

高等学校教材

电子电路习题 及机辅分析题解题指导

北方交通大学 冯民昌 主编
李金平 主审

中 国 铁 道 出 版 社

1999年·北京

(京)新登字 063 号

内 容 简 介

本书介绍了按高等工业学校“模拟电子电路 I、II”教学基本要求编写的模拟电子线路教材所包含的各种习题及计算机辅助分析题的解题方法及结果,特别突出了如何使用国际通用 PSPICE 程序及上机操作指南。内容包括:晶体二极管及其应用,晶体三极管及其放大电路,场效应管及其放大电路,负反馈,频率响应,双极模拟集成电路,集成运放应用,MOS 模拟集成电路,调谐放大器,高频功放,正弦振荡器,振幅调制与解调,角度调制与解调,混频,模拟信号数字化,数字调制与解调,反馈控制系统,PSPICE 程序描述,PSPICE 程序上机操作指南,机辅分析例题共 20 章。

本书可作为高等学校信息与通信工程、自动控制、电气工程等专业“电子电路”或“电子技术”习题课教材。

图书在版编目(CIP)数据

电子电路习题及机辅分析题解题指导 / 冯民昌主编.
北京:中国铁道出版社,1999
高等学校教材
ISBN 7-113-03348-2

I. 电… II. 冯… III. 电子电路-高等学校-解题
IV. TN710-44

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 14504 号

高等学校教材

书 名: 电子电路习题及机辅分析题解题指导
著作责任者: 北方交通大学 冯民昌主编
出版·发行: 中国铁道出版社 (100054, 北京市宣武区右安门西街 8 号)
责任编辑: 倪嘉寒
封面设计: 李艳阳
印 刷: 北京市兴顺印刷厂
开 本: 787×1092 1/16 印张: 19.25 字数: 484 千
版 本: 1999 年 7 月第 1 版 1999 年 7 月第 1 次印刷
印 数: 1~8000 册
书 号: ISBN 7-113-03348-2/TN·116
定 价: 24.90 元

版权所有 盗印必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社发行部调换。

前 言

本书是根据国家教委工科电子课程指导委员会制订的《高等工业学校电子线路 I, II》教学基本要求,并考虑到近几年来教学内容改革所涉及的模拟电子电路习题更新而编写。

本书可与中国铁道出版社出版的教材《模拟集成电路基础》(第二版,冯民昌主编,1998)和《模拟集成电路系统》(第二版,冯民昌主编,1998)配套使用,也可以单独使用。

学习电子电路课程,做习题是一个不可缺少的重要环节,通过习题可以加深对教学内容的理解,同时提高学生分析问题和解决问题的能力。

本书除介绍常规手工计算习题外,考虑教学内容更新,从第十八章开始介绍了国际通用 PSPICE 电路模拟和分析程序;PSPICE 程序在 PC 机操作指南;计算机辅助分析与设计解题指导。由于需用 PSPICE 软件对电路进行各种分析计算,因此后三章所述内容中电压物理量的符号一律采用 V 表示。本书共介绍例题 261 题,其中手工计算习题 221 题,机辅分析题 40 题。

本书由冯民昌教授主编,参加编写的有:祁英(第一、二、三、四、五章),张建敏(第九、十、十一、十二、十三、十四章),张玉慧(第十八、十九、二十章),冯民昌(第六、七、八、十五、十六、十七、十八章)。全书由北方交通大学李金平副教授主审。本书编写过程中得到北方交通大学微电子电路教研室许多老师的帮助,在此一并致谢。

限于作者水平,书中仍会有谬误和不妥之处,恳请读者批评指正。

作者

1999 年 3 月

于北方交通大学

目 录

第一章 晶体二极管及其应用	(1)
一、内容提要	(1)
二、例题解析	(1)
第二章 双极型晶体管及基本放大电路	(7)
一、内容提要	(7)
二、例题解析	(8)
第三章 场效应管及其基本放大电路	(19)
一、内容提要	(19)
二、例题解析	(19)
第四章 负反馈放大器	(27)
一、内容提要	(27)
二、例题解析	(28)
第五章 放大器的频率响应	(36)
一、内容提要	(36)
二、例题解析	(37)
第六章 双极型模拟集成电路	(51)
一、内容提要	(51)
二、例题解析	(52)
第七章 集成运放分析及应用	(63)
一、内容提要	(63)
二、例题解析	(63)
第八章 MOS 模拟集成电路	(76)
一、内容提要	(76)
二、例题解析	(77)
第九章 小信号调谐放大器	(85)
一、内容提要	(85)
二、例题解析	(87)
第十章 高频功率放大器	(96)
一、内容提要	(96)
二、例题解析	(97)
第十一章 正弦振荡器	(105)
一、内容提要	(105)
二、例题解析	(107)
第十二章 振幅调制与解调	(120)

一、内容提要	(120)
二、例题解析	(122)
第十三章 角度调制与解调	(129)
一、内容提要	(129)
二、例题解析	(131)
第十四章 混频	(137)
一、内容提要	(137)
二、例题解析	(138)
第十五章 模拟信号数字化及数模转换	(141)
一、内容提要	(141)
二、例题解析	(141)
第十六章 数字调制与解调	(146)
一、内容提要	(146)
二、例题解析	(146)
第十七章 反馈控制系统	(150)
一、内容提要	(150)
二、例题解析	(151)
第十八章 PSPICE 语言描述	(158)
一、概 述	(158)
二、器件描述	(161)
三、子电路、集成器件的描述	(171)
四、电源描述	(171)
五、分析类型描述	(178)
六、输出指令描述	(183)
七、控制命令描述	(185)
第十九章 PSPICE 上机操作指南	(188)
一、PSPICE 5.0 软件使用指南	(188)
二、PSPICE 5.1for Windows 软件使用指南	(221)
第二十章 PSPICE 例题详解	(256)
一、直流分析	(256)
二、交流分析	(257)
三、瞬态分析	(274)
四、设计题	(295)
附 录 本书常用符号	(299)

