



模拟集成电路基础

1 集成运算放大电路结构简图



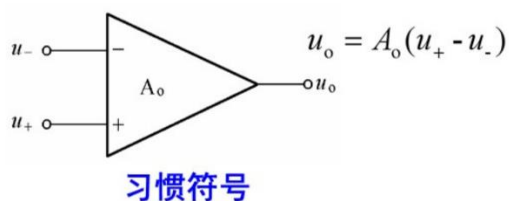
输入级：差分放大电路， K_{CMR} 高，抑制____信号，放大____信号

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_- ：____输入端

u_+ ：____输入端

A_o ：_____

u_o ：_____

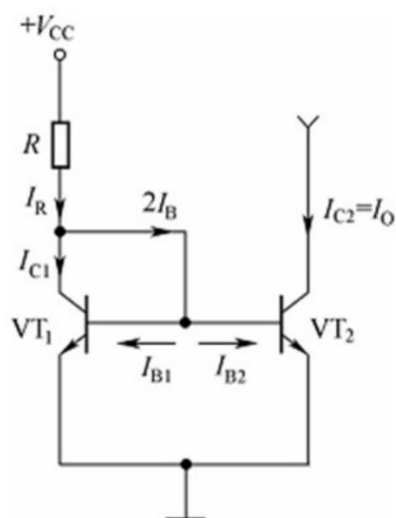


2 偏置电路：晶体管电流源及其应用

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_____。

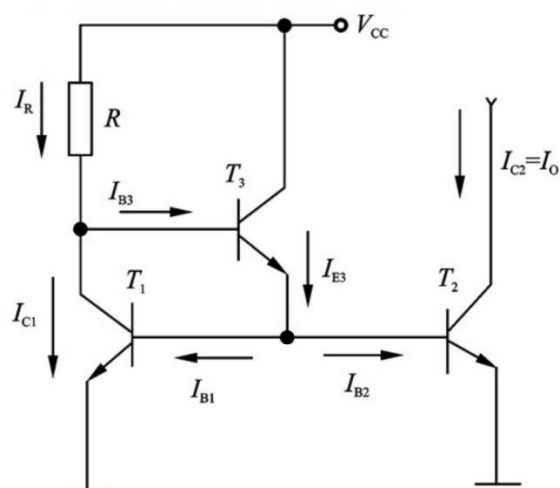
