

模拟电路复习手稿

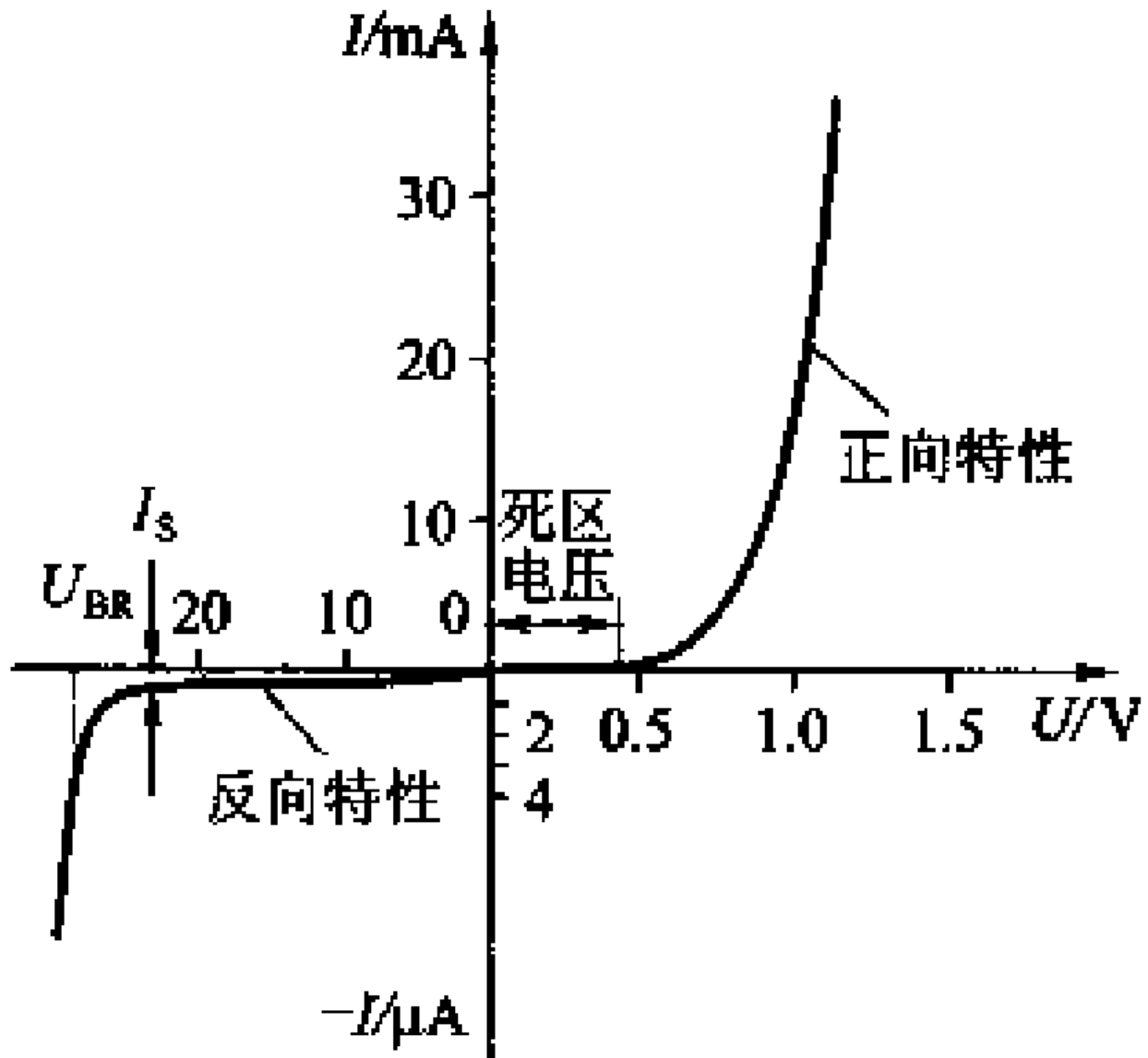
半导体器件

半导体

- 多子的浓度取决于掺入杂质的浓度
- 少子的浓度取决于温度

二极管

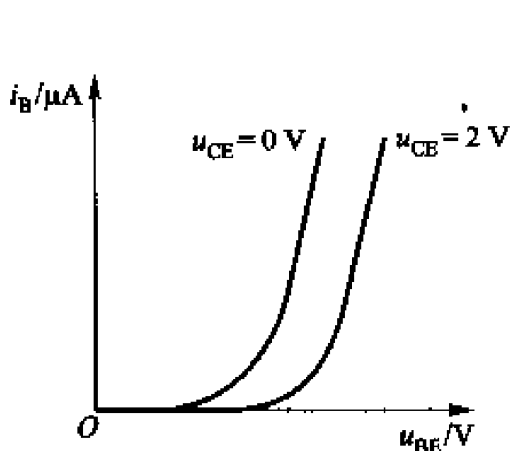
- 二极管的两个模型：理想模型和恒压降模型
- 硅管和锗管的导通压降：0.7 V 和 0.2 V
- 了解一下稳压管怎么回事



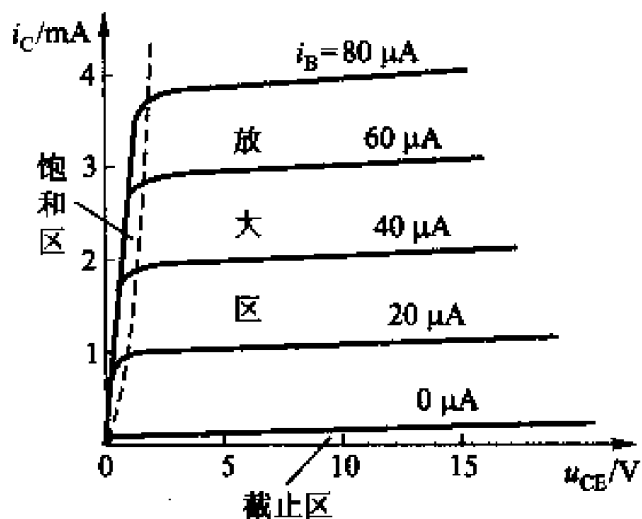
三极管

直流分量 I_B , 交流分量 i_b , 瞬时值 i_B , 交流有效值 I_b , 交流值的相量

- 两条曲线: $i_B = f(u_{BE})|_{u_{CE}=\text{const}}$, $i_C = f(u_{CE})|_{i_B=\text{const}}$
- 三个区: 截止区 (都反偏), 放大区 (BE 正偏、BC 反偏), 饱和区 (都正偏)
 - 假设放大区, 先算 I_B , 再算 $I_C = \beta I_B$, 看看 BC 是否反偏
 - 假设饱和区, $U_{BE} = 0.7\text{V}$, $U_{CES} = 0.3\text{V}$, 看看是否有 $\beta I_B > I_{CS}$



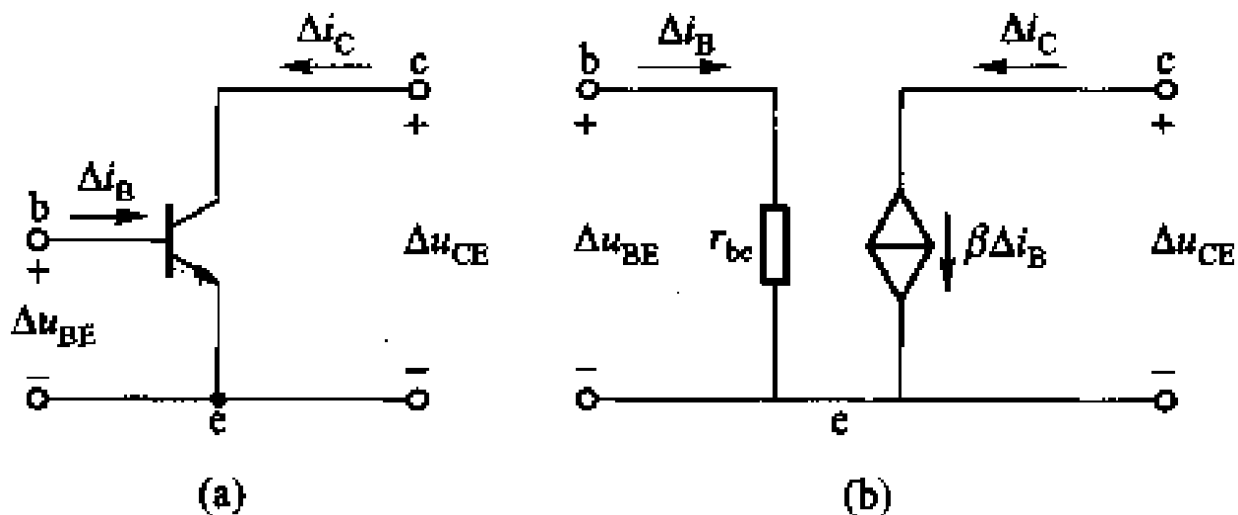
(a) 输入特性



(b) 输出特性

- 三极管有个安全工作区, 电流不能太大, 电压不能太大, 功率也不能太大 ($i_C - u_{CE}$ 图上是一条反比例线)

放大电路的基本原理和分析方法



- PNP 三极管的微变等效电路: 电阻和受控电流源的位置与 NPN 的相同, 三个电流的方向取反

主要技术指标

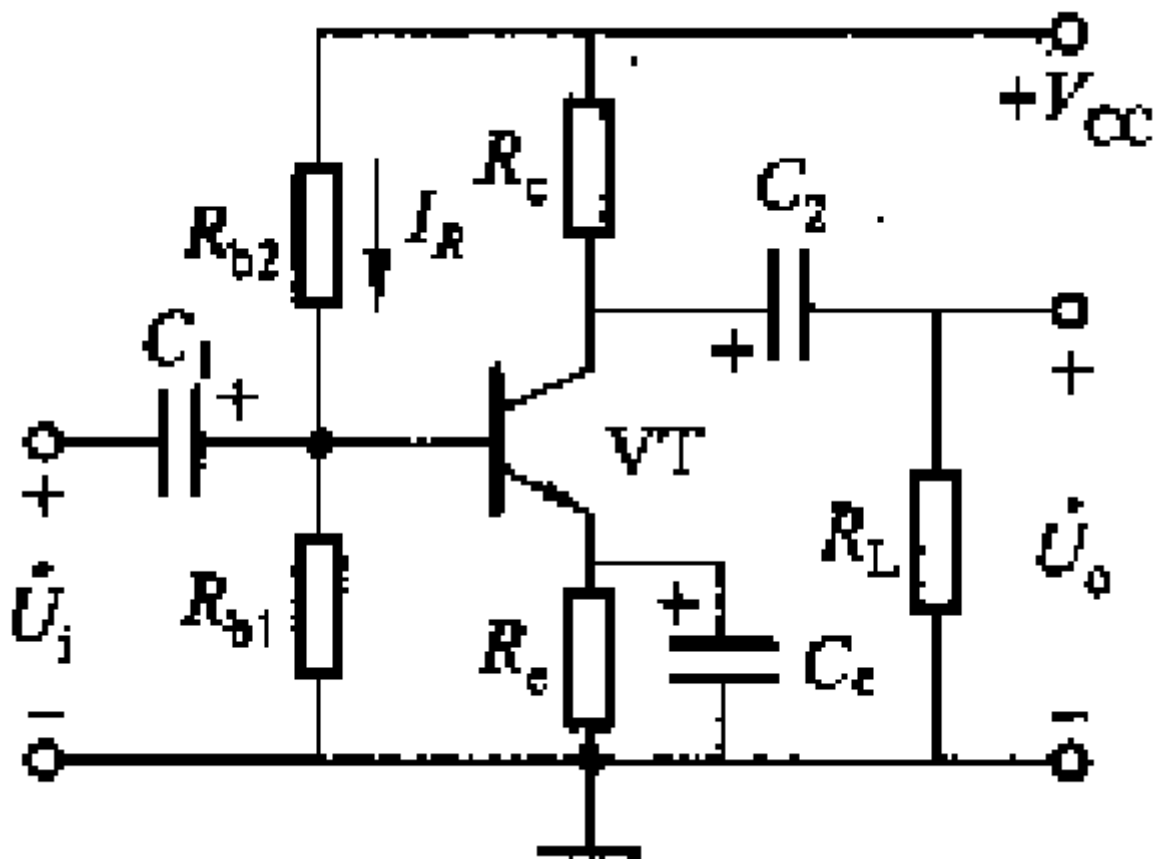
- 放大倍数
- 输入电阻：从输入端看进去的电阻，越大越好
- 输出电阻：从负载 R_L 看进去的电阻，越小越好
- 通频带： $\frac{\sqrt{2}}{2}$

单管放大电路三种组态

- 学会画直流通路和交流通路
- 学会画微变等效电路：be 之间连 r_{be} ，ce 之间连电流源 $i_c = \beta i_b$
- 求静态工作点 $\rightarrow r_{be} \rightarrow$ 微变等效电路 \rightarrow 放大系数、输入电阻、输出电阻 ($u_i = 0$)
 - $r_{be} = r_{bb'} (= 300\Omega) + (1 + \beta) \frac{26\text{mV}}{I_{EQ}}$

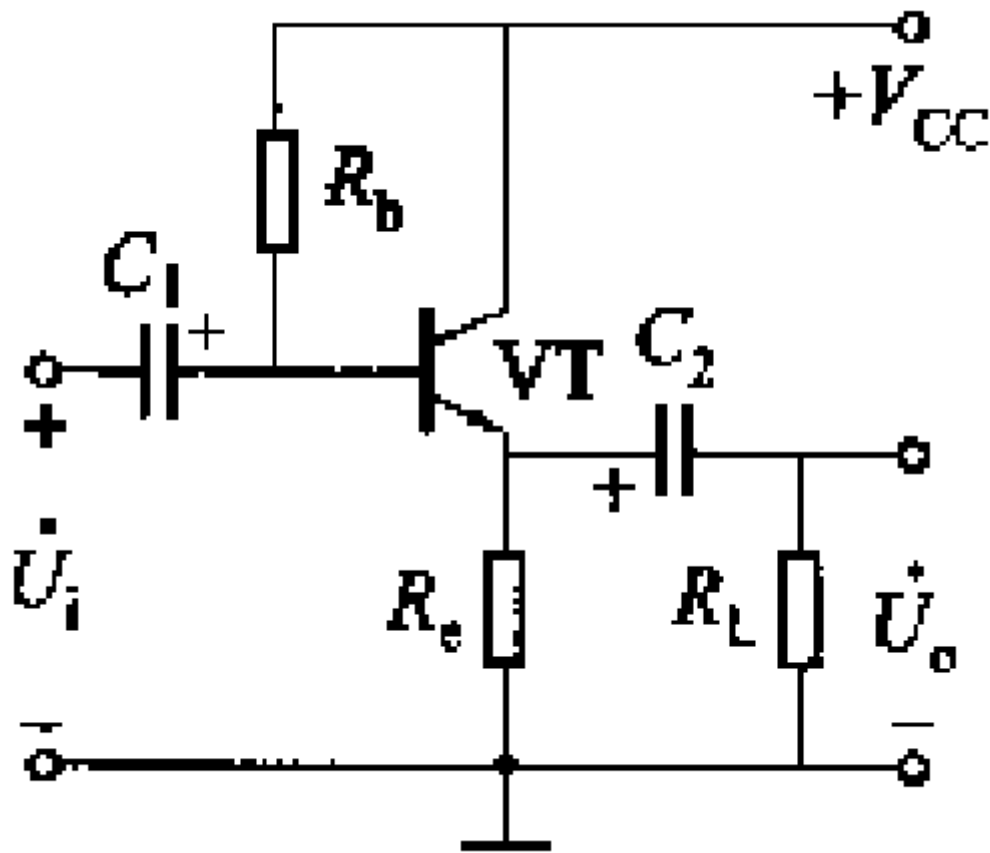
共射

- 交直流并存、电压放大、倒相
- 在 $i_C = f(u_{CE})|_{i_B=\text{const}}$ 中，负载线过低 $\rightarrow u_{CE}$ 顶部截止失真（下边事截止区）
- 在 $i_C = f(u_{CE})|_{i_B=\text{const}}$ 中，负载线过高 $\rightarrow u_{CE}$ 底部饱和失真（左边事饱和区）



