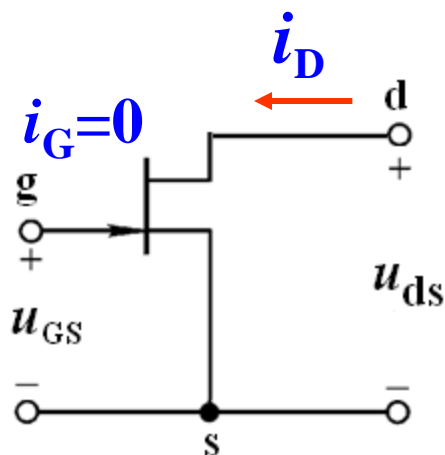


2. 场效应管放大电路的动态分析

➤ JFET中、低频小信号等效模型



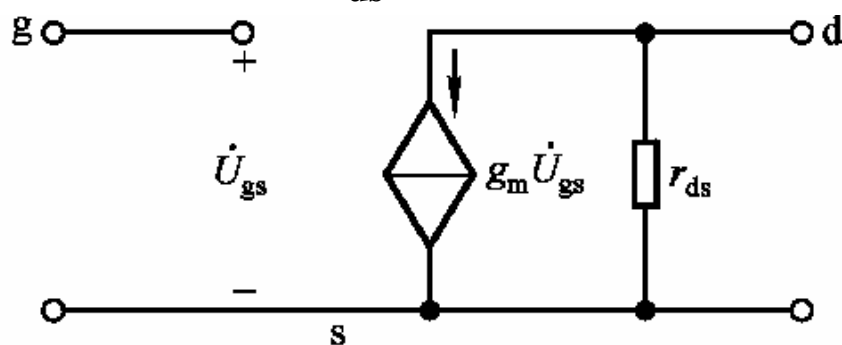
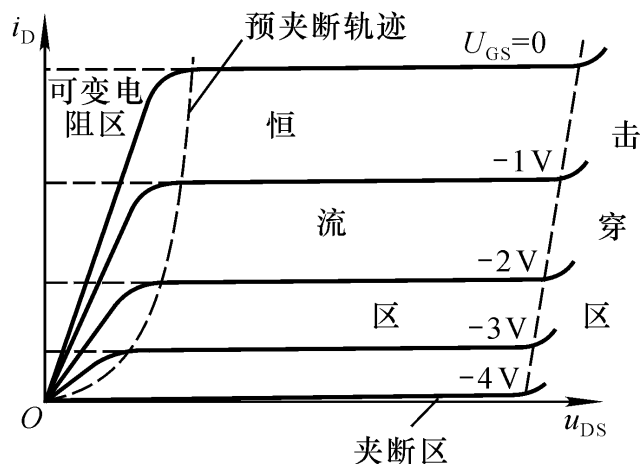
$$i_D = f(u_{GS}, u_{DS})$$

低频跨
导 g_m

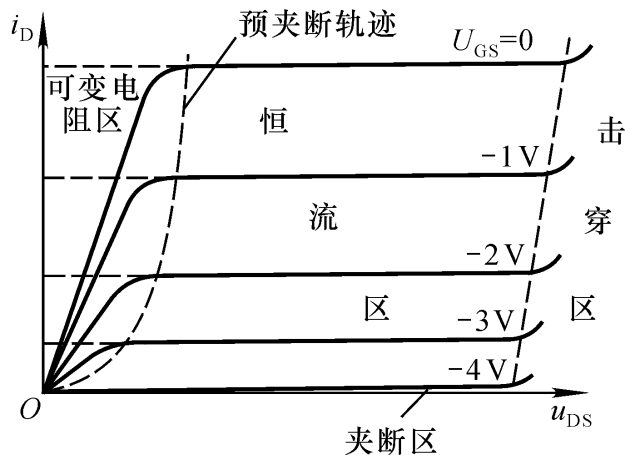
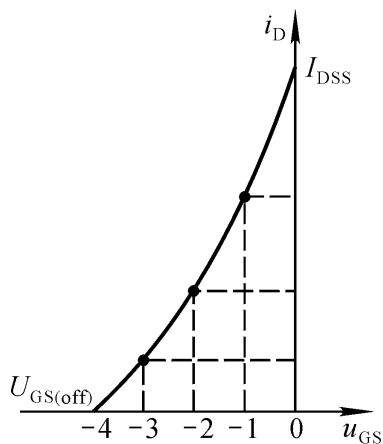
漏源电
导 $1/r_{ds}$

$$di_D = \left. \frac{\partial i_D}{\partial u_{GS}} \right|_{U_{DS}} \times du_{GS} + \left. \frac{\partial i_D}{\partial u_{DS}} \right|_{U_{GS}} \times du_{DS}$$

$$\dot{i}_d = g_m \dot{U}_{gs} + \frac{1}{r_{ds}} \dot{U}_{ds}$$



➤ 参数 g_m 和 r_{ds} 的推导



$$i_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{u_{GS}}{U_{GS(off)}}\right)^2$$

输出电阻

$$g_m = \left. \frac{\partial i_D}{\partial u_{GS}} \right|_{U_{DS}} = \frac{2}{-U_{GS(off)}} \sqrt{I_{DSS} I_{DQ}}$$

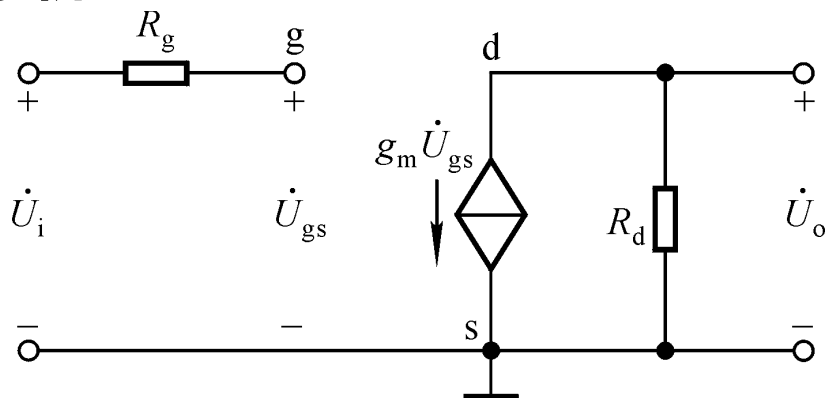
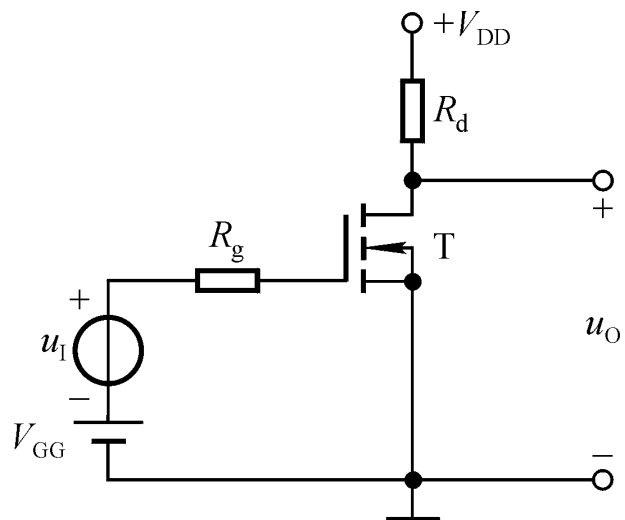
$$r_{ds} = \left. \frac{\partial u_{DS}}{\partial i_D} \right|_{U_{GS}} \approx \frac{|V_A|}{I_{DQ}} = \frac{1}{\lambda I_{DQ}}$$

问题：MOSFET模型？

$$i_D = I_{DO} \left(\frac{u_{GS}}{U_{GS(th)}} - 1 \right)^2$$

$$g_m = \frac{2}{U_{GS(th)}} \sqrt{I_{DO} I_{DQ}}$$

➤ 基本共源放大电路动态分析



例： $R_d=3k$, $U_{GS(th)}=1V$
 $I_{DQ}=3mA$, $I_{DO}=3mA$

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{-g_m \dot{U}_{gs} \cdot R_d}{\dot{U}_{gs}} = -g_m R_d$$

