

## 扩音机

## 【本章重点】

1. 扩音机电路组成及各部分工作原理；
2. 集成电路简介和集成运算放大器定义、组成、主要参数、特点及工作原理；
3. 差分放大电路抑制零漂原理及  $Q$ 、 $A_{ud}$ 、 $A_{uc}$ 、 $R_i$ 、 $R_o$ 、 $K_{CMR}$  的计算；
4. 电压放大器的加载效应及集成运算放大器作为理想电压放大器的条件；
5. 集成运算放大器电路的线性应用和电阻的选择。

## 【本章难点】

1. 差分放大电路的计算；
2. 集成运算放大器工作的理想条件；
3. 集成运算放大器的线性应用。

## 3.1 扩音机电路概述

## 3.1.1 扩音机的组成

扩音机在专业上称为功率放大器,简称功放,是音响系统中最基本的设备。它的作用是将来自信号源的微弱电信号进行放大,产生足够大的电流以驱动扬声器发出声音。其组成框图如图 3-1-1 所示。

## 3.1.2 扩音机电路各部分作用

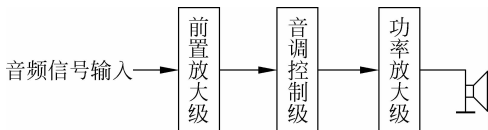


图 3-1-1 助听器组成框图

图 3-1-2 所示为常见的扩音机电路。该电路由前置放大级、音调控制级和功率放大级三部分组成。

## 1. 前置放大级

前置放大级也就是输入放大电路,它主要是对输入信号起到缓冲隔离和放大作用。在图 3-1-2 所示前置放大级电路中,采用高性能集成运算放大器 LM741 构成同相输入放大电路,其特点是:增益控制简单、噪声小、电路简洁,安装调试方便,并且输入阻抗高、输出阻抗低。

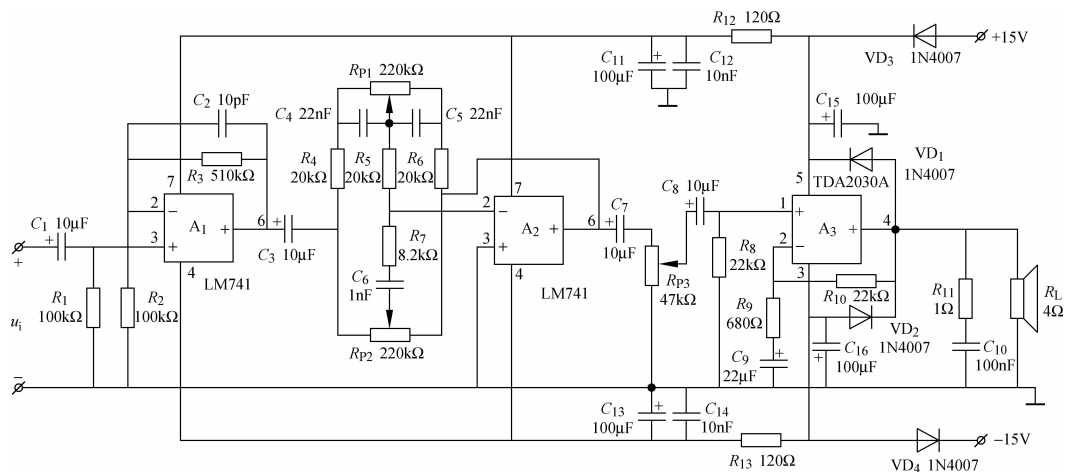


图 3-1-2 常见的扩音机电路原理图

## 2. 音调控制级

我们知道,一般对于语言和音乐,在重放音时所需的频率范围是不同的,它们对放大电路的频率响应要求就不同。另外,放音的环境条件以及每个人的听觉习惯与爱好不同,所以在扩音机电路中常常要加入音调控制电路。一般设有低音调节和高音调节两个旋钮,用来按实际要求提升或衰减高音区或低音区,以达到改善音质的作用。音调控制电路根据其在整机电路中的位置,可分为衰减式、负反馈式以及衰减负反馈混合式三种电路。在图 3-1-2 中采用 RC 型负反馈高低音调节音调控制电路, $R_{P1}$  是低音调节电位器, $R_{P2}$  是高音调节电位器。该电路调试方便,信噪比高,目前大多数普及型功率放大器都采用这种电路。