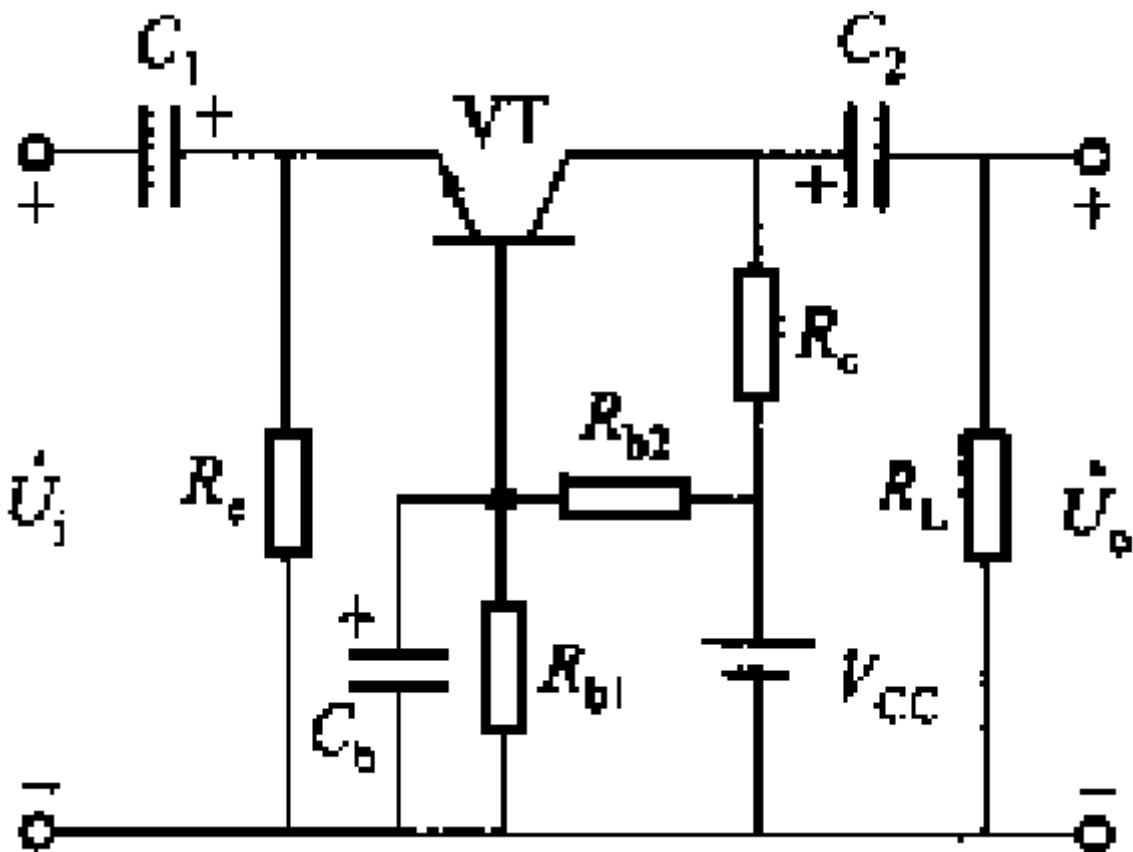
共集（射极输出器）

- 电压不放大、电流放大
- 输入电阻大、输出电阻小
- 作为输入级可减小对输入信号源的影响，作为输出级可提高负载能力，作为中间级隔离前后级的影响



共基

- 输入电阻小，输出电阻大
- 放宽频带



静态工作点的稳定问题

温度升高，静态工作点上移，可能导致饱和和失真

多级

1. 阻容耦合

- 各级静态工作点独立
- 不易放大低频信号，无法集成

2. 变压器耦合

- 有阻抗变换的作用，各级静态工作点独立
- 不易放大低频信号，无法集成

3. 直接耦合

- 可放大直流和交流信号，便于集成
- 各级静态工作点不独立，零点漂移严重

抑制零点漂移

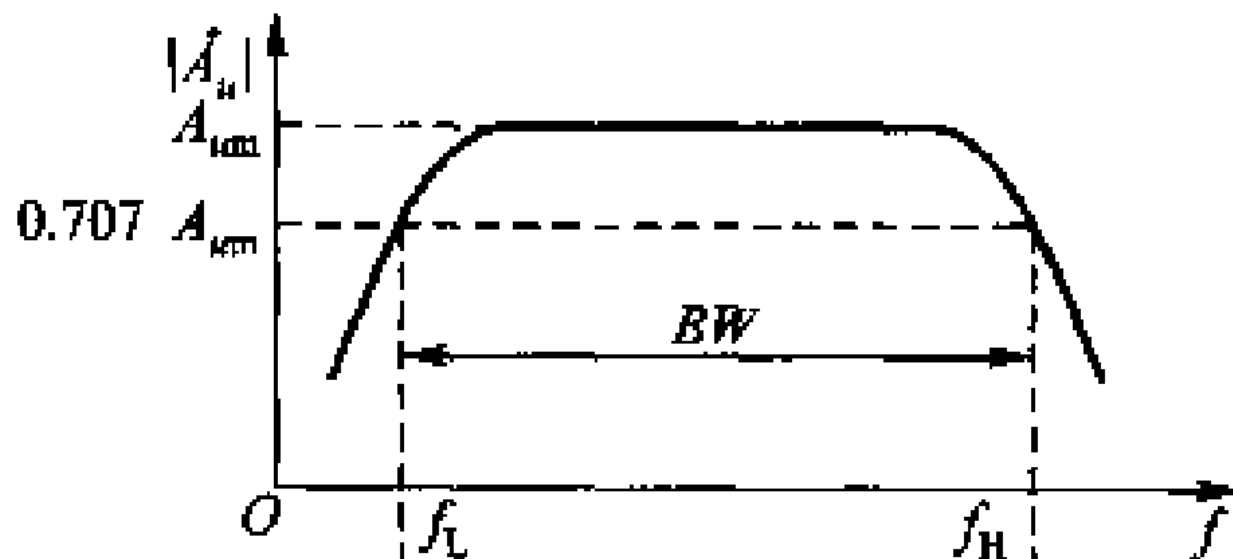
- 引入直流负反馈以稳定静态工作点
- 热敏元件
- 差分放大电路

分析方法（两级）

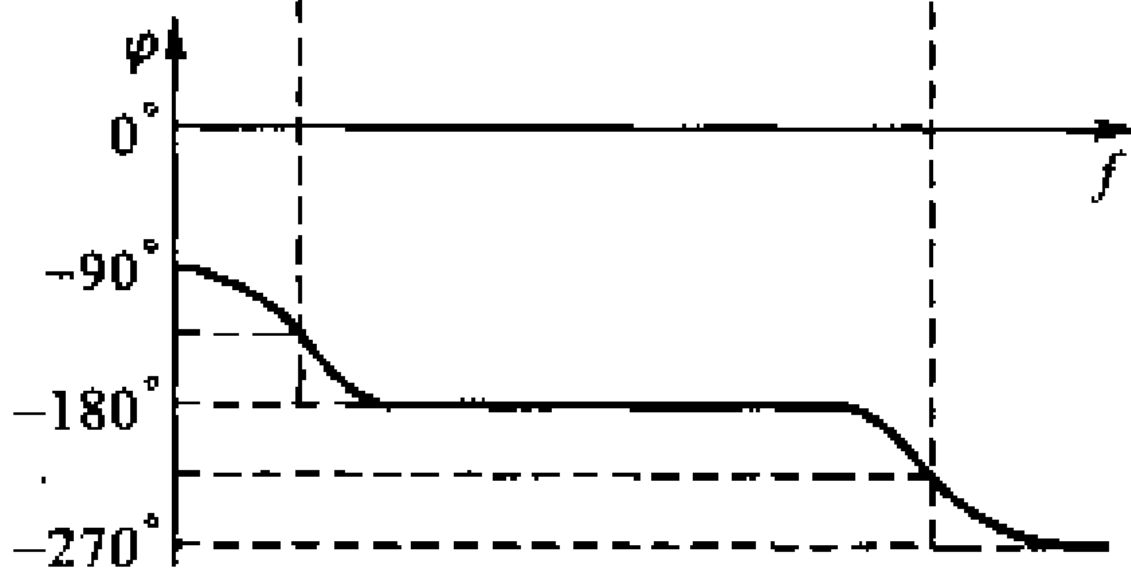
将第二级的电阻看作第一级的负载电阻, $R_{i2} \rightarrow A_{u1} \rightarrow A_{u2} \rightarrow R_i \rightarrow R_o$

放大电路的频率响应

几个概念: $A_{um}, f_L, f_H, BW = f_H - f_L$



(a) 幅频特性

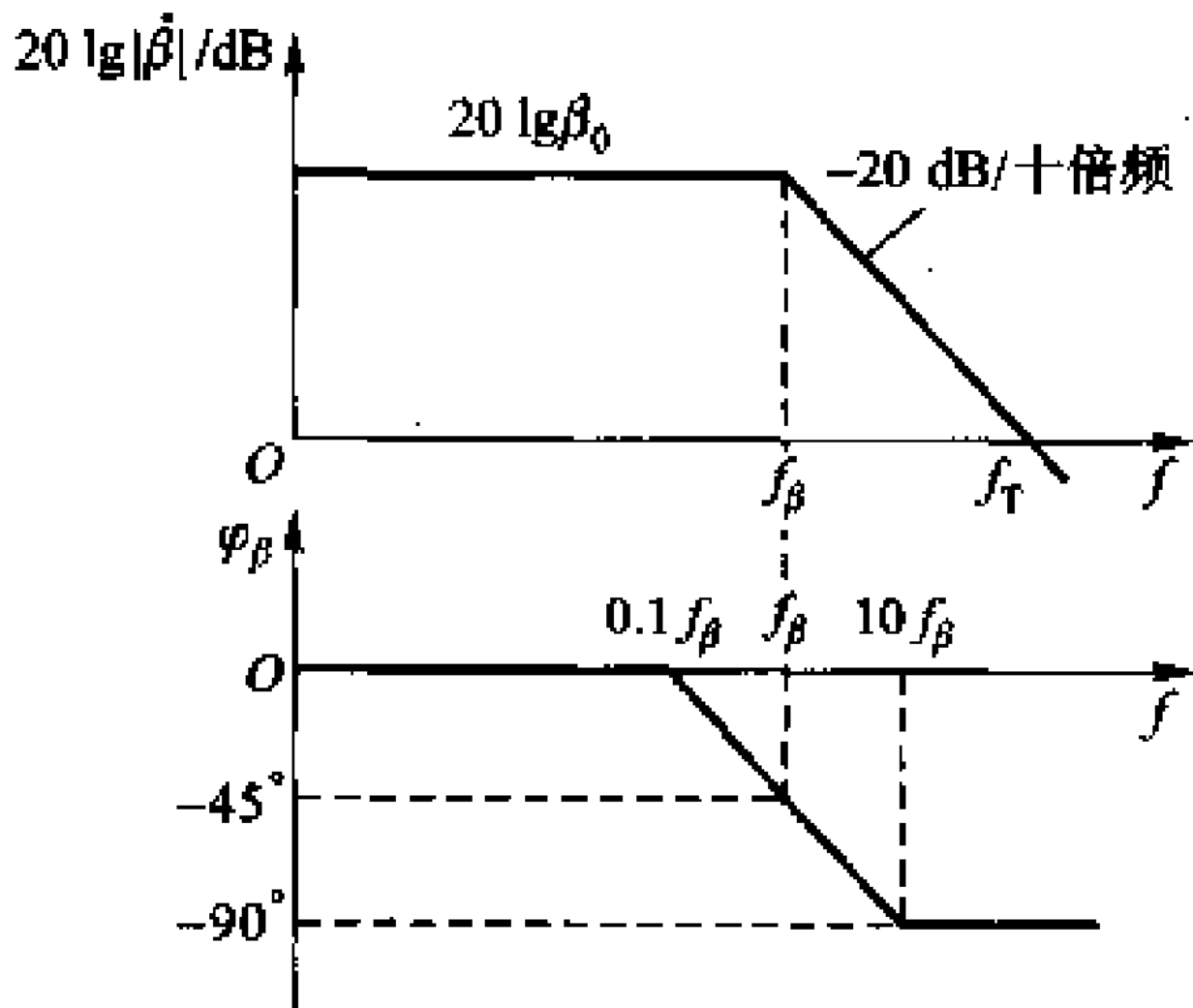


(b) 相频特性

三极管

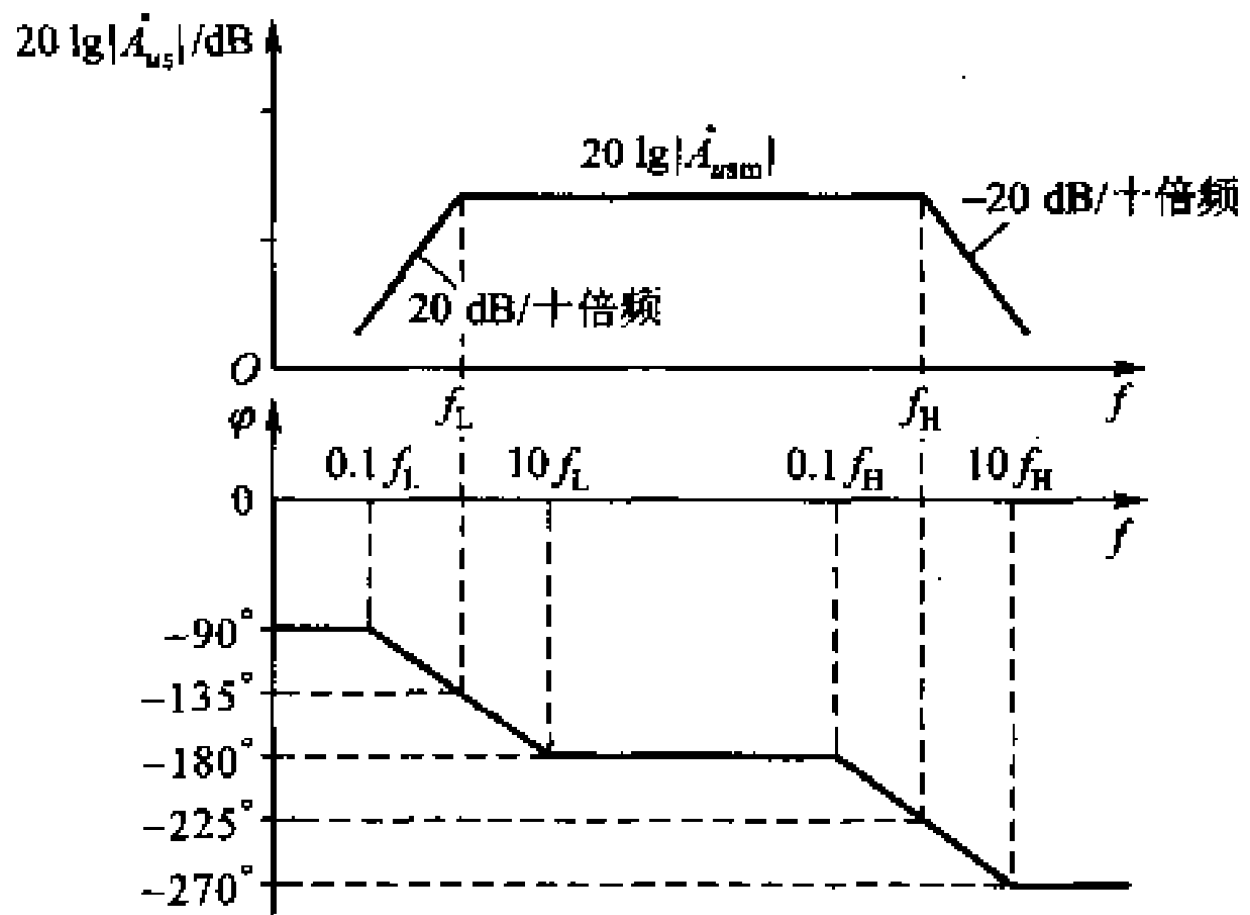
高频时, $\dot{\beta} = \frac{\beta_0}{1+j\frac{f}{f_\beta}}$, $\dot{\alpha} = \frac{\alpha_0}{1+j\frac{f}{f_\alpha}}$

- 共射截止频率: f_β
- 特征频率: $f_T = \beta_0 f_\beta$
- 共基截止频率: $f_\alpha = (1 + \beta_0) f_\beta$

