

集成电路是 20 世纪 50 年代末发展起来的一种新型器件,它采用半导体集成工艺,把众多晶体管、电阻、电容及连线制作在一块硅片上,做成具有特定功能的独立电子线路。与分立元件电路相比,集成电路具有性能好、可靠性高、体积小、耗电少、成本低等优点,因此,自它诞生起便得到了飞速的发展并获得了广泛的应用。

集成运算放大器(operational amplifier)简称运放,是一种模拟集成电路,由于它最初被用于模拟计算机,实现各种数学运算而得名,该名称一直沿用至今。目前,集成运放的应用已远远超出了模拟运算的范畴,它作为一种通用集成器件被广泛用于各种电子系统及设备中。

## 5.1 集成运算放大器的组成

集成运算放大器实质上是一种高增益的多级直接耦合放大电路。集成运放的类型很多,电路也不一样,但结构具有共同之处,通常由输入级、中间级、输出级和偏置电路四部分组成,图 5-1 示出了其内部电路组成原理框图。

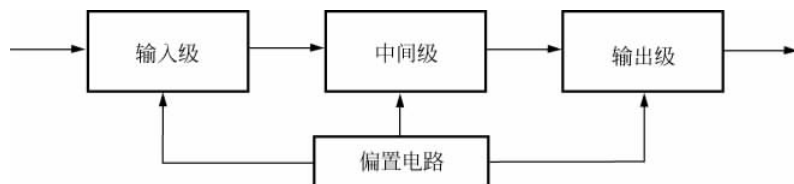


图 5-1 集成运放的内部电路组成框图

其中对输入级的要求是输入电阻大、噪声低、零漂小,一般是由三极管或场效应管组成的差动式放大电路组成;中间级的主要作用是提供电压增益,它可由一级或多级放大电路组成;输出级一般由电压跟随器或互补电压跟随器组成,以降低输出电阻,提高带负载能力;偏置电路为各级电路提供合适的偏置电流。此外还有一些辅助环节,如单端化电路、相位补偿环节、电平移动电路、输出保护电路等。

## 5.2 电流源电路

电流源(current source)电路是广泛应用于集成电路中的一种单元电路。在集成电路中,电流源除了作为偏置电路提供恒定的静态偏置电流外,还可利用其输出电阻大的特点,

做有源电阻使用,以提高单级放大电路的放大倍数。

5.2.1 电流源电路

1. 单管电流源电路

表 5-1 示出了几种三极管单管电流源电路,以供读者学习和比较。

表 5-1 常见的几种三极管电流源

| 类 型          | 电 路 结 构 | $I_o$ 与 $I_r$ 的关系式                                                                                                                                                     | 输 出 电 阻                                                                             | 特 点                                                        |
|--------------|---------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| 基本镜像<br>电流源  |         | $I_r = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R} \approx \frac{U_{CC}}{R}$ $I_o = \frac{\beta}{\beta + 2} I_r \approx I_r$                                                             | $R_o = r_{ce2}$                                                                     | 当 $\beta$ 、 $U_{CC}$ 较小时, $I_o$ 的精度较低、热稳定性较差               |
| 改进型镜像<br>电流源 |         | $I_r = \frac{U_{CC} - 2U_{BE}}{R}$ $I_o = \frac{\beta^2 + \beta}{\beta^2 + \beta + 2} I_r \approx I_r$                                                                 | $R_o = r_{ce2}$                                                                     | 有 $T_3$ 管隔离,在 $\beta$ 较小时也有 $I_o \approx I_r$ , $I_o$ 精度提高 |
| 比例式电<br>流源   |         | $I_r = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R + R_1} \approx \frac{U_{CC}}{R + R_1}$ $I_o = \frac{R_1}{R_2} I_r + \frac{U_T}{R_2} \ln \frac{I_r}{I_o}$ $\approx \frac{R_1}{R_2} I_r$ | $R_o \approx \left( 1 + \frac{\beta R_2}{R_2 + r_{be2} + R_1 // R} \right) r_{ce2}$ | 按比例输出毫安级电流, $I_o/I_r$ 与电阻成反比。 $R_o$ 增大, $I_o$ 精度提高         |
| 微电流源         |         | $I_r = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R} \approx \frac{U_{CC}}{R}$ $I_o = \frac{U_T}{R_2} \ln \frac{I_r}{I_o}$                                                                 | $R_o \approx \left( 1 + \frac{\beta R_2}{R_2 + r_{be2}} \right) r_{ce2}$            | 提供微安级电流, $I_o \ll I_r$ 。<br>$R_o$ 增大, $I_o$ 精度提高           |
| 威尔逊电<br>流源   |         | $I_r = \frac{U_{CC} - 2U_{BE}}{R}$ $I_o = \frac{\beta^2 + 2\beta}{\beta^2 + 2\beta + 2} I_r \approx I_r$                                                               | $R_o \approx \frac{\beta}{2} r_{ce}$                                                | $I_o$ 精度高。因为有负反馈,所以 $I_o$ 稳定性也好                            |

## 2. 多路电流源

表 5-1 中的电流源电路都是以一个参考电流对应一个输出电流。实际电路设计中,常常以一个参考电流对应多个输出电流,如图 5-2 所示。

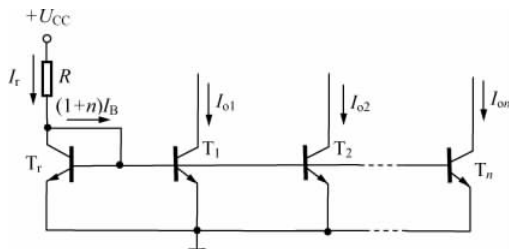


图 5-2 多路镜像电流源电路

在图 5-2 中,若所有三极管的特性参数都相同,则有

$$I_{o1} = I_{o2} = \dots = I_{on} = \frac{I_r}{1 + \frac{1+n}{\beta}}$$

式中,  $n$  是多路镜像电流源电路中输出三极管的个数。

在集成电路中,多路镜像电流源电路是由多集电极三极管实现的。

### 5.2.2 电流源电路作为有源负载

由于电流源电路具有直流电阻小而交流(动态)电阻大的特点,所以,在模拟集成电路中广泛地把它作为负载使用,称为有源负载。

在图 5-3 所示电路中,由  $T_2$ 、 $T_3$  管组成的镜像电流源作为  $T_1$  管(共发射极放大电路)的集电极有源负载。因为电流源电路的交流电阻很大,所以它可使单级共发射极放大电路的电压达  $10^3$  甚至更高。电流源电路也常作为射极负载。

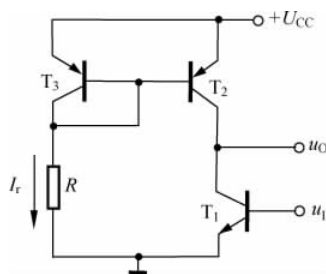


图 5-3 电流源电路作为有源负载

## 5.3 差动放大电路

差动放大电路是一种可提供两个输入端和两个输出端的放大电路,这种电路为系统中的不同接口提供了方便。差动放大电路由于具有抑制零漂(温漂)的能力,因而被广泛地应用在运算放大器集成电路中。

### 5.3.1 直接耦合放大电路的主要问题

直接耦合放大电路可以放大直流信号。如果一个电路的输入信号为零时,而输出信号却不为零,称为零点漂移,简称零漂。

零漂是直接耦合放大电路中存在的主要问题。当温度变化时,晶体三极管的各项参数也随之变化,从而造成静态工作点的漂移。因温度变化引起的零点漂移称为温漂。由于直

接耦合放大电路中各级静态工作点相互影响,故前级的漂移可经放大后送至末级,造成输出端产生较大的电压波动,即产生零漂。若零漂很严重,有用信号将被完全淹没于噪声中,电路不能正常工作。零漂越小,电路性能越稳定。

在多级放大电路中,第一级电路的零漂决定整个放大电路的零漂指标。所以,为了提高放大电路放大微弱信号的能力,在提高放大倍数的同时,必须减小输入级的零点漂移。集成电路的输入级大多采用差动放大电路,它能有效地抑制因温度变化引起的零点漂移。

### 5.3.2 差动放大电路的组成

图 5-4 为常用的差动放大电路,由两个相同的共发射极放大电路组成,发射极共用电阻  $R_E$ ,因此常称为长尾式电路。图 5-4 所示电路具有结构对称、元件参数对称的特点,电路有两个输入端和两个输出端。信号可以双端输入,也可以单端输入;可以双端输出,也可以单端输出。因此,差动放大电路共有四种输入输出方式,分别为双端输入、双端输出;双端输入、单端输出;单端输入、双端输出;单端输入、单端输出。

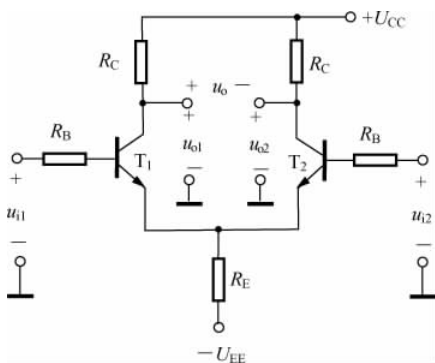


图 5-4 典型差动放大电路

### 5.3.3 差动放大电路的工作原理

#### 1. 静态工作情况

静态时,  $u_{i1} = u_{i2} = 0$ , 由于电路结构及元件参数的对称性,两边的集电极电流相等,集电极电位也相等,即

$$I_{C1} = I_{C2}, \quad U_{C1} = U_{C2}$$

故输出电压

$$U_O = U_{C1} - U_{C2} = 0$$

当温度升高时,两管的集电极电流增大,集电极电位下降,且两边的变化量相等,即

$$\Delta I_{C1} = \Delta I_{C2}, \quad \Delta U_{C1} = \Delta U_{C2}$$

虽然每只管子都产生了零点漂移,但是在双端输出时,两管集电极电位的变化相互抵消,所以输出电压仍为零,即

$$U_O = (U_{C1} + \Delta U_{C1}) - (U_{C2} + \Delta U_{C2}) = 0$$

可见,零点漂移完全被抑制了,对称差动放大电路对两管所产生的同向漂移(不管是什么原因引起的)都具有抑制作用,这是它的突出优点。

## 2. 动态工作情况

当有信号输入时,差动放大电路的工作情况可分为下列情形来讨论。

### (1) 共模输入

差动放大电路两个输入端作用着大小相等、极性相同的两个信号时,即  $u_{i1} = u_{i2}$  时,称为共模输入。此时,对于完全对称的差动放大电路而言,两管的集电极电位变化相同,因而双端输出时电压等于零,即差动放大电路对共模信号有抑制作用。差动放大电路对零漂的抑制就是抑制共模信号的一个特例。

