

第 3 章

集成运算放大器电路

内容提要：集成运算放大器是一个集成形式的直接耦合多级放大电路，它一般由输入级、中间级、输出级和偏置电路组成。差动放大电路是输入级的主要结构形式，利用其电路结构的对称性来增加对温漂的抑制能力；电流偏置是集成运算放大器的一大特点，用于偏置电路的电流源以镜像电流源为基本单元电路，其改进电路有微电流源和多路电流源等形式；F007 是集成运算放大器的典型代表，了解其电路组成有利于对集成运算放大器举一反三。以集成运算放大器作为放大器件可组成各种放大电路，其基本单元电路是同相比例器和反相比例器。

学习提示：在正确理解差动放大电路和电流源电路的电路结构与工作原理的基础上，重点熟悉集成运算放大器的主要参数及理想集成运算放大器的特点，并应熟练掌握同相比例器、反相比例器的分析方法与电路特点。

3.1 概 述

集成电路是 20 世纪 60 年代初发展起来的一种电子器件，它是采用半导体集成工艺，把众多的晶体管(或场效应管)、电阻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。与分立元件电子线路相比，集成电路器件具有可靠性高、体积小、耗电省、使用方便等优点。因此在各种电子系统中，集成电路获得了广泛的应用。随着集成电路制作工艺的发展，目前已有在系统可编程模拟集成电路投入使用，这使电子线路的设计更加灵活方便。

3.1.1 集成运算放大器的电路组成

集成运算放大器是模拟集成电路中应用较为普遍的一种典型电路，它事实上是具有高放大倍数、高输入电阻、低输出电阻的多级直接耦合放大电路的集成化，集成运算放大器习惯上称为集成运放。集成运算放大器作为较早发展起来的模拟集成电路之一，其种类较多，但其电路结构具有一定的共性，其内部电路一般可分为 4 个组成部分，即输入级、中间级、输出级及偏置电路，其结构框图和电路符号如图 3.1 所示。在图 3.1 中有两个输入端、一个输

出端,其中 u_P 、 u_N 、 u_O 均以“地”为公共端。

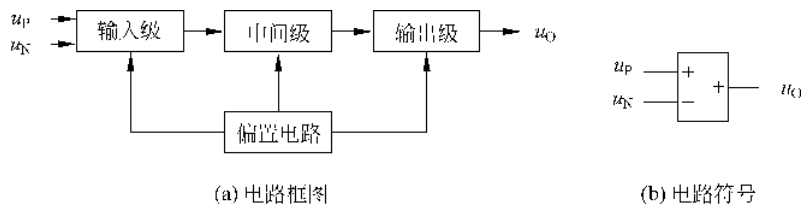


图 3.1 集成运算放大器的电路框图及符号

1. 输入级

输入级常采用的电路结构是差动放大电路。对输入级的要求是:输入电阻高、静态电流小,具有一定的电压放大能力及抑制零点漂移的能力。通常输入级性能的好坏对集成运算放大器的性能起着决定性的作用。

2. 中间级

中间级一般采用具有有源负载的共发射极(共源极)放大电路。对其要求是能提供较大的电压放大倍数,集成运算放大器的电压放大倍数主要通过中间电压放大级来实现。

3. 输出级

输出级常采用的电路结构是射极跟随器或互补对称电路。对输出级的要求是输出电阻小、带负载能力强。

4. 偏置电路

偏置电路用于合理设置集成运算放大器各级放大电路的静态工作点,以便不失真地放大输入信号。集成运算放大器常采用电流源作为偏置电路。

3.1.2 集成运算放大器的电路结构特点

集成运算放大器由于受集成电路制造工艺的制约,其电路结构形式具有下述特点。

1. 用有源器件代替无源器件

集成电路中的电阻元件是由硅半导体的体电阻构成的,电阻值的范围一般为几十欧姆至几百千欧姆,阻值范围较小,且电阻值的精度不易控制,误差较大。因此,当需要较大阻值的电阻时,多采用有源器件作为有源负载来代替电阻。

