



一、二极管和三极管

概念

1、半导体基本概念

基本概念：

- ☑半导体；
- ☑价电子和共价键；
- ☑杂质半导体；
- ☑载流子；
- ☑多子和少子；
- ☑N型和P型半导体；
- ☑PN结

知识要点：

(1)	N型半导体	P型半导体
多子	自由电子	空穴
少子	空穴	自由电子

(2) 无论N型或P型半导体都是中性的，对外不显电性。

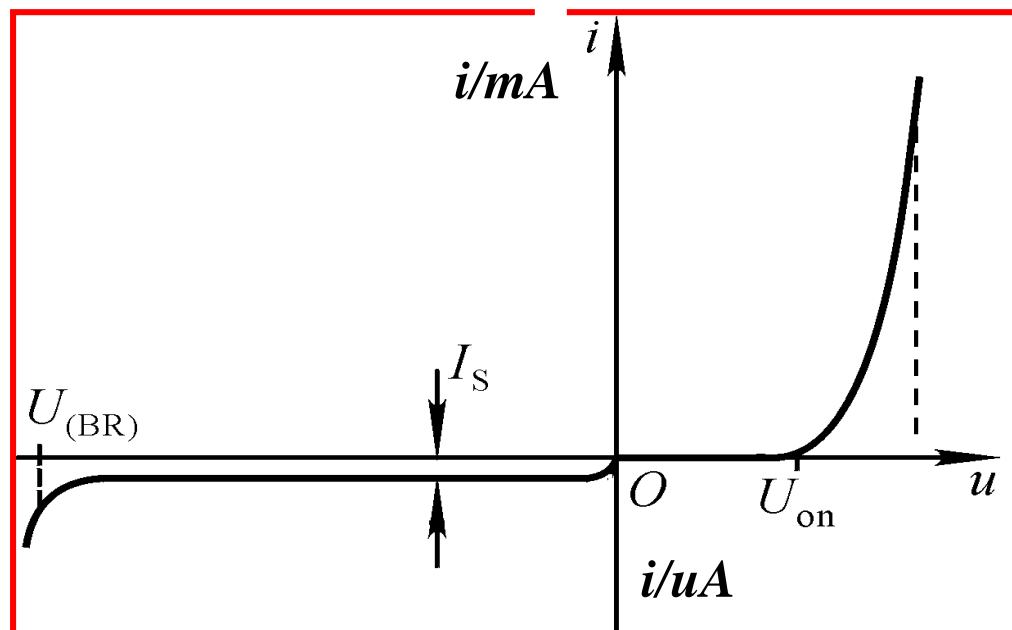
(3) PN结的单向导电性

正向偏置	导通状态
反向偏置	截止状态

概念

2、二极管相关概念

(1) 伏安特性



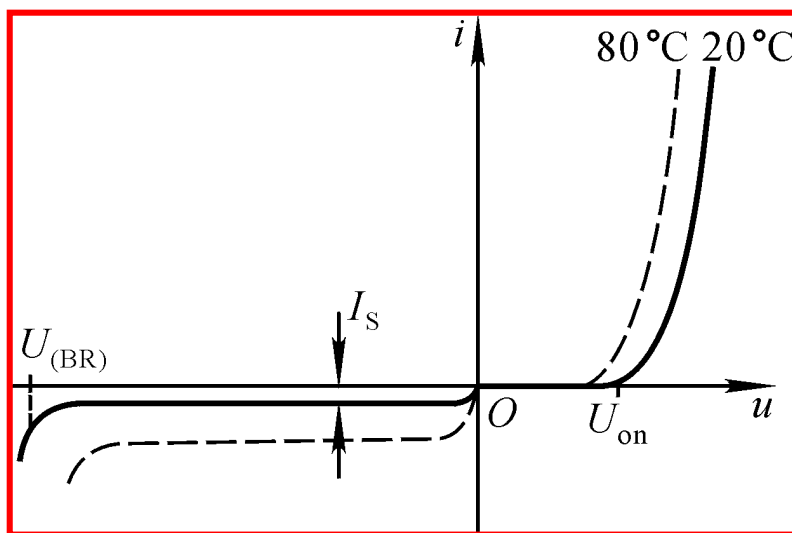
材料	开启电压	导通电压	反向饱和电流
硅Si	0.5V	0.5~0.8V	1 μA 以下
锗Ge	0.1V	0.1~0.3V	几十 μA

概念

(2) 二极管的电流方程

$$i_D = I_s (e^{U_D / U_T} - 1) \quad U_T = \frac{kT}{q} (\text{v}) \quad (\text{常温 } 26\text{mv})$$

(3) 伏安特性受温度影响



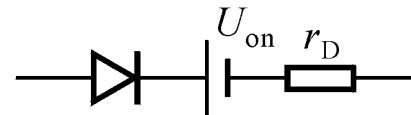
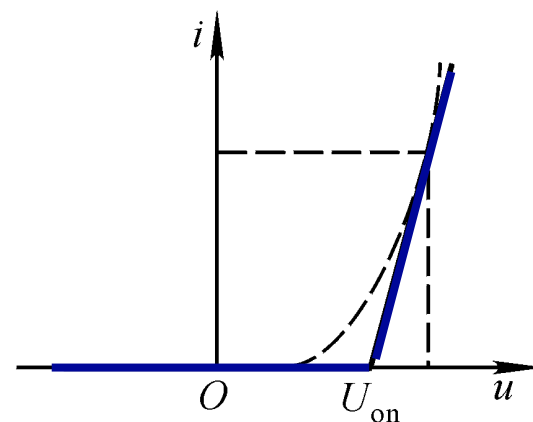
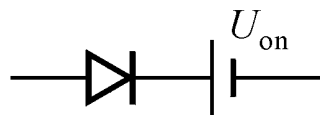
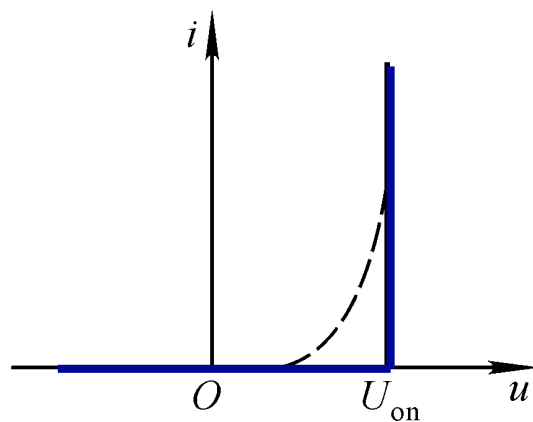
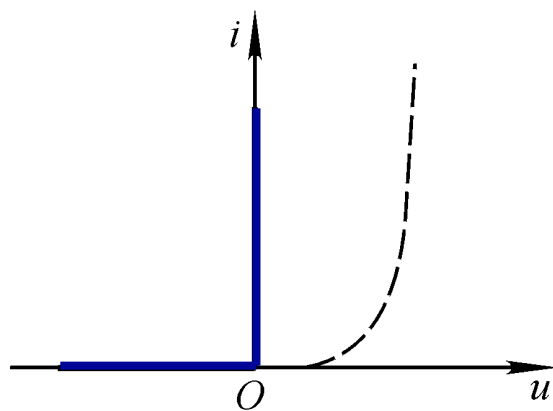
(4) 主要参数

- 最大整流电流 I_F
- 最高反向工作电压 U_R
- 反向电流 I_R
- 最高工作频率 f_M

分析方法

✓ 二极管电路分析方法

(1) 等效模型



分析方法

✓ 二极管电路分析方法

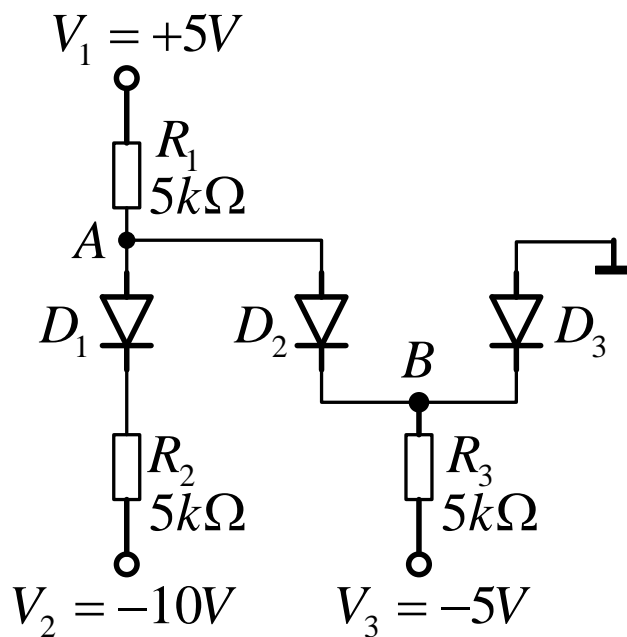
(2) 分析方法

分析方法和步骤：

- ① 将二极管断开
- ② 分析二极管阴阳两极接入点间电压的极性和大小；
- ③ 根据所选择的等效模型得到等效电路；
- ④ 利用线性电路分析方法分析电路。

习题

电路图如图所示，设二极管的导通电压均为 $0.7V$ ，则A点和B点的电压分别为多少？（需写清分析过程，判断各管状态）



概念

3、晶体管相关概念

(1) 为什么叫三极管？

三极管的基本结构。三个级、三个区、两个结

(2) 为什么三极管能够放大？

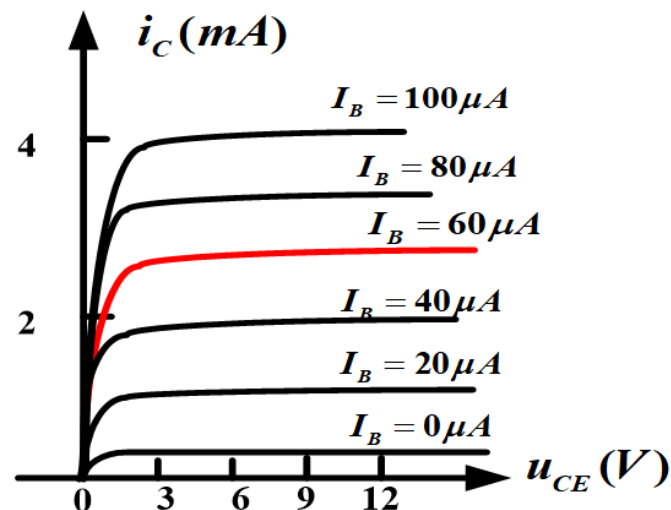
三极管的电流分配

1) 三电极电流关系 $I_E = I_B + I_C$

2) $I_C \approx \bar{\beta} I_B$

3) $I_C \gg I_B$, $I_C \approx I_E$

4) $\Delta I_C \gg \Delta I_B$



(3) 三极管在什么情况下才能放大？

发射结正偏、集电结反偏

概念

几个重要公式：

$$I_E = I_C + I_B \quad I_C = \beta I_B \quad I_E = (1 + \beta) I_B$$

$$U_{BE} = 0.7V$$

$$\alpha = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_E} \quad \beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \quad \alpha = \frac{\beta}{1 + \beta}$$

