



课程内容

第1章 常用半导体器件

第2章 三极管和场效应管放大电路

第3章 集成运算放大器

3.1 多级放大电路

3.2 差分放大电路

3.3 功率放大电路

第4章 放大电路中的负反馈

第5章 集成运算放大器的应用

5.1 理想集成运算放大器

5.2 模拟信号运算电路

5.3 信号处理电路

第6章 直流稳压电源

6.1 单相桥式整流电路

6.2 电容滤波电路

6.3 稳压电路

考查方法：

- 1、会看：读图，定性分析
- 2、会算：定量计算（估算） 这2者考查分析问题能力
- 3、会选：电路形式，器件，参数，考查解决问题的能力—设计能力
- 4、会调：仪器选用，测试方法，故障诊断，EDA，考查解决问题的能力—实践能力

复习与考试

一、考查什么

二、复习什么

三、怎样复习

四、复习举例：集成运放应用电路

一、考查什么

- 会看：电路的识别、定性分析。

- 如是哪种电路：

- 共射、共基、共集、共源、共漏、差分放大电路及哪种接法
 - 引入了什么反馈
 - 比例、加减、积分、微分.....运算电路
 - 单限、滞回、窗口电压比较器
 - 线性直流稳压电源.....

- 又如性能如何：

- 放大倍数的大小、输入电阻的高低、带负载能力的强弱
 - 引入负反馈后电路是否稳定
 - 输出功率的大小、效率的高低
 - 稳压性能的好坏.....

- 会算：电路的定量分析。

- 例如求解

- 电压放大倍数、输入电阻、输出电阻
 - 深度负反馈条件下的放大倍数
 - 运算关系
 - 电压传输特性
 - 输出电压波形及其频率和幅值
 - 输出功率及效率
 - 输出电压的平均值、可调范围

- **会选：** 根据需求选择电路及元器件
 - 在已知需求情况下选择电路形式，例如：
 - 是采用单管放大电路还是采用多级放大电路；是直接耦合、阻容耦合；是晶体管放大电路还是场效应管放大电路；是否用集成放大电路。
 - 是采用电压串联负反馈电路、电压并联负反馈电路、电流串联负反馈电路还是采用电流并联负反馈电路。
 - 是采用**OTL**、**OCL**功放电路
 - 是采用电容滤波还是电感滤波
 - 是采用稳压管稳压电路还是串联型稳压电路

- **会选：** 根据需求选择电路及元器件
 - 在已知功能情况下选择元器件类型，例如：
 - 是采用低频管还是高频管。
 - 是采用通用型集成运放还是采用高精度型、高阻型、低功耗.....集成运放。
 - 采用哪种类型的电阻、电位器和电容
 - 在已知指标情况下选择元器件的参数
 - 电路中所有电阻、电容、电感等的数值；半导体器件的参数，如稳压管的稳定电压和耗散功率，晶体管的极限参数等。

- 会调：
 - 电路调试的方法及步骤。
 - 调整电路性能指标应改变哪些元件参数、如何改变。
 - 电路故障的判断和消除。
 - 例如
 - 调整放大器的电压放大倍数、输入电阻和输出电阻的方法与步骤
 - 电路中某元件断路或短路将产生什么现象。
 - 电路出现异常情况可能的原因。
 -

二、复习什么

- 以基本概念、基本电路、基本分析方法为主线
- 概念和性能指标：每个术语的物理意义，如何应用。
- 基本电路：电路结构特征、性能特点、基本功能、适用场合，这是读图的基础。
 - 基本放大电路
 - 差分放大电路
 - 功率放大电路
 - 集成运放
 - 运算电路
 - 电压比较器
 - 直流电源

三、怎样复习

- 重点是基础知识：基本概念、电路、方法
- 识别电路是正确分析电路的基础

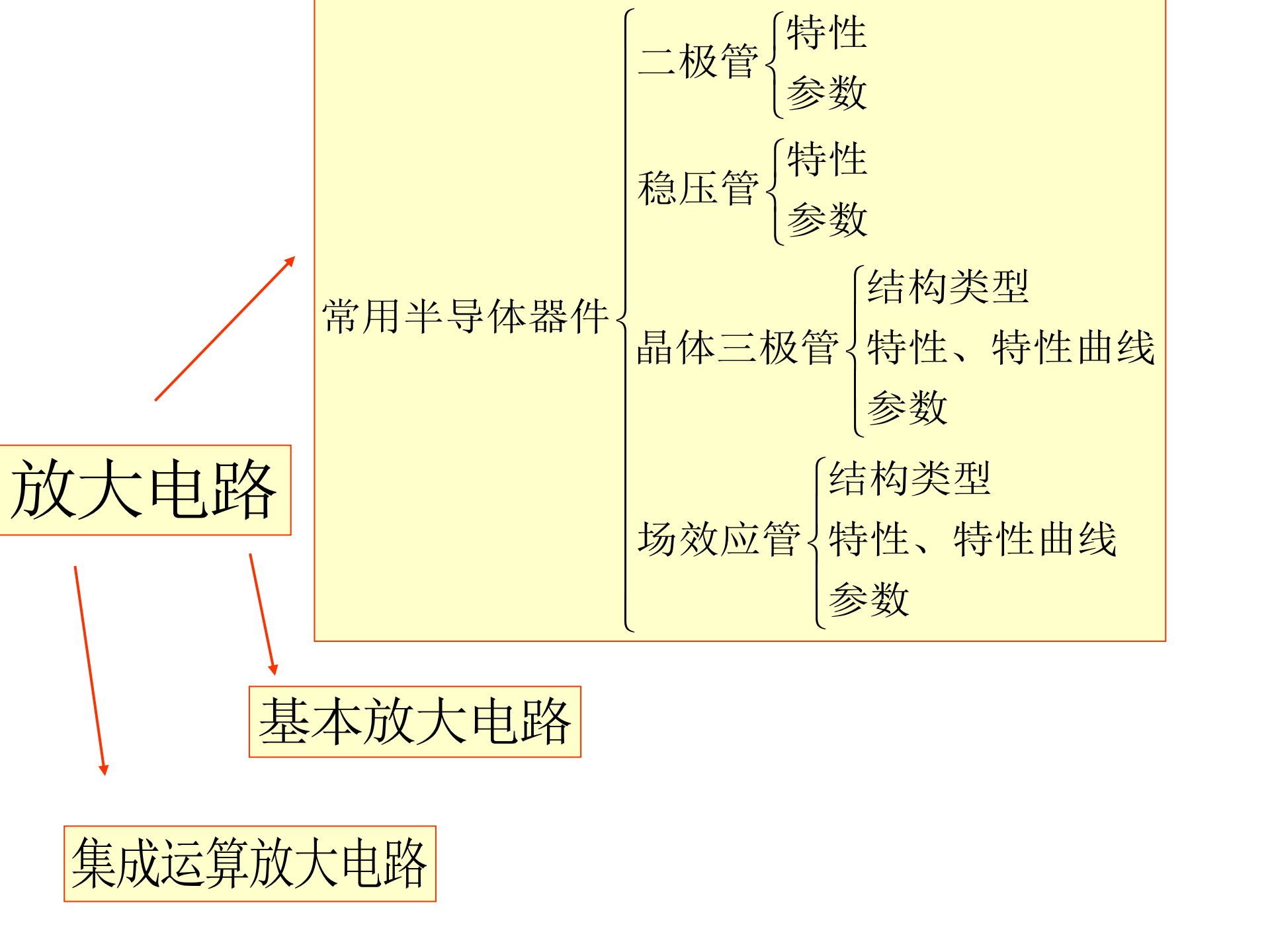
模拟电路知识体系

- 总的来说就是以三极管为核心，以集成运放为主线，以交流信号的放大为目的。
- 集成运放内部主要组成单元是差分输入级、电压放大级、功率放大级、偏置电路。
- 集成运放的两个不同工作状态：线性和非线性应用。
- 模拟电路主要就是围绕集成运放的内部结构、外部特性及应用、性能改善、工作电源产生、信号源产生等展开。

有关符号的约定

- 大写字母、大写下标表示直流量。如， U_{CE} 、 I_C 等。
- 小写字母、大写下标表示总量（含交、直流）。如， u_{CE} 、 i_B 等。
- 小写字母、小写下标表示纯交流量。如， u_{ce} 、 i_b 等。
- 上方有圆点的大写字母、小写下标表示相量。如， \dot{U}_{ce} 、 \dot{i}_b 等。

放大电路



```
graph LR; A[常用半导体器件] --> B[放大电路]; A --> C[基本放大电路]; A --> D[集成运算放大电路];
```

