

第一章 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。()

解：(1) √ (2) × (3) √ (4) × (5) √ (6) ×

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. 变窄 B. 基本不变 C. 变宽

(2) 设二极管的端电压为 U ，则二极管的电流方程是_____。

A. $I_S e^U$ B. $I_S e^{U/U_T}$ C. $I_S (e^{U/U_T} - 1)$

(3) 稳压管的稳压区是其工作在_____。

A. 正向导通 B. 反向截止 C. 反向击穿

(4) 当晶体管工作在放大区时，发射结电压和集电结电压应为_____。

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

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

A. 结型管 B. 增强型 MOS 管 C. 耗尽型 MOS 管

解：(1) A (2) C (3) C (4) B (5) A C

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 $U_D=0.7V$ 。

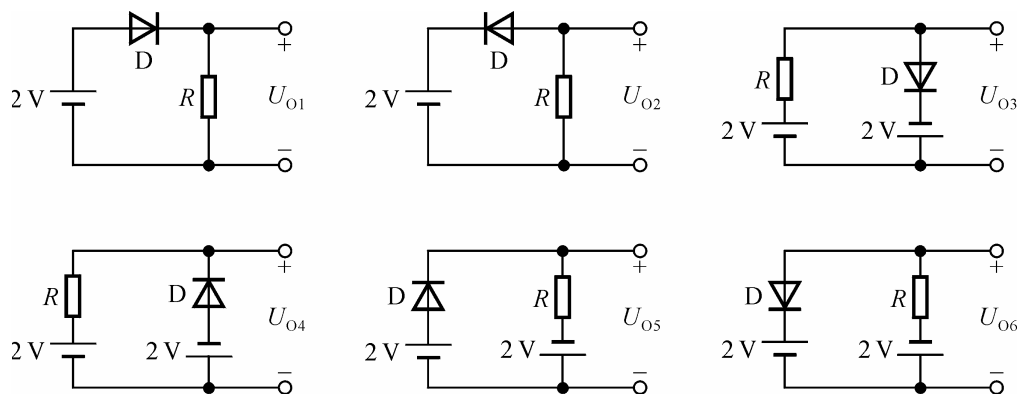


图 T1.3

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

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。

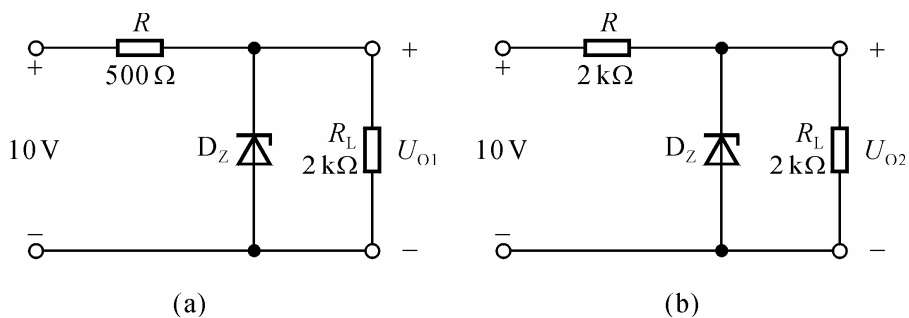


图 T1.4

解： $U_{O1} = 6V$ ， $U_{O2} = 5V$ 。

五、某晶体管的输出特性曲线如图T1.5所示，其集电极最大耗散功率 $P_{CM}=200\text{mW}$ ，试画出它的过损耗区。

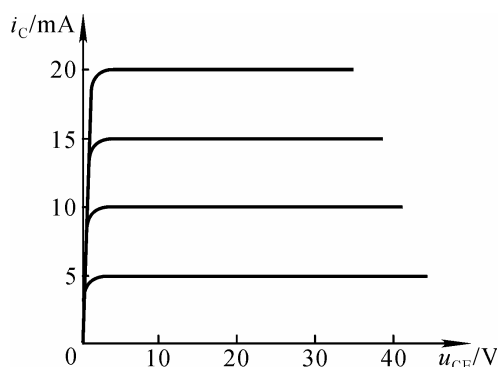
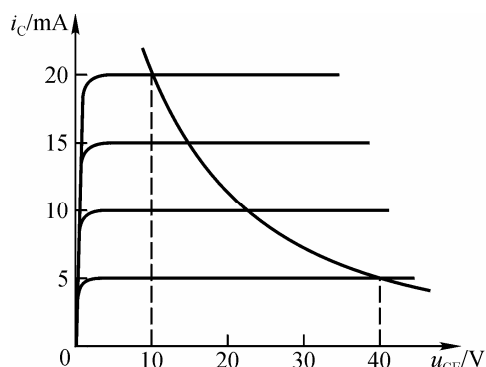


图 T1.5



解图 T1.5

解：根据 $P_{CM}=200\text{mW}$ 可得： $U_{CE}=40\text{V}$ 时 $I_C=5\text{mA}$ ， $U_{CE}=30\text{V}$ 时 $I_C\approx 6.67\text{mA}$ ， $U_{CE}=20\text{V}$ 时 $I_C=10\text{mA}$ ， $U_{CE}=10\text{V}$ 时 $I_C=20\text{mA}$ ，将各点连接成曲线，即为临界过损耗线，如解图T1.5所示。临界过损耗线的左边为过损耗区。

六、电路如图T1.6所示， $V_{CC}=15\text{V}$ ， $\beta=100$ ， $U_{BE}=0.7\text{V}$ 。试问：

(1) $R_b=50\text{k}\Omega$ 时， $u_O=?$

(2) 若T临界饱和，则 $R_b\approx?$

解：(1) $R_b=50\text{k}\Omega$ 时，基极电流、集电极电流和管压降分别为

$$I_B = \frac{V_{BB} - U_{BE}}{R_b} = 26\text{ }\mu\text{A}$$

$$I_C = \beta I_B = 2.6\text{mA}$$

$$U_{CE} = V_{CC} - I_C R_C = 2\text{V}$$

所以输出电压 $U_O = U_{CE} = 2\text{V}$ 。

(2) 设临界饱和时 $U_{CES} = U_{BE} = 0.7\text{V}$ ，所以

$$I_C = \frac{V_{CC} - U_{CES}}{R_C} = 2.86\text{mA}$$

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = 28.6\text{ }\mu\text{A}$$

$$R_b = \frac{V_{BB} - U_{BE}}{I_B} \approx 45.4\text{k}\Omega$$

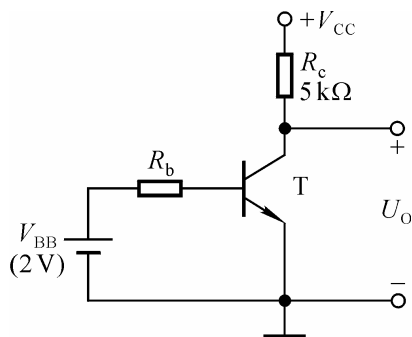


图 T1.6

七、测得某放大电路中三个 MOS 管的三个电极的电位如表 T1.7 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 T1.7

管 号	$U_{GS(th)}/V$	U_S/V	U_G/V	U_D/V	工作状态
T_1	4	-5	1	3	
T_2	-4	3	3	10	
T_3	-4	6	0	5	

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，如解表 T1.7 所示。

解表 T1.7

管 号	$U_{GS(th)}/V$	U_S/V	U_G/V	U_D/V	工作状态
T_1	4	-5	1	3	恒流区
T_2	-4	3	3	10	截止区
T_3	-4	6	0	5	可变电阻区

习 题

1.1 选择合适答案填入空内。

(1) 在本征半导体中加入_____元素可形成 N 型半导体，加入_____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. 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 β 约为_____。

- 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. 增大 B. 不变 C. 减小

解：(1) A ， C (2) A (3) C (4) A

1.2 能否将 1.5V 的干电池以正向接法接到二极管两端？为什么？

解：不能。因为二极管的正向电流与其端电压成指数关系，当端电压为1.5V时，管子会因电流过大而烧坏。

1.3 电路如图P1.3所示，已知 $u_i = 10\sin \omega t(\text{V})$ ，试画出 u_i 与 u_o 的波形。设二极管正向导通电压可忽略不计。

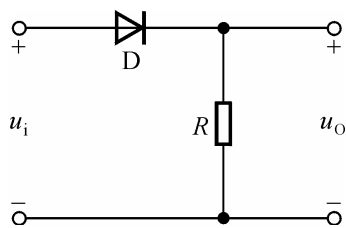
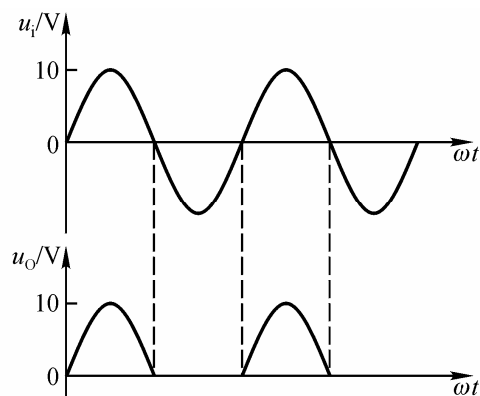


图 P1.3



解图 P1.3

解： u_i 和 u_o 的波形如解图P1.3所示。

1.4 电路如图P1.4所示，已知 $u_i = 5\sin \omega t(\text{V})$ ，二极管导通电压 $U_D = 0.7\text{V}$ 。试画出 u_i 与 u_o 的波形，并标出幅值。

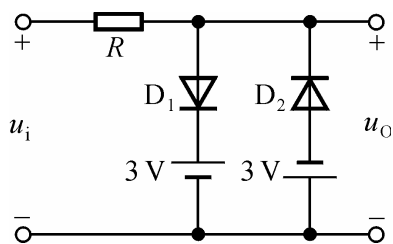
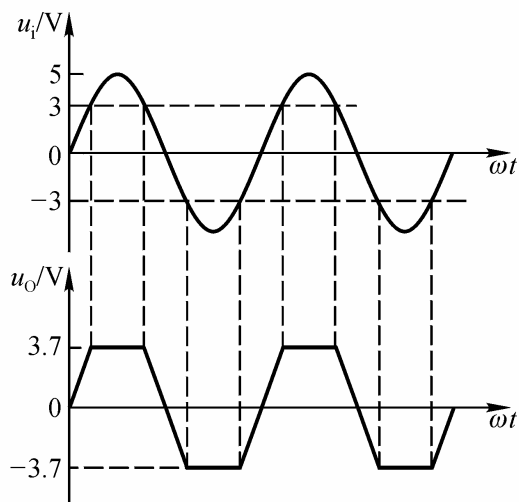


图 P1.4



解图 P1.4

解：波形如解图 P1.4 所示。

1.5 电路如图P1.5 (a) 所示，其输入电压 u_{I1} 和 u_{I2} 的波形如图 (b) 所示，二极管导通电压 $U_D = 0.7\text{V}$ 。试画出输出电压 u_O 的波形，并标出幅值。

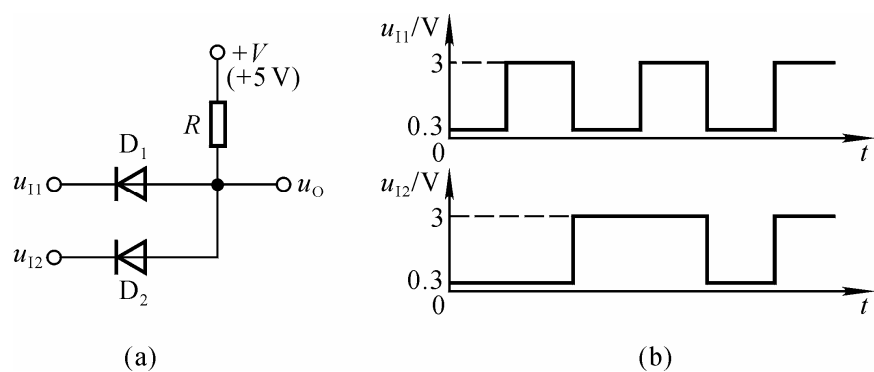
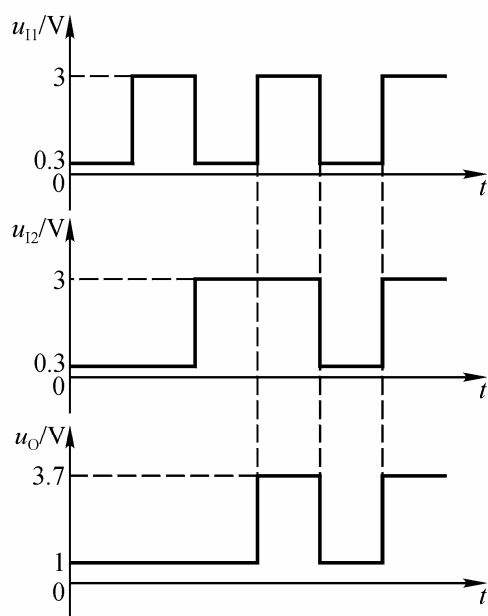


图 P1.5

解： u_O 的波形如解图P1.5 所示。



解图 P1.5

1.6 电路如图P1.6所示，二极管导通电压 $U_D = 0.7\text{V}$ ，常温下 $U_T \approx 26\text{mV}$ ，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有效值为多少？

解： 二极管的直流电流

$$I_D = (V - U_D) / R = 2.6\text{mA}$$

其动态电阻

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

故动态电流有效值

$$I_d = U_i / r_D \approx 1\text{mA}$$

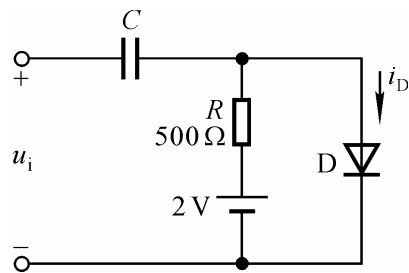


图 P1.6

1.7 现有两只稳压管，它们的稳定电压分别为 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) 两只稳压管串联时可得 1.4V 、 6.7V 、 8.7V 和 14V 等四种稳压值。

(2) 两只稳压管并联时可得 0.7V 和 6V 等两种稳压值。

1.8 已知稳压管的稳定电压 $U_Z = 6\text{V}$ ，稳定电流的最小值 $I_{Z\min} = 5\text{mA}$ ，最大功耗 $P_{ZM} = 150\text{mW}$ 。试求图P1.8所示电路中电阻 R 的取值范围。

解： 稳压管的最大稳定电流

$$I_{ZM} = P_{ZM} / U_Z = 25\text{mA}$$

电阻 R 的电流为 $I_Z \sim I_{Z\min}$ ，所以其取值范围为

$$R = \frac{U_I - U_Z}{I_Z} = 0.36 \sim 1.8\text{k}\Omega$$

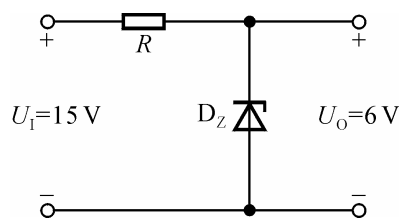


图 P1.8

1.9 已知图P1.9 所示电路中稳压管的稳定电压 $U_Z = 6\text{V}$ ，最小稳定电流 $I_{Z\min} = 5\text{mA}$ ，最大稳定电流 $I_{Z\max} = 25\text{mA}$ 。

(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 $U_I = 35\text{V}$ 时负载开路，则会出
现什么现象？为什么？

解：(1) 当 $U_I = 10\text{V}$ 时，若 $U_O = U_Z = 6\text{V}$ ，则稳压管的电流为 4mA ，小于其最小稳定电流，所以稳压管未击穿。故

$$U_O = \frac{R_L}{R + R_L} \cdot U_I \approx 3.33\text{V}$$

当 $U_I = 15\text{V}$ 时，稳压管中的电流大于最小稳定电流 $I_{Z\min}$ ，所以

$$U_O = U_Z = 6\text{V}$$

同理，当 $U_I = 35\text{V}$ 时， $U_O = U_Z = 6\text{V}$ 。

(2) $I_{D_Z} = (U_I - U_Z)/R = 29\text{mA} > I_{ZM} = 25\text{mA}$ ，稳压管将因功耗过大而损坏。

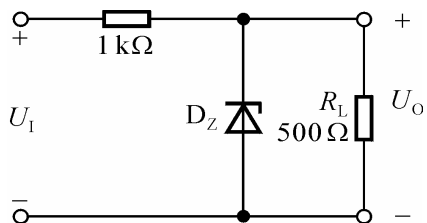


图 P1.9

1.10 在图P1.10 所示电路中，发光二极管导通电压 $U_D = 1.5\text{V}$ ，正向电流在 $5 \sim 15\text{mA}$ 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

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

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

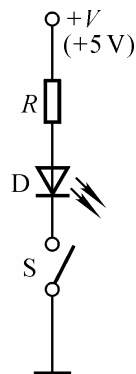


图 P1.10

1.11 电路如图 P1.11 (a)、(b) 所示，稳压管的稳定电压 $U_Z = 3\text{V}$ ， R 的取值合适， u_1 的波形如图 (c) 所示。试分别画出 u_{O1} 和 u_{O2} 的波形。

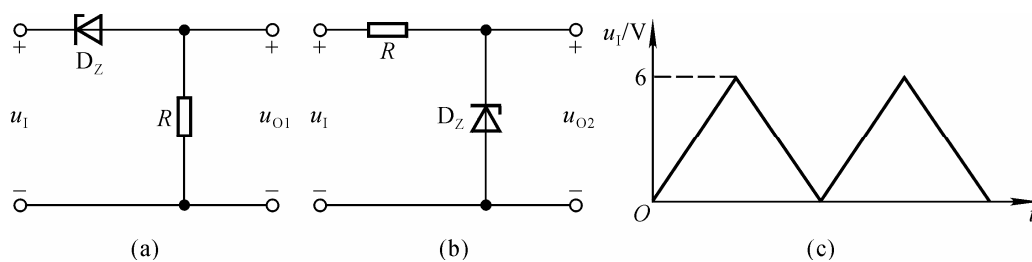
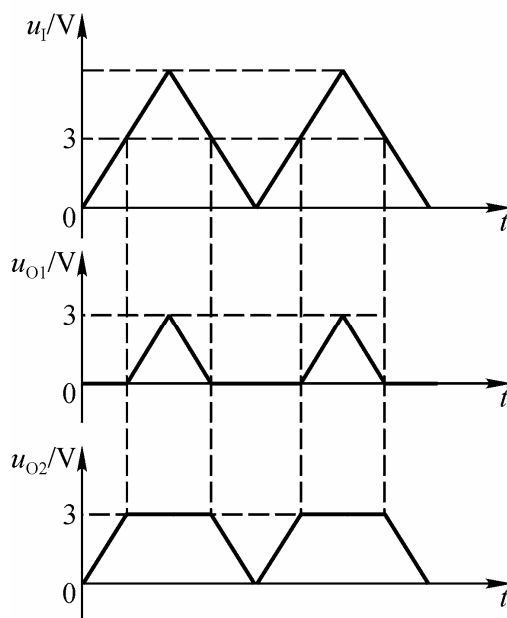


图 P1.11

解：波形如解图 P1.11 所示



解图 P1.11

1.12 在温度 20°C 时某晶体管的 $I_{\text{CBO}} = 2\text{ }\mu\text{A}$ ，试问温度是 60°C 时 $I_{\text{CBO}} \approx ?$

解： 60°C 时 $I_{\text{CBO}} \approx I_{\text{CBO}}^5 (T=20^\circ\text{C}) = 32\text{ }\mu\text{A}$ 。

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

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

1.14 已知两只晶体管的电流放大系数 β 分别为 50 和 100，现测得放大电路中这两只管子两个电极的电流如图 P1.14 所示。分别求另一电极的电流，标出其实际方向，并在圆圈中画出管子。

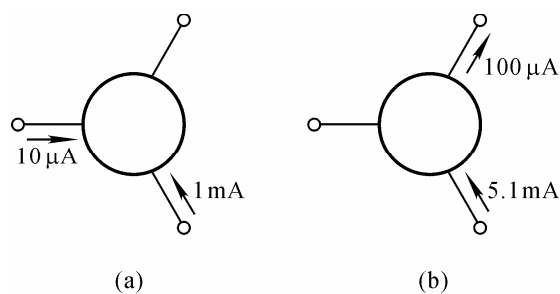
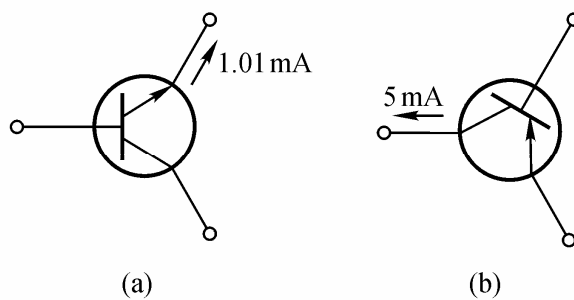


图 P1.14

解： 答案如解图 P1.14 所示。



解图 P1.14

1.15 测得放大电路中六只晶体管的直流电位如图 P1.15 所示。在圆圈中画出管子，并分别说明它们是硅管还是锗管。

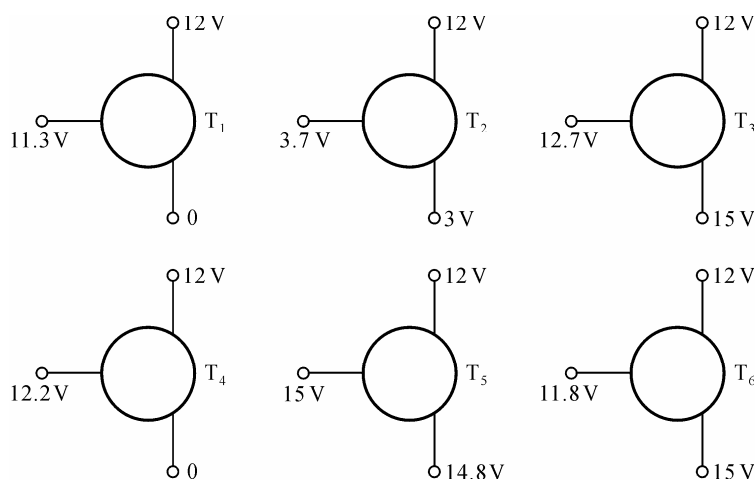


图 P1.15

解：晶体管三个极分别为上、中、下管脚，答案如解表 P1.15 所示。

解表 P1.15

管号	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆
上	e	c	e	b	c	b
中	b	b	b	e	e	e
下	c	e	c	c	b	c
管型	PNP	NPN	NPN	PNP	PNP	NPN
材料	Si	Si	Si	Ge	Ge	Ge

1.16 电路如图 P1.16 所示，晶体管导通时 $U_{BE} = 0.7V$ ， $\beta = 50$ 。试分析 V_{BB} 为 0V、1V、1.5V 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， $u_O = 12V$ 。

（2）当 $V_{BB} = 1V$ 时，因为

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

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

$$u_O = V_{CC} - I_{CQ} R_C = 9V$$

所以 T 处于放大状态。

（3）当 $V_{BB} = 3V$ 时，因为

$$I_{BQ} = \frac{V_{BB} - U_{BEQ}}{R_b} = 160 \mu A$$

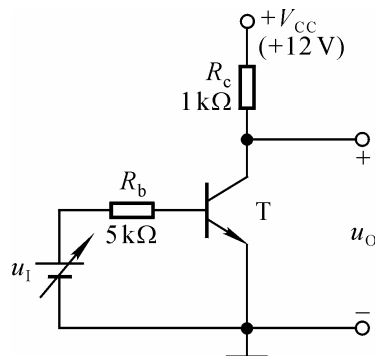


图 P1.16

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 8\text{mA}$$

$$u_O = V_{CC} - I_{CQ} R_C < U_{BE}$$

所以 T 处于饱和状态。

1.17 电路如图 P1.17 所示，试问 β 大于多少时晶体管饱和？

解：取 $U_{CES} = U_{BE}$ ，若管子饱和，则

$$\beta \cdot \frac{V_{CC} - U_{BE}}{R_b} = \frac{V_{CC} - U_{BE}}{R_C}$$

$$R_b = \beta R_C$$

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

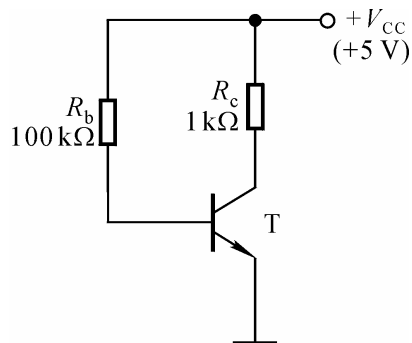


图 P1.17

1.18 电路如图 P1.18 所示，晶体管的 $\beta = 50$ ， $|U_{BE}| = 0.2\text{V}$ ，饱和管压降 $|U_{CES}| = 0.1\text{V}$ ；稳压管的稳定电压 $U_Z = 5\text{V}$ ，正向导通电压 $U_D = 0.5\text{V}$ 。试问：当 $u_I = 0\text{V}$ 时 $u_O = ?$ 当 $u_I = -5\text{V}$ 时 $u_O = ?$

解：当 $u_I = 0$ 时，晶体管截止，稳压管击穿， $u_O = -U_Z = -5\text{V}$ 。

当 $u_I = -5\text{V}$ 时，晶体管饱和， $u_O = 0.1\text{V}$ 。

因为

$$|I_B| = \frac{u_I - U_{BE}}{R_b} = 480\mu\text{A}$$

$$|I_C| = \beta |I_B| = 24\text{mA}$$

$$U_{EC} = V_{CC} - |I_C| R_C < V_{CC}$$

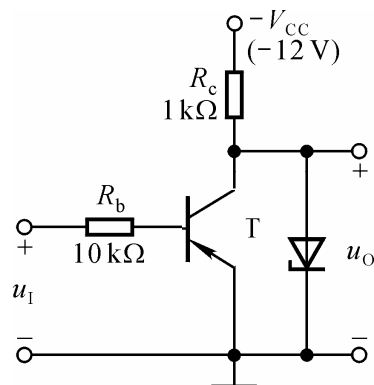


图 P1.18

1.19 分别判断图 P1.19 所示各电路中晶体管是否有可能工作在放大状态。

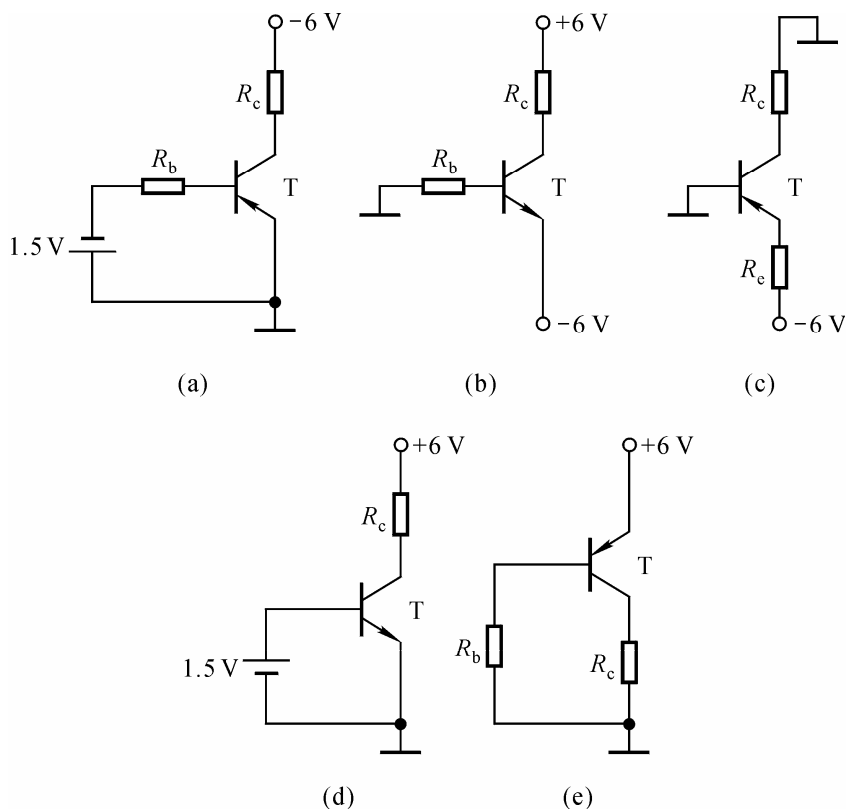


图 P1.19

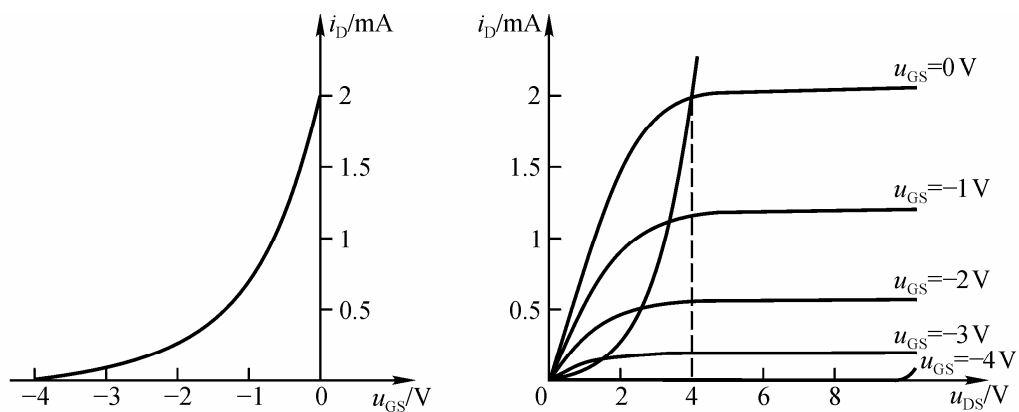
解：（a）可能 （b）可能 （c）不能
 （d）不能，T 的发射结会因电流过大而损坏。 （e）可能

1.20 已知某结型场效应管的 $I_{DSS} = 2\text{mA}$ ， $U_{GS(\text{off})} = -4\text{V}$ ，试画出它的转移特性曲线和输出特性曲线，并近似画出予夹断轨迹。

解： 根据方程

$$i_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{u_{GS}}{U_{GS(\text{th})}}\right)^2$$

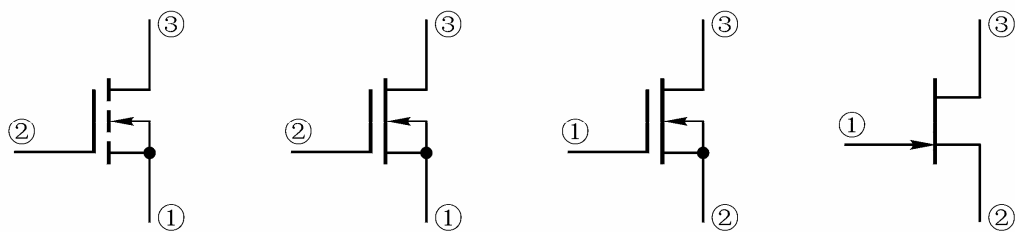
逐点求出确定的 u_{GS} 下的 i_D ，可近似画出转移特性和输出特性；在输出特性中，将各条曲线上 $u_{GD} = U_{GS(\text{off})}$ 的点连接起来，便为予夹断线；如解图 P1.20 所示。



解图 P1.20

1.21 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 P1.21 所示。



解图 P1.21

1.22 已知场效应管的输出特性曲线如图 P1.22 所示，画出它在恒流区的转移特性曲线。

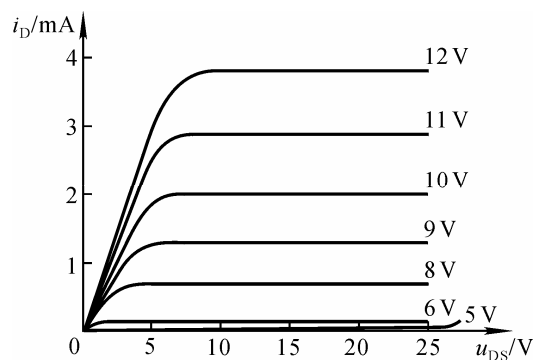
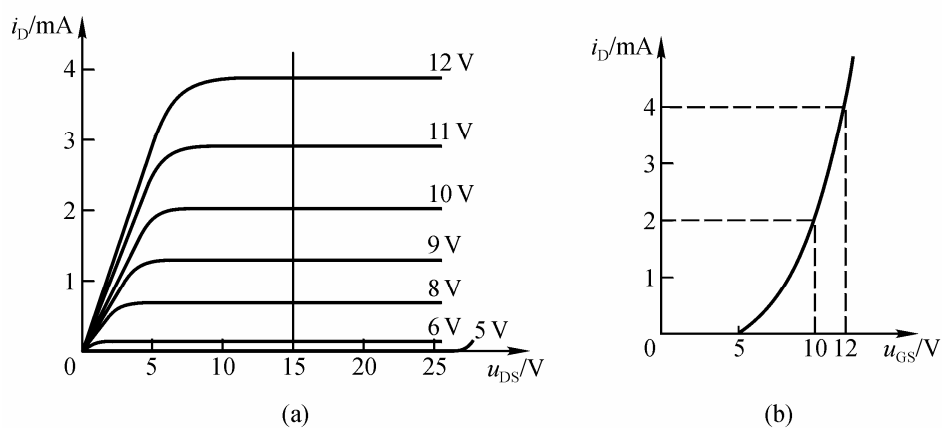


图 P1.22

解：在场效应管的恒流区作横坐标的垂线（如解图P1.22（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P1.22（b）所示。



解图 P1.22

1.23 电路如图 1.23 所示，T 的输出特性如图 P1.22 所示，分析当 $u_I = 4\text{V}$ 、 8V 、 12V 三种情况下场效应管分别工作在什么区域。

解：根据图 P1.22 所示 T 的输出特性可知，其开启电压为 5V ，根据图 P1.23 所示电路可知所以

$$u_{GS} = u_I。$$

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

当 $u_I = 8\text{V}$ 时，设 T 工作在恒流区，根据输出特性可知 $i_D \approx 0.6\text{mA}$ ，管压降

$$u_{DS} \approx V_{DD} - i_D R_d \approx 10\text{V}$$

因此， $u_{GD} = u_{GS} - u_{DS} \approx -2\text{V}$ ，小于开启电压，说明假设成立，即 T 工作在恒流区。

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

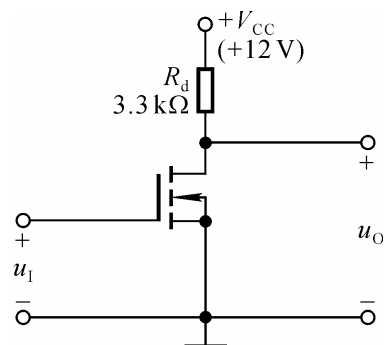


图 P1.23

1.24 分别判断图 P1.24 所示各电路中的场效应管是否有可能工作在恒流区。

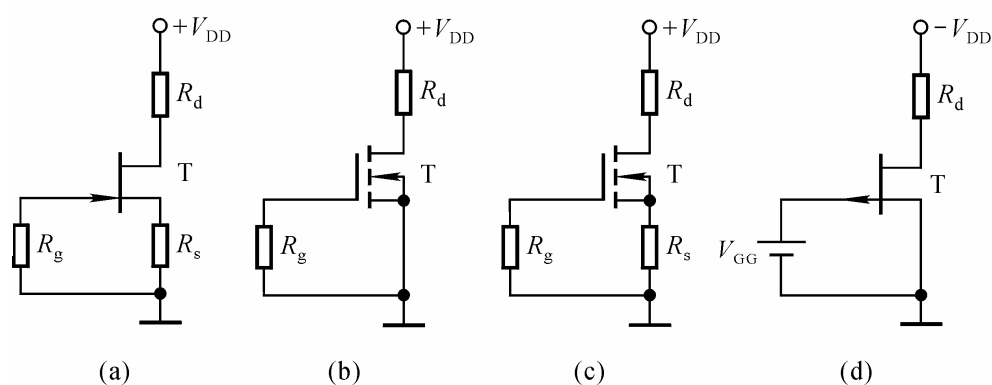


图 P1.24

解：(a) 可能 (b) 不能 (c) 不能 (d) 可能

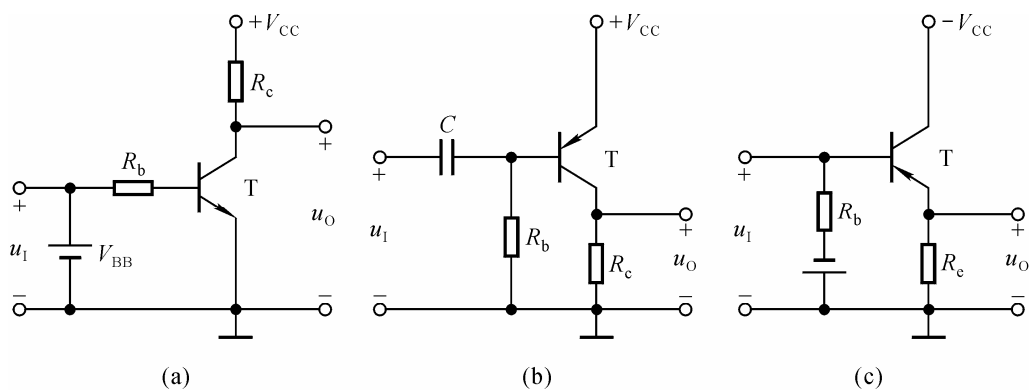
第二章 基本放大电路

自 测 题

一、在括号内用“√”或“×”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由有源元件提供的；()
(4) 电路中各电量的交流成份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，所以当输入信号为直流信号时，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。()
- 解：(1) × (2) √ (3) × (4) × (5) √ (6) ×
(7) ×

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



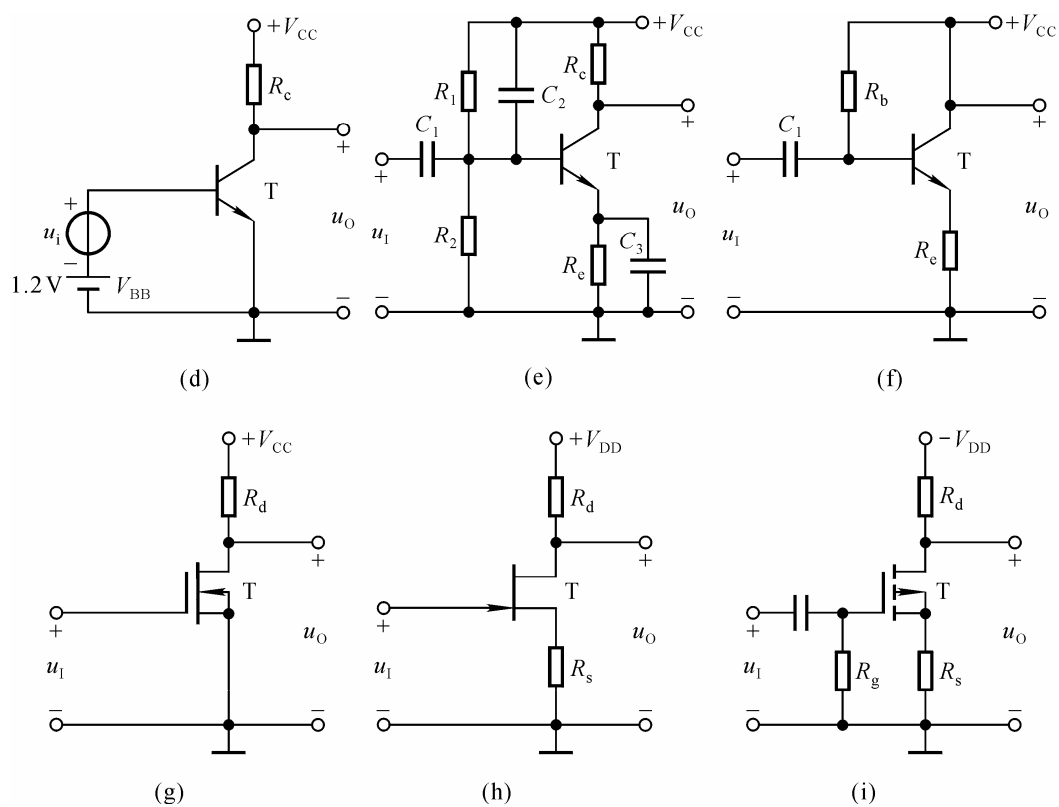


图 T2.2

解：（a）不能。因为输入信号被 V_{BB} 短路。

（b）可能。

（c）不能。因为输入信号作用于基极与地之间，不能驮载在静态电压之上，必然失真。

（d）不能。晶体管将因发射结电压过大而损坏。

（e）不能。因为输入信号被 C_2 短路。

（f）不能。因为输出信号被 V_{CC} 短路，恒为零。

（g）可能。

（h）不合理。因为 G-S 间电压将大于零。

（i）不能。因为 T 截止。

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

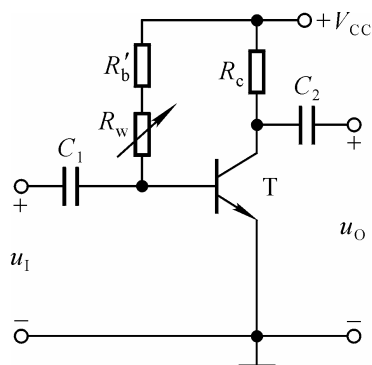


图 T2.3

(1) 当 $U_i=0\text{V}$ 时，测得 $U_{BEQ}=0.7\text{V}$ ，若要基极电流 $I_{BQ}=20\mu\text{A}$ ，则 R'_b 和 R_w 之和 $R_b=\underline{\hspace{2cm}}\text{k}\Omega$ ；而若测得 $U_{CEQ}=6\text{V}$ ，则 $R_c=\underline{\hspace{2cm}}\text{k}\Omega$ 。

(2) 若测得输入电压有效值 $U_i=5\text{mV}$ 时，输出电压有效值 $U'_o=0.6\text{V}$ ，则电压放大倍数

$$A_u = \underline{\hspace{2cm}} \approx \underline{\hspace{2cm}}。$$

若负载电阻 R_L 值与 R_c 相等，则带上负载后输出电压有效值 $U_o=\underline{\hspace{2cm}}=\underline{\hspace{2cm}}\text{V}$ 。

解：(1) $(V_{CC}-U_{BEQ})/I_{BQ}, 565$ ； $(V_{CC}-U_{CEQ})/\beta I_{BQ}, 3$ 。

$$(2) -U_o/U_i \quad -120 \quad ; \quad \frac{R_L}{R_c+R_L} \cdot U'_o \quad 0.3。$$

四、已知图 T2.3 所示电路中 $V_{CC}=12\text{V}$ ， $R_c=3\text{k}\Omega$ ，静态管压降 $U_{CEQ}=6\text{V}$ ；并在输出端加负载电阻 R_L ，其阻值为 $3\text{k}\Omega$ 。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 $U_{om} \approx \underline{\hspace{2cm}}$ ；

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

(2) 当 $U_i=1\text{mV}$ 时，若在不失真的条件下，减小 R_w ，则输出电压的幅值将 $\underline{\hspace{2cm}}$ ；

A. 减小 B. 不变 C. 增大

(3) 在 $U_i=1\text{mV}$ 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 $\underline{\hspace{2cm}}$ ；

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 $\underline{\hspace{2cm}}$ 。

A. R_w 减小 B. R_c 减小 C. V_{CC} 减小

解：(1) A (2) C (3) B (4) B

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)、2.7.2 和 2.7.9(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 _____，最大的是 _____；
(2) 输出电阻最小的电路是 _____；
(3) 有电压放大作用的电路是 _____；
(4) 有电流放大作用的电路是 _____；
(5) 高频特性最好的电路是 _____；
(6) 输入电压与输出电压同相的电路是 _____；反相的电路是 _____。

解： (1) C, D E (2) B (3) A C D
(4) A B D E (5) C (6) B C E, 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。

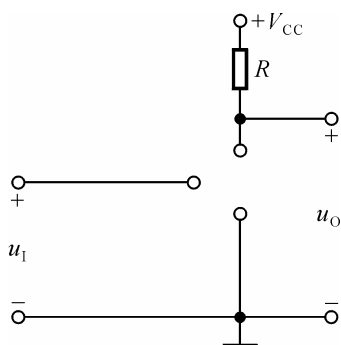
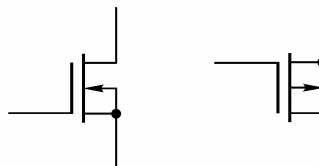


图 T2.6

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。



解图 T2.6

习 题

2.1 按要求填写下表。

电路名称	连接方式 (e、c、b)			性能比较 (大、中、小)				
	公共极	输入极	输出极	$ A_u $	A_i	R_i	R_o	其它
共射电路								
共集电路								
共基电路								

解：答案如表所示。

电路名称	连接方式			性能比较 (大、中、小)				
	公共端	输入端	输出端	$ A_u $	A_i	R_i	R_o	其它
共射电路	e	b	c	大	大	小	大	
共集电路	c	b	e	小	大	大	小	
共基电路	b	e	c	大	小	小	大	频带宽