$$g_m = \frac{2}{U_{GS(th)}} \sqrt{I_{DO} I_{DQ}} = 6mS$$

$$R_i \approx \infty$$

$$\dot{A}_u = -18$$

$$R_o = R_d$$

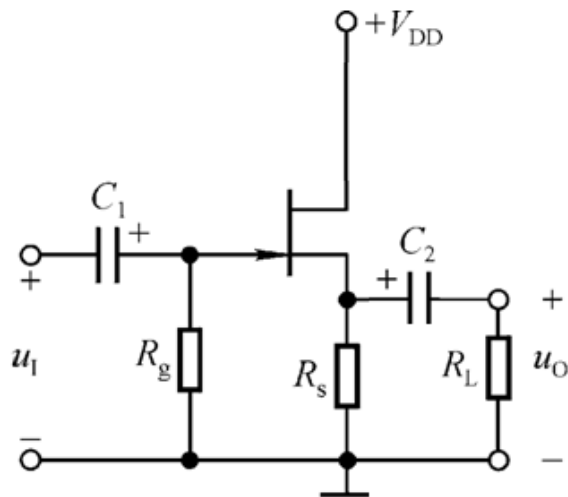
$$R_i = \infty, R_o = 3k\Omega$$

相对于CE放大电路较小

基本共源放大电路特点： 输入电阻大，电压放大倍数较小

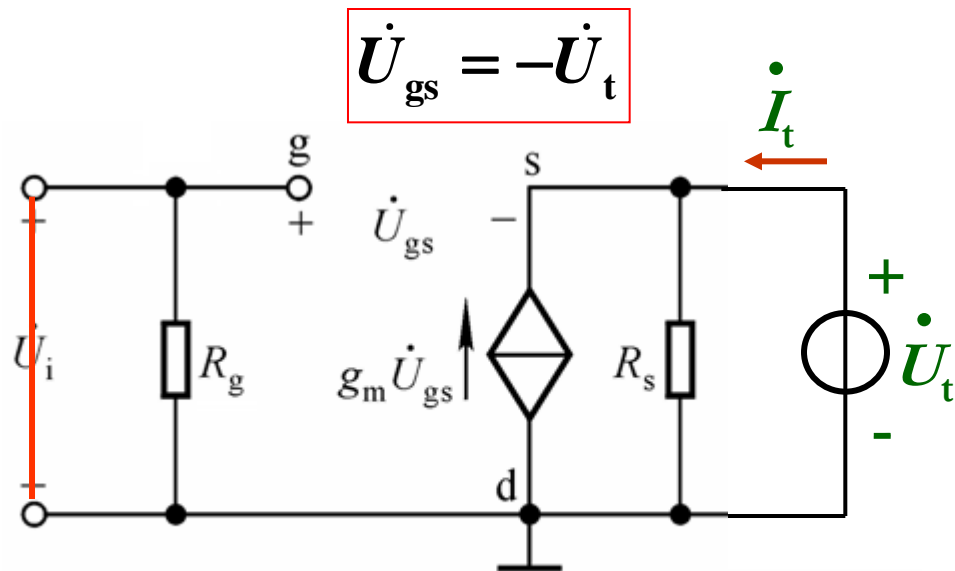
问题： 共源放大电路如何确定最大不失真输出电压？

➤ 共漏放大电路动态分析



$$\begin{aligned}\dot{A}_u &= \frac{U_o}{\dot{U}_i} = \frac{g_m \dot{U}_{gs} \cdot (R_s // R_L)}{\dot{U}_{gs} + g_m \dot{U}_{gs} \cdot (R_s // R_L)} \\ &= \frac{g_m (R_s // R_L)}{1 + g_m (R_s // R_L)}\end{aligned}$$

$$R_i \approx R_g$$



$$R_o = \frac{\dot{U}_t}{\dot{I}_t} = \frac{\dot{U}_t}{\frac{\dot{U}_t}{R_s} - g_m (-\dot{U}_t)} = R_s // \frac{1}{g_m}$$

基本共漏放大电路特点：

- 具有电压跟随作用
- 输入电阻大
- 输出电阻小



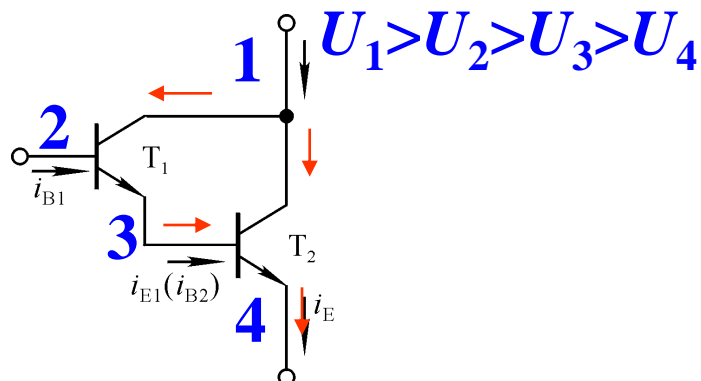
2.7 复合管

- 单个晶体管的输入电阻 (r_{be}) 以及电流放大倍数常常不能满足放大电路的要求, 常采用两个或者多个管子组成复合管, 以提高 R_i 和电流放大倍数;
- 为了利用不同晶体管或场效应管的特点, 常采用两个或者多个管子组成复合管, 以提高管子的性能。

一、复合管组成原则

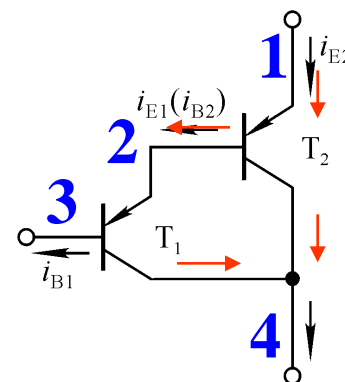
- 保证每个管子工作在放大状态时各极电流方向正确;
- 保证每个管子工作在放大状态时各极电位关系正确。

讨论7:



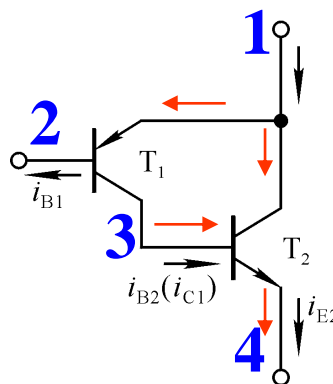
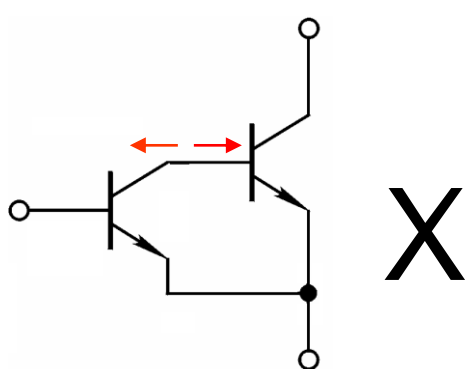
$$\beta = (1 + \beta_1)\beta_2 + \beta_1 \approx \beta_1\beta_2$$

