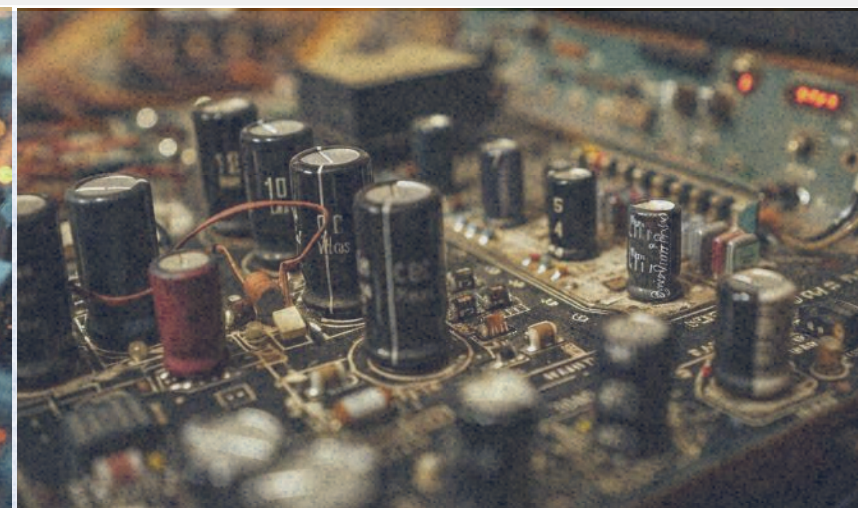
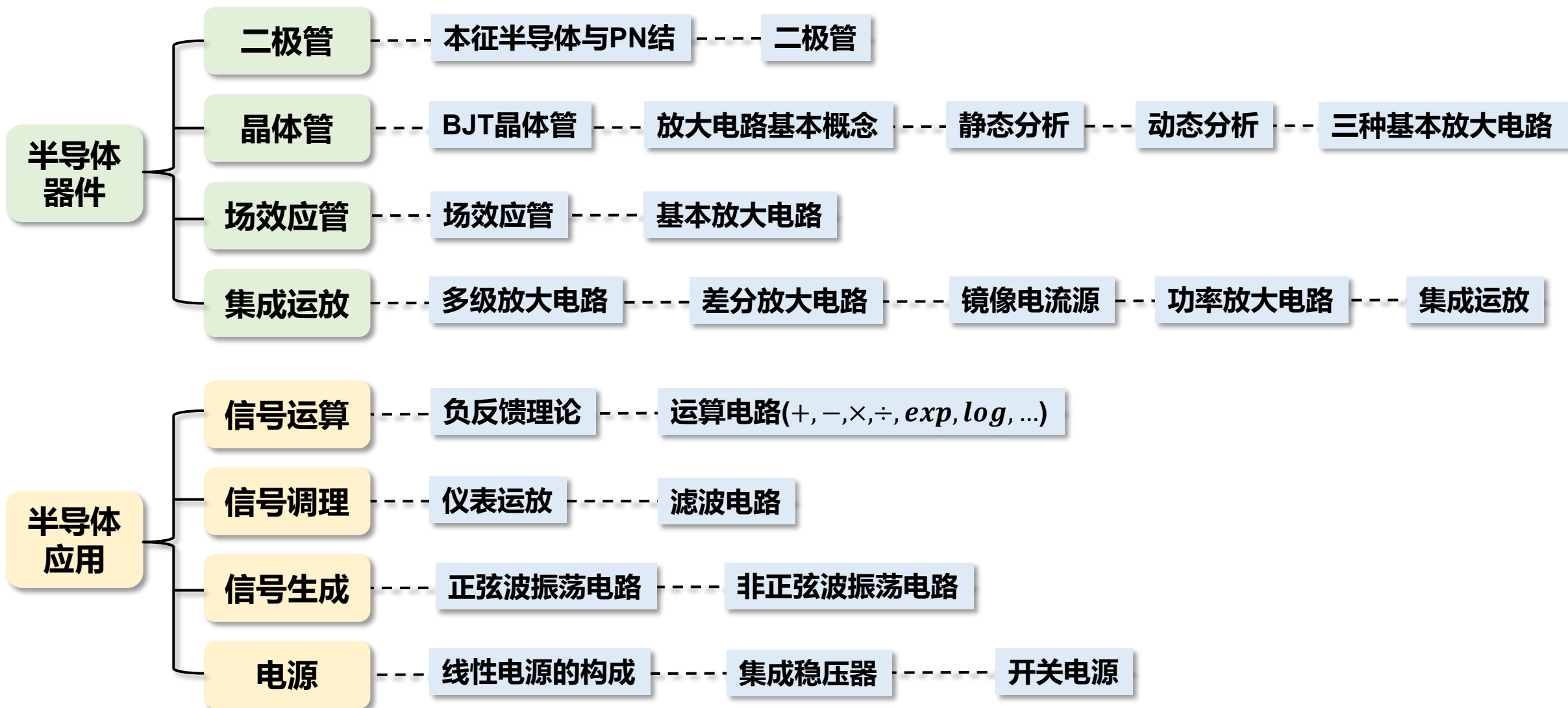


电子技术与系统(模拟电子电路)

模电知识点总结



西安交通大学
人工智能学院
赵文哲

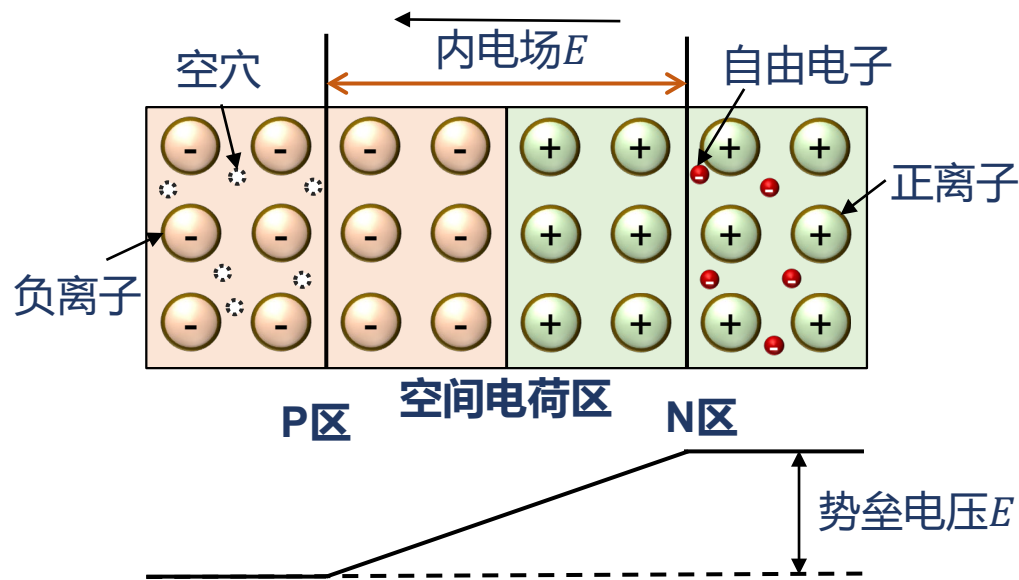




半导体器件：二极管

1. 本征半导体与PN结

1. 本征半导体是指高度提纯、结构完整的半导体单晶体。
2. 本征半导体受激发后，产生两种载流子，分别是自由电子和空穴。
3. N型半导体中多数载流子是自由电子，P型半导体中多数载流子是空穴。
4. P型半导体和N型半导体均呈电中性。
5. P型半导体和N型半导体的交界面通过扩散运动和漂移运动形成PN结，如下图。
6. PN结施加正向电压（从P型到N型）时，耗尽层变薄；施加反向电压（从N型到P型）时，耗尽层变厚。

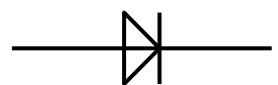




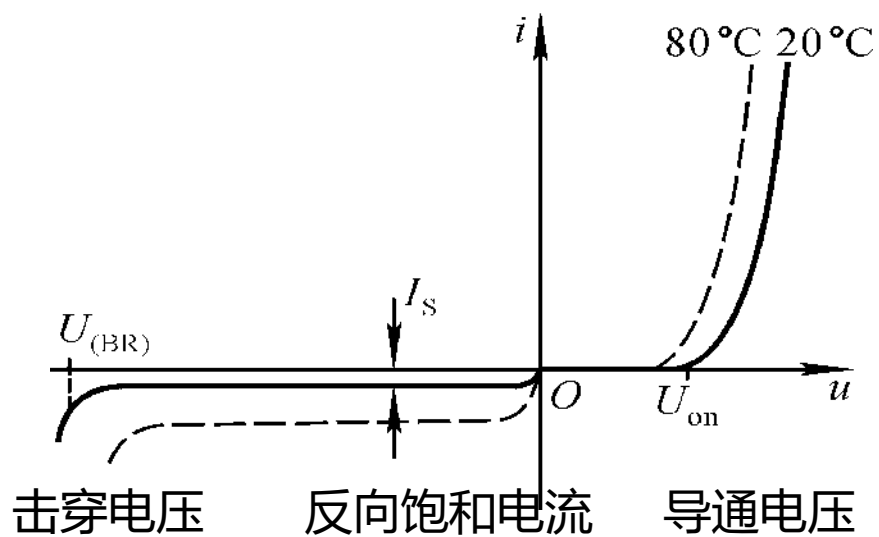
半导体器件：二极管

2. 二极管

1. 二极管具有单向导电性，硅二极管的正向导通电压约为0.7V。
2. 稳压二极管工作在反向击穿区域，配合合适的限流电阻可输出稳定的电压。
3. 二极管的电路符号与伏安特性如下：

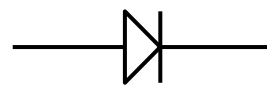


二极管

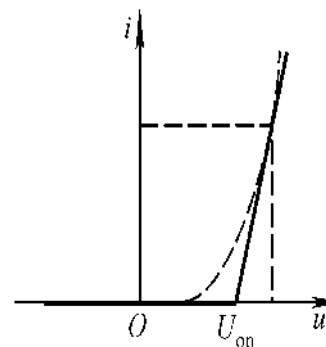
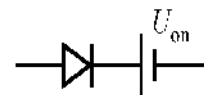
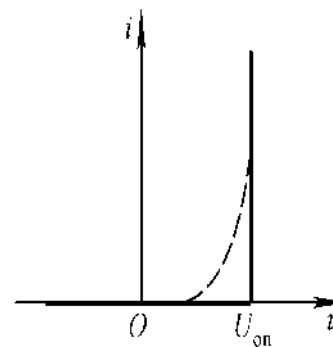
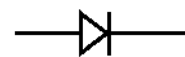
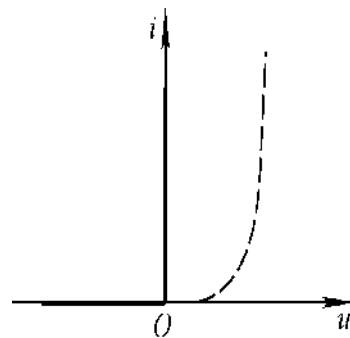


反向击穿前, $i = f(u) = I_S(e^{\frac{u}{U_t}} - 1)$ 常温下 $U_t = 26\text{mV}$

题面显式提供



理想二极管





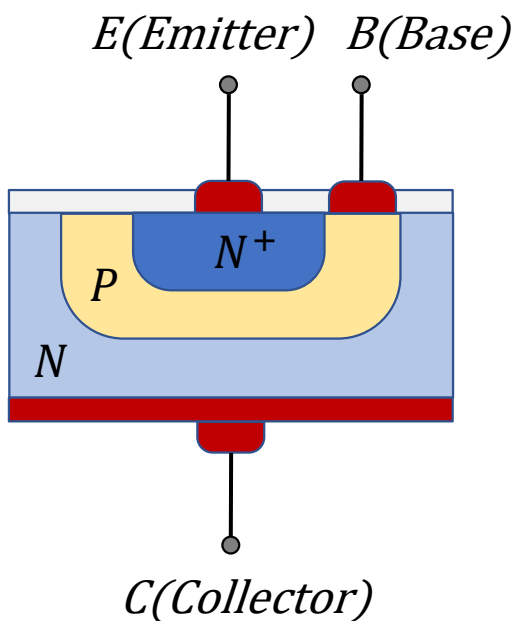
半导体器件：晶体管

1. 双极型晶体管 (Bipolar Junction Transistor, BJT)

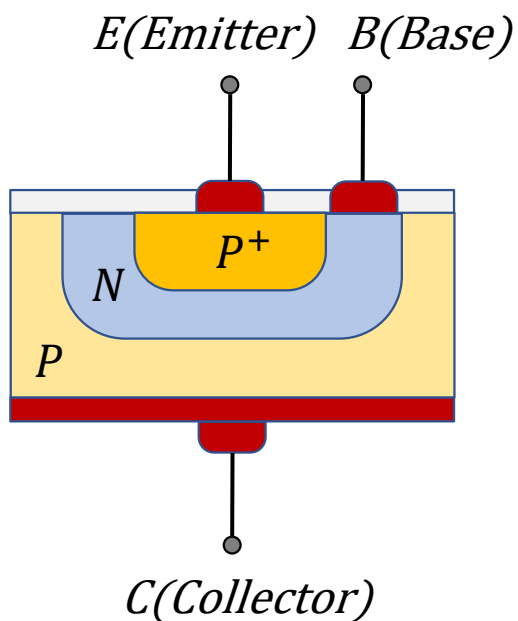
1. BJT晶体管具有3个端口：基极(Base), 集电极(Collector), 发射极(Emitter)；有2个相互影响的PN结：发射结和集电结。

2. BJT晶体管分为NPN和PNP两种类型，示意图和电路符号如下：

示意图

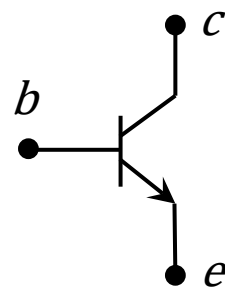


NPN型晶体管

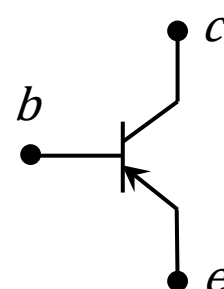


PNP型晶体管

电路符号



NPN型晶体管



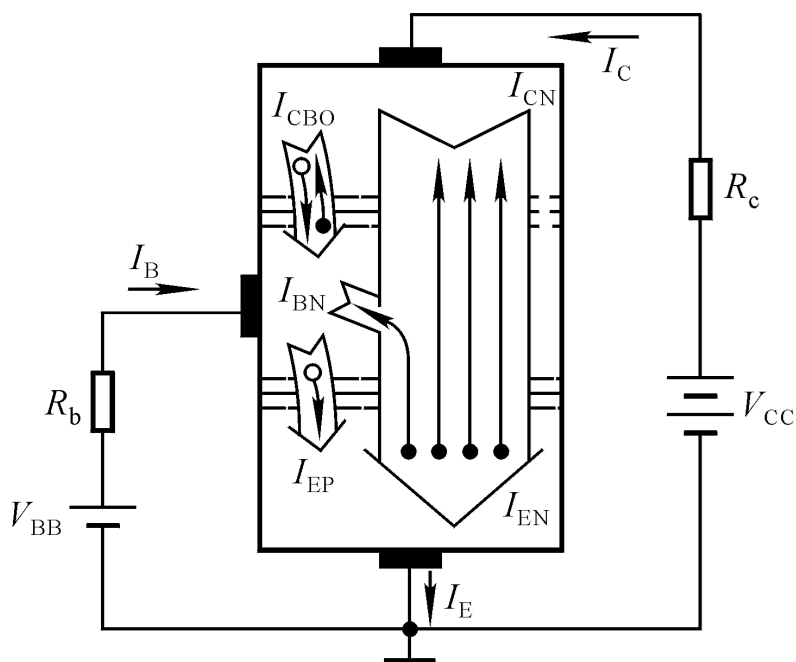
PNP型晶体管



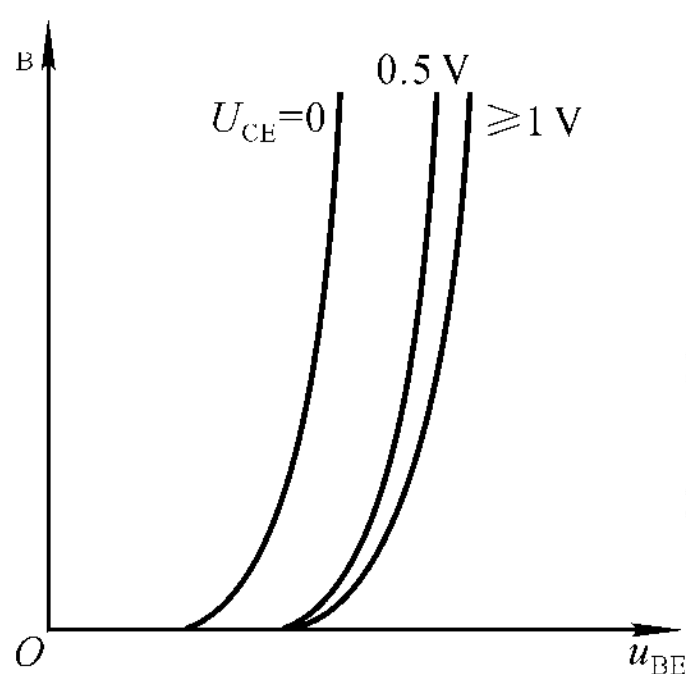


半导体器件：晶体管

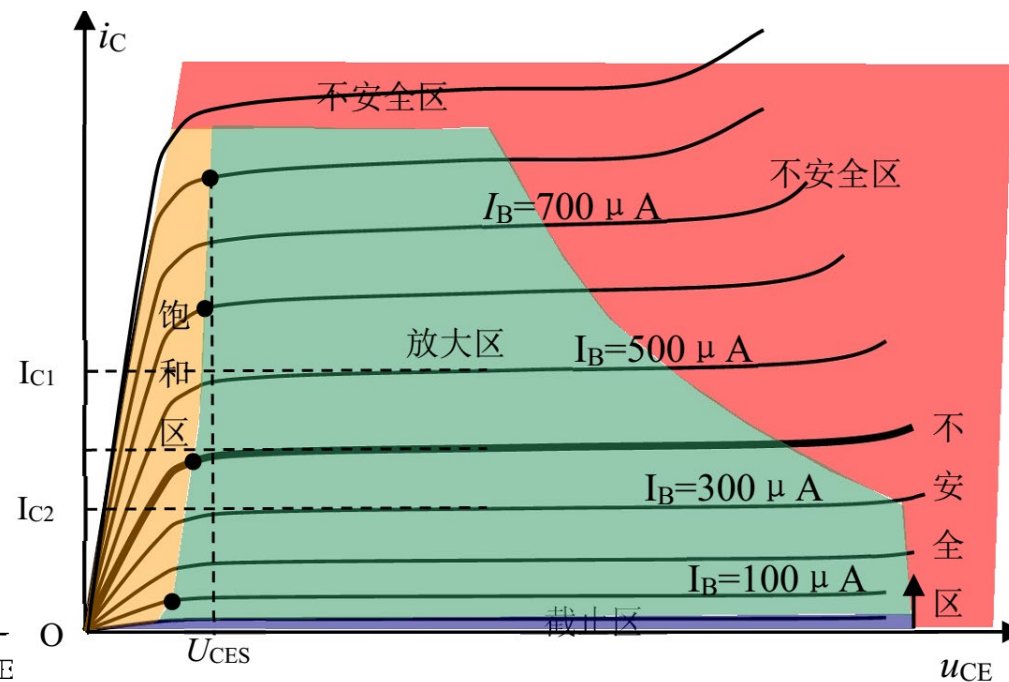
3. BJT晶体管的发射结正偏、集电结反偏，使晶体管工作于放大区。
4. BJT晶体管工作于放大区时，具有电流放大功能，载流子运动示意图如下：
5. BJT晶体管的转移特性和输出特性如下：
6. BJT晶体管的输出特性曲线分为：饱和区，放大区，截止区。



