

第5章

放大器基础

本章要点：

本章从电子流动角度引出半导体二极管及其模型；基于电流控制特性结合仿真介绍晶体管及其直流、交流小信号模型；基于三极管介绍小信号放大器构成的一般原则、三种基本组态、工程实用放大器电路组成原理及特点；最后介绍场效应管、模型及其放大电路。读者学完本章，应重点理解PN结的单向导电性，三极管的电流控制特点；理解半导体二极管、三极管的模型；了解利用三极管的直流、交流小信号模型分析简单的三极管应用电路的方法；理解放大的实质及利用三极管构成小信号放大器的一般原则；初步理解三极管放大电路的三种基本组态及其特性，进而理解工程实用放大器电路组成原理及特点；理解场效应管的电压控制特点，对照三极管理解场效应管的外特性、模型及其应用。



仿真包

放大现象在生活中到处可见,种类很多,包括光学放大、力学放大、电子学放大等。电工电子技术中的放大现象是电子学放大。

5.1 电子技术的引入



主要以硅为材料的半导体器件是组成各种电子电路的基础,研究电子器件及其应用是电工电子技术课程的核心内容之一。

5.1.1 强电线路中的电流流动特点

电路是指电流的通路。电力系统实践中,一般通过电网高压输电,在终端建立变电所,变成常用的 380V 动力电或 220V 照明电,使用最多的设备是电线、电缆(对应的电路模型为导线),实践中常用“线路”一词来形象地描述这种主要通过导线构建的电路。

电力系统中的线路均流过很大的电流(安培级),可用于驱动生产机械或照明设备。电力线路中电子的流动是一种能量的流动,在带给人们光明与动力的同时推动了时代的进步,随着电气化时代的兴旺与繁荣,电力工业也成为国民经济发展的重要支柱产业之一。电力线路中的电压电流值均很大,把这样的应用称为强电,把强电领域中的技术统称为电工技术。

在强电线路中,电子流动的大小在额定范围内主要取决于负载的需要,主要原因是因为构成线路的主要设备——导线在额定范围内对电流不具有阻碍作用,能在额定范围内流过任意大小的电流。

5.1.2 本征半导体的微弱导电性能

孙悟空有一根金箍棒,具有巨大的能量,类似强电线路中的电流。孙悟空的金箍棒还有一个特点:能大能小,其能量的释放可以控制,而强电线路中的电流大小主要取决于负载,基本上是不可以控制的。

强电线路的构建方法主要是导线(含配电设备)+终端负载,要实现电子流动的控制应用,应寻找其他的导电材料,半导体材料应运而生。

导电能力介于导体和绝缘体之间的物质称为**半导体**。用于制造半导体器件的材料主要是硅(Si)、锗(Ge)、砷化镓(GaAs)。其中硅用得最多,而砷化镓主要用来制作高频高速器件。

在半导体工业中,将硅(锗)高度提纯并制成单晶体,称为单晶硅(锗),这种纯净的具有单晶体结构的半导体称为**本征半导体**,在热力学零度(-273.16°C)时,本征半导体没有自由电子,如图 5.1.1 所示,因此不能导电。

常温下,本征半导体中的少量价电子可能获得足够的能量,摆脱共价键的束缚,成为自由电子,这种现象称为**本征激发**,如图 5.1.2 所示。少量的价电子成为自由电子后,同

时在原来的共价键中留下一个空位,称为“空穴”。

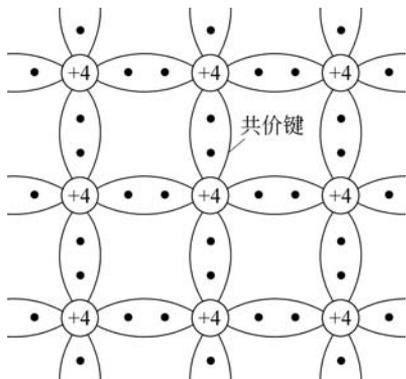


图 5.1.1 本征半导体结构示意图

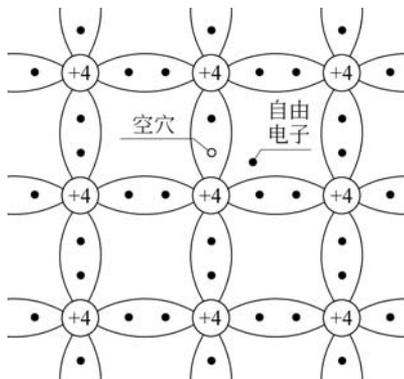


图 5.1.2 本征激发

本征激发使本征半导体具有微弱的导电性。

5.1.3 杂质半导体的导电性能

在本征半导体中,掺入少量的杂质元素,便成为杂质半导体。按掺入杂质的不同,可分为 N 型半导体和 P 型半导体。

在硅(或锗)晶体中掺入少量五价元素原子,杂质原子就替代原来晶格中某些硅原子的位置,它的五个价电子中有四个与周围的硅原子形成共价键,而余下的一个不受共价键的束缚。在常温下,它所获得的能量就足以使它摆脱原子核的吸引而变成自由电子,如图 5.1.3 所示。一个杂质原子就可提供一个自由电子,这种杂质半导体中电子浓度大大高于空穴浓度,主要依靠电子导电,故称为电子半导体或 N 型半导体。电子为多数载流子(简称多子),空穴为少数载流子(简称少子)。

在硅(或锗)晶体中掺入三价元素原子,杂质原子的三个价电子与周围的四个硅原子形成共价键时,因缺少一个价电子,必然产生一个“空穴”,如图 5.1.4 所示。这种杂质半导体中空穴浓度大大高于电子浓度,主要依靠空穴导电,故称为空穴半导体或 P 型半导体。空穴是多数载流子,电子是少数载流子。

主要以硅为材料的本征半导体只有在本征激发条件下才可获得自由电子,导电性能十分微弱。添加了杂质的半导体,如 N 型杂质半导体,其中的 5 个价电子中的 1 个不受共价键的束缚,在常温下就可成为自由电子,导电性能大大改善。可通过控制杂质半导体的掺杂浓度控制其载流子浓度,从而控制杂质半导体的导电性能;可通过将不同类型的杂质半导体组合,实现电流可控制的半导体器件。

如将 P 型、N 型半导体组合,可制作出二极管、三极管等构成集成电路的基础器件。将集成电路组合,可实现各种复杂的应用。

晶体硅的半导体特性被发现后,随着以晶体硅材料为基础的超大规模集成电路的进一步应用,几乎改变了一切,甚至人类的思维。

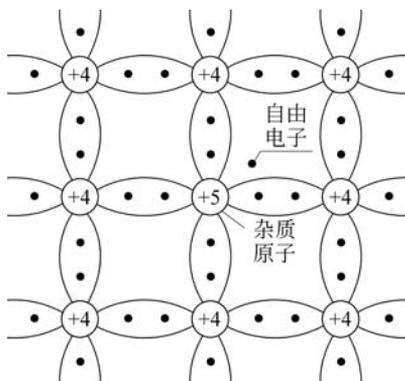


图 5.1.3 N型半导体结构示意图

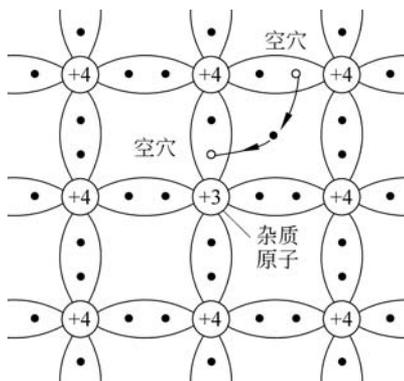


图 5.1.4 P型半导体结构示意图

此外,尽管以硅为材料的本征半导体导电性能非常微弱,但其可吸收光能,并将光能转换为电子的流动,千万个单晶硅组合,在满足一定照度条件的光照下,瞬间就可输出电压并在有回路的情况下产生电流,单晶硅太阳能电池也成为当前开发得最快的一种太阳能电池,广泛用于宇宙空间和地面设施。

地壳中硅元素的含量为 26.30%,为单晶硅的生产提供了取之不尽的原料。尽管单晶硅生产线对环境影响严重,但硅元素是地壳的主要组成元素之一,堆积如山的硅碎片直接扔到野外,可以称之为回“硅”自然。

随着主要以硅为材料的半导体器件的深入应用,最早研究和生产以硅为基础的半导体芯片的地方被冠名为“硅谷”,^①之后,“硅谷”也逐渐演变成为高科技的代名词。超大规模集成电路走进了千家万户,几乎改变了一切。随着人工智能应用不断深入,5G网络已经开始应用,所有的这些成果已经在很大程度上影响人类的生活,正在改变着人类的思维。

伴随着半导体芯片的进一步应用,以研究电子器件及其应用为主要内容的电子技术学科诞生并蓬勃发展,掌握电子技术的基础知识成为新时代非电类工科学生的基本技能要求。

思考与练习

- 5.1.1 在本征半导体中,自由电子浓度与空穴浓度有什么关系?
- 5.1.2 在同一温度下,N型半导体中少数空穴浓度与本征半导体中空穴浓度是否一样?

^① 硅谷(Silicon Valley),位于美国加利福尼亚州旧金山湾区,是高科技产业云集的圣塔克拉拉谷(Santa clara valley)的别称。

5.2 半导体二极管

二极管是本课程重点研究的半导体器件之一,是电子技术应用的基础。

5.2.1 PN结的形成及其特点



二极管的主体是PN结。先学习什么是PN结。

对一块半导体采用不同的掺杂工艺,使其一侧成为P型半导体,而另一侧成为N型半导体,这样,在它们的交界面将形成PN结。可通过如图5.2.1所示模型来理解。

P型半导体的多数载流子是空穴,N型半导体的多数载流子是电子。当把P型半导体和N型半导体有机结合在一起时,由于它们的交界面两种载流子的浓度差很大,因此出现多数载流子的扩散运动:P区的空穴向N区扩散,且与N区的电子复合;N区的电子向P区扩散,且与P区的空穴复合。这样在交界面两侧将形成了一个由不能移动的正、负离子组成的空间电荷区,也就是PN结,又称为耗尽层。

空间电荷区建立的内电场阻止多数载流子继续扩散,同时有利于少数载流子漂移。当多子扩散运动和少子漂移运动达到动态平衡时,空间电荷区的宽度基本上稳定下来,PN结就处于相对稳定的状态,流过PN结结面的电流为零。

根据上面的分析,不难发现,多数载流子扩散运动形成的结,将阻止电流的通过,只有外加反向电场,内部电场被外加反向电场抵消,结被解开,才能有较大的电流通过,可见,PN结具有单向导电性,解释如下。

当PN结外加正向电压(简称正偏),即外电源的正极接P区,负极接N区时,外电场与内电场的方向相反,空间电荷区将变窄,内电场被削弱,多子扩散得到加强,少子漂移将被削弱,扩散电流大大超过漂移电流,形成较大的正向电流,PN结导通,如图5.2.2所示。

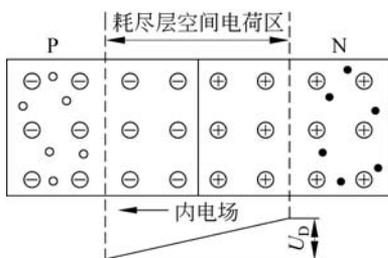


图 5.2.1 平衡状态下的PN结

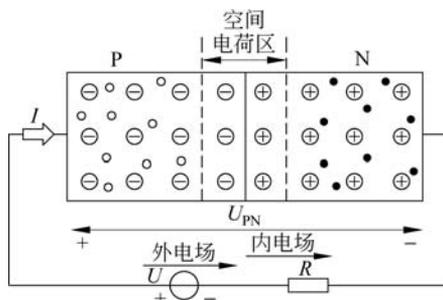


图 5.2.2 PN结正偏导通

由于PN结导通压降只有零点几伏,因此在回路中串联电阻 R 以限制回路电流,防止结电流过大而导致PN结损坏。

当PN结外加反向电压(简称反偏),即外电源的正极接N区,负极接P区时,外电场

与内电场方向一致,空间电荷区将变宽,内电场得到增强,阻止多子扩散,而有利于少子漂移。在电路中形成了基于少子漂移的反向电流。由于少子数量很少,因此形成很小的反向饱和电流,记为 I_S ,常将它忽略不计,认为PN结截止,如图 5.2.3 所示。

当PN结反偏电压超过某一数值($U_{(BR)}$)后,反向电流会急剧增加,这种现象称为反向击穿。 $U_{(BR)}$ 称为反向击穿电压。PN结反向击穿时,必须对其电流加以限制,以免PN结因过热而永久性损坏。当反向电压降低时,PN结恢复正常。

可用如图 5.2.4 所示曲线描述PN结的伏安特性曲线。

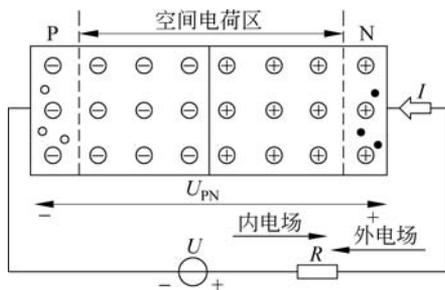


图 5.2.3 PN结反偏截止

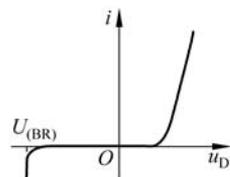


图 5.2.4 PN结的伏安特性

5.2.2 二极管的主要性能参数

将PN结用外壳封装起来,再引出两个电极,就构成了半导体二极管,简称二极管,图形符号如图 5.2.5 所示,文字符号为D。

二极管的主体是PN结,因此二极管的伏安特性与PN结的伏安特性类似,但由于管壳、引线等因素的影响,两者特性仍有区别。

典型二极管在常温时的伏安特性如图 5.2.6 所示,包括三个区:正向工作区、反向工作区和击穿区。



图 5.2.5 二极管符号

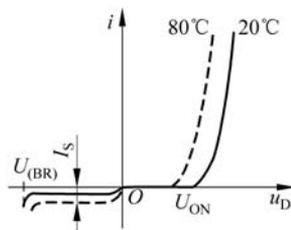


图 5.2.6 二极管伏安特性

• 正向工作区

$u_D > 0$ 的区域是正向工作区。当正向电压比较小时,正向电流几乎等于零。只有当正向电压超过某一数值后,正向电流才明显增大(mA量级),这一电压值称为导通电压,用 U_{ON} 表示。硅管的导通压降 U_{ON} 为 $0.6 \sim 0.8V$,一般取 $0.7V$ 。锗管的 U_{ON} 为 $0.2 \sim$

0.3V,一般取 0.3V。

- 反向工作区

$U_{(BR)} < u_D < 0$ 的区域是反向工作区。二极管反向电流很小,硅管的反向电流在 nA 量级,锗管的反向电流在 μA 量级,因此一般认为二极管反向截止。

- 击穿区

$u_D < U_{(BR)}$ 的区域是击穿区。反向击穿电压 $U_{(BR)}$ 一般在几十伏以上。

二极管的主要参数如下。

1. 最大整流电流 I_F

I_F 是指二极管长时间稳定工作允许流过的最大正向平均电流,它的值决定于 PN 结的面积和外界散热状况。实际应用时,在规定散热条件下,正向平均电流必须小于 I_F ,否则二极管将因 PN 结温升得过高而损坏。

2. 最大反向工作电压 U_R

U_R 是指二极管使用时所允许外加的最大反向电压,超过此值二极管就可能被击穿。因此 U_R 在数值上必须小于反向击穿电压 $U_{(BR)}$,一般取 $U_R = 1/2U_{(BR)}$ 或 $U_R = 2/3U_{(BR)}$ 。

3. 反向电流 I_R

I_R 是指二极管未击穿时的反向电流。 I_R 越小,二极管的单向导电性越好。理论上 $I_R = I_S$,所以 I_R 受温度影响大。

5.2.3 二极管的应用



二极管具有单向导电性和反向击穿特性,在电路中有着广泛的应用。

1. 整流电路

把交流电压转换成直流电压的过程称为整流,把主要用于整流应用的二极管称为整流二极管,如图 5.2.7(a)所示是半波整流电路。

交流电压是大小和方向均发生变化的物理量,二极管具有单向导电性,电流只可从一个方向通过二极管,因此,图 5.2.7(a)中输出电压 u_o 的实际方向为图示参考方向,不会发生变化,是一种含有直流电压和交流电压的混合电压。习惯上称为单向脉动性直流电压。

下面具体分析其工作原理。

硅管的导通电压 U_{ON} 为 0.7V,我国的照明线路电压为 220V,输入正弦电压 u_i 的幅值远大于二极管的导通电压 U_{ON} ,可视 D 为理想二极管。

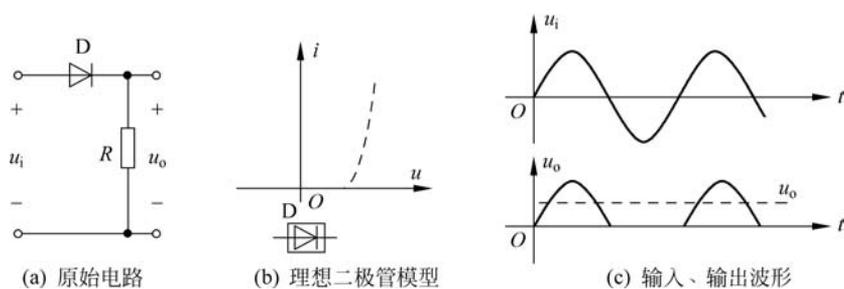


图 5.2.7 半波整流电路

理想二极管伏安特性及模型如图 5.2.7(b)所示。正向导通时,导通电压 $U_{ON}=0$, 导通电阻 $R=0$; 反向截止时,反向电流等于 0。

当 u_i 为正半周时,二极管正偏导通, $u_o = u_i$; 当 u_i 为负半周时,二极管反偏截止, $u_o = 0$ 。因此,输出为半个周期的正弦脉冲电压,波形如图 5.2.7(c)所示。

显然,半波整流电路损失了半个周期的交流电的能量,可使用 4 个二极管组成全波整流电路,实际器件连接图如图 5.2.8 所示。图中,变压器将输入电压变换到二极管的额定电压范围,电容滤除电路中的交流成分。

