



模拟集成电路基础

1 集成运算放大电路结构简图



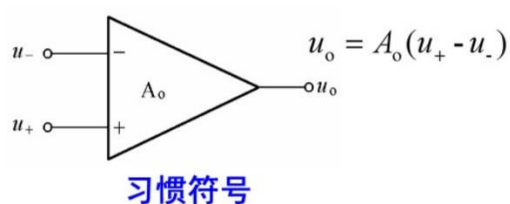
输入级：差分放大电路， K_{CMR} 高，抑制共模信号，放大差模信号

中间级：有源负载共射（或多级）放大电路，起电压放大作用

输出级：采用互补对称放大电路， r_o 小，带负载能力强

偏置电路：采用电流源电路，提供合适的偏置

符号：



u_- ：反相输入端

u_+ ：同相输入端

A_0 ：开环电压放大倍数

u_o ：输出端电压

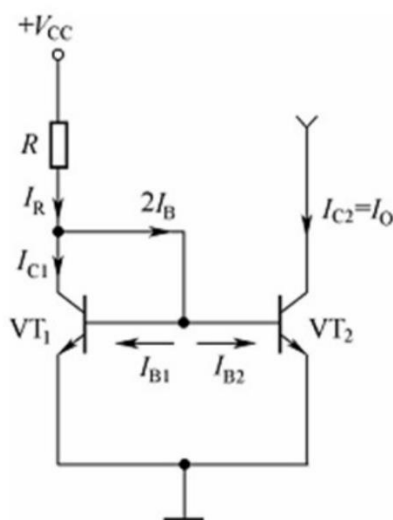


2 偏置电路：晶体管电流源及其应用

根据集成电路的特点，模拟集成电路中的偏置电路、集电极或发射极负载等，一般采用晶体管电流源。

2.1 镜像电流源

电路图如下：



由于两边管子参数对称，故

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

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

$$I_{C1} = I_{C2} = \beta I_B$$

由于：

$$I_R = I_{C1} + 2I_B = I_C + 2\frac{I_C}{\beta}$$

故：

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

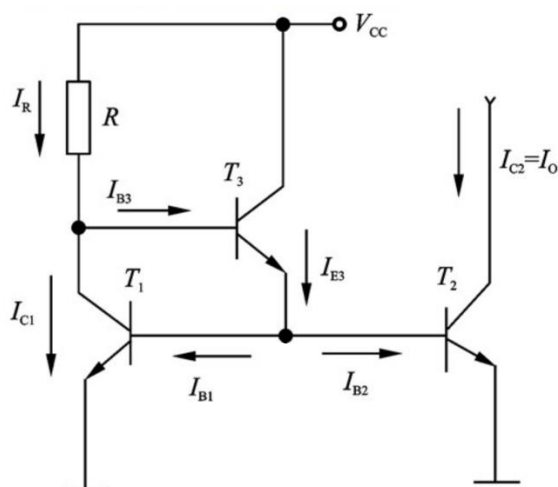
当 $\beta \gg 2$ 时，

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



2.2 改进型镜像电流源（精密电流源）

电路图：



T_1, T_2, T_3 三管参数相同，对称，故有：

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

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

$$I_{C1} = I_{C2} = \beta I_B$$

则对该电路图：

$$I_{E3} = 2I_B$$

$$I_{B3} = \frac{I_{E3}}{\beta + 1}$$

$$I_{C1} = \beta I_B$$

$$I_R = I_{B3} + I_{C1} = \left(\beta + \frac{2}{\beta + 1} \right) I_B = \left(1 + \frac{2}{\beta(\beta + 1)} \right) I_C$$