载流子运动示意图



BJT晶体管的转移特性



BJT晶体管的输出特性





半导体器件：晶体管

2. 放大电路基本概念

1. 放大电路的参数重点关注：电压放大倍数 A_u 、输入电阻 R_i 、输出电阻 R_o 。
2. 电压放大倍数 A_u 在计算时需要考虑输出负载 R_L 。
3. 晶体管放大电路采用静态、动态分离的方法进行分析。首先，分析晶体管的静态工作点，判断晶体管是否工作于放大区；其次，采用图表法定性分析或微变等效电路定量分析电路对交流信号的放大参数。

3. 放大电路的静态分析

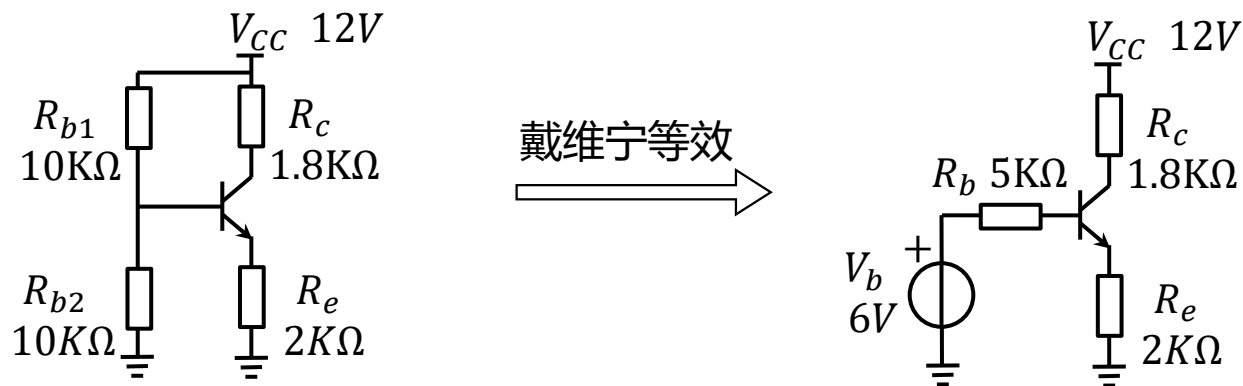
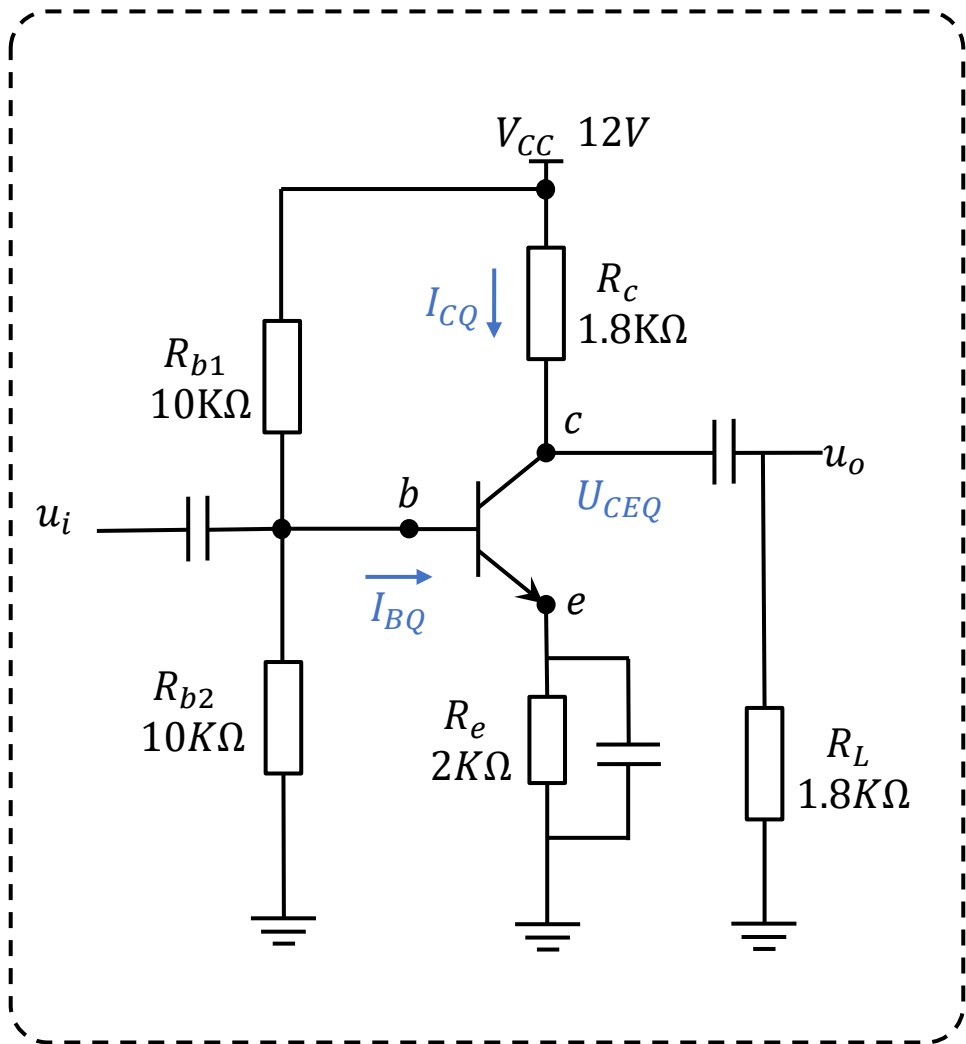
1. 静态工作点分析方法：将电容开路，求晶体管3个极的电压或电流。首先求b极和e极的电压与电流，如满足发射结正偏，则假定晶体管工作与放大区，求c极电压，判断晶体管是否饱和。如不饱和，则晶体管处于放大区成立。
2. 硅晶体管工作于放大区时，晶体管3个极的电流电压满足如下关系： $I_C = \beta I_B$ ， $I_E = I_B + I_C$ ； U_{BE} 取 $0.7V$ ， U_{CE} 取决于外部电路。
3. 温度对BJT晶体管参数的影响：随着温度升高，晶体管放大系数 β 增大，由少子漂移形成的 I_{CBO} 增大，发射结导通电压 U_{BE} 减小。





半导体器件：晶体管

4. 分析如下电路的静态工作点。已知晶体管 U_{BE} 导通压降为 $0.7V$ ，放大系数 $\beta = 100$ ，求 I_{BQ} , U_{BQ} , I_{EQ} , I_{CQ} , U_{CEQ} 。



静态工作点依次求解如下：

$$I_{BQ} = \frac{E_B - U_{BEQ}}{R_B + (1 + \beta)R_E} = \frac{6 - 0.7}{5K + 101 \times 2K} = 25.6\mu A$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 2.56mA$$

$$I_{EQ} = I_{CQ} + I_{BQ} = 2.59mA$$

$$U_{CEQ} = E_C - I_{CQ}R_C - I_{EQ}R_E = 2.21V$$



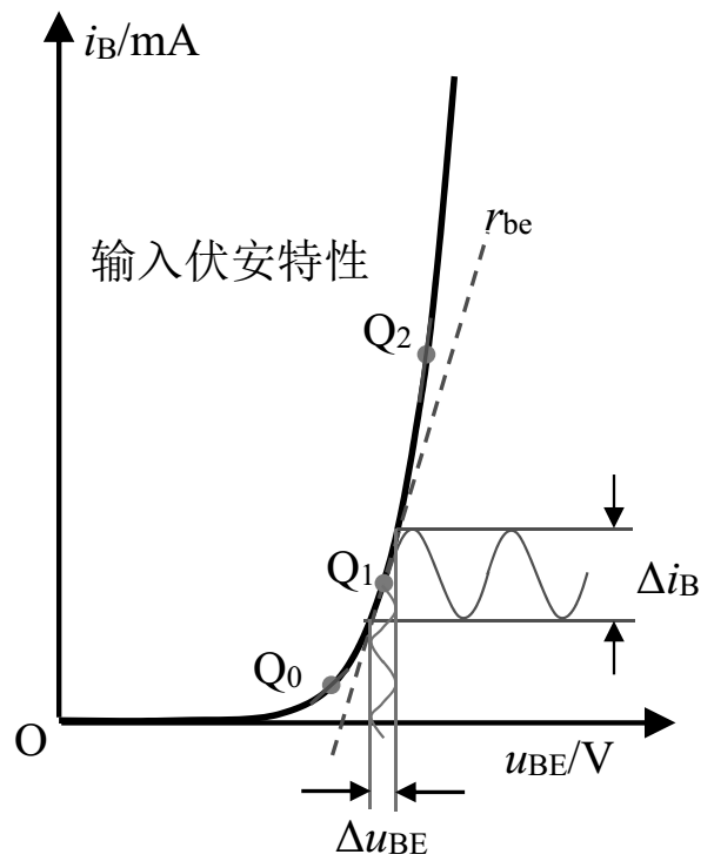
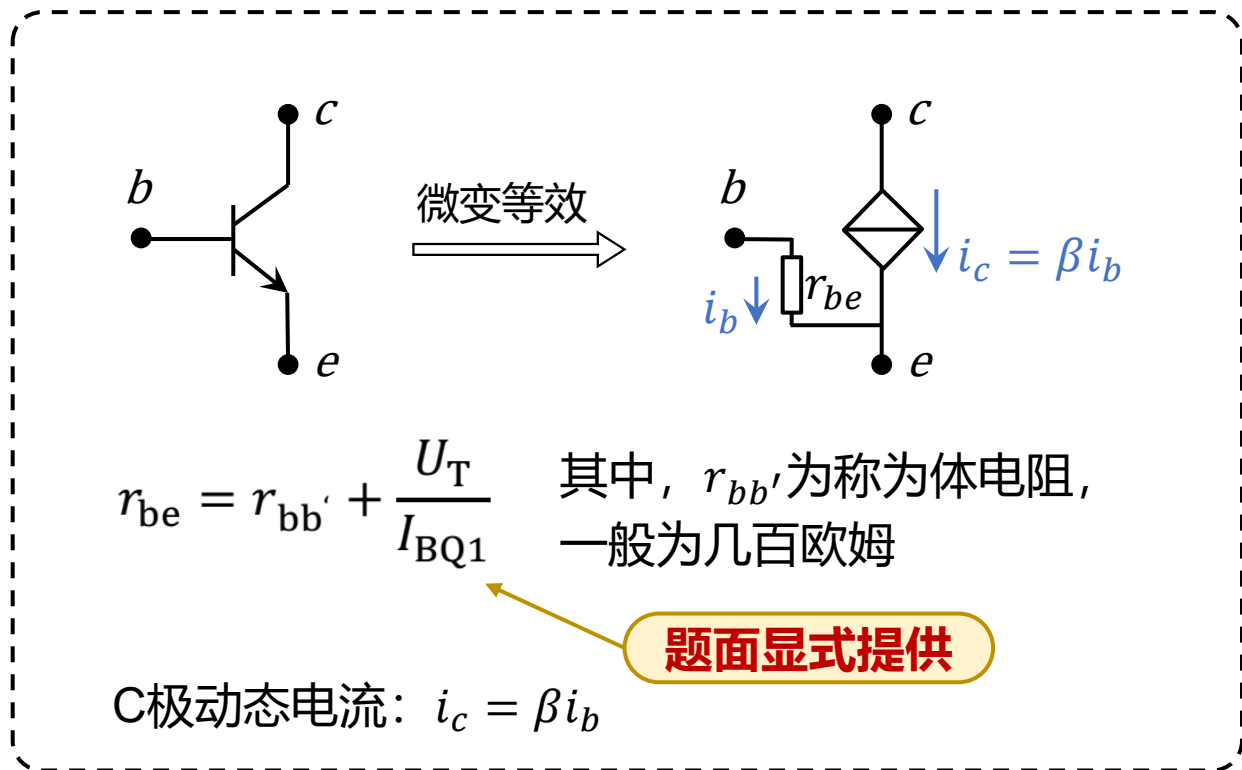


半导体器件：晶体管

2. 放大电路的动态分析

1. 微变等效电路：当晶体管工作与放大区时，发射结中微小的电流变化正比于C极的电流变化，且放大倍数与晶体管静态放大倍数近似相等。

2. 晶体管的微变等效电路如下图：

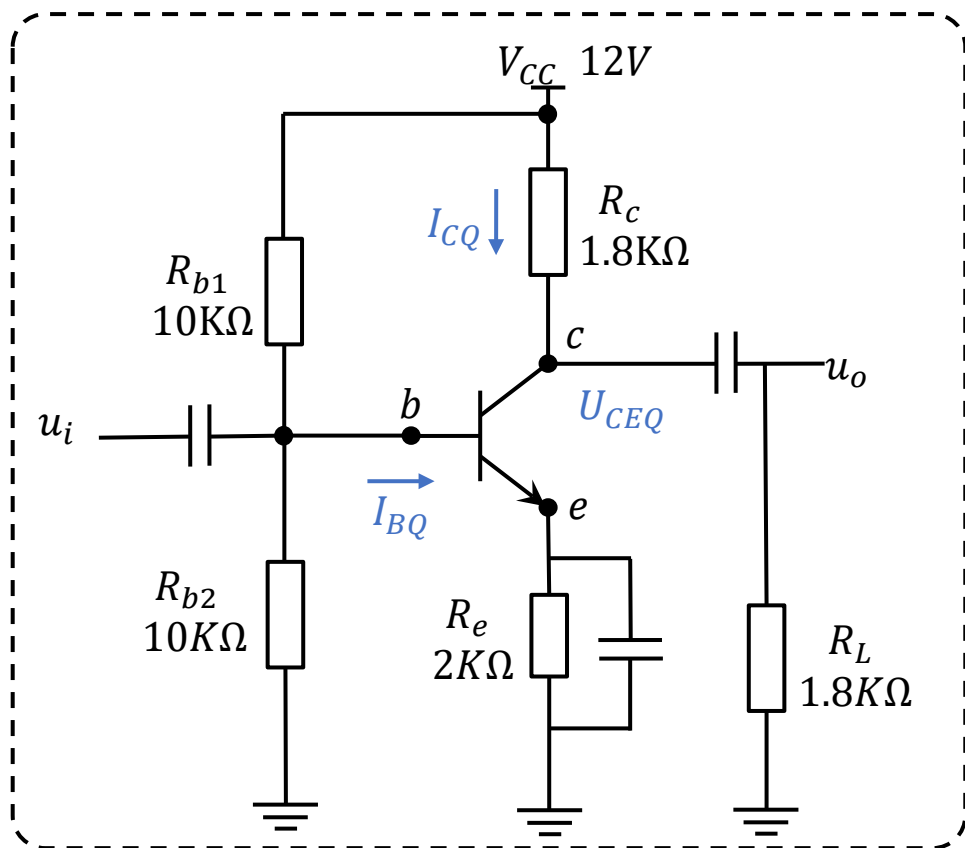




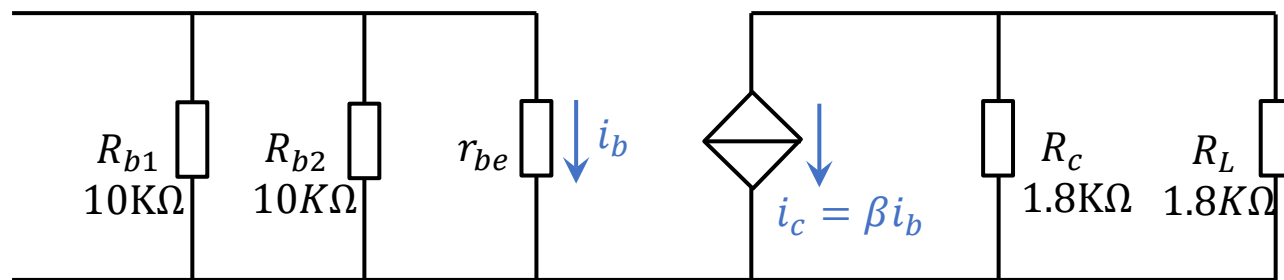
半导体器件：晶体管

3. 使用微变等效模型求交流小信号放大系数的步骤：首先，将电容短路，电压无变化处统一接地。其次，将晶体管替换成微变等效电路，标出电压、电流的参考方向。再次，简化电路，求静态电流 I_{BQ} ，计算 r_{be} 。最后，求解交流小信号的放大系数 A_V ，输入电阻 r_i ，输出电阻 r_o 。

4. 分析之前电路的动态参数，已知 $r_{bb'} = 10\Omega$ ，求放大系数 A_V ，输入电阻 r_i ，输出电阻 r_o 。



微变等效电路：



$$r_{be} = r_{bb'} + \frac{U_T}{I_{BQ}} = 10 + \frac{26\text{mV}}{25.6\mu\text{A}} = 1026\Omega$$

$$A_u = \frac{u_o}{u_i} = \frac{-\beta i_b (R_c || R_L)}{i_b r_{be}} = \frac{100 \times 0.9\text{K}}{1026} = -87.7$$

$$r_i = R_{B1} || R_{B2} || r_{be} = 851\Omega$$

$$r_o = R_c = 1.8\text{K}\Omega$$

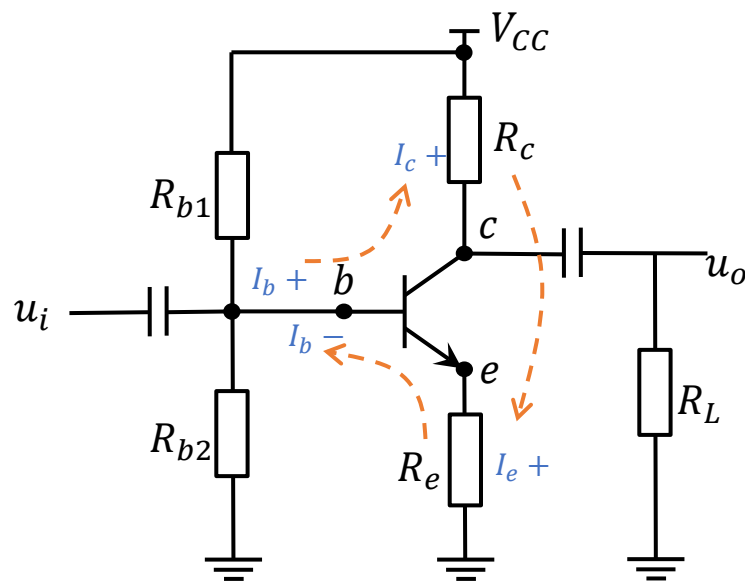
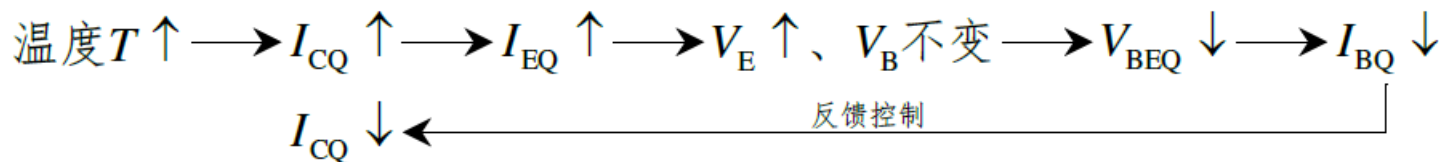




半导体器件：晶体管

3. 晶体管的三种基本放大电路

1. 晶体管的输入和输出可以组成二端口网络。按照输入输出公用的端口，可以分成：共射极放大电路、共集电极放大电路、以及共基极放大电路。
2. 共射极放大电路的电压和电流增益都大于1，电压输出相位与输入相反。
3. 共集电极放大电路只有电流放大作用，电压输出相位与输入同向，放大系数接近于1，又称为射极跟随器。
4. 共基极放大电路只有电压放大作用，电流放大系数接近于1，又称为电流跟随器。
5. 共射极放大电路的 R_e 可以减小温度对静态工作点的影响。



