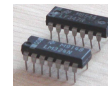
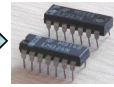


第4章 模拟集成电路基础

- 4.1 模拟集成电路共性问题
 - 4.2 晶体管电流源电路及其应用
 - 4.3 差动放大电路
 - 4.4 功率放大电路
 - 4.5 多级放大电路
 - 4.6 集成运算放大电路
 - 4.7 辅修内容
- 小结



包含集成电路 →



没有集成电路会有当今的计算机吗？
没有集成电路会有当今的手机吗？

你知道吗？
你想知道吗？

集成运放包含什么功能的电路？
集成运放的特点？作用？
集成运放怎么运用？

4.1 模拟集成电路共性问题

4.1.1 模拟集成电路的工艺特点

4.1.2 集成运算放大电路的结构框图

4.1.1 模拟集成电路的工艺特点

概述

集成电路是一种将“管”和“路”紧密结合的器件，它以半导体单晶硅为芯片，采用专门的制造工艺，把晶体管、场效应管、二极管、电阻和电容等元器件及它们之间的连线所组成的完整电路制作在一起，使之具有**特定的功能**。

集成电路体积小、重量轻、耗电少、可靠性高，已成为现代电子器件的主体。集成电路分数字与模拟两大类。

模拟集成电路的种类很多，有集成运算放大器（简称集成运放），集成功率放大器，集成模拟乘法器，集成锁相环，集成稳压器等。在模拟集成电路中，集成运算放大器是最为重要、用途最广的一种，这里主要介绍**集成运放**的内部电路、工作原理、性能指标及常用等效模型。

1. 集成电路中的元器件特点

(1) 集成电路中的元器件是在相同的工艺条件下做出的，邻近的器件具有良好的**对称性**，而且受环境温度和干扰的影响后的变化也相同，因而特别有利于实现需要**对称结构**的电路。

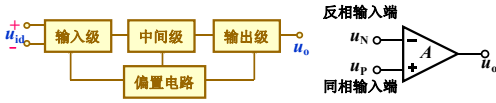
(2) 集成工艺制造的电阻、电容数值范围有一定的限制。集成电路中的电阻是使用**半导体材料的体电阻**制成的，因而很难制造大的电阻，其阻值一般在几十欧姆到几十千欧姆之间；集成电路中的电容是用PN结的**结电容**作的。

(3) 集成工艺制造晶体管、场效应管最容易，众多数量的晶体管通过一次综合工艺完成。集成晶体管有纵向NPN型管（ β 值高、性能好）、横向PNP型管（ β 值低、但反向耐压高）和场效应管，另外，集成工艺比较容易制造多极晶体管，如多发射极管、多集电极管等。集成二极管、稳压管等一般用NPN管的发射结代替。

2. 集成电路结构形式上的特点

- (1) 利用元器件参数的**对称性**来提高电路**稳定性**
- (2) 利用**有源器件**代替**无源元件**
- (3) 一般采用**直接耦合方式**
- (4) 采用较复杂的电路结构
- (5) 适当利用**外接分立元件**

4.1.2 模拟集成电路的结构框图



输入级：采用输入电阻高的差分电路，大大减少温漂。

中间级：采用有源负载的共发射极电路，增益大。

输出级：OCL 功率放大电路，带负载能力强

偏置电路：镜像电流源，微电流源等。

【问题引导】集成电路各级需要解决的问题及结构特点如何？

4.2 晶体管电流源电路及其应用

4.2.1 晶体管电流源电路

4.2.2 有源负载放大电路

4.2.1 晶体管电流源电路

根据集成工艺的特点，模拟集成放大电路中的 **偏置电路**、**集电极或发射极负载**等，一般采用**晶体管电流源**。这不仅能使电路性能具有不随温度及电源电压变化而变化的良好稳定性（做**偏置**），而且能获得高增益、大动态范围的特性（做**有源负载**）。

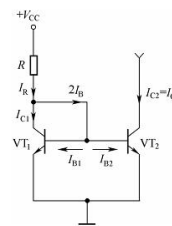
电流源电路是指能够输出恒定电流的电路。由第 2 章晶体管的特性已知，**晶体管**本身便具有**近似恒流**的特性。

在集成电路中，常用的电流源电路有：**镜像电流源**、**精密电流源**、**微电流源**、**比例电流源**和**多路电流源**等。它主要提供集成运放中各级合适的静态电流或作为有源负载代替高阻值电阻，以提高放大电路的放大倍数。

【问题思考】晶体管恒流源的作用有哪两个？

1. 镜像电流源

两管参数对称，工作在临界饱和状态。



$$\because U_{BE1} = U_{BE2} = U_{BE}, \beta_1 = \beta_2 = \beta$$

$$\therefore I_{B1} = I_{B2} = I_B, I_{C1} = I_{C2} = I_C = \beta I_B$$

基准电流

$$I_R = \frac{V_{CC} - U_{BE}}{R} = I_C + 2I_B = I_C + 2\frac{I_C}{\beta}$$

$$I_O = I_C = \frac{\beta}{\beta + 2} I_R = \frac{1}{1 + \frac{2}{\beta}} I_R$$

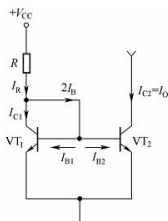
当 $\beta \gg 2$ 时，

$$I_O \approx I_R = \frac{V_{CC} - U_{BE}}{R} \quad I_O \text{ 基本恒定}$$

【知识提醒】对晶体管恒流源电路的要求：1) 识别结构，2) 会求基准电流，3) 会推导输出电流 I_O ？

镜像电流源的温度补偿作用

$$T(^{\circ}\text{C}) \uparrow \rightarrow I_C \uparrow \rightarrow I_R \uparrow \rightarrow U_R \uparrow \rightarrow U_B \uparrow \rightarrow I_B \uparrow \rightarrow I_C \uparrow$$



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

镜像电流源的缺点

若要求 I_O 大，则 I_R 及 R 的功耗大；

若要求 I_O 小，则 I_R 小， R 很大，

使 R 集成困难。

2. 改进型镜像电流源 (1)

T_1 、 T_2 、 T_3 、完全相同

$$\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 \quad I_{B1} = I_{B2} = I_B$$

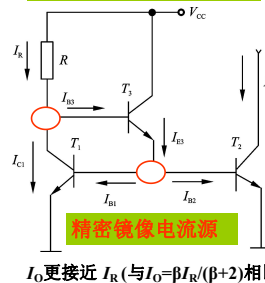
$$U_{BE1} = U_{BE2} = U_{BE}$$

$$I_{C1} = I_{C2} = I_R - I_{B3}$$

$$\text{而 } I_{B3} = \frac{I_{E3}}{1 + \beta} = \frac{2I_B}{1 + \beta} = \frac{2I_{C1}}{(1 + \beta)\beta}$$

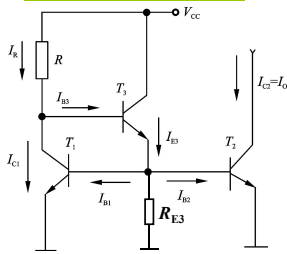
整理得

$$I_O = I_{C1} = I_{C2} = \frac{1}{1 + \frac{2}{\beta(1 + \beta)}} I_R \approx I_R$$



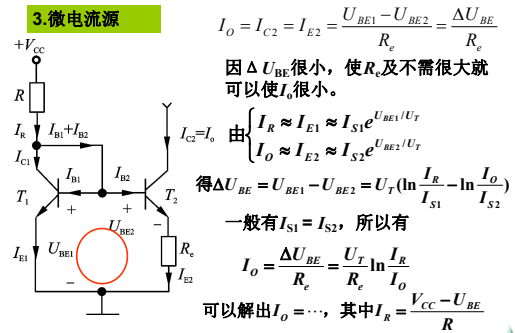
I_O 更接近 I_R (与 $I_O = \beta I_R / (\beta + 2)$ 相比)

2. 改进型镜像电流源 (2)

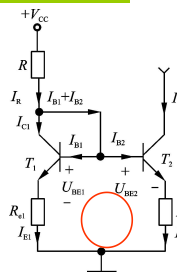


为了避免 T_3 的电流过小而使 β_3 下降, 常在 T_3 的射极加一电阻 R_{E3} , 使 I_{E3} 增大。

3. 微电流源



4. 比例电流源



$$U_{BE1} + I_{E1} R_{e1} = U_{BE2} + I_{E2} R_{e2}$$

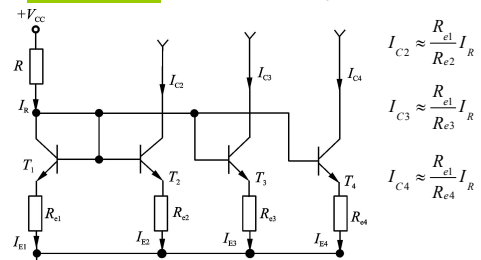
因 $U_{BE1} \approx U_{BE2}$, 则 $I_{E1} R_{e1} \approx I_{E2} R_{e2}$

而 $I_R \approx I_{E1}$, $I_O \approx I_{E2}$

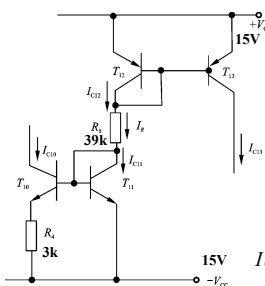
$$\text{所以 } \frac{I_O}{I_R} \approx \frac{R_{e1}}{R_{e2}}, \quad I_O \approx \frac{R_{e1}}{R_{e2}} I_R$$

5. 多路电流源

T_1 分别与 T_2 、 T_3 、 T_4 组成比例电流源



例4-1 图示为集成运放F007的部分电流源, 其各三极管的 β 均为50, $U_{BE}=0.7V$ 。试求出各管的集电极电流。



解:

$$I_R = \frac{2V_{CC} - 2U_{BE}}{R_5} = 0.73\text{mA}$$

T_{10} 、 T_{11} 构成微电流源,

$$I_{C10} \approx \frac{U_T \ln \frac{I_R}{I_{C10}}}{R_4} = \frac{26}{3} \ln \frac{0.73}{I_{C10}}$$

可解得: $I_{C10} \approx 28\mu A$

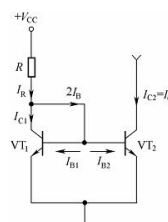
T_{12} 、 T_{13} 构成镜像电流源,

$$I_{C12} = I_{C13} = \frac{\beta}{\beta + 2} I_R = 0.52\text{mA}$$

例A 在下图电路中, T_1 、 T_2 管的特性相同, 已知 $V_{CC}=15V$, $\beta_1=\beta_2=\beta$, $U_{BE1}=U_{BE2}=0.6V$ 。

(1) 试证明当 $\beta \gg 2$ 时, $I_{C2} \approx I_R$;

(2) 若要求 $I_{C2}=28\mu A$, 电阻 R 应取多大?



解: (1) 在镜像电流源中已推出

$$I_O = I_C = \frac{\beta}{\beta + 2} I_R = \frac{1}{1 + \frac{2}{\beta}} I_R$$

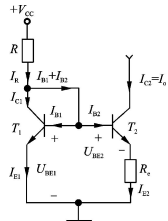
当 $\beta \gg 2$ 时, $I_{C2} = I_O \approx I_R$

$$(2) I_{C2} = I_O \approx I_R = I_{C1}$$

$$R = \frac{V_{CC} - U_{BE1}}{I_{C1}} = 514(\text{k}\Omega)$$

例3: 在下图电路中基

- (1) 指出电路为何种电流源电路;
- (2) 根据二极管电流方程, 导出 T_1 、 T_2 管的工作电流 I_{C1} 、 I_{C2} 的关系式;
- (3) 若测得 $I_{C2} = 28 \mu A$, $I_{C1} = 0.73 mA$, 估算电阻 R_1 和 R 的阻值。



解: (1) 为微电流源

(2) 见微电流源推导过程

$$I_{C2} = \frac{U_T}{R_e} \ln \frac{I_{C1}}{I_{C2}}$$

$$(3) R_e = \frac{U_T}{I_{C2}} \ln \frac{I_{C1}}{I_{C2}} = 3(k\Omega)$$

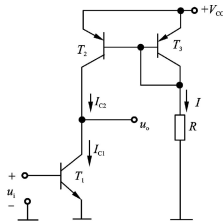
$$R = \frac{V_{CC} - U_{BE1}}{I_{C1}} = 20(k\Omega)$$

4.2.2 有源负载放大电路

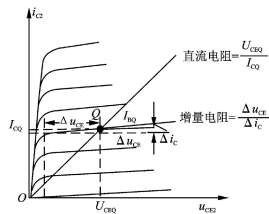
在共射放大电路中, 为了 **提高 A_u** , 行之有效的 **方法是增大集电极电阻 R_c** 。然而, 为了维持晶体管的静态电流不变, 在增大 R_c 时必须提高电源电压。当电源电压增大到一定程度时, 电路的设计就变得不合理了。另外在集成电路中, 不能使用过大的电阻, 而且 R_c 增大, 直流功耗也增大, 对电源电压的要求也会提高, 因此 A_u 的增加受到 R_c 取值的限制。

如果用 **恒流源来代替 R_c** , 则由于恒流源的直流电阻不大, 故恒流源两端的直流电压并不大, 但恒流源的动态交流电阻很大, 该交流电阻与交流通道中的 R_c 等效, A_u 可以大大提高。由于晶体管和场效应管是有源器件, 而上述电路又以它们为负载, 故称为 **有源负载**。

有源共射放大电路



(a) 电路图



(b) 工作的直流电阻和增量电阻

【问题引导】为什么用恒流源来代替 R_c ?