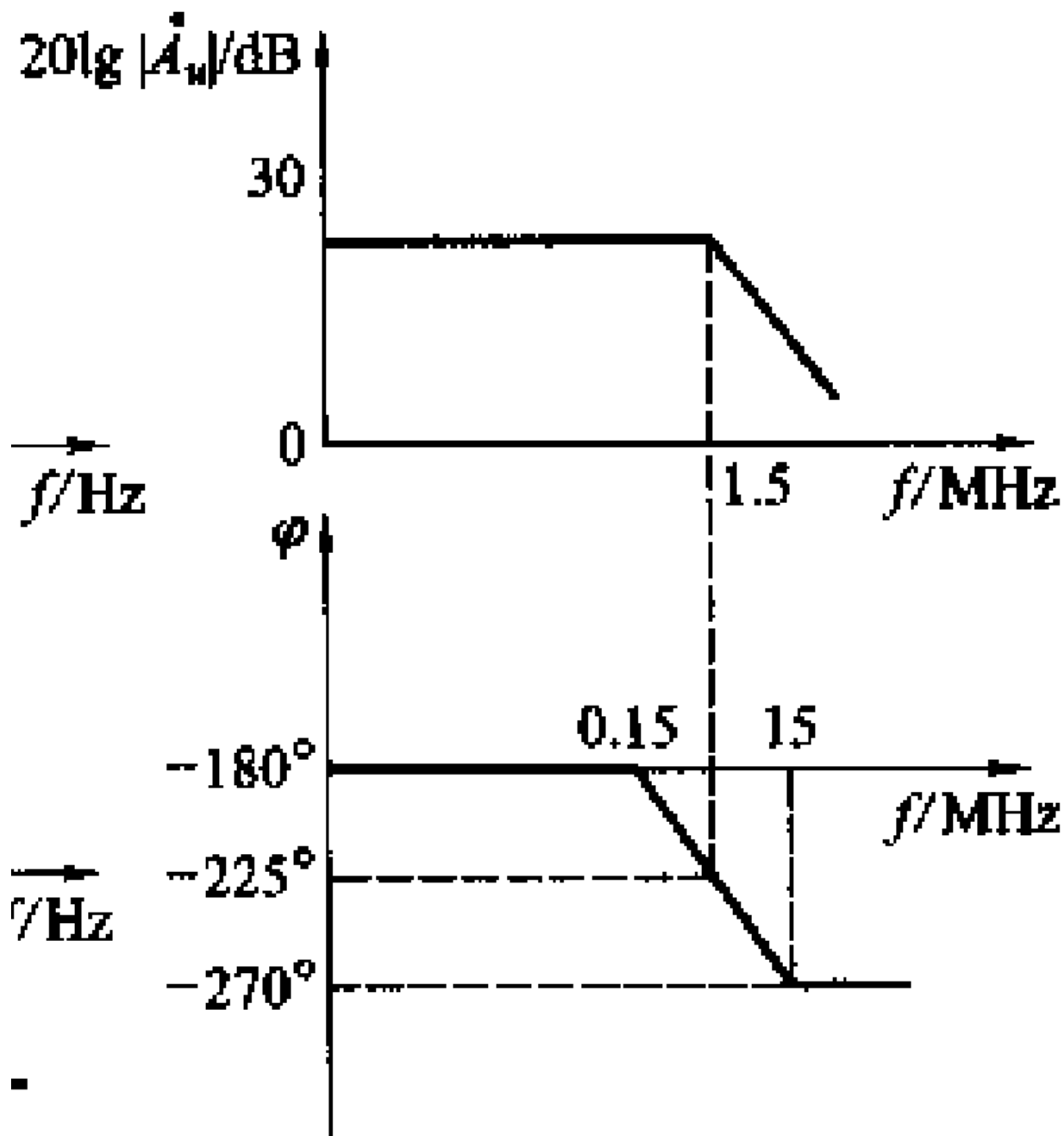


(共射的) 两种耦合方式

阻容耦合: $\dot{A}_{us} \approx \frac{\dot{A}_{usm}}{(1-j\frac{f}{f_L})(1+j\frac{f}{f_H})}$



直接耦合: $\dot{A}_{us} = \frac{\dot{A}_{usm}}{1+j\frac{f}{f_H}}$



功率放大电路（功放）

前面的放大电路与功放的不同：

- 电路的要求：比较大的电压放大倍数 vs 足够的输出功率，较高的效率
- 主要技术指标：电压放大倍数、输入电阻、输出电阻 vs 最大输出功率、效率
- 分析方法：图解法、微变等效电路 vs 图解法

分类：

- 电路结构
 - OTL 互补对称功放
 - OCL 互补对称功放
- 功率三极管导电角（一个周期内多大的范围导通）

- 甲类： 360° ，波形好、管耗大效率低
- 乙类： 180° ，波形严重失真、管耗小效率高
- 甲乙类： $180^\circ \sim 360^\circ$ ，居中

射极输出器

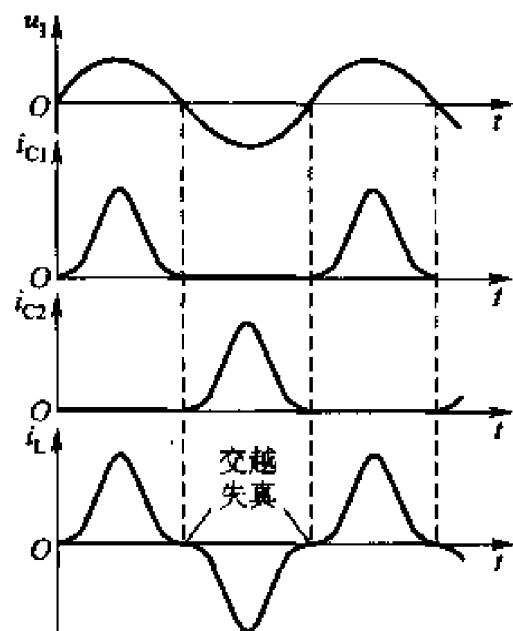
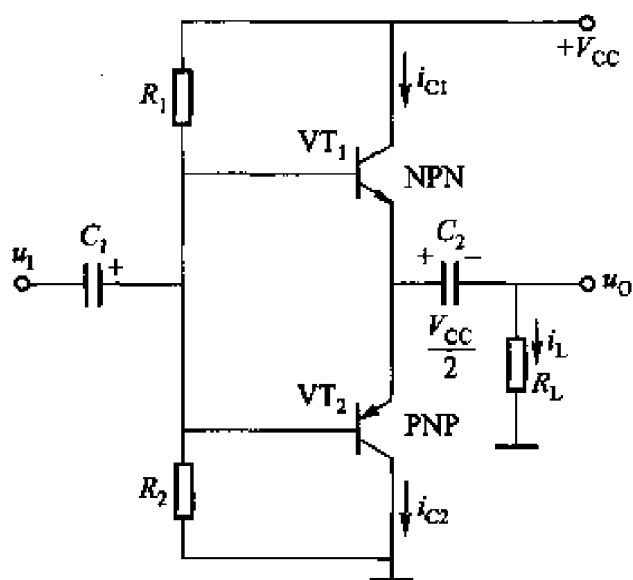
- 输出电阻小，带负载能力强
- 对负向输入电压的跟随范围小
- 效率低，若试图降低 Q 点，会引起截止失真

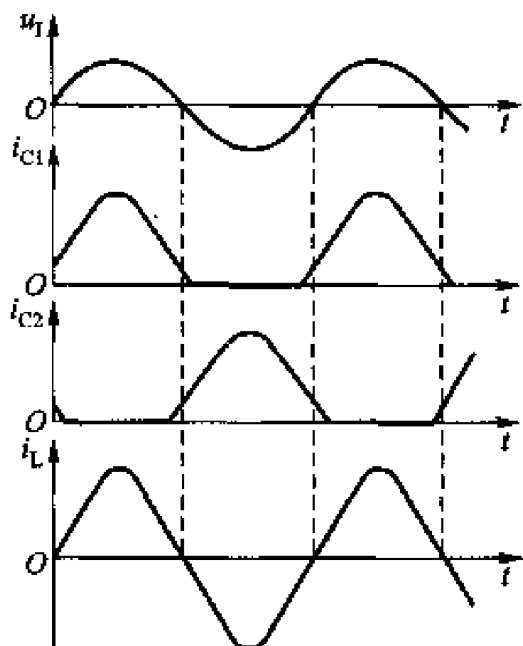
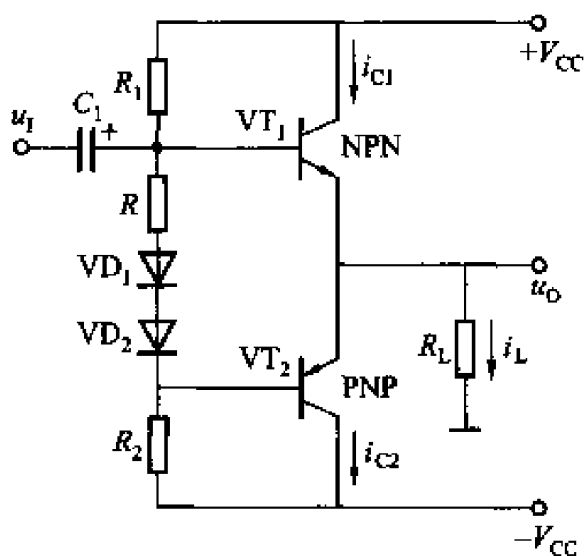
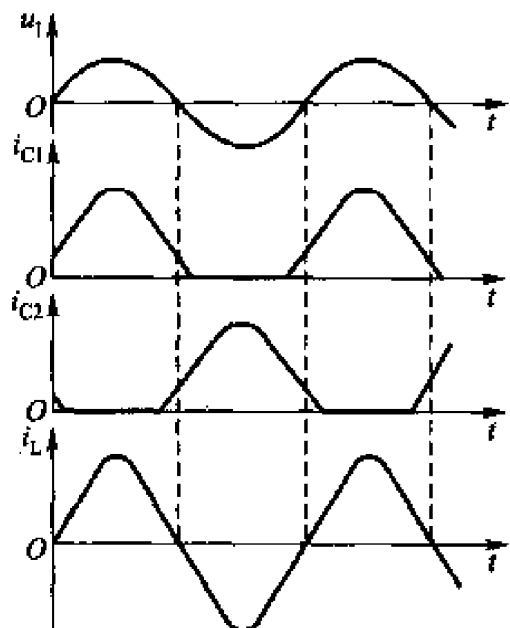
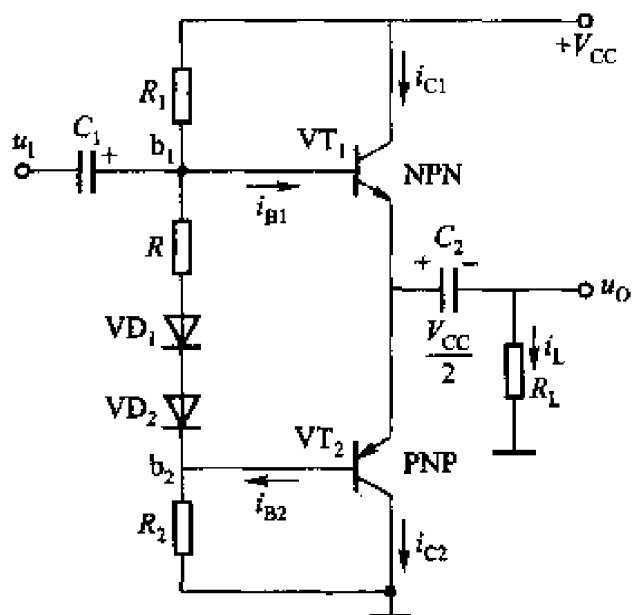
互补对称式功率放大电路

OTL 和 OCL

- OTL 乙类： i_L 交越失真
- OTL 甲乙类
 - 两种 OTL 在静态时 $U_C = V_{CC}/2$
- OCL 甲乙类（省去了大电容，改善了低频响应，有利于实现集成化）
 - 静态时， $I_L = 0$
 - 调节 R_1, R_2 做到 $U_O = 0$
 - 出现交越失真则增大 R
 - R 开路或 D_1, D_2 中有接反或开路，则三极管会烧毁；计算：

$$2V_{CC} = I_B(R_1 + R_2) + 2U_{BEQ}, P = V_{CC} \times I_C$$





极限参数

以 OCL 为例，对于 OTL，做代换 $V_{cc} \rightarrow \frac{V_{cc}}{2}$ 即可。

1. 最大输出功率 $U_{cem} = V_{CC} - U_{CES}$, $I_{cm} = \frac{U_{cem}}{R_L}$, $P_{om} = \frac{1}{2} U_{cem} I_{cm}$

2. 效率 $P_V = \frac{2}{\pi} V_{CC} I_{cm}$, $\eta = \frac{P_{om}}{P_V}$

3. 功率三极管

1. 集电极最大允许电流 $I_{CM} > \frac{V_{CC} - U_{CES}}{R_L}$

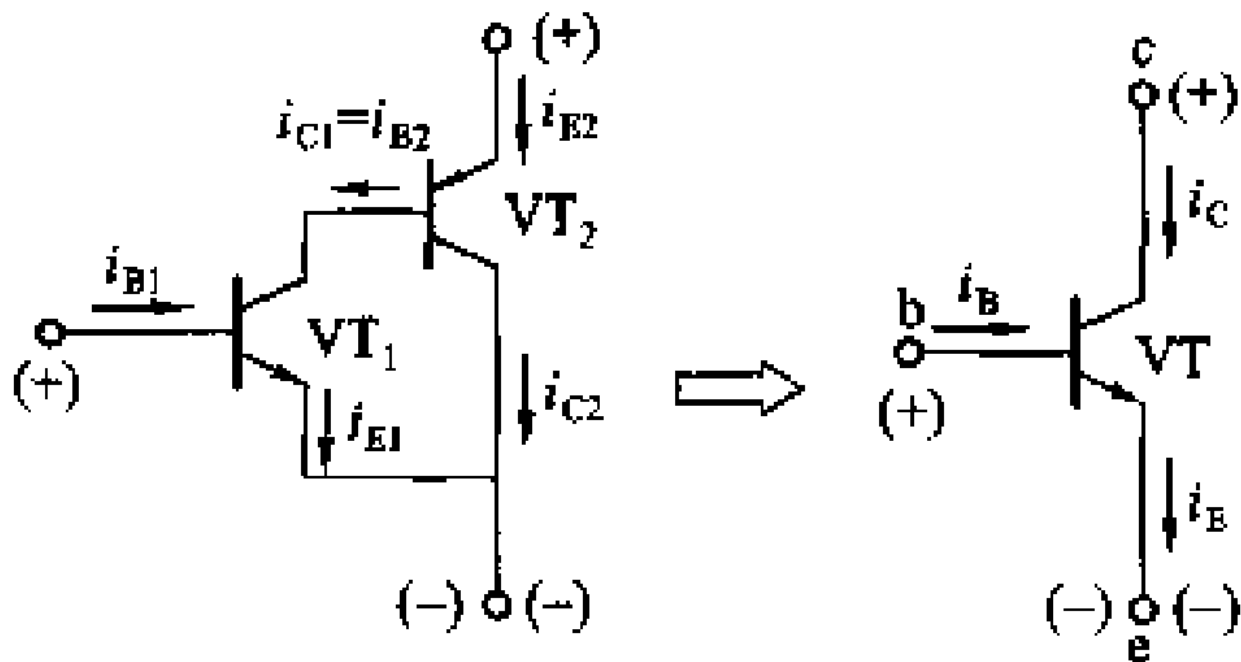
2. 集电极最大允许反向电压 $U_{(BR)CEO} > 2V_{CC} - |U_{CES2}|$