实际上,由于电路元件参数值的微小差异,晶体管特性的差异,输入共模信号  $u_{ic}$  ( $u_{ic} = \frac{u_{i1} + u_{i2}}{2}$ ) 时,共模输出电压  $u_{oc}$  不等于零。 $u_{oc}$  与  $u_{ic}$  之比定义为共模电压放大倍数  $A_{uc}$ ,即

$$A_{uc} = \frac{u_{oc}}{u_{ic}} \quad (5-1)$$

$A_{uc}$  越小,表明差动放大电路抑制共模信号的能力越强。

### (2) 差模输入

差动放大电路两输入端作用着大小相等、极性相反的信号时,即  $u_{i1} = -u_{i2}$  时,称为差模输入。此时,两输出端的电位  $u_{C1}$  和  $u_{C2}$  的电位变化量  $\Delta u_{C1}$  和  $\Delta u_{C2}$  也是大小相等、极性相反的。因此差模输出电压  $u_{od} = u_{C1} - u_{C2} = (U_{C1} + \Delta u_{C1}) - (U_{C2} + \Delta u_{C2}) = 2\Delta u_{C1} = -2\Delta u_{C2}$ ,差动放大电路能有效地放大差模信号,定义差模输出电压  $u_{od}$  与差模输入电压  $u_{id}$  ( $u_{id} = u_{i1} - u_{i2}$ ) 之比为差模电压放大倍数  $A_{ud}$ ,即

$$A_{ud} = \frac{u_{od}}{u_{id}} \quad (5-2)$$

可见,双端输出时,差动放大电路放大差模信号,抑制共模信号,即“有差则动,无差不动”,故称为差动放大电路。

### (3) 共模抑制比

对差动放大电路而言,差模信号是有用信号,要求对它有一定的放大倍数;而共模信号是需要抑制的,因此,对它的放大倍数要越小越好。对共模信号的放大倍数越小,就意味着电路的零点漂移越小,抗共模干扰能力越强。为了综合衡量差动放大电路的性能,通常引入共模抑制比  $K_{CMR}$ ,其定义为

$$K_{CMR} = \left| \frac{A_{ud}}{A_{uc}} \right| \quad (5-3)$$

或用对数形式表示

$$K_{CMR} = 20 \lg \left| \frac{A_{ud}}{A_{uc}} \right| \text{ (dB)} \quad (5-4)$$

显然,  $K_{CMR}$  越大,差动放大电路放大差模信号的能力越强,而受共模信号的影响越小。对于双端输出的差动放大电路,若电路完全对称,则有  $A_{uc} = 0$ ,  $K_{CMR} \rightarrow \infty$ ,这是理想情况。而实际上电路不可能完全对称,  $K_{CMR}$  也不可能趋于无穷大。

## 5.3.4 差动放大电路的分析计算

### 1. 静态工作点的计算

静态分析的任务是在输入信号为零的情况下确定差动放大电路的直流工作点,它是动

态分析的基础。静态分析应在差动放大电路的直流通路上进行,图 5-4 的直流通路如图 5-5 所示。

静态时,  $u_{i1} = u_{i2} = 0$ , 由于  $T_1$ 、 $T_2$  两管特性相同, 而且电路元件参数对称, 所以两管电流相等, 即

$$I_{CQ1} = I_{CQ2}, \quad I_{BQ1} = I_{BQ2}, \quad I_{EQ1} = I_{EQ2}$$

同时两管的集电极电位也相同, 即

$$U_{CQ1} = U_{CQ2}$$

因此, 静态时差动放大电路的输出电压为零, 即

$$U_O = U_{CQ1} - U_{CQ2} = 0$$

差动放大电路静态工作点的计算应首先从公共射极支路入手, 即先求出  $I_{EQ}$ , 由图 5-5 可得

$$U_{EE} = I_{BQ}R_B + U_{BEQ} + I_{EQ}R_E$$

通常  $\beta \gg 1$ ,  $U_{EE} \gg U_{BEQ}$ ,  $I_{EQ}R_E \gg I_{BQ}R_B$ , 所以有

$$I_{EQ} \approx \frac{U_{EE}}{R_E} \quad (5-5)$$

因此得到两管的集电极电流为

$$I_{CQ1} = I_{CQ2} \approx \frac{I_{EQ}}{2} \quad (5-6)$$

两管的基极电流为

$$I_{BQ} = \frac{I_{CQ}}{\beta} \quad (5-7)$$

两管集-射间的电压为

$$U_{CEQ} \approx U_{CC} + U_{EE} - I_{CQ}(R_C + 2R_E) \quad (5-8)$$

## 2. 动态指标的计算

在差动放大电路中, 由于差模输入  $u_{id} = u_{i1} - u_{i2}$ , 共模输入  $u_{ic} = \frac{u_{i1} + u_{i2}}{2}$ , 所以, 其两输入端的信号可以分别表示为

$$u_{i1} = \frac{u_{id}}{2} + u_{ic} \quad (5-9)$$

$$u_{i2} = -\frac{u_{id}}{2} + u_{ic} \quad (5-10)$$

式(5-9)和式(5-10)表明, 一对任意信号可以分解为差模信号和共模信号, 电路中差模和共模信号是共存的。下面分别讨论差模和共模两种情况。

### (1) 差模输入

双端输入双端输出差模输入电路如图 5-6 所示。若要进行差模分析, 首先应画出其差模交流通路。

由于  $u_{i1} = -u_{i2}$ , 因此, 若  $T_1$  管的集电极电流增加  $\Delta i_C$ , 则  $T_2$  管的集电极电流便减少  $\Delta i_C$ , 即在差模输入电压作用下,  $i_{C1} = I_{CQ1} + \Delta i_C$ ,  $i_{C2} = I_{CQ2} - \Delta i_C$ , 那么, 流过公共射极电阻  $R_E$  的差模交流电流为零,  $R_E$  上的差模交流电压也等于零, 因此,  $R_E$  对差模交流信号相当于短路。

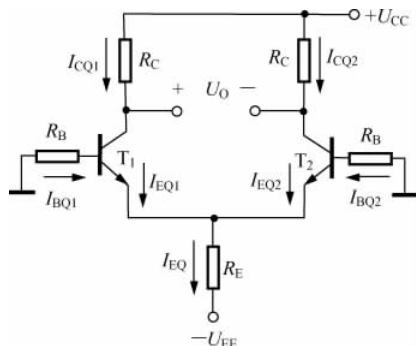


图 5-5 图 5-4 的直流通路

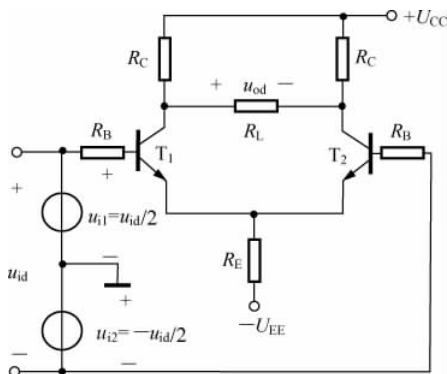


图 5-6 双端输入、双端输出差动放大电路的差模输入

在差模输入电压作用下,负载电阻  $R_L$  上的交流电位一边升高,一边降低,而且升高和降低的幅度一样,因此,  $R_L$  的中点是交流接地电位。

由此可画出图 5-6 所示的差模交流通路如图 5-7 所示。

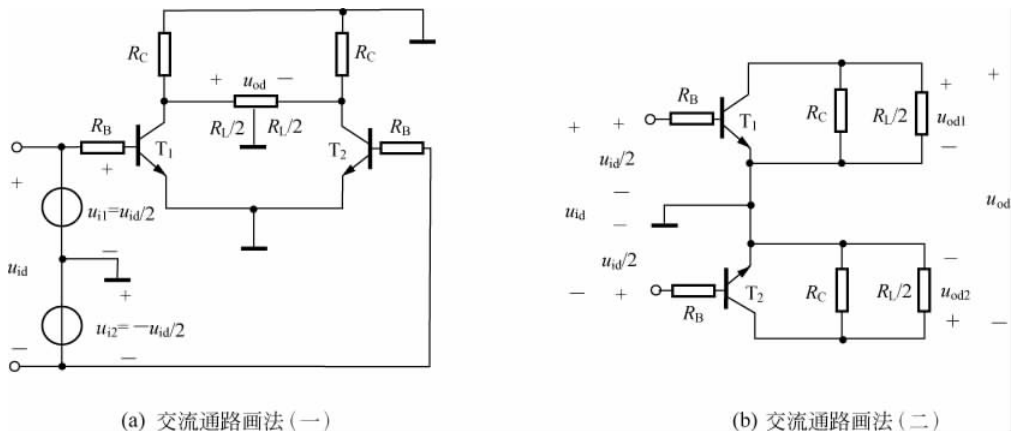


图 5-7 双端输入、双端输出差动放大电路的差模交流通路

由图 5-7(b)可以看出,图 5-6 所示差动放大电路的差模交流通路由两个完全对称的共发射极电路组成,因此,差模放大电路的性能分析可采用所谓的“半电路分析法”。

#### ① 差模电压增益

由图 5-7(b)可得双端输入双端输出差动放大电路的差模电压增益为

$$A_{ud} = \frac{u_{od}}{u_{id}} = \frac{u_{od1} - u_{od2}}{u_{id}/2 - (-u_{id}/2)} = \frac{2u_{od1}}{2 \times (u_{id}/2)} = \frac{u_{od1}}{u_{id}/2} = A_{u1} \quad (5-11)$$

