

# 第二篇 学习指导

## 第 1 章 半导体器件

### 1.1 教学要求

- (1) 理解半导体的基本特性,掌握 PN 结的单向导电性。
- (2) 理解二极管的伏安特性,掌握二极管电路的分析方法,了解稳压二极管的稳压特性。
- (3) 掌握三极管的组成,放大条件,放大原理。理解三极管的伏安特性。
- (4) 了解场效应管的放大原理,掌握场效应管伏安特性。

### 1.2 内容归纳

#### 1.2.1 半导体的基础知识

在电子器件中,常用的半导体材料有元素半导体(如硅、锗等)、化合物半导体(如砷化镓等),以及掺杂或制成其他化合物半导体的材料,其中硅是目前最常用的一种半导体材料。

##### 1. 本征半导体特性

①热敏;②光敏;③杂敏。

##### 2. 本征激发

随着温度升高或受到外界激发增强,共价键中的价电子就会获得足够的能量而挣脱共价键的束缚,成为自由电子,与此同时,共价键中就留下一个空位,称为空穴,这种现象称为本征激发。本征激发产生自由电子-空穴对,其中自由电子带单位电荷负电,空穴带单位电荷正电。两者均可在电场的作用下定向移动,称为载流子。半导体中存在两种类型的载流子参与导电,这是半导体和导体导电机理的本质区别。

##### 3. 杂质半导体

常温下,本征半导体载流子数目非常有限,故其导电能力较弱。但是在本征半导体中掺入微量的杂质会使其导电性能发生显著的改变。杂质半导体分为 N 型半导体和 P 型半导体。

##### (1) N 型半导体

在本征半导体中掺入 5 价元素形成。一个杂质原子能提供一个自由电子,因此,在 N 型半导体中,自由电子的浓度远大于空穴的浓度。自由电子为多子,空穴为少子。

##### (2) P 型半导体

在本征半导体中掺入 3 价元素形成。一个杂质原子能提供一个空穴,因此,在 P 型半导体中,空穴的浓度远大于自由电子的浓度。空穴为多子,自由电子为少子。

##### 4. PN 结

在同一块半导体基片上,利用杂质补偿的方法,使得半导体一边为 P 区,一边为 N 区,它们的

交界面将形成一个特殊的带电薄层,称为 PN 结。PN 结是构成半导体二极管、三极管、场效应管、集成电路等多种半导体器件的基础。

### (1) 内电场

PN 结内的带电薄层也称为内电场,电场的方向是 N→P。内电场有两个作用:阻碍多子的扩散,促进少子的漂移。当漂移运动和扩散运动处于动态平衡时,内电场强度不再变化,PN 结形成。

### (2) PN 结的单向导电性

PN 结两端加正向偏置电压时,扩散运动占优势,有较大的电流通过,PN 结呈现的电阻很低,称为正向导通;

PN 结两端加反向偏置电压时,漂移运动占优势,有微弱的电流通过,PN 结呈现的电阻很高,称为反向截止。

## 1.2.2 半导体二极管

### 1. 二极管的伏安特性

加在二极管两极间的电压和流过二极管的电流之间的关系称为二极管的伏安特性。用于定量描述这两者关系的曲线称为伏安特性曲线。

#### (1) 正向特性

当二极管正偏电压小于导通电压时,可视为正向电流为零的截止状态。当正向电压大于导通电压时,随着外加正向电压的增大,二极管处于正向导通状态。硅管导通电压为 0.6~0.7V,锗管约为 0.2~0.3V。

#### (2) 反向特性

外加反向电压时,在外加反向电压增加时并无明显增大,通常硅管为几微安到几十微安;锗管为几十微安到几百微安,故又称反向饱和电流。当反向电压过高且达到一定值时,反向电流急剧增大,特性曲线接近于陡峭直线,这种现象称为二极管的反向击穿。

### 2. 二极管的电路模型

#### (1) 理想模型

正向偏置时,管压降为 0;反向偏置时,认为其电阻为无穷大,流过的电流为 0。

#### (2) 恒压源模型

当二极管导通时,其管压降认为是恒定的,不随电流变化,典型值为硅管 0.7V,锗管约为 0.2V。不导通时,认为其电阻为无穷大,流过的电流为 0。

### 3. 二极管工作状态的判断方法

判断二极管在电路中的状态步骤如下:①将二极管从电路中断开;②分析计算其阳、阴两极间是正向电压还是反向电压,若是前者,则二极管导通,否则截止;③如果同时有多个管子承受正向电压,则正向电压高的管子优先导通,再重新判断其余二极管的工作状态。

### 4. 二极管的应用电路

整流电路,限幅电路,钳位电路。

### 5. 稳压二极管

稳压管工作于 PN 结的反向击穿区,其内部电流对电压的变化敏感。稳压管正向特性与普通二极管相似。

## 1.2.3 半导体三极管

半导体三极管,又称晶体三极管,由两个相距很近的 PN 结组成。由于 PN 结之间的相互影

响,使得三极管具有电流放大功能。

### 1. 三极管的结构

三极管分为 NPN 和 PNP 两种类型。三极管内部含三区两结。两结:发射结和集电结;三区:发射区(e)、基区(b)和集电区(c),由这三个区域引出三个电极分别称为发射极、基极和集电极。

### 2. 三极管的放大条件

#### (1) 内部条件

发射区杂质浓度大于集电区杂质浓度,以便于有足够的载流子供“发射”;集电结的面积比发射结的面积大,以利于集电区收集载流子;基区很薄,杂质浓度很低,以减少载流子在基区的复合机会。

#### (2) 外部条件

发射结正偏;集电结反偏。针对不同类型的管子,放大电路中各极的电位关系如下:

$$\text{NPN 管 } V_c > V_b > V_e; \text{ PNP 管 } V_c < V_b < V_e$$

### 3. 三极管放大电路的三种组态

共射极、共基极、共集极。

### 4. 三极管电流分配关系

$$\textcircled{1} I_E = I_B + I_C; \textcircled{2} I_C = \beta I_B, \Delta I_C = \beta \Delta I_B$$

### 5. 三极管的伏安特性

① 输入特性:  $i_B = f(v_{BE})|_{v_{CE}=\text{常数}}$ ,与二极管的伏安特性曲线相似。

② 输出特性:  $i_C = f(v_{CE})|_{i_B=\text{常数}}$ ,三极管输出特性曲线分为三个区。

放大区:发射结正偏,集电结反偏。  $i_C = \beta i_B$ 。

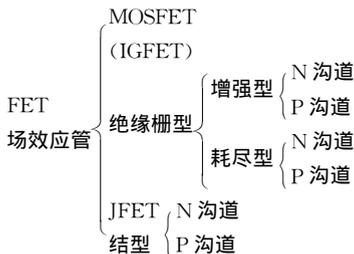
饱和区:发射结正偏,集电结正偏。  $v_{CE} = V_{CES}$ ,对于 NPN 型(硅)管  $V_{CES} = 0.3V$ ,PNP 型(锗)管  $|V_{CES}| = 0.1V$ 。

截止区:发射结反偏。  $I_B = 0$ 。

## 1.2.4 场效应晶体管

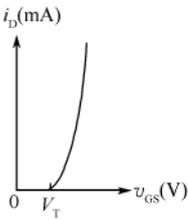
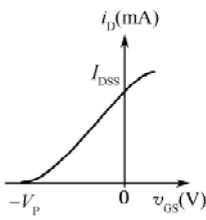
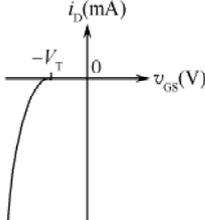
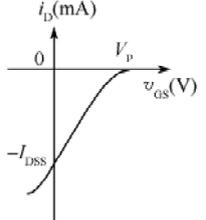
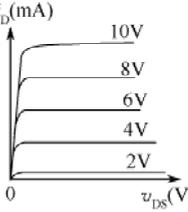
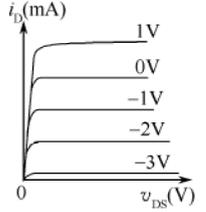
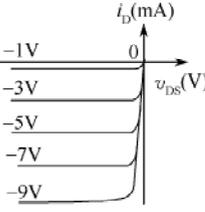
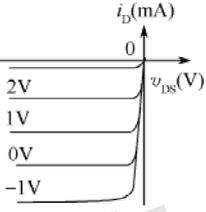
场效应晶体管也是一种三端半导体器件,其外形与普通三极管相似,但与三极管相比,具有输入电阻高、噪声小、功耗低和热稳定性好的特点。

### 1. 场效应管的分类



### 2. MOS 管的符号和特性(以流入 D 为电流正方向)

管型	增强型 NMOS 管	耗尽型 NMOS 管	增强型 PMOS 管	耗尽型 PMOS 管
电路符号				

管型	增强型 NMOS 管	耗尽型 NMOS 管	增强型 PMOS 管	耗尽型 PMOS 管
转移特性				
输出特性				

### 3. 场效应管的电压极性要求

在 FET 放大电路中,  $V_{DS}$  的极性决定于沟道性质, N(沟道) 为正, P(沟道) 为负; 为了建立合适的偏置电压  $V_{GS}$ , 不同类型的 FET, 对偏置电压的极性有不同要求: 增强型 MOSFET 的  $V_{GS}$  和  $V_{DS}$  同极性, 耗尽型 MOSFET 的  $V_{GS}$  可正、可负或为零。

### 4. 场效应管的主要参数

(1) 跨导  $g_m$ : 指  $v_{DS}$  为某一固定值时, 栅源电压对漏极电流的控制能力, 定义为

$$g_m = \left. \frac{\Delta i_D}{\Delta v_{GS}} \right|_{v_{DS} = \text{常数}}$$

(2) 直流输入电阻  $R_{GS}$ : 栅源电压与栅极电流的比值, 其值一般大于  $10^9 \Omega$ 。

(3) 漏极饱和电流  $I_{DSS}$ : 当  $V_{GS} = 0$  时, 在规定的  $v_{DS}$  下所产生的漏极电流。此参数只对耗尽型管子有意义。

(4) 开启电压  $V_T$ : 增强型 FET 的参数。当  $V_{DS}$  一定时, 使管子导通的最小栅源电压。

(5) 夹断电压  $V_P$ : 耗尽型 FET 的参数。当  $V_{DS}$  一定时, 使管子截止的最小栅源电压。

### 5. 三极管和场效应管的性能比较

(1) 场效应管的源极(S)、栅极(G)、漏极(D)分别对应于三极管的发射极(e)、基极(b)和集电极(c), 它们的作用相似。

(2) 场效应管是电压控制电流器件, 由  $V_{GS}$  控制  $i_D$ , 其放大系数  $g_m$  一般较小, 因此场效应管的放大能力较差; 三极管是电流控制电流器件, 由  $i_B$  (或  $i_E$ ) 控制  $i_C$ 。

(3) 场效应管栅极几乎没有电流; 而三极管工作时基极总要吸取一定的电流。因此场效应管的输入电阻比三极管的输入电阻高。

(4) 场效应管只有一种极性的载流子参与导电, 称为单极型器件, 三极管中两种载流子参与导电, 称为双极型器件。

(5) 场效应管在源极未与衬底连在一起时, 源极和漏极可以互换使用, 且特性变化不大; 而三极管的集电极与发射极互换使用时, 其特性差异很大, 电流放大系数值将减小很多。

(6) 场效应管的噪声系数很小, 在低噪声放大电路的输入级, 即要求信噪比较高的电路中要选用场效应管。

## 1.3 习题解答

**【习题 1.1】** 二极管伏安特性有何特点？

**【知识点】** 二极管的电压与流过二极管电流的关系。

**【解题过程】** 正向特性:当正向电压小于开启电压时,电流为零,二极管截止;超过开启电压时,电流随着电压的增大呈指数增大,二极管导通。

反向特性:当反向电压小于反向击穿电压时,存在微弱的反向饱和电流;超过反向击穿电压时,二极管被击穿,反向电流急剧增加,而两端的电压基本保持不变。

**【习题 1.2】** 二极管是非线性器件,它的直流电阻和交流电阻有何区别?用万用表欧姆挡测量的二极管电阻属于哪一种?为什么用万用表欧姆挡的不同量程测出的二极管阻值也不同?

**【知识点】** 非线性器件的等效电阻与外加电压的大小有关。

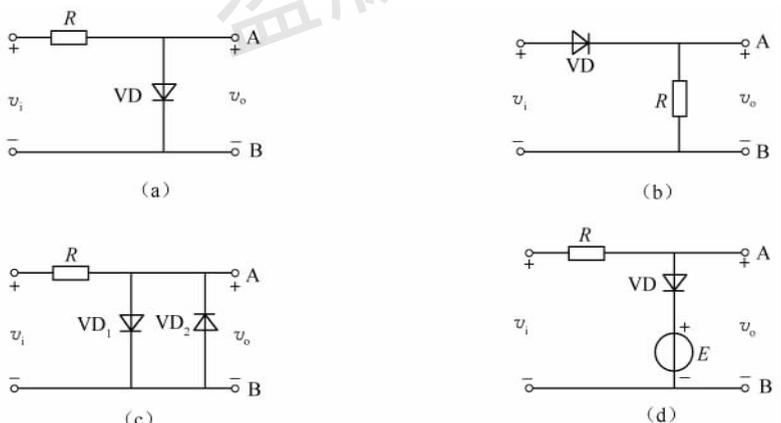
**【解题过程】** 直流电阻定义为工作点处的直流电压与直流电流之比,在伏安特性曲线上是工作点处割线斜率的倒数;交流电阻定义为工作点处的电压变化量与电流变化量之比,在伏安特性曲线上是工作点处切线斜率的倒数;非线性器件同一工作点处直流电阻和交流电阻不相等。用万用表欧姆挡测量的二极管电阻是直流电阻。由于非线性器件不同工作点处直流电阻不相等,所以万用表欧姆挡的不同量程测出的二极管阻值也不同。

**【习题 1.3】** 为什么稳压管的动态电阻越小,稳压效果越好?

**【知识点】** 稳压二极管的稳压特性。

**【解题过程】** 稳压二极管的动态电阻  $r_z = \frac{\Delta v_z}{\Delta i_z}$ ,其值越小,代表稳压管两端的电压随电流的变化越小,因此稳压效果越好。

**【习题 1.4】** 在图题 1.4 所示的各电路中输入电压  $v_i = 10 \sin \omega t \text{ V}$ ,  $E = 5 \text{ V}$ 。试画出各电路输出  $v_o$  波形,并标出其幅值,设管子正向压降为  $0.7 \text{ V}$ ,反向电流可以忽略。



图题 1.4

**【知识点】** 二极管工作状态的判断。

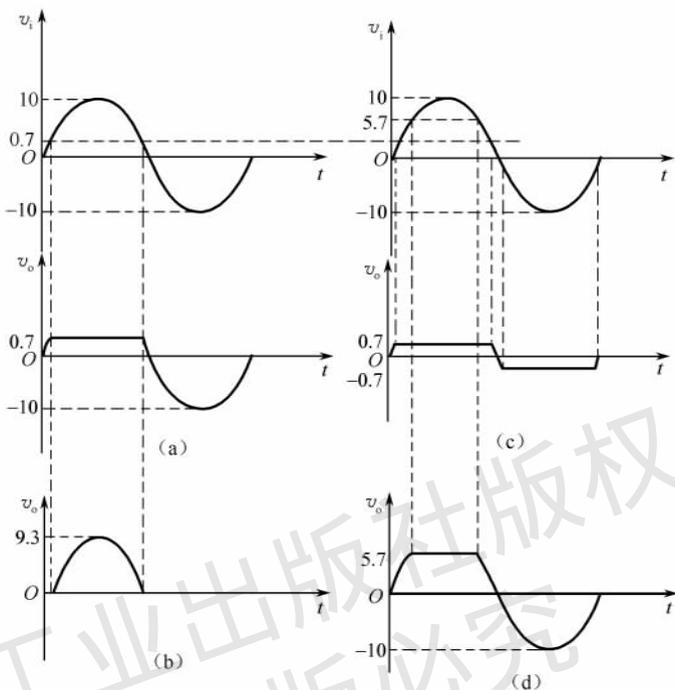
**【解题过程】** 图(a):若将二极管从电路中断开,其两端的正向压降为  $v_D = v_i$ ,所以当  $v_i > 0.7 \text{ V}$  时,VD 导通,  $v_o = 0.7 \text{ V}$ ;当  $v_i \leq 0.7 \text{ V}$  时,VD 截止,  $v_o = v_i$ ;输出电压的波形如图解 1.4(a) 所示。

图(b):若将二极管从电路中断开,其两端的正向压降为  $v_D = v_i$ ,所以当  $v_i > 0.7 \text{ V}$  时,VD 导通,

$v_o = v_i - 0.7V$ ; 当  $v_i \leq 0.7V$  时, VD 截止,  $v_o = 0$ ; 输出电压的波形如图解 1.4(b) 所示。

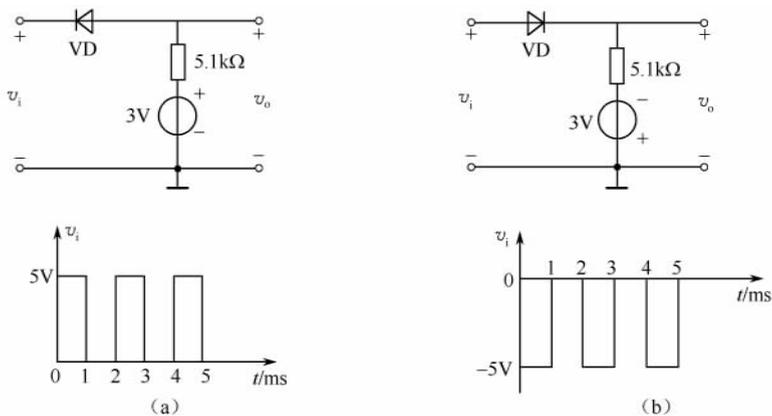
图(c): 若将二极管从电路中断开, 其两端的正向压降分别为  $v_{D1} = v_i, v_{D2} = -v_i$ , 所以当  $v_i > 0.7V$  时, VD<sub>1</sub> 导通, VD<sub>2</sub> 截止,  $v_o = 0.7V$ ; 当  $-0.7V \leq v_i \leq 0.7V$  时, VD<sub>1</sub>、VD<sub>2</sub> 均截止,  $v_o = v_i$ ; 当  $v_i < -0.7V$  时, VD<sub>1</sub> 截止, VD<sub>2</sub> 导通,  $v_o = -0.7V$ ; 输出电压的波形如图解 1.4(c) 所示。

图(d): 若将二极管从电路中断开, 其两端的正向压降为  $v_D = v_i - 5V$ , 所以当  $v_i > 5.7V$  时, VD 导通,  $v_o = 5.7V$ ; 当  $v_i \leq 5.7V$  时, VD 截止,  $v_o = v_i$ ; 输出电压的波形如图解 1.4(d) 所示。



图解 1.4

【习题 1.5】 画出题 1.5 所示各电路中的  $v_o$  的波形(可忽略 VD 的正向压降)。

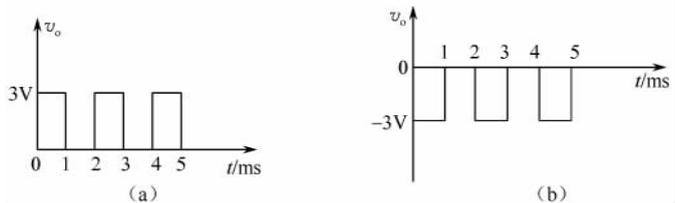


图题 1.5

【知识点】 二极管的单向导电性。

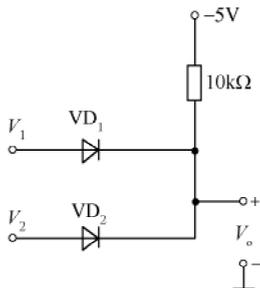
【解题过程】 图(a): 若将二极管从电路中断开, 其两端的正向压降为  $v_D = 3 - v_i$ , 所以当  $v_i < 3V$  时, VD 导通,  $v_o = v_i$ ; 当  $v_i \geq 3V$  时, VD 截止,  $v_o = 3V$ ; 输出电压的波形如图解 1.5(a) 所示。

图(b):若将二极管从电路中断开,其两端的正向压降为  $v_D = v_i + 3V$ ,所以当  $v_i > -3V$  时,VD 导通,  $v_o = v_i$ ;当  $v_i \leq -3V$  时,VD 截止,  $v_o = -3V$ ;输出电压的波形如图解 1.5(b)所示。



图解 1.5

**【习题 1.6】** 分析图题 1.6 中所示的电路中各二极管的工作状态(导通或截止)确定出  $v_o$ ,将结果填入表中(图中二极管均为理想二极管)。



$V_1$	$V_2$	VD <sub>1</sub>	VD <sub>2</sub>	$V_o$
0	0			
0	5			
5	0			
5	5			

图题 1.6

**【知识点】** 二极管的单向导电性。

**【解题过程】** 若将二极管从电路中断开,其两端的正向压降分别为  $V_{D1} = V_1 - 5V, V_{D2} = V_2 + 5V$ ,所以:

$V_1$	$V_2$	VD <sub>1</sub>	VD <sub>2</sub>	$V_o$
0	0	截止	截止	0V
0	5	截止	导通	5V
5	0	导通	截止	5V
5	5	导通	导通	5V

图解 1.6

当  $V_1 = V_2 = 0V$  时,VD<sub>1</sub>、VD<sub>2</sub> 均导通,  $v_o = 0V$ ;  
 当  $V_1 = 0V, V_2 = 5V$  时,VD<sub>2</sub> 优先导通,VD<sub>1</sub> 截止,  $V_o = V_2 = 5V$ ;  
 当  $V_1 = 5V, V_2 = 0V$  时,VD<sub>1</sub> 优先导通,VD<sub>2</sub> 截止,  $V_o = V_1 = 5V$ ;  
 当  $V_1 = V_2 = 5V$  时,VD<sub>1</sub>、VD<sub>2</sub> 均导通,  $v_o = 5V$ 。各管的输出见图解 1.6。

