



教育部
高等职业教育
示范专业
规划教材

教育部
高等职业教育示范专业规划教材
(电气工程及自动化类专业)

模拟电子技术

主编 刘吉来



教育部高等职业教育示范专业规划教材
(电气工程及自动化类专业)

模 拟 电 子 技 术

主 编 刘吉来

副主编 吉武庆

参 编 徐咏梅

吴南星

主 审 周良权

齐伟民

张国勤



机 械 工 业 出 版 社

本教材为高职高专规划教材。全书共分8章,内容包括晶体三极管放大电路的构成原理、性能特征以及实际设计使用方法及问题处理,场效应晶体管、功率放大器、集成运算放大器的组成及特征、主要性能指标、使用方法和保护措施、以及常用的功放电路实例,提供信号源的各种振荡电路的结构、工作原理及实用电路,稳压电源的基本知识、单元组成电路、以及实用稳压电源,电子电路使用中经常遇到的各种电子噪声源、传输路线及抗噪声干扰的基本方法,以及构成电子电路的主要阻容元件的种类、选择和使用方法等等。

本教材为高职高专电类专业模拟电子技术课程的教材,也适用于高等院校成人教育等教学用书,同时也可供工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术/刘吉来主编. —北京:机械工业出版社, 2005.8

教育部高等职业教育示范专业规划教材

ISBN 7-111-16917-4

I. 模... II. 刘... III. 模拟电路—电子技术—高等学校:技术学校—教材 IV. TN710

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第078400号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:于宁 版式设计:冉晓华 责任校对:刘志文

封面设计:鞠杨 责任印制:石冉

北京中兴印刷有限公司印刷

2005年8月第1版第1次印刷

787mm×1092mm $\frac{1}{16}$ ·10.75印张·265千字

定价:17.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010) 68326294

封面无防伪标均为盗版

前言

本教材是教育部高等职业教育示范专业规划教材之一。本教材与高职高专学生的基础素质以及学校培养目标、知识和能力结构相适应,淡化理论推导、注重实践技能,编写中摒弃陈旧知识,介绍目前使用的成熟技术和器件,突出了应用性和实践技能的培养。

本教材本着培养基层工程技术应用型人才的人才培养理念,注意对学生工程实际技能的培养,教材内容注重对实际应用电路的介绍,简化了理论推导,增加了实际应用中有噪声及处理、元器件选用方法等新内容,使本教材在满足专业基础课程教学的同时又具有可以直接运用到生产实践中的实用性。

本教材共分8章,第1章和第7章由浙江水利水电专科学校刘吉来编写;第2章由陕西工业职业技术学院吉武庆编写;第3章和第8章由浙江工商职业技术学院徐咏梅编写;第4章由漯河职业技术学院齐伟民编写;第5章由四川机电职业技术学院张国勤编写;第6章由安徽机电职业技术学院吴南星编写。本教材由刘吉来任主编,吉武庆任副主编。

本教材由周良权教授主审,他对书稿进行了认真的审阅,并提出许多宝贵意见,在此表示衷心的感谢!

由于编者水平和时间有限,书中难免有不妥之处,诚恳希望读者指正。

编者

目 录

前言	本章小结	101
第1章 晶体管放大电路	练习题	101
1.1 半导体二极管	第5章 正弦波振荡电路	107
1.2 晶体三极管及放大电路的基本概念	5.1 振荡条件	107
1.3 放大电路的构成	5.2 振荡的建立	108
1.4 射极输出器	5.3 LC 正弦波振荡电路	112
1.5 多级放大电路	5.4 石英晶体振荡电路	116
1.6 负反馈放大器	5.5 振荡电路的应用实例	118
本章小结	本章小结	119
练习题	练习题	119
第2章 场效应晶体管	第6章 电源电路	121
2.1 结型场效应晶体管	6.1 整流与滤波	121
2.2 绝缘栅型场效应晶体管	6.2 可控整流电路	128
2.3 场效应晶体管的基本电路	6.3 线性集成稳压器	139
本章小结	6.4 开关型稳压电源	146
练习题	本章小结	148
第3章 功率放大器	练习题	149
3.1 功率放大器的特点和种类	第7章 噪声与干扰	152
3.2 互补推挽功率放大器	7.1 噪声与干扰的来源	152
3.3 其他类型推挽功率放大器	7.2 噪声和干扰的传输途径	154
3.4 功率放大器的保护电路	7.3 噪声和干扰的抑制方法	155
3.5 功率放大器应用实例	本章小结	158
本章小结	练习题	158
练习题	*第8章 常用阻容元件的选用方法	159
第4章 集成运算放大器	8.1 电阻器	159
4.1 差动放大电路	8.2 电容器	162
4.2 集成运算放大器的组成及特征	8.3 电感器	163
4.3 集成运算放大器的应用	8.4 印制电路板	164
4.4 实际集成运放电路的误差分析	8.5 电线、电缆	166
4.5 集成运算放大器应用实例	参考文献	168

第 1 章 晶体管放大电路

放大电路是模拟电路的基础，所以掌握放大电路是掌握模拟电路的捷径。本章首先从放大电路的基本概念出发，介绍放大电路的构成、工作原理、基本组态形式，以及设计放大电路的基本方法。

1.1 半导体二极管

1.1.1 半导体二极管

物质根据其导电性能可分为导体、绝缘体和半导体。而在半导体材料中，有这样一些具有独特导电性能的材料，如四价元素硅和锗，它有两种载流子“自由电子”和“空穴”参与导电，并且其导电性能受温度、电场、微量掺杂元素等的影响后会发生较大变化。

