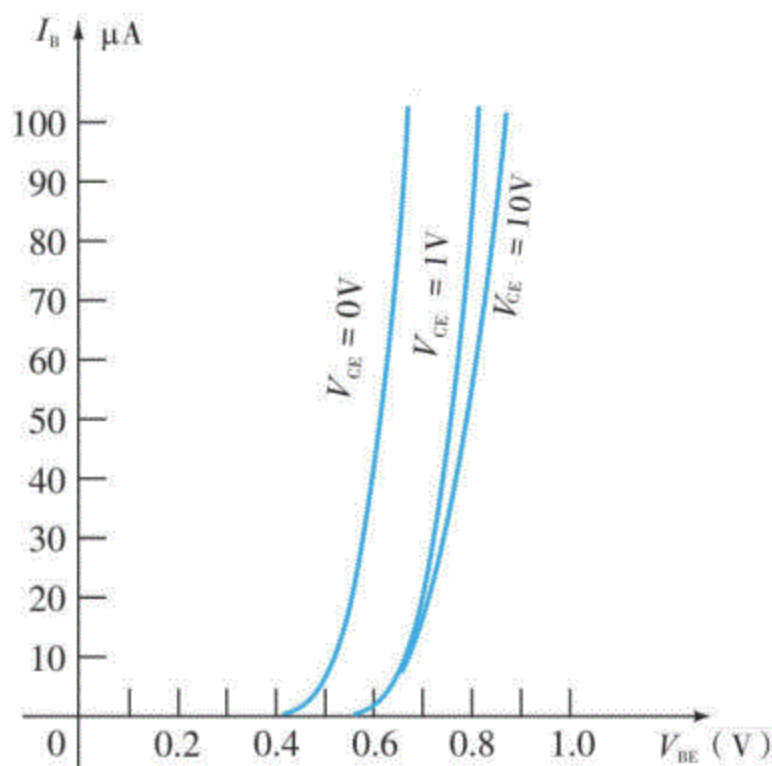


图9.23 输入特性曲线

当 $V_{CE}=0V$ 时，集电结也处于正偏，此时的集电区收集由发射区扩散到基区的自由电子的能力很弱，导致大量自由电子留在基区，基区的复合因此增强。

在 V_{BE} 相同的情况下， $V_{CE}=0V$ 时的基极电流 i_B 最大。

②随着 V_{CE} 的增大，输入特性曲线向右移动。随着 V_{CE} 的增大，三极管的集电结由正偏向反偏过渡，基区与集电区间的耗尽区变宽，这意味着基区的有效宽度减小，空穴与自由电子在基区复合的机会减小，因此基极电流 i_B 减小。同时，集电区收集自由电子的能力加强，使得从发射区扩散到基区的自由电子更多地漂移到集电区。

因此，在相同的 V_{BE} 下，基极电流 i_B 比 $V_{CE}=0V$ 时明显减小。相应地，为了维持相同的基极电流 i_B ，需加大 V_{BE} ，输入特性曲线因此向右移动。

③当 $V_{CE}>1V$ 后，集电结完全反偏，只要 V_{BE} 一定，发射区扩散到基区的自由电子的量就一定。集电结反偏所产生的内电场，足以将扩散到基区的自由电子的绝大多数收集到集电区，以至于即使 V_{CE} 再增加，只要 V_{BE} 保持不变， i_B 也不再明显下降。

$V_{CE}>1V$ 之后的输入特性曲线靠得非常近，而且大多数三极管的输入特性曲线比较相似，因此，三极管器件资料中常常没有给出输入特性曲线。

9.3.2 输出特性曲线

三极管的输出特性曲线是指，基极电流 i_B 为一常量时，集电极电流 i_C 与三极管管压降 V_{CE} （也有称输出电压的）之间的关系曲线。用函数表示为

$$i_C = f(V_{CE}) | i_B = \text{常数}$$

$i_C = \beta i_B$ ，对于每一确定的 i_B 都有一确定的 i_C ，因此，会有许多条 i_C 曲线。

V_{CE} 从零增大时，集电区收集自由电子的能力也逐渐增强，所以 i_C 也逐渐增大。当 V_{CE} 达到一定值时，集电结内电场足以将大部分由发射区扩散到基区的自由电子收集到集电区，之后即使 V_{CE} 再增大，集电结内电场再增强，但由于自由电子的量一定， i_C 也不再增大。因此在一定的 V_{CE} 范围内， i_C 曲线几乎平行于横轴，此时 i_C 的大小仅取决于 i_B （参见图9.24）。

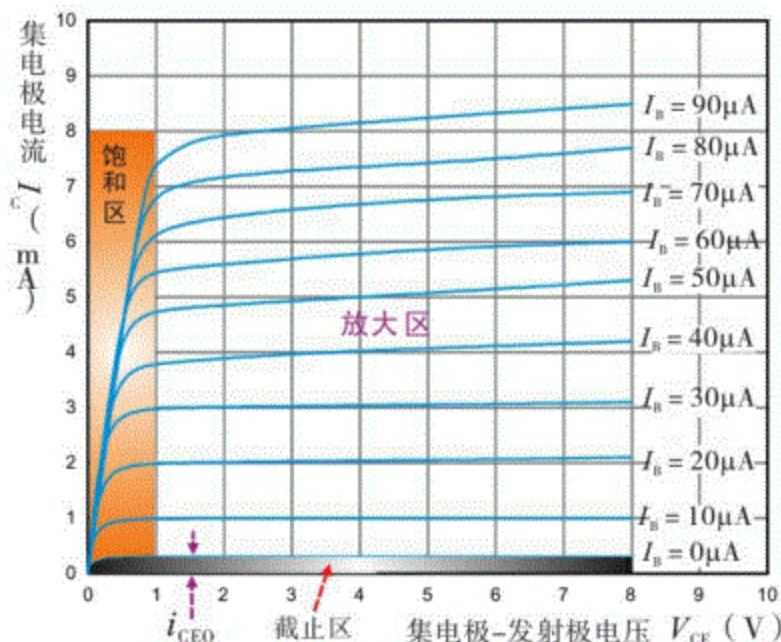


图9.24 三极管9018的输出特性曲线

三极管的三个工作区

从输出特性曲线看，三极管有三个工作区域：截止区、放大区与饱和区。

■ **截止区**：通常将 $i_B=0$ 的输出特性曲线以下的区域称为截止区。

当三极管的发射结电压小于开启电压 U_{on} (硅管0.5、锗管0.2), 且集电结处于反向偏置时, 我们说三极管处于截止区。

前面说 $i_C \approx \beta i_B$, 似乎截止区的 $i_C=0$ 是理所当然的, 即三极管C、E间的电流通道是关闭的。但严格地说, 此时的三极管并不是完全截止的 (尤其是锗三极管和在高温条件下), 还有 I_{CEO} 流经C、E通道。

I_{CEO} 被称为**穿透电流**, 其定义是: 当三极管基极开路 (基极电流为零) 时, 在集电极电源的作用下集电极与发射极之间形成的电流。小功率三极管的 I_{CEO} 很小, 在近似分析中通常忽略其影响。

■ **放大区**: 三极管的发射结正偏 ($V_{BE} > U_{on}$)、集电结反偏 ($V_{CE} > V_{BE}$) 时的工作区域称为**放大区**。

在放大区, 集电极电流 i_C 主要受基极电流 i_B 的控制, 输出电流的变化量 Δi_C 是输入电流变化量 Δi_B 的 β 倍, 即具有电流放大作用。

从图9.24所示的三极管9018的输出特性曲线可以看到, 随着 V_{CE} 的增大, 曲线微微上翘。这是由于, 当 V_{CE} 增大时, 反偏加强, 集电结变宽, 基区的有效宽度变窄, 基区的复合运动减少, 在保持 i_B 不变的情况下, i_C 将随 V_{CE} 的增大而少有增大。在一些资料中, 此现象也被称为基调效应 (基区宽度调制效应)。

■ **饱和区**: 三极管的发射结与集电结都正偏时, 三极管处于饱和区。

在饱和区, $V_{BE} > U_{on}$, 且 $V_{CE} \leq V_{BE}$ 。此时, 集电结收集电子的能力被削弱, 即使再增加基极电流 i_B , 集电极电流 i_C 也不再或很少增加。

在饱和区, 集电极电流 i_C 也不再受基极电流 i_B 的控制。 $i_C \approx \beta i_B$ 的关系不再成立, 三极管失去放大作用。三极管饱和时的**集电极-发射极**间的电压被称为饱和压降, 用 V_{CES} 或 $V_{CE(sat)}$ 表示。

9.3.3 三极管的参数

这里介绍一些三极管的主要参数。电流放大系数包括直流电流放大系数($\bar{\beta}$ 、 $\bar{\alpha}$)和交流电流放大系数 (β 、 α), 9.2.4节中已经有详细叙述, 这里不再重复。

■极间反向电流

集电极-基极反向饱和电流 (I_{CBO}): I_{CBO} 为发射极开路时, 电极C、B间的反向饱和电流。 I_{CBO} 很小, 小功率硅三极管的 I_{CBO} 小于 $1\mu A$, 锗三极管的 I_{CBO} 在 $10\mu A$ 左右。

集电极-发射极反向饱和电流 (I_{CEO}): I_{CEO} 是基极开路时, 电极C、E间的反向饱和电流。 I_{CEO} 是由集电区穿过基区至发射区的电流, 所以又称**穿透电流**。

在选用三极管时, 通常希望极间反向电流越小越好。硅三极管的极间反向饱和电流比锗三极管的小2~3个数量级。因此硅管的温度稳定性优于锗管。

■极限参数

最大集电极电流 (I_{CM}): I_{CM} 是指三极管的参数变化不超过允许值时, 其集电极的最大电流。当三极管的 i_C 超过 I_{CM} 时, 三极管的放大倍数 (β) 会下降, 同时三极管明显发热, 严重时可能烧毁三极管。

最大集电极耗散功率 (P_{CM}): $P_{CM}=i_C V_{CE}$, 指集电结上允许的最大功率。一个实际三极管的 P_{CM} 是一个确定值。三极管工作时若超过此值, 则会使管内的PN结温度过高而导致三极管性能变差或烧毁。

反向击穿电压:

在一些资料中又被称为极间反向击穿电压、反向击穿特性。它指的是三极管的某一电极开路时, 另外两个电极间所允许加的最高反向电压, 超过此值会导致三极管被击穿, 从而引起三极管永久性损坏或性能下降。

$V_{(BR) CBO}$: 发射极开路时, **集电极-基极**间的反向击穿电压。

$V_{(BR) CEO}$: 基极开路时, **集电极-发射极**间的反向击穿电压。

$V_{(BR) EBO}$: 集电极开路时, **发射极-基极**间的反向击穿电压。

表9.1所示的是三极管9018的极限参数，以供参考。

表9.1 三极管9018的极限参数 (25℃)

符 号	说 明	参 数	单 位			
V_{CBO}	集电极-基极电压	30	V			
V_{CEO}	集电极-发射极电压	15	V			
V_{EB0}	发射极-基极电压	5	V			
I_{c}	集电极电流	50	mA			
P_{c}	集电极耗散功率	400	mW			
T_{j}	结温	150	°C			
T_{STG}	储存温度	- 55 ~ 150	°C			
符号	说 明	测试条件	最小	典型	最大	单位
BV_{CBO}	集电极-基极反向击穿电压	$I_{\text{c}}=100\mu\text{A}, I_{\text{e}}=0$	30			V
BV_{CEO}	集电极-发射极反向击穿电压	$I_{\text{c}}=1.0\text{mA}, I_{\text{e}}=0$	15			V
BV_{EB0}	发射极-基极反向击穿电压	$I_{\text{e}}=100\mu\text{A}, I_{\text{c}}=0$	5			V
I_{CBO}	集电极-基极反向饱和电流	$V_{\text{ce}}=12\text{V}, I_{\text{e}}=0$			50	nA
h_{FE}	放大系数	$V_{\text{ce}}=5\text{V}, I_{\text{c}}=1.0\text{mA}$	28	100	198	
$V_{\text{CE}}(\text{sat})$	集电极-发射极饱和压降	$I_{\text{c}}=10\text{mA}, I_{\text{e}}=1\text{mA}$			0.5	V
C_{ob}	输出电容	$V_{\text{ce}}=10\text{V}, I_{\text{c}}=0, f=1\text{MHz}$		1.3	1.7	pF
f_{T}	截止频率	$V_{\text{ce}}=5\text{V}, I_{\text{c}}=5\text{mA}$	700	1100		MHz

9.4 三极管电路的基本概念

9.4.1 直流等效模型

你可以将三极管的**基极-发射极**看作一个二极管，将**集电极-发射极**看作一个受控的电流源。例如，图9.25所示的就是一个NPN三极管的直流等效模型。

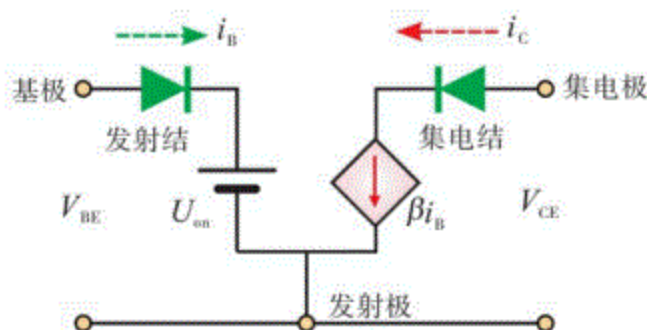


图9.25 NPN三极管直流等效模型

三极管工作在放大状态时，发射结总是正偏，集电结总是反偏，在等效电路中可以省略，因此等效电路如图9.26所示。需要注意的是，三极管的直流模型是三极管静态时工作在放大状态的模型，其使用条件是 $V_{BE} > U_{on}$ ，且 $V_{CE} \geq V_{BE}$ 。