第一章 晶体二极管及其应用

一、内容提要

1. 半导体是导电能力介于导体和绝缘体之间的一种物体。半导体之所以得到广泛应用是因为它的导电能力会随温度、光照或所掺杂质而显著变化。特别是掺杂可以改变半导体的导电能力和导电类型,这是今天能用半导体材料制造各种管子及集成电路的基本依据。半导体的这些特点是由它的内部导电机理所决定的。

2. PN 结是构成半导体器件的基本机构。PN 结的主要特性是它的单向导电性,即在正向电压作用下,正向导电率较高,产生很大的扩散电流。而在反向电压作用下,反向导电率很低,只有数量很少的少子漂移电流。此外,PN 结还存在电容效应和反向击穿特性,利用这些特性可制成变容二极管和稳压二极管。

3. 二极管理想伏安特性可由 PN 结的电流方程表示,即为: $I = I_s(e^{U/U_T} - 1)$ 。理想伏安特性曲线如图 1-1 所示。

4. 半导体光电器件可分为光敏器件和发光器件两类,分别实现光—电和电—光转换。

5. 晶体二极管最基本的用途是整流、稳压和限幅。

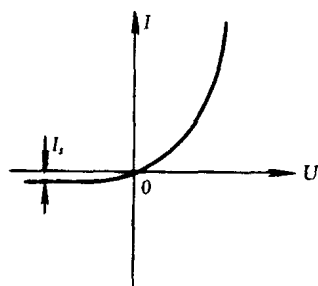


图 1-1 二极管的理想伏安特性

二、例题解析

【例 1-1】 $T = 300\text{K}$ 时,硅半导体本征激发载流子浓度 $n_i = 1.5 \times 10^{10}/\text{cm}^3$,在 $T = 300\text{K}$ 时掺入受主杂质浓度 $N_A = 2 \times 10^{14}/\text{cm}^3$,计算此时的空穴和电子浓度。

【解】 因为 $N_A \gg n_i$

所以空穴浓度 $P_P \approx N_A = 2 \times 10^{14}/\text{cm}^3$

电子浓度 $n_p \approx n_i^2 / P_P = 1.125 \times 10^6/\text{cm}^3$

【例 1-2】 锗半导体 PN 结,在 $T = 300\text{K}$ 时:(1)若加入正向和反向电压,其电压值都是 0.05V ,试求正向与反向电流之比值是多少?(2)如果反向饱和电流均为 $5\mu\text{A}$,试求在正向电压为 0.1V 、 0.2V 、 0.3V 时的正向电流值。

【解】

$$(1) \quad \therefore \text{正向电流 } I_+ = I_s(e^{U/U_T} - 1)$$

$$\text{反向电流 } I_- = -I_s$$

$$\therefore I_+ / I_- = -e^{U/U_T} + 1 = -5.842$$

$$(2) \quad U = 0.1\text{V}, I_+ = 2.29 \times 10^{-6}\text{A}$$

$$U = 0.2\text{V}, I_+ = 10.95 \times 10^{-3}\text{A}$$

$$U = 0.3\text{V}, I_+ = 0.513\text{A}$$

【例 1-3】 如图 1-2 所示各二极管电路,试问图中各二极管是导通还是截止,若各二极管的正向导通电压为 0.7V ,求输出电压 U_o 是多少伏?

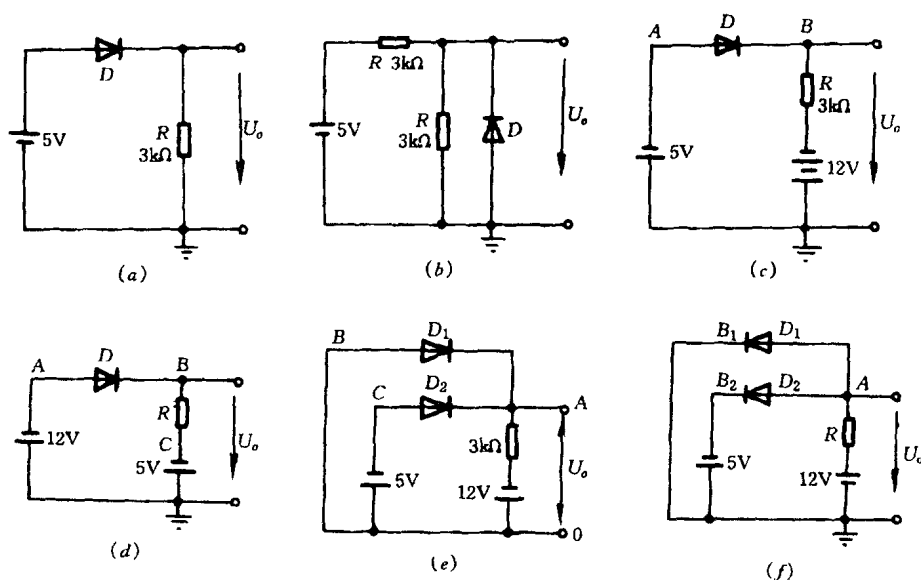


图 1-2 例 1-3 图

【解题思路】 二极管在正向导通时,对于硅管大约有 0.7V 的正向压降,对于锗管大约有 0.2V 的正向压降。反向截止时,由于反向电流很小,可认为截止电阻无穷大,相当于开路。

