

第 14 章

半导体器件

本章重点是导体二极管的单向导电特性、伏安特性以及重要参数；硅稳压二极管的伏安特性、稳压原理及主要参数；晶体管的放大作用、输入特性曲线和输出特性曲线、主要参数以及温度对参数的影响。

14.1 重点内容提要

一、半导体的导电特性

1. 半导体

半导体是指导电能力介于导体和绝缘体之间的一类物质。

2. 本征半导体

本征半导体就是完全纯净的具有晶体结构的半导体。

载流子：电子带负电，空穴带正电，在外电场作用下自由电子移动，相邻的价电子填补空穴而形成空穴移动，它们都能导电。

本征激发产生的自由电子和空穴成对出现，数量取决于环境温度高低。

3. P 型半导体和 N 型半导体

(1) P 型半导体：在纯净半导体中掺入适量三价元素，形成空穴型(P 型) 半导体。它的导电能力大大高于本征半导体。其中空穴为多数载流子(简称“多子”)，自由电子为少数载流子(简称“少子”)。

(2) N 型半导体：在纯净半导体中掺入适量五价元素，形成自由电子型(N 型) 半导体。其中自由电子为“多子”，空穴为“少子”。

在两种杂质半导体中，整体上电量平衡，对外不显电性(不带静电)。


二、PN 结及其单向导电性

PN 结 又称耗尽层、阻挡层，将两种杂质半导体结合在一起，由于界面两侧载流子浓度不同而产生载流子扩散运动。P 型区空穴向 N 型区扩散，N 型区自由电子向 P 区扩散。在边界两侧两种载流子产生复合，形成带正电和负电的离子。在边界两侧形成空间电荷区，称为 PN 结。

- (1) 区内正、负离子带电而不能移动,载流子因复合而数量很少,因此电阻率很高。
- (2) 正、负离子形成的内电场阻止多子继续扩散。
- (3) 内电场对少子有吸引作用,形成少子的逆向运动,称为漂移。
- (4) 在没有外电场作用时,当扩散运动和漂移运动达到动态平衡时,两侧间没有电流,空间电荷区厚度一定。
- (5) PN 结正向导通,反向截止,即为单向导电性。

三、二极管

1. 基本结构、符号、伏安特性及主要参数

(1) 结构:将 PN 结两边各引出一个电极便构成一个二极管。其中 P 型区引出阳极 A(+),N 型区引出阴极 K(-)。符号: A  K

(2) 伏安特性及参数:伏安特性如图 14.1 所示。

正向 $I_a = f(U_a)$: U_s 为死区电压(硅管为 0.5V, 锗管为 0.2V)。 U_a 为管压降,随 I_a 而变化很小,可近似取 $U_a = 0.7V$ (硅管), 0.3V (锗管)。

反向 $I_R = f(U_R)$: I_R 基本不变,称反向饱和电流。 U_{BR} 为反向击穿电压,若外加电压超过 U_{BR} ,则 I_R 增大,失去单向导电性,损坏。

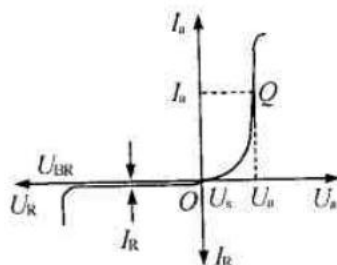


图 14.1

2. 半导体二极管的应用

- (1) 整流与检波电路。
- (2) 限幅电路:有单向限幅和双向限幅两种。
- (3) 钳位电路。
- (4) 续流电路。

四、稳压二极管

稳压管是一种特殊的面接触型硅二极管,其伏安特性及符号如图 14.2 所示。反向工作在击穿状态,管压降 U_Z 几乎不随电流 I_Z 变化,故能起稳压作用。

1. 主要参数

稳定电压 U_Z 、稳定电流 I_Z 、最大稳定电流 I_{ZM} 或最大允许功耗

$P_Z (= U_Z I_{ZM})$ 、动态电阻 $r_z (= \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z})$ 和电压温度系数 α_{U_I} 等。

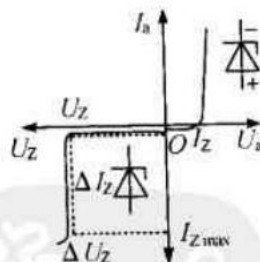


图 14.2

2. 稳压管的应用

- (1) 等效电路如图 14.3 所示。
- (2) 实现简单稳压电路如图 14.4(a) 所示。
- (3) 削波电路如图 14.4(b) 所示。

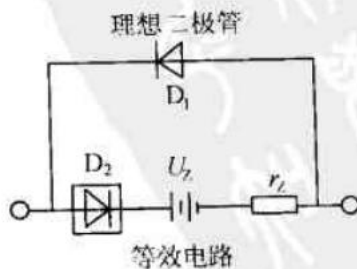


图 14.3

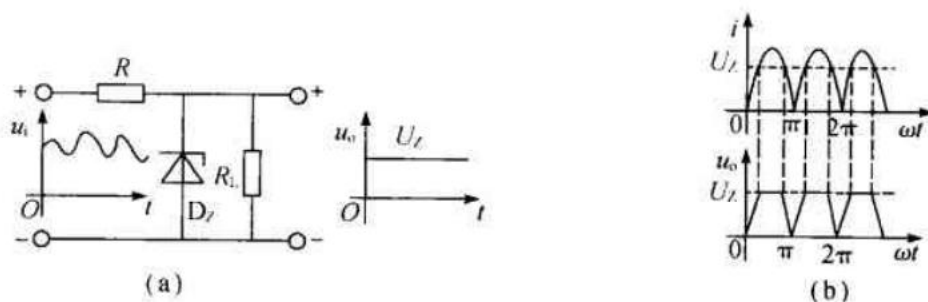


图 14.4

五、晶体管

晶体管又称半导体三极管。

1. 结构与基本放大原理

(1) 晶体管有三个电极和两个 PN 结,三个电极分别是发射极(E 或 e)、基极(B 或 b) 和集电极(C 或 c),两个 PN 结是发射结(Je) 和集电结(Jc)。

发射区掺杂浓度高,基区薄,集电区掺杂浓度低,集电结的面积比发射结大。

(2) 类型。

1) NPN 型和 PNP 型。

2) 硅(Si) 管或锗(Ge) 管。

(3) 基本放大电路。

根据实现电流放大作用的要求,供电电源接法应保证:发射结为正向偏置,集电结为反向偏置。两种结构形式的共射极接法电路如图 14.5 所示。

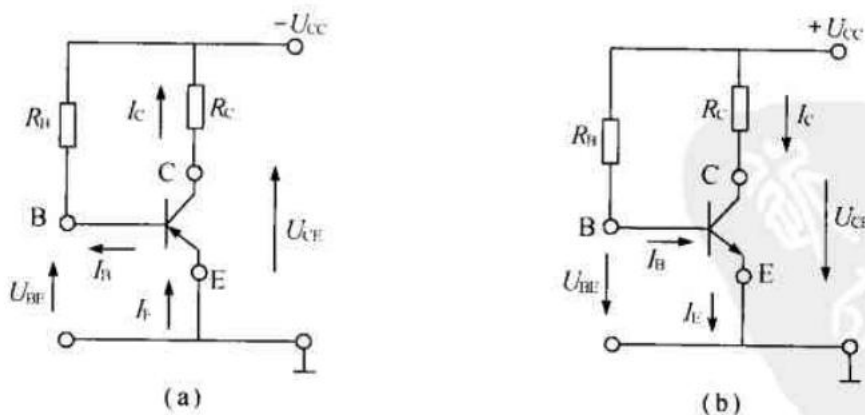


图 14.5

(4) 三极管的构造特点。

- 1) 发射区面积小,掺杂浓度高,多数载流子数量多。
- 2) 基区极薄,掺杂浓度很低,多子数量很少。
- 3) 集电区面积大,掺杂浓度次于发射区而高于基区。

2. 特性曲线

三极管的输出特性 $I_C = f(U_{CE}) \Big|_{I_B = \text{常数}}$ 是一个曲线簇,

如图 14.6 所示。

(1) 由 $U_{CE} \geq 1\text{V}$ 到集电结击穿之前具有恒流特性, 且 $I_C = \beta I_B$, β 近似为常数, 称为线性放大区。此时发射结为正偏, 集电结为反偏。

(2) 当 $I_B \leq 0$ 时, $I_C \leq I_{CEO}$, 称为截止区。此时两个 PN 结均为反偏。

(3) 当 $U_{CB} \leq 0$ (或 $U_{CE} \leq U_{BE}$) 时, $I_C \propto U_{CE}$, I_C 与 I_B 无线性关系, 称为饱和区。此时两个 PN 结均为正偏。

(4) 三极管用于放大电路时工作在线性放大区, 用于数字(或开关)电路时, 则工作在饱和区(导通)和截止区(断开)。

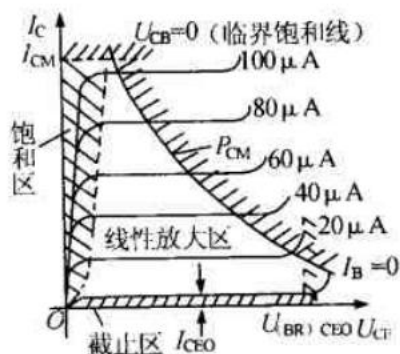


图 14.6

3. 主要参数

(1) 电流放大系数(β 和 β)。

直流(静态)电流放大系数 $\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B}$;

交流(动态)电流放大系数 $\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$ 。

(2) 反向饱和电流 I_{CBO} 和穿透电流 I_{CEO} : 二者间的关系为 $I_{CEO} = (1 + \beta) I_{CBO}$ 。随温度升高而增大, 影响电路工作稳定性。

(3) 集电极最大允许电流 I_{CM} : 集电极电流超过此值则 β 下降 $\frac{1}{3}$ 。

(4) 反向击穿电压 $U_{(BR)CEO}$, $U_{(BR)CBO}$, $U_{(BR)EBO}$: 一般选择三极管的依据: $U_{CC} \leq \frac{1}{2} U_{(BR)CEO}$, $U_{(BR)EBO} \leq 4\text{V}$, U_{CC} 为电源电压。

(5) 集电极最大允许耗散功率 P_{CM} : $P_{CM} = I_C U_{CE}$, 它和 I_{CM} , $U_{(BR)CEO}$ 三者决定了三极管的安全工作区。

六、光电器件

光工业控制中, 光电器件的应用较多。了解发光二极管及光电晶体管的特性。

考点: 半导体导电的本质, PN 结及其单向导电性, 二极管的应用, 稳压管的应用, 三极管管脚的判别, 三个工作区及其判定。

14.2 练习与思考题解答

14.1.1 电子导电和空穴导电有什么区别? 空穴电流是不是自由电子递补空穴所形成的?

【解题过程】 电子导电是自由电子在外电场作用下定向运动,携带负电荷导电,运动方向与电流方向相反;空穴导电则是由被原子核束缚的价电子在共价键之间递补空穴,在外电场作用下形成空穴的定向运动,携带正电荷导电,运动方向与电流方向相同。

空穴导电是半导体所特有的,不是自由电子递补空穴所形成的,而是价电子递补空穴形成的,空穴参与导电,其数量不减。

14.1.2 杂质半导体中的多数载流子和少数载流子是怎样产生的?为什么杂质半导体中少数载流子的浓度比本征载流子的浓度小?

【解题过程】 当在纯净半导体中掺杂时,杂质原子的价电子中多余电子被挤入能级更高的外层,使之易于挣脱原子核引力的束缚,从而成为自由电子;或者因为杂质原子少了一个价电子,而在共价键上形成“空位”,“空位”很容易被相邻原子中的价电子填充,于是在相邻原子上形成空穴。

掺杂浓度增加,这种自由电子或空穴的数量便远远多于本征激发所产生的自由电子或空穴数量,形成多数载流子。

自由电子或空穴和本征激发的空穴或自由电子复合,使本征激发的空穴或自由电子数量更少,形成少数载流子。

由于复合作用,杂质半导体中少子浓度要比本征载流子浓度小得多。

14.1.3 N型半导体中的自由电子多于空穴,而P型半导体中的空穴多于自由电子,是否N型半导体带负电,而P型半导体带正电?

【解题过程】 N型半导体中五价杂质原子的一个价电子被挤入更外层而挣脱原子核束缚成为自由电子时,该杂质原子便失去一个电子而成为带正电的离子。

P型半导体三价的杂质原子共价键上空位被填补,在相邻半导体原子上形成一个带正电的空穴,但该杂质原子则多一个价电子,从而成为带负电的离子。

不论N型、P型半导体,多数载流子浓度远远高于少数载流子,但电荷量平衡,整体不带电。

14.3.1 二极管的伏安特性上有一个死区电压。什么是死区电压?硅管和锗管的死区电压的典型值约为多少?

【解题过程】 当正向超过某值 U_s 时,正向电流才迅速增大,这个 U_s 值就称为死区电压。出现死区电压的原因是由于PN结形成后,空间电荷区的内电场阻止多数载流子扩散,当外加正向电压很低时,不能克服内电场的阻碍作用,这样使得正向扩散电流很小,通过二极管的电流较小(近似为0),硅管和锗管的死区电压分别均为0.5V和0.1V。

14.3.2 为什么二极管的反向饱和电流与外加反向电压基本无关,而当环境温度升高时,又明显增大?

【解题过程】 反向电流达到饱和,不随外加电压(反向电压)变化。这是因为反向饱和电

流是由少数载流子漂移运动形成,少子的数量很小,稍加反向电压便全部漂移过去。

当温度升高时,本征激发增加,少子增多,反向饱和电流也增大。

14.3.3 用万用电表测量二极管的正向电阻时,用 $R \times 100\Omega$ 挡测出的电阻值小,而用 $R \times 1k\Omega$ 挡测出的电阻值大,这是为什么?

【解题过程】如图 14.7 所示,由于当 $U > U_{a2}$ 二极管正向特性曲线上升过快,因此可近似为 $U_{a1} \approx U_{a2}$,又因为 $I_{a1} \gg I_{a2}$,所以

$$R_1 = \frac{U_{a1}}{I_{a1}} < \frac{U_{a2}}{I_{a2}} = R_2$$

14.3.4 怎样用万用电表判断二极管的正极和负极以及管子的好坏?

【解题过程】万用表表头正极(红色)是内部电池的负极,而表头的负极(黑色)是电池的正极。若测得二极管为较小正向电阻,则黑笔所触及的是二极管正极,红笔所触及的是二极管负极。若测得的正向电阻较小,而反向电阻很大,则该二极管是好的。若测得正、反向电阻均接近于 0,则二极管已击穿损坏。若正、反向电阻均为 ∞ ,则二极管已断路。

14.3.5 把一个 1.5V 的干电池直接接到(正向接法)二极管的两端,会不会发生什么问题?

【解题过程】二极管的正向压降:硅管 0.6~0.8V(最高不超过 1V),锗管 0.2~0.3V,因此 1.5V 干电池接到二极管两端,将使二极管烧坏。

14.3.6 在某电路中,要求通过二极管的正向平均电流为 80mA,加在上面的最高反向电压为 110V,试从附录 C 选中一合适的二极管。

【解题过程】2CP13 型二极管,正向平均电流 100mA,反向峰值电压 150V。

14.3.7 在图 14.8 所示的两个电路中,已知直流电压 $U_i = 3V$, $R = 1k\Omega$,二极管的正向压降为 0.7V,试求 U_o 。

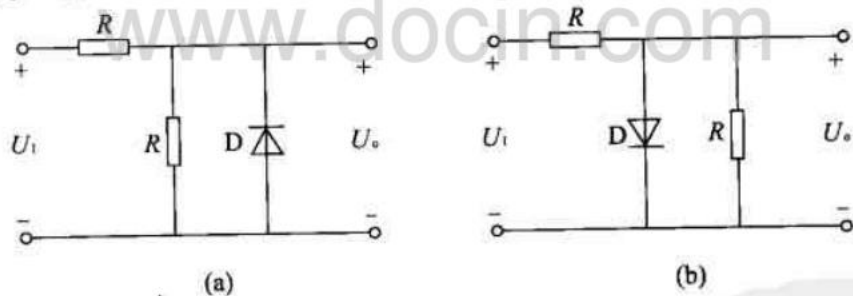


图 14.8

【知识点窍】二极管状态判别。

【逻辑推理】先判别二极管处于什么状态,再计算压降。

【解题过程】(a) 两电阻分压 $U_R = 1.5V$

则 $U_F = -1.5V$ 二极管截止, $U_o = U_R = 1.5V$

(b) 二极管正向导通, $U_o = 0.7V$

14.3.8 图 14.9(a) 所示是一个二极管削波电路,设二极管的正向压降可忽略不计,当输入正弦电压 $u_i = 10\sin \omega t V$ [波形如图 14.9(b) 所示] 时,试画出输出电压 u_o 的波形。

【知识点窍】二极管状态判别。

【逻辑推理】先判断二极管在各个时间段的状态,再作图。

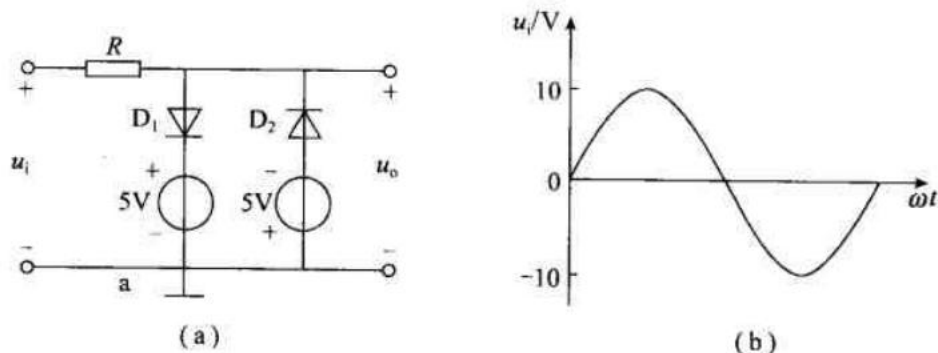
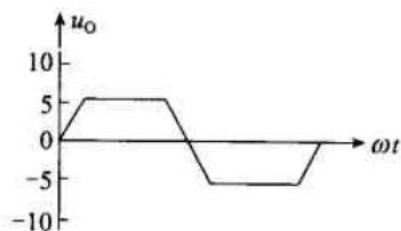


图 14.9

【解题过程】 选择 u_i 负极为零参考点, 由图可知 $V_{D1 \text{ 阴}} = 5\text{V}$ $V_{D2 \text{ 阳}} = -5\text{V}$
 当 $V_{D1 \text{ 阳}} > 5\text{V}$ 时 D_1 导通, $u_o = 5\text{V}$
 当 $V_{D2 \text{ 阴}} < -5\text{V}$ 时 D_2 导通, $u_o = -5\text{V}$
 u_o 波形图解 14.9 所示。



图解 14.9

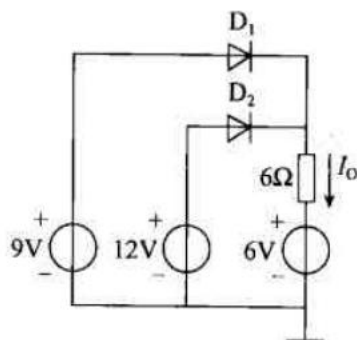


图 14.10

14.3.9 电路如图 14.10 所示, 试求电流 I_o 。设二极管的正向压降可忽略不计。

【知识点窍】 先判断两个二极管的状态谁先导通, 由相应回路计算电流。

【解题过程】 $V_{D1 \text{ 阳}} = 9\text{V}$ $V_{D2 \text{ 阳}} = 12\text{V}$

$V_{D1 \text{ 阴}} = V_{D2 \text{ 阴}} = 6\text{V}$ $\therefore V_{D1} = 3\text{V}$ $V_{D2} = 6\text{V}$

从而 D_2 优先导通, 由 D_2 构成闭合回路。

$$\therefore I_o = \frac{12 - 6}{6} = 1\text{A}$$

14.3.10 在图 14.11 所示电路中, 哪只二极管导通? 哪个继电器动作? 设两个继电器的线圈电阻为 $10\text{k}\Omega$, 当流过的电流大于 2mA 时才能动作, 并设二极管的正向压降可忽略不计。

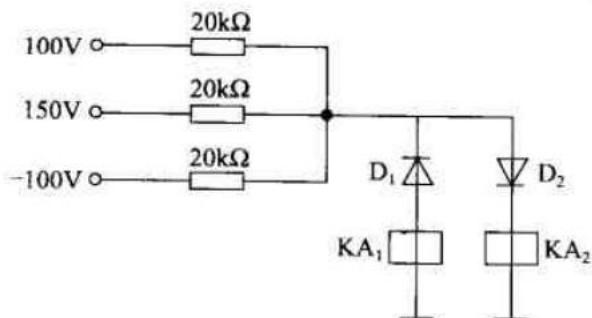
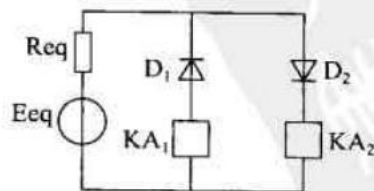


图 14.11



图解 14.11

【知识点窍】 二极管状态判别。

【解题过程】 化简三个电源支路

$$R_{eq} = 1 / \left(\frac{1}{20} + \frac{1}{20} + \frac{1}{20} \right) = \frac{20}{3} \text{ k}\Omega$$

$$E_{eq} = R_{eq} \left(\frac{100}{20} + \frac{150}{20} - \frac{100}{20} \right) = 50 \text{ V}$$

从而等效电路图如图解 14.11 所示。

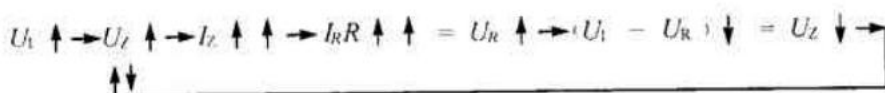
由图可知 D_1 截止, D_2 导通, 所以 KA_1 不动作。

$$I_{D2} = 50 / \left(\frac{20}{3} + 10 \right) = 3 \text{ mA} > 2 \text{ mA}$$

满足 KA_2 动作条件。

14.4.1 为什么稳压二极管的动态电阻愈小, 则稳压效果愈好?

【解题过程】 稳压管的稳压原理是其电压有偏差后, 对电压偏差进行调整的过程。图 14.12 所示的是最基本的稳压管稳压电路。它的稳压过程是



由此可见, 稳压是利用一个较小的 ΔU_Z 会产生一个较大的 ΔI_Z 而调整的过程。而且, 在 ΔU_Z 相同时, 产生的 ΔI_Z 越大, 调整效果也就越好, 即稳压效果也越好。根据稳压管动态电阻的定义: $r_z = \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z}$ 可以看到, r_z 小, 就是在 ΔU_Z 一定时, 有

较大的 ΔI_Z , 当然稳压效果好。

14.4.2 利用稳压二极管或普通二极管的正向压降, 是否也可以稳压?

【解题过程】 由于稳压二极管、普通二极管正向特性曲线比较陡, 所以也可以作稳压管用, 但是因为它们管压降很低: 硅管 $0.6 \sim 0.7 \text{ V}$, 锗管 $0.2 \sim 0.3 \text{ V}$, 所以只用在稳压值很低的情况。

14.4.3 图 14.13(a) 所示是一稳压二极管削波电路, 设稳压二极管 D_{Z1} 和 D_{Z2} 的稳定电压均为 5 V , 两管的正向压降均可忽略不计。当输入正弦电压 $u_i = 10 \sin \omega t \text{ V}$ [波形如图 14.13(b) 所示] 时, 试画出输出电压 u_o 的波形。

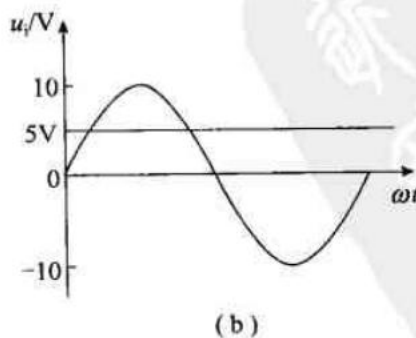
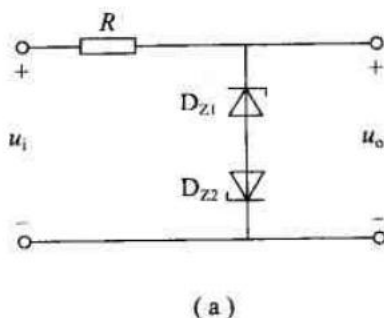
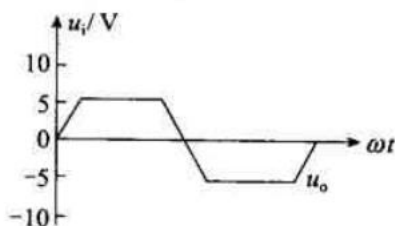


图 14.13

【知识点窍】 稳压二极管基本工作性质、稳定工作的条件及其性能。

【解题过程】 输出电压 u_o 的波形如图解 14.13。



图解 14.13

14.5.1 晶体管的发射极和集电极是否可以调换使用,为什么?

【解题过程】 (1) 发射区掺杂浓度高而面积小,而集电区则掺杂浓度低而面积大。若调换使用将不能有效地放大电流($\beta < 1$)。

(2) 由于三极管 $U_{(BR)EBO} \leq 4V$,若调换使用,当电源电压高于 4.7V 时,三极管便因击穿而损坏。

综上所述,不可以调换使用。

14.5.2 晶体管在输出特性的饱和区工作时,其电流放大系数和在放大区工作时是否一样大?

【解题过程】 已知晶体管饱和的条件是 $I_B \geq \frac{I_{CS}}{\beta}$,其中 I_{CS} 为饱和集电极电流, β 为线性电流放大系数,设饱和时电流放大系数为 β' ,则 $I_B = \frac{I_{CS}}{\beta'} \geq \frac{I_{CS}}{\beta}$,很显然有 $\beta' \leq \beta$,即饱和区工作时的电流放大系数小于线性放大区的电流放大系数。

14.5.3 晶体管具有电流放大作用,其外部条件和内部条件各为什么?

【解题过程】 内部结构条件——发射区高掺杂,其中多数载流子浓度很高,基区很薄,且低掺杂,则基区中多子的浓度很低。

外部条件——外加电源极性应使发射结正向偏置,集电结反向偏置,即 $U_C > U_B > U_E$ 。

14.5.4 为什么晶体管基区掺杂浓度小而且做得很薄?

【解题过程】 之所以把基区掺杂浓度很小,而且做得很薄,其目的是为减少载流子复合,增大电流放大系数 β 。

14.5.5 将一 PNP 型晶体接成共发射极电路,要使其具有电流放大作用。 E_C 和 E_B 的正、负极应如何连接,为什么?画出电路。

【解题过程】 如图 14.14 所示。由于晶体管是 PNP 型,于是应该使发射结正偏,集电结反偏, E 为正, B 为负; C 为负, B 为正,这是晶体三极管满足放大的条件。

14.5.6 有两个晶体管,一个管子 $\beta = 50$, $I_{CBO} = 0.5\mu A$; 另一个管子 $\beta = 150$, $I_{CBO} = 2\mu A$ 。如果其他参数一样,选用哪个管子较好?为什么?

【解题过程】 温度稳定性与穿透电流大小有直接关系,两只管子的穿透电流分别为

$$I_{CEO1} = (1 + \beta) I_{CBO} = (1 + 50) \times 0.5 = 25.5\mu A$$

$$I_{CEO2} = (1 + \beta) I_{CBO} = (1 + 150) \times 2 = 302\mu A$$

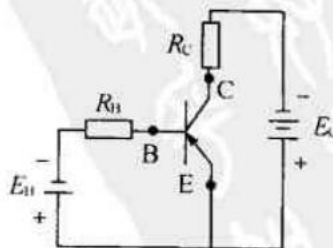


图 14.14

由此可见,选用第一只管子较好,因为穿透电流小,温度稳定性好。

14.5.7 使用晶体管时,只要(1)集电极电流超过 I_{CM} 值。(2)耗散功率超过 P_{CM} 值。(3)集-射极电压超过 $U_{(BR)CE}$ 值,晶体管就必然损坏,上述几种说法是否都是对的?

【解题过程】 因为 $I_C > I_{CM}$ 时,将使 β 下降至 $\frac{1}{3}$ 以下,管子不起作用,而管子未必损坏。当 $I_C \gg I_{CM}$ 会把管脚的内部引线烧断。

于是(1)不对,而(2),(3)是正确的。

14.5.8 测得某一晶体管的 $I_B = 10\mu A$, $I_C = 1mA$,能否确定它的电流放大系数?什么情况下可以,什么情况下不可以?

【解题过程】 (a) 若 $U_{CE} > 1V$,则可认为测量工作点处于线性放大区,其电流放大系数

$$\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B} = \frac{1}{10 \times 10^{-3}} = 100$$

(b) 若 $U_{CE} \leq 1V$,则处于饱和区, $\bar{\beta}$ 与 I_C/I_B 不是线性关系,只是该工作点上的电流放大系数。

14.5.9 晶体管在工作时,基极引线万一断开,为什么有时会导致管子损坏?(通常在测试或安装晶体管时,要后接或先断集电极)

【解题过程】 晶体三极管工作在放大状态时,当基极电流 I_B 发生微小的变化,相应的集电极电流 I_C 将有较大的变化,即 $\Delta I_C = \beta \Delta I_B$ 。此时基极引线万一断开,基极电流的变化率是很大的,致使集电极电流 I_C 突然增大到超过最大允许电流 I_{CM} 时就导致管子损坏。

14.5.10 晶体管放大电路如图 14.15 所示,(1) 如 U_{CC} , U_{BB} , R_C 不变,关小 R_B 时, I_B , I_C , U_{CE} 作何变化?(2) 如 U_{CC} , U_{BB} , R_B 不变,减小 R_C 时, I_B , I_C , U_{CE} 作何变化?

【知识点窍】 晶体管电流分配放大原理以及输入输出特性曲线的考查。

【解题过程】 (1) U_{CC} , U_{BB} , R_C 不变, R_B 减小时:

$$I_B = \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_B} \text{ 增大} \quad I_C = \beta I_B \text{ 增大}$$

$$U_{CE} = U_{CC} - I_C \cdot R_C \text{ 减小}$$

(2) U_{CC} , U_{BB} , R_B 不变, R_C 减小时:

$$I_B = \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_B} \text{ 不变} \quad I_C = I_B \bar{\beta} \text{ 不变}$$

$$U_{CE} = U_{CC} - I_C R_C \text{ 增大。}$$

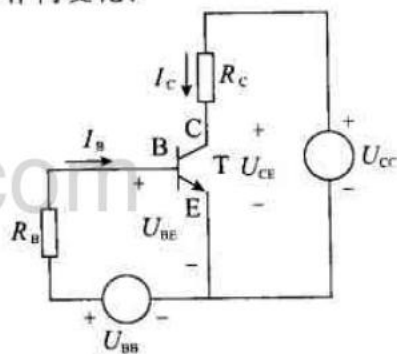


图 14.15

14.5.11 测得工作在放大电路中两个晶体管的两个电极电流如图 14.16 所示:

(1) 求另一个电极电流,并在图中标出实际方向;

(2) 判别它们各是 NPN 型还是 PNP 型,并标出 E, B, C 电极;

(3) 估算它们的 $\bar{\beta}$ 。

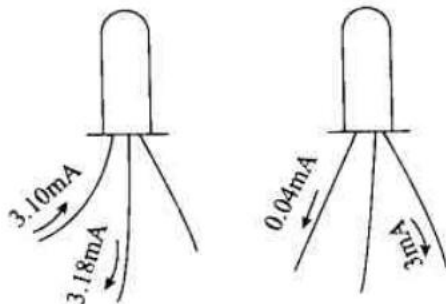
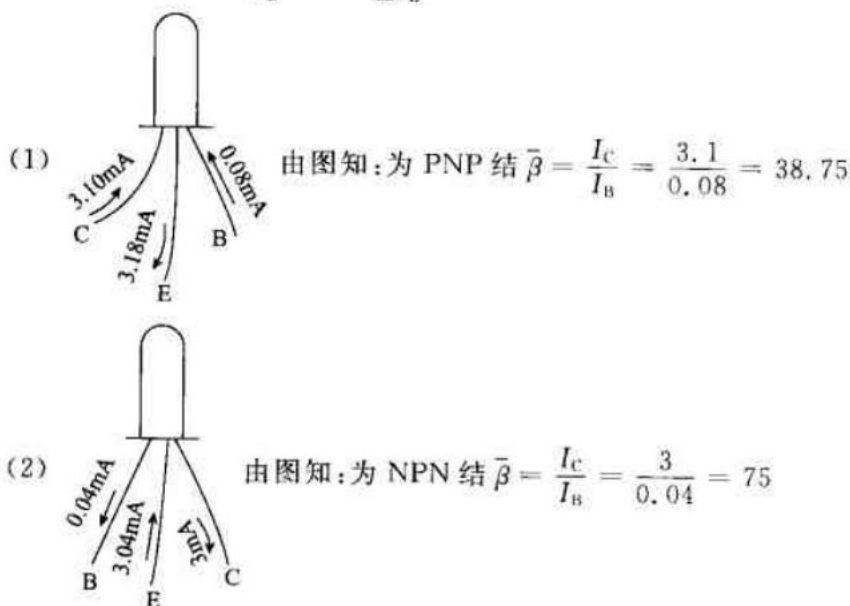


图 14.16

【知识点窍】 晶体管电流分配和放大原理。

NPN 结和 PNP 结基本结构考查。

【解题过程】 $\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B}$ $\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$ $I_E = I_C + I_B$



14.3 课后习题全解

A 选择题

14.1.1 对半导体言,其正确的说法是()。

- (1) P 型半导体中由于多数载流子为空穴,所以它带正电
- (2) N 型半导体中由于多数载流子为自由电子,所以它带负电
- (3) P 型半导体和 N 型半导体本身都不带电

【分析】 不论是 N 型半导体还是 P 型半导体,虽然它们都有一种载流子占多数,但整个晶体是不带电的,其中 N 型的自由电子为多数载流子, P 型的空穴为多数载流子,故选(3)。

14.3.1 在图 14.17 所示的电路中, U_O 为()。

- (1) -12V
- (2) -9V
- (3) -3V

【分析】 根据二极管特性判断其导通截止状态,本题中 $V_{D(R1)} = -12V$, $V_{D(R2)} = -9V$, 因此截止。故选(2)。

14.3.2 在图 14.18 所示的电路中, U_O 为()。其中,忽略二极管的正向压降。

- (1) 4V
- (2) 1V
- (3) 10V

【分析】 二极管优先导通考查。

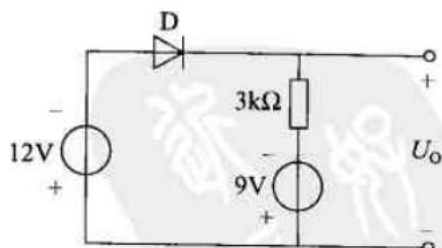


图 14.17

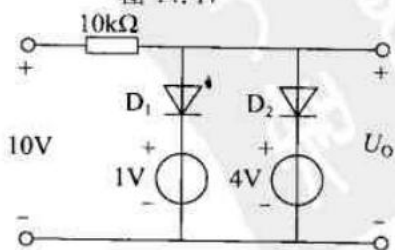


图 14.18

判据:正向电压大的二极管优先导通。 $U_{D1} = 9V > U_{D2} = 6V$ 故 D_1 先导通

$\therefore U_O = 1V$, 故选(2)。

14.3.3 在图 14.19 所示电路中, 二极管 D_1, D_2, D_3 的工作状态为()。

- (1) D_1, D_2 截止, D_3 导通
- (2) D_1 导通, D_2, D_3 截止
- (3) D_1, D_2, D_3 均导通

【分析】 二极管优先导通考查。

$$U_{D1} = 12V > U_{D2} = 8V > U_{D3} = 6V$$

故 D_1 优先导通, D_2, D_3 截止, 故选(2)。

14.3.4 在图 14.20 所示电路中, 二极管 D_1, D_2, D_3 的工作状态为()。

- (1) D_1, D_2 截止, D_3 导通
- (2) D_1 截止, D_2, D_3 导通
- (3) D_1, D_2, D_3 均导通

【分析】 二极管优先导通考查, 先设定一参考零点。

$$U_{D1} = 0V < U_{D2} = 4V < U_{D3} = 6V$$

故 D_3 先导通, D_1, D_2 截止, 故选(1)。

14.4.1 在图 14.21 的电路中, 稳压二极管 D_{Z1} 和 D_{Z2} 的稳定电压分别为 5V 和 7V, 其正向压降可忽略不计, 则 U_O 为()。

- (1) 5V
- (2) 7V
- (3) 0V

【分析】 稳压二极管稳定电压的考查。

稳定电是在规定电流下稳压管反向击穿电压

$$U_D = U_{D1} = 5V, \text{ 故选(1)。}$$

14.4.2 在图 14.22 所示的电路中, 稳压二极管 D_{Z1} 和 D_{Z2} 的稳定电压分别为 5V 和 7V, 其正向压降可忽略不计, 则 U_O 为()。

- (1) 5V
- (2) 7V
- (3) 0V

【分析】 稳压二极管稳定电压的考查。

$$U_{Z1} < U_{Z2}, \text{ 故 } D_{Z1} \text{ 优先导通, } U_D < U_{Z1} = 5V, \text{ 故选(1)。}$$

14.5.1 在放大电路中, 若测得某晶体管三个极的电位分别为 9V、2.5V、3.2V, 则这三个极分别为()。

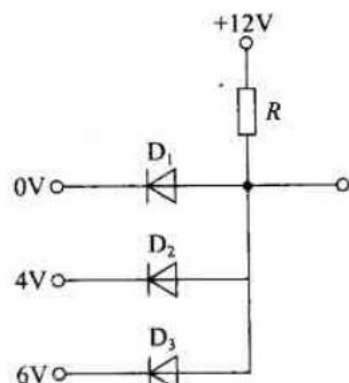


图 14.19

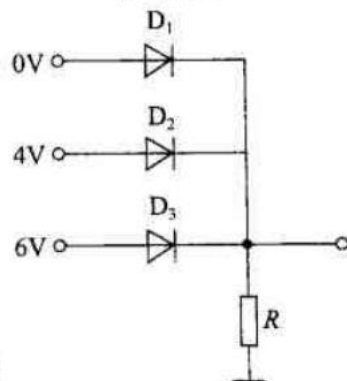


图 14.20

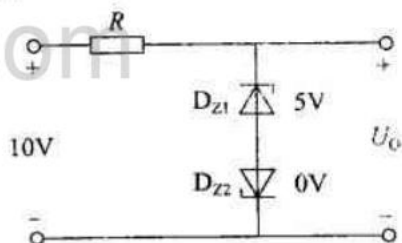


图 14.21

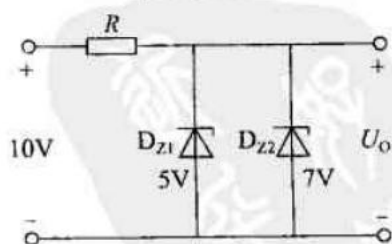


图 14.22

(1) C, B, E

(2) C, E, B

(3) E, C, B

【分析】 双极型晶体管基本特性考查。

要使用晶体管起电流放大作用,发射结必须正向偏置,集电结必须反向偏置。

三个极电位均大于0,故选(2)。

14.5.2 在放大电路中,若测得某晶体管三个极的电位分别为 -9V , -6.2V , -6V ,则 -6.2V 的那个极为()。

(1) 集电极

(2) 基极

(3) 发射极

【分析】 对于PNP型管, U_{CE} 、 U_{BE} 均为负值发射极电位最高 -6V ,电极电位最低 -9V
 $\therefore -6\text{V}$ 为基极,故选(2)。

14.5.3 在放大电路中,若测得某晶体管三个极的电位分别为 6V , 1.2V , 1V ,则该管为()。

(1) NPN型硅管

(2) PNP型锗管

(3) NPN型锗管

【分析】 由电位均为正可知为NPN管, $U_{\text{BE}} = 0.2\text{V}$ 知为锗管,故选(3)。

14.5.4 对某电路中一个NPN型硅管进行测试,测得 $U_{\text{BE}} > 0$, $U_{\text{BC}} > 0$, $U_{\text{CE}} > 0$,则此管工作在()。

(1) 放大区

(2) 饱和区

(3) 截止区

【分析】 晶体管的输出特性考查。晶体管工作在饱和区时 $U_{\text{BC}} > 0$, $U_{\text{BE}} > 0$, $U_{\text{CE}} \approx 0$, 故选(2)。

14.5.5 对某电路中一个NPN型硅管测试,测得 $U_{\text{BE}} > 0$, $U_{\text{BC}} < 0$, $U_{\text{CE}} > 0$,则此管工作在()。

(1) 放大区

(2) 饱和区

(3) 截止区

【分析】 晶体管输出特性考查。晶体管工作在放大区时 $U_{\text{BC}} < 0$, $U_{\text{BE}} > 0$, $U_{\text{CE}} > 0$, 故选(1)。

14.5.6 对某电路中一个NPN型硅管进行测试,测得 $U_{\text{BE}} < 0$, $U_{\text{BC}} < 0$, $U_{\text{CE}} > 0$,则此管工作在()。

(1) 放大区

(2) 饱和区

(3) 截止区

【分析】 晶体管输出特性考查。晶体管工作在截止区时: $U_{\text{BC}} < 0$, $U_{\text{BE}} < 0$, $U_{\text{CE}} > 0$, 故选(3)。

14.5.7 晶体管的控制方式为()。

(1) 输入电流控制输出电压 (2) 输入电流控制输出电流 (3) 输入电压控制输出电压

【分析】 晶体管电流分配和放大原理。由于晶体管具有电流放大作用,故选(2)。

B 基 本 题

14.3.5 图14.23(a)所示是输入电压 u_i 的波形。试画出对应于 u_i 的输出电压 u_o 、电阻 R 上电压 u_R 和二极管 D 上电压 u_D 的波形,并用基尔霍夫电压定律检验各电压之间的关系。二极

