

模拟集成电路基础

5.1 电流源电路

在分立元件组成的放大电路中,都有相应的偏置电路为放大器提供合适的静态工作点,从而保证放大电路处于放大状态。这些偏置电路是由电阻和直流电源组成的。在集成电路中制造电阻比较困难,特别是阻值大的电阻,而制造三极管非常方便,所以在集成电路中用三极管电流源电路作偏置电路和负载电阻(而恒流源可以代替大电阻)。将三极管的基极和集电极短接构成二极管、稳压管。

5.1.1 镜像电流源

镜像电流源如图 5-1 所示,从仿真实验中看出

$$\begin{aligned} I_{C2} \approx I_{REF} &= \frac{V_{CC} - U_{BE1}}{R_1} = \frac{5 - 0.7}{5} \\ &= 0.86\text{mA} \end{aligned}$$

由于输出恒流 I_{C2} 和基准电流 I_{REF} 基本相等,它们之间如同是镜像的关系。

5.1.2 比例电流源

图 5-2 为比例电流源,从仿真实验中看出

5

$$I_{C2} \approx \frac{R_2}{R_3} I_{REF} = \frac{1}{3} \times 0.72 = 0.24 \text{mA}$$

即 I_{C2} 的大小和两个三极管发射极电阻值成反比,故称为比例电流源。

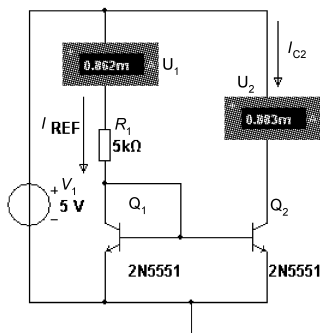


图 5-1 镜像电流源

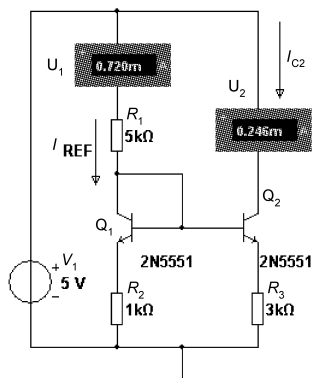


图 5-2 比例电流源

5.1.3 微电流源

如果需要的输出电流很小,如微安级甚至更小,对于镜像电流源及比例电流源而言,在电源电压一定的情况下, R 值需要选得很大,这在集成电路中是应该避免的。在比例电流源电路中,将 Q_1 管的射极电阻 R_2 变为 0Ω ,即可获得一个比基准电流 I_{REF} 小很多的微电流源,适用于微功耗的集成电路。微电流源如图 5-3 所示,图中基准电流 $I_{REF} =$

$$\frac{V_{CC} - U_{BE}}{R_1}, I_{C2} \approx \frac{U_T}{R_c} \ln \frac{I_{REF}}{I_{C2}}。$$

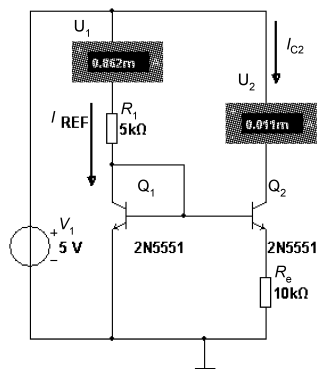


图 5-3 微电流源

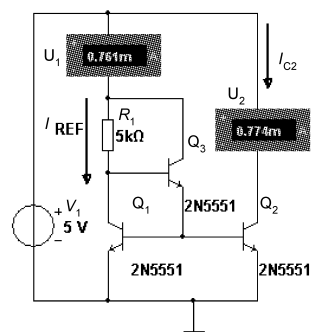


图 5-4 改进型电流源

5.1.4 改进型电流源

上述 3 种基本电流源电路中,要求三极管的 β 值要足够大,否则镜像电流和基准电流的偏差会变大。图 5-4 为改进型电流源电路,图中要求各三极管参数都相同, $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3$