4.3 差动放大电路

4.3.1 差动放大电路结构与抑制零漂的原理

4.3.2 差动放大电路基本性能分析

4.3.3 差动放大电路的改进

概述

根据集成电路结构形式上的特点, 集成电路的极间耦合方式一般采用 **直接耦合**。直接耦合存在 **温度漂移 (零点漂移)** 问题。为了抑制 **温度漂移**, 一种比较有效的电路就是 **差动放大电路**。

零点漂移的严重性

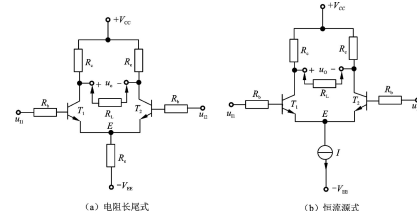
如果零点漂移的大小足以和输出的有用信号相比拟, 就无法正确地将两者加以区分。因此, 为了使放大电路能正常工作, 必须有效地抑制零点漂移。

【问题思考】为什么要抑制温度漂移?

4.3.1 差动放大电路结构与抑制零漂的原理

差动放大电路 (Differential Amplifier)

1. 电路组成



(a) 电阻长尾式

(b) 恒流源式

特点 { a. 两只完全相同的管子;
b. 元件参数对称;

2. 输入输出方式

输入端：一个是 T_1 的基极 B_1 ，另一个是 T_2 的基极 B_2 。

输出端：一个是 T_1 的集电极 C_1 ，另一个是 T_2 的集电极 C_2 。

输入方式：

双端输入：若信号同时加到两个输入端。

单端输入：若信号仅从一个输入端加入，另一个输入端接地。

输出方式：

双端输出：若从 C_1 和 C_2 两端输出。

单端输出：仅从集电极 C_1 或 C_2 对地输出称为单端输出。

差动电路的工作模式：

(1) 双端输入、双端输出（双入——双出）

(2) 双端输入、单端输出（双入——单出）

(3) 单端输入、双端输出（单入——双出）

(4) 单端输入、单端输出（单入——单出）

3. 差模信号与共模信号

差模信号：两大小相等，极性相反的信号（ $u_{id1} = -u_{id2}$ ）

共模信号：两大小相等，极性相同的信号（ $u_{ic1} = u_{ic2}$ ）

差模输入信号 u_{id} ：两输入信号之差

共模输入信号 u_{ic} ：同时接到两个输入端的信号

可以将两个任意输入信号 u_{i1} 、 u_{i2} 分解为共模分量和差模分量

$$\begin{cases} u_{i1} = u_{ic1} + u_{id1} \\ u_{i2} = u_{ic2} + u_{id2} \end{cases} \quad \begin{cases} u_{ic} = u_{ic1} = u_{ic2} = \frac{1}{2}(u_{i1} + u_{i2}) \\ u_{id} = u_{i1} - u_{i2} \end{cases}$$

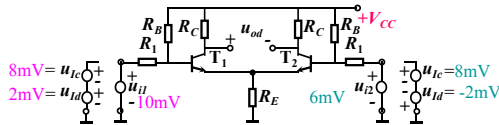
$$\begin{cases} u_{id1} = \frac{1}{2}u_{id} \\ u_{id2} = -\frac{1}{2}u_{id} \end{cases} \quad \begin{cases} u_{ic1} = u_{ic2} = u_{ic} \\ u_{id1} = -u_{id2} \end{cases}$$

注意：差模信号与差模输入信号的区别！

例C $\begin{cases} u_{i1} = 10\text{mV} \\ u_{i2} = 6\text{mV} \end{cases}$ 则 $\begin{cases} u_{ic} = \frac{1}{2}(u_{i1} + u_{i2}) = 8\text{mV} \\ u_{id} = u_{i1} - u_{i2} = 4\text{mV} \end{cases}$

$$\begin{cases} u_{ic1} = u_{ic2} = u_{ic} = 8\text{mV} \\ u_{id1} = \frac{1}{2}u_{id} = 2\text{mV}, u_{id2} = -u_{id1} = -2\text{mV} \end{cases}$$

【结论】任意信号 = 一对差模信号 + 一对共模信号



【问题思考】任意信号如何分解？

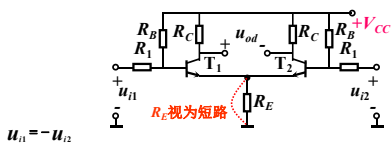
4. 抑制零漂的工作原理

原理：静态时，输入信号为零，即将输入端①和②短接。由于两管特性相同，所以当温度或其他外界条件发生变化时，两管的集电极电流 I_{CQ1} 和 I_{CQ2} 的变化规律始终相同，结果使两管的集电极电位 U_{CQ1} 、 U_{CQ2} 始终相等，从而使 $U_{OQ} = U_{CQ1} - U_{CQ2} = 0$ ，因此消除了零点漂移。

具体实践：在实践中，两个特性相同的管子采用“差分对管”，两半电路中对应的电阻可用电桥精密选配，尽可能保证阻值对称性精度满足要求。

结论：可想而知，即使采取了这些措施，差动放大电路的两半电路仍不可能完全对称，也就是说，零点漂移不可能完全消除，只能被抑制到很小。

5. 差动放大电路对差模信号的放大作用

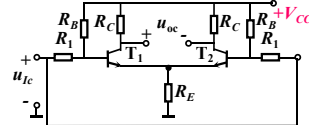


在差模信号作用下， $\Delta i_{E1} = -\Delta i_{E2}$ ， $\Delta i_{RE} = 0$ ， R_E 可视为短路

$$\begin{aligned} & u_{i1} \uparrow \rightarrow i_{b1} \uparrow \rightarrow i_{e1} \uparrow \rightarrow v_{e1} \downarrow \\ & u_{i2} \downarrow \rightarrow i_{b2} \downarrow \rightarrow i_{e2} \downarrow \rightarrow v_{e2} \uparrow \end{aligned} \quad \left. \begin{array}{l} \text{输出电压 } u_o = u_{o1} = v_{c1} - v_{c2} \neq 0. \end{array} \right\}$$

$$\text{差模放大倍数 } A_{ud} = \frac{u_{od}}{u_{id}}$$

6. 差动放大电路对共模信号的抑制作用



$$\begin{aligned} & u_{ic} \uparrow \rightarrow i_{B1} \uparrow \rightarrow i_{C1} \uparrow \rightarrow v_{C1} \downarrow \\ & u_{ic} \uparrow \rightarrow i_{B2} \uparrow \rightarrow i_{C2} \uparrow \rightarrow v_{C2} \downarrow \end{aligned} \quad \left. \begin{array}{l} \text{输出电压 } u_o = u_{oc} = v_{C1} - v_{C2} = 0 \end{array} \right\}$$

$$\text{共模放大倍数 } A_{uc} = \frac{u_{oc}}{u_{ic}}$$

$$\text{共模抑制比 } K_{CMR} = \left| \frac{A_{ud}}{A_{uc}} \right| \text{ 或 } K_{CMR} = 20 \lg \left| \frac{A_{ud}}{A_{uc}} \right|$$

理想情况下， $K_{CMR} \rightarrow \infty$

7. 不同信号的输入方式下的输出电压的计算

(1) 差模输入方式

差模输入信号为

$$u_{Id} = u_{i1} - u_{i2}$$

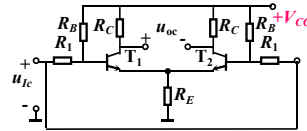
单边差模信号为

$$u_{i1} = \frac{1}{2} u_{Id}$$

$$u_{i2} = -\frac{1}{2} u_{Id}$$

【问题思考】谁是同相输入端？谁是反相输入端？

(2) 共模输入方式

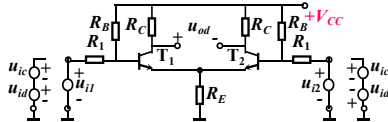
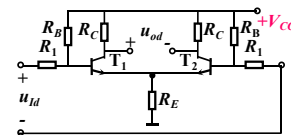


$$u_{i1} = u_{i2} = u_{ic}$$

若为双端输出, $u_{oc} = 0$.

在共模输入信号作用下, 差放两半电路中的电流和电压的变化完全相同。

(3) 任意信号输入方式

差模输入信号 $u_{id} = u_{i1} - u_{i2}$ 共模输入信号 $u_{ic} = (u_{i1} + u_{i2}) / 2$ 利用叠加原理得到: $u_o = A_d u_{id} + A_c u_{ic}$ 8. 加 $-V_{EE}$ 的差动放大电路

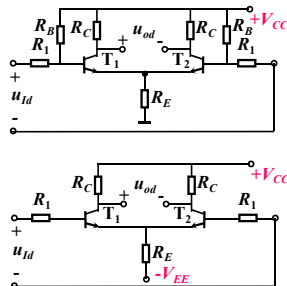
以上所述基本差动放大电路, 实际上不可能完全抑制零漂, 因为两半电路不会完全对称。特别对于单端输出, 共模抑制比并不是无穷大, 而这种“单端输出”方式又是经常采用的。

发射极电阻 R_E 的作用是稳定静态工作点, 当然也抑制零点漂移。 R_E 越大, 效果越好。

R_E 越大, 工作点越稳定, 零点漂移也越小。但 R_E 变大后, R_E 上的压降也变大, 管子的动态范围变小。采用双电源供电, 用电源 V_{EE} 提供 R_E 上所需的电压, 可以保持输出电压一定的动态范围。

由 $-V_{EE}$ 提供发射极正偏电压, 故 R_B 可以去掉。

改进后的电路叫射极耦合差动放大电路也叫长尾电路。



4.3.2 差动放大电路基本性能分析

差动放大器共有四种输入输出方式:

1. 双端输入、双端输出 (双入双出)
2. 双端输入、单端输出 (双入单出)
3. 单端输入、双端输出 (单入双出)
4. 单端输入、单端输出 (单入单出)

【知识点提醒】静态分析---求Q点;

静态分析方法: 半等效电路分析法

动态分析---求差模电压放大倍数 A_{ud}

共模电压放大倍数 A_{uc}

差模输入电阻 R_{id}

输出电阻 R_o

动态分析方法: 半等效电路分析法

一、静态分析

1. 双入双出 (R_L 开路)令 $u_i = 0$, 画出“半等效电路”

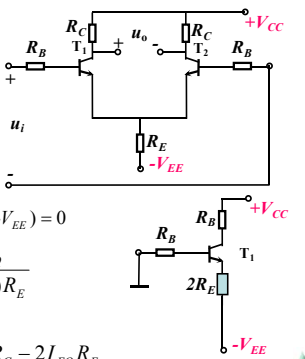
【问题思考】静态如何画“半等效电路”?

$$I_{BQ}R_B + U_{BEQ} + 2I_{EQ}R_E + (-V_{EE}) = 0$$

$$\text{解得 } I_{BQ} = \frac{V_{EE} - U_{BEQ}}{R_B + 2(1 + \beta)R_E}$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ}$$

$$U_{CEQ} = V_{CC} + V_{EE} - I_{CQ}R_C - 2I_{EQ}R_E$$



一、静态分析 (续)

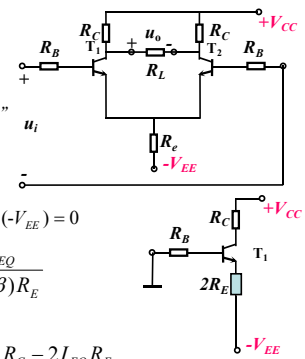
2. 双入双出 ($R_L \neq \infty$)令 $u_i = 0$, 画出“半等效电路”

$$I_{BQ}R_B + U_{BEQ} + 2I_{EQ}R_E + (-V_{EE}) = 0$$

$$\text{解得 } I_{BQ} = \frac{V_{EE} - U_{BEQ}}{R_B + 2(1 + \beta)R_E}$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ}$$

$$U_{CEQ} = V_{CC} + V_{EE} - I_{CQ}R_C - 2I_{EQ}R_E$$



例A: 对下图进行静态分析

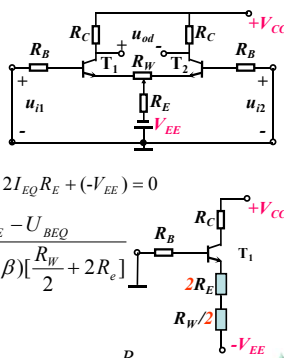
$$u_{i1} = u_{i2} = 0$$

$$I_{BQ}R_B + U_{BEQ} + I_{EQ}\frac{R_W}{2} + 2I_{EQ}R_E + (-V_{EE}) = 0$$

$$\text{解得 } I_{BQ} = \frac{V_{EE} - U_{BEQ}}{R_B + (1 + \beta)[\frac{R_W}{2} + 2R_E]}$$

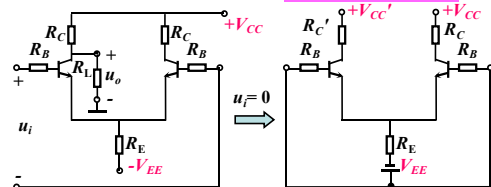
$$I_{CQ} = \beta I_{BQ}$$

$$U_{CEQ} = V_{CC} + V_{EE} - I_{CQ}R_C - I_{EQ}(\frac{R_W}{2} + 2R_E)$$



3. 双入-单出差动放大电路

一、静态分析 (续)



$$V'_{CC} = \frac{R_L}{R_C + R_L} V_{CC}$$

$$V_{EE} = I_B R_B + U_{BE} + (1 + \beta) I_B R_E$$

$$R'_C = R_C \parallel R_L$$

$$I_B = \frac{V_{EE} - U_{BE}}{R_B + (1 + \beta)R_E} \quad I_C = \beta I_B$$

$$I_{B1} = I_{B2} = I_B$$

$$U_{CE1} = V'_{CC} + V_{EE} - I_C R'_C - 2(1 + \beta) I_B R_E$$

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

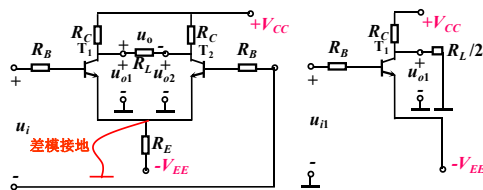
$$U_{CE2} = V_{CC} + V_{EE} - I_C R_C - 2(1 + \beta) I_B R_E$$

$$I_{E1} = I_{E2}$$

二、差模信号作用下的动态分析

半等效电路分析法

1. 双入-双出差动电路 【问题引导】怎样画差模半等效电路?