2. 用晶体管代替二极管

为了简化集成电路的制作工艺,在用到二极管的地方,多采用晶体管的发射结来代替。

3. 电路结构与元件参数具有对称性

集成电路中各元件由于采用相同的工艺过程制作在同一硅片上,虽说元件参数的精度较低,但其参数的一致性较好,容易制作两个特性相同的管子或阻值相等的电阻。它们受环境温度或干扰的影响后变化也相同,这对提高电路的某些性能是有利的。故在电路结构上常采用对称的电路形式。

4. 集成运算放大器各级电路之间采用直接耦合

集成电路中的电容元件,一般利用 PN 结的结电容构成,因此其容量较小,不适合用作耦合电容。在硅片上制作电感就更困难。基于上述原因,在集成运算放大器中各级之间采用直接耦合方式。发挥直接耦合的优点,抑制直接耦合的不足是集成运算放大器在电路结构上要解决的主要问题之一。

要正确分析集成运算放大器的工作原理,首先应搞清楚电流源电路和差动放大电路的工作原理和特点。

3.2 电流源电路

电流源电路是模拟电路中基本单元电路形式之一,它不仅能作为有源负载使用,而且被广泛地应用于集成运算放大电路中的偏置电路。因此,了解电流源电路的电路形式、电流分配关系、电路特点,对于理解差动放大电路和集成运算放大电路的工作原理十分必要。

3.2.1 单管电流源电路

1. 电路结构形式

电流源电路形式较多,由一个晶体管 and 相应电阻组成的电流源电路是其最简单的电路形式。单管电流源电路的形式之一如图 3.2 所示,它类同于分压式偏置放大电路的直流通路。

2. 工作原理分析

对于图 3.2 所示电路,当合理选择电路参数,使 $I_{R1} \gg I_B$ 时,电阻 R_2 上的电压 U_{R2} 可利用电阻 R_1 、 R_2 的分压进行计算,即

$$U_{R2} \approx \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{EE}$$

晶体管发射极电流 I_E 为

$$I_E = \frac{U_{R2} - U_{BE}}{R_E} \approx \frac{1}{R_E} \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{EE} - U_{BE} \right) \quad (3.1)$$

可见当电路参数选定之后,电流 I_E 为恒定值。由于 $I_C \approx I_E$, 所以 I_C 也为恒定值。从晶体管集电极来看,电路可等效为一个电流源。电流源的动态电阻由图 3.3 所示等效电路求出。

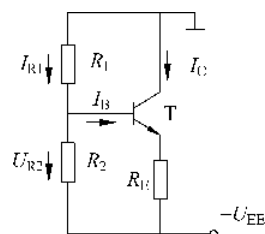
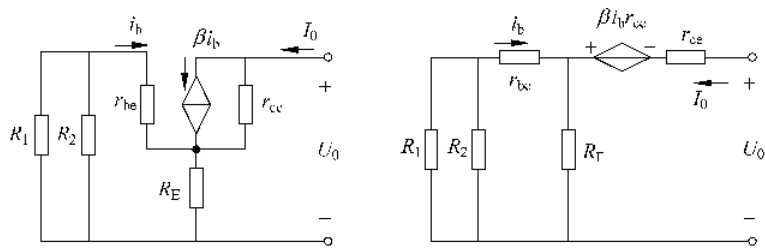


图 3.2 单管电流源电路



(a) 求电流源动态电阻的微变等效电路 (b) 对受控电流源进行等效变换后的电路

图 3.3 求电流源等效电阻的电路

分析图 3.3(b) 可见:

$$\begin{aligned}
 i_b &= -\frac{R_E}{R_E + r_{be} + R_1 \parallel R_2} I_0 \\
 U_0 &= [r_{ce} + R_E \parallel (r_{be} + R_1 \parallel R_2)] I_0 - \beta i_b r_{ce} \\
 &= [r_{ce} + R_E \parallel (r_{be} + R_1 \parallel R_2)] I_0 + \frac{\beta r_{ce} R_E}{R_E + r_{be} + R_1 \parallel R_2} I_0 \\
 R_o &= \frac{U_0}{I_0} = r_{ce} + R_E \parallel (r_{be} + R_1 \parallel R_2) + \frac{\beta r_{ce} R_E}{R_E + r_{be} + R_1 \parallel R_2} \\
 &\approx r_{ce} \left(1 + \frac{\beta R_E}{R_E + r_{be} + R_1 \parallel R_2} \right) \quad (3.2)
 \end{aligned}$$

