

# 第八讲：总复习

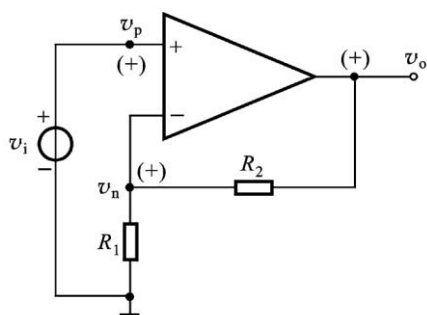
## 一、 运算放大器

### 【主要内容】

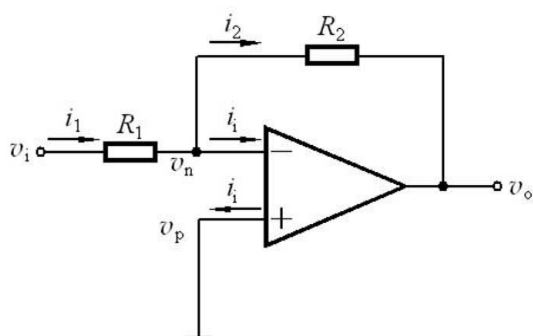
1. 掌握理想运放的理想化条件（虚短和虚断）
2. 掌握同相放大、反相放大、求和电路、求差电路的分析分析方法

### 【知识梳理】

- 虚短： $v_p \approx v_n$  虚断： $i_p \approx i_n \approx 0$
- 两种基本放大电路

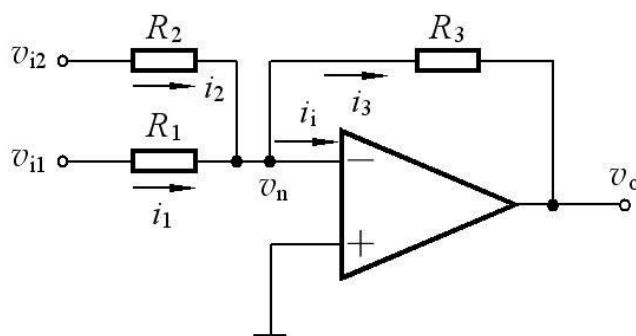


同相放大电路  $A_v = 1 + R_2/R_1$



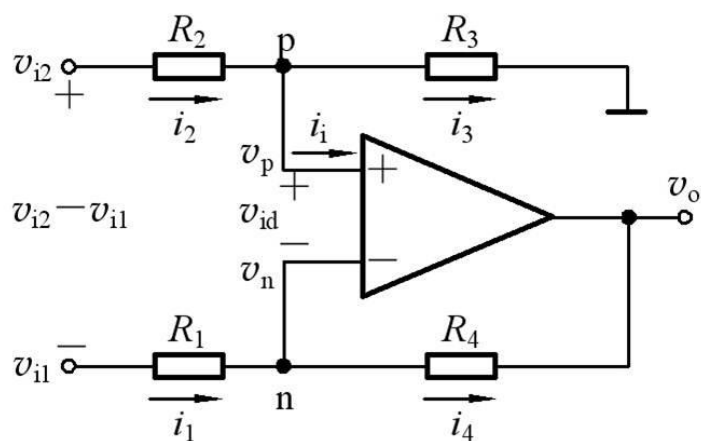
反相放大电路  $A_v = -R_2/R_1$

- 求和电路



$$A_v = -\frac{R_3}{R_1}v_{i1} - \frac{R_3}{R_2}v_{i2}$$

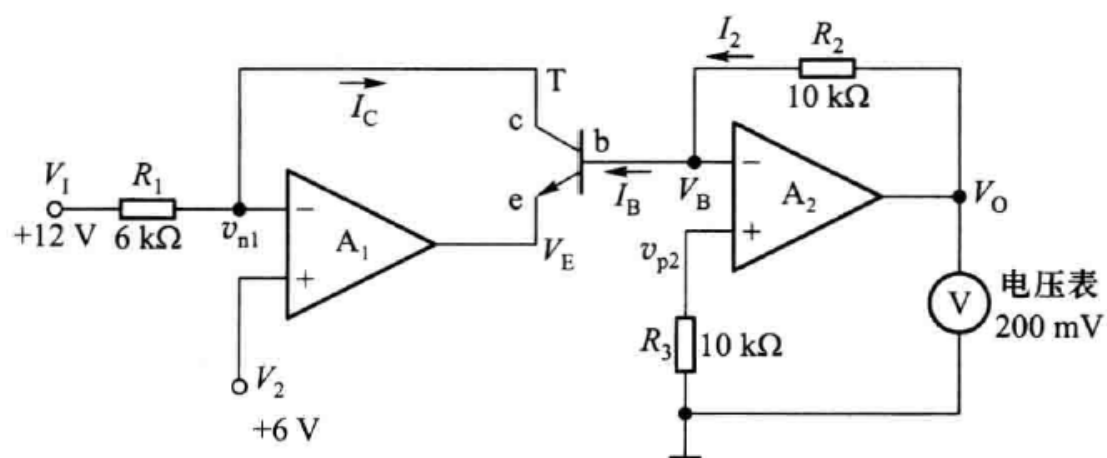
• 求差电路



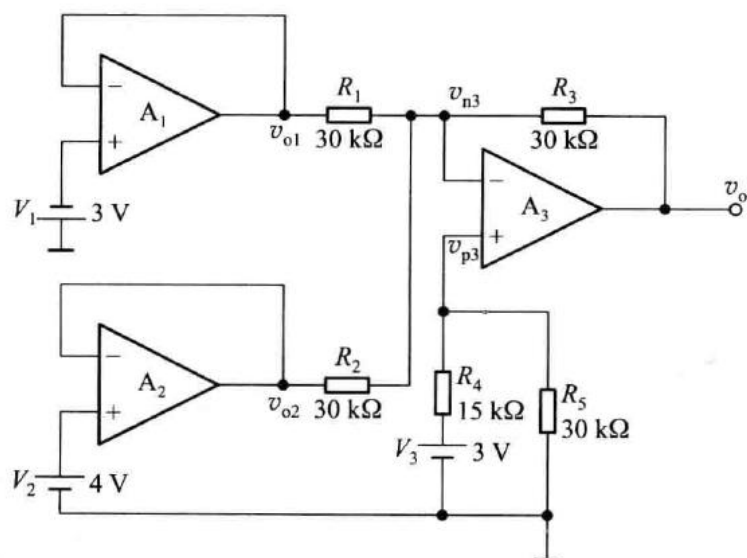
$$A_{vd} = \frac{R_4}{R_1}$$

【习题详解】

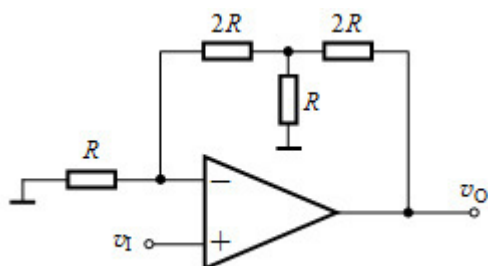
【例1-1】 电路如图所示，设运放是理想的，三极管 T 的  $V_{BE} = V_B - V_E = 0.7V$ 。(1) 求三极管的 c、b、e 各极的电位值；(2) 若电压表的读数为  $200mV$ ，试求三极管电流放大系数  $\beta = I_C/I_B$  的值。



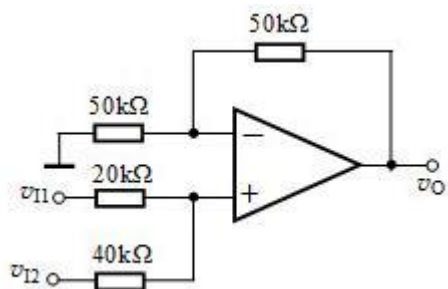
【例1-2】 电路如图所示，设运放是理想的，试求 $v_{o1}$ 、 $v_{o2}$ 及 $v_o$ 的值。