## 3. 功率放大级

功率放大级是多级放大电路的末级,通常要带一定的负载,以推动扬声器发声、电机旋转等。这就要求其输出大幅度的电压和电流,向负载提供足够大的不失真功率的电路,称为功率放大器,简称功放。在图 3-1-2 中,集成功率放大器 TDA2030A 与外围电路组成功率放大级。它是一种音频质量较好的功放集成电路,具有转换速率高,失真小,输出功率大,外围电路简单等特点。

扩音机不仅应用于音响设备中,同时广泛地用于控制系统和测量系统中。

本项目主要学习集成运算放大器的结构、性能、特点及其应用,以及差分放大电路抑制零点漂移的原理及计算等内容。

## 3.2 集成运算放大器简介

在图 3-1-2 所示的扩音机电路中,LM741 是一种高增益单片运算放大器,高共模电压范围和不存在锁定倾向,使得它非常适合作为一个电压跟随器来使用。其工作电压的高

增益和宽范围在积分器、求和放大器和通用反馈放大器中提供了优良的性能。

本节主要学习集成运算放大器的组成、原理,以及集成运算放大器的重要单元电路——差分放大电路的组成、工作原理、电路接法等内容。

### 3.2.1 集成运算放大器的组成

如图 3-2-1 所示,集成运算放大器内部电路包括差动输入级、电压放大级、输出级以及偏置电路等。

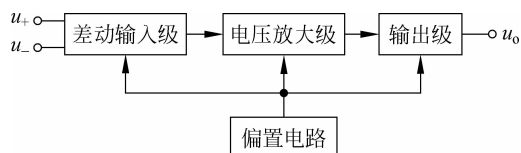


图 3-2-1 集成运算放大器内部电路框图

### 3.2.2 集成运算放大器各部分作用

#### 1. 差动输入级

差动输入级的任务是提高输入电阻和提高共模抑制比,抑制零点漂移。这对集成运算放大器的质量起关键的作用。

#### 2. 电压放大级

电压放大级采用共射放大电路,用来产生足够大的电压放大倍数,应具有较高的输入电阻。放大管一般由复合管组成,并采取措施提高集电极负载电阻。如采用恒流源代替  $R_C$ ,一般电压放大级的电压增益可达到 60dB 以上。

#### 3. 偏置电路

偏置电路为集成运放内部的恒流源提供稳定的偏置电压。

#### 4. 输出级

输出级主要是输出足够大的电流,以提高带负载能力。因此,要求该级应具有很低的输出电阻和很高的输入电阻。一般采用射极输出器的方式。

### 3.2.3 集成运算放大器的主要参数

集成运算放大器的性能可以用各种参数来表示,了解这些参数有助于正确选择和使用各种类型的集成运放。

#### 1. 开环差模电压放大倍数 $A_{uo}$

在无反馈回路的条件下,运放输出电压与输入差模电压之比,称为开环差模电压放大倍数,用  $A_{uo}$  表示。性能较好的集成运放的  $A_{uo}$  可达到 140dB 以上。

## 2. 输入失调电压 $U_{IO}$ 和输入失调电流 $I_{IO}$

输入失调主要反映运放输入级差动电路的对称性。当输入为零时,输出并不为零;若使静态时输出端为零电位,运放两个输入端之间必须外加直流补偿电压,此补偿电压称为输入失调电压,用  $U_{IO}$  表示。当输入信号为零时,放大器两个输入端的基极静态电流存在差值,必须外加直流补偿电流,此补偿电流称为输入失调电流,用  $I_{IO}$  表示。对于性能较好的集成运放,其输入失调电压低于  $1\text{mV}$ ,输入失调电流低于  $1\text{nA}$ 。

## 3. 失调的温漂

在规定的工作温度范围内, $U_{IO}$  随温度的平均变化率称为输入失调电压温漂,以  $dU_{IO}/dT$  表示。

在规定的工作温度范围内, $I_{IO}$  随温度的平均变化率称为输入失调电流温漂,以  $dI_{IO}/dT$  表示。

## 4. 输入偏置电流 $I_{IB}$

静态时,输入级两个差放管的基极电流  $I_{B1}$  和  $I_{B2}$  的平均值,即  $I_{IB} = \frac{I_{B1} + I_{B2}}{2}$ ,称为输入偏置电流,用  $I_{IB}$  表示。