常用半导体器件

二极管 { 特性
参数

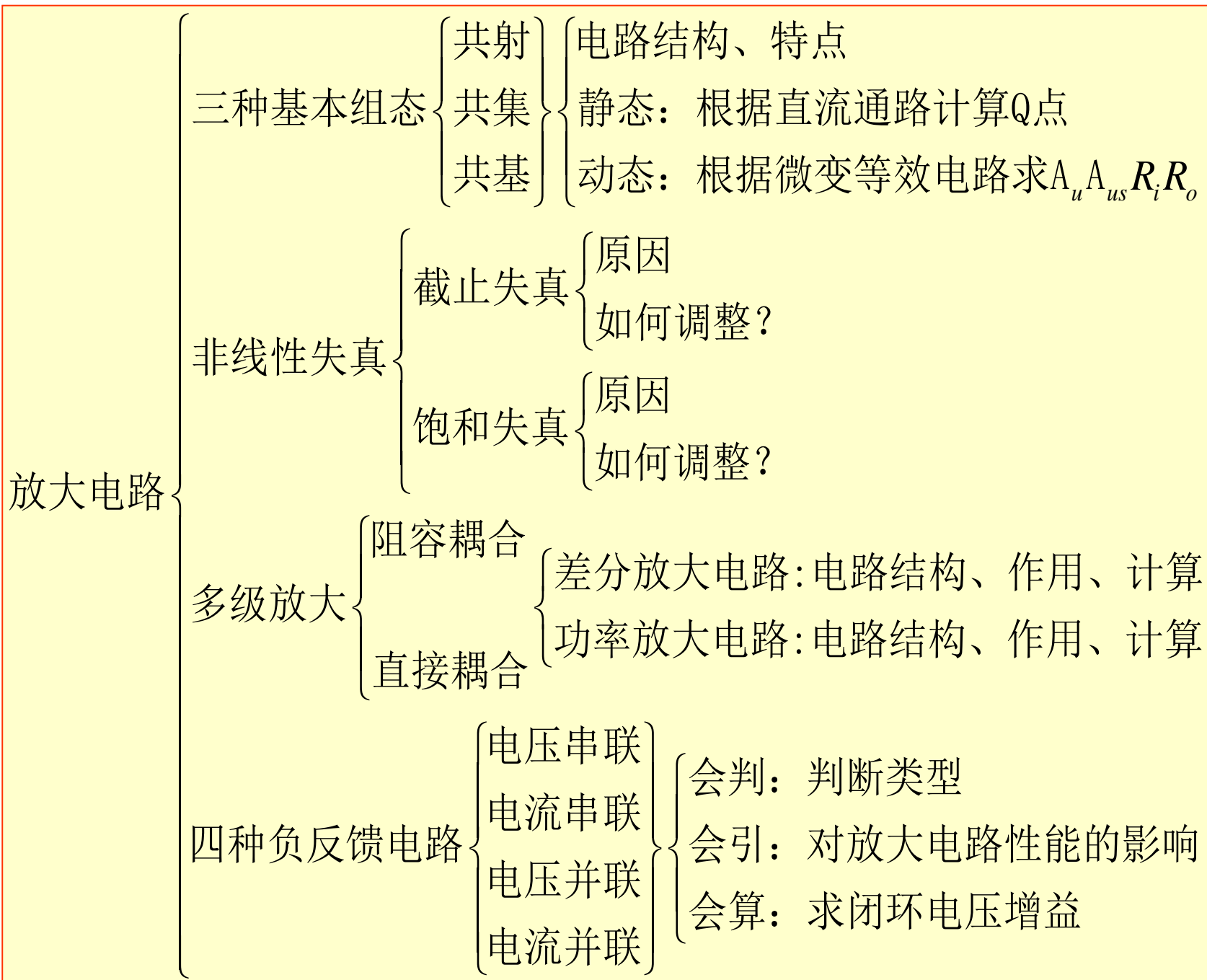
稳压管 { 特性
参数

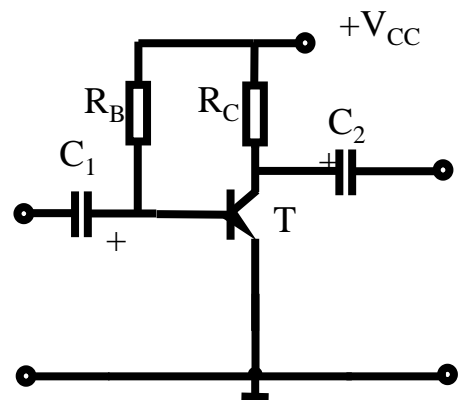
晶体三极管 { 结构类型
特性、特性曲线
参数

场效应管 { 结构类型
特性、特性曲线
参数

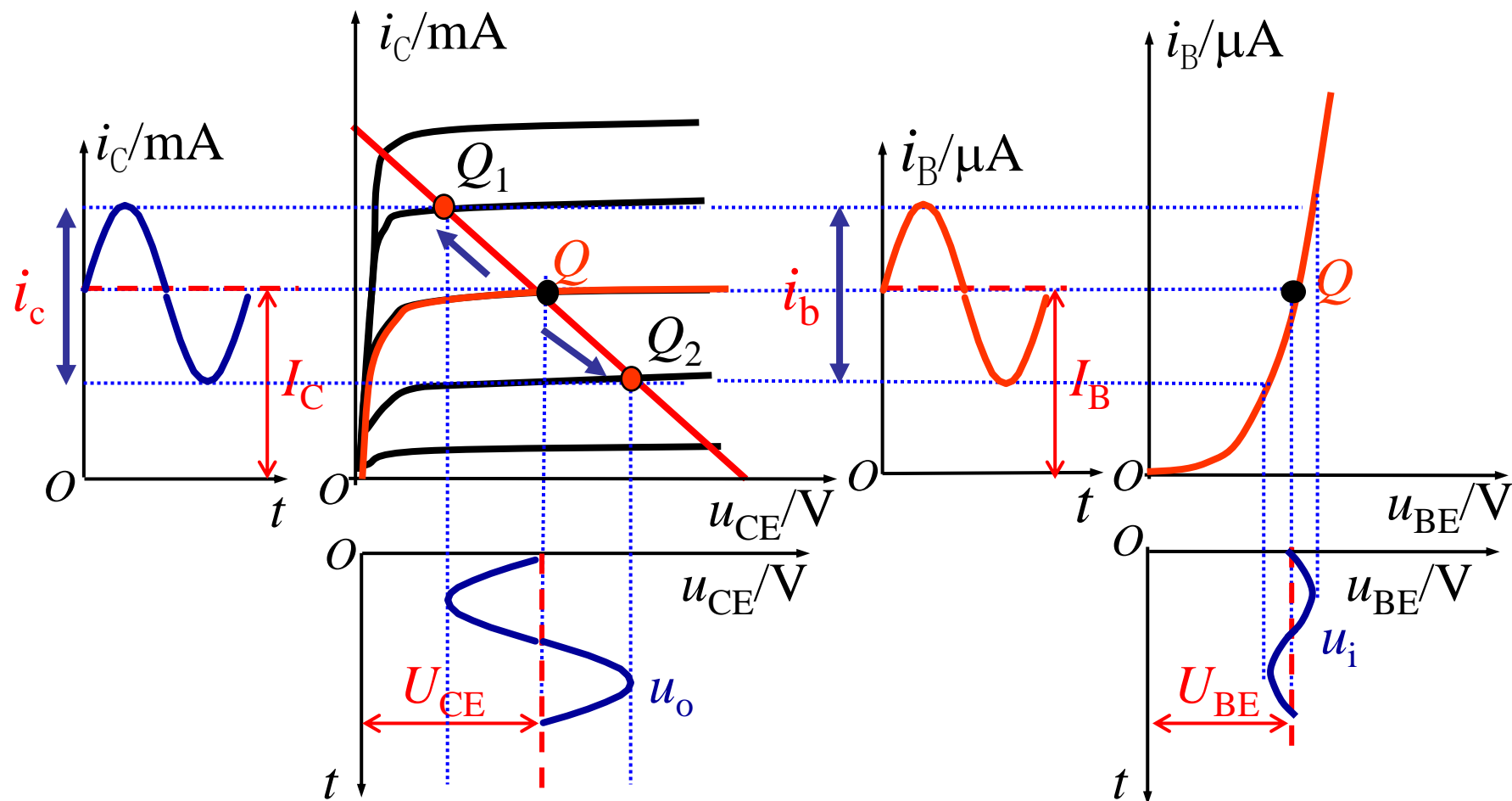
基本放大电路

集成运算放大电路

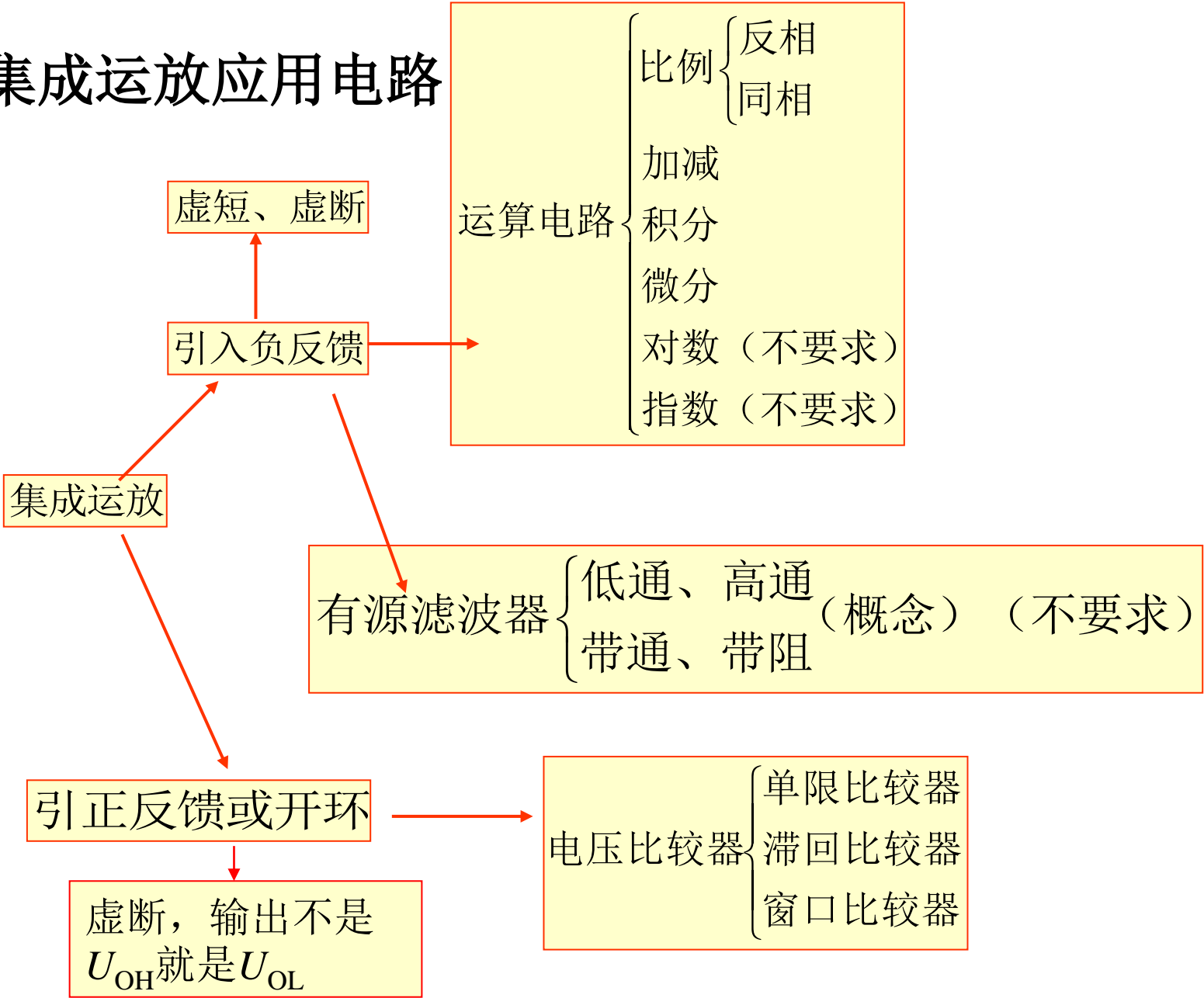




动态分析图解法



集成运放应用电路

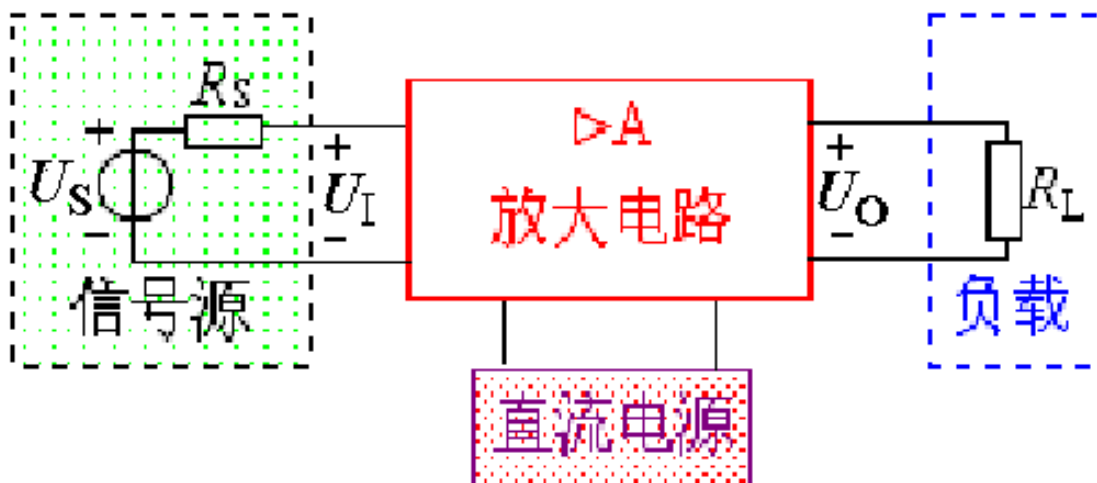


一、基本放大电路

考核要点（题型）

- 基本题： 单级，共射、共基、共集电极
 - 求Q
 - 画小信号（微变）等效电路
 - 求动态指标（增益、输入电阻、输出电阻）
 - 简答：其他性能或概念
- 基本题（难度稍增）：
- 2级放大
- 综合题

放大电路概念



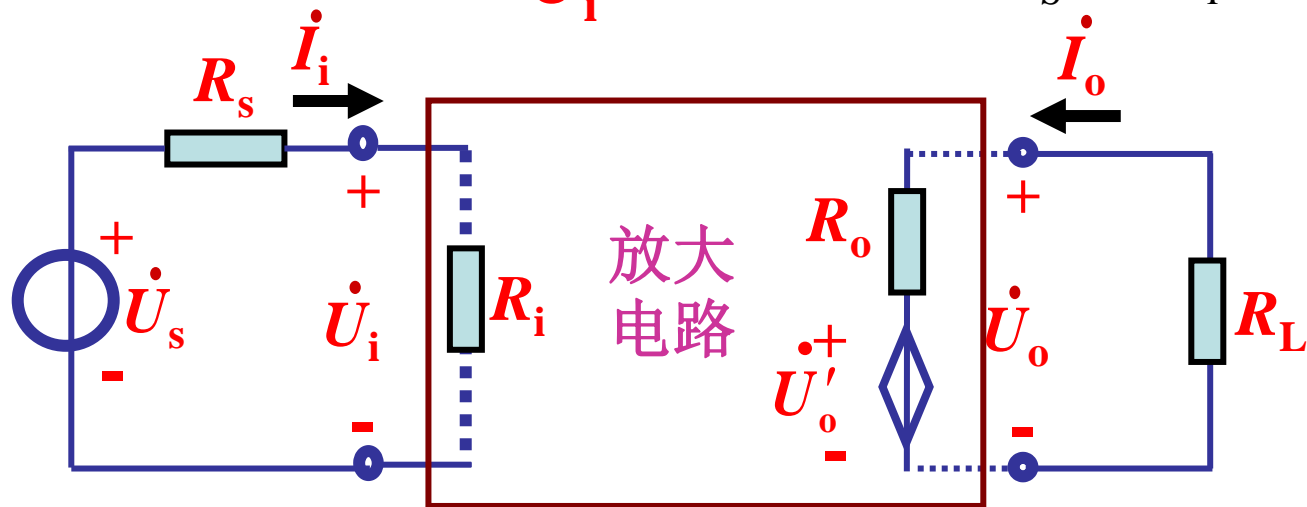
放大电路主要用于放大微弱的电信号，输出电压或电流在幅度上得到了放大。放大电路为双口网络，即一个信号输入口和一个信号输出口。



放大电路的主要技术指标

1. 电压放大倍数 $A_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i}$

$$A_{us} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = \frac{R_i}{R_i + R_s} A_u$$



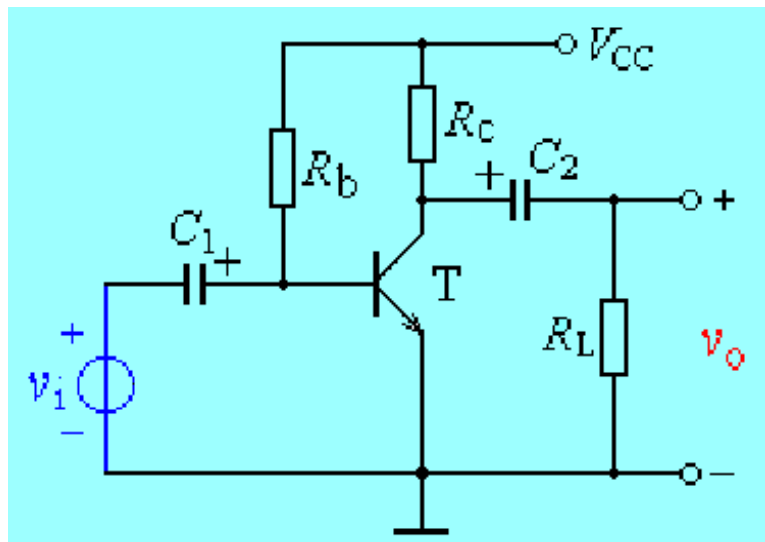
2. 输入电阻 $R_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i}$

3. 输出电阻 $R_o = \left. \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_o} \right|_{\substack{\dot{U}_s=0 \\ R_L=\infty}}$

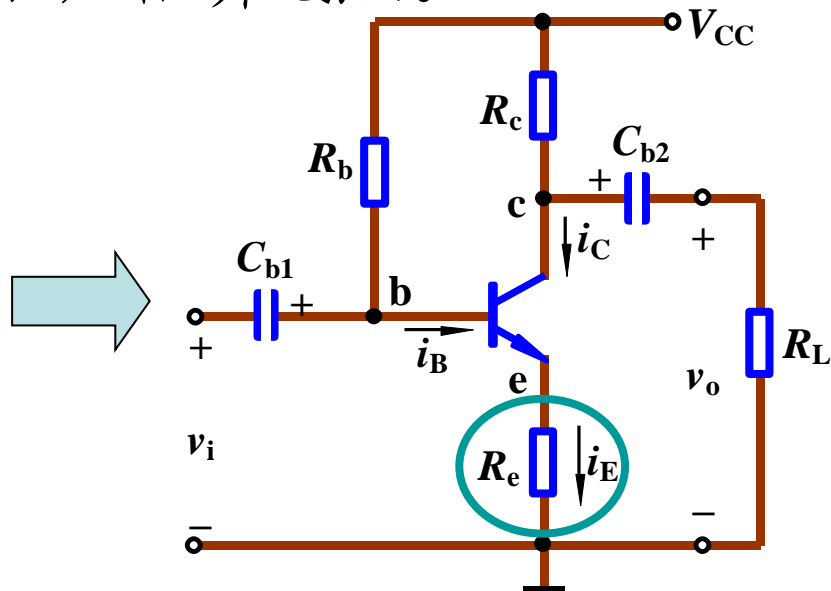
三种基本组态的比较

组态 性能	共射组态	共集组态	共基组态
电 路			
\dot{A}_u	大(十几 ~ 一几百) $-\frac{\beta R'_L}{r_{be}}$	小(小于、近于 1) $\frac{(1 + \beta) R'_e}{r_{be} + (1 + \beta) R'_e}$	大(数值同共射电路, 但同相) $\frac{\beta R'_L}{r_{be}}$
R_i	$R_b // r_{be}$ (中)	$R_b // [r_{be} + (1 + \beta)(R_e // R_L)]$ (大)	$R_e // \frac{r_{be}}{1 + \beta}$ (小)
R_o	R_c	$R_e // \frac{(R_s // R_b) + r_{be}}{1 + \beta}$ (小)	R_c

放大电路如下图所示，估算Q点。

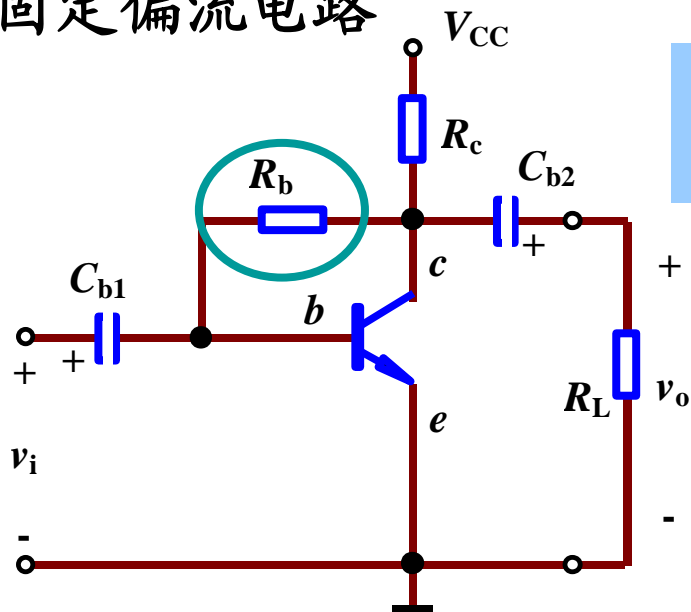


固定偏流电路

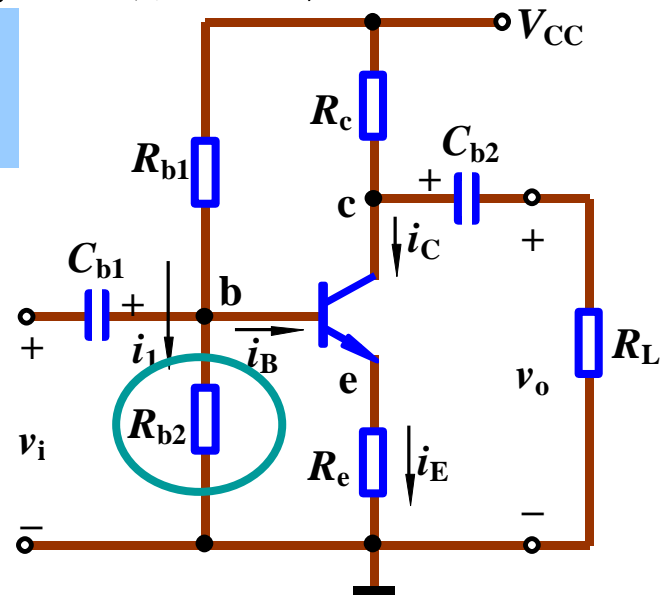


射极偏置电路

共射



集电极-基极偏置电路



分压式射极偏置电路

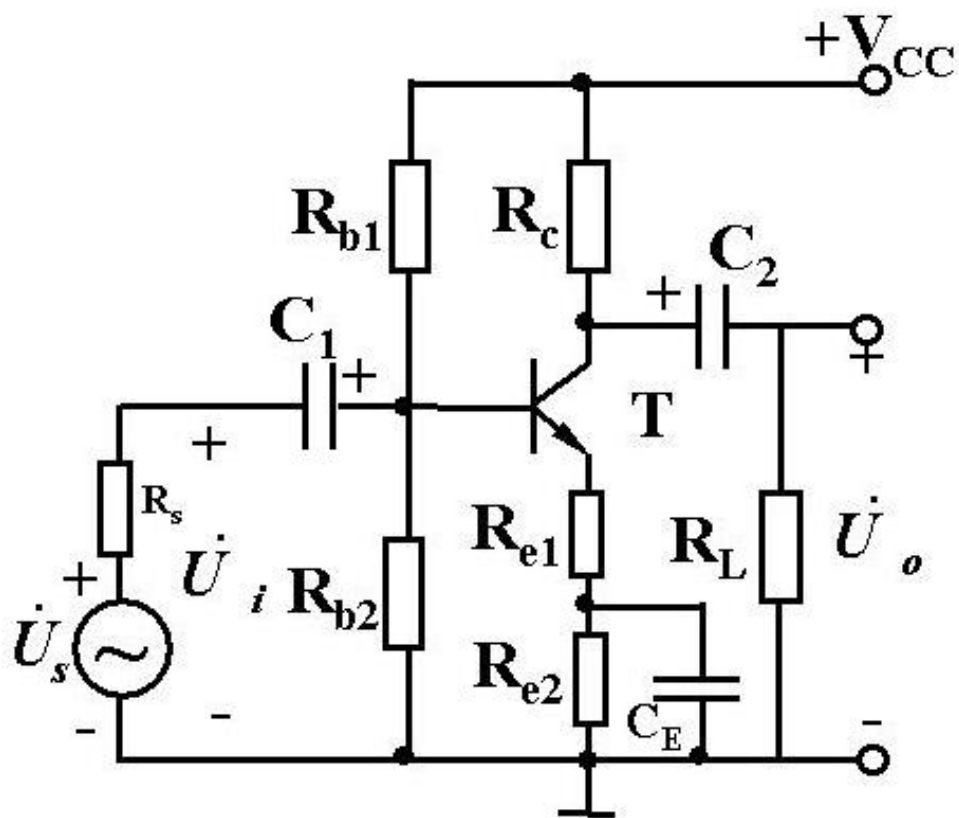
(1) 计算静态工作点。

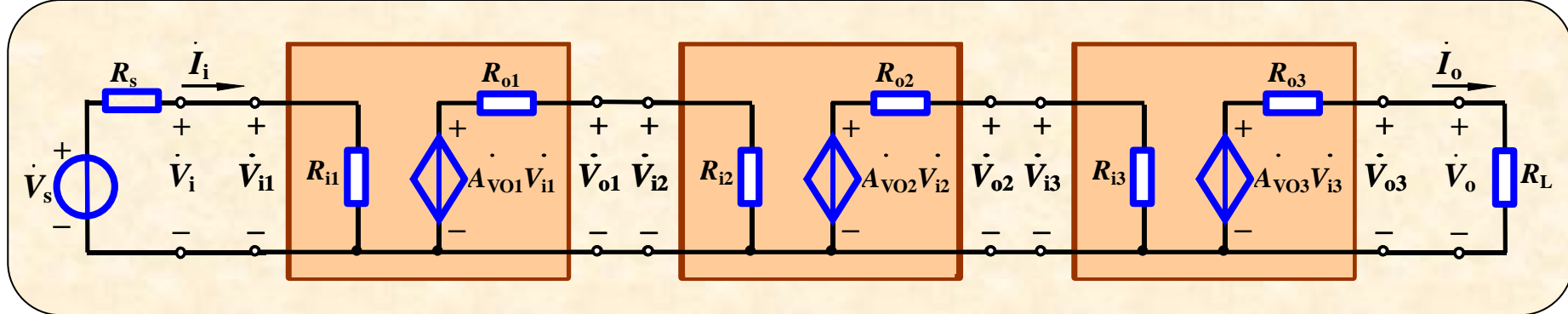
(2) 画出微变等效电路，计算 R_i, R_o, A_u, A_{us} 。

(3) 若电容 C_E 开路，则将引起电路的哪些动态参数发生变化？如何变化？

(4) 若电路输出出现如下失真，则为何种失真？为消除失真，可将（ ）。

A. R_{b1} 减小 B. R_{b2} 减小 C. R_c 增大 D. V_{CC} 减小





输入级— $R_i \uparrow$
共集、共射

中间放大级— $A_v \uparrow$
共射、共基

输出级— $R_o \downarrow$
共集

1. 电压放大倍数

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{\dot{U}_{o1}}{\dot{U}_i} \cdot \frac{\dot{U}_{o2}}{\dot{U}_{i2}} \cdots \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_{in}} = \prod_{j=1}^n \dot{A}_{uj}$$

2. 输入电阻

$$R_i = R_{i1}$$

3. 输出电阻

$$R_o = R_{on}$$

对电压放大电路的要求： R_i 大， R_o 小， A_u 的数值大，最大不失真输出电压大。

二、差分放大电路

零漂： 输入短路时，输出仍有缓慢变化的电压产生。
主要由温度变化引起，在多级放大电路中，影响最严重的是输入级。

②差分式放大电路的工作原理（对称性）；抑制零漂的原理；差模、共模信号的定义、分解；

对四种组态（双入一双出，双入一单出，单入一双出，单入一单出）的主要技术指标的计算（含直流工作点，差模放大倍数，输入、输出电阻的计算）。

对差分放大器，人为只加差模信号（放大），所谓共模输入实际上是外界的干扰信号，应抑制。

$$K_{\text{CMR}} = \left| \frac{A_{vd}}{A_{vc}} \right| \quad K_{\text{CMR}} \text{ 越大, 抑制零漂能力越强}$$