得到：输出电流：

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

相较于镜像电流源，其精度得到提高。

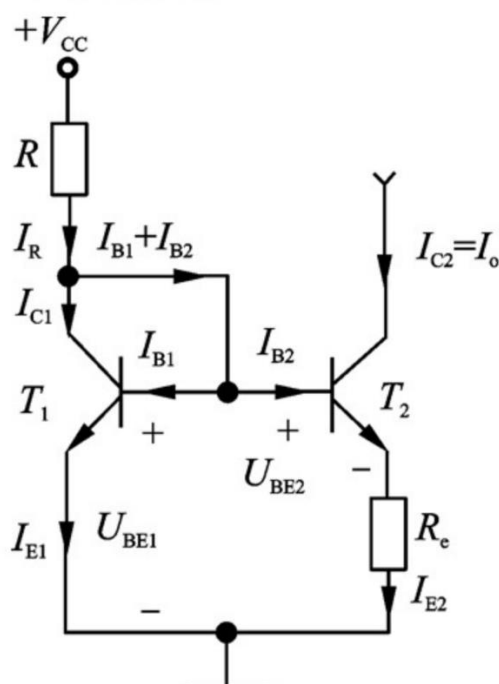
其中，参考电流

$$I_R = \frac{V_{CC} - 2U_{BE}}{R}$$



2.3 微电流源电路

电路图如下：



由最下方回路：

$$U_{BE1} - U_{BE2} = I_{E2} R_e$$

则：

$$I_O = I_{C2} \approx I_{E2} = \frac{\Delta U_{BE}}{R_e}$$

所以，控制两管的 U_{BE} 就能控制输出电流，由于 ΔU_{BE} 本身就很很小，不需要多大的 R_e 就可以得到微小的工作电流。

【了解即可】 由BJT 伏安特性方程：

$$\begin{cases} I_R \approx I_{E1} \approx I_S e^{\frac{U_{BE1}}{U_T}} \\ I_O = I_{C2} \approx I_{E2} \approx I_S e^{\frac{U_{BE2}}{U_T}} \end{cases}$$

可得：

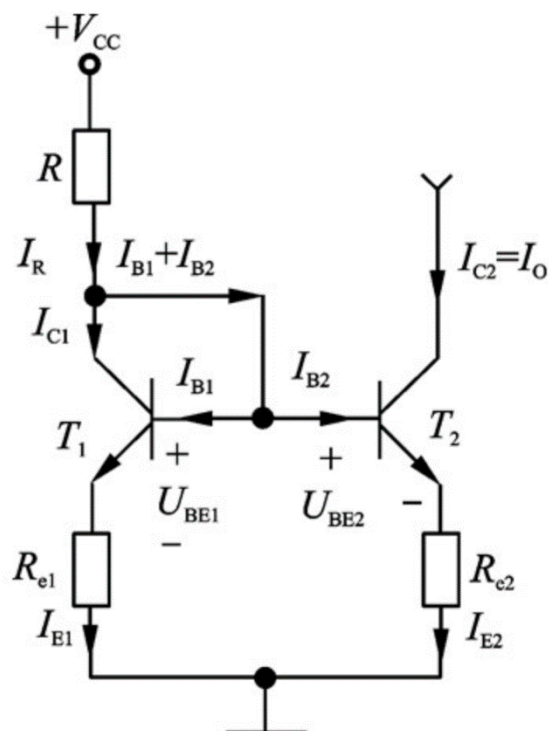
$$I_O = \frac{U_T}{R_e} \left(\ln \frac{I_R}{I_S} - \ln \frac{I_O}{I_S} \right) = \frac{U_T}{R_e} \ln \frac{I_R}{I_O}$$

