

# 电路

---

## 电路

### 第一章 直流电流

#### 基尔霍夫定律

支路

结点

网孔

KCL

KVL

#### 单口网络及等效

单口网络（二端网络）

等效交换

#### 支路电流法

求解过程

#### 结点电压法

求解过程

#### 回路电流法

求解过程

#### 叠加定理

求解过程

#### 等效电源定理

戴维南等效电路

诺顿等效电路

#### 求最大功率

#### 求 吸收/释放 功率

### 第二章 一阶动态电路的暂态分析

#### 电容元件与电感元件

电容的伏安特性

电感的伏安特性

#### 换路定则及其初始条件

换路定则

初始值的计算

#### RC电路响应分析（电容）

#### RL电路响应分析（电感）

#### 一阶电路响应

### 第三章 正弦稳态电路

#### 正弦交流电的基本概念

#### 交流变量相加

#### 交流变量乘除

#### 三种基本元件的阻抗

#### 相量图

#### 正弦稳态电路的功率

有功功率

无功功率

功率因数

视在功率

复功率

#### 第四章 模拟集成运算放大器

集成运算放大电路模型

虚断路（理想化）

虚短路（理想化）

运算放大器电压传输特性

反向电压传输特性

负反馈

#### 第五章 半导体二极管及其直流稳压

二极管的特征

N型半导体

P型半导体

PN结

二极管电路分析

判断导通

恒压降模型

直流稳压电源

#### 第六章 晶体三极管及其放大电路

三极管基本结构

发射结

集电结

晶体管的类型

三极管类型判断

晶体管放大的外部条件

三极管基本知识

1. 电流特性

2. 放大电路画法

直流通路

交流通路

3. 参数等效模型

下标大小写

放大电路的分析

静态分析

静态工作点（Q）

基本放大电路

直流分析

交流分析

阻容耦合放大电路

直流分析

交流分析

共集电极放大电路

共基极放大电路

静态工作点稳定电路

#### 第七章 场效应管及其放大电路

基本结构

概念

FET的直流偏置要求

JFET

增强型MOS管
耗尽型MOS管
直流偏置电路
自给偏压
栅极电阻 $R_G$ 作用
源极电阻 $R_S$ 作用
源极电阻 $R_D$ 作用
静态分析
动态分析
第八章 低频功率放大电路
频率响应的基本概念
幅频与相频
波特图
第九章 负反馈放大电路
第十章 信号产生与处理电路
各放大电路优缺点

# 第一章 直流电流

---

## 基尔霍夫定律

### 支路

无分支的一段电路，不包括导线

一个支路中电流相同

### 结点

三条及以上支路的连接点，一根导线加两个支路只有一个节点

### 网孔

内部不另含支路的回路

### KCL

流入和流出任一节点的所有电流的代数和为零

### KVL

对任一回路，沿着指定的回路绕行方向，各元件两端的电压代数和为零

( + -> - 为正) 高压-> 低压

## 单口网络及等效

### 单口网络（二端网络）

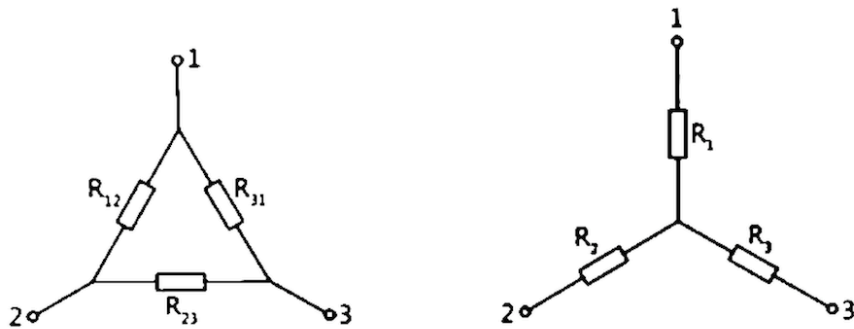
只有一个端口（一对端钮）与外部电路连接的电路。

## 等效交换

电源：- -> + 与电阻相反

1. 电流源并联：  $i_s = \sum_{k=1}^i u_{sk}$
2. 电压源串联：  $u_s = \sum_{k=1}^n u_{sk}$
3. 电压源与电流源串联：省略电压源
4. 电压源与电流源并联：省略电流源
5. 电流源与电阻并联 <-> 电压源与电阻串联
6.  $\Delta$ -Y等效变换

$$R_1 = \frac{R_{12} \cdot R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}$$