3. 集电极最大允许耗散功率 $P_{CM} > \frac{V_{CC}^2}{\pi^2 R_L}$

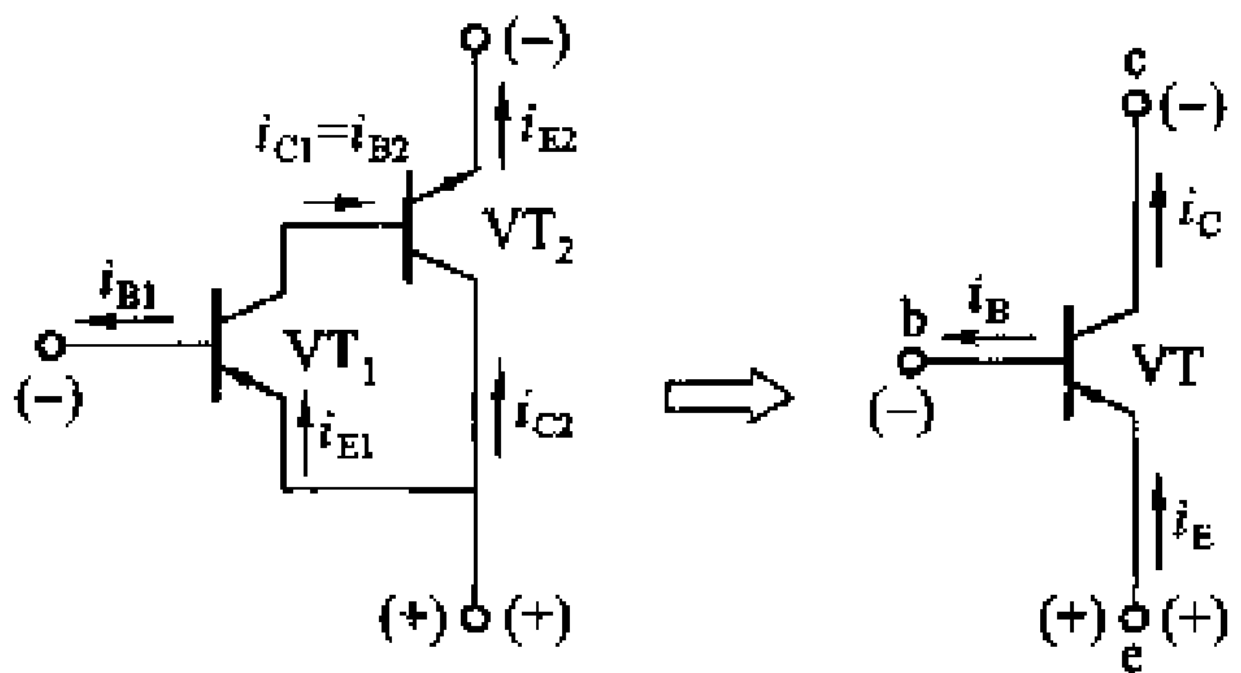
4. 欲得最大功率所需输入的电压有效值 $U_i = \frac{U_{cem}}{\sqrt{2}}$

复合管

- 保证电流方向合理
- 前面那个管的类型就是所得复合管的类型
- 两个相同类型的管: $\beta = \beta_1\beta_2$, $r_{be} = r_{be1} + (1 + \beta_1)r_{be2}$
- 两个不同类型的管: $\beta = \beta_1\beta_2$, $r_{be} = r_{be1}$



(a) NPN型



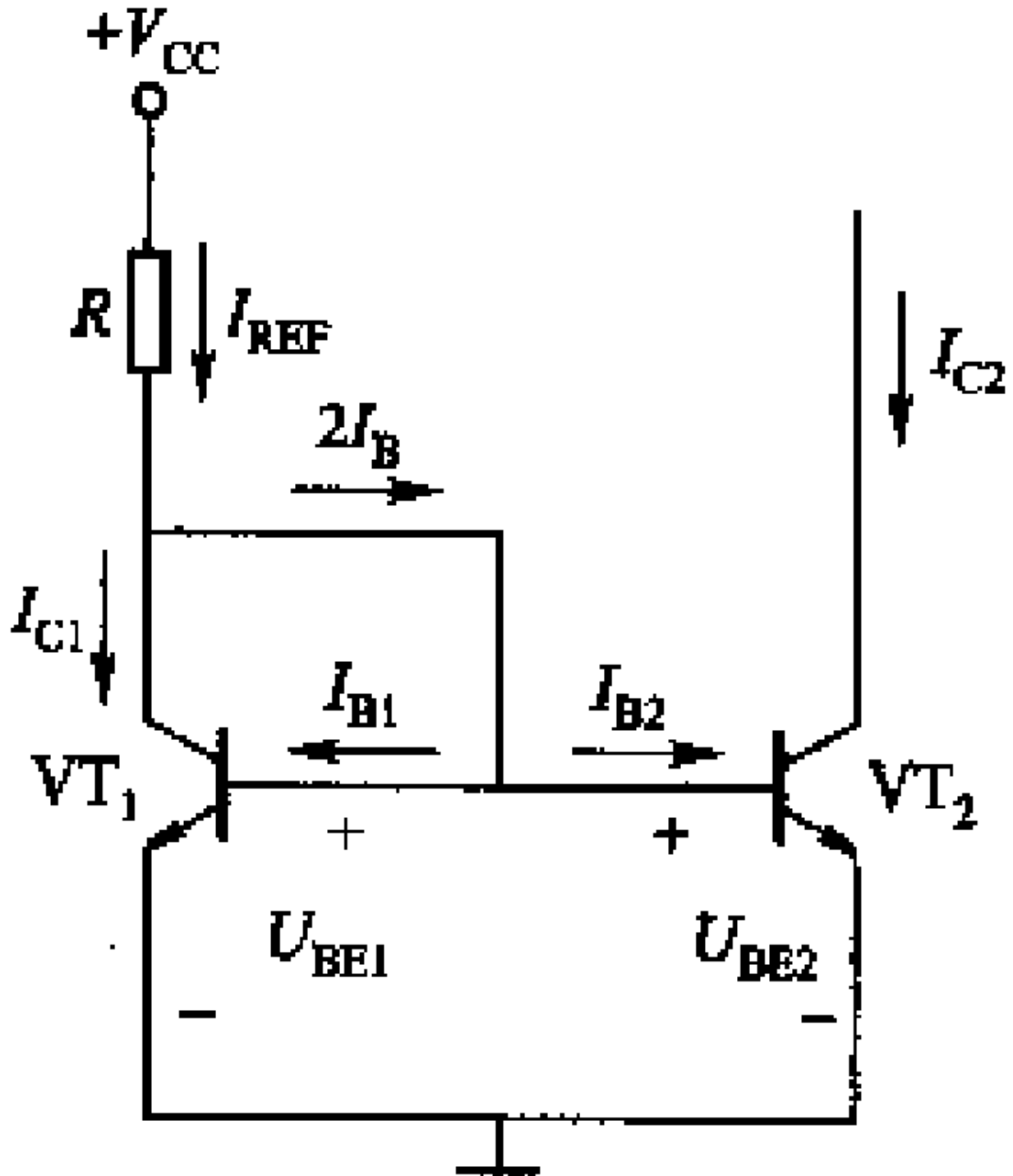
(b) PNP型

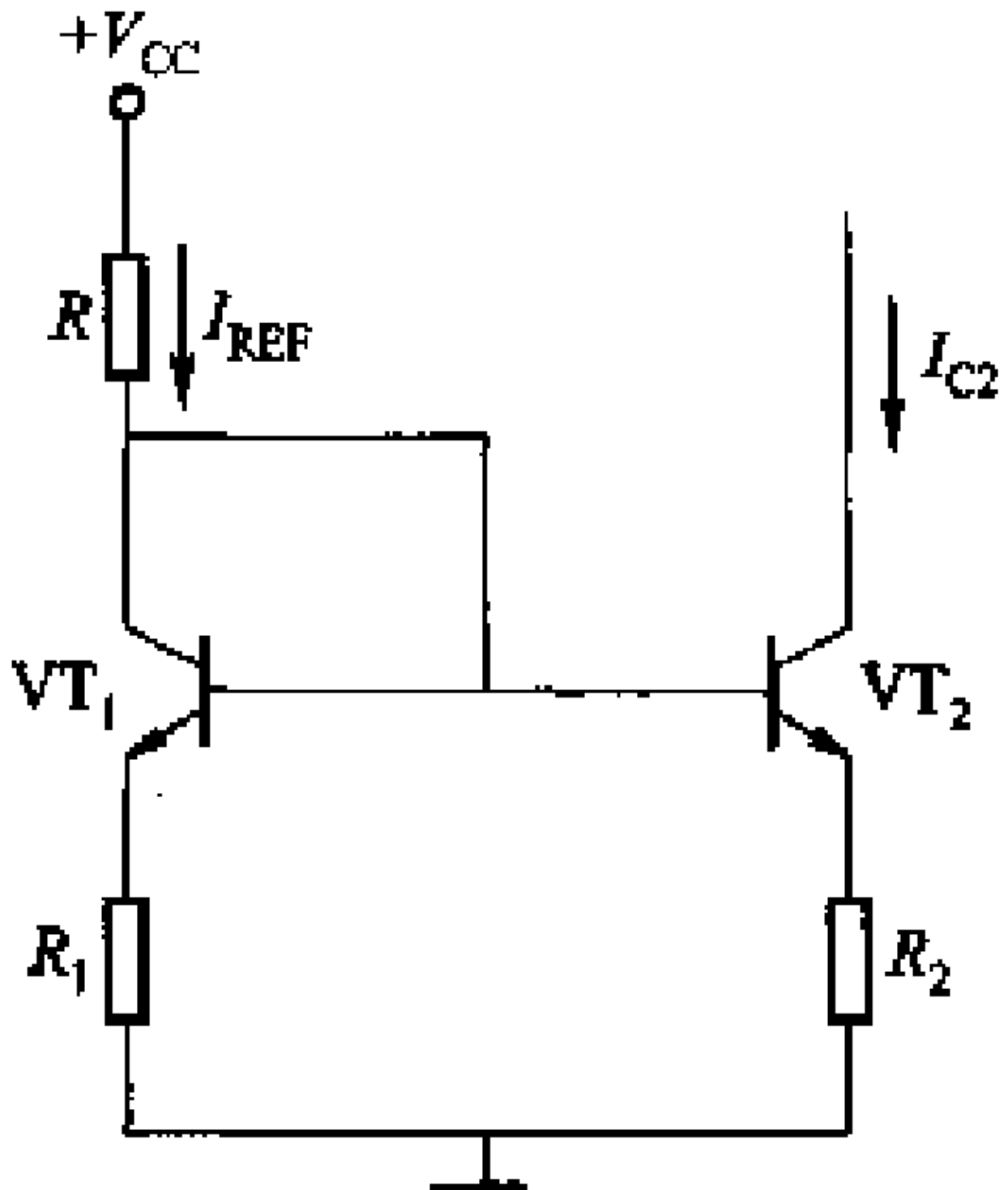
集成运算放大电路（集成运放）

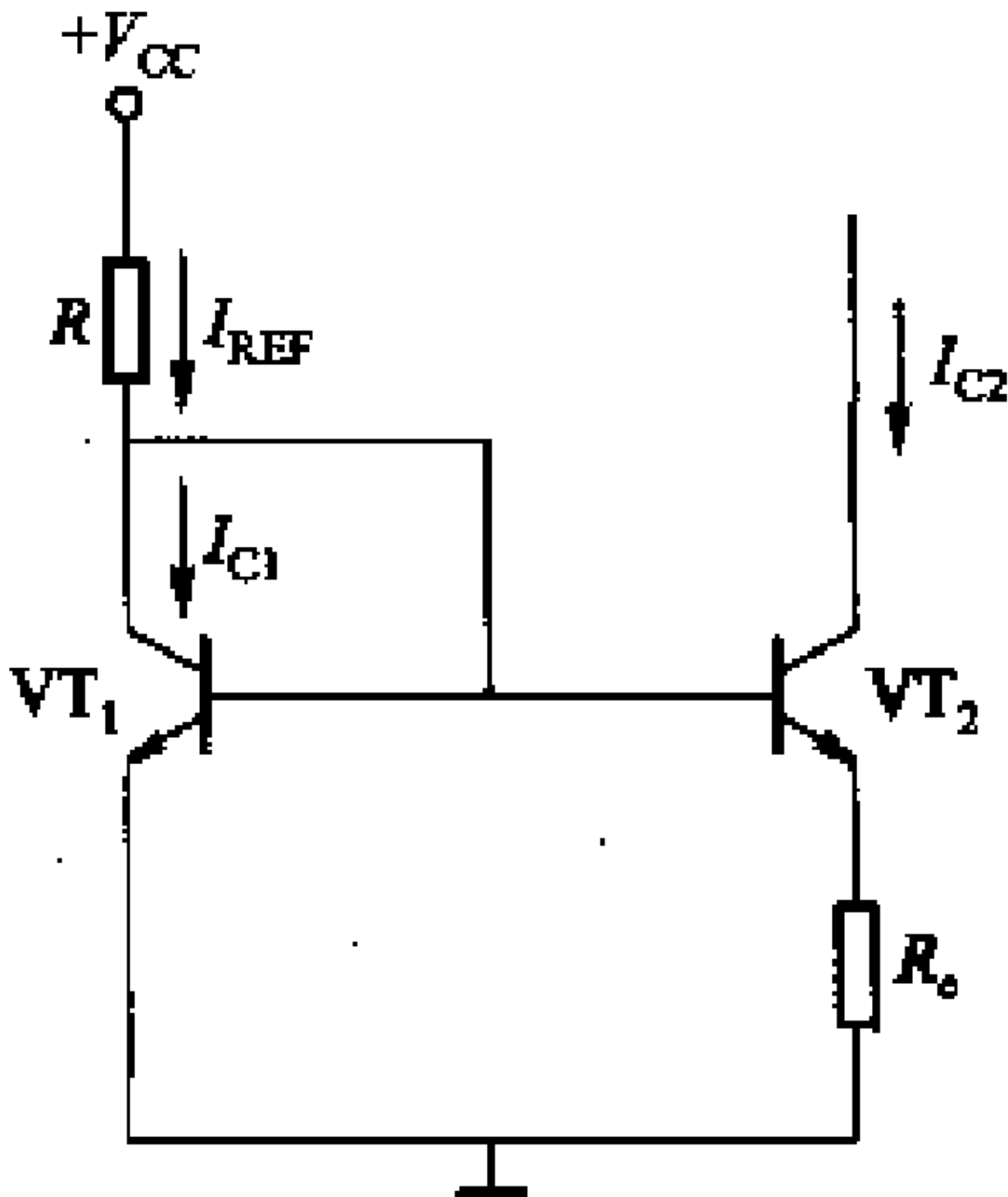
四个部分：偏置电路（为各放大级提供偏置电流） → 差分放大输入（克服零点漂移） → 中间级（电压放大） → 输出级（功率放大）

偏置电路

- 镜像电流源： $I_{B1} = I_{B2}$
- 比例电流源： $U_{B1} = U_{B2}, U_{BE1} = U_{BE2}$
- 微电流源： $R_{e2} = \frac{26\text{mV}}{I_{C2}} \ln \frac{I_{C1}}{I_{C2}}$