【例1-3】 电路如图所示，设运放理想，则 $v_o = f(v_i) = \underline{\hspace{2cm}}$ 。



【例1-4】 理想运算放大电路如图，求 $v_o = f(v_{i1}, v_{i2}) = \underline{\hspace{2cm}}$ 。



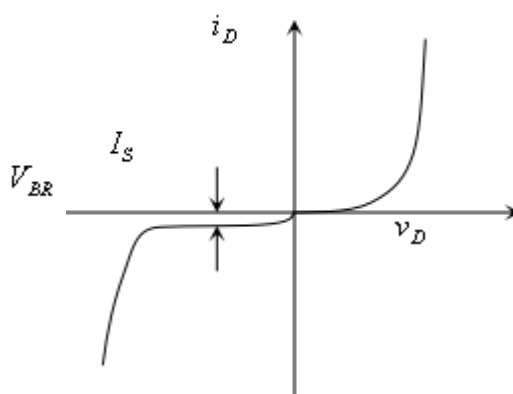
## 二、 二极管及其基本电路

### 【主要内容】

1. 掌握杂质半导体的基础知识及相关概念（多子、少子、P 型、N 型半导体）
2. 掌握晶体二极管的基本特性及其直流模型（理想模型和恒压降模型）
3. 掌握二极管（包括稳压二极管）组成电路的分析方法

### 【知识梳理】

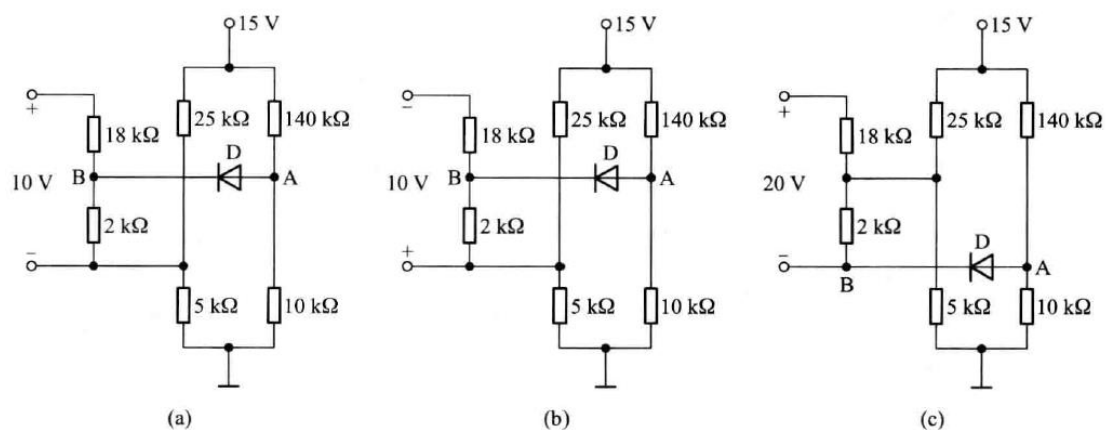
- 杂质半导体分为 P(positive)型与 N(negative)型，在 P 型半导体中，空穴是多数载流子，N 型半导体中则电子是多数载流子。
- 二极管的基本特性：正向导通，反向截止



- 理想模型：正向导通时，二极管视作一根导线；  
恒压降模型：存在一开启电压  $V_D$ ，当二极管两端电压达到开启电压时导通，且压降恒为该电压值。
- 稳压二极管：工作于反向击穿状态，存在一反向击穿电压  $V_Z$ ，当稳压管两端电压达到反向击穿电压时击穿，且反向压降恒为该电压值。
- 二极管电路分析方法：先假设二极管断开，求出其两个端点的电位值，比较两端电位差，再根据不同模型进行分析。

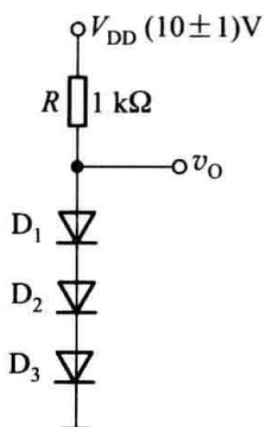
## 【习题详解】

【例 2-1】试判断图中二极管是导通还是截止，为什么？设二极管是理想的。

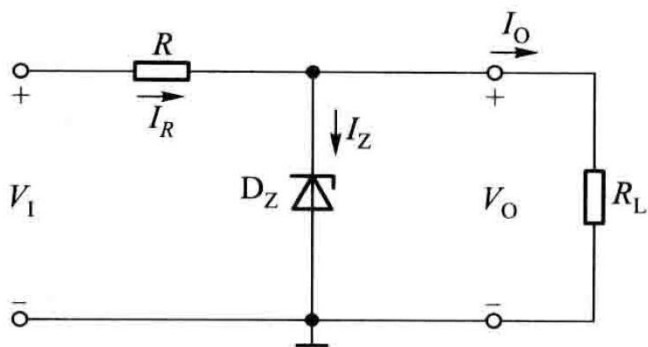


【例 2-2】低压稳压电路如图所示，(1)利用硅二极管恒压降模型求电路的 $I_D$ 和 $v_o$  ( $V_D = 0.7V$ )；

(2) 室温下，利用硅二极管小信号模型求 $v_o$ 的变化范围。



【例 2-3】稳压管如图所示，若  $V_1 = 10V$ ， $R = 100\Omega$ ，稳压管的  $V_Z = 5V$ ， $I_{Z(min)} = 5mA$ ， $I_{Z(max)} = 50mA$ ，问：(1) 负载  $R_L$  的变化范围；(2) 稳压电路的最大输出功率  $P_{OM}$  是多少？(3) 稳压管的最大耗散功率  $P_{ZM}$  和电阻  $R$  上的最大耗散功率  $P_{RM}$  是多少？



### 三、 场效应管及其放大电路

#### 【主要内容】

1. 掌握场效应管的各种类型的特性
2. 掌握场效应管的工作原理，能够判断场效应管的工作状态（估算法）
3. 掌握场效应管放大电路直流工作点的计算（会画直流通路）
4. 掌握场效应管三种组态交流指标的分析计算（会画交流通路和小信号等效电路）

#### 【知识梳理】

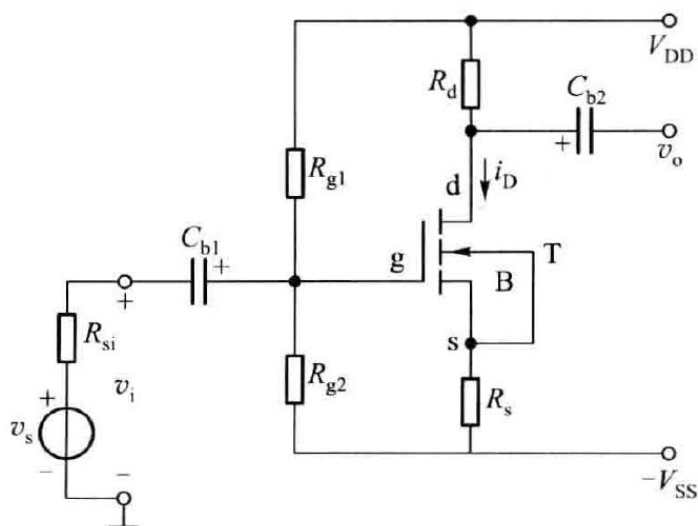
	N 沟道		P 沟道	
	增强型 MOSFET	耗尽型 MOSFET	增强型 MOSFET	耗尽型 MOSFET
电路符号				
输出特性				
转移特性				