判断二极管在电路中的工作状态的基本方法是:先假设二极管断开,分别计算二极管阳极电位和阴极电位,然后比较阳极与阴极间将承受的电压。若该电压大于导通电压,则说明该二极管处于正向偏置而导通,两端的实际电压为二极管的导通压降;如果该电压值小于导通电压,说明该二极管处于反向偏置而截止。

需注意的是:在用上述方法判断过程中,如果电路中出现两个以上二极管承受大小不相等的正向电压,则应判定承受正向电压较大者优先导通,其两端电压为导通电压,然后再用上述方法判断其余二极管。

本例题目的在于加深对二极管单向导电性的理解。

【解】 图(a)中,因 D 承受正向电压导通,有压降 0.7V 。

所以 $U_o = 5 - 0.7 = 4.3\text{V}$

图(b)中,因 D 承受反向电压而截止,相当于开路,

所以 U_o 由两个电阻 R 决定,即

$$U_o = 2.5\text{V},$$

图(c)中,断开 D ,则

$$U_A = -5\text{V}, U_B = -12\text{V}, U_{AB} = U_A - U_B = 7\text{V},$$

所以 D 导通,其导通压降为 0.7V ,故

$$U_o = -5 - 0.7 = -5.7\text{V}$$

图(d)中,因断开二极管 D ,有

$$U_{AB} = U_A - U_B = -12 - (-5) = -7\text{V}$$

可见二极管 D 接入后承受反向电压, D 截止, 电路中电流为零, 则电阻 R 上压降为 0。

所以 $U_o = U_B = U_C = -5\text{V}$

图(e)中, 首先将 D_1 和 D_2 断开, 求得两管将承受的电压。

D_1 管 $U_{BA} = U_B - U_A = 0 - (-12) = 12\text{V}$

D_2 管 $U_{CA} = U_C - U_A = -5 - (-12) = 7\text{V}$

D_1 管承受的正向电压较大而优先导通, 导通压降 $U_F = 0.7\text{V}$, 则 $U_A = -0.7\text{V}$ 。

此时 $U_{CA} = -5 - (-0.7) = -4.3\text{V}$, 所以 D_2 承受反向电压, 处于截止状态, $U_o = U_A = -0.7\text{V}$ 。

图(f)中, 将 D_1 和 D_2 断开

D_1 管 $U_{AB} = 12 - 0 = 12\text{V}$

D_2 管 $U_{AC} = 12 - (-5) = 17\text{V}$

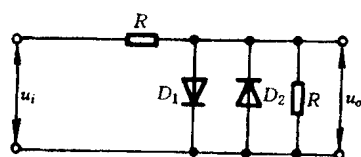
二极管接入后, D_2 承受的正向电压较 D_1 高而优先导通, 使 U_A 钳制在

$$U_A = U_C + U_F = -5 + 0.7 = -4.3\text{V}$$

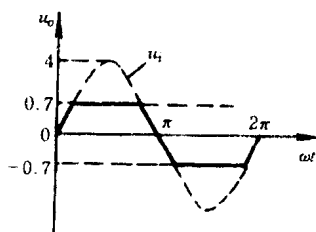
此时 D_1 因承受反向电压而截止。

所以 $U_o = U_A = -4.3\text{V}$

【例 1-4】 图 1-3(a) 所示是二极管限幅电路, 已知输入 U_i 是幅值为 4V 的正弦波信号, 二极管 D_1 和 D_2 的正向导通电压为 0.7V , 请画出输出 u_o 的波形。



(a)



(b)

图 1-3 例 1-4 图

(a) 限幅电路; (b) 题解。

【解】 在 u_i 的正半周, 当 $u_i > 0.7\text{V}$ 时, D_1 的阳极电位高于阴极, D_1 导通, 这时 $u_o = 0.7\text{V}$ 。

在 u_i 的负半周, 当 $|u_i| > 0.7\text{V}$ 时, D_2 的阳极电位高于阴极, D_2 导通, 这时 $u_o = -0.7\text{V}$ 。

在 u_i 的其余时间间隔内, D_1 和 D_2 均承受反向电压而截止, 所以 u_o 始终和 u_i 波形相同, 即 $u_o = u_i$ 。

波形如图 1-3(b) 所示。

【例 1-5】 图 1-4 所示二极管电路, 已知 $E_1 = 0.26\text{V}$, $e_1 = 10\text{mV}$ (有效值), 二极管的直流电阻 $R_D = 10\Omega$, 试求流过二极管的直流电流 I_D 和交流电流 i_D (有效值)。

【解】 (1) 直流电流 $I_D = \frac{U_D}{R_D} = 26\text{mA}$

(2) 交流电阻 $r = \frac{26}{I_D} = 1\Omega$

交流电流 $i_D = \frac{e_1}{r} = 10\text{mA}$

【例 1-6】某二极管的伏安特性如图 1-5(a)所示,试求:

(1) 如果需要得到 10mA 的正向电流,加在二极管两端的正向电压是多少?

(2) 如将二极管接到 10V 电源上,如图 1-5(b)所示,为了限制二极管正向电流为 10mA,所加限流电阻 R 的阻值为多大?

【解】(1) 由图(a)曲线作图可得到:

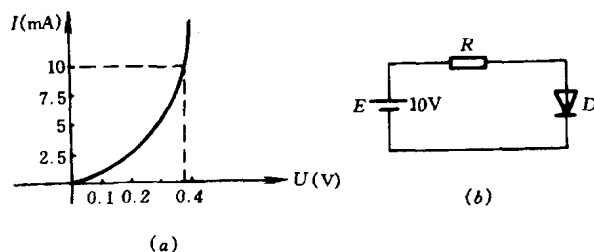


图 1-5 例 1-6 图

(a) 二极管伏安特性曲线; (b) 二极管电路。

当 $I = 10\text{mA}$ 时, $U_D \approx 0.37\text{V}$

(2) $\therefore R = U_R / I$

$$U_R = E - U_D$$

$$\therefore R = \frac{E - U_D}{I} = \frac{10 - 0.37}{10 \times 10^{-3}} = 0.963\text{k}\Omega。$$

【例 1-7】用万用表测量二极管的正向电阻,用不同的量程挡测出的正向电阻值是否相同? 为什么?