2.2 分别改正图 P2.2 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。

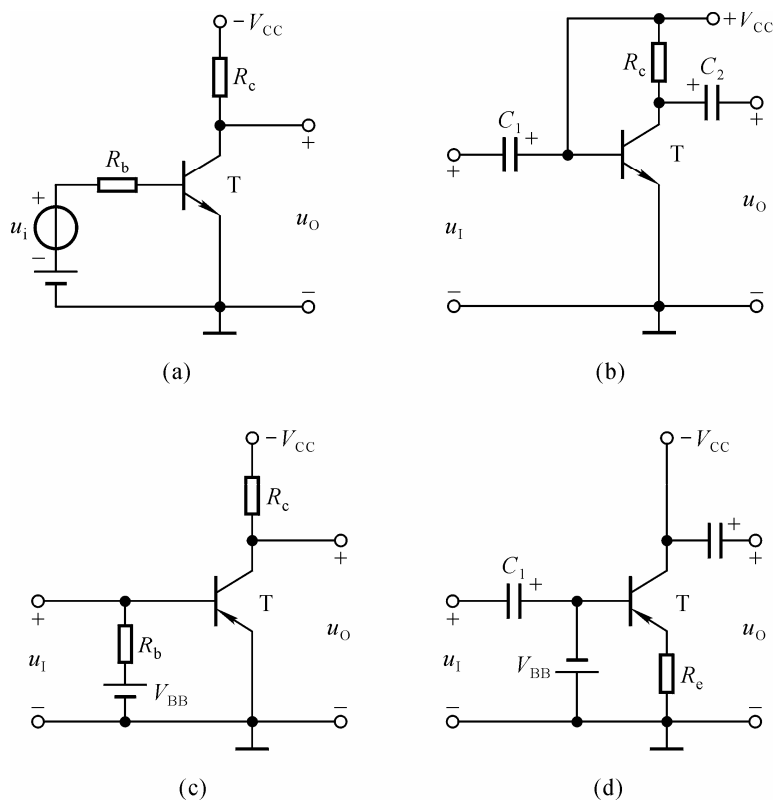


图 P2.2

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 。

2.3 画出图 P2.3 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。

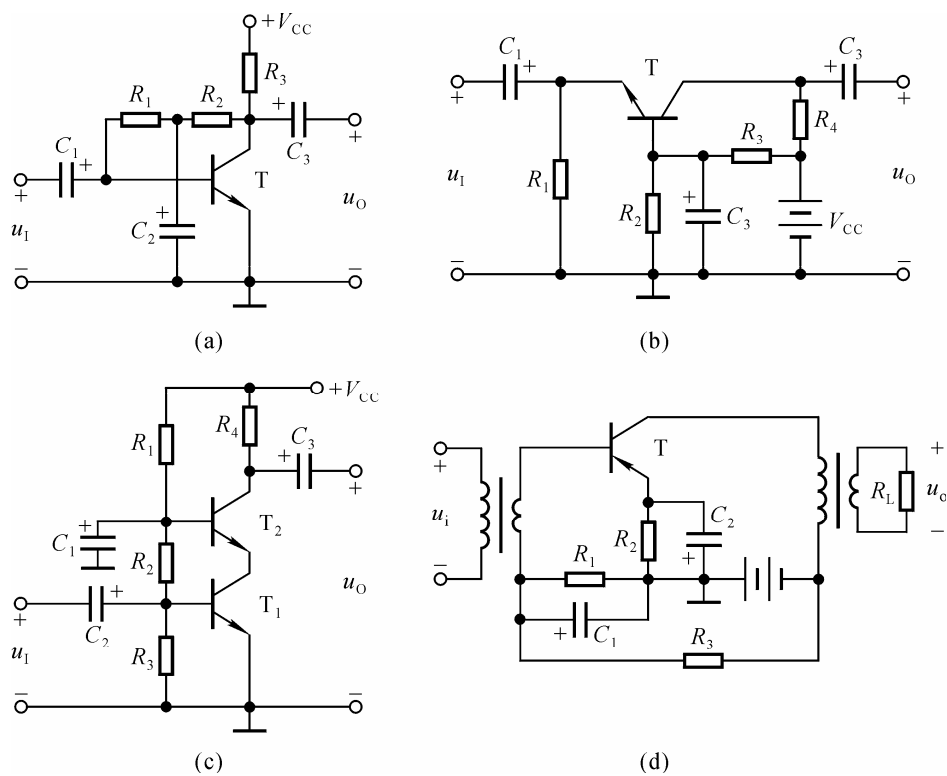
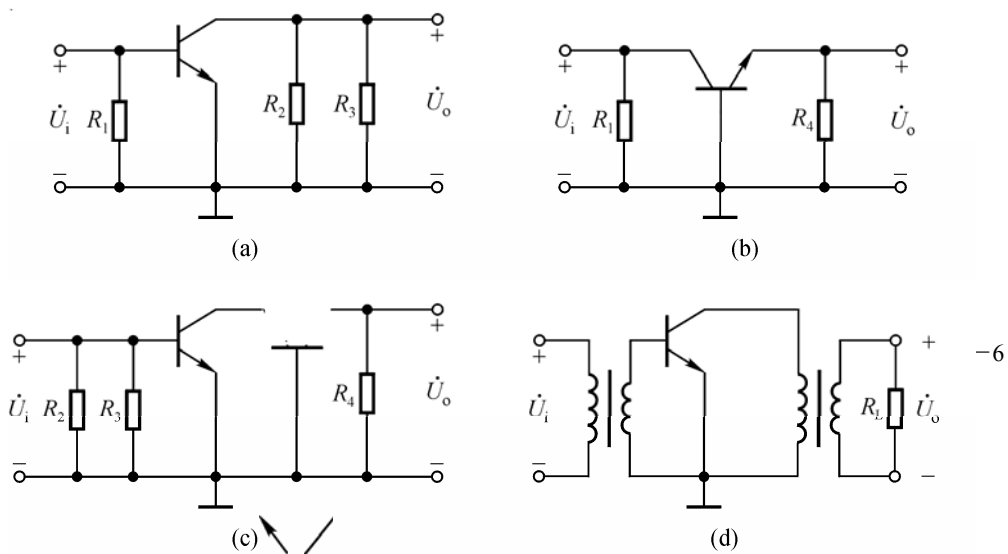


图 P2.3

解： 将电容开路、变压器线圈短路即为直流通路，图略。

图 P2.3 所示各电路的交流通路如解图 P2.3 所示；



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 $U_{BEQ} = 0.7\text{V}$ 。利用图解法分别求出 $R_L = \infty$ 和 $R_L = 3\text{k}\Omega$ 时的静态工作点和最大不失真输出电压 U_{om} (有效值)。

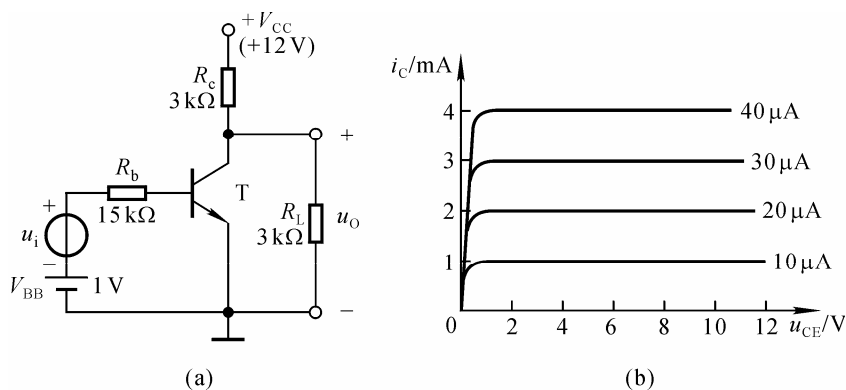
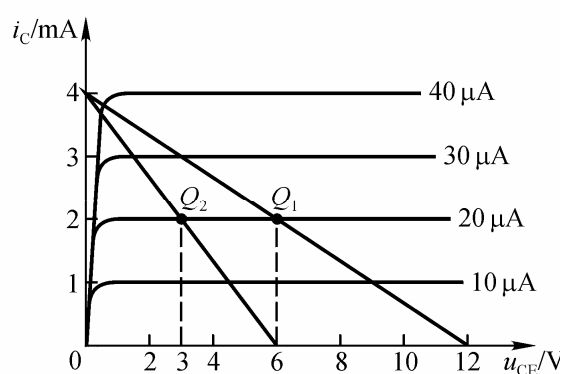


图 P2.4

解：空载时： $I_{BQ} = 20\mu\text{A}$ ， $I_{CQ} = 2\text{mA}$ ， $U_{CEQ} = 6\text{V}$ ；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： $I_{BQ} = 20\mu\text{A}$ ， $I_{CQ} = 2\text{mA}$ ， $U_{CEQ} = 3\text{V}$ ；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

2.5 在图P2.5所示电路中, 已知晶体管的 $\beta=80$, $r_{be}=1\text{k}\Omega$, $\dot{U}_i=20\text{mV}$; 静态时 $U_{BEQ}=0.7\text{V}$, $U_{CEQ}=4\text{V}$, $I_{BQ}=20\mu\text{A}$ 。判断下列结论是否正确, 凡对的在括号内打“√”, 否则打“×”。

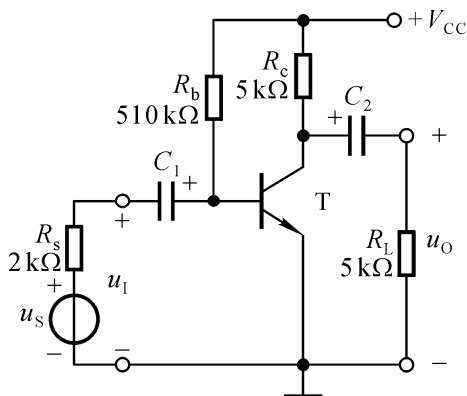


图 P2.5

- (1) $\dot{A}_u = -\frac{4}{20 \times 10^{-3}} = -200$ () (2) $\dot{A}_u = -\frac{4}{0.7} \approx -5.71$ ()
- (3) $\dot{A}_u = -\frac{80 \times 5}{1} = -400$ () (4) $\dot{A}_u = -\frac{80 \times 2.5}{1} = -200$ ()
- (5) $R_i = (\frac{20}{20})\text{k}\Omega = 1\text{k}\Omega$ () (6) $R_i = (\frac{0.7}{0.02})\text{k}\Omega = 35\text{k}\Omega$ ()
- (7) $R_i \approx 3\text{k}\Omega$ () (8) $R_i \approx 1\text{k}\Omega$ ()
- (9) $R_o \approx 5\text{k}\Omega$ () (10) $R_o \approx 2.5\text{k}\Omega$ ()
- (11) $\dot{U}_s \approx 20\text{mV}$ () (12) $\dot{U}_s \approx 60\text{mV}$ ()

解: (1) × (2) × (3) × (4) √ (5) × (6) ×
(7) × (8) √ (9) √ (10) × (11) × (12) √

2.6 电路如图P2.6所示, 已知晶体管 $\beta=50$, 在下列情况下, 用直流电压表测晶体管的集电极电位, 应分别为多少? 设 $V_{CC}=12\text{V}$, 晶体管饱和管压降 $U_{CES}=0.5\text{V}$ 。

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

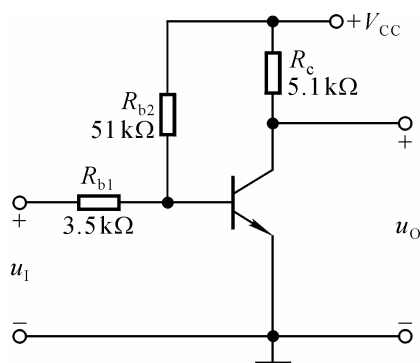


图 P2.6

解：设 $U_{BE} = 0.7V$ 。则

(1) 基极静态电流

$$I_B = \frac{V_{CC} - U_{BE}}{R_{b2}} - \frac{U_{BE}}{R_{b1}} \approx 0.022mA$$

$$U_C = V_{CC} - I_C R_c \approx 6.4V$$

(2) 由于 $U_{BE} = 0V$ ，T截止， $U_C = 12V$ 。

(3) 临界饱和基极电流

$$I_{BS} = \frac{V_{CC} - U_{CES}}{\beta R_c} \approx 0.045mA$$

实际基极电流

$$I_B = \frac{V_{CC} - U_{BE}}{R_{b2}} \approx 0.22mA$$

由于 $I_B > I_{BS}$ ，故T饱和， $U_C = U_{CES} = 0.5V$ 。

(4) T截止， $U_C = 12V$ 。

(5) 由于集电极直接接直流电源， $U_C = V_{CC} = 12V$

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 $R_L = 3k\Omega$ 时的Q点、 A_u 、 R_i 和 R_o 。

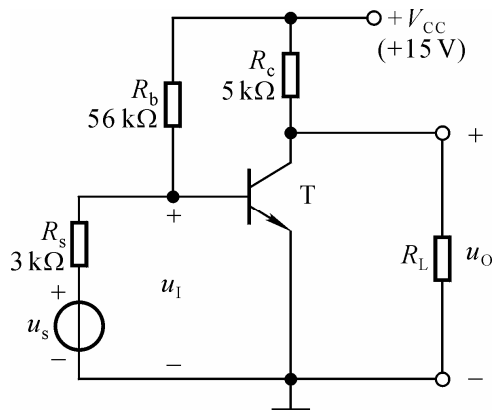


图 P2.7

解 2.7 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

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

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

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

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

$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_c \approx 6.2\text{ V}$$

$$\dot{A}_u = -\frac{\beta R_c}{r_{be}} \approx -308$$

$$R_i = R_b // r_{be} \approx r_{be} \approx 1.3\text{ k}\Omega$$

$$\dot{A}_{us} \approx \frac{r_{be}}{R_s + r_{be}} \cdot \dot{A}_u \approx -93$$

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

$R_L = 5\text{ k}\Omega$ 时，静态管压降、电压放大倍数分别为

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

$$\dot{A}_u = -\frac{\beta R_L'}{r_{be}} \approx -115$$

$$\dot{A}_{us} \approx \frac{r_{be}}{R_s + r_{be}} \cdot \dot{A}_u \approx -47$$

$$R_i = R_b // r_{be} \approx r_{be} \approx 1.3k\Omega$$

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

2.8 在图 P2.7 所示电路中，由于电路参数不同，在信号源电压为正弦波时，测得输出波形如图 P2.8 (a)、(b)、(c) 所示，试说明电路分别产生了什么失真，如何消除。

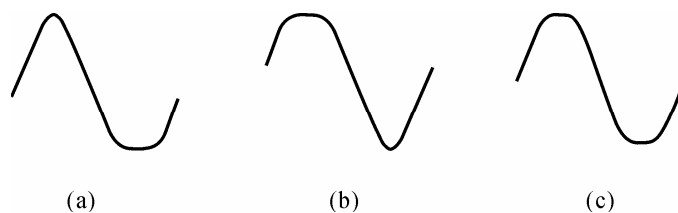


图 P2.8

解：(a) 饱和失真，增大 R_b ，减小 R_c 。

(b) 截止失真，减小 R_b 。

(c) 同时出现饱和失真和截止失真，应增大 V_{CC} 。

2.9 若由 PNP 型管组成的共射电路中，输出电压波形如图 P2.8(a)、(b)、(c) 所示，则分别产生了什么失真？

解：(a) 截止失真；(b) 饱和失真；(c) 同时出现饱和失真和截止失真。

2.10 已知图 P2.10 所示电路中晶体管的 $\beta = 100$ ， $r_{be} = 1k\Omega$ 。

(1) 现已测得静态管压降 $U_{CEQ} = 6V$ ，估算 R_b 约为多少千欧；

(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 为多少千欧？

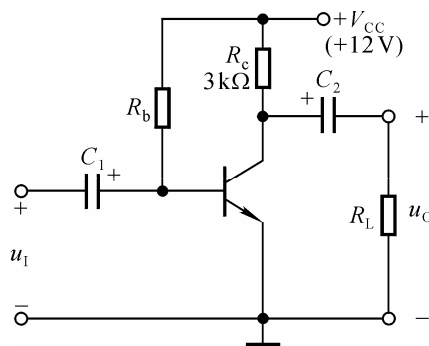


图 P2.10

解：（1）求解 R_b

$$I_{CQ} = \frac{V_{CC} - U_{CEQ}}{R_c} = 2\text{mA}$$

$$I_{BQ} = \frac{I_{CQ}}{\beta} = 20\mu\text{A}$$

$$R_b = \frac{V_{CC} - U_{BEQ}}{I_{BQ}} \approx 565\text{k}\Omega$$

（2）求解 R_L ：

$$\dot{A}_u = -\frac{U_o}{U_i} = -100 \quad \dot{A}_u = -\frac{\beta R'_L}{r_{be}} \quad R'_L = 1\text{k}\Omega$$

$$\frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_L} = 1 \quad R_L = 1.5\text{k}\Omega$$

2.11 在图 P2.10 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

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

2.12 在图 P2.10 所示电路中，设某一参数变化时其余参数不变，在表中填入①增大②减小或③基本不变。

参数变化	I_{BQ}	U_{CEQ}	$ A_u $	R_i	R_o
R_b 增大					
R_c 增大					
R_L 增大					

解： 答案如解表 P2.12 所示。

解表 P2.12 所示

参数变化	I_{BQ}	U_{CEQ}	$ A_u $	R_i	R_o
R_b 增大	②	①	②	①	③
R_c 增大	③	②	①	③	①
R_L 增大	③	③	①	③	③

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

(1) 求电路的 Q 点、 A_u 、 R_i 和 R_o ；

(2) 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？

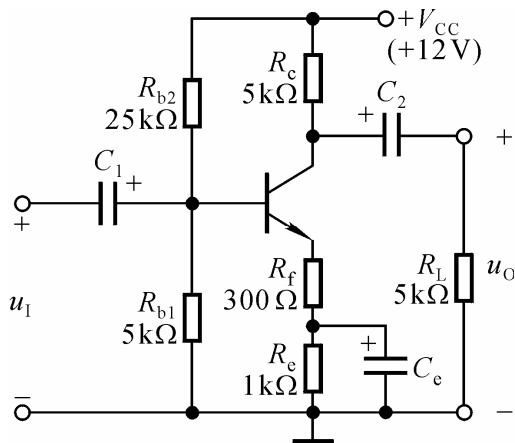


图 P2.13

解：（1）静态分析：

$$\begin{aligned}
 U_{BQ} &\approx \frac{R_{b1}}{R_{b1} + R_{b2}} \cdot V_{CC} = 2V \\
 I_{EQ} &= \frac{U_{BQ} - U_{BEQ}}{R_f + R_e} \approx 1mA \\
 I_{BQ} &= \frac{I_{EQ}}{1 + \beta} \approx 10 \mu A \\
 U_{CEQ} &\approx V_{CC} - I_{EQ}(R_c + R_f + R_e) = 5.7V
 \end{aligned}$$

动态分析：

$$\begin{aligned}
 r_{be} &= r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26mV}{I_{EQ}} \approx 2.73k\Omega \\
 \dot{A}_u &= -\frac{\beta(R_c // R_L)}{r_{be} + (1 + \beta)R_f} \approx -7.7 \\
 R_i &= R_{b1} // R_{b2} // [r_{be} + (1 + \beta)R_f] \approx 3.7k\Omega \\
 R_o &= R_c = 5k\Omega
 \end{aligned}$$

（2） R_i 增大， $R_i \approx 4.1k\Omega$ ； $|\dot{A}_u|$ 减小， $\dot{A}_u \approx -\frac{R_L'}{R_f + R_e} \approx -1.92$ 。

2.14 试求出图P2.3（a）所示电路Q点、 \dot{A}_u 、 R_i 和 R_o 的表达式。

解：Q点为

$$\begin{aligned}
 I_{BQ} &= \frac{V_{CC} - U_{BEQ}}{R_1 + R_2 + (1 + \beta)R_c} \\
 I_{CQ} &= \beta I_{BQ} \\
 U_{CEQ} &= V_{CC} - (1 + \beta)I_{BQ}R_c
 \end{aligned}$$

\dot{A}_u 、 R_i 和 R_o 的表达式分别为

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

2.15 试求出图P2.3（b）所示电路Q点、 \dot{A}_u 、 R_i 和 R_o 的表达式。设静态时 R_2 中的电流远大于T的基极电流。

解：Q 点：

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

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ}$$

$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_c + U_{BEQ}$$

\hat{A}_u 、 R_i 和 R_o 的表达式分别为

$$\hat{A}_u = \frac{\beta R_4}{r_{be}}$$

$$R_i = R_1 // \frac{r_{be}}{1 + \beta}$$

$$R_o = R_4$$

2.16 试求出图P2.3 (c) 所示电路Q点、 \hat{A}_u 、 R_i 和 R_o 的表达式。设静态时 R_2 中的电流远大于 T_2 管的基极电流且 R_3 中的电流远大于 T_1 管的基极电流。

解：两只晶体管的静态电流、管压降分析如下：

$$I_{BQ1} \approx \frac{V_{CC} - U_{BEQ1}}{R_1 + R_2} - \frac{U_{BEQ1}}{R_3}$$

$$I_{CQ2} \approx I_{CQ1} = \beta I_{BQ1}$$

$$U_{CQ2} = V_{CC} - I_{CQ2} R_4$$

$$U_{BQ2} \approx \frac{R_2}{R_1 + R_2} (V_{CC} - U_{BEQ1}) + U_{BEQ1}$$

$$U_{CEQ1} = U_{BQ2} - U_{BEQ2}$$

$$U_{CEQ2} = U_{CQ2} - U_{BQ2} + U_{BEQ2}$$

\hat{A}_u 、 R_i 和 R_o 的表达式分析如下：

$$\begin{aligned}\hat{A}_{u1} &= -\frac{\beta_1 \cdot \frac{r_{be2}}{1 + \beta_2}}{r_{be1}} \\ \hat{A}_{u2} &= \frac{\beta_2 R_4}{r_{be2}} \\ \hat{A}_u &= \hat{A}_{u1} \hat{A}_{u2} \\ R_i &= R_2 // R_3 // r_{be1} \\ R_o &= R_4\end{aligned}$$

2.17 设图 P2.17 所示电路所加输入电压为正弦波。试问：

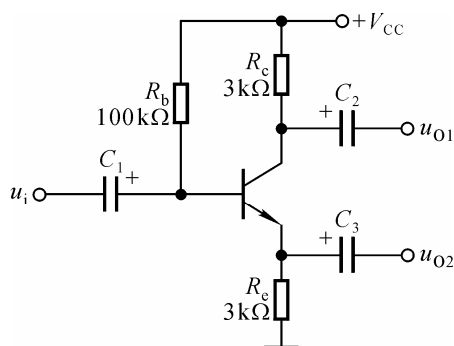


图 P2.17

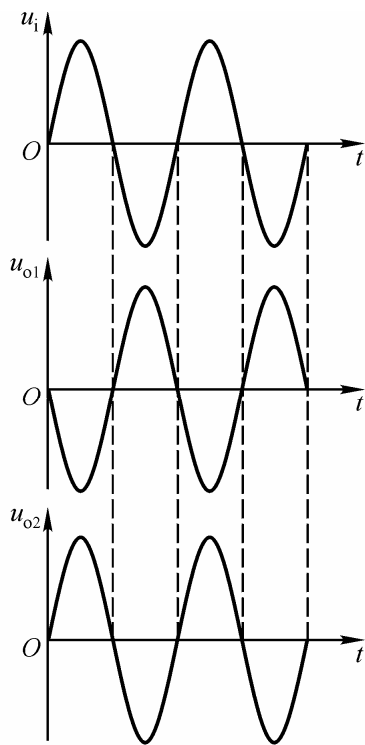
(1) $\hat{A}_{u1} = \hat{U}_{o1} / \hat{U}_i \approx ?$ $\hat{A}_{u2} = \hat{U}_{o2} / \hat{U}_i \approx ?$

(2) 画出输入电压和输出电压 u_i 、 u_{o1} 、 u_{o2} 的波形；

解：(1) 因为通常 $\beta \gg 1$ ，所以电压放大倍数分别应为

$$\begin{aligned}\hat{A}_{u1} &= -\frac{\beta R_c}{r_{be} + (1 + \beta)R_e} \approx -\frac{R_c}{R_e} = -1 \\ \hat{A}_{u2} &= \frac{(1 + \beta)R_e}{r_{be} + (1 + \beta)R_e} \approx +1\end{aligned}$$

(2) 两个电压放大倍数说明 $u_{o1} \approx -u_i$, $u_{o2} \approx u_i$ 。波形如解图 P1.17 所示。

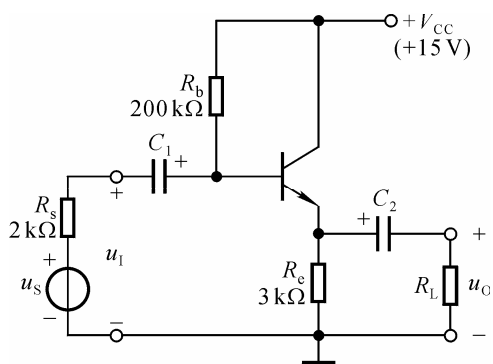


解图 P1.17

2.18 电路如图 P2.18 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 A_u 和 R_i ；



(3) 求出 R_o 。

图 P2.18

解: (1) 求解 Q 点:

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

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

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

(2) 求解输入电阻和电压放大倍数:

$R_L = \infty$ 时

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

$$\dot{A}_u = \frac{(1 + \beta)R_e}{r_{be} + (1 + \beta)R_e} \approx 0.996$$

$R_L = 3 k\Omega$ 时

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

$$\dot{A}_u = \frac{(1 + \beta)(R_e // R_L)}{r_{be} + (1 + \beta)(R_e // R_L)} \approx 0.992$$

(3) 求解输出电阻:

$$R_o = R_e // \frac{R_s // R_b + r_{be}}{1 + \beta} \approx 37 \Omega$$

2.19 电路如图 P2.19 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 $U_s = 10 mV$ (有效值), 问 $U_i = ?$ $U_o = ?$ 若 C_3 开路, 则 $U_i = ?$ U_o

$= ?$

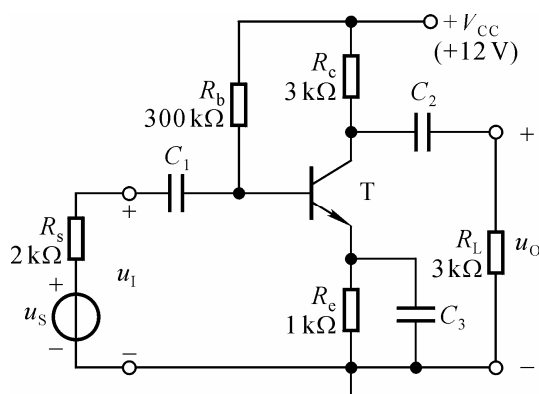


图 P2.19

解：（1）Q 点：

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

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

$$U_{CEQ} \approx V_{CC} - I_{EQ}(R_c + R_e) = 4.56 V$$

\dot{A}_u 、 R_i 和 R_o 的分析：

$$r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26 mV}{I_{EQ}} \approx 952 \Omega$$

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

$$\dot{A}_u = - \frac{\beta(R_c // R_L)}{r_{be}} \approx -95$$

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

（2）设 $U_s = 10 mV$ （有效值），则

$$U_i = \frac{R_i}{R_s + R_i} \cdot U_s \approx 3.2 mV$$

$$U_o = |\dot{A}_u| U_i \approx 304 mV$$

若 C_3 开路，则

$$R_i = R_b // [r_{be} + (1 + \beta)R_e] \approx 51.3 k\Omega$$

$$\dot{A}_u \approx - \frac{R_c // R_L}{R_e} = -1.5$$

$$U_i = \frac{R_i}{R_s + R_i} \cdot U_s \approx 9.6 mV$$

$$U_o = |\dot{A}_u| U_i \approx 14.4 mV$$

2.20 改正图 P2.20 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。

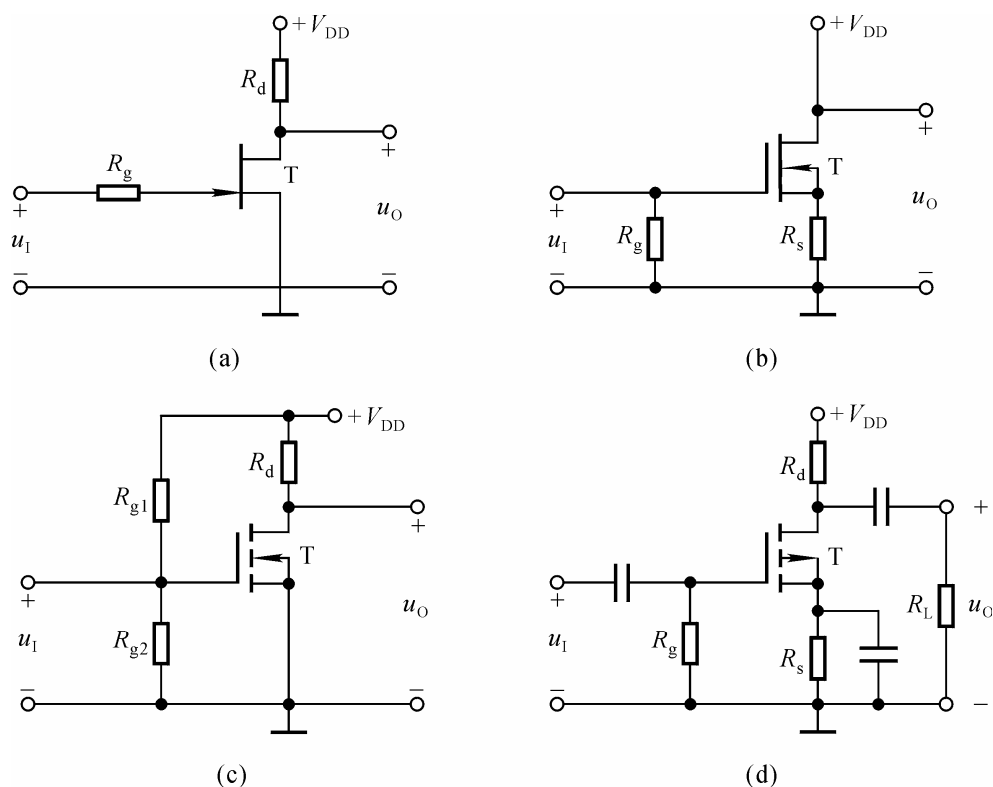


图 P2.20

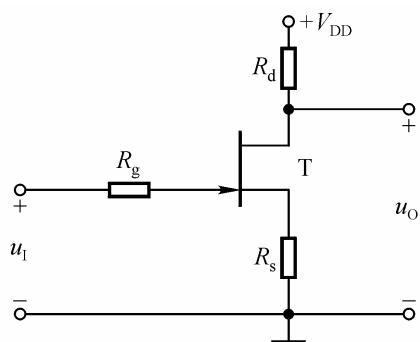
解：(a) 源极加电阻 R_S 。

(b) 漏极加电阻 R_D 。

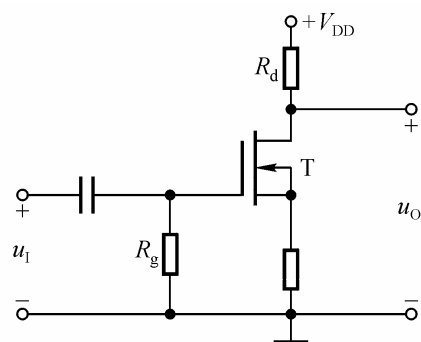
(c) 输入端加耦合电容。

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

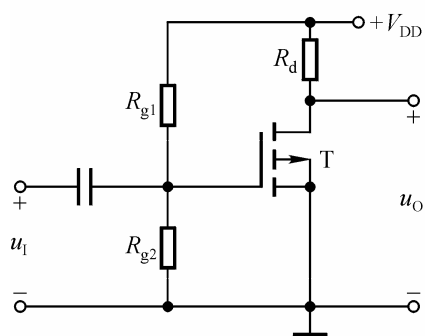
改正电路如解图 P2.20 所示。



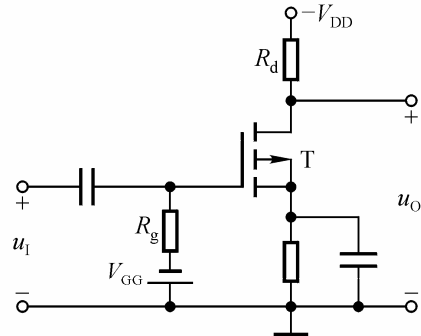
(a)



(b)



(c)



(d)

解图 P2.20

2.21 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 A_u 、 R_i 和 R_o 。

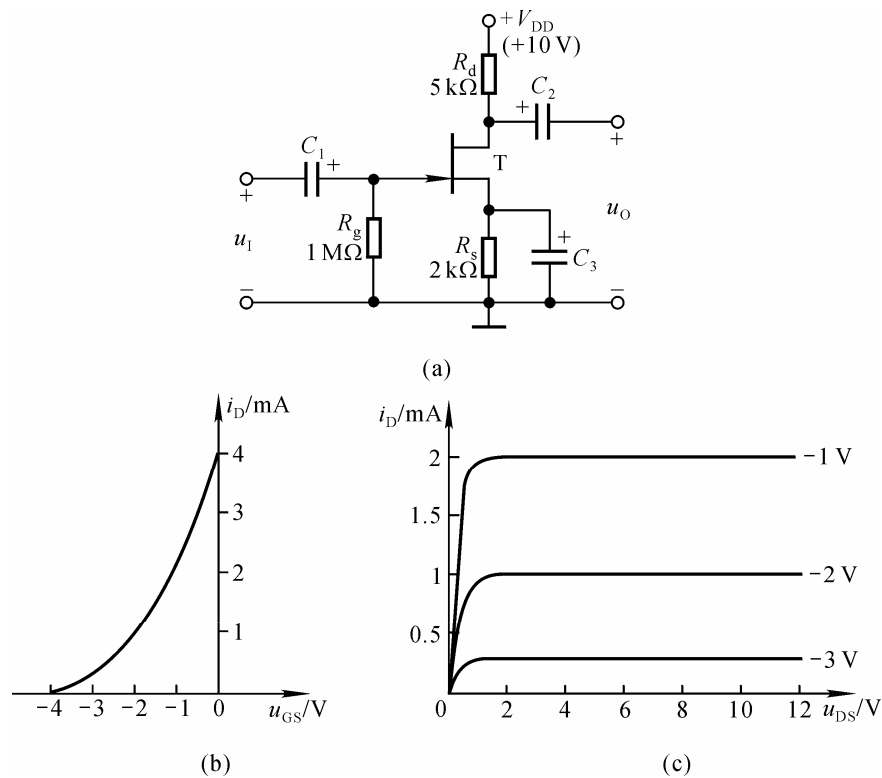
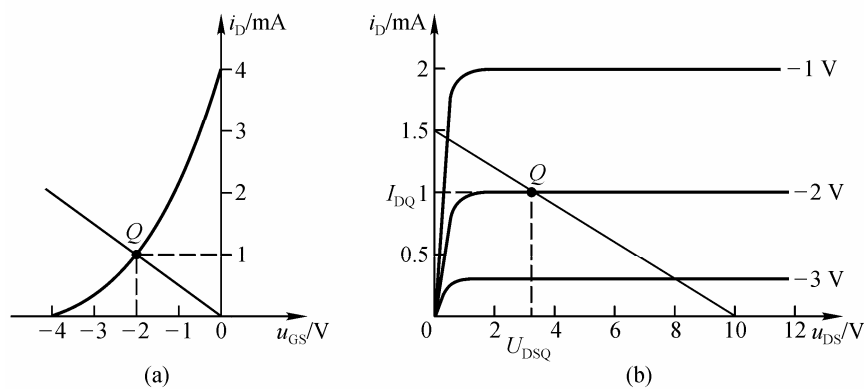


图 P2.21

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 P2.21 (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 $U_{GSQ} = -2V$ 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。

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

$$\dot{A}_u = -g_m R_D = -5$$

$$R_i = R_g = 1 \text{ M}\Omega$$

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

2.22 已知图 P2.22 (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 。

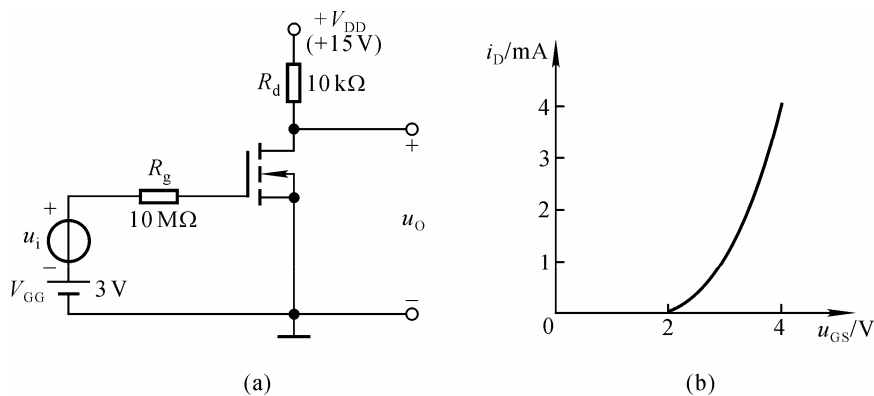


图 P2.22

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：

$$g_m = \frac{2}{U_{GS(th)}} \sqrt{I_{DQ} I_{DO}} = 2 \text{ mA/V}$$

$$\dot{A}_u = -g_m R_D = -20$$

2.23 电路如图P.23所示, 已知场效应管的低频跨导为 g_m , 试写出 \dot{A}_u 、 R_i 和 R_o 的表达式。

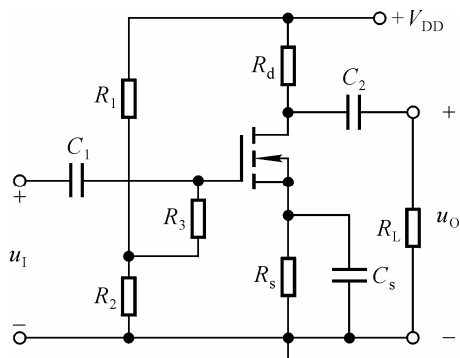


图 P2.23

解: \dot{A}_u 、 R_i 和 R_o 的表达式分别为

$$\dot{A}_u = -g_m(R_D // R_L)$$

$$R_i = R_3 + R_1 // R_2$$

$$R_o = R_D$$

2.24 图 P2.24 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)。

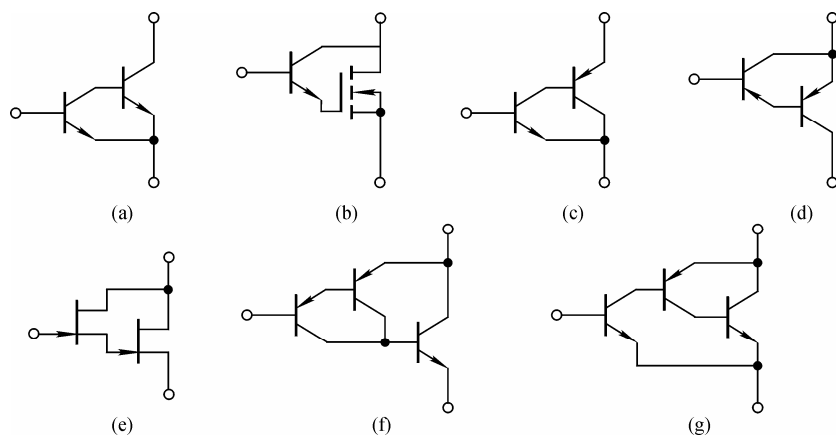


图 P2.24

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) 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。

第三章 多级放大电路

自 测 题

一、判断下列说法是否正确，凡对的在括号内打“√”，否则打“×”。

(1) 现测得两个共射放大电路空载时的电压放大倍数均为 -100 ，将它们连成两级放大电路，其电压放大倍数应为 10000 。()

(2) 阻容耦合多级放大电路各级的 Q 点相互独立，()它只能放大交流信号。()

(3) 直接耦合多级放大电路各级的 Q 点相互影响，()它只能放大直流信号。()

(4) 只有直接耦合放大电路中晶体管的参数才随温度而变化。()

(5) 互补输出级应采用共集或共漏接法。()

解：(1) × (2) √ √ (3) √ × (4) × (5) √

二、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 $1\text{k}\Omega$ 至 $2\text{k}\Omega$ ，电压放大倍数大于 3000 ，第一级应采用_____，第二级应采用_____。

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

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

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

(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 $|\dot{A}_{ui}| = |\dot{U}_o / \dot{I}_i| > 1000$ ，输出电阻 $R_o < 100$ ，第一级应采用_____，第二级应采用_____。

解：(1) A, A (2) D, A (3) B, A (4) D, B
(5) C, B

三、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_____。

- 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. 电源电压不稳定

(2) 集成放大电路采用直接耦合方式的原因是_____。

- A. 便于设计 B. 放大交流信号 C. 不易制作大容量电容

(3) 选用差分放大电路的原因是_____。

- A. 克服温漂 B. 提高输入电阻 C. 稳定放大倍数

(4) 差分放大电路的差模信号是两个输入端信号的_____, 共模信号是两个输入端信号的_____。

- A. 差 B. 和 C. 平均值

(5) 用恒流源取代长尾式差分放大电路中的发射极电阻 R_e , 将使电路的_____。

- 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_____。

- A. 电压放大倍数大 B. 不失真输出电压大
C. 带负载能力强

解: (1) C, D (2) C (3) A (4) A, C (5) B

(6) C

四、电路如图PT3.4所示, 所有晶体管均为硅管, β 均为 60, $r_{bb'}=100\Omega$, 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 $u_O = 0V$? 若静态 $u_O = 0V$, 则 $R_{c2} = ?$ 电压放大倍数为多少?

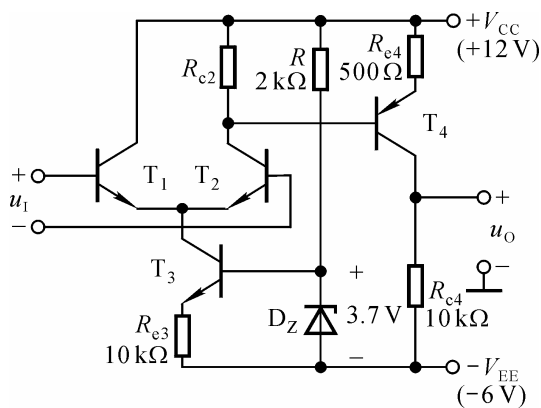


图 T3.4

解：（1）T₃管的集电极电流

$$I_{C3} = (U_Z - U_{BEQ3}) / R_{e3} = 0.3\text{mA}$$

静态时T₁管和T₂管的发射极电流

$$I_{E1} = I_{E2} = 0.15\text{mA}$$

（2）若静态时 $u_O > 0$ ，则应减小 R_{c2} 。

当 $u_I = 0$ 时 $u_O = 0$ ，T₄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

$$I_{R_{c1}} = I_{C2} - I_{B4} = I_{C2} - \frac{I_{CQ4}}{\beta} = 0.14\text{mA}$$

$$R_{c2} = \frac{I_{E4} R_{E4} + |U_{BEQ4}|}{I_{R_{c2}}} \approx 7.14\text{k}\Omega$$

电压放大倍数求解过程如下：

$$r_{be2} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26\text{mV}}{I_{EQ2}} \approx 10.7\text{k}\Omega$$

$$r_{be4} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26\text{mV}}{I_{EQ4}} \approx 2.74\text{k}\Omega$$

$$\dot{A}_{u1} = \frac{\beta \{R_{c2} // [r_{be4} + (1 + \beta)R_{e4}]\}}{2 r_{be2}} \approx 16.5$$

$$\dot{A}_{u2} = -\frac{\beta R_{c4}}{r_{be4} + (1 + \beta)R_{e4}} \approx -18$$

$$\dot{A}_u = \dot{A}_{u1} \cdot \dot{A}_{u2} \approx -297$$

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。

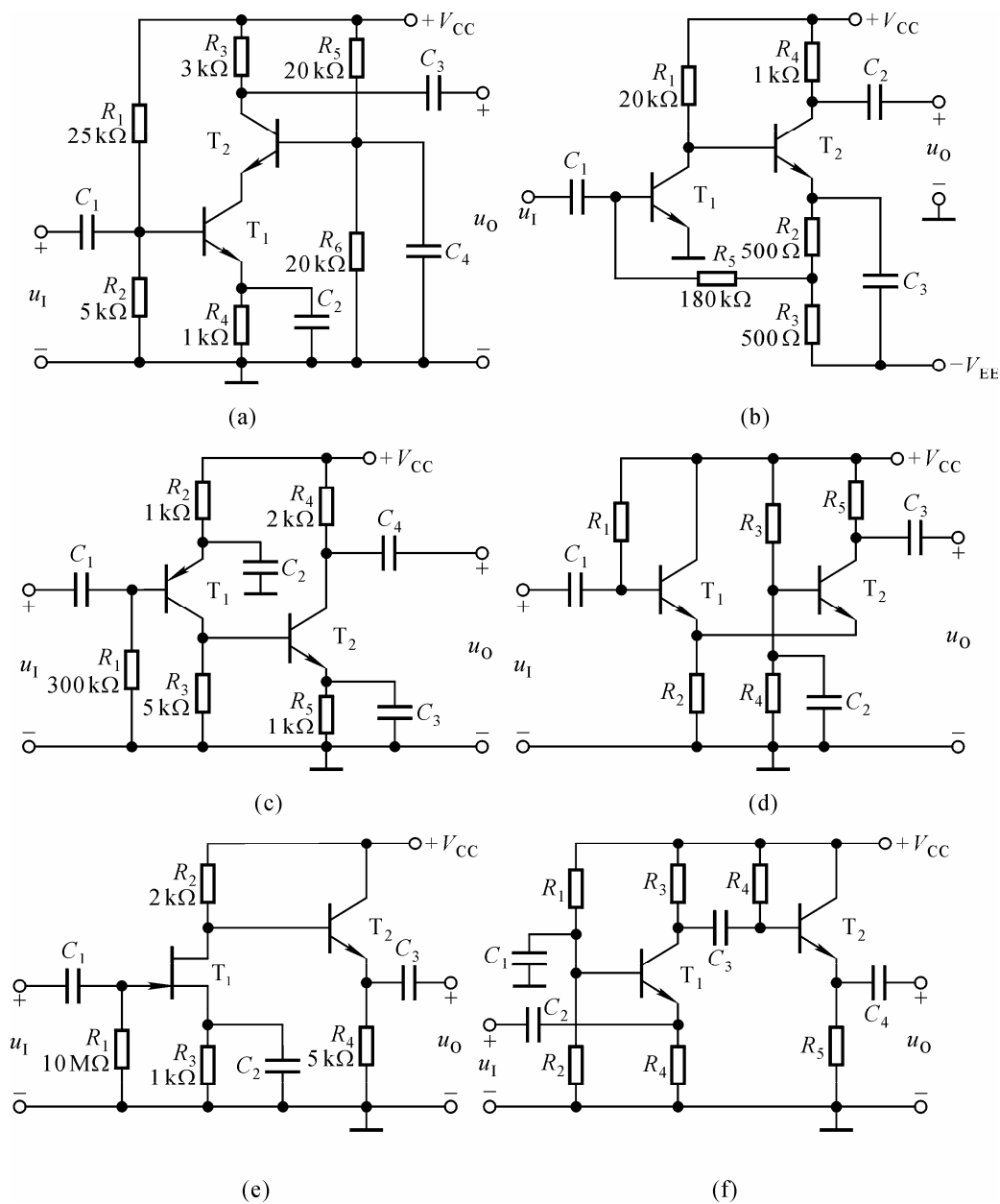


图 P3.1

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 \dot{A}_u 、 R_i 和 R_o 的表达式。

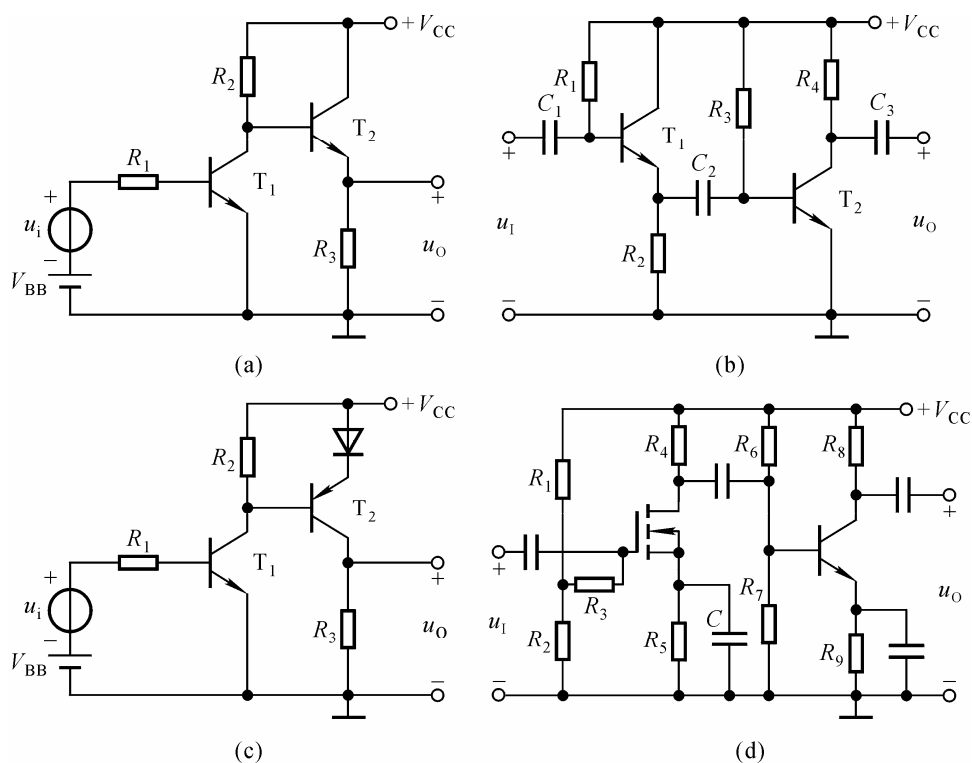


图 P3.2

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 \dot{A}_u 、 R_i 和 R_o 的表达式分别为