**【习题 1.7】** 二极管电路如图题 1.7 所示,判断图中的二极管是导通还是截止,并求出 AB 两端的电压  $V_{AB}$ (图中二极管均为理想二极管)。

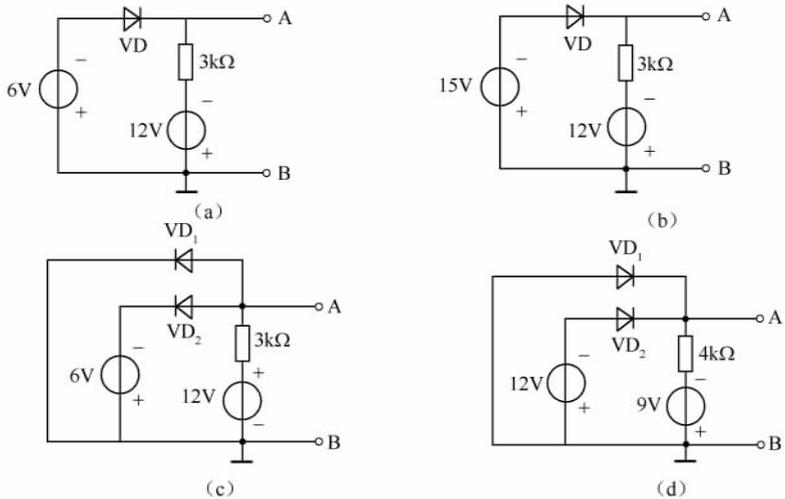
**【知识点】** 二极管的单向导电性。

**【解题过程】** 图(a):若将二极管从电路中断开,其两端的正向压降为  $V_D = -6V - (-12V) = 6V > 0$ ,所以二极管 VD 导通,  $V_{AB} = -6V$ 。

图(b):若将二极管从电路中断开,其两端的正向压降为  $V_D = -15V - (-12V) = -3V < 0$ ,所以二极管 VD 截止,  $V_{AB} = -12V$ 。

图(c):若将二极管从电路中断开,其两端的正向压降分别为  $V_{D1} = 12V, V_{D2} = 12V - (-6V) = 18V$ ,因为  $V_{D2} > V_{D1} > 0$ ,所以二极管 VD<sub>2</sub> 优先导通,此时,  $V_{D1} = -6V - 0V = -6V < 0$ ,VD<sub>1</sub> 截止。  $V_{AB} = -6V$ 。

图(d):若将二极管从电路中断开,其两端的正向压降分别为  $V_{D1} = 9V, V_{D2} = -12V - (-9V) = -3V$ ,因为  $V_{D1} > 0, V_{D2} < 0$ ,所以二极管 VD<sub>1</sub> 导通,VD<sub>2</sub> 截止,此时,  $V_{AB} = 0V$ 。



图题 1.7

**【习题 1.8】** 试估算图题 1.8 所示各电路中流过二极管的电流和 A 点的电位(设二极管的正向压降为  $0.7V$ )。

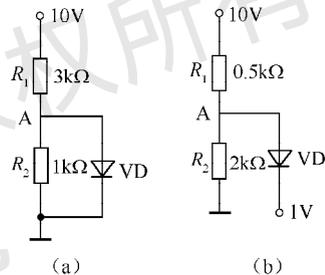
**【知识点】** 二极管的单向导电性。

**【解题过程】** 图(a):若将二极管从电路中断开,其两端的正向压降为  $V_D = 10V > 0.7V$ ,所以二极管 VD 导通,

$$\begin{aligned} V_A &= 0.7V, I_D = I_{R1} - I_{R2} \\ &= \frac{(10 - 0.7)V}{3k\Omega} - \frac{0.7V}{1k\Omega} = 2.4mA \end{aligned}$$

图(b):若将二极管从电路中断开,其两端的正向压降为  $V_D = 10V - 1V > 0.7V$ ,所以二极管 VD 导通,

$$V_A = 1.7V, I_D = I_{R1} - I_{R2} = \frac{(10 - 1.7)V}{0.5k\Omega} - \frac{1.7V}{2k\Omega} = 15.75mA$$



图题 1.8

**【习题 1.9】** 既然三极管具有两个 PN 结,可否用两只二极管背靠背地相连以构成一只三极管,说明理由。

**【知识点】** 三极管的内部结构。

**【解题过程】** 不行,三极管与二极管的最大区别是具有电流放大作用,要保证其放大功能,内部的两个 PN 结结构是不对称的,掺杂浓度和面积也都不相同。

**【习题 1.10】** 能否将三极管的发射极与集电极交换使用?为什么?

**【知识点】** 三极管的内部结构。

**【解题过程】** 不行,虽然发射区和集电区的类型一样,但其掺杂浓度和面积都不相同,因此集电极和发射极不能交换使用。

**【习题 1.11】** 要使 PNP 型三极管具有线性放大作用,其发射结和集电结的偏置电压应如何连接;并说明其处于截止及饱和状态时的条件。

**【知识点】** 三极管的放大条件。

**【解题过程】** 三极管要具有放大作用,必须保证发射结正偏,集电结反偏。处于饱和区的条件:发射结和集电结都正偏。处于截止区的条件:发射结反偏。

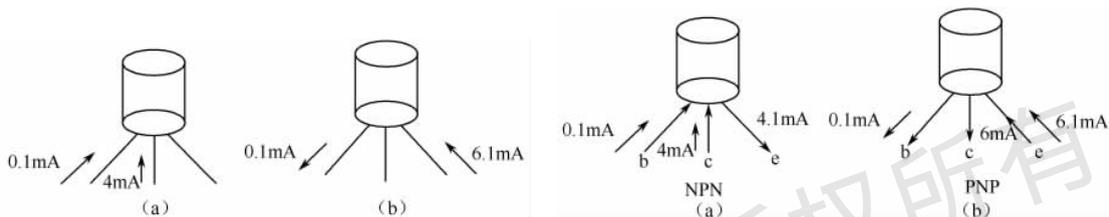
**【习题 1.12】** 测得工作在放大电路中两个三极管的两个电极电流如图题 1.12 所示：(1)求另一个电极电流，并在图中标出实际方向。(2)判断三极管是 NPN 型还是 PNP 型，并标出 e、c、b 极。

**【知识点】** 三极管的电流分配关系。

**【解题过程】** 三极管三个极的电流关系为：(1) $I_E = I_B + I_C$ 。(2)NPN 型的三极管，发射极电流方向是流出，集电极和基极电流方向都是流入。PNP 型的三极管，发射极电流方向是流入，集电极和基极电流方向都是流出。(3) $I_B \ll I_E$ 。

图(a)所示的两个极的电流方向均为流入，所以 0.1mA 为基极电流，4mA 为集电极电流，剩下的电极为发射极电流，其为  $I_E = I_B + I_C = 4.1\text{mA}$ ，电流方向为流出，根据电流方向确定此管类型为 NPN 型。结论如图解 1.12 所示。

图(b)所示的两个极的电流一个流入，一个流出，所以 6.1mA 为发射极电流，剩下的电极电流为  $6.1\text{mA} - 0.1\text{mA} = 6\text{mA}$ ，电流方向为流出，又因为  $0.1\text{mA} < 6\text{mA}$ ，所以 6mA 为集电极电流，此管类型为 PNP 型。结论如图解 1.12 所示。



图题 1.12

图解 1.12

**【习题 1.13】** 测得某放大电路中三极管的三个电极 A、B、C 的对地电位分别为  $V_A = -9\text{V}$ ， $V_B = -6\text{V}$ ， $V_C = -6.2\text{V}$ ，分析 A、B、C 中哪个是基极、发射极、集电极，并说明此三极管是 NPN 型还是 PNP 型。

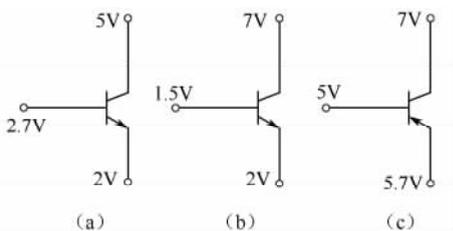
**【知识点】** 三极管工作于放大区时三个电极电压的大小关系。

**【解题过程】** 三极管工作于放大区要满足的外部条件是：发射结正偏，集电极反偏。对于 NPN 型的三极管，三个极的电位关系为： $V_E < V_B < V_C$ ；对于 PNP 型三极管，三个极的电位关系为： $V_E > V_B > V_C$ ；所以放大电路中，不论是什么类型的管子，基极电位都是中间电位，所以第一步可判断出基极。另外发射结正偏电压为典型值，若是硅管，正偏电压为 0.7V；若是锗管，正偏电压为 0.2V，由此可判断出发射极和集电极。最后根据三个极电位的大小，可判断管子的类型。

因为  $V_A < V_C < V_B$ ，所以电极 C 为基极 b， $V_B - V_C = 0.2\text{V}$ ，由此可判断出电极 B 为发射极 e，剩下的电极 A 为集电极 c。因此  $V_E > V_B > V_C$ ，此管类型为 PNP 型。

**【习题 1.14】** 测得某放大电路中三极管的三个电极电位见图题 1.14，试判断管子分别工作在什么状态？

**【知识点】** 根据发射结和集电结的偏置状态判断三极管的工作状态。



图题 1.14

**【解题过程】** 若发射结正偏，集电结反偏，三极管工作于放大区；若发射结和集电结都正偏，三极管工作于饱和区；若发射结反偏，三极管工作于截止区。

图(a)： $V_{BE} = 2.7\text{V} - 2\text{V} = 0.7\text{V} > 0$ ，发射结正偏， $V_{BC} = 2.7\text{V} - 5\text{V} = -2.3\text{V} < 0$ ，集电结反偏，所以三极管工作于放大区。

图(b)： $V_{BE} = 1.5\text{V} - 7\text{V} = -5.5\text{V} < 0$ ，发射结反偏，所以三极管工作于截止区。

图(c):  $V_{EB} = 5.7V - 5V = 0.7V > 0$ , 发射结正偏,  $V_{CB} = 7V - 5V = 2V > 0$ , 集电结正偏, 所以三极管工作于饱和区。

**【习题 1.15】** 有一个场效应管但不知道是什么类型, 通过实验测试它的漏极特性如图题 1.15 所示。请判断并计算:

- (1) 它是哪种类型的场效应管?
- (2) 它的电压  $V_p$  (或开启电压  $V_T$ ) 大约是多少?
- (3) 它的  $I_{DSS}$  大约是多少?

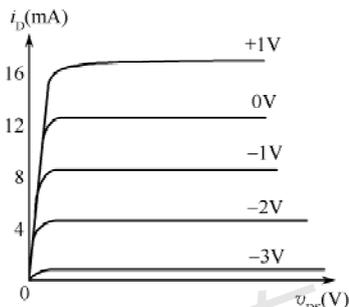
**【知识点】** 根据栅源电压和漏源电压的值判断场效应管的类型。

**【解题过程】** 漏源电压  $V_{DS}$  的极性决定于沟道的性质, N 沟道为正, P 沟道为负; 不同类型的场效应管 (FET) 对栅源电压  $V_{GS}$  的要求不同, 增强型 MOSFET 的漏源电压  $V_{GS}$  与  $V_{DS}$  极性相同, 耗尽型 MOSFET 的  $V_{GS}$  可正可负或为零。

(1) 图中  $V_{DS} > 0$ , N 沟道,  $V_{GS}$  有正有负有零, 耗尽型。所以该管子为耗尽型的 NMOS 管。

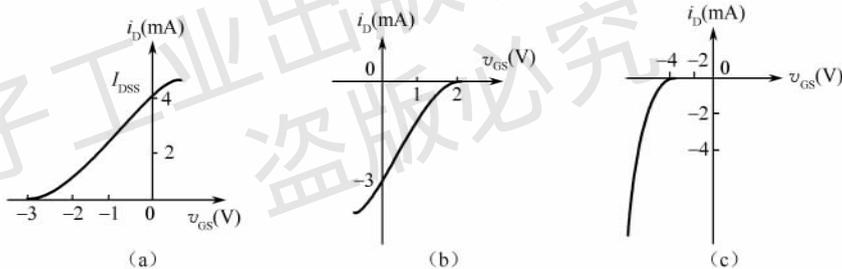
(2) 对于耗尽型的管子, 夹断电压为漏极电流等于 0 时所对应的栅源电压  $V_{GS}$ ,  $V_p = -3V$ 。

(3) 漏极饱和电流  $I_{DSS}$  为栅源电压  $V_{GS} = 0$  时所对应的漏极电流,  $I_{DSS} = 12mA$ 。



图题 1.15

**【习题 1.16】** 图题 1.16 所示为 MOSFET 的转移特性, 分别说明各属于何种沟道。如是增强型, 说明它的开启电压  $V_T = ?$  如是耗尽型, 说明它的夹断电压  $V_p = ?$  (图中  $i_D$  的假定正向为流进漏极。)



图题 1.16

**【知识点】** 根据转移特性曲线判断场效应管的类型。

**【解题过程】** 增强型 MOSFET 的  $v_{GS}$  只能单边变化, 或正或负, 耗尽型 MOSFET 的  $v_{GS}$  可正可负或为零。若漏极电流的方向为流入, 即  $i_D > 0$ , 则沟道类型为 N 沟道, 若漏极电流的方向为流出, 即  $i_D < 0$ , 则沟道类型为 P 沟道。

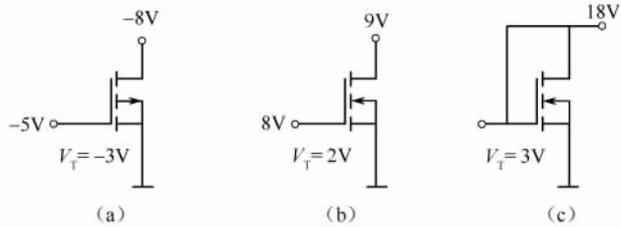
图(a)中  $i_D > 0$ , 沟道类型为 N 沟道,  $v_{GS}$  有正有负有零, 管子为耗尽型。所以该管子为耗尽型的 NMOS 管。夹断电压  $V_p = -3V$ 。

图(b)中  $i_D < 0$ , 沟道类型为 P 沟道,  $v_{GS}$  有正有负有零, 管子为耗尽型。所以该管子为耗尽型的 PMOS 管。夹断电压  $V_p = 2V$ 。

图(c)中  $i_D < 0$ , 沟道类型为 P 沟道,  $v_{GS} < 0$ , 管子为增强型。所以该管子为增强型的 PMOS 管。开启电压  $V_T = -4V$ 。

**【习题 1.17】** 判断图题 1.17 所示的 MOSFET 工作于何种区域?

**【知识点】** 根据栅源电压和漏源电压的值判断 MOS 管的工作区域。



图题 1.17

**【逻辑推理】** 对于增强型 MOSFET, 若  $|V_{GS}| < |V_T|$ , 管子工作于截止区; 若  $|V_{GS}| > |V_T|$ ,  $|V_{DS}| > |V_{GS} - V_T|$ , 管子工作于饱和区; 若  $|V_{GS}| > |V_T|$ ,  $|V_{DS}| < |V_{GS} - V_T|$ , 管子工作于可变电阻区。

**【解题过程】** 图(a)所示管子是增强型 PMOS 管,  $|V_{GS}| > |V_T|$ ,  $|V_{DS}| > |V_{GS} - V_T|$ , 所以管子工作于饱和区。

图(b)所示管子是增强型 NMOS 管,  $|V_{GS}| > |V_T|$ ,  $|V_{DS}| > |V_{GS} - V_T|$ , 所以管子工作于饱和区。

图(c)所示管子是增强型 NMOS 管,  $|V_{GS}| > |V_T|$ ,  $|V_{DS}| > |V_{GS} - V_T|$ , 所以管子工作于饱和区。

电子工业出版社版权所有  
盗版必究

# 第 2 章 放大器基础

## 2.1 教学要求

- (1) 掌握共射放大电路的基本电路组成;掌握共射电路图解分析法。
- (2) 理解静态工作点对输出波形失真的影响。
- (3) 理解稳定静态工作点电路的工作原理。
- (4) 掌握静态工作点估算方法。
- (5) 掌握运用微变等效电路法估算输入电阻、输出电阻和电压放大倍数。
- (6) 掌握三种组态放大器的特性及应用。
- (7) 理解差动放大器结构特点、性能特点。
- (8) 掌握场效应管放大器的分析方法。
- (9) 理解多级放大器的级间耦合方式;掌握阻容耦合多级放大电路的电压放大倍数、输入/输出电阻估算方法。
- (10) 理解低频功率放大电路的任务、特点和要求;掌握 OTL、OCL 功率放大器的电路组成特点及工作原理和计算。
- (11) 了解集成功放器的主要参数、结构特点并正确辨认其电流源电路。
- (12) 掌握电流源的工作原理及其应用。

## 2.2 内容归纳

### 2.2.1 放大器的基础知识

放大电路的放大实质上是能量的转换,即用较小能量的输入信号通过半导体器件去控制电源,使电路的输出端得到一个与输入信号变化相似的,但能量却大得多的输出信号。具有能量控制作用的元件有三极管、场效应管,以及集成运算放大器等。

#### 1. 放大器的性能指标

增益、输入阻抗、输出阻抗、频率响应和失真。

#### 2. 放大器的分析方法

放大器的分析包含静态分析和动态分析。静态分析可采用估算法和图解法,动态分析则采用图解法或小信号模型分析法。图解法分析电路的工作点选择是否合适,是否产生失真,以及功率放大电路比较方便,而小信号模型分析法适合分析低频小信号放大器的增益、输入输出电阻和频率响应等动态指标。

#### 3. 静态工作点的稳定

放大器不仅要设置合适的工作点,而且要求工作点要稳定。引起放大器工作点不稳定的主要因素是温度,常用的稳定工作点电路是分压式偏置电路。对于直接耦合的多级放大器,稳定静态工作点,抑制零漂,可采用差动放大器。

#### 4. 小信号放大器和功率放大器的比较

小信号放大器强调不失真的放大输入信号,必须设置合适的静态工作点,保证在信号的整个周

期内放大元件都工作于放大区。功率放大器强调高效率的输出大功率,允许一定程度的失真,为了保证高效率,功放中的放大元件静态时通常处于截止状态或者微弱导通状态。

## 2.2.2 三极管放大器

### 1. 直流通路和交流通路的画法

画直流通路时,将电容器视为开路,其他不变。画交流通路时,将电容器短路、直流电源视为对地短路,其余元件照画。

### 2. 静态工作点的计算

(1) 固定偏置电路(如图 2.2.1 所示)

$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - V_{BEQ}}{R_B}, I_{CQ} = \beta I_{BQ}, V_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_C$$

(2) 射极偏置电路(如图 2.2.2 所示)

$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - V_{BEQ}}{R_B + (1 + \beta) R_E}, I_{CQ} = \beta I_{BQ}, V_{CEQ} \approx V_{CC} - I_{CQ} R_E$$

(3) 分压式偏置电路(如图 2.2.3 所示)

$$V_{BQ} \approx V_{CC} \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}}, I_{CQ} \approx I_{EQ} = \frac{V_{BQ} - V_{BEQ}}{R_E}, V_{CEQ} \approx V_{CC} - I_{CQ} (R_C + R_E)$$

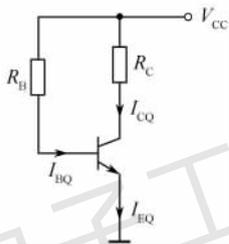


图 2.2.1 固定偏置电路

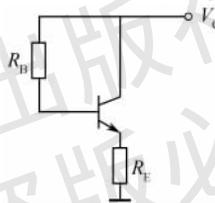


图 2.2.2 射极偏置电路

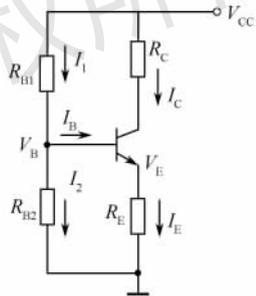


图 2.2.3 分压式偏置电路

### 3. 静态工作点的设置与波形失真的关系

- (1) 饱和失真,静态工作点太靠近饱和区引起的波形失真;
- (2) 截止失真,静态工作点太靠近截止区引起的波形失真;
- (3) 大信号失真,静态工作点合适,但输入信号过大引起的波形失真。

### 4. 三极管的微变等效电路模型

三极管的微变等效电路模型如图 2.2.4 所示。

$$r_{be} = 200 + (1 + \beta) \frac{26\text{mV}}{I_E \text{mA}} \Omega$$

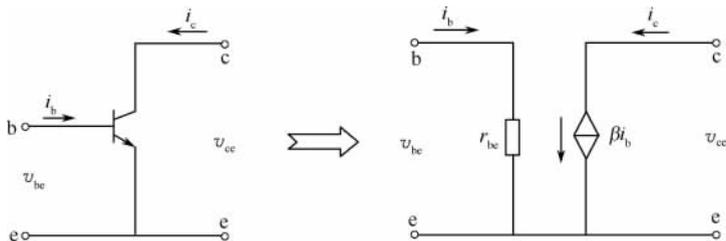


图 2.2.4 三极管的微变等效电路

## 5. 三种基本组态的判断方法

三种组态:共基极,共射极,共集电极。

判断方法:输入信号加在三极管的某个电极,输出信号从另一个电极取出,剩下的那个电极即是公共端。

共射极组态:基极输入,集电极输出,发射极是公共端;

共集电极组态:基极输入,发射极输出,集电极是公共端;

共基极组态:发射极输入,集电极输出,基极是公共端。

## 6. 三极管三种放大电路的性能对比

表 2.2.1 三极管三种放大电路的性能对比

	共射极电路	共集电极电路	共基极电路
电路图			
电压增益 $A_v$	$A_v = -\frac{\beta R'_L}{r_{be} + (1 + \beta) R_e}$ ( $R'_L = R_c // R_L$ )	$A_v = \frac{(1 + \beta) R'_L}{r_{be} + (1 + \beta) R'_L}$ ( $R'_L = R_e // R_L$ )	$A_v = \frac{\beta R'_L}{r_{be}}$ ( $R'_L = R_c // R_L$ )
$v_o$ 与 $v_i$ 的相位关系	反相	同相	同相
最大电流增益 $A_i$	$A_i \approx \beta$	$A_i \approx 1 + \beta$	$A_i \approx \alpha$
输入电阻	$R_i = R_{b1} // R_{b2} // [r_{be} + (1 + \beta) R_e]$	$R_i = R_b // [r_{be} + (1 + \beta) R'_L]$	$R_i = R_e // \frac{r_{be}}{1 + \beta}$
输出电阻	$R_o \approx R_c$	$R_o = \frac{r_{be} + R'_s}{1 + \beta} // R_e$ ( $R'_s = R_s // R_b$ )	$R_o \approx R_c$
用途	多级放大电路的中间级	输入级、中间级、输出级	高频或宽频带电路

