

复习和考试

模拟电子技术期末复习

例1：BJT放大电路的分析计算

❖ 第一步：直流电源单独工作（交流信号为0），分析直流通路，计算静态工作点（ I_B, I_C, V_{CE} ）；

❖ 第二步：求
$$r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26(mV)}{I_E(mA)} \quad (\Omega)$$

❖ 第三步：直流电源=0，交流电源单独工作，画出小信号模型图（先画三极管的，再画公共端找出接地点，把其它外围电路补充完整）；

❖ 第四步：根据模型图求 A_v, R_i, R_o

例2: NMOS放大电路的分析计算

- ❖ 第一步：直流电源单独工作（交流信号为0），分析直流通路，计算静态工作点（ V_{GS}, I_D, V_{DS} ），验证是否工作在饱和区；

两个公式：

$$i_D = K_n (v_{GS} - V_T)^2$$

$$v_{GS} > V_T, \text{ 且 } v_{DS} \geq (v_{GS} - V_T)$$

- ❖ 第二步：求 $g_m = 2K_n (V_{GSQ} - V_{TN})$

- ❖ 第三步：直流电源=0，交流电源单独工作，画出小信号模型图，一般 r_{ds} 可以忽略不计。（先画MOS管的，再画公共端找出接地点，把其它外围电路补充完整）；

- ❖ 第四步：根据模型图求 A_v, R_i, R_o

例3：反馈放大电路的分析计算

- ❖ 第一步：找出反馈通路；
- ❖ 第二步：根据瞬时极性法判断是正反馈还是负反馈。如果是负反馈，执行第三步；如果是正反馈，跳到第四步。
- ❖ 第三步：根据“虚短”“虚断”列出节点方程，推导出 V_o 的表达式；
- ❖ 第四步：正反馈是RC或者LC的，按照正弦波振荡频率公式计算；正反馈是R的，按照迟滞电压比较器来分析。

例4：波形电路的分析计算

- ❖ 第一步：找出电压比较器，根据叠加原理写出 v_+ ；
- ❖ 第二步：根据临界条件， $v_+=v_-$ ，算出 V_{T+}, V_{T-} ，即为积分运算的两个端点值；
- ❖ 第三步：列出积分表达式，算出时间。

$$V_{T+} = -\frac{1}{RC} \int_{t_1}^{t_2} -V_Z dt + V_{T-}$$
$$V_{T-} = -\frac{1}{RC} \int_{t_2}^{t_3} V_Z dt + V_{T+}$$

- ❖ 第四步：周期 $T = (t_2 - t_1) + (t_3 - t_2)$ 可得。

本课内容

基本概念（第1章）

单向放大电路
（第4，5，6，7章）

直流电源（第11章）

放大电路

半导体基础（第3章）

反馈放大电路
（第8，2，10章）

功率放大（第9章）

教学目标

1) 会看：定性分析
2) 会算：定量计算 } 考查分析问题的能力

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

综合应用所学知识的能力

第1、6、9、10、11章 概念

- ❖ 数字信号、模拟信号；数字电路、模拟电路的区别和联系；
- ❖ 频率响应的概念，波特图；
- ❖ 乙类功率放大电路的特点、计算，与甲乙类电路的区别；
- ❖ 滤波器的传递函数、电路认识；
- ❖ 直流稳压电源的组成、各部分输出电压的计算。

1.判断下列说法是否正确，凡正确的打“√”，凡错误的打“×”。

1)只有功率放大电路才放大功率；（×）

2)功率放大电路的最大输出功率是指负载电阻上可能获得的最大交流功率；（√）

3)功率放大电路在输出功率不同时，输出级的功率也不同；（√）

4)功率放大电路与电压放大电路的共同之处是都有电压放大作用。（×）

2.有三种功率放大电路：A. 甲类功率放大电路, B. 甲乙类功率放大电路,C. 乙类功率放大电路,选择正确答案填空：

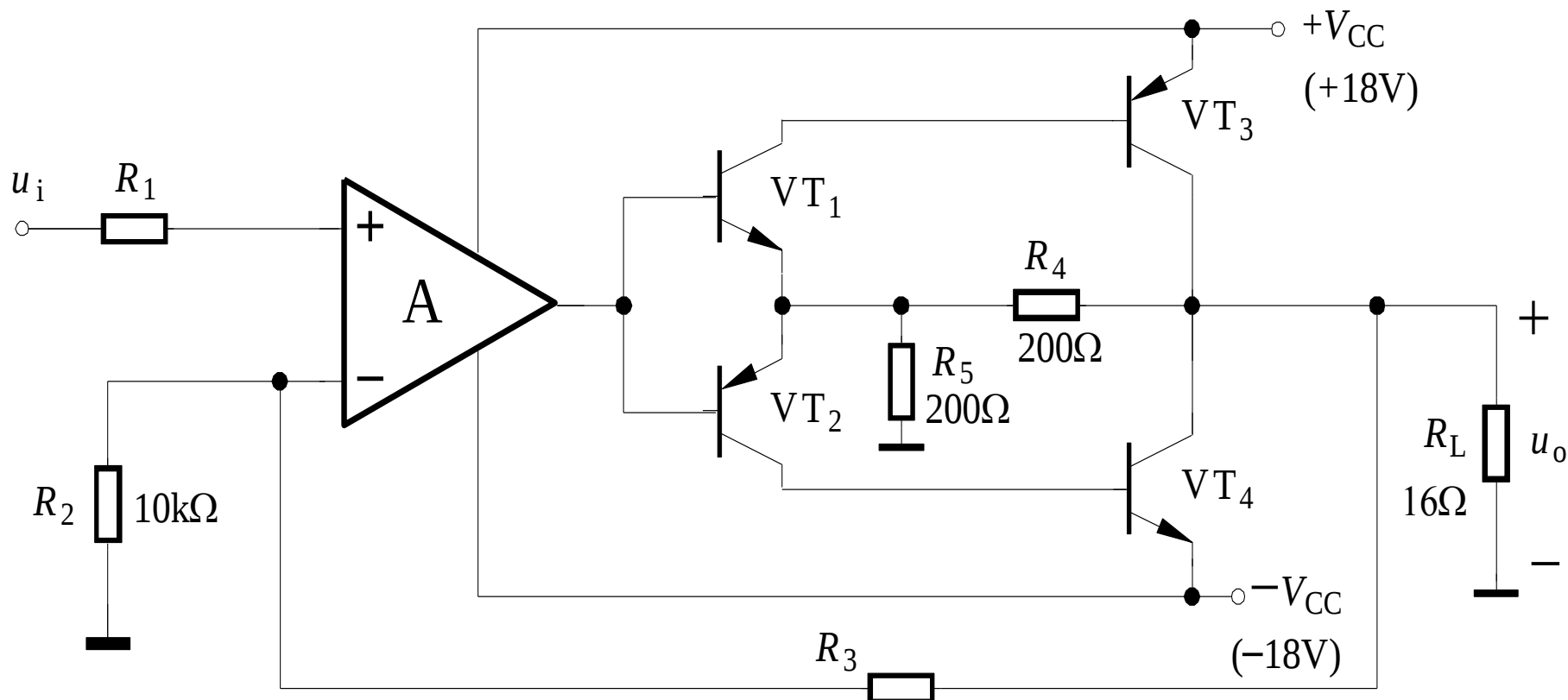
1)当输出功率变化时，电源提供的功率也随之变化的电路是（
）； **B, C**

2)若三种电路的最大输出功率相同，则功放管耗散功率最大的电路是（**A**）；

3)功放管的导通角大于 π 且小于 2π 电路是（**B**）

3.在如图所示电路中，已知输入电压 v_i 为正弦波，其最大有效值 $V_i=0.5$,此时负载上得到最大输出功率；运算放大电路为理想运放；三极管导通时 $|V_{BE}|$ 均为 $0.7V$ ， VT_3 和 VT_4 的饱和管压降 $|V_{CES}|=2V$ ；电路的交越失真可忽略不计。试问：

- 1)电路的最大输出功率；
- 2)在输出功率最大时，输出级的效率；
- 3)为使输出功率达到最大，电阻 R_3 至少应取多少千欧？



解：

$$1) P_{\text{om}} = \frac{(V_{\text{CC}} - U_{\text{CES}})^2}{2R_{\text{L}}} = 8\text{W}$$

$$2) \eta = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{V_{\text{CC}} - U_{\text{CES}}}{V_{\text{CC}}} \approx 69.8\%$$

$$3) A_{u\text{f}} = 1 + \frac{R_3}{R_2} = \frac{V_{\text{CC}} - U_{\text{CES}}}{\sqrt{2}U_{\text{i}}}$$

$$R_3 \approx 216\text{k}\Omega$$

4、二阶有源滤波电路传递函数归一化形式的一般表达式为

$$A_u(s) = \frac{a_0 + a_1s + a_2s^2}{b_0 + b_1s + b_2s^2} A_{up}$$

试说明在下列情况下，上式各表示何种有源滤波电路

$$1) a_0 = a_2 = 0$$

$$2) a_0 = b_0, a_1 = -b_1, a_2 = b_2$$

解：

$$1) a_0 = a_2 = 0 \text{ 时, 传递函数为 } A_u(s) = \frac{a_1s}{b_0 + b_1s + b_2s^2} A_{up},$$

构成带通滤波电路；

$$2) a_0 = b_0, a_1 = -b_1, a_2 = b_2 \text{ 时, 传递函数为 } A_u(s) = \frac{b_0 - b_1s + b_2s^2}{b_0 + b_1s + b_2s^2} A_{up}$$

构成全通滤波电路

5、完整的频率响应

$$\dot{A}_v \approx \dot{A}_{vm} \frac{j \frac{f}{f_L}}{(1 + j \frac{f}{f_L})(1 + j \frac{f}{f_H})}$$

$$f_L \ll f \ll f_H :$$

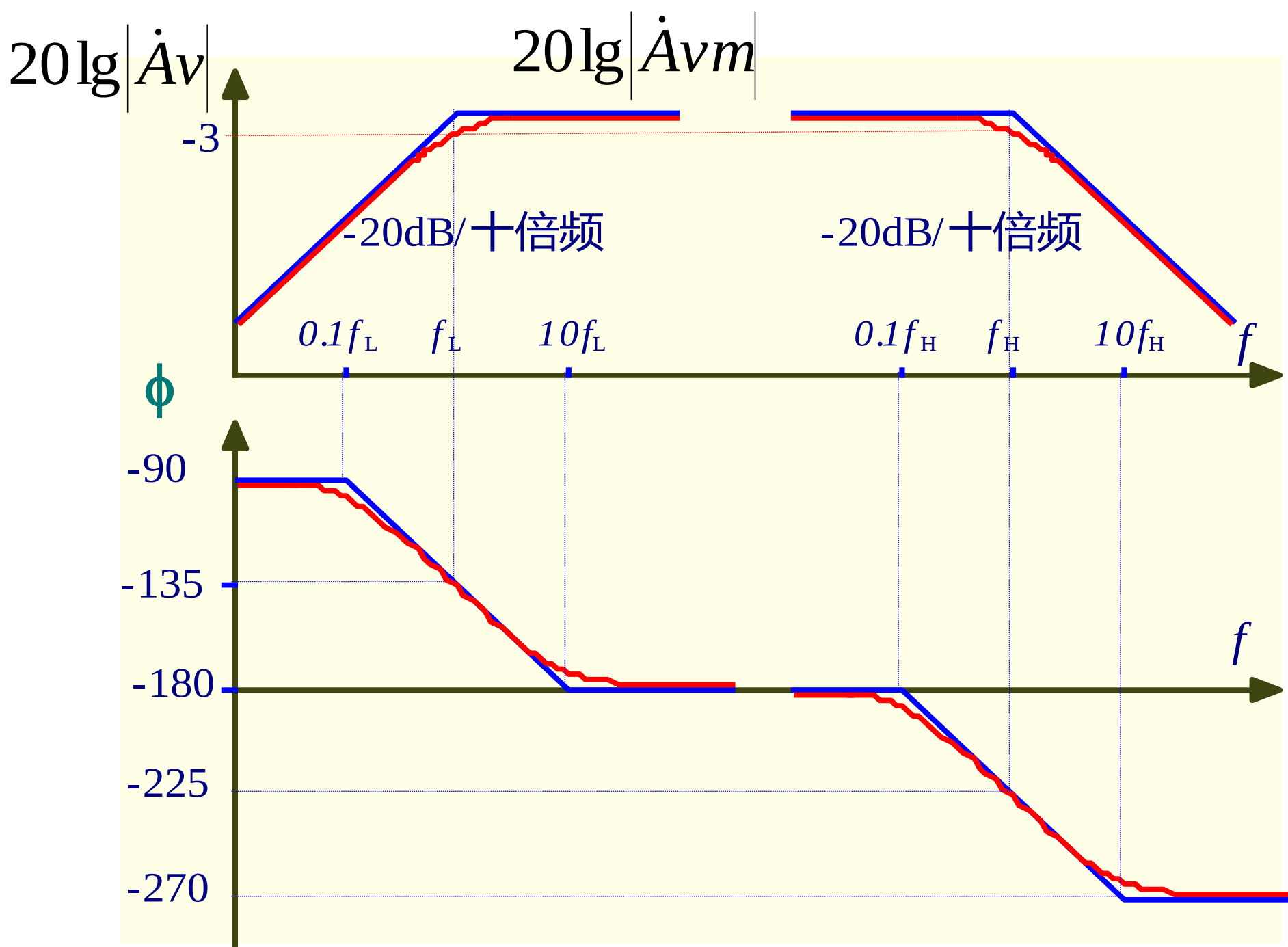
$$\frac{f}{f_L} \rightarrow \infty, \quad \frac{f}{f_H} \rightarrow 0, \quad \dot{A}_v \approx \dot{A}_{vm}$$

$$f \rightarrow f_L:$$

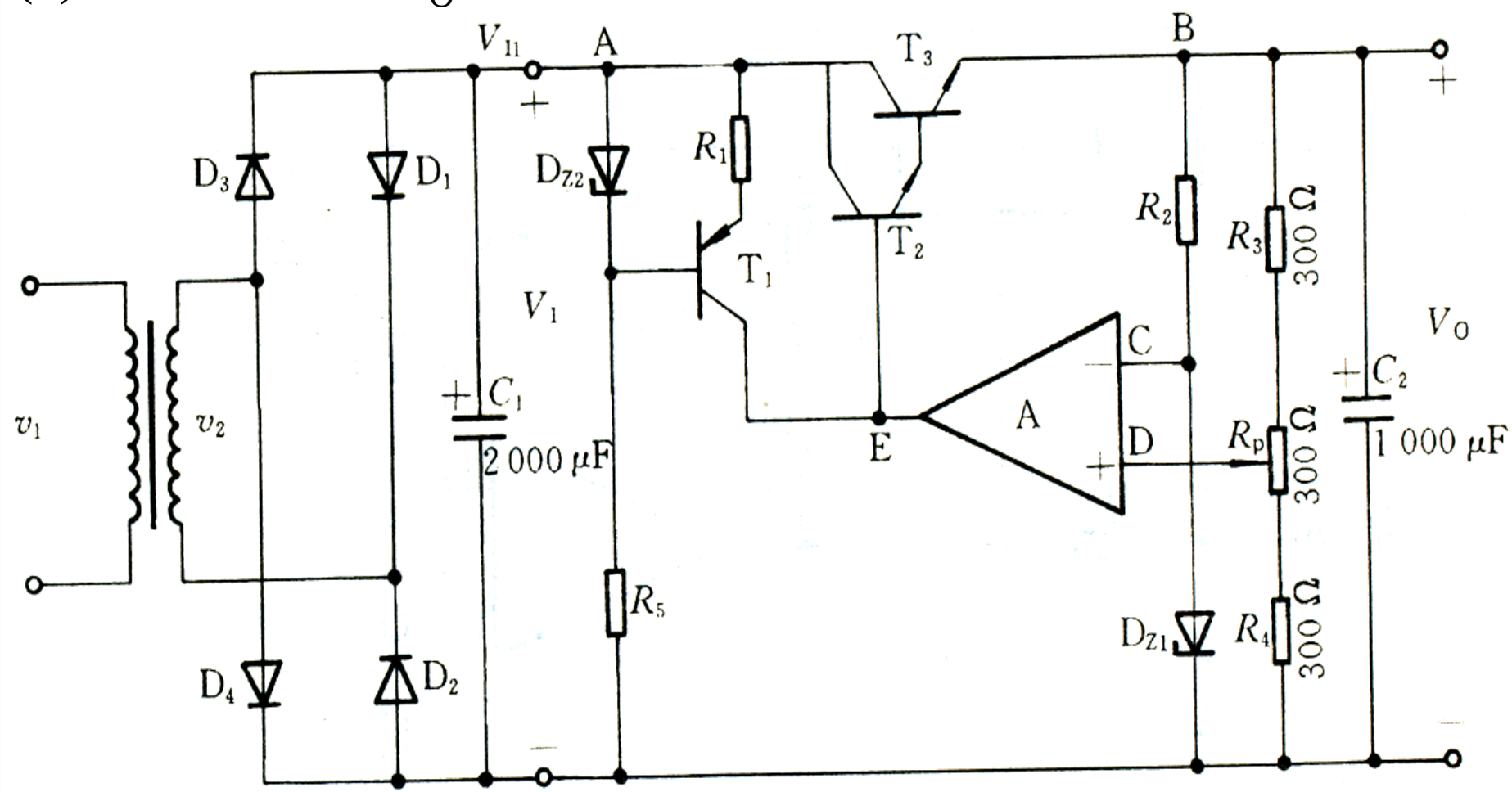
$$f \ll f_H, \frac{f}{f_H} \rightarrow 0 \quad \text{则} \dot{A}_{vL} = \frac{j \frac{f}{f_L}}{(1 + j \frac{f}{f_L})}$$

$$f \rightarrow f_H:$$

$$f \gg f_L, \frac{f}{f_L} \rightarrow \infty \quad \text{则} \dot{A}_{vH} = \frac{1}{(1 + j \frac{f}{f_H})}$$



- 6、(1) 设BJT正确连接,改正图中错误;
- (2) 设变压器副边有效值 $V_2=20V$,求 $V_1=?$ 说明电路中 T_1, R_1, D_{Z2} 的作用;
- (3) 当 $V_{Z1}=6V, V_{BE}=0.7V$,电位器 R_p 在中间位置,计算A,B,C,D,E各点的电位和 V_{CE3} 的值;
- (4) 计算输出电压 V_O 的调节范围.



解： 1)二极管 D_1, D_4, D_{Z1}, D_{Z2} 极性接反,运放A的反相端和同相端接反
2) $V_1=(1.1\sim 1.2)V_2$, T1、R1和 D_{Z2} 为稳压电源的启动电路;
3) R_p 箭头在中间位置,A、B、C、D、E各点电位和 V_{CE3} 的值:

$$\text{取 } V_A = V_1 = 1.2V_2 = 1.2 \times 20V = 24V$$

$$V_B = V_O = \frac{R_3 + R_p + R_4}{R_4 + \frac{R_p}{2}} \cdot V_{Z1} = 12V \quad V_C = V_D = V_Z = 6V$$

$$V_E = V_O + 2V_{BE} = 13.4V \quad V_{CE1} = V_A - V_O = 12V$$

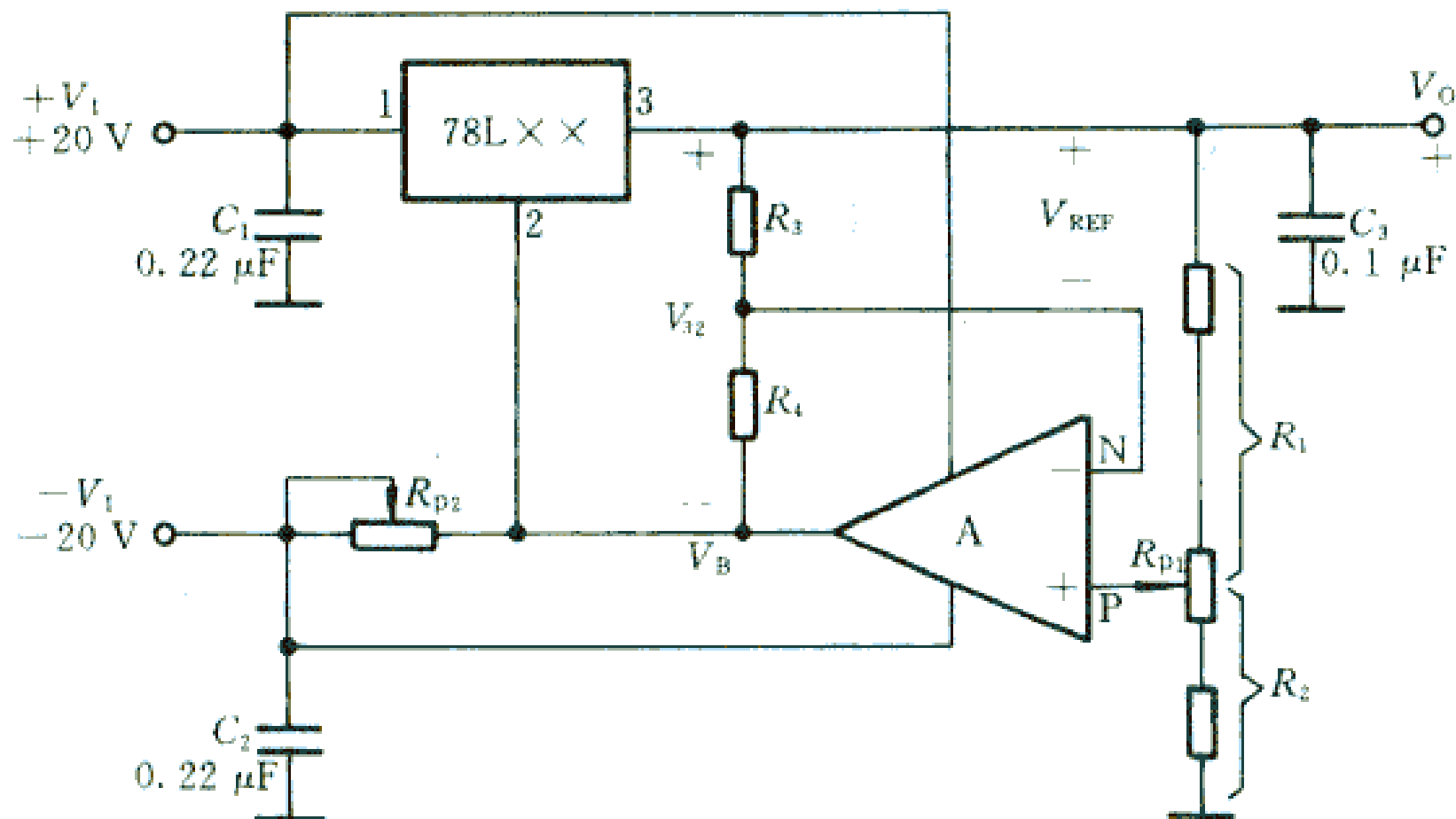
4)输出电压的最大值和最小值分别为:

$$V_{o\max} = \frac{900}{300} \times 6V = 18V \quad V_{o\min} = \frac{900}{600} \times 6V = 9V$$

所以输出电压的调节范围为: 9V~18V

7、

设 $V_{32} = V_{XX}$ ，证明 $V_o = V_{XX} \cdot \frac{R_3}{R_3 + R_4} \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_1}$