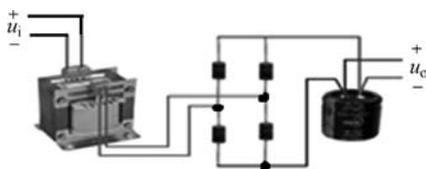


图 5.2.8 全波整流电路

2. 稳压电路

二极管反向击穿后的伏安特性十分陡峭,击穿电压 U_Z 在较大电流范围内几乎不变,利用这种特性可以构成稳压电路,如图 5.2.9 所示。当输入电压 U_1 或负载 R_L 发生变化时,稳压管中的电流 I_Z 发生变化,但输出电压 U_O (稳压管两端电压)几乎恒定(U_Z)。这种二极管又称为稳压管,符号如图 5.2.10 所示。

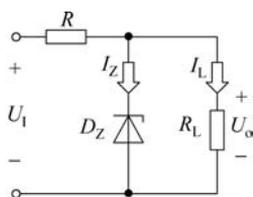


图 5.2.9 稳压电路

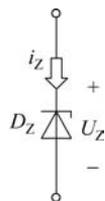


图 5.2.10 稳压管符号

将合适参数的稳压管接入上面的全波整流电路的输出端,则该电路的输出电压 U_O 几乎恒定,可作为直流电路的工作电源使用。

3. 限幅电路

当二极管导通时,导通电压 U_{ON} 在较大的电流范围内变化幅度非常小,硅管的导通电压 U_{ON} 一般取 $0.7V$ 。根据这个特点,二极管常用于防止输出电压超过给定值的电路,称为限幅电路或削波电路。图 5.2.11 是单向削波电路,限制输出电压不超过 $U + U_{ON}$ 。当 $u_i < U + U_{ON}$ 时,D 截止, $u_o = u_i$; 当 $u_i \geq U + U_{ON}$ 时,D 导通, $u_o = U + U_{ON}$ 。

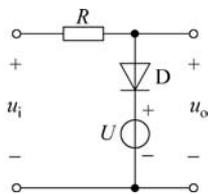


图 5.2.11 单向削波电路

另外,二极管还具有温敏特性,相应的二极管称为温敏二极管,常用于测量温度;此外,二极管还可以发光,相应的二极管称为发光二极管。

5.2.4 二极管电路模型的深入探讨



一个实际器件的物理特性是非常复杂的。在分析电路时,实际器件都必须用相应的模型来表示。模型的种类有多种:曲线模型适用于图解分析;建立在器件物理原理基础上复杂的电路模型适用于计算机辅助分析;根据器件外特性构造的简化电路模型适用于工程近似分析。这里只讨论二极管简化电路模型。

理想二极管的模型前面做过介绍。当忽略二极管的导通压降所求得的分析结果误差较大时,可采用如图 5.2.12(a)所示的由理想二极管串联电压源 U_{ON} 构成的简化模型分析求解电路。

二极管正向导通以后,二极管上的导通压降随流过二极管的电流变化不大。当忽略这种变化所求得的分析结果误差较大时,可采用如图 5.2.12(b)所示的由理想二极管串联电压源 U_{ON} 和电阻 r_D 构成的简化模型分析求解电路。

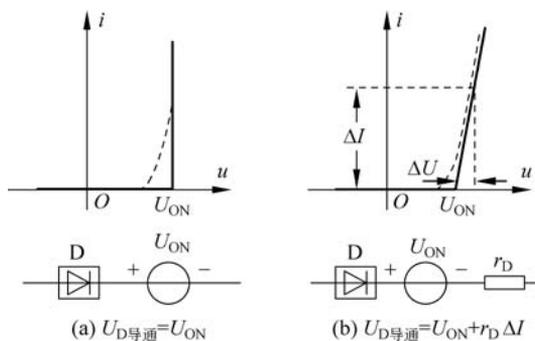


图 5.2.12 二极管电路模型

二极管正向导通以后,其电流的变化量与电压的变化量近似呈线性关系,有

$$r_D = \Delta U / \Delta I$$

【例 5.2.1】 图 5.2.13(a) 所示电路中,二极管的 $U_{ON}=0.7\text{V}$, $R=1\text{k}\Omega$, 试计算当 U_D 分别为 0V 、 1V 和 10V 时, I 的数值各是多大。

解:

将图 5.2.13(a) 中二极管用图 5.2.12(b) 简化电路模型替代, 可得到图 5.2.4(b) 所示简化等效电路。

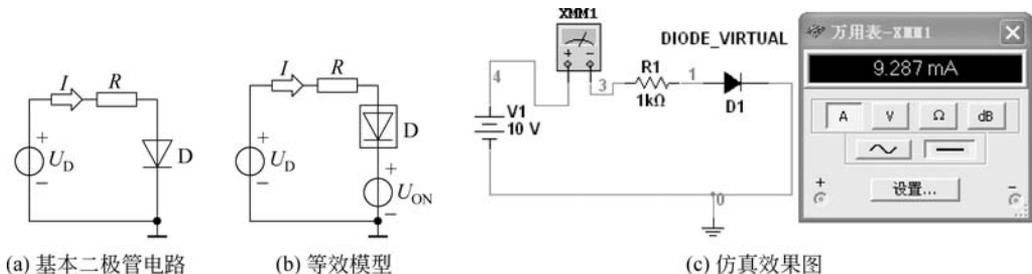


图 5.2.13 例 5.1.1 的图

由图 5.2.13 可见, 当 $U_D < U_{ON}$ 时, 理想二极管截止, 回路无电流流过; 当 $U_D > U_{ON}$ 时, 理想二极管导通, 回路电流可由下式求得。

$$I \approx \frac{U_D - U_{ON}}{R}$$

由前面的分析可知:

当 $U_D = 0\text{V}$ 时, 二极管截止, $I = 0$;

当 $U_D = 1\text{V}$ 时, 二极管导通, $I \approx \frac{U_D - U_{ON}}{R} = \frac{1 - 0.7}{1} = 0.3(\text{mA})$;

当 $U_D = 10\text{V}$ 时, $I \approx \frac{U_D - U_{ON}}{R} = \frac{10 - 0.7}{1} = 9.3\text{mA} \approx 10(\text{mA})$, 仿真结果如图 5.2.13(c) 所示。

由此可见, 当 $U_D \gg U_{ON}$ 时, 可忽略二极管的导通压降, 视二极管为理想二极管。

5.2.5 晶闸管

晶闸管是晶体闸流管(Thyristor)的简称, 俗称可控硅。晶闸管不是二极管, 但在应用中具有与二极管相似的一些特性, 可通过如图 5.2.14 所示实验电路来理解。

图 5.2.14 中的 T 即为晶闸管, 具有阳极、阴极、门极(控制极)3 个极。图 5.2.14(a) 中, 虽然晶闸管阳极与阴极间加上了正向电压, 但由于门极电路中的开关 S 处于断开状态, 灯泡不亮, 晶闸管不导通。图 5.2.14(b) 中, 虽然晶闸管门极电路中的开关 S 处于闭合状态, 门极与阴极间加上了正向电压, 但由于晶闸管阳极与阴极间加上了反向电压, 灯泡不亮, 晶闸管不导通。图 5.2.14(c) 中, 晶闸管阳极与阴极间加上正向电压, 晶闸管门极电路中的开关 S 首先处于闭合状态, 门极与阴极间加上了正向电压, 灯泡发光, 晶闸管导通。之后, 虽然开关 S 断开, 但由于晶闸管内部导电通路已经形成, 灯泡继续发光, 晶

闸管保持导通状态不变。

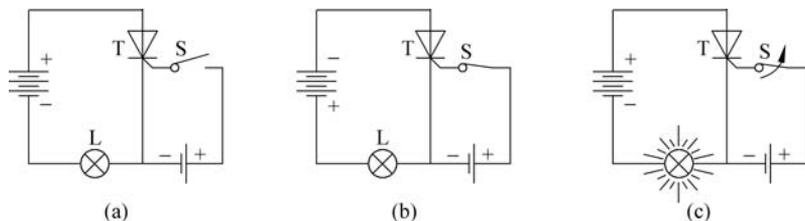


图 5.2.14 晶闸管实验电路

可总结晶闸管的应用特点如下。

(1) 当晶闸管阳极与阴极间加上了反向电压时,不管门极与阴极间加上了何种电压,晶闸管都不导通。

(2) 当晶闸管阳极与阴极间加上正向电压时,且门极与阴极间也加上正向电压时,晶闸管导通。

(3) 晶闸管在导通情况下,只要晶闸管阳极与阴极间有一定的正向电压,不论门极电压如何,晶闸管均保持导通,即晶闸管导通后,门极失去作用。

(4) 晶闸管在导通情况下,当晶闸管阳极与阴极间的正向电压减小到接近于零时,晶闸管关断。

晶闸管是一种大功率的开关型半导体器件,晶闸管的出现,使半导体器件从弱电领域进入了强电领域,在可控整流、交流调压、无触点电子开关等电子电路中得到广泛应用。

思考与练习

5.2.1 欲使二极管具有良好的单向导电性,管子的正向电阻和反向电阻分别是大一些好,还是小一些好?

5.2.2 在例 5.2.1 中,若二极管类型为稳压二极管,击穿电压为 6V,接法不变,问电流 I 有无明显变化?

5.2.3 画出如图 5.2.8 所示的全波整流电路实际器件连接图的电路模型。

5.3 半导体三极管

半导体晶体管又称为晶体三极管,简称三极管、晶体管。它由两块相同类型半导体中间夹一块异型半导体构成。根据半导体排列方式的不同,三极管又分 NPN、PNP 两种类型,如图 5.3.1 所示,文字符号为 T。

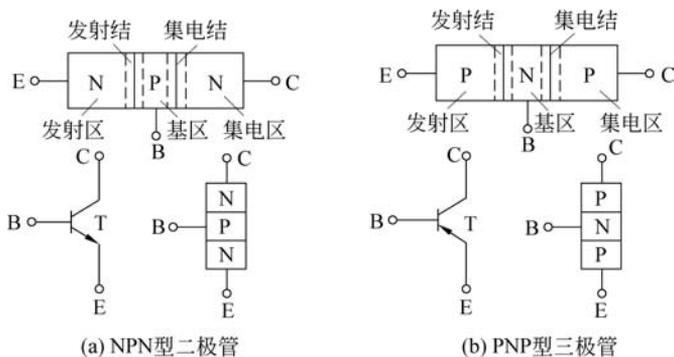


图 5.3.1 三极管结构示意图及符号

5.3.1 三极管的 3 个工作区



三极管有三个区：发射区、基区、集电区；三个极：发射极(E极)、基极(B极)、集电极(C极)；两个结：发射结、集电结。

从工艺上看，晶体管有这样的特点：发射区是高浓度掺杂区，基区很薄且杂质浓度低，集电结面积大。

三极管是一个电流控制器件，其内部结构是非常复杂的，可通过如图 5.3.2 所示仿真图来理解三极管的电流控制特性。

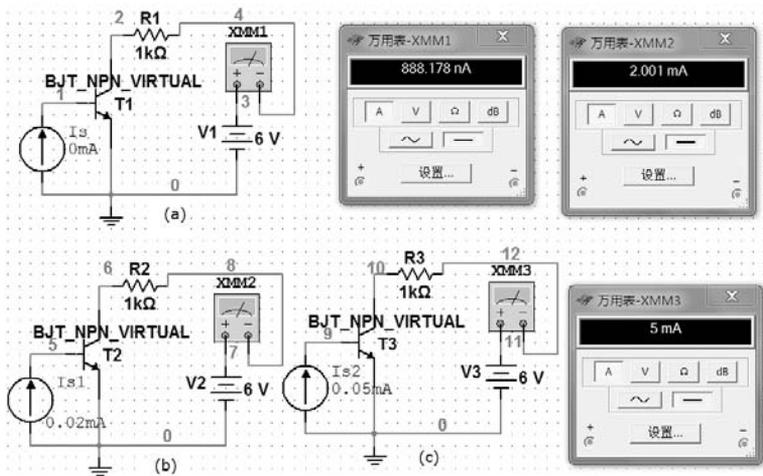


图 5.3.2 三极管电流控制特性仿真图 1

图 5.3.2(a)中，将三极管 B 极悬空(输出为 0mA 的电流源等同于悬空)，C、E 两极通过电阻接在 6V 电源上，测量结果显示流过的电流不到 1 μ A。分析电路，三极管 C、E 两极相当于两个背靠背的二极管(如图 5.3.3 所示)，由二极管的单向导电性，C、E 两极没有电流流过。

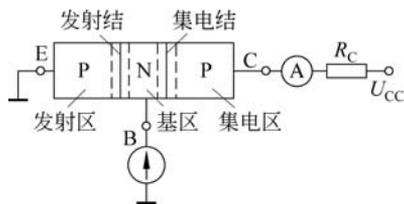


图 5.3.3 三极管电流控制特性实验电路

图 5.3.2(b)中,将三极管 B 极接 0.02mA 的电流源,C、E 两极有电流流过,大小为 2mA。

把流过 B 极的电流称为基极电流,流过 C 极的电流称为集电极电流,流过 E 极的电流称为发电极电流。在三极管电路中,基极电流相当于 1 个控制信号,当基极电流流过基区时,改变了三极管内部导电载流子的分布,在发射结、集电结间形成了 1 个导电通路,C、E 两极有电流流过,这便是三极管的电流控制特性。

下面,结合仿真进一步研究三极管的电流控制特性。

在上面的电路中,将三极管 B 极改接 0.05mA 的电流源,仿真结果如图 5.3.2(c)所示。仿真结果显示,C、E 两极有电流流过,流过 C 极的电流大小为 5mA。

由图 5.3.2(b)、(c)仿真结果可知,当控制电流大小适中时,控制电流 i_B 可有效控制输出电流 i_C ,输出电流与控制电流保持线性比例关系,三极管工作在放大区。

把集电极电流与基极电流的直流量之比称为直流电流放大系数,记为 $\bar{\beta}$,即

$$\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B} \quad (5.3.1)$$

三极管的电流放大系数 $\bar{\beta}$ 为三极管的核心参数,如图 5.3.2 所示电路三极管的 $\bar{\beta}=100$ 。

当控制电流在直流量基础上叠加 1 个交流小信号依然满足大小适中时,输出电流将在直流量的基础上叠加 1 个与控制端叠加的交流小信号成线性比例关系的交流信号,可见,三极管可实现交流小信号的放大,把集电极电流与基极电流的变化量之比称为交流电流放大系数,记为 β ,即

$$\beta = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B} \quad (5.3.2)$$

显然,输出电流不可能无限上升,当控制电流超过临界值时,输出电流将不再与控制电流保持比例关系。

在上面的电路中,将三极管 B 极改接 0.06mA 的电流源,仿真结果如图 5.3.4(a)所示。仿真结果显示,C、E 两极有电流流过,流过 C 极的电流大小为 5.794mA,近似保持线性关系。

将三极管 B 极改接 0.12mA 的电流源,仿真结果如图 5.3.4(b)所示。仿真结果显示,C、E 两极有电流流过,但流过 C 极的电流大小为 5.882mA。输入电流增加 1 倍,输出电流却几乎保持不变,称三极管工作在饱和区。

基于上面的仿真实验,可知三极管具有3个工作区:

当B极接0mA电流源时,C、E两极没有电流流过,三极管工作在截止区。

当 i_B 大小适中时,三极管工作在放大区,有

$$i_C = \beta i_B$$

当 i_B 超过临界值时,输出电流几乎保持不变,称三极管工作在饱和区。

在模拟电子电路中,三极管工作在放大区。本章及第6章主要讨论三极管在放大区的应用。

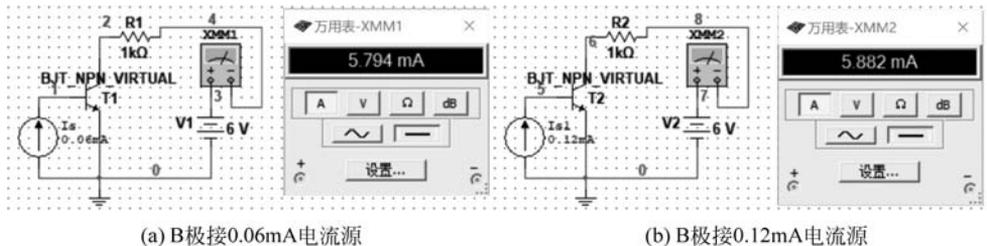


图 5.3.4 三极管电流控制特性仿真图 2

5.3.2 三极管的伏安特性及其主要参数



三极管的伏安特性全面地描述了各电极电流和电压之间的关系,是分析三极管电路的基础。这里以NPN管为例介绍三极管的共射伏安特性曲线。所谓共射是指输入回路与输出回路的公共端是射极的连接方式,如图5.3.5所示。下面,从输入回路、输出回路两个方面介绍三极管的伏安特性曲线。

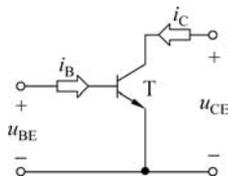


图 5.3.5 三极管共射连接方式

1. 输入特性曲线

输入特性曲线是以三极管输出端压降 u_{CE} 为参变量,描述输入回路电流 i_B 与电压 u_{BE} 之间关系的曲线,定义如下:

$$i_B = f(u_{BE}) \Big|_{u_{CE} = \text{常数}} \quad (5.3.3)$$

忽略三极管集电结的影响,其输入回路是一个二极管,可见,三极管输入特性主要表现为二极管伏安特性,三极管输出端压降 u_{CE} 将对其输入特性构成影响,参考实例如图5.3.6(a)所示。

当 $u_{CE} = 0$ 时,输入回路相当于两个二极管并联;当 u_{CE} 增大,集电结正偏电压减小,曲线右移; $u_{CE} \geq 1V$ 后,集电结反偏,输入特性曲线基本上是重合的。

2. 输出特性曲线

输出特性曲线是以 i_B 为参变量,描述输出回路电流 i_C 与电压 u_{CE} 之间关系的曲

线,定义如下:

$$i_C = f(u_{CE}) \Big|_{i_B = \text{常数}} \quad (5.3.4)$$

参考实例如图 5.3.6(b)所示。

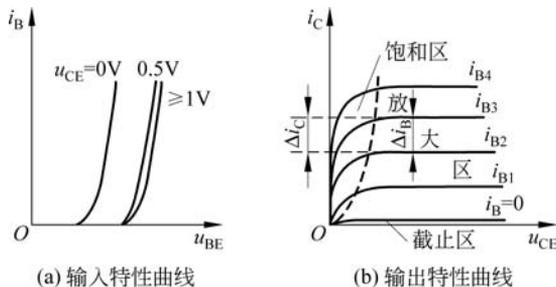


图 5.3.6 三极管输入、输出特性曲线

注意,无论是输入特性曲线还是输出特性曲线,均有一个参变量,究其原因,三极管是一个电流控制器件,必须合理产生控制信号,才能使三极管正常工作。

可结合三极管的输出特性曲线进一步理解三极管的三个工作区,三个工作区相应的工作条件及特性如下:

(1) 截止区($i_B \leq 0$ 的区域)

工作条件: 发射结反偏,集电结反偏。

主要特性: $i_B \leq 0, i_C \approx 0$ 。

(2) 放大区(输出特性曲线中近似水平的部分)

工作条件: 发射结正偏,集电结反偏。

主要特性: $I_C = \bar{\beta} I_B, \Delta i_C = \beta \Delta i_B$ 。

(3) 饱和区(输出特性曲线中靠近纵坐标的附近区域)

工作条件: 发射结正偏,集电结正偏。

主要特性: $i_C < \beta i_B, u_{CE} < u_{BE}$ 。深度饱和时, $U_{CES} = 0.3V$ 。

还常用共基直流、交流电流放大系数 $\bar{\alpha}$ 、 α 描述共基(输入回路与输出回路的公共端是基极)接法下三极管的电流放大作用。

集电极电流与发射极电流的直流量之比称为共基直流电流放大系数,即

$$\bar{\alpha} = \frac{I_C}{I_E} \quad (5.3.5)$$

集电极电流与发射极电流的变化量之比称为共基交流电流放大系数,记为 α ,即

$$\alpha = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_E} \quad (5.3.6)$$

$\beta(\alpha)$ 体现共射(共基)接法三极管的电流放大作用。 β 与 $\bar{\beta}$ (α 与 $\bar{\alpha}$)有交、直流的区别,但在放大区两者数值近似相等,因此在估算时一般不再区分。

三极管的其他主要参数还有:集-基极、集-射极反向截止电流 I_{CBO} 、 I_{CEO} ,集电极最大允许电流 I_{CM} ,集-射极反向击穿电压 $U_{(BR)CEO}$,集电极最大允许耗散功率 P_{CM} 等。

I_{CBO} 表示当发射极开路时,集电极与基极之间的反向截止电流。

I_{CEO} 表示当基极开路时,集电极和发射极之间的反向截止电流,又称为穿透电流。它们的关系是

$$I_{CEO} = (1 + \bar{\beta})I_{CBO} \quad (5.3.7)$$

I_{CBO} (I_{CEO}) 是少数载流子漂移运动形成的,因此受温度影响很大,是反映晶体管优劣的主要指标。

当集电极电流 I_C 过大时,三极管的 β 值要下降。当 β 值下降到正常数值的 $\frac{2}{3}$ 时的集电极电流,称为集电极最大允许电流 I_{CM} 。

基极开路时,加在集电极和发射极之间的最大允许电压,称为集-射极反向击穿电压 $U_{(BR)CEO}$ 。 u_{CE} 超过此值时管子会击穿。

关于这些参数的更多阐述,请参考其他书籍。

5.3.3 三极管工作在放大区的简化模型



电子电路中的放大电路主要用于交流信号的放大。当基极电流 i_B 在直流量基础上叠加一个交流小信号依然满足大小适中时,三极管可实现交流小信号的放大。可见,用三极管实现交流小信号的放大的原理如下。

合理选择器件参数,使基极电流的直流量 I_B 等参数适合于叠加交流小信号。

交流信号正、负交替,选择 I_B 等参数位于输出特性曲线的中心区域附近时最佳。当然, I_B 等参数反映在三极管特性曲线上是对应的一个点,称为直流工作点,记为 Q 点,常用三极管简化直流电路模型来分析三极管电路的 Q 点。

三极管的输入特性与二极管非常类似,在正常放大工作情况下,硅管的发射结电压 $U_{BE} = 0.6 \sim 0.7V$,锗管的 $U_{BE} = 0.2 \sim 0.3V$ (一般硅管取 $U_{BE(ON)} = 0.7V$,锗管取 $U_{BE(ON)} = 0.3V$)。

三极管主要用于小信号放大,其工作电压与发射结导通压降量级差别不大,在近似分析时, U_{BE} 不可忽略,可视 U_{BE} 基本不变,可使用如图 5.2.12(a) 所示的二极管模型代替如图 5.3.5 所示共射放大电路的输入回路。

从输出特性看,在放大区, $I_C = \bar{\beta}I_B$, 即输出电流 I_C 受输入电流 I_B 控制。因此在放大模式下,三极管输入端可近似用直流电压源 $U_{BE(ON)}$ 等效,输出端用电流控制电流源等效,得到三极管简化直流电路模型如图 5.3.7 所示。

当 I_B 等参数已位于输出特性曲线的中心区域附近时,可在输入端叠加一个小信号变化量,此时,这个小信号变化量将引起输出信号的变化。当这个小信号变化量大小适中时, $\Delta i_C = \beta \Delta i_B$ 。

因为叠加的小信号非常小,输入回路二极管上的导通压降随流过二极管的电流引起

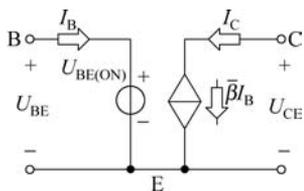


图 5.3.7 简化直流电路模型

的变化不可忽略,可使用如图 5.2.12(b)所示的二极管模型代替如图 5.3.5 所示共射放大电路的输入回路。分析三极管电路时,直流量、交流量单独分析,依照叠加原理,分析三极管电路交流特性时, $U_{BE(ON)}$ 置零,三极管的输入电路可用三极管的输入特性 r_{be} 等效。

$$r_{be} = \left. \frac{\Delta u_{BE}}{\Delta i_B} \right|_{U_{CE}} \quad (5.3.8)$$

r_{be} 称为三极管的输入电阻,它表示三极管的输入特性。在 Q 点附近小范围内, r_{be} 可根据式(5.3.8)从输入特性曲线求得。

对于低频小功率三极管, r_{be} 常用下式估算

$$r_{be} \approx 200(\Omega) + (1 + \beta) \frac{26(\text{mV})}{I_{EQ}(\text{mA})} \quad (5.3.9)$$

在输出特性曲线上,当 U_{CE} 为常数时, Δi_C 和 Δi_B 之比为三极管的电流放大系数。在 Q 点附近小范围内(小信号条件), β 是一个常数,由它确定 Δi_C 受 Δi_B 的控制关系。因此,三极管的输出电路可用受控电流源来等效。 β 可根据式(5.3.2),从输出特性曲线求得;在三极管手册中 β 常用 h_{fe} 表示。

表 5.3.1 二极管、三极管的特性及其简化模型

	符号及描述	特性曲线	简化模型
二极管	阳极 阴极 阳极 阴极		
	电流方程 $i = I_S(e^{u/u_T} - 1)$ U_{ON} : 硅: 0.7V, 锗: 0.3V		
三极管		输入特性 	直流模型
	输入电阻 r_{be} : $r_{be} \approx 200(\Omega) + (1 + \beta) \frac{26(\text{mV})}{I_{EQ}(\text{mA})}$ 输出电阻 r_{CE} 一般很大,在分析时忽略	输出特性 	小信号模型

以 NPN 管共射连接方式为参考

在输出特性曲线上还可以看到,当 I_B 为常数时, Δi_C 将随 Δu_{CE} 增加而略有增加, Δu_{CE} 和 Δi_C 之比

$$r_{ce} = \left. \frac{\Delta u_{CE}}{\Delta i_C} \right|_{I_B} \quad (5.3.10)$$

称为三极管的输出电阻。在小信号条件下, r_{ce} 也是一个常数。因此,三极管输出电流,除了受输入控制的部分外,还应包括反映 Δu_{CE} 影响的流过 r_{ce} 的部分,其输出电路可用受控电流源与输出电阻并联来等效。 r_{ce} 可根据式(5.3.10),从输出特性曲线求得。

由于 r_{ce} 很大,约为几十千欧到几百千欧,一般忽略不计,在小信号条件下,可构造三极管的简化小信号电路模型如图 5.3.8 所示。图中 Δi_B 用 i_b 表示, Δu_{BE} 用 u_{be} 表示,其他与此类似。在近似分析时,常用简化模型。

当然,有读者可能说,如图 5.2.12 所示的二极管模型中有理想二极管的电路符号,如图 5.3.7、图 5.3.8 所示模型中没有理想二极管的符号,为什么呢?

读者不要忘记,上面的直流及小信号模型是基于三极管工作在放大区建立的模型,此时,发射结导通,理想二极管导通时相当于短路,因此,模型中没有理想二极管的符号。

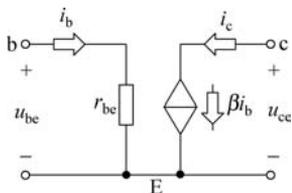


图 5.3.8 简化小信号电路模型

基于上面的分析,不难发现,三极管电路分析包括直流分析、交流分析两个部分,可通过下面的例题来初步理解。



【例 5.3.1】 电路如图 5.3.9(a) 所示,已知 $\beta=100$,其他元件参数已在图中标出,试分析三极管各极的电压和电流值,并确定三极管的工作状态。

解:

题中要求确定三极管的工作状态,应对该电路进行直流分析。在工程上,常用三极管简化直流电路模型替代三极管进行近似分析,其基本步骤如下:

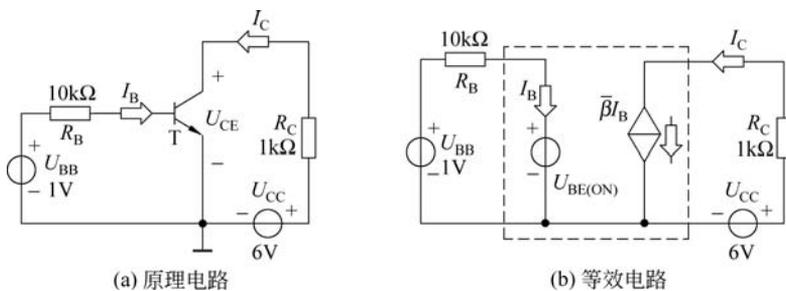


图 5.3.9 例 5.3.1 的图

- 假设三极管工作在放大状态,用其简化直流电路模型代替三极管;
- 确定三极管各极电压和电流值,主要指 I_B 、 I_C 、 U_{CE} ;
- 根据结果验证或确定三极管实际的工作模式,必要时再作分析。

(1) 三极管工作在放大状态的条件是三极管发射结正偏,集电结反偏。 U_{BB} 使三极

管发射结正偏,假设三极管工作在放大状态,将简化直流电路模型代替三极管,得到等效电路如图 5.3.9(b)所示。

(2) 由输入回路求 I_B 得

$$I_B = \frac{U_{BB} - U_{BE(ON)}}{R_B} = \left(\frac{1 - 0.7}{10} \right) \text{mA} = 30 \mu\text{A}$$

$$I_C = \beta I_B = 100 \times 30 = 3(\text{mA})$$

由输出回路求 U_{CE} 得

$$U_{CE} = U_{CC} - I_C R_C = (6 - 3 \times 1) \text{V} = 3 \text{V}$$

(3) 分析表明, $U_{CE} = 3 \text{V} > 0.7 \text{V}$, 使集电结反偏, 因此可以确定三极管工作在放大状态。

【例 5.3.2】 在例 5.3.1 中, 若将 R_C 增大到 $2 \text{k}\Omega$, 其他元件参数不变, 试判断这时三极管的工作状态; 如果 R_C 仍为 $1 \text{k}\Omega$ 不变, 将 R_B 减小为 $3 \text{k}\Omega$, 三极管的工作状态又将如何?

解:

(1) 当 R_C 增大到 $2 \text{k}\Omega$ 时, 仍假设三极管工作在放大状态, 按例 5.3.1 的分析, I_B 、 I_C 不变, U_{CE} 变化为

$$U_{CE} = U_{CC} - I_C R_C = (6 - 3 \times 2) \text{V} = 0 \text{V} < U_{BE} = 0.7 \text{V}$$

这时集电结正偏, 因此三极管工作在饱和状态。在饱和条件下

$$U_{CES} = 0.3 \text{V}$$

$$I_C = \frac{U_{CC} - U_{CES}}{R_C} = \left(\frac{6 - 0.3}{2} \right) \text{mA} = 2.85 \text{mA}$$

(2) 如果 R_C 仍为 $1 \text{k}\Omega$ 不变, 将 R_B 减小为 $3 \text{k}\Omega$, 仍假设三极管工作在放大状态, 按例 5.3.1 的分析

$$I_B = \frac{U_{BB} - U_{BE(ON)}}{R_B} = \left(\frac{1 - 0.7}{3} \right) \text{mA} = 100 \mu\text{A}$$

$$I_C = \beta I_B = (100 \times 100) \mu\text{A} = 10 \text{mA}$$

由输出回路求 U_{CE} 得

$$U_{CE} = U_{CC} - I_C R_C = (6 - 10 \times 1) \text{V} = -4 \text{V} < U_{BE} = 0.7 \text{V}$$

这时集电结正偏, 因此三极管工作在饱和状态。在饱和条件下

$$U_{CES} = 0.3 \text{V}$$

$$I_C = \frac{U_{CC} - U_{CES}}{R_C} = \left(\frac{6 - 0.3}{1} \right) \text{mA} = 5.7 \text{mA}$$

限于篇幅, 三极管电路的交流分析请参考其他书籍。

5.3.4 三极管在电子技术领域中的重要作用

在电子管、三极管出现以前, 电路的主要应用模式是电源 + 导线 + 终端设备。在这

样的应用模式下,电路中的电子流动是一种能量的流动。电力工业也成为各国的基础支柱产业之一。

大发明家爱迪生在研究白炽灯的寿命时,在灯泡的碳丝附近焊上一小块金属片,发现了一个奇怪的现象:金属片虽然没有与灯丝接触,但如果在它们之间加上电压,灯丝就会产生一股电流,趋向附近的金属片。已经证明,电流的产生原因是因为炽热的金属能向周围发射电子。

基于上面的原理,1904年,英国物理学家弗莱明研制了世界上第一只电子管。此后不久,美国发明家德福雷斯特在二极管的灯丝和板极之间巧妙地加了一个栅板,发明了第一只真空三极管,推动了无线电电子学的蓬勃发展,世界从此进入了电子时代。一门根据电子学的原理,运用电子器件设计和制造某种特定功能的电路以解决实际问题的新型技术:电子技术诞生,传统电路由电工领域拓展到了电子技术领域。

电子管的参考结构如图 5.3.10 所示。

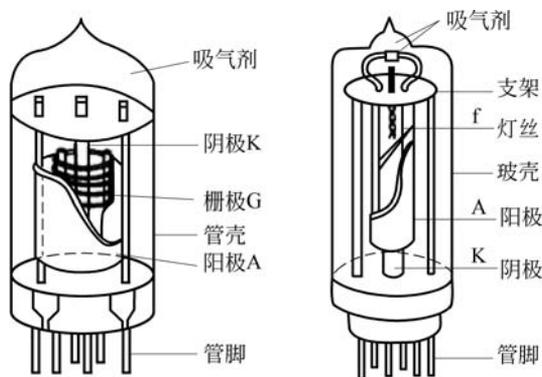


图 5.3.10 电子管示意图

电子管体积大、功耗大、发热量大、寿命短、电源利用效率低,臭虫(Bug)钻入电子管电路被烫死后可能因接触问题导致电路故障,找臭虫(Debug)成为调试、排除故障的代名词,基于电子管的应用电路主要在某些专门领域中应用。

三极管可在一小片半导体材料(如硅片)上通过掺杂制作而成,随着制作工艺的提高,可在一小片半导体硅片上制作成百上千万个三极管。三极管体积小、功耗小,性能可靠,具有电子管无法比拟的优越性。

三极管的出现是电子技术发展史上的一座里程碑,是电子技术之树上绽开的一朵绚丽多彩的“奇葩”,使电子技术走进了千家万户,成为人们日常生活不可分割的一部分。

电子技术包括信息电子技术和电力电子技术两大分支。信息电子技术包括模拟(Analog)电子技术和数字(Digital)电子技术。

模拟电子技术典型应用电路有:

- 放大电路

增加电信号幅度或功率的电子电路称为放大电路,应用放大电路实现放大的装置称为放大器,典型电路如音响中的功放电路。

在对小信号进行放大时,根据人们对电压、电流、功率各物理量关心的不同,分别称为电压放大、电流放大、功率放大。但不管是什么放大,其实质都是对功率进行了放大。这是电子学放大与其他类型放大的根本区别。

• 振荡电路

用来产生重复电子信号(通常是正弦波或方波)的电子电路称为振荡电路,能将直流电转换为具有一定频率交流电信号输出,典型电路如计算机系统的工作脉冲电路。

振荡电路种类很多,按振荡激励方式可分为自激振荡器、他激振荡器;按电路结构可分为阻容振荡器、电感电容振荡器、晶体振荡器、音叉振荡器等;按输出波形可分为正弦波、方波、锯齿波等振荡器。振荡电路广泛用于电子工业、医疗、科学研究等方面。

• 滤波电路

滤波电路用于消除电信号中的干扰,让有用信号尽可能无衰减地通过,对无用信号尽可能大地衰减,典型电路如收音机的调谐接收电路。

思考与练习

- 5.3.1 三极管从结构上看可以分成哪两种类型,两者的特性有什么异同?
- 5.3.2 三极管可以有几种工作模式?它们有哪些典型的应用?
- 5.3.3 在设计三极管开关电路时,哪些工作区是有用的?