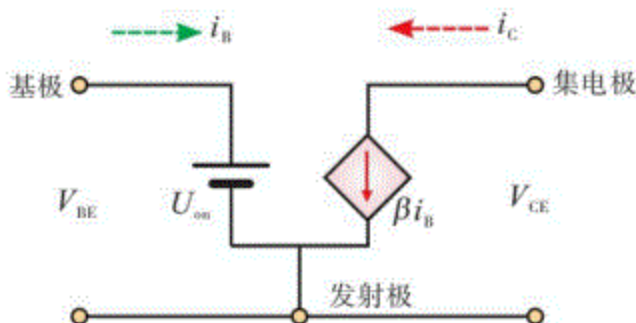


图9.26 工作在放大状态

9.4.2 电路初步分析

图9.27所示的是基本的（NPN）三极管共发射极电路。先来认识电路中各电压、电流的称谓及其内涵，以便于阅读后面的内容或其他相关资料。相信以下内容不难理解。

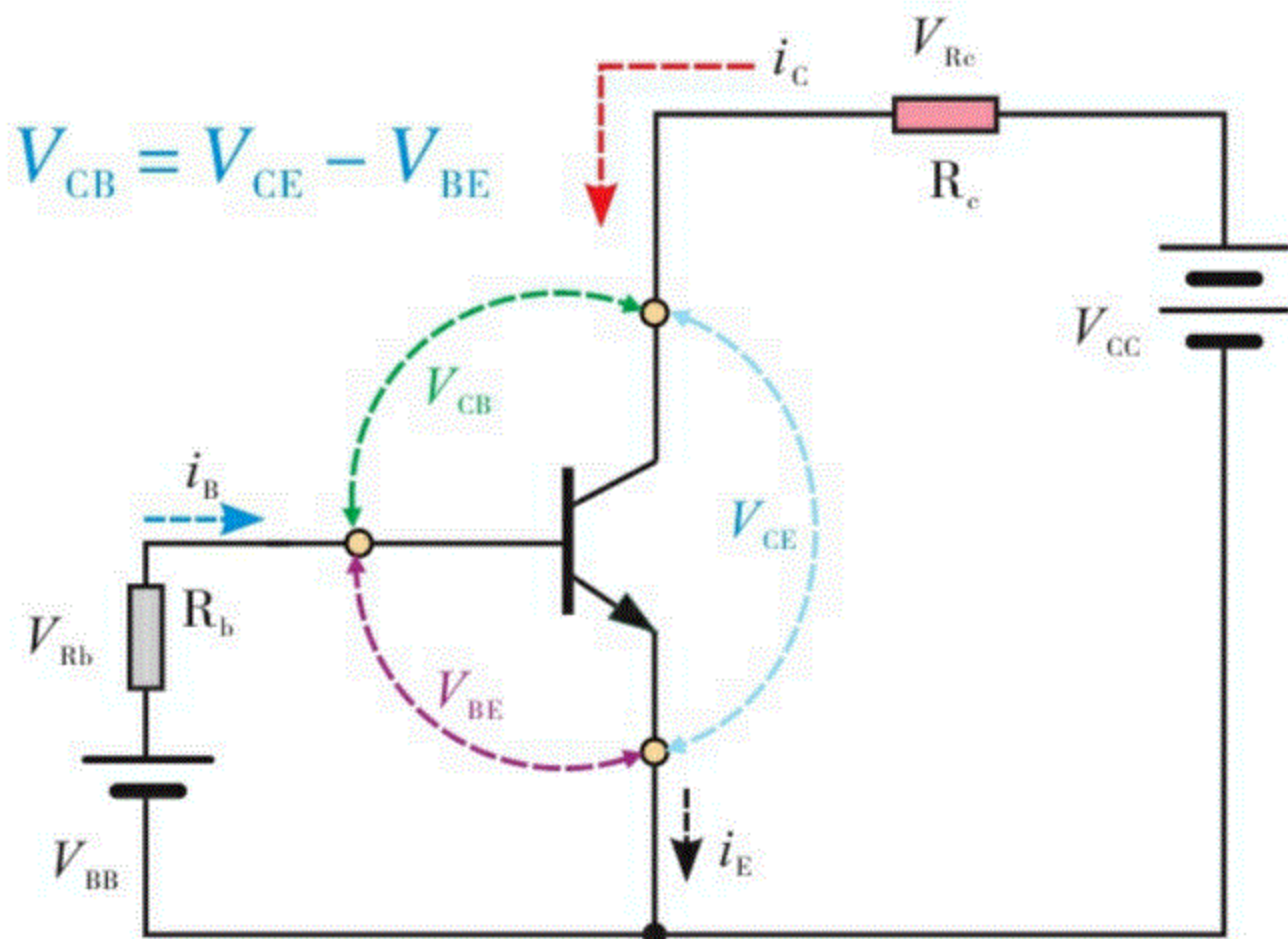


图9.27 基本NPN三极管共发射极电路

V_{BE} : 三极管处于放大区时, $V_{BE} \approx 0.7V$ 。

基极电阻 R_b 的电流 $= i_B$ 。由欧姆定律可知, 基极电阻上的电压 $V_{Rb} = i_B R_b$ 。

基极电源 V_{BB} 、基极电阻 R_b 、三极管的发射结在一个回路 (参见图9.28)。

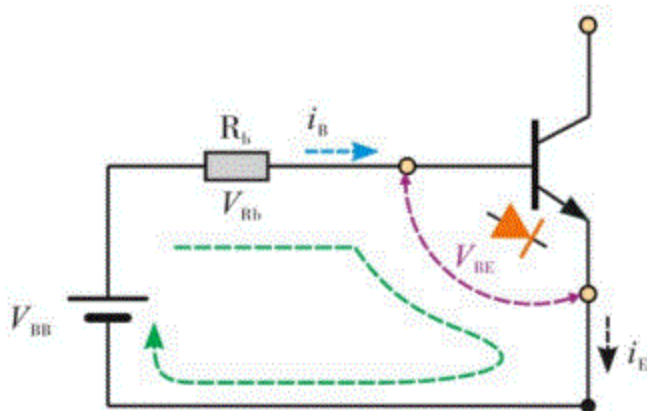


图9.28 基极电源、基极电阻、三极管发射结在一个回路

将基极电源、基极电阻与三极管的发射结独立出来，如图9.28所示。

结合前面相关的知识，可得

$$V_{Rb} = V_{BB} - V_{BE} = i_B R_b$$

$$i_B = (V_{BB} - V_{BE}) \div R_b$$

将集电极电源、集电极电阻与三极管的C、E通道独立出来，如图9.29所示。

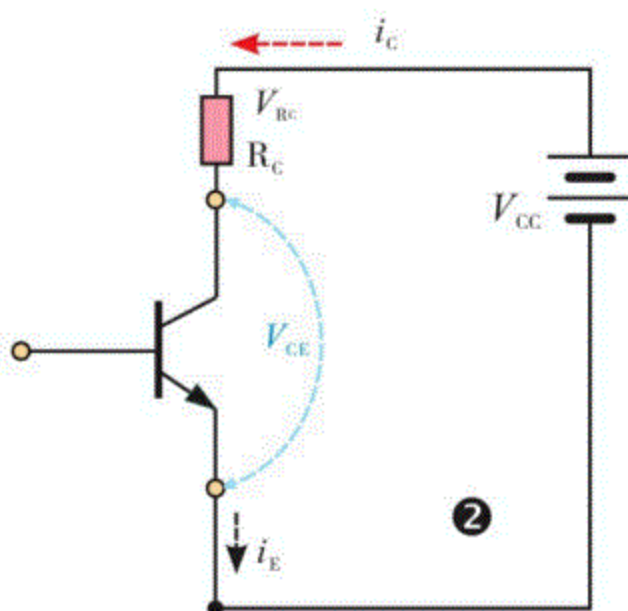


图9.29 将集电极电源、集电极电阻与三极管C、E通道独立出来

R_C 与三极管的**集电极**串联，因此有

$$V_{Rc} = V_{CC} - V_{CE} = i_C R_C$$

$$i_C = (V_{CC} - V_{CE}) \div R_C$$

9.4.3 单电源供电

前面所给出的三极管电路使用的都是双电源，但这其实是不方便的。

在实际应用中，通常采用单电源给三极管供电，如图9.30所示。在实际电路图中，通常不采用图9.30所示的画法，而是采用图9.31所示的习惯画法。

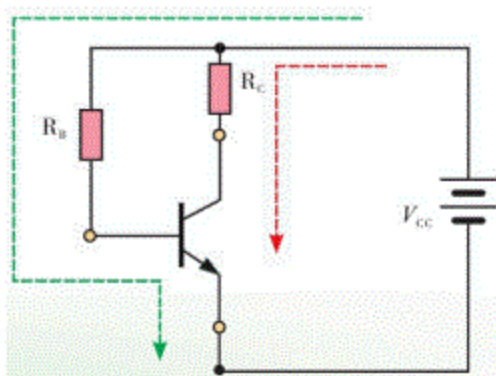


图9.30 单电源共发射极电路的传统画法

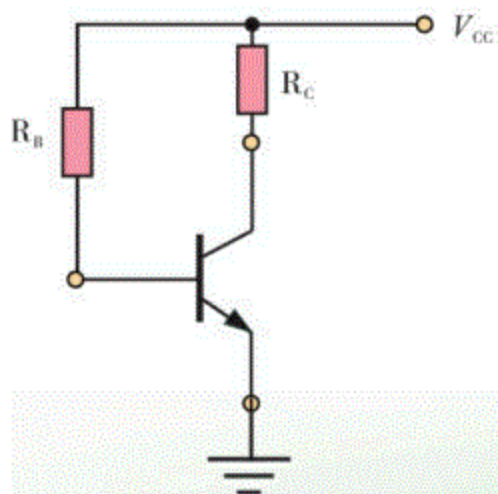


图9.31 单电源共发射极电路的习惯画法

为了使三极管三个电极的电压满足发射极正偏、集电极反偏的外部条件，通常使基极电阻远远大于集电极电阻 ($R_B \gg R_C$)。若 $R_B \gg R_C$ ，由串联电路的知识即可理解，由于电阻的降压，必然导致 V_C 远远大于 V_B ($V_C \gg V_B$)。

9.5 共发射极放大电路

放大电路都可以看成一个**四端网络**，如图9.32所示，其中有两个输入端、两个输出端。而三极管只有三个电极，在以三极管为核心组成放大电路时，三极管的其中一个电极将作为输入/输出的公共端。

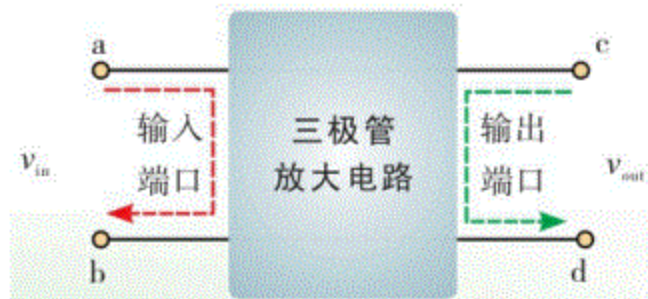


图9.32 放大电路看成四端网络

根据三极管放大电路输入/输出的公共端点的不同，三极管放大电路有三种基本电路形式：共基极电路、共发射极电路、共集电极电路。

三极管用于组建放大器时，共发射极电路是最常见的。共发射极的放大电路是以基极为输入、集电极为输出，发射极为输入/输出的公共端的电路（参见图9.33）。

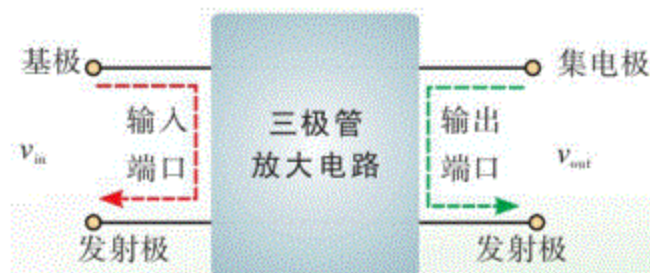


图9.33 共发射极放大电路黑盒子图

9.5.1 关于放大器的一些概念

放大器（Amplifier, Amp）是电子设备中最基本的单元电路之一，在电路或电路方框图中，常用图9.34所示的三角图形来表示（尖的一端表示放大器的输出端）。

放大器（放大电路）最基本的目的就是，使输入到放大器的信号变得更大。

看放大器的输入与输出信号，最明显的一个特点是，放大器输出的信号在某一参数上有明显变化，如图9.34所示。但这种参数只是信号电压或信号电流的变化（总的来说，是信号的功率发生了变化）。

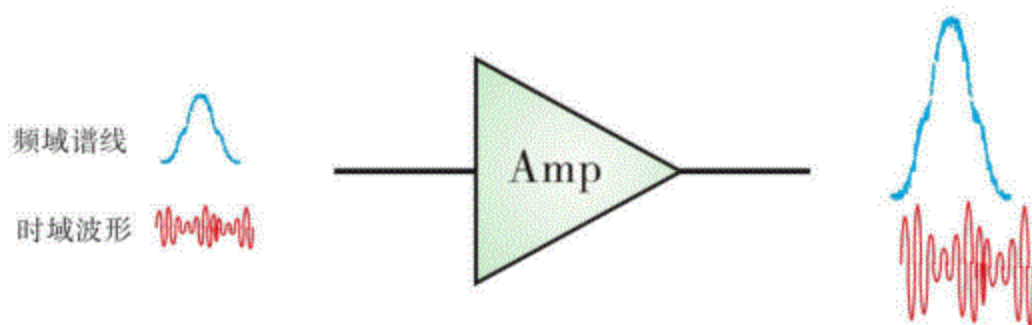


图9.34 放大器的输入与输出

放大器放大输入的信号通过放大器后，输出信号的电压或电流的幅得到了放大，但它随时间变化的规律不能变，如图9.35所示，即放大器并不改变被放大信号的频率。

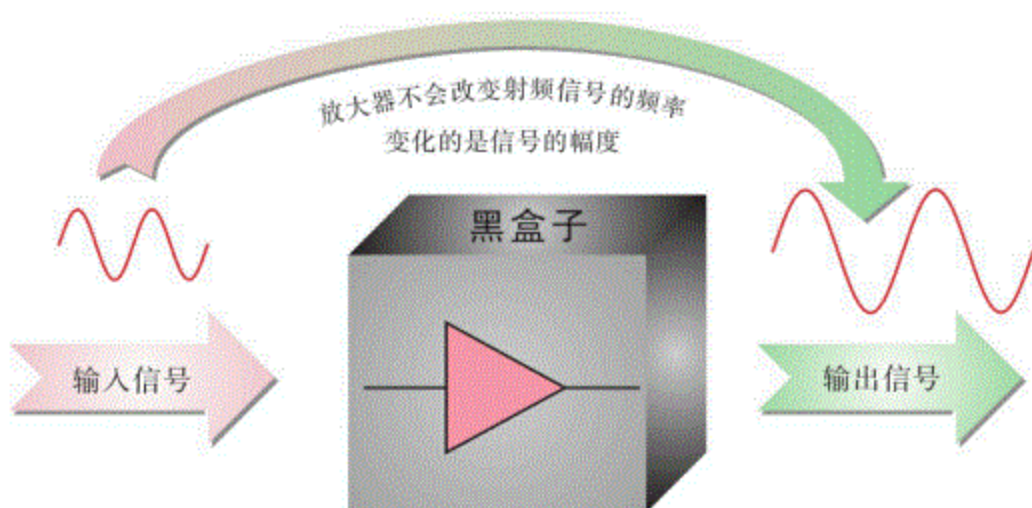


图9.35 放大器不改变频率

放大器电路可由分立元件的晶体管电路组成，也可由集成电路（IC）组成。一般来说，分立元件的放大电路可以得到较好的性能。后面即将介绍的三极管共发射极放大电路就属于**分立元件电路**。但是，采用IC组成放大器电路可得到较小的电路尺寸，而且易于使用。如图9.36所示。

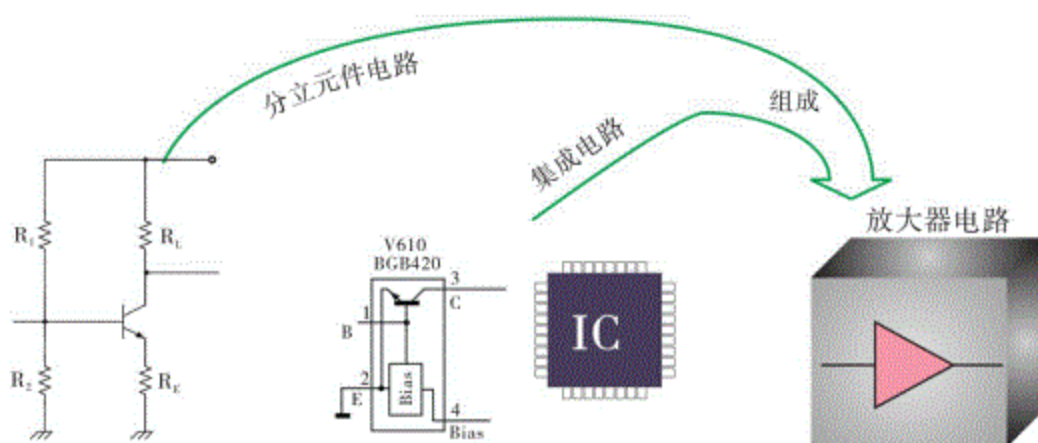


图9.36 采用IC

因器件或电路的**非线性**，电路会产生**失真**。放大器输出信号中会包含噪声、互调产物，以及谐波等。图9.37在频域中显示了放大器输出信号中的谐波成分。

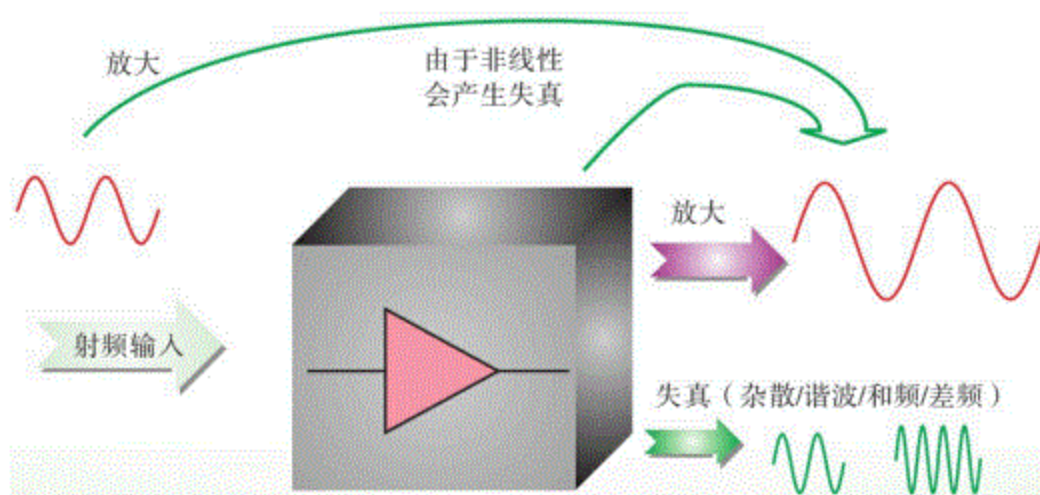


图9.37 在频域中显示了放大器输出信号中的谐波成分

9.5.2 共发射极放大电路的组成

单管共发射极的基本放大电路如图9.38所示。其中的三极管VT（也可能用T、V等其他字母标识）是放大电路的核心，起放大作用。三极管的基极是**输入端**，集电极是**输出端**，发射极连接到输入与输出的**公共端**——接地。

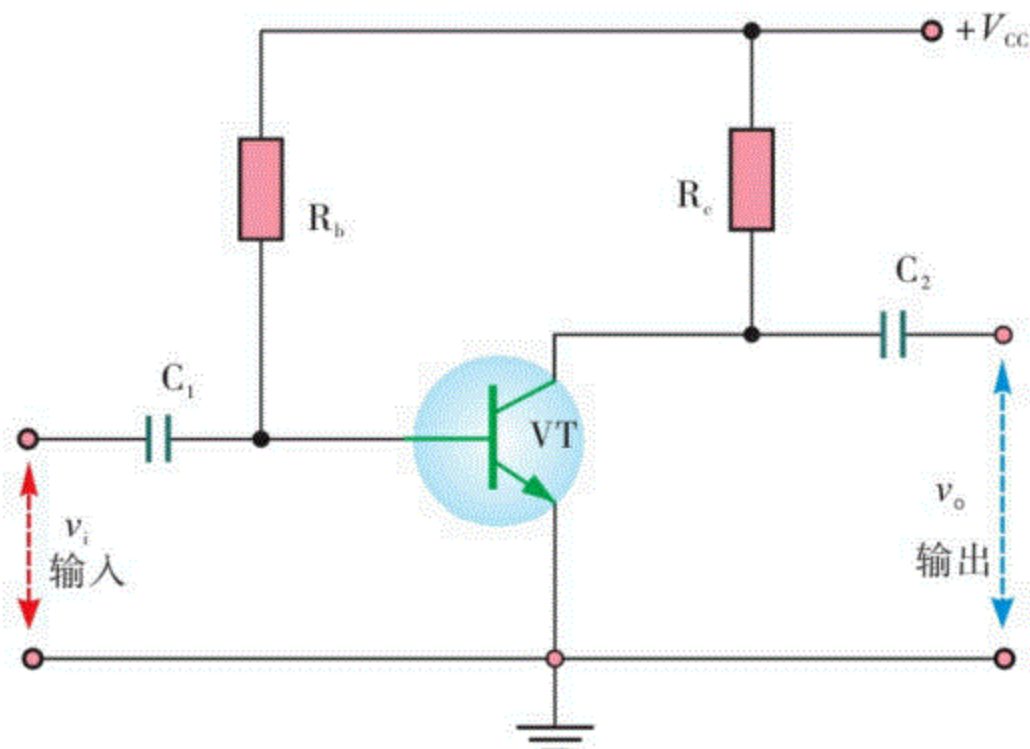


图9.38 NPN三极管共发射极的基本放大电路

电容 C_1 是输入电容, 又称**输入耦合电容**。 C_1 一方面被用来隔断三极管放大电路与信号源(或前级电路)之间的直流联系, 避免相互影响; 另一方面又将前级输出的交流信号耦合到三极管的基极, 以起放大控制作用。

电容 C_2 是输出电容, 又被称为**输出耦合电容**。 C_2 一方面隔断三极管放大电路与负载(或后级电路)之间的直流联系, 另一方面又将放大后的信号耦合到输出端, 以供负载使用。**需注意的是**, 如果使用电解电容作耦合电容, 应注意电解电容的连接方向——使电解电容的正极连接高电位。

基极电阻 R_B 又被称为基极偏置电阻。 V_{CC} 是直流电源。 R_B 、 V_{CC} 与三极管的基极和发射极一起组成三极管的基极回路, 使三极管的**发射结**处于正向偏置。 R_B 的阻值通常在几十k Ω 至几百k Ω 之间。若 R_B 为0, 则输入的交流信号将被电源 V_{CC} 短路, 无法起控制作用, 电路不能实现放大功能。

R_C 是集电极电阻。 V_{CC} 、 R_C 与三极管的集电极、基极组成集电极回路, 为**集电结**提供合适的偏置电压, 使集电结处于反向偏置状态。 V_{CC} 不但为三极管提供工作电源, 还为输出信号提供能量。 R_C 的阻值通常在几k Ω 至十几k Ω 之间。

在习惯的电路画法上, 一般不画出电源 V_{CC} 的符号, 仅标出它对地的电压值和对地的极性(+或-)。例如, 图中的 $+V_{CC}$ 也可以是+5V、-3V (PNP三极管电路, 见图9.39) 等。

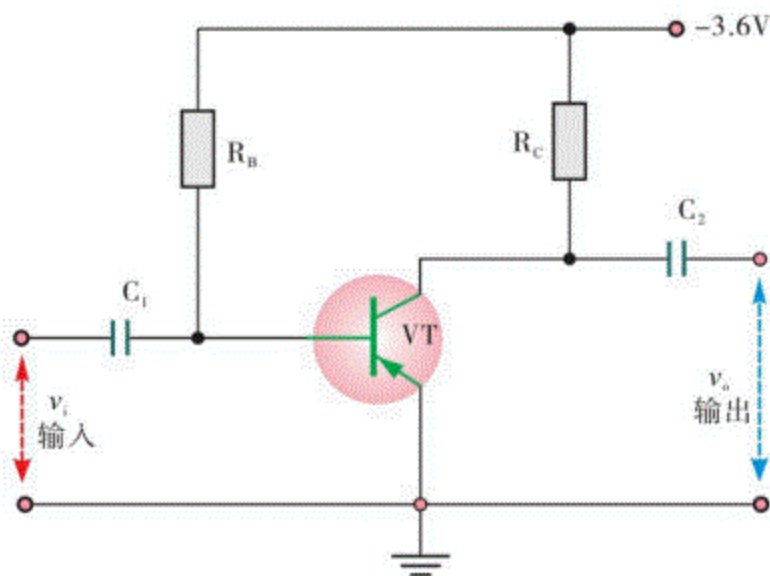


图9.39 PNP三极管共发射极的基本放大电路

放大电路**无信号输入**时, 三极管电路各处的电压电流不变。

有输入信号进入放大电路, 且在输入信号的正半周时, 信号电压叠加在基极电压上, 基

极电压上升，基极电流上升，使三极管的集电极电流成 β 倍地增长。

当**输入信号**处于负半周时，信号电压使基极电压下降，基极电流下降，三极管的集电极电流因此成 β 倍地下降。如此，三极管放大了输入信号电流。

等等，呃，上面所示的NPN与PNP共发射极的基本放大电路中，输入/输出标识的都是**电压**，而上面与前面的内容所展示的，三极管放大的都是**电流**，这如何理解啊？

赞一下！观察真仔细。

三极管本身放大的的确是电流。但三极管放大电路对外呈现的的确是**电压放大**，而这一点正是下面要介绍的。

9.5.3 从电流放大到电压放大

可以确定的是，图9.40和图9.41中的直流电源 V_{CC} 的电压值是稳定的。对于图9.40所示的电阻电路，显然，电路的电流 I 是稳定的。结合**欧姆定律**，很容易理解下面两点：

- ❶ 若 R_2 的阻值减小，相应地，电流 I 增大， R_1 上的压降增大，输出电压 V_O 变小。
- ❷ 若 R_2 的阻值增大，相应地，电流 I 减小， R_1 上的压降减小，输出电压 V_O 变大。

