

# 第 1 章 常用半导体器件

## 自测题

一、判断下列说法是否正确，用“×”和“√”表示判断结果填入空内。

(1) 在 N 型半导体中如果掺入足够量的三价元素，可将其改型为 P 型半导体。(√)

(2) 因为 N 型半导体的多子是自由电子，所以它带负电。(×)

(3) PN 结在无光照、无外加电压时，结电流为零。(√)

(4) 处于放大状态的晶体管，集电极电流是多子漂移运动形成的。(×)

(5) 结型场效应管外加的栅-源电压应使栅-源间的耗尽层承受反向电压，才能保证其  $R_{GS}$  大的特点。

(√)

(6) 若耗尽型 N 沟道 MOS 管的  $U_{GS}$  大于零，则其输入电阻会明显变小。(×)

二、选择正确答案填入空内。

(1) PN 结加正向电压时，空间电荷区将 A。

A. 变窄 B. 基本不变 C. 变宽

(2) 稳压管的稳压区是其工作在 C。

A. 正向导通 B. 反向截止 C. 反向击穿

(3) 当晶体管工作在放大区时，发射结电压和集电结电压应为 B。

A. 前者反偏、后者也反偏 B. 前者正偏、后者反偏 C. 前者正偏、后者也正偏

(4)  $U_{GS}=0V$  时，能够工作在恒流区的场效应管有 A、C。

A. 结型管 B. 增强型 MOS 管 C. 耗尽型 MOS 管

三、写出图 T1.3 所示各电路的输出电压值，设二极管导通电压  $U_D=0.7V$ 。

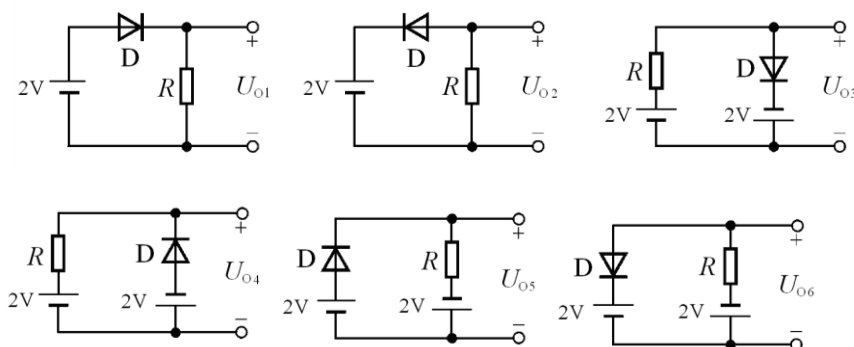


图 T1.3

解:  $U_{O1}=1.3V$ ,  $U_{O2}=0V$ ,  $U_{O3}=-1.3V$ ,  $U_{O4}=2V$ ,  $U_{O5}=1.3V$ ,  $U_{O6}=-2V$ 。

四、已知稳压管的稳压值  $U_Z=6V$ ，稳定电流的最小值  $I_{Zmin}=5mA$ 。求图 T1.4 所示电路中  $U_{O1}$  和  $U_{O2}$  各为多少伏。

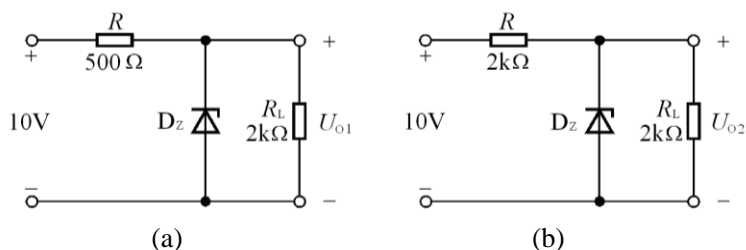


图 T1.4

解：左图中稳压管工作在击穿状态，故  $U_{O1}=6V$ 。

右图中稳压管没有击穿，故  $U_{O2}=5V$ 。

五、电路如图 T1.5 所示， $V_{CC}=15V$ ， $\beta=100$ ， $U_{BE}=0.7V$ 。

试问：

(1)  $R_b=50k\Omega$  时， $U_o=?$

(2) 若  $T$  临界饱和，则  $R_b=?$

解：(1)  $I_B = \frac{V_{BB} - U_{BE}}{R_b} = 26\mu A$ ，

$I_C = \beta I_B = 2.6mA$ ，

$U_o = V_{CC} - I_C R_c = 2V$ 。

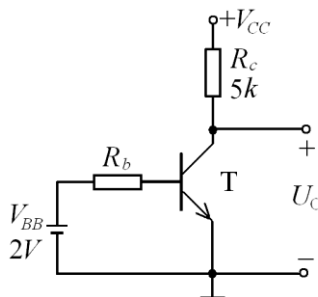


图 T1.5

(2)  $\therefore I_{CS} = \frac{V_{CC} - U_{BE}}{R_c} = 2.86mA$ ， $I_{BS} = I_{CS} / \beta = 28.6\mu A$

$\therefore R_b = \frac{V_{BB} - U_{BE}}{I_{BS}} = 45.5k\Omega$

六、测得某放大电路中三个 MOS 管的三个电极的电位如表 T1.6 所示，它们的开启电压也在表中。试分析各管的工作状态（截止区、恒流区、可变电阻区），并填入表内。

表 T1.6

管号	$U_{GS(th)}/V$	$U_S/V$	$U_G/V$	$U_D/V$	工作状态
T <sub>1</sub>	4	-5	1	3	恒流区
T <sub>2</sub>	-4	3	3	10	截止区
T <sub>3</sub>	-4	6	0	5	可变电阻区

解：因为三只管子均有开启电压，所以它们均为增强型 MOS 管。根据表中所示各极电位可判断出它们各自的工作状态，如表 T1.6 最后一栏所示。

## 习题

1.1 选择合适答案填入空内。

(1) 在本征半导体中加入 (A) 元素可形成 N 型半导体，加入 (C) 元素可形成 P 型半导体。

A. 五价      B. 四价      C. 三价

(2) 当温度升高时，二极管的反向饱和电流将 (A)。

A. 增大      B. 不变      C. 减小

(3) 工作在放大区的某三极管，如果当  $I_B$  从  $12\mu A$  增大到  $22\mu A$  时， $I_C$  从  $1mA$  变为  $2mA$ ，那么它的  $\beta$  约为 (C)。

A. 83      B. 91      C. 100

(4) 当场效应管的漏极直流电流  $I_D$  从  $2mA$  变为  $4mA$  时，它的低频跨导  $g_m$  将 (A)。

A. 增大；      B. 不变；      C. 减小

1.2 电路如图 P1.2 所示, 已知  $u_i = 10\sin\omega t$  (V), 试画出  $u_i$  与  $u_o$  的波形。设二极管导通电压可忽略不计。

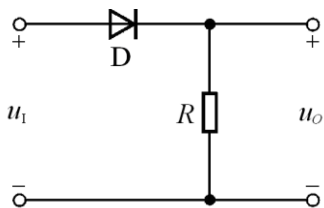
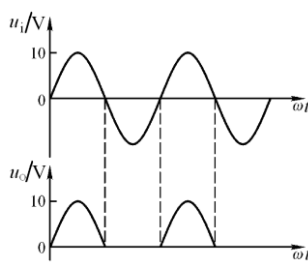


图 P1.2



解图 P1.2

解:  $u_i$  与  $u_o$  的波形如解图 P1.2 所示。

1.3 电路如图 P1.3 所示, 已知  $u_i = 5\sin\omega t$  (V), 二极管导通电压  $U_D=0.7V$ 。试画出  $u_i$  与  $u_o$  的波形图, 并标出幅值。

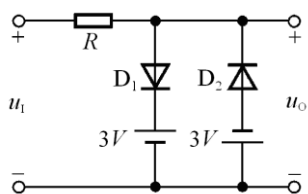
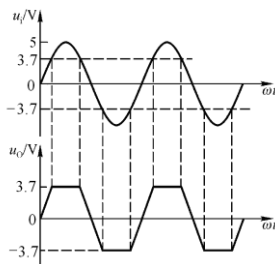


图 P1.3



解图 P1.3

解: 波形如解图 P1.3 所示。

1.4 电路如图 P1.4 所示, 二极管导通电压  $U_D=0.7V$ , 常温下  $U_T \approx 26mV$ , 电容  $C$  对交流信号可视为短路;  $u_i$  为正弦波, 有效值为  $10mV$ 。试问二极管中流过的交流电流的有效值为多少?

解: 二极管的直流电流

$$I_D = (V - U_D) / R = 2.6mA$$

其动态电阻:

$$r_D \approx U_T / I_D = 10\Omega$$

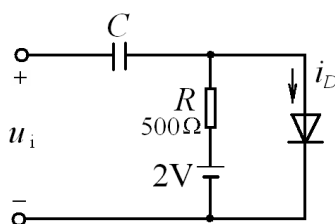


图 P1.4

故动态电流的有效值:  $I_d = U_i / r_D \approx 1mA$

1.5 现有两只稳压管, 稳压值分别是  $6V$  和  $8V$ , 正向导通电压为  $0.7V$ 。试问:

- (1) 若将它们串联相接, 则可得到几种稳压值? 各为多少?
- (2) 若将它们并联相接, 则又可得到几种稳压值? 各为多少?

解: (1) 串联相接可得 4 种:  $1.4V$ ;  $14V$ ;  $6.7V$ ;  $8.7V$ 。

(2) 并联相接可得 2 种:  $0.7V$ ;  $6V$ 。

1.6 已知图 P1.6 所示电路中稳压管的稳定电压  $U_Z = 6V$ ，最小稳定电流

$I_{Z\min} = 5mA$ ，最大稳定电流  $I_{Z\max} = 25mA$ 。

(1) 分别计算  $U_I$  为 10V、15V、35V 三种情况下输出电压  $U_O$  的值；

(2) 若  $U_I = 35V$  时负载开路，则会出现什么现象？为什么？

解：(1) 只有当加在稳压管两端的电压大于其稳压值时，输出电压才为 6V。

$$\therefore U_I = 10V \text{ 时, } U_O = \frac{R_L}{R + R_L} U_I = 3.3V ;$$

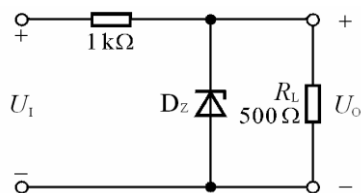


图 P1.6

$$U_I = 15V \text{ 时, } U_O = \frac{R_L}{R + R_L} U_I = 5V ;$$

$$U_I = 35V \text{ 时, } U_O = \frac{R_L}{R + R_L} U_I \approx 11.7V > U_Z, \therefore U_O = U_Z = 6V .$$

0.1

(2) 当负载开路时， $I_Z = \frac{U_I - U_Z}{R} = 29mA > I_{Z\max} = 25mA$ ，故稳压管将被烧毁。

1.7 在图 P1.7 所示电路中，发光二极管导通电压

$U_D = 1.5V$ ，正向电流在 5~15mA 时才能正常工作。

试问：(1) 开关  $S$  在什么位置时发光二极管才能发光？

(2)  $R$  的取值范围是多少？

解：(1)  $S$  闭合。

(2)  $R$  的范围为：

$$R_{\min} = (V - U_D) / I_{D\max} \approx 233\Omega$$

$$R_{\max} = (V - U_D) / I_{D\min} \approx 700\Omega$$

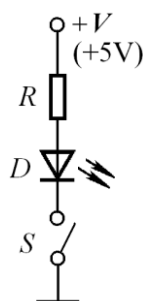


图 P1.7

1.8 现测得放大电路中两只管子两个电极的电流如图 P1.8 所示。分别求另一电极的电流，标出其方向，并在圆圈中画出管子，且分别求出它们的电流放大系数  $\beta$ 。

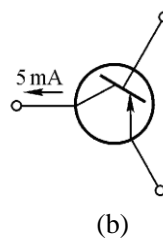
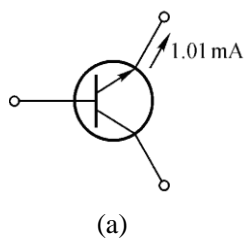
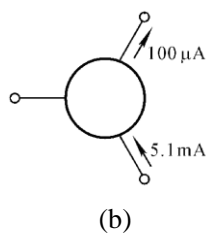
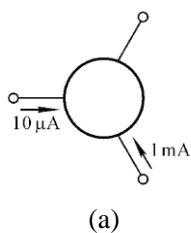


图 P1.8

解图 P1.8



解：答案如解图 P1.8 所示。

放大倍数分别为  $\beta_a = 1\text{mA}/10\mu\text{A} = 100$  和  $\beta_b = 5\text{mA}/100\mu\text{A} = 50$

1.9 测得放大电路中六只晶体管的直流电位如图 P1.9 所示。在圆圈中画出管子，并说明它们是硅管还是锗管。

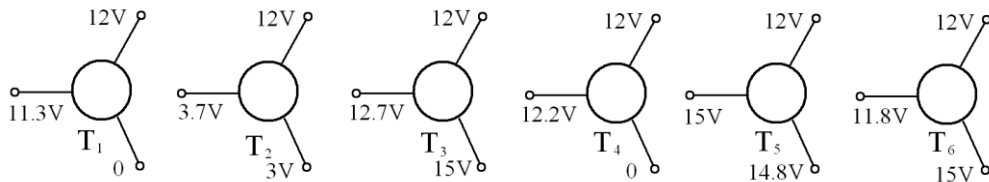
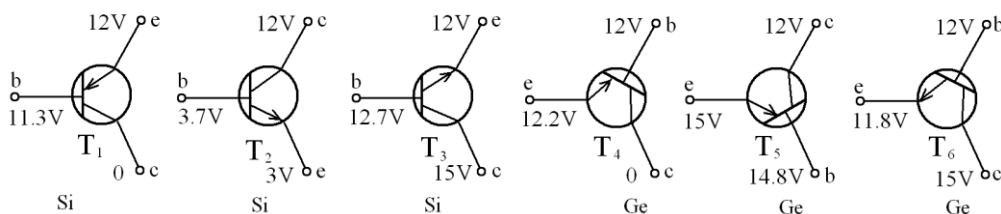


图 P1.9

解：如解图 1.9。



解图 1.9

1.10 电路如图 P1.10 所示，晶体管导通时  $U_{BE} = 0.7\text{V}$ ， $\beta = 50$ 。试分析  $V_{BB}$  为 0V、1V、3V 三种情况下  $T$  的工作状态及输出电压  $u_o$  的值。

解：(1) 当  $V_{BB} = 0$  时， $T$  截止， $u_o = 12\text{V}$ 。

(2) 当  $V_{BB} = 1\text{V}$  时，因为

$$I_{BQ} = \frac{V_{BB} - U_{BEQ}}{R_b} = 60\mu\text{A}$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 3\text{mA}$$

$$u_o = V_{CC} - I_{CQ} R_c = 9\text{V}$$

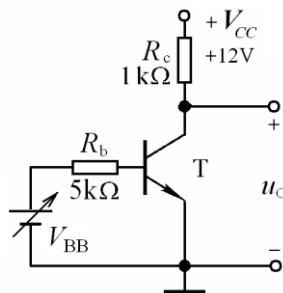


图 P1.10

所以  $T$  处于放大状态。

(3) 当  $V_{BB} = 3\text{V}$  时，因为  $I_{BQ} = \frac{V_{BB} - U_{BEQ}}{R_b} = 460\mu\text{A}$ ，

$I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 23\text{mA}$ ， $I_{CS} = \frac{V_{CC} - U_{CES}}{R_c} = 11.3\text{mA}$ ，所以  $T$  处于饱和状态。

**1.11** 电路如图 P1.11 所示,晶体管的  $\beta=50$ ,  $|U_{BE}|=0.2V$ , 饱和管压降  $|U_{CES}|=0.1V$ ; 稳压管的稳定电

压  $U_Z=5V$ , 正向导通电压  $U_D=0.5V$ 。试问: 当  $u_I=0V$  时  $u_O=?$ ; 当  $u_I=-5V$  时  $u_O=?$

解: 当  $u_I=0V$  时, 晶体管截止, 稳压管击穿,

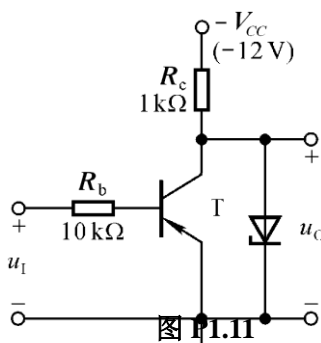
$$u_O = -U_Z = -5V。$$

当  $u_I=-5V$  时, 晶体管饱和,

$$u_O = -0.1V。$$

因为:

$$|I_B| = \frac{u_I - U_{BE}}{R_b} = 480\mu A, \quad |I_C| = \beta |I_B| = 24mA, \quad U_{EC} = V_{CC} - |I_C| R_c < 0$$



**1.12** 分别判断图 P1.12 所示各电路中晶体管是否有可能工作在放大状态。

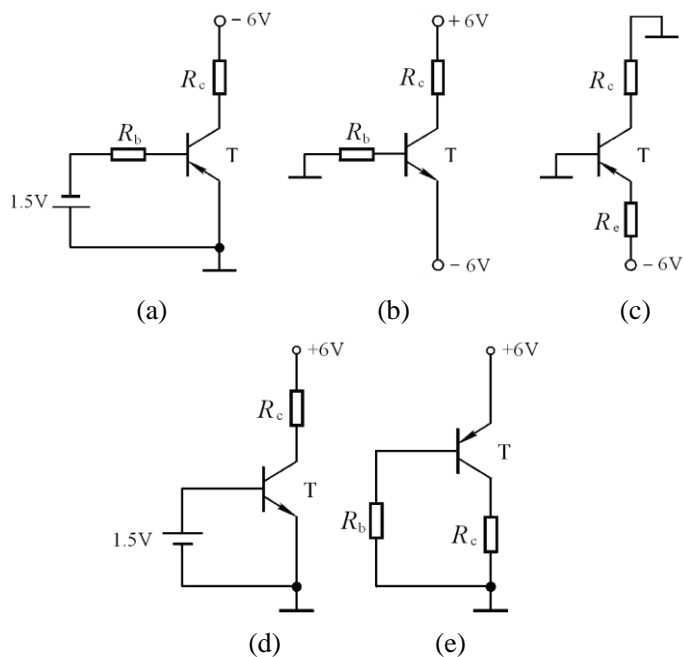
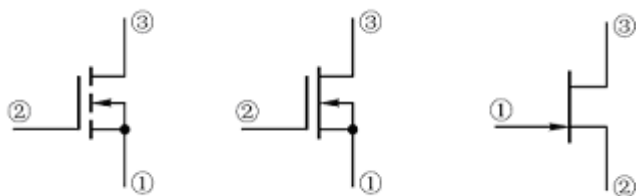


图 P1.12

解: (a)可能; (b)可能; (c)不能; (d)不能,  $T$  的发射结会因电流过大而损坏。(e)可能。

**1.13** 已知放大电路中一只 N 沟道场效应管三个极①、②、③ 的电位分别为  $4V$ 、 $8V$ 、 $12V$ , 管子工作在恒流区。试判断它可能是哪种管子(结型管、MOS 管、增强型、耗尽型), 并说明①、②、③ 与 G、S、D 的对应关系。

解: 管子可能是增强型管、耗尽型管和结型管, 三个极①、②、③ 与 G、S、D 的对应关系如解图 P1.13 所示。



解图 PL.13

1.14 已知场效应管的输出特性曲线如图 PL.14 所示，画出它在恒流区的转移特性曲线。

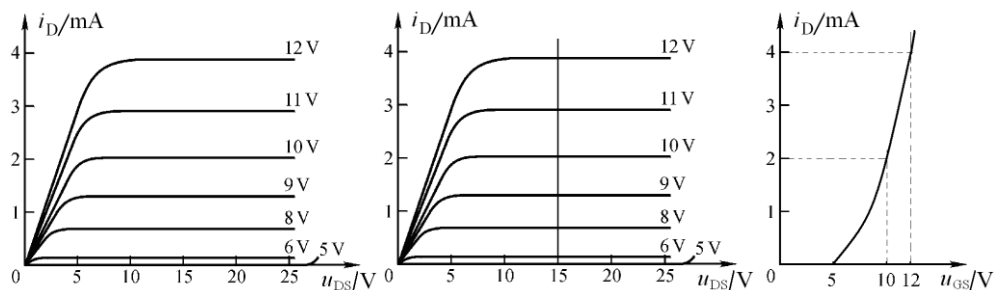


图 PL.14

(a)

(b)

解图 PL.14

解：在场效应管的恒流区作横坐标的垂线(如解图 PL.14 (a)所示),读出其与各条曲线交点的纵坐标值及  $u_{GS}$  值，建立  $i_D = f(u_{GS})$  坐标系，描点，连线，即可得到转移特性曲线，如解图 PL.14 (b)所示。

1.15 电路如图 P1.15 所示， $T$  的输出特性如图 PL.14 所示,分析当  $u_I = 4V$ 、 $8V$ 、 $12V$  三种情况下场效应管分别工作在什么区域。

解：根据图 P1.14 所示  $T$  的输出特性可知，其开启电压为  $5V$ ，根据图 P1.15 所示电路可知  $u_{GS} = u_I$ 。

当  $u_I = 4V$  时， $u_{GS}$  小于开启电压，故  $T$  截止。

当  $u_I = 8V$  时，设  $T$  工作在恒流区，根据输出

特性可知  $i_D \approx 0.6mA$ ，管压降  $u_{DS} \approx V_{DD} - i_D R_d \approx 10V$ ，

因此， $u_{GD} = u_{GS} - u_{DS} \approx -2V$ ，小于开启电压，

说明假设成立，即  $T$  工作在恒流区。

当  $u_I = 12V$  时，由于  $V_{DD} = 12V$ ，必然使  $T$  工作在可变电阻区。

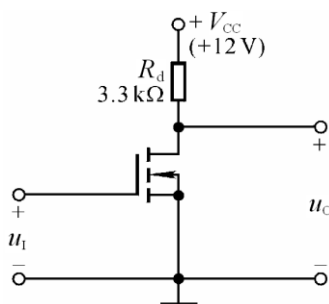


图 PL.15

1.16 分别判断图 PL.16 所示各电路中的场效应管是否有可能工作在恒流区。

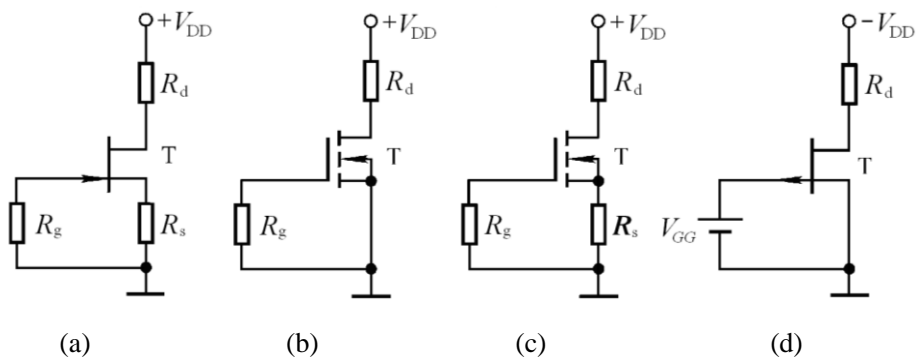
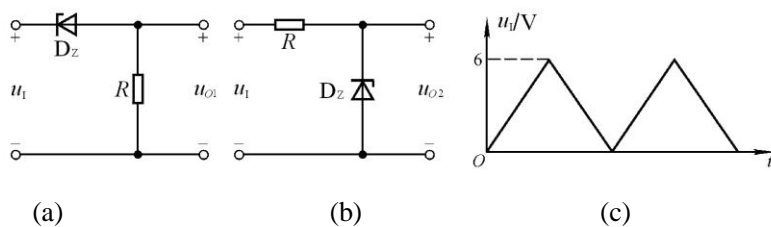


图 P1.16

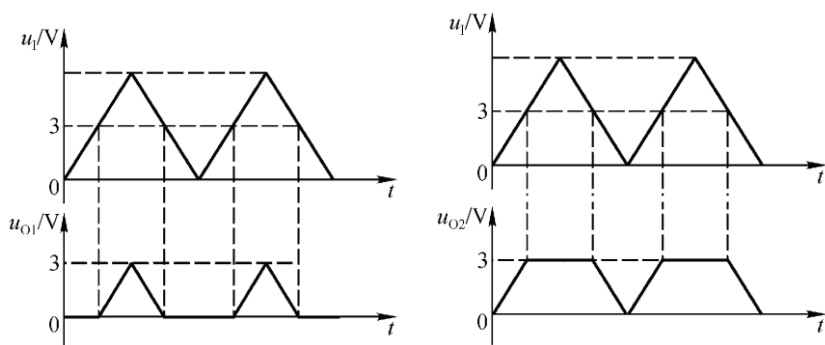
解: (a)可能,(b)不能,(c)不能,(d)可能。

补充 1. 电路如补图 P1(a)、(b)所示, 稳压管的稳定电压  $U_Z = 3V$ ,  $R$  的取值合适,  $u_i$  的波形如图(c)所示。试分别画出  $u_{O1}$  和  $u_{O2}$  的波形。



补图 P1

解: 波形如下图所示



补充 2. 在温度  $20^{\circ}\text{C}$  时某晶体管的  $I_{CBO} = 2\mu\text{A}$ , 试问温度是  $60^{\circ}\text{C}$  时的  $I_{CBO} = ?$

解:  $I_{CBO60} = I_{CBO20} \times 2^4 = 2 \times 2^4 = 32\mu\text{A}$ 。

补充 3. 有两只晶体管, 一只的  $\beta=200$ ,  $I_{CEO} = 200\mu\text{A}$ ; 另一只的  $\beta=100$ ,  $I_{CEO} = 10\mu\text{A}$ , 其它参数大致相同。你认为应选用哪只管子? 为什么?

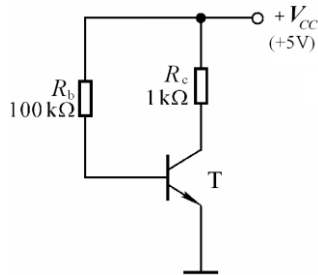
解: 选用  $\beta=100$ ,  $I_{CEO} = 10\mu\text{A}$  的管子, 因其  $\beta$  适中,  $I_{CEO}$  较小, 因而温度稳定性较另一只管子好。

补充 4. 电路如补图 P4 所示, 试问  $\beta$  大于多少时晶体管饱和?

解：取  $U_{CES} = U_{BE}$ ，若管子饱和，

$$\text{则 } \beta \cdot \frac{V_{CC} - U_{BE}}{R_b} = \frac{V_{CC} - U_{BE}}{R_c}, \text{ 即 } R_b = \beta R_c$$

所以,  $\beta \geq \frac{R_b}{R_c} = 100$  时,管子饱和。



补图 P4

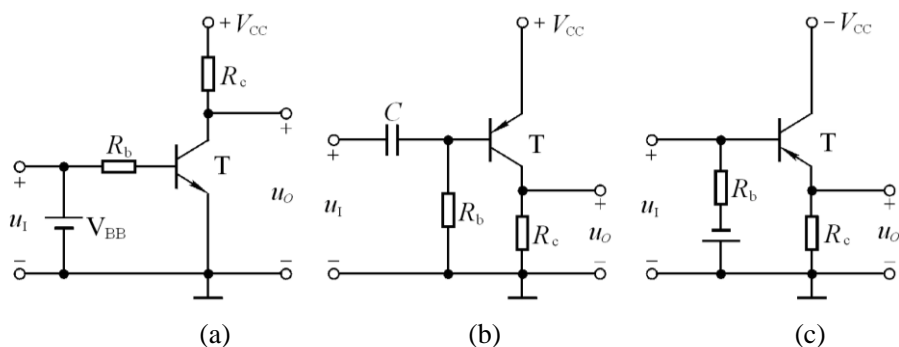
## 第 2 章 基本放大电路

### 自测题

一. 在括号内用“√”和“×”表明下列说法是否正确。

1. 只有电路既放大电流又放大电压,才称其有放大作用。(×)
2. 可以说任何放大电路都有功率放大作用。(√)
3. 放大电路中输出的电流和电压都是有源元件提供的。(×)
4. 电路中各电量的交流成分是交流信号源提供的。(×)
5. 放大电路必须加上合适的直流电源才能正常工作。(√)
6. 由于放大的对象是变化量,所以当输入直流信号时,任何放大电路的输出都毫无变化。(×)
7. 只要是共射放大电路,输出电压的底部失真都是饱和失真。(×)

二. 试分析图 T2.2 各电路是否能放大正弦交流信号,简述理由。设图中所有电容对交流信号均可视为短路。



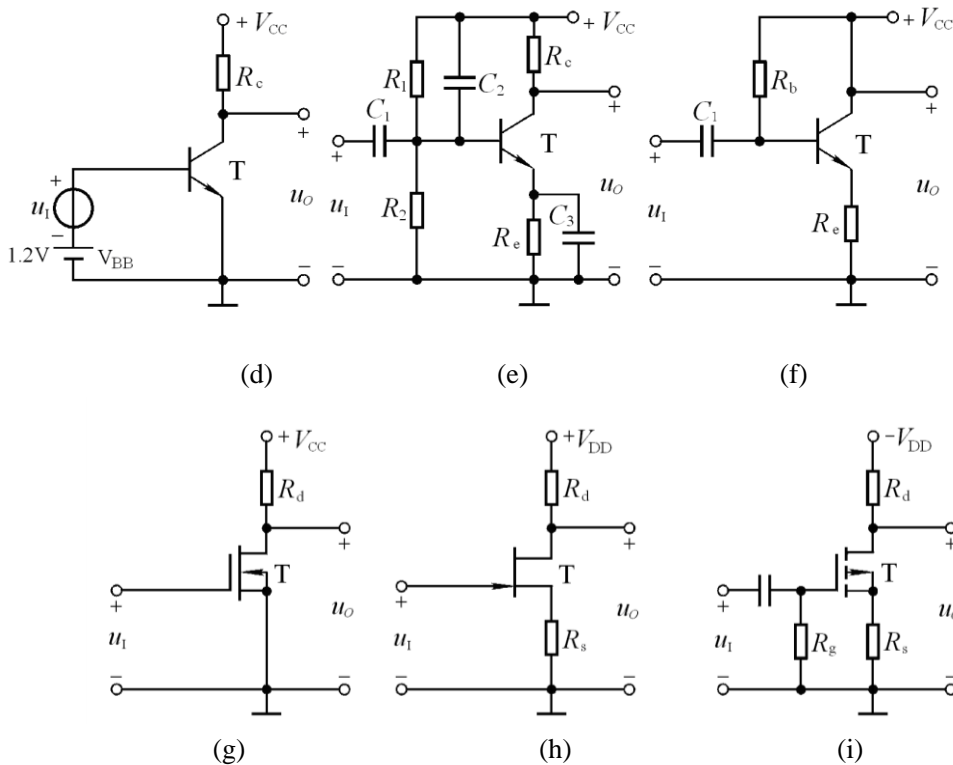


图 T2.2

解：图(a)不能。 $V_{BB}$  将输入信号短路。

图(b)可以。

图(c)不能。输入信号与基极偏置是并联关系而非串联关系。

图(d)不能。晶体管基极回路因无限流电阻而烧毁。

图(e)不能。输入信号被电容  $C_2$  短路。

图(f)不能。输出始终为零。

图(g)可能。

图(h)不合理。因为  $G-S$  间电压将大于零。

图(i)不能。因为  $T$  截止。

三. 在图 T2.3 所示电路中, 已知  $V_{CC} = 12V$ , 晶体管  $\beta = 100$ ,  $R'_b = 100k\Omega$ 。填空: 要求先填文字表达式后填得数。

(1) 当  $\dot{U}_i = 0V$  时, 测得  $U_{BEQ} = 0.7V$ , 若要基极电流  $I_{BQ} = 20\mu A$ , 则  $R'_b$  和  $R_w$  之和

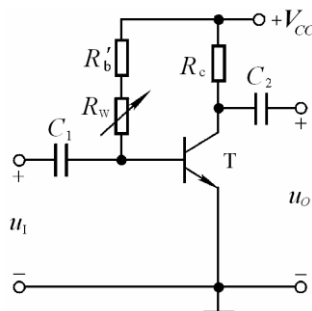
$$R_b = (V_{CC} - U_{BEQ}) / I_{BQ} \text{ k}\Omega \approx (565) \text{ k}\Omega; \text{ 而若测得 } U_{CEQ} = 6V,$$

$$\text{则 } R_c = (V_{CC} - U_{CEQ}) / \beta I_{BQ} \approx (3) \text{ k}\Omega.$$

(2) 若测得输入电压有效值  $U_i = 5mV$  时,

$$\text{输出电压有效值 } U_o' = 0.6V,$$

$$\text{则电压放大倍数 } \dot{A}_u = (-U_o / U_i) \approx (-120).$$



若负载电阻  $R_L$  值与  $R_c$  相等, 则带上

图 T2.3

负载后输出电压有效值  $U_o = (\frac{R_L}{R_L + R_c} \cdot U_o') = (0.3) V$ 。

四、已知图 T2.3 所示电路中  $V_{CC} = 12V$ ,  $R_c = 3k\Omega$ , 静态管压降  $U_{CEQ} = 6V$ , 并在输出端加负载电阻  $R_L$ , 其阻值为  $3k\Omega$ 。选择一个合适的答案填入空内。

(1) 该电路的最大不失真输出电压有效值  $U_{om} \approx$  ( A );

A. 2V                  B. 3V                  C. 6V

(2) 当  $\dot{U}_i = 1mV$  时, 若在不失真的条件下, 减小  $R_w$ , 则输出电压的幅值将( C );

A. 减小                  B. 不变                  C. 增大

(3) 在  $\dot{U}_i = 1mV$  时, 将  $R_w$  调到输出电压最大且刚好不失真, 若此时增大输入电压, 则输出电压波形将( B );

A. 顶部失真                  B. 底部失真                  C. 为正弦波

(4) 若发现电路出现饱和失真, 则为消除失真, 可将( B )。

A.  $R_w$  减小                  B.  $R_c$  减小                  C.  $V_{CC}$  减小

五、现有直接耦合基本放大电路如下:

A. 共射电路                  B. 共集电路                  C. 共基电路  
D. 共源电路                  E. 共漏电路

它们的电路分别如图 2.2.1、2.5.1(a)、2.5.4 (a)、2.6.2 和 2.6. 9(a)所示; 设图中  $R_e < R_b$ , 且  $I_{CQ}$ 、 $I_{DQ}$  均相等。选择正确答案填入空内, 只需填 A、B、... ..

(1) 输入电阻最小的电路是( C ), 最大的是( D、E );

(2) 输出电阻最小的电路是( B );

(3) 有电压放大作用的电路是( A、C、D );

(4) 有电流放大作用的电路是( A、B、D、E );

(5) 高频特性最好的电路是( C );

(6) 输入电压与输出电压同相的电路是( B、C、E ); 反相的电路是( A、D )。

六、未画完的场效应管放大电路如图 T2.6 所示, 试将合适的场效应管接入电路, 使之能够正常放大。要求给出两种方案。

**解:** 根据电路接法, 可分别采用耗尽型 N 沟道和 P 沟道 MOS 管, 如解图 T2.6 所示。

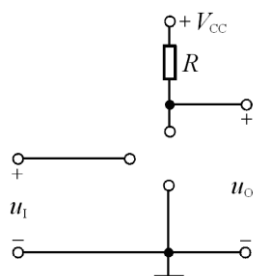
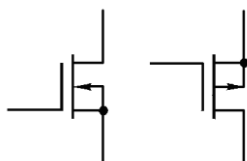


图 T2.6



解图 T2.6

## 习题

**2.1** 分别改正图 P2.1 所示各电路中的错误, 使它们有可能放大正弦波信号。要求保留电路原来的共射接法和耦合方式。

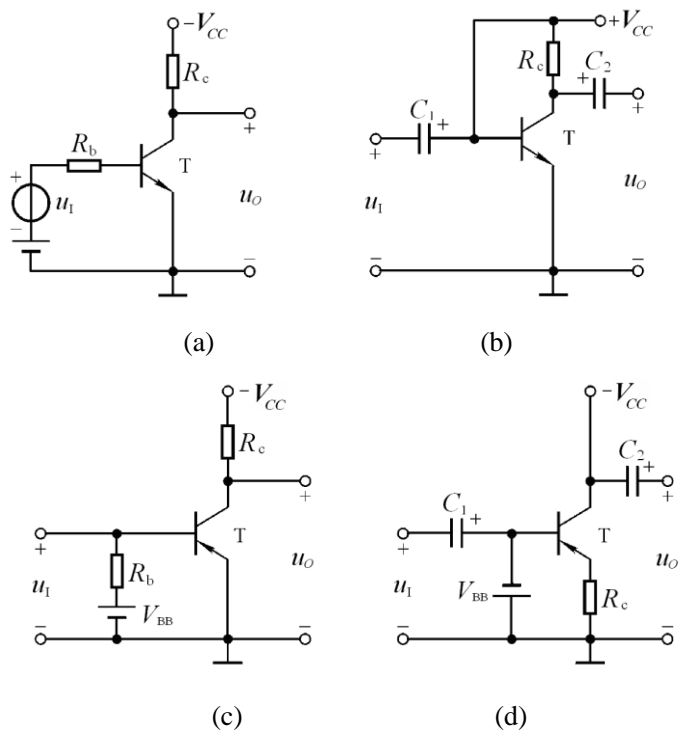


图 P2.1

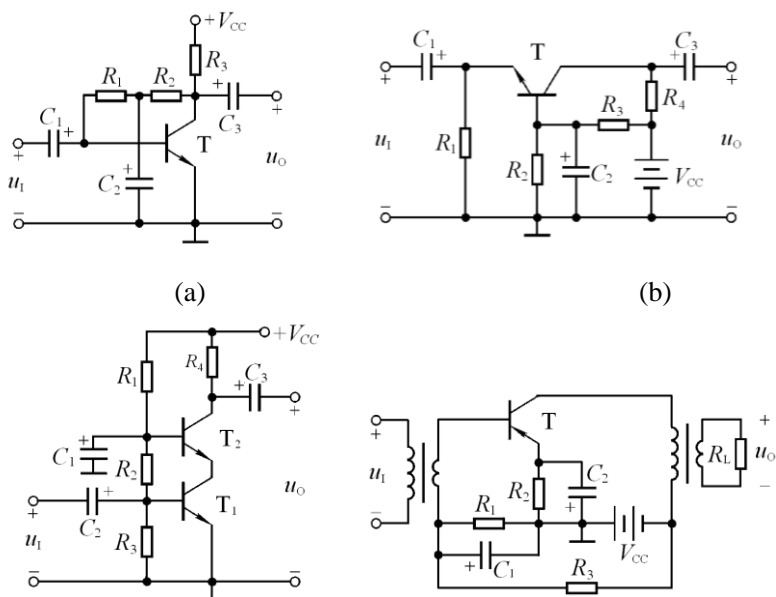
解: (a) 将  $-V_{CC}$  改为  $+V_{CC}$ 。

(b) 在  $+V_{CC}$  与基极之间加  $R_b$ 。

(c) 将  $V_{BB}$  反接, 且在输入端串联一个电阻。

(d) 在  $V_{BB}$  支路加  $R_b$ , 在  $-V_{CC}$  与集电极之间加  $R_c$ 。

**2.2** 画出图 P2.2 所示各电路的直流通路和交流通路。设所有电容对交流信号均可视为短路。





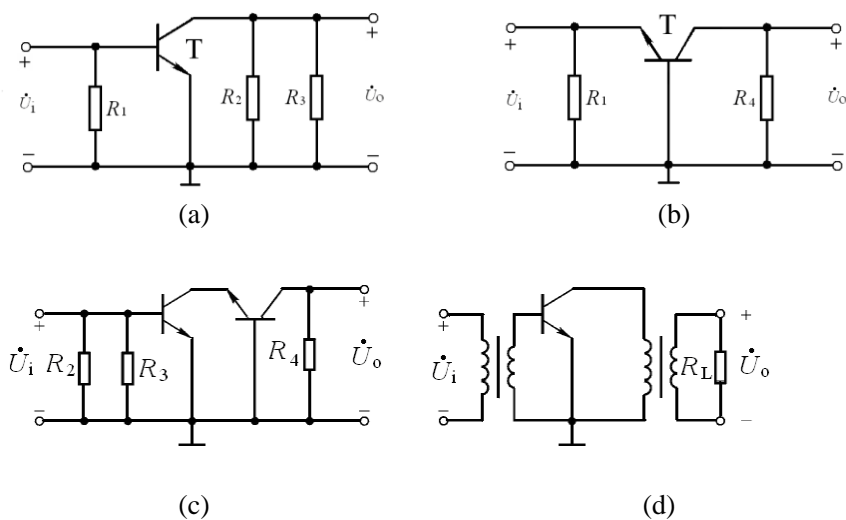
(c)

(d)

图 P2.2

解：将电容开路、变压器线圈短路即为直流通路，图略。

图 P2.2 所示各电路的交流通路如解图 P2.2 所示；



解图 P2.2

2.3 分别判断图 P2.2(a)、(b)所示两电路各属哪种放大电路，并写出  $Q$ 、 $\dot{A}_u$ 、 $R_i$  和  $R_o$  的表达式。

解：图 (a):  $I_{BQ} = \frac{V_{CC} - U_{BEQ}}{R_1 + R_2 + (1 + \beta)R_3}$ ,  $I_{CQ} = \beta I_{BQ}$ ,  $U_{CEQ} = V_{CC} - (1 + \beta)I_{BQ}R_3$ 。

$$\dot{A}_u = -\beta \frac{R_2 // R_3}{r_{be}}, \quad R_i = r_{be} // R_1, \quad R_o = R_2 // R_3$$

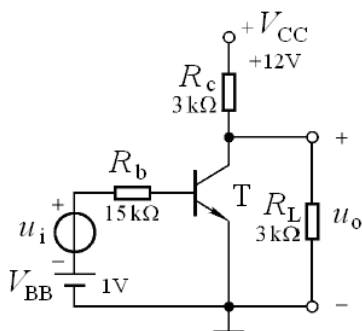
图(b):  $I_{BQ} = \left( \frac{R_2}{R_2 + R_3} V_{CC} - U_{BEQ} \right) / [R_2 // R_3 + (1 + \beta)R_1]$ ,  $I_{CQ} = \beta I_{BQ}$ ,

$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ}R_4 - I_{EQ}R_1。$$

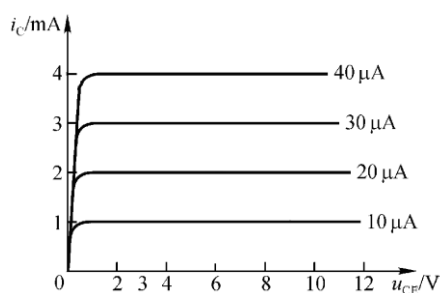
$$\dot{A}_u = \frac{\beta R_4}{r_{be}}, \quad R_i = R_1 // \frac{r_{be}}{1 + \beta}, \quad R_o = R_4。$$

2.4 电路如图 P2.4 (a)所示，图(b)是晶体管的输出特性，静态时  $U_{BEQ} = 0.7V$ 。利用图解法分别求出

$R_L = \infty$  和  $R_L = 3k\Omega$  时的静态工作点和最大不失真输出电压  $U_{om}$ （有效值）。



(a)



(b)

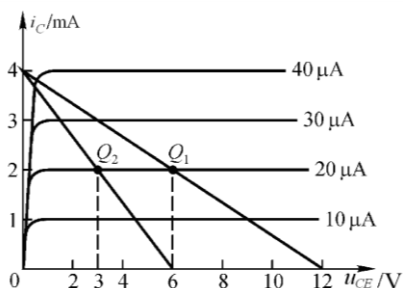
图 P2.4

解：空载时：  $I_{BQ} = 20\mu A$ ,  $I_{CQ} = 2mA$ ,  $U_{CEQ} = 6V$ ；

最大不失真输出电压峰值约为 5.3V，有效值约为 3.75V。

带载时：  $I_{BQ} = 20\mu A$ ,  $I_{CQ} = 2mA$ ,  $U_{CEQ} = 3V$ ；

最大不失真输出电压峰值约为 2.3V，有效值约为 1.63V。如解图 P2.4 所示。



解图 P2.4

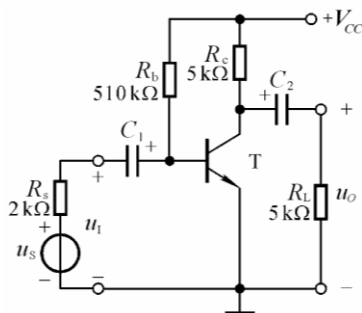


图 P2.5

2.5 在图 P2.5 所示电路中，已知晶体管的  $\beta=80$ ,  $r_{be}=1k\Omega$ ,  $\dot{U}_i=20mV$ ，静态时

$U_{BEQ}=0.7V$ ,  $U_{CEQ}=4V$ ,  $I_{BQ}=20\mu A$ 。判断下列结论是否正确，在括号内打“√”和“×”表示。

(1)  $\dot{A}_u = -\frac{4}{20 \times 10^{-3}} = -200$  (×)