2.1 镜像电流源

电路图如下：



2.2 改进型镜像电流源（精密电流源）

电路图：

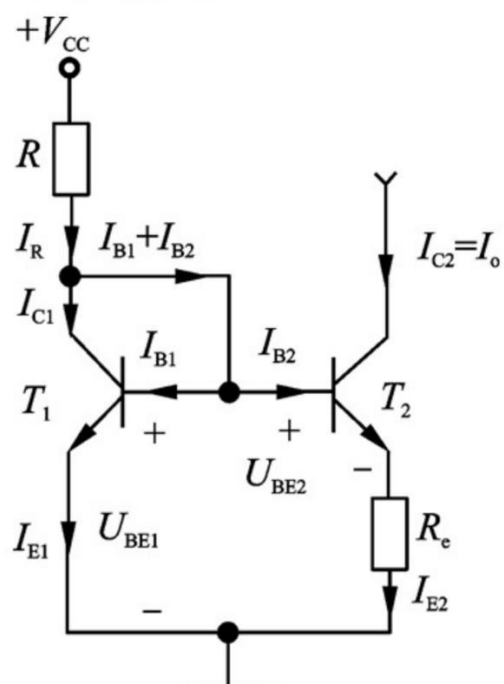


T_1, T_2 三管参数相同



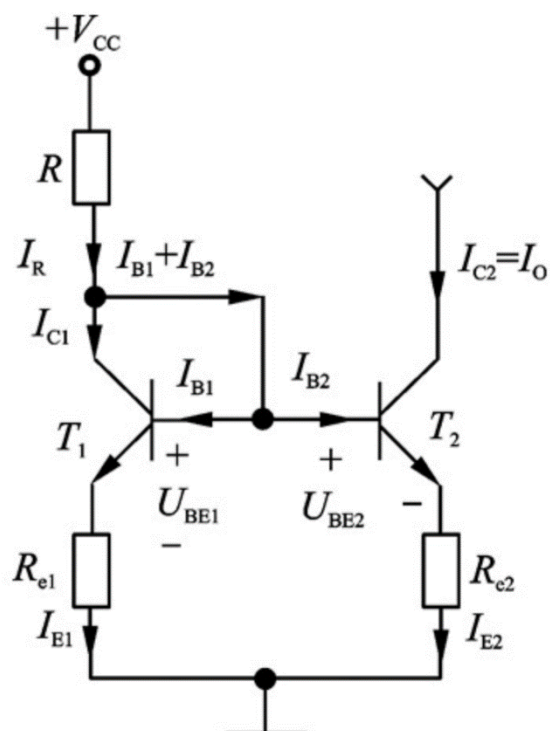
2.3 微电流源电路

电路图如下：



2.4 比例电流源

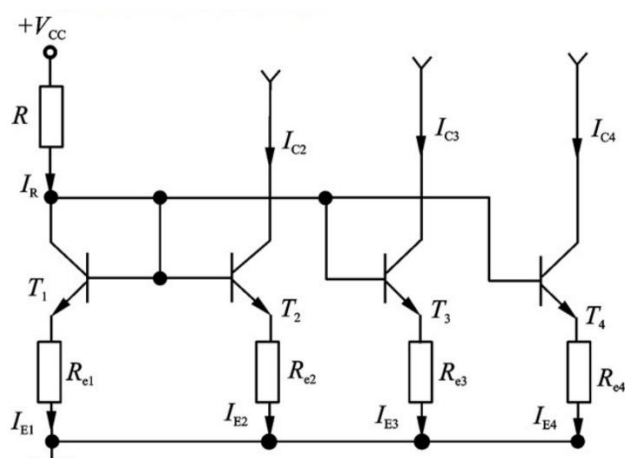
电路图如下：





2.5 多级比例放大电路

电路图如下：



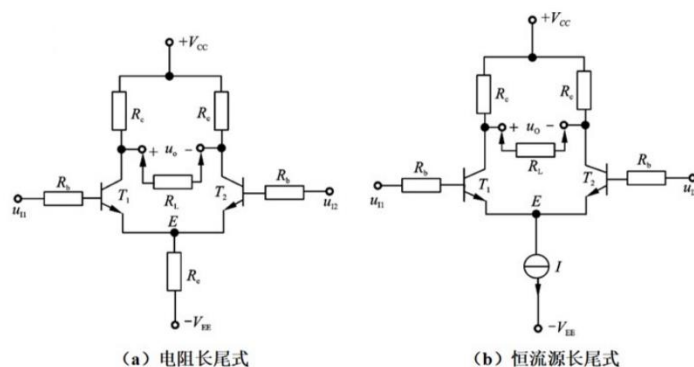
3 中间级：差动放大电路

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_____计算。