在纯净半导体中掺入微量三价元素后，会形成以空穴为主要导电载流子的空穴型半导体，称为 P 型半导体；在纯净半导体中掺入微量五价元素后，会形成以自由电子为主要导电载流子的电子型半导体，称为 N 型半导体。

如果采用适当工艺把 P 型半导体和 N 型半导体做在同一基片上，如图 1-1 所示，则会形成具有单向导电性能的 PN 结，即 PN 结加正向电压时（称为正向偏置），外加电场和内电场方向相反，PN 结变薄，正向电阻很小，PN 结导通，可以形成较大的正向电流；而 PN 结加反向电压时（称为反向偏置），外加电压和内电场方向相同，PN 结变厚，反向电阻很大，PN 结截止，反向电流基本为零。利用 PN 结的单向导电性，可做成晶体二极管及稳压管。

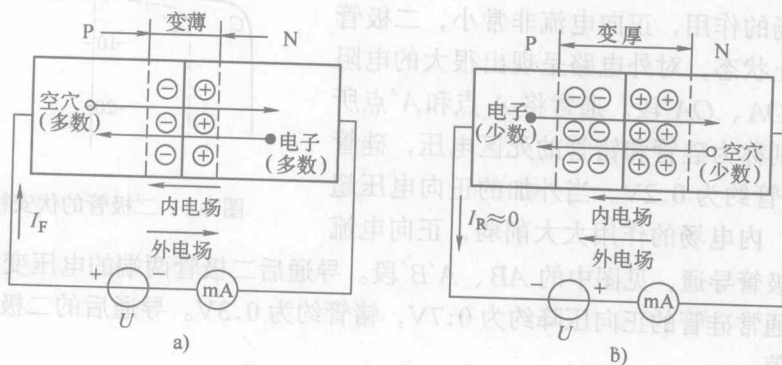


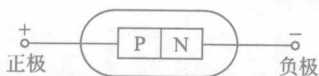
图 1-1 PN 结单向导电性

1. 二极管的结构、外形、分类与符号

半导体二极管的结构很简单，用一个 PN 结做成管芯，在 P 型区和 N 型区两侧各接上电极引线，再用管壳封装即可，如图 1-2a 所示。其中从 P 区接出的引线称正极，N 区接出

的引线为负极，分别用符号“+”和“-”表示。

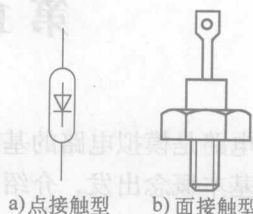
点接触型和面接触型二极管的外形见图 1-3 所示。



a) 结构



b) 符号



a) 点接触型

b) 面接触型

图 1-2 二极管的结构

图 1-3 晶体二极管的外形

按材料的不同，二极管分为锗管和硅管两大类型；按结构又有点接触型和面接触型之分；按用途不同，二极管还可以分为整流、检波、稳压、变容、开关、光电、发光二极管等若干种类。

常用普通二极管（如整流二极管、检波二极管）的电路符号如图 1-2b 所示，三角形一侧为正极，另一侧为负极，箭头表示正向电流流动方向。

很显然，二极管具有单向导电的特性，正是由于这种特性，使得二极管有了重要的用途。

2. 二极管的伏安特性

二极管的伏安特性是指通过二极管的电流与其两端电压之间的关系。虽然二极管的种类较多，但它们的伏安特性都具有相似性。可以用晶体管特性图示仪测出二极管的伏安特性曲线，典型的二极管伏安特性如图 1-4 所示。图中实线为硅二极管的特性，虚线为锗二极管的特性。第一象限中反映的是正向特性曲线，反向特性曲线示于第三象限。

(1) 正向特性 正向特性是指二极管外加正向电压，即外电源的正极接二极管的正极，负极接二极管的负极时的特性。当正向电压较小时，外电场不足以克服内电场的作用，正向电流非常小，二极管基本上处于截止状态，对外电路呈现出很大的电阻值，如图中的 OA 、 OA' 段。通常将 A 点和 A' 点所对应的电压分别称为硅管和锗管的死区电压，硅管约为 0.5V ，锗管约为 0.2V 。当外加的正向电压超过死区电压时，内电场的作用大大削弱，正向电流迅速增长，二极管导通，见图中的 AB 、 $A'B'$ 段。导通后二极管两端的电压变化很小，基本上是个常数。通常硅管的正向压降约为 0.7V ，锗管约为 0.3V 。导通后的二极管对外电路呈现很小的电阻值。

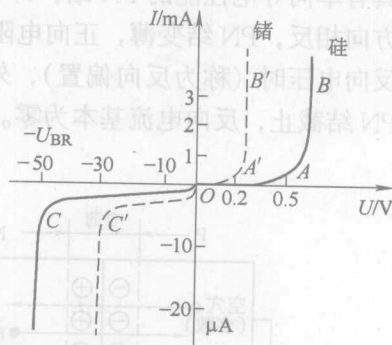


图 1-4 二极管的伏安特性曲线

(2) 反向特性 反向特性是指二极管外加反向电压，即外电源的正极接二极管的负极，负极接二极管的正极时的特性。见图中 OC 、 OC' 段，它表示二极管的反向电压在一定范围内，反向电流非常小并且基本上不随反向电压变化；此时管子处于反向截止状态，呈现很大的电阻，所以反向电流又称为反向饱和电流，用 I_R 表示。

反向电流大,说明二极管的反向特性差,一般小功率硅管的反向电流常小于 $1\mu\text{A}$,锗管则可达几十微安,大功率管将更大些。应当指出,反向饱和电流受温度的影响很大。