双入双出差模半等效电路的画法: $u_{id} = u_{i1} - u_{i2}$ ① R_C 视为短路; ② R_E 取一半。

$$u_{i1} = u_{id}/2, \quad u_{i2} = -u_{id}/2$$

差模特性分析

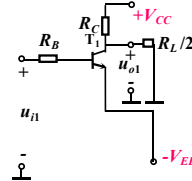
$$A_{u1} = \frac{u_{o1}}{u_{i1}} = -\frac{\beta(R_C \parallel \frac{R_L}{2})}{R_B + r_{be}}$$

$$A_{ud} = \frac{u_{od}}{u_{id}} = \frac{2u_{o1}}{2u_{i1}} = A_{u1}$$

$$R_{id} = \frac{u_{id}}{i_{id}} = 2(R_B + r_{be})$$

$$R_o = 2R_C$$

双入双出电路差模放大倍数与单边共射放大电路相同



双入双出差模半等效电路

$$u_{id} = u_{i1} - u_{i2}$$

$$u_{i1} = u_{id}/2$$

$$u_{i2} = -u_{id}/2$$

双端输入双端输出小结

(1) 差模电压放大倍数

$$A_{ud} = -\frac{\beta(R_C // \frac{R_L}{2})}{R_B + r_{be}}$$

(2) 共模电压放大倍数

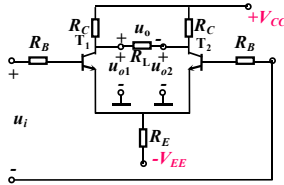
$$A_{uc} = 0$$

(3) 差模输入电阻

$$R_{id} = 2(R_B + r_{be})$$

(4) 输出电阻 $R_o = 2R_C$

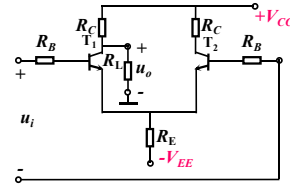
用半等效电路分析非常方便！用不着画微变等效电路！



二、差模信号作用下的动态分析(续)

2. 双入-单出差动放大电路

差模半等效电路分析法

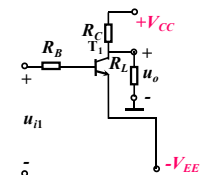
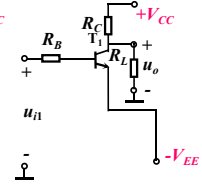


双入单出差模半等效电路的画法:

R_C 视为短路;

$$u_{id} = u_i = u_{i1} - u_{i2}$$

$$u_{i1} = u_{id}/2, \quad u_{i2} = -u_{id}/2$$



双入单出差模半等效电路

$$u_{id} = u_i = u_{i1} - u_{i2}$$

$$u_{i1} = u_{id}/2$$

$$u_{i2} = -u_{id}/2$$

差模特性分析

$$A_{u1} = \frac{u_o}{u_{i1}} = -\frac{\beta(R_C // R_L)}{R_B + r_{be}}$$

$$A_{ud} = \frac{u_{od}}{u_{id}} = \frac{u_o}{2u_{i1}} = \frac{A_{u1}}{2}$$

$$R_{id} = \frac{u_{id}}{i_{id}} = 2(R_B + r_{be})$$

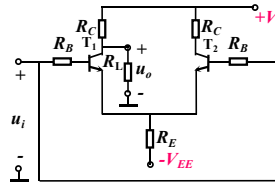
$$R_o = R_C$$

双入单出电路差模放大倍数
是单边共射放大电路的一半

三、共模信号作用下的动态分析

双端输入单端输出共模特性分析

共模半等效电路分析法

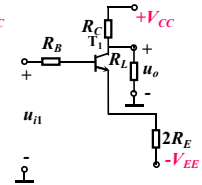


双入单出共模半等效电路的画法:

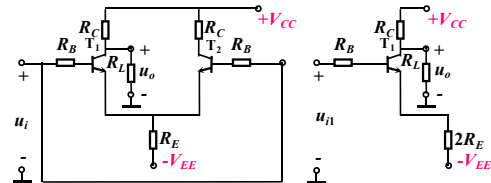
R_E 变成 $2R_E$ 。为什么?

$$u_{ic} = u_i$$

$$u_{i1} = u_i, \quad u_{i2} = u_i$$



【问题引导】怎样画差模半等效电路? 怎样画共模半等效电路?



共模特性分析

$$A_{uc} = \frac{u_{oc}}{u_{ic}} = \frac{u_o}{u_{i1}} = -\frac{\beta R'_C}{R_B + r_{be} + 2(1 + \beta)R_E} \approx -\frac{R'_C}{2R_E}$$

共模抑制比

$$K_{CMR} = \left| \frac{A_{ud}}{A_{uc}} \right| = \frac{R_B + r_{be} + 2(1 + \beta)R_E}{2(R_B + r_{be})}$$

用共模半等效电路
作共模分析同样非常方便!

用不着画微变等效电路!

共模半等效电路

双端输入单端输出差动放大电路分析小结

(1) 差模电压放大倍数

$$A_{ud} = \frac{u_o}{u_{id}} = -\frac{\beta(R_C // R_L)}{2(R_B + r_{be})}$$

(2) 差模输入电阻

$$R_{id} = 2(R_B + r_{be})$$

(3) 输出电阻

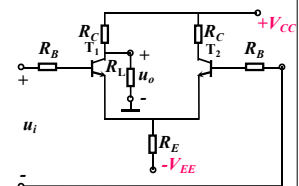
$$R_o = R_C$$

(4) 共模电压放大倍数

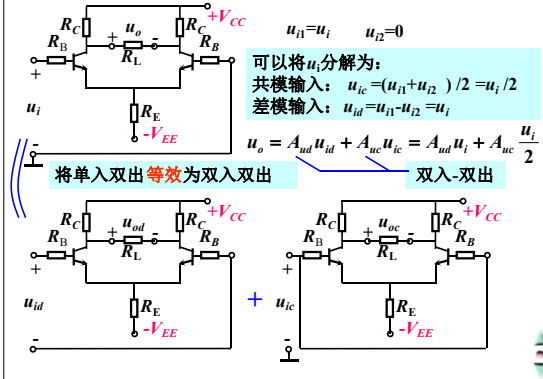
$$A_{uc} = \frac{u_{oc}}{u_{ic}} = \frac{u_o}{u_{i1}} = -\frac{\beta R'_C}{R_B + r_{be} + 2(1 + \beta)R_E} \approx -\frac{R'_C}{2R_E}$$

(5) 共模抑制比

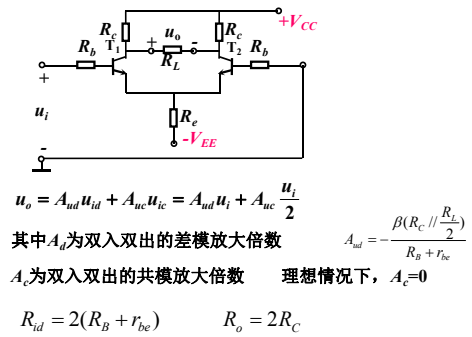
$$K_{CMR} = \frac{A_{ud}}{A_{uc}} = \frac{R_B + r_{be} + 2(1 + \beta)R_E}{2(R_B + r_{be})}$$



四、单入-双出差分放大电路的动态分析



四、单入-双出差分放大电路的动态分析（续）



单入双出差分放大电路分析小结

$$u_o = A_{ud}u_{id} + A_{uc}u_{ic}$$

$$= A_{ud}u_i + A_{uc}\frac{u_i}{2}$$

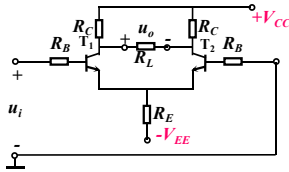
其中

$$A_{ud} = -\frac{\beta(R_C // \frac{R_L}{2})}{R_B + r_{be}}$$

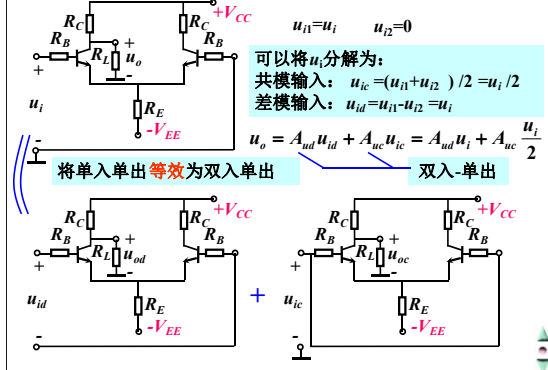
理想情况下, $A_{uc} = 0$

$$R_{id} = 2(R_B + r_{be})$$

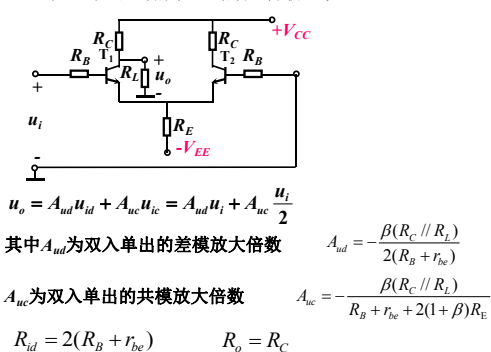
$$R_o = 2R_C$$

因为 $A_{uc} = 0$, $u_o = A_{ud}u_i$, 单入双出可视为双入双出。

五、单入-单出差分放大电路动态分析



五、单入-单出差分放大电路动态分析（续）



单入单出差分放大电路分析小结

$$u_o = A_{ud}u_{id} + A_{uc}u_{ic}$$

$$= A_{ud}u_i + A_{uc}\frac{u_i}{2}$$

其中

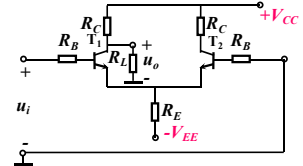
$$A_{ud} = -\frac{\beta(R_C // R_L)}{2(R_B + r_{be})}$$

$$A_{uc} = -\frac{\beta(R_C // R_L)}{R_B + r_{be} + 2(1 + \beta)R_E}$$

$$R_{id} = 2(R_B + r_{be})$$

$$R_o = R_C$$

注意放大倍数的正负号：
设从 T_1 的基极输入信号，
如果从 C_1 输出，为负号；
从 C_2 输出为正号。



差动放大电路动态参数计算总结

(1) 差模电压放大倍数

与单端输入还是双端输入无关，只与输出方式有关：

双端输出时： $A_{ud} = -\frac{\beta(R_C // R_L)}{R_B + r_{be}}$

单端输出时： $A_{ud} = \pm \frac{\beta(R_C // R_L)}{2(R_B + r_{be})}$

(2) 共模电压放大倍数

与单端输入还是双端输入无关，只与输出方式有关：

双端输出时： $A_{uc} = 0$ 单端输出时： $A_{uc} \approx -\frac{R'_L}{2R_E}$

(3) 差模输入电阻

不论是单端输入还是双端输入，差模输入电阻 R_{id} 是基本放大电路的两倍。

$$R_{id} = 2(R_B + r_{be})$$

(4) 输出电阻

单端输出时， $R_o = R_C$
双端输出时， $R_o = 2R_C$

(5) 共模抑制比

共模抑制比 K_{CMR} 是差分放大器的一个重要指标。

$$K_{CMR} = \left| \frac{A_{ud}}{A_{uc}} \right|, \text{ 或 } K_{CMR} = 20 \lg \left| \frac{A_{ud}}{A_{uc}} \right| (dB)$$

双端输出时 K_{CMR} 可认为等于无穷大，

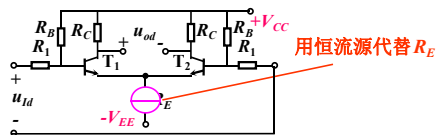
单端输出时共模抑制比：

$$K_{CMR} = \frac{-\beta R'_L / 2(R_B + r_{be})}{-R'_L / 2R_E} \approx \frac{\beta R_E}{R_B + r_{be}}$$

