



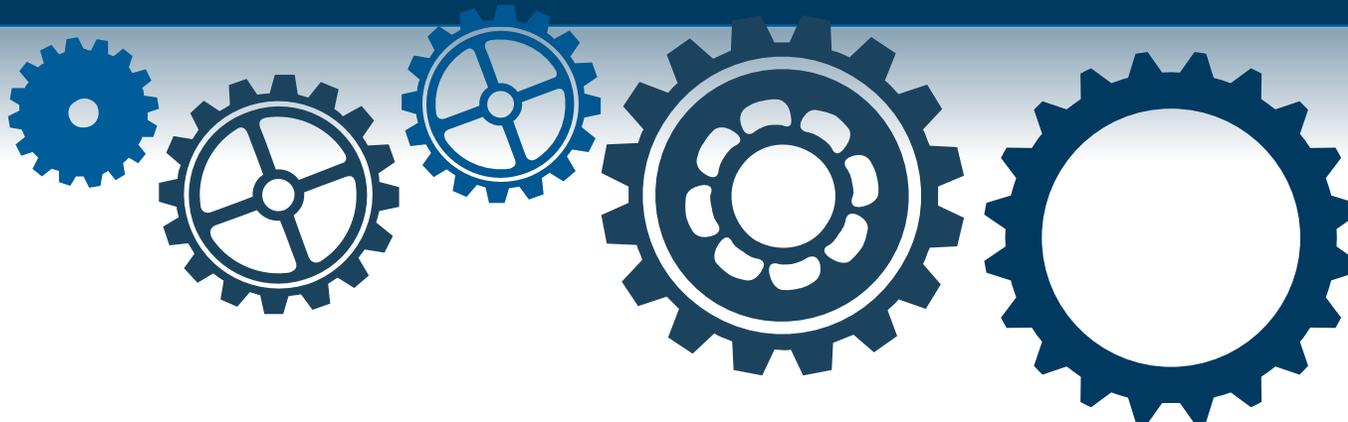
电工电子技术

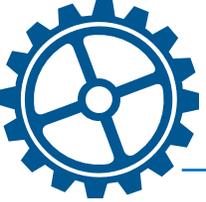


第8章



集成运算放大器





第8章 集成运算放大器

学习目标

1. 掌握集成运算放大器的结构组成和图形符号。
2. 掌握集成运算放大器的主要参数和理想化条件。
3. 熟悉差动放大电路的基本电路和工作原理。
4. 掌握集成运算放大器的线性应用。
5. 掌握集成运算放大器的非线性应用。

育人目标

以大国工匠的事迹引导学生学习工匠精神，脚踏实地、潜心钻研，为社会发展贡献自己的力量。

The slide features several blue gear icons of various sizes and designs. Two gears are positioned above the title bar, and a cluster of four gears is positioned below it. The gears vary in size and some have internal patterns, such as a four-spoke wheel or a circular pattern.

8.1 集成运算放大器概述



8.1 集成运算放大器概述

8.1.1 集成运放的结构组成和图形符号

1. 集成运放的结构组成

集成运放是一种高电压增益、高输入电阻和低输出电阻的多级直接耦合放大电路，一般由输入级、中间级、输出级和偏置电路四部分组成，如图8-1所示。



图 8-1 集成运放的结构组成图

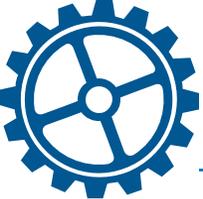
输入级：一般是差动放大电路，利用其对称特性可以提高整个电路的共模抑制比和电路性能，有反相输入端“-”、同相输入端“+”两个输入端。

中间级：主要作用是提高电压增益，一般由多级放大电路组成。

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，并尽可能地扩大动态范围，增大输出电压幅度，提高输出功率。