$=\beta$, 输出电流 I_{C2} 为:

$$I_{C2} = \frac{I_{REF}}{1 + \frac{2}{(2+\beta)\beta}} \approx I_{REF}$$

仿真结果可以看出,和基本镜像电流源比较,在电路参数相同的情况下,改进型电流源可以使输出电流 I_{C2} 与基准电流 I_{REF} 更接近镜像关系。

5.1.5 威尔逊电流源

威尔逊电流源也是一种改进型电流源,如图 5-5 所示。图中 3 个三极管特性相同, $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta$, 其输出电流 I_{C3} 为:

$$I_{C3} = \left(1 - \frac{2}{\beta^2 + 2\beta + 2}\right) I_{REF} \approx I_{REF}$$

$$I_{REF} = \frac{V_{CC} - U_{BE3} - U_{BE1}}{R_1}$$

从仿真结果看,输出电流 I_{C3} 与基准电流 I_{REF} 之间偏差很小。

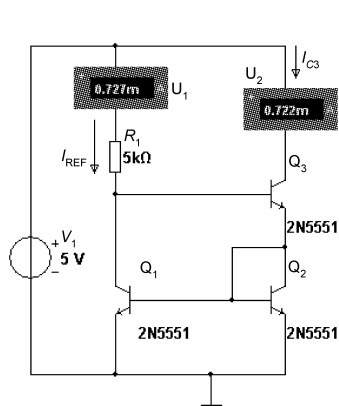


图 5-5 威尔逊电流源

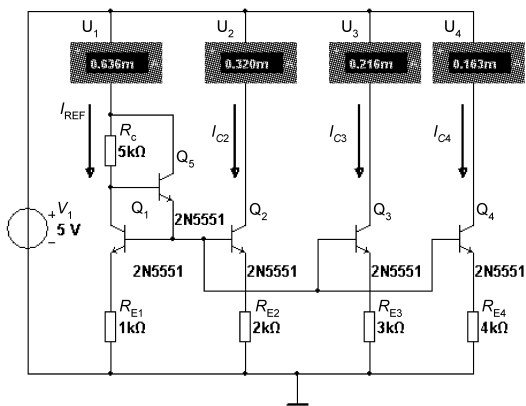


图 5-6 多路电流源

5.1.6 多路电流源

集成放大电路是一个多级放大器,因而需要多路电流源分别给各级提供合适的偏置电流。一个具有 3 路输出的多路比例电流源如图 5-6 所示,各三极管参数完全相同,各输出电流如下:

$$I_{C2} \approx I_{E2} = \frac{I_{REF} R_{e1}}{R_{e2}}$$

$$I_{C3} \approx I_{E3} = \frac{I_{REF} R_{e1}}{R_{e3}}$$

$$I_{C4} \approx I_{E4} = \frac{I_{REF} R_{e1}}{R_{e2}}$$

5.2 差分放大电路

5.2.1 长尾式差分放大电路的静态工作点

图 5-7 所示为长尾式差分放大电路,它由两个完全对称的共发射极电路组成, R_E 是公用发射极电阻,又称为长尾电阻。采用双电源供电。输入信号从两个三极管基极输入,称为双端输入,输出信号从两个集电极输出,称为双端输出,或从任意一个集电极输出,称为单端输出。

若输入信号为 0,放大电路处于静态。此时,两个三极管基极对地电位为 0V,由于处于放大状态的三极管发射结电压 $U_{BE} \approx 0.7V$,所以发射极电位 $U_E = -0.7V$ 。