图（a）

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

$$R_i = R_1 + r_{be1}$$

$$R_o = R_3 // \frac{r_{be2} + R_2}{1 + \beta_2}$$

图（b）

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

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

$$R_o = R_4$$

图 (c)

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

$$R_i = R_1 + r_{be1}$$

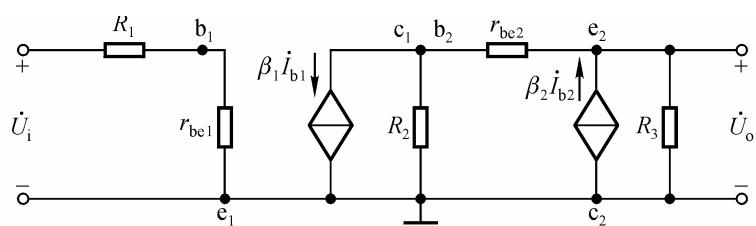
$$R_o = R_3$$

图 (d)

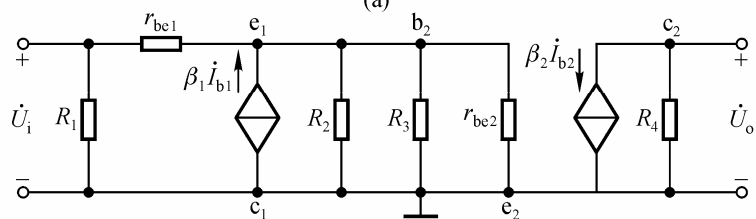
$$\dot{A}_u = [-g_m(R_4 // R_6 // R_7 // r_{be2})] \cdot \left(-\frac{\beta_2 R_8}{r_{be2}}\right)$$

$$R_i = R_3 + R_1 // R_2$$

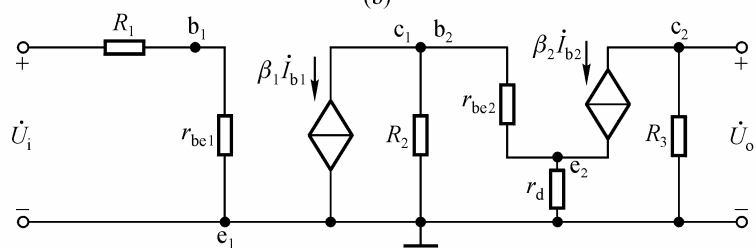
$$R_o = R_8$$



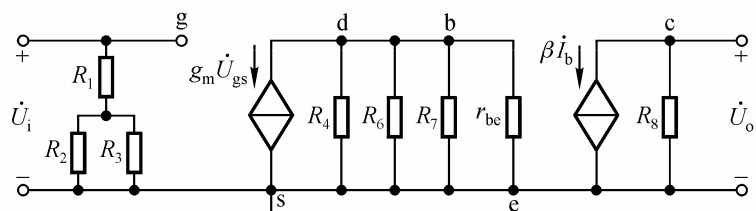
(a)



(b)



(c)



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比较大;
- (2) 哪些电路的输出电阻比较小;
- (3) 哪个电路的 $\left| \dot{A}_{us} \right| = \left| \dot{U}_o / \dot{U}_s \right|$ 最大。

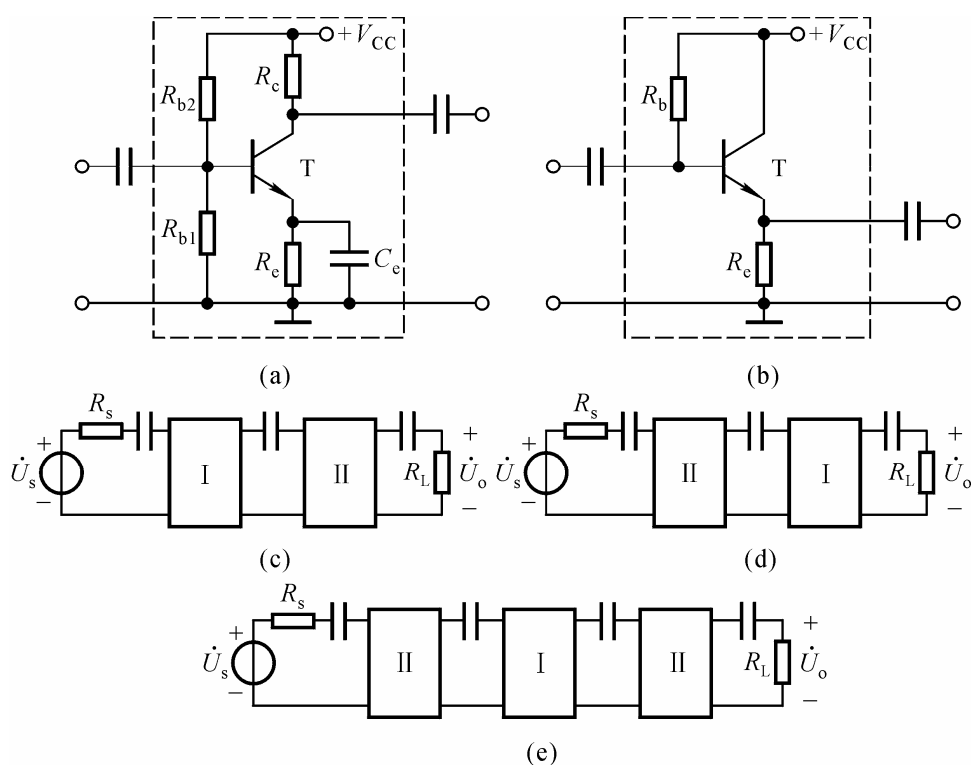


图 P3.3

解: (1) 图 (d)、(e) 所示电路的输入电阻较大。
 (2) 图 (c)、(e) 所示电路的输出电阻较小。
 (3) 图 (e) 所示电路的 $\left| \dot{A}_{us} \right|$ 最大。

3.4 电路如图P3.1 (a) (b) 所示, 晶体管的 β 均为 50, r_{be} 均为 $1.2\text{k}\Omega$, Q 点合适。求解 \dot{A}_u 、 R_i 和 R_o 。

解： 在图 (a) 所示电路中

$$\begin{aligned}\dot{A}_{u1} &= \frac{-\beta_1 \cdot \frac{r_{be2}}{1+\beta_2}}{r_{be1}} \\ \dot{A}_{u2} &= \frac{\beta_2 R_3}{r_{be2}} = 125 \\ \dot{A}_u &= \dot{A}_{u1} \cdot \dot{A}_{u2} \approx -125 \\ R_i &= R_1 // R_2 // r_{be1} \approx 0.93\text{k}\Omega \\ R_o &= R_3 = 3\text{k}\Omega\end{aligned}$$

在图 (b) 所示电路中

$$\begin{aligned}\dot{A}_{u1} &= \frac{-\beta_1 \cdot (R_1 // r_{be2})}{r_{be1}} \approx -50 \\ \dot{A}_{u2} &= -\frac{\beta_2 R_4}{r_{be2}} \approx -42 \\ \dot{A}_u &= \dot{A}_{u1} \cdot \dot{A}_{u2} \approx 2100 \\ R_i &= (R_5 + R_2 // R_3) // r_{be1} \approx 1.2\text{k}\Omega \\ R_o &= R_4 = 1\text{k}\Omega\end{aligned}$$

3.5 电路如图P3.1 (c) (e) 所示, 晶体管的 β 均为 80, r_{be} 均为 $1.5\text{k}\Omega$, 场效应管的 g_m 为 3mA/V ; Q 点合适。求解 \dot{A}_u 、 R_i 和 R_o 。

解： 在图 (c) 所示电路中

$$\begin{aligned}\dot{A}_{u1} &= \frac{-\beta_1 \cdot (R_3 // r_{be2})}{r_{be1}} \approx -62 \\ \dot{A}_{u2} &= -\frac{\beta_2 R_4}{r_{be2}} \approx -107 \\ \dot{A}_u &= \dot{A}_{u1} \cdot \dot{A}_{u2} \approx 6634 \\ R_i &= R_1 // r_{be1} \approx 1.5\text{k}\Omega \\ R_o &= R_4 = 2\text{k}\Omega\end{aligned}$$

在图 (e) 所示电路中

$$\dot{A}_{u1} = -g_m \{R_2 // [r_{be} + (1 + \beta)R_4]\} \approx -g_m R_2 \approx -6$$

$$\dot{A}_{u2} = \frac{(1 + \beta)R_4}{r_{be} + (1 + \beta)R_4} \approx 1$$

$$\dot{A}_u = \dot{A}_{u1} \cdot \dot{A}_{u2} \approx -6$$

$$R_i = R_1 = 10\text{M}\Omega$$

$$R_o = R_4 // \frac{r_{be} + R_2}{1 + \beta} \approx 43\Omega$$

3.6 图P3.6 所示电路参数理想对称， $\beta_1 = \beta_2 = \beta$ ， $r_{be1} = r_{be2} = r_{be}$ 。

(1) 写出 R_W 的滑动端在中点时 A_d 的表达式；

(2) 写出 R_W 的滑动端在最右端时 A_d 的表达式，比较两个结果有什么不同。

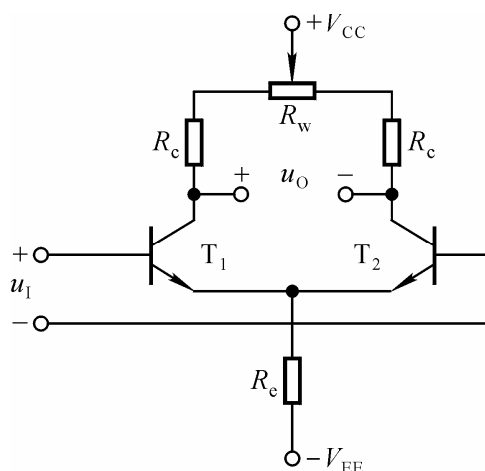


图 P3.6

解：(1) R_W 的滑动端在中点时 A_d 的表达式为

$$A_d = \frac{\Delta u_O}{\Delta u_I} = -\frac{\beta(R_c + \frac{R_W}{2})}{r_{be}}$$

(2) R_W 的滑动端在最右端时

$$\Delta u_{C1} = -\frac{\beta(R_c + R_w)}{2r_{be}} \cdot \Delta u_I \quad \Delta u_{C2} = +\frac{\beta R_c}{2r_{be}} \cdot \Delta u_I$$

$$\Delta u_O = \Delta u_{C1} - \Delta u_{C2} = -\frac{\beta(R_c + \frac{R_w}{2})}{r_{be}} \cdot \Delta u_I$$

所以 A_d 的表达式为

$$A_d = \frac{\Delta u_O}{\Delta u_I} = -\frac{\beta(R_c + \frac{R_w}{2})}{r_{be}}$$

比较结果可知，两种情况下的 A_d 完全相等；但第二种情况下的 $|\Delta u_{C1}| > |\Delta u_{C2}|$ 。

3.7 图P3.7所示电路参数理想对称，晶体管的 β 均为50， $r_{bb'}=100\Omega$ ， $U_{BEQ} \approx 0.7$ 。试计算 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} ，以及动态参数 A_d 和 R_i 。

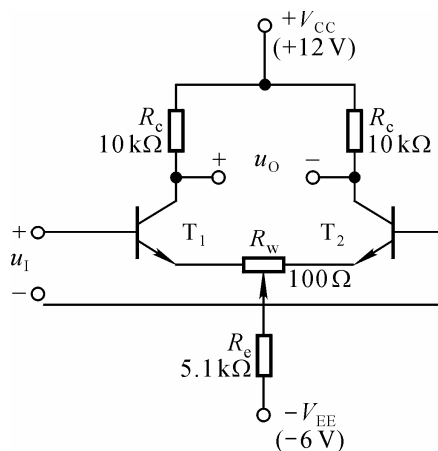


图 P3.7

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分析如下：

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

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

A_d 和 R_i 分析如下：

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

$$A_d = -\frac{\beta R_c}{r_{be} + (1 + \beta) \frac{R_w}{2}} \approx -97$$

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

3.8 电路如图P3.8所示， T_1 管和 T_2 管的 β 均为40， r_{be} 均为 $3\text{k}\Omega$ 。试问：若输入直流信号 $u_{I1}=20\text{mV}$ ， $u_{I2}=10\text{mV}$ ，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 Δu_O =？

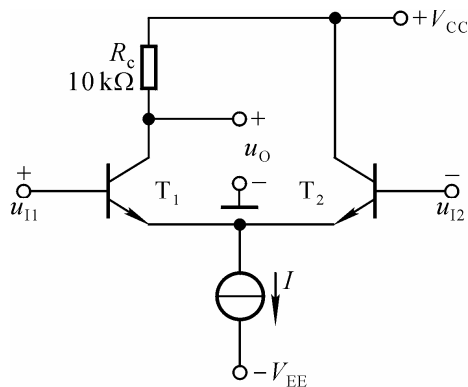


图 P3.8

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 Δu_O 分别为

$$u_{IC} = \frac{u_{I1} + u_{I2}}{2} = 15\text{mV}$$

$$u_{Id} = u_{I1} - u_{I2} = 10\text{mV}$$

$$A_d = -\frac{\beta R_c}{2r_{be}} \approx -67$$

$$\Delta u_O = A_d u_{Id} \approx -0.67\text{V}$$

由于电路的共模放大倍数为零，故 Δu_O 仅由差模输入电压和差模放大倍数决定。

3.9 电路如图 P3.9 所示，晶体管的 $\beta=50$ ， $r_{bb'}=100\Omega$ 。

(1) 计算静态时 T_1 管和 T_2 管的集电极电流和集电极电位；

(2) 用直流表测得 $u_O=2V$ ， $u_I=?$ 若 $u_I=10mV$ ，则 $u_O=?$

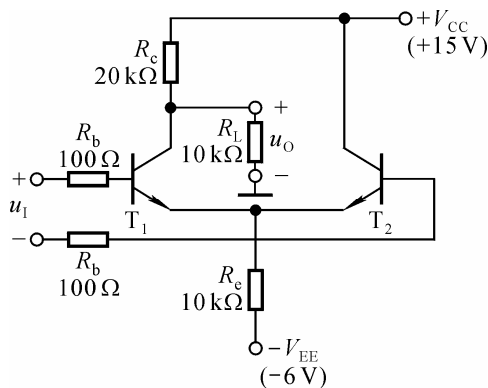


图 P3.9

解：(1) 用戴维宁定理计算出左边电路的等效电阻和电源为

$$R'_L = R_c // R_L \approx 6.67k\Omega, \quad V'_{CC} = \frac{R_L}{R_c + R_L} \cdot V_{CC} = 5V$$

静态时 T_1 管和 T_2 管的集电极电流和集电极电位分别为

$$I_{CQ1} = I_{CQ2} = I_{CQ} \approx I_{EQ} \approx \frac{V_{EE} - U_{BEQ}}{2R_e} = 0.265mA$$

$$U_{CQ1} = V'_{CC} - I_{CQ} R'_L \approx 3.23V$$

$$U_{CQ2} = V_{CC} = 15V$$

(2) 先求出输出电压变化量，再求解差模放大倍数，最后求出输入电压，如下：

$$\Delta u_O = u_O - U_{CQ1} \approx -1.23V$$

$$r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26mA}{I_{EQ}} \approx 5.1k\Omega$$

$$A_d = -\frac{\beta R'_L}{2(R_b + r_{be})} \approx -32.7$$

$$u_I = \frac{\Delta u_O}{A_d} \approx 37.6mV$$

若 $u_I=10mV$ ，则

$$\Delta u_O = A_d u_I \approx -0.327V$$

$$u_O = U_{CQ1} + \Delta u_O \approx 2.9V$$

3.10 试写出图 P3.10 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 β_1 和 β_2 ，b-e 间动态电阻分别为 r_{be1} 和 r_{be2} 。

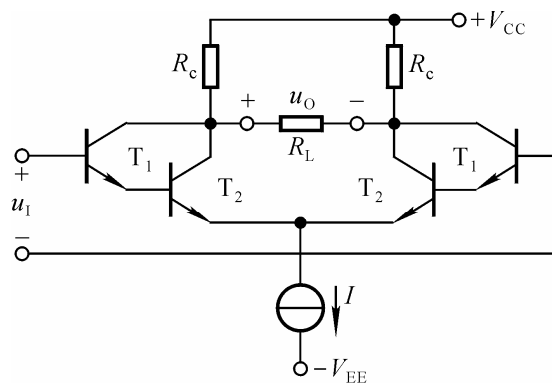


图 P3.10

解： A_d 和 R_i 的近似表达式分别为

$$A_d \approx -\frac{\beta_1 \beta_2 (R_c // \frac{R_L}{2})}{r_{be1} + (1 + \beta_1) r_{be2}}$$

$$R_i = 2[r_{be1} + (1 + \beta_1) r_{be2}]$$

3.11 电路如图 P3.11 所示， T_1 和 T_2 的低频跨导 g_m 均为 2mA/V 。试求解差模放大倍数和输入电阻。

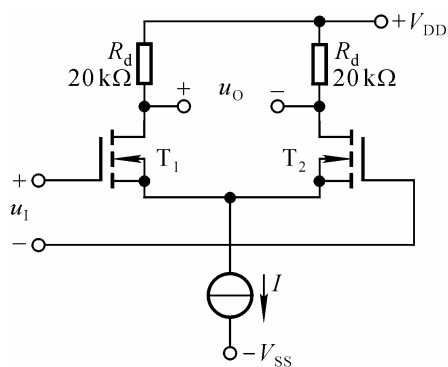


图 P3.11

解： 差模放大倍数和输入电阻分别为

$$A_d = -g_m R_D = -40$$

$$R_i = \infty$$

3.12 试求出图 P3.12 所示电路的 A_d 。设 T_1 与 T_3 的低频跨导 g_m 均为 2mA/V ，

T_2 和 T_4 的电流放大系数 β 均为 80。

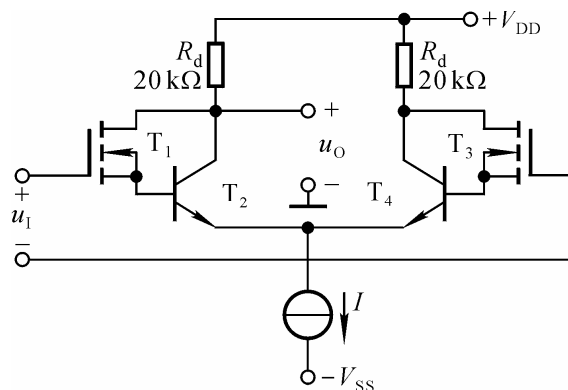


图 P3.12

解： 首先求出输出电压和输入电压的变化量，然后求解差模放大倍数。

$$\begin{aligned}\Delta u_O &= -(\Delta i_D + \Delta i_C)R_D = -(g_m \Delta u_{GS} + \beta g_m \Delta u_{GS})R_D \\ \frac{1}{2}\Delta u_I &= \Delta u_{GS} + \Delta u_{BE} = \Delta u_{GS} + \Delta i_D r_{be} = \Delta u_{GS} + g_m \Delta u_{GS} r_{be} \\ A_d &= -\frac{1}{2} \cdot \frac{(1+\beta)g_m R_D}{1+g_m r_{be}}, \text{ 若 } r_{be}=1\text{ k}\Omega, \text{ 则 } A_d = -540.\end{aligned}$$

3.13 电路如图 P3.13 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。

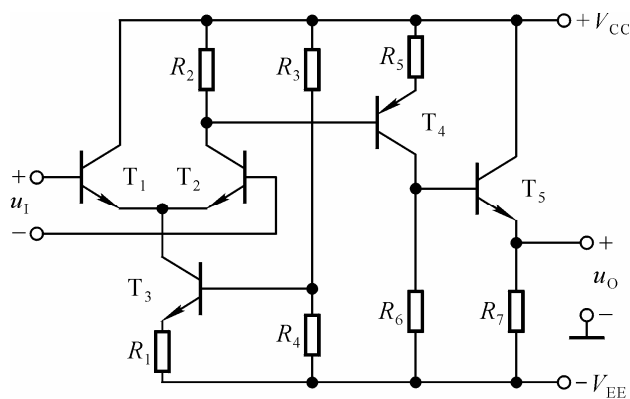


图 P3.13

解： A_u 、 R_i 和 R_o 的表达式分析如下：

$$A_{u1} = \frac{\Delta u_{O1}}{\Delta u_1} = \frac{\beta_1 \{R_2 // [r_{be4} + (1 + \beta_4)R_5]\}}{2r_{be1}}$$

$$A_{u2} = \frac{\Delta u_{O2}}{\Delta u_{12}} = -\frac{\beta_4 \{R_6 // [r_{be5} + (1 + \beta_5)R_7]\}}{r_{be4} + (1 + \beta_4)R_5}$$

$$A_{u3} = \frac{\Delta u_{O3}}{\Delta u_{13}} = \frac{(1 + \beta_5)R_7}{r_{be5} + (1 + \beta_5)R_7}$$

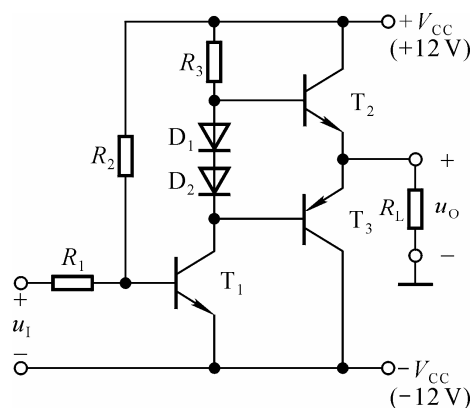
$$A_u = \frac{\Delta u_o}{\Delta u_1} = A_{u1} \cdot A_{u2} \cdot A_{u3}$$

$$R_i = r_{be1} + r_{be2}$$

$$R_o = R_7 // \frac{r_{be5} + R_6}{1 + \beta_5}$$

3.14 电路如图 3.14 所示。已知电压放大倍数为 -100 ，输入电压 u_1 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 $U_o = ?$



P3.14

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}

$$U_{\text{imax}} = \frac{U_{\text{om}}}{|A_u|} \approx 77.8\text{mV}$$

(2) 若 $U_i = 10\text{mV}$ ，则 $U_o = 1\text{V}$ (有效值)。

若 R_3 开路，则 T_1 和 T_3 组成复合管，等效 $\beta \approx \beta_1 \beta_3$ ， T_3 可能饱和，使得 $u_o \approx -11\text{V}$ (直流)。

若 R_3 短路，则 $u_o \approx 11.3\text{V}$ (直流)。

第四章 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_____。
- 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_____。
- 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_____。
- A. 指标参数准确 B. 参数不受温度影响
C. 参数一致性好
- (4) 集成运放的输入级采用差分放大电路是因为可以_____。
- A. 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. 共射放大电路 B. 共集放大电路
C. 共基放大电路

解：(1) C (2) B (3) C (4) A (5) A

二、判断下列说法是否正确，用“√”或“×”表示判断结果填入括号内。

- (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。()

解：(1) × (2) √ (3) √ (4) √ (5) ×

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。

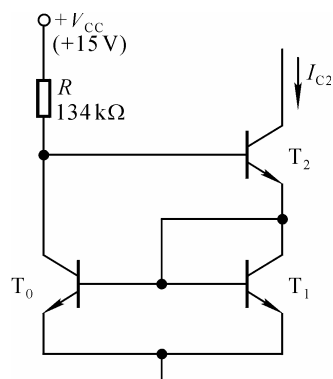


图 T4.3

解：分析估算如下：

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

$$I_{C0} = I_{C1} = I_C$$

$$I_{E2} = I_{E1}$$

$$I_R = I_{C0} + I_{B2} = I_{C0} + I_{B1} = I_C + \frac{I_C}{\beta}$$

$$I_C = \frac{\beta}{1 + \beta} \cdot I_R \approx I_R = 100 \mu \text{ A}$$

四、电路如图 T4.4 所示。

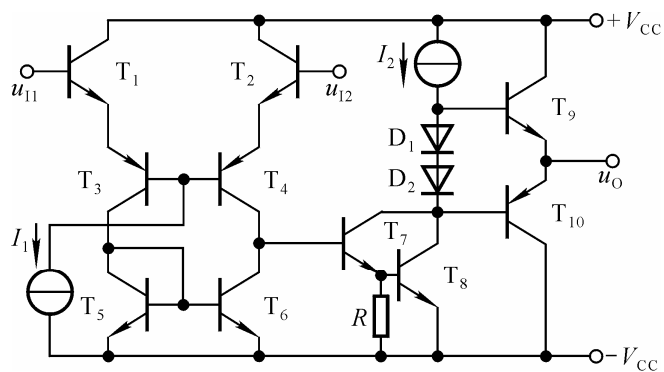


图 T4.4

(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。

五、根据下列要求, 将应优先考虑使用的集成运放填入空内。已知现有集成运放致的类型是: 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_____。

(2) 作宽频带放大器, 应选用_____。

(3) 作幅值为 $1\mu\text{V}$ 以下微弱信号的量测放大器, 应选用_____。

(4) 作内阻为 $100\text{k}\Omega$ 信号源的放大器, 应选用_____。

(5) 负载需 5A 电流驱动的放大器, 应选用_____。

(6) 要求输出电压幅值为 ± 80 的放大器, 应选用_____。

(7) 宇航仪器中所用的放大器, 应选用_____。

解: (1) ① (2) ③ (3) ⑦ (4) ② (5) ⑥

(6) ⑤ (7) ④

习 题

4.1 通用型集成运放一般由几部分电路组成，每一部分常采用哪种基本电路？通常对每一部分性能的要求分别是什么？

解：通用型集成运放由输入级、中间级、输出级和偏置电路等四个部分组成。

通常，输入级为差分放大电路，中间级为共射放大电路，输出级为互补电路，偏置电路为电流源电路。

对输入级的要求：输入电阻大，温漂小，放大倍数尽可能大。

对中间级的要求：放大倍数大，一切措施几乎都是为了增大放大倍数。

对输出级的要求：带负载能力强，最大不失真输出电压尽可能大。

对偏置电路的要求：提供的静态电流稳定。

4.2 已知一个集成运放的开环差模增益 A_{od} 为 100dB，最大输出电压峰-峰值 $U_{opp} = \pm 14V$ ，分别计算差模输入电压 u_I （即 $u_P - u_N$ ）为 $10\mu V$ 、 $100\mu V$ 、 $1mV$ 、 $1V$ 和 $-10\mu V$ 、 $-100\mu V$ 、 $-1mV$ 、 $-1V$ 时的输出电压 u_O 。

解：根据集成运放的开环差模增益，可求出开环差模放大倍数

$$20\lg A_{od} = 100\text{dB}$$

$$A_{od} = 10^5$$

当集成运放工作在线性区时，输出电压 $u_O = A_{od} u_I$ ；当 $A_{od} u_I$ 超过 $\pm 14V$ 时， u_O 不是 $+14V$ ，就是 $-14V$ 。故 u_I （即 $u_P - u_N$ ）为 $10\mu V$ 、 $100\mu V$ 、 $1mV$ 、 $1V$ 和 $-10\mu V$ 、 $-100\mu V$ 、 $-1mV$ 、 $-1V$ 时， u_O 分别为 $1V$ 、 $10V$ 、 $14V$ 、 $14V$ 、 $-1V$ 、 $-10V$ 、 $-14V$ 、 $-14V$ 。

4.3 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	单位增益带宽
单位	dB	$M\Omega$	mv	nA	nA	Hz	dB	V/ μV	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。

[illegible]

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} 。

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

当 $\beta (1 + \beta) \gg 3$ 时

第四章题解—5

4.5 图 4.5 所示为多集电极晶体管构成的多路电流源。已知集电极 C_0 与 C_1 所接集电区的面积相同， C_2 所接集电区的面积是 C_0 的两倍， $I_{C0}/I_B = 4$ ，e-b 间电压约为 $0.7V$ 。试求解 I_{C1} 、 I_{C2} 各为多少

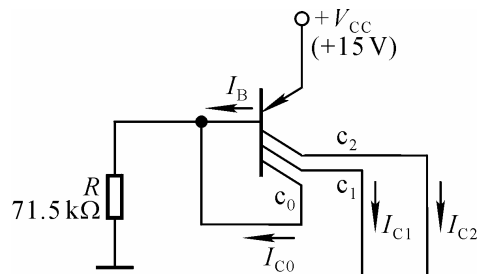


图 P4.5

解：多集电极晶体管集电极电流正比于集电区的面积。

先求出 R 中电流，再求解 I_{C1} 、 I_{C2} 。

$$I_R = \frac{V_{CC} - U_{EB}}{R} = 200\mu A \quad (\text{其中 } U_{EB} = 0.7V)$$

$$I_R = I_C + I_B = I_{C0} + \frac{I_{C0}}{\beta}$$

$$I_{C0} = \frac{\beta I_R}{1 + \beta} = 160\mu A$$

$$I_{C1} = I_{C0} = 160\mu A$$

$$I_{C2} = 2I_{C0} = 320\mu A$$

4.6 电路如图P4.6所示，T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 $A_u = \Delta u_O / \Delta u_1$ 的表达式。

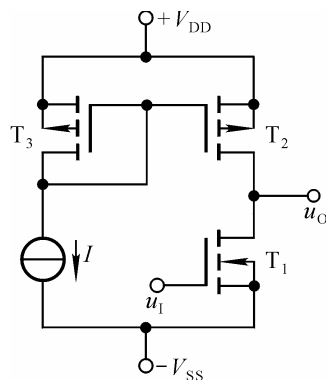


图 P4.6

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 、 T_2 管d-s间动态电阻分别为 r_{ds1} 、 r_{ds2} ，所以电压放大倍数 A_u 的表达式为

$$A_u = \frac{\Delta u_O}{\Delta u_1} = -\frac{\Delta i_D (r_{ds1} // r_{ds2})}{\Delta u_1} = -g_m (r_{ds1} // r_{ds2})$$

4.7 电路如图P4.7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间动态电阻为 r_{ds2} 和 r_{ds4} 。试求出两电路的电压放大倍数 $A_u = \Delta u_O / \Delta (u_{i1} - u_{i2})$ 的表达式。

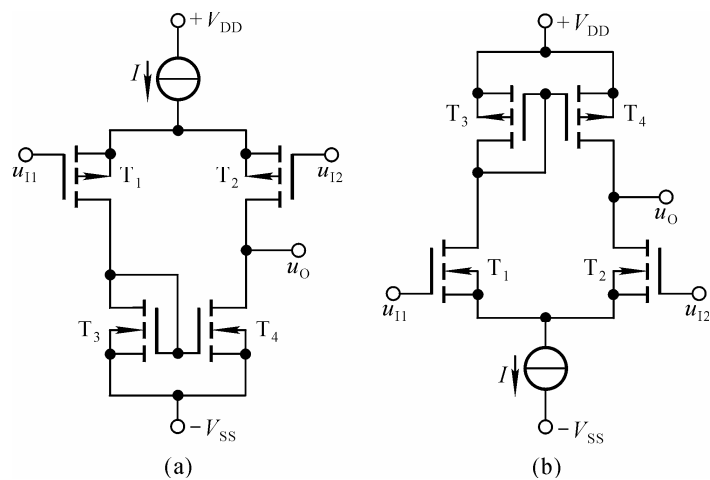


图 P4.7

解：在图（a）（b）所示电路中

$$\begin{aligned}\Delta i_{D1} &= -\Delta i_{D2} \approx \Delta i_{D3} = \Delta i_{D4} \\ \Delta i_O &= \Delta i_{D2} - \Delta i_{D4} \approx \Delta i_{D2} - \Delta i_{D1} = -2\Delta i_{D1} \\ \Delta i_{D1} &= g_m \cdot \frac{\Delta(u_{I1} - u_{I2})}{2} \\ g_m &\approx -\frac{\Delta i_O}{\Delta(u_{I1} - u_{I2})}\end{aligned}$$

图（a）所示电路的电压放大倍数

$$\begin{aligned}A_u &= \frac{\Delta u_o}{\Delta(u_{I1} - u_{I2})} \\ &= -\Delta i_O (r_{ds2} // r_{ds4}) / \Delta(u_{I1} - u_{I2}) \\ &\approx g_m (r_{ds2} // r_{ds4})\end{aligned}$$

同理，图（b）所示电路的电压放大倍数

$$A_u \approx g_m (r_{ds2} // r_{ds4})$$

4.8 电路如图 P4.8 所示，具有理想的对称性。设各管 β 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 $(u_{I1} - u_{I2})$ ，则由此产生的差模电流为 Δi_D ，求解电路电流放大倍数 A_i 的近似表达式。

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

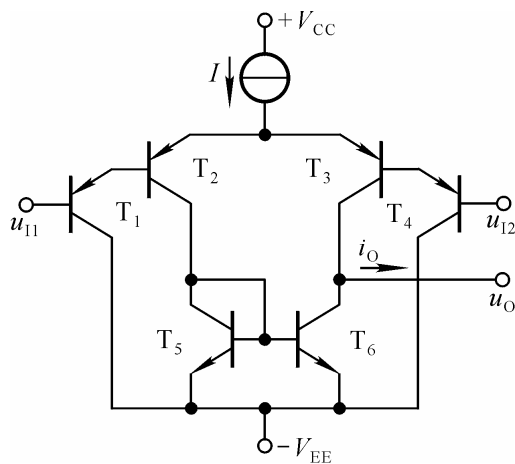


图 P4.8

$$\begin{aligned}\Delta i_O &\approx 2(1 + \beta)\beta \Delta i_i \\ A_i &= \frac{\Delta i_O}{\Delta i_i} \approx 2(1 + \beta)\beta\end{aligned}$$

4.9 电路如图 P4.9 所示，具有理想的对称性。回答题 4.8 所提的问题。

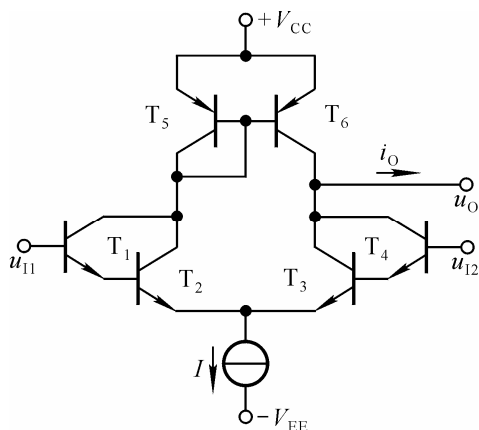


图 P4.9

解：(1) 图示电路为双端输入、单端输出的差分放大电路。T₁和T₂、T₃和T₄分别组成的复合管为放大管，T₅和T₆组成的镜像电流源为有源负载。

(2) 由于用T₅和T₆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

$$\Delta i_O \approx 2(1 + \beta)\beta \Delta i_1$$

$$A_i = \frac{\Delta i_O}{\Delta i_1} \approx 2(1 + \beta)\beta$$

4.10 电路如图 P4.10 所示，T₁与T₂管的特性相同，所有晶体管的 β 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。

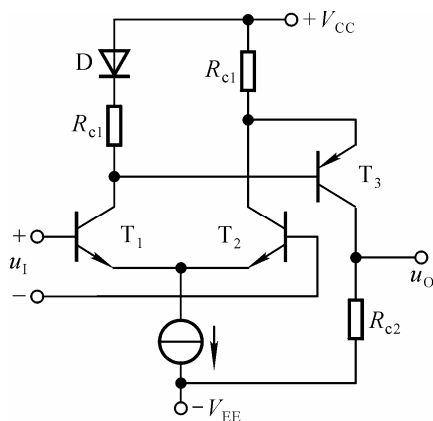


图 P4.10

(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。

解：（1）在忽略二极管动态电阻的情况下

$$A_{u1} \approx -\beta \cdot \frac{R_{c1} // \frac{r_{be3}}{2}}{r_{be1}}$$

$$A_{u2} = -\beta \cdot \frac{R_{c2}}{r_{be3}}$$

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

（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 $u_O \approx 0$ 。

4.11 电路如图P4.11所示， T_1 与 T_2 管为超 β 管，电路具有理想的对称性。选择合适的答案填入空内。

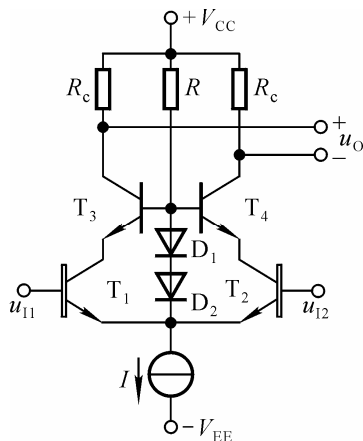


图 P4.11

（1）该电路采用了_____。

- 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
了_____。

- 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 β 管能够_____。

- 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 与 T_2 管的静态压降约为_____。

- A. 0.7V
- B. 1.4V
- C. 不可知

解：（1）C （2）C （3）B （4）A

4.12 电路如图P4.11所示，试问：为什么说 D_1 与 D_2 的作用是减少 T_1 与 T_2 管集电结反向电流 I_{CBO} 对输入电流的影响？

解：因为 $U_{BE3} + U_{CE1} = 2U_D$ ， $U_{BE1} \approx U_D$ ， $U_{CE1} \approx U_D$ ，所以 $U_{CB1} \approx 0$ ，反向电流为零，因此 I_{CBO} 对输入电流影响很小。

4.13 在图 P4.13 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) $i_{B2} \approx ?$
- (3) $A_{ui} = \Delta u_O / (i_{I1} - i_{I2}) \approx ?$

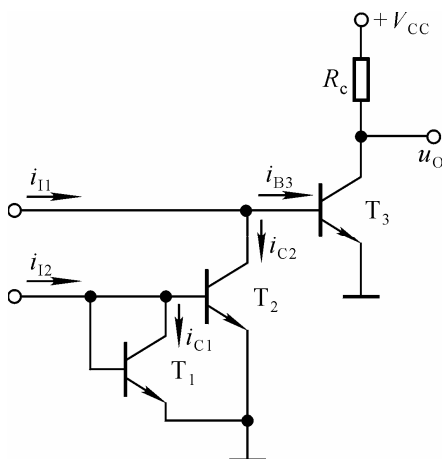


图 P4.13

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

$$\Delta u_O = -\Delta i_{C3} R_c = -\beta_3 \Delta i_{B3} R_c$$

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

4.14 比较图 P4.14 所示两个电路，分别说明它的是如何消交越失真和如何实现过流保护的。

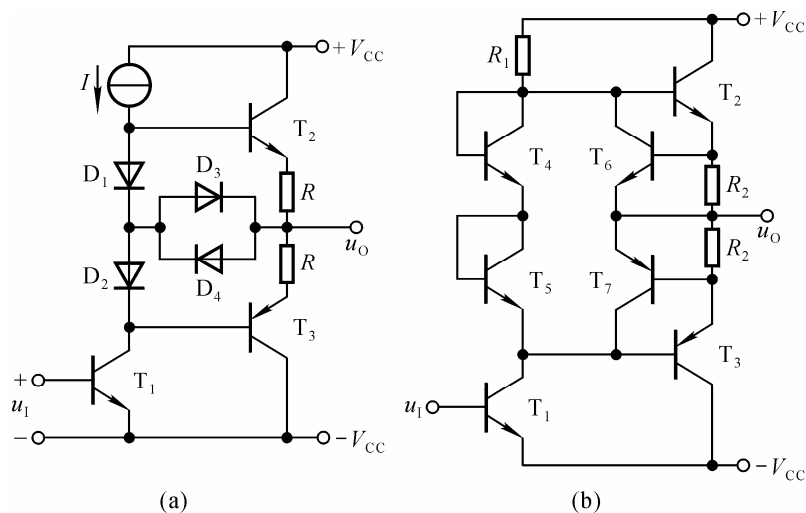


图 P4.14

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。

4.15 图 4.15 所示电路是某集成运放电路的一部分，单电源供电， T_1 、 T_2 、 T_3 为放大管。试分析：

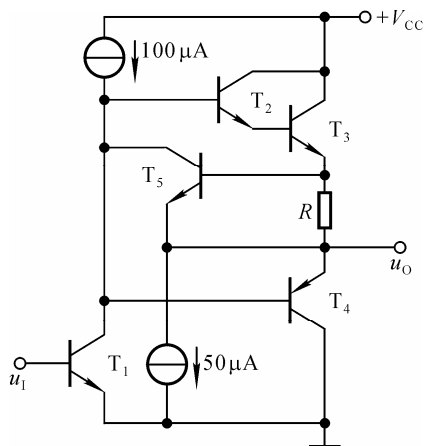


图 P4.15

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

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 $u_{B4} = u_{C1} = u_O + u_R + u_{B2} + u_{B3}$ ， $u_{E4} = u_O$ ， $u_{B4} > u_{E4}$ 。

(3) $50\ \mu\text{A}$ 电流源为 T_3 提供射极电流，在交流等效电路中等效为阻值非常大的电阻。

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

4.16 电路如图 P4.16 所示，试说明各晶体管的作用。

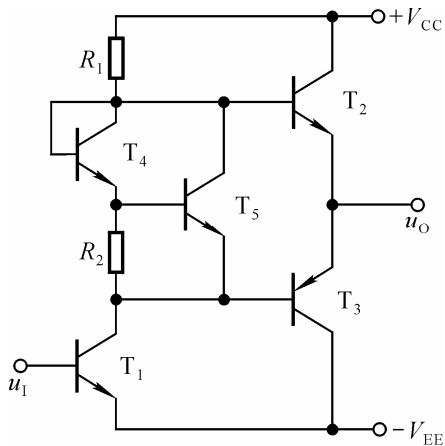


图 P4.16

解：T₁为共射放大电路的放大管；T₂和T₃组成互补输出级；T₄、T₅、R₂组成偏置电路，用于消除交越失真。

4.17 图 4.17 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) T₃与T₄的作用；
- (3) 电流源I₃的作用；
- (4) D₂与D₃的作用。

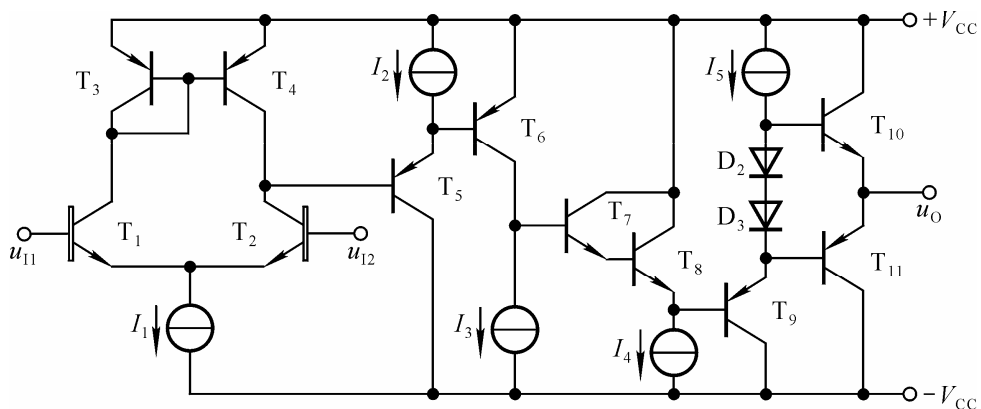


图 P4.17

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。

4.18 通用型运放 F747 的内部电路如图 P4.18 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？

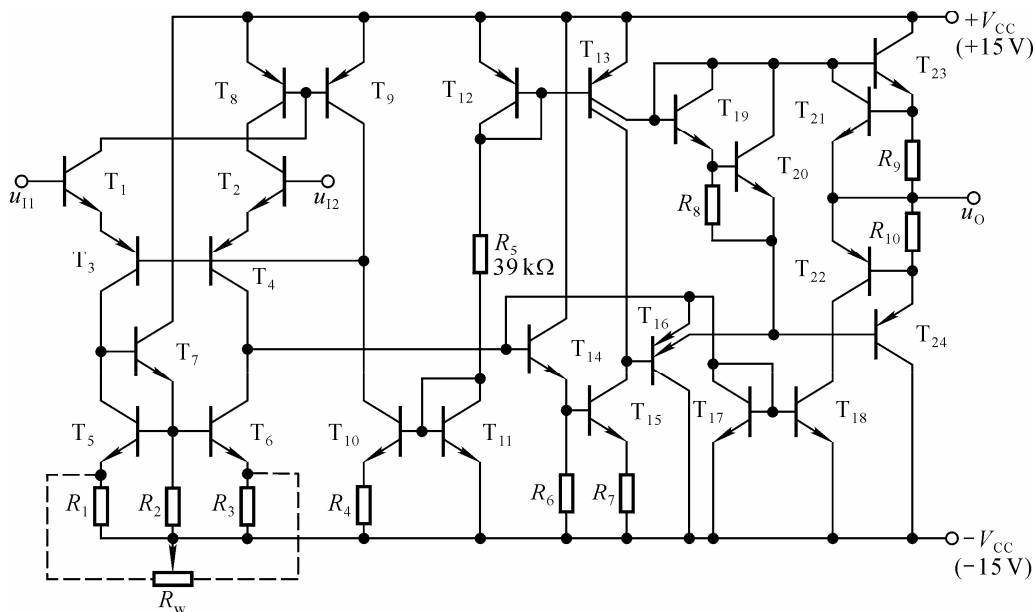


图 P4.18

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

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

使 T_{23} 、 T_{24} 处于微导通，从而消除交越失真。

第五章 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. 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_____, 而低频信号作用时放大倍数数值下降的原因是_____。

- 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_____。

- A. 0.5 倍
- B. 0.7 倍
- C. 0.9 倍

即增益下降_____。

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

(4) 对于单管共射放大电路, 当 $f = f_L$ 时, \dot{U}_o 与 \dot{U}_i 相位关系是_____。

- A. $+45^\circ$
- B. -90°
- C. -135°

当 $f = f_H$ 时, \dot{U}_o 与 \dot{U}_i 的相位关系是_____。

- A. -45°
- B. -135°
- C. -225°

解: (1) A (2) B, A (3) B A (4) C C

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_{π}' ；

(3) f_H 和 f_L ；

(4) 画出波特图。

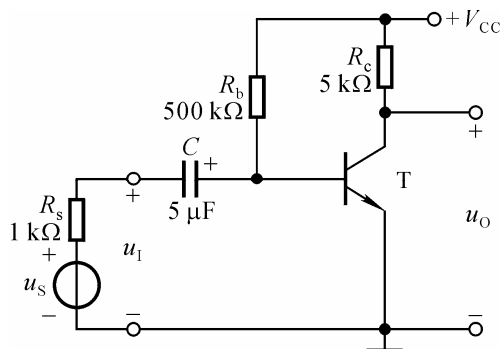


图 T5.2

解：(1) 静态及动态的分析估算：

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

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

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

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

$$r_{be} = r_{bb'} + r_{b'e} \approx 1.27k\Omega$$

$$R_i = r_{be} // R_b \approx 1.27k\Omega$$

$$g_m = \frac{I_{EQ}}{U_T} \approx 69.2mA/V$$

$$\dot{A}_{usm} = \frac{R_i}{R_s + R_i} \cdot \frac{r_{b'e}}{r_{be}} (-g_m R_c) \approx -178$$