管的正向压降可忽略不计。

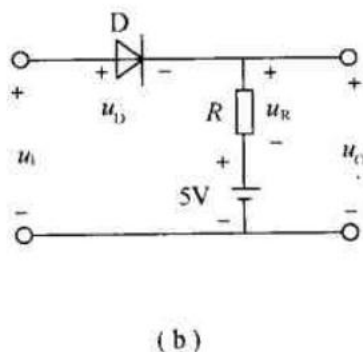
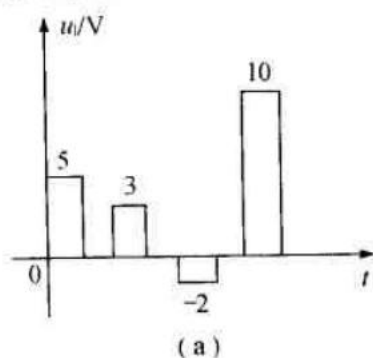


图 14.23

【知识点窍】 二极管的性质,基尔霍夫电压定律。

【逻辑推理】 u_i 不同,二极管上的压降不同,二极管的状态也不同。

【解题过程】 u_i , u_R 及 u_D 的波形如图 14.24 所示。

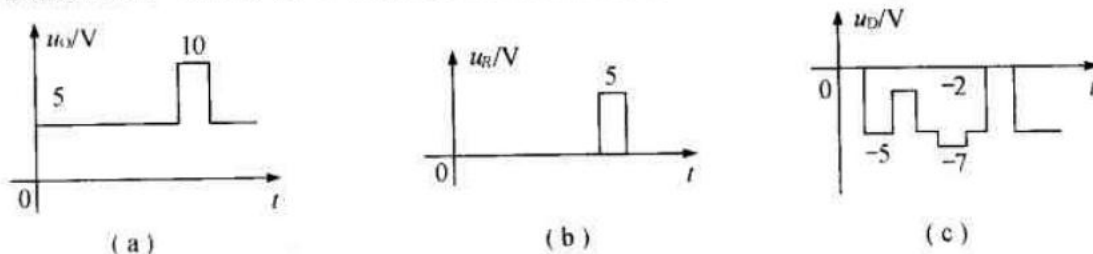


图 14.24

输入电压

$$u_i = u_D + u_o = u_D + u_R + 5V$$

输出电压

$$u_o = u_R + 5V$$

当 $u_i > 5V$ 时,二极管 D 导通, $u_o = u_i$; 当 $u_i \leq 5V$ 时,二极管 D 截止, $u_o = 5V$ 。

14.3.6 在图 14.25 所示的各电路图中, $U = 5V$, $u_i = 10\sin\omega t V$, 二极管的正向压降可忽略不计,试分别画出输出电压 u_o 的波形。这四种均为二极管削波电路。

【知识点窍】 二极管的性质,基尔霍夫电压定律。

【逻辑推理】 u_i 不同,二极管上的压降不同,二极管的状态也不同。

【解题过程】 (a) 由 14.25(a) 中, $u_o = u_i - u_R = u_D + U$

二极管导通时: $u_i > U$, $u_o = U$

二极管截止: $u_i \leq U$, $u_o = u_i$

波形图如图 14.26(a) 所示。

(b) 如图 14.25(b) 中, $u_o = u_i + u_D = u_R + U$

二极管导通过: $u_i < U$, $u_o = U$

二极管截止时: $u_i \geq U$, $u_o = u_i$

波形图如图 14.26(a) 所示。

(c) 如图 14.25(c) 中, $u_o = u_i - u_R = U - u_D$

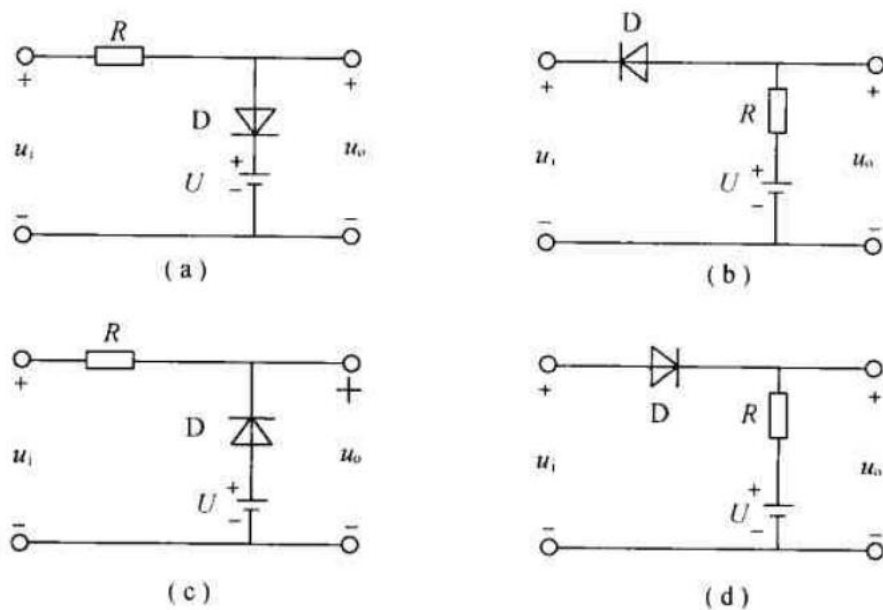


图 14.25

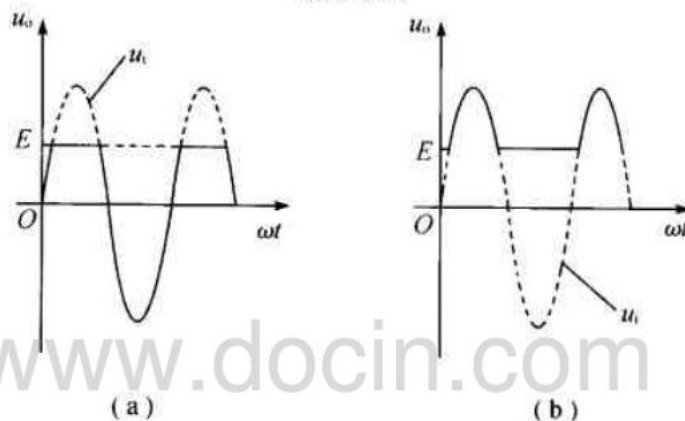


图 14.26

二极管导通时: $u_i < U, u_o = U$

二极管截止时: $u_i \geq U, u_o = u_i$

波形如图 14.26(b) 所示。

(d) 如图 14.25(d) 中, $u_D = u_i - u_o = U + u_R$

二极管导通时: $u_i > U, u_o = u_i$

二极管截止时: $u_i \leq U, u_o = U$

波形如图 14.26(b) 所示。

14.3.7 在图 14.27 所示的两个电路中, 已知 $u_i = 30\sin\omega t$ V, 二极管的正向压降可忽略不计, 试分别画出输出电压 u_o 的波形。

【知识点窍】 二极管的性质。

【逻辑推理】 随着 u_i 的变化, 二极管上的压降也不同, 二极管的状态也发生变化。

【解题过程】 从图 14.27(a)、(b) 中有, u_i 为正半周时, 二极管导通; u_i 为负半周时, 二极管截止。

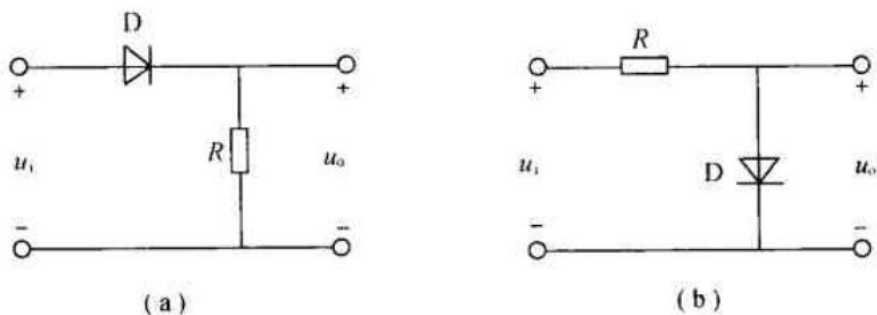


图 14.27

对图 14.27(a), $u_o = u_R$, u_i 正半周时, $u_R = u_i$; u_i 负半周时, $u_R = 0$

对图 14.27(b), $u_o = u_D$, u_i 正半周时, $u_D \approx 0$; u_i 负半周时, $u_D = u_i$

波形如图 14.28 所示。

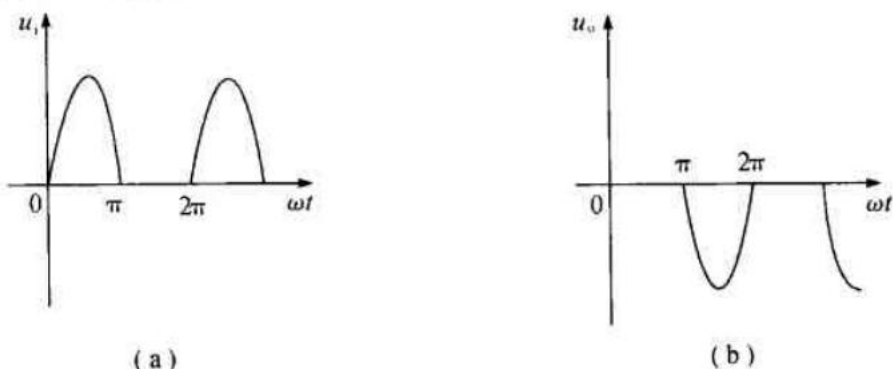


图 14.28

14.3.8 在图 14.29 所示电路中,试求:下列几种情况下输出端 Y 的电位 V_Y 及各元件(R, D_A, D_B) 中通过的电流:

(1) $V_A = V_B = 0$ 。

(2) $V_A = +3V, V_B = 0$ 。

(3) $V_A = V_B = +3V$ 。二极管的正向压降可忽略不计。

【知识点窍】 二极管的性质,欧姆定律。

【逻辑推理】 此题中虽然出现了两个二极管,但分析的思路一样,它们上面的压降决定了它们的状态。当都为区间压降时,让压降大的那个二极管先导通,判断另一个二极管的状态。

【解题过程】 (1) $V_A = V_B = 0$ 时,即 D_A, D_B 均导通,由欧姆定律

$$I_R = \frac{E}{R} = \frac{12}{3.9} \approx 3.08\text{mA}$$

I_A, I_B 是两个二极管中电流,于是

$$I_A = I_B = \frac{1}{2} I_R \approx 1.54\text{mA}, V_Y = 0$$

(2) $V_A = 3V, V_B = 0$ 时, V_B 较低, D_B 先导通,使 $V_Y = 0, D_A$ 截止, $I_A = 0$,

于是 $I_R = I_B = \frac{12}{3.9} \approx 3.08\text{mA}, I_A \approx 0$

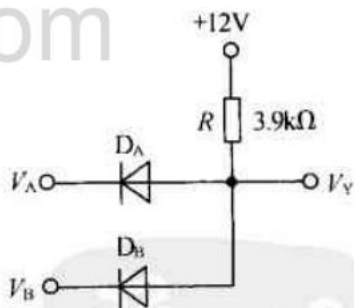


图 14.29

(3) $V_A = V_B = +3V$, 两个二极管同时导通, 使 $V_Y = +3V$,

$$I_R = \frac{12-3}{3.9} = 2.30\text{mA}$$

$$I_A = I_B = \frac{1}{2} I_R = \frac{1}{2} \frac{12-3}{3.9} \approx 1.15\text{mA}$$

14.3.9 在图 14.30 所示电路中, 试求下列几种情况下输出端电位 V_Y 及各元件中通过的电流:

(1) $V_A = +10V, V_B = 0$ 。

(2) $V_A = +6V, V_B = +5.8V$ 。

(3) $V_A = V_B = +5V$ 。设二极管正向电阻为 0, 反向电阻为无穷大。

【知识点窍】 二极管的性质, 欧姆定律, 分压公式。

【解题过程】 (1) $V_A = +10V, V_B = 0$ 时, D_A 导通, V_A 导通

$$V_Y = \frac{9}{1+9} \times 10 = 9V$$

D_B 截止, 于是由欧姆定律

$$I_A = \frac{V_A}{1+9} = \frac{10}{10} = 1\text{mA}$$

$$I_R = I_A = 1\text{mA}, I_B = 0$$

(2) $V_A = 6V, V_B = 5.8V$ 时, D_A 先导通, 使 $V_Y = \frac{9}{1+9} \times 6 = 5.4V, D_B =$ 端电压

$$V_{B_Y} = V_B - V_Y = 5.8 - 5.4 = 0.4V$$

设二极管正向电阻为 0, 于是 D_B 导通, 由支路电流法

$$\begin{cases} 1 \cdot I_A + 9(I_A + I_B) = V_A \\ 1 \cdot I_B + 9(I_A + I_B) = V_B \end{cases}$$

所以

$$(I_A + I_B)(1+9+9) = V_A + V_B$$

由 KCL 定律

$$I_R = I_A + I_B$$

所以

$$I_R = \frac{V_A + V_B}{19} = \frac{6+5.8}{19} \approx 0.62\text{mA}$$

所以, 由欧姆定律

$$V_Y = I_R \cdot R = 0.62 \times 9 = 5.59V$$

于是

$$I_A = \frac{6-5.59}{1} = 0.41\text{mA}$$

$$I_B = \frac{5.8-5.59}{1} =$$

0.21mA

(3) $V_A = V_B = 5V$, 两个二极管同时导通。

由支路电流法

$$\begin{cases} 10I_A + 9I_B = 5 \\ 10I_B + 9I_A = 5 \end{cases}$$

所以

$$19(I_A + I_B) = 10$$

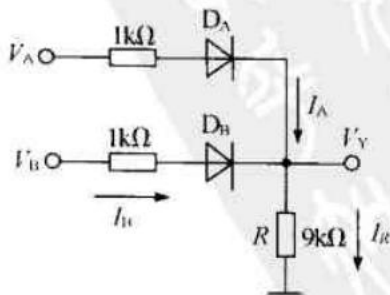


图 14.30

由 KCL 定律

$$I_A + I_B = I_R$$

所以

$$I_R = \frac{10}{19} \approx 0.526 \text{ mA}$$

则由欧姆定律

$$V_Y = I_R R = 0.526 \times 9 \approx 4.74 \text{ V}$$

于是

$$I_A = I_B = \frac{1}{2} I_R \approx 0.263 \text{ mA}$$

14.3.10 在图 14.31 所示电路中, $U = 10 \text{ V}$, $e = 30 \sin \omega t \text{ V}$ 。试用波形图表示二极管上电压 u_D 。

【知识点窍】 二极管的性质, 基尔霍夫电压定律。

【逻辑推理】 先由 KVL 定律得到二极管上压降与 E, e 之间的关系, 再判断二极管的状态。

【解题过程】 由 KVL 定律, $u_D = U + e - u_R$

$U + e > 0$ 时, 二极管导通, $u_D \approx 0$

$U + e \leq 0$ 时, 二极管截止, 则电路中无电流, 二极管 D 二端电压即为电源电动势, $u_D = U + e = 10 + 30 \sin \omega t \text{ V}$

因为 $U + e \leq 0$, 即 $10 + 30 \sin \omega t \leq 0$, 则 $\sin \omega t \leq -\frac{1}{3}$

所以, 解得: $\pi + \arcsin \frac{1}{3} \leq \omega t \leq 2\pi - \arcsin \frac{1}{3}$

即 $199.5^\circ \leq \omega t \leq 340.5^\circ$

波形图如图 14.32 所示。

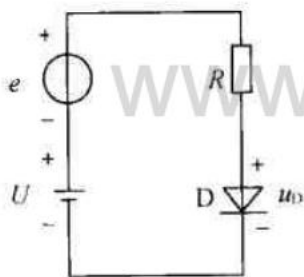


图 14.31

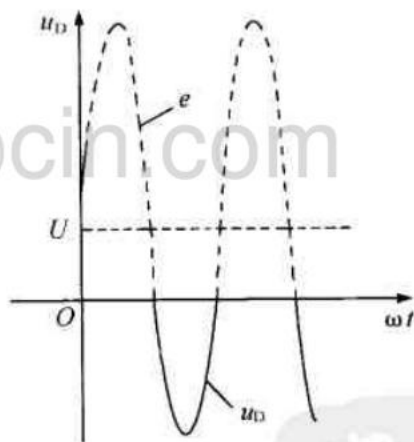


图 14.32

14.4.3 在图 14.33 所示电路中, $U = 20 \text{ V}$, $R_1 = 900 \Omega$, $R_2 = 1100 \Omega$ 。稳压二极管 D_Z 的稳定电压 $U_Z = 10 \text{ V}$, 最大稳定电流 $I_{ZM} = 8 \text{ mA}$ 。试求稳压二极管中通过的电流 I_Z , 是否超过 I_{ZM} ? 如果超过, 怎么办?

【知识点窍】 稳压管的性质, 全电路欧姆定律。

【逻辑推理】 R_1 上的电压即为稳压管的电压 10 V , 由欧姆定律可得到 R_1, R_2 上的电流, 再由 KCL 定律, 即得到稳压管中的电流。

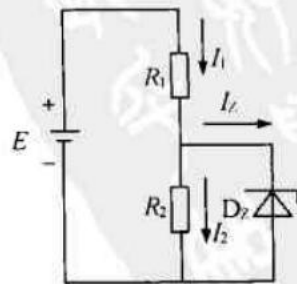


图 14.33

【解题过程】 R_1 中电流: $I_1 = \frac{U - U_Z}{R_1} = \frac{20 - 10}{900} \approx 11.1\text{mA}$

电阻 R_2 中电流为

$$I_2 = \frac{U_Z}{R_2} = \frac{10}{1100} \approx 9.09\text{mA}$$

稳压管中电流, 由 KCL 定律

$$I_Z = I_1 - I_2 \approx 2.01\text{mA} < I_{ZM} = 8\text{mA}$$

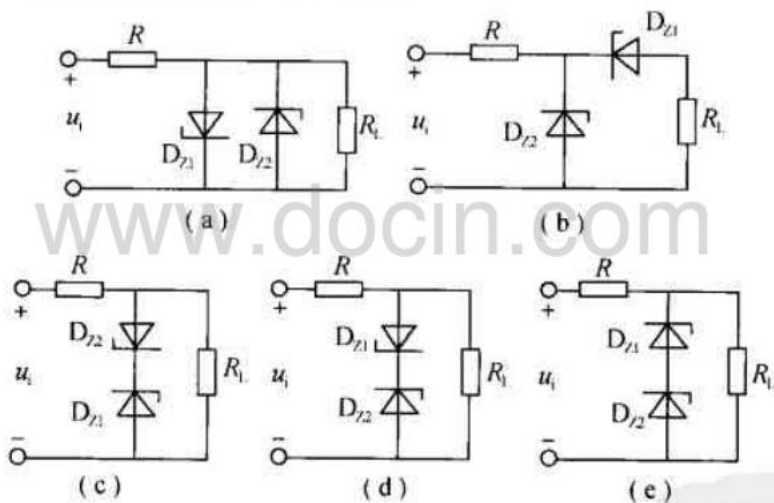
如果 I_Z 超 I_{ZM} , 应加大电阻 R_1 ; 也可减小电阻 R_2 。

14.4.4 有两个稳压二极管 D_{Z1} 和 D_{Z2} , 其稳定电压分别为 5.5V 和 8.5V 。如果要得到 0.5V , 3V , 6V , 9V 和 14V 几种稳定电压, 问这两个稳压二极管(还有限流电阻)应该如何连接? 画出各个电路。

【知识点窍】 稳压管的性质。

【逻辑推理】 二极管区间连接即可得到正向压降 0.5V ; D_{Z1} 与 R_L 串联后与 D_{Z2} 的稳压与 D_{Z1} 的稳压之差为 3V ; D_{Z2} 正向连接与 D_{Z1} 反向连接串联, 则稳压为正向压降 0.5V 与 D_{Z1} 的稳压 5.5V 之和为 6V ; 同理 D_{Z2} 正向连接串联得到稳压 9V ; 二者都反向连接再串联, 得到稳压为二者稳压之和为 14V 。

【解题过程】 各电路图如图解 14.33 所示。



图解 14.33

(a) 0.5V (b) 3V (c) 6V (d) 9V (e) 14V

14.5.8 某一晶体管的 $P_{CM} = 100\text{mW}$, $I_{CM} = 20\text{mA}$, $U_{(BR)CEO} = 15\text{V}$, 试问在下列几种情况下, 哪种是正常工作?

- (1) $U_{CE} = 3\text{V}$, $I_C = 10\text{mA}$
- (2) $U_{CE} = 2\text{V}$, $I_C = 40\text{mA}$
- (3) $U_{CE} = 6\text{V}$, $I_C = 20\text{mA}$

【解题过程】 第(1)种情况工作正常: $I_C < I_{CM}$, $U_{CE} < U_{(BR)CEO}$

$$P_C = I_C U_{CE} = 10 \times 3 = 30\text{mW} < P_{CM}.$$

第(2)种情况 $I_C > I_{CM}$, β 大大下降。

第(3)种情况 $P_C = I_C U_{CE} = 20 \times 6 = 120\text{mW} > P_{CM}$, 将烧坏 PN 结。

14.5.9 在图 14.34 所示的各个电路中, 试问晶体管工作于何种状态?

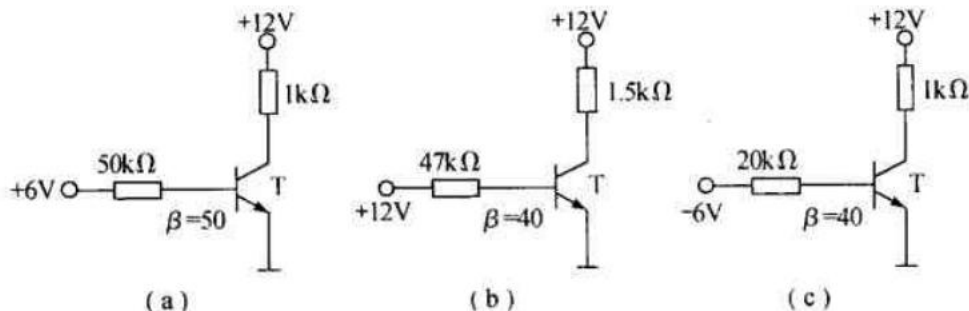


图 14.34

【知识点窍】对晶体管三种工作状态(截止、饱和、放大)的理解。

【逻辑推理】由电路参数得到 $I_{C(sat)}$, 由此得 $I'_B = \frac{I_{C(sat)}}{\beta}$ 再比较 I_B 与 I'_B 。

【解题过程】设 $V_{BE} = 0.6\text{V}$, 因为 $I_{C(sat)} \approx \frac{V_{CC}}{R_C}$, $I'_B = \frac{I_{C(sat)}}{\beta}$, $I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{\beta}$,

所以对(a)管 $I_{C(sat)} = \frac{12}{1} = 12\text{mA}$

晶体管刚饱和时, 基极电流

$$I'_B = \frac{12}{50} = 0.24\text{mA}$$

$$I_B = \frac{6 - 0.6}{50} = 0.108\text{mA}$$

$I_B < I'_B$, 所以(a)管工作在放大状态。

对(b)管, 晶体管饱和时集电极电流近似为

$$I_{C(sat)} = \frac{12}{1.5} = 8\text{mA}$$

$$I'_B = \frac{8}{40} = 0.2\text{mA}$$

$$I_B = \frac{12 - 0.6}{40} = 0.285\text{mA}$$

$I_B > I'_B$ 所以(b)管工作在饱和状态。

对(c)管, 因为 T 的基极为负电压, 故(c)管可靠截止。

14.5.10 图 14.35 所示是一自动关灯电路(例如用于走廊或楼道照明)。在晶体管集电极电路接入 JZC 型直流电磁继电器的线圈 KA, 线圈的功率和电压分别为 0.36W 和 6V。晶体管 9013 的电流放大系数 β 为 200。当将按钮 SB 按一下后, 断电器的动合触点

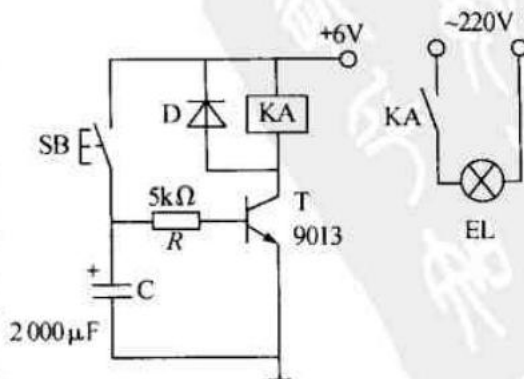


图 14.35

闭合,40W220V的照明灯EL点亮,经过一定时间自动熄灭。(1)试说明其工作原理。(2)刚将按钮按下时,晶体管工作于何种状态?此时 I_c 和 I_b 各为多少? β 是否为200?设饱和时 $U_{CE} \approx 0$ 。(3)刚饱和时 I'_b 为多少?此时电容上电压衰减到约为多少V?(4)图中的二极管D作何用处?

【解题过程】 设 $V_{BE} = 0.6V$ 。

(1)当SB按下时,电容充电,三极管T深度饱和,KA线圈得电,KA动合触点闭合,灯亮,SB抬起后, I_b 由电容C充的电提供,即C放电($\tau = RC = 10s$ 放电比较缓慢)。

T退饱和,在这个过程中 I_b 的变化对 I_c 影响不大,故KA线圈仍得电,即KA仍闭合着。经过一定时间,C储存的电量不足以使T的 I_c 维持线圈KA的正常工作状态,则KA动合触点断开,灯灭。

(2)刚按下SB时,T工作于深度饱和状态,所以

$$I_c = \frac{0.36}{6} A = 0.06 A$$

$$I'_b = \frac{6 - 0.6}{5} = 1.08 mA$$

$$I_b = \frac{I_c}{\beta} = \frac{0.06}{200} = 0.3 mA, I'_b > I_b$$

故T工作于深度饱和状态

$$\beta' = I_c / I'_b = 55.6$$

$$(3) \text{刚饱和时 } I'_b = \frac{I_c}{\beta} = \frac{0.06}{200} A = 0.3 \times 10^{-3} A = 0.3 mA$$

此时电容两端电压

$$U_c = U_{BE} + I_b \times R = 0.6 + 0.3 \times 10^{-3} \times 5 \times 10^3 \\ = 2.1 V$$

(4)当T截止时,继电器产生的自感电动势的电流可经二极管D环流,延迟继电器的释放时间。

14.6.1 图14.36所示是一声光报警电路。在正常情况下,B端电位为0;若前接装置发生故障时,B端电位上升到+5V。试分析之,并说明电阻 R_1 和 R_2 起何作用?

【解题过程】 正常情况下,B端电位为0,发光二极管不导通,不发光,晶体管T也截止, $I_c = 0$,蜂鸣器不动作,前接装置发生故障后,B点电位上升到+5V,即 $V_B = 5V$,则发光二极管PN结正偏,导通并发光;此时三极管T也导通, $I_c = \beta I_b$,故蜂鸣器中流过电流,则开始声音报警。

该电路中 R_1 起限流作用,从而防止流过发光管的电流过大致使损坏。

R_2 通过B点电压向晶体管提供基极电流。

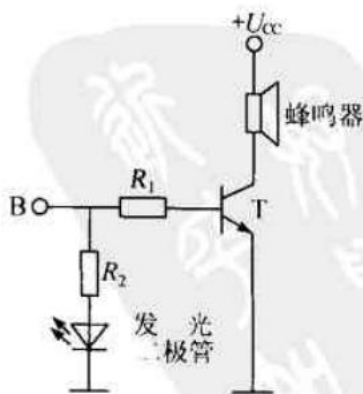


图 14.36

C 拓 宽 题

14.3.11 在图 14.37(a) 左所示是一种二极管钳位电路,当输入 u_i 是图 14.37(b) 所示的三角波时,试画出输出 u_o 的波形。二极管正向压降可忽略不计。

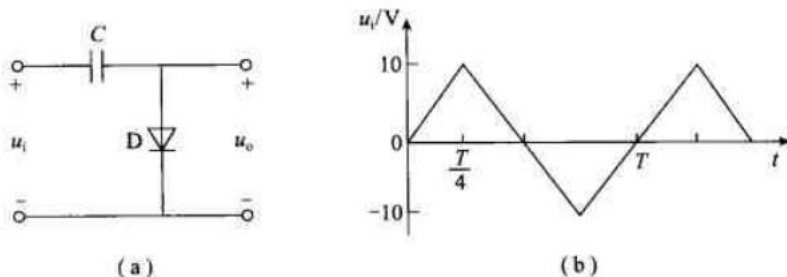


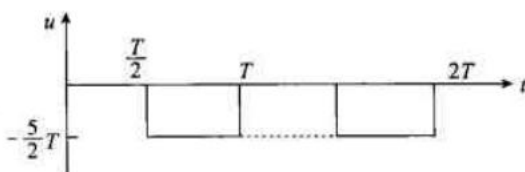
图 14.37

【知识点窍】二极管的正向导电性。

【解题过程】 u_o 波形如图解 14.37 所示。

正半周 C 充电 $Q = \int_0^{\frac{T}{2}} C u_i(t) dt = C \cdot \frac{5}{2} T$

负半周截止 $u = \frac{Q}{C} = \frac{5}{2} T$



图解 14.37

14.5.11 图 14.38 所示是继电器延时吸

合的电路,从开关 S 断开时计时,当集电极电流增加到 10mA 时,继电器 KA 吸合。(1) 分析该电路的工作原理;(2) 刚吸合时电容元件 C 两端电压为多少伏?(锗管 U_{BE} 很小,可忽略不计);(3) S 断开后经多少秒延时继电器吸合?(提示:可应用戴维宁定理计算电容元件充电到达的稳态值。)

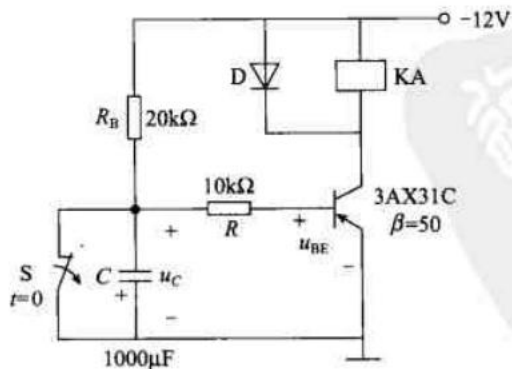


图 14.38

【解题过程】(1) 工作原理: S 断开后,电容 C 充电 $u_c > u_D$, BJT 导通, I_b 不断上升,充电至某一时刻 $I_c = \beta I_b = 10\text{mA}$, 继电器线圈导通,即继电器延时吸合。

(2) 刚吸合时 $I_c = 10\text{mA} = I_b = 0.2\text{mA}$

$$I_b = \frac{u_c}{R_b} \therefore u_c = 10\text{k}\Omega \times 0.2\text{mA} = 2\text{V}$$

14.5.12 如何用万用电表判断出一个晶体管是 NPN 型还是 PNP 型?如何判断出管子的三个管脚?又如何通过实验来区别是锗管还是硅管?

【知识点窍】 晶体管的性质,万用表的使用。

【逻辑推理】 步骤:(1)判断基极 B。(2)根据基极 B,判断 PNP 型还是 NPN 型。(3)判断集电极和发射极。(4)判断是硅管还是锗管。

【解题过程】 (1)判断基极。

用万用电表测电阻的 $R \times 1\text{k}\Omega$ 挡依次测量三个脚之间的正、反电阻,若某一脚对另两只脚之间的正向和反向电阻分别相等,各自性质犹如二极管,则该脚便是基极 B。

(2)判断 PNP 型或是 NPN 型。

若将电表红笔接触基极,黑笔接触另两个脚,测得均为正向电阻,则是 PNP 型,否则是 NPN 型。具体过程参考“练习与思考题解答”中 14.3.4 题。

(3)分辨集电极和发射极。

用电表测量未知的两个脚之间的正、反向电阻。对于 PNP 型锗管,测得较小电阻(正向)时黑笔所接为发射极,红笔所接为集电极。对于 NPN 型锗管(很少用),黑笔所接为集电极,红笔所接为发射极。对于硅管,发射极与集电极之间正、反电阻都很大,可在基极上接一只 $100\text{k}\Omega$ 的电阻,对于 NPN 型,可将该电阻另一端接在黑笔上,将三极管另两只脚在红笔和黑笔之间反复换接,测得其中一个电阻值较小时,则黑笔所接为集电极,红笔所接为发射极。若是 PNP 型,则将电阻另一端接红笔,测得电阻较小时,红笔所接为集电极,黑笔所接为发射极。

(4)分辨硅管与锗管。

判定三个管脚后,为进一步确定它是硅管还是锗管,可在 B、E 之间加正向偏置电压(通过限流电阻),测出 U_{BE} 。若 $U_{BE} \geq 0.6\text{V}$,则为硅管;若 $U_{BE} \leq 0.3\text{V}$,则为锗管。



第 15 章

基本放大电路

本章介绍基本放大电路、多级放大器、负反馈以及差分放大器,掌握估算法求静态工作点的方法,熟悉静态工作点的稳定方法及负反馈稳定工作点电路的分析,以及共射极放大电路 f_L , f_H , A_{um} 的计算。

15.1 重点内容提要

一、基本放大电路的组成

1. 放大电路概述

(1) 作用:把微弱的电信号放大到负载(如喇叭、电阻)所需的数值。

(2) 主要性能指标:图 15.1 所示电路中, u_s , R_s 分别为测试用正弦波信号的开路电压和内阻, R_L 为负载电阻; u_i , i_i 分别是放大电路的输入电压、电流; u_o , i_o 分别是输出电压、电流;直流电源为放大电路供电。

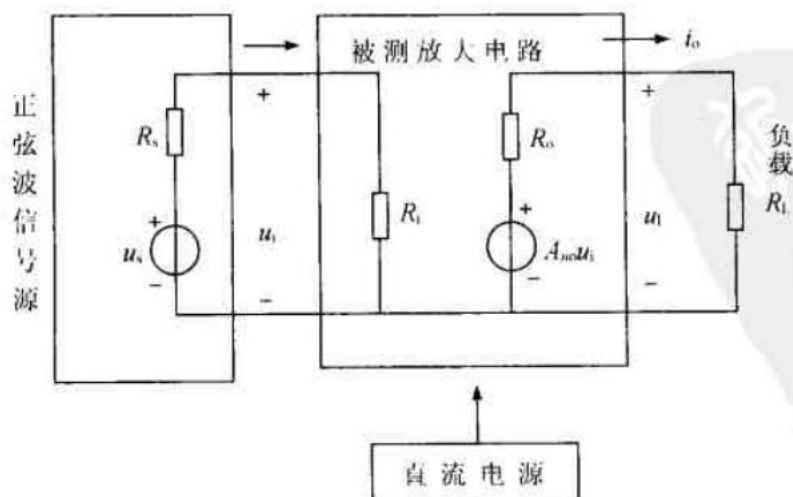


图 15.1

1) 放大倍数(增益): $A_u = \frac{u_o}{u_i}$, $A_i = \frac{i_o}{i_i}$,

$$A_r = \frac{u_o}{i_i}, A_s = \frac{i_o}{u_i}$$

分别是电压放大倍数, 电流放大倍数, 互阻放大倍数, 互导放大倍数。

$$2) \text{ 输入电阻 } R_i: R_i = \frac{u_i}{i_i} \Big|_{R_L \text{ 一定}}$$

$$3) \text{ 输出电阻 } R_o: R_o = \frac{u_o}{i_o} \Big|_{\substack{u_s=0 \\ R_L \text{ 一定}}}, \text{ 如图 15.2 所示。}$$

$$4) \text{ 频带宽度 } f_{bw}: f_{bw} = f_H - f_L$$

f_L, f_H 分别是下限截止频率和上限截止频率, 是

$|A_u|$ 下降到 $\frac{A_{um}}{\sqrt{2}}$ 时的工作频率。

$$5) \text{ 非线性失真系数 } D(\text{全谐波失真}): D = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} u_{on}^2}}{u_{o1}}$$

u_{on} 是输出的第 n 阶谐波电压。

6) 动态范围 $u_{o(p-p)}$ (输出最大幅度): 峰—峰 (p-p) 值。

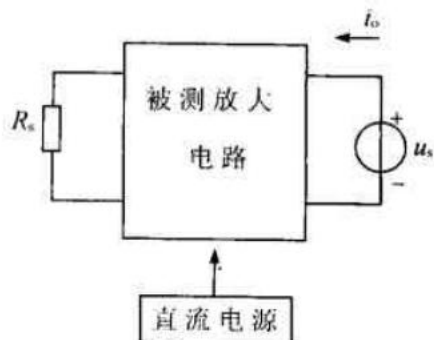


图 15.2

2. 基本放大电路组成原则

(1) 直流偏置: 晶体管发射结应正向偏置, 集电结反偏, 即晶体管工作在放大区。

(2) 信号的输入与输出: 信号源和负载接入, 不影响晶体管的原直流偏置。

本章主要研究由 NPN 型硅管组成的共发射极接法的基本放大电路, 电路如图 15.3 所示。由 PNP 型三极管组成的基本放大电路只是电源极性与 NPN 型电路相反, 分析的方法完全相同。

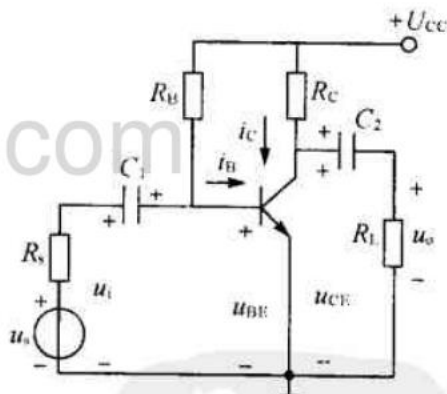
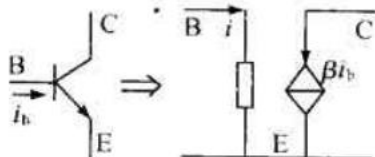


图 15.3

3. 三种晶体管基本放大器的计算

如表 15.1 所示。

简化 h 参数等效电路(交流):



$$\frac{\Delta V_{BE}}{\Delta I_B} = r_{be} = r_{bb'} + r_{b'e} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26}{I_{EQ}}$$

表 15.1 晶体管三种基本放大器的计算

组态	原理图	直流通路及静态计算	交流通路、微变等效电路及动态计算	
			交流通路	微变等效电路
共发射极放大电路		$I_{BQ} = (V_{CC} - U_{BEQ}) / R_B$ <p>式中: 硅管 U_{BEQ} 取 0.7V; 锗管 U_{BEQ} 取 0.3V;</p> $I_{CQ} = \beta I_{BQ}$ $u_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_C$	$A_u = -\beta(R_C // R_L) / r_{be}$ <p>式中: “-” 表示 u_o 与 u_i 反相</p> $r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26}{I_{EQ}}$ $R_i = R_B // r_{be}; \quad R_o = R_C$	
共集电极放大电路		<p>方法一: 适用于 $I \geq (5 \sim 10) I_{BQ}$</p> $U_{BQ} \approx \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} V_{CC}$ $I_{EQ} = \frac{U_{BQ} - U_{BEQ}}{R_E}$ <p>方法二: $V_{BQ} = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} \cdot V_{CC}$</p> $R_B = R_{B1} // R_{B2};$ $I_{BQ} = \frac{V_{BQ} - U_{BEQ}}{R_B + (1 + \beta) R_E}$ $I_{CQ} = \beta I_{BQ}$	$A_u = \frac{(1 + \beta)(R_E // R_L)}{r_{be} + (1 + \beta)(R_E // R_L)}$ <p>($A_u \leq 1, \approx 1$)</p> <p>u_o 与 u_i 同相</p> $R_i = R_{B1} // R_{B2} // [r_{be} + (1 + \beta)(R_E // R_L)]$ $R_o = R_E // \frac{r_{be} + (R_{B1} // R_{B2})}{1 + \beta}$ <p>当信号源有内阻 R_s 时,</p> $R_o = R_E // \frac{r_{be} + (R_s // R_{B1} // R_{B2})}{1 + \beta}$	

续表

组态	原理图	直流通路及静态计算	交流通路、微变等效电路及动态计算	
			交流通路	微变等效电路
共基极放大电路		<p>计算方法同共集电极放大电路: 共集和共基两种放大电路的 U_{CEQ}、I_{CQ} 计算式均为</p> $U_{CEQ} \approx V_{CC} - I_{EQ}(R_C + R_E);$ $I_{CQ} = V_{CC} - I_{CQ}R_C$	$A_u = \frac{\beta(R_C // R_L)}{r_{be}}$ <p>u_o 与 u_i 同相</p> $R_i = R_E // \frac{r_{be}}{1 + \beta}; R_o = R_C$	

二、放大电路的静态分析

静态分析的目的是确定静态工作点,即确定 U_{BE} 、 I_B 、 I_C 和 U_{CE} 的值,静态($u_i = 0$ 时)电路,分析方法有图解法和近似计算法两种。

1. 静态工作点的估算法,即近似计算法

- (1) 画出放大电路的直流通路。
- (2) 由直流通路列出输入回路和输出回路直流负载线方程,并取硅管 $|u_{BEQ}| = 0.6 \sim 0.7\text{V}$,锗管 $|u_{BEQ}| = 0.2 \sim 0.3\text{V}$,代入方程,求出静态工作点的值。

2. 图解法

既可分析放大电路的静态,又可分析放大电路的动态。

- (1) 画直流通路。
- (2) 列出输入回路直流负载线方程,并在晶体管的输入特性曲线上作出输入回路直流负载线,两者的交点 Q 即为静态工作点,坐标 (U_{BEQ}, I_{BQ}) 。
- (3) 列输出回路直流负载线方程,并在晶体管的输出特性曲线上作出输出回路直流负载线,它与 $i_B = I_{BQ}$ 的输出特性曲线的交点就是静态工作点 Q ,坐标 (U_{CEQ}, I_{CQ}) 。