## 5. 共模抑制比 $K_{CMR}$

运放差模电压放大倍数与共模电压放大倍数之比的绝对值,称为共模抑制比,用  $K_{CMR}$  表示。常以分贝(dB)为单位。

## 6. 差模输入电阻 $R_{id}$

运放的两个差动输入端之间的等效动态电阻,称为差模输入电阻,用  $R_{id}$  表示。

## 7. 共模输入电阻 $R_{ic}$

运放的每个输入端对地之间的等效动态电阻,称为共模输入电阻,用  $R_{ic}$  表示。

## 8. 输出电阻 $R_o$

从运放输出端和地之间看进去的动态电阻,称为输出电阻,用  $R_o$  表示。

## 9. 输入电压范围

当加在运放两个输入端之间的电压差超过某一数值时,输入级的某一侧晶体管将出现发射结反向击穿而不能工作,则输入端之间能承受的最大电压差称为最大差模输入电压,用  $U_{dm}$  表示。

当运放的输入端所加共模电压超过某一数值时,放大器不能正常工作。此最大电压值称为最大共模输入电压,用  $U_{dm}$  表示。

## 10. 带宽

运放开环电压增益下降到直流增益的  $1/\sqrt{2}$  ( $-3\text{dB}$ ) 时所对应的频带宽度,称为运放的一  $3\text{dB}$  带宽,用  $BW$  表示。

运放开环电压增益下降到 1 时的频带宽度,称为运放的单位增益带宽,用  $BW_G$  表示。

### 11. 转换速率(压摆率) $S_R$

该指标是反映运放对于高速变化的输入信号的响应情况。运放在额定输出电压下, 输出电压的最大变化率, 即  $S_R = \left| \frac{du_o}{dt} \right|_{\max}$ , 称为转换速率(压摆率), 用  $S_R$  表示。

### 12. 静态功耗 $P_C$

当输入信号为零时, 运算放大器消耗的总功率称为静态功耗, 用  $P_C$  表示。

### 13. 电源电压抑制比 PSRR

电源电压的改变将引起失调电压的变化。失调电压的变化量与电源电压变化量之比, 即  $PSRR = \frac{\Delta U_{IO}}{\Delta E}$ , 定义为电源电压抑制比, 用 PSRR 表示。

## 3.2.4 集成运算放大器电路符号

集成运算放大器是一种具有极高增益的电压放大器, 经由适当选取的外部元件, 就能构成各种运算电路, 如放大、加、减、微分和积分等。运算放大器的首次应用是在模拟计算机中。实现数学运算的能力是将运算放大器的高增益和负反馈结合起来的成果。20 世纪 60 年代, 神童半导体公司研制出了第一块集成运算放大器, 并成为工业标准, 这就是广泛使用的  $\mu A741$ , 它的电压增益达到  $2 \times 10^5$ 。按照增益的量级, 集成运算放大器可分为低增益运放( $10^3$ )、中增益运放( $10^4$ )及高增益运放( $10^5$ )。实际上, 运算放大器有别于其他所有电压放大器的就是它的增益大小, 增益愈高愈好。集成运算放大器的理想状态就是电压增益无穷大。

集成运算放大器的电路符号如图 3-2-2 所示。其中, 图 3-2-2(a)所示是国标符号, 图 3-2-2(b)所示为习惯通用画法。“-”符号代表反相输入端, “+”代表同相输入端, 它们对地的电压分别用  $u_+$  和  $u_-$  表示, 输出电压为  $u_o$ ; “▷”代表信号从输入端向输出端流动; “∞”代表理想运算放大器的开环增益无穷大。

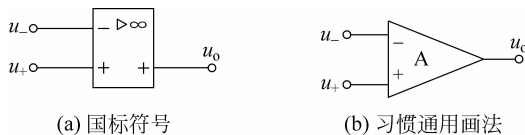


图 3-2-2 集成运算放大器符号

集成运算放大器实际上是一个高增益的多级直接耦合放大器。直接耦合电路既能放大交流信号, 又能放大直流信号, 具有很好的低频特性。但各级放大电路的静态工作点是相互影响的, 尤其是在电源电压波动、元器件参数变换及环境温度变化时, 都会使电路的静态工作点偏离原来的设计值。若第一级电路的静态工作点有微小变化, 经过后续多级电路的放大, 将使输出端的电压远远漂离零点, 严重干扰了放大器的工作, 引起输出信号失真。克服零点漂移最有效的方法是使用差分放大电路作为集成运算放大器的输入级。