$$I_E = \frac{V_2 - U_{BE}}{R_E} = \frac{12 - 0.7}{5} = 2.26mA$$

$$I_{C1} = I_{C2} \approx \frac{1}{2} I_E = 1.13mA$$

$$U_{C1} = U_{C2} = V_1 - I_{C1} R_{C1} = 12 - 1.13 \times 2 = 9.74V$$

静态工作点计算结果和图 5-7 仿真测量结果基本一致。

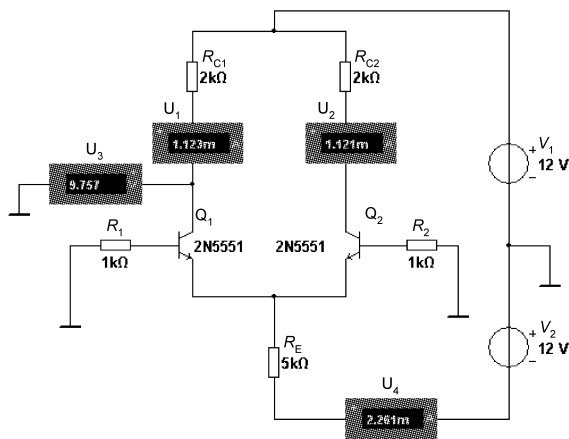


图 5-7 静态工作点的测量

5.2.2 差分放大器输入电压为零时的情况

图 5-8 所示为输入为零时的情况,这时两个三极管的集电极电位相等,输出应该为 0V。如果差分电路不是完全对称,当输入信号为零时,输出电压将不为零,这种现象称为差分放大电路的失调。

5.2.3 差分放大器的差模特性

当差分放大电路的两个输入端加上大小相等、极性相反的信号时,称为差模输入方式。输入差模信号的电路如图 5-9 和图 5-10 所示,在差模信号的作用下,两管集电极电

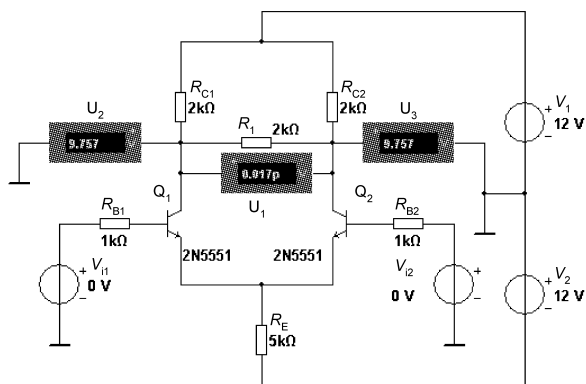


图 5-8 差分电路的失调

位变化相反,便产生了输出电压,输出电压等于两个集电极电位之差。

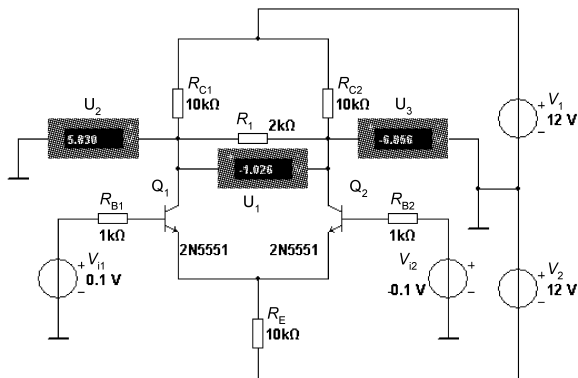


图 5-9 输入差模信号电路(1)

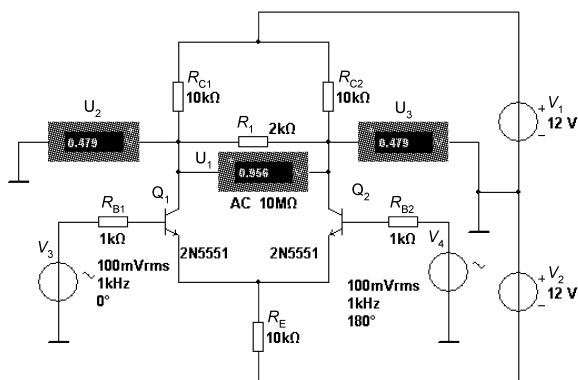


图 5-10 输入差模信号电路(2)

5.2.4 差分放大器的共模特性

在差分放大电路两个输入端加上大小相等、极性相同的信号,称为共模输入。图 5-11

和图 5-12 所示的共模信号分别为直流和交流信号。由于差分放大电路两管电路对称,两管集电极电位的变化相同,理想情况下输出电压为零。双端共模输出电压与共模输入电压 V_i 之比,定义为差分放大电路的共模电压放大倍数,完全对称的差分电路的共模电压放大倍数应为零。