式(3.2)表明,电流源的动态电阻是相当大的。只要晶体管工作在放大状态,图 3.2 所示电路就是一个较为理想的恒流源电路。

3.2.2 镜像电流源电路

1. 电路结构形式

镜像电流源电路的种类较多,可分为基本镜像电流源电路和改进型镜像电流源电路。图 3.4 所示为基本镜像电流源电路。

2. 工作原理分析

由图 3.4 所示电路可见,若 T_1 与 T_2 特性完全相同,且其发射结电压相等。因此它们的基极电流和集电极电流均相等。即有

$$\begin{aligned}
 I_{B1} &= I_{B2} = I_B \\
 I_{C1} &= I_{C2}
 \end{aligned}$$

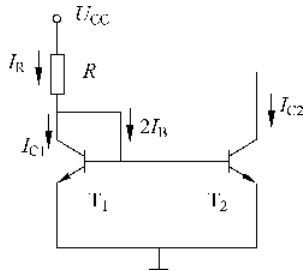


图 3.4 基本镜像电流源电路

由于 T_1 的 $U_{BE} = U_{CE}$, 故 T_1 处于临界放大状态(或临界饱和状态), $I_{C1} = \beta I_{B1}$ 关系式成立。依据电路的基本定律并结合图 3.4 所示电路的连接关系,有

$$I_R = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R} \quad (3.3)$$

$$I_R = I_{C1} + 2I_B = I_{C1} + 2 \frac{I_{C1}}{\beta} = I_{C1} \left(1 + \frac{2}{\beta} \right) \quad (3.4)$$

只要 $\beta \gg 2$, 则 $I_R \approx I_{C1}$ 。所以输出电流 I_{C2} 为

$$I_{C2} = I_{C1} \approx I_R = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R} \quad (3.5)$$

习惯上称电流 I_R 为基准电流。当 I_R 由式(3.3)确定后, I_{C2} 也随着确定; 若 I_R 改变则 I_{C2} 也随着改变, 这种关系类似镜像关系。所以, 称图 3.4 所示电路为镜像电流源电路。

3. 电路特点

图 3.4 所示的基本镜像电流源电路, 其主要优点是电路结构简单且具有一定的温度补偿作用。其不足之处是不能实现输出电流与基准电流之间的比例调节; 对于确定的电源电压, 当要求输出电流较小时, 必须增大电阻 R 的数值, 这在实际应用中并不容易实现。

3.2.3 比例电流源电路

1. 电路结构形式

为了实现输出电流与基准电流之间的比例调节, 可对基本镜像电流源电路结构进行改进, 其改进电路之一如图 3.5 所示。

2. 工作原理分析

从图 3.5 所示比例电流源电路可见:

$$I_R \approx \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R + R_{E1}} \quad (3.6)$$

$$U_{BE1} + I_{E1} R_{E1} = U_{BE2} + I_{E2} R_{E2}$$

参照 PN 结的电流方程式 $I = I_S (e^{\frac{U}{U_T}} - 1)$, 发射结电压与电流的关系可近似表示为

$$U_{BE} \approx U_T \ln \frac{I_E}{I_S}$$

则有

$$U_{BE1} - U_{BE2} \approx U_T \ln \frac{I_{E1}}{I_{S1}} - U_T \ln \frac{I_{E2}}{I_{S2}} = U_T \ln \frac{I_{E1}}{I_{S1}} \frac{I_{S2}}{I_{E2}} \quad (3.7)$$