可通过图解法或累试法求出 I_O 。



2.4 比例电流源

电路图如下：



由下方回路：

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

因 $U_{BE1} = U_{BE2}$ ，则： $I_{E1}R_{E1} = I_{E2}R_{E2}$

又有： $I_R \approx I_{E1}, I_O \approx I_{E2}$

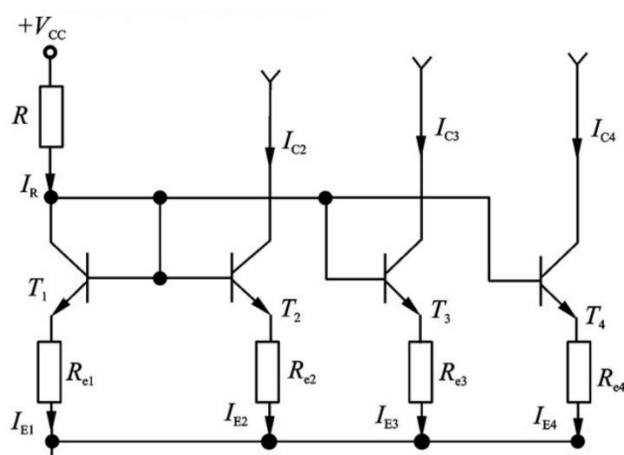
故：

$$\frac{I_O}{I_R} = \frac{R_{E1}}{R_{E2}}$$



2.5 多级比例放大电路

电路图如下：



由下方回路，易得：

$$I_{E1}R_{E1} = I_{E2}R_{E2} = I_{E3}R_{E3} = I_{E4}R_{E4}$$

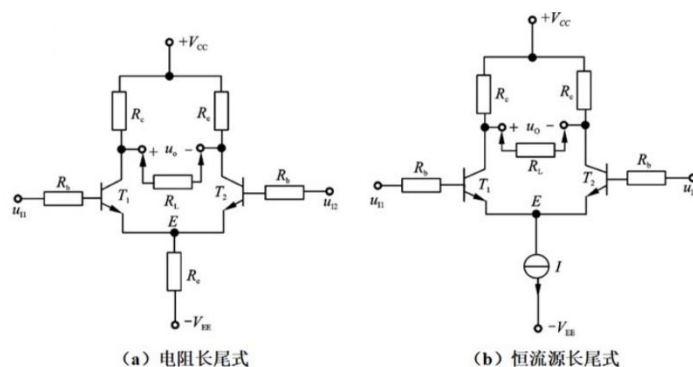
3 中间级：差动放大电路

引入差动放大电路的原因在于：抑制温漂

可采取多种方法：在电路中引入直流负反馈，或采用温度补偿的方法，或采用差动放大电路，其中最有效的方法即为改变电路结构，利用电路对称性进行温度补偿，抑制零点漂移。

3.1 电路特点

3.1.1 电路结构



对称+长尾，下端不接地，而是接电源负极，保证三极管工作在放大状态



3.1.2 电路工作模式

双端输入+双端输出（双入-双出）

双端输入+单端输出（双入-单出）

单端输入+双端输出（单入-双出）

单端输入+单端输出（单入-单出）

3.1.3 差模信号与共模信号分解

定义差动放大电路的两个输入信号之差为差模输入信号 u_{Id} ，两个输入信号的平均值为共模输入信号 u_{Ic}

$$u_{Id} = u_{11} - u_{12}$$
$$u_{Ic} = \frac{1}{2}(u_{11} + u_{12})$$

可将输入信号进行分解：

$$u_{11} = \frac{1}{2}u_{Id} + u_{Ic}$$
$$u_{12} = -\frac{1}{2}u_{Id} + u_{Ic}$$

故，输出电压为：

$$u_O = A_{ud}u_{Id} + A_{uc}u_{Ic}$$

即对共模信号与差模信号分别放大，采用叠加定理计算。

3.1.4 共模抑制比 K_{CMR}

定义

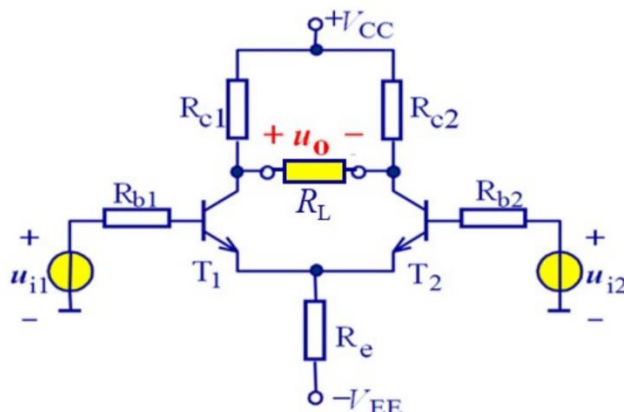
$$K_{CMR} = \left| \frac{A_{ud}}{A_{uc}} \right|$$



3.2 差动放大电路基本性能分析

3.2.1 双入-双出差动放大电路

3.2.1.1 静态分析



静态分析时，交流电源短路去源，

选用一侧的输入回路：

$$I_{BQ}R_{b2} + U_{BEQ} + I_{Re}R_e = V_{EE}$$

$$I_{Re} = 2I_{EQ} = 2(1 + \beta)I_{BQ}$$

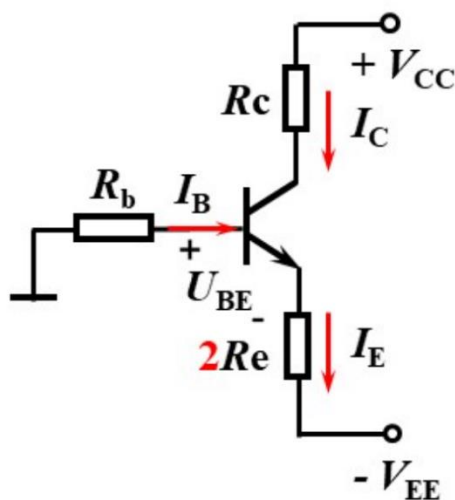
可解得：

$$I_{BQ} = \frac{V_{EE} - U_{BEQ}}{R_{b2} + 2(1 + \beta)R_e}$$

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

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

对比三极管单管基本放大电路，可以得到静态半等效电路如下图所示：





该模块的学习中尤其需要注重公共电阻 R_E 与 R_L 的状态！

在双入-双出的静态分析过程中，

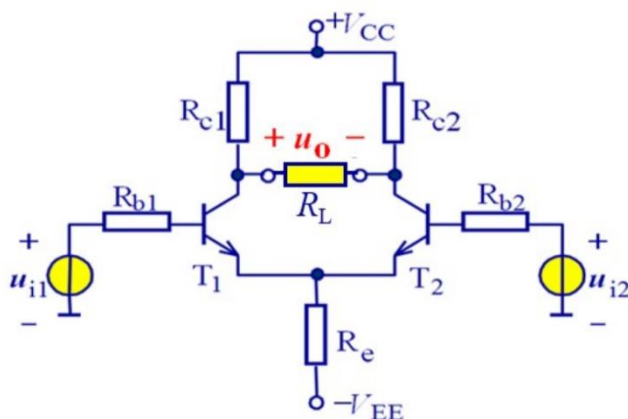
流过电阻 R_E 的电流： $I_{R_E} = I_{EQ1} + I_{EQ2} = 2I_{EQ}$