四种输入、输出方式比较

输入输出方式	差模输入 u_{id} 共模 u_{ic}	差模电压放大倍数 A_{ud}	差模 R_{id}	差模 R_{od}	共模抑制比 K_{CMR}
双入双出	$u_{id} = u_i$ $u_{ic} = 0$	$-\beta \frac{R'_L}{r_{be}}$	$2(R_B + r_{be})$	$2R_C$	∞
单入双出	$u_{id} = u_i$ $u_{ic} = u_i / 2$	$R'_L = R_C // \frac{R_L}{2}$	$2(R_B + r_{be})$	R_C	$K_{CMR} = \left \frac{A_{ud}}{A_{uc}} \right $ 很大
双入单出	$u_{id} = u_i$ $u_{ic} = 0$	$-\frac{1}{2} \beta \frac{R'_L}{r_{be}}$	$2(R_B + r_{be})$	R_C	$K_{CMR} = \left \frac{A_{ud}}{A_{uc}} \right $ 很大
单入单出	$u_{id} = u_i$ $u_{ic} = u_i / 2$	$R'_L = R_C // R_L$	$2(R_B + r_{be})$	R_C	$K_{CMR} = \left \frac{A_{ud}}{A_{uc}} \right $ 很大

4.3.3 差动放大电路的改进

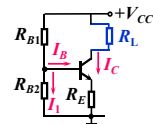


1. 电路的组成和工作原理

对于单端输出差放，共模放大倍数为 $A_{uc} \approx -\frac{R_C // R_L}{2R_E}$

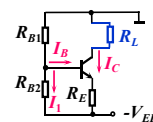
要减小 A_{uc} ，提高共模抑制比，应增大 R_E ，但 R_E 不能太大，因为 R_E 上的压降由 V_{EE} 提供。在保持 T_1 、 T_2 两管的工作电流为一定值时，要加大 R_E ，必须提高 V_{EE} ，这不切实际。若能找到这样一种元器件取代 R_E ，它的直流电阻小，交流电阻大，而不需要很大的 V_{EE} ，就能大幅减小 A_{uc} 。

2. 电流源电路



若 $I_1 \gg I_B$ ，则

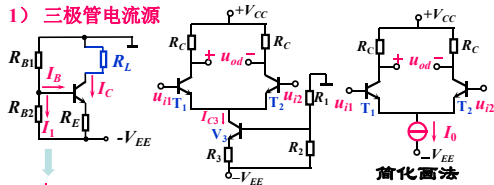
$$U_{R_{B2}} = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} V_{CC}$$



$$I_C \approx I_E = \frac{U_{R_{B2}} - U_{BE}}{R_E} \text{ 基本恒定}$$

减少共模放大倍数的思路：增大 R_{EE} → 用恒流源代替 R_{EE}

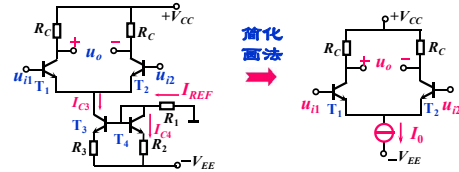
1) 三极管电流源



电流源代替差分电路中的 R_{EE}

特点：直流电阻为有限值
动态电阻很大

2) 具有电流源的差分放大电路

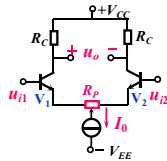


T_3 、 T_4 构成比例电流源电路

$$I_{REF} \approx I_{C4} \approx \frac{V_{EE} - U_{BE4}}{R_1 + R_2} \quad I_{C3} = I_0 \approx I_{REF} \frac{R_2}{R_3}$$

【问题引导】为什么用恒流源来代替 R_c ?

能调零的差分放大电路



例4-2 $\beta = 50$, $r_{be} = 2.6\text{K}\Omega$.

(1) Q点? (2) A_d 、 R_{id} 、 R_{od} 、 A_c 、 K_{CMR} =?

【解】(1) Q点?

静态时, $u_{i1} = u_{i2} = 0$

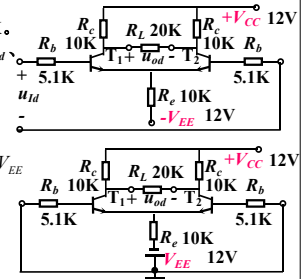
$$I_{BQ}R_b + U_{BEQ} + 2I_{EQ}R_e = V_{EE}$$

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

解得 $I_{BQ} = 0.011\text{mA}$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 0.55\text{mA}$$

$$U_{CEQ} = V_{CC} + V_{EE} - I_{CQ}R_c - 2I_{EQ}R_e = 7.5\text{V}$$



例4-2 $\beta = 50$, $r_{be} = 2.6\text{K}\Omega$.

(1) Q点? (2) A_d 、 R_{id} 、 R_{od} 、 A_c 、 K_{CMR} =?

【解】(2) 动态分析

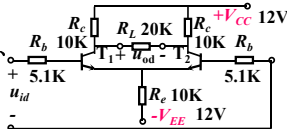
为双入双出差放

$$A_{ud} = \frac{u_{od}}{u_{id}} = -\frac{\beta(R_c // \frac{R_L}{2})}{R_b + r_{be}} = -32.5$$

$$R_{id} = \frac{u_{id}}{i_{id}} = 2(R_b + r_{be}) = 15.4\text{k}\Omega$$

$$R_{od} = 2R_c = 20\text{k}\Omega$$

$$A_c = 0 \quad K_{CMR} = \infty$$



例4-3 $\beta = 50$, $r_{bb'} = 100\Omega$.

(1) 静态时 I_{CQ1} 、 I_{CQ2} 、 V_{CQ1} 、 V_{CQ2} =?

【解】(1) Q点?

静态时, $u_{i1} = u_{i2} = 0$

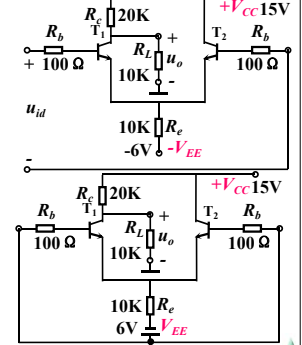
$$I_{BQ}R_b + U_{BEQ} + 2I_{EQ}R_e = V_{EE}$$

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

解得 $I_{BQ} = 0.052\text{mA}$

$$I_{CQ1} = I_{CQ2} = \beta I_{BQ} = 0.26\text{mA}$$

$$V_{CQ2} = 15\text{V} \quad V_{CQ1} = ?$$



例4-3 $\beta=50$, $r_{bb'}=100\Omega$ 。(1)静态时 I_{CQ1} 、 I_{CQ2} 、 V_{CQ1} 、 V_{CQ2} =?

【解】(1) V_{CQ1} =?

$R'_L = R_C // R_L = 6.67\text{k}\Omega$

$V'_{CC} = \frac{R_L}{R_C + R_L} V_{CC} = 5\text{V}$

$V_{CQ1} = V'_{CC} - I_{CQ1} R'_L = 3.23\text{V}$

例4-3 $\beta=50$, $r_{bb'}=100\Omega$ 。(2)用直流表测得 $u_o=2\text{V}$, $u_i=?$ 设共模输出电压可忽略不计。

【解】(2) 动态分析

$r_{be} = r_{bb'} + \frac{26}{I_{BQ}} = 5.1\text{k}\Omega$

双入单出差放 $A_{ud} = \frac{u_{od}}{u_{id}} = -\frac{\beta(R_C // R_L)}{2(R_b + r_{be})} = -32.7$

设差模输入 $u_{id}=u_i$ 是直流, 则对应差模输出 u_{od} 也是直流。

用直流表测得 $u_o=2\text{V}$, 则有: $2 = V_{CQ1} + u_{od}$

V_{CQ1} —静态电位, u_{od} —差模输出

$u_{od} = 2 - V_{CQ1} = -1.23$ $u_i = u_{id} = \frac{u_{od}}{A_d} = 37.6\text{mV}$

例4-3 $\beta=50$, $r_{bb'}=100\Omega$ 。(2)用直流表测得 $u_o=2\text{V}$, $u_i=?$ 若 $u_i=10\text{mV}$, $u_o=?$ 设共模输出电压可忽略不计。

【解】(2) 动态分析

若 $u_{id}=u_i=10\text{mV}$ (直流)

则 $u_{od} = A_{ud} u_{id} = -0.327\text{V}$ (直流)

$u_o = V_{CQ1} + u_{od} = 2.9\text{V}$ (直流)

例：(1)求静态工作点；

(2)求电路的差模 A_{ud} , R_{id} , R_o 。

【解】(1) 求“Q”

$I_{REF} = \frac{V_{EE} - U_{BE4}}{R_1 + R_2} = \frac{6 - 0.7}{6.2 + 0.1} \approx 0.84\text{ (mA)}$

$I_0 = I_{REF} \frac{R_2}{R_3} = 0.84\text{ mA}$ $I_{CQ1} = I_{CQ2} = 0.5 I_0 = 0.42\text{ mA}$

静态, 输入为0:

$U_{CEQ1} = U_{CEQ2} = V_{CC} - V_{BE1} - I_{CQ1} R_C$ $V_B = V_{B1} = V_{B2} = 0\text{V}$,

$= 6 - (-0.7) - 0.42 \times 7.5 = 3.55\text{ (V)}$ $V_E = V_{E1} = V_{E2} = -0.7\text{V}$

例：(1)求静态工作点；

(2)求电路的差模 A_{ud} , R_{id} , R_o 。

【解】(2) 求 A_{ud} , R_{id} , R_o

$r_{be1} = r_{be2} = 200 + 101 \frac{26}{0.42} = 6452(\Omega)$

$A_{ud} = -\frac{\beta R_C}{r_{be} + (1 + \beta) \frac{1}{2} R_p} = \frac{-100 \times 7.5}{6.45 + 101 \times 0.05} = -65$

$R_{id} = 2[r_{be} + (1 + \beta) \frac{1}{2} R_p] = 23\text{ k}\Omega$

$R_o = 2R_C = 15\text{ (k}\Omega)$

4.4 功率放大电路

4.4.1 功率放大电路的特点与性能指标

4.4.2 功率放大电路的分类

4.4.3 乙类互补对称OCL功率放大电路

4.4.3 改进型OCL功率放大电路

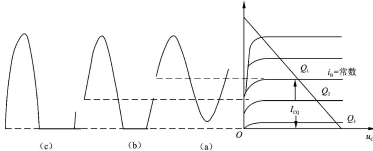
4.4.1 功率放大电路的特点及主要性能要求

P_{omax} 大, 三极管工作在极限状态
 $\eta = P_{om} / P_V$ 要高

非线性失真要小
 晶体管的散热与保护问题
 分析方法——图解法

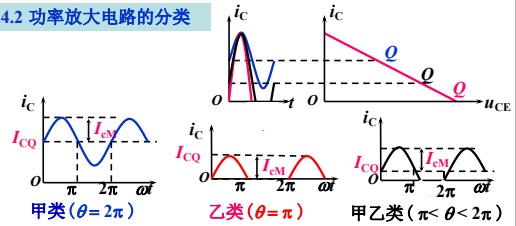
4.4.2 功率放大电路的分类

甲类: $\theta_T = 360^\circ$
 乙类: $\theta_T = 180^\circ$
 甲乙类: $180^\circ < \theta_T < 360^\circ$



【问题思考】功率放大电路有哪些特点？

4.4.2 功率放大电路的分类



甲类工作状态失真小, 静态电流大, 管耗大, 效率低。

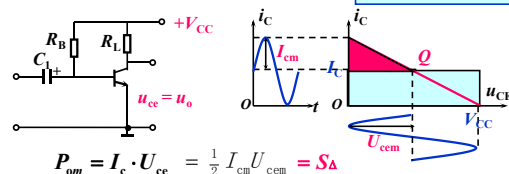
乙类工作状态失真大, 静态电流为零, 管耗小, 效率高。

甲乙类工作状态失真大, 静态电流小, 管耗小, 效率较高。

4.4.3 乙类互补对称OCL功率放大电路

一、互补对称功率放大电路的引出

1. 甲类功率放大电路的输出功率与效率



$$P_{om} = I_C \cdot U_{ce} = \frac{1}{2} I_{cm} U_{cem} = S \Delta$$

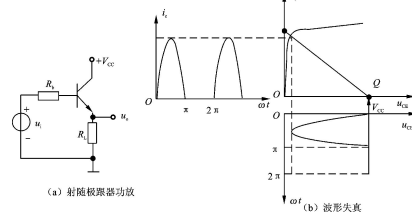
$$P_V = I_{CC} V_{CC} = (I_C + i_C) V_{CC} = I_C V_{CC} = 4 S \Delta$$

$$\therefore \eta_{max} = P_{om} / P_V = 25\%$$

为什么效率低？因为 $u_i = 0$ 时, $I_{CQ} \neq 0$, 三极管有功率损耗！

2. 互补对称功率放大器的引出

如何提高效率？ $u_i = 0$ 时, 使 $I_{CQ} = 0$, 使三极管无静态功率损耗！



射极输出器输出电阻小, 带负载能力强, 适合作功率输出级。为了提高效率, 须使三极管 $I_{CQ} = 0$, 其静态偏置与图解分析如图所示。

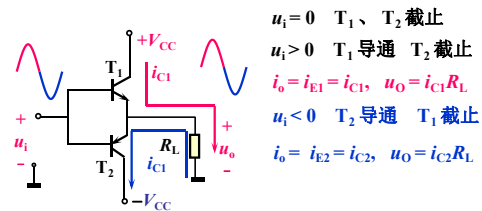
单个射极输出器只管信号半个周期！信号另外半个周期怎么办？再用一个射极输出器管信号另半个周期！