5.4 用三极管构成小信号放大器的一般原则

利用三极管工作在放大、截止、饱和三种状态下的不同特性,可构成放大、恒流、开关等功能的电路。放大器是电子电路中最基础、应用最广泛的一种电路。

5.4.1 小信号放大器的一般结构

从前面的分析知道,在小信号时,三极管可用线性电路来等效,因此小信号放大器可以看成是一个线性有源两端口网络。对于输入信号源,放大器可视为它的负载,因此放大器输入口可等效成一个电阻与信号源相连;对于负载,放大器可视为它的信号源,因此放大器输出口可等效成一个电压源与负载相连。这样构成如图 5.4.1 所示的小信号放大器的结构示意图。

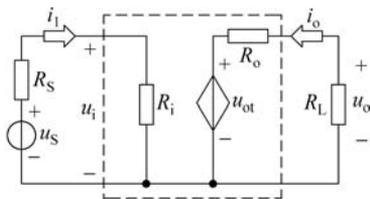


图 5.4.1 小信号放大器的结构示意图

5.4.2 放大器的基本性能指标



描述放大器性能的指标很多,这里仅介绍在信号频率适中的范围内,反映小信号放

大器最基本的性能的几个指标。

1. 输入电阻 R_i

放大器在输入端口的等效电阻称为输入电阻,定义为输入电压与输入电流的比,即

$$R_i = \frac{u_i}{i_i} \quad (5.4.1)$$

由图 5.4.1 写出输入电压与信号源电压的关系为

$$u_i = \frac{R_i}{R_i + R_s} u_s \quad (5.4.2)$$

式(5.4.2)表明, R_i 越大,放大器获取输入电压的能力越强。因此输入电阻是衡量放大器从信号源获取信号能力的指标。

2. 输出电阻 R_o

放大器在输出端口可等效为一个电源,等效电源的内阻 R_o 称为输出电阻。由图 5.4.1 可以看出,当负载开路、信号源为零时,在输出端加电压 u_o , u_o 与产生的电流 i_o 的比,就是定义的输出电阻。即

$$R_o = \frac{u_o}{i_o} \Big|_{R_L = \infty, u_s = 0} \quad (5.4.3)$$

由图 5.4.1 写出放大器带负载的输出电压 u_o 与负载开路时的输出电压 u_{ot} 的关系

$$u_o = \frac{R_L}{R_L + R_o} u_{ot} \quad (5.4.4)$$

式(5.4.4)表明, R_o 越小,负载对 u_o 的影响就越小。因此输出电阻是衡量放大器带负载能力的指标。

3. 增益 A

增益 A 又称为放大倍数。定义为放大器输出量与输入量的比,即

$$A = \frac{x_o}{x_i} \quad (5.4.5)$$

是衡量放大器放大能力的指标。根据输出、输入电量的不同,又分

$$A_u = \frac{u_o}{u_i} \quad \text{电压增益}; \quad A_i = \frac{i_o}{i_i} \quad \text{电流增益}$$

$$A_g = \frac{i_o}{u_i} \quad \text{互导增益}; \quad A_r = \frac{u_o}{i_i} \quad \text{互阻增益}$$

它们分别是衡量电压放大、电流放大、互导放大、互阻放大四种放大器的放大能力的指标。

4. 源增益 A_s

定义为放大器输出量与信号源电量的比,即

$$A_S = \frac{x_o}{x_S} \quad (5.4.6)$$

与增益的定义类似,根据输出、输入电量的不同,也分四种源增益 A_{uS} 、 A_{iS} 、 A_{gS} 、 A_{rS} 。源增益 A_S 与增益 A 之间存在一定的关系,如:

$$A_{uS} = \frac{u_o}{u_S} = \frac{u_o}{u_i} \frac{u_i}{u_S} = A_u \frac{R_i}{R_i + R_S} = A_u \frac{R_i}{R_i + R_S} \quad (5.4.7)$$

式(5.4.7)表明, R_i 越大,放大器性能越稳定。

5.4.3 基本放大器的工作原理及组成原则



图 5.4.2 是基本共射放大器,它由 NPN 三极管 T,电阻 R_B 、 R_C ,直流电压源 U_{CC} 、 U_{BB} ,输入电压源 u_i 组成。现以该电路为例说明放大器的工作原理和组成原则。

1. 工作原理

当 $u_i = 0$ 时,放大器处于直流工作状态,称为静态。在输入回路中,直流电源 U_{BB} 使三极管发射结正偏,并与 R_B 共同决定基极电流

$$I_{BQ} = (U_{BB} - U_{BE(ON)}) / R_B$$

在输出回路中,足够的 U_{CC} 使三极管集电结反偏,保证三极管工作在放大状态,有

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ}, \quad U_{CEQ} = U_{CC} - I_{CQ} R_C$$

这样建立起合适的直流工作点 I_{BQ} 、 U_{BEQ} 、 I_{CQ} 、 U_{CEQ} ,又称为静态工作点。

当 $u_i \neq 0$ 时,放大器处于交流工作状态,称为动态。在输入回路中,输入电压源 u_i 叠加在 U_{BB} 上,使三极管基极电流在 I_{BQ} 的基础上也叠加了一个变化量 i_b ,即 $i_B = I_{BQ} + i_b$,进而使 $u_{BE} = U_{BEQ} + u_{be}$, $i_C = I_{CQ} + i_c$, $u_{CE} = U_{CEQ} + u_{ce}$, u_{ce} 就是在输出端产生的随 u_i 变化而变化的输出电压 u_o 。当电路参数选择合适时,可以使输出电压 u_o 比输入电压 u_i 大得多,从而实现了电压的放大。

2. 组成原则

从上面的分析可以知道,在组成放大器时必须遵循以下几个原则。

(1) 放大器外加直流电源的极性必须保证放大管工作在放大状态。对于晶体管,即须保证发射结正偏,集电结反偏。

(2) 输入回路的接法应该使放大器的输入电压 u_i 能够传送到放大管的输入回路,并使放大管产生输入电流变化量 (i_b) 或输入电压变化量 (u_{be} 、 u_{gs})。

(3) 输出回路的接法应使放大管输出电流的变化量 (i_c 、 i_d) 能够转化为输出电压的

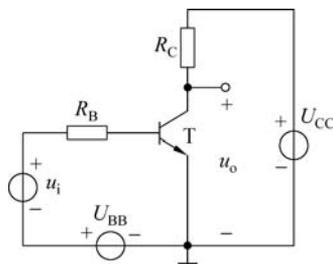


图 5.4.2 基本共射放大器

变化量(u_{ce} 、 u_{ds}),并传送到放大器的输出端。

(4) 选择合适的电路元器件参数,使输出信号不产生明显的失真。

只要满足上述几项原则,即使电路的形式有所变化,仍然能够实现放大的作用。

【例 5.4.1】 试分析图 5.4.3 所示的电路是否可能实现放大。

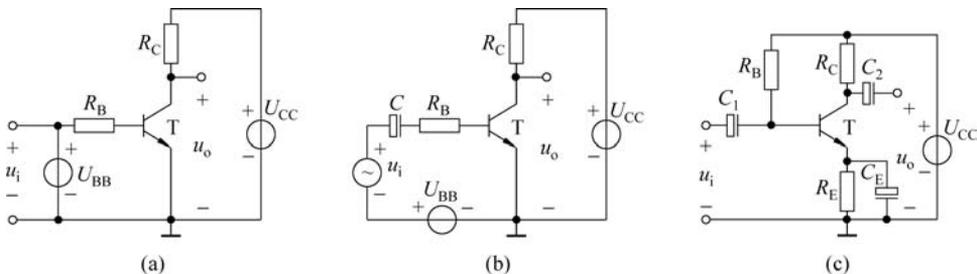


图 5.4.3 例 5.4.1 的图

解:

图 5.4.3(a)在电路参数选择合适的情况下, U_{BB} 、 U_{CC} 可以使三极管发射结正偏,集电结反偏,保证三极管工作在放大状态。但是,电路的输入信号 u_i 被 U_{BB} 短路,不能使三极管的输入电流或电压产生变化,即上述原则(2)不能满足,故电路不能实现放大。

图 5.4.3(b)也不能实现放大,因为电容 C 有隔直的作用,将 U_{BB} 与晶体管隔开,三极管发射结没有正向的偏置电压, $I_B=0$ 。

图 5.4.3(c)是单电源供电的共射放大器,可以实现放大。 U_{CC} 通过 R_B 使三极管发射结正偏,在电路参数选择合适的情况下, U_{CC} 能够保证集电结反偏,使三极管工作在放大状态;输入信号 u_i 通过 C_1 加到 VT 发射结,产生变化的 u_{be} 、 i_b ; $i_c = \beta i_b$, i_c 流过 R_C 产生变化的 u_{R_C} ,进而产生变化的 u_{ce} ,并通过 C_2 加到负载上,实现了电压放大。

思考与练习

5.4.1 放大器的基本性能指标增益 A 、输入电阻 R_i 、输出电阻 R_o 。分别用来衡量放大器的什么能力?

5.4.2 放大器为什么必须建立合适的静态工作点?

5.4.3 在放大器中,如果要计算小信号的响应,为什么必须先知道其电流工作点?

5.5 放大器的三种组态及其典型电路



三极管有三个极,在构成放大器输入、输出两个端口时,必然有一个极是公共端。将发射极、集电极、基极分别作为输入输出端口的公共端,依照放大器的组成原则,可构成放大器的三种基本组态。

5.5.1 放大器三种组态的基本电路

放大器三种组态的基本电路如图 5.5.1 所示。工程上不管多么复杂的放大器,都是在这三种基本组态电路基础上演变而来的,简要解释如下:

图 5.5.1(a)为基本共射放大器。放大器输入、输出公共端为发射极, U_{BB} 保证发射结正偏, U_{CC} 保证集电结反偏,三极管工作在放大状态,输入电压 u_i 通过电阻 R_B 传送到放大管的输入回路。图 5.5.1(b)为基本共基放大器。放大器输入、输出公共端为基极, U_{BB} 保证发射结正偏, U_{CC} 保证集电结反偏,三极管工作在放大状态,输入电压 u_i 通过电阻 R_E 传送到放大管的输入回路。图 5.5.1(c)为基本共集放大器。放大器输入、输出公共端为集电极, U_{BB} 保证发射结正偏, U_{CC} 保证集电结反偏,三极管工作在放大状态,输入电压 u_i 通过电阻 R_B 传送到放大管的输入回路。

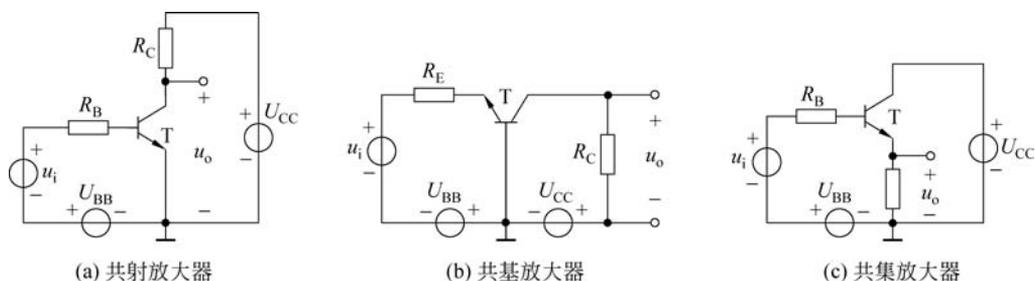


图 5.5.1 放大器的基本组态

5.5.2 放大器三种组态的典型电路

放大器三种组态的基本电路特性较差,放大器三种组态的典型电路如图 5.5.2 所示。

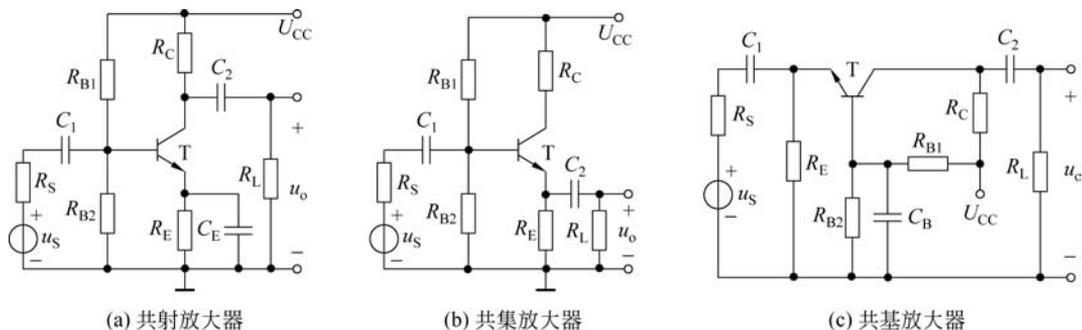


图 5.5.2 放大器三种组态的典型电路

如图 5.5.2 所示电路采用 U_{CC} 单电源供电, U_{CC} 通过 R_{B1} 、 R_{B2} 的分压使发射结正偏,只要 R_C 、 R_E 参数合理,就能使集电结反偏,保证三极管工作在放大状态; R_E 的作用

是稳定静态工作点; C_1 、 C_2 用来隔断放大器与信号源和负载的直流通路,使放大器的工作状态与信号源和负载之间互不影响,同时交流信号又能顺利通过放大器并传递到负载。这样的结构既符合放大器的组成原则,同时又提高了电路的稳定性。因此,该电路在实际中经常被采用。

将如图 5.5.2 所示各电路的输入电压源短路,电容开路,可以画出各电路的直流通路,具体如图 5.5.3 所示(典型的共射、共集、共基三个放大器的直流通路相同)。

通常实际电路满足 $I_B \ll I_{RB2}$ 、 $I_B \ll I_C$, 因此

$$U_B \approx \frac{R_{B2}}{R_{B2} + R_{B1}} U_{CC} \quad (5.5.1)$$

$$I_{CQ} \approx I_E = \frac{U_B - U_{BE(ON)}}{R_E} = \frac{\frac{R_{B2}}{R_{B2} + R_{B1}} U_{CC} - U_{BE(ON)}}{R_E} \quad (5.5.2)$$

$$U_{CEQ} = U_{CC} - I_{CQ}(R_C + R_E) \quad (5.5.3)$$

将如图 5.5.2 所示各电路中的直流电压源短路,电容也短路时,可以画出各电路的交流通路如表 5.5.1 所示,表中 $R_B = R_{B1} // R_{B2}$ 。

对于交流信号,由于三极管的接法不同,交流通路也就不同,因此它们有着不同的性能特点。

共集放大器的电压增益恒小于 1,且约等于 1,即 $u_o \approx u_i$, 可以认为射极输出电压几乎跟随基极输入变化而变化,因此共集放大器又称为射极跟随器。虽然共集放大器不能实现电压放大($A_u < 1$),但它的输出电流(I_o)比输入电流(I_i)大得多,所以仍然有功率放大作用。

共基放大器输入电阻较共射放大器小,输出电阻与共射放大器相当,但共基放大器的电压增益为正,是同相放大。

共射放大器各项指标较为适中,在低频电压放大时用得最多;共集放大器是三种基本组态中输入电阻最大、输出电阻最小的电路,多用作输入、输出级;共基放大器的频率特性最好,常用于宽带放大。三种基本组态放大器性能比较如表 5.5.1 所示。

表 5.5.1 三种基本组态放大器性能比较

	共射放大器	共集放大器	共基放大器
电路形式			

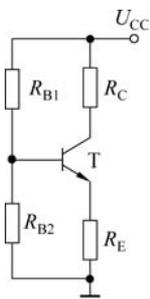


图 5.5.3 直流通路

续表

	共射放大器	共集放大器	共基放大器
直流分析		上面所示三种基本组态放大器具有相同的直流通路： $I_{CQ} \approx I_E = \frac{U_B - U_{BE(ON)}}{R_E} = \frac{R_{B2} U_{CC} - U_{BE(ON)}}{R_{B2} + R_{B1} R_E}$ $U_{CEQ} = U_{CC} - I_{CQ}(R_C + R_E)$ $r_{be} \approx 200(\Omega) + (1 + \beta) \frac{26(\text{mV})}{I_{EQ}(\text{mA})}$	
交流通道			
交流小信号参数	$R_i = R_{B1} // R_{B2} // r_{be}$ $R_o = R_C$ $A_u = \frac{-\beta(R_C // R_L)}{r_{be}}$	$R_i = R_B // [r_{be} + (1 + \beta)R'_L]$ $R'_L = R_E // R_L$ $R_o = R_E // \frac{R_S // R_B + r_{be}}{(1 + \beta)}$ $A_u = \frac{(1 + \beta)(R_E // R_L)}{r_{be} + (1 + \beta)(R_E // R_L)}$	$R_i = R_E // \frac{r_{be}}{1 + \beta}$ $R_o = R_C$ $A_u = \frac{\beta(R_C // R_L)}{r_{be}}$
用途	指标较为适中,常用作低频电压放大	输入电阻最大、输出电阻最小,多用作输入、输出级	频率特性最好,常用作宽带放大

【例 5.5.1】 试分析如图 5.5.4 所示电路的特点并估算其放大倍数。

解：

图 5.5.4 所示电路包括两级放大器,放大器级与级之间通过电容连接,称为阻容耦合。

由于电容的隔直作用,各级直流通路相互独立,静态工作点互不影响。此外,电容对低频信号呈现的电抗大,传递低频信号的能力弱,所以不能反映直流成分的变化,不适合放大缓慢变化的信号。

图 5.5.4 中第 1 级放大器为典型共射放大电路,第 2 级具有与前面介绍的典型共集放大器相同的特性,可近似认为该电路的电压放大倍数为第 1 级典型共射放大电路的电压放大倍数。

在上面的电路中,增加 1 级共集放大器(输出电阻小)的目的是为了改善电路的输出特性。此外,为了减小耦合电容对信号的衰减,耦合电容一般选取为几十微法到几百微

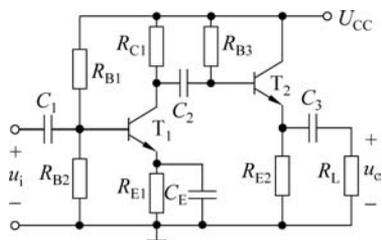


图 5.5.4 例 5.5.1 的图

法,这样大的电容是不适合于集成化的,所以,如图 5.5.4 所示电路主要适用于用分立元件组成的交流放大器。

【例 5.5.2】 试分析如图 5.5.5 所示电路的特点。

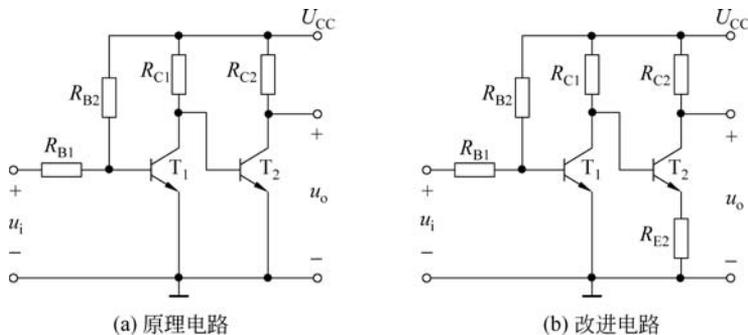


图 5.5.5 例 5.5.2 的图

解:

图 5.5.5 所示电路包括两级放大器,放大器级与级之间不通过任何元件就直接相连,称为直接耦合。

图 5.5.5 所示电路由于没有耦合电容的存在,具有良好的低频特性,可以对缓慢信号进行放大,适合于直流(零频)放大器,也容易将电路集成在一块硅片上,构成集成放大器。

当然,电路采用直接耦合方式相连也存在不足。

在图 5.5.5(a)中, R_{C1} 既是第一级的集电极电阻,又可作为第二级的基极电阻,所以省去了 R_{B2} 。在静态时, T_1 管的 U_{CEQ1} 等于 T_2 管的 U_{BEQ2} ,一般情况下, $U_{BEQ2} = 0.7\text{V}$,所以 T_1 管处于临界饱和的状态,显然信号容易失真。这说明前后级的相互影响导致了工作点的不合理,需要采取措施,对前后级之间的电平进行配置。

图 5.5.5(b)所示电路在 T_2 管的射极加电阻 R_{E2} ,以提高 T_2 管的基极电位,进而使 U_{CEQ1} 满足要求, $U_{CEQ1} = U_{BQ2} = U_{BEQ2} + U_{RE2}$,是图 5.5.5(a)的一种改进方法。

如图 5.5.5 所示电路称为多级共射放大电路,常用作集成运算放大器的中间级。

思考与练习

5.5.1 在如图 5.5.2(a)所示电路中,已知 $R_{B1} = 50\text{k}\Omega$, $R_{B2} = 25\text{k}\Omega$, $R_E = 3.3\text{k}\Omega$, $R_C = R_L = 2\text{k}\Omega$, $\beta = 100$, $U_{CC} = 12\text{V}$, $U_{BE(ON)} = 0.7\text{V}$,请求 R_i 、 R_o 、 A_u 的值并计算 R_S 分别为 100Ω 、 $1\text{k}\Omega$ 时的 A_{uS} 。

5.5.2 如图 5.5.2(b)的电路参数同上题, $R_S = 1\text{k}\Omega$,试求性能参数 R_i 、 R_o 、 A_u 、 A_{uS} 的值和当 $R_L = 500\Omega$,其他参数不变时的 A_u 。

5.6 工程实用放大器的电路构成原理及特点

显然,5.5节介绍的基本组态放大器难以满足工程应用实践的要求。主要有以下几点:

- 基本组态放大器采集信号的能力有限;
- 基本组态放大器的放大能力有限;
- 基本组态放大器的负载能力有限。

下面以集成运算放大器的组成框图为例介绍工程实用放大器的电路构成原理及特点。

5.6.1 组成框图

集成运算放大器的基本组成如图 5.6.1 所示。



图 5.6.1 集成运算放大器的组成框图

从图 5.6.1 可以看出,工程实用放大器一般包括四个基本部分:

- 输入级

输入级提供与输出端成同相关系和反相关系的两个输入端,电路形式为差动放大电路,要求输入电阻高,可较好改善基本组态放大器采集信号能力弱的缺陷,是提高运算放大器质量的关键部分。

- 中间级

中间级主要完成对输入电压信号的放大,一般采用多级共射放大电路实现,可较好改善基本组态放大器放大能力有限的不足。

- 输出级

输出级提供较高的功率输出、较低的输出电阻,一般由互补对称电路或射极输出器构成,可较好改善基本组态放大器负载能力有限的不足。

- 偏置电路

偏置电路提供各级静态工作电流,一般由各种恒流源电路组成。

5.6.2 差动输入电路

工程应用实践中的原始信号往往十分微弱,容易被温度等外部因素干扰,因此,工程

实用放大器的输入电路应具有尽量高的输入阻抗且能较好地抑制温度等外部因素引起的干扰。为实现上面的目标,工程中的放大电路的输入电路一般采用差动放大器,称为差动输入电路。

可通过如图 5.6.2(a)所示的基本差动放大电路来理解差动放大器。

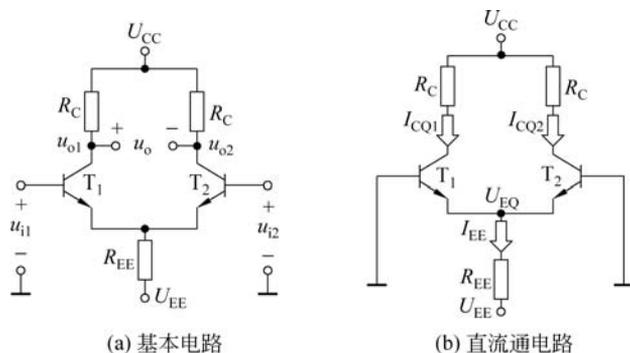


图 5.6.2 差动放大器的基本电路

图 5.6.2(a)所示基本差动放大电路具有以下特点:

- 电路是由两个结构、参数左右对称的共射放大器组成。
- 它有两个输入端,存在两个输入信号 u_{i1} 、 u_{i2} 。
- 它有两个输出端,可以从任何一个集电极输出(称为单端输出),也可从两个集电极之间输出(称为双端输出)。

图 5.6.2(a)所示基本差动放大电路的直流通路如图 5.6.2(b)所示。由图 5.6.2(b),可知:

- 当差动放大器双端输出时,能保证在零信号输入时,零信号输出;
- 差动放大器能够有效地放大差模信号和强有力地抑制共模信号、抑制温漂,可从以下几个方面理解。

1. 差模信号与共模信号

作用在差动放大器两输入端的一对数值相等、极性相反的输入信号,即 $u_{i1} = -u_{i2}$,称为差模输入信号,表示为

$$u_{i1} = -u_{i2} = u_{id}/2, \quad u_{id} = u_{i1} - u_{i2}$$

作用在差动放大器两输入端的一对数值相等、极性相同的输入信号,即 $u_{i1} = u_{i2}$,称为共模输入信号,表示为

$$u_{i1} = u_{i2} = u_{ic}$$

当然,加到差动放大器两输入端的信号,通常既不是单纯的差模信号,又不是单纯的共模信号,而是任意信号 u_{i1} 、 u_{i2} 。对它们进行改写,有

$$u_{i1} = \frac{u_{i1} + u_{i2}}{2} + \frac{u_{i1} - u_{i2}}{2} \quad (5.6.1)$$

$$u_{i2} = \frac{u_{i1} + u_{i2}}{2} - \frac{u_{i1} - u_{i2}}{2} \quad (5.6.2)$$

可以看到,差动放大器两输入端的任意信号都可以分解为一对共模信号和一对差模信号。

$$u_{i1} = u_{ic} + \frac{u_{id}}{2}$$

$$u_{i2} = u_{ic} - \frac{u_{id}}{2}$$

其中

$$u_{ic} = \frac{u_{i1} + u_{i2}}{2}$$

$$u_{id} = u_{i1} - u_{i2}$$

2. 对共模信号的抑制作用

当电路输入共模信号 $u_{i1} = u_{i2} = u_{ic}$ 时(如图 5.6.3 所示),由于电路两边对称, $i_{b1} = i_{b2}$, $i_{c1} = i_{c2}$, 所以 $u_{c1} = u_{c2}$, 这样输出电压 $u_{oc} = u_{c1} - u_{c2} = (U_{CQ1} + u_{c1}) - (U_{CQ2} + u_{c2}) = 0$, 即共模输入条件下差动输出为 0。可见,差动放大器能较好地抑制共模信号。

差动放大器利用其电路结构、参数上的对称性实现了对共模信号的抑制。另外,射极电阻 R_{EE} 的接入将降低共射放大电路的电压放大倍数,对共模信号的抑制也起着积极的作用。 R_{EE} 越大,抑制共模信号的能力就越强(差模输入条件下 R_{EE} 被短路,见后文)。因此,即便是单端输出,差动放大器仍然有抑制共模信号的作用。

由于电路参数的对称性,温度变化引起管子电流变化完全相同,可以将温漂等效成共模信号。因此,差动放大器能较好地抑制温漂。

3. 对差模信号的放大作用

当差动放大器输入一对差模信号 $u_{i1} = -u_{i2} = u_{id}/2$ 时(如图 5.6.4 所示),由于电路参数对称, T_1 、 T_2 所产生的电流的变化大小相等、方向相反,即 $i_{b1} = -i_{b2}$, $i_{c1} = -i_{c2}$, 所以 $u_{c1} = -u_{c2}$, 这样输出电压 $u_{od} = u_{c1} - u_{c2} = 2u_{c1}$, 实现了电压放大。并且,当极性相反、幅度相同的电流 i_{c1} 、 i_{c2} 共同流过 R_{EE} 时,两管的变化电流相抵消,流过 R_{EE} 电流保持不变,因此,对差模信号而言, R_{EE} 可视为短路,这样画出差动放大器的差模交流通路如图 5.6.5 所示。由此电路,可以分析差动放大器在差模输入信号作用下的性能——差模性能。

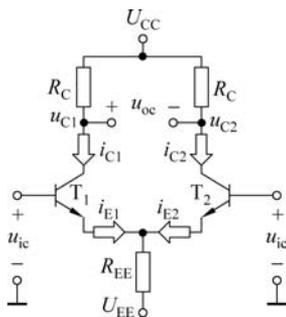


图 5.6.3 差动放大器输入共模信号

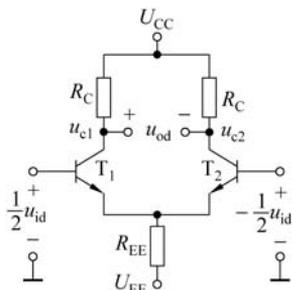


图 5.6.4 差动放大器输入差模信号

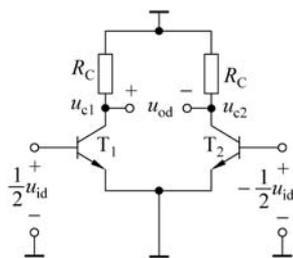


图 5.6.5 差模交流通路

差动放大器在输入差模信号时的电压增益称为差模电压增益,记为 A_d ,定义

$$A_d = \frac{u_{od}}{u_{id}} \quad (5.6.3)$$

式中, u_{od} 是在 u_{id} 作用下的输出电压。由图 5.6.5 可知

$$A_d = \frac{u_{od}}{u_{id}} = \frac{u_{c1} - u_{c2}}{u_{id}} = \frac{2u_{c1}}{2 \frac{u_{id}}{2}} = A_{u1} = -\frac{\beta R_C}{r_{be}} \quad (5.6.4)$$

式中, A_{u1} 表示单管共射放大器的增益,又称为半电路增益。式(5.6.4)表明,差动放大器双端输出时的电压增益等于半电路增益。可以认为:

差动放大器是以牺牲一个管子的增益为代价,换取了低漂移的效果。

4. 共模抑制比

对于一个差动放大器,共模电压增益越小,抑制温漂(共模信号)的效果就越好;差模电压增益越大,放大有用信号(差模信号)的能力就越强。为了综合衡量差动放大器对差模信号的放大能力和对共模信号的抑制能力,特别引入一个性能指标——共模抑制比,记作 K_{CMRR} ,定义为

$$K_{CMRR} = \left| \frac{A_d}{A_c} \right| \quad (5.6.5)$$

式中, A_d 为差模电压增益, A_c 为共模电压增益。

工程中,式(5.6.5)常用对数形式表示,记作 K_{CMR} ,单位为分贝(dB)。

$$K_{CMR} = 20 \lg \left| \frac{A_d}{A_c} \right| \quad (5.6.6)$$

共模抑制比越大,电路的性能越好。对于电路参数理想对称的双端输出情况,共模抑制比无穷大,实际差放电路约为 60dB,性能较好的差放电路可达 120dB。

从前面的分析知道,为了使差动放大器有强的抑制共模信号的能力, R_{EE} 选得越大越好。但是,若 R_{EE} 选得过大,不仅在集成电路中难以实现,而且对电源 U_{EE} 有更高的

要求。

电流源具有非常大的内阻,对工作电压源要求不高(实际电流源电路参见 5.6.5 节),所以在实际的差动放大器中,常采用电流源代替 R_{EE} ,如图 5.6.6 所示。由于要做到参数理想对称几乎不可能,因此,一般在两管发射极之间加一个很小的电位器 R_W ,通过调节电位器使 $u_{i1} = u_{i2} = 0$ 时 $u_o = 0$,所以 R_W 称为调零电位器。

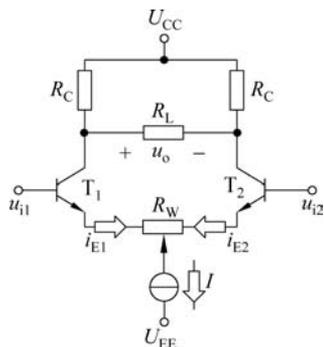


图 5.6.6 改进的差动放大器

5.6.3 多级共射放大电路

为实现高的电压放大倍数,中间级一般采用多级共射放大电路来实现。

将多个基本共射放大电路连接起来,便构成多级共射放大电路。当然,这将不可避免地产生一个新的问题:级与级之间如何连接的问题,称为耦合问题。

1. 阻容耦合

放大器级与级之间通过电容连接,称为阻容耦合,典型电路及其分析见例 5.5.1。

2. 直接耦合

放大器级与级之间不通过任何元件就直接相连,称为直接耦合,典型电路及其分析见例 5.5.2。

直接耦合方式由于没有耦合电容的存在,其优点显而易见。

- 具有良好的低频特性,可以对缓慢信号进行放大,适合于直流(零频)放大器。
- 容易将电路集成在一块硅片上,构成集成放大器。

但是由于直接耦合方式前后级直接相连,工作点必然相互影响,这不仅使 Q 点的分析复杂化,同时还带来两个需要解决的问题:一是级间电平的配置;二是克服零点漂移。

- 级间电平的配置

图 5.5.5(a)所示为两级共射放大器直接耦合的电路。图中 R_{C1} 既是第一级的集电极电阻,又可作为第二级的基极电阻,所以省去了 R_{B2} 。在静态时, T_1 管的 U_{CEQ1} 等于 T_2 管的 U_{BEQ2} ,一般情况下, $U_{BEQ2} = 0.7V$,所以 T_1 管处于临界饱和的状态,显然信号容易失真。这说明前后级的相互影响导致了工作点的不合理,需要采取措施,对前后级之间的电平进行配置。图 5.5.5(b)所示电路是一种简单的电平配置方法,在 T_2 管的射极加电阻 R_{E2} ,以提高 T_2 管的基极电位,进而使 U_{CEQ1} 满足要求, $U_{CEQ1} = U_{BQ2} = U_{BEQ2} + U_{RE}$ 。

- 零点漂移

一个理想的直接耦合放大器,当输入信号为零时,其输出电压应保持不变。但实际上,它却忽大忽小、忽快忽慢地无规则变化,这种现象称为零点漂移。当放大器有信号输入时,漂移与信号混在一起,相当于放大器引入了干扰,严重时,放大器无法工作。

在放大器中,任何参数的变化,如半导体材料的热不稳定性使半导体元件参数随温度变化而变化、电源电压的波动、元件的老化等,都将产生零点漂移。其中温度的影响最为严重,因而零点漂移又称为温度漂移,简称温漂。

在多级放大器的各级漂移当中,第一级产生的漂移信号将受到后面各级的放大,所以危害最大。因此,在要求较高的直接耦合放大器中,输入级一般采用抑制零点漂移最有效的差动放大器。

5.6.4 互补输出级

放大器的输出级将直接与负载相连,所以要求带负载能力要强,对电压放大器来讲,就是输出电阻要低。为了解决上述问题,工程中的放大电路一般采用双向跟随的互补输出级。

互补输出级的基本电路如图 5.6.7 所示。电路中的两个三极管 T_1 、 T_2 类型不同,但在理想情况下要求参数相同。

由电路图可知,静态时, $u_i = 0$, $u_o = 0$,两个三极管处于截止状态,负载上也无电流流过。所以,静态时电路无功率损耗。

电路加上输入信号,当 $u_i > 0$ 时, T_1 管导通, T_2 管截止,电流从 U_{CC} 经过 T_1 流过负载,如图 5.6.7 中实线所标注, T_1 管以射极跟随形式将正向信号传输到负载,最大正向输出电压 $U_{om+} = U_{CC} - U_{CES}$ 。当 $u_i < 0$ 时, T_1 管截止, T_2 管导通,电流从 $-U_{CC}$ 经过 T_2 流过负载,如图 5.6.7 中虚线所标注, T_2 管以射极跟随形式将负向信号传输到负载,最大负向输出电压 $U_{om-} = -U_{CC} + |U_{CES}|$ 。 U_{CES} 为饱和管压降。这样, T_1 、 T_2 以互补的方式交替工作,实现了双向跟随,并且正负跟随能力相同。

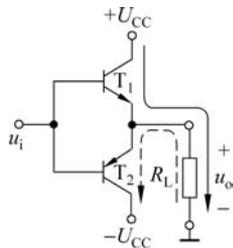


图 5.6.7 互补输出级基本电路

通过上面的分析,可以得出互补输出级基本电路具有以下特点:

- 电路的静态输出为零,即保证了零入零出,负载的接入不会对电路的 Q 点产生影响,这对直接耦合放大器非常重要。
- 静态时,管子和负载都无电流流过,电路无静态损耗。
- 管子在工作时,保持了射极跟随器输出的电路特点,输出电阻很小。
- 两个管子交替互补工作的方式,使得输出幅度较大,且正负跟随的能力一样,电路最大输出电压的幅度 $U_{om} = U_{CC} - |U_{CES}|$ 。
- 但是,当 $|u_i| < U_{BE(ON)}$ 时, T_1 、 T_2 均截止。所以,当输入信号的幅度较小的时候,电路将出现失真。如果输入为正弦波,则输出波形在正负交界的部分将出现失真,称为交越失真,如图 5.6.8 所示。

为了克服交越失真,可以采取提高 Q 点,使 T_1 、 T_2 在静态处于临界导通状态,当有输入信号作用时,就能保证一个管子导通,实现双向跟随,参考电路如图 5.6.9 所示。