$$r_{be} = r_{be1} + (1 + \beta_1)r_{be2}$$



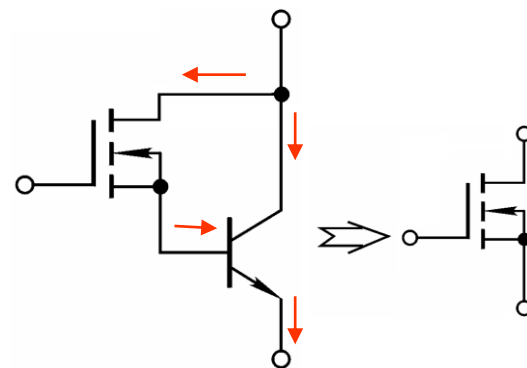
$$\beta \approx \beta_1\beta_2$$

$$r_{be} = r_{be1} + (1 + \beta_1)r_{be2}$$



$$\beta \approx \beta_1\beta_2$$

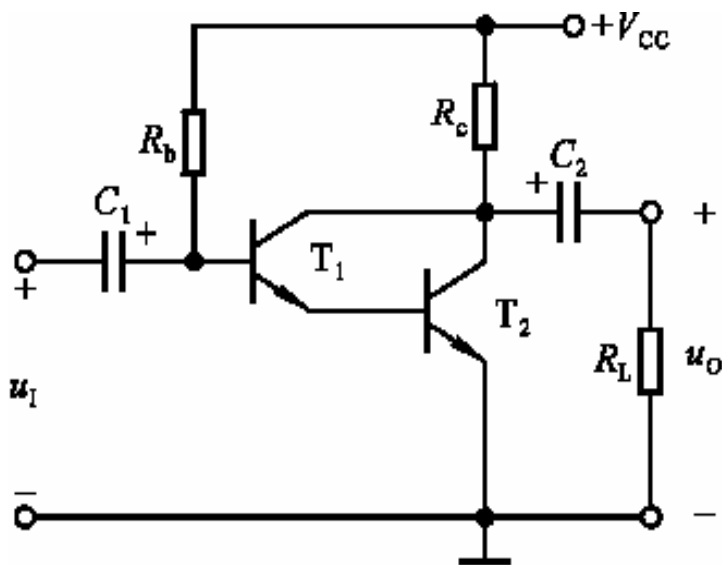
$$r_{be} \approx r_{be1}$$



- 复合管的等效管型取决于第一个管
- 采用复合管的目的：
提高 R_i 、提高 β 、改变管型

二、复合管组成的放大电路

• 基本共射放大电路

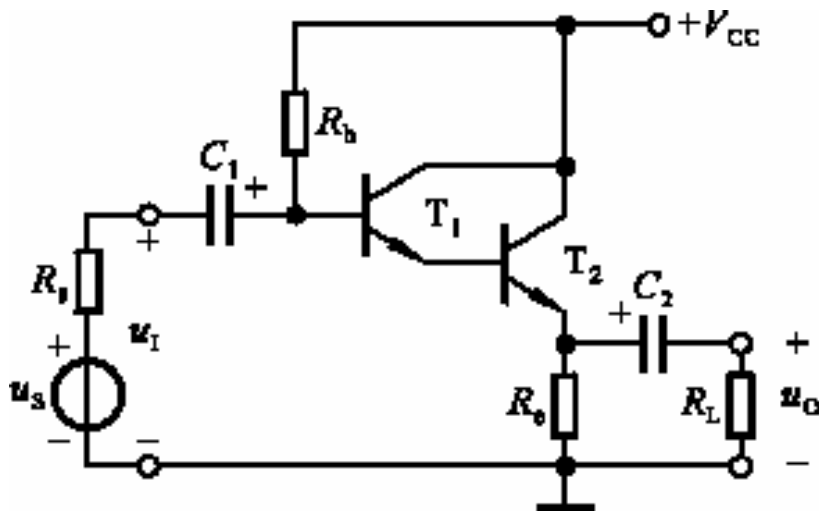


复合管视为 $\beta \approx \beta_1 \beta_2$,

$r_{be} = r_{be1} + (1 + \beta_1)r_{be2}$ 的晶体管

采用复合管的目的：
提高 R_i 、 A_u

• 基本共集放大电路



$$R_i \approx R_b // [r_{be} + (1 + \beta)(R_e // R_L)]$$

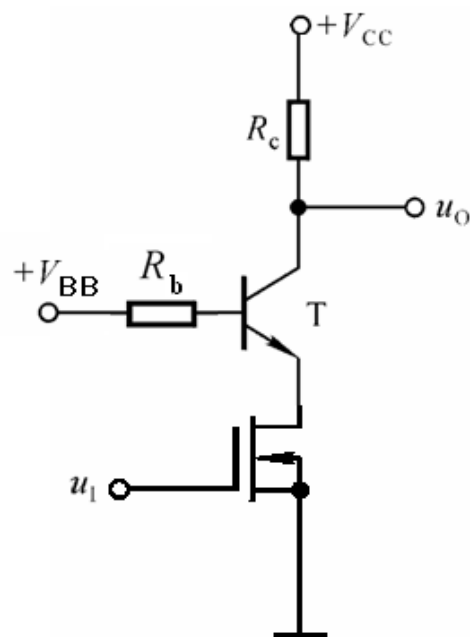
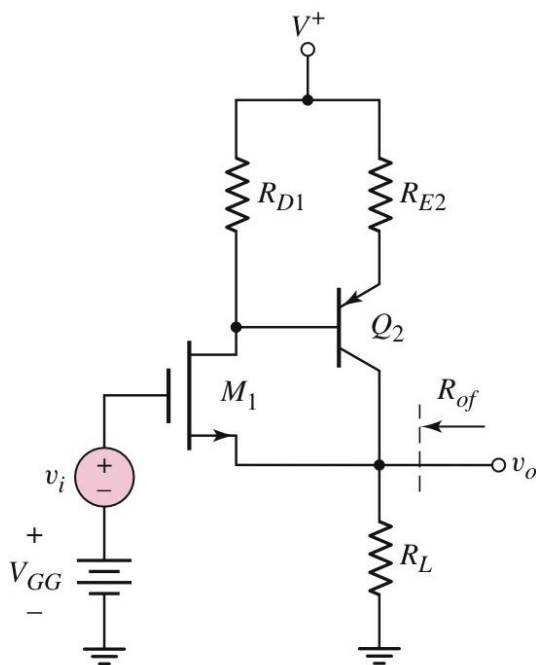
$$R_o \approx R_e // \frac{r_{be} + R_b // R_s}{1 + \beta}$$

采用复合管的目的：
提高 A_u 、 R_i ，减小 R_o

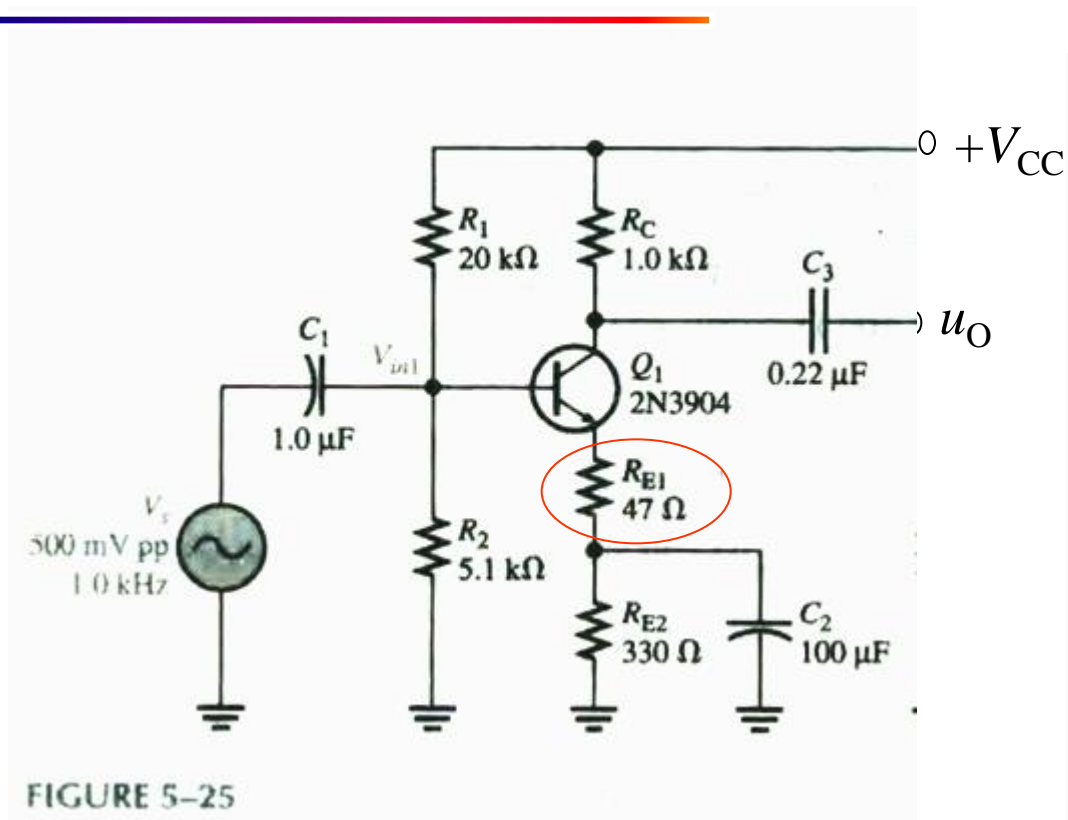
三、BiCMOS及其放大器

利用场效应管高输入电阻的特点和晶体管高电压放大倍数的特点，可组成BiCMOS器件。

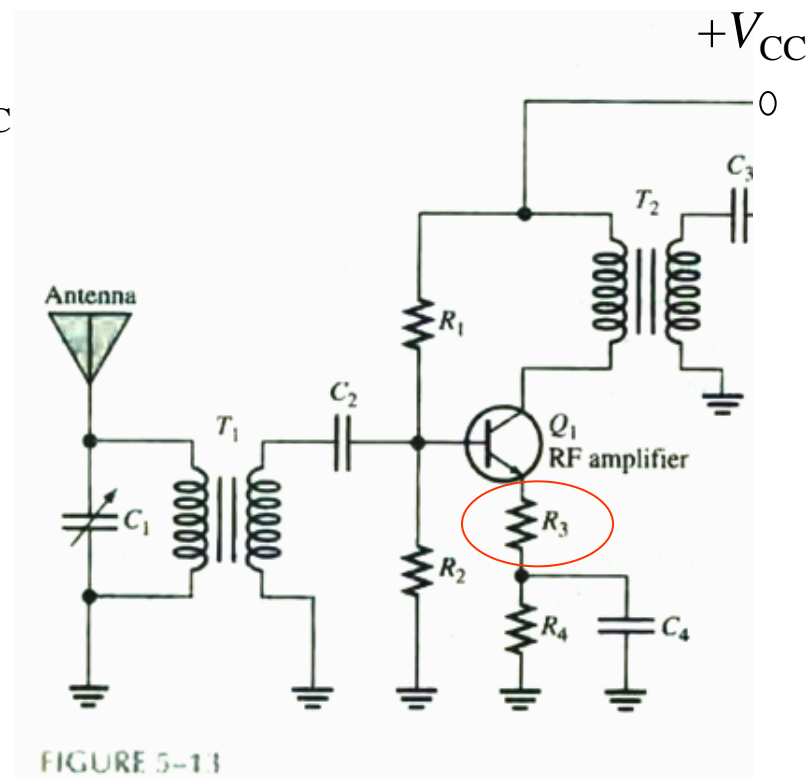
- **BiCMOS Cascode放大器**：将共射（或共源）放大电路与共基（或共栅）放大电路级联。共源-共基BiCMOS Cascode放大器：