3.1.4 共模抑制比 K_{CMR}

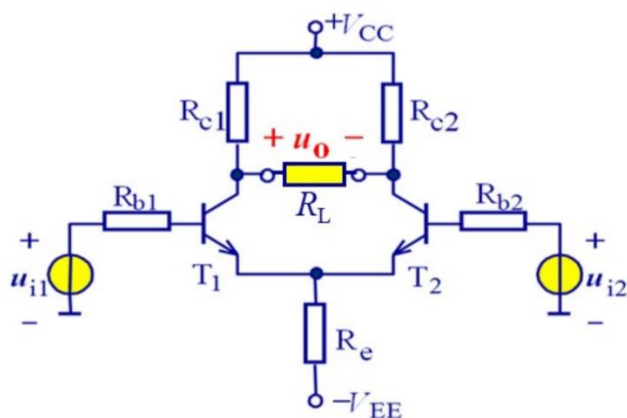
定义

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

3.2 差动放大电路基本性能分析

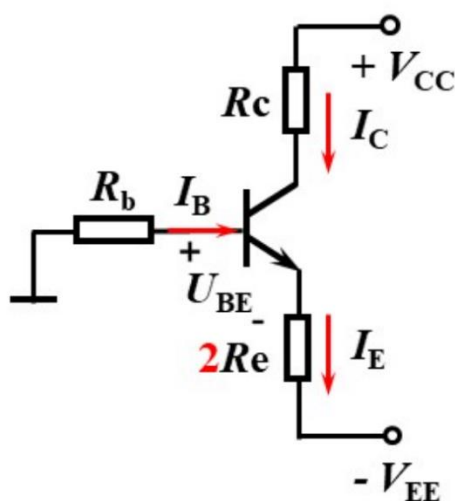
3.2.1 双入-双出差动放大电路

3.2.1.1 静态分析





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，

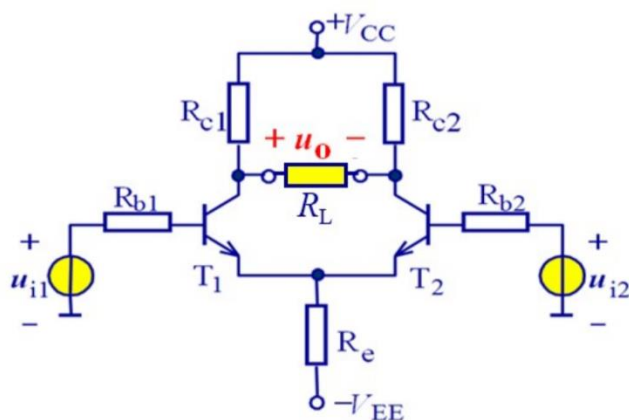
流过电阻 R_E 的电流： $I_{R_E} = I_{EQ1} + I_{EQ2} = 2I_{EQ}$