(2) 估算 C_{π}' ：

$$f_T \approx \frac{\beta_0}{2\pi r_{b'e}(C_\pi + C_\mu)}$$

$$C_\pi \approx \frac{\beta_0}{2\pi r_{b'e} f_T} - C_\mu \approx 214\text{pF}$$

$$C'_\pi = C_\pi + (1 + g_m R_c) C_\mu \approx 1602\text{pF}$$

(3) 求解上限、下限截止频率：

$$R = r_{b'e} // (r_{b'b} + R_s // R_b) \approx r_{b'e} // (r_{b'b} + R_s) \approx 567\Omega$$

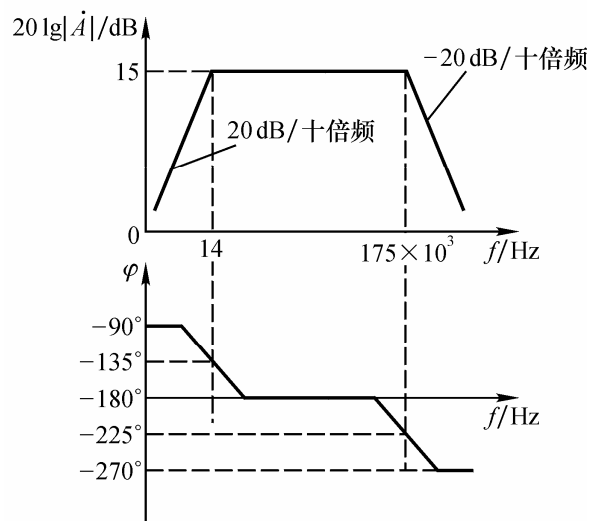
$$f_H = \frac{1}{2\pi R C'_\pi} \approx 175\text{kHz}$$

$$f_L = \frac{1}{2\pi (R_s + R_i) C} \approx 14\text{Hz}$$

(4) 在中频段的增益为

$$20\lg|A_{usm}| \approx 45\text{dB}$$

频率特性曲线如解图 T5.2 所示。



解图 T5.2

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 $20\lg|\dot{A}_{um}| = \underline{\hspace{2cm}} \text{ dB}$, $\dot{A}_{um} = \underline{\hspace{2cm}}$ 。
- (2) 电路的下限频率 $f_L \approx \underline{\hspace{2cm}} \text{ Hz}$, 上限频率 $f_H \approx \underline{\hspace{2cm}} \text{ kHz}$ 。
- (3) 电路的电压放大倍数的表达式 $\dot{A}_u = \underline{\hspace{4cm}}$ 。

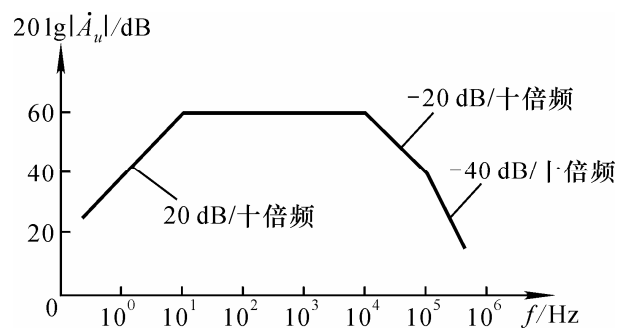


图 T5.3

解: (1) 60 10^4

(2) 10 10

(3)

$$\frac{\pm 10^3}{(1 + \frac{10}{jf})(1 + j\frac{f}{10^4})(1 + j\frac{f}{10^5})} \text{ 或 } \frac{\pm 100jf}{(1 + j\frac{f}{10})(1 + j\frac{f}{10^4})(1 + j\frac{f}{10^5})}$$

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_{μ} 、 C_{π} ， $R_i \approx r_{be}$ 。

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。

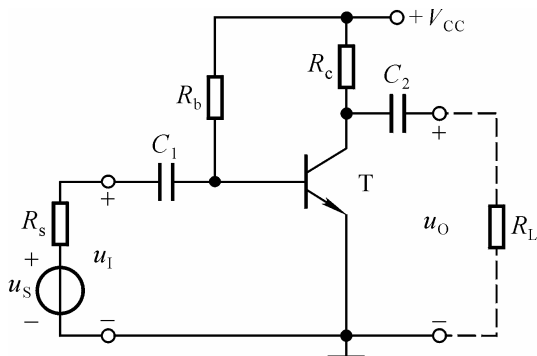


图 P5.1

(1) 在空载情况下，下限频率的表达式 $f_L =$ _____。当 R_s 减小时， f_L 将 _____；当带上负载电阻后， f_L 将 _____。

(2) 在空载情况下，若 b-e 间等效电容为 C_{π}' ，_____ 则上限频率的表达式 $f_H =$ _____；当 R_s 为零时， f_H 将 _____；当 R_b 减小时， g_m 将 _____， C_{π}' 将 _____， f_H 将 _____。

解：(1) $\frac{1}{2\pi(R_s + R_b // r_{be})C_1}$ 。 ①； ①。

(2) $\frac{1}{2\pi[r_{be} // (r_{bb'} + R_b // R_s)]C_{\pi}'}$ ； ①； ①， ①， ③。

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。

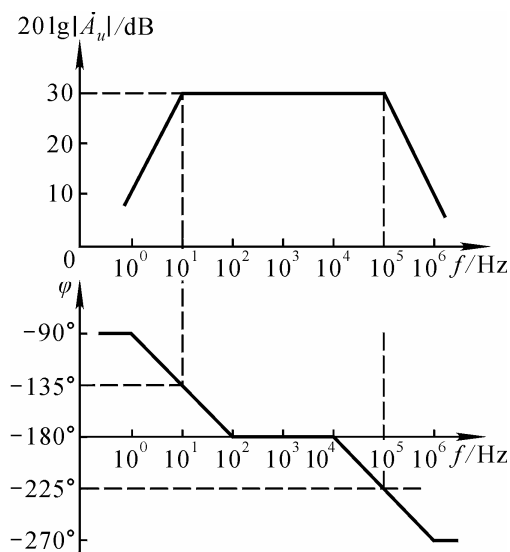


图 P5.2

解：设电路为基本共射放大电路或基本共源放大电路。

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

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。

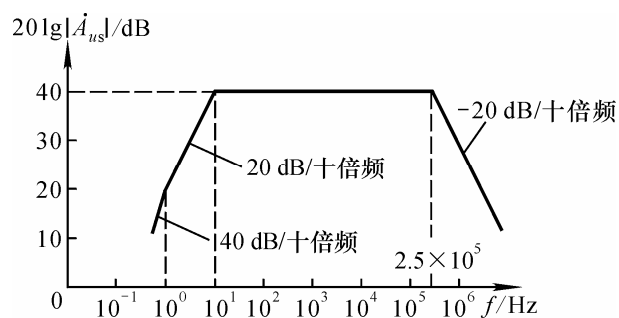


图 P5.3

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

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

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

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 $f = 10^5$ 时，附加相移又约为多少？

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 $-60\text{dB}/\text{十倍频}$ ，所以电路为三级放大电路；

(3) 当 $f = 10^4 \text{Hz}$ 时， $\phi' = -135^\circ$ ；当 $f = 10^5 \text{Hz}$ 时， $\phi' \approx -270^\circ$ 。

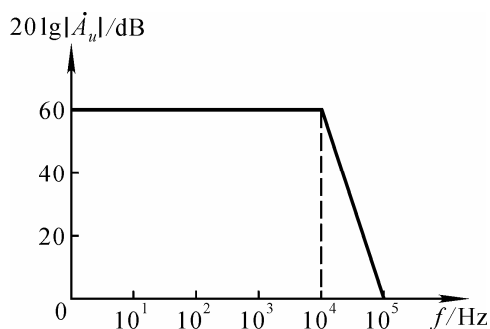


图 P5.4

5.5 若某电路的幅频特性如图 P5.4 所示，试写出 \dot{A}_u 的表达式，并近似估算该电路的上限频率 f_H 。

解： \dot{A}_u 的表达式和上限频率分别为

$$\dot{A}_u = \frac{\pm 10^3}{(1 + j \frac{f}{10^4})^3} \quad f_H \approx \frac{f_H'}{1.1\sqrt{3}} \approx 5.2 \text{kHz}$$

5.6 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) $\dot{A}_{um} = ? f_L = ? f_H = ?$

(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 、 f_H 。

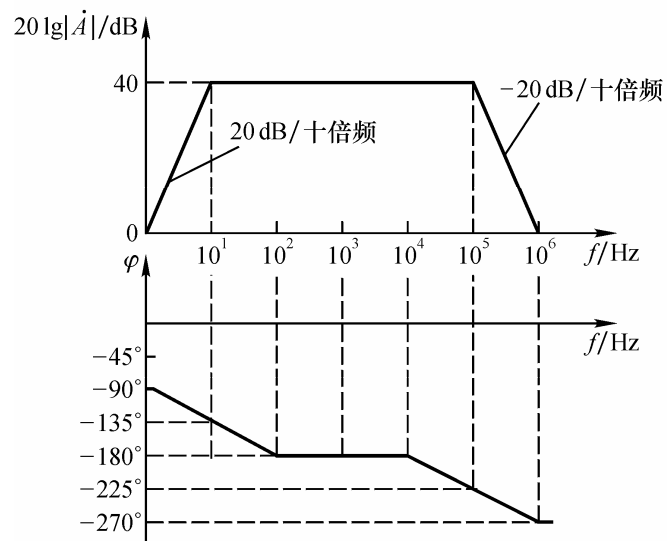
$$\dot{A}_u = \frac{-100 \cdot j \frac{f}{10}}{(1+j\frac{f}{10})(1+j\frac{f}{10^5})}$$

$$\dot{A}_{um} = -100$$

$$f_L = 10\text{Hz}$$

$$f_H = 10^5\text{Hz}$$

(2) 波特图如解图 P5.6 所示。



解图 P5.6

5.7 已知两级共射放大电路的电压放大倍数

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

(1) $\dot{A}_{um} = ?$ $f_L = ?$ $f_H = ?$

(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 、 f_H 。

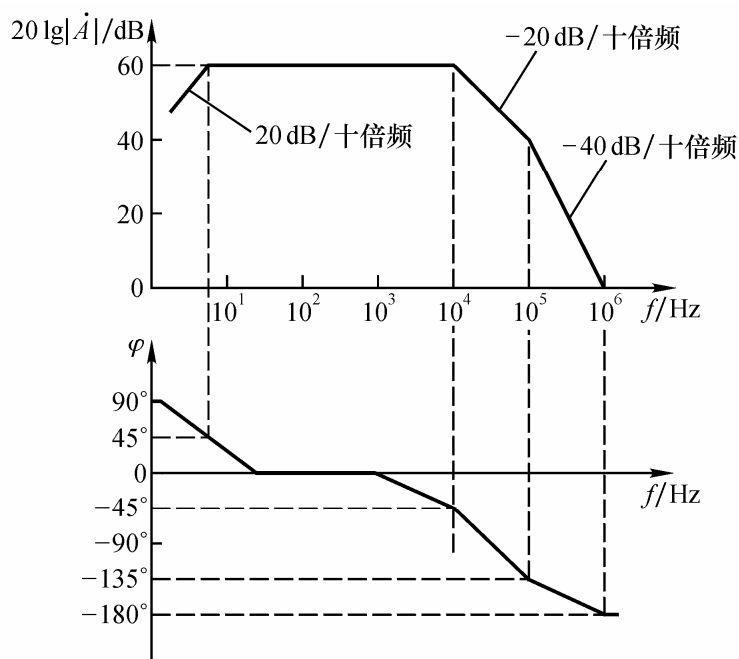
$$\dot{A}_u = \frac{10^3 \cdot j\frac{f}{5}}{\left(1 + j\frac{f}{5}\right)\left(1 + j\frac{f}{10^4}\right)\left(1 + j\frac{f}{2.5 \times 10^5}\right)}$$

$$\dot{A}_{um} = 10^3$$

$$f_L = 5\text{Hz}$$

$$f_H \approx 10^4\text{Hz}$$

(2) 波特图如解图 P5.7 所示。



解图 P5.7

5.8 电路如图P5.8所示。已知：晶体管的 β 、 r_{be} 、 C_u 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。

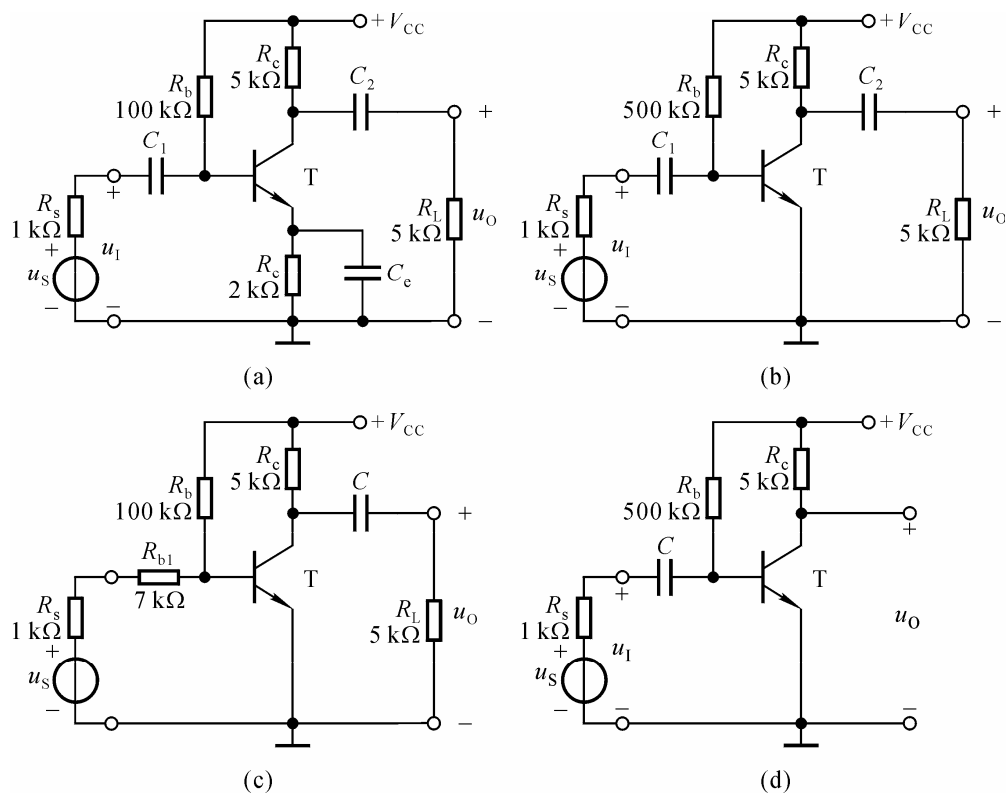


图 P5.8

(1) 低频特性最差即下限频率最高的电路是_____;

(2) 低频特性最好即下限频率最低的电路是_____;

(3) 高频特性最差即上限频率最低的电路是_____;

解：(1) (a) (2) (c) (3) (c)

5.9 在图P5.8 (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 $f_L \approx ?$

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。

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

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

5.10 在图 P5.8 (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 $r_{be}=1\text{k}\Omega$, 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 $f_L\approx?$

解: (1) 求解 $C_1:C_2$

因为 $C_1(R_s + R_i) = C_2(R_c + R_L)$

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

$$C_1 = \frac{\tau}{R_s + R_i} \approx 12.5 \mu\text{F}$$

$$C_2 = \frac{\tau}{R_c + R_L} \approx 2.5 \mu\text{F}$$

$$f_{L1} = f_{L2} = \frac{1}{2\pi\tau} \approx 6.4\text{Hz}$$

$$f_L \approx 1.1\sqrt{2}f_{L1} \approx 10\text{Hz}$$

5.11 在图 P5.8 (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_π' 会因电压放大倍数数值的减小而大大减小, 所以虽然 C_π' 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。

5.12 在图 P5.8 (a) 所示电路中, 若 $C_1 > C_e$, $C_2 > C_e$, $\beta = 100$, $r_{be} = 1\text{k}\Omega$, 欲使 $f_L = 60\text{Hz}$, 则 C_e 应选多少微法?

解: 下限频率决定于 C_e 所在回路的时间常数, $f_L \approx \frac{1}{2\pi RC_e}$ 。R 为 C_e 所在回路的等效电阻。

R 和 C_e 的值分别为:

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

$$C_e \approx \frac{1}{2\pi R f_L} \approx 133 \mu F$$

5.13 在图P5.8 (d) 所示电路中, 已知晶体管的 $r_{bb'} = 100 \Omega$, $r_{be} = 1k\Omega$, 静态电流 $I_{EQ} = 2mA$, $C_\pi' = 800pF$; $R_s = 2k\Omega$, $R_b = 500k\Omega$, $R_C = 3.3k\Omega$, $C = 10\mu F$ 。

试分别求出电路的 f_H 、 f_L , 并画出波特图。

解: (1) 求解 f_L

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

(2) 求解 f_H 和中频电压放大倍数

$$r_{b'e} = r_{be} - r_{b'b} = 0.9k\Omega$$

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

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

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

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

其波特图参考解图 P5.6。

5.14 电路如图P5.14 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。

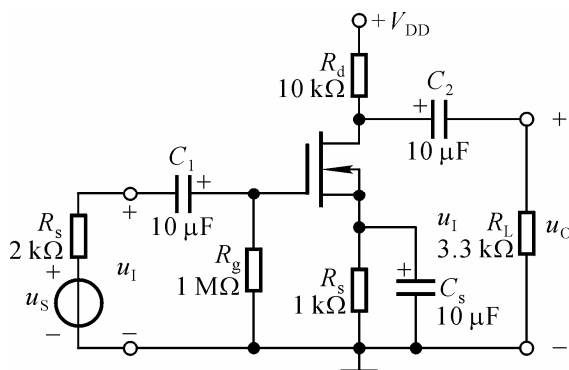


图 P5.14

解： f_H 、 f_L 、 \dot{A}_{us} 的表达式分析如下：

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

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

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

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

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

5.15 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：

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

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

$$f_L \approx \frac{1}{2\pi (R_d + R_L) C} \approx 0.796\text{Hz}$$

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

其波特图参考解图 P5.6。

5.16 已知一个两级放大电路各级电压放大倍数分别为

$$\dot{A}_{u1} = \frac{\dot{U}_{o1}}{\dot{U}_i} = \frac{-25jf}{\left(1+j\frac{f}{4}\right)\left(1+j\frac{f}{10^5}\right)}$$

$$\dot{A}_{u2} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_{i2}} = \frac{-2jf}{\left(1+j\frac{f}{50}\right)\left(1+j\frac{f}{10^5}\right)}$$

- (1) 写出该放大电路的表达式；
 (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) 电压放大电路的表达式

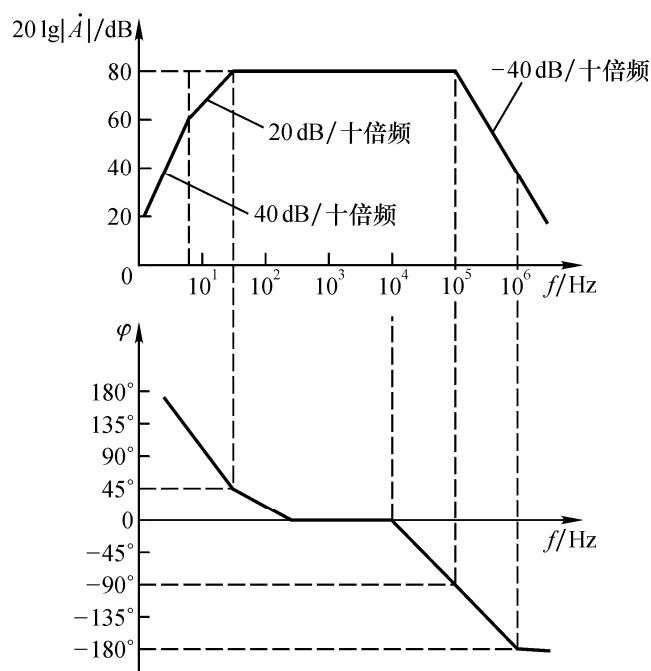
$$\dot{A}_u = \dot{A}_{u1} \dot{A}_{u2} = \frac{-50f^2}{\left(1+j\frac{f}{4}\right)\left(1+j\frac{f}{50}\right)\left(1+j\frac{f}{10^5}\right)^2}$$

- (2) f_L 和 f_H 分别为：

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

$$\frac{1}{f_H} \approx \frac{1}{1.1\sqrt{2}10^5}, \quad f_H \approx 64.3\text{kHz}$$

(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 80dB。波特图如解图 P5.16 所示。



解图 P5.16

5.17 电路如图 P5.17 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_π' 相等，则哪一级的上限频率低。

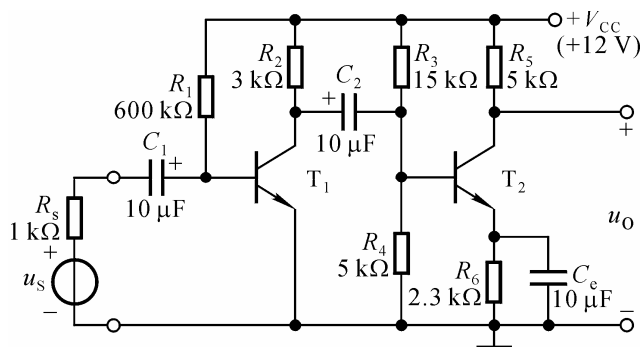


图 P5.17

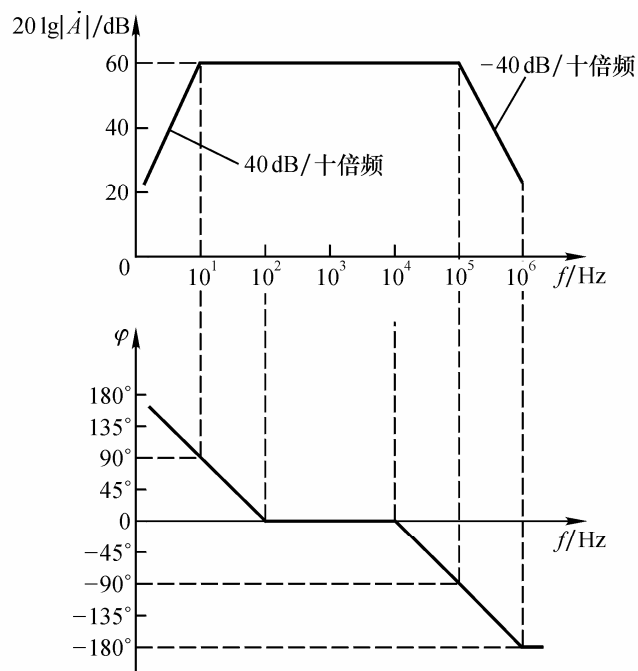
解：(1) 决定电路下限频率的是 C_e ，因为它所在回路的等效电阻最小。

(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。

5.18 若两级放大电路各级的波特图均如图 P5.2 所示，试画出整个电路的波特图。

解： $20\lg|\dot{A}_{um}| = 60\text{dB}$ 。在折线化幅频特性中，频率小于 10Hz 时斜率为 $+40\text{dB/十倍频}$ ，频率大于 10^5Hz 时斜率为 -40dB/十倍频 。在折线化相频特性中， $f = 10\text{Hz}$ 时相移为 $+90^\circ$ ， $f = 10^5\text{Hz}$ 时相移为 -90° 。波特图如解图 P5.18 所示。

解图 P5.18



第六章 放大电路中的反馈

自测题

一、在括号内填入“√”或“×”，表明下列说法是否正确。

- (1) 若放大电路的放大倍数为负，则引入的反馈一定是负反馈。()
- (2) 负反馈放大电路的放大倍数与组成它的基本放大电路的放大倍数量纲相同。()
- (3) 若放大电路引入负反馈，则负载电阻变化时，输出电压基本不变。()
- (4) 阻容耦合放大电路的耦合电容、旁路电容越多，引入负反馈后，越容易产生低频振荡。()

解：(1) × (2) √ (3) × (4) √

二、已知交流负反馈有四种组态：

- 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

选择合适的答案填入下列空格内，只填入 A、B、C 或 D。

- (1) 欲得到电流—电压转换电路，应在放大电路中引入_____；
- (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_____；
- (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_____；
- (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_____。

解：(1) B (2) C (3) A (4) D

三、判断图 T6.3 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 A_{uf} 或 A_{usf} 。设图中所有电容对交流信号均可视为短路。

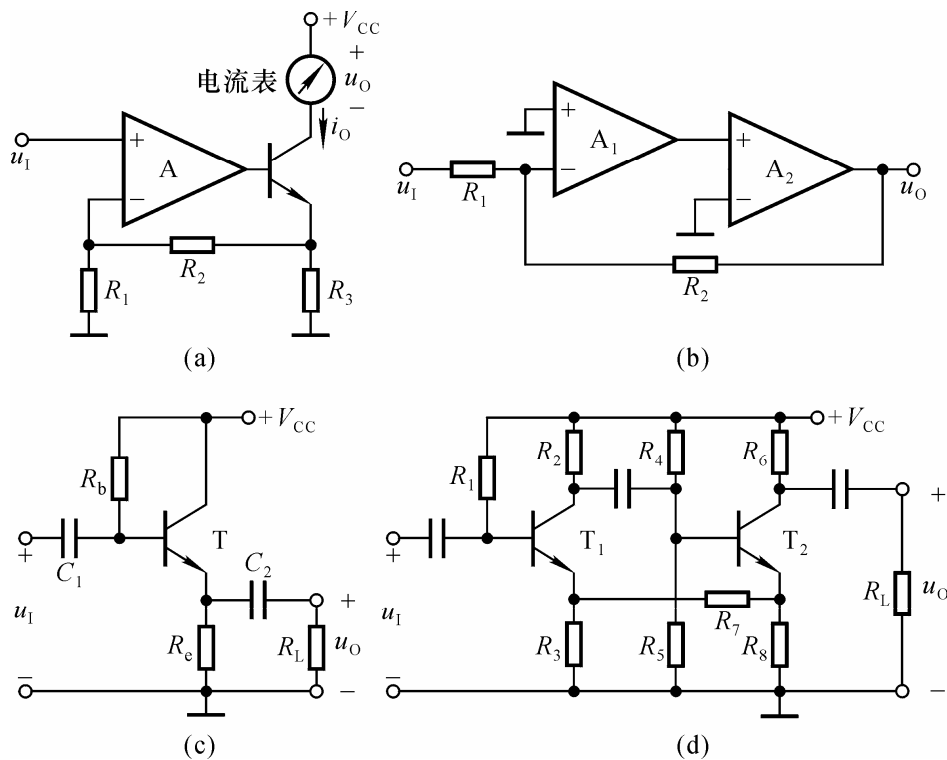


图 T6.3

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 \dot{A}_{uf} 分别为

$$\dot{F}_k = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \quad \dot{A}_{uf} \approx \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_1 R_3} \cdot R_L$$

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 \dot{A}_{uf} 分别为

$$\dot{F}_k = -\frac{1}{R_2} \quad \dot{A}_{uf} \approx -\frac{R_2}{R_1}$$

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 \dot{A}_{uf} 分别为

$$\dot{F}_k = 1 \quad \dot{A}_{uf} \approx 1$$

图（d）所示电路中引入了正反馈。

四、电路如图 T6.4 所示。

(1) 合理连线，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？

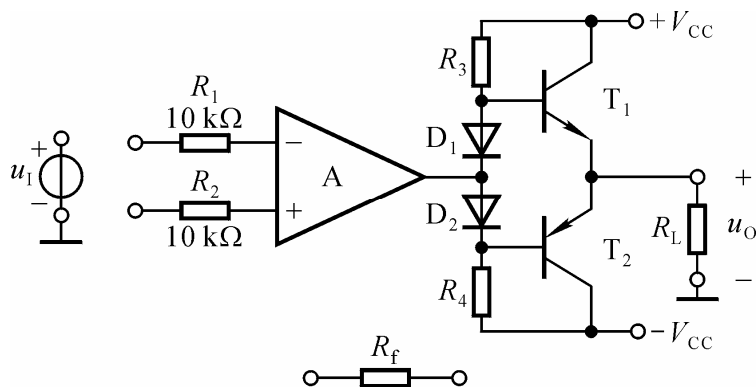
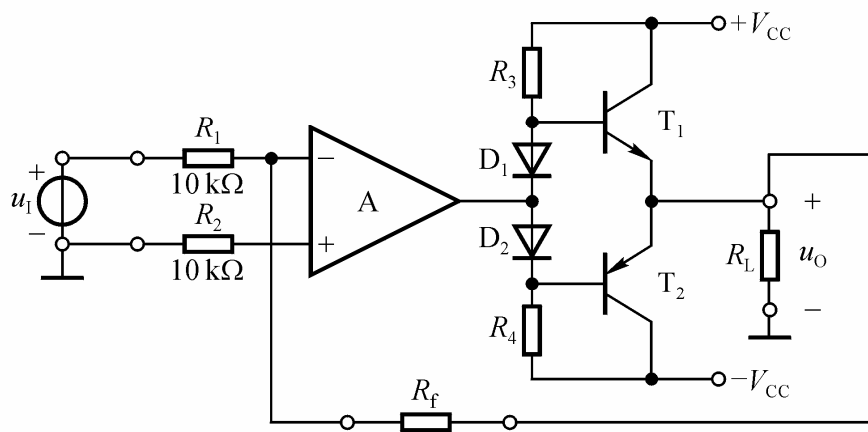


图 T6.4

解：(1) 应引入电压串联负反馈，如解图 T6.4 所示。



解图 T6.4

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

五、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 T6.5

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。

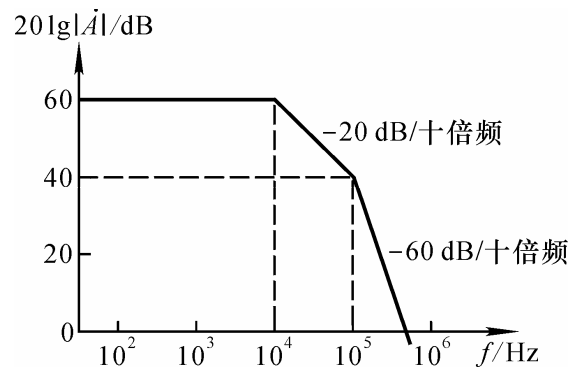


图 T6.5

解：因为 $f = 10^5$ Hz 时， $20\lg|A| = 40\text{dB}$ ， $\varphi_A' = -180^\circ$ ；为使此时 $20\lg|AF| < 0$ ，则需

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

习 题

6.1 选择合适的答案填入空内。

(1) 对于放大电路，所谓开环是指_____。

- A. 无信号源 B. 无反馈通路
- C. 无电源 D. 无负载

而所谓闭环是指_____。

- A. 考虑信号源内阻 B. 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_____，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_____。

- 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_____。

- 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. 直流负反馈 B. 交流负反馈

- ① 为了稳定静态工作点，应引入 _____；
- ② 为了稳定放大倍数，应引入 _____；
- ③ 为了改变输入电阻和输出电阻，应引入 _____；
- ④ 为了抑制温漂，应引入 _____；
- ⑤ 为了展宽频带，应引入 _____。

解：(1) B B (2) D (3) C (4) C
(5) A B B A 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 _____ 负反馈；

(2) 为了稳定放大电路的输出电流，应引入 _____ 负反馈；

(3) 为了增大放大电路的输入电阻，应引入 _____ 负反馈；

(4) 为了减小放大电路的输入电阻，应引入 _____ 负反馈；

(5) 为了增大放大电路的输出电阻，应引入 _____ 负反馈；

(6) 为了减小放大电路的输出电阻，应引入 _____ 负反馈。

解：(1) A (2) B (3) C (4) D (5) B (6) A

6.3 判断下列说法的正误，在括号内填入“√”或“×”来表明判断结果。

(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。()

解：(1) × (2) × (3) √ (4) ×

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。

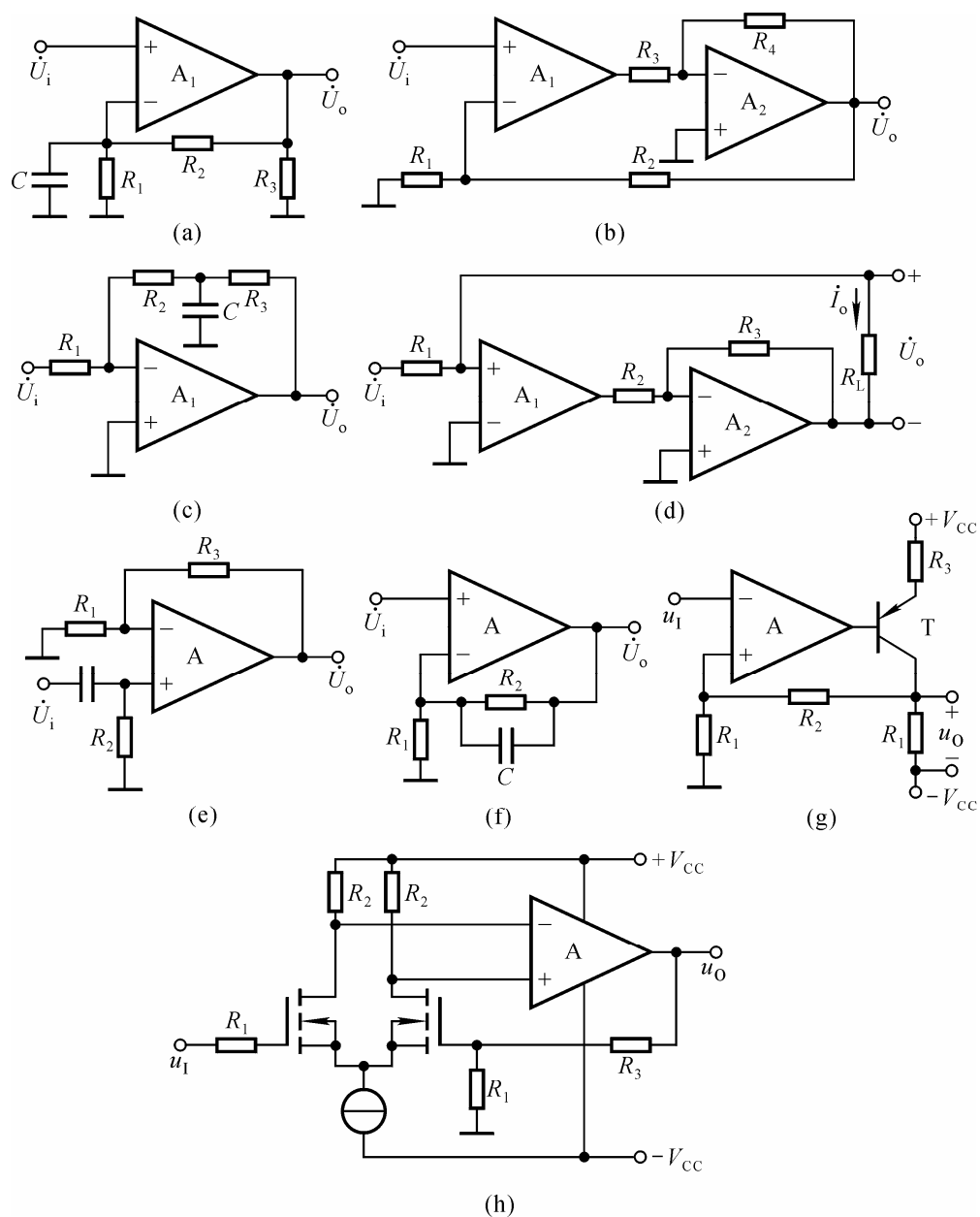


图 P6.4

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 6.5 所示，要求同题 6.4。

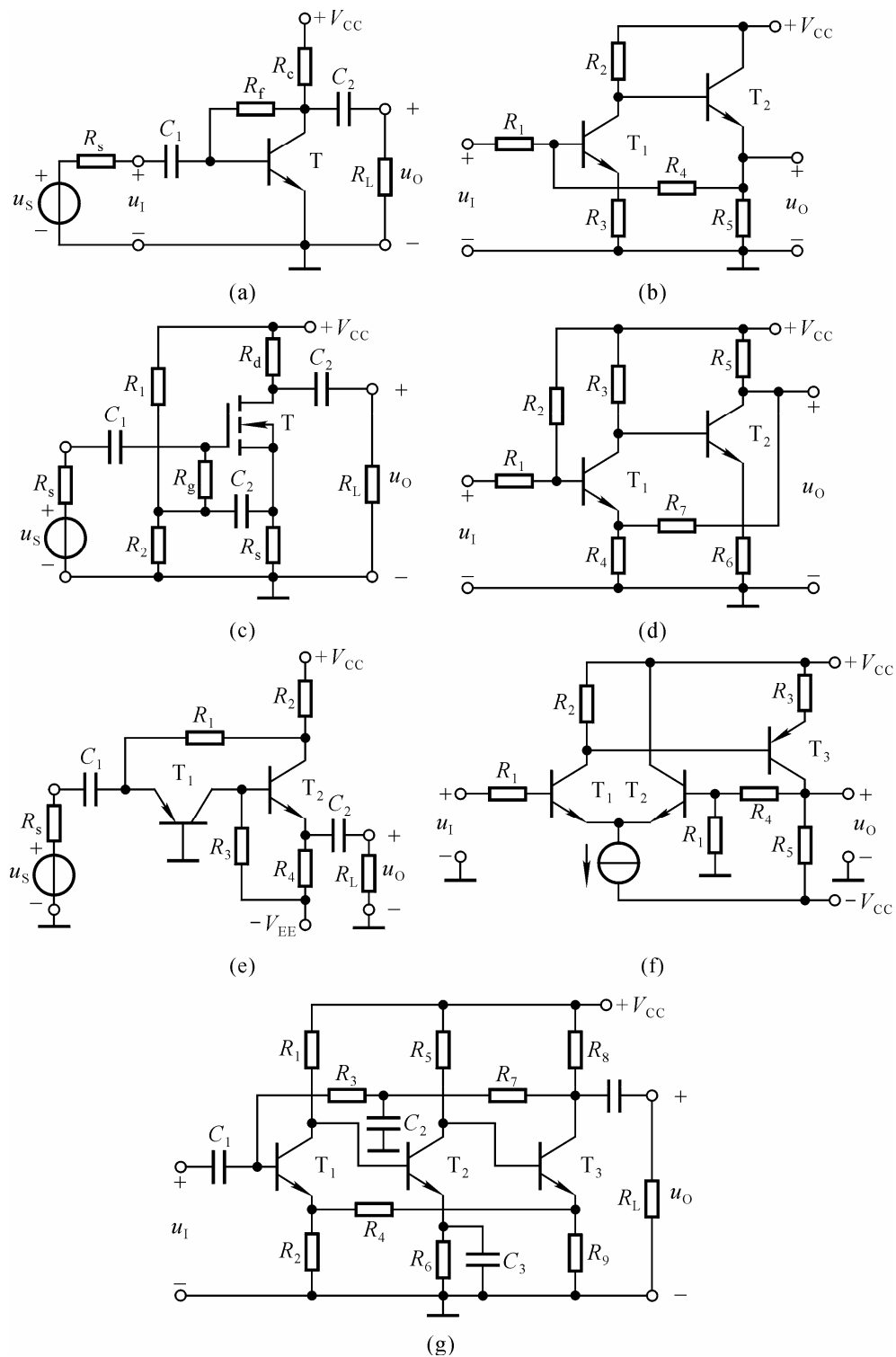


图 P6.5

解：图（a）所示电路中引入了交、直流负反馈

图（b）所示电路中引入了交、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 、 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）、（e）、（f）所示各电路中均引入了交、直流负反馈。

图（g）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
$$\dot{F}_{\dot{I}} = \dot{F}_{\dot{I}} / \dot{F}_o = 1$$

（e）电压串联负反馈
$$\dot{F}_{\dot{U}} = \dot{U}_{\dot{f}} / \dot{U}_o = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

（f）电压串联负反馈
$$\dot{F}_{\dot{U}} = \dot{U}_{\dot{f}} / \dot{U}_o = 1$$

（g）电压串联负反馈
$$\dot{F}_{\dot{U}} = \dot{U}_{\dot{f}} / \dot{U}_o = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

（h）电压串联负反馈
$$\dot{F}_{\dot{U}} = \dot{U}_{\dot{f}} / \dot{U}_o = \frac{R_1}{R_1 + R_3}$$

6.7 分别判断图 P6.5（a）（b）（e）（f）（g）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：

（a）电压并联负反馈
$$\dot{F}_{\dot{I}} = \dot{I}_f / \dot{U}_o = -1/R$$

（b）电压并联负反馈
$$\dot{F}_{\dot{I}} = \dot{I}_f / \dot{U}_o = -1/R_4$$

（c）电流并联负反馈
$$\dot{F}_{\dot{I}} = \dot{F}_{\dot{I}} / \dot{F}_o = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

（d）电压串联负反馈
$$\dot{F}_{\dot{U}} = \dot{U}_{\dot{f}} / \dot{U}_o = \frac{R_1}{R_1 + R_4}$$

（e）电流串联负反馈
$$\dot{F}_{\dot{U}} = \dot{U}_{\dot{f}} / \dot{F}_o = -\frac{R_2 R_9}{R_2 + R_4 + R_9}$$

6.8 估算图 6.4 (d) ~ (h) 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：

$$(d) \quad \dot{A}_{uf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \approx \frac{\dot{F}_o R_L}{\dot{F}_i R_1} \approx \frac{\dot{F}_o R_L}{\dot{F}_f R_1} = \frac{R_L}{R_1}$$

$$(e) \quad \dot{A}_{uf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \approx \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_f} = 1 + \frac{R_3}{R_1}$$

$$(f) \quad \dot{A}_{uf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \approx \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_f} = 1$$

$$(g) \quad \dot{A}_{uf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \approx \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_f} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

$$(h) \quad \dot{A}_{uf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \approx \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_f} = 1 + \frac{R_3}{R_1}$$

6.9 估算图 6.5 (e) (f) (g) 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：

$$(e) \quad \dot{A}_{usf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \approx \frac{\dot{F}_o (R_4 // R_L)}{\dot{F}_f R_s} = (1 + \frac{R_1}{R_2}) \cdot \frac{R_L'}{R_s}$$

$$(f) \quad \dot{A}_{uf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \approx \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_f} = 1 + \frac{R_4}{R_1}$$

$$(g) \quad \begin{aligned} \dot{A}_{uf} &= \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \approx \frac{\dot{F}_o (R_7 // R_8 // R_L)}{\dot{U}_f} \\ &= - \frac{(R_2 + R_4 + R_9)(R_7 // R_8 // R_L)}{R_2 R_9} \end{aligned}$$

6.10 分别说明图 6.4 (d) ~ (h) 所示各电路因引入交流负反馈使得放大电路输入电阻和输出电阻所产生的变化。只需说明是增大还是减小即可。

解： 图 (d) 所示电路因引入负反馈而使输入电阻减小、输出电阻增大。

图 (e) ~ (h) 所示各电路均因引入负反馈而使输入电阻增大，输出电阻减小。

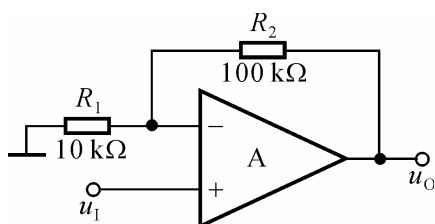
6.11 分别说明图 6.5 (a) (b) (c) (e) (f) (g) 所示各电路因引入交流负反馈使得放大电路输入电阻和输出电阻所产生的变化。只需说明是增大还是减小即可。

解：图 6.5 (a) (b) (c) (e) (f) (g) 所示各电路因引入交流负反馈使得放大电路输入电阻和输出电阻所产生的变化如下：

- (a) 输入电阻减小，输出电阻减小。
- (b) 输入电阻减小，输出电阻减小。
- (c) 输入电阻增大，输出电阻增大。
- (e) 输入电阻减小，输出电阻增大。
- (f) 输入电阻增大，输出电阻减小。
- (g) 输入电阻增大，输出电阻增大。

6.12 电路如图 P6.12 所示，已知集成运放的开环差模增益和差模输入电阻均近于无穷大，最大输出电压幅值为 $\pm 14\text{V}$ 。填空：

电路引入了 _____ (填入反馈组态) 交流负反馈，电路的输入电阻趋近于 _____，电压放大倍数 $A_{uf} = \Delta u_O / \Delta u_1 \approx$ _____。设 $u_1 = 1\text{V}$ ，则 $u_O \approx$ _____ V；若 R_1 开路，则 u_O 变为 _____ V；若 R_1 短路，则 u_O 变为 _____ V；若 R_2 开路，则 u_O 变为 _____ V；若 R_2 短路，则 u_O 变为 _____ V。



P6.12

解：电压串联负反馈，无穷大，11。11；1；14；14；1。

6.13 电路如图 P6.13 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。

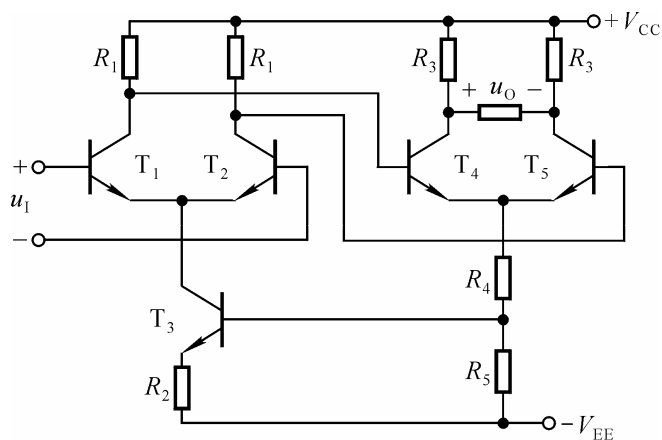


图 P6.13

解：若 $u_{B1} = u_{B2}$ 增大，则产生下列过程：

$$u_{B1} = u_{B2} \uparrow \rightarrow u_{C1} = u_{C2} \downarrow (u_{B4} = u_{B5} \downarrow) \rightarrow i_{E4} = i_{E5} \downarrow \rightarrow u_{R5} \downarrow (u_{B3} \downarrow) \rightarrow i_{C3} \downarrow \rightarrow u_{R1} \downarrow$$

$$u_{C1} = u_{C2} \uparrow \leftarrow$$

说明电路对共模信号有负反馈作用。

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

(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

$$A_f \approx 1/F = 500$$

(2) 根据题目所给数据，可知

$$\frac{1}{1+AF} = \frac{1}{1+2 \times 10^2} \approx 0.005$$

A_f 相对变化率为 A 的相对变化率的 $\frac{1}{1+AF}$ ，故 A_f 的相对变化率约为 0.1

%。

6.15 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：先求解 AF ，再根据深度负反馈的特点求解 A 。

$$AF \approx \frac{10\%}{0.1\%} = 100$$

$$AF \gg 1$$

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

$$A_u = A = \frac{AF}{F} \approx 2000$$

6.16 电路如图P6.16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？

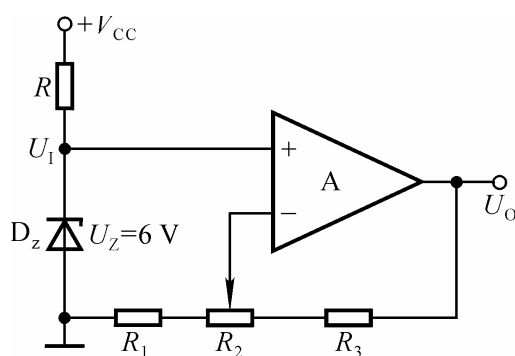


图 P6.16

解： U_O 的调节范围约为

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

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

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

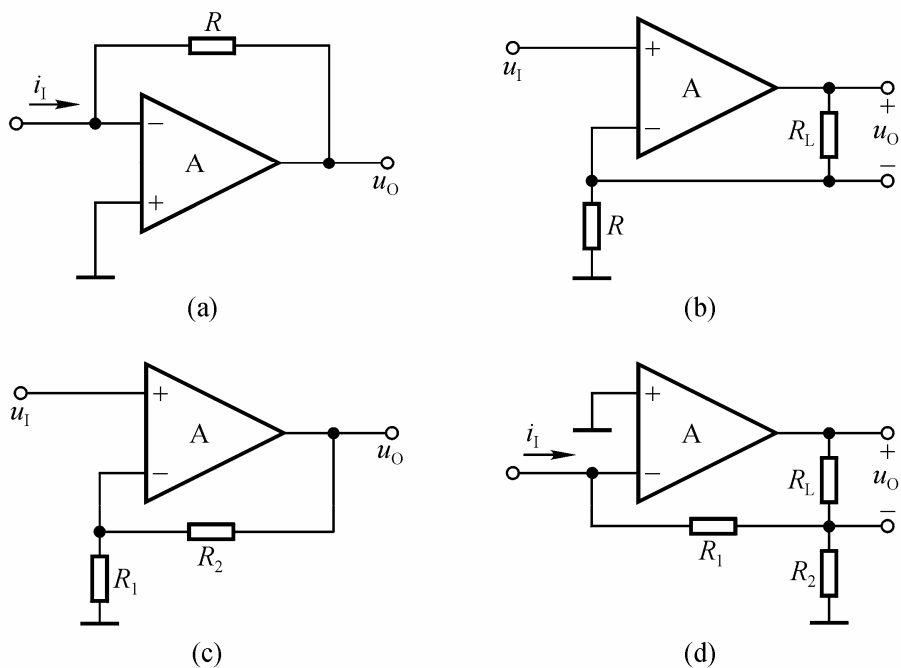
$$f_{L1} = 10^4 \text{ Hz} \quad f_{L2} = f_{L3} = 10^5 \text{ Hz}$$