注:图中的  $V_T$ 、 $V_P$  依据 N 沟道和 P 沟道不同,严格说应分别为  $V_{TN}$ 、 $V_{TP}$  和  $V_{PN}$ 、 $V_{PP}$ 。

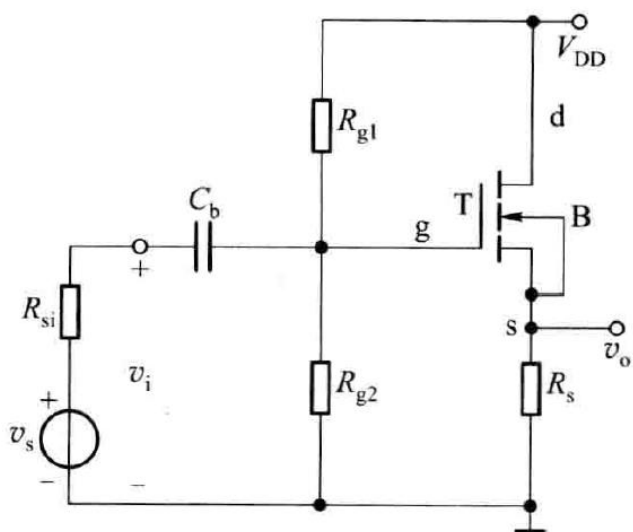
- 可变电阻区与放大区判断方法：先假定 MOS 管工作在饱和模式，由直流通路写出外电路  $v_{GS}$  与  $I_D$  之间的关系式，再利用饱和区数学模型  $I_D = K_n(v_{GS} - V_{TN})^2$  联立解上述方程，选出合理的一组解。

## 【习题详解】

【例 3-1】电路如图, 已知 $R_d = 10k\Omega$ ,  $R_{si} = R_s = 0.5k\Omega$ ,  $R_{g1} = 165k\Omega$ ,  $R_{g2} = 35k\Omega$ ,  $V_{TN} = 0.8V$ ,  $K_n = 1mA/V^2$ , 场效应管输出电阻 $r_{ds} = \infty$ , 电路的静态工作点处 $V_{GS} = 1.5V$ 。试求其电压增益、源电压增益、输入电阻和输出电阻。(提示: 先根据 $K_n$ 、 $V_{GS}$ 和 $V_{TN}$ 求出 $g_m$ , 再求 $A_v$ )

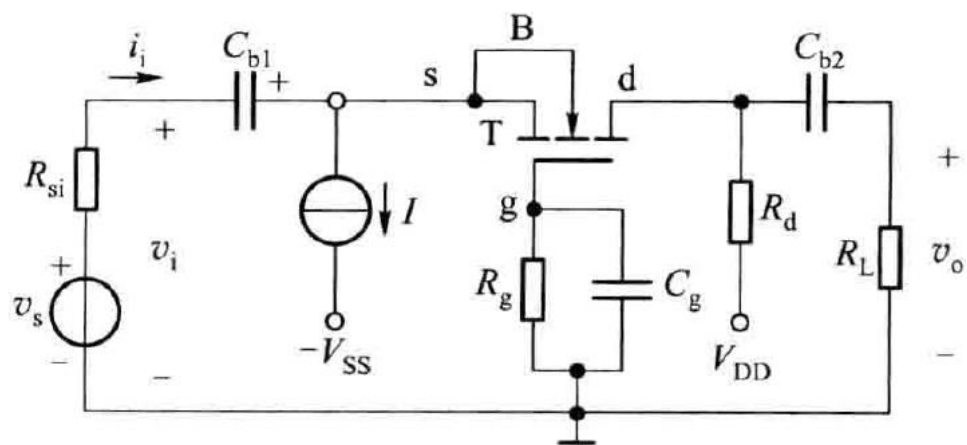


【例 3-2】电路如图, 设电路参数为 $V_{DD} = 12V$ ,  $R_{g1} = 150k\Omega$ ,  $R_{g2} = 450k\Omega$ ,  $R_s = 1k\Omega$ ,  $R_{si} = 10k\Omega$ 。场效应管参数为 $V_{TN} = 1.5V$ ,  $K_n = 2mA/V^2$ ,  $\lambda = 0$ 。试求 (1) 静态工作点Q; (2) 电压增益 $A_v$ 和源电压增益 $A_{vs}$ ; (3) 输入电阻 $R_i$ 和输出电阻 $R_o$ 。





【例 3-3】电路如图，设电路参数为 $I = 1\text{mA}$ ， $V_{DD} = V_{SS} = 5\text{V}$ ， $R_g = 100\text{k}\Omega$ ， $R_d = 10\text{k}\Omega$ ， $R_{si} = 1\text{k}\Omega$ ， $R_L = 1\text{k}\Omega$ 。场效应管参数为 $V_{TN} = 1\text{V}$ ， $K_n = 1\text{mA/V}^2$ ， $\lambda = 0$ 。试求（1）输入电阻 $R_i$ 和输出电阻 $R_o$ ；（2）电流增益 $A_{is} = i_o/i_s$ 。



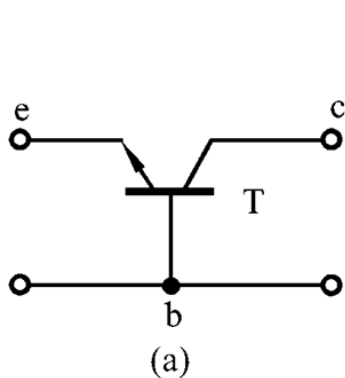
## 四、 双极结型三极管（BJT）及放大电路基础

### 【主要内容】

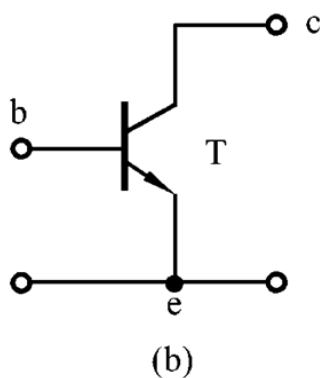
1. 掌握晶体三极管的工作原理，能够判断三极管的工作状态（估算法）
2. 掌握三极管放大电路直流工作点的计算（会画直流通路）
3. 掌握三极管三种组态交流指标的分析计算（会画交流通路和小信号等效电路）及电路特点
4. 掌握多级（二级）放大电路的直流工作点计算及交流指标的分析

### 【知识梳理】

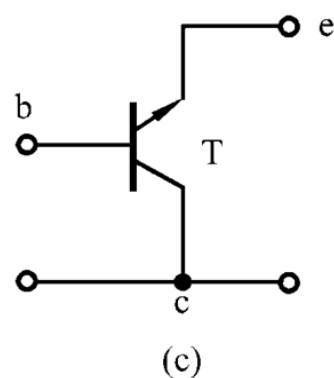
- 实现放大作用的外部条件：发射结正偏，集电结反偏
- 电流分配关系： $I_C = \beta I_B + I_{CEO} \approx \beta I_B$ ； $I_E = I_C + I_B \approx (1 + \beta)I_B$
- 静态分析：将电容开路，信号源短路，画出直流通路；利用 KCL、KVL 进行分析，计算得到 Q 点（ $I_{BQ}$ 、 $I_{CQ}$ 、 $V_{CEQ}$ ）
- 动态分析：将直流电源置零（电压源短路、电流源开路），电容短路，画出其交流通路；利用小信号等效模型画出小信号等效电路；利用 KCL、KVL 进行分析，计算得到交流参数（ $A_v$ 、 $R_i$ 、 $R_o$ ）
- 多级放大（以二级为例）： $A_v = A_{v1} \cdot A_{v2}$ ， $R_i = R_{i1}$ ， $R_o = R_{o2}$ 。
- 三种组态的判断



