

基于三极管和场效应管 的放大电路分析

统一模型

0. 前言

目录

第一章 集成运算放大电路

第二章 二极管电路

第三章 三极管放大电路

第四章 场效应管放大电路

第五章 差分放大电路

第六章 滤波电路及放大电路的频率响应

第七章 反馈放大电路

第八章 功率放大电路

模电教学内容共有8个章节，其中5个章节标题都包含有“放大电路”，可以看出：放大电路是模电中最基本也最核心的内容。掌握了放大电路，就抓住了模电课程学习的“牛鼻子”。

放大电路中又以三极管放大电路为最根本，因此三极管放大电路的分析方法是模电课程学习的重中之重内容。掌握了三极管就掌握了放大电路，掌握了放大电路就掌握了模电课程。

本教程主要包括：三极管、场效应管、差分、功率放大等四章内容。为降低学习难度，本教程推荐使用统一模型来解决三极管以及场效应管的交流分析问题。本教程的资料顺序即为课程的推荐学习顺序。

1. 放大电路基础知识

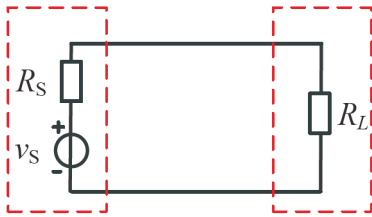


图1 基本电路框架

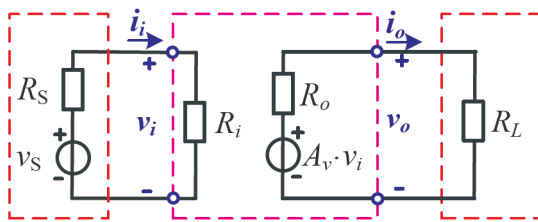


图2 含有放大器的电路框架

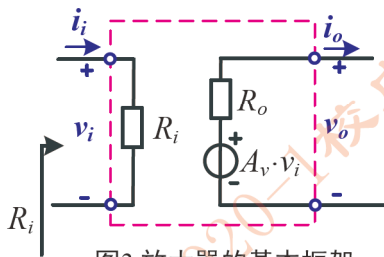


图3 放大器的基本框架

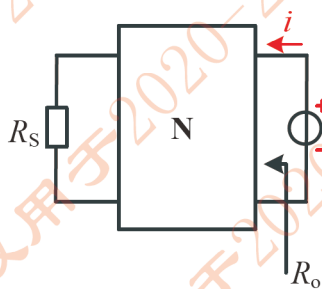


图4 外加电压电流法求解输出电阻

1. 基本概念

- (1) 电路三要素：电源(信号源)、负载与连接线
- (2) 放大电路接在电源和负载之间
- (3) 放大电路有四个端子，两个输入端和两个输出端
- (4) v_i : 两个输入端之间的电压
 v_o : 两个输出端之间的电压
 i_i : 流入放大器的电流
 i_o : 流出放大器的电流

2. 输入电阻 R_i

对于信号源而言，放大器相当于电阻(输入电阻 R_i)

$$R_i = \frac{v_i}{i_i} = \frac{-r_{be} \cdot i_b}{-(\beta+1) \cdot i_b} = \frac{r_{be}}{\beta+1}$$

3. 放大倍数 A_v 、 A_{vs}

$$A_v = \frac{v_o}{v_i}$$

$$A_{vs} = \frac{v_i}{v_s} \cdot \frac{v_o}{v_i} = \frac{R_i}{R_i + R_s} \cdot \frac{v_o}{v_i}$$

4. 输出电阻 R_o (外加电压电流法求解)

对于负载而言，放大器相当于新的信号源，新信号源的内阻定义为输出电阻 R_o 。

- (1) 去掉放大电路中的独立源(电压源短路、电流源开路)
- (2) 将负载 R_L 用电压源 v 代替，求电流 i

$$R_o = \frac{v}{i}$$

2. 三极管与场效应管的小信号模型

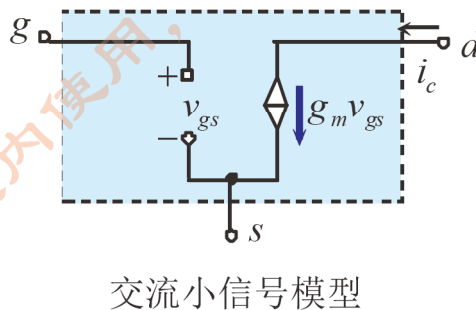
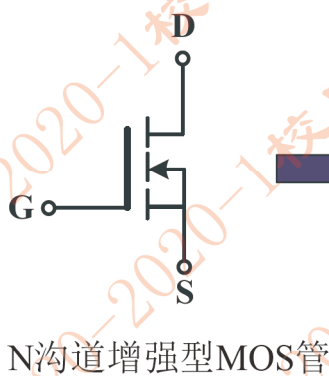
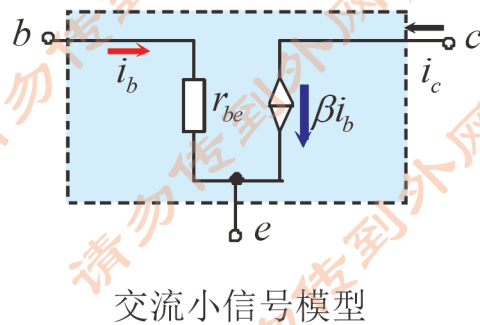
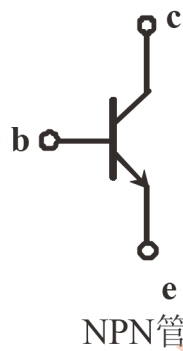
放大器有两个输入端和两个输出端共四个端子，但是三极管与场效应管只有三极，因此基于三极管和场效应管的放大电路，其输入端和输出端必然将会共用一个端子。