对负载电阻：由于 $U_{CQ1} = U_{CQ2}$ ，故 R_L 中无电流流过，方可得到上述静态半等效电路

3.2.1.2 动态分析

由于输入信号区分差模与共模，所以差放的动态分析也有差模共模之分，下标 d 表示差模， c 表示共模

电路图如下：

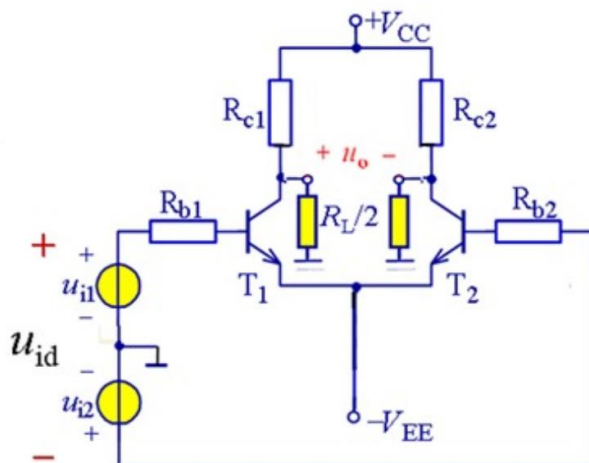


1. 差模性能分析

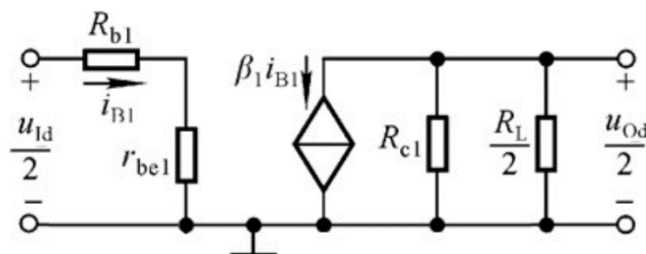
公共电阻状态：

- ①长尾电阻 R_E 对差模信号而言应视为短路（ R_E 上端为差模信号接地点）
- ②两个单端输出电压大小相等而相位相反，所以接在两输出端之间的负载电阻 R_L ，中点必为差模零电位
- ③一个输入端到地的差模输入电压是总的差模输入电压 u_{id} 的一半

故可变化为：



画出半等效动态电路：



则在半等效电路中，差模放大倍数：

$$A_{u1} = \frac{u_{O1}}{u_{I1}} = -\frac{\beta(R_c // \frac{R_L}{2})}{R_{b1} + r_{be1}}$$