偏置电路：为各级提供合适的工作电流，一般由各种类型的电流源电路组成。

除此之外，还有一些过载保护电路及高频补偿环节等辅助环节。



8.1 集成运算放大器概述

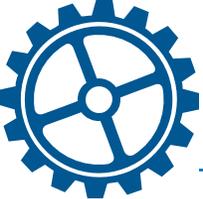
2. 集成运放的结构特点

- (1) 元器件参数的精度较差，但误差的一致性较好，易于制成对称性好的电路，如差动放大电路。
- (2) 制作电容困难，级间采用直接耦合方式。
- (3) 制作晶体管比制作电阻更方便，常用由晶体管或场效应管组成的恒流源为各级提供偏置电流，或者用作有源负载。
- (4) 采用一些特殊结构，如横向PNP型管（ β 低、耐压高、 f_T 小）、双集电极晶体管等。

3. 集成运放的图形符号

集成运放的图形符号如图8-2所示，三角形表示放大器，三角形所指方向为信号传输方向， A_o 为 ∞ 时表示开环增益极高。它有两个输入端和一个输出端。同相输入端标“+”（或P），当输入电压从同相端输入，即从“+”端与地之间输入时，输出端电压与输入电压同相；反相输入端标“-”（或N），当输入电压从反相端输入，即从“-”端与地之间输入时，输出电压端与输入电压反相。输出端的“+”表示输出电压为正。

实际集成运放有圆壳式封装、单列直插式封装和双列直插式封装等，如图8-3所示。集成运放的引脚除输入、输出三个端口外，还有电源端、公共端（地端）、调零端、相位补偿端、外接偏置电阻端等。这些引脚虽未在图形符号上标出，但在实际使用时必须了解各引脚的功能及外接线的方



8.1 集成运算放大器概述

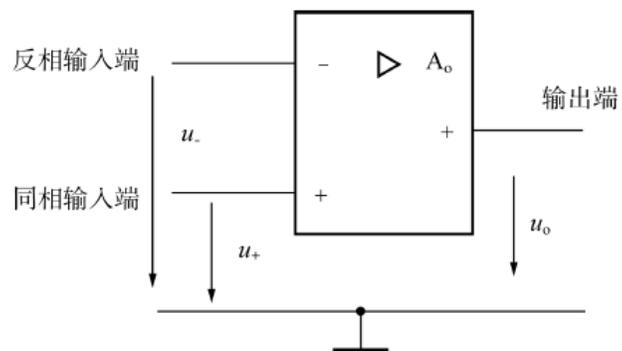
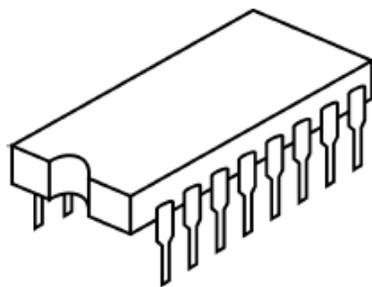
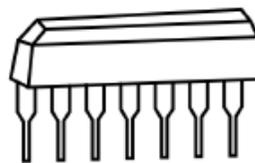


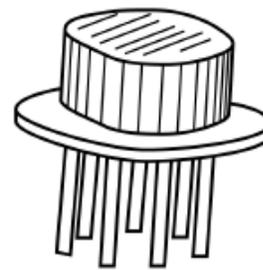
图 8-2 集成运放的图形符号



(a) 双列直插式封装



(b) 单列直插式封装



(c) 圆壳式封装

图 8-3 实际集成运放的外形图

8.1.2 集成运放的主要参数和理想化条件

1. 集成运放的主要参数

(1) **开环差模电压放大倍数 A_o** : 输出和输入之间无任何反馈元件时的差模电压放大倍数, 即 $A_o = \frac{u_o}{u_+ - u_-}$
 A_o 一般为 $10^4 \sim 10^7$ 。