式(5-11)表明,双端输入双端输出差动放大电路的差模电压增益等于其差模交流通路中单边放大电路的电压增益,即

$$A_{ud} = A_{u1} = -\frac{\beta R'_L}{R_B + r_{be}} \quad (5-12)$$

其中

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

若电路为单端输出(以负载电阻  $R_L$  接在  $T_1$  管的集电极到地之间为例),如图 5-8(a)所示,则其差模交流通路如图 5-8(b)所示。

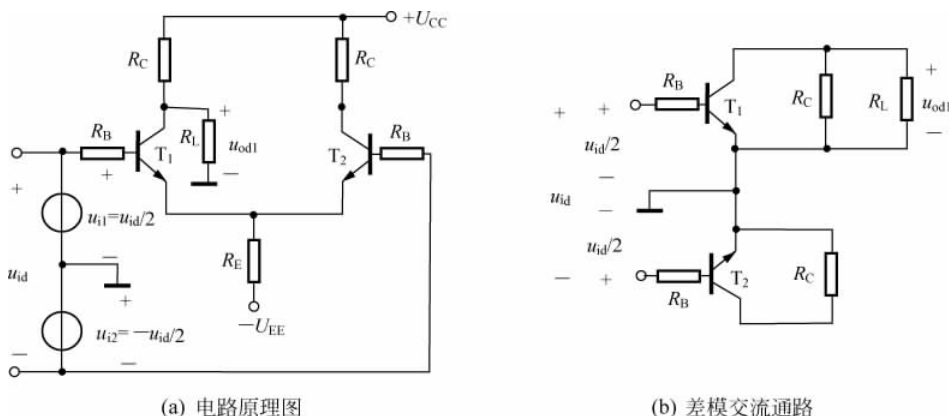


图 5-8 双端输入、单端输出差动放大电路

由图 5-8(b)不难得到,单端输出时的差模电压增益为

$$A_{ud1} = \frac{u_{od1}}{u_{id}} = \frac{u_{od1}}{2 \times (u_{id}/2)} = \frac{1}{2} A_{u1} = -\frac{\beta R'_L}{2(R_B + r_{be})} \quad (5-13a)$$

同理可得

$$A_{ud2} = \frac{u_{od2}}{u_{id}} = \frac{u_{od2}}{2 \times (-u_{id}/2)} = -\frac{1}{2} A_{u2} \quad (5-13b)$$

式(5-13a)、式(5-13b)表明,差动放大电路单端输出时的差模电压增益等于其交流通路中单边放大电路电压增益的一半,且从不同端口输出时,输出信号相位相反,即

$$A_{ud1} = -A_{ud2} = \frac{1}{2} A_{u1} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\beta R'_L}{R_B + r_{be}} \quad (5-14)$$

其中,  $R'_L = R_C // R_L$ 。

请读者注意式(5-14)与式(5-12)中  $R'_L$  的不同。

### ② 差模输入电阻

由图 5-7(b)和图 5-8(b)可以看出,无论是双端输出还是单端输出,双端输入差动放大电路的差模输入电阻是相同的,都等于单边放大电路输入电阻之和,即

$$R_{id} = 2(R_B + r_{be}) \quad (5-15)$$

### ③ 差模输出电阻

由图 5-7(b)可知,双端输出时,差动放大电路的差模输出电阻为

$$R_{od} \approx 2R_C \quad (5-16a)$$

由图 5-8(b)可知,单端输出时,差动放大电路的差模输出电阻为

$$R_{od1} = R_{od2} \approx R_C \quad (5-16b)$$

### (2) 共模输入

图 5-9(a)是双端输入、双端输出差动放大电路加共模信号时的电路图。

由于  $u_{i1} = u_{i2} = u_{ic}$ , 因此,  $T_1$ 、 $T_2$  管集电极电流的变化是完全相同的,流过公共射极电阻  $R_E$  的电流的变化量是每个三极管电流变化量的两倍,  $R_E$  上的电压变化量为  $\Delta u_E = \Delta i_E R_E =$

$2\Delta i_{E1}R_E$ , 即对每管而言, 相当于发射极接了  $2R_E$  的电阻。由此得到图 5-9(a) 所示电路的共模交流通路如图 5-9(b) 所示。

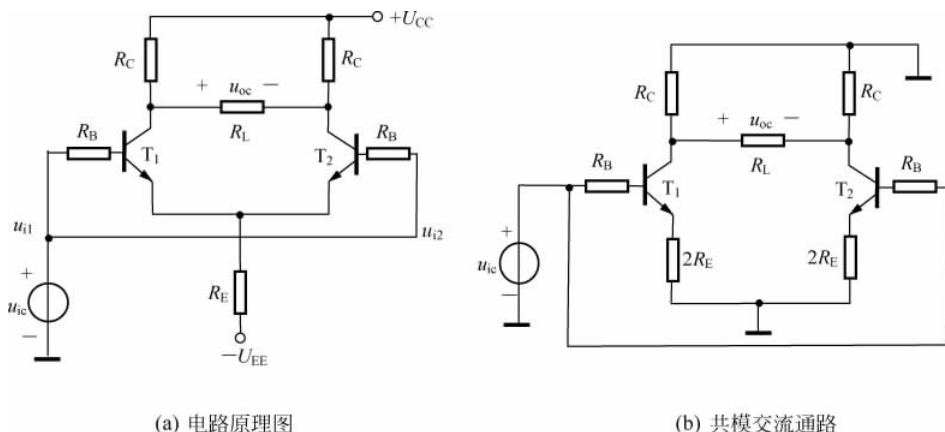


图 5-9 双端输入、双端输出差动放大电路的共模输入

#### ① 共模电压增益

由图 5-9(b) 可知, 在共模输入电压作用下,  $T_1$ 、 $T_2$  管的集电极电压的变化完全相同, 因此, 共模输出电压为

$$u_{oc} = u_{c1} - u_{c2} = 0$$

故得差动放大电路双端输出时的共模电压增益为

$$A_{uc} = \frac{u_{oc}}{u_{ic}} = 0 \quad (5-17)$$

式(5-17)表明, 双端输出时, 差动放大电路对共模信号无放大能力。而共模信号实质上是加在差分对管上的同向信号, 如温漂信号或者伴随输入信号一起混入的干扰信号。因此, 差动放大电路在双端输出时有很强的抑制共模信号的能力。这种抑制能力是依靠电路的对称性获得的。

若为单端输出(以  $T_1$  管集电极输出为例), 共模交流通路如图 5-10 所示。

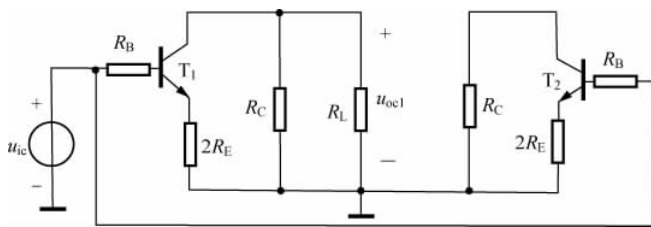


图 5-10 单端输出差动放大电路的共模交流通路

由图 5-10 可知, 差动放大电路单端输出时的共模电压增益为

$$A_{uc1} = -\frac{\beta R'_L}{R_B + r_{be} + 2(1 + \beta)R_E} \approx -\frac{R'_L}{2R_E} \quad (5-18)$$

式(5-18)表明, 单端输出时差动放大电路的共模电压增益比双端输出时增大, 抑制共模信号的能力下降。要想提高单端输出时的共模抑制能力, 应使  $R_E$  越大越好。

## ② 共模输入电阻

由图 5-9(b)和图 5-10 可以看出,无论是双端输出还是单端输出,从输入端看进去的共模输入电阻均为

$$R_{ic} = \frac{1}{2} [R_B + r_{be} + 2(1 + \beta)R_E] \quad (5-19)$$

## ③ 共模输出电阻

由图 5-9(b)可知,双端输出时,差动放大电路的共模输出电阻为

$$R_{oc} \approx 2R_C \quad (5-20a)$$

由图 5-10 可知,单端输出时,差动放大电路的共模输出电阻为

$$R_{oc1} = R_{oc2} \approx R_C \quad (5-20b)$$

(3) 共模抑制比  $K_{CMR}$ 

由以上讨论可知,双端输出时,共模抑制比为

$$K_{CMR} = \left| \frac{A_{ud}}{A_{uc}} \right| = \infty \quad (5-21a)$$

单端输出时,共模抑制比为

$$K_{CMR} = \left| \frac{A_{ud1}}{A_{uc1}} \right| \approx \frac{\beta R_E}{R_B + r_{be}} \quad (5-21b)$$

## 5.3.5 恒流源差动放大电路

在图 5-4 所示的典型差动放大电路中, $R_E$ 愈大,抑制共模信号的能力愈强,但是若  $R_E$  过大, $R_E$  上的直流压降增大,相应地要求负电源  $U_{EE}$  的电压很高;而且,在集成电路中制造大电阻十分困难。为了达到既能增强负反馈( $R_E$  起共模负反馈的作用),又不必使用大电阻,也不致要求  $U_{EE}$  电压过高的目的,采用恒流源电路替代  $R_E$  在电路中的作用,如图 5-11(a) 所示。图 5-11(b) 为其简化画法。