三极管放大电路的三种组态：共发射极、共基极、共集电极

场效应管放大电路的三种组态：共源极、共栅极、共漏极

三极管b、c、e与场效应管的g、d、s分别对应，其小信号模型也相似。

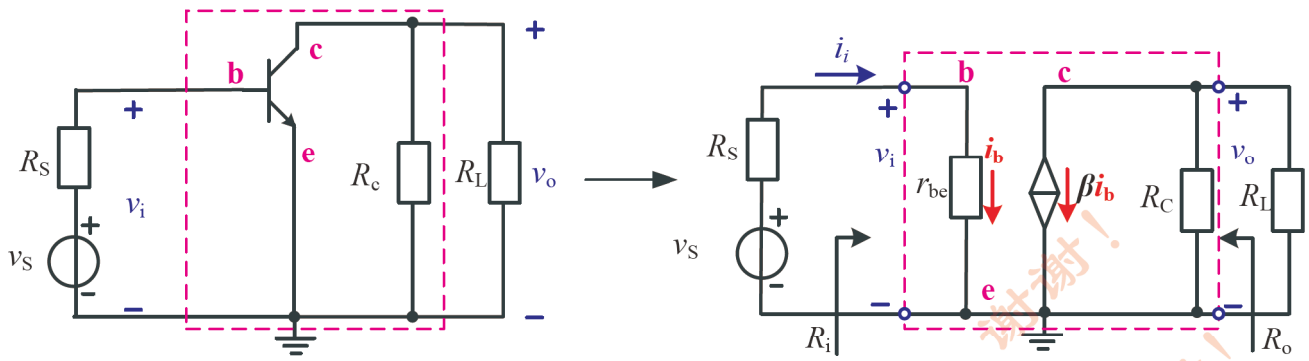
学习目标：用一个模型解决六种组态放大电路的分析。



在画小信号模型等效电路时务必做到：

- (1) 清晰标注三极管的bec三极以及场效应管的gds三极
- (2) 清晰标注 i_b 和 βi_b 的电流方向；
- (3) 清晰标注 v_{gs} 的电压极性和 $g_m v_{gs}$ 的电流方向。

3. 三极管放大电路之共发射极



解： 1、准备工作

- (1) 画出小信号模型等效电路(特别注意e、b、c三极的对应关系)
- (2) 在图中清楚标注出： v_i 、 i_i 、 v_o (特别注意电压的“+、-”号，电流的方向)
- (3) 在图中清楚标注出： i_b 、 βi_b (特别注意电流的方向)

2、求解 R_i 、 A_v 、 A_{vs}

- (1) 写出 v_i 、 i_i 、 v_o 的表达式(用 i_b 表示)

$$v_i = r_{be} \cdot i_b$$

$$i_i = i_b$$

$$v_o = -\beta i_b \cdot (R_C // R_L)$$

- (2) 求解

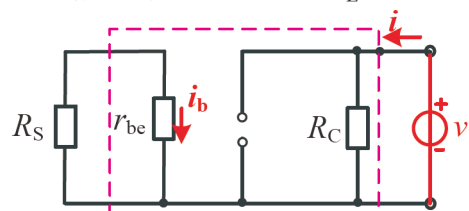
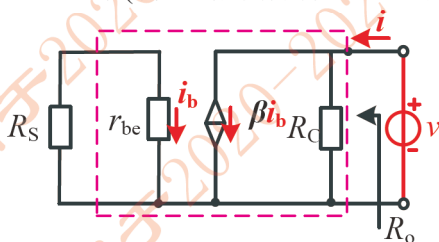
$$R_i = \frac{v_i}{i_i} = \frac{r_{be} \cdot i_b}{i_b} = r_{be}$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{-\beta i_b \cdot (R_C // R_L)}{r_{be} \cdot i_b} = -\beta \cdot (R_C // R_L)$$

$$A_{vs} = \frac{v_i}{v_s} \cdot \frac{v_o}{v_i} = \frac{R_i}{R_i + R_s} \cdot \frac{v_o}{v_i} = -\beta \cdot (R_C // R_L) \cdot \frac{r_{be}}{r_{be} + R_s}$$

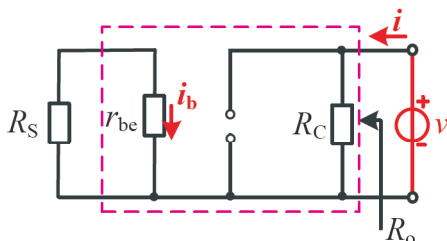
3、求解 R_o

- (1) 重画电路(将电路中所有的电压源做短路、电流源做开路处理，画出 R_L 之前的电路)



- (2) 使用外加电压电流法求解(一端口网络的输入电阻的求解问题)