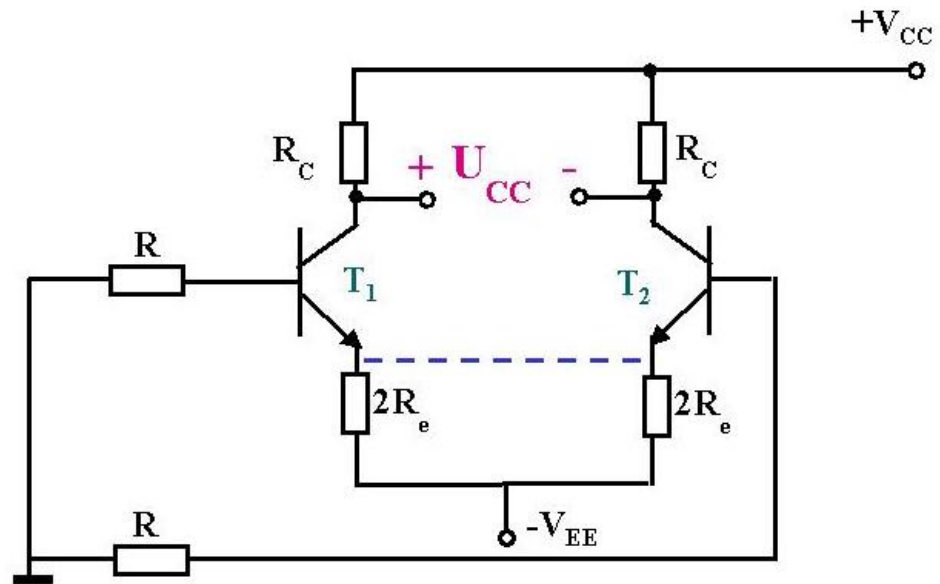
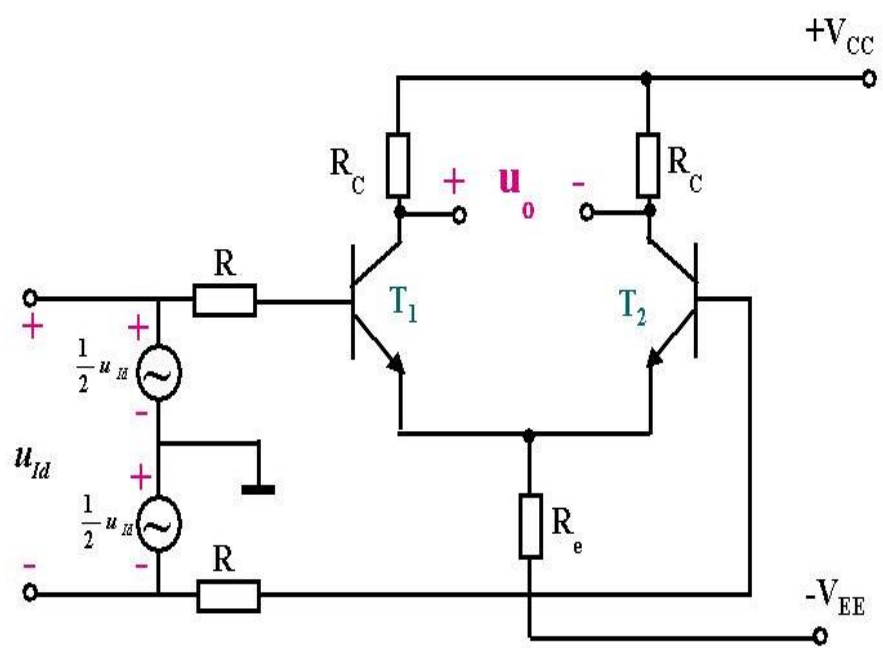
长尾式差动放大电路

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

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

$$U_{CQ} = V_{CC} - I_{CQ}R_c \text{ (对地)}$$

$$U_{BQ} = -I_{BQ}R \text{ (对地)}$$



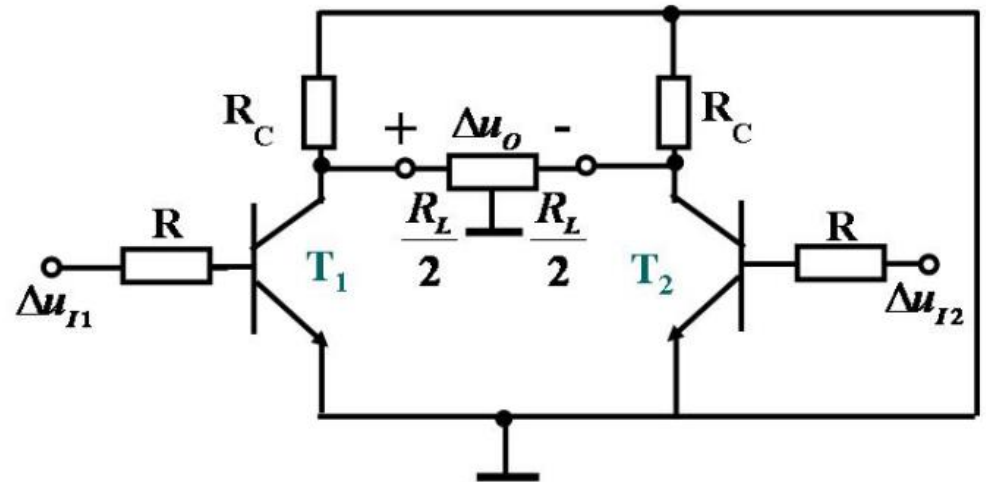
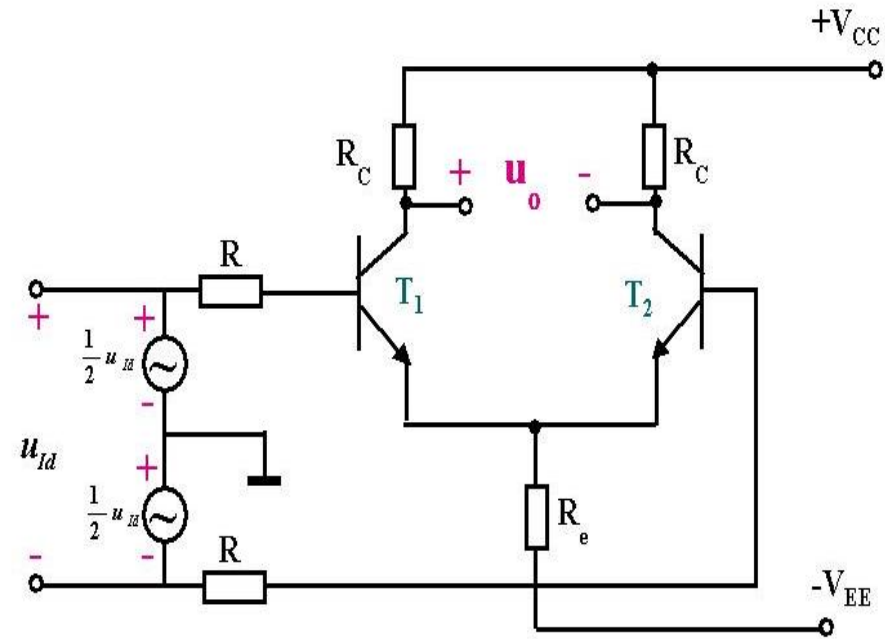
$$u_{od} = u_{od1} - u_{od2} = 2u_{od1}$$

$$u_{id} = u_{i1} - u_{i2} = 2u_{i1}$$

$$A_d = - \frac{\beta \left(R_C // \frac{1}{2} R_L \right)}{R + r_{be}}$$

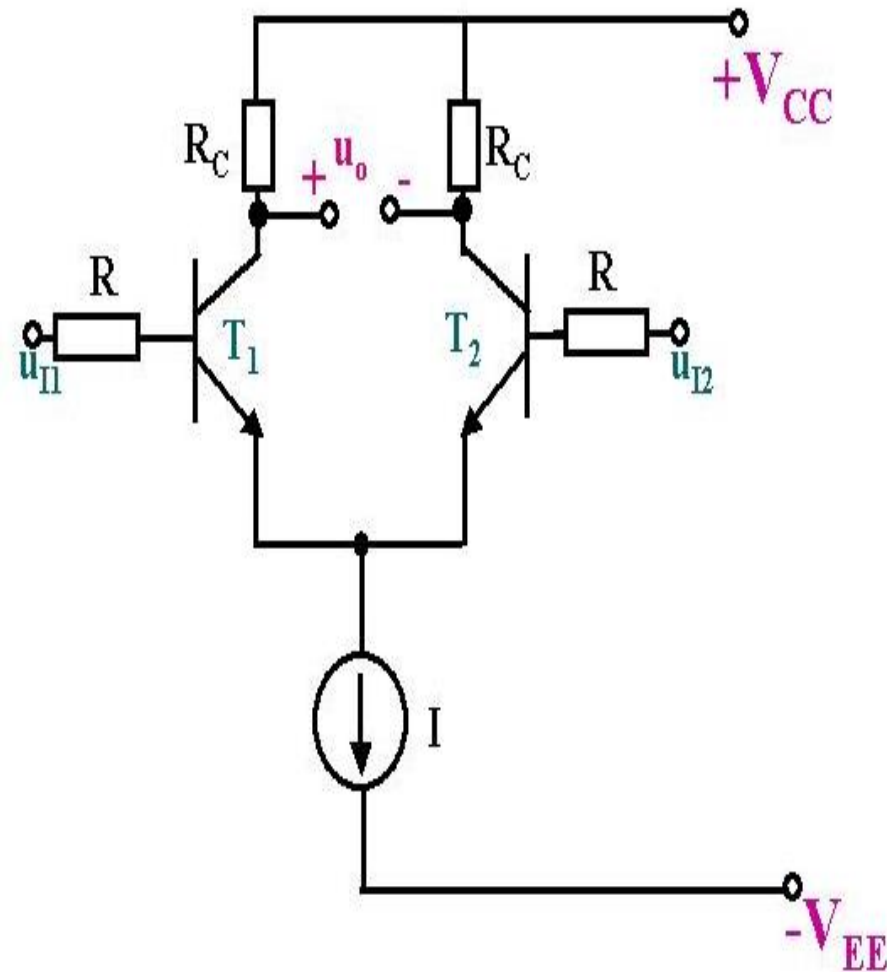
$$R_i = 2 (r_{be} + R)$$

$$R_o = 2 R_C$$



差放电路的几种接法

1. 双端输入、双端输出

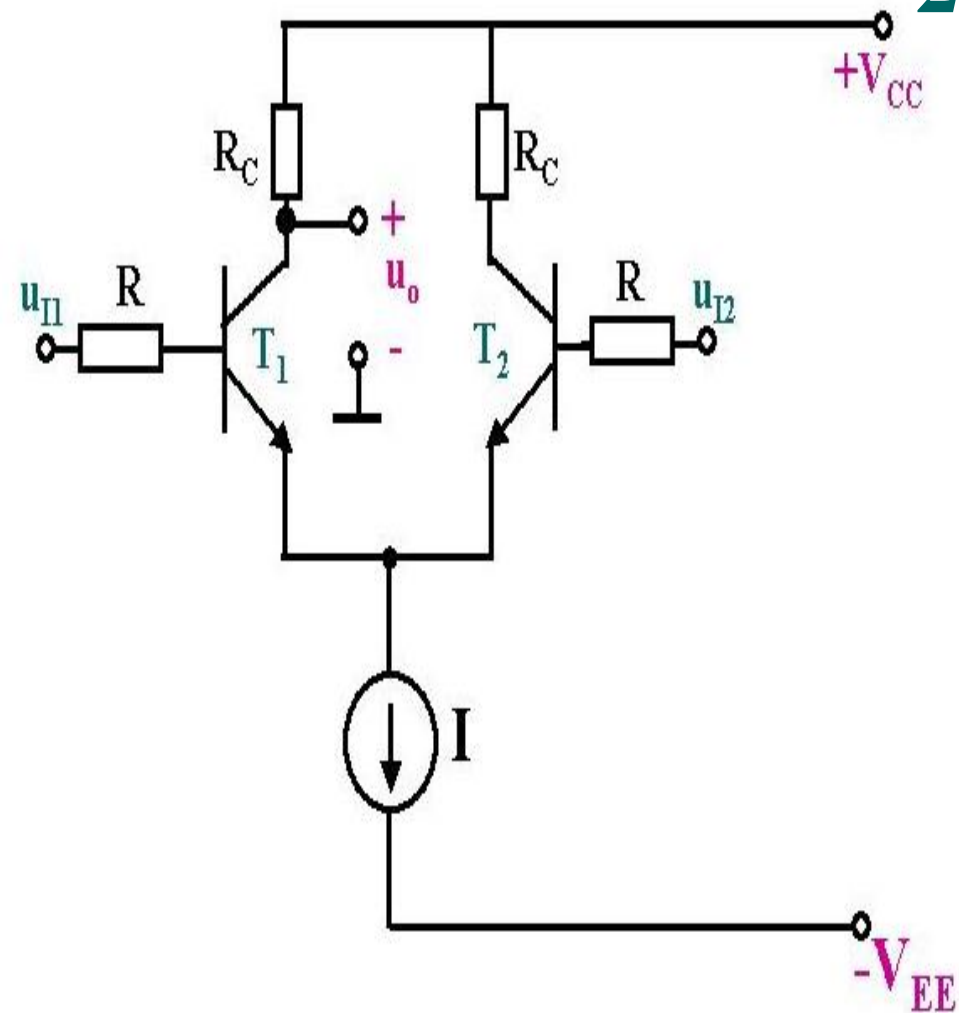


$$A_d = -\frac{\beta \left(R_C // \frac{1}{2} R_L \right)}{R + r_{be}}$$

$$R_{id} = 2[R + r_{be}]$$

$$R_o = 2R_c$$

2. 双端输入、单端输出



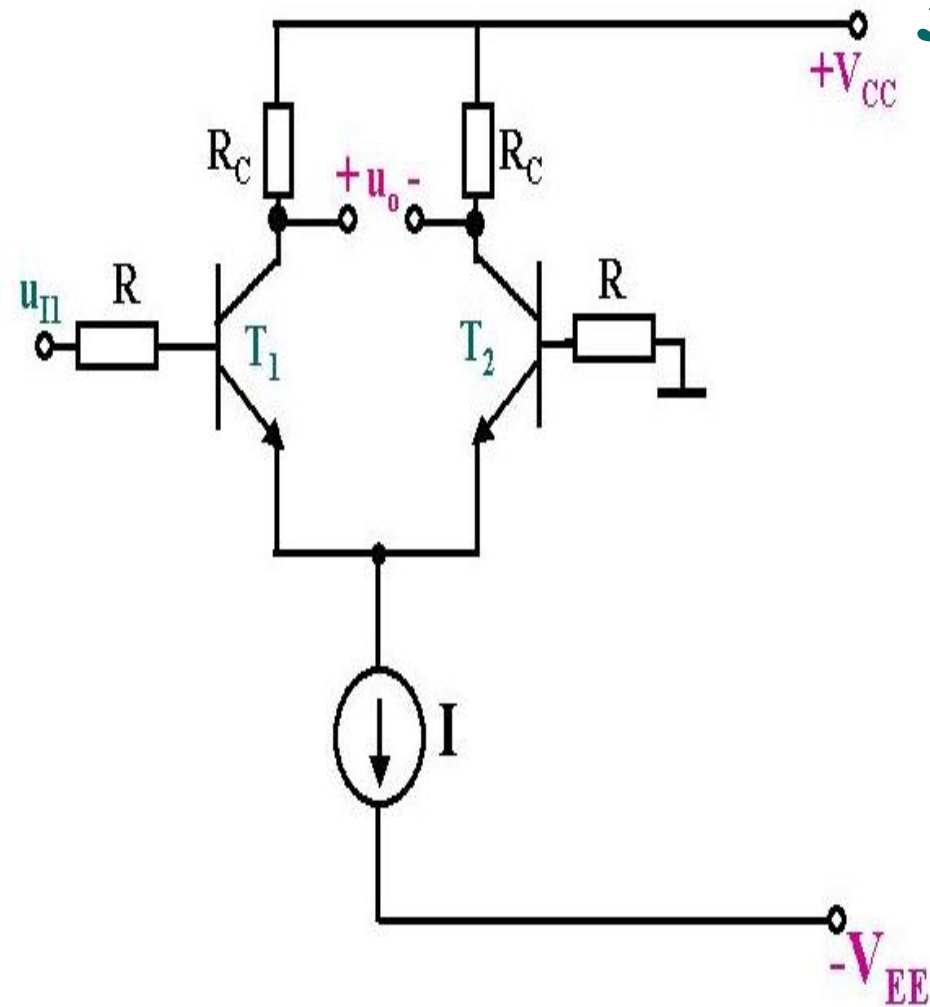
$$A_d = -\frac{1}{2} \frac{\beta(R_C // R_L)}{R + r_{be}}$$

$$R_{id} = 2[R + r_{be}]$$

$$R_o = R_c$$

第

3. 双端输入、双端输出

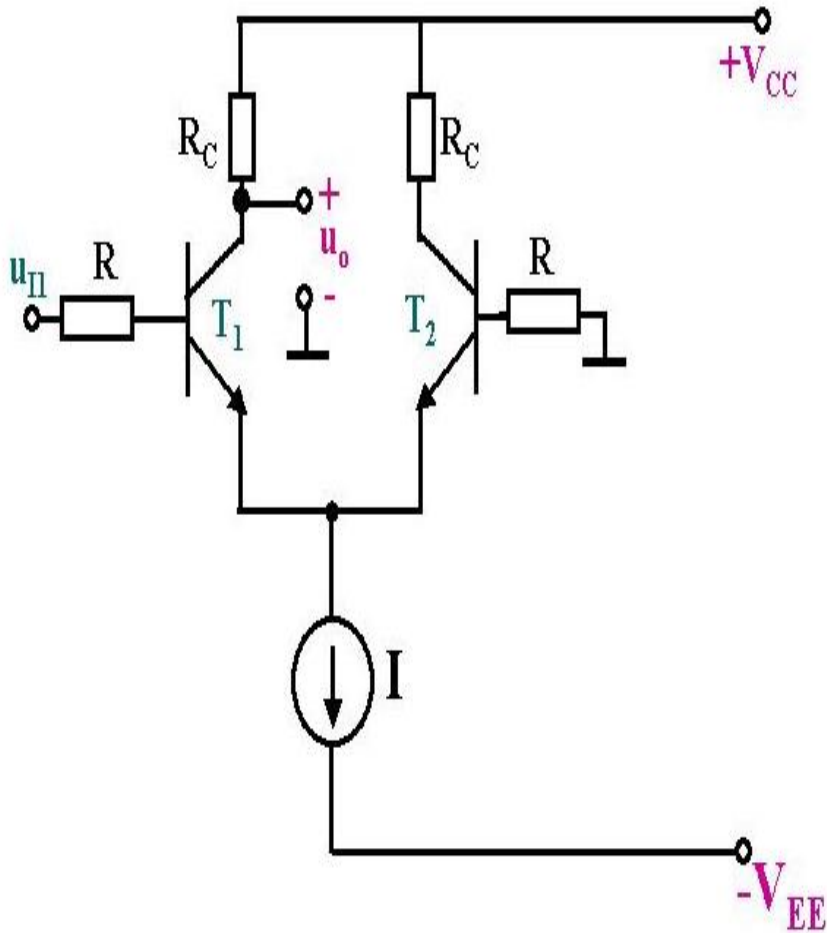


$$A_d = - \frac{\beta \left(R_C // \frac{1}{2} R_L \right)}{R + r_{be}}$$

$$R_{id} = 2[R + r_{be}]$$

$$R_o = 2R_C$$

4. 单端输入、单端输出



$$A_d = -\frac{1}{2} \frac{\beta(R_C // R_L)}{R + r_{be}}$$

$$R_{id} = 2[R + r_{be}]$$

$$R_o = R_c$$

三、功率放大电路

1、功率放大电路与电压放大电路有什么不同？

①任务不同：

主要以输出大功率为目的； 要求带负载能力强。

②分析方法不同：

电路工作在大信号状态，不属于线性电路；

2、功率放大电路主要有哪些性能指标？

①最大输出功率 ②输出效率

3、功放的工作状态可以分为哪几种？

甲类（A类）	$\alpha = 360^\circ$
乙类（B类）	$\alpha = 180^\circ$
甲乙类（AB类）	$180^\circ < \alpha < 360^\circ$