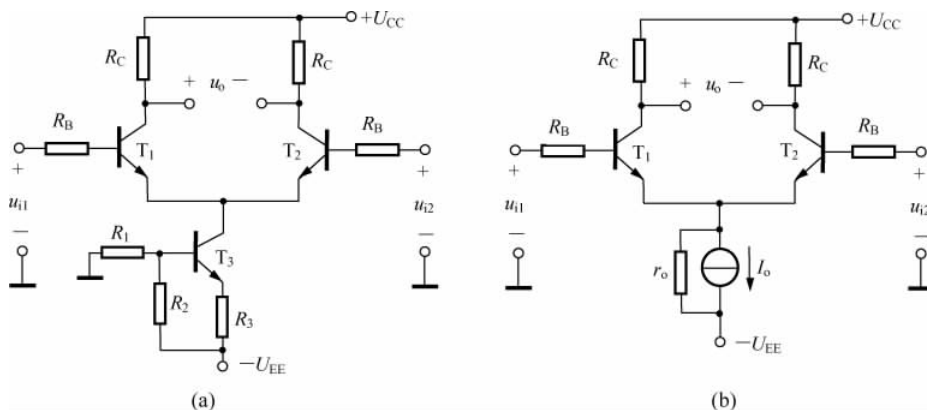


图 5-11 恒流源差动放大电路

在图 5-11(a)中,当  $T_3$  工作在放大区时,其集电极电流几乎仅决定于基极电流而与其管压降无关,若基极电流是一个不变的直流电流时,集电极电流就是一个恒定的电流。因此,利用  $T_3$  管组成的恒流源电路可以为差分对管  $T_1$ 、 $T_2$  提供稳定的静态工作电流。若忽略  $T_3$  管的基极电流,电阻  $R_2$  的电压为

$$U_{R_2} \approx \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_{EE} \quad (5-22)$$

$T_3$  管的集电极电流为

$$I_{C3} \approx I_{E3} = \frac{U_{R_2} - U_{BE3}}{R_3} \quad (5-23)$$

$T_1$ 、 $T_2$  管的集电极静态电流为

$$I_{CQ1} = I_{CQ2} \approx \frac{I_{C3}}{2} \quad (5-24)$$

当  $T_3$  管的输出特性为理想特性(放大区的输出特性曲线与横轴平行)时,恒流源的动态输出电阻为无穷大,这相当于在  $T_1$ 、 $T_2$  管的发射极接了一个阻值为无穷大的电阻,因此,差动放大电路即使在单端输出时共模电压增益也趋于零,共模抑制比趋于无穷大。

## 5.4 集成运算放大器

### 5.4.1 集成运算放大器的结构、符号及封装形式

#### 1. 结构

集成运算放大器品种繁多,内部电路结构也各不相同,但它们的基本组成部分、结构形式、组成原则基本一致。图 5-12 为第二代通用型运放  $\mu A741$  的内部电路,其各部分功能简述如下。

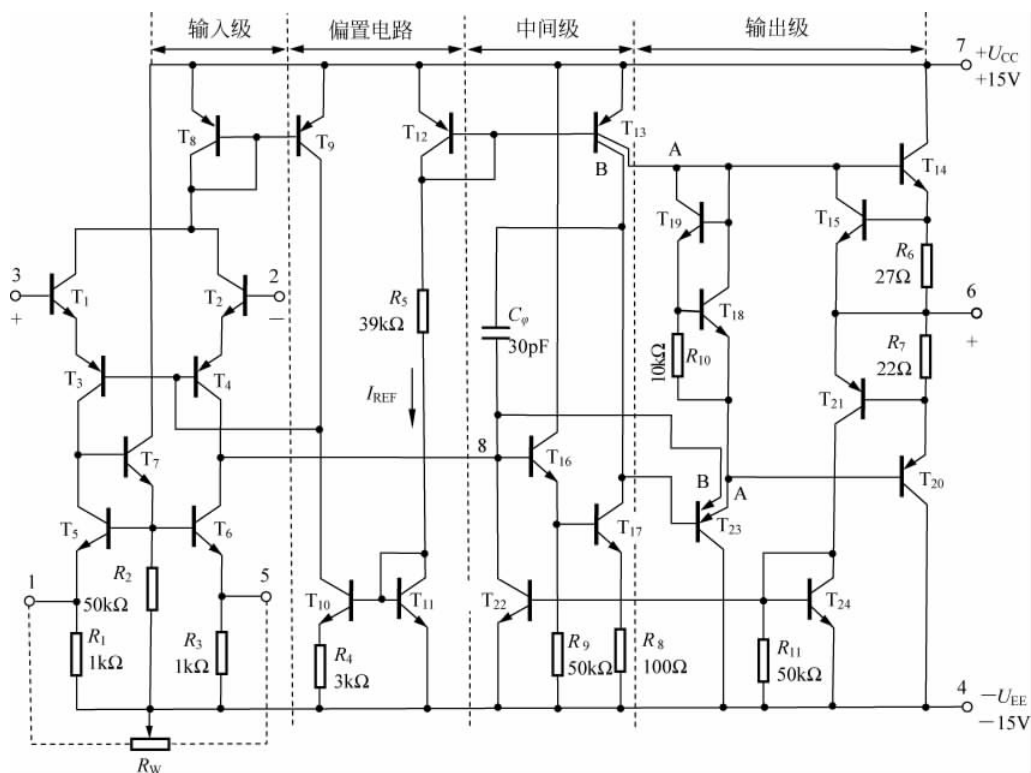


图 5-12  $\mu A741$  的内部电路

### (1) 偏置电路

集成运放采用电流源偏置技术,电流源电路包含在各级电路中,它不仅为各级电路提供稳定的恒流偏置,而且也作为放大级的有源负载。其中  $T_{10}$ 、 $T_{11}$ 、 $T_{12}$  管和  $R_4$ 、 $R_5$  组成的微电流源,作为整个集成运放的主偏置级;  $T_8$ 、 $T_9$  为一对横向 PNP 型管,它们组成镜像电流源,为输入级  $T_1$ 、 $T_2$  管提供偏置电流;  $T_{12}$ 、 $T_{13}$  管组成双输出的镜像电流源,其中  $T_{13}$  管为双集电极的横向 PNP 型管,可以看作是三个三极管。一路输出为  $T_{13B}$  的集电极,主要作为中间放大级的有源负载;另一路输出为  $T_{13A}$  的集电极,供给输出级的偏置电流,使  $T_{14}$ 、 $T_{20}$  工作在甲乙类放大状态,同时也作为  $T_{23A}$  的有源负载。

### (2) 差动输入级

输入级是由  $T_1 \sim T_7$  管组成的差动放大电路组成,其中,  $T_1$ 、 $T_3$  和  $T_2$ 、 $T_4$  组成共集-共基组合差动放大电路,  $T_5$ 、 $T_6$ 、 $T_7$  组成的改进型镜像电流源作为其有源负载。输入级为双端输入、单端输出,其中,  $T_1$  管的基极为同相输入端,  $T_2$  管的基极为反相输入端;引自  $T_4$ 、 $T_6$  公共集电极的单端输出是中间放大级的输入信号。

### (3) 中间增益级

中间增益级由  $T_{16}$ 、 $T_{17}$  管组成。其中,  $T_{16}$  管构成射极输出器,因此,中间级的输入电阻很高,这样,就可大大降低中间级对输入级的负载效应,从而保证了输入级的高电压增益。从这个意义上讲,  $T_{16}$  管是用作输入级和中间级的隔离级。中间级的增益主要是由  $T_{17}$  管组成的共发射极电路提供,  $T_{13B}$  和  $T_{12}$  组成的镜像电流源为其集电极有源负载,本级的电压增益可达 55dB。

此外,为了消除运放在深度负反馈时的自激振荡,在中间级采用了频率补偿技术,  $C_\varphi$  为密勒补偿电容。

### (4) 互补功率输出级和保护电路

输出级采用了互补推挽功率放大电路,由  $T_{14}$ 、 $T_{20}$  管组成。  $T_{18}$ 、 $T_{19}$  和  $R_{10}$  组成的电路用于提供  $T_{14}$ 、 $T_{20}$  管的静态偏置电压,使其工作在甲乙类状态,以克服交越失真。

$T_{23}$  为射极输出器,其中,  $T_{13A}$  作为  $T_{23A}$  的射极有源负载,因此其输入电阻很大,将它插在中间级和输出级之间作为隔离级,可以减小输出级对中间级的负载效应,以保证中间级的高电压增益。

为了防止因输入级信号过大或输出负载过小甚至短路而造成的功放管损坏,在输出级设置了过流保护元件。其中  $T_{15}$ 、 $R_6$  为  $T_{14}$  提供过流保护,  $T_{21}$ 、 $R_7$ 、 $T_{24}$  和  $T_{22}$  为  $T_{20}$  提供过流保护。当电路输出正常时,各保护三极管均不导通。

当正向输出电流过大,即流过  $T_{14}$ 、 $R_6$  的电流过大时,  $R_6$  上的电压增大,使  $T_{15}$  管由截止变为导通,  $T_{15}$  管的导通分流了  $T_{14}$  管的基极电流,从而使  $T_{14}$  管的集电极电流也减小,起到了保护  $T_{14}$  管的作用。

当负向输出电流过大,即流过  $T_{20}$ 、 $R_7$  的电流过大时,  $R_7$  上的电压增大,使  $T_{21}$  管由截止变为导通,同时  $T_{24}$ 、 $T_{22}$  也导通,  $T_{22}$  管的导通分流了  $T_{16}$  管的基极电流,使  $T_{16}$ 、 $T_{17}$  管的基极电位降低,导致  $T_{17}$  管的集电极电位升高,  $T_{23}$  管的发射极电位,也即  $T_{20}$  管的基极电位升高,  $T_{20}$  管趋于截止,因而限制了流过  $T_{20}$  管的电流,起到了保护作用。

综上所述,  $\mu A741$  是一种较理想的电压放大器件,它具有高增益、高输入电阻、低输出电阻、高共模抑制比、低失调等优点。

## 2. 符号

图 5-13 所示为集成运放的电路符号。由于集成运放的输入级一般由差动放大电路组成,因此有两个输入端,其中一个输入端的信号与输出信号之间为反相关系,称为反相输入端,在图中用符号“-”标注;另一个输入端的信号与输出信号之间为同相关系,称为同相输入端,在图中用符号“+”标注。