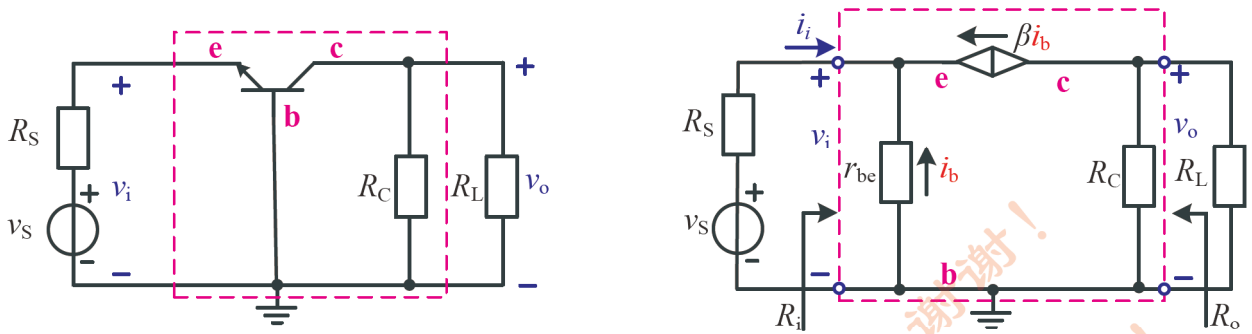
受控电流源有无电流流过的判断方法：首先将受控电流源从电路中去掉，如果在外加电压源 v 的作用下，无法在 r_{be} 上产生电流 i_b ，则受控源无电流流过。



在此电路中，确实无电流流过受控源。

$$R_o = \frac{v}{i} = R_C$$

4. 三极管放大电路之共基极



解： 1、准备工作

- (1) 画出小信号模型等效电路(特别注意e、b、c三极的对应关系)
- (2) 在图中清楚标注出： v_i 、 i_i 、 v_o (特别注意电压的“+、-”号，电流的方向)
- (3) 在图中清楚标注出： i_b 、 βi_b (特别注意电流的方向)

2、求解 R_i 、 A_v 、 A_{vs}

- (1) 写出 v_i 、 i_i 、 v_o 的表达式(用 i_b 表示)

$$v_i = -r_{be} \cdot i_b$$

$$i_i = -(\beta + 1) \cdot i_b$$

$$v_o = -\beta i_b \cdot (R_c // R_L)$$

- (2) 求解

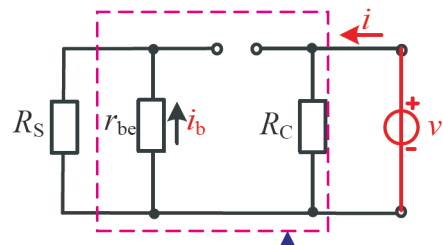
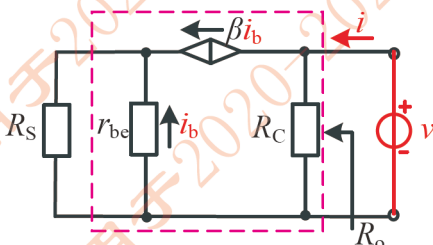
$$R_i = \frac{v_i}{i_i} = \frac{-r_{be} \cdot i_b}{-(\beta + 1) \cdot i_b} = \frac{r_{be}}{\beta + 1}$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{-\beta i_b \cdot (R_c // R_L)}{-r_{be} \cdot i_b} = \beta \cdot (R_c // R_L)$$

$$A_{vs} = \frac{v_i}{v_s} \cdot \frac{v_o}{v_i} = \frac{R_i}{R_i + R_s} \cdot \frac{v_o}{v_i} = \beta \cdot (R_c // R_L) \cdot \frac{r_{be}/\beta + 1}{r_{be}/\beta + 1 + R_s}$$

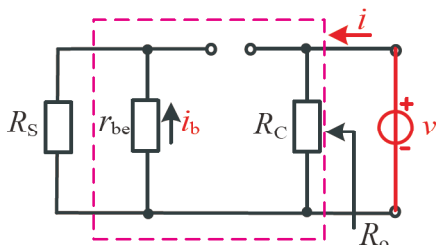
3、求解 R_o

- (1) 重画电路(将电路中所有的电压源做短路、电流源做开路处理，画出 R_L 之前的电路)



- (2) 使用外加电压电流法求解(一端口网络的输入电阻的求解问题)

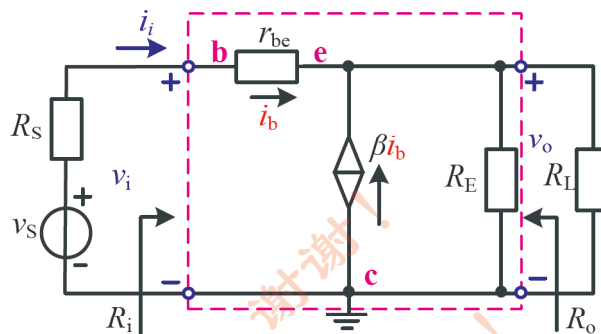
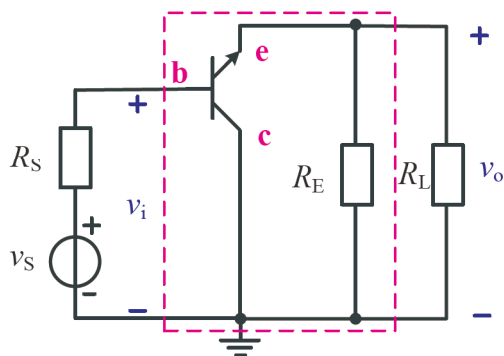
受控电流源有无电流流过的判断方法：首先将受控电流源从电路中去掉，如果在外加电压源 v 的作用下，无法在 r_{be} 上产生电流 i_b ，则受控源无电流流过。