差模作用下： $u_{I1} = -u_{I2}$ ， $u_{O1} = -u_{O2}$

此时差模放大倍数：

$$A_{ud} = \frac{u_{Od}}{u_{Id}} = \frac{2u_{O1}}{2u_{I1}} = A_{u1}$$

故该电路是以牺牲一个管子的放大作用来换取对零点漂移的抑制。

差模输入电阻：

$$R_{id} = \frac{u_{Id}}{i_{Id}} = 2(R_{b1} + r_{be})$$

差模输出电阻：

$$R_{Od} = 2R_c$$

2. 共模性能分析

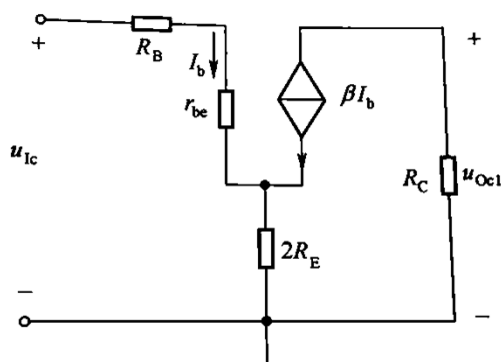
公共电阻状态：

①流过长尾电阻 R_E 的电流是两管电流之和，两个单端输出电压大小、相位相同，



故在共模半等效电路中，长尾电阻要加倍

②对于负载电阻，由于 $u_{C1} = u_{C2} = u_C$ ，故 R_L 视作开路



而在共模电路中： $u_{Ic1} = u_{Ic2} = u_{Ic}$ ， $u_{Oc1} = u_{Oc2} = u_{Oc}$

放大倍数：

$$A_{uc} = \frac{u_{Oc}}{u_{Ic}} = \frac{u_{Oc1} - u_{Oc2}}{u_{Ic}} = 0$$

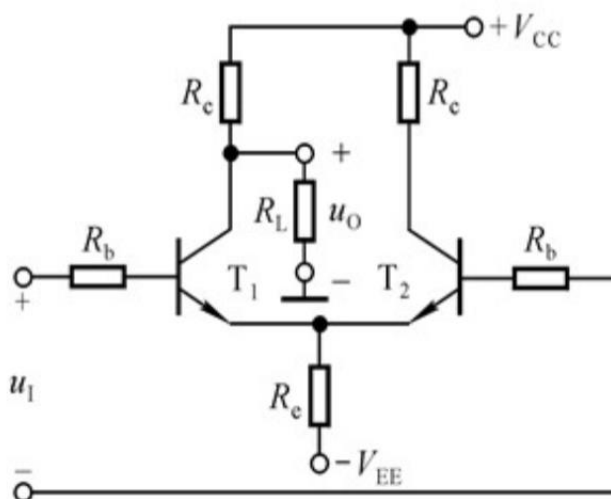
故只要电路保持对称，共模信号能被完全抑制

此时共模抑制比：

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

3.2.2 双入单出差动放大电路

电路图如下：





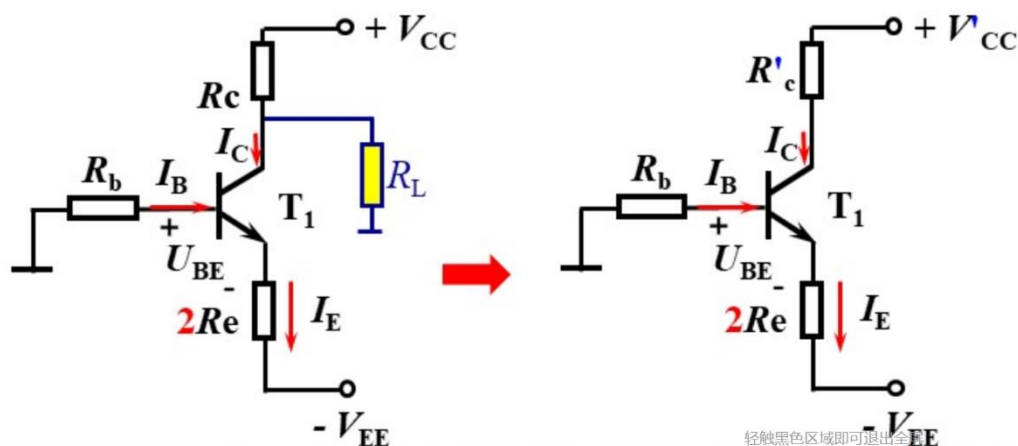
3.2.2.1 静态分析

和上述双入双出一样，长尾电阻视作 $2R_E$ ，但此时的输出电阻不可视作断路，需要考虑进计算过程

利用戴维宁定理对 R_C 与 R_L 进行等效变换，则：

$$V'_{CC} = \frac{R_C}{R_C + R_L} V_{CC}, R'_C = R_C // R_L$$

则左半部分的静态电路图简化为：



由于输入回路对称，所以静态电流 $I_{BQ1} = I_{BQ2} = I_{BQ}$ ，从而 $I_{CQ1} = I_{CQ2} = I_{CQ}$ ，计算方法与双入双出相同。

但是由于输出回路不对称， $V_{CQ1} \neq V_{CQ2}, V_{CEQ1} \neq V_{CEQ2}$

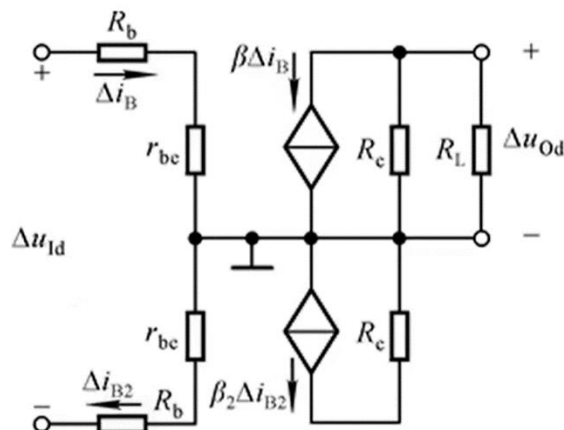
$$V_{CQ1} = V'_{CC} - I_{CQ} R'_C$$

$$V_{CQ2} = V_{CC} - I_{CQ} R_C$$

3.2.2.2 动态分析

1. 差模性能分析

与双入双出电路的差模分析类似，长尾电阻视作短路接地，但是此时的电路不对称，负载电阻仅在单边



放大倍数:

$$A_{ud} = \frac{u_{od}}{u_{id}} = \frac{\Delta u_{od}}{2 \cdot \frac{\Delta u_{id}}{2}} = \frac{1}{2} A_{u1} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\beta(R_c // R_L)}{R_b + r_{be}}$$