当外加反向电压增大到一定值时,反向电流突然增大,称之为反向击穿,如图 1-4 中的 C、C' 点所示, C、C' 点对应的电压分别称为硅管、锗管的反向击穿电压,用 U_{BR} 表示。反向击穿时,若不限制反向电流,二极管的 PN 结会因功耗太大而烧坏,从而失去单向导电特性。

从以上分析可以知道,二极管实际上就是一个 PN 结,具有单向导电性,是一种非线性器件。

3. 二极管的主要参数

为了使二极管在电路中能够安全可靠地工作,在选用时必须充分注意它的参数。

(1) 最大整流电流 I_{F} I_{F} 是指二极管长期运行时允许流过的最大正向平均电流,其大小由 PN 结的面积和散热条件决定。如果在实际运用过程中通过二极管的平均电流超过 I_{F} ,则二极管将发热并可能烧坏管子。因此在选用二极管时,管子的 I_{F} 必须大于电路中的实际平均工作电流,并且要注意满足散热条件。

(2) 最高反向工作电压 U_{RM} U_{RM} 是指二极管在使用时允许承受的最高反向电压。为了避免反向击穿,通常取二极管反向击穿电压 U_{BR} 的一半作为 U_{RM} 。在选用二极管时,所加的反向电压峰值不应超过这个数值。

(3) 反向电流 I_{R} (或反向饱和电流 I_{S}) I_{R} 是指在室温和 U_{RM} 条件下的反向电流。该电流数值越小,管子的单向导电性越好。

(4) 最高工作频率 f_{M} 该参数决定于二极管 PN 结的结电容大小。使用时信号频率不能超过 f_{M} ,否则管子的单向导电性能将下降。

二极管的用途很多,例如作检波、温度补偿、门电路、整流等等。在电源电路中,主要作为整流用,作整流用的二极管称为整流二极管。

4. 特殊二极管

除了上述普通二极管外,还有若干种特殊的二极管,如发光二极管、光电二极管、变容二极管、稳压二极管等,它们具有特殊的功能,在某些电路中也得到广泛的应用。

(1) 发光二极管 发光二极管是一种常见的二极管。当它被正向导通且电流达到一定值时,二极管能发光。光的颜色由所用的材料决定,有红色、黄色、绿色等;它常用来作显示器(如指示灯)。由于发光二极管的工作电压低(几伏)、电流小(几~几十毫安)、体积小、寿命长,故得到广泛应用。图 1-5 是它的电路符号。

(2) 光电二极管 光电二极管的主要特点是它的反向电流与光的照度成正比,即反向电流随光照强度的增加而增加。光电二极管常用作传感器的光敏元件,可以将光信号转换为电信号。大面积的光电二极管可用来作能源,称为光电池。图 1-6 是光电二极管的电路符号。



图 1-5 发光二极管的电路符号

(3) 变容二极管 变容二极管的特点是当所加的反向电压变化时,二极管中 PN 结的电容随之发生显著的变化。其电容量一般为几十~几百皮法,且随反向电压(0~30V)的增加而减小(约 15 倍)。

变容二极管可用来作为调谐电容使用,例如在电视机的频道选择器中,利用它来微调选择电视台的频道。其电路符号见图 1-7。



图 1-6 光电二极管的电路符号



图 1-7 变容二极管的电路符号

1.1.2 稳压二极管

稳压二极管是能够提供稳定电压的特殊二极管，它的制造工艺采取了一些特殊措施，使其得到了很陡峭的反向击穿特性，并能在击穿区内安全工作。

稳压二极管的符号和特性曲线如图 1-8 所示，其正向特性与普通二极管相同，导通电压也只有零点几伏。为了保证稳压管工作在反向击穿状态，作稳压使用时必须反向加压，并且还要加限流电阻，其作用是保证工作电流 I_Z 满足 $I_{Zmin} < I_Z < I_{Zmax}$ 。若 $I_Z < I_{Zmin}$ ，则稳压管进入反向饱和区，没有稳压作用；若 $I_Z > I_{Zmax}$ ，则会引起管子过热而损坏。从其反向击穿特性可以看出，即使流过管子的电流在很大范围内变化，管子两端的电压变化却非常小，稳压管就是利用这一特点实现稳压的。

常用的稳压管有 2CW、2DW 系列，均为硅管。

稳压管的主要参数：

(1) 稳定电压 U_Z 它是指稳压管反向击穿后，通过规定的电流 I_Z 时相应的电压值。由于制造工艺的原因，同型号的稳压管其稳压值并不是惟一的，譬如 2CW14，其 $U_Z = 6.2 \sim 7.5V$ 。

(2) 稳定电流 I_Z 它是指稳压管的电压开始稳定时所对应的电流。稳压管正常工作条件是通过它的电流必须大于管子的稳定电流 I_Z ，否则稳压管的稳压效果会变差。