$\Delta$ 变Y: Y形电阻 =  $\frac{\Delta\text{形相邻电阻乘积}}{\Delta\text{形电阻之和}}$

$$R_1 = \frac{R_{12} \cdot R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} \quad R_2 = \frac{R_{12} \cdot R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} \quad R_3 = \frac{R_{23} \cdot R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}$$

Y变 $\Delta$ :  $\Delta$ 形电阻 =  $\frac{\text{Y形电阻两两乘积之和}}{\text{Y形不相邻电阻}}$

$$R_{12} = \frac{R_1 \cdot R_2 + R_2 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_3}{R_3} \quad R_{23} = \frac{R_1 \cdot R_2 + R_2 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_3}{R_1} \quad R_{31} = \frac{R_1 \cdot R_2 + R_2 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_3}{R_2}$$

若三个电阻相等，则  $R_{\Delta} = 3R_Y$

## 支路电流法

以支路电流为求解变量的分析方法

### 求解过程

1. 找出n个结点，b条支路
2. 标出支路电流方向
3. 根据KCL列出结点-1个独立的节点电流方程，回路中的支路不能只有电流源
4. 选定独立回路并指定每个回路的绕行方向，再根据KVL列出支路-结点+1个回路电压方程
5. 解出各支路电流

## 结点电压法

适用于节点少支路多的电路

任选一节点作为参考，将其他节点到参考节点的电压降作为该节点的电压。以节点电压为未知量，将各支路电流用节点电压表示，利用KCL列出独立电流方程求解。（+ -> - 为正）

## 求解过程

1. 给待求项相关结点标上0，并给其他所有节点标号
2. 将直接与电流源串联的电阻变导线，直接与电压源并联的电阻变断路。让 $G_{nn}$  = 节点 $n$ 各支路电阻的倒数和
3. 让 $G_{12} = -\frac{1}{\text{连接两结点唯一支路上的电阻}}$ ，让所有非零结点两两直接相连
4. 让 $I_{Snn} = \frac{\text{电压源}}{\text{所在支路电阻}}$ 之和 + 电流源产生电流之和（流入结点为正，电压源由负到正产生电流），求所有节点
5. 列出方程求解， $U_{10}$  = 结点1到0的电位差

$$\begin{cases} G_{11}U_{10} + G_{12}U_{20} + G_{13}U_{30} = I_{11} \\ G_{21}U_{10} + G_{22}U_{20} + G_{23}U_{30} = I_{22} \\ G_{31}U_{10} + G_{32}U_{20} + G_{33}U_{30} = I_{33} \end{cases}$$

## 回路电流法

### 求解过程

1. 找出 $n$ 个结点， $b$ 条支路，取(支路-结点+1)条回路标号，并指定回路电流绕行方向
2. 令 $R_{nn}$  = 回路 $n$ 的电阻之和，求所有回路
3. 令 $R_{12} = R_{21}$  = 回路1和2共有的电阻之和（电阻在两回路的电流反向则为负），比较所有电阻
4. 令 $u_{Snn}$  = 回路1中所有电压源之和（指定电流方向由+到-则取负）
5. 对每个回路列方程

$$\begin{cases} R_{11}i_1 + R_{12}i_2 + R_{13}i_3 = u_{S11} \\ R_{21}i_1 + R_{22}i_2 + R_{23}i_3 = u_{S22} \\ R_{31}i_1 + R_{32}i_2 + R_{33}i_3 = u_{S33} \end{cases}$$

6. 各支路电流 = 该支路所属回路电流之和

## 叠加定理

由多个独立电源在某一支路产生的电压和电流等于各个电源独立作用的代数和

### 求解过程

1. 找出待求部分，让其内部的电压源短路，电流源开路，求出此时待求部分'
2. 恢复待求部分，让其外部的电压源短路，电流源开路，求出此时待求部分"
3. 待求部分=待求部分' + 待求部分"

## 等效电源定理

适用于复杂电路中计算某一特定支路的电压或电流

将待求支路看作外电路，其余部分替换为等效电源

### 戴维南等效电路

任一单口网络，对外电路而言，可用一个理想电压源和一电阻**串联**来等效

1. 用**基尔霍夫电压定律**计算开路电压，计算理想电压源  $U_{oc}$  (接口电压)
2. 可直接电流源开路电压源短路，求开路电阻，或在开路处接上独立电源  $U_s$ ，令原电路的电压源短路电流源断路，求出支路上的  $U_s$  和  $I_s$ ， $R_{eq} = \frac{U_s}{I_s}$
3. 将电阻  $R_{eq}$  和电压源  $U_{oc}$  串联，形成等效电源