在此电路中，确实无电流流过受控源。

$$R_o = \frac{v}{i} = R_c$$

5. 三极管放大电路之共集电极



解： 1、准备工作

- (1) 画出小信号模型等效电路(特别注意**e、b、c**三极的对应关系)
- (2) 在图中清楚标注出： v_i 、 i_i 、 v_o (特别注意电压的“+、-”号，电流的方向)
- (3) 在图中清楚标注出： i_b 、 βi_b (特别注意电流的方向)

2、求解 R_i 、 A_v 、 A_{vs}

- (1) 写出 v_i 、 i_i 、 v_o 的表达式(用 i_b 表示)

$$v_i = r_{be} \cdot i_b + (\beta + 1) i_b (R_E // R_L)$$

$$i_i = i_b$$

$$v_o = (\beta + 1) i_b (R_E // R_L)$$

- (2) 求解

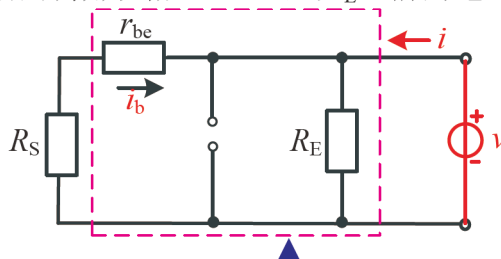
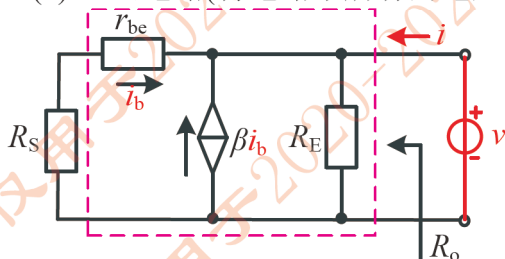
$$R_i = \frac{v_i}{i_i} = \frac{r_{be} \cdot i_b + (\beta + 1) \cdot i_b (R_E // R_L)}{i_b} = r_{be} + (\beta + 1) \cdot (R_E // R_L)$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{(\beta + 1) \cdot i_b (R_E // R_L)}{r_{be} \cdot i_b + (\beta + 1) \cdot i_b (R_E // R_L)} = \frac{(\beta + 1) \cdot (R_E // R_L)}{r_{be} + (\beta + 1) \cdot (R_E // R_L)} \approx 1$$

$$A_{vs} = \frac{v_i}{v_s} \cdot \frac{v_o}{v_i} = \frac{R_i}{R_i + R_s} \cdot \frac{v_o}{v_i}$$

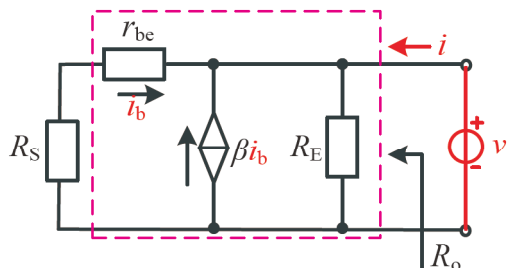
3、求解 R_o

- (1) 重画电路(将电路中所有的电压源做短路、电流源做开路处理，画出 R_L 之前的电路)



- (2) 使用外加电压电流法求解(一端口网络的输入电阻的求解问题)

受控电流源有无电流流过的判断方法：首先将受控电流源从电路中去掉，如果在外加电压源 v 的作用下，无法在 r_{be} 上产生电流 i_b ，则受控源无电流流过。



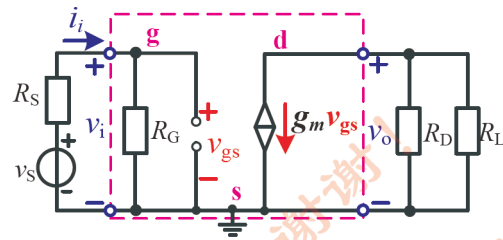
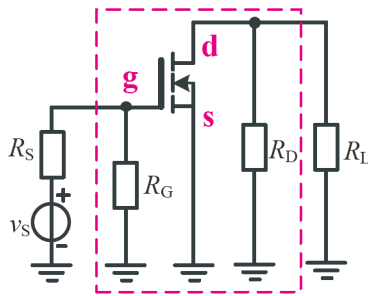
在此电路中，**有电流**流过受控源，受控源不能省略。

$$v = -(R_s + r_{be}) i_b$$

$$i = \frac{v}{R_E} - (\beta + 1) \cdot i_b = \frac{v}{R_E} + (\beta + 1) \cdot \frac{v}{R_s + r_{be}} = \frac{v}{R_E} + \frac{v}{R_s + r_{be} / \beta + 1}$$

$$R_o = \frac{v}{i} = R_E // \frac{R_s + r_{be}}{\beta + 1}$$

6. 场效应管放大电路之共源极



解： 1、准备工作

- (1) 画出小信号模型等效电路(特别注意g、d、s三极的对应关系)
- (2) 在图中清楚标注出： v_i 、 i_i 、 v_o (特别注意电压的“+、-”号，电流的方向)
- (3) 在图中清楚标注出： v_{gs} 、 $g_m v_{gs}$ (特别注意电流的方向)