OCL（双电源）——乙类、甲乙类。

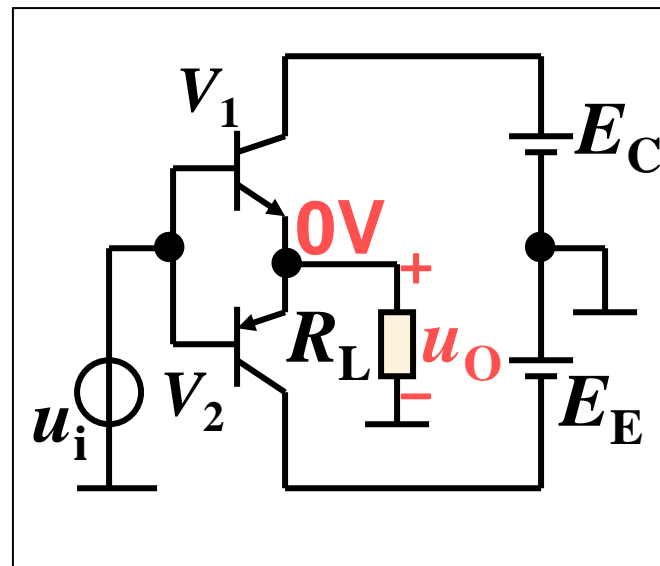
OTL（单电源）——乙类、甲乙类。

OCL电路（乙类）

无输出电容的互补对称功放电路

1、电路的结构特点？

- 互补对称的BJT接成对称的射极输出器；
- 双电源供电； • 输出无电容。



2、静态时发射极电位？

3、动态时电路怎么工作？

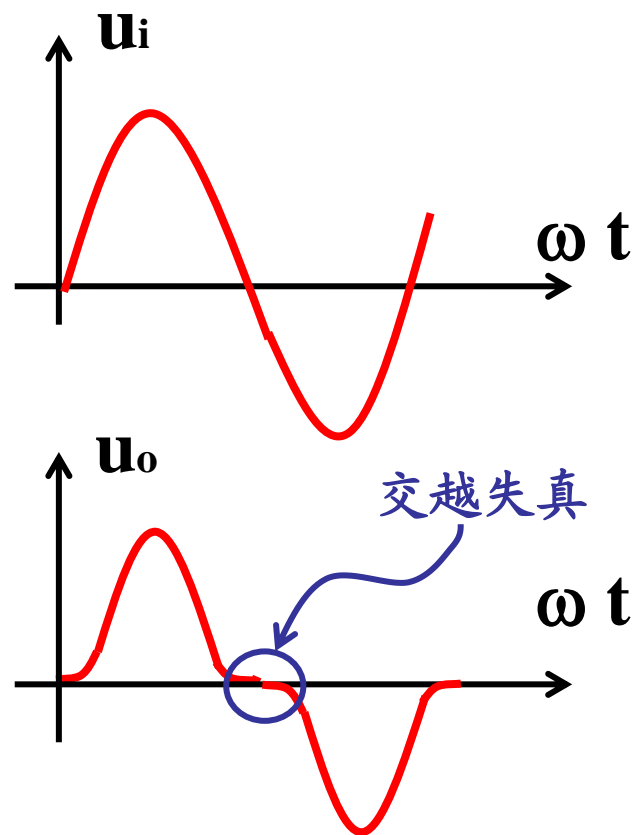
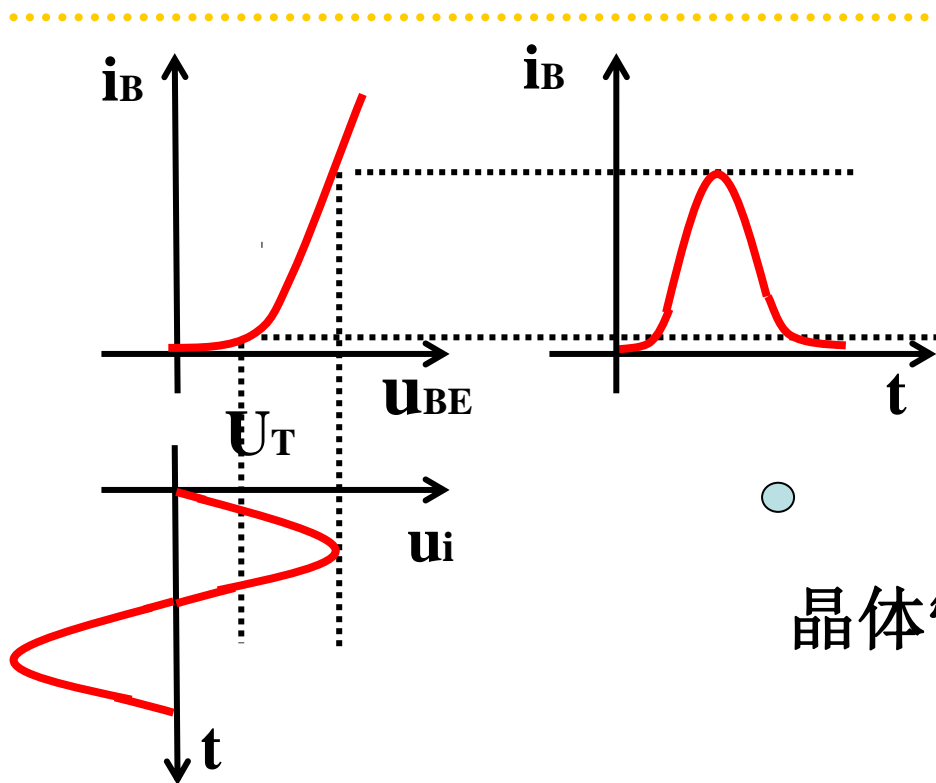
4、会存在什么样的失真？是什么原因造成的？

交越失真；  是BJT存在死区造成的。

输入信号 u_i 在过零前后，输出信号出现的失真便为交越失真。

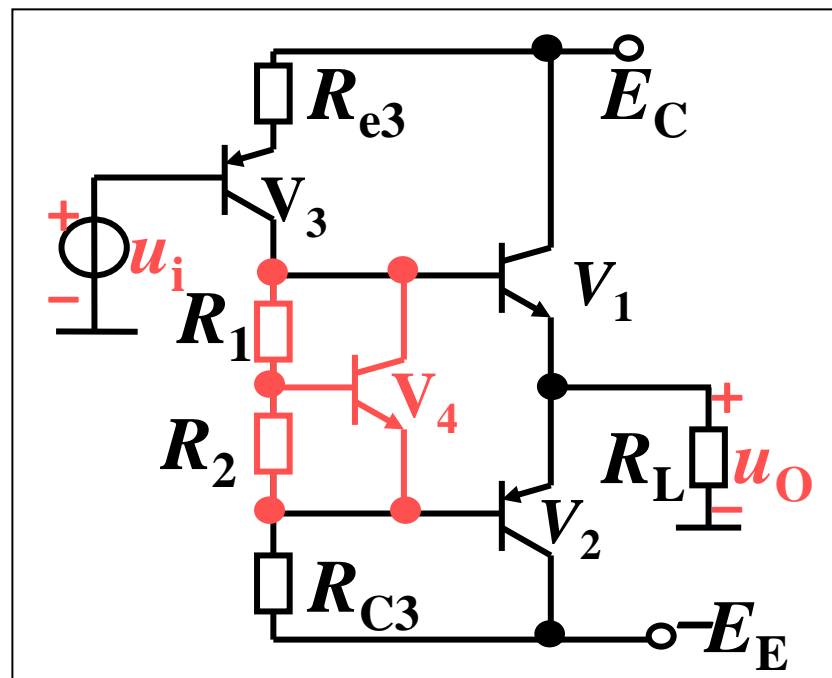
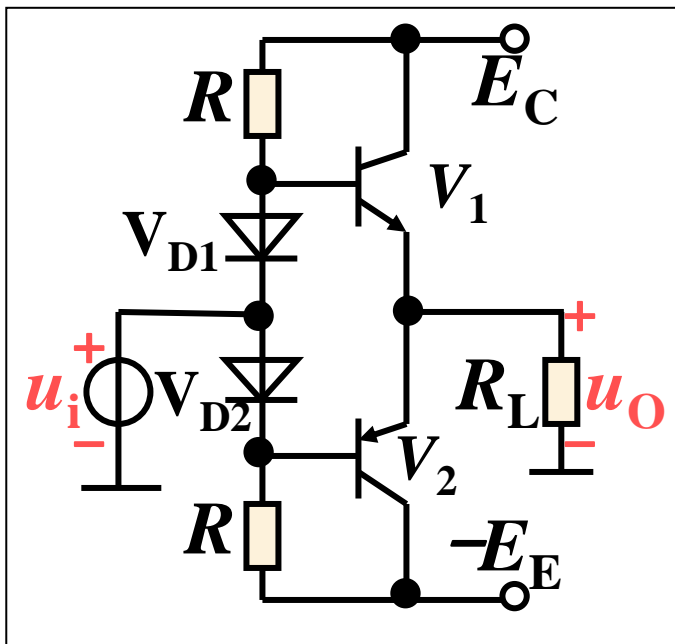
- 交越失真的含义

当输入信号 u_i 为正弦波时，输出信号在过零前后出现的失真便为交越失真。



- 交越失真产生的原因
晶体管特性存在非线性(死区)

5、怎么克服交越失真？



在两管的基极间加偏置电路或 U_{BE} 倍增电路，
致使两管在静态时均处于微弱导通状态。

6、输出功率 P_O 和效率

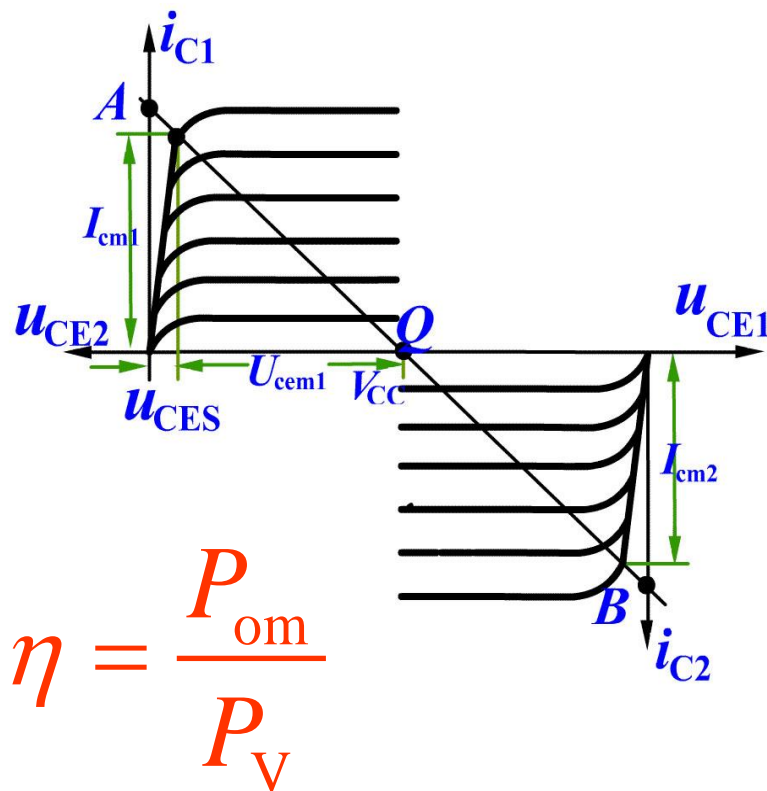
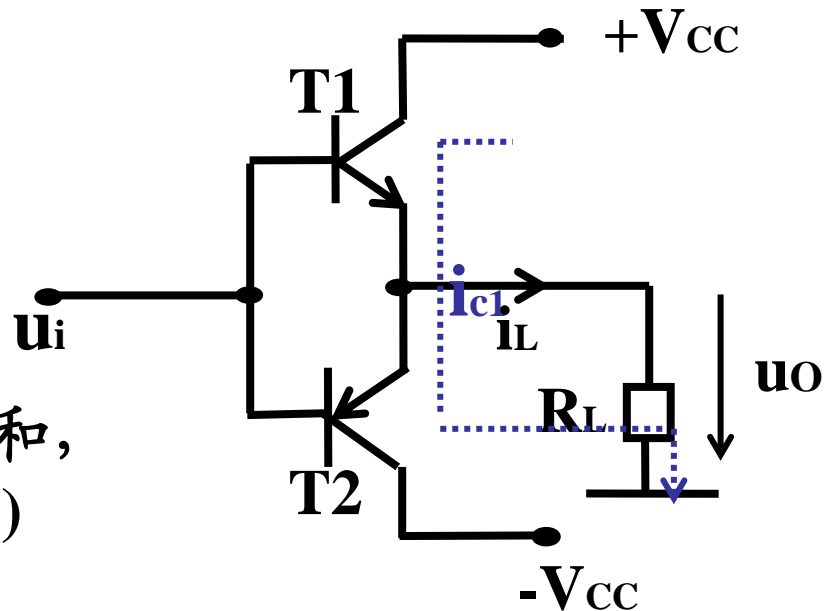
$$P_O = U_O I_O = \frac{U_{om}}{\sqrt{2}} * \frac{U_{om}}{\sqrt{2} R_L} = \frac{U_{om}^2}{2 R_L}$$

u_i 幅度足够大，T1、T2进入临界饱和，此时输出达到最大值。则负载（ R_L ）上的电压为：

$$U_{om} = V_{CC} - U_{CES}$$

$$P_{om} = \frac{1}{2} \frac{U_{om}^2}{R_L} = \frac{(V_{CC} - U_{CES})^2}{2 R_L}$$

$$\begin{aligned} P_V &= V_{CC} \times \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} I_{cm} \sin \omega t d(\omega t) \\ &= \frac{2 V_{CC} I_{cm}}{\pi} \end{aligned}$$



无输出变压器的互补对称功放电路（OTL电路）

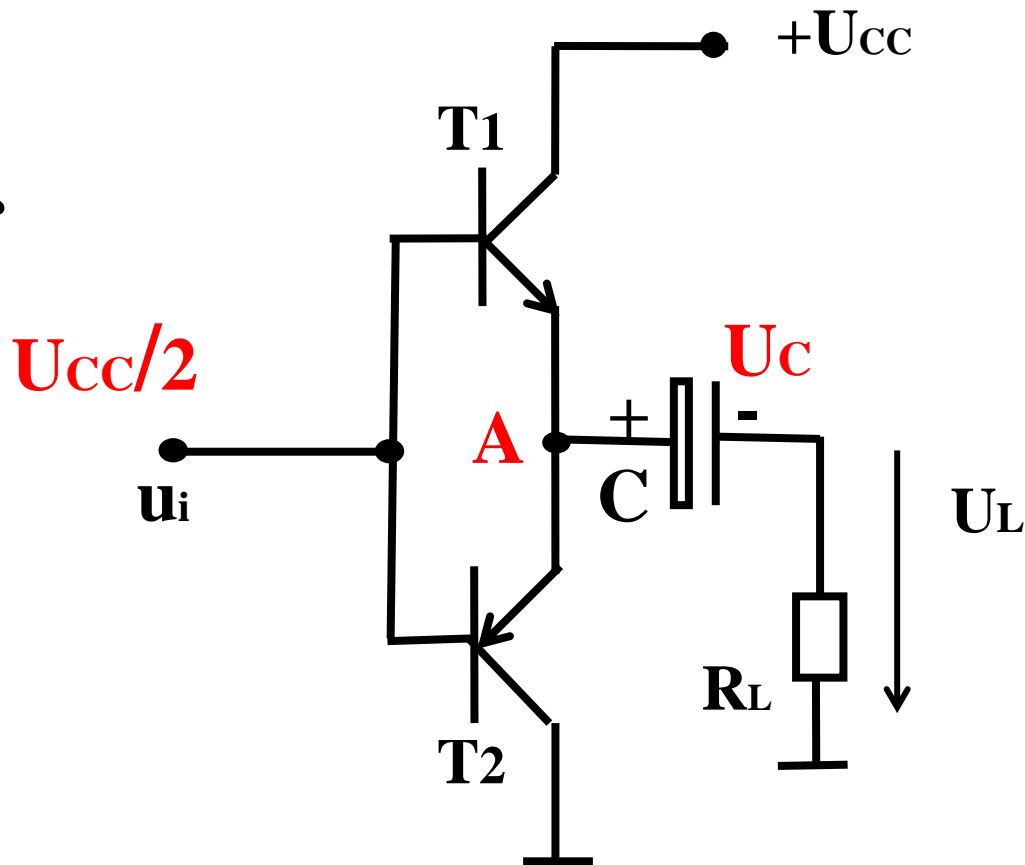
（1）特点：

- ▲ 单电源供电；
- ▲ 输出加有大电容。

（2）静态时：

$$\text{令： } U_I = \frac{U_{CC}}{2}$$
$$U_C = \frac{U_{CC}}{2} \text{。}$$

$$P_{om} = \frac{1}{2} \frac{U_{om}^2}{R_L} = \frac{(V_{CC}/2 - U_{CES})^2}{2R_L}$$



OCL

$$U_{om} = V_{cc} - U_{CES}$$

$$I_{cm} = \frac{V_{cc} - U_{CES}}{R_L}$$

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

$$\eta = \frac{P_{om}}{P_V} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{V_{CC} - U_{CES}}{V_{CC}}$$

OTL

$$U_{om} = \frac{V_{cc}}{2} - U_{CES}$$

$$I_{cm} = \frac{\frac{V_{cc}}{2} - U_{CES}}{R_L}$$

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

$$\eta = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{\frac{V_{CC}}{2} - U_{CES}}{\frac{V_{CC}}{2}}$$

四、反馈放大电路

- 有无反馈

有反馈通路（闭环） → 则引入了反馈（交直流？）

- 反馈极性（正、负反馈）

瞬时极性法，沿放大和反馈环路走一圈，

判断 X_f 与 X_i 的相位关系：同相为负；反相为正

或判断净输入信号 X_{id} ：增加为正；减小为负

- 串联反馈、并联反馈 → 看输入端

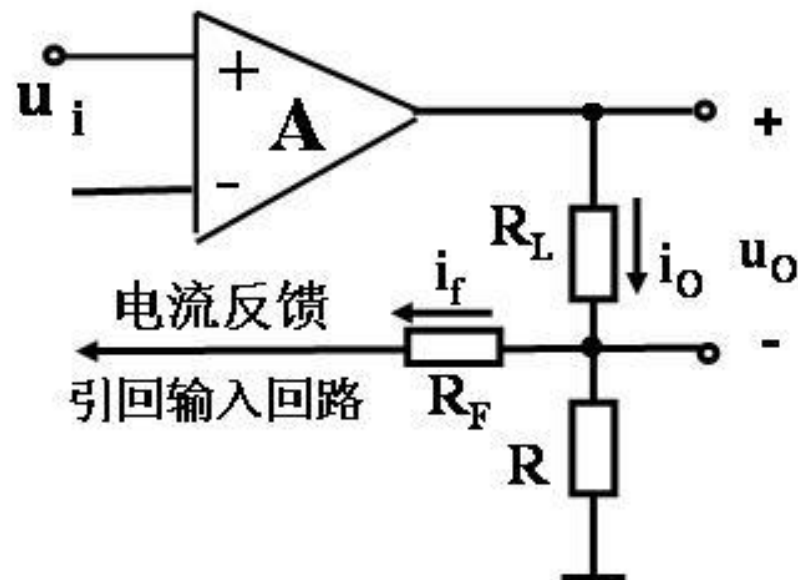
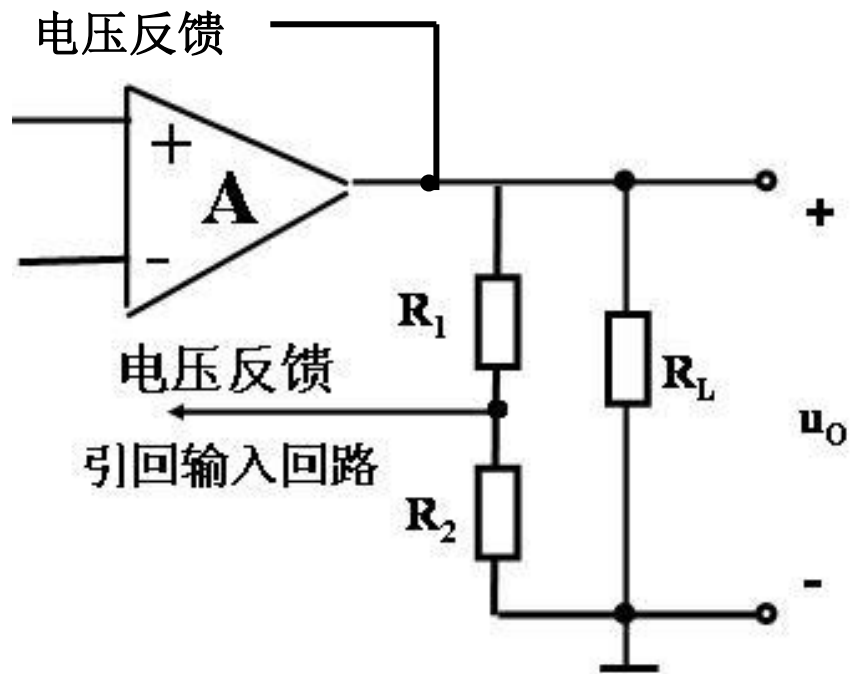
串联：反馈量 \dot{X}_f 和输入量 \dot{X}_i 接于不同的输入端。