$$P_{C_{\max}} = U_{CE} I_C$$

分析方法

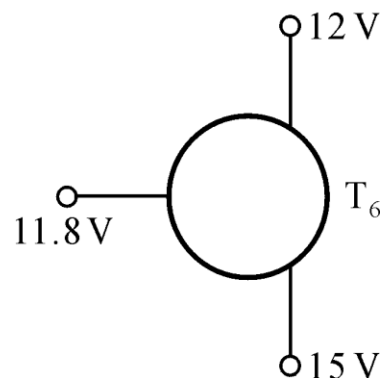
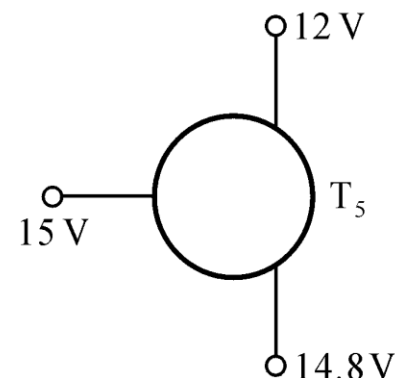
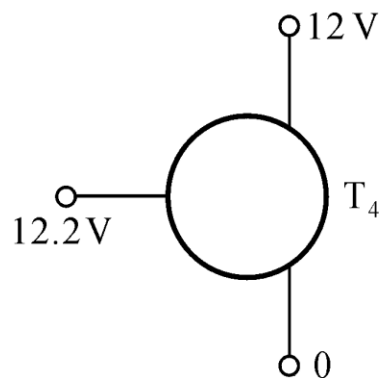
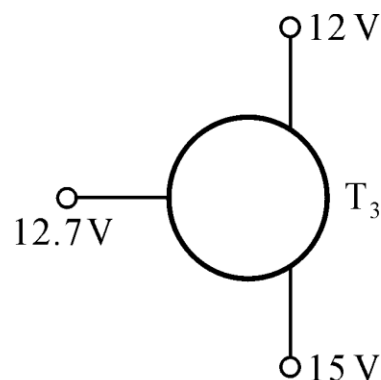
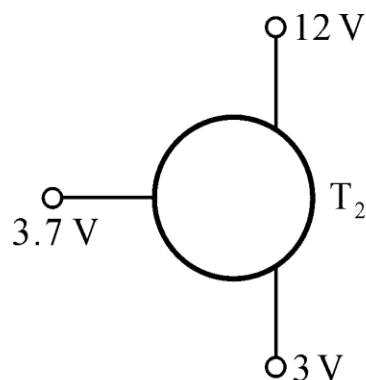
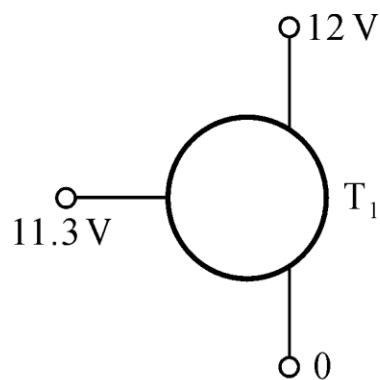
✓ 三极管三种工作状态的判断方法

(1) 结偏置判定方法

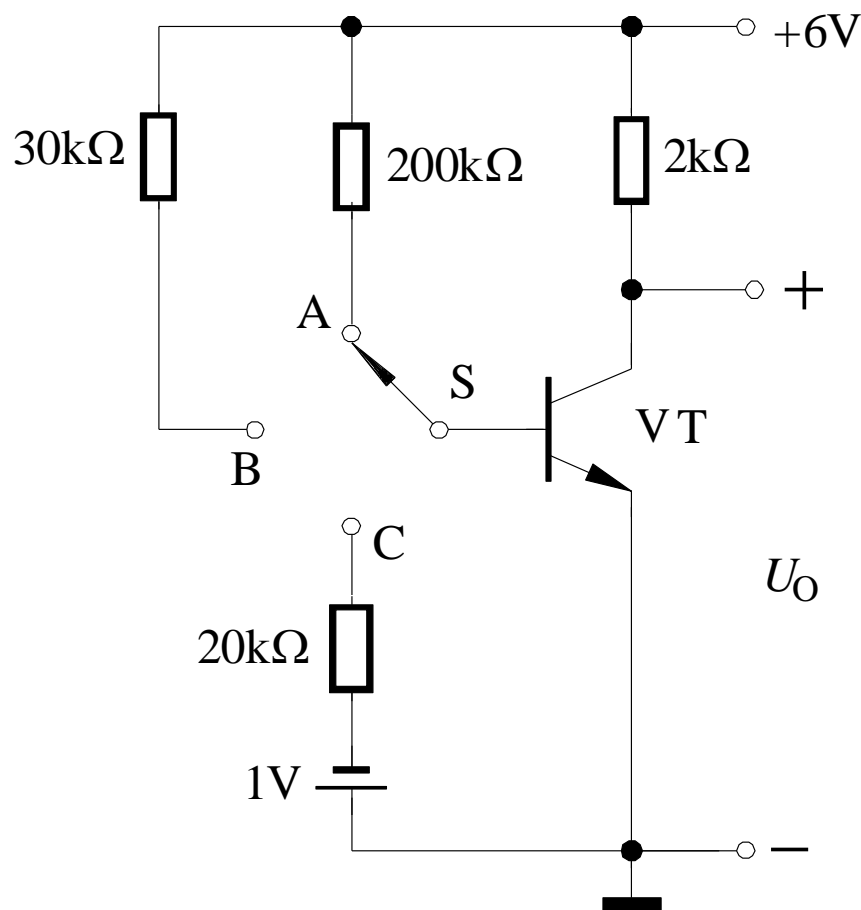
(2) 电流判定方法

计算基极饱和电流，然后判断基极电流和饱和电流的关系。

测得放大电路中六只晶体管的直流电位如图所示。在圆圈中画出管子，并分别说明它们是硅管还是锗管。



在图示电路中，VT为硅晶体管， $\beta = 50$ 。当开关S分别接到A、B、C端时，分析晶体管的工作状态（放大、饱和、截止），并确定 U_O 的近似值。





二、 放大器基础

Basic of Amplifiers

- ◆一套概念
- ◆两个方法
- ◆ n 个电路

概念

(1) 放大的概念

- ※ 放大的本质：能量的控制与转换
- ※ 放大的对象：变化量
- ※ 放大的特征：功率放大
- ※ 放大的基本要求：不失真——放大的前提

概念

(2) 放大电路的性能指标

- ① 放大倍数 (Gain, 增益) ;
- ② 输入电阻 (input impedance) ;
- ③ 输出电阻 (output impedance) ;
- ④ 通频带 (频率响应) ;
- ⑤ 非线性失真;
- ⑥ 最大输出幅度;
- ⑦ 最大输出功率、效率等

概念

(3) 静态和动态的概念、静态工作点

静态：放大电路没有输入信号时，电路中各点的电流和电压是直流信号，称为直流工作状态或静止工作状态，简称静态。

动态：放大电路有输入信号时，电路中的电压和电流随交流信号而变化，称为动态。

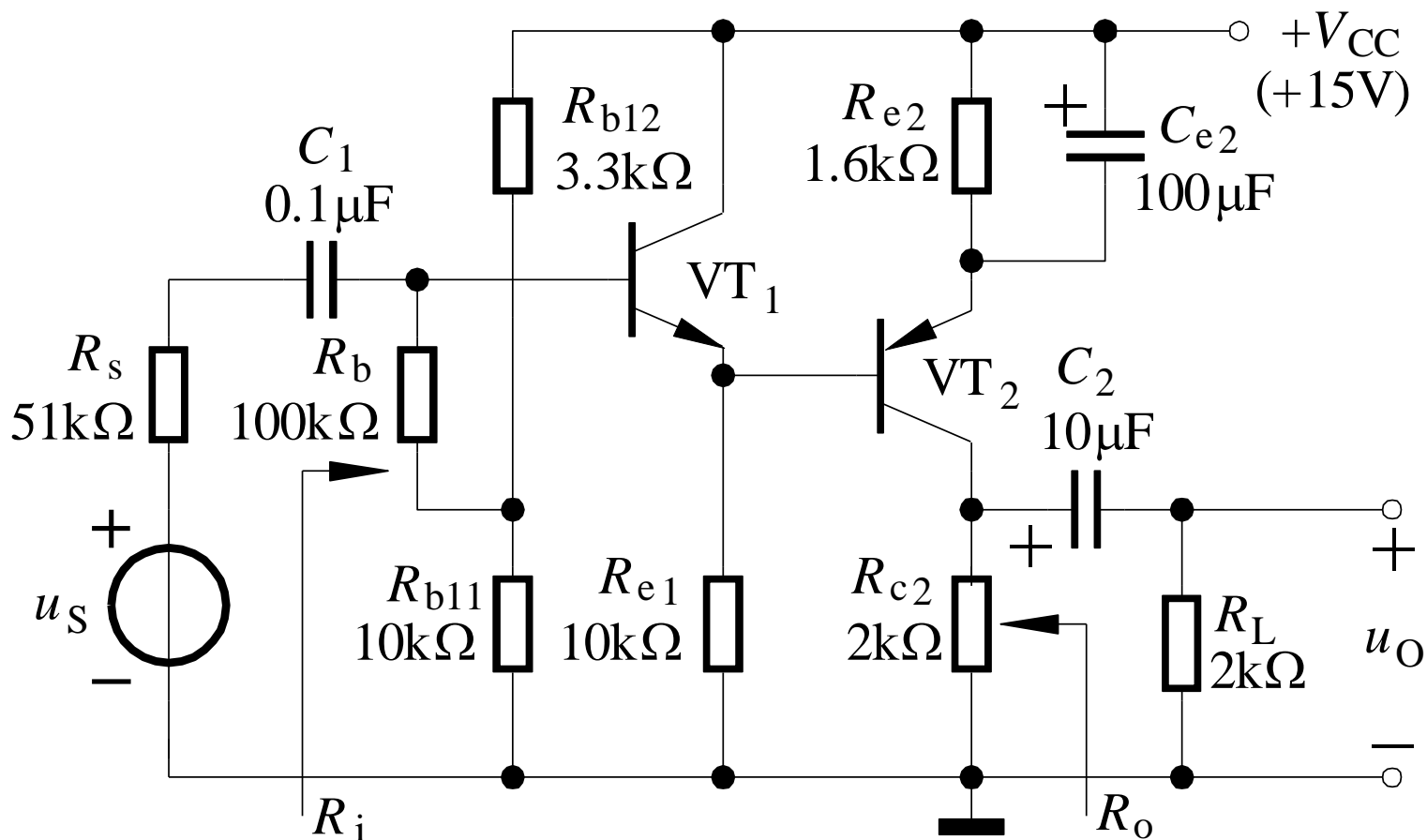
*** 静态工作点 (Quiescent Operating Point) :**