考虑到 T_1 与 T_2 特性完全相同, 则有 $I_{S1} = I_{S2}$ 。在室温下, 若 I_{E1} 与 I_{E2} 相差在 10 倍以内时, 式(3.7)满足下述关系:

$$|U_{BE1} - U_{BE2}| \approx \left| U_T \ln \frac{I_{E1}}{I_{E2}} \right| < U_T \ln 10 = 26 \times 2.3 \text{ mV} \approx 60 \text{ mV} \quad (3.8)$$

一般硅晶体管导通时 $U_{BE} = 0.6 \sim 0.7 \text{ V}$, 考虑到式(3.8)的关系, 故可以近似认为: $U_{BE1} \approx U_{BE2}$ 。则式(3.6)可近似表示为

$$I_{E1} R_{E1} \approx I_{E2} R_{E2}$$

当 $\beta \gg 1$ 时, 有 $I_{E1} \approx I_{C1} \approx I_R$, $I_{E2} \approx I_{C2}$, 则

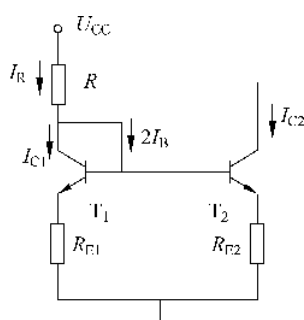


图 3.5 比例电流源电路

$$I_{C2} \approx \frac{R_{E1}}{R_{E2}} I_R \quad (3.9)$$

式(3.9)表明,在比例电流源中,改变两个管子发射极电阻的比值,可以调节输出电流 I_{C2} 与基准电流 I_R 的比例。

3.2.4 微电流源电路

1. 电路结构形式

在集成运算放大器电路中,往往要求提供几十微安甚至更小电流值的电流源电路。当电源电压一定时,为了实现利用阻值较小的电阻而获得极小的输出电流 I_{C2} ,可将比例电流源中 R_{E1} 短路,所得电路如图 3.6 所示,此电路称为微电流源电路。

2. 工作原理分析

由图 3.6 可见, T_2 管的发射极电流为

$$I_{E2} = \frac{U_{BE1} - U_{BE2}}{R_E}$$

设图中 T_1 与 T_2 特性完全相同,由式(3.7)有

$$U_{BE1} - U_{BE2} \approx U_T \ln \frac{I_{E1}}{I_{E2}}$$

当 $\beta \gg 1$ 时,有 $I_{E1} \approx I_R$, $I_{E2} \approx I_{C2}$, 所以:

$$I_{C2} \approx I_{E2} \approx \frac{U_T}{R_E} \ln \frac{I_R}{I_{C2}} \quad (3.10)$$

在已知 R_E 的情况下,式(3.10)对 I_{C2} 而言是超越方程,可以通过图解法或累试法解出 I_{C2} 。式中基准电流 I_R 为

$$I_R = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R}$$

3. 电路特点

微电流源电路的突出特点是利用较小阻值的电阻可获得微安级的电流源。譬如,当 $U_{CC} = 15V$ 时,若要求 $I_R = 1mA$, $I_{C2} = 20\mu A$,则选取 $R \approx 15k\Omega$, $R_E \approx 5k\Omega$ 即可。

3.2.5 改进型电流源电路

在上述几种电流源电路的分析过程中,几乎都假定 $\beta \gg 1$,即忽略了基极电流对基准电流和输出电流的影响。当 β 值较小时,前述分析结论的近似程度将降低。晶体管在小电流下工作时,其电流放大能力下降。因此,有必要考虑对上述电路形式进行改进,以提高电流源输出电流的精度。

改进的措施之一是在镜像电流源电路中增加射极输出器,改进后的电路如图 3.7 所示。

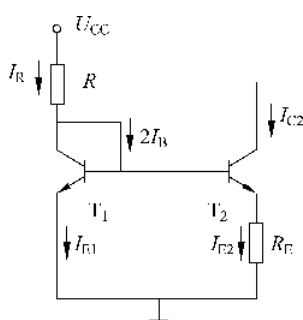


图 3.6 微电流源电路

图中在 T_3 管的发射极与地之间接入电阻 R_{E3} , 其目的是增大 T_3 管的工作电流, 以保证 T_3 有较大的电流放大能力, 使 I_{C1} 更接近基准电流 I_R 的值。