2、求解 R_i 、 A_v 、 A_{vs}

- (1) 写出 v_i 、 i_i 、 v_o 的表达式(用 v_{gs} 表示)

$$v_i = v_{gs}$$

$$i_i = \frac{v_i}{R_G}$$

$$v_o = -g_m v_{gs} \cdot (R_D // R_L)$$

- (2) 求解

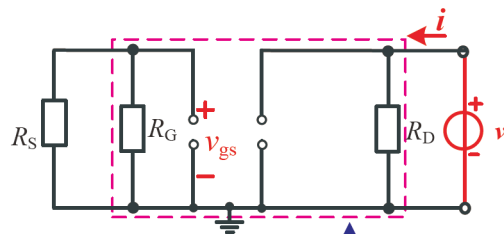
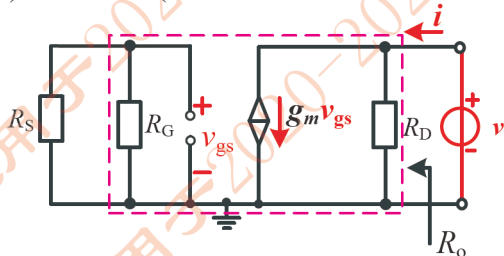
$$R_i = \frac{v_i}{i_i} = R_G$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{-g_m v_{gs} \cdot (R_D // R_L)}{v_{gs}} = -g_m \cdot (R_D // R_L)$$

$$A_{vs} = \frac{v_i}{v_s} \cdot \frac{v_o}{v_i} = \frac{R_i}{R_i + R_s} \cdot \frac{v_o}{v_i} = -g_m \cdot (R_D // R_L) \cdot \frac{R_G}{R_G + R_s}$$

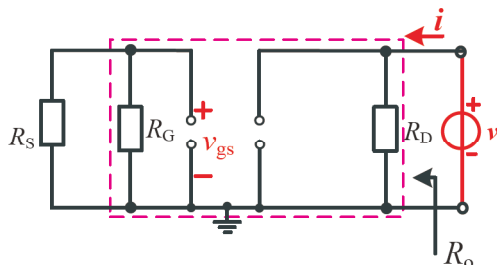
3、求解 R_o

- (1) 重画电路(将电路中所有的电压源做短路、电流源做开路处理，画出 R_i 之前的电路)



- (2) 使用外加电压电流法求解(一端口网络的输入电阻的求解问题)

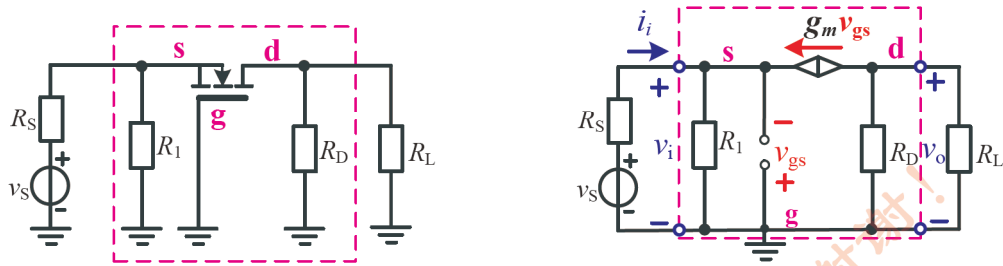
受控电流源有无电流流过的判断方法：首先将受控电流源从电路中去掉，如果在外加电压源 v 的作用下，无法产生电压 v_{gs} ，则受控源无电流流过。



在此电路中，确实无电流流过受控源。

$$R_o = \frac{v}{i} = R_D$$

7. 场效应管放大电路之共栅极



解： 1、准备工作

- (1) 画出小信号模型等效电路(特别注意g、d、s三极的对应关系)
- (2) 在图中清楚标注出： v_i 、 i_i 、 v_o (特别注意电压的“+、-”号，电流的方向)
- (3) 在图中清楚标注出： v_{gs} 、 $g_m v_{gs}$ (特别注意电流的方向)

2、求解 R_i 、 A_v 、 A_{vs}

- (1) 写出 v_i 、 i_i 、 v_o 的表达式(用 v_{gs} 表示)

$$v_i = -v_{gs}$$

$$i_i = \frac{v_i}{R_1}$$

$$v_o = -g_m v_{gs} \cdot (R_D // R_L)$$

- (2) 求解

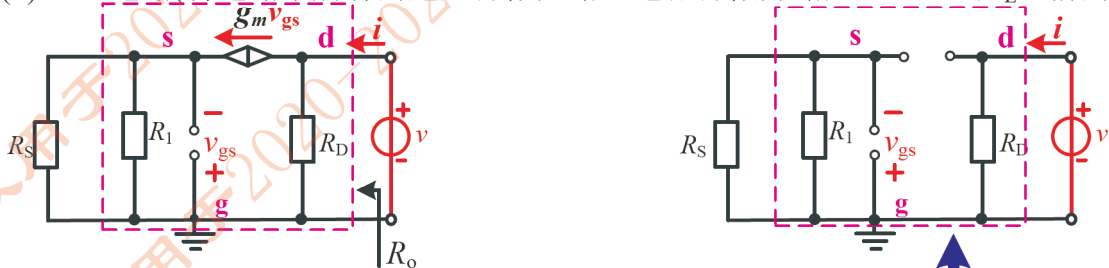
$$R_i = \frac{v_i}{i_i} = R_1$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{-g_m v_{gs} \cdot (R_D // R_L)}{-v_{gs}} = g_m \cdot (R_D // R_L)$$

$$A_{vs} = \frac{v_i}{v_s} \cdot \frac{v_o}{v_i} = \frac{R_i}{R_i + R_s} \cdot \frac{v_o}{v_i} = g_m \cdot (R_D // R_L) \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_s}$$