(3) 动态电阻 r_Z 它是指稳压管两端电压的变化量 ΔU_Z 与所对应的电流变化量 ΔI_Z 的比值，即

$$r_Z = \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z}$$

它是描述反向击穿线垂直程度的参数，击穿线越垂直， r_Z 越小，则稳压性能越好。

(4) 额定耗散功率 P_{ZM} 它是稳压管所允许的最大功耗，是稳压管允许温升所决定的参数。当管子的实际功耗超过此值时，将因过热而损坏。其大小为

$$P_{ZM} = U_Z I_{Zmax}$$

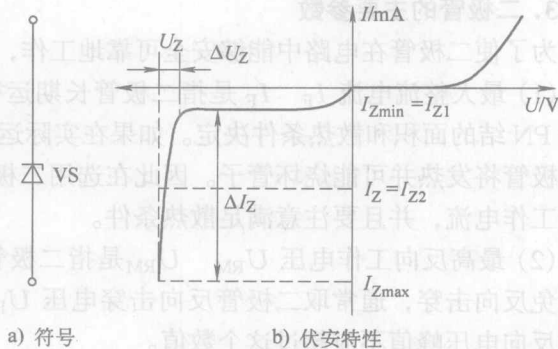


图 1-8 硅稳压管的符号及伏安特性曲线

1.2 晶体三极管及放大电路的基本概念

1.2.1 放大电路

所谓放大电路是用来放大微弱电信号的电路。放大电路广泛用于音响设备、电子仪器、

测量、控制系统以及图像处理等各个领域，是应用最为广泛的电子电路之一。

根据用途，放大电路可分为电压（电流）放大电路和功率放大电路，前者以放大电压（电流）信号为主要任务，后者主要要求有较大的功率输出。根据工作频率，放大电路可分为直流放大电路和交流放大电路。此外，根据电路结构还可分为分立元件放大电路和集成放大电路。目前，在直流及低、中频范围，广泛应用集成放大电路。

图 1-9 是扩音器的例子，它把传声器的声音信号放大后由扬声器发出。如果放大电路的输入阻抗为 $1\text{k}\Omega$ ，传声器输出的为 1mV 时，则输入电功率为 1nW 。此时如果供给阻抗为 8Ω 、电功率为 8W 的扬声器，则输出的声音信号电压为 8V ，因此，要求放大电路的电压放大倍数为 $8\,000$ ，电功率放大倍数为 80 亿。

图 1-10 是监视器的例子，其作用是放大电视摄影机的图像信号，然后驱动 CRT。电视摄影机的输出为 1V ，当驱动 CRT 需要 100V 时，则需准备电压放大倍数为 100 、频带宽度为 4.2MHz 以上、而动态输出范围为 100V 以上的放大电路。

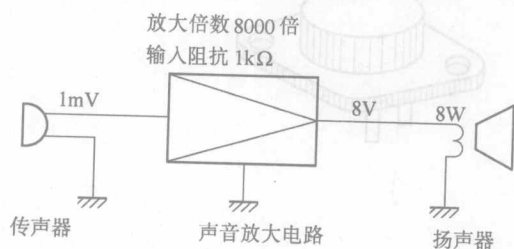


图 1-9 扩音器

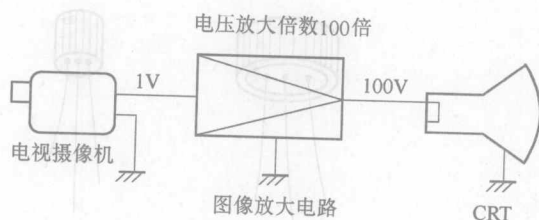


图 1-10 图像监视器

1.2.2 分贝的概念

放大电路的放大能力除了用放大倍数表示外，还多用增益表示，单位是分贝（dB）。

图 1-9 所举扩音器的例子中，放大电路的电压放大倍数为 $8\,000$ ，电功率放大倍数为 80 亿。这样过大的放大倍数数字使用起来很不方便，因此，常用放大倍数的对数增益来表示，即电功率的放大倍数为 A_P ，电功率增益的计算公式为

$$G_P = 10\lg A_P$$

在扩音器的例子中，电功率增益为 99dB 。电压放大倍数为 A_u ，电压增益 G_u 的计算公式为

$$G_u = 20\lg A_u$$

扩音器例子中的电压增益为 78dB ，监视器例子中的电压增益为 40dB 。

1.2.3 晶体三极管的工作原理

晶体三极管是由 P 型半导体和 N 型半导体组合而成，其结构及外形图如图 1-11 所示，三极管内部有三个区：发射区、基区和集电区，其中基区较另两个区要薄得多。三个区分别引出三个电极：发射极 E、基极 B 和集电极 C。两个 PN 结分别为发射区与基区之间的发射结和集电区与基区之间的集电结，集电结面积较发射结要大。注意 NPN 型和 PNP 型三极管表示符号的区别是发射结的箭头方向不同，它表示发射结加正向电压时的电流方向。

NPN 型和 PNP 型三极管工作原理相似，不同之处仅在于使用时工作电源极性相反而

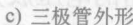


图 1-11 三极管结构及外形图

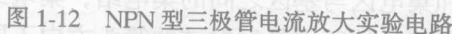
已。下面以 NPN 型三极管为例进行说明。

图 1-12 所示为一 NPN 型三极管电流放大实验电路。电源 U_{BB} 使发射结承受正向偏置电压，而电源 $U_{CC} > U_{BB}$ ，使集电结承受反向电压，这样做的目的是使三极管能够具有正常的电流放大作用。

通过改变电阻 R_B , 基极电流 I_B 、集电极电流 I_C 和发射极电流 I_E 都发生变化, 表 1-1 为一组实验所得的数据。

从表中所列数据可以发现:

- 1) $I_E = I_C + I_B$, 且 I_B 与 I_E 、 I_C 相比, I_B 小得很多。



2) I_B 虽然很小, 但对 I_C 有控制作用, I_C 随 I_B 的改变而改变, 两者在一定的范围内保持比例关系, 即 $\Delta I_C = \beta \Delta I_B$, β 称为三极管的电流放大系数, 它反映三极管的电流放大能力, 也可以说电流 I_B 对电流 I_C 的控制能力。

表 1-1 实验数据

I_B/mA	0	0.02	0.04	0.06	0.08
I_C/mA	<0.001	1.00	2.50	4.00	5.50
I_E/mA	<0.001	1.02	2.54	4.06	5.58