三、放大电路的动态分析

动态分析是研究信号在电路中的传输情况,确定输出信号的大小、相位和质量,如放大倍数、输入、输出电阻和失真程度等。

1. 图解法

动态分析步骤:

- (1) 将 u_i 叠加到 u_{BEQ} 上, 画出 $u_{BE} = (u_{BEQ} + u_i)$ 的波形。
- (2) 由管子的输入特性和 u_{BE} 的变化, 画出 i_B 波形。
- (3) 由 i_B 波形, 利用输出特性和交流负载线 ($R_L = \infty$ 时, 即为直流负载线), 画出 i_C 和 u_{CE} 的波形。其中, u_{CE} 波形的交流分量是输出电压 u_o 的波形。

通过动态过程的图解分析, 从波形上测出 u_{om} 和 u_{im} , 求得 $|A_u| = \frac{u_{om}}{u_{im}}$, 并可知 u_o 和 u_i 的相位关系及动态范围。

2. 近似解析法

当晶体管工作在线性放大区时, 在静态工作点附近可将晶体管特性加以线性化处理, 画出微变等效电路来进行动态分析。

(1) 晶体管的微变等效电路: 晶体管在低频小信号工作时的近似微变等效电路如图 15.4 所示, 图中输入电阻 r_{be} 可用近似公式估算, 即

$$r_{be} = 300 + (1 + \beta) \frac{26}{I_E}$$

其中 I_E 是静态发射极电流。

- (2) 放大电路的交流通路及微变等效电路的画法。
- (3) 动态分析计算。

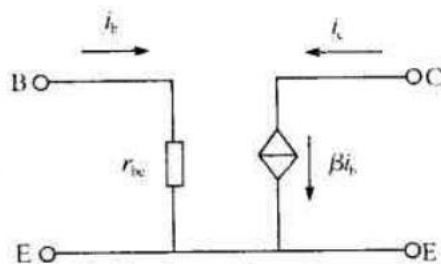


图 15.4

四、影响放大质量的几个因素

1. 非线性失真

- (1) 若 R_B 过大, I_B 过小, 使 Q 点过低, 则将产生截止失真。
- (2) 若 R_B 过小, I_B 过大, 使工作点 Q 过高, 则将产生饱和失真。
- (3) 若信号幅度过大, 则将产生双向失真。

2. 温度对静态工作点的影响

- (1) 温度升高, I_{CBO} 增大, 使 I_C 增大, 工作点上移;
- (2) 温度升高, β 增大, 使 I_C 增大, 工作点上移。

3. 放大电路的频率特性

放大器的频率特性如图 15.5 所示。当输入信号中含有多种频率(如音乐信号)时, 由于对各种频率的信号放大倍数各不相同, 输出与输入间的相位差也各不相同, 使信号产生失真, 称为频率失真。

五、多级放大电路

1. 多级放大电路

多级放大电路由多个基本放大电路级联组成。

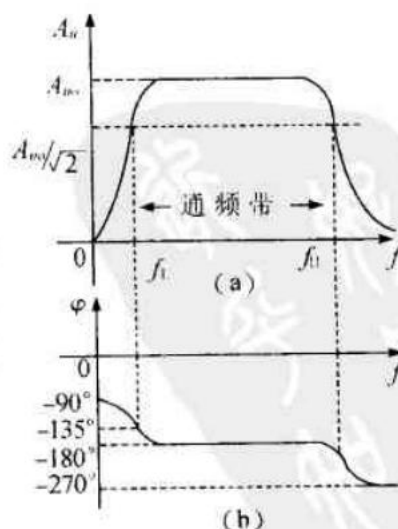


图 15.5

(1) 输入级(前置放大级):有高的输入阻抗(高的输入电阻,小的输入电容)和低噪声(如射极跟随器)。

(2) 中间放大级(电压放大级):提高信号电压的幅度。

(3) 输出级(功率放大级):提高驱动负载的能力,有低的输出电阻。

2. 级间耦合方式

(1) 阻容耦合:级间串入耦合(隔直)电容的耦合方式。其优点是各级 Q 点相互独立,因此电路调整较为方便,缺点是低频响应较差。

(2) 电隔离耦合:通过磁耦合或光耦合等方式实现信号传输的方法。这些耦合均有各级 Q 独立的特点,变压器耦合还可以实现阻抗变换和传输大的功率。缺点是频响较差,光耦合的信号传输效率较低,体积重量较大。

(3) 直接耦合:采取一定电路技术后,级间直接相连的耦合方式,低频区和中频区特性一致,缺点是要考虑各级直流相互影响,如级间耦合和零点漂移。

六、差分放大电路

1. 基本差分放大电路的特点

(1) 电路完全对称:当静态或输入共模信号时,输出恒为 0,即理论上不产生零点漂移,克服了直接耦合放大电路的“零漂”问题及其他共模干扰。

(2) 双入—双出:有两个输入端和两个输出端,通常由两个输出端间输出 u_o ,在规定的 u_o 极性下,其中一个输入端(如 u_{i1})与 u_o 反相位,称反相输入端;另一输入端(u_{i2})则与 u_o 同相位,称同相输入端。

(3) 具有很大的共模反馈电阻 R_E :因为电路实际上不可能完全对称, R_E 对共模信号有强负反馈作用(这是一种电流负反馈,将在第 17 章讨论),增强了电路对零点漂移的抑制作用,而对差模信号放大则无影响。

(4) 采用双电源工作:除 $+U_{CC}$ 外,还有 U_{EE} ,用于抵消 R_E 上直流压降,增大信号工作范围。

(5) 具有阻值很小的调零电位器 R_P :改变两管差模信号负反馈比值,调节零点。

2. 输入信号

(1) 共模输入: $u_{i1c} = u_{i2c}$

(2) 差模输入: $u_{i1d} = -u_{i2d}$

(3) 比较输入:可分解为差模与共模。

$$u_{i1d} = -u_{i2d} = \frac{1}{2}(u_{i1} - u_{i2})$$

$$u_{i1c} = u_{i2c} = \frac{1}{2}(u_{i1} + u_{i2})$$

u_{i1}, u_{i2} 为输入信号, $u_{i1} \neq u_{i2}$ 。

3. 输入—输出方式

有四种输入—输出方式,示意电路如图 15.6 所示。

(1) 双入—双出:如图 15.6(a) 所示。

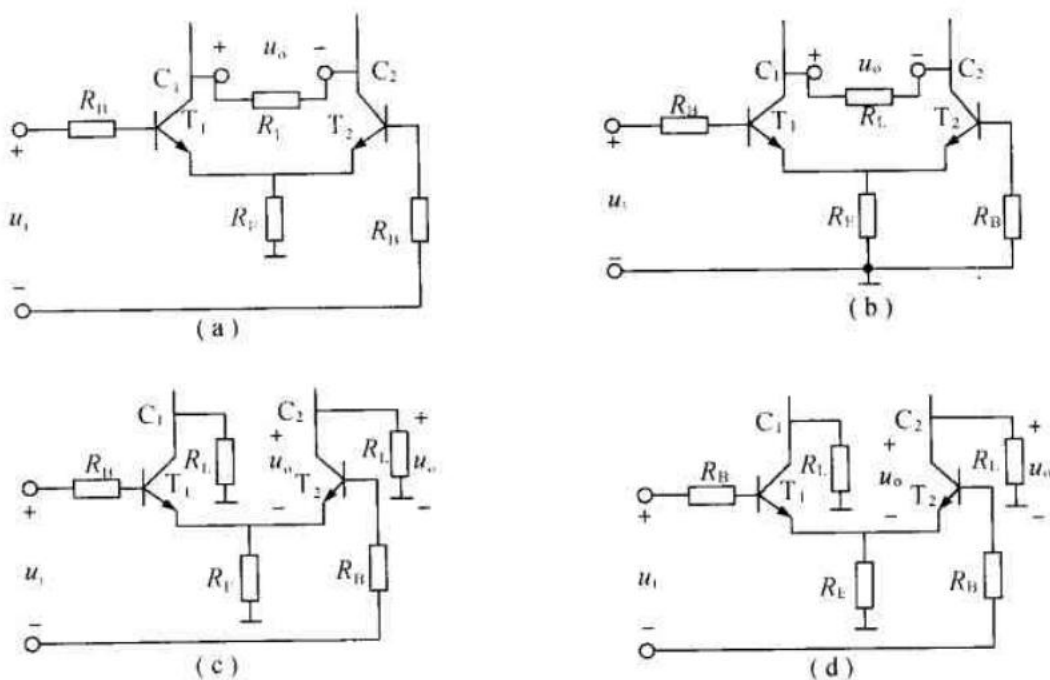


图 15.6

输入信号:

$$u_{i1} = \frac{1}{2}u_i, u_{i2} = -\frac{1}{2}u_i$$

两管电压放大倍数: $A_{d1} = \frac{u_{o1}}{u_{i1}} = A_{d2} = \frac{u_{o2}}{u_{i2}}$

差模放大倍数: $A_d = \frac{u_o}{u_i} = \frac{u_{o1} - u_{o2}}{u_i} = A_{d1} = -\frac{\beta R'_L}{R_B + r_{be}}$

$$R'_L = R_C // \frac{1}{2}R_L = \frac{R_C \frac{R_L}{2}}{R_C + \frac{R_L}{2}}$$

输入电阻: $r_i = 2(R_B + r_{be})$

输出电阻: $r_o \approx 2R_C$

(2) 单入—双出:如图 15.6(b) 所示。

输入信号: $u_{i1} \approx \frac{1}{2}u_i, u_{i2} = -\frac{1}{2}u_i$

与“双入—双出”方式相同。

(3) 双入—单出:如图 15.6(c) 所示。

共模放大倍数: $A_c = -\frac{\beta R'_L}{R_B + r_{be} + 2(1+\beta)R_E} \approx -\frac{R'_L}{2R_E}$

差模电压放大倍数: $A_d = -\frac{1}{2} \frac{\beta R'_L}{R_B + r_{be}}$ (反相输出) 或

$$A_d = \frac{1}{2} \frac{\beta R'_L}{R_B + r_{be}} \text{ (同相输出)}$$

其中 $R'_L = R_C // R_L = \frac{R_C R_L}{R_C + R_L}$ 。

(4) 单入—单出:如图 15.6(d) 所示。

特点均与“双入—单出”方式相同。

4. 共模抑制比

它是衡量差动放大电路及集成运算放大电路抑制零点漂移能力的重要指标。

$$\text{CMRR} = \frac{A_d}{A_c}$$

用对数表示,则为 $\text{CMRR} = 20 \lg \frac{A_d}{A_c} \text{dB}$ 。

七、功率放大电路

1. 用途

在多级放大电路中作输出级,向负载提供负载所需的功率,是一种能量转换电路。

2. 对功率放大电路的基本要求

(1) 输出功率大。为此,输入信号电压幅度要大,晶体管工作在极限参数状态下(I_{CM} , $U_{(BR)CEO}$, P_{CM})。

(2) 效率要高,以减少电源供应。为此采用乙类或甲乙类工作状态,使静态直流功率损耗近似为 0。

(3) 要保证信号基本不失真。

(4) 功放管在大信号条件下工作,微变等效电路法已不能适用于功率放大电路的分析,而应该用图解法。

(5) 功放管既要输出大的电压,又要输出大的电流;工作时,工作点应在安全区内移动。

3. 分类

(1) 耦合方式:直接耦合、变压器耦合、电容耦合。

(2) 功放管类型:电子管功放、晶体管功放、场效应管功放、集成功放。

(3) 器件的工作状态:根据导通角(θ)大小,分为甲类、乙类、甲乙类。

(4) 电路形式:单管功放,推挽式功放,桥式功放。

4. 典型电路

(1) 无变压器互补对称功率放大电路(OTL):电路如图 15.7 所示。

结构原理与特点如下:

1) T_1 为 NPN 型, T_2 为 PNP 型,两管特性相同,均工作在乙类或甲乙类。

2) T_1 正半周导电, T_2 负半周导电,互补对称。

3) R 提供静态偏置电压,消除交越失真。

4) C_1 为旁路电容,使两管输入信号对称。

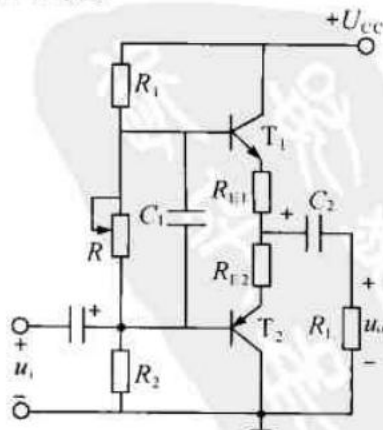


图 15.7

5) R_{E1} 和 R_{E2} 两个小电阻,起限流保护作用,防止负载短路。

电路分析如下:

静态:偏流 $I_{B1} = I_{B2} \approx 0, I_{C1} = I_{C2} \approx I_{CE0}$ 。

$$P_E = U_{CC} I_{CE0} \approx 0$$

$$U_{C2} = V_A = \frac{1}{2} U_{CC}, U_{C1} \approx \frac{1}{2} U_{CC}$$

动态: $u_o \approx u_i, A_u \approx 1, A_i \approx \beta$ 。

输出功率:

$$P_o = \frac{U_o^2}{R_L} \approx \frac{U_i^2}{R_L}$$

最大输出功率: $U_{om} \approx \frac{1}{2} U_{CC}, U_{omax} \approx \frac{1}{2\sqrt{2}} U_{CC}$

$$P_{omax} \approx \frac{U_{CC}^2}{8R_L}$$

最高效率: $\eta = \frac{P_{omax}}{P_E} \approx 78.5\%$

电源供应功率: $P_E = U_{CC} I_C$

其中 I_C 是输出信号电流半周平均值, $I_C = \frac{U_{CC}}{2\pi R_L}$ 。

(2) 无输出电容(C_2) 互补对称功率放大电路(OCL):

电路如图 15.8 所示。

电路特点:

1) 用 D_1 及 D_2 两只二极管获得偏置电压,消除交越失真,同时具有温度补偿作用。

2) 电路分析与 OTL 相似,但 $u_{om} = U_{CC}$ (此处 U_{CC} 值为 OTL 电路中的一半), $P_{omax} = \frac{U_{CC}^2}{2R_L}$, 其余与 OTL 电路相同。

(3) 管子的最大功耗 P_{TM} 对 OTL 与 OCL 电路均有:

$$P_{TM} \approx 0.2 P_{OM}$$

5. 复合管

目的是增大输出功率和提高电路的对称性。

复合管有四种接法,如图 15.9 所示。它们的总电流放大倍数均为 $\beta \approx \beta_1 \beta_2$ 。

八、场效应管及其放大电路

1. 场效应管的结构类型及特性曲线(见表 15.2)

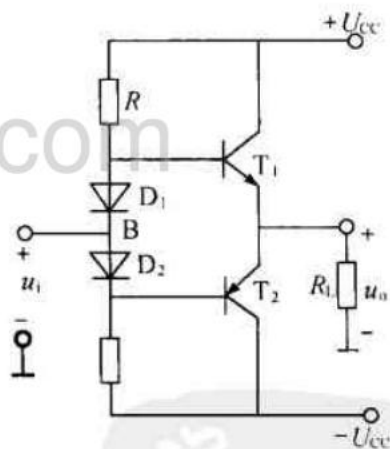


图 15.8

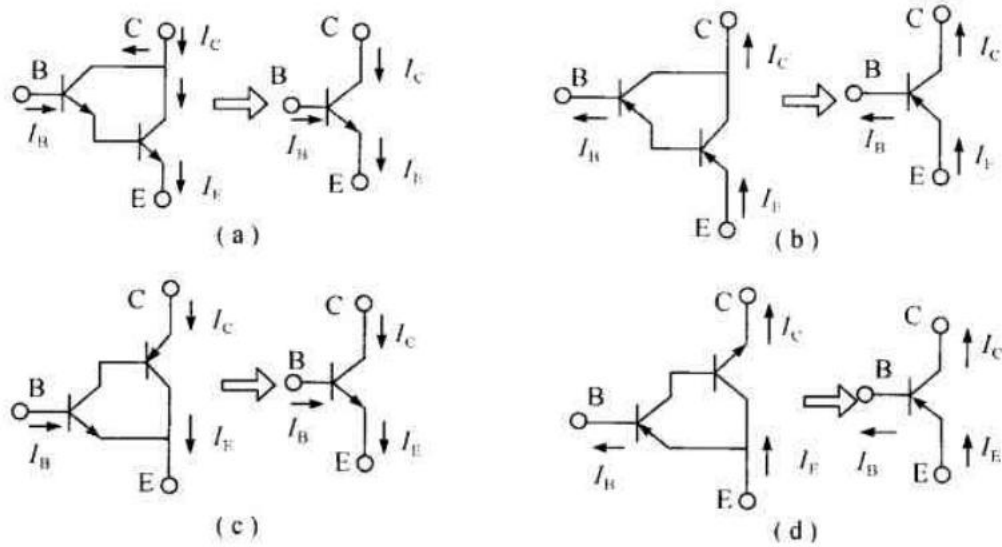
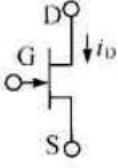
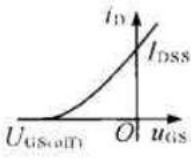
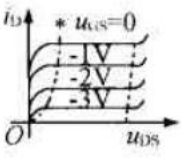
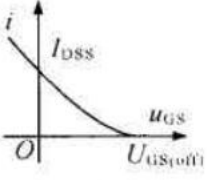
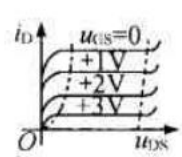
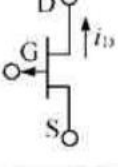
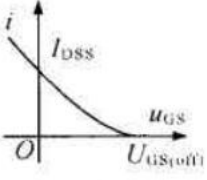
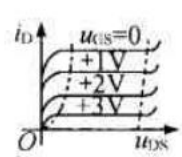


图 15.9

表 15.2 场效应管的符号及特性曲线

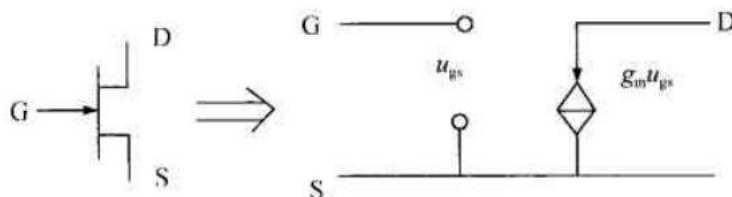
种类	结构类型	工作方式	电源极性		符号及电流方向	转移特性	输出特性
			U_{DS}	U_{GS}		$i_D = f(u_{GS}) \Big _{u_{DS}=C}$	$i_D = f(u_{DS}) \Big _{u_{GS}=C}$
绝缘栅型	N 沟道	耗尽型	+	-			
		增强型	+	+			
	P 沟道	耗尽型	-	+			
		增强型	-	-			

续表

种类	结构类型	工作方式	电源极性		符号及电流方向	转移特性	输出特性
			U_{DS}	U_{GS}		$i_D = f(u_{GS}) \Big _{u_{DS}=C}$	$i_D = f(u_{DS}) \Big _{u_{GS}=C}$
结型	N 沟道	/	+	-			
							
结型	P 沟道	/	+	+			

2. 场效应管的转移特性的近似计算及主要参数

(1) 微变等效电路:



(2) 结型及绝缘栅耗尽型场效应管:

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

$$g_m = -\frac{2I_{DSS}}{U_{GS(off)}} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS(off)}}\right) = \frac{-2}{U_{GS(off)}} \sqrt{I_{DSS} I_D}$$

(3) 绝缘栅增强型场效应管:

$$I_D = K(U_{GS} - U_{GS(th)})^2 > U_{GS} > U_{GS(th)}$$

$$g_m = 2K(U_{GS} - U_{GS(th)}) = 2\sqrt{KI_D}$$

I_{DSS} ——原始沟道漏极电流(对耗尽型 MOS)或饱和漏极电流(对结型—JFET);

$U_{GS(off)}$ ——夹断电压;

$U_{GS(th)}$ ——栅源开启电压;

U_{GS} ——工作点栅源电压;

I_D ——工作点漏极电流;

K ——转移特性曲线形状系数;

g_m ——跨导, $g_m = \left. \frac{dI_D}{du_{GS}} \right|_{u_{GS}=\text{常数}}$ 。

考点: 电路参数与静态工作点的关系, 静态工作点与波形失真的关系, 交、直流负载线的画法, 含电流串联负反馈的典型放大电路的静态与动态分析计算, 阻容耦合多级放大电路的静态和动态分析, 负反馈模型的判别, 负反馈对放大器性能的影响, 射极跟随器的特点及应用, 对功率放大器的要求及电路元件的作用, 复合管, 典型差动放大器的输入模式及输入、输出方式, 绝缘栅场效应管类型、特点及其放大电路分析。

15.2 练习与思考题解答

15.2.1 改变 R_c 和 U_{CC} 对放大电路的直流负载线有什么影响?

【解题过程】 如图 15.10 所示, 直流负载线的基本方程为: $U_{CE} = U_{CC} - R_c I_C$, R_c 为直流负载线斜率的负倒数, 于是 R_c 增大, 斜率增大, 在同一条 I_B 的 $I_C - U_{CE}$ 曲线上, Q 点左移, 并可进入饱和区。 U_{CC} 减少, 使直流负载线向左移, Q 点左移。

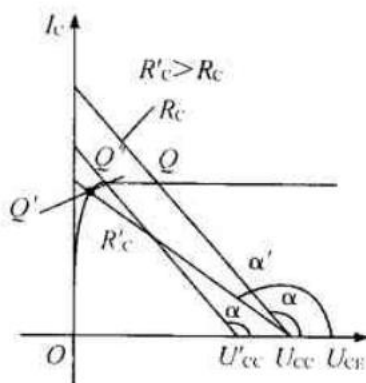


图 15.10

15.2.2 分析图 15.11, 设 U_{CC} 和 R_c 为定值, (1) 当 I_B 增加时, I_C 是否成正比地增加? 最后接近何值? 这时 U_{CE} 的大小如何? (2) 当 I_B 减小时, I_C 作何变化? 最后达到何值? 这时 U_{CE} 约等于多少?

【解题过程】 (1) 起初, I_C 近似正比于 I_B 增加, 但逐渐比值减少, 并进入饱和区, 使

$$I_C \approx \frac{U_{CC}}{R_c} = 3\text{mA}, u_{CE} \approx 0$$

(2) 开始时, I_C 近似正比于 I_B 减少, 逐渐比值减小, 最终 $I_C = I_{CEO}$, $I_B = 0$, 进入截止区。当 $I_B < 0$ 时, $I_C \approx I_{CBO}$, $u_{CE} \approx U_{CC}$ 。

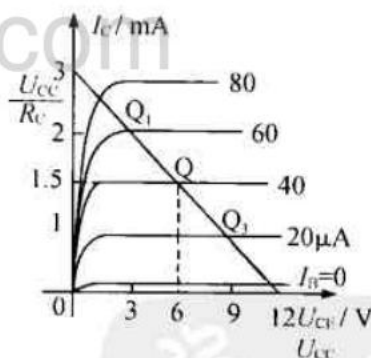


图 15.11

15.2.3 在例 15.2.2 中, 如果 (1) R_c 不是 $4\text{k}\Omega$, 而是 $40\text{k}\Omega$ 或 $0.4\text{k}\Omega$, (2) R_B 不是 $300\text{k}\Omega$, 而是 $3\text{M}\Omega$ 或 $30\text{k}\Omega$, 试分别说明对静态工作点的影响, 放大电路能否正常工作。

【解题过程】 例 15.2.2 的电路如图 15.12 所示。 $U_{CC} = 12\text{V}$ 。

(1) $R_c = 40\text{k}\Omega$ 时, 直流负载线斜率大大增加, 静态工作点 Q 移至饱和区, $I_C = \frac{U_{CC}}{R_c} = \frac{12}{40} = 0.3\text{mA}$, $U_{CE} \approx 0$, 不能放大正半周信号。 $R_c = 0.4\text{k}\Omega$ 时, 直流负载线几乎垂直, 而且过点 $(U_{CC}, 0)$ 有电流放大功能, 但无电压放大功能。 $U_{CE} \approx U_{CC} = 12\text{V}$, 不随 u_i 变化, $I_C \approx 1.5\text{mA}$ 。

(2) $R_B = 3\text{M}\Omega$ 时, $I_B \approx \frac{12}{3 \times 10^6} = 4\mu\text{A}$, 工作点接近截止区, $u_{CE} \approx U_{CC}$, 不能放大负半

周信号。

$$R_B = 30\text{k}\Omega \text{ 时, } I_B \approx \frac{12}{30 \times 10^3} = 400\mu\text{A}$$

$$\text{工作点在饱和区, } I_C \approx \frac{U_{CC}}{R_C} = 3\text{mA}$$

$U_{CE} = 0$ 。电路不能正常工作。

15.2.4 在图 15.13 所示电路中,如果调节 R_B 使基极电位升高,试问:此时 I_C 、 U_{CE} 及集电极电位 V_C 将如何变化?

【解题过程】 基极电位 V_B 升高,则基极电流 I_B 增大, I_C 增加, U_{CE} 下降,集电极电位 $V_C = U_{CE}$ 也下降。

15.2.5 在图 15.13 中, $R_B = 240\text{k}\Omega$, $R_C = 3\text{k}\Omega$, $U_{CC} = 12\text{V}$, 晶体管 $\beta = 40$ 。由于晶体管损坏换上一个 $\beta = 80$ 的新管,试问:(1)若保持 I_C 不变,应将 R_B 调整为多少?(2) U_{CE} 有无改变,等于多少?本题 U_{CE} 可忽略不计。

【知识点窍】 交流放大电路的直流分路分析。

$$\text{【解题过程】} (1) I_C = \beta_1 I_B = 40 \times \frac{12}{240} = 2\text{mA}$$

$$I_C = \beta_2 \cdot \frac{U_{CC}}{R_B'} = 80 \times \frac{12}{R_B'} = 2\text{mA}$$

$$\therefore R_B' = 480\text{k}\Omega \text{ 故 } R_B \text{ 应调为 } 480\text{k}\Omega。$$

$$(2) U_{CE} = U_{CC} - I_C R_C$$

公式中 U_{CC} 、 I_C 、 R_C 均保持不变,故 U_{CE} 不变化。

15.2.6 如果放大电路用的是 3DG100A 型晶体管,试问:能否用 18V 的集电极电源?

【解题过程】 因为 3DG100A 的 $U_{(BR)CE0} = 15\text{V}$, 所以集电极电源电压 U_{CC} 应小于 $U_{(BR)CE0}$, 否则三极管将被击穿,故不能用 18V 作集电极电源。

15.3.1 区别交流放大电路的(1)静态工作与动态工作;(2)直流通路与交流通路;(3)直流负载线与交流负载线;(4)电压和电流的直流分量与交流分量。

【解题过程】 (1) 输入信号 $u_i = 0$ 时的工作状态称静态; $u_i \neq 0$ 时的工作状态则称动态。

(2) 直流通路是直流电压、直流电流分量的通路,将直流电源除源后交流信号的通路则称交流通路。

(3) 在静态根据负载电阻 R_L 画出的负载线为直流负载线,反映了输出回路直流电压与电流的关系;根据输出回路交流信号电流流过的等效负载电阻所画出的负载线为交流负载线,反映了输出回路交流电压与电流的关系。

(4) 在交流放大电路中电流和电压直流分量就是静态时的工作电流和电压,交流分量就是被放大的信号电流和电压分量。

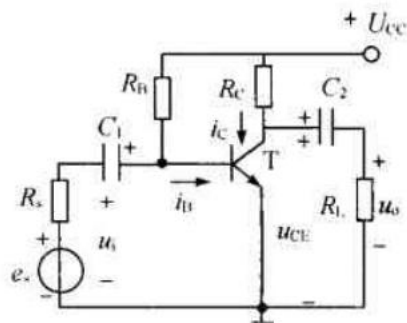


图 15.12

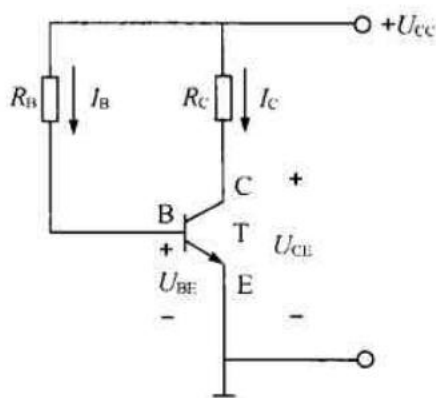


图 15.13

15.3.2 在图 15.1.2(图 15.13)中,电容器 C_1 和 C_2 两端的直流电压和交流电压各应等于多少?并说明其上直流电压的极性。

【解题过程】 如图 15.13 所示, C_1 的直流分量 $U_{C_1} = U_{BE} \approx 0.6\text{V}$,

C_2 的直流分量是 $U_{C_2} \approx U_{CE}$, C_1 和 C_2 对交流信号而言,容抗很小,可忽略,故其交流压降也近似为 0。

15.3.3 在图 15.1.2(图 15.13)所示电路中,用直流电压表测得的集电极对“地”电压和负载电阻 R_L 上的电压是否一样?用示波器观察集电极对“地”的交流电压波形和集电极电阻 R_C 及负载电阻 R_L 上交流电压波形是否一样?分析原因。

【解题过程】 如图 15.13 所示。直流电压表测得的集电极对“地”电压为 U_{CE} , R_L 上无直流电压(C_2 起隔直作用)。故结果不同。

示波器观察的是交流分量,集电极对“地”的交流电压即为 R_L 上的电压。 R_C 上的交流电压和集电极对“地”交流电压大小相等,但相位相反。

15.3.4 晶体管用微变等效电路来代替,条件是什么?

【解题过程】 微变等效电路只适用于小信号在线性工作区,故条件是工作在线性放大区,且信号较小。

15.3.5 电压放大倍数 A_u 是不是与 β 成正比?

【解题过程】 A_u 取决于 $\frac{\beta}{r_{be}}$, 但 β 增加, r_{be} 也增加, A_u 增加则较小,当 β 足够大, A_u 几乎与 β 无关。所以 A_u 不与 β 成正比。

15.3.6 为什么说当 β 一定时通过增大 I_E 来提高电压放大倍数是有限制的?试从 I_C 和 r_{be} 两方面来说明。

【解题过程】 (1) I_E 增大则 I_C 增大,最后进入饱和区, A_u 下降; $I_C \geq I_{CM}$, β 下降到原值 $\frac{1}{3}$ 以下,也使 A_u 下降。

(2) I_E 增大, r_{be} 减小,到最后 $r_{be} \approx r_{be'} \approx 200\Omega$, 不能再减小了, A_u 也不能增大。可见靠 I_E 增大来提高电压放大倍数是有限制的。

15.3.7 能否增大 R_C 来提高放大电路的电压放大倍数?当 R_C 过大时对放大电路的工作有何影响?设 I_B 不变。

【解题过程】 (1) 在线性放大区适当增大 R_C , 可提高电压放大倍数 A_u , 但 A_u 还受负载电阻 R_L 影响, R_L 一定时, I_C 增大对 A_u 影响有限。

(2) 当 R_C 过大时, 工作点进入饱和区, 产生饱和失真, 不可能增大 A_u 。

15.3.8 r_{be} , r_{ce} , r_i , r_o 是交流电阻, 还是直流电阻?它们各是什么电阻?在 r_o 中包括不包括负载电阻 R_L ?

【解题过程】 r_{be} , r_{ce} , r_i , r_o 都是交流电阻。 r_{be} 是晶体三极管的输入电阻; r_i 是放大电路的输入电阻; r_{ce} 是晶体三极管的输出电阻; r_o 是放大电路的输出电阻, 它不包括负载电阻 R_L 。

15.3.9 通常希望放大电路的输入电阻高一些好, 还是低一些好?对输出电阻呢?放大电路的带负载能力是指什么?

【解题过程】 输入电阻高一些好而输出电阻低一些好,因为前者可使信号源内阻损失降低,信号得到有效放大,而后者可使信号有效输出。带负载能力是指供给负载的电流和功率大小,输出电阻愈小,则带负载能力愈强。

15.3.10 图 15.1.2(图 15.13) 所示的放大电路在工作时用示波器观察,发现输出波形失真严重。当用直流电压表测量时,试问:

(1) 若测得 $U_{CE} \approx U_{CC}$, 试分析管子工作在什么状态?怎样调节 R_B 才能使电路正常工作?

(2) 若测得 $U_{CE} < U_{BE}$, 这时管子又是工作在什么状态?怎样调节 R_B 才能使电路正常工作?

【解题过程】 (1) 管子工作在截止状态下,减小 R_B 使 I_B 和 I_C 增大,工作点上移,可使电路正常工作。

(2) 管子工作在饱和状态下,增大 R_B ,可以使电路正常工作。

15.3.11 发现输出波形失真,是否说明静态工作点一定不合适?

【解题过程】 不一定,若工作点合适而信号幅度过大,也会造成失真。

15.4.1 在放大电路中,静态工作点不稳定对放大电路的工作有何影响?

【解题过程】 静态工作点不稳定不仅会引起放大能力的变化,而且将引起波形失真。

(1) 工作点升高则产生饱和失真;(2) 工作点下移将产生截止失真。

15.4.2 对分压式偏置电路而言,为什么只有满足 $I_2 \gg I_B$ 和 $V_B \gg U_{BE}$ 两个条件,静态工作点才能得以基本稳定?

【解题过程】 当 $I_2 \gg I_B$ 时, I_B 变化不影响 V_B 大小,当 $V_B \gg U_{BE}$ 时, U_{BE} 变化也几乎不影响 V_B 大小,从而 I_B 大小得以基本稳定,于是 $I_C \approx I_E = \frac{V_B - U_{BE}}{R_E} \approx \frac{V_B}{R_E}$, 所以满足 $I_2 \gg I_B$ 和 $V_B \gg U_{BE}$, 静态工作点才能得以基本稳定。

15.4.3 对分压式偏置电路而言,当更换晶体管时,对放大电路的静态值有无影响?试说明。

【解题过程】 对于分压式偏置电路,当 $I_2 \gg I_B$ 和 $U_B \gg U_{BE}$ 二条件被满足时, I_C 和 I_E 几乎与晶体管参数无关,因此更换晶体管时 I_C 和 U_{CE} 几乎不受影响,只是基极电流 I_B 大小不同而已。

15.4.4 在实际中调整分压式偏置电路的静态工作点时,应调节哪个元件的参数比较方便?接上发射极电阻的旁路电容 C_E 后是否影响静态工作点?

【解题过程】 实验中,通常调节电阻 R_{B1} 。作为隔直电容 C_E 对静态工作点无影响,因为对直流静态工作点,电容等于开路。

15.4.5 在图 15.14 所示放大电路图中,若出现以下情况,对放大电路的工作会带来什么影响?(1) R_{B1} 断开;(2) R_{B1} 短路;(3) R_{B2} 断开;(4) R_{B2} 短路;(5) C_E 断开;(6) C_E 短路;(7) C_2 断开;(8) C_2 短路。

【知识点窍】 固定偏置放大电路基本工作原理。

【解题过程】 (1) R_{B1} 断开,放大电路停止工作。

(2) R_{B1} 短路,会导致基极电位 V_B 过高,使 U_{CE} 相对减小,从而减小了放大电路输出电压的变化范围。

(3) R_{B2} 断路,放大电路停止工作。

- (4) R_{B2} 短路, 基极电位 $V_B = 0$, 放大电路无法工作。
- (5) C_E 断开, 降低电压放大倍数。
- (6) C_E 短路, 会导致放大电路稳定性能下降。
- (7) C_2 断开, 交流信号无法正常通过负载。
- (8) C_2 短路, 放大电路与负载电路构成直流通路, 交流通路无法正常工作。

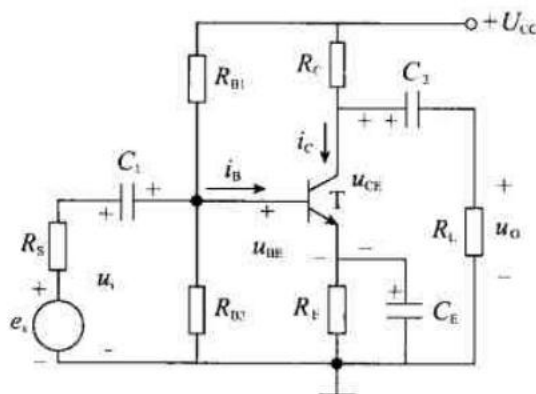


图 15.14

15.5.1 从放大电路的幅频特性上看, 高频段和低频段放大倍数的下降主要因为受到了什么影响?

【解题过程】 低频段主要因为耦合电容 (C_1, C_2) 和旁路电容 C_E 的容抗 ($\frac{1}{\omega C_1}, \frac{1}{\omega C_2}, \frac{1}{\omega C_E}$) 增大, 前者产生信号压降, 后者产生串联负反馈, 使输出电压减小, 从而放大倍数下降。

高频段则是由于三极管极间电容和电路分布电容 C_o 的容抗 $\frac{1}{\omega C_o}$ 下降, 产生分流作用及并联负反馈作用 (C, B 极间电容), 使输出电压下降, 放大倍数也下降。

15.5.2 为什么通常要求低频放大电路的通频带要宽一些, 而在上册讲到串联谐振时又希望通频带要窄一些?

【解题过程】 这是由于它们的用途不同。

(1) 低频放大电路主要是放大音频信号, 其频率范围从几十赫兹到上万赫兹, 所以低频放大器通频带愈宽则声音质量愈好。

(2) 串联谐振电路则用于无线电接收, 通频带愈窄则选择性愈强。

这是由于它们的用途不同决定的。

15.6.1 何谓共集电极电路? 如何看出射极输出器是共集电极电路。

【解题过程】 针对交流信号, 集电极为输入回路和输出回路的公共端故称共集电极放大电路; 画出射极输出器的交流等效电路, 可以看出信号从基极输入, 发射极输出, 且发射极和集电极有公共端, 从而可以看出射极输出器是共集电极电路。

15.6.2 射极输出器有何特点? 有何用途?

【解题过程】 它的突出特点为:

- (1) 电压放大倍数接近于 1, 输出电压与输入电压同相。
- (2) 输入电阻高。

(3) 输出电阻低。

用途:在多级放大电路中,用它作为输入级,可使放大电路具有较高的输入电阻,用它作输出极,可使放大电路具有较高的带负载能力,这就是射极输出器的阻抗变换作用。

15.6.3 为什么射极输出器又称为射极跟随器,跟随什么?

【解题过程】 射极输出器的电压倍数近似等于1,但总小于1,也就是该电路的输出电压 \dot{U}_o 与输入电压 \dot{U}_i 之间不仅基本相等,而且相位相同,可以看出输出电压跟随输入电压变化而变化,故其又称为射极跟随器。

15.7.1 差分放大电路在结构上有何特点?

【解题过程】 (1) 电路完全对称:静态或输入共模信号时,输出恒为0,即理论上无零漂移。

(2) 双入—双出:有两个输入端、两个输出端。

(3) 具有很大的共模反馈电阻 R_E :增加了电路对零点漂移的抑制作用、对差模信号放大无影响。

(4) 采用双电源工作: U_{CC} , $-U_{EE}$ 用于抵消 R_E 上直流压降,增大信号工作范围。

(5) 具有阻值很小的调零电器 R_P :调节零点。

15.7.2 什么是共模信号和差模信号?差分放大电路对这两种输入信号是如何区别对待的?

【解题过程】 共模信号:两个输入端上大小相等、极性相同的信号。

差模信号:两个输入端上大小相等而极性相反的信号。

利用结构对称性,差分放大电路对于输入共模信号时进行抑制,使之输出为零(理论上),而对于输入差模信号时则将其放大 A_d 倍输出。

15.7.3 双端输入—双端输出差分放大电路为什么能抑制零点漂移?为什么共模抑制电阻 R_E 能提高抑制零点漂移的效果?是不是 R_E 越大越好?为什么 R_E 不影响差模信号的放大效果?

【解题过程】 电路完全对称,当外界温度变化或输入共模干扰信号时,两对称放大管产生的漂移电压互相抵消,输出不会产生零点漂移。

共模反馈电阻 R_E 对共模信号或温度变化引起的漂移电压具有很强的负反馈作用,因此大大增强了抑制零点漂移的能力。

理论上 R_E 越大,抑制零点漂移的能力也越强,但 R_E 增大使直流压降增大,为保证三极管的放大工作范围,就要提高 U_{EE} 的电压,这是不利的。通常在 $U_{EE} = U_{CC}$ 的条件下,使 $U_{EE} = 2I_E R_E$ 来选择 R_E 的大小。

差模信号作用下,两管信号电流在 R_E 上压降互相抵消,所以 R_E 不影响差模信号的放大。

15.7.4 在图 15.15 所示电路中,晶体管 T_1 和 T_2 的偏流是如何获得的?

【知识点窍】 差分放大电路。

【解题过程】 在这个电路中引入了发射极电阻 R_E 和负电源 $-U_{EE}$,从而集电结反偏、发射结正偏,两个 BJT 均导通,得到晶体管 T_1 和 T_2 的偏流。

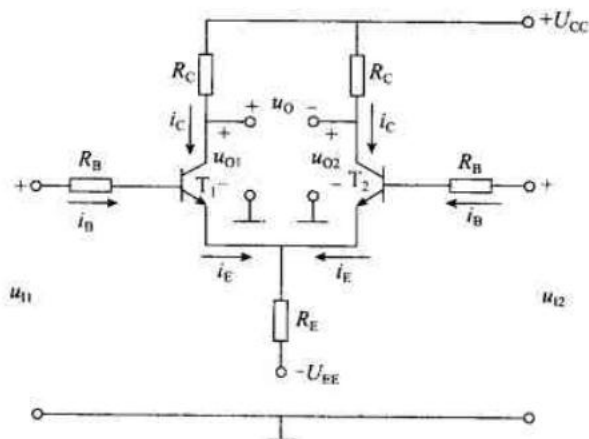


图 15.15

15.8.1 从放大电路的甲类、甲乙类和乙类三种工作状态分析效率和失真。

【解题过程】 甲类:静态工作点在交流负载线中点,静态消耗功率 $P_E = U_{CC} I_C$,有信号时一部分转换为输出功率,最大输出功率 $P_{OM} = \frac{1}{2} U_{CC} I_C$,效率 $\eta \approx 50\%$,但不失真。

乙类:静态 $I_C = 0$,电源不消耗功率。有信号时,电源供给信号半周平均值直流电流,效率最高可达 78.5%,但半周导电,信号失真严重;如果采用互补对称输出,则会引入交越失真。

甲乙类:介于甲类和乙类之间,因为有着较小的静态电流,静态也消耗较小的电源功率,动态时再加半周平均值电流的直流功率,因此效率低于乙类而高于甲类。失真则比甲类大而比乙类小,采用互补对称输出可完全消除失真。

15.8.2 在 OTL 电路中,为什么 C_L 的电容量必须足够大?