解：

$$V_p = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_0$$

$$V_N = \frac{R_4}{R_3 + R_4} V_{XX} + V_B = \frac{R_4}{R_3 + R_4} V_{XX} + (V_O - V_{XX})$$

$$\because V_N \approx V_P$$

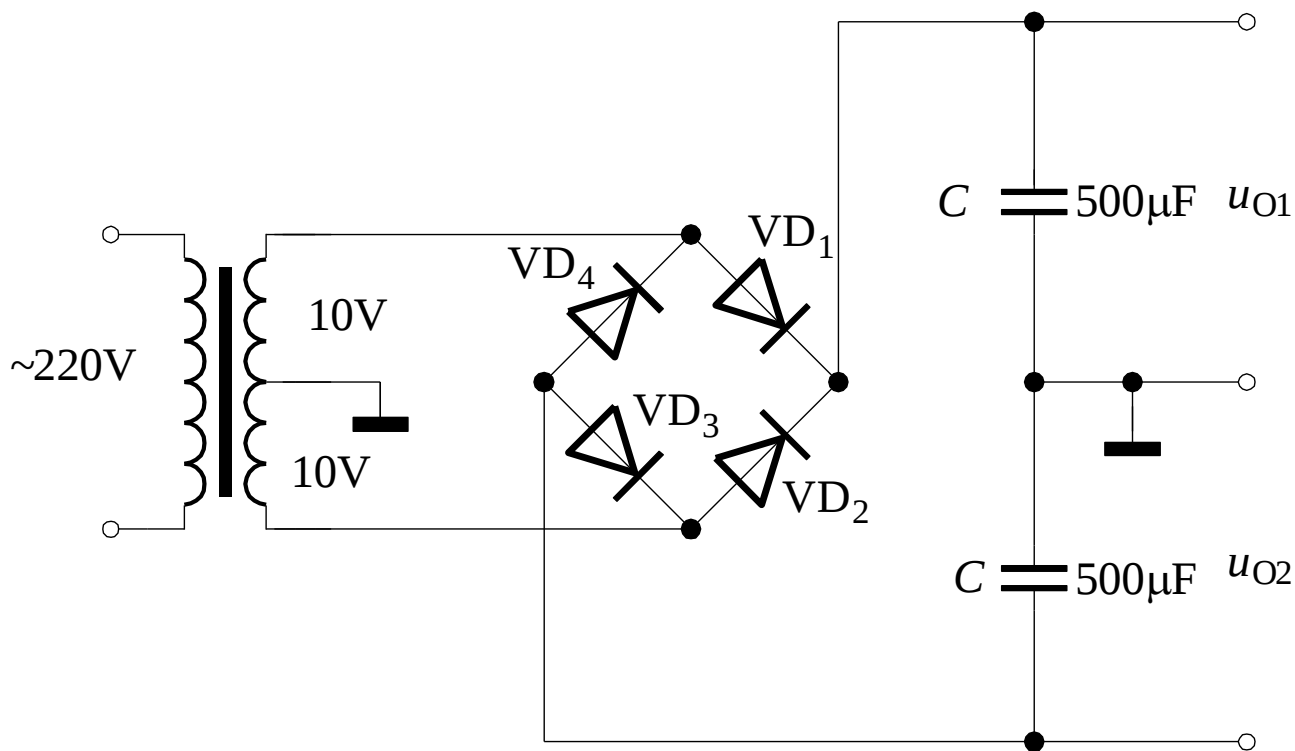
$$\therefore \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_0 = \frac{R_4}{R_3 + R_4} V_{XX} + (V_O - V_{XX})$$

整理得

$$V_O = V_{XX} \cdot \frac{R_3}{R_3 + R_4} \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$

8.在如图所示整流滤波电路中，变压器次级电压有效值如图中所标注，二极管的正向压降及变压器内阻均可忽略不计。

- 1)标出输出电压 v_{o1} 、 v_{o2} 对地的极性；
- 2)估算输出电压的平均值 $V_{o1(AV)}$ 和 $V_{o2(AV)}$ ；
- 3)求出每只二极管所承受的最大反向电压。



解：

1) v_{o1} 为正, v_{o2} 为负；

$$2) V_{o1(AV)} = -V_{o2(AV)} \approx 14.1V$$

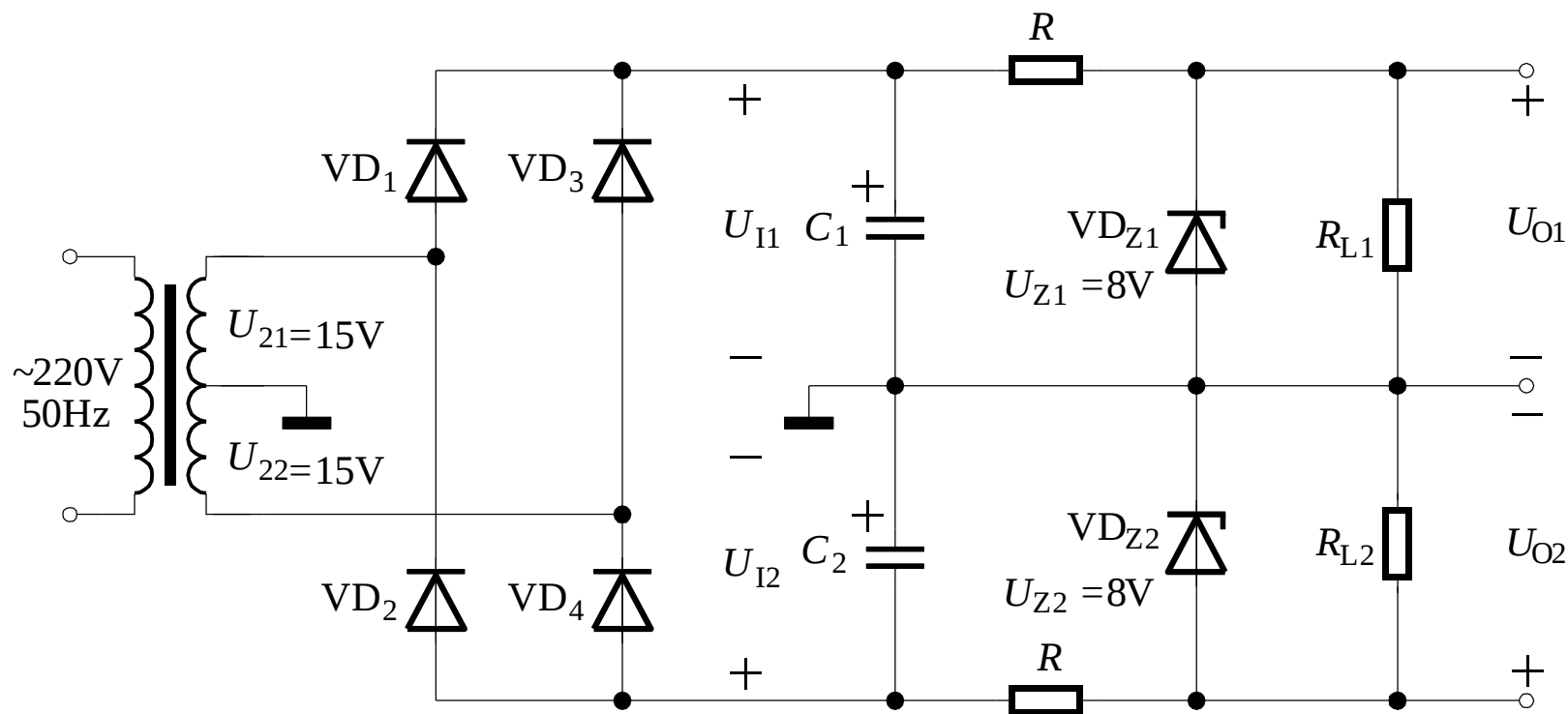
$$3) V_{RM} \approx 28.2V$$

9.在如图所示电路中，已知变压器内阻和二极管正向电阻均可忽略不计， C_1 、 C_2 取值满足 $RC=(3\sim5)T/2$ （ T 为电网电压的周期），稳压管 VD_{Z1} 、 VD_{Z2} 特性完全相同。

1)整流滤波后电压平均值 $U_{I1} = +18V$ ， $U_{I2} = -18V$ ；

2)输出电压 $U_{O1} = +8V$ ， $U_{O2} = -8V$ 。

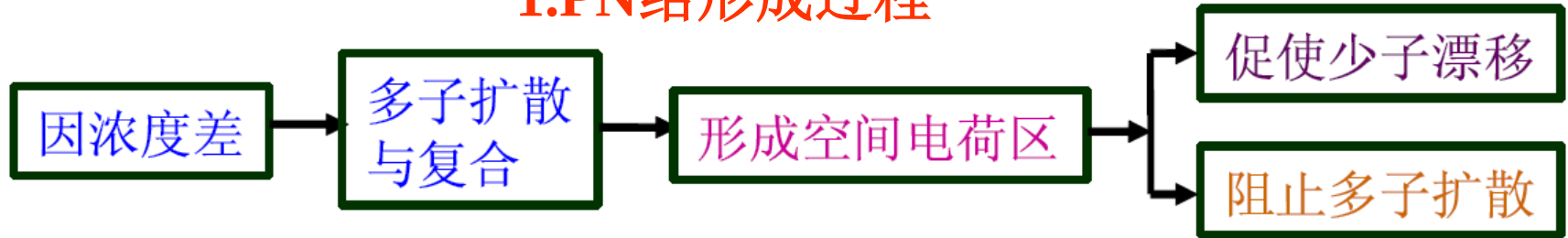
3)整流二极管 $VD1\sim VD3$ 承受的最大反向电压 $U_{RM} = 42.4V$



第3章 半导体二极管

- ❖ 什么是半导体，本征半导体，杂质半导体
- ❖ 杂质半导体的导电机理；
- ❖ **PN结的形成及其单向导电性；**
- ❖ **半导体二极管的伏安特性；**
- ❖ 要注意基本概念与实验的结合。

1. PN结形成过程



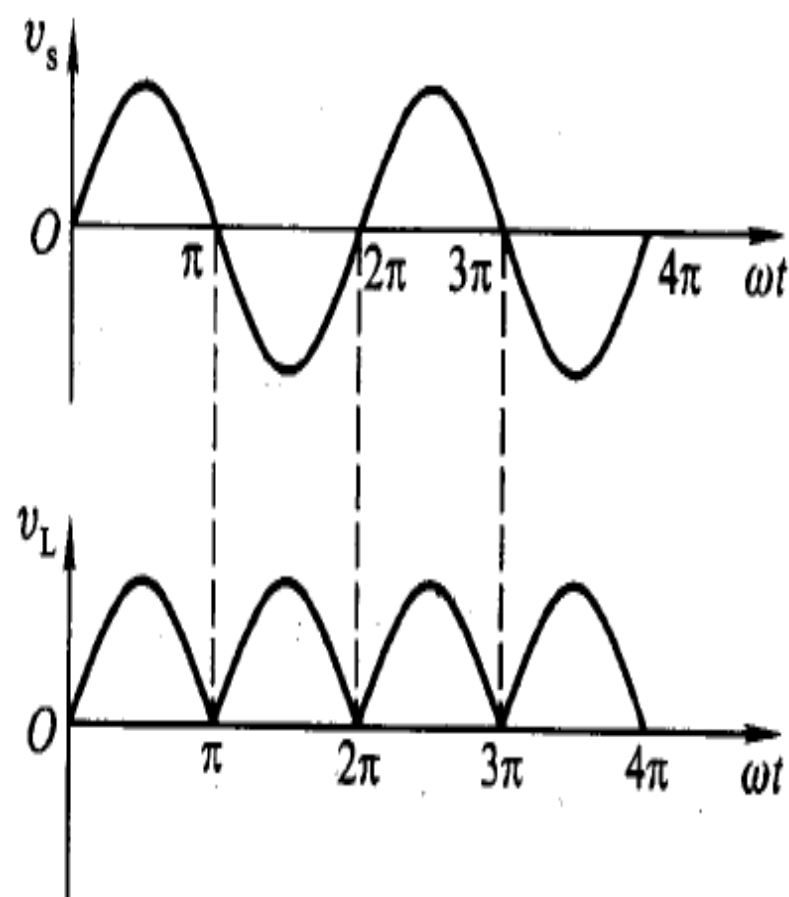
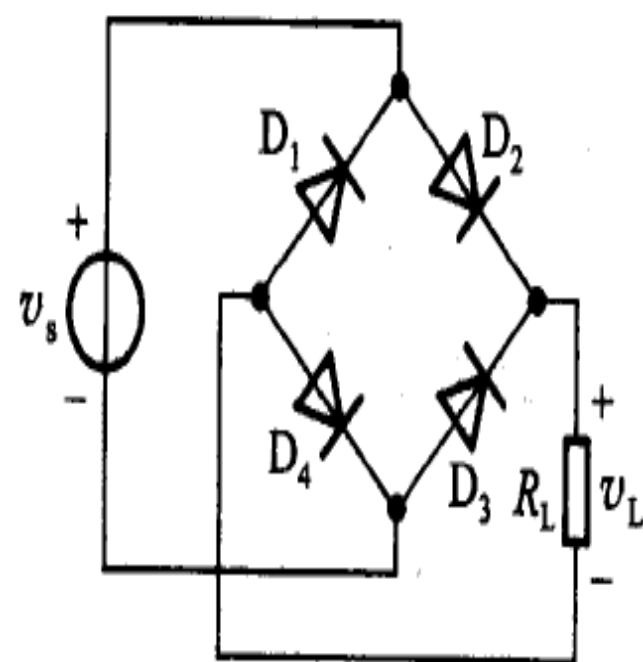
2. PN结、二极管伏安特性方程

$$i_D = I_s \left(e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1 \right)$$

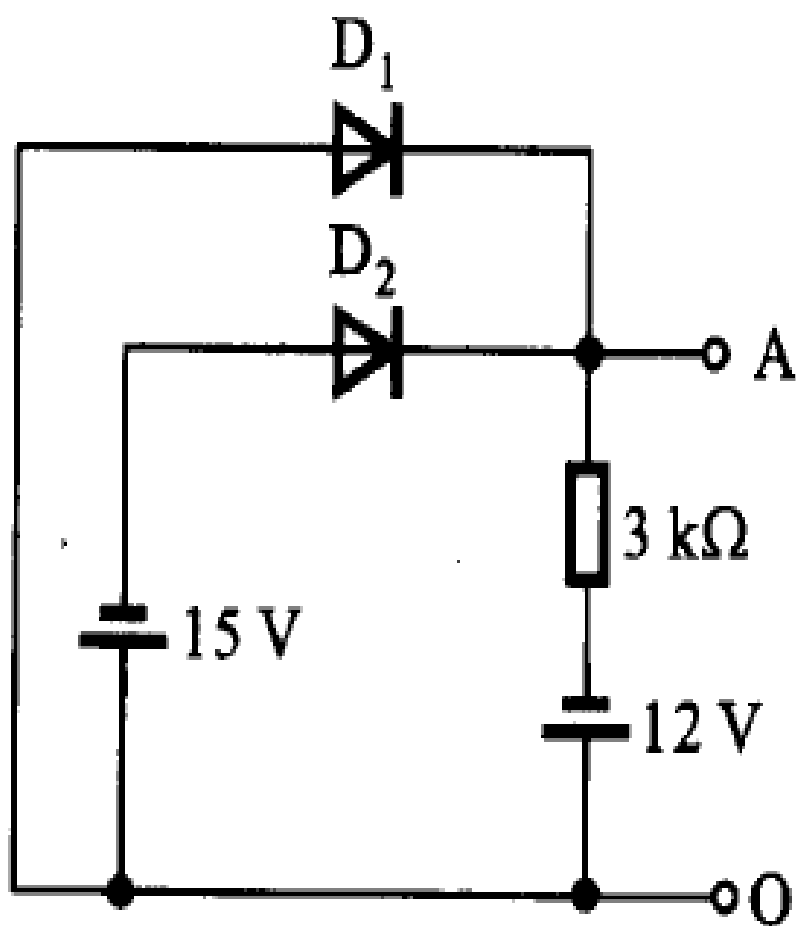
3. PN结、二极管单向导电性-----有方向的电子开关

正向偏压时相当于开关闭合，反向偏压时相当于开关断开

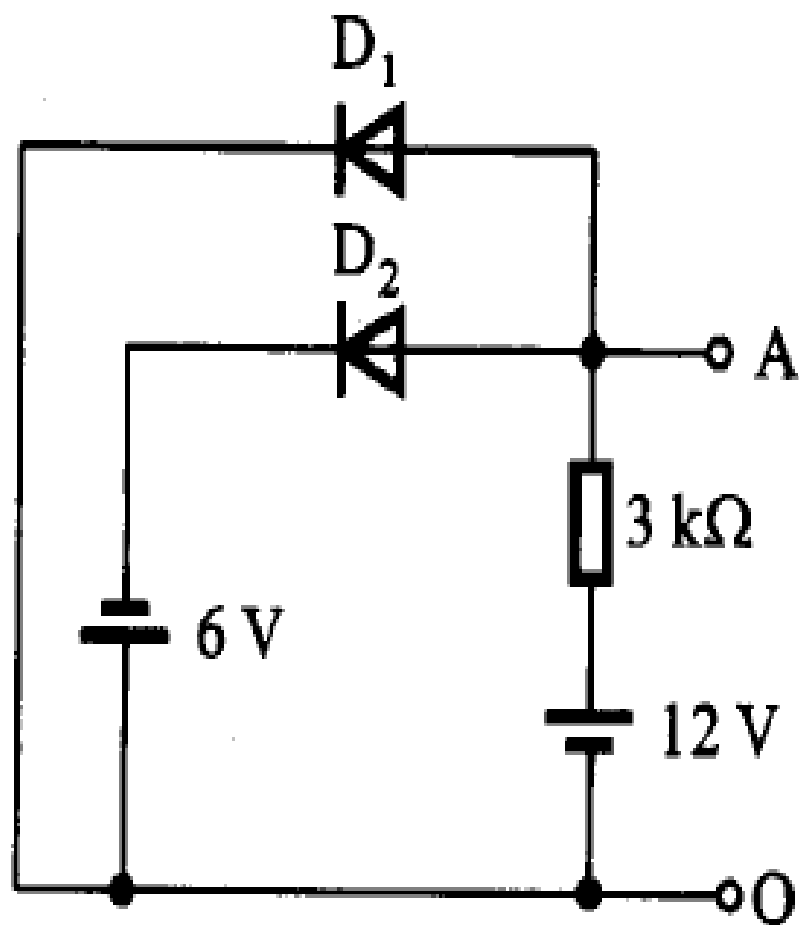
3.4.2 电路如图题 3.4.2 所示, 电源 v_s 为正弦波电压, 试绘出负载 R_L 两端的电压波形, 设二极管是理想的。



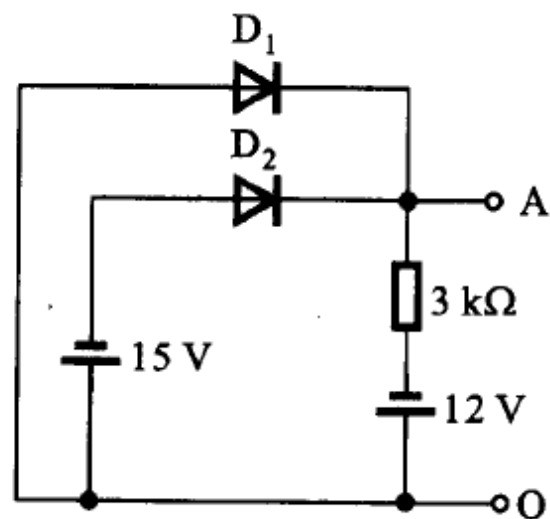
3.4.5 二极管电路如图题 3.4.5 所示，试判断图中的二极管是导通还是截止，并求出 AO 两端电压 V_{AO} 。设二极管是理想的。



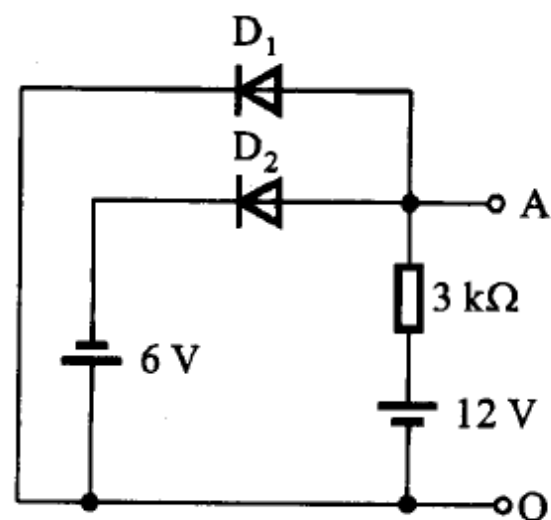
(c)



(d)



(c)



(d)

图 c: 将 D_1 和 D_2 均断开, 以 O 点为电位参考点, D_1 的阳极电位为 0 V, 阴极电位为 -12 V; D_2 的阳极电位为 -15 V, 阴极电位为 -12 V, 故 D_1 导通, D_2 截止, D_1 导通后使 A 点的电位为 0 V, $V_{AO} = 0$ V。

图 d: 将 D_1 和 D_2 均断开, 以 O 点为电位参考点, D_1 的阳极电位为 12 V, 阴极电位为 0 V; D_2 的阳极电位为 12 V, 阴极电位为 -6 V, 即 D_1 和 D_2 都为正向偏置。但是 D_2 一旦导通, D_1 的阳极电位将变为 -6 V, D_1 便不能再导通。所以此电路 D_1 截止, D_2 导通, $V_{AO} = -6$ V。

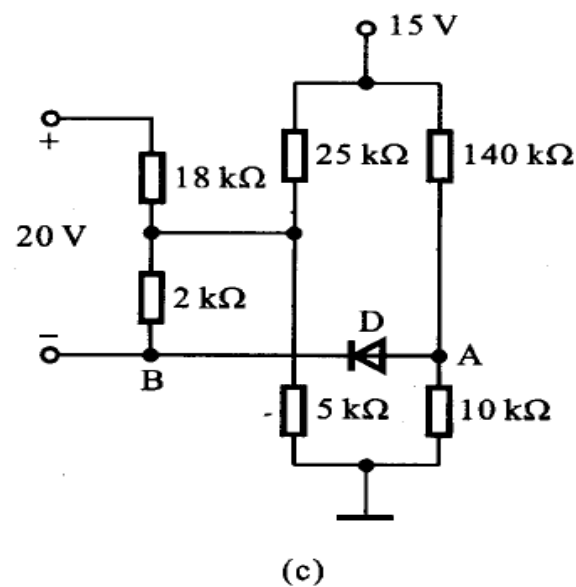


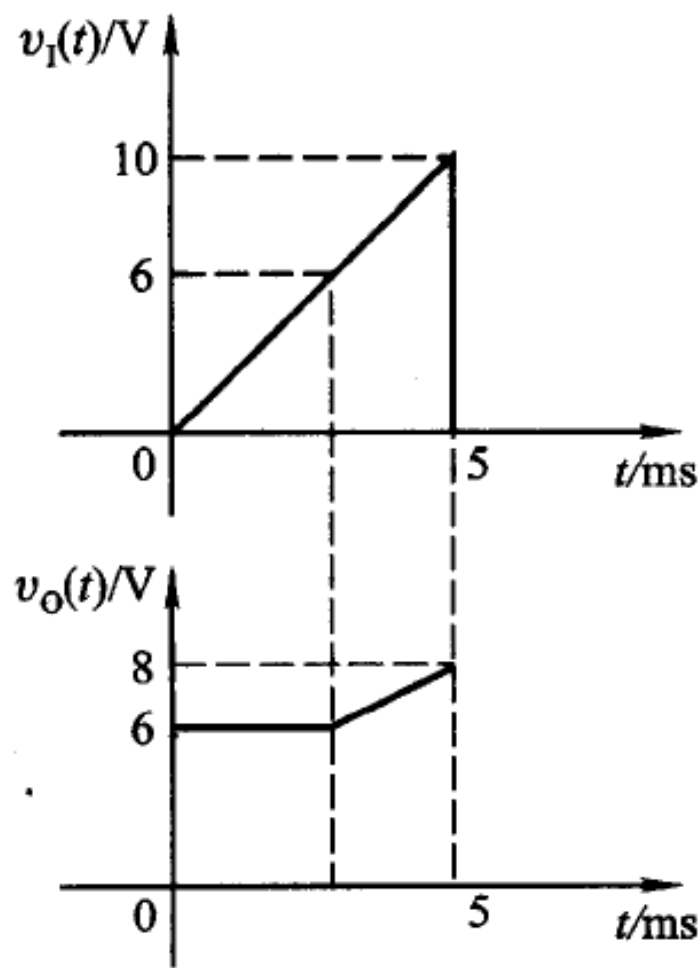
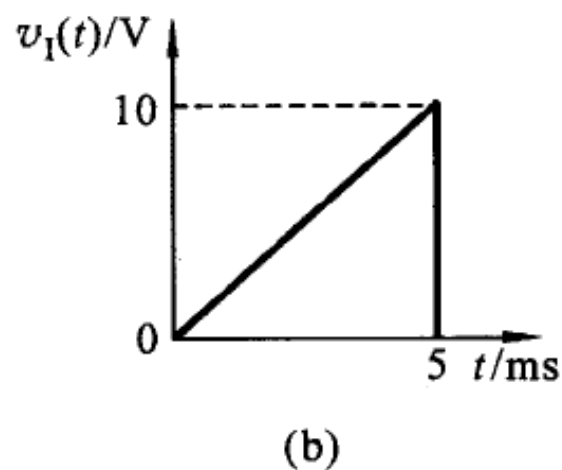
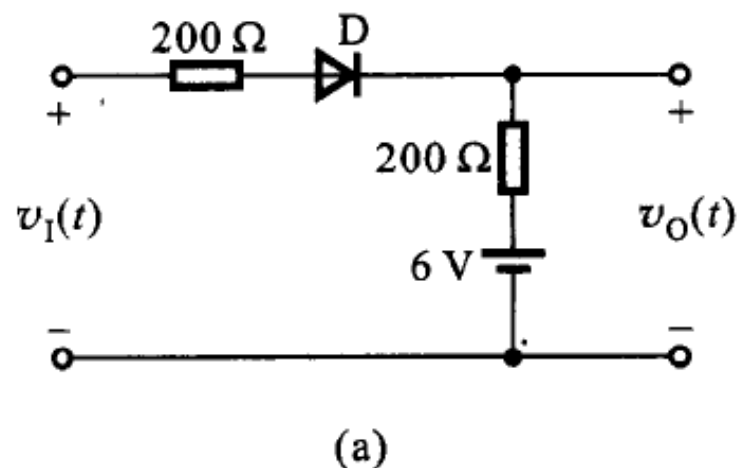
图 c: 将 D 断开, 以 “⊥” 为参考点, 有

$$V_A = \frac{10 \text{ k}\Omega}{(140 + 10) \text{ k}\Omega} \times 15 \text{ V} = 1 \text{ V}$$

$$V_B = \frac{5 \text{ k}\Omega}{(25 + 5) \text{ k}\Omega} \times 15 \text{ V} - \frac{2 \text{ k}\Omega}{(18 + 2) \text{ k}\Omega} \times 20 \text{ V} = 0.5 \text{ V}$$