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：



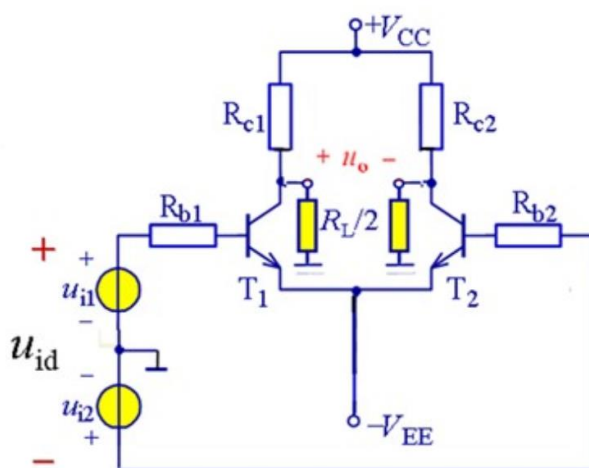
1. 差模性能分析



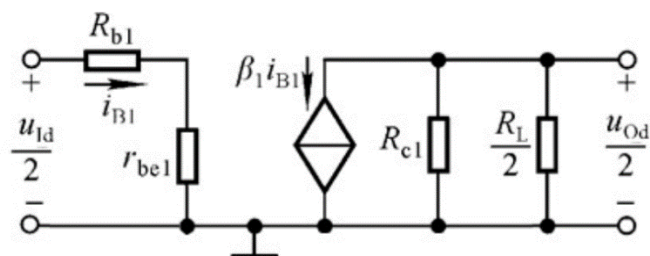
公共电阻状态：

- 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：

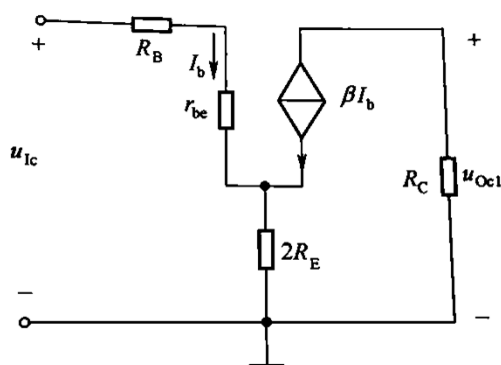


该电路是以牺牲一个管子的放大作用来换取对零点漂移的抑制。

2. 共模性能分析

公共电阻状态：

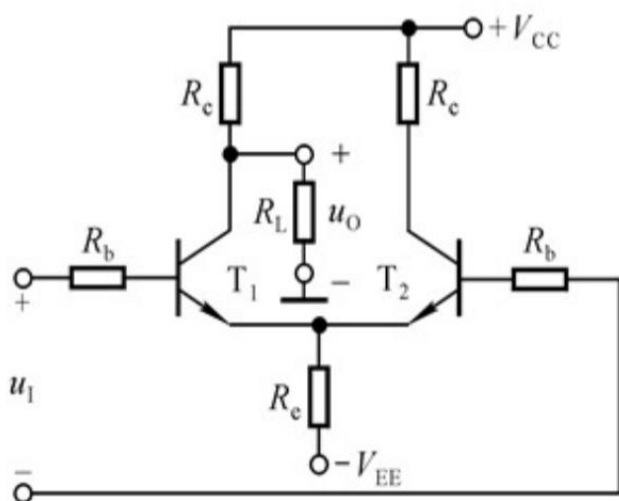
- ①流过长尾电阻 R_E 的电流是两管电流之和，两个单端输出电压大小、相位相同，故在共模半等效电路中，长尾电阻要加倍
- ②对于负载电阻，由于 $u_{c1} = u_{c2} = u_c$ ，故 R_L 视作开路