共基



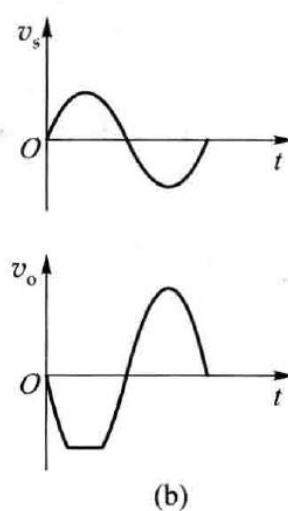
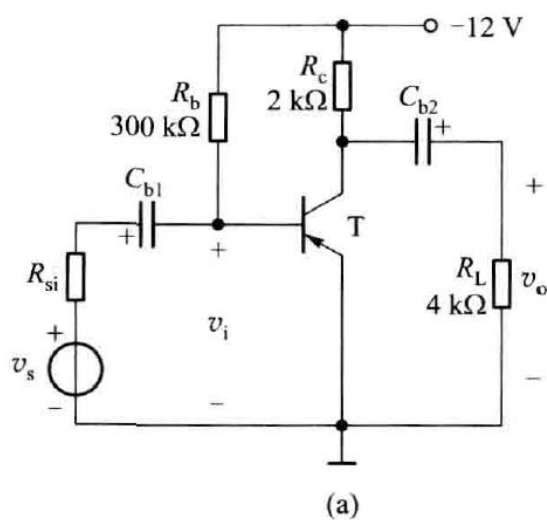
共射



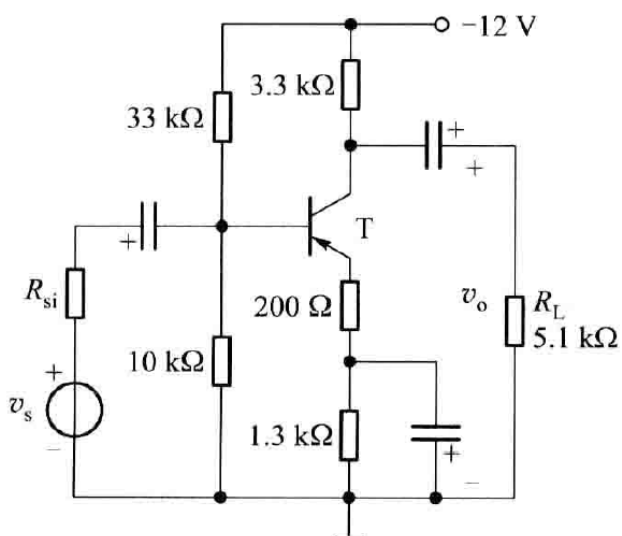
共集

### 【习题详解】

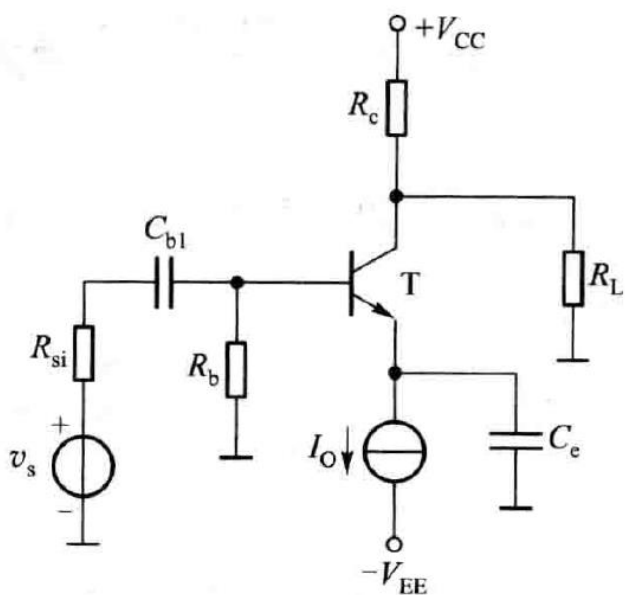
【例 4-1】电路如图，已知 BJT 的  $\beta = 100$ ,  $V_{BEQ} = -0.7V$ 。(1) 试估算该电路的 Q 点；(2) 画出小信号等效电路；(3) 求该电路的电压增益和输入输出电阻；(4) 若  $v_o$  中的交流成分出现图 b 所示失真现象，问是截止失真还是饱和失真？为消除此失真，应调整电路中的哪个元件？如何调整？



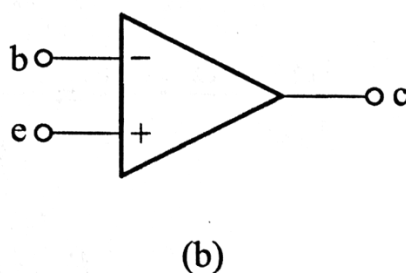
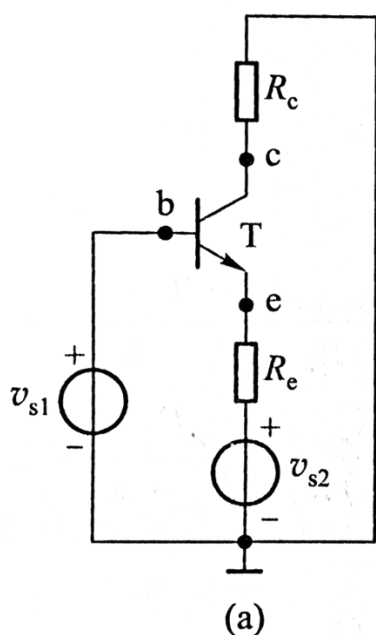
【例 4-2】电路如图，设信号源内阻 $R_{si} = 600\Omega$ ，BJT 的 $\beta = 50$ 。(1) 画出该电路的小信号等效电路；(2) 求该电路的输入电阻和输出电阻；(3) 当 $v_s = 15mV$ 时，求 $v_o$ 。



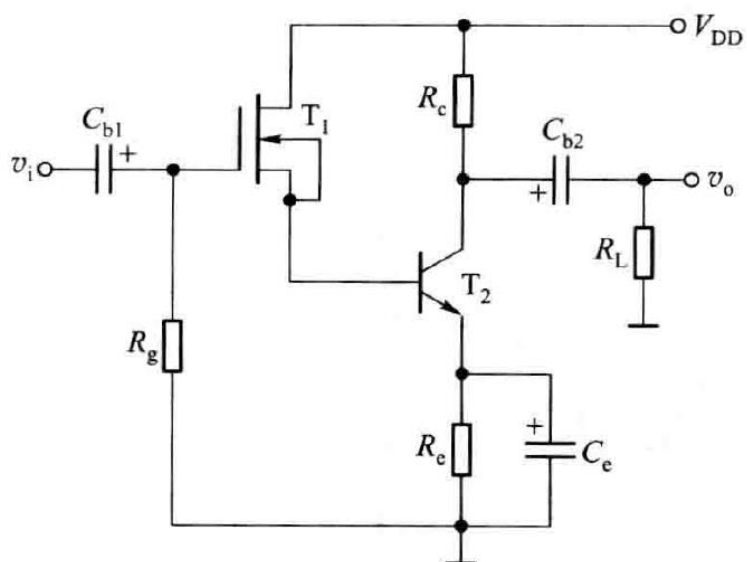
【例 4-3】电路如图，已知 $V_{CC} = V_{EE} = 12V$ ，电流源的 $I_O = 1mA$ ，BJT 的 $\beta = 100$ ， $V_{BEQ} = 0.6V$ ，电阻 $R_b = 110k\Omega$ ， $R_c = R_L = 10k\Omega$ ；(1) 求 $I_L$ 、 $I_{R_c}$ 及 Q 点；(2) 画出小信号等效电路；(3) 求电压增益、输入输出电阻。