D 被正偏而导通。

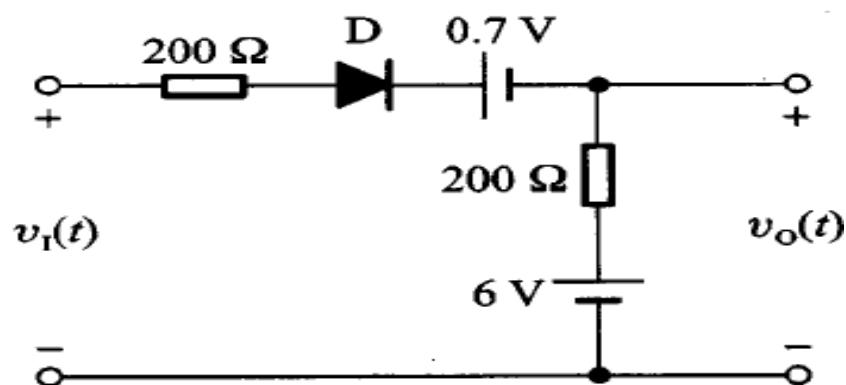
3.4.7 二极管电路如图题 3.4.7a 所示, 设输入电压 $v_1(t)$ 波形如图 b 所示, 在 $0 < t < 5 \text{ ms}$ 的时间间隔内, 试绘出 $v_o(t)$ 的波形, 设二极管是理想的。



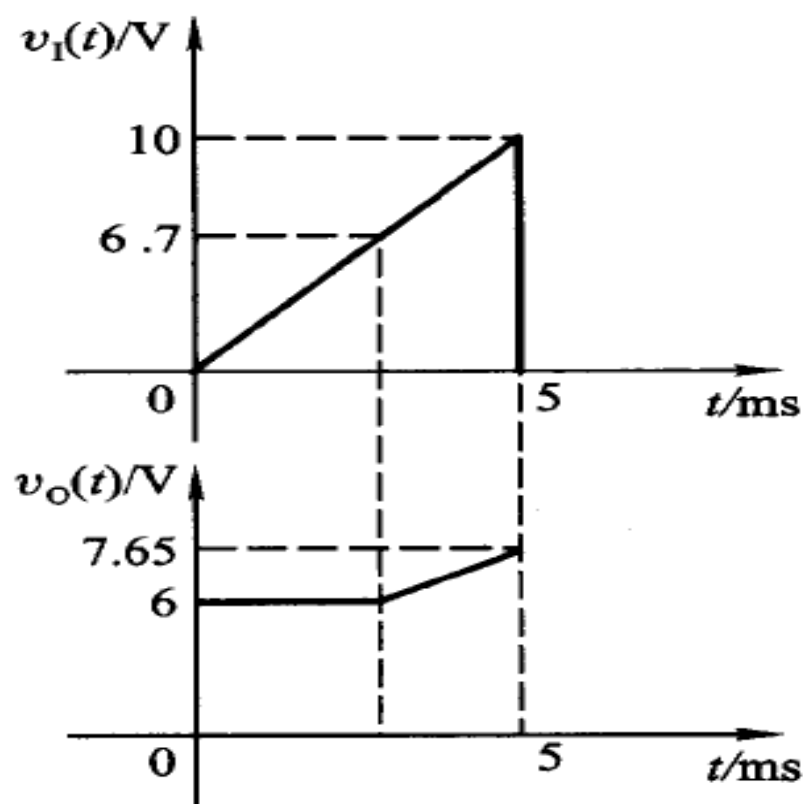
3.4.8 使用恒压降模型($V_D = 0.7\text{ V}$)，重复题 3.4.7。

解：图题 3.4.7a 电路的恒压降等效电路如图解 3.4.8a 所示。 $v_I(t) < 6.7\text{ V}$ 时，D 截止； $v_O(t) = 6\text{ V}$ ； $v_I(t) \geq 6.7\text{ V}$ 时，D 导通，

$$v_O(t) = \frac{v_I(t) - 6\text{ V} - 0.7\text{ V}}{200\ \Omega + 200\ \Omega} \times 200\ \Omega + 6\text{ V} = \frac{1}{2}v_I(t) + 2.65\text{ V}$$



(a)



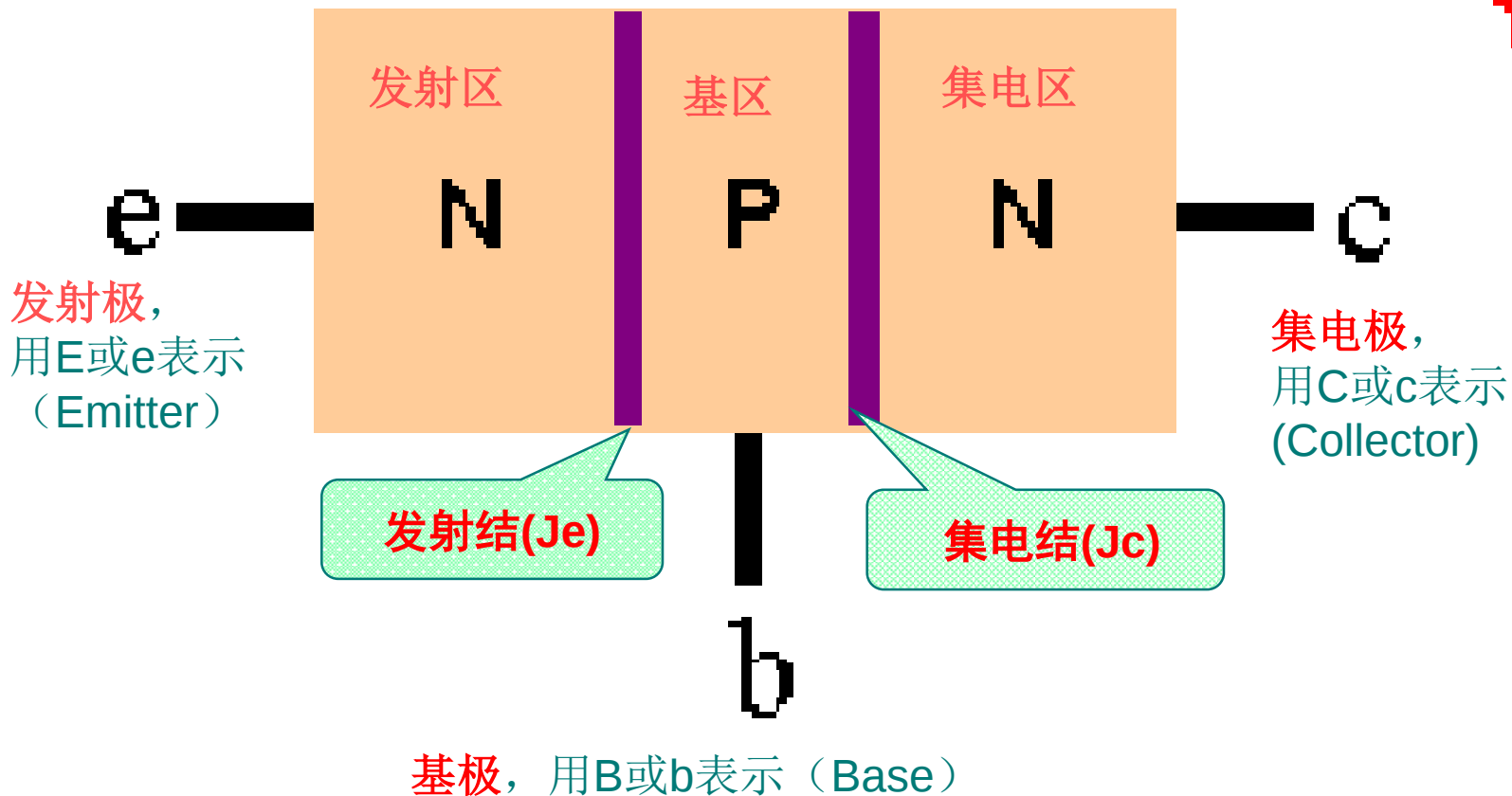
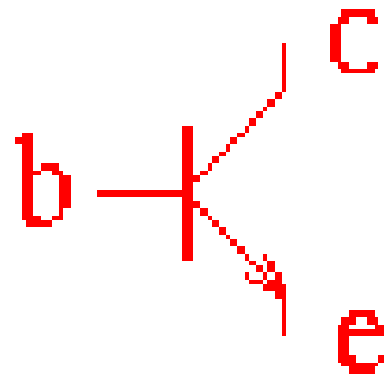
(b)

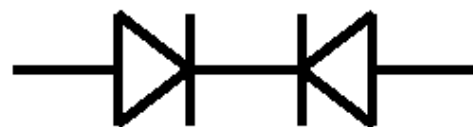
第5章 半导体三极管及放大电路

- ❖ 半导体三极管放大的条件（发射结正偏，集电结反偏），会判断电路能否正常放大（直流偏置正确，交流信号不被短路）
- ❖ 半导体三极管的电流控制和放大作用
- ❖ 直流通路与静态工作点的确定(计算及图解法)
- ❖ 交流通路与H参数模型（熟练掌握）及电压增益、输入输出电阻的求解
- ❖ 三种组态的特点，主要用途。

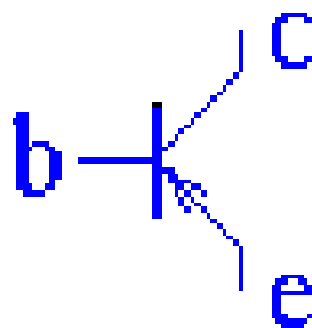
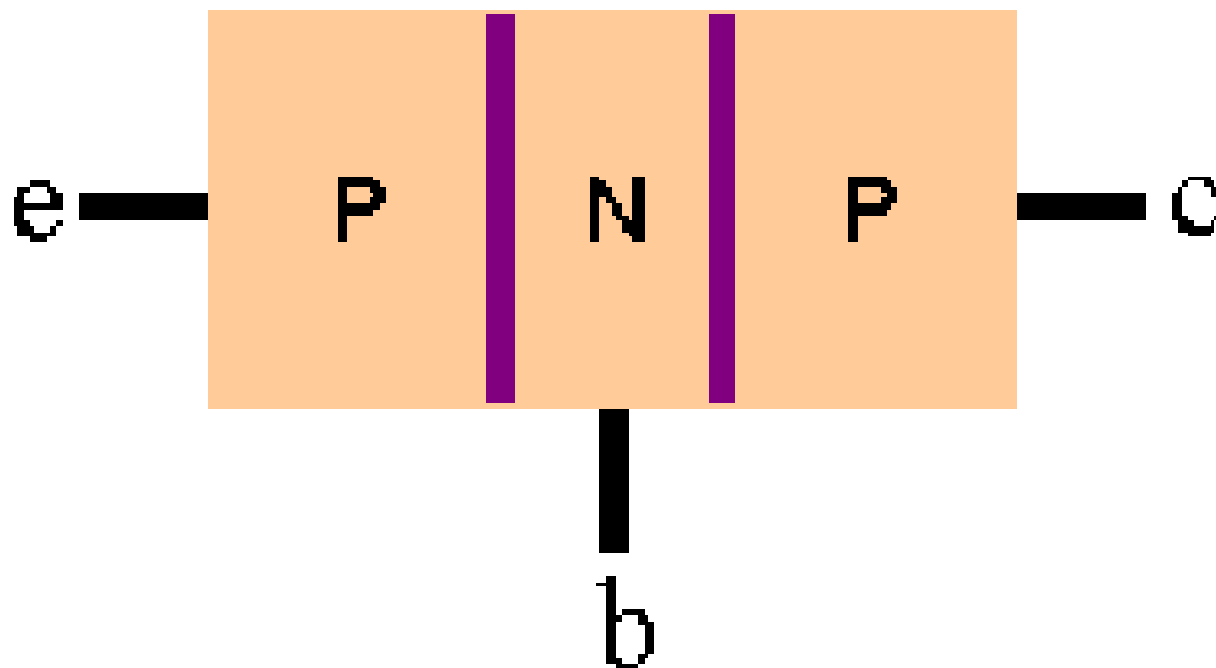


NPN 型

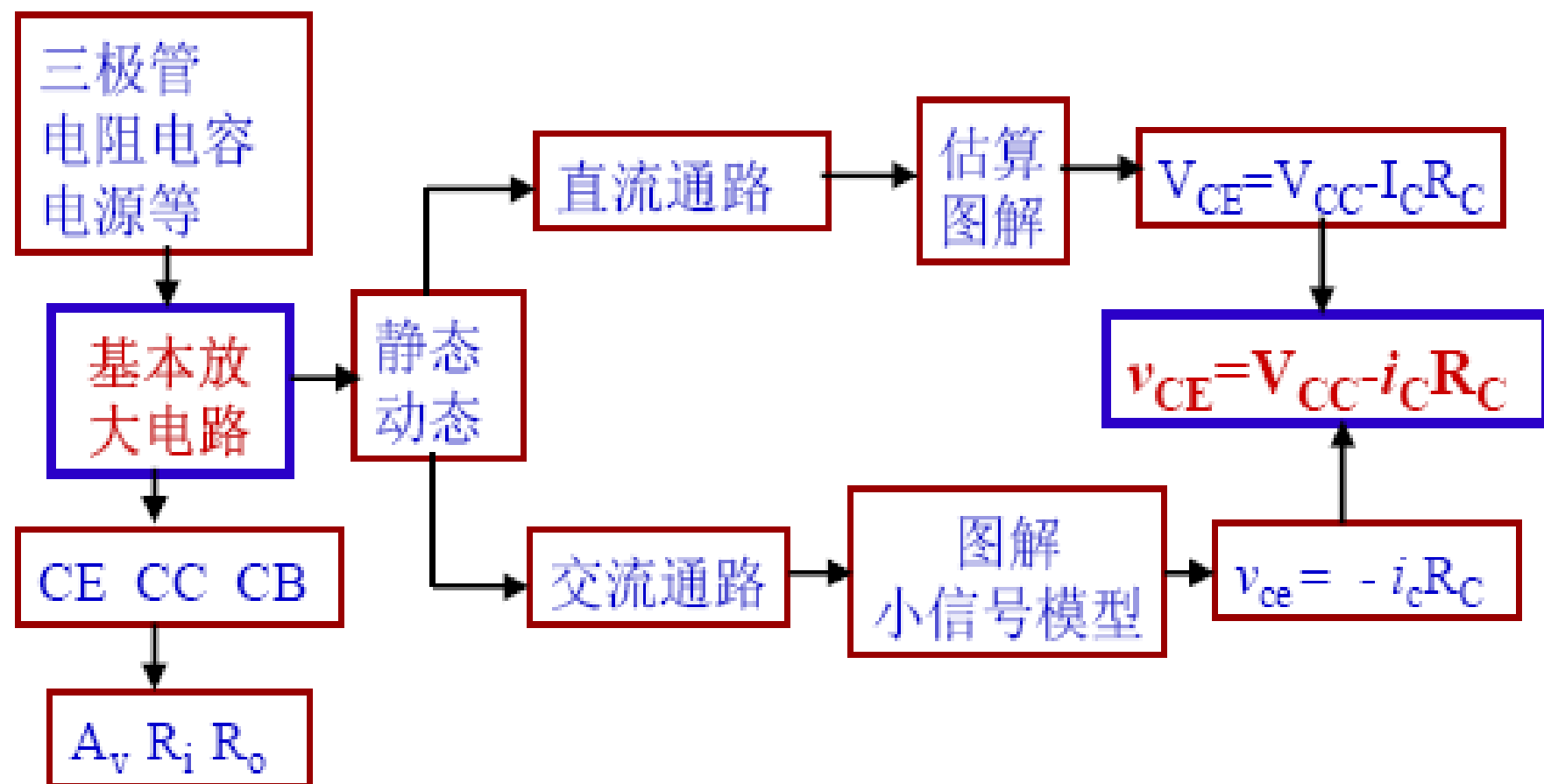




PNP型



基本放大电路总结



1. 三极管工作状态与偏压关系

状态	发射结	集电结	I_C
截止	反偏或零偏	反偏	0
放大	正偏	反偏	βI_B
饱和	正偏	正偏	$< \beta I_B$
倒置	反偏	正偏	$\neq 0$

2. 三极管处于放大状态时电流分配及电压关系

电流关系：

$$\begin{cases} I_C = \beta I_B \\ I_E = (1 + \beta) I_B \\ I_E = I_C + I_B \end{cases}$$

电位关系：

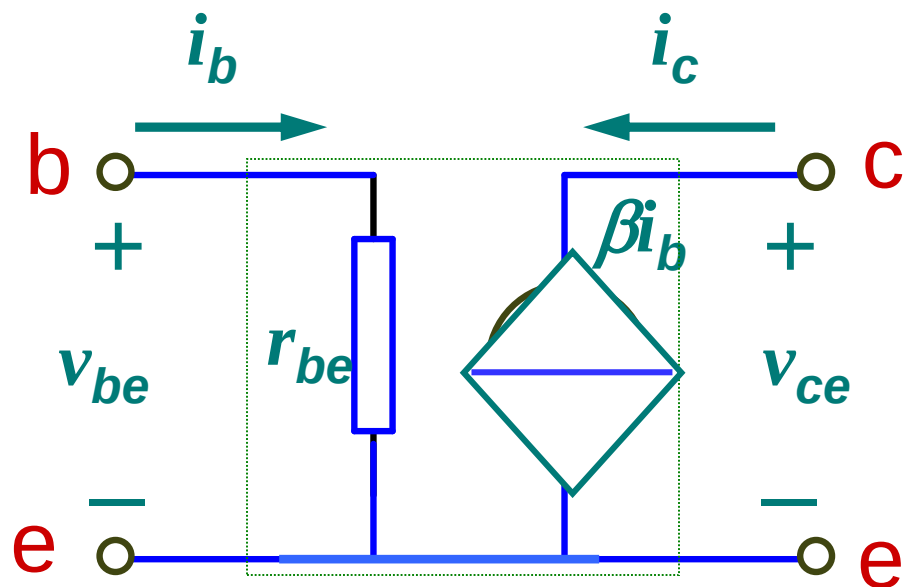
	NPN	PNP
c	最高	最低
b	中 $V_B = V_E + 0.7V$	中 $V_B = V_E - 0.7V$
e	最低	最高

锗管： $V_B = V_E + 0.2V$ $V_B = V_E - 0.2V$

3. 单管放大电路的三种基本组态

	共射组态(CE)	共集组态(CC)	共基组态(CB)
A_u	$-\frac{\beta(R_c // R_L)}{r_{be} + (1 + \beta)R_e}$ (反相,大)	$\frac{(1 + \beta)(R_e // R_L)}{r_{be} + (1 + \beta)(R_e // R_L)}$ (同相, ≈ 1)	$\frac{\beta(R_c // R_L)}{r_{be}}$ (同相,大)
R_i	$R_b // [r_{be} + (1 + \beta)R_e]$ (中)	$R_b // [r_{be} + (1 + \beta)(R_e // R_L)]$ (最大)	$R_e // \frac{r_{be}}{1 + \beta}$ (最小)
R_o	R_C (大)	$R_e // \frac{r_{be} + (R_b // R_{S\text{信号源内阻}})}{1 + \beta}$ (最小)	R_C (大)

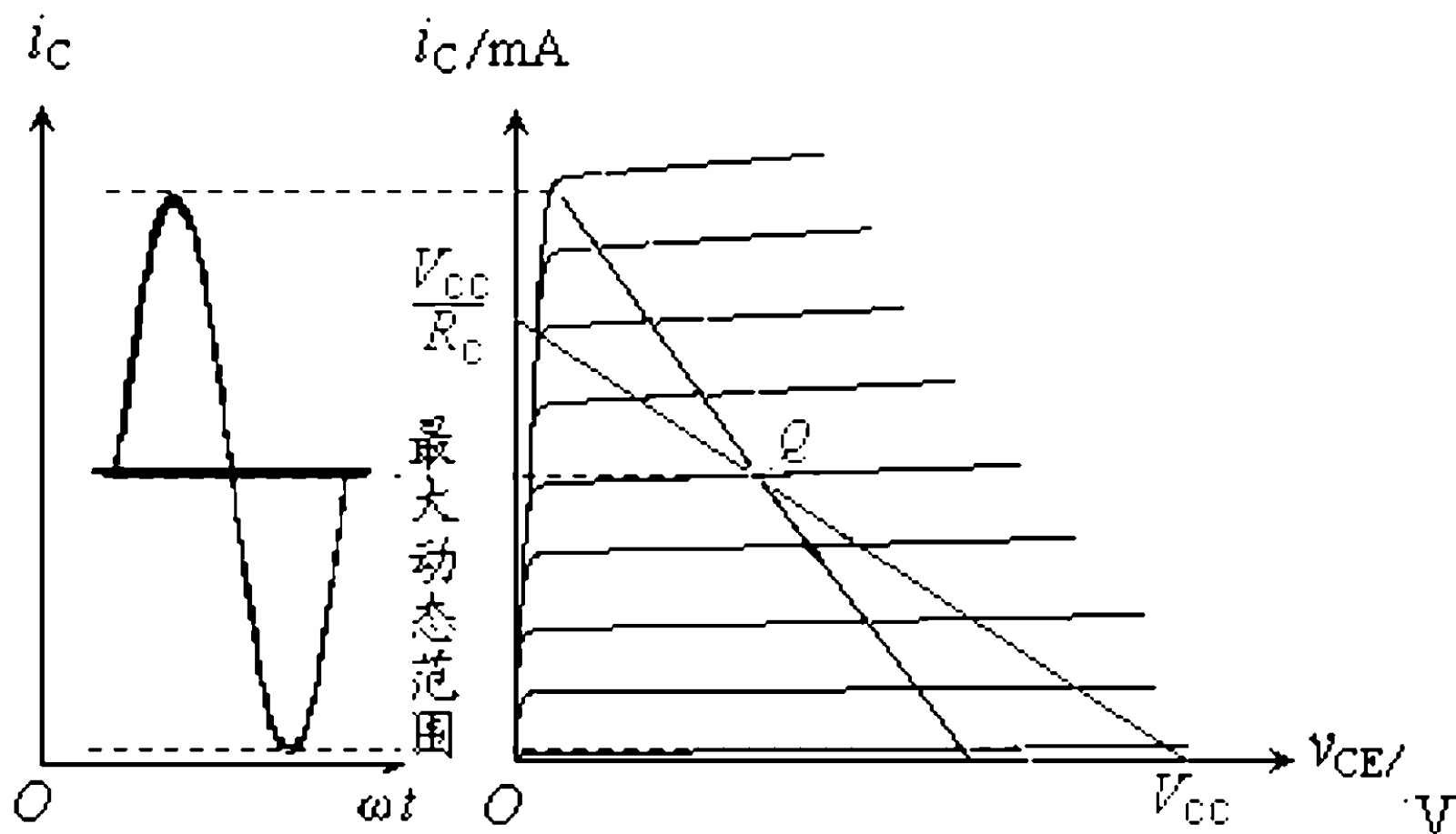
4. 三极管的中频小信号模型



低频模型：中频模型+外接耦合电容

高频模型：中频模型+内部PN结电容

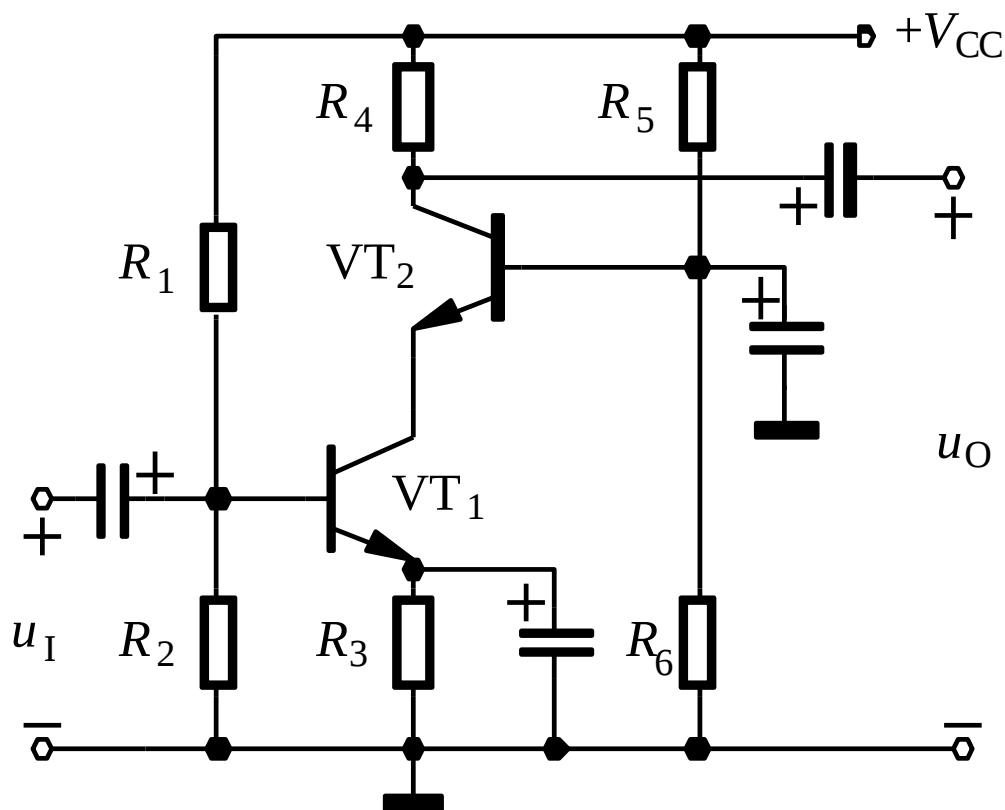
5. 三极管放大电路的图解分析



例.放大电路如图所示。设 VT_1 、 VT_2 特性相同，且 $U_{BE}=0.7V$ ，电源电压 $V_{CC}=12V$ ，电阻 $R_1=34k\Omega$ ， $R_2=10k\Omega$ ， $R_5=20k\Omega$ ， $R_6=10k\Omega$ ，现要求静态工作电流 $I_{CQ2}=1mA$ ，且 VT_1 、 VT_2 均应工作在放大区。