并联：反馈量 \dot{X}_f 和输入量 \dot{X}_i 接于同一输入端。

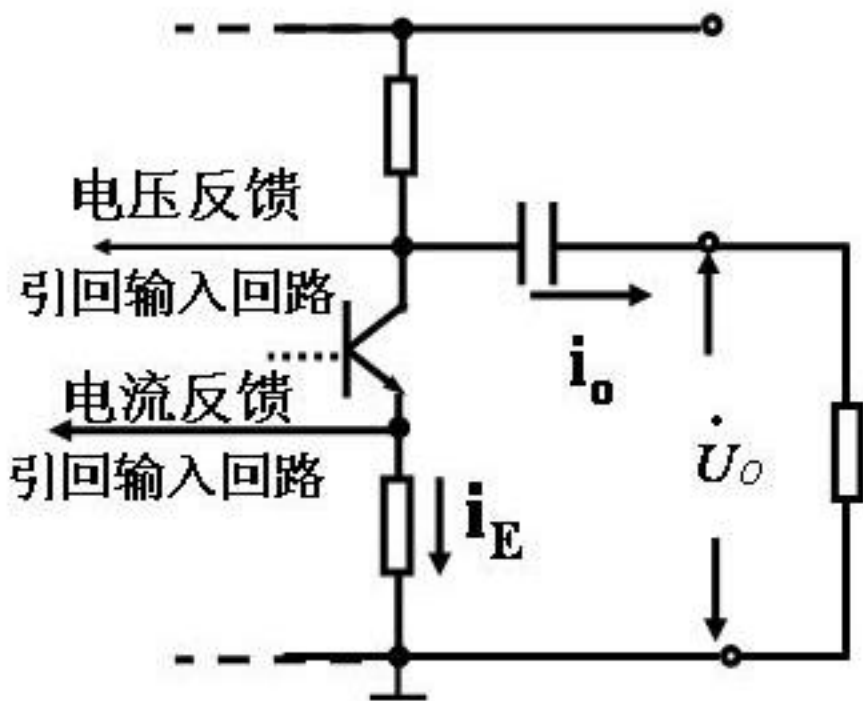
- 电压反馈、电流反馈 → 看输出端

电压：将负载短路，反馈量为零。

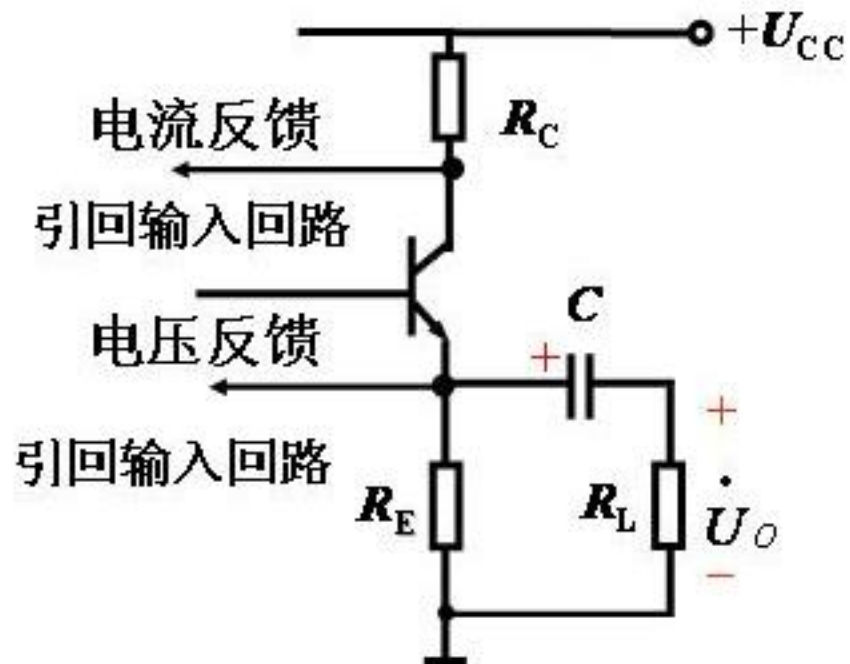
电流：将负载短路，反馈量仍然存在。



运放电路的电压反馈和电流反馈
 R_L 浮地为电流反馈，稳定输出电流，
 否则为电压反馈，稳定输出电压



(a)



(b)

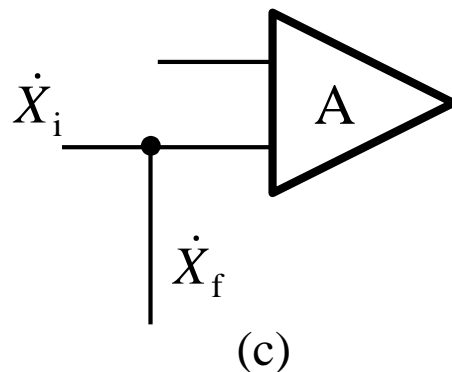
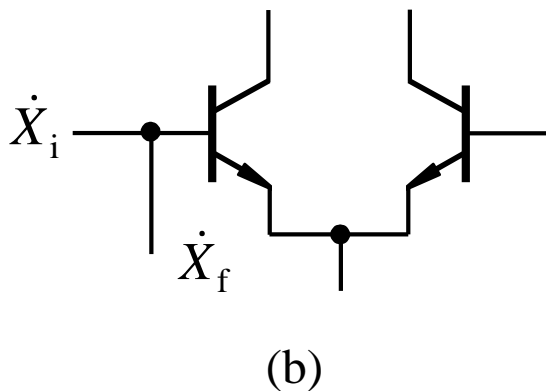
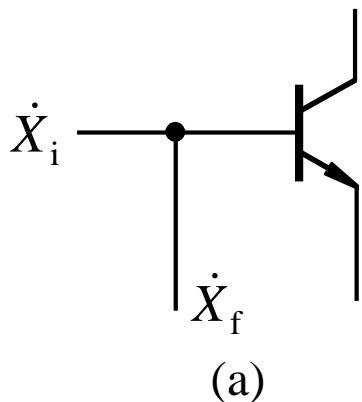
分立元件放大电路的电压反馈和电流反馈

反馈取自输出端或输出分压端为电压反馈，反馈取自非输出端为电流反馈。

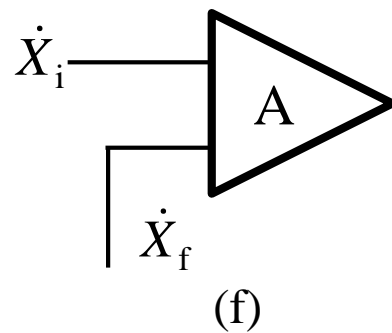
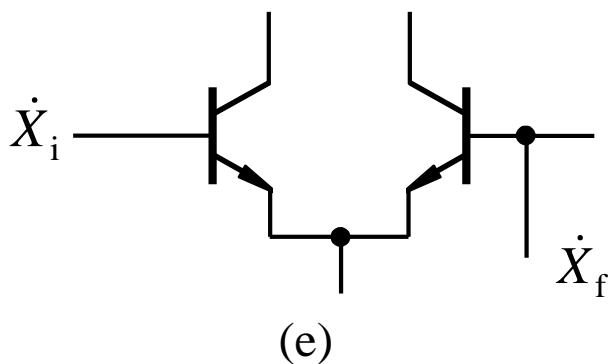
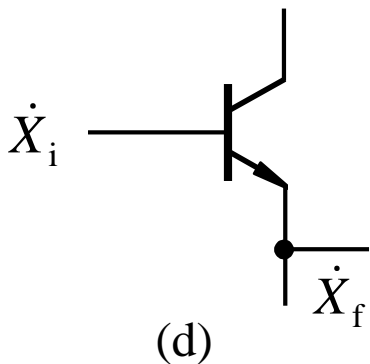
■ 串联反馈和并联反馈的判别方法：

通过反馈信号和输入信号在基本放大电路输入端的连接方式来判别。

如果反馈信号和输入信号接于基本放大电路的同一输入端，则为并联反馈；



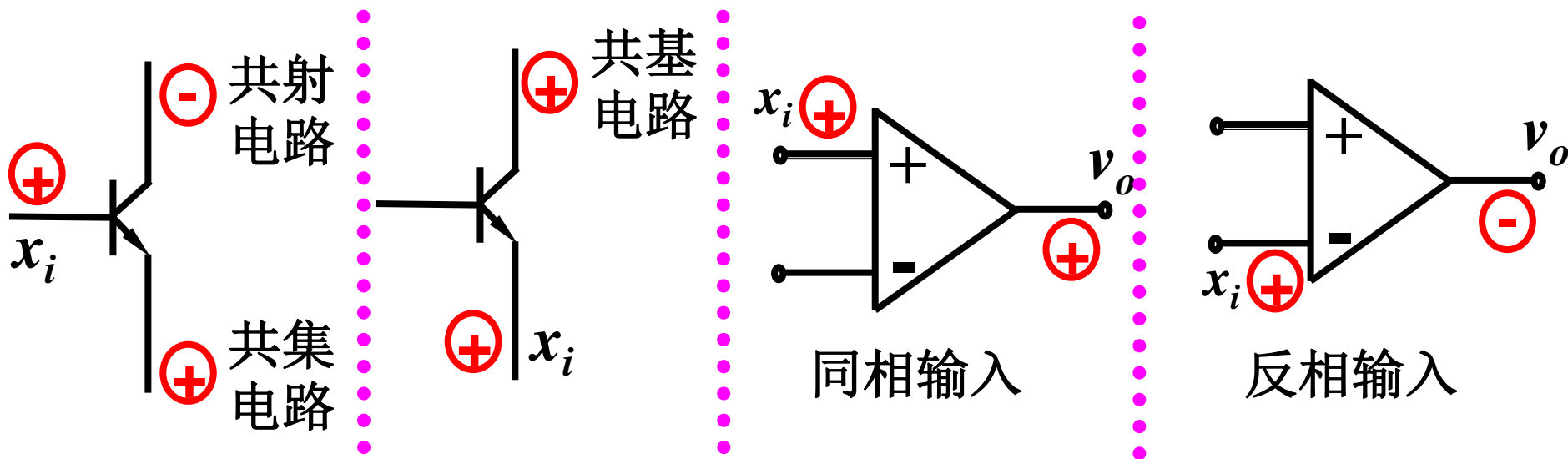
如果反馈信号和输入信号接于基本放大电路的不同输入端，则为串联反馈。



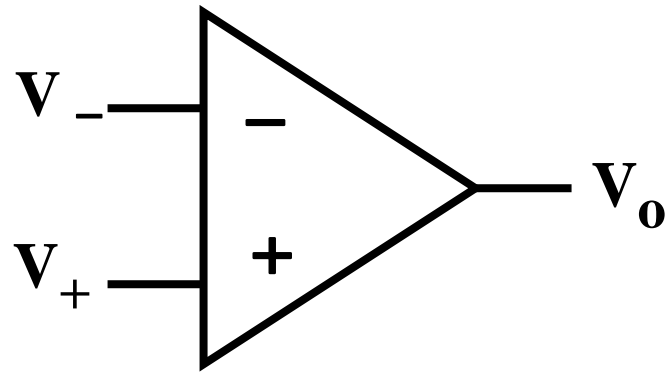
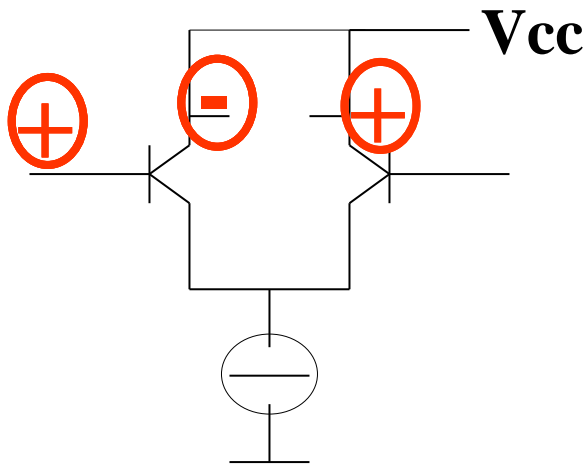
瞬时极性法

BJT或运放各级极性的标出方法(NPN同PNP):

习惯上将输入信号 x_i 在某瞬时的极性标为“ \oplus ”,其余各极的极性在此基础上按规律标出。



了解差动放大电路的相位关系



选择合适的答案填入空内

1, 为了实现下列目的, 分别引入下列两种反馈中的一种。

A 直流负反馈

B 交流负反馈

(1) 为了稳定静态工作点, 应引入**A**。

(2) 为了稳定放大倍数, 应引入**B**。

(3) 为了改变输入电阻和输出电阻, 应引入**B**。

2, 交流负反馈有以下几种情况:

A 电压 B 电流 C 串联 D 并联

- (1) 为了稳定电路的输出电压, 应引入__A__负反馈。
- (2) 为了稳定电路的输出电流, 应引入__B__负反馈。
- (3) 为了增大电路的输入电阻, 应引入__C__负反馈。
- (4) 为了减小电路的输入电阻, 应引入__D__负反馈。
- (5) 为了增大电路的输出电阻, 应引入__B__负反馈。
- (6) 为了减小电路的输出电阻, 应引入__A__负反馈。

深度负反馈的特点

深度负反馈条件下

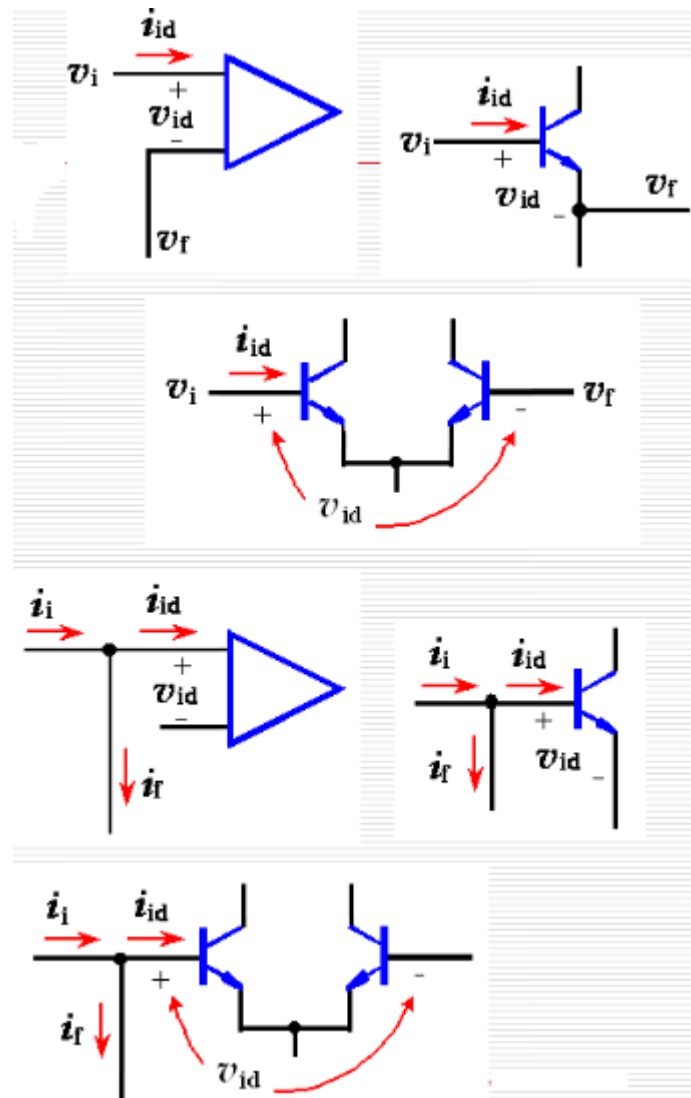
$$x_{id} = x_i - x_f \approx 0$$

串联负反馈，输入端电压求和

$$\begin{cases} v_{id} = v_i - v_f \approx 0 & \text{虚短} \\ i_{id} = \frac{v_{id}}{r_i} \approx 0 & \text{虚断} \end{cases}$$

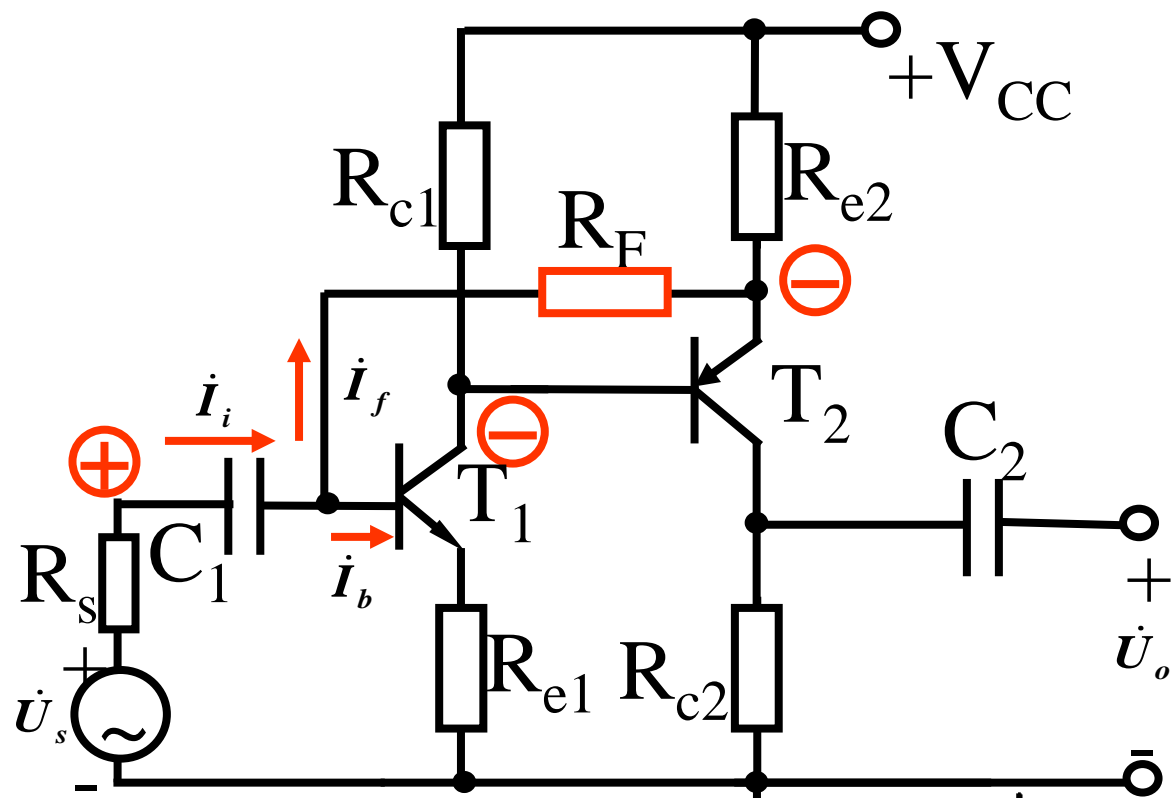
并联负反馈，输入端电流求和

$$\begin{cases} i_{id} = i_i - i_f \approx 0 & \text{虚断} \\ v_{id} = i_{id} r_i \approx 0 & \text{虚短} \end{cases}$$