## 2.2.3 场效应管放大器

### 1. 场效应管放大电路的三种组态

表 2.2.2 场效应管放大电路的三种组态

	共源极	共漏极	共栅极
$u_i$ 接的电极	栅极 G	栅极 G	源极 S
$u_o$ 接的电极	漏极 D	源极 S	漏极 D
与三极管放大电路的对应关系	共射极	共集电极	共基极

### 2. 直流分析

(1) 自给偏置电路[如图 2.2.5(a)所示]

$$V_{GS} = -V_S = -I_D R_S, I_D = K_n (V_{GS} - V_T)^2,$$

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D (R_D + R_S)$$

(2) 分压式偏置电路[如图 2.2.5(b)所示]

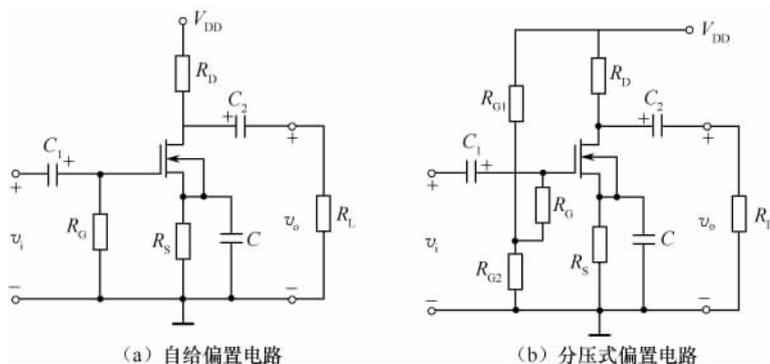


图 2.2.5

$$V_{GS} = V_G - V_S = \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} V_{DD} - I_D R_S, I_D = K_n (V_{GS} - V_P)^2$$

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D (R_S + R_D)$$

### 3. 交流分析

场效应管微变等效电路如图 2.2.6 所示。

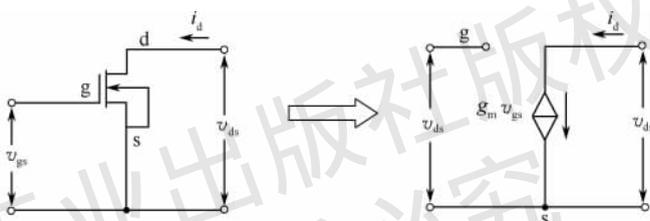


图 2.2.6 场效应管微变等效电路

## 2.2.4 差动放大器

差动放大器是利用参数匹配的两个三极管组成对称形式的电路结构(见图 2.2.7)进行补偿,以达到减小温度漂移的目的。差动放大器作为集成运放的输入级,可以放大差模信号而抑制共模信号。

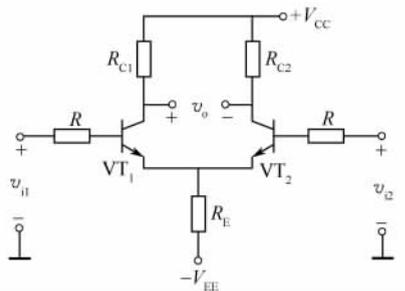


图 2.2.7 差动放大器电路

### 1. 四种类型

双入双出、双入单出、单入双出和单入单出。

### 2. 三种输入信号

(1) 共模输入:  $v_{ic} = \frac{v_{i1} + v_{i2}}{2}$ ;

(2) 差模输入:  $v_{id} = v_{i1} - v_{i2}$ ;

(3) 任意输入:  $v_{i1} = v_{ic} + \frac{v_{id}}{2}, v_{i2} = v_{ic} - \frac{v_{id}}{2}$ 。

### 3. 差模性能

(1) 单入  $\Rightarrow$  双入:  $R_{id} = 2(R_S + r_{be})$ ;

(2) 双出:  $A_{vd} = \frac{v_o}{v_{i1} - v_{i2}} = A_{v1} = -\frac{\beta(R_C // \frac{R_L}{2})}{R + r_{be}}, R_o \approx 2R_C$

$$\text{单出: } A_{vd1} = \frac{u_{c1}}{u_{i1} - u_{i2}} = \frac{u_{c1}}{2u_{i1}} = \frac{1}{2} A_{vd} = -\frac{\beta(R_C // R_L)}{2(R + r_{be})}, R_o \approx R_C$$

#### 4. 共模性能

$$\text{双出: } A_{vc} = \frac{u_{oc}}{u_{ic}} = \frac{u_{oc1} - u_{oc2}}{u_{ic}} = 0$$

$$\text{单出: } A_{vc1} \approx -\frac{R_C // R_L}{2R_E}$$

### 2.2.5 功率放大器

功率放大器通常位于多级放大器的最后一级,其任务是将前置放大器放大的电压信号再进行功率放大,以足够的输出功率推动执行机构工作。

#### 1. 功放的要求

输出功率尽可能大,非线性失真要小,效率要高,功率放大管要有比较好的散热装置。

#### 2. 功放的特点

甲类功放:管子导通一个周期,失真小,效率低。

乙类互补对称功放:管子导通半个周期,存在交越失真,效率高。

甲乙类功放:管子导通大半周期,能克服交越失真,效率略低但接近于乙类功放。

#### 3. 乙类功放的计算

如图 2.2.8 所示,乙类互补对称功率放大器的输出功率为

$$P_o = \frac{I_{om}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{V_{om}}{\sqrt{2}} = \frac{1}{2} I_{om} V_{om} = \frac{v_{om}^2}{2R_L}$$

电源提供的总功率为

$$P_E = \frac{2V_{CC} I_{om}}{\pi} = \frac{2V_{CC} V_{om}}{\pi R_L}$$

电路的效率为

$$\eta = \frac{P_o}{P_E} = \frac{\pi V_{om}}{4 V_{CC}}, \eta_{\max} = 78.5\%$$

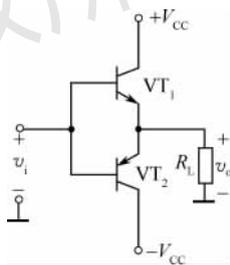


图 2.2.8 乙类互补对称功率放大器电路

## 2.3 习题解答

**【习题 2.1】** 放大器为什么要设置合适的静态工作点?

**【知识点】** 放大器的静态工作点。

**【解题过程】** 如果不设置合适的工作点,加入信号后,放大器的工作点就会移至位于饱和区或截止区,产生非线性失真。

**【习题 2.2】** 什么是放大器直流通路?什么是放大器交流通路?怎样画直流和交流通路?

**【知识点】** 放大电路的交直流通路。

**【解题过程】** 直流通路:直流信号流经的途径;交流通路:交流信号流经的途径。  
画直流通路的方法:电容开路;画交流通路的方法:电容短路,直流电压源短路。

**【习题 2.3】** 放大电路的直流负载线和交流负载线的概念有何不同?什么情况下这两条负载线重合?

**【知识点】** 放大电路的交直流负载线。

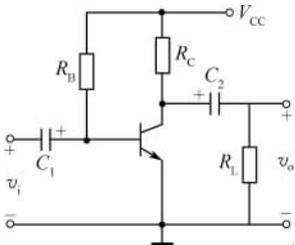
**【解题过程】** 直流负载线:没有输入信号时, $V_{CE}$ 和 $I_C$ 的关系曲线。交流负载线:加输入信号时, $v_{ce}$ 和 $i_c$ 的关系曲线。其斜率为 $-1/(R_C//R_L)$ ,两线在 $Q$ 点相交。当电路空载时的交流负载线和直流负载线重合。

**【习题 2.4】** 如何确定放大电路的最大动态范围?如何选择 $Q$ 点才能使动态范围最大?

**【知识点】** 图解分析法。

**【解题过程】** 放大电路的最大动态范围是指最大不失真输出电压的幅值,设放大电路的交流负载线与三极管输出特性曲线中的 $I_{BQ}=0$ 的交点为 $Q_1$ ,与三极管输出特性曲线饱和区交点为 $Q_2$ ,则放大电路的最大动态范围 $v_{om}=\min\{|v_{CEQ1}-V_{CEQ}|,|V_{CEQ}-v_{CEQ2}|\}$ 。

**【习题 2.5】** 当图示电路中的三极管改用 PNP 型管时,有哪些元器件的连接需要改变?变之后,若在输入端输入正弦信号的正半周,输出电压产生了失真,此失真是何种类型的失真?



图题 2.5

**【知识点】** PNP 型三极管组成的放大电路结构和原理。

**【解题过程】** 若将电路中的三极管改用 PNP 型管,集电极电源极性应变为负,电容 $C_1$ 、 $C_2$ 的两端应调换,也即 $C_1$ 的负极接基极, $C_2$ 的负极接集电极。PNP 型三极管组成的共射组态的放大电路依然是反相放大器,若在输入信号的正半周时,输出电压发生失真,说明是在输入信号变大时,工作点移到截止所致,故该失真是截止失真。

**【习题 2.6】** 三极管放大电路有哪几种组态?判断组态的基本方法是什么?

**【知识点】** 三极管放大电路组态的判断方法。

**【解题过程】** 三极管放大电路有三种组态:共基极,共射极和共集电极组态。

判断方法:一般看输入信号加在三极管的哪个电极,输出信号从哪个电极取出。共射极放大电路中,信号由基极输入,集电极取出;共集电极放大电路中,信号由基极输入,发射极输出;共基极电路中,信号由发射极输入,集电极输出。

**【习题 2.7】** 三种组态的放大电路各有什么特点?

**【知识点】** 三极管各种组态放大电路的特点。

**【解题过程】** 共射极放大电路的电压和电流增益都大于 1,输入电阻在三种组态中居中,输出电阻与集电极电阻有关。共射极放大电路适用于低频情况下,作为多级放大器的中间级,提高放大倍数。共集电极放大电路只有电流放大作用,没有电压放大,有电压跟随作用。在三种组态中,此类电路输入电阻最高,输出电阻最小,最适于信号源与负载的隔离和匹配,可用于输入级、输出级或缓冲级。共基极放大电路只有电压放大作用,没有电流放大,有电流跟随作用,输入电阻小,输出电阻与集电极电阻有关。高频特性较好,常用于高频或宽带带低输入阻抗的场合。

**【习题 2.8】** 多级放大电路常用的耦合方式有哪几种?各有什么特点?

**【知识点】** 多级放大电路常用的耦合方式及其特点。

**【解题过程】** 最常用的耦合方式是直接耦合和阻容耦合。

直接耦合就是把前级的输出端和后级的输入端直接相连的耦合方式。其特点是可以传递缓慢变化的低频信号或直流信号。直接耦合放大器存在两个问题:一是前、后级静态工作点相互影响,相互牵制;二是零漂严重。

阻容耦合就是前后级间采用电容连接,只能传输交流信号,不能用来放大缓慢变化的低频信号和直流信号,特别是在集成电路中,由于制作大容量的耦合电容困难,因而无法采用阻容耦合方式。

**【习题 2.9】** 与三极管的共射、共集和共基电路相对应,MOSFET 有共源、共漏和共栅电路,试比较它们的异同点。

**【知识点】** 三极管放大电路与场效应管放大电路的对比。

**【解题过程】**

共射电路与共源电路相对应,两者都是反相放大器,但是共射电路的输入电阻低,而共源电路的输入电阻高。

共集电极电路与共漏电路相对应,两者电压增益接近于 1,输入电阻高输出电阻低。

共基电路与共栅电路相对应,两者都是同相放大器而且电压增益大,但是共基电路的高频特性好,常用于高频或宽频带低输入阻抗的场合,而共栅电路因栅极与沟道之间的高阻未发挥作用,故很少用到。

**【习题 2.10】** 在图题 2.10 所示电路中,试分析三极管分别工作在饱和、放大、截止状态时的  $V_{CE}$  值。

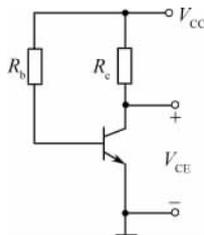
**【知识点】** 三极管工作于不同区域的特点。

**【解题过程】**

三极管工作于放大区:  $I_C = \beta I_B$ , 而  $I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_b}$ , 所以  $V_{CE} = V_{CC} - \beta I_B R_C$ ;

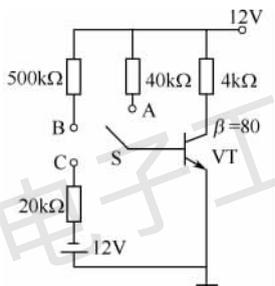
三极管工作于饱和区:  $V_{CE} = V_{CES}$ ;

三极管工作于截止区:  $I_C \approx 0, V_{CE} = V_{CC}$ 。



图题 2.10

**【习题 2.11】** 电路如图题 2.11 所示,设三极管,  $V_{BE} = 0.6V$ ,  $I_{CEO}$ 、 $V_{CES}$  可忽略不计,试分析当开关 S 分别接通 A、B、C 位置时,三极管分别工作在其输出特性曲线的哪个区域,并求出相应的集电极电流  $I_C$ 。



图题 2.11

**【知识点】** 根据所给定的电路判断三极管的工作状态。

**【逻辑推理】** 三极管可能出现饱和、截止和放大三种可能状态。判断方法: ①  $V_{BE} < 0.7V$ , 三极管截止; ②  $V_{BE} > 0.7V$ , 三极管可能工作在放大区或饱和区, 需要进一步分析, 其步骤为: 首先假定三极管工作在放大区, 根据直流通路计算  $I_B$ 、 $I_C$  和  $V_{CE}$ , 若  $V_{CE} > 0$ , 则假设正确, 工作在放大区, 若  $V_{CE} < 0$ , 与假设矛盾, 工作在饱和区。

**【解题过程】** 图示电路中

S 连 A:  $V_{BE} > 0.7V$ , 假定三极管工作在放大区,  $I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_b} =$

$$\frac{12 - 0.6}{40} \times 10^{-3} = 0.3\text{mA}, \text{此时 } V_{CE} = 12 - 80 \times 0.3 \times 4 < 0, \text{与假设矛盾,}$$

三极管工作于饱和区。

S 连 B:  $V_{BE} > 0.7V$ , 假定三极管工作在放大区,  $I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_b} = \frac{12 - 0.6}{500} \times 10^{-3} = 0.028\text{mA}$ , 此时  $V_{CE} = 12 - 80 \times 0.028 \times 4 > 0$ , 与假设相符, 三极管工作于放大区。

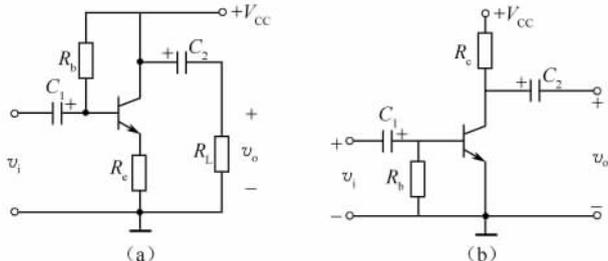
S 连 C:  $V_B < V_E$ , 发射结反偏, 三极管工作于截止区。

**【习题 2.12】** 判断图题 2.12 所示各电路对交流信号有无放大作用, 为什么?

**【知识点】** 放大电路的组成原则。

**【逻辑推理】** 放大电路的组成原则: 合适的静态工作点保证在信号的整个周期内三极管的发射结正偏, 集电结反偏。其次动态信号能够作用于晶体管的输入回路, 在负载上能够获得放大的了的动态信号。

**【解题过程】** 图(a)不能。因为集电极的电位固定不变。输出电压  $v_o = 0$ 。

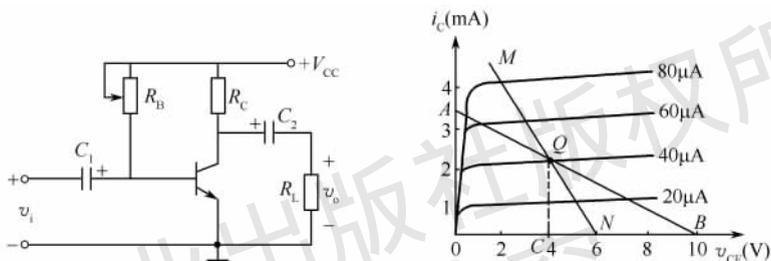


图题 2.12

图(b)不能。静态工作点不合适。在信号的负半周,三极管的发射结将处于反偏截止状态,输出信号产生截止失真。

**【习题 2.13】** 放大电路和三极管的输出特性曲线如图题 2.13 所示,放大电路的交直流负载线已画于图中。试求:

- (1)  $R_B$ 、 $R_C$  和  $R_L$  各为多少?  $\beta$  为多少?
- (2) 不失真的最大输入电压峰值为多少?



图题 2.13

**【知识点】** 图解法分析放大电路。

**【逻辑推理】** 在三极管的输出特性曲线平面中,交、直流负载线的交点即为 Q 点。直流负载线斜率为  $-\frac{1}{R_C}$  较平,交流负载线为  $-\frac{1}{R_C // R_L}$  较陡。直流负载线与横坐标轴的交点为  $V_{CC}$ 。

**【解题过程】** (1) 交直流负载线的交点是静态工作点。线 AB 为直流负载线, MN 为交流负载线,由图可知  $I_{CQ} = 2\text{mA}$ ,  $I_{BQ} = 40\mu\text{A}$ ,  $V_{CEQ} = 4\text{V}$ 。

$$\text{因为 } \beta = \frac{I_{CQ}}{I_{BQ}} = 50, V_{CC} = 10\text{V}, \text{ 且 } I_{CQ} = \frac{V_{CC} - V_{CEQ}}{R_C}, \text{ 所以 } R_C = \frac{(10 - 4)\text{V}}{0.2\text{mA}} = 3\text{k}\Omega;$$

又因  $I_{BQ} = \frac{V_{CC} - V_{BEQ}}{R_B}$ , 所以  $R_B = \frac{9.3\text{V}}{40\mu\text{A}} = 233\text{k}\Omega$ 。交流负载线 MN 的斜率为  $-\frac{1}{R_L'} = -1$ ,  $R_L' = R_C // R_L$ , 所以  $R_L = 1.5\text{k}\Omega$ 。

$$(2) \text{ 由图可知, 最大不失真输出电压峰值 } V_{om} = 2\text{V}, r_{be} = 200 + \frac{26}{I_{EQ}} = 850\Omega,$$

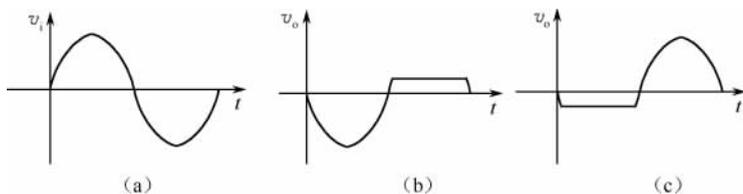
$$\text{所以 } A_v = -\beta \frac{R_L'}{r_{be}} = -59.8, V_{im} = \left| \frac{V_{om}}{A_v} \right| = 34\text{mV}.$$

**【习题 2.14】** NPN 型三极管构成的放大器输入、输出波形如图题 2.14 所示,问图(b)和图(c)所示波形各产生了什么失真? 怎样才能消除失真?

**【知识点】** 三极管放大电路的非线性失真。

**【解题过程】** 共射极放大电路为反相放大器,输出电压的正半周对应输入电压的负半周,若发

生失真,则为输入信号变小时工作点移至截止区所致,为截止失真。输出电压的负半周对应输入电压的正半周,若发生失真,则为输入信号变大时工作点移至饱和所致,为饱和失真。图(b), $v_o$  正半周失真,为截止失真。图(c), $v_o$  负半周失真,为饱和失真。



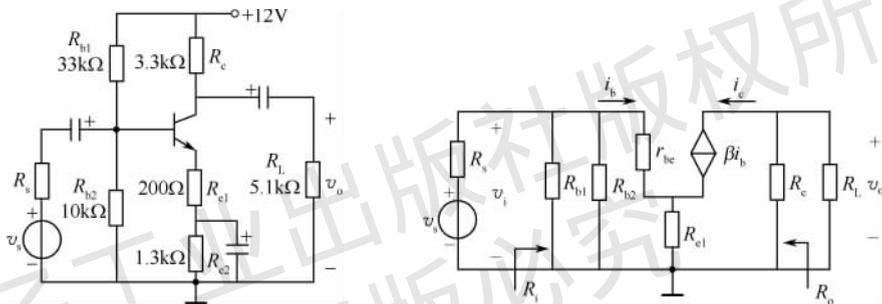
图题 2.14

**【习题 2.15】** 在图题 2.15 所示的放大电路中,设信号源内阻  $R_s = 600\Omega$ ,三极管的  $\beta = 50$ 。

- (1) 画出该电路的微变等效电路;
- (2) 求该电路的输入电阻  $R_i$ 、输出电阻  $R_o$ ;
- (3) 当  $v_s = 15\text{mV}$  时,求输出电压  $v_o$ 。

**【知识点】** 微变等效电路法分析放大电路的动态特性指标。

**【解题过程】** (1)微变等效电路如图解 2.15 所示:



图题 2.15

图解 2.15

$$(2) R_i = R_{b1} // R_{b2} // [r_{be} + (1 + \beta)R_{e1}], r_{be} = 200 + (1 + \beta) \frac{26\text{mV}}{I_{EQ}}$$

$$\text{因为 } V_{BQ} = \frac{10}{33 + 10} \times 12 = 2.8\text{V}, \text{ 所以 } I_{EQ} = \frac{2.8 - 0.7}{(0.2 + 1.3)\text{k}\Omega} = 1.4\text{mA};$$

$$r_{be} = 200 + (1 + 50) \frac{26\text{mV}}{1.4\text{mA}} = 1.15\text{k}\Omega;$$

$$R_i = R_{b1} // R_{b2} // [r_{be} + (1 + \beta)R_{e1}] = 33 // 10 // (1.15 + 10.2) = 4.58\text{k}\Omega;$$

$$R_o = R_c = 3.3\text{k}\Omega.$$

$$(3) A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{-\beta i_b (R_c // R_L)}{i_b [r_{be} + (1 + \beta)R_{e1}]} = -\frac{50 \times (3.3 // 5.1)}{11.35} = -8.81$$

$$A_{v_s} = \frac{v_o}{v_s} = \frac{v_o}{v_i} \cdot \frac{v_i}{v_s} = A_v \cdot \frac{R_i}{R_i + R_s} = -8.81 \times \frac{4.58}{4.58 + 0.6} = -7.79$$