常见的改进型电流源电路还有威尔逊电流源, 其电路形式如图 3.8 所示。

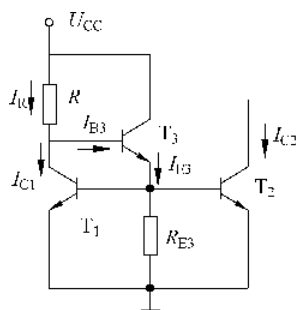


图 3.7 改进型镜像电流源

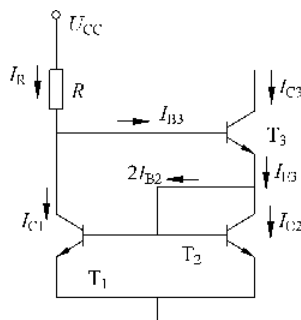


图 3.8 威尔逊电流源

假设 T_1 、 T_2 、 T_3 管的特性完全相同, 即 $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta$ 。由图 3.8 所示电路分析可知:

$$I_R = \frac{U_{CC} - 2U_{BE}}{R} = I_{C1} + I_{B3}$$

$$I_{C1} = I_{C2}$$

$$I_{E3} = I_{C2} + 2I_{B2} = I_{C2} + \frac{2I_{C2}}{\beta}$$

求解以上各式可得

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

由上式可见, I_{C3} 更接近 I_R 的值。

3.2.6 多路电流源电路

在实际电路中, 往往需要多路电流源分别提供合适的偏置电流。这时可利用一个基准电流去获得多个不同的输出电流, 以适应不同的需要, 其工作原理事实上是上述相应电路的推广。

图 3.9 所示电路是基于镜像电流源的多路电流源电路之一。图中 I_R 为基准电流, I_{C2} 、 I_{C3} 、 I_{C4} 为 3 路输出电流, 若各个晶体管的特性相同, 参照前述分析方法, 可求出此电路的电流关系为

$$\begin{aligned} I_R &= I_{C1} + \frac{4I_{B1}}{1 + \beta} = I_{C1} + \frac{4}{1 + \beta} \frac{I_{C1}}{\beta} \\ &= I_{C1} \left(1 + \frac{4}{(1 + \beta)\beta}\right) \\ I_{C2} &= I_{C3} = I_{C4} = \frac{(1 + \beta)\beta}{(1 + \beta)\beta + 4} I_R \end{aligned} \quad (3.11)$$

图 3.10 所示电路是基于微电流源的多路电流源电路, 图中 I_R 为基准电流, I_{C2} 、 I_{C3} 为两路输出电流, 若各个晶体管的特性相同。根据电路可得