【例 4-4】电路如图，BJT 的放大系数为 $\beta$ ，输入电阻为 $r_{be}$ ，略去了偏置电路。试求下列三种情况下的电压增益、输入电阻和输出电阻：(1)  $v_{s2} = 0$ ，从集电极输出；(2)  $v_{s1} = 0$ ，从集电极输出；(3)  $v_{s2} = 0$ ，从发射极输出。并指出上述 (1) (2) 两种情况的相位关系能否用图 b 来表示？符号“+”表示同相输入端，即 $v_c$ 和 $v_e$ 同相，而符号“-”表示反相输入端，即 $v_c$ 和 $v_b$ 反相。



【例 4-5】电路如图， 设 FET 的互导为  $g_m$ ，  $r_{ds}$  很大； BJT 的电流放大系数为  $\beta$ ， 输入电阻为  $r_{be}$ 。 (1) 画出该电路的小信号等效电路； (2) 说明  $T_1$ 、  $T_2$  各组成什么组态； (3) 求该电路的电压增益、 输入输出电阻。



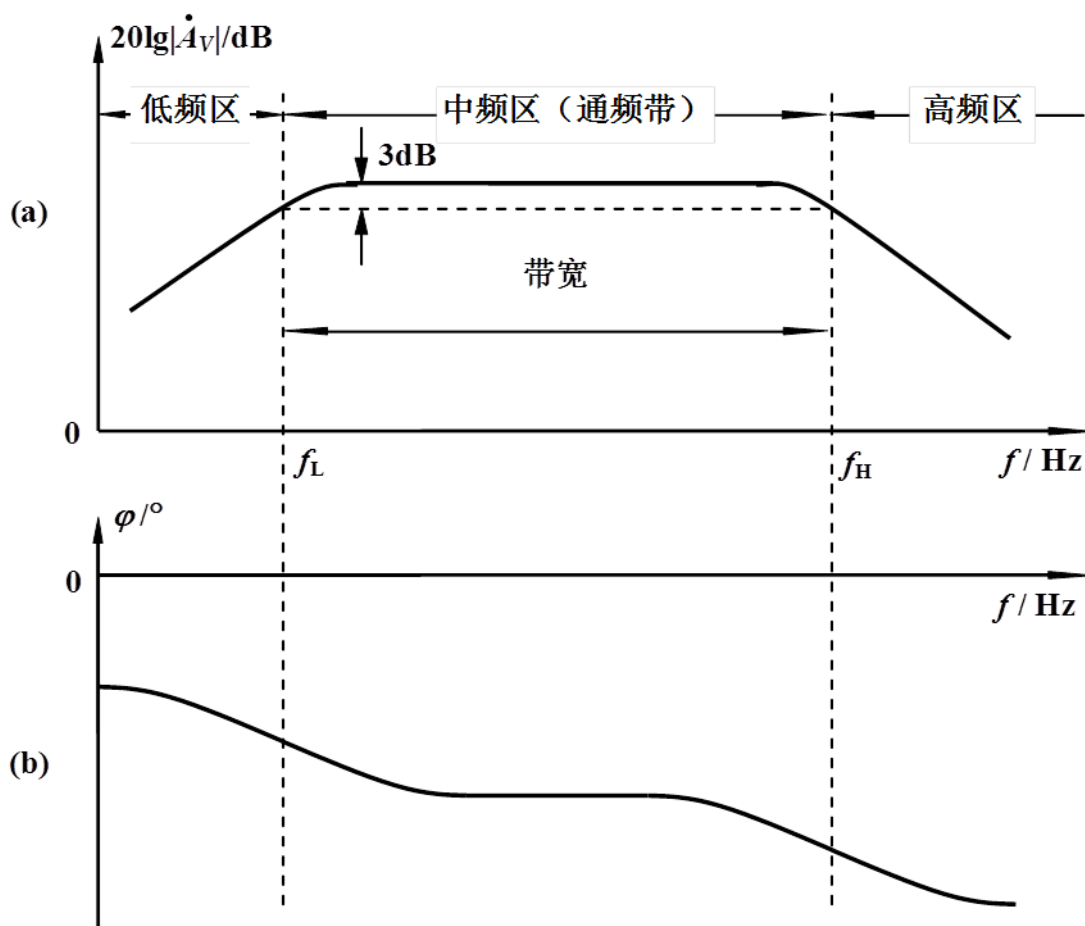
## 五、 频率响应

### 【主要内容】

1. 掌握单时间常数 RC 电路频率响应的基本概念及性质（上下限频率、带宽、相移角度）
2. 掌握放大电路低频与高频特性的影响因素
3. 掌握多级放大电路的通频带特性

### 【知识梳理】

- 频率响应的图像



- 在 $f_L$ 或 $f_H$ 上，电压增益下降到 $0.707|A_{vM}|$ ，即比中频电压增益小3dB
- 通频带宽 $BW = f_H - f_L \approx f_H$
- 影响低频的因素：耦合电容、旁路电容；  
影响高频的因素：极间电容、分布电容、负载电容。

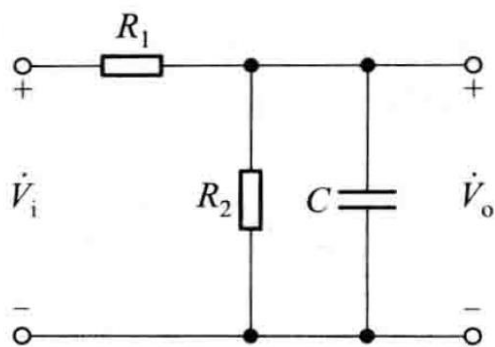
【习题详解】

【例 5-1】已知某放大电路电压增益的频率特性表达式为

$$A_v = \frac{100j\frac{f}{10}}{\left(1 + j\frac{f}{10}\right)\left(1 + j\frac{f}{10^5}\right)}$$

试求该电路的上、下限频率, 中频电压增益的分贝数, 输出电压与输入电压在中频区的相位差。

【例 5-2】电路如图, 设其中 $R_1 = 1k\Omega$ ,  $R_2 = 10k\Omega$ ,  $C = 3pF$ 。试求该电路: (1) 是高通还是低通电路? (2) 电压增益的表达式及其最大值; (3) 转折频率的大小。





## 六、 模拟集成电路

### 【主要内容】

1. 掌握镜像电流源电路的构成特点
2. 掌握差模信号和共模信号的定义及物理意义
3. 掌握零点漂移产生的原因及抑制零点漂移的原理
4. 掌握差分放大电路交直流分析方法