三极管三个电极的电流分配关系和放大作用是由其内在特性决定的, 三极管能够起到放大作用的外部条件是发射结正向偏置, 集电结反向偏置。

1.2.4 晶体三极管的特性及主要参数

三极管的特性曲线全面反映了三极管各极电压与电流之间的关系, 是分析三极管各种电路的重要依据。各种三极管的特性曲线形状相似, 但数据根据种类的不同有较大差异, 使用时可查阅相关手册或通过实验测定。

1. 输入特性曲线

输入特性是指在三极管的集、射极间所加电压 U_{CE} 为常数时, 基、射极间电压 U_{BE} 与基极电流 I_B 之间的关系。图 1-13 为硅 NPN 三极管 3DG4 的输入特性曲线, 由图可见, 当 $U_{CE} \geq 1\text{V}$ 时, 就能保证集电结处于反向偏置, 可以把发射区扩散到基区的电子中的绝大部分拉入集电区。此时, 再增大 U_{CE} 对 I_B 影响甚微, 也即 $U_{CE} \geq 1\text{V}$ 的输入特性曲线基本上是重合的。所以半导体器件手册通常只给出一条 $U_{CE} \geq 1\text{V}$ 时的三极管输入特性曲线。

三极管的输入特性曲线与二极管的伏安特性曲线很相似, 也存在一段死区, 硅管的死区电压约为 0.5V, 锗管的死区电压约为 0.2V。在正常导通时, 硅管的 U_{BE} 约在 0.6~0.7V 之间, 而锗管在 0.3V 左右。

2. 输出特性曲线

输出特性是指在三极管的基极电流 I_B 为常数时, 集、射极间电压 U_{CE} 与集电极电流 I_C 之间的关系。图 1-14 为硅 NPN 三极管 3DG4 的输出特性曲线, 由图可见, 当 I_B 不变时,

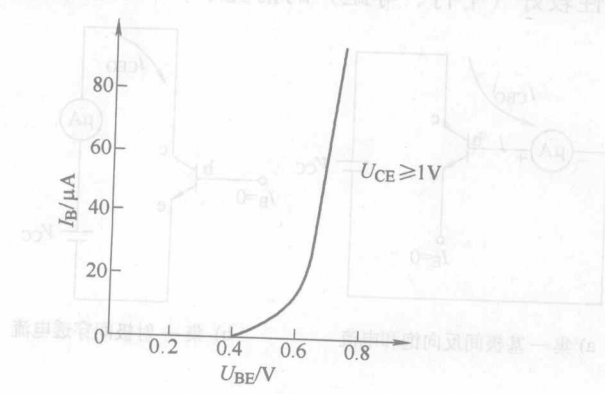


图 1-13 三极管的输入特性曲线

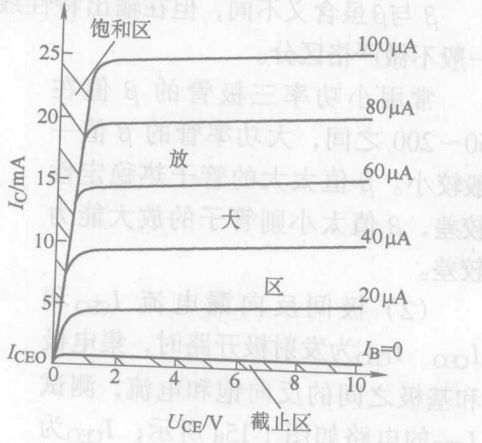


图 1-14 三极管的输出特性曲线

随着 U_{CE} 从零开始增加, 集电极电流 I_C 也从零开始增大, 当 $U_{CE} \approx 1V$ 时, I_C 逐渐趋于饱和, 近似为一水平直线; 当 I_B 增大时, 曲线水平上移, 所以三极管的输出特性曲线为一组曲线。

三极管的输出特性曲线族分为放大区、截止区、饱和区, 如图 1-14 所示, 信号正常放大时, 管子工作在放大区, 而作为开关用时, 则工作在截止区和饱和区。

(1) 放大区 管子工作在放大区时, $I_C = \beta I_B$, I_C 大小几乎与 U_{CE} 无关, 仅取决于 I_B , 这就是三极管的电流控制特性。

(2) 截止区 截止区是指 $I_B \leq 0$ 的区域。实际上当 $I_B \leq 0$ 时, 集电极电流 I_C 并不等于零。此时的集电极电流 $I_C = I_{CEO}$, 称为穿透电流。这是基极少子与集电极少子在集电极的反向偏置下所形成的称为漂移电流 I_{CBO} 被放大的结果。详细可参阅有关资料。

可靠截止状态的工作条件是发射结和集电结都反向偏置。

(3) 饱和区 在特性曲线 $U_{CE} \leq 0.5V$ ($U_{CE} < U_{BE}$) 区域, 管子工作在饱和区。此时三极管的发射结和集电结都处于正向偏置, I_C 已经很大, 不能随 I_B 增大而成比例增大, $I_C \neq \beta I_B$, 即 I_C 处于“饱和”状态。在饱和时 U_{CES} 很小, C 与 E 之间的电压称为饱和压降。小功率的硅管 $U_{CES} \approx 0.3V$, 锗管取 $0.1V$ 。

3. 三极管的主要参数

三极管的参数主要包括三极管的性能参数和安全工作限定参数。

(1) 电流放大系数 β 三极管的电流放大系数根据工作状态的不同分为两种, 一是指三极管工作在静态(直流)情况下的放大系数, 称为直流(静态)放大系数, 表示在无交流信号输入时集电极电流 I_C 与基极电流 I_B 的比值, 用 $\bar{\beta}$ 表示。

$$\bar{\beta} = \frac{I_C - I_{CEO}}{I_B} \approx \frac{I_C}{I_B} \quad (1-1)$$

另一个是动态(交流)电流放大系数 β , 是指 U_{CE} 为定值时, 集电极电流变化量 ΔI_C 与基极电流变化量 ΔI_B 之比, 即

$$\beta = \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \right|_{U_{CE} = \text{常数}} \quad (1-2)$$