讨论8：实用放大电路



阻容耦合音频放大电路第一级



晶体管无线音频接收电路第一级

讨论8：实用放大电路

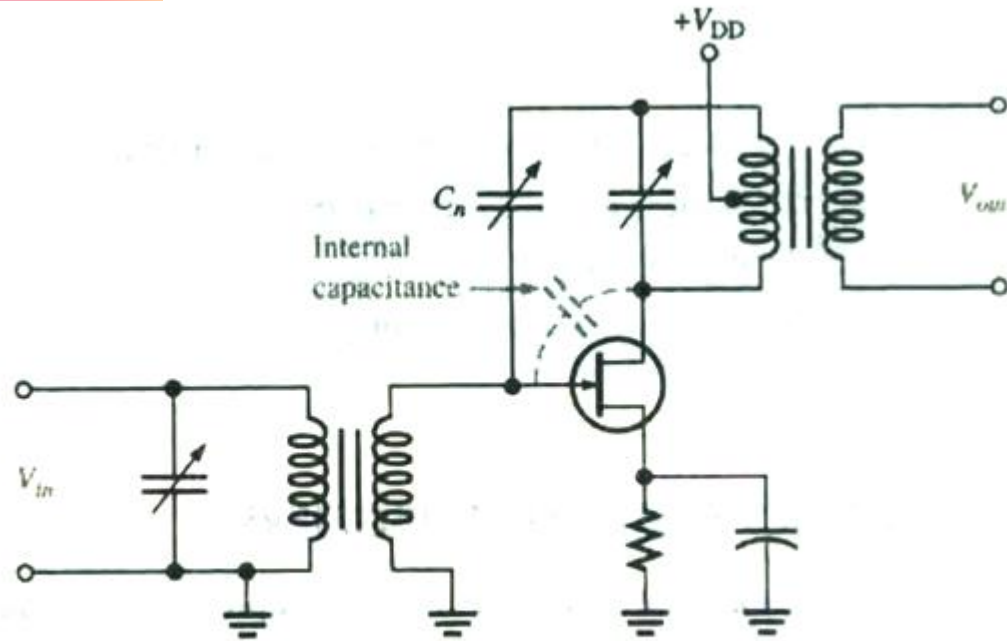


FIGURE 5-9
Hazeltine neutralization. C_n cancels the internal capacitance.

JFET无线接收电路第一级

第二章是本课程的重点和难点，本章要求如下：

- 1、掌握以下基本概念和定义：放大、静态工作点、饱和失真与截止失真、直流通路和交流通路、直流负载线与交流负载线、 h 参数等效模型、电压放大倍数、输入电阻和输出电阻、最大不失真输出电压。
- 2、掌握放大电路的组成原则和各种基本放大电路（CE，CC，CB，CS，CD，稳 Q 电路）的工作原理及特点；能够根据具体要求（如 A_u 、 R_i 、 R_o 、 Q 点、 U_{om} 等）选择电路的类型。
- 3、掌握放大电路静态和动态的分析方法，能正确估算基本放大电路的静态工作点和动态参数 A_u 、 R_i 和 R_o ，正确分析电路的输出波形和产生饱和失真与截止失真的原因。
- 4、了解稳定静态工作点的必要性和稳定方法。了解复合管的组成原则。

第二章基本电路、基本分析方法总结

电路总结（请自己将电路特点 A_u 、 R_i 、 R_o 列表对比细化）：
CE、CC、CB（又分为NPN、PNP管放大电路）；CS、CD
（又分为JFET、MOS管放大电路）；稳 Q 电路。

方法总结：

- 直流通路交流通路：画直流、交流通路的方法，由直流通路估算 Q 点的方法，分析放大电路组成原则的方法；
- 图解法+直流通路：分析 Q 点位置，估算 Q 点；
- 图解法+交流通路：分析非线性失真（截止失真还是饱和失真）、分析 U_{om} ；
- 等效电路法+交流通路：分析 A_u 、 R_i 、 R_o ；
- 单管放大电路基本接法的判断方法。

第二章常见题型

- (1) 关于放大的概念、放大电路静态和动态参数物理意义正确性的判断。
- (2) 电子电路能否放大动态信号的判断。
- (3) 如何利用双极型管和单极型管组成单管放大电路。
- (4) 判断单管放大电路属于哪种基本放大电路（基本接法）。
- (5) 正确画出放大电路的直流通路和交流通路。
- (6) 共射、共集、共基放大电路的静态工作点、电压放大倍数、输入电阻和输出电阻的分析方法。
- (7) 共源、共漏放大电路的静态工作点、电压放大倍数、输入电阻和输出电阻的分析方法。
- (8) 基本放大电路失真的判断及消除失真的方法，最大不失真输出电压的求解方法。
- (9) 各种基本放大电路的性能特点及其选用。



第三章 多级放大电路

Multistage Amplifier

3.1 多级放大电路的耦合方式

3.2 多级放大电路的分析

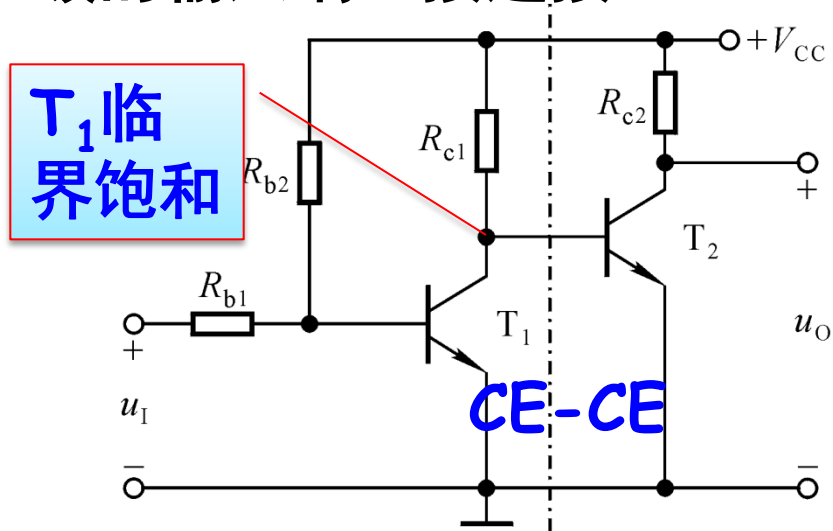
3.3 直接耦合多级放大电路



3.1 多级放大电路的耦合方式

级间耦合方式：多级放大电路级与级之间的连接方式
直接耦合、阻容耦合、变压器耦合、光电耦合

一、直接耦合(Direct Coupled) 前一级的输出端与后一级的输入端直接连接



优点：

- 低频特性好
- 便于集成

缺点：

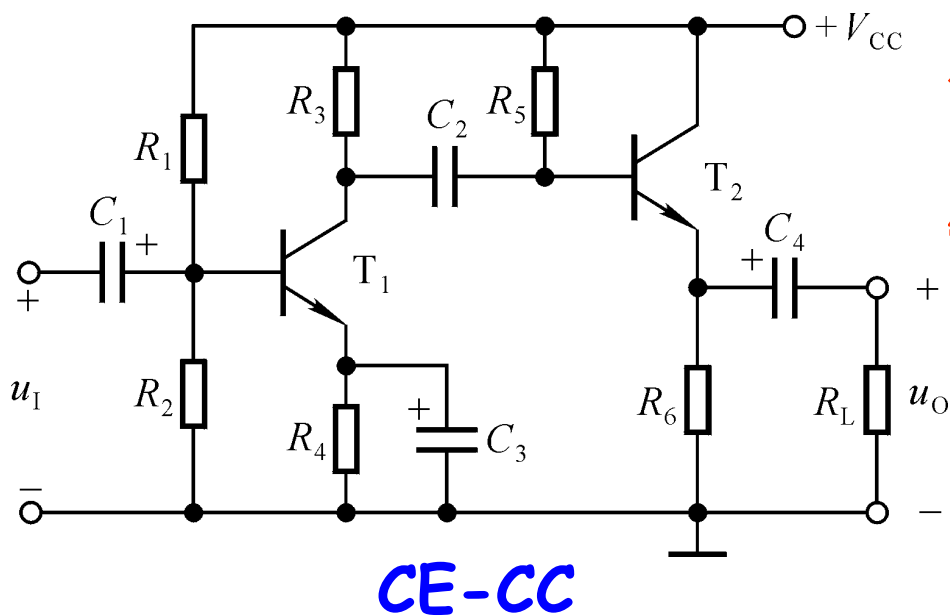
- Q 点互相影响，不便于设计和调试
- 前级 Q 点变化会被后级放大

采取的措施：

- 采用EDA仿真软件设计电路，简化设计过程；
- 采用差分放大电路来消除零点漂移。

二、阻容耦合(Capacitively Coupled)