由于输入回路没有变化，输入电阻依然是:

$$R_i = 2(R_b + r_{be})$$

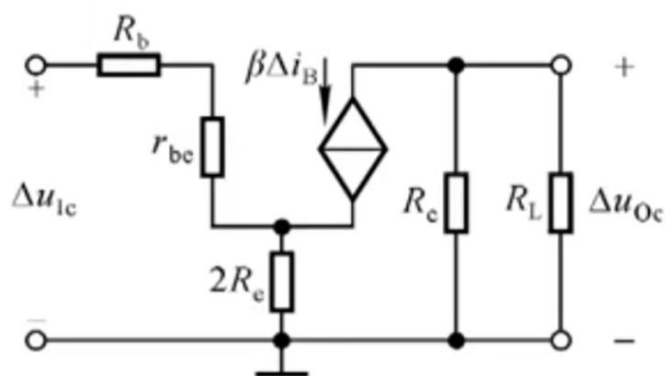
输出电阻为:

$$R_o = R_c$$

(因为此时是单边输出，输出电压仅在单边)

2. 共模分析

共模时，长尾电阻加倍， R_L 仍需接入电路



此时， $u_i = u_{i1} = u_{i2}$

放大倍数:

$$A_{uc} = \frac{u_{oc}}{u_{ic}} = \frac{-\beta(R_c // R_L)}{R_b + r_{be} + 2(1 + \beta)R_e}$$



共模抑制比：

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

3.2.3 单入-双出差动放大电路

单端输入方式可以看作是双端输入的特殊情况，在加信号的一端将信号分解为两个串联的信号源，数值均为 $\frac{u_1}{2}$ ，极性相同，在接地的一端等效为两个串联信号源，数值均为 $\frac{u_1}{2}$ ，极性相反。

所以同双端输入时一样，左、右两边分别获得差模信号，但是于此同时输入了共模信号。

所以此时的输出电压：

$$u_O = A_{ud}u_{Id} + A_{uc}u_{Ic} = A_{ud}u_1 + A_{uc}\frac{u_1}{2}$$

所以，单入-双出差动放大电路与双入-双出放大电路的静态工作点与动态参数完全相同。

3.2.4 单入-单出差动放大电路

与单入-双出差动放大电路同理，单入-单出差动放大电路与双入-单出差动放大电路的静态工作点与动态参数完全相同~

3.2.5 【小结】差动放大电路的动态参数

1. 差模电压放大倍数

与双端输入还是单端输入无关，只与输出方式有关：

双端输出时：

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

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

与双端输入还是单端输入无关，只与输入输出方式有关：

双端输出时：

$$A_{uc} = 0$$



单端输出时：

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

3. 差模输入电阻

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

无论是单端输出还是双端输出均为上式。

4. 差模输出电阻

双端输出：

$$R_{Od} = 2R_C$$

单端输出：

$$R_{Od} = R_C$$

4 输出级：功率放大电路

4.1 前置补充知识

三极管的输入特性输出特性曲线

直流负载线方程

波形失真分析

4.2 功率放大电路的分类

按工作信号的频率分类：

低频功率放大电路-音频功率放大电路

高频功率放大电路-射频功率放大电路

按电路中三极管导通情况分类：

晶体管在整个信号周期内均导通（导通角 $\theta_T = 360^\circ$ ）—甲类放大电路

晶体管仅在信号的正半周或负半周导通（导通角 $\theta_T = 180^\circ$ ）—乙类放大电路

晶体管导通时间大于半个周期而小于一个周期（导通角满足 $180^\circ < \theta_T < 360^\circ$ ）—甲乙类放大电路

按构成功率放大电路的器件不同分类：

分立元件功率放大电路

集成功率放大电路

按电路的组织形式不同分类：



$$P_{omax} = U_o \times I_o = \frac{U_{cem}}{\sqrt{2}} \times \frac{I_{cm}}{\sqrt{2}} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} V_{CC} - U_{CES} \right) (I_{CQ} - I_{CEO})$$