二、乙类互补对称OCL功放电路的组成与工作原理

(OCL — Output Capacitorless)

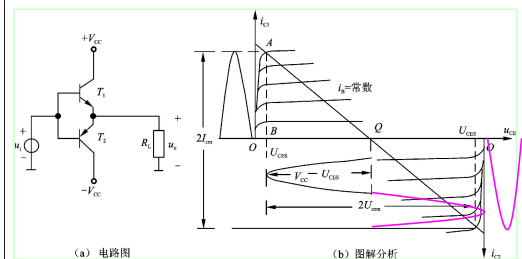
电路组成及工作原理

采用两个三极管组成两个射极输出器, 两个射极输出器同输入、同输出, 分别工作于信号正半周放大与负半周放大。



【问题思考】为什么要用射极输出器组成OCL功放？

乙类互补对称OCL功放电路图解分析



信号正半周, T_1 导通, T_2 截止。

信号负半周, T_2 导通, T_1 截止。

三、乙类互补对称OCL功放电路的输出功率与效率

输出电压幅值为 U_{om}

输出电压有效值为 $U_{om} = \frac{U_{om}}{\sqrt{2}}$

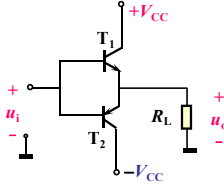
输出功率为 $P_o = \frac{U_{om}^2}{R_L} = \frac{U_{om}^2}{2R_L}$

设输入信号为正弦信号

$i_c = \frac{U_{om}}{R_L} \sin \omega t$ 电源瞬时功率为 $p_v = i_c V_{CC}$

电源平均功率为 $P_v = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi p_v d\omega t = \frac{2}{\pi} \frac{V_{CC} U_{om}}{R_L}$

效率 $\eta = \frac{P_o}{P_v} = \frac{\pi U_{om}}{4 V_{CC}}$



当 U_{om} 为最大不失真输出电压最大值即 $U_{om} = V_{CC} - U_{CES}$ 时

若忽略 U_{CES} , 则最大不失真输出时

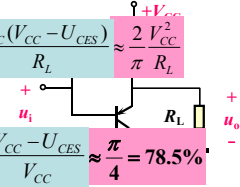
最大不失真 输出功率 $P_o = \frac{U_{om}^2}{2R_L}$ $P_{om} = \frac{(V_{CC} - U_{CES})^2}{2R_L} \approx \frac{V_{CC}^2}{2R_L}$

最大不失真 电源平均功率

$P_v = \frac{2}{\pi} \frac{V_{CC} U_{om}}{R_L}$ $P_{vm} = \frac{2}{\pi} \frac{V_{CC} (V_{CC} - U_{CES})}{R_L} \approx \frac{2}{\pi} \frac{V_{CC}^2}{R_L}$

最大不失真 效率

$\eta = \frac{P_{om}}{P_{vm}} = \frac{\pi U_{om}}{4 V_{CC}}$ $\eta_m = \frac{\pi V_{CC} - U_{CES}}{4 V_{CC}} \approx \frac{\pi}{4} = 78.5\%$



每只管耗 每只管子最大管耗为 $0.2P_{om}$

$P_{T1} = P_{T2} = \frac{1}{2} (P_v - P_o) = \frac{1}{2} \left(\frac{2U_{om}V_{CC}}{\pi R_L} - \frac{U_{om}^2}{2R_L} \right)$

令

$= \frac{U_{om}}{R_L} \left(\frac{V_{CC}}{\pi} - \frac{U_{om}}{4} \right)$

$\frac{dP_{T1}}{dU_{om}} = \frac{V_{CC}}{\pi R_L} - \frac{U_{om}}{2R_L} = 0$ (视 U_{om} 为变量)

则: $U_{om} = \frac{2V_{CC}}{\pi}$ 时管耗最大, 即: $P_{T1m} = \frac{V_{CC}^2}{\pi^2 R_L}$

$\therefore P_{om} = \frac{V_{CC}^2}{2R_L} \therefore P_{T1m} = \frac{2}{\pi^2} P_{om} \approx 0.2P_{om}$

最大管耗并不在最大不失真电压输出时刻和最大不失真功率输出时刻!

【知识点总结】:

$P_o = \frac{U_{om}^2}{2R_L}$, $P_{om} = \frac{(V_{CC} - U_{CES})^2}{2R_L}$

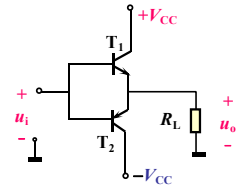
$P_v = \frac{2}{\pi} \frac{V_{CC} U_{om}}{R_L}$, $P_{vm} = \frac{2}{\pi} \frac{V_{CC} (V_{CC} - U_{CES})}{R_L}$

$\eta = \frac{P_o}{P_v} = \frac{\pi U_{om}}{4 V_{CC}}$, $\eta_m = \frac{\pi V_{CC} - U_{CES}}{4 V_{CC}}$

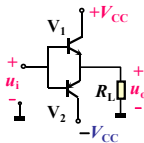
$P_{T1m} = P_{T2m} = \frac{V_{CC}^2}{\pi^2 R_L} \approx 0.2P_{om}$

P_{om} —— 最大不失真输出功率

P_{T1m} 、 P_{T2m} —— 最大管耗



四、OCL功放电路中晶体管的选择



选管原则:

$\begin{cases} P_{CM} > 0.2 P_{om} \\ U_{(BR)CEO} > 2V_{CC} \\ I_{CM} > V_{CC} / R_L \end{cases}$ (P_{om} 为最大不失真输出功率)

注意留有余量!

例4-4 已知: $U_i = 10V$ (有效值), 忽略 U_{CES} 。

(1) P_o 、 P_v 、 P_T 、 η = ?

解(1)

$U_{om} = U_{im} = \sqrt{2} U_i \approx 14V$

$P_o = \frac{U_{om}^2}{2R_L} = 12.25W$

$P_v = \frac{2}{\pi} \frac{V_{CC} U_{om}}{R_L} = 22.3W$

$P_{T1} = P_{T2} = 0.5(P_v - P_o) = 5.03W$

$\eta = \frac{P_o}{P_v} = 54.96\%$

$I_{CM} = 5A$

$U_{(BR)CEO} = 50V$

$P_{CM} = 100W$

$+V_{CC} = 20V$

$-V_{CC} = -20V$

$R_L = 8\Omega$

u_i

u_o

R_L

$+V_{CC}$

$-V_{CC}$

u_i

u_o

R_L

$+V_{CC}$

$-V_{CC}$

u_i

u_o

R_L

$+V_{CC}$

$-V_{CC}$

例4-4 幅值 $U_{im}=V_{CC}=20\text{V}$ 时, 忽略 U_{CES} 。

(2) P_o 、 P_V 、 P_{T1} 、 η =?

三极管工作情况?

解(2) $U_{om}=U_{im}=20\text{V}$

$$P_o = \frac{U_{om}^2}{2R_L} = 25\text{W} = P_{om}$$

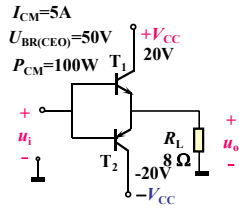
$$P_V = \frac{2}{\pi} \frac{V_{CC} U_{om}}{R_L} = 31.85\text{W}$$

$$P_{T1m} = P_{T2m} = 0.2 P_{om} = 5\text{W} < P_{CM}$$

$$\eta = \frac{P_o}{P_V} = 78.5\%$$

三极管安全

$$\begin{cases} I_{Cmax} = \frac{U_{om}}{R_L} = 2.5\text{A} < I_{CM} \\ U_{CEmax} = 2V_{CC} = 40\text{V} < U_{BR(CEO)} \\ P_{T1} = P_{T2} = 3.425\text{W} < P_{CM} \end{cases}$$



例 E 已知: $V_{CC}=24\text{V}$, $R_L=8\Omega$, 忽略 $U_{CE(sat)}$ 求 P_{om} 以及此时的 P_V 、 P_{T1} , 并选管。

[解] $P_{om} = \frac{V_{CC}^2}{2R_L} = \frac{24^2}{2 \times 8} = 36\text{ (W)}$

$$P_V = 2V_{CC}^2 / \pi R_L = 2 \times 24^2 / (\pi \times 8) = 45.9\text{ (W)}$$

$$P_{T1} = \frac{1}{2} (P_V - P_o) = 0.5 (45.9 - 36) = 4.9\text{ (W)}$$

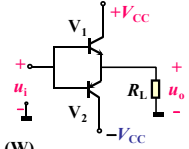
$$P_{T1m} = 0.2 \times 36 = 7.2\text{ (W)}$$

要求:

$$\begin{cases} P_{CM} > 0.2 P_{om} = 7.2\text{W} \\ U_{(BR)CEO} > 2V_{CC} = 48\text{V} \\ I_{CM} > V_{CC} / R_L = 3\text{A} \end{cases}$$

可选:

$$\begin{cases} P_{CM} = 10 \sim 15\text{W} \\ U_{(BR)CEO} = 60 \sim 100\text{V} \\ I_{CM} = 5\text{A} \end{cases}$$



例 F 已知: $V_{CC}=12\text{V}$, $R_L=8\Omega$, $U_{CES}=2\text{V}$, 求

1) P_{om} 、 η 以及此时的 P_V 、 P_{T1} , 并选管。

2) 计算 $\eta=0.6$ 时的 P_o

解1) $P_{om} = \frac{(V_{CC} - U_{CES})^2}{2R_L} = \frac{10^2}{2 \times 8} = 6.25\text{ (W)}$

$$P_V = \frac{2V_{CC}(V_{CC} - U_{CES})}{\pi R_L} = 9.55\text{W}$$

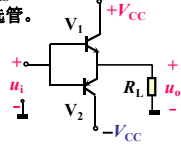
$$\eta = \frac{P_{om}}{P_V} = 65.4\% \quad P_{T1m} = 0.2 \times 6.25 = 1.25\text{ (W)}$$

要求:

$$\begin{cases} P_{CM} > 0.2 P_{om} = 1.25\text{W} \\ U_{(BR)CEO} > 2V_{CC} = 24\text{V} \\ I_{CM} > V_{CC} / R_L = 1.5\text{A} \end{cases}$$

可选:

$$\begin{cases} P_{CM} = 1.5 \sim 2\text{W} \\ U_{(BR)CEO} = 30 \sim 50\text{V} \\ I_{CM} = 2\text{A} \end{cases}$$



例 F 已知: $V_{CC}=12\text{V}$, $R_L=8\Omega$, $U_{CES}=2\text{V}$, 求

1) P_{om} 、 η 以及此时的 P_V 、 P_{T1} , 并选管。

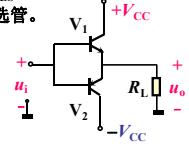
2) 计算 $\eta=0.6$ 时的 P_o

解2)

$$\eta = \frac{\pi U_{om}}{4 V_{CC}} = 0.6$$

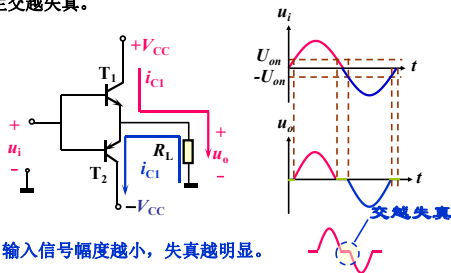
$$\text{解得: } U_{om} = 9.17\text{V}$$

$$P_o = \frac{U_{om}^2}{2R_L} = 5.25\text{W}$$



4.4.4 改进型OCL功率放大电路

考虑三极管存在死区电压 U_{on} , 当 $-U_{on} < u_i < U_{on}$ 时, T_1 、 T_2 都截止, 产生交越失真。

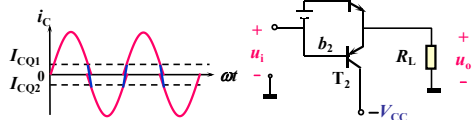


一、甲乙类互补对称功率放大电路

1. 克服交越失真的思路

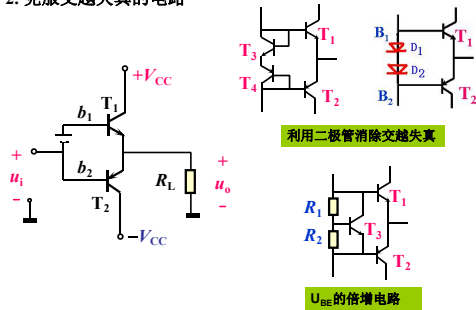
给两三极管提供静态偏压, 使当 $-U_{on} < u_i < U_{on}$ 时, T_1 、 T_2 都微导通, 可以克服交越失真。

对于交流信号而言, b_1 、 b_2 等电位

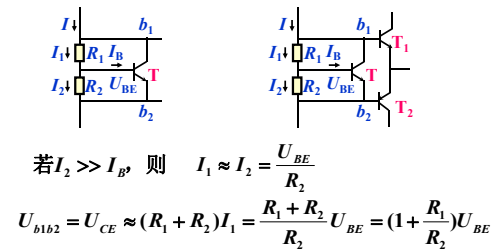


【问题思考】如何消除交越失真?