前一级的输出端与后一级的输入端通过电阻电容连接

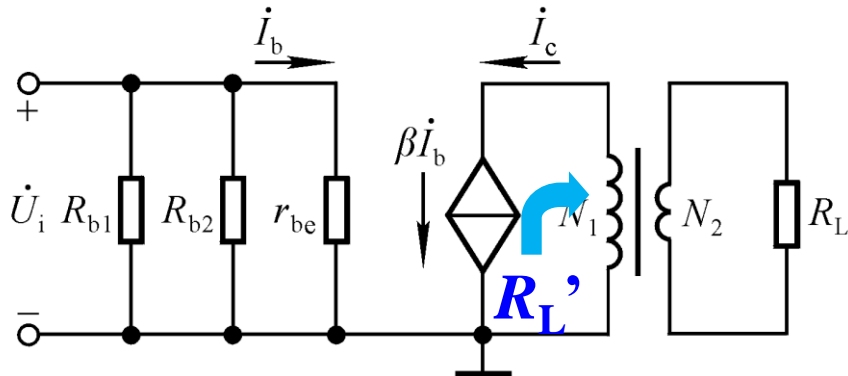
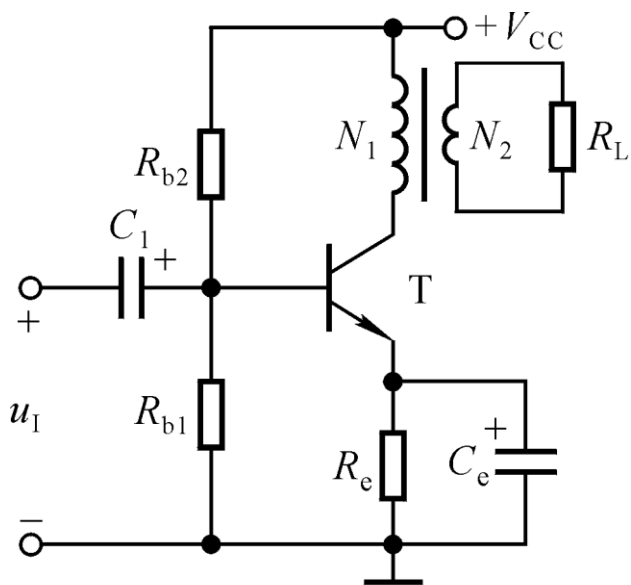


优点：各级 Q 点相互独立

缺点：①低频特性较差
②不便于集成

三、变压器耦合(Transformer Coupled)

放大电路通过变压器互相连接或者连接信号源以及负载



缺点： ①不适合集成
②低频特性差

优点： ①Q点相互独立
②实现阻抗匹配

$$P_1 = P_2$$

$$I_1^2 R'_L = I_2^2 R_L$$

$$\therefore R'_L = \left(\frac{I_2}{I_1} \right)^2 R_L$$

$$R'_L = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 R_L$$

$$\dot{A}_{u2} = -\frac{\beta R'_L}{r_{be}}$$

可提高 $|A_u|$

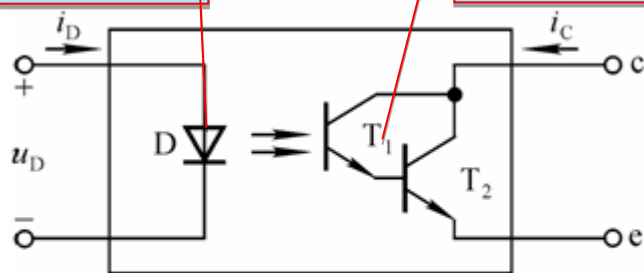
四、光电耦合(photoelectrically coupled)

以光信号为媒介实现电信号的耦合和传递

• 光电耦合器及其传输特性

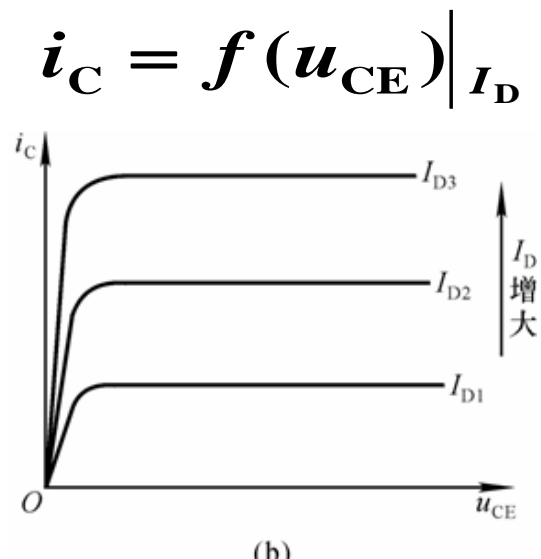
发光二极管

光电三极管

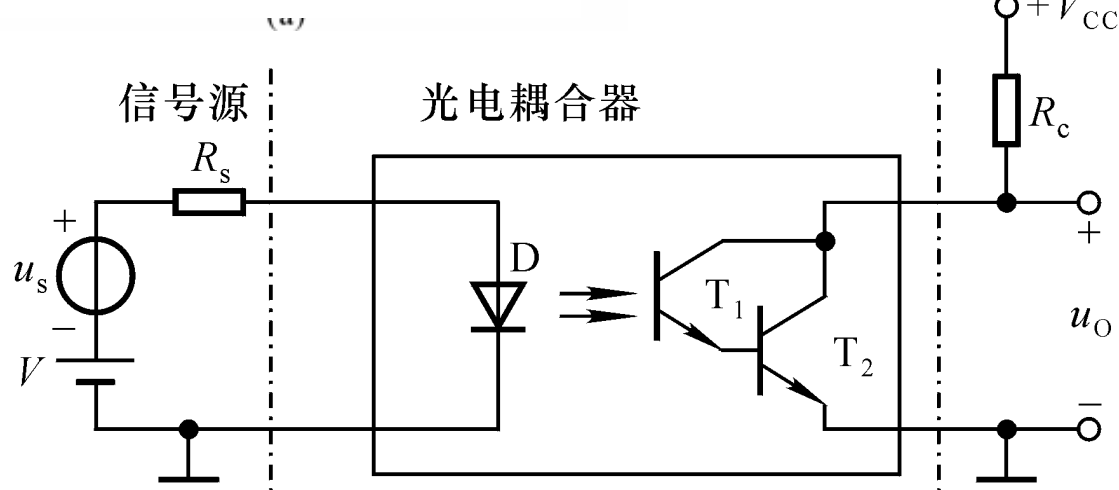


传输比: 0.1~1.5

$$CTR = \left. \frac{\Delta i_C}{\Delta i_D} \right|_{U_{CE}}$$



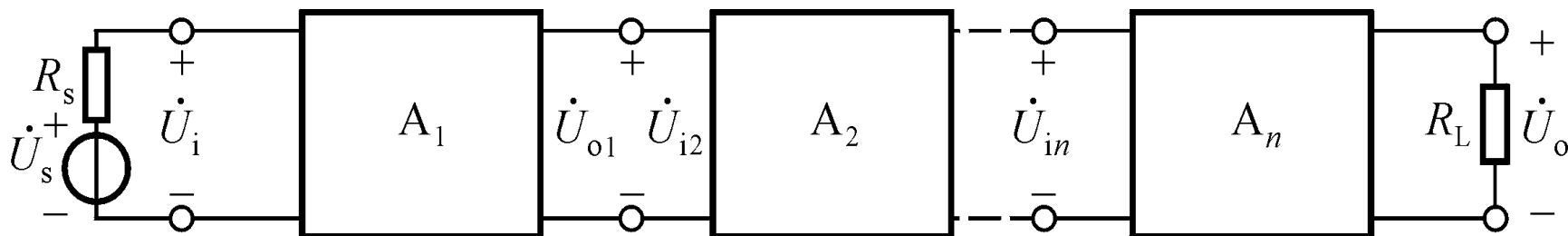
• 光电耦合放大电路



作用：
实现电气隔离，
抗干扰能力强



3.2 多级放大电路的动态分析



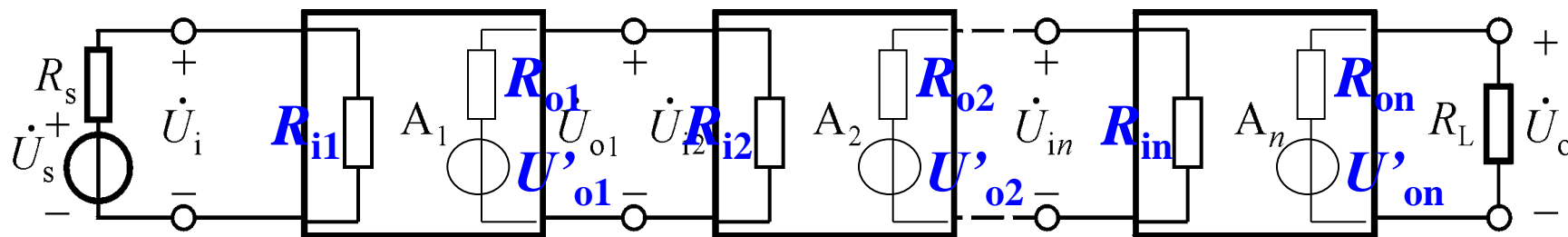
$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{\dot{U}_{o1}}{\dot{U}_i} \cdot \frac{\dot{U}_{o2}}{\dot{U}_{i2}} \cdots \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_{in}} = \dot{A}_{u1} \cdot \dot{A}_{u2} \cdots \dot{A}_{un}$$