【解题过程】 C_L 作用:(1)隔直。

(2)负半周时,为管子 T_2 提供电源。

C_L 上直流电压为 $\frac{1}{2} U_{CC}$,其目的是为了保证正、负半周期,输出对称,在负半周时, C_L 放电,为了使其上电压不下降过快, C_L 应足够大。

15.9.1 场效晶体管和双极型晶体管比较有何特点?

【解题过程】 场效晶体管:

- (1)只有一种载流子参与导电,称为单极型。
- (2)电压控制型,栅极无电流。
- (3)输入电阻很大。
- (4)热稳定性好,结构简单,易于集成。

双极型晶体管:

- (1)自由电子和空穴同时参与导电。
- (2)电流控制型,有基极电流。
- (3)输入电阻很小。

(4) 集成度不如场效晶体管。

15.9.2 说明场效晶体管的夹断电压 $U_{GS(off)}$ 和开启电压 $U_{GS(th)}$ 的意义。试画出:(1)N 沟道绝缘栅增强型;(2)N 沟道绝缘栅耗尽型;(3)P 沟道绝缘栅增强型;(4)P 沟道绝缘栅耗尽型四种场效应晶体管的转移特性曲线,并总结出何者具有夹断电压和何者具有开启电压以及它们的正负。耗尽型和增强型区别在哪里?

【解题过程】 夹断电压 $U_{GS(off)}$ 是指场效晶体管的栅源电压 U_{GS} 降低到某值,使原始沟道中的载流子被复合而耗尽,沟道被夹断时的电压。

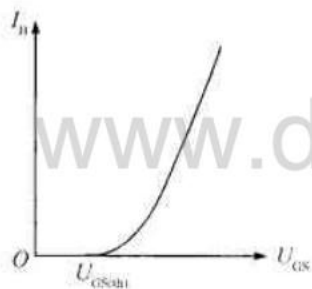
开启电压 $U_{GS(th)}$ 则是指场效晶体管原始没有导电沟道,而当栅源电压 U_{GS} 上升到某值时,开始建立导电沟道时的电压。

$U_{GS(th)}$ 出现在增强型, $U_{GS(off)}$ 则出现在耗尽型。而且在 N 沟道中, $U_{GS(th)} > 0, U_{GS(off)} < 0$, 在 P 沟道中, $U_{GS(th)} < 0, U_{GS(off)} > 0$ 。

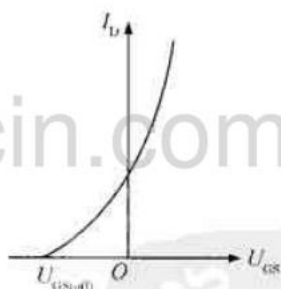
耗尽型与增强型的区别在于在 SiO_2 绝缘层中掺有正离子(N 沟道)或负离子(P 沟道),因此在 $U_{GS} = 0$ 时便都有原始导电沟道,而增强型没有。

15.9.3 试解释为什么 N 沟道增强型绝缘栅场效应晶体管中(主教材图 15.9.3),靠近漏极的导电沟道较窄,而靠近源极的较宽。

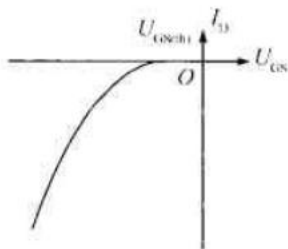
【解题过程】 $U_{GS} > U_{GS(th)}$ 时,不是源、漏极之间形成导电沟道,产生漏极电流 I_D , I_D 沿沟道产生的压降是沟道上各点与栅极间的电压不相等,削弱了栅极中正电场的作用,因此从源极到漏极沟道逐渐变窄。绝缘栅场效应管的转移特性曲线如下所示:



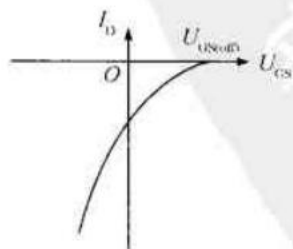
(a) N 沟道增强型



(b) N 沟道耗尽型



(c) P 沟道增强型



(d) P 沟道耗尽型

15.9.4 绝缘栅场效应晶体管的栅极为什么不能开路?

【解题过程】 因为 SiO_2 绝缘层厚度很薄,微小的感应电压便能产生很高的电场强度,以致使绝缘层击穿而损坏。为了保护绝缘层,必须短路栅极,使感应电荷被释放,故栅极不能开路。

15.9.5 比较共源极场效应晶体管放大电路和共发射极晶体管放大电路,在电路结构上有什么相似之处?为什么前者的输入电阻较高?

【解题过程】 若共源极场效应管采用分压式偏置电路,则和分压式偏置电路的晶体管共发射极放大电路在结构上是完全相似的。

因为场效应晶体管是电压控制型,栅极无电流,故输入电阻很高。

15.9.6 为什么增强型绝缘栅场效应晶体管放大电路无法采用自给偏置?

【解题过程】 在 N 沟道增强型场效应晶体管中, $U_{\text{GS(th)}} > 0$, 自给偏置只能使 $U_{\text{GS}} < 0$, 故无法开启。

在 P 沟道增强型场效应晶体管中, $U_{\text{GS(th)}} < 0$, 自给偏置只能使 $U_{\text{GS}} > 0$, 故也无法开启。

所以,增强型场效应晶体管放大器不能用自给偏置。

15.9.7 在教材图 15.9.10 所示的自给偏压偏置电路中,电阻 R_G 起何作用?如果在 $R_G = 0$ (短路) 和 $R_G = \infty$ (开路) 两种情况下,则后果如何?在教材图 15.9.11 所示的分压式偏置电路中, R_G 又起何作用?

【解题过程】 教材图 15.9.10 电路中 $R_G = 0$, 交流等效电路如图 15.16 所示, $R_i = 0$, 输入信号短路,无法工作。

$R_G = \infty$, 偏置电压无法加到栅极,且形成栅极开路,易被感应电动势击穿。

教材图 15.9.11 中电路, R_G 构成直流通路,把偏置电压加栅极上。而从交流通路上看,如图 15.17 所示, R_G 起着增大输入电阻的作用,若 R_G 短路, $r_i = R_{G1} // R_{G2} \ll R_L$, 这就失去了场效应晶体管放大电路的主要特点。

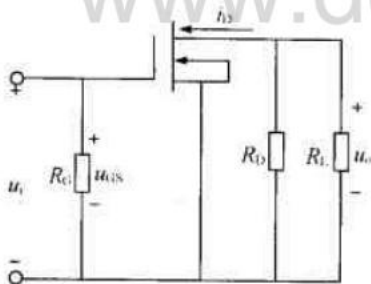


图 15.16

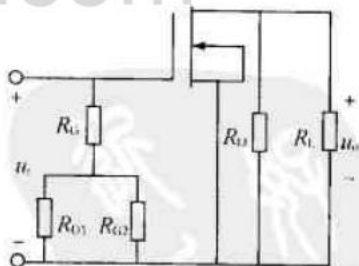


图 15.17

15.9.8 为什么在场效应晶体管低频放大电路中,输入端耦合电容 C_i 通常取得较小 ($0.01 \sim 0.047 \mu\text{F}$),而在晶体管低频放大电路中往往取得较大 (几到几十微法)?

【解题过程】 场效应晶体管的输入电阻很大,即使 C_i 取得较小,容抗 $\frac{1}{\omega C_i}$ 仍可忽略。晶体管电路输入电阻较小,只有当 C_i 很大时,其容抗 $\frac{1}{\omega C_i}$ 方可忽略。

15.3 课后习题全解

A 选择题

15.2.1 在图 15.18 中,若半 R_B 减小,则集电极电流 I_C (),集电极电位 V_C ()。

I_C : (1) 增大 (2) 减小 (3) 不变

V_C : (1) 增大 (2) 减小 (3) 不变

【分析】 用放大电路的直流通路确定静态值。

$$\text{相关公式有: } I_B = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_B} \approx \frac{U_{CC}}{R_B}$$

$$I_C = \beta I_B \quad U_{CE} = U_{CC} - I_C R_C$$

故 R_B 减小时, I_B 、 I_C 均增大,集电极电流 V_C 减小,故分别

选(1)、(2)。

15.2.2 在图 15.18 中的晶体管原处于放大状态,若将 R_B 调到零,则晶体管()。

(1) 处于饱和状态 (2) 仍处于放大状态 (3) 被烧毁

【分析】 用放大电路的直流通路确定静态值。

$R_B = 0$ 时,有 I_B 、 I_C 为无穷大,从而晶体管会被烧毁,故选(3)。

15.2.3 在图 15.18 中, $U_{CC} = 12\text{V}$, $R_C = 3\text{k}\Omega$, $\beta = 50$, U_{BE} 可忽略,若使 $U_{CE} = 6\text{V}$,则 R_B 应为()。

(1) $360\text{k}\Omega$ (2) $300\text{k}\Omega$ (3) $600\text{k}\Omega$

【分析】 用放大电路的直流通路确定静态值。

将 $U_{CC} = 12\text{V}$, $R_C = 3\text{k}\Omega$, $\beta = 50$, $U_{CE} = 6\text{V}$

代入相应公式可分别求得: $I_C = 2\text{mA}$

$$\therefore I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{2}{50} = \frac{U_{CC}}{R_B} \Rightarrow R_B = 300\text{k}\Omega, \text{ 故选(2)。}$$

15.2.4 在上题中,若使 $I_C = 1.5\text{mA}$,则 R_B 应为()。

(1) $360\text{k}\Omega$ (2) $400\text{k}\Omega$ (3) $600\text{k}\Omega$

【分析】 用放大电路的直流通路确定静态值。

$$I_C = 1.5\text{mA}, \text{ 有: } I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{1.5}{50} = \frac{U_{CC}}{R_B} = \frac{12}{R_B}$$

$$\therefore R_B = 400\text{k}\Omega, \text{ 故选(2)。}$$

15.3.1 分析图 15.19 中各个交流分量的相位: u_o 与 u_i (); u_o 与 i_e (); i_b 与 i_e ()。

u_o 与 u_i : (1) 同相 (2) 反相 (3) 相位任意

u_o 与 i_e : (1) 同相 (2) 反相 (3) 相位任意

i_b 与 i_e : (1) 同相 (2) 反相 (3) 相位任意

【分析】 图解法对放大电路进行动态分析。

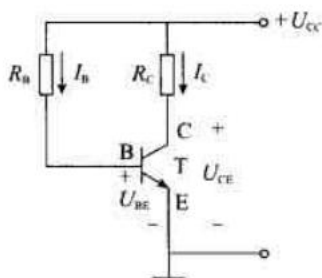


图 15.18

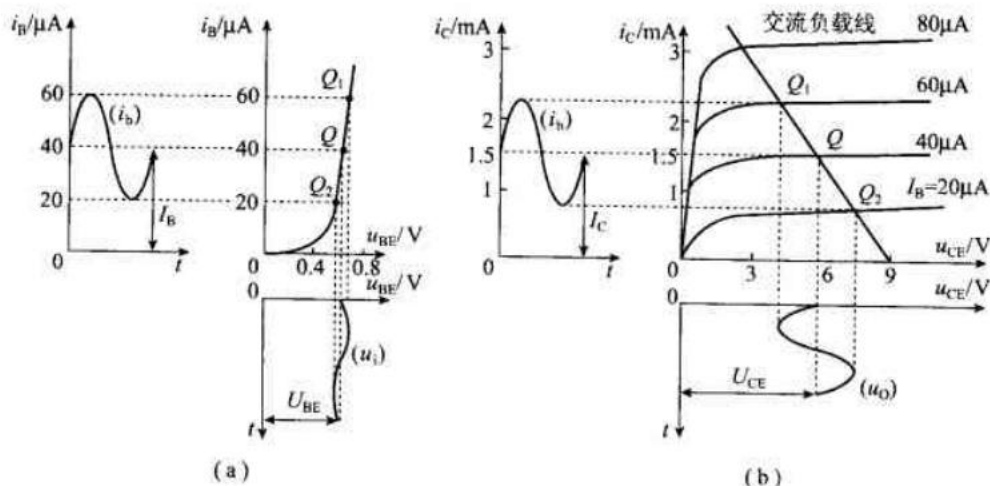


图 15.19

由图 15.19 分析:

(1) 输入电压信号 u_i 和 u_o 相位相反。

(2) i_b 与 i_c 相位相同。

(3) u_o 与 i_c 相位相反, 故分别选 (2)、(2)、(1)。

15.3.2 在图 15.20 所示的放大电路中, 若将偏置电阻 R_B 的阻值调小, 而晶体管仍工作于放大区, 则电压放大倍数 $|A_u|$ 应()。

- (1) 减小
- (2) 增大
- (3) 基本不变

【分析】 电压放大倍数的计算:

$$|A_u| = \beta \cdot \frac{R'_L}{r_{be}} = \frac{R_C // R_L}{200 + (\beta + 1) \frac{20\text{mV}}{I_E}}$$

R_B 减小时 I_b 增大, I_E 增大, 故 $|A_u|$ 增大, 选 (2)。

15.3.3 在共发射极交流放大电路中, () 是正确的。

- (1) $\frac{u_{BE}}{i_b} = r_{be}$
- (2) $\frac{U_{BE}}{I_B} = r_{be}$
- (3) $\frac{u_{be}}{i_b} = r_{be}$

【分析】 晶体管微变电路中输入电阻的求法。

共射极交流放大电路中, 当 U_{CE} 为常数时 $r_{be} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B} = \frac{\Delta U_{BE}}{i_b}$, 故选 (3)。

15.4.1 在图 15.21 所示的分压式偏置放大电路中, 通常偏置电阻 R_{B1} () R_{B2} 。

- (1) >
- (2) <
- (3) \approx

【分析】 分压式偏置放大电路, 静态工作点的稳定性条件。

为保证静态工作点稳定, 一般 $R_{B1} > R_{B2}$, 故选 (1)。

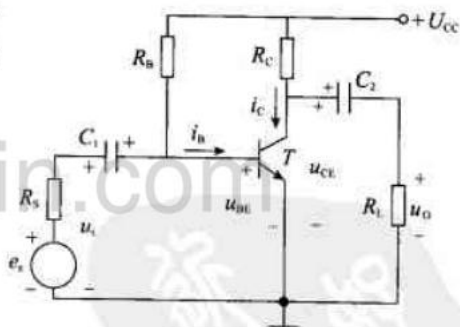


图 15.20

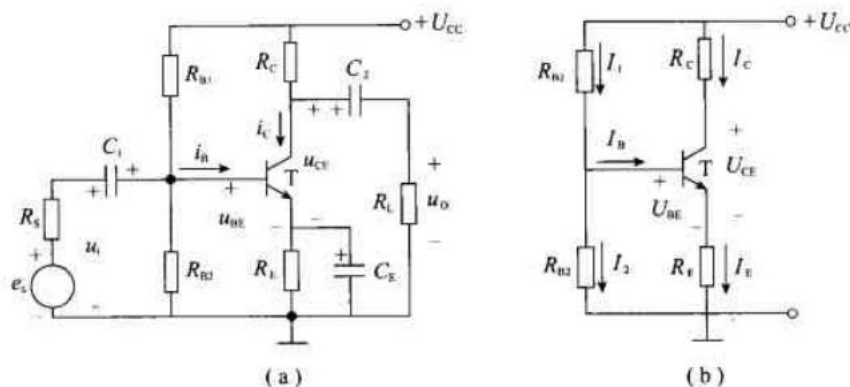


图 15.21

15.4.2 在图 15.21 所示的放大电路中,若只将交流旁路电容 C_E 除去,则电压放大倍数 $|A_u|$ ()。

- (1) 减小 (2) 增大 (3) 不变

【分析】 固定偏置放大电路中交流旁路电容的作用。

当发射极电流交流 i_e 流过 R_E 时,会产生交流电压降,从而降低电压放大倍数,故选(1)。

15.6.1 射极输出器()。

- (1) 有电流放大作用,没有电压放大作用
(2) 有电流放大作用,没有电压放大作用
(3) 没有电流放大作用,也没有电压放大作用

【分析】 射极输出器的特点。

由射极输出器微变等效电路可得:

$$U_o = R'_L \dot{I}_e = (1 + \beta) R'_L \dot{I}_b$$

$$\dot{U}_i = r_{be} \dot{I}_b + (1 + \beta) R'_L \dot{I}_b$$

由于 $r_{be} \ll (1 + \beta) R'_L$ $U_o \approx U_i$

虽然没有电压放大作用,但因 $I_e = (1 + \beta) I_b$,仍有一定的电流放大和功率放大作用,故选(1)。

15.7.1 在图 15.22 的差分放大电路中,抑制电阻 R_E 对()起抑制作用。

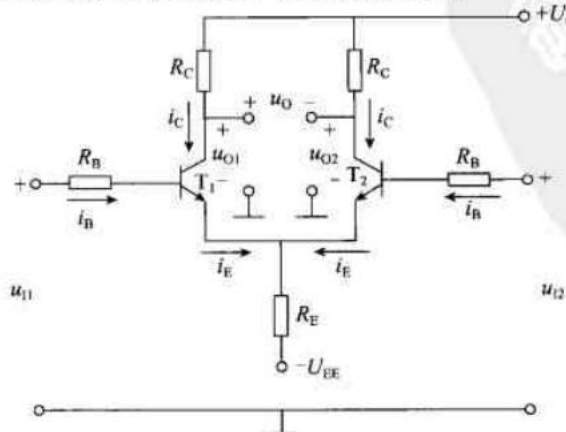


图 15.22

(1) 差模信号

(2) 共模信号

(3) 差模信号和共模信号

【分析】 差分放大电路动态分析。

(1) 在共模信号作用下,完全对称的差分放大电路输出电压为 0,对共模信号没有放大作用。

(2) 差模信号使差分放大电路两管的集电极电流一增一减,变化量相等,通过 R_c 中电流近于不变,故 R_c 对差模信号不起作用,故选(2)。15.7.2 在图 15.22 的双端输入—双端输出的差分放大电路中,如果 u_{i1} 和 u_{i2} 都是正值,当 $u_{i1} > u_{i2}$ 时,则 u_o ()。(1) > 0 (2) < 0 (3) $= 0$ **【分析】** 差分放大电路的动态分析。双端输出电压 $U_o = A_{d1}U_{i1} - A_{d2}U_{i2} = A_{d1}(U_{i1} - U_{i2}) > 0$,故选(1)。

15.8.1 在甲类工作状态的功率放大电路中,在不失真的条件下增大输入信号,则电源供给的功率(),管耗()。

电源供给的功率:(1) 增大

(2) 不变

(3) 减小

管耗:

(1) 增大

(2) 减小

(3) 不变

【分析】 互补对称功率放大电路中,甲类工作状态特点。甲类工作状态不记有无输入信号,电源供给功率不变,无输入信号时,电源功率全消耗在管子和电阻上,有输入信号时,一部分转为输出功率 P_o ,信号越大,输出功率越大。故分别选(2),(2)。

15.9.1 场效晶体管的控制方式为()。

(1) 输入电流控制输出电压

(2) 输入电压控制输出电压

(3) 输入电压控制输出电流

【分析】 场效应晶体管的特点。

场效应晶体管是一种利用电场效应来控制其电流大小的半导体器件,故选(3)。

B 基 本 题

15.2.5 晶体管放大电路如图 15.23(a) 所示,已知 $U_{CC} = 12V$, $R_c = 3k\Omega$, $R_b = 240k\Omega$, 晶体管的 $\beta = 40$ 。(1) 试用直流通路估算各静态值 I_B , I_C , U_{CE} ; (2) 如晶体管的输出特性如图 15.23(b) 所示,试用图解法作放大电路的静态工作点; (3) 在静态时 ($u_i = 0$) C_1 和 C_2 上的电压各为多少?并标出极性。

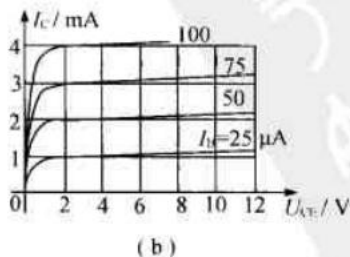
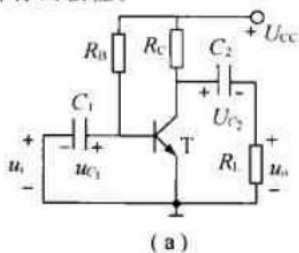


图 15.23

【逻辑推理】 直流通路静态工作点估计和计算。

【解题过程】 (1) 如图 15.24(a) 所示的直流通路:

C_1, C_2 上的电压极性标在原图。

$$\text{由 } I_B = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_B} = \frac{12 - 0.7}{240} \approx 50 \times 10^{-6} \text{ A} \approx 50 \mu\text{A}$$

$$I_C = \beta I_B = 40 \times 50 = 2 \text{ mA}$$

$$U_{CE} = U_{CC} - I_C R_C = 12 - 2 \times 3 = 6 \text{ V}$$

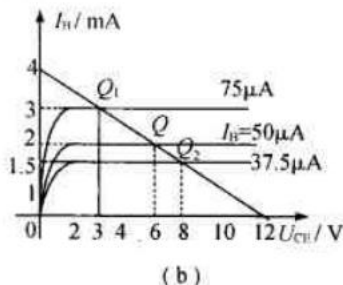
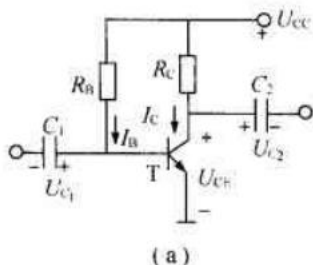


图 15.24

(2) 由输出特性作出直流负载线 $U_{CE} = U_{CC} - I_C R_C$

已知: $I_C = 0, U_{CE} = 12 \text{ V}, U_{CE} = 0$ 时, $I_C = \frac{U_{CC}}{R_C} = \frac{12}{3} = 4 \text{ mA}$

过(0,12), (4,0) 两点, 于是可作直线如图 15.24(b) 所示, 即为直流负载线。

由图可知 $I_B = 50 \mu\text{A}$ 时, Q 点(2,6), 即 $I_C = 2 \text{ mA}, U_{CE} = 6 \text{ V}$ 。

(3) 静态时, $U_{C1} = U_{BE}, U_{C2} = U_{CE} = 6 \text{ V}$ 。极性在原图 15.23(a) 中。

15.2.6 在图 15.23(a) 中, 若 $U_{CC} = 10 \text{ V}$, 今要求 $U_{CE} = 5 \text{ V}, I_C = 2 \text{ mA}$, 试求: R_C 和 R_B 的阻值。设晶体管的 $\beta = 40$ 。

【逻辑推理】 用全电路欧姆定律求解基极、集电极电阻。

【解题过程】 由于 $U_{CE} = U_{CC} - I_C R_C$

$$R_C = \frac{U_{CC} - U_{CE}}{I_C} = \frac{10 - 5}{2} = 2.5 \text{ k}\Omega$$

由于 $I_C = \beta I_B$,

$$I_B = \frac{1}{\beta} I_C = \frac{2}{40} = 50 \times 10^{-3} \text{ mA} = 50 \mu\text{A}$$

$$R_B = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{I_B} = \frac{10 - 0.7}{50} = 200 \text{ k}\Omega$$

15.2.7 在图 15.25 所示电路中, 晶体管是 PNP 型锗管。

(1) U_{CC} 和 C_1, C_2 的极性如何考虑? 请在图上标出; (2) 设 $U_{CC} = -12 \text{ V}, R_C = 3 \text{ k}\Omega, \beta = 75$, 如果要将静态值 I_C 调到 1.5 mA , 问 R_B 应调到多大? (3) 在调整静态工作点时, 如不慎将 R_B 调到零, 对晶体管有无影响? 为什么? 通常采取何种措施来防止发生这种情况?

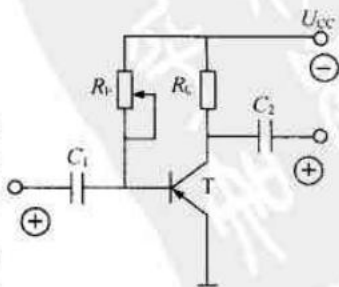


图 15.25

【逻辑推理】 R_B 在共射放大电路的作用,是给出直流工作点 Q 。

【解题过程】 (1) PNP 三极管的电源极性和 NPN 型三极管相反,故电容 C_1 和 C_2 极性和图 15.25 中所示相反,用 \ominus 或 \oplus 标明在图 15.25 中。

$$(2) \text{ 由于 } I_C = \beta I_B, \text{ 于是 } I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{1.5}{75} = 20 \times 10^{-3} \text{ mA} = 20 \mu\text{A}$$

$$\text{此时 } R_B = \frac{-U_{CC} + U_{BE}}{I_B} \approx \frac{12}{20} = 600 \text{ k}\Omega$$

(3) 若 $R_B = 0$ 时, $U_{BE} = 12 \text{ V} \gg 0.7 \text{ V}$ (硅管) 或 $U_{BE} = 12 \text{ V} \gg 0.3 \text{ V}$ (锗管), 于是 I_B 大大增大,使 PN 结发热而损坏。一般在偏置电路中,给 R_B 再串联一电阻。

15.3.4 利用微变等效电路计算题 15.2.1 放大电路的电压放大倍数 A_u 。(1) 输出端开路;
(2) $R_L = 6 \text{ k}\Omega$, 设 $r_{be} = 0.8 \text{ k}\Omega$ 。

【知识点窍】 微变等效电路,欧姆定律。

【逻辑推理】 用交流小信号模型求解 A_u 电路,如图 15.26 所示。

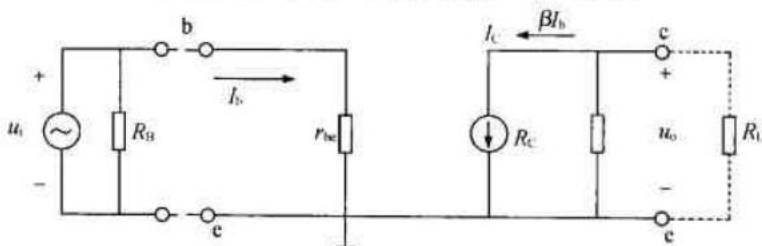


图 15.26

【解题过程】 (1) 输出端开路:

$$u_o = -I_C R_C, \quad I_C = \beta I_b = \beta \frac{u_i}{r_{be}}$$

于是, $u_o = -\beta \frac{u_i}{r_{be}} \cdot R_C$, 于是 $A_u = \frac{u_o}{u_i} = -\frac{\beta R_C}{r_{be}} = -150$

(2) 输出端有负载 R_L

$$U_o = -I_C (R_C // R_L)$$

$$\text{所以 } u_o = -\beta \frac{u_i}{r_{be}} (R_L // R_C)$$

$$\text{于是 } A_u = \frac{u_o}{u_i} = -\frac{\beta}{r_{be}} (R_L // R_C) = -\frac{40}{0.8} \times \frac{3 \times 6}{3+6} = -100$$

15.3.5 在图 15.24(a) 图中,已知 $U_{CC} = 12 \text{ V}$, $R_C = 3 \text{ k}\Omega$, $r_{be} = 1.4 \text{ k}\Omega$, 晶体管的 $\beta = 100$ 。

(1) 现已测得静态得 $U_{CE} = 6 \text{ V}$, 试估算 R_B 为多少千欧? (2) 若测得 \dot{U}_i 和 \dot{U}_o 的有效值分别为 1 mV 和 100 mV , 则 R_L 约为多少千欧?

【知识点窍】 放大电路动态分析基本考查。

$$\text{【解题过程】 (1) } r_{be} = 200 \Omega + (1 + \beta) \frac{26 \text{ mV}}{(1 + \beta) I_B} = 1.4 \text{ k}\Omega$$

$$\therefore I_B = \frac{26 \text{ mV}}{1.2 \text{ k}\Omega} = \frac{U_{CC}}{R_B} \Rightarrow R_B = 553.9 \text{ k}\Omega$$

$$(2) |A| = 100 = \beta \frac{R'_c}{r_{be}} = 100 \times \frac{R_c // R_L}{1.4 \text{ k}\Omega}$$

$$\therefore R_L = 2.66 \text{ k}\Omega$$

15.3.6 已知某放大电路的输出电阻为 $3.3 \text{ k}\Omega$, 如图 15.27 所示, 输出端的开路电压的有效值 $U_{oc} = 2 \text{ V}$, 试问该放大电路接有负载电阻 $R_L = 5.1 \text{ k}\Omega$, 输出电压将下降到多少?

【知识点窍】微变等效模型。

【逻辑推理】微变等效模型求交流小信号问题。

【解题过程】 $\dot{U}_{o0} = -\beta \dot{I}_b R_c, \beta I_b = \frac{-U_{o0}}{R_c}$

如图 15.27 所示。

$$\dot{U}_{oi} = -\beta \dot{I}_b (R_c // R_L), \beta I_b = -\frac{U_{oi}}{R_c // R_L}$$

于是

$$\frac{U_{o0}}{R_c} = \frac{R_c + R_L}{R_c R_L} U_{oi}$$

$$U_{oi} = \frac{R_L}{R_c + R_L} U_{o0} = \frac{5.1}{3.3 + 5.1} \times 2 = 1.21 \text{ V}$$

15.3.7 在图 15.28 所示放大电路中, 已知 $U_{CC} = 12 \text{ V}$, $R_c = 2 \text{ k}\Omega$, $R_L = 2 \text{ k}\Omega$, $R_B = 100 \text{ k}\Omega$, $R_F = 1 \text{ M}\Omega$, 晶体管 $\beta = 51$, $U_{BE} = 0.6 \text{ V}$ 。

(1) 当将 R_F 调到零时, 试求静态值 (I_B, I_C, U_{CE}), 此时晶体管工作在何种状态?

(2) 当将 R_F 调到最大时, 试求静态值, 此时晶体管工作在何种状态?

(3) 若使 $U_{CE} = 6 \text{ V}$, 应将 R_F 调到何值? 此时晶体管工作在何种状态?

(4) 设 $u_i = U_m \sin \omega t$, 试画出上述三种状态下对应的输出电压 u_o 的波形。如产生饱和失真或截止失真, 应如何调节 R_F 使不产生失真?

【知识点窍】放大电路交直流分析。

【解题过程】 (1) $I_B = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_B} = 0.114 \text{ mA}$

$$I_C = \beta I_B = 6 \text{ mA}$$

$$U_{CE} = U_{CC} - I_C \cdot R_c = 0 \text{ V}$$

(2) $I_B = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_c + R_F} = 10 \mu\text{A} \quad I_C = \beta I_B = 0.5 \text{ mA}$

$$U_{CE} = U_{CC} - I_C R_c = 11 \text{ V}$$

(3) $U_{CE} = U_{CC} - I_C \cdot R_c = 6 \text{ V} \Rightarrow I_C = 3 \text{ mA}$

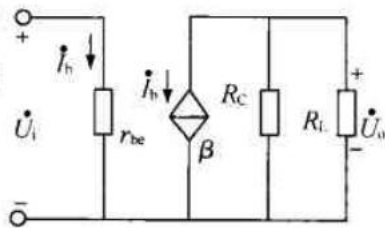


图 15.27

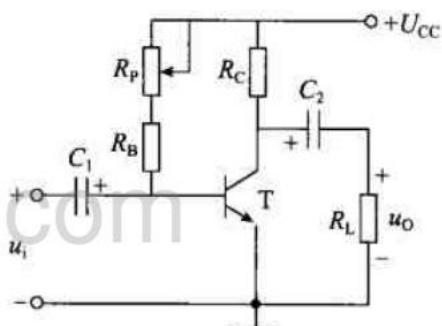


图 15.28

$$\therefore I_B = \frac{I_C}{\beta} = 0.059 \text{ mA}$$

$$I_B = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_B + R_P} = 0.0588 \text{ mA}$$

$$\therefore R_P = 93.9 \text{ k}\Omega$$

(4) 略。

15.4.3 试判断:图 15.29 所示各个电路能不能放大交流信号?为什么?

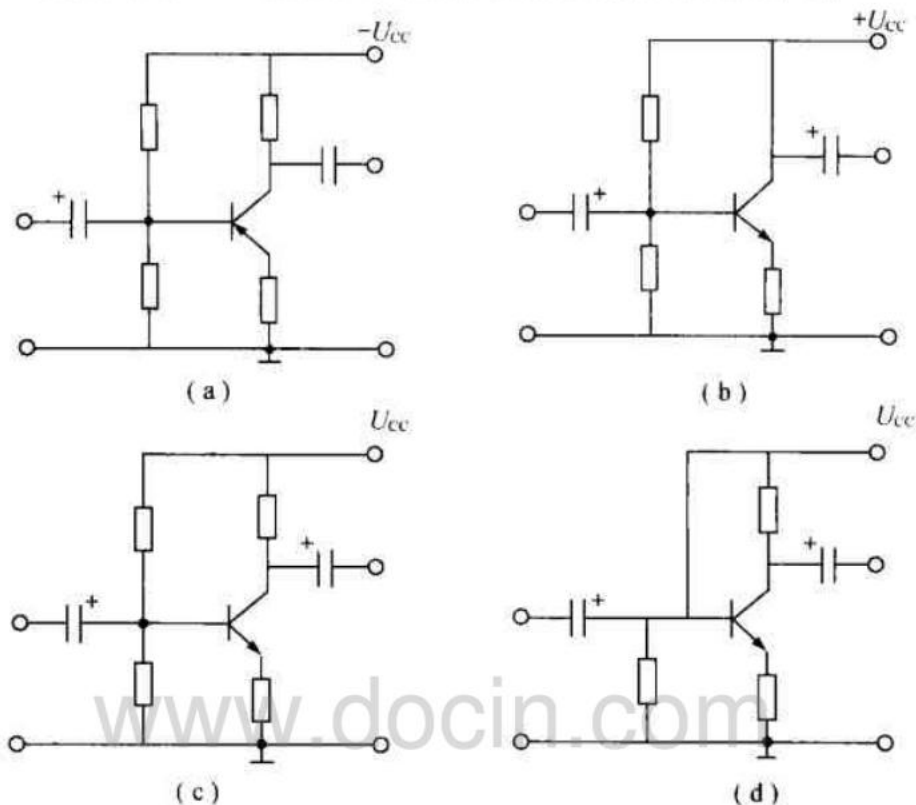


图 15.29

【知识点窍】 放大电路分析。

【解题过程】 电路(a)和(c)均可以放大交流信号。

电路(b)和(d)均不能放大交流信号,因为电路(b)没有直流负载电阻,集电极电位恒为 U_{CC} ,交流通路中集电极对地短路。而电路(d)中偏置电阻为零,晶体管饱和,其交流通路中输入端对地短路,信号无法输入到三极管中,且使信号源短路。

15.4.4 在图 15.30 所示的分压式偏置放大电路中,已知 $U_{CC} = 15 \text{ V}$, $R_C = 3 \text{ k}\Omega$, $R_E = 2 \text{ k}\Omega$, $I_C = 1.55 \text{ mA}$, $\beta = 100$,试估算 R_{B1} 和 R_{B2} (取附录 H 标称值)。

【知识点窍】 分压式偏置放大电路,欧姆定律,基尔霍夫电压定律。

【逻辑推理】 R_{B1} , R_{B2} 的作用是稳定直流偏置电压,使 $U_{BE} = 0.6 \text{ V}$ 。

【解题过程】 由图 15.30(b) 先估算晶体管基极电位 V_B , 设 $U_{BE} \approx 0.6 \text{ V}$ 。

$$V_B = R_E I_E + U_{BE} \approx (2 \times 1.55 + 0.6) \text{ V} = 3.7 \text{ V}$$

R_{B1} 和 R_{B2} 分压电路的分压比 $\eta = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}}$, 应满足 $V_B = \eta U_{CC}$, 即

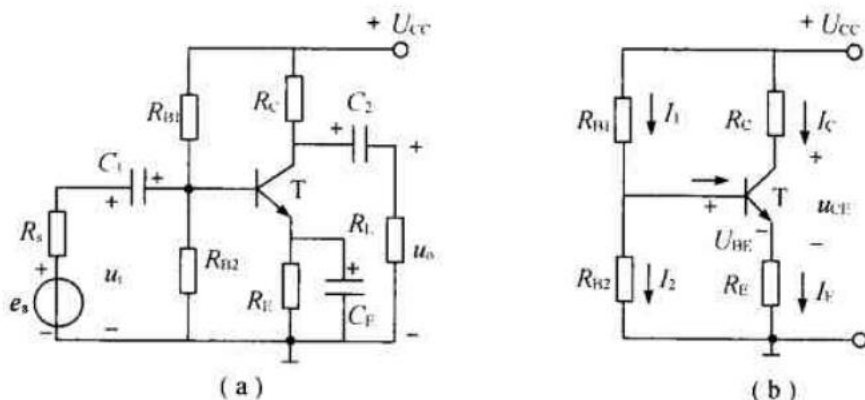


图 15.30

$$\eta = \frac{V_B}{U_{CC}} = \frac{3.7}{15} \approx 0.25$$

选 $R_{B1} = 3R_{B2}$ 可满足这一比例关系,同时 R_{B1} 和 R_{B2} 的选取还要满足 $I_2 > (5 \sim 10)I_B$ 的要求。电路中的 $I_B = I_C/\beta = 31\mu\text{A}$,考虑到 $I_2 = V_E/R_{B2}$,参照附录 H 中电阻标称值,可选择多组电阻值搭配来实现。比如(1) $R_{B1} = 30\text{k}\Omega$, $R_{B2} = 10\text{k}\Omega$; (2) $R_{B1} = 33\text{k}\Omega$, $R_{B2} = 11\text{k}\Omega$; (3) $R_{B1} = 39\text{k}\Omega$, $R_{B2} = 13\text{k}\Omega$ 等。

15.4.5 在教材图 15.4.1 所示的分压式偏置放大电路中,已知 $U_{CC} = 24\text{V}$, $R_C = 3.3\text{k}\Omega$, $R_E = 1.5\text{k}\Omega$, $R_{B1} = 33\text{k}\Omega$, $R_{B2} = 10\text{k}\Omega$, $R_L = 5.1\text{k}\Omega$,晶体管的 $\beta = 66$,并设 $R_s \approx 0$ 。(1)试求静态值 I_B , I_C 和 U_{CE} ; (2)画出微变等效电路; (3)计算晶体的输入电阻 r_{be} ; (4)计算电压放大倍数 A_u ; (5)计算放大电路输出端开路时的电压放大倍数,并说明负载电阻 R_L 对电压放大倍数的影响; (6)估算放大电路的输入电阻和输出电阻。

【知识点窍】 分压式偏置放大电路,微变等效模型,基尔霍夫电压定律。

【逻辑推理】 直流通路如教材图 15.4.1(b) 所示。

【解题过程】 (1) $I_B \ll I_{R_{B1}} = I_{R_{B2}}$

$$\text{于是 } V_B = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} \cdot U_{CC} = \frac{10}{33 + 10} \times 24 = 5.58\text{V}$$

$$V_B = I_B(1 + \beta) \cdot R_E + U_{BE}$$

$$\text{于是, } I_B = \frac{V_B - U_{BE}}{(1 + \beta)R_E} = \frac{5.58 - 0.6}{67 \times 1.5} \approx 46\mu\text{A}$$

$$I_C = \beta I_B = 66 \times 46\mu\text{A} = 3.04\text{mA}$$

$$U_{CE} = U_{CC} - I_C R_C - I_E R_E = 24 - 3.04 \times 3.3 - 3.08 \times 1.5 = 9.35\text{V}$$

(2) 微变等效电路如图 15.31 所示。

$$(3) \quad r_{be} = 200 + (1 + \beta) \frac{26}{I_E} = 200 + 67 \times \frac{26}{3.08} \approx 0.766\text{k}\Omega$$

$$(4) \quad \dot{U}_o = -\beta \dot{I}_b (R_C \parallel R_L) = -\beta \dot{I}_b R'_L$$

$$R'_L = R_C \parallel R_L$$

$$\dot{U}_i = \dot{I}_b r_{be}$$

于是

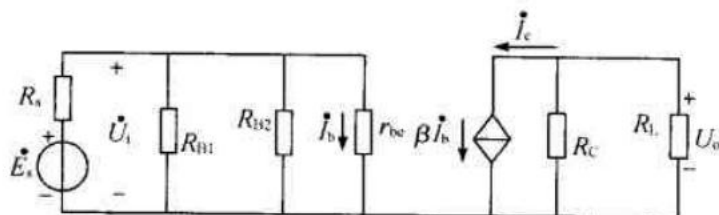


图 15.31

$$A_u = \frac{U_o}{U_i} = -\frac{\beta R'_L}{r_{be}} = -\frac{66}{0.766} \times \frac{3.3 \times 5.1}{3.3 + 5.1} \approx -173$$

(5) 同理: $\dot{U}_o = -\beta \dot{I}_b R_C$

$$A_u = \frac{U_o}{U_i} = -\frac{\beta R_C}{r_{be}} = -\frac{66}{0.766} \times 3.3 \approx -284$$