因为 $f_{L2} = f_{L3} = 10 f_{L1}$ ，所以，在 $f = f_{L2} = f_{L3}$ 时， $|A|$ 约为 60dB，附加相移约为 -180° 。为了使 $f = f_{L2} = f_{L3}$ 时的 $20\lg|A_f|$ 小于 0dB，即不满足自激振荡的幅值条件，反馈系数 $20\lg|F|$ 的上限值应为 -60dB ，即 F 的上限值为 10^{-3} 。

6.18 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 P6.18(a)(b)(c)(d) 所示。



解图 P6.18

6.19 电路如图 P6.19 所示。

(1) 试通过电阻引入合适的交流负反馈，使输入电压 u_1 转换成稳定的输出电流 i_L ；

(2) 若 $u_1 = 0 \sim 5\text{V}$ 时， $i_L = 0 \sim 10\text{mA}$ ，则反馈电阻 R_F 应取多少？

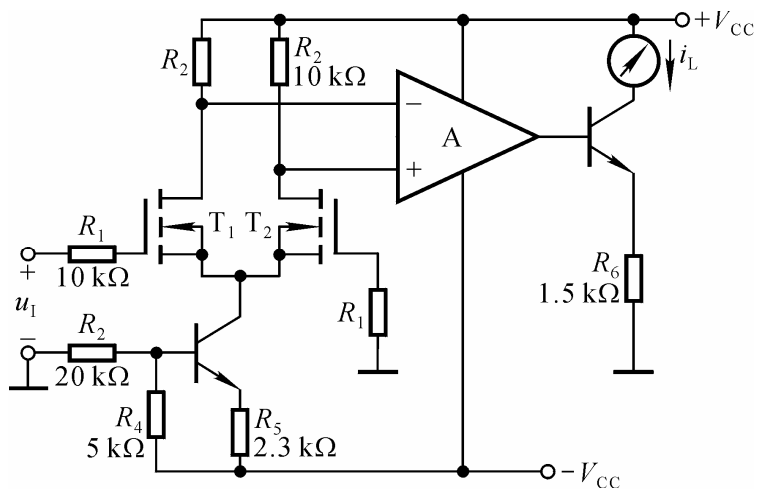
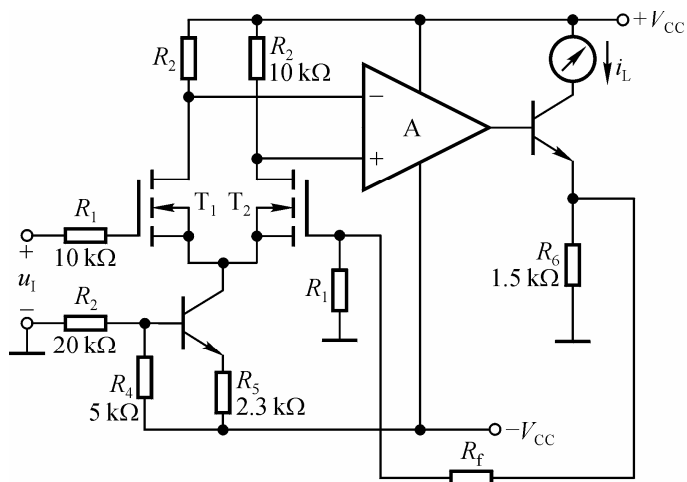


图 P6.19

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 P6.19 所示。



解图 P6.19

(2) 首先求解 \dot{F}_{sc} ，再根据 $\dot{A}_{\text{f}} \approx 1/\dot{F}_{\text{sc}}$ 求解 R_f 。

$$\dot{F}_{\text{sc}} = \frac{R_1 R_f}{R_1 + R_f + R_6}$$

$$\dot{A}_{\text{f}} \approx \frac{R_1 + R_f + R_6}{R_1 R_f}$$

代入数据
$$\frac{10 + R_f + 1.5}{10 \times 1.5} = \frac{10}{5}$$

所以
$$R_f = 18.5 \text{ k}\Omega$$

6.20 图 P6.20 (a) 所示放大电路 \dot{A}_{uf} 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 50pF 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？

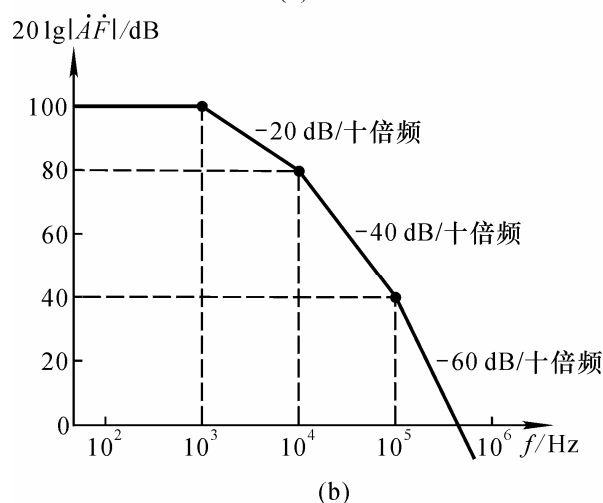
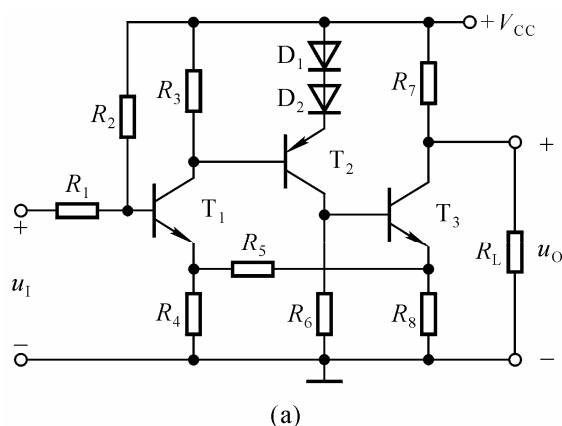


图 P6.20

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° ，在 $f = 10^4\text{Hz}$ 时附加相移约为 -135° ，在 $f = 10^5\text{Hz}$ 时附加相移约为 -225° ，因此附加相移为 -180° 的频率在 $10^4\text{Hz} \sim 10^5\text{Hz}$ 之间，此时 $|\dot{A}_F| > 0$ ，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 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。

6.21 试分析如图 P6.21 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。

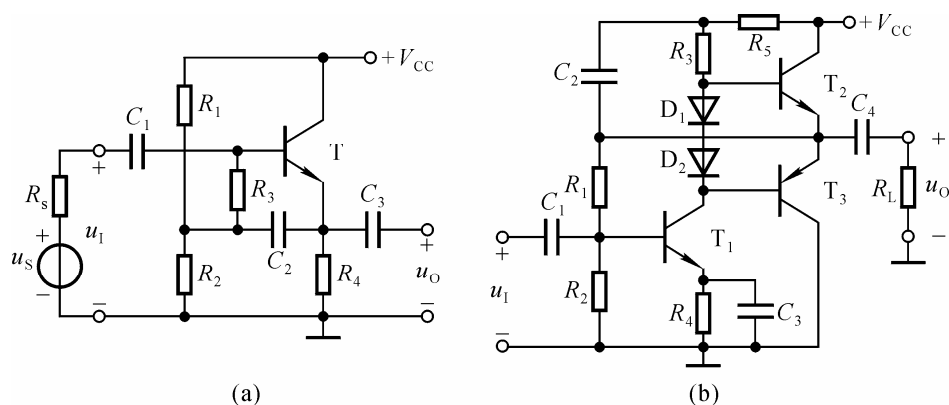


图 P6.21

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。

6.22 在图 P6.22 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。

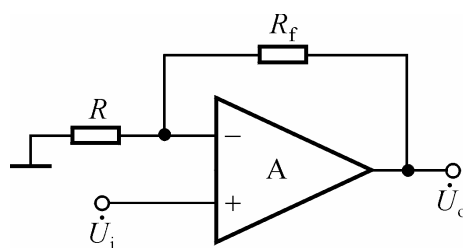
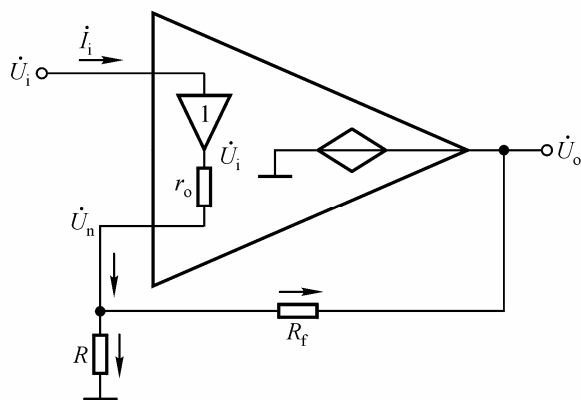


图 P6.22

解：(1) $\dot{A}_u \approx 1 + \frac{R_f}{R}$



解图 P6.22

(2) 画出图 P6.22 所示电路中集成运放的等效电路如解图 P6.22 所示。

因为 r_o 很小，反相输入端电位为

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

将集成运放的内部电路替换为图 6.7.6 所示电路 (参阅 P297~P298)，可得

$$\dot{F}_i = j\omega C \dot{U}_o$$

$$\dot{F}_i \approx \frac{\dot{U}_i}{R} + \frac{\dot{U}_i - \dot{U}_o}{R_f} = \frac{\dot{U}_i (R + R_f)}{R R_f} - \frac{\dot{U}_o}{R_f} = j\omega C \dot{U}_o$$

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

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

所以上限截止频率为 $f_H = \frac{1}{2\pi R_f C}$

6.23 已知集成运放的开环差模增益 $A_{od} = 2 \times 10^5$ ，差模输入电阻 $r_{id} = 2\text{M}\Omega$ ，输出电阻 $r_o = 200\Omega$ 。试用方块图法分别求解图 P6.23 所示各电路的 A 、 F 、 A_f 、 R_{if} 、 R_{of} 。

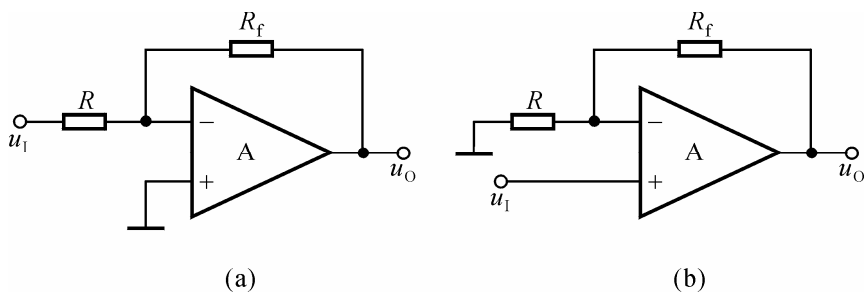


图 P6.23

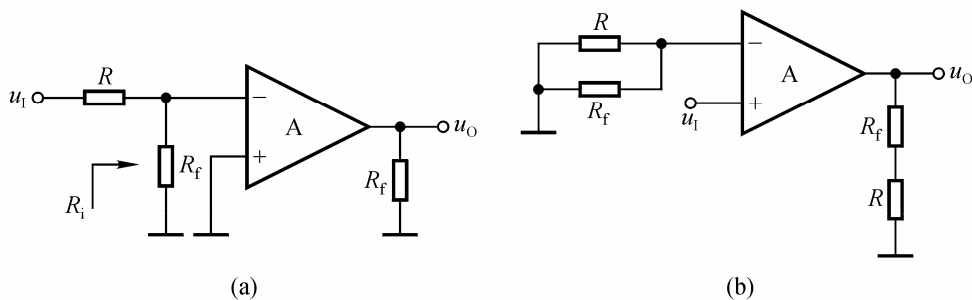
解：图 P6.23 (a) 所示反馈放大电路的基本放大电路如解图 P6.23 (a) 所示，因此 A 、 F 、 A_f 分析如下：

$$A = \frac{\Delta u_O}{\Delta i_I} = \frac{\Delta u_O}{-\frac{\Delta u_i}{r_{id} // R_f}} = -A_{od}(r_{id} // R_f)$$

$$F = \frac{\Delta i_F}{\Delta u_O} = -\frac{1}{R_f}$$

$$1 + AF = 1 + A_{od}(r_{id} // R_f) \cdot \frac{1}{R_f} \approx A_{od} \cdot (r_{id} // R_f) \cdot \frac{1}{R_f}$$

$$A_f = \frac{-A_{od}(r_{id} // R_f)}{1 + A_{od} \cdot (r_{id} // R_f) \cdot \frac{1}{R_f}}$$



解图 P6.23

R_i 、 R_o 、 R_{if} 、 R_{of} 分别为

$$R_i = r_{id} // R_f$$

$$R_o = r_o // R_f$$

$$R_{if} \approx \frac{r_{id} // R_f}{A_{od} \cdot (r_{id} // R_f) \cdot \frac{1}{R_f}} = \frac{R_f}{A_{od}}$$

$$R_{of} \approx \frac{r_o // R_f}{A_{od} \cdot (r_{id} // R_f) \cdot \frac{1}{R_f}} = \frac{(r_o // R_f)(r_{id} + R_f)}{A_{od} r_{id}}$$

若 $r_{id} \gg R_f$, $r_o \ll R_f$, 则

$$A \approx -A_{od} R_f, R_i \approx R_f, R_o \approx r_o$$

$$A_f = \frac{-A_{od} R_f}{1 + A_{od}}$$

$$R_{if} \approx R_f / A_{od}$$

$$R_{of} \approx r_o / A_{od}$$

整个电路的输入电阻约为 $(R + R_f / A_{od})$ 。

图 P6.23 (b) 所示反馈放大电路的基本放大电路如解图 P6.23 (b) 所示，因此 A 、 F 、 A_f 、 R_{if} 、 R_{of} 分析如下：

$$R_i = r_{id} + R // R_f \quad R_o = r_o // (R + R_f)$$

$$u_i = u_{id} \cdot \frac{r_{id} + R // R_f}{r_{id}}$$

$$A = \frac{\Delta u_O}{\Delta u_i} = \frac{\Delta u_O}{\Delta u_{id} \cdot \frac{r_{id} + R // R_f}{r_{id}}} = A_{od} \cdot \frac{r_{id}}{r_{id} + R // R_f}$$

$$F = \frac{\Delta u_F}{\Delta u_O} = \frac{R}{R + R_f}$$

$$1 + AF = 1 + A_{od} \cdot \frac{r_{id}}{r_{id} + R // R_f} \cdot \frac{R}{R + R_f} \approx A_{od} \cdot \frac{r_{id}}{r_{id} + R // R_f} \cdot \frac{R}{R + R_f}$$

$$\begin{aligned}
A_f &= \frac{A_{od} \cdot \frac{r_{id}}{r_{id} + R // R_f}}{1 + A_{od} \cdot \frac{r_{id}}{r_{id} + R // R_f} \cdot \frac{R}{R + R_f}} \\
R_{if} &\approx (r_{id} + R // R_f) A_{od} \cdot \frac{r_{id}}{r_{id} + R // R_f} \cdot \frac{R}{R + R_f} \\
&= A_{od} \cdot \frac{r_{id} R}{R + R_f} \\
R_{of} &\approx \frac{r_o // (R + R_f)}{A_{od} \cdot \frac{r_{id}}{r_{id} + R // R_f} \cdot \frac{R}{R + R_f}} \\
&= \frac{r_o // (R + R_f)}{A_{od}} \cdot \frac{r_{id} + R // R_f}{r_{id}} \cdot \frac{R + R_f}{R}
\end{aligned}$$

若 $r_{id} \gg R // R_f$, $r_o \ll (R + R_f)$, 则

$$\begin{aligned}
R_i &\approx r_{id} & R_o &\approx r_o \\
A &\approx A_{od} & AF &\approx A_{od} \cdot \frac{R}{R + R_f} \\
A_f &\approx \frac{A_{od}}{1 + A_{od} \cdot \frac{R}{R + R_f}} \\
R_{if} &\approx r_{id} \left(1 + A_{od} \cdot \frac{R}{R + R_f} \right) \approx \frac{A_{od} r_{id} R}{R + R_f} \\
R_{of} &\approx \frac{r_o}{1 + A_{od} \cdot \frac{R}{R + R_f}} \approx \frac{r_o}{A_{od}} \cdot \frac{R + R_f}{R}
\end{aligned}$$

第七章 信号的运算和处理

自 测 题

一、判断下列说法是否正确，用“√”或“×”表示判断结果。

- (1) 运算电路中一般均引入负反馈。()
(2) 在运算电路中，集成运放的反相输入端均为虚地。()
(3) 凡是运算电路都可利用“虚短”和“虚断”的概念求解运算关系。
()
(4) 各种滤波电路的通带放大倍数的数值均大于 1。()

解：(1) √ (2) × (3) √ (4) ×

二、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_____。
(2) 欲将正弦波电压转换成二倍频电压，应选用_____。
(3) 欲将正弦波电压叠加上一个直流量，应选用_____。
(4) 欲实现 $A_u = -100$ 的放大电路，应选用_____。
(5) 欲将方波电压转换成三角波电压，应选用_____。
(6) 欲将方波电压转换成尖顶波波电压，应选用_____。

解：(1) C (2) F (3) E (4) A (5) C (6) D

三、填空：

- (1) 为了避免 50Hz 电网电压的干扰进入放大器，应选用_____ 滤波电路。
(2) 已知输入信号的频率为 10kHz~12kHz，为了防止干扰信号的混入，应选用_____ 滤波电路。
(3) 为了获得输入电压中的低频信号，应选用_____ 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_____ 滤波电路。

解：(1) 带阻 (2) 带通 (3) 低通 (4) 有源

四、已知图 T7.4 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。

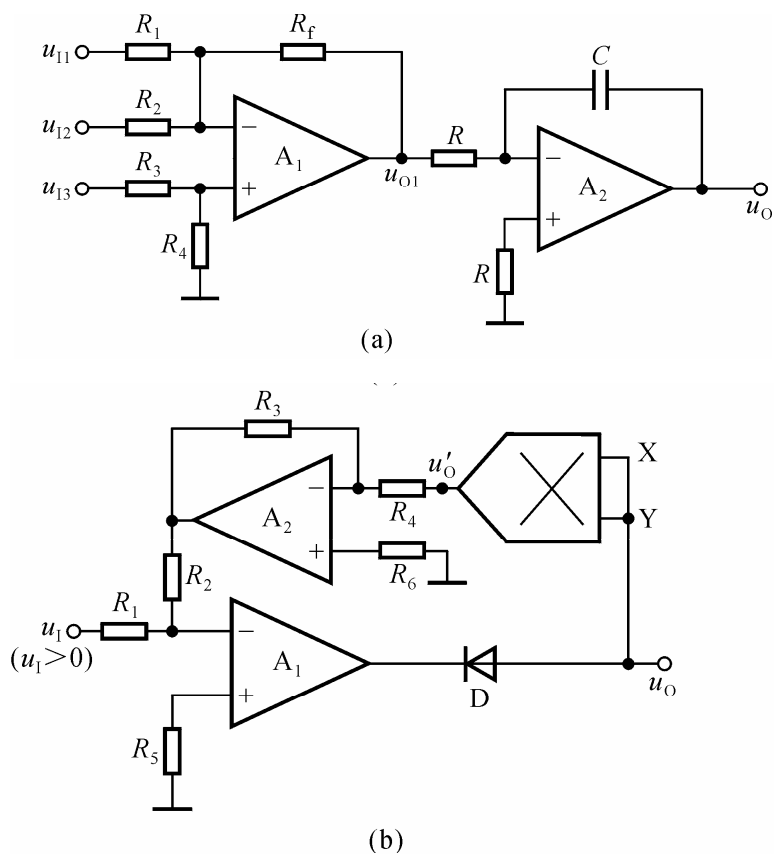


图 T7.4

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

$$\begin{aligned}
 \text{(a)} \quad u_{O1} &= -R_f \left(\frac{u_{11}}{R_1} + \frac{u_{12}}{R_2} \right) + \left(1 + \frac{R_f}{R_1 // R_2} \right) \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot u_{13} \\
 u_O &= -\frac{1}{RC} \int u_{O1} dt \\
 \text{(b)} \quad u_{O2} &= -\frac{R_2}{R_1} u_1 = -\frac{R_3}{R_4} u'_O = -\frac{R_3}{R_4} \cdot k u_O^2 \\
 u_O &= \sqrt{\frac{R_2 R_4}{k R_1 R_3}} \cdot u_1
 \end{aligned}$$

习 题

本章习题中的集成运放均为理想运放。

7.1 分别选择“反相”或“同相”填入下列各空内。

(1) _____ 比例运算电路中集成运放反相输入端为虚地，而 _____ 比例运算电路中集成运放两个输入端的电位等于输入电压。

(2) _____ 比例运算电路的输入电阻大，而 _____ 比例运算电路的输入电阻小。

(3) _____ 比例运算电路的输入电流等于零，而 _____ 比例运算电路的输入电流等于流过反馈电阻中的电流。

(4) _____ 比例运算电路的比例系数大于 1，而 _____ 比例运算电路的比例系数小于零。

解：(1) 反相，同相 (2) 同相，反相 (3) 同相，反相

(4) 同相，反相

7.2 填空：

(1) _____ 运算电路可实现 $A_u > 1$ 的放大器。

(2) _____ 运算电路可实现 $A_u < 0$ 的放大器。

(3) _____ 运算电路可将三角波电压转换成方波电压。

(4) _____ 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) _____ 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) _____ 运算电路可实现函数 $Y = aX^2$ 。

解：(1) 同相比比例 (2) 反相比比例 (3) 微分 (4) 同相求和

(5) 反相求和 (6) 乘方

7.3 电路如图 P7.3 所示，集成运放输出电压的最大幅值为 $\pm 14\text{V}$ ，填表。

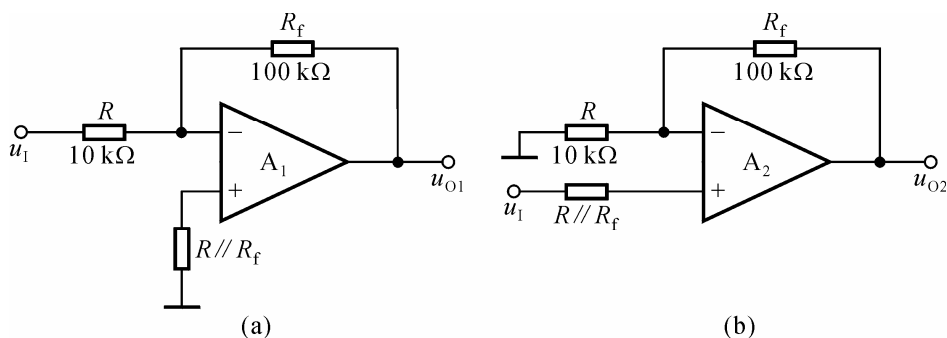


图 P7.3

u_1/V	0.1	0.5	1.0	1.5
u_{O1}/V				
u_{O2}/V				

解： $u_{O1} = (-R_f/R) u_1 = -10 u_1$, $u_{O2} = (1+R_f/R) u_1 = 11 u_1$ 。当集成运放工作到非线性区时，输出电压不是 $+14\text{V}$ ，就是 -14V 。

u_1/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

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

解： 可采用反比例运算电路，电路形式如图 P7.3(a) 所示。 $R = 20\text{k}\Omega$ ， $R_f = 2\text{M}\Omega$ 。

7.5 电路如图 P7.5 所示，试求：

- (1) 输入电阻；
- (2) 比例系数。

解： 由图可知 $R_i = 50\text{k}\Omega$ ， $u_M = -2u_1$ 。

$$i_{R2} = i_{R4} + i_{R3}$$

即

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

输出电压

$$u_O = 52u_M = -104u_1$$

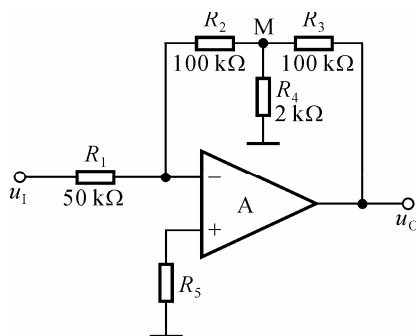


图 P7.5

7.6 电路如图 P7.5 所示，集成运放输出电压的最大幅值为 $\pm 14\text{V}$ ， u_1 为 2V 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) $u_o = -\frac{R_3}{R_1} = -2u_1 = -4V$

(2) $u_o = -\frac{R_2}{R_1} = -2u_1 = -4V$

(3) 电路无反馈, $u_o = -14V$

(4) $u_o = -\frac{R_2 + R_3}{R_1} = -4u_1 = -8V$

7.7 电路如图 P7.7 所示, T_1 、 T_2 和 T_3 的特性完全相同, 填空:

(1) $I_1 \approx$ _____ mA, $I_2 \approx$ _____ mA;

(2) 若 $I_3 \approx 0.2\text{mA}$, 则 $R_3 \approx$ _____ $\text{k}\Omega$ 。

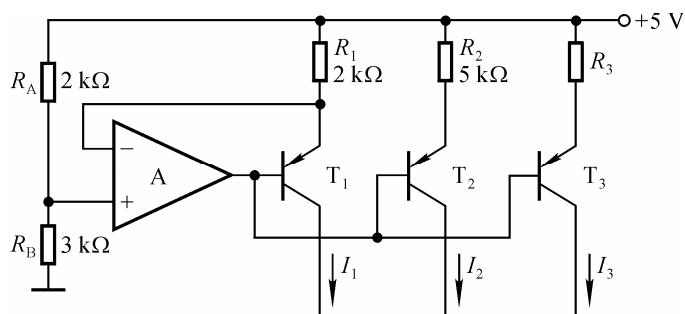


图 P7.7

解: (1) 1, 0.4; (2) 10。

7.8 试求图 P7.8 所示各电路输出电压与输入电压的运算关系式。

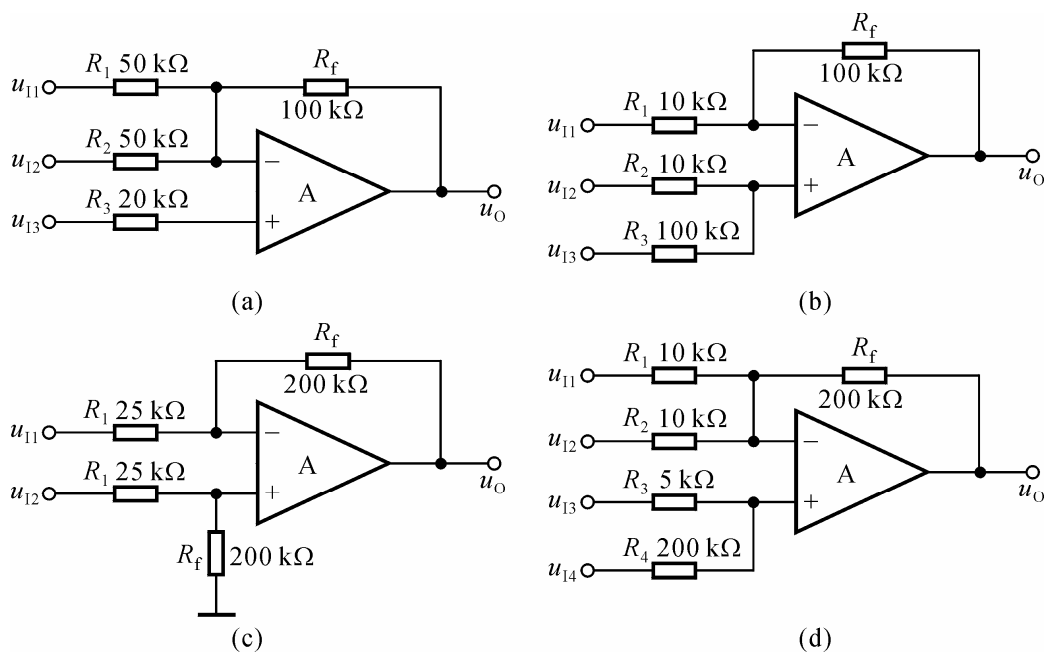


图 P7.8

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：

$$(a) \quad u_O = -\frac{R_f}{R_1} \cdot u_{11} - \frac{R_f}{R_2} \cdot u_{12} + \frac{R_f}{R_3} \cdot u_{13} = -2u_{11} - 2u_{12} + 5u_{13}$$

$$(b) \quad u_O = -\frac{R_f}{R_1} \cdot u_{11} + \frac{R_f}{R_2} \cdot u_{12} + \frac{R_f}{R_3} \cdot u_{13} = -10u_{11} + 10u_{12} + u_{13}$$

$$(c) \quad u_O = \frac{R_f}{R_1} (u_{12} - u_{11}) = 8(u_{12} - u_{11})$$

$$(d) \quad u_O = -\frac{R_f}{R_1} \cdot u_{11} - \frac{R_f}{R_2} \cdot u_{12} + \frac{R_f}{R_3} \cdot u_{13} + \frac{R_f}{R_4} \cdot u_{14} \\ = -20u_{11} - 20u_{12} + 40u_{13} + u_{14}$$

7.9 在图 P7.8 所示各电路中，是否对集成运放的共模抑制比要求较高，为什么？

解：因为均有共模输入信号，所以均要求用具有高共模抑制比的集成运放。

7.10 在图 P7.8 所示各电路中，集成运放的共模信号分别为多少？要求

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

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

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

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

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

7.11 图 P7.11 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。

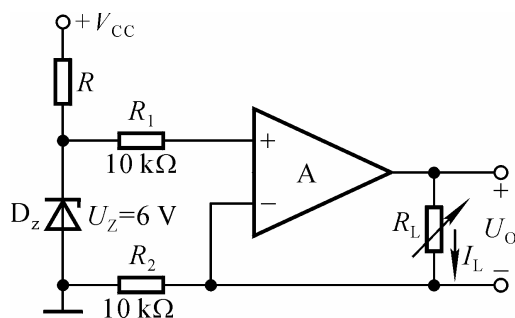


图 P7.11

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

7.12 电路如图 P7.12 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 $u_{I1} = 10\text{mV}$ ， $u_{I2} = 20\text{mV}$ ，则 $u_O = ?$
- (3) 若 u_O 的最大幅值为 $\pm 14\text{V}$ ，输入电压最大值 $u_{I1\max} = 10\text{mV}$ ， $u_{I2\max} = 20\text{mV}$ ，最小值均为 0V ，则为了保证集成运放工作在线性区， R_2 的最大值为多少？

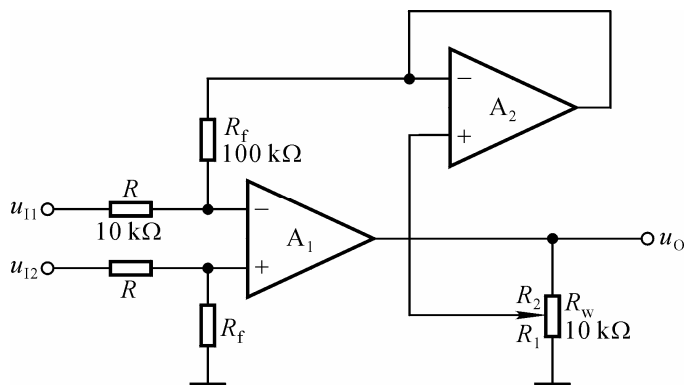


图 P7.12

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
$$u_O = 10 \cdot \frac{R_W}{R_1} \cdot (u_{I2} - u_{I1})$$

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

(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，则为了保证集成运放工作在线性区， $(u_{I2} - u_{I1}) = 20\text{mV}$ 时集成运放的输出电压应为 $+14\text{V}$ ，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

$$R_{1\min} \approx 143 \Omega$$

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

7.13 分别求解图 P7.13 所示各电路的运算关系。

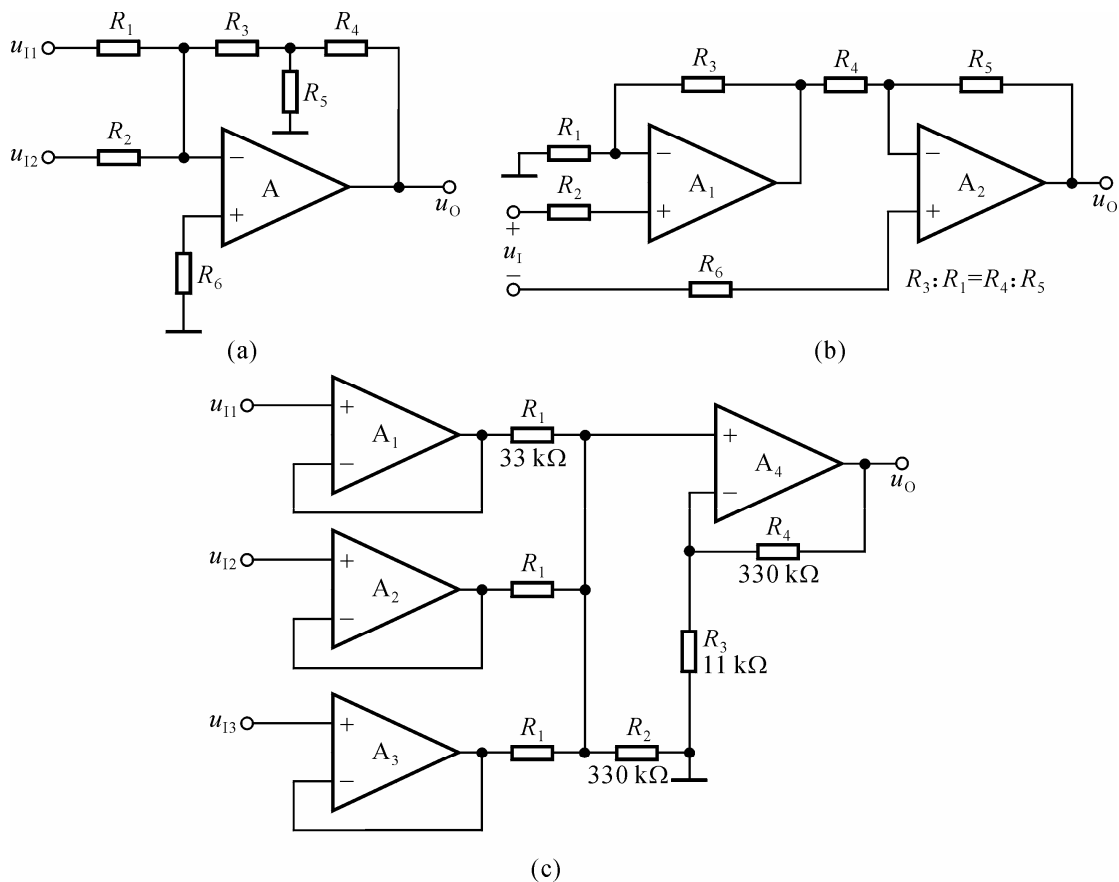


图 P7.13

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

$$u_M = -R_3 \left(\frac{u_{11}}{R_1} + \frac{u_{12}}{R_2} \right)$$

$$i_{R4} = i_{R3} - i_{R5} = \frac{u_{11}}{R_1} + \frac{u_{12}}{R_2} - \frac{u_M}{R_5}$$

$$u_O = u_M - i_{R4} R_4 = -(R_3 + R_4 + \frac{R_3 R_4}{R_5}) \left(\frac{u_{11}}{R_1} + \frac{u_{12}}{R_2} \right)$$

（b）先求解 u_{O1} ，再求解 u_O 。

$$\begin{aligned}
 u_{O1} &= (1 + \frac{R_3}{R_1})u_{I1} \\
 u_O &= -\frac{R_5}{R_4}u_{O1} + (1 + \frac{R_5}{R_4})u_{I2} \\
 &= -\frac{R_5}{R_4}(1 + \frac{R_3}{R_1})u_{I1} + (1 + \frac{R_5}{R_4})u_{I2} \\
 &= (1 + \frac{R_5}{R_4})(u_{I2} - u_{I1})
 \end{aligned}$$

(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

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

7.14 在图 P7.14 (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 $u_O=0$ 。试画出输出电压 u_O 的波形。

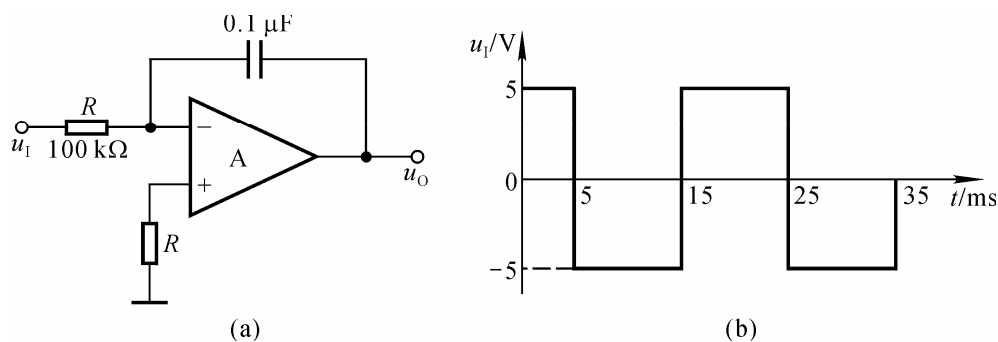


图 P7.14

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

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

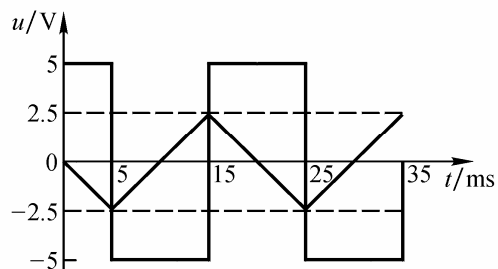
若 $t=0$ 时 $u_O=0$ ，则 $t=5\text{ms}$ 时

$$u_O = -100 \times 5 \times 5 \times 10^{-3} \text{V} = -2.5 \text{V}。$$

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 P7.14 所示。



解图 P7.14

7.15 已知图 P7.15 所示电路输入电压 u_i 的波形如图 P7.4 (b) 所示，且当 $t=0$ 时 $u_o=0$ 。试画出输出电压 u_o 的波形。

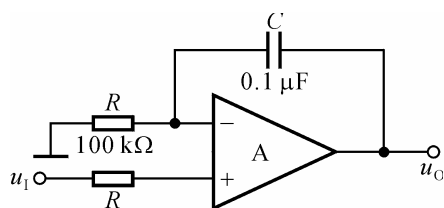
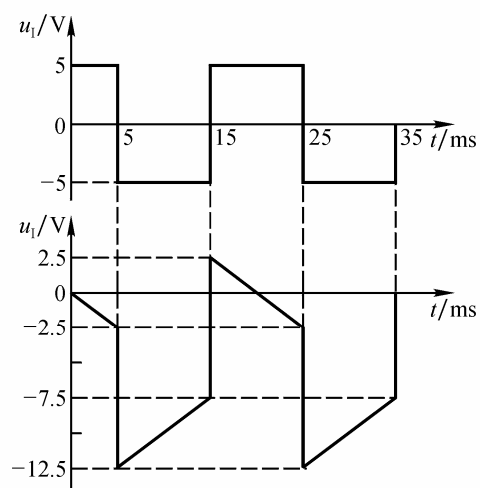


图 P7.15



解图 P7.15

解：输出电压与输入电压的运算关系为 $u_o = 100u_i(t_2 - t_1) + u_i - u_c(t_1)$ ，波形如解图 P7.15 所示。

7.16 试分别求解图 P7.16 所示各电路的运算关系。

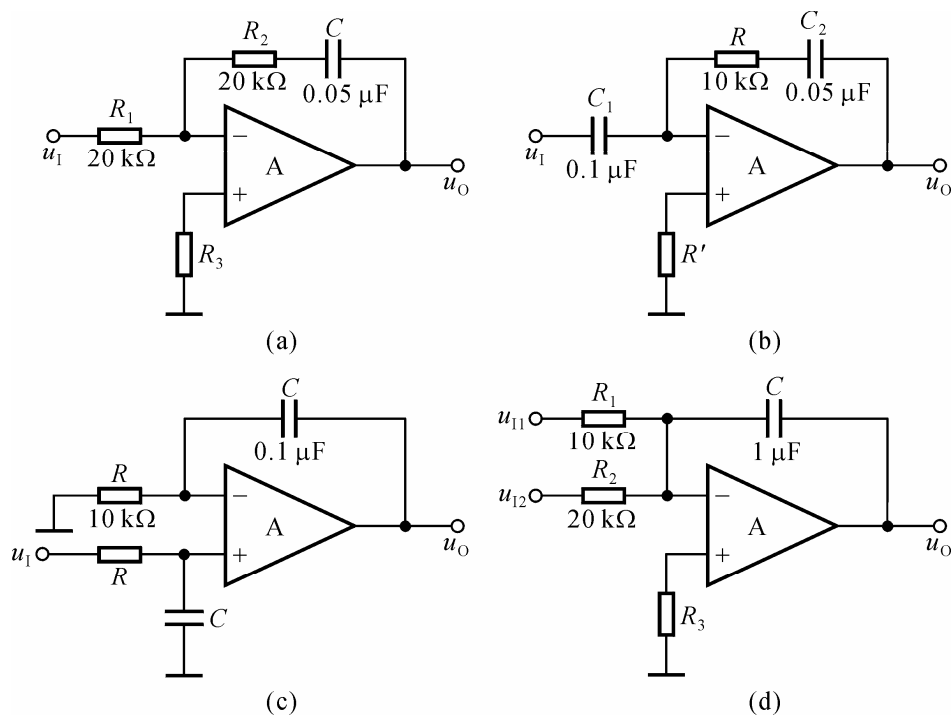


图 P7.16

解：利用节点电流法，可解出各电路的运算关系分别为：

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

$$(b) \quad u_O = -RC_1 \frac{du_I}{dt} - \frac{C_1}{C_2} u_I = -10^{-3} \frac{du_I}{dt} - 2u_I$$

$$(c) \quad u_O = \frac{1}{RC} \int u_I dt = 10^3 \int u_I dt$$

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

7.17 在图 P7.17 所示电路中，已知 $R_1 = R = R' = 100 \text{ k}\Omega$ ， $R_2 = R_f = 100 \text{ k}\Omega$ ，

$C = 1 \mu F$ 。

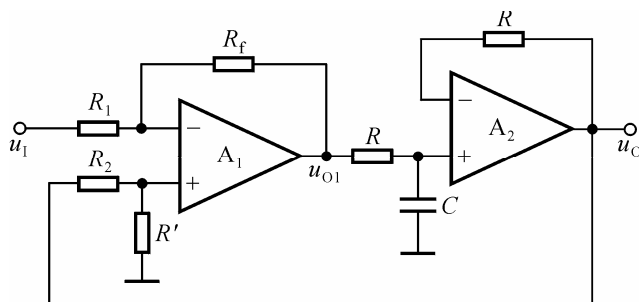


图 P7.17

(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_1 的同相输入端和反相输入端所接电阻相等，电容上的电压 $u_C = u_O$ ，所以其输出电压

$$u_{O1} = -\frac{R_f}{R_1} \cdot u_1 + \frac{R_f}{R_2} \cdot u_O = u_O - u_1$$

电容的电流

$$i_C = \frac{u_{O1} - u_O}{R} = -\frac{u_1}{R}$$

因此，输出电压

$$u_O = \frac{1}{C} \int i_C dt = -\frac{1}{RC} \int u_1 dt = -10 \int u_1 dt$$

(2) $u_O = -10u_1t_1 = [-10 \times (-1) \times t_1]V = 6V$ ，故 $t_1 = 0.6S$ 。即经 0.6 秒输出电压达到 $6V$ 。

7.18 试求出图 P7.18 所示电路的运算关系。

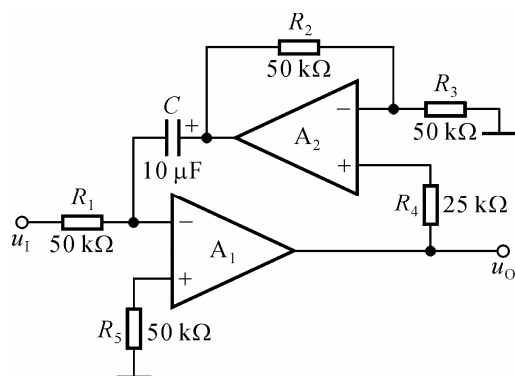


图 P7.18

解： 设 A_2 的输出为 u_{O2} 。因为 R_1 的电流等于 C 的电流，又因为 A_2 组成以 u_O 为输入的同相比例运算电路，所以

$$u_{O2} = -\frac{1}{R_1 C} \int u_1 dt = -2 \int u_1 dt$$

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

$$u_O = -\int u_1 dt$$

7.19 在图 P7.19 所示电路中，已知 $u_{11} = 4V$ ， $u_{12} = 1V$ 。回答下列问题：

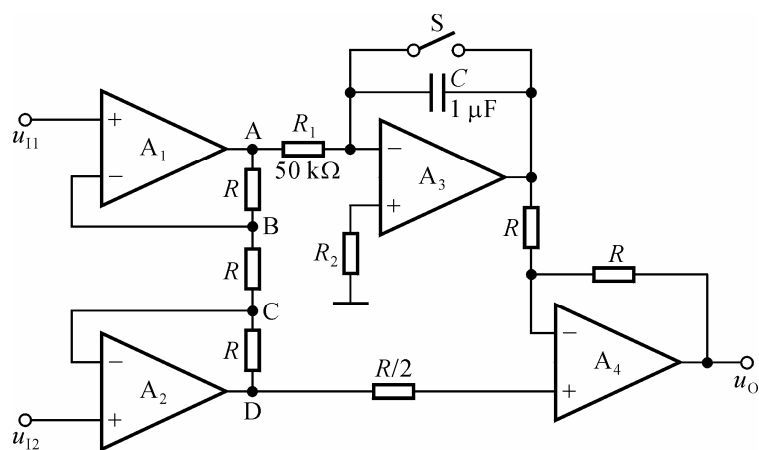


图 P7.19

- (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） $U_A = 7V$ ， $U_B = 4V$ ， $U_C = 1V$ ， $U_D = -2V$ ， $u_O = 2 U_D = -4V$ 。