## 诺顿等效电路

任一单口网络，对外电路而言，可用一个理想电流源和一电阻**并联**来等效

1. 用导线连接接口，求接口的导线电流  $I_{sc}$
2. 可直接电流源开路电压源短路，求开路电阻，或在开路处接上独立电源  $U_s$ ，令原电路的电压源短路电流源断路，求出流经  $U_s$  的电流  $I_s$ ， $R_{eq} = \frac{U_s}{I_s}$
3. 将电阻  $R_{eq}$  和电流源  $I_{sc}$  并联，形成等效电源

## 求最大功率

1. 拿出可变电阻形成开路，用等效电源定律求出  $u_{oc}$  和  $R_{eq}$
2. 当  $R_L = R_{eq}$  时， $P_{max} = \frac{u_{oc}^2}{4R_{eq}}$

## 求 吸收/释放 功率

1. 电阻恒定吸收功率
2. 电源：元件中电流从**高电压**流经**低电压**则吸收功率（电压和电流同向）

# 第二章 一阶动态电路的暂态分析

---

## 电容元件与电感元件

### 电容的伏安特性

电容：阻止**电压**突变

$$u_C = u_v(t_0) + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i_C(\tau) d\tau = u_C(\infty) + [u_C(0_+) - u_C(\infty)]e^{-\frac{t-t_0}{\tau}} (\tau = RC)$$

$$i_C = \frac{dq}{dt} = C \frac{du_C}{dt}$$

$$w_C(t) = \frac{1}{2} C u_C^2(t)$$

### 电感的伏安特性

电感：阻止**电流**突变

$$i_L = i_L(t_0) + \frac{1}{L} \int_{t_0}^t u_L(\xi) d(\xi) = i_L(\infty) + [i_L(0_+) - i_L(\infty)]e^{-\frac{t-t_0}{\tau}} (\tau = \frac{L}{R})$$

$$u_L = L \frac{di_L}{dt}$$

$$w_L(t) = \frac{1}{2} L i_L^2(t)$$

## 换路定则及其初始条件

电路中开关的接通、断开，元件参数的变化统称为换路

时间常数： $\tau = CR$

$0_+$ ：换路前一瞬间

$0_-$ ：换路后一瞬间

### 换路定则

换路时电容上的电压，电感上的电流不能跃变

$$u_C(0_+) = u_C(0_-)$$

$$i_L(0_+) = i_L(0_-)$$

### 初始值的计算

$0_-$  时，电容=开路，电感=短路

$0_+$  时，电容=电压源，电感=电流源

## RC电路响应分析（电容）

1. 画出开始状态与变化后状态的电路图
2. 将**电容开路**，求出两状态稳定时电容两端电压  $u_C(0_+)$  和  $u_C(\infty)$
3. 找出开始突变时间  $t_0$
4. 找出时间常数  $\tau = RC$ ，将**变化后**电路的电压源短路电流源开路，并去掉电容后，电容两端的等效电阻为  $R$
5. 套公式  $u_C = u_C(\infty) + [u_C(0_+) - u_C(\infty)]e^{-\frac{t-t_0}{\tau}} (\tau = RC) \quad i_C = C \frac{du_C}{dt}$

## RL电路响应分析（电感）

1. 画出开始状态与变化后状态的电路图
2. 将**电感短路**，求出两状态稳定时电感两端电流  $i_L(0_+)$  和  $i_L(\infty)$
3. 找出开始突变时间  $t_0$
4. 找出时间常数  $\tau = \frac{L}{R}$ ，将**变化后**电路的电压源短路电流源开路，并去掉电感后，电容两端的等效电阻为  $R$
5. 套公式  $i_L = i_L(\infty) + [i_L(0_+) - i_L(\infty)]e^{-\frac{t-t_0}{\tau}} (\tau = \frac{L}{R}) \quad u_L = L \frac{di_L}{dt}$