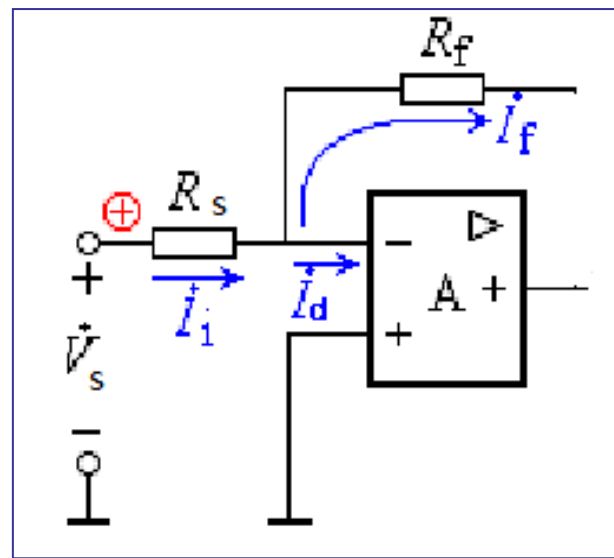


结论：虚短虚断同时存在。分立元件的负反馈求解可等效为运放。

各放大电路的级间反馈均满足深负反馈条件，
试估算各电路的闭环电压放大倍数。



电流并联负反馈



$$\dot{U}_o = \dot{I}_{c2} R_{c2}, \text{ 分流公式求 } \dot{I}_F = \frac{R_{e2} \dot{I}_{c2}}{(R_{e2} + R_F)}$$

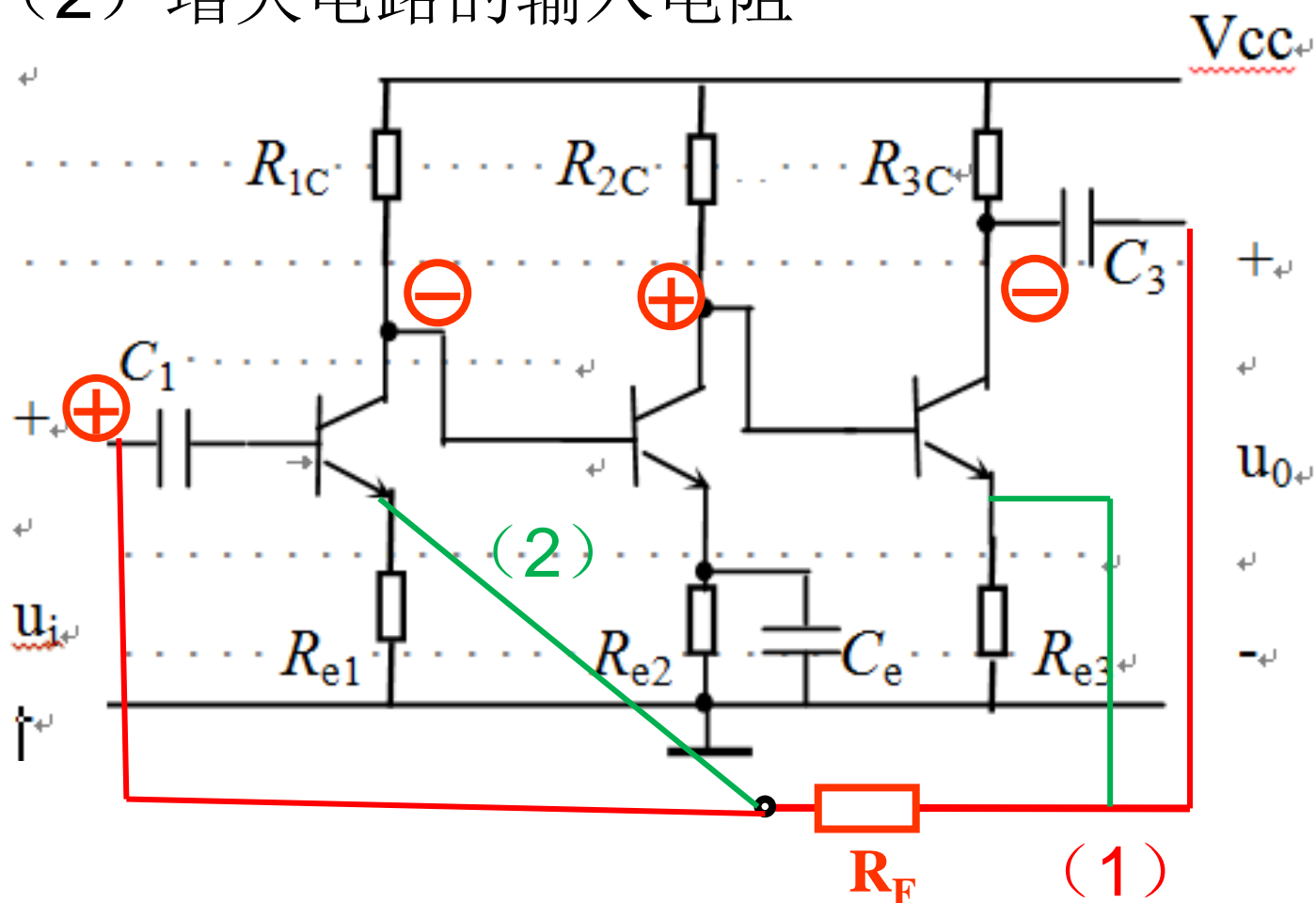
$$\dot{U}_S = \dot{I}_I R_S = \dot{I}_F R_S$$

$$\dot{A}_{uuf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_S} \approx \frac{\dot{I}_{c2} R_{c2} (R_{e2} + R_F)}{R_{e2} R_s \dot{I}_{e2}} \approx \frac{R_{c2} (R_{e2} + R_F)}{R_{e2} R_s}$$

5、放大电路如图所示。为分别达到下述两种效果，应引入什么级间反馈？并在图上连出满足条件的反馈，用（1）（2）区分。

（1）稳定电路的输出电压；

（2）增大电路的输入电阻



五、运放电路

运算放大器是具有高开环电压放大倍数、高输入电阻和低输出电阻的多级直接耦合集成放大电路。其结构上的特点主要是：

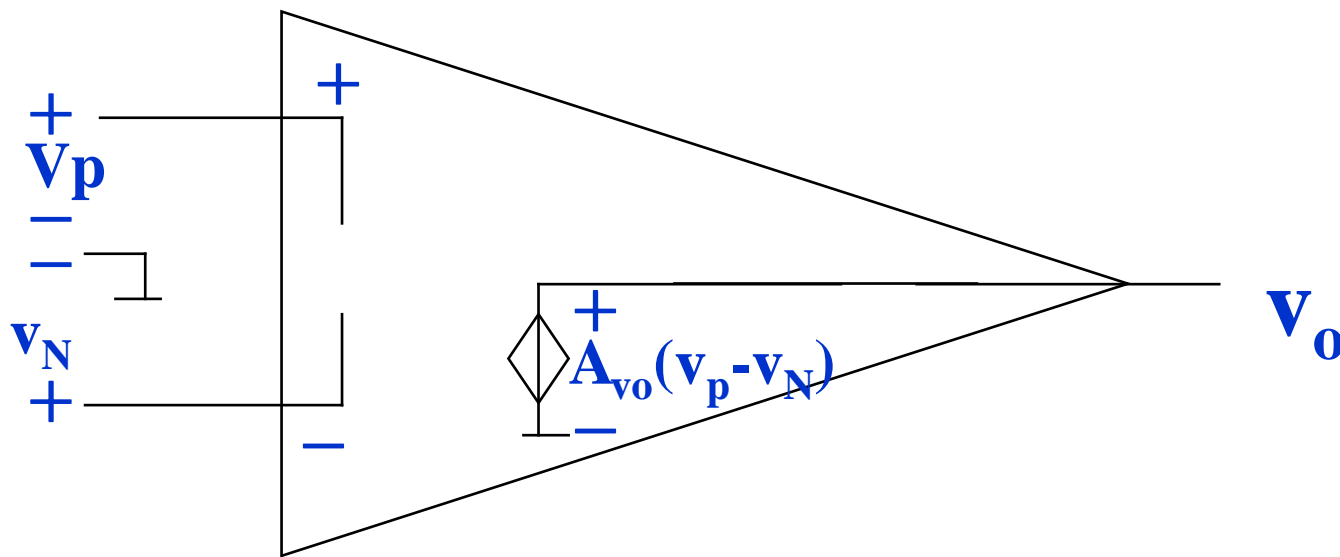
- （1）采用差分放大电路作为输入级以提高输入电阻和抑制零点漂移；
- （2）采用射极输出器或互补对称电路作为输出级以减小输出电阻，提高带负载能力；
- （3）采用各放大级直接耦合方式以改善电路的频率响应。

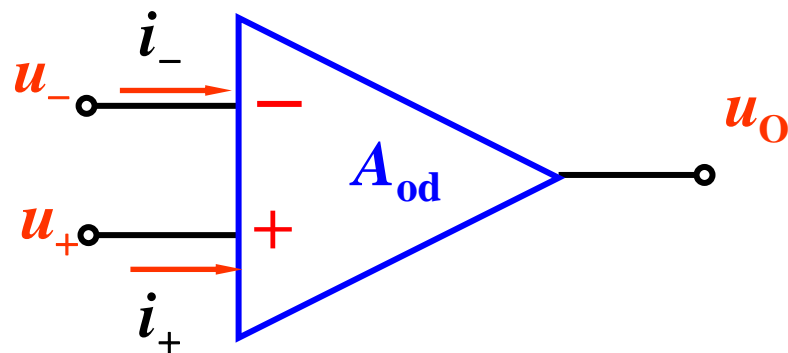
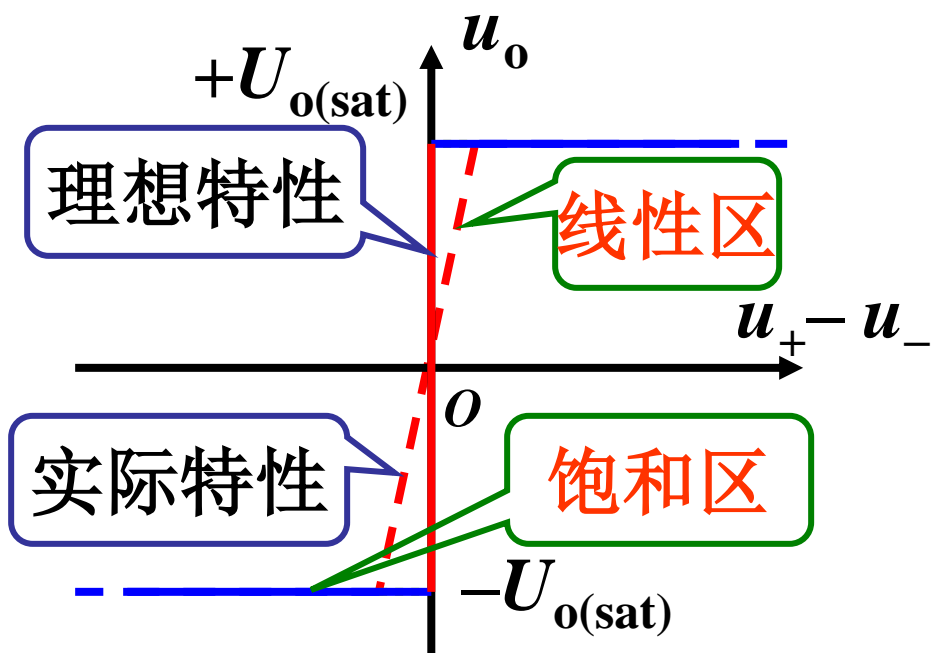
理想运算放大器

理想运放及其分析依据

理想化条件:

- 1) 开环电压放大倍数 $A_{uo} \rightarrow \infty$
- 2) 差模输入电阻 $r_{id} \rightarrow \infty$
- 3) 开环输出电阻 $r_o \rightarrow 0$
- 4) 共模抑制比 $K_{CMRR} \rightarrow \infty$





线性区:

$$u_o = A_{uo} (u_+ - u_-)$$

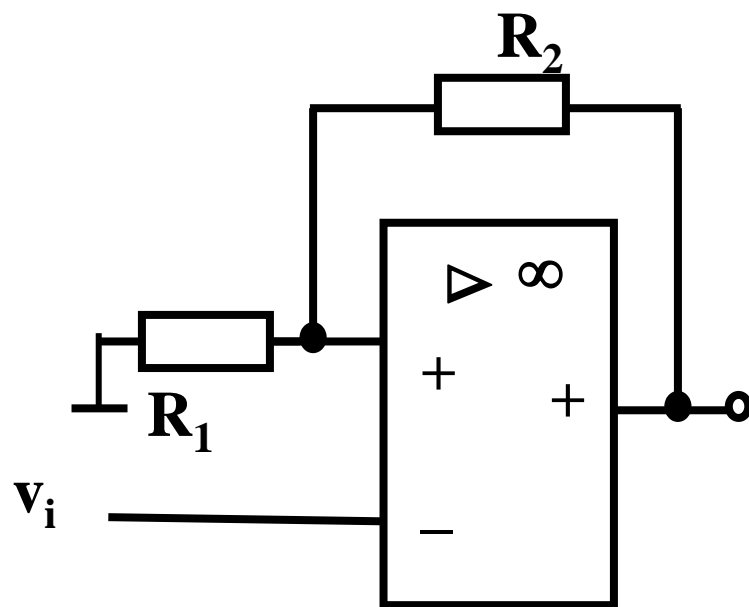
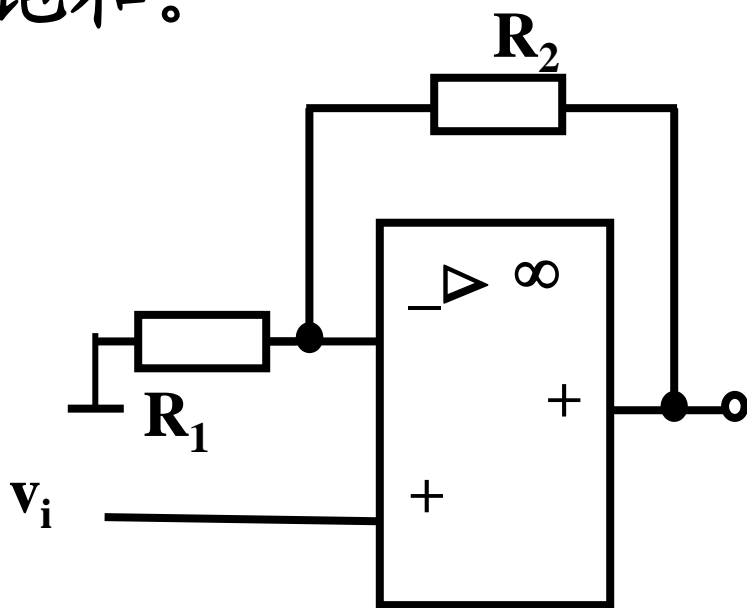
非线性区:

$$u_+ > u_- \text{ 时, } u_o = +U_{o(sat)}$$

$$u_+ < u_- \text{ 时, } u_o = -U_{o(sat)}$$

在运放的线性应用中，运放的输出与输入之间加了负反馈，运放工作于线性状态。

在运放的非线性应用中（电压比较器），运放处于开环或正反馈状态。输出正饱和或负饱和。



理想运放运算电路的分析规律:

(1) 虚短 (似短, 不是真短)

$$\longrightarrow V_o = A_o(V_P - V_N)$$

虚短路

$$V_P \approx V_N$$


(2) 虚断 (似断, 不是真断)

$$R_i = \infty$$



$$i_i = 0$$

虚开路

(3) $R_o = 0$  放大倍数与负载无关,
可以分开分析。

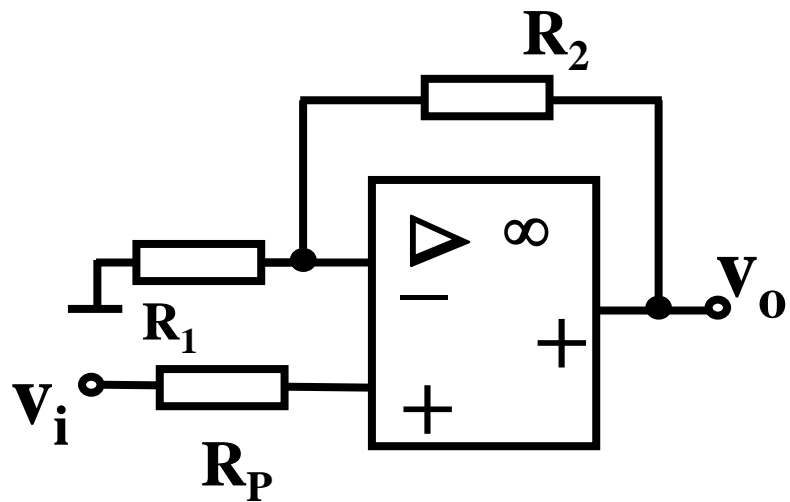
虚短和虚断的特点, 在分析或设计集成运放组成的运算电路时很有用。

在分析比较复杂的运放线性电路时，要抓住以下几点：

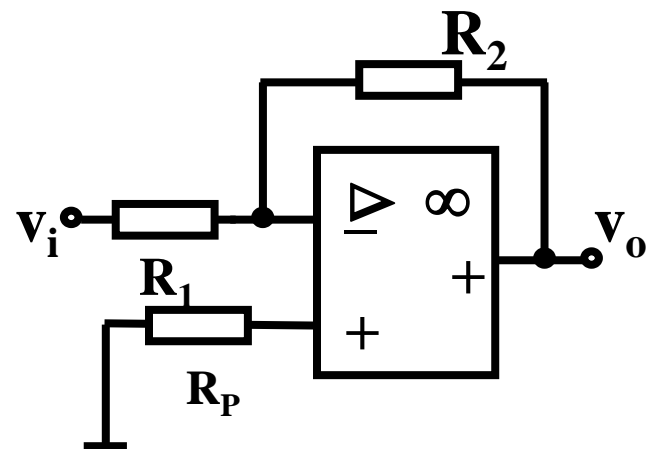
- 1、认清每一个运放的运算功能。
- 2、利用虚短和虚断等重要概念，确定电路中某些特殊点的电位或某些电流之间的关系。
- 3、以此为突破口，确定整个电路的运算关系。