1)电阻 R_3 应选多大？

2)电阻 R_4 的阻值有无限制？若有，其极限值为多大？



解： 1) $I_{CQ1} \approx I_{CQ2} = 1\text{mA}$ $U_{BQ1} \approx V_{CC} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \approx 2.7\text{V}$

$$R_3 \approx \frac{U_{BQ1} - U_{BE1}}{I_{CQ1}} = 2\text{k}\Omega$$

2) $U_{BQ2} \approx V_{CC} \frac{R_6}{R_5 + R_6} = 4\text{V}$

$$U_{CQ1} = U_{BQ2} - U_{BE2} = 3.3\text{V} > U_{BQ1} = 2.7\text{V}$$

故VT₁工作在放大区。欲使VT₂也工作在放大区，需

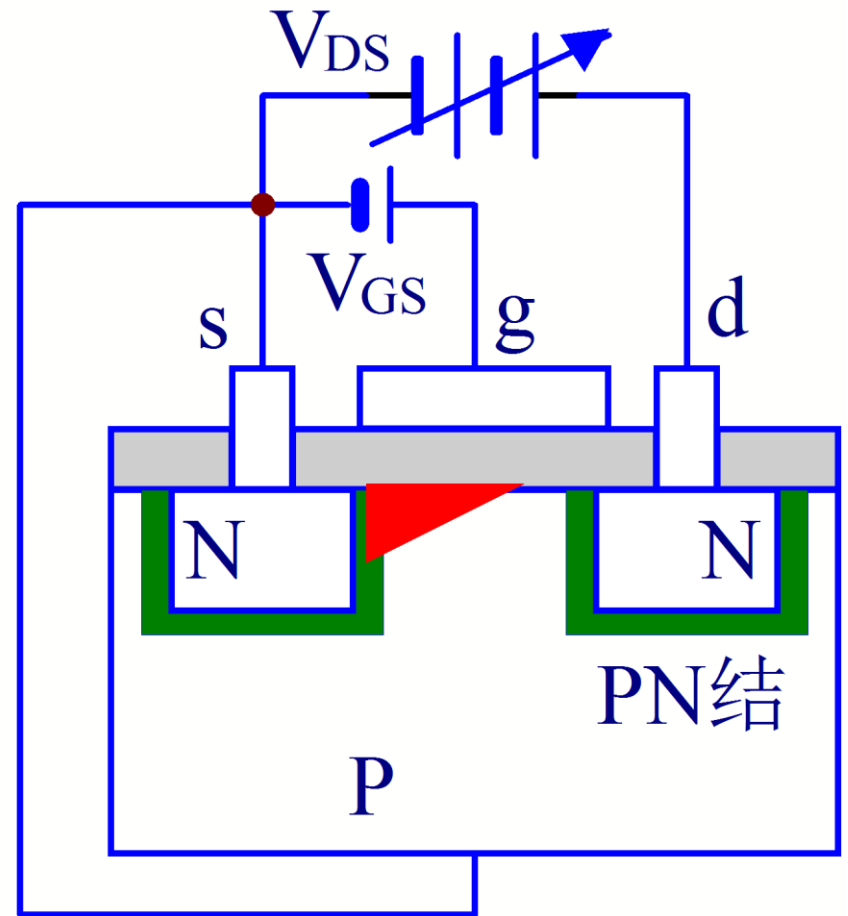
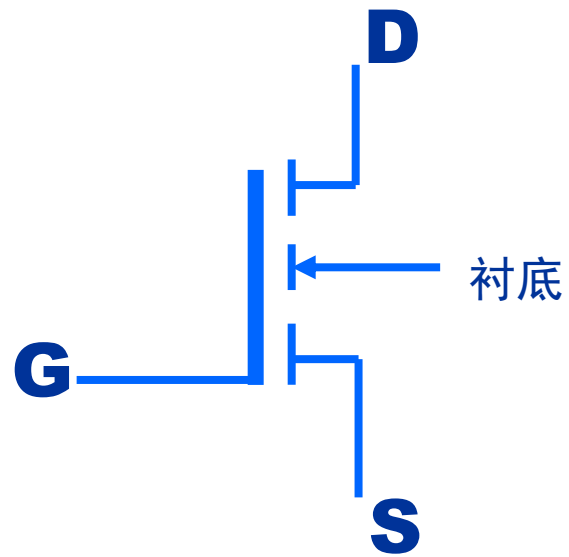
$$U_{CQ2} = V_{CC} - I_{CQ2}R_4 > U_{BQ2} = 4\text{V}$$

$$R_4 < \frac{V_{CC} - U_{BQ1}}{I_{CQ2}} = 8\text{k}\Omega \quad R_{4\text{max}} = 8\text{k}\Omega$$

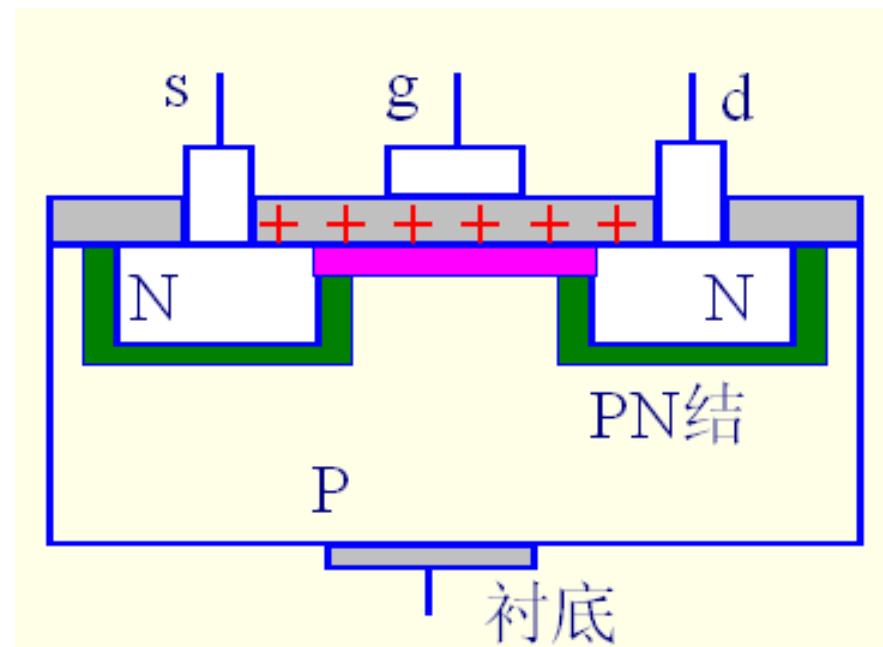
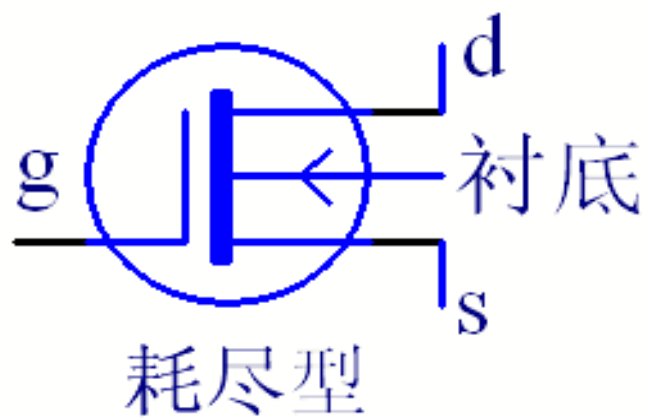
第4章 场效应管放大电路

- ❖ MOSFET的工作原理（耗尽型、增强型）；
- ❖ MOS管的输出特性、转移特性及主要参数；
- ❖ 电路的分析（静态和动态），小信号模型；
- ❖ 与三极管放大电路各组态的比较。

N沟道增强型

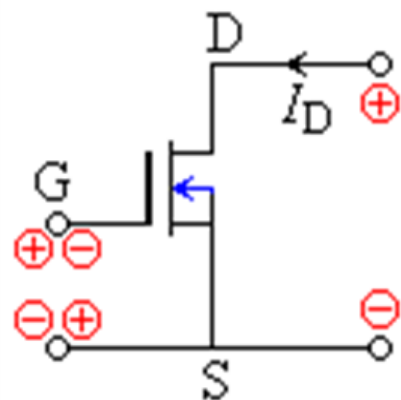


N沟道耗尽型

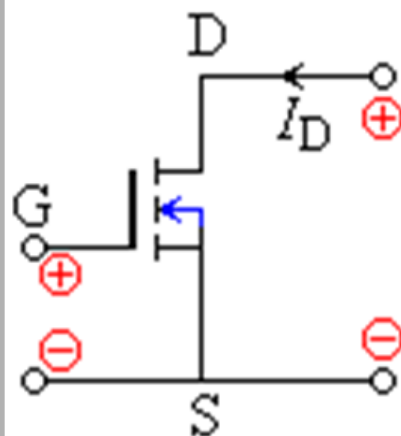


1. 各种管子的符号:

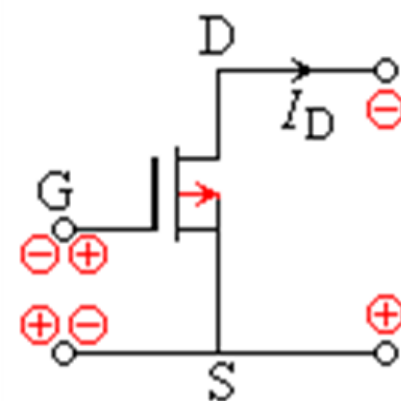
N
沟道
耗尽型



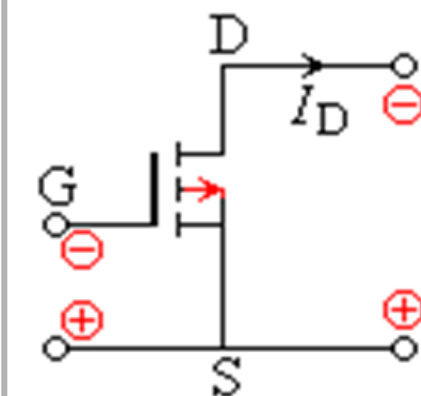
N
沟道
增强型



P
沟道
耗尽型



P
沟道
增强型



2. V - I 特性方程:

- 饱和区（恒流区又称放大区）

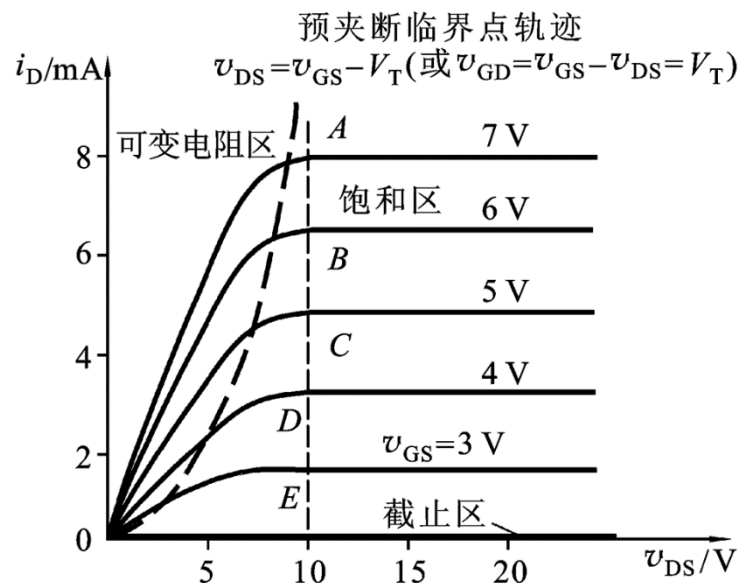
$$v_{GS} > V_T, \text{ 且 } v_{DS} \geq (v_{GS} - V_T)$$

$$i_D = K_n (v_{GS} - V_T)^2$$

$$= K_n V_T^2 \left(\frac{v_{GS}}{V_T} - 1 \right)^2$$

$$= I_{DO} \left(\frac{v_{GS}}{V_T} - 1 \right)^2$$

$$I_{DO} = K_n V_T^2 \quad \text{是 } v_{GS} = 2V_T \text{ 时的 } i_D$$



- 可变电阻区

$$v_{DS} \leq (v_{GS} - V_T)$$

$$i_D \approx 2K_n (v_{GS} - V_T) v_{DS}$$

3. 低频跨导 g_m

$$g_m = \left. \frac{\partial i_D}{\partial v_{GS}} \right|_{V_{DS}}$$

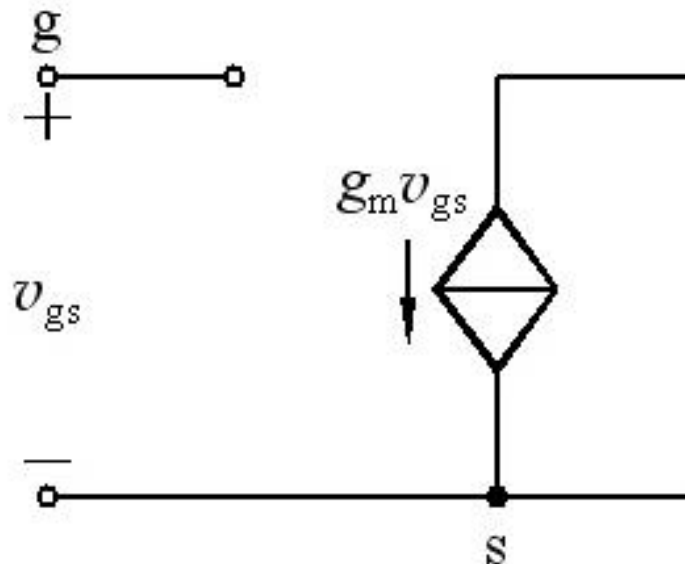
考虑到 $i_D = K_n (v_{GS} - V_T)^2 \Rightarrow (v_{GS} - V_T) = \sqrt{\frac{i_D}{K_n}}$

则
$$g_m = \left. \frac{\partial i_D}{\partial v_{GS}} \right|_{V_{DS}} = \left. \frac{\partial [K_n (v_{GS} - V_T)^2]}{\partial v_{GS}} \right|_{V_{DS}}$$

$$= 2K_n (v_{GS} - V_T) = 2\sqrt{K_n i_D}$$

其中
$$K_n = \frac{\mu_n C_{ox}}{2} \cdot \frac{W}{L}$$

4. 放大电路的组成 及小信号模型



1) 耗尽型MOSFET和JFET可自偏置:

即 V_{GS} 加不加直流的外接电源都可以

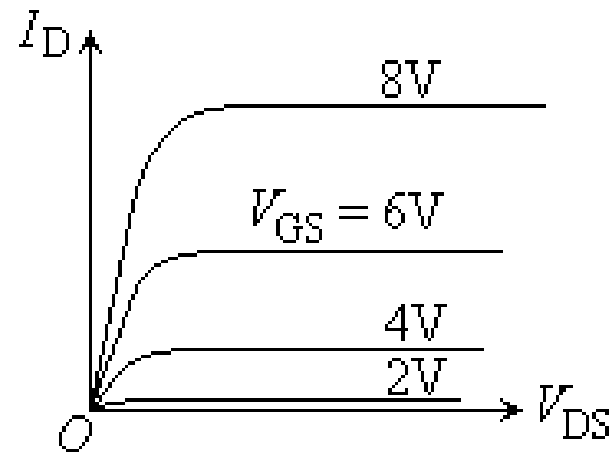
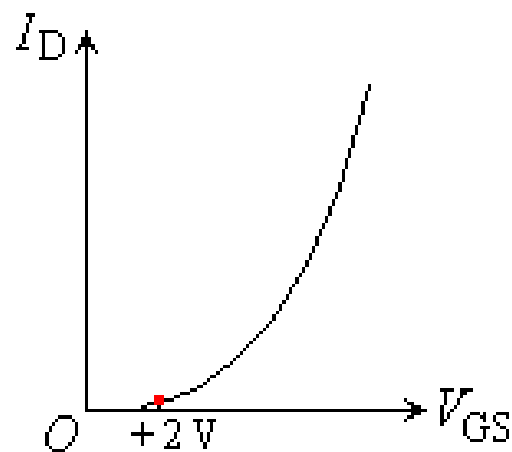
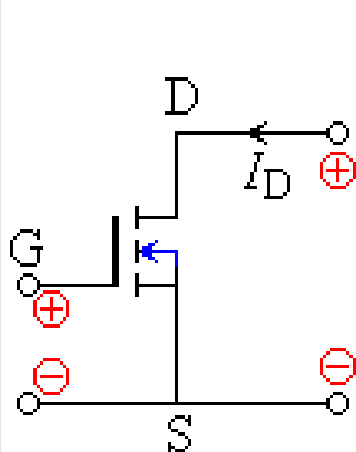
2) 增强型MOSFET必须加合适栅源偏置:

即栅极必须接有直流电源

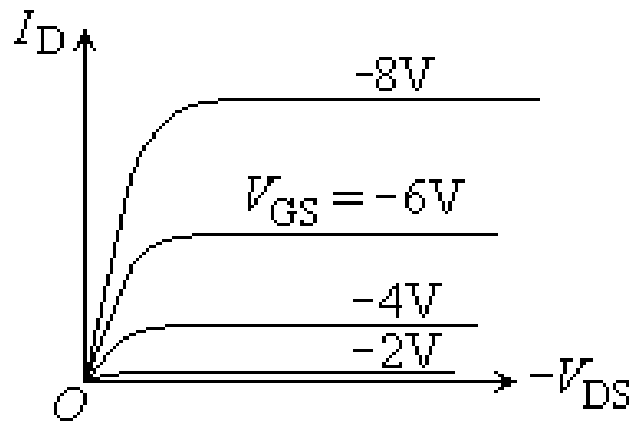
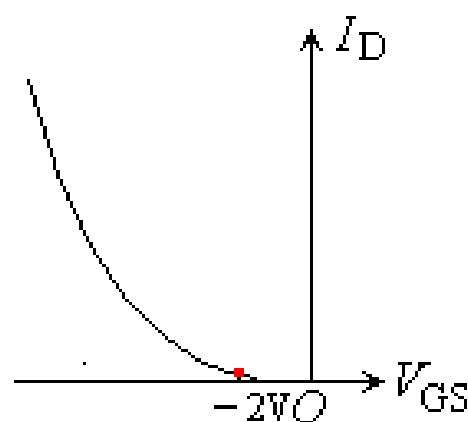
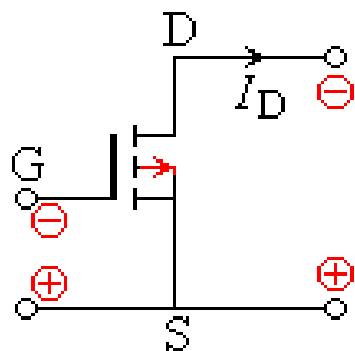
各类场效应管总结

绝缘栅场效应管

N 沟道增强型



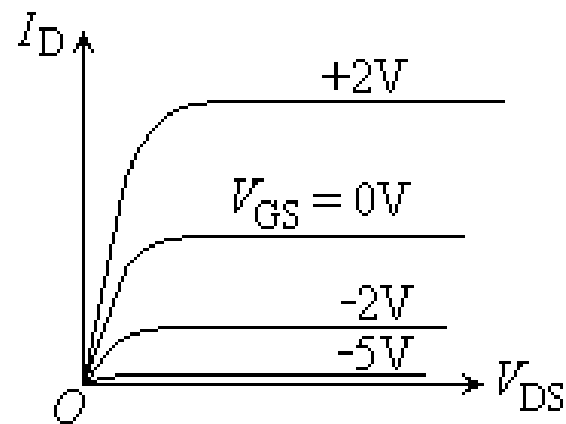
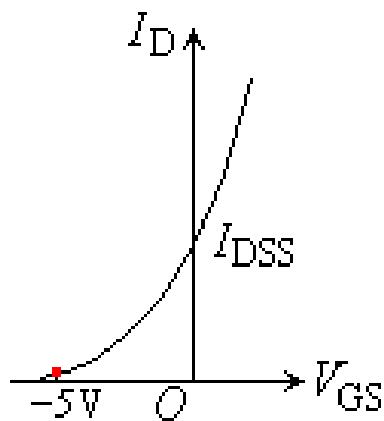
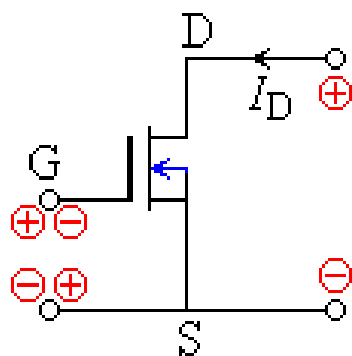
P 沟道增强型