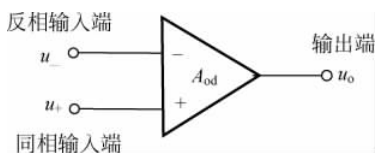


图 5-13 集成运放的电路符号

## 3. 封装形式

集成运放是一种集器件与电路于一体的组件,集成芯片封装方式通常有金属圆壳式、双列直插式和扁平式三种,分别如图 5-14(a)、(b)、(c)所示。

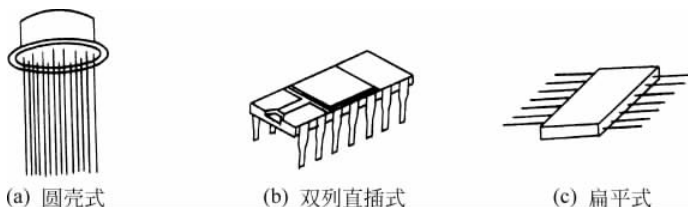


图 5-14 集成芯片的封装形式

## 5.4.2 集成运算放大器的主要参数

为了正确挑选和使用集成运放,必须弄清其主要参数的含义。

### 1. 与运算精度有关的参数

#### (1) 交流参数

##### ① 开环差模电压放大倍数 $A_{od}$

指在规定负载的情况下,运放开环(不加反馈)时的差模电压放大倍数。常用分贝(dB)表示,其分贝数为  $20\lg |A_{od}|$ 。 $A_{od}$ 一般为  $10^4 \sim 10^7$ ,即  $80 \sim 140\text{dB}$ 。 $A_{od}$ 越大,所构成的运算电路越稳定,运算精度也越高。

##### ② 共模抑制比 $K_{CMR}$

$K_{CMR}$ 指运放的开环差模电压放大倍数与开环共模电压放大倍数之比,通常用分贝表示,即

$$K_{CMR} = 20\lg \left| \frac{A_{od}}{A_{oc}} \right| (\text{dB}) \quad (5-25)$$

$K_{CMR}$ 愈大,表示运放对共模信号的抑制能力愈强。一般运放的  $K_{CMR}$ 在  $80\text{dB}$ 以上,优质运放的  $K_{CMR}$ 可达  $160\text{dB}$ 。

##### ③ 差模输入电阻 $R_{id}$

$R_{id}$ 指当运加差模信号时,从运放两个输入端看进去的等效电阻。以三极管为输入级的运放  $R_{id}$ 一般最大为数兆欧。输入级采用场效应管的运放,  $R_{id}$ 可高达  $10^6\text{M}\Omega$ 。

#### (2) 直流参数

##### ① 输入偏置电流 $I_{IB}$

输入偏置电流  $I_{IB}$ 是指集成运放两个输入端静态电流的平均值,即

$$I_{IB} = \frac{1}{2}(I_{B1} + I_{B2}) \quad (5-26)$$

输入偏置电流越小,信号源内阻对输出电压的影响越小。

### ② 输入失调电压 $U_{IO}$ 及其温漂 $\Delta U_{IO}/\Delta T$

由于差动输入级的不完全对称,在输入电压为零时,为使输出电压也为零而在输入端所加的补偿电压,称为失调电压  $U_{IO}$ 。 $U_{IO}$  值越大,说明电路的对称程度越差。失调电压  $U_{IO}$  随温度而变化,其比值  $\Delta U_{IO}/\Delta T$  称为失调电压温漂。

### ③ 输入失调电流 $I_{IO}$ 及其温漂 $\Delta I_{IO}/\Delta T$

输入失调电流  $I_{IO}$  是指集成运放输出电压为零时,两个输入端静态电流的差,即  $I_{IO} = |I_{B1} - I_{B2}|$ 。输入失调电流  $I_{IO}$  随温度而变化,其比值  $\Delta I_{IO}/\Delta T$  称为失调电流温漂。

## 2. 与工作速率和工作频率有关的主要参数

### (1) 开环带宽 $BW$ 及单位增益带宽 $BW_G$

$A_{od}$  下降 3dB 时对应的输入信号频率为  $BW$ 。 $A_{od}$  下降到 0dB 时对应的输入信号频率为  $BW_G$ 。

### (2) 转换速率 $S_R$

转换速率  $S_R$  反映运放对高速变化的信号的响应速度,定义为

$$S_R = \left. \frac{du_o(t)}{dt} \right|_{\max} \quad (5-27)$$

通常要求运放的  $S_R$  值大于信号变化斜率的绝对值,否则输出会出现失真。

## 3. 与器件安全工作有关的参数

### (1) 最大差模输入电压 $U_{idmax}$

指的是保证集成运放正常工作,反相和同相输入端之间所能承受的最大电压值,它对应于差放对管中三极管发射结的反向击穿电压。

### (2) 最大共模输入电压 $U_{icmax}$

指的是保证集成运放正常工作,反相和同相输入端同时加入电压的最大电压值,它对应于差放对管中三极管饱和或截止时所对应的输入电压值。

以上介绍了集成运放的几项主要技术指标。除此之外,还有其他许多指标,读者可自行查阅相关的文献,此处不再赘述。

## 5.4.3 理想运算放大器的概念及其特点

分析集成运放的各种应用电路时,在保证所需要的精度的前提下,为简便起见,常常将电路中的集成运放视为理想的。所谓理想化运放就是将集成运放的各项技术指标理想化。

### 1. 集成运放理想化的条件

(1) 开环差模电压放大倍数  $A_{od} \rightarrow \infty$ 。

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

(3) 差模输出电阻  $R_{od} \rightarrow 0$ 。

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

(5) 输入偏置电流  $I_{IB} \rightarrow 0$ 。

(6) 输入失调电压  $U_{IO}$ 、失调电流  $I_{IO}$  及它们的温漂均为零。

## 2. 理想运放的特点

图 5-15 为集成运算放大器的电压传输特性,其中实线代表理想运放的特性,虚线表示实际运放的特性。由图可以看出,运放的工作区域可分为线性区和饱和区,运放可以工作在线性区,也可以工作在饱和区。运放在不同的工作区域呈现出不同的特点,这些特点是分析各类运放电路的重要依据。

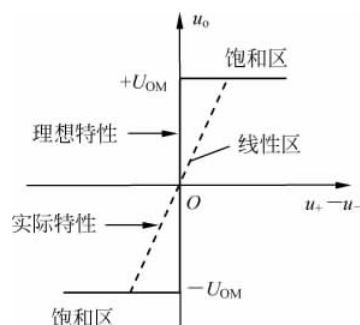


图 5-15 集成运放的电压传输特性

### (1) 线性区的特点

理想运放工作在线性区时有两个重要的特点：“虚短”和“虚断”。

#### ① 虚短

当运放工作在线性区时,其输出电压与两个输入端的电压之间存在线性关系,即

$$u_o = A_{od}(u_+ - u_-) \quad (5-28)$$

由于理想运放的  $A_{od} \rightarrow \infty$ ,而其输出电压  $u_o$  为有限值,所以有

$$u_+ \approx u_- \quad (5-29)$$

式(5-29)表明,运放反相输入端和同相输入端电位几乎相等,如同短路一样,称此种情况为“虚短”。若运放其中一个输入端接“地”,则有  $u_+ \approx u_- = 0$ ,这时称“虚地”。

需要说明的一点是:为了使运放工作在线性区,通常要引入深度负反馈(关于反馈的概念,将在下一章讨论)。

#### ② 虚断

由于理想运放的  $R_{id} \rightarrow \infty$ ,所以流入运放反相输入端与同相输入端的电流近似等于零,即

$$i_+ = i_- \approx 0 \quad (5-30)$$

式(5-30)表明,运放反相输入端和同相输入端如同断开一样,称此种情况为“虚断”。

### (2) 饱和区的特点

理想运放工作在饱和区时,“虚断”的概念依然成立,但“虚短”的概念不再成立。这时,输出电压的取值只有两种可能,即

$$\begin{cases} u_o = +U_{OM}, & u_+ > u_- \\ u_o = -U_{OM}, & u_+ < u_- \end{cases} \quad (5-31)$$

若运放处在开环状态或引入正反馈(关于反馈的概念,将在下一章讨论),则表明其工作在饱和区。

## 5.4.4 集成运算放大器的使用注意事项

### 1. 集成运放的分类和选用

集成运放根据应用来分可分为两大类:一类为通用型运放;另一类为专用型运放。通用型运放适用于一般无特殊要求的场合;专用型运放是为了适应各种不同的特殊需要而设计的,其中有高速型、高阻型、低功耗型、大功率型、高精度型等。集成运放按其内部电路可分为双极型(由三极管组成)和单极型(由场效应管组成)两大类。按每一集成片中运算放大

器的数目可分为单运放、双运放、四运放。

通常是根据实际要求来选用运算放大器。选好后,根据引线端子图和符号图连接外部电路,包括电源、外接偏置电阻、消振电路及调零电路等。

## 2. 集成运放的保护

使用集成运放时,为了防止损坏,应在电路中采取适当的保护措施,常用的保护有输入端保护、输出端保护和电源保护,如图 5-16(a)、(b)、(c)所示。

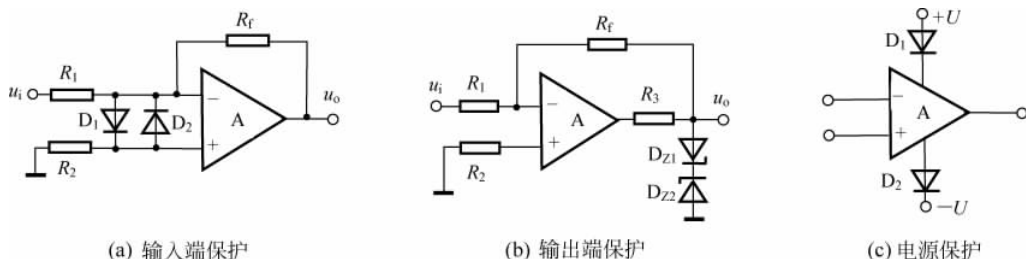


图 5-16 集成运放的保护

当输入端所加的差模或共模电压过高时会损坏输入级的三极管。为此,在输入端接入反向并联的二极管,将输入电压限制在二极管的正向压降以下,如图 5-16(a)所示。

为了防止输出电压过大,可利用稳压管来保护,将两个稳压管反向串联,把输出电压限制在 $(U_Z + U_D)$ 的范围内,其中, $U_Z$ 是稳压管的稳定电压, $U_D$ 是它的正向压降,如图 5-16(b)所示。