输入电压 u_i 为零时，晶体管各极的电流、b-e间的电压、管压降称为静态工作点 Q ，记作 I_{BQ} 、 I_{CQ} (I_{EQ})、 U_{BEQ} 、 U_{CEQ} 。

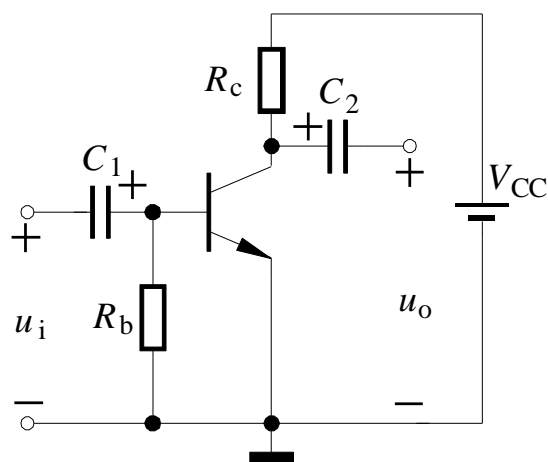
4、放大电路的构成原则和工作原理

- 静态：外加直流电源的极性必须使三极管**发射结正偏，集电结反偏**以保证其工作于放大区，保证**合适的静态工作点**；
- 动态：进得去出的来
- 直流偏置
- 交流组态
- 放大电路正确性判断：三种组态

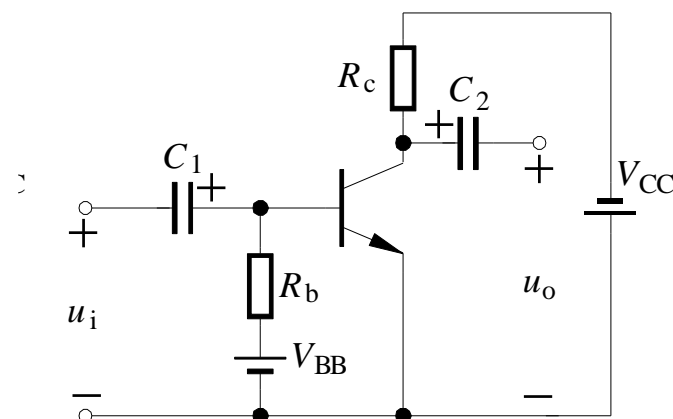
下图所示放大电路中，T1和T2管分别构成（）组态电路。



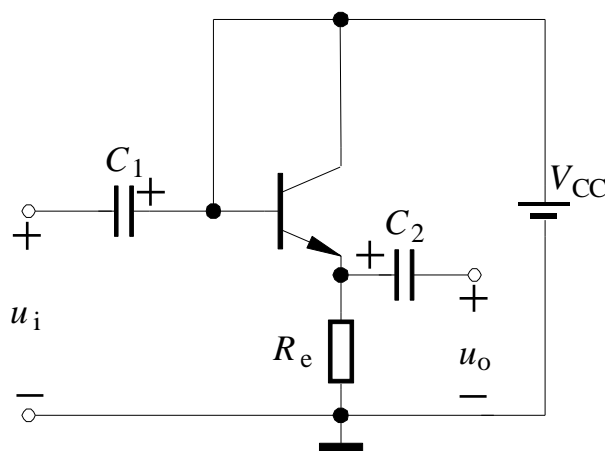
试判断以下电路能否放大交流信号, 说明原因。



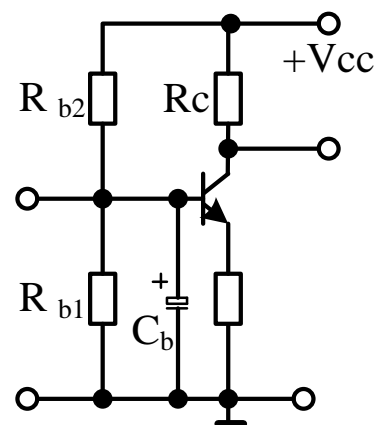
(1)



(2)

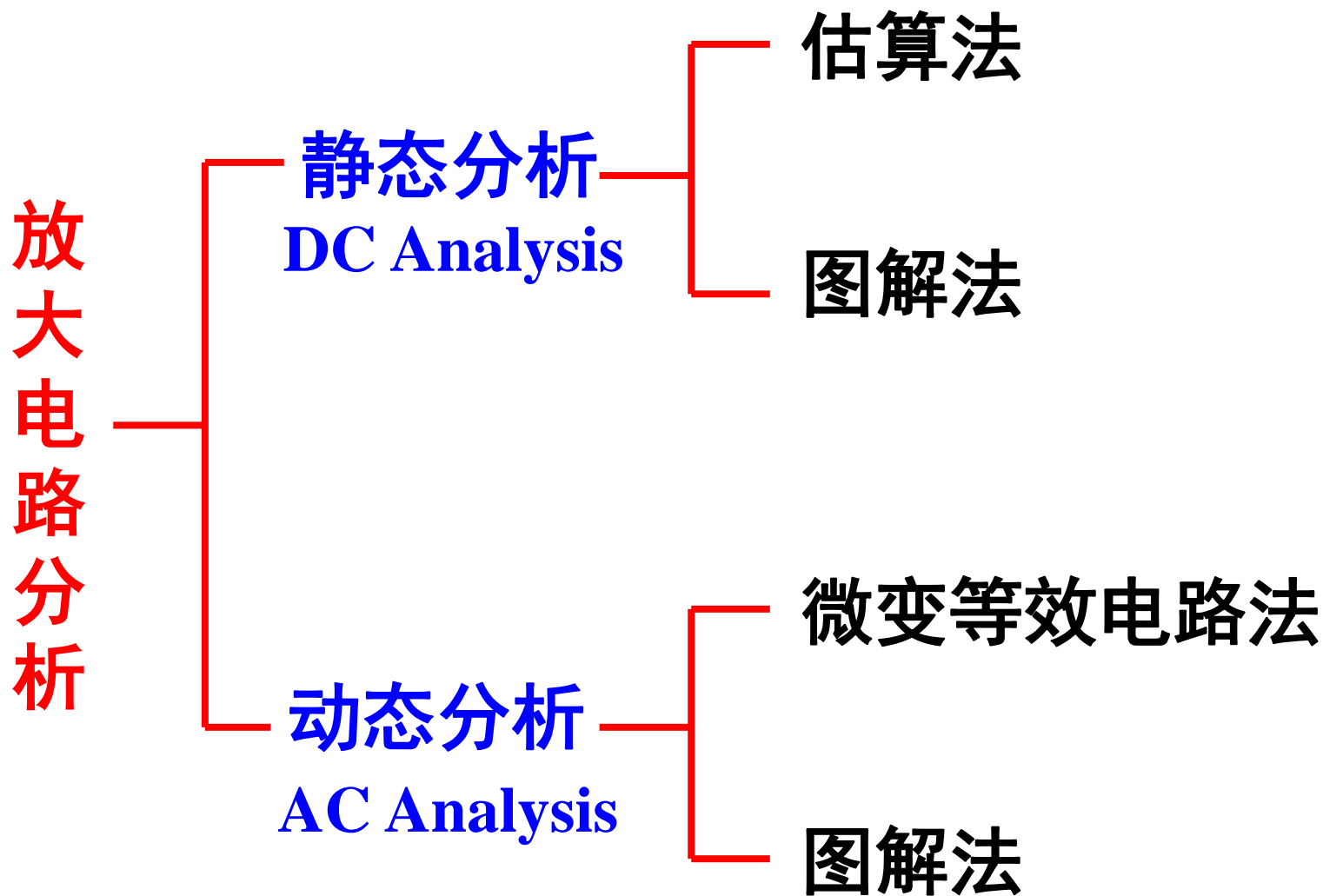


(3)



(h)

基本方法



基本方法

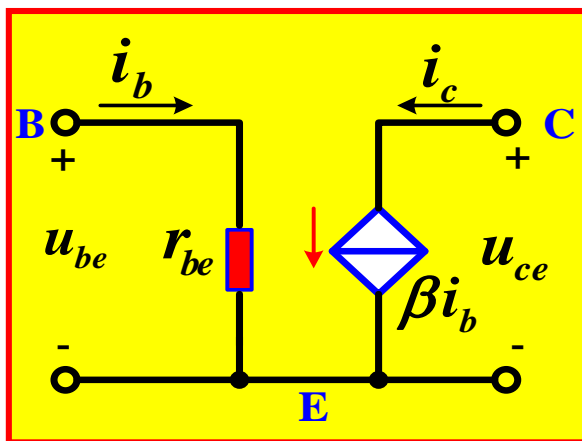
(1) 静态估算法

估算法的一般步骤如下：

- 1、画出放大电路的直流通路
- 2、根据基极回路求 I_B
- 3、由BJT的电流分配关系求 I_C
- 4、由集电极回路求 U_{CE}

基本方法

(2) 微变等效电路法



$$r_{be} = \frac{U_{be}}{I_b} = r_{bb'} + r_{b'e}$$
$$\approx r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{U_T}{I_{EQ}}$$