常用解题方法：节点电流法，叠加原理

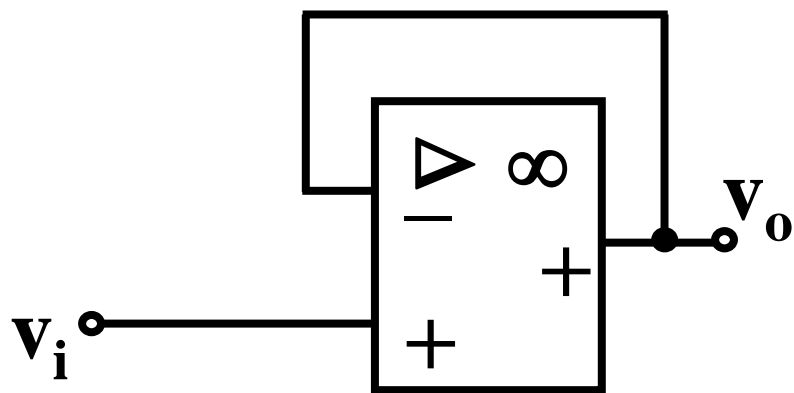
注意：运放线性电路输入有虚短和虚断的特点，但输出电流不为零， $R_o \neq 0$ 。



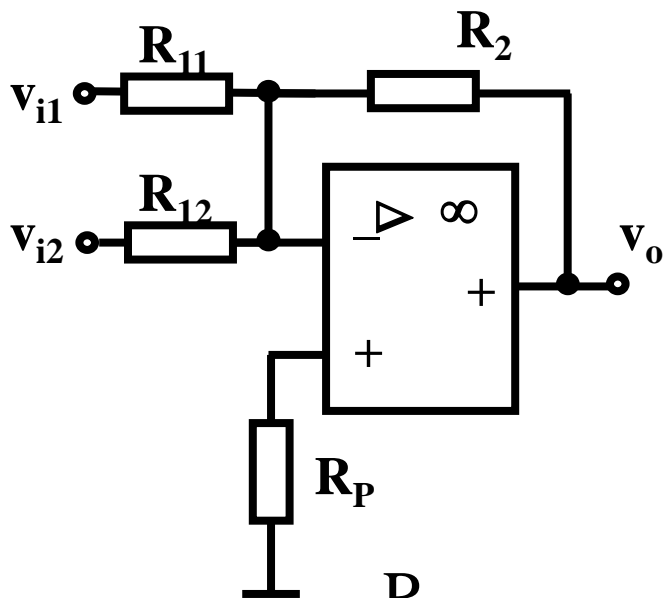
同相比例放大 $u_o = (1 + \frac{R_2}{R_1}) u_i$



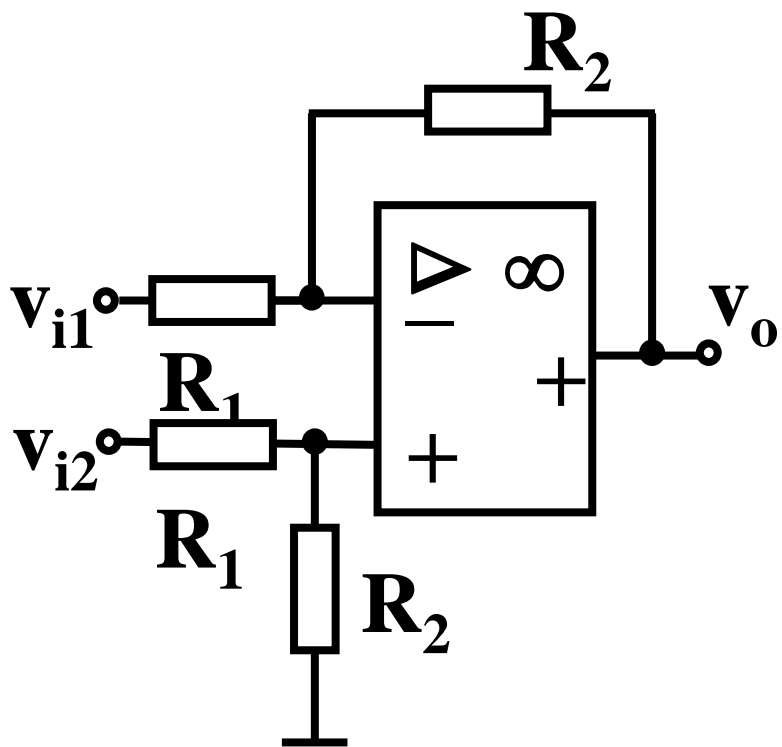
反相比例放大 $u_o = -\frac{R_2}{R_1} u_i$



电压跟随器 $u_o = u_i$

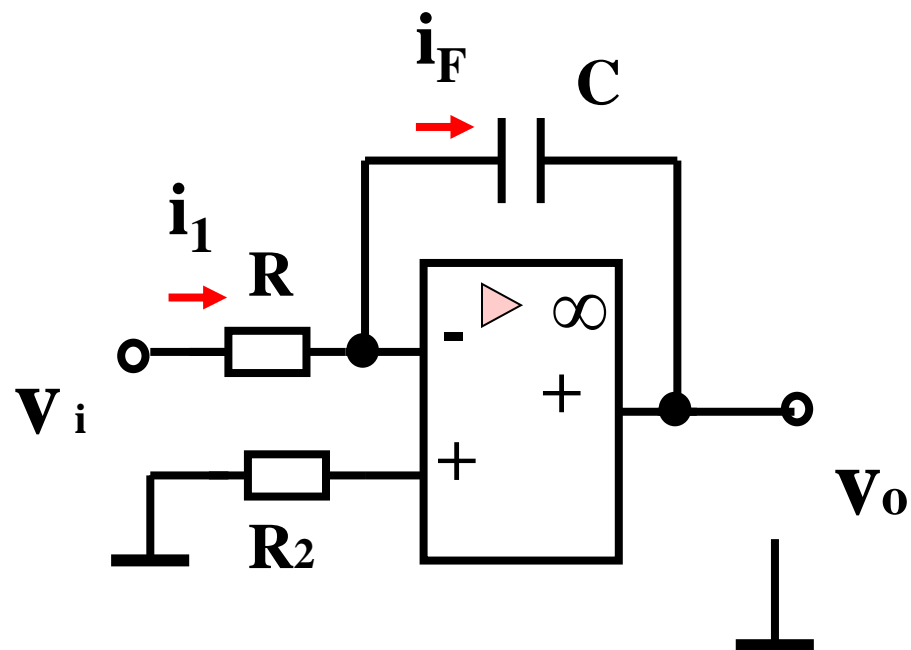


反相加法 $u_o = -\frac{R_2}{R_{11}} u_{i1} - \frac{R_2}{R_{12}} u_{i2}$



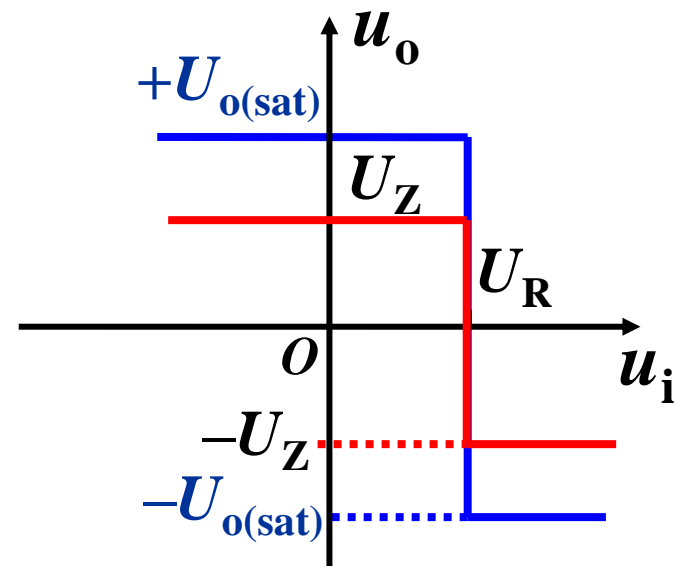
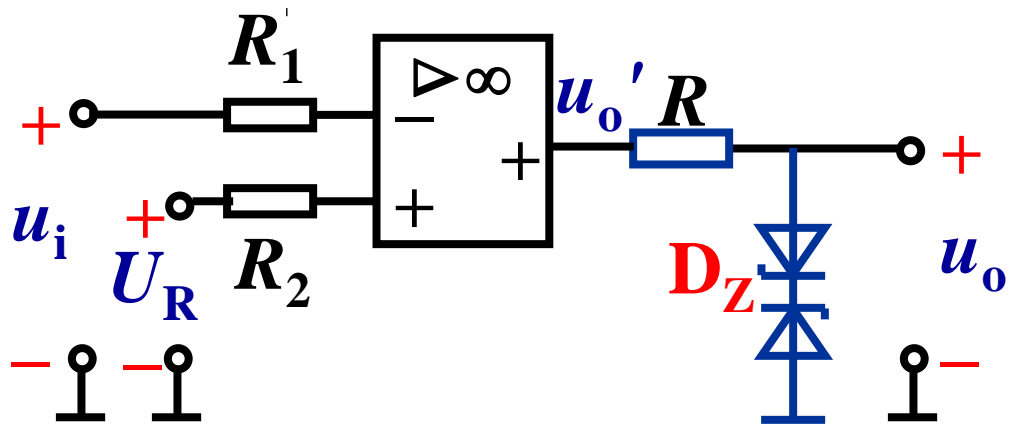
减法运算电路

$$u_0 = \frac{R_F}{R_1} (u_{i2} - u_{i1})$$

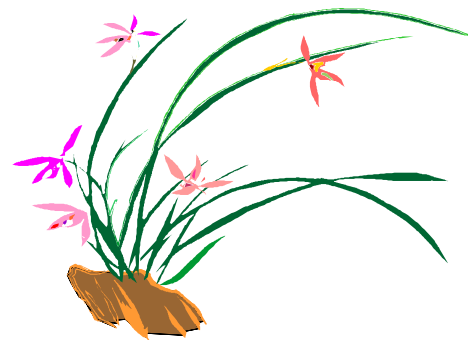
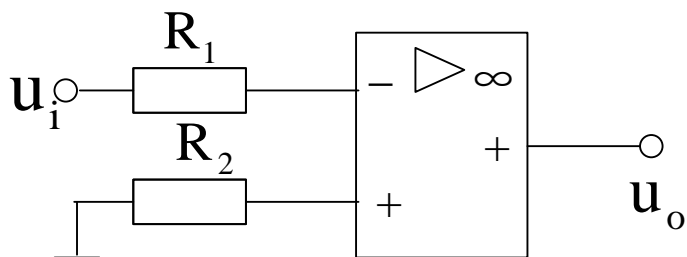


$$\begin{aligned} v_o &= -v_c = -\frac{1}{C} \int i_F dt \\ &= -\frac{1}{RC} \int v_i dt \end{aligned}$$

输出带限幅的电压比较器

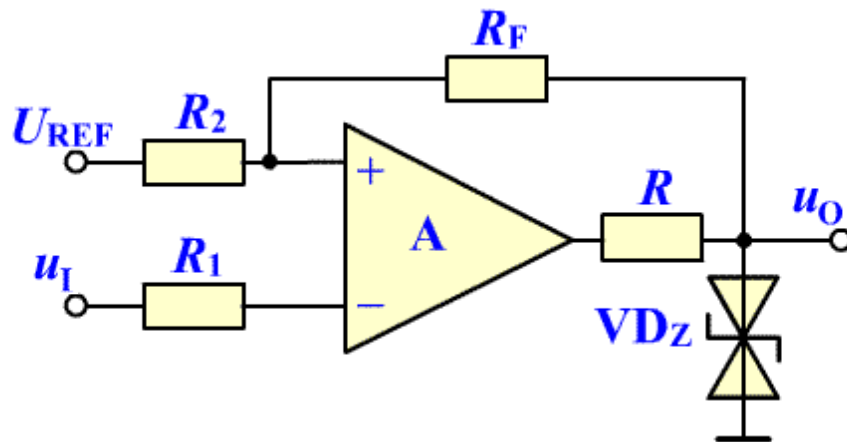


电压传输特性



滞回比较器

U_{REF} 为参考电压；
输出电压 u_O 为 $+U_Z$ 或 $-U_Z$ ； u_I 为输入电压。

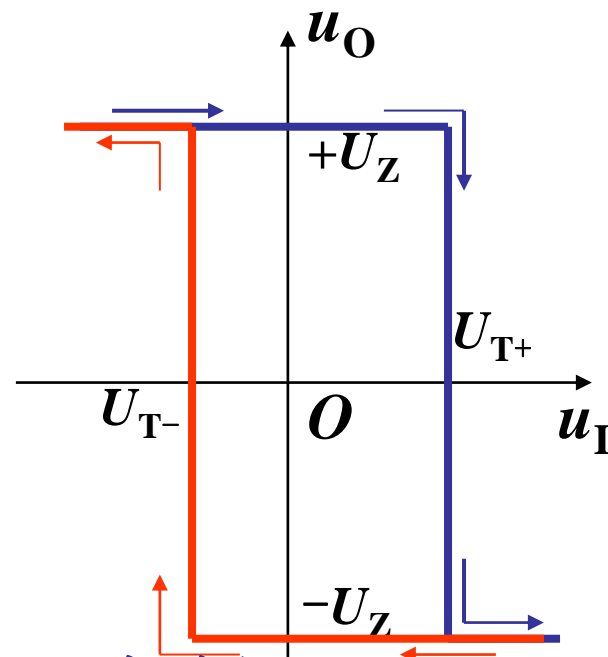


$$u_+ = \frac{R_F}{R_2 + R_F} U_{\text{REF}} + \frac{R_2}{R_2 + R_F} u_O$$

$$u_{T+} = \frac{R_F}{R_2 + R_F} U_{\text{REF}} + \frac{R_2}{R_2 + R_F} U_Z$$

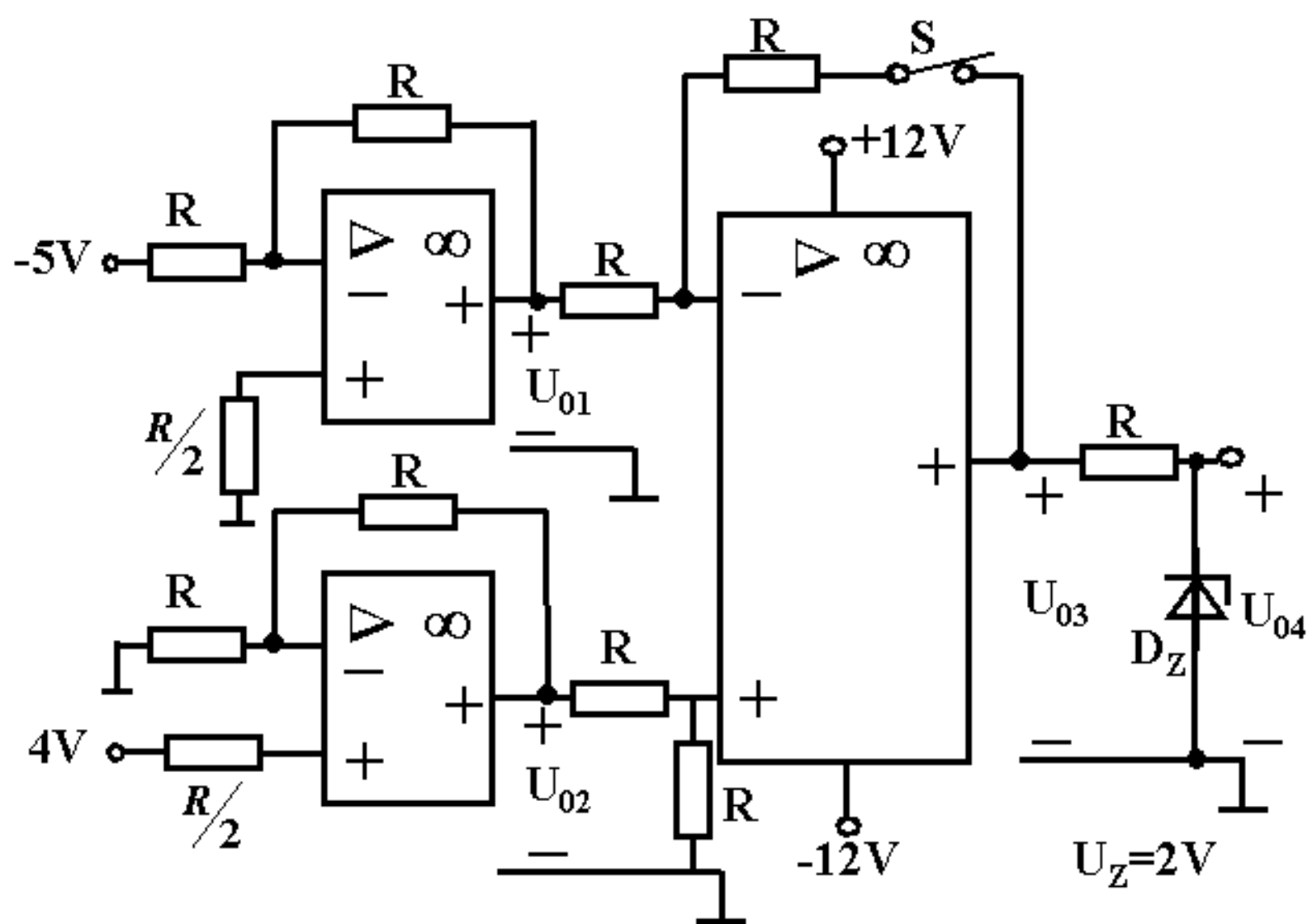
$$u_{T-} = \frac{R_F}{R_2 + R_F} U_{\text{REF}} - \frac{R_2}{R_2 + R_F} U_Z$$

比较器有两个不同的门限电平，故传输特性呈滞回形状。



回差(门限宽度) ΔU_T :

$$\Delta U_T = U_{T+} - U_{T-} = \frac{2R_2}{R_2 + R_F} U_Z$$



S闭合, A1为 反相比例 电路; A2为 同相比例 电路;
A3为 减法 电路。

$$U_{o1} = \underline{5V},$$

$$U_{o2} = \underline{8V},$$

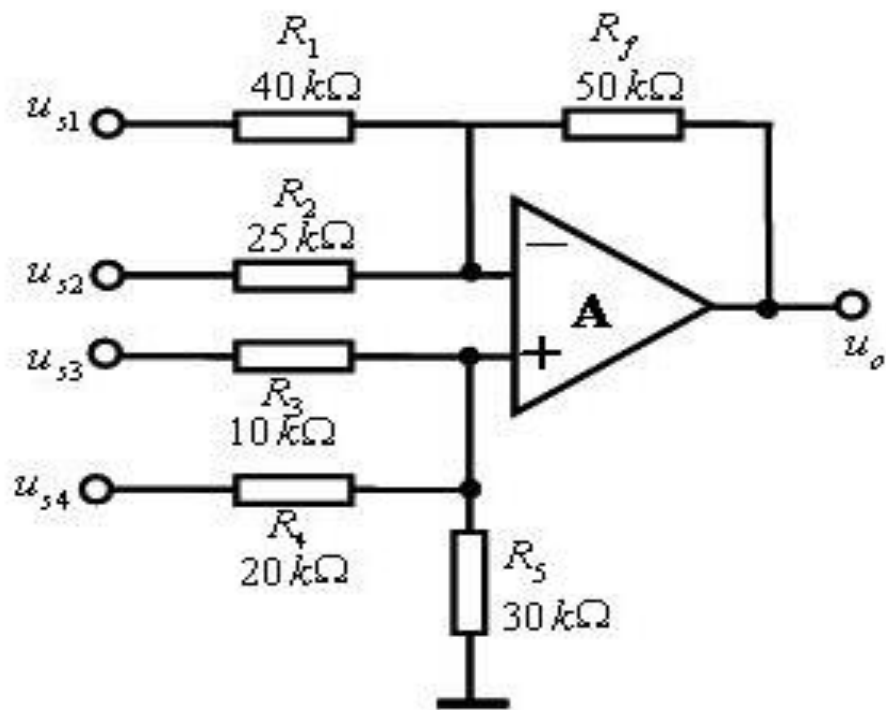
$$U_{o3} = \underline{3V},$$

$$U_{o4} = \underline{2V};$$

S断开

$$U_{o3} = \underline{-12V};$$

$$U_{o4} = \underline{-0.7V};$$



$$u_o = -\frac{R_f}{R_1}u_{i1} - \frac{R_f}{R_2}u_{i2} + \left(1 + \frac{R_f}{R_1 // R_2}\right) \left(\frac{R_4 // R_5}{R_3 + R_4 // R_5} u_{i3} + \frac{R_3 // R_5}{R_4 + R_3 // R_5} u_{i4} \right)$$

$$= -\frac{50}{40}u_{i1} - \frac{50}{25}u_{i2} + \left(1 + \frac{50}{40 // 25}\right) \left(\frac{20 // 30}{10 + 20 // 30} u_{i3} + \frac{10 // 30}{20 + 10 // 30} u_{i4} \right)$$

$$= -1.25u_{i1} - 2u_{i2} + 2.32u_{i3} + 1.16u_{i4}$$

六 正弦波振荡电路

正弦波振荡的条件:

(1) 振幅条件: $|\dot{A}\dot{F}| = 1$

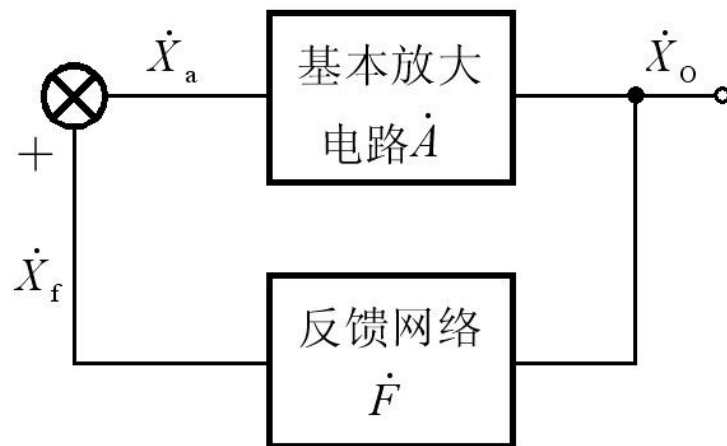
(2) 相位条件: $\varphi_A + \varphi_F = \pm 2n\pi$ n 是整数

相位条件意味着振荡电路必须是正反馈, 振幅条件可以通过调整放大电路的放大倍数达到。

2. 起振和稳幅

起振条件

$$\begin{cases} A(\omega) \cdot F(\omega) > 1 \\ \varphi_a(\omega) + \varphi_f(\omega) = 2n\pi \end{cases}$$



振荡电路是单口网络，无须输入信号就能起振，起振的信号源来自何处？ 电路器件内部噪声以及电源接通扰动

选频：噪声中，满足相位平衡条件的某一频率 ω_0 的噪声信号被放大，成为振荡电路的输出信号。

稳幅：当输出信号幅值增加到一定程度时，就要限制它继续增加，否则波形将出现失真。

稳幅的作用就是，当输出信号幅值增加到一定程度时，使振幅平衡条件从 $AF > 1$ 回到 $AF = 1$ 。 ---利用负反馈

3. 振荡电路工作原理

当 $\omega = \omega_0 = \frac{1}{RC}$ 时, $\varphi_f = 0$

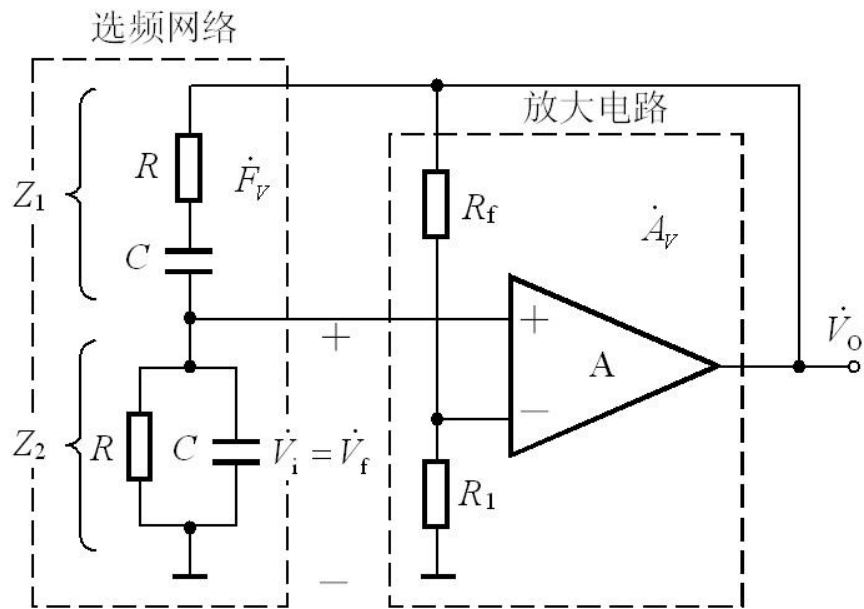
用瞬时极性法判断可知,
电路满足相位平衡条件

$$\varphi_a + \varphi_f = 2n\pi$$

此时若放大电路的电压增益为 $A_v = 1 + \frac{R_f}{R_1} = 3$

则振荡电路满足振幅平衡条件 $A_v F_v = 3 \times \frac{1}{3} = 1$

电路可以输出频率为 $f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$ 的正弦波



RC正弦波振荡电路一般用于产生频率低于 1 MHz 的正弦波

七 直流稳压电源

要求：（1）掌握整流、滤波、稳压三个基本概念。

（2）要求熟练掌握单相整流电路和电容滤波的工作原理及各项指标的估算，并能正确选择相关元件的参数。

（3）熟练掌握串联反馈式稳压电路稳压原理及输出电压的计算。

（4）对于三端式集成稳压器，重点放在掌握使用方法和应用。

二、整流电路（原理、波形）

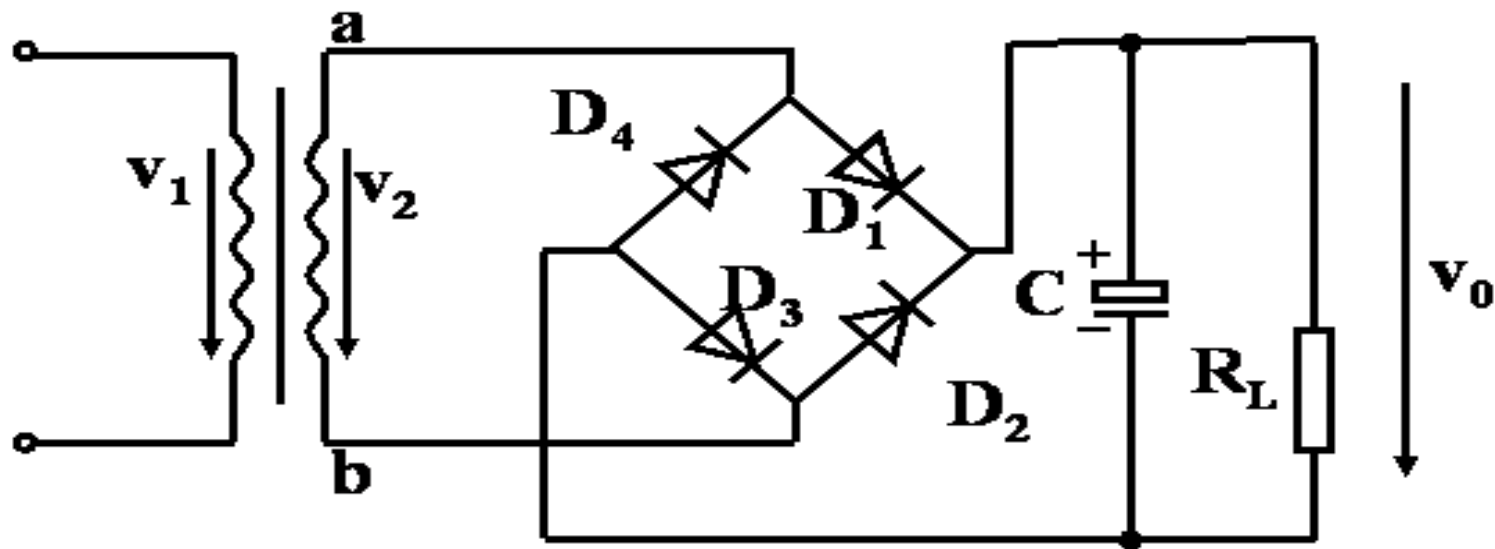
电路形式	输入交流电压（有效值）	U_o	I_o	I_D	U_{RM}
单相半波整流电路	U_2	$0.45U_2$	U_o/R_L	I_o	$\sqrt{2} U_2$
单相桥式全波整流电路	U_2	$0.9U_2$	U_o/R_L	$1/2 I_o$	$\sqrt{2} U_2$
单相全波整流电路（中心抽头）	U_2	$0.9U_2$	U_o/R_L	$1/2 I_o$	$2\sqrt{2} U_2$

三、滤波电路

电路形式	输入交流电压（有效值）	空载时 U_o	负载时 U_o	I_D	U_{RM}
半波整流电容滤波	U_2	$\sqrt{2} U_2$	U_2	I_o	$2\sqrt{2} U_2$
桥式整流电容滤波	U_2	$\sqrt{2} U_2$	$1.2U_2$	$1/2 I_o$	$\sqrt{2} U_2$
全波整流电容滤波 （中心抽头）	U_2	$\sqrt{2} U_2$	$1.2U_2$	$1/2 I_o$	$2\sqrt{2} U_2$

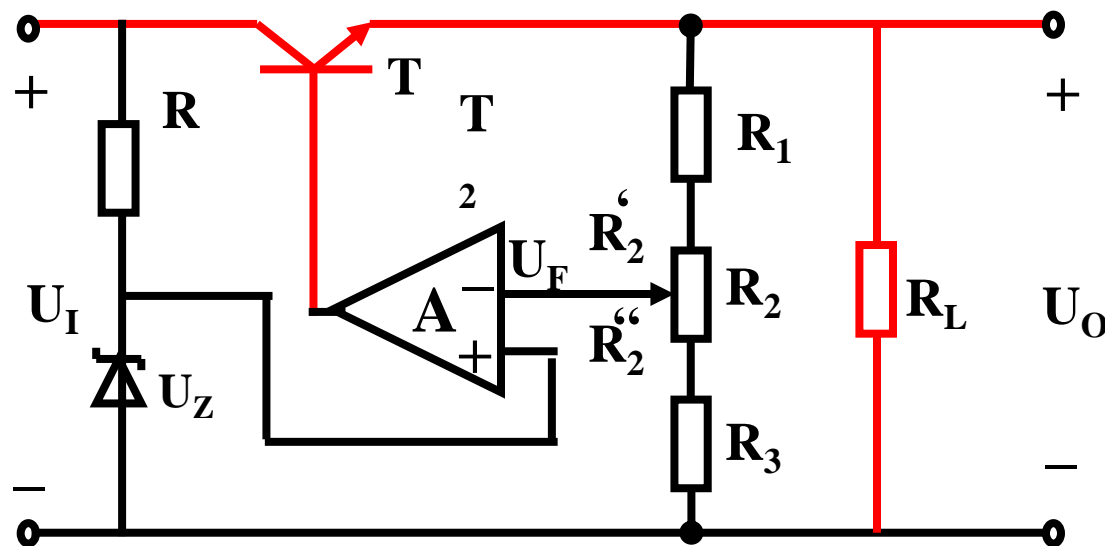
在图中，已知变压器副边电压有效值 V_2 为10V，请问：

- (1) 正常情况 $V_O = \underline{12V}$ ；
- (2) 电容虚焊时 $V_O = \underline{9V}$ ，则每只整流晶体二极管所承受的最高反向电压为 $\underline{14V}$ ；
- (3) 电路正常，若负载电阻开路时 $V_O = \underline{14V}$ ；
- (4) 一只整流管和滤波电容同时开路， $V_O = \underline{4.5V}$ 。



输出电压的调节范围

$$U_Z = U_F = \frac{R_2'' + R_3}{R_1 + R_2 + R_3} U_O$$



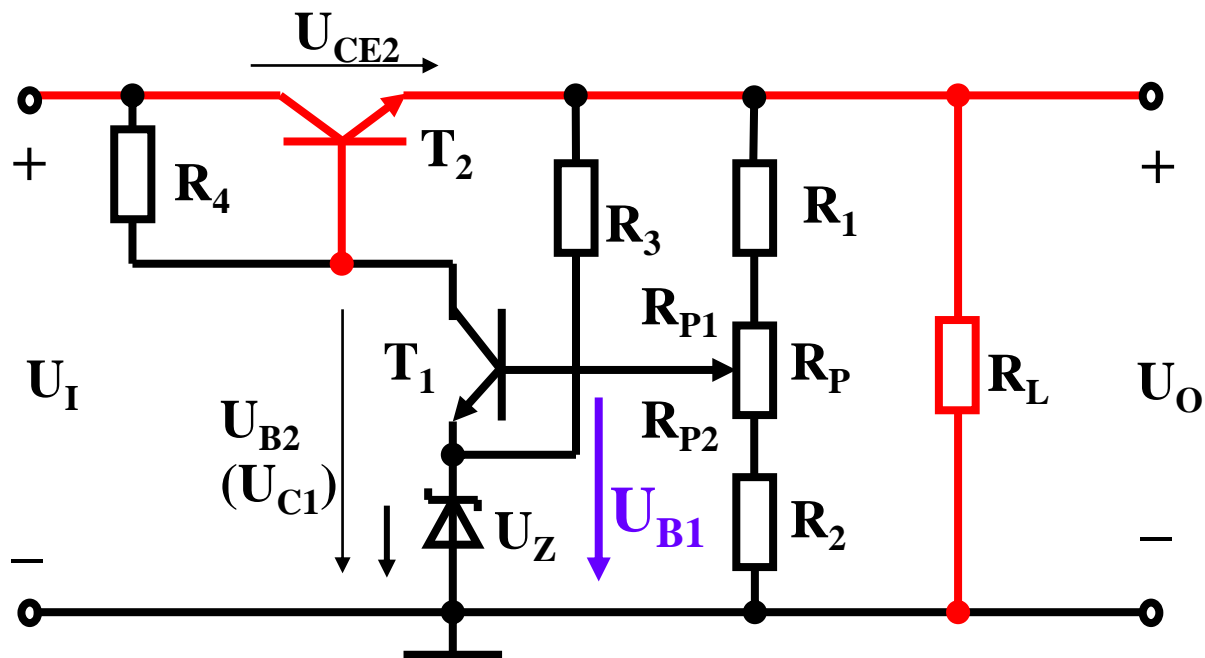
则:
$$U_O = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_2'' + R_3} U_Z$$

当 R_2 的滑动端调至最上端时
$$U_{Omin} = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_2 + R_3} U_Z$$

当 R_2 的滑动端调至最下端时
$$U_{Omax} = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_3} U_Z$$

带有放大环节的串联型稳压电源

构成：调整管、放大环节、比较环节、基准电压源



$$U_I = U_{CE2} + U_O$$

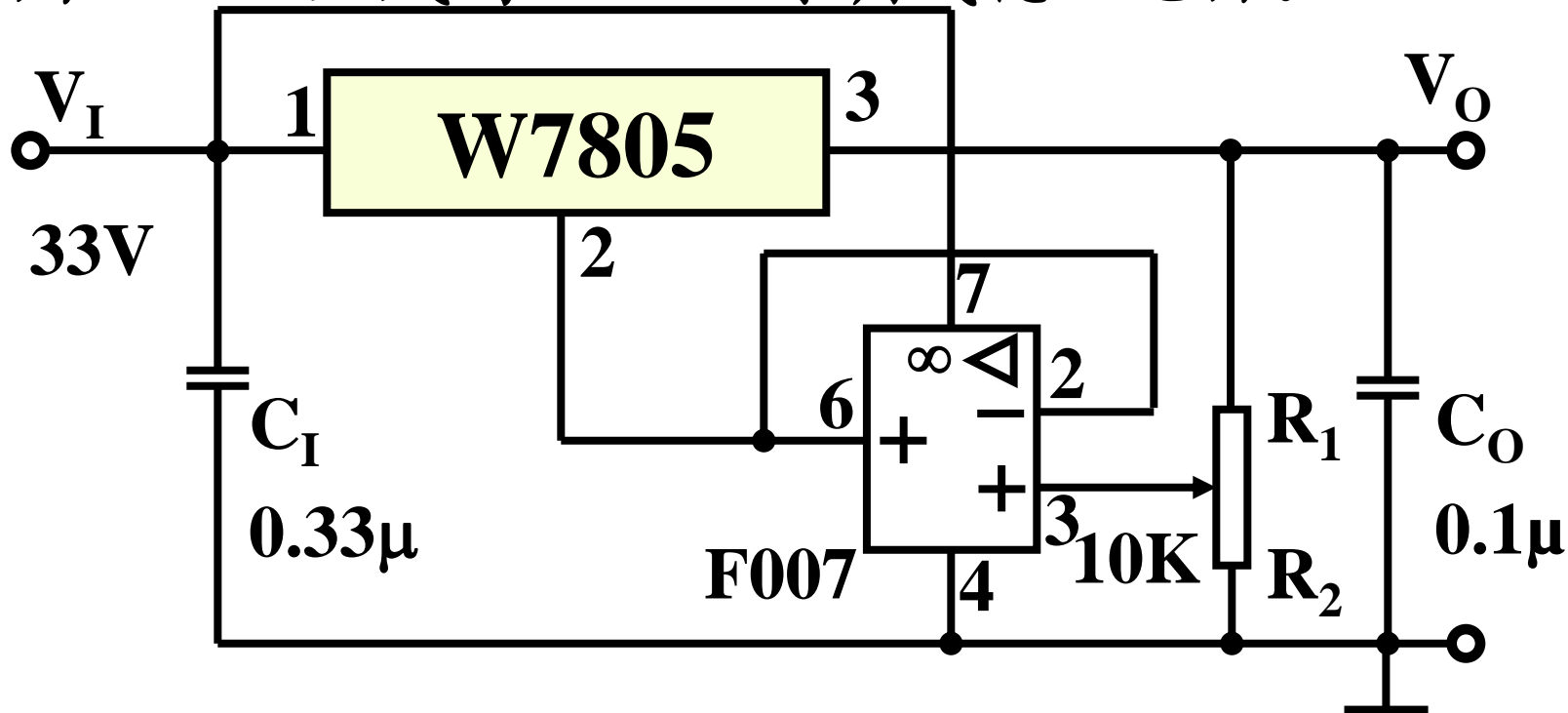
$$U_{B1} = I_1(R_{P2} + R_2) = \frac{U_O(R_{P2} + R_2)}{R_1 + R_2 + R_P}$$

$$U_{B1} = U_{BE1} + U_Z$$

U_O 电压调整范围

四、输出电压可调式电路

用三端稳压器也可以实现输出电压可调，下图是用W7805组成的7-30V可调式稳压电源。



运算放大器作为电压跟随器使用，它的电源就借助于稳压器的输入直流电压。

$$V_O = V_{XX} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad (V_{XX}=5V)$$

Good Luck !