显然, R_L 的作用使 A_u 下降, 使交流负载总电阻变小。

(6) 输入电阻为

$$r_i = R_{B1} // R_{B2} // r_{be} = 33 // 10 // 0.766 \approx 0.696 \text{ k}\Omega$$

输出电阻为

$$r_o = R_C = 3.3 \text{ k}\Omega$$

15.4.6 在上题中, 设 $R_s = 1 \text{ k}\Omega$, 试计算: 输出端接有负载时的电压放大倍数 $A_u = \dot{U}_o / \dot{U}_i$ 和 $A_{us} = \dot{U}_o / \dot{E}_s$, 并说明信号源内阻 R_s 对电压放大倍数的影响。

【知识点窍】 放大电路分析。

【逻辑推理】 $A_u / A_{us} = \dot{E}_s / \dot{U}_i = \frac{r_i + R_s}{r_i}$, $A_{us} = \frac{r_i}{r_i + R_s} A_u$ 。

【解题过程】 当 $R_s = 1 \text{ k}\Omega$ 时 $\dot{U}_i = \frac{r_i}{r_i + R_s} \dot{E}_s$

因此, $\frac{U_i}{E_s} = \frac{r_i}{r_i + R_s}$ 于是

$$A_{us} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{E}_s} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{\dot{U}_i}{\dot{E}_s} = \frac{r_i}{r_i + R_s} A_u$$

已知: $A_u = -173$, $r_i = 0.696 \Omega$, $R_s = 1 \text{ k}\Omega$, 所以

$$A_{us} = \frac{0.696}{0.696 + 1} \times (-173) \approx -71 \ll A_u$$

由 $A_{us} = \frac{r_i}{r_i + R_s} \cdot A_u$ 可知, r_i 一定时信号源内阻 R_s 愈大, 电压放大倍数愈小。

15.4.7 在上图中, 如将图 15.32 中的发射极交流旁路电容 C_E 除去。(1) 试问静态值有无变化?(2) 画出微变等效电路;(3) 计算电压放大倍数 A_u , 并说明发射极电阻 R_E 对电压放大倍数的影响;(4) 计算放大电路的输入电阻和输出电阻。

【解题过程】 (1) 去掉旁路电容后静态值无变化。

(2) 微变等效电路如图解 15.32 所示。

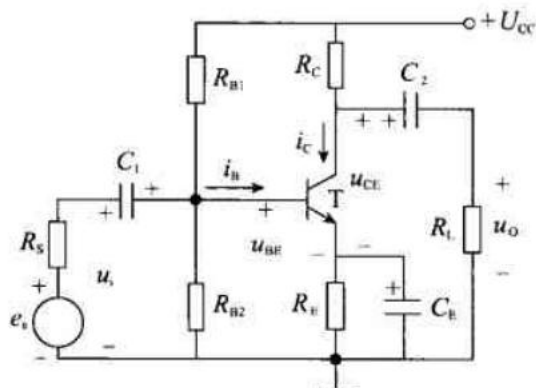
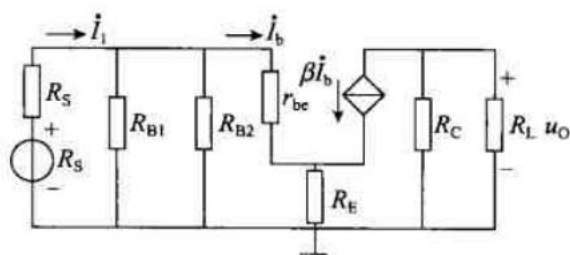


图 15.32



图解 15.32

$$(3) A_u = \frac{u_o}{u_i} = -\beta \frac{R'_L}{r_{be}(1+\beta)R_E} = -66 \times \frac{2}{0.72 + 67 \times 1.5} = -1.3$$

∴ 发射极电阻 R_E 降低了电压放大倍数。

$$(4) \text{输入电阻 } r_i = R_{B1} // R_{B2} // [r_{be} + (1+\beta)R_E] = 33 // 10 // [0.72 + 67 \times 1.5] = 7.13 \text{ k}\Omega$$

$$\text{输出电阻 } r_o \approx R_C = 3.3 \text{ k}\Omega$$

15.4.8 在图 15.32 所示的放大电路中,用万用表直流电压挡测量晶体管各个极的电位(对“地”电压)或 U_{BE} 和 U_{CE} 以判断下列故障:(1) R_{B1} 开路;(2) R_{B1} 短路;(3) R_E 开路;(4) C_E 击穿;(5)BE 结开路;(6)BE 结击穿;(7)CE 间击穿。

【解题过程】 (1) R_{B1} 开路, $u_{BE} = U_{CC}$

(2) R_{B1} 短路,基极对地电压 $V_B = U_{CC}$

(3) R_E 开路,集电极电压 $V_C = U_{CC}$

(4)CE 被击穿,发射极电压 $V_E = 0$

(5)BE 结开路, $V_B \neq 0, V_E = 0$

(6)BE 结击穿, $u_{BE} = 0$

(7)CE 结击穿, $u_{CE} = 0$

15.6.2 在图 15.33 所示的射极输出器中,已知 $R_s = 50 \Omega$, $R_{B1} = 100 \text{ k}\Omega$, $R_{B2} = 30 \text{ k}\Omega$, $R_E = 1 \text{ k}\Omega$, 晶体管的 $\beta = 50$, $r_{be} = 1 \text{ k}\Omega$ 。试求 A_u , r_i 和 r_o 。

【知识点窍】 射极跟随器。

【逻辑推理】 射极跟随器特点:① $A_u \approx 1$ 。② r_i 较大。③ r_o 较小,用于耦合。

【解题过程】 输入电阻

$$r_i = R_{B1} // R_{B2} // (r_{be} + R'_E)$$

$$R'_E = \frac{\dot{U}_E}{\dot{I}_i} = \frac{(1+\beta)\dot{I}_i R_E}{\dot{I}_i} = (1+\beta)R_E$$

于是,输入电阻

$$r_i = R_{B1} // R_{B2} // [r_{be} + (1+\beta)R_E] = 100 // 30 // [1 + 51 \times 1] \approx 16 \text{ k}\Omega$$

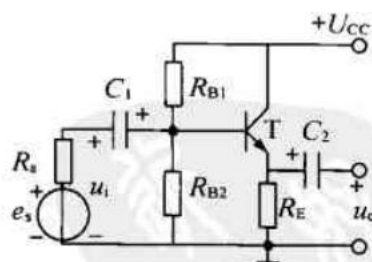


图 15.33

将 e_s 短接, 并设输出端电压为 \dot{U} , 则

$$\dot{I}_E = \frac{\dot{U}}{R_E}$$

$$\dot{I}_b = \frac{\dot{U}_o}{r_{be} + R_s // R_{B1} // R_{B2}}$$

所以总电流

$$\dot{I}_o = \dot{I}_E + \dot{I}_b + \beta \dot{I}_b = \dot{U}_o \left(\frac{1}{R_E} + \frac{\beta + 1}{r_{be} + R_s // R_{B1} // R_{B2}} \right)$$

因此, 输出电阻

$$\begin{aligned} \dot{R}_o &= \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_{mo}} = \frac{1}{\frac{1}{R_E} + \frac{1 + \beta}{r_{be} + R_s // R_{B1} // R_{B2}}} = R_E // \frac{r_{be} + R_s // R_{B1} // R_{B2}}{(1 + \beta)} \\ &= 1 // \frac{1 + 0.05 // 100 // 30}{51} \approx 20 \Omega \end{aligned}$$

已知: $A_u = \frac{u_o}{u_i}$, $\dot{U}_o = (1 + \beta) \dot{I}_b R_E$, 所以

$$A_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{(1 + \beta) R_E}{r_{be} + (1 + \beta) R_E}$$

由分压公式: $\frac{\dot{U}_i}{e_s} = \frac{r_i}{r_i + R_s}$, 所以

$$\begin{aligned} A_{us} &= \frac{\dot{U}_o}{\dot{e}_s} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{e}_s} \cdot \frac{\dot{U}_i}{\dot{U}_i} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \cdot \frac{\dot{U}_i}{\dot{e}_s} = \frac{r_i}{R_s + r_i} A_u = \frac{r_i}{R_s + r_i} \cdot \frac{(1 + \beta) \cdot R_E}{r_{be} + (1 + \beta) R_E} \\ &= \frac{16}{0.05 + 16} \times \frac{51 \times 1}{1 \times 51 + 1} = 0.98 \end{aligned}$$

15.6.3 两级放大电路如图 15.34 所示, 晶体管的 $\beta_1 = \beta_2 = 40$, $r_{be1} = 1.37 \text{ k}\Omega$, $r_{be2} = 0.89 \text{ k}\Omega$ 。(1) 画出直流通路, 并估算各级电路的静态值(计算 U_{CE1} 时忽略 I_{B2}); (2) 画出微变等效电路, 并计算 A_{u1} , A_{u2} 和 A_u ; (3) 计算 r_i 和 r_o 。

【知识点窍】多级放大电路的计算方法及射极输出的相关等效电路及计算公式。

【逻辑推理】由放大电路特点知前级为共发射极放大电路, 后级为射极输出器, 题目中指出 I_{B2} 对 U_{CE1} 无影响, 即各级放大电路静态工作点可以单独考虑。

【解题过程】 (1) 前级静态值

$$U_{B1} = \frac{20}{33 + 8.2} \times 8.2 \text{ V} = 4 \text{ V}$$

$$I_{C1} \approx I_{E1} = \frac{4 - 0.6}{3 + 0.39} \text{ mA} = 1 \text{ mA}$$

$$I_{B1} \approx \frac{1}{40} \text{ mA} = 25 \mu\text{A}$$

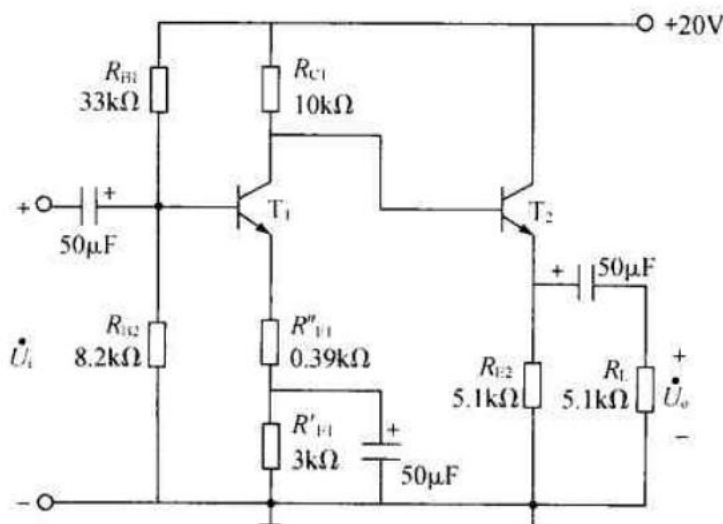


图 15.34

$$U_{CE1} \approx 20 - (10 + 3 + 0.39) \times 1 = 6.6 \text{ V}$$

后级静态值

$$I_{C2} \approx I_{E2} = \frac{U_{C1} - U_{BE2}}{R_{E2}} = \frac{(20 - 10 \times 1) - 0.6}{5 - 1} = 1.8 \text{ mA}$$

$$I_{B2} = \frac{1.8}{40} \text{ mA} = 45 \mu\text{A}$$

$$U_{CE2} = 20 - 5.1 \times 1.8 = 10.8 \text{ V}$$

(2) 前级电压放大倍数

$$A_{u1} = -\beta_1 \frac{R'_{L1}}{r_{be1} + (1 + \beta_1)R'_{E1}} = -40 \times \frac{9.1}{1.37 + (1 + 40) \times 0.39} = -21$$

式中

$$R'_{L1} = R_{C1} \parallel [r_{be2} + (1 + \beta_2) \cdot \frac{R_{E2} R_L}{R_{E2} + R_L}]$$

后级电压放大倍数

$$A_{u2} = \frac{(1 + \beta_2)R'_L}{r_{be2} + (1 + \beta_2)R'_L} = \frac{(1 + 40) \times 2.5}{0.89 + (1 + 40) \times 2.5} = 0.99$$

两级电压放大倍数

$$A_u = A_{u1} \cdot A_{u2} = -21 \times 0.99 = -20.8$$

$$(3) r_i = r_{i1} = R_{B1} \parallel R_{B2} \parallel [r_{be} + (1 + \beta_1)R'_{E1}] = 4.77 \text{ k}\Omega$$

$$r_o = r_{o2} \approx \frac{r_{be2} + R_{C1}}{\beta_2} = \frac{0.89 + 10}{40} \text{ k}\Omega = 272 \Omega$$

前级的集电极电阻 R_{C1} 即为后级的基极电阻。

从本例的两级放大电路看,提高了输入电阻,降低了输出电阻。

15.6.4 在图 15.35 所示电路中, $U_{CC} = 12 \text{ V}$, $R_C = 2 \text{ k}\Omega$, $R_E = 2 \text{ k}\Omega$, $R_B = 300 \text{ k}\Omega$, 晶体管的 $\beta = 50$ 。电路有两个输出端。试求:

$$(1) \text{ 电压放大倍数 } A_{u1} = \frac{\dot{U}_{o1}}{\dot{U}_i} \text{ 和 } A_{u2} = \frac{\dot{U}_{o2}}{\dot{U}_i}. (2) \text{ 输出电阻 } r_{o1} \text{ 和 } r_{o2}.$$

【知识点窍】 微变等效模型, 基尔霍夫电压定律。

【逻辑推理】 R_E 上电流 $I_E = \alpha I_C = (1 + \beta) I_B$, R_E 是负反馈电阻, 稳定工作点。该放大电路的微变等效电路如图 15.36(a) 所示。

【解题过程】 由 KVL 定律:

$$U_{CC} = U_B + U_{BE} + U_E = I_B R_B + I_E R_E + U_{BE} = I_B R_B + (1 + \beta) R_E I_B + U_{BE}$$

$$I_B = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_B + (1 + \beta) R_E} \approx \frac{12 - 0.7}{300 + 51 \times 2} \approx 30 \mu A$$

$$I_E = (1 + \beta) I_B = 51 \times 30 \mu A = 1.53 \text{ mA}$$

$$r_{be} = 200 + (1 + \beta) \frac{26}{I_E} = 200 + 51 \times \frac{26}{1.53} = 1.07 \text{ k}\Omega$$

由欧姆定律

$$\dot{U}_i = \dot{I}_b r_{be} + \dot{U}_{o2},$$

$$\dot{U}_{o1} = -\beta \dot{I}_b R_C, \dot{U}_{o2} = (1 + \beta) \dot{I}_b R_E$$

所以
$$A_{u1} = \frac{\dot{U}_{o1}}{\dot{U}_i} = \frac{-\beta R_C}{r_{be} + (1 + \beta) R_E} = -\frac{50 \times 2}{1.07 + 51 \times 2} \approx -0.97$$

$$A_{u2} = \frac{\dot{U}_{o2}}{\dot{U}_i} = \frac{(1 + \beta) R_E}{r_{be} + (1 + \beta) R_E} = \frac{51 \times 2}{1.07 + 51 \times 2} \approx 0.99$$

(2) 将 U_i 除源(短接), $\dot{U}_{BE} + \dot{V}_E = 0$

$$\dot{I}_b r_{be} + (1 + \beta) \dot{I}_b R_E = 0$$

故 $\dot{I}_b = 0$, 由此可得

$$r_{o1} = R_C = 2 \text{ k}\Omega$$

从发射极输出时的输出电阻为

$$r_{o2} \approx \frac{r_{be} + R'_s}{\beta} \approx \frac{r_{be}}{\beta} = \frac{1070}{50} \Omega = 21.4 \Omega$$

式中, $R'_s = R_s // R_B$, 忽略信号源内阻, 所以 $R'_s \approx 0$ 。

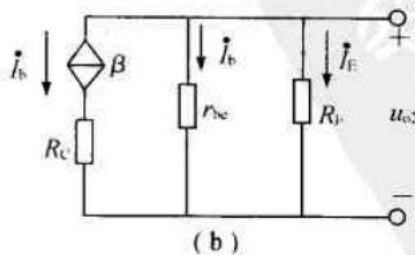
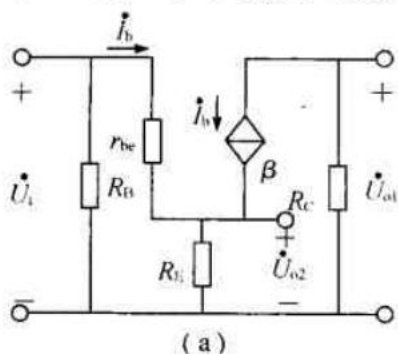


图 15.36

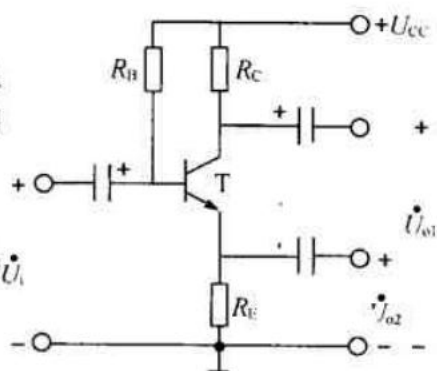


图 15.35

15.7.3 在例 15.7.1 中, (1) 当 $R_E = 5\text{k}\Omega$ 时, 估算静态值; (2) 当 $-U_{EE} = -6\text{V}$ 时, 估算静态值; (3) 当 $U_{CC} = 9\text{V}$ 时, 估算静态值。通过分析计算说明电路的静态值与 R_E 、 $-U_{EE}$ 和 U_{CC} 的关系。

【知识点窍】 差动放大器分析, 基尔霍夫电压定律。

【逻辑推理】 了解不同参数对差动放大器静态值的影响。

【解题过程】 已知: $U_{CC} = 12\text{V}$, $U_{EE} = 12\text{V}$, 三极管 $\beta = 50$, $R_C = 10\text{k}\Omega$, $R_E = 10\text{k}\Omega$, $R_B = 20\text{k}\Omega$, $R_P = 100\Omega$, $R_L = 20\text{k}\Omega$ 。并已求得静态值为: $I_C = 0.6\text{mA}$, $I_B = 0.02\text{mA}$, $U_{CE} = 6\text{V}$ 。

(1) 当 $R_E = 5\text{k}\Omega$ 时, 如图 15.37 所示。由于 R_P 中点可看为 0 电位。

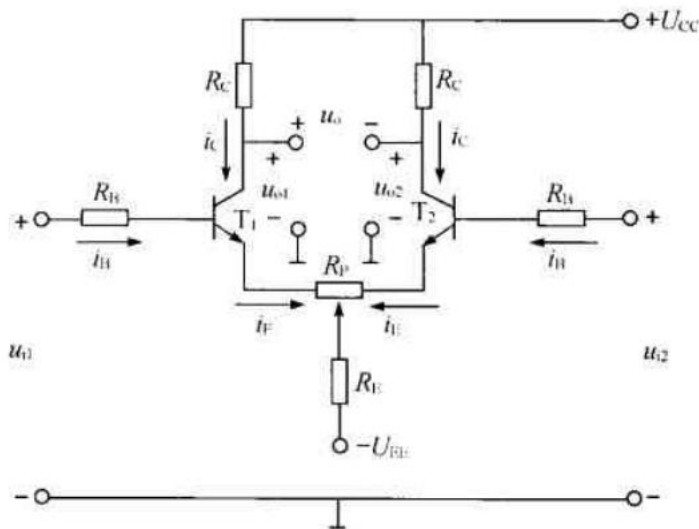


图 15.37

$$I_{E2} = I_{E1} \approx \frac{1}{2} \frac{U_{EE}}{R_E}, \text{即}$$

$$I_C \approx \frac{U_{EE}}{2R_E} = \frac{12}{2 \times 5} = 1.2\text{mA}$$

$$\text{所以, } I_B = \frac{I_C}{\beta} = 0.024\text{mA}$$

$$U_{CE} \approx U_{CC} - I_C R_C = 12 - 1.2 \times 10 = 0\text{V}$$

(2) 当 $-U_{EE} = -6\text{V}$ 时

$$I_C \approx \frac{U_{EE}}{2R_E} = \frac{6}{2 \times 10} = 0.3\text{mA}$$

$$U_{CE} \approx U_{CC} - I_C R_C = 12 - 0.3 \times 10 = 9\text{V}$$

(3) $U_{CC} = 9\text{V}$ 时

$$I_C = 0.45\text{mA}, I_B = 0.009\text{mA}$$

$$U_{CE} \approx U_{CC} - I_C R_C = 9 - 0.45 \times 10 = 4.5\text{V}$$

由(1), (2), (3)可知, R_E 减小则静态工作点上移, 进入饱和区; $-U_{EE}$ 减小则静态工作点下移, 进入截止区; U_{CC} 减小将使 U_{CE} 减小, 从而使工作点左移, 进入饱和区。

15.7.4 在图 15.38 所示的差分放大电路中, 设 $u_{i1} = u_{i2} = u_{ic}$ 是共模输入信号。试证明:

两管集电极中任一个对“地”的共模输出电压与共模输入电压之比,即单端输出共模电压放大倍数为

$$A_c = \frac{u_{oc1}}{u_{ic}} = \frac{u_{oc2}}{u_{ic}} = \frac{-\beta R_c}{R_B + r_{be} + 2(1+\beta)R_E} \approx -\frac{R_c}{2R_E}$$

R_B 较小,可忽略不计,并在一般情况下, $R_B + r_{be} \ll 2(1+\beta)R_E$ 。

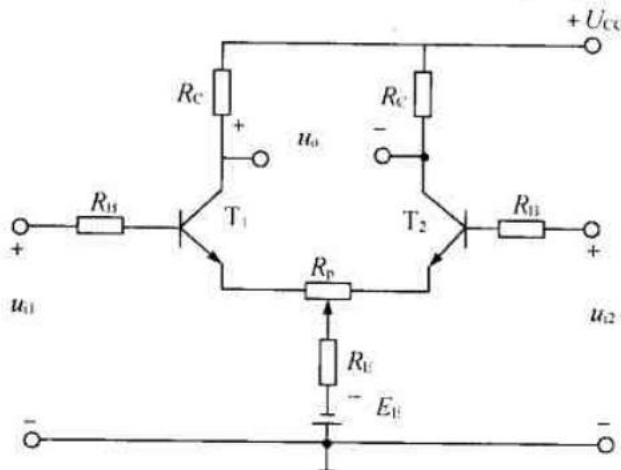


图 15.38

【知识点窍】 差分放大器分析。

【逻辑推理】 求差分放大器共模输入的放大倍数。

【解题过程】 单端输出共模信号的交流通路如图 15.39 所示。

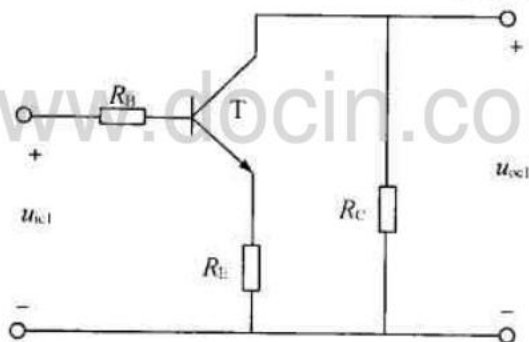


图 15.39

共模输入电压

$$u_{ic1} = (R_B + r_{be})i_{b1c} + (1+\beta)i_{b1c}2R_E$$

共模输出电压

$$u_{oc1} = -\beta i_{b1c} R_c$$

于是

$$A_c = \frac{u_{oc1}}{u_{ic1}} = \frac{-\beta R_c}{(R_B + r_{be}) + (1+\beta) \cdot 2R_E} \approx -\frac{R_c}{2R_E}$$

15.7.5 图 15.40(a) 所示的是单端输入—单端输出差分放大电路,已知 $\beta = 50$, $U_{BE} = 0$,

7V,试计算电压放大倍数 $A_d = \frac{u_o}{u_i}$ 。

【知识点窍】 差动放大器分析。

【逻辑推理】 先利用 KVL 定律求出静态电流 I_B , 再由微变等效电路求出电压放大倍数。

【解题过程】 首先求静态值 I_B 。

$$I_B = \frac{15 - U_{BE}}{2(1 + \beta)R_E} = \frac{15 - 0.7}{2 \times 51 \times 14.3} = 9.8 \mu\text{A}$$

于是, 由 r_{be} 定义可得

$$r_{be} = 200 + \frac{26}{I_B} = \left(200 + \frac{26}{9.8 \times 10^{-3}} \right) \Omega \approx 2.85 \text{ k}\Omega$$

单端输入的差模电压放大倍数

$$A_d = \frac{u_o}{u_i} = -50 \times \frac{10}{2.85} = -175.3$$

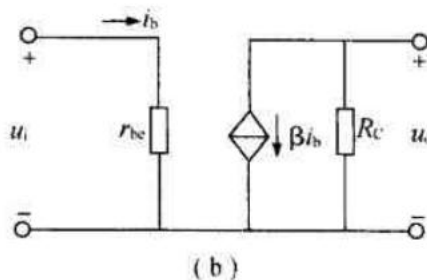
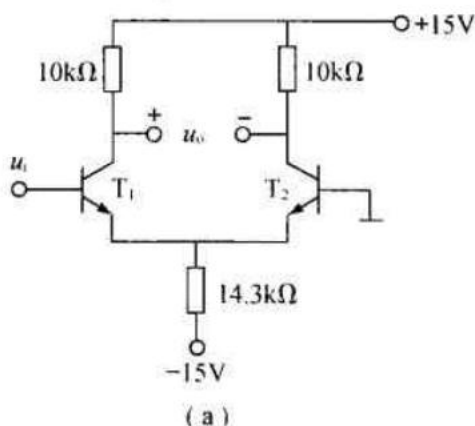


图 15.40

15.8.2 图 15.41 所示是什么电路? T_4 和 T_5 是如何连接的? 起什么作用? 在静态时, $V_A = 0$, 这时 T_3 的集电极电位 V_{C3} 应调到多少? 设各管的发射结电压为 0.6 V 。

【知识点窍】 功率放大器。

【逻辑推理】 T_4 、 T_5 接成二极管, 为 T_1 、 T_2 提供直流偏置电压, 以避免交越失真。

【解题过程】 图 15.41 所示是 OCL(无电容输出级) 功率放大器。 T_5 、 T_4 作为直流偏置电压, 消除交越失真。

当静态 $V_A = 0$ 时, $V_{C3} = -U_{BE} = -0.6 \text{ V}$ 。

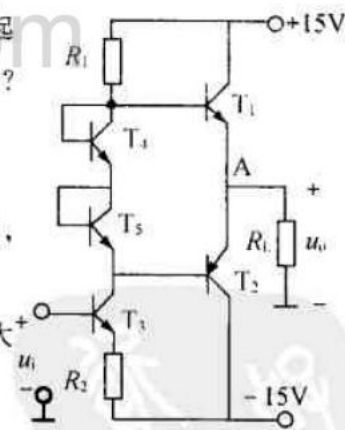


图 15.41

15.9.2 在图 15.42 所示的场效应晶体管放大电路中, 已知 $R_{G1} = 30 \text{ k}\Omega$, $R_{G2} = 2 \text{ M}\Omega$, $R_{G3} = 47 \text{ k}\Omega$, $R_G = 10 \text{ M}\Omega$, $R_D = 30 \text{ k}\Omega$, $R_S = 2 \text{ k}\Omega$, $U_{DD} = +18 \text{ V}$, $C_1 = C_2 = 0.01 \mu\text{F}$, $C_S = 10 \mu\text{F}$, 管子为 3D01。试计算: (1) 静态值 I_D 和 U_{DS} ; (2) r_i 、 r_o 和 A_u ; (3) 如将旁路电容 C_S 除去, 计算 A_{uf} 。设静态值 $U_{GS} = -0.2 \text{ V}$, $g_m = 1.2 \text{ mA/V}$, $r_{ds} \gg R_D$ 。

【知识点窍】 场效应晶体管放大电路, 基尔霍夫电压定律。

【逻辑推理】 场效应晶体管放大电路, 栅极无电流。

【解题过程】 (1) $V_G = \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} \times U_{DD}$

$$= \frac{47}{2\,000 + 47} \times 18$$

$$\approx 0.41\text{V}$$

$$U_{GS} = V_G - I_D R_S$$

因此

$$I_D = \frac{1}{R_S} (V_G - U_{GS})$$

$$= \frac{1}{2} [0.41 - (-0.2)]$$

$$= 0.31\text{mA}$$

由于无栅极电流, $I_D = I_S$, 于是

$$U_{DS} = U_{DD} - I_D (R_D + R_S) = 18 - 0.31 \times (30 + 2) \approx 8.08\text{V}$$

(2) 微变等效如图 15.43 所示。

输入电阻

$$r_i = R_G + R_{G1} // R_{G2} = 10 + \frac{2 \times 0.047}{2 + 0.047}$$

$$\approx 10\text{M}\Omega$$

输出电阻: $r_o \approx R_D = 30\text{k}\Omega$

$$A_u = -g_m R'_L = -1.2 \times \frac{15 \times 15}{15 + 15} = -18$$

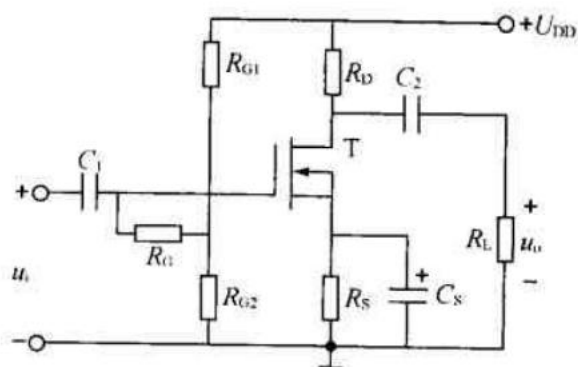


图 15.42

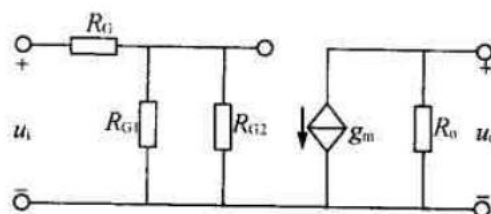


图 15.43

(3) 如图 15.44 所示。

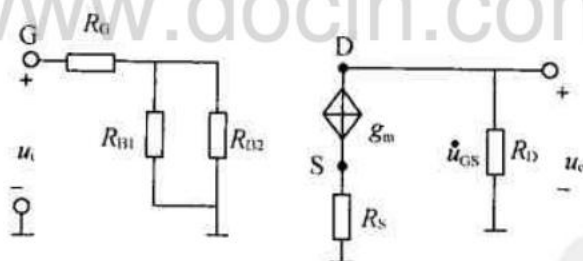


图 15.44

因为 $\dot{I}_D = g_m \dot{U}_{GS}$ (跨导的定义)

所以

$$\dot{U}_{GS} = \dot{U}_i - \dot{I}_D R_S = \dot{U}_i - g_m \dot{U}_{GS} R_S$$

即输入电压 $\dot{U}_i = \dot{U}_{GS} (1 + g_m R_S)$

又因输出电压 $\dot{U}_o = -g_m \dot{U}_{GS} R'_L$

故电压增益 $A_{uf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i}$ 代入数据, 得到

$$A_{uf} = -\frac{g_m R'_L}{1 + g_m R_s} = \frac{-1.2 \times 15}{1 + 1.2 \times 2} \approx -5.3$$

15.9.3 场效应晶体管差分放大电路如图 15.45 所示,已知 $g_m = 1.5 \text{ mA/V}$,求电压放大倍数 $A_u = \frac{u_o}{u_i}$ 。

【解题过程】 这个差分电路的工作原理与双极性三极管差动放大电路是类似的,只是它的输入电阻比后者高许多倍。直接由单入—单出场效应晶体管差动放大电路电压放大公式

$$A_u = -\frac{1}{2} g_m R'_L$$

$$\begin{aligned} \text{所以 } A_u &= \frac{u_o}{u_i} = -\frac{1}{2} g_m R'_L \\ &= -\frac{1}{2} \times 1.5 \times 15 \\ &= -11.25 \end{aligned}$$

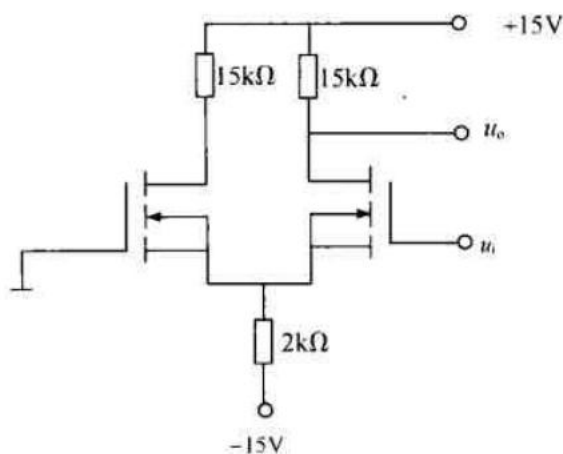


图 15.45

C 拓 宽 题

15.4.9 设计一单管晶体管放大电路,已知 $R_L = 3 \text{ k}\Omega$ 。要求: $|A_u| \geq 60$, $r_i \geq 1 \text{ k}\Omega$, $r_o < 3 \text{ k}\Omega$, 工作点稳定。建议选用高频小功率管 3GD100,其技术数据见附录 C, β 值可选在 50 ~ 100 之间,最后核查静态工作点是否合适,求得的各电阻值均采用标称值(查附录 H)。

【知识点窍】 分压式偏置放大电路中静态工作点稳定。

【逻辑推理】 据“工作点稳定”可选出放大电路类型,然后由相关公式查表得出具体参数。

【解题过程】 (1) 选择放大电路和晶体管。

要求工作点稳定,可选用分压偏置放大电路(教材图 15.4.1),选 $U_{CC} = 12 \text{ V}$;按建议选用晶体管 3GD100,设 $\beta = 50$,并设 $|A_u| = 60$, $r_i = 1 \text{ k}\Omega$ 。

参数计算

由式 $r_{ie} \approx [200 + (1 + \beta) \frac{26}{I_E}] \Omega \approx r_i$ 可求

$$I_C \approx I_E \approx \frac{26(1 + \beta)}{r_i - 200} = \frac{26 \times 51}{1000 - 200} = 1.66 \text{ mA}$$

由式 $|A_u| = \frac{\beta R'_L}{r_{be}}$ 可求

$$R'_L = \frac{60 \times 1}{50} = 1.2 \text{ k}\Omega$$

$$R'_L = \frac{R_C R_L}{R_C + R_L}$$

$$\text{即 } R_C = \frac{R'_L R_L}{R_L - R'_L} = \frac{1.2 \times 3}{3 - 1.2} = 2 \text{ k}\Omega$$

设 $V_B = 4\text{V}$

$$R_E = \frac{V_B - U_{BE}}{I_E} = \frac{4 - 0.6}{1.66} \approx 2\text{ k}\Omega$$

基极电流

$$I_B \approx \frac{I_C}{\beta} = \frac{1.66}{50} = 0.033\text{mA}$$

设 $I_2 = 10I_B$, 即

$$I_2 = 10 \times 0.033 = 0.33\text{mA} \approx I_1$$

得 $R_{B2} = \frac{V_B}{I_2} = \frac{4}{0.33}\text{ k}\Omega = 12.12\text{ k}\Omega$ (取 $12\text{ k}\Omega$)

$$R_{B1} = \frac{U_{CC} - V_B}{I_1} = \frac{12 - 4}{0.33} = 24.24\text{ k}\Omega$$
 (取 $24\text{ k}\Omega$)

(2) 核查静态工作点。

由 $U_{CE} = U_{CC} - (R_C + R_E)I_C$ 作直流负载线图, 如图 15.46 所示。

$$I_C = 0, U_{CE} = U_{CC} = 12\text{V}, U_{CE} = 0$$

$$I_C = \frac{U_{CC}}{R_C + R_E} = \frac{12}{2 + 2}\text{mA} = 3\text{mA}$$

$$U_{CE} = 12 - (2 + 2) \times 1.66 = 5.4\text{V}$$

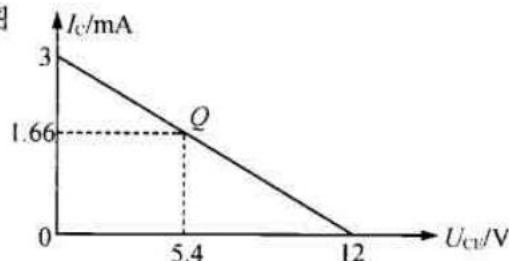


图 15.46

静态工作点合适, 在小信号情况下, 不会产生失真。

15.7.6 在图 15.47 所示的差分放大电路中, $\beta = 50$, $U_{BE} = 0.7\text{V}$, 输入电压 $u_{i1} = 7\text{mV}$, $u_{i2} = 3\text{mV}$ 。(1) 计算放大电路的静态值 I_B , I_C 及各电极的电位 V_E , V_C 和 V_B ; (2) 把输入电压 u_{i1} , u_{i2} 分解为共模分量 u_{ic1} , u_{ic2} 和差模分量 u_{id1} , u_{id2} ; (3) 求单端共模输出 u_{oc1} 和 u_{oc2} ; (4) 求单端差模输出 u_{od1} 和 u_{od2} ; (5) 求单端总输出 u_{o1} 和 u_{o2} ; (6) 求双端共模输出 u_{oc} , 双端差模输出 u_{od} 和双端总输出 u_o 。

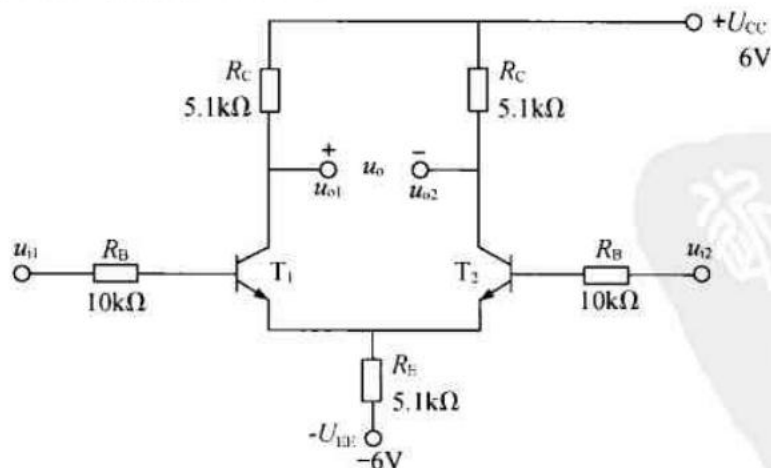


图 15.47

【知识点窍】 差动放大器分析。

【逻辑推理】 直流通路中, R_E 稳定 E 点和工作点 Q ; 交流通路中, E 点接地。

【解题过程】(1) 求静态值: 输入接地, 因电路对称, 两管静态值相同, 有

$$6 = U_{BE} + I_B R_B + 2I_B \cdot (1 + \beta) \cdot R_E$$

于是
$$I_B = \frac{-U_{BE} - U_{BE}}{R_B + 2(1 + \beta)R_E} = \frac{6 - 0.7}{10 + 2 \times 51 \times 5.1} \approx 10 \mu A$$

因此 $I_C = \beta I_B = 50 \times 10 \mu A = 0.5 \text{ mA}$

$$U_{CE} = U_{CC} + 6 - I_C R_C - 2I_E R_E = 6 + 6 - 0.5 \times 5.1 - 2 \times 0.51 \times 5.1 \approx 4.25 \text{ V}$$

由 KVL 定律

$$V_E = 2I_E R_E - 6 = 2 \times 0.51 \times 5.1 - 6 = -0.798 \text{ V}$$

$$V_C = U_{CC} - I_C R_C = 6 - 0.5 \times 5.1 = 3.45 \text{ V}$$

$$V_B = V_E + U_{BE} = -0.798 + 0.7 = -0.098 \text{ V} \approx -0.1 \text{ V}$$

(2) 共模分量 $u_{ic1} = u_{ic2} = \frac{1}{2}(u_{i1} + u_{i2}) = \frac{1}{2}(7 + 3) = 5 \text{ mV}$

差模分量 $u_{id1} = \frac{1}{2}(u_{i1} - u_{i2}) = \frac{1}{2}(7 - 3) = 2 \text{ mV}$

$$u_{id2} = -u_{id1} = -2 \text{ mV}$$

(3) 由定义, 可得

$$r_{be} = 200 + (1 + \beta) \frac{26}{I_E} = 200 + \frac{26}{0.01} = 2.8 \text{ k}\Omega$$

如图 15.48(a) 所示, 由 KVL 定律, 共模输入电压:

$$\begin{aligned} \dot{U} &= \dot{I}_b(R_B + r_{be}) + V_E = \dot{I}_b(R_B + r_{be}) + 2\dot{I}_E \cdot R_E \\ &= \dot{I}_b(R_B + r_{be}) + 2\dot{I}_b(1 + \beta) \cdot R_E \end{aligned}$$

共模输出电压: $\dot{U}_o = -\dot{I}_b \beta R_C$

共模电压增益

$$A_c = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{-\beta R_C}{R_B + r_{be} + 2(1 + \beta) \cdot R_E} \cdot R_E \approx 0.478$$

共模分量

$$u_{oc1} = u_{oc2} = A_{uc} \cdot u_{ic1} = 0.478 \times 5 = -2.39 \text{ mV}$$

(4) R_E 对差分交流通路短路, 如图 15.48(b) 所示。

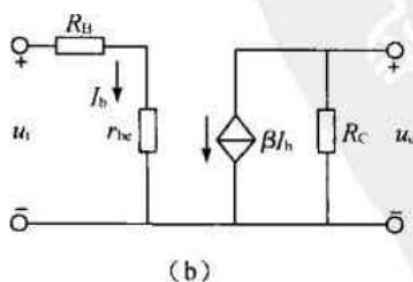
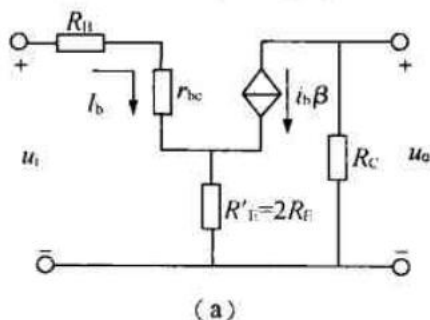