微变等效电路法基本步骤：

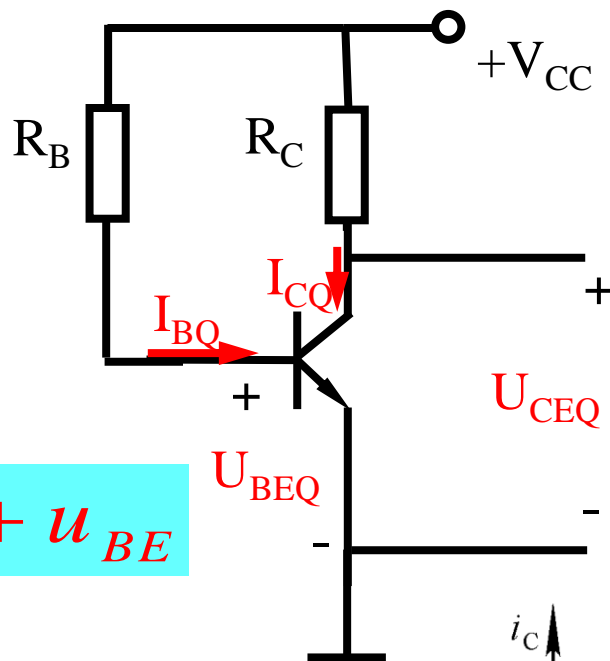
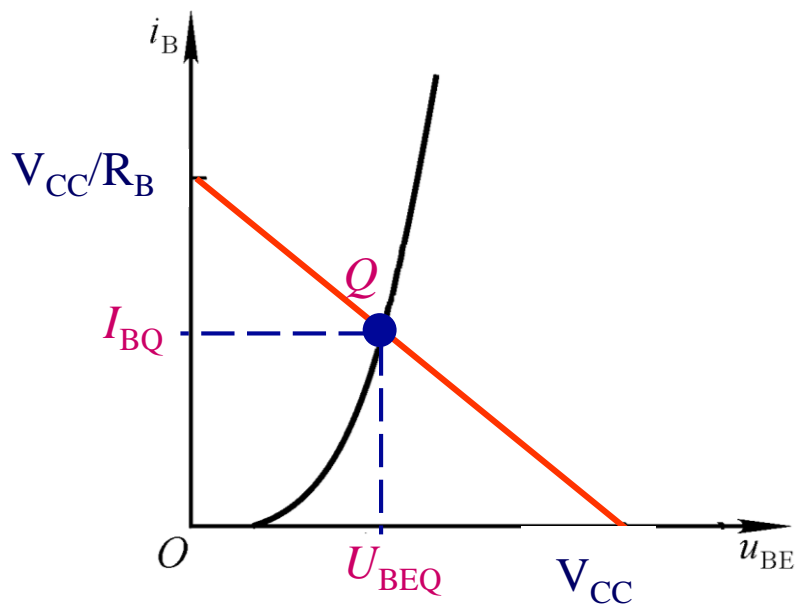
- 1、画出交流通路；
- 2、用h参数模型替换晶体管，得到微变等效电路；
- 3、用线性电路分析方法求解各性能指标；

基本方法

(3) 图解法

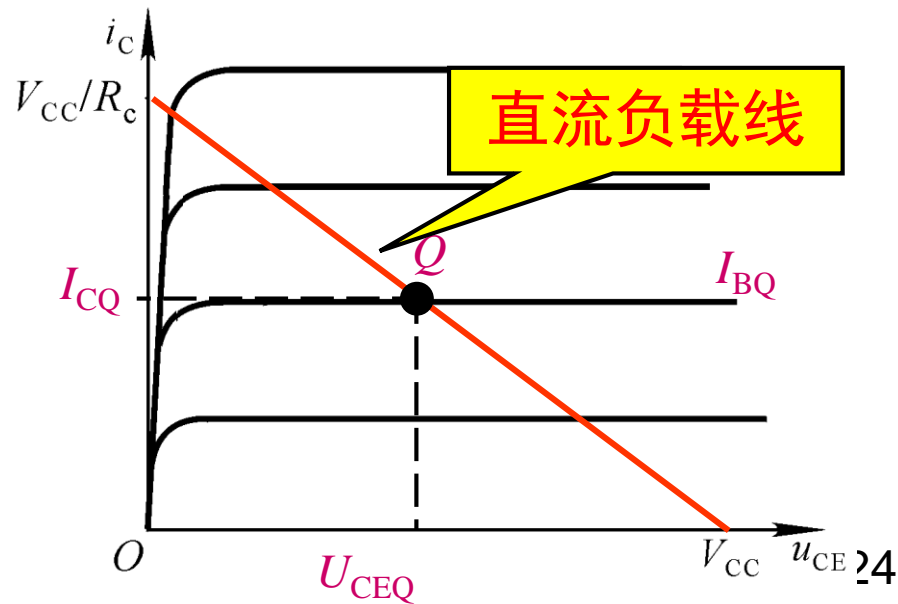
输入回路的电压方程:

$$V_{CC} = i_B R_B + u_{BE}$$



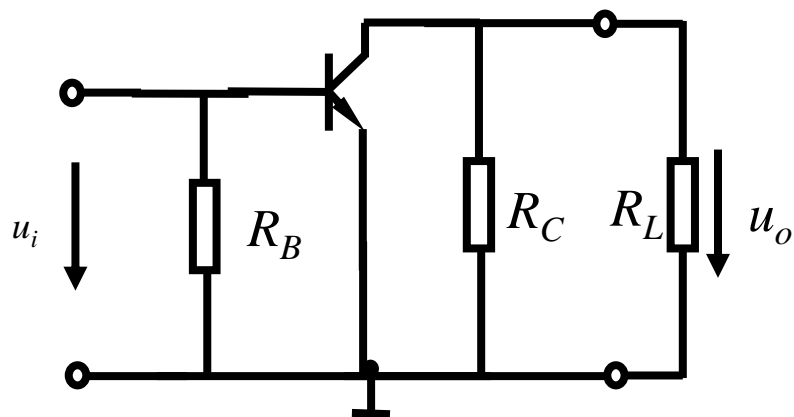
输出回路的电压方程:

$$u_{CE} = V_{CC} - i_C R_C$$



基本方法

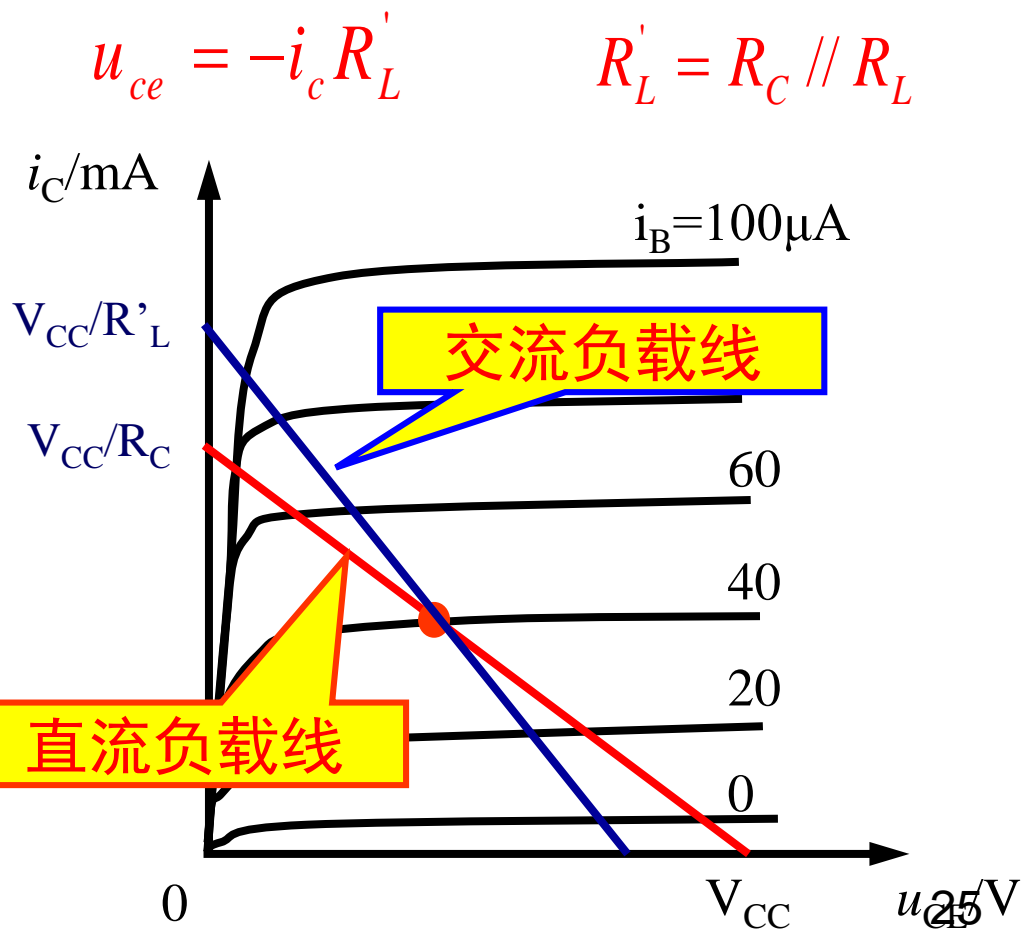
(3) 图解法



交流负载线的两要点：

①斜率为 $-\frac{1}{R'_L}$ ($R'_L = R_L // R_C$)

②经过Q点($u_i=0$ 时)