(2)  $\dot{A}_u = -\frac{4}{0.7} = -5.71$  (×)

(3)  $\dot{A}_u = -\frac{80 \times 5}{1} = -400$  (×)

(4)  $\dot{A}_u = -\frac{80 \times 2.5}{1} = -200$  (√)

(5)  $R_i = \frac{20}{20} k\Omega = 1k\Omega$  (×)

(6)  $R_i = \frac{0.7}{0.02} k\Omega = 35k\Omega$  (×)

(7)  $R_i \approx 3k\Omega$  (×)

(8)  $R_i \approx 1k\Omega$  (√)

(9)  $R_o = 5k\Omega$  (√)

(10)  $R_o = 2.5k\Omega$  (×)

(11)  $\dot{U}_s \approx 20mV$  (×)

(12)  $\dot{U}_s \approx 60mV$  (√)

2.6 电路如图 P2.6 所示，已知晶体管  $\beta=120$ ,  $U_{BE}=0.7V$ ，饱和管压降  $U_{CES}=0.5V$ 。在下列情况下，用直流电压表测量晶体管的集电极电位，应分别为多少？

(1) 正常情况；(2)  $R_{b1}$  短路；(3)  $R_{b1}$  开路；(4)  $R_{b2}$  开路；(5)  $R_{b2}$  短路；(6)  $R_C$  短路；

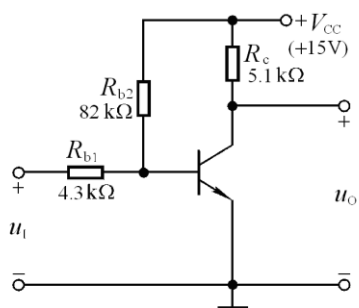


图 P2.6

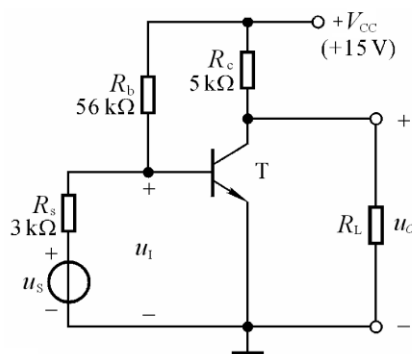


图 P2.7

解: (1)  $I_B = \frac{V_{CC} - U_{BE}}{R_{b2}} - \frac{U_{BE}}{R_{b1}} = 174 - 163 = 11\mu\text{A}$ ,  $I_C = \beta I_B = 1.32\text{mA}$ ,

$\therefore U_C = V_{CC} - I_C R_c = 8.3\text{V}$ 。

(2)  $R_{b1}$  短路,  $I_C = I_B = 0$ ,  $\therefore U_C = 15\text{V}$ 。

(3)  $R_{b1}$  开路, 临界饱和基极电流  $I_{BS} = \frac{V_{CC} - U_{CES}}{\beta R_c} \approx 23.7\mu\text{A}$ ,

实际基极电流  $I_B = \frac{V_{CC} - U_{BE}}{R_{b2}} = 174\mu\text{A}$ 。

由于  $I_B > I_{BS}$ , 管子饱和,  $\therefore U_C = U_{CES} = 0.5\text{V}$ 。

(4)  $R_{b2}$  开路, 无基极电流,  $U_C = V_{CC} = 15\text{V}$ 。

(5)  $R_{b2}$  短路, 发射结将烧毁,  $U_C$  可能为  $15\text{V}$ 。

(6)  $R_c$  短路,  $U_C = V_{CC} = 15\text{V}$ 。

2.7 电路如图 P2.7 所示, 晶体管的  $\beta=80$ ,  $r_{bb'}=100\Omega$ 。分别计算  $R_L = \infty$  和  $R_L = 3\text{k}\Omega$  时的 Q 点、 $\dot{A}_u$ 、

$R_i$  和  $R_o$ 。

解: 在空载和带负载情况下, 电路的静态电流、 $r_{be}$  均相等, 它们分别为:

$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - U_{BEQ}}{R_b} - \frac{U_{BEQ}}{R_s} \approx 22\mu\text{A}$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} \approx 1.76\text{mA}$$

$$r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26mV}{I_{EQ}} \approx 1.3k\Omega$$

空载时，静态管压降、电压放大倍数、输入电阻和输出电阻分别为：

$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_c \approx 6.2V ; \quad \dot{A}_u = -\frac{\beta R_c}{r_{be}} \approx -308$$

$$R_i = R_b // r_{be} \approx r_{be} \approx 1.3k\Omega ; \quad \dot{A}_{us} \approx \frac{r_{be}}{r_{be} + R_s} \cdot \dot{A}_u \approx -93$$

$$R_o = R_c = 5k\Omega$$

$R_L = 3k\Omega$  时，静态管压降、电压放大倍数分别为：

$$U_{CEQ} = \frac{R_L}{R_L + R_c} V_{CC} - I_{CQ} (R_c // R_L) \approx 2.3V$$

$$\dot{A}_u = -\frac{\beta(R_c // R_L)}{r_{be}} \approx -115 \quad \dot{A}_{us} \approx \frac{r_{be}}{r_{be} + R_s} \cdot \dot{A}_u \approx -34.7$$

$$R_i = R_b // r_{be} \approx r_{be} \approx 1.3k\Omega \quad R_o = R_c = 5k\Omega。$$

**2.8** 若将图 P2.7 所示电路中的 NPN 管换成 PNP 管，其它参数不变，则为使电路正常放大电源应作如何变化？Q 点、 $\dot{A}_u$ 、 $R_i$  和  $R_o$  变化吗？如变化，则如何变化？若输出电压波形底部失真，则说明电路产生了什么失真，如何消除？

解：由正电源改为负电源；Q 点、 $\dot{A}_u$ 、 $R_i$  和  $R_o$  不会变化；输出电压波形底部失真对应输入信号正半周失真，对 PNP 管而言，管子进入截止区，即产生了截止失真；减小  $R_b$ 。

**2.9** 已知图 P2.9 所示电路中，晶体管  $\beta=100$ ， $r_{be}=1.4k\Omega$ 。

(1) 现已测得静态管压降  $U_{CEQ}=6V$ ，估算  $R_b$ ；

(2) 若测得  $\dot{U}_i$  和  $\dot{U}_o$  的有效值分别为  $1mV$  和  $100mV$ ，则负载电阻  $R_L$  为多少？

解：(1)  $I_C = \frac{V_{CC} - U_{CE}}{R_c} = 2mA$ ， $I_B = I_C / \beta = 20\mu A$ ，

$$\therefore R_b = \frac{V_{CC} - U_{BE}}{I_B} = 565k\Omega。$$

$$(2) \text{ 由 } \dot{A}_u = -\frac{U_o}{U_i} = -\frac{\beta(R_c // R_L)}{r_{be}} = -100,$$

可得： $R_L = 2.625k\Omega$ 。

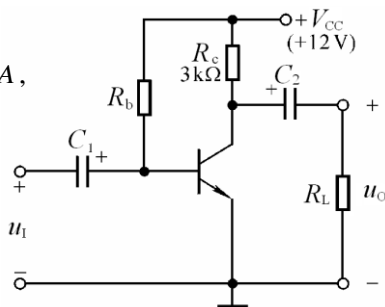


图 P2.9

**2.10** 在图 P2.9 所示电路中, 设静态时  $I_{CQ} = 2\text{mA}$ , 晶体管饱和管压降  $U_{CES} = 0.6\text{V}$ 。试问: 当负载电

阻  $R_L = \infty$  和  $R_L = 3\text{k}\Omega$  时, 电路的最大不失真输出电压各为多少伏?

**解:** 由于  $I_{CQ} = 2\text{mA}$ , 所以  $U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ}R_c = 6\text{V}$ 。

空载时, 输入信号增大到一定幅值, 电路首先出现饱和失真。故

$$U_{om} = \frac{U_{CEQ} - U_{CES}}{\sqrt{2}} \approx 3.82\text{V}$$

$R_L = 3\text{k}\Omega$  时, 当输入信号增大到一定幅值, 电路首先出现截止失真。故

$$U_{om} = \frac{I_{CQ}R_L'}{\sqrt{2}} \approx 2.12\text{V}$$

**2.11** 电路如图 P2.11 所示, 晶体管  $\beta=100$ ,  $r_{bb'}=100\Omega$ 。

(1) 求电路的 Q 点、 $\dot{A}_u$ 、 $R_i$  和  $R_o$ ;

(2) 若改用  $\beta=200$  的晶体管, 则 Q 点如何变化?

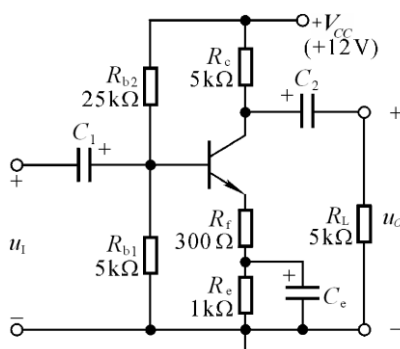
(3) 若电容  $C_e$  开路, 则将引起电路的哪些动态参数发生变化? 如何变化?

**解:** (1) 静态分析:

$$U_{BQ} = \frac{R_{b1}}{R_{b1} + R_{b2}} \cdot V_{CC} = 2\text{V}$$

$$I_{EQ} = \frac{U_{BQ} - U_{BEQ}}{R_f + R_e} = 1\text{mA}$$

$$I_{BQ} = \frac{I_{EQ}}{1 + \beta} = 10\mu\text{A}$$



$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{EQ}(R_c + R_f + R_e) = 5.7\text{V}$$

图 P2.11

动态分析:  $r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26\text{mV}}{I_{EQ}} \approx 2.73\text{k}\Omega$

$$\dot{A}_u = -\frac{\beta(R_c // R_L)}{r_{be} + (1 + \beta)R_f} = -7.7$$

$$R_i = R_{b1} // R_{b2} // [r_{be} + (1 + \beta)R_f] \approx 3.7\text{k}\Omega$$

$$R_o = R_c = 5\text{k}\Omega$$

(2)  $\beta=200$  时,  $U_{BQ} = \frac{R_{b1}}{R_{b1} + R_{b2}} \cdot V_{CC} = 2\text{V}$  (不变);

$$I_{EQ} = \frac{U_{BQ} - U_{BEQ}}{R_f + R_e} = 1\text{mA} \quad (\text{不变}); \quad I_{BQ} = \frac{I_{EQ}}{1 + \beta} = 5\mu\text{A} \quad (\text{减小});$$

$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{EQ}(R_c + R_f + R_e) = 5.7\text{V} \quad (\text{不变}).$$

$$(3) C_e \text{ 开路时, } \dot{A}_u = -\frac{\beta(R_c // R_L)}{r_{be} + (1 + \beta)(R_e + R_f)} \approx -\frac{R_c // R_L}{R_e + R_f} = -1.92 \quad (\text{减小});$$

$$R_i = R_{b1} // R_{b2} // [r_{be} + (1 + \beta)(R_e + R_f)] \approx 4.1\text{k}\Omega \quad (\text{增大});$$

$$R_o = R_c = 5\text{k}\Omega \quad (\text{不变}).$$

**2.12** 电路如图 P2.12 所示, 晶体管的  $\beta=80$ ,  $r_{be}=1\text{k}\Omega$ 。

(1) 求出 Q 点; (2) 分别求出  $R_L=\infty$  和  $R_L=3\text{k}\Omega$  时电路的  $\dot{A}_u$ 、 $R_i$  和  $R_o$ 。

**解:** (1) 求解 Q 点:

$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - U_{BEQ}}{R_b + (1 + \beta)R_e} \approx 32.3\mu\text{A}$$

$$I_{EQ} = (1 + \beta)I_{BQ} \approx 2.61\text{mA}$$

$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{EQ}R_e \approx 7.17\text{V}$$

(2) 求解放大倍数和输入、输出电阻:

$$R_L=\infty \text{ 时; } \dot{A}_u = \frac{(1 + \beta)R_e}{r_{be} + (1 + \beta)R_e} \approx 0.996$$

$$R_i = R_b // [r_{be} + (1 + \beta)R_e] \approx 110\text{k}\Omega$$

$$R_L=3\text{k}\Omega \text{ 时; } \dot{A}_u = \frac{(1 + \beta)(R_e // R_L)}{r_{be} + (1 + \beta)(R_e // R_L)} \approx 0.992$$

$$R_i = R_b // [r_{be} + (1 + \beta)(R_e // R_L)] \approx 76\text{k}\Omega$$

$$\text{输出电阻: } R_o = R_e // \frac{R_s // R_b + r_{be}}{1 + \beta} \approx 37\Omega$$

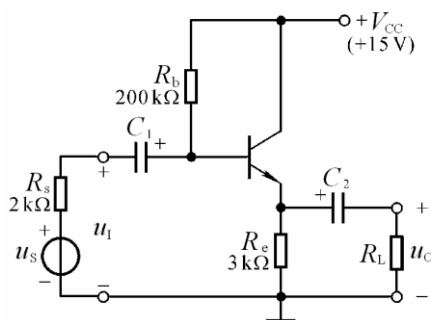


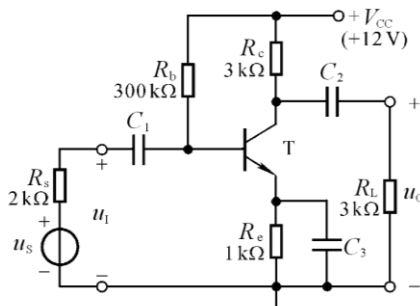
图 P2.12

**2.13** 电路如图 P2.13 所示, 晶体管的  $\beta=60$ ,  $r_{bb}=100\Omega$ 。

(1) 求解 Q 点、 $\dot{A}_u$ 、 $R_i$  和  $R_o$

(2) 设  $U_s = 10\text{mV}$  (有效值), 问  $U_i = ?$ ,  $U_o = ?$

若  $C_3$  开路, 则  $U_i = ?$ ,  $U_o = ?$



解: (1)  $Q$  点:

$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - U_{BEQ}}{R_b + (1 + \beta)R_e} \approx 31\mu A$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} \approx 1.86mA$$

图 P2.13

$$U_{CEQ} \approx V_{CC} - I_{CQ}(R_c + R_e) \approx 4.5V$$

$\dot{A}_u$ 、 $R_i$  和  $R_o$  的分析:

$$r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26mV}{I_{EQ}} \approx 952\Omega, \quad \dot{A}_u = -\frac{\beta(R_c // R_L)}{r_{be}} \approx -95$$

$$R_i = R_b // r_{be} \approx 952\Omega,$$

$$R_o = R_c = 3k\Omega.$$

(2) 设  $U_s = 10mV$  (有效值), 则

$$U_i = \frac{R_i}{R_s + R_i} \cdot U_s = 3.2mV; \quad U_o = |\dot{A}_u| \cdot U_i = 304mV$$

若  $C_3$  开路, 则:

$$R_i = R_b // [r_{be} + (1 + \beta)R_e] \approx 51.3k\Omega, \quad \dot{A}_u \approx -\frac{R_c // R_L}{R_e} \approx -1.5$$

$$U_i = \frac{R_i}{R_s + R_i} \cdot U_s = 9.6mV, \quad U_o = |\dot{A}_u| \cdot U_i = 14.4mV.$$

2.14 改正图 P2.14 所示各电路中的错误, 使它们有可能放大正弦波电压。要求保留电路的共漏接法。

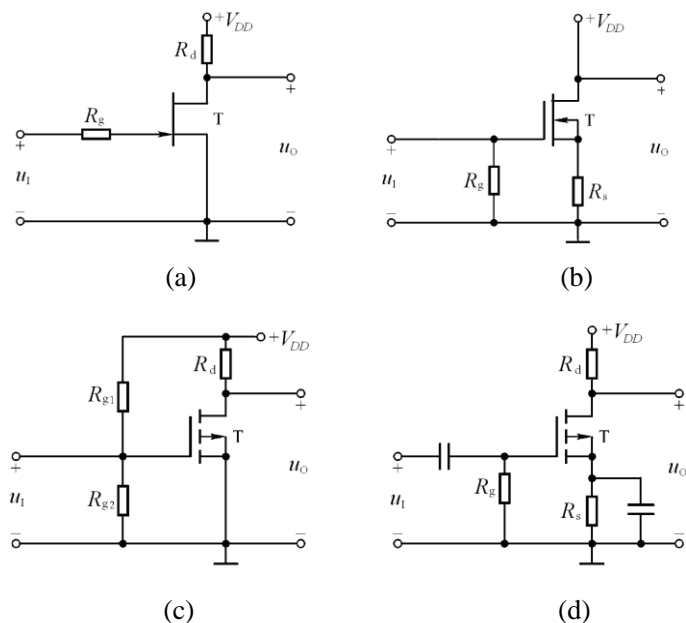


图 P2.14

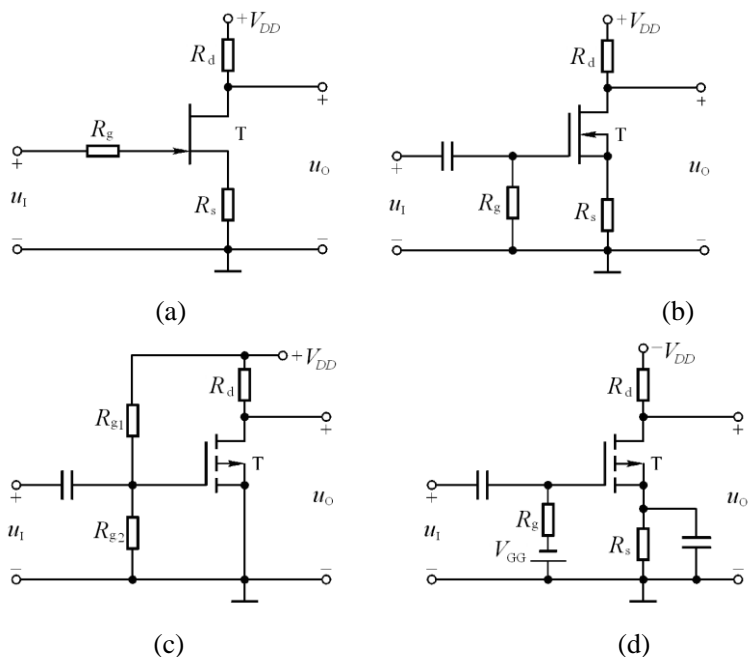
解: (a) 源极加电阻  $R_s$ ;

(b) 漏极加电阻  $R_D$ ;

(c) 输入端加耦合电容;

(d) 在  $R_g$  支路加  $-V_{GG}$ ,  $+V_{DD}$  改为  $-V_{DD}$

改正电路如解图 P2.14 所示。



解图 P2.14

2.15 已知图 P2.21 (a) 所示电路中场效应管的转移特性和输出特性分别如图(b)、(c)所示。

(1) 利用图解法求解  $Q$  点；

(2) 利用等效电路法求解  $\dot{A}_u$ 、 $R_i$  和  $R_o$ 。

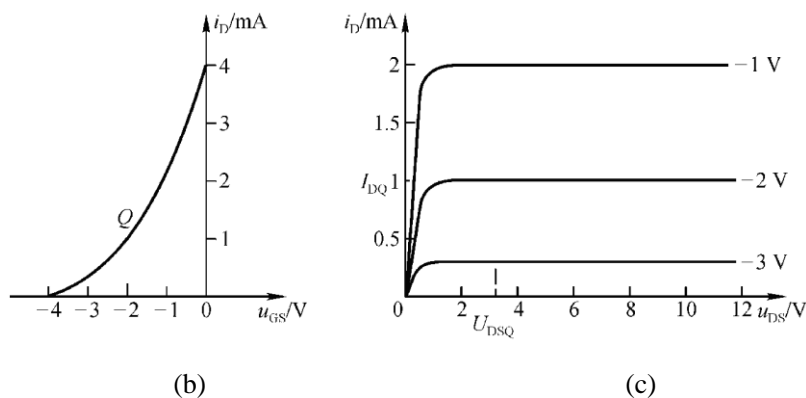
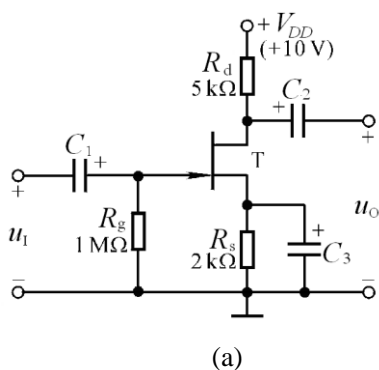
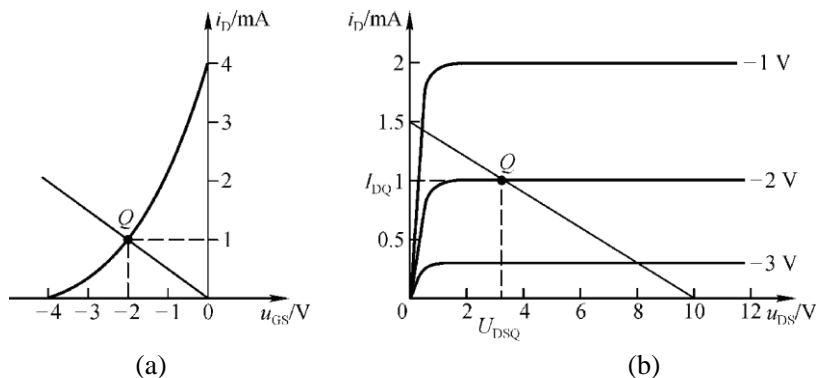


图 P2.15

解：(1) 在转移特性中作直线  $u_{GS} = -i_D R_s$ ，与转移特性的交点即为  $Q$  点；读出坐标值，得出

$I_{DQ} = 1\text{mA}$ ,  $U_{GSQ} = -2\text{V}$ 。如解图 P2.15(a) 所示。





解图 P2.21

在输出特性中作直流负载线  $u_{DS} = V_{DD} - i_D(R_d + R_s)$ , 与  $U_{GS} = -2V$  的那条输出特性曲线的交点为  $Q$

点,  $U_{DSQ} \approx 3V$ 。如解图 P2.21(b)所示。

(2) 首先画出交流等效电路 (图略), 然后进行动态分析。

$$g_m = \left. \frac{\partial i_D}{\partial u_{GS}} \right|_{U_{DS}} = \frac{-2}{U_{GS(off)}} \sqrt{I_{DSS} I_{DQ}} = 1 \text{ mA/V}$$

$$\dot{A}_u = -g_m R_d = -5; \quad R_i = R_g = 1 \text{ M}\Omega; \quad R_o = R_d = 5 \text{ k}\Omega$$

2.16 已知图 P2.16(a)所示电路中场效应管的转移特性如图(b)所示。

求解电路的  $Q$  点和  $\dot{A}_u$ 。

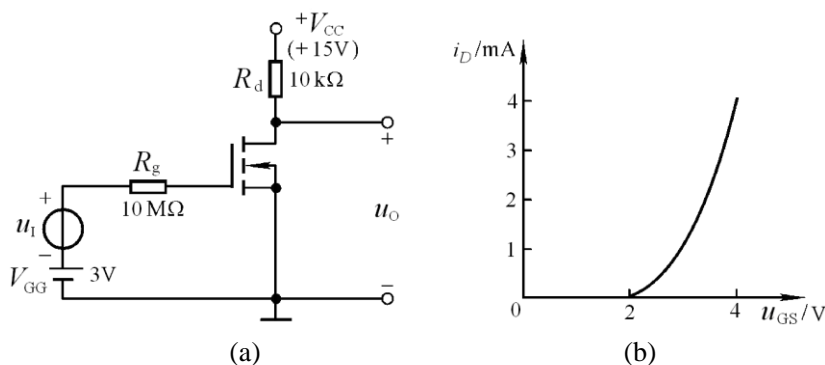


图 P2.16

解: (1) 求  $Q$  点:

根据电路图可知,  $U_{GSQ} = V_{GG} = 3V$ 。

从转移特性查得, 当  $U_{GSQ} = 3V$  时的漏极电流:  $I_{DQ} = 1 \text{ mA}$

因此管压降  $U_{DSQ} = V_{DD} - I_{DQ} R_d = 5V$ 。

(2) 求电压放大倍数:

$$\because g_m = \frac{2}{U_{GS(th)}} \sqrt{I_{DQ} I_{DO}} = 2 \text{ mA/V}, \quad \therefore \dot{A}_u = -g_m R_d = -20$$

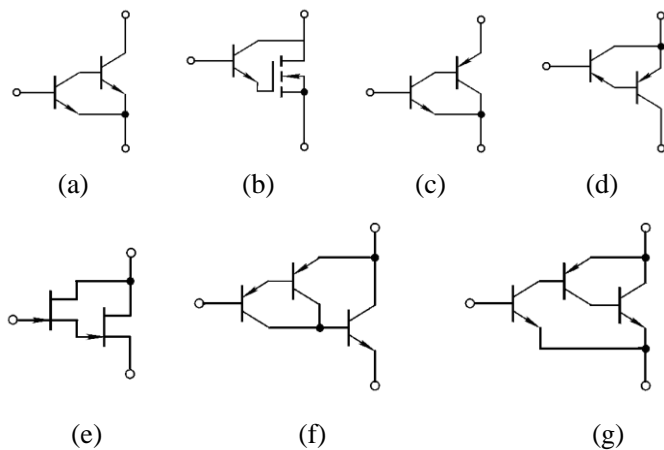
2.17 电路如图 P2.17 所示。(1) 若输出电压波形底部失真, 则可采取哪些措施? 若输出电压波形顶

部失真，则可采取哪些措施？（2）若想增大 $|\dot{A}_u|$ ，则可采取哪些措施？

**解：**（1）输出电压波形底部失真，类似于 NPN 型三极管的饱和失真，应降低 Q，故可减小  $R_2$  或增大  $R_1$ 、 $R_S$ ；若输出电压波形顶部失真，则与上述相反，故可增大  $R_2$  或减小  $R_1$ 、 $R_S$ 。

（2）若想增大 $|\dot{A}_u|$ ，就要增大漏极静态电流以增大  $g_m$ ，故可增大  $R_2$  或减小  $R_1$ 、 $R_S$ 。

**2.18 图 P2.18** 中的哪些接法可以构成复合管？标出它们等效管的类型（如 NPN 型、PNP 型、N 沟道结型… …）及管脚(b、e、c、d、g、s)。



**图 P2.18**

**解：** (a)不能。(b)不能。

(c)构成 NPN 型管，上端为集电极，中端为基极，下端为发射极。

(d)不能。(e)不能。

(f)构成 PNP 型管，上端为发射极，中端为基极，下端为集电极。

(g)构成 NPN 型管，上端为集电极，中端为基极，下端为发射极。

## 第3章 多级放大电路

### 自测题

一、现有基本放大电路：

A.共射电路 B.共集电路 C.共基电路 D.共源电路 E.共漏电路

根据要求选择合适电路组成两级放大电路。

(1)要求输入电阻为  $1k\Omega$  至  $2k\Omega$ ，电压放大倍数大于 3000，第一级应采用(A)，第二级应采用(A)。

(2)要求输入电阻大于  $10M\Omega$ ，电压放大倍数大于 300，第一级应采用(D)，第二级应采用(A)。

(3)要求输入电阻为  $100k\Omega \sim 200k\Omega$ ，电压放大倍数数值大于 100，第一级应采用(B)，第二级应采用(A)。

(4)要求电压放大倍数的数值大于 10，输入电阻大于  $10M\Omega$ ，输出电阻小于  $100\Omega$ ，第一级应采用(D)，第二级应采用(B)。

(5)设信号源为内阻很大的电压源，要求将输入电流转换成输出电压，且  $\left| \dot{A}_{ui} \right| = \left| \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_i} \right| > 1000$ ，输出电阻  $R_o$

$< 100$ ，第一级应采用采用(C)，第二级应(B)。

二、选择合适答案填入空内。

(1)直接耦合放大电路存在零点漂移的原因是(C、D)。

A. 电阻阻值有误差 B. 晶体管参数的分散性  
C. 晶体管参数受温度影响 D. 电源电压不稳

(2)集成放大电路采用直接耦合方式的原因是(C)。

A. 便于设计 B. 放大交流信号 C. 不易制作大容量电容

(3)选用差动放大电路的原因是(A)。

A. 克服温漂 B. 提高输入电阻 C. 稳定放大倍数

(4)差动放大电路的差模信号是两个输入端信号的(A)，共模信号是两个输入端信号的(C)。

A. 差 B. 和 C. 平均值

(5)用恒流源取代长尾式差动放大电路中的发射极电阻，将使单端电路的(B)。

A. 差模放大倍数数值增大 B. 抑制共模信号能力增强 C. 差模输入电阻增大

(6)互补输出级采用共集形式是为了使(C)。

A. 放大倍数的数值大 B. 最大不失真输出电压大 C. 带负载能力强

三、电路如图 T3 3 所示，所有晶体管均为硅管， $\beta$  均为 200， $r_{bb'} = 200\Omega$ ，静态时  $U_{BEQ} \approx 0.7V$ 。试求：

(1)静态时  $T_1$  管和  $T_2$  管的发射极电流。

(2)若静态时  $u_o > 0$ ，则应如何调节  $R_{c2}$  的值才能使  $u_o = 0$ ？

若静态  $u_o = 0V$ ，则  $R_{c2} = ?$ ，电压放大倍数为多少？

解：(1)  $T_3$  管的集电极电流  $I_{C3} = (U_Z - U_{BEQ3}) / R_{E3} = 0.3mA$

静态时  $T_1$  管和  $T_2$  管的发射极电流  $I_{E1} = I_{E2} = 0.15mA$

(2)若静态时  $u_o > 0$ ，则应减小  $R_{c2}$ 。

当  $u_i = 0$  时  $u_o = 0$ ,  $T_4$  管的集电极电流  $I_{CQ4} = V_{EE} / R_{c4} = 0.6\text{mA}$ 。

$R_{c2}$  的电流及其阻值分别为:

$$I_{R_{c2}} = I_{C2} - I_{B4} = I_{C2} - \frac{I_{CQ4}}{\beta} = 0.147\text{mA},$$

$$R_{c2} = \frac{I_{E4}R_{E4} + |U_{BEQ4}|}{I_{R_{c2}}} \approx 6.8\text{k}\Omega$$

电压放大倍数求解过程如下:

$$r_{be2} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26\text{mV}}{I_{EQ2}} \approx 35\text{k}\Omega$$

$$r_{be4} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26\text{mV}}{I_{EQ4}} \approx 8.9\text{k}\Omega$$

$$\dot{A}_{u1} = \frac{\beta \{ R_{c2} / [r_{be4} + (1 + \beta) R_{E4}] \}}{2r_{be2}} \approx 18.$$

$$\dot{A}_{u2} = - \frac{\beta R_{c4}}{r_{be4} + (1 + \beta) R_{E4}} \approx -18.3$$

$$\dot{A}_u = \dot{A}_{u1} \dot{A}_{u2} \approx -335$$

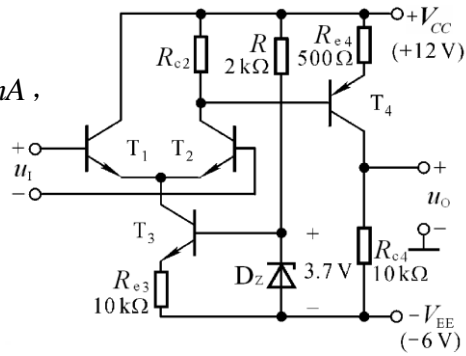


图 T3 3

## 习题

3.1 判断图 P3.1 所示各两级放大电路中  $T_1$  和  $T_2$  管分别组成哪种基本接法的放大电路。设图中所有电容对于交流信号均可视为短路。

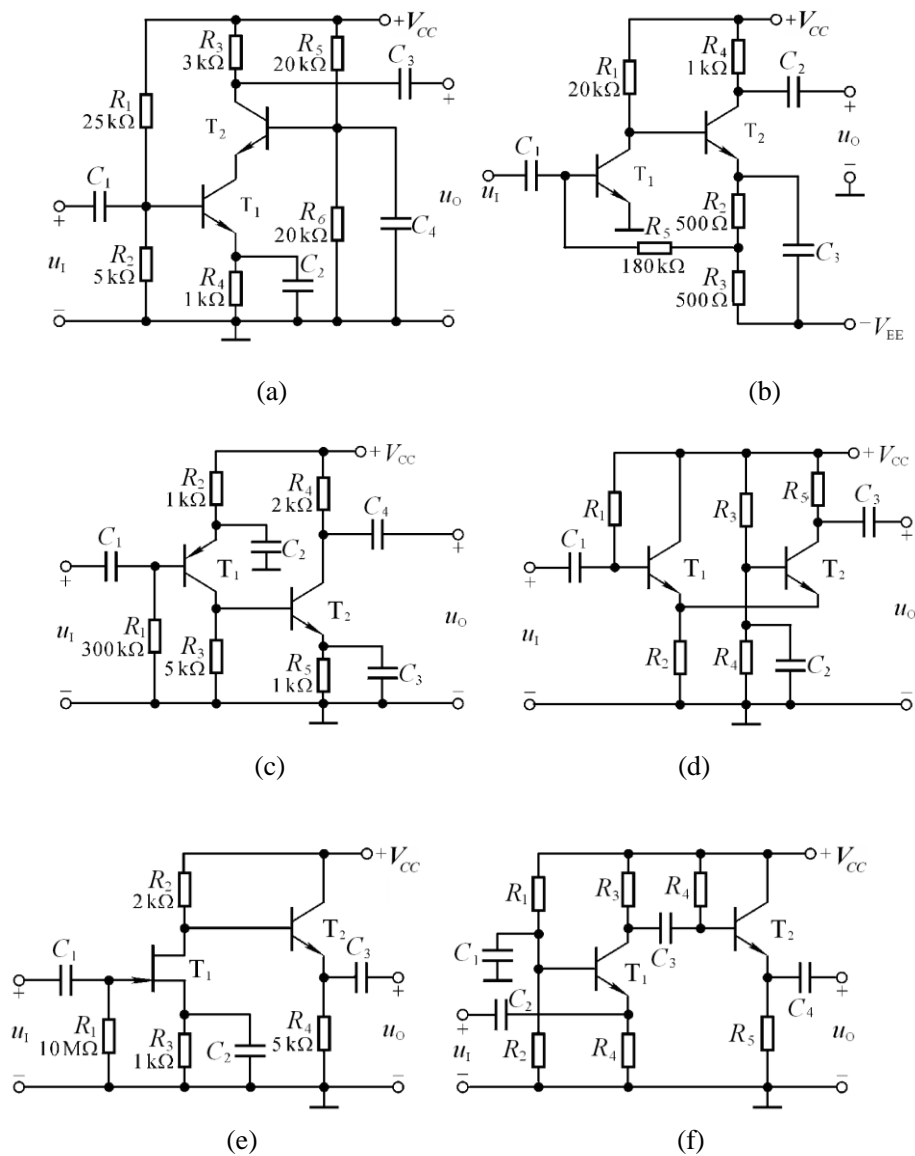


图 P3.1

解: (a)共射, 共基 (b)共射, 共射 (c)共射, 共射  
(d)共集, 共基 (e)共源, 共集 (f)共基, 共集

3.2 设图 P3.2 所示各电路的静态工作点均合适, 分别画出它们的交流等效电路, 并写出  $A_u$ 、 $R_i$  和  $R_o$  的表达式。

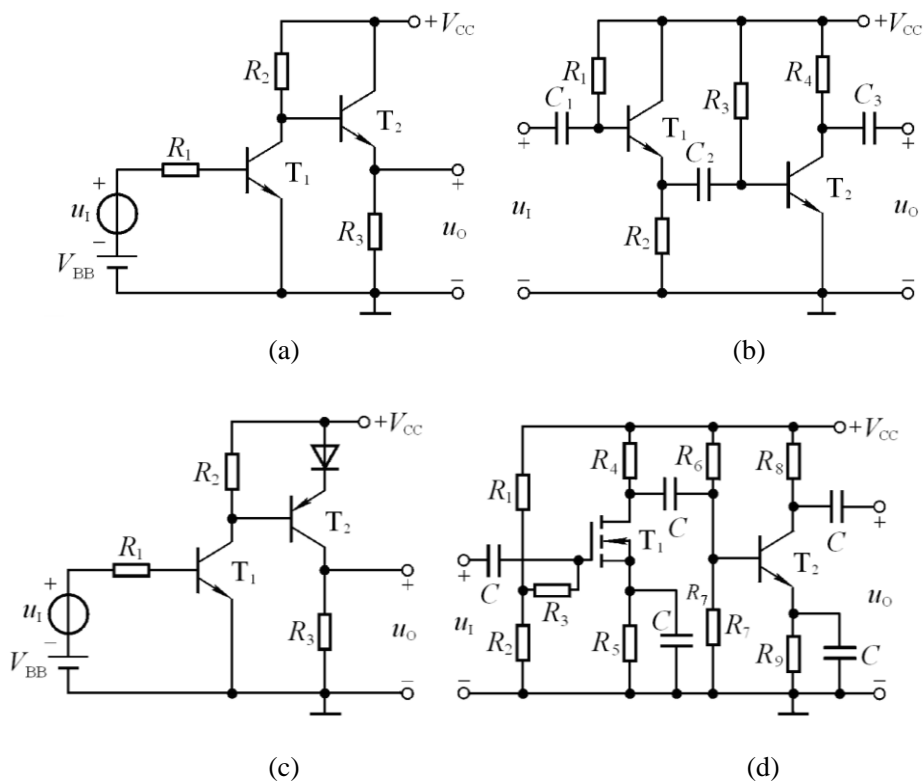


图 P3.2

解: (1)图示各电路的交流等效电路如解图 P3.2 所示。

(2)各电路的  $A_u$ 、 $R_i$  和  $R_o$  的表达式分别为:

$$(a): \dot{A}_u = -\frac{\beta_1 \{R_2 // [r_{be2} + (1 + \beta_2)R_3]\}}{R_1 + r_{be1}} \cdot \frac{(1 + \beta_2)R_3}{r_{be2} + (1 + \beta_2)R_3};$$

$$R_i = R_1 + r_{be1}; \quad R_o = R_3 // \frac{r_{be2} + R_2}{1 + \beta_2}$$

$$(b): \dot{A}_u = +\frac{(1 + \beta_1)(R_2 // R_3 // r_{be2})}{r_{be1} + (1 + \beta_1)(R_2 // R_3 // r_{be2})} \cdot \left(-\frac{\beta_2 R_4}{r_{be2}}\right)$$

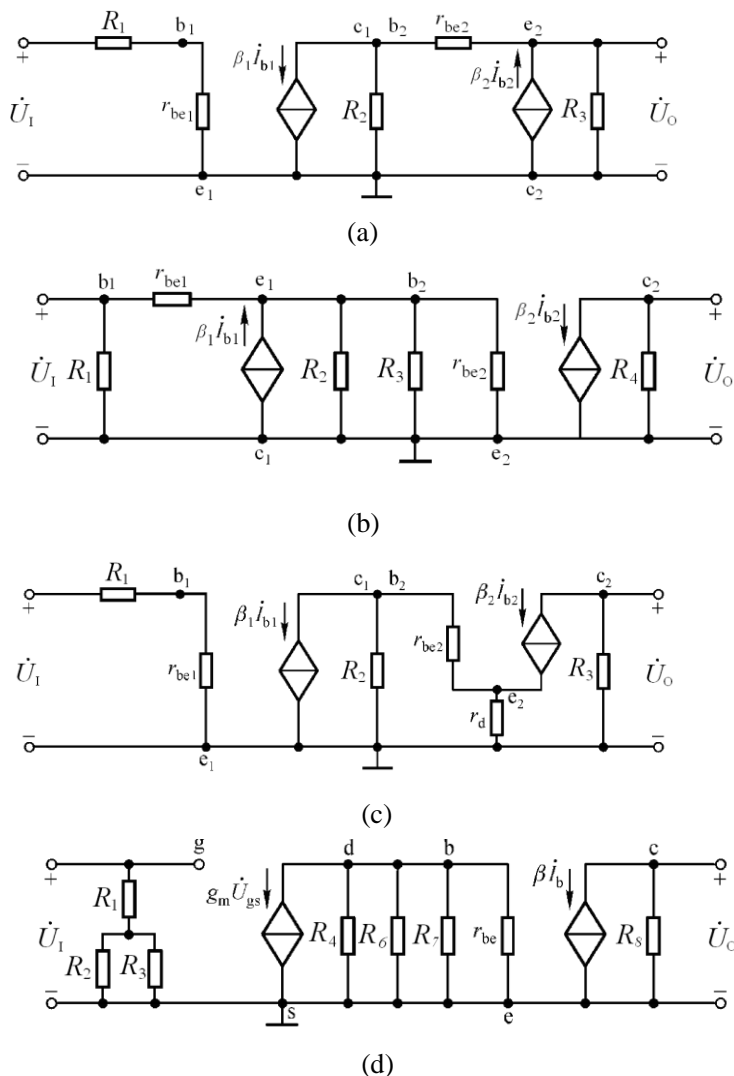
$$R_i = R_1 // [r_{be1} + (1 + \beta_1)R_2 // R_3 // r_{be2}]; \quad R_o = R_4$$

$$(c): \dot{A}_u = -\frac{\beta_1 \{R_2 // [r_{be2} + (1 + \beta_2)r_d]\}}{r_{be1} + R_1} \cdot \left[-\frac{\beta_2 R_3}{r_{be2} + (1 + \beta_2)r_d}\right]$$

$$R_i = R_1 + r_{be1}; \quad R_o = R_3$$

$$(d): \dot{A}_u = [-g_m(R_4 // R_6 // R_7 // r_{be2})] \cdot \left(-\frac{\beta_2 R_8}{r_{be2}}\right)$$

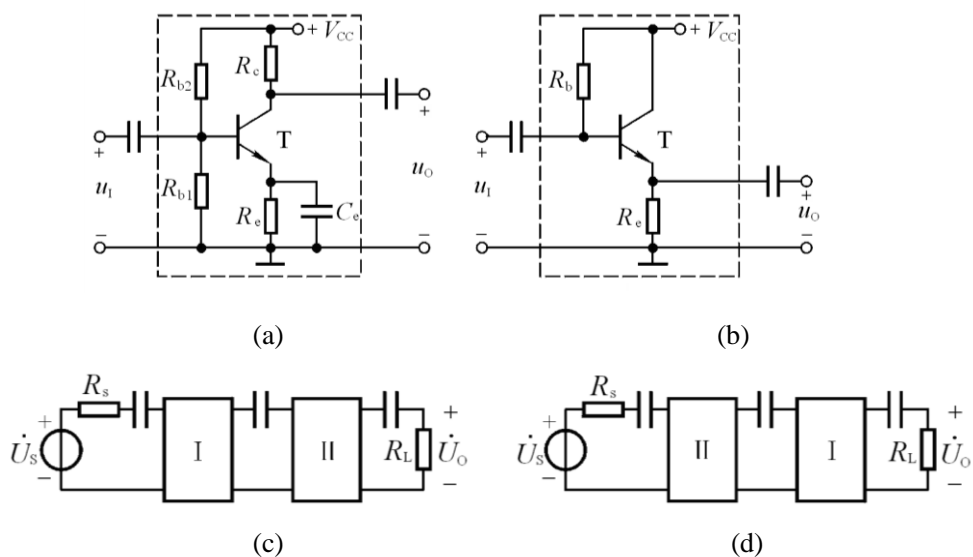
$$R_i = R_1 // R_2 + R_3; \quad R_o = R_8$$



解图 P3.2

3.3 基本放大电路如图 P3.3(a)、(b)所示，图(a)虚线框内为电路 I，图(b)虚线框内为电路 II。由电路 I、II 组成的多级放大电路如图(c)、(d)、(e)所示，它们均正常工作。试说明图(c)、(d)、(e)所示电路中

- (1) 哪些电路的输入电阻较大；
- (2) 哪些电路的输出电阻较小；
- (3) 哪个电路的电压放大倍数最大。



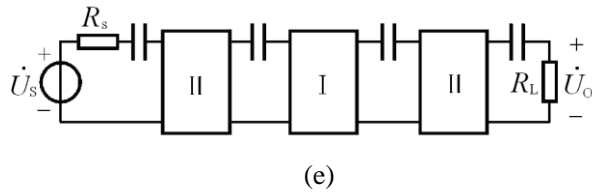


图 P3.3

- 解: (1)图(d)、(e)所示电路的输入电阻比较大;  
 (2)图(c)、(e)所示电路的输出电阻比较小;  
 (3)图(e)所示电路的电压放大倍数最大。

3.4 电路如图 P3.1 (a) (b)所示, 晶体管的  $\beta$  均为 150,  $r_{be}$  均为  $2k\Omega$ ,  $Q$  点合适。求解  $\dot{A}_u$ 、 $R_i$  和  $R_o$ 。