图 15.48

差模输入电压: $\dot{U}_i = \dot{I}_b (R_B + r_{be})$

差模输出电压: $\dot{U}_o = -\beta \dot{I}_b \cdot R_c$

于是, 差模电压增益

$$A_d = A_{d1} = A_{d2} = -\frac{\beta R_c}{R_B + r_{be}} = -\frac{50 \times 5.1}{10 + 2.8} \approx -19.9$$

差模分量分别为

$$u_{od1} = A_{d1} \cdot u_{id1} = -19.9 \times 2 \approx -39.8 \text{ mV}$$

$$u_{od2} = A_{d2} \cdot u_{id2} = -19.9 \times (-2) = 39.8 \text{ mV}$$

(5) 两个输出端各自电压为

$$u_{o1} = u_{oc1} + u_{od1} = -2.39 + (-39.8) = -42.2 \text{ mV}$$

$$u_{o2} = u_{oc2} + u_{od2} = -2.39 + 39.8 = 37.4 \text{ mV}$$

(6) 双端输出时

$$u_{oc} = u_{oc1} - u_{oc2} = -2.39 - (-2.39) = 0$$

$$u_{od} = u_{od1} - u_{od2} = -39.8 - 39.8 = -79.6 \text{ mV}$$

$$u_o = u_{o1} - u_{o2} = -42.2 - 37.4 = -79.6 \text{ mV}$$

15.9.4 在图 15.49 所示的源极输出器中, 已知 $U_{DD} = 12 \text{ V}$, $R_S = 12 \text{ k}\Omega$, $R_{G1} = 1 \text{ M}\Omega$, $R_{G2} = 500 \text{ k}\Omega$, $R_G = 1 \text{ M}\Omega$, 试求: 静态值、电压放大倍数、输入电阻和输出电阻。设 $V_S \approx V_G$, $g_m = 0.9 \text{ mA/V}$ 。

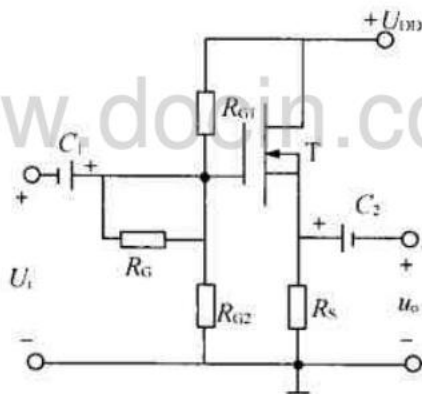


图 15.49

【知识点窍】 场效应晶体管放大电路, 基尔霍夫电压定律。

【逻辑推理】 在场效应晶体管放大电路中, 栅极无电流。

【解题过程】 由于栅极无电流 $I_{GS} = 0$

于是

$$\begin{aligned} V_S \approx V_G &= \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} \cdot U_{DD} \\ &= \frac{500}{1\,000 + 500} \times 12 = 4 \text{ V} \end{aligned}$$

$$I_D = I_S = \frac{V_S}{R_S} = \frac{4}{12} = 0.33 \text{ mA}$$

所以 $U_{DS} = U_{DD} - I_D R_S = 12 - 0.33 \times 12 = 8V$

输入电压 $\dot{U}_i = \dot{U}_{GS} + \dot{I}_D R_S$

因为 $\dot{I}_D = g_m \dot{U}_{GS}$, 故

$$U_i = U_{GS}(1 + g_m R_S)$$

输出电压

$$\dot{U}_s = \dot{U}_o = \dot{I}_D R_S = g_m R_S \cdot \dot{U}_{GS}$$

放大倍数

$$A_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{g_m R_S}{1 + g_m R_S} = \frac{0.9 \times 12}{1 + 0.9 \times 12} \approx 1$$

输入电阻

$$r_i = R_G + R_{G1} // R_{G2} = 1 + 1 // 0.5 \approx 1.33M\Omega$$

求输出电阻: 交流微变等值电路如图 15.50 所示。对输出电阻, 在输出端加一恒压源 \dot{U}_o , 产生输出电流为 \dot{I}_o , 方向如图所示。

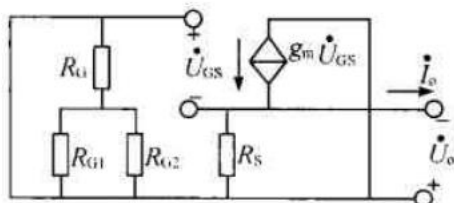


图 15.50

输出电阻: $r_o = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_o}$

由图可知 $\dot{U}_o = \dot{U}_{GS}$

$$\dot{I}_o = \frac{\dot{U}_{GS}}{R_S} + g_m \dot{U}_{GS} = (g_m + \frac{1}{R_S}) \dot{U}_{GS}$$

于是有 $r_o = \frac{1}{g_m + \frac{1}{R_S}} \approx \frac{1}{g_m} = 1.1k\Omega$

第 16 章

集成运算放大器

本章主要介绍集成运放的概念,主要技术指标,重点掌握集成运放在线性和非线性领域方面的应用。集成运放的基本应用电路的分析与计算是本课程的重点内容。

16.1 重点内容提要

一、集成运算放大器的结构特点与分析方法

1. 集成运算放大器的电路简单说明

(1) 输入级:是具有高输入电阻和低零点漂移的双入—双出差动运算放大电路。两个输入端也就是集成运算放大器的外部输入端,分别为同相输入端和反相输入端。

(2) 中间级:其作用是提高电压放大倍数;将双端输入变为单端输出;将静态输出电位转移到零电位等。

(3) 输出级:一般由互补功率放大电路或射极输出器构成,具有低输出电阻和较强的带负载能力。

集成运算放大器的外部接线图和原理性电路符号如图 16.1 所示。

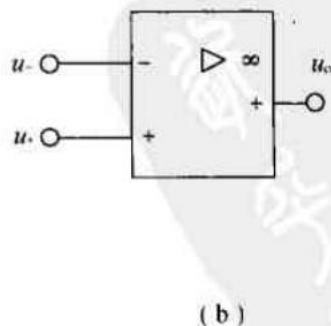
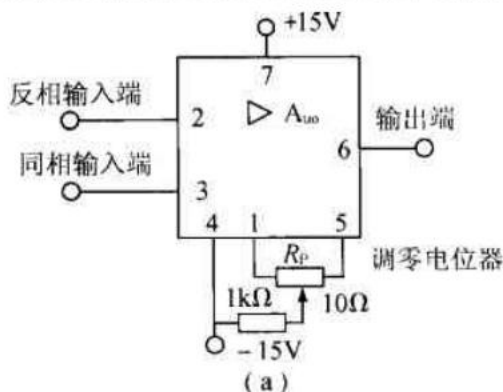


图 16.1

(4) 偏置电路:作用是为上述各级电路提供稳定和合适的偏置电流,决定各级的静态工作点。

2. 主要参数

(1) 最大输出电压 U_{opp} 。(2) 输入失调电压 U_{I0} 。(3) 失调电流 I_{I0} 。(4) 输入偏置电流 I_{IB} 。(5) 共模输入电压范围 U_{ICM} 。

3. 理想运算放大器及其分析依据

(1) 传输特性:如图 16.2 所示。

1) 线性工作区, $u_i \approx 0$ 。2) 非线性工作区, $u_o = \pm u_{o(sat)}$ 。

(2) 在线性区应用时的分析方法。

1) 外加深度负反馈, $A_{uF} = \frac{1}{F}$ 。2) $u_+ \approx u_-$, 即“虚短”。3) $i_+ = i_- \approx 0$, 即“虚断”。4) 输出电阻 $r_o = 0$, 共模抑制比 $CMRR \approx 0$ 。

(3) 在非线性区应用时的分析方法。

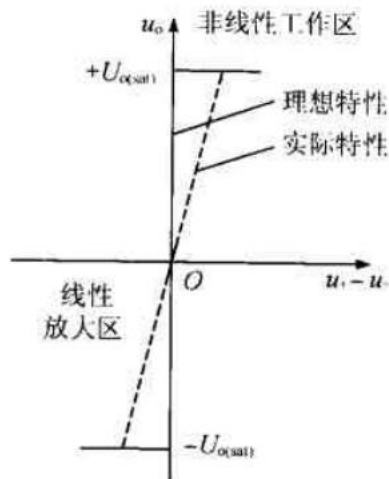
1) 当 $u_+ > u_-$ 时, $u_o = +U_{o(sat)}$; 当 $u_+ < u_-$ 时, $u_o = -U_{o(sat)}$ 。2) $i_+ = i_- = 0$ 。

图 16.2

二、运算放大器在信号运算方面的应用

1. 反相比例运算器

电压并联负反馈, 如图 16.3(a) 所示。

$$A_{uF} = \frac{u_o}{u_i} = \frac{R_F}{R_1}$$

当 $R_F = R_1$ 时

$$u_o = -u_i \text{ (反相器)}$$

$$R_2 = R_1 // R_F \text{ (平衡电阻)}$$

2. 同相比例运算器

电压串联负反馈, 如图 16.3(b) 所示。

$$A_{uF} = \frac{u_o}{u_i} = 1 + \frac{R_F}{R_1}$$

当 $R_1 = \infty$ 或 $R_F = 0$ 时

$$u_o = u_i \text{ (电压跟随器)}, R_2 = R_1 // R_F$$

3. 加法运算器

如图 16.3(c) 所示。

$$u_o = -\left(\frac{R_F}{R_{11}}u_{i1} + \frac{R_F}{R_{12}}u_{i2}\right)$$

当 $R_F = R_{11} = R_{12}$ 时, $u_o = -(u_{i1} + u_{i2})$

$$R_2 = R_{11} // R_{12} // R_F$$

4. 减法运算器

如图 16.3(d) 所示。

$$u_o = (1 + \frac{R_F}{R_1})(\frac{R_3}{R_2 + R_3})u_{i2} - \frac{R_F}{R_1}u_{i1}$$

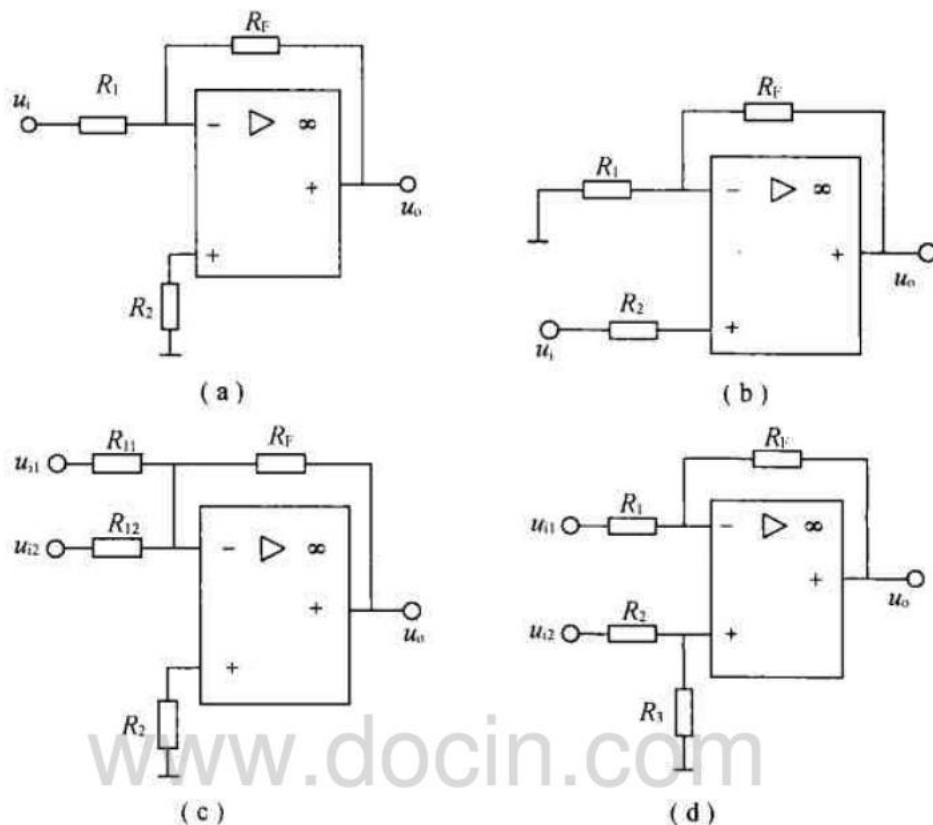


图 16.3

当 $R_1 = R_2, R_3 = R_F$ 时

$$R_1 // R_F = R_2 // R_3$$

5. 积分运算电路

电路如图 16.3(e) 所示。

$$u_o = -\frac{1}{R_1 C_F} \int u_i dt + k$$

其中 k 为积分常数, 即电容的初始电压值 $u_c(0_+)$ 。

当 $u_i = U_i$ 恒定时

$$u_o = -\frac{U_i}{R_1 C_F} t + u_o(0), R_2 = R_1$$

6. 微分运算电路

如图 16.3(f) 所示。

$$u_o = -R_F C_1 \frac{du_i}{dt}, R_2 = R_F$$

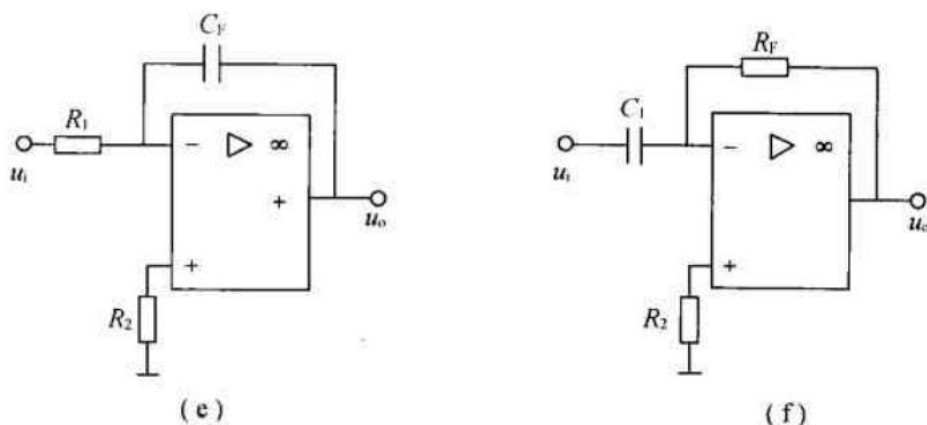


图 16.3(续)

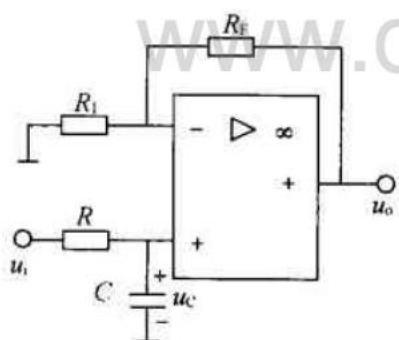
三、运算放大器在信号处理方面的应用

1. 有源滤波器

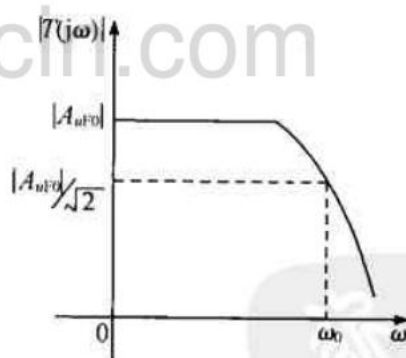
(1) 有源低通滤波器:(电路如图 16.4(a) 所示,频响特性如图 16.4(b) 所示)。

$$T(j\omega) = \frac{\dot{U}_o(j\omega)}{\dot{U}_i(j\omega)} = \frac{1 + \frac{R_F}{R_1}}{1 + j\frac{\omega}{\omega_0}} = \frac{A_{uF0}}{1 + j\frac{\omega}{\omega_0}}$$

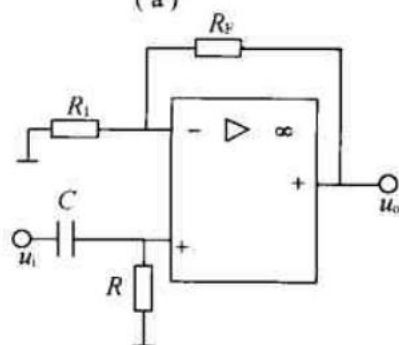
$$\dot{\omega}_0 = \frac{1}{RC} \quad |T(j\omega)| = \frac{|A_{uF0}|}{\sqrt{1 + (\frac{\omega}{\omega_0})^2}} \quad \varphi(\omega) = -\arctan \frac{\omega}{\omega_0}$$



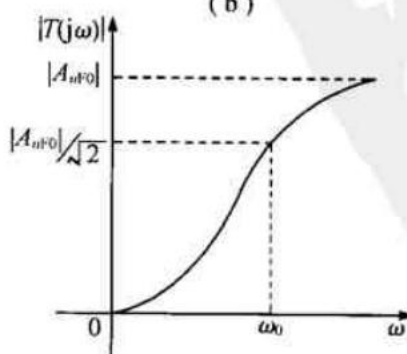
(a)



(b)



(c)



(d)

图 16.4

(2) 有源高通滤波器:(电路如图 16.4(c) 所示,频响特性如图 16.4(d) 所示)。

$$T(j\omega) = \frac{U_o(j\omega)}{U_i(j\omega)} = \frac{1 + \frac{R_F}{R_1}}{1 - j \frac{\omega_0}{\omega}} = \frac{A_{uF0}}{1 - j \frac{\omega_0}{\omega}}$$

$$\dot{\omega}_0 = \frac{1}{RC} \quad |T(j\omega)| = \frac{|A_{uF0}|}{\sqrt{1 + (\frac{\omega_0}{\omega})^2}} \quad \varphi(\omega) = \arctan \frac{\omega_0}{\omega}$$

2. 采样保持电路

当 S 闭合时,信号源 u_i 对电容 C 充电,即为采样。当 S 断开时,因 $i_i \approx 0$, u_C 保持充电结束时的电压,即为保持。输出 $u_o = u_C$, 电路如图 16.5 所示。

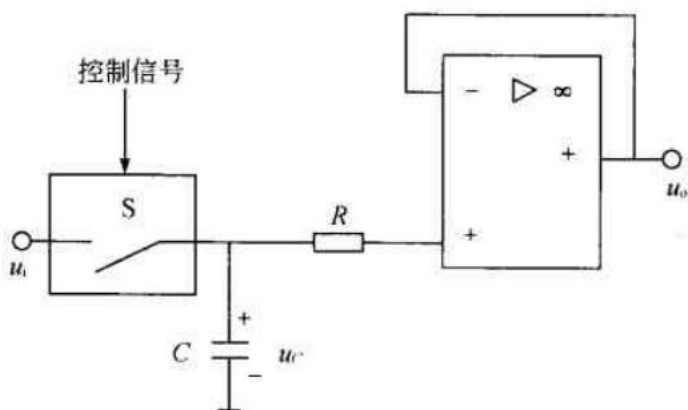


图 16.5

3. 电压比较器

(1) 过零比较器。

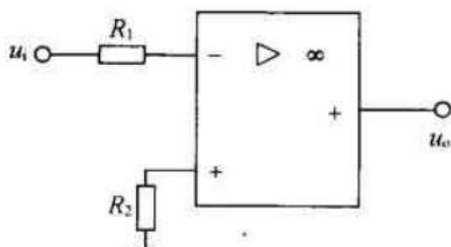
1) 反相输入。电路如图 16.6(a) 所示,传输特性如图 16.6(b) 所示。
 $U_R = 0$ (参考电压为 0)

$$u_i < 0, u_o = +U_{o(sat)} \quad u_i > 0, u_o = -U_{o(sat)}$$

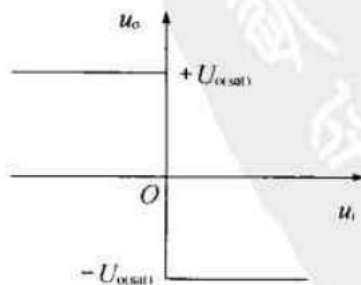
2) 同相输入,限幅输出。电路如图 16.6(c) 所示。传输特性如图 16.6(d) 所示。

$U_R = 0, U_Z$ 为双向稳压管的稳定电压。

$$u_i > 0, u_o = +U_Z \quad u_i < 0, u_o = -U_Z$$

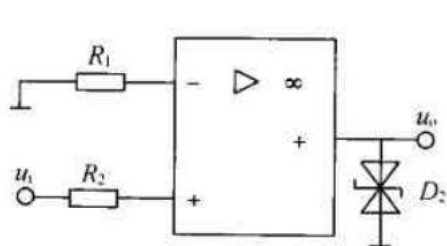


(a)

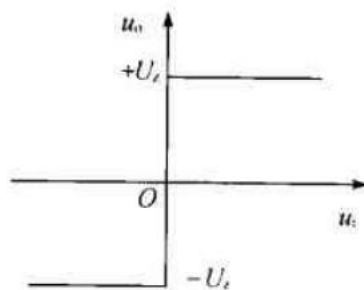


(b)

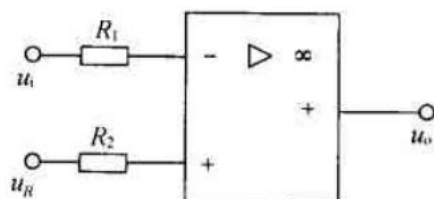
图 16.6



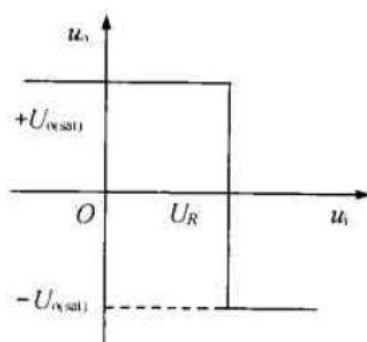
(c)



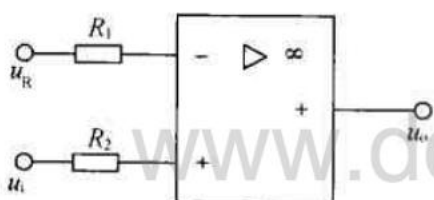
(d)



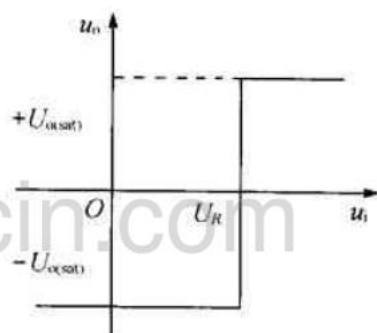
(e)



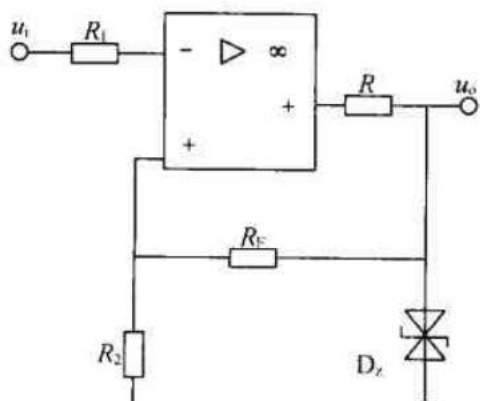
(f)



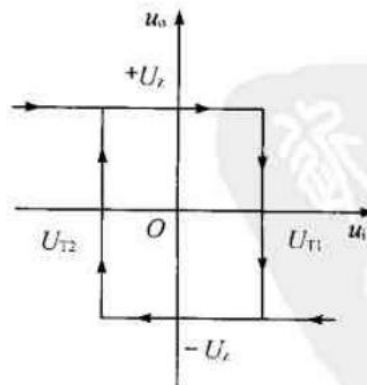
(g)



(h)



(i)



(j)

图 16.6(续)

(2) 任意电压比较器。

1) 反相输入。电路如图 16.6(e) 所示, 传输特性如图 16.6(f) 所示。

u_R 为参考电压(阈值电压) 翻转条件:

$$u_i < u_R, u_o = +U_{o(sat)}$$

$$u_i > u_R, u_o = -U_{o(sat)}$$

2) 同相输入: 电路如图 16.6(g) 所示, 传输特性如图 16.6(h) 所示。

翻转条件:

$$u_i < u_R, u_o = -U_{o(sat)}$$

$$u_i > u_R, u_o = +U_{o(sat)}$$

(3) 滞回比较器, 如图 16.6(i) 所示, 传输特性如图 16.6(j) 所示。

$$\text{上门限: } U_{T1} = +\frac{R_2}{R_2 + R_F} U_Z,$$

$$\text{下门限: } U_{T2} = -\frac{R_2}{R_2 + R_F} U_Z,$$

$U_{T1} - U_{T2} = U_T$, 回差。 u_i 由小变大, 超过 U_{T1} , 则 u_o 由 $+U_Z$ 变为 $-U_Z$; u_i 由大变小, 小于 U_{T2} , 则 u_o 由 $-U_Z$ 变为 $+U_Z$ 。

考点: 运用“虚短”、“虚断”的性质分析运算大器, 模拟信号运算电路分析, 电压比较器分析。

16.2 练习与思考题解答

16.1.1 什么是理想运算放大器? 理想运算放大器工作在线性区和饱和区时各有什么特点? 分析方法有什么不同。

【解题过程】 理想运算放大器是满足理想化条件的运算放大器。

理想条件: (1) 开环电压放大倍数 $A_{uo} \rightarrow \infty$ 。

(2) 差模输入电阻 $r_{id} \rightarrow \infty$ 。

(3) 开环输入电阻 $r_o \rightarrow \infty$ 。

(4) 共模抑制比 $K_{CMRR} \rightarrow \infty$ 。

运放工作在线性区时: u_o 与 $u_i (= u_+ - u_-)$ 成线性关系。

(1) $r_{id} \rightarrow \infty, i_+ = i_- \approx 0$, “虚断”。

(2) $A_{uo} \rightarrow \infty, u_+ = u_- \approx 0$, “虚短”。

(3) 当同相输入端接“地”时, 反相端为“虚地”。

运放工作在饱和区时:

$$u_+ > u_- \text{ 时, } u_o = +U_{o(sat)}$$

$$u_+ < u_- \text{ 时, } u_o = -U_{o(sat)}$$

$$i_+ = i_- \approx 0$$

16.1.2 在例 16.1.1 中, 若将反相输入端接“地”, 即 $u_- = 0$, 而在同相输入端输入正弦电压 $u_i = u_+ = 5\sin\omega t \text{ mV}$ 。试画出 u_o 的波形。

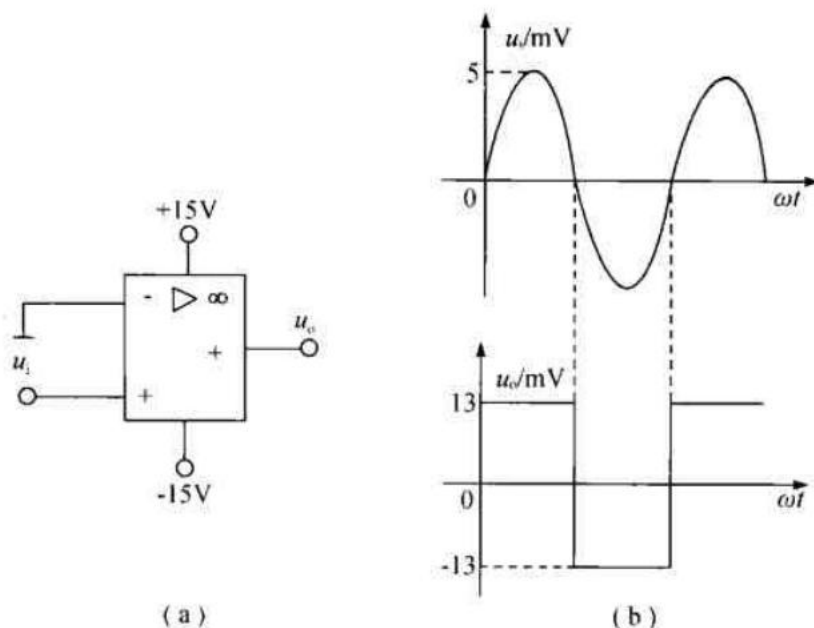


图 16.7

【解题过程】 电路可画成如图 16.7(a) 所示。已知 $U_{o(sat)} = \pm 13\text{V}$, $A_{uo} = 2 \times 10^5$, 可得输出饱和时的输入电压为

$$u_{i(sat)} = \frac{U_{o(sat)}}{A_{uo}} = \frac{\pm 13}{2 \times 10^5} \text{V} = \pm 0.065 \text{mV}$$

相位角为

$$\alpha = \arcsin \frac{u_{i(sat)}}{U_m} = \arcsin \frac{\pm 0.065}{5} = \pm 0.75^\circ \approx 0$$

由此可画出 u_o 波形, 如图 16.7(b) 所示。

16.1.3 如将 $A_{uo} = 2 \times 10^5$ 用分贝(dB)表示, 等于多少?

【解题过程】 $G_{uo} = 20 \lg A_{uo} = 20 \lg(2 \times 10^5) \approx 106 \text{dB}$

16.2.1 什么叫做“虚地”? 在图 16.2.1 所示电路中, 同相输入端接“地”, 反相输入端的电位接近“地”电位。既然如此, 就把两个输入端直接连起来, 是否会影响运算放大器的工作?

【解题过程】 因为运算放大器开环放大倍数很大, 所以实际允许输入电压很小, 但并非为 0。当同相端接“地”时, 由于 $u_+ \approx u_-$, 所以反相端接近“地”电位, 故称“虚地”。若将两个输入直接连接, 则 $u_i = 0$, $u_o = A_{uo} \cdot u_i = 0$, 运放不工作。

16.2.2 在教材图 16.2.1 中, 已知输入电压 $u_i = \sin 6280t \text{mV}$, 试求输出电压 u_o 的幅值, 并画出 u_i 和 u_o 的波形图。

【解题过程】 重画教材图 16.2.1 如图 16.8(a) 所示, $\dot{U}_o = -\frac{R_F}{R_1} \dot{U}_i$, 于是有效值 $U_o = \frac{R_F}{R_1} \cdot U_i$,

幅值: $U_{om} = \frac{R_F}{R_1} \cdot U_{im} = \frac{R_F}{R_1} \cdot 1 \text{mV}$, 但 u_i 、 u_o 相位相反, 波形图如图 16.8(b) 所示。

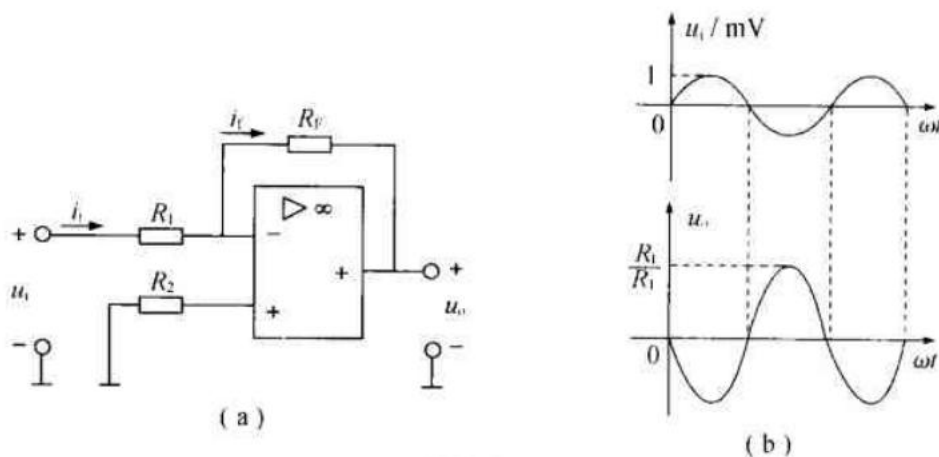


图 16.8

16.2.3 如在教材图 16.2.9 所示的积分运算电路和教材图 16.2.12 所示的微分运算电路中,输入电压 u_i 是一周期性正负交变的矩形波电压,试分别画出输出电压 u_o 的波形。

【解题过程】 对图 16.2.9 所示积分电路,若满足 $\tau = R_1 C_F \gg \frac{T}{2}$,则可画 u_o 波形如图 16.9(b) 所示。对图 16.2.12 所示微分电路,若满足 $R_F C_1 = \tau \ll \frac{T}{2}$,则可画出 u_o 波形如图 16.9(c) 所示。

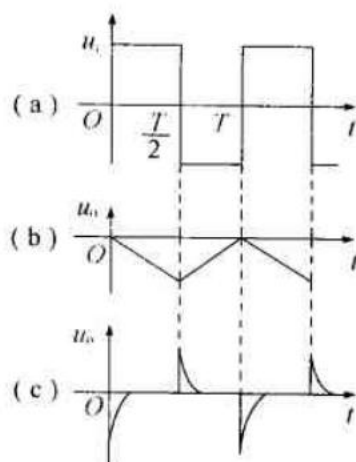


图 16.9

16.3.1 试说明:上述三种信号处理电路中的运算放大器各工作在线性区还是饱和区?

【解题过程】 有源滤波器和采样保持器工作在线性区,因为输入、输出间有负反馈,且输出没有饱和。电压比较器的输出饱和电压工作在开环状态,于是,工作在饱和区。

16.3.2 如图 16.10 所示,有源低通滤波器电路中, $R_1 = 100\text{k}\Omega$, $R_F = 150\text{k}\Omega$, $R = 82\text{k}\Omega$, $C = 0.01\mu\text{F}$ 。试求: $\omega = \omega_0$ 时的 $|T(j\omega)|$ 和 ω_0 。

$$\text{【解题过程】 } \dot{U}_+ = \dot{U}_C(j\omega) = \frac{\dot{U}_i(j\omega)}{R + j\frac{1}{\omega C}} \cdot j\frac{1}{RC}$$

$$\dot{U}_+ = \dot{U}_-, \text{ 于是, } \frac{\dot{U}_o - \dot{U}_-}{R_F} = \frac{\dot{U}_-}{R_1}$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_o &= \frac{R_F}{R_1} \dot{U}_+ + \dot{U}_- = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) \dot{U}_+ \\ &= \frac{j\frac{1}{\omega C}}{R + j\frac{1}{\omega C}} \cdot \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) \dot{U}_i \end{aligned}$$

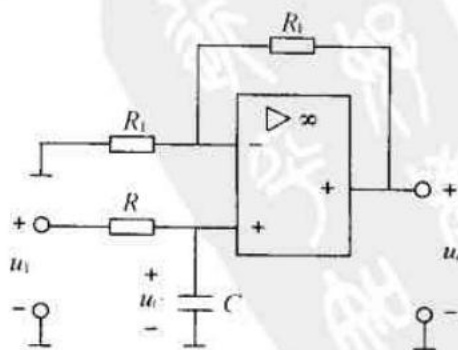


图 16.10

$$\text{令 } \omega_0 = \frac{1}{RC}$$

$$\dot{U}_o = \frac{1 + \frac{R_F}{R_1}}{1 + j\frac{\omega}{\omega_0}} \cdot \dot{U}_i$$

$$A_u = T(j\omega) = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{1 + \frac{R_F}{R_1}}{1 + j\frac{\omega}{\omega_0}}$$

$\omega = \omega_0$ 时

$$|T(j\omega)| = \frac{1 + \frac{R_F}{R_1}}{\sqrt{1+1}} = \frac{\sqrt{2}}{2} (1 + \frac{R_F}{R_1}) = \frac{1}{\sqrt{2}} (1 + \frac{150}{100}) = 1.77$$

$$\omega_0 = \frac{1}{RC} = \frac{1}{82 \times 10^3 \times 0.01 \times 10^{-6}} = 1219.5 \text{ rad/s}$$

16.3.3 图 16.11 所示是一种电平检测器,图中 U_R 为参考电压且为正值, R 和 G 分别为红色和绿色发光二极管,试判断在什么情况下它们会亮?

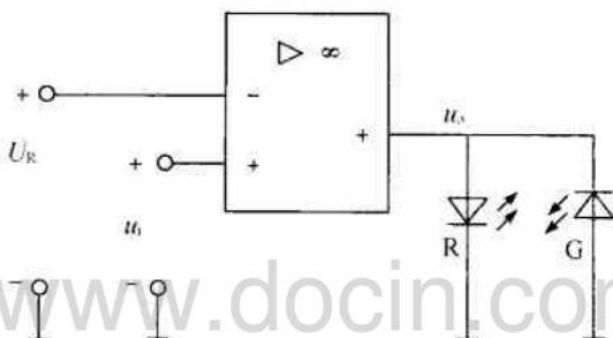


图 16.11

【知识点窍】电压比较器,二极管的单向导通特性。

【解题过程】如图 16.11 所示,当 $u_i > U_R$ 时, $u_o = +U_{o(sat)}$, 红灯亮; 当 $u_i < U_R$ 时, $u_o = -U_{o(sat)}$, 绿灯亮。

16.3 课后习题全解

A 选择题

16.2.1 在图 16.12 所示电路中,若运算放大器的电源电压为 $\pm 15\text{V}$,则输出电压 u_o 最接近于()。

- (1) 20V
- (2) -20V
- (3) 13V

【分析】运算放大器虚短、虚断两种方法的应用。

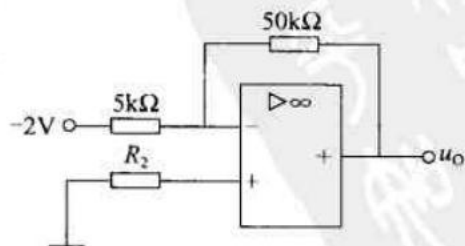


图 16.12

$$\frac{-2\text{V}-0}{5\text{k}\Omega} = \frac{0-u_o}{50\text{k}\Omega} \quad \therefore u_o = 20\text{V}, \text{故选(1)}。$$

16.2.2 在图 16.13 所示电路中, 输入电压 u_i 为()。

- (1) u_i
 (2) $-u_i$
 (3) $-2u_i$

【分析】 运算放大器虚短、虚断两种方法的应用。

$$\text{由虚短: } u_+ = u_- = u_i \cdot \frac{R}{2R+R} = \frac{1}{3}u_i$$

$$\text{虚断: } \frac{u_i - \frac{1}{3}u_i}{R} = \frac{\frac{1}{3}u_i - u_o}{2R}$$

$$u_o = -u_i, \text{故选(2)}。$$

16.2.3 在图 16.14 所示电路中, 输入电压 u_i 为()。

- (1) $-3u_i$
 (2) $3u_i$
 (3) u_i

【分析】 运算放大器虚短、虚断两种方法的应用。

$$\text{虚短: } u_+ = u_- = -u_i$$

$$\text{虚断: } \frac{-u_i - u_i}{R} = \frac{u_i - u_o}{R}$$

$$\therefore u_o = 3u_i, \text{故选(2)}。$$

16.2.4 在图 16.15 所示电路中, 若 $u_i = 1\text{V}$, 则 u_o 为()。

- (1) 6V
 (2) 4V
 (3) -6V

【分析】 运算放大器虚短、虚断两种方法的应用。

$$\text{虚短: } u_{-1} = u_{-2} = 0$$

$$\text{虚断: } \frac{u_i - 0}{3\text{k}\Omega} = \frac{0 - u_1}{6\text{k}\Omega}$$

第一个运算放大器输出电压 $u_1 = -2\text{V}$

$$u_{-2} = u_2 = -2\text{V} \quad \frac{u_o - u_2}{8\text{k}\Omega} = \frac{u_2 - 0}{4\text{k}\Omega}$$

$$\therefore u_o = -6\text{V}, \text{故选(3)}。$$

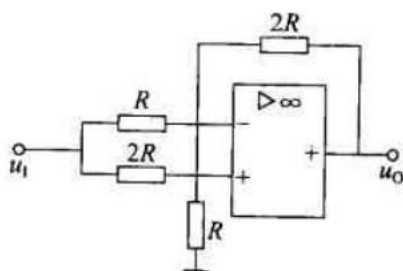


图 16.13

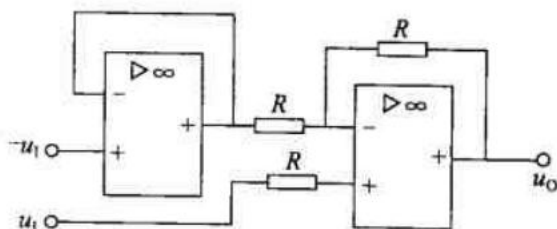


图 16.14

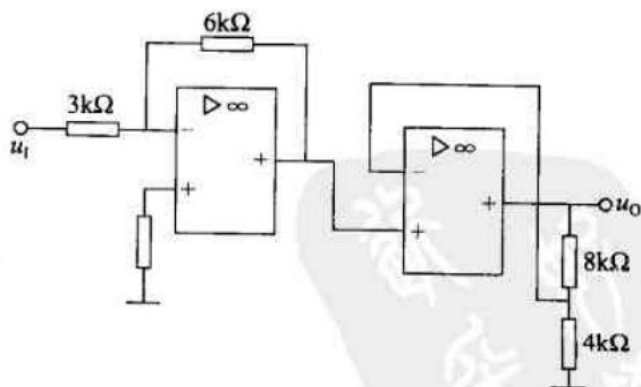


图 16.15

16.2.5 在图 16.16 所示电路中,若 $u_i = -0.5\text{V}$,则输出电流 i_o 为 ()。

- (1) 10mA
(2) 5mA
(3) -5mA

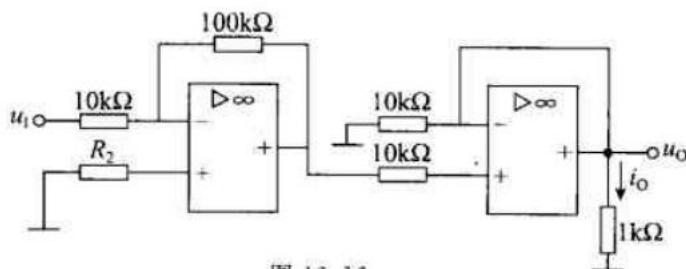


图 16.16

【分析】 运算放大器虚短、虚断两种方法的应用。

$$\frac{-0.5 - 0}{10\text{k}\Omega} = \frac{0 - u_{o1}}{100\text{k}\Omega} \quad \therefore u_{o1} = 5\text{V}$$

$$u_{+2} = u_{-2} = 5\text{V} = u_o \quad \therefore i_o = u_o / 1\text{k}\Omega = 5\text{mA}, \text{ 故选 (2).}$$

16.3.1 在图 16.17 所示电路中,若 u_i 为正弦电压,则 u_o 为 ()。

- (1) 与 u_i 同相的正弦电压
(2) 与 u_i 反相的正弦电压
(3) 矩形波电压

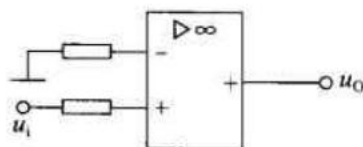


图 16.17

【分析】 该电路为电压比较器。

正半周 $u_i > 0$, 同相输入端输入 $u_o = +u_o(\text{sat})$, 为矩形波电压, 故选 (3)。

16.3.2 电路如图 16.18(a) 所示, 输入电压 u_i 的波形如图 16.18(b) 所示, 试问指示灯 HL 的亮暗情况为 ()。

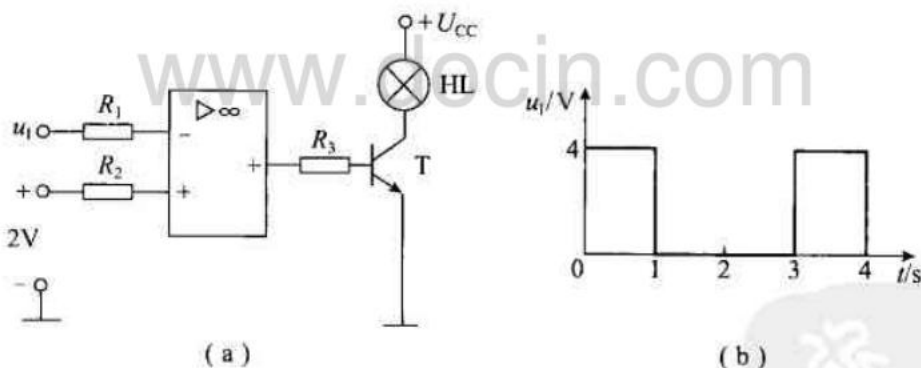


图 16.18

- (1) 亮 1s, 暗 2s (2) 暗 1s, 亮 2s (3) 亮 3s, 暗 2s

【分析】 $u_i = 4\text{V}$ 时 $> 2\text{V}$ (参考电压), 反相输入端输入。故 $u_o = -u_o(\text{sat})$, 为此时三极管截止, 小灯泡暗 1s。

$u_i = 0\text{V}$ 时 $< 2\text{V}$ (参考电压), $u_o = +u_o(\text{sat})$ 三极管导通, 小灯泡亮 2s, 故选 (2)。

B 基本题

16.1.1 已知 F007 运算放大器的开环电压放大倍数 $A_{uo} = 100\text{dB}$, 差模输入电阻 $r_{id} = 2\text{M}\Omega$, 最大输出电压 $U_{opp} = \pm 13\text{V}$ 。为了保证工作在线性区。试求: (1) u_+ 和 u_- 的最大允许差值; (2) 输入端电流的最大允许值。

【知识点窍】 运放的工作区。

【逻辑推理】 工作在线性区时,有 $u_o = A_{uo} u_i$, u_o 为输出电压。

【解题过程】 (1) $A_{uodB}(\text{dB}) = 20\lg A_{uo}$

$$A_{uo} = 10^{\frac{A_{uodB}}{20}} = 10^{\frac{100}{20}} = 10^5$$

差分输入

$$u_i = u_+ - u_- = \frac{U_{OFF}}{A_{uo}} = \frac{\pm 13\text{V}}{10^5} = \pm 0.13\text{mV}$$

$$(2) \text{ 输入端电流 } i_+ = i_- = \frac{u_i}{r_{id}} = \frac{\pm 0.13\text{mV}}{2\text{M}\Omega} = \pm 0.065\text{nA}$$

16.1.2 在图 16.19 所示电路中,正常情况下四个桥臂电阻均为 R 。当某个电阻因受温度或应变等非电量的影响而变化 ΔR 时,电桥平衡即遭破坏,输出电压 u_o 反映此非电量的大小。试证明

$$u_o = -\frac{A_{uo}U}{4} \cdot \frac{\frac{\Delta R}{R}}{1 + \frac{\Delta R}{2R}}$$

【知识点窍】 电桥。

【逻辑推理】 电桥的作用是测量 $R + \Delta R$,

当 $\Delta R = 0$, $u_+ = u_-$, $u_o = 0$ 。

【解题过程】 运放输入端电压

$$u_- = \frac{1}{2}U$$

$$u_+ = \frac{R}{R + R + \Delta R} \cdot U = \frac{1}{2 + \frac{\Delta R}{R}}U$$

$$\text{输出电压 } u_o = A_{uo}(u_+ - u_-) = A_{uo}\left(\frac{1}{2 + \frac{\Delta R}{R}} - \frac{1}{2}\right)U = -A_{uo} \cdot U \frac{\frac{\Delta R}{R}}{2(2 + \frac{\Delta R}{R})}$$

其中, A_{uo} 为开环电压增益,于是

$$u_o = -\frac{A_{uo} \cdot U}{4} \cdot \frac{\frac{\Delta R}{R}}{1 + \frac{\Delta R}{2R}}$$

16.2.6 在图 16.20 所示的反比例运算电路中,设 $R_1 = 10\text{k}\Omega$, $R_F = 500\text{k}\Omega$ 。试求闭环电压放大倍数 A_{uf} 和平衡电阻 R_2 。若 $u_i = 10\text{mV}$, 则 u_o 为多少?