基本方法

(4) 非线性失真分析方法

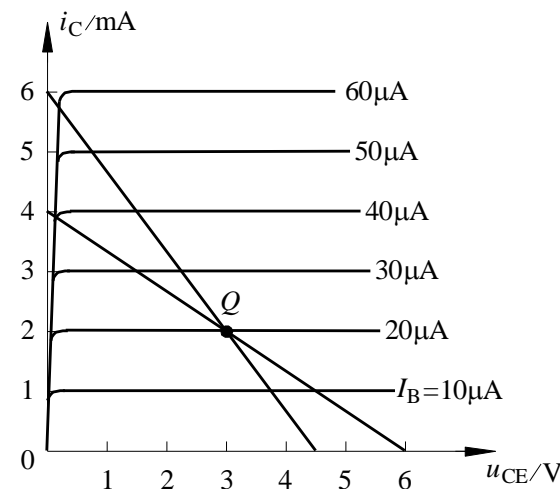
非线性失真的判别原则：

- ✓ 静态工作点Q过高——饱和失真
- ✓ 静态工作点Q过低——截止失真

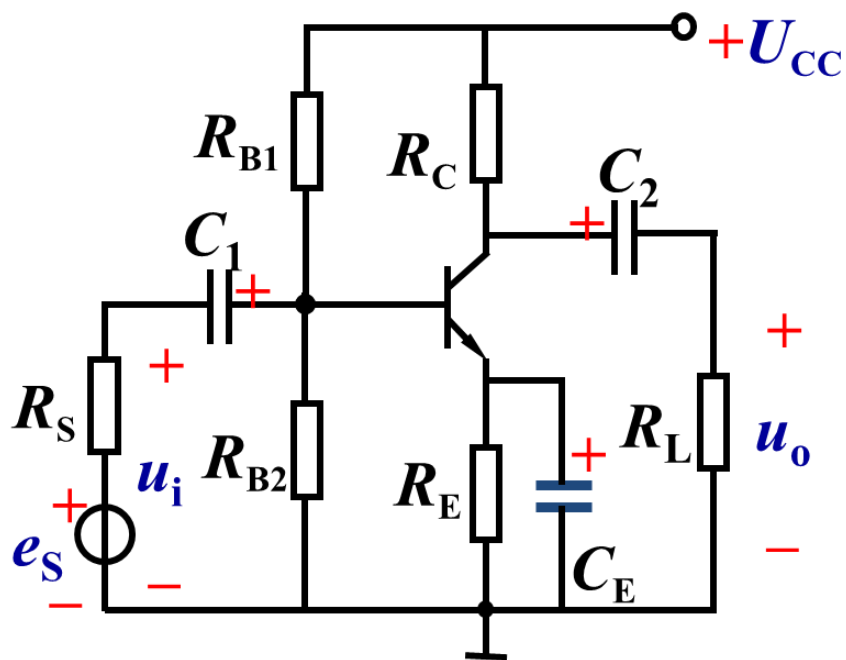
消除失真的途径：

- ✓ 尽量将Q点设置在交流负载线的中间位置
- ✓ 减小输入信号的幅度

现象—原因—消除方法



8、静态工作点稳定电路



- 稳定静态工作点原理
- 静态分析和动态分析
- 旁路电容的作用

9、其他组态放大电路

	共射极电路	共集电极电路	共基极电路
电路图			
电压增益 A_v	$A_v = -\frac{\beta R'_L}{r_{be} + (1 + \beta)R_e}$ ($R'_L = R_c \parallel R_L$)	$A_v = \frac{(1 + \beta)R'_L}{r_{be} + (1 + \beta)R'_L}$ ($R'_L = R_e \parallel R_L$)	$A_v = \frac{\beta R'_L}{r_{be}}$ ($R'_L = R_e \parallel R_L$)
v_o 与 v_i 的相位关系	反相	同相	同相
最大电流增益 A_i	$A_i \approx \beta$	$A_i \approx 1 + \beta$	$A_i \approx \alpha$
输入电阻	$R_i = R_{b1} \parallel R_{b2} \parallel [r_{be} + (1 + \beta)R_e]$	$R_i = R_b \parallel [r_{be} + (1 + \beta)R'_L]$	$R_i = R_e \parallel \frac{r_{be}}{1 + \beta}$
输出电阻	$R_o \approx R_c$	$R_o = \frac{r_{be} + R'_s}{1 + \beta} \parallel R_e$ ($R'_s = R_s \parallel R_b$)	$R_o \approx R_c$
用 途	多级放大电路的中间级	输入级、中间级、输出级	高频或宽频带电路

11、多级放大电路

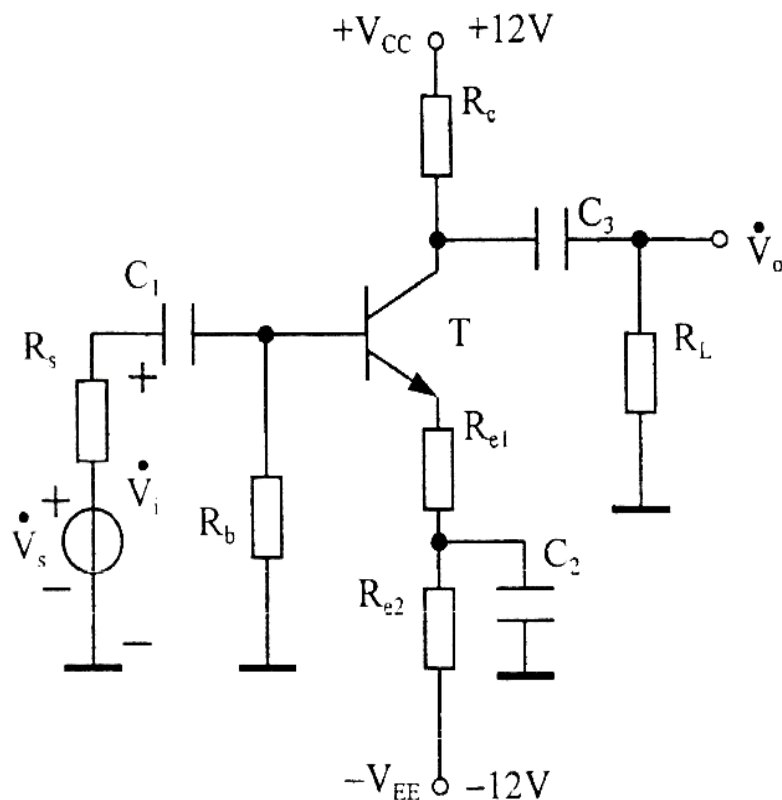
- 耦合方式（优缺点）
- 静态分析
- 动态分析

后级作为前级的负载；前级作为后级的信号源

- ① 第 $i+1$ 级放大电路的输入电阻应视为第 i 级放大电路的负载电阻；
- ② 第 $i-1$ 级放大电路的输出电阻应视为第 i 级放大电路的信号源内阻；

共射放大电路如图所示，其中 β 和 U_{BE} 为已知，电容理想。

- (1) 试画出直流通路，确定电路的静态工作点（写出 I_{BQ} 、 I_{CQ} 和 U_{CEQ} 的表达式）
- (2) 画出该放大器的微变等效电路；
- (3) 求出该放大器的输入电阻、输出电阻、电压增益 A_u （写表达式）





三、放大电路的 频率响应

Frequency Response

概念

1. 频率响应的相关概念

(1) 幅度失真和相位失真

(2) 频率响应的概念

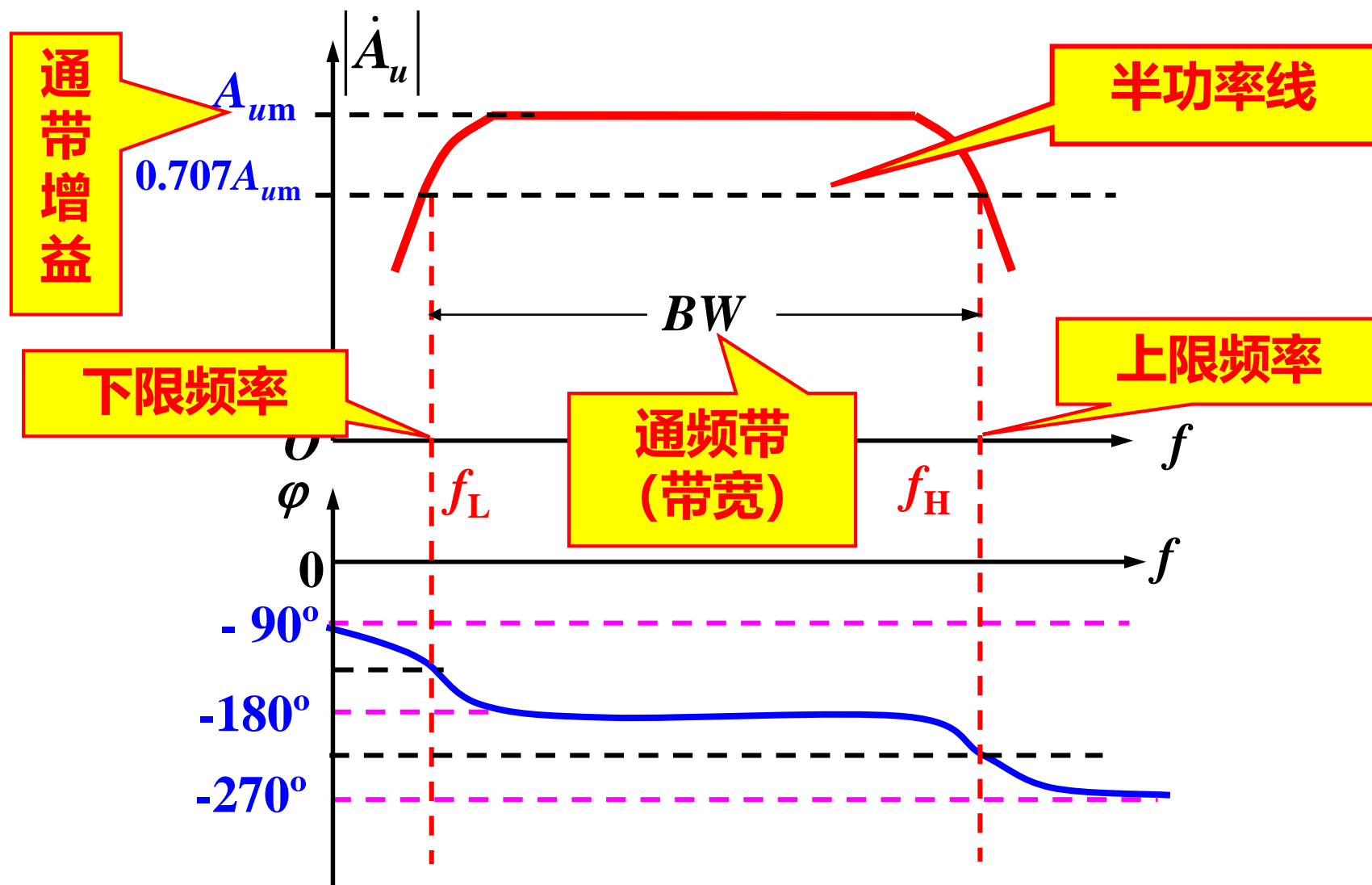
放大器的增益与频率的关系可表示为：

$$\dot{A}u = |\dot{A}u(f)| \angle \varphi(f)$$

$|\dot{A}u(f)|$ _____ 增益的幅值与频率 f 的函数关系，称为**幅频响应**

$\angle \varphi(f)$ _____ 增益的相位与频率 f 的函数关系称为**相频响应**

概念



典型的单管共射放大电路的幅频特性和相频特性

概念

(3) 频率响应的波特图 (Bode Plot)