β 与 $\bar{\beta}$ 虽含义不同, 但在输出特性线性较好(平行、等距)的情况下, 两者差别很小, 一般不做严格区分。

常用小功率三极管的 β 值在 50~200 之间, 大功率管的 β 值一般较小。 β 值太大的管子热稳定性较差, β 值太小则管子的放大能力较差。

(2) 极间反向漏电流 I_{CBO} 和 I_{CEO} I_{CBO} 为发射极开路时, 集电极和基极之间的反向饱和电流, 测试 I_{CBO} 的电路如图 1-15a 所示; I_{CEO} 为

基极开路时, 由集电区穿过基区流入发射区的穿透电流, 测试 I_{CEO} 的电路如图 1-15b 所示。

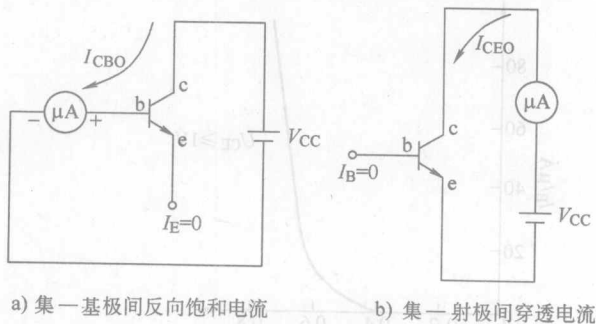


图 1-15 三极管反向漏极电流测试电路

$$I_{\text{CEO}} = (1 + \bar{\beta}) I_{\text{CBO}} \quad (1-3)$$

$$I_{\text{C}} = \bar{\beta} I_{\text{B}} + I_{\text{CEO}} \quad (1-4)$$

由于 I_{CBO} 受温度影响很大, 故温度变化对 I_{CEO} 和 I_{C} 的影响很大, 当温度低时, 忽略 I_{CEO} 的影响时, $I_{\text{C}} \approx \bar{\beta} I_{\text{B}}$, 所以选用管子时, 一般选择极间反向漏电流尽量小些。小功率硅管的 I_{CBO} 小于 $1\mu\text{A}$, 锗管的 I_{CBO} 约 $10\mu\text{A}$ 左右。

(3) 三极管的极限参数

1) 集电极最大允许的电流 I_{CM} : 当集电极电流 I_{C} 超过一定值时, 三极管的 β 值要下降。当 β 值下降到规定值 $2/3$ 时的集电极电流, 称为集电极最大允许电流。因此, 选管子时, 应使参数留有余量。

2) 集电极最大允许功率损耗 P_{CM} : P_{CM} 表示集电结上允许损耗功率的最大值, 超过这个值时的管子性能会变坏甚至会被烧毁。 P_{CM} 与环境的温度有关, 当环境温度升高时, 最大允许功率损耗 P_{CM} 会降低, 所以一般采用加散热器或风冷方式降低管子的温度。

3) 集-射反向击穿电压 $U_{(\text{BR})\text{CBO}}$: 它是指基极开路时, 加于集电极与发射极间允许的最大反向电压值。对于一般的三极管, 极间的高电压主要加在集-射极间, 因此, 在使用中, 要保证 $U_{\text{CE}} < U_{(\text{BR})\text{CBO}}$, 否则会导致三极管损坏。另外, 随着温度的上升击穿电压会下降, 所以选择三极管时, $U_{(\text{BR})\text{CBO}}$ 应大于工作电压 U_{CE} 两倍以上。

4) 最高允许结温 T_{JM} : P_{CM} 主要受结温 T_{j} 的限制, 一般情况下, 锗管的 T_{JM} 为 $70 \sim 90^\circ\text{C}$, 而硅管的 T_{JM} 可达 $150 \sim 170^\circ\text{C}$ 。改善散热条件可提高管子的 P_{CM} , 如采用加大散热器的散热面积、强迫风冷、水冷等措施降低大功率管的结温。

4. 温度对参数的影响

1) 温度对 U_{BE} 的影响: 当温度升高时, 在 I_{B} 相同的条件下, U_{BE} 将会减小。

2) 温度对 I_{CBO} 的影响: 当温度升高时, I_{CBO} 及 I_{CEO} 会增大, 温度每升高 10°C , I_{CBO} 约增加一倍。

3) 温度对 β 的影响: 三极管的电流放大倍数 β 随温度的升高而增大, 温度升高 1°C , β 值将增大 $0.5\% \sim 1\%$, 表现为输出曲线的间距随温度升高而增大。

1.3 放大电路的构成

1.3.1 共射极基本放大电路

放大器的功能是: 在输入端输入一个微小信号, 在输出端得到一个波形与输入相似, 幅值比输入的信号大得多的信号。如图 1-16 为 NPN 型管组成的基本放大电路的结构, 由于晶体三极管的发射极是输入信号 u_i 输出信号 u_o 的公共参考点, 所以我们称为共射极放大电路。下面讨论它们的电路结构、工作原理及分析方法。

1. 放大电路的组成及各元件的作用

共射极接法的基本放大电路如图 1-16 所示, u_s 为交流信号源输出电压。电路中各元件的作用分别如下:

1) 三极管 V: 它是放大电路中的核心元件, 具有电流放大作用。

2) 直流电源 U_{CC} 和 U_{BB} : 提供三极管发射结和集电结的工作电压, 保证发射结正偏和

集电结反偏,并向负载提供输出功率与负担三极管及电阻的功率损耗, U_{CC} 一般在几伏到十几伏之间。

3) 偏置电阻 R_B : 用来调节基极电流 I_B 的大小,使晶体管有一个合适的工作点,偏置电阻 R_B 的大小一般为几十千欧到几百千欧。

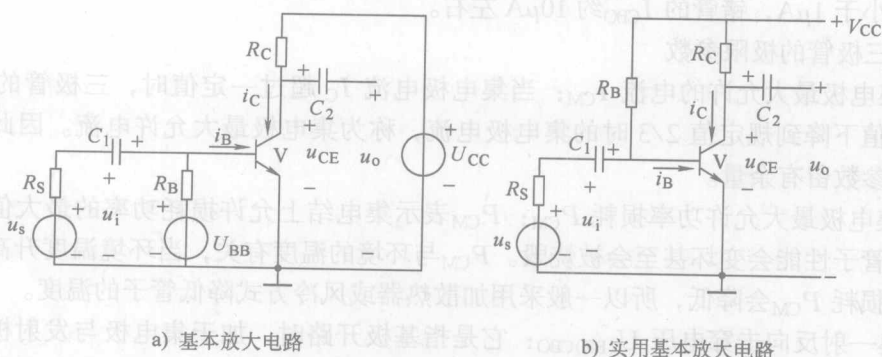


图 1-16 共射极基本放大电路

4) 集电极电阻 R_C : 将三极管的电流放大作用 (i_C) 转换成电压放大作用 ($R_C i_C$), 以便获得输出电压 u_o , R_C 的大小一般为几千欧。

5) 耦合电容 C_1 和 C_2 : 起“通交流隔直流”作用, 用来传递交流信号, 作为前后级之间的耦合器件; 同时, 又将信号源、放大器以及负载间的直流隔断。 C_1 和 C_2 应选得足够大, 一般为几微法到几十微法。

在实用电路中用电源 U_{CC} 代替 U_{BB} , 基极电流 I_B 由 U_{CC} 经 R_B 提供, 且习惯上在电路图中 U_{CC} 用电位 V_{CC} 表示, 电路改画成图 1-16b 的形式。

1.3.2 放大电路的分析

在放大电路中, 交直流电共同作用于一个电路, 为沿用电路分析方法, 把电路分为两个等效的电路, 即直流等效电路和交流等效电路, 对应的工作状态称为静态 (直流) 和动态 (交流)。静态是放大电路没有交流输入信号时的工作状态; 动态则是有交流输入信号时的工作状态。

1. 静态分析

静态分析是要确定电路的静态值 I_B 、 I_C 和 U_{CE} , 在输入、输出特性中, 明确为坐标内的一个点, 称为静态工作点, 用 Q 来表示。静态工作点落在特性曲线的放大区中心与否, 直接影响放大后的输出信号是否会失真。

(1) 估算法 估算法是用放大电路的直流通道近似计算静态值, 由于耦合电容 C_1 、 C_2 的隔直作用, 因而它的直流通路如图 1-17 所示。

图中:

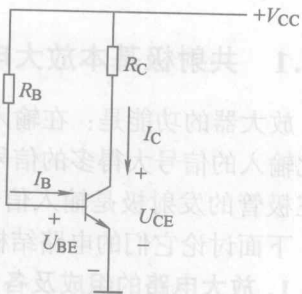


图 1-17 放大电路的直流通道

$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - U_{BE}}{R_B} \approx \frac{V_{CC}}{R_B} \quad (1-5)$$

式中 U_{BE} 对硅管取 0.7V, 对锗管取 0.3V。

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} \quad (1-6)$$

$$U_{CEQ} = V_{CC} - R_C I_{CQ} \quad (1-7)$$

使用式 (1-6) 的条件是三极管工作在放大区。

如果算得 U_{CEQ} 的值小于 1V, 说明三极管处于或接近饱和状态, 此时 $I_C \neq \beta I_B$, I_{CQ} 被 R_C 限流, 称为饱和电流 I_{CS} , 集-射电压称为饱和电压 U_{CES} , 则

$$I_{CS} = \frac{V_{CC} - U_{CES}}{R_C} \approx \frac{V_{CC}}{R_C} \quad (1-8)$$

上式中 I_{CS} 基本上只与 V_{CC} 及 R_C 有关, 而与 β 及 I_{BQ} 无关 (I_{BQ} 足够大时)。临界饱和状态时的基极电流称为临界基极饱和电流 I_{BS} , 即

$$I_{BS} = \frac{I_{CS}}{\beta} = \frac{V_{CC}}{\beta R_C} \quad (1-9)$$

如果 $I_{BQ} > I_{BS}$, 则表明三极管已进入饱和状态。

(2) 图解法 根据晶体三极管的输出特性曲线, 用作图的方法求静态值称为图解法。设晶体管三极管的输出特性曲线如图 1-18 所示, 图解法步骤如下:

- 1) 用估算法求出基极电流 I_B ;
- 2) 根据 I_B 在输出特性曲线中找到对应的那条曲线;
- 3) 作直流负载线;

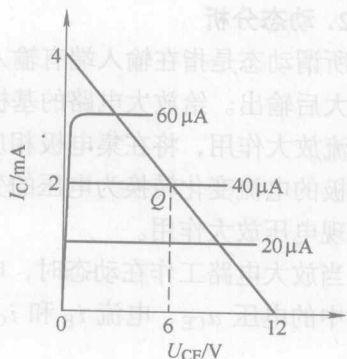


图 1-18

由式 (1-7) 得 $I_C = \frac{V_{CC}}{R_C} - \frac{U_{CE}}{R_C}$, 为过 $(\frac{V_{CC}}{R_C}, V_{CC})$ 两点的直线方程, 其斜率为 $-1/R_C$, 只与集电极负载电阻 R_C 有关, 成为直流负载线。