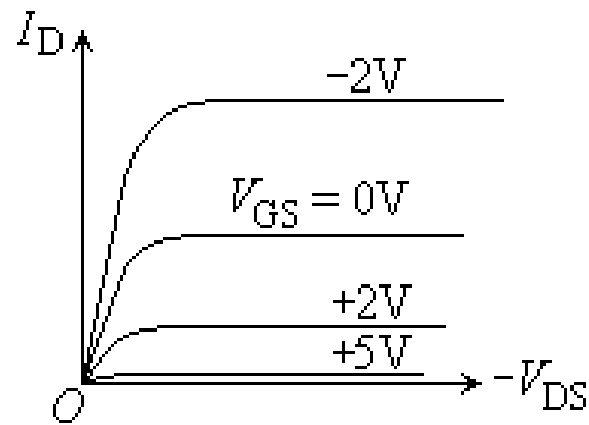
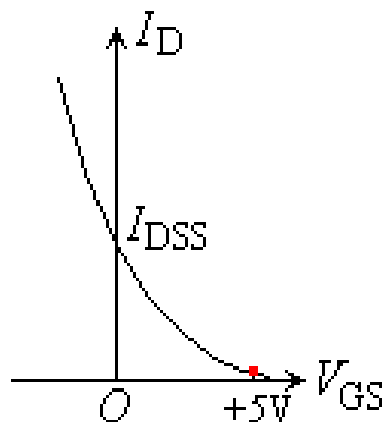
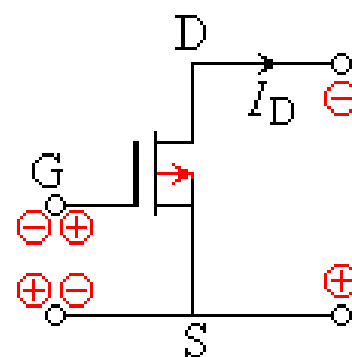
$$i_D = I_{D0} \left(\frac{V_{GS}}{V_T} - 1 \right)^2$$

绝缘栅场效应管

N 沟道耗尽型



P 沟道耗尽型

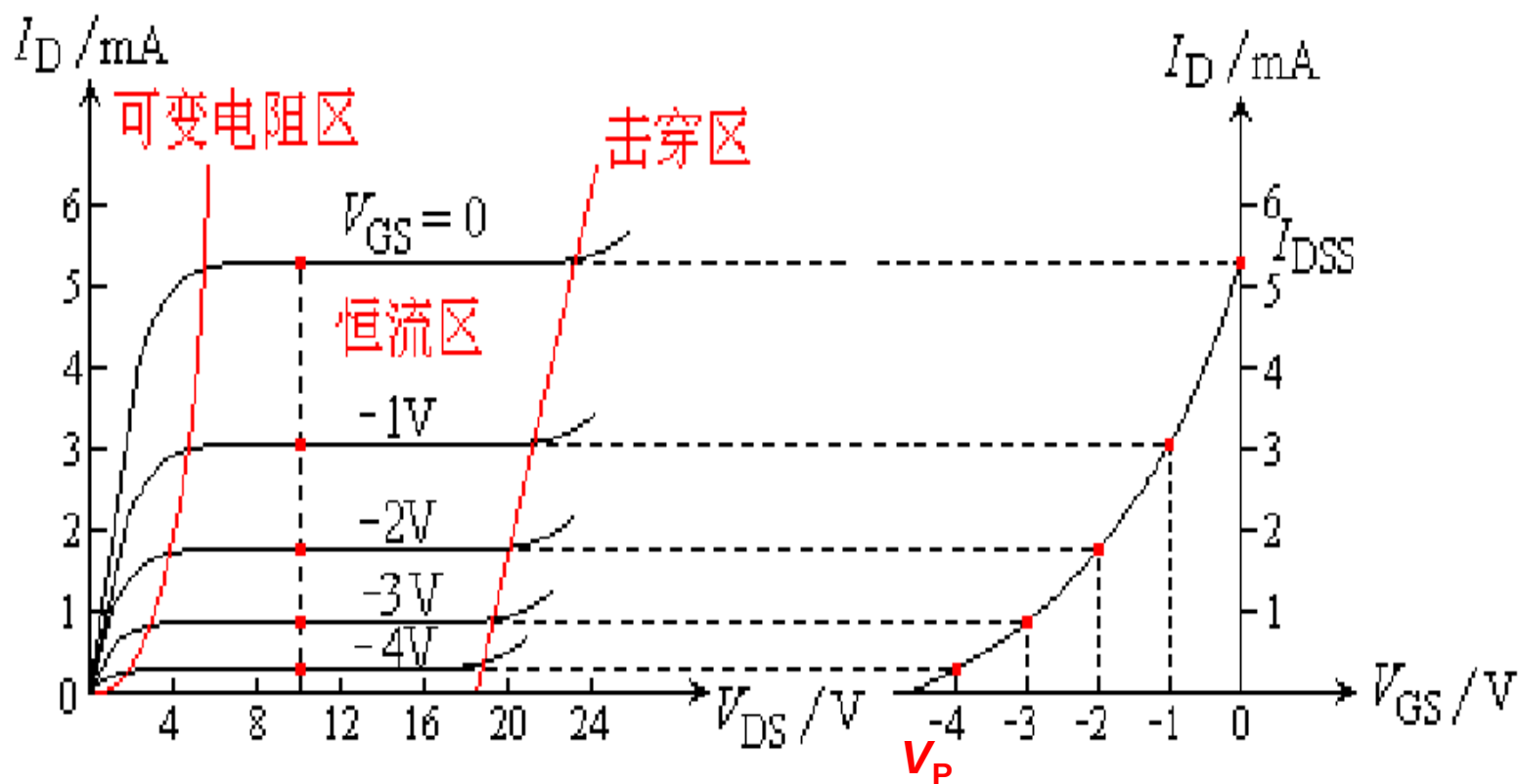


$$i_D = i_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2$$

5. 单管放大电路的三种基本组态

	共源组态(CS)	共漏组态(CD)	共栅组态(CG)
A_u	$-\frac{g_m(r_{ds} \parallel R_d \parallel R_L)}{1 + g_m R_{\text{源极电阻}}}$ (反相,大)	$\frac{g_m(r_{ds} \parallel R \parallel R_L)}{1 + g_m(r_{ds} \parallel R \parallel R_L)}$ (同相, ≈ 1)	$\frac{(g_m + \frac{1}{r_{ds}})(R_d \parallel R_L)}{1 + \frac{R_d \parallel R_L}{r_{ds}}}$
R_i	$R_{g1} \parallel R_{g2}$ (很高)	$R_{g1} \parallel R_{g2}$ (很高)	$R_{\text{源极电阻}} \parallel \frac{1}{g_m}$
R_o	$r_{ds} \parallel R_d$	$r_{ds} \parallel R \parallel \frac{1}{g_m}$	$r_{ds} \parallel R_d$

6. 场效应管放大电路的图解方法

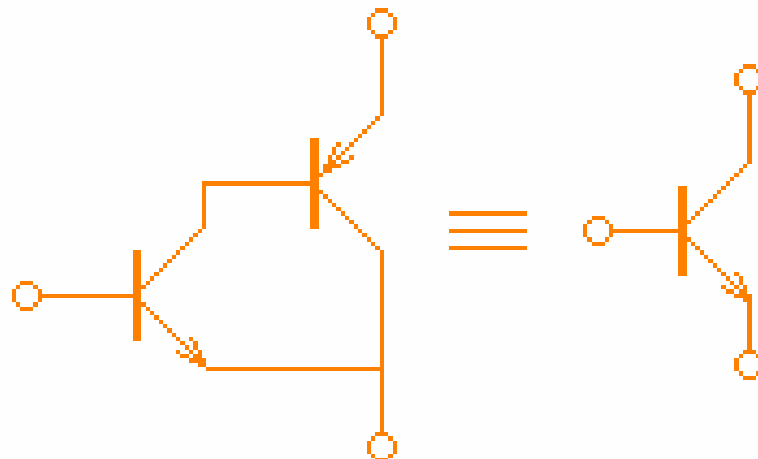
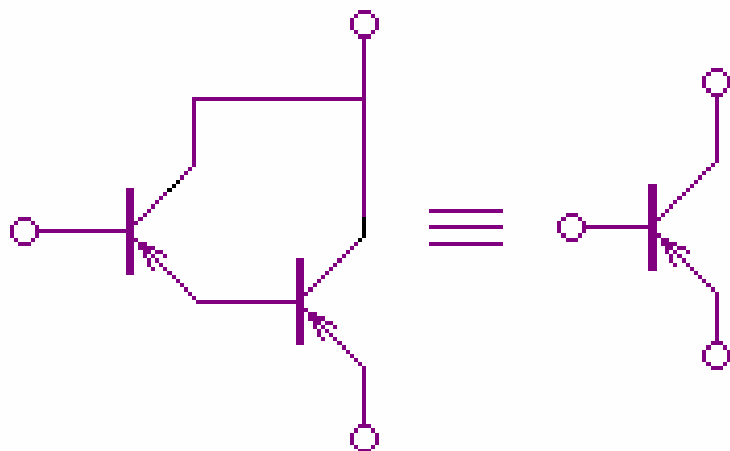
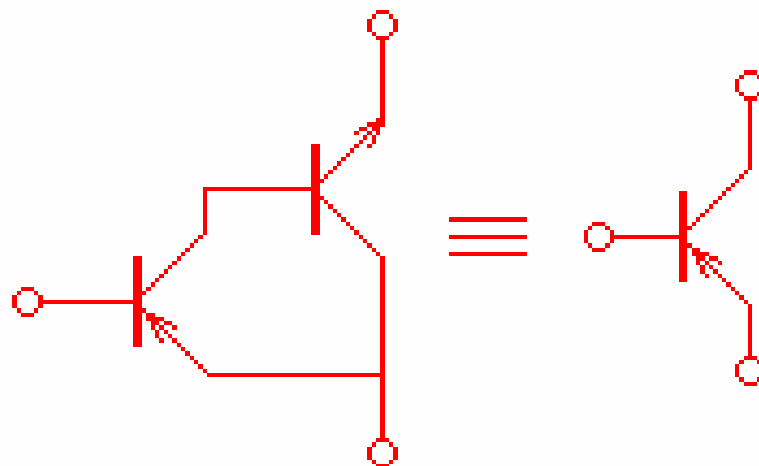
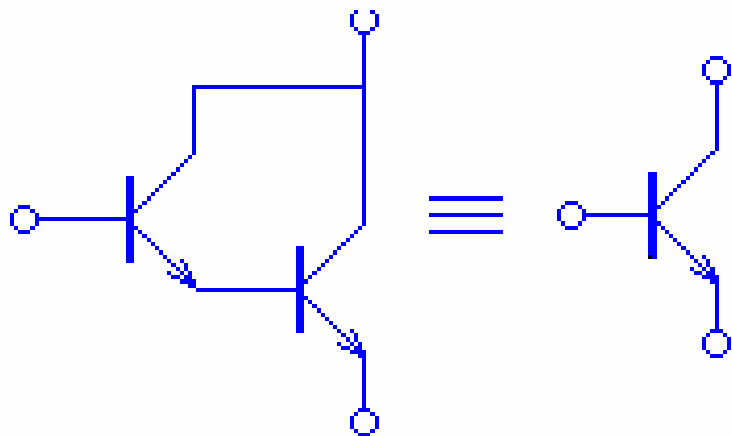


第7章 集成运算放大器

- ❖ 集成电路中的电流源电路（镜像电流源、微电流源）；
- ❖ 差分式放大电路的分析及计算（双入双出、双入单出、单入单出、单入双出）--记半边电路的特点公式；
- ❖ 集成运放的组成及理想运放的主要参数。

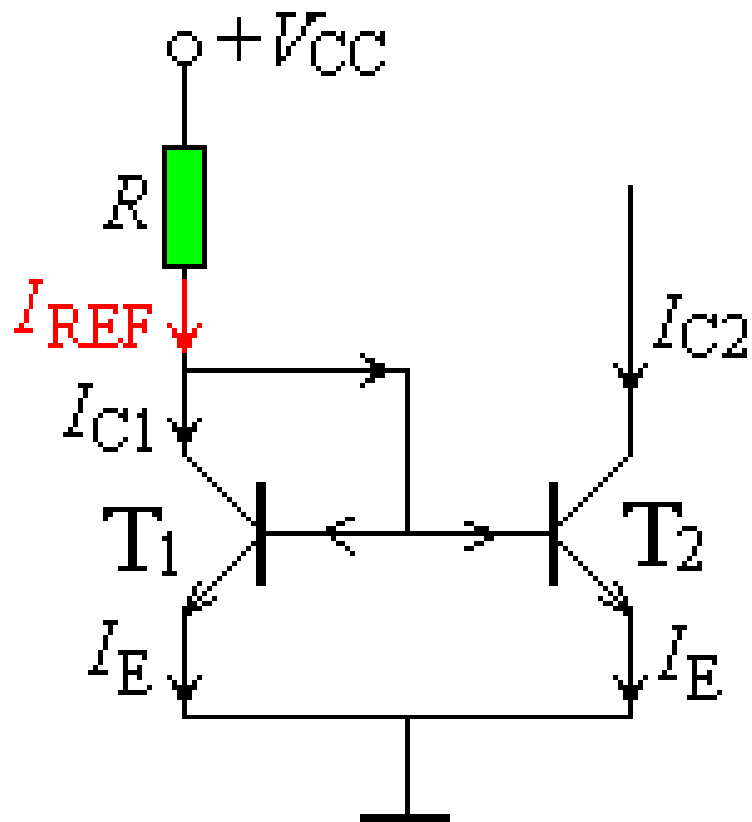
1. 电路形式的认识

◆ 复合管（达林顿管）



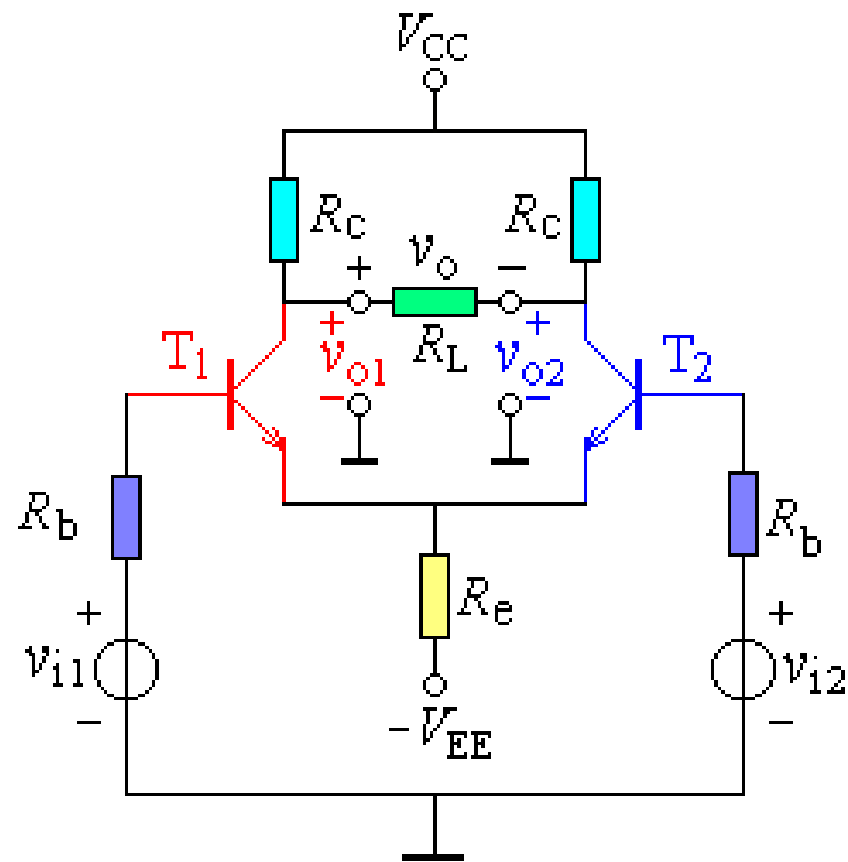
◆ 电流源

放大管背靠背连接

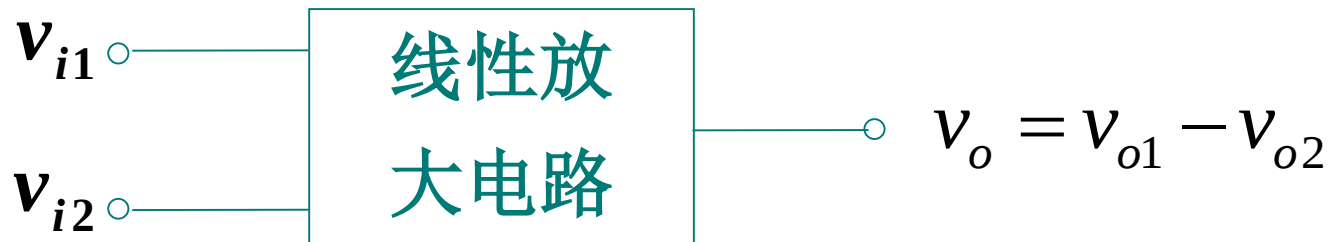


◆ 差分放大电路

放大管面对面连接



2.基本概念



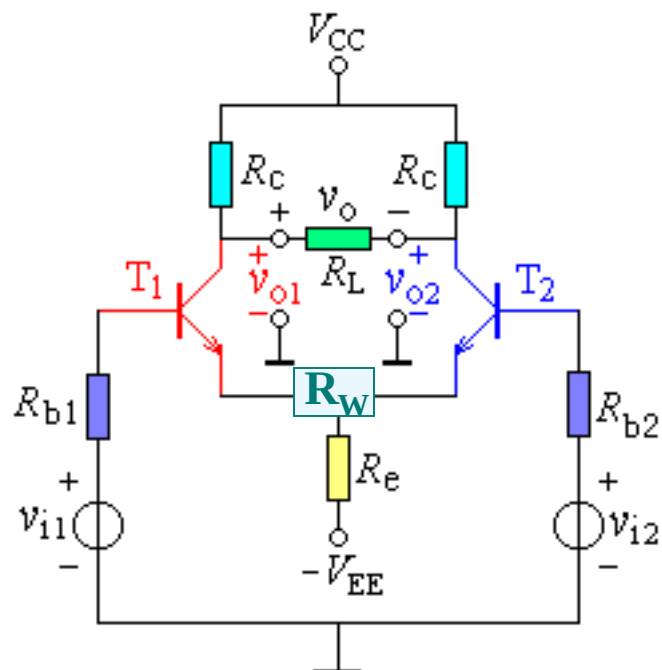
定义 $\begin{cases} \text{差模信号: } v_{id} = v_{i1} - v_{i2} \\ \text{共模信号: } v_{ic} = \frac{1}{2}(v_{i1} + v_{i2}) \end{cases}$ 则 $\begin{cases} v_{i1} = v_{ic} + \frac{1}{2}v_{id} \\ v_{i2} = v_{ic} - \frac{1}{2}v_{id} \end{cases}$

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

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

定义: $K_{CMR} = \left| \frac{A_{VD}}{A_{VC}} \right|$

3. 差分电路基本计算



a. 双端输出

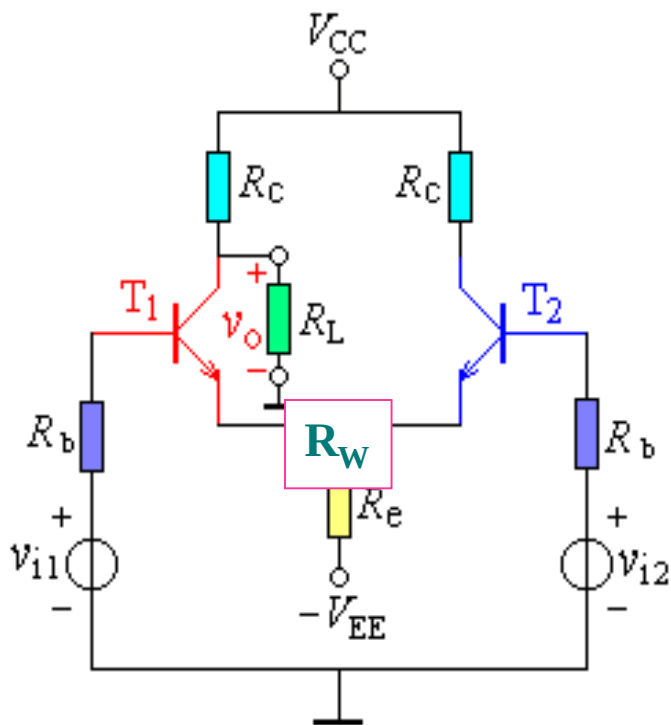
$$A_{vd} = - \frac{\beta(R_c // \frac{1}{2} R_L)}{r_{be} + (1 + \beta) \frac{1}{2} R_w}$$

$$A_{VC} = \frac{v_{oc}}{v_{ic}} \approx 0$$

$$R_{id} = 2(R_b + r_{be} + \frac{1}{2} R_w (1 + \beta))$$

$$R_{ic} = \frac{1}{2} [R_b + r_{be} + (1 + \beta) (\frac{R_w}{2} + 2R_e)]$$

$$R_o = 2R_c$$



b. 单端输出

$$R_o = R_c$$

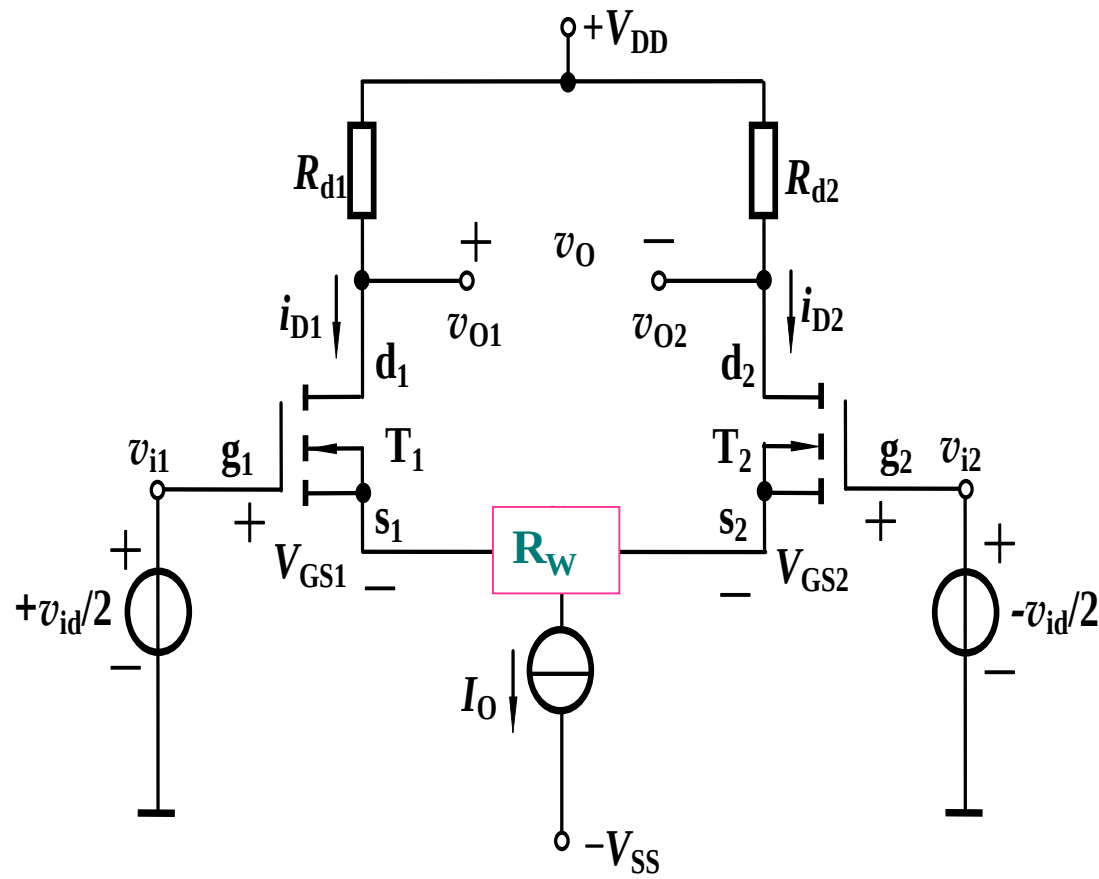
$$A_{vd} = \frac{v_{od}}{v_{id}} = \pm \frac{\beta(R_c // R_L)}{2[R_b + r_{be} + (1 + \beta)\frac{R_w}{2}]}$$

$$A_{vc} = \pm \frac{\beta(R_c // R_L)}{r_{be} + (1 + \beta)[\frac{R_w}{2} + 2R_e]}$$