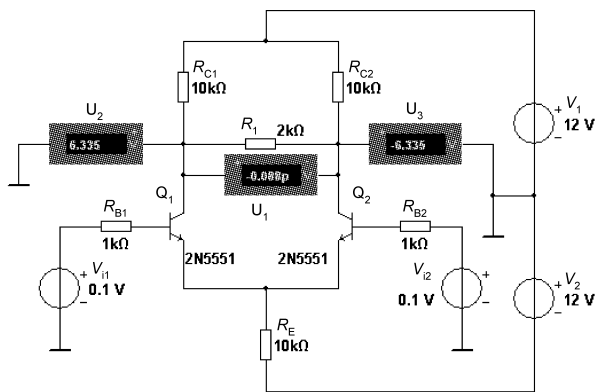


图 5-11 输入共模信号电路(1)

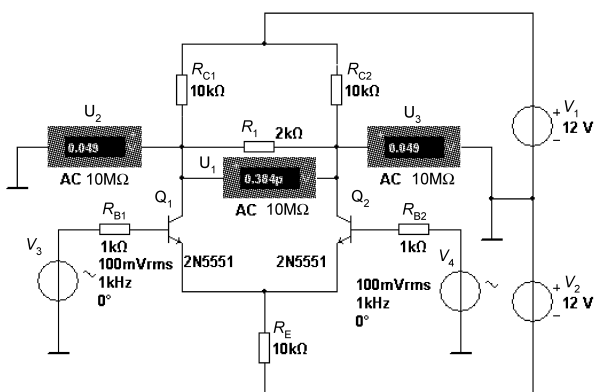


图 5-12 输入共模信号电路(2)

现实中温度变化或电源电压波动对于差动放大电路来说,相当于在两个三极管的基极输入了共模信号。差分放大电路对称性越好,它对共模信号的抑制能力就越强。图 5-10 和图 5-11 所示为共模信号输入时的仿真状态。由于放大电路对称性好,所以两个电路的共模输出电压都等于 0。

5.2.5 典型差动放大电路

典型长尾式差动放大电路如图 5-13 所示,对比图 5-7,只是在两个三极管发射极上接了一个调零电位器。因为在实际电路中,差动电路两边不可能作到完全对称,当输入信号为零时,输出电压可能不等于零,这时可以调节 R_P 使静态时的输出电压等于零。

图 5-14 为恒流源差动放大电路,很明显是用一个三极管恒流源电路取代了公共发射极电阻 R_E 。公共射极电阻 R_E 对差模信号无电流负反馈作用,对共模信号产生 $2R_E$ 电流

负反馈作用,有效提高了差动放大电路的共模抑制比, R_E 越大越好。但 R_E 阻值过大,在 R_E 上产生的直流压降增大,使得差动放大电路输出动态范围减小。而电流源具有直流电阻小、交流电阻大的特点,用它代替 R_E ,既可提高共模抑制比,又不减小输出动态范围。

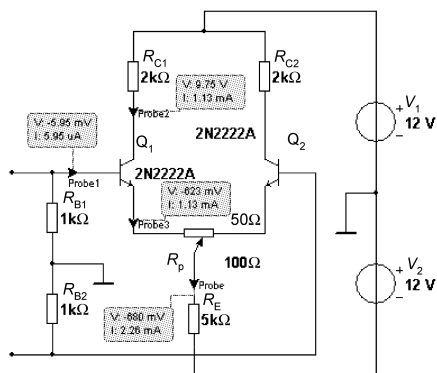


图 5-13 长尾式差动放大电路

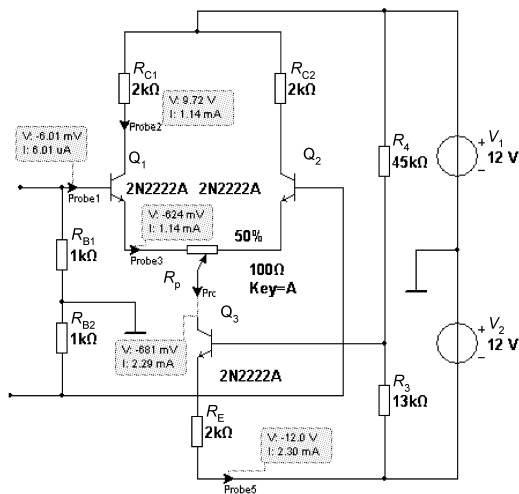


图 5-14 恒流源差动放大电路

现在对两个差动放大器静态工作点进行仿真分析,在主要的测试点放置测量探针。长尾式差动放大电路测量结果: $I_{BQ} = 5.95 \mu A$, $I_{CQ} = 1.13 mA$, $U_{CEQ} \approx 10.37 V$; 恒流源差动放大电路测量结果: $I_{BQ} = 6 \mu A$, $I_{CQ} = 1.14 mA$, $U_{CEQ} = 10.34 V$ 。