### 【知识梳理】

- 镜像电流源的特点：电流稳定，直流电阻小，交流输出电阻很大。
- 零点漂移：当放大电路的输入端短路时，输出端还有缓慢变化的电压产生。

抑制方法：采用差分放大电路；引入直流负反馈；温度补偿

- 差模信号与共模信号： $v_{id} = v_{i1} - v_{i2}$ ， $v_{ic} = (v_{i1} + v_{i2})/2$

差模电压增益

$$A_{vd} = \frac{v_{od}}{v_{id}}$$

共模电压增益

$$A_{vc} = \frac{v_{oc}}{v_{ic}}$$

共模抑制比

$$K_{CMR} = \frac{A_{vd}}{A_{vc}}$$

反映了电路抑制零点漂移的能力

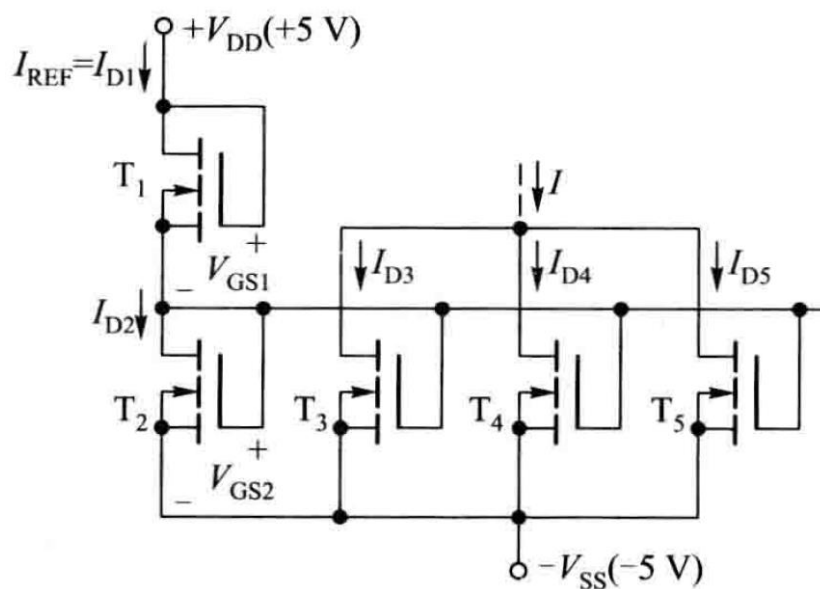
- 分析方法：参考课本上表格；

在实际的计算中，比较题目中电路与标准电路的区别，然后在公式的相应部分进行变换。

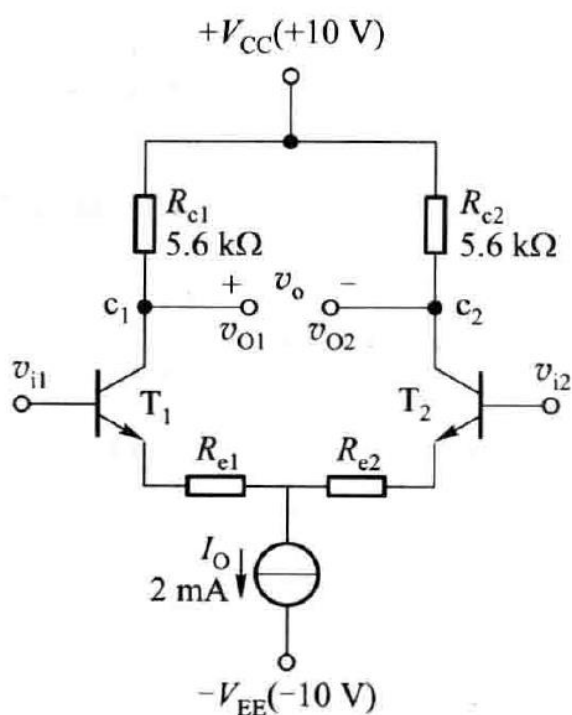
（注意对公式的理解，分清双端输出、单端输出，以及双端输入、单端输入）

【习题详解】

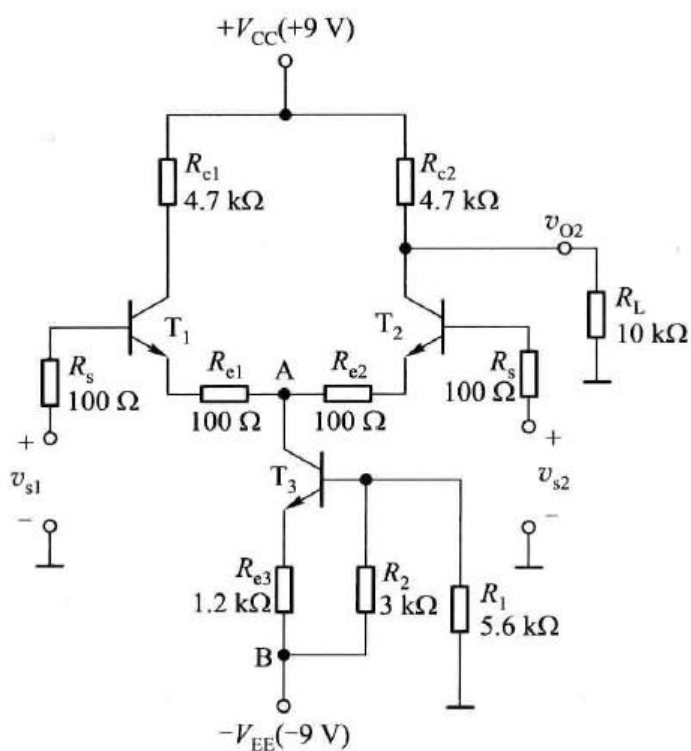
【例 6-1】电流源电路如图所示,  $V_{DD} = +5V$ ,  $-V_{SS} = -5V$ ,  $T_1 \sim T_5$  为特性相同的 NMOS 管,  $V_{TN} = 2V$ ,  $K_{n2} = K_{n3} = K_{n4} = K_{n5} = 0.25mA/V^2$ ,  $K_{n1} = 0.10mA/V^2$ ,  $\lambda_n = 0$ , 求  $I_{REF}$  和  $I$  的值。



【例 6-2】电路如图， $R_{e1} = R_{e2} = 100\Omega$ ，BJT 的  $\beta = 100$ ， $V_{BE} = 0.6V$ ，电流源动态输出电阻  $r_o = 100k\Omega$ 。(1) 当  $v_{i1} = -v_{i2} = 0.01V$  时，求输出电压  $v_o = v_{o1} - v_{o2}$ ；(2) 当  $c_1$ 、 $c_2$  间接入负载电阻  $R_L = 5.6k\Omega$  时，求  $v_o'$  的值；(3) 单端输出且  $R_L = \infty$  时， $v_{o2}$  等于多少？求  $A_{vd2}$ 、 $A_{vc2}$ 、 $K_{CMR2}$  的值；(4) 求电路的差模输入电阻、共模输入电阻和不接  $R_L$  时，单端输出的输出电阻  $R_{o2}$ 。



【例 6-3】电路如图，已知 BJT 的  $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 50$ ， $r_{ce} = 200\text{k}\Omega$ ， $V_{BE} = 0.7\text{V}$ ，试求单端输出的差模电压增益  $A_{vd2}$ 、共模抑制比  $K_{CMR2}$ 、差模输入电阻  $R_{id}$  和输出电阻  $R_o$ 。



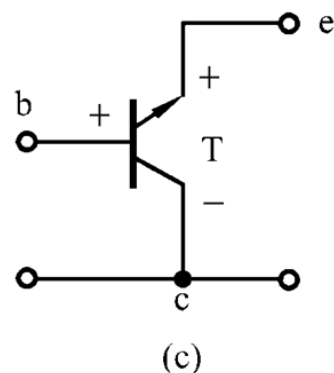
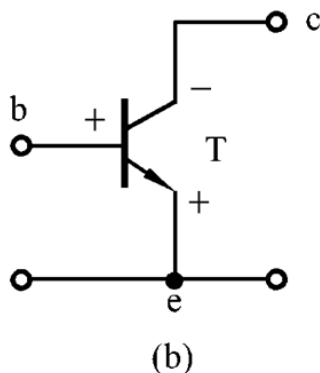
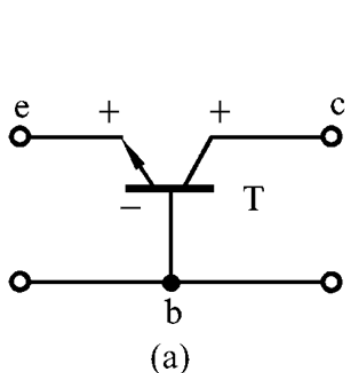
## 七、 反馈放大电路