（2）因为 $u_O = 2u_D - u_{O3}$ ， $2 u_D = -4V$ ，所以 $u_{O3} = -4V$ 时， u_O 才为零。

即

$$u_{O3} = -\frac{1}{R_1 C} \cdot u_A \cdot t = -\frac{1}{50 \times 10^3 \times 10^{-6}} \times 7 \times t = -4$$

$$t \approx 28.6mS$$

7.20 画出利用对数运算电路、指数运算电路和加减运算电路实现除法运算的原理框图。

解：答案如解图 7.20 所示。



解图 7.20

7.21 为了使图 P7.21 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_{11} 、 u_{12} 的运算关系式。

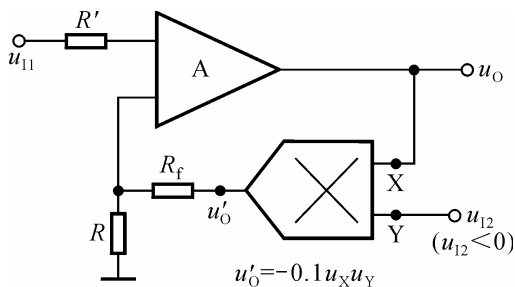


图 P7.21

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

$$\begin{aligned}
 u'_O &= ku_O u_{12} \\
 u_{11} &= \frac{R}{R + R_f} u'_O \\
 &= \frac{R}{R + R_f} \cdot (-0.1u_O u_{12})
 \end{aligned}$$

所以

$$u_O = -\frac{10(R + R_f)}{R} \cdot \frac{u_{11}}{u_{12}}$$

7.22 求出图 P7.22 所示各电路的运算关系。

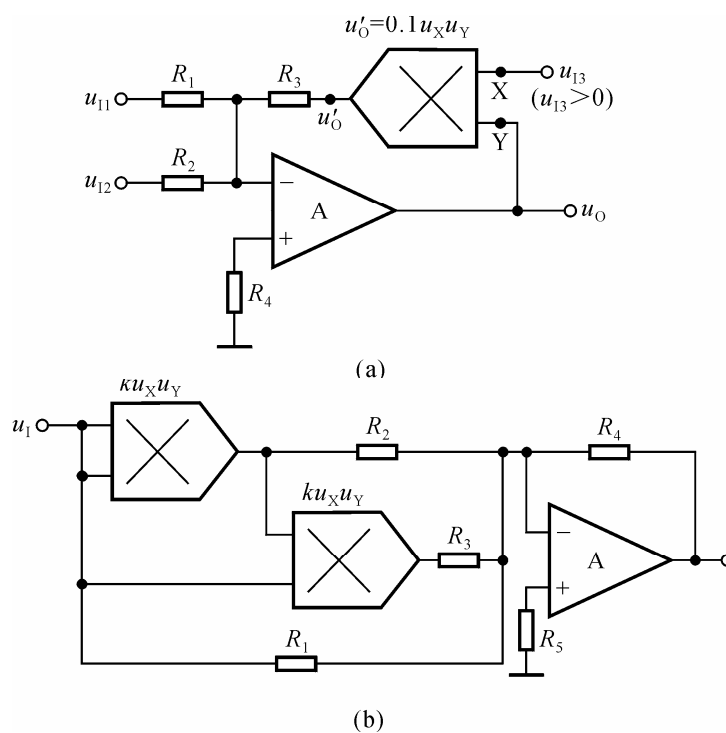


图 P7.22

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

$$\begin{aligned}
 (a) \quad u'_O &= -R_3 \left(\frac{u_{11}}{R_1} + \frac{u_{12}}{R_2} \right) = ku_O u_{13} \\
 u_O &= -\frac{R_3}{ku_{13}} \left(\frac{u_{11}}{R_1} + \frac{u_{12}}{R_2} \right)
 \end{aligned}$$

$$(b) \quad u_O = -\frac{R_4}{R_2} k u_1^2 - \frac{R_4}{R_3} k^2 u_1^3 - \frac{R_4}{R_1} u_1$$

7.23 利用图 7.3.9 所示方框图的思路，分别设计 5 次方运算电路和 5 次幂运算电路。

解：方框图如图 7.3.9 所示， $N=5$ 时为 5 次方电路； $N=0.2$ 时为 5 次幂电路。

7.24 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

7.25 试说明图 P7.25 所示各电路属于哪种类型的滤波电路，是几阶滤波电路。

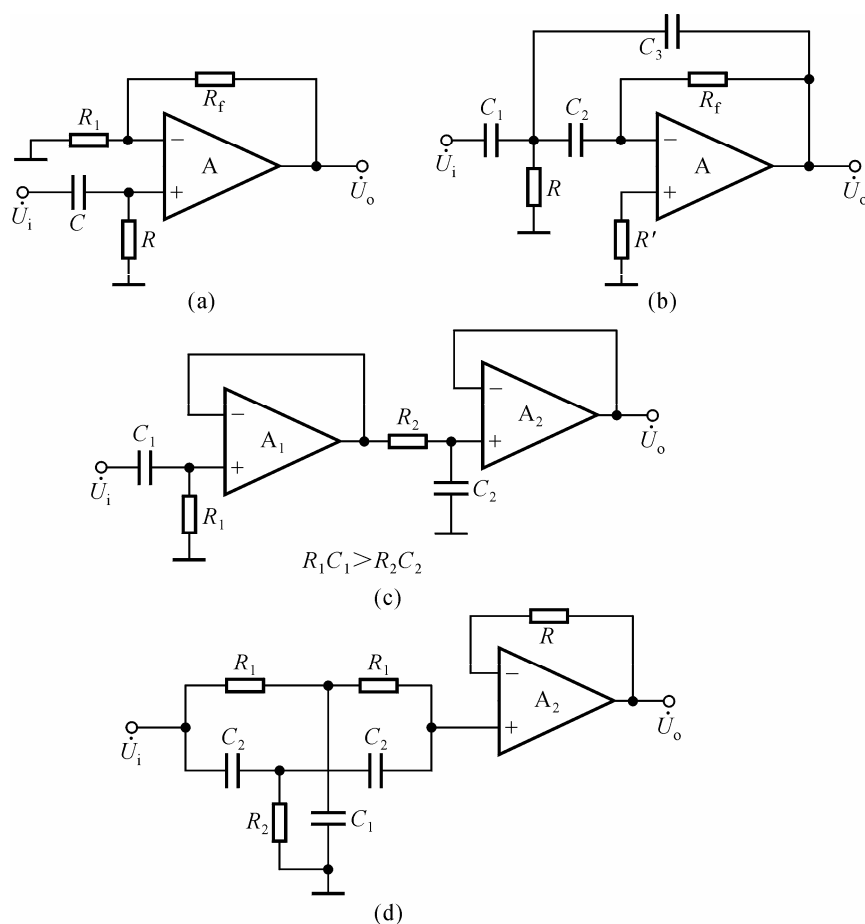


图 P7.25

解：图（a）所示电路为一阶高通滤波器。

图（b）所示电路二阶高通滤波器。

图（c）所示电路二阶带通滤波器。

图（d）所示电路二阶带阻滤波器。

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

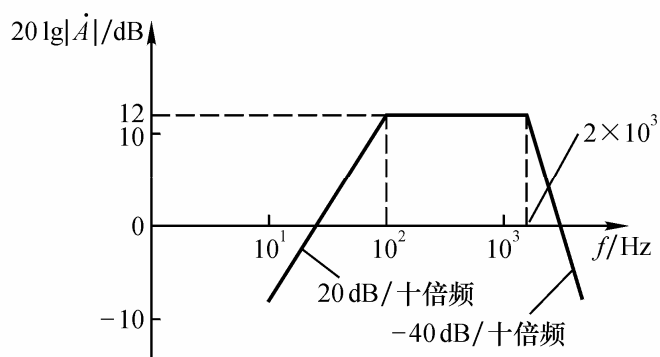
解：低通滤波器的通带截止频率为 2kHz，高通滤波器的通带截止频率为 100Hz。将两个滤波器串联，就构成一个带通滤波电路。其通带放大倍数为

$$\dot{A}_{up} = 4$$

通带增益为

$$20\lg|\dot{A}_{up}| \approx 12$$

幅频特性如解图 P7.26 所示。



解图 P7.26

7.27 分别推导出图 P7.27 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。

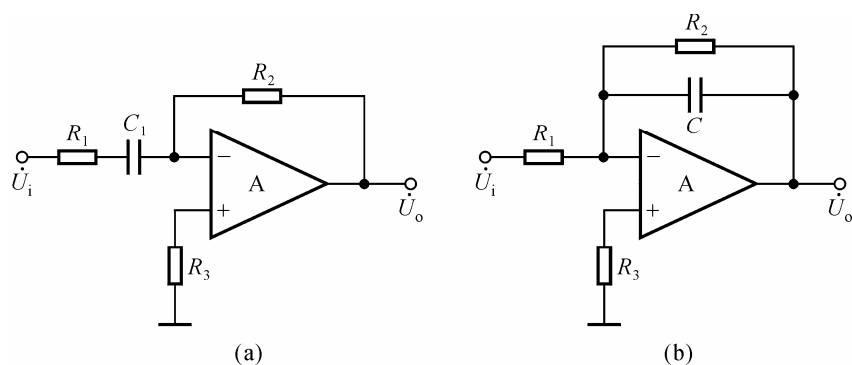


图 P7.27

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

$$A_u(s) = -\frac{R_2}{R_1 + \frac{1}{sC}} = -\frac{sR_2C}{1 + sR_1C}$$

故其为高通滤波器。

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。

7.28 试分析图P7.28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）？

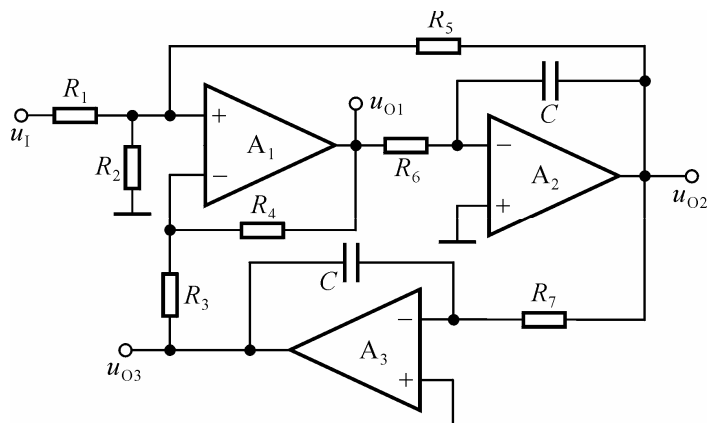


图 P7.28

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。

7.29 简述开关电容滤波电路的特点。

解：参阅 P362~P363。

7.30 在图 7.4.9 所示电路中，已知通带放大倍数为 2，截止频率为 1kHz， 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 $A_{up} = 2$ ，所以 $Q=1$ ， $\left|A_u\right|_{f=f_p} = 2$ 。

因为 $f_0 = f_p = \frac{1}{2\pi RC}$ ，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

$$R_1 = R_2 = 4R \approx 640\text{k}\Omega$$

第八章 波形的发生和信号的转换

自测题

一、判断下列说法是否正确，用“√”或“×”表示判断结果。

(1) 在图 T8.1 所示方框图中，若 $\phi_F = 180^\circ$ ，则只有当 $\phi_A = \pm 180^\circ$ 时，电路才能产生正弦波振荡。()

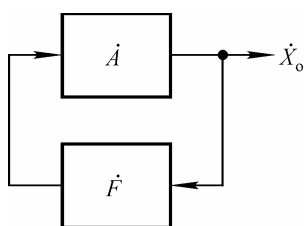


图 T8.1

(2) 只要电路引入了正反馈，就一定会产生正弦波振荡。()

(3) 凡是振荡电路中的集成运放均工作在线性区。()

(4) 非正弦波振荡电路与正弦波振荡电路的振荡条件完全相同。()

解：(1) √ (2) × (3) × (4) ×

二、改错：改正图 T8.2 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）。

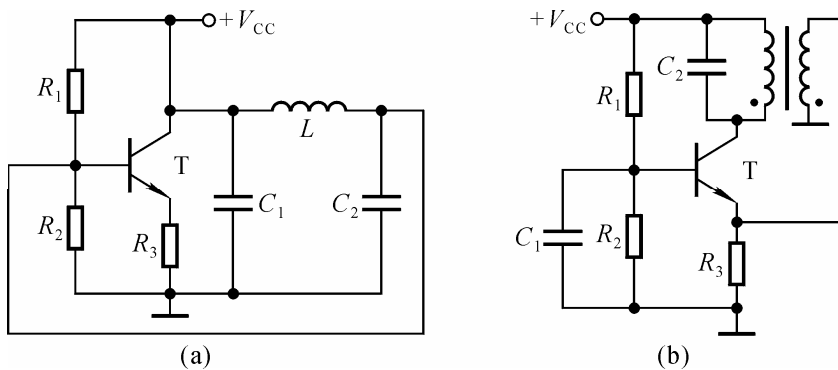


图 T8.2

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，改同铭端。

三、试将图 T8.3 所示电路合理连线，组成 RC 桥式正弦波振荡电路。

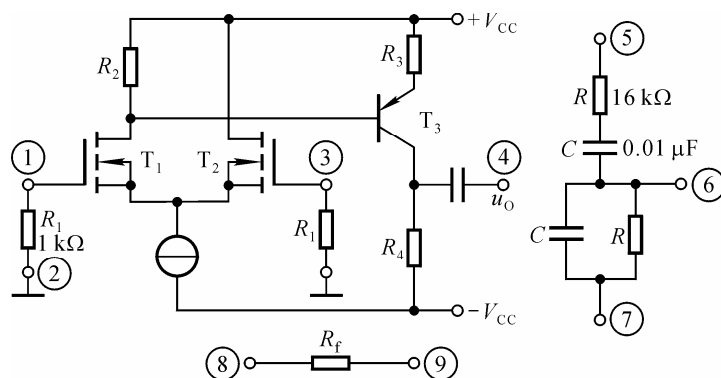
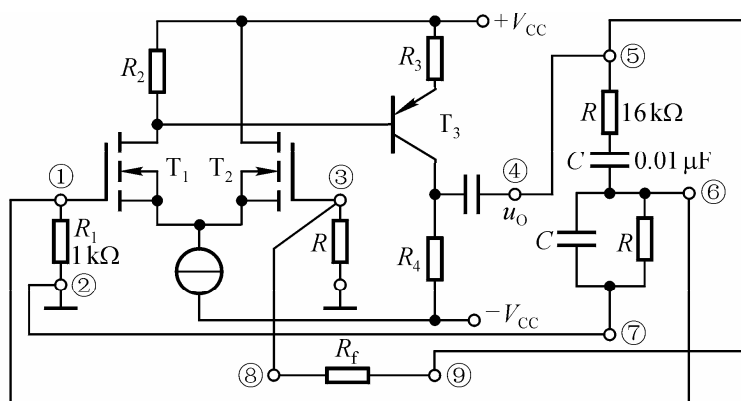


图 T8.3

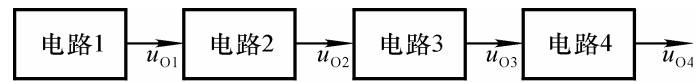
解：④、⑤与⑨相连，③与⑧相连，①与⑥相连，②与⑦相连。如解图 T8.3 所示。



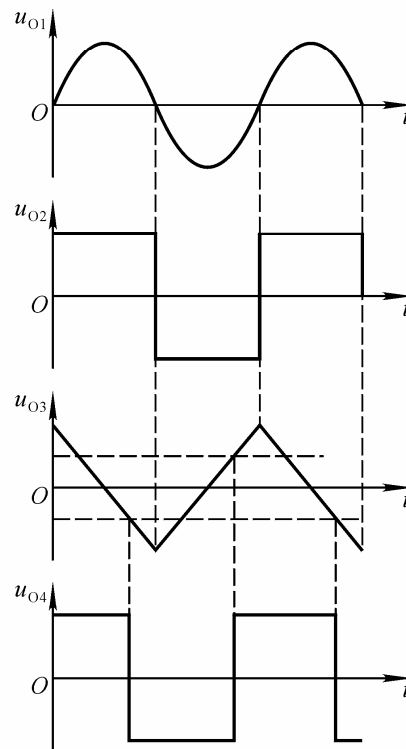
解图 T8.3

四、已知图 T8.4 (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 _____ ， 电路 2 为 _____ ， 电路 3 为 _____ ， 电路 4 为 _____ 。



(a)



(b)

图 T8.4

解：正弦波振荡电路，同相输入过零比较器，反相输入积分运算电路，同相输入滞回比较器。

五、试分别求出图 T8.5 所示各电路的电压传输特性。

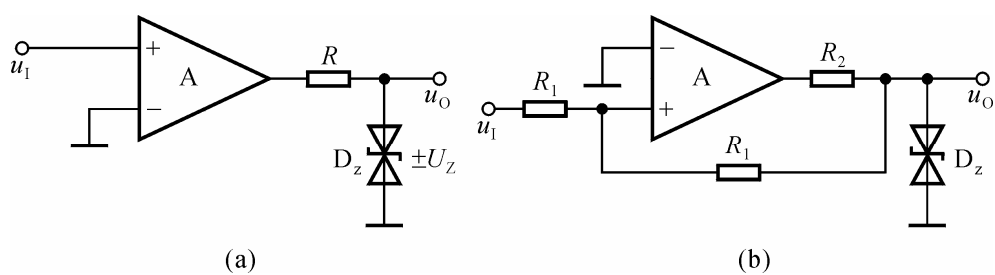
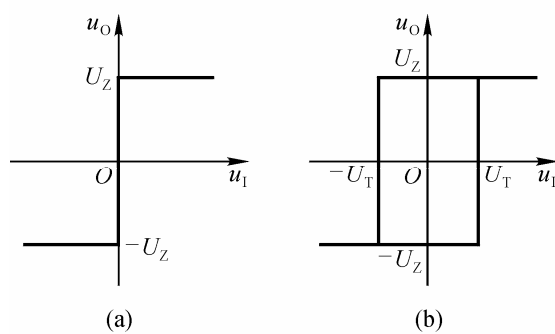


图 T8.5

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 $\pm U_T = \pm 0.5 U_Z$ 。两个电路的电压传输特性如解图 T8.5 所示



解图 T8.5

六、电路如图 T8.6 所示。

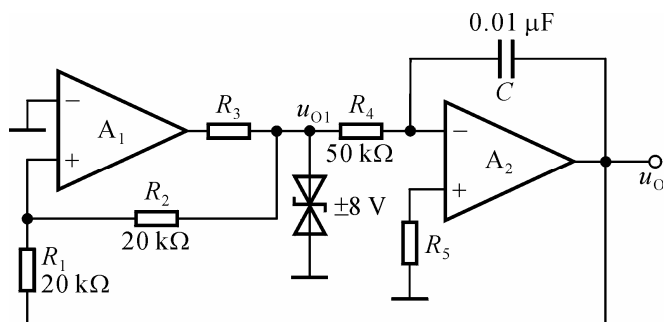


图 T8.6

- (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。

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

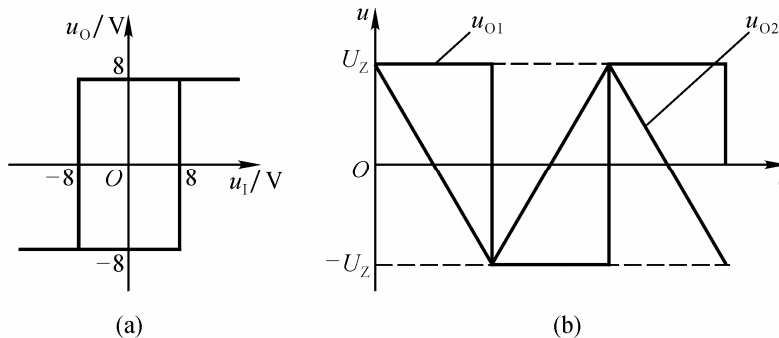
$$\pm U_T = \pm 8V$$

u_{O1} 与 u_O 的关系曲线如解图 T8.6 (a) 所示。

(3) u_O 与 u_{O1} 的运算关系式

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

$$= -2000 u_{O1} (t_2 - t_1) + u_O(t_1)$$



解图 T8.6

(4) u_{O1} 与 u_O 的波形如解图T8.6(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 。

习 题

8.1 判断下列说法是否正确, 用“√”或“×”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 $\phi_F = \pm \phi_A$ 。()

(2) 因为 RC 串并联选频网络作为反馈网络时的 $\phi_F = 0^\circ$, 单管共集放大电路的 $\phi_A = 0^\circ$, 满足正弦波振荡的相位条件 $\phi_A + \phi_F = 2n\pi$ (n 为整数), 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 $f_0 = 1/RC$ 。()

(4) 电路只要满足 $\left| \frac{A_F}{A_V} \right| = 1$, 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。()

解: (1) √ (2) × (3) × (4) × (5) × (6) √

8.2 判断下列说法是否正确, 用“√”或“×”表示判断结果。

(1) 只要集成运放引入正反馈, 就一定工作在非线性区。()

(2) 当集成运放工作在非线性区时, 输出电压不是高电平, 就是低电平。()

(3) 一般情况下, 在电压比较器中, 集成运放不是工作在开环状态, 就是仅仅引入了正反馈。()

(4) 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。()

(5) 在输入电压从足够低逐渐增大到足够高的过程中, 单限比较器和滞回比较器的输出电压均只跃变一次。()

(6) 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。()

解: (1) × (2) √ (3) √ (4) × (5) √ (6) ×

8.3 现有电路如下：

- A. RC 桥式正弦波振荡电路
- B. LC 正弦波振荡电路
- C. 石英晶体正弦波振荡电路

选择合适答案填入空内，只需填入 A、B 或 C。

- (1) 制作频率为 $20\text{Hz} \sim 20\text{kHz}$ 的音频信号发生电路，应选用_____。
- (2) 制作频率为 $2\text{MHz} \sim 20\text{MHz}$ 的接收机的本机振荡器，应选用_____。
- (3) 制作频率非常稳定的测试用信号源，应选用_____。

解：(1) A (2) B (3) C

8.4 选择下面一个答案填入空内，只需填入 A、B 或 C。

- A. 容性 B. 阻性 C. 感性

- (1) LC 并联网络在谐振时呈_____，在信号频率大于谐振频率时呈_____，在信号频率小于谐振频率时呈_____。
- (2) 当信号频率等于石英晶体的串联谐振频率或并联谐振频率时，石英晶体呈_____；当信号频率在石英晶体的串联谐振频率和并联谐振频率之间时，石英晶体呈_____；其余情况下石英晶体呈_____。
- (3) 当信号频率 $f=f_0$ 时， RC 串并联网络呈_____。

解：(1) B A C (2) B C A (3) B

8.5 判断图 P8.5 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。

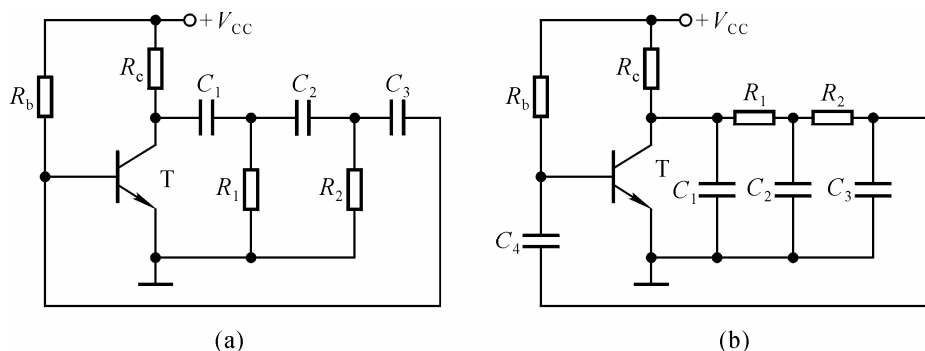


图 P8.5

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（ $\phi_A = -180^\circ$ ），且图中三级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 $+180^\circ$ （ $\phi_F = +180^\circ$ ）的频率，即存在满足正弦波振荡相位条件的频率 f_0 （此时 $\phi_A + \phi_F = 0^\circ$ ）；且在 $f=f_0$ 时有可能满足起振条件 $|A_F| > 1$ ，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（ $\phi_A = -180^\circ$ ），且图中三级移相电路为滞后网络，在信号频率为 0 到无穷大时相移为 $0^\circ \sim -270^\circ$ ，因此存在使相移为 -180° （ $\phi_F = -180^\circ$ ）的频率，即存在满足正弦波振荡相位条件的频率 f_0 （此时 $\phi_A + \phi_F = -360^\circ$ ）；且在 $f=f_0$ 时有可能满足起振条件 $|A_F| > 1$ ，故可能产生正弦波振荡。

8.6 电路如图 P8.5 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。

8.7 电路如图 P8.7 所示，试求解：

（1） R_W 的下限值；

(2) 振荡频率的调节范围。

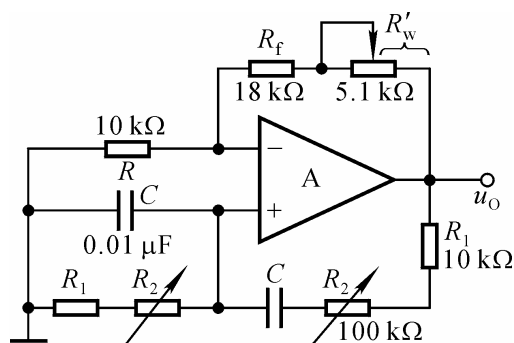


图 P8.7

解：(1) 根据起振条件

$$R_f + R'_w > 2R, R'_w > 2k\Omega。$$

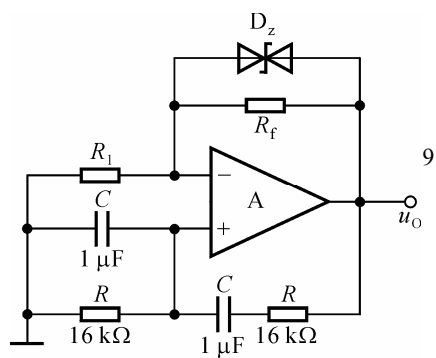
故 R_w 的下限值为 $2k\Omega$ 。

(2) 振荡频率的最大值和最小值分别为

$$f_{0\max} = \frac{1}{2\pi R_1 C} \approx 1.6\text{kHz}$$

$$f_{0\min} = \frac{1}{2\pi (R_1 + R_2) C} \approx 145\text{Hz}$$

8.8 电路如图P8.8所示，稳压管 D_z 起稳幅作用，其稳定电压 $\pm U_z = \pm 6\text{V}$ 。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) 输出电压不失真情况下的峰值是稳压管的稳定电压，故其有效值

$$U_o = \frac{1.5U_z}{\sqrt{2}} \approx 6.36V$$

- (2) 电路的振荡频率

图 P8.8

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} \approx 9.95Hz$$

8.9 电路如图 P8.9 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？

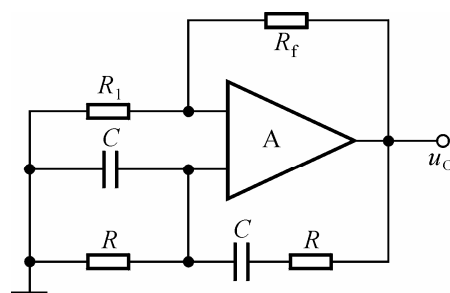


图 P8.9

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。

8.10 图P8.10 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 $\pm U_Z = \pm 6V$, $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R$, $C_1 = C_2 = C$ 。

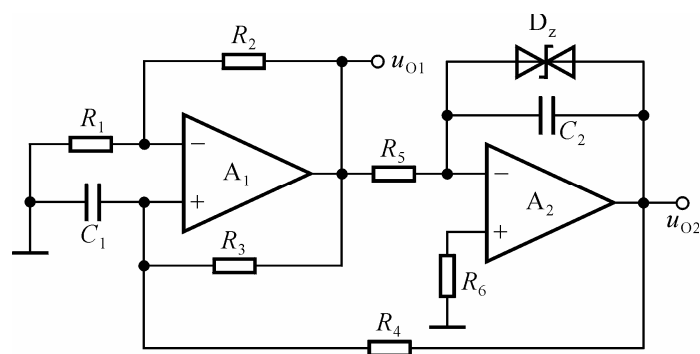


图 P8.10

- (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 \dot{U}_{o1} 和 \dot{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 \dot{U}_{o2} 超前输入电压 \dot{U}_{o1} 90° ，而由 A_1 组成的电路的输出电压 \dot{U}_{o1} 滞后输入电压 \dot{U}_{o2} 90° ，因而 \dot{U}_{o1} 和 \dot{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) 解方程组：

$$\begin{cases} \dot{U}_{p1} = \dot{U}_{n1} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot \dot{U}_{o1} \\ \frac{\dot{U}_{p1} - \dot{U}_{o1}}{R_4} + \frac{\dot{U}_{p1} - \dot{U}_{o1}}{R_3} = -\dot{U}_{p1} \cdot j\omega C_1 \\ \dot{U}_{o2} = -\frac{\dot{U}_{o1}}{j\omega R_5 C_2} \end{cases}$$

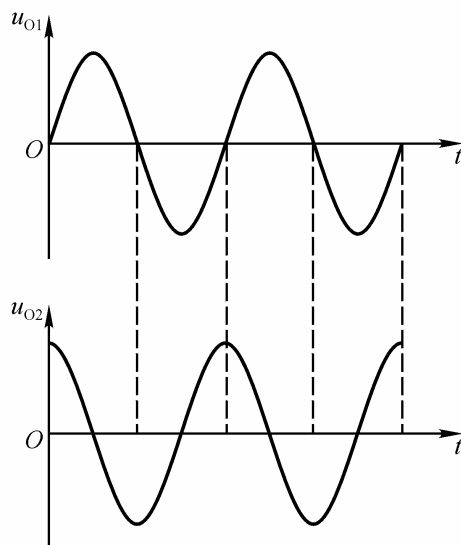
可得正实根，求出 $f_0 = \frac{1}{\sqrt{2\pi} RC}$ 。

(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 $\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}RC}$ 代入可得

$$|\dot{U}_{o1}| = \sqrt{2} |\dot{U}_{o2}|, \text{ 故 } U_{o1\max} = \sqrt{2} U_{o2\max} \approx 8.5V。$$

若 u_{O1} 为正弦波，则 u_{O2} 为余弦波，如解图 8.10 所示。



解图 P8.10

8.11 分别标出图 P8.11 所示各电路中变压器的同铭端，使之满足正弦波振荡的相位条件。

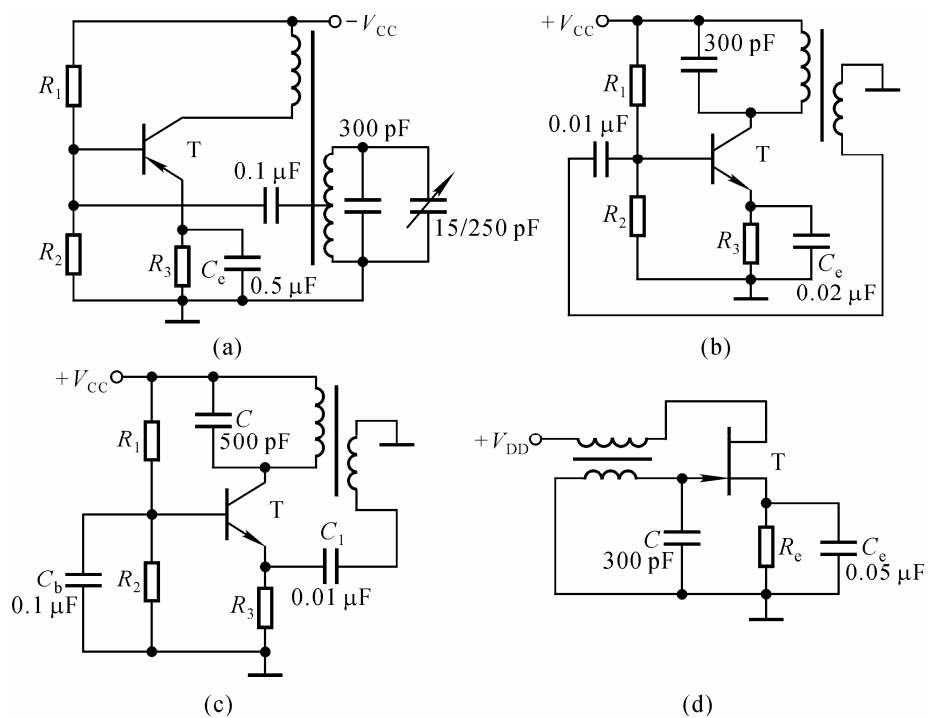
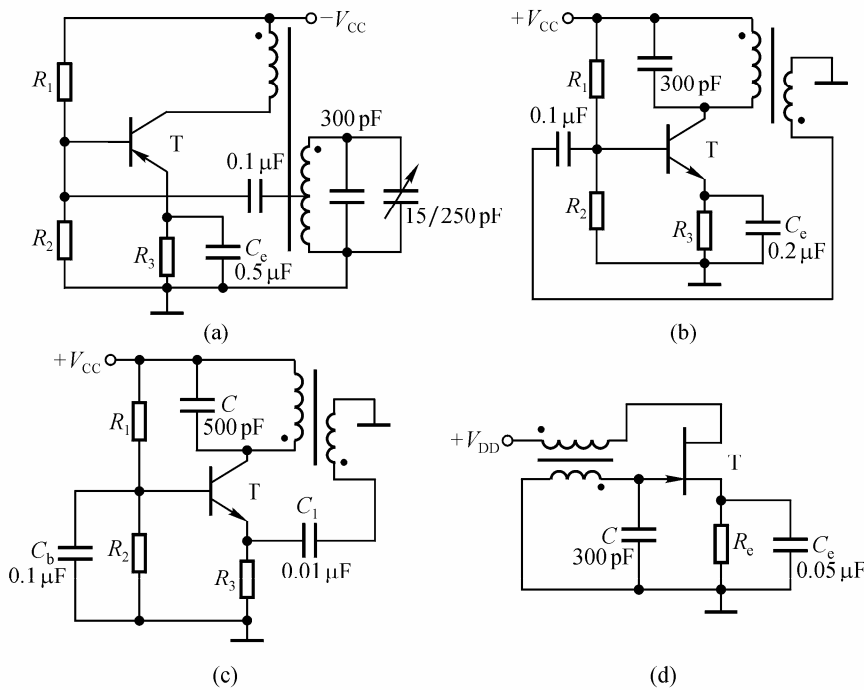


图 P8.11

解：图 P8.11 所示各电路中变压器的同铭端如解图 P8.11 所示。



解图 P8.11

8.12 分别判断图 P8.12 所示各电路是否满足正弦波振荡的相位条件。

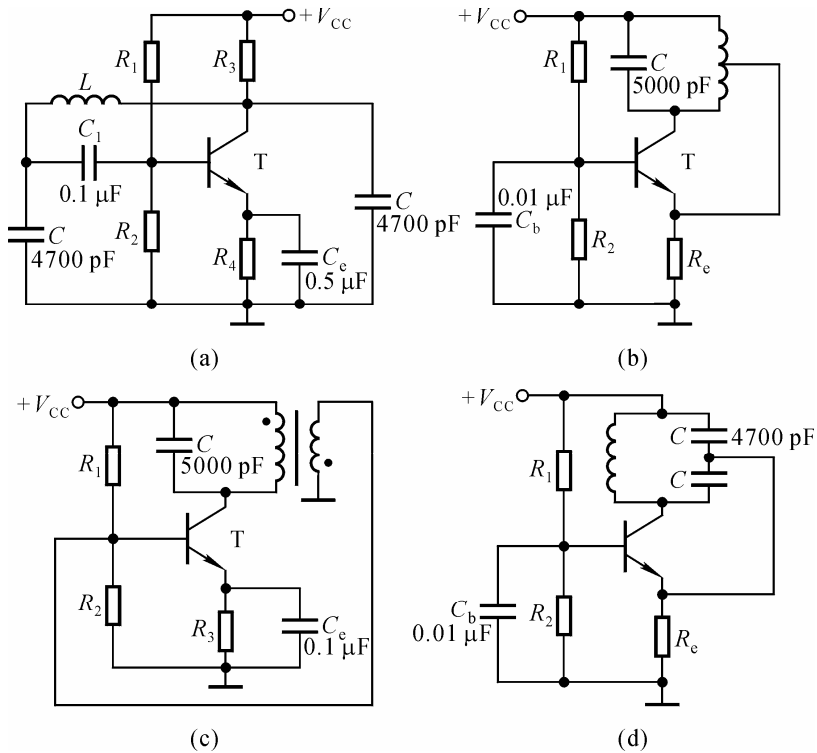


图 P8.12

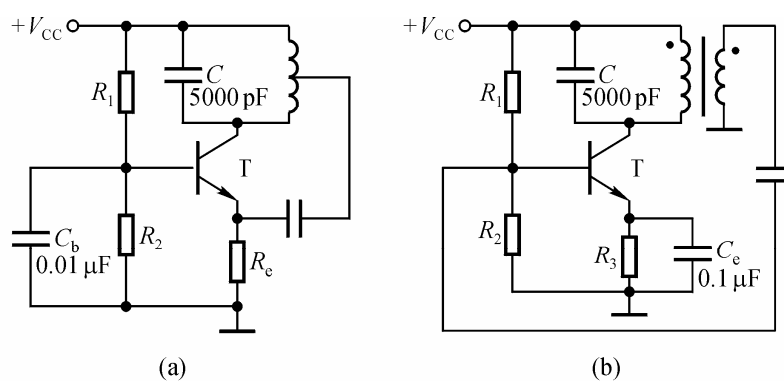
解：(a) 可能 (b) 不能 (c) 不能 (d) 可能

8.13 改正图 P8.12 (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，且将变压器的同铭端改为原边的上端和副边的上端为同铭端，或它们的下端为同铭端。

改正后的电路如解图 P8.13 所示。



解图 P8.13

8.14 试分别指出图 P8.14 所示两电路中的选频网络、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相位条件。

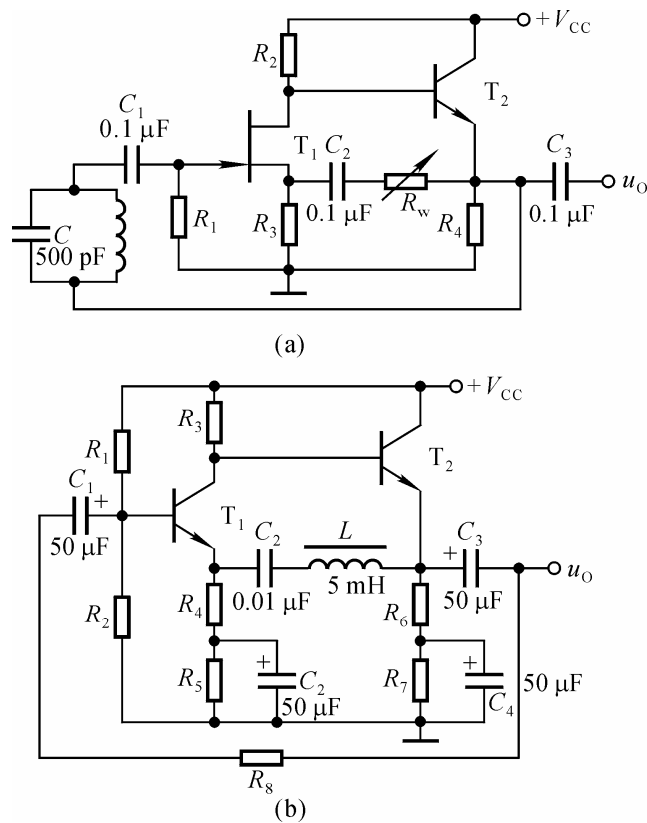


图 P8.14

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。

8.15 试分别求解图 P8.15 所示各电路的电压传输特性。

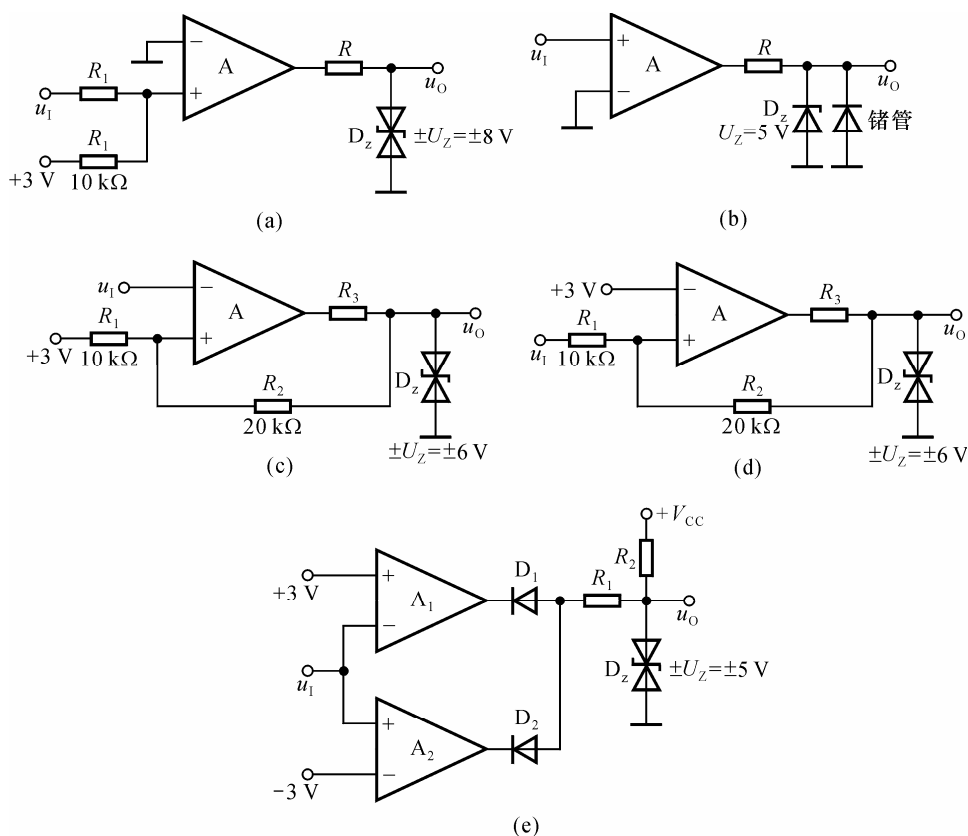


图 P8.15

解：图（a）所示电路为单限比较器， $u_O = \pm U_Z = \pm 8\text{V}$ ， $U_T = -3\text{V}$ ，其电压传输特性如解图 P8.15（a）所示。

图（b）所示电路为过零比较器， $U_{OL} = -U_D = -0.2\text{V}$ ， $U_{OH} = +U_Z = +6\text{V}$ ， $U_T = 0\text{V}$ 。其电压传输特性如解图 P8.15（b）所示。

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

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

求出阈值电压 $U_{T1} = 0\text{V}$ $U_{T2} = 4\text{V}$

其电压传输特性如解图 P8.15（c）所示。

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

$$u_P = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot u_I + \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot u_{O1} = u_N = 3\text{V}$$

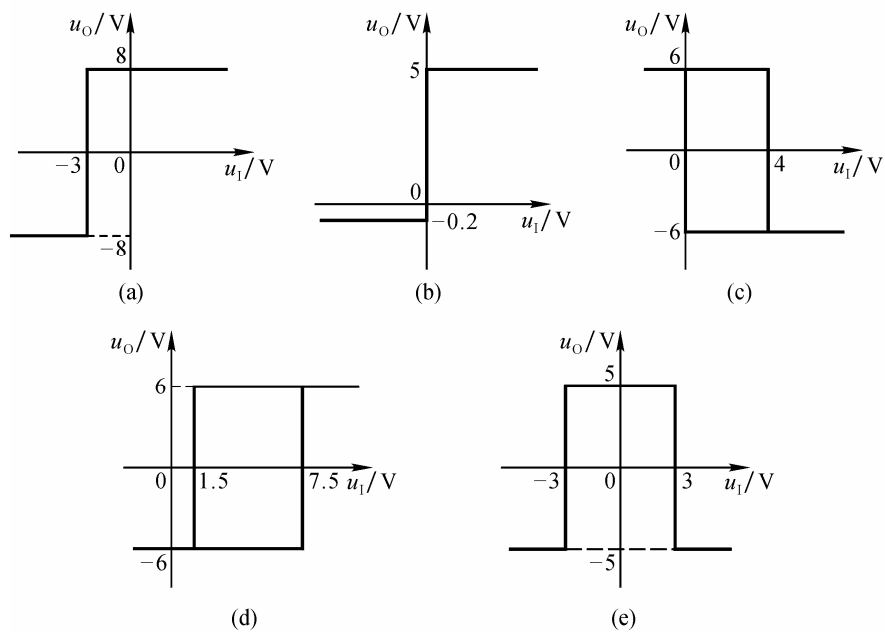
得出阈值电压

$$U_{T1} = 1.5V$$

$$U_{T2} = 7.5V$$

其电压传输特性如解图 P8.15 (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 P8.15 (e) 所示。



解图 P8.15

8.16 已知三个电压比较器的电压传输特性分别如图 P8.16 (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。