【解题思路】从二极管是一个非线性器件上入手,考虑由于通过二极管的电流与加在二极管上的电压不是正比关系,所以当不同的电流通过管子时,管子两端的电压和电流的比值(即测出的电阻值)也不同。

【解】设万用表电阻挡的电池电压为 E , 这里选两挡 $R \times 10$ 和 $R \times 100$ 做比较。 $R \times 10$ 挡等效内阻设为 R_1 , $R \times 100$ 挡等效内阻为 $R_2 = 10R_1$ 用万用表测二极管正向电阻所构成的电路如图 1-6(a)所示。

由电路:

$$R \times 10 \text{ 挡 } U = E - IR_1$$

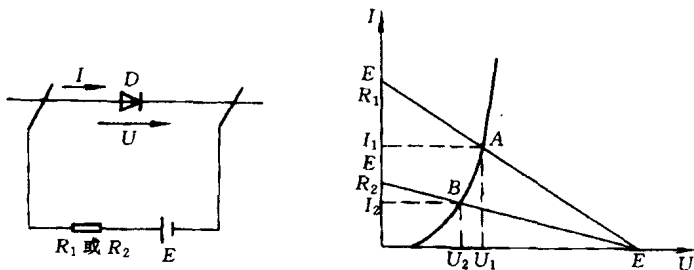


图 1-6 例 1-7 图

(a) 二极管外电路; (b) 二极管正向电阻的图解。

$$R \times 100 \text{ 挡} \quad U = E - IR_2 \\ = E - 10IR_1$$

这两个方程在 $I-U$ 坐标系中均为直线,如图 1-6(b)所示,图中曲线为二极管 D 的伏安特性。

由二极管本身特性看,管子电压和电流又应满足特性曲线所揭示的规律。因此,同时受这两种关系约束的电压、电流必定在特性曲线与直线的交点上。用 $R \times 10$ 挡测时,交于图中 A 点,万用表读数为 U_1/I_1 ;用 $R \times 100$ 挡测时,交于图中 B 点,万用表读数为 U_2/I_2 。显然前者阻值小而后者阻值大。

【例 1-8】 在桥式整流电路中,如果有一个整流管断路会产生什么后果? 如果有一个整流管极性接反会出现什么后果? 如果有一个整流管短路会出现什么后果?

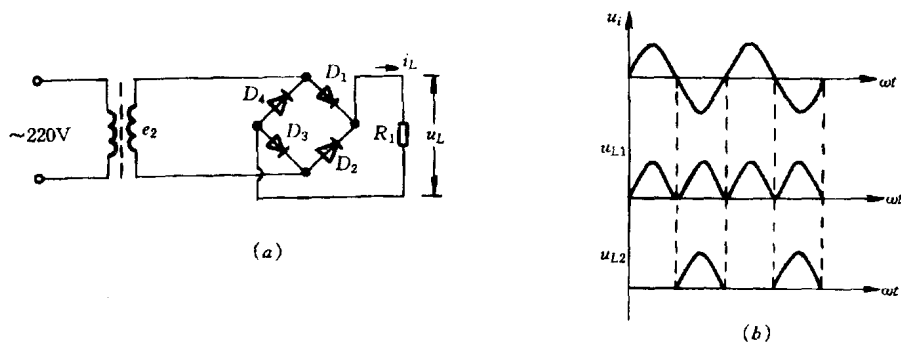


图 1-7 例 1-8 图
(a)桥式整流电路;(b)题 1-8 波形图。

【解】 桥式整流为一种全波整流电路,如图 1-7(a)所示。正半周电压时,二极管 D_1 和 D_3 导通, D_2 和 D_4 截止;负半周时 D_2 和 D_4 导通, D_1 和 D_3 截止,波形如图 1-7(b)中 U_{L1} 所示波形。

(1)若一个整流管断路,如 D_1 开路,则在 u_i 正半周时,副圈 e_2 不能通过 D_1 和 D_3 向负载 R_L 供电,相当于半波整流电路,输出电压下降为正常情况下的 $1/2$ 。波形如图 1-7(b)中的 u_{L2} 所示波形。

(2)若有一个整流管极性接反,例如出现 D_1 的正负极接反的情况,则在 u_i 的正半周时, D_1 截止,不能形成通路,负载 R_L 上无电流通过, $U_L = 0$ 。而在 u_i 的负半周时, D_1 、 D_2 导通,变压器副边经 D_2 、 D_1 近于短路状态, D_2 、 D_1 及变压器会因电流过大而损坏。

(3)若有一个整流管短路,如为 D_1 两端短路,则在 u_i 的负半周, D_2 导通时将流过较大电流,当超过其最大整流电流时, D_2 及变压器副边会损坏。

【例 1-9】 图 1-8 所示整流电路,求输出电压 U_{o1} 和 U_{o2} 的直流分量是多少伏?

【解】 $U_{o1} = 0.45 \times 20 = 9V$

$$U_{o2} = 0.9 \times 6 = 5.4V$$

【例 1-10】 已知两只硅稳压管的稳定电压值分别为 $8V$ 和 $7.5V$,若将它们串联使用,能获得几种不同的稳定电压值? 若将其并联,又能获得几种不同的稳定电压值?