- ① 横坐标改线性增长为指数增长，以对数坐标表示；
- ② 幅频纵坐标以分贝形式表示；
- ③ 曲线做直线化处理。

□幅频特性曲线：

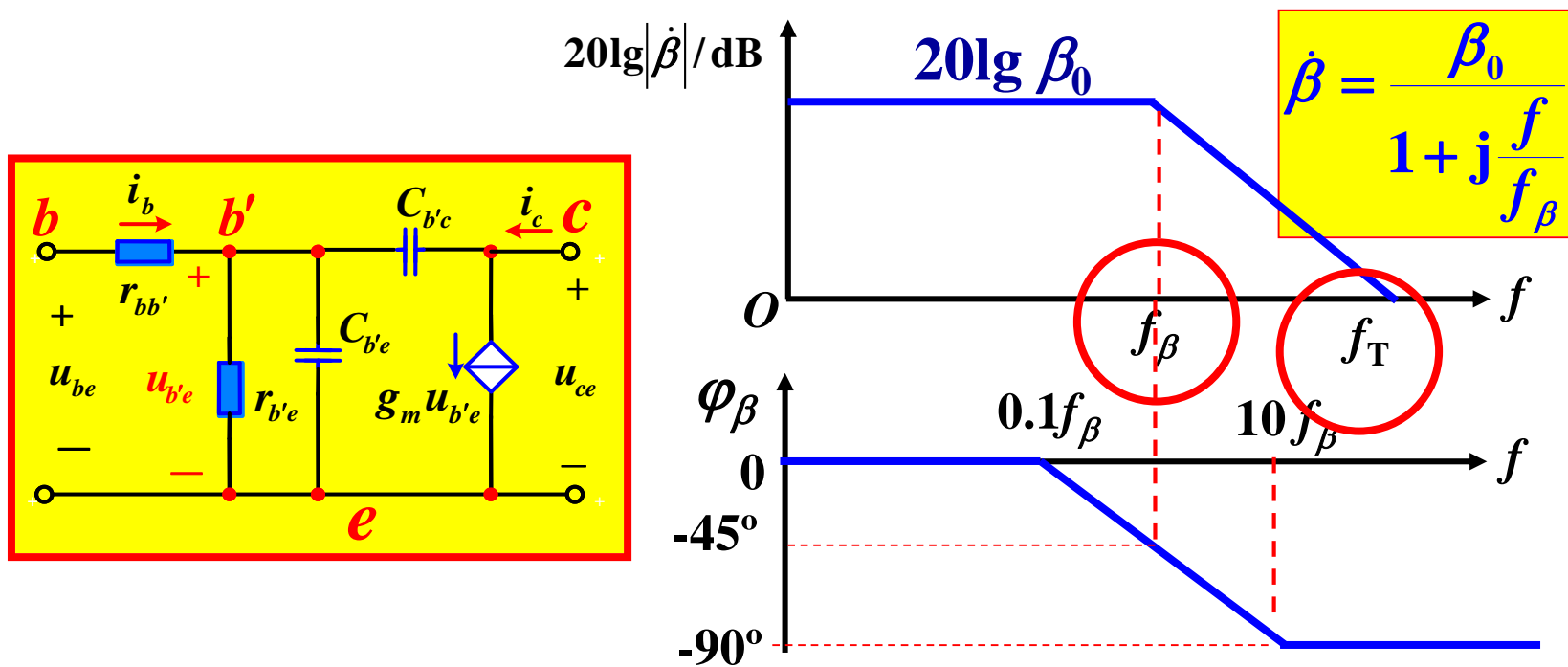
横轴 (f) — 对数坐标；纵轴 (\dot{A}_u) — $20\lg |\dot{A}_u|$

□相频特性曲线：

横轴 (f) — 对数坐标；纵轴 — 相角 (φ)

概念

(4) 晶体管频率参数



1. $f_T = \beta_0 f_\beta$, $f_\alpha = (1 + \beta_0) f_\beta$;
2. $f_\beta < f_T < f_\alpha$

分析方法

2、单管共射电路的频率响应分析方法

(1) 分析思路

中频段： C_I 短路，极间电容开路。

低频段：考虑 C_I 的影响，极间电容开路。

高频段：考虑极间电容的影响， C_I 短路。

分析方法

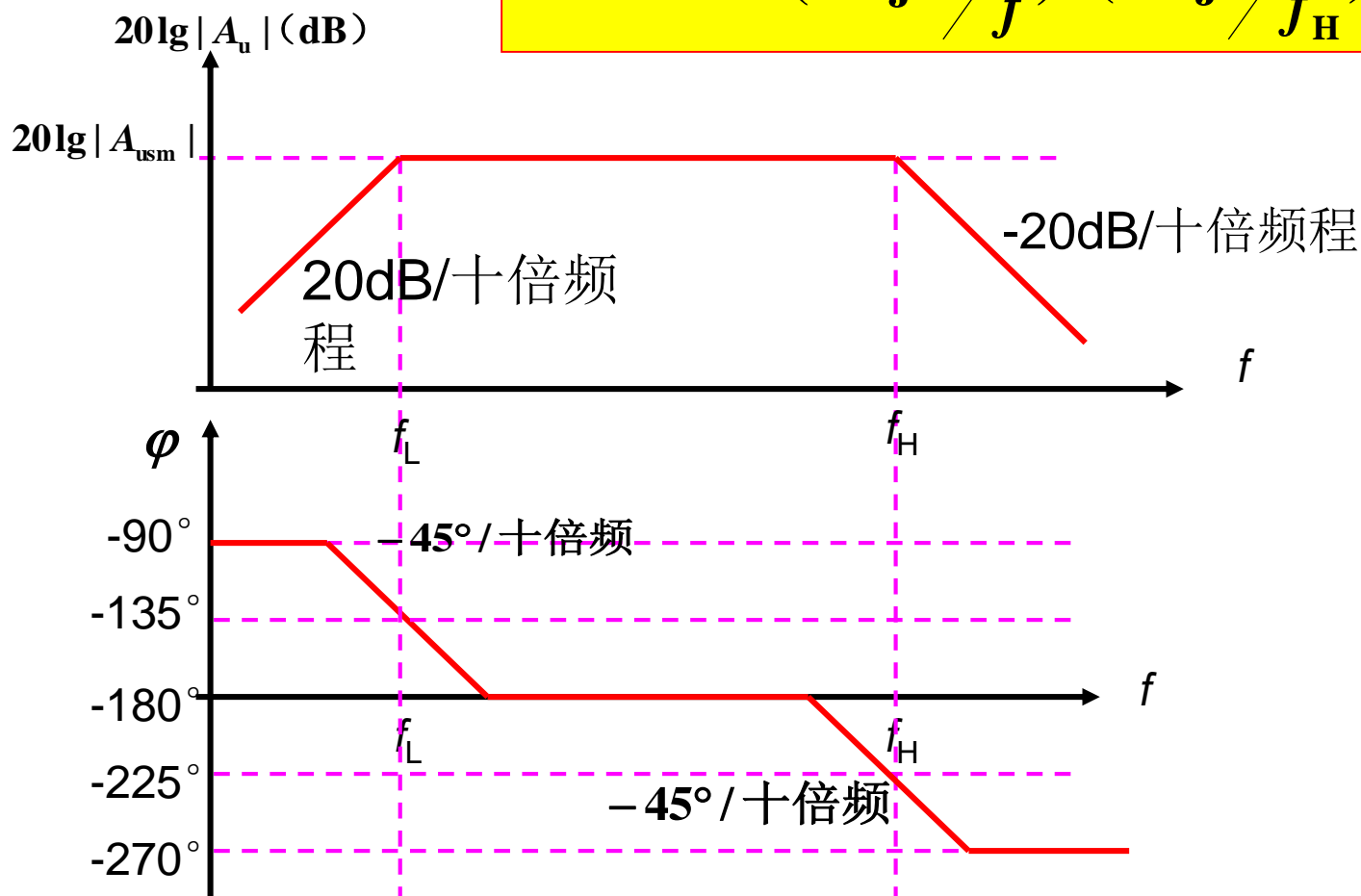
	低通	高通
截止频率 f_c	f_H	f_L
电压增益	$\dot{A}_u(s) = \frac{1}{1 + j \frac{f}{f_H}}$	$\dot{A}_u(s) = \frac{1}{1 - j \frac{f_L}{f}}$
$f > f_c$	不通	通
$f < f_c$	通	不通
$f \ll 0.1f_c$	0°	相位超前 90°
$f \gg 10f_c$	相位滞后 90°	0°

分析方法

2、单管共射电路的频率响应分析方法

(3) 频率响应

$$\dot{A}_{us} = \dot{A}_{usm} \cdot \frac{1}{(1 - j f_L / f)} \cdot \frac{1}{(1 + j f / f_H)}$$





四、功率放大电路

Power Amplifiers

概念

1.效率 (η)

$$\eta = \frac{P_{o\max}}{P_D} \times 100\%$$

$P_{o\max}$: 负载上得到的交流信号功率。

P_D : 电源提供的直流功率。

概念

2.主要指标参数

最大输出功率

$$P_{o\max} = \frac{u_{o\max}}{\sqrt{2}} \frac{i_{o\max}}{\sqrt{2}} = \frac{1}{2} u_{o\max} i_{o\max} = \frac{u_{o\max}^2}{2R_L} = \frac{1}{2} i_{o\max}^2 R_L$$

电源输出功率

$$P_D = \frac{1}{T} \int_0^T V_{DD} I_c(t) dt = \frac{1}{T} V_{DD} \int_0^T I_c(t) dt$$

管耗

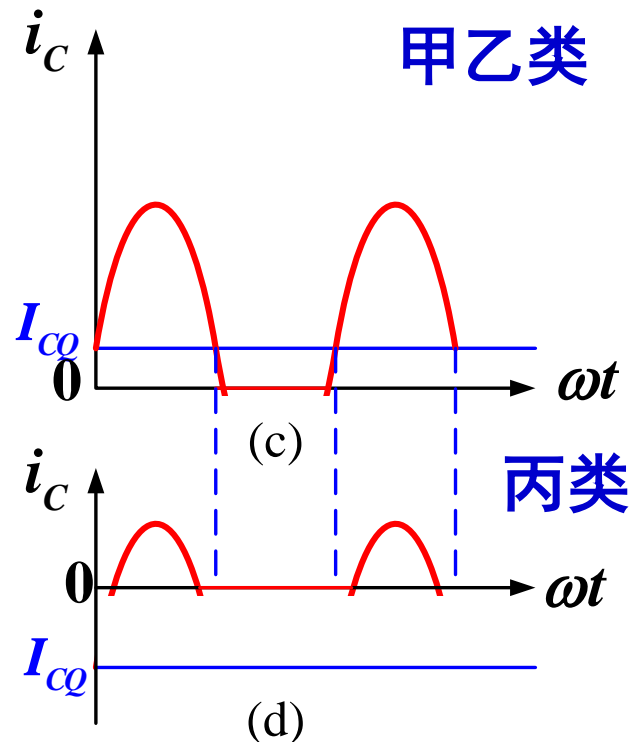
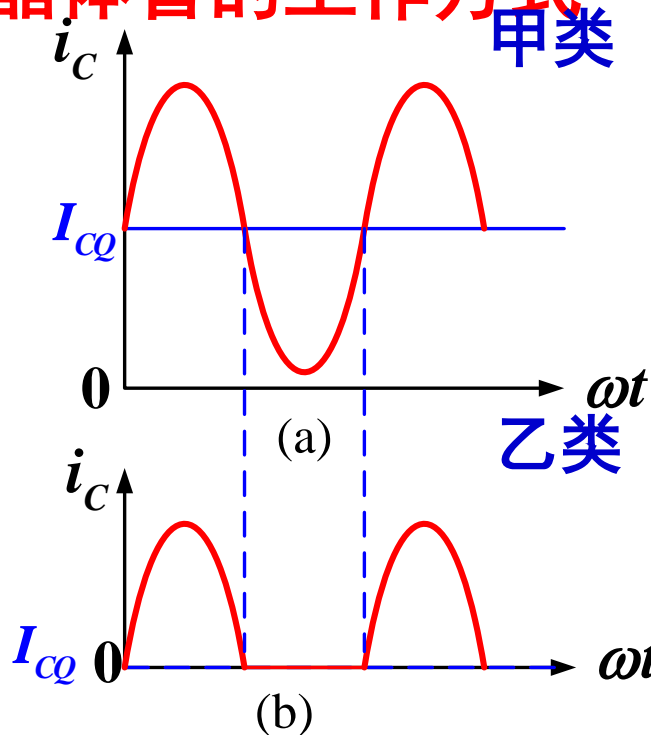
$$P_C = P_D - P_{o\max}$$