【知识点窍】 运算放大电路的分析。

【逻辑推理】 闭环放大倍数, $u_- = 0$, $i_1 = \frac{u_i}{R_1}$, $i_2 = \frac{-u_o}{R_F}$ 。

因 $i_1 = i_2$

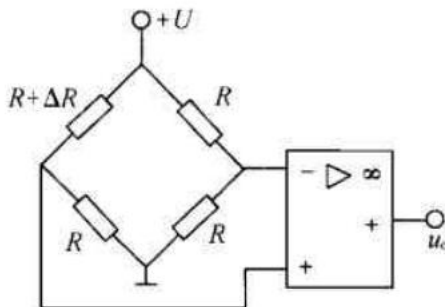


图 16.19

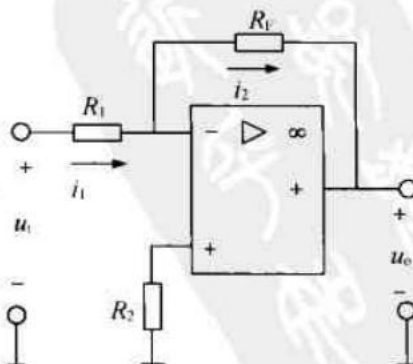


图 16.20

$$\frac{u_i}{R_1} = -\frac{u_o}{R_F}$$

即 $\frac{u_o}{u_i} = -\frac{R_F}{R_1}$

【解题过程】 由“虚短”可知： $u_+ = u_- = 0$ 。

由“虚断”可知： $i_1 = i_2$

所以，输出电压

$$u_o = -i_2 R_F + u_- = -i_2 R_F + 0$$

输入电压

$$u_i = i_1 R_1 + u_+ = i_1 R_1$$

因此，得到电压增益

$$A_{uf} = -\frac{R_F}{R_1} = -\frac{500}{10} = -50$$

为了“+，-”极匹配，消除温漂等影响，则有

$$R_2 = R_1 // R_F = \frac{10 \times 500}{10 + 500} = 9.8 \text{ k}\Omega$$

$u_i = 10 \text{ mV}$ 时，由定义，输出电压为

$$u_o = A_{uf} \cdot u_i = -50 \times 10 = -500 \text{ mV}$$

16.2.7 在图 16.21 所示的同相比例运算电路中，已知 $R_1 = 2 \text{ k}\Omega$, $R_F = 10 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 2 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 18 \text{ k}\Omega$, $u_i = 1 \text{ V}$ ，求 u_o 。

【知识点窍】 理想运放的性质。

【逻辑推理】 利用“虚短”、“虚断”概念。

$$i_+ = i_- = 0, u_+ = u_-, u_- = u_+ = \frac{R_3}{R_2 + R_3} \cdot u_i$$

再由 $u_- = \frac{R_1}{R_1 + R_2} u_o$ ，可求 u_o 。

【解题过程】 $u_+ = \frac{R_3}{R_2 + R_3} u_i = \frac{18}{2 + 18} \times 1 = 0.9 \text{ V}$

由“虚断”可知： $i_{id} = 0$ ，即 R_1 、 R_F 串联，所以

$$u_- = \frac{R_1}{R_1 + R_F} u_o$$

又由“虚短”可知： $u_+ = u_-$ ，所以

$$u_o = \frac{R_1 + R_F}{R_1} \times u_+ = \frac{2 + 10}{2} \times 0.9 = 5.4 \text{ V}$$

16.2.8 为了获得较高的电压放大倍数，而又可避免采用高值电阻 R_F ，将反相比例运算电路改为图 16.22 所示电路，并设 $R_F \gg R_4$ ，试证明： $A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} = -\frac{R_F}{R_1} (1 + \frac{R_3}{R_4})$ 。

【知识点窍】 运算放大电路的分析，基尔霍夫电压定律。

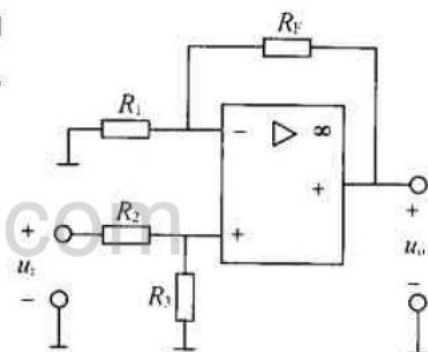


图 16.21

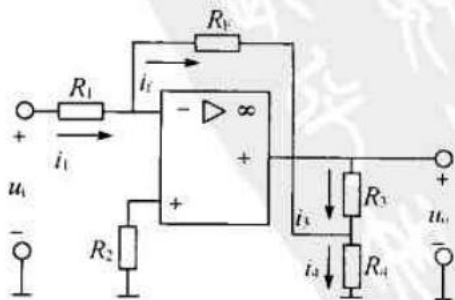


图 16.22

【解题过程】 各支路电流参考方向如图所示,由“虚短”可知: $u_- = u_+ = 0$,故 $u_i - u_- = u_i - u_+ = i_1 R_1$,即

$$i_1 = \frac{u_i}{R_1} = i_F, \quad i_3 + i_f = i_4$$

因 $R_F \gg R_1, i_f \ll i_4$, 故 $i_3 \approx i_4$, 所以

$$u_o = i_3 R_3 + i_4 R_4 \approx i_4 (R_3 + R_4)$$

由 KVL 定律

$$u_- = i_f R_F + i_4 R_4 = 0$$

所以

$$i_4 R_4 = -i_f R_F, i_4 = -i_f \frac{R_F}{R_4} = -\frac{u_i}{R_1} \cdot \frac{R_F}{R_4}$$

于是

$$u_o = -\frac{u_i}{R_1} \cdot \frac{R_F}{R_4} (R_3 + R_4) = -\frac{R_F}{R_1} \left(1 + \frac{R_3}{R_4}\right) u_i$$

故闭环电压增益为

$$A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} = -\frac{R_F}{R_1} \left(1 + \frac{R_3}{R_4}\right)$$

16.2.9 在上题图 16.22 所示电路中:(1) 已知 $R_1 = 50\text{k}\Omega, R_2 = 33\text{k}\Omega, R_3 = 3\text{k}\Omega, R_4 = 2\text{k}\Omega, R_F = 100\text{k}\Omega$, 求电压放大倍数 A_{uf} ; (2) 如果 $R_3 = 0$, 要得到同样大的电压放大倍数, R_F 的阻值应增大到多少?

【知识点窍】 运算放大电路的分析。

【解题过程】 利用 16.2.3 的结果, 将数据代入, 得:

$$(1) \quad A_{uf} = -\frac{R_F}{R_1} \left(1 + \frac{R_3}{R_4}\right) = -\frac{100}{50} \times \left(1 + \frac{3}{2}\right) = -5$$

$$(2) \quad A_{uf} = -\frac{R_F}{R_1} = -5$$

$$R_F = 5 \times R_1 = 5 \times 50 = 250\text{k}\Omega$$

16.2.10 电路如图 16.23 所示, 已知 $u_{i1} = 1\text{V}, u_{i2} = 2\text{V}, u_{i3} = 3\text{V}, u_{i4} = 4\text{V}, R_1 = R_2 = 2\text{k}\Omega, R_3 = R_4 = R_F = 1\text{k}\Omega$, 试计算输出电压 u_o 。

【知识点窍】 运算放大电路分析, 基尔霍夫电流定律, 叠加原理。

【逻辑推理】 可用叠加原理, 把各输入分别加入, 或者利用 $u_- = u_+, i_- = i_+ = 0$ 来计算。

【解题过程】 方法一

$$u_- = \frac{R_4}{R_3 + R_4} (u_{i3} - u_{i4}) + u_{i1}$$

于是

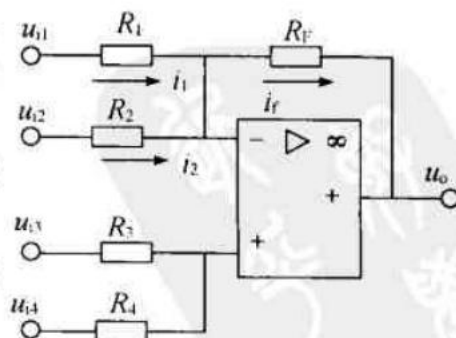


图 16.23

$$u_1 = u_- = \frac{R_4}{R_3 + R_4}(u_{i3} - u_{i4}) + u_{i4} = 4 + \frac{1}{1+1}(3-4) = (4 - \frac{1}{2})\text{V} = 3.5\text{V}$$

$$i_1 = \frac{u_{i1} - u_-}{R_1}, i_2 = \frac{u_{i2} - u_-}{R_2}, i_F = \frac{u_- - u_o}{R_F}$$

由 KCL 定理: $i_1 + i_2 = i_F$

$$\frac{1-u}{2} + \frac{2-u}{2} = \frac{3}{2} - u = \frac{u-u_o}{1}$$

$$u_o = 2u - \frac{3}{2} = 5.5\text{V}$$

方法二 可用叠加原理求解。令 $u_{i3} = u_{i4} = 0$, 可得

$$u'_o = -(\frac{R_F}{R_1}u_{i1} + \frac{R_F}{R_2}u_{i2}) = -\frac{R_F}{R_1}(u_{i1} + u_{i2}) = -\frac{1}{2}(1+2) = -1.5\text{V}$$

令 $u_{i1} = u_{i2} = 0$, 可得

$$R = R_1 // R_2 = \frac{2 \times 2}{2+2} = 1\text{k}\Omega$$

由节点电压法

$$(\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4})u_- = \frac{u_{i3}}{R_3} + \frac{u_{i4}}{R_4}$$

则有

$$u_1 = \frac{\frac{u_{i3}}{R_3} + \frac{u_{i4}}{R_4}}{\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}} = \frac{\frac{3}{1} + \frac{4}{1}}{\frac{1}{1} + \frac{1}{1}} = 3.5\text{V}$$

$$u''_o = (1 + \frac{R_F}{R})u_+ = (1 + \frac{1}{1}) \times 3.5 = 7\text{V}$$

合成: 结果 $u_o = u'_o + u''_o = -1.5 + 7 = 5.5\text{V}$

16.2.11 求图 16.24 所示电路的 u_o 与 u_i 的运算关系式。

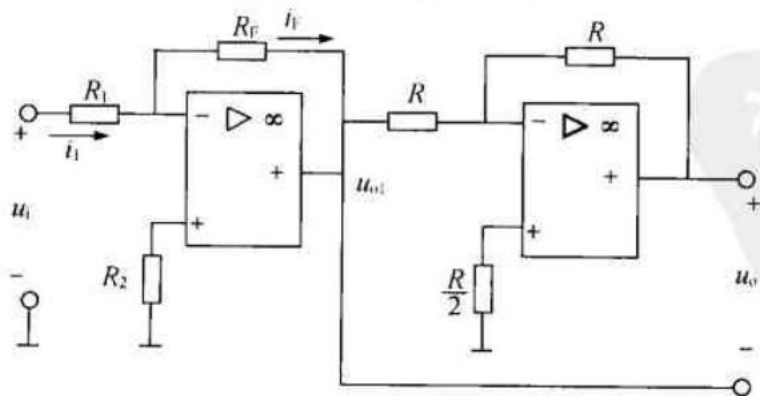


图 16.24

【知识点窍】 二级运算放大电路。

【逻辑推理】 $u_o = u_{o2} - u_{o1}$, 两级都是反相放大器, 利用“虚短”、“虚断”分析。

【解题过程】 对第一级, 因为 $u_+ = u_- = 0$, 且 $i_1 = i_F$

$$i_F = -\frac{u_{o1}}{R_F}, i_1 = \frac{u_1}{R_1}$$

所以

$$\frac{u_{o1}}{R_F} = -\frac{u_1}{R_1}, u_{o1} = -\frac{R_F}{R_1} u_1$$

对第二级

$$u_{o2} = -\frac{R}{R} u_{o1} = -\frac{R}{R} \left(-\frac{R_F}{R_1}\right) u_1 = \frac{R_F}{R_1} u_1$$

$$\text{所以 } u_o = u_{o2} - u_{o1} = \frac{R_F}{R_1} u_1 - \left(-\frac{R_F}{R_1} u_1\right) = 2 \frac{R_F}{R_1} u_1$$

16.2.12 有一个两信号相加的反相加法运算电路(原教材图 16.2.6),其电阻 $R_{11} = R_{12} = R_F$ 。如果 u_{i1} 和 u_{i2} 分别为图 16.25 所示的三角波和矩形波,试画出输出电压的波形。

【知识点窍】 加法运算电路。

【逻辑推理】 利用理想运放“虚短”,“虚断”的特性可知 i_+ , i_- , u_+ , u_- 均为 0,由欧姆定律可得到 i_1 , i_2 与 u_{i1} , u_{i2} 的关系,再由 KCL 定律可得出输出电压 u_o 与 u_{i1} , u_{i2} 的关系。

【解题过程】 重画原教材图 16.2.6,如图 16.26(a) 所示

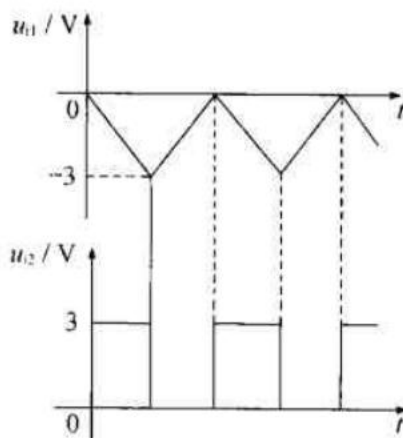


图 16.25

$$i_+ = i_- = 0, u_+ = u_- = 0$$

由

$$i_1 = \frac{u_{i1}}{R_{11}}, i_2 = \frac{u_{i2}}{R_{12}}$$

又因为

$$i_1 + i_2 = i_3$$

于是

$$u_o = -\left(\frac{R_F}{R_{11}} u_{i1} + \frac{R_F}{R_{12}} u_{i2}\right) = -(u_{i1} + u_{i2})$$

当 $t = 0$ 时, $u_{i1} = 0$, u_{i2} 由 0 跳变到 +3V, 故 u_o 由 0 跳变到 -3V。

当 $t = t_1$ 时, $u_{i1} = -3V$, u_{i2} 由 +3V 跳变到 0, 故 u_o 由 0 跳变到 +3V。

在 $t = 0 \sim t_1$ 期间,

$$u_o = -(u_{i1} + 3) = -[(0 \sim -3) + 3] = -3V \sim 0, \text{一条直线。}$$

在 $t = t_1 \sim t_2$ 期间,

$$u_o = -(u_{i1} + 0) = -u_{i1} = +3V \sim 0, \text{一条直线。}$$

当 $t = t_2$ 时,

重复 $t = 0$ 时刻的状态。

依次类推,可画出 u_o 波形如图 16.26(b) 所示。

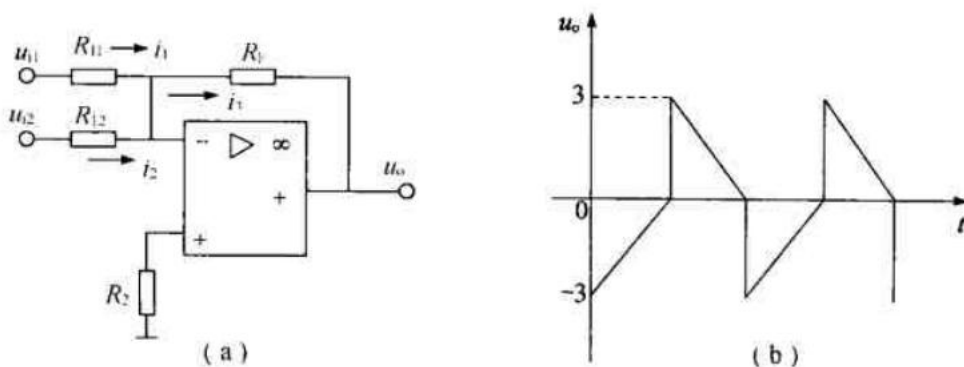


图 16.26

16.2.13 求图 16.27 所示的电路中 u_o 与各输入电压的运算关系式。

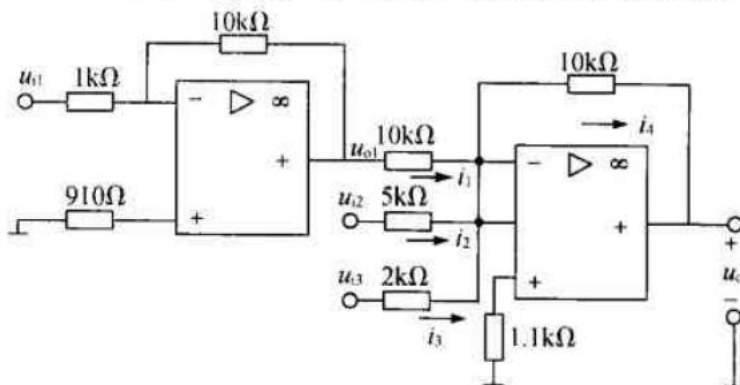


图 16.27

【知识点窍】 二级运算放大电路。

【逻辑推理】 第一级,反相放大器: $u_{o1} = -\frac{10}{1}u_{i1} = -10u_{i1}$,

第二级,反相加法器: $u_{i2} = u_{i2} = 0$, 由 KCL 定律: $i_1 + i_2 + i_3 = i_4$, $\frac{u_{o1}}{10} + \frac{u_{i2}}{5} + \frac{u_{i3}}{2} = -\frac{u_o}{10}$,

于是可求 u_o 。

【解题过程】 第一级为反比例运算电路,利用题 16.2.6 的结论,有

$$u_{o1} = -\frac{10}{1}u_{i1} = -10u_{i1}$$

第二级为反相加法运算电路,利用题 16.2.7 的结论,有

$$u_o = -\left(\frac{10}{10}u_{o1} + \frac{10}{5}u_{i2} + \frac{10}{2}u_{i3}\right) = -(-10u_{i1} + 2u_{i2} + 5u_{i3}) = 10u_{i1} - 2u_{i2} - 5u_{i3}$$

16.2.14 图 16.28 所示是利用两个运算放大器组成的具有较高输入电阻的差分放大电路。试求出 u_o 与 u_{i1} 、 u_{i2} 的运算关系式。

【知识点窍】 二级运算放大电路。

【逻辑推理】 二级均是同比例放大器,利用“虚短”、“虚断”逐级计算。

【解题过程】 前级为同比例运算电路。

$$u_{o1} = \left(1 + \frac{R_1/K}{R_1}\right)u_{i1} = \left(1 + \frac{1}{K}\right)u_{i1}$$

第二级为减法运算电路。

由于 $u_+ = u_{i2}$, 根据“虚短”: $u_+ = u_-$, 所以 $u = u_{i2}$,

由“虚断”可知: $i_2 = i_{F2}$, 即

$$\frac{u_{o1} - u_{i2}}{R_2} = \frac{u_{i2} - u_o}{KR_2}$$

整理, 得

$$u_o = (1 + \frac{KR_2}{R_2})u_{i2} - \frac{KR_2}{R_2}u_{o1} = (1 + K)u_{i2} - K(1 + \frac{1}{K})u_{i1} = (1 + K)(u_{i2} - u_{i1})$$

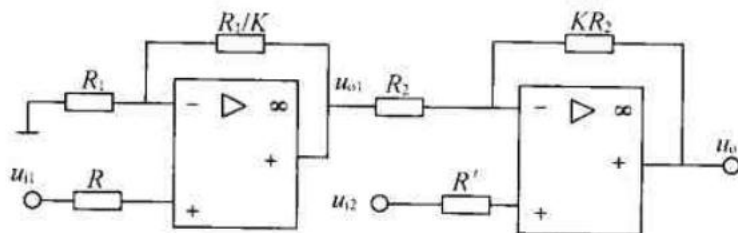


图 16.28

16.2.15 在原教材图 16.2.7 所示的差动运算电路中, $R_1 = R_2 = 4\text{k}\Omega$, $R_F = R_3 = 20\text{k}\Omega$, $u_{i1} = 1.5\text{V}$, $u_{i2} = 1\text{V}$, 试求: 输出电压 u_o 。

【知识点窍】 差动运算电路。

【解题过程】 重画原教材图 16.2.7 如图 16.29 所示。

由分压公式可知

$$u_+ = \frac{R_3}{R_2 + R_3} u_{i2}$$

利用“虚短”可知: $u_- = u_+$, 于是

$$u_- = \frac{R_2}{R_2 + R_3} u_{i2}$$

由“虚断”可知: $\frac{u_{i1} - u_-}{R_1} = \frac{u_- - u_o}{R_F}$ 因此

$$u_o = (1 + \frac{R_F}{R_1})u_- - \frac{R_F}{R_1}u_{i1}$$

$$u_o = (1 + \frac{R_F}{R_1}) \frac{R_2}{R_2 + R_3} u_{i2} - \frac{R_F}{R_1} u_{i1} = (1 + \frac{20}{4}) \cdot \frac{20}{4 + 20} \times 1 - \frac{20}{4} \times 1.5 = -2.5\text{V}$$

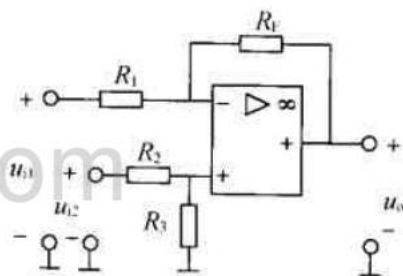


图 16.29

16.2.16 电路如图 16.30 所示。知 $u_i = 0.5\text{V}$, $R_1 = R_2 = 10\text{k}\Omega$, $R_3 = 2\text{k}\Omega$, 试求 u_o 。

【知识点窍】 运算放大电路分析。

【逻辑推理】 利用“虚短”和“虚断”的性质来求解。

【解题过程】 由“虚短”概念知 $u_{+2} = u_{-2}$, $u_{-1} = u_{+1}$

由 KVL 定律: $u_{+1} = -u_{-2} = iR_2$, 于是

$$u_{-1} - u_{-2} = u_i = u_{+1} - u_{-2}$$

即 $u_i = iR_3$

所以 $i = \frac{u_i}{R_3}$

又由 KVL 定律以及“虚断”可知

$$u_o = i(R_1 + R_2 + R_3) = \frac{u_i}{R_3}(R_1 + R_2 + R_3)$$

代入数据,得

$$u_o = \frac{0.5}{2}(10 + 10 + 2) = 5.5 \text{ V}$$

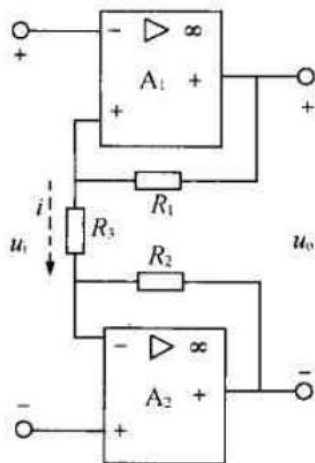


图 16.30

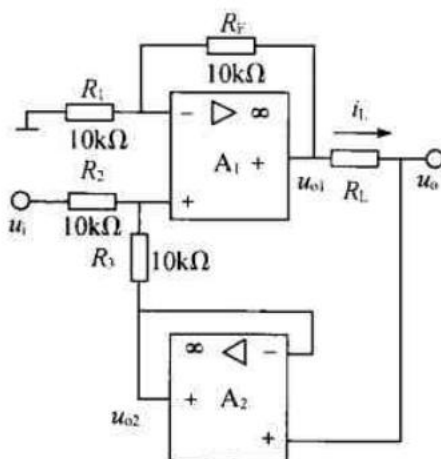


图 16.31

16.2.17 电路如图 16.31 所示,试证明: $i_L = \frac{u_i}{R_L}$ 。

【知识点窍】 运算放大电路分析。

【逻辑推理】 A_2 是跟随器, $u_{o2} = u_o$, 于是由 $u_{+1} = u_{-1}$, $i_{+1} = i_{-1} = 0$ 可证。

【解题过程】 $u_{o2} = u_o$ 。

由“虚断”可知: R_2 和 R_3 上电流大小相等方向相同,即

$$\frac{u_i - u_+}{R_2} = \frac{u_+ - u_{o2}}{R_3}$$

所以

$$\frac{\frac{u_i}{R_2} + \frac{u_{o2}}{R_3}}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} = u_+$$

已知 A_2 为跟随器,则 $u_{o2} = u_o$,所以

$$u_+ = \frac{1}{2}(u_i + u_o)$$

由“虚短”和“虚断”,对于 A_1 ,有

$$u_+ = u_-, i_{R1} = i_{RF}$$

所以, $u_+ = \frac{R_1}{R_1 + R_F} u_{o1}$, 即

$$u_{o1} = (1 + \frac{R_F}{R_1}) u_+ = (1 + \frac{10}{10}) \times \frac{1}{2}(u_i + u_o) = u_i + u_o$$

所以

$$i_L = \frac{u_{o1} - u_o}{R_L} = \frac{1}{R_L}(u_i + u_o - u_o) = \frac{u_i}{R_L}$$

得证。

16.2.18 在图 16.32 所示积分运算电路中,如果 $R_1 = 10\text{k}\Omega$, $C_F = 1\mu\text{F}$, $u_i = -1\text{V}$ 时,试问: u_o 由起始值 0 达到 10V (设为运算放大器的最大输出电压) 所需要的时间是多少? 超出这段时间后输出电压会呈现什么样的变化规律? 如果要把 u_o 与 u_i 保持积分运算关系的有效时间增大 10 倍, 应如何改变电路参数值?

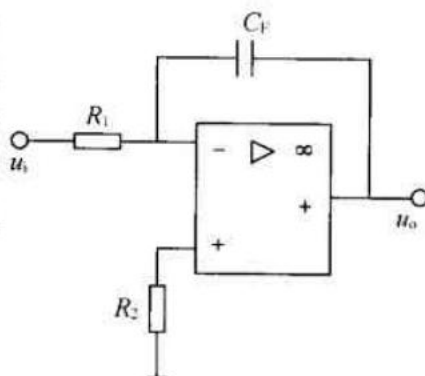


图 16.32

【知识点窍】 积分运算电路。

【逻辑推理】 $u_i = -1\text{V}$ 恒定, 于是, $u_o = -\frac{u_i}{R_1 C_F} t + u_i(0)$ 。

【解题过程】 由“虚短”和“虚断”可知:

$$i_1 = i_F, u_+ = u_- = 0$$

所以 $i_1 = \frac{u_i}{R_1}, i_F = -\frac{du_o}{dt}$

$$u_i = -R_1 C_F \frac{du_o}{dt}$$

$$\text{则 } u_o = -\frac{1}{R_1 C_F} \int u_i dt + u_i(0)$$

因为 $u_i = -1\text{V}$ 恒定, 且初始情况下 $u_o(0) = 0$

$$\text{于是 } u_o = -\frac{U_i}{R_1 C_F} t$$

$$\text{因此 } t = \frac{-u_o R_1 C_F}{U_i} = \frac{-10 \times 10 \times 10^3 \times 1 \times 10^{-6}}{-1} = 0.1\text{s}$$

即所需要的时间为 0.1s 。超出这段时间后运算放大器进入饱和状态, 输出电压保持不变。若要使积分时间 $t' = 10t = 1\text{s}$, 则

$$C_F R_1 = \frac{-U_i}{u_o} t' = \frac{1}{10} \times 1 = 0.1\text{s}$$

可将 R_1 或 C_F 增大 10 倍, 即采用 $R_1 = 100\text{k}\Omega$, $C_F = 1\mu\text{F}$ 或 $R_1 = 10\text{k}\Omega$, $C_F = 10\mu\text{F}$ 。

16.2.19 在图 16.33 所示的电路中, 电源电压为 $\pm 15\text{V}$, $u_{i1} = 1.1\text{V}$, $u_{i2} = 1\text{V}$ 。试求: 接入输入电压后, 输出电压 u_o 由 0 上升到 10V 所需时间为多少?

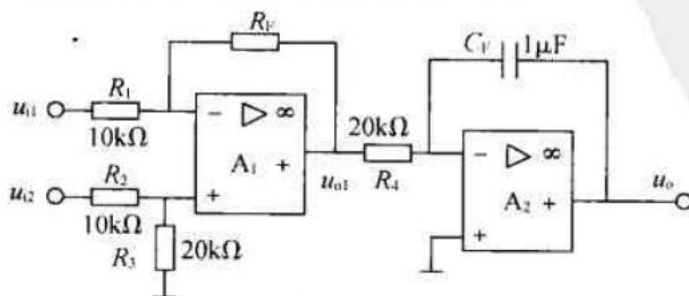


图 16.33

【知识点窍】 二级运算放大电路。

【逻辑推理】 第一级是减法电路,第二级是积分电路。

【解题过程】 由“虚短”可知 $u_- = u_+ = \frac{R_3}{R_2 + R_3} u_{i2}$

由“虚断”则有 $\frac{u_{i1} - u_-}{R_1} = \frac{u_- - u_{o1}}{R_F}$

所以

$$\begin{aligned} u_{o1} &= R_F \left[-\frac{u_{i1}}{R_1} - \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_F} \right) u_- \right] \\ u_{o1} &= -\frac{R_F}{R_1} u_{i1} + \frac{R_3}{R_2 + R_3} \times \left(1 + \frac{R_F}{R_1} \right) u_{i2} \\ &= -\frac{20}{10} \times 1.1 + \frac{20}{10 + 20} \times \left(1 + \frac{20}{10} \right) \times 1 = -0.2 \text{ V} \end{aligned}$$

由于 u_{o1} 恒定,根据题 16.2.16,可知

$$u_o = -\frac{1}{R_4 C_F} \int u_{o1} dt = -\frac{u_{o1}}{R_4 C_F} t$$

于是

$$t = \frac{-u_o}{u_{o1}} R_4 C_F = \frac{-10}{-0.2} \times 20 \times 10^3 \times 1 \times 10^{-6} = 1 \text{ s}$$

16.2.20 按下列各运算关系式画出运算电路,并计算各电阻的阻值,括号中的反馈电阻 R_F 和电容 C_F 是已知值。(1) $u_o = -3u_i$ ($R_F = 50 \text{ k}\Omega$); (2) $u_o = -(u_{i1} + 0.2u_{i2})$ ($R_F = 100 \text{ k}\Omega$); (3) $u_o = 5u_i$ ($R_F = 20 \text{ k}\Omega$); (4) $u_o = 0.5u_i$ ($R_F = 10 \text{ k}\Omega$); (5) $u_o = 2u_{i2} - u_{i1}$ ($R_F = 10 \text{ k}\Omega$); (6) $u_o = -200 \int u_i dt$ ($C_F = 0.1 \mu\text{F}$); (7) $u_o = -10 \int u_{i1} dt - 5 \int u_{i2} dt$ ($C_F = 1 \mu\text{F}$)。

【知识点窍】 各种运算放大电路。

【逻辑推理】 (1) 反比例放大电路;(2) 反相加法电路;(3) 同比例放大电路;(4) 反比例放大电路;(5) 减法放大电路;(6) 积分电路;(7) 减法积分电路。

【解题过程】 (1) $u_o = -3u_i = -\frac{R_F}{R_1} u_i$

$$\text{即 } \frac{R_F}{R_1} = 3, R_1 = \frac{R_F}{3} = \frac{50}{3} \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = \frac{R_1 \cdot R_F}{R_1 + R_F} = \frac{\frac{50}{3} \times 50}{\frac{50}{3} + 50} = 12.5 \text{ k}\Omega$$

反比例运算电路如图 16.34 所示。

$$(2) u_o = -(u_{i1} + 0.2u_{i2}) = -\left(\frac{R_F}{R_{i1}} u_{i1} + \frac{R_F}{R_{i2}} u_{i2} \right)$$

$$\text{即 } R_{i1} = R_F = 100 \text{ k}\Omega$$

$$R_{i2} = \frac{R_F}{0.2} = \frac{100}{0.2} = 500 \text{ k}\Omega$$

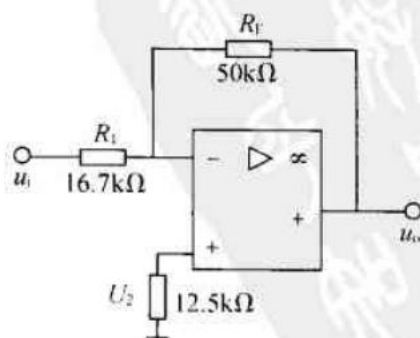


图 16.34

$$\begin{aligned} \text{所以 } R_2 &= R_{11} // R_{12} // R_F \\ &= 100 // 500 // 100 \approx 45.5 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

反相加法运算电路如图 16.35 所示。

$$(3) \quad u_o = 5u_i = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right)u_i$$

$$\text{即 } 1 + \frac{R_F}{R_1} = 5$$

$$\text{所以 } R_1 = \frac{R_F}{4} = \frac{20}{4} = 5 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = R_1 // R_F = 5 // 20 = 4 \text{ k}\Omega$$

同相比值运算电路如图 16.36 所示。

$$(4) \quad u_o = 0.5u_i = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) \frac{R_3}{R_2 + R_3} u_i$$

$$\begin{cases} \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) \frac{R_3}{R_2 + R_3} = 0.5 \\ \frac{R_1 R_F}{R_1 + R_F} = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} \end{cases}$$

令 $R_3 = R_F, R_1 = R_2$, 则

$$\frac{R_1 + R_F}{R_1} \times \frac{R_3}{R_2 + R_3} = \frac{R_F}{R_1} = 0.5$$

得 $R_2 = R_1 = 20 \text{ k}\Omega, R_3 = R_F = 10 \text{ k}\Omega$

电路如图 16.37 所示。

$$(5) \quad u_o = 2u_{i2} - u_{i1} = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right)u_{i2} - \frac{R_F}{R_1}u_{i1}$$

$$\text{则 } \frac{R_F}{R_1} = 1, 1 + \frac{R_F}{R_1} = 2$$

所以 $R_1 = R_F = 10 \text{ k}\Omega$

$$R_2 = R_1 // R_F = 5 \text{ k}\Omega$$

电路如图 16.38 所示。

$$(6) \quad u_o = -200 \int u_i dt = -\frac{1}{R_1 C_F} \int u_i dt$$

$$\text{故 } R_1 C_F = \frac{1}{200}$$

$$R_1 = \frac{1}{200 C_F} = \frac{1}{200 \times 0.1 \times 10^{-6}} \Omega = 50 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = R_1 = 50 \text{ k}\Omega$$

反相积分电路如图 16.39 所示。

$$\begin{aligned} (7) \quad u_o &= -10 \int u_{i1} dt - 5 \int u_{i2} dt \\ &= -\frac{1}{R_{11} C_F} \int u_{i1} dt - \frac{1}{R_{12} C_F} \int u_{i2} dt \end{aligned}$$

可利用叠加原理, 先分别对每个积分求解。

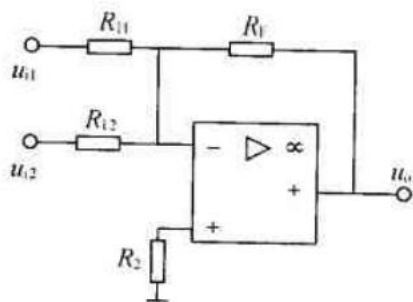


图 16.35

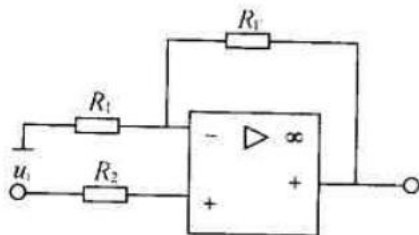


图 16.36

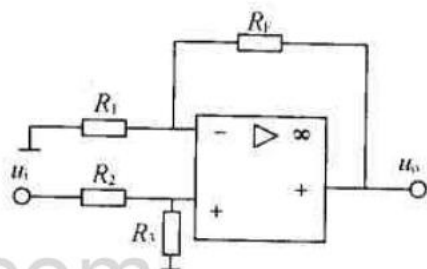


图 16.37

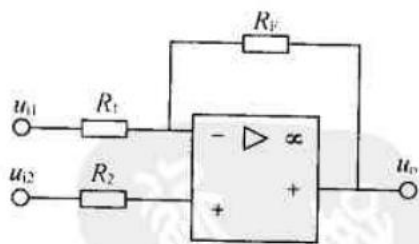


图 16.38

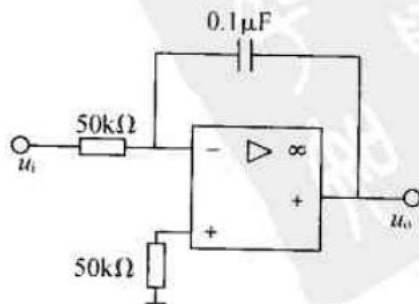


图 16.39

得 $R_{11}C_F = \frac{1}{10}, R_{12}C_F = \frac{1}{5}$

所以

$$R_{11} = \frac{1}{10C_F} = \frac{1}{10 \times 1 \times 10^{-6}} \Omega = 100 \text{ k}\Omega$$

$$R_{12} = \frac{1}{5C_F} = \frac{1}{5 \times 1 \times 10^{-6}} \Omega = 200 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = R_{11} // R_{12} = \frac{100 \times 200}{100 + 200} \approx 66.7 \text{ k}\Omega$$