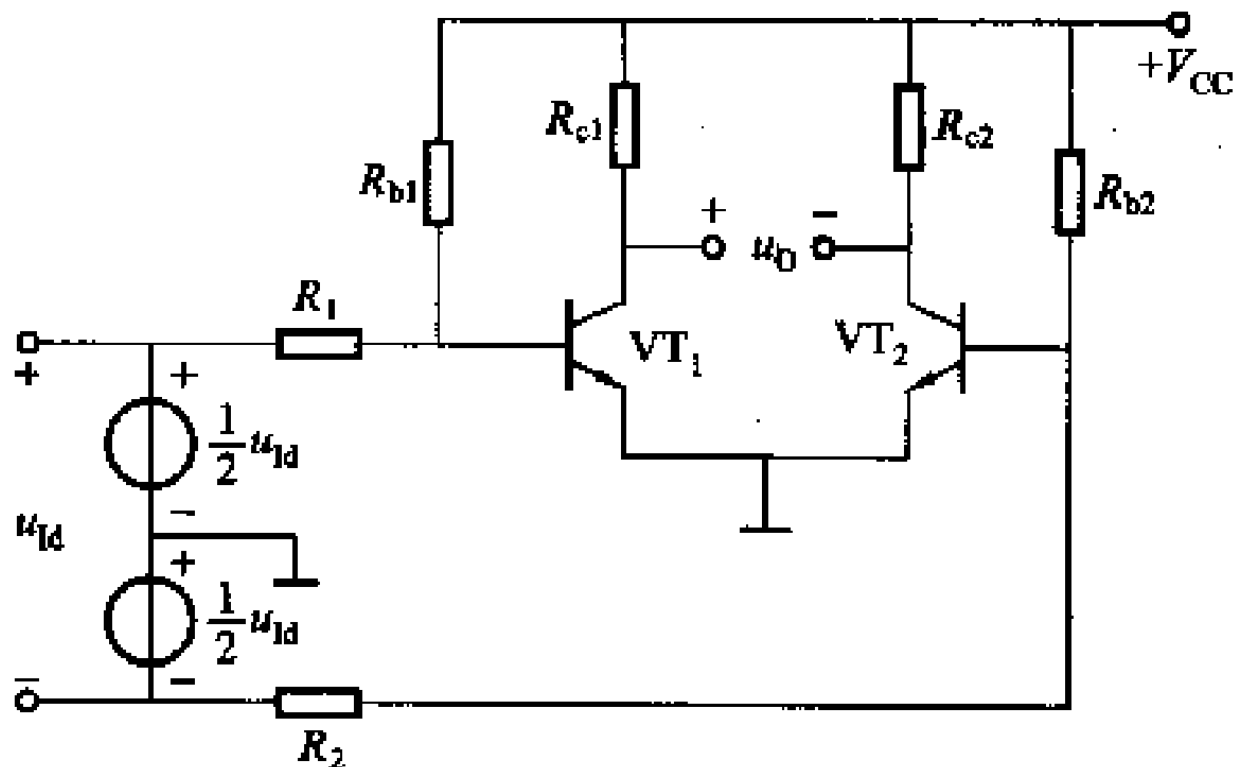
差分放大输入

还是要进行静态分析和动态分析！

- 牺牲一个放大管的放大倍数换取对零点漂移的抑制（但不理想），单端输出时失去对零点漂移的抑制能力
- 差模输入： $u_{Id} = |u_+ - u_-|$ ，共模输入： $u_{Ic} = (u_+ + u_-)/2$
- 差模电压放大倍数： $A_d = \frac{\Delta u_O}{\Delta u_{Id}}$ ，共模电压放大倍数： $A_c = \frac{\Delta u_O}{\Delta u_{Ic}}$
- 共模抑制比： $K_{CMR} = 20 \lg \left| \frac{A_d}{A_c} \right| = 20 \lg \left| \frac{\Delta u_{Id}}{\Delta u_{Ic}} \right|$
- 根据对称性，分析微变等效电路的时候只需要分析半个电路，但是注意输入电阻、输出电阻需要 $\times 2$

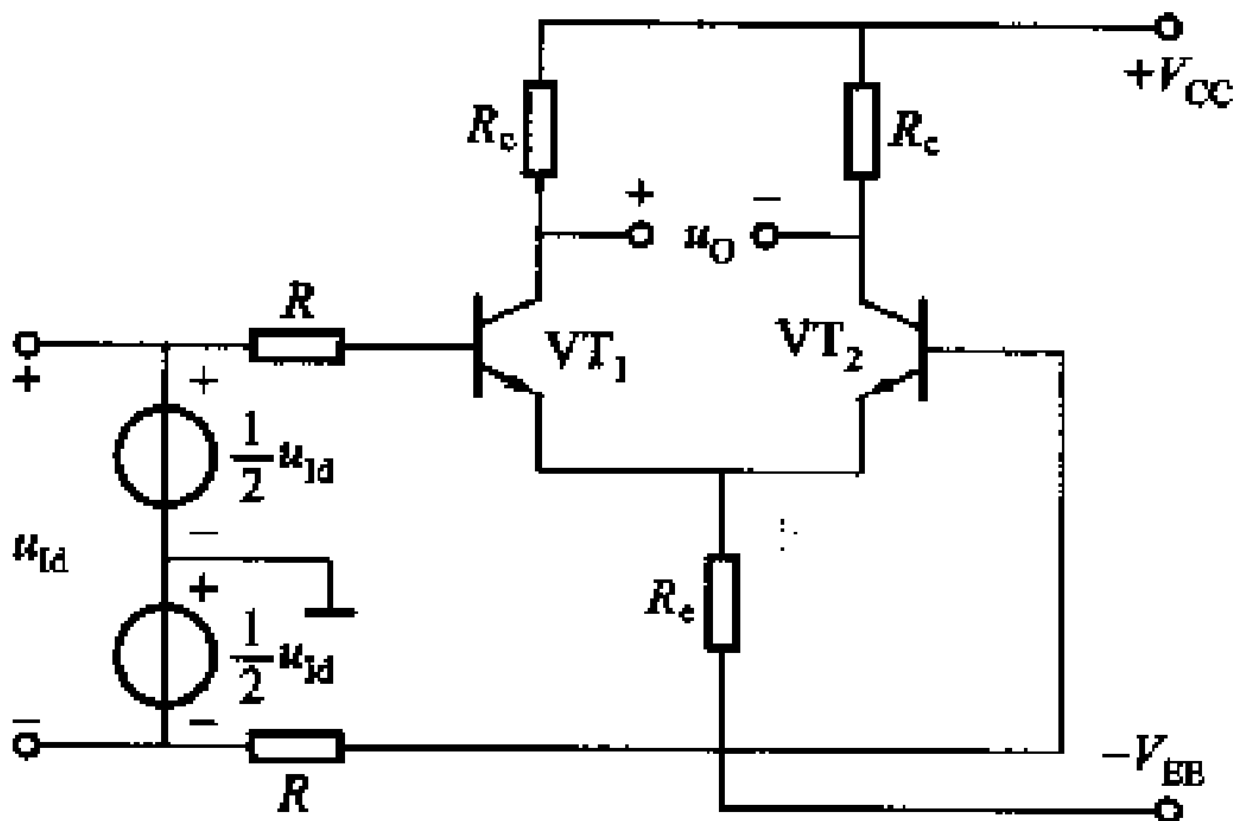
基本形式差分放大电路

- $A_d = A_{u1}$
- $A_c = 0$



长尾式差分放大电路

- 静态分析注意两个交流源接地

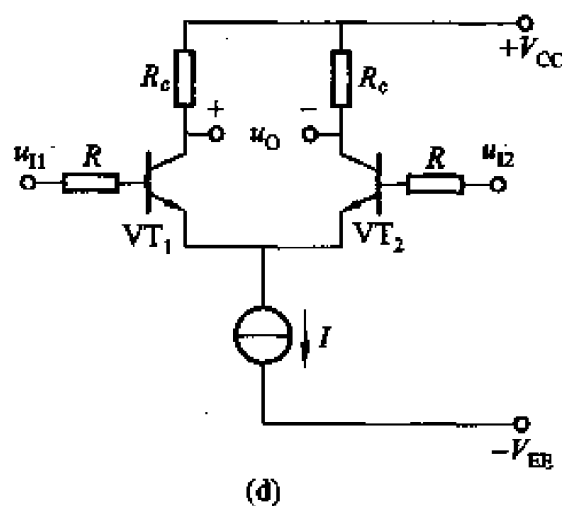
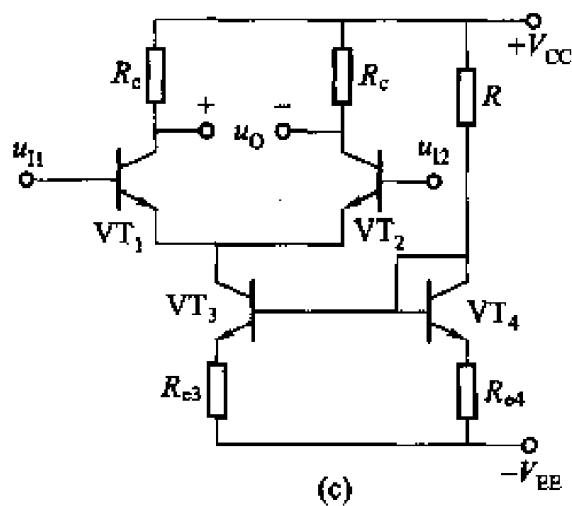
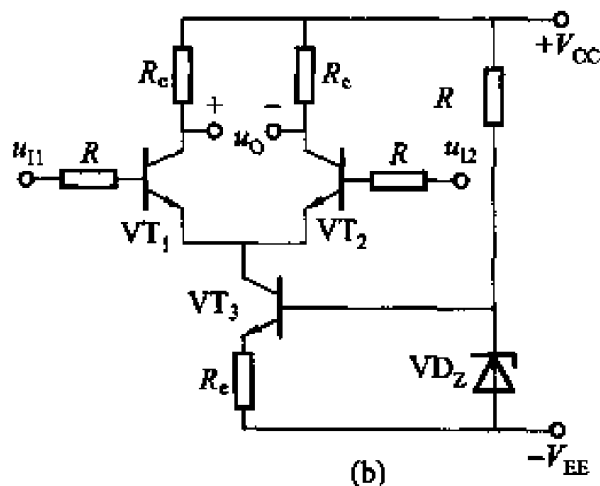
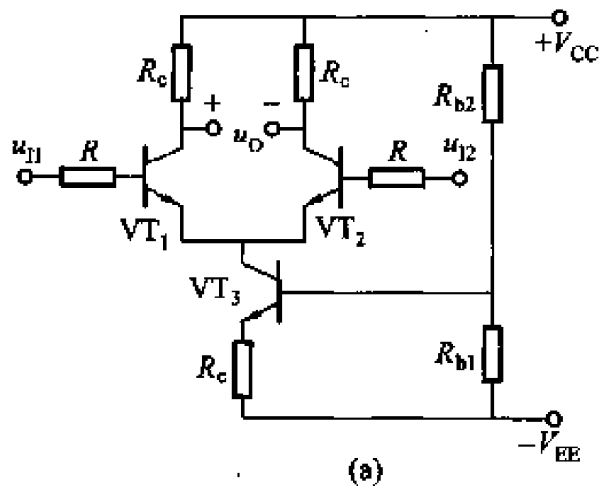


恒流源式差分放大电路

- 交流通路和长尾式的相同

把双入双出作为标准,

- 单入啥也不影响
- 单出, 差模电压放大倍数 和 输出电阻 变为一半



中间级

目标: 大的电压放大倍数、输入电阻、输出电流

1. 用 (镜像) 电流源替代共射的 $R_C \rightarrow$ 大的电压放大倍数
2. 复合管代替单管 \rightarrow 大的电压放大倍数、输入电阻
3. 差放替代单管, 单端输出

输出级

目标: 大的输出功率、输入电阻, 小的输出电阻; 不要求大的电压放大倍数, 应减小失真, 应有过载保护

1. 互补对称电路: 甲乙类 OCL 或 OTL 互补对称电路
2. 过载保护电路

放大电路中的反馈

反馈的判断

- 什么事“输入信号”：集成运放的两个输入端点
- 什么事“集成运放”：就是上一章中的东西，常见的有：理想运放（三角形）的正负端点，三极管的 B 和 E，差放的两个输入

所谓的瞬时极性法需要记住：

1. 三极管 B 进，BE 同号，BC 反号；C 进，CE 同号；
2. 理想运放 + 出同号，- 出反号；
3. 差放的两个 C 反号（跷跷板……）。

怎么判断正反馈还是负反馈？

- i 和 f 在同端同号或异端异号，则为正反馈；

怎么判断电压反馈还是电流反馈？

- 将 U_o 置零，若反馈消失，则为电压反馈

怎么判断串联反馈还是并联反馈？

- 千万别去理解所谓的“以电压形式求和”和“以电流形式求和”……
- 反馈接到了输入端，就是并联反馈

有两个概念叫做“虚短”和“虚断”，这是反馈概念的精髓，但请注意必须是深度负反馈。

有个愚蠢的概念叫做“虚地”，不要去理解它，这是一个冗余的概念！

四种组态关注的量

- 不要尝试去记住这些东西，而是去观察它们的名字和式子的形式

1. 电压串联负反馈： $\dot{A}_{uu} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_{i'}}$, $\dot{F}_{uu} = \frac{\dot{U}_f}{\dot{U}_o}$
2. 电压并联负反馈： $\dot{A}_{ui} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_{i'}}$, $\dot{F}_{ui} = \frac{\dot{I}_f}{\dot{U}_o}$
3. 电流串联负反馈： $\dot{A}_{iu} = \frac{\dot{I}_o}{\dot{U}_{i'}}$, $\dot{F}_{iu} = \frac{\dot{U}_f}{\dot{I}_o}$
4. 电流并联负反馈： $\dot{A}_{ii} = \frac{\dot{I}_o}{\dot{I}_{i'}}$, $\dot{F}_{ii} = \frac{\dot{I}_f}{\dot{I}_o}$

这个东西似乎没有什么用处，按说它们可以方便电压放大倍数的计算，但是实际上电压放大倍数总是可以利用虚短和虚断轻松得到

一般表达式

$$\text{闭环放大倍数 } \dot{A}_f = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}}$$

对放大电路性能的影响

1. 放大倍数下降为原来的 $\frac{1}{1+\dot{A}\dot{F}}$ ，放大倍数稳定性提高了 $(1+\dot{A}\dot{F})$
2. 减小放大电路的非线性失真、抑制干扰
3. 上限截止频率提高 $(1+\dot{A}\dot{F})$ ，下限截止频率变为原来的 $\frac{1}{1+\dot{A}\dot{F}}$
4. 输入电阻：串联反馈增大、并联反馈减小（形象地理解，串联反馈从输入端来看像是一个放大电路和另一个东西串联）
5. 输出电阻：电压反馈减小，电流反馈增大（形象地理解，电压反馈从输输出端来看像是一个放大电路和另一个东西并联）
6. 非要说的话，直流负反馈稳定静态工作点
7. 最后是一句废话：电压负反馈稳定输出电压，电流负反馈稳定输出电流

（深度负反馈）计算闭环电压放大倍数

别的都没用，你就记住： $U_+ = U_-$, $I_+ = I_- = 0$ 就完事了

负反馈的自激振荡

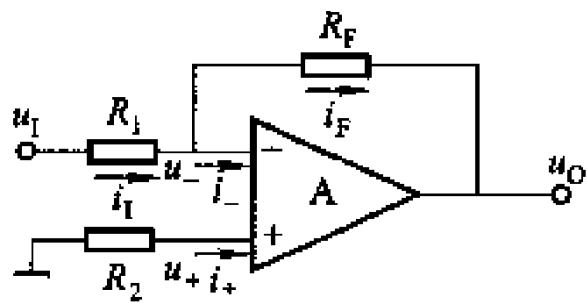
条件

$\dot{A}\dot{F} = -1$ 或 $|\dot{A}\dot{F}| = 1$ 且 $\arg \dot{A}\dot{F} = \pm(2n+1)\pi$ ，实际上是 $|\dot{A}\dot{F}| \geq 1$ 的时候也可以

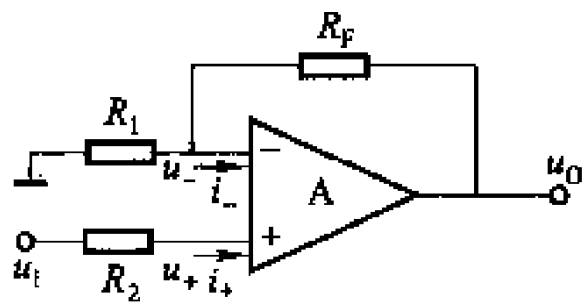
幻灯片里是给你一个波特图问你能不能产生自激振荡。

运算电路（估计是这里会考电路的设计）

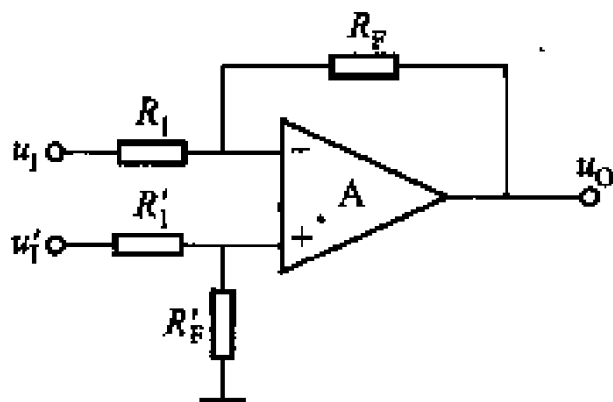
1. 反相比例：输入电阻小、输出电阻小
2. 同相比例：输入电阻大、输出电阻小
3. 差分比例：输入电阻小、输出电阻小
4. 反相输入求和
5. 同相输入求和
6. 积分电路：波形变换、移相（具体计算时注意电容两端电压可能饱和）
7. 微分电路