解: 在图(a)所示电路中

$$\therefore \dot{A}_{u1} = -\frac{\beta_1 \cdot \frac{r_{be2}}{1+\beta_2}}{r_{be1}} \approx -1; \quad \dot{A}_{u2} = \frac{\beta_2 R_3}{r_{be2}} = 225;$$

$$\therefore \dot{A}_u = \dot{A}_{u1} \cdot \dot{A}_{u2} \approx -225$$

$$R_i = R_1 // R_2 // r_{be1} \approx 1.35k\Omega; \quad R_o = R_3 = 3k\Omega。$$

在图(b)所示电路中

$$\therefore \dot{A}_{u1} = -\frac{\beta_1 \cdot (R_1 // r_{be2})}{r_{be1}} \approx -136; \quad \dot{A}_{u2} = -\frac{\beta_2 R_4}{r_{be2}} = -75$$

$$\therefore \dot{A}_u = \dot{A}_{u1} \cdot \dot{A}_{u2} \approx 10200$$

$$R_i = (R_5 + R_2 // R_3) // r_{be1} \approx 2k\Omega; \quad R_o = R_4 = 1k\Omega$$

3.5 电路如图 P3.1 (c)、(e)所示, 晶体管的  $\beta$  均为 200,  $r_{be}$  均为  $3k\Omega$ 。场效应管的  $g_m$  为  $15mS$ ;  $Q$  点

合适。求解  $\dot{A}_u$ 、 $R_i$  和  $R_o$ 。

解: 在图(c)所示电路中

$$\dot{A}_{u1} = -\frac{\beta_1 \cdot (R_3 // r_{be2})}{r_{be1}} \approx -125; \quad \dot{A}_{u2} = -\frac{\beta_2 R_4}{r_{be2}} = -133.3$$

$$\dot{A}_u = \dot{A}_{u1} \cdot \dot{A}_{u2} \approx 16666.7; \quad R_i = R_1 // r_{be1} \approx 3k\Omega; \quad R_o = R_4 = 2k\Omega。$$

在图(e)所示电路中

$$\dot{A}_{u1} = -g_m \{R_2 // [r_{be} + (1+\beta)R_4]\} \approx -g_m R_2 \approx -30 \quad \dot{A}_{u2} = -\frac{(1+\beta)R_4}{r_{be} + (1+\beta)R_4} \approx 1$$

$$\dot{A}_u = \dot{A}_{u1} \cdot \dot{A}_{u2} \approx -30; \quad R_i = R_1 = 10M\Omega; \quad R_o = R_4 // \frac{r_{be} + R_2}{1+\beta} \approx 25\Omega$$



3.6 图 P3.6 所示电路参数理想对称，晶体管的  $\beta$  均为 100， $r_{bb'} = 100\Omega$ ， $U_{BEQ} \approx 0.7V$ 。试求  $R_w$  的

滑动端在中点时  $T_1$  管和  $T_2$  管的发射极静态电流  $I_{EQ}$  以及动态参数  $A_d$  和  $R_i$ 。

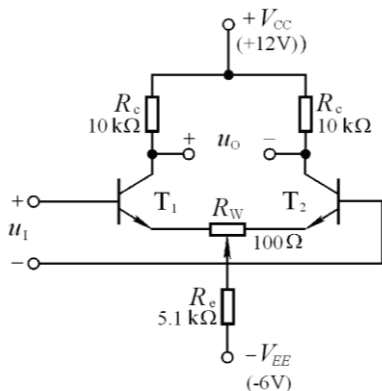


图 P3.6

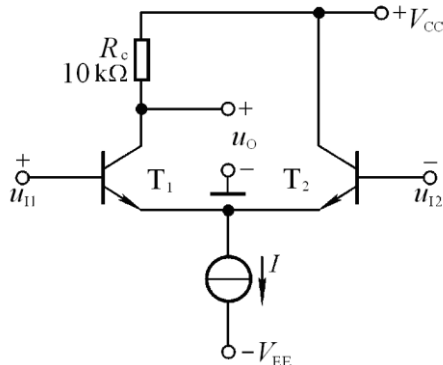


图 P3.7

解：  $R_w$  滑动端在中点时  $T_1$  管和  $T_2$  管的发射极静态电流  $I_{EQ}$  分析如下：

$$\because U_{BEQ} + I_{EQ} \cdot \frac{R_w}{2} + 2I_{EQ}R_e = V_{EE}$$

$$\therefore I_{EQ} = \frac{V_{EE} - U_{BEQ}}{\frac{R_w}{2} + 2R_e} \approx 0.517mA$$

动态参数  $A_d$  和  $R_i$  分析如下：

$$r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26mV}{I_{EQ}} \approx 5.18k\Omega$$

$$A_d = -\frac{\beta R_c}{r_{be} + (1 + \beta)R_w / 2} \approx -98$$

$$R_i = 2r_{be} + (1 + \beta)R_w \approx 20.5k\Omega$$

3.7 电路如图 P3.7 所示， $T_1$  和  $T_2$  两管的  $\beta$  均为 140， $r_{be}$  均为  $4k\Omega$ 。试问：若输入直流信号  $u_{I1} = 20mV$ ，

$u_{I2} = 10mV$ ，则电路的共模输入电压  $u_{IC} = ?$  差模输入电压  $u_{Id} = ?$  输出动态电压  $\Delta u_O = ?$

解：电路的共模输入电压  $u_{IC}$ 、差模输入电压  $u_{Id}$ 、差模放大倍数  $A_d$  和动态电压  $\Delta u_O$  分别为：

$$u_{IC} = \frac{u_{I1} + u_{I2}}{2} = 15mV; \quad u_{Id} = u_{I1} - u_{I2} = 10mV$$

$$A_d = -\frac{\beta R_c}{2r_{be}} \approx -175; \quad \Delta u_O = A_d u_{Id} = -1.75V$$

3.8 电路如图 P3.8 所示， $T_1$  和  $T_2$  的低频跨导  $g_m$  均为  $10mS$ 。试求解差模放大倍数和输入电阻。

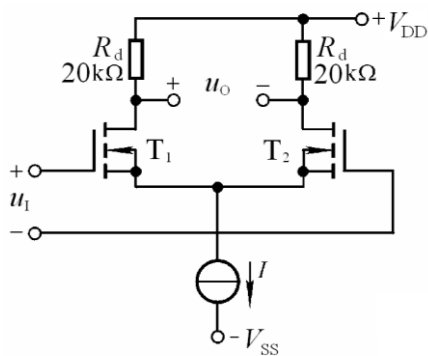


图 P3.8

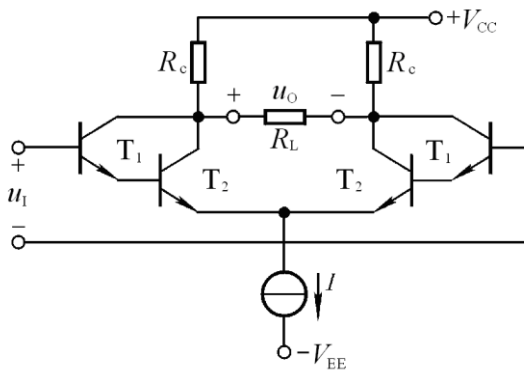


图 P3.9

解：差模放大倍数和输入电阻分别为：

$$A_d = -g_m R_d = -200; \quad R_i = \infty。$$

3.9 试写出图 P3.9 所示电路  $A_d$  和  $R_i$  的近似表达式。设  $T_1$  和  $T_2$  的电流放大系数分别为  $\beta_1$  和  $\beta_2$ ，b-e 间动态电阻分别为  $r_{be1}$  和  $r_{be2}$ 。

解：  $A_d$  和  $R_i$  的近似表达式分别为

$$A_d \approx -\frac{\beta_1 \beta_2 (R_c // \frac{R_L}{2})}{r_{be1} + (1 + \beta_1) r_{be2}}; \quad R_i = 2[r_{be1} + (1 + \beta_1) r_{be2}]$$

3.10 电路如图 P3.10 所示，  $T_1 \sim T_5$  的电流放大系数分别为  $\beta_1 \sim \beta_5$ ，b-e 间动态电阻分别为  $r_{be1} \sim r_{be5}$ ，写出  $A_u$ 、  $R_i$  和  $R_o$  的表达式。

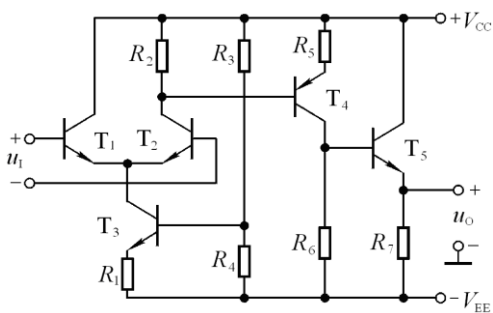


图 P3.10

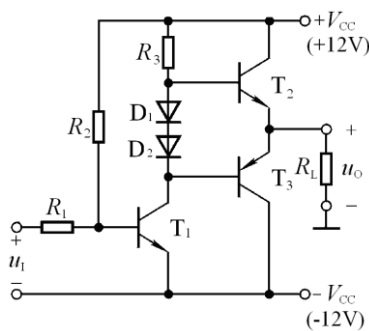


图 P3.11

解：  $A_u$ 、  $R_i$  和  $R_o$  的表达式分析如下：

$$A_{u1} = \frac{\Delta u_{O1}}{\Delta u_i} = \frac{\beta_1 \{R_2 // [r_{be4} + (1 + \beta_4) R_5]\}}{2r_{be1}}$$

$$A_{u2} = \frac{\Delta u_{O2}}{\Delta u_{i2}} = -\frac{\beta_4 \{R_6 // [r_{be5} + (1 + \beta_5) R_7]\}}{r_{be4} + (1 + \beta_4) R_5}$$

$$A_{u3} = \frac{\Delta u_{O3}}{\Delta u_{I3}} = \frac{(1 + \beta_5)R_7}{r_{be5} + (1 + \beta_5)R_7}$$

$$\therefore A_u = \frac{\Delta u_o}{\Delta u_i} = A_{u1} \cdot A_{u2} \cdot A_{u3}; \quad R_i = r_{be1} + r_{be2}; \quad R_o = R_7 // \frac{r_{be5} + R_6}{1 + \beta_5}$$

**3.11** 电路如图 P3.11 所示。已知电压放大倍数为-100，输入电压  $u_i$  为正弦波， $T_2$  和  $T_3$  管的饱和压降  $U_{CES}=1V$ 。试问：

(1)在不失真的情况下，输入电压最大有效值  $U_{imax}$  为多少伏？

(2)若  $U_i=10mV$ （有效值），则  $U_o=?$  若此时  $R_3$  开路，则  $U_o=?$  若  $R_3$  短路，则  $U_o=?$

**解：** (1)最大不失真输出电压有效值为：
$$U_{om} = \frac{V_{CC} - U_{CES}}{\sqrt{2}} \approx 7.78V$$

故在不失真的情况下，输入电压最大有效值：
$$U_{imax} = \frac{U_{om}}{|\dot{A}_u|} \approx 77.8mV$$

(2) $U_i=10mV$ ，则  $U_o=1V$ （有效值）。

若  $R_3$  开路，则  $T_1$  和  $T_3$  组成复合管，等效  $\beta = \beta_1\beta_3$ ， $T_3$  可能饱和，使得  $U_o = -11V$ （直流）；若  $R_3$  短路，

则  $U_o = 11.3V$ （直流）。

## 第4章 集成运算放大电路

### 自测题

一、选择合适答案填入空内。

- (1)集成运放电路采用直接耦合方式是因为( C )。  
A.可获得很大的放大倍数 B.可使温漂小 C.集成工艺难于制造大容量电容
- (2)通用型集成运放适用于放大( B )。  
A.高频信号 B.低频信号 C.任何频率信号
- (3)集成运放制造工艺使得同类半导体管的( C )。  
A.指标参数准确 B.参数不受温度影响 C.参数一直性好
- (4)集成运放的输入级采用差分放大电路是因为可以( A )。  
A.减小温漂 B.增大放大倍数 C.提高输入电阻
- (5)为增大电压放大倍数,集成运放的中间级多采用( A )。  
A.共射放大电路 B.共集放大电路 C.共基放大电路

二、判断下列说法是否正确,用“√”和“×”表示判断结果。

- (1)运放的输入失调电压  $U_{IO}$  是两输入端电位之差。( × )
- (2)运放的输入失调电流  $I_{IO}$  是两输入端电流之差。( √ )

(3)运放的共模抑制比  $K_{CMR} = \left| \frac{A_d}{A_c} \right|$ 。( √ )

- (4)有源负载可以增大放大电路的输出电流。( √ )
- (5)在输入信号作用时,偏置电路改变了各放大管的动态电流。( × )

三、电路如图 T4.3 所示,已知  $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 100$ 。各管的  $U_{BE}$  均为  $0.7V$ ,试求  $I_{C2}$  的值。

解:分析估算如下:

$$I_R = \frac{V_{CC} - U_{BE2} - U_{BE1}}{R} = 100\mu A$$

$$I_{B2} = \frac{2I_{B0} + \beta I_{B0}}{1 + \beta} = \frac{2 + \beta}{1 + \beta} I_{B0};$$

$$I_R = \beta I_{B0} + I_{B2} = \left( \frac{2 + \beta}{1 + \beta} + \beta \right) I_{B0}$$

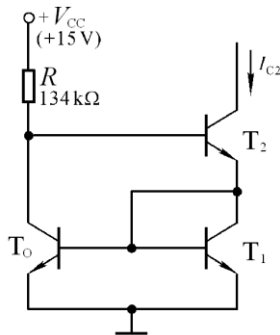


图 T4.3

$$I_{C2} = \beta I_{B2} = \beta \frac{2 + \beta}{1 + \beta} \cdot I_{B0}。比较上两式,得$$

$$I_{C2} = \frac{\beta(2 + \beta)}{2 + \beta + \beta(1 + \beta)} \cdot I_R \approx I_R = 100\mu A$$

四、电路如图 T4.4 所示。

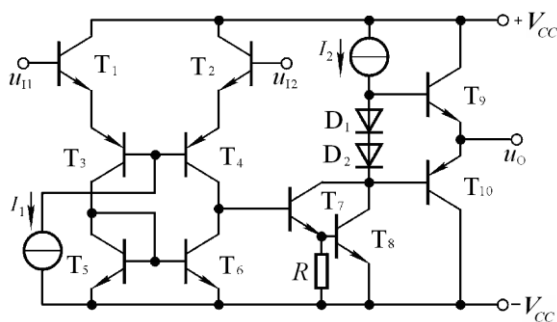


图 T4.4

- (1)说明电路是几级放大电路，各级分别是哪种形式的放大电路（共射、共集、差放... ..）；
- (2)分别说明各级采用了哪些措施来改善其性能指标（如增大放大倍数、输入电阻... ..）。

**解：**(1)三级放大电路，第一级为共集-共基双端输入单端输出差分放大电路，第二级是共射放大电路，第三级是互补输出级。

(2)第一级采用共集-共基形式，增大输入电阻，改善高频特性；利用有源负载( $T_5$ 、 $T_6$ )增大差模放大倍数，使单端输出电路的差模放大倍数近似等于双端输出电路的差模放大倍数，同时减小共模放大倍数。第二级为共射放大电路，以 $T_7$ 、 $T_8$ 构成的复合管为放大管、以恒流源作集电极负载，增大放大倍数。第三级为互补输出级，加了偏置电路，利用 $D_1$ 、 $D_2$ 的导通压降使 $T_9$ 和 $T_{10}$ 在静态时处于临界导通状态，从而消除交越失真。

## 习题

**4.1** 根据下列要求, 将应优先考虑使用的集成运放填入空内。已知现有集成运放的类型是: ①通用型 ②高阻型 ③高速型 ④低功耗型 ⑤高压型 ⑥大功率型 ⑦高精度型

- (1) 作低频放大器, 应选用( ① )。
- (2) 作宽频带放大器, 应选用( ③ )。
- (3) 作幅值为  $1\mu\text{V}$  以下微弱信号的量测放大器, 应选用( ⑦ )。
- (4) 作内阻为  $100\text{k}\Omega$ 。信号源的放大器, 应选用( ② )。
- (5) 负载需  $5\text{A}$  电流驱动的放大器, 应选用( ⑥ )。
- (6) 要求输出电压幅值为  $\pm 80\text{V}$  的放大器, 应选用( ⑤ )。
- (7) 宇航仪器中所用的放大器, 应选用( ④ )。

**4.2** 已知几个集成运放的参数如表 P4.3 所示, 试分别说明它们各属于哪种类型的运放。

表 P4.3

特性指标	$A_{od}$	$r_{id}$	$U_{IO}$	$I_{IO}$	$I_{IB}$	$-3\text{dB}f_H$	$K_{CMR}$	$SR$	增益带宽
单位	$\text{dB}$	$\text{M}\Omega$	$\text{mV}$	$\text{nA}$	$\text{nA}$	$\text{Hz}$	$\text{dB}$	$\text{V}/\mu\text{V}$	$\text{MHz}$
$A_1$	100	2	5	200	600	7	86	0.5	
$A_2$	130	2	0.01	2	40	7	120	0.5	
$A_3$	100	1000	5	0.02	0.03		86	0.5	5
$A_4$	100	2	2	20	150		96	65	12.5

**解:**  $A_1$  为通用型运放,  $A_2$  为高精度型运放,  $A_3$  为高阻型运放,  $A_4$  为高速型运放。

**4.3** 多路电流源电路如图 P4.3 所示, 已知所有晶体管的特性均相同,  $U_{BE}$  均为  $0.7\text{V}$ 。试求  $I_{C1}$ 、 $I_{C2}$  各为多少。

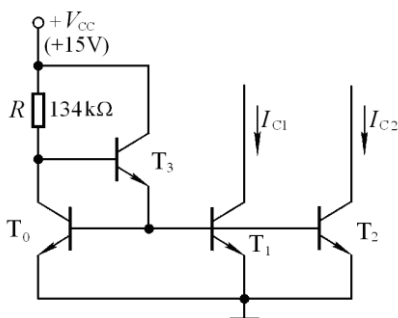


图 P4.3

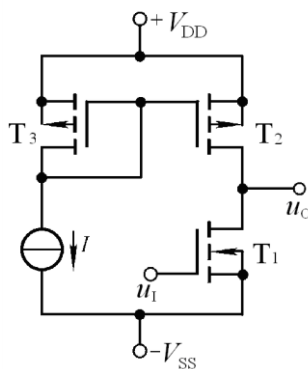


图 P4.4

**解:** 因为  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  的特性均相同, 且  $U_{BE}$  均相同, 所以它们的基极、集电极电流均相等, 设集电极电流为  $I_C$ 。先求出  $R$  中电流, 再求解  $I_{C1}$ 、 $I_{C2}$ 。

$$I_R = \frac{V_{CC} - U_{BE4} - U_{BE0}}{R} = 100\mu\text{A}$$

$$I_R = I_{C0} + I_{B3} = I_{C0} + \frac{3I_B}{1 + \beta} = I_C + \frac{3I_C}{\beta(1 + \beta)}$$

$$I_C = \frac{\beta^2 + \beta}{\beta^2 + \beta + 3} I_R$$

当  $\beta(1+\beta) \gg 3$  时,  $I_{C1} = I_{C2} \approx I_R = 100\mu A$ 。

**4.4** 电路如图 P4.4 所示,  $T_1$  管的低频跨导为  $g_m$ ,  $T_1$  和  $T_2$  管 d-s 间的动态电阻分别为  $r_{ds1}$  和  $r_{ds2}$ 。试求解电压放大倍数  $A_u = \Delta u_o / \Delta u_i$  的表达式。

**解:** 由于  $T_2$  和  $T_3$  所组成的镜像电流源是以  $T_1$  为放大管的共射放大电路的有源负载,  $T_1$  和  $T_2$  管 d-s 间的动态电阻分别为  $r_{ds1}$  和  $r_{ds2}$ , 所以电压放大倍数  $A_u$  的表达式为:

$$A_u = \frac{\Delta u_o}{\Delta u_i} = \frac{\Delta i_D (r_{ds1} // r_{ds2})}{\Delta u_i} = -g_m (r_{ds1} // r_{ds2})。$$

**4.5** 电路如图 P4.5 所示,  $T_1$  与  $T_2$  管特性相同, 它们的低频跨导为  $g_m$ ;  $T_3$  与  $T_4$  管特性对称;  $T_2$  与  $T_4$  管 d-s 间的动态电阻分别为  $r_{ds2}$  和  $r_{ds4}$ 。试求出电压放大倍数  $A_u = \Delta u_o / \Delta(u_{i1} - u_{i2})$  的表达式。

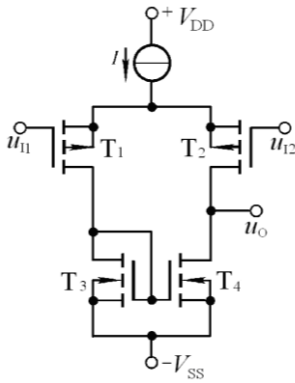


图 P4.5

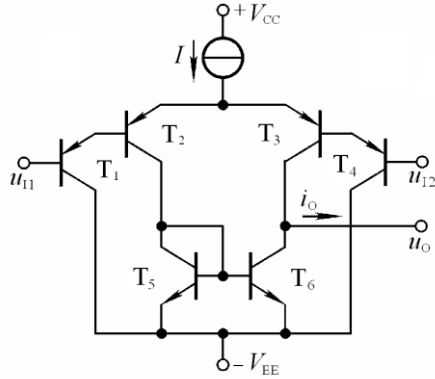


图 P4.6

**解:** 在图示电路中:

$$\Delta i_{D1} = -\Delta i_{D2} \approx \Delta i_{D3} = \Delta i_{D4}; \quad \Delta i_O = \Delta i_{D2} - \Delta i_{D4} \approx \Delta i_{D2} - \Delta i_{D1} = 2\Delta i_{D1}$$

$$\Delta i_{D1} = g_m \cdot \frac{\Delta(u_{i1} - u_{i2})}{2}; \quad g_m \approx \frac{\Delta i_O}{\Delta(u_{i1} - u_{i2})}$$

$$\therefore \text{电压放大倍数: } A_u = \frac{\Delta u_o}{\Delta(u_{i1} - u_{i2})} = -\frac{\Delta i_O (r_{ds2} // r_{ds4})}{\Delta(u_{i1} - u_{i2})} \approx g_m (r_{ds2} // r_{ds4})$$

**4.6** 电路如图 P4.6 所示, 具有理想的对称性。设各管  $\beta$  均相同。

(1)说明电路中各晶体管的作用; (2)若输入差模电压为  $(u_{i1} - u_{i2})$  产生的差模电流为  $\Delta i_D$ , 则电路的

$$\text{电流放大倍数 } A_i = \frac{\Delta i_O}{\Delta i_D} = ?$$

**解:** (1)图示电路为双端输入、单端输出的差分放大电路。  $T_1$  和  $T_2$ 、 $T_3$  和  $T_4$  分别组成的复合管为放大管,  $T_5$  和  $T_6$  组成的镜像电流源为有源负载。

(2)由于用  $T_5$  和  $T_6$  所构成的镜像电流源作为有源负载, 将左半部分放大管的电流变化量转换到右边, 故输出电流变化量及电路电流放大倍数分别为:

$$\Delta i_o \approx 2(1+\beta)\beta\Delta i_D; \quad A_i = \frac{\Delta i_o}{\Delta i_D} \approx 2(1+\beta)\beta。$$

4.7 电路如图 P4.7 所示,  $T_1$  和  $T_2$  管的特性相同, 所有晶体管的  $\beta$  均相同,  $R_{c1}$  远大于二极管的正向电阻。当  $u_{I1} = u_{I2} = 0V$  时,  $u_O = 0V$ 。

(1) 求解电压放大倍数的表达式; (2) 当有共模输入电压时,  $u_O = ?$  简述理由。

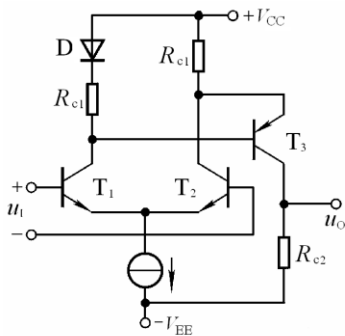


图 P4.7

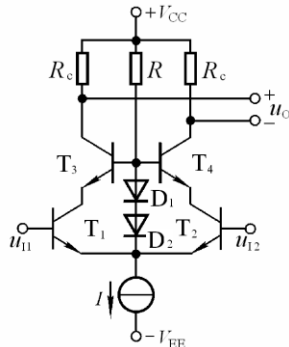


图 P4.8

解: (1) 在忽略二极管动态电阻的情况下:

$$A_{u1} \approx -\beta \frac{R_{c1} // \frac{r_{be3}}{2}}{r_{be1}}, \quad A_{u2} \approx -\beta \frac{R_{c2}}{r_{be3}}。$$

$$\therefore A_u = A_{u1} \cdot A_{u2}。$$

(2) 当有共模输入电压时,  $u_O$  近似为零。

由于  $R_{c1} \gg r_d$ ,  $\Delta u_{C1} \approx \Delta u_{C2}$ , 因此  $\Delta u_{BE3} \approx 0$ , 故  $u_O \approx 0$ 。

4.8 电路如图 P4.8 所示,  $T_1$  和  $T_2$  管为超  $\beta$  管, 电路具有理想的对称性。选择合适的答案填入空内。

(1) 该电路采用了( C )。

A. 共集-共基接法    B. 共集-共射接法    C. 共射-共基接法

(2) 电路所采用的上述接法是为( C )。

A. 增大输入电阻    B. 增大电流放大系数    C. 展宽频带

(3) 电路采用超  $\beta$  管能够( B )。

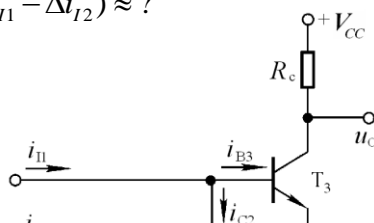
A. 增大输入级的耐压值    B. 增大放大能力    C. 增大带负载能力

(4)  $T_1$  和  $T_2$  管的静态压降约为( A )。

A. 0.7V    B. 1.4V    C. 不可知

4.9 在图 P4.9 所示电路中, 已知  $T_1 \sim T_3$  管的特性完全相同,  $\beta \gg 2$ ; 反相输入端的输入电流为  $i_{I1}$ , 同相输入端的输入电流为  $i_{I2}$ 。试问:

(1)  $i_{C2} \approx ?$ ;    (2)  $i_{B3} \approx ?$ ;    (3)  $A_{ui} = \Delta u_O / (\Delta i_{I1} - \Delta i_{I2}) \approx ?$





解: (1) 因为  $T_1$  和  $T_2$  为镜像关系,

且  $\beta \gg 2$ , 所以:  $i_{C2} \approx i_{C1} \approx i_{I2}$

$$(2) i_{B3} = i_{I1} - i_{C2} \approx i_{I1} - i_{I2}$$

(3) 输出电压的变化量和放大倍数

分别为:

$$\Delta u_o = -\Delta i_{B3} R_c = -\beta_3 \Delta i_{B3}$$

图 P4.9

$$A_{ui} = \Delta u_o / (\Delta i_{I1} - \Delta i_{I2}) \approx \Delta u_o / \Delta i_{B3} = -\beta_3 R_c$$

4.10 比较图 P4.10 所示两个电路, 分别说明它们是如何消除交越失真和如何实现过流保护的。

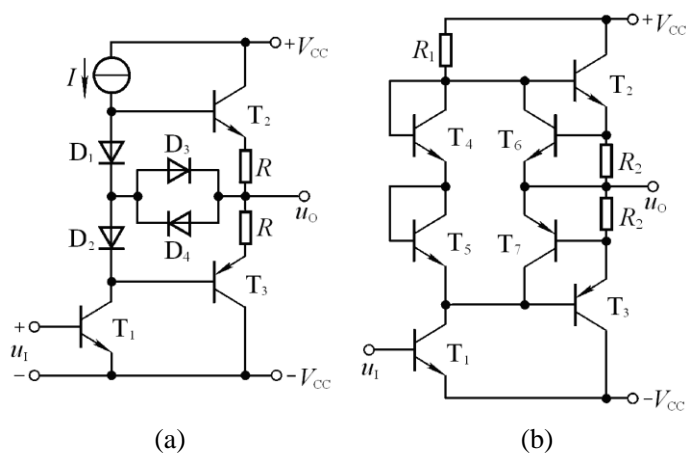


图 P4.10

解: 在图(a)所示电路中,  $D_1$ 、 $D_2$  使  $T_2$ 、 $T_3$  微导通, 可消除交越失真。 $R$  为电流采样电阻,  $D_3$  对  $T_2$  起过流保护。当  $T_2$  导通时,  $u_{D3} = u_{BE2} + i_O R - u_{D1}$ , 未过流时  $i_O R$  较小, 因  $u_{D3}$  小于开启电压使  $D_3$  截止; 过流时因  $u_{D3}$  大于开启电压使  $D_3$  导通, 为  $T_2$  基极分流。 $D_4$  对  $T_4$  起过流保护, 原因与上述相同。

在图(b)所示电路中,  $T_4$ 、 $T_5$  使  $T_2$ 、 $T_3$  微导通, 可消除交越失真。 $R_2$  为电流采样电阻,  $T_6$  对  $T_2$  起过流保护。当  $T_2$  导通时,  $u_{BE6} = i_O R_2$ , 未过流时  $i_O R_2$  较小, 因  $u_{BE6}$  小于开启电压使  $T_6$  截止; 过流时因  $u_{BE6}$  大于开启电压使  $T_6$  导通, 为  $T_2$  基极分流。 $T_7$  对  $T_3$  起过流保护, 原因与上述相同。

4.11 图 4.11 所示电路是某集成运放电路的一部分, 单电源供电。试分析:

- (1)  $100 \mu A$  电流源的作用;
- (2)  $T_4$  的工作区域 (截止、放大、饱和);
- (3)  $50 \mu A$  电流源的作用;
- (4)  $T_5$  与  $R$  的作用。

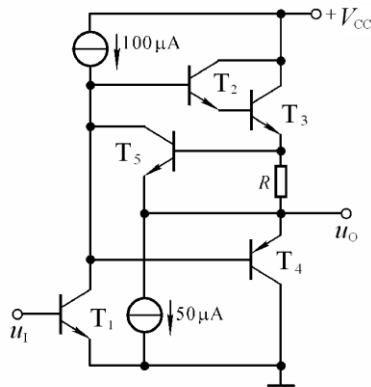


图 4.11

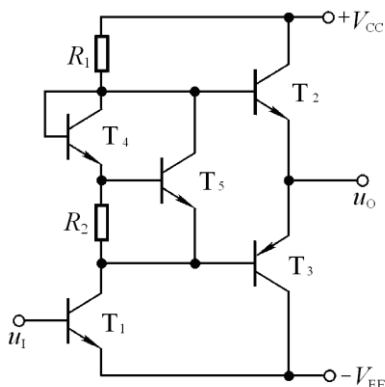


图 P4.12

**解:** (1)为  $T_1$  提供静态集电极电流、为  $T_2$  提供基极电流，并作为  $T_1$  的有源负载。

(2)  $T_4$  截止。因为:  $u_{B4} = u_{C1} = u_O + u_R + u_{B2} + u_{B3}$ ,  $u_{E4} = u_O$ ,  $\therefore u_{B4} > u_{E4}$ 。

(3)  $50 \mu A$  电流源为  $T_3$  提供射极电流，在交流等效电路中等效为大阻值的电阻。

(4)保护电路。  $u_{BE5} = i_O R_2$ ，未过流时  $T_5$  电流很小；过流时使  $i_{E5} > 50 \mu A$ ,  $T_5$  更多地为  $T_3$  的基极分流。

**4.12** 电路如图 P4.12 所示,试说明各晶体管的作用。

**解:**  $T_1$  为共射放大电路的放大管；  $T_2$  和  $T_3$  组成互补输出级；  $T_4$ 、  $T_5$ 、  $R_2$  组成偏置电路，用于消除交越失真。

**4.13** 图 P4.13 所示简化的高精度运放电路原理图，试分析：

(1)两个输入端中哪个是同相输入端，哪个是反相输入端；(2)  $T_3$  与  $T_4$  的作用；(3)电流源  $I_3$  的作用；(4)  $D_2$  与  $D_3$  的作用。

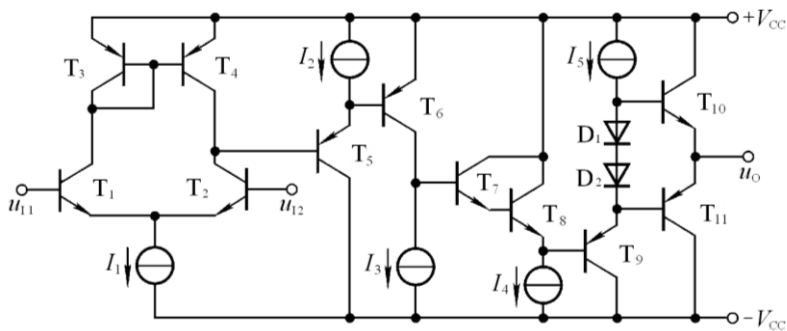


图 P4.13

**解:** (1)  $u_{i1}$  为反相输入端，  $u_{i2}$  为同相输入端。

(2)为  $T_1$  和  $T_2$  管的有源负载，将  $T_1$  管集电极电流变化量转换到输出，使单端输出差分放大电路的差模放大倍数近似等于双端输出时的放大倍数。

(3)为  $T_6$  设置静态电流，且为  $T_6$  的集电极有源负载，增大共射放大电路的放大能力。

(4)消除交越失真。

**4.14** 通用型运放 F747 的内部电路如图 P4.14 所示，试分析：

(1)偏置电路由哪些元件组成？基准电流约为多少？

(2)哪些是放大管，组成几级放大电路，每级各是什么基本电路？

(3)  $T_{19}$ 、 $T_{20}$  和  $R_8$  组成的电路的作用是什么？

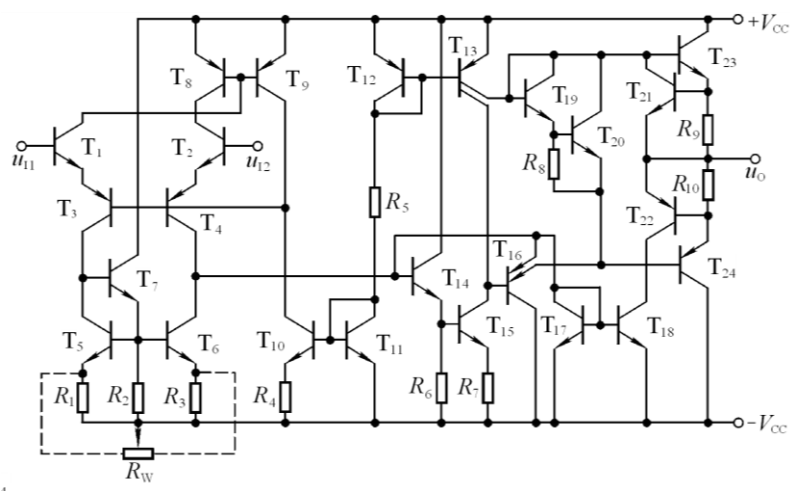


图 P4.14

解：(1)由  $T_{10}$ 、 $T_{11}$ 、 $T_9$ 、 $T_8$ 、 $T_{12}$ 、 $T_{13}$ 、 $R_5$  构成。

(2)图示电路为三级放大电路：

$T_1 \sim T_4$  构成共集-共基差分放大电路； $T_{14} \sim T_{16}$  构成共集-共射-共集电路； $T_{23}$ 、 $T_{24}$  构成互补输出级。

(3)消除交越失真。互补输出级两只管子的基极之间电压

$$U_{B23} - U_{B24} = U_{BE20} + U_{BE19} \quad U_{B23} - U_{B24} = U_{BE20} + U_{BE19}$$

使  $T_{23}$ 、 $T_{24}$  处于微导通，从而消除交越失真。

## 第 5 章 放大电路的频率响应

### 自测题

一、选择正确答案填入空内。

(1) 测试放大电路输出电压幅值与相位的变化, 可以得到它的频率响应, 条件是( A )。

- A. 输入电压幅值不变, 改变频率
- B. 输入电压频率不变, 改变幅值
- C. 输入电压的幅值与频率同时变化

(2) 放大电路在高频信号作用时放大倍数数值下降的原因是( B ), 而低频信号作用时放大倍数数值下降的原因是( A )。

- A. 耦合电容和旁路电容的存在
- B. 半导体管极间电容和分布电容的存在
- C. 半导体管的非线性特性
- D. 放大电路的静态工作点不合适

(3) 当信号频率等于放大电路的  $f_L$  或  $f_H$  时, 放大倍数的值约下降到中频时的( B )。

- A. 0.5 倍;
- B. 0.7 倍;
- C. 0.9 倍

即增益下降( A )。

- A. 3dB
- B. 4dB;
- C. 5dB

(4) 对于单管共射放大电路, 当  $f=f_L$  时,  $U_o$  与  $U_i$  相位关系是( C )。

- A.  $+45^\circ$
- B.  $-90^\circ$
- C.  $-135^\circ$

当  $f=f_H$  时,  $U_o$  与  $U_i$  相位关系是( C )。

- A.  $-45^\circ$
- B.  $-135^\circ$
- C.  $-225^\circ$

二、电路如图 T5.2 所示。已知:  $V_{CC}=12V$ ; 晶体管的  $C_\mu=4pF$ ,  $f_T=50MHz$ ,  $r_{bb'}=100\Omega$ ,  $\beta_0=80$ 。试求

解: (1) 中频电压放大倍数  $\dot{A}_{usm}$ ; (2)  $C_\pi'$ ; (3)  $f_L$  和  $f_H$ ; (4) 画出波特图。

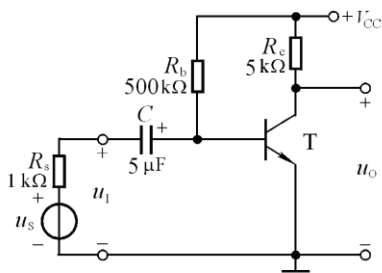


图 T5.2

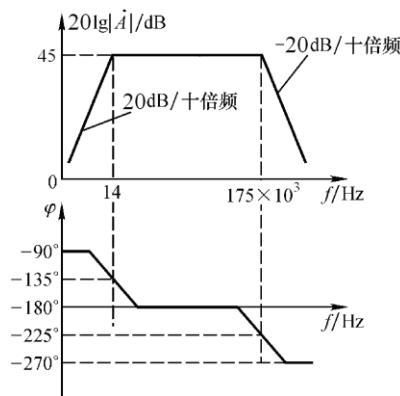
解: (1) 静态及动态的分析估算:

$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - U_{BEQ}}{R_b} \approx 22.6\mu A;$$

$$I_{EQ} = (1 + \beta) I_{BQ} \approx 1.8mA$$

$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_c \approx 3V;$$

$$r_{b'e} = (1 + \beta) \cdot \frac{26mV}{I_{EQ}} \approx 1.17k\Omega$$



解图 T5.2

$$r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26mV}{I_{EQ}} \approx 1.27k\Omega; \quad R_i = r_{be} // R_b \approx 1.2k\Omega$$

$$g_m = \frac{I_{EQ}}{U_T} \approx 69.2mA/V; \quad \dot{A}_{usm} = \frac{R_i}{R_i + R_s} \cdot \frac{r_{be}}{r_{be}} (-g_m R_c) \approx -178$$

(2) 估算  $C_\pi'$

$$f_T \approx \frac{\beta_0}{2\pi r_{be} (C_\pi + C_\mu)}; \quad C_\pi \approx \frac{\beta_0}{2\pi r_{be} f_T} - C_\mu \approx 214pF;$$

$$C_\pi' = C_\pi + (1 + g_m R_c) C_\mu \approx 160pF$$

(3) 求解上限、下限截止频率:

$$R = r_{be} // (r_{bb'} + R_s // R_b) \approx r_{be} // (r_{bb'} + R_s) \approx 567\Omega。$$

$$f_H = \frac{1}{2\pi R C_\pi'} \approx 175kHz; \quad f_L = \frac{1}{2\pi (R_s + R_i) C} \approx 14Hz。$$

(4) 在中频段的增益:  $20\lg|\dot{A}_{usm}| \approx 45dB。$

频率特性曲线如解图 T5.2 所示。

三、已知某放大电路的波特图如图 T5.3 所示, 填空:

(1) 电路的中频电压增益  $20\lg|\dot{A}_{um}| = (60)dB, \dot{A}_{um} = (10^3)。$

(2) 电路的下限频率  $f_L \approx (10)Hz$ , 上限频率  $f_H \approx (10)kHz。$

(3) 电路的电压放大倍数的表达式

$$(\dot{A}_u = \frac{\pm 10^3}{(1 + \frac{10}{jf})(1 + j\frac{f}{10^4})(1 + j\frac{f}{10^5})} = \frac{\pm 100jf}{(1 + j\frac{f}{10})(1 + j\frac{f}{10^4})(1 + j\frac{f}{10^5})})。$$

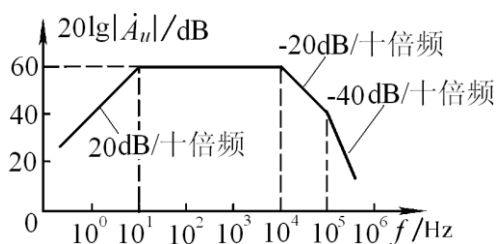


图 T5.3

说明: 该放大电路的中频放大倍数可能为 “+”, 也可能为 “-”。

## 习题

5.1 在图 P5.1 所示电路中, 已知晶体管的  $r_{bb'}$ 、 $C_{\mu}$ 、 $C_{\pi}$ ,  $R_i \approx r_{be}$ 。

填空: 除要求填写表达式的之外, 其余各空填入① 增大、② 基本不变、③ 减小。

(1) 在空载情况下, 下限频率的表达式  $f_L \approx (\frac{1}{2\pi(R_s + R_b // r_{be})C_1})$ 。当  $R_s$  减小时,  $f_L$  将( ① );

当带上负载电阻后,  $f_L$  将( ② )。

(2) 在空载情况下, 若 b-e 间等效电容为  $C_{\pi}'$ , 则上限频率的表达式

$f_H \approx (\frac{1}{2\pi[r_{b'e} // (r_{bb'} + R_b // R_s)]C_{\pi}'})$ ; 当  $R_s$  为零时,  $f_H$  将( ① ); 当  $R_b$  减小时,  $f_H$  将( ① ),  $C_{\pi}'$

将( ① ),  $f_H$  将( ③ )。

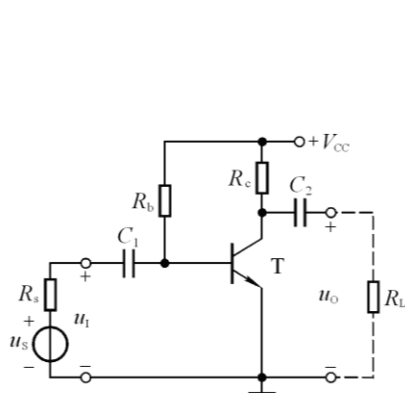


图 P5.1

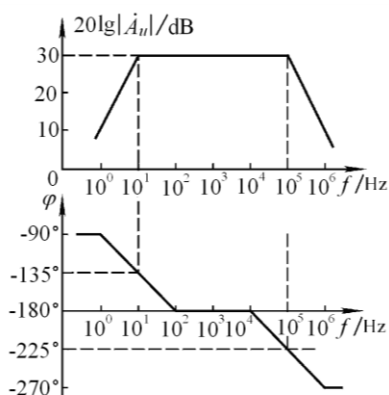


图 P5.2

5.2 已知某电路的波特图如图 P5.2 所示, 试写出  $\dot{A}_u$  的表达式。

解: 设电路为基本共射放大电路或基本共源放大电路。

$$\dot{A}_u \approx \frac{-32}{(1 + \frac{10}{jf})(1 + j\frac{f}{10^5})} \approx \frac{-3.2jf}{(1 + j\frac{f}{10})(1 + j\frac{f}{10^5})}$$

5.3 已知某共射放大电路的波特图如图 P5.3 所示, 试写出  $\dot{A}_u$  的表达式。

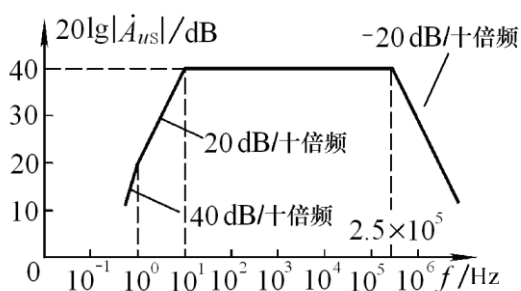


图 P5.3

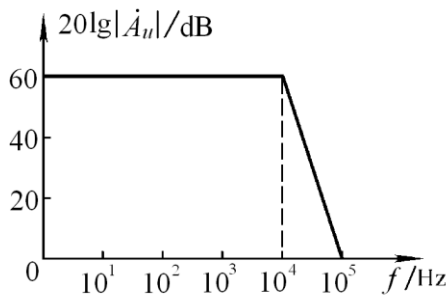


图 P5.4

**解：**观察波特图可知，中频电压增益为  $40\text{dB}$ ，即中频放大倍数为  $-100$ ；下限截止频率为  $1\text{Hz}$  和  $10\text{Hz}$ ，上限截止频率为  $250\text{kHz}$ 。故电路  $\dot{A}_u$  的表达式为：

$$\dot{A}_u = \frac{-100}{(1 + \frac{1}{jf})(1 + \frac{10}{jf})(1 + j\frac{f}{2.5 \times 10^5})} = \frac{+10f^2}{(1 + jf)(1 + j\frac{f}{10})(1 + j\frac{f}{10^5})}$$