虽然两个电路结构不同,但静态工作点数据基本相同。

5.2.6 差模放大倍数的测量

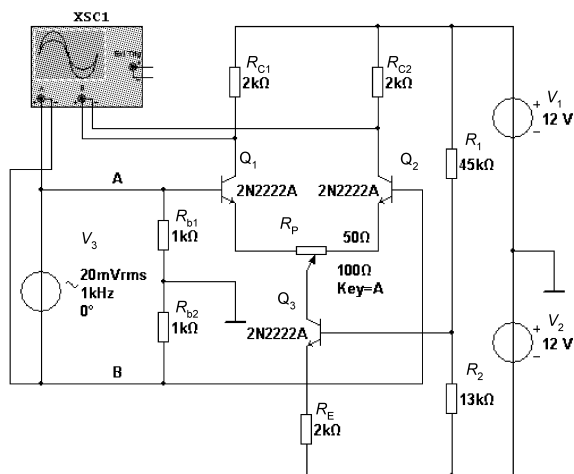
1. 双端输入、双端输出 ($R_L = \infty$)

在图 5-13(a)中,在恒流源差动放大电路两输入端接入差模信号 $U_{i1} = -U_{i2} = 10 mV$,即输入差模信号 $U_{id} = U_{i1} - U_{i2} = 20 mV$ 。注意此时输入信号的幅度大小应保证输出信号不失真,用示波器观察电路的输入波和输出波形。如图 5-15(b)所示,在示波器中拖动读数指针,得出双端输入、双端输出时的差模放大倍数为:

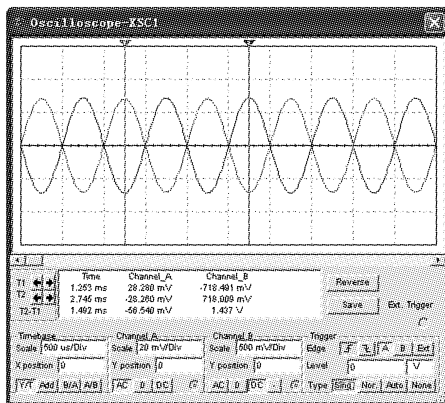
$$A_{vd} = -\frac{718}{28.28} \approx -25.38$$

2. 双端输入、单端输出 ($R_L = \infty$)

图 5-16(a)为差分放大电路单端输出电路,输出电压从 Q_1 的集电极或 Q_2 的集电极输出,示波器 A 通道的接法和图 5-15(a)相同,但示波器 B 通道的地线必须接地,这样通过 B 通道测量到的才是单端输出信号。如果从 Q_2 的集电极取出差模信号,则输入波形和输出波形的相位相同(从 Q_1 的集电极输出,输入和输出相位相反)。这种接法常用来将差模信号转换为单端输出信号。根据图 5-16(b),单端输出时的差模放大倍数为:

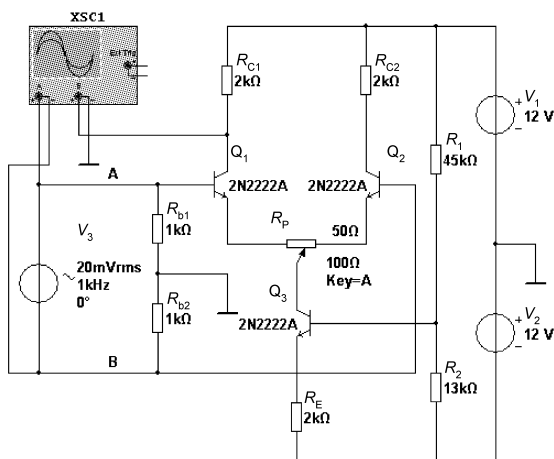


(a) 电路图

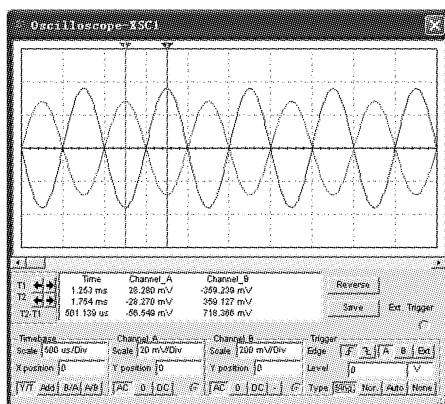


(b) 输入与输出电压

图 5-15 双端输出的电压增益



(a) 电路图



(b) 输入与输出电压波形

图 5-16 单端输出的电压增益

$$A_{vd} = -\frac{358.88}{28.28} \approx -12.69$$

由此证明了,当恒流源差动放大电路在空载的情况下,双端输出时的差模放大倍数是单端输出时的两倍。如果在图 5-15(a)和图 5-16(a)中接上相同的负载电阻 R_L ,则双端输出时的差模电压放大倍数小于单端输出时的两倍。原因是:双端输出时,交流负载电阻 $R'_L = R_C // (R_L/2)$;单端输出时的交流负载电阻 $R'_L = R_C // R_L$ 。

5.2.7 共模电压放大倍数的测量($R_L = \infty$)

1. 双端输出的共模电压放大倍数

在差动放大电路两个输入端输入共模信号 $U_{i1} = U_{i2} = 10\text{mV}$ (大小相同、极性相同的

信号)。此时示波器测量共模输入的 A 通道“+”接线柱接 U_{i1} 或 U_{i2} ，“-”接线柱接地，B 通道接 Q_1 、 Q_2 的集电极，如图 5-17 所示。

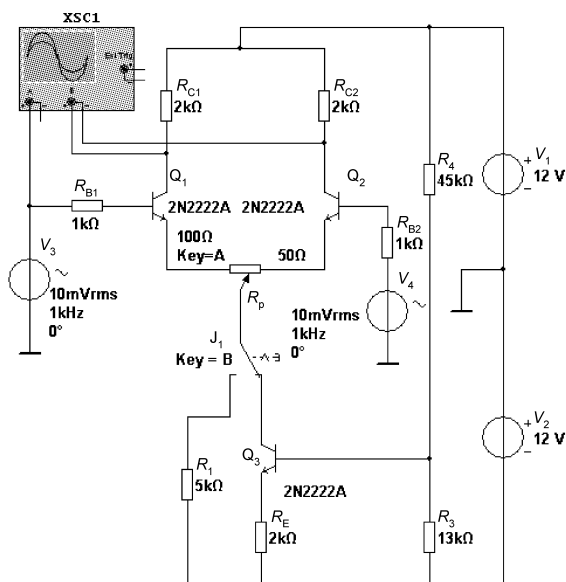


图 5-17 双端输出共模电压的测量

首先将开关 J_1 切换到恒流源差动放大器状态，无论是双端输出或单端输出，共模输出电压 U_{OC} 均几乎为零，因此共模上电压放大倍数 $A_{vc}=0$ ，共模抑制比 $K_{CMR}=\infty$ 。

然后将开关 J_1 切换到 R_E ，成为长尾式差动放大电路。在双端输出情况下，共模输出电压为零，由于电路对称性好，所以共模电压放大倍数 $A_{vc}=0$ ，共模抑制比 $K_{CMR}=\infty$ 。

2. 单端输出的共模电压放大倍数($R_L=\infty$)