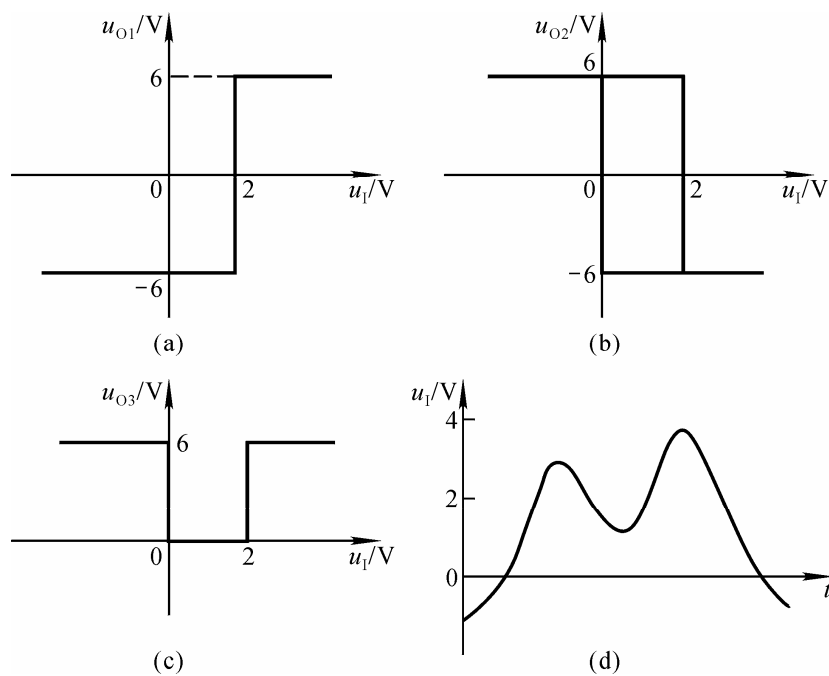
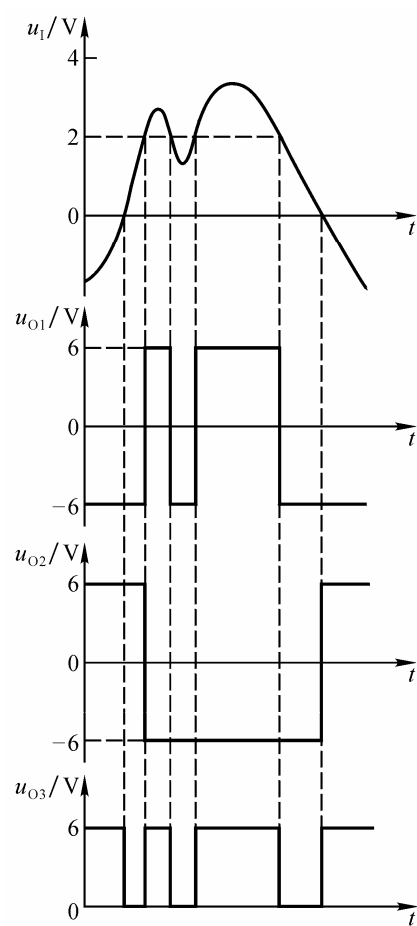


图 P8.16

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 P8.16 所示。



解图 P8.16

8.17 图 P8.17 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 关系的传输特性。

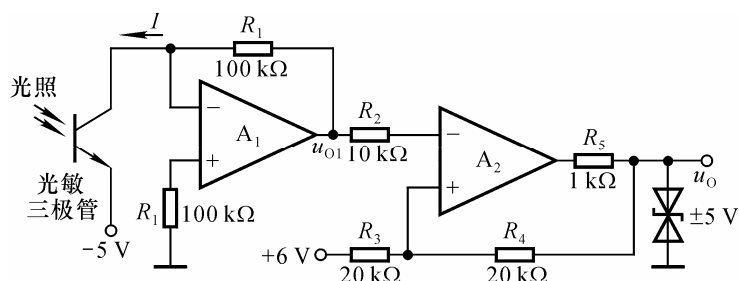


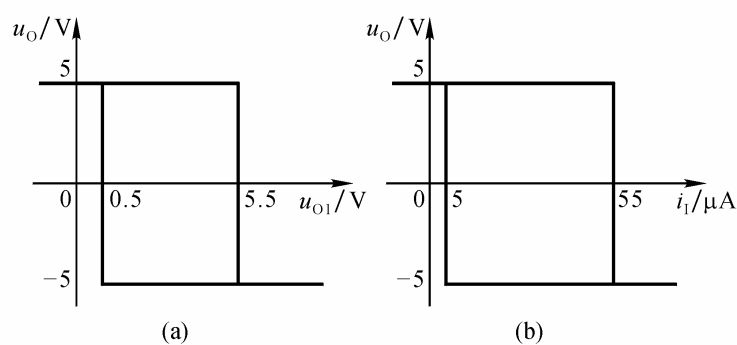
图 P8.17

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_O 与 i 关系式为

$$u_{O1} = -i_1 R_1 = -100i_1$$

u_O 与 u_{O1} 的电压传输特性如解图 P8.17 (a) 所示，因此 u_O 与 i 关系的传输特性如解图 P8.17 (b) 所示。



解图 P8.17

8.18 设计三个电压比较器，它们的电压传输特性分别如图 P8.16 (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 $50\text{k}\Omega$ 。

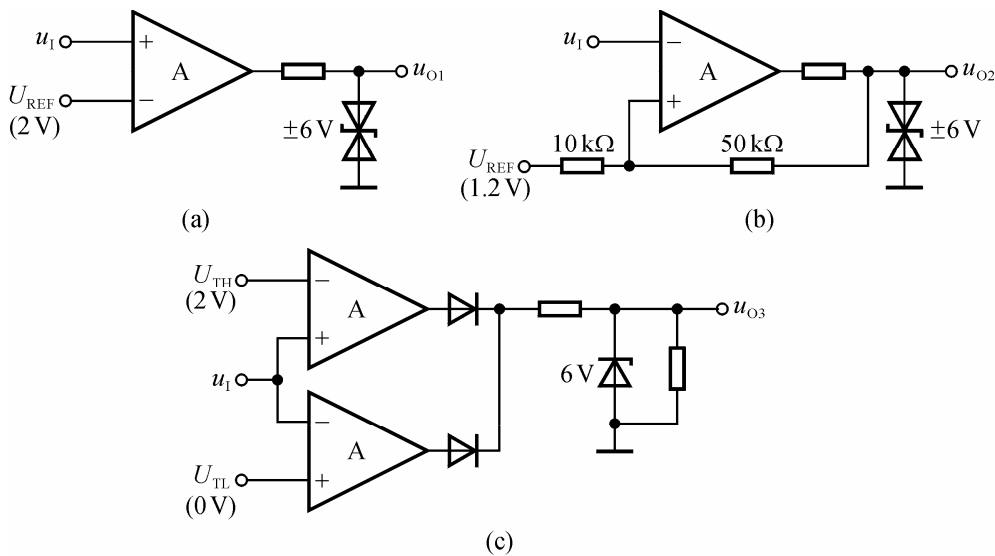
解：具有图 P8.16 (a) 所示电压传输特性的电压比较器为同相输入的单限比较器。输出电压 $u_O = \pm U_Z = \pm 6\text{V}$ ，阈值电压 $U_T = 2\text{V}$ ，电路如解图 P8.18 (a) 所示。

具有图 P8.16 (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 $u_O = \pm U_Z = \pm 6\text{V}$ ；阈值电压 $U_{T1} = 0\text{V}$ ， $U_{T2} = 2\text{V}$ ，说明电路输入有 U_{REF} 作用，根据

$$u_P = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot u_O + \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_{\text{REF}} = u_N = u_1$$

列方程，令 $R_2 = 50\text{k}\Omega$ ，可解出 $R_1 = 10\text{k}\Omega$ ， $U_{\text{REF}} = 1.2\text{V}$ 。电路如解图 P8.18 (b) 所示。

具有图 P8.16 (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 $U_{\text{OL}} = 0\text{V}$ ， $U_{\text{OH}} = 6\text{V}$ ，阈值电压 $U_{T1} = 0\text{V}$ ， $U_{T2} = 2\text{V}$ 。电路如解图 P8.18 (c) 所示。



解图 P8.18

8.19 在图 P8.19 所示电路中，已知 $R_1 = 10\text{k}\Omega$ ， $R_2 = 20\text{k}\Omega$ ， $C = 0.01\mu\text{F}$ ，

集成运放的最大输出电压幅值为 $\pm 12\text{V}$ ，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。

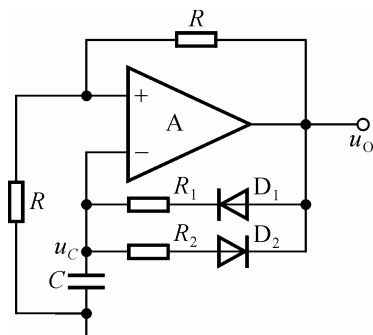
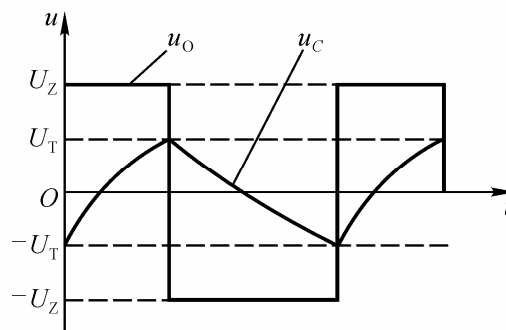


图 P8.19



解图 P8.19

解：(1) 振荡周期

$$T \approx (R_1 + R_2) C \ln 3 \approx 3.3\text{ms}$$

(2) 脉冲宽度

$$T_1 \approx R_1 C \ln 3 \approx 1.1\text{ms}$$

u_O 和 u_C 的波形如解图 8.19 所示。

8.20 图 P8.20 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。

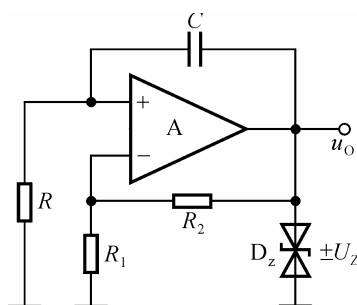
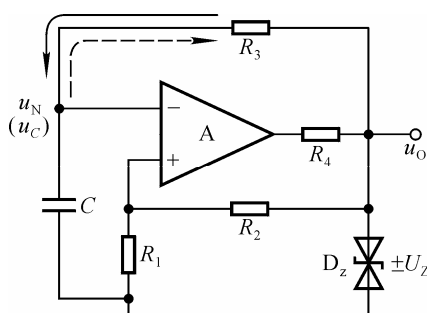


图 P8.20



解图 P8.20

解：图 P8.20 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 8.20 所示。

8.21 波形发生电路如图P8.21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：

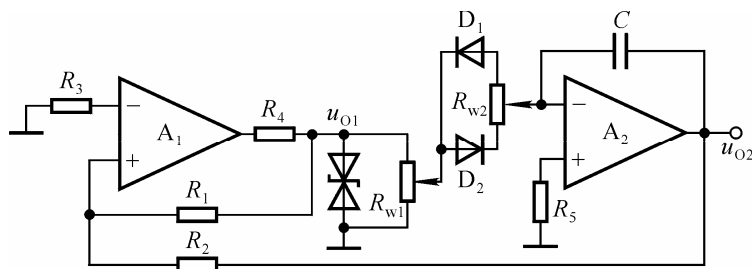


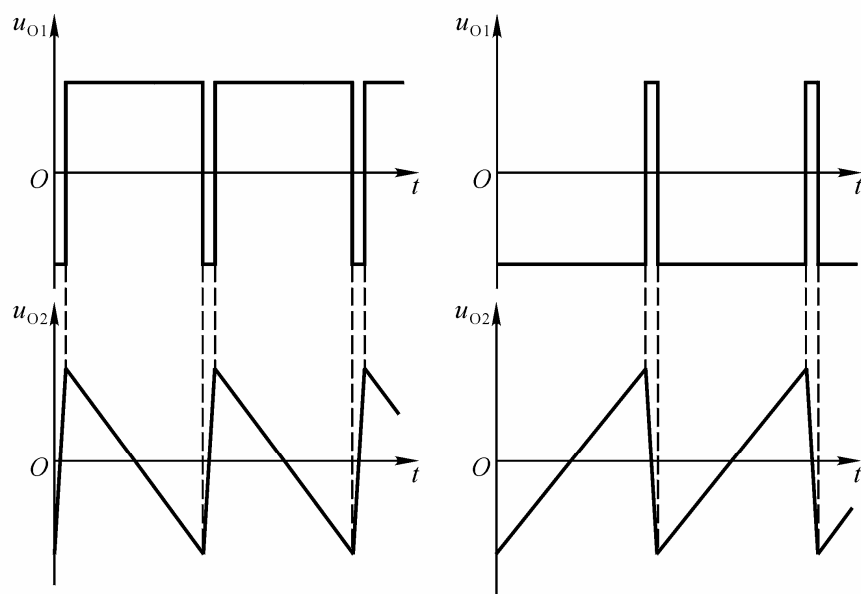
图 P8.21

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。

8.22 在图 P8.21 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 8.22 所示。



(a) R_{W2} 滑动端在最上端

(b) R_{W2} 滑动端在最下端

解图 8.22

8.23 电路如图P8.23所示, 已知集成运放的最大输出电压幅值为 $\pm 12\text{V}$, 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 $U_1 = 2.5\text{V}$, 画出 u_{O1} 、 u_{O2} 和 u_{O3} 的波形。

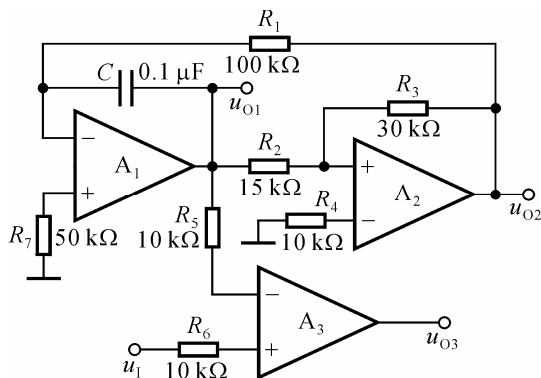


图 P8.23

解: 在图P8.23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 $\pm U_T = \pm \frac{R_2}{R_3} \cdot U_{OM} = \pm 6\text{V}$

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 $u_{O1}(t_1) = -U_T = -6\text{V}$, 终了值 $u_{O1}(t_1) = -U_T = 6\text{V}$, $u_{O2} = -U_{OM} = -12\text{V}$, 代入上式

$$6 = -\frac{1}{10^5 \times 10^{-7}} \times (-12) \times \frac{T}{2} - 6$$

求出振荡周期 $T = 20\text{ms}$

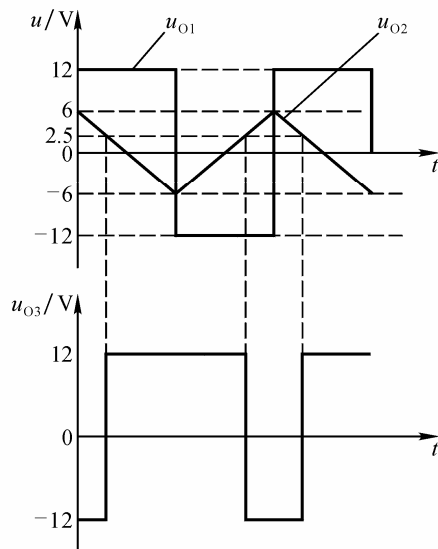
求解脉冲宽度 T_1 :

$$U_1 = -\frac{1}{RC} \cdot (-U_{OM}) \cdot \frac{T_1}{2} - U_T$$

$$T_1 = \frac{6 + u_1}{600}$$

求解占空比：
$$\delta = \frac{T_1}{T} = \frac{6+U_1}{12}$$

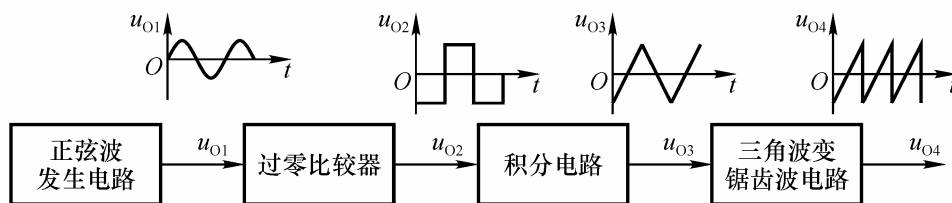
(2) u_{O1} 、 u_{O2} 和 u_{O3} 的波形如解图 8.23 所示。



解图 P8.23

8.24 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 P8.24 所示。



解图 P8.24

8.25 试分析图 P8.25 所示各电路输出电压与输入电压的函数关系。

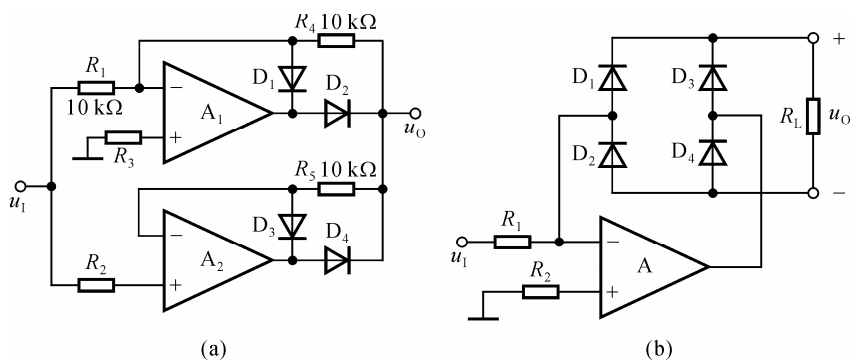


图 P8.25

解：图示两个电路均为绝对值运算电路。运算关系式分别为

$$(a) \quad u_o = |u_1|$$

$$(b) \quad u_o = \frac{R_L}{R_1} |u_1|$$

8.26 电路如图 P8.26 所示。

- (1) 定性画出 u_{O1} 和 u_O 的波形；
- (2) 估算振荡频率与 u_1 的关系式。

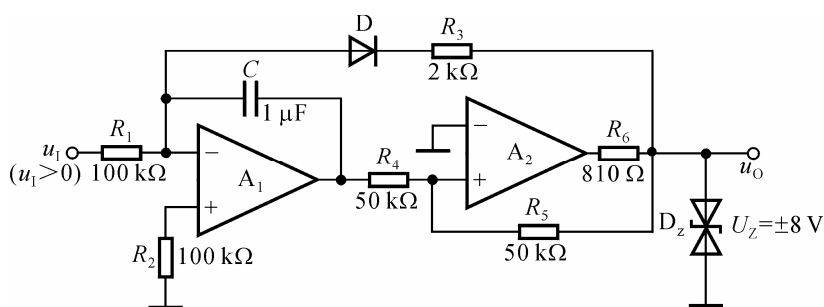


图 P8.26

解：(1) u_{O1} 和 u_O 的波形如解图 P8.26 所示。

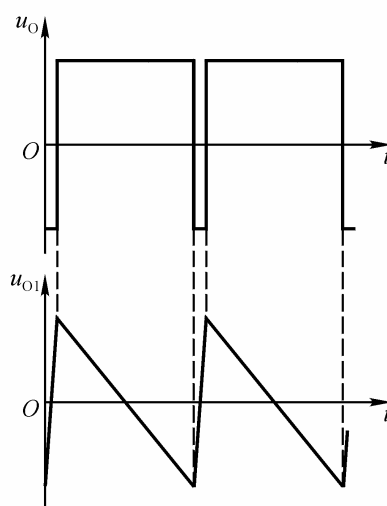
(2) 求解振荡频率：首先求出电压比较器的阈值电压，然后根据振荡周期近似等于积分电路正向积分时间求出振荡周期，振荡频率是其倒数。

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

$$U_T \approx -\frac{1}{R_1 C} u_1 T - U_T$$

$$T \approx \frac{2U_T R_1 C}{u_1}$$

$$f \approx \frac{u_1}{2U_T R_1 C} = 0.625u_1$$



解图 P8.26

8.27 已知图P8.27所示电路为压控振荡电路，晶体管T工作在开关状态，
第八章题解-28

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。

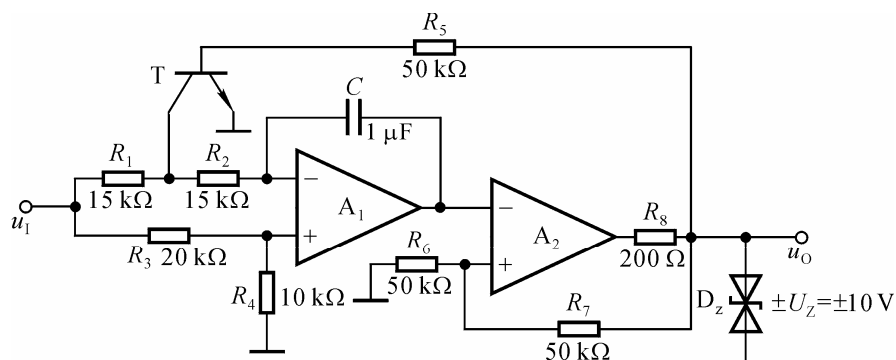


图 P8.27

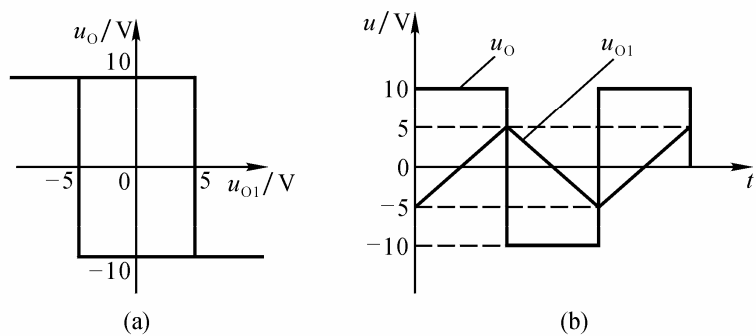
解：(1) T导通时， $u_{N1} = u_I / 3$ 。

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

T截止时，

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

- (2) u_O 和 u_{O1} 的关系曲线如解图P8.27(a)所示。
- (3) u_O 和 u_{O1} 的波形如解图P8.27(b)所示。



解图 P8.27

(4) 首先求出振荡周期，然后求出振荡频率，如下：

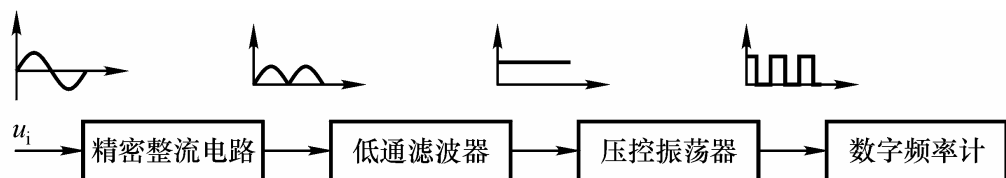
$$U_T = \frac{10^3}{45} \cdot u_1 \cdot \frac{T}{2} - U_T$$

$$T = \frac{2U_T \times 90}{10^3 u_1} = \frac{0.9}{u_1}$$

$$f \approx 1.1 u_1$$

8.28 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 P8.28 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。



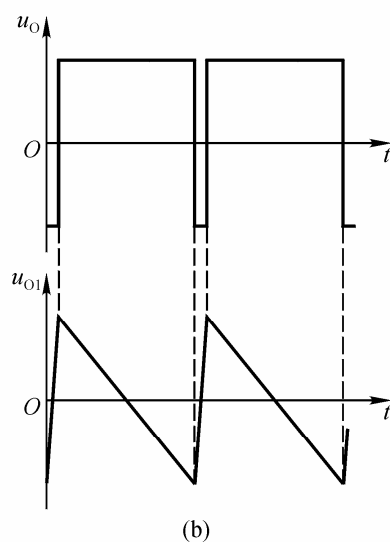
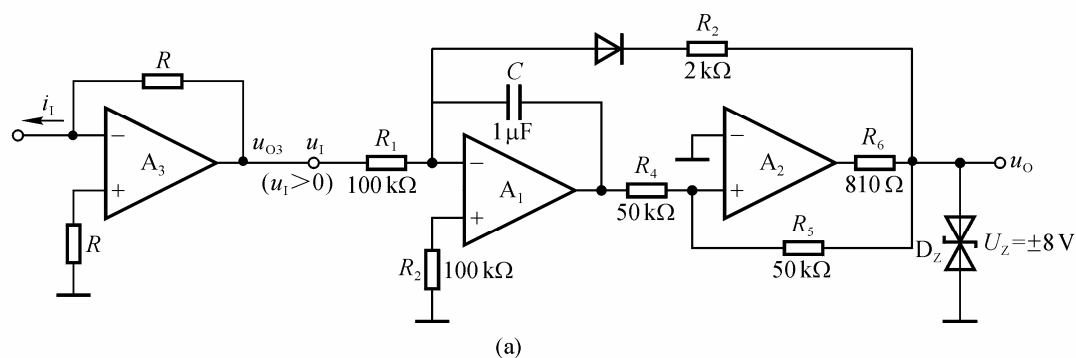
解图 P8.28

8.29 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 P8.26 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 P8.29 (a) 所示，其波形如解图 (b) 所示。

若输入电流与解图 P8.29 (a) 所示相反，则应将 u_{O3} 经比例系数为 -1 的反相比例运算电路后，再接压控振荡器。



解图 P8.29

此题还可选用其它的压控振荡器，完成电压—频率转换。

8.30 什么是调制？什么是调幅、调频和调相？什么是解调？

解：参阅 P451~P452。

8.31 锁相环有什么特点？如何利用锁相环实现调制和解调？

解：参阅 P448、P452~P454。

第九章 功率放大电路

自 测 题

一、选择合适的答案，填入空内。只需填入 A、B 或 C。

(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，负载上可能获得的最大_____。

- 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_____。

- 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 OCL 乙类功放电路中，若最大输出功率为 1W，则电路中功放管的集电极最大功耗约为_____。

- A. 1W B. 0.5W C. 0.2W

(4) 在选择功放电路中的晶体管时，应当特别注意的参数有_____。

- A. β B. I_{CM} C. I_{CBO}
D. BU_{CEO} E. P_{CM} F. f_T

(5) 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 $P_{OM} =$ _____。

- A. $\frac{(V_{CC} - U_{CES})^2}{2R_L}$ B. $\frac{(\frac{1}{2}V_{CC} - U_{CES})^2}{R_L}$ C. $\frac{(\frac{1}{2}V_{CC} - U_{CES})^2}{2R_L}$

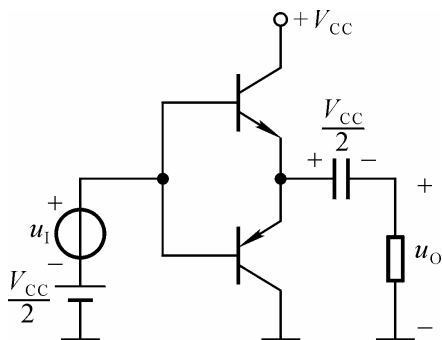


图 T9.1

解：(1) A (2) B (3) C (4) B D E (5) C

二、电路如图 T9.2 所示，已知 T_1 和 T_2 的饱和管压降 $|U_{CES}| = 2V$ ，直流功耗可忽略不计。

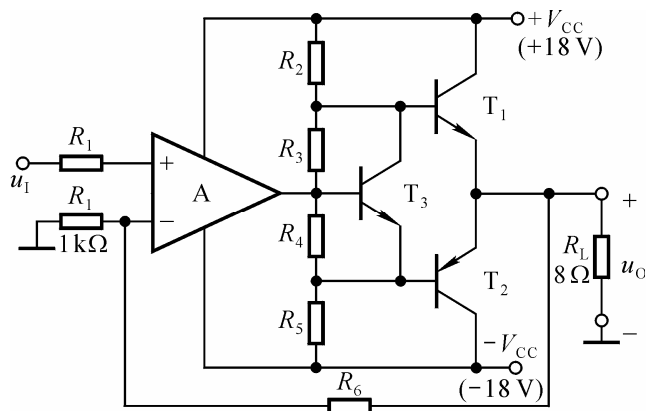


图 T9.2

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 η 各为多少？

(3) 设最大输入电压的有效值为 $1V$ 。为了使电路的最大不失真输出电压的峰值达到 $16V$ ，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

$$P_{om} = \frac{(V_{CC} - U_{CES})^2}{\sqrt{2}R_L} = 16W$$

$$\eta = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{V_{CC} - U_{CES}}{V_{CC}} \approx 69.8\%$$

(3) 电压放大倍数为

$$\dot{A}_u = \frac{U_{omax}}{\sqrt{2}U_i} \approx 11.3$$

$$\dot{A}_u = 1 + \frac{R_6}{R_1} \approx 11.3$$

$R_1 = 1k\Omega$ ，故 R_6 至少应取 $10.3k\Omega$ 。

习 题

9.1 分析下列说法是否正确，凡对者在括号内打“√”，凡错者在括号内打“×”。

(1) 在功率放大电路中，输出功率愈大，功放管的功耗愈大。()

(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耗散功率应大于 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。()

解：(1) × (2) √ (3) × (4) × × √
(5) × × √ √ (6) × √ √

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。

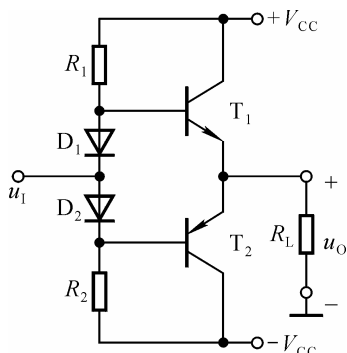


图 P9.2

- (1) 电路中 D_1 和 D_2 管的作用是消除_____。
- 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} _____。
- A. $> 0V$ B. $= 0V$ C. $< 0V$
- (3) 最大输出功率 P_{OM} _____。
- 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_____。
- 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. 可能因功耗过大烧坏 B. 始终饱和 C. 始终截止

解：(1) C (2) B (3) C (4) C (5) A

9.3 在图P9.2所示电路中, 已知 $V_{CC}=16\text{V}$, $R_L=4\Omega$, T_1 和 T_2 管的饱和管压降 $|U_{CES}|=2\text{V}$, 输入电压足够大。试问:

- (1) 最大输出功率 P_{om} 和效率 η 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

$$P_{om} = \frac{(V_{CC} - |U_{CES}|)^2}{2R_L} = 24.5\text{W}$$

$$\eta = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{V_{CC} - |U_{CES}|}{V_{CC}} \approx 69.8\%$$

- (2) 晶体管的最大功耗

$$P_{Tmax} \approx 0.2P_{om} = \frac{0.2 \times V_{CC}^2}{2R_L} = 6.4\text{W}$$

- (3) 输出功率为 P_{om} 时的输入电压有效值

$$U_i \approx U_{om} \approx \frac{V_{CC} - |U_{CES}|}{\sqrt{2}} \approx 9.9\text{V}$$

9.4 在图P9.4所示电路中, 已知二极管的导通电压 $U_D=0.7\text{V}$, 晶体管导通时的 $|U_{BE}|=0.7\text{V}$, T_2 和 T_4 管发射极静态电位 $U_{EQ}=0\text{V}$ 。

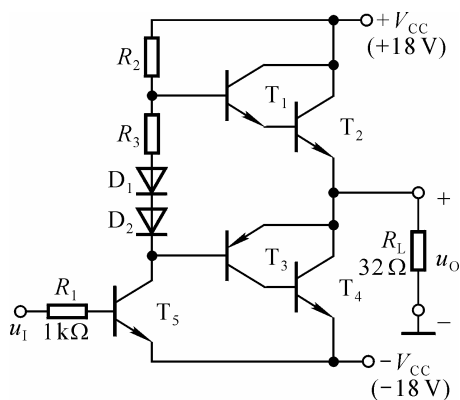


图 P9.4

试问:

- (1) T_1 、 T_3 和 T_5 管基极的静态电位各为多少?
- (2) 设 $R_2=10\text{k}\Omega$, $R_3=100\Omega$ 。若 T_1 和 T_3 管基极的静态电流可忽略不计, 则 T_5 管集电极静态电流为多少? 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 管基极的静态电位分别为

$$U_{B1} = 1.4V \quad U_{B3} = -0.7V \quad U_{B5} = -17.3V$$

(2) 静态时 T_5 管集电极电流和输入电压分别为

$$I_{CQ} \approx \frac{V_{CC} - U_{B1}}{R_2} = 1.66mA$$

$$u_1 \approx u_{B5} = -17.3V$$

(3) 若静态时 $i_{B1} > i_{B3}$, 则应增大 R_3 。

(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。

9.5 在图P9.4所示电路中, 已知 T_2 和 T_4 管的饱和管压降 $|U_{CES}| = 2V$, 静态时电源电流可忽略不计。试问负载上可能获得的最大输出功率 P_{om} 和效率 η 各为多少?

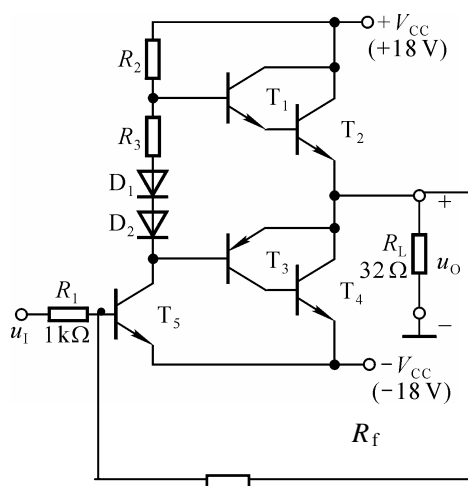
解: 最大输出功率和效率分别为

$$P_{om} = \frac{(V_{CC} - |U_{CES}|)^2}{2R_L} = 4W$$

$$\eta = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{V_{CC} - |U_{CES}|}{V_{CC}} \approx 69.8\%$$

9.6 为了稳定输出电压，减小非线性失真，请通过电阻 R_f 在图P9.4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P9.6所示。



解图 P9.6

在深度负反馈情况下，电压放大倍数

$$\dot{A}_{uf} \approx -\frac{R_f}{R_1} \quad |\dot{A}_{uf}| \approx 10$$

$R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ ，所以 $R_f \approx 10 \text{ k}\Omega$ 。

9.7 估算图P9.4所示电路 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。

解：功放管的最大集电极电流、最大管压降、最大功耗分别为

$$I_{C\max} = \frac{V_{CC} - |U_{CES}|}{R_L} = 0.5 \text{ A}$$

$$U_{CE\max} = 2V_{CC} - |U_{CES}| = 34 \text{ V}$$

$$P_{T\max} \approx 0.2 \times \frac{V_{CC}^2}{2R_L} \approx 1 \text{ W}$$

9.8 在图P9.8所示电路中，已知 $V_{CC} = 15 \text{ V}$ ， T_1 和 T_2 管的饱和管压降 $|U_{CES}|$

$| = 2\text{V}$ ，输入电压足够大。求解：

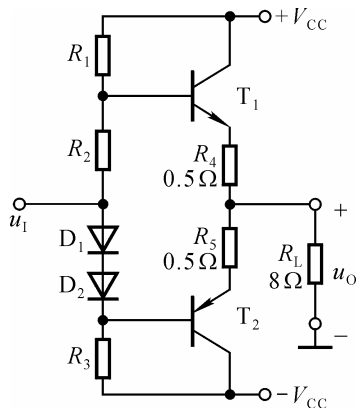


图 P9.8

(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 η 。

解：(1) 最大不失真输出电压有效值

$$U_{om} = \frac{\frac{R_L}{R_4 + R_L} \cdot (V_{CC} - U_{CES})}{\sqrt{2}} \approx 8.65\text{V}$$

(2) 负载电流最大值

$$i_{Lmax} = \frac{V_{CC} - U_{CES}}{R_4 + R_L} \approx 1.53\text{A}$$

(3) 最大输出功率和效率分别为

$$P_{om} = \frac{U_{om}^2}{2R_L} \approx 9.35\text{W}$$

$$\eta = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{V_{CC} - U_{CES} - U_{R4}}{V_{CC}} \approx 64\%$$

9.9 在图P9.8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

$$i_{Cmax} = \frac{V_{CC} - U_{CES}}{R_4} \approx 26\text{A}$$

$$P_{Tmax} = \frac{V_{CC}^2}{\pi^2 R_4} \approx 46\text{W}$$

9.10 在图P9.10所示电路中，已知 $V_{CC}=15V$ ， T_1 和 T_2 管的饱和管压降 $|U_{CES}|=1V$ ，集成运放的最大输出电压幅值为 $\pm 13V$ ，二极管的导通电压为 $0.7V$ 。

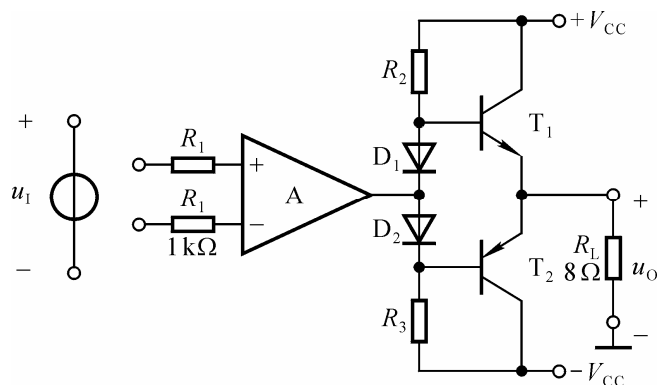


图 P9.10

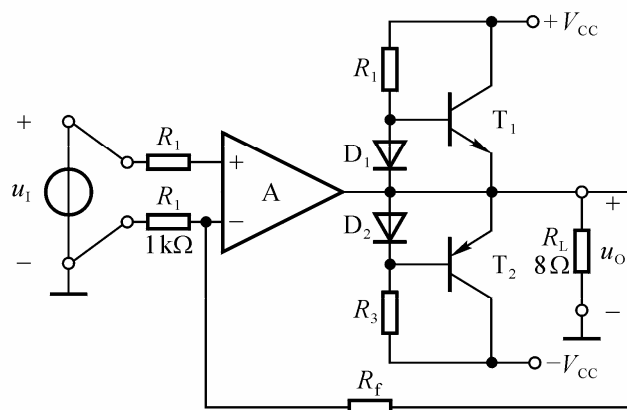
- (1) 若输入电压幅值足够大，则电路的最大输出功率为多少？
- (2) 为了提高输入电阻，稳定输出电压，且减小非线性失真，应引入哪种组态的交流负反馈？画出图来。
- (3) 若 $U_i=0.1V$ 时， $U_o=5V$ ，则反馈网络中电阻的取值约为多少？

解：(1) 输出电压幅值和最大输出功率分别为

$$u_{Omax} \approx 13V$$

$$P_{om} = \frac{(u_{Omax}/\sqrt{2})^2}{R_L} \approx 10.6W$$

- (2) 应引入电压串联负反馈，电路如解图 P9.10 所示。



解图 P9.10

(3) 在深度负反馈条件下, 电压放大倍数为

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \approx 1 + \frac{R_f}{R_1} \quad \dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = 50$$

$R_1 = 1 \text{ k}\Omega$, 所以 $R_f \approx 49 \text{ k}\Omega$ 。

9.11 OTL 电路如图 P9.11 所示。

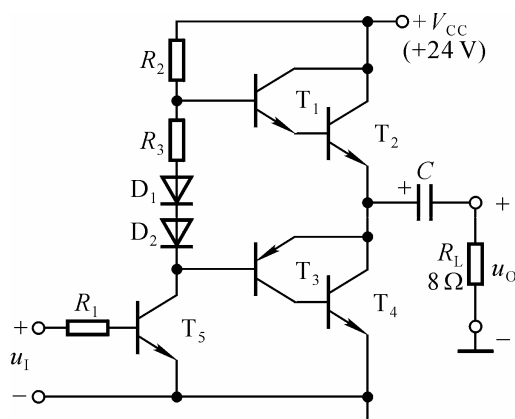


图 P9.11

(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 管的饱和管压降 $|U_{CES}| = 3\text{V}$, 输入电压足够大, 则电路的最大输出功率 P_{om} 和效率 η 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 $U_E = V_{CC}/2 = 12\text{V}$; 若不合适, 则应调节 R_2 。

(2) 最大输出功率和效率分别为

$$P_{om} = \frac{(\frac{1}{2} \cdot V_{CC} - |U_{CES}|)^2}{2R_L} \approx 5.06\text{W}$$

$$\eta = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{\frac{1}{2} \cdot V_{CC} - |U_{CES}|}{\frac{1}{2} \cdot V_{CC}} \approx 58.9\%$$

(3) T_2 和 T_4 管 I_{CM} 、 $U_{(BR)CEO}$ 和 P_{CM} 的选择原则分别为

$$I_{CM} > \frac{V_{CC}/2}{R_L} = 1.5A$$

$$U_{(BR)CEO} > V_{CC} = 24V$$

$$P_{CM} > \frac{(V_{CC}/2)^2}{\pi^2 R_L} \approx 1.82W$$

9.12 已知图P9.12所示电路中 T_1 和 T_2 管的饱和管压降 $|U_{CES}| = 2V$ ，导通时的 $|U_{BE}| = 0.7V$ ，输入电压足够大。

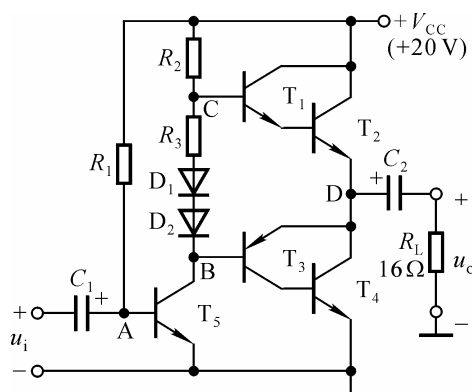


图 P9.12

(1) A、B、C、D 点的静态电位各为多少？

(2) 为了保证 T_2 和 T_4 管工作在放大状态，管压降 $|U_{CE}| \geq 3V$ ，电路的最大输出功率 P_{om} 和效率 η 各为多少？

解：(1) 静态电位分别为

$$U_A = 0.7V, U_B = 9.3V, U_C = 11.4V, U_D = 10V$$

(2) 最大输出功率和效率分别为

$$P_{om} = \frac{(\frac{1}{2} \cdot V_{CC} - |U_{CES}|)^2}{2R_L} \approx 1.53W$$

$$\eta = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{\frac{1}{2} \cdot V_{CC} - |U_{CES}|}{\frac{1}{2} \cdot V_{CC}} \approx 55\%$$

9.13 图 P9.13 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。

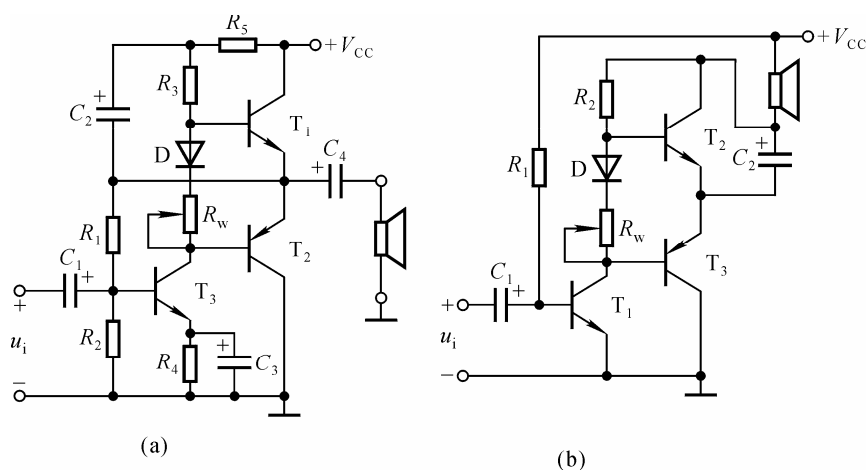


图 P9.13

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_4 的正端经扬声器、 T_2 至 C_4 的负端。 C_2 、 R_2 起自举作用。

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 $U_{OPP} = (V_{CC} - 6) \text{ V}$ ，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 8Ω 。

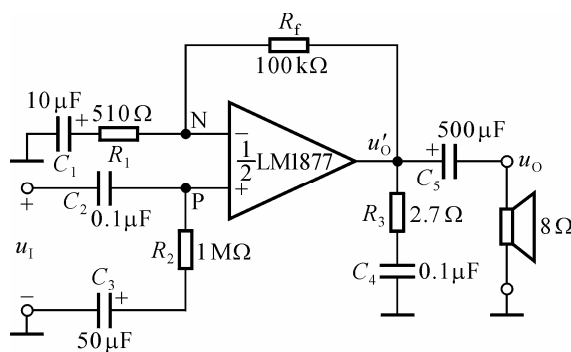


图 P9.14

(1) 静态时 u_P 、 u_N 、 u'_O 、 u_O 各为多少？

(2) 设输入电压足够大，电路的的最大输出功率 P_{om} 和效率 η 各为多少？

解：(1) 静态时

$$u'_O = u_P = u_N = \frac{V_{CC}}{2} = 12\text{V} \quad u_O = 0\text{V}$$

(2) 最大输出功率和效率分别为

$$P_{om} = \frac{\left(\frac{V_{CC} - 6}{2}\right)^2}{2R_L} \approx 5.06\text{W}$$

$$\eta = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{V_{CC} - 6}{V_{CC}} \approx 58.9\%$$

9.15 电路如图 9.4.6 所示，回答下列问题：

(1) $A_u = U_{o1}/U_i \approx ?$

(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 η 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？

解：(1) 电压放大倍数

$$A_u = 1 + \frac{R_f}{R_1} = 1 + \frac{20}{0.68} \approx 30.4$$

(2) 最大输出功率和效率分别为

$$P_{om} = \frac{\left(\frac{U_{OPP}}{2\sqrt{2}}\right)^2}{R_L} \approx 11.4W$$

$$\eta = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{U_{OPP}}{2V_{CC}} \approx 70.65\%$$

(3) 输入电压有效值

$$U_i = \frac{U_{OPP}}{2\sqrt{2}|A_u|} \approx 314mV$$

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 $13V$ 。

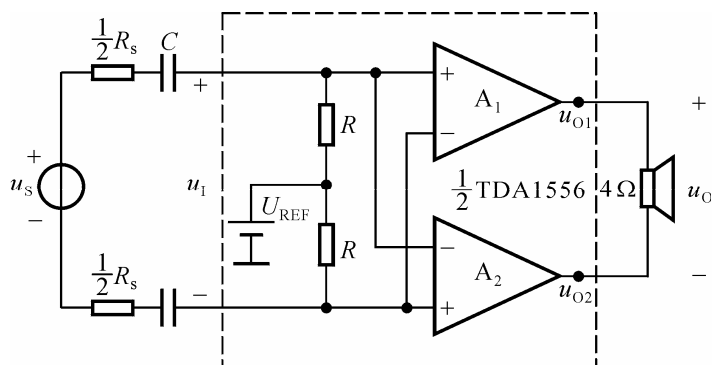


图 P9.16

(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 η 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

$$P_{om} = \frac{U_{omax}^2}{2R_L} \approx 21W$$

$$\eta = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{U_{omax}}{V_{CC}} \approx 68\%$$

(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 $V_{CC} = 15$, 放大器的最大输出电压幅值为 13V。

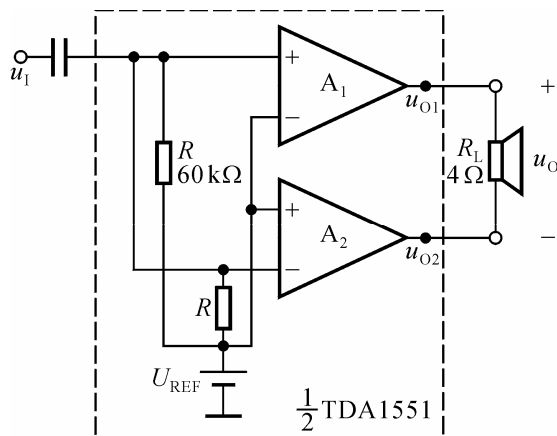


图 P9.17

(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 η 各为多少?