为了防止因电源极性接反而损坏运放,可分别在正、负两路电源和运放电源端之间串入二极管进行保护,如图 5-16(c)所示。

## 3. 调零

由于运算放大器内部管子的参数不可能完全对称,所以当输入信号为零时,仍有输出信号,为此,在使用时要外接调零电路,图 5-17 为  $\mu A741$  的调零电路。

有时可能碰到运放无法调零的异常现象,产生该现象的原因有:调零电位器  $R_W$  不起作用;调零电路接线有误;反馈极性接错或负反馈开环;存在虚焊点;运放已损坏等。这时,应仔细分析原因并及时排除故障。

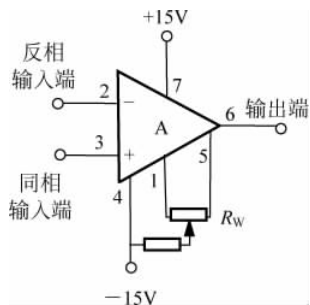


图 5-17  $\mu A741$  的调零电路

## 4. 消振

由于运算放大器内部管子的极间电容和其他寄生电容的影响,很容易产生自激振荡,破坏正常工作。为此,在使用时要注意消振。通常是外接  $RC$  消振电路或消振电容,用它来破坏产生自激振荡的条件。是否已消振,可将输入端接“地”,用示波器观察输出有无振荡波形。目前,由于集成工艺水平的提高,运算放大器内部已有消振元件,无须外部消振。

## 5.5 用 Multisim 分析差动放大电路

**【例 5-1】** 差动放大电路如图 5-18 所示, $T_1$ 、 $T_2$  管均用 2N2222,  $\beta_1 = \beta_2 = 50$ ,其他参数按默认值。试用 Multisim 分析该电路:

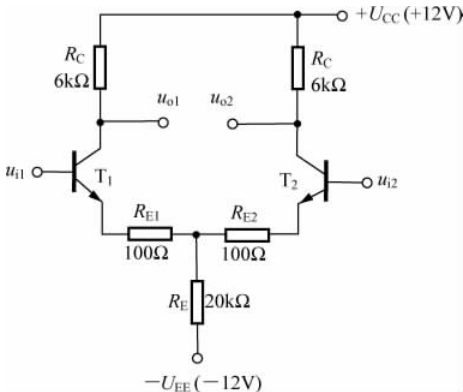
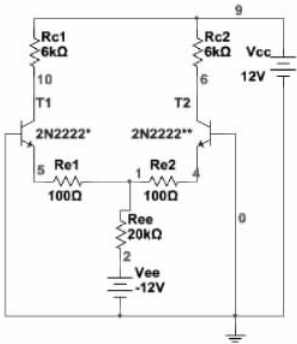


图 5-18 例 5-1 的图

- (1) 求静态工作点；
- (2) 仿真  $R_{E1} = R_{E2} = 0$  和  $R_{E1} = R_{E2} = 300\Omega$  时的电压传输特性曲线；
- (3) 若输入信号是差模信号，分别求出双端输出时的差模电压增益  $A_{ud}$  和单端输出时的差模电压增益  $A_{ud1}$ ；
- (4) 若输入信号是共模信号，分别求出双端输出时的共模电压增益  $A_{uc}$  和单端输出时的共模电压增益  $A_{uc1}$ 。

**【解】** (1) 静态时，输入信号接地，如图 5-19(a)所示。作直流工作点分析，结果如图 5-19(b)所示，由图可得静态时三极管的集电极电位约为 10.32V，发射极电位约为 -584.79mV。



(a)

| DC Operating Point Analysis |                       |  |
|-----------------------------|-----------------------|--|
| Variable                    | Operating point value |  |
| 1 V(1)                      | -613.25191 m          |  |
| 2 V(10)                     | 10.31668              |  |
| 3 V(4)                      | -584.78504 m          |  |
| 4 V(5)                      | -584.78504 m          |  |
| 5 V(6)                      | 10.31668              |  |

(b)

图 5-19 例 5-1 图解(1)

(2)  $R_{E1} = R_{E2} = 0$  时，仿真电压传输特性曲线的电路及结果如图 5-20 所示，其中，图 5-20(a)、(b)分别为  $T_1$ 、 $T_2$  管的仿真电路，图 5-20(c)、(d)分别为  $T_1$ 、 $T_2$  管的电压传输特性曲线。

$R_{E1} = R_{E2} = 300\Omega$  时，仿真电压传输特性曲线的电路与图 5-20(a)、(b)类似， $T_1$ 、 $T_2$  管的电压传输特性曲线分别如图 5-20(e)、(f)所示。

比较图 5-20(e)、(f)和图 5-20(c)、(d)不难看出，增大差分对管发射极电阻  $R_E$  的值，可扩大差动放大电路的线性输入范围。

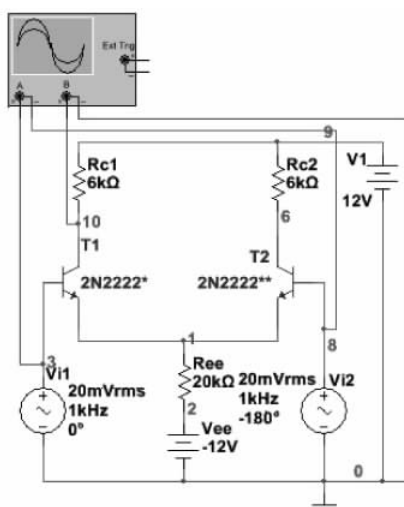
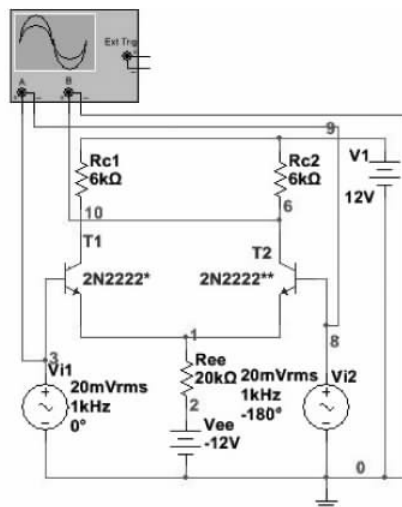
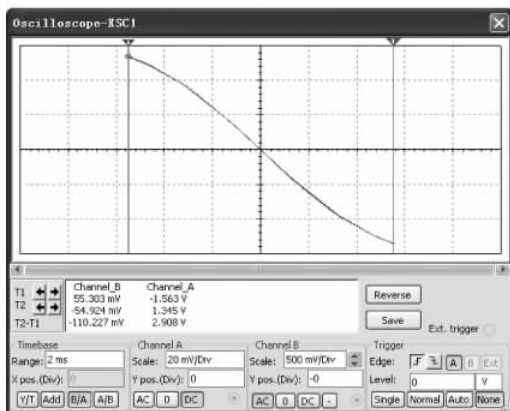
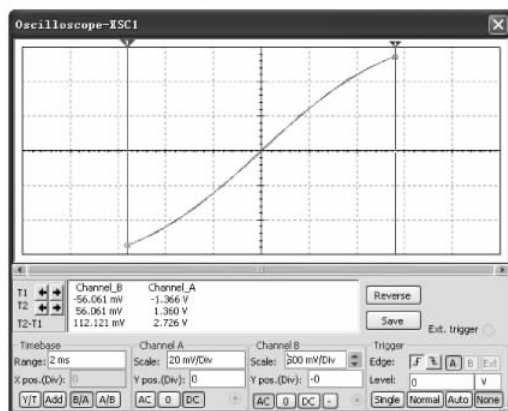
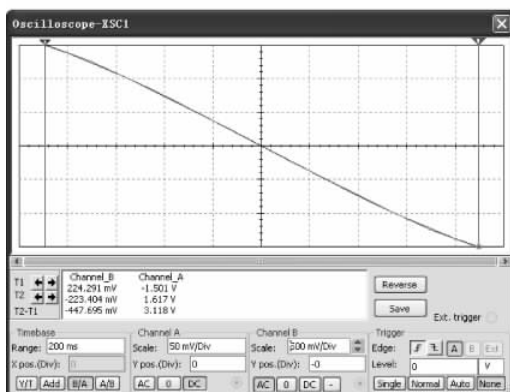
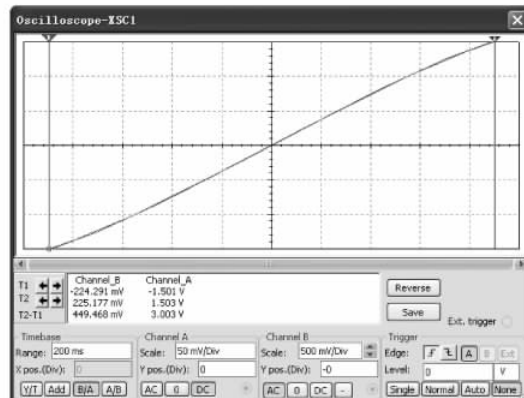

 (a)  $u_{id}-u_{o1}$  特性测试电路

 (b)  $u_{id}-u_{o2}$  特性测试电路

 (c)  $R_{E1}=R_{E2}=0$  时的  $u_{id}-u_{o1}$  曲线

 (d)  $R_{E1}=R_{E2}=0$  时的  $u_{id}-u_{o2}$  曲线

 (e)  $R_{E1}=R_{E2}=300\Omega$  时的  $u_{id}-u_{o1}$  曲线

 (f)  $R_{E1}=R_{E2}=300\Omega$  时的  $u_{id}-u_{o2}$  曲线

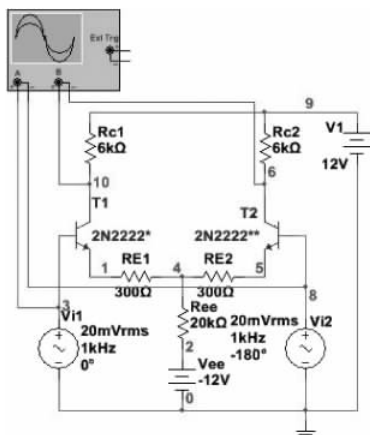
图 5-20 例 5-1 图解(2)