故要电路保持对称，共模信号能被完全抑制

3.2.2 双入单出差动放大电路

电路图如下：

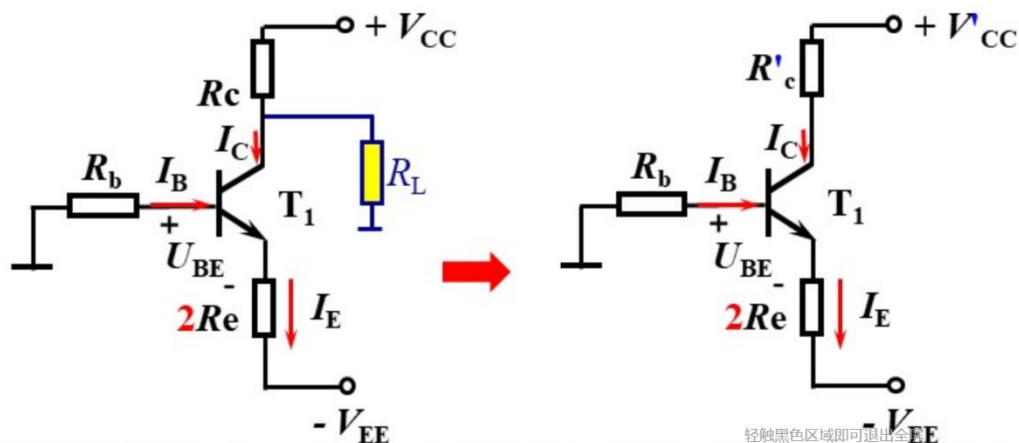


3.2.2.1 静态分析

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：

则左半部分的静态电路图简化为：



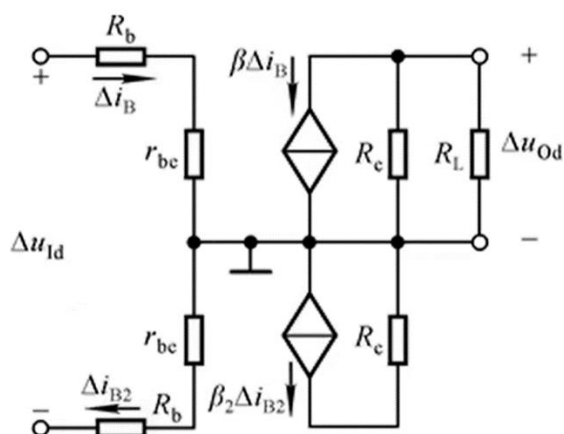
由于输入回路对称，所以静态电流 $I_{BQ1} = I_{BQ2} = I_{BQ}$ ，从而 $I_{CQ1} = I_{CQ2} = I_{CQ}$ ，计算方法与双入双出相同。

但是由于输出回路不对称，

3.2.2.2 动态分析

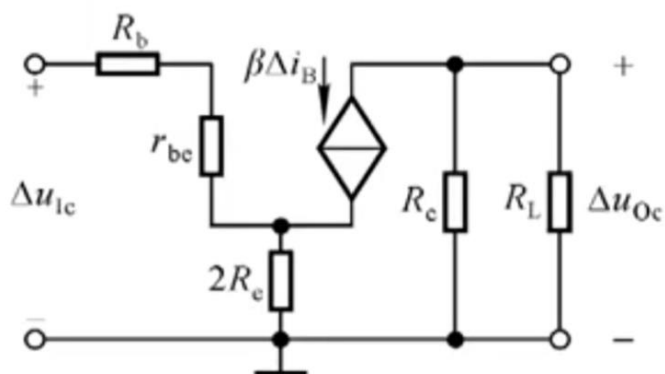
1. 差模性能分析

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

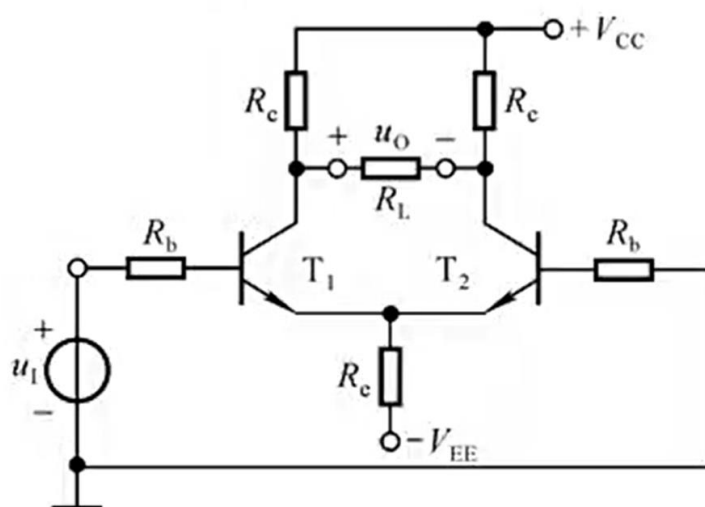


2. 共模分析

共模时，长尾电阻加倍， R_L 仍需接入电路



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 $\frac{u_i}{2}$ ，极性相同，在接地的一端等效为两个串联信号源，数值均为 $\frac{u_i}{2}$ ，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：