由以上可以看到，**电阻可以将电流的变化转化为电压的变化**。现在，问题的关键来了：

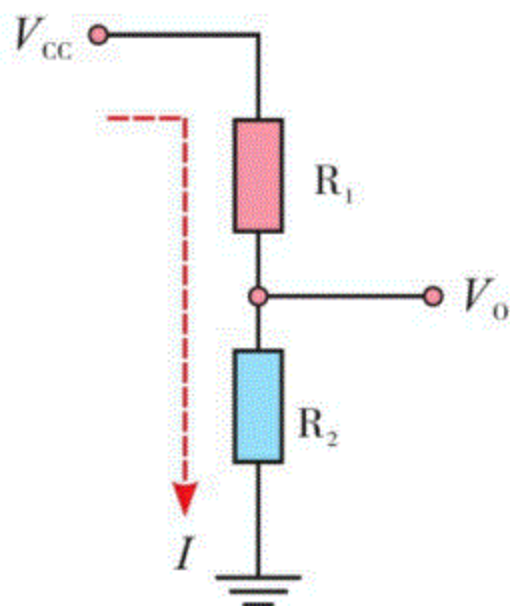
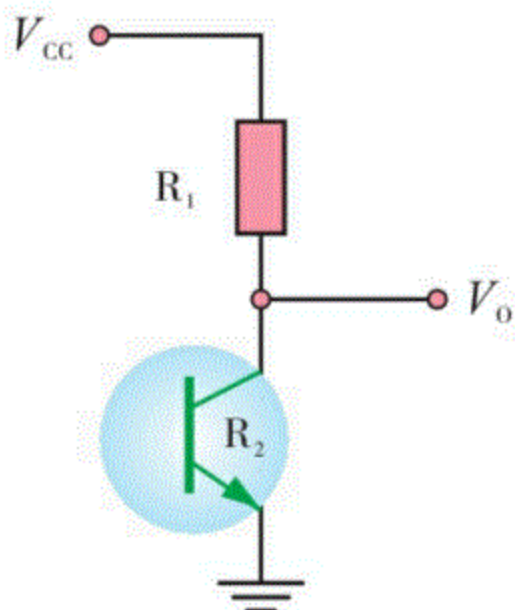


图9.40 普通电阻电路

理解左边的电阻电路不成问题吧？

自己先想一想

将 R_2 更换为三极管的C、E极之后呢？

图9.41 将 R_2 换为三极管电路

■ 电路器件、器件参数、电源确定后，若没有外部的输入信号，则电路的状态是稳定的，基极、集电极与电阻上的电压、电阻上的电流等，都是稳定不变的（参见图9.42）。此

时的电路状态被称为**静态**。在二极管一章中已讲到，静态是相对于直流而言的。

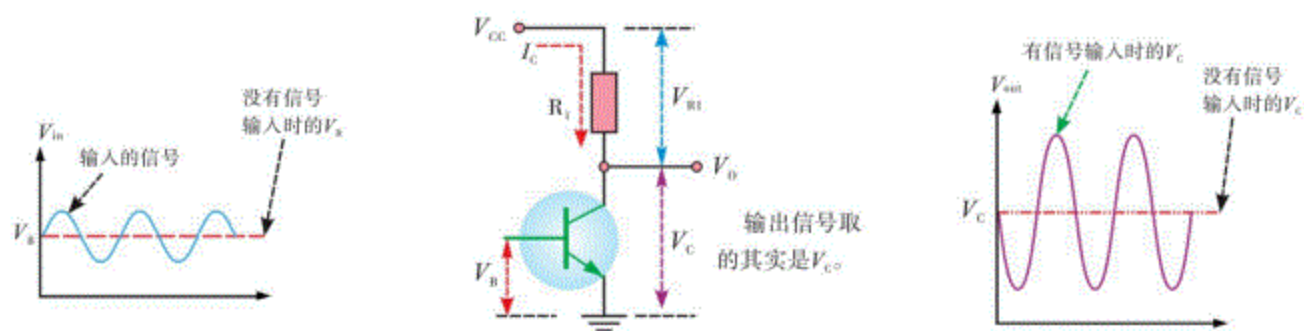


图9.4 静态

■ 仅利用串联电路的知识即可理清上图中一些信号的关系：

电阻 R_1 的电流=集电极电流 I_C ；

电阻 R_1 的压降 $V_{R1}=R_1I_C$ ；

输出电压 V_O =集电极电压 V_C ；

集电极电压 $V_C=V_{CC}-V_{R1}$ 。

对照上图仔细看一看，想一想，不难的。

现在来看一看表9.2：

表9.2展示的是输入信号叠加到 V_B 上时，导致的基极电流、 R_1 电压、 V_C 电压与输出电压的变化。这里所利用的也仅仅是上面所示的一些算式。

表9.2 图9.41电路基极输入信号导致共发射极放大电路中各电压、电流的变化

V_{CC}	V_{in}	$i_B (\mu A)$	β	$i_C (mA)$	R_1	V_{R1}	$V_C = V_{CC} - V_{R1}$	V_O
5V	↑	40	100	4.0	1k Ω	4.0V	5V-4.0V=1V	1V
	↑	30		3.0		3.0V	5V-3.0V=2V	2V
	无输入	25		2.5		2.5V	5V-2.5V=2.5V	2.5V
	↓	20		2.0		2.0V	5V-2.0V=3V	3V
	↓	10		1.0		1.0V	5V-1.0V=4V	4V

再结合表9.2的数据表叙述一下：

■ 输入的交流信号（电压）叠加在基极电压上。交流信号电压增大，即基极电压增大，基极电流增大；反之，基极电流减小。 $i_C \approx \beta i_B$ ，因此， i_B 变化时，导致 i_C 出现 β 倍的变化。

■ 集电极电流增大，则集电极电阻 R_1 上的压降也增大，相应地，集电极电压，即输出电压减小。

■ 集电极电流减小，则集电极电阻 R_1 上的压降也减小，相应地，集电极电压，即输出电压增大。

由以上内容可得出这样的结论：

三极管共发射极放大电路对输入信号进行了放大。三极管基极电流与集电极电流的变化是同步、同相的，即输入增大，输出随之增大；输入减小，则输出随之减小。

由于集电极电阻的作用，三极管共发射极放大电路是电压放大器。三极管基极电压与集电极电压的变化是同步、反相的，即输入电压增大，输出电压减小；输入电压减小，则输出电压增大。因此，三极管共发射极放大电路又被称为反相放大器。

从上面的内容可以看到，集电极电路中 R_C （图9.41中的 R_1 ）起到非常重要的作用， R_C 被用来将集电极电流的变化转化为电压的变化，借以实现电压放大。 R_C 又被称为集电极负载电阻。

集电极电阻 R_C 应选择合适的阻值，既不能过小，也不能过大。

假如 R_C 的阻值为零，则集电极电压=电源电压，虽然集电极电流有 β 倍的变化，但集电极电压无变化，无法实现电压放大。

若集电极电阻 R_C 的阻值过小，如为 100Ω ，则将导致集电极电压的变化量很小，很难体现（实现）电路的放大作用。在表9.2的示例中，使用 $1k\Omega$ 的集电极电阻，基极电流由 $25\mu A$ 变化至 $30\mu A$ 时，集电极电压的变化量是 $0.5V$ ；而使用 100Ω 的电阻时，基极电流由 $25\mu A$ 变化至 $30\mu A$ 时，集电极电压的变化量是 $0.05V$ （可参照表9.2自己计算一下）。

若 R_C 的阻值过大，将导致集电极电压过度变化，导致输出失真。在表9.2的示例中，若集电极电阻为 $2k\Omega$ ，当基极电流为 $30\mu A$ 时，集电极电流为 $3mA$ ，电阻上的压降应是 $3mA \times 2k\Omega = 6V$ 。但是，电路的工作电压才 $5V$ ，这将导致放大电路出现饱和失真，部分信号被截去。

仔细阅读、领会这里的内容哦。

9.6 三极管开关应用

一般来说，三极管电路通常用于四个方面：

- ①放大电路。三极管与外围元件一起可组成各种不同用途的放大电路，如音频放大器、射频放大器、前置放大器、低噪声放大电路、缓冲放大器、驱动放大器、功率放大器等。
- ②三极管被用于组成电子开关电路。三极管开关电路是除三极管放大器外运用最广的三极管电路，在模拟与数字电路中都可可见到。
- ③三极管与外围元件一起组成混频电路。通常仅见于无线电接收机、无线电发射机。
- ④三极管与外围元件一起组成振荡电路。振荡电路在模拟电子与数字电子系统都可见到。

9.6.1 三极管开关原理

与放大电路中的三极管不同，开关电路中的三极管工作在截止与饱和区。很容易理解三极管开关电路。以NPN三极管开关电路为例：

当基极电压 $=0V$ 时，三极管的发射结截止，三极管的C、E通道也没有电流，相当于三极管的C、E通道断开。因此，三极管的C、E通道可等效为一个开关断开，如图9.43所示。

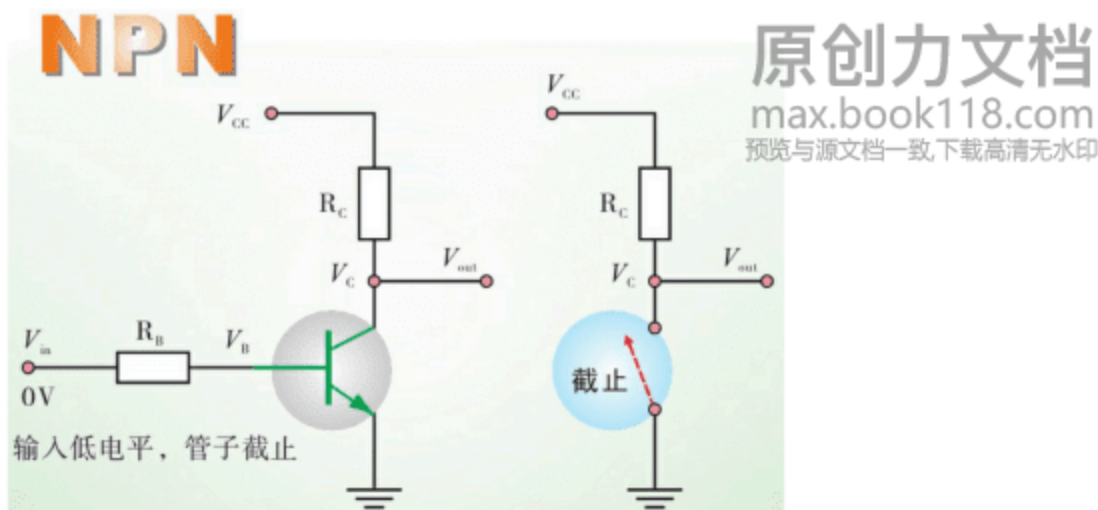


图9.43 基极电压为零

当基极电压 $=V_{CC}$ 时，三极管的发射结饱和，导致很大的基极电流，由此也导致三极管饱和，相当于三极管的C、E通道完全导通。三极管的C、E通道因此可等效为一个开关闭合，如图9.44所示。

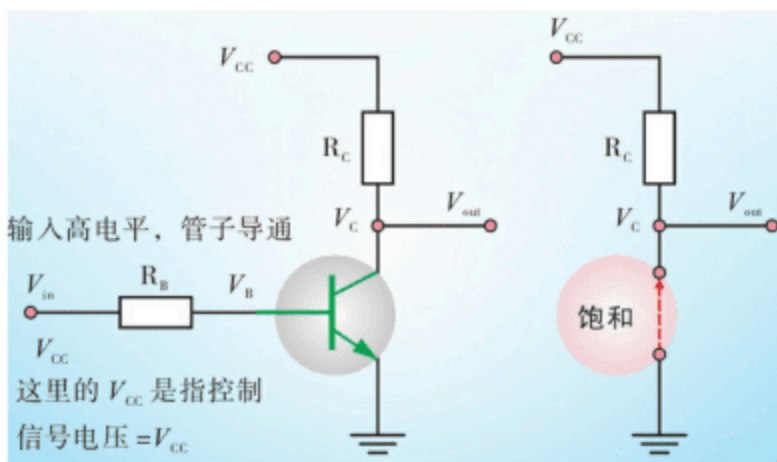


图9.44 基极电压为 V_{CC}

对于NPN三极管开关电路，你会常常看到这样的描述：控制（输入）信号为低电平时，三极管截止；控制信号为高电平时，三极管饱和导通。

控制信号为低电平，指的是三极管的 V_{BE} 小于PN结的导通电压，通常是指 $0V$ 。在某些电路系统中，为了确保三极管处于截止状态，还可能给开关管提供负压。控制信号为高电平，指的是三极管的 V_{BE} 远远大于PN结的导通电压，通常在PN结导通电压的三倍以上，有的甚至接近 V_{CC} 电压。

PNP

PNP PNP三极管开关电路的控制动作则与NPN三极管开关电路相反:

控制（输入）信号为高电平时，三极管截止；控制信号为低电平时，三极管饱和导通，如图9.45所示。

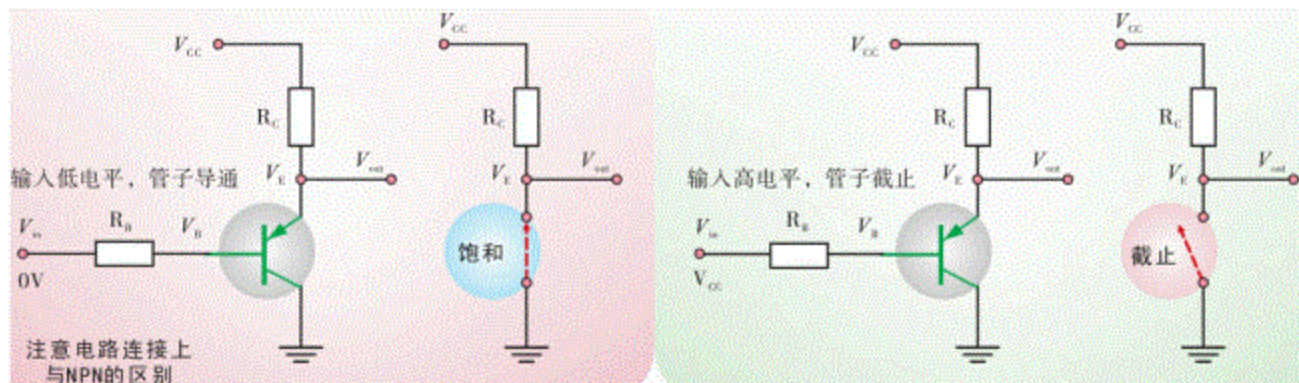


图9.45 PNP型三极管的控制动作

前面图8.122中的双三极管U602就被用作开关管，用于控制背景灯的工作。当控制信号BL_KEY为高电平时，U602的1、6脚导通，按键背景灯因此建立电流通路，开始工作。图9.46所示的是一个手机中的信号指示灯电路，你应可以分析它的工作。

实际上，前面所示三极管开关电路中的 R_C 可以用其他任何可用的负载替代，如LED、振动器、蜂鸣器、继电器、一个单元电路等。但注意，若负载是振动器（马达）等感性负载，一定要采取保护措施（参见电感、二极管的相关内容）。

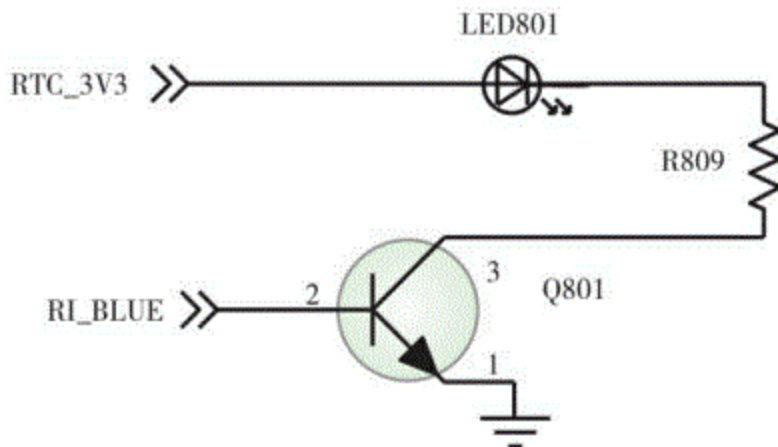


图9.46 手机中的信号指示灯电路

三极管的开关电路在不同的应用中可能以不同的形式出现，以下所示的几个电路就是实际的例子。在图9.47中，手机连接到USB充电器或PC的USB接口时，U202输出3.3V电源，Q200饱和导通，充电监测信号USB_DET由高电平变为低电平。在图9.48所示的电路

中, M_1 是振动器, DAC 信号为高电平时, BQ_1 导通, 电池电源经 R_{51} 、 BQ_1 给 M_1 供电, M_1 开始工作。

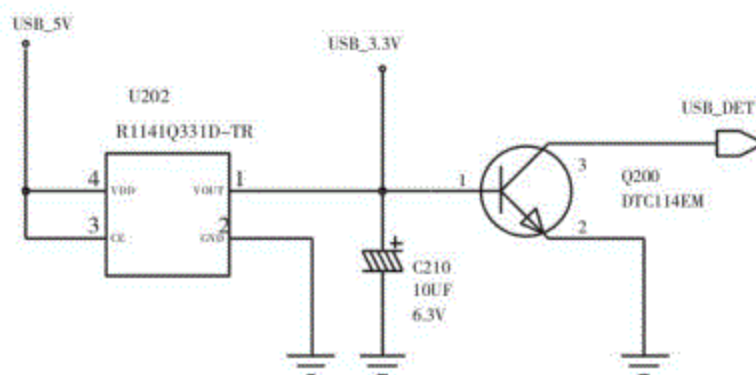


图9.47 三星E620手机中的USB检测电路

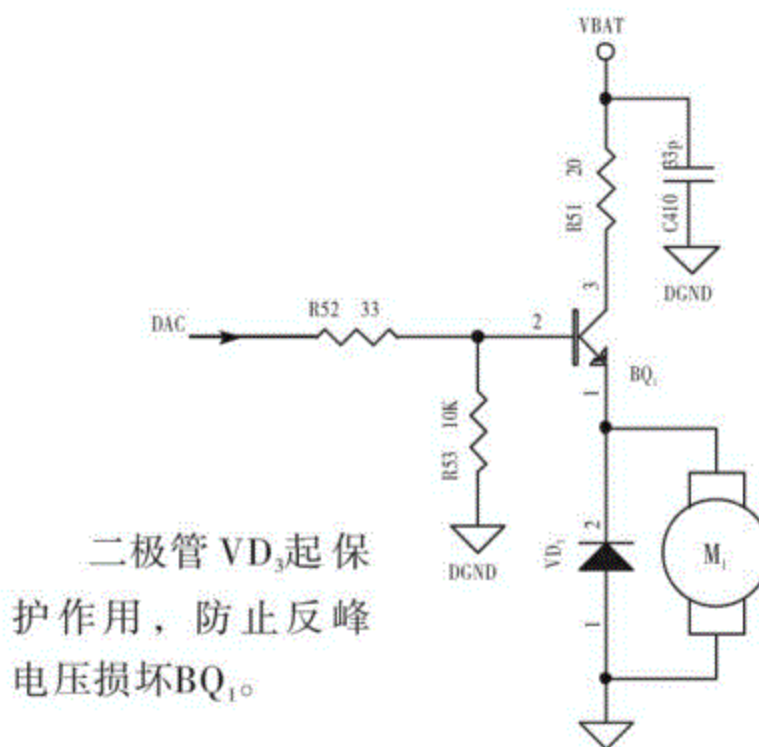


图9.48 一个手机中的振动器电路

图9.49中, 三极管Q516的发射极接控制信号端。

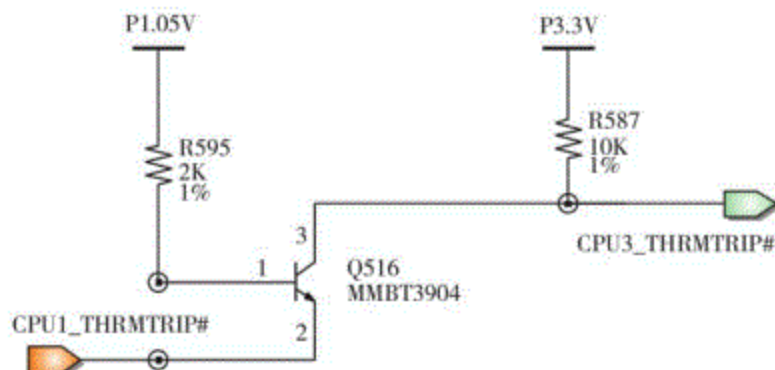


图9.49 三星笔记本电脑R710内的一个控制信号电路

控制信号为高电平时，三极管Q516截止，电路输出3.3V的高电平信号。

控制信号为低电平时，三极管Q516饱和导通，电路输出0V的低电平信号。

图9.50所示的是一个静音电路。当控制信号为高电平时，PNP三极管Q26截止，Q23、Q25因基极没有电压而截止，音频信号被送到耳机。

当控制信号为低电平时，PNP三极管Q26饱和导通，P3.3V电源经Q26给Q23、Q25的基极供电，Q23、Q25因高电平而饱和导通，致使音频信号经Q23、Q25的C、E通道短路到地，耳机因无音频信号而静音。

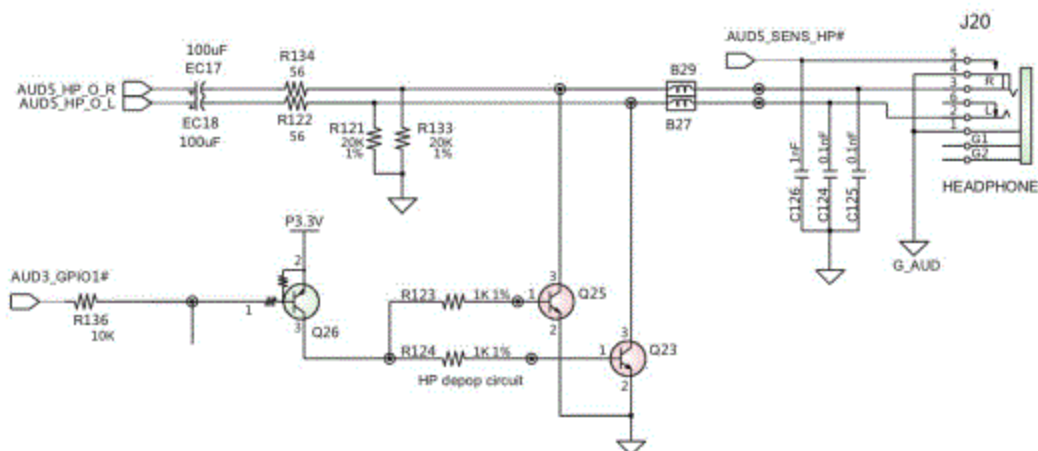


图9.50 三星笔记本电脑R710内的静音控制电路

注意，开关管截止时，电路的输出信号不一定是低电平，例如图9.50所示的电路。因此，开关电路的输出是高电平还是低电平与用作开关的三极管连接方式相关，应具体电路具体分析。另外应注意，NPN三极管的控制与开关动作是与PNP三极管相反的。

9.6.2 三极管开关电路

三极管开关不但具有机械开关的功能, 同时还有机械开关所不具备的优点: 三极管开关动作快, 以微秒 (μs)、纳秒 (ns) 计算; 三极管开关没有外露的活动触点, 没有氧化、锈蚀、磨损之虑, 不会出现电弧; 三极管开关适用范围广等。前面也介绍了基本的三极管开关电路和几个实际的三极管开关电路。那么, 如何得到一个实用的三极管开关电路呢?