(a) 反相输入

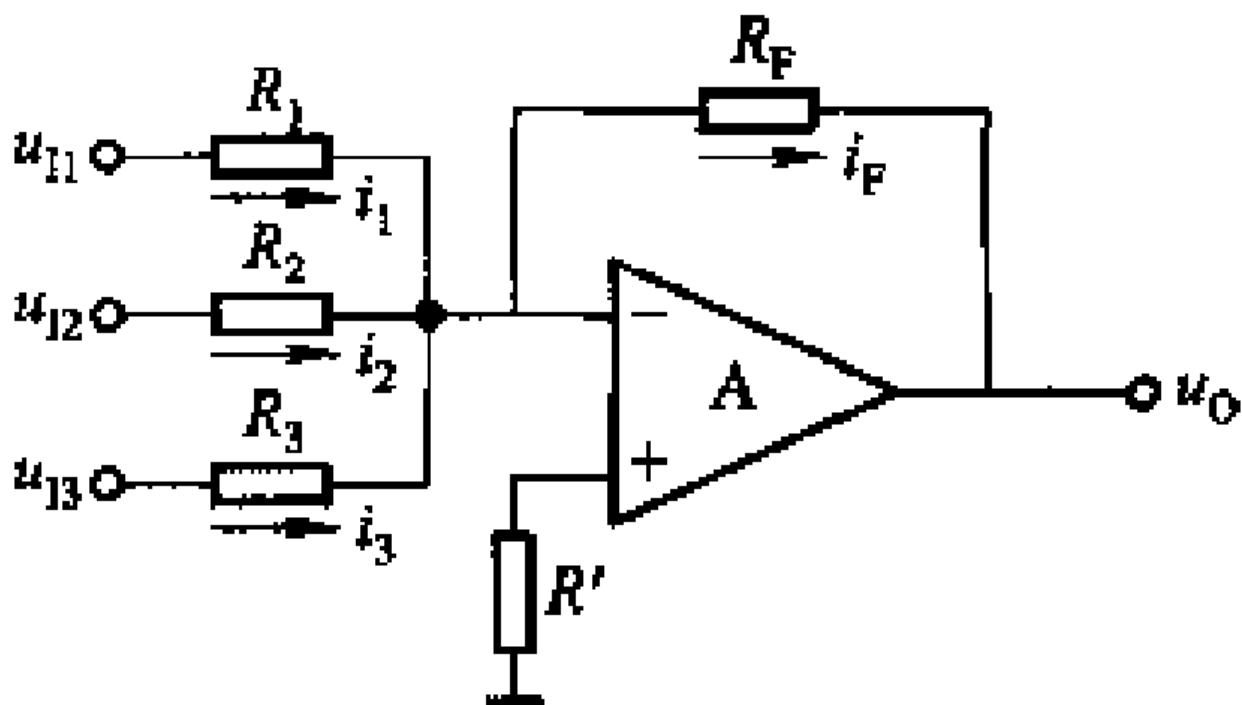


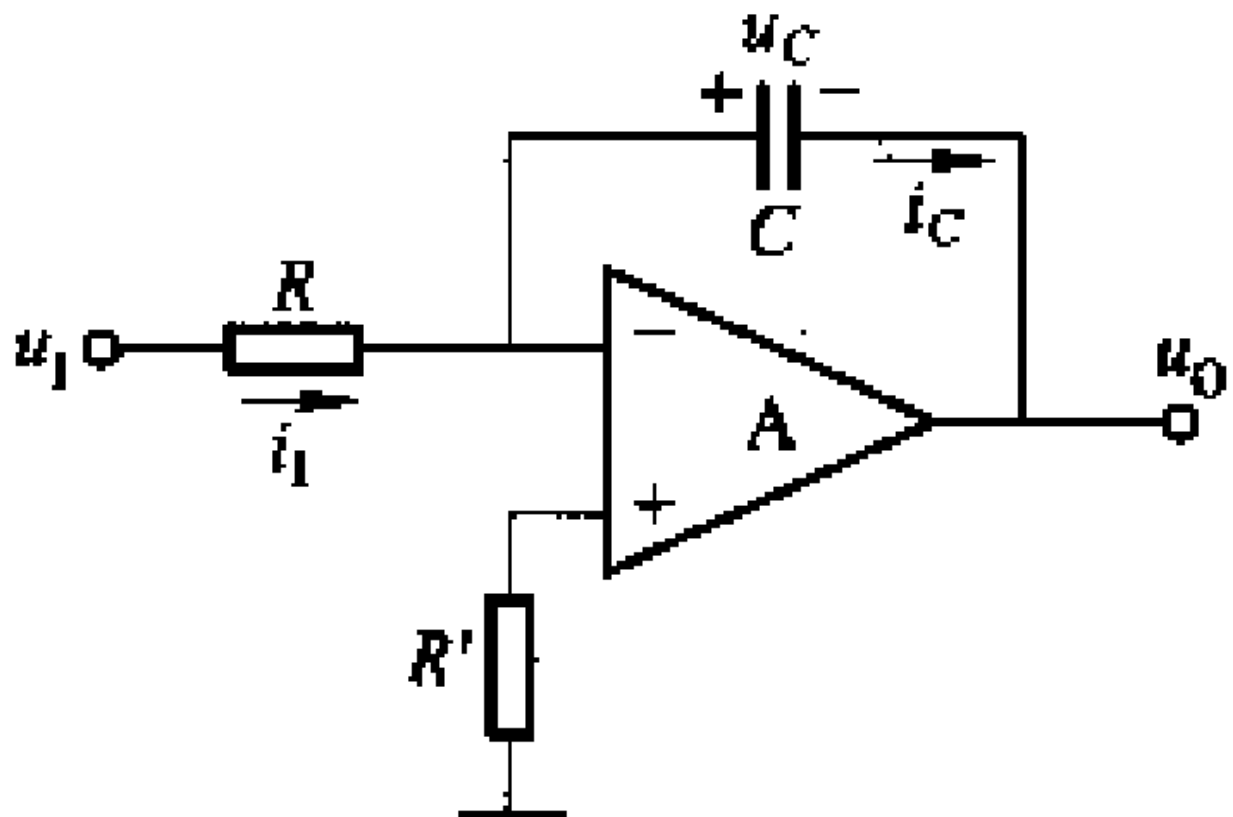
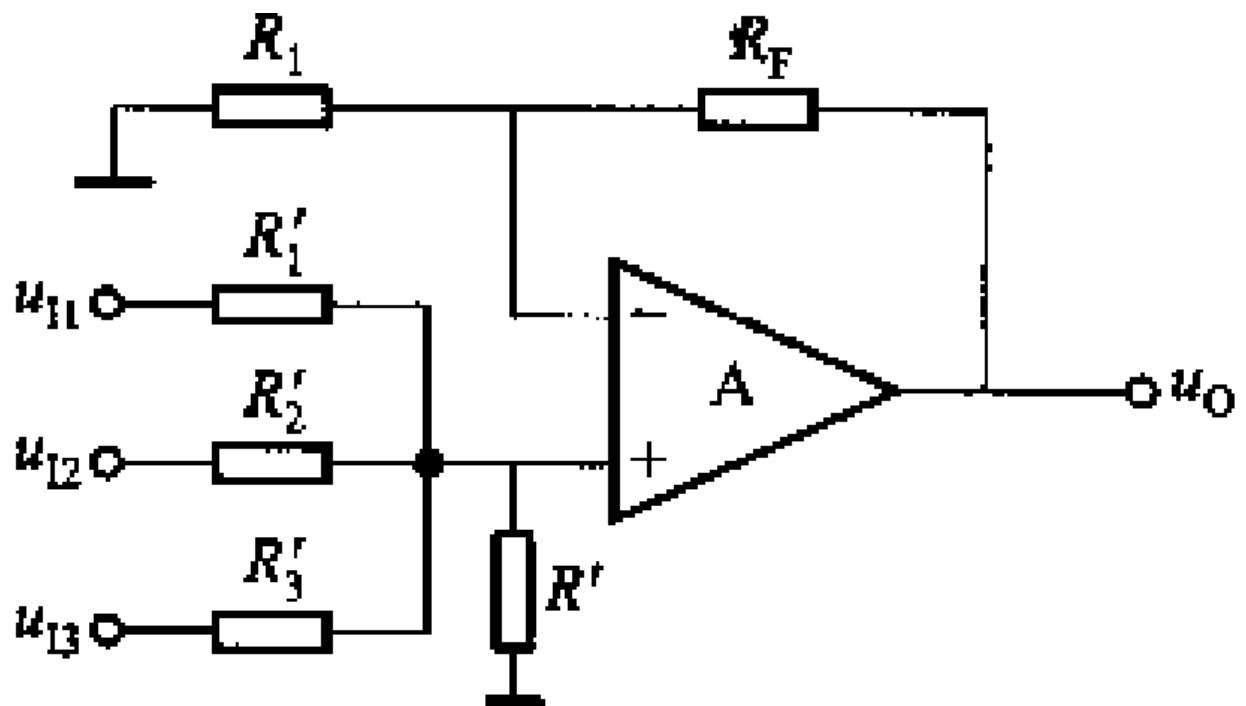
(b) 同相输入



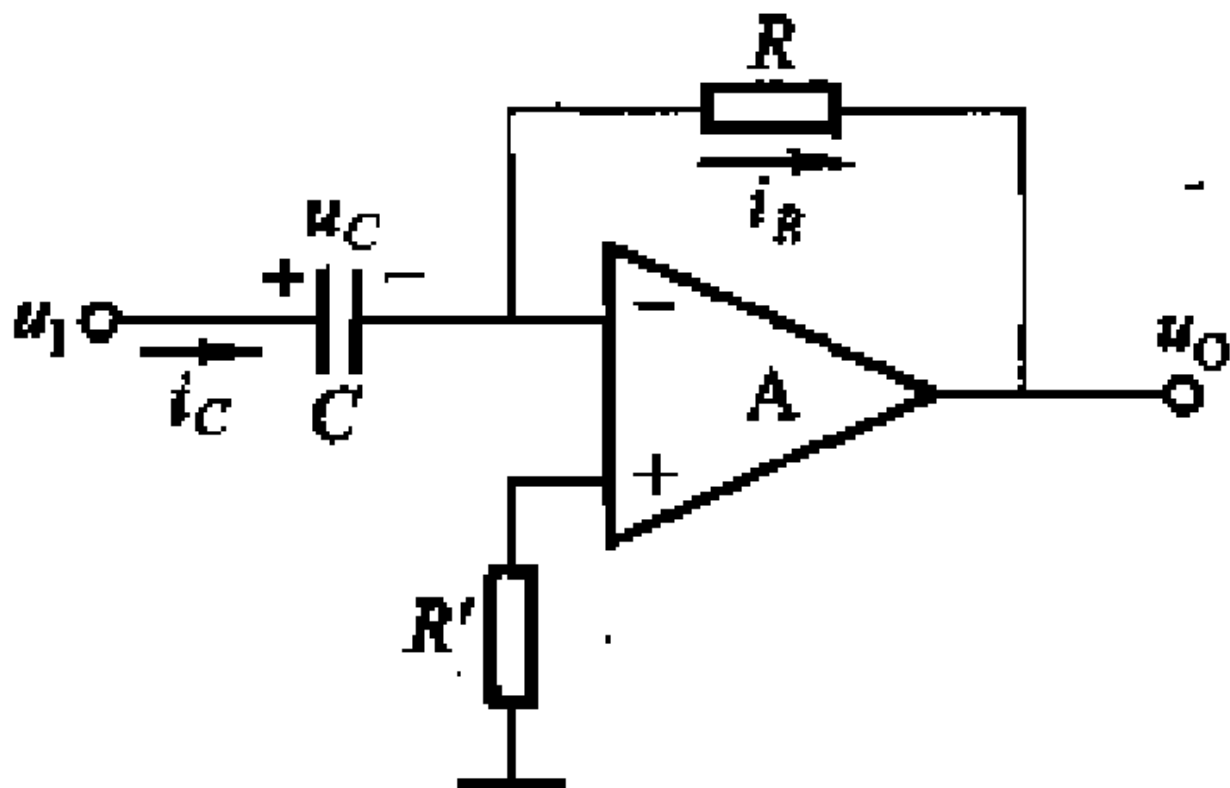
(c) 差分输入

反相比例和同相比例中 $R_2 = R_1 // R_F$, 差分比例中 $R_1 = R'_1, R_F = R'_F$





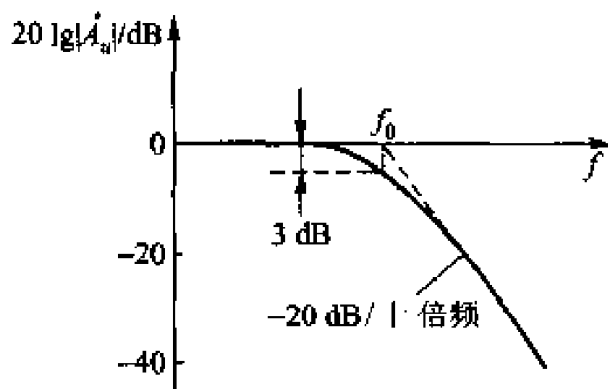
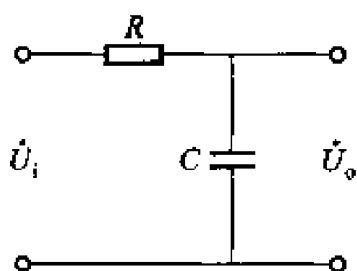
积分电路 $U_1/R + C \frac{dU_O}{dt} = 0$



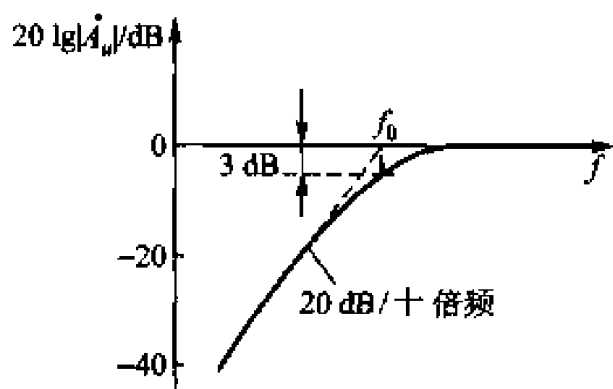
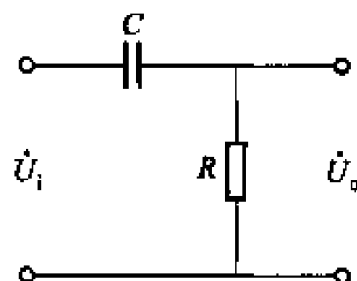
信号处理电路

有源滤波器

1. 低通: RC 串联, 从 C 输出
2. 高通: RC 串联, 从 R 输出
3. 带通 = 低通 + 高通
4. 带阻 = 低通 + 高通



(a) RC 低通电路



(b) RC 高通电路

RC 串联, R 上是高通, C 上是低通。 $f_T = \frac{1}{2\pi RC}$

- 高通: $f < f_T$, 20dB/十倍频 达到零; $0.1f_T < f < 10f_T$, 90° 开始 -45° /十倍频 达到 0°
- 低通: $f > f_T$, 零开始 $-20\text{dB}/十倍频$; $0.1f_T < f < 10f_T$, 0° 开始 -45° /十倍频 达到 -90°