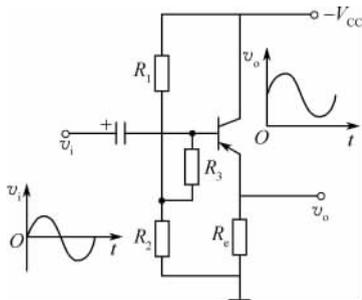
$$v_o = A_{v_s} v_s = -7.79 \times 15\text{mV} = -116.85\text{mV}$$

**【习题 2.16】** 图题 2.16 所示电路属于何种组态?其输出电压的波形是否正确?若有错,请改正。

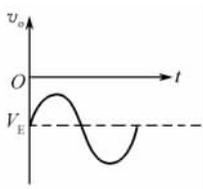
**【知识点】** 三极管各种组态放大电路的特点。

**【解题过程】** 电路输入端为基极,输出端为射极,且集电极接电源,交流接地,故此电路为共集

电极电路。在此共集电极电路中,三极管的类型为 PNP 型,故应有  $v_o < 0$ , 直流分量  $V_E < 0$ ,  $v_o$  的波形应如图解 2.16 所示。



图题 2.16



图解 2.16

**【习题 2.17】** 放大电路如图题 2.17 所示  $V_{CC} = 24V$ ,  $R_C = 3.3k\Omega$ ,  $R_L = 1.5k\Omega$ ,  $R_{B1} = 33k\Omega$ ,  $R_{B2} = 10k\Omega$ ,  $\beta = 66$ , 设  $R_s = 0$ 。(1)画出微变等效电路;(2)计算晶体管的输入电阻;(3)计算电压放大倍数;(4)估算放大电路的输入电阻和输出电阻。

**【知识点】** 分压式偏置放大电路的分析。

**【解题过程】** (1) 微变等效电路如图解 2.17 所示。

$$(2) \text{ 因为 } V_{BQ} = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} V_{CC} = \frac{10}{33 + 10} \times 24 = 5.58V$$

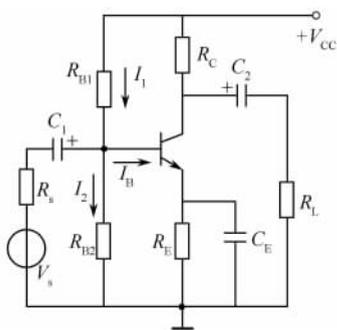
$$\text{所以 } I_{EQ} = \frac{V_{BQ} - V_{BEQ}}{R_E} = \frac{5.58 - 0.7}{1.5k} = 3.25mA,$$

$$\text{所以三极管的输入电阻 } r_{be} = 200 + (1 + 66) \frac{26mV}{3.25mA} = 735\Omega.$$

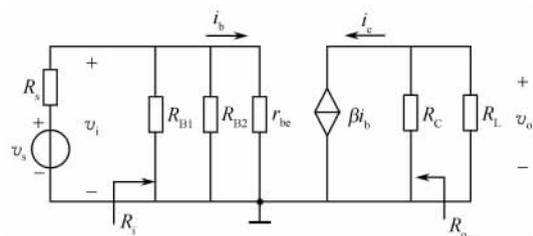
$$(3) \text{ 电压放大倍数为 } A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{-\beta i_b (R_C // R_L)}{i_b r_{be}} = \frac{66(3.3 // 1.5)}{0.735} = -180.$$

$$(4) \text{ 放大电路的输入电阻为 } R_i = R_{B1} // R_{B2} // r_{be} = 33 // 10 // 0.735k = 0.67k\Omega,$$

$$\text{输出电阻为 } R_o = R_C = 3.3k\Omega.$$



图题 2.17



图解 2.17

**【习题 2.18】** 射极输出器如图题 2.18 所示,已知  $R_B = 300k\Omega$ ,  $R_E = 5.1k\Omega$ ,  $R_L = 2k\Omega$ ,  $R_s = 2k\Omega$ ,  $V_{CC} = 12V$ ,  $\beta = 49$ 。(1)画出微变等效电路;(2)试计算电压放大倍数;(3)计算输入电阻和输出电阻。

**【知识点】** 共集电极放大电路的分析。

**【解题过程】** (1) 原电路的微变等效电路如图解 2.18 所示。

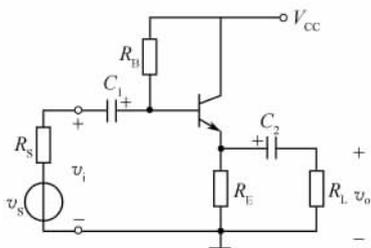
$$(2) I_{BQ} = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (1 + \beta)R_E} = \frac{12 - 0.7}{300\text{k} + (1 + 49)5.1\text{k}\Omega} = 0.02\text{mA}$$

$$r_{be} = 200 + (1 + \beta) \frac{26\text{mV}}{I_{EQ}} = 200 + \frac{26\text{mV}}{I_{BQ}} = 1.5\text{k}\Omega$$

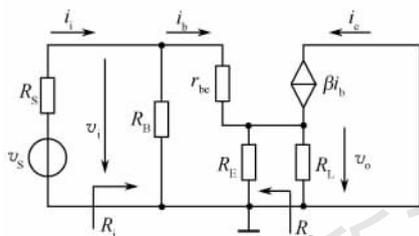
$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{i_c(R_E // R_L)}{i_b r_{be} + i_e(R_E // R_L)} = \frac{(1 + \beta)(R_E // R_L)}{r_{be} + (1 + \beta)(R_E // R_L)} \approx 0.98,$$

$$(3) R_i = R_B // [r_{be} + (1 + \beta)(R_E // R_L)] = 300\text{k}\Omega // (1.5 + 50 \times 1.44) = 59\text{k}\Omega,$$

$$R_o = R_E // \frac{r_{be} + R_S // R_B}{1 + \beta} = 5.1 // \left( \frac{1.5 + 2}{51} \right) = 69\Omega.$$

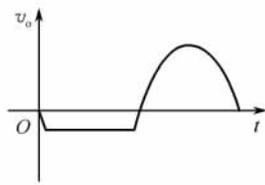
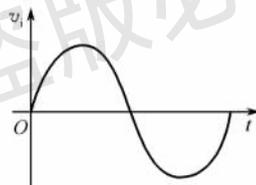
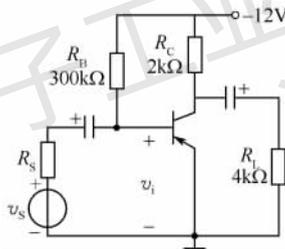


图题 2.18



图解 2.18

**【习题 2.19】** 电路如图题 2.19 所示,已知三极管的  $\beta = 100$ ,  $V_{BEQ} = -0.7\text{V}$ 。(1)试估算该电路的 Q 点;(2)画出微变等效电路图;(3)求该电路的电压增益  $A_v$ 、输入电阻  $R_i$ 、输出电阻  $R_o$ ;(4)若  $v_o$  中的交流成分出现如图所示的失真现象,问是截止失真还是饱和失真?为消除此失真,应调整电路中的哪个元件?如何调整?



图题 2.19

**【知识点】** 共发射极放大电路的分析。

**【解题过程】**

$$(1) I_{BQ} = \frac{-V_{CC} - V_{BEQ}}{R_B} = \frac{12 - 0.7}{300\text{k}\Omega} = 40\mu\text{A}$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 100 \times 40\mu\text{A} = 4\text{mA}$$

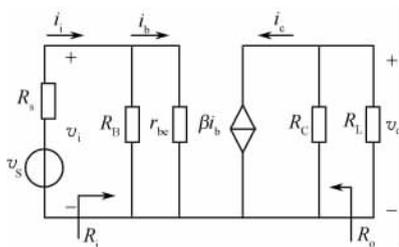
$$V_{CEQ} = V_{CC} + I_{CQ}R_C = -12\text{V} + 4 \times 2 = -4\text{V}$$

(2) 微变等效电路如图解 2.19 所示。

$$(3) r_{be} = 200 + \frac{26\text{mV}}{I_{BQ}} = 200 + \frac{26\text{mV}}{40 \times 10^{-3}} = 856.5\Omega$$

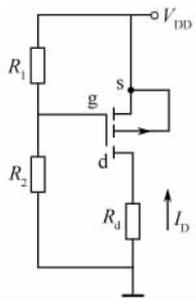
$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{-\beta i_b (R_C // R_L)}{i_b r_{be}} = \frac{-100 \times (4 // 2)}{0.857} = -155.67$$

输入电阻  $R_i = R_B // r_{be} = 300 // 0.857 \approx 0.857\text{k}\Omega$ , 输出电阻  $R_o = R_C = 2\text{k}\Omega$ 。



图解 2.19

(4) 由于三极管是 PNP 管,故当  $v_S$  大于某一值,如  $V_B > -0.7V$ ,使得  $V_{EB} < 0.7V$ ,则三极管截止,出现截止失真,是由于 Q 点太低造成的,应使  $I_{BQ}$  增大,从而使 Q 点上移,为此减小  $R_B$  即可以消除失真。



图题 2.20

**【习题 2.20】** P 沟道增强型 MOSFET 共源极电路如图题 2.20 所示,设  $R_1 = R_2 = 100k\Omega$ ,  $V_{DD} = 5V$ ,  $R_d = 7.5k\Omega$ ,  $V_T = -1V$ ,  $K_P = 0.2mA/V^2$ 。试计算所示电路的漏极电流  $I_D$  和漏源电压  $V_{DS}$ 。

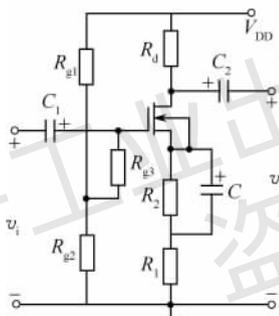
**【知识点】** PMOS 场效应管静态工作点的分析计算。

**【解题过程】** 因为  $V_G = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{DD} = \frac{100}{100 + 100} \times 5 = 2.5V$ , 栅源电压  $V_{GS} = V_G - V_{DD} = 2.5V - 5V = -2.5V < V_T = -1V$ , 管子导通。假设场效应管工作于饱和区,则漏极电流  $I_D = K_P (V_{GS} - V_T)^2 = -0.2 \times (-2.5 + 1)^2 = -0.45mA$ , 漏源电压  $V_{DS} = -V_{DD} - I_D R_D = -5 + 0.45 \times 7.5 = -1.625V$ 。

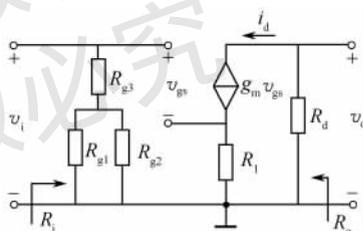
由于  $|V_{DS}| = 1.625V > |V_{GS} - V_T| = 1.5V$ , 说明场效应管的确工作在饱和区,假设成立。

所以  $I_D = -0.45mA$ ,  $V_{DS} = -1.625V$ 。

**【习题 2.21】** 已知电路参数如图题 2.21 所示, FET 工作点上的跨导  $g_m = 1mS$ ,  $R_{g1} = 300k\Omega$ ,  $R_{g2} = 100k\Omega$ ,  $R_{g3} = 2M\Omega$ ,  $R_1 = 2k\Omega$ ,  $R_2 = 10k\Omega$ ,  $R_d = 10k\Omega$ ,  $V_{DD} = 20V$ 。(1) 画出微变等效电路;(2) 求电压增益  $A_v$ ; (3) 求放大器的输入电阻  $R_i$ 。



图题 2.21



图解 2.21

**【知识点】** 微变等效电路法分析场效应管的动态特性。

**【解题过程】** (1) 电路的微变等效电路如图解 2.21 所示。

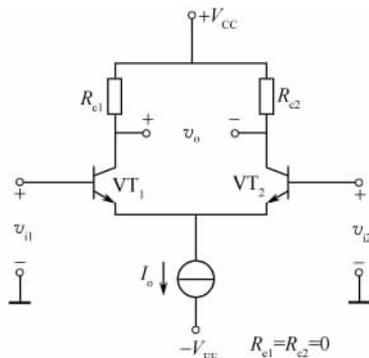
(2) 电压增益:  $A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{-g_m R_d}{1 + g_m R_1} = -\frac{1 \times 10}{1 + 1 \times 2} = -3.3$ ;

(3) 输入电阻:  $R_i = R_{g3} + R_{g1} // R_{g2} = 2075k\Omega$ 。

**【习题 2.22】** 在图题 2.22 所示的射极耦合差分式放大电路中,  $+V_{CC} = 10V$ ,  $-V_{EE} = -10V$ ,  $I_o = 1mA$ ,  $r_o = 25k\Omega$  (电路中未画出),  $R_{c1} = R_{c2} = 10k\Omega$ ,  $\beta = 200$ ,  $V_{BE} = 0.7V$ ; (1) 当  $v_{i1} = v_{i2} = 0$  时, 求  $I_C$ 、 $V_{CE1}$  和  $V_{CE2}$ ; (2) 当  $v_{i1} = -v_{i2} = +v_{id}/2$  时, 求双端输出时的  $A_{v_{id}}$  和单端输出的  $A_{v_{e1}}$ 、 $A_{v_{e2}}$  和  $K_{CMR1}$  的值。

**【知识点】** 差动放大器的分析。

**【解题过程】** (1) 当  $v_{i1} = v_{i2} = 0$  时,  $I_{C1} = I_{C2} = I_o/2 = 0.5mA$ ,  $V_E = 0 - V_{BE} = -0.7V$ ,



图题 2.22

所以  $V_{CE1} = V_{CE2} = V_{CC} - I_{C1}R_{c1} - V_E = 10 - 0.5 \times 10 + 0.7 = 5.7V$ 。

(2) 双端输出时,  $A_{vd} = \frac{-\beta R_{c1}}{r_{be1}} = -\frac{200 \times 10}{10.7} \approx -186.9$ ,

$$r_{be1} = 200 + (1 + \beta) \times \frac{26mV}{I_{EQ}} = 10.7k\Omega$$

单端输出时,  $A_{vd1} = \frac{A_{vd}}{2} = -93.45$ ,  $A_{vc1} = \frac{R_C}{2 \times r_o} = -\frac{10}{2 \times 25} = -0.2$ ,

共模抑制比为:  $K_{CMR1} = \left| \frac{A_{vd1}}{A_{vc1}} \right| = 467.25$ 。

**【习题 2.23】** 电路如图题 2.23 所示, 设  $\beta_1 = \beta_2 = 60$ ,  $V_{BE} = 0.7V$ ,  $R_{C1} = R_{C2} = 10k\Omega$ ,  $R_e = 5k\Omega$ ,  $R_b = 2k\Omega$ ,  $R_p = 10k\Omega$ ,  $R_L = 20k\Omega$ , 滑动变阻器的滑动头在中间位置。试求: (1) 电路的静态工作点; (2) 差模电压放大倍数; (3) 电路的输入输出电阻。

**【知识点】** 差动放大器的分析。

**【逻辑推理】**  $A_{vd} = \frac{-\beta R_{c1}}{r_{be1}}$ 。

**【解题过程】** (1) 电路的静态工作点为:

$$0 - I_{BQ}R_b - 0.7 - (1 + \beta)I_B(2R_e + R_p/2) = -V_{EE}$$

因为  $I_{BQ} = \frac{V_{EE} - 0.7}{R_b + (1 + \beta)(2R_e + R_p/2)} = \frac{11.3}{2 + 61 \times (10 + 5)} = 0.012mA$ ,

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 60 \times 0.012mA = 0.72mA,$$

$$V_{CC} - I_{CQ}R_{C1} - V_{CEQ} - \frac{1}{2}I_{EQ}R_p - 2I_{EQ}R_e = -V_{EE}$$

$$V_{CC} - I_{CQ}R_{C1} - V_{CEQ} - \frac{1}{2}I_{EQ}R_p - 2I_{EQ}R_e = -V_{EE}$$

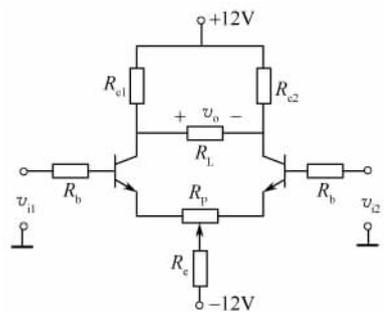
$$\Rightarrow V_{CEQ} = V_{CC} + V_{EE} - I_{CQ}(R_{C1} + \frac{1}{2}R_p + 2R_e)$$

$$\Rightarrow V_{CEQ} = 6V$$

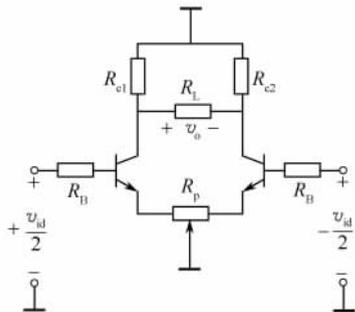
(2) 差模交流通路如图解 2.23 所示:

$$v_{od} = -2\beta i_b (R_{c1} // R_L / 2), v_{id} = +2i_b [R_B + r_{be} + (1 + \beta)R_p / 2],$$

$$r_{be} = 200 + \frac{26mV}{I_{BQ}} = 2.4k\Omega, A_{vd} = \frac{v_{od}}{v_{id}} = \frac{-\beta(R_{c1} // R_L / 2)}{R_B + r_{be} + (1 + \beta)R_p / 2} = -0.97。$$



图题 2.23



图解 2.23

(3) 电路的输入电阻  $R_i = 2 \left[ R_B + r_{be} + \frac{1}{2} (1 + \beta) R_p \right] = 618.8k\Omega$ , 输出电阻  $R_o = R_{c1} + R_{c2} = 20k\Omega$ 。

**【习题 2.24】** 已知在图题 2.24 所示放大电路中,  $R_{B11} = 470k\Omega$ ,  $R_E = 10k\Omega$ ,  $R_{B12} = 24k\Omega$ ,

$R_{B22}=12\text{k}\Omega$ ,  $R_C=1.5\text{k}\Omega$ ,  $R_{e1}=200\Omega$ ,  $R_{e2}=800\Omega$ ,  $R_L=1.5\text{k}\Omega$ ,  $V_{CC}=15\text{V}$ , 各三极管  $\beta=50$ ,  $V_{BE}=0.6\text{V}$  试问: (1) 各级静态值; (2) 画微变等效电路; (3) 总电压增益; (4) 电路的输入/输出电阻。

**【知识点】** 多级放大器的分析。

**【逻辑推理】**  $A_v=A_{v1}A_{v2}$ 。图示放大器中第一级为共集电极电路  $A_v\approx 1$ , 第二级为共射放大器。所以放大器的增益  $A_v\approx A_{v2}$ 。

**【解题过程】** (1) 第一级:

$$I_{B1} = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_{B11} + (1 + \beta)R_E} = \frac{15 - 0.6}{470\text{k}\Omega + 51 \times 10} = 0.0147\text{mA}$$

$$I_{C1} = \beta I_{B1} = 50 \times 0.0147\text{mA} = 0.737\text{mA}$$

$$V_{CE1} = V_{CC} - I_{E1}R_E = 15 - 0.737 \times 10 = 7.5\text{V}$$

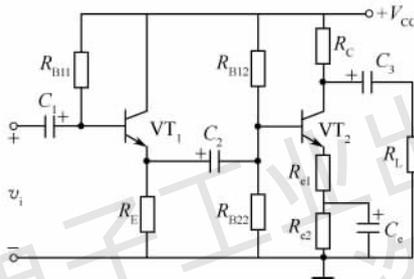
第二级:  $V_{B2} = \frac{R_{B22}}{R_{B22} + R_{B12}} V_{CC} = \frac{12}{24 + 12} \times 15 = 5\text{V}$

$$I_{E2} = \frac{V_{B2} - V_{BE}}{R_{E1} + R_{E2}} = \frac{4.4}{1\text{k}} = 4.4\text{mA}, I_{C2} \approx I_{E2} = 4.4\text{mA}$$

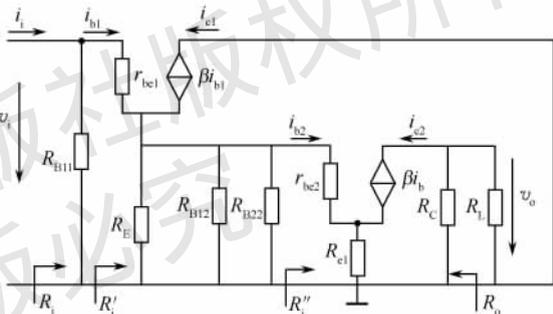
$$I_{B2} \approx \frac{I_{C2}}{\beta} = \frac{4.4\text{mA}}{50} = 88\mu\text{A}$$

$$V_{CE2} = V_{CC} - I_{C2}(R_C + R_{e1} + R_{e2}) = 4.12\text{V}$$

(2) 微变等效电路如图解 2.24 所示。



图题 2.24



图解 2.24

(3) 多级放大器的电压放大倍数  $A_v = A_{v1}A_{v2} \approx A_{v2}$ , 所以

$$A_v = A_{v2} = \frac{v_o}{v_{i2}} = \frac{-\beta i_{b2}(R_C // R_L)}{i_{b2}[r_{be2} + (1 + \beta)R_{e1}]} = \frac{50 \times 0.75}{0.5 + 51 \times 0.2} = -3.5$$

其中  $r_{be2} = 200 + \frac{26\text{mV}}{I_{B2}\text{mA}} = 0.5\text{k}\Omega$ 。

(4) 在微变等效电路中:  $R_i' = r_{be2} + (1 + \beta)R_{e1} = 10.7\text{k}\Omega$

$$R_i' = r_{be1} + (1 + \beta)(R_E // R_{B12} // R_{B22} // R_i') = 162.11\text{k}\Omega$$