$$U_{BE1} + I_{E1}R_{E1} = U_{BE2} + I_{E2}R_{E2} = U_{BE3} + I_{E3}R_{E3}$$

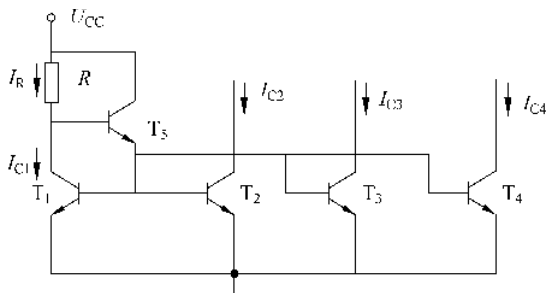


图 3.9 多路镜像电流源电路

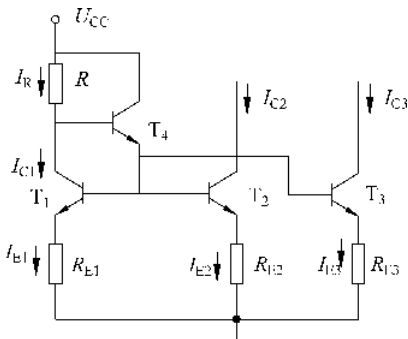


图 3.10 多路微电流源电路

当各管的发射极电流差别不大于 10 倍时,可近似认为

$$I_{E1}R_{E1} \approx I_{E2}R_{E2} \approx I_{E3}R_{E3}$$

且

$$I_{E1} \approx I_R, \quad I_{E2} \approx I_{C2}, \quad I_{E3} \approx I_{C3}$$

则

$$I_R R_{E1} \approx I_{C2} R_{E2} \approx I_{C3} R_{E3}$$

当 I_R 确定后,只要选择合适的各级发射极电阻,即可得到所需要的输出电流。

图 3.11 所示是多集电极管形成的多路电流源电路。T 通常为横向 PNP 型管,当 I_B 一定时,各集电极电流之比等于它们的集电区面积之比。设各集电区的面积分别为 S_1 、 S_2 、 S_3 ,则有

$$\frac{I_{C1}}{S_1} = \frac{I_{C2}}{S_2} = \frac{I_{C3}}{S_3}$$

因此,当各集电区面积确定之后,其电流比亦确定。使用中通过 R 值调节 I_B 值。分析电路可得

$$I_B = \frac{U_{EE} - U_{BE}}{(1 + \beta)R}$$

与晶体管电流源类似,场效应管也可组成各种电流源电路,用于场效应管集成放大电路中的偏置电路。有兴趣的读者可参阅有关文献。

电流源电路是集成运算放大器的重要组成部分之一,其主要用途是提供必要的偏置电流。分析电流源电路的依据是 PN 结的电流方程和基尔霍夫电流定律,分析思路是参照电路的连接关系,先确定基准电流的表达式,进而求出输出电流与基准电流的关系。

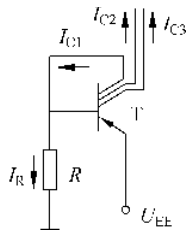


图 3.11 多集电极管构成的多路电流源

3.3 差动放大电路

在讨论多级放大电路的直接耦合方式时,曾指出这种耦合方式有一个明显的缺点,即当外界环境因素(特别是温度)改变引起前级的静态工作点变化时,这种变化将被逐级放大,从而造成输出端电压的变化,即所谓的零点漂移,温度变化是引起零点漂移的主要因素。抑制零点漂移有多种途径,采用具有对称性的差动放大电路就是较为有效的方法之一。

3.3.1 基本差动放大电路

1. 电路组成

基本差动放大电路如图 3.12 所示。设 T_1 、 T_2 的特性完全相同,从电路组成看,此电路的显著特点是电路结构的对称性,其左右两边事实上各为一个直接耦合的共发射极基本放大电路。输入信号分别由两个基极回路加入,输出信号取自两管的集电极。

2. 抑制零点漂移的工作原理

在图 3.12 所示的基本差动放大电路中,当输入信号为零时,电路可重画如图 3.13 所示。若环境温度发生变化,由于电路的对称性,温度变化使 I_{B1} (I_{C1})、 I_{B2} (I_{C2}) 产生相同的增量,此时,两管集电极电压的增量也相同。由 $u_o = U_{C1} - U_{C2}$ 可见,无论环境温度如何变化,输出电压均保持零值不变。

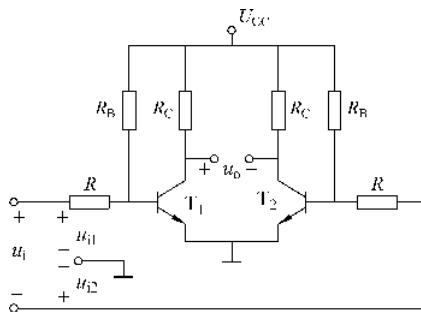


图 3.12 基本差动放大电路

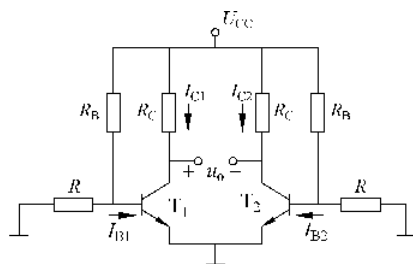


图 3.13 输入信号等于零时的等效电路

由上述分析可见,在图 3.12 所示的基本差动放大电路中,当环境温度发生变化时,对于每个晶体管来说,温度对其性能的影响仍然存在,但电路利用其对称性,使其对输出所产生的影响相互抵消,因此,电路的对称性是其抑制零点漂移的关键。