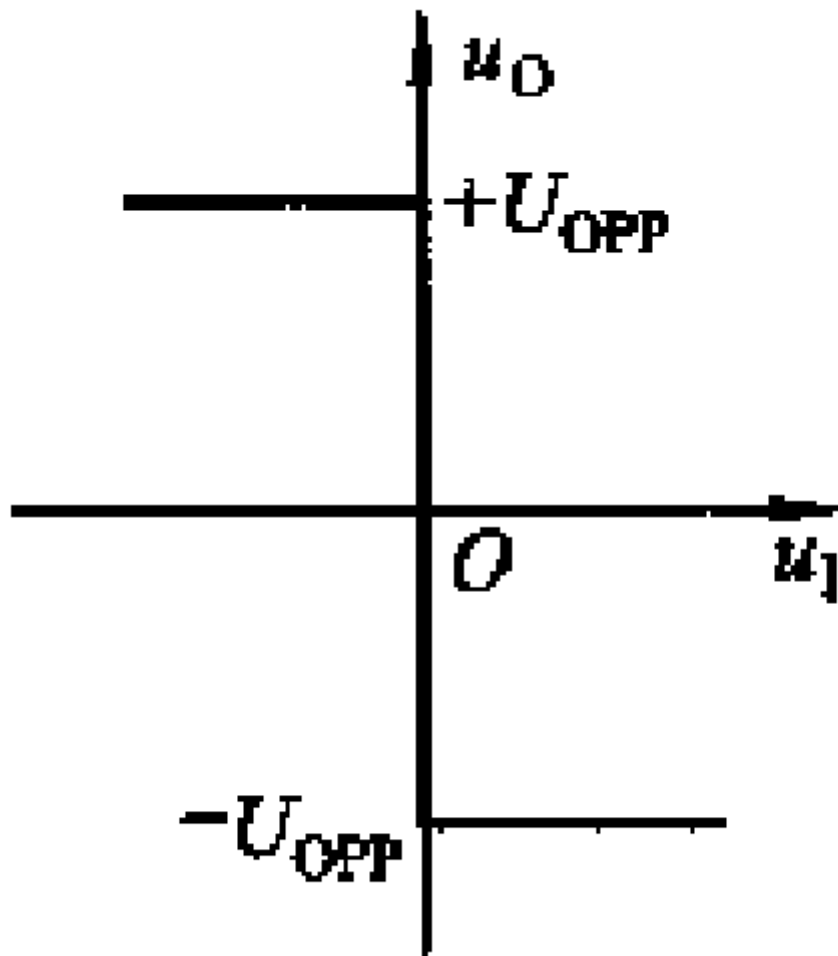
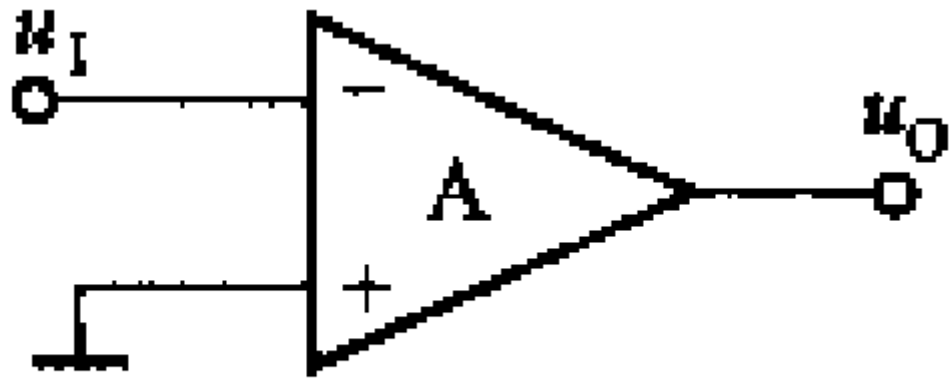
电压比较器

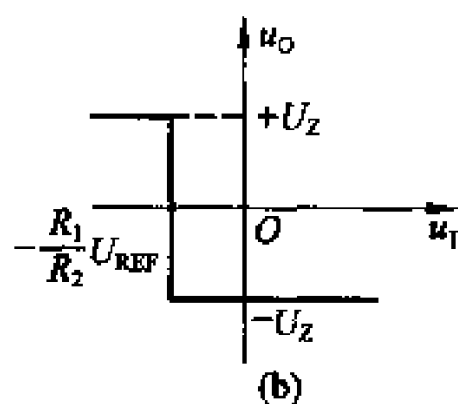
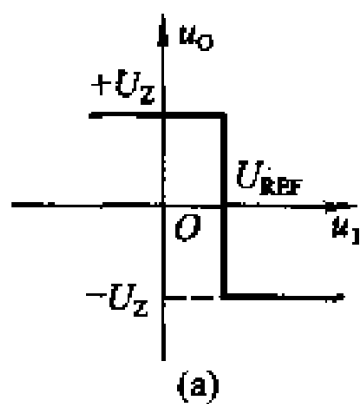
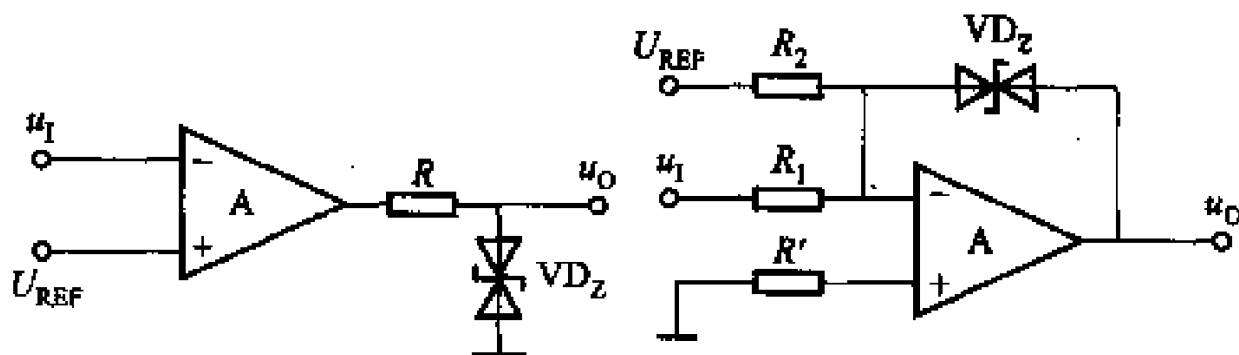
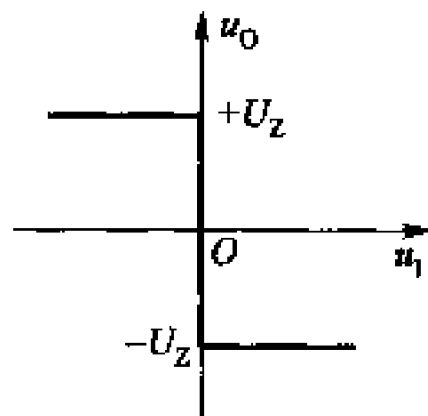
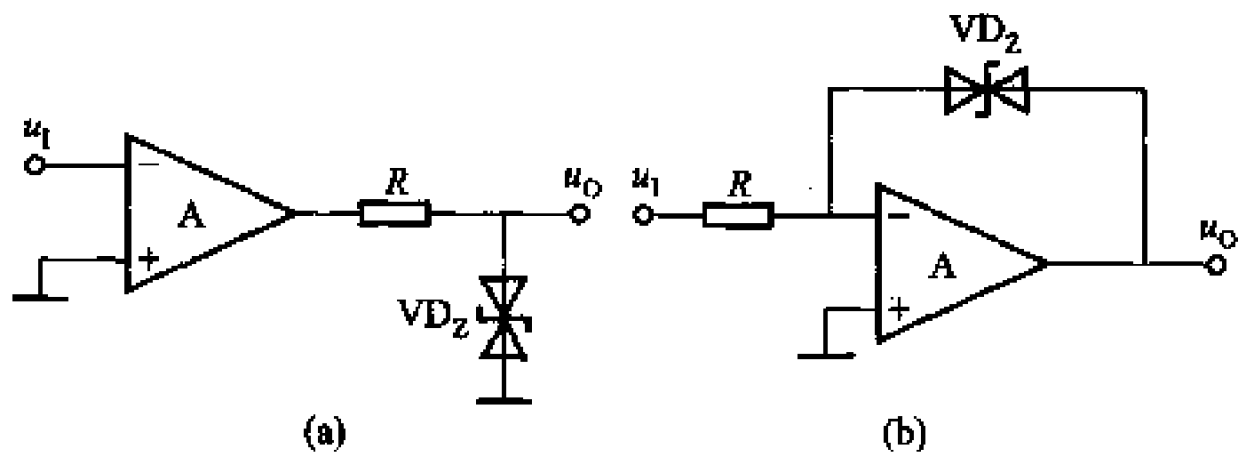
- 电压比较器工作在理想运放的非线性区

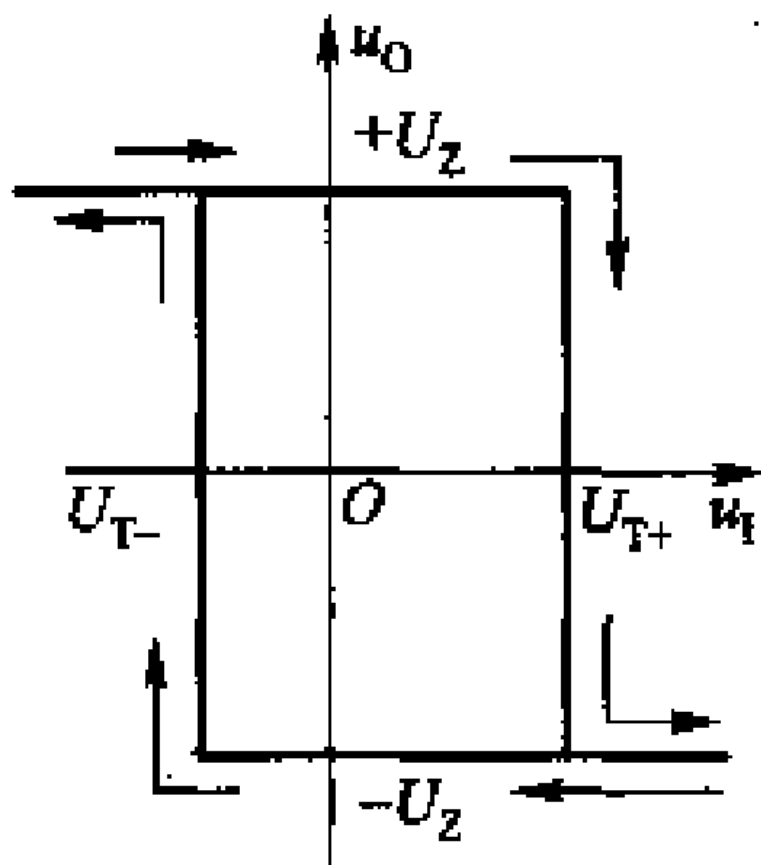
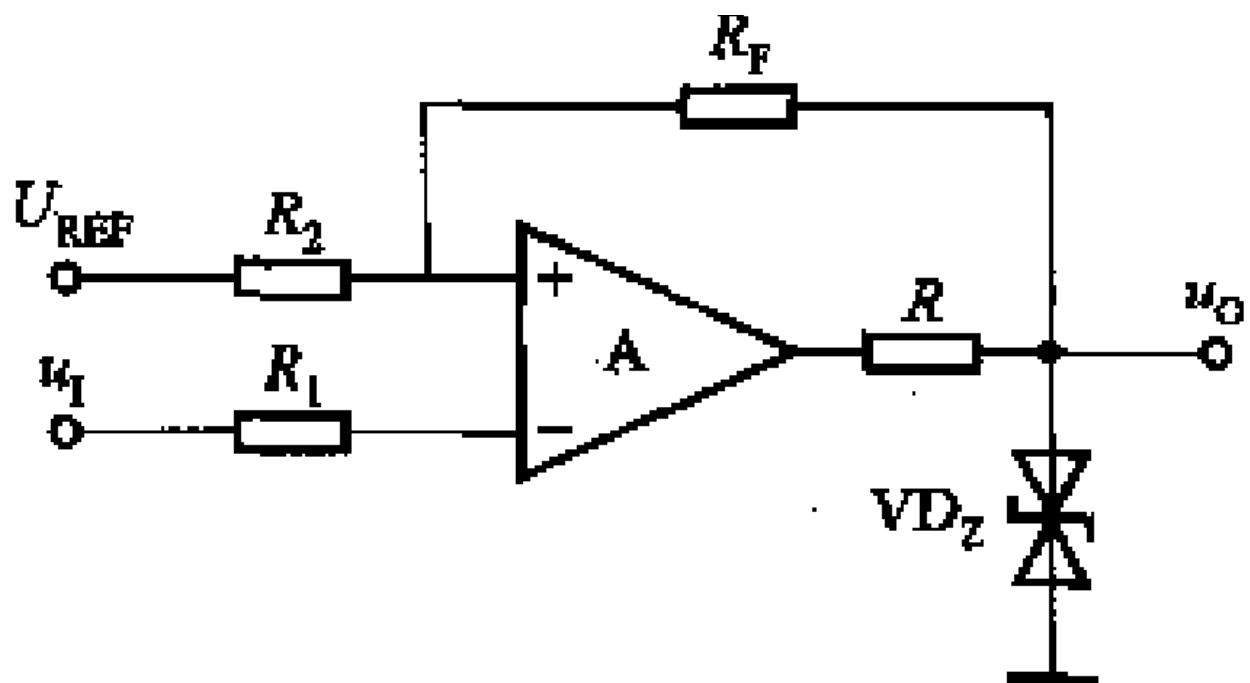
按照上交郑老师的说法, 先分析临界点, 再分析两边的情况。实际上, 应该记住两边的趋势 (看清楚是不是负端输入), 然后直接看临界点 ($U_+ = U_-$)

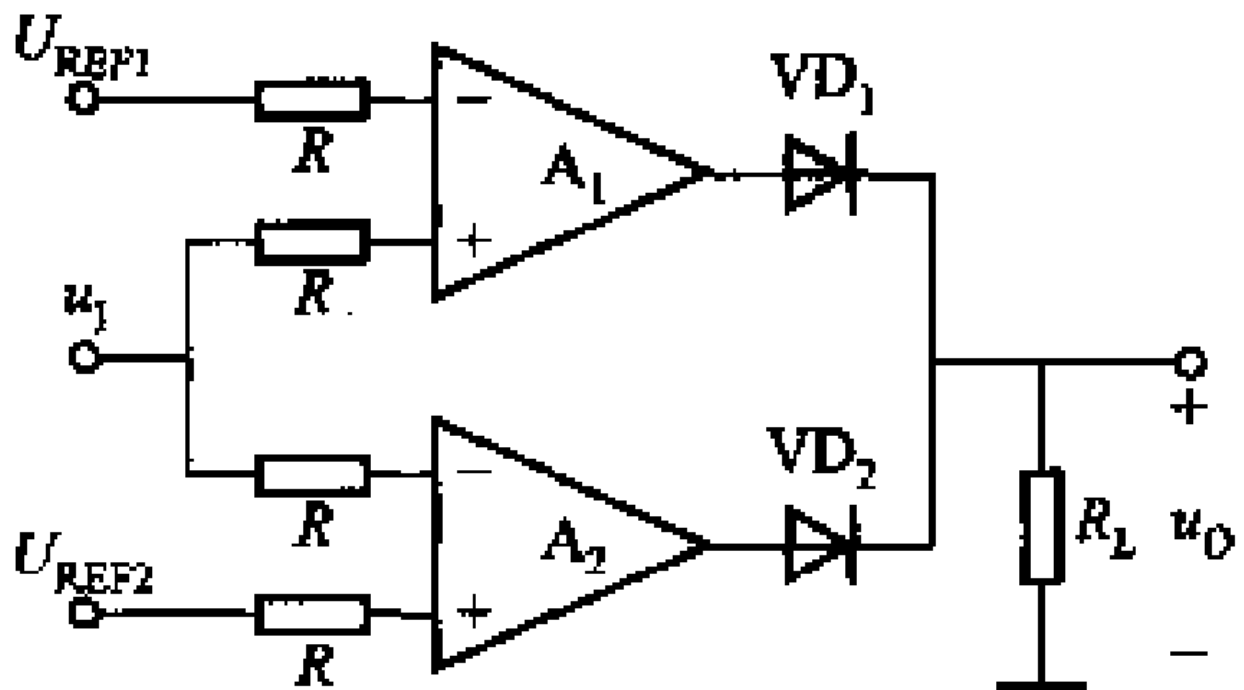
1. 过零比较器 (输入负输出正)、单限比较器 (抗干扰能力差)
2. 滞回比较器: 算临界点的时候不用纠结具体的过程, $\pm U_Z$ 各算一个就行了
3. 双限比较器: 临界点就是两个参考电压