(2) **最大输出电压 U_{opp}** : 集成运放在线性区的最大不失真输出电压。

(3) **输入失调电压 U_{io}** : 由于电路元件的不对称性, 当输入电压为零时, 为使输出电压为零而需在输入端所加的补偿电压。实际上常表示为输入电压为零时, 输出电压 U_o 折合到输入端的电压值, 即

$$I_{io} = | I_{B1} - I_{B2} |$$



8.1 集成运算放大器概述

U_{io} 一般为几毫伏，其值越小越好。

(4) **输入失调电流 I_{io}** : 当输入电压为零时，两个输入端的静态电流之差的绝对值，即

$$I_B = \frac{1}{2}(I_{B1} + I_{B2})$$

I_{io} 一般为 $10^{-2} \mu A$ 级别，其值越小越好。

(5) **输入偏置电流 I_B** : 输入电压为零时，两个输入端静态电流的平均值，即

$$I_B = \frac{1}{2}(I_{B1} + I_{B2})$$

I_B 一般为 $10^{-1} \mu A$ 级别，其值越小越好。

(6) **最大差模输入电压 U_{idM}** : 集成运放两个输入端之间输入差模电压的最大允许值。

(7) **最大共模输入电压 U_{icM}** : 集成运放两个输入端之间输入共模电压的最大允许值。

集成运放还有输入电阻、输出电阻和共模抑制比等参数。

2. 集成运放的电压传输特性

图8-4所示为集成运放的电压传输特性曲线。

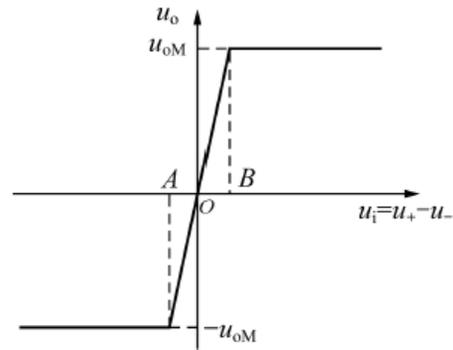
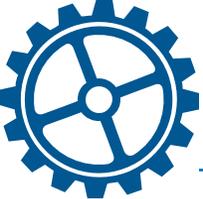


图 8-4 集成运放的电压传输特性曲线



8.1 集成运算放大器概述

当输入电压 u_i 在A、B之间时，集成运放工作在线性区，在A、B之外时，集成运放工作在线性区。集成运放工作在线性区时，输入电压与输出电压的关系为 $A_o = \frac{u_o}{u_i}$ 。由于集成运放电压放大倍数 A_o 很大，所以线性区很窄。要使集成运放在较大的输入电压下也能工作在线性区，必须在电路中引入深度负反馈。集成运放工作在线性区时，输出只有两种饱和状态（ $\pm U_{om}$ ）。电压饱和值 $\pm U_{om}$ 略低于正负电源电压。

3 集成运放的理想化条件

在分析集成运放的应用电路时，为了简化电路分析，常将集成运放理想化。集成运放的理想化条件如下。

- (1) 开环差模电压放大倍数 $A_o = \frac{u_o}{u_+ - u_-} = \frac{u_o}{u_i} = \infty$ 。
- (2) 差模输入电阻 $r_{id} = \infty$ 。
- (3) 输出电阻 $r_o = 0$ 。
- (4) 共模抑制比 $K_{CMR} = \infty$ 。

实际运算放大器的上述指标接近理想化条件，因此借理想运放进行分析所引起的误差很小，工程上是允许的，而且分析过程简化很多。图8-5所示为理想运放的图形符号。

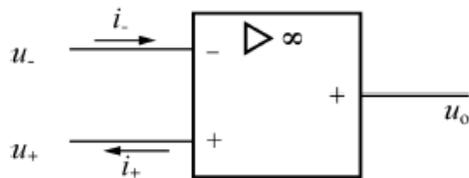


图 8-5 理想运放的图形符号



8.1 集成运算放大器概述

4. 理想运放的特点

当集成运放工作在线性区时，有

$$\left. \begin{aligned} A_o = \frac{u_o}{u_+ - u_-} = \frac{u_o}{u_i} \Rightarrow u_i = u_+ - u_- = \frac{u_o}{A_o} \\ \text{理想运放 } A_o = \infty, u_o \text{ 为有限值} \end{aligned} \right\} \Rightarrow u_+ - u_- = 0 \Rightarrow u_+ = u_-$$

