

## 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  $K_{CMR} = \frac{|A_d|}{A_c}$  ( )
- (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。

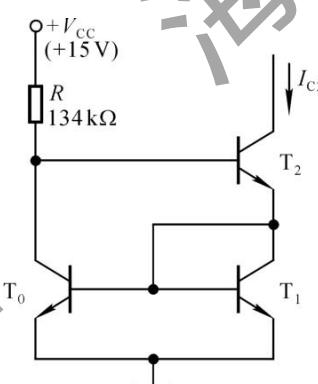


图 T4.3

解：分析估算如下：

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

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

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

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

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

四、电路如图 T4.4 所示。

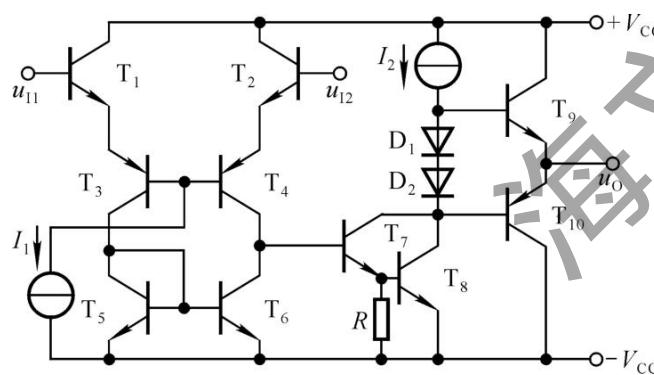


图 T4.4

(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 $1\mu V$ 以下微弱信号的量测放大器，应选用\_\_\_\_\_。

(4) 作内阻为 $100k\Omega$ 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 $\pm 80$ 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 μV、100 μV、1mV、1V 和 -10 μV、-100 μV、-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

$$\begin{aligned}20\lg A_{od} &= 100\text{dB} \\A_{od} &= 10^5\end{aligned}$$

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 μV、100 μV、1mV、1V 和 -10 μV、-100 μV、-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	$A_{od}$	$I_{id}$	$U_{io}$	$I_{io}$	$I_{IB}$	$-3\text{dBfH}$	$K_{CMR}$	$SR$	单位增益带宽
单位	dB	MΩ	mv	nA	nA	Hz	dB	V/μV	MHz
A <sub>1</sub>	100	2	5	200	600	7	86	0.5	
A <sub>2</sub>	130	2	0.01	2	40	7	120	0.5	
A <sub>3</sub>	100	1000	5	0.02	0.03		86	0.5	5
A <sub>4</sub>	100	2	2	20	150		96	65	12.5

解：A<sub>1</sub> 为通用型运放，A<sub>2</sub> 为高精度型运放，A<sub>3</sub> 为高阻型运放，A<sub>4</sub> 为高速型运放。

4.4 多路电流源电路如图 P4.4 所示, 已知所有晶体管的特性均相同,  $U_{BE}$  均为 0.7V。试求  $I_{C1}$ 、 $I_{C2}$  各为多少。

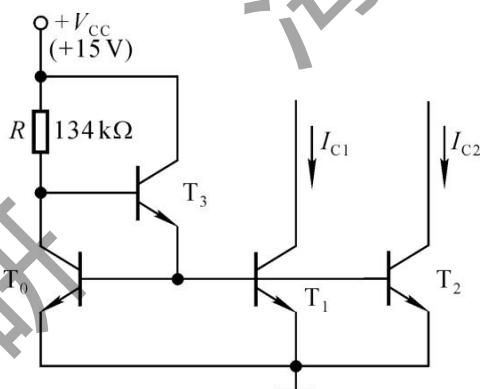


图 P4.4

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

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

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

$$I_C = \frac{\beta_2 + \beta_3}{\beta + \beta_3} \cdot I_R$$

当  $\beta(1 + \beta) \gg 3$  时

$$I_{C1} = I_{C2} \approx I_R = 100 \mu A$$

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?