忽略 U_{CEO} 与 I_{CEO} ，则 $P_{omax} = \frac{1}{4} V_{CC} I_{CQ}$

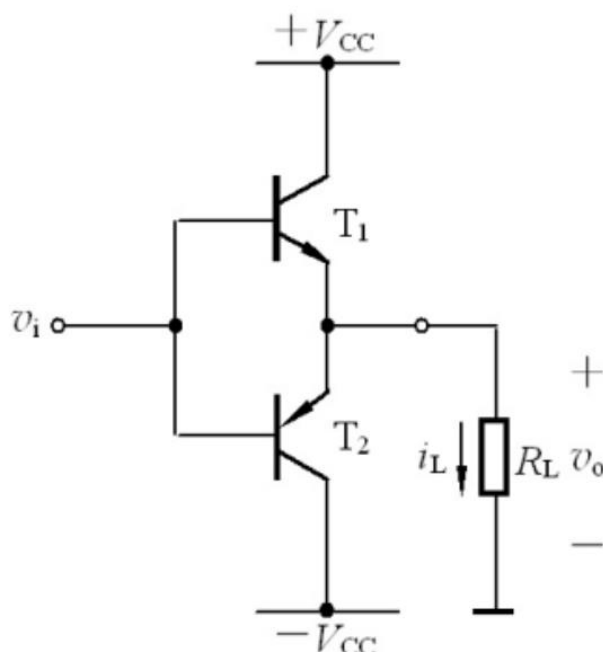
故最大效率

$$\eta_{max} = \frac{P_{omax}}{P_V} = 25\%$$

故甲类放大电路输出功率小，且效率低，不适宜用作功放电路，需要进行改进。

4.4 乙类互补对称 OCL 电路的组成与工作原理（乙类推挽功放）

4.4.1 电路组成：



组成：一对 NPN、PNP 特性相同的互补三极管组成的共集放大电路（射极跟随器 $\rightarrow A_u = 1$ ）

4.4.2 工作原理

当 $u_i = 0$ 时，电路处于静态，电路上下匹配，所以

$$u_{BE1} = u_{BE2} = 0, u_o = 0, I_{CQ1} = I_{CQ2} = 0$$

当输入信号处于正半周时，且幅度远大于三极管开启电压时，VT1 管导通，VT2 管截止，电流从上往下流，与参考方向一致，获得输出信号正半周电压

当输入信号处于负半周时，且幅度远大于三极管开启电压时，VT2 管导通，VT1

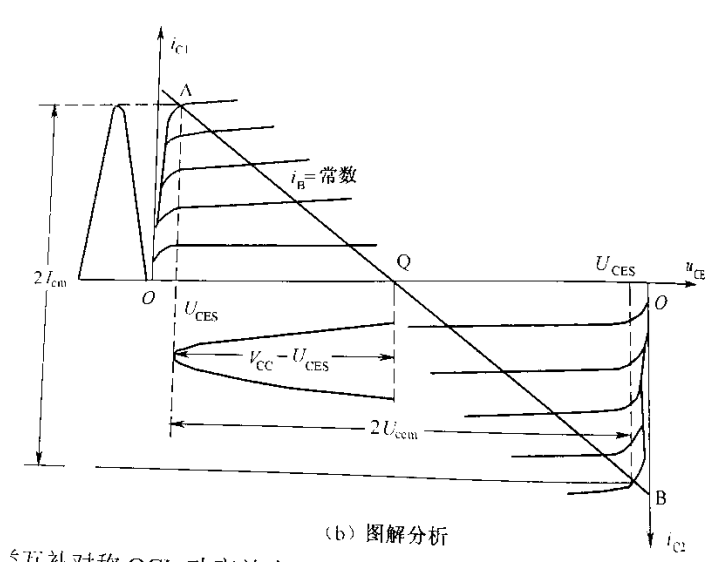


管截止，电流从下往上流，与参考方向相反，获得输出信号负半周电压

但是当输入信号幅度小于三极管开启电压时，电路不工作，此时在正负半周交替过零时，产生交越失真。

4.4.3 电路功率及效率计算

图解分析：



1. 最大不失真输出功率 P_{omax}

电路输出功率：

$$P_o = U_o \times I_o = \frac{U_o^2}{R_L}$$

而，

$$U_o = \frac{U_{cem}}{\sqrt{2}}, I_o = \frac{I_{cm}}{\sqrt{2}}$$

故：

$$P_o = \frac{1}{2} \frac{U_{om}^2}{R_L}$$

电路最大输出功率：

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

2. 电源功率

“由于静态电流 $I_C = 0$ ，所以直流电源在负载获得最大输出功率时，所消耗的平



均功率等于其平均电流与电源电压之积”，简单来说，就是 $V_{CC} \frac{\int I_C dt}{T}$

$$\begin{aligned} P_V &= V_{CC} I_{CC} = V_{CC} \frac{2}{2\pi} \int_0^\pi I_{om} \sin \omega t d(\omega t) = V_{CC} \frac{2}{2\pi} \int_0^\pi \frac{U_{om}}{R_L} \sin \omega t d(\omega t) \\ &= \frac{2}{\pi} \frac{V_{CC} \cdot U_{om}}{R_L} \\ &= \frac{2}{\pi} \frac{V_{CC}(V_{CC} - U_{CES})}{R_L} \end{aligned}$$

3. 效率

$$\eta_{max} = \frac{P_{omax}}{P_V} = \frac{\pi}{4} \frac{V_{CC} - U_{CES}}{V_{CC}} \times 100\%$$