## 一阶电路响应

名称	开始	后来
零输入响应	通电	断电
零状态响应	断电	通电
全响应	通电	通电

## 第三章 正弦稳态电路

### 正弦交流电的基本概念

$$u=U_m sin(\omega t+\varphi) \quad (\varphi \text{左加右减})$$

$$i=I_m sin(\omega t+\varphi) \quad (\varphi \text{左加右减})$$

$$\omega t=2\pi ft=\frac{2\pi t}{T}$$

### 交流变量相加

$$i=I_m sin(\omega t+\varphi)$$

$$\dot{I}=\frac{I_m}{\sqrt{2}}(cos\varphi+sin\varphi\cdot j)=a+bj$$

$$i=\sqrt{2}\cdot\sqrt{a^2+b^2}sin(\omega t+\theta) \quad (tan\theta=\frac{b}{a})$$

### 交流变量乘除

$$\dot{I}=\frac{I_m}{\sqrt{2}}\angle\varphi \quad \dot{U}=\frac{U_m}{\sqrt{2}}\angle\varphi$$

$$Z=a+bj=\sqrt{a^2+b^2}\angle\theta \quad (tan\theta=\frac{b}{a})$$

$$\frac{x\angle\varphi_1}{y\angle\varphi_2}=\frac{x}{y}\angle(\varphi_1-\varphi_2)$$

$$x\angle\varphi_1\cdot y\angle\varphi_2=xy\angle(\varphi_1+\varphi_2)$$

### 三种基本元件的阻抗

元件	电阻	电感	电容	感抗	容抗
Z值	R	$\omega Lj$	$\frac{-j}{\omega C}$	$\omega L$	$\frac{1}{\omega C}$

### 相量图

电流经过R:  $\dot{U}_R$ 与 $\dot{I}$ 相向



电流经过 $L$ :  $\dot{U}_L$ 与 $\dot{I}$ 超前90度(感压超前: 逆时针)

电流经过 $C$ :  $\dot{U}_C$ 与 $\dot{I}$ 滞后90度(容压滞后: 顺时针)

## 正弦稳态电路的功率

### 有功功率

纯电阻只有有功功率

$$\text{有功功率} : P = \begin{cases} UI \cos \varphi \\ \frac{U^2}{|Z|} \cos \varphi \\ I^2 |Z| \cos \varphi \end{cases}$$

### 无功功率

纯电感和纯电容只有无功功率

$$\text{无功功率} : Q = \begin{cases} UI \sin \varphi \\ \frac{U^2}{|Z|} \sin \varphi \\ I^2 |Z| \sin \varphi \end{cases}$$

### 功率因数

$$\tan \varphi = \frac{Q_{\text{总}}}{P_{\text{总}}}$$

### 视在功率

$$S_N = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

### 复功率

$$\bar{S} = P + jQ$$

## 第四章 模拟集成运算放大器

---

[放大电路分析](#)

[康华光模电精讲](#)

### 集成运算放大电路模型

差模输入电压:  $u_{id} = u_{i+} - u_{i-}$

开环放大倍数:  $A_{uo}$

## 虚断路（理想化）

$$\begin{aligned}R_i &\rightarrow \infty \\R_o &\rightarrow 0 \\A_{uo} &\rightarrow \infty \\I_{i+} &= I_{i-} = 0\end{aligned}$$

## 虚短路（理想化）

$$\begin{aligned}u_{i+} &= u_{i-} \\u_{id} &= 0\end{aligned}$$

## 运算放大器电压传输特性

线性放大区（虚短路）： $u_o = A_{uo}(u_{i+} - u_{i-}) = A_{uo}u_{id}$

限幅区： $u_o = U_{CC}$  或  $u_o = U_{EE}$

## 反向电压传输特性

扩大线性区——引入负反馈

$$\begin{aligned}u_{id} &= \frac{R_2}{R_1 + R_2}u_i + \frac{R_1}{R_1 + R_2}u_o \\u_o &= -\frac{R_2}{R_1}u_i\end{aligned}$$