6. 三种放大电路的特性如下：





半导体器件：晶体管

电路组态	共射极放大电路	共集电极放大电路 (射极跟随器)	共基极放大电路
电路图			
电压增益	$A_v = -\frac{\beta R'_L}{r_{be} + (1 + \beta) R_c}$ $(R'_L = R_c \parallel R_L)$ 输入输出电压反相	$A_v = \frac{(1 + \beta) R'_L}{r_{be} + (1 + \beta) R'_L}$ $(R'_L = R_c \parallel R_L)$ 输入输出电压同相	$A_v = \frac{\beta R'_L}{r_{be}}$ $(R'_L = R_c \parallel R_L)$ 输入输出电压同相
最大电流增益	$A_i \approx \beta$	$A_i \approx 1 + \beta$	$A_i \approx \alpha = \frac{\beta}{1 + \beta}$
输入电阻	$R_i = R_{b1} \parallel R_{b2} \parallel [r_{be} + (1 + \beta) R_c]$ 中等大小	$R_i = R_b \parallel [r_{be} + (1 + \beta) R'_L]$ R_i 高且与 R_L 有关	$R_i = R_c \parallel \frac{r_{be}}{(1 + \beta)}$ 小
输出电阻	$R_o \approx R_c$ 大	$R_o = \frac{r_{be} + R'_{si}}{1 + \beta} \parallel R_c \quad (R'_{si} = R_{si} \parallel R_b)$ R_o 小且与 R_{si} 有关	$R_o \approx R_c$ 大



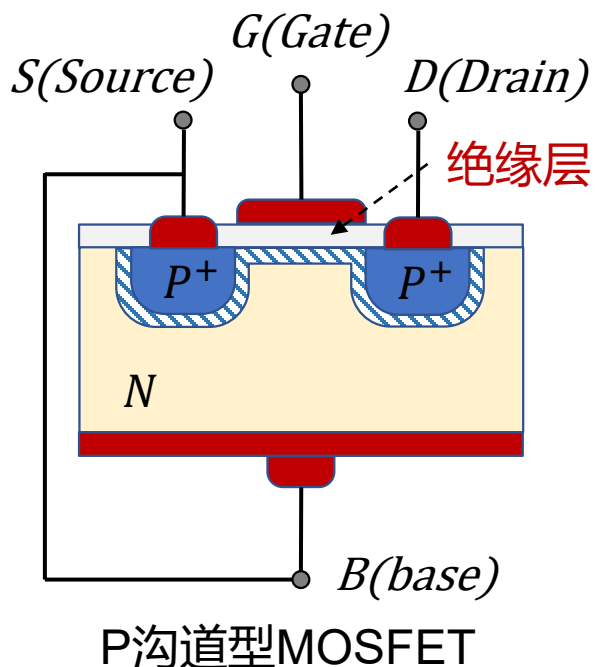
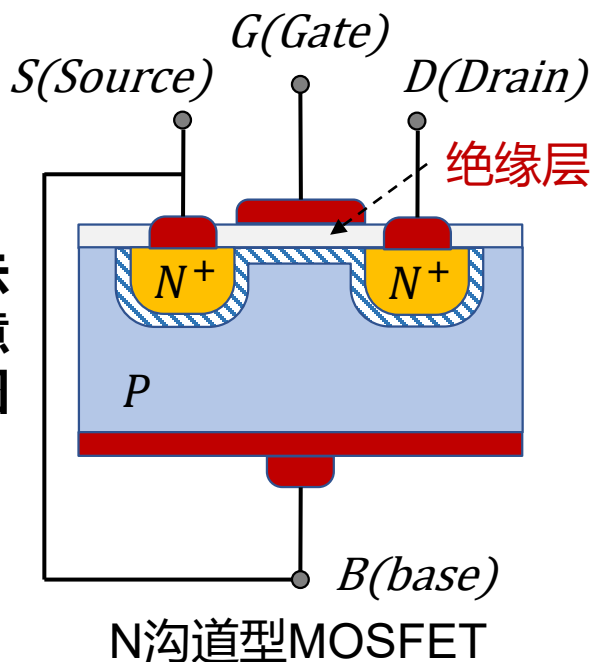


半导体器件：场效应管

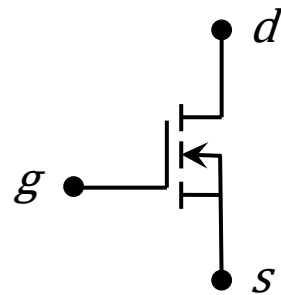
1. 场效应管(Field Effect Transistor, FET)

1. 与BJT采用两种载流子(多子和少子)同时参与导电不同，场效应管仅使用一种载流子参与导电，称为单极型器件。
2. 场效应管在G极与衬底之间施加电场，可以控制D极和S极的导通电流，是电压控制电流器件。
3. 场效应管具有3个端口：栅极(Gate)、漏极(Drain)、源极(Source)。
4. 增强型绝缘栅型场效应管(Metal-Oxide-Semiconductor FET, MOSFET)分为N沟道型和P沟道型，如下：

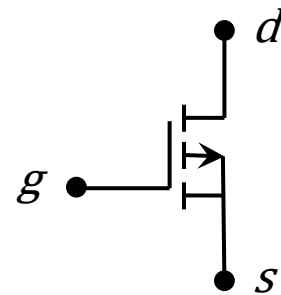
示意图



电路符号



N沟道增强型
MOSFET



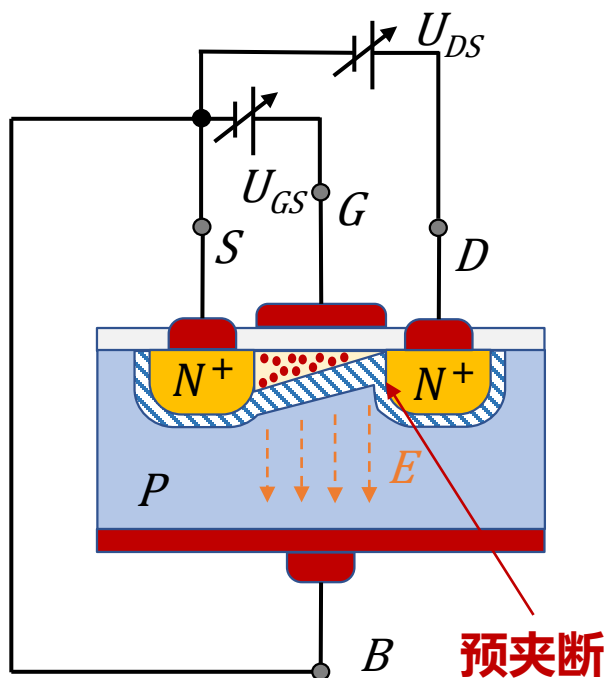
P沟道增强型
MOSFET



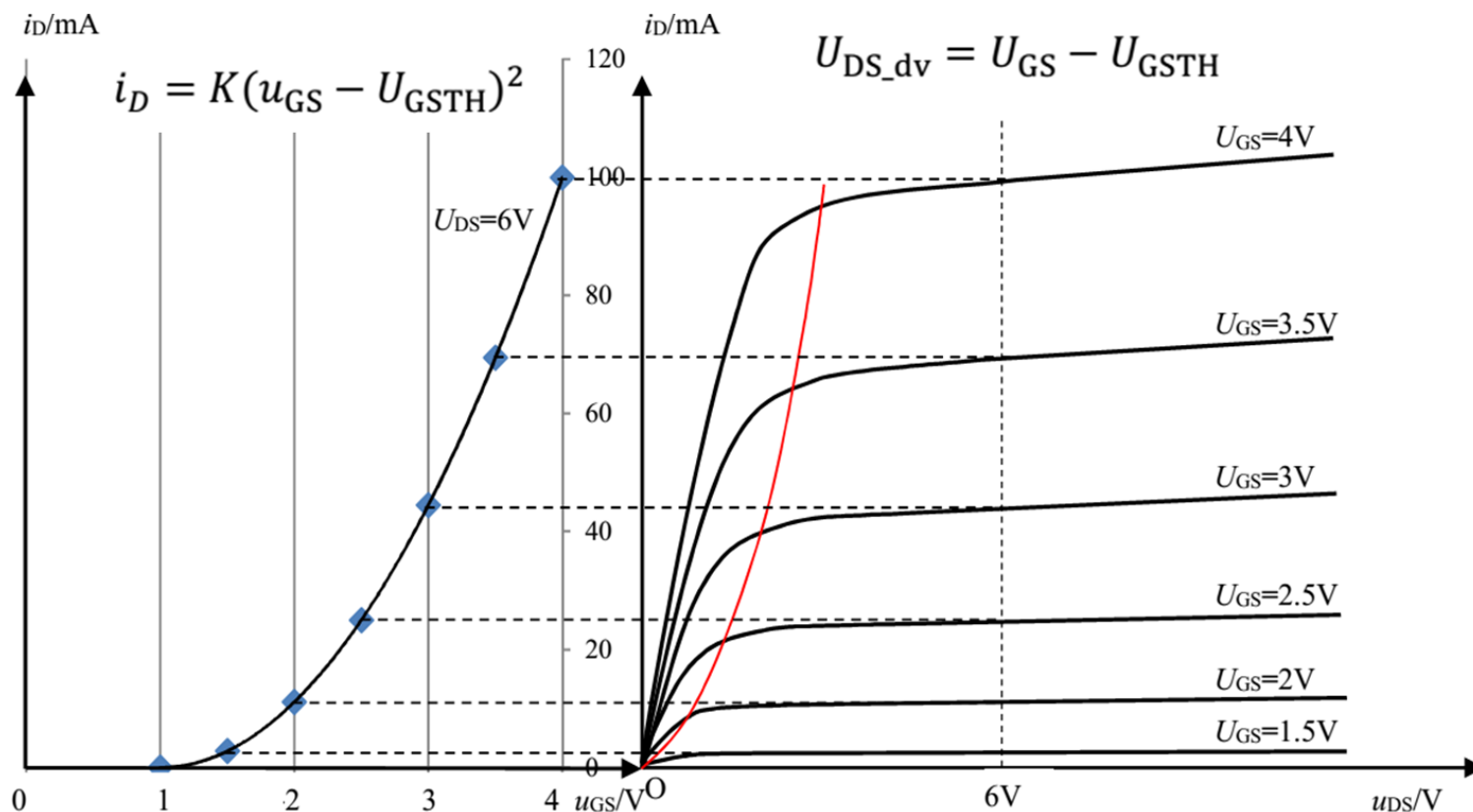


半导体器件：场效应管

5. N沟道增强型MOSFET工作在放大区时，耗尽层处于预夹断状态，此时 I_{DS} 几乎不变，仅取决于 U_{GS} ，如下图：
6. N沟道增强型MOSFET的转移特性和输出特性如下：
7. MOSFET的输出特性曲线分为：可变电阻区，恒流区，截止区。



MOSFET导电示意图



MOSFET的转移特性

MOSFET的输出特性

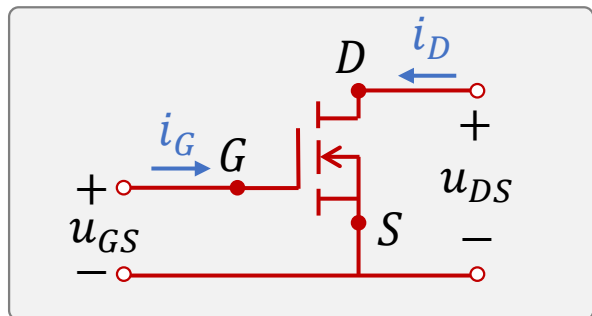




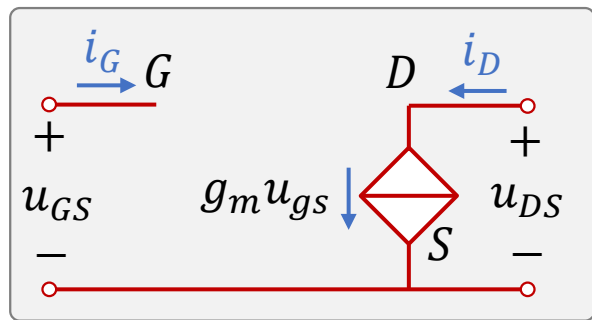
半导体器件：场效应管

2. MOSFET的基本放大电路

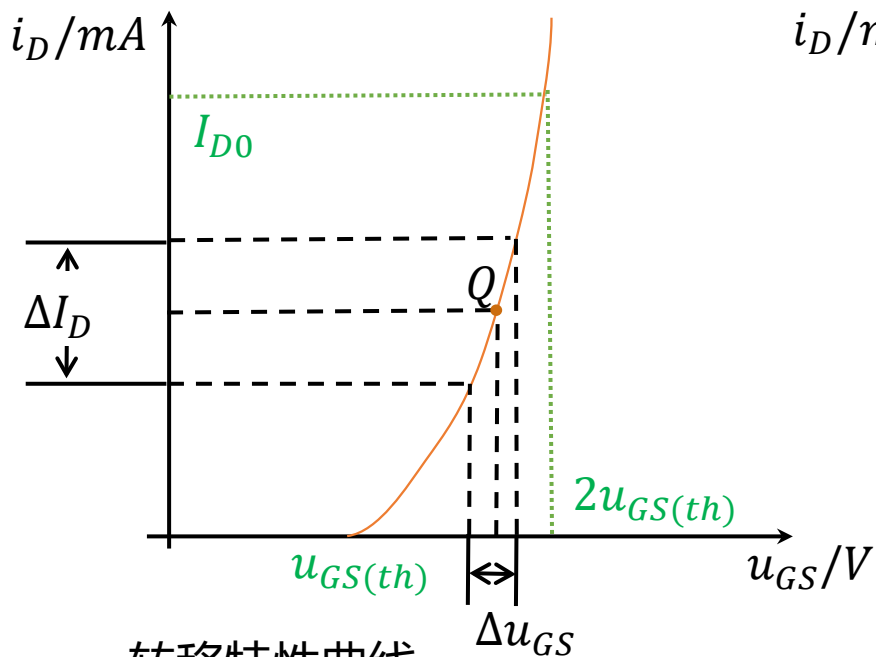
1. MOSFET的微变等效电路：NMOSFET工作与放大区时，GS端的电压正比于D端的电流。



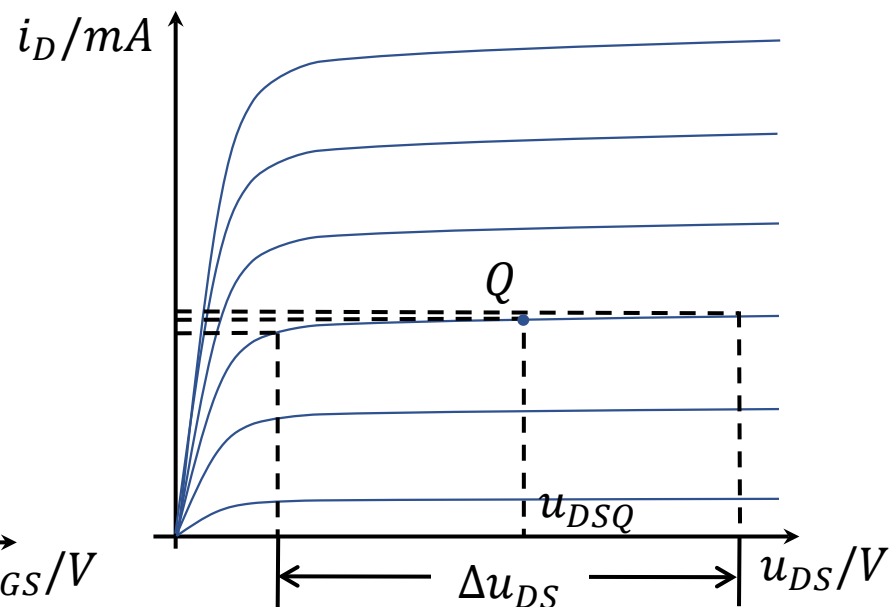
NMOS管



简化形式的微变等效电路



转移特性曲线



输出特性曲线

拟合公式: $i_D = I_{D0} \left(\frac{u_{GS}}{u_{GS(th)}} - 1 \right)^2 = K (U_{GSQ} - U_{GS(th)})^2$ 题面显式提供

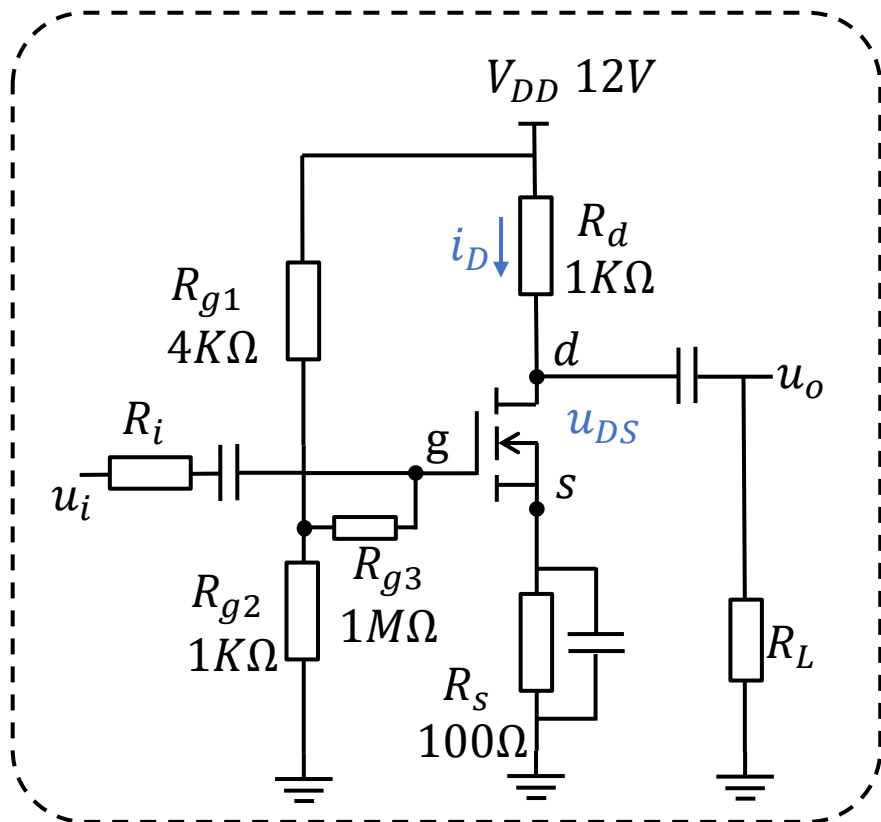
跨导可以通过转移特性拟合公式求导得到: $g_m = \frac{d}{du_{GS}} i_D = \frac{2}{u_{GS(th)}} \sqrt{I_{D0} i_D}$





半导体器件：场效应管

2. 与晶体管类似，使用MOSFET同样可以组成基本放大电路，分别是：共源极、共漏极、共栅极放大电路，且分析方法与晶体管基本放大电路一致。
3. 由于MOSFET为电压控制型器件，其组成的放大电路的输入电阻非常高。
4. 分析如下电路的静态工作点，求 U_{GQ} ， I_{DQ} ， U_{DSQ} 。



已知NMOS的转移特性为 $I_{DQ} = K(U_{GSQ} - U_{GS(th)})^2$ ，其中 $U_{GS(th)} = 2V$ ， $K = 0.0502A/V^2$