### 3.3 差分放大电路

差分放大电路又称为差动放大电路,简称差放,是另一类基本放大电路。由于它具有优异的抑制零漂性能,因此获得广泛的应用,成为集成电路中重要的基本单元电路。

#### 3.3.1 基本差分放大电路组成

差分放大电路的基本形式如图 3-3-1 所示,它由两个结构完全对称的单管放大电路组成。两个三极管  $VT_1$  和  $VT_2$  的特性相同,外接电阻也一一对称相等,两管的静态工作点必然相同。输入信号从两管基极输入,输出信号从两管集电极之间输出。静态时,输入信号为零,即  $u_{i1} = u_{i2} = 0$ 。由于电路对称,  $I_{C1} = I_{C2}$ ,  $R_{C1} I_{C1} = R_{C2} I_{C2}$ , 即  $U_{C1} = U_{C2}$ , 故输出电压  $U_o = U_{C1} - U_{C2} = 0$ 。

当温度升高时,两管的集电极电流同步增加,相应的,集电极电位同步下降。由于电路对称,两管变化量相等,即  $\Delta U_{C1} = \Delta U_{C2}$ , 因此输出电压为  $U_o = \Delta U_{C1} - \Delta U_{C2} = 0$ 。可见,虽然每只管子的零漂并未减少,但两管各自的零漂电压在输出端可以互相抵消,使零漂被抑制。显然,电路的对称性越好,对零漂的抑制能力越强。在集成运算放大电路等集成电路中,其输入级都采用差分放大电路,由于工艺上可以做到电路的对称性较高,因而都有较强的抑制零漂能力。

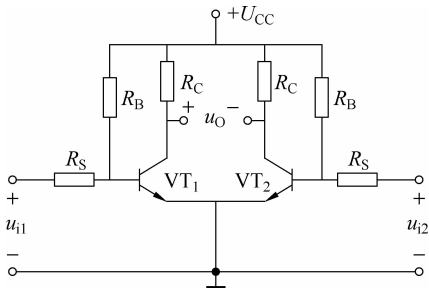


图 3-3-1 基本差分放大电路组成

#### 3.3.2 差分放大电路分析

##### 1. 共模信号输入差分放大电路

在放大电路的两个输入端分别输入大小相等、极性相同的信号,即  $u_{i1} = u_{i2}$ 。这种输入方式称为共模输入,这种信号称为共模信号。共模输入信号常用  $u_{ic}$  表示,即  $u_{ic} = u_{i1} = u_{i2}$ , 如图 3-3-2 所示。

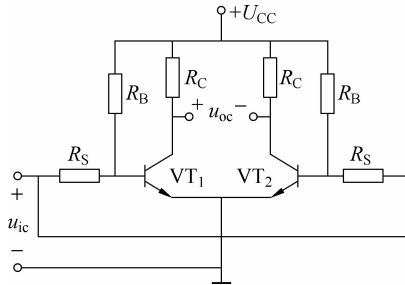


图 3-3-2 共模输入差分放大电路

在图 3-3-2 中,  $VT_1$  与  $VT_2$  的输入信号均由  $u_{ic}$  提供, 那么  $I_{B1} = I_{B2}$ ,  $I_{C1} = I_{C2}$ ,  $u_{o1} = u_{o2}$ , 则  $u_{oc} = u_{o1} - u_{o2} = 0 \rightarrow A_{uc} = u_{oc} / u_{ic} = 0$ 。

通过以上分析可知,差分放大电路对共模信号没有放大作用,引起零点漂移的因素均可以等效为共模信号输入电路的情况,所以差分放大电路对共

模信号有抑制能力。

## 2. 差模信号输入差分放大电路

在放大电路的两个输入端分别输入大小相等、极性相反的信号,即  $u_{i1} = -u_{i2}$ 。这种输入方式称为差模输入,这种信号称为差模信号。差模输入信号常用  $u_{id}$  表示,即  $u_{i1} = u_{id}/2, u_{i2} = -u_{id}/2$ ,如图 3-3-3 所示。