## 负反馈

将反馈信号引向反相输入端

使反馈信号抵消部分输入信号

保证在输入信号较大时， $U_{id}$  仍然很小，且在“虚短路”范围内

从而集成运算放大器工作在线性放大区

## 第五章 半导体二极管及其直流稳压

---

### 二极管的特征

#### N型半导体

在硅晶体中掺入五价元素磷

#### P型半导体

在硅晶体中掺入三价元素硼

#### PN结

正极接P，负极接N，低电阻，导通

死区电压：正向电压很小时，正向电流激增

击穿电压：反向电压很大时，反向电流锐减

## 二极管电路分析

### 判断导通

1. 断开二极管，断点的电压参考方向与二极管一致
2. 根据电路分析电压差
3. 电压差大于0则导通，反之截止
4. 若两管均满足导通条件，则压差大者优先导通

### 恒压降模型

## 直流稳压电源

1. 变压
2. 整流
3. 滤波
4. 稳压

## 第六章 晶体三极管及其放大电路

### 三极管基本结构

基极B

发射极E

集电极C

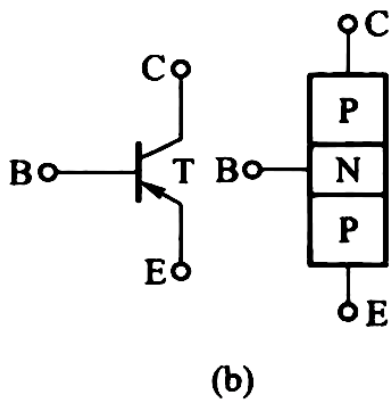
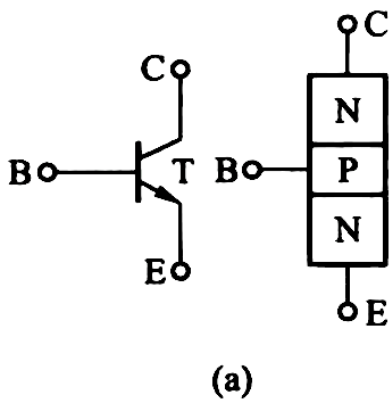
发射结

基区和发射区之间的结

集电结

基区和集电区之间的结

### 晶体管的类型



## 三极管类型判断

1. 中间电位为**基极B**
2.
  - **硅管**：与基极B相差**0.7**为发射极E
  - **锗管**：与基极B相差**0.3**为发射极E
3.
  - **NPN**：集电极**C**电位最高
  - **PNP**：集电极**C**电位最低
4. 电流方向与**集电极C**相比较

## 晶体管放大的外部条件

发射结正偏、集电结反偏

## 三极管基本知识

### 1. 电流特性

三极管处于放大区时：

$$I_E = I_B + I_C$$
$$\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B}$$

### 2. 放大电路画法

#### 直流通路

电容开路

交流信号源短路

#### 交流通路

电容短路

直流电压源短路

### 3. 参数等效模型

三极管可等效为电阻  $r_{be}$  与可变电流源  $i_c$

## 下标大小写

交流：  $u_i$

直流：  $U_I$

混合：  $u_I$

## 放大电路的分析

### 静态分析

## 静态工作点 (Q)

静态工作点选择不合适导致电路失真

对未失真的电路进行动态分析

$$I_{EQ} = I_{CQ} + I_{BQ} \approx I_{CQ}$$

$$r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{U_T}{I_{EQ}}$$

## 基本放大电路

### 直流分析

$$I_{BQ} \rightarrow I_{CQ} \rightarrow U_{CEQ}$$

1. 画出直流通路，电容开路，交流信号源短路
2.  $V_{CC}$  接地连通，由 KVL 求得  $I_{BQ}$
3.  $I_{CQ} = \beta I_{BQ}$
4. 由 KVL 求出  $U_{CEQ}$

### 交流分析

1. 画出交流通路，电容短路，直流电压源短路， $V_{CC}$  接地
2. 将三极管等效，be等效为电阻  $r_{be}$ ，ce等效为可变电流源  $i_c$
3. 求解

由 KVL 求得：

$$u_o = -i_c \cdot R_c$$

$$u_i = i_b \cdot R_b + i_b \cdot r_{be}$$

- 放大倍数  $\dot{A}_u$ ：

$$\dot{A}_u = \frac{u_o}{u_i} = \frac{-i_c \cdot R_c}{i_b(r_b + r_{be})} = \frac{-\beta R_c}{R_b + r_{be}}$$

- 输入电阻  $R_i$ ：

$$R_i = \frac{u_i}{i_i} = \frac{i_b(R_b + r_{be})}{i_b} = R_b + r_{be}$$

- 输出电阻  $R_o$ ：

$$R_o = \frac{u_o}{i_o} = \frac{u_o}{u_o/R_c} = R_c$$

## 阻容耦合放大电路

### 直流分析

$$I_{BQ} \rightarrow I_{CQ} \rightarrow U_{CEQ}$$

1. 画出直流通路，电容开路，交流信号源短路
2.  $V_{CC}$  接地连通，由 KVL 求得  $I_{BQ}$

$$V_{CC} - I_{BQ} \cdot R_b - U_{CEQ} = 0$$

$$3. I_{CQ} = \beta I_{BQ}$$

$$4. \text{由 KVL 求得 } U_{CEQ}$$

$$V_{CC} - I_{CQ} \cdot R_c - U_{CEQ} = 0$$

## 交流分析

1. 画出交流通路，电容短路，直流电压源短路， $V_{CC}$  接地
2. 将三极管等效，be等效为电阻  $r_{be}$ ，ce等效为可变电流源  $i_c$
3. 注意划定输入输出电阻范围，求解