所以放大电路总的输入电阻:  $R_i = R_{B11} // R_i' = 120.5\text{k}\Omega$ ,

输出电阻:  $R_o = R_C = 1.5\text{k}\Omega$ 。

**【习题 2.25】** 电路如图题 2.25 所示:

(1) 当输入信号  $V_i = 10\text{V}$  (有效值) 时, 求电路的输出功率  $P_o$  和效率  $\eta$ 。

(2) 当输入信号的幅值  $V_{im} = V_{CC} = 20\text{V}$  时, 求电路的输出功率  $P_o$  和效率  $\eta$ 。

**【知识点】** 乙类互补对称功放的分析计算。

**【解题过程】** (1) 电路的输出功率:

$$P_o = \frac{V_o^2}{R_L} = \frac{10^2}{30} = 3.33\text{W}$$

直流电压提供的平均功率为:

$$P_E = \frac{2V_{CC}V_{om}}{\pi R_L} = \frac{2 \times 20 \times 10\sqrt{2}}{\pi \times 30} = 6\text{W},$$

所以电路的效率为:  $\eta = \frac{P_O}{P_E} = \frac{3.33}{6} = 55.5\%$ 。

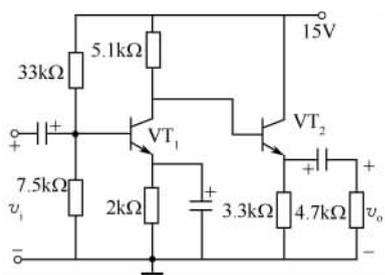
(2) 电路的输出功率:  $P_O = \frac{V_{om}^2}{2R_L} = \frac{20^2}{60} = 6.67\text{W}$ ,

直流电压提供的平均功率为:  $P_E = \frac{2V_{CC}V_{om}}{\pi R_L} = \frac{2 \times 20 \times 20}{\pi \times 30}$

$= 8.49\text{W}$ ,

所以电路的效率为:  $\eta = \frac{P_O}{P_E} = 78.5\%$ 。

**【习题 2.26】** 电路如图题 2.26 所示。设两管的  $\beta = 100, V_{BEQ} = 0.7\text{V}$ 。(1) 估算两管的 Q 点 (设  $I_{BQ} \ll I_{CQ}$ ); (2) 求  $A_v, R_i$  和  $R_o$ 。



图题 2.26

**【知识点】** 组合放大器的分析。

**【解题过程】** (1) 估算  $VT_1$  和  $VT_2$  的 Q 点:

$$V_{B1} = \frac{7.5}{33+7.5} \times 15 = 2.78\text{V}$$

$$I_{E1} \approx I_{C1} = \frac{2.78 - 0.7}{2} = 1.04\text{mA}$$

$$I_{B1} \approx \frac{I_{C1}}{\beta} = \frac{1.04\text{mA}}{100} = 10.4\mu\text{A}$$

$$V_{CE1} = V_{CC} - I_{C1}(5.1+2) = 15 - 1.04 \times 7.1 \approx 7.6\text{V}$$

$$V_{E2} = V_{B2} - V_{BE} = V_{CC} - I_{C1}R_{e1} - V_{BE} = 15 - 1.04 \times 5.1 - 0.7 \approx 9\text{V}$$

$$I_{E2} \approx I_{C2} = \frac{V_{E2}}{R_{e2}} = \frac{9}{3.3} = 2.7\text{mA}, I_{B2} \approx \frac{I_{C2}}{\beta} = \frac{2.7\text{mA}}{100} = 27\mu\text{A}$$

$$V_{CE2} = V_{CC} - I_{C2}R_{e2} = 15 - 2.7 \times 3.3 \approx 6\text{V}$$

(2) 求得  $r_{be1} \approx 2.73\text{k}\Omega, r_{be2} \approx 1.2\text{k}\Omega$ , 所以

$$A_v = A_{v1}A_{v2} \approx -\frac{\beta_1 R'_{L1}}{r_{be1}} \times 1, \text{ 其中 } R'_{L1} = R_{e1} // [r_{be2} + (1+\beta_2)(R_{e2} // R_L)],$$

所以总的电压增益  $A_v = A_{v1}A_{v2} \approx -\frac{\beta_1 R'_{L1}}{r_{be1}} = -182$ 。

输入电阻  $R_i = r_{be1} // R_{b1} // R_{b2} = 1.88\text{k}\Omega$ , 输出电阻  $R_o = R_{e2} // \frac{R_{e1} + r_{be2}}{1+\beta_2} = 61\Omega$ 。

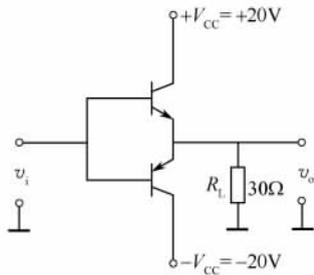
**【习题 2.27】** 某放大电路中  $\dot{A}_v$  的对数幅频特性如图题 2.27 所示。(1) 试求该电路中的中频

电压增益  $|\dot{A}_{VM}|$ 、上限频率  $f_H$  和下限频率  $f_L$ ; (2) 当输入信号的频率  $f = f_L$  或  $f = f_H$  时, 该电路实际的电压增益是多少分贝?

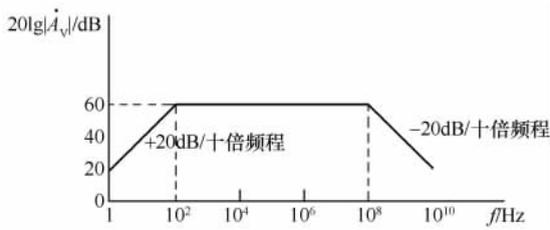
**【知识点】** 放大电路的频率响应。

**【解题过程】** (1) 由图可知,  $20\lg|\dot{A}_{VM}| = 60, \lg|\dot{A}_{VM}| = 3, |\dot{A}_{VM}| = 10^3$  即为中频增益, 上下限频率分别为  $f_H = 10^8\text{Hz}, f_L = 10^2\text{Hz}$ 。

(2) 实际上, 上下限频率分别为  $f = f_H$  或  $f_L$  时, 电压增益降低 3dB。即实际电压增益  $60 - 3 = 57\text{dB}$ 。

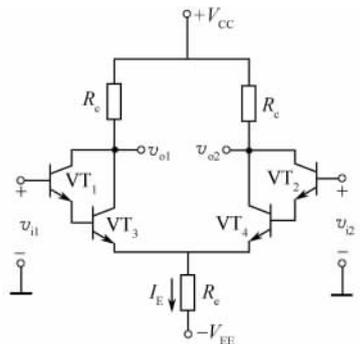


图题 2.25



图题 2.27

**【习题 2.28】** 在图题 2.28 所示电路中,  $+V_{CC}=6\text{V}$ ,  $-V_{EE}=-6\text{V}$ ,  $R_c=6.2\text{k}\Omega$ ,  $R_e=4.7\text{k}\Omega$ , 三极管的  $\beta_1=\beta_2=30$ ,  $\beta_3=\beta_4=100$ ,  $V_{BE1}=V_{BE2}=0.6\text{V}$ ,  $V_{BE3}=V_{BE4}=0.7\text{V}$ 。试计算双端输入、单端输出时的  $R_{id}$ 、 $A_{vdl}$ 、 $A_{vcl}$  和  $K_{CMR1}$  的值。



图题 2.28

**【知识点】** 差动放大器的分析。

**【解题过程】** 交流输入  $v_{i1}=v_{i2}=0$  时,  $VT_1$ 、 $VT_2$  基极电位为零,  $VT_3$ 、 $VT_4$  的发射极电位

$$V_{E3}=V_{E4}=0-V_{BE1}-V_{BE3}=-1.3\text{V}$$

$$I_E=\frac{V_{E3}-V_{EE}}{R_e}=\frac{-1.3-(-6)}{4.7}=1\text{mA}$$

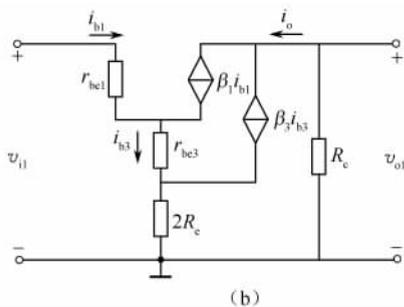
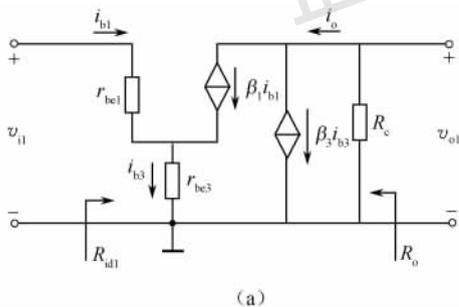
$VT_3$ 、 $VT_4$  的静态工作点电流为:  $I_{EQ3}=I_{EQ4}=\frac{1}{2}I_E=0.5\text{mA}$ ,

$VT_1$ 、 $VT_2$  的静态工作点电流为:  $I_{EQ1}=I_{EQ2}=\frac{I_{EQ3}}{1+\beta_3}=5\mu\text{A}$ ,

双端输入单端输出时电路的半边微变等效电路如图解 2.28(a)所示。

$$r_{be1}=200+(1+\beta_1)\frac{26\text{mV}}{I_{EQ1}}=200+(1+30)\frac{26\text{mV}}{5\times 10^{-3}}=161.4\text{k}\Omega$$

$$r_{be3}=200+(1+\beta_3)\frac{26\text{mV}}{I_{EQ3}}=200+(1+100)\frac{26\text{mV}}{5\times 10^{-3}}=5.45\text{k}\Omega$$



图解 2.28

输入电压:  $v_{i1}=i_{b1}r_{be1}+(1+\beta_1)i_{b1}r_{be3}$ ;

半边电路的输入电阻为:  $R_{id1}=\frac{v_{i1}}{i_{b1}}=r_{be1}+(1+\beta_1)r_{be3}=330.35\text{k}\Omega$ ;

双端输入时电路输入电阻为:  $R_{id}=2R_{id1}=660.7\text{k}\Omega$ ;

单端输出电压为:  $v_{o1}=-i_oR_c=-(\beta_1i_{b1}+\beta_3i_{b3})R_c=-[\beta_1+\beta_3(1+\beta_1)]i_{b1}R_c$ ;

双端输入单端输出时电压增益为:

$$A_{\text{rd1}} = \frac{1}{2} \frac{v_{o1}}{v_{id}} = \frac{1}{2} \frac{-[\beta_1 + \beta_3(1 + \beta_1)] i_{b1} R_c}{i_{b1} [r_{be1} + (1 + \beta_1) r_{be3}]} = -29.4$$

共模输入时,半边电路的微变等效电路如图解 2.28(b)所示。

共模输入电压为:

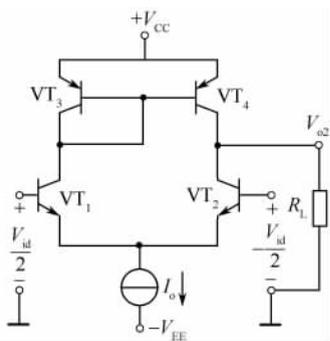
$$\begin{aligned} v_{i1} &= i_{b1} r_{be1} + (1 + \beta_1) i_{b1} r_{be3} + (1 + \beta_3) i_{b3} 2R_c \\ &= i_{b1} [r_{be1} + (1 + \beta_1) r_{be3} + (1 + \beta_1)(1 + \beta_3) 2R_c] \end{aligned}$$

共模输出电压为:  $v_{o1} = -[\beta_1 i_{b1} + \beta_3 i_{b3}] R_c = -i_{b1} (\beta_1 + \beta_3(1 + \beta_1)) R_c$ ;

单端输出时共模电压增益为:

$$A_{\text{rc1}} = \frac{v_{o1}}{v_{i1}} = \frac{-[\beta_1 + \beta_3(1 + \beta_1)] R_c}{[r_{be1} + (1 + \beta_1) r_{be3} + (1 + \beta_1)(1 + \beta_3) 2R_c]} = -0.652$$

共模抑制比为:  $K_{\text{CMR1}} = \left| \frac{A_{\text{rd1}}}{A_{\text{rc1}}} \right| = \frac{29.4}{0.652} = 45.1$ 。



图题 2.29

**【习题 2.29】** 电路如图题 2.29 所示,所有三极管的  $\beta = 30$ ,  $r_{ce} = 100\text{k}\Omega$ , 电流源  $I_o = 1\text{mA}$ , 动态电阻  $r_o = 2000\text{k}\Omega$ , 负载电阻  $R_L = 4\text{k}\Omega$ 。当  $v_{id} = 40\text{mV}$  时,试求输出电压  $v_{o2}$ 、共模电压增益  $A_{\text{rc2}}$  和共模抑制比  $K_{\text{CMR2}}$ 。

**【知识点】** 差动放大器的分析。电流源作集电极负载,单端输出相当于双端输出。

**【解题过程】** 由电路可知:

$$r_{be1} = 200 + (1 + \beta_1) \frac{26\text{mV}}{I_{\text{EQ1}}} = 200 + (1 + 30) \frac{26\text{mV}}{0.5\text{mA}} = 1.81\text{k}\Omega$$

双端输入单端输出差模电压增益为:

$$A_{\text{rd2}} = \frac{\beta_2 (R_L // r_{ce1} // r_{ce2})}{r_{be1}} = \frac{30 \times 4}{1.81} = 66.3$$

$$v_{o2} = A_{\text{rd2}} \cdot v_{id} = 120 \times 40 = 4.8\text{V}$$

双端输入单端输出共模电压增益为  $A_{\text{rc2}} \approx 0$ ; 共模抑制比为  $K_{\text{CMR2}} \approx \infty$ 。

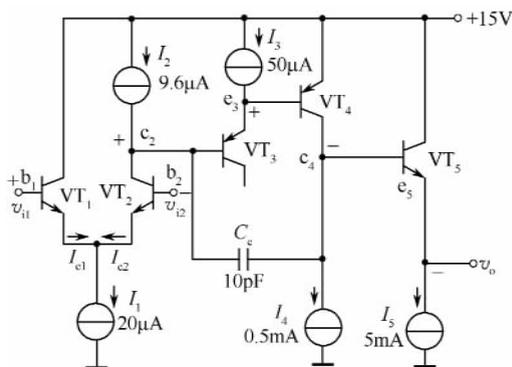
**【习题 2.30】** 图题 2.30 所示为三极管集成运放电路。(1) 试判断两管  $VT_1$ 、 $VT_2$  的两个基极,哪个为同相端,哪个为反相端?(2) 分辨图中的三极管中何者为射极耦合对、射极跟随器、共射极放大器? 并指明它们各自的功能。

**【知识点】** 差动多级放大器电路分析。

**【解题过程】** 由电路可知:

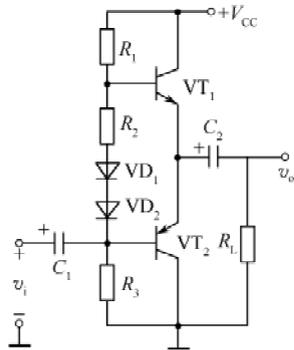
(1) 各级的电压瞬时极性如图 2.30 所示,由图可知,  $b_1$  为反相输入端,  $b_2$  为同相输入端。

(2)  $VT_1$ 、 $VT_2$  为射极耦合对,具有单端输出反相放大作用,  $VT_3$  为射极跟随器;  $VT_4$  为共射极反相放大器;  $VT_5$  组成射极跟随器。另外,图中的恒流源一方面起提供静态偏置电流作用,另一方面又作为与其搭配使用三极管的有源负载,动态电阻非常大。



图题 2.30

**【习题 2.31】** 一单电源互补对称电路如图题 2.31 所示, 设  $VT_1$ 、 $VT_2$  的特性完全对称,  $v_i$  为正弦波,  $V_{CC}=12V$ ,  $R_L=8\Omega$ 。试回答下列问题: (1) 静态时, 电容  $C_2$  两端电压应是多少? (2) 动态时, 若输出电压  $v_o$  出现交越失真, 应调整哪个电阻? 如何调整? (3) 若  $R_1=R_3=1.1k\Omega$ ,  $VT_1$ 、 $VT_2$  的  $\beta=40$ ,  $|V_{BE}|=0.7V$ ,  $P_{CM}=400mW$ , 假设  $VD_1$ 、 $VD_2$  和  $R_2$  中任意一个开路, 将会产生什么后果?



图题 2.31

**【知识点】** 功率放大电路分析。

**【解题过程】** 由电路可知:

(1) 静态时, 电容  $C_2$  两端电压为  $\frac{1}{2}V_{CC}=6V$ 。

(2) 动态输入时, 若产生交越失真, 说明  $V_{BE}$  过小, 这时可调大  $R_2$  阻值, 以增大  $R_2$  两端电压, 使  $R_2$ 、 $VD_1$  和  $VD_2$  串联总电压增大, 以增大  $VT_1$  和  $VT_2$  的静态  $V_{BEQ}$ , 从而消除交越失真。

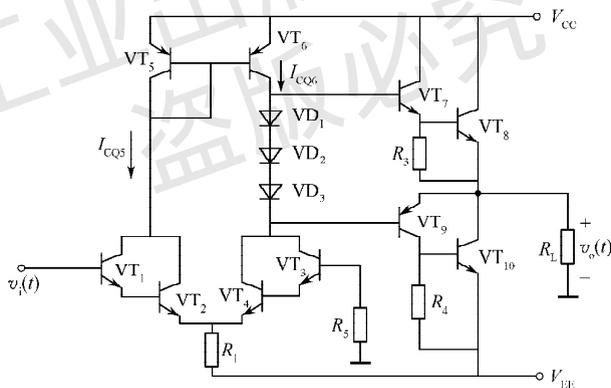
(3)  $R_2$ 、 $VD_1$  和  $VD_2$  的作用是使管子静态时, 处于微导通状态, 这时静态  $I_{BQ}$ 、 $I_{CQ}$  都很小, 管子的静态功耗  $P_{TQ}=V_{CEQ}I_{CQ}$  也很小, 但若  $R_2$ 、 $VD_1$  和  $VD_2$  之间任意一个断开时, 则有:

$$V_{CEQ} = \frac{1}{2}V_{CC}, I_{CQ} = \beta I_{BQ} = \beta \frac{\frac{1}{2}V_{CC} - V_{BE}}{R_1} = 192.73mA$$

这时, 每个管的功耗为(静态)  $P_{Ti} = V_{CEQ}I_{CQ} = 1156.4mW \gg 400mW$ 。

因此,  $R_2$ 、 $VD_1$  和  $VD_2$  之间任意一个断开时都会烧坏三极管  $VT_1$  和  $VT_2$ 。

**【习题 2.32】** 两级功放原理电路如图题 2.32 所示, 试: (1) 简述电路工作原理; (2) 已知  $|V_{EE}|=V_{CC}$ , 各管的  $V_{BE(on)}$  相等, 设各管基极电流不计, 求  $I_{CQ5}$ ; (3) 已知输出电压有效值  $V_L=8V$ ,  $R_L=8\Omega$ , 求输出功率  $P_o$ 。



图题 2.32

**【知识点】** 多级放大器电路分析。

**【解题过程】** 由电路可知:

(1)  $VT_1$  和  $VT_2$  组成 NPN 型的复合管,  $VT_3$  和  $VT_4$  组成 PNP 型的复合管, 这 4 个管子构成差动放大器中的对管,  $VT_5$  和  $VT_6$  管构成镜像电流源作为差放的有源负载。

$VT_7$  和  $VT_8$  组成 NPN 型的复合管,  $VT_9$  和  $VT_{10}$  组成 PNP 型的复合管, 这 4 个管子构成甲乙类互补对称功放中的对管。图中三个串联的二极管为静态时功放管提供微弱导通电压。

$$(2) I_{CQ5} = \frac{|V_{EE}| - 2V_{BE(on)}}{2R_1}$$

$$(3) \text{输出功率 } P_o = \frac{V_L^2}{R_L} = \frac{8^2}{8} = 8W$$

# 第3章 反馈电路

## 3.1 教学要求

- (1) 掌握反馈的基本概念,能熟练判断反馈电路的极性和类型。
- (2) 熟悉负反馈对放大器性能的影响,会按要求引入适当的负反馈。
- (3) 熟练掌握深度负反馈条件下闭环电压增益  $A_{VF}$  的估算方法。
- (4) 掌握正弦波振荡电路的工作原理和组成。
- (5) 掌握 RC 振荡电路和 LC 三点式振荡电路的组合法则。
- (6) 了解频率稳定度的含义,熟悉石英晶体振荡器的电路类型。

## 3.2 内容归纳

### 3.2.1 负反馈放大电路

#### 1. 负反馈放大电路的组成框图

组成框图如图 3.2.1 所示。

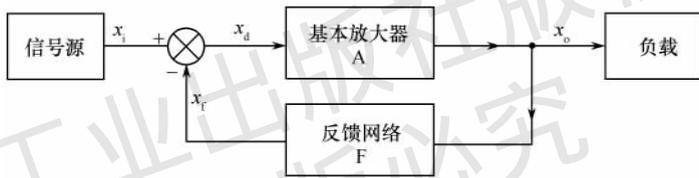


图 3.2.1 负反馈放大电路的组成框图

(1) 闭环增益:  $A_f = \frac{A}{1+AF}$ , 其中  $A$  是基本放大器的增益,  $F$  为反馈系数。

(2) 反馈深度:  $|1+AF|$ , 它的大小反映了反馈对放大器性能指标的影响程度。

- ①  $|1+AF| > 1$ , 引入负反馈; 且  $|1+AF| \gg 1$ , 引入深度负反馈;
- ②  $|1+AF| < 1$ , 引入正反馈;
- ③  $|1+AF| \rightarrow 0$ , 引入自激。

#### 2. 反馈的分类

##### (1) 反馈分类

正反馈与负反馈——根据反馈极性进行划分的。如果引入反馈后,使净输入量增加,闭环增益增加,则为正反馈;如果引入反馈后,使净输入量减少,闭环增益减少,则为负反馈。

局部反馈与越级反馈——如果反馈网络跨接在单个放大器的输入回路和输出回路,则成为局部反馈;如果反馈网络跨接在多级放大器的输入回路和输出回路,则成为越级反馈。

直流反馈与交流反馈——如果反馈信号只与输出回路的直流量有关,则为直流反馈,其作用是稳定放大器的直流工作点;如果反馈信号与输出回路的交流信号有关,则为交流反馈,其作用是改善放大器的交流性能指标。