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：

单端输出时：

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：

单端输出时：

3. 差模输入电阻

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：

单端输出：



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：

变压器耦合功率放大电路

无输出变压器功率放大电路

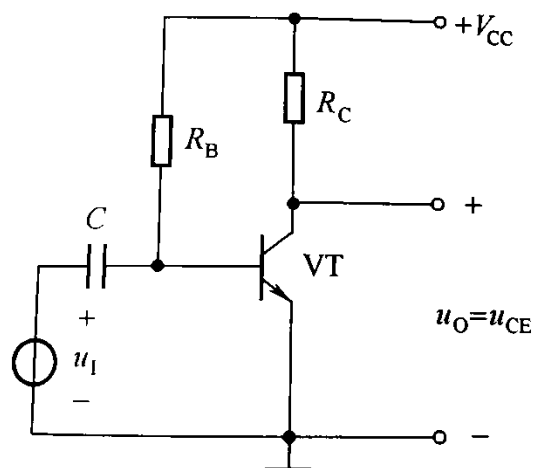
无输出电容功率放大电路（OCL）

无输出变压器功率放大电路（OTL）

平衡式无输出变压器功率放大电路（BTL）

4.3 甲类互补对称 OCL 功率放大电路

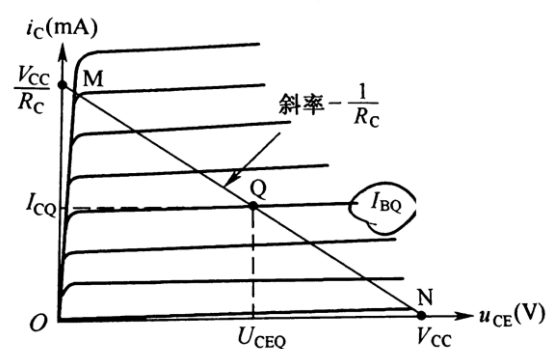
以共射组态放大电路为例：



将静态工作点设置在直流负载线的中点，
直流电源提供的直流功率：

电路可能的最大交流输出功率 P_{omax}

图解分析：



忽略 U_{CE0} 与 I_{CE0} ，则

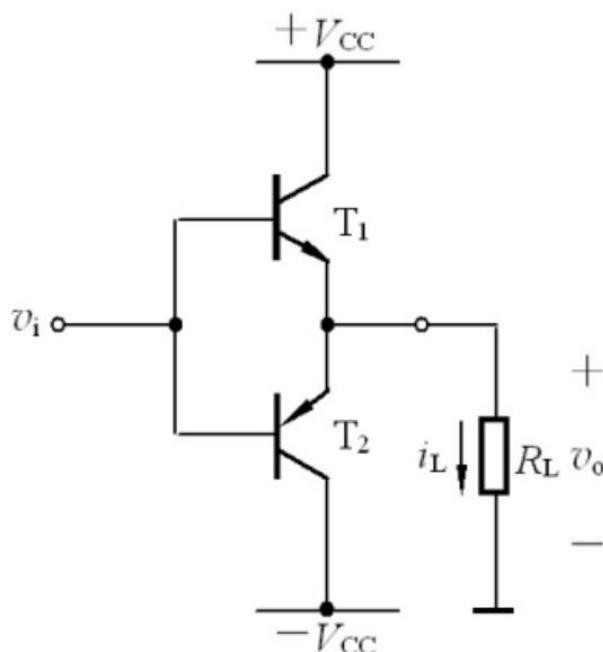
故最大效率

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 → _____）

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

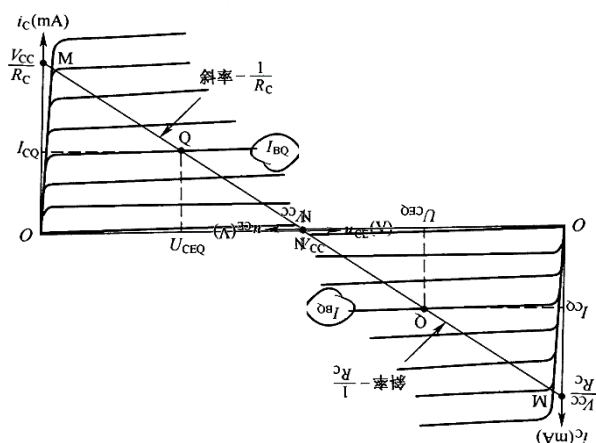
当输入信号处于正半周时，且幅度远大于三极管开启电压时，_____ 导通，_____ 截止，电流从上往下流，与参考方向_____，获得输出信号_____ 电压