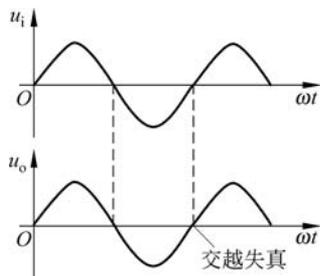


图 5.6.8 交越失真波形

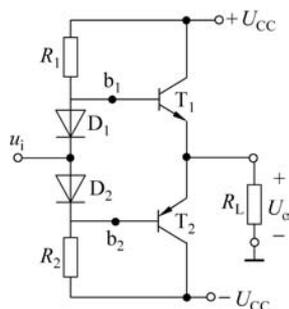


图 5.6.9 克服交越失真的互被输出级

5.6.5 恒流偏置电路

前面指出,为了使差动放大器有强的抑制共模信号的能力, R_{EE} 选得越大越好。在实际的差动放大器中,常采用电流源代替 R_{EE} ,称为恒流偏置电路。

三极管工作在放大状态不仅具有放大的特性,而且具有恒流的特性。所以,利用三极管不仅可以构成放大器,而且还可以构成电流源电路。电流源能提供恒定的电流,可作为放大器的静态恒流偏置;利用电流源交流电阻很大的特点,可代替大电阻(如图 5.6.6 所示)。特别是在集成电路中,由于集成工艺的限制,很难做大电阻,所以大量采用电流源电路代替大电阻。

1. 镜像电流源电路

图 5.6.10 所示为镜像电流源电路。图中 T_1 、 T_2 的特性要求完全相同,设 $\beta_1 = \beta_2 = \beta$ 。由于 T_1 的集电极与基极相连, $U_{CE1} = U_{BE1}$,所以 T_1 工作在放大状态,因此 $I_{C1} = \beta I_{B1}$ 。又因为 T_1 、 T_2 的基极回路对称,特性相同,所以 $I_{B1} = I_{B2}$, $I_{C1} = I_{C2}$ 。 I_{C2} 是输出电流,与 I_{C1} 成镜像关系,电路的名称便由此而得。

输出电流是电流源电路的重要参数,由电路分析输出电流 I_{C2} 和参考电流 I_R 的关系

$$I_{C2} = I_{C1} = I_R - 2I_{B1} = I_R - 2 \frac{I_{C1}}{\beta} = I_R - 2 \frac{I_{C2}}{\beta}$$

所以

$$I_{C2} = \frac{\beta}{\beta + 2} I_R \quad (5.6.7)$$

当 $\beta \gg 2$ 时,有

$$I_{C2} \approx I_R = \frac{U_{CC} - U_{BE(ON)}}{R} \quad (5.6.8)$$

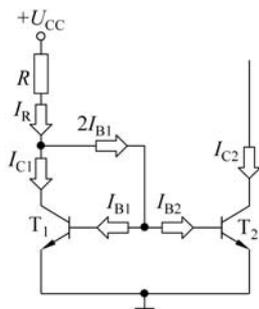


图 5.6.10 镜像电流源

在集成电路中, $\beta \gg 2$ 的条件很容易满足。当 U_{CC} 和 R 一定时, 输出电流也就随之确定。

镜像电流源电路简单, 在精度要求不是很高、输出电流大小适中的时候经常采用。如果输出电流要求很小, 那么 I_R 也就要求很小, R 的取值必然很大, 这在集成电路中是难以做到的, 这时可以采用微电流源。

2. 微电流源

为了在 R 不是很大的时候得到微小的输出电流, 可在 T_2 管的射极接一电阻, 得到如图 5.6.11 所示的微电流源。由电路, $U_{BE2} = U_{BE1} - I_{E2}R_E$, 所以 $U_{BE2} < U_{BE1}$, 故 $I_{C2} < (I_{C1} \approx I_R)$ 。下面, 不加证明地给出输出电流满足的表达式

$$I_{C2}R_E \approx U_T \ln \frac{I_R}{I_{C2}} \quad (5.6.9)$$

这是一个超越方程, 一般可用图解法或累试法来求解。但在设计电路时, 应该根据 I_{C2} 的要求, 先选定 I_R 的数值, 然后求出 R 和 R_E 的数值, 这个求解过程很简单。

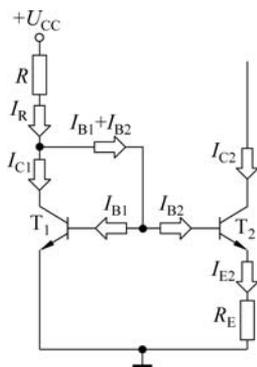


图 5.6.11 微电流源

思考与练习

- 5.6.1 你认为差动放大电路单端输出有无共模抑制功能? 说明理由。
- 5.6.2 互补输出级相对于简单共集放大器作输出级的优点是什么?
- 5.6.3 电流源电路的主要用途是什么?
- 5.6.4 放大器产生零点漂移的主要原因是什么?

5.7 场效应管放大电路

场效应晶体管简称场效应管(FET)。场效应管是利用控制输入回路的电场效应来控制输出回路电流的一种半导体器件, 并以此命名。由于它仅靠半导体中的多数载流子导电, 又称单极型晶体管。

5.7.1 场效应管的电压控制特性及其核心参数



下面以 N 沟道增强型 MOS 管(NEMOS)为例, 介绍场效应管的特点。

NEMOS 的结构及实验电路如图 5.7.1 所示。

在 P 型硅基片(称为衬底)基础上制成两个高掺杂浓度的源扩散区 N+ 和漏扩散区 N+。在金属栅极与沟道之间形成一层二氧化硅绝缘氧化层, 对外引出栅极 G。再从源扩散区和漏扩散区分别引出源极 S 和漏极 D, 从衬底引出 B 极便制

作出了 MOS 型场效应管。

可见, MOS 管由金属、氧化物和半导体等组成, 所以又称为金属-氧化物-半导体场效应管, 简称 MOS 管。

当然, MOS 管的栅极使用金属作为材料是早期的制作方法, 随着半导体技术的进步, 现代 MOS 管的栅极已用多晶硅取代了金属。

工程实践中, MOS 管的衬底(B)一般和源极 S 相连。三个与外部连接的电极, 分别为源极(S)(类似三极管的发射极)、栅极(G)(类似三极管的基极)、漏极(D)(类似三极管的集电极)。与三极管不同的是, 大多数情况下, MOS 管的源极和漏极是可以互换的。

下面结合计算机仿真来介绍 N 沟道增强型 MOS 管的电压控制特性。

计算机仿真实验电路如图 5.7.1 所示, 图中, U_{GS} 为可调电源, 可从 $-U_{DD}$ 到 $-U_{DD}$ 连续调节。电流表 XMM1 用于测量漏-源极间的电流, 电流表 XMM2 用于测量输入回路的电流。

当 U_{GS} 为 $-U_{DD}$ 时, 电流表指示为 0, 基本没有电流流过, 继续调大 U_{GS} , 电流表指示依旧为 0。当 U_{GS} 为 1V, U_{DD} 为 12V 时, Multisim 中的仿真参考效果如图 5.7.2(a) 所示。仿真结果显示, 当 U_{GS} 为 1V 时, 电流表 XMM2 的读数为 0, 电流表 XMM1 读数近似为 0。

可见, 当 U_{GS} 较小时, MOS 管截止, 漏极没有电流流过。分析如图 5.7.1 所示的实验电路, D、S 之间是两个背靠背的二极管。中间为 P, 两边为 N。当 U_{GS} 的值为负或较小时, 无法形成导电通路, 漏极没有电流流过。

继续调大 U_{GS} , 当 U_{GS} 大于某个值时, 电流表 XMM1 有明显指示, 继续调大 U_{GS} , 电流表上流过的电流相应增长, 这便是场效应管输入回路电压控制输出回路电流的控制特性。

将 U_{GS} 调为 4V, Multisim 中的仿真参考效果如图 5.7.2(b) 所示。

仿真结果显示, 当 U_{GS} 为 4V 时, 电流表 XMM2 的读数为 0。电流表 XMM1 读数为 $202.505\mu\text{A}$, 电流表有明显指示。

当 U_{GS} 加上正的电压达到一定值时, 在电动势的作用下, 改变内部载流子的分布, 在 D、S 之间形成 1 个导电通路, 场效应管导通, 因此, 电流表有明显指示。

继续调整 U_{GS} 的值, 以进一步观察 MOS 管的电压控制特性。

将 U_{GS} 调为 8V, Multisim 中的仿真参考效果如图 5.7.2(c) 所示。

仿真结果显示, 当 U_{GS} 为 8V 时, 电流表 XMM2 的读数为 0。电流表 XMM1 读数为 1mA。

将 U_{GS} 调为 10V, Multisim 中的仿真参考效果如图 5.7.2(d) 所示。仿真结果显示, 当 U_{GS} 为 10V 时, 电流表 XMM2 的读数为 0, 电流表 XMM1 读数为 1.055mA, 基本不变。

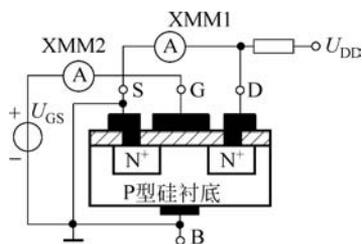


图 5.7.1 NEMOS 的结构及实电路

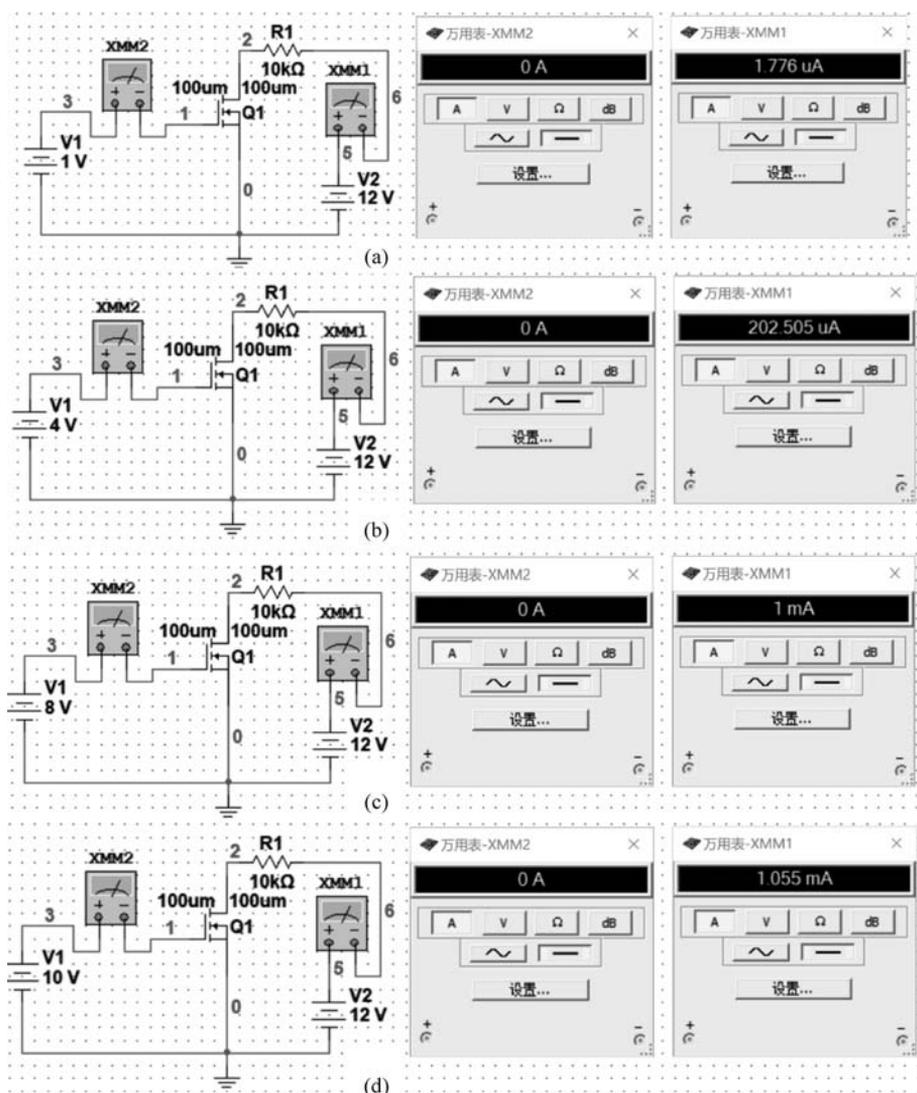


图 5.7.2 Multisim 中的仿真效果图

可见,当 U_{GS} 的值超过一定大小时, U_{GS} 增长,电流表上流过的电流基本不变。

既然半导体有N型、P型两种类型,当然也就存在P沟道增强型MOS管(PEMOS)。场效应管主要有两种类型:结型场效应管(JFET)和金属氧化物半导体场效应管(MOSFET)。MOS管又可分为耗尽型、增强型两种。场效应管的系列树如图5.7.3所示,不同类型场效应管的符号如图5.7.4所示。

由上面的仿真实验可知,场效应管的电压控制特性具体体现为输入回路电压 u_{GS} 对输出回路电流 i_D 的控制特性,常用跨导来描述场效应管的这种特性。

跨导用符号 g_m 表示,具体定义式如下:

定义:

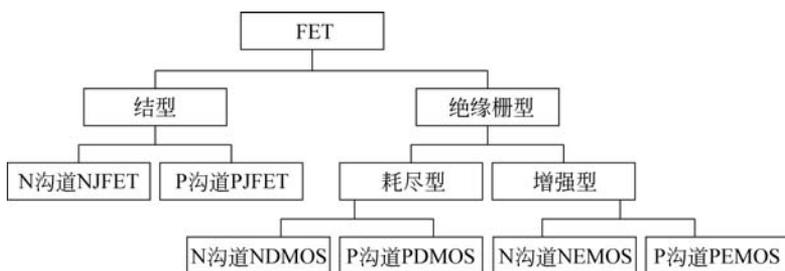


图 5.7.3 场效应管的系列树

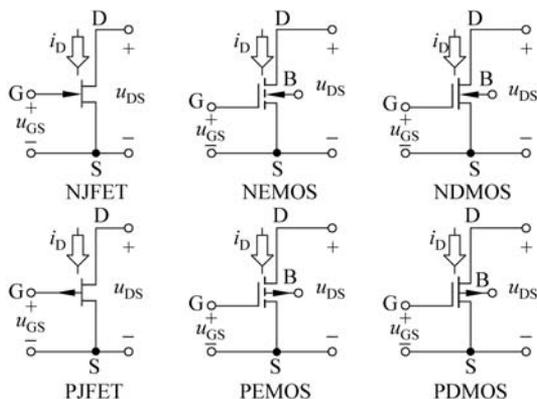


图 5.7.4 场效应管电路符号一览表

$$g_m = \left. \frac{\Delta i_D}{\Delta u_{GS}} \right|_{U_{DS}=\text{常数}} \quad (5.7.1)$$

其单位是 S(西门子)或 mS,体现了 Δu_{GS} 对 Δi_D 的控制作用,类似三极管的电流放大系数 β ,是体现场效应管放大能力的核心参数。

由上面的仿真实验可总结出增强型 MOS 管的另外两个核心参数:开启电压 $U_{GS(th)}$ 、饱和漏极电流 I_{D0} 。

开启电压 $U_{GS(th)}$ 指 u_{DS} 不变时, D、S 间形成导电通道(使 $|i_D| > 0$)所需的最小 $|u_{GS}|$ 值。

$U_{GS(th)}$ 的值为正值。正常情况下($U_{GS} = 0$),具有该参数的场效应管处于不导通状态,只有当 $U_{GS} > U_{GS(th)}$ 时,场效应管才可能导通,故称 $U_{GS(th)}$ 为开启电压。

根据前面的仿真实验,当 u_{GS} 的值超过一定大小时, u_{GS} 增长,漏极电流基本不变,这个电流便是饱和漏极电流 I_{D0} 。

对增强型 MOS 管而言,饱和漏极电流 I_{D0} 定义为 $u_{GS} = 2U_{GS(th)}$ 时的漏极电流,是计算增强型 MOS 管 Q 点的必须参数。

注意: $U_{GS(th)}$ 、 I_{D0} 是增强型 MOS 管的参数,并不是结型管和耗尽型 MOS 管的参数。结型管和耗尽型 MOS 管相对应的参数为夹断电压 $U_{GS(off)}$ 、饱和漏极电流 I_{DSS} ,有兴趣的读者请参考相关书籍进一步了解这两个参数及更多场效应管的参数。

5.7.2 场效应管的三个工作区



如图 5.7.1 所示的实验电路中,场效应管导通时 G、S 间经过绝缘栅后相互连接,输入电流 $i_G \approx 0$,输入特性显而易见。

场效应管输出特性常用输出特性曲线描述。场效应管输出特性曲线是以栅-源电压 u_{GS} 为参变量,描述漏极电流 i_D 与漏-源电压 u_{DS} 之间关系的曲线,即:

$$i_D = f(u_{DS}) \Big|_{u_{GS}=\text{常数}}$$

N 沟道增强型 MOS 管输出特性参考实例如图 5.7.5(a)所示。

转移特性曲线是以漏-源电压 u_{DS} 为参变量,描述漏极电流 i_D 与栅-源电压 u_{GS} 之间关系的曲线,即

$$i_D = f(u_{GS}) \Big|_{u_{DS}=\text{常数}}$$

在恒流区,忽略 u_{DS} 对 i_D 的影响,转移特性可近似用一条曲线来代替,N 沟道增强型 MOS 管转移特性参考实例如图 5.7.5(b)所示。

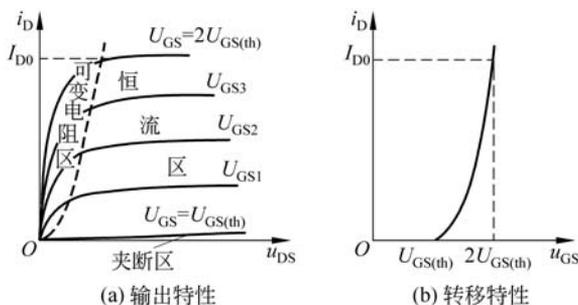


图 5.7.5 N 沟道增强型 MOS 场效应管特性

可以看出,转移特性曲线与输出特性曲线有严格的对应关系,转移特性能更好地体现栅-源电压 u_{GS} 对漏极电流 i_D 的控制作用。

转移特性也可近似用电流方程表示,增强型 MOS 管转移特性方程如下:

$$i_D = I_{D0} \left(\frac{u_{GS}}{U_{GS(th)}} - 1 \right)^2 \quad (u_{GS} > u_{GS(th)}, u_{DS} > u_{GS} - u_{GS(th)}) \quad (5.7.2)$$

场效应管具有多种类型,其电路结构和工作原理上有很大的区别,但它们的输出特性曲线却非常相似,可分为三个工作区。

1. 可变电阻区

如图 5.7.5(a)所示的虚线以左的区域为可变电阻区。可变电阻区类似三极管的饱和区。当 u_{GS} 的值超过一定大小时, u_{GS} 增长,漏极电流基本不变,输入回路电压不再具有对漏极电流的控制能力,漏极电流呈现出饱和的特点。如图 5.7.2(c)、(d)所示仿真结果显示,当 $u_{GS} = 8V$ 时,电流表 XMM1 读数为 $1mA$; 当 $u_{GS} = 10V$ 时,电流表 XMM1 读数为 $1.055mA$, i_D 几乎不随 u_{GS} 增大而变化,MOS 管工作在可变电阻区。

当然,有读者可能说,为什么 MOS 的这个工作区不叫饱和区,却叫可变电阻区呢?