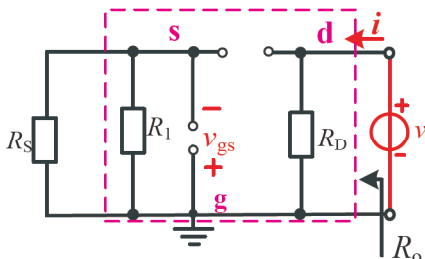
3、求解 R_o

- (1) 重画电路(将电路中所有的电压源做短路、电流源做开路处理，画出 R_L 之前的电路)



- (2) 使用外加电压电流法求解(一端口网络的输入电阻的求解问题)

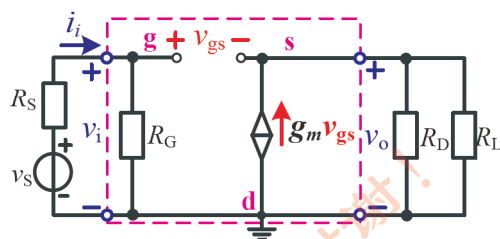
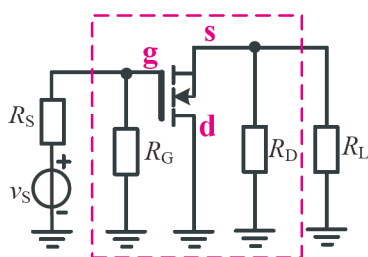
受控电流源有无电流流过的判断方法：首先将受控电流源从电路中去掉，如果在外加电压源 v 的作用下，无法产生电压 v_{gs} ，则受控源无电流流过。



在此电路中，确实无电流流过受控源。

$$R_o = \frac{v}{i} = R_D$$

8. 场效应管放大电路之共漏极



解： 1、准备工作

- (1) 画出小信号模型等效电路(特别注意g、d、s三极的对应关系)
- (2) 在图中清楚标注出： v_i 、 i_i 、 v_o (特别注意电压的“+、-”号，电流的方向)
- (3) 在图中清楚标注出： v_{gs} 、 $g_m v_{gs}$ (特别注意电流的方向)

2、求解 R_i 、 A_v 、 A_{vs}

- (1) 写出 v_i 、 i_i 、 v_o 的表达式(用 v_{gs} 表示)

$$v_i = v_{gs} + g_m v_{gs} \cdot (R_D // R_L)$$

$$i_i = \frac{v_i}{R_G}$$

$$v_o = g_m v_{gs} \cdot (R_D // R_L)$$

- (2) 求解

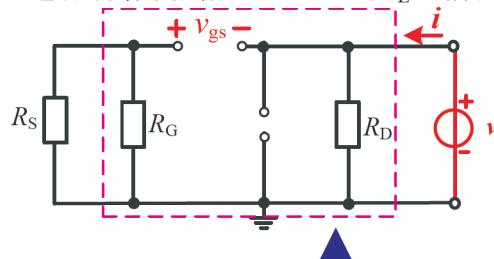
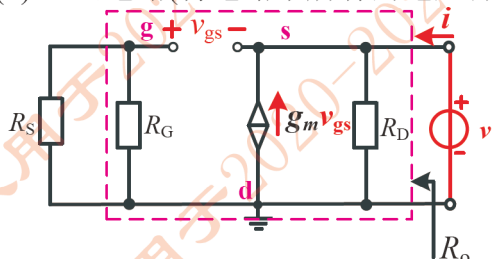
$$R_i = \frac{v_i}{i_i} = R_G$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{g_m v_{gs} \cdot (R_D // R_L)}{v_{gs} + g_m v_{gs} \cdot (R_D // R_L)} = \frac{v_{gs} \cdot (R_D // R_L)}{1 + v_{gs} \cdot (R_D // R_L)}$$

$$A_{vs} = \frac{v_i}{v_s} \cdot \frac{v_o}{v_i} = \frac{R_i}{R_i + R_s} \cdot \frac{v_o}{v_i} = \frac{v_{gs} \cdot (R_D // R_L)}{1 + v_{gs} \cdot (R_D // R_L)} \cdot \frac{R_G}{R_G + R_s}$$

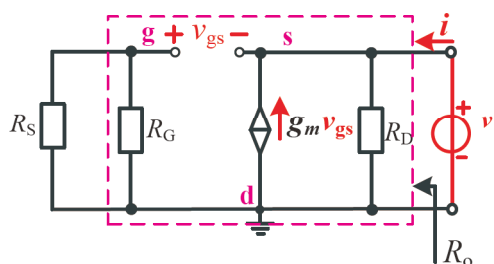
3、求解 R_o

- (1) 重画电路(将电路中所有的电压源做短路、电流源做开路处理，画出 R_L 之前的电路)



- (2) 使用外加电压电流法求解(一端口网络的输入电阻的求解问题)