$$\approx \pm \frac{R_c // R_L}{\frac{R_w}{2} + 2R_e}$$

$$R_{id} = 2(R_b + r_{be} + \frac{1}{2}R_w(1 + \beta))$$

$$R_{ic} = \frac{1}{2}[R_b + r_{be} + (1 + \beta)(\frac{R_w}{2} + 2R_e)]$$



双端输出：

$$A_{VD} = -\frac{g_m(R_d // \frac{R_L}{2})}{1 + g_m \frac{R_W}{2}}$$

$$A_{VC} \rightarrow 0$$

$$R_o = 2(R_d // r_{ds})$$

单端输出：

$$A_{VD} = \pm \frac{1}{2} \frac{g_m(R_d // R_L)}{1 + g_m \frac{R_W}{2}}$$

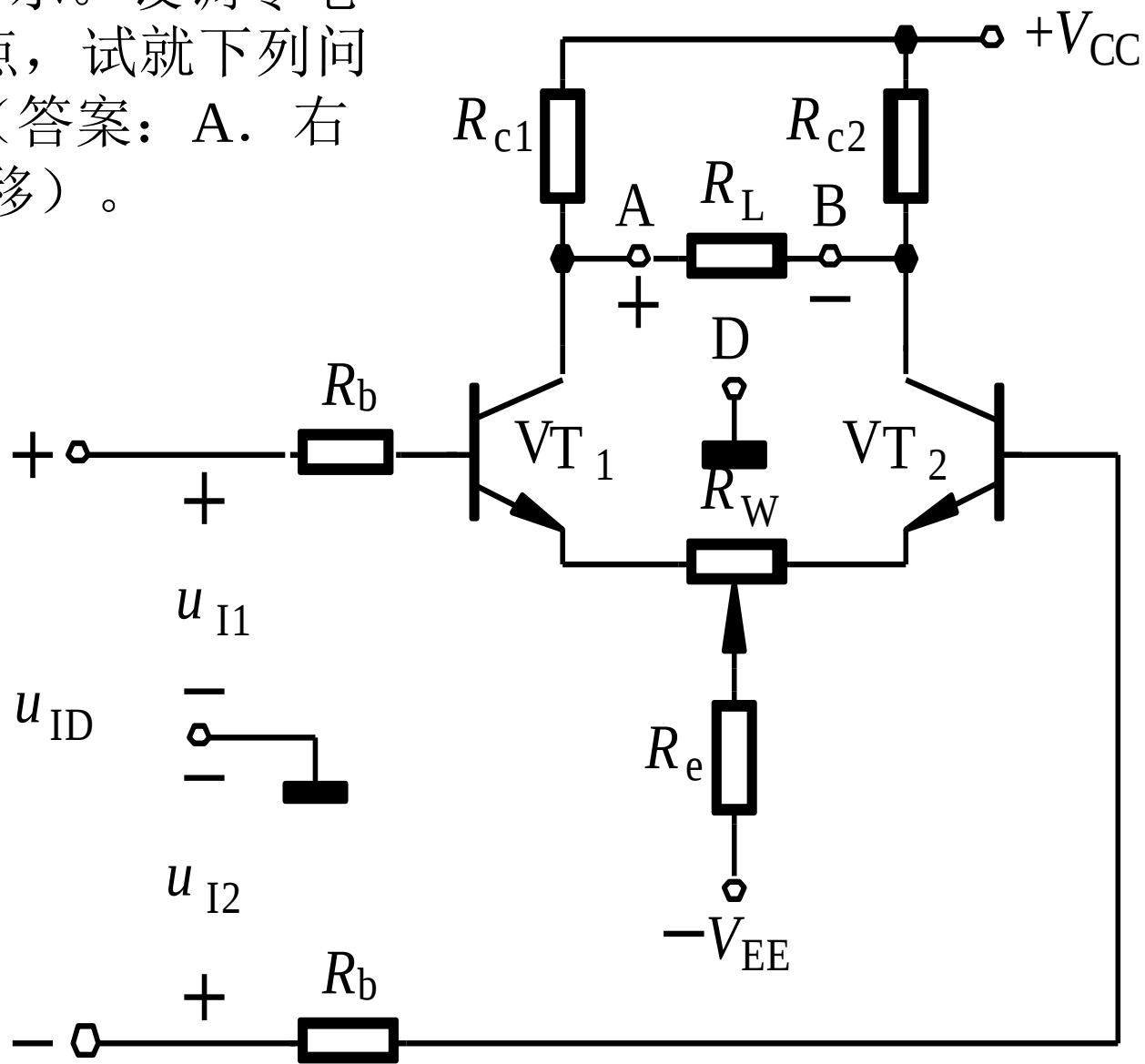
$$A_{VC} = \pm \frac{g_m(R_d // R_L)}{1 + g_m(\frac{R_W}{2} + 2r_o)}$$

$$R_o = R_d // r_{ds}$$

例：实验电路如图所示。设调零电位器 R_W 滑动端位于中点，试就下列问题选择正确答案填空（答案：A. 右移，B. 左移，C. 不移）。

1) 若只因为
 $U_{BE1} < U_{BE2}$ ，
 为了使静态电
 流 $I_{C1} = I_{C2}$ ，
 应将 R_W 滑动
 端 A；

2) 若只因为
 $\beta_1 < \beta_2$ ，
 为了使两边单
 端输出放大
 倍数
 $|A_{v1}| = |A_{v2}|$ ，
 应将 R_W 滑动
 端 B。

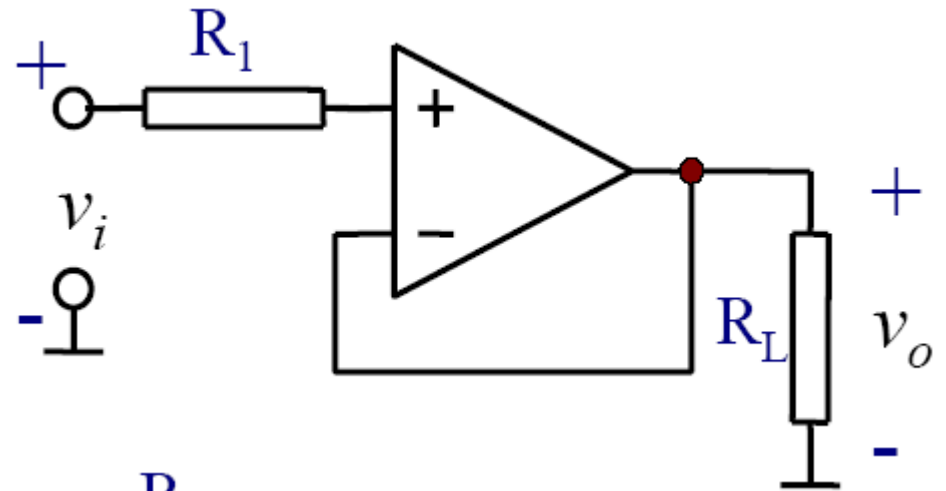


第8章 反馈放大电路

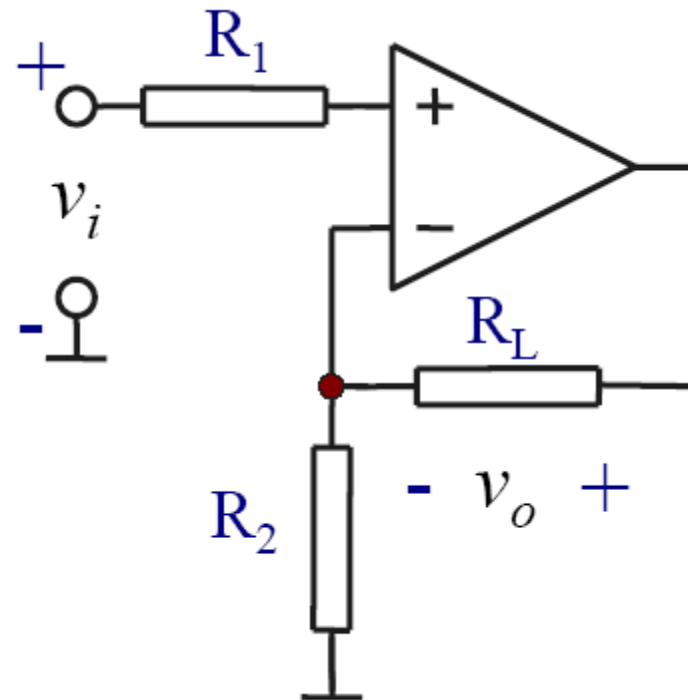
- ❖ 基本概念（反馈、反馈通道、开环、闭环、级间反馈、本级反馈）；
- ❖ 负反馈对放大电路性能的改善（提高增益的稳定性、改变输入输出电阻、扩展频带、减少非线性失真）；
- ❖ 负反馈类型的判断（四步法）及符合要求的电路连接；
- ❖ 深度负反馈条件下的近似计算及自激振荡的条件。

1、负反馈的四种类型

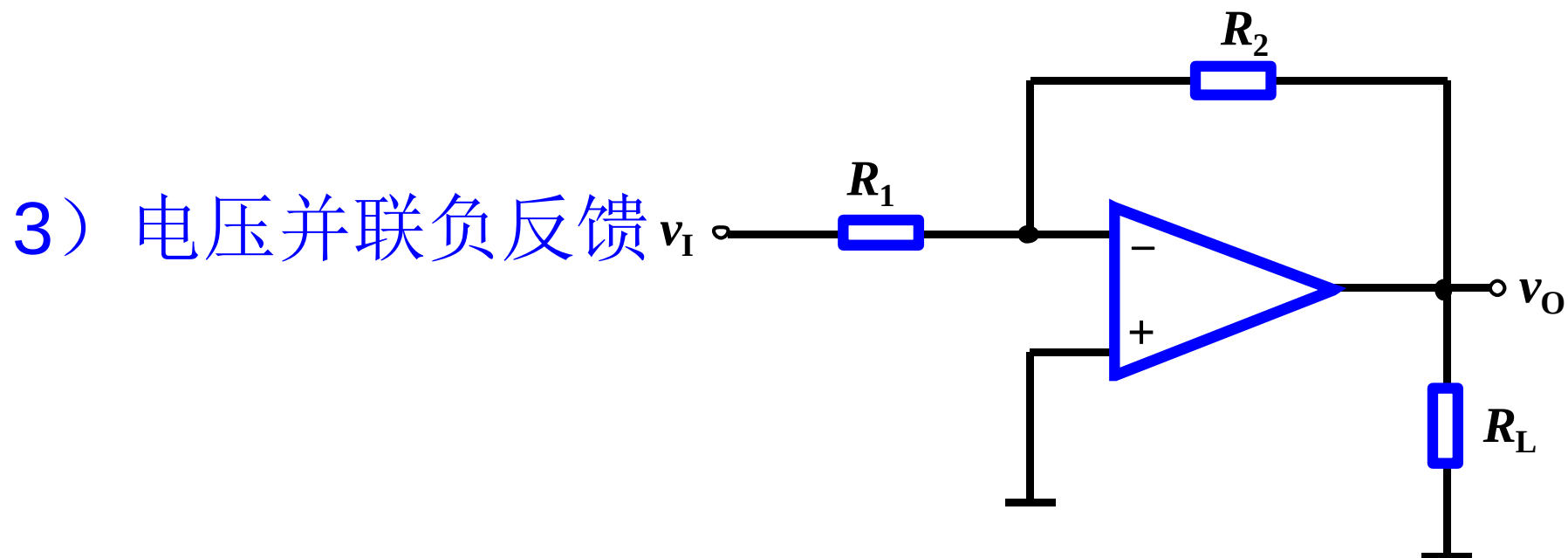
1) 电压串联负反馈



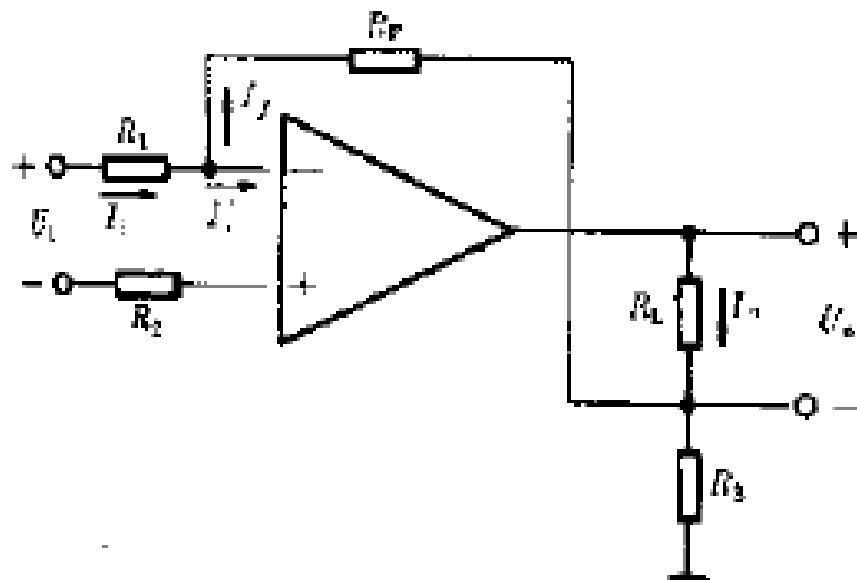
2) 电流串联负反馈



3) 电压并联负反馈



4) 电流并联负反馈



2、负反馈放大电路的一般表达式

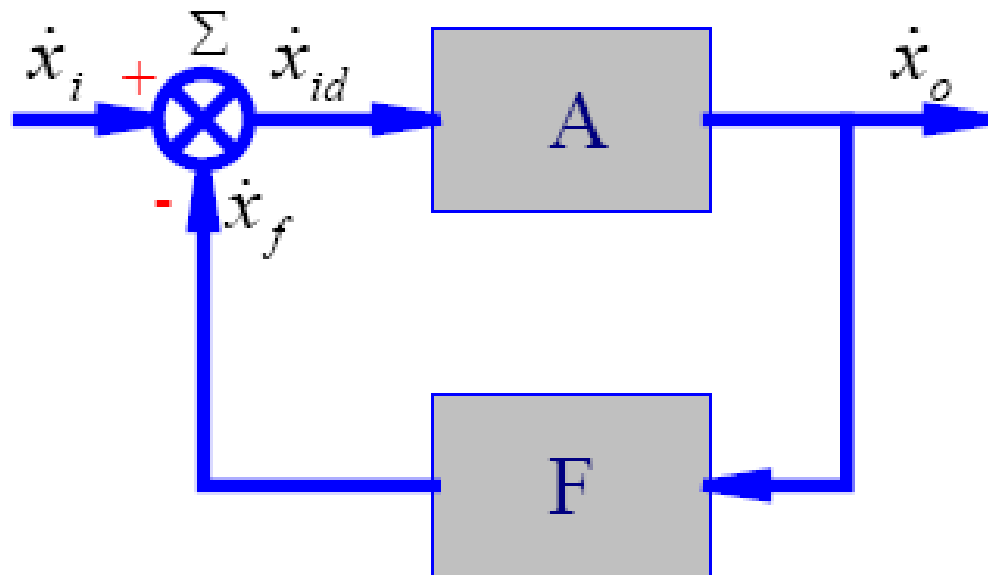
已知

$$\dot{A} = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_{id}} \quad \text{开环增益（考虑反馈网络的负载效应）}$$

$$\dot{F} = \frac{\dot{X}_f}{\dot{X}_o} \quad \text{反馈系数}$$

$$\dot{A}_F = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i} \quad \text{闭环增益}$$

$$\begin{aligned} \text{所以 } \dot{A}_F &= \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i} = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_{id} + \dot{X}_f} \\ &= \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_o / \dot{A} + \dot{X}_o \dot{F}} \end{aligned}$$



$$\text{因为 } \dot{X}_{id} = \dot{X}_i - \dot{X}_f$$

即

$$\dot{A}_F = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}} \quad \text{闭环增益的一般表达式}$$

$|1 + \dot{A}\dot{F}| \gg 1$ 时，深度负反馈

$$1 + \dot{A}\dot{F} \approx \dot{A}\dot{F}, \text{ 即 } \dot{X}_i \approx \dot{X}_f, \dot{X}_d \approx 0$$

$$\dot{A}_f = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}} \approx \frac{\dot{A}}{\dot{A}\dot{F}} = \frac{1}{\dot{F}}$$

引入深度负反馈后，电路增益基本与放大电路的内部参数和负载无关(只要负载不使A下降太多)。

3、反馈组态总结

电路增益（深度负反馈条件下）： $\dot{A}_f = \frac{1}{\dot{F}}$

电压放大倍数（深度负反馈条件下）：

$$A_{vf} = \frac{I_o R_o}{I_i R_i} = A_{v_{vf}} = A_{v_{if}} \frac{1}{R} = A_{i_{vf}} R_o = A_{i_{if}} \frac{R_o}{R_i}$$

串联反馈，电路的输入电阻 $R_{if} = (1 + AF)R_i$

并联反馈，电路的输入电阻 $R_{if} = \frac{R_i}{(1 + AF)}$

电流反馈，电路的输出电阻 $R_{of} = (1 + AF)R_o$

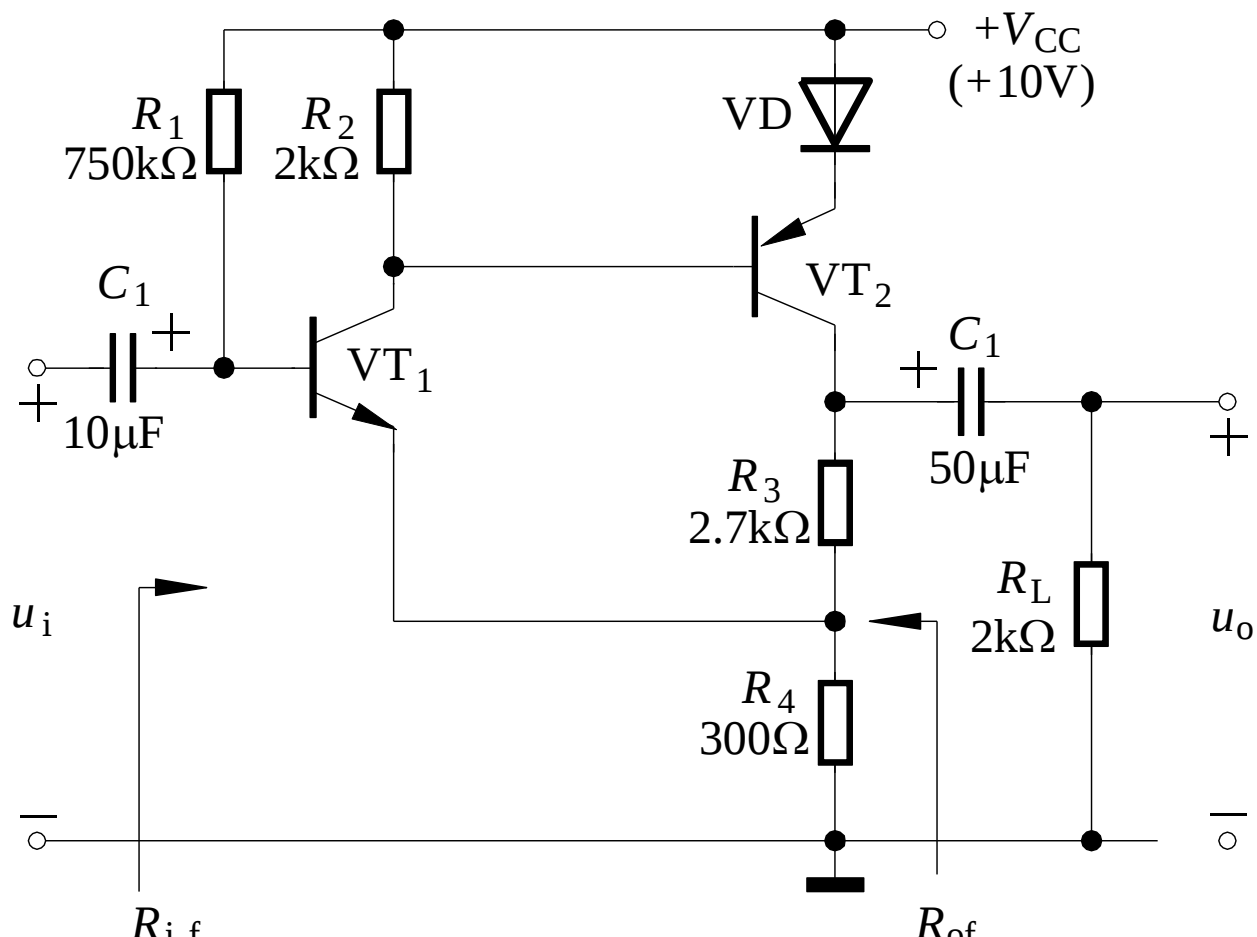
电压反馈，电路的输出电阻 $R_{of} = \frac{R_o}{(1 + AF)}$

并联反馈信号源内阻越大越好

例：反馈放大电路如图所示，设电容器对交流信号均可视为短路。

1) 指出级间交流反馈支路、极性和组态及其对输入电阻、输出电阻的影响；

2) 计算深度负反馈条件下闭环电压放大倍数、输入电阻、输出电阻。



解：

1) 由 R_3 和 R_4 组成交流电压串联负反馈，可增大输入电阻，减小输出电阻。

$$2) \quad A_{uuf} = \frac{u_o}{u_i} \approx 1 + \frac{R_3}{R_4} = 10$$

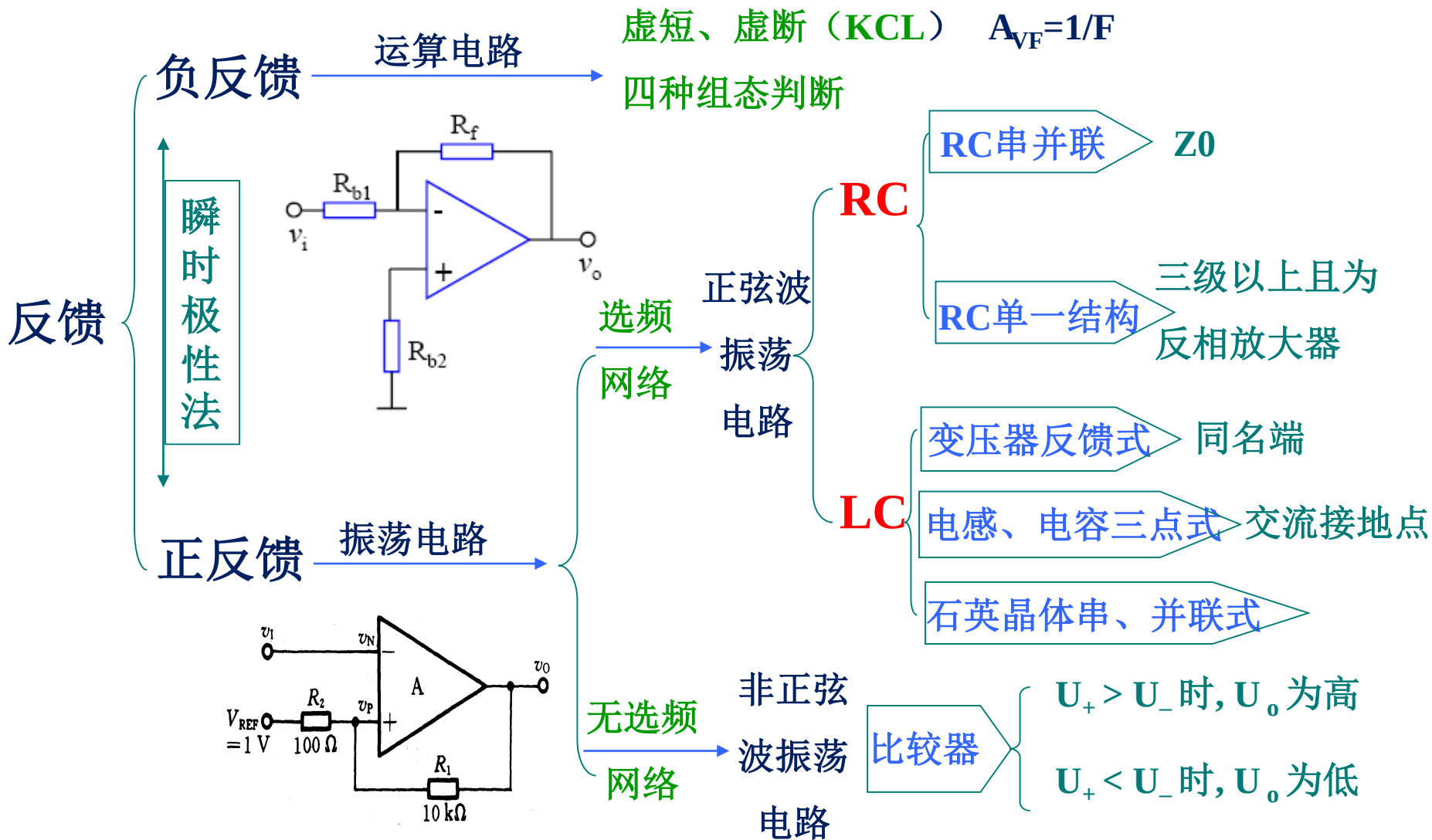
$$R_{if} \approx R_1 = 750\text{k}\Omega$$

$$R_{of} \approx 0$$

第2、10章 信号的运算与处理电路

- ❖ 基本概念：虚短、虚断；
- ❖ 基本运算电路的电路形式与分析（正比例、负比例、加、减、积分）；
- ❖ 电压比较器电路。
- ❖ 正弦波信号的振荡电路：**RC串并联式**，**电容/电感三点式**
- ❖ 非正弦波电路的产生：电压比较器、积分运算