### 【主要内容】

1. 掌握反馈的基本概念，能用瞬时极性法判断反馈的极性
2. 掌握四种类型负反馈的判断方法
3. 能画出反馈网络
4. 掌握负反馈对放大电路性能的影响
5. 掌握反馈系数的计算
6. 掌握深度负反馈条件下电路增益的近似计算方法

### 【知识梳理】

- 反馈的概念：将电路输出电量的一部分或全部通过反馈网络，用一定的方式送回到输入回路，以影响输入、输出电量。
- 瞬时极性法



- 四种组态的判断方法：“直压间流”、“直并间串”
- 负反馈对放大电路的影响：

串联负反馈增大输入电阻，并联负反馈减小输入电阻；

（输入电阻大时要求 $R_{si}$ 小，反之要求 $R_{si}$ 大）

电压负反馈减小输出电阻、稳定输出电压，电流负反馈增大输出电阻、稳定输出电流。

- 反馈系数的计算

基本放大电路的净输入信号

$$x_{id} = x_i - x_f$$

开环增益（基本放大电路增益）

$$A = \frac{x_o}{x_{id}}$$

反馈网络的反馈系数

$$F = \frac{x_f}{x_o}$$

闭环增益（负反馈放大电路的增益）

$$A_f = \frac{x_o}{x_i} = \frac{A}{1 + AF}$$

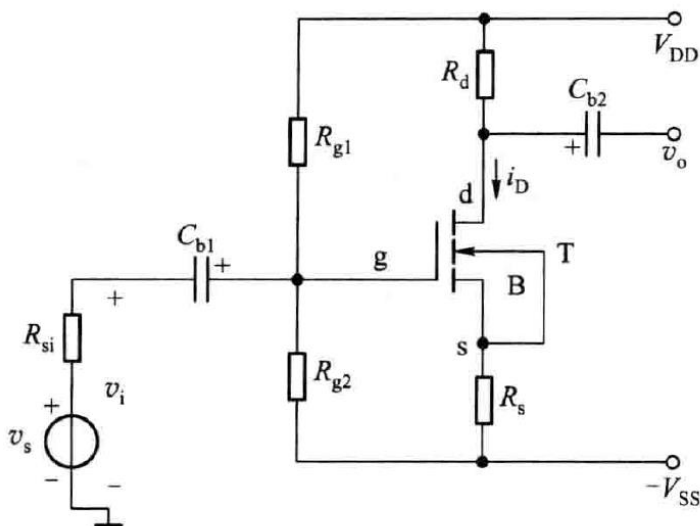
- 深度负反馈下的近似计算

输入量近似等于反馈量，净输入量近似等于零。即  $x_i \approx x_f$ ,  $x_{id} \approx 0$ 。

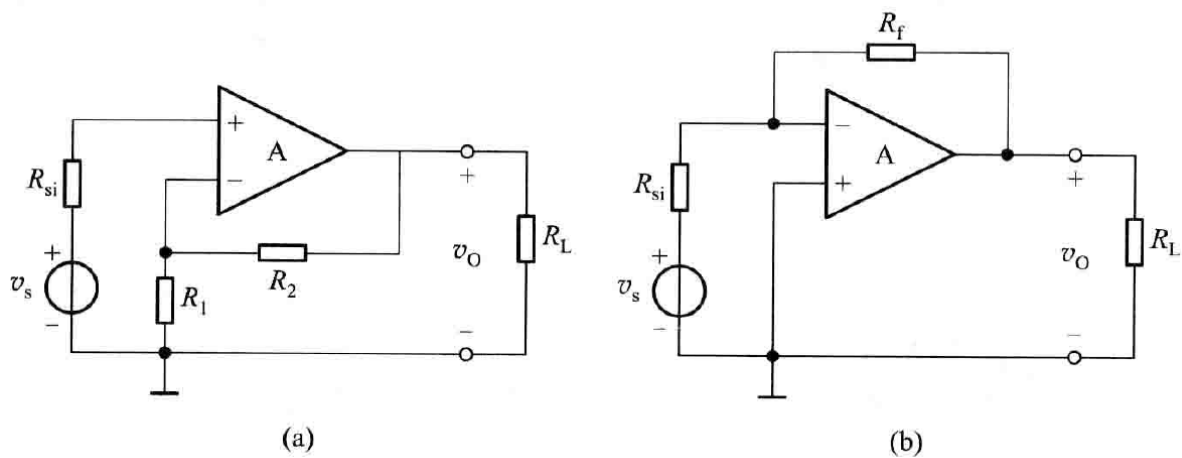
串联负反馈  $R_{if} \rightarrow \infty$ ，并联负反馈  $R_{if} \rightarrow 0$ ；电压负反馈  $R_{of} \rightarrow 0$ ，电流负反馈  $R_{of} \rightarrow \infty$ 。

### 【习题详解】

【例 7-1】试判断图示电路引入了何种类型的交流反馈。



【例 7-2】在图示电路中，从反馈的效果来考虑，对信号源内阻 $R_{si}$ 的大小有何要求？



【例 7-3】一放大电路的开环电压增益为 $A_{vo} = 10^4$ ，当它接成负反馈放大电路时，其闭环电压增益为 $A_{vf} = 50$ ，若 $A_{vo}$ 变化10%，问 $A_{vf}$ 变化多少？

## 八、 功率放大电路

### 【主要内容】

1. 掌握理想乙类中负载获得的功率、管耗、电源供给的功率、效率的计算
2. 掌握交越失真产生的原因及消除方法
3. 掌握甲乙类功率放大电路的分析方法

### 【知识梳理】

- 理想乙类双电源互补对称功放的计算

输出功率 $P_o$

$$P_o = I_o V_o = \frac{V_{om}^2}{2R_L}$$

$$P_{om} \approx \frac{V_{CC}^2}{2R_L}$$

管耗 $P_T$

$$P_T = P_{T1} + P_{T2} = \frac{2}{R_L} \left( \frac{V_{CC} V_{om}}{\pi} - \frac{V_{om}^2}{4} \right)$$

直流电源供给功率 $P_v$

$$P_v = P_o + P_T = \frac{2V_{CC}V_{om}}{\pi R_L}$$

效率 $\eta$

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

当 $V_{om} = V_{CC}$ 时, 最大效率 $\eta = \pi/4 \approx 78.5\%$

- 管子的选择

最大管耗 $P_{CM} \geq 0.2P_{om}$

最大允许电流 $I_{CM} > i_{Cmax} \approx V_{CC}/R_L$

满足 $V_{(BR)CEO} > v_{CEmax} \approx 2V_{CC}$

- 解决交越失真的方法: 采用甲乙类电路



## 九、 信号处理与信号产生电路

### 【主要内容】

1. 掌握一阶有源滤波电路的分析方法（会计算传递函数及特征频率）
2. 掌握正弦波振荡电路的振荡条件（起振条件、平衡条件）
3. 掌握 RC 正弦波振荡电路的分析：选频原理，起振以及稳幅措施
4. 掌握电压比较器的分析方法（计算门限电压、确定高低电平值、画电压传输特性曲线）