对于图 3.12 所示的基本差动放大电路,在正常输入信号的作用下, u_i 对 T_1 、 T_2 的基极电流的影响相反。譬如,若 u_i 增大,则引起 i_{B1} 、 i_{C1} 增加, u_{C1} 减小; i_{B2} 、 i_{C2} 减小, u_{C2} 增加, $u_{C1} \neq u_{C2}$,输出电压 $u_o = u_{C1} - u_{C2} \neq 0$ 。在放大电路的线性工作区内,输出电压随着输入电压按一定比例变化。因此,图 3.12 所示电路不仅可以抑制零点漂移,而且可以对正常的输入信号进行放大。

3. 差动放大电路的主要性能指标

差动放大电路由于其电路结构的特殊性,描述其电路性能的主要性能指标与前面所讨论的放大电路的主要性能指标有一定的区别。为了确切地描述差动放大电路对不同输入信号的放大能力,在差动放大电路的分析中,引入了差模输入信号和共模输入信号的概念。所谓差模输入信号是指差动放大电路两边加入绝对值相等、极性相反的输入电压;共模输入信号是指差动放大电路两边加入大小相等、极性相同的输入电压。在一般情况下,差模输入电压 u_{id} 的定义为

$$u_{id} = u_{i1} - u_{i2} \quad (3.12)$$

共模输入电压 u_{ic} 的定义为

$$u_{ic} = \frac{1}{2}(u_{i1} + u_{i2}) \quad (3.13)$$

引入了差模输入电压 u_{id} 和共模输入电压 u_{ic} 后,相对应的有差模输出电压 u_{od} 和共模输出电压 u_{oc} ,由此引出下述性能指标的定义。

(1) 差模电压放大倍数 A_{ud}

$$A_{ud} = \frac{u_{od}}{u_{id}} \quad (3.14)$$

(2) 共模电压放大倍数 A_{uc}

$$A_{uc} = \frac{u_{oc}}{u_{ic}} \quad (3.15)$$

(3) 共模抑制比 K_{CMR}

$$K_{CMR} = \left| \frac{A_{ud}}{A_{uc}} \right| \quad (3.16)$$

差动放大电路的其他性能指标如输入、输出电阻等将结合具体电路分析介绍。

差动放大电路的一个重要特点是:对于加到两输入端大小相等、极性相反的差模信号具有较强的放大能力;而对于加到两输入端大小相等、极性相同的共模信号放大能力很弱。也就是说,差动放大电路能够放大差模信号,抑制共模信号。由于噪声和温漂等效于共模信号,因此差动放大电路能够抑制噪声和温漂。

3.3.2 长尾式差动放大电路

从上述分析已知,基本差动放大电路抑制温漂的原理是利用电路结构的对称性,当环境温度变化时,尽管其对电路每边的影响仍然存在,但对于输出端来讲,两边的变化量相互抵消,从而保证输出电压值不受温度改变的影响。若电路结构不满足对称性,则对温漂的抑制能力就会降低。为了提高基本差动放大电路抑制温漂的能力,常在其发射极电路中加一个电阻 R_E ,形成所谓的长尾式差动放大电路,如图 3.14 所示。