解: 同题 9.16 (1)、(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	$\pm 7.5 \sim \pm 20 \text{ V}$	6.0~24V	6.0~18V

(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 $\pm V_{CC} = \pm 10\text{V}$ ，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 32Ω 。问三种器件的最大输出功率各为多少？

解：(1) OTL电路应取 $V_{CC} = 20\text{V}$ ，BTL电路应取 $V_{CC} = 13\text{V}$ 。

(2) OTL、OCL 和 BTL 电路的最大输出功率分别为

$$P_{om(OTL)} = \frac{\left(\frac{V_{CC}}{2} - |U_{CEmin}|\right)^2}{2R_L} \approx 0.316\text{W}$$

$$P_{om(OCL)} = \frac{(V_{CC} - |U_{CEmin}|)^2}{2R_L} = 2.25\text{W}$$

$$P_{om(BTL)} = \frac{(V_{CC} - 2|U_{CEmin}|)^2}{2R_L} \approx 1.27\text{W}$$

9.19 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) 仅有负半周；

(2) T_1 、 T_2 将因功耗过大而损坏；

(3) 仅有正半周；

(4) T_2 将因功耗过大而损坏；

(5) $u_O = V_{CC} - U_{BE1} \approx 14.3\text{V}$ ；

(6) 稍有交越失真。

9.20 电路如图 P9.4 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) 无输出；

(2) 功放管将因功耗过大而损坏；

(3) $u_O = V_{CC} - U_{BE1} - U_{BE2} \approx 16.6V$

(4) 正、负半周不对称，正半周幅值小；

(5) 稍有交越失真。

第十章 直流电源

自 测 题

一、判断下列说法是否正确，用“√”“×”表示判断结果填入空内。

(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。()

解：(1) × (2) √ (3) √ × (4) √ (5) ×

(6) √

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 $U_{O(AV)} \approx$ _____ ；

(2) 电容虚焊时 $U_{O(AV)} \approx$ _____ ；

(3) 负载电阻开路时 $U_{O(AV)} \approx$ _____ ；

(4) 一只整流管和滤波电容同时开路， $U_{O(AV)} \approx$ _____ 。

解：(1) B (2) C (3) A (4) D

三、填空：

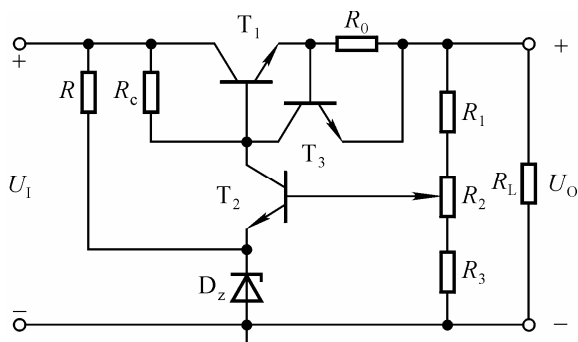


图 T10.3

在图 T10.3 所示电路中，调整管为 _____，采样电路由 _____ 组成，基准电压电路由 _____ 组成，比较放大电路由 _____ 组成，保护电路由 _____ 组成；输出电压最小值的表达式为 _____，最大值的表达式为 _____。

解： T_1 、 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R 、 D_Z 、 T_2 、 R_c 、 R_0 、 T_3 ；

$$\frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_2 + R_3}(U_Z + U_{BE2}), \quad \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_3}(U_Z + U_{BE2})。$$

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 200Ω 。

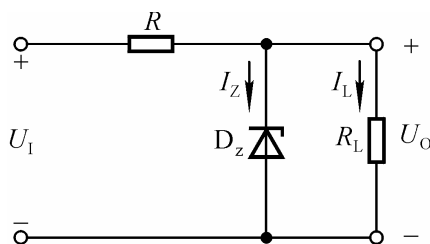


图 T10.4

(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

$$I_{D_Z \max} = I_{R \max} = \frac{U_{I \max} - U_Z}{R} = 52.5\text{mA} > I_{Z \max} = 40\text{mA}$$

所以电路不能空载。

(2) 根据 $I_{D_z \min} = \frac{U_{I \min} - U_Z}{R} - I_{L \max}$, 负载电流的最大值

$$I_{L \max} = \frac{U_{I \min} - U_Z}{R} - I_{D_z \min} = 32.5 \text{mA}$$

根据 $I_{D_z \max} = \frac{U_{I \max} - U_Z}{R} - I_{L \min}$, 负载电流的最小值

$$I_{L \min} = \frac{U_{I \max} - U_Z}{R} - I_{D_z \max} = 12.5 \text{mA}$$

所以, 负载电流的范围为 $12.5 \sim 32.5 \text{mA}$ 。

五、在图 10.5.24 所示电路中, 已知输出电压的最大值 $U_{O \max}$ 为 25V , $R_1 = 240 \Omega$; W117 的输出端和调整端间的电压 $U_R = 1.25 \text{V}$, 允许加在输入端和输出端的电压为 $3 \sim 40 \text{V}$ 。试求解:

(1) 输出电压的最小值 $U_{O \min}$;

(2) R_2 的取值;

(3) 若 U_I 的波动范围为 $\pm 10\%$, 为保证输出电压的最大值 $U_{O \max}$ 为 25V , U_I 至少应取多少伏? 为保证 W117 安全工作, U_I 的最大值为多少伏?

解: (1) 输出电压的最小值 $U_{O \min} = 1.25 \text{V}$

(2) 因为

$$U_{O \max} = (1 + \frac{R_2}{R_1}) \times 1.25 \text{V} = 25 \text{V}$$

$$R_1 = 240 \Omega$$

所以

$$R_1 = 4.56 \text{k} \Omega$$

(3) 输入电压的取值范围为

$$U_{I \min} \approx \frac{U_{O \max} + U_{12 \min}}{0.9} \approx 31.1 \text{V}$$

$$U_{I \max} \approx \frac{U_{O \min} + U_{12 \max}}{1.1} \approx 37.5 \text{V}$$

六、电路如图 T10.6 所示。合理连线，构成 5V 的直流电源。

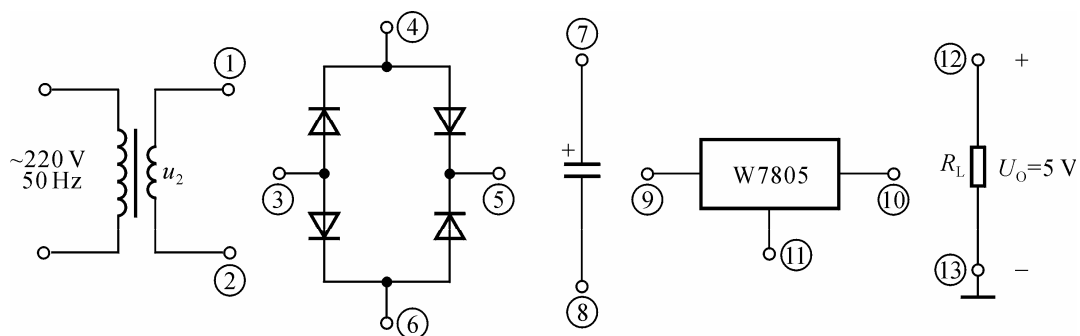
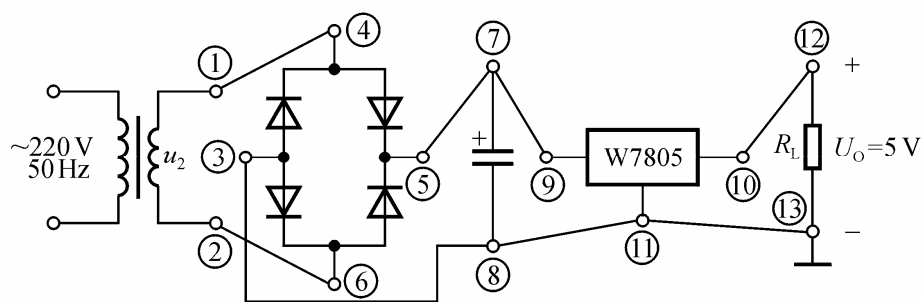


图 T10.6

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“√”或“×”表示判断结果填入空内。

- (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。()

解：(1) √ (2) √ (3) ×

10.2 判断下列说法是否正确，用“√”或“×”表示判断结果填入空内。

- (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。()

解：(1) √ (2) √ (3) √ (4) × √

10.3 选择合适答案填入空内。

- (1) 整流的目的是 _____。
 - 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 _____。
 - A. 输出电压约为 $2U_D$
 - B. 变为半波直流
 - C. 整流管将因电流过大而烧坏
- (3) 直流稳压电源中滤波电路的目的是 _____。
 - 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 _____。
 - A. 高通滤波电路
 - B. 低通滤波电路
 - C. 带通滤波电路

解：(1) A (2) C (3) C (4) B

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 _____。

- 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 _____。

- A. 基准电压 B. 采样电压 C. 基准电压与采样电压之差

(3) 开关型直流电源比线性直流电源效率高的原因是 _____。

- A. 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. 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，高电平时间不变，周期增大

解：(1) D (2) C (3) A (4) A

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

$$I_F > 1.1 \times \frac{I_{L(AV)}}{2} = 55mA$$

$$U_R > 1.1\sqrt{2}U_2 \approx 26V$$

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。

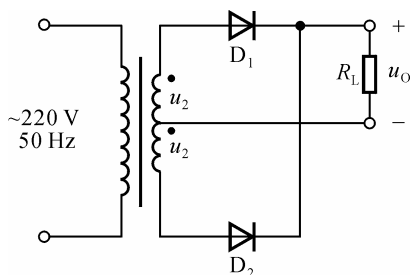
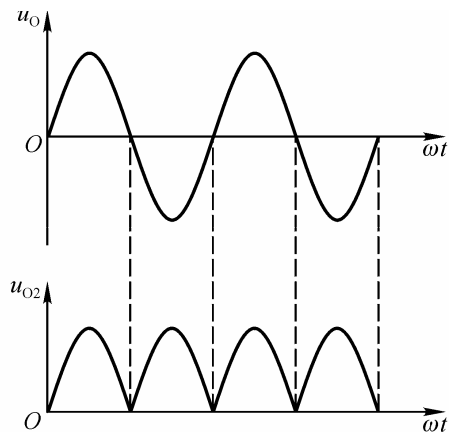


图 P10.6



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

$$I_D \approx \frac{0.45U_2}{R_L} \quad U_R = 2\sqrt{2}U_2$$

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：

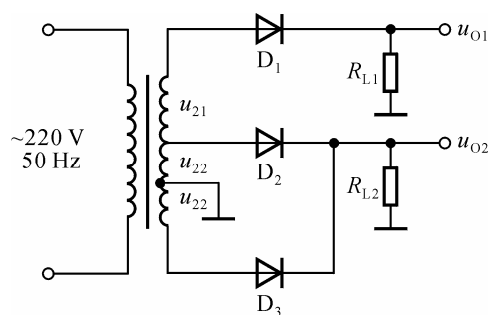


图 P10.7

(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

$$U_R > \sqrt{2}(U_{21} + U_{22}) \approx 99V$$

D_2 、 D_3 的最大反向电压

$$U_R > 2\sqrt{2}U_{22} \approx 57V$$

10.8 电路图 P10.8 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) 当 $U_{21} = U_{22} = 20\text{V}$ 时， $U_{O1(\text{AV})}$ 和 $U_{O2(\text{AV})}$ 各为多少？
- (4) 当 $U_{21} = 18\text{V}$ ， $U_{22} = 22\text{V}$ 时，画出 u_{O1} 、 u_{O2} 的波形；并求出 $U_{O1(\text{AV})}$ 和 $U_{O2(\text{AV})}$ 各为多少？

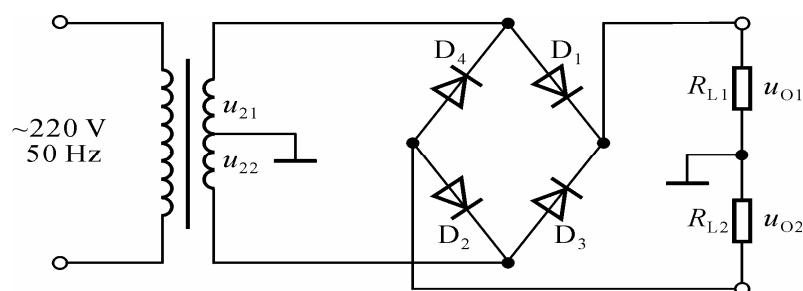


图 P10.8

解：(1) 均为上“+”、下“-”。

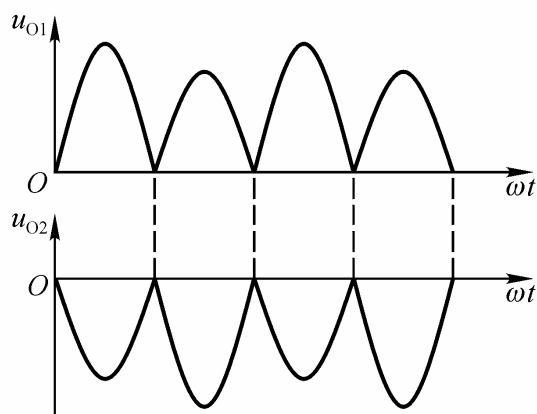
(2) 均为全波整流。

(3) $U_{O1(\text{AV})}$ 和 $U_{O2(\text{AV})}$ 为

$$U_{O1(\text{AV})} = -U_{O2(\text{AV})} \approx 0.9U_{21} = 0.9U_{22} = 18\text{V}$$

(4) u_{O1} 、 u_{O2} 的波形如解图 P10.8 所示。它们的平均值为

$$U_{O1(\text{AV})} = -U_{O2(\text{AV})} \approx 0.45U_{21} + 0.45U_{22} = 18\text{V}$$



解图 P10.8

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。

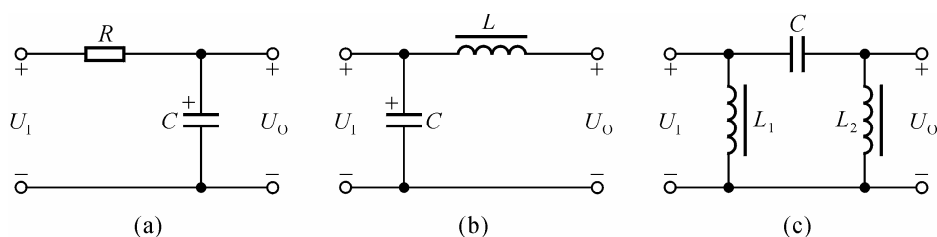


图 P10.9

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。

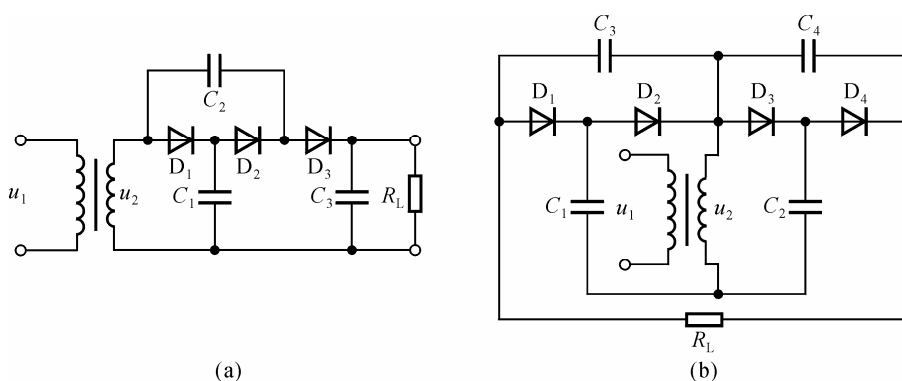


图 P10.10

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 15Ω 。试问：

(1) 当输入电压为 $20 \sim 24\text{V}$ 、 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 $I_{Z\max} = P_{ZM} / U_Z = 40\text{mA}$, $I_L = U_Z / R_L = 10 \sim 30\text{mA}$, 所以 R 的取值范围为

$$R_{\max} = \frac{U_{I\min} - U_Z}{I_Z + I_{L\max}} = 400\Omega$$

$$R_{\min} = \frac{U_{I\max} - U_Z}{I_{Z\max} + I_{L\min}} = 360\Omega$$

(2) 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 $20 \sim 24\text{V}$, $R_1 = 360\Omega$ 。试问:

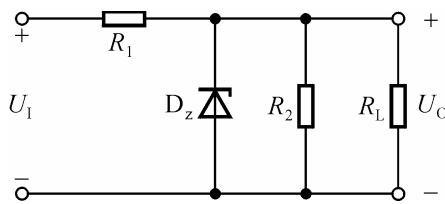


图 P10.12

(1) 为保证空载时稳压管能够安全工作, 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

$$I_{R1} = \frac{U_I - U_Z}{R_1} \approx 39 \sim 50\text{mA}$$

$$I_{Z\max} = \frac{P_{ZM}}{U_Z} = 40\text{mA}$$

(1) 为保证空载时稳压管能够安全工作

$$R_2 = \frac{U_Z}{(I_{R1\max} - I_{Z\max})} = 600\Omega$$

(2) 负载电流的最大值

$$I_{L\max} = I_{R1\min} - I_{R2} - I_{Z\min} = 24\text{mA}$$

负载电阻的变化范围

$$R_{L\min} = \frac{U_Z}{I_{L\max}} = 250\Omega$$

$$R_{L\min} = \infty$$

10.13 电路如图T10.3所示, 稳压管的稳定电压 $U_Z = 4.3\text{V}$, 晶体管的 $U_{BE} = 0.7\text{V}$, $R_1 = R_2 = R_3 = 300\Omega$, $R_0 = 5\Omega$ 。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 $U_1 = 25\text{V}$, 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 $U_R = U_Z + U_{BE} = 5\text{V}$, 输出电压的可调范围

$$U_O = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_2 + R_3} \cdot U_Z \sim \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_3} \cdot U_Z$$

$$= 7.5 \sim 15\text{V}$$

(2) 调整管发射极最大电流 $I_{E\max} = U_{BE} / R_0 \approx 140\text{mA}$

(3) 调整管的最大管压降和最大功耗分别为

$$U_{CE\max} = U_{I\max} - U_{O\min} = 20\text{V}$$

$$P_{T\max} \approx I_{E\max} U_{CE\max} \approx 2.8\text{W}$$

10.14 电路如图P10.14所示, 已知稳压管的稳定电压 $U_Z = 6\text{V}$, 晶体管的 $U_{BE} = 0.7\text{V}$, $R_1 = R_2 = R_3 = 300\Omega$, $U_1 = 24\text{V}$ 。判断出现下列现象时, 分别因为电路产生什么故障 (即哪个元件开路或短路)。

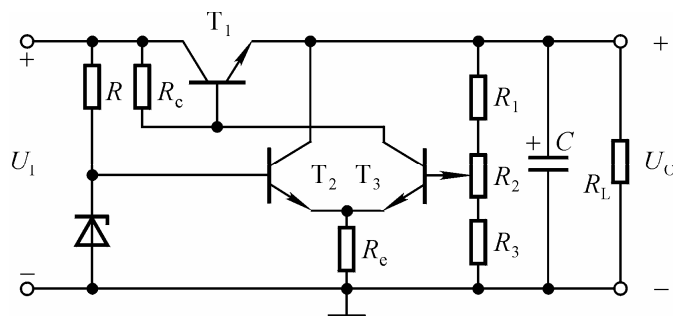


图 P10.14

- (1) $U_O \approx 24\text{V}$;
- (2) $U_O \approx 23.3\text{V}$;
- (3) $U_O \approx 12\text{V}$ 且不可调;
- (4) $U_O \approx 6\text{V}$ 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； (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、采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。

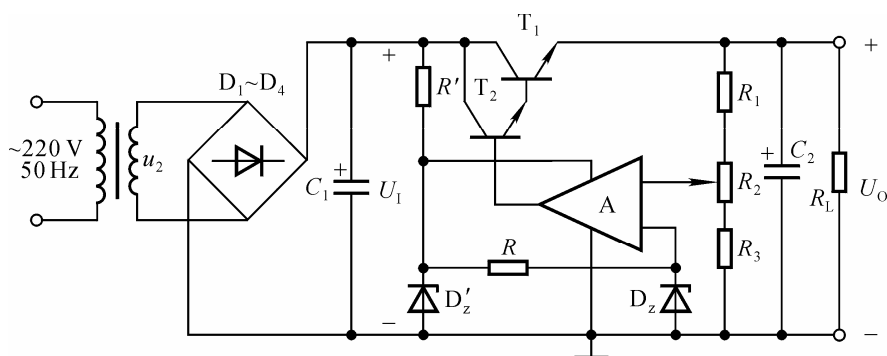


图 P10.15

- 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 $I'_1 \approx I'_O = 1.5A$ ，晶体管 T 的 $U_{EB} \approx U_D$ ， $R_1 = 1 \Omega$ ， $R_2 = 2 \Omega$ ， $I_D \gg I_B$ 。求解负载电流 I_L 与 I'_O 的关系式。

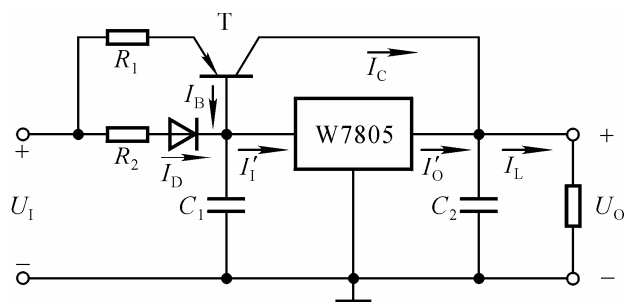


图 P10.16

解：因为 $U_{EB} \approx U_D$, $I_E R_1 \approx I_D R_2 \approx I'_1 R_2 \approx I'_O R_2$, $I_C \approx I_E$, $I_C \approx I_E$, 所以

$$I_C \approx \frac{R_2}{R_1} \cdot I'_O$$

$$I_L \approx (1 + \frac{R_2}{R_1}) \cdot I'_O = 4.5A$$

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 $3 \sim 40V$, 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;

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

$$U_{Imin} = U_{Omax} + U_{12min} \approx 20V$$

$$U_{Imax} = U_{Omin} + U_{12max} \approx 41.25V$$

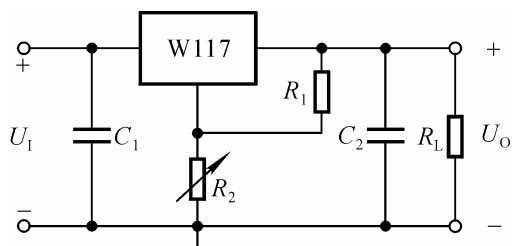


图 P10.17

10.18 试分别求出图 P10.18 所示各电路输出电压的表达式。

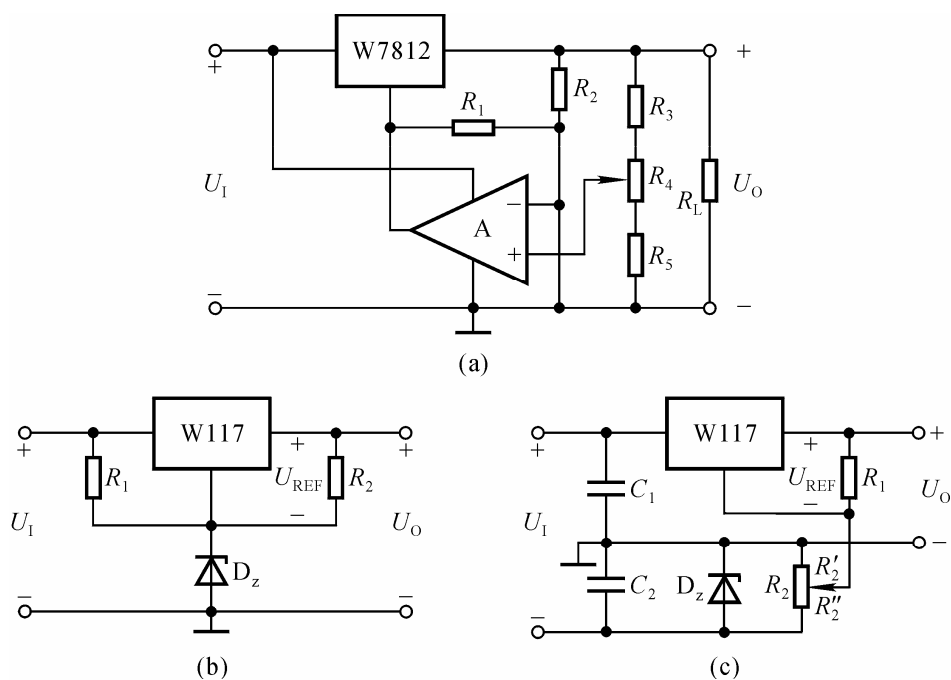


图 P10.18

解：在图（a）所示电路中，W7812 的输出为 U_{REF} ，基准电压

$$U_{\text{R}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_{\text{REF}}$$

输出电压的表达式

$$\frac{R_3 + R_4 + R_5}{R_3 + R_4} \cdot U_{\text{R}} \leq U_{\text{O}} \leq \frac{R_3 + R_4 + R_5}{R_3} \cdot U_{\text{R}}$$

在图（b）所示电路中，输出电压的表达式

$$U_{\text{O}} = U_{\text{Z}} + U_{\text{REF}} = (U_{\text{Z}} + 1.25) \text{ V}$$

在图（c）所示电路中，输出电压的表达式

$$U_{\text{O}} = U_{\text{REF}} - \frac{R_2'}{R_2} \cdot U_{\text{Z}} = U_{\text{REF}} \sim (U_{\text{REF}} - U_{\text{Z}})$$

10.19 两个恒流源电路分别如图 10.19（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 $|U_{BE}| = 0.7\text{V}$ ；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 $U_Z = 5\text{V}$ ； $R_1 = R = 50\Omega$ 。分别求出两电路负载电阻的最大值。

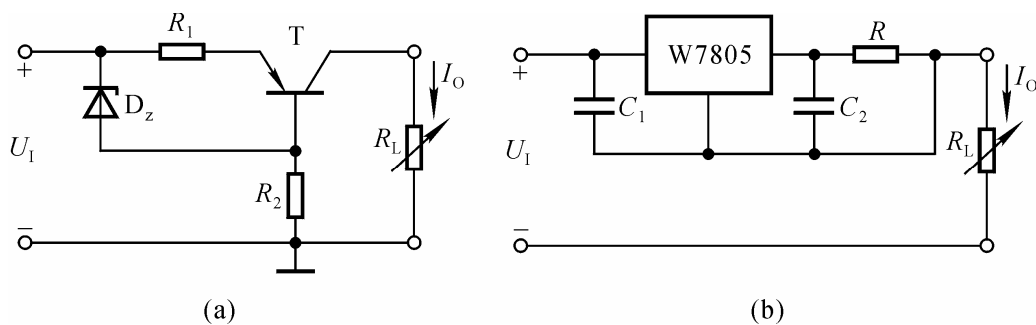


图 P10.19

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

$$(a) I_O = \frac{U_Z - U_{EB}}{R_1} \quad (b) I_O = \frac{U'_O}{R}$$

(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

$$(a) U_{Omax} = U_I - (U_Z - U_{EB}) - (-U_{CES}) = 12.3\text{V}$$

$$I_O = 86\text{mA}$$

$$R_{Lmax} = \frac{U_{Omax}}{I_O} \approx 143\Omega$$

$$(b) U_{Omax} = U_I - U_{12} = 17\text{V}$$

$$I_O = 100\text{mA}$$

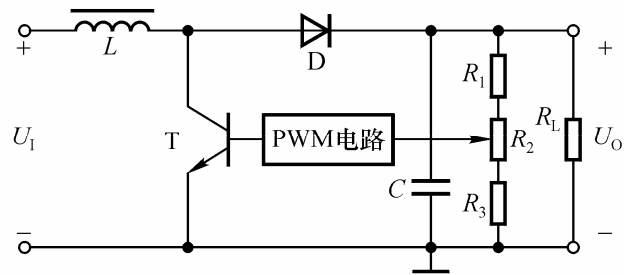
$$R_{Lmax} = \frac{U_{Omax}}{I_O} = 170\Omega$$

10.20 在图 10.6.3 所示电路中，已知采样电压大于基准电压，试定性画出 u_{N2} 、 u_{P2} 、 u_B 和 u_O 的波形。

解：参阅图 10.6.2 和 10.6.4。

10.21 在图 10.6.8 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 10.21 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 10.21

第十一章 模拟电子电路读图

习 题

11.1 电路如图 P11.1 所示，其功能是实现模拟计算，求解微分方程。

(1) 求出微分方程；

(2) 简述电路原理。

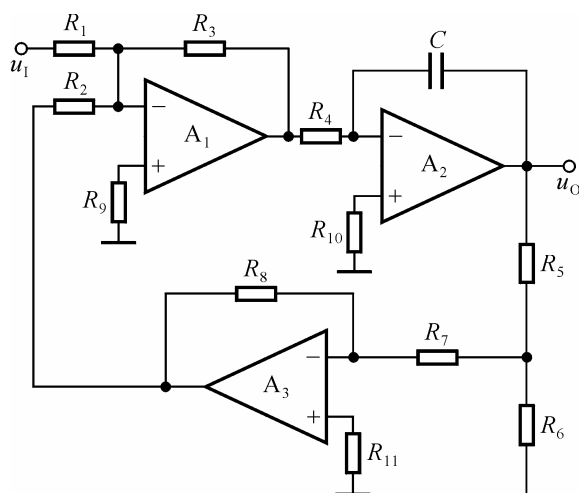


图 P11.1

解：(1) 设 A_1 、 A_3 的输出电压分别为 u_{O1} 、 u_{O3} 。由于每个集成运放均引入了负反馈，根据“虚断”和“虚短”可得下列关系式及微分方程：

$$\begin{aligned}
 u_{O1} &= -\frac{R_3}{R_1}u_1 - \frac{R_3}{R_2}u_{O3} \\
 u_{O3} &= \frac{R_6}{R_5 + R_6} \left(-\frac{R_8}{R_7}u_{O1} \right) \\
 u_O &= -\frac{1}{R_4C} \int u_{O1} dt \\
 &= -\frac{1}{R_4C} \int \left(-\frac{R_3}{R_1}u_1 + \frac{R_3}{R_2} \cdot \frac{R_6}{R_5 + R_6} \cdot \frac{R_8}{R_7}u_O \right) dt \\
 \frac{du_O}{dt} + \frac{R_3R_6R_8u_O}{R_2R_4R_7(R_5 + R_6)C} - \frac{R_3}{R_1R_4C}u_1 &= 0
 \end{aligned}$$

(2) 当参数选择合适时，输入合适 u_1 ，便可在输出得到模拟解 u_O 。

11.2 图 P11.2 所示为反馈式稳幅电路，其功能是：当输入电压变化时，输出电压基本不变。主要技术指标为

- (1) 输入电压波动 20% 时，输出电压波动小于 0.1%；
- (2) 输入信号频率从 50~2000Hz 变化时，输出电压波动小于 0.1%；
- (3) 负载电阻从 10k Ω 变为 5 k Ω 时，输出电压波动小于 0.1%。

要求：

- (1) 以每个集成运放为核心器件，说明各部分电路的功能；
- (2) 用方框图表明各部分电路之间的相互关系；
- (3) 简述电路的工作原理。

提示：场效应管工作在可变电阻区，电路通过集成运放 A₃ 的输出控制场效应管的工作电流，来达到调整输出电压的目的。

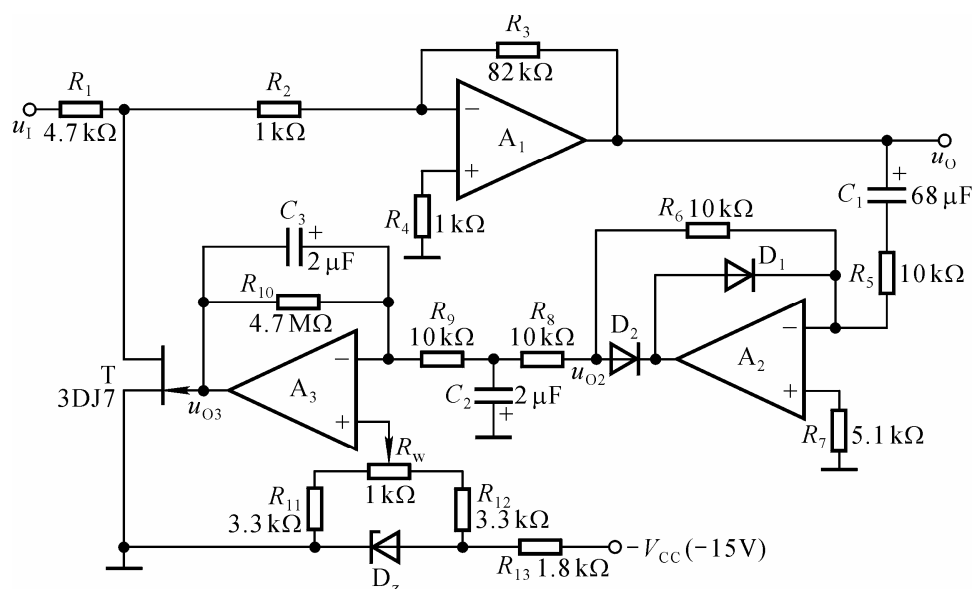
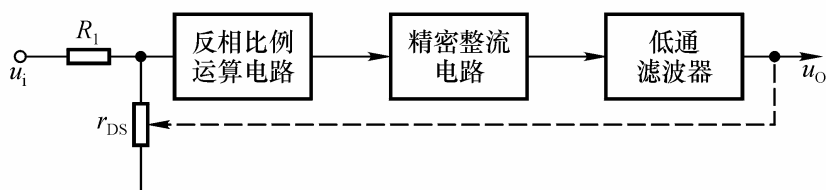


图 P11.2

解：(1) A₁：反比例运算电路；A₂：半波精密整流电路；A₃：二阶低通滤波器；T：等效成可变电阻。

(2) 图 P11.2 所示电路的方框图如解图 P11.2 所示。



解图 P11.2

(3) 当参数选择合适时, 若 u_i 幅值增大导致 u_O 增大, 则 r_{ds} 减小, 使得 u_{O1} 、 u_{O2} 减小, 从而使 u_O 减小, 趋于原来数值。过程简述如下:

$$\begin{array}{c} u_i \uparrow \rightarrow u_O \uparrow \rightarrow r_{DS} \downarrow \rightarrow u_{O1} \downarrow \rightarrow u_{O2} \downarrow \\ u_O \downarrow \leftarrow \text{—————} \end{array}$$

若 u_i 幅值减小, 则各物理量的变化与上述过程相反。

11.3 在图 P11.2 所示电路中, 参数如图中所标注。设场效应管 D-S 之间的等效电阻为 r_{ds} 。

(1) 求出输出电压 u_O 与输入电压 u_i 、 r_{ds} 的运算关系式; 说明当 u_i 增大时, r_{ds} 应如何变化才能使 u_O 稳幅?

(2) 当 u_i 为 1kHz 的正弦波时, 定性画出 u_O 和 u_{O2} 的波形。

(3) u_{O3} 是直流信号, 还是交流信号, 为什么? 为使 u_O 稳幅, 当 u_i 因某种原因增大时, u_{O3} 的幅值应当增大, 还是减小, 为什么?

(4) 电位器 R_W 的作用是什么?

解: (1) 列 A_1 反相输入端的节点电流方程可得

$$u_O = -\frac{R_3}{R_2} \cdot \frac{R_2 // r_{ds}}{R_1 + R_2 // r_{ds}} \cdot u_i$$

为了在 u_i 变化时 u_O 基本不变, u_i 增大时 r_{ds} 应减小。

(2) A_2 与 D_1 、 D_2 、 R_6 等组成半波整流电路, u_{O2} 和 u_O 的关系为

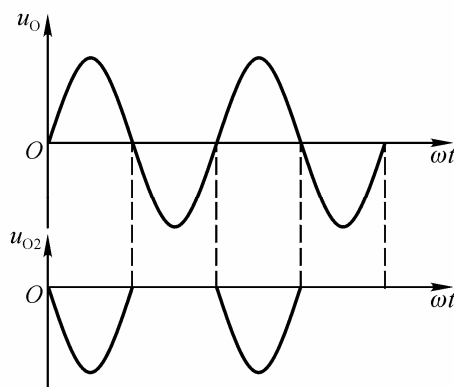
$$\begin{cases} u_{O2} = -u_O & (u_O \text{ 正半周}) \\ u_{O2} = 0 & (u_O \text{ 负半周}) \end{cases}$$

因此波形如解图 P11.3 所示。

(3) u_{O3} 为直流信号, 因为 A_3 组成了二阶低通滤波器, 所以 u_{O3} 是 u_{O2} 的平均值。

u_i 增大时 u_{O3} 应增大; 因为只有 u_{O3} 增大 r_{DS} 才会减小。

(4) 调零。



解图 P11.3

11.4 在图P11.2所示电路中, 设场效应管d-s之间的等效电阻为 r_{ds} 。为了使得输入电压 u_1 波动20%时, 输出电压 u_O 波动小于0.1%, r_{ds} 应变化百分之多少?

解: 当 u_1 变化20%时, u_O 变化0.1%。根据

$$u_O = -\frac{R_3}{R_2} \cdot \frac{R_2 // r_{ds}}{R_1 + R_2 // r_{ds}} \cdot u_1,$$

此时 $\left(\frac{R_3}{R_2} \cdot \frac{R_2 // r_{ds}}{R_1 + R_2 // r_{ds}} \right)$ 变化0.5%, 即 $\frac{R_2 // r_{ds}}{R_1 + R_2 // r_{ds}}$ 变化0.5%。

11.5 五量程电容测量电路如图P11.5所示, C_X 为被测电容, 输出电压 u_O 是一定频率的正弦波, u_O 经AC/DC转换和A/D转换, 送入数字显示器, 即可达到测量结果。

- (1) 以每个集成运放为核心器件, 说明各部分电路的功能;
- (2) 用方框图表明各部分电路之间的相互关系;
- (3) 简述电路的工作原理。

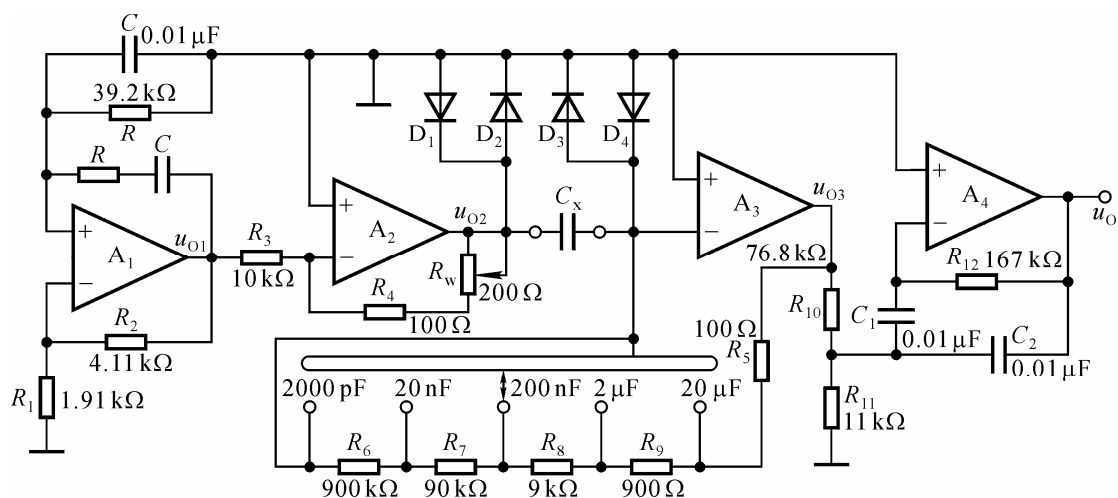
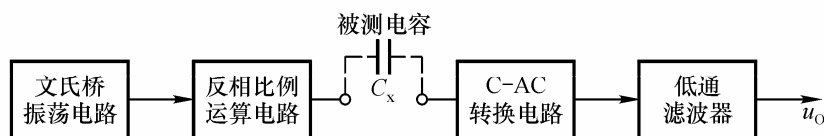


图 P11.5

解: (1) A_1 : 文氏桥振荡电路; A_2 : 反比例运算电路; A_2 : C—AC (电容—交流电压) 转换电路; A_4 : 带通滤波器。

(2) 图 P11.5 所示电路的方框图如解图 P11.5 所示。



解图 P11.5

(3) 文氏桥振荡电路输出频率为 f_0 的正弦波，经反相比例运算电路作用于被测电容，通过 C-AC 电路转换成与电容容量成正比的交流电压，再通过中心频率为 f_0 的带通滤波器输出频率为 f_0 的交流信号，因此输出交流电压的幅值正比于电容容量。

为了保证在每个测量档内被测电容所转换的输出电压最大值均相等，C-AC 电路在不同档的反馈电阻阻值不同，容量越高的档，阻值越小，以保证转换系数的最大值基本不变。

可参考 P575~P576。

11.6 电路如图 P11.5 所示，试求解：

- (1) u_{O1} 的频率；
- (2) u_{O2} 与 u_{O1} 的运算关系式；
- (3) 在五个量程中， u_{O3} 与 u_{O2} 的各运算关系式；
- (4) A_4 及其有关元件所组成的电路的中心频率为多少？

解：(1) u_{O1} 的频率

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} \approx 400\text{Hz}$$

(2) u_{O2} 与 u_{O1} 的运算关系式

$$u_{O2} = -\frac{R_4 + R_w}{R_3} \cdot u_{O1} = (0.01 \sim 0.03) \cdot u_{O3}$$

(3) u_{O3} 与 u_{O2} 的各运算关系式

$$|\dot{A}_{u3}| = 2\pi j f_0 R_f C_X$$

测量档自低向高 R_f 分别为 $1\text{M}\Omega$ 、 $100\text{k}\Omega$ 、 $10\text{k}\Omega$ 、 $1\text{k}\Omega$ 、 100Ω 。

(4) 带通滤波器的中心频率

$$f_0 = \frac{1}{2\pi C_1} \sqrt{\frac{1}{R_{10}} \left(\frac{1}{R_{11}} + \frac{1}{R_{12}} \right)} \approx 400\text{Hz}$$

11.7 电路如图 P11.5 所示。回答下列问题：

(1) 在不同量程下， u_{O3} 与 u_{O2} 转换系数的最大值为多少？为什么这样设计？简述理由。

(2) 为什么 u_{O1} 的频率和由 A_4 及其有关元件所组成的电路的中心频率相同？简述理由。

(3) 二极管 $D_1 \sim D_4$ 的作用是什么？

解：(1) 在不同量程下， u_{O3} 与 u_{O2} 转换系数的最大值均为 $\left| \hat{A}_{u3} \right| \approx 5.03$ 。

为了保证在每个测量档内被测电容所转换的输出电压最大值均相等，以便作为所接 A/D 转换电路的输入电压，C-AC 电路在不同档的反馈电阻阻值不同，容量越高的档，阻值越小，以保证转换系数的最大值基本不变。

(2) 为了滤去其它频率的干扰和噪声，便于测量。

(3) 二极管 $D_1 \sim D_4$ 起限幅作用， D_1 、 D_2 限制 A_2 的输出电压幅值， D_3 、 D_4 限制 A_3 的净输入电压幅值，以保护运放。此外，在误操作（即带电操作）时，也为被测电容提供低阻放电回路，以保护测量电路。

11.8 直流稳压电源如图 11.8 所示。

(1) 用方框图描述电路各部分的功能及相互之间的关系；

(2) 已知W117的输出端和调整端之间的电压为 1.25V，3 端电流可忽略不计，求解输出电压 U_{O1} 和 U_{O2} 的调节范围，并说明为什么称该电源为“跟踪电源”？

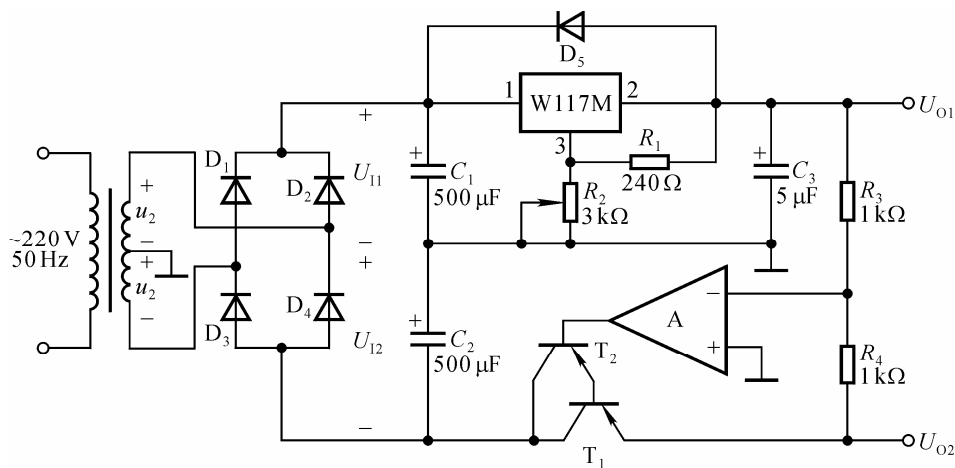
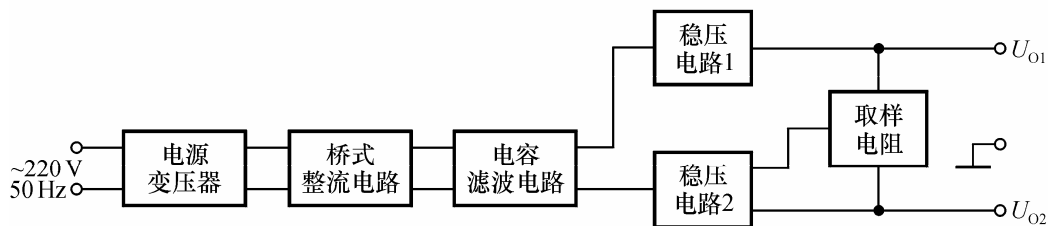


图 P11.8

解：（1）方框图如解图 P11.8 所示。



解图 P11.8

（2）输出电压调节范围为

$$U_{O1} = -U_{O2} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot U_{REF} = 1.25 \sim 16.8V$$

因为在调节 R_2 时， U_{O2} 的数值始终和 U_{O1} 保持相等，故称之为“跟踪电源”。

11.9 电路如图 P11.8 所示。已知 W117 的输出端和调整端之间的电压为 1.25V，3 端电流可忽略不计，输出电流的最小值为 5mA；1 和 2 端之间电压大于 3V 才能正常工作，小于 40V 才不至于损坏；晶体管 T_1 饱和管压降的数值为 3V；电网电压波动范围为 $\pm 10\%$ 。

（1）求解输出电压 U_{O1} 和 U_{O2} 的调节范围；

（2）为使电路正常工作，在电网电压为 220V 时， U_1 的取值范围为多少？

（3）若在电网电压为 220V 时， $U_1 = 32V$ ，则变压器副边电压有效值 U_2 约为多少伏？

解：（1）输出电压调节范围为

$$U_{O1} = -U_{O2} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot U_{REF} = 1.25 \sim 16.8V$$

（2）根据方程组

$$\begin{cases} 1.1U_1 = U_{Omin} + U_{12max} \\ 0.9U_1 = U_{Omax} + U_{12min} \end{cases}$$

输入电压的取值范围为 22.1~37.5V。

（3）变压器副边电压有效值

$$U_2 \approx \frac{U_1}{1.2} \approx 27V$$

11.10 电路如图 P11.8 所示。回答下列问题：

- (1) 电路中各电容的作用；
- (2) 二极管 D_5 的作用；
- (3) 调整管为什么采用复合管。

解：(1) 滤波。

(2) 保护 W117，使电路在断电时 C_3 有一个放电回路，而不通过 W117 放电。

(3) 在负载电流一定时，减小 A 的输出电流；或者说，在 A 的输出电流一定时，增大负载电流。