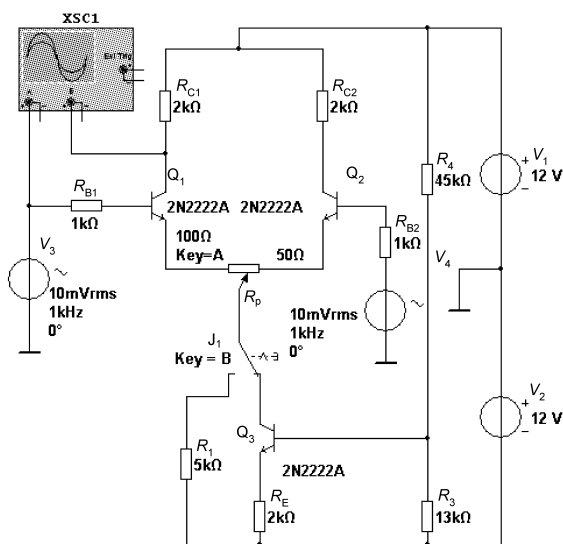
图 5-18 为单端输出运算放大器，输入信号大小和图 5-17 相同。在单端输出情况下，示波器 B 通道的“+”接线柱只能接 Q_1 的集电极或 Q_2 的集电极，“-”接线柱必须接地，即输出信号只能从任一三极管集电极输出。首先测量长尾式差分放大器的共模输出电压，结果共模输出电压为 2.778mV，如图 5-18(b) 所示。将测量的数据计算代入公式计算：

$$A_{vc\text{单}} = \frac{-2.778}{14.14} \approx -0.196 \text{ (共模电压放大倍数)}$$

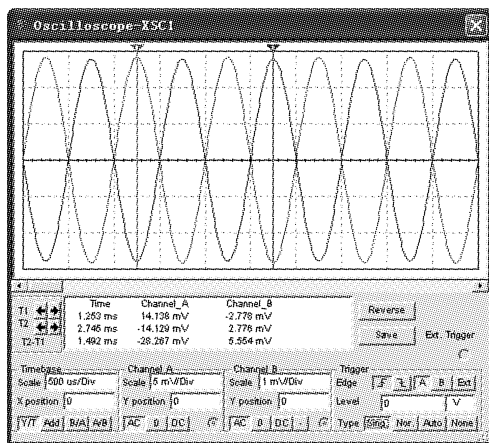
$$K_{CMR} = \left| \frac{A_{vd\text{单}}}{A_{vc\text{单}}} \right| = \left| \frac{-12.69}{-0.196} \right| \approx 64.7 \text{ (共模抑制比)}$$

经计算得出长尾式差动放大器的共模抑制比为 64.7。理论上长尾式差动放大器单端输出时共模电压放大倍数 $A_{vc} \approx \frac{(R_C // R_L)}{2R_C}$ ，这里 $R_L=\infty$ ，所以 $A_{vc} \approx -\frac{2}{2 \times 5} = -0.2$ 。仿真测试和理论公式计算结果基本相同。

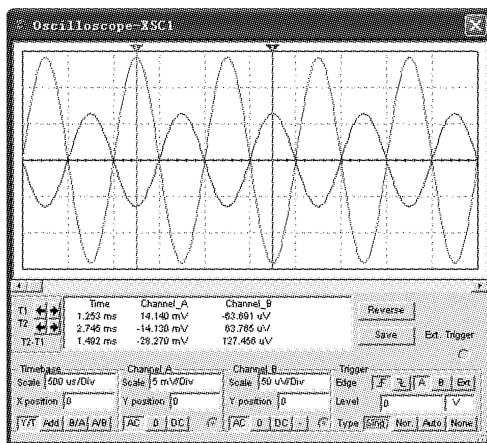
接着将开关切换到恒流源差动放大器，再次测量共模输出电压，结果如图 5-18(c) 所示。但输出共模电压只有 $63.765 \mu\text{V}$ 。



(a) 电路图



(b) 长尾式差动放大器



(c) 恒流源差动放大器

图 5-18 单端输出共模电压的测量

共模电压放大倍数 $A_{vc} = 63.765 \mu\text{V} / 14.14 \text{mV} = 0.0045$

为了提高电路对共模信号的抑制能力,常常采用直流电阻小、交流电阻大的电流源代替长尾式差动放大器中的 R_E ,其共模抑制比可提高一两个数量级。

通过上述仿真及测量,可得出如下结论:

(1) 差分放大电路对差模信号有放大作用,其差模电压放大倍数较大,且与输出方式有关。在空载条件下,双端输出的差模电压放大倍数为单端输出时的两倍。

(2) 差分放大电路对共模信号有抑制作用,其共模电压放大倍数较小,同样与输出方式有关。双端输出时共模电压输出为零,故共模电压放大倍数也为零,共模抑制比趋于无穷大。单端输出时共模电压输出不再为零,但一般比较小,共模电压放大倍数较小,共模抑制比较大。