在图 3-3-3 中,放大电路为差分放大电路差模输入的情况。此时,因电路对称,参数相等,两管集电极电位的变化必定大小相等、极性相反,若某个管集电极电位升高  $\Delta u_c$ ,则另一个必然降低  $\Delta u_c$ 。

设两管的电压放大倍数分别为  $A_1, A_2$ ,集电极输出电压分别为  $u_{o1}, u_{o2}$ ,则

$$u_{o1} = A_1 u_{i1} = A_1 \frac{u_{id}}{2}, \quad u_{o2} = A_2 u_{i2} = -A_2 \frac{u_{id}}{2}$$

电路的总输出为

$$u_{od} = u_{o1} - u_{o2} = (A_1 + A_2) \frac{u_{id}}{2}$$

因电路对称,  $A_1 = A_2 = A$ ,故

$$u_{od} = 2A \frac{u_{id}}{2} = Au_{id}$$

差模电压放大倍数为

$$A_{ud} = \frac{u_{od}}{u_{id}} = A \quad (3-3-1)$$

可见,基本差分放大电路的差模电压放大倍数与单管共射放大电路的电压放大倍数相同。

由单管共射放大电路的电压放大倍数计算式,有

$$A_{ud} = A = -\frac{\beta R_C}{r_{be}} \cdot \frac{R_B // r_{be}}{R_S + R_B // r_{be}} = -\frac{\beta R_C}{R_S \left(1 + \frac{r_{be}}{R_B}\right) + r_{be}}$$

一般情况下,  $R_B \gg r_{be}$ ,故有

$$A_{ud} = A \approx -\frac{\beta R_C}{R_S + r_{be}} \quad (3-3-2)$$

当两个集电极接有负载  $R_L$  时,式(3-3-2)应为

$$A_{ud} = -\frac{\beta R'_L}{R_S + r_{be}} \quad (3-3-3)$$

式中:  $R'_L = R_C // (R_L/2)$ 。这是由于对称,且两管集电极电位的变化等值反相,而与两个集电极相连的  $R_L$  的中点电位不变,相当于交流地电位,因而对于每个单管来说,负载电阻(输出端对地间的电阻)应是  $R_L$  的一半,即  $R_L/2$ 。

放大电路的输入回路经过两个管子的发射结和  $R_C$ ,故输入电阻为

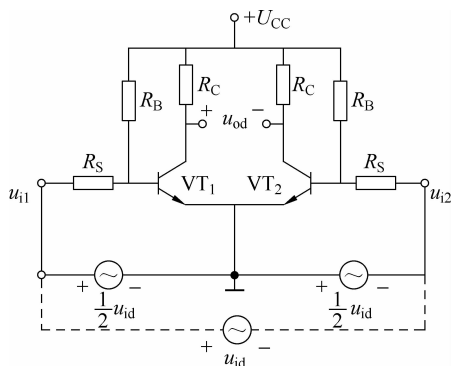


图 3-3-3 差模输入差分放大电路

$$R_{id} = 2(R_S + r_{be}) \quad (3-3-4)$$

放大电路的输出回路经过两个  $R_C$ , 故输出电阻为

$$R_{od} = 2R_C \quad (3-3-5)$$

差分放大电路对共模信号无放大作用, 对差模信号有放大作用, 说明这种放大电路是根据两端输入信号之差来放大的, 输入有差别, 输出才变动。

### 3. 共模抑制比

共模抑制比  $K_{CMR}$  是衡量一个差分放大器放大差模信号、抑制共模信号的能力, 其表达式为

$$K_{CMR} = \left| \frac{A_{ud}}{A_{uc}} \right| \quad (3-3-6)$$

共模抑制比一般用分贝(dB)来表示, 即

$$K_{CMR} = 20 \lg \left| \frac{A_{ud}}{A_{uc}} \right|$$

从表达式来看,  $K_{CMR}$  越大, 差分放大器放大差模信号(有用信号)的能力越强, 抑制共模信号(无用信号)的能力也越强。它是差分放大器的一项十分重要的技术指标。理想情况下,  $K_{CMR}$  趋近于无穷大。一般差放电路的  $K_{CMR}$  为 40~60dB, 高水平的可达 120dB 以上。

## 3.3.3 改进的差分放大电路

基本差分放大器都工作在双端输入、双端输出状态。若要求其单端输出(也叫不对称输出), 则“两侧对称”的优点将无从体现。另外, 当零漂严重时, 由于信号过大, 电路两侧将很难做到完全抵消。针对基本差分放大器的这类不足, 引入长尾式差分放大器。