**5.4** 已知某电路的幅频特性如图 P5.4 所示，试问：(1)该电路的耦合方式；(2)该电路由几级放大电路组成；(3)当  $f=10^4\text{Hz}$  时，附加相移为多少？当  $f=10^5\text{Hz}$  时，附加相移又约为多少？(4)该电路的上限频率  $f_H$  为多少？

**解：**(1)因为下限截止频率为 0，所以电路为直接耦合电路；

(2)因为在高频段幅频特性为  $-60\text{dB}/十倍频$ ，所以电路为三级放大电路；

(3)当  $f=10^4\text{Hz}$  时， $\phi' = -45^\circ \times 3 = -135^\circ$ ；

当  $f=10^5\text{Hz}$  时， $\phi' = -90^\circ \times 3 = -270^\circ$ 。

(4)该电路的  $\dot{A}_u = \frac{\pm 10^3}{(1 + j\frac{f}{10^4})^3}$ ；上限频率为  $f_H \approx \frac{f_H'}{1.1\sqrt{3}} \approx 5.2\text{kHz}$

**5.5** 已知某电路电压放大倍数： $\dot{A}_u = \frac{-10jf}{(1 + j\frac{f}{10})(1 + j\frac{f}{10^5})}$

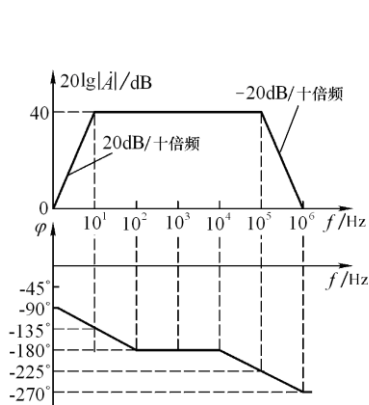
试求解：(1) $\dot{A}_{um} = ?$   $f_L \approx ?$   $f_H \approx ?$  (2)画出波特图。

**解：**(1)变换电压放大倍数的表达式，求出  $\dot{A}_{um}$ 、 $f_L$  和  $f_H$ 。

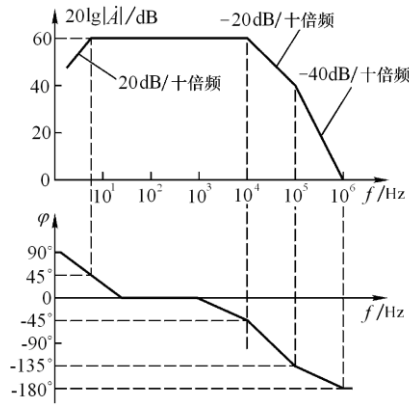
$$\because \dot{A}_u = \frac{-10jf}{(1 + j\frac{f}{10})(1 + j\frac{f}{10^5})} = \frac{-100 \cdot j\frac{f}{10}}{(1 + j\frac{f}{10})(1 + j\frac{f}{10^5})}$$

$$\therefore \dot{A}_{um} = -100; \quad f_L = 10\text{Hz}; \quad f_H = 10^5\text{Hz}。$$

(2)波特图如解图 P5.5 所示。



解图 P5.5



解图 P5.6

5.6 已知两级共射放大电路的电压放大倍数

$$\dot{A}_u = \frac{200jf}{(1+j\frac{f}{5})(1+j\frac{f}{10^4})(1+j\frac{f}{2.5 \times 10^5})}$$

(1)  $\dot{A}_{um} = ?$   $f_L \approx ?$   $f_H \approx ?$  (2) 画出波特图。

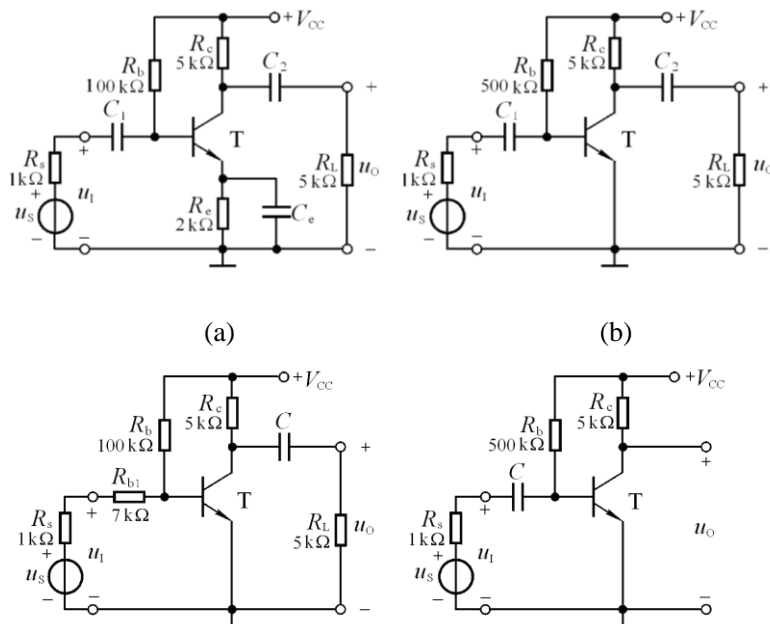
解: (1) 变换电压放大倍数的表达式, 求出  $\dot{A}_{um}$ 、 $f_L$  和  $f_H$ 。

$$\dot{A}_u = \frac{200jf}{(1+j\frac{f}{5})(1+j\frac{f}{10^4})(1+j\frac{f}{2.5 \times 10^5})} = \frac{10^3 \cdot j\frac{f}{5}}{(1+j\frac{f}{5})(1+j\frac{f}{10^4})(1+j\frac{f}{2.5 \times 10^5})}$$

$$\therefore \dot{A}_{um} = 10^3; \quad f_L = 5 \text{ Hz}; \quad f_H \approx 10^4 \text{ Hz}。$$

(2) 波特图如解图 P5.6 所示。

5.7 电路如图 P5.7 所示。已知: 晶体管的  $\beta$ 、 $r_{bb}$ 、 $C_\mu$  均相等, 所有电容的容量均相等, 静态时所有电路中晶体管的发射极电流  $I_{EQ}$  均相等。定性分析各电路, 将结论填入空内。





(c)

(d)

图 P5.7

- (1) 低频特性最差即下限频率最高的电路是(a)。  
 (2) 低频特性最好即下限频率最低的电路是(c)。  
 (3) 高频特性最差即上限频率最低的电路是(c)。

5.8 在图 P5.7(b)所示电路中, 若要求  $C_1$  与  $C_2$  所在回路的时间常数相等, 且已知  $r_{be} = 1k\Omega$ , 则  $C_1 : C_2 = ?$

若  $C_1$  与  $C_2$  所在回路的时间常数均为  $25ms$ , 则  $C_1$ 、 $C_2$  各为多少? 下限频率  $f_L = ?$

解: (1) 求解  $C_1 : C_2$

因为  $C_1 \cdot (R_s + R_i) = C_2 \cdot (R_c + R_L)$  将电阻值代入上式, 求出:  $C_1 : C_2 = 5 : 1$ 。

(2) 求解  $C_1$ 、 $C_2$  的容量和下限频率

$$C_1 = \frac{\tau}{R_s + R_i} \approx 12.5\mu F; \quad C_2 = \frac{\tau}{R_c + R_L} \approx 2.5\mu F$$

$$f_{L1} = f_{L2} = \frac{1}{2\pi\tau} \approx 6.4Hz; \quad f_L \approx 1.414 f_{L1} \approx 9.1Hz$$

5.9 在图 P5.7 (a)所示电路中, 若  $C_e$  突然开路, 则中频电压放大倍数  $\dot{A}_{usm}$ 、 $f_H$  和  $f_L$  各产生什么变化(是增大、减小、还是基本不变)? 为什么?

解:  $|\dot{A}_{usm}|$  将减小。因为在同样幅值的  $\dot{U}_i$  作用下,  $|\dot{I}_b|$  将减小,  $|\dot{I}_c|$  随之减小,  $|\dot{U}_o|$  必然减小。

$f_L$  减小。因为少了一个影响低频特性的电容。

$f_H$  增大。因为  $C_\pi'$  会因电压放大倍数数值的减小而大大减小, 所以虽然  $C_\pi'$  所在回路的等效电阻有所增大, 但时间常数仍会减小很多, 故  $f_H$  增大。

5.10 电路如图 P5.10 所示,

已知  $C_{gs} = C_{gd} = 5pF$ ,  $g_m = 5mS$ ,

$C_1 = C_2 = C_s = 10\mu F$ 。

试求  $f_H$ 、 $f_L$  各约为多少,

并写出  $\dot{A}_{us}$  的表达式。

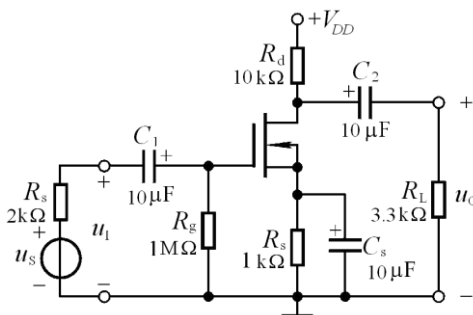


图 P5.10

解:  $f_H$ 、 $f_L$  和  $\dot{A}_{us}$  的表达式分析如下:

$$\dot{A}_{usm} = \frac{R_i}{R_i + R_s} (-g_m R_L') \approx -g_m R_L' \approx -12.4$$

$$f_L = \frac{1}{2\pi R_s C_s} \approx 16\text{Hz}$$

$$C'_{gs} = C_{gs} + (1 + g_m R'_L) C_{gd} \approx 72\text{pF}$$

$$f_H = \frac{1}{2\pi(R_g // R_s)C'_{gs}} \approx \frac{1}{2\pi R_s C'_{gs}} \approx 1.1\text{MHz}$$

$$\dot{A}_{us} \approx \frac{-12.4 \cdot j \frac{f}{16}}{(1 + j \frac{f}{16})(1 + j \frac{f}{1.1 \times 10^6})}$$

**5.11** 在图 5.4.7(a)所示电路中, 已知  $R_g = 2\text{M}\Omega$ ,  $R_d = R_L = 10\text{k}\Omega$ ,  $C = 10\mu\text{F}$ ; 场效应管的  $C_{gs} = C_{gd} = 4\text{pF}$ ,  $g_m = 4\text{mS}$ 。试画出电路的波特图, 并标出有关数据。

**解:**  $\dot{A}_{um} = -g_m R'_L \approx -20, 20\lg|\dot{A}_{um}| \approx 26\text{dB}$

$$C'_{gs} = C_{gs} + (1 + g_m R'_L) C_{gd} \approx 88\text{pF}$$

$$f_L \approx \frac{1}{2\pi(R_d + R_L)C} \approx 0.79\text{Hz}$$

$$f_H \approx \frac{1}{2\pi R_g C'_{gs}} \approx 904\text{Hz}$$

其波特图参考解图 P5.5。

**5.12** 已知一个两级放大电路各级电压放大倍数分别为:

$$\dot{A}_{u1} = \frac{\dot{U}_{o1}}{\dot{U}_i} = \frac{-25jf}{(1 + j\frac{f}{4})(1 + j\frac{f}{10^5})}; \quad \dot{A}_{u2} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_{i2}} = \frac{-2jf}{(1 + j\frac{f}{50})(1 + j\frac{f}{10^5})}$$

(1) 写出该放大电路的电压放大倍数的表达式;

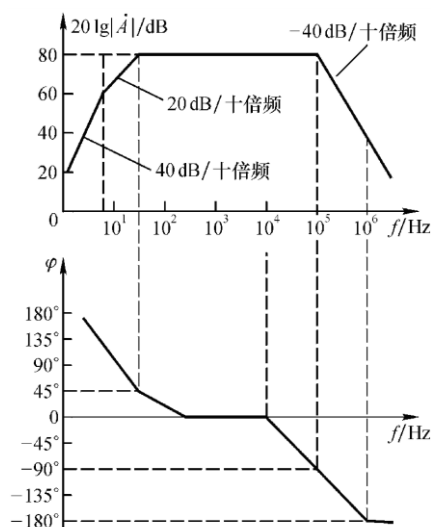
(2) 求出该电路的  $f_L$  和  $f_H$  各约为多少;

(3) 画出该电路的波特图。

**解:** (1) 电压放大倍数的表达式:

$$\begin{aligned} \dot{A}_u &= \dot{A}_{u1} \cdot \dot{A}_{u2} \\ &= \frac{-50f^2}{(1 + j\frac{f}{4})(1 + j\frac{f}{50})(1 + j\frac{f}{10^5})^2} \end{aligned}$$

(2)  $f_L$  和  $f_H$  分别为:



$$f_L \approx 50\text{Hz};$$

$$\therefore \frac{1}{f_H} \approx \frac{1}{1.1\sqrt{2} \times 10^5},$$

$$\therefore f_H \approx 64.3\text{kHz}$$

解图 P5.12

(3)根据电压放大倍数的表达式可知，中频电压放大倍数为  $10^4$ ，增益为  $80\text{dB}$ 。波特图如解图 P5.12 所示。

5.13 电路如图 P5.13 所示。试定性分析下列问题，并简述理由。

(1)哪一个电容决定电路的下限频率；

(2)若  $T_1$  和  $T_2$  静态时发射极电流相等，且  $r_{bb'}$  和  $C_\pi'$  相等，则哪一级的上限频率低。

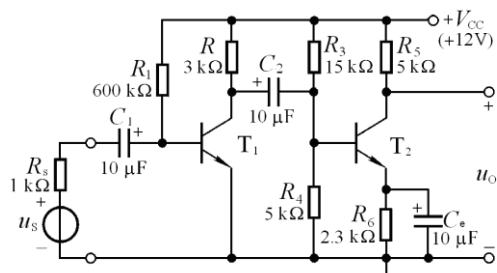


图 P5.13

解：(1)决定电路下限频率的是  $C_e$ ，因为它所在回路的等效电阻最小。

(2)因为  $R_2 // R_3 // R_4 > R_1 // R_5$ ， $C_{\pi 2}'$  所在回路的时间常数大于  $C_{\pi 1}'$  所在回路的时间常数，所以第二级的上限频率低。

补充 1 在图 P5.7(a)所示电路中，若  $\beta=100$ ， $r_{be}=1\text{k}\Omega$ ， $C_1=C_2=C_e=100\mu\text{F}$ ，则下限频率  $f_L=?$

解：由于所有电容容量相同，而  $C_e$  所在回路等效电阻最小，所以下限频率决定于  $C_e$  所在回路的时间常数。

$$\therefore R = R_e // \frac{r_{be} + R_s // R_b}{1 + \beta} \approx \frac{r_{be} + R_s}{1 + \beta} \approx 20\Omega$$

$$\therefore f_L \approx \frac{1}{2\pi RC_e} \approx 80\text{Hz}$$

补充 2 在图 P5.7(d)所示电路中，已知晶体管的  $r_{bb'}=100\Omega$ ， $r_{be}=1\text{k}\Omega$ ，静态电流  $I_{EQ}=2\text{mA}$ ，

$C_\pi'=800\text{pF}$ ， $R_s=2\text{k}\Omega$ ， $R_b=500\text{k}\Omega$ ， $R_c=3.3\text{k}\Omega$ ， $C=10\mu\text{F}$ 。

试分别求出电路的  $f_H$  和  $f_L$ ，并画出波特图。

$$\text{解：(1)求解 } f_L: f_L = \frac{1}{2\pi(R_s + R_i)C} \approx \frac{1}{2\pi(R_s + r_{be})C} \approx 5.3\text{Hz}$$

(2)求解  $f_H$  和中频电压放大倍数:  $r_{b'e} = r_{be} - r_{b'b} = 0.9k\Omega$

$$f_H = \frac{1}{2\pi[r_{b'e} // (r_{bb'} + R_b // R_s)]C_{\pi}'} \approx \frac{1}{2\pi[r_{b'e} // (r_{bb'} + R_s)]C_{\pi}'} \approx 316kHz$$

$$g_m \approx \frac{I_{EQ}}{U_T} \approx 77mA/V$$

$$\dot{A}_{usm} = \frac{R_i}{R_i + R_s} \cdot \frac{r_{b'e}}{r_{be}} (-g_m R_L') \approx -76$$

$$20\lg|\dot{A}_{usm}| \approx 37.6dB$$

其波特图参考解图 P5.5 。

## 第6章 放大电路中的反馈

### 自测题

一、已知交流负反馈由四种组态：A.电压串联负反馈；B.电压并联负反馈；C.电流串联负反馈；D.电流并联负反馈。选择合适答案填入下列空格内。

- 1.欲得到电流-电压转换电路，应在放大电路中引入(B)。
- 2.欲将电压信号转换成与之成比例的电流信号，应在放大电路中引入(C)。
- 3.欲减小电路从信号源索取的电流，增大带负载能力，应在放大电路中引入(A)。
- 4.欲从信号源获得更大的电流，并稳定输出电流，应在放大电路中引入(D)。

二、判断图 T6.2 所示各电路中是否引入了反馈；若引入了反馈，则判断是正反馈还是负反馈；若引入了交流负反馈，则判断是哪种组态的负反馈，并求出反馈系数和深度负反馈条件下的电压放大倍数  $\dot{A}_{uf}$  或  $\dot{A}_{usf}$ 。设图中所有电容对交流信号均可视为短路。

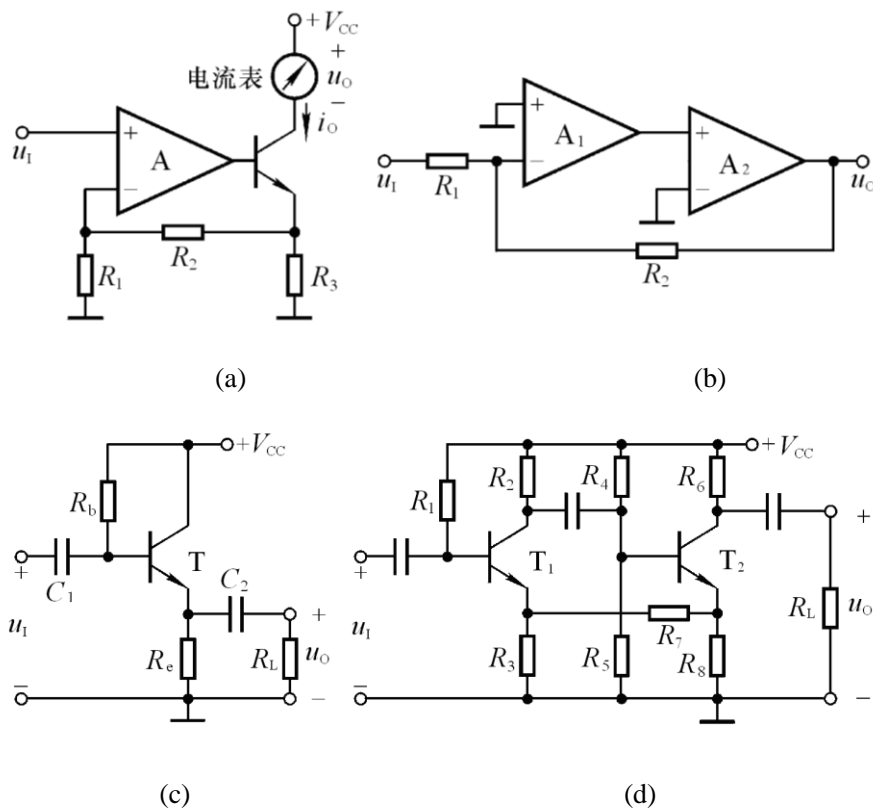


图 T6.2

**解：**图(a)所示电路中引入了电流串联负反馈。反馈系数和深度负反馈条件下的电压放大倍数分别为：

$$F_{ui} = \frac{u_F}{i_o} = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_2 + R_3}; \quad A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} = \frac{i_o R_L}{u_F} \approx \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_1 R_3} R_L。$$

式中  $R_L$  为电流表的等效电阻。

图(b)所示电路中引入了电压并联负反馈。反馈系数和深度负反馈条件下的电压放大倍数分别为：

$$F_{iu} = \frac{i_F}{u_O} \approx -\frac{1}{R_2}; \quad A_{uf} = \frac{u_O}{u_I} = \frac{u_O}{i_I R_1} \approx \frac{u_O}{i_F R_1} = -\frac{R_2}{R_1}$$

图(c)所示电路中引入了电压串联负反馈。反馈系数和深度负反馈条件下的电压放大倍数分别为：

$$F_{uu} = \frac{u_O}{u_F} = 1 \quad A_{uf} = \frac{u_O}{u_I} \approx \frac{u_O}{u_F} = 1$$

图(d)所示电路中引入了正反馈。

三、电路如图 T6.3 所示。

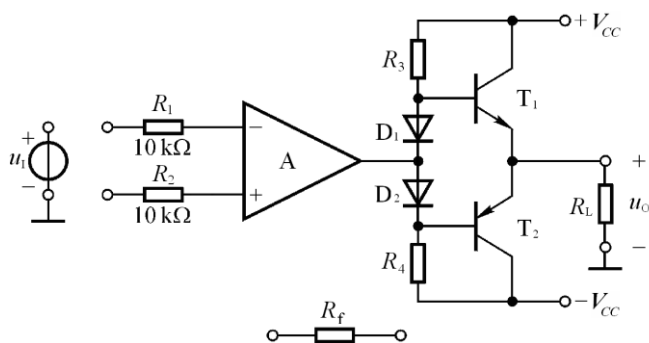


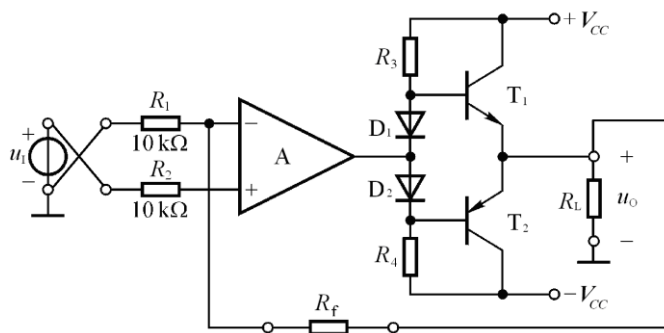
图 T6.3

(1)正确接入信号源和反馈，使电路的输入电阻增大，输出电阻减小；

(2)若  $\left| \dot{A}_u \right| = \frac{U_o}{U_i} = 20$ ，则  $R_f$  应取多少千欧？

**解：**(1)应引入电压串联负反馈，如解图 T6.3 所示。

(2)因  $A_u \approx 1 + \frac{R_f}{R_1} = 20$ ，故  $R_f = 190k\Omega$ 。



解图 T6.3

四、已知一个负反馈放大电路的基本放大电路的对数幅频特性如图 T6.4 所示，反馈网络由纯电阻组成。试问：若要求电路稳定工作，即不产生自激振荡，则反馈系数的上限值为多少分贝？简述理由。

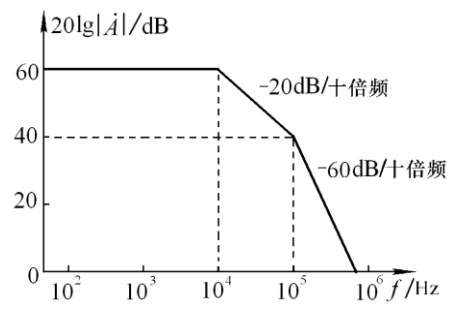


图 T6.4

**解：** 因为  $f_H=10^5\text{Hz}$  时，  $20\lg|A_u|=40\text{dB}$ ，  $\varphi_A=-180^\circ$ ； 为使此时  $20\lg|A_u F|<0$ ，

则需，  $20\lg|F|<-40\text{dB}$ ， 即  $|F|<10^{-2}$ 。

## 习题

**6.1** 选择合适答案填入空内。

(1)对于放大电路,所谓开环是指(B)。

A.无信号源 B.无反馈通路 C.无电源 D.无负载

而所谓闭环是指(B)

A.考虑信号源内阻 B.存在反馈通路 C.接入电源 D.接入负载

(2)在输入量不变的情况下,若引入反馈后(D),则说明引入的反馈是负反馈。

A.输入电阻增大 B.输出量增大 C.净输入量增大 D.净输入量减小

(3)直流负反馈是指(C)。

A.直接耦合放大电路中所引入的负反馈

B.只有放大直流信号时才有的负反馈

C.在直流通路中的负反馈

(4)交流负反馈是指(C)。

A.阻容耦合放大电路中所引入的负反馈

B.只有放大交流信号时才有的负反馈

C.在交流通路中的负反馈

(5)为了实现下列目的,应引入

A.直流反馈 B.交流反馈

①稳定静态工作点,应引入(A);

②稳定放大倍数,应引入(B);

③改变输入电阻和输出电阻,应引入(B);

④抑制温漂,应引入(A);

⑤展宽频带,应引入(B)。

**6.2** 选择合适答案填入空内。

A.电压 B.电流 C.串联 D.并联

(1)为了稳定放大电路的输出电压,应引入(A)负反馈;

(2)为了稳定放大电路的输出电流,应引入(B)负反馈;

(3)为了增大放大电路的输入电阻,应引入(C)负反馈;

(4)为了减小放大电路的输入电阻,应引入(D)负反馈;

(5)为了增大放大电路的输出电阻,应引入(B)负反馈;

(6)为了减小放大电路的输出电阻,应引入(A)负反馈;

**6.3** 下列说法是否正确,用“√”和“×”表示判断结果填入括号内。

(1)只要在放大电路中引入反馈,就一定能使其性能得到改善。(×)

(2)放大电路的级数越多,引入的负反馈越强,电路的放大倍数也就越稳定。(×)

(3)反馈量仅仅决定于输出量。(√)

(4)既然电流负反馈稳定输出电流,那么必然稳定输出电压。(×)

**6.4** 判断图 P6.4 所示各电路中是否引入了反馈,是直流反馈还是交流反馈,是正反馈还是负反馈。设图中所有电容对交流信号均可视为短路。



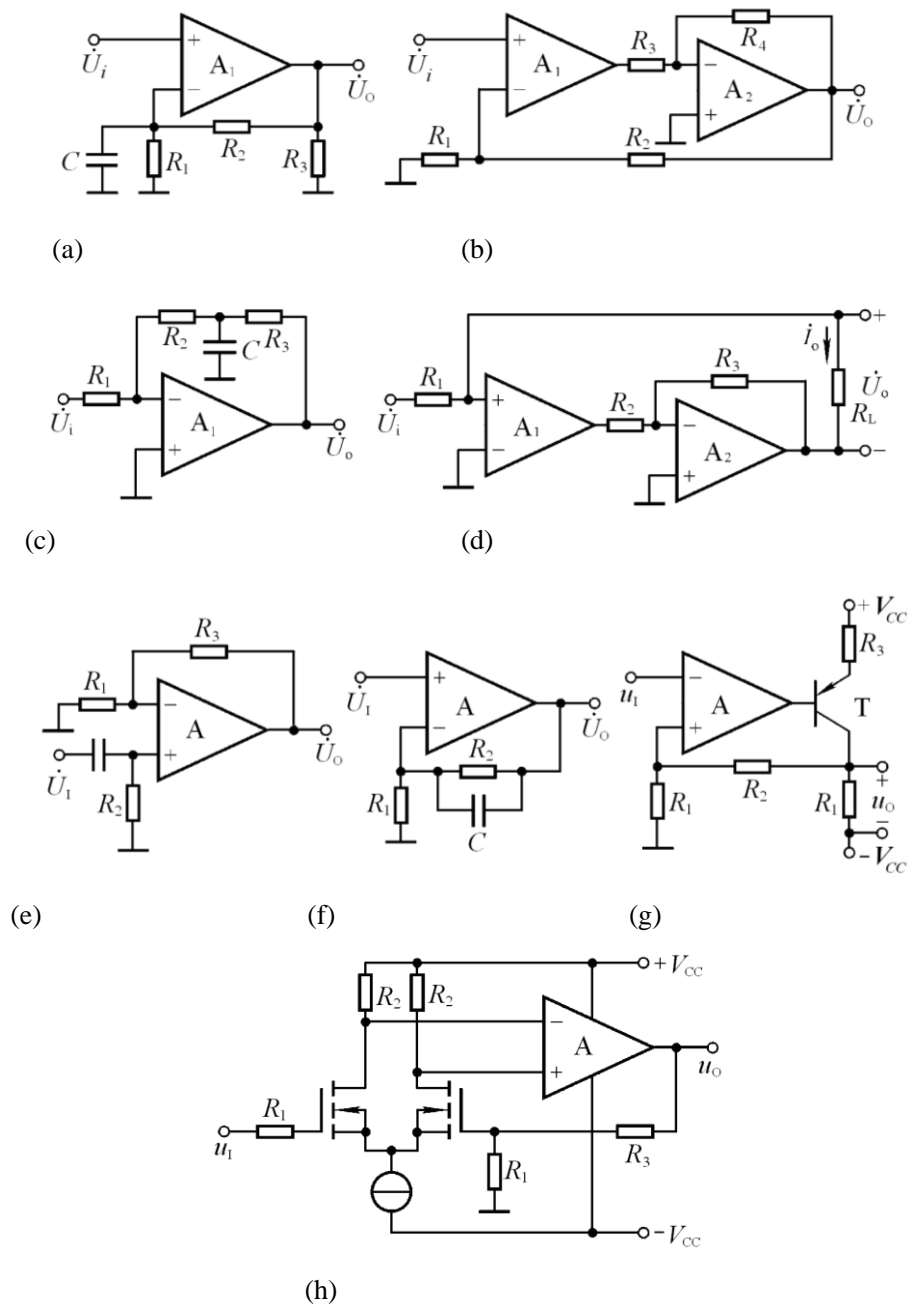


图 P6.4

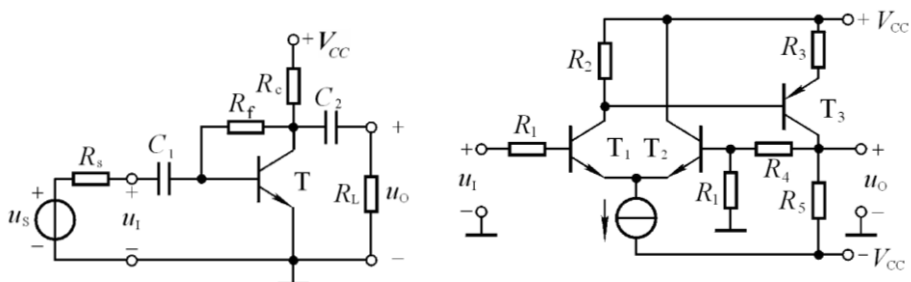
解：图(a)所示电路中引入了直流负反馈。

图(b)所示电路中引入了交、直流正反馈。

图(c)所示电路中引入了直流负反馈。

图(d)、(e)、(f)、(g)、(h)所示各电路中均引入了交、直流负反馈。

6.5 电路如图 P6.5 所示，要求同题 6.4。



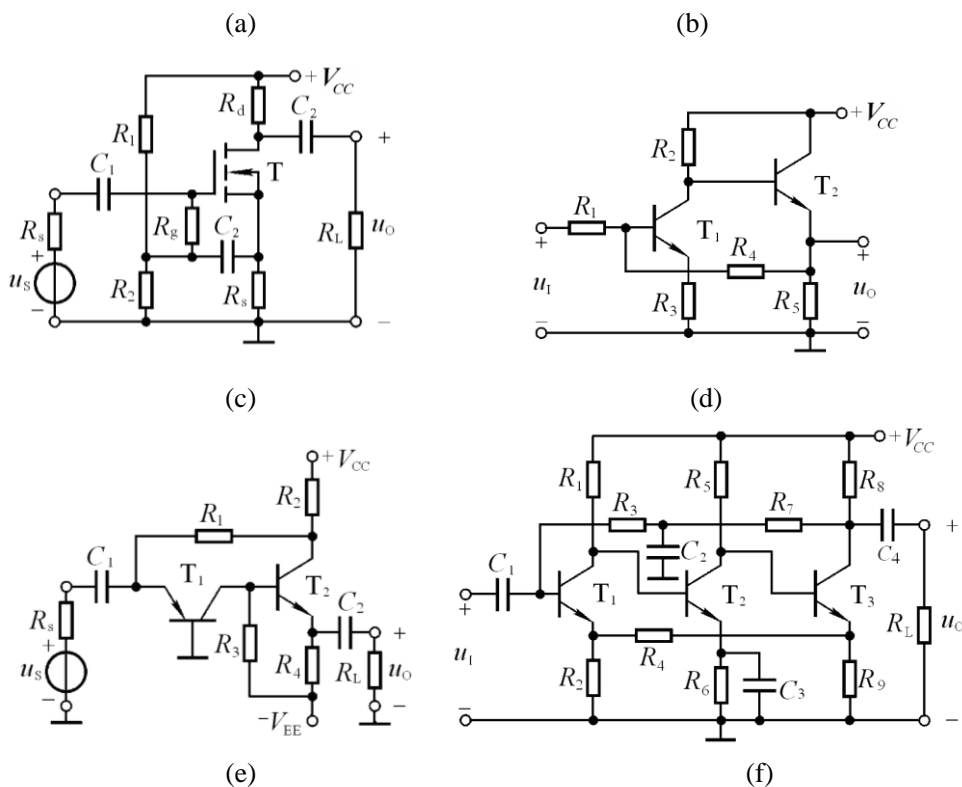


图 P6.5

**解:** 图(a)引入了交、直流负反馈

图(b) 引入了交、直流负反馈。

图(c) 所示电路中通过  $R_s$  引入直流负反馈；通过  $R_s$ 、 $C_2$  和  $R_1$ 、 $R_2$  并联引入交流负反馈；通过  $C_2$ 、 $R_g$  引入交流正反馈。

图(d) 引入了交、直流负反馈。

图(e) 引入了交、直流负反馈。

图(f) 所示电路中通过  $R_3$  和  $R_7$  引入直流负反馈，通过  $R_4$  引入交、直流负反馈。

**6.6** 分别判断图 6.4 (d)~(h)所示各电路中引入了哪种组态的交流负反馈，并计算它们的反馈系数。

**解:** 各电路中引入交流负反馈的组态及反馈系数分别如下：

(d) 电流并联负反馈:  $F_{ii} = i_F / i_O = 1$

(e) 电压串联负反馈:  $F_{uu} = u_F / u_O = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$

(f) 电压串联负反馈:  $F_{uu} = u_F / u_O = 1$

(g) 电压串联负反馈:  $F_{uu} = u_F / u_O = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$

(h) 电压串联负反馈:  $F_{uu} = u_F / u_O = \frac{R_1}{R_1 + R_3}$

**6.7** 分别判断图 P6.5 (a) 、(b) 、(e) 、(f) 所示各电路中引入了哪种组态的交流负反馈。

解：(a)电压并联负反馈；(b) 电压串联负反馈；(c)电流并联负反馈；(f)电流串联负反馈。

6.8 分别估算图 6.4 (d)~(h)所示各电路在理想运放条件下的电压放大倍数。

解：各电路在理想运放条件下的电压放大倍数如下：

$$(d) \text{ 电流并联负反馈: } \dot{A}_{uf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \approx \frac{\dot{I}_o R_L}{\dot{I}_i R_1} \approx \frac{\dot{I}_o R_L}{\dot{I}_f R_1} = \frac{R_L}{R_1}$$

$$(e) \text{ 电压串联负反馈: } \dot{A}_{uf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \approx \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_f} = 1 + \frac{R_3}{R_1}$$

$$(f) \text{ 电压串联负反馈: } \dot{A}_{uf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \approx \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_f} = 1$$

$$(g) \text{ 电压串联负反馈: } \dot{A}_{uf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \approx \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_f} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

$$(h) \text{ 电压串联负反馈: } \dot{A}_{uf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \approx \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_f} = 1 + \frac{R_3}{R_1}$$

6.9 分别估算图 6.5 (a)、(b)、(c)、(d)所示各电路在深度负反馈条件下的电压放大倍数。

解：各电路在深度负反馈条件下的电压放大倍数如下：

$$(a) \text{ 电压并联负反馈: } \dot{A}_{usf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = \frac{-\dot{I}_f R_f}{\dot{I}_i R_s} \approx -\frac{R_f}{R_s}$$

$$(b) \text{ 电压串联负反馈: } \dot{A}_{uf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \approx \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_f} = (1 + \frac{R_4}{R_1})$$

$$(c) \text{ 电流并联负反馈: } \dot{A}_{usf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} \approx \frac{\dot{I}_o (R_4 // R_L)}{\dot{I}_f R_s} = (1 + \frac{R_1}{R_2}) \cdot \frac{R_4 // R_L}{R_s}$$

$$(d) \text{ 电流串联负反馈: } \because \dot{U}_f = R_2 \cdot \dot{I}_{R_2} = R_2 \cdot \frac{R_9}{R_2 + R_4 + R_9} \cdot \dot{I}_0 = \frac{R_2 R_9}{R_2 + R_4 + R_9} \cdot \dot{I}_0$$

$$\therefore \dot{A}_{uf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \approx \frac{\dot{I}_0 (R_7 // R_8 // R_L)}{\dot{U}_f} = -\frac{(R_2 + R_4 + R_9)(R_7 // R_8 // R_L)}{R_2 R_9}$$

6.10 电路如图 P6.10 所示，已知集成运放为理想运放，最大输出电压幅值为±14V。填空：

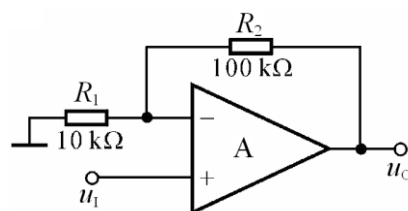
电路引入了电压串联（填入反馈组态）

交流负反馈，电路的输入电阻趋近于无穷大，

电压放大倍数  $A_{uf} = \Delta u_o / \Delta u_i \approx$  11。

设  $u_i = 1V$ ，则  $u_o =$  11V；若  $R_1$  开路，

则  $u_o$  变为 1V；若  $R_1$  短路，则  $u_o$  变为 14V；



若  $R_2$  开路, 则  $u_o$  变为 14 V ; 若  $R_2$  短路, 则  $u_o$  变为 1 V 。

图 P6.10

已知一个负反馈放大电路  $A=10^5, F=2 \times 10^{-3}$ 。试问:

(1)  $A_f = ?$ ; (2) 若  $A$  的相对变化率为 20%, 则  $A_f$  的相对变化率为多少?

解: (1) 因为  $AF=200 \gg 1$ , 所以:  $A_f \approx \frac{1}{F} = 500$

(2) 根据题目所给数据, 可知:

$$\frac{dA_f}{A_f} = \frac{1}{1+AF} \cdot \frac{dA}{A} = \frac{1}{1+10^5 \times 2 \times 10^{-3}} \cdot 20\% \approx 0.1\%$$

**6.12** 已知一个电压串联负反馈放大电路的电压放大倍数  $A_{uf} = 20$ , 其基本放大电路的电压放大倍数  $A_u$  的相对变化率为 10%,  $A_{uf}$  的相对变化率小于 0.1%, 试问  $F$  和  $A_u$  各为多少?

解: 由  $\frac{dA_f}{A_f} = \frac{1}{1+AF} \cdot \frac{dA}{A}$ , 得:

$$1+AF = \frac{dA}{A} / \frac{dA_f}{A_f} = 10\% / 0.1\% = 100 \gg 1. \text{ (属深度负反馈)}$$

$$\text{所以: } F \approx \frac{1}{A_f} = \frac{1}{20} = 0.05.$$

$$\text{由以上两式可得: } A = \frac{AF}{F} \approx \frac{100}{0.05} = 2000$$

**6.13** 已知负反馈放大电路的  $\dot{A} = \frac{10^4}{(1+j\frac{f}{10^4})(1+j\frac{f}{10^5})^2}$ 。

试分析: 为了使放大电路能够稳定工作 (即不产生自激振荡), 反馈系数的上限值为多少?