并联反馈与串联反馈——根据反馈信号与外加输入信号在放大器的输入回路中的比较对象来分类,如果比较的是电压,则为串联反馈;如果比较的是电流,则为并联反馈。

电压反馈与电流反馈——根据反馈信号对输出信号的取样对象来分类,如果取样对象是电压,则为电压反馈;如果取样对象是电流,则为电流反馈。

## (2) 交流反馈的判别方法和步骤

找出反馈网络(元件):跨接在输入回路与输出回路的网络,即放大器的输出回路与输入回路连接起来的网络(元件)。注意电源线和地线是不传输信号的,不能看作反馈。

• 判断反馈极性——瞬时极性法:假设放大器输入信号电压的瞬时极性为“+”,然后依据输入信号传输路径确定电路各点的电压瞬时极性,最后判断反馈到输入端的信号是增强了还是削弱了原输入信号,从而确定反馈极性的正负。

三极管构成三种组态放大器时,输出信号与输入信号的极性关系如图 3.2.2 所示,其中图(a)为共射组态:输入 b(+),输出 c(-);图(b)为共基组态:输入 e(+),输出 c(+);图(c)为共集组态:输入 b(+),输出 e(+)

运放构成放大器时,输出信号与输入信号的极性关系如图 3.2.3 所示,其中

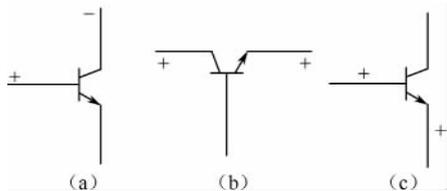


图 3.2.2 三种组态放大器输入/输出信号极性关系

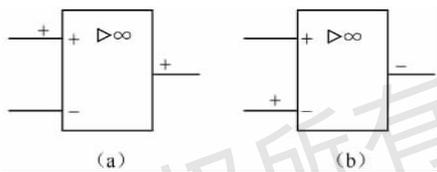


图 3.2.3 运放的输入/输出信号的极性关系

图(a)为同相:输入(+),输出(+);图(b)为反相:输入(+),输出(-)。

• 判断并联反馈与串联反馈:如果反馈信号与输入信号相交于同一点,组成并联结构,则引入了并联反馈;如果反馈信号与输入信号相交于不同点,组成串联结构,则引入了串联反馈。

三极管构成的反馈电路:图 3.2.4 所示为并联反馈电路。图 3.2.5 所示为串联反馈电路。

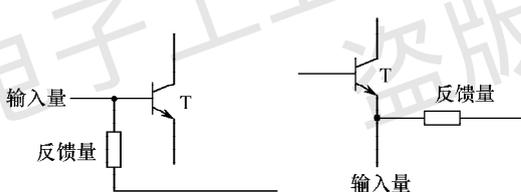


图 3.2.4 并联反馈电路

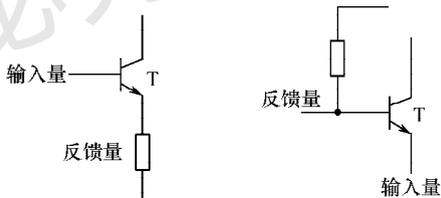


图 3.2.5 串联反馈电路

运放构成的反馈电路:并联反馈电路如图 3.2.6 所示。串联反馈电路如图 3.2.7 所示。

• 判断电压反馈与电流反馈——负载短路法:如果输出负载短路,反馈信号也为零,则为电压反馈;如果反馈信号还存在,则为电流反馈。另一种方法是:判断反馈信号与输出信号如果相交于一点,组成并联结构,则是电压反馈;相反,相交于不同点,组成串联结构,则是电流反馈如图 3.2.8 所示。



图 3.2.6 并联反馈运放电路

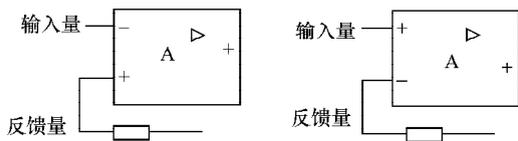


图 3.2.7 串联反馈运放电路

### 3. 深度负反馈放大器的估算

#### (1) 深度负反馈

条件:  $1+AF \gg 1$

特点:  $A_f = \frac{A}{1+AF} \approx \frac{1}{F}$

$$x_i = x_f, x_d = 0$$

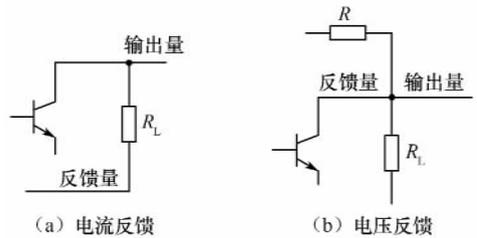


图 3.2.8 负载短路法

即反馈信号  $x_f$  近似等于输入信号  $x_i$ , 净输入信号  $x_d$  近似为零。这是深度负反馈放大器具有的特点。

(2) 串联负反馈:  $x_i$  为  $v_i$ ,  $x_f$  为  $v_f$ ,  $x_d$  为  $v_d$ , 于是有  $v_d \approx 0$ ; 净输入电流为  $i_d = \frac{v_d}{R_i} \approx 0$ 。

并联负反馈:  $x_i$  为  $i_i$ ,  $x_f$  为  $i_f$ ,  $x_d$  为  $i_d$ , 于是有  $i_d \approx 0$ ; 净输入电压为  $v_d = i_d R_i \approx 0$ 。

(3) 虚短:  $v_d \approx 0$ ; 虚断:  $i_d \approx 0$ 。

#### 4. 负反馈对放大器性能的影响

负反馈对放大器性能的影响主要表现在: 提高增益的恒定性, 改善了输入电阻和输出电阻, 减少了非线性失真, 抑制反馈环内的噪声, 展宽了通频带。具体作用如表 3.1 所示。

表 3.1 负反馈对放大器性能的影响

电路组态 项目	电压串联	电压并联	电流串联	电流并联
增益恒定	电压恒定	电压恒定	电流恒定	电流恒定
输入电阻	增大	减少	增大	减少
输出电阻	减少	减少	增大	增大
通频带	增宽	增宽	增宽	增宽
非线性失真	减少	减少	减少	减少
用途	电压放大电路的 输入级或中间级	电流-电压变化器及 放大电路的中间级	电压-电流变换器及 放大电路的输入级	电流放大

### 3.2.2 正弦波振荡器

#### 1. 正弦波振荡器的基本概念和原理

##### (1) 振荡的平衡条件

振幅平衡条件:  $|\dot{A}\dot{F}| = AF = 1$

相位平衡条件:  $\varphi_A + \varphi_F = 2n\pi (n=0, 1, 2, \dots)$

##### (2) 振荡的建立和稳定

起振条件:  $|\dot{A}\dot{F}| > 1$

电路要具有稳幅、选频特性。

根据选频网络的元件不同, 正弦波振荡器可分为 RC 振荡器、LC 振荡器和石英振荡器。

##### (3) 振荡电路的组成

振荡电路是一个没有输入信号的选频网络的正反馈放大电路, 一般由基本放大器和反馈网络(具有选频作用)构成。

#### 2. RC 正弦波振荡器

##### (1) RC 串并联选频电路(如图 3.2.9 所示)

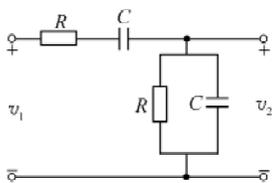


图 3.2.9 RC 串并联选频电路

振荡频率:  $\omega = \omega_0 = \frac{1}{2\pi RC}$

### 3. LC 三点式正弦波振荡器

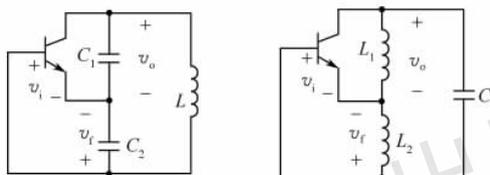
#### (1) 组成法则

晶体管构成三点式振荡器:与发射极相连的电抗为相同性质的,基极和集电极各自相连的电抗为相反性质的;

集成运放构成三点式振荡器:与运放的同相端相连的电抗是相同性质的,运放的反相端和运放的输出端各自相连的电抗是相反性质的。

#### (2) 振荡频率

计算振荡频率时,只需要分离出 LC 总回路的谐振总频率即可。



(a) 电容三点式

(b) 电感三点式

图 3.2.10 三点式振荡器电路

电容三点式:  $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}}}$

电感三点式:  $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_1 + L_2)C}}$

#### (3) 典型电路

如图 3.2.10 所示。

### 4. 石英晶体振荡器

#### (1) 特点

石英晶体振荡器的振荡频率稳定度很高,广泛应用于要求频率稳定性高的电子设备中。

串联谐振频率:晶振等效为小电阻;并联谐振频率:晶振呈现电感性,  $f_p$  很接近  $f_s$ 。

#### (2) 石英晶体振荡电路

并联晶体振荡电路:晶体工作于并联谐振频率,以等效电感  $L$  接入电路中。

串联晶体振荡电路:晶体工作于串联谐振频率,以等效小电阻(近似短路)接入电路中。

## 3.3 习题解答

**【习题 3.1】** 什么是反馈?什么是正反馈和负反馈?什么是串联反馈和并联反馈?什么是电压反馈和电流反馈?

**【知识点】** 反馈的定义和分类。

**【解题过程】** 反馈是指将放大器输出回路中的电量(电压或电流)的一部分或全部,经过一定的电路(称为反馈回路)送回到输入回路,从而对放大器的输出量进行自动调节的过程。

根据反馈的极性不同,可以分为正反馈和负反馈。引入反馈后,若原输入信号和反馈信号叠加的结果是使净输入减小( $x_d < x_i$ ),从而使闭环增益减小,则为负反馈;引入反馈后,若原输入信号和反馈信号叠加的结果是使净输入增加( $x_d > x_i$ ),从而使闭环增益增加,则为正反馈。

根据反馈信号与外加输入信号在放大电路输入回路中的比较对象不同来分类,可以分为并联反馈与串联反馈。在并联反馈中,输入信号、反馈信号和净输入信号均以电流形式体现三者的求和关系;在串联反馈中,输入信号、反馈信号和净输入信号均以电压形式体现三者的求和关系。

根据反馈信号对输出回路的取样对象不同,又有电压反馈与电流反馈之分。在电压反馈中,反馈网络、负载和基本放大器三者是并联关系。反馈信号  $x_f$  对输出电压  $v_o$  取样且正比于  $v_o$ , 即  $x_f = Fv_o$ ; 在电流反馈中,反馈网络、负载和基本放大器三者是串联关系,反馈信号  $x_f$  对输出电流  $i_o$  取样且正比于  $i_o$ , 即  $x_f = Fi_o$ 。

**【习题 3.2】** 选择合适的答案填入空格内。

- (1) 为了稳定放大电路的输出电压,应引入\_\_\_\_\_负反馈;
- (2) 为了稳定放大电路的输出电流,应引入\_\_\_\_\_负反馈;
- (3) 为了增大放大电路的输入电阻,应引入\_\_\_\_\_负反馈;
- (4) 为了减小放大电路的输入电阻,应引入\_\_\_\_\_负反馈;
- (5) 为了增大放大电路的输出电阻,应引入\_\_\_\_\_负反馈;
- (6) 为了减小放大电路的输出电阻,应引入\_\_\_\_\_负反馈。

A. 电压                      B. 电流                      C. 串联                      D. 并联

**【知识点】** 各种负反馈电路的作用:

串联负反馈——提高输入电阻;

并联负反馈——降低输入电阻;

电压负反馈——降低输出电阻,稳定输出电压;

电流负反馈——提高输出电阻,稳定输出电流。

**【解题过程】** (1)、(6)题是电压负反馈,它们能稳定输出电压,同时降低输出电阻;(2)、(5)题是电流负反馈,它们能稳定输出电流,同时提高输出电阻;(3)题是串联负反馈,能提高输入电阻;(4)题是并联负反馈,能降低输入电阻。

**【习题 3.3】** 选择合适的答案填入空格内。

(1) 对放大电路,所谓开环是指\_\_\_\_\_;

A. 无信号源                      B. 无反馈通路                      C. 无电源                      D. 无负载

而所谓闭环是指\_\_\_\_\_。

A. 考虑信号源内阻                      B. 有反馈通路                      C. 接入电源                      D. 接入负载

(2) 直流负反馈是指\_\_\_\_\_。

A. 直流耦合放大电路中所引入的负反馈;

B. 只有放大直流信号时才有的负反馈;

C. 在直流通路中的负反馈。

(3) 为了实现下列目的,应引入哪种类型的反馈,填入空格内。

为了稳定静态工作点,应引入\_\_\_\_\_;

为了稳定放大倍数,应引入\_\_\_\_\_;

为了改变输入和输出电阻,应引入\_\_\_\_\_;

为了抑制温漂,应引入\_\_\_\_\_;

为了展宽频带,应引入\_\_\_\_\_。

A. 直流负反馈                      B. 交流负反馈

**【知识点】** 开环与闭环的区别;直流负反馈的定义;各种反馈电路的作用。

直流负反馈——稳定工作点;

交流负反馈——提高增益的稳定性,抑制非线性失真,展宽通频带,改变输入和输出电阻。

**【解题过程】** (1) B B (2) C (3) A B B A B

**【习题 3.4】** 判断下列说法是否正确:

(1) 在负反馈放大电路中,在反馈系数极大的情况下,只有尽可能地增大开环放大倍数,才能有效地提高闭环放大倍数。

(2) 在负反馈放大电路中,基本放大器的放大倍数越大,闭环放大倍数越稳定。

(3) 在深度负反馈条件下,闭环放大倍数与反馈系数有关。而与放大器开环放大倍数无关。因此可以省去放大电路仅留下反馈网络,来获得稳定的闭环放大倍数。

(4) 负反馈只能改善反馈环路内的放大性能,对反馈环路之外无效。

**【知识点】** 负反馈对放大器性能的影响。

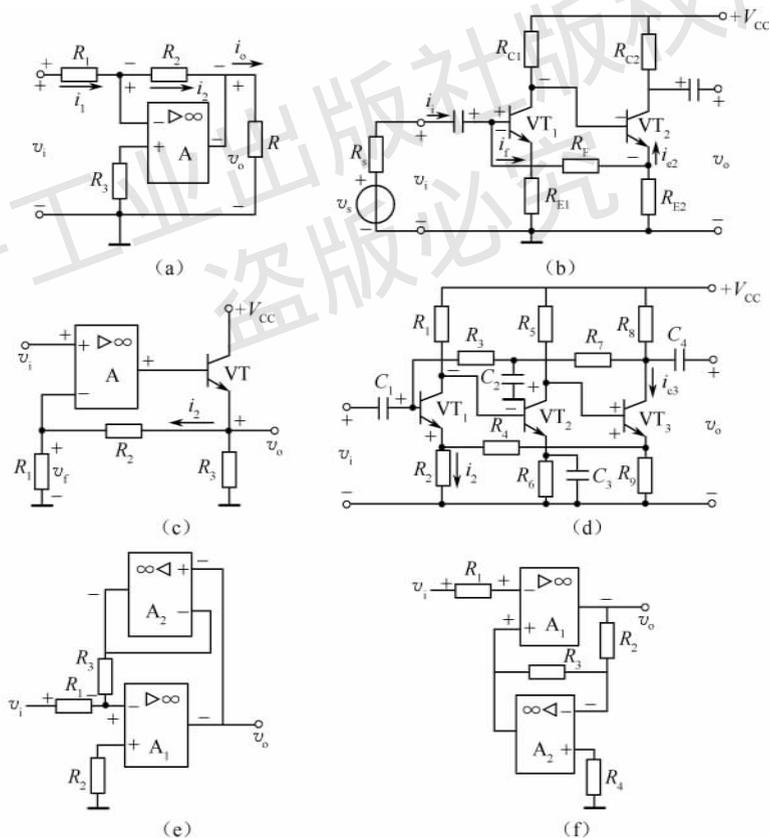
**【解题过程】** (1) 错误。因为  $A_f = \frac{A}{1+AF} \approx \frac{1}{F}$ 。闭环增益只与反馈网络的系数有关,而与基本放大器的开环增益无关。

(2) 错误。闭环增益只与反馈网络的系数有关,而与基本放大器的开环增益无关。

(3) 错误。虽然闭环增益与基本放大器的开环增益无关,但是不能去掉的。

(4) 正确。

**【习题 3.5】** 在图题 3.5 所示的电路中,找出反馈网络并判断反馈类型和极性。



图题 3.5

**【知识点】** 正反馈和负反馈的判别——瞬时极性法。

在反馈放大电路的输入端,加入对“地”瞬时极性为正的电压,并在输入端标上“+”,然后根据各级放大电路输出电压和输入电压的相位关系,标出输出端的电压极性。如果输入和输出同相时,二者的极性符号相同,否则相反。在根据反馈网络在放大电路输出回路的连接处的极性,画出回路连接处的极性,并画出反馈网络引入到输入端的极性。

**正反馈:**反馈网络与输入信号在相同点引入,且极性相同。

反馈网络与输入信号在不同点引入,且极性不相同。

**负反馈:**反馈网络与输入信号在相同点引入,且极性不相同。

反馈网络与输入信号在不同点引入,且极性相同。

**串联反馈和并联反馈的判别。**

**串联反馈:**反馈网络与输入信号在不同点引入,二者比较的是电压,串联比较。

**并联反馈:**反馈网络与输入信号在相同点引入,二者比较的是电流,并联比较。

**电压反馈和电流反馈的判别——短路法。**

将放大电路交流通路负载短路,即  $v_o = 0$ ,若反馈不再起作用就为电压反馈,否则为电流反馈。

而根据串联反馈和并联反馈的判别方法,如果反馈网络和输出信号相交于同一点,二者取样对象是电压,是并联结构,即为电压反馈;如果反馈网络和输出信号相交于不同点,二者取样对象是电流,是串联结构,即为电流反馈。

**【解题过程】** 图(a)反馈网络:  $R_2, R_1$ ;根据瞬时极性法,假设输入端(运放反相端)的极性为“+”,运放输出端的极性是“-”,经过电阻(反馈网络)反馈到运放的反相端为“-”,输入信号和反馈信号在同一点引入,极性相反,构成了负反馈。输入信号与反馈信号相交于同一点,构成了并联反馈;反馈信号与输出信号相交于同一点,构成了电压反馈,综合起来就构成了电压并联负反馈。

图(b)反馈网络:  $R_F, R_{E1}$ ;电流并联负反馈。

图(c)反馈网络:  $R_2, R_1$ ;电压串联负反馈。

图(d)反馈网络:  $R_4, R_2$ ;电流串联负反馈,  $R_7, R_3$  只引入直流负反馈。

图(e)反馈网络:  $A_2, R_3$ ;电压并联负反馈。

图(f)反馈网络:  $A_2, R_2$ ;电压串联负反馈。

**【习题 3.6】** 近似计算图题 3.5(a)~(d)电路在深度负反馈条件下的电压放大倍数。

**【知识点】** 不同组态负反馈放大电路的判断与闭环增益的计算。

**【推理】** 先判断出各电路的组态,然后“虚短”和“虚断”求解闭环电压增益。

**【解题过程】** 图(a)引入电压并联负反馈,根据“虚短”和“虚断”,因为是并联反馈,反馈信号和输入信号比较的是电流,分别为  $i_c, i_f$ ,而净输入信号  $i_d = 0$ ,输出信号与反馈信号取样对象是电压。 $v_o = -i_2 R_2, v_i = i_1 R_1$ ,故闭环增益是

$$A_{VF} = \frac{v_o}{v_i} = \frac{-i_2 R_2}{i_1 R_1} = -\frac{R_2}{R_1}$$

图(b)引入电流并联负反馈,因为是并联反馈,反馈信号和输入信号比较的是电流,分别是  $i_i, i_f$ ,而净输入信号  $i_d = 0$ ,输出端构成电流反馈,输出信号与反馈信号取样对象是电流,  $v_o = i_{c2} R_{c2} = i_{c2} R_{c2}, v_i = i_i R_s = i_f R_s$  因此闭环电压增益是

$$A_{VF} = \frac{v_o}{v_i} = \frac{v_o}{v_i} = \frac{i_{c2} R_{c2}}{i_f R_s} = \frac{i_{c2} R_{c2}}{i_f R_s} = \frac{R_{c2} R_F + R_{E2}}{R_s R_{E2}}$$

图(c)引入电压串联负反馈,根据“虚短”和“虚断”,因为是串联反馈,反馈信号和输入信号比较的是电压,分别为  $v_i, v_f$ ,而净输入信号  $v_d = 0$ ,输出信号与反馈信号取样对象也是电压,故  $v_o = i_2 (R_1 + R_2), v_i = v_f = i_2 R_1$ ,因此闭环电压增益是

$$A_{VF} = \frac{v_o}{v_i} = \frac{v_o}{v_f} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

图(d)引入电流串联负反馈,根据“虚短”和“虚断”,因为是串联反馈,反馈信号和输入信号比较的是电压,分别为  $v_i, v_f$ , 而净输入信号  $v_d = 0$ , 输出信号与反馈信号取样对象也是电流,  $v_o = -i_{c3}$  ( $R_7 // R_8$ ) =  $-i_{c3} \frac{R_7 R_8}{R_7 + R_8}$ ,  $v_i = v_f = i_2 R_2$ ,

闭环电压增益是

$$A_{VF} = \frac{v_o}{v_i} = \frac{v_o}{v_f} = \frac{-i_{c3} (R_7 // R_8)}{i_2 R_2} = -\frac{(R_9 + R_4 + R_2) R_7 R_8}{R_9 R_2 (R_7 + R_8)}$$

**【习题 3.7】** 一个电压串联负反馈放大电路,当输入电压  $v_i = 3\text{mV}$  时,  $v_o = 150\text{mV}$ ; 而无反馈时,当  $v_i = 3\text{mV}$  时,  $v_o = 3\text{V}$ , 试求这个负反馈放大电路的反馈系数和反馈深度。

**【知识点】** 根据闭环增益公式, 求解出  $F$ ; 根据开环增益可以求解出  $A$ , 反馈深度为  $1 + AF$ 。

**【解题过程】**

$$A_f = \frac{A}{1 + AF} = \frac{v_o}{v_i} = \frac{150}{3} = 50$$

$$A = \frac{v_o}{v_i} = \frac{3000}{3} = 1000$$

故求解可得,  $F = \frac{1}{19} = 0.05$ ; 反馈深度  $1 + AF = 20$ 。

**【习题 3.8】** 一个放大电路的开环电压增益是  $A_{vo} = 10^6$ , 当它接成负反馈放大电路时, 其闭环电压增益为  $A_{vf} = 50$ , 若  $A_{vo}$  变化 10%, 问  $A_{vf}$  变化多少?