$$\dot{A}_u = \prod_{j=1}^n \dot{A}_{uj}$$

电压放大倍数=各级电压放大倍数的乘积

将后一级电路看作前一级的负载

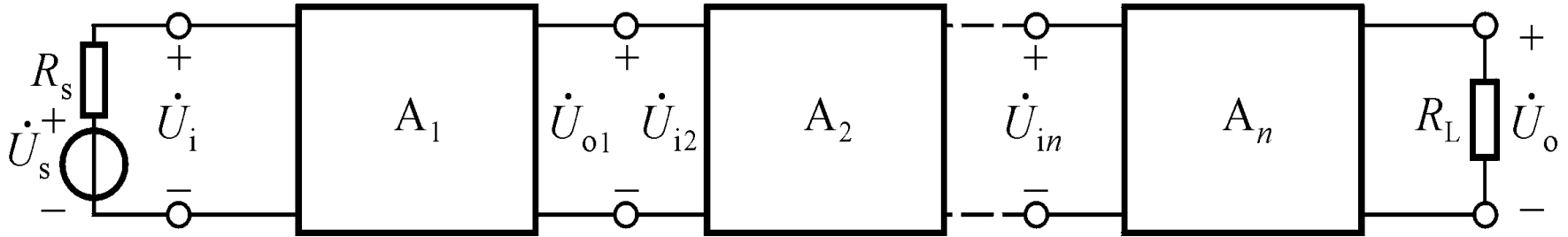
将前一级电路看作后一级的带内阻的信号源，该内阻即为前一级的输出电阻



$$\dot{A}_{us} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = \underbrace{\frac{\dot{U}'_{o1}}{\dot{U}_s}}_{\dot{A}_{uso1}} \cdot \frac{\dot{U}'_{o2}}{\dot{U}'_{o1}} \cdots \cdots \underbrace{\frac{\dot{U}'_{on}}{\dot{U}'_{o(n-1)}} \cdot \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}'_{on}}}_{\dot{A}_{usn}}$$

$$\dot{A}_{us} = \left(\prod_{j=1}^{n-1} \dot{A}_{usoj} \right) \cdot \dot{A}_{usn}$$

开路电压放大倍数 A_{uo}
源电压放大倍数 A_{us}



$$R_i = R_{i1}$$

输入电阻=第一级 R_i

可能与后一级电路及负载有关

$$R_o = R_{on}$$

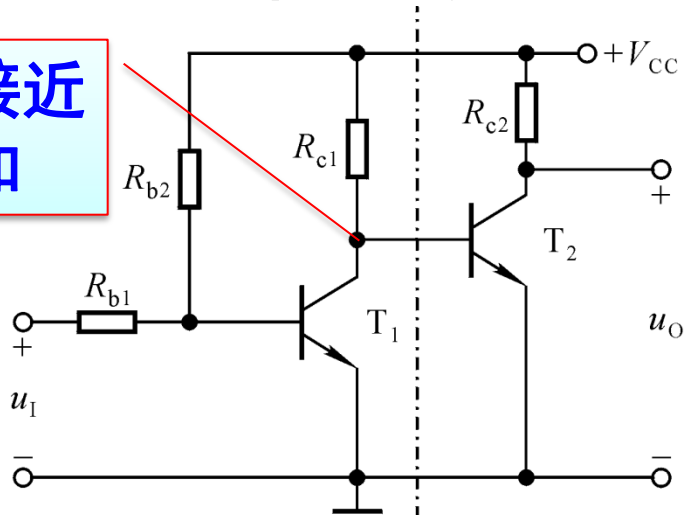
输出电阻=最后一级的 R_o

可能与前一级电路及信号源内阻有关

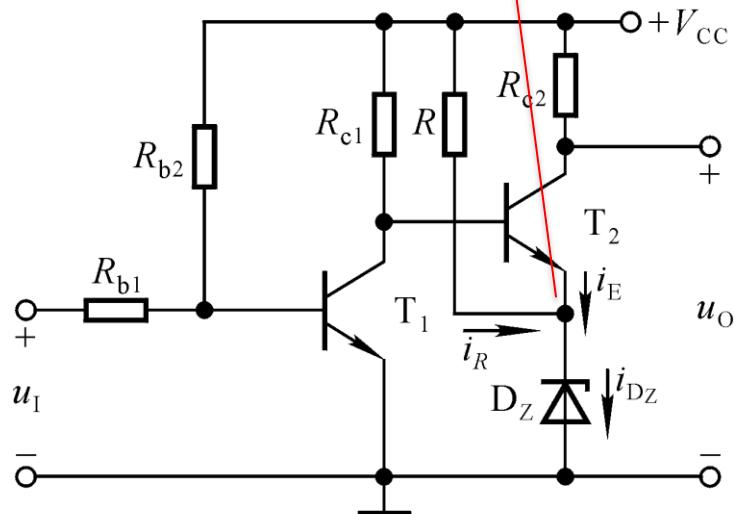
当采用CC电路作为第一级时， R_i 与第二级的输入电阻有关；
当采用CC作为最后一级时， R_o 与倒数第二级的输出电阻有关。