受控电流源有无电流流过的判断方法：首先将受控电流源从电路中去掉，如果在外加电压源 v 的作用下，无法产生电压 v_{gs} ，则受控源无电流流过。



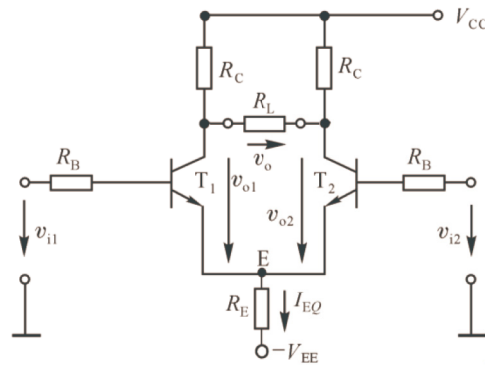
在此电路中，有电流流过受控源，受控源不能省略。

$$v = -v_{gs}$$

$$i = \frac{v}{R_D} - g_m v_{gs} = \frac{v}{R_D} + g_m \cdot v = \frac{v}{R_D} + \frac{v}{1/g_m}$$

$$R_o = \frac{v}{i} = R_D // \frac{1}{g_m}$$

9. 差分放大基础知识



1、基本概念

输入信号分别为 v_{i1} 和 v_{i2} ，定义：

差模信号 $v_{id} = v_{i1} - v_{i2}$ 共模信号 $v_{ic} = \frac{v_{i1} + v_{i2}}{2}$

$$\text{则 } v_{i1} = \frac{v_{id}}{2} + v_{ic} \quad v_{i2} = -\frac{v_{id}}{2} + v_{ic}$$

输入信号分别为 v_{i1} 和 v_{i2} 可以看做两个电路的叠加：

$$\text{电路1: } v_{i1} = \frac{v_{id}}{2} \quad v_{i2} = -\frac{v_{id}}{2}$$

$$\text{电路2: } v_{i1} = v_{ic} \quad v_{i2} = v_{ic}$$

电路1的两输入信号一正一反，称为差模输入。

电路2的两输入信号完全相同，称为共模输入。

差分放大的电路分析必须分解为差模输入和共模输入两个电路进行分析。

2、单端输入和双端输入

如输入信号为 v_{i1} 和 v_{i2} 中有一路为0(即接地)，则称为单端输入，否则为双端输入。

注意：无论单端输入或者双端输入，都要分解为差模输入和共模输入，计算过程无差别。

3、单端输出和双端输出

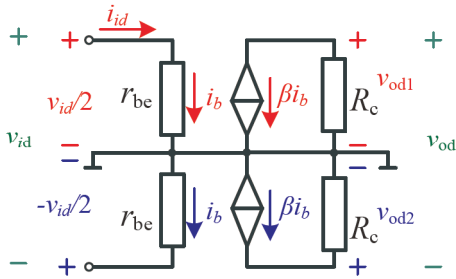
单端输出：负载 R_L 一端接在三极管的C极，另一端接地。

双端输出：负载 R_L 接在两个三极管的C极之间。

注意：单端输出和双端输出时，输出电压的表达式有所区别，计算时需要特别注意。

10. 差分放大之开路输出

1. 差模输入



$$v_{id} = 2r_{be} \cdot i_b$$

$$i_{id} = i_b$$

$$R_{id} = \frac{v_{id}}{i_{id}} = 2r_{be}$$

$$v_{od1} = -\beta i_b \cdot R_c$$

$$v_{od2} = \beta i_b \cdot R_c$$

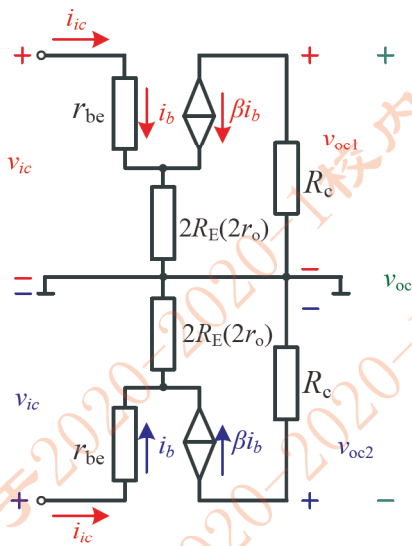
$$v_{od} = v_{od1} - v_{od2} = -2\beta i_b \cdot R_c$$