三极管用作电子开关时有:

三极管截止时, $I_B = I_C = 0$, $V_{CE} = V_{CC}$ 。通常无须考虑此时的电路参数。

三极管饱和时, V_{CES} 通常在 $0.15 \sim 0.6\text{V}$ 之间, 集电极饱和电流 $I_{C(sat)}$ 、使开关管能进入饱和状态的最小基极饱和电流 $I_{B(min)}$ 分别可用式 (9.8) 计算。如图 9.51 所示。

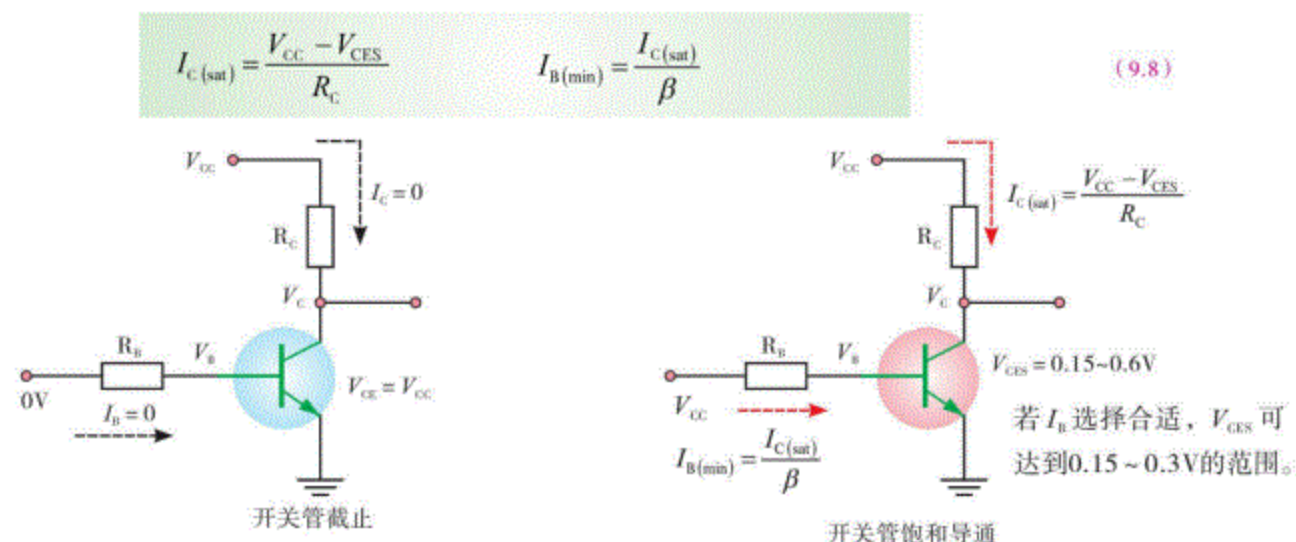


图9.51 三极管开关管截止和导通电路

开关应用时多选用硅三极管, 而且多采用共发射极的电路形式。硅三极管的开启电压为 0.5V , 导通电压在 0.7V 左右, 导致三极管饱和的 $V_{BE(sat)}$ 通常在 $0.85 \sim 1.2\text{V}$ 之间。

使三极管处于截止状态是件较为容易的事, 使电路的输入端电压低于 0.5V 即可。在实际中, 为了确保三极管处于截止状态, 往往使三极管开关电路的输入电压值小于 0.3V 。当然, 输入电压越接近 0 , 就越能确保开关管处于截止状态。

某些时候, 低电平控制信号或许也有 0.6V , 这可能导致开关三极管 (以下简称开关管)

不能完全截止。为了确保开关管截止，可在基极通道上串接一个硅二极管，如图9.52所示。0.6V的电压将会降落在二极管上。

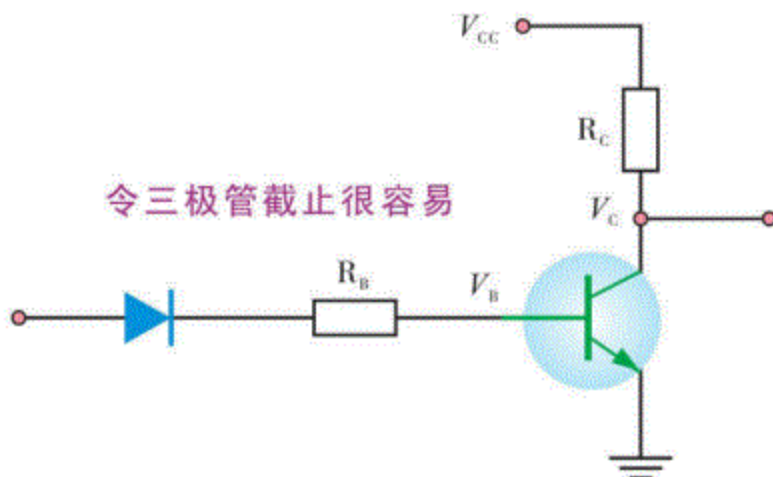


图9.52 在基极上串接一个硅二极管

要使三极管呈开关闭合（导通）状态，须使三极管进入饱和区。三极管饱和时，集电极-发射极间的电压 V_{CES} 很小，通常在0.15~0.6V间，在开关应用时，这个压降几乎可忽略不计，如NPN硅三极管9013的 V_{CES} 的典型值为0.16V。

为了使开关管饱和，开关管的基极电流 I_B 应足够大。**须注意的是**， I_B 不能导致开关管的 $I_{C(sat)}$ 超过其集电极最大电流 I_{CM} ，否则将导致开关管损坏。

实际中，开关管的 $I_{C(sat)}$ 究竟是多少？**应根据不同的应用来选择集电极电阻 R_C 的阻值，以满足电路系统的需求。**如果电路系统需要的仅仅是信号电平的高低， R_C 的值较大，如9.6.1节中图9.49所示的电路。如果需要开关电路提供较大的电流， R_C 的值较小，如9.6.1节中图9.48所示的电路。

那么，究竟如何才能使开关管饱和，又不至于损坏开关管呢？

■ 音频静音开关

① 根据交流信号的大小来选择合适功率的开关管。一旦开关管选定，重点在基极电阻的计算上。控制信号的电压就是开关电路中开关管的基极电源电压 V_{BB} 。

② 了解所选开关三极管的最大集电极电流 I_{CM} ，基极-发射极间饱和电压 $V_{BE(sat)}$ 。

③在这种应用中, 可使开关管深度饱和, 即可假设 $I_{C(sat)} = I_{CM}$ 。由 $I_{C(sat)} \div \beta$ 得到使开关管饱和所需的基极饱和电流 $I_{B(min)}$ 。由此计算出的 $I_{B(min)}$ 仅会使开关管饱和导通, 因集电极没有直流电源, 对于大多数音频应用来说, 无须担心会导致开关管的 I_C 达到 I_{CM} 的值。基极电阻的值可用这里的公式计算:

$$R_B = (V_{BB} - V_{BE(sat)}) \div \frac{I_{C(sat)}}{\beta} \quad (9.9)$$

一个静音的开关应用中, 如图9.53所示, 所选开关管的 I_{CM} 为200mA, $V_{BE(sat)} = 0.65 \sim 0.85V$, $\beta = 100$ 。已知输入的控制信号为3V。问: 用多大的基极电阻可以实现开关功能?

解:

$$R_B = (3V - 0.85V) \div \frac{200mA}{100} = 1075\Omega$$

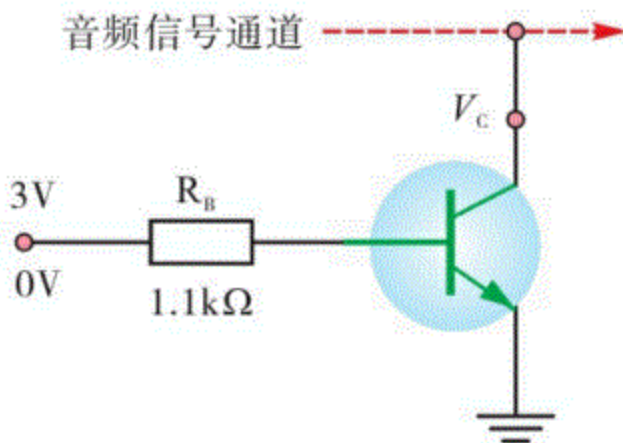


图9.53 音频静音开关电路

这里的 $V_{BE(sat)}$ 取的最大值, 因此, 实际的基极电阻可取标称值1100Ω (1.1kΩ)。

■ 直流负载的控制开关

许多时候, 开关管会被用来驱动(控制)直流负载, 如LED灯、振动器、继电器等。在这一类应用中, 首先需要考虑的是集电极负载的最大工作电流, 这个电流可被当作 $I_{C(sat)}$ 。驱动LED的, 需要在集电极电流通道中串接限流电阻。驱动振动器、继电器等感性负载的, 应注意线圈电阻。

一个LED控制电路如图9.54所示。已知所选LED的 $I_F=25\text{mA}$, $V_F=2.7\sim 3.4\text{V}$, LED仅作指示用。所选开关管与图9.53电路中的开关管一样 ($V_{CE(sat)}=0.3\text{V}$)。问: 如何选择基极电阻与限流电阻可使LED正常、安全工作?

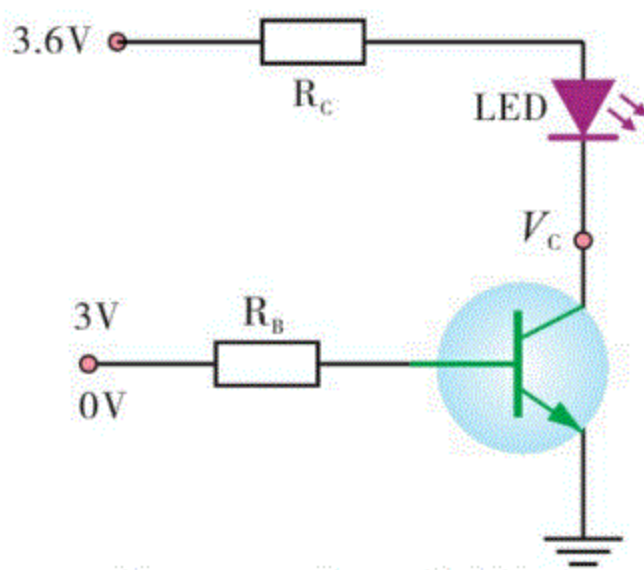


图9.54 一个LED控制电路

解: LED仅作指示用, 可选取 $V_F=2.7\text{V}$, $I_{LED}=4\text{mA}$ 。限流电阻 R_C 可用式 (9.10) 计算:

$$R_C = (V_{CC} - V_F - V_{CE(sat)}) \div I_{LED} \quad (9.10) \quad R_C = (3.6\text{V} - 2.7\text{V} - 0.3\text{V}) \div 4\text{mA} = 150\Omega$$

基极电阻的取值方法与前一应用的方法一样, 不过这里的 $I_{C(sat)} = I_{LED}$ 。由前面的公式计算可知, 最小基极饱和电流 $I_{B(sat)} = I_{C(sat)} \div \beta = 4\text{mA} \div 100 = 40\mu\text{A}$ 。为确保开关管饱和, 可使基极电流略大于 $40\mu\text{A}$, 这里选择 $55\mu\text{A}$ 。利用式 (9.9) 可得基极电阻的值为

$$R_B = (3\text{V} - 0.85\text{V}) \div 55\mu\text{A} \approx 39\text{k}\Omega$$

■ 驱动继电器

继电器的线圈有直流电阻, 相当于前面两个应用中的 R_C 。表9.3所示的是部分松下直流继电器的参数, 可供参考。在继电器应用中, 开关管的 $I_{C(sat)}$ 可取值为继电器的吸合电流。

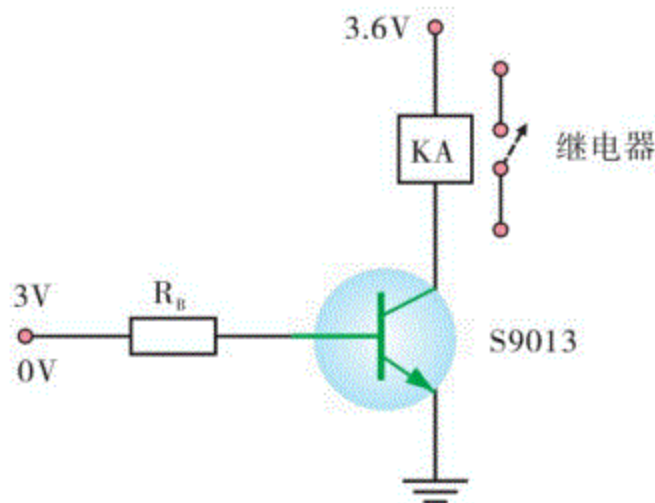


图9.55 一个继电器控制电路

表9.3 部分松下直流继电器参数

线圈额定电压	吸合电流	线圈电阻	额定功率	最小工作电压	最大工作电压
1.5V DC	93.8mA	16Ω	140mW	额定电压的 75%	额定电压的 150%
3.0V DC	46.7mA	64.3Ω			
4.5V DC	31mA	145Ω			
5.0V DC	28.1mA	178Ω			
6.0V DC	23.3mA	257Ω			
9.0V DC	15.5mA	579Ω			
12V DC	11.7mA	1028Ω			
24V DC	5.8mA	4114Ω	270mW		额定电压的 120%
18V DC	5.6mA	8533Ω			

图9.55电路中的继电器为3V的直流继电器。一旦继电器选定，即意味着继电器的吸合电流（集电极饱和电流）基本确定： $3\text{V} \div 64.3\Omega \approx 47\text{mA}$ 。因此，此处无须考虑集电极电阻，而是要考虑其他方面的问题：

开关管的最大集电极电流 I_{CM} 应在继电器吸合电流的两倍以上。例如，图9.55中的开关管 I_{CM} 应在94mA以上，这比较容易，许多小功率三极管都可满足要求。如果对开关速度有要求，则可选择专门的开关三极管；若没有开关速度要求，可选一般的小功率三极管，如S9013。

使用9V及以下的继电器时，开关管的耐压一般不成问题。使用9V以上继电器的，**开关**

管的集电极-发射极反向击穿电压 V_{CEO} 最好两倍于继电器额定电压之上。

S9013的 $V_{BE(sat)} = 0.91 \sim 1.2V$, $\beta = 120$ 。若控制信号有效时为3V, 则参照前面的方法可计算出开关管的基极电阻为

$$R_B = (V_{BB} - V_{BE(sat)}) \div \frac{I_{C(sat)}}{\beta} = (3V - 1V) \div \frac{47mA}{120} \approx 5.1k\Omega$$

由以上可知, 选择三极管S9013、5.1k Ω 的基极电阻, 可使上面的三极管开关电路实现对继电器工作的控制。

继电器、开关管、基极电阻选定, 电路连接好。**别急着通电!** 还有一件很重要的事:

开关管由饱和导通转为截止时, 由于继电器线圈是感性负载, 会产生很大的反峰电压, 这会损坏电路器件, 需要**采取保护措施**。通常的做法是, 在继电器线圈两端**反向并联**一个二极管, 即二极管的电流方向与线圈电流方向相反 (参见电感、二极管的相关内容)。最终得到的继电器控制电路如图9.56的①所示。

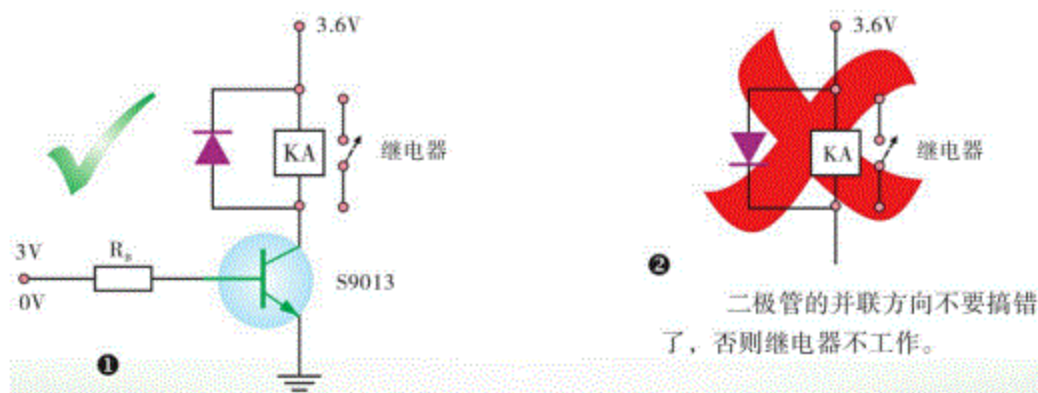


图9.56 继电器控制电路

■电源供电开关

电源供电开关在电路系统以给某个单元电路供电为目的, 又被称为(电源)负载开关。需要目标电路工作时, 供电开关闭合; 需要目标电路停止工作时, 开关断开。

与前面所示应用不同的是, 电源供电开关通常选用**PNP开关三极管**。图9.57所示的是其基本的电路形式。

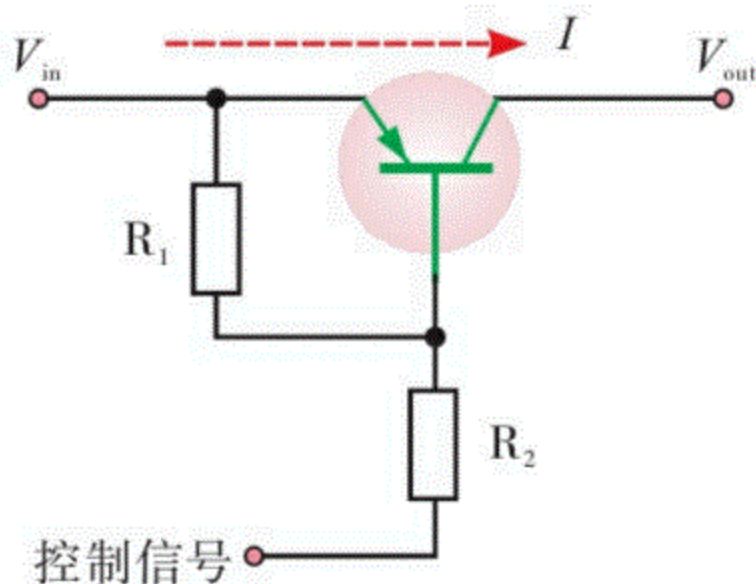


图9.57 基本电路形式

？你能想一想为什么NPN三极管不适合做供电开关吗？

在设计使用这种开关电路时，首先应了解目标电路的最大工作电流 I 。为使开关管能安全工作，开关管的最大集电极电流 I_{CM} 应 $\geq 2I$ 。满足这个条件后，不必担心开关管的集电极工作电流过大。供电开关与目标电路如图9.58方框图所示的连接关系，你看目标电路像不像一个电阻？开关管通道的电流就是由它限定的。