【解】 两只稳压值不同的稳压管串联使用,有四种方法,如图 1-9(a)所示。可分别获得

如下稳压值(设 $U_{Z1} = 8V$, $U_{Z2} = 7.5V$):

$$U_{o1} = U_{Z1} + U_{Z2} = 8 + 7.5 = 15.5V$$

$$U_{o2} = U_{Z1} + U_{F2} = 8 + 0.7 = 8.7V$$

$$U_{o3} = U_{F1} + U_{Z2} = 0.7 + 7.5 = 8.2V$$

$$U_{o4} = U_{F1} + U_{F2} = 0.7 + 0.7 = 1.4V$$

若将它们并联,有四种接法,如图 1-9(b)所示,但获得的稳压值只有两种:

$$U_{o1} = U_{Z2} = 7.5V \quad (D_{Z1} \text{ 截止})$$

$$U_{o2} = U_{o3} = U_{o4} = U_F = 0.7V$$

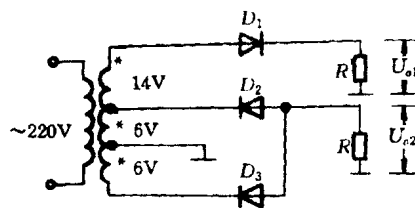


图 1-8 例 1-9 图

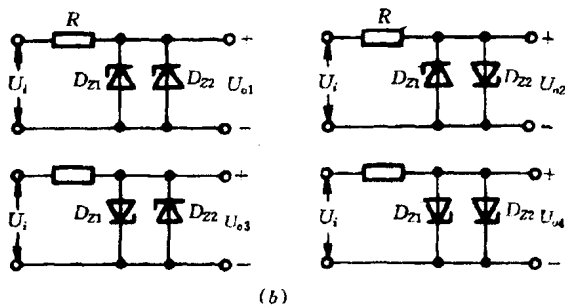
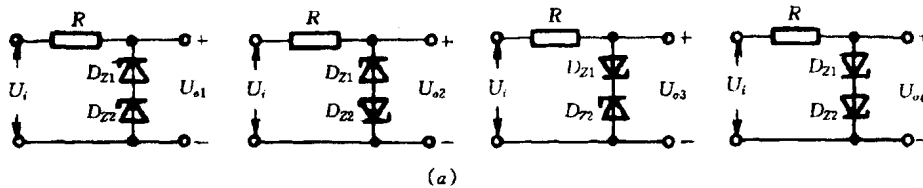


图 1-9 例 1-10 图及解

第二章 双极型晶体管及基本放大电路

一、内容提要

1. 晶体三极管是一种电流控制器件,即通过基极电流或射极电流去控制集电极电流。要使三极管正常工作并有放大作用,管子的发射结必须正向偏置,集电结必须反向偏置。

三极管的特性可用输入和输出特性曲线来表示,也可用特性参数来表示。主要的特性参数有:电流放大系数 α 、 β ,极间反向电流 I_{cbo} 、 I_{ceo} ,极限参数 I_{CM} 、 P_{CM} 和 BU_{CEO} 。

2. 放大电路的构成:①有源器件,如晶体管。②要保证有源器件能正常工作,既要有合适的静态工作点,又要使变化的信号能输入、放大、输出并基本不失真。

3. 放大电路的主要性能指标有:静态工作点 Q —输入变化量幅值为零时放大管的工作状态值,是分析变化量的基础。

放大倍数 A —输出变化量幅值与输入变化量幅值之比,是衡量放大能力的指标。一般有电压增益 $A_U = U_o/U_i$;源电压放大倍数 $A_{Us} = U_o/U_s$,其中 U_s 是信号源电压;电流增益 $A_I = I_o/I_i$ 。

输入电阻 r_i —从输入端看进去的等效电阻,反映了放大电路向信号源取多大电流的指标。

输出电阻 r_o —从输出端看进去的等效电阻,反映了放大电路带负载能力的指标。

4. 分析放大电路的基本方法是图解法和等效电路法。

图解法以器件的特性曲线为基础、直观、形象,主要用于分析放大器的大信号工作。

等效电路法以器件的交流信号模型为基础,是分析小信号放大电路的主要手段。低频 h 参数等效电路是小信号交流等效电路,在很多实际情况下,可根据简化条件,将 h_{re} 和 h_{oe} 忽略,只须用保留 h_{ie} 和 h_{fe} 两个参数的简化等效电路即可获得所需精度。

5. 晶体三极管按其连接方式不同,可以有三种组态,即共射、共集、共基三种放大电路。这三种放大电路的主要特性对比如表 2-1 所示。

表 2-1

	电压增益 A_U	电流增益 A_I	输入输出电压 相位关系	输入电阻 r_i	输出电阻 r_o	适用范围
共射电路	大 (几十至几百)	大 (几十至一百以上)	反相	中等	中等	一般放大
共集电路	小 (≤ 1)	大 (几十至一百以上)	同相	大	小	信号跟随
共基电路	大 (几十至几百)	小 (≤ 1)	同相	小	大	高频放大

6. 单极放大器的典型分析步骤

(1) 求静态工作点。利用将发射结电压近似为锗管 0.2~0.3V,硅管 0.6~0.7V,求出静态工作点电流。用作图法求静态工作点在输出特性曲线上的位置,或计算 U_{ceQ} ,判断工作点是否

合适,或进而计算输出电压的最大不失真摆幅。

(2)计算放大倍数。根据静态工作点电流 I_{CQ} , 给定的 r_{bb}' 和 h_{fe} , 计算 h_{ie} :

$$h_{ie} = r_{bb}' + \frac{26}{I_{CQ}} h_{fe}$$

然后计算电压放大倍数:

$$A_{U} = - h_{fe} R_L / h_{ie}$$

$$A_{US} = - h_{fe} R_L / (R_S + h_{ie})$$

因为 h_{ie} 与工作点电流有关, 所以放大倍数随工作点电流大小而变化。

7. 多级放大器中前一级输出信号需通过一定方式传送到下一级称耦合方式。有以下四种耦合方式, 分别适用于不同的场合。

直接耦合式: 有温漂问题, 但便于集成化。

阻容耦合式: 能克服温漂, 但低频响应差, 不便于集成化。

变压器耦合式: 低频响应差, 只适于特殊要求场合。

光电耦合式: 抗干扰性能好。

无论哪一种耦合电路都应让有用信号顺利通过, 对信号的衰减尽可能小。

二、例题解析

【例 2-1】某晶体三极管的交流放大系数 $\alpha = 0.96$, 若基极电流变化量 $\Delta I_b = 10\mu A$, 试问集电极和发射极变化量是多少?