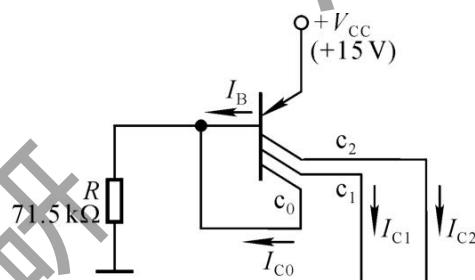


图 P4.5

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  $I_{C1}$ 、 $I_{C2}$ 。

$$I_R = \frac{V_{CC} - U_{EB}}{R} = 200\mu A \quad (\text{其中 } U_{EB} = 0 \text{ V})$$

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

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

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

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

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  $A_u = \Delta u_o / \Delta u_i$  的表达式。

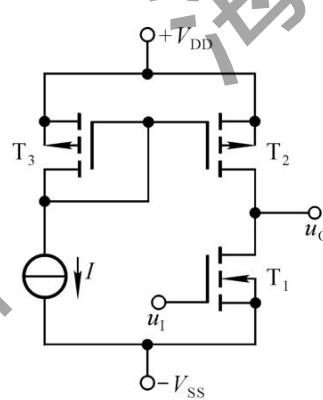


图 P4.6

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

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

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。

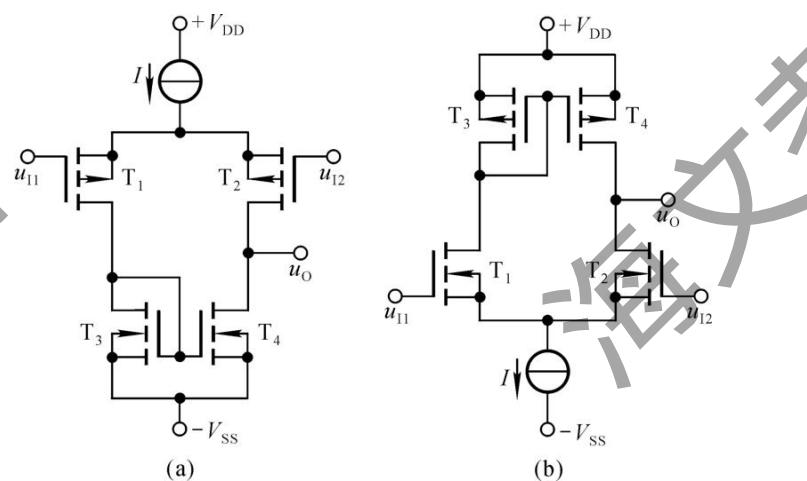


图 P4.7

解：在图(a)(b)所示电路中

$$\begin{aligned}\Delta I_{D1} &= \Delta I_{D2} \approx \Delta I_{D3} = \Delta I_{D4} \\ \Delta I_O &= \Delta I_{D2} - \Delta I_{D4} \approx \Delta I_{D2} = -\Delta I_{D1} \\ \Delta I_{D1} &= g_m \cdot \frac{(u_{11} - u_{12})}{2} \\ g_m &\approx -\frac{\Delta O}{\Delta (u_{11} - u_{12})}\end{aligned}$$

图(a)所示电路的电压放大倍数

$$\begin{aligned}A_u &= \frac{\Delta O}{\Delta (u_{11} - u_{12})} \\ &= -\Delta I_O (r_{ds2} // r_{ds4}) / \Delta (u_{11} - u_{12}) \\ &\approx g_m (r_{ds2} // r_{ds4}) \frac{u}{u_{11} - u_{12}}\end{aligned}$$

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 $\beta$ 均相同。

(1) 说明电路中各晶体管的作用；

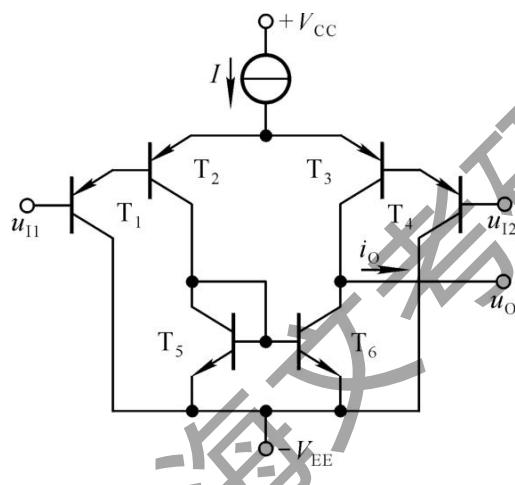
(2) 若输入差模电压为 $(u_{11} - u_{12})$ ，则由此产生的差模电流为 $\Delta i_D$ ，求