积分加法运算电路如图 16.40 所示。

16.2.21 电路如图 16.41 所示,试求 u_o 与 u_{i1}, u_{i2} 的关系式。

【知识点窍】 积分运算电路,基尔霍夫电压定律。

【逻辑推理】 $i_- = i_+ = 0, u_- = u_+$ 。

【解题过程】

$$i_1 = i_- = \frac{u_{i1} - u_-}{R}$$

$$i_2 = \frac{u_{i2} - u_+}{R} = C \frac{du_+}{dt}$$

$$RC \frac{du_+}{dt} + u_+ = u_{i2}$$

$$u_+ + \frac{1}{RC} \int u_+ dt = \frac{1}{RC} \int u_{i2} dt$$

$$u_+ = \frac{1}{RC} \int u_{i2} dt - \frac{1}{RC} \int u_+ dt$$

由于

$$i_1 = C \frac{du_c}{dt} = \frac{u_{i1} - u}{R} = \frac{u_{i1} - u_+}{R},$$

$$u_- = u$$

两边积分:

$$u_c - \frac{1}{RC} \int u_{i1} dt = -\frac{1}{RC} \int u_+ dt$$

得

$$\frac{1}{RC} \int u_+ dt = \frac{1}{RC} \int u_{i1} dt - u_c$$

由

$$u_o = u - u_c = u_+ - u_c = \frac{1}{RC} \int u_{i2} dt - \frac{1}{RC} \int u_+ dt - u_c$$

$$= \frac{1}{RC} \int u_{i2} dt - \left(\frac{1}{RC} \int u_{i1} dt - u_c \right) - u_c$$

$$= \frac{1}{RC} \int (u_{i2} - u_{i1}) dt$$

16.2.22 在图 16.2.9 所示电路中,如果 $R_1 = 50 \text{ k}\Omega, C_F = 1 \mu\text{F}, u_i$ 如图 16.42 所示,试画出输出电压 u_o 的波形。设 $u_c(0) = 0$ 。

【知识点窍】 积分运算电路。

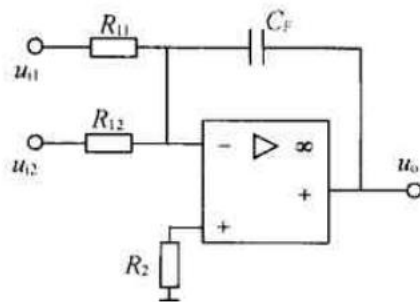


图 16.40

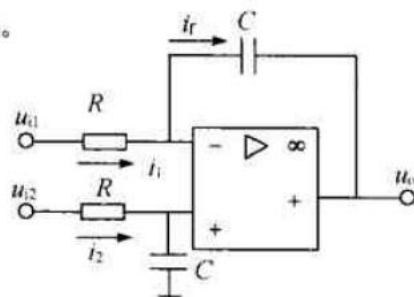


图 16.41

【逻辑推理】 电路为反相积分电路, u_i 为恒值时, u_o 为 u_i/V 三角波。

【解题过程】 (1) $t = 0 \sim 10\text{ms}$ 时:

$$\begin{aligned} u_o &= -\frac{1}{R_1 C_F} \int u_i dt \\ &= -\frac{1}{50 \times 10^3 \times 1 \times 10^{-6}} \int 5 dt \text{ V} \\ &= -\frac{5}{50 \times 10^3 \times 1 \times 10^{-6}} t \text{ V} \\ &= -100t \text{ V} \end{aligned}$$

(2) $t = 10 \sim 20\text{ms}$ 时:

$$u_o = -\frac{1}{R_1 C_F} \int (-5) dt = 100t + K$$

当 $t = 10\text{ms} = \frac{1}{100}\text{s}$ 时, $u_o = -1\text{V}$, 故 $K = -2$ 。于是得 u_o 的波形如图 16.43 所示。

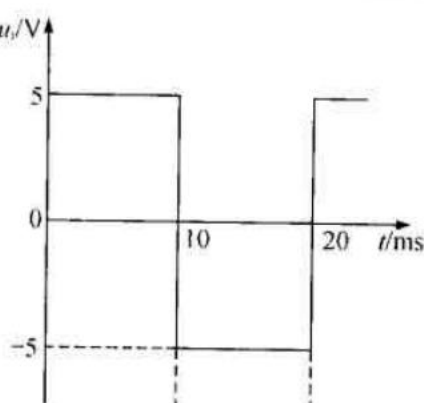


图 16.42

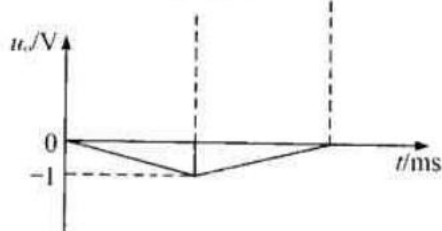


图 16.43

16.2.23 在图 16.44 中, 求 u_o 。

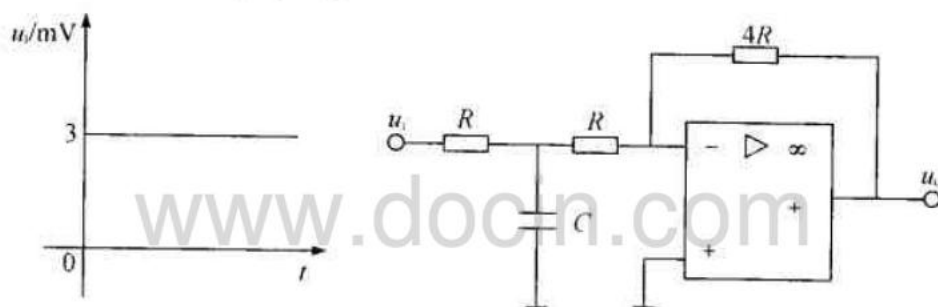


图 16.44

【知识点窍】 电路的瞬态分析。

【逻辑推理】 随着 C 的充电, u_- 发生变化, u_o 也随之变化, 所以 u_i 从 0 跳变到 3V 时, 应进行瞬态分析。

【解题过程】 由于电路同相端接“地”, 故反相端为“虚地”。

由于电容电压不突变, 则

$$u_C(0_+) = u_C(0_-) = 0$$

稳态时, 电路开路, $u_C(\infty) = \frac{1}{2}u_i = 1.5\text{mV}$

$R // R$ 为 RC 回路的串联电阻, 故时间常数 $\tau = \frac{1}{2}RC$ 。

由于是零状态响应, 故 $u_C(t) = u_C(\infty)(1 - e^{-t/\tau}) = 1.5(1 - e^{-2t/RC})\text{mV}$ 。

又根据反相比值运算关系有

$$u_o(t) = -\frac{4R}{R}u_c(t) = -4 \times 1.5(1 - e^{2t/RC}) = -6(1 - e^{2t/RC})\text{mV}$$

所以 $u_o(t) = 6(e^{-2t/RC} - 1)\text{mV}$

16.2.24 图 16.45 所示是一基准电压电路, u_o 可作基准电压用, 试计算 u_o 的调节范围。

【知识点窍】 基准电压电路。

【逻辑推理】 U_Z 为稳压管, 故其可看做直流恒压源, 而放大器为电压跟随器, 即 $u_o = u_+$ 。

【解题过程】 运算放大器组成一个电压跟随器, 所以有 $u_o = u_- = u_+$, 故只要求出 u_+ 的调节范围即可得 u_o 的调节范围。

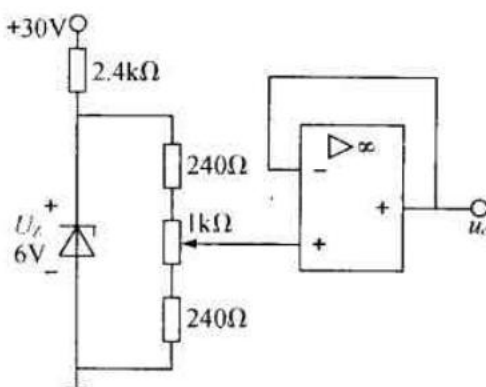


图 16.45

当电位器滑到最上端时

$$u_+ = \frac{U_Z}{1k + 2 \times 240} (1k + 240) = \frac{6V}{1000 + 2 \times 240} \times (1000 + 240) = 5.02V$$

当电位器滑到最下端时

$$u_+ = \frac{U_Z}{1k + 2 \times 240} \times 240 = \frac{6V}{1000 + 2 \times 240} \times 240 \approx 0.97V$$

因此 $u_o = u_-$ 的调节范围为 $0.97 \sim 5.02V$ 。

16.2.25 图 16.46 所示是应用运算放大器测量电压的原理电路, 共有 $0.5V, 1V, 5V, 10V, 50V$ 五种量程, 试计算: 电阻 $R_{11} \sim R_{15}$ 的阻值。输出端接有满量程 $5V, 500\mu A$ 的电压表。

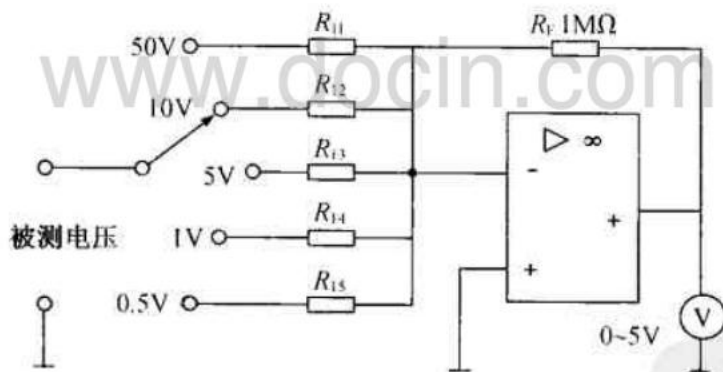


图 16.46

【知识点窍】 运算放大器的应用。

【逻辑推理】 图 16.46 所示电路实质是每次仅有一个输入, 因此是反相比值运算电路, 于

是有 $\frac{\dot{U}_i}{R_i} = -\frac{\dot{U}_o}{R_F}$, 则 $R_i = -\frac{\dot{U}_i}{\dot{U}_o} R_F$, 满偏时, $R_i = \frac{U_{im}}{U_{om}} R_F, U_{im} = 0.5, 1, 5, 10, 50V, U_{om} = 5V$ 。

【解题过程】 由于是反相比值运算电路:

$$\frac{u_{or}}{u_i} = -\frac{R_F}{R_{1x}}$$

这里, x 对应 1, 2, 3, 4, 5, 因此

$$R_{ix} = \frac{-u_i}{u_{ox}} R_F$$

又因为每个量程上输入最大时输出均为电压表满量程 5V, 故有

$$R_{11} = \frac{50}{5} \times 1\text{M}\Omega = 10\text{M}\Omega, R_{12} = \frac{10}{5} \times 1\text{M}\Omega = 2\text{M}\Omega$$

$$R_{13} = \frac{5}{5} \times 1\text{M}\Omega = 1\text{M}\Omega, R_{14} = \frac{1}{5} \times 1\text{M}\Omega = 200\text{k}\Omega$$

$$R_{15} = \frac{0.5}{5} \times 1\text{M}\Omega = 100\text{k}\Omega$$

16.2.26 图 16.47 所示是应用运算放大器测量小电流的原理电路, 试计算: 电阻 $R_{F1} \sim R_{F5}$ 的阻值。输出端接的电压表同上题。

【知识点窍】 运算放大器的应用。

【逻辑推理】 $i_+ = i_- = 0, u_o = -i_i R_F$ 。于是 $U_{om} = I_{im} R_F, R_F = R_{F1}, \dots, \sum_{i=1}^5 R_{Fi}$ 五种值。

【解题过程】 由“虚短”可知: $u_+ = u_- = 0$ 。而

又因为“虚断”, 可以得到 $i_+ = i_-$, 所以

输出电压 $u_o = -i_i \cdot R_F$

设各挡输入电流为 $I_x, x = 1, 2, 3, 4, 5$ 。

$$I_1 = 5\text{mA}, I_2 = 0.5\text{mA}, I_3 = 0.1\text{mA}, I_4 = 50\mu\text{A}, I_5 = 10\mu\text{A}$$

$$\text{于是, } R_F = \frac{u_o}{-I_x}$$

$$\text{故有 } R_{F1} = \frac{5\text{V}}{5\text{mA}} = 1\text{k}\Omega, R_{F2} = \frac{5\text{V}}{0.5\text{mA}} - R_{F1} = 9\text{k}\Omega$$

$$R_{F3} = \frac{5\text{V}}{0.1\text{mA}} - R_{F1} - R_{F2} = 50 - 10 = 40\text{k}\Omega$$

$$R_{F4} = \frac{5\text{V}}{50 \times 10^{-6}} - R_{F1} - R_{F2} - R_{F3} = 100 - 50 = 50\text{k}\Omega$$

$$R_{F5} = \frac{5\text{V}}{10 \times 10^{-6}} - (R_{F1} + R_{F2} + R_{F3} + R_{F4}) = 500 - 100 = 400\text{k}\Omega$$

16.2.27 图 16.48 所示是应用运算放大器测量电阻的原理电路, 输出端接的电压表同上题。当电压表指示 5V 时, 试计算被测电阻 R_F 的阻值。

【知识点窍】 运算放大器的应用。

【逻辑推理】 反比例运算。

$$\text{【解题过程】 } R_F = \left| \frac{u_o}{u_i} \right| \times R_1 = \left| \frac{-5}{10} \right| \times 1\text{M}\Omega =$$

500kΩ

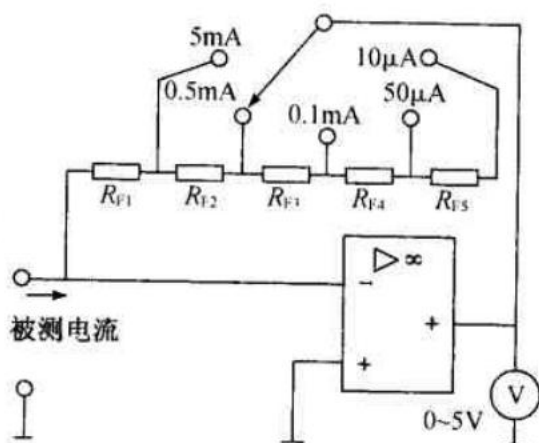


图 16.47

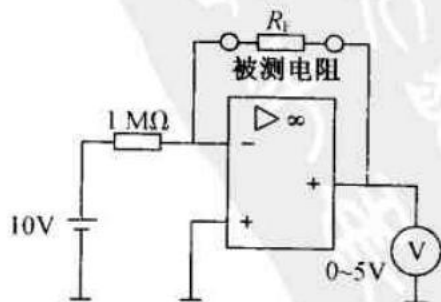


图 16.48

16.3.3 画出图 16.49 所示各电压比较器的传输特性。

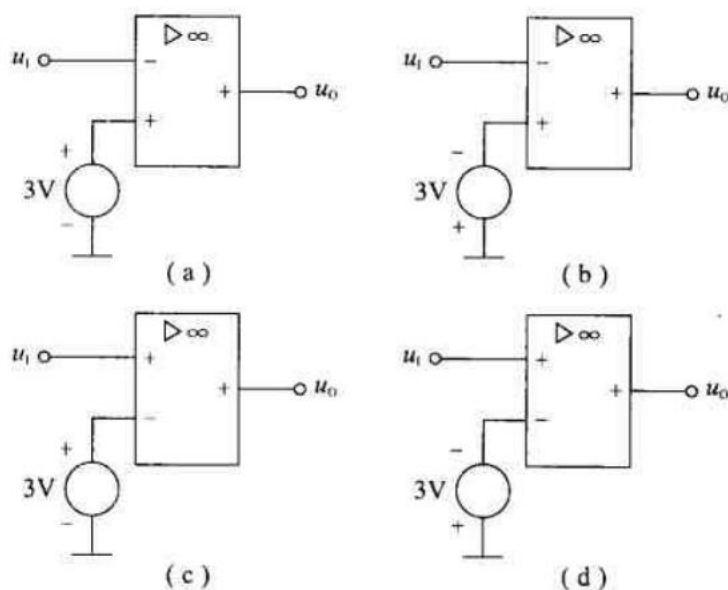
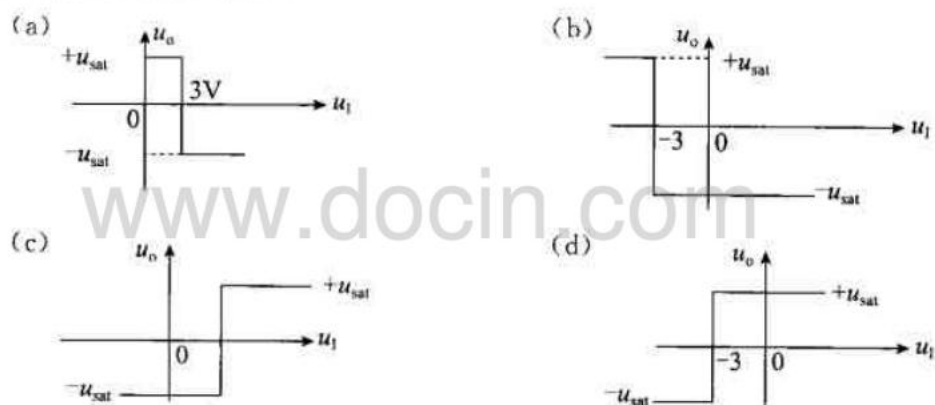


图 16.49

【知识点窍】电压比较器的输出特性。

【解题过程】如图解 16.49 所示：



图解 16.49

16.3.4 在图 16.50 所示电路中,运算放大器的最大输出电压 $U_{opp} = \pm 12V$,稳压二极管的稳定电压 $U_Z = 6V$,其正向压降 $U_D = 0.7V$, $u_i = 12\sin\omega t V$ 。在参考电压 $U_R = +3V$ 和 $-3V$ 两种情况下,试画出传输特性和输出电压 u_o 的波形。

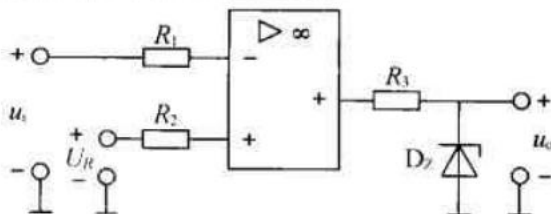


图 16.50

【知识点窍】运算放大器的性质,稳压管的性质。

【逻辑推理】稳压管 D_Z 的作用是限幅,本电路是带限幅的电压比较器,输出为管子上的

压降,但是由于只用一个稳压二极管,反向工作时, $u_o = 6\text{V}$,正向导通时, $u_o = -0.7\text{V}$ 。

【解题过程】 由于稳压管的作用 $u_{o\max} = +6\text{V}$ 和 $u_{o\min} = -0.7\text{V}$ 。

当 $u_i > U_R$ 时, $u_o = -0.7\text{V}$; 当 $u_i < U_R$ 时, $u_o = +6\text{V}$

由此可画出输入电压波形如图 16.51(a) 所示; 当 $U_R = +3\text{V}$ 时, u_o 波形如图 16.51(b) 所示; 当 $U_R = -3\text{V}$ 时, u_o 波形如图 16.51(c) 所示, 传输特性如图 16.52 所示。

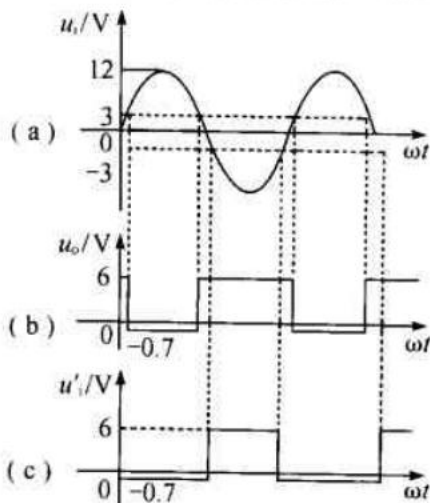


图 16.51

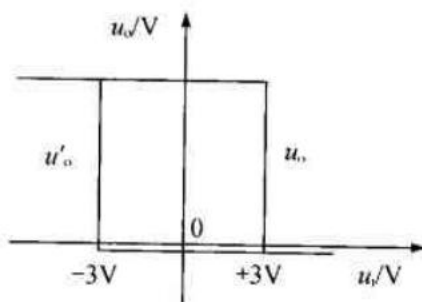


图 16.52

注: 这里将 $U_R = 3\text{V}$ 和 $U_R = -3\text{V}$ 同时标在图 16.55 上, 并非滞回比较器。

16.3.5 在图 16.53(a) 中, 运算放大器的最大输出电压 $U_{OM} = \pm 12\text{V}$, 参考电压 $U_R = 3\text{V}$, 输入电压 u_i 为三角波电压, 如图 16.53(b) 所示, 试画出输出电压 u_o 的波形。

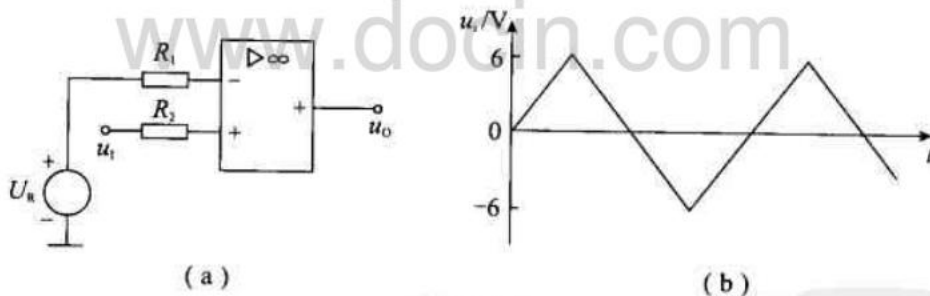
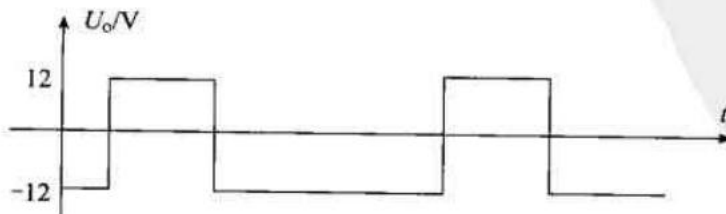


图 16.53

【解题过程】 $U_R = 3\text{V}$, 正相输入端输入 u_o 波形如图解 16.53 所示。

$u_i > 3\text{V}$ 时, $u_o = +12\text{V}$; $u_i < 3\text{V}$ 时, $u_o = -12\text{V}$ 。



图解 16.53

16.3.6 图 16.54 是火灾报警电路的方框图。 u_{i1} 和 u_{i2} 分别来自两个温度传感器, 它们安装在室内同一处; 一个安装在塑料壳内, 产生 u_{i1} ; 另一个安装在金属板上, 产生 u_{i2} 。无火情时,

$u_{i1} = u_{i2}$, 声光报警电路不响不亮。一旦发生火情, 安装在金属板上的温度传感器因金属板导热快而温度升高较快, 另一个温度上升较慢, 于是产生差值电压($u_{i2} - u_{i1}$), 当这差值电压增高到一定数值时, 发光二极管发亮, 蜂鸣器发声, 同时报警。请按图 16.54 所示方框图设计电路。

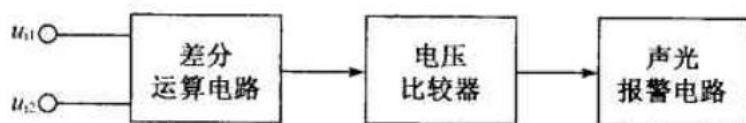
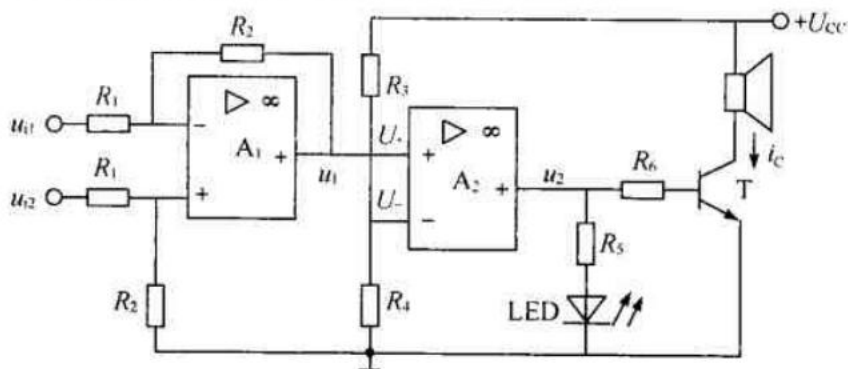


图 16.54

【解题过程】 所设计的火灾报警电路如图解 16.54 所示。



图解 16.54

无火情时 $u_{i1} = u_{i2}$, 故差分放大输出 $u_1 = 0$

$$U_- = \frac{R_4}{R_3 + R_4} U_{CC} > U_+ = 0$$

所以电压比较器输出 $U_2 < 0$, 故 LED 不发光。

同时 T 不导通, $I_C = 0$, 故蜂鸣器不响。发生火情时, u_{i1} 与 u_{i2} 必不等, 当差值大到使 $u_+ = u_1 > U_- = \frac{R_4}{R_3 + R_4} U_{CC}$ 时, $U_2 > 0$, 使得 LED 发光, 蜂鸣器开始报警。

C 拓 宽 题

16.2.28 测量放大电路用于放大从测量电路或传感器送来的微弱信号, 对它的主要要求是输入电阻高和共模抵制比大。图 16.55 所示是由三个运算放大器组成的测量放大电路。第一级由两个同相输入运算电路组成(即为习题 16.2.16 的电路), 其输入电阻高, 并由于电路结构对称, 可抵制零点漂移或共模输入; 第二级是差分放大电路, 用于放大差模信号。试求输出电压 u_o 和电压放大倍数 A_d 。

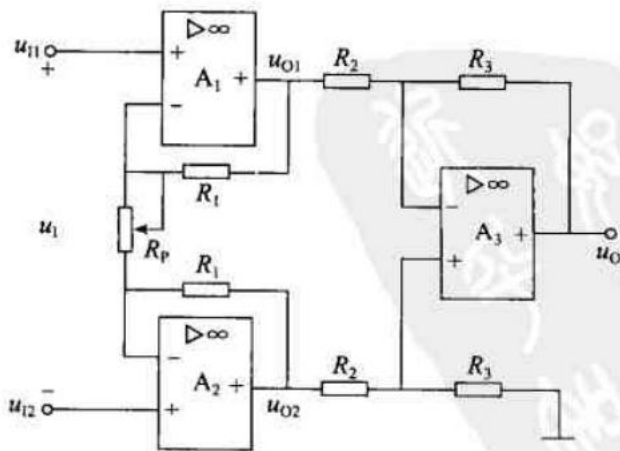
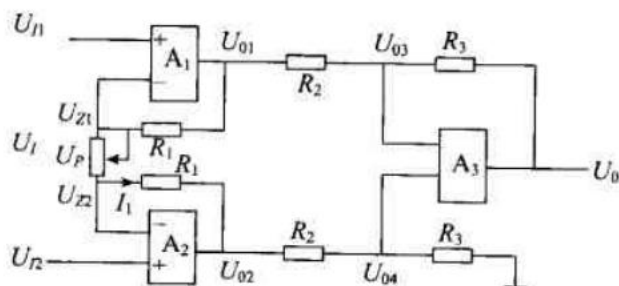


图 16.55

【解题过程】 由图分析可得:



$$I_1 = \frac{u_{21} - u_{22}}{R_P} = \frac{u_2}{R_P}$$

$$\therefore u_{(2)} = u_{12} - I_1 \cdot R_1 = u_{22} - \frac{u_1}{R_P} \cdot R_1$$

$$u_{(3)} = u_{(3)} = \frac{R_3}{R_2 + R_3} u_{(2)}$$

$$\frac{u_{(3)} - u_{11}}{R_1} = \frac{u_{11} - u_{12}}{R_P} = I_1$$

$$\therefore u_{(3)} = I_1 R_1 + u_{11} = \frac{R_1}{R_P} u_1 + u_{11}$$

$$\text{由虚断: } \frac{u_{(3)} - u_{(3)}}{R_2} = \frac{u_{(3)} - u_{(3)}}{R_3}$$

$$\therefore u_{(3)} = \frac{R_2 + R_3}{R_2} u_{(3)} - R_3 u_{(3)}$$

$$= \frac{R_3}{R_2} \left(u_{12} - \frac{R_1}{R_P} u_1 \right) - R_3 \left(\frac{R_1}{R_P} u_1 + u_{11} \right)$$

$$= \frac{R_3}{R_2} u_{12} - \left(\frac{R_1 R_3}{R_P R_2} + \frac{R_1 R_3}{R_P} \right) u_1 - R_3 u_{11}$$

$$= \frac{R_3}{R_2} \left(1 + \frac{2R_1}{R_P} \right) (u_{12} - u_{11})$$

$$Ad = \frac{u_1}{u_1}$$

16.3.7 图 16.56 所示是由电桥和差分运算电路组成的测温电路。图中 R_t 为热敏电阻，具有正的电阻温度系数， $\alpha = 4 \times 10^{-3} (1/^\circ\text{C})$ ，在 0°C 时的阻值 $R_0 = 51\Omega$ 。 R_1, R_2 和 R_3 为精密固定电阻，其阻值均为 51Ω 。 $R_4 = R_5 = 10\text{k}\Omega, R_6 = R_7 = 100\text{k}\Omega$ 。电源电压 $U = 10\text{V}$ 。试求环境温度分别为 25°C 和 -5°C 时的输出电压 u_o 。

【解题过程】 (1) 环境温度为 25°C

$$R_t = 51(4 \times 10^{-3} \times 25 + 1) = 56.1\Omega$$

$$\therefore u_{11} = \frac{R_3}{R_3 + R_t} u_c = 4.762\text{V} \quad u_{12} = 5\text{V}$$

$$\text{虚断: } u_+ = u_- = \frac{R_7}{R_5 + R_7} \cdot u_{12} = 4.545\text{V}$$

$$\text{虚断: } \frac{u_{11} - u_-}{R_4} = \frac{u_- - u_o}{R_6} \Rightarrow u_o = 2.28\text{V}$$

(2) 环境温度为 -5°C

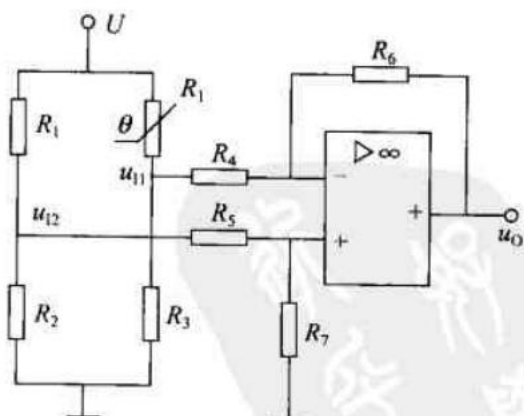


图 16.56

$$R_t = 51(1 - 4 \times 10^{-3} \times 5) = 49.98 \Omega$$

$$u_{i1} = \frac{R_3}{R_3 + R_t} u = 5.05 \text{ V}$$

$$u_{i2} = 5 \text{ V} \quad u_i = u = 4.545 \text{ V}$$

$$\frac{u_{i1} - u_{i2}}{R_4} = \frac{u_{i1} - u_{i2}}{R_5} \Rightarrow u_{i1} = -0.51 \text{ V}$$

16.3.8 图 16.57 所示是液体恒温控制电路。本电路由测温电桥、温度信号放大电路、恒温预置电路、继电器驱动电路、显示电路和电阻丝加热电路六部分组成。当温度在设置值范围内,电桥平衡,加热电路断开,液体处于保温状态;当温度低于设置值时,电桥失去平衡,加热电路接通,液体处于加热状态。图中, R_t 是具有正的电阻温度系数的热敏电阻;电位器 R_p 用于设定液体温度的预置值。试逐级分析该电路的工作原理。

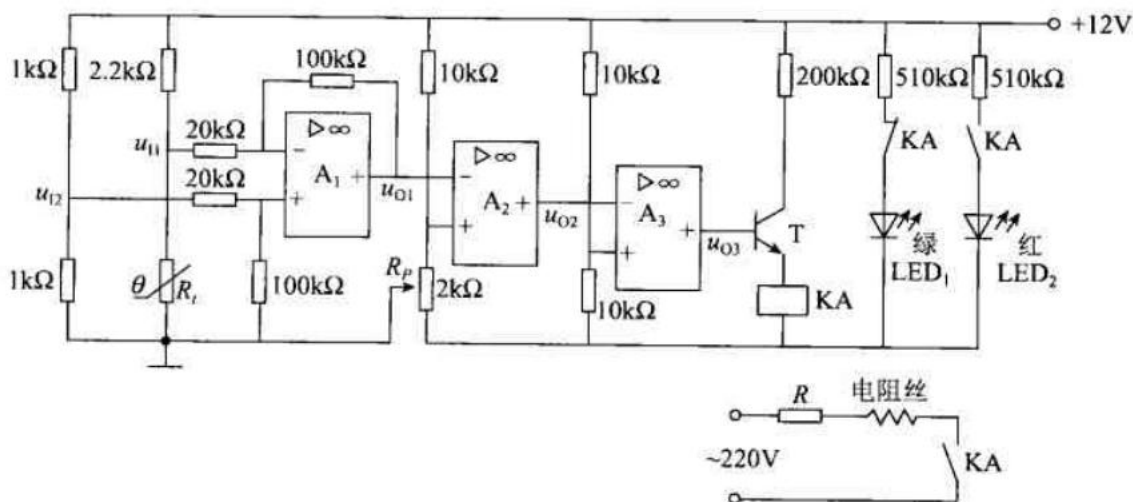


图 16.57

【解题过程】 工作原理:热敏电阻 R_t 随温度变化阻值发生变化。

$$\text{由图知: } u_{i2} = 6 \text{ V} \quad u_{i1} = \frac{R_t}{R_t + 2.2} \cdot 12 \text{ V}$$

$$\text{虚短: } u_{i1} = \frac{100}{100 + 20} \times u_{i2} = 5 \text{ V} = u_{i-}$$

$$\text{虚断: } \frac{u_{i1} - u_{i-}}{20 \text{ k}\Omega} = \frac{u_{i1} - u_{o1}}{100 \text{ k}\Omega} \Rightarrow u_{o1} = 30 - 5u_{i1}$$

$$u_{o1} = u_{2-} \quad u_{2-} = \frac{R_p}{10 + R_p} \cdot 12 \text{ V}$$

$$u_{o1} = u_{2-} > u_{2+} \text{ 时, } u_{o2} = -u_{o1(\text{sat})}$$

$$u_{o1} = u_{2-} < u_{2+} \text{ 时, } u_{o2} = u_{o1(\text{sat})}$$

$$u_{3+} = \frac{10}{10 + 10} \cdot 12 = 5 \text{ V}$$

$$u_{o2} < u_{3+} \text{ 时, } u_{o3} = +u_{o2(\text{sat})}$$

$$\text{当温度低于设置值时, } u_{o3} = +u_{o2(\text{sat})}$$

三极管导通,KA 吸合,红灯亮处于加热状态;

当温度在设定范围内时, $u_{o2} > u_{3+}$

$u_{o3} = -u_{o2(\text{sat})}$ 三极管截止 KA 无法吸合绿灯亮,处于保温状态。

第 17 章

电子电路中的反馈

本章重点是能判别电子电路中的直流反馈和交流反馈、正反馈、负反馈以及负反馈的类型,负反馈对放大电路工作性能的影响及正弦波振荡电路自激振荡的条件等内容只需了解即可。

17.1 重点内容提要

一、反馈的基本概念

1. 反馈

将输出端的信号一部分(或全部)通过一个网络送回到输入端称为反馈。

2. 正反馈和负反馈

在图 17.1 所示电路中,用 x 表示信号。信号的传递方向如图中箭头所示, x_i 、 x_o 和 x_f 分别为输入、输出和反馈信号。 x_i 和 x_f 在输入端比较(\otimes 是比较环节的等号),得出净输入信号 x_d 。

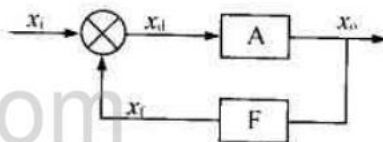


图 17.1

若引回的反馈信号和输入信号比较使净输入信号减小,因而输出信号也减小,则称这种反馈为负反馈。若反馈信号使净输入信号增大,因而输出信号也增大的,则称这种反馈为正反馈。

判别正反馈还是负反馈通常采用瞬时极性法。其判别原则为:对单级运算放大器电路而言;同相(反相)输入端电位的瞬时极性和输出端电路的瞬时极性相同(相反),因此,凡是反馈电路从输出端引回到同相输入端的为正反馈,引回到反相输入端的则为负反馈。对发射极带有电阻 R_e 而无旁路电容的分立元件电子电路而言,基极电位的瞬时极性与集电极电位的瞬时极性相反,而与发射极电位的瞬时极性相同,如图 17.2 所示,因此对 NPN 型晶体管,凡是反馈降低了基极或提高了发射极电位的为负反馈,反之则为正反馈。

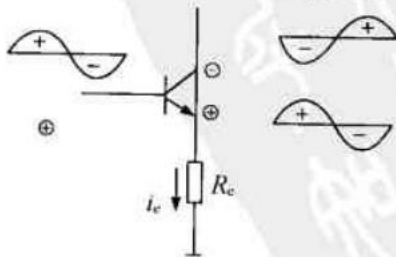


图 17.2

3. 直流反馈和交流反馈

直流反馈存在于直流电路中,交流反馈存在于交流电

路中。很多电子电路中两种反馈同时存在。

在图 17.3(a) 所示电路中, 设 T_2 发射极的旁路电容 C_e 足够大, 可认为电路两端的交流信号基本为零, 则从 T_2 的发射极通过 R_F 引回到 T_1 基极的反馈信号中将只有直流成分, 因此电路中引入的是直流反馈。在图 17.3(b) 所示电路中, 从输出端通过 C_F 和 R_F 将反馈引回到 T_1 的发射极, 由于电容的隔直作用, 反馈信号中将只有交流成分, 所以这个反馈是交流反馈。

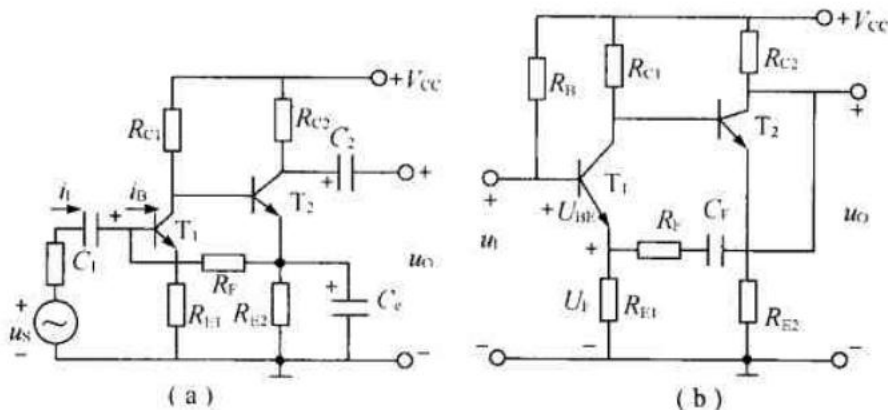


图 17.3

二、放大电路中负反馈

1. 定义

(1) 负反馈: 送回输入端的反馈信号削弱了原来的输入信号, 使放大倍数降低, 称为负反馈。

(2) 开环放大器: 不带反馈的放大器称为开环放大器, 如图 17.4 所示, 其放大倍数称开环放大倍数。

$$\text{即 } \dot{A}_o = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_d}$$

(3) 闭环放大器: 带有反馈的放大器称为闭环放大器, 如图 17.4 所示, 其放大倍数称为闭环放大倍数, 即

$$\text{反馈系数 } \dot{A}_F = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i} = \frac{\dot{A}_o}{1 + \dot{A}_o \dot{F}}, \text{ 其中 } \dot{F} = \frac{\dot{X}_F}{\dot{X}_o}, \text{ 净输入}$$

(或开环输入) 信号 $\dot{X}_d = \dot{X}_i - \dot{X}_F$, 反馈网络一般是无源网络。

2. 负反馈电路类型及判别方法

负反馈电路分类为: 电压串联、电压并联、电流串联、电流并联。

(1) 判别电压反馈还是电流反馈。

方法一: 将输出端负载电阻 R_L 短接, 看反馈信号是否存在, 若不存在则为电压反馈。若继续存在则为电流反馈。

方法二: 除公共地线外, 若输出线和反馈线接在同一点上, 则有电压反馈; 若接在不同点上

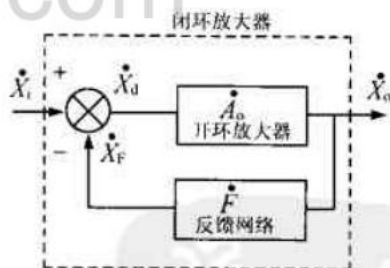


图 17.4