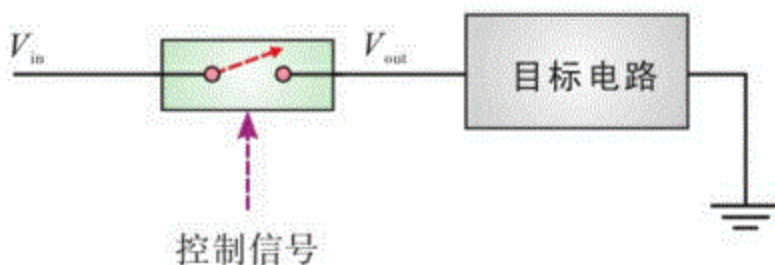


图9.58 供电开关与目标电路的连接关系

在图9.57所示电路中，控制信号为高电平时（接近开关管的发射极电压），开关管截止，无输出。当控制信号为低电平时（0V），开关管饱和导通，电路输出电源为目标电路供电。由于开关管的 $V_{CE(sat)}$ 很小，因此供电开关的输出近似等于输入。

在电路中， $R_1 \gg R_2$ ，如 R_1 为10k Ω ， R_2 为100 Ω 。如此，可确保开关管饱和导通。你看 R_1 、 R_2 是什么关系？开关管的基极电压取值哪里？很明显， R_1 、 R_2 为电阻分压器。当控制信号为0V时，控制端相当于接地。 R_2 的端电压就是开关管的基极电压。选择合适的 R_1 、 R_2 阻值，使 R_2 上的电压 $\leq$ 开关管的 $V_{BE(sat)}$ 即可。

实际上, 供电开关通常还用了一个NPN三极管配合, 如图9.59所示。当控制信号为高电平时, VT_1 饱和导通, R_2 相当于接地, VT_2 的基极电压下降, VT_2 也因此饱和导通, 输出电源。

当控制信号为低电平时, VT_1 截止, 此时的 VT_2 相当于开路, VT_2 的基极电压等于 V_{in} , VT_2 也因此截止, 电路无输出。

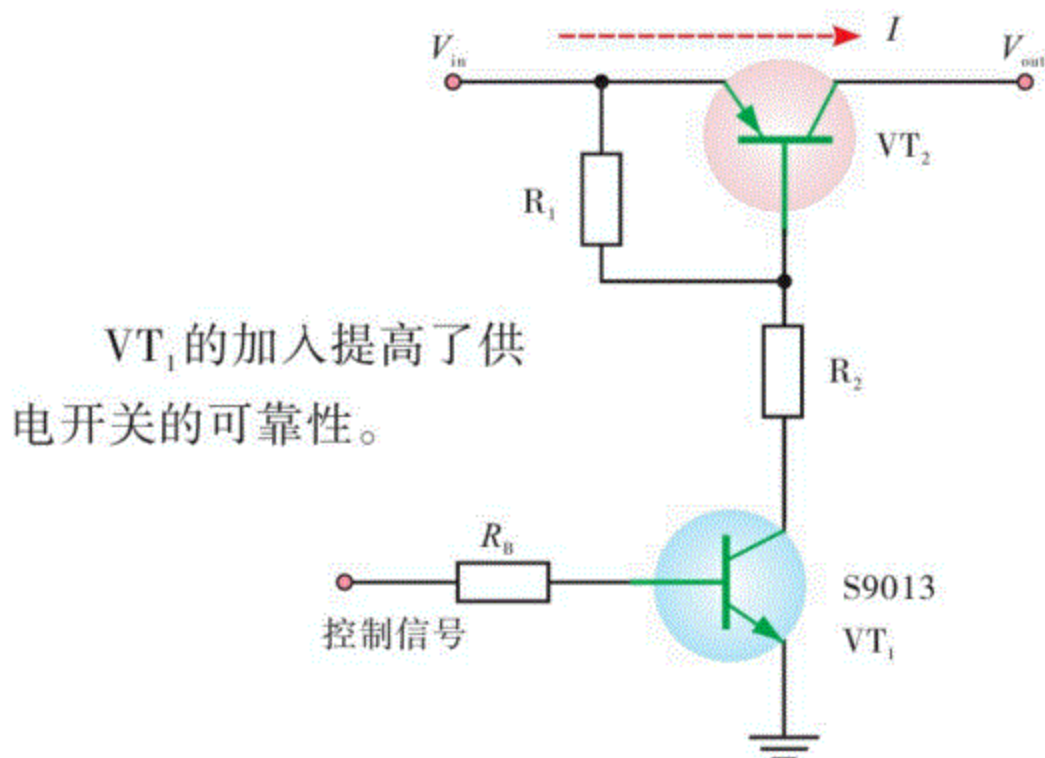


图9.59 供电开关用一个三极管配合

前一页的问题想到了吗? 再看看图9.60, 想想NPN三极管的导通条件?

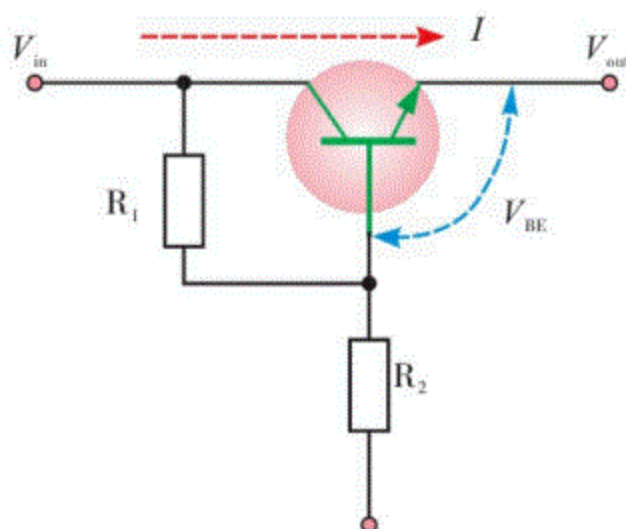


图9.60 判断NPN二极管的导通条件

硅三极管要饱和导通，须基极电压大于发射极电压0.7V以上，据导通程度的不同， V_{BE} 通常在0.8~1.2V以上。这意味着，即使基极电压等于集电极电压（输入电源电压），输出电压也会低于输入0.8~1.2V。这对于电子电路系统来说，是不允许的。

对使用PNP三极管的开关电路来说，不存在以上所述的问题。饱和状态下，基极电压必然低于发射极。可是，饱和状态下，PNP三极管的基极电压也必然低于集电极电压。如果选择合适的基极饱和电流，硅三极管的 $V_{CE(sat)}$ 可以在0.1~0.2V之间，这意味着供电开关的输出仅比输入低0.1~0.2V。很明显，PNP供电开关的性能优于NPN供电开关。如图9.61所示。

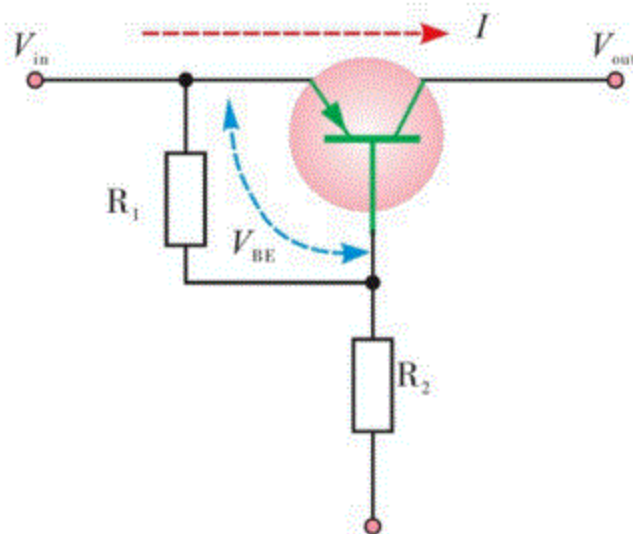


图9.61 PNP三极管开关电路

9.6.3 关于三极管开关电路

从前面两节内容看，对于一般的应用而言，三极管开关应用是比较容易实现的。

开关管集电极负载的最大工作电流即是开关管的**集电极饱和电流** $I_{C(sat)}$ 。不同的集电极负载会导致不同的 $I_{C(sat)}$ （参见9.6.2节的内容）。

$I_{C(sat)} \div \beta$ ，即得到可以使开关管进入饱和状态的**最小基极饱和电流** $I_{B(sat)}$ 。

控制信号的有效电平（令开关管饱和的电压） $\div I_{B(sat)}$ ，即得到基极电阻的值。

三极管在饱和导通后还存在管压降（ V_{CE} ，0.15~0.6V），因此三极管开关不适宜于串联使用，如图9.62的①所示。但是，三极管开关却可以并联使用，如图9.62的②所示。

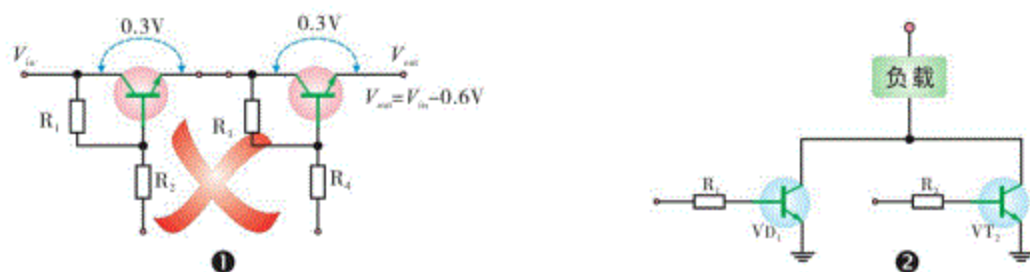


图9.62 三极管开关的正确、错误使用

有时候，信号的低电平未必能使三极管完全截止，尤其当输入的低电平接近0.6V时更是如此。通常是在基极通道串接一个二极管予以解决（参见9.6.2节的内容）。

有时候，为了提高三极管开关的转化速度，可以在基极电阻上并联一个适当容量的电容器，如图9.63所示。并联的电容器被称为加速电容（参见电容的相关内容）。

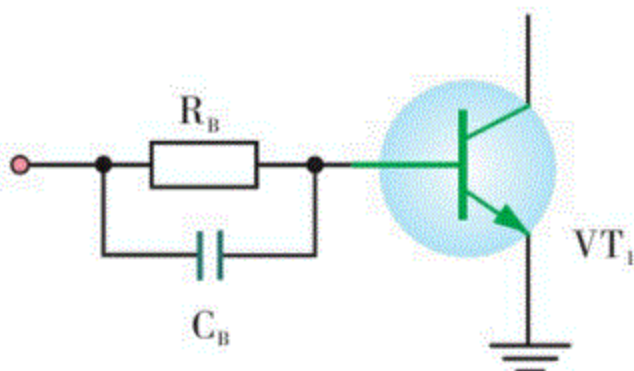


图9.63 在基极电阻并联一个电容器

在前面介绍的三极管开关电路中，负载都是**串接**在开关管的C、E通道的。有时候，开关电路的负载不是接在集电极与电源之间，而是**并联**在开关管的C、E端，如图9.64所示。这种接法的开关动作与负载串接在集电极通道的接法相反：当三极管截止时，负载工作；当三极管导通时，负载停止工作。

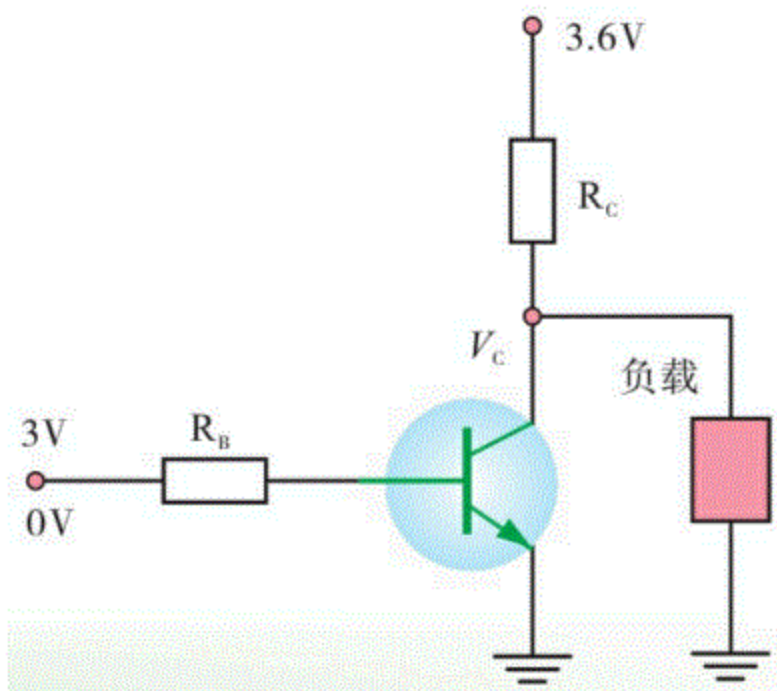


图9.64 负载并联在开关管的C、E端

9.7 三极管器件

除应用于放大、开关电路的一般三极管外，还有一些特殊的三极管，如光电三极管、带阻三极管、带阻尼三极管、达林顿管等。这里作一个简单介绍。

9.7.1 光电三极管

光敏三极管和普通三极管的输出特性曲线相似，也有电流放大作用，只是它的集电极电流不只是受基极电路和电流控制，同时也受光辐射的控制。光电三极管的基极通常不引出，看起来好似光电二极管（但也有一些光敏三极管的基极有引出，用于温度补偿和附加控制等

作用)。

光电三极管的功能可等效为一只光电二极管与一只三极管相连, 并仅引出集电极与发射极, 如图9.65的②所示, 其电路图形符号如图9.65的③所示。

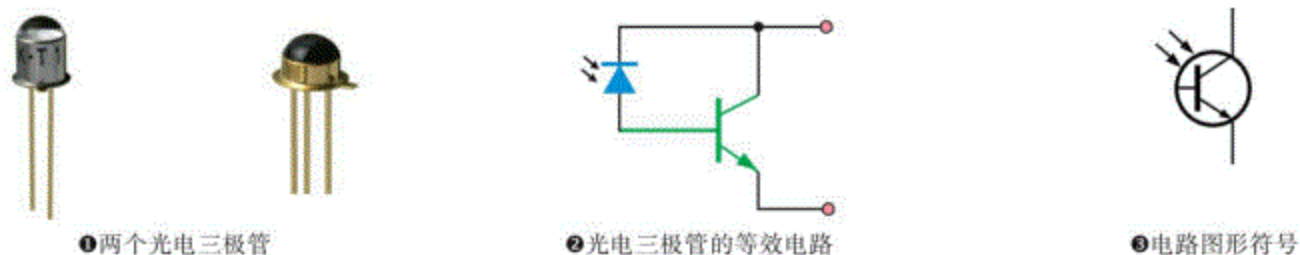


图9.65 光电三极管

当具有光敏特性的PN结受到光照时, 产生光电流, 光电流流入发射结, 从而在集电极回路中得到一个放大了相当于 β 倍的信号电流。光电三极管比光电二极管具有更高的灵敏度。

与光电二极管一样, 光电三极管类似于一个由光照强度控制的可变电阻。

例如, 光电三极管PT334-6C在 $V_{CE}=20V$ 时的暗电流为 $100nA$, 其C-E极相当于一个 $200M\Omega$ 的电阻; 在 $V_{CE}=5V$ 时的亮电流 $I_{C(on)}$ 为 $3.5mA$, 其C-E极相当于 1429Ω 的电阻。

图9.66所示的是一个实际的应用, 读者先看能否理解?

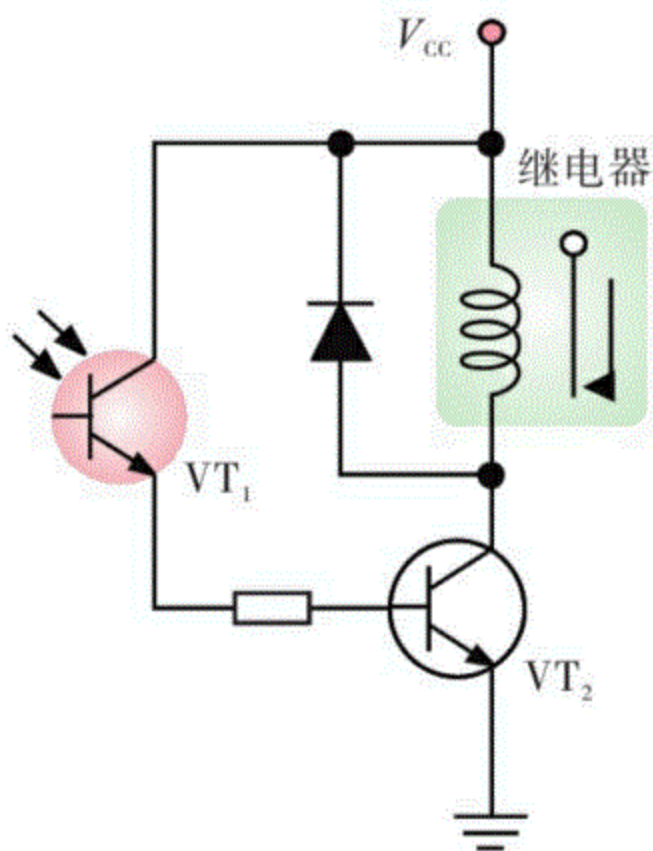


图9.66 实际应用图

在图9.66所示的电路中，光电三极管 VT_2 被用作一个光控的基极电阻。没有光照或光照不足时， VT_1 的CE间电阻很大，三极管 VT_2 截止，继电器不工作。

光照强度达到一定时， VT_1 的CE间电阻变得很小，三极管 VT_2 因获得较大的基极电流而饱和导通，继电器因此吸合。对了，电路中与继电器并联的二极管所起的作用还记得吧？

图9.67所示的电路中光电三极管的应用其实与图9.66所示电路中的类似，理解它不难。想一想，有光照时LED亮还是不亮？图9.68所示的是一个实用的自动夜灯电路，有光照时，LED不发光；没光照时，LED发光。在图9.68所示的电路中，用到了发光二极管、光电三极管、NPN与PNP三极管、电阻与电容，在前面所介绍的电子元件中，仅电感没有使用。

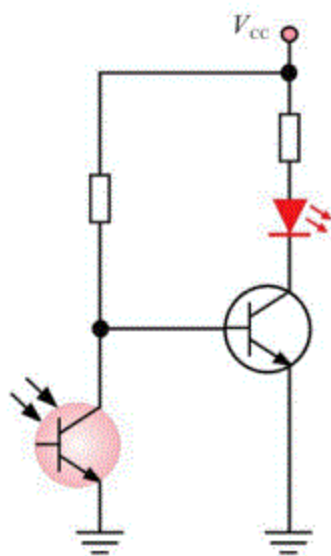


图9.67 光电三极管的应用

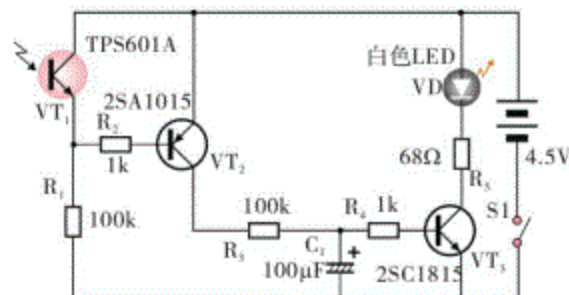


图9.68 实用的自动夜灯电路

先别看后面的内容，知识分析一下！

在图9.68所示电路中：当开关 S_1 闭合时，电路即开始工作。 R_3 与 C_1 组成一个积分延时电路，以防止电路误动作。**有光照时**， VT_1 导通，致使PNP三极管 VT_2 的基极为高电平。 VT_2 因此截止，电源不能送到三极管 VT_3 的基极， VT_3 截止，LED因没有电流通路不工作。