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

$$\begin{aligned}\Delta i_o &\approx 2(\beta + \beta) \Delta i_I \\ A_i &= \frac{\Delta i_o}{\Delta i_I} \approx 2(\beta + \beta)\beta\end{aligned}$$



图P4.8

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。

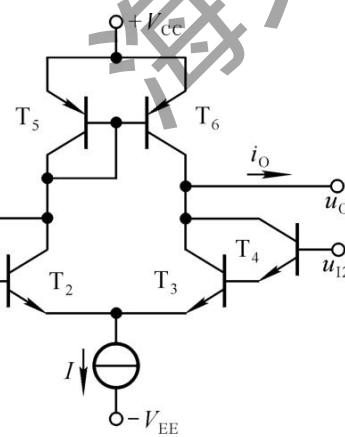


图 P4.9

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

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

$$\Delta i_o \approx 2(1 + \beta)\beta \Delta i_i$$

$$A_i = \frac{\Delta i_o}{\Delta i_i} \approx 2(1 + \beta)\beta$$

4.10 电路如图 P4.10 所示， $T_1$  与  $T_2$  管的特性相同，所有晶体管的  $\beta$  均相同， $R_{c1}$  远大于二极管的正向电阻。当  $u_{11} = u_{12} = 0V$  时， $u_o = 0V$ 。

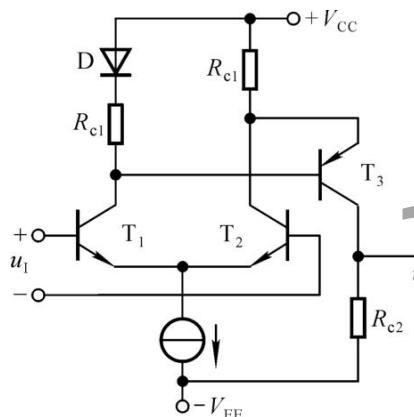


图 P4.10

(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

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

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

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

(2) 当有共模输入电压时,  $u_o$  近似为零。由于  $R_{c1} >> r_d$ ,  $\Delta u_{C1} \approx \Delta u_{C2}$ , 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  $\beta$  管, 电路具有理想的对称性。选择合适的答案填入空内。

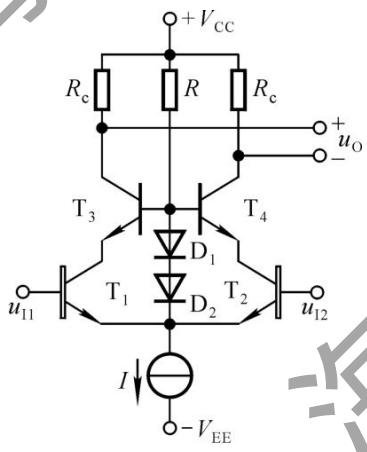


图 P4.11

(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

- A. 增大输入电阻
- B. 增大电流放大系数
- C. 展宽频带

(3) 电路采用超  $\beta$  管能够 \_\_\_\_\_。

- 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,  $\beta >> 2$ ; 反相输入端的输入电流为  $i_{11}$ , 同相输入端的输入电流为  $i_{12}$ 。试问:

$$(1) i_{C2} \approx ?$$

$$(2) i_{B2} \approx ?$$

$$(3) A_{ui} = \Delta u_o / (i_{11} - i_{12}) \approx ?$$

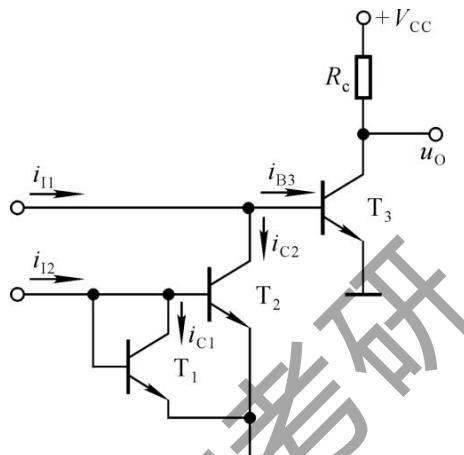


图 P4.13

解:(1) 因为  $T_1$  和  $T_2$  为镜像关系, 且  $\beta >> 2$ , 所以  $i_{C2} \approx i_{C1} \approx i_{12}$ 。