【解】因 $\alpha \approx \bar{\alpha}$

$$\beta \approx \bar{\beta} = \bar{\alpha} / (1 - \bar{\alpha}) = 24$$

所以

$$\Delta I_c = \beta \Delta I_b = 0.24mA$$

$$\Delta I_e = \Delta I_c + \Delta I_b$$

$$= (1 + \beta) \Delta I_b = 0.25mA$$

【例 2-2】某电路中有一晶体三极管, 测出当 $I_b = 6\mu A$ 时, $I_c = 0.4mA$; 当 $I_b = 18\mu A$ 时, $I_c = 1.12mA$, 试问这个三极管的 β 值是多少? I_{cbo} 和 I_{ceo} 是多少?

【解】 $\beta = \Delta I_c / \Delta I_b = 60$

$$I_{cbo} = 0.66\mu A$$

$$I_{ceo} = 40\mu A$$

【例 2-3】判别下列晶体管的工作状态:

(1) 锗 PNP 管, $U_b = 2V$, $U_e = 1.7V$, $U_c = -3V$;

(2) 锗 NPN 管, $U_b = 1.2V$, $U_e = 0.9V$, $U_c = 6V$;

(3) 硅 PNP 管, $U_b = -1.7V$, $U_e = -1V$, $U_c = -6V$;

(4) 硅 NPN 管, $U_b = 1.2V$, $U_e = 0.6V$, $U_c = 1V$ 。

【解题思路】在判断晶体三极管工作状态时, 应依据以下两点:

1. 晶体三极管有三个工作区域, 即

(1) 饱和工作区, 条件: 发射结正偏, 集电结正偏;

(2) 放大工作区, 条件: 发射结正偏, 集电结反偏;

(3) 截止工作区, 条件: 发射结反偏, 集电结反偏。

2. 不同材料管子的发射结正向偏压不同。硅管 $|U_{be}| \approx 0.6 \sim 0.7V$, 锗管 $|U_{be}| \approx 0.2 \sim$

0.3V。

- 【解】 (1)发射结反偏,集电结反偏,故晶体管工作在截止状态。
 (2)发射结正偏,集电结反偏,故晶体管工作在放大状态。
 (3)发射结正偏,集电结反偏,故晶体管工作在放大状态。
 (4)发射结正偏,集电结正偏,故晶体管工作在饱和状态。

【例 2-4】 在三极管放大电路中,测得三只三极管各个电极的电位如图 2-1 所示,试判断三极管的类型,材料,电极。

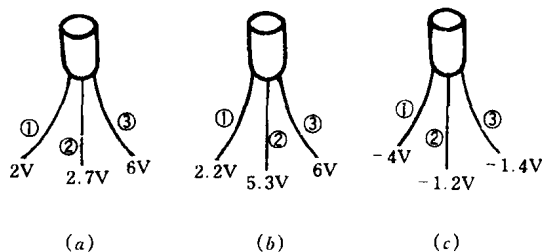


图 2-1 例 2-4 图

【解题思路】 处于放大状态的晶体管,无论 PNP 管还是 NPN 管,基极电位总是处于中间值,据此先判断出基极。通常发射结电压对硅材料为 0.6~0.7V,对锗材料约为 0.2V,而集电结电压一般为若干伏的数量级。据此区分剩下两个电极哪个为集电极,哪个为发射极。若 $U_c > U_b > U_e$,为 NPN 管;若 $U_c < U_b < U_e$ 为 PNP 管。

解题结果见表 2-2。

表 2-2

编号	$ V_{BE} $	材料	管型	管脚		
				c	b	e
(a)管	0.7V	硅	NPN 型	③	②	①
(b)管	0.7V	硅	PNP 型	①	②	③
(c)管	0.2V	锗	PNP 型	①	③	②

【例 2-5】 试分析图 2-2 所示电路,三极管 $\beta = 50$, $I_{cbo} = 4\mu A$,二极管正向电阻为零,反向电阻 $r = \infty$ 。试问开关分别接到 A、B 和 C 三处时三极管的工作状态及集电极电流 $I_c = ?$

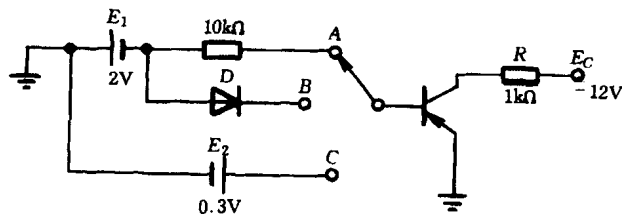


图 2-2 例 2-5 图

【解】 (1)开关接 A,使发射结正偏,集电结反偏,三极管工作在放大区,

$$I_c \approx |E_c|/R = 12\text{mA}$$

(2)开关接 B,使二极管 D 反向截止, $I_b = 0$,三极管工作在截止区,

$$I_c = (1 + \bar{\beta}) I_{cbo} = 0.204 \text{mA}$$

(3) 开关接 C, 使发射结反偏, 集电结反偏, 三极管工作在截止区, 有反偏电流 $I_b = -I_{cbo}$

$$I_c = \bar{\beta} I_b + (1 + \bar{\beta}) I_{cbo} = I_{cbo} \\ = 4 \mu\text{A}$$

【例 2-6】 分析图 2-3 所示各三极管电路, 说明这些电路是否能对交流电压信号进行线性放大, 为什么?