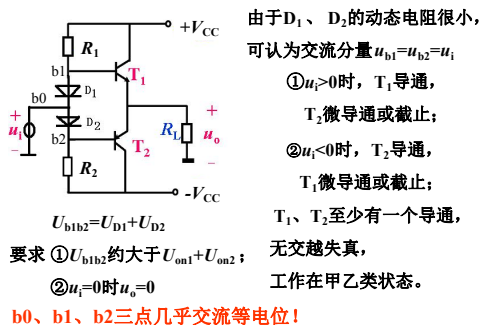
2. 克服交越失真的电路



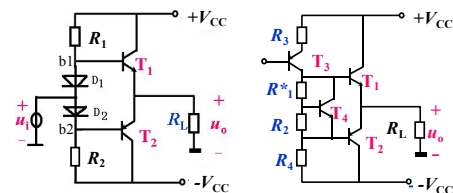
3. 电压倍增电路



4. 利用二极管提供偏置电压



5. 实际电路1



6. 实际电路2(选讲)

当 $u_i = 0$ 时， T_1 、 T_2 微导通。

当 $u_i > 0$ (↑至↓)，当 $u_{c3} < 0$ (↓至↑)

T_2 微导通 → 充分导通 → 微导通；

T_1 微导通 → 截止 → 微导通。

当 $u_i < 0$ (↓至↑)， $u_{c3} > 0$ (↑至↓)

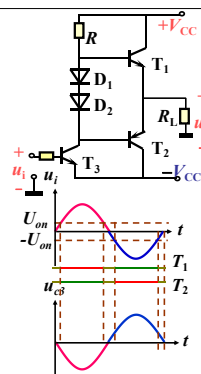
T_1 微导通 → 充分导通 → 微导通；

T_2 微导通 → 截止 → 微导通。

— 截止

— 导通

— 微导通



7. 功率和效率

由于甲乙类互补对称功率放大电路的静态电流很小，其工作原理与分析方法与乙类功率放大电路近似相同。

对于甲乙类互补对称功率放大电路的输出功率与效率计算，仍然可以使用乙类功率放大电路的计算公式，这样做计算过程简单，误差也不是很大。

例4-5 (1) 二极管 D_1 、 D_2 的作用是什么？

(2) P_{om} 、 η 、 P_{Tm} 为？

(3) 要使 $P_o = P_{om}$ ，输入有效值 U_i 为？

解(1)：消除交越失真

解(2)：

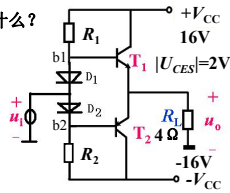
$$P_{om} = \frac{(V_{CC} - U_{CES})^2}{2R_L} = \frac{10^2}{2 \times 8} = 24.5 \text{ W}$$

$$\eta_m = \frac{\pi}{4} \frac{V_{CC} - U_{CES}}{V_{CC}} = 69.8\%$$

$$P_{T1m} = P_{T2m} \approx 0.2 P_{om} = 6.4 \text{ W}$$

解(3)：

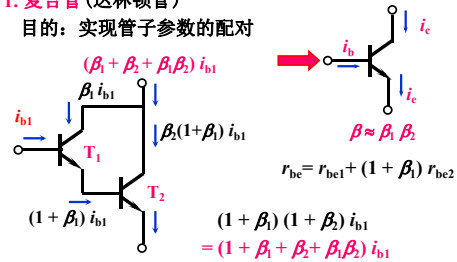
$$U_i \approx U_{om} = \frac{U_{om}}{\sqrt{2}} = \frac{V_{CC} - |U_{CES}|}{\sqrt{2}} = 9.9 \text{ V}$$



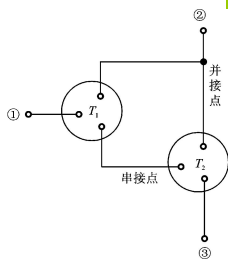
二、准互补对称功率放大电路

1. 复合管 (达林顿管)

目的：实现管子参数的配对



复合管的构成规则：



1. 在串接点，必须保证两管电流方向的一致和连续（实际电流方向不冲突）

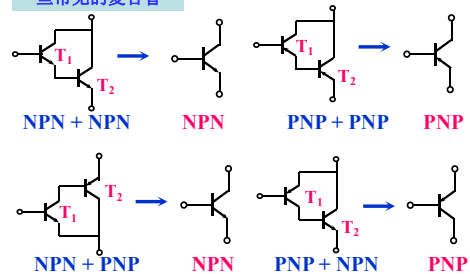
2. 在并接点，必须保证两管电流同时流入接点或同时流出接点。

3. 必须保证复合管中每个管子都工作在放大区（即保证发射结正偏，集电结反偏）。

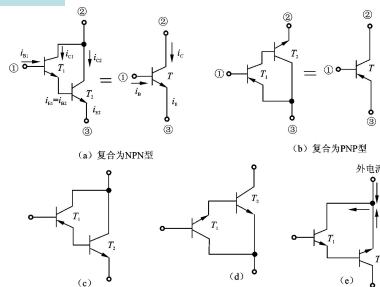
4. 复合管类型与第一只管子相同。

【问题思考】能否形成复合管有哪些原则？

一些常见的复合管



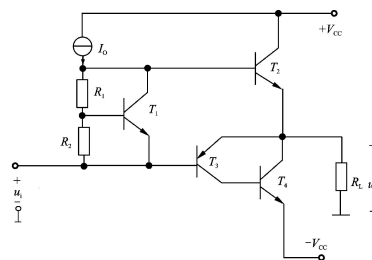
练习：



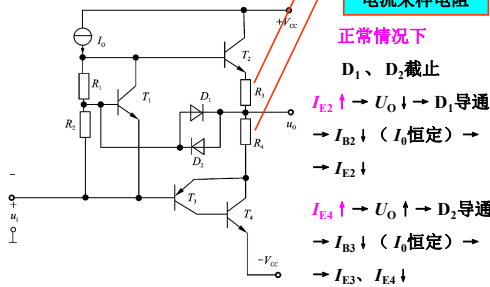
2. 准互补功率放大电路

(输出管为同类型管的电路)

由于输出管为同类型管，容易做到正、负半周输出特性相同。



3. 输出电流的保护



例G 已知 $U_D=0.7V$, $|U_{BE}|=0.7V$, $|U_{CES}|=2V$, $V_{EQ}=0$ 。

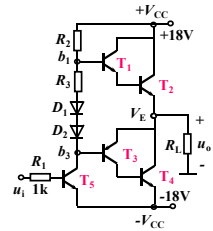
- (1) 静态值 V_{B1} , V_{B3} , V_{B5} =?
- (2) 设 $R_2=10k$, $R_3=100\Omega$, $I_{BQ1}=0$, $I_{BQ3}=0$, 则 I_{CQ5} =?
- (3) R_3 、 D_1 、 D_2 的作用是什么?
- (4) 图中二极管的个数可以是 1,2,3,4 吗? 几个最好? 为什么?

解(1):

$$V_{B1}=1.4V, V_{B3}=-0.7V, V_{B5}=-17.3V$$

$$\text{解(2): } I_{CQ5} = \frac{V_{CC} - V_{B1}}{R_2} = 1.66mA$$

解(3): 消除交越失真



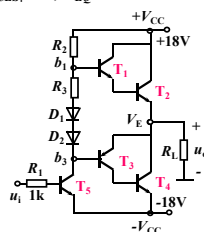
例G 已知 $U_D=0.7V$, $|U_{BE}|=0.7V$, $|U_{CES}|=2V$, $V_{EQ}=0$ 。

- (1) 静态值 V_{B1} , V_{B3} , V_{B5} =?
- (2) 设 $R_2=10k$, $R_3=100\Omega$, $I_{BQ1}=0$, $I_{BQ3}=0$, 则 I_{CQ5} =?
- (3) R_3 、 D_1 、 D_2 的作用是什么?
- (4) 图中二极管的个数可以是 1,2,3,4 吗? 几个最好? 为什么?
- (5) P_{om} =? η =?

解(4): 可以是3个二极管, 或两个二极管串联一个小电阻。

$$\text{解(5): } P_{om} = \frac{(V_{CC} - |U_{CES}|)^2}{2R_L} = 4W$$

$$\eta = \frac{\pi V_{CC} - |U_{CES}|}{4 V_{CC}} = 69.8\%$$



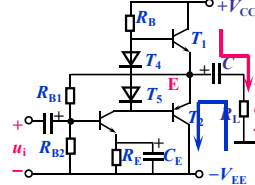
甲乙类单电源互补对称放大电路 (补充)

— OTL 电路 (Output Transformerless)

取 $V_{EE}=0$

电容 C 的作用:

- 1) 充当 $V_{CC}/2$ 电源
- 2) 耦合交流信号



当 $u_i = 0$ 时: $U_E = V_{CC}/2$

$$U_C = V_{CC}/2$$

当 $u_i > 0$ 时:

T_2 导通, C 放电, T_2 的等效电源电压 $-0.5V_{CC}$ 。

当 $u_i < 0$ 时:

T_1 导通, C 充电, T_1 的等效电源电压 $+0.5V_{CC}$ 。

应用 OCL 电路有关公式时, 要用 $V_{CC}/2$ 取代 V_{CC} 。

第八章 功率放大电路

OCL 电路和 OTL 电路的比较(知识扩充)

	OCL	OTL
电源	双电源	单电源
信号	交、直流	交流
频率响应	好	f_L 取决于输出耦合电容 C
电路结构	较简单	较复杂
P_{omax}	$\frac{1}{2} \frac{U_{om}^2}{R_L} \approx \frac{1}{2} \frac{V^2 V_{CC}}{R_L}$	$\frac{1}{8} \frac{U_{om}^2}{R_L} \approx \frac{1}{8} \frac{V^2 V_{CC}}{R_L}$

4.5 多级放大电路

4.5.1 多级放大电路的耦合方式

4.5.2 多级放大电路分析

引言

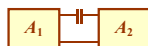
- 为什么要多级放大？前面我们主要研究了由一个晶体管组成基本放大电路，它们的电压放大倍数一般只有几十倍。但是在实际应用中，往往需要放大非常微弱的信号，上述的放大倍数是远远不够的。为了获得更高的电压放大倍数，可以把多个基本放大电路连接起来，组成“多级放大电路”。其中每一个基本放大电路叫做一“级”，而级与级之间的连接方式则叫做“耦合方式”。
- 实际上，单级放大电路中也存在电路与信号源以及负载之间的耦合问题。

4.5.1 多级放大电路的耦合方式

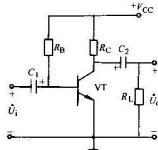
1. 阻容耦合

阻容耦合是通过电容器将后级电路与前级相连接。

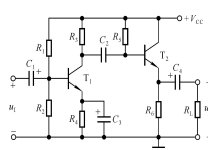
阻容耦合



各级“Q”独立，只放大交流信号，信号频率低时耦合电容容抗大。



单级阻容耦合放大电路



两级阻容耦合放大电路

阻容耦合的优点：



- 各级的直流工作点相互独立。由于电容隔直通交流，所以它们的直流通路相互隔离、相互独立的，这样就给设计、调试和分析带来很大方便；
- 在传输过程中，交流信号损失少。只要耦合电容选得足够大，则较低频率的信号也能由前级几乎不衰减地加到后级，实现逐级放大；
- 电路的温漂小；
- 体积小，成本低。

阻容耦合的缺点：

- 无法集成；
- 低频特性差。

【问题思考】阻容耦合能放大直流信号吗？

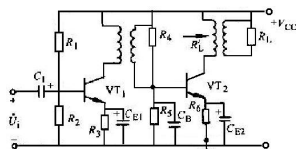
2. 变压器耦合

变压器可以通过磁路的耦合把一次侧的交流信号传送到二次侧，因此可以作为耦合元件。

变压器耦合

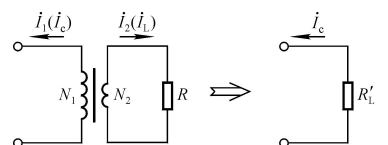


用于选频放大器、功率放大器等。



变压器耦合的两级放大电路

为什么要采用变压器耦合？因为变压器在传送交流信号的同时，可以实现电流、电压以及阻抗变换。



工作原理：

$$\frac{U_1}{U_2} = n, \frac{I_1}{I_2} = \frac{1}{n} \quad R'_L = \frac{U_1}{I_1} = \frac{nU_2}{\frac{1}{n}I_2} = n^2 \frac{U_2}{I_2} = n^2 R_L$$

变压器耦合的优点：



- 1) 变压器耦合多级放大电路前后级的静态工作点是相互独立、互不影响的。因为变压器不能传送直流信号。
- 2) 变压器耦合多级放大电路基本上没有温漂现象。
- 3) 变压器在传送交流信号的同时，可以实现电流、电压以及阻抗变换。