无光照时， VT_1 截止，致使PNP三极管 VT_2 的基极为低电平， VT_2 因此饱和导通，电源经 VT_2 的CE极， R_3 、 R_4 送到三极管 VT_3 的基极， VT_3 也因此饱和导通，为LED提供电流通道，LED开始工作。

9.7.2 带阻尼与带阻三极管

带阻尼三极管是将高反压大功率开关三极管与阻尼二极管、保护电阻封装在一起的特殊三极管。带阻尼三极管主要应用于电视机与显示器的行扫描电路中。

图9.69 (a) 所示的就是带阻尼三极管的内部电路结构图。其中，电阻是保护电阻，防止基极的电压过高而损坏三极管；二极管是阻尼二极管，起到续流二极管的作用。

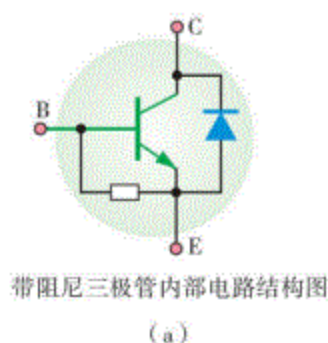


图9.69 带阻尼三极管

图9.70所示的是一个彩色电视机中行输出电路的局部，其中，V402就是带阻尼三极管（在电路的位置俗称行管）。V402的集电极连接到行输出（变压器）上。

行输出变压器本身是一个升压变压器。由电感的知识可知，三极管V402由导通转为截止时，行输出变压器会产生很高的反峰电压。如果没有保护措施，行管很容易被击穿。阻尼二极管的作用就是为反峰电压提供泄放通道，以保护行管。当然，也有一些机器没有使用带阻尼三极管，使用的是独立的阻尼二极管。

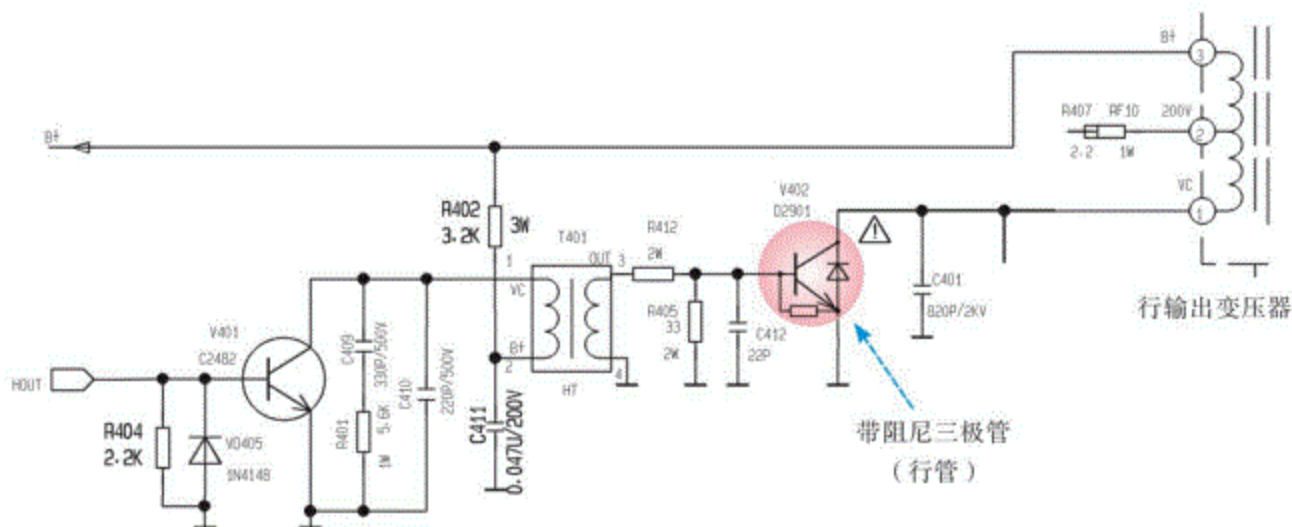


图9.70 彩色电视机中行输出电路的局部

带阻三极管也是集成了其他元件的三极管。与带阻尼三极管不同的是，除三极管外，带阻三极管内仅集成一个或两个电阻。图9.71和图9.72所示就是一些常见的带阻三极管的内部电路结构图。

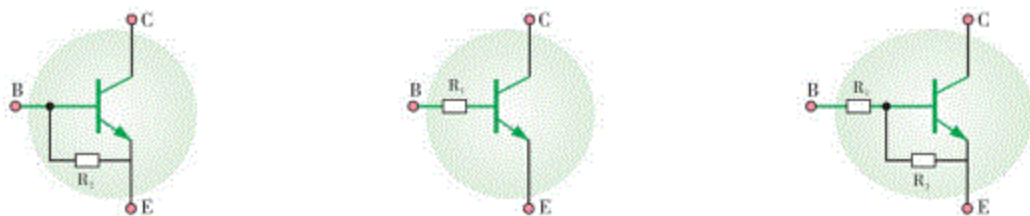


图9.71 几个NPN型带阻三极管内部电路结构图

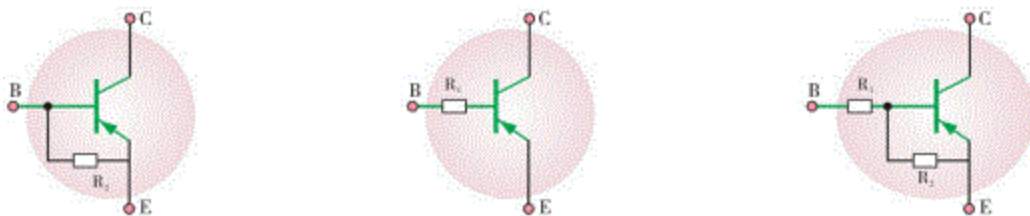


图9.72 几个PNP型带阻三极管内部电路结构图

带阻三极管其实就是集成了偏置电阻的三极管，在使用带阻三极管时无须再用独立的偏置电阻。带阻三极管通常应用于开关电路、数字电路，因此又被称为数字三极管或数码三极管。

带阻三极管有许多型号，其内部的电阻阻值各不相同，可在网上搜索相关三极管的数据表来了解。通常，基极电阻 R_1 越小，三极管的饱和度就越深。 R_2 则减小三极管截止时的集电极反向电流。

带阻三极管的外观与普通三极管没有什么区别，对于一不知好坏的三极管来说，一般的手段比较难以确认它是否是带阻三极管。

图9.73所示的是一个实际的带阻三极管应用电路。带阻三极管V1157~V1159被用来控制按键背景灯的工作。当控制信号为高电平时，三极管V1157~V1159导通，发光二极管V1154~V1156开始工作。

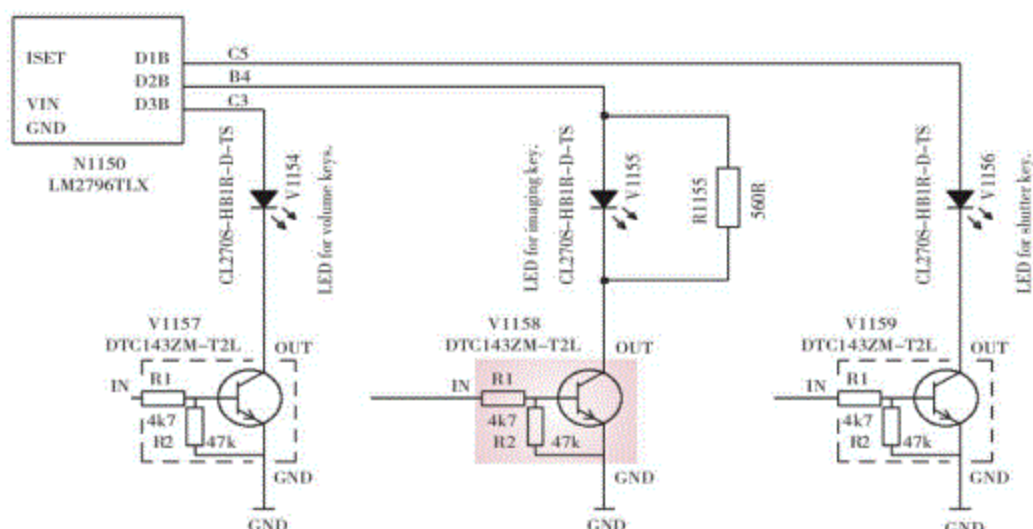


图9.73 诺基亚N95手机内按键背景灯控制电路局部

9.7.3 达林顿复合三极管

达林顿 (Darlington) 管也称复合三极管、复合晶体管。采用复合连接的方式，将两只或多只三极管连接在一起，可以等效为一个新的三极管，复合连接后的三极管被称为达林顿管。

普通的达林顿管有4种连接方式，如图9.74所示。

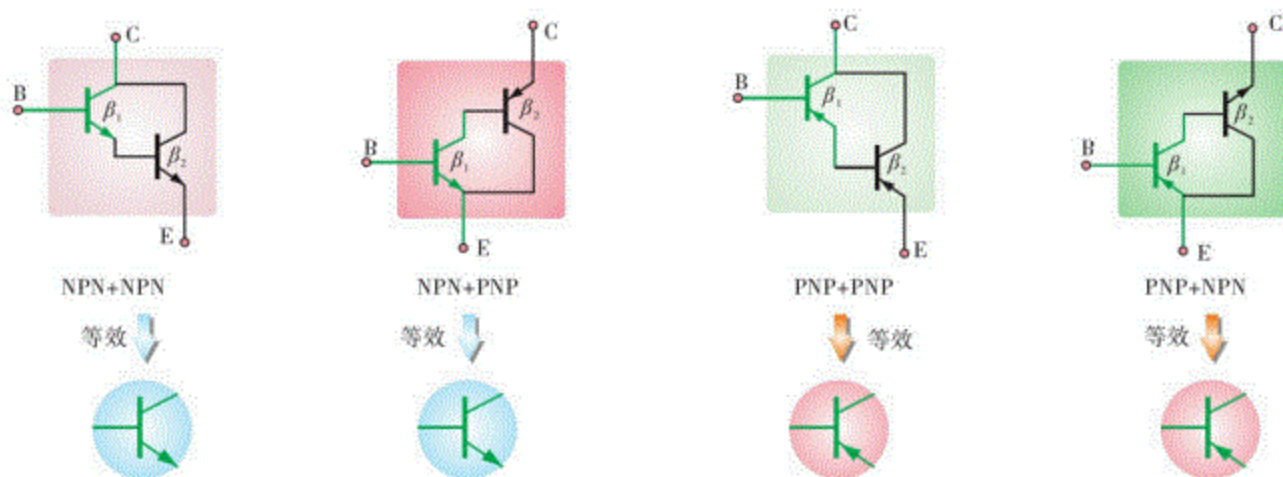


图9.74 普通达林顿管的4种连接方式

不论哪一种连接方式，复合三极管的电流放大系数 β 等于连接在一起的三极管的 β 的乘积，即 $\beta=\beta_1\beta_2$ 。由此可见，达林顿管具有很强的电流放大能力。

两只三极管连接后的复合三极管的类型取决于第一只三极管，即第一只三极管为NPN型，则复合管为NPN型。

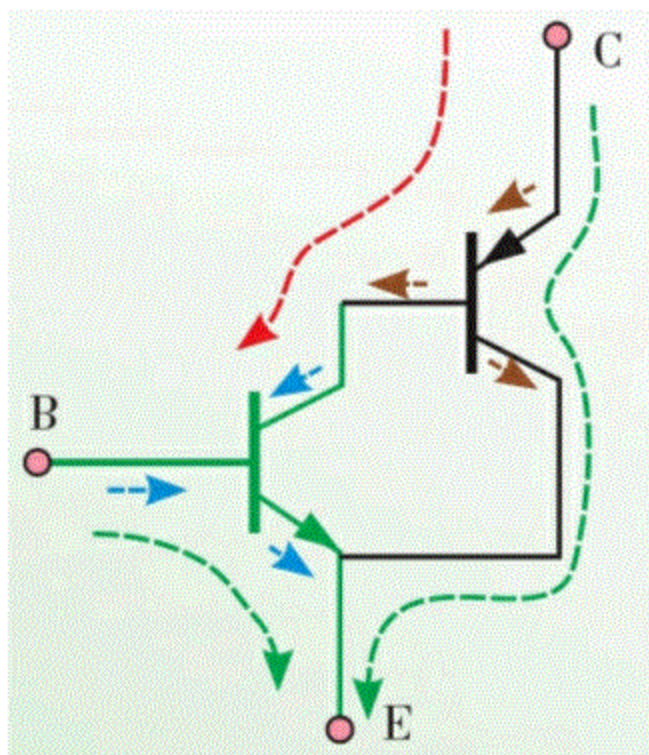


图9.75 NPN复合管

注意：两只三极管连接为复合管时，须三极管各极电流方向没有冲突。若出B现电流冲突，则不是复合管。请比较图9.75和图9.76的电流方向。

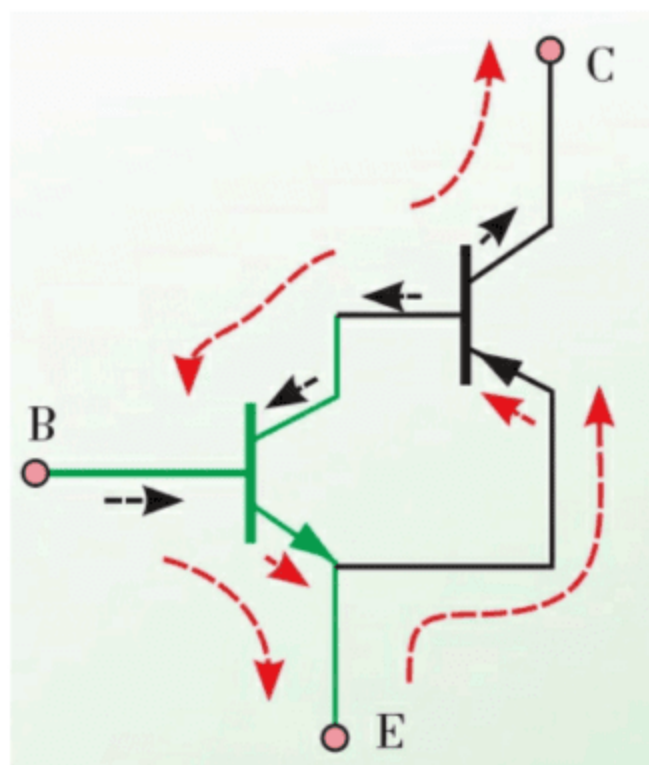


图9.76 连接错误，不是复合管

一些大功率达林顿管在普通达林顿管的基础上还集成了用于饱和的泄放电阻和续流二极管，如图9.77所示。成品达林顿管的内部电路结构如何，须查阅相关器件的资料。达林顿管主要用于音频功率放大、大电流驱动、电源稳压与开关控制等电路。

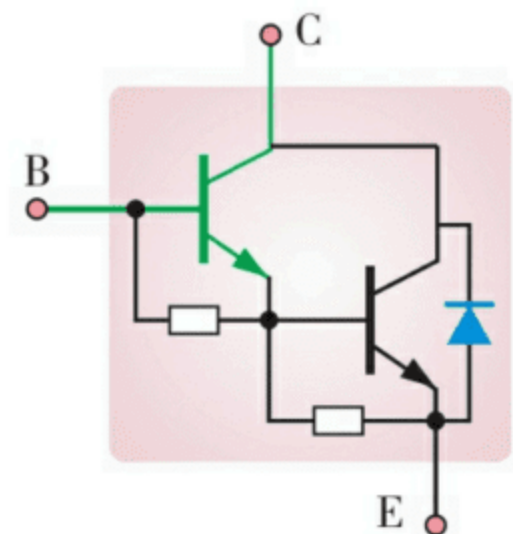


图9.77 集成了泄放电阻和续流二极管

9.8 三极管的识别与检测

9.8.1 三极管的外形

三极管有三个电极，但三个电极的器件未必就是三极管。许多双二极管、场效应管都有三个电极。有的三极管还有四个电极（通常是集电极有两个）。因此，对于不了解的器件，仅依靠外形来判断该器件是否是三极管是不可靠的。



可通过器件上的标注来识别判断三极管，如3DG6、3DD15D、3AX31、S9012~S9018等。但一些SMD半导体器件很小，其表面没有标识，或没有明确的型号标识。如果这样的器件在某电子设备的电路板上，可通过查阅该设备的电路图来了解该器件。如果一个未安装的器件仅外观像三极管，且无标识，那么你也无须费时去识别判断。

在日常工作中，可注意积累相关三极管特征，以便于在工作中快速识别。例如，上面提到的S9012、S9014等TO-92封装的三极管，其引脚排列顺序如图9.78所示。三极管的封装形式很多，这里不一一列举，有需要的可通过网络搜索查询。

需注意的是，有三极管类似TO-92封装，但其引脚排列未必如图9.78(a)所示。因此，类似图9.78所示的引脚排列图仅供参考。若不是已知的三极管，还是需要借助器件的数据表资料，或利用万用表来识别判断目标三极管的引脚。

无论如何，有一点是肯定的：大功率三极管的散热片是与集电极连接的。



图9.78 三极管引脚排列顺序

9.8.2 三极管电极间关系

大多数情况下，可用指针万用表或数字万用表来检测三极管。虽然前面已多次涉及，在讲述利用万用表检测三极管前，这里还是要再次重复，数字万用表的红表笔接万用表内电源的正极；而指针万用表则相反，红表笔接表内电源的负极。

■三极管各电极间的电压关系

要快速理解三极管各电极间的电压关系，需借助二极管模拟的三极管电极关系。再来看看图9.79，通过这个图，理解三极管的基极与发射极、基极与集电极之间的关系不难。

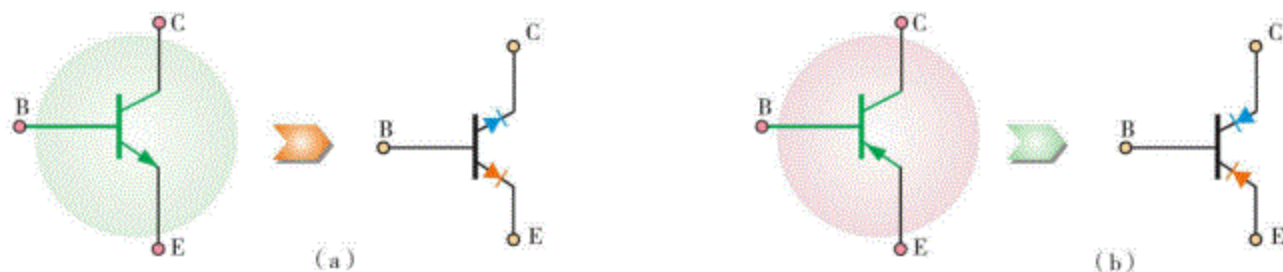


图9.79 二极管模拟三极管电极关系

一般条件下的三极管检测会利用到二极管的相关知识。你可以先想想看，假如：

数字万用表调至二极管测试挡，将万用表的黑表笔接在NPN三极管的基极上，红表笔分别接三极管的另外两个电极，会是什么结果？调转表笔后呢？若是检测PNP三极管呢？

指针万用表调至1k电阻挡，将万用表的黑表笔接在NPN三极管的基极上，红表笔分别接三极管的另外两个电极，会是什么结果？调转表笔后呢？若是PNP三极管呢？

其实是很简单的：不论是数字万用表还是指针万用表，当红、黑表笔连接三极管的BE或BC电极时，等效于给三极管的一个PN结加上了正偏或反偏电压。

若万用表与三极管电极的连接等效加正偏电压，很明显，万用表的读数小。

若万用表与三极管电极的连接等效加反偏电压，很明显，万用表的读数大。

图9.80~图9.82清晰地展示了使用数字万用表检测NPN三极管时,各电极间的电压关系。利用图所示的知识,很容易用数字万用表检测判断NPN三极管的好坏;利用万用表也很容易判断NPN三极管的引脚。好坏与引脚的检测判断其实就是上面示意图的**逆向思维**。