### 1. 长尾式差分放大电路

长尾式差分放大电路又叫发射极耦合差分放大电路。在基本差分放大器的基础上, 加上一个射极电阻  $R_E$  即构成长尾式差分放大器, 如图 3-3-4 所示。接入  $R_E$  的目的是引入直流负反馈, 用来稳定静态工作点、抑制零漂。比如, 当温度升高时, 两管的  $I_{C1}$  和  $I_{C2}$  同时增大, 由于有了  $R_E$ , 便有以下负反馈过程:

$T^\circ C \uparrow \rightarrow \langle I_{C1} \uparrow, I_{C2} \uparrow \rangle \rightarrow I_E \uparrow \rightarrow U_{RE} \uparrow \rightarrow \langle U_{BE1} \downarrow, U_{BE2} \downarrow \rangle \rightarrow \langle I_{B1} \downarrow, I_{B2} \downarrow \rangle \rightarrow \langle I_{C1} \downarrow, I_{C2} \downarrow \rangle$   
可见, 由于射极电阻  $R_E$  的作用, 使每个管子的零漂得到了抑制, 从而促进整个电路零漂的抑制。从这个角度来看,  $R_E$  越大越好。

#### (1) 长尾式差分放大电路的静态分析

当输入信号为零时, 也就是  $u_{i1} = u_{i2} = 0$ , 由图 3-3-4 可得到直流通路如图 3-3-5 所示。为保持各管发射极电位 ( $U_E = 2I_E R_E$ ) 不变, 每个发射极电路中串入的电阻不再是  $R_E$ , 而是  $2R_E$ 。这样, 各电阻上的压降 ( $2I_E R_E$ ) 正好等于原发射极电位  $U_E$ 。接着, 按照固定分压放大电路分析即可。



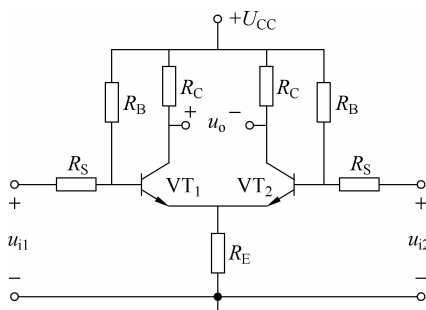


图 3-3-4 长尾式差分放大电路

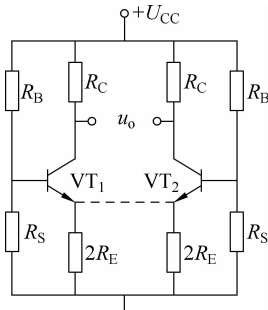


图 3-3-5 长尾式差分放大电路的直流通路

## (2) 长尾式差分放大电路的动态分析

### ① $R_E$ 对共模输入信号 $u_{ic}$ 放大倍数的抑制

对于共模输入信号,由于两管的  $i_E$  变化量大小相等,方向相同(同增同减), $\Delta i_{E1} = \Delta i_{E2} = \Delta i_E$ ,因而流过  $R_E$  的总电流变化量为  $2\Delta i_E$ ,该增量在  $R_E$  上引起的电压增量是  $2\Delta i_E \cdot R_E$ , $R_E$  在电路中构成的是电流串联负反馈, $R_E$  上的电流增加越多,产生的反馈电压就越大,VT<sub>1</sub> 和 VT<sub>2</sub> 的导通情况势必减弱,有效地抑制了共模信号输出。

### ② $R_E$ 对差模输入信号 $u_{id}$ 的放大倍数无影响

对于差模输入信号,由于两管的  $i_E$  变化方向相反,一个  $i_E$  增加,另一个  $i_E$  减少,但增减的数量相等, $\Delta i_{E1} = -\Delta i_{E2}$ ,因而流过  $R_E$  的总电流不变, $R_E$  两端的电压降也不变。换句话说, $R_E$  对差模信号不起作用, $R_E$  的引入不影响差模电压放大倍数。