两个输入端的电位相等，好像短接一样，但并非真的短路，因此称为虚短路，简称虚短。

由理想化条件可知

$$\left. \begin{aligned} i_- = i_+ = \frac{u_- - u_+}{r_{id}} \\ \text{理想运放 } r_{id} = \infty \end{aligned} \right\} \Rightarrow i_- = i_+ = 0$$

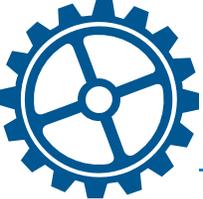
两个输入端之间的输入电阻无穷大，好像断路一样，但并非真的断路，因此称为虚断路，简称虚断。

当集成运放工作在线性区时，由集成运放的电压传输特性可知

$$u_+ > u_- \Rightarrow u_o = +U_{oM}, \quad u_+ < u_- \Rightarrow u_o = -U_{oM}$$

The slide features several blue gear icons of various sizes and designs. One gear is at the top center, another is to its right. Below the title bar, there are four gears: a small one on the left, a medium one next to it, a large one in the center, and another medium one on the right. The title '8.2 差动放大电路' is centered on a dark grey rounded rectangle.

8.2 差动放大电路



8.2 差动放大电路

8.2.1 直接耦合放大电路的零点漂移

1. 多级放大电路的直接耦合

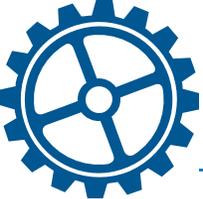
为了获得足够高的增益或满足对输入电阻、输出电阻的特殊要求，实用的放大电路通常由几级基本放大单元级联而成，构成多级放大电路。各级之间的连接方式称为耦合方式。常用的耦合方式有阻容耦合、变压器耦合、直接耦合三种。

直接耦合又称直流耦合。直接耦合的信号传输通路没有电抗元件，可以用来放大直流及缓慢变化的信号，而且体积小，便于集成。但其各级之间的静态工作点相互影响，存在较严重的零点漂移问题。

2. 零点漂移

如果将直接耦合放大电路的输入端短路，其输出端应有一固定的直流电压，即静态输出电压。但实际上输出电压将随着时间的推移，偏离初始值而缓慢地随机波动，这种现象称为零点漂移。零点漂移实际上就是静态工作点的漂移。

产生零点漂移的原因很多，如电源电压的波动、电路元件参数的变化及温度对晶体管参数的影响，都会使放大电路的静态工作点发生变动。即使这种变动很微小，也会被传送到下一级进行放大，这样逐级放大下去就产生了零点漂移现象。



8.2 差动放大电路

这些原因中以温度的影响最为严重(因此零点漂移也常称为温漂)。在直接耦合多级放大电路的各级漂移中,又以第一级的漂移影响最大,因为第一级的漂移会被送到后面各级逐级放大。最终在输出端产生较大的电压漂移,这种漂移电压大到一定程度时,就无法与正常放大的信号区分,使得放大器不能正常工作。因此,抑制零点漂移要着重于第一级。采用高性能的差动放大电路是克服零点漂移问题的有效方法。

8.2.2 差动放大电路的基本电路和工作原理

1. 差动放大电路的工作原理

最简单的差动放大电路如图8-6所示,它由两个完全对称的单管放大电路组成。在该电路中,晶体管 VT_1 、 VT_2 的型号一样,特性相同, R_{B1} 为输入回路限流电阻, R_{B2} 为基极偏流电阻, R_C 为集电极负载电阻。输入电压由两管的基极输入,输出电压从两管的集电极之间提取(又称双端输出),由于电路的对称性,在理想情况下,它们的静态工作点必然一一对应相等。