变压器耦合的缺点：

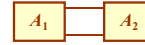
- 1) 高频和低频性能都很差；
- 2) 体积大，成本高，无法集成。

变压器耦合能放大直流信号吗？

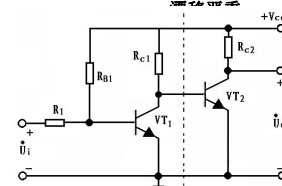
3. 直接耦合

直接耦合是将前级输出直接作为后级输入。

直接耦合

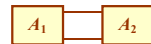


电路简单，能放大交、直流信号，“ Q ”互相影响，零点



直接耦合和两级放大电路

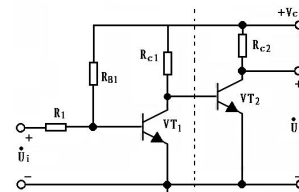
直接耦合的优点



- 1) 电路可以放大缓慢变化的信号和直流信号。由于级间是直接耦合，所以电路可以放大缓慢变化的信号和直流信号。
- 2) 便于集成。由于电路中只有晶体管和电阻，没有电容器和电感器，因此便于集成。

直接耦合的缺点：

- 1) 各级的静态工作点不独立，相互影响。会给设计、计算和调试带来不便。
- 2) 引入了零点漂移问题。零点漂移对直接耦合放大电路的影响比较严重。



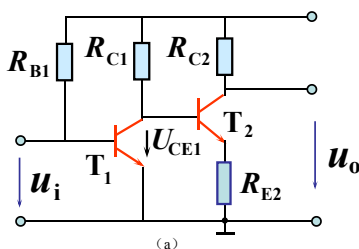
直接耦合和两级放大电路

该电路存在两个问题：

- 1) 第一级的静态工作点已接近饱和区。
- 2) 由于采用同种类型的管子，级数不能太多。

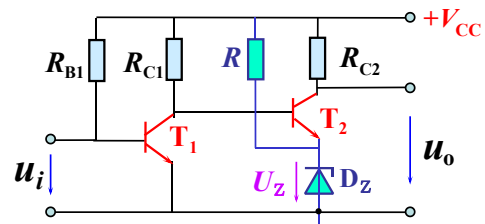
- 1) 第一级的静态工作点已接近饱和区。怎么解决？

可以采用如下的办法：



(a) 加入电阻 R_{E2}

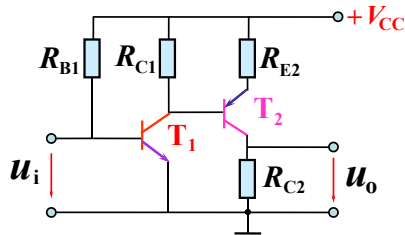
采用如下方法更好：



(b) 在 T_2 的发射极加入稳压管

由于采用同种类型的管子，级数不能太多，怎么办？

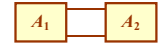
可以在电路中采用不同类型的管子，即NPN和PNP管配合使用，如下图所示。



利用NPN型管和PNP型管进行电平移动

4. 直接耦合放大电路的零点漂移问题

1) 何谓零点漂移？



2) 产生零点漂移的原因

电阻，管子参数的变化，电源电压的波动。如果采用高精度电阻并经过老化处理和采用高稳定度的电源，则晶体管参数随温度的变化将成为产生零点漂移的主要原因。

3) 零点漂移的严重性及其抑制方法

如果零点漂移的大小足以和输出的有用信号相比拟，就无法正确地将两者加以区分。因此，为了使放大电路能正常工作，必须有效地抑制零点漂移。

4) 为什么直接耦合放大电路零点漂移严重？



因为温度的变化和零点漂移都是随时间缓慢变化的，如果放大电路各级之间采用阻容耦合，这种缓慢变化的信号不会逐级传递和放大，问题不会很严重。但是，对直接耦合多级放大电路来说，输入级的零点漂移会逐级放大，在输出端造成严重的影响。特别当温度变化较大，放大电路级数多时，造成的影响尤为严重。

5) 抑制零点漂移的方法？

- ① 采用恒温措施，使晶体管工作温度稳定。需要恒温室或槽，因此设备复杂，成本高。
- ② 采用温度补偿法。在电路用热敏元件或二极管（或晶体管的发射结）来与工作管的温度特性互相补偿。
- ③ 采用直流负反馈稳定静态工作点。
- ④ 各级之间采用阻容耦合。
- ⑤ 采用差动放大电路。

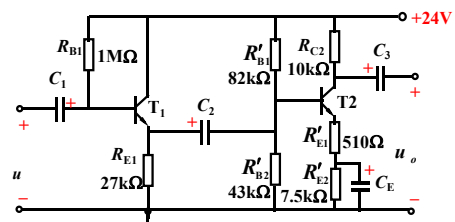
4.5.2 多级放大电路分析

1. 静态工作点的分析

{ 变压器耦合 } 与单级放大电路相同
 { 阻容耦合 }
 { 直接耦合 }

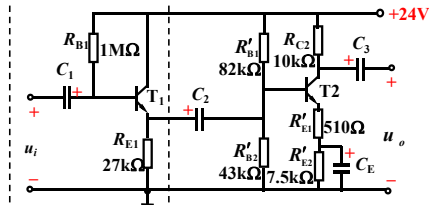
思路：根据电路的约束条件和管子的 I_B 、 I_C 和 I_E 的相互关系，列出方程组求解。如果电路中有特殊电位点，则应以此为突破口，简化求解过程。

例H 如图所示的两级电压放大电路，
已知 $\beta_1 = \beta_2 = 50$ ， T_1 和 T_2 均为3DG8D。
计算前、后级放大电路的静态值 ($U_{BE} = 0.6V$)；

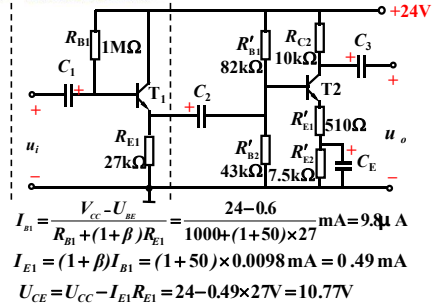


解:

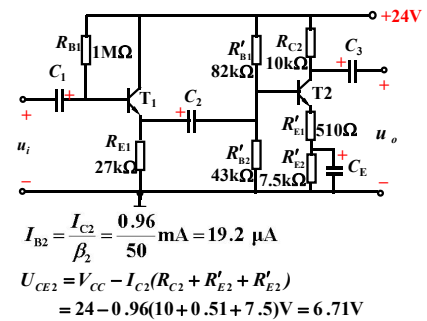
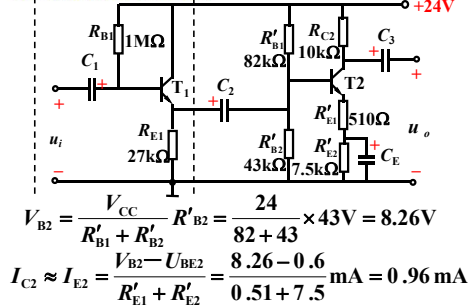
两级放大电路的静态值可分别计算。



第一级是射极输出器:

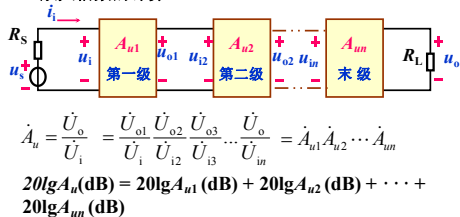


第二级是分压式偏置电路



2、动态性能分析

(1) 放大倍数的计算



考虑级与级之间的相互影响，计算各级电压放大倍数时，应把后级的输入电阻作为前级的负载处理!!!

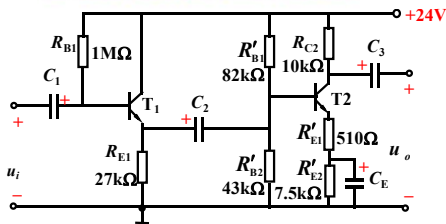
(2) 输入和输出电阻的计算

多级放大电路的输入电阻为第一级放大电路的输入电阻。

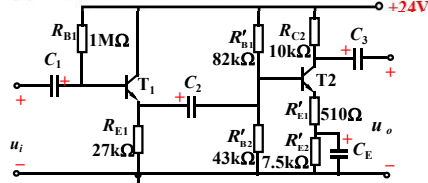
多级放大电路的输出电阻为最后一级放大电路的输出电阻。

例1 如图所示的两级电压放大电路，
已知 $\beta_1 = \beta_2 = 50$ ， T_1 和 T_2 均为 3DG8D。

- (1) 求各级电压的放大倍数及总电压放大倍数。
(2) 求放大电路的输入电阻和输出电阻



(1) 直接计算各级电压放大倍数及总电压放大倍数。



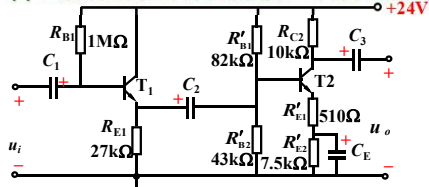
第一级为射极输出器，其负载为：

$$R'_{L1} = R_{E1} // R'_{B1} // R'_{B2} // [r_{be2} + (1 + \beta_2)R'_{E2}] = 470.22\Omega$$

$$\dot{A}_{u1} = \frac{(1 + \beta_1)R'_{L1}}{r_{be1} + (1 + \beta_1)R'_{L1}} = \frac{(1 + 50) \times 9.22}{3 + (1 + 50) \times 9.22} = 0.994$$

注意后级放大电路的输入电阻是前级放大电路的负载！

(1) 直接计算各级电压放大倍数及总电压放大倍数。



第二级为共射放大电路，其负载为：

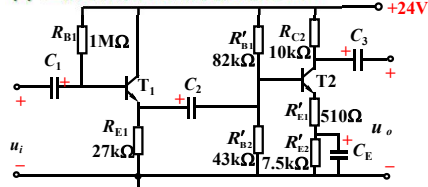
$$R'_{L2} = R_{C2} = 10k\Omega \quad \dot{A}_{u2} = -\beta_2 \frac{R_{C2}}{r_{be2} + (1 + \beta_2)R'_{E2}} = -18$$

$$\dot{A}_u = \dot{A}_{u1} \dot{A}_{u2} = -17.9$$

分别写出各级放大倍数，
再写总放大倍数！很方便！

用不着画微变等效电路！

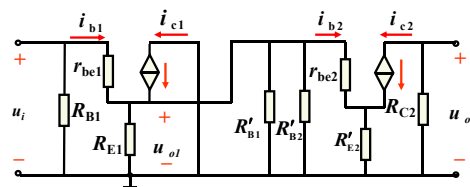
(2) 直接计算放大电路的输入输出电阻。



$$R_i = R_{i1} = R_{B1} // [r_{be1} + (1 + \beta_1)R'_{L1}] = \dots$$

$$R_o = R_{o2} = R_{C2} = \dots$$

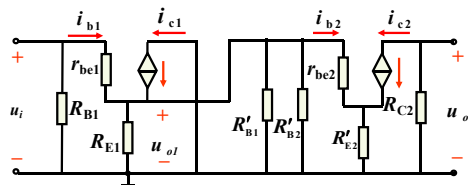
(1) 用微变等效电路求电压的放大倍数（麻烦）



第一级放大电路为射极输出器

$$\dot{A}_{u1} = \frac{(1 + \beta_1)R'_{L1}}{r_{be1} + (1 + \beta_1)R'_{L1}} = \frac{(1 + 50) \times 9.22}{3 + (1 + 50) \times 9.22} = 0.994$$

用微变等效电路来分析多麻烦！ 尽量不要用！



第二级放大电路为共发射极放大电路

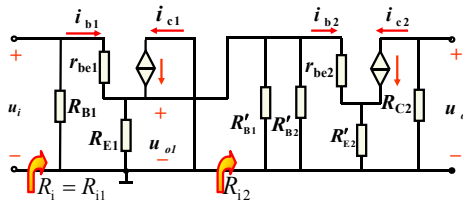
$$\dot{A}_{u2} = -\beta \frac{R_{C2}}{r_{be2} + (1 + \beta_2)R'_{E2}} = -50 \times \frac{10}{1.79 + (1 + 50) \times 0.51} = -18$$

总电压放大倍数

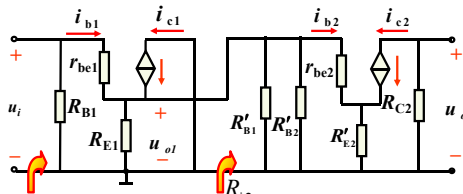
$$\dot{A}_u = \dot{A}_{u1} \dot{A}_{u2} = 0.994 \times (-18) = -17.9$$

(2) 用微变等效电路计算 R_i 和 R_o (麻烦)

微变等效电路



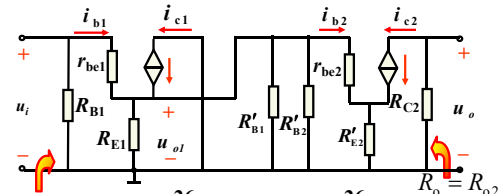
由微变等效电路可知, 放大电路的输入电阻 R_i 等于第一级的输入电阻 R_{i1} 。第一级是射极输出器, 它的输入电阻 R_{i1} 与负载有关, 而射极输出器的负载即是第二级输入电阻 R_{i2} 。



$$r_{be2} = 200 + (1 + \beta) \frac{26}{I_{E2}} = 200 + 51 \frac{26}{0.96} \Omega = 1.58 \text{ k}\Omega$$

$$R_{i2} = R'_{B1} // R'_{B2} // [r_{be2} + (1 + \beta) R'_{E2}] = 14 \text{ k}\Omega$$

$$R'_{i1} = R_{E1} // R_{i2} = \frac{27 \times 14}{27 + 14} \text{ k}\Omega = 9.22 \text{ k}\Omega$$

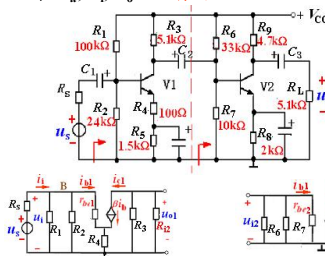


$$r_{be1} = 200 + (1 + \beta) \frac{26}{I_{E1}} = 200 + (1 + 50) \times \frac{26}{0.49} = 3 \text{ k}\Omega$$

$$R_i = R_{i1} = R_{B1} // [r_{be1} + (1 + \beta) R'_{L1}] = 320 \text{ k}\Omega$$

$$R_o = R_{o2} = R_{C2} = 10 \text{ k}\Omega$$

例 J: $\beta_1 = 60, \beta_2 = 100; r_{be1} = 2 \text{ k}\Omega, r_{be2} = 2.2 \text{ k}\Omega$ 。
求 A_u, R_i, R_o 。(练习)



希望能直接写出各级电压放大倍数! 再写总电压放大倍数!