(3) 差模输入且  $R_{E1} = R_{E2} = 300\Omega$  时, 测试双端输出差模电压增益的电路如图 5-21(a) 所示, 相应的示波器测试结果如图 5-21(b) 所示, 由图 5-21(b) 可得双端输出差模电压增益为

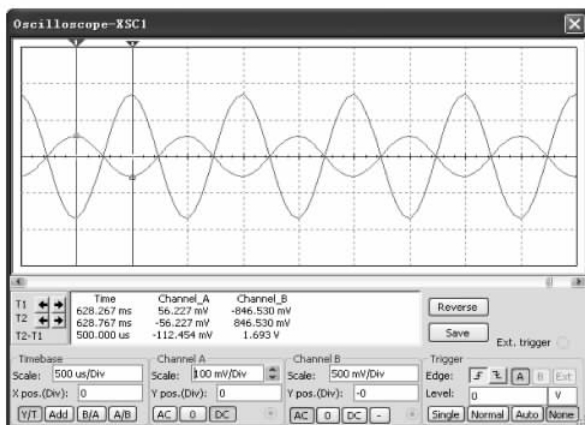
$$A_{ud} = 1.693\text{V} / -112.454\text{mV} \approx -15.06$$

测试单端输出差模电压增益的电路如图 5-21(c) 所示, 相应的示波器测试结果如图 5-21(d) 所示, 由图 5-21(d) 可得单端输出差模电压增益为

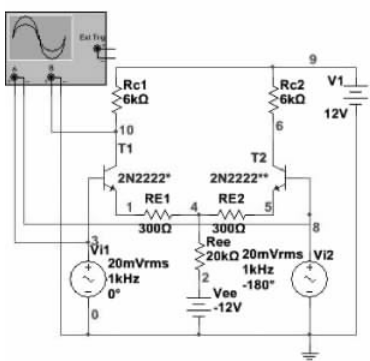
$$A_{ud1} = 846.53\text{mV} / -112.454\text{mV} \approx -7.53$$



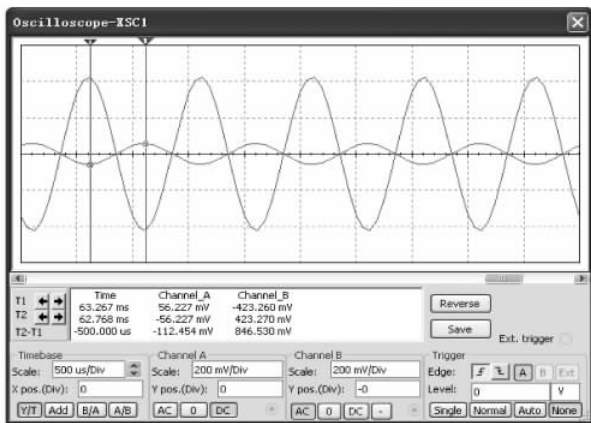
(a) 双端输出差模电压增益测试电路



(b) 双端输出差模电压增益测试结果



(c) 单端输出差模电压增益测试电路



(d) 单端输出差模电压增益测试结果

图 5-21 例 5-1 图解(3)

可见, 差动放大电路单端输出时的差模增益近似为双端输出时的一半。

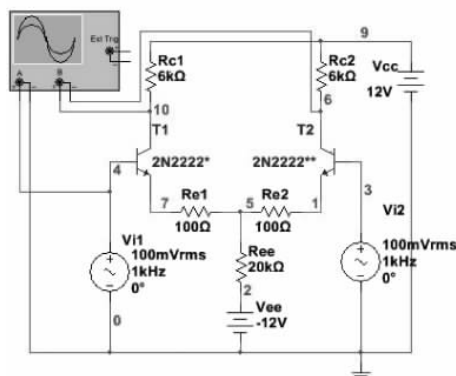
(4) 输入共模信号且  $R_{E1} = R_{E2} = 100\Omega$  时, 测试双端输出共模电压增益的电路如图 5-22(a) 所示, 相应的示波器测试结果如图 5-22(b) 所示, 由图 5-22(b) 可得双端输出共模电压增益为

$$A_{uc} = -11.321\text{pV} / 281.135\text{mV} \approx 4 \times 10^{-11}$$

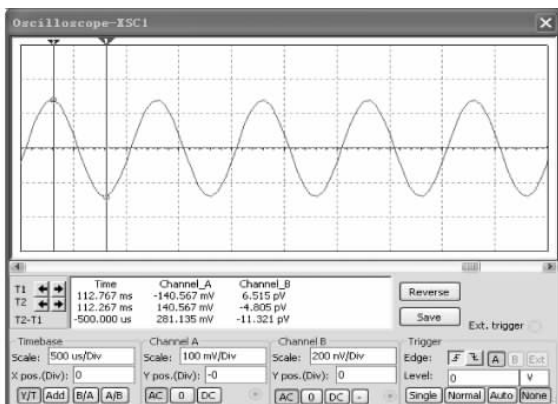
测试单端输出共模电压增益的电路如图 5-22(c) 所示, 相应的示波器测试结果如图 5-22(d) 所示, 由图 5-22(d) 可得单端输出差模电压增益为

$$A_{uc1} = -41.024\text{mV} / 281.135\text{mV} \approx 0.146$$

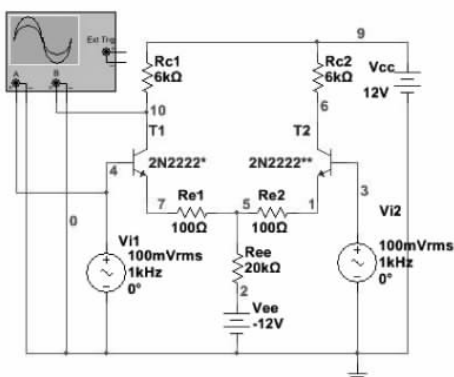
可见, 差动放大电路由双端输出改为单端输出时, 抗共模干扰能力减小。



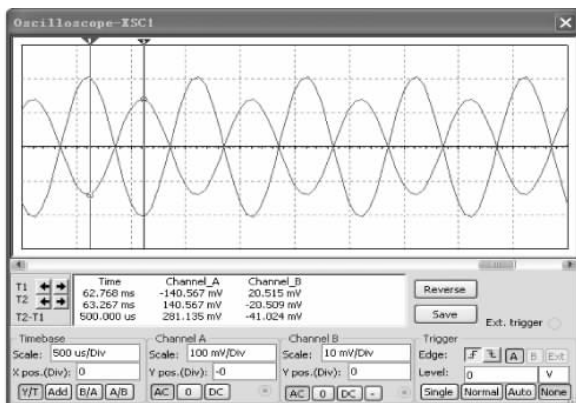
(a) 双端输出共模电压增益测试电路



(b) 双端输出共模电压增益测试结果



(c) 单端输出共模电压增益测试电路



(d) 单端输出共模电压增益测试结果

图 5-22 例 5-1 图解(4)

## 思考题与习题

### 【5-1】 填空。

- (1) 电流源在集成电路中的主要作用是\_\_\_\_\_。
- (2) 差动放大电路的  $A_{ud}$  愈\_\_\_\_\_愈好, 而  $A_{uc}$  愈\_\_\_\_\_愈好; 共模抑制比  $K_{CMR}$  是\_\_\_\_\_之比,  $K_{CMR}$  越大, 表明电路的\_\_\_\_\_能力越强。
- (3) 带  $R_E$  的(长尾式)差动放大电路中,  $R_E$  越大, 则  $A_{ud}$  \_\_\_\_\_,  $A_{uc}$  \_\_\_\_\_,  $K_{CMR}$  \_\_\_\_\_。
- (4) 差动放大电路由双端输出改为单端输出, 其  $A_{ud}$  \_\_\_\_\_,  $A_{uc}$  \_\_\_\_\_,  $K_{CMR}$  \_\_\_\_\_。
- (5) 差动放大电路由双端输入改为单端输入, 其空载差模电压增益\_\_\_\_\_。
- (6) 集成运放内部一般包括四个组成部分, 它们是\_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_和\_\_\_\_\_。集成运放的输入级几乎都采用\_\_\_\_\_电路, 其目的是\_\_\_\_\_; 输出级通常采用\_\_\_\_\_电路, 其目的是\_\_\_\_\_。
- (7) 集成运放的两个输入端分别为\_\_\_\_\_和\_\_\_\_\_, 其含义是\_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_。

- (8) 输入失调电压  $U_{I0}$  是 \_\_\_\_\_,  $U_{I0}$  越大, 表示运放输入级的对称程度越 \_\_\_\_\_。
- (9) 理想运放的主要技术指标为 \_\_\_\_\_。
- (10) 理想运放工作在线性区和饱和区的重要结论分别是: 线性区 \_\_\_\_\_; 饱和区 \_\_\_\_\_。

【5-2】 电流源电路如图 5-23 所示, 设各三极管特性一致,  $|U_{BE}| = 0.7V$ 。

- (1) 若  $T_3$ 、 $T_4$  管的  $\beta = 2$ , 试求  $I_{C4}$ ;
- (2) 若要求  $I_{C1} = 26\mu A$ , 则  $R_1$  为多少?