解: 根据放大倍数表达式可知, 放大电路高频段有三个截止频率分别为

$$f_{L1} = 10^4 \text{ Hz}, \quad f_{L2} = f_{L3} = 10^5 \text{ Hz}$$

因为  $f_{L2} = f_{L3} = 10f_{L1}$ , 所以, 在  $f = f_{L2} = f_{L3} = 10^5 \text{ Hz}$  时,  $|\dot{A}|$  约为  $60\text{dB}$ , 附加相移约为  $-180^\circ$ ,

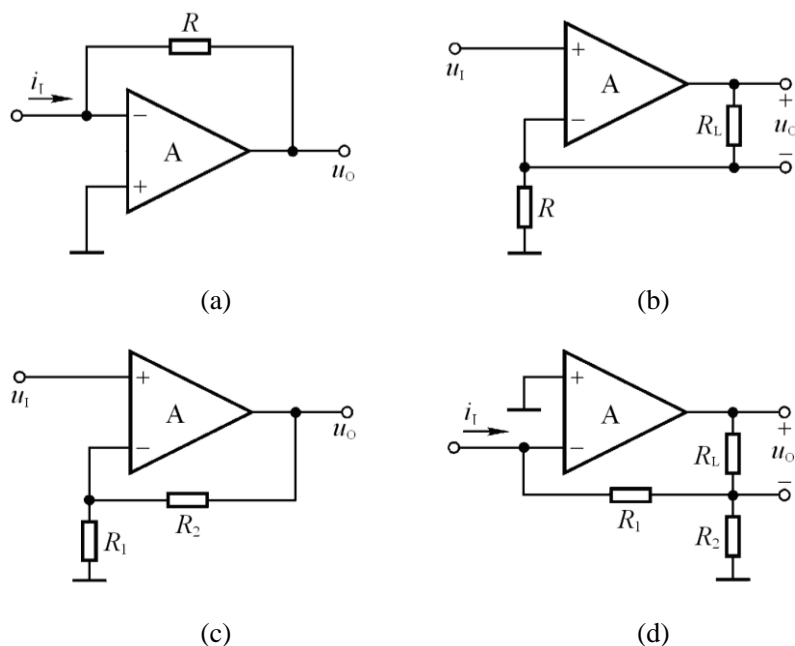
为了使  $f = f_{L2} = f_{L3}$  时的  $20\lg|\dot{A}\dot{F}|$  小于  $0\text{dB}$ , 即不满足自激振荡的幅值条件, 反馈系数  $20\lg|\dot{F}|$  的上限值应为  $-60\text{dB}$ , 即  $|\dot{F}|$  的上限值为  $10^{-3}$ 。

**6.14** 以集成运放作为放大电路, 引入合适的负反馈, 分别达到下列目的, 要求画出电路图来。

- (1) 实现电流—电压转换电路;
- (2) 实现电压—电流转换电路
- (3) 实现输入电阻高、输出电压稳定的电压放大电路;

(4) 实现输入电阻低、输出电流稳定的电流放大电路。

**解：**可实现题目(1)(2)(3)(4)要求的参考电路分别如解图 P6.14 (a) (b) (c) (d) 所示。



解图 P6.14

6.15 电路如图 P6.15 所示。

(1) 试通过电阻引入合适的交流负反馈，使输入电压  $u_I$  转换成稳定的输出电流  $i_L$ ；

(2) 若  $u_I = 0 \sim 5V$  时， $i_L = 0 \sim 10mA$ ，则反馈电阻  $R_F$  应取多少？

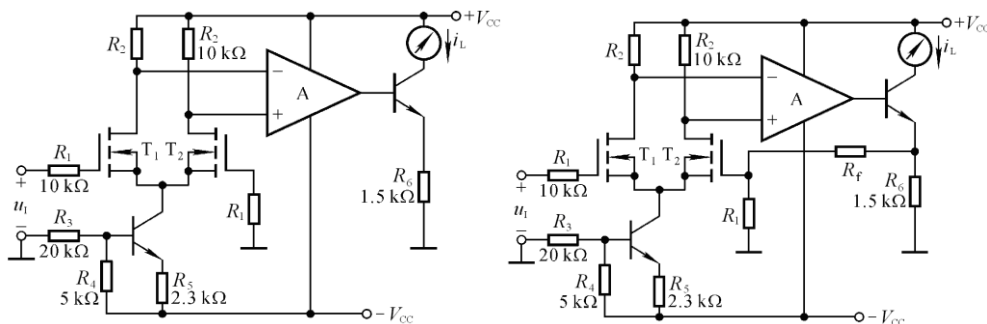


图 P6.15

解图 P6.15

**解：**(1) 引入电流串联负反馈，通过电阻  $R_f$  将三极管的发射极与  $T_2$  管的栅极连接起来，如解图 P6.15 所示。

(2) 首先求解  $\dot{F}$ ，再根据  $\dot{A}_f \approx \frac{1}{\dot{F}}$  求解  $R_f$ 。

$$\therefore F_{ui} = \frac{u_F}{i_O} = \frac{R_1 R_f}{R_1 + R_f + R_6} \quad \therefore A_{iuf} = \frac{i_O}{u_I} \approx \frac{1}{F_{ui}} = \frac{R_1 + R_f + R_6}{R_1 R_f}$$

$$\text{代入数据 } \frac{10 + R_f + 1.5}{10 \times 1.5} = \frac{10(mA)}{5(V)}, \text{ 所以 } R_f = 18.5k\Omega.$$

**6.16** 图 P6.16(a)所示放大电路  $\dot{A}\dot{F}$  的波特图如图(b)所示。

(1)判断该电路是否会产生自激振荡？简述理由。

(2)若电路产生了自激振荡，则应采取什么措施消振？要求在图(a)中画出来。

(3)若仅有一个  $50\text{pF}$  电容，分别接在三个三极管的基极和地之间均未能消振，则将其接在何处有可能消振？为什么？

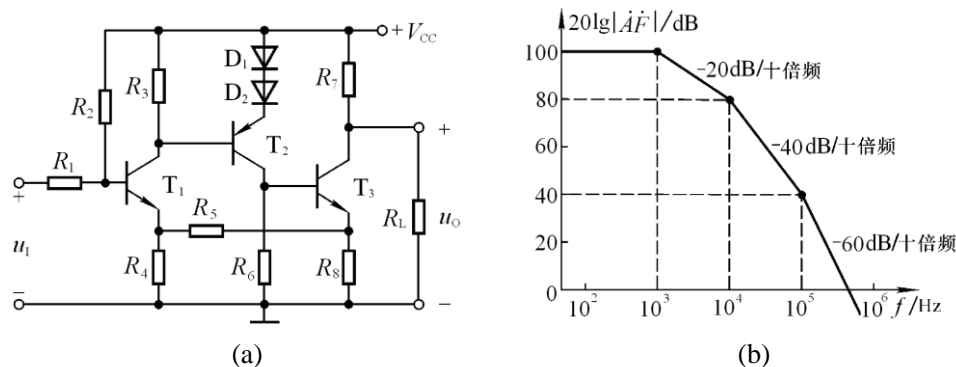


图 P6.16

**解：**(1)电路一定会产生自激振荡。因为在  $f = 10^3 \text{ Hz}$  时，附加相移为  $-45^\circ$ ；在  $f = 10^4 \text{ Hz}$  时，附加相移为  $-135^\circ$ ；在  $f = 10^5 \text{ Hz}$  时，附加相移为  $-225^\circ$ 。因此附加相移为  $-180^\circ$  的频率在  $10^4 \text{ Hz} \sim 10^5 \text{ Hz}$  之间，此时  $|\dot{A}\dot{F}| > 0$ ，故一定会产生自激振荡。

(2)可在晶体管  $T_2$  的基极与地之间加消振电容。(注：方法不唯一)

(3)可在晶体管  $T_2$  的基极和集电极之间加消振电容。因为根据密勒定理，等效在基极与地之间的电容比实际电容大得多，因此容易消振。

**6.17** 试分析如图 P6.17 所示各电路中是否引入了正反馈（即构成自举电路），如有，则在电路中标出，并简述正反馈起什么作用。设电路中所有电容对交流信号均可视为短路。

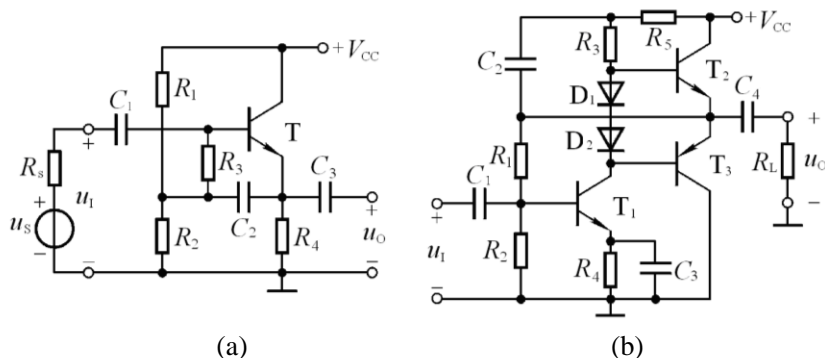


图 P6.17

**解：**图(a)所示电路中通过  $C_2$ 、 $R_3$  引入了正反馈，作用是提高输入电阻，改善跟随特性。

图(b)所示电路中通过  $C_2$ 、 $R_3$  引入了正反馈，作用是提高第二级跟随范围，增大放大倍数，使输出的正方向电压有可能高于电源电压。

**6.18** 在图 P6.18 所示电路中，已知  $A$  为电流反馈型集成运放，试问：(1)中频电压放大倍数；(2)上限截止频率。

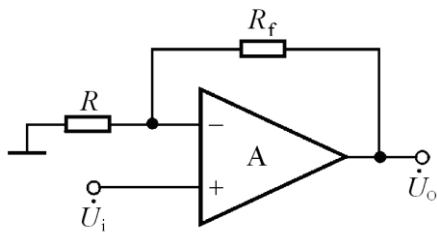
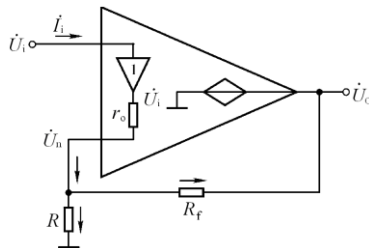


图 P6.18



解图 P6.18

**解：**画出图 P6.18 所示电路中集成运放的等效电路如解图 P6.18 所示。因为  $r_o$  很小，反相输入端电位为：

$$\dot{U}_n = \dot{U}_i - \dot{I}_i r_o \approx \dot{U}_i$$

将集成运放的内部电路替换为教材中图 6.7.5 所示电路（参阅 P310 ~P311），

可得：  $\dot{I}_i = j\omega C \dot{U}_o$

$$\text{而 } \dot{I}_i \approx \frac{\dot{U}_n}{R} + \frac{\dot{U}_n - \dot{U}_o}{R_f} = \frac{\dot{U}_n(R + R_f)}{RR_f} - \frac{\dot{U}_o}{R_f} = \frac{\dot{U}_i(R + R_f)}{RR_f} - \frac{\dot{U}_o}{R_f} = j\omega C \dot{U}_o$$

$$\therefore \dot{U}_o \left( \frac{1 + j\omega R_f C}{R_f} \right) \approx \frac{\dot{U}_i (R + R_f)}{RR_f}$$

$$\text{即： } \dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \approx \left( 1 + \frac{R_f}{R} \right) \frac{1}{1 + j\omega R_f C}$$

$$\therefore (1) A_u = 1 + \frac{R_f}{R} ; (2) \text{上限截止频率为： } f_H = \frac{1}{2\pi R_f C}$$

**6.19** 测试 NPN 型晶体管穿透电流的电路如图 P6.19 所示。

- (1) 电路中引入了哪种反馈？测试晶体管穿透电流的原理是什么？
- (2) 选择合适的  $R$ ，在 Multisim 环境下测试晶体管的穿透电流。

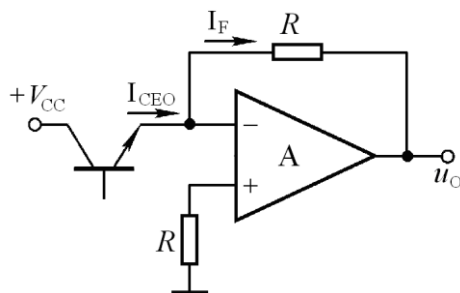
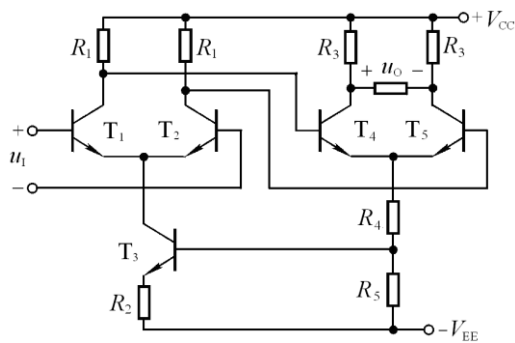


图 P6.19

**解：**(1) 电路中引入了电压并联负反馈；图中可见，  $I_{CEO} = I_F = -\frac{u_O}{R}$ 。

(2) 由于小功率管的  $I_{CEO}$  在  $\mu\text{A}$  数量级， $R$  的选择范围应在几百  $\text{k}\Omega$  数量级。

**补充 1.**电路如补图 P6.1 所示，试说明电路引入的是共模负反馈，即反馈仅对共模信号起作用。

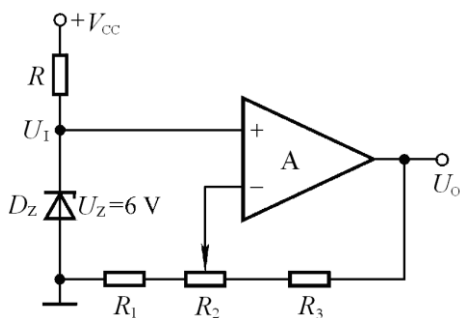


补图 P6.1

解：若  $u_{B1} = u_{B2}$  增大，则产生下列过程：

$u_{B1} = u_{B2} \uparrow \rightarrow u_{C1} = u_{C2} \downarrow (u_{B4} = u_{B5} \downarrow) \rightarrow i_{E4} = i_{E5} \downarrow \rightarrow u_{R5} \downarrow (u_{B3} \downarrow) \rightarrow i_{C3} \downarrow \rightarrow u_{R1} \downarrow \rightarrow u_{C1} = u_{C2} \uparrow$   
说明电路对共模信号有负反馈作用。

补充 2. 电路如补图 P6.2 所示。试问：若以稳压管的稳定电压  $U_Z$  作为输入电压，则当  $R_2$  的滑动端位置变化时，输出电压  $U_O$  的调节范围为多少？



补图 P6.2

解：  $U_O$  的调节范围约为  $\frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_1 + R_2} \cdot U_Z \sim \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_1} \cdot U_Z$

即  $\frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_1 + R_2} \cdot 6V \sim \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_1} \cdot 6V$



## 第7章 信号的运算和处理

### 自测题

一、现有电路：

- |            |            |
|------------|------------|
| A.反相比例运算电路 | B.同相比例运算电路 |
| C.积分运算电路   | D.微分运算电路   |
| E.加法运算电路   | F.乘方运算电路   |

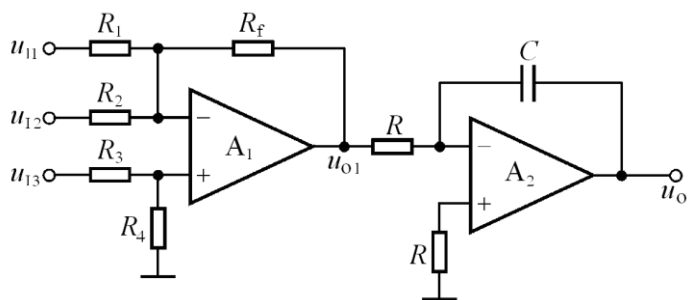
选择一个合适的答案填入空内。

- (1)欲将正弦波电压移相 $+90^\circ$ ，应选用( C )。
- (2)欲将正弦波电压转换成二倍频电压，应选用( F )。
- (3)欲将正弦波电压叠加上一个直流量，应选用( E )。
- (4)欲实现  $A_u=-100$  的放大电路，应选用( A )。
- (5)欲将方波电压转换成三角波电压，应选用( C )。
- (6)欲将方波电压转换成尖顶波波电压，应选用( D )。

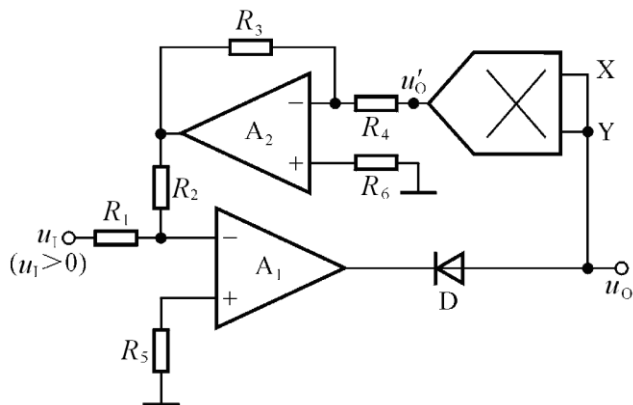
二、填空：

- (1)为了避免  $50\text{Hz}$  电网电压的干扰进入放大器，应选用( 带阻 )滤波电路。
- (2)已知输入信号的频率为  $10\text{kHz} \sim 12\text{kHz}$ ，为了防止干扰信号的混入，应选用( 带通 )滤波电路。
- (3)为了获得输入电压中的低频信号，应选用( 低通 )滤波电路。
- (4)为了使滤波电路的输出电阻足够小，保证负载电阻变化时滤波特性不变，应选用( 有源 )滤波电路。

三、已知图 T7.3 所示各电路中的集成运放均为理想运放，模拟乘法器的乘积系数  $k$  大于零。试分别求解各电路的运算关系。



(a)



(b)

图 T7.3

**解：** 图(a)所示电路为求和运算电路，图(b)所示电路为开方运算电路。它们的运算表达式分别为：

$$(a) \quad u_{o1} = -R_f \left( \frac{u_{I1}}{R_1} + \frac{u_{I2}}{R_2} \right) + \left( 1 + \frac{R_f}{R_1 // R_2} \right) \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot u_{I3}$$

$$u_o = -\frac{1}{RC} \int u_{o1} dt$$

$$(b) \quad u_{o2} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot u_I = -\frac{R_3}{R_4} \cdot u_o' = -\frac{R_3}{R_4} \cdot k u_o^2$$

$$u_o = \sqrt{\frac{R_2 R_4}{k R_1 R_3}} \cdot u_I$$

## 习题

本章习题中的集成运放均为理想运放。

### 7.1 填空：

- (1) ( 同相比例 )运算电路可实现  $A_u > 1$  的放大器。
- (2) ( 反相比例 )运算电路可实现  $A_u < 0$  的放大器。
- (3) ( 微分 )运算电路可将三角波电压转换成方波电压。
- (4) ( 同相求和 )运算电路可实现函数  $Y = aX_1 + bX_2 + cX_3$ ，a、b 和 c 均大于零。
- (5) ( 反相求和 )运算电路可实现函数  $Y = aX_1 + bX_2 + cX_3$ ，a、b 和 c 均小于零。
- (6) ( 乘方 )运算电路可实现函数  $Y = aX^2$ 。

7.2 电路如图 P7.2 所示，集成运放输出电压的最大幅值为  $\pm 14V$ ，填表。

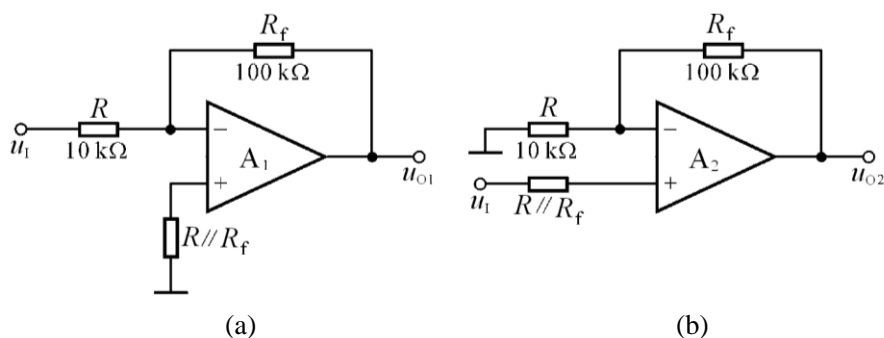


图 P7.2

$u_i/V$	0.1	0.5	1.0	1.5
$u_{O1}/V$				
$u_{O2}/V$				

解：  $u_{O1} = -(R_f / R)u_i = -10u_i$ ；  $u_{O2} = (1 + R_f / R)u_i = 11u_i$ 。

当集成运放工作到非线性区时，输出电压不是  $+14V$ ，就是  $-14V$ 。

$u_i/V$	0.1	0.5	1.0	1.5
$u_{O1}/V$	-1	-5	-10	-14
$u_{O2}/V$	1.1	5.5	11	14

7.3 设计一个比例运算电路，要求输入电阻  $R_i = 20k\Omega$ ，比例系数为  $-100$ 。

解：可采用反相比例运算电路，电路形式如图 P7.2(a)所示。

$$R = 20k\Omega; \quad R_f = 2M\Omega。$$

7.4 电路如图 P7.4 所示，试求其输入电阻和比例系数。

解：由图可知  $R_i = R_1 = 50\text{k}\Omega$ ,

$$\because i_{R_1} = i_{R_2}, \text{即} \frac{u_I}{R_1} = \frac{-u_M}{R_2}$$

$$\therefore u_M = -\frac{R_2}{R_1} u_I = -2u_I$$

$$\text{而 } -\frac{u_M}{R_2} = \frac{u_M}{R_4} + \frac{u_M - u_O}{R_3}$$

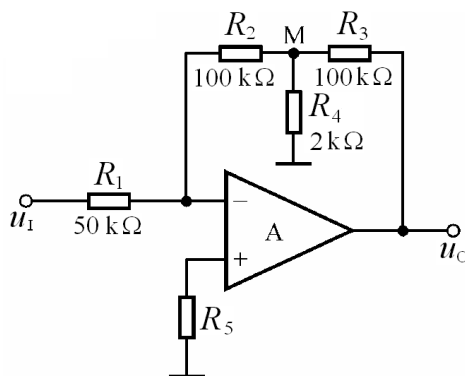


图 P7.4

解得：  $u_O = 52u_M = -104u_I$

7.5 电路如图 P7.4 所示，集成运放输出电压的最大幅值为  $\pm 14\text{V}$ ， $u_I$  为  $2\text{V}$  的直流信号。分别求出下列各种情况下的输出电压：

(1)  $R_2$  短路； (2)  $R_3$  短路； (3)  $R_4$  短路； (4)  $R_4$  断路。

解：(1)  $R_2$  短路时，  $u_M = -\frac{R_2}{R_1} u_I = 0$ ， $R_4$  相当于开路 ( $R_4$  上无电流流过)。

$$\therefore u_O = -\frac{R_3}{R_1} u_I = -2u_I = -4\text{V} ;$$

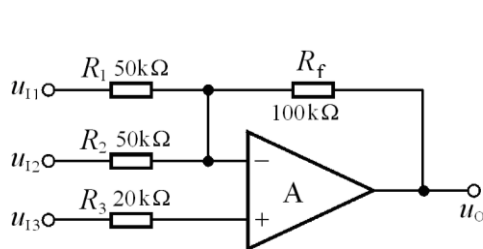
(2)  $R_3$  短路时，  $u_M = u_O$ ， $R_4$  对反馈网络无影响。

$$\therefore u_O = -\frac{R_2}{R_1} u_I = -2u_I = -4\text{V} ;$$

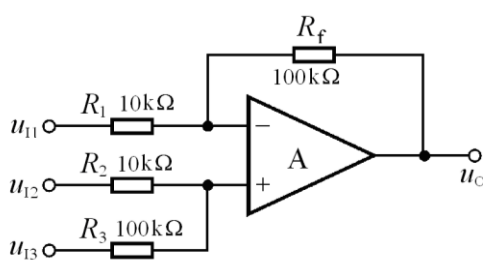
(3)  $R_4$  短路时，电路无反馈。  $\therefore u_O = -14\text{V}$  ；

(4)  $R_4$  断路时，  $u_O = -\frac{R_2 + R_3}{R_1} u_I = -4u_I = -8\text{V}$  。

7.6 试求图 P7.6 所示各电路输出电压与输入电压的运算关系式。



(a)



(b)

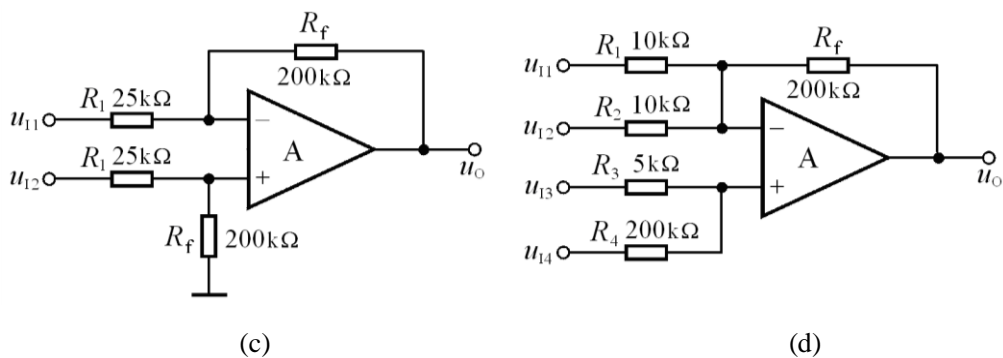


图 P7.6

**解：**在图示各电路中，集成运放的同相输入端和反相输入端所接总电阻均相等。各电路的运算关系式分析如下：

$$(a) u_O = -\frac{R_f}{R_1} \cdot u_{I1} - \frac{R_f}{R_2} \cdot u_{I2} + \frac{R_f}{R_3} \cdot u_{I3} = -2u_{I1} - 2u_{I2} + 5u_{I3}$$

$$(b) u_O = -\frac{R_f}{R_1} \cdot u_{I1} + \frac{R_f}{R_2} \cdot u_{I2} + \frac{R_f}{R_3} \cdot u_{I3} = -10u_{I1} + 10u_{I2} + u_{I3}$$

$$(c) u_O = \frac{R_f}{R_1} (u_{I2} - u_{I1}) = 8(u_{I2} - u_{I1})$$

$$(d) u_O = \frac{R_f}{R_1} u_{I1} - \frac{R_f}{R_2} u_{I2} + \frac{R_f}{R_3} u_{I3} + \frac{R_f}{R_4} u_{I4} = 2u_{I1} - 2u_{I2} + 4u_{I3} + 4u_{I4}$$

**7.7** 在图 P7.6 所示各电路中，集成运放的共模信号分别为多少？写出表达式。

**解：**因为集成运放同相输入端和反相输入端之间净输入电压为零，所以它们的电位就是集成运放的共模输入电压。图示各电路中集成运放的共模信号分别为：

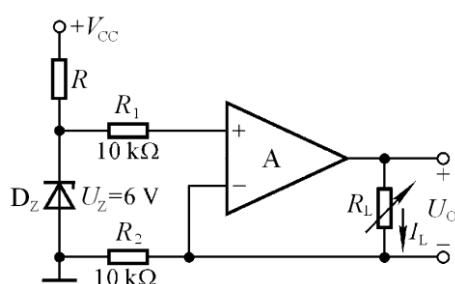
$$(a) u_{IC} = u_{I3}$$

$$(b) u_{IC} = \frac{R_3}{R_2 + R_3} u_{I2} + \frac{R_2}{R_2 + R_3} u_{I3} = \frac{10}{11} u_{I2} + \frac{1}{11} u_{I3}$$

$$(c) u_{IC} = \frac{R_f}{R_1 + R_f} u_{I2} = \frac{8}{9} u_{I2}$$

$$(d) u_{IC} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} u_{I3} + \frac{R_3}{R_3 + R_4} u_{I4} = \frac{40}{41} u_{I3} + \frac{1}{41} u_{I4}$$

**7.8** 图 P7.8 所示为恒流源电路，已知稳压管工作在稳压状态，试求负载电阻中的电流。



解:  $I_L = \frac{u_P}{R_2} = \frac{U_Z}{R_2} = 0.6mA$ 。

图 P7.8

7.9 电路如图 P7.9 所示。

(1) 写出  $u_o$  与  $u_{I1}$ 、 $u_{I2}$  的运算关系式；

(2) 当  $R_W$  的滑动端在最上端时，若  $u_{I1} = 10mV$ ， $u_{I2} = 20mV$ ，则  $u_o = ?$

(3) 若  $u_o$  的最大幅值为  $\pm 14V$ ，输入电压最大值  $u_{I1\max} = 10mV$ ， $u_{I2\max} = 20mV$ ，为了保证集成运放工作在线性区， $R_2$  的最大值为多少？

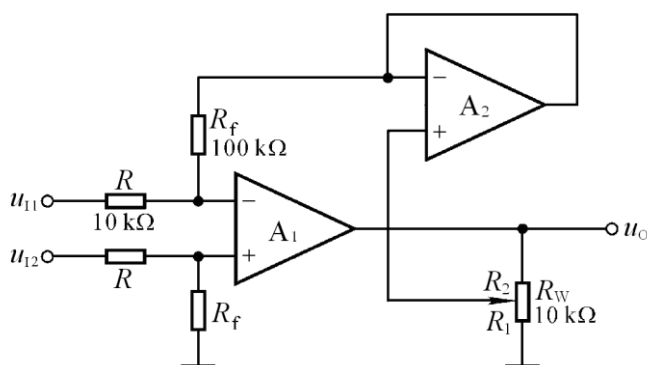


图 P7.9

解: (1)  $A_2$  同相输入端电位

$$u_{P2} = u_{N2} = \frac{R_f}{R} (u_{I2} - u_{I1}) = 10(u_{I2} - u_{I1})$$

输出电压  $u_o = (1 + \frac{R_2}{R_1}) \cdot u_{P2} = 10(1 + \frac{R_2}{R_1})(u_{I2} - u_{I1})$

或  $u_o = 10 \frac{R_W}{R_1} (u_{I2} - u_{I1})$

(2) 将  $u_{I1} = 10mV$ ， $u_{I2} = 20mV$  代入上式，得  $u_o = 100mV$ 。

(3) 根据题目所给参数， $(u_{I2} - u_{I1})$  的最大值为  $20mV$ 。若  $R_1$  为最小值，则为保证集成运放工作在线性区， $(u_{I2} - u_{I1}) = 20mV$  时集成运放的输出电压应为  $+14V$ ，写成表达式为

$$u_o = 10 \cdot \frac{R_W}{R_{1\min}} \cdot (u_{I2} - u_{I1}) = 10 \cdot \frac{10}{R_{1\min}} \cdot 20 = 14$$

故  $R_{1\min} \approx 143\Omega$

$$R_{2\max} = R_W - R_{1\min} = (10 - 0.143)k\Omega \approx 9.86k\Omega$$

7.10 分别求解图 P7.10 所示各电路的运算关系。

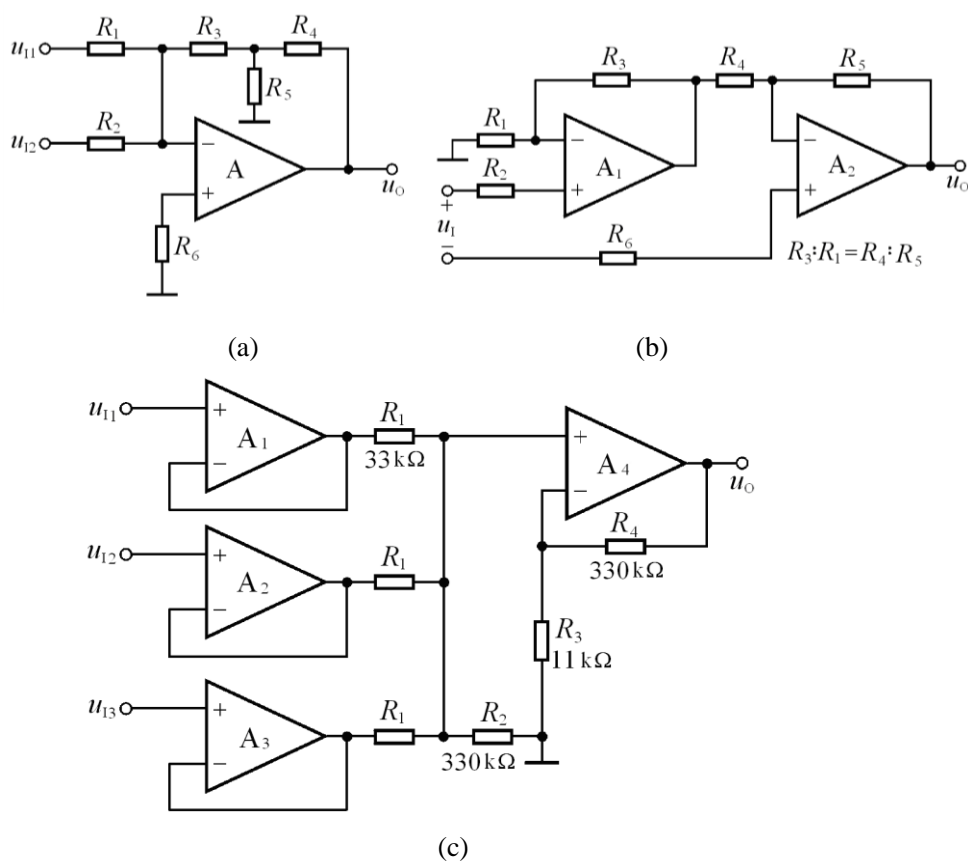


图 P7.10

解：图(a)所示为反相求和运算电路；图(b)所示的  $A_1$  组成同相比值运算电路， $A_2$  组成加减运算电路；图(c)所示的  $A_1, A_2, A_3$  均组成为电压跟随器电路， $A_4$  组成反相求和运算电路。

(a) 设  $R_3, R_4, R_5$  的节点为 M，则

$$u_M = -R_3 \left( \frac{u_{I1}}{R_1} + \frac{u_{I2}}{R_2} \right)$$

$$i_{R_4} = i_{R_3} - i_{R_5} = \frac{u_{I1}}{R_1} + \frac{u_{I2}}{R_2} - \frac{u_M}{R_5}$$

$$u_O = u_M - i_{R_4} R_4 = -(R_3 + R_4 + \frac{R_3 R_4}{R_5}) \left( \frac{u_{I1}}{R_1} + \frac{u_{I2}}{R_2} \right)$$

(b) 先求解  $u_{O1}$ ，再求解  $u_O$ 。

$$u_{O1} = \left( 1 + \frac{R_3}{R_1} \right) u_{I1}$$

$$u_O = \frac{R_5}{R_4} u_A - (1 + \frac{R_5}{R_4}) u_B = -\frac{R_5}{R_4} (1 + \frac{R_3}{R_1} u_1 + (1 + \frac{R_5}{R_4}) u_2) = -\frac{R_5}{R_4} (u_1 + u_2)$$

(c)  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$  的输出电压分别为  $u_{I1}$ 、 $u_{I2}$ 、 $u_{I3}$ ，由于在  $A_4$  组成的反相求和运算电路中反相输入端和同相输入端外接电阻阻值相等，所以

$$u_O = \frac{R_4}{R_1} (u_{I1} + u_{I2} + u_{I3}) = 10(u_{I1} + u_{I2} + u_{I3})$$

**7.11** 在图 P7.11(a)所示电路中，已知输入电压  $u_I$  的波形如图(b)所示，当  $t=0$  时  $u_C=0$ 。试画出输出电压  $u_O$  的波形。

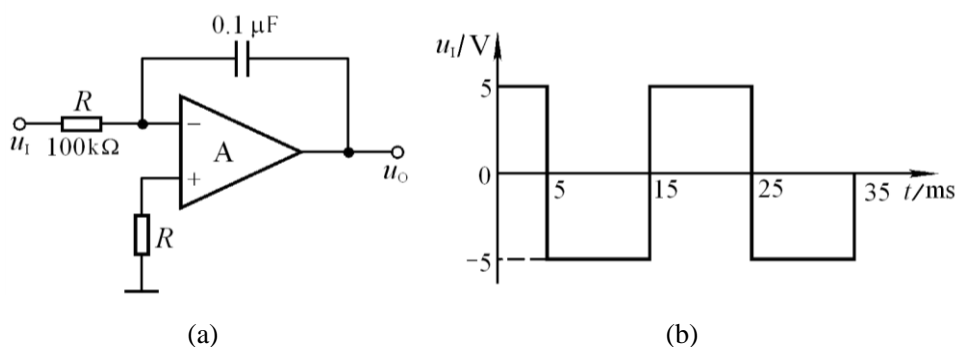


图 P7.11

**解：**输出电压的表达式为  $u_O = -\frac{1}{RC} \int_{t_1}^{t_2} u_I dt + u_O(t_1)$

当  $u_I$  为常量时：

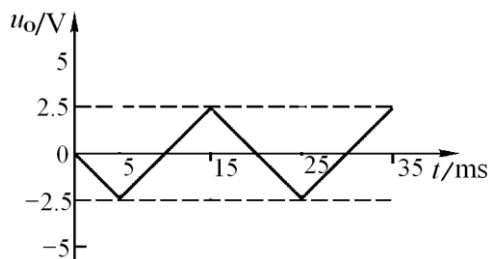
$$u_O = -\frac{1}{RC} u_I (t_2 - t_1) + u_O(t_1) = -\frac{1}{10^5 \times 10^{-7}} u_I (t_2 - t_1) + u_O(t_1) = -100 u_I (t_2 - t_1) + u_O(t_1)$$

若  $t=0$  时  $u_O=0$ ；则

$$\text{当 } t=5\text{ms 时, } u_O = -100 \times 5 \times 5 \times 10^{-3} \text{V} = -2.5\text{V}。$$

$$\text{当 } t=15\text{ms 时, } u_O = [-100 \times (-5) \times 10 \times 10^{-3} + (-2.5)] \text{V} = 2.5\text{V}。$$

因此输出波形如解图 P7.11 所示。



解图 P7.11

**7.12** 已知图 P7.12 所示电路输入电压  $u_I$  的波形如图 P7.11 (b)所示，且当  $t=0$  时  $u_C=0$ 。试画出输出电压  $u_O$  的波形。



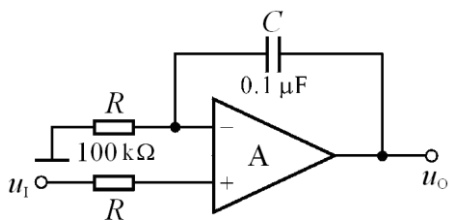
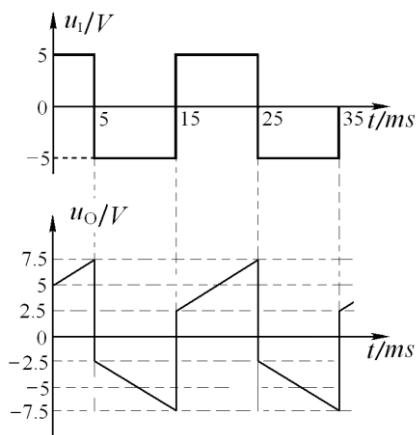


图 P7.12



解图 P7.12

解：图中可见， $u_N = u_P = u_I$ ， $\therefore -\frac{u_I}{R} = C \frac{du_C}{dt} = C \frac{d(u_I - u_O)}{dt}$

即： $\frac{du_O}{dt} = \frac{du_I}{dt} + \frac{u_I}{RC}$ ； $\therefore$ 输出电压与输入电压的运算关系为：

$$u_O(t) = u_I + \frac{1}{RC} u_I t + u_C(0)$$

或： $u_O(t) = 100u_I t + u_I + u_C(0)$

设当  $t=0$  时， $u_C=0$ 。分段画出波形如解图 P7.12 所示。

7.13 试分别求解图 P7.13 所示各电路的运算关系。

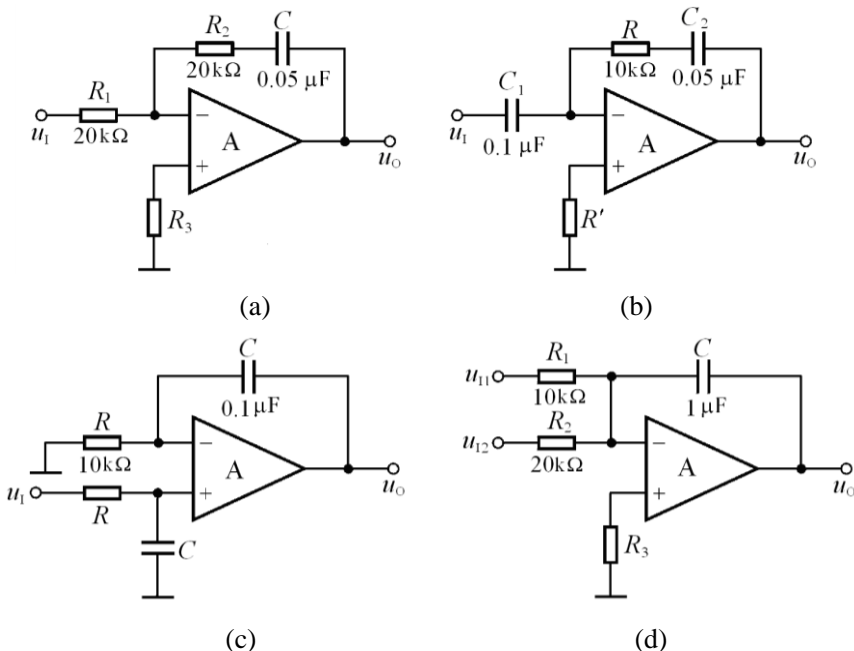


图 P7.13

解：利用节点电流法，可解出各电路的运算关系分别为：

$$(a) \quad u_O = -\frac{R_2}{R_1} u_I - \frac{1}{R_1 C} \int u_I dt = -u_I - 100 \int u_I dt$$

(b) 设两电容的充电电流为:  $i = C_1 \cdot \frac{du_{C1}}{dt} = C_1 \cdot \frac{du_I}{dt}$  (方向向右), 则

$$u_O = -(iR + \frac{1}{C_2} \int i dt) = -RC_1 \frac{du_I}{dt} - \frac{C_1}{C_2} u_I = -10^{-3} \frac{du_I}{dt} - 2u_I$$

(c) 反相端:  $u_O = u_N + u_C = u_P + \frac{1}{RC} \int u_P dt$

$$\text{同相端: } u_P = u_C = \frac{1}{C} \int \frac{u_I - u_P}{R} dt = \frac{1}{RC} \int u_I dt - \frac{1}{RC} \int u_P dt$$

$$\text{代入上式, 得 } u_O = \frac{1}{RC} \int u_I dt = 10^3 \cdot \int u_I dt$$

$$(d) \quad u_O = -\frac{1}{C} \int (\frac{u_{I1}}{R_1} + \frac{u_{I2}}{R_2}) dt = -100 \int (u_{I1} + 0.5u_{I2}) dt$$

7.14 在图 P7.14 所示电路中, 已知  $R_1 = R_2 = R' = R_f = R = 100k\Omega$ ,  $C = 1\mu F$ 。

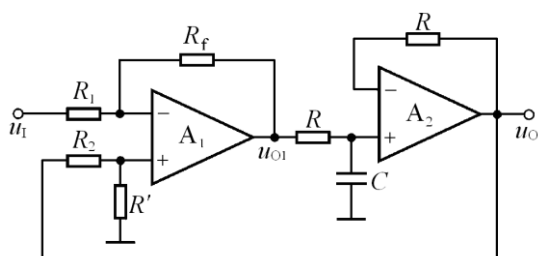


图 P7.14

(1) 试求出  $u_O$  与  $u_I$  的运算关系。

(2) 设  $t=0$  时  $u_O=0$ , 且  $u_I$  由零跃变为  $-1V$ , 试求输出电压由零上升到  $+6V$  所需要的时间。

**解:** (1) 因为  $A_2$  构成电压跟随器, 电容上的电压  $u_C = u_O$ 。 $A_1$  为求差运算电路, 利用叠加原理, 求出其输出电压:

$$u_{O1} = -\frac{R_f}{R_1} u_I + (1 + \frac{R_f}{R_1}) \cdot \frac{R'}{R_2 + R'} u_O = u_O - u_I$$

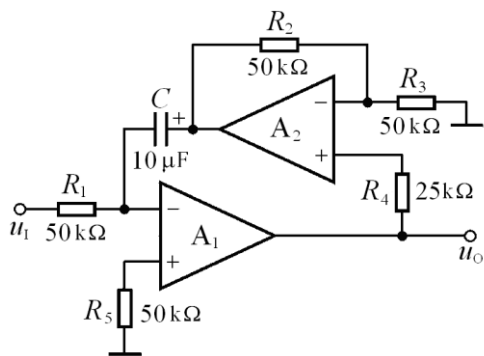
$$\text{电容的电流: } i_C = \frac{u_{O1} - u_O}{R} = -\frac{u_I}{R} \quad (\text{利用了上式})$$

$$\text{因此, 输出电压: } u_O = u_C = \frac{1}{C} \int i_C dt = -\frac{1}{RC} \int u_I dt = -10 \int u_I dt$$

$$(2) u_O = -10u_I t_1 = [-10 \times (-1) \times t_1] V = 10t_1 V = 6V,$$

故  $t_1 = 0.6s$ 。即经  $0.6$  秒输出电压达到  $6V$ 。

7.15 试求出图 P7.15 所示电路的运算关系。



解: 设  $A_2$  的输出为  $u_{O2}$ 。因为  $R_1$  的电流等于 C 的电流, 所以:

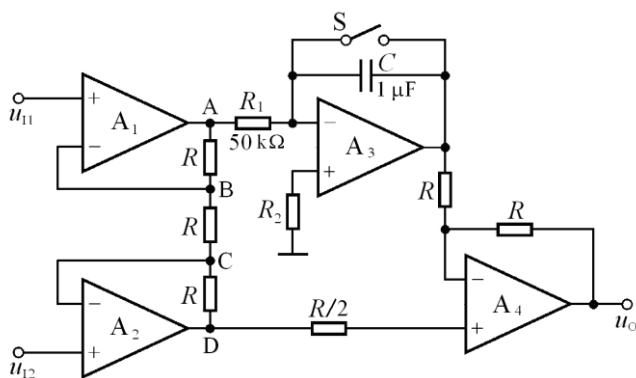
$$u_{o2} = -\frac{1}{R_1 C} \int u_i dt = -2 \int u_i dt$$

又因为  $A_2$  组成以  $u_O$  为输入的同相比例运算电路, 所以:

$$u_{O2} = (1 + \frac{R_2}{R_3}) u_O = 2u_O$$

比较以上两式，得： $u_O = -\int u_I dt$

**7.16** 在图 P7.16 所示电路中, 已知  $u_{11}=4V$ ,  $u_{12}=1V$ 。回答下列问题:



- (1) 当开关  $S$  闭合时, 分别求解  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  和  $u_O$  的电位;  
(2) 设  $t=0$  时  $S$  打开, 问经过多长时间  $u_O=0$ ?