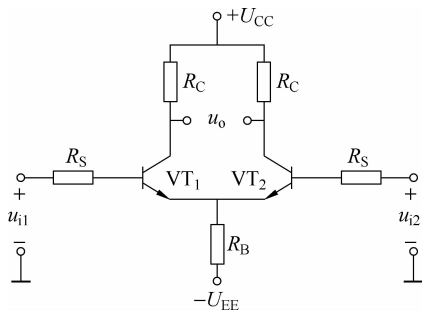


图 3-3-6 双电源长尾式差分放大电路

如上所述,增大  $R_E$  的值可以更好地抑制零漂。然而,若  $R_E$  过大,会使其直流压降过大,在  $U_{CC}$  一定的情况下,静态电流值下降,使放大器不能正常工作。为此,在公共发射极回路中引入负电源  $U_{EE}$  来补偿  $R_E$  上的直流压降,解决了设置静态值与抑制零漂之间的矛盾,如图 3-3-6 所示。

**【例 3-3-1】** 在图 3-3-6 中,  $R_S = 5k\Omega$ ,  $R_C = 10k\Omega$ ,  $R_E = 10k\Omega$ ,  $U_{CC} = 12V$ ,  $U_{EE} = -12V$ , 两管电流放大系数均为  $\beta = 50$ 。试计算: ① 静态工作点; ② 差模电压放大倍数; ③ 输入电阻和输出电阻。

**解:** ① 计算静态工作点。

静态时,  $u_{I1} = u_{I2} = 0$ , 根据单管的基极回路可列出如下关系式:

$$R_S I_{BQ} + U_{BE} + 2R_{EQ} I_{EQ} - U_{EE} = 0$$

又由

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

所以

$$I_{BQ} = \frac{U_{EE} - U_{BE}}{R_S + 2(1 + \beta)R_E}$$

代入数据

$$I_{BQ} = \frac{12 - 0.7}{5 + 2 \times (1 + 50) \times 10} = 0.011(\text{mA})$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 50 \times 0.011 = 0.55(\text{mA})$$

$$U_{CEQ} = U_{CC} + U_{EE} - I_{CQ}R_C - 2I_{EQ}R_E = 7.5(\text{V})$$

② 计算差模电压放大倍数。

在图 3-3-6 所示的电路中,因  $R_E$  对差模信号不起作用,即差模信号在  $R_E$  上无压降,可以理解成短路,双电源长尾式差分放大电路交流通路如图 3-3-7 所示。

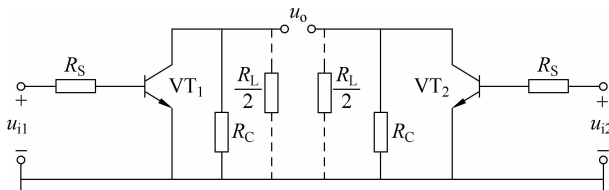


图 3-3-7 双电源长尾式差分放大电路交流通路

三极管基射极内阻为

$$r_{be} = 200 + (1 + \beta) \frac{26}{I_{CQ}} = 200 + (1 + 50) \times \frac{26}{0.55} \approx 2.6(\text{k}\Omega)$$

当未接入负载  $R_L$  时,有

$$A_{ud} = -\frac{\beta R_C}{R_S + r_{be}} = -\frac{50 \times 10}{5 + 2.6} = -65.8$$

当接入负载  $R_L$  时,有

$$A_{ud} = -\frac{\beta R'_L}{R_S + r_{be}}$$

式中:  $R'_L = R_C // (R_L/2)$ 。

③ 计算输入电阻  $R_{id}$  和输出电阻  $R_{od}$ 。

此电路为双端输入、双端输出形式,其输入电阻  $R_{id}$  为

$$R_{id} = 2(R_S + r_{be}) = 2 \times (5 + 2.6) = 15.2(\text{k}\Omega)$$

输出电阻  $R_{od}$  为

$$R_{od} = 2R_C = 2 \times 10 = 20(\text{k}\Omega)$$

应当说明,这里计算的差模电压放大倍数及输出电阻都是对双端输出来说的。双端输出即从两个管子的集电极之间输出信号。后面还会看到单端输出的情况,即从一个管子的集电极与地之间输出信号。单端输出时,差模电压放大倍数及输出电阻不能用式(3-3-2)和式(3-3-5)计算。

## 2. 具有调零作用的差分放大电路

在实际差分电路中,由于电路参数不可能对称,因此静态时,双端输出不可能完全为零。为了克服电路不对称问题,往往在差分电路中引入调零电位器,来抵消元件参数的不