反馈的应用



RC振荡电路:

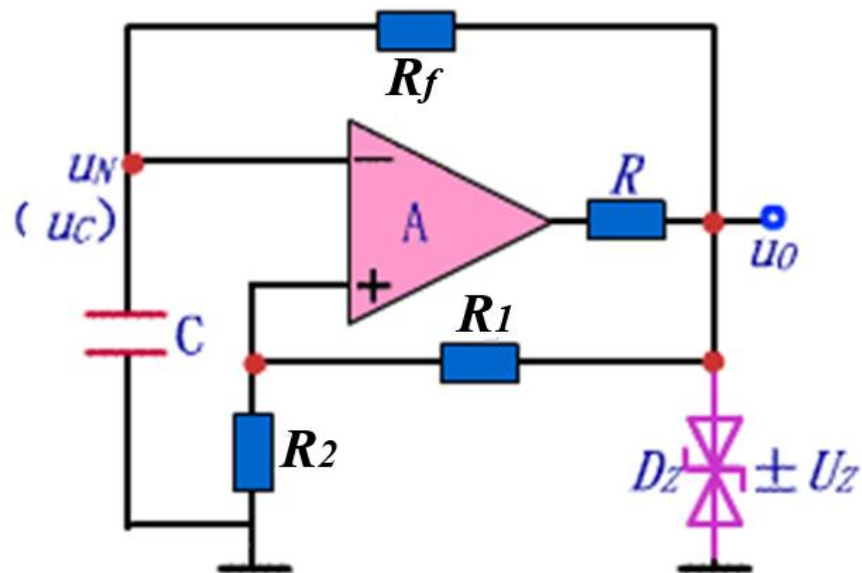
$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$$

电容三点式:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}}}$$

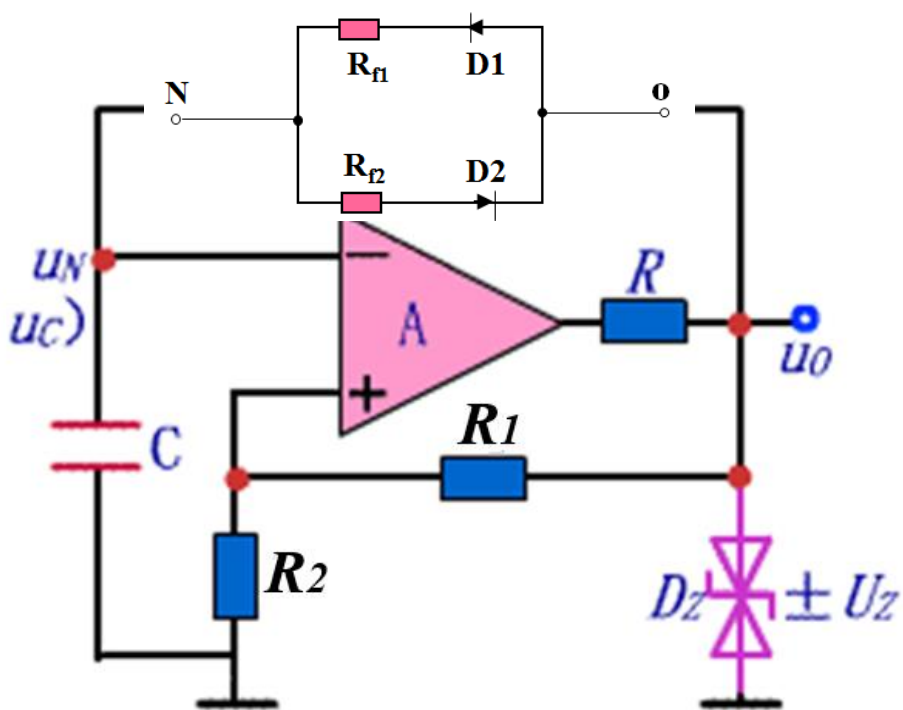
电感三点式:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{C(L_1 + L_2 + 2M)}}$$



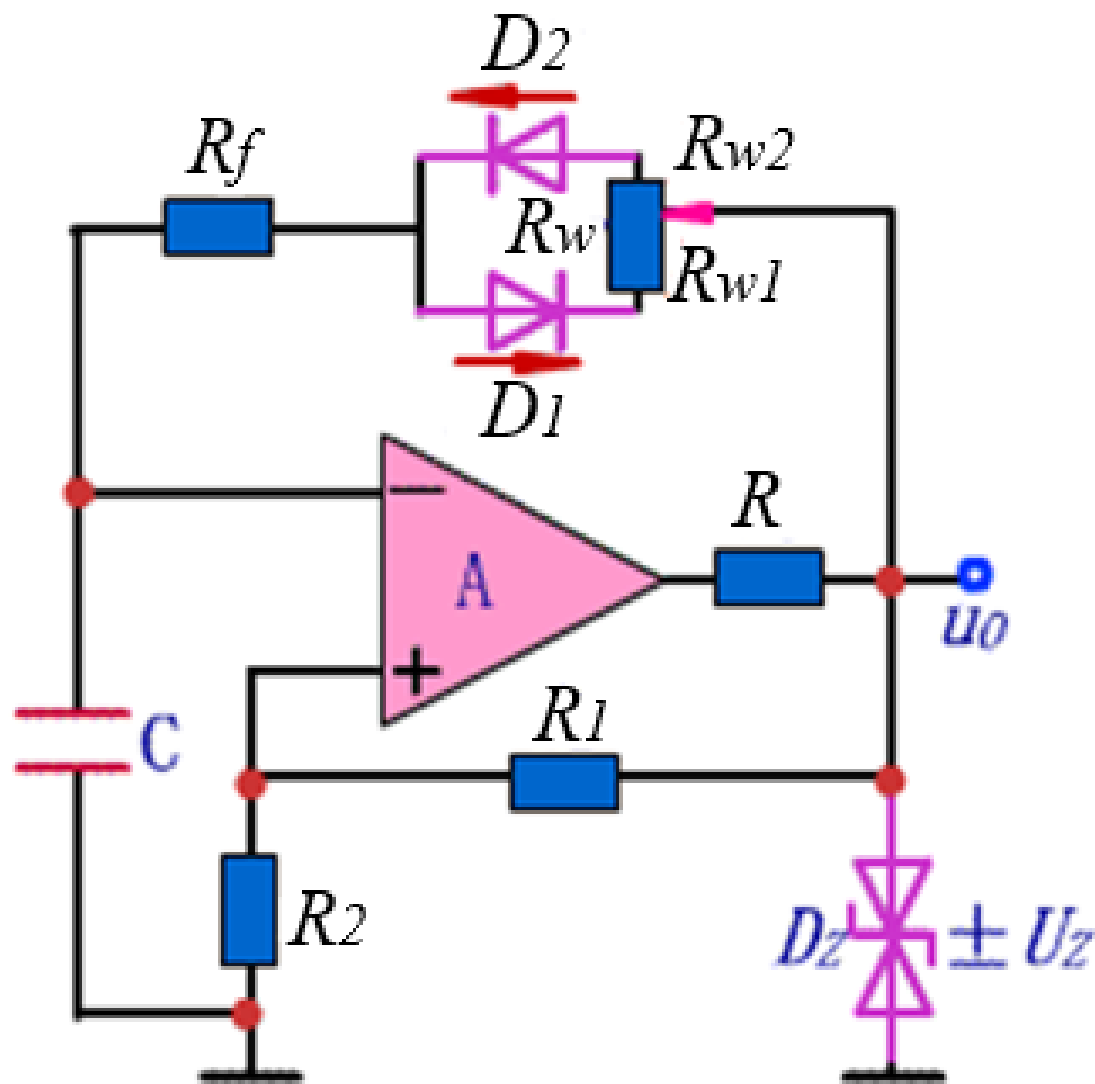
$$T = 2R_f C \ln \frac{1+F}{1-F}$$

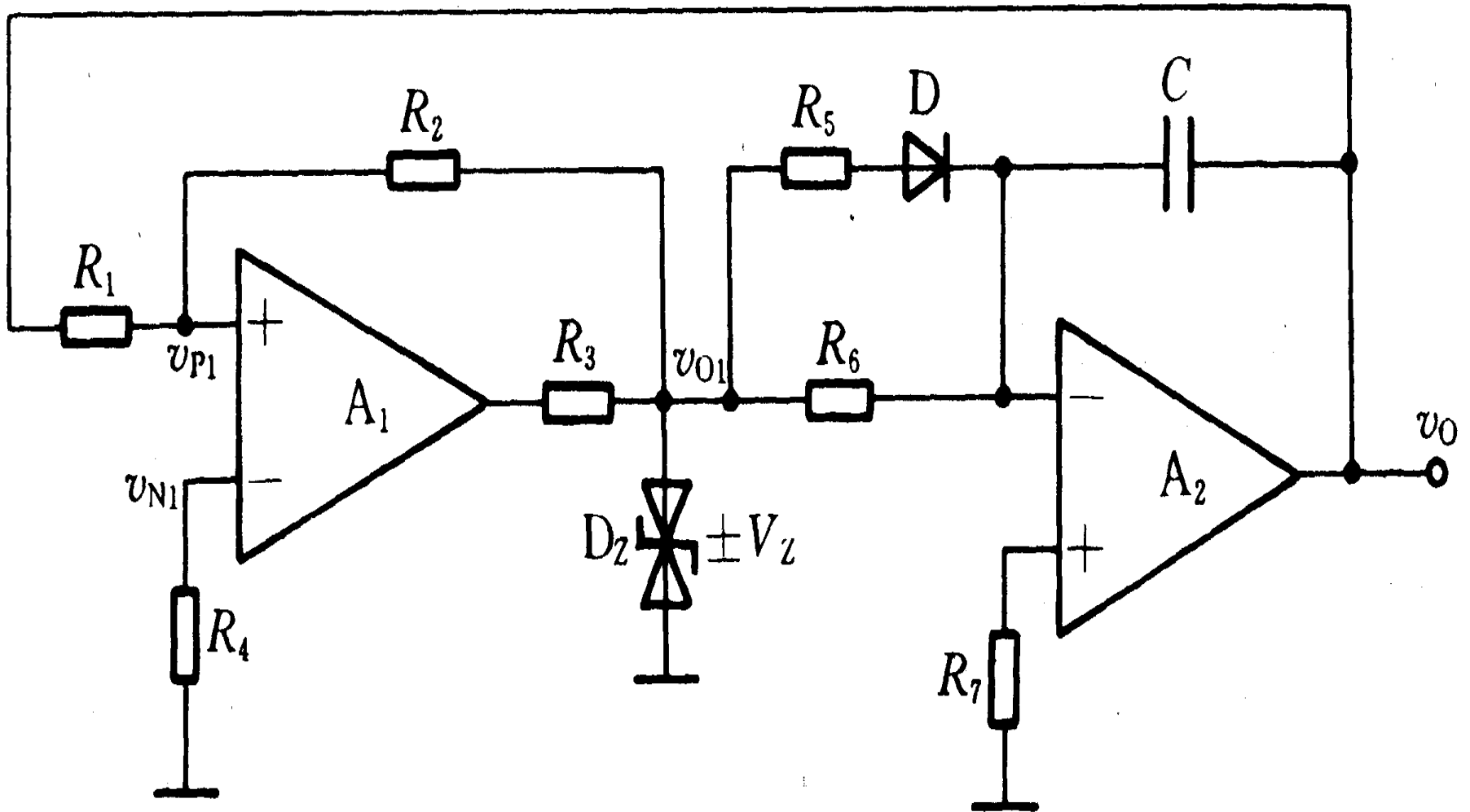
$$F = ?$$



$$T = (R_{f1} + R_{f2})C \ln \frac{1+F}{1-F}$$

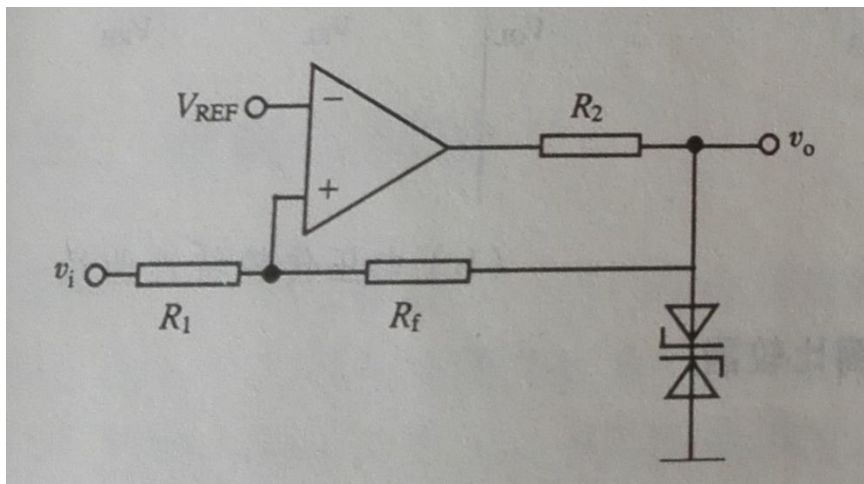
$$T = T_1 + T_2 \approx (R_w + 2R_f)C \ln \frac{1+F}{1-F}$$





$$T = T_1 + T_2 = \frac{2R_1R_6C}{R_2} + \frac{2R_1(R_6 // R_5)C}{R_2} = \frac{2R_1R_6C(R_6 + 2R_5)}{R_2(R_6 + R_5)}$$

同相输入迟滞电压比较器:

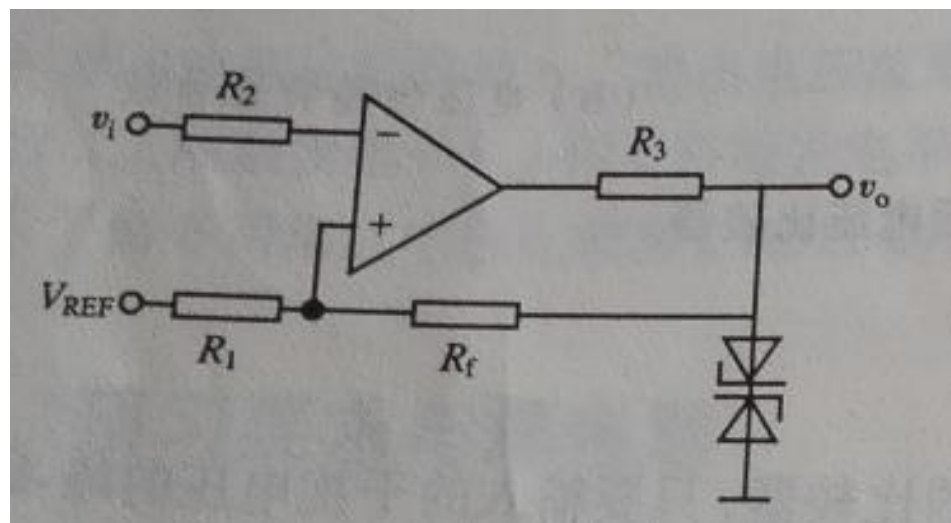


临界条件

$$v_+ = \frac{R_f}{R_1 + R_f} v_i + \frac{R_1}{R_1 + R_f} v_o$$
$$= v_- = V_R$$

临界条件

$$v_+ = \frac{R_f}{R_1 + R_f} V_R + \frac{R_1}{R_1 + R_f} v_o$$
$$= v_- = v_i$$

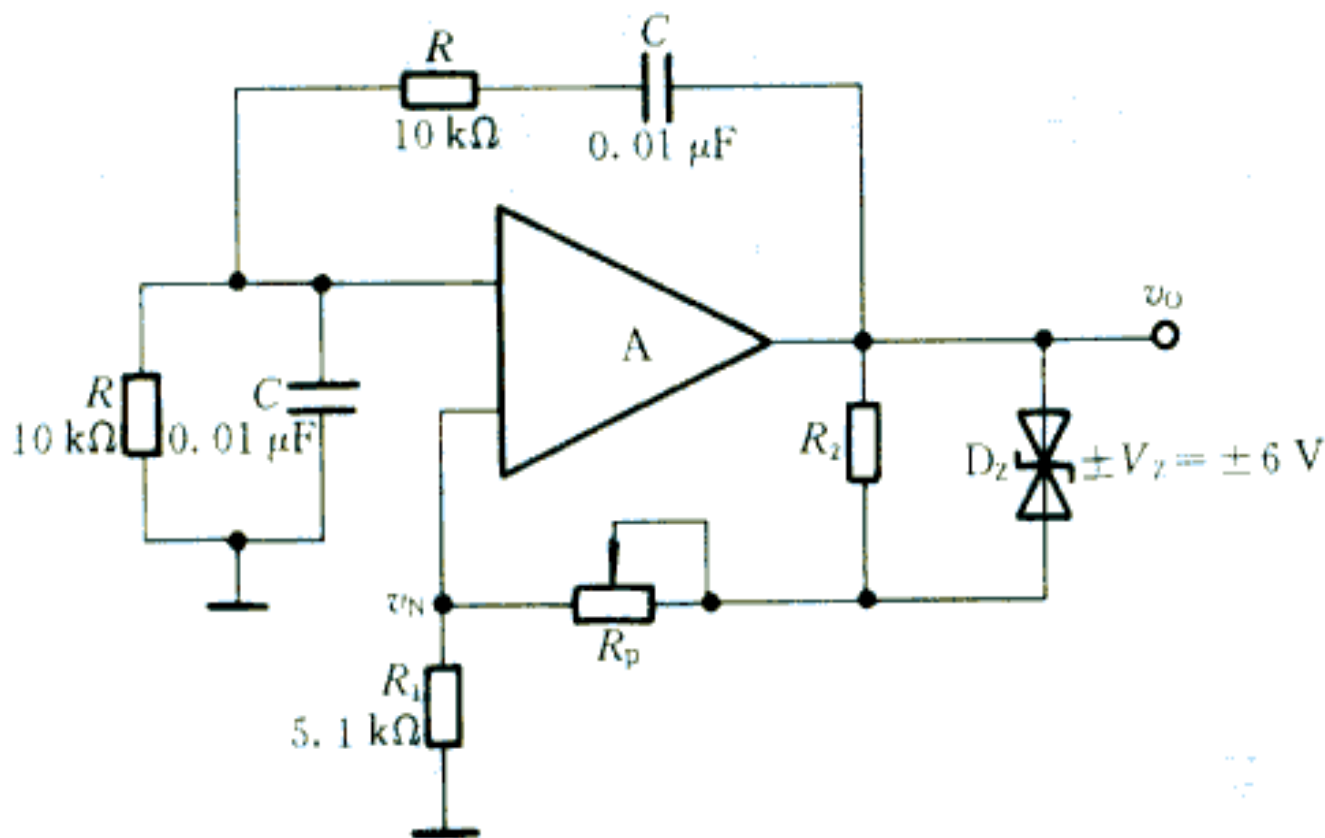


反相输入迟滞电压比较器

1、设运放A是理想的，分析图中的正弦波振荡电路：

- (1) 为满足振荡条件，标出A的同相端和反相端；
- (2) 为能起振， R_p 和 R_2 两个电阻之和应大于何值；
- (3) 求电路的振荡频率；
- (4) 证明稳定振荡时输出电压的峰值为

$$V_{om} = \frac{3R_1}{2R_1 - R_p} \cdot V_Z$$



解：（1）利用瞬时极性法分析，为满足相位平衡条件，运放A的输入端应为上“+”下“-”

（2）为能起振，要求

$$A_V = 1 + \frac{R_P + R_2}{R_1} > 3,$$

即 $R_P + R_2 > 2R_1 = 10.2K\Omega$

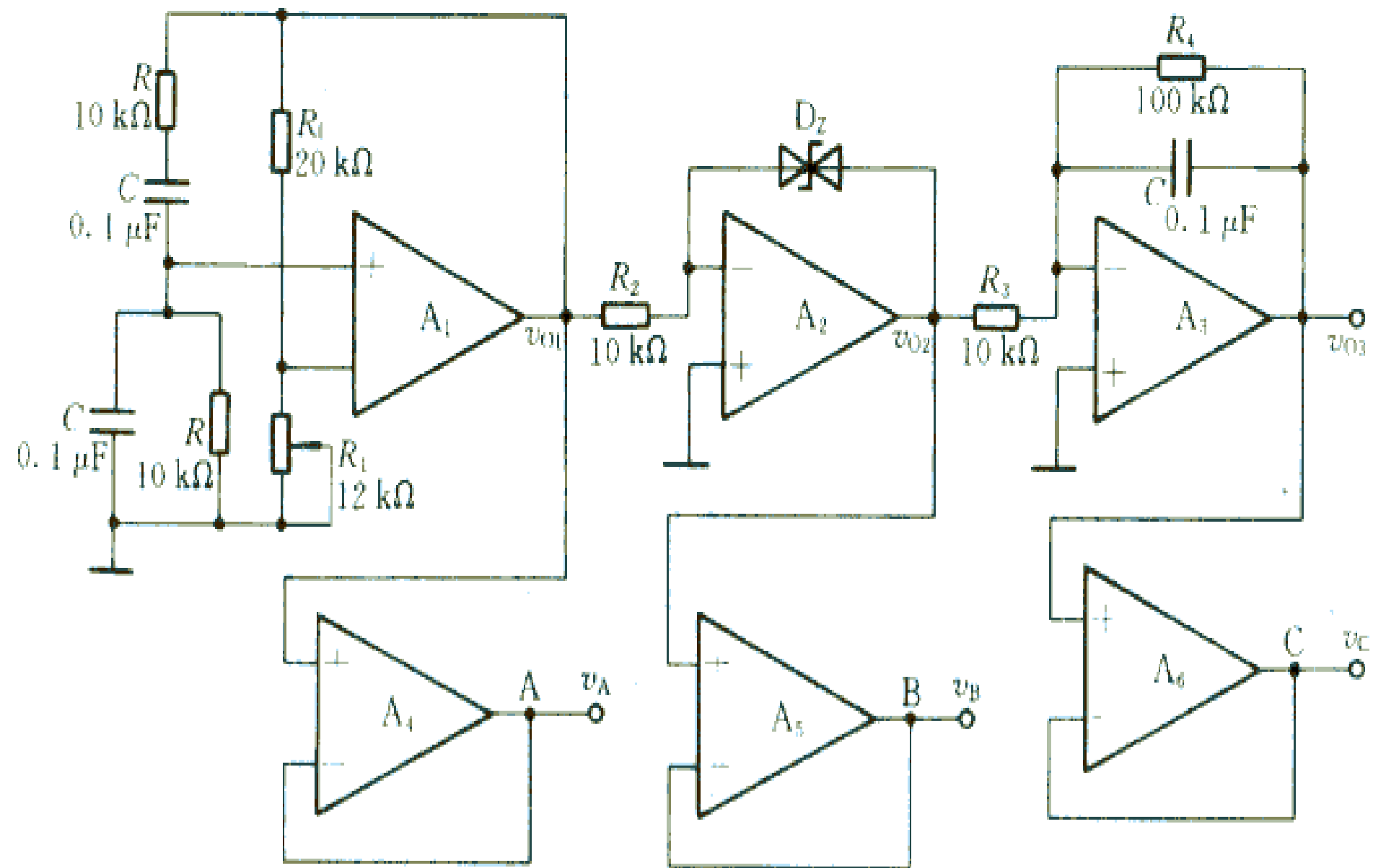
（3）振荡频率

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \times 0.01F \times 10^6 \times 10 \times 10^3 \Omega} \approx 1591.5Hz$$

（4）求 V_{om} 的表达式

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{当 } v_B = V_{om} \text{ 时, 有 } \begin{cases} V_N = V_P = \frac{1}{3} V_{om} \\ V_Z + V_{RP} = \frac{2}{3} V_{om} \end{cases} \\ I_{R1} = I_{RP} \Rightarrow V_{RP} = \frac{R_P V_N}{R_1} \end{array} \right. \Rightarrow V_{om} = \frac{3R_1}{2R_1 - R_P} \cdot V_Z$$