解: (1) 对  $A_1$ 、 $A_2$  而言, 都工作在同相比例运算状态,

$$\therefore U_B = u_{N1} = u_{P1} = u_{I1} = 4V ; \quad U_C = u_{N2} = u_{P2} = u_{I2} = 1V .$$

由于三个  $R$  从上而下流过同一电流  $i_R = \frac{U_B - U_C}{R} = \frac{3}{R}$ ,

$$\therefore U_A = U_B + \frac{3}{R} \cdot R = 7V; \quad U_D = U_C - \frac{3}{R} R = -2V.$$

当开关  $S$  闭合时,  $A_3$  输出  $u_{O3} = 0$ ,

$$\therefore u_o = (1 + \frac{R}{R})U_D = 2U_D = -4V。$$

$$(2) t=0 \text{ 时 } S \text{ 打开, } A_3 \text{ 为积分电路, } u_{o3} = -\frac{1}{R_1 C} \int U_A dt = -\frac{U_A}{R_1 C} \cdot t = -140t；$$

$$\text{因为 } A_4 \text{ 为求差电路, } \therefore u_o = 2U_D - u_{o3} = -4V - u_{o3} = 140t - 4。$$

令上式为零, 求出  $t \approx 28.6mS$ 。

**7.17** 为了使图 P7.17 所示电路实现除法运算, (1)标出集成运放的同相输入端和反相输入端; (2)求出  $u_o$  和  $u_{I1}$ 、 $u_{I2}$  的运算关系式。

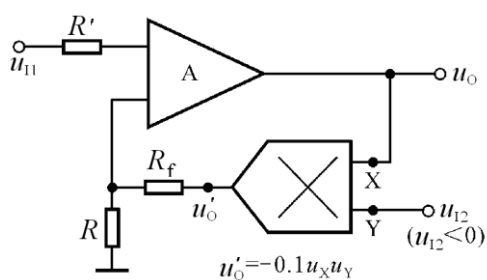


图 P7.17

**解:** (1)为了保证电路引入负反馈, A 的上端为“+”, 下端为“-”。

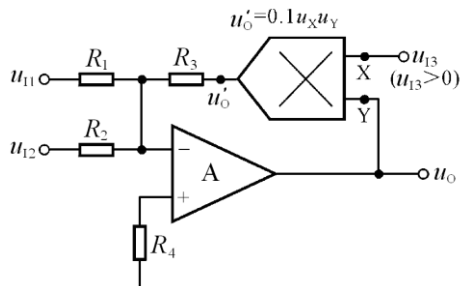
(2)根据模拟乘法器输出电压和输入电压的关系和节点电流关系, 可得

$$u'_o = k u_o u_{I2} = -0.1 u_o u_{I2}；$$

$$u_{I1} = u_P = u_N = \frac{R}{R + R_f} u'_o = \frac{R}{R + R_f} \cdot (-0.1 u_o u_{I2})$$

$$\text{所以 } u_o = -\frac{10(R + R_f)}{R} \cdot \frac{u_{I1}}{u_{I2}}$$

**7.18** 求出图 P7.18 所示各电路的运算关系。



(a)

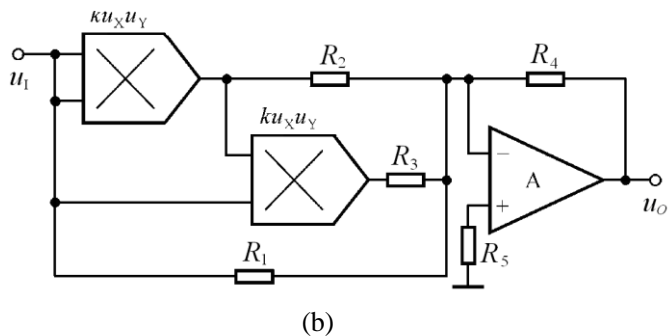


图 P7.18

**解：** 电路(a)实现求和、除法运算，电路(b)实现一元三次方程。它们的运算关系式分别为：

$$(a) \quad u'_O = -R_3 \left( \frac{u_{I1}}{R_1} + \frac{u_{I2}}{R_2} \right) = k u_O u_{I3}, \quad u_O = -\frac{R_3}{k u_{I3}} \left( \frac{u_{I1}}{R_1} + \frac{u_{I2}}{R_2} \right)$$

$$(b) \quad u_O = -\frac{R_4}{R_1} u_I - \frac{R_4}{R_2} k u_I^2 - \frac{R_4}{R_3} k^2 u_I^3.$$

**7.19** 在下列各种情况下，应分别采用哪种类型（低通、高通、带通、带阻）的滤波电路。

- (1) 抑制 50Hz 交流电源的干扰；
- (2) 处理具有 1Hz 固定频率的有用信号；
- (3) 从输入信号中取出低于 2kHz 的信号；
- (4) 抑制频率为 100kHz 以上的高频干扰。

**解：** (1) 带阻滤波器； (2) 带通滤波器  
(3) 低通滤波器 (4) 低通滤波器

**7.20** 试说明图 P7.20 所示各电路属于哪种类型的滤波电路，是几阶滤波电路。

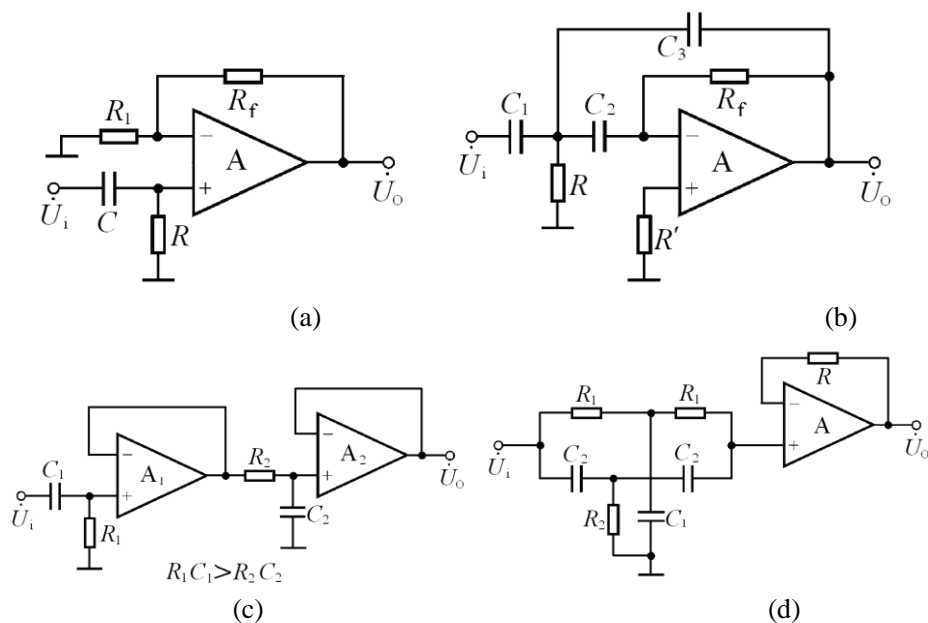


图 P7.20

**解：** 图(a)所示电路为一阶高通滤波器。  
图(c)所示电路二阶带通滤波器。

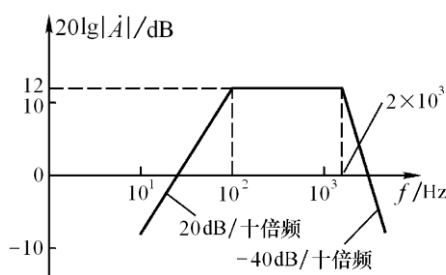
图(b)所示电路二阶高通滤波器。  
图(d)所示电路二阶带阻滤波器。

**7.21** 设一阶 HPF 和二阶 LPF 的通带放大倍数均为 2，通带截止频率分别为  $100\text{ Hz}$  和  $2\text{ kHz}$ 。试用它们构成一个带通滤波电路，并画出幅频特性。

**解：**低通滤波器的通带截止频率为  $2\text{ kHz}$ ，高通滤波器的通带截止频率为  $100\text{ Hz}$ 。将两个滤波器串联，就构成一个带通滤波电路。

其通带放大倍数为： $\dot{A}_{up} = 4$ 。通带增益  $20\lg|\dot{A}_{up}| \approx 12$

幅频特性如解图 P7.21 所示。



解图 P7.21

**7.22** 在图 7.3.9 (P364) 所示电路中，已知通带放大倍数为 2，截止频率为  $1\text{ kHz}$ ， $C$  取值为  $1\mu\text{F}$ 。试选取电路中各电阻的阻值。

**解：**因为通带放大倍数  $\dot{A}_{up} = 2$ ，所以  $Q = 1, |\dot{A}_u|_{f=f_p} = 2$ 。

因为  $f_o = f_p = \frac{1}{2\pi RC}$ ，代入数据，得出： $R \approx 160\text{ k}\Omega$ 。

为使得集成运放同相输入端和反相输入端所接电阻相等，则  $R_1 = R_2 = 4R \approx 640\text{ k}\Omega$ 。

**7.23** 试分析图 P7.23 所示电路的输出  $u_{O1}$ 、 $u_{O2}$  和  $u_{O3}$  分别具有哪种滤波特性 (LPF、HPF、BPF、BEF)？

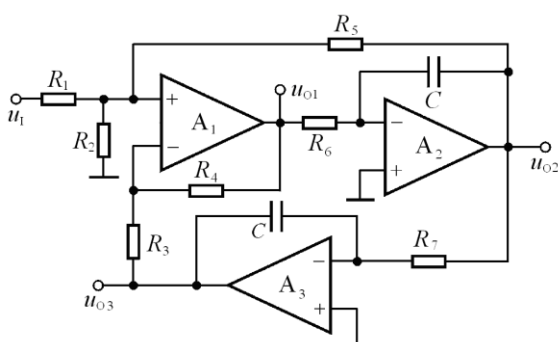
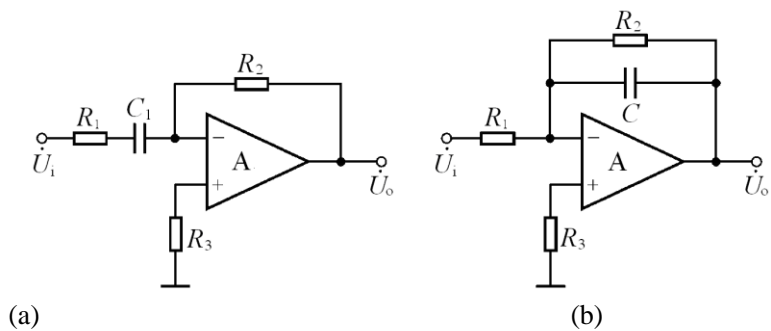


图 P7.23

**解：**以  $u_{O1}$  为输出是高通滤波器，以  $u_{O2}$  为输出是带通滤波器，以  $u_{O3}$  为输出是低通滤波器。

**补充 1.** 分别推导出补图 P7.1 所示各电路的传递函数，并说明它们属于哪种类型的滤波电路。



补图 P7.1

**解：**利用节点电流法可求出它们的传递函数。

在图(a)所示电路中

$$A_u(s) = -\frac{R_2}{R_1 + \frac{1}{sC}} = -\frac{sR_2C}{1 + sR_1C}。 \quad \text{故其为高通滤波器。}$$

$$\text{在图(b)所示电路中 } A_u(s) = -\frac{R_2 \cdot \frac{1}{sC} / (R_2 + \frac{1}{sC})}{R_1} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{1 + sR_2C}。$$

故其为低通滤波器。

## 第 8 章 波形的发生和信号的转换

### 自测题

一、改错：改正图 T8.1 所示各电路中的错误，使电路可能产生正弦波振荡。要求不能改变放大电路的基本接法（共射、共基、共集）。

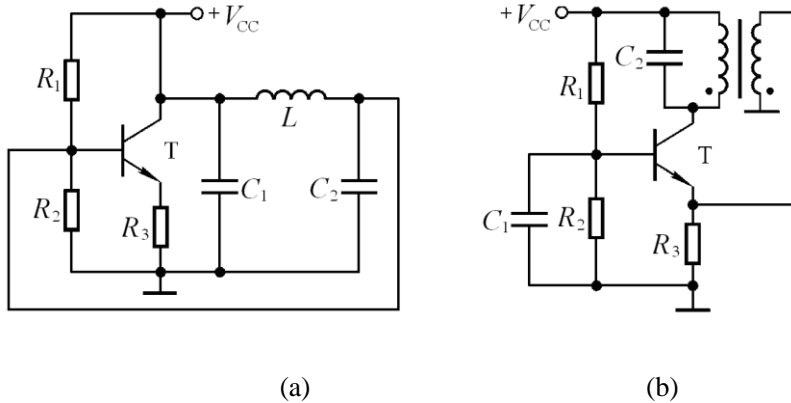


图 T8.1

**解：** (a) 加集电极电阻  $R_c$  及放大电路输入端的耦合电容。  
 (b) 变压器副边与放大电路之间加耦合电容，改同名端。

二、试将图 T8.2 所示电路合理连线，组成 RC 桥式正弦波振荡电路。

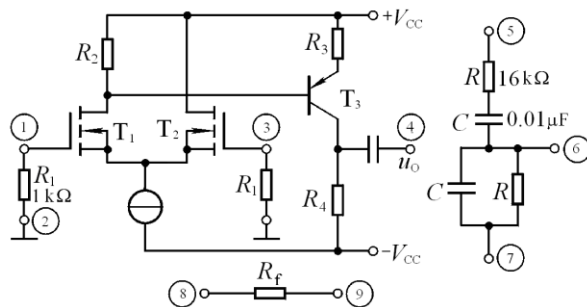
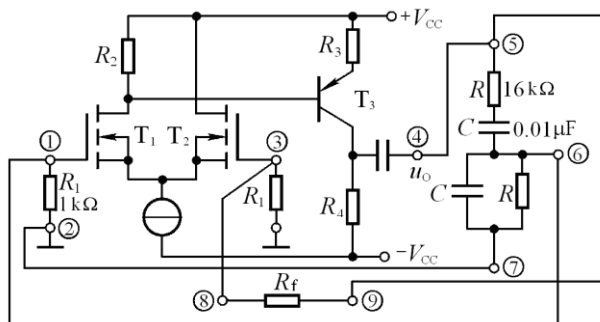


图 T8.2

**解：** ④、⑤与⑨相连，③与⑧ 相连，①与⑥ 相连，②与⑦相连。如解图 T8.2 所示。

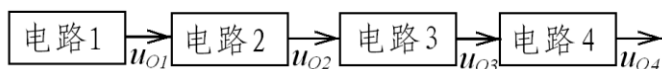


解图 T8.2

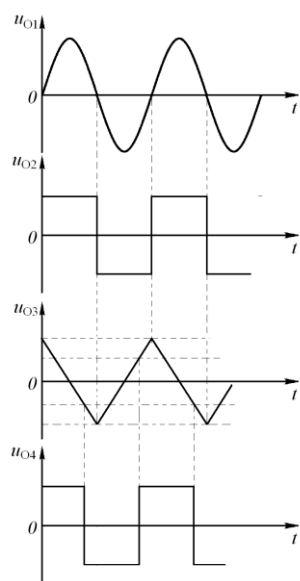
三、已知图 T8.3(a)所示方框图各点的波形如图(b)所示，填写各电路的名称。



电路 1 为 正弦波振荡电路，电路 2 为 同相输入过零比较器，  
电路 3 为 反相输入积分运算电路，电路 4 为 同相输入滞回比较器。



(a)



(b)

图 T8.3

四、试分别求出图 T8.4 所示各电路的电压传输特性。

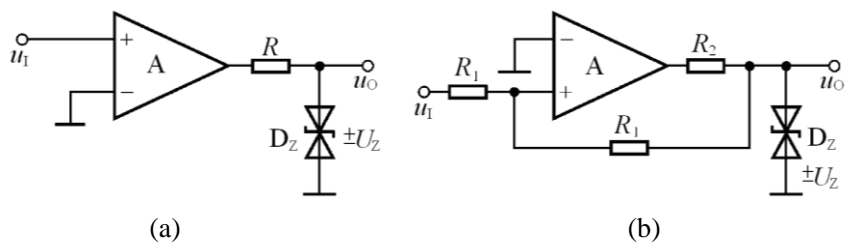
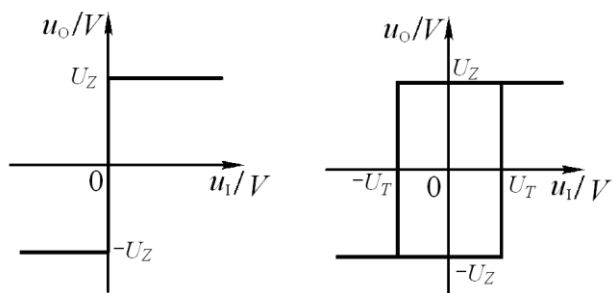


图 T8.4

**解：**图(a)所示电路为同相输入的过零比较器；图(b)所示电路为同相输入的滞回比较器，两个阈值电压为  $\pm U_T = \pm U_Z$ 。两个电路的电压传输特性如解图 T8.5 所示。



解图 T8.4

五、电路如图 T8.5 所示。

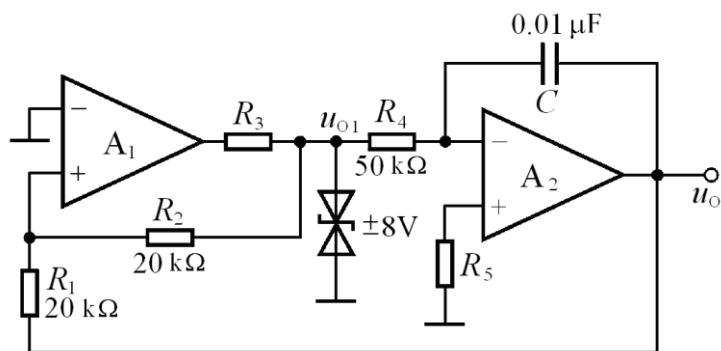


图 T8.5

- (1) 分别说明  $A_1$  和  $A_2$  各构成哪种基本电路；
- (2) 求出  $u_{O1}$  与  $u_O$  的关系曲线  $u_{O1}=f(u_O)$ ；
- (3) 求出  $u_O$  与  $u_{O1}$  的运算关系式  $u_O=f(u_{O1})$ ；
- (4) 定性画出  $u_{O1}$  与  $u_O$  的波形；
- (5) 说明若要提高振荡频率，则可以改变哪些电路参数，如何改变？

解:(1) $A_1$ : 滞回比较器;  $A_2$ : 积分运算电路。

$$(2) \text{根据 } u_{P1} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot u_{O1} + \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot u_O = \frac{1}{2}(u_{O1} + u_O) = u_{N1} = 0$$

可得:  $\pm U_T = \pm 8V$

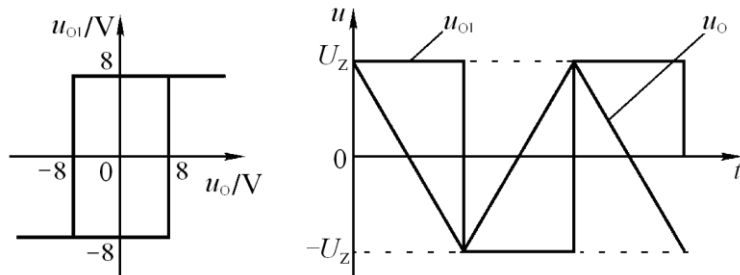
$u_{O1}$  与  $u_O$  的关系曲线如解图 T8.5 (a)所示。

- (3)  $u_O$  与  $u_{O1}$  的运算关系式

$$u_O = -\frac{1}{R_4 C} u_{O1} (t_2 - t_1) + u_O(t_1) = -2000 u_{O1} (t_2 - t_1) + u_O(t_1)$$

- (4)  $u_{O1}$  与  $u_O$  的波形如解图 T8.5(b)所示。

- (5) 要提高振荡频率，可以减小  $R_4$ 、 $C$ 、 $R_1$  或增大  $R_2$ 。



(a)

(b)

解图 T8.5

## 习题

8.1 判断下列说法是否正确，用“√”和“×”表示判断结果。

(1)在图 T8.1 所示方框图中，产生正弦波振荡的相位条件是  $\varphi_F = \varphi_A$ 。(×)

(2)因为 RC 串并联选频网络作为反馈网络时的  $\varphi_F = 0^\circ$ ，单管共集放大电路的  $\varphi_A = 0^\circ$ ，满足正弦波振荡电路的相位条件  $\varphi_F + \varphi_A = 2n\pi$ ，故合理连接它们可以构成正弦波振荡电路。(×)

(3)在 RC 桥式正弦波振荡电路中，若 RC 串并联选频网络中的电阻均为  $R$ ，电容均为  $C$ ，则其振荡频率  $f_o = 1/RC$ 。(×)

(4)电路只要满足  $|\dot{A}\dot{F}| = 1$ ，就一定会产生正弦波振荡。(×)

(5)负反馈放大电路不可能产生自激振荡。(×)

(6)在 LC 正弦波振荡电路中，不用通用型集成运放作放大电路的原因是其上限截止频率太低。(√)

8.2 判断下列说法是否正确，用“√”和“×”表示判断结果。

(1)为使电压比较器的输出电压不是高电平就是低电平，就应在其电路中使集成运放不是工作在开环状态，就是仅仅引入正反馈。(√)

(2)如果一个滞回比较器的两个阈值电压和一个窗口比较器的相同，那么当它们的输入电压相同时，它们的输出电压波形也相同。(×)

(3)输入电压在单调变化的过程中，单限比较器和滞回比较器的输出电压均只跃变一次。(√)

(4)单限比较器比滞回比较器抗干扰能力强，而滞回比较器比单限比较器灵敏度高。(×)

8.3 选择合适答案填入空内。

A.容性 B.阻性 C.感性

(1)LC 并联网路在谐振时呈(B)；在信号频率大于谐振频率时呈(A)；在信号频率小于谐振频率时呈(C)。

(2)当信号频率等于石英晶体的串联谐振频率时，石英晶体呈(B)；当信号频率在石英晶体的串联谐振频率和并联谐振频率之间时，石英晶体呈(C)；其余情况下，石英晶体呈(A)。

(3)信号频率  $f = f_o$  时，RC 串并联网路呈(B)。

8.4 判断图 P8.4 所示各电路是否可能产生正弦波振荡，简述理由。设图(b)中  $C_4$  容量远大于其它三个电容的容量。

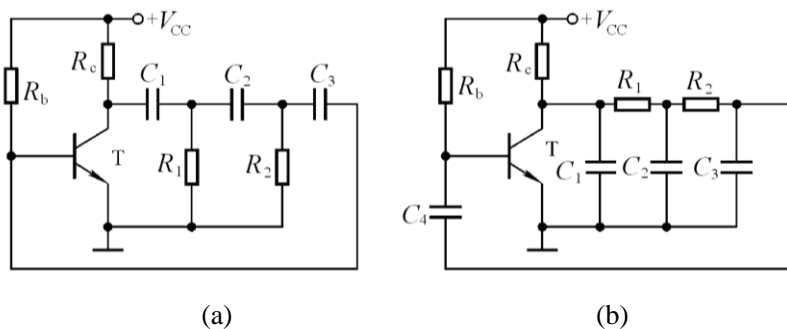


图 P 8.4

**解:** 图(a)所示电路有可能产生正弦波振荡。因为共射放大电路输出电压和输入电压反相( $\varphi_A = -180^\circ$ ), 且图中三级 RC 移相电路为超前网络, 在信号频率为 0 到无穷大时相移为  $+270^\circ \sim 0^\circ$ , 因此存在使相移为  $+180^\circ$  的频率, 即存在满足正弦波振荡相位条件的频率  $f_0$ , 故可能产生正弦波振荡。

图(b)所示电路有可能产生正弦波振荡。因为共射放大电路输出电压和输入电压反相( $\varphi_A = -180^\circ$ ), 且图中三级 RC 移相电路为滞后网络, 在信号频率为 0 到无穷大时相移为  $-270^\circ \sim 0^\circ$ , 因此存在使相移为  $-180^\circ$  的频率, 即存在满足正弦波振荡相位条件的频率  $f_0$ , 故可能产生正弦波振荡。

**8.5** 电路如图 P8.4 所示, 试问:

- (1) 若去掉两个电路中的  $R_2$  和  $C_3$ , 则两个电路是否可能产生正弦波振荡? 为什么?
- (2) 若在两个电路中再加一级 RC 电路, 则两个电路是否可能产生正弦波振荡? 为什么?

**解:** (1) 不能。因为图(a)所示电路在信号频率为 0 到无穷大时相移为  $+180^\circ \sim 0^\circ$ , 图(b)所示电路在信号频率为 0 到无穷大时相移为  $0^\circ \sim -180^\circ$ , 在相移为  $\pm 180^\circ$  时反馈量为 0, 因而不可能产生正弦波振荡。

(2) 可能。因为存在相移为  $\pm 180^\circ$  的频率, 满足正弦波振荡的相位条件, 且电路有可能满足幅值条件, 因此可能产生正弦波振荡。

**8.6** 电路如图 P8.6 所示, 试求解: (1)  $R_W$  的下限值; (2) 振荡频率的调节范围。

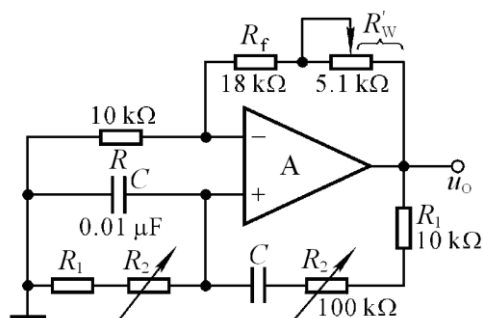


图 P8.6

**解:** (1) 根据起振条件

$$R_f + R'_W > 2R, R'_W > 2k\Omega \quad \text{故 } R_W \text{ 的下限值为 } 2k\Omega。$$

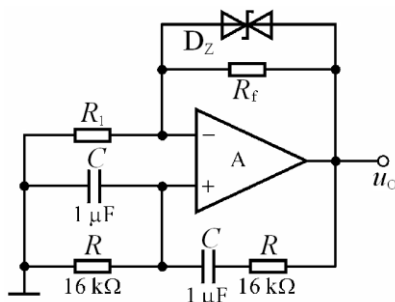
(2) 振荡频率的最大值和最小值分别为

$$f_{0\max} = \frac{1}{2\pi R_1 C} \approx 1.6kHz, \quad f_{0\min} = \frac{1}{2\pi(R_1 + R_2)C} \approx 145Hz。$$

**8.7** 电路如图 P8.7 所示, 稳压管起稳幅作用, 其稳压值为  $\pm 6V$ 。试估算:

- (1) 输出电压不失真情况下的有效值;
- (2) 振荡频率。

**解:** (1) 设输出电压不失真情况下的峰值为  $U_{om}$ , 此时  $U_N = U_P = \frac{1}{3}U_{om}$



由图可知:  $U_{om} - \frac{1}{3}U_{om} = \frac{2}{3}U_{om} = U_Z$

$$\therefore U_{om} = \frac{3}{2}U_Z = 9V。$$

图 P 8.7

有效值为:  $U_o = \frac{U_{om}}{\sqrt{2}} \approx 6.36V$

(2) 电路的振荡频率:  $f_o = \frac{1}{2\pi RC} \approx 9.95Hz$

8.8 电路如图 P8.8 所示。

(1) 为使电路产生正弦波振荡, 标出集成运放的“+”和“-”; 并说明电路是哪种正弦波振荡电路。

(2) 若  $R_1$  短路, 则电路将产生什么现象?

(3) 若  $R_1$  断路, 则电路将产生什么现象?

(4) 若  $R_f$  短路, 则电路将产生什么现象?

(5) 若  $R_f$  断路, 则电路将产生什么现象?

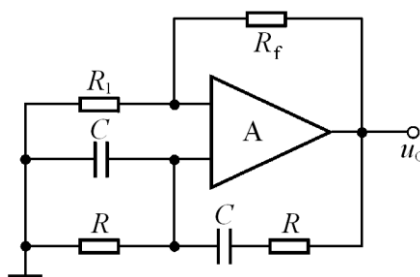


图 P 8.8

解: (1) 上“-”下“+”。

(2) 输出严重失真, 几乎为方波。

(3) 输出为零。

(4) 输出为零。

(5) 输出严重失真, 几乎为方波。

8.9 图 P8.9 所示电路为正交正弦波振荡电路, 它可产生频率相同的正弦信号和余弦信号。已知稳压管的稳定电压  $\pm U_Z = \pm 6V$ ,  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R$ ,  $C_1 = C_2 = C$ 。

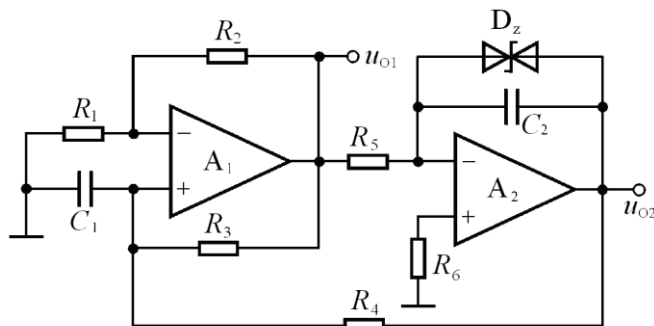


图 P8.9

(1) 试分析电路为什么能够满足产生正弦波振荡的条件;

(2) 求出电路的振荡频率;

(3) 画出  $u_{o1}$  和  $u_{o2}$  的波形图, 要求表示出它们的相位关系, 并分别求出它们的峰值。

解: (1) 在特定频率下, 由  $A_2$  组成的积分运算电路的输出电压  $u_{o2}$  超前输入电压  $u_{o1}$   $90^\circ$ , 而由  $A_1$  组成

的电路的输出电压  $u_{o1}$  滞后输入电压  $u_{o2}$   $90^\circ$ , 因而  $u_{o1}$  和  $u_{o2}$  互为依存条件, 即存在  $f_0$  满足相位条件。在

参数选择合适时也满足幅值条件, 故电路在两个集成运放的输出同时产生正弦和余弦信号。

(2) 根据题意列出方程组:

$$u_{P1} = u_{N1} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot u_{O1}$$

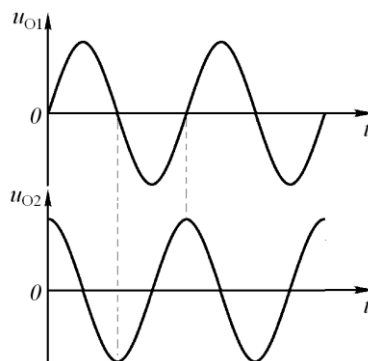
$$\frac{u_{P1} - u_{O2}}{R_4} + \frac{u_{P1} - u_{O1}}{R_3} = -u_{P1} \cdot j\omega C_1$$

$$u_{O2} = -\frac{u_{O1}}{R_5} \cdot \frac{1}{j\omega C_2} = -\frac{u_{O1}}{j\omega R_5 C_2}$$

或改写为:  $2u_{P1} = u_{O1}$

$$2u_{P1} - u_{O1} - u_{O2} = -u_{P1} \cdot j\omega RC$$

$$j\omega RC \cdot u_{O2} = -u_{O1}$$



解图 8.9

解方程组, 可得:  $(\omega RC)^2 = 2$ , 或  $\omega = \frac{\sqrt{2}}{RC}$ 。即  $f_0 = \frac{1}{\sqrt{2}\pi RC}$ 。

(3) 输出电压  $u_2$  最大值  $U_{O2\max} = U_Z = 6V$

对方程组中的第三式取模, 并将  $\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{2}{\sqrt{2}RC}$

代入可得  $|u_{O1}| = \sqrt{2}|u_{O2}|$ , 故  $U_{O1\max} = \sqrt{2}U_{O2\max} \approx 8.5V$ 。

若  $u_{O1}$  为正弦波, 则  $u_{O2}$  为余弦波, 如解图 8.9 所示。

**8.10** 分别标出图 P8.10 所示各电路中变压器的同名端, 使之满足正弦波振荡的相位条件。

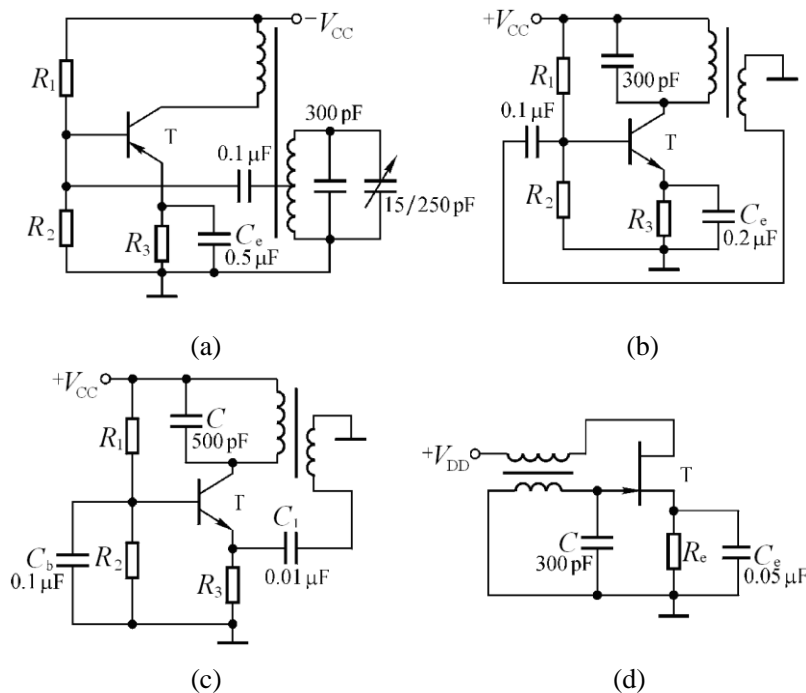
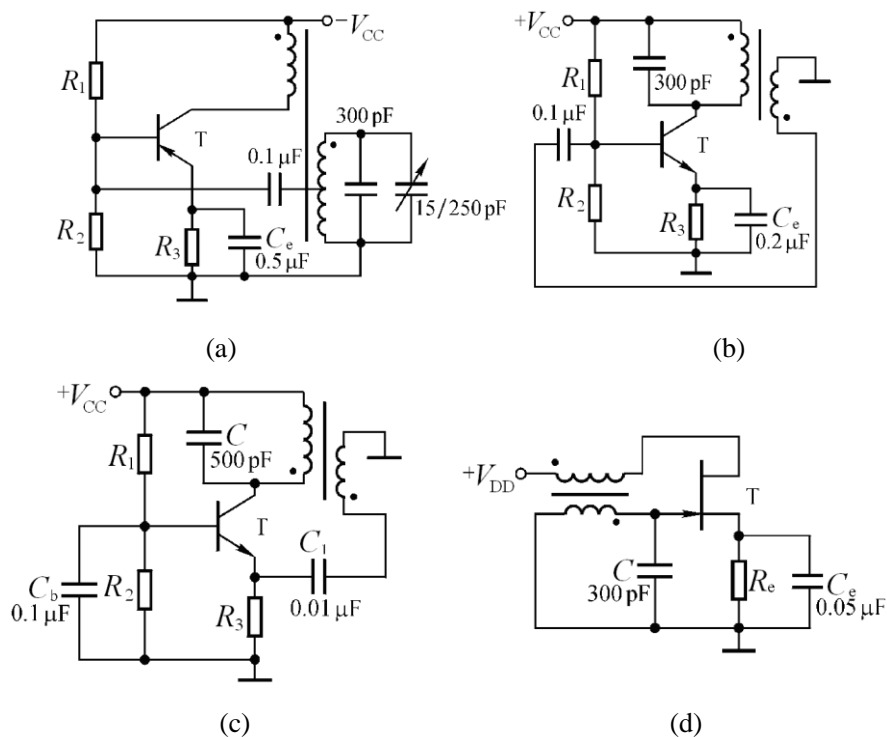


图 P8.10

解: 图 P8.10 所示各电路中变压器的同名端如解图 P8.10 所示。



解图 P8.10

8.11 分别判断图 P8.11 所示各电路是否可能产生正弦波振荡。

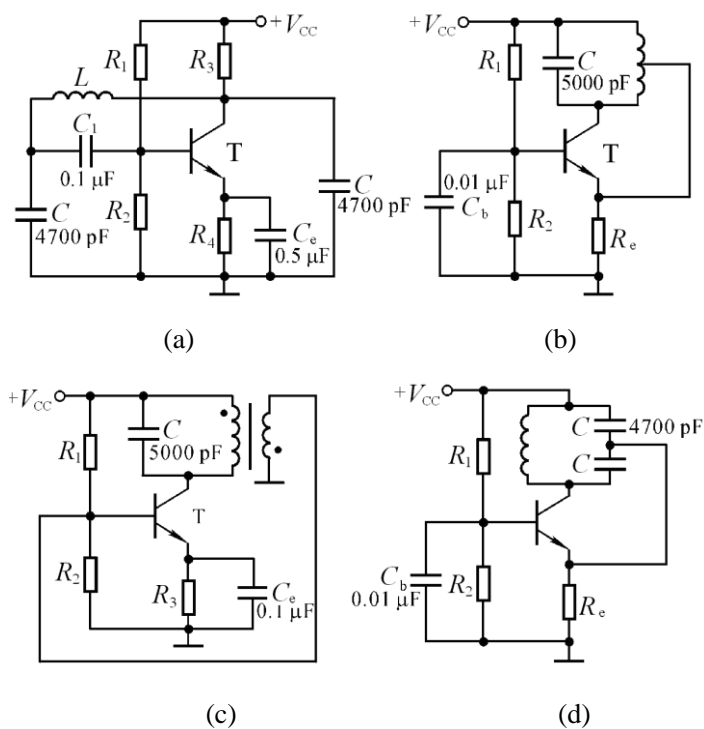


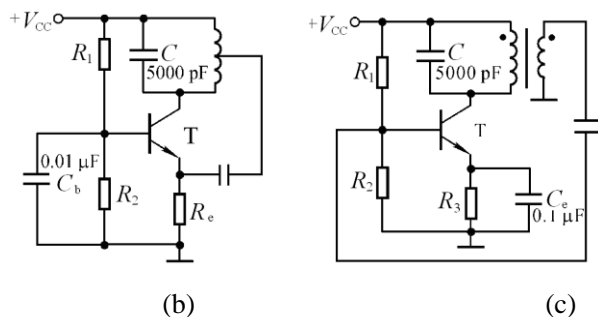
图 P8.11

- 解: (a)可能 (电容三点式)  
 (b)不能 (电感与  $R_e$  之间的连线应串入隔直电容)  
 (c)不能 (①同(b), ②同名端错误。)  
 (d)可能 (电容三点式)

8.12 改正图 P8.11(b)、(c)所示两电路中的错误, 使之有可能产生正弦波振荡。

解: 应在(b)所示电路电感反馈回路中加耦合电容。

应在(c)所示电路放大电路的输入端(基极)加耦合电容, 且将变压器的同名端改为原边的上端和副边的上端为同名端, 或它们的下端为同名端。改正后的电路如解图 P8.11(b)、(c) 所示。



解图 P8.11

8.13 试分别指出图 P8.13 所示电路中的选频网络、正反馈网络和负反馈网络, 并说明电路是否满足正弦波振荡的条件。

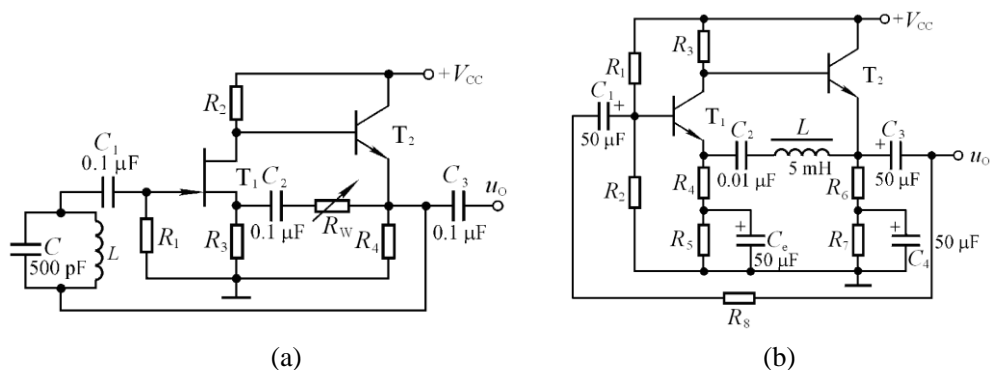
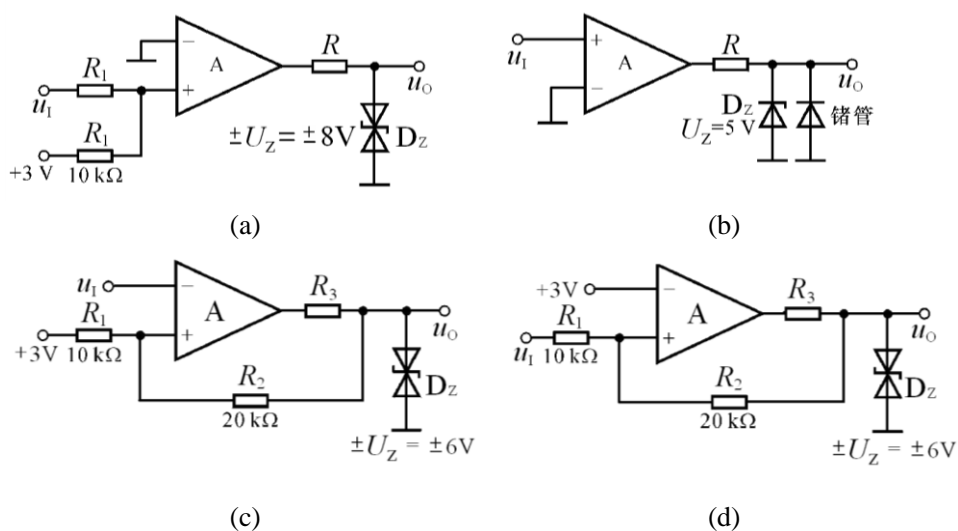


图 P8.13

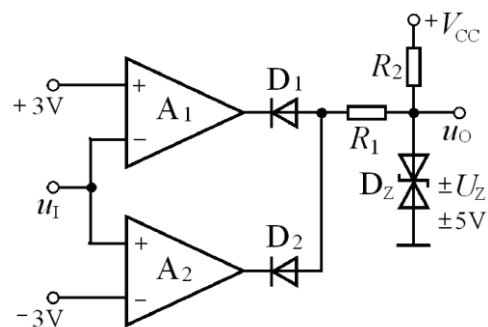
解: 在图(a)所示电路中, 选频网络:  $C$  和  $L$ ; 正反馈网络:  $R_3$ 、 $C_2$  和  $R_w$ ; 负反馈网络:  $C$  和  $L$ 。电路满足正弦波振荡的相位条件。

在图(b)所示电路中, 选频网络:  $C_2$  和  $L$ ; 正反馈网络:  $C_2$  和  $L$ ; 负反馈网络:  $R_8$ 。电路满足正弦波振荡的相位条件。

8.14 试分别求解图 P8.14 所示各电路的电压传输特性。







(e)  
图 P8.14

**解：**图(a)所示电路为单限比较器， $u_o = \pm U_Z = \pm 18V$ ， $U_T = -3V$ ，其电压传输特性如解图 P8.14 (a) 所示。

图(b)所示电路为过零比较器， $U_{OL} = -U_D = -0.2V$ ， $U_{OH} = +U_Z = +6V$ ， $U_T = 0V$ 。其电压传输特性如解图 P8.14(b)所示。

图(c)所示电路为反相输入的滞回比较器， $u_o = \pm U_Z = \pm 6V$ 。令

$$u_P = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot u_o + \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_{REF} = u_N = u_i$$

求出阈值电压： $U_{T1} = 0V, U_{T2} = 4V$

其电压传输特性如解图 P8.14(c)所示。

图(d)所示电路为同相输入的滞回比较器， $u_o = \pm U_Z = \pm 6V$ 。令

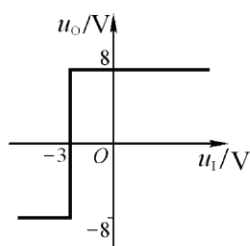
$$u_P = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot u_{o1} + \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot u_i = u_N = 3V$$

求出阈值电压： $U_{T1} = 1.5V, U_{T2} = 7.5V$

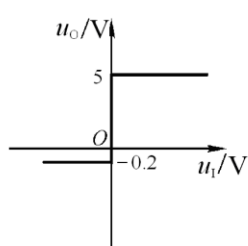
其电压传输特性如解图 P8.14(d)所示。

图(e)所示电路为窗口比较器， $u_o = \pm U_Z = \pm 5V$ ， $\pm U_T = \pm 3V$ ，

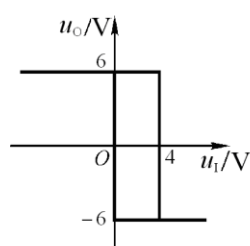
其电压传输特性如解图 P8.14(e)所示。



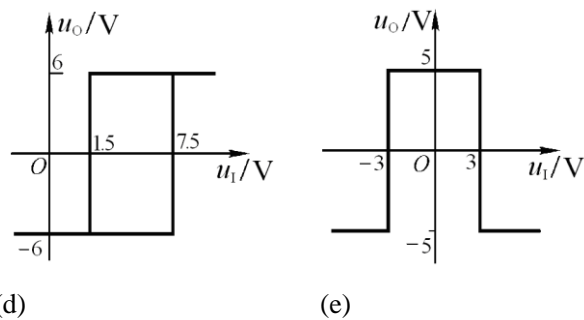
(a)



(b)



(c)



解图 P8.14

**8.15** 已知三个电压比较器的电压传输特性分别如图 P8.15(a)、(b)、(c)所示，它们的输入电压波形均如图(d)所示，试画出  $u_{O1}$ 、 $u_{O2}$  和  $u_{O3}$  的波形。

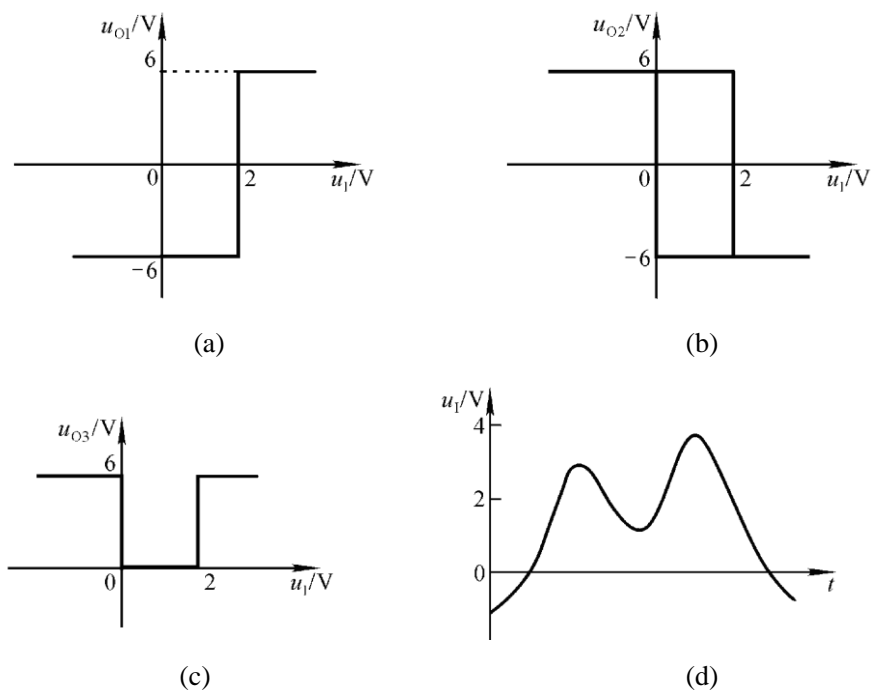
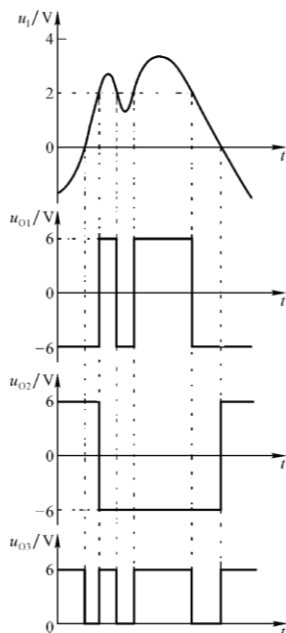