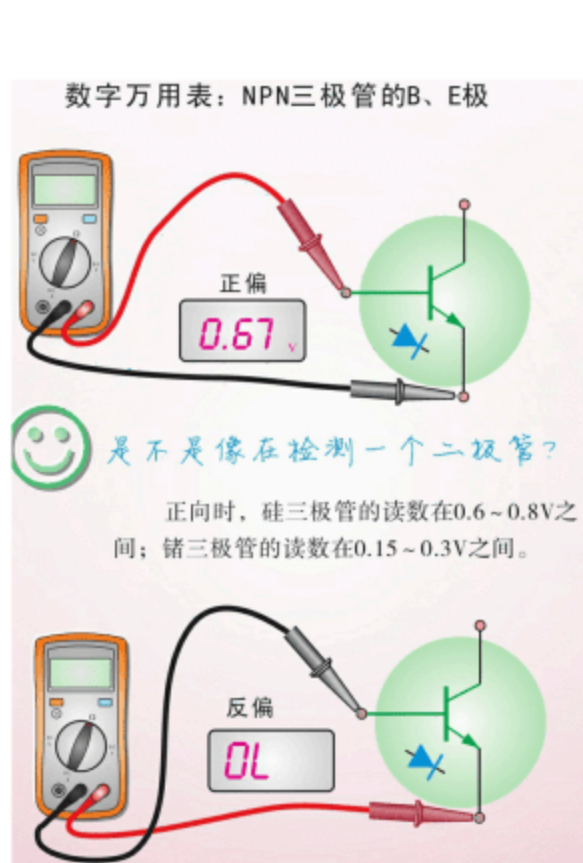


图9.80 NPN三极管检测示意图 (1)

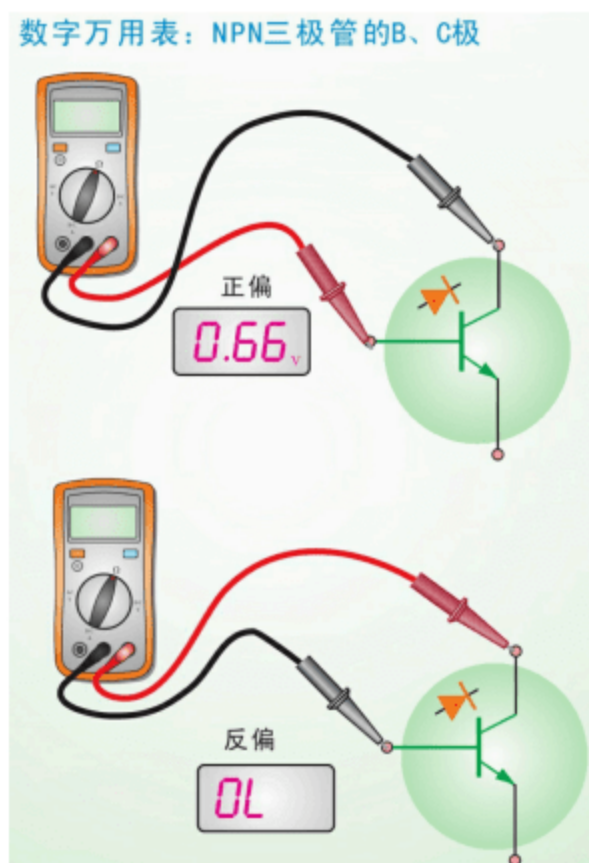


图9.81 NPN三极管检测示意图 (2)

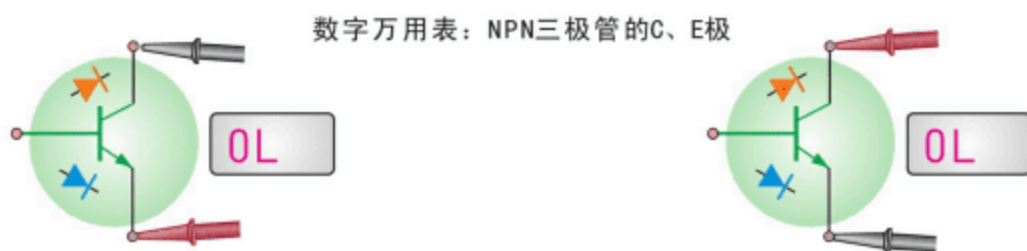


图9.82 NPN三极管检测示意图 (3)

图9.80、图9.81中的显示有一个细微差异,仔细看一看,你发现了吗?

PNP型三极管的电极间电压关系是与NPN型三极管相反的。在用万用表检测PNP三极管时,万用表的显示结果当然与检测NPN的结果相反,如图9.83和图9.84所示。

数字万用表：PNP三极管的B、E极

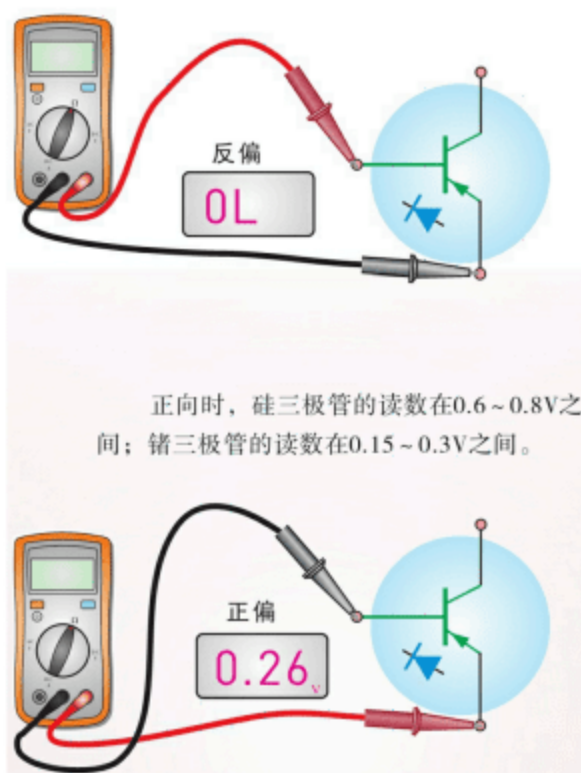


图9.83 PNP三极管检测示意图 (1)

数字万用表：PNP三极管的B、C极

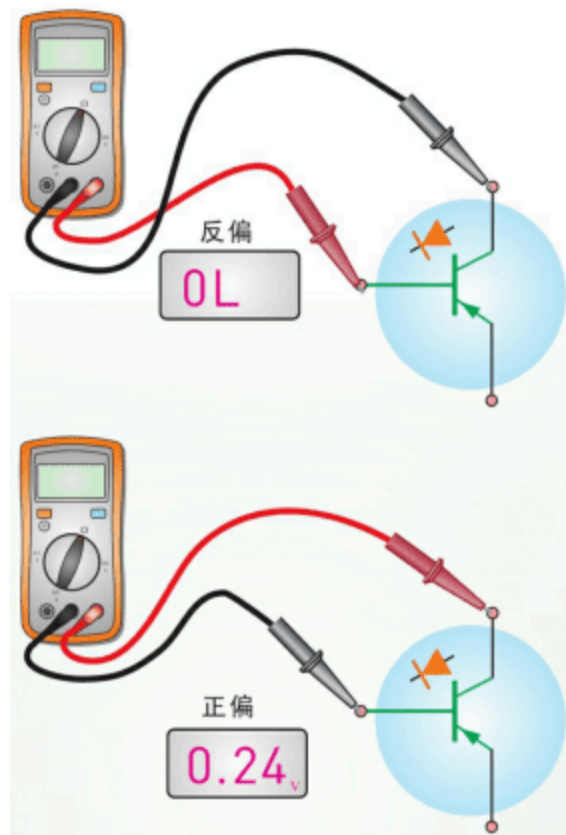


图9.84 PNP三极管检测示意图 (2)

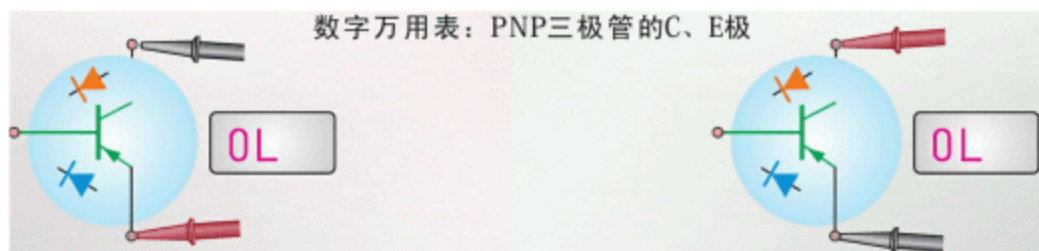


图9.85 PNP三极管检测示意图 (3)

图9.83~图9.85清晰地展示了使用数字万用表检测PNP三极管时，各电极间的电压关系。利用上图所示的知识，很容易用数字万用表检测判断PNP三极管的好坏；利用万用表也很容易判断PNP三极管的引脚。

正常情况下，**BE结的压降会略大于BC结的压降**，这也是判断三极管集电极、发射极的依据。

■三极管各电极间的电阻关系

三极管各电极间的电压关系是从数字万用表检测的角度上说的，而三极管各电极间的电阻关系是从指针万用表检测的角度上说的。

由于数字万用表的表笔所接表内电源极性与指针万用表的表笔所接表内电源极性相反，因此在检测时依据红、黑表笔的判断也是相反的（一定要注意这一点），如图9.86～图9.88所示。

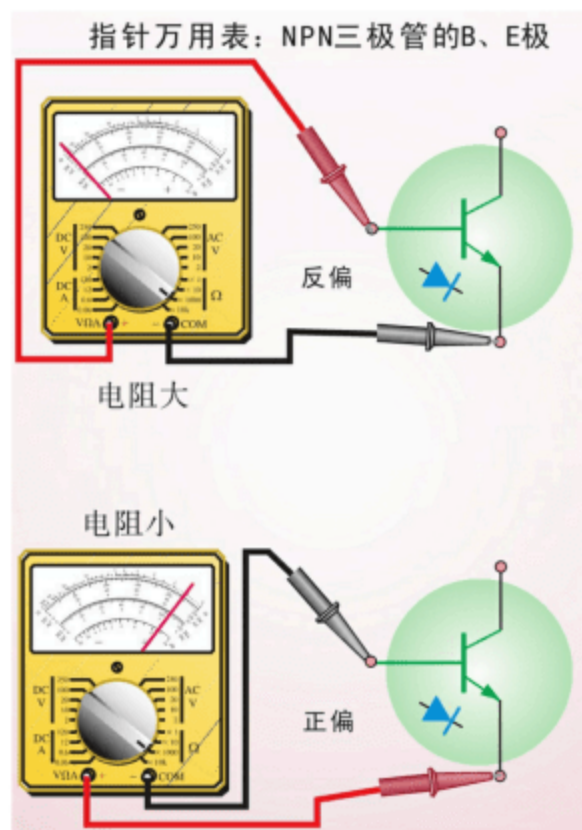


图9.86 指针表检测NPN管 (1)

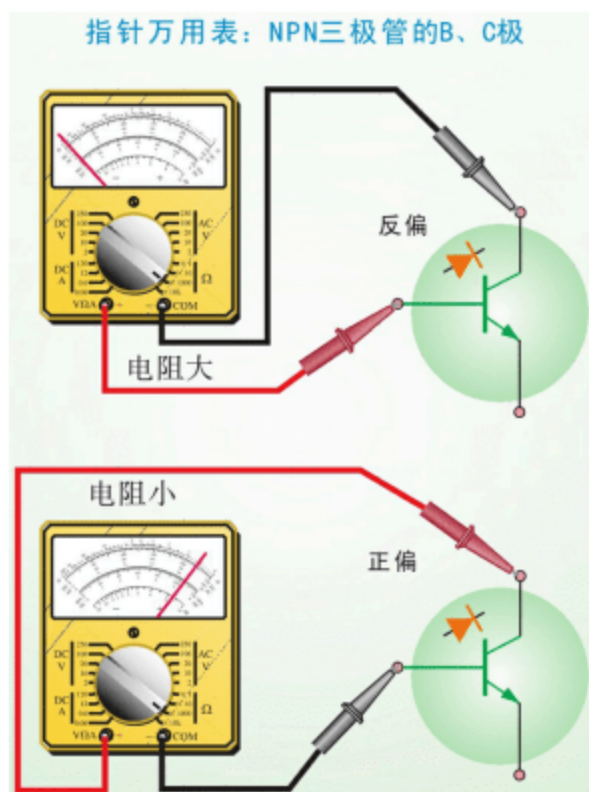


图9.87 指针表检测NPN管 (2)

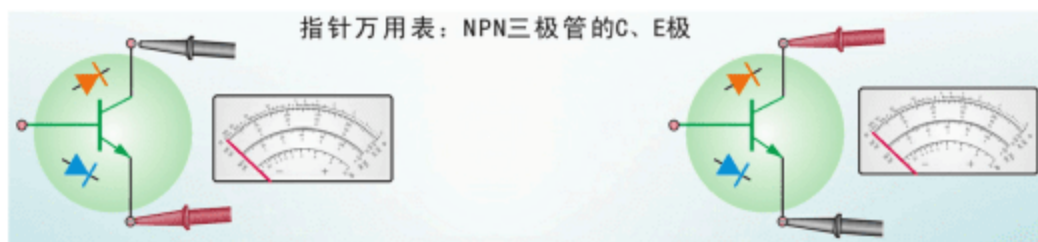


图9.88 检测NPN管的C、E极

将指针万用表置于1k挡，BE、BC正向时，三极管的读数在几十至1000Ω之间；反向时读数从500kΩ到无穷大。通常，硅三极管的读数大些，锗三极管的读数小些。而且，**BE极间电阻略大于BC极间电阻**，这也是识别三极管集电极与发射极的依据。

同样，在用指针万用表检测PNP三极管时，万用表的显示结果当然与检测NPN的结果相反，如图9.89和图9.90所示。C、E极间电阻同样很大（见图9.91）。

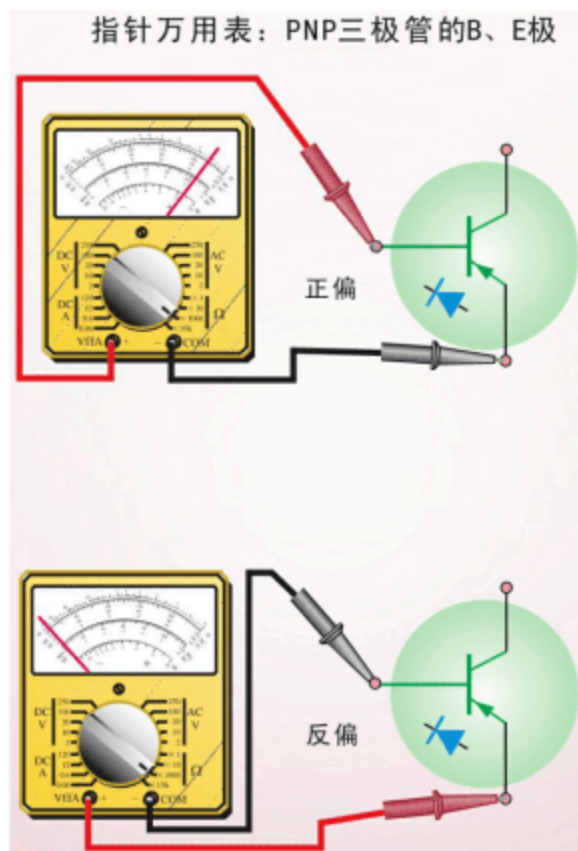


图9.89 指针表检测PNP管 (1)

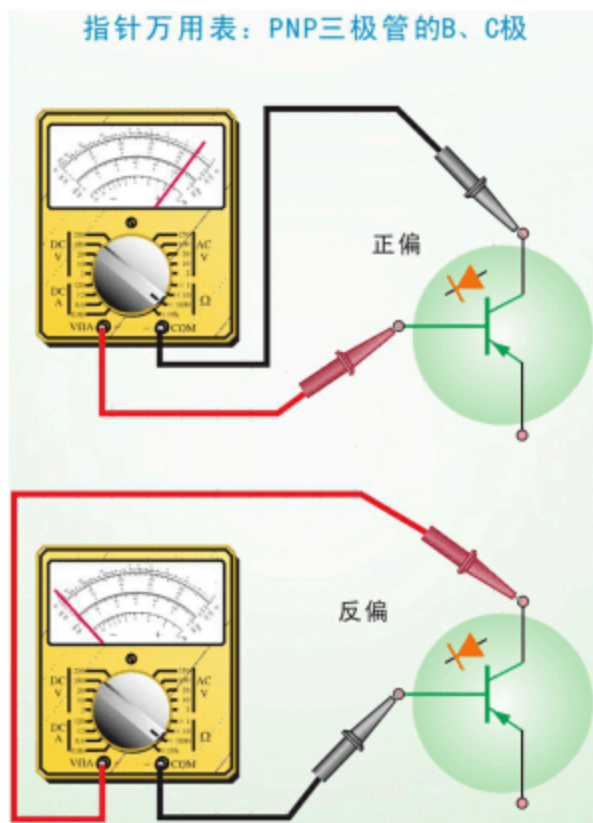


图9.90 指针表检测PNP管 (2)

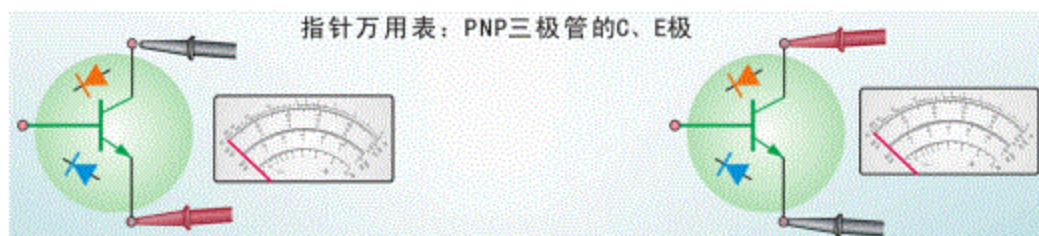


图9.91 检测PNP管的C、E极

理解、掌握了本节图9.79~图9.91所示的示意图，即可轻松利用数字或指针万用表检测判断三极管、识别三极管的引脚。初始必然会比较生疏。在实际动手前，不妨在纸上画一画，想一想。有时候，**纸上谈兵**也是很好的方法。

9.8.3 识别三极管类型引脚

关于三极管的引脚，在9.8.1节中已经有过简单介绍。应注意的是，某些封装的三极管引脚可能有多种排列顺序，如TO-92及类似封装的三极管，如图9.92所示。实际中，对于大多数人来说，一些类似的封装是不太容易区分的。因此，仅依据三极管外形来判断三极管的引脚并不可取。



图9.92 TO-92封装的三极管引脚排列示意图

正如前面所述，如果知道目标三极管的型号，则可在网上搜索该三极管的数据表资料来确定其引脚。那么，如果只知是三极管，但不知型号，或一时无法上网该如何呢？不急，利用万用表也能判断识别。无论如何，有些东西还是可以确定的。

金封小功率三极管：引脚朝向自己，无论有无发射极标记，使其引脚排列如图9.93所示。4个引脚的，G为接地端。

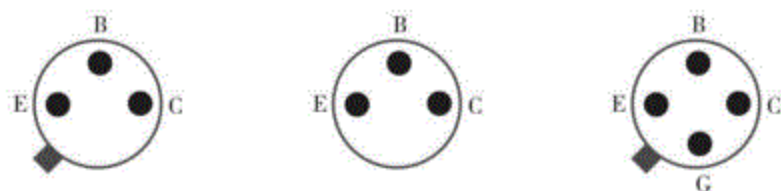


图9.93 引脚排列图

金封大功率三极管：金属外壳为集电极；引脚朝向自己，引脚距安装孔近的一端向上，基极与发射极排列如图9.94所示。

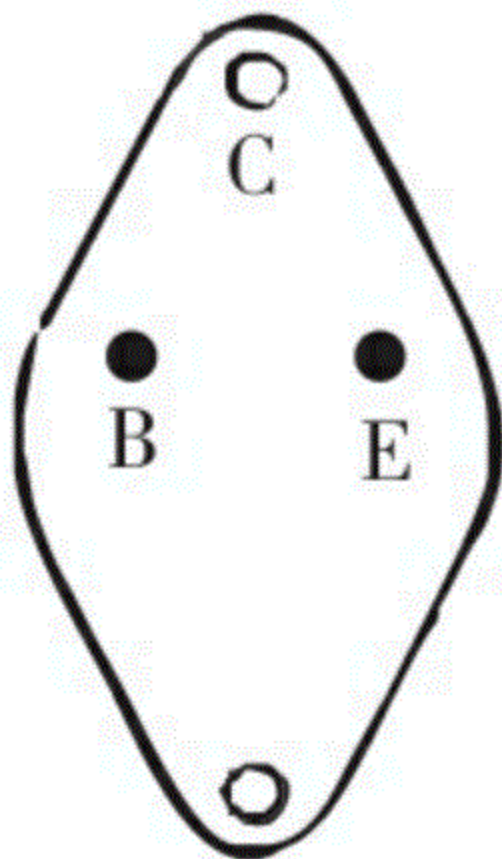


图9.94 基极与发射极排列

塑封大功率三极管：肯定会有金属散热片。金属散热片通常与集电极相连，如图9.95所示。

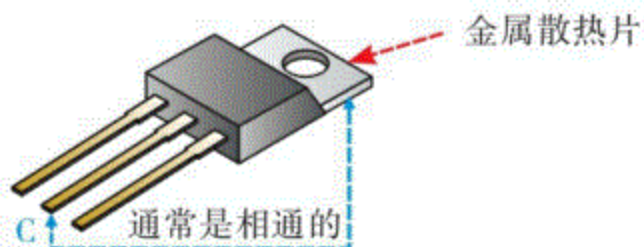


图9.95 金属散热片通常与集电极相连

三极管引脚说明如图9.96和图9.97所示。

贴片封装的三极管，无论是PNP还是NPN，独自一边一脚的，通常是集电极。

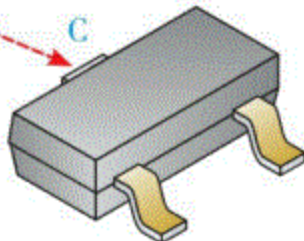


图9.96 三极管引脚说明 (1)