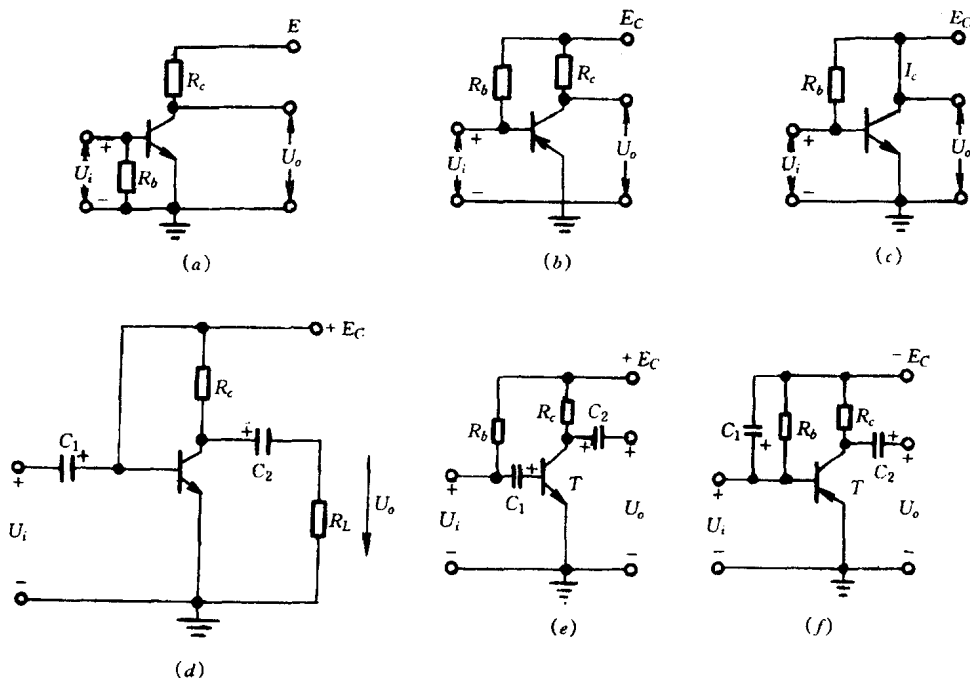


图 2-3 例 2-6 图

【解题思路】 分析一个电路是否有正常的电压放大作用, 关键是要看电路的组成是否符合两条基本原则:

(1) 有极性连接正确的直流电源、合理的元件参数以保证三极管发射结正偏、集电结反偏和合适的静态工作点, 使三极管工作在放大区域。

(2) 电路的交流通路能保证信号的输入和输出, 即有电压放大倍数。

【解】 图(a)因为管子基极回路无直流电源, 静态基极电流 I_{BQ} 为零, 故无正常的电压放大作用。

图(b)因为管子是 PNP 管, 而图中电源极性接反了, 不能满足发射结加正向偏压, 集电结加反向偏压的要求, 故不能对 u_i 线性放大。

图(c)因为交流通路中无 R_c , 使输出电压信号短路, 故不能对 u_i 线性放大。

图(d)因为无基极偏流电阻 R_b , 从直流通路看会因管子的静态基极电流过大而使管子烧坏; 从交流通路看信号被直流电源 E_c 短路, 所以不能有电压放大作用。

图(e)因为由于 C_1 的隔直作用便 $I_B = 0$, 发射结无偏置, 故信号不能正常放大

图(f)因为输入信号经 C_1 和电源短路, 无法加到三极管发射结上, U_{BE} 为一常数, 故电路无放大作用。

【例 2-7】 如图 2-4(a)所示电路,已知 $E_C = 3\text{V}$, $U_b = 0.7\text{V}$, $R_c = 3\text{k}\Omega$, $R_D = 150\text{k}\Omega$, 晶体管 T 的输出特性曲线如图 2-4(b)所示,试求:

- (1) 放大器的静态工作点 I_{CQ} 和 U_{CQ} ;
- (2) 若 $R_c = \infty$, 求输入 u_i 为正弦电压时输出最大不失真电压的幅值;
- (3) 若 $R_L = 7\text{k}\Omega$ 时, 求输出最大不失真电压的幅值。

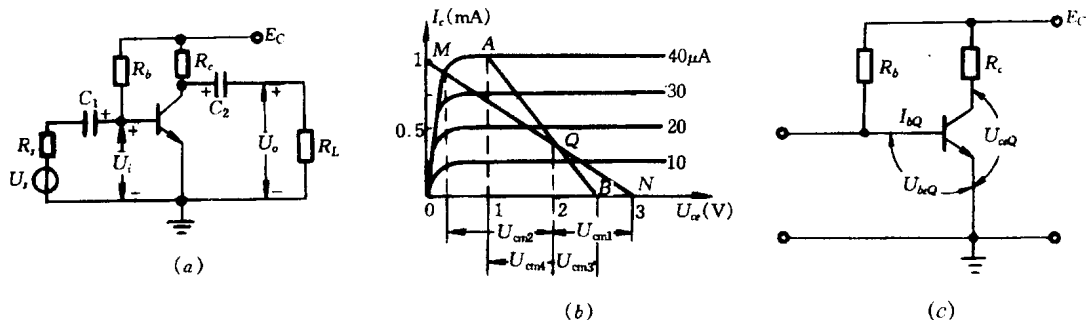


图 2-4 例 2-7 图

(a) 放大电路; (b) 三极管输出特性曲线; (c) 放大器直流通路。

【解】 本题目的在于练习用图解法分析放大电路。

(1) 画出放大器的直流通路如图 2-4(c)所示。由图可知, 直流负载线的方程为:

$$U_{ce} = E_c - I_c R_c$$

$$\begin{cases} \text{令 } I_c = 0, \text{ 则 } U_{ce} = E_c = 3\text{V} \\ \text{令 } U_{ce} = 0, \text{ 则 } I_c = E_c / R_c = 1\text{mA} \end{cases}$$