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，_____ 导通，_____ 截止，电流从下往上流，与参考方向_____，获得输出信号_____ 电压

但是当输入信号幅度_____ 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：

而，

故：

电路最大输出功率：

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 $V_{CC} \frac{\int I_C dt}{T}$

3. 效率

理想情况下忽略管压降，

4. 晶体管的管耗 P_T



最大功耗：

【晶体管选择问题】

1. 晶体管功耗选择

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

2. 最大管压降

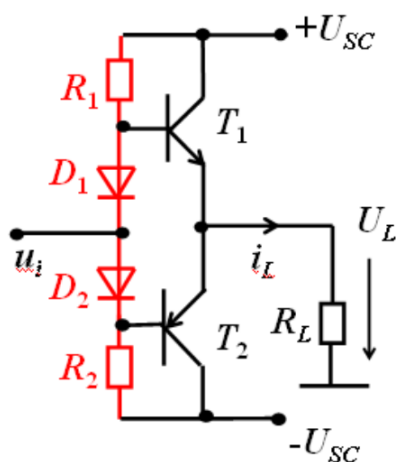
$$U_{CEO} > 2V_{CC}$$

3. 集电极最大电流

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

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

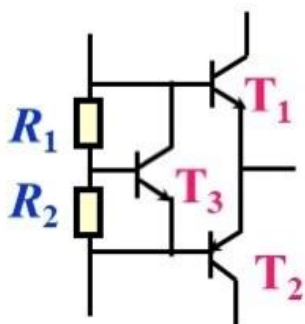


二极管的作用：_____

定量分析同上。



4.5.2 U_{BE} 倍增电路

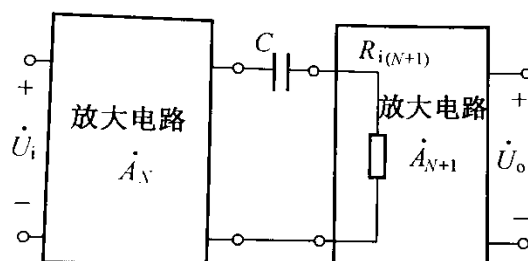


VT3 的 U_{BE} 提供电压偏置，若 $I_B \approx 0$

5 多级放大电路

5.1 耦合方式

5.1.1 阻容耦合



优点：

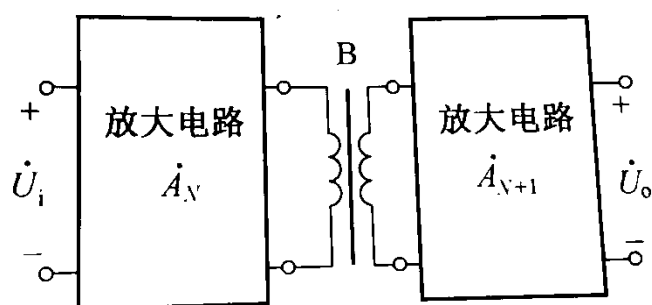
1. 各级静态工作点不相互影响
2. 零点漂移小
3. 交流信号损失小

缺点：

1. 低频特性差
2. 难以集成



5.1.2 变压器耦合



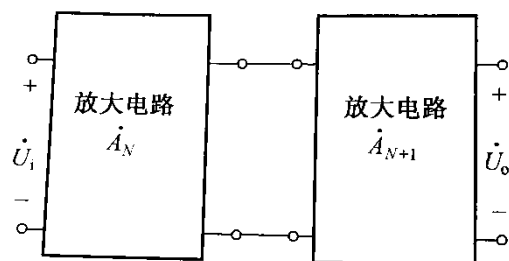
优点:

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

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。

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。