有四个电极，独自一边的仍然是集电极。另外一边中与C相通的也是集电极。

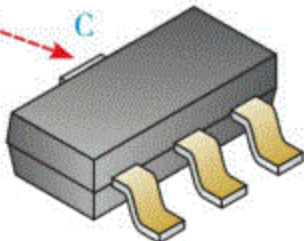


图9.97 三极管引脚说明 (2)

数字万用表：已知好的三极管，检测识别电极类型

NPN三极管：数字万用表的**红表笔**接基极，**黑表笔**分别接集电极、发射极，两次读数小。

PNP三极管：数字万用表的**黑表笔**接基极，**红表笔**分别接集电极、发射极，两次读数小。

面对一已知好的但不知其电极排列的三极管，可参阅如下所示内容进行识别：

①先假设**任意一电极**为基极 (B)。

②使**红表笔**接假设的基极，如图9.98的❶所示。这里假设目标三极管为NPN型。

③使**黑表笔**分别接触另外两个电极，如图9.98的❷、❸所示。

④若上一步两次测试读数都很小，在1V以下，则说明第①步的假设成立，即红表笔所接的是基极。由于使用的是数字万用表，可以确定该三极管为**NPN型**。

读数在0.5~0.85V的，为硅三极管；读数在0.15~0.35V的，为锗三极管。两次测试中，读数小的黑表笔所接为集电极，读数大的为发射极。由图9.98所示的数据看，该三极管的引脚依次为B、C、E。

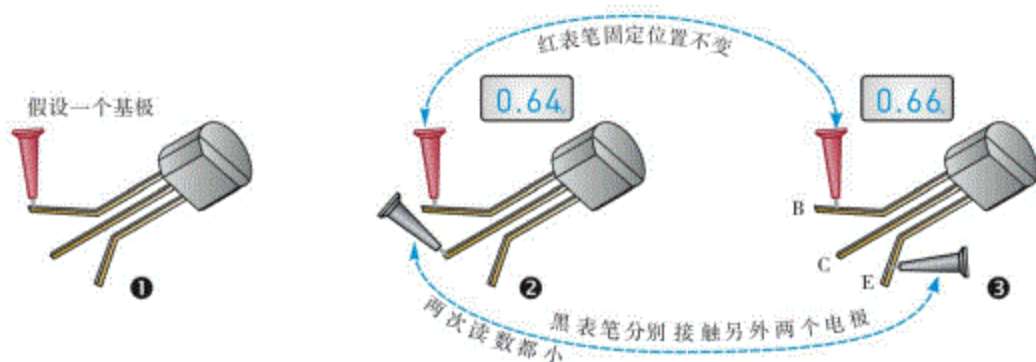


图9.98 用万用表识别三极管的电极

变化一

⑤如果进行上面第③步时两次万用表读数都很大，如图9.99所示，则说明假定的基极不成立。

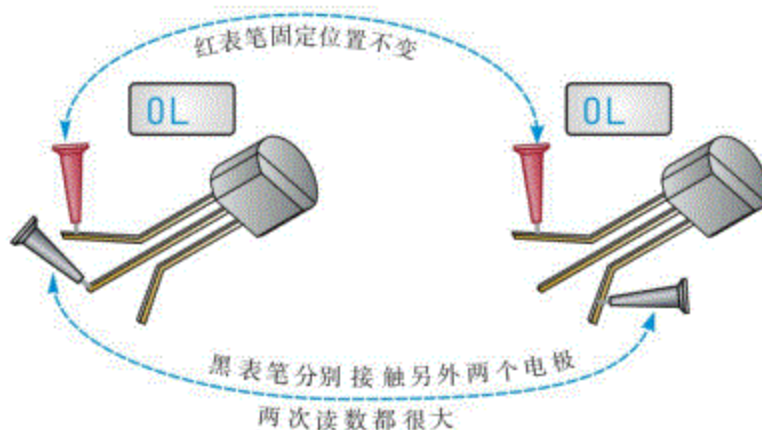


图9.99 两次读数大

接下来假定另一电极为基极，然后重复上面②~④的检测分析步骤，直到确定目标三极管的电极为止。

变化二

⑥如果上面第③步时万用表读数是一次大、一次小，假设如图9.100所示，则说明假定的基极不成立。

这里的前提是三极管是好的，因此目标三极管应该是PNP型。

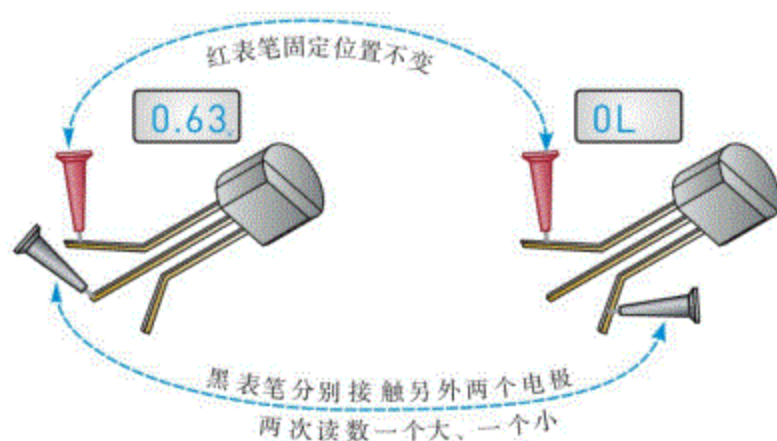


图9.100 两次读数一个大、一个小

⑦若进行前一页第③步时的结果如图9.100所示，则读数小的一次中黑表笔所接的应是基极。

固定黑表笔在基极位置，移动红表笔到另一个电极，如图9.101所示。比较两次读数，即可辨别出集电极、发射极。

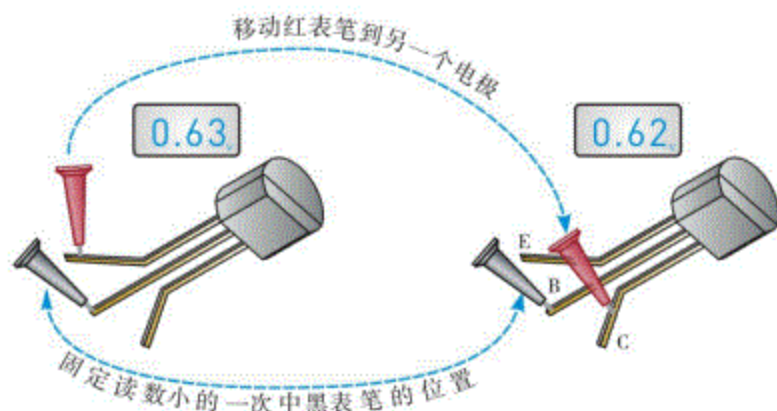


图9.101 固定黑表笔在基极位置，移动红表笔到另一个电极

在前面第⑥中，其实有一个分析过程涉及三极管各电极的电压关系。

因两次测试的读数是一大一小，所以可确定红表笔所接的不是基极。若目标三极管是NPN型，从图9.102可以看到，不论红表笔接集电极还是接发射极，万用表的读数都不可能出现一大一小（参见9.8.1节的内容）。



图9.102 万用表的读数不可能出现一大一小

数字万用表的红表笔所接的不是基极，移动黑表笔所得的万用表读数又是一大一小，从三极管的知识可知，只能是PNP三极管（参见图9.103）。



图9.103 万用表读数为一大一小

变化三

这里要接前面**变化一**说起：如果前面第③步时两次万用表读数都很大，则说明假定的NPN型三极管基极不成立。

⑧接下来假定另一电极为基极（参见图9.104），然后重复前面②~④的检测分析步骤，若两次的万用表读数都很小，则红表笔所接为基极，管子为NPN管；读数相对较小的一次，黑表笔所接为集电极；余下的为发射极。

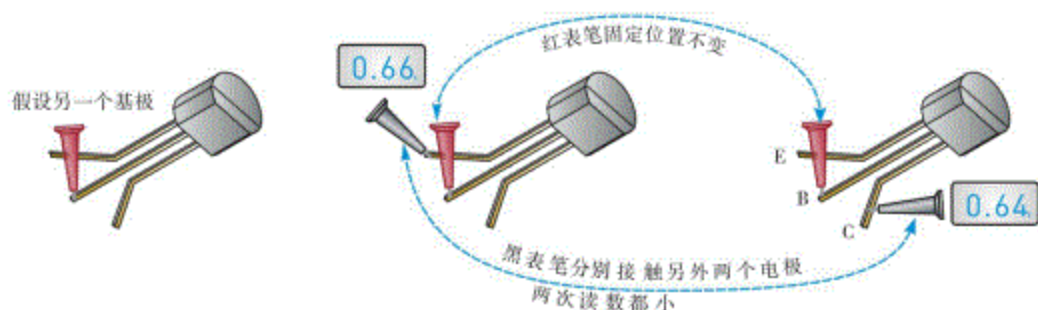


图9.104 假定另一电极为基极

⑨若上一假定测试又是两次读数都大，则**再**假定余下的电极为基极（参见图9.105），然后重复前面②~④的检测分析步骤，若两次的万用表读数都很小，则红表笔所接为基极，管子为NPN管；读数相对较小的一次，黑表笔所接为集电极；余下的为发射极。

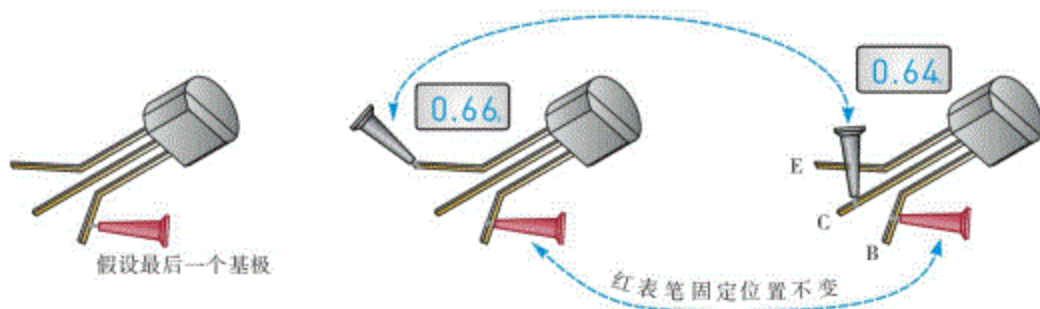


图9.105 假定余下的电极为基极

指针万用表：已知好的三极管，检测识别电极类型

利用指针万用表电阻挡的检测识别操作，完全可参考前面利用数字万用表的检测识别操作，只是指针万用表的红、黑表笔极性与数字万用表相反：**指针万用表的红表笔接假定的基极时，是假定目标三极管为PNP型；指针万用表的黑表笔接假定的基极时，是假定目标三极管为NPN型。**

NPN型三极管：指针万用表的黑表笔接基极，**红表笔**分别接集电极、发射极，两次读数小。

PNP型三极管：指针万用表的**红表笔**接基极，黑表笔分别接集电极、发射极，两次读数小。

这里不再讲述指针万用表的具体操作，参考数字万用表的操作，结合9.8.2节的内容，用指针万用表检测识别三极管的类型电极也是比较简单的。

从第一个假定开始，若假定测试的两次万用表读数都大，则假定另一个电极为基极，直至三个电极全部假定。

在三次假定中，任何一次假定测试时出现万用表读数为一大、一小时，则转至**变化二**所述的检测分析。

当然，你也可用数字万用表的**黑表笔接假定的基极**，这时假定目标三极管为**PNP型**。

以上所述的三极管类型、电极识别判断其实是一个不断排除的过程，多练习自然就熟悉

了。

9.8.4 检查判断三极管的好坏

三极管损坏有击穿、开路、反向特性变差等情况。用数字或指针万用表，对每两个电极进行正、反两次测试（参见图9.106，三组六次测试），即可进行判断。正常情况下，不论是NPN还是PNP三极管，不论是使用数字万用表还是指针万用表，其中一组测试两次读数都为大，另两组测试的万用表读数则是一大、一小。如图9.107～图9.109所示。

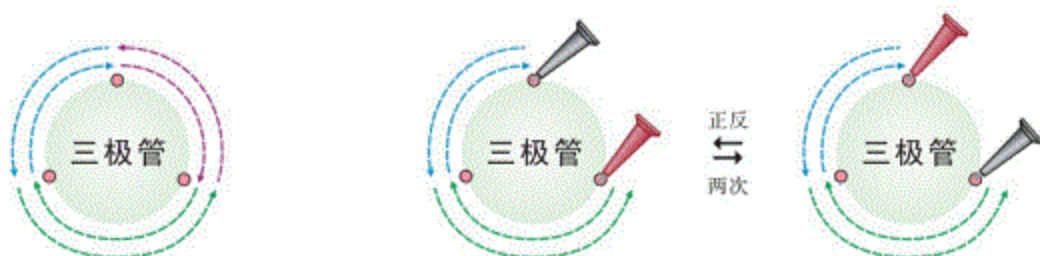


图9.106 三组六次测试

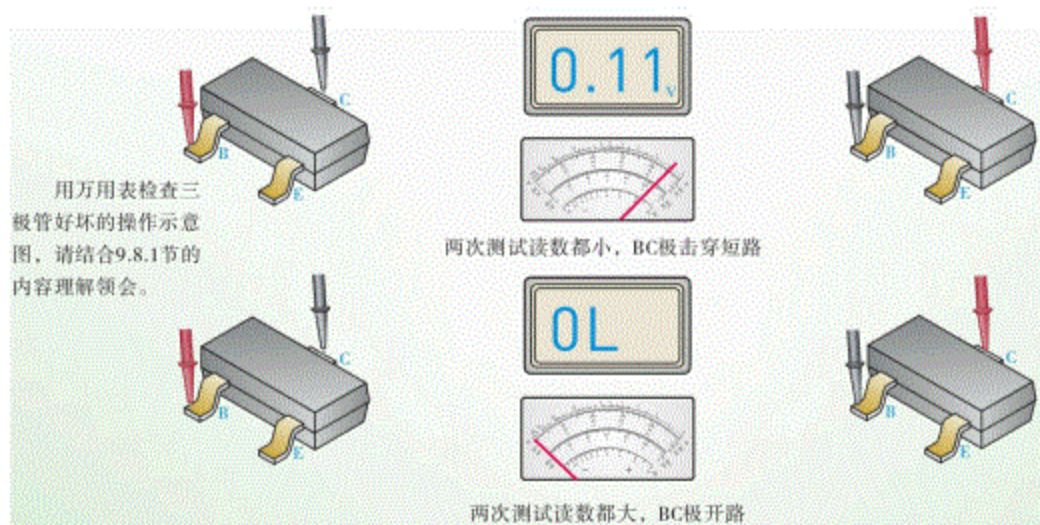


图9.107 检查判断三极管的好坏 (1)

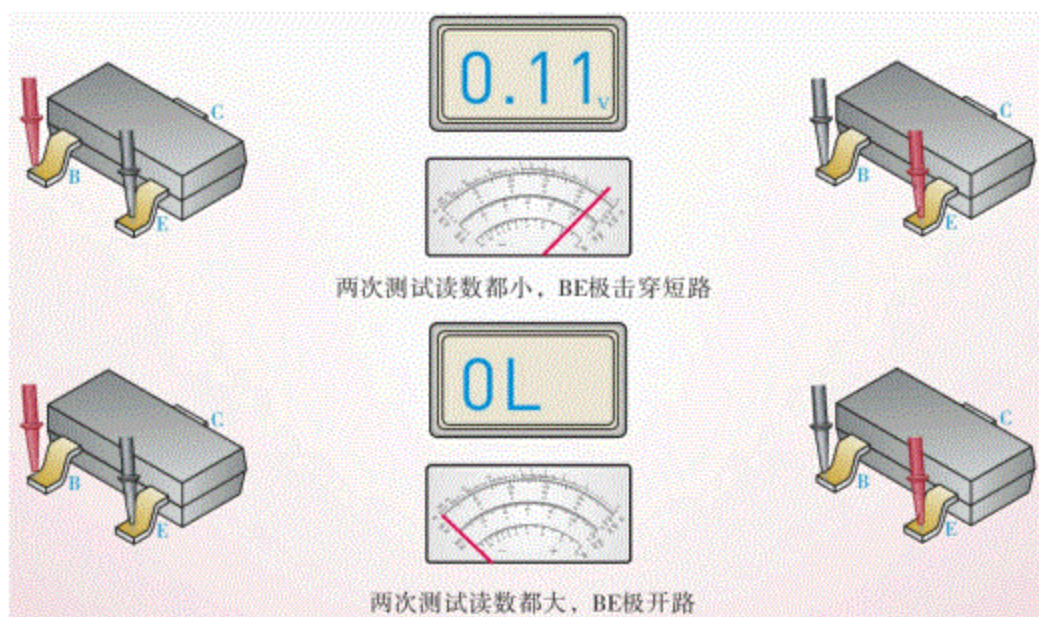


图9.108 检查判断三极管的好坏 (2)

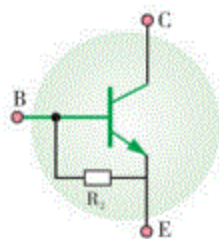


图9.109 两次测试读数都小，CE极击穿短路

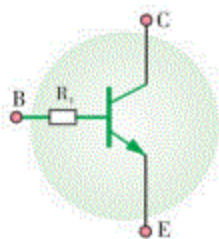
三极管C、E极开路的不太容易看出来。不过，若C、E极开路，BC、BE检测时的读数会有明显差异。在进行三极管的BC、BE反向测试时，若电极间并没有出现短路，但万用表读数小于正常值，则说明三极管性能变差，应更换。同样，三极管的C、E极没有短路，但电极间电阻小于正常值，也说明三极管性能变差，应更换。

9.8.5 关于特殊三极管的检测

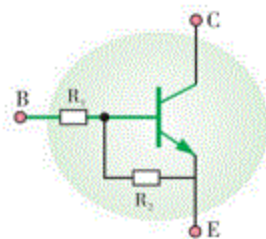
这里必须要声明一下：前面介绍的三极管检测识别方法不适用于带阻、带阻尼与达林顿等特殊三极管。由于特殊三极管内除三极管本身外，还有其他元件，因此用万用表检测时的读数与纯三极管的有较大差异，若不了解，则会出现错误判断。用万用表检测不同的特殊三极管时，出现的变化如图9.110所示。



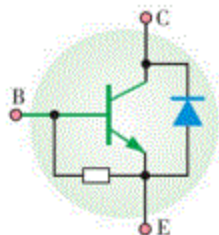
BE极反向测试时，万用表读数会减小。



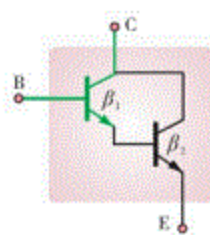
BE、BC极正向测试时，万用表读数会增大。



BE、BC极正向测试时，万用表读数会增大。BE极反向测试时，读数会减小。



BE极反向测试时，万用表读数会减小。CE极正向测试时，有一次读数会明显减小。



BE极反向测试时，万用表读数会增大（一倍左右）。带电检测时，硅管的 V_{BE} 在1V以上。

图9.110 用万用表检测不同的特殊三极管时出现的变化