- 4) 求静态工作点 Q , 并确定 U_{CEQ} 、 I_{CQ} 。

直流负载线与由步骤 2 确定的输出特性曲线的交点即为静态工作点 Q , 由静态工作点便可在坐标上查得静态值 U_{CEQ} 、 I_{CQ} 。

【例 1-1】在图 1-16b 中, 已知 $V_{CC} = 20V$, $R_B = 300k\Omega$, $R_C = 3k\Omega$, $\beta = 50$, 晶体三极管的输出特性曲线如图 1-19 所示。(1) 试用估算法和图解法求放大电路的静态值。(2) 如果偏置电阻 R_B 由 $300k\Omega$ 减至 $100k\Omega$, 三极管的工作状态有何变化?

解: (1) 估算法

$$I_{BQ} \approx \frac{V_{CC}}{R_B} = \frac{12}{300 \times 10^3} A = 40 \mu A$$

$$I_{BS} = \frac{I_{CS}}{\beta} = \frac{V_{CC}}{\beta R_C} = 80 \mu A$$

因为 $I_{BQ} < I_{BS}$, 所以电路处于三极管的放大区。

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 50 \times 40 \mu A = 2mA$$

$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_C = (12 - 2 \times 3)V = 6V$$

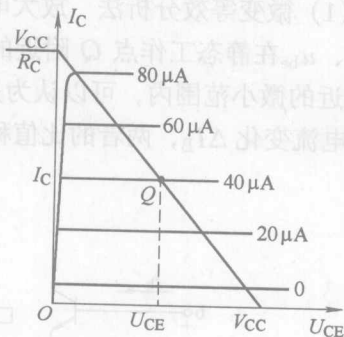


图 1-19

图解法

在图 1-19 中, 根据 $\frac{V_{CC}}{R_C} = 4\text{mA}$, $V_{CC} = 12\text{V}$ 作直流负载线, 与 $I_{BQ} = 40\mu\text{A}$ 特性曲线相交得工作点 Q , 根据 Q 查坐标得: $I_{CQ} = 2\text{mA}$, $U_{CEQ} = 6\text{V}$ 。

(2) 当偏置电阻 R_B 由 $300\text{k}\Omega$ 减至 $100\text{k}\Omega$ 时, $I_{BQ} = \frac{12}{100 \times 10^3} \text{A} = 120\mu\text{A} > I_{BS}$

表明三极管已进入饱和工作状态, 此时

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

$$I_{CQ} = I_{CS} \approx \frac{V_{CC}}{R_C} = 4\text{mA}$$

2. 动态分析

所谓动态是指在输入端有输入信号时的工作状态。放大电路的功能就是将微小的输入信号放大后输出。给放大电路的基极加入微小变化的交流信号 (如几十微安), 则由于三极管的电流放大作用, 将在集电极相应地会引起较大的电流变化 (如几毫安), 同时通过 R_C 把集电极的电流变化转换为电压的变化输出, 从而实现了电压放大的目的, 因此, 共射极电路能实现电压放大作用。

当放大电路工作在动态时, 电路将在直流电源 V_{CC} 和交流输入信号 u_i 共同作用下工作, 电路中的电压 u_{CE} 、电流 i_B 和 i_C 均包含两个分量, 即

$$i_B = I_B + i_b$$

$$i_C = I_C + i_c$$

$$u_{CE} = U_{CE} + u_{ce}$$

其中 I_B 、 I_C 和 U_{CE} 是在电源 V_{CC} 单独作用下产生的电流、电压, 实际上就是放大电路的静态值, 称为直流分量。而 i_b 、 i_c 和 u_{ce} 是在输入信号 u_i 作用下产生的电流、电压, 称为交流分量。

交流分量的分析可采用微变等效法和图解法进行分析。

(1) 微变等效分析法 放大电路中的三极管是非线性器件, 在输入信号 u_i 较小时, 引起 i_b 、 u_{be} 在静态工作点 Q 附近的变化也很微小, 因此, 将非线性的输入特性曲线在工作点 Q 附近的微小范围内, 可以认为是线性的, 如图 1-20 所示。当 U_{BE} 有一微小变化 ΔU_{BE} 时, 基极电流变化 ΔI_B , 两者的比值称为晶体三极管的动态输入电阻, 用 r_{be} 表示:

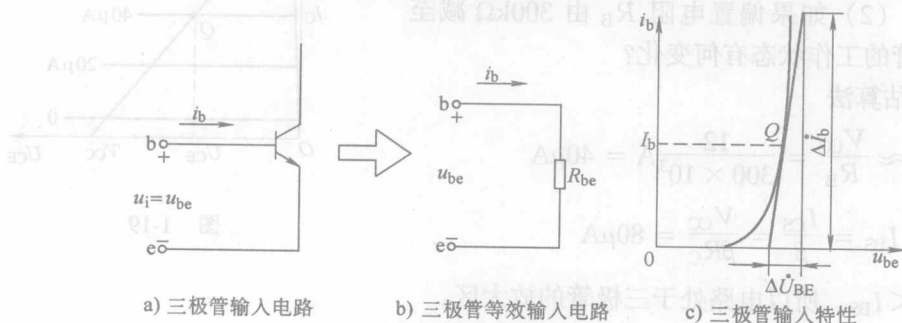


图 1-20 晶体三极管的等效输入电路