讨论1、直接耦合放大电路 静态工作点的设置

T_1 接近
饱和

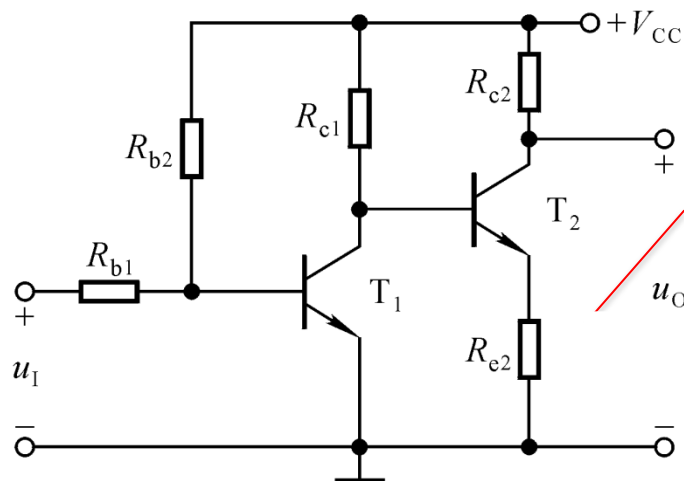


采用稳压管

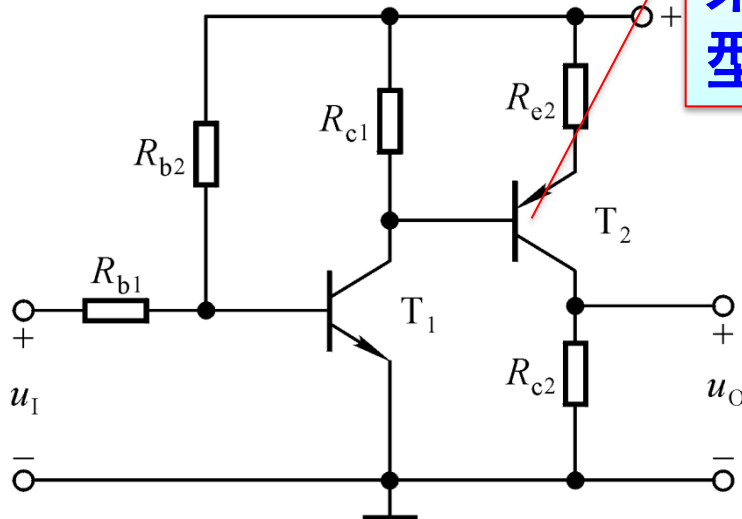


研究：还有何方法？ 采用场效应管？

采用二
极管或
者电阻



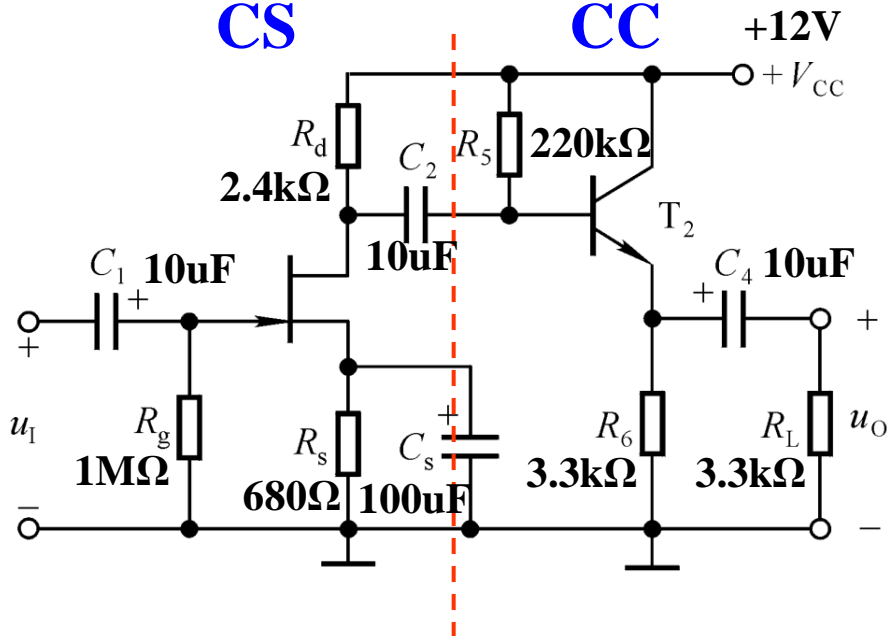
采用PNP
型管



讨论2、两级阻容耦合放大电路的动态分析

CS

CC



JFET参数: $I_{DSS}=10\text{mA}$, $U_{GS(off)}=-4\text{V}$

BJT参数: $\beta=100$, $r_{bb'}=0\Omega$

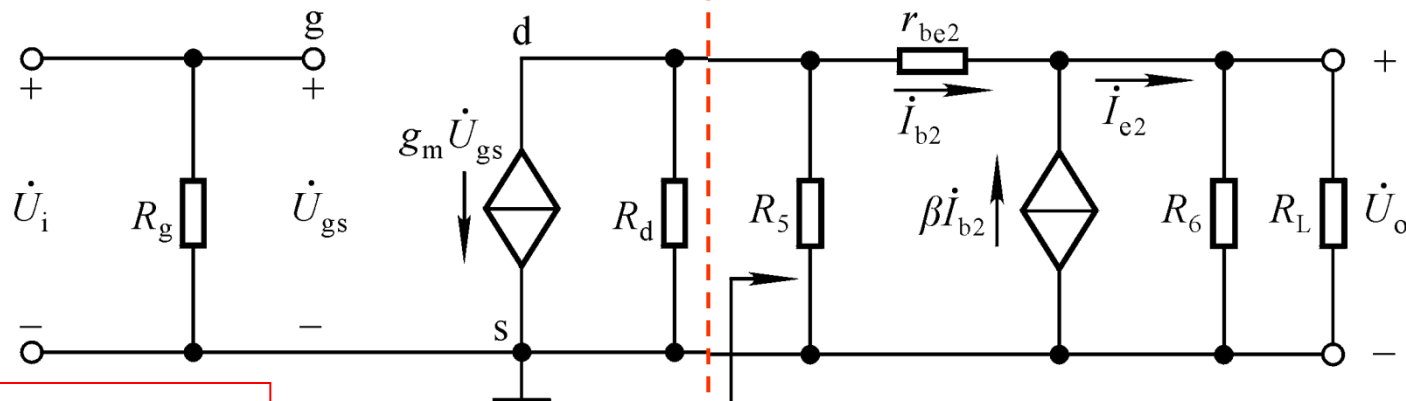
求: Q 点、 A_u 、 R_i 、 R_o

• Q 点: 阻容耦合, 分别单独求

Q_1 : $I_{DQ} \approx 2.8\text{mA}$, $U_{GSQ} \approx -1.9\text{V}$

Q_2 : $I_{EQ} \approx 2.06\text{mA}$, $U_{CEQ} \approx 5.2\text{V}$

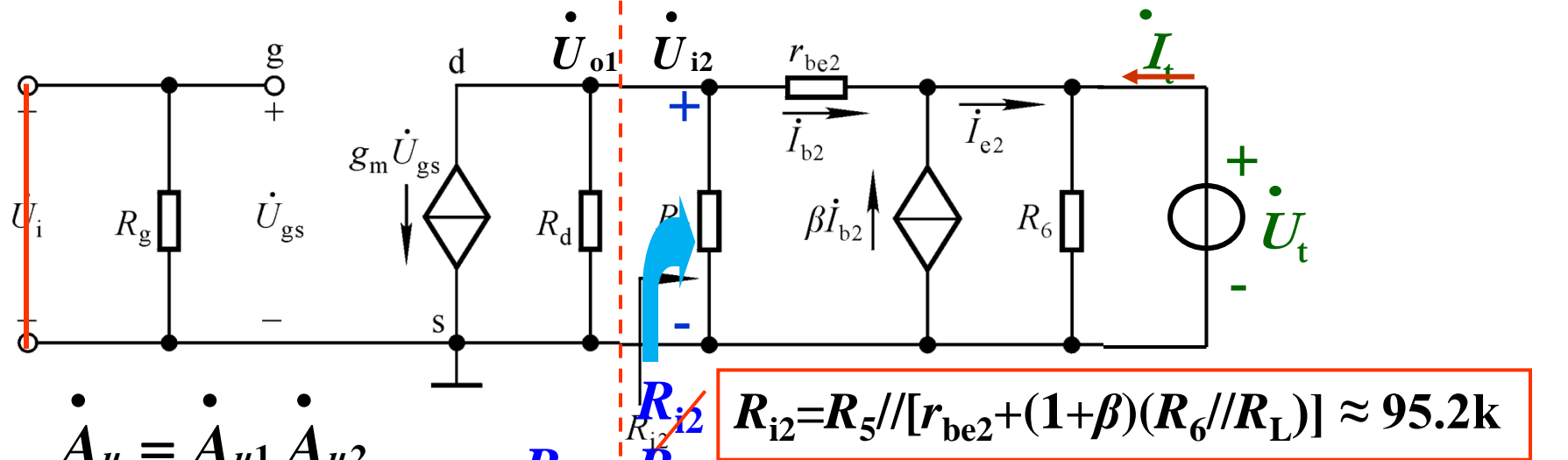
• 动态



$$g_m = \frac{2}{-U_{GS(off)}} \sqrt{I_{DSS} I_{DQ}}$$

$$g_m \approx 2.6\text{mS}$$

$$r_{be2} \approx 1275\Omega$$

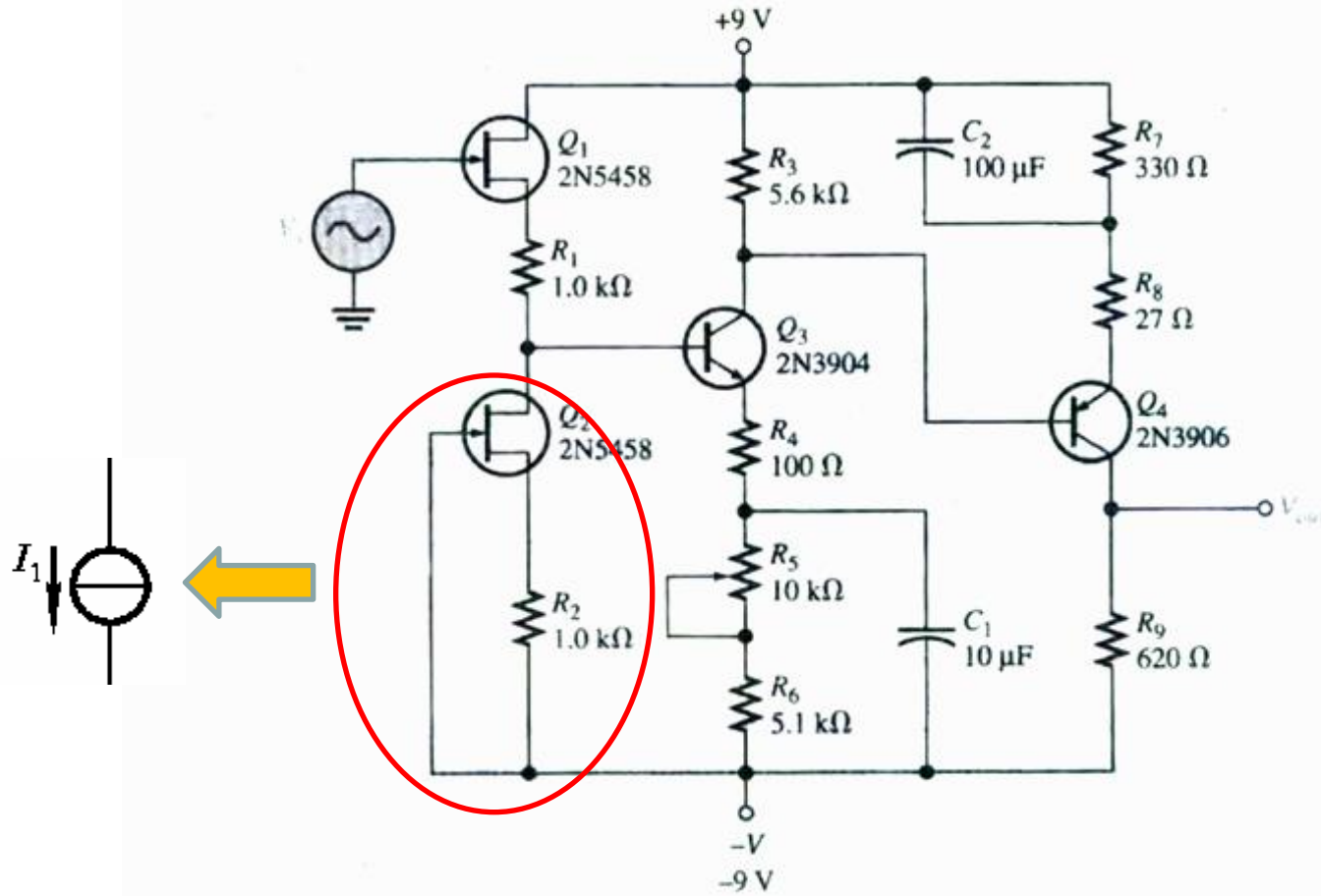


讨论3：放大电路选择

按下列要求组成两级放大电路：

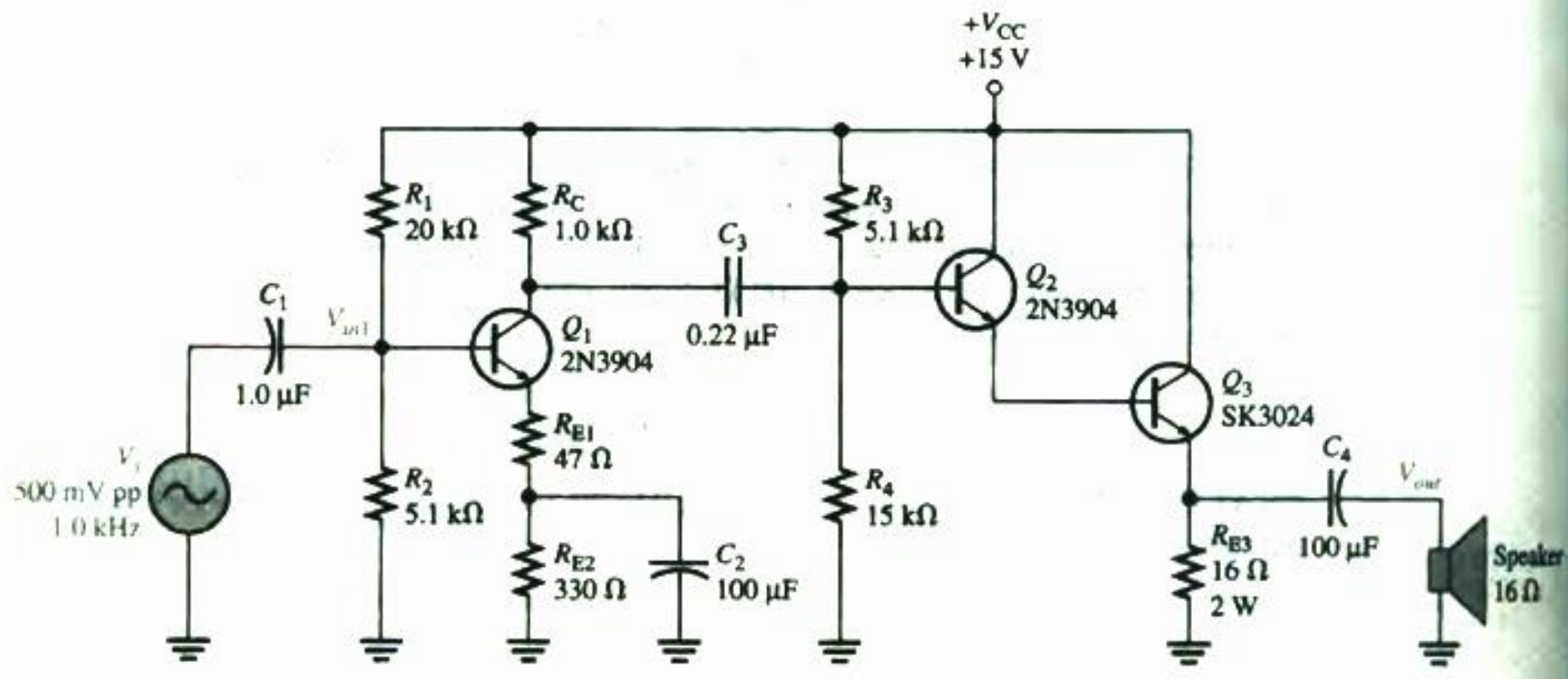
- | | |
|---|-----------|
| (1) $R_i = 1 \sim 2\text{k}\Omega$, A_u 的数值 ≥ 3000 ; | (1) 共射、共射 |
| (2) $R_i \geq 10\text{M}\Omega$, A_u 的数值 ≥ 300 ; | (2) 共源、共射 |
| (3) $R_i = 100 \sim 200\text{k}\Omega$, A_u 的数值 ≥ 150 ; | (3) 共集、共射 |