$$(2) i_{B3} = i_{11} - i_{C2} \approx i_{11} - i_{12}$$

(3) 输出电压的变化量和放大倍数分别为

$$\Delta u_o = -\frac{\Delta i_c}{R_c} = -\beta_3 \frac{\Delta i_c}{R_c}$$

$$A_{ui} = \Delta u_o / \Delta (i_{11} - i_{12}) \approx \frac{u_o}{\Delta i_{B3}} = -\beta_3 R_c$$

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。

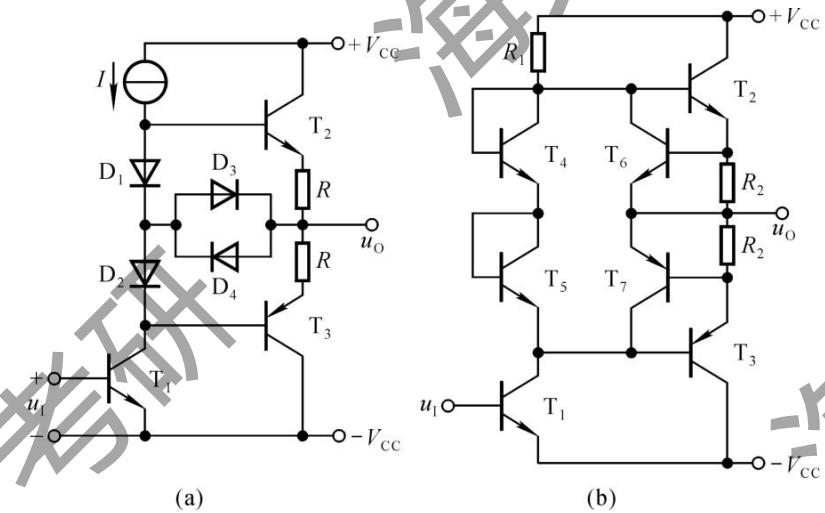


图 P4.14

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：

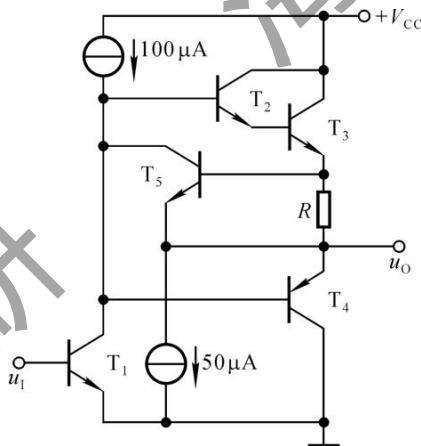


图 P4.15

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

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  $u_{B4} = u_{C1} = u_o + u_R + u_{B3} + u_{B2}$ ,  $u_{E4} = u_o$ ,  $u_{B4} > u_{E4}$ 。
- (3)  $50 \mu A$  电流源为  $T_3$  提供射极电流，在交流等效电路中等效为阻值非常大的电阻。
- (4) 保护电路。 $u_{BE5} = i_o R$ , 未过流时  $T_5$  电流很小；过流时使  $i_{E5} > 50 \mu A$ ,  $T_5$  更多地为  $T_3$  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。

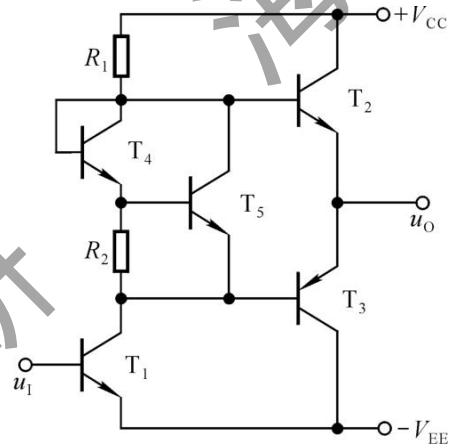


图 P4.16

解：T<sub>1</sub> 为共射放大电路的放大管；T<sub>2</sub> 和 T<sub>3</sub> 组成互补输出级；T<sub>4</sub>、T<sub>5</sub>、R<sub>2</sub> 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) T<sub>3</sub> 与 T<sub>4</sub> 的作用；
- (3) 电流源 I<sub>3</sub> 的作用；
- (4) D<sub>2</sub> 与 D<sub>3</sub> 的作用。