图 P8.15

**解：**根据三个电压比较器的电压传输特性，画出在输入电压作用下它们的输出电压波形，如解图 P8.15 所示。



解图 P8.15

**8.16 图 P8.16** 所示为光控电路的一部分，它将连续变化的光电信号转换成离散信号（即不是高电平，就是低电平），电流  $I$  随光照的强弱而变化。

- (1) 在  $A_1$  和  $A_2$  中，哪个工作在线性区？哪个工作在非线性区？为什么？
- (2) 试求出表示  $u_O$  与  $i_I$  关系的传输特性。

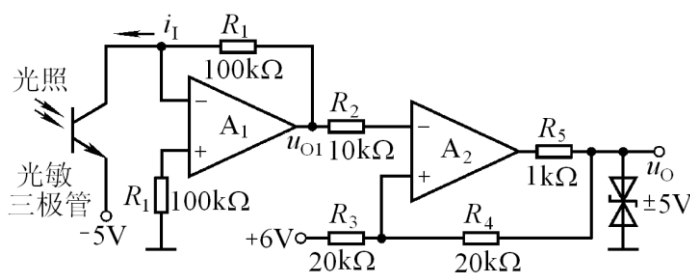


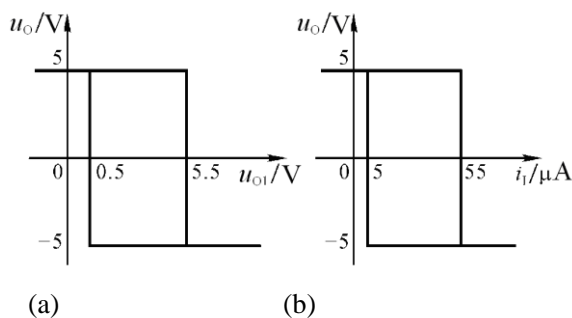
图 P8.16

**解：**(1)  $A_1$  工作在线性区（电路引入了负反馈）； $A_2$  工作在非线性区（电路仅引入了正反馈）。

(2)  $u_{O1}$  与  $i_I$  关系式为：  $u_{O1} = i_I R_1 = 100i_I$

$u_O$  与  $u_{O1}$  的电压传输特性如解图 P8.16(a)所示 ( $U_{T1} = 0.5V$ ， $U_{T2} = 5.5V$ )，因此  $u_O$  与  $i_I$  关系的传输特性

如解图 P8.16 (b)所示。与  $U_{T1}$ 、 $U_{T2}$  所对应的  $i_{I1}$ 、 $i_{I2}$  分别为：  $5\mu A$  和  $55\mu A$ 。



### 解图 P8.16

**8.17** 设计三个电压比较器，它们的电压传输特性分别如图 P8.15 (a)、(b)、(c)所示。要求合理选择电路中各电阻的阻值，限定最大值为  $50k\Omega$ 。

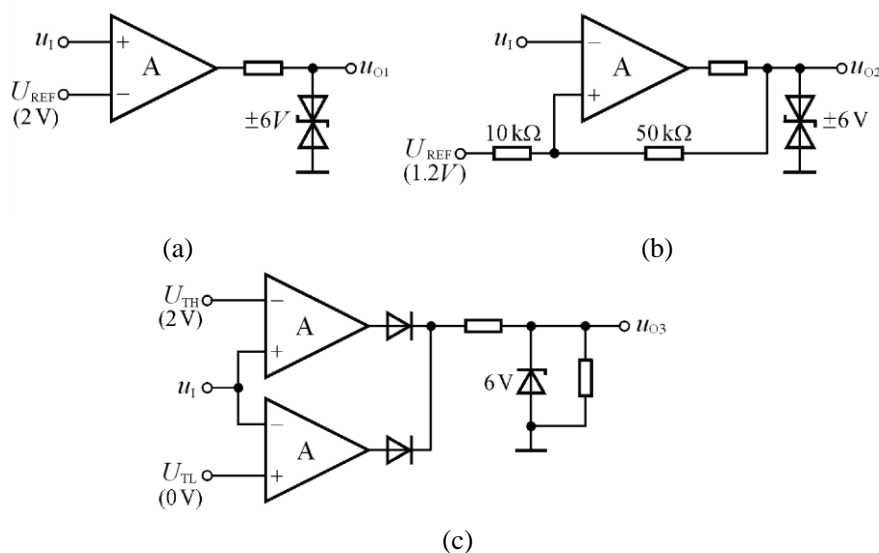
**解：**具有图 P8.15 (a)所示电压传输特性的电压比较器为同相输入的单限比较器。输出电压  $u_o = \pm U_Z = \pm 6V$ ，阈值电压： $U_T = 2V$ ，电路如解图 P8.17(a)所示。

具有图 P8.15 (b)所示电压传输特性的电压比较器为反相输入的滞回比较器。输出电压  $u_o = \pm U_Z = \pm 6V$ ；阈值电压： $U_{T1} = 0V, U_{T2} = 2V$ ，说明电路输入有  $U_{REF}$  作用，根据：

$$u_P = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot u_o + \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_{REF} = u_N = u_I$$

列方程，令  $R_2 = 50k\Omega$ ，可解出  $R_1 = 10k\Omega$ ， $U_{REF} = 1.2V$ 。电路如解图 P8.17(b)所示。

具有图 P8.15(c)所示电压传输特性的电压比较器为窗口单限比较器。输出电压  $U_{OL} = 0V, U_{OH} = 6V$ ，阈值电压： $U_{T1} = 0V, U_{T2} = 2V$ 。电路如解图 P8.17(c)所示。



解图 P8.17

**8.18** 在图 P8.18 所示电路中，已知  $R_1 = 10k\Omega$ ， $R_2 = 20k\Omega$ ， $C = 0.01\mu F$ ，集成运放的最大输出电压幅值为  $\pm 12V$ ，二极管的动态电阻可忽略不计。(1)求出电路的振荡周期；(2)画出  $u_o$  和  $u_c$  的波形。

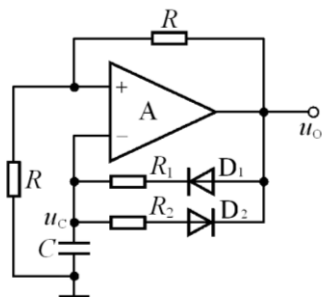
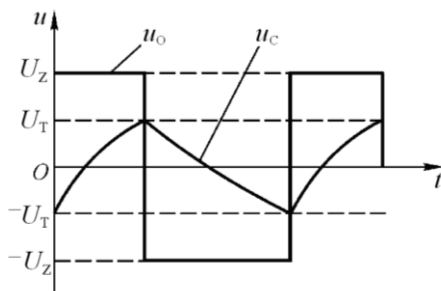


图 P8.18



解图 P8.18

解: (1)振荡周期:  $T \approx (R_1 + R_2)C \ln 3 \approx 3.3mS$

(2)脉冲宽度:  $T_1 \approx R_1 C \ln 3 \approx 1.1mS$

$\therefore u_O$  和  $u_C$  的波形如解图 8.18 所示。

8.19 图 P8.19 所示电路为某同学所接的方波发生电路, 试找出图中的三个错误, 并改正。

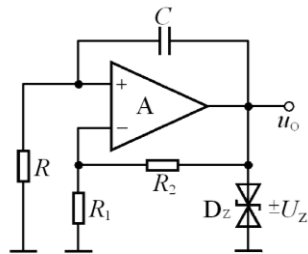
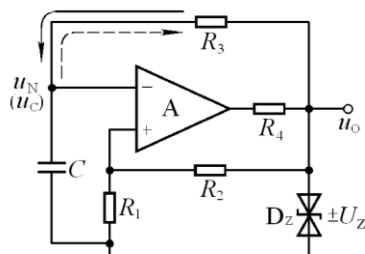


图 P8.19



解图 P8.19

解: 图 P8.19 所示电路中有三处错误: (1)集成运放“+”、“-”接反; (2)  $R$ 、 $C$  位置接反; (3)输出限幅电路无限流电阻。改正后的电路如解图 8.19 所示。

8.20 波形发生电路如图 P8.20 所示, 设振荡周期为  $T$ , 在一个周期内  $u_{O1} = U_Z$  的时间为  $T_1$ , 则占空比为  $T_1/T$ ; 在电路某一参数变化时, 其余参数不变。选择①增大、②不变或③减小填入空内:

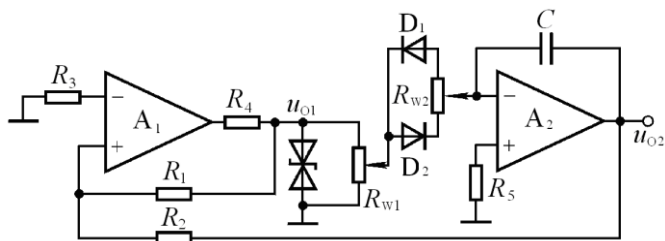


图 P8.20

当  $R_1$  增大时,  $u_{O1}$  的占空比将\_\_\_\_, 振荡频率将\_\_\_\_,  $u_{O2}$  的幅值将\_\_\_\_;

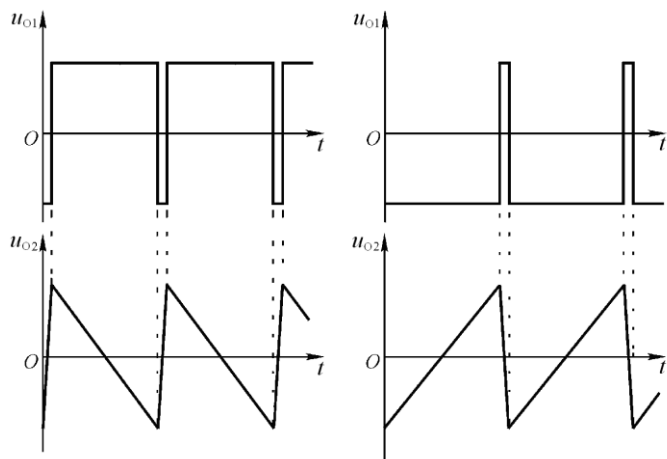
若  $R_{W1}$  的滑动端向上移动, 则  $u_{O1}$  的占空比将\_\_\_\_, 振荡频率将\_\_\_\_,  $u_{O2}$  的幅值将\_\_\_\_; 若  $R_{W2}$  的滑动端向上移动, 则  $u_{O1}$  的占空比将\_\_\_\_, 振荡频率将\_\_\_\_,  $u_{O2}$  的幅值将\_\_\_\_。

解: 设  $R_{W1}$ 、 $R_{W2}$  在未调整前滑动端均处于中点, 则应填入②, ①, ③;

②, ①, ②; ③, ②, ②。

8.21 在图 P8.20 所示电路中, 已知  $R_{W1}$  的滑动端在最上端, 试分别定性画出  $R_{W2}$  的滑动端在最上端和在最下端时  $u_{O1}$  和  $u_{O2}$  的波形。

解:  $u_{O1}$  和  $u_{O2}$  的波形如解图 P8.21 所示。



(a)  $R_{W2}$  滑动端在最上端 (b)  $R_{W2}$  滑动端在最下端

解图 P8.21

8.22 电路如图 P8.22 所示，已知集成运放的最大输出电压幅值为  $\pm 12V$ ， $u_1$  的数值在  $u_{O1}$  的峰-峰值之间。

- (1) 求解  $u_{O3}$  的占空比与  $u_1$  的关系式；
- (2) 设  $u_1 = 2.5V$ ，画出  $u_{O1}$ 、 $u_{O2}$  和  $u_{O3}$  的波形。

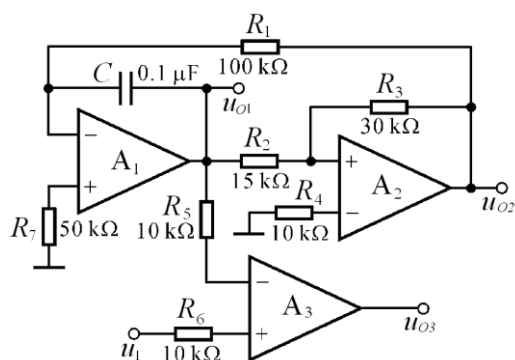


图 P8.22

解：在图 P8.22 所示电路中， $A_1$  和  $A_2$  组成矩形波-三角波发生电路。

(1) 在  $A_2$  组成的滞回比较器中，令  $u_p = \frac{R_2}{R_2 + R_3} \cdot u_{O2} + \frac{R_3}{R_2 + R_3} \cdot u_{O1} = 0$

求出阈值电压：  $\pm U_T = \pm \frac{R_2}{R_3} \cdot U_{OM} = \pm 6V$

在  $A_1$  组成的积分运算电路中，运算关系式为

$$u_O = -\frac{1}{RC} u_{O2}(t_2 - t_1) + u_O(t_1)$$

在二分之一振荡周期内，积分起始值：  $u_{O1}(t_1) = -U_T = -6V$ ，

终了值：  $u_{O1}(t_1) = -U_T = 6V$ ，  $u_{O2} = -U_{OM} = -12V$ ，

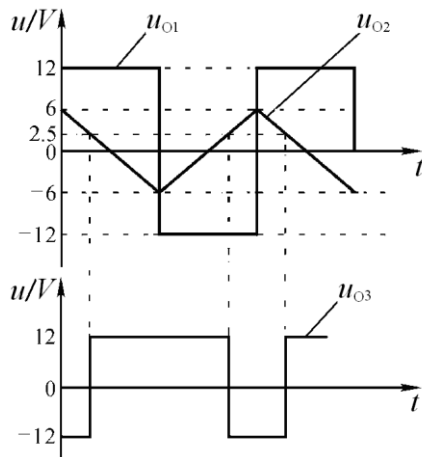
代入上式得：  $6 = -\frac{1}{10^5 \times 10^{-7}} \times (-12) \times \frac{T}{2} - 6$

求出振荡周期：  $T = 20ms$

$$\text{求解脉冲宽度 } T_1: \because U_I = -\frac{1}{RC} \cdot (-U_{OM}) \cdot \frac{T_1}{2} - U_T, \quad \therefore T_1 = \frac{6+U_I}{600}$$

$$\text{求解占空比: } \delta = \frac{T_1}{T} = \frac{6+U_I}{12}$$

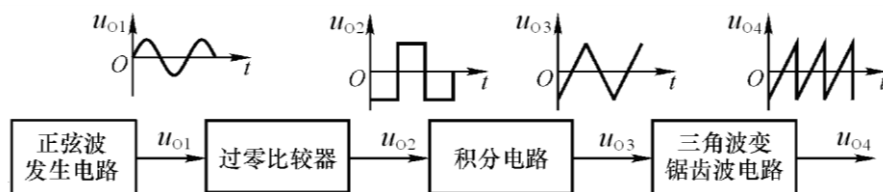
(2)  $u_{O1}$ 、 $u_{O2}$  和  $u_{O3}$  的波形如解图 8.22 所示。



解图 P8.22

**8.23** 试将正弦波电压转换为二倍频锯齿波电压，要求画出原理框图来，并定性画出各部分输出电压的波形。

**解：**原理框图和各部分输出电压的波形如解图 P8.23 所示。



解图 P8.23

**8.24** 试分析图 P8.24 所示各电路输出电压与输入电压的函数关系。

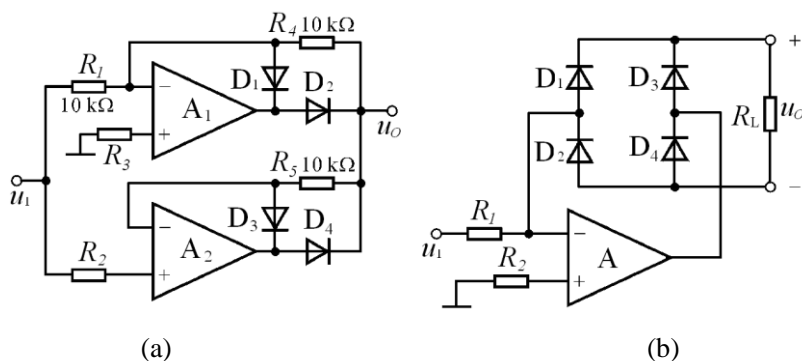


图 P8.24

**解：**图示两个电路均为绝对值运算电路。运算关系式分别为

$$(a) \quad u_O = |u_I|; \quad (b) \quad u_O = \frac{R_L}{R_1} |u_I|。$$

**8.25** 电路如图 P8.25 所示。(1) 定性画出  $u_{O1}$  和  $u_O$  的波形；(2) 估算振荡频率与  $u_I$  的关系式。

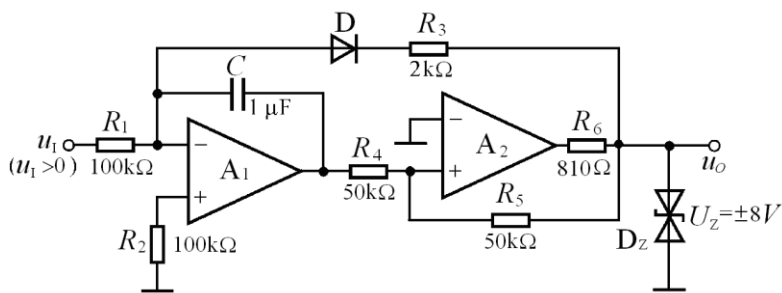


图 P8.25

解: (1)  $u_{O1}$  和  $u_O$  的波形如解图 P8.26 所示。

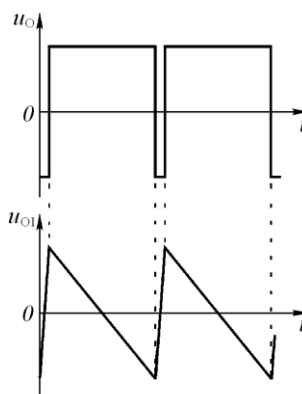
(2) 求解振荡频率: 首先求出电压比较器的阈值电压, 然后根据振荡周期近似等于积分电路正向积分时间求出振荡周期, 振荡频率是其倒数。

$$\pm U_T = \pm U_Z = \pm 8V;$$

$$U_T \approx -\frac{1}{R_1 C} u_I T - U_T;$$

$$T \approx \frac{2U_T R_1 C}{u_I};$$

$$f \approx \frac{u_I}{2U_T R_1 C} = 0.625 u_I$$



解图 P8.25

8.26 已知图 P8.26 所示电路为压控振荡电路, 晶体管  $T$  工作在开关状态, 当其截止时相当于开关断开, 当其导通时相当于开关闭合, 管压降近似为零;  $u_I > 0$ 。

(1) 分别求解  $T$  导通和截止时  $u_{O1}$  和  $u_I$  的运算关系式  $u_{O1} = f(u_I)$ ;

(2) 求出  $u_O$  和  $u_{O1}$  的关系曲线  $u_O = f(u_{O1})$ ;

(3) 定性画出  $u_O$  和  $u_{O1}$  的波形;

(4) 求解振荡频率  $f$  和  $u_I$  的关系式。

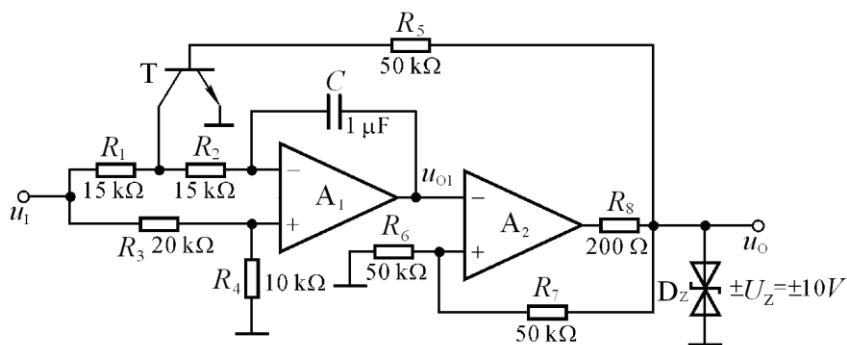


图 P8.26

解: (1)  $u_O = U_Z$  时,  $T$  导通时, 此时  $R_1$ 、 $R_2$  中点接地,



$$u_{N1} = u_{P1} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} u_I = u_I / 3。$$

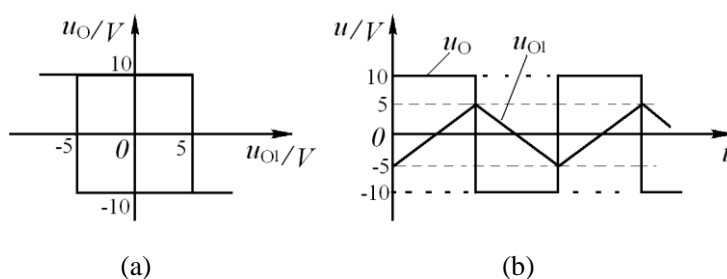
$$\therefore u_{O1} = \frac{1}{R_2 C} \cdot \frac{u_I}{3} (t_1 - t_0) + u_{O1}(t_0) = \frac{10^3}{45} u_I (t_1 - t_0) + u_{O1}(t_0)$$

$u_O = -U_Z$  时,  $T$  截止时,

$$u_{O1} = -\frac{1}{(R_1 + R_2)C} \cdot \frac{2u_I}{3} (t_2 - t_1) + u_{O1}(t_1) = -\frac{10^3}{45} u_I (t_2 - t_1) + u_{O1}(t_1)$$

(2)  $u_O$  和  $u_{O1}$  的关系曲线如解图 P8.26 (a) 所示。

(3)  $u_O$  和  $u_{O1}$  的波形如解图 P8.26 (b) 所示。



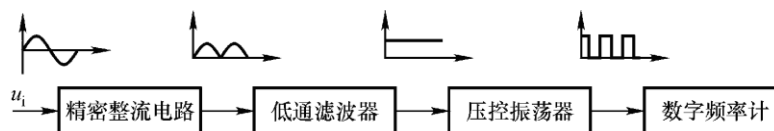
解图 P8.26

(4) 首先求出振荡周期, 然后求出振荡频率, 如下:

$$U_T = \frac{10^3}{45} \cdot u_I \cdot \frac{T}{2} - U_T; \quad T = \frac{2U_T \times 90}{10^3 u_I} = \frac{0.9}{u_I}; \quad \therefore f \approx 1.1u_I$$

8.27 试设计一个交流电压信号的数字式测量电路, 要求仅画出原理框图。

解: 原理框图如解图 P8.27 所示, 各部分波形如图所示, 数字频率计完成计数、译码、显示等功能。

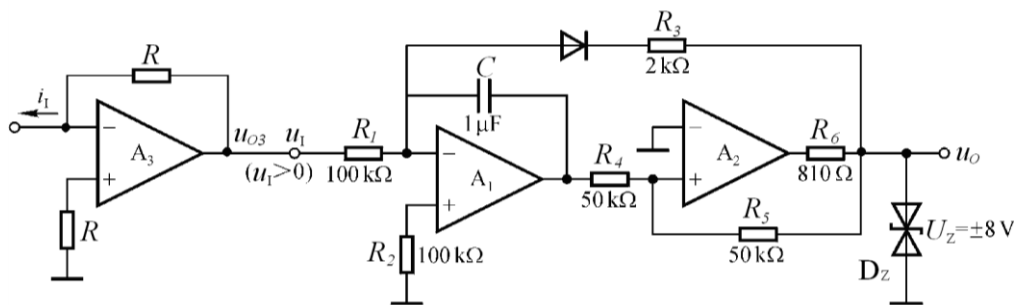


解图 P8.27

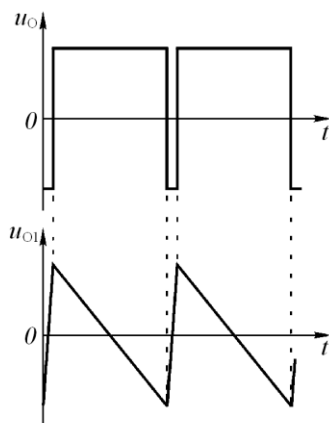
8.28 试将直流电流信号转换成频率与其幅值成正比的矩形波, 要求画出电路来, 并定性画出各部分电路的输出波形。

解: 首先将电流信号转换成电压信号, 然后将电压信号接如图 P8.25 所示压控振荡器的输入端, 即可将直流电流信号转换成频率与其幅值成正比的矩形波, 如解图 P8.28 (a) 所示, 其波形如解图(b)所示。

若输入电流与解图 P8.28 (a) 所示相反, 则应将  $u_{O3}$  经比例系数为 -1 的反比例运算电路后, 再接压控振荡器。



(a)



(b)

解图 P8.28

## 第9章 功率放大电路

### 自测题

一、选择合适的答案填入括号内。

(1) 功率放大电路的最大输出功率是在输入电压为正弦波时, 输出基本不失真情况下, 负载上可获得的最大( A )。

A. 交流功率 B. 直流功率 C. 平均功率

(2) 功率放大电路的转换效率是指( B )。

- A. 输出功率与晶体管所消耗的功率之比;  
B. 最大输出功率与电源提供的平均功率之比;  
C. 晶体管所消耗的功率与电源提供的平均功率之比。

(3) 在选择功放电路中的晶体管时, 应当特别注意的参数有( BDE )。

- A.  $\beta$  B.  $I_{CM}$  C.  $I_{CBO}$   
D.  $U_{CEO}$  E.  $P_{CM}$  F.  $f_T$

(4) 若图 T9.1 所示电路中晶体管饱和管压降的数值为  $|U_{CES}|$ , 则最大输出功率  $P_{OM} = ( C )$ 。

- A.  $\frac{(V_{CC} - U_{CES})^2}{2R_L}$  B.  $\frac{(\frac{1}{2}V_{CC} - U_{CES})^2}{R_L}$  C.  $\frac{(\frac{1}{2}V_{CC} - U_{CES})^2}{2R_L}$

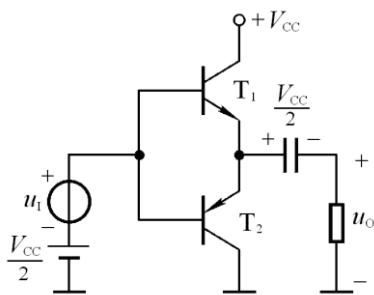


图 T9.1

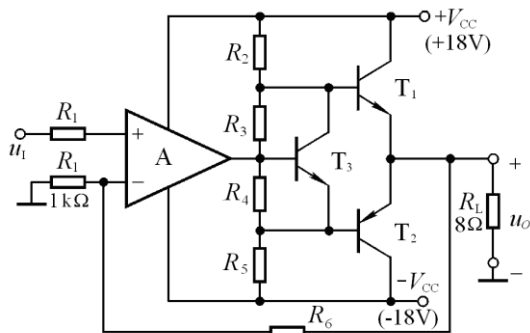


图 T9.2

二、电路如图 T9.2 所示，已知  $T_1$  和  $T_2$  的饱和管压降  $|U_{CES}| = 2\text{V}$ ，直流功耗可忽略不计。

回答下列问题：

- (1)  $R_3$ 、 $R_4$  和  $T_3$  的作用是什么？
- (2) 负载上可能获得的最大输出功率  $P_{om}$  和电路的转换效率  $\eta$  各为多少？
- (3) 设最大输入电压的有效值为  $1\text{V}$ 。为了使电路的最大不失真输出电压的峰值达到  $16\text{V}$ ，电阻  $R_6$  至少应取多少千欧？

**解：** (1) 消除交越失真。

(2) 最大输出功率和效率分别为：

$$P_{om} = \frac{(V_{CC} - U_{CES})^2}{2R_L} = 16\text{W}, \quad \eta = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{V_{CC} - U_{CES}}{V_{CC}} \approx 69.8\%$$

(3) 由题意知，电压放大倍数为：

$$A_u = 1 + \frac{R_6}{R_1} \geq \frac{U_{omax}}{\sqrt{2}U_i} = \frac{16}{\sqrt{2} \times 1} = 11.3$$

$$\therefore R_6 \geq (11.3 - 1)R_1 = 10.3\text{k}\Omega$$

## 习题

**9.1** 判断下列说法是否正确，用“√”和“×”表示判断结果。

- (1) 在功率放大电路中，输出功率越大，功放管的功耗越大。(×)
- (2) 功率放大电路的最大输出功率是指在基本不失真情况下，负载上可能获得的最大交流功率。(√)
- (3) 当 OCL 电路的最大输出功率为 1W 时，功放管的集电极最大功耗应大于 1W。(×)
- (4) 功率放大电路与电压放大电路、电流放大电路的共同点是
  - ① 都使输出电压大于输入电压；(×)
  - ② 都使输出电流大于输入电流；(×)
  - ③ 都使输出功率大于信号源提供的输入功率。(√)
- (5) 功率放大电路与电压放大电路的区别是
  - ① 前者比后者电源电压高；(×)
  - ② 前者比后者电压放大倍数数值大；(×)
  - ③ 前者比后者效率高；(√)
  - ④ 在电源电压相同的情况下，前者比后者的最大不失真输出电压大。(√)
- (6) 功率放大电路与电流放大电路的区别是
  - ① 前者比后者电流放大倍数大；(×)
  - ② 前者比后者效率高；(√)
  - ③ 在电源电压相同的情况下，前者比后者的输出功率大。(√)

**9.2** 已知电路如图 P9.2 所示， $T_1$  和  $T_2$  管的饱和管压降  $|U_{CES}| = 3V$ ， $V_{CC} = 15V$ ， $R_L = 8\Omega$ ，选择正确答案填入空内。

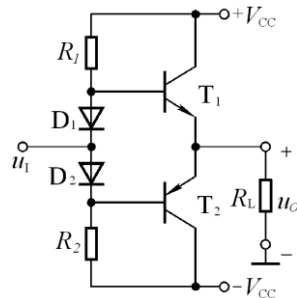


图 P9.2

- (1) 电路中  $D_1$  和  $D_2$  的作用是消除( C )。
  - A. 饱和失真 B. 截止失真 C. 交越失真
- (2) 静态时，晶体管发射极电位  $U_{EQ}$ ( B )。
  - A.  $>0$  B.  $=0$  C.  $<0$
- (3) 最大输出功率  $P_{OM}$ ( C )。
  - A.  $\approx 28W$  B.  $= 18W$  C.  $= 9W$
- (4) 当输入为正弦波时，若  $R_1$  虚焊，即开路，则输出电压( C )。
  - A. 为正弦波 B. 仅有正半波 C. 仅有负半波
- (5) 若  $D_1$  虚焊，则  $T_1$  管( A )。
  - A. 可能因功耗过大而烧坏 B. 始终饱和 C. 始终截止

**9.3** 电路如图 P9.2 所示。在出现下列故障时，分别产生什么现象？

- (1)  $R_1$  开路； (2)  $D_1$  开路； (3)  $R_2$  开路；
- (4)  $T_1$  集电极开路； (5)  $R_1$  短路； (6)  $D_1$  短路

**解：**(1)  $R_1$  开路： $T_1$  截止， $T_2$  可能因饱和而烧毁。

(2)  $D_1$  开路： $T_1$ 、 $T_2$  都可能因饱和而先后被烧毁。

(3)  $R_2$  开路： $T_2$  截止， $T_1$  可能因饱和而烧毁。

(4)  $T_1$  集电极开路： $T_1$  不工作， $u_o$  只有负半周。

(5)  $R_1$  短路： $T_1$  可能因饱和而被烧毁，负载电阻也不安全。

(6)  $D_1$  短路：会出现交越失真。

**9.4** 在图 P9.2 所示电路中，已知  $V_{CC} = 16V$ ， $R_L = 4\Omega$ ， $T_1$  和  $T_2$  管的饱和压降  $|U_{CES}| = 2V$ ，输入电压足够

大。试问：

(1)最大输出功率  $P_{om}$  和效率  $\eta$  各为多少？

(2)晶体管的最大功耗  $P_{Tmax}$  为多少？

(3)为了使输出功率达到  $P_{om}$ ，输入电压的有效值约为多少？

解：(1)最大输出功率和效率分别为

$$P_{om} = \frac{(V_{CC} - U_{CES})^2}{2R_L} = 24.5W, \quad \eta = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{V_{CC} - U_{CES}}{V_{CC}} \approx 69.8\%$$

(2)晶体管的最大功耗

$$P_{Tmax} \approx 0.2P_{om} = \frac{0.2 \times V_{CC}^2}{2R_L} = 6.4W$$

(3)输出功率为  $P_{om}$  时的输入电压有效值

$$U_i \approx U_{om} \approx \frac{V_{CC} - U_{CES}}{\sqrt{2}} \approx 9.9V$$

**9.5** 在图 P9.5 所示电路中，已知二极管的导通电压为  $U_D=0.7V$ ，晶体管导通时的  $|U_{BE}|=0.7V$ ， $T_2$  和  $T_3$  管发射极静态电位  $U_{EQ}=0V$ 。试问：(1) $T_1$ 、 $T_3$  和  $T_5$  管的基极静态电位各为多少？(2)设  $R_2=10k\Omega$ ， $R_3=100\Omega$ 。若  $T_1$  和  $T_3$  管基极的静态电流可以忽略不计，则  $T_5$  管集电极静态电流约为多少？静态时  $u_i=?$  (3)若静态时  $i_{B1}>i_{B3}$ ，则应调节哪个参数可使  $i_{B1}=i_{B3}$ ？如何调节？(4)电路中二极管的个数可以是 1、2、3、4 吗？你认为哪个最合适？为什么？

解：(1) $T_1$ 、 $T_3$  和  $T_5$  管的基极静态电位分别为  $U_{B1}=1.4V$ ； $U_{B3}=-0.7V$ ； $U_{B5}=-17.3V$

(2)静态时  $T_5$  管集电极电流：

$$I_{CQ} \approx \frac{V_{CC} - U_{B1}}{R_2} = 1.66mA;$$

输入电压： $u_i \approx u_{B5} = -17.3V$ 。

(3)若静态时  $i_{B1}>i_{B3}$ ，

则应增大  $R_2$ （调节  $R_2$  可以改变输出端的直流电压）。

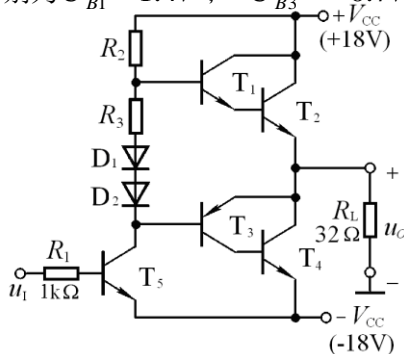


图 P9.5

(4)采用如图所示两只二极管加一个小阻值电阻合适，也可只用三只二极管。这样一方面可使输出级晶体管工作在临界导通状态，可以消除交越失真；另一方面在交流通路中， $D_1$  和  $D_2$  管之间的动态电阻又比较小，可忽略不计，从而减小交流信号的损失。

**9.6** 电路如图 P9.5 所示。在出现下列故障时，分别产生什么现象？

(1)  $R_2$  开路； (2)  $D_1$  开路； (3)  $R_2$  短路；

(4)  $T_1$  集电极开路； (5)  $R_3$  短路。

解：(1)  $R_2$  开路： $T_1$ 、 $T_2$  截止， $T_4$  可能因饱和而烧毁。

(2)  $D_1$  开路： $T_3$ 、 $T_4$  都可能因饱和而先后被烧毁。

(3)  $R_2$  短路： $T_2$  可能因饱和而被烧毁，负载电阻也不安全。

(4)  $T_1$  集电极开路： $T_1$ 、 $T_2$  构成的复合管的放大倍数  $\beta = \beta_2$ ，信号正半周放大不足。

(5)  $R_3$  短路: 会出现交越失真。

**9.7** 在图 P9.5 所示电路中, 已知  $T_2$  和  $T_4$  管的饱和压降  $|U_{CES}|=2V$ , 静态时电源电流可以忽略不计。试问:

- (1) 负载上可能获得的最大输出功率  $P_{om}$  和效率  $\eta$  各约为多少?
- (2)  $T_2$  和  $T_4$  管的最大集电极电流、最大管压降和集电极最大功耗各约为多少?

**解:** (1) 最大输出功率和效率分别为:

$$P_{om} = \frac{(V_{CC} - U_{CES})^2}{2R_L} = 4W, \quad \eta = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{V_{CC} - U_{CES}}{V_{CC}} \approx 69.8\%$$

(2) 功放管的最大集电极电流、最大管压降、最大功耗分别为:

$$I_{Cmax} = \frac{V_{CC} - U_{CES}}{R_L} = 0.5A; \quad U_{CEmax} = 2V_{CC} - U_{CES} = 34V; \quad P_{Tmax} \approx 0.2 \times \frac{V_{CC}^2}{2R_L} \approx 1W$$

**9.8** 为了稳定输出电压, 减小非线性失真, 请通过电阻  $R_f$  在图 P9.5 所示电路中引入合适的负反馈; 并估算在电压放大倍数数值约为 10 的情况下,  $R_f$  的取值。

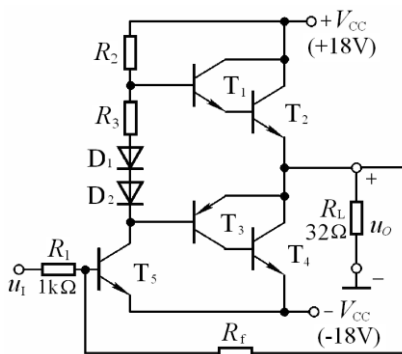
**解:** 应引入电压并联负反馈,  
由输出端经反馈电阻  $R_f$  接  $T_5$  管基极,  
如解图 P9.8 所示。

在深度负反馈情况下, 电压放大倍数

$$\dot{A}_{uf} = \frac{u_o}{u_i} \approx \frac{-i_f R_f}{i_i R_1} = -\frac{R_f}{R_1},$$

$$\therefore |\dot{A}_{uf}| \approx 10, \quad R_1 = 1k\Omega$$

$$\therefore R_f \approx 10k\Omega。$$



解图 P9.8

**9.9** 在图 P9.9 所示电路中, 已知  $V_{CC}=15V$ ,  $T_1$  和  $T_2$  管的饱和压降  $|U_{CES}|=2V$ , 输入电压足够大。求解:

- (1) 最大不失真输出电压的有效值;
- (2) 负载电阻  $R_L$  上电流的最大值;
- (3) 最大输出功率  $P_{om}$  和效率  $\eta$ 。

**解:** (1) 最大不失真输出电压的有效值

$$U_{om} = \frac{R_L}{R_L + R_4} \cdot (V_{CC} - U_{CES}) \sqrt{2} \approx 8.6V$$

(2) 负载电流的最大值

$$i_{Lmax} = \frac{V_{CC} - U_{CES}}{R_L + R_4} \approx 1.5A$$

(3) 最大输出功率和效率分别为:

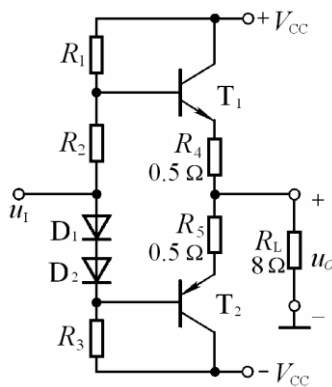


图 P9.9

$$P_{om} = \frac{U_{om}^2}{R_L} \approx 9.3 \text{ W}; \quad \eta = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{V_{CC} - U_{CES}}{V_{CC}} \cdot \left( \frac{R_L}{R_L + R_4} \right)^2 \approx 60.3\%$$

**9.10** 在图 P9.9 所示电路中,  $R_4$  和  $R_5$  可起短路保护作用。试问: 当输出因故障而短路时, 晶体管的最大集电极电流和功耗各为多少?

**解:** 当输出短路时, 功放管的最大集电极电流和功耗分别为

$$i_{Cmax} = \frac{V_{CC} - U_{CES}}{R_4} \approx 26 \text{ A}; \quad P_{Tmax} = \frac{V_{CC}^2}{\pi^2 R_4} \approx 45. \text{ W}。$$

**9.11** 在图 P9.11 所示电路中, 已知  $V_{CC}=15\text{V}$ ,  $T_1$  和  $T_2$  管的饱和压降  $|U_{CES}|=1\text{V}$ , 集成运放的最大输出电压幅值为  $\pm 13\text{V}$ , 二极管的导通电压为  $0.7\text{V}$ 。

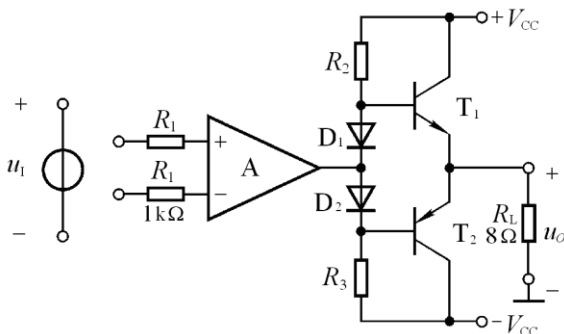


图 P9.11

- (1) 若输入电压幅值足够大, 则电路的最大输出功率为多少?
- (2) 为了提高输入电阻, 稳定输出电压, 且减小非线性失真, 应引入哪种组态的交流负反馈? 画出图来。
- (3) 若  $U_i=0.1\text{V}$  时,  $U_o=5\text{V}$ , 则反馈网络中电阻的取值约为多少?

**解:** (1) 输出电压幅值和

最大输出功率分别为  $u_{Omax} \approx 13\text{V}$ ;

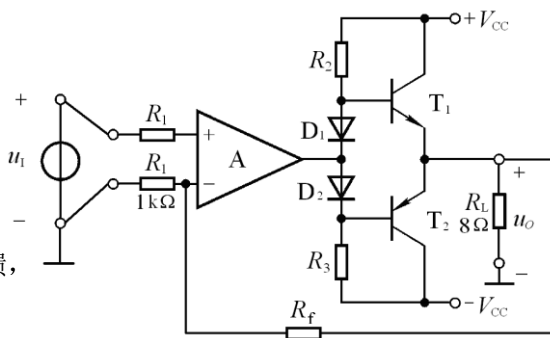
$$P_{om} = \frac{(u_{Omax}/\sqrt{2})^2}{R_L} \approx 10.6 \text{ W}。$$

(2) 应引入电压串联负反馈,

电路如解图 P9.11 所示。

(3) 在深度负反馈条件下,

电压放大倍数为



解图 P9.11

$$\dot{A}_u = 1 + \frac{R_f}{R_1} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = 5 \text{ (} \because R_1 = 1\text{k}\Omega, \therefore R_f = 49\text{k}\Omega \text{)}。$$

**9.12** OTL 电路如图 P9.12 所示。

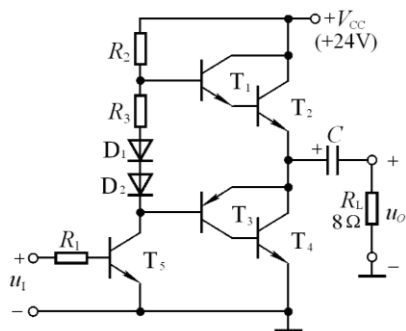


图 P9.12

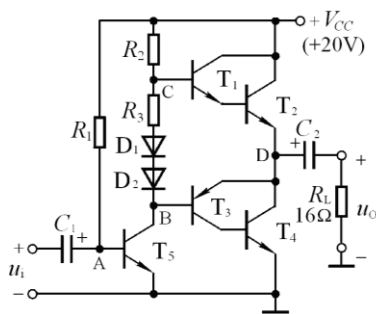


图 P9.13

(1) 为了使得最大不失真输出电压幅值最大, 静态时  $T_2$  和  $T_4$  管的发射极电位应为多少? 若不合适, 则一般应调节哪个元件参数?

(2) 若  $T_2$  和  $T_4$  管的饱和压降  $|U_{CES}| = 3V$ , 输入电压足够大, 则电路的最大输出功率  $P_{om}$  和效率  $\eta$  各为多少?

(3)  $T_2$  和  $T_4$  管的  $I_{CM}$ 、 $U_{(BR)CEO}$  和  $P_{CM}$  应如何选择?

**解:** (1) 射极电位  $U_E = V_{CC} / 2 = 12V$ ; 若不合适, 则应调节  $R_2$ 。

(2) 最大输出功率和效率分别为

$$P_{om} = \frac{(\frac{1}{2}V_{CC} - U_{CES})^2}{2R_L} \approx 5.06W; \quad \eta = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{\frac{1}{2}V_{CC} - U_{CES}}{\frac{1}{2}V_{CC}} \approx 58.9\%$$

(3)  $T_2$  和  $T_4$  管的  $I_{CM}$ 、 $U_{(BR)CEO}$  和  $P_{CM}$  的选择原则分别为

$$I_{CM} > \frac{V_{CC}}{2R_L} = 1.5A; \quad U_{(BR)CEO} > V_C = 24V; \quad P_{CM} > \frac{(V_{CC}/2)^2}{2R_L} \approx 1.82W。$$

**9.13** 已知图 P9.13 所示电路中,  $T_2$  和  $T_4$  管的饱和压降  $|U_{CES}| = 2V$ , 导通时的  $|U_{BE}| = 0.7V$ , 输入电压足够大。

(1) A、B、C、D 点的静态电位各为多少?