| (4) $R_i \geq 10\text{M}\Omega$, A_u 的数值 ≥ 10 ,
$R_o \leq 100\Omega$. | (4) 共源、共集 |

补充：高阻抗前置放大电路- 直接耦合多级放大电路



高阻抗前置放大器

补充：阻容耦合音频多级放大电路



音频多级放大电路

补充：光前置放大电路 - 直接耦合多级放大电路

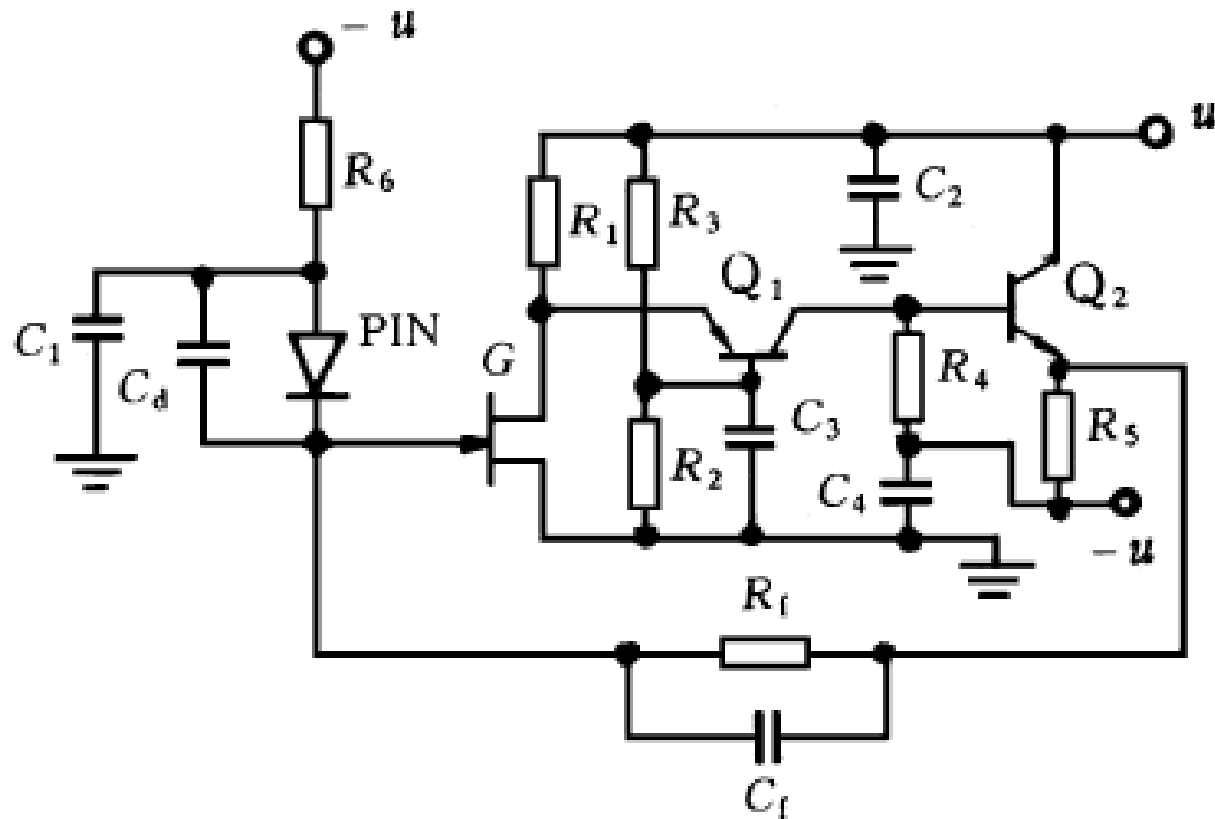


图 5 使用 GaSaFET 的一种光前置放大电路

第三章要求

- 1、掌握以下概念及定义：零点漂移，差模信号与差模放大倍数，共模信号与共模放大倍数，共模抑制比，互补，交越失真。
- 2、掌握直接耦合、阻容耦合、变压器耦合等方式的优缺点，能够正确判断多级放大电路的组合形式，正确估算多级放大电路的 A_u 、 R_i 和 R_o 。
- 3、掌握双端输入差分放大电路静态工作点和放大倍数的计算方法，理解单端输入差分放大电路静态工作点和放大倍数的计算方法，理解差分放大电路采用参数相同的对管和 R_e （或者恒流源）的共模负反馈作用来抑制温漂的原理。
- 4、掌握互补输出级电路（OCL电路）的组成和工作原理。

第三章基本电路、基本分析方法总结

电路总结（请自己将电路特点 A_u 、 R_i 、 R_o 列表对比细化）：
差分放大电路的四种基本接法；恒流源式差分放大电路；互补电路、消除交越失真的互补电路（二极管、 U_{BE} 倍增电路）、准互补电路。

方法总结：

- 多级放大电路分析 A_u 、 R_i 、 R_o 方法；
- 差分放大电路输入信号的分解方法；
- 差分放大电路的四种基本接法 A_d 、 A_c 、 u_o 、 R_i 、 R_o 的分析方法；
- 互补电路消除交越失真的方法。

第三章常见题型

- (1) 多级放大电路的定性分析，包括各级电路属于哪种基本电路、耦合方式和性能特点等。
- (2) 根据性能指标要求组成多级放大电路。
- (3) 差分放大电路的分析计算。
- (4) 多级放大电路的分析计算。

1-5章知识关联结构图

放大电路

第2章 静态分析

估算：直流通路+直流模型
图解：直流通路+特性曲线

第2章 单管放大电路

动态分析

第2章
中低频：交流通路+ h 参数模型
高频：交流通路+混合 π 模型
第5章

多级放大电路 第3、4章

学习方法

- 抓重点（章、节、目）、难点
- 掌握基本概念
- 掌握基本分析方法
- 对比理解电路特点、作用、工作原理