根据栅极的分压电路可得： $U_{GQ} = \frac{R_{g2}}{R_{g1} + R_{g2}} V_{DD} = 2.4V$

联立方程组：

$$\begin{cases} U_{GQ} - U_{GSQ} = I_{DQ} R_S \\ I_{DQ} = K(U_{GSQ} - U_{GS(th)})^2 \end{cases}$$

可以求出： $I_{DQ} = 3.83mA$ $U_{GSQ} = 2.4V - 0.383V = 2.017V$

$$U_{DSQ} = V_{DD} - (R_d + R_s)I_{DQ} = 7.79V$$





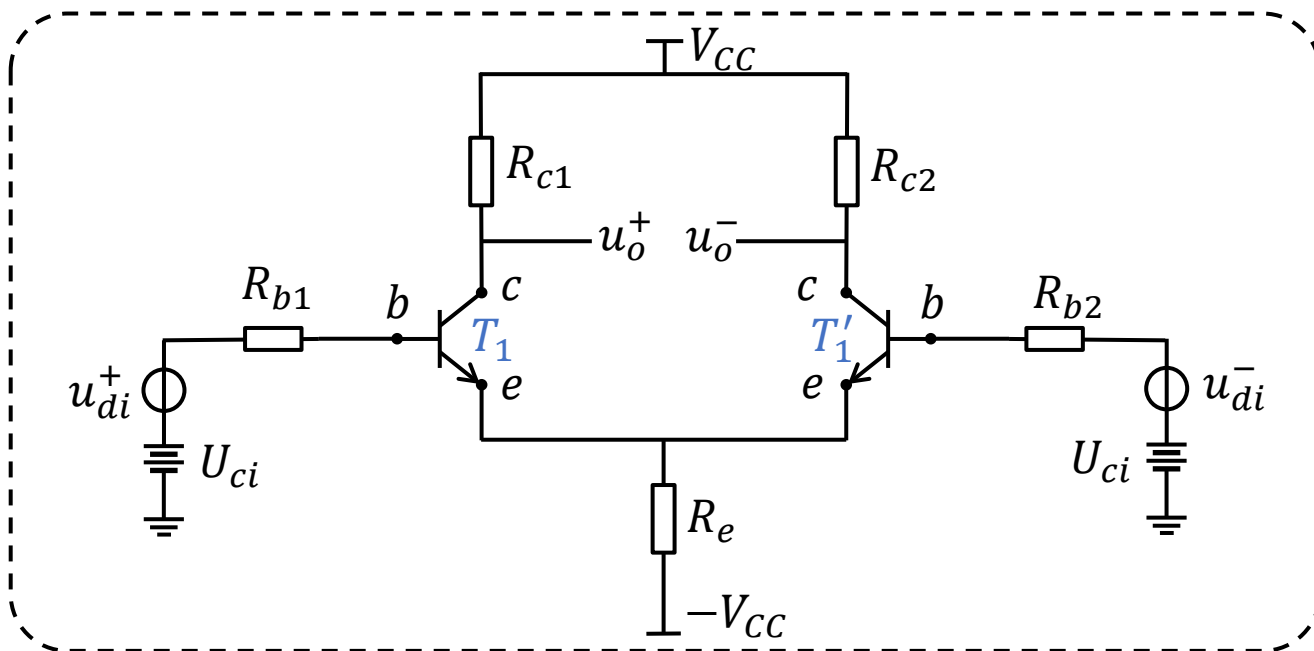
半导体器件：集成运放

1. 多级放大电路

1. 采用阻容耦合的多级放大电路可以避免温漂向后传递，但由于无法避免使用大电容，难以集成生产。
2. 采用直接耦合的多级放大电路无法避免温漂向后传递，使多级放大器的最终输出结果产生更大的漂移，输出范围变小，容易产生饱和失真或截止失真。

2. 差分放大电路

1. 差分放大电路由对称的2个共射极放大电路构成，当 R_e 并在一起时，称为长尾式差分放大电路，结构如下：



其中，输入信号可以分解为共模输入信号 u_{ci} ，差模输入信号 u_{di} 。

$$u_{ci} = \frac{u_i^+ + u_i^-}{2}$$

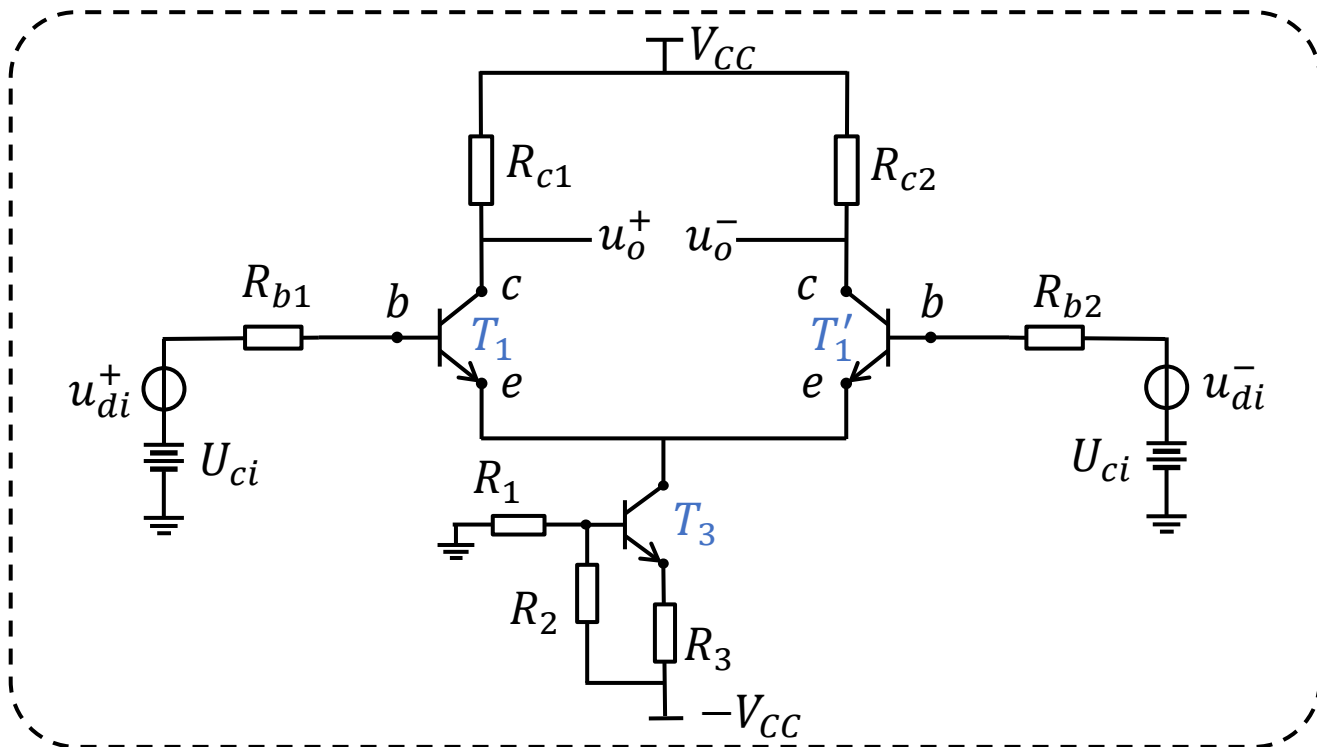
$$u_{di} = \frac{u_i^+ - u_i^-}{2}$$





半导体器件：集成运放

2. 当差分放大电路中对称器件的电气特性、温度特性一致时，差分放大电路可以显著抑制零点漂移、共模放大系数；可以显著提高差模放大系数。
3. 当差分放大电路中对称器件的电子特性、温度特性有差异时，晶体管的发射极偏置电阻 R_e 可以有效抑制零点漂移。
4. 随着 R_e 增大，差分放大电路的共模抑制比 K_{CMR} 越大，即抑制温漂的能力就越强，因此可以采用恒流源代替发射极偏置电阻 R_e 。利用恒流源动态电阻极大的特性，提高差分电路的共模抑制比。



输入电阻: $R_i = 2(R_{b1} + r_{be1})$

输出电阻: $R_o = 2R_{c1}$

差模放大倍数: $A_d = \frac{\Delta u_{do}}{\Delta u_{di}} = -\frac{\beta \left(R_{c1} \parallel \frac{R_L}{2} \right)}{R_{b1} + r_{be1}}$

共模放大倍数: $A_c = \frac{\Delta u_{co}}{\Delta u_{ci}} = 0$

共模抑制比: $K_{CMR} = \left| \frac{A_d}{A_c} \right| = \infty$

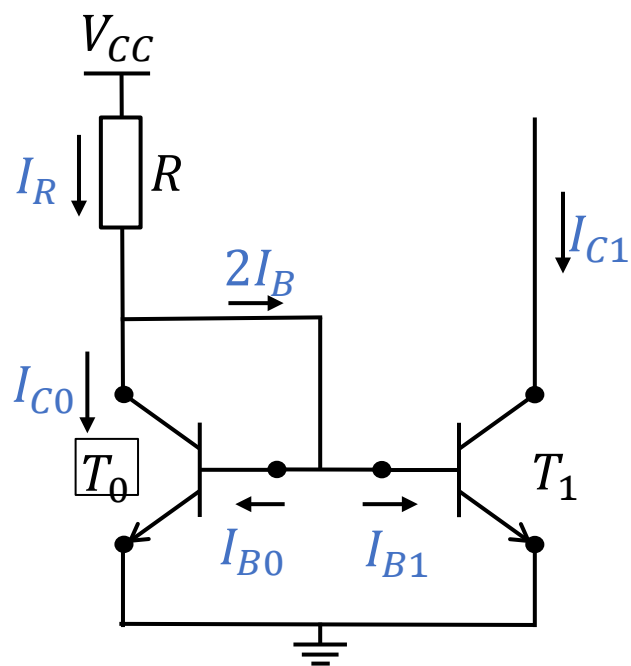




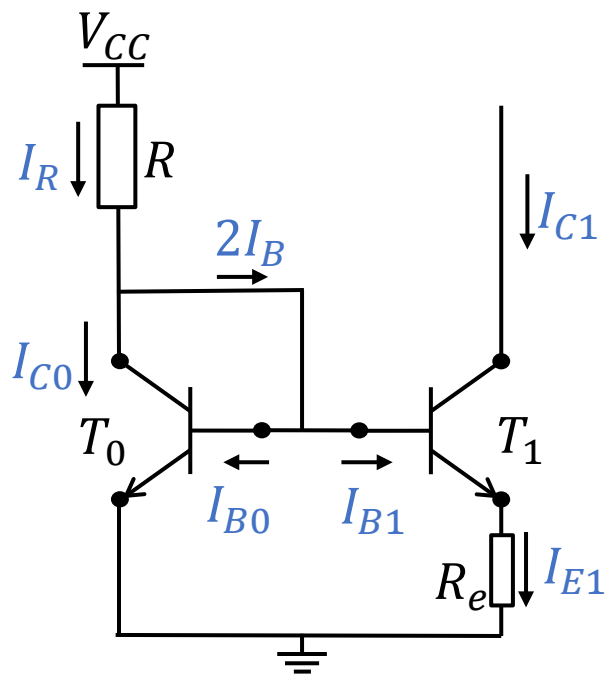
半导体器件：集成运放

3. 镜像电流源

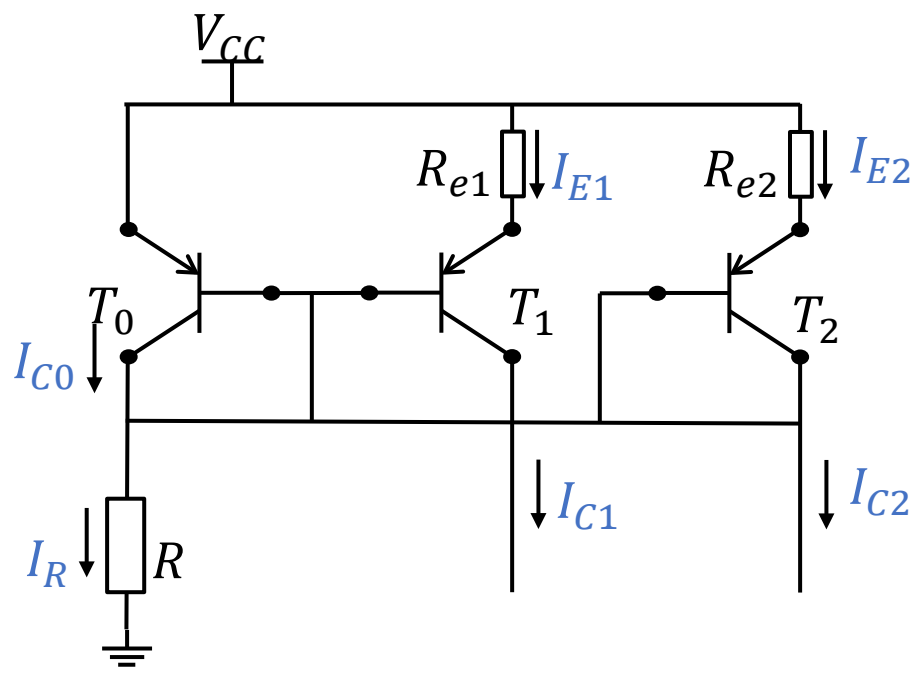
1. 利用集成电路可以制作电气特性一致的晶体管这一特性，可以制作出与参考电流相同或成比例关系的多组电流源。
2. 在集成电路中，镜像电流源为各级放大电路提供稳定的偏置电流（稳定静态工作点），或当作有源负载（ R_e ）。
3. 镜像电流源提供偏置电流时，采用PNP型晶体管；当作有源负载时，采用NPN型晶体管。



镜像电流源



微电流源



PNP结构的多路电流源

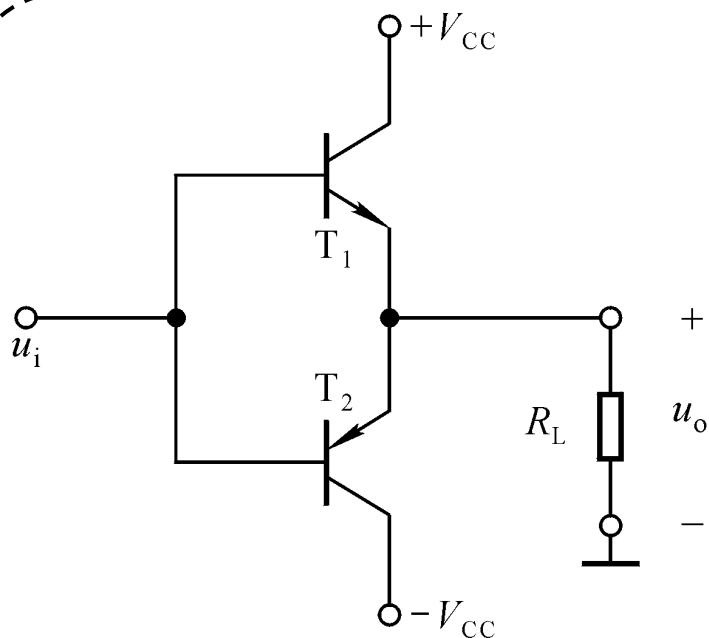




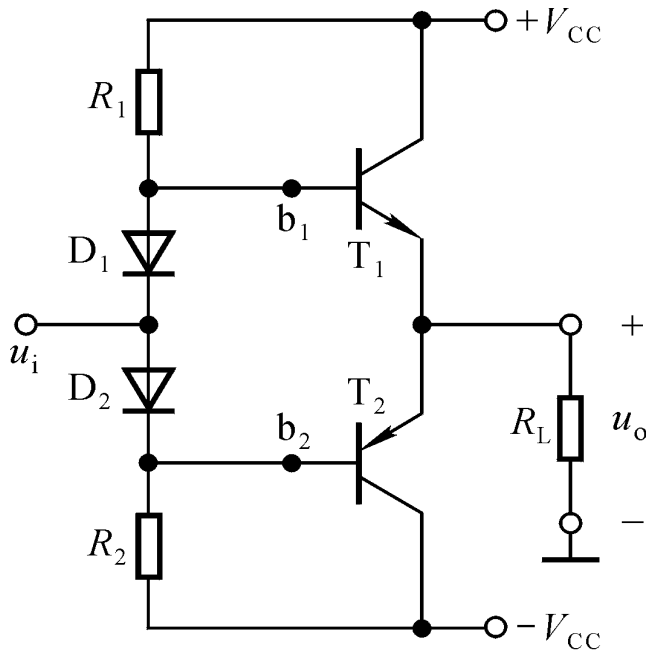
半导体器件：集成运放

4. 功率放大电路

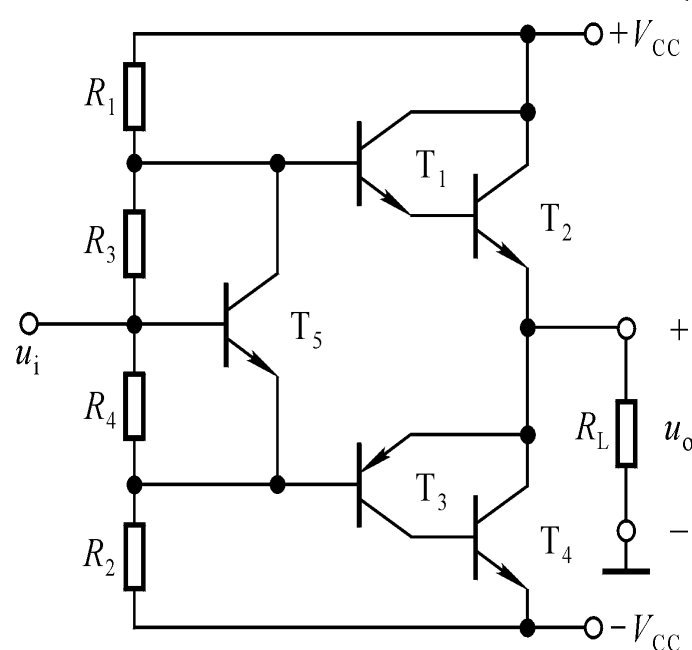
1. 晶体管共射极放大电路可以放大信号的电压与电流，因此具有功率放大能力，这类电路称为甲类放大器。由于晶体管始终处于放大区，效率较低。
2. 使用性能对称的NPN和PNP晶体管交替工作的功率放大电路，称为乙类放大器。优势是效率高，缺点是容易产生交越失真。