【5-3】 由电流源组成的电流放大电路如图 5-24 所示, 试估算电流放大倍数  $A_i = I_o/I_i = ?$

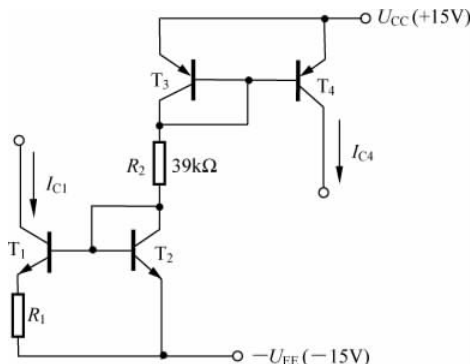


图 5-23 题 5-2 的图

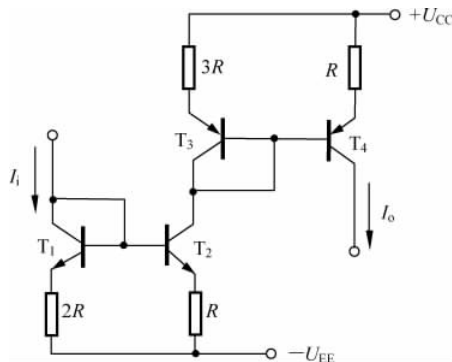


图 5-24 题 5-3 的图

【5-4】 差动放大电路如图 5-25 所示, 已知  $U_{CC} = U_{EE} = 12V$ ,  $\beta_1 = \beta_2 = 50$ ,  $R_{C1} = R_{C2} = 3k\Omega$ ,  $R_{B1} = R_{B2} = 10k\Omega$ ,  $R_E = 5.6k\Omega$ ,  $R_L = 20k\Omega$ 。求:

- (1) 静态工作点;
- (2) 电压放大倍数;
- (3) 输入、输出电阻。

【5-5】 差动放大电路如图 5-26 所示, 已知  $\beta = 100$ ,  $U_{BE} = 0.7V$ ,  $r_{bb}$  影响可忽略, 试求:

- (1) 各管的静态工作点  $I_{CQ}$  和  $U_{CEQ}$ ;
- (2) 最大差模输入电压  $U_{idmax}$  (设管子发射结反向击穿电压  $U_{BE(CBR)} = 6V$ );
- (3) 最大正向共模输入电压  $U_{icmax}$ , 最大负向共模输入电压  $U_{icmin}$ 。

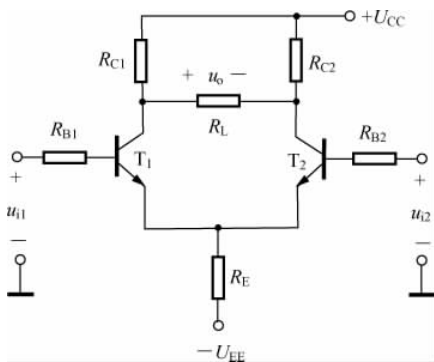


图 5-25 题 5-4 的图

【5-6】 差动放大电路如图 5-27 所示, 试求:

- (1)  $u_o$  的直流电位  $U_{OQ}$ ;
- (2) 差模电压增益  $A_u = \frac{u_o}{u_{i1} - u_{i2}}$ 。

【5-7】 电路如图 5-28 所示,  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  均为硅管,  $\beta_1 = \beta_2 = 50$ ,  $\beta_3 = 80$ , 静态时输出端电压为零, 试求:

- (1) 各管的静态电流、管压降及  $R_{E2}$  的阻值;
- (2)  $u_i = 5mV$  时的  $U_o$  值。

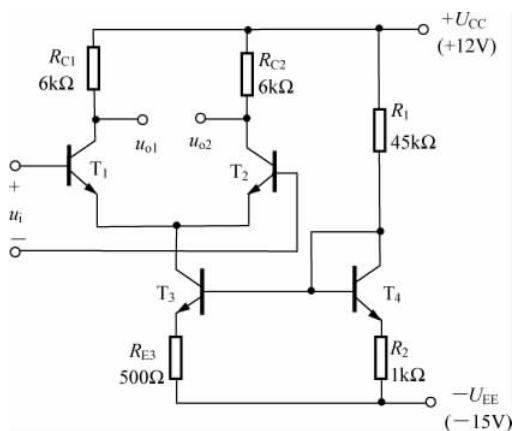


图 5-26 题 5-5 的图

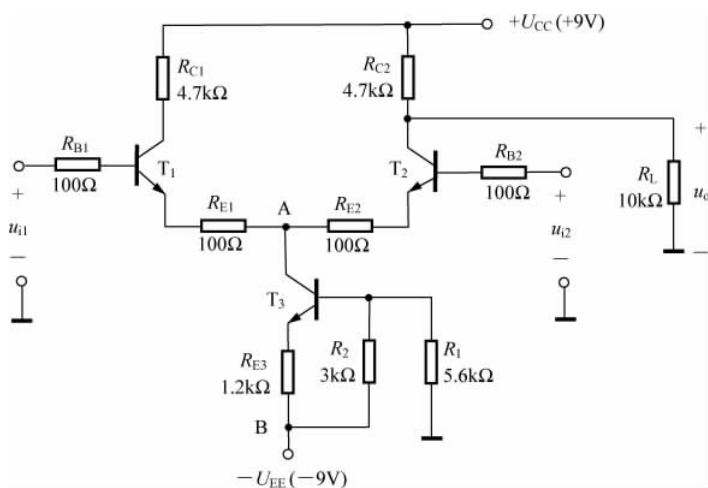


图 5-27 题 5-6 的图

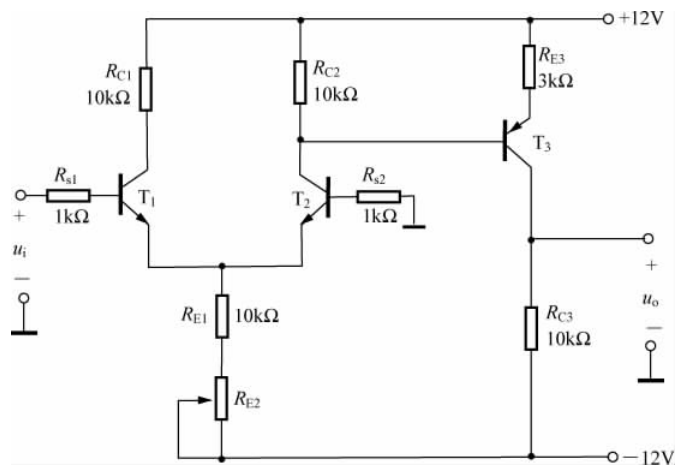


图 5-28 题 5-7 的图

【5-8】 集成运放 5G23 的电路原理图如图 5-29 所示。

- (1) 简要叙述电路的组成原理；
- (2) 说明二极管  $D_1$  的作用；
- (3) 判断 2、3 端哪个是同相输入端，哪个是反相输入端。

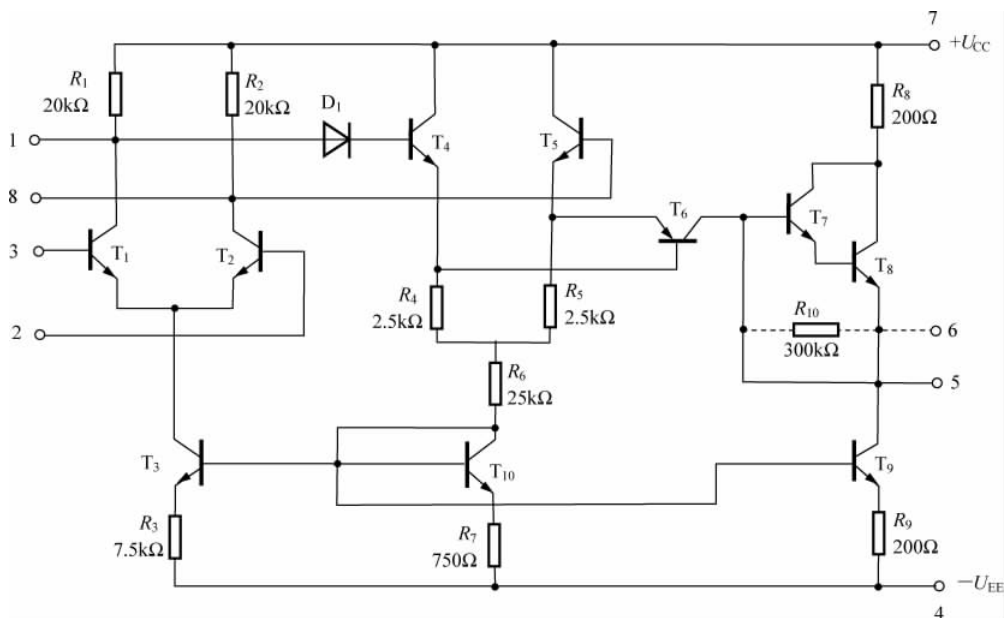


图 5-29 题 5-8 的图

【5-9】 低功耗型集成运放 LM324 的简化原理电路如图 5-30 所示。试说明：

- (1) 输入级、中间级和输出级的电路形式和特点；
- (2) 电路中  $T_8$ 、 $T_9$  和电流源  $I_{o1}$ 、 $I_{o2}$ 、 $I_{o3}$  各起什么作用？

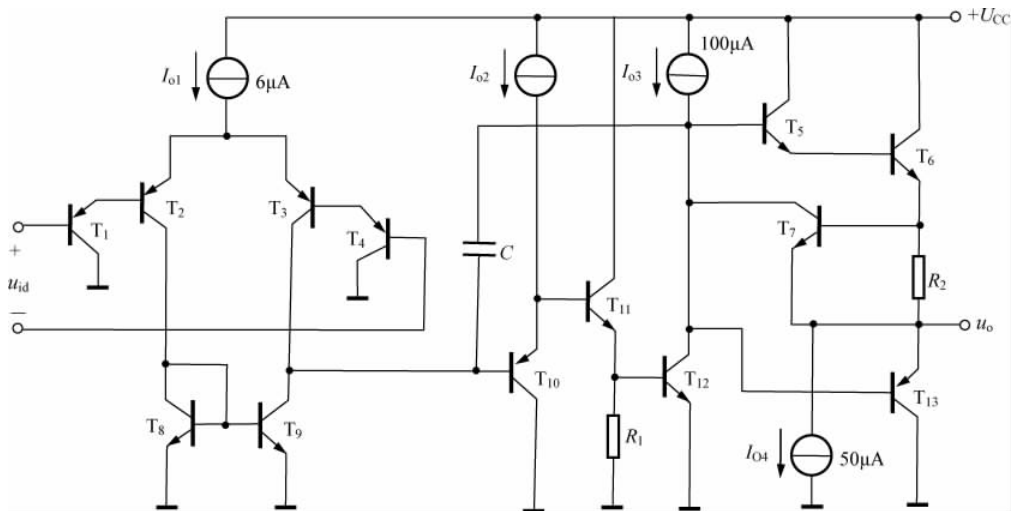


图 5-30 题 5-9 的图