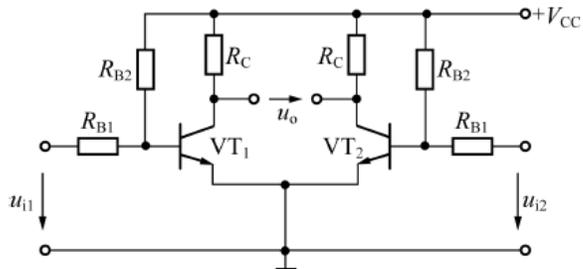
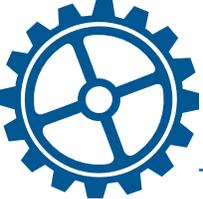


图 8-6 最简单的差动放大电路



8.2 差动放大电路

2. 抑制零点漂移

在输入电压为零， $u_{i1} = u_{i2} = 0$ 的情况下，由于电路对称，存在 $I_{C1} = I_{C2}$ ，因此两管的集电极电位相等，即 $U_{C1} = U_{C2}$ ，故 $u_o = U_{C1} - U_{C2} = 0$ 。

当温度升高引起晶体管集电极电流增大时，由于电路对称，存在 $\Delta I_{C1} = \Delta I_{C2}$ ，因此两管集电极电位的下降量必然相等，即 $\Delta U_{C1} = \Delta U_{C2}$ ，所以输出电压仍为零，即 $u_o = \Delta U_{C1} - \Delta U_{C2} = 0$ 。

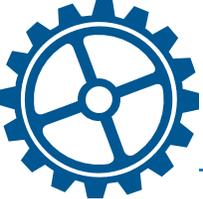
由以上分析可知，在理想情况下，由于电路的对称性，输出电压采用从两管集电极间提取的双端输出方式，对于无论什么原因引起的零点漂移，均能有效地进行抑制。

抑制零点漂移是差动放大电路最突出的优点。但必须注意，在这种最简单的差动放大电路中，每个晶体管的漂移仍然存在。

3. 动态分析

差动放大电路的信号输入有共模输入、差模输入和比较输入三种类型，输出方式有单端输出和双端输出两种类型。

(1) **共模输入**。在电路的两个输入端输入大小相等、极性相同的电压信号，这种输入方式称为共模输入。大小相等、极性相同的信号为共模信号。



8.2 差动放大电路

很显然，由于电路的对称性，在共模输入信号的作用下，两管集电极电位的大小、方向变化相同，输出电压为零(双端输出)，说明差动放大电路对共模信号无放大作用，共模信号的电压放大倍数为零。

(2) **差模输入**。在电路的两个输入端输入大小相等、极性相反的电压信号，即 $u_{i1}=-u_{i2}$ ，这种输入方式称为差模输入。大小相等、极性相反的信号为差模信号。

在如图8-6所示的电路中，设 $u_{i1}>0$ 、 $u_{i2}<0$ ，则在 u_{i1} 的作用下，VT1管的集电极电流增大，导致集电极电位下降（ ΔU_{C1} 为负值）；同理，在 u_{i2} 的作用下，VT2管的集电极电流减小 ΔI_{C2} ，导致集电极电位升高（ ΔU_{C2} 为正值）。由于两管电流的变化量大小相等、方向相反， ΔU_{C1} 和 ΔU_{C2} 大小相等且一正一负，输出电压为 $u_o=\Delta U_{C1}-\Delta U_{C2}$ 。

(3) **比较输入**。两个输入信号的大小和相对极性是任意的，既非差模，又非共模，这种输入方式称为比较输入。在自动控制系统中，经常运用比较输入的方式。

为了便于分析和处理，通常将比较信号分解为差模分量和共模分量。令 $u_{ic} = \frac{u_{i1} + u_{i2}}{2}$ ， $u_{id} = \frac{u_{i1} - u_{i2}}{2}$ ，则有 $u_{i1}=u_{ic}+u_{id}$ ， $u_{i2}=u_{ic}-u_{id}$ ，因此，任意信号可以分解成一对差模信号和一对共模信号的新型组合。例如，任意输入信号 $u_{i1}=-6\text{mV}$ ， $u_{i2}=2\text{mV}$ ，将该信号分解成差模信号和共模信号。可得

$$u_{ic} = \frac{-6+2}{2} \text{ mV} = -2 \text{ mV}, \quad u_{id} = \frac{-6-2}{2} \text{ mV} = -4 \text{ mV}, \quad \text{则有 } u_{i1} = (-2-4) \text{ mV}, \quad u_{i2} = (-2+4) \text{ mV}。$$