基础乙类功率放大器



消除交越失真



使用 U_{BE} 倍增和同类晶体管优化信号



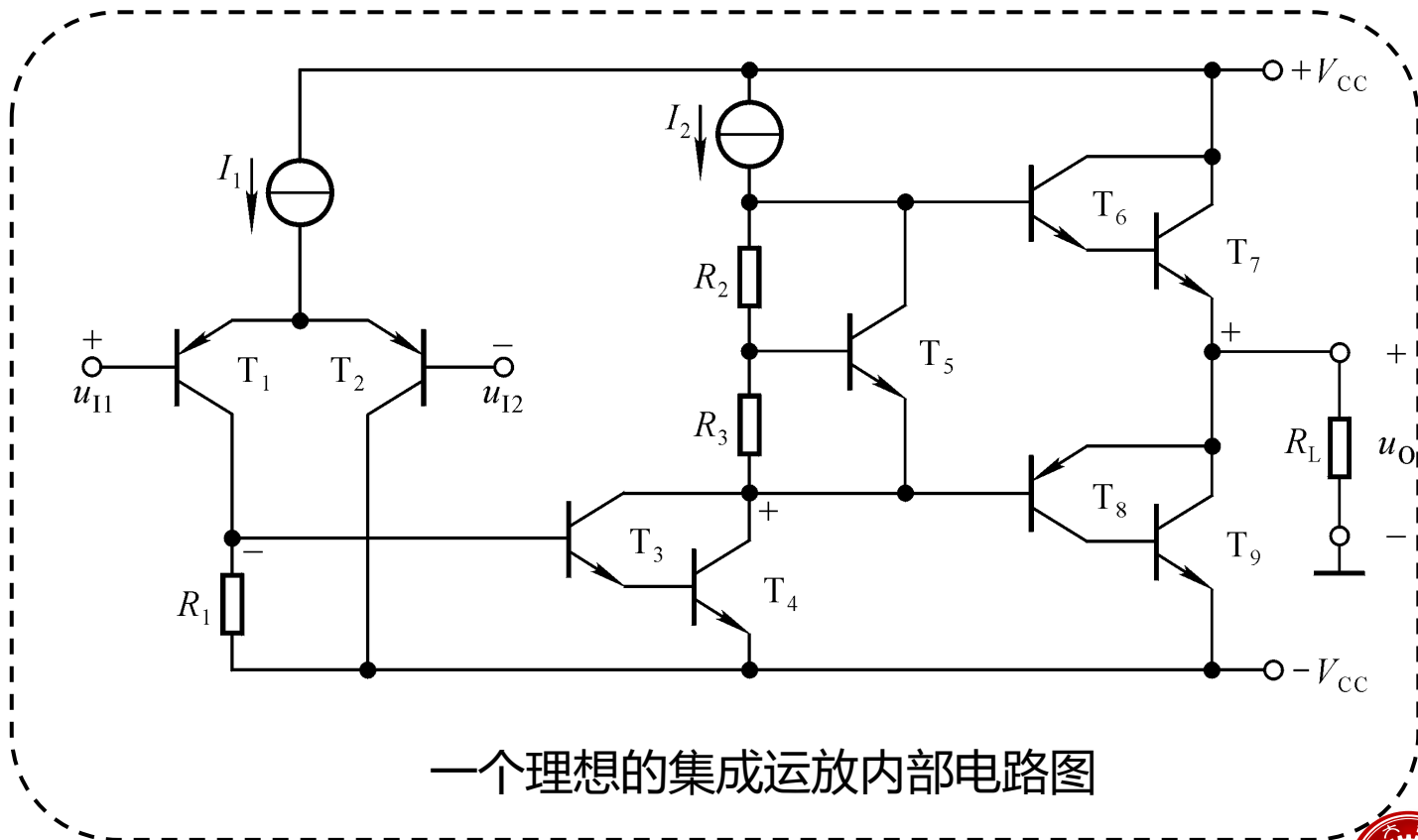
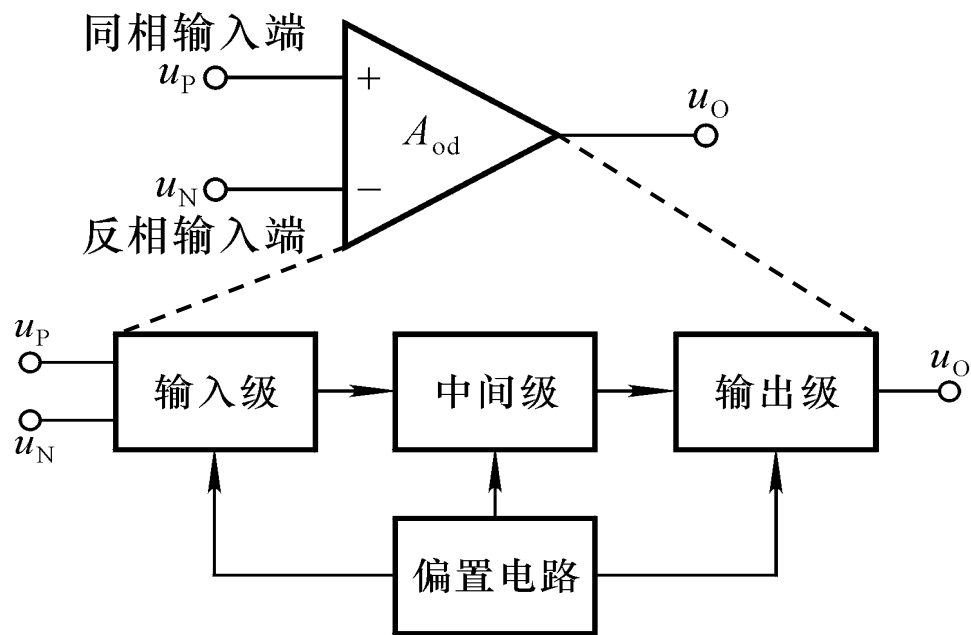


半导体器件：集成运放

5. 集成运放

1. 集成运算放大器是一种采用直接耦合的多级放大电路，具有如下特点：利用一致性好的差分放大电路作为输入级，利用电流源电路提供稳定的偏置电流和替换无源器件，利用功率放大电路作为最后一级输出级，利用复合管改善晶体管电气特性。

2. 集成运放的放大倍数极大，在 10^5 以上。

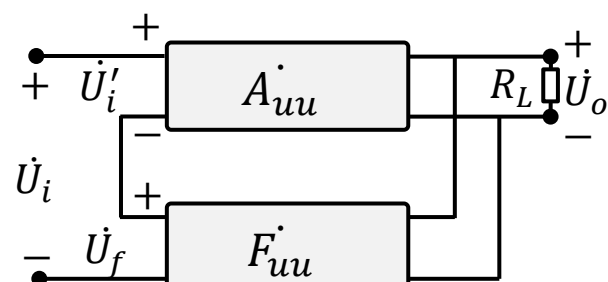
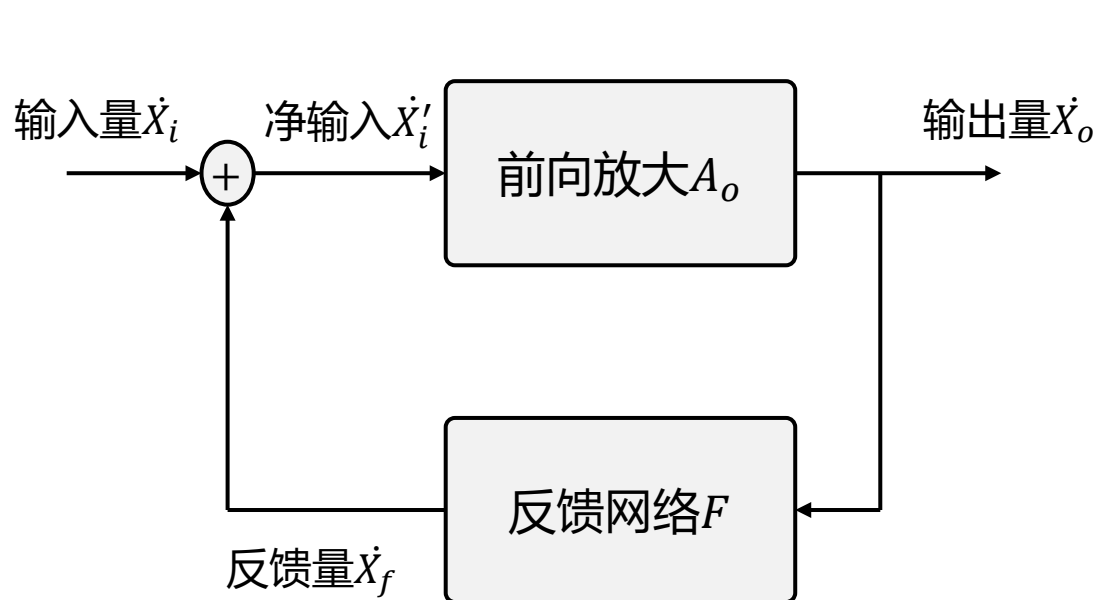




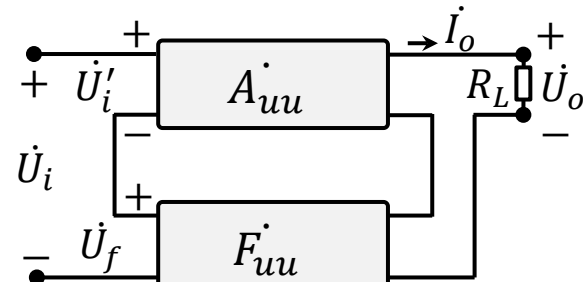
半导体应用：信号运算

1. 负反馈理论

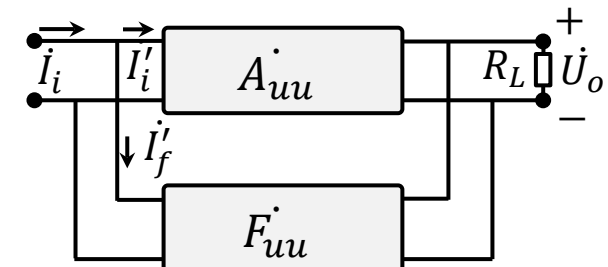
1. 将放大电路的输出信号通过反馈网络引入放大电路的输入端，构成了反馈电路。
2. 当反馈信号的变化与输入信号相反时，称为负反馈。负反馈是自动控制理论的基础。
3. 按照放大电路的输入分类，可以分为串联反馈和并联反馈；按照输出分类，可以分为电压反馈和电流反馈。
4. 电压负反馈使系统输出电阻急剧变小；串联负反馈使输入电阻急剧变大。
5. 在负反馈电路中，如果前向放大系数非常大，则电路进入深度负反馈，系统放大倍数仅取决于反馈回路。



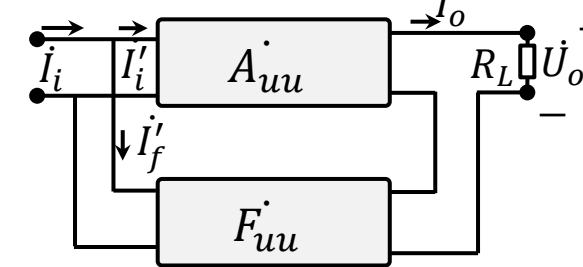
电压串联负反馈



电流串联负反馈



电压并联负反馈



电流并联负反馈

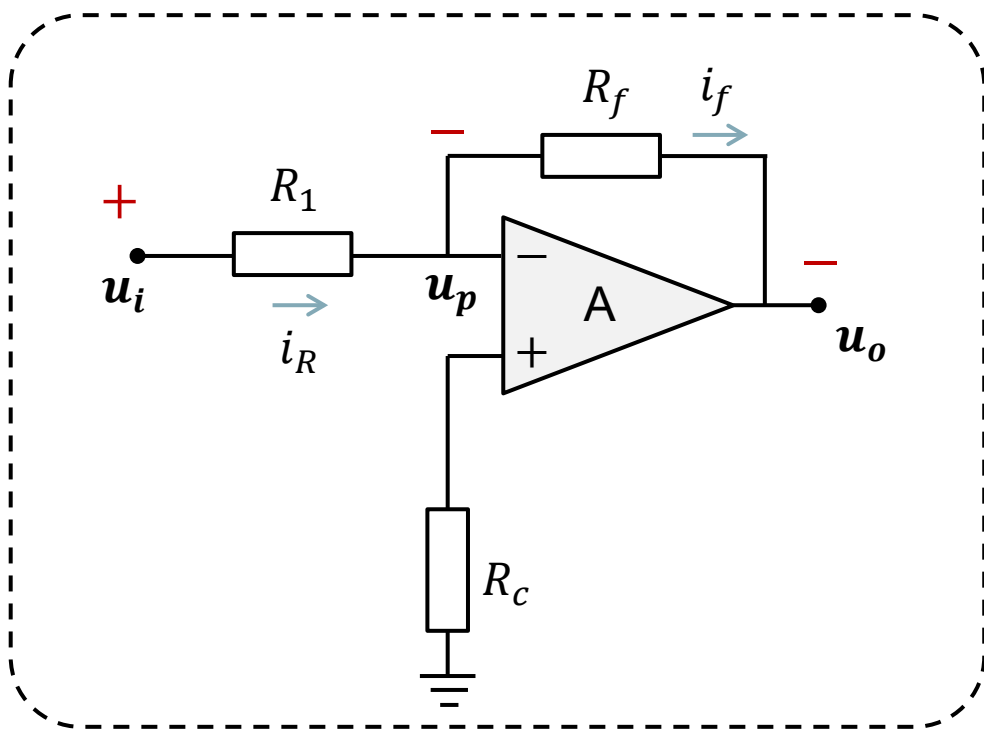




半导体应用：信号运算

2. 集成运放组成的运算电路

1. 在集成运放电路中，认为运算放大器为理想器件，放大倍数为无穷。
2. 在包含运放的电路中，当运放处于放大状态时，运放的输入端虚短，输入端虚断。
3. 反向比例运算：运放的同向输入端固定，反向输入端接输入信号，输出端接信号输出，如下图。



由于电路工作在深度负反馈状态，故运放输入端口满足虚短、虚断。

由于输入端口满足虚断，故 $i_R = i_f$

由于输入端口满足虚短，故 $u_p = 0$

$$i_R = \frac{u_i - u_p}{R_1} = \frac{u_i}{R_1} \quad i_f = \frac{u_p - u_o}{R_f} = -\frac{u_o}{R_f}$$

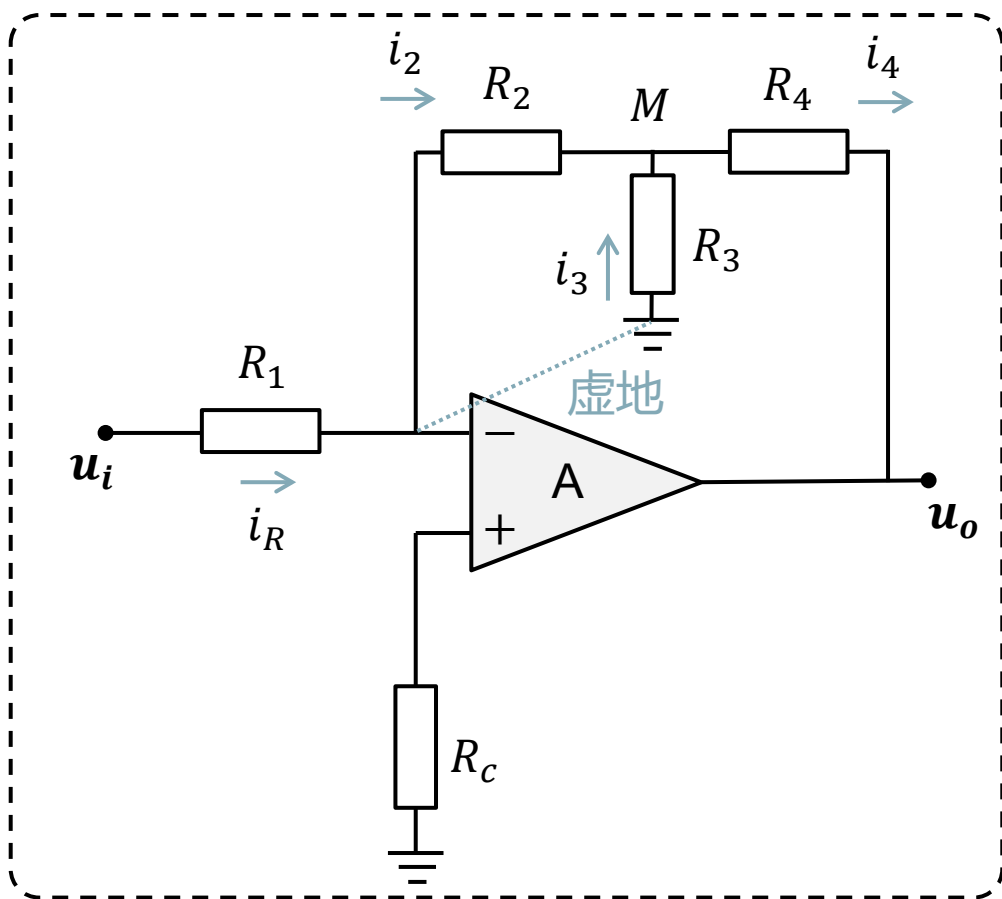
可得： $u_o = -i_f R_f = -\frac{R_f}{R_1} u_i$





半导体应用：信号运算

4. T型反馈网络反向比例运算：在反向比例运算电路中，如果需要较高的放大系数，则要求反馈电阻的组织非常大才可以做到，但这种做法会使输出信号不稳定。一种改进方法是将反馈电阻替换为T型电路结构，可以在不使用大电阻的前提下，有效提高电路的放大倍数，如下图。



$$i_2 = \frac{u_i}{R_1} \quad u_M = -\frac{R_2}{R_1} u_i$$

$$i_3 = \frac{-u_M}{R_3} = \frac{R_2}{R_1 R_3} u_i$$

$$i_4 = i_2 + i_3 = \frac{R_3 + R_2}{R_1 R_3} u_i$$

$$u_o = -i_4 (R_4 + R_2 \parallel R_3)$$

$$= -\frac{R_3 + R_2}{R_1 R_3} (R_4 + R_2 \parallel R_3) u_i$$

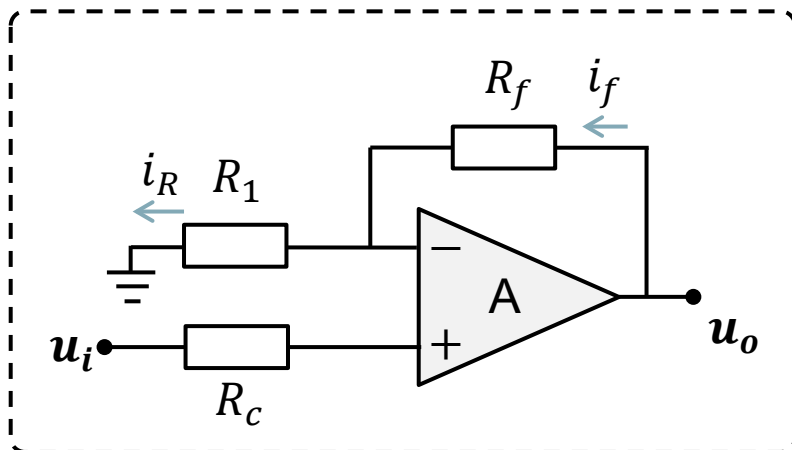
使用 R_2 从 R_3 处撬动了更大的电流，从而减小电阻阻值



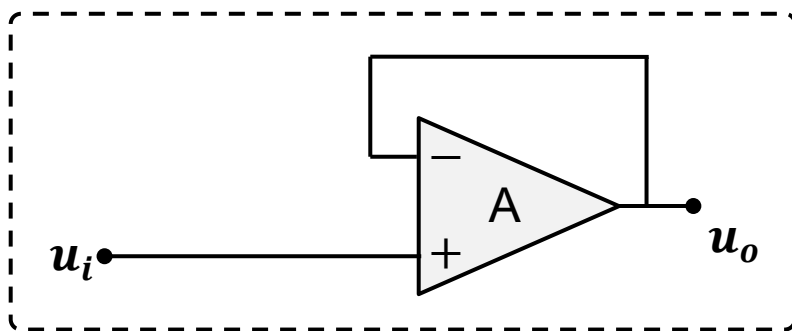


半导体应用：信号运算

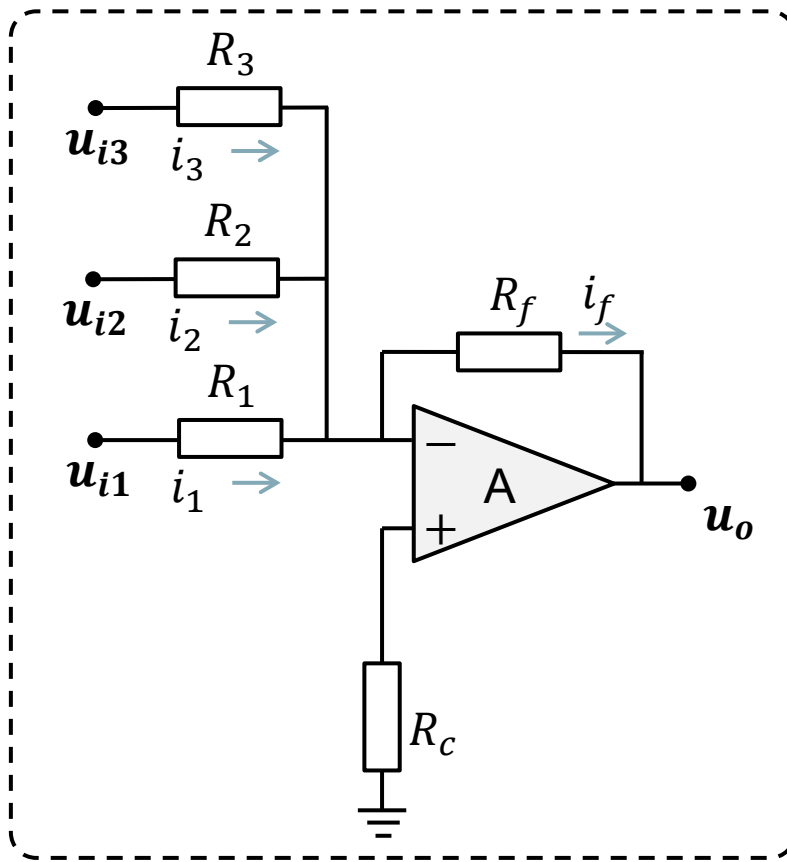
5. 同向比例运算：运放的反向输入端固定，同向输入端接输入信号，输出端接信号输出，如下图。
6. 电压跟随器：当同向比例运算器的反向输入对地电阻极大时，输出电压等于输入电压，且系统输出阻抗极小。
7. 加法运算：利用叠加原理，将同向或反向比例运算电路叠加可以构造出多个输入信号的加法运算，如下图。