### 【知识梳理】

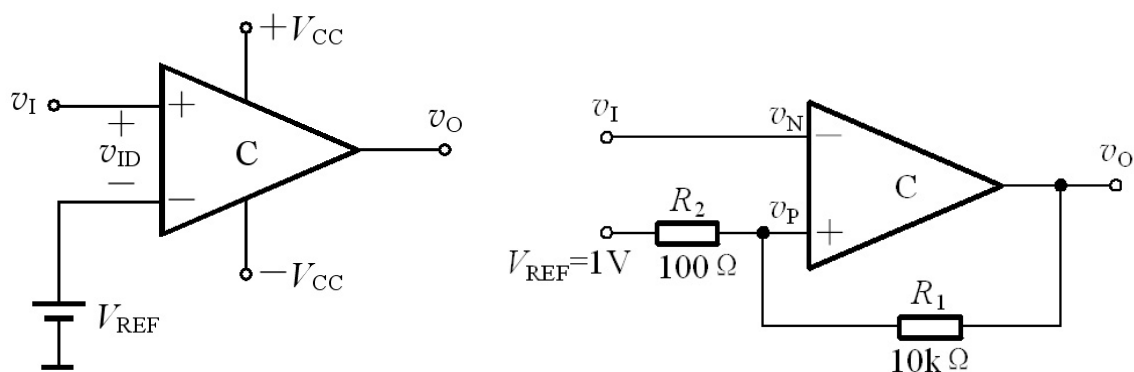
- 传递函数

$$A(j\omega) = \frac{V_o(j\omega)}{V_i(j\omega)}$$

- 起振条件： $|AF| > 1$

$$\text{平衡条件} \begin{cases} \text{振幅平衡条件: } AF = 1 \\ \text{相位平衡条件: } \varphi_a + \varphi_f = 2n\pi, n = 0, 1, 2 \dots \end{cases}$$

- 电压比较器



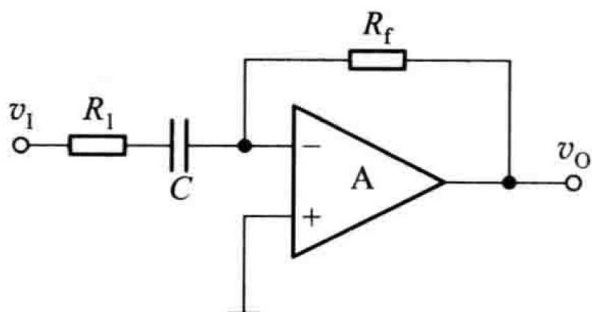
传输特性： $v_I > V_T$  时， $v_O = V_{OH}$ ； $v_I < V_T$  时， $v_O = V_{OL}$ 。

门限电压  $V_T = V_{REF}$ ，高低电平  $V_{OH}$ 、 $V_{OL}$  分别等于  $\pm V_{CC}$ 。

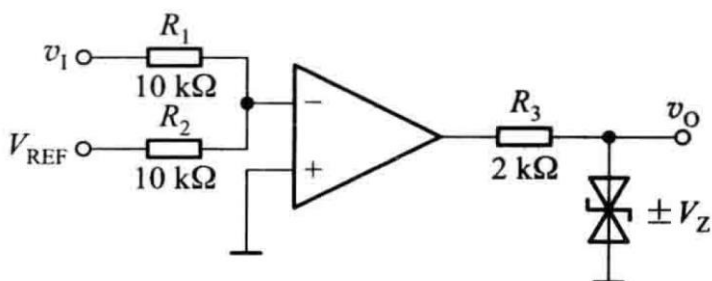
- 迟滞比较器（施密特触发器）：在反相单门限电压比较器的基础上引入正反馈网络，就组成了具有双门限值的反相输入迟滞比较器。

【习题详解】

【例 9-1】设 A 为理想运放，试写出图示电路的传递函数，指出这是一个什么类型的滤波电路。



【例 9-2】一比较器电路如图所示，设运放是理想的，且  $V_{REF} = -1V$ ， $V_Z = 5V$  试求门限电压值  $V_T$ ，画出比较器的传输特性  $v_o = f(v_i)$ 。

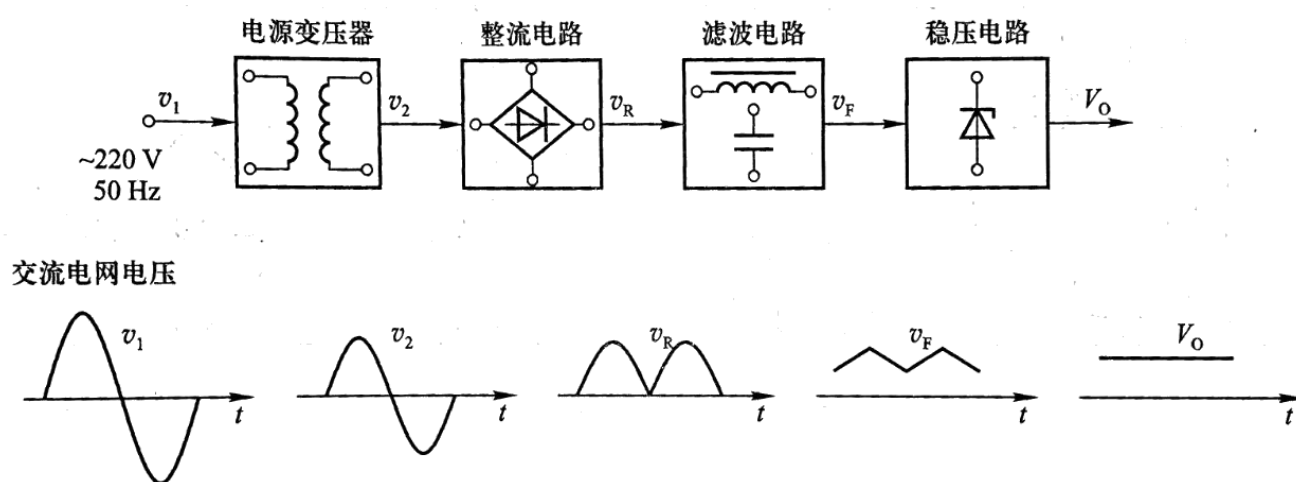


## 十、 直流稳压电源

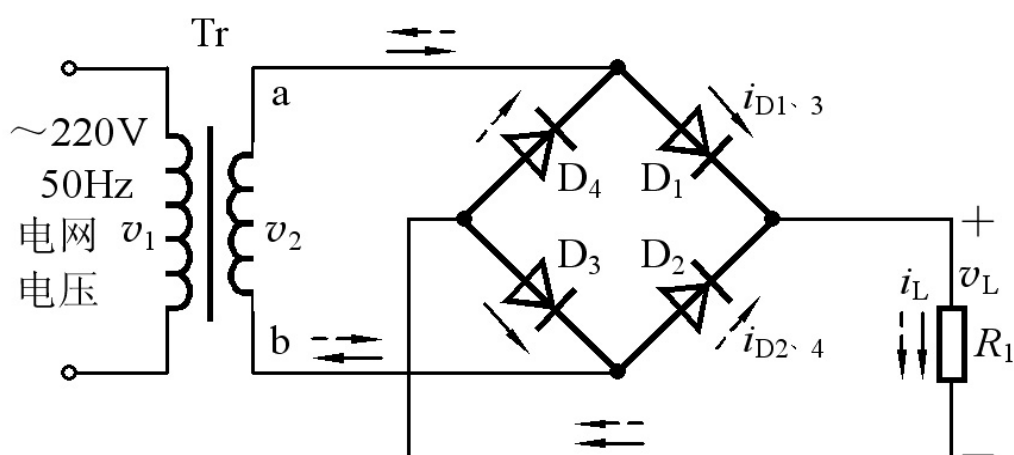
### 【主要内容】

1. 掌握小功率电压源的系统构成
2. 理解整流滤波的工作原理
3. 掌握线性串联反馈式稳压电路的工作原理以及计算

### 【知识梳理】



- 整流电路：利用二极管的单向导电性



工作原理：利用二极管的单向导电性