$$A_{vd1} = \frac{v_{od1}}{v_{id}} = -\beta \frac{R_c}{2r_{be}}$$

$$A_{vd2} = \frac{v_{od2}}{v_{id}} = \beta \frac{R_c}{2r_{be}}$$

$$A_{vd} = \frac{v_{od}}{v_{id}} = -\beta \frac{R_c}{r_{be}}$$

2. 共模输入



$$v_{ic} = r_{be} \cdot i_b + (\beta + 1) \cdot i_b \cdot 2R_E$$

$$i_{ic} = i_b$$

$$R_{ic} = \frac{v_{ic}}{i_{ic}} = \frac{r_{be}}{2} + (\beta + 1) \cdot R_E$$

$$v_{oc1} = v_{oc2} = -\beta i_b \cdot R_c$$

$$v_{oc} = v_{oc1} - v_{oc2} = 0$$

$$A_{vc1} = A_{vc2} = \frac{v_{oc1}}{v_{ic}} = \frac{v_{oc2}}{v_{ic}}$$

$$= -\beta \frac{R_c}{r_{be} + (\beta + 1) \cdot 2R_E}$$

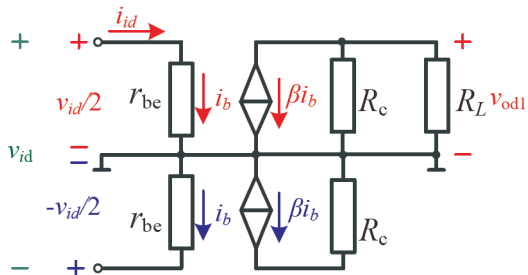
$$A_{vc} = \frac{v_{oc}}{v_{ic}} = 0$$

11. 差分放大之负载输出

输出端接负载 R_L 以后，会影响输出电压，因此对电压增益产生一定影响。对输入电阻和输出电阻无影响。

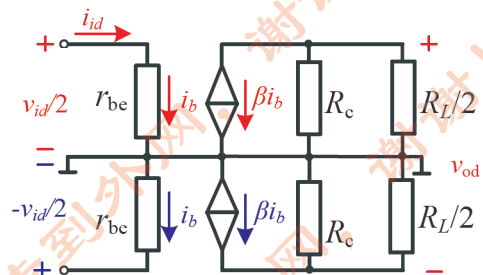
1. 差模输入

差模输入(单端输出，左管输出为例)



$$v_{od1} = -\beta i_b \cdot (R_c // R_L)$$

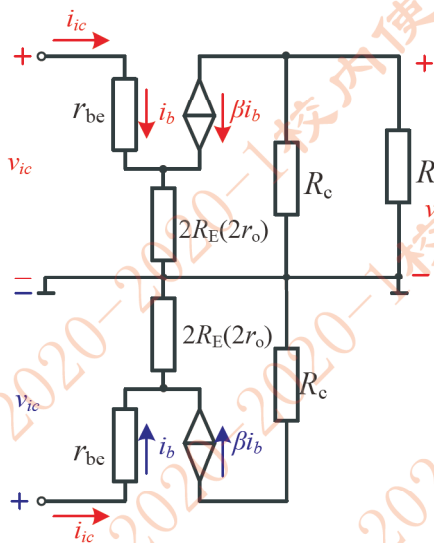
差模输入(双端输出)



$$v_{od} = -2\beta i_b \cdot (R_c // R_L)$$

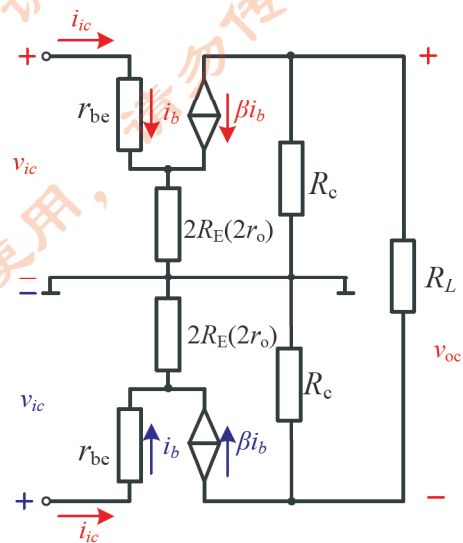
2. 共模输入

共模输入(单端输出，左管输出为例)



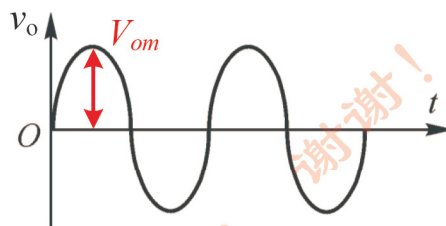
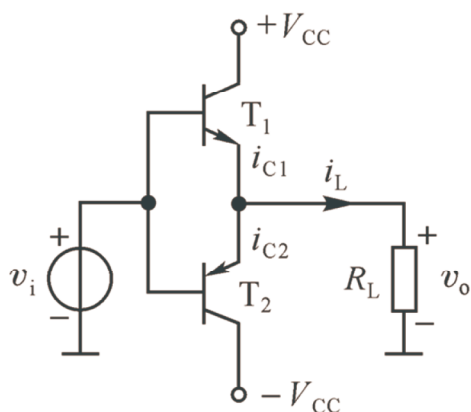
$$v_{oc1} = -\beta i_b \cdot (R_c // R_L)$$

共模输入(双端输出)



$$v_{oc} = 0$$

12. 功率放大电路



功率放大电路的功能：将直流电源所提供的功率，转化为输出信号的功率。

功率放大电路的最基本组态为：双电源供电互补对称放大电路。

分析要点：

- (1) 输入、输出信号幅度相同，即 $v_i = v_o$ ，输出信号的幅度(最大值)记为 V_{om} ；
- (2) 受电源限制，输出信号峰-峰值在 $\pm V_{CC}$ 之间。

重要公式：

- (1) 输出功率

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

$$V_{om} \text{ 的最大值为 } V_{CC}, \text{ 因此最大功率 } P_{om} = \frac{V_{CC}^2}{2R_L}$$

- (2) 功放效率

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

$$\text{当 } V_{om} \text{ 等于最大值 } V_{CC} \text{ 时, 效率最高, 最高效率 } \eta_m = \frac{\pi}{4} = 78.5\%$$

- (3) 直流电源提供的功率

$$\text{根据效率的定义 } \eta = \frac{P_o}{P_{DC}}, \text{ 可求出: } P_{DC} = \frac{P_o}{\eta} = \frac{2V_{CC}V_{om}}{\pi R_L}$$