理想情况下忽略管压降，

$$\eta_{max} \approx \frac{\pi}{4} = 78.5\%$$

4. 晶体管的管耗 P_T

$$P_T = P_V - P_o$$

最大功耗：

$$P_{Tmax} \approx 0.2 P_{omax}$$

【晶体管选择问题】

1. 晶体管功耗选择

$$P_{CM} > 0.2 P_{omax}$$

2. 最大管压降

$$U_{CEO} > 2V_{CC}$$

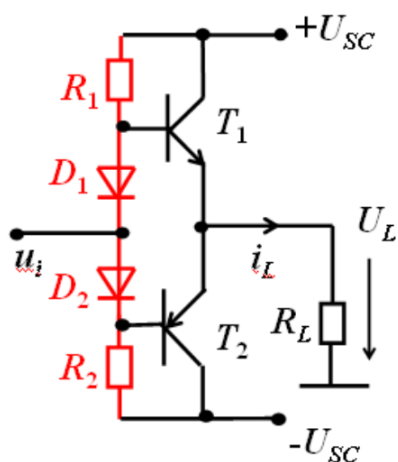
3. 集电极最大电流

$$I_{cmax} > \frac{V_{CC}}{R_L}$$



4.5 消除交越失真——甲乙类互补对称 OCL 功率放大电路

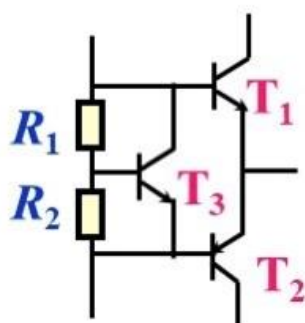
4.5.1 利用二极管提供偏置电压



二极管的作用：消除交越失真

定量分析同上。

4.5.2 U_{BE} 倍增电路



VT3 的 U_{BE} 提供电压偏置，若 $I_B \approx 0$

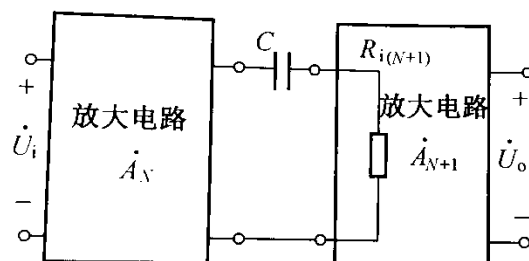
$$U_{B1-B2} = \frac{U_{BE}}{R_2} (R_1 + R_2) = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) U_{BE}$$



5 多级放大电路

5.1 耦合方式

5.1.1 阻容耦合



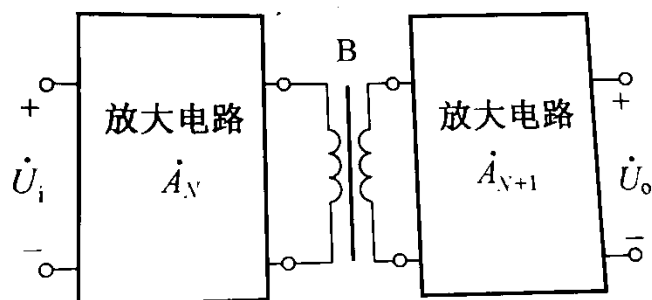
优点：

1. 各级静态工作点不相互影响
2. 零点漂移小
3. 交流信号损失小

缺点：

1. 低频特性差
2. 难以集成

5.1.2 变压器耦合



优点：

1. 不能传递直流信号，各级静态工作点相互独立，互不影响
2. 零点漂移小
3. 具有阻抗变换作用

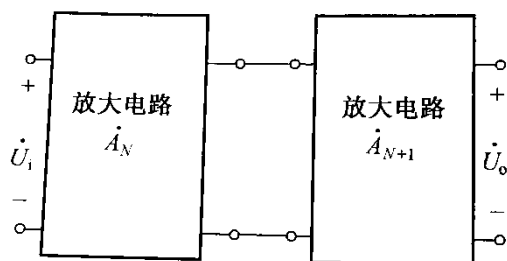
缺点：

1. 高频低频性能都很差



2. 电路无法集成

5.1.3 直接耦合



优点:

1. 低频特性好
2. 便于集成

缺点:

1. 存在各级 Q 点的配置问题
2. Q 点相互影响, 给设计和计算带来不便
3. 存在严重的零点漂移问题

5.2 多级放大电路的定量分析

5.2.1 电压放大倍数

$$A_u = A_{u1}A_{u2}A_{u3} \cdots A_{un} = \prod_{i=1}^n A_{ui}$$

5.2.2 输入电阻与输出电阻

多级放大电路的输入电阻就是输入级的输入电阻, 计算输入电阻时, 输入级的输出电阻视作下一级的输入电阻。

$$R_i = R_{i1}$$

输出电阻就是输出级的输出电阻, n 级放大电路的输入电阻视作上一级的输出电阻。

$$R_o = R_{on}$$