因为此时,尽管 i_D 不受 u_{GS} 控制,但 i_D 受 u_{DS} 控制。当 u_{GS} 一定时, i_D 与 u_{DS} 几乎呈线性关系,斜率为 $1/R_{DS}$ ($R_{DS} = \frac{u_{DS}}{i_D} \Big|_{u_{GS}=\text{常数}}$)。

直线的斜率受 u_{GS} 控制,因此 R_{DS} 是一个受电压控制的可变电阻,可变电阻区由此得名。

2. 恒流区

如图 5.7.5(a)所示的虚线以右的大部分区域为恒流区,其特点如下。

- 当 u_{GS} 不变时, i_D 几乎不随 u_{DS} 增大而变化,体现恒流特性。
- u_{GS} 增大, i_D 增大,体现电压控制电流的特性。

可见,场效应管在恒流区是一个电压控制的电流源。当 u_{GS} 不变时,漏极电流恒定,恒流区也因此而得名。

3. 截止区

当 $u_{GS} < U_{GS(th)}$ 时, D、S 间没有导电通道, $i_D \approx 0$, 即图 5.7.5(a)中靠近横轴的区域,称为截止区。如图 5.7.2(a)所示仿真结果显示, $u_{GS} = 1V$, 小于开启电压 $U_{GS(th)}$, MOS 管不导通,漏极电流 $i_D \approx 0$, MOS 管工作在截止区。

由图 5.7.5 可知,场效应管具有与三极管相近的输出特性,其中,可变电阻区对应三极管的饱和区,恒流区对应三极管的放大区。可参考三极管的分析方法分析场效应管。

5.7.3 场效应管的模型

1. 直流模型

由于 $i_G \approx 0$, 场效应管输入端可视为开路; 转移特性反映了输入电压 u_{GS} 对输出电流 i_D 的控制作用,可用电压控电流源等效表示,这样构成场效应管直流电路模型如图 5.7.6 所示,其中受控源 $I_D(U_{GS})$ 由式(5.7.2)表示。

2. 小信号模型

场效应管小信号电路模型如图 5.7.7 所示。输入开路是对 $i_G \approx 0$ 的等效; 受控电流源是对转移特性的等效, g_m 是转移特性工作点上切线的斜率,反映了在工作点附近小范围内,通过切线对曲线的逼近描述小信号 Δu_{GS} 对 Δi_D 的控制作用。

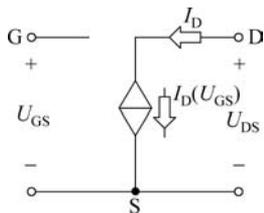


图 5.7.6 直流模型

根据定义 $g_m = \left. \frac{\Delta i_D}{\Delta u_{GS}} \right|_{U_{DS} = \text{常数}}$, 可从转移特性曲线求出 g_m , 如图 5.7.8(a) 所示; 对电流方程求导, 得到 g_m 的表达式为

$$g_m = \frac{2}{U_{GS(th)}} \sqrt{I_{D0} I_{DQ}} \quad (\text{NEMOS}) \quad (5.7.3)$$

输出电阻 r_{ds} 反映了 Δu_{DS} 和 Δi_D 的关系, 可由输出特性图 5.7.8(b) 求得(也可用 $r_{ds} = 100/I_{DQ}$ 近似估算)

$$r_{ds} = \left. \frac{\Delta u_{DS}}{\Delta i_D} \right|_{U_{GS}}$$

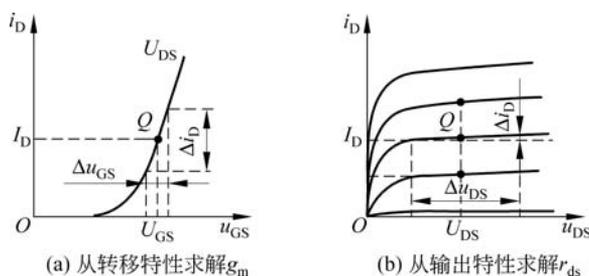


图 5.7.8 利用特性曲线求模型参数

r_{ds} 约为几十千欧到几百千欧, 一般忽略不计。在近似分析中常用简化小信号模型如图 5.7.9 所示。

场效应管电路的分析与三极管电路非常类似。在直流通路中, 利用场效应管直流模型(转移特性方程), 可以进行直流分析; 在交流通路中, 将场效应管小信号电路模型代替场效应管, 可以进行交流分析。场效应管的符号特性及简化分析模型列表如表 5.7.1 所示。

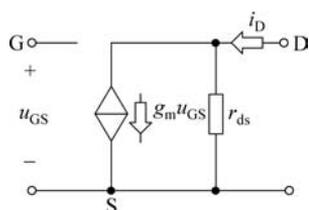


图 5.7.7 小信号模型

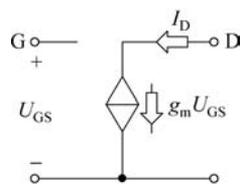
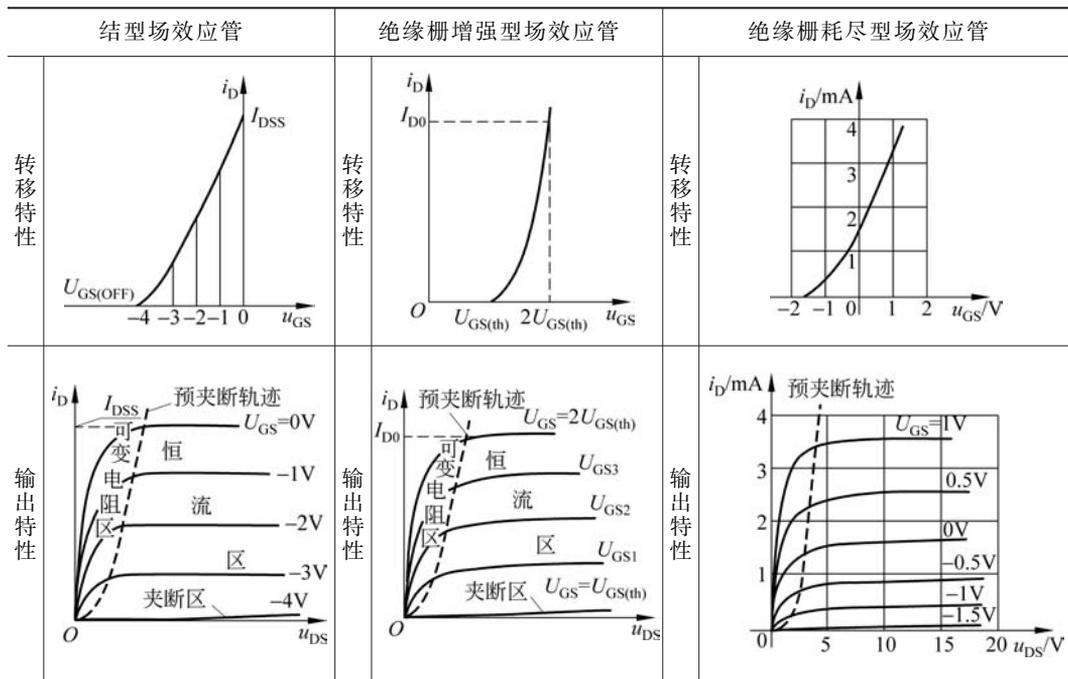


图 5.7.9 简化小信号模型

表 5.7.1 场效应管的符号、特性及简化分析模型

	结型场效应管	绝缘栅增强型场效应管	绝缘栅耗尽型场效应管
符号			

续表



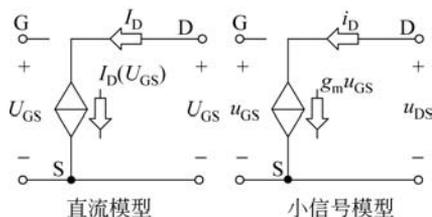
以 N 沟道场效应管为参考

$$g_m = \frac{2}{U_{GS(th)}} \sqrt{I_{D0} I_{DQ}} \quad i_D = I_{D0} \left(\frac{u_{GS}}{U_{GS(th)}} - 1 \right)^2$$

上面公式用于增强型场效应管分析

$$i_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{u_{GS}}{U_{GS(off)}} \right)^2$$

$$g_m = \frac{-2}{U_{GS(off)}} \sqrt{I_{DSS} I_{DQ}} \quad (\text{结型、耗尽型})$$



5.7.4 分压式偏置共源放大器

场效应管(FET)是利用栅极电压控制漏极电流的器件,利用 u_{GS} 对 i_D 的控制作用,可以构成放大器。场效应管的漏极 D、栅极 G、源极 S 分别与三极管的集电极 C、基极 B、发射极 E 相对应,所以两者的放大器也类似,场效应管放大器也有三种基本接法,即共源放大器、共漏放大器和共栅放大器。

三极管放大器要保证放大管工作在放大区,必须设置合适的静态工作点。同样,场效应管放大器要保证放大管工作在恒流区,也必须设置合适的静态工作点。

图 5.7.10 所示电路为 N 沟道增强型 MOS 管构成的分压式偏置共源放大器。它与典型共射放大器非常类似,通过 R_{G1} 、 R_{G2} 对 U_{DD} 分压来设置静态工作点,故称为分压式偏置电路。

1. 直流分析

从图 5.7.10 所示原理电路容易看出其直流通路。由于 $I_G = 0$, 所以电阻 R_{G3} 不产生电压降, 即 $U_{RG3} = 0$, 栅极电位

$$U_{GQ} = \frac{R_{G1}}{R_{G1} + R_{G2}} U_{DD} \quad (5.7.4)$$

源极电位

$$U_{SQ} = I_{DQ} R_S \quad (5.7.5)$$

因此, 栅-源电压

$$U_{GSQ} = U_{GQ} - U_{SQ} = \frac{R_{G1}}{R_{G1} + R_{G2}} U_{DD} - I_{DQ} R_S \quad (5.7.6)$$

又假设场效应管工作在恒流区, 由式(5.7.2), 在直流时

$$I_{DQ} = I_{D0} \left(\frac{u_{GSQ}}{U_{GS(th)}} - 1 \right)^2 \quad (5.7.7)$$

式(5.7.6)与式(5.7.7)联立可求得 I_{DQ} 和 U_{GSQ} 。根据输出回路列方程, 可得到

$$U_{DSQ} = U_{DD} - I_{DQ} (R_D + R_S) \quad (5.7.8)$$

2. 交流分析

画出放大器的交流通路如图 5.7.11(a)所示, 场效应管再用其简化小信号电路模型替代, 得到放大器的小信号等效电路如图 5.7.11(b)所示。

根据电路

$$R_i = R_{G3} + R_{G1} // R_{G2} \quad (5.7.9)$$

$$R_o = R_D \quad (5.7.10)$$

$$\begin{aligned} A_u &= \frac{u_o}{u_i} = \frac{-i_d (R_D // R_L)}{u_{gS}} = \frac{-g_m u_{gS} (R_D // R_L)}{u_{gS}} \\ &= -g_m (R_D // R_L) \end{aligned} \quad (5.7.11)$$

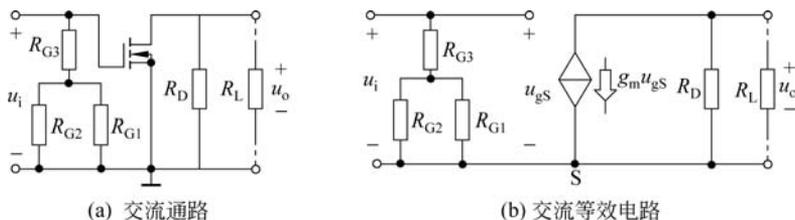


图 5.7.11 放大器的交流通路及其等效电路

从上面的分析看到, 共源放大器与共射放大器非常类似, 都具有电压放大的能力, 且输出波形与输入波形反相。只是场效应管的输入电流近似为零, 管子的输入电阻近似为无穷大, 所以放大器的输入电阻取决于偏置电阻。因此偏置电阻 R_G 等应选择得大一些,

这也是为什么在分压式偏置中要引入 R_{G3} 的理由。只要选择大的偏置电阻, 共源放大器的输入电阻将比共射放大器大得多。

【例 5.7.1】 已知图 5.7.10 所示电路中, $U_{DD}=12\text{V}$, $R_D=10\text{k}\Omega$, $R_S=5\text{k}\Omega$, $R_{G1}=200\text{k}\Omega$, $R_{G2}=200\text{k}\Omega$, $R_{G3}=1\text{M}\Omega$, $R_L=10\text{k}\Omega$ 。所用的场效应管为 N 沟道增强型, 其参数 $I_{D0}=1\text{mA}$, $U_{GS(th)}=2\text{V}$ 。试求: (1) 静态值; (2) 电压放大倍数、输入电阻、输出电阻。

解:

(1) 由直流通路求 U_{GSQ} 、 I_{DQ} 、 U_{DSQ} 。

由式(5.7.6), 式(5.7.7)

$$U_{GSQ} = U_{GQ} - U_{SQ} = \frac{R_{G1}}{R_{G1} + R_{G2}} U_{DD} - I_{DQ} R_S = \frac{200}{200 + 200} \times 12 - I_{DQ} \times 5$$

$$I_{DQ} = 1 \times \left(\frac{U_{GSQ}}{2} - 1 \right)^2$$

联立求解

$$I_{DQ1} \approx 0.5\text{mA}, \quad I_{DQ2} \approx 1.25\text{mA}$$

$$U_{GSQ1} = 3.5\text{V}, \quad U_{GSQ2} = -0.25\text{V}$$

根据 N 沟道增强型 MOS 管工作在恒流区的条件, 可以确定 $I_{DQ}=0.5\text{mA}$ 、 $U_{GSQ}=3.5\text{V}$ 为真解。由式(5.7.8)得

$$U_{DSQ} = U_{DD} - I_{DQ}(R_D + R_S) = 12 - 0.5 \times (10 + 5) = 4.5\text{V}$$

(2) 由交流通路求 A_u 。

当 $I_{DQ}=0.5\text{mA}$ 时, 可由式(5.7.3)确定管子模型参数 g_m ,

$$g_m = \frac{2}{U_{GS(th)}} \sqrt{I_{D0} I_{DQ}} = \frac{2}{2} \times \sqrt{1 \times 0.5} = 0.707\text{mA/V}$$

由式(5.7.11)得

$$A_u = -g_m (R_D // R_L) = -0.707 \times 10 // 10 \approx 3.5$$

由式(5.7.9)得

$$R_i = R_{G3} + R_{G1} // R_{G2} = 1 + 0.1 = 1.1\text{M}\Omega$$

由式(5.7.10)得

$$R_o = R_D = 10\text{k}\Omega$$

可以看到, 场效应管放大器的输入电阻大, 但放大能力比三极管放大器差。

思考与练习

5.7.1 能否用场效应管实现电流源?

习题

5.1 填空题

1. 导电能力介于导体和绝缘体之间的物质称为_____, 纯净的具有单晶体结构的

半导体称为_____。

2. 常温下,本征半导体中的少量价电子可能获得足够的能量,摆脱共价键的束缚,成为自由电子,这种现象称为_____,并使本征半导体具有_____。

3. 在本征半导体中掺入微量的_____,就成为杂质半导体,其_____将大大增强,可分为_____和_____两种类型。

4. 若对一块半导体采用不同的掺杂工艺,使其一侧成为_____,而另一侧成为_____,则将在交界面两侧将形成了一个由不能移动的正、负离子组成的空间电荷区,也就是_____。

5. 二极管具有_____,_____导通,_____截止。

6. 晶闸管不是二极管,是一种大功率的_____半导体器件,晶闸管的出现,使半导体器件从_____领域进入了_____领域。

7. 三极管工作在放大区的条件是_____正偏,_____反偏,而当三极管进入饱和区时,三极管发射结和集电结都处于_____。

8. 三极管电路在只有直流电源供电时,三极管各极的电压和电流值_____,反映在三极管特性曲线上是对应的一个点,称为_____,记为_____。要使三极管工作在放大区,首先应合理设置_____。

9. _____是衡量放大器向信号源获取信号能力的指标,而_____是衡量放大器带负载能力的指标。

10. 共集放大器又称为_____,是三种基本组态中_____最大、_____最小的电路,多用作_____。

11. 放大器级与级之间通过电容连接,称为_____,不适合放大_____的信号,只适用于_____的交流放大器;而放大器级与级之间采用_____相连则需要对前后级之间的_____进行配置。

12. 场效应管有_____,_____两大类,前者有_____,_____两种;后者又分_____和_____两种类别。

13. 场效应管为_____,具有_____大、_____低、噪声低、热稳定性好、抗辐射能力强等突出优点,但其_____比晶体管差。

5.2 分析计算题(基础部分)

1. 在如图 5.1 所示电路中,已知 $u_i = 10\sin(100\omega t)(V)$, $R = 2k\Omega$, 分别画出下列两种情况下 u_o 的波形。

(1) 二极管视为理想二极管。

(2) 二极管的导通电压 $U_D = 0.7V$ 。

2. 在图 5.2 所示电路中,当电源 $U = 5V$ 时,测得 $I = 1mA$ 。若把电源电压调整到 $U = 10V$, 则电流是等于 $2mA$ 、大于 $2mA$ 还是小于 $2mA$?