效率

$$\eta = \frac{\text{最大输出功率 } p_{o\max}}{\text{直流电源提供的功率 } P_D} = \frac{p_{o\max}}{p_{o\max} + P_C}$$

概念

3. 晶体管的工作方式



甲类：功率管在一个周期内导通（如小信号放大）。

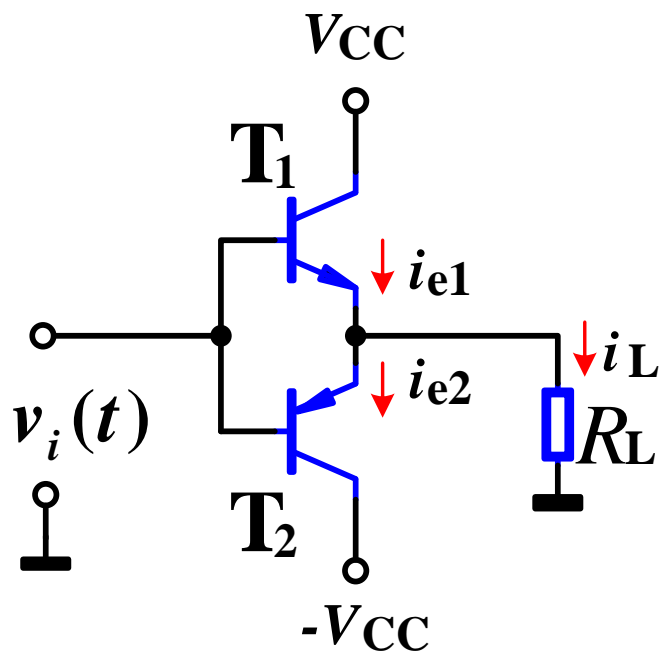
乙类：功率管仅在半个周期内导通（如射随器“互补”工作）。

甲乙类：管子在大于半个周期小于一个周期内导通（交越失真）。

丙类：功率管小于半个周期内导通。

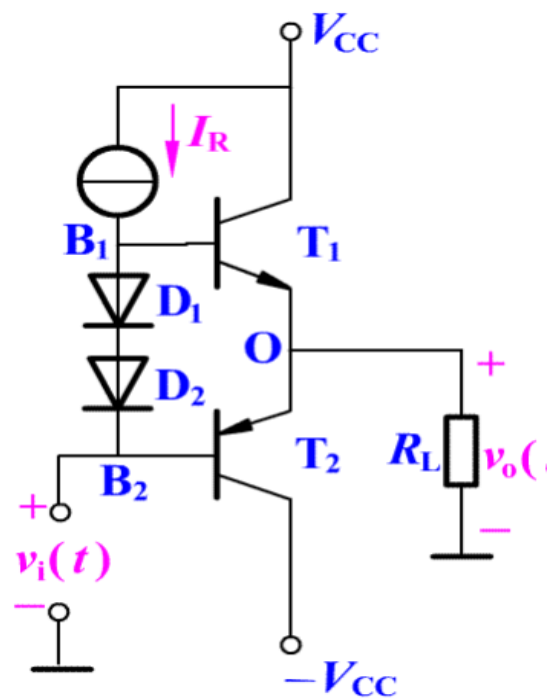
实际电路分析

(1) 乙类互补输出电路



(2) 交越失真

- 产生原因
- 现象
- 消解电路

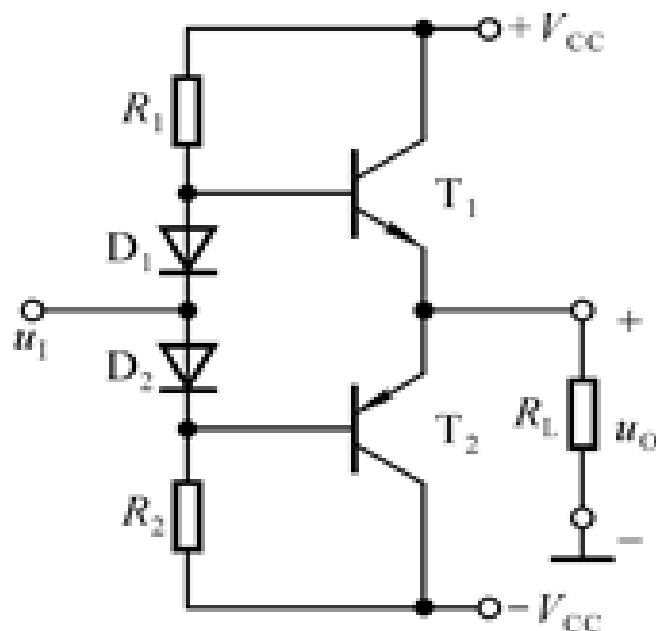


(a)

1. 在图所示电路中，已知 $V_{CC} = 16V$ ， $R_L = 4\Omega$ ， T_1 和 T_2 管的饱和管压降 $|U_{CES}| = 2V$ ，输入电压足够大。试问：

(1) 最大输出功率 P_{om} 和效率 η 各为多少？

(2) 晶体管的最大功耗 P_{Tmax} 为多少？





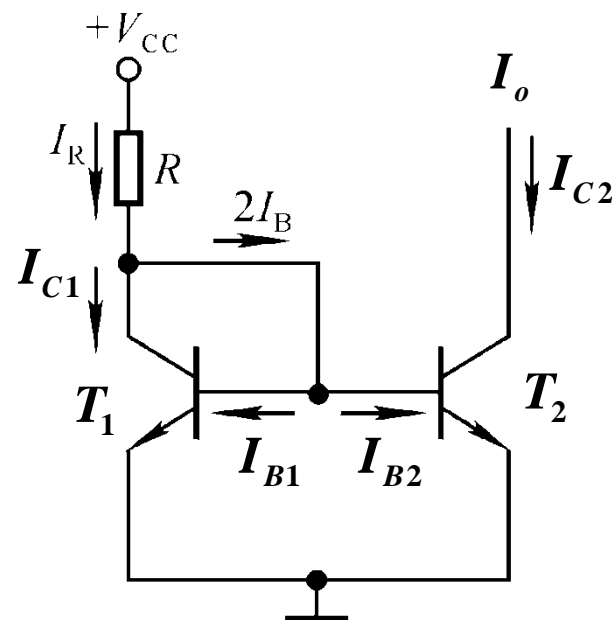
五、集成运算放大电路基础

Basic of Integrated Operational Amplifier

电 路

1、恒流源

- (1) 电路结构
- (2) 各种恒流源的特点
- (3) 参考电流的寻找和计算
- (4) 镜像电流源和比例电流源的分析
- (5) 恒流源的应用



$$I_O = I_{C2} = \frac{I_R}{1 + \frac{2}{\beta}} \approx I_R$$

2、差分放大电路

(1) 电路结构

(2) 工作原理

(3) 共模抑制比

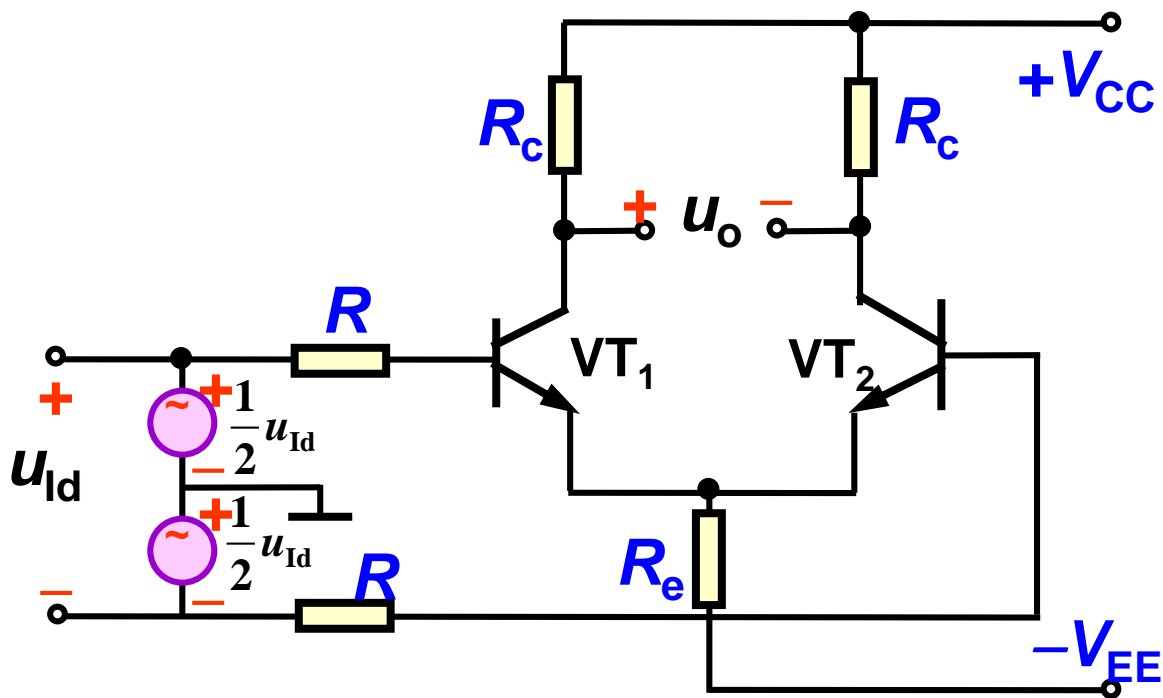
$$K_{\text{CMR}} = \frac{|A_d|}{|A_c|}$$

(4) 典型差分放大电路

-

电路

2、差分放大电路



(1) 静态分析

(2) 四种连接方式

差分放大电路的四种接法

差分放大电路四种接法的性能比较

接法 性能	差分输入 双端输出	差分输入 单端输出	单端输入 双端输出	单端输入 单端输出
A_d	$-\frac{\beta(R_c // \frac{R_L}{2})}{R + r_{be}}$	$-\frac{1}{2} \frac{\beta(R_c // R_L)}{R + r_{be}}$	$-\frac{\beta(R_c // \frac{R_L}{2})}{R + r_{be}}$	$-\frac{1}{2} \frac{\beta(R_c // R_L)}{R + r_{be}}$
K_{CMR}	很高	较高	很高	较高
R_{id}	$2(R + r_{be})$	$2(R + r_{be})$	$2(R + r_{be})$	$2(R + r_{be})$
R_o	$2R_c$	R_c	$2R_c$	R_c