注意, 为了避免混淆, 电压比较器我只贴出了反向端输入的 (除了双限比较器)。

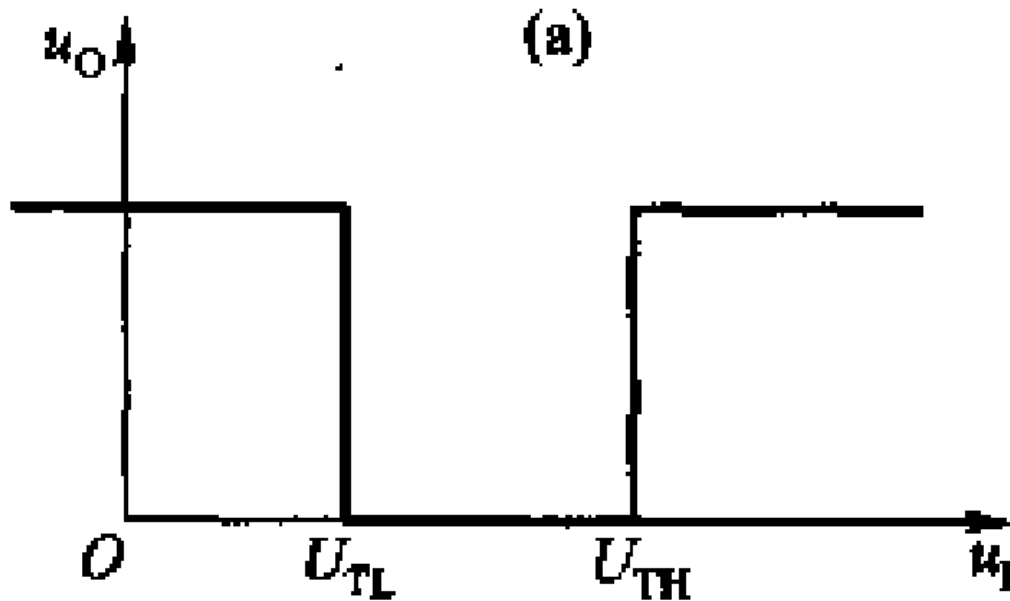








(a)



(b)

波形发生电路

分析方法

条件

- 起振: $|\dot{A}\dot{F}| > 1$ 且 $\varphi_A + \varphi_F = \pm 2n\pi$
- 稳幅: $|\dot{A}\dot{F}| = 1$ 且 $\varphi_A + \varphi_F = \pm 2n\pi$

如何判断给定电路是否满足相位条件：瞬时极性法

断开反馈回路，加入输入信号 \dot{U}_i ，分析此时 \dot{U}_i 和 \dot{U}_f 的相位关系，若输入的和反馈回来的同极性则满足相位条件

- 注意， φ_A 只是放大电路的相位差，往往此时放大电路是一个理想运放，则 $\varphi_A = 0$ or 180°
 - 如果是三极管，则通常是共基（E 输入，C 输出）或共射（B 输入、C 输出）
 - 判断是共基还是共射：反馈接到 E (B) 就是 共基（共射）
 - 先判断是否满足相位条件（ $\varphi_A + \varphi_F$ ），再判断 φ_A ，最后算 φ_F
- \dot{U}_f 说的只是正反馈部分
- 这只是相位条件，判断完后不要得意忘形，还要判断幅值条件。你可能会说，我理想运放放大能力很强，幅值条件怎么会不满足？请注意，在深度负反馈情况下，放大电路的放大系数由负反馈系数决定
- 瞬时极性法里面一些电压关系的背后是电流，从这一点出发有时候很清楚

电路组成

放大 \rightarrow 选频 \rightarrow 正反馈 \rightarrow 稳幅

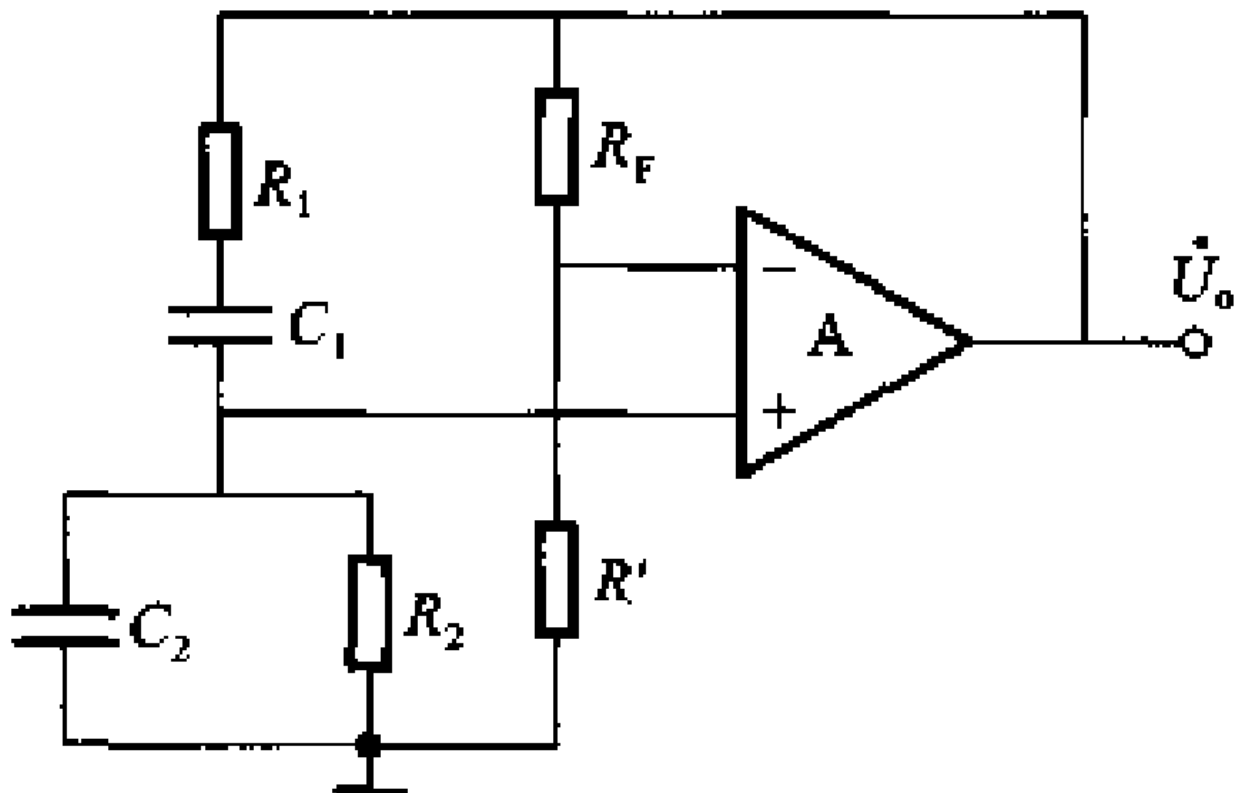
RC 振荡（低频）

RC 串并联网络

- 事一个带通滤波器
- 从 RC 并联那里输出
- $\dot{F} = \frac{1}{3+j[\omega CR - \frac{1}{\omega CR}]} \Rightarrow \omega = \omega_0 \equiv \frac{1}{RC}$ 时 $\dot{F}_{\max} = \frac{1}{3}$, $\varphi_F = 0$
- $-90^\circ < \varphi_F < 90^\circ$

文氏电桥

- RC 串并联网络正反馈 从 + 输入端输入，作用：选频
- 电阻串联负反馈 从 - 输入端输入，作用：改善振荡波形、减小放大电路对选频特性的影响、提高振荡电路的带负载能力
- $f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$
- 起振 $|\dot{A}\dot{F}| > 1 \Rightarrow R_F > 2R'$ （也就是说反馈电阻、离地远的那个电阻更大！）



$$(R_1 = R_2, C_1 = C_2)$$

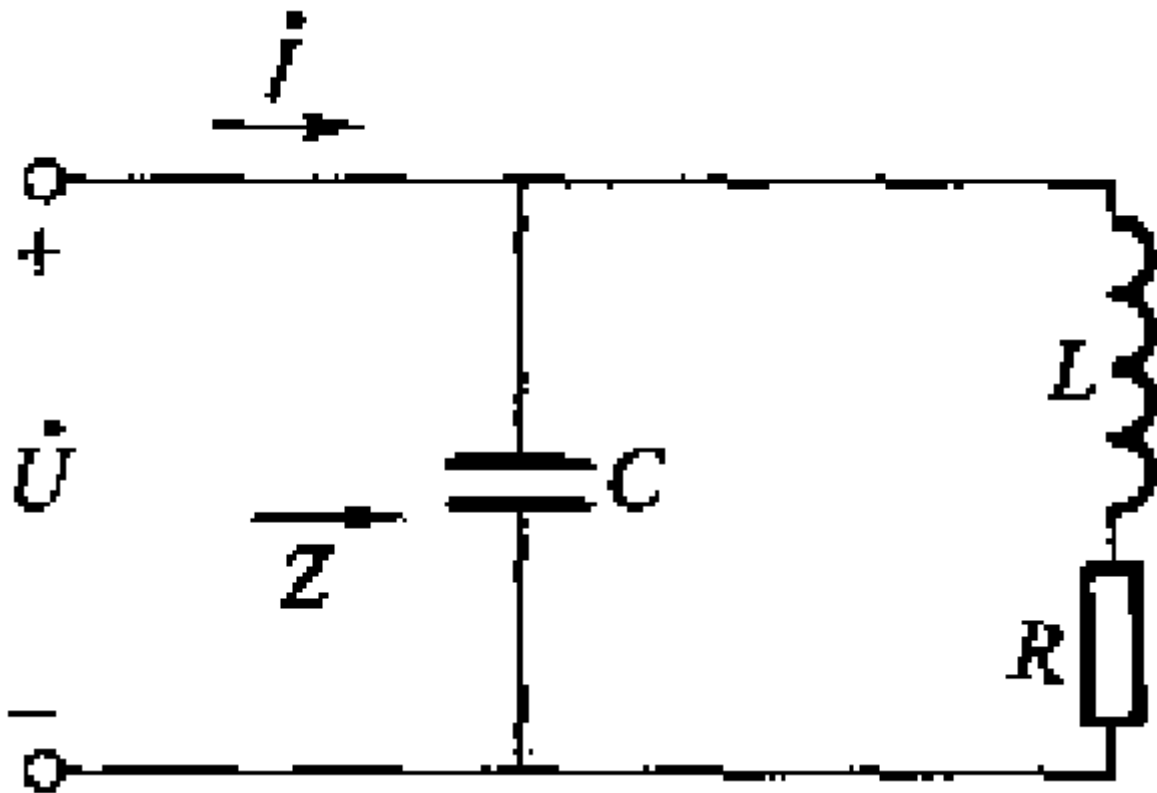
RC 移相式振荡电路

- 一节 RC 电路的移相范围是 $0 \sim 90^\circ$

LC 振荡（高频）

LC 并联电路

- $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$, 想清楚谁是 L , 谁是 C , 因为可能存在电感的串并联、电容的串并联、互感
- $Q = \frac{\omega_0 L}{R}$

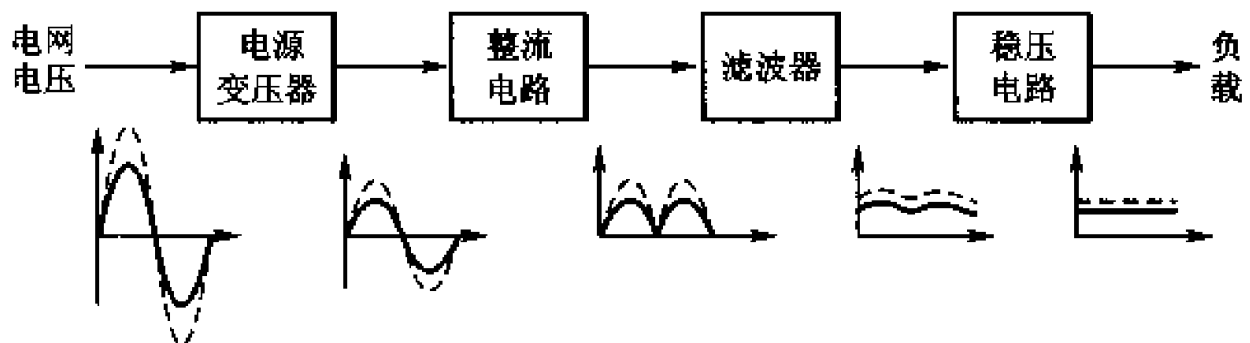


1. 变压器反馈式
2. 电感三点式
3. 电容三点式

• 可能是: $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_1+L_2+2M)C}}$, $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L\frac{C_1C_2}{C_1+C_2}}}$, $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_3}}$

直流电源

四个部分: 变压 (幅值变小) → 整流 (有正有负变为全正) → 滤波 (过滤脉动值、提高平均值) → 稳压 (使得负载变化时电压保持稳定)



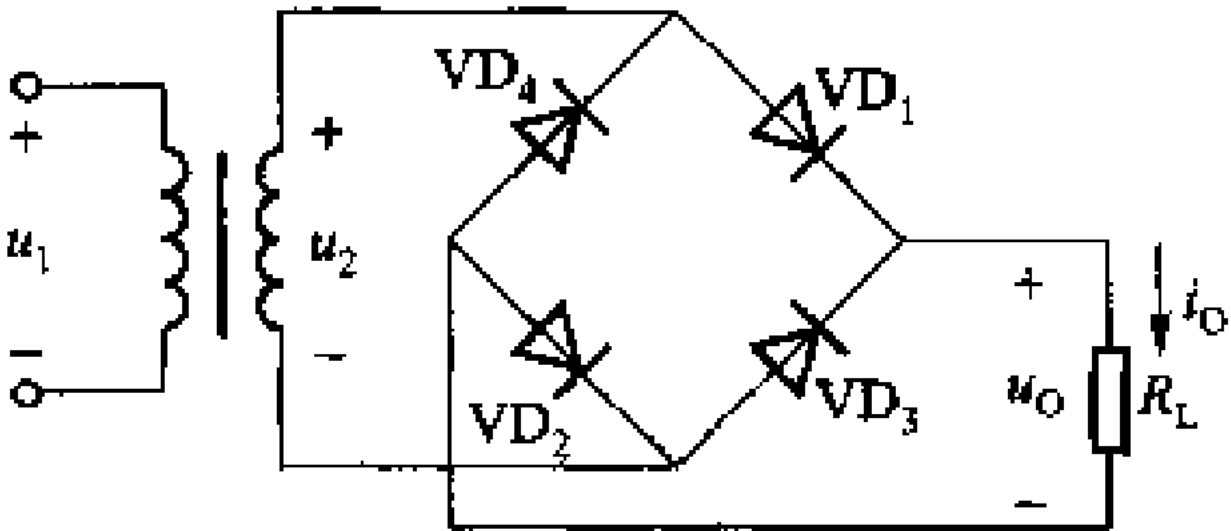
单相整流

直接利用二极管的单向导电性整流。

1. 单相半波整流电路: 一个二极管
2. 单相全波整流电路: 两个二极管
3. 单相桥式整流电路: 四个二极管

	输出直流电压 $U_{O(AV)}$	脉动系数 $S = \frac{U_{O1m}}{U_{O(AV)}}$	二极管正向平均电流 $I_{D(AV)}$	二极管最大反向峰值电压 U_{RM}
半波	$0.45U_2$	1.57	I_0	$\sqrt{2}U_2$
桥式	$0.9U_2$	0.67	$I_0/2$	$\sqrt{2}U_2$

缺单相半波整流电路和单相全波整流电路的电路图



滤波

1. 电容滤波（负载并上电容）

- 桥式整流时： $R_L C \geq (3 \sim 5) \frac{T}{2}$, $U_{O(AV)} \approx 1.2U_2$
- 小电流负载
- 整流二极管中将流过较大的冲击电流

	负载开路（滤波时电压不下降）	正常工作（整流 + 滤波）	电容开路（仅整流）	一个二极管开路	一个二极管开路 + 电容开路（半波整流）
$\frac{U_{O(AV)}}{U_2}$	$\sqrt{2}$	1.2	0.9	0.6 ~ 0.9	0.45

2. 电感滤波（负载串上电感）

- 直流流过电感没有损失，交流电源全部落在电感上
- 大电流负载
- 整流二极管冲击电流小

3. 复式滤波

- LC 滤波
- LC - II 型滤波：在桥式整流和 LC 滤波之间并一个电容

3. RC - II 型滤波: LC - II 型滤波 的电感换成电阻

	$U'_{O(AV)}/U_2$	使用场合	整流二极管冲击电流	外特性 (?)
电容滤波	1.2	小电流	大	软
电感滤波	0.9	大电流	小	硬
LC 滤波	0.9	适应性较强	小	硬
LC - II 型滤波	1.2	小电流	大	软
RC - II 型滤波	1.2	小电流	大	更软

如何记忆? 记住前两列和前两行