(2) 若管压降  $|U_{CE}| \geq 3V$ , 为使最大输出功率  $P_{om}$  不小于  $1.5W$ , 则电源电压至少应取多少?

**解:** (1) 静态电位分别为:

$$U_A = 0.7V, \quad U_B = 9.3V, \quad U_C = 11.4V, \quad U_D = 10V$$

$$(2) \quad \text{由 } P_{om} = \frac{(\frac{1}{2}V_{CC} - U_{CE})^2}{2R_L} = \frac{(\frac{1}{2}V_{CC} - 3)^2}{2 \times 16} \geq 1.5W$$

$$\text{得: } V_{CC} \geq 19.9V$$

**9.14** LM1877N -9 为 2 通道低频功率放大电路, 单电源供电, 最大不失真输出电压的峰峰值  $U_{OPP} = (V_{CC} - 6)V$ , 开环电压增益为  $70dB$ 。图 P9.14 所示为 LM1877N -9 中一个通道组成的实用电路,



电源电压为  $24V$ ,  $C_1 \sim C_3$  对交流信号可视为短路;  $R_3$  和  $C_4$  起相位补偿作用, 可以认为负载为  $8\Omega$ 。

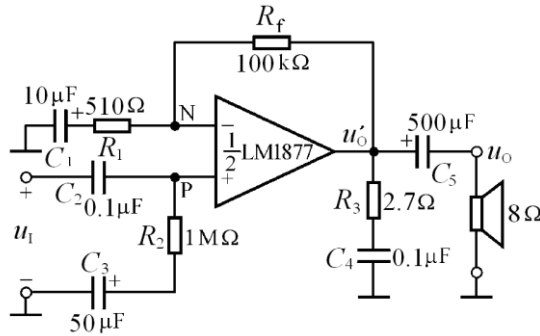


图 P9.14

- (1) 图示电路为那种功率放大电路?
- (2) 静态时  $u_P$ 、 $u_N$ 、 $u'_O$ 、 $u_O$  各为多少?
- (3) 设输入电压足够大, 电路的最大输出功率  $P_{om}$  和效率  $\eta$  各为多少?

解: (1) 图示电路是 OTL 功率放大电路。

$$(2) \text{ 静态时: } u'_O = u_P = u_N = \frac{V_{CC}}{2} = 12V; \quad u_O = 0V。$$

(3) 最大输出功率和效率分别为:

$$P_{om} = \frac{\left(\frac{V_{CC}-6}{2}\right)^2}{2R_L} \approx 5.06W; \quad \eta = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{V_{CC}-6}{V_{CC}} \approx 58.9\%。$$

9.15 电路如图 9.4.6 所示, 回答下列问题:

$$(1) \dot{A}_u = \frac{\dot{U}_{o1}}{\dot{U}_i} \approx ?$$

(2) 若  $V_{CC}=15V$  时最大不失真输出电压的峰-峰值为  $27V$ , 则电路的最大输出功率  $P_{om}$  和效率  $\eta$  各为多少?

(3) 为了使负载获得最大输出功率, 输入电压的有效值约为多少?

$$\text{解: (1) 电压放大倍数: } \dot{A}_u = 1 + \frac{R_f}{R_1} = 1 + \frac{20}{0.68} \approx 30.4$$

$$(2) \text{ 最大输出功率为: } P_{om} = \frac{\left(\frac{U_{OPP}}{2\sqrt{2}}\right)^2}{R_L} \approx 11.4W$$

$$\text{效率为: } \eta = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{U_{OPP}}{2V_{CC}} \approx 70.6\%$$

$$(3) \text{ 输入电压有效值: } U_i = \frac{U_{OPP}}{2\sqrt{2}|\dot{A}_u|} \approx 314mV。$$

**9.16** TDA1556 为 2 通道 BTL 电路, 图 P9.16 所示为 TDA1556 中一个通道组成的实用电路。已知  $V_{CC}=15V$ , 放大器的最大输出电压幅值为  $13V$ 。

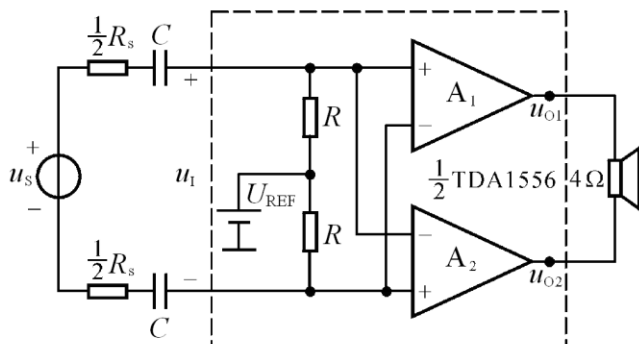


图 P9.16

(1) 为了使负载上得到的最大不失真输出电压幅值最大, 基准电压  $U_{REF}$  应为多少伏? 静态时  $u_{o1}$  和  $u_{o2}$  各为多少伏?

(2) 若  $U_i$  足够大, 则电路的最大输出功率  $P_{om}$  和效率  $\eta$  各为多少?

(3) 若电路的电压放大倍数为 20, 则为了使负载获得最大输出功率, 输入电压的有效值约为多少?

**解:** (1) 基准电压:  $U_{REF}=V_{CC}/2=7.5V$ ; 静态时  $u_{o1}=u_{o2}=7.5V$

(2) 最大输出功率和效率分别为:

$$P_{om} = \frac{U_{omax}^2}{2R_L} = \frac{13^2}{2 \times 4} \approx 21W; \quad \eta = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{U_{omax}}{V_{CC}} \approx 68\%$$

(3) 输入电压有效值:  $U_i = \frac{U_{omax}}{\sqrt{2}A_u} \approx 0.46V$

**9.17** TDA1556 为 2 通道 BTL 电路, 图 P9.17 所示为 TDA1556 中一个通道组成的实用电路。已知  $V_{CC}=15V$ , 放大器的最大输出电压幅值为  $13V$ 。

(1) 输入信号分别作用于  $A_1$ 、 $A_2$  的同相输入端还是反相输入端? 若输入电压为  $\dot{U}_i$ , 则  $A_1$ 、 $A_2$  的输入各为多少?

(2) 为了使负载上得到的最大不失真输出电压幅值最大, 基准电压  $U_{REF}$  应为多少伏? 静态时  $u_{o1}$  和  $u_{o2}$  各为多少伏?

(3) 若  $\dot{U}_i$  足够大, 则电路的最大输出功率  $P_{om}$  和效率  $\eta$  各为多少?

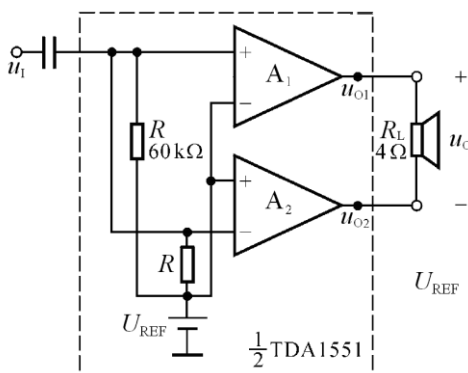


图 P9.17

**解:** (1) 输入信号分别作用于  $A_1$  的同相端、 $A_2$  的反相端, 都为  $\dot{U}_i$ 。

(2) 同题 9.16(1)。

(3) 同题 9.16(2)。

**9.18** 已知型号为 TDA1521、LM1877 和 TDA1556 的电路形式和电源电压范围如表所示, 它们的功

放管的最小管压降 $|U_{CEmin}|$ 均为  $3V$ 。

型号	TDA1521	LM1877	TDA1556
电路形式	OCL	OTL	BTL
电源电压	$\pm 7.5 \sim \pm 20V$	$6.0 \sim 24V$	$6.0 \sim 18V$

(1)设在负载电阻均相同的情况下,三种器件的最大输出功率均相同。已知 OCL 电路的电源电压 $\pm V_{CC} = \pm 10V$ ,试问 OTL 电路和 BTL 电路的电源电压分别应取多少伏?

(2)设仅有一种电源,其值为  $15V$ ;负载电阻为  $32\Omega$ 。问三种器件的最大输出功率各为多少?

**解:** (1) OTL 电路应取  $V_{CC}=20V$ , BTL 电路应取  $V_{CC}=13V$ 。

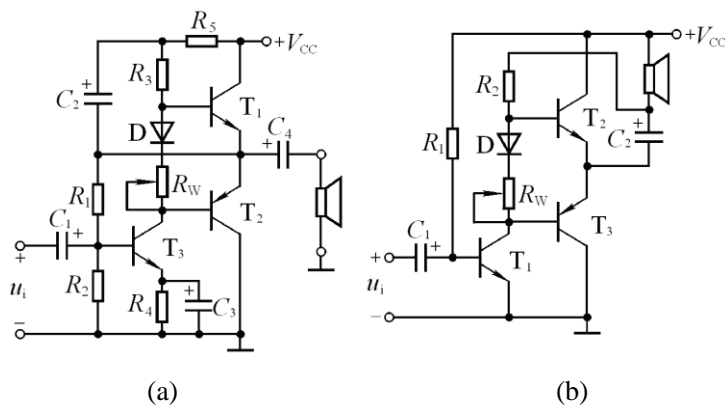
(2) OTL、OCL 和 BTL 电路的最大输出功率分别为:

$$P_{om(OTL)} = \frac{\left(\frac{V_{CC}}{2} - |U_{CEmin}|\right)^2}{2R_L} \approx 0.316W$$

$$P_{om(OCL)} = \frac{(V_{CC} - |U_{CEmin}|)^2}{2R_L} \approx 2.25W$$

$$P_{om(BTL)} = \frac{(V_{CC} - 2|U_{CEmin}|)^2}{2R_L} \approx 1.27W$$

**补充 9.1** 补图 P9.1 所示为两个带自举的功放电路。试分别说明输入信号正半周和负半周时功放管输出回路电流的通路,并指出哪些元件起自举作用。



**补图 P9.1**

**解:** 在图(a)所示电路中,在信号的正半周,经共射电路反相,输出级的输入为负半周,因而  $T_2$  导通,电流从  $C_4$  的正端经  $T_2$ 、地、扬声器至  $C_4$  的负端;在信号的负半周,经共射电路反相,输出级的输入为正半周,因而  $T_1$  导通,电流从  $+V_{CC}$  经  $T_1$ 、 $C_4$ 、扬声器至地。 $C_2$ 、 $R_3$  起自举作用。

在图(b)所示电路中,在信号的正半周,经共射电路反相,输出级的输入为负半周,因而  $T_3$  导通,电流从  $+V_{CC}$  经扬声器、 $C_2$ 、 $T_3$  至地;在信号的负半周,经共射电路反相,输出级的输入为正半周,因而  $T_2$  导通,电流从  $C_2$  的正端经扬声器、 $T_2$  至  $C_2$  的负端。 $C_2$ 、 $R_2$  起自举作用。

## 第 10 章 直流电源

### 自测题

一.判断下列说法是否正确,用“√”和“×”表示判断结果填入括号内。

- (1)直流电源是一种将正弦信号转换为直流信号的波形变换电路。( × )
- (2)直流电源是一种能量转换电路,它将交流能量转换为直流能量。( √ )
- (3)在变压器副边电压和负载电阻相同的情况下,桥式整流电路的输出电流是半波整流电路输出电流的 2 倍。( √ ); 因此,它们的整流管的平均电流比值为 2:1。( × )
- (4)若  $U_2$  为电源变压器副边电压的有效值,则半波整流电容滤波电路和全波整流电容滤波电路在空载时的输出电压均为  $\sqrt{2}U_2$ 。( √ )
- (5)当输入电压  $U_1$  和负载电流  $I_L$  变化时,稳压电路的输出电压是绝对不变的。( × )
- (6)一般情况下,开关型稳压电路比线性稳压电路效率高。( √ )

二、在图 10.3.1(a)中,已知变压器副边电压有效值  $U_2$  为 10V,  $R_L C \geq \frac{3T}{2}$  ( $T$  为电网电压的周期)。测得

输出电压平均值  $U_{O(AV)}$  可能的数值为

- A. 14V      B. 12V      C. 9V      D. 4.5V

选择合适答案填入空内。

- (1)正常情况  $U_{O(AV)} \approx$  ( B );
- (2)电容虚焊时  $U_{O(AV)} \approx$  ( C );
- (3)负载电阻开路时  $U_{O(AV)} \approx$  ( A );
- (4)一只整流管和滤波电容同时开路,  $U_{O(AV)} \approx$  ( D )。

三、填空: 在图 T10.3 所示电路中,调整管为( $T_1$ ), 采样电路由( $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ )组成, 基准电压电路由( $R$ 、 $D_Z$ )组成, 比较放大电路由( $T_2$ 、 $R_c$ )组成, 保护电路由( $R_0$ 、 $T_3$ )组成; 输出电压最小值的表达式为( $\frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_3}(U_Z + U_{BE2})$ ), 最大值的表达式

( $\frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_2 + R_3}(U_Z + U_{BE2})$ )。

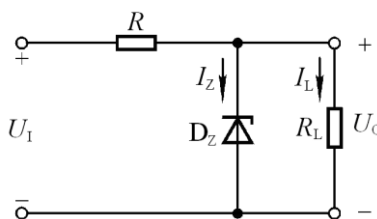
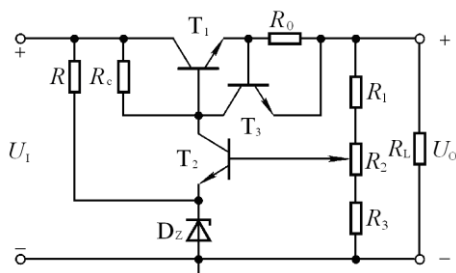


图 T10.3

图 T10.4

四、在图 T10.4 所示稳压电路中, 已知稳压管的稳定电压  $U_Z$  为 6V, 最小稳定电流  $I_{Zmin}$  为 5mA, 最大稳定电流  $I_{Zmax}$  为 40mA; 输入电压  $U_i$  为 15V, 波动范围为  $\pm 10\%$ ; 限流电阻  $R$  为  $200\Omega$ 。(1)电路是否能空载? 为什么? (2)作为稳压电路的指标, 负载电流  $I_L$  的范围为多少?

解: (1)由于空载时稳压管流过的最大电流:

$$I_{DZmax} = I_{Rmax} = \frac{U_{Imax} - U_Z}{R} = 52.5mA > I_{Zmax} = 40mA$$

所以电路不能空载。

(2)根据  $I_{DZmin} = \frac{U_{Imin} - U_Z}{R} - I_{Lmax}$ , 负载电流的最大值

$$I_{Lmax} = \frac{U_{Imin} - U_Z}{R} - I_{DZmin} = 32.5mA$$

根据  $I_{DZmax} = \frac{U_{Imax} - U_Z}{R} - I_{Lmin}$ , 负载电流的最小值

$$I_{Lmin} = \frac{U_{Imax} - U_Z}{R} - I_{DZmax} = 12.5mA$$

所以, 负载电流的范围为 12.5 ~ 32.5mA。

五、在图 10.5.24 所示电路中, 已知输出电压的最大值  $U_{omax}$  为 25V,  $R_1=240\Omega$ ; W117 的输出端和调整端间的电压  $U_R=1.25V$ , 允许加在输入端和输出端的电压 3~40V。试求解: (1)输出电压的最小值  $U_{omin}$ ; (2)  $R_2$  的取值; (3)若  $U_1$  的波动范围为  $\pm 10\%$ , 为保证输出电压的最大值  $U_{omax}$  为 25V,  $U_1$  至少应取多少伏? 为保证 W117 安全工作,  $U_1$  的最大值为多少伏?

解: (1)输出电压的最小值  $U_{omin}=1.25V$

(2)因为  $U_{omax} = (1 + \frac{R_2}{R_1}) \times 1.25V = 25V$ ,  $R_1=240\Omega$

所以,  $R_2=4.56k\Omega$ 。

(3)输入电压的取值范围为:

$$U_{Imin} \approx \frac{U_{omax} + U_{12min}}{0.9} \approx 31.1V; \quad U_{Imax} \approx \frac{U_{omin} + U_{12max}}{1.1} \approx 37.5V。$$

六、电路如图 T10.6 所示。合理连线, 构成 5V 直流电源。

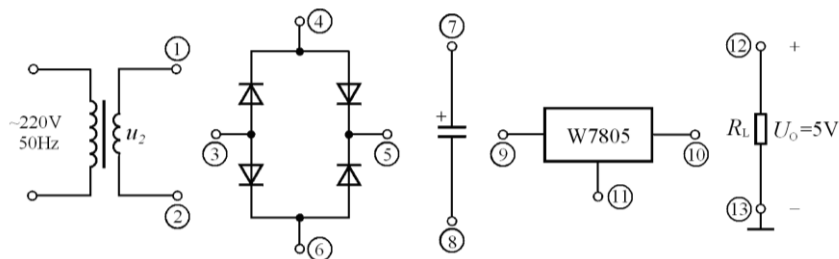
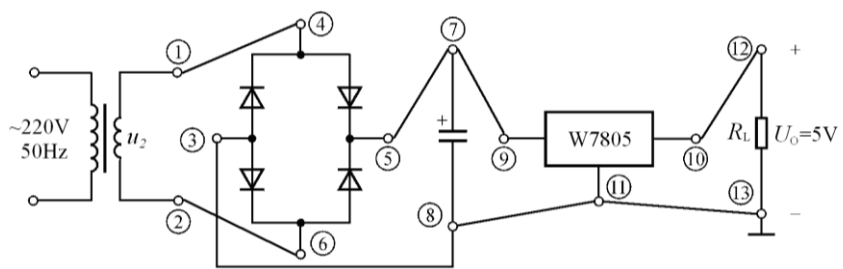


图 T10.6

解: 1 接 4, 2 接 6; 5 接 7、9; 3 接 8、11、13; 10 接 12。如解图 T10.6 所示。



解图 T10.6

## 习题

**10.1** 判断下列说法是否正确，用“√”和“×”表示判断结果。

- (1) 整流电路可将正弦电压变为脉动的直流电压。( √ )
- (2) 电容滤波电路适用于小负载电流，而电感滤波电路适用于大负载电流。( √ )
- (3) 在单相桥式整流电容滤波电路中，若有一只整流管断开，输出电压平均值变为原来的一半。( × )

**10.2** 判断下列说法是否正确，用“√”和“×”表示判断结果。

- (1) 对于理想的稳压电路， $\Delta U_O / \Delta U_I = 0$ ， $R_O = 0$ 。( √ )
- (2) 线性直流电源中的调整管工作在放大状态，开关型直流电源中的调整管工作在开关状态。( √ )
- (3) 因为串联型稳压电路中引入了深度负反馈，因此也可能产生自激振荡。( × )
- (4) 在稳压管稳压电路中，稳压管的最大稳定电流必须大于最大负载电流。( × )；而且，其最大稳定电流与最小稳定电流之差应大于负载电流的变化范围。( √ )

**10.3** 选择合适答案填入空内。

- (1) 整流的目的是( A )。  
A. 将交流变为直流    B. 将高频变为低频    C. 将正弦波变为方波
- (2) 在单相桥式整流电路中，若有一只整流管接反，则( C )  
A. 输出电压约为  $2U_D$     B. 变为半波整流    C. 整流管将因电流过大而烧毁
- (3) 直流稳压电源中滤波电路的作用是( C )  
A. 将交流变为直流    B. 将高频变为低频    C. 将交、直流混合量中的交流成分滤掉
- (4) 滤波电路应选用( B )。  
A. 高通滤波电路    B. 低通滤波电路    C. 带通滤波电路

**10.4** 选择合适答案填入空内。

- (1) 若要组成输出电压可调、最大输出电流为 3A 的直流稳压电源，则应采用( D )。  
A. 电容滤波稳压管稳压电路    B. 电感滤波稳压管稳压电路  
C. 电容滤波串联型稳压电路    D. 电感滤波串联型稳压电路
- (2) 串联型稳压电路中的放大环节所放大的对象是( C )。  
A. 基准电压    B. 取样电压    C. 基准电压与取样电压之差
- (3) 开关型直流电源比线性直流电源效率高的原因是( A )。  
A. 调整管工作在开关状态    B. 输出端有 LC 滤波电路    C. 可以不用电源变压器
- (4) 在脉宽调制式串联型开关稳压电路中，为使输出电压增大，对调整管基极控制信号的要求是( A )。  
A. 周期不变，占空比增大    B. 频率增大，占空比不变  
C. 在一个周期内，高电平不变，周期增大

**10.5** 在图 10.2.5(a) 所示电路中，已知输出电压平均值  $U_{O(AV)} = 15V$ ，负载电流平均值  $I_{L(AV)} = 100mA$ 。

(1) 变压器副边电压有效值  $U_2 \approx ?$

(2) 设电网电压波动范围为  $\pm 10\%$ 。在选择二极管的参数时，其最大整流平均电流  $I_F$  和最高反向电压  $U_R$  的下限值约为多少？

**解：**(1) 输出电压平均值  $U_{O(AV)} \approx 0.9U_2$ ，因此变压器副边电压有效值：

$$U_2 \approx \frac{U_{O(AV)}}{0.9} \approx 16.7V$$

(2)考虑到电网电压波动范围为 $\pm 10\%$ ，整流二极管的参数为

$$I_F > 1.1 \times \frac{I_{L(AV)}}{2} = 55mA; \quad U_R > 1.1\sqrt{2}U_2 \approx 26V$$

**10.6** 电路如图 P10.6 所示，变压器副边电压有效值为  $2U_2$ 。

- (1)画出  $u_2$ 、 $u_{D1}$  和  $u_o$  的波形；
- (2)求出输出电压平均值  $U_{O(AV)}$  和输出电流平均值  $I_{L(AV)}$  的表达式；
- (3)二极管的平均电流  $I_{D(AV)}$  和所承受的最大反向电压  $U_{Rmax}$  的表达式。

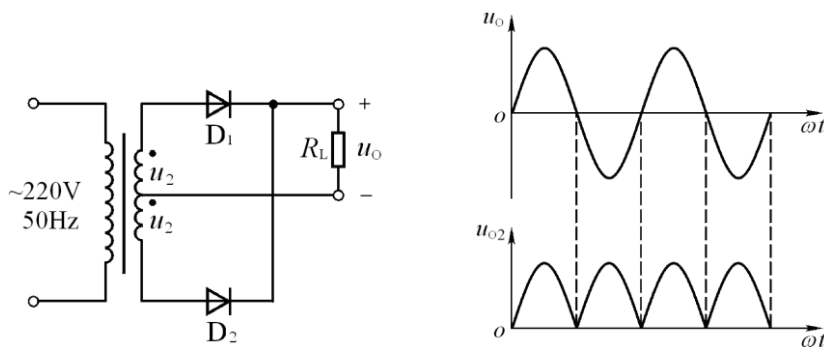


图 P10.6

解图 P10.6

**解：**(1)全波整流电路，波形如解图 P10.6 所示。

(2)输出电压平均值  $U_{O(AV)}$  和输出电流平均值  $I_{L(AV)}$  为

$$U_{O(AV)} \approx 0.9U_2; \quad I_{L(AV)} \approx \frac{0.9U_2}{R_L}$$

(3)二极管的平均电流  $I_{D(AV)}$  和所承受的最大反向电压  $U_R$  为

$$I_{D(AV)} \approx \frac{0.45U_2}{R_L}; \quad U_R = 2\sqrt{2}U_2$$

**10.7** 电路如图 P10.7 所示，变压器副边电压有效值  $U_{21} = 50V$ ， $U_{22} = 20V$ 。

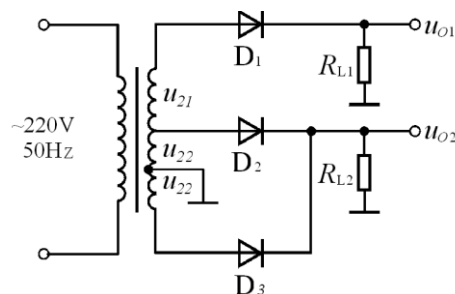
试问：(1)输出电压平均值  $U_{O1(AV)}$  和  $U_{O2(AV)}$  各为多少？

(2)各二极管承受的最大反向电压为多少？

**解：**(1)两路输出电压分别为：

$$U_{O1} \approx 0.45(U_{21} + U_{22}) = 31.5V$$

$$U_{O2} \approx 0.9U_{22} = 18V$$





(2)  $D_1$  的最大反向电压:

$$U_R > \sqrt{2}(U_{21} + U_{22}) \approx 99V$$

图 P10.7

$$D_2、D_3 \text{ 的最大反向电压: } U_R > 2\sqrt{2}U_{22} \approx 57V$$

**10.8** 电路如图 10.8 所示, (1)分别标出  $u_{o1}$  和  $u_{o2}$  对地的极性; (2) $u_{o1}$ 、 $u_{o2}$  分别是半波整流还是全波整流? (3) $U_{21} = U_{22} = 20V$  时,  $U_{O1(AV)}$  和  $U_{O2(AV)}$  各为多少? (4)当  $U_{21} = 18V$ ,  $U_{22} = 22V$  时, 画出  $u_{o1}$ 、 $u_{o2}$  的波形; 并求出  $U_{O1(AV)}$  和  $U_{O2(AV)}$  各为多少?

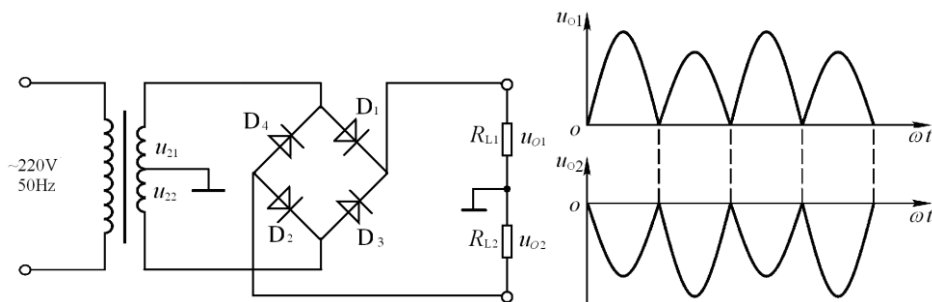


图 10.8

解图 P10.8

**解:** (1)均为上“+”、下“-”。

(2)均为全波整流。

$$(3) U_{O1(AV)} \text{ 和 } U_{O2(AV)} \text{ 为: } U_{O1(AV)} = -U_{O2(AV)} \approx 0.9U_{21} = 18V$$

(4) $u_{o1}$ 、 $u_{o2}$  的波形如解图 P10.8 所示。它们的平均值为

$$U_{O1(AV)} = -U_{O2(AV)} \approx 0.45U_{21} + 0.45U_{22} = 18V$$

**10.9** 分别判断图 P10.9 所示各电路能否作为滤波电路, 简述理由。

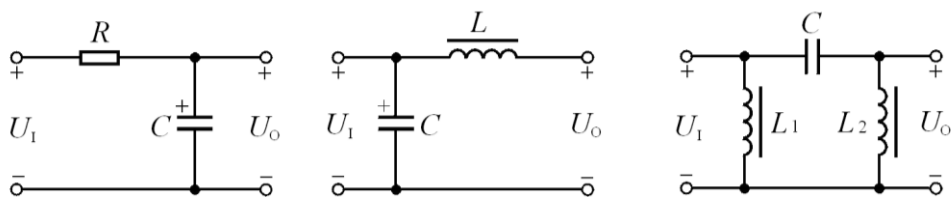


图 P10.9

**解:** 图(a)、(b)所示电路可用于滤波;

图(c)所示电路不能用于滤波。因为电感对直流分量的电抗很小、对交流分量的电抗很大, 所以在滤波电路中应将电感串联在整流电路的输出和负载之间。因为电容对直流分量的电抗很大、对交流分量的电抗很小, 所以在滤波电路中应将电容并联在整流电路的输出或负载上。

**10.10** 试在图 P10.10 所示电路中, 标出各电容两端电压的极性和数值, 并分析负载电阻上能够获得几倍压的输出。

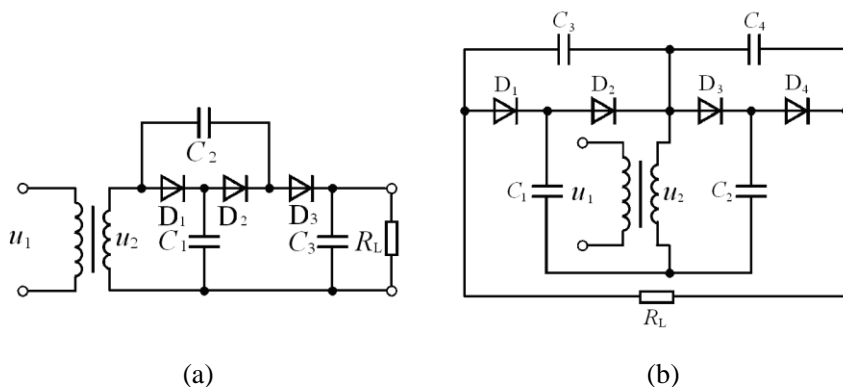


图 P 10.10

**解:** 在图(a)所示电路中,  $C_1$  上电压极性为上 “+” 下 “-”, 数值为一倍压;  $C_2$  上电压极性为右 “+” 左 “-”, 数值为二倍压;  $C_3$  上电压极性为上 “+” 下 “-”, 数值为三倍压。负载电阻上为三倍压。

在图(b)所示电路中,  $C_1$  上电压极性为上 “-” 下 “+”, 数值为一倍压;  $C_2$  上电压极性为上 “+” 下 “-”, 数值为一倍压;  $C_3$ 、 $C_4$  上电压极性均为右 “+” 左 “-”, 数值均为二倍压。负载电阻上为四倍压。

**10.11** 电路如图 T10.4 所示, 已知稳压管的稳定电压为  $6V$ , 最小稳定电流为  $5mA$ , 允许耗散功率为  $240mW$ , 动态电阻小于  $15\Omega$ 。试问:

- (1) 当输入电压为  $20 \sim 24V$ 、 $R_L$  为  $200 \sim 600\Omega$  时, 限流电阻  $R$  的选取范围是多少?
- (2) 若  $R = 390\Omega$ , 则电路的稳压系数  $S_r$  为多少?

**解:** (1) 因为  $I_{Zmax} = P_{ZM} / U_Z = 40mA$ ,  $I_L = U_Z / R_L = 10 \sim 30mA$ ,

所以  $R$  的取值范围为:

$$R_{max} = \frac{U_{Imax} - U_Z}{I_Z + I_{Lmax}} = 400\Omega \quad ; \quad R_{min} = \frac{U_{Imax} - U_Z}{I_{Zmax} + I_{Lmin}} = 360\Omega$$

$$(2) \text{稳压系数为: } S_r \approx \frac{r_Z}{R} \cdot \frac{U_I}{U_Z} \approx 0.154$$

**10.12** 电路如图 P10.12 所示, 已知稳压管的稳定电压为  $6V$ , 最小稳定电流为  $5mA$ , 允许耗散功率为  $240mW$ , 输入电压为  $20 \sim 24V$ ,  $R_1 = 360\Omega$ 。试问:

- (1) 为保证空载时稳压管能安全工作,  $R_2$  应选多大?
- (2) 当  $R_2$  按上面原则选定后, 负载电阻允许的变化范围是多少?

**解:**  $R_1$  中的电流和稳压管中的最大电流为:

$$I_{R_1} = \frac{U_I - U_Z}{R_1} \approx 39 \sim 50mA;$$

$$I_{Zmax} = \frac{P_{ZM}}{U_Z} = 40mA$$

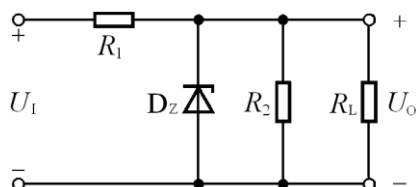


图 P10.12

$$(1) \text{ 为保证空载时稳压管能够安全工作: } R_2 = \frac{U_Z}{I_{R_1max} - I_{Zmax}} = 600\Omega$$

(2) 负载电流的最大值:  $I_{L\max} = I_{R_1\min} - I_{R_2} - I_{Z\min} = 24mA$

(3) 负载电阻的变化范围:  $R_{L\min} = \frac{U_Z}{I_{L\max}} = 250\Omega$ ,  $R_{L\max} = \infty$

**10.13** 电路如图 T10.3 所示, 稳压管的稳定电压  $U_Z = 4.3V$ , 晶体管的  $U_{BE} = 0.7V$ ,  $R_1 = R_2 = R_3 = 300\Omega$ ,  $R_o = 5\Omega$ 。试估算:

(1) 输出电压的可调范围;

(2) 调整管发射极允许的最大电流;

(3) 若  $U_I = 25V$ , 波动范围为  $\pm 10\%$ , 则调整管的最大功耗为多少。

**解:** (1) 基准电压  $U_R = U_Z + U_{BE} = 5V$ , 输出电压的可调范围:

$$U_O = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_2 + R_3} \cdot U_Z \sim \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_3} \cdot U_Z = 7.5V \sim 15V;$$

(2) 调整管发射极最大电流:  $I_{E\max} = U_{BE} / R_o \approx 140mA$ ;

(3) 调整管的最大管压降和最大功耗分别为:

$$U_{CE\max} = U_{I\max} - U_{O\min} = 20V$$

$$P_{T\max} \approx I_{E\max} \cdot U_{CE\max} = 2.8W$$

**10.14** 电路如图 P10.14 所示, 已知稳压管的稳定电压  $U_Z = 6V$ , 晶体管的  $U_{BE} = 0.7V$ ,  $R_1 = R_2 = R_3 = 300\Omega$ ,  $U_I = 24V$ 。判断出现下列现象时, 分别因为电路出现什么故障 (即哪个元件开路或短路)。

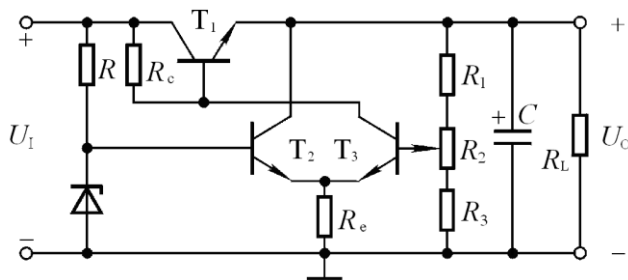


图 P10.14

(1)  $U_O \approx 24V$ ; (2)  $U_O \approx 23.3V$ ; (3)  $U_O \approx 12V$  且不可调;

(4)  $U_O \approx 6V$  且不可调;

(5)  $U_O$  可调范围变为  $6 \sim 12V$ 。

**解:** (1)  $T_1$  的 c、e 短路;

(2)  $R_c$  短路或  $T_1$  集电结击穿 (3)  $R_2$  短路;

(4)  $T_2$  的 b、c 短路;

(5)  $R_1$  短路。

**10.15** 直流稳压电源如图 P10.15 所示。(1)说明电路的整流电路、滤波电路、调整管、基准电压电路、比较放大电路、取样电路等部分各由哪些元件组成。(2)标出集成运放的同相输入端和反相输入端。(3)写出输出电压的表达式。

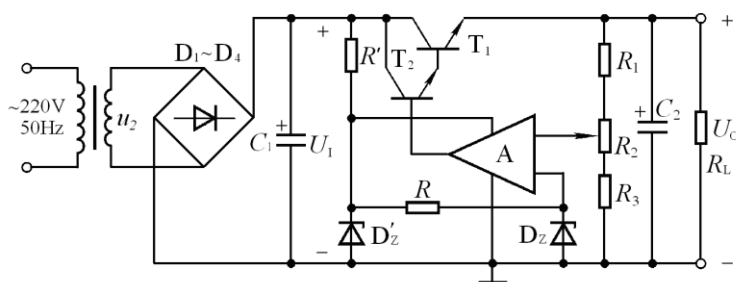


图 P 10.15

解: (1)整流电路:  $D_1 \sim D_4$ ; 滤波电路:  $C_1$ ; 调整管:  $T_1$ 、 $T_2$ ;  
基准电压电路:  $R'$ 、 $D'_z$ 、 $R$ 、 $D_z$ ; 比较放大电路:  $A$ ; 取样电路:  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 。

(2)为了使电路引入负反馈,集成运放的输入端上为“-”下为“+”。

(3)输出电压的表达式为:  $\frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_2 + R_3} \cdot U_z \leq U_o \leq \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_3} \cdot U_z$

10.16 电路如图 P10.16 所示, 设  $I'_I \approx I'_O = 1.5A$ , 晶体管 T 的  $U_{BE} \approx U_D$ ,

$R_1 = 1\Omega$ ,  $R_2 = 2\Omega$ ,  $I_D \gg I_B$ 。求解负载电流  $I_L$  与  $I'_O$  的关系式。

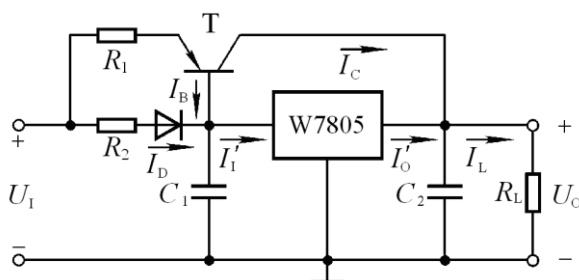


图 P10.16

解: 因为  $U_{BE} \approx U_D$ ,  $I_E R_1 \approx I_D R_2 \approx I'_I R_2 \approx I'_O R_2$ ,  $I_C \approx I_E$ , 所以

$$I_C \approx \frac{R_2}{R_1} I'_O, \quad I_L \approx (1 + \frac{R_2}{R_1}) \cdot I'_O = 4.5A。$$

10.17 在图 P10.17 所示电路中,  $R_1 = 240\Omega$ ,  $R_2 = 3k\Omega$ ; W117 输入端和输出端电压允许范围为 3~40V,

输出端和调整端之间的电压  $U_R$  为 1.25V。试求解:

(1)输出电压的调节范围; (2)输入电压允许的范围。

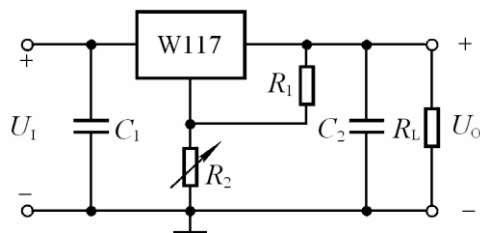


图 P10.17

解: (1)输出电压的调节范围:  $U_o \approx (1 + \frac{R_2}{R_1}) U_{REF} = 1.25 \sim 16.9V$

(2)输入电压取值范围:  $U_{\text{imin}} = U_{\text{Omax}} + U_{12\text{min}} \approx 20\text{V}$

$$U_{\text{Imax}} = U_{\text{Omin}} + U_{12\text{max}} \approx 41.25\text{V}$$

**10.18** 试分别求出图 P10.18 所示各电路输出电压的表达式。

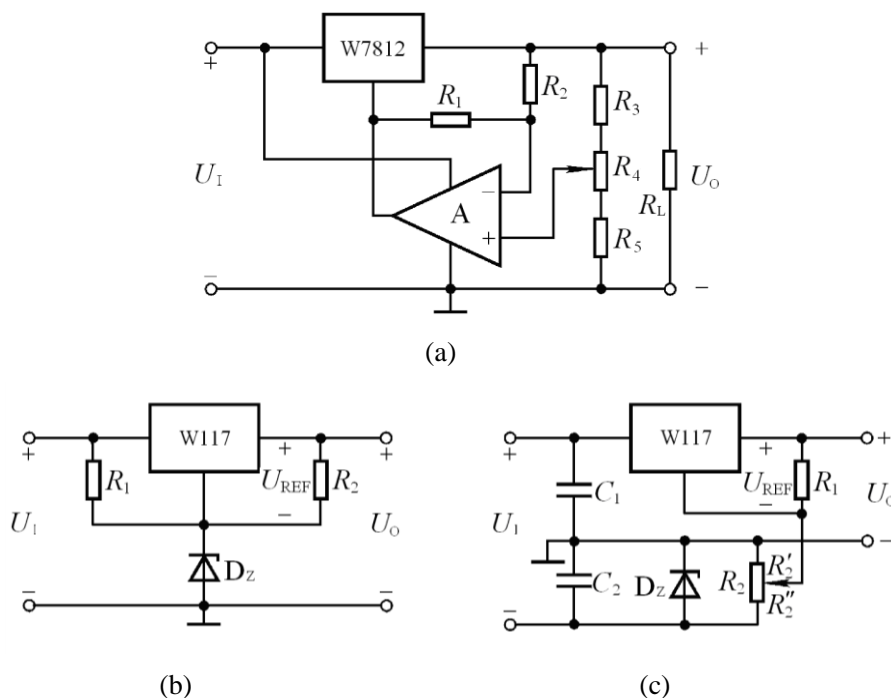


图 P10.18

**解:** 在图(a)所示电路中, W7812 的输出为  $U_{\text{REF}} = 12\text{V}$ , 由于流过  $R_1$ 、 $R_2$  的电流近似相等, 即

$$I = \frac{U_{\text{REF}}}{R_1 + R_2}, \text{ 所以基准电压:}$$

$$U_R = U_{N1} = U_O - IR_2 = U_O - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_{\text{REF}}.$$

$$\text{而 } U_P = \frac{R_{4\text{下}} + R_5}{R_3 + R_4 + R_5} U_O = U_N = U_O - \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{\text{REF}},$$

$$\text{即 } U_O = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \frac{R_3 + R_4 + R_5}{R_3 + R_{4\text{上}}} U_{\text{REF}}$$

$$\text{或 } \frac{R_2}{R_1 + R_2} \frac{R_3 + R_4 + R_5}{R_3 + R_4} U_{\text{REF}} \leq U_O \leq \frac{R_2}{R_1 + R_2} \frac{R_3 + R_4 + R_5}{R_3} U_{\text{REF}}$$

在图(b)中, 输出电压的表达式:  $U_O = U_Z + U_{\text{REF}} = (U_Z + 1.25)\text{V}$

在图(c)中, 输出电压的表达式:  $U_O = U_{\text{REF}} - \frac{R'_2}{R_2} \cdot U_Z = U_{\text{REF}} \sim (U_{\text{REF}} - U_Z)$

**10.19** 两个恒流源电路分别如图 P10.19(a)、(b)所示。(1)求解各电路负载电流的表达式；(2)设输入电压为 20V，晶体管饱和压降为 3V，b-e 间电压数值  $|U_{BE}| = 0.7V$ ，W7805 输入端和输出端间的电压最小值为 3V，稳压管的稳定电压  $U_Z = 5V$ ， $R_1 = R = 50\Omega$ 。分别求出两电路负载电阻的最大值。

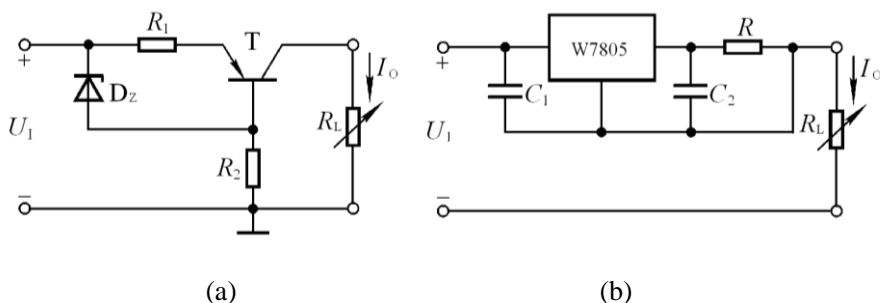


图 P10.19

**解：**(1)设图 10.19 (b)中 W7805 的输出电压为  $U'_O$ 。图示两个电路输出电流的表达式分别为：(a)

$$I_O = \frac{U_Z - U_{EB}}{R_1}, \quad (b) \quad I_O = \frac{U'_O}{R}$$

(2)两个电路输出电压的最大值、输出电流和负载电阻的最大值分别为

$$(a) \quad U_{O_{\max}} = U_I - (U_Z - U_{EB}) - U_{CES} = 12.7V ;$$

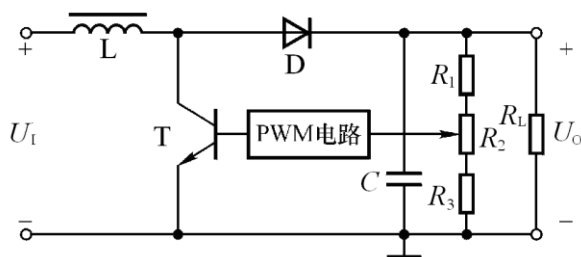
$$I_O = 86mA ; \quad R_{L_{\max}} = \frac{U_{O_{\max}}}{I_O} \approx 148\Omega$$

$$(b) \quad U_{O_{\max}} = U_I - U_{12} = 17V ;$$

$$I_O = 100mA ; \quad R_{L_{\max}} = \frac{U_{O_{\max}}}{I_O} \approx 170\Omega$$

**10.20** 在图 10.6.5 所示电路中，若需要输出电压有一定的调节范围，则应如何改进电路，请画出电路来。

**解：**改进电路如解图 10.20 所示。值得注意的是通常开关型稳压电源输出电压的可调范围很小，故  $R_2$  的取值较  $R_1$ 、 $R_3$  要小。



解图 10.20