8.2 差动放大电路

4. 典型差动放大电路

典型差动放大电路如图8-7所示，与最简单的差动放大电路相比，该电路增加了调零电位器 R_P 、发射极公共电阻 R_E 和负电源 E_E 。

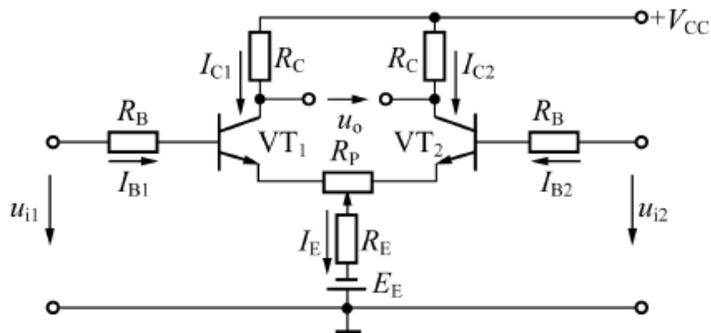


图 8-7 典型差动放大电路

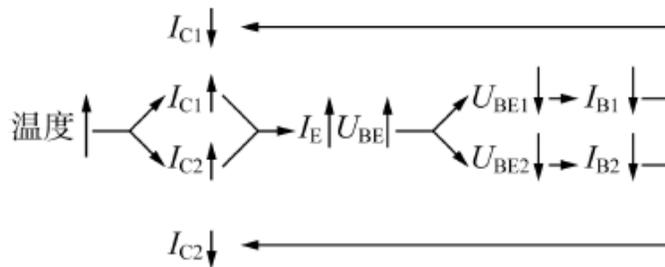


图 8-8 抑制零点漂移的过程

例如温度升高时， VT_1 和 VT_2 的集电极电流 I_{C1} 和 I_{C2} 都增大，它们的发射极电流 I_{E1} 和 I_{E2} 会增大，流过发射极公共电阻的电流 $I_E=I_{E1}+I_{E2}$ 也会增大， R_E 上的电压增大， VT_1 和 VT_2 的发射极电位升高，使 U_{BE1} 和 U_{BE2} 减小，则 I_{B1} 和 I_{B2} 减小，从而抑制了 I_{C1} 和 I_{C2} 的增大。这样，由于温度变化引起的漂移，通过 R_E 的作用得到了一定程度的抑制。抑制零点漂移的过程，如图8-8所示。



8.2 差动放大电路

由于差模信号使两个晶体管的集电极电流一增一减，只要电路的对称性足够好，其变化量大小相等，流过 R_E 的电流就等于静态值（不变），因此 R_E 对差模信号的放大基本上不产生影响。

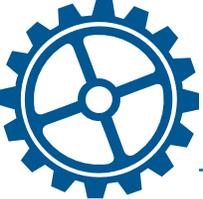
既然 R_E 不影响差模信号的放大，为了使 R_E 抑制零点漂移的作用显著一些，其阻值可以取得大一些。但是，在 V_{CC} 一定的情况下，过大的 R_E 会使管压降 U_{CE} 变小，静态工作点下移，集电极电流减小，电压放大倍数下降。为此，可以接入负电源 E_E 来补偿 R_E 上的静态压降（一般使 $E_E = V_{CC}$ ），从而保证两个晶体管有合适的静态工作点。