- 放大倍数  $\dot{A}_u$ ：

$$\dot{A}_u = \frac{u_o}{u_i} = \frac{-i_c \cdot (R_c // R_L)}{i_b \cdot r_{be}} = \frac{-\beta(R_c // R_L)}{r_{be}}$$

- 输入电阻  $R_i$ ：

$$R_i = \frac{u_i}{i_i} = \frac{u_i}{\frac{u_i}{R_b} + \frac{u_i}{r_{be}}} = r_{be} // R_b = \frac{r_{be} \cdot R_b}{r_{be} + R_b}$$

- 输出电阻  $R_o$ ：

$$R_o = R_c$$

## 共集电极放大电路

- 1.

$$\dot{A}_u = \frac{u_o}{u_i} = \frac{(1 + \beta)R_L'}{r_{be} + (1 + \beta)R_L'} = 1$$

2.  $R_i$  高
3.  $R_o$  低

## 共基极放大电路

1.  $R_i$  低
2. 可运用在更高电源电压下
3. 高频特性更优越

## 静态工作点稳定电路

# 第七章 场效应管及其放大电路

## 基本结构

共源极S：共射极

共漏极D：共集电极

共栅极G：共基极

## 概念

### FET的直流偏置要求

#### JFET

加入栅源电压后保证栅源之间的PN结反偏

#### 增强型MOS管

加入栅源电压后，使衬底的多子受到排斥

#### 耗尽型MOS管

栅源电压正偏、零偏、反偏均能工作

## 直流偏置电路

### 自给偏压

#### 栅极电阻 $R_G$ 作用

为栅偏压提供通路和泻放栅极积累电荷

#### 源极电阻 $R_S$ 作用

提供负栅偏压

#### 源极电阻 $R_D$ 作用

把  $i_D$  的变化转变为  $u_{DS}$  的变化

## 静态分析

$$I_{DQ} \rightarrow U_{GSQ} \rightarrow U_{DSQ}$$

1. 画出直流通路，电容开路，交流信号源短路
2. 由栅源回路 KVL 得  $U_{GSQ} = -I_{DQ}R_S$
3.  $I_G = 0$ ， $V_{CC}$  接地连通，由漏源回路 KVL 求得  $I_{BQ}$

$$U_{DSQ} = V_{DD} - I_{DQ}R_D - I_{DQ}R_S$$

$$I_{DQ} = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GSQ}}{U_{GS}}\right)^2$$

## 动态分析

1. 画出交流通路，电容短路，直流电压源短路， $V_{CC}$  接地
2. 画出微变等效电路，GS断开且电位差为  $u_{gs}$ ，DS等效为可变电流源  $g_m u_{gs}$
3. 注意划定输入输出电阻范围，求解

$$g_m = \frac{di_D}{du_{GS}}$$

- 放大倍数  $\dot{A}_u$  :

$$\dot{A}_u = \frac{u_o}{u_i} = \frac{-g_m U_{gs} (R_D // R_L)}{U_{gs}} = -g_m R'_L$$

- 输入电阻  $R_i$  :

$$R_i = \frac{u_i}{i_i} = R_{G_3} + R_{G_1} // R_{G_2}$$

- 输出电阻  $R_o$  :

$$R_o = \frac{u_o}{i_o}$$

## 第八章 低频功率放大电路

---

### 频率响应的基本概念

#### 幅频与相频

$$\dot{A}_u = A_u(f) \angle \varphi(f)$$

幅频特性:  $A_u(f)$

相频特性:  $\varphi(f)$

#### 波特图

1. 幅频特性和相频特性的**横坐标**都采用**对数刻度**以扩大表示范围
2. **幅频特性**纵轴上的幅值也用**对数**表示为  $20\lg|A_u|$  单位是分贝 (dB)
3. **相频特性**的纵坐标仍采用**角度**表示

## 第九章 负反馈放大电路

---

## 第十章 信号产生与处理电路

---

### 各放大电路优缺点

---