1. 静态分析

当 $u_{i1} = u_{i2} = 0$ 时,电路处于静态,其等效电路如图 3.15 所示。由图 3.15 可得

$$R_B I_{B1} + U_{BE1} + I_{RE} R_E = U_{EE}$$

$$I_{E1} + I_{E2} = I_{RE}$$

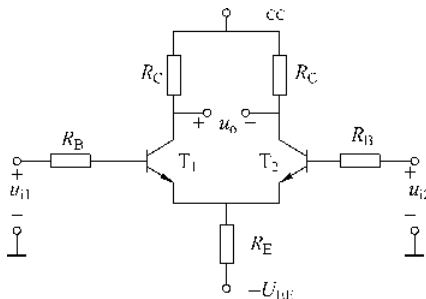


图 3.14 长尾式差动放大电路

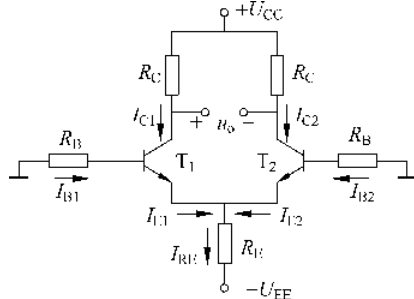


图 3.15 静态分析等效电路

考虑到电路的对称性,有: $\beta_1 = \beta_2 = \beta, U_{BE1} = U_{BE2} = U_{BEQ}, I_{B1} = I_{B2} = I_{BQ}, I_{E1} = I_{E2} = I_{EQ}, I_{C1} = I_{C2} = I_{CQ}$, 由上述各式可解出

$$I_{RE} = \frac{U_{EE} - U_{BEQ}}{R_E + \frac{R_B}{2(1+\beta)}} \approx \frac{U_{EE} - U_{BEQ}}{R_E} \quad (3.17)$$

$$I_{CQ} \approx I_{EQ} = \frac{1}{2} I_{RE} \quad (3.18)$$

$$U_{CEQ} = U_{CC} - I_{CQ} R_C + (R_B I_{BQ} + U_{BEQ}) \approx U_{CC} - I_{CQ} R_C + U_{BEQ} \quad (3.19)$$

$$u_O = U_{CQ1} - U_{CQ2} = 0 \quad (3.20)$$

在上述计算中,忽略了 I_B 在 R_B 上的压降。

2. 动态分析

在差动放大电路中,差模输入信号和共模输入信号对电路的作用效果不同,因此,可分别分析其作用效果。

1) 差模电压放大倍数 A_{ud}

在差模信号 u_{id} 的作用下,差动放大电路中一边的发射极电流增大;另一边的发射极电流减小。考虑到电路的对称性,两管发射极电流的增量绝对值相等、方向相反。这样,流过电阻 R_E 的电流增量为零,即电路中晶体管发射极等效交流接地;在交流等效电路中,直流电源对地短路,因此可做出长尾式差动放大电路的差模等效电路,如图 3.16 所示。

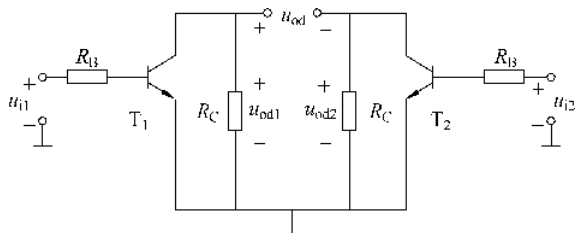


图 3.16 长尾式差动放大电路的差模等效电路

考虑到电路的对称性, $r_{be1} = r_{be2} = r_{be}$, 由图 3.16 可得

$$\begin{aligned} u_{od1} &= -\frac{\beta R_C}{R_B + r_{be}} u_{i1} \\ u_{od2} &= -\frac{\beta R_C}{R_B + r_{be}} u_{i2} \\ u_{od} &= u_{od1} - u_{od2} = -\frac{\beta R_C}{R_B + r_{be}} (u_{i1} - u_{i2}) = -\frac{\beta R_C}{R_B + r_{be}} u_{id} \\ A_{ud} &= \frac{u_{od}}{u_{id}} = -\frac{\beta R_C}{R_B + r_{be}} \end{aligned} \quad (3.21)$$

当在两个管子的集电极之间接入负载电阻 R_L 时,由于两个管子的集电极电压的变化方向相反但绝对值相等,因此电阻 R_L 的中点电位保持不变即等效交流接地。对于单边电路其等效负载电阻 $R'_L = R_C // \frac{R_L}{2}$, 所以有

$$A_{ud} = \frac{u_{od}}{u_{id}} = -\frac{\beta R'_L}{R_B + r_{be}} \quad (3.22)$$