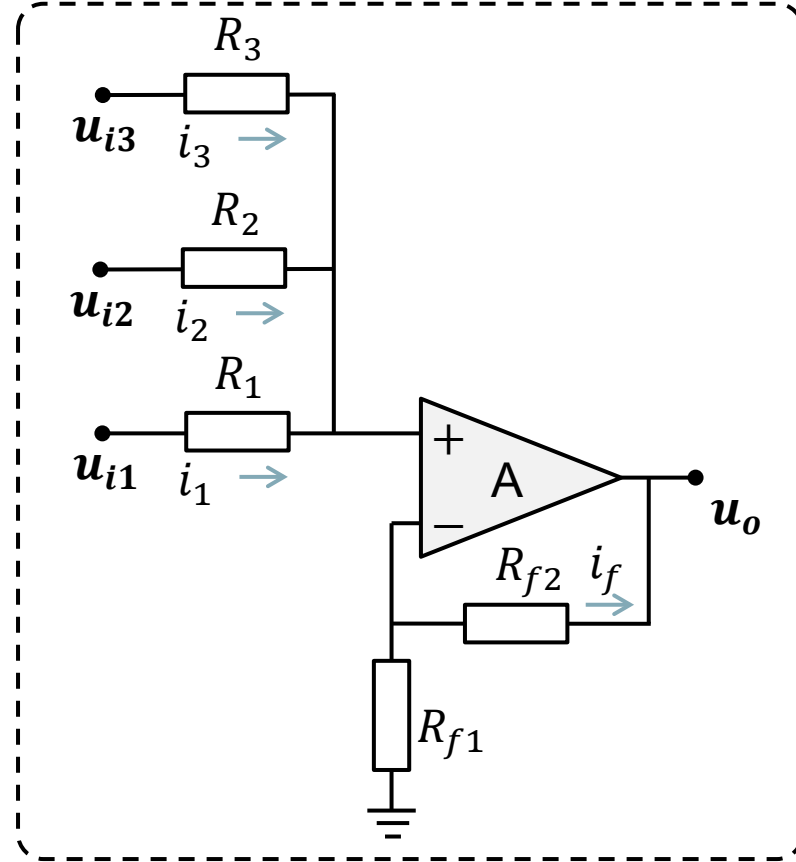
同向比例放大器



电压跟随器



反向加法电路



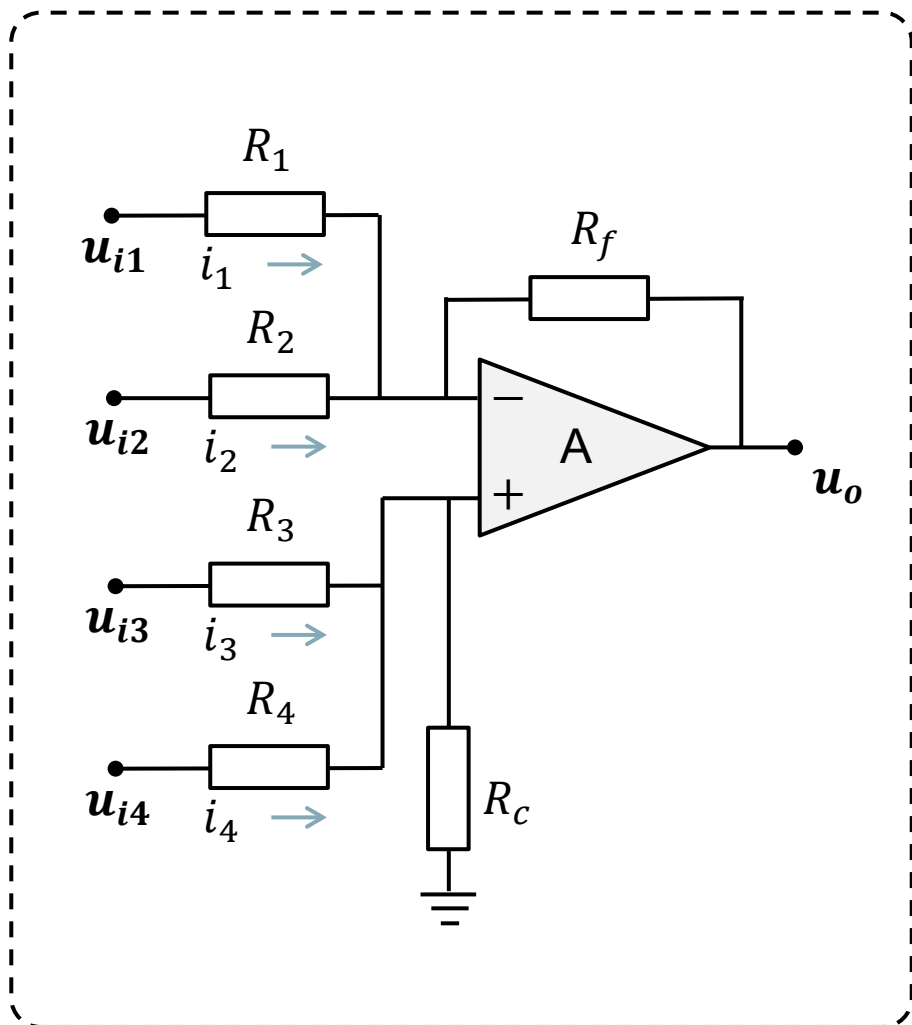
同向加法电路





半导体应用：信号运算

8. 加减混合运算：当运放的同向输入电阻之并与反向输入电阻之并相等时，加减法电路可以化简，如下图。



已知 $R_1 \parallel R_2 \parallel R_f = R_3 \parallel R_4 \parallel R_c = R_P$

同向输入产生的输出 (推导见课件)

$$u_{o1} = R_f \left(\frac{u_{i3}}{R_3} + \frac{u_{i4}}{R_4} \right)$$

反向输入产生的输出

$$u_{o2} = -R_f \left(\frac{u_{i1}}{R_1} + \frac{u_{i2}}{R_2} \right)$$

通过叠加原理得到最终输出

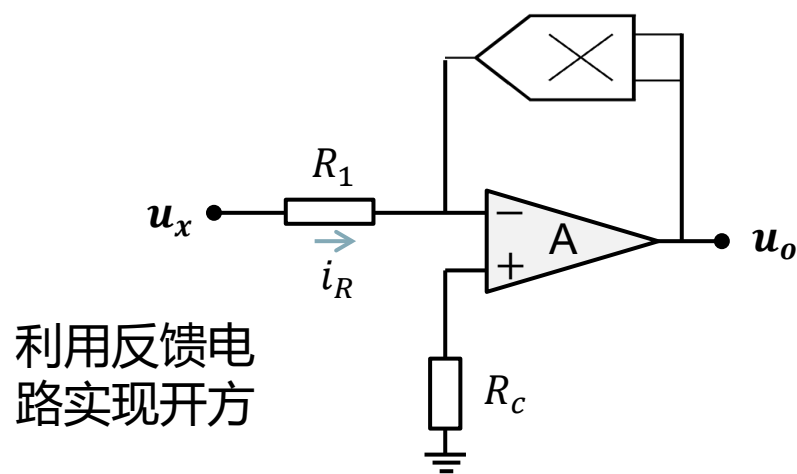
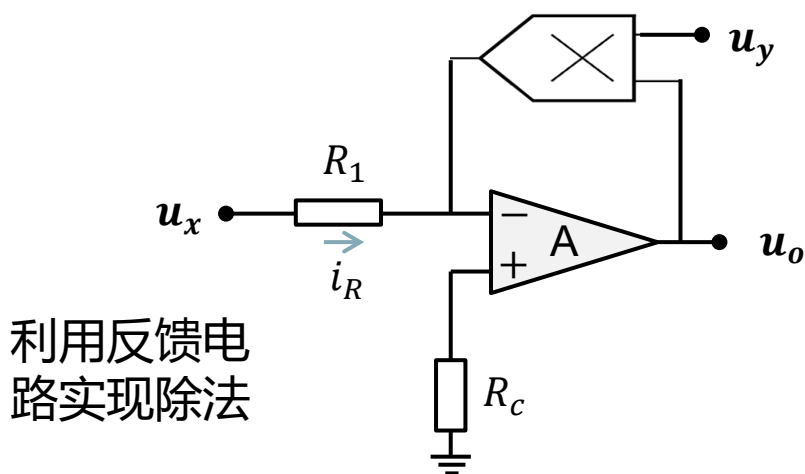
$$u_o = R_f \left(\frac{u_{i3}}{R_3} + \frac{u_{i4}}{R_4} - \frac{u_{i1}}{R_1} - \frac{u_{i2}}{R_2} \right)$$





半导体应用：信号运算

9. 积分与微分运算：运放的反馈网络为电容，则可以在输出端得到输入信号的积分；运放的输入电阻为电容，则可以在输出端得到输入信号的微分。
10. 对数与指数运算：鉴于二极管或三极管的电压电流特性中存在指数形式，将其接入运放的反馈网络或输入线路，可以在输出端得到输入信号的对数或指数。
11. 乘法与平方运算：通过对数、加法、指数运算电路的组合，可以得到乘法运算。当乘法的两个输入端为相同信号时，可以得到平方运算。
12. 除法与开方运算：由于负反馈电路可以自动平衡输入输出，将乘法器接入负反馈网络，可以得到除法运算或开方运算，如下图。



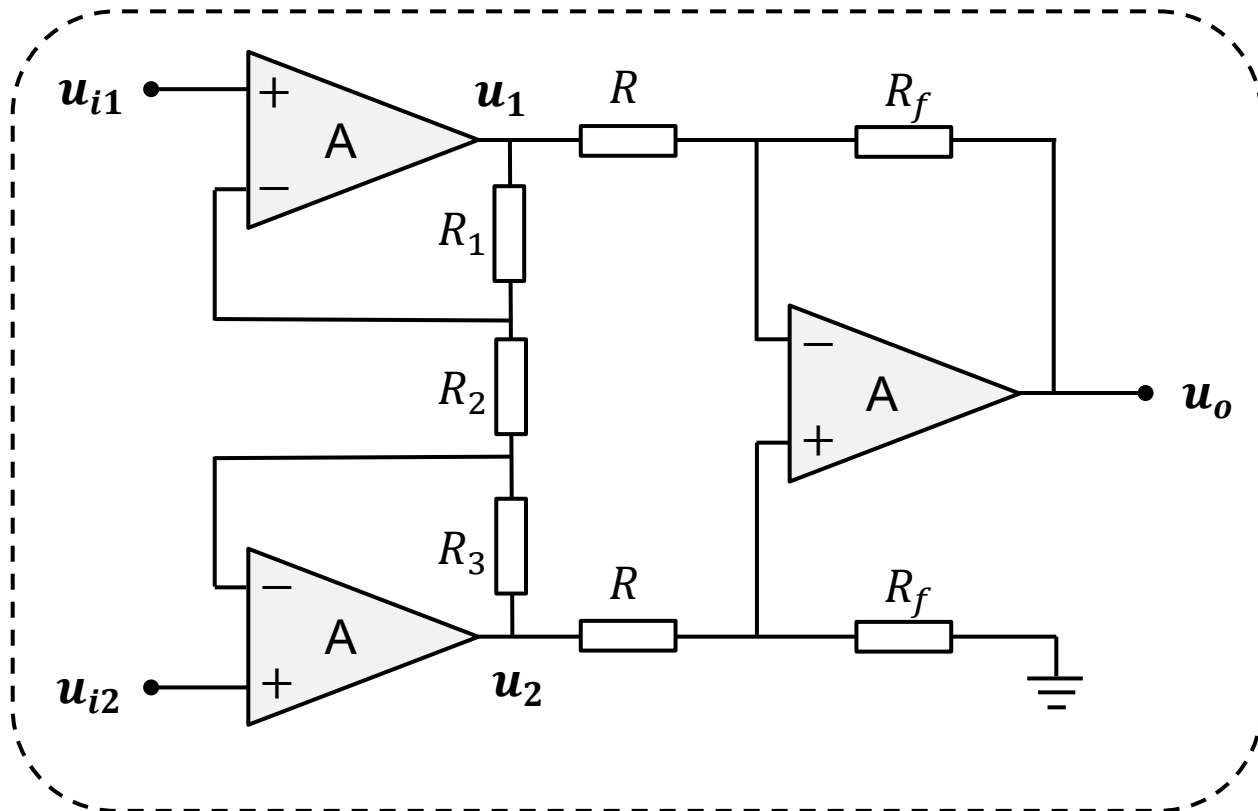


半导体应用：信号调理

1. 仪表运放

1. 工业传感器往往输出微弱的差分信号，且输出电阻较大，共模干扰严重。为了测量这类信号，需要使用一种输入阻抗很大、共模抑制能力强、差模放大倍数大、增益调节方便的放大电路。

2. 仪表运放满足上述特点，其电路结构如下：



计算左图放大倍数：

$$u_{R_2} = u_{i1} - u_{i2} \quad u_1 - u_2 = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_2} (u_{i1} - u_{i2})$$

由叠加原理，得

$$u_{o1} = -\frac{R_f}{R} u_1$$

$$\frac{R_f}{R + R_f} u_2 = \frac{R}{R + R_f} u_{o2} \quad u_{o2} = \frac{R_f}{R} u_2$$

$$u_o = u_{o1} + u_{o2} = -\frac{R_f}{R} \frac{(R_1 + R_2 + R_3)}{R_2} (u_{i1} - u_{i2})$$

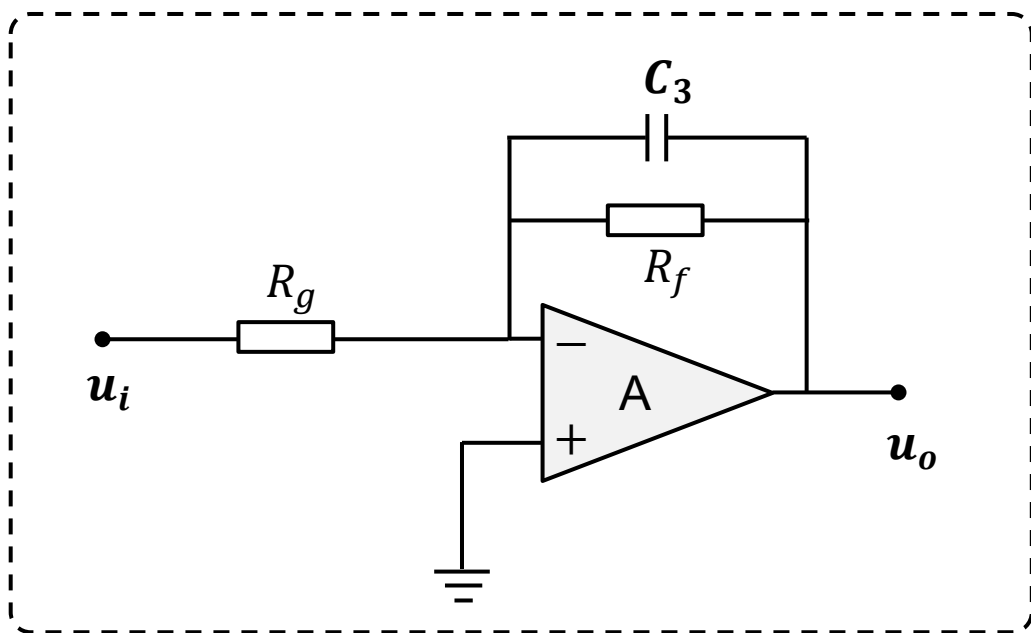




半导体应用：信号调理

2. 滤波电路

1. 对输入信号的各个频率有选择的释放到输出信号，称为滤波电路。
2. 滤波电路按照处理方式可分为：模拟滤波器、数字滤波器；按照是否存在有源器件可分为：有源滤波、无缘滤波；按照滤波频率效果可分为：低通滤波、高通滤波、带通滤波、带阻滤波。
3. 一阶滤波电路在特征频率处，幅值变为峰值的0.707倍，对数轴下为-3dB；每10倍频程下降20dB。
4. 有源一阶低通滤波器的电路如下，计算其电压增益 A_{uf} 、截止频率 f_h 。



$$A_{uf} = - \frac{R_f \parallel \frac{1}{j\omega C_3}}{R_g} = - \frac{\frac{R_f \times \frac{1}{j\omega C_3}}{R_f + \frac{1}{j\omega C_3}}}{R_g} = - \frac{R_f}{R_g} \times \frac{j\omega C_3}{R_f + \frac{1}{j\omega C_3}}$$
$$= - \frac{R_f}{R_g} \times \frac{1}{1 + j\omega R_f C_3}$$

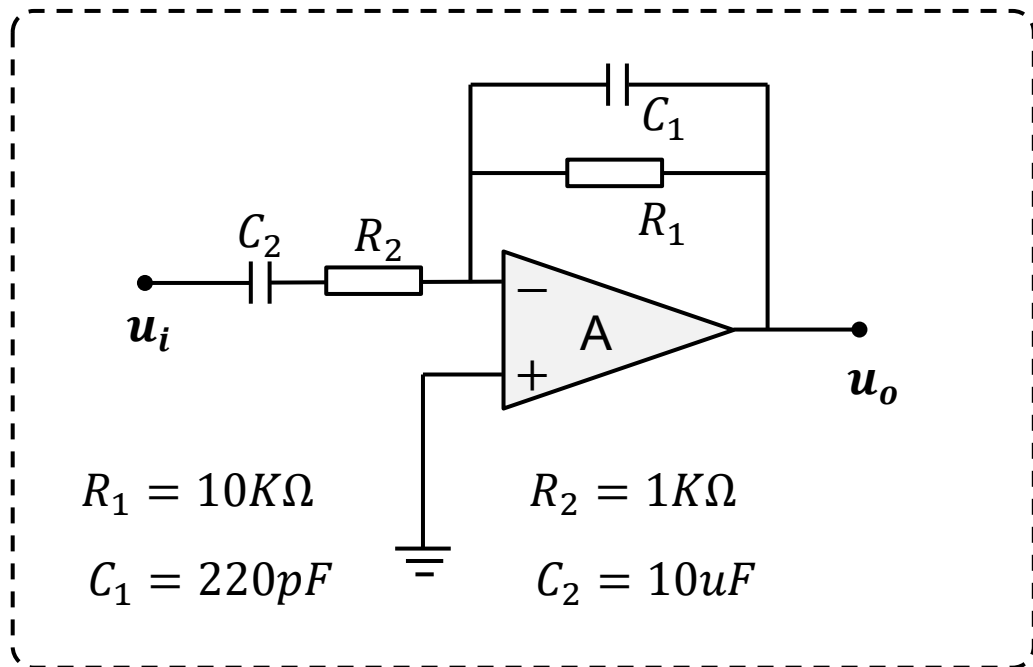
$$\text{截止频率 } f_h \text{ 为: } f_h = \frac{1}{2\pi R_f C_3}$$