据此, 在三极管的输出特性曲线上作出直流负载线 MN , 如图 2-4(b)所示。另外, 由图又可以算得静态基极电流为:

$$I_{bQ} = (E_c - U_b) / R_b \approx 15.3\mu\text{A}$$

所以, 直流负载线 MN 与 $I_b = 15\mu\text{A}$ 这条输出特性曲线的交点即为所求静态工作点 Q 。由图可得出

$$I_{CQ} \approx 0.33\text{mA}$$

$$U_{ceQ} \approx 1.7\text{V}$$

(2) 若 $R_L = \infty$, 放大器有 $R_L' = 3\text{k}\Omega = R_c$, 交流负载线与 MN 重合。由图 2-4(b)作图可得: $U_{cm1} = 1.3\text{V}$, $U_{cm2} = 1.45\text{V}$ 。

由图可见, 由于放大器的静态工作点 Q 处于交流负载线的下半部, 所以在不失真条件下, 电路所能给出的最大幅值应以输出信号不产生截止失真为准, 即最大不失真电压幅值 U_{cm} 为:

$$U_{cm} = U_{cm1} = 1.3\text{V}$$

(3) 若 $R_L = 7\text{k}\Omega$, 则 $R_L' = R_L // R_c = 2.1\text{k}\Omega$, 在图 2-4(b)上作交流负载线 AB , 可查得:

$$U_{cm3} = 0.73\text{V}, U_{cm4} = 1.07\text{V}$$

所以输出最大不失真电压幅值为:

$$U_{cm}' = U_{cm3} = 0.73\text{V}$$

【例 2-8】 图 2-4(a)所示放大电路, 已知 $E_C = 6\text{V}$, $U_{beQ} = 0.7\text{V}$, $R_s = 500\Omega$, $R_b = 300\text{k}\Omega$, $R_c = 4\text{k}\Omega$, 晶体管的 $h_{fe} = 50$, $\beta = 50$, $r_{bb'} = 300\Omega$ 。

试求: (1) 静态工作电流 I_{CQ} ;

- (2)画出放大器的简化 h 参数等效电路;
 (3)估算放大器输入电阻 r_i 和增益 A_V (不计 R_L);
 (4)接入 $R_L = 4\text{k}\Omega$, 求增益 A_U 和 $A_{Us} = U_o/U_s$ 。

【解】 (1)由直流通路图 2-4(c)可得:

$$I_{BQ} = (E_C - U_{BEQ})/R_b \approx 17.7\mu\text{A}$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 0.88\text{mA}$$

(2)放大器的简化 h 参数等效电路如图 2-5 所示。

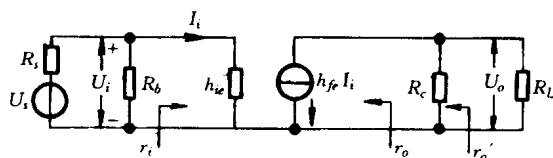


图 2-5 例 2-8 图

$$\begin{aligned} (3) \text{输入电阻 } r_i &= r_{be} = r_{bb'} + (1 + h_{fe}) \frac{26}{I_E} \\ &= 300 + (1 + 50) \frac{26}{0.88} \\ &\approx 1.8\text{k}\Omega \end{aligned}$$

$$A_U = -h_{fe} R_c / r_i = -111$$

(4)接入 $R_L = 4\text{k}\Omega$ 后, $R_L' = R_c // R_L = 2\text{k}\Omega$

$$A_U = -h_{fe} R_L' / r_i = -55.6$$

$$A_{Us} = U_o / U_s$$

$$= \frac{r_i}{r_i + R_s} A_U = -44$$

由以上分析可见,共射组态放大电路的主要特点是:输出电压与输入电压相位相反,电压放大倍数较大,输入电阻和输出电阻适中。

此外,可见当计及信号源内阻 R_s 后,电压放大倍数降低了,下降程度决定于输入电阻和信号源内阻的比值。

【例 2-9】 图 2-6(a)所示放大器,已知 $R_s = 50\Omega$, $R_{b2} = 10\text{k}\Omega$, $R_{b1} = 33\text{k}\Omega$, $R_c = 1\text{k}\Omega$, $R_L = 1\text{k}\Omega$, 晶体管参数 $h_{fe} = 50$, $h_{ie} = 1.2\text{k}\Omega$ 。

试求:(1)画出放大器的直流通路和交流通路;

(2)画出放大器简化 h 参数等效电路;

(3)求出放大器的输入电阻 R_i (不含 R_b) 和 R_i' (含 R_b), 增益 A_U 和 A_{Us} , 输出电阻 R_o' (含 R_c)。

【解】 (1)放大器直流通路和交流通路分别如图 2-6(b)和图 2-6(c)所示。

(2)放大器的简化 h 参数等效电路如图 2-6(d)所示。

$$(3) R_i = 1.2\text{k}\Omega$$

$$R_i' = 1.04\text{k}\Omega$$

$$A_U = -20.8$$

$$A_{Us} = -20 \text{ (未考虑 } R_{b\Sigma} \text{ 影响)}$$