在输入电压为零时，因电路不完全对称，会使输出电压不等于零。这时可调节电位器 R_P 使输出电压为零，所以 R_P 称为调零电位器。但因 R_P 会使电压放大倍数降低，所以其阻值不宜过大，一般为几十欧到几百欧。

由以上分析可知，典型差动放大电路既可利用电路的对称性，采用双端输出的方式抑制零点漂移，又可利用发射极公共电阻 R_E 的作用抑制每个晶体管的零点漂移，稳定静态工作点。因此，这种典型差动放大电路即使是采用单端输出，其零点漂移也能得到有效的抑制。

8.2.3 输入、输出方式

差动放大电路有两个输入端和两个输出端，因此信号输入、输出方式有如下四种。



8.2 差动放大电路

1. 双端输入、双端输出

双端输入、双端输出的情况如图8-9a所示，根据前面的分析，差模电压放大倍数为

$$A_{ud} = \frac{U_o}{U_i} = \frac{\beta R_L'}{R_S + r_{BE}}, \quad R_L' = R_C // \frac{R_L}{2}$$

输入电阻 r_{id} 和输出电阻 r_o 分别为

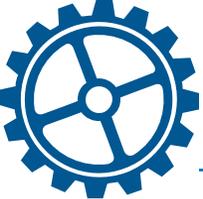
$$r_{id} = 2(R_S + r_{BE}), \quad r_o \approx 2R_C$$

共模电压放大倍数为

$$A_{uc} = \frac{\text{共模输出电压 } U_{oc}}{\text{共模输入电压 } U_{ic}} = 0$$

共模抑制比为

$$K_{CMR} \rightarrow \infty$$



8.2 差动放大电路

2. 双端输入、单端输出

双端输入、单端输出的情况如图8-9b所示，由于输出只从VT1管的集电极输出，所以输出电压只有双端输出的一半，即差模电压放大倍数为

$$A_{ud} = \frac{U_o}{U_i} = -\frac{1}{2} \frac{\beta R_L'}{R_S + r_{BE}}$$

如果从VT₂管输出，只是U_o的相位与前者相反，差模电压放大倍数为

$$A_{ud} = \frac{U_o}{U_i} = \frac{1}{2} \frac{\beta R_L'}{R_S + r_{BE}}$$

输入电阻和输出电阻分别为

$$r_{id} = 2(R_S + r_{BE}), \quad r_o \approx R_C$$

共模电压放大倍数为 $A_{uc} = \frac{\text{共模输出电压 } U_{oc}}{\text{共模输入电压 } U_{ic}} = -\frac{\beta R_L'}{r_{BE} + R_S + (1 + \beta)2R_E}$

共模抑制比为

$$K_{CMR} = \frac{\beta R_E}{R_S + r_{BE}}$$



8.2 差动放大电路

3. 单端输入、双端输出

单端输入、双端输出的情况如图8-9c所示， U_i 仅加在 VT_1 管输入端， VT_2 管的输入端接地；或者 U_i 仅加在 VT_2 管输入端， VT_1 管的输入端接地。这种输入方式称为单端输入，是实际电路中最常见的一种。

若忽略电路对共模信号的放大作用，则单端输入就等效为双端输入情况，故双端输入、双端输出的结论均适用单端输入、双端输出。这种接法的特点是把单端输入的信号转换成双端输出，作为下一级的差动输入，适用于负载两端任何一端不接地，而且输出正负对称性好的情况。而实际上常需要对地输出，单端输入、双端输出接法就不适用。

4. 单端输入、单端输出

单端输入、单端输出的情况如图8-9d所示，它与双端输入、单端输出等效。这种接法的特点是具有很强的抑制零点漂移的能力，而且可以根据不同的输出端得到同相和反相关系。

综上所述，差动放大电路的电压放大倍数仅与输出形式有关，双端输出的差模电压放大倍数与单管基本放大电路相同；单端输出的差模电压放大倍数是单管基本放大电路电压放大倍数的一半。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：
<https://d.book118.com/667006144200010012>