3. 设硅稳压管 D_{Z1} 和 D_{Z2} 的稳定电压为 $5V$ 和 $10V$, 已知稳压管的正向压降为 $0.7V$, 求如图 5.3 所示电路的输出电压 u_o 。

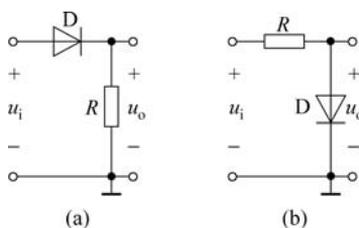


图 5.1 习题 5.2.1 的图

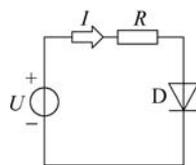


图 5.2 习题 5.2.2 的图

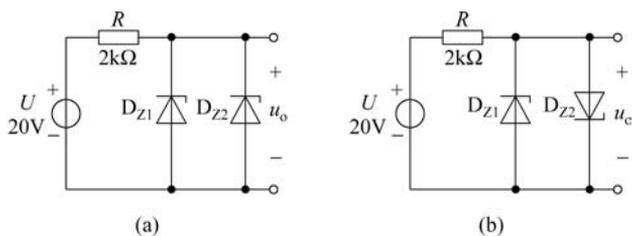


图 5.3 习题 5.2.3 的图

4. 在三极管放大器中,测得几个三极管的各电极电位分别为下列各组数值,判断它们的类型,并确定 E,B,C。

- (1) $U_1=2\text{V}, U_2=2.7\text{V}, U_3=6\text{V}$
- (2) $U_1=2.8\text{V}, U_2=3\text{V}, U_3=6\text{V}$
- (3) $U_1=2\text{V}, U_2=5.8\text{V}, U_3=6\text{V}$
- (4) $U_1=2\text{V}, U_2=5.3\text{V}, U_3=6\text{V}$

5. 试分析图 5.4 所示电路能否实现放大,并说明理由。

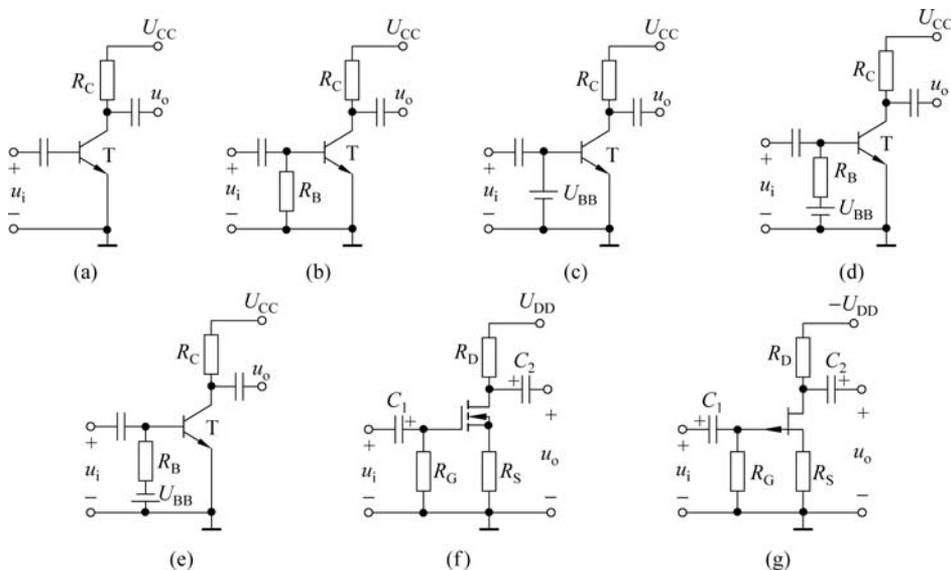


图 5.4 习题 5.2.5 的图

6. 用万用表直流电压挡测得电路中三极管各电极的对地电位如图 5.5 所示,试判断这些三极管的工作状态。

7. 在图 5.6 所示电路中,已知 $\beta \gg 1, U_{BE(ON)} = 0.7V$, 试求 I_C, U_{CE} 的值。

8. 如图 5.7 所示电路中,已知 $\beta = 100, U_{BE(ON)} = 0.7V$ 。

(1) 试估算 I_C, U_{CE} 的值,并说明三极管的工作状态。

(2) 若 R_2 开路,再计算 I_C, U_{CE} 的值,并说明此时三极管的工作状态。

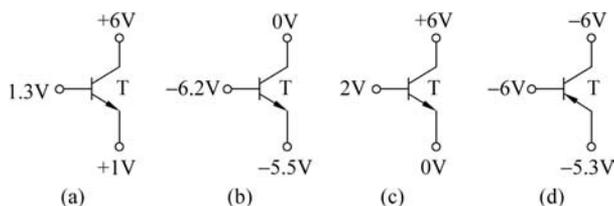


图 5.5 习题 5.2 6 的图

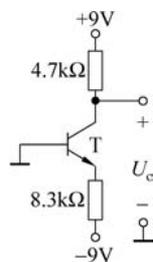


图 5.6 习题 5.2 7 的图

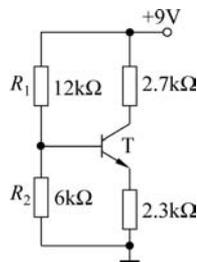


图 5.7 习题 5.2 8 的图

9. 几个场效应管的转移特性如图 5.8 所示,判断它们的类型。

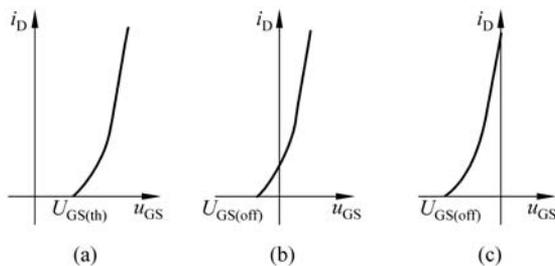


图 5.8 习题 5.2 9 的图

10. 判别图 5.9 所示各特性曲线分别代表的管子的类型。

11. 图 5.10 所示电路中,场效应管的 $r_{ds} \gg R_D$ 。

(1) 写出 A_u, R_i, R_o 的表达式。

(2) 若 C_S 开路, A_u, R_i, R_o 如何变化? 写出变化后的表达式。

12. 在如图 5.11 所示电路中,设 $U_{CC} = 12V, R_B = 50k\Omega, R_C = 3k\Omega$, 三极管的 $\beta = 50$, 管子导通时的 $U_{BE(ON)} = 0.7V$ 。

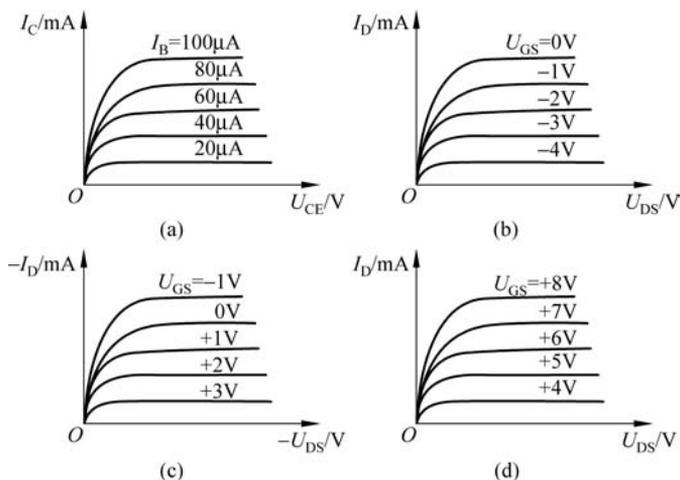


图 5.9 习题 5.2 10 的图

- (1) 判断该电路的静态工作点位于哪个区域。
- (2) 若 $R_B = 50\text{k}\Omega$ 不变, 为使电路能正常放大, R_C 的数值最大不能超过多大。
- (3) 若 $R_C = 3\text{k}\Omega$ 不变, 为使用电路能正常放大, R_B 至少应有多大。

13. 在如图 5.11 所示电路中, 已知, $R_B = 470\text{k}\Omega$, $R_C = 2\text{k}\Omega$, 且 $I_{CQ} = 1\text{mA}$, $U_{CEQ} = 7\text{V}$, $U_{BEQ} = 0.7\text{V}$, $\beta = 50$, 下列三种计算电压增益的方法是否正确? 为什么?

$$(1) A_u = \frac{U_o}{U_i} = \frac{U_{CEQ}}{U_{BEQ}} = \frac{7}{0.7} = 10$$

$$(2) A_u = \frac{U_o}{U_i} = \frac{-I_{CQ}R_C}{U_{BEQ}} = -\frac{1 \times 2}{0.7} \approx -3$$

$$(3) A_u = \frac{U_o}{U_i} = -\frac{i_c R_C}{i_b R_i} = -\beta \frac{R_C}{R_B // r_{be}} \approx -\frac{50 \times 2}{1.6} = -62.5$$

14. 在图 5.11 所示电路中, 若 $U_{CC} = 6\text{V}$, $R_B = 260\text{k}\Omega$, $R_C = 3\text{k}\Omega$, 三极管参数不变, 试在下面两种情况下计算电路中电压增益 A_u 。

- (1) 负载开路。
- (2) $R_L = 3\text{k}\Omega$ 。

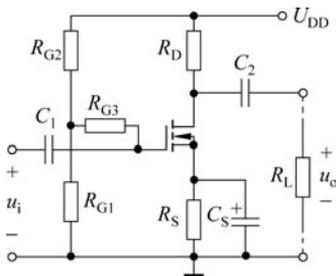


图 5.10 习题 5.2 11 的图

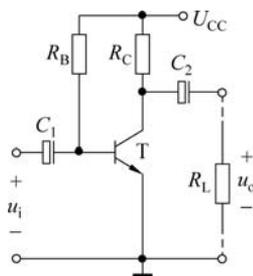


图 5.11 习题 5.2 12、13、14 的图

5.3 分析计算题(提高部分)

1. 在如图 5.12 所示电路中,二极管 D 的正向压降可忽略不计,反向饱和电流为 $10\mu\text{A}$,反向击穿电压为 20V ,且击穿后基本不随电流而变化,已知 $R=1\text{k}\Omega$,当 U 分别为 10V 、 30V 时,求电路中的电流 I 。

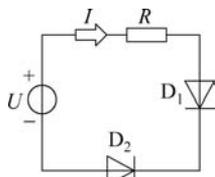


图 5.12 习题 5.3 1 的图

2. 在如图 5.13 所示的电路中,已知 $U_{CC}=12\text{V}$, $\beta=100$, $r_{be}=300\Omega$, $R_B=45\text{k}\Omega$, $R_C=R_S=3\text{k}\Omega$,请分别计算 $R_L=\infty$ 和 $R_L=3\text{k}\Omega$ 时的 Q 点 (I_{CQ} , U_{CEQ})、 A_u 、 A_{uS} 、 R_i 和 R_o 。

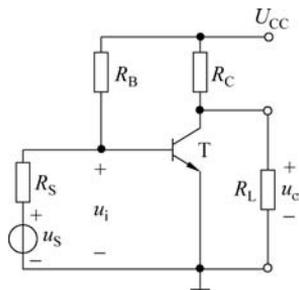


图 5.13 习题 5.3 2 的图

3. 电路如图 5.14 所示,已知三极管的 $\beta=60$, $R_B=300\text{k}\Omega$, $R_C=R_L=3\text{k}\Omega$, $R_E=1\text{k}\Omega$, $R_S=3\text{k}\Omega$, $U_{CC}=12\text{V}$,请求解下面的问题。

- (1) 求静态工作点 I_{CQ} 、 U_{CEQ} 。
- (2) 求 A_u 、 R_i 、 R_o 。
- (3) 设 $U_S=5\text{mV}$ (有效值),问 $U_i=?$ $U_o=?$
若 C_E 开路,则 $U_i=?$ $U_o=?$

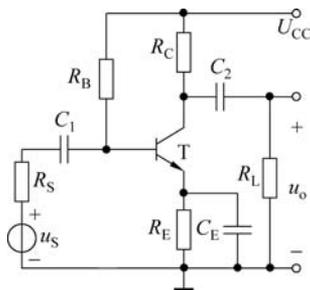


图 5.14 习题 5.3 3 的图

4. 电路如图 5.15 所示,已知三极管 $\beta=50$, $U_{BE(ON)}=0.7\text{V}$, $R_{B1}=510\text{k}\Omega$, $R_L=3\text{k}\Omega$, $R_E=10\text{k}\Omega$, $U_{CC}=12\text{V}$ 。试求出 I_{CQ} 、 U_{CEQ} 、 A_u 、 R_i 和 R_o 的值。

5. 在如图 5.16 所示电路中,已知静态时 $U_{C1Q}=U_{C2Q}=10\text{V}$ 。

- (1) 设 $A_d=-100$, $A_c=0$, $u_{i1}=10\text{mV}$, $u_{i2}=5\text{mV}$,求输出电压 u_o 的值。
- (2) 设 $A_d=-10\left(\frac{u_o}{u_{i1}-u_{i2}}\right)$, $A_{c1}=A_{c2}=-0.1$ (单端输出) $U_{i1}=0.99\text{V}$ 、 $U_{i2}=1.01\text{V}$,求 T_1 、 T_2 集电极对地电位 U_{C1} 、 U_{C2} 的值。

6. 设如图 5.17 所示电路参数理想对称, $\beta_1=\beta_2=\beta$, $r_{be1}=r_{be2}=r_{be}$,且 R_W 的滑动端在中点处,试写出:

- (1) I_{C1Q} 、 U_{C1Q} 的表达式。
- (2) A_d 的表达式。

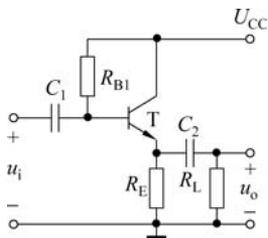


图 5.15 习题 5.3.4 的图

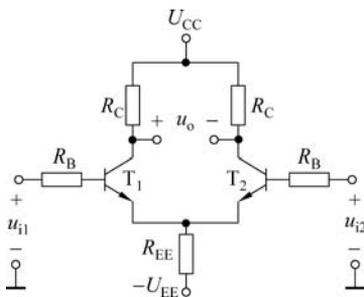


图 5.16 习题 5.3.5 的图

7. 如图 5.18 所示电路参数理想对称,三极管的 $\beta_1 = \beta_2 = 100$, $U_{BE(ON)} = 0.7V$, 电流源电流 $I = 1mA$, $R_C = 12k\Omega$, $R_W = 100\Omega$, $U_{CC} = U_{EE} = 12V$ 。当 R_W 滑动在中央时,求

- (1) T_1 、 T_2 射极电流 I_{E1Q} 、 I_{E2Q} ;
- (2) 双端输出的差模电增益 A_d ;
- (3) 电路的输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o 。

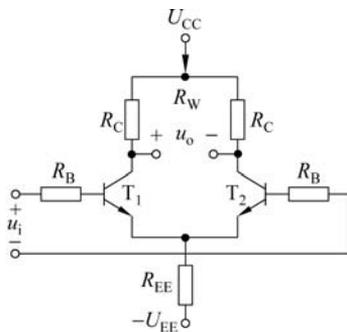


图 5.17 习题 5.3.6 的图

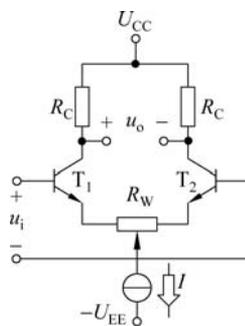


图 5.18 习题 5.3.7 的图

8. 如图 5.19 所示电路中 T_1 、 T_2 的参数完全相同, β 足够大。

- (1) T_1 、 T_2 和 R_1 组成什么电路?
- (2) I_{C2} 与 I_R 有什么关系? 写出 I_{C2} 的表达式。

9. 计算如图 5.20 所示电路 R_E 的值, 设三极管的 β 均相等且很大, $U_{BE(ON)} = 0.7V$, $U_T = 26mV$, $R = 9.3k\Omega$, $I_{C2} = 10\mu A$, $U_{CC} = 10V$ 。

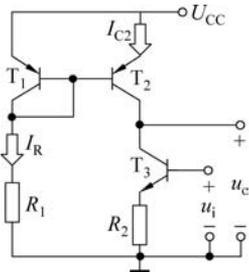


图 5.19 习题 5.3.8 的图

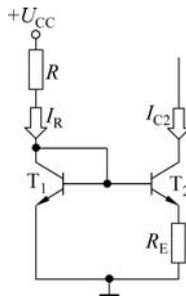


图 5.20 习题 5.3.9 的图

5.4 应用题

1. 某放大器在负载开路时的输出电压为 6V, 接入 $2\text{k}\Omega$ 的负载电阻后输出电压降为 4V, 试说明放大器的输出电阻为多少。
2. 有两个放大倍数相同、输入和输出电阻不同的放大器 A 和 B, 对同一个具有内阻的信号源电压进行放大, 在负载开路的条件下测得 A 的输出电压大, 这说明了什么问题?
3. 写出测试单管放大器电压增益 A_u 所需的仪器, 并在图 5.21 上。画出其连线图。各仪器可用方框表示。
4. 判断如图 5.22 所示电路能否对正弦电压进行线性放大。如不能, 则指出错在哪里, 并进行改正。要求不减元件, 且电压增益绝对值要大于 1, U_o 无直流成分。



图 5.21 习题 5.4.3 的图

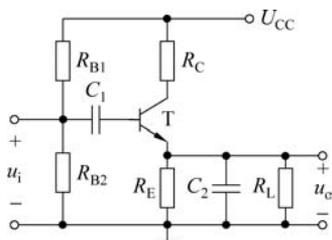


图 5.22 习题 5.4.4 的图

5. 在如图 5.23 所示电路中, 由于电路参数不同, 在信号源电压为正弦波时, 测得输出波形如图 5.23 所示。试说明各分图中电路分别产生了什么失真, 如何消除。
6. 分析如图 5.24 所示电路, 试回答:
 - (1) 静态时, 负载中 R_L 中的电流应为多少?
 - (2) 若输出电压波形出现交越失真, 应调哪个电阻? 如何调整?

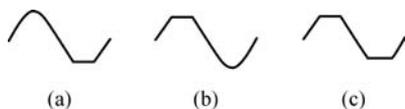


图 5.23 习题 5.4.5 的图

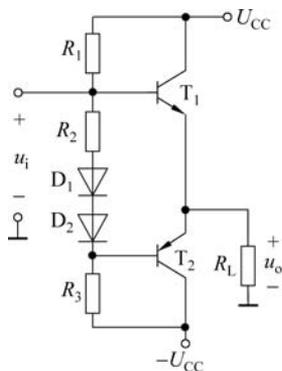


图 5.24 习题 5.4.6 的图