半导体应用：信号调理

5. 有源一阶带通滤波器的电路如下，计算其电压增益 A_{uf} 、中频增益 A 、上限截止频率 f_h 、下限截止频率 f_l 。



$$A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} = -(R_1 \parallel j\omega C_1) / (R_2 + j\omega C_2)$$

$$A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} = -\frac{R_1}{1 + j\omega R_1 C_1} \cdot \frac{R_2 (1 + j\omega R_2 C_2)}{j\omega R_2 C_2}$$

$$= -\frac{R_1}{R_2} \times \frac{1}{1 + j\omega R_1 C_1} \times \frac{j\omega R_2 C_2}{1 + j\omega R_2 C_2}$$

中频增益 A

上限截止频率 f_h

下限截止频率 f_l

6. 二阶有源滤波器采用LC电路组成，导通区域外下降速度更陡峭，每10倍频程下降40dB。

7. 二阶有源滤波器在特征频率处增益取决于品质因数。二阶低通有源滤波器根据此处的增益，可以分为：巴特沃斯滤波器 ($Q=0.707$)，贝塞尔滤波器 ($Q<0.707$)，切比雪夫滤波器 ($Q>0.707$)。

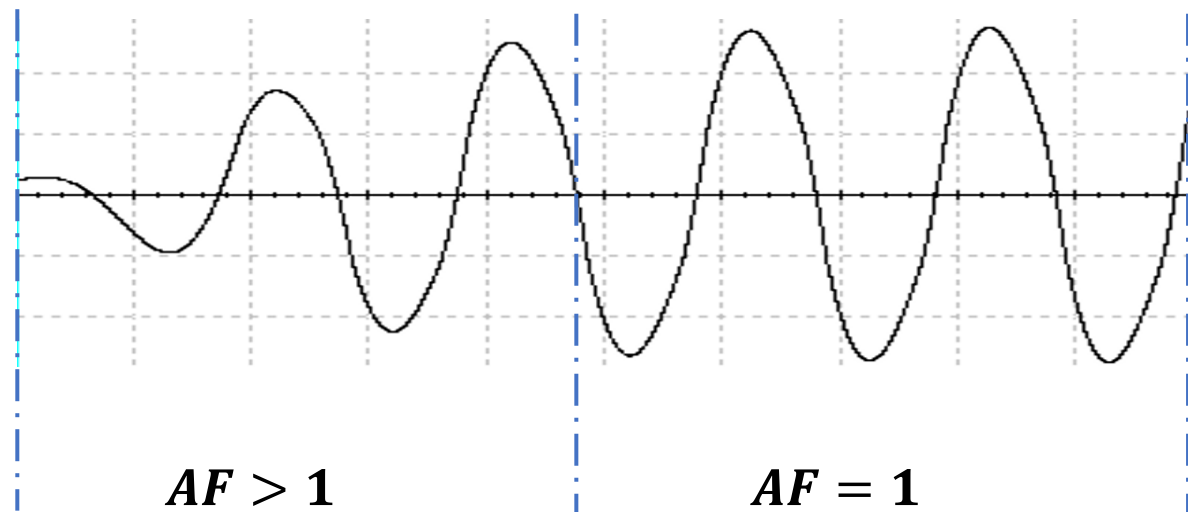
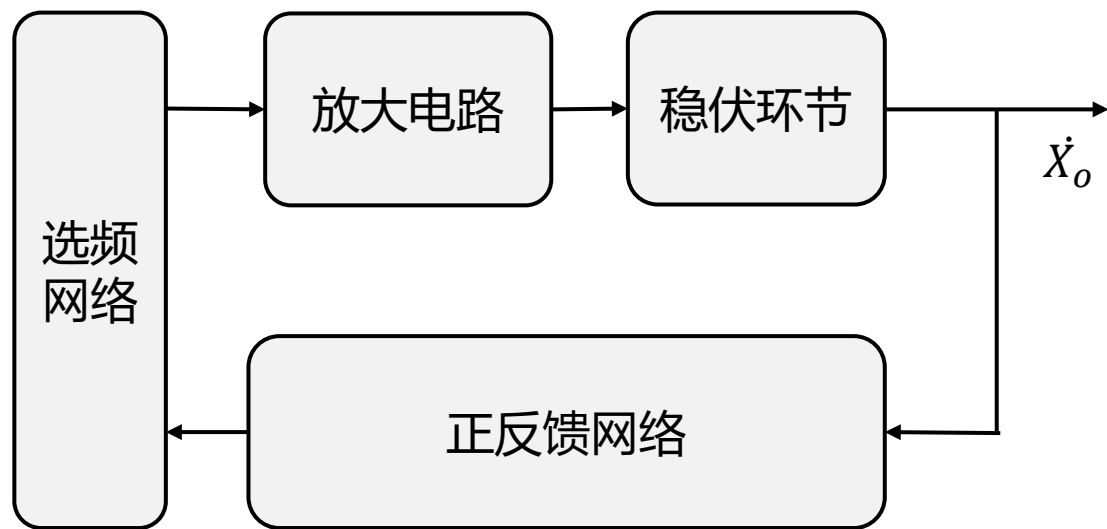




半导体应用：信号生成

1. 正弦波振荡电路

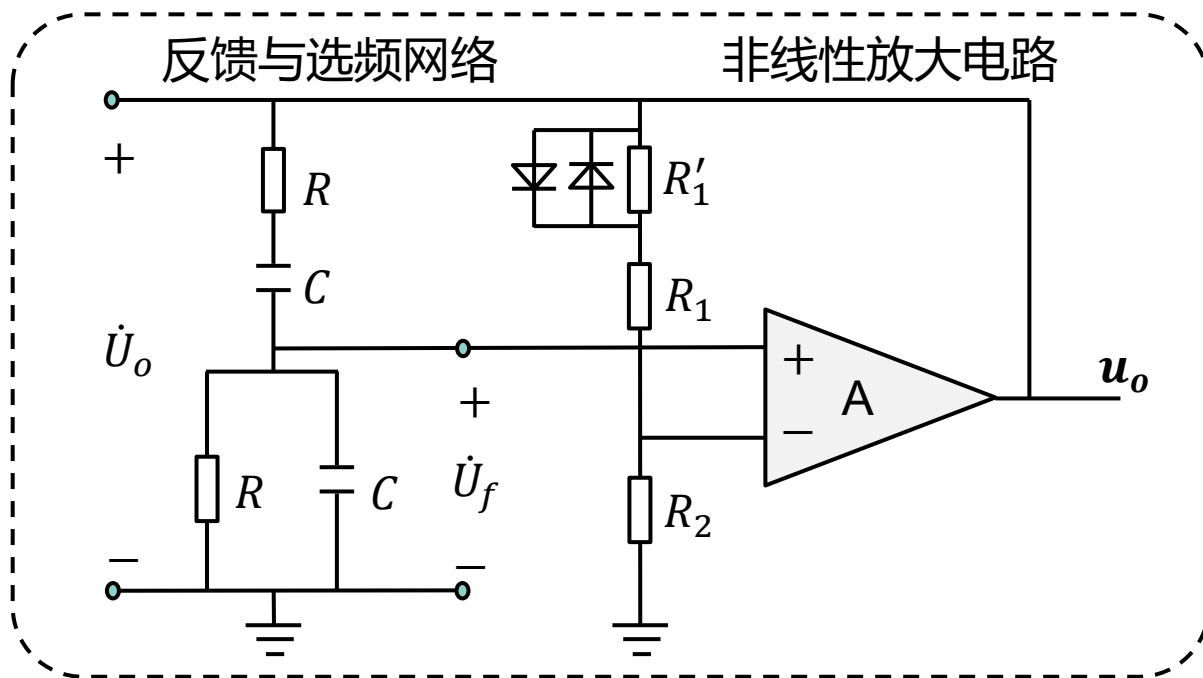
1. 自激振荡：当反馈网络返回的信号可以代替外部输入，直接送给前向放大电路的输入时，系统产生自激振荡。
2. 自激振荡的平衡条件：幅度平衡条件， $AF=1$ ；相位平衡条件，反馈后的相位满足 2π 整数倍。
3. 在振荡建立时，需要满足 $AF>1$ ，使选定频率的信号可以逐步放大。当振荡稳定时，需要改变A、F的取值，使其满足振荡平衡条件。
4. 振荡电路由以下4部分构成：放大电路，稳伏环节，正反馈网络，选频网络。
5. RC正弦振荡电路产生的正弦波频率较低，通常在1MHz以下；LC正弦波振荡电路的工作频率较高。





半导体应用：信号生成

6. 文氏桥选频网络：通过电阻电容的串联和并联组成了带通滤波器，使其仅在谐振频率处产生最大的放大倍数，为 $1/3$ ；在谐振频率处，系统呈纯电阻性。



$$\dot{F} = \frac{\dot{U}_f}{\dot{U}_o} = \frac{R \parallel \frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C} + (R \parallel \frac{1}{j\omega C})} = \frac{1}{3 + j(\omega RC - \frac{1}{\omega RC})}$$

$$\text{令: } f_0 = \frac{1}{2\pi RC} \quad \text{得: } \dot{F} = \frac{1}{3 + j(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f})}$$

当 $f = f_0$ 时，不但输入输出电压同相位，
且 $|\dot{F}|$ 最大，为 $1/3$

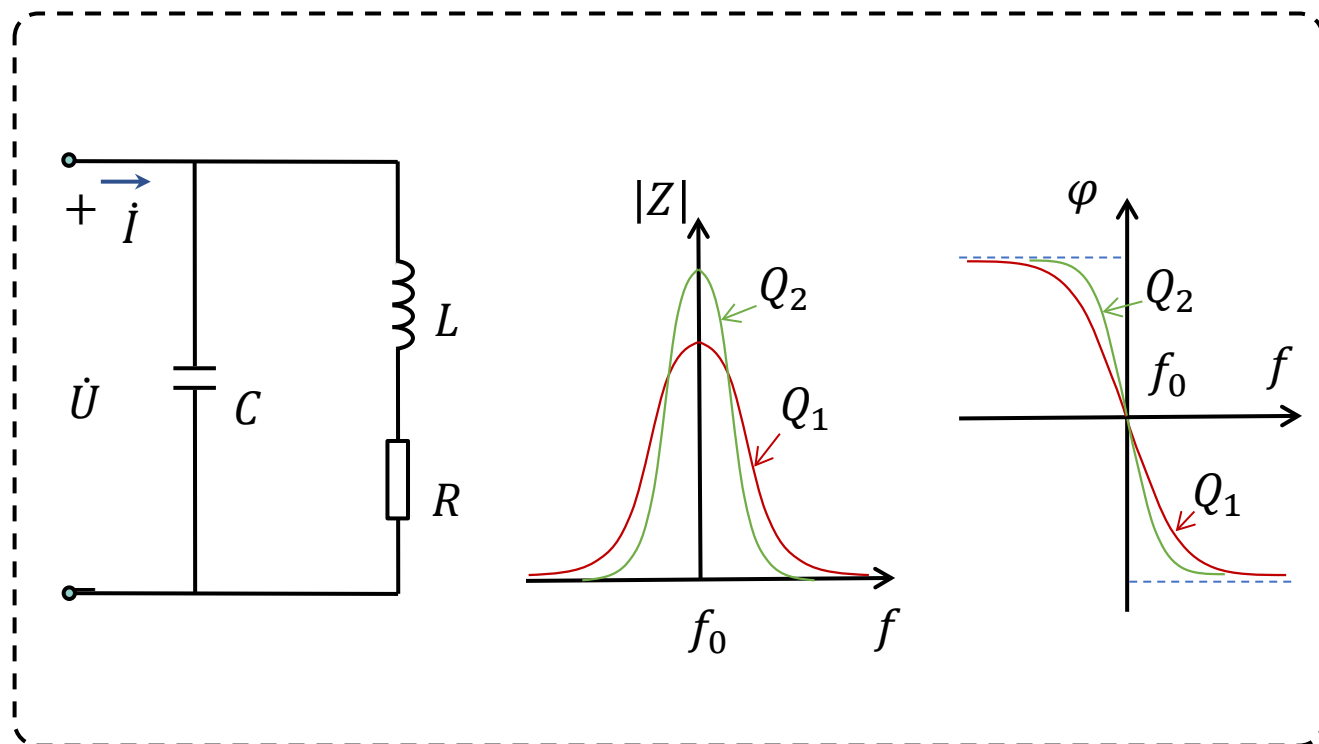
7. 放大电路需要增加非线性放大环节，使输出信号幅值达到一定程度后，放大系数减小，从而达到振荡稳定条件。



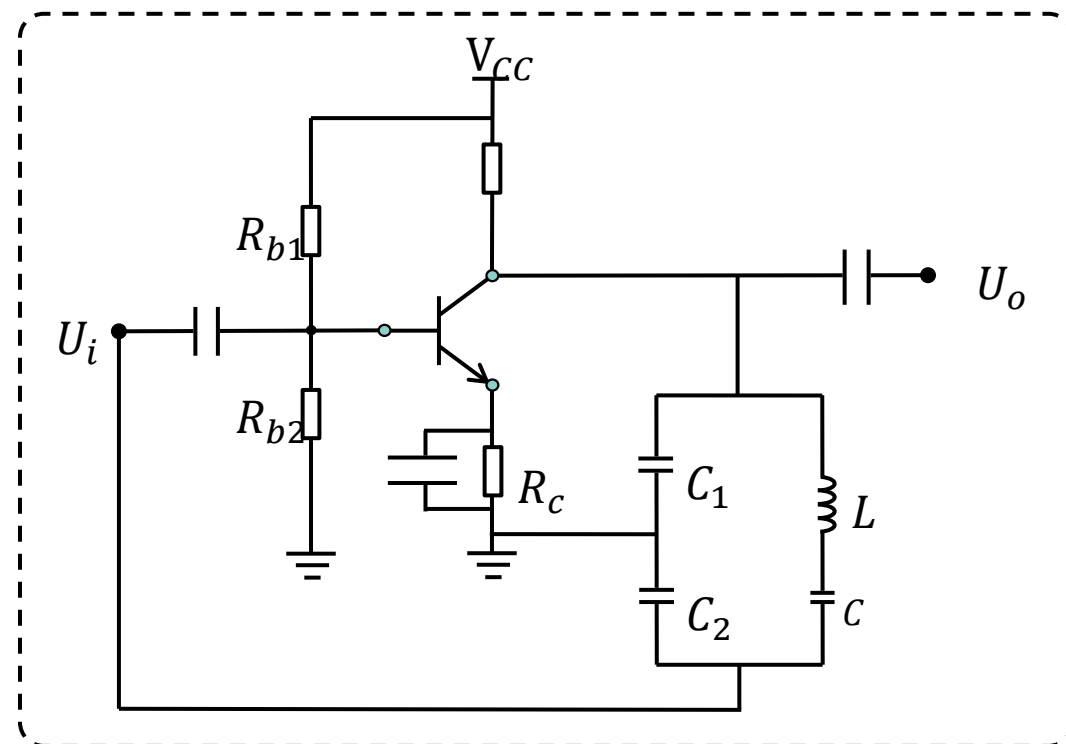


半导体应用：信号生成

8. LC振荡电路：LC选频网络具有二阶特性，在谐振频率处具有更高的放大倍数，相位变化也更加陡峭。
9. 电容三点式振荡电路产生的波形质量高，频率可调整范围较小，适合输出频率固定的场合。
10. 使用石英晶体替代电容三点式电路中的电感器件，可以得到电气特性好、温漂极小的时钟产生电路。常用于钟表、数字电路的时钟等场合。



LC并联谐振选频网络



电容三点式振荡电路

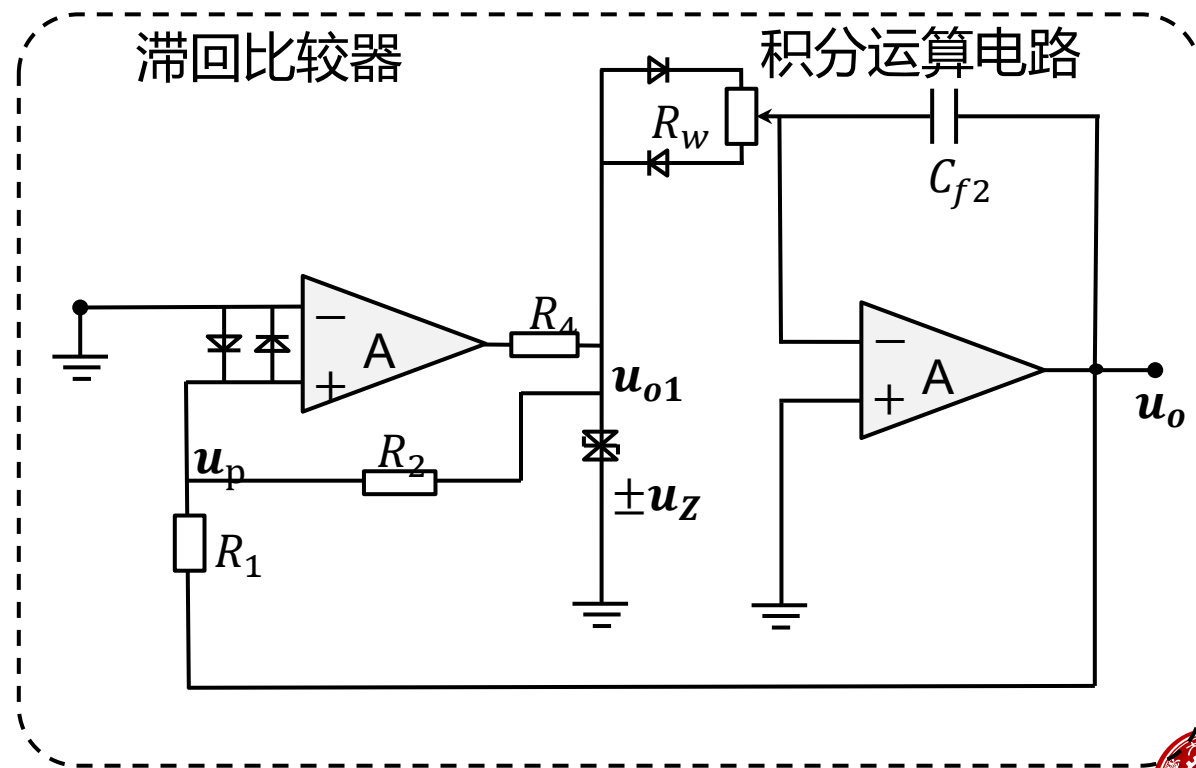
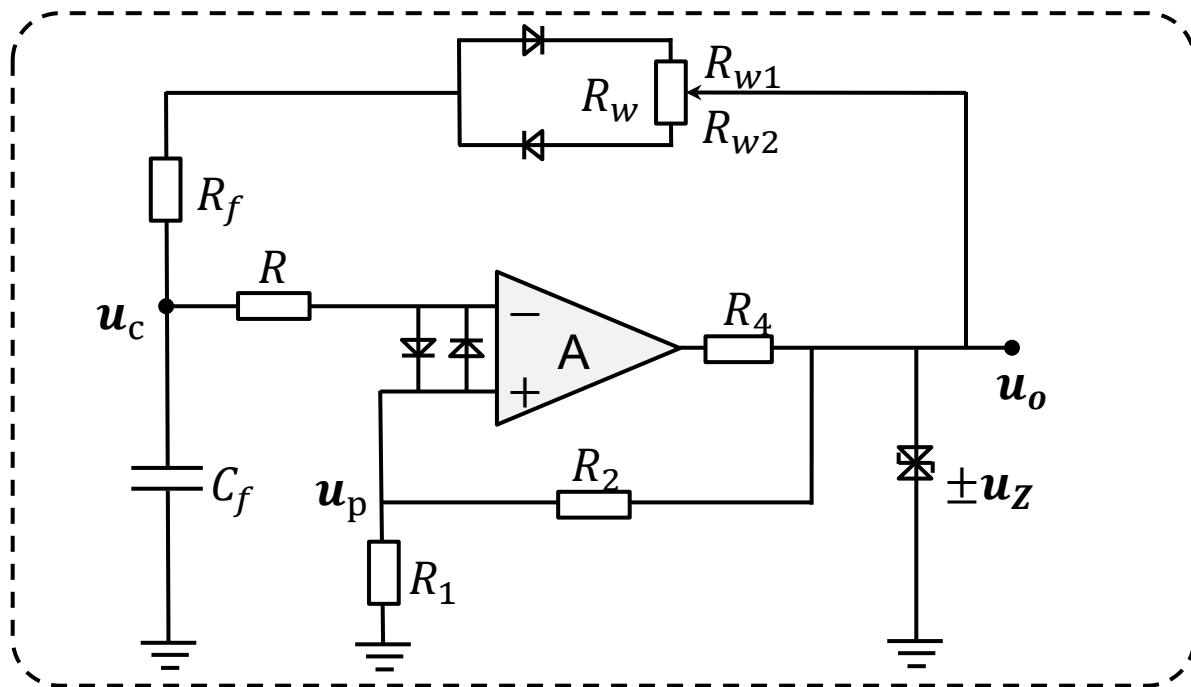