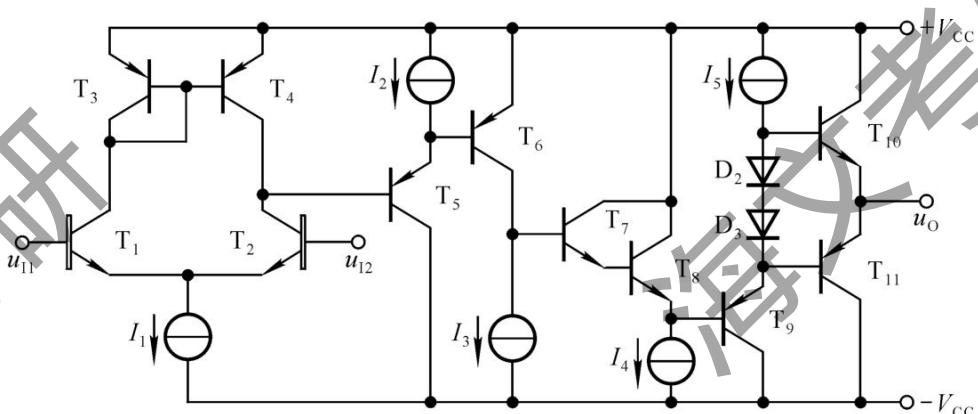


图 P4.17

解：(1)  $u_{11}$  为反相输入端， $u_{12}$  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？

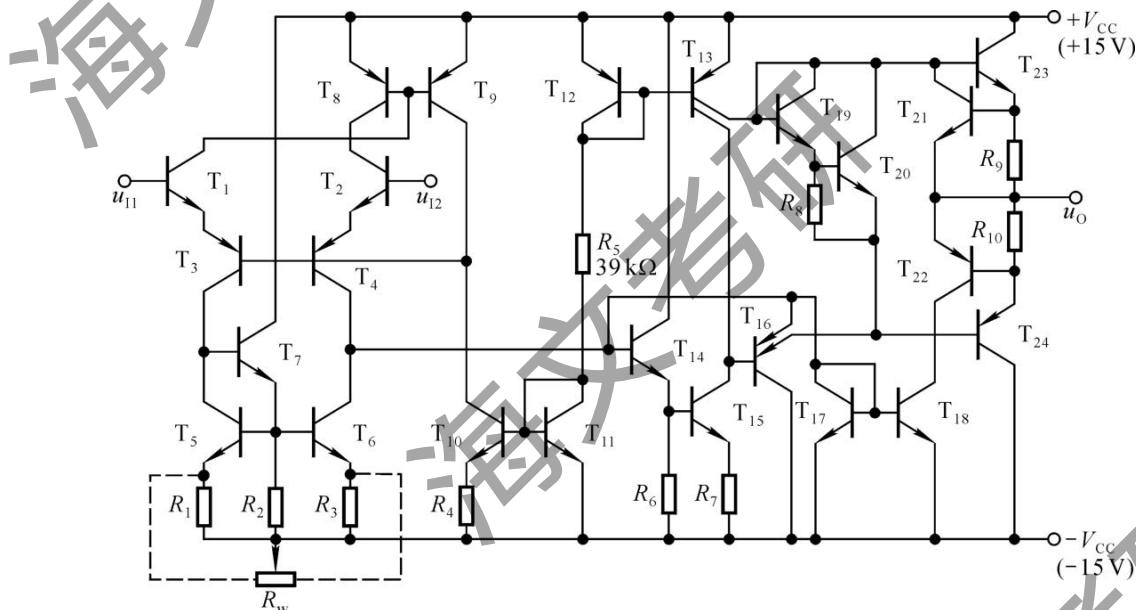


图 P4.18

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。