2、电路是波形发生器说明A1~A6的功能并且画出各输出波形。



解：电路组成

A1是RC桥式正弦波振荡电路

(v_{o1} 为正弦波)，

A2为反相过零比较器

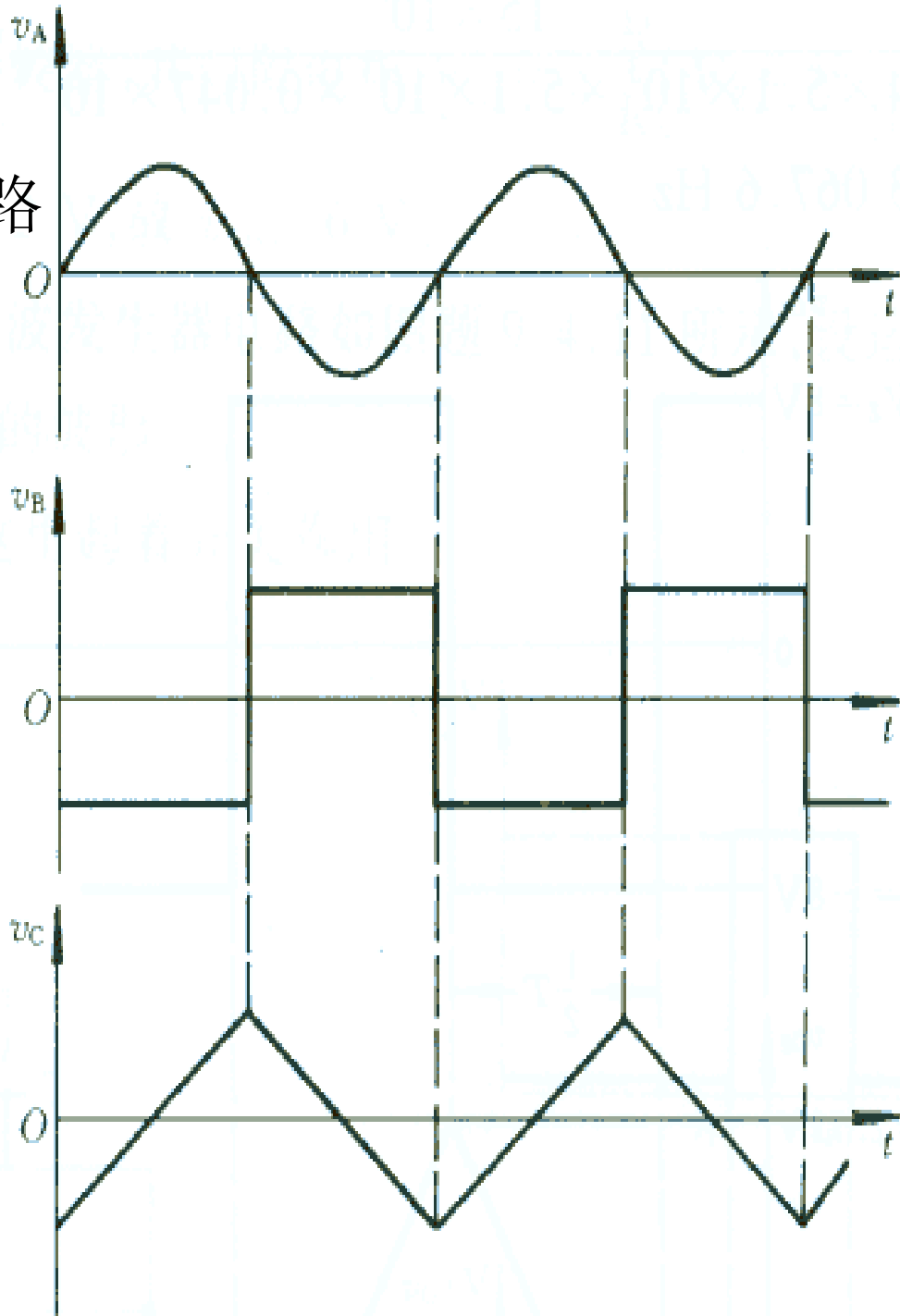
(v_{o2} 为方波)，

A3为反相积分电路

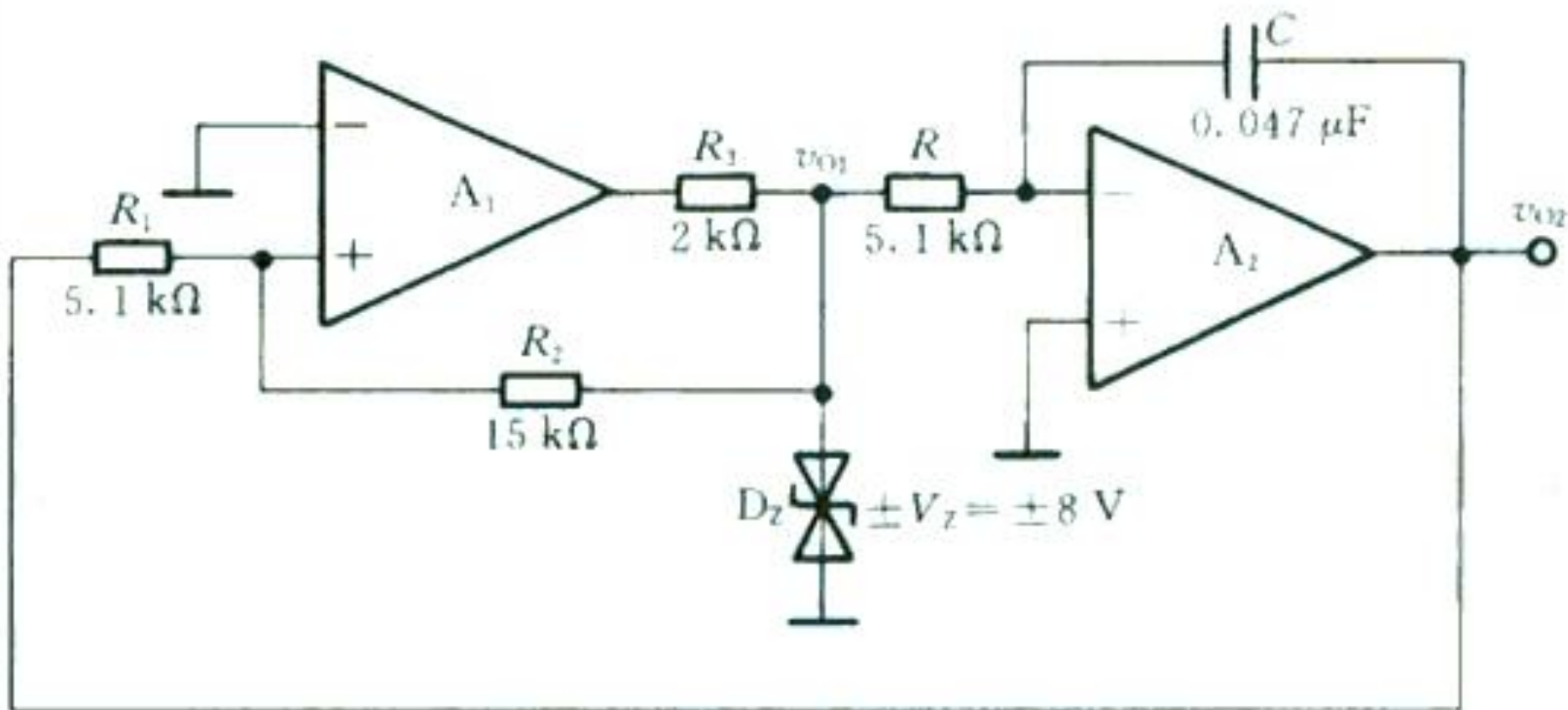
(v_{o3} 为三角波)，

A4、A5、A6是电压跟随器

(提高带负载能力)

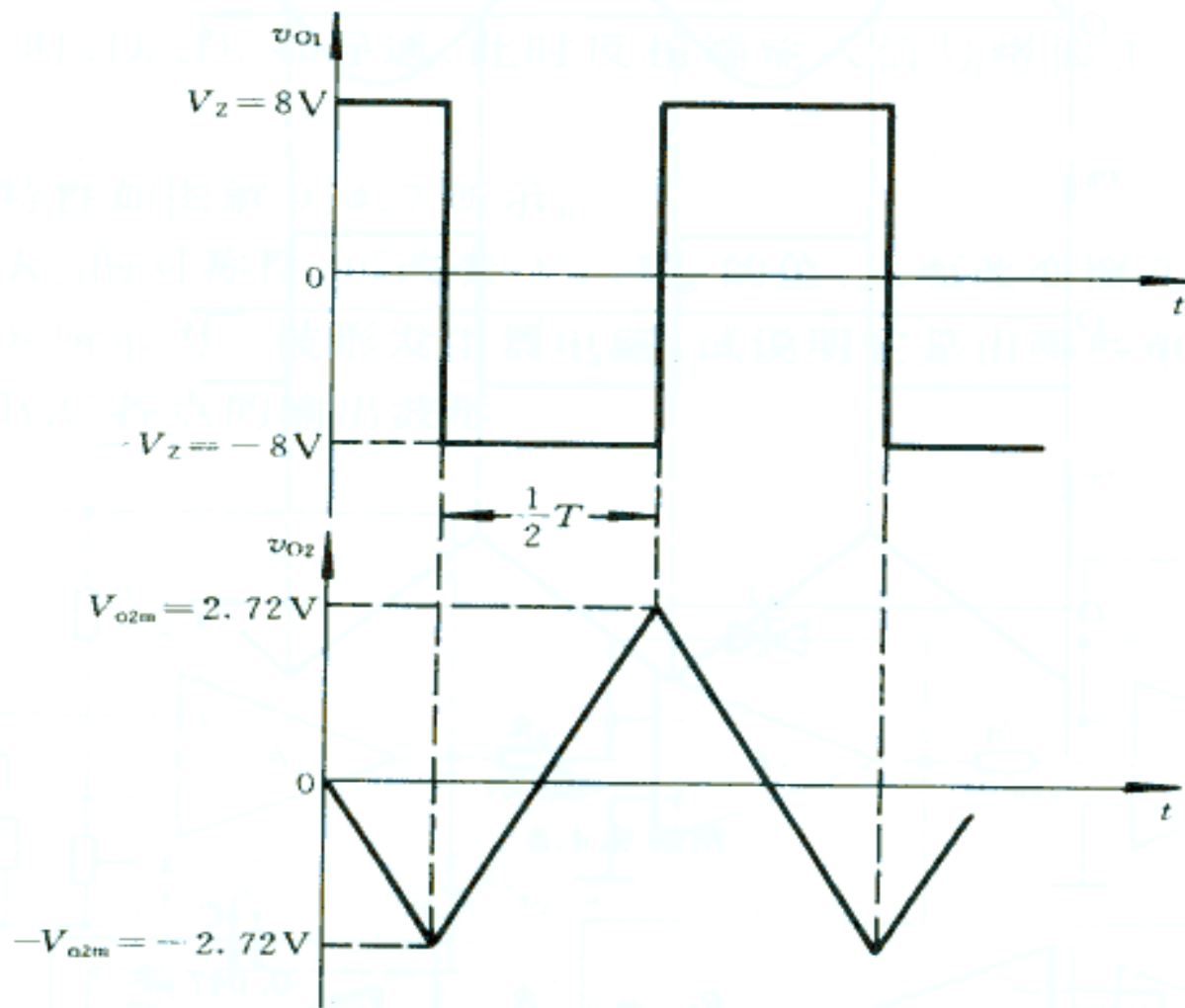


3、电路是方波—三角波产生电路，求振荡频率并画出输出波形。

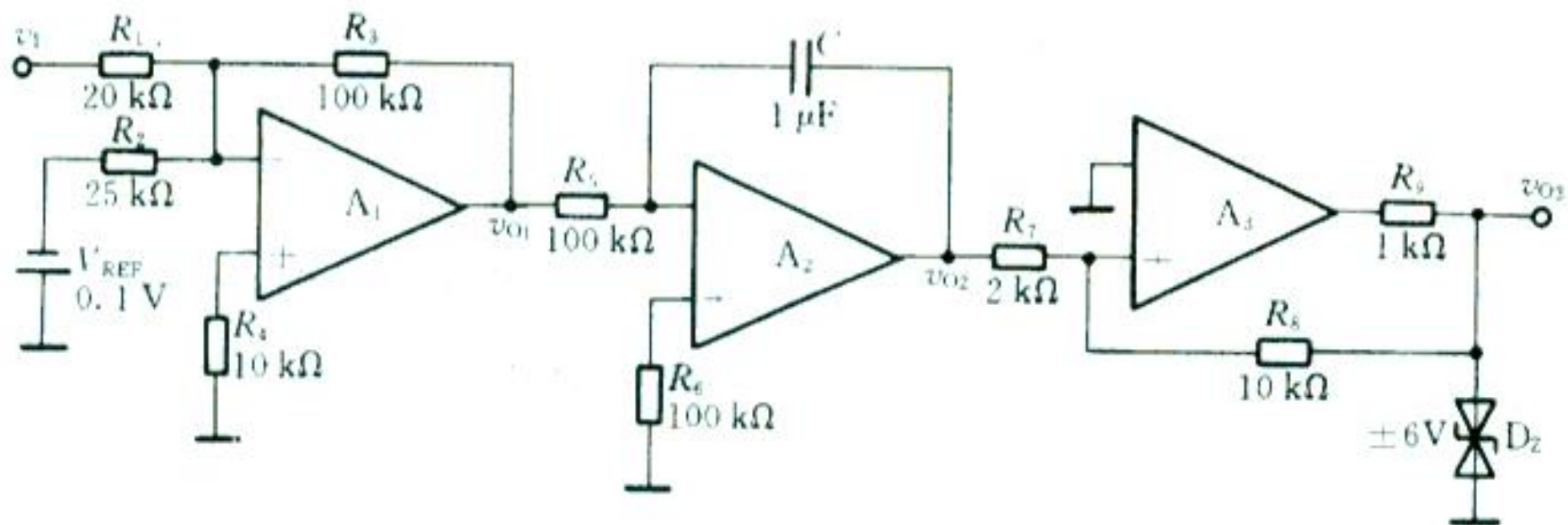


解：电路组成为方波--三角波，根据周期公式

$$T = 4RC \frac{R_1}{R_2} \text{ 可得 } f = \frac{1}{T} = \frac{R_2}{4RCR_1} \approx 3067.6\text{Hz}$$



4、设A1~A3为理想运放，电容C上的初始电压为0V。若 v_I 为0.11V的阶跃信号，求信号加上后1s， v_{o1} 、 v_{o2} 、 v_{o3} 所达到的数值。



解：

$$v_{o1} = -\frac{R_3}{R_1} v_I - \frac{R_3}{R_2} v_{REF} = -\frac{100}{20} \times 0.11 - \frac{100}{25} \times (-0.1) = -0.15V$$

当 $t = 1s$ 时，有

$$v_{o2} = -\frac{1}{R_5 C} v_{o1} t = -\frac{1}{100 \times 10^3 \times 1 \times 10^{-6}} \times (-0.15) \times 1 = 1.5V$$

A3为同相输入迟滞比较器，其门限电压为

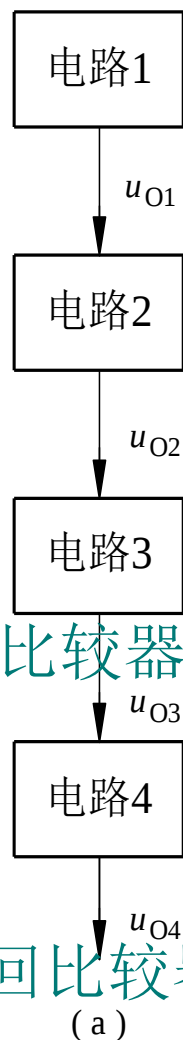
$$v_{th} = \pm \frac{R_7}{R_8} V_Z = \pm \frac{2 \times 10^3}{10 \times 10^3} \times 6V = \pm 1.2V$$

$\therefore$ 在 $t = 1s$ 时， $v_{o2} = 1.5V > 1.2V$

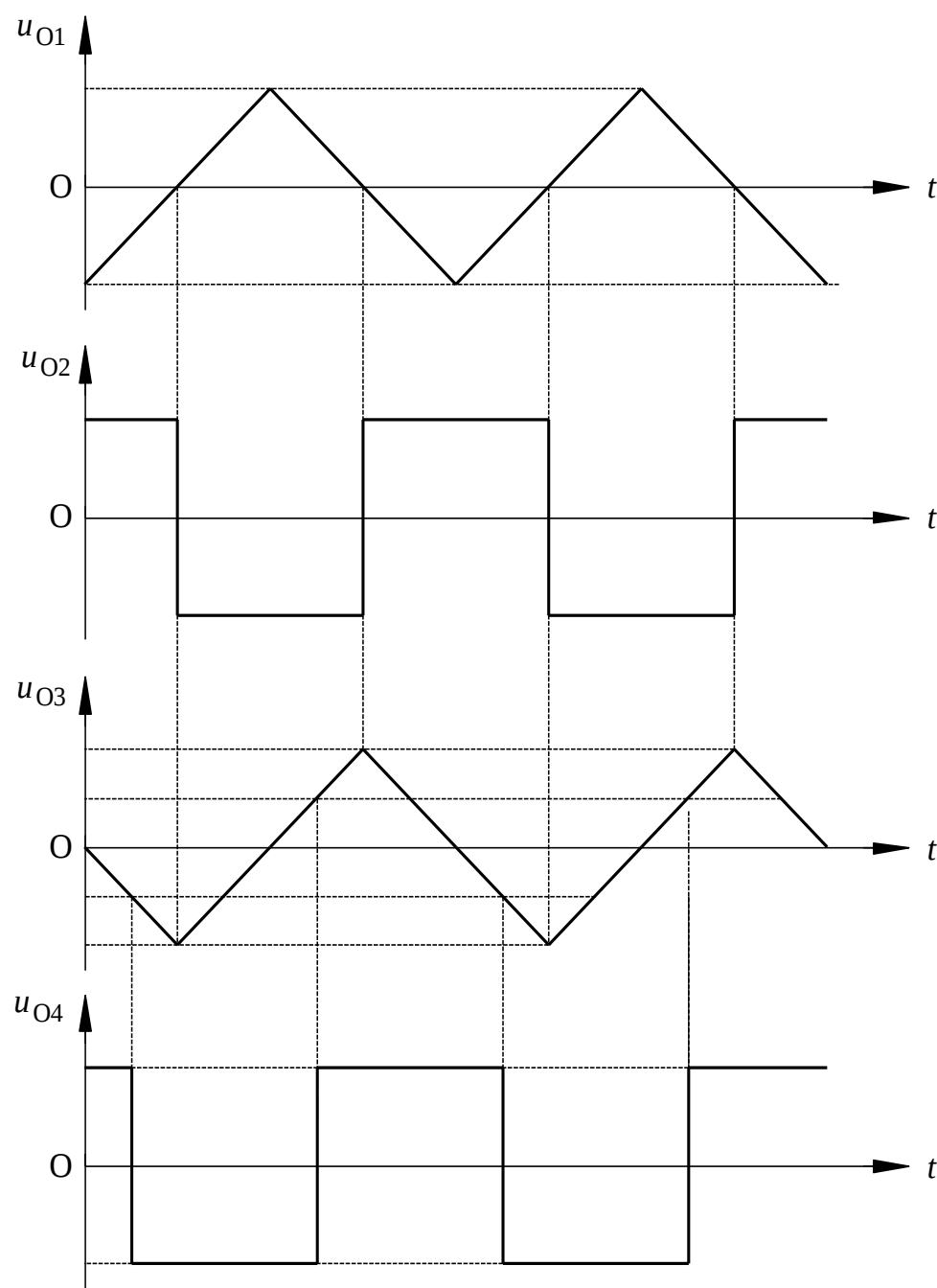
$\therefore v_{o3} = 6V$

5、图（a）所示为某电路的方框图，已知 $u_{O1} \sim u_{O4}$ 的波形如图（b）所示。将各电路的名称分别填入空内：

1. 电路1 为 三角波发生器
2. 电路2 为 (反相输入) 过零比较器
3. 电路3 为 积分器;
4. 电路4 为 (同相输入) 滞回比较器

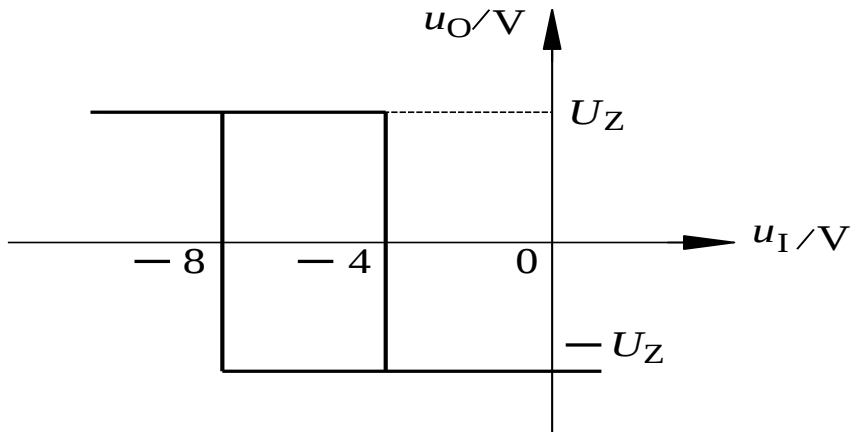
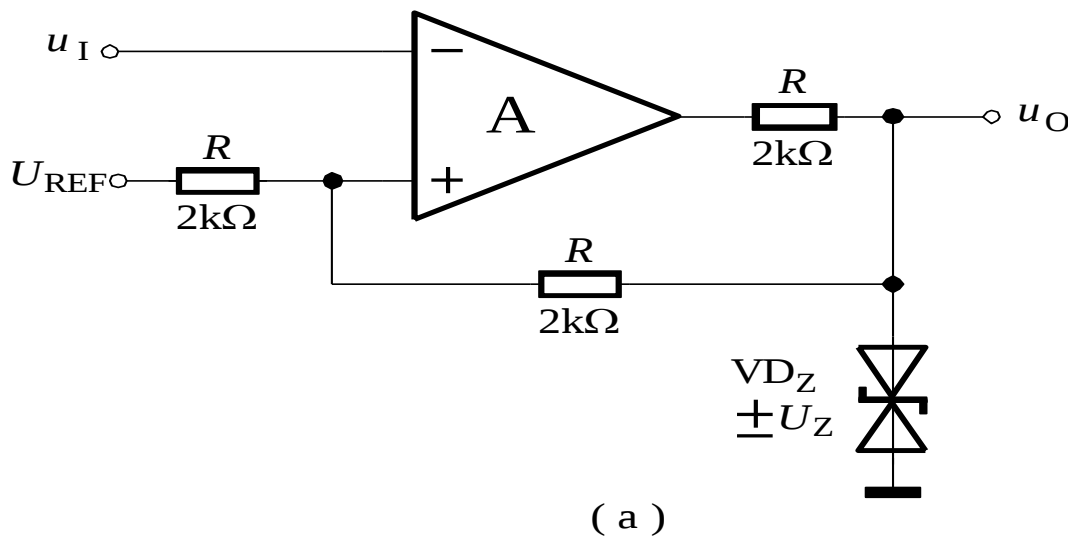


(a)



(b)

6.在图（a）所示电路中，已知A为理想运算放大器；该电路的电压传输特性如图（b）所示。试求解稳压管的稳定电压 $\pm U_Z$ 及基准电压 U_{REF}



解：

$$u_{+} = \frac{1}{2}u_{\text{O}} + \frac{1}{2}U_{\text{REF}} = \pm \frac{1}{2}U_{\text{Z}} + \frac{1}{2}U_{\text{REF}}$$

$$\begin{cases} \frac{1}{2}U_{\text{Z}} + \frac{1}{2}U_{\text{REF}} = -4 \\ -\frac{1}{2}U_{\text{Z}} + \frac{1}{2}U_{\text{REF}} = -8 \end{cases}$$

$$U_{\text{REF}} = -12\text{V}$$

$$U_{\text{Z}} = 4\text{V}$$

考前答疑

1、第17周一第二讲、第三讲， 2318；

第17周周三下午3:00~5:00， 在2319；

2、1月11号上午9:00~12:00在6301；

3、QQ群

Good Luck!