[解]

$$R_{i2} = R_6 // R_7 // r_{be2} \quad R'_{L1} = R_3 // R_{i2}$$

$$\dot{A}_{u1} = \frac{-\beta_1 R'_{L1}}{r_{be1} + (1 + \beta_1) R_1} = \frac{-60 \times 1.3}{2 + 61 \times 0.1} \approx -9.6$$

$$\dot{A}_{u2} = \frac{-\beta_2 R'_L}{r_{be2}} = \frac{-100 \times (4.7 // 5.1)}{2.2} \approx -111$$

$$\dot{A}_u = \dot{A}_{u1} \dot{A}_{u2}$$

$$R_i = R_{i1} = R_1 // R_2 // [r_{be1} + (1 + \beta_1) R_4]$$

$$R_o = R_{o2} = 4.7 \text{ k}\Omega$$

3、三种耦合方式放大电路的应用场合

阻容耦合放大电路：用于交流信号的放大。

变压器耦合放大电路：用于功率放大及调谐放大。

直接耦合放大电路：一般用于放大直流信号或缓慢变化的信号。

集成电路中的放大电路都采用直接耦合方式。为了抑制零漂，它的输入级采用特殊形式的差动放大电路。

4.6 集成运算放大电路

4.6.1 F007集成运放简介

4.6.2 集成运放的主要性能指标

4.6.3 集成运放的模型

4.6.4 集成运放的电压传输特性

4.6.5 集成运放的使用与注意事项

集成运算放大器——Operational Amplifier

集成运算放大器——简称集成运放

1. 模拟集成电路的特点

- 1) 直接耦合：
采用差动电路形式，元件相对误差小；
- 2) 大电阻用恒流源代替，大电容外接；
- 3) 二极管用三极管代替（B、C极接在一起）；
- 4) 高增益、高输入电阻、低输出电阻。

2. 组成方框图



输入级：差分电路，大大减少温漂。

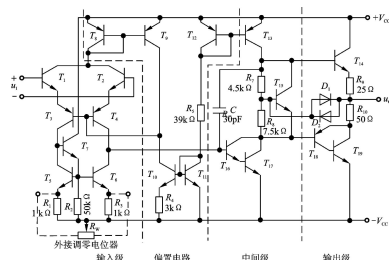
中间级：采用有源负载的共发射极电路，增益大。

输出级：OCL 电路，带负载能力强

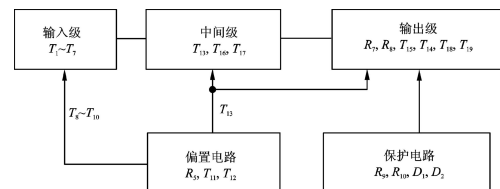
偏置电路：镜像电流源，微电流源。

4.6.1 F007集成运放简介

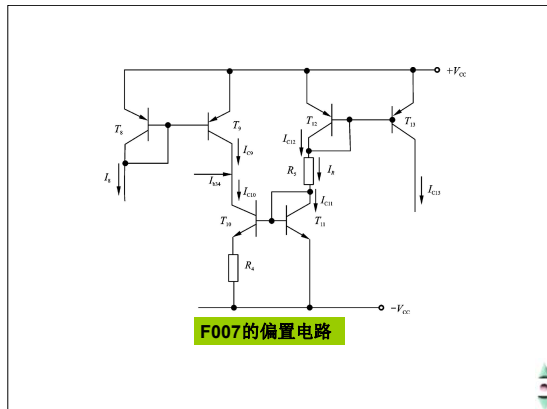
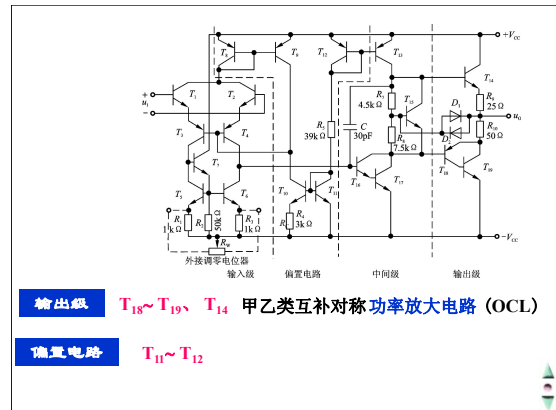
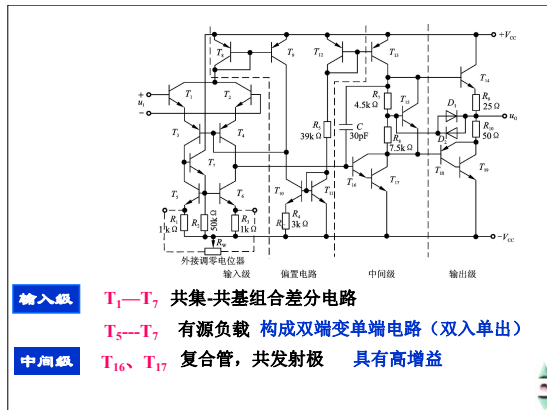
F007为通用型集成运算放大器



作为使用者，不必深入运放的内部电路！



F007的结构框图



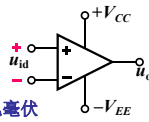
1. 国标 GB-3430-82 对集成电路的规定 (知识扩充)

第一部分		第二部分		第三部分		第四部分		第五部分	
字母 符号 国 标		字 母 器 件 类 型		数 字 品 种		字 母 工 作 条 件		字 母 封 装	
符 号	意 义	符 号	意 义	符 号	意 义	符 号	意 义	符 号	意 义
C	中国 制 造	T H E C F D W J B	TTL HTL ECL CMOS 线性放大 音响电视 稳压器 接口电路 非线性	C E R M	0 ~ 70°C -40 ~ 85°C -55 ~ 85°C -55 ~125°C	W B F D P J K T	陶瓷扁平 塑料扁平 全封闭扁平 陶瓷直插 塑料直插 黑陶瓷直插 金属菱形 金属圆形		

2. 主要参数

1) 输入失调电压 U_{IO}

使 $U_O = 0$, 输入端施加的补偿电压 几毫伏



2) 输入失调电流 I_{IO}

$U_O = 0$ 时, $I_{IO} = |I_{BN} - I_{BP}|$ 1 nA ~ 0.1 μ A

3) 输入偏置电流 I_{IB}

$U_O = 0$ 时, $I_{IB} = \frac{1}{2}(I_{BN} + I_{BP})$ 10 nA ~ 1 μ A

4) 开环电压增益 A_{ud}

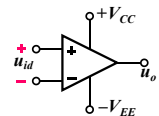
100 ~ 140 dB, ($A_{ud} = 10^5 \sim 10^7$)

5) 差模输入电阻 R_{id} 几十千欧 ~ 几兆欧

输出电阻 R_o 几十欧 ~ 几百欧

6) 共模抑制比 K_{CMR}

$K_{CMR} = 20 \lg \left| \frac{A_{ud}}{A_{uc}} \right| (\text{dB}) > 80 \text{ dB}$



7) 最大差模输入电压 U_{idM}

当 U_{id} 过大时, 反偏的 PN 结可能因反压过大而被击穿。

8) 最大共模输入电压 U_{icM}

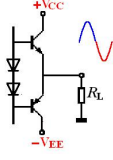
共模输入 U_{ic} 过大, K_{CMR} 下降 CF741 为 $\pm 13V$

9) 最大输出电压幅度 U_{OPP}

输出级为 OCL 电路

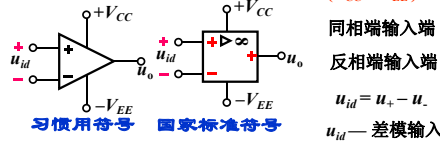
一般比电源电压小一个 $U_{CE(sat)}$

如电源电压 $\pm 15V$, U_{OPP} 为 $\pm 13 \sim 14V$

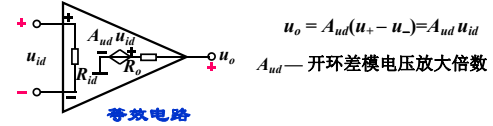


4.6.3 集成运放的模型

运放的符号

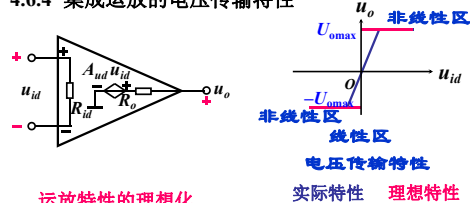


习惯用符号 国家标准符号



等效电路
作为使用者, 更关心运放的外部特性!

4.6.4 集成运放的电压传输特性

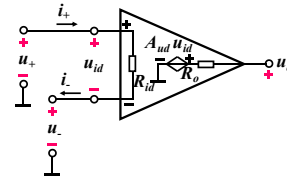


- 1) $A_{ud} \rightarrow \infty$ 2) $R_{id} \rightarrow \infty$ 3) $R_o \rightarrow 0$
- 4) $K_{CMR} \rightarrow \infty$ 5) $BW \rightarrow \infty$ 6) $U_{IO} \rightarrow 0$, $I_{IO} \rightarrow 0$

理想运放工作在线性区的两个特点

- 1) $u_+ \approx u_-$ (虚短) 证: $u_o = A_{ud} u_{id} = A_{ud}(u_+ - u_-)$
 $u_{+id} \approx 0$ $u_+ - u_- = u_o / A_{ud} \approx 0$

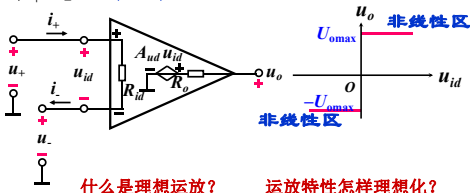
- 2) $i_+ \approx i_- \approx 0$ (虚断) 证: $i_+ = u_{id} / R_{id} \approx 0$ 同理 $i_- \approx 0$



理想运放工作在线性区的两个特点

- 1) $u_o = \begin{cases} U_{omax} & , u_+ > u_- \\ -U_{omax} & , u_+ < u_- \end{cases}$ (虚短不再成立)

- 2) $i_+ \approx i_- \approx 0$ (虚断)



4.6.4 集成运放的使用与注意事项

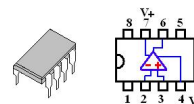
集成运放的封装和引脚排列

封装形式: 金属圆筒形、双列直插式、扁平式

封装材料: 陶瓷、金属、塑料

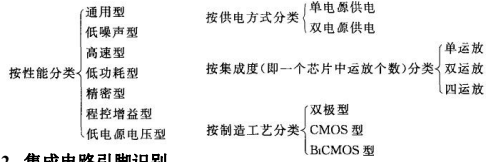
例: 塑封双列直插式 (DIP) CF741

DIP—Dual In-Line Package

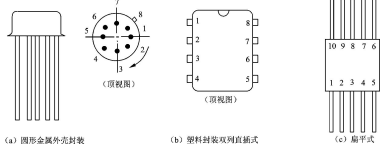


4.6.4 集成运放的使用与注意事项

1. 集成运放的分类与选用



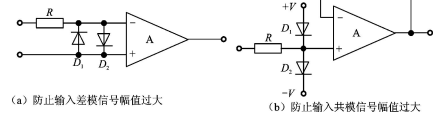
2. 集成电路引脚识别



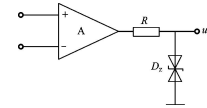
3. 集成运放的调零

外接调零电位器

4. 集成运放的保护

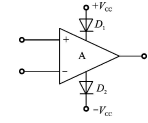


(1) 输入端的保护



(2) 输出端保护

(3) 电源端保护



集成运放使用注意事项

1. 查阅手册了解引脚的排列及功能;
2. 检查接线有否错误或虚连, 输出端不能与地、电源短路;
3. 输入信号应远小于 U_{IdM} 和 U_{ICM} , 以防阻塞或损坏器件;
4. 电源不能接反或过高, 拔器件时必须断电;
5. 输入端外接直流电阻要相等, 小信号高精度直流放大需调零。