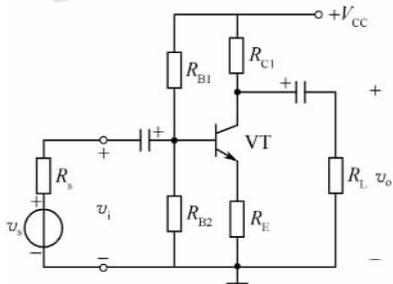
**【知识点】** 负反馈对放大器增益的影响。

**【解题过程】** 已知  $A_{vo} = 10^6$ ,  $A_{vf} = \frac{A}{1 + AF} = 50$ , 可以求解出反馈系数  $F = 0.02$ 。当  $A_{vo}$  变化 10%, 有

$$\frac{dA_f}{A_f} = \frac{1}{1 + AF} \frac{dA}{A} = \frac{1}{1 + 10^6 \times 0.02} \times 10\% = 5 \times 10^{-6}$$

由此可以看出, 放大器引入负反馈后, 增益的稳定性提高了。

**【习题 3.9】** 电路如图题 3.9 所示, 近似计算它的闭环电压增益, 并定性地分析它的输入电阻和输出电阻。



图题 3.9

**【知识点】** 深度负反馈时, 闭环增益  $A_f \approx \frac{1}{F}$ 。

**【解题过程】** 发射极电阻  $R_E$  引入了电流串联负反馈。

$$\text{闭环增益 } A_{Gf} = \frac{i_o}{v_i} = \frac{i_o}{v_f} = \frac{1}{R_E}, v_i = v_f = i_e R_E$$

并且  $v_o = -i_c (R_{C1} // R_L)$ , 因此电路的闭环电压增益是

$$A_{vf} = \frac{v_o}{v_i} = \frac{-i_c (R_{C1} // R_L)}{i_e R_E} = -\frac{(R_{C1} // R_L)}{R_E}$$

输入电阻: 根据虚短和虚断,  $R_i = \frac{v_i}{i_i} = R_{B1} // R_{B2}$ ;

输出电阻:  $R_o = \frac{v_i}{i_i} = R_{C1}$ 。

**【习题 3.10】** 已知一个负反馈放大电路的  $A = 10^5$ ,  $F = 2 \times 10^{-3}$ 。求:

(1)  $A_f = ?$

(2) 若  $A$  的相对变化率为 20%, 则  $A_f$  的相对变化率是多少?

**【知识点】** 负反馈对放大器增益的影响。

**【解题过程】** (1) 已知  $A = 10^5$ ,  $F = 2 \times 10^{-3}$ ,  $A_f = \frac{A}{1 + AF} = \frac{10^5}{1 + 10^5 \times 2 \times 10^{-3}} = 500$

若 A 的相对变化率为 20%，则  $\frac{dA_f}{A_f} = \frac{1}{1+AF} \frac{dA}{A} = \frac{1}{1+10^5 \times 2 \times 10^{-3}} \times 20\% = 10^{-3}$ 。

**【习题 3.11】** 正弦波振荡器的振幅平衡条件和相位平衡条件是什么？正弦波振荡器的起振振幅条件和相位条件各是什么？

**【知识点】** 正弦波振荡器的平衡条件和起振条件。

**【解题过程】** (1) 振荡的平衡条件：

振幅平衡条件  $|\dot{A}\dot{F}| = AF = 1$

相位平衡条件  $\varphi_A + \varphi_F = 2n\pi (n=0, 1, 2, \dots)$

(2) 振荡的起振条件：

振幅起振条件  $|\dot{A}\dot{F}| = AF > 1$

相位起振条件  $\varphi_A + \varphi_F = 2n\pi (n=0, 1, 2, \dots)$

**【习题 3.12】** 选择一个答案填入空格内。

(1) 当信号频率等于石英晶体的串联谐振频率时，石英晶体呈\_\_\_\_\_；

当信号频率在石英晶体的串联谐振频率和并联谐振频率之间时，石英晶体呈\_\_\_\_\_，其余情况下石英晶体呈\_\_\_\_\_。

(2) 当信号频率  $f=f_0$  时，RC 串并网络呈\_\_\_\_\_。

A. 电容性

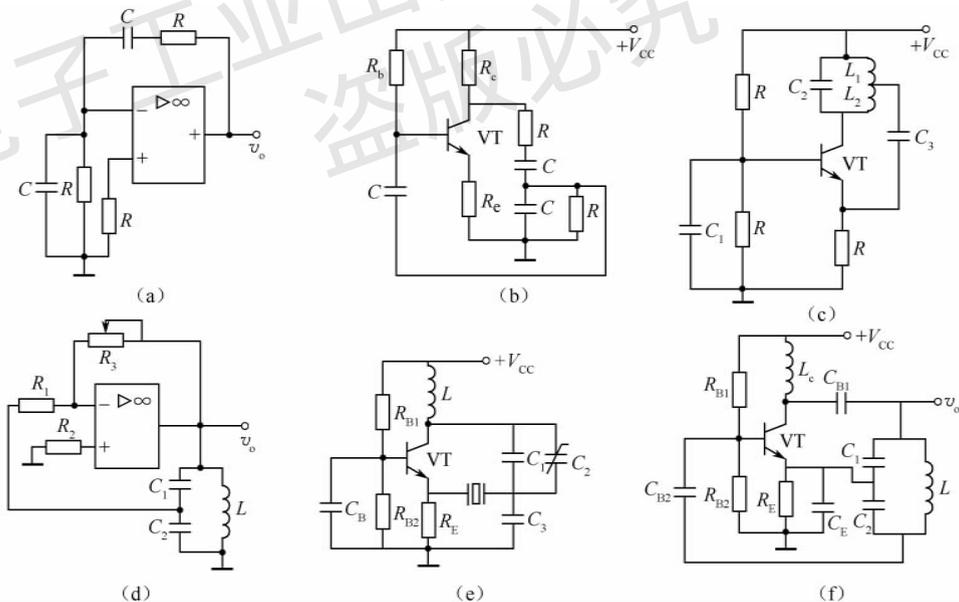
B. 电阻性

C. 电感性

**【知识点】** 石英晶体振荡器的频率特性。

**【解题过程】** (1) B、C、A (2) B

**【习题 3.13】** 指出图题 3.13 电路中，哪些电路可能产生振荡，哪些电路不能产生振荡？如果能够产生振荡，并说明是何种类型的振荡电路。



图题 3.13

**【知识点】** 振荡器的振荡相位平衡条件，三点式振荡器的组成法则。

**【解题过程】** 图(a)运算放大器构成反相放大器，输出反馈引入到运放的反相端，并在反相端断开， $\varphi_A = 180^\circ$ 。反馈网络由 RC 串并网络构成，当  $\omega = \omega_0 = \frac{1}{2\pi RC}$  时， $\varphi_F = 0^\circ$ ，故  $\varphi_A + \varphi_F = 180^\circ$ ，不

满足相位平衡条件,不能振荡。

图(b)共射组态,输出反馈引入到基极,断开基极输出,并在基极加上“+”极性,则三极管的集电极输出“-”, $\varphi_A = 180^\circ$ ,反馈网络由 RC 串并网络构成,当  $\omega = \omega_0 = \frac{1}{2\pi RC}$  时,  $\varphi_F = 0^\circ$ ,故  $\varphi_A + \varphi_F = 180^\circ$ ,不满足相位平衡条件,不能振荡。

图(c)VT 组成共基组态,三极管发射极相连的是  $L_1$  和  $L_2$ ,集电极相连的是  $C_2$  和  $L_2$ ,基极相连的是  $C_2$  和  $L_1$ 。符合三点式振荡器的组成法则,构成电感三点式振荡器。可以振荡。

图(d)运放构成了反相放大器,同相端连接了  $L$  和  $C_2$ ,反相端连接了  $C_1$  和  $C_2$ ,运放输出端连接了  $C_1$  和  $L$ ,不符合三点式振荡器的组成法则,不能振荡。

图(e)首先不考虑晶振,发射极连接了  $C_3$  和  $C_1 // C_2$ ,基极连接了  $C_3$  和  $L$ ,集电极连接了  $L$  和  $C_1 // C_2$ ,符合三点式振荡器的组成法则,能振荡,(构成电容三点式振荡器)。

图(f)VT 组成共射极组态, $L_C$  是高频扼流圈,电容  $C_{B1}$ 、 $C_{B2}$  和  $C_E$  交流短路。三极管发射极相连的是  $C_1$  和  $C_2$ ,集电极相连的是  $C_1$  和  $L$ ,基极相连的是  $C_2$  和  $L$ 。符合三点式振荡器的组成法则,构成电容三点式振荡器,可以振荡。

**【习题 3.14】** 为了实现下述各要求,试问应分别选择何种类型的振荡器?

- (1) 产生 100Hz~20kHz 的正弦波信号。
- (2) 产生 200Hz~1MHz 的正弦波信号。
- (3) 产生 500kHz 的正弦波信号,且要求高的频率稳定度。

**【知识点】** 各种振荡器的振荡频率范围。

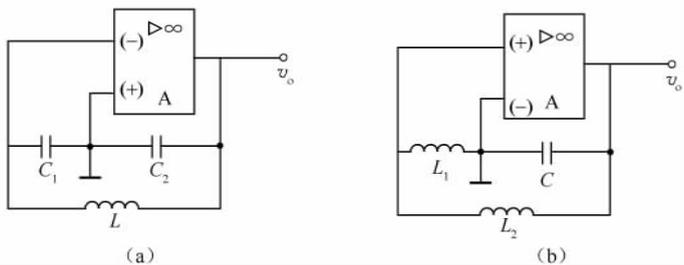
**【解题过程】** (1)RC 正弦波振荡器;(2)RC 正弦波振荡器;(3)石英晶体振荡器。

**【习题 3.15】** 三点式正弦波振荡器的交流等效电路如图题 3.15 所示,为满足振荡的相位平衡条件,请在图中标出运算放大器 A 的同相和反相输入端。

**【知识点】** 三点式振荡器的组成法则。

**【解题过程】** 图(a)根据集成运放三点式振荡器的组成法则, $C_2$  和  $C_1$  之间连接的是运放的同相端,则  $L$  和  $C_1$  之间连接的是运放的反相端。

图(b)根据集成运放三点式振荡器的组成法则,若  $L_1$  和  $L_2$  之间连接的是运放的同相端,则  $L_1$  和  $C$  之间连接的是运放的反相端。

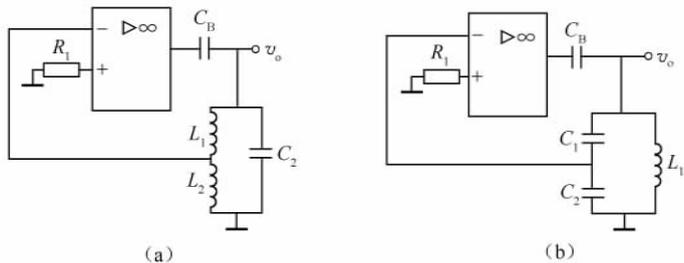


图题 3.15

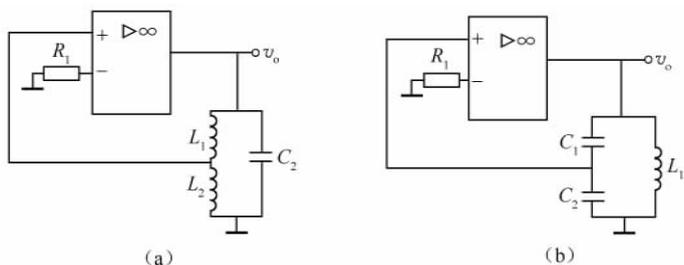
**【习题 3.16】** 对如图题 3.16 所示的电路,画出三点式振荡器的交流通路,试用相位平衡条件判断哪个电路可以振荡,哪个不能产生振荡,指出可能振荡的电路属于什么类型?并将不能振荡的电路修改成能够振荡的电路。

**【知识点】** 三点式振荡器的组成法则。

**【解题过程】** 如图解 3.16 所示。



图题 3.16



图解 3.16

图(a)根据集成运放三点式振荡器的组成法则,图中  $L_1$  和  $L_2$  之间连接的是运放的反相端,则  $L_2$  和  $C_2$  之间连接的是运放的同相端, $L_1$  和  $C_2$  之间连接的是运放的输出端。不符合组成法则,不能形成振荡电路,可能振荡的电路是电感三点式振荡器。

图(b)根据集成运放三点式振荡器的组成法则,图中  $C_2$  和  $C_1$  之间连接的是运放的反相端,则  $L_1$  和  $C_2$  之间连接的是运放的反相端, $L_1$  和  $C_1$  之间连接的是运放的输出端。不符合组成法则,不能形成振荡电路,可能振荡的电路是电容三点式振荡器。

修改方法:

图(a)根据集成运放三点式振荡器的组成法则,将运放的同相端和反相端互换一下,就构成了电感三点式振荡器。

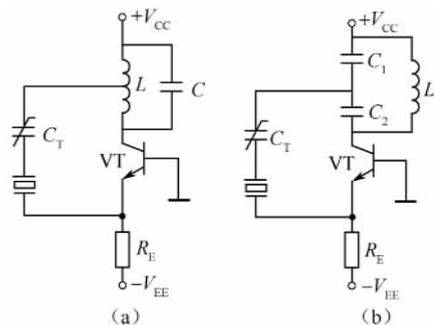
图(b)根据集成运放三点式振荡器的组成法则,将运放的同相端和反相端互换一下,就构成了电容三点式振荡器。

**【习题 3.17】** 如图题 3.17 所示的石英晶体振荡电路,试说明属于哪种类型的晶体振荡电路?

**【知识点】** 石英晶体振荡电路的构成原理。

**【解题过程】** 图(a)串联谐振晶体振荡电路。不难看出,三极管 VT 构成共基组态,发射极连接了两段电感,基极和集电极各连接了一段电感和电容,是电感三点式振荡电路。石英晶体和电容  $C_T$  串联谐振,呈现一个小电阻,就可以构成串联晶体振荡电路。

图(b)串联谐振晶体振荡电路。不难看出,三极管 VT 构成共基组态,发射极连接了  $C_1$  和  $C_2$ ,基极连接了一段电感  $L$  和电容  $C_1$ ,集电极连接了一段电感  $L$  和电容  $C_2$ ,是电容三点式振荡电路。石英晶体和电容  $C_T$  串联谐振,呈现一个小电阻,就可以构成串联晶体振荡电路。



图题 3.17

# 第 4 章 集成运算放大器的应用

## 4.1 教学要求

1. 熟悉集成运放的电压传输特性,掌握线性工作时,集成运放的两个重要特点,虚短和虚断。
2. 掌握反相放大器和同相放大器的电路结构和性能特点,熟练利用虚短、虚断分析各种运算电路。
3. 掌握理想滤波器的分类以及幅频特性曲线。
4. 了解有源滤波器的电路结构。
5. 掌握单门限电压比较器和迟滞比较器的工作原理,能够画出电压比较器的传输特性曲线。

## 4.2 内容归纳

### 4.2.1 集成运算放大器

#### 1. 集成运放的传输特性

(1) 当输入信号的幅值很小时,集成运放工作在放大状态,输出电压与输入电压成线性关系,即  $v_o = A_{vd}(v_p - v_N)$ 。

(2) 当输入信号幅度比较大时,集成运放工作在饱和区域,输出电压与输入电压成非线性关系,输出电压等于正向最大输出电压或负向最大输出电压。

当  $v_p > v_N$  时,输出  $v_o$  为高电平  $V_{OH}$ ;

当  $v_p < v_N$  时,输出  $v_o$  为低电平  $V_{OL}$ 。

#### 2. 理想模型

理想集成运放具有理想参数,即  $A_{vd} \rightarrow \infty; R_{id} \rightarrow \infty; R_o \rightarrow 0$ 。

#### 3. 在线性放大状态时,具有两个重要特点

“虚短”:  $v_p = v_N$ 。相当于两输入端短接,但由于不是真正的短接,故称“虚短”。注意,虚短不能理解为两输入端短接,只是  $v_p - v_N$  的值小到可以忽略不计的程度。实际上,运放正是利用这个极其微小的差值进行电压放大的。

“虚断”:  $i_p = i_N = 0$ 。相当于运放两输入端开路,但由于不是真正的开路,故称“虚断”。注意,虚断不能理解为输入端开路,只是输入电流小到可以忽略不计的程度。

利用这两个特点,分析集成运放的应用电路非常方便。

### 4.2.2 运算电路

反相和同相放大器是集成运放最基本的应用电路。由于许多运算电路都是在其基础上演变而来的,因此,要求熟悉电路的组成原理、性能特点,熟记输出电压  $v_o$  的表达式,如表 4.1 所示。

#### 1. 加减运算电路

加法、减法电路都是在同相放大器和反相放大器的基础上发展起来的,因此,在分析电路时,首先寻找同相放大器或反相放大器,利用叠加原理进行求解。若电路中没有同相放大器或反相放大器,采用虚短、虚断来求解。同相、反相加法器的电路组成及功能见表 4.2。减法器 and 仪用放大器电路组成和功能见表 4.3。

表 4.1 反相和同相放大器的组成、性能特点

	反相放大器	同相放大器
电路结构		
类型	电压并联负反馈	电压串联负反馈
$v_o$	$v_o = -\frac{R_f}{R_1} v_i$	$v_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) v_i$
$R_i$	$R_1$	$\infty$
$R_o$	0	0
应用	(1) 实现反相比例运算; (2) 改变 $R_f$ 和 $R_1$ 的值, 可以实现任意比值的比例运算	(1) 实现同相比例运算; (2) 去掉 $R_1$ , 并令 $R_f = 0$ , 就构成了电压跟随器

表 4.2 同相、反相加法器的电路组成及功能

	反相加法器	同相加法器
电路图		
$v_o$	$v_o = -\frac{R_f}{R_1} v_1 - \frac{R_f}{R_2} v_2 - \frac{R_f}{R_3} v_3$	$v_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) \left(\frac{R_3 // R}{R_2 + R_3 // R} v_1 + \frac{R_2 // R}{R_3 + R_2 // R} v_2\right)$
功能	令 $R_1 = R_2 = R_3 = R_f$ , $v_o = -(v_1 + v_2 + v_3)$ 构成了反相加法器	令 $R_1 = R_2 = R_3 = R_f = R$ , $v_o = \frac{2}{3}(v_1 + v_2)$ 构成了同相加法器

表 4.3 减法器 and 仪用放大器电路组成及功能

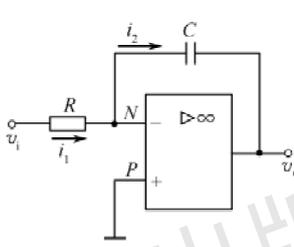
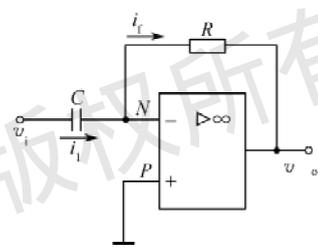
	减法器	仪用放大器
电路图		

	减法器	仪用放大器
$v_o$	$v_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) \frac{R_2}{R_2 + R_3} v_2 - \frac{R_f}{R_1} v_1$	$v_o = \frac{R_4}{R_3} \left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right) (v_2 - v_1)$
功能	<p>令 <math>R_1 = R_f, R_2 = R_3</math></p> <p><math>v_o = v_2 - v_1</math></p> <p>构成了减法器</p>	用来放大微弱差值信号的高精度放大器, 共模抑制比很高, 输入电阻高, 电压增益在很大范围内可调

## 2. 积分和微分电路

若  $Z_1 = R, Z_f = C$ , 则构成积分电路; 若  $Z_1 = C, Z_f = R$ , 则构成了微分电路。积分与微分电路的构成与功能见表 4.4。

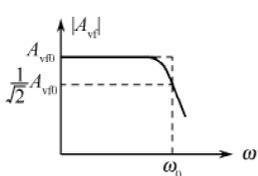
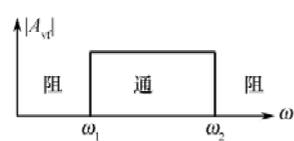
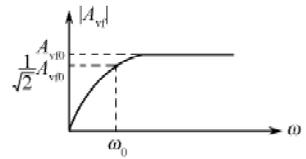
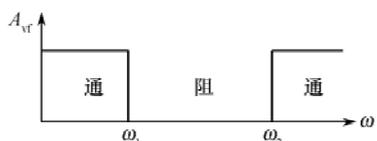
表 4.4 积分与微分电路的构成与功能

	积分电路	微分电路
电路图		
$v_o$	$v_o = -\frac{1}{RC} \int v_i dt$	$v_o = -RC \frac{dv_i}{dt}$
功能	积分运算及波形变化; 例如: 将方波变成三角波	微分运算及波形变换, 例如: 将方波变成尖脉冲

## 4.2.3 有源滤波器

有源滤波器的分类及其幅频特性, 如表 4.5 所示。

表 4.5 有源滤波器的分类及其幅频特性

滤波器类型	幅频特性	滤波器类型	幅频特性
低通滤波器		带通滤波器	
高通滤波器		带阻滤波器	

## 4.2.4 电压比较器

### 1. 单门限电压比较器

单门限电压比较器是指只有一个门限电平的比较器。当输入电压等于此门限电平时,输出电压立即发生跳变。表 4.6 给出了单门限电压比较器的一般形式及传输特性。

无论输入信号  $v_i$ 、参考电压  $V_{REF}$  加在运放的哪个输入端,只要运放开环工作,即为单门限比较器。电路中稳压管  $VD_Z$  可将运放输出的极限电压转换成数字电路所需的逻辑电平,而与其串联的电阻为限流电阻。

表 4.6 单门限电压比较器的一般形式及传输特性

	过零比较器	注意电平电压比较器
电路图		
传输特性		

分析方法:

(1) 令  $v_+ = v_-$  求出输入电压  $v_i$ , 该  $v_i$  值即为门限电平。

(2) 分别分析  $v_i$  大于门限及小于门限时,  $v_+$  与  $v_-$  的大小关系。若  $v_+ > v_-$ , 则  $v_o = V_{OH} = V_Z + V_{D(on)}$ ; 若  $v_+ < v_-$ , 则  $v_o = V_{OL} = -(V_Z + V_{D(on)})$ 。

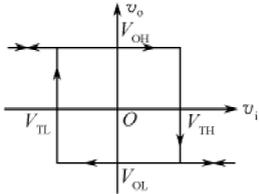
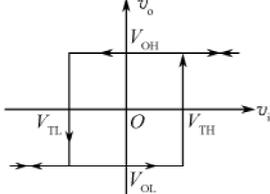
(3) 画传输特性曲线及输出波形图。

### 2. 迟滞比较器

单门限比较器, 电路结构简单, 但当门限电平附近出现干扰信号时, 输出会出现误操作。为提高电路抗干扰能力, 采用迟滞比较器。该电路在输入电压  $v_i$  增大以及  $v_i$  减少时, 分别采用不同的门限电压, 使其传输特性具有滞回曲线的形状, 如表 4.7 所示。

表 4.7 迟滞比较器

	反相输入迟滞比较器	同相输入迟滞比较器
电路图		

	反相输入迟滞比较器	同相输入迟滞比较器
传输特性		
迟滞宽度	$V_{TH} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{REF} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{OH}$ $V_{TL} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{REF} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{OL}$ $\Delta V = \frac{R_1}{R_1 + R_2} (V_{OH} - V_{OL})$	$V_{TH} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) V_{REF} - \frac{R_1}{R_2} V_{OL}$ $V_{TL} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) V_{REF} - \frac{R_1}{R_2} V_{OH}$ $\Delta V = \frac{R_1}{R_2} (V_{OH} - V_{OL})$
应用	可用来组成波形整形及波形变换电路	

分析方法:

(1) 令  $v_+ = v_-$  求出输入电压  $v_i$ , 该  $v_i$  值即为门限电平。

注意: 由于正反馈的作用, 输出 ( $V_{OH}$ 、 $V_{OL}$ ) 对输入会造成影响, 电路出现两个门限, 其中数值大的为上门限电平  $V_{TH}$ , 数值小的为下门限电平  $V_{TL}$ 。

(2) 围绕两个门限电平, 分别分析  $v_o$  和  $v_i$  之间的关系:

围绕  $v_o = V_{OH}$  时对应的门限电平。若使  $v_o$  由  $V_{OH}$  跳变到  $V_{OL}$ , 则  $v_-$  应大于  $v_+$ 。分析  $v_i$  如何变化 (大于还是小于门限电平), 才能保证  $v_- > v_+$ 。

围绕  $v_o = V_{OL}$  时对应的门限电平。若使  $v_o$  由  $V_{OL}$  跳变到  $V_{OH}$ , 则  $v_+$  应大于  $v_-$ 。分析  $v_i$  如何变化 (大于还是小于门限电平), 才能保证  $v_+ > v_-$ 。

(3) 画出传输特性曲线或输出波形图。

### 4.3 习题解答

**【习题 4.1】** 电路如图题 4.1 所示, 各集成运放均是理想的, 试写出各输出电压  $v_o$  的值。

**【知识点】** 集成运算放大器的分析方法: 寻找同相或反相放大器, 如果有, 则代入相应的增益公式进行求解; 如果没有, 则利用虚短和虚断。

**【解题过程】** 图(a)为同相放大器, 直接带入增益公式求解, 其输出电压为

$$v_o = \left(1 + \frac{33\text{k}\Omega}{33\text{k}\Omega}\right) v_i = 2 \times 0.1\text{V} = 0.2\text{V}$$

图(b)为电压跟随器, 直接代入增益公式求解, 其输出电压为

$$v_o = v_i = 1\text{V}$$

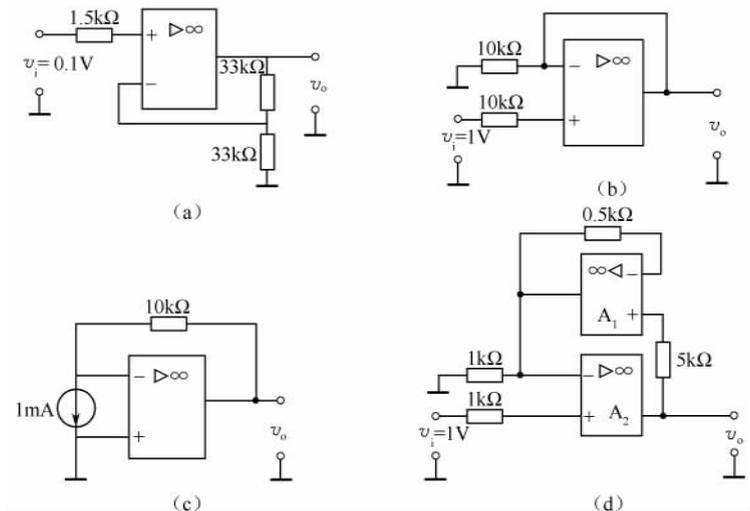
图(c)利用“虚短”、“虚断”的概念:  $v_p = v_n$ ,  $i_p = i_n = 0$

$$v_o = 1\text{mA} \times 10\text{k}\Omega = 10\text{V}$$

图(d)利用“虚短”、“虚断”的概念:  $v_p = v_n$ ,  $i_p = i_n = 0$

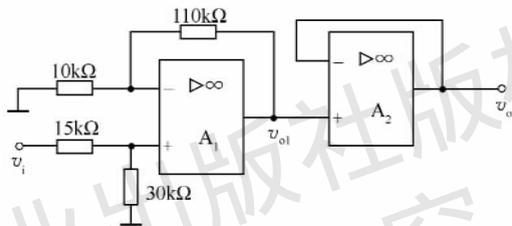
$$v_{p2} = v_i = 1\text{V}, v_{n2} = v_{p2} = 1\text{V}$$

$$v_o = v_{p1} = v_{n1} = v_{p2} = v_{n2} = 1\text{V}$$



图题 4.1

【习题 4.2】 电路如图题 4.2 所示, 试问当  $v_i = 100\sin\omega t$  mV 时  $v_o$  为多少?



图题 4.2

【知识点】 同相放大器的应用,  $A_1$  构成同相放大器,  $A_2$  构成电压跟随器。

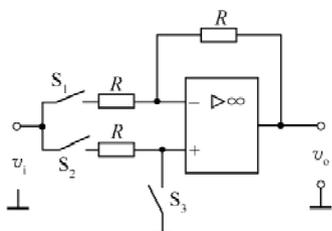
【解题过程】

$$v_{o1} = \frac{10\text{k}\Omega + 110\text{k}\Omega}{10\text{k}\Omega} \cdot \frac{30\text{k}\Omega}{30\text{k}\Omega + 15\text{k}\Omega} = 8v_i$$

$$v_o = v_{o1} = 8v_i = 800\sin\omega t$$

【习题 4.3】 电路如图题 4.3 所示, 求下列情况时,  $v_o$  和  $v_i$  的关系式。

- (1)  $S_1$  和  $S_3$  闭合,  $S_2$  断开。
- (2)  $S_1$  和  $S_2$  闭合,  $S_3$  断开。
- (3)  $S_2$  闭合,  $S_1$  和  $S_3$  断开。



图题 4.3

- (4)  $S_1, S_2, S_3$  闭合。

【知识点】 同相放大器和反相放大器的组合。

【解题过程】 (1)  $S_1$  和  $S_3$  闭合,  $S_2$  断开时, 构成反相放大器,

$$v_o = -v_i$$

- (2)  $S_1$  和  $S_2$  闭合,  $S_3$  断开时,  $v_{p1} = v_{n1} = v_i, i = 0, v_o = v_i$ 。

- (3)  $S_2$  闭合,  $S_1$  和  $S_3$  断开时, 构成同相放大器。  $v_{p1} = v_{n1} = v_i$ ,

$$v_o = v_i$$

- (4)  $S_1, S_2, S_3$  闭合时, 构成反相放大器,  $v_o = -v_i$ 。

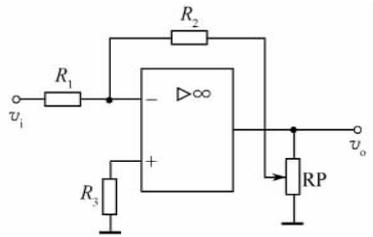
【习题 4.4】 增益可调的反比例运算电路如图题 4.4 所示, 已知电路的输出  $V_{o(\text{sat})} = \pm 15V$

$R_1 = 100\text{k}\Omega, R_2 = 200\text{k}\Omega, R_P = 5\text{k}\Omega, v_i = 2V$ , 求在下列情况下的  $v_o$  值。

- (1) RP 滑动头在顶部位置。
- (2) RP 滑动头在正中位置。
- (3) RP 滑动头在底部位置。

**【知识点】** 反相放大器与电压比较器。

**【解题过程】** (1) 此时反馈电阻是  $R_2$ , 运放构成反相放大器。



图题 4.4

$$v_o = -\frac{R_2}{R_1}v_i = -\frac{200\text{k}\Omega}{100\text{k}\Omega} \times 2\text{V} = -4\text{V}$$

(2) 设 RP 中点处电压是  $v_3$ , 则

$$\frac{v_i - 0}{R_1} = \frac{0 - v_3}{R_2}$$

$$v_3 = -\frac{R_2}{R_1}v_i = -2v_i = -4\text{V}$$

而

$$\frac{0 - v_3}{R_2} = \frac{v_3 - 0}{\frac{1}{2}\text{RP}} + \frac{v_3 - v_o}{\frac{1}{2}\text{RP}}$$

$$v_o = \frac{1}{2}\text{RP} \left[ \frac{v_3}{R_2} + \frac{4v_3}{\text{RP}} \right] = -8\text{V}$$

(3) 运放构成了电压比较器。 $v_i = 2\text{V}$  加在运放的反相端, 运放的同相端接在  $0\text{V}$ 。电压比较器输出  $v_o = -15\text{V}$ 。

**【习题 4.5】** 试求图题 4.5 中电流  $I_L$ 。

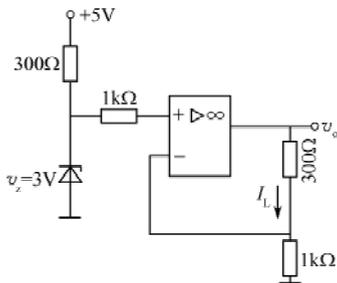
**【知识点】** 同相放大器。

**【解题过程】** 代入同相放大器的公式求解, 有

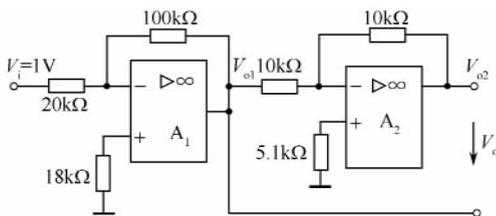
$$v_o = \left(1 + \frac{0.3}{1}\right) \times 3 = 3.9\text{V}$$

$$I_L = \frac{v_o}{R} = \frac{3.9\text{V}}{(1 + 0.3)\text{k}\Omega} = 3\text{mA}$$

**【习题 4.6】** 试求图题 4.6 电路中的  $V_o$  值。



图题 4.5



图题 4.6

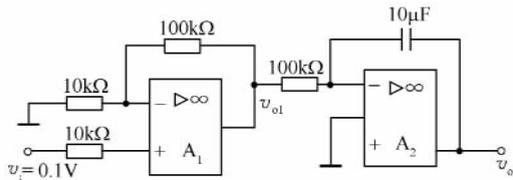
**【知识点】** 反相放大器。

**【解题过程】**  $V_{o1} = -\frac{100\text{k}\Omega}{20\text{k}\Omega} \times V_i = -\frac{100\text{k}\Omega}{20\text{k}\Omega} \times 1\text{V} = -5\text{V}$

$$V_{o2} = -\frac{10\text{k}\Omega}{10\text{k}\Omega} \times V_{o1} = 5\text{V}$$

$$V_o = V_{o2} - V_{o1} = 5\text{V} - (-5\text{V}) = 10\text{V}$$

**【习题 4.7】** 在图题 4.7 示电路中, 设  $V_C(0) = 0V$ , 求  $t = 5$  秒时的输出  $v_o$  值。



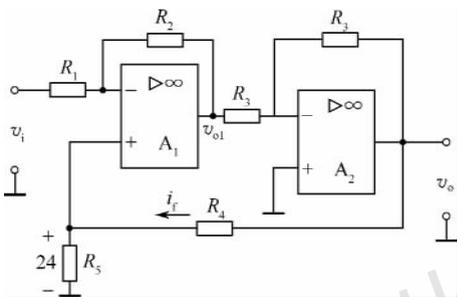
图题 4.7

**【知识点】** 同相放大器 and 积分电路。

**【解题过程】**  $v_{o1} = \left(1 + \frac{100k\Omega}{10k\Omega}\right) \times v_i = 11 \times 0.1V = 1.1V$

$$v_o = -\frac{1}{RC} \int_0^t v_{o1} dt = -\frac{1}{100 \times 10^3 \times 10 \times 10^{-6}} \int_0^5 1.1 dt = -1.1 \times (5-0) = -5.5V$$

**【习题 4.8】** 电路如图题 4.8 所示,  $A_1, A_2$  为理想集成运放。问:



图题 4.8

(1) 两级放大器各自的反馈极性与类型。

(2) 两级放大器级间的反馈极性与类型。

(3) 电压放大倍数  $v_o/v_i = ?$

(4) 当负载  $R_L$  变化时, 该电路能否稳定输出电压和输出电流。

**【知识点】** 瞬时极性法, 深度负反馈条件下的  $A_{vf}$  估算。

**【解题过程】** (1) 运放  $A_1$  组成的第一级放大器引入了负反馈, 反馈类型是电压并联负反馈。

运放  $A_2$  组成的第二级放大器引入了负反馈, 反馈类型是电压并联负反馈。

(2) 两级放大器级间引入了负反馈, 反馈类型是电压串联负反馈。

(3) 因为反馈类型是电压串联负反馈,

$$v_o = \frac{R_4 + R_5}{R_5} v_i, \quad v_o = -v_{o1}, \quad \frac{v_i - v_i}{R_1} = \frac{v_i - v_{o1}}{R_2}$$

联立得

$$A_{vf} = \frac{1}{R_1} \left[ \frac{R_5}{R_4 + R_5} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) + \frac{1}{R_2} \right]$$

(4) 因为是电压负反馈, 当负载  $R_L$  变化时, 该电路能够稳定输出电压。

**【习题 4.9】** 如图题 4.9 所示电路中, 设输出电压  $v_o = 3V$  时, 驱动报警发出报警信号, 如果  $v_{i1} = 1V, v_{i2} = -4.5V$ , 试问  $v_{i3}$  为多大时发出报警信号?

**【知识点】** 反相加法器。

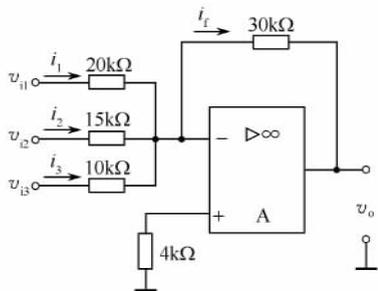
**【解题过程】** 代入反相加法器公式, 有

$$\frac{v_{i1}}{20k\Omega} + \frac{v_{i2}}{15k\Omega} + \frac{v_{i3}}{10k\Omega} = \frac{-v_o}{30k\Omega}$$

$$v_o = -(1.5v_{i1} + 2v_{i2} + 3v_{i3})$$

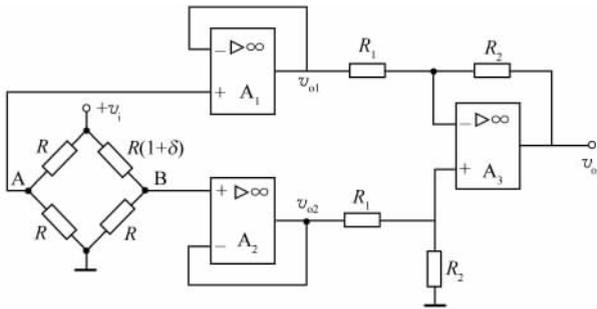
将  $v_o = 3V, v_{i1} = 1V, v_{i2} = -4.5V$  代入表达式中, 可求出

$v_{i3} = 1.5V$ 。即  $v_{i3}$  为  $1.5V$  时发出报警信号。



图题 4.9

【习题 4.10】一桥式放大电路如图 4.10 所示, 写出  $v_o = f(\delta)$  的表达式 ( $\delta = \Delta R/R$ )。



图题 4.10

【知识点】 仪用放大器。

【解题过程】 4 个电阻首尾相连构成电阻桥, 不难求出 A、B 点的电位。

$$v_A = \frac{1}{2} v_i, v_B = \frac{R}{2R + \delta R} v_i = \frac{1}{2 + \delta} v_i$$

$$v_{o1} = v_A = \frac{1}{2} v_i, v_{o2} = v_B = \frac{1}{2 + \delta} v_i$$

而  $v_{o1}, v_{o2}$  为减法器  $A_3$  的输入电压, 所以

$$v_o = \frac{R_2}{R_1} (v_{o2} - v_{o1}) = \frac{R_2}{R_1} \left( \frac{1}{2 + \delta} - \frac{1}{2} \right) v_i$$

【习题 4.11】 仪用放大器电路如图 4.1.10 所示, 求  $v_o$  的数学表达式。

【知识点】 同相放大器 and 减法器。

【解题过程】 运放  $A_1, A_2$  分别是同相放大器, 组成第一级差分放大电路, 运放  $A_3$  组成减法器电路。

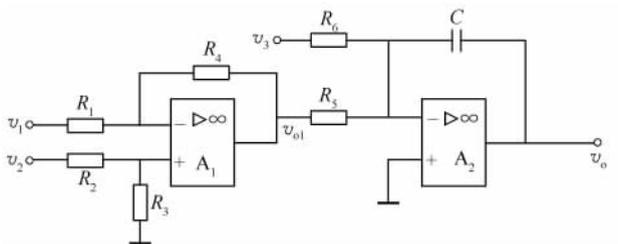
$$v_3 - v_4 = \frac{2R_2 + R_1}{R_1} v_{R1} = \left( 1 + \frac{2R_2}{R_1} \right) (v_1 - v_2)$$

而

$$v_o = -\frac{R_4}{R_3} (v_3 - v_4) = -\frac{R_4}{R_3} \left( 1 + \frac{2R_2}{R_1} \right) (v_1 - v_2)$$

【习题 4.12】 电路如图题 4.12 所示,  $A_1, A_2$  是理想运放, 电容的初始电压  $u_C(0) = 0$ 。

- (1) 写出  $v_o$  与  $v_1, v_2, v_3$  之间的电压放大倍数表达式;
- (2) 当电路中的电阻都相等时, 输出电压  $v_o$  的数学表达式。



图题 4.12

【知识点】 减法器电路 and 积分电路。

【解题过程】 (1)  $v_1, v_2$  作为减法器的输入电压, 代入公式求解:

$$v_{o1} = \left( \frac{R_3}{R_3 + R_2} \right) \left( 1 + \frac{R_4}{R_1} \right) v_2 - \frac{R_4}{R_1} v_1$$

而  $v_{o1}, v_3$  是积分电路的输入电压, 代入公式求解:

$$v_o = -\frac{1}{C} \int_0^t \left( \frac{v_3}{R_6} + \frac{v_{o1}}{R_5} \right) dt$$

(2) 当电路中的电阻都相等时, 即

$$v_{o1} = \left( \frac{R_3}{R_3 + R_2} \right) \left( 1 + \frac{R_4}{R_1} \right) v_2 - \frac{R_4}{R_1} v_1 = v_2 - v_1$$

$$v_o = -\frac{1}{C} \int_0^t \left( \frac{v_3}{R_6} + \frac{v_{o1}}{R_5} \right) dt = -\frac{1}{RC} \int_0^t (v_3 + v_2 - v_1) dt$$

**【习题 4.13】** 在下列情况下, 应分别采用哪种类型的滤波电路?

- (1) 有用信号频率为 200Hz;
- (2) 有用信号频率低于 500kHz;
- (3) 希望抑制 50Hz 交流电源的干扰;
- (4) 希望抑制 20kHz 以下的信号。

**【知识点】** 滤波器的分类。

**【解题过程】** (1) 带通滤波器, (2) 低通滤波器, (3) 带阻滤波器, (4) 高通滤波器。

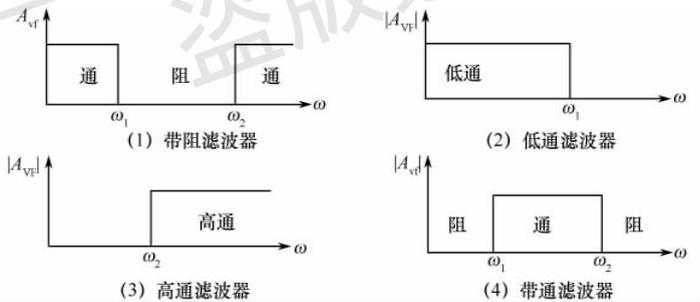
**【习题 4.14】** 设运放为理想器件。在下列几种情况下, 它们应分别属于哪种类型的滤波电路? 定性画出其幅频特性。

- (1) 理想情况下, 当频率为零和无穷大时的电压增益相等且不为零;
- (2) 直流电压增益就是它的通带电压增益;
- (3) 在理想情况下, 频率为无穷大时的电压增益就是它的通带电压增益;
- (4) 在频率为零和无穷大时, 电压增益都等于零。

**【知识点】** 滤波器的分类。

**【解题过程】** (1) 带阻滤波器, (2) 低通滤波器, (3) 高通滤波器, (4) 带通滤波器。

幅频特性如图解 4.14 所示。



图解 4.14

**【习题 4.15】** 图题 4.15 所示为一阶低通滤波电路, 设 A 是理想运放, 试推导出电路的传递函数, 并求出其 -3dB 截止角频率  $\omega_H$ 。

**【知识点】** RC 滤波电路的输出电压表达式是:  $v_{o1} = \frac{1}{sC} v_i$ ,  $s = j\omega$ 。

**【解题过程】** 输出电压与输入电压之间的关系:

$$v_o(s) = v_{o1}(s) = \frac{1}{sC} v_i(s)$$