半导体应用：信号生成

2. 非正弦波振荡电路

1. 常见的非正弦波振荡电路有：矩形波，占空比可调的矩形波，三角波，锯齿波等。
2. 矩形波：使用RC低通滤波电路作为迟滞比较器的输入，可以得到占空比50%的矩形波。
3. 使用二极管控制RC低通滤波器的充放电时间，可以控制矩形波的占空比。
4. 在矩形波后增加积分电路，可以实现三角波；为了克服积分电路的漂移现象，从三角波的输出引入反馈网络到矩形波输入，从而解决漂移现象。



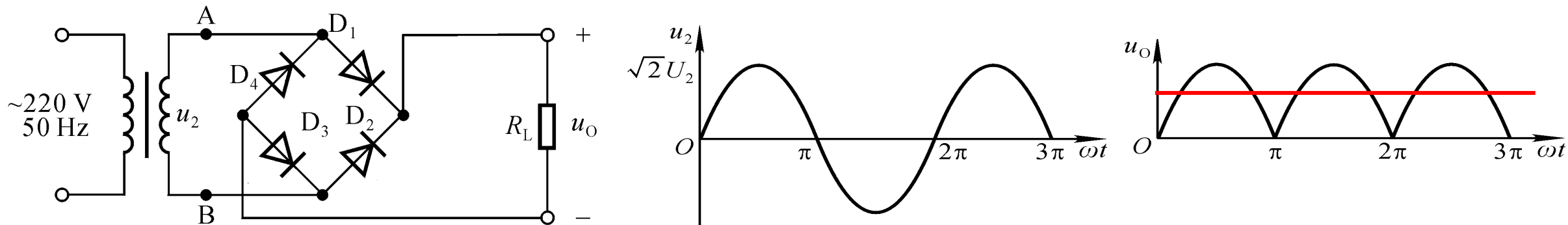


半导体应用：电源

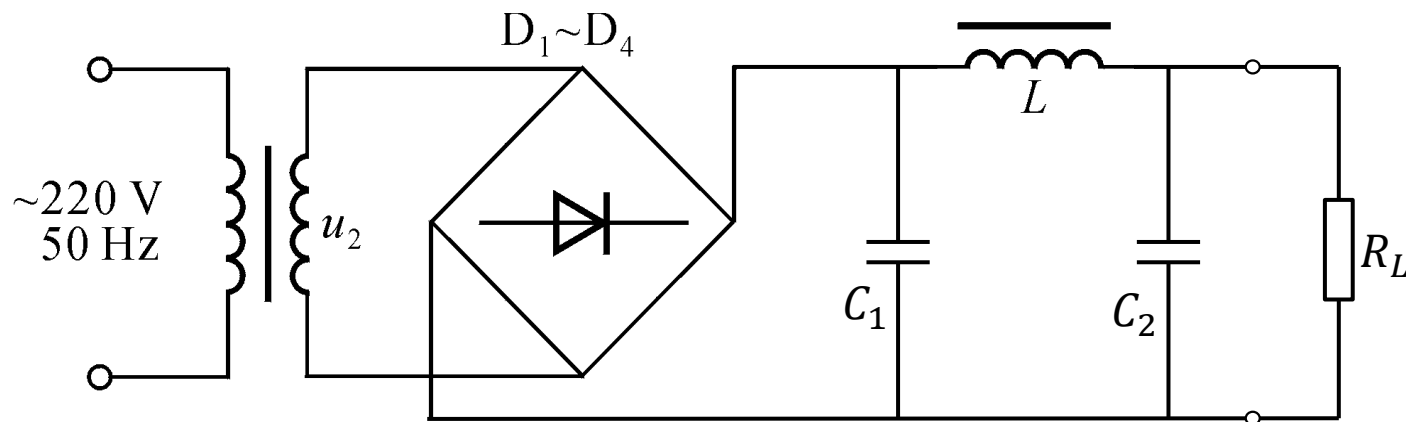
1. 线性电源的构成

1. 线性电源由变压器、整流电路、滤波电路、稳压电路构成。

2. 整流电路：由二极管组成的桥式电路构成。如下图所示为单相桥式整流电路，直流电压为0.9倍的交流有效电压。



3. 滤波电路：通过电容和电感的组合电路，将整流后的电压进行初步平滑。当负载较小时，电容滤波的效果较好；当负载较大时，电感滤波的效果较好。为了适应可变的负载，采用 π 型滤波电路可以融合二者的优势。

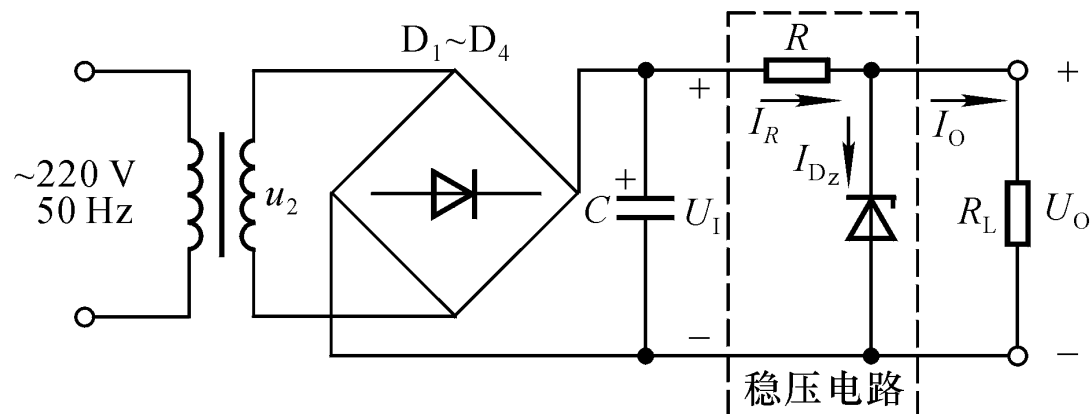




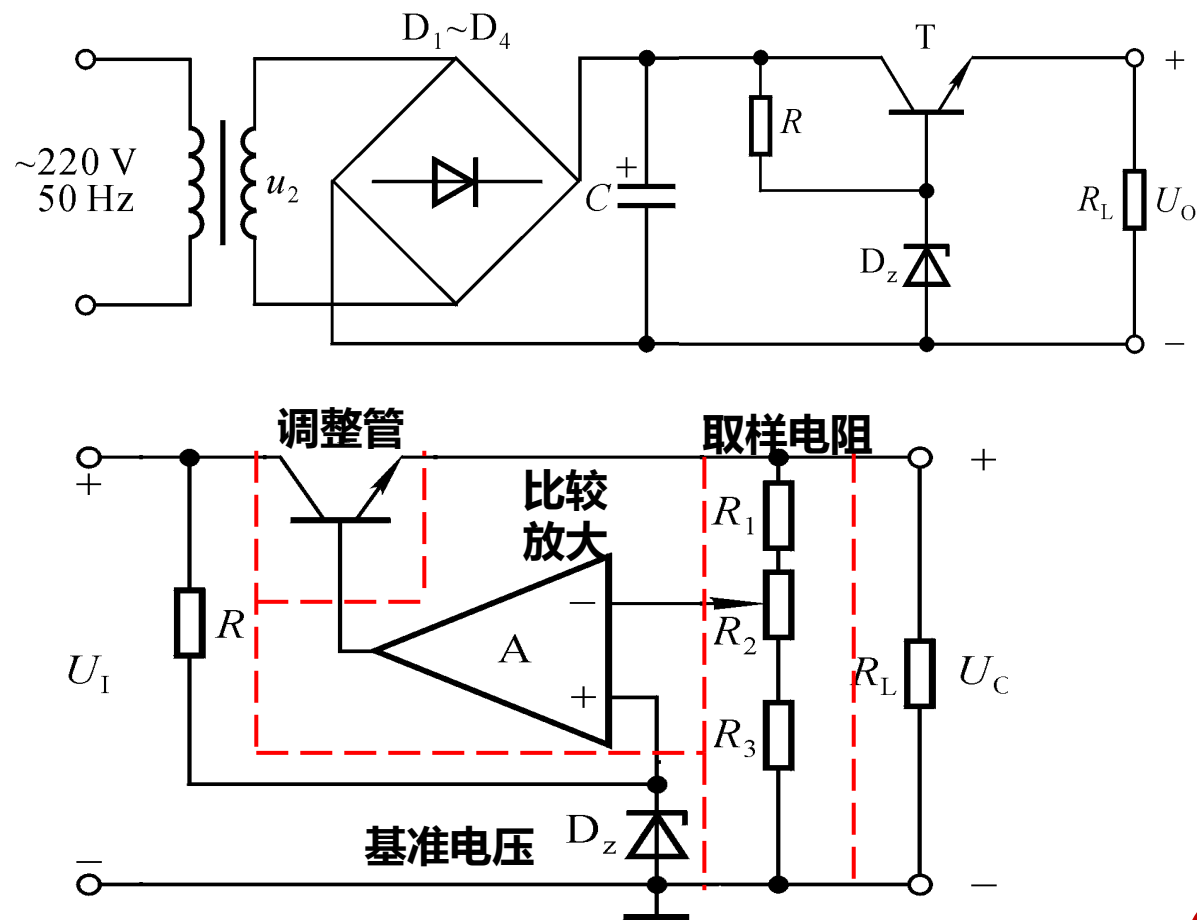
半导体应用：电源

4. 稳压电路：进一步降低直流电压源的纹波。

5. 稳压管稳压电路：使用稳压管提供稳定的参考电压，使用晶体管共基极接法提供电流放大能力，从而实现稳定的电压输出。



6. 使用负反馈的稳压电路：将运放接入稳压电路的反馈回路，可以使输出电压仅取决于反馈电阻的分压，从而稳定输出信号。

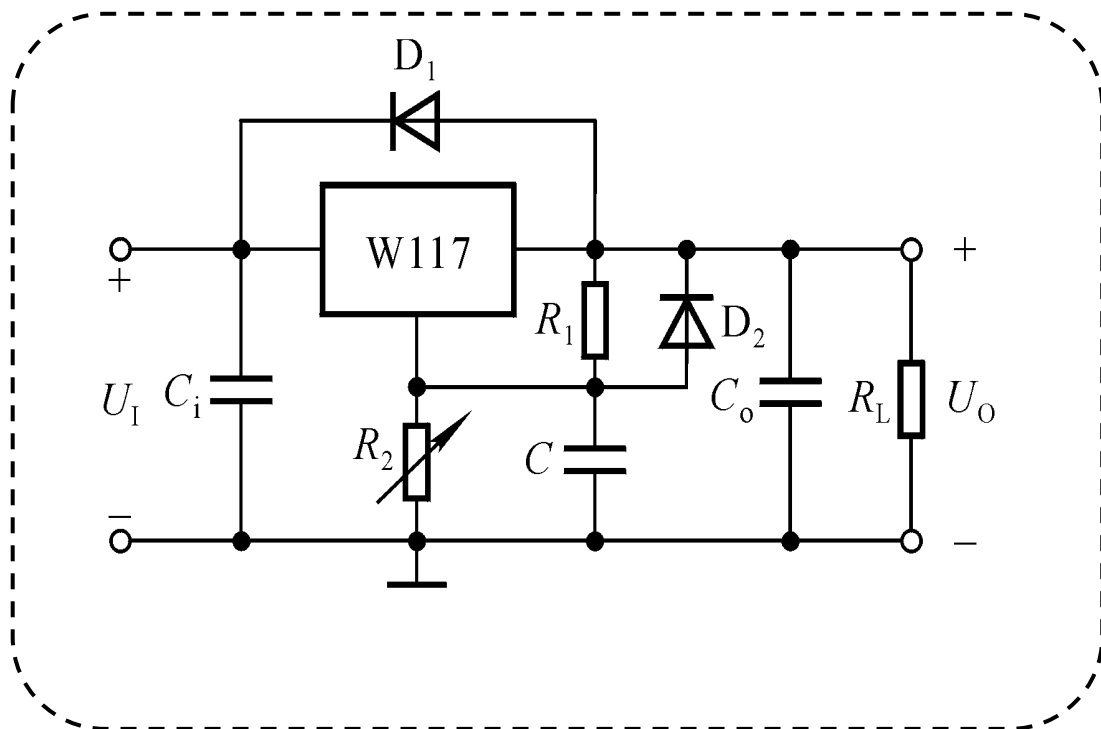




半导体应用：电源

2. 集成稳压器

1. 将串联型稳压电路使用集成电路实现，暴露出参考电压调节端口，可以组成输出电压可调的线性直流电源。
2. 集成稳压器可以使用反向二极管进行保护，防止掉电时内部电路烧毁。
3. 如下列电路图所示，已知W117的参考电压为1.25V，欲使用W117集成稳压器搭建3.3V直流电源。选定输入电压为5V， R_1 为10K Ω ， R_L 为51 Ω ，求分压电阻 R_2 的取值，W117的功耗。



根据反馈网络的分压电阻，可得：
$$\frac{U_o}{R_1 + R_2} = \frac{U_{ref}}{R_1}$$

整理后，可得：
$$R_2 = \frac{U_{ref}}{U_o - U_{ref}} R_1 = 0.61 R_1 = 6.1 K\Omega$$

接下来可以求W117的输出端电流 I_W ：

$$I_W = \frac{U_o}{R_L \parallel (R_1 + R_2)} = \frac{3.3}{0.051 \parallel 16.1} mA = 64.9 mA$$

功耗为：
$$P_W = (U_I - U_o) I_W = 1.7 \times 64.9 mW = 110 mW$$

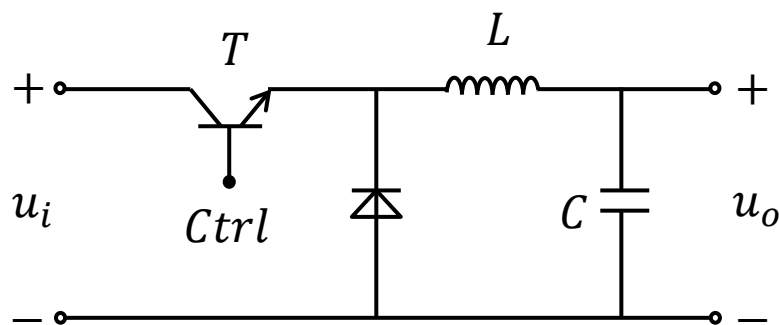




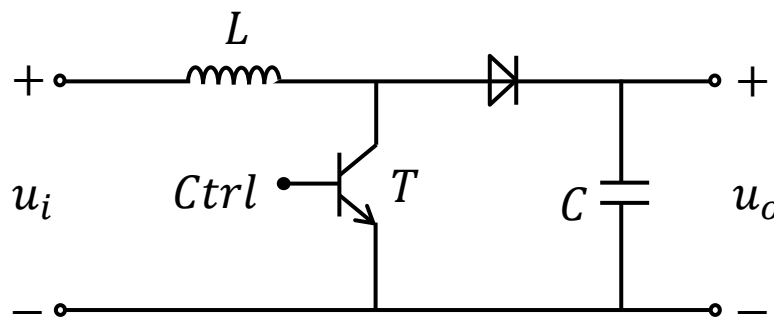
半导体应用：电源

3. 开关电源

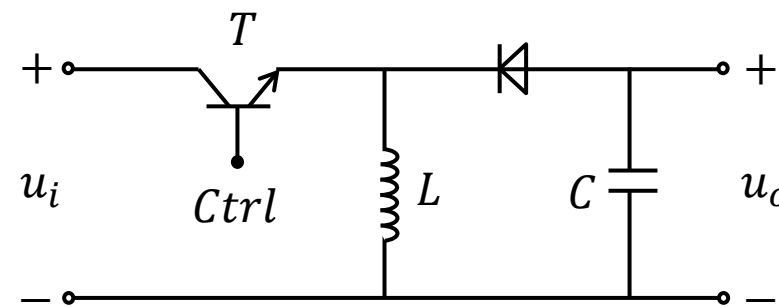
1. 线性电源的效率一般为20%到50%，无法应用于大功率场景。开关电源的效率可以达到95%，适合对供电效率要求较高的场合。
2. 开关电源通过脉宽调制等技术将直流电源切分成按照一定比例通断的方波，然后通过滤波和稳压电路输出稳定的直流信号。
3. 由于滤波和稳压电路与线性电源相同，在使用集成芯片的开关电源时，二者的分压负反馈方法也是一样的。
4. 通过合理使用电阻和电感，可以搭出降压、升压或反压的电路。



BUCK电路



BOOST电路



BUCK-BOOST电路



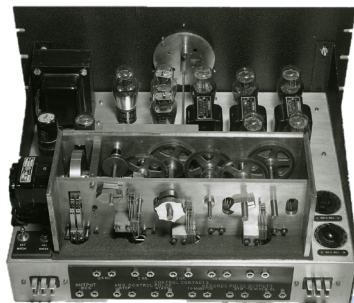
从模拟世界到数字世界

真空管

半导体

集成电路

无线通信



Radio station



Westinghouse H-842P6



Analog phone

Digital cell phone

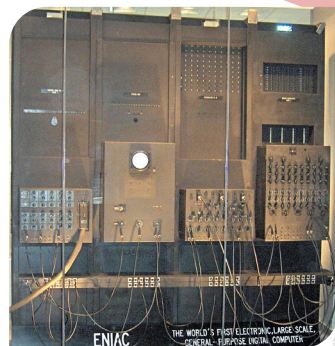


计算机



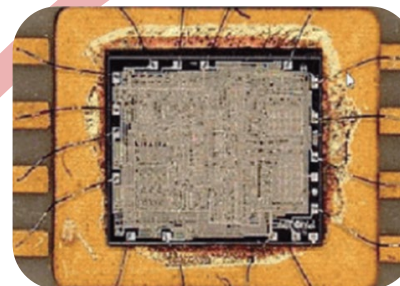
GAP/R K2-W

ENIAC



Heathkit EC-1

Intel 4004



Intel P4 CPU