六、电子电路中的反馈

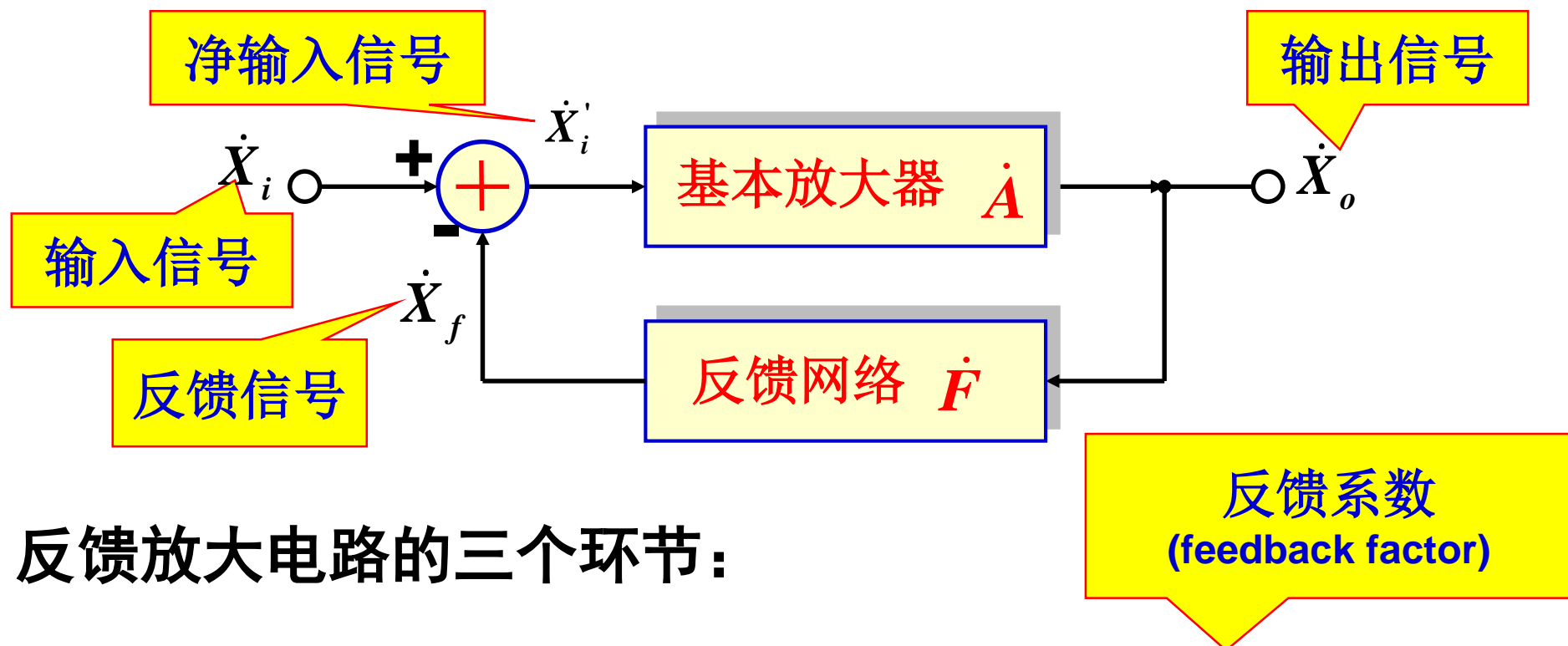
Feedback

要点

1. **What:** 反馈的基本概念
2. **Which:** 判断电路中有无反馈及反馈的类型
3. **Why:** 负反馈对放大电路性能的影响
4. **How:** 根据需求引入合适的反馈

要点

1. What: 反馈的基本概念



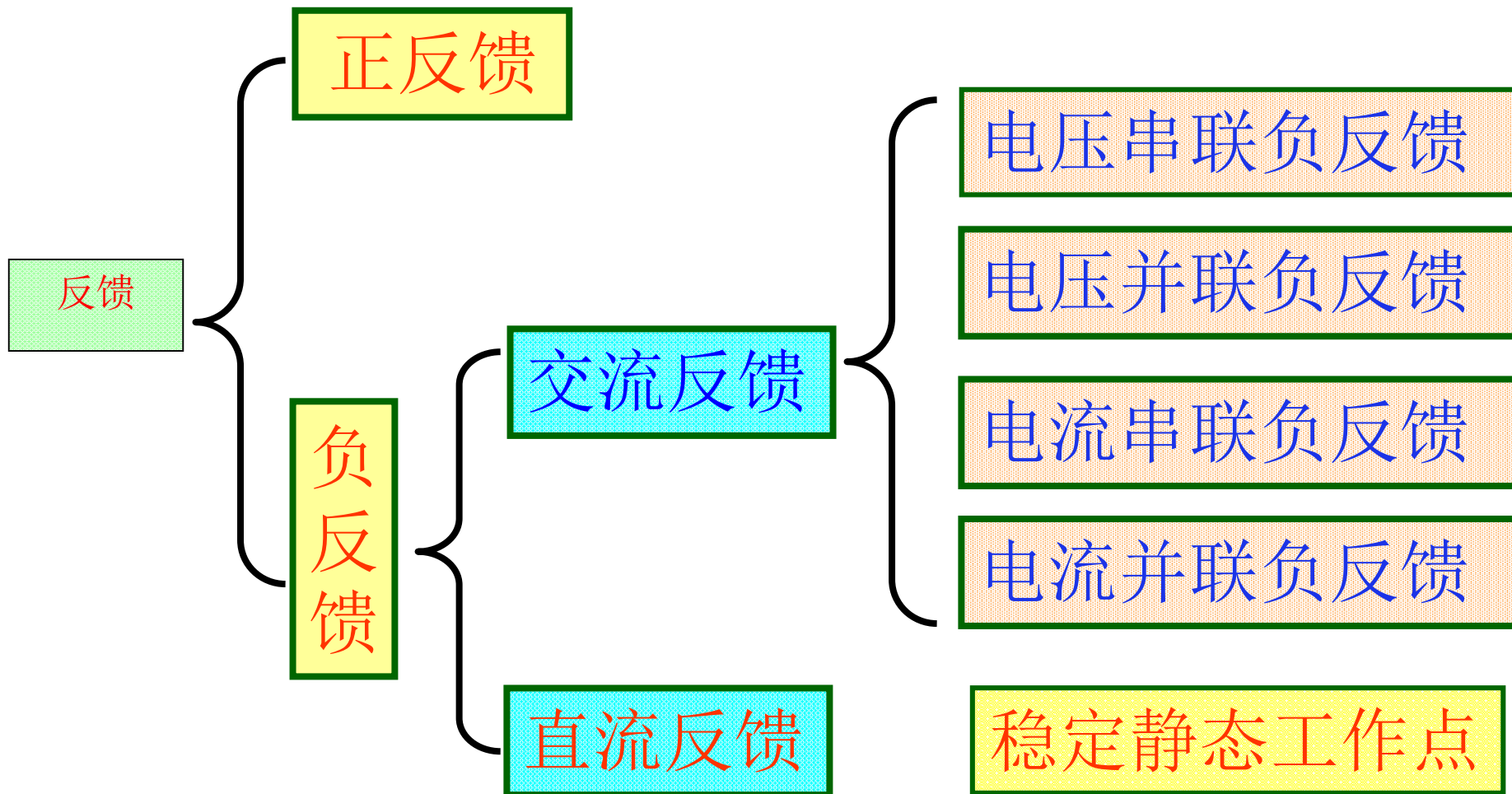
反馈放大电路的三个环节:

基本放大电路 $\dot{A} = \dot{X}_o / \dot{X}'_i$ 反馈电路 $\dot{F} = \dot{X}_f / \dot{X}_o$

开环增益
(open-loop gain)

比较环节 $\dot{X}'_i = \dot{X}_i - \dot{X}_f$

概念体系



概念

(3) 反馈放大电路增益的一般表达式

闭环增益 (closed-loop gain) :

$$\dot{A}_f = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i} = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}}$$

环路增益(loop gain):

$$\dot{T} = \dot{X}_f / \dot{X}_i' = \dot{A}\dot{F}$$

反馈深度(feedback depth):

$$|1 + \dot{A}\dot{F}| = |1 + \dot{T}|$$

反馈深度 (或环路增益) 是衡量反馈强弱的一项重要指标。其值直接影响电路性能。

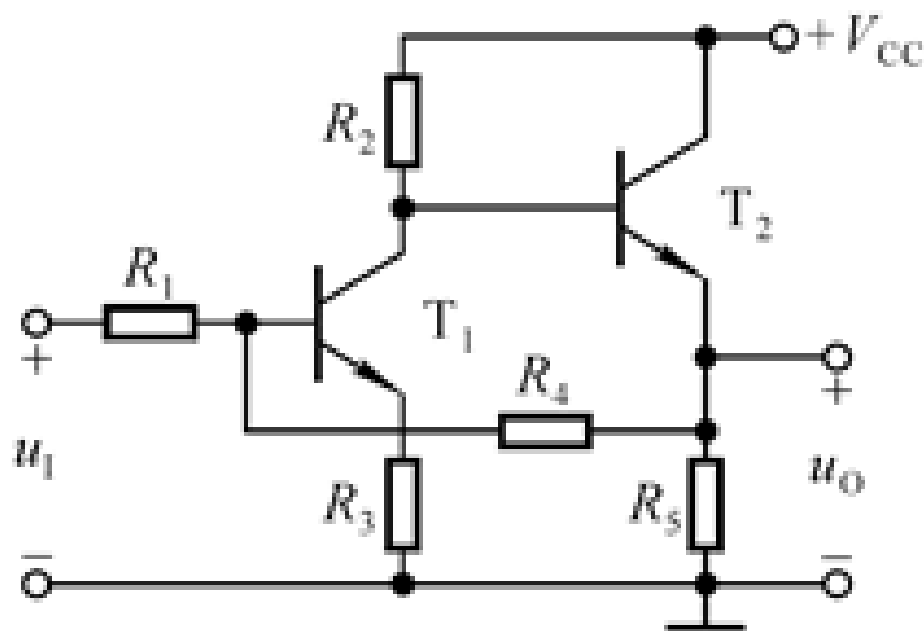
1.4 四种类型负反馈放大器增益表达式

四种负反馈组态的电压放大倍数、反馈系数之比较

	输出信号	反馈信号	开环放大倍数	反馈系数	闭环放大倍数
电压串联式	\dot{U}_o	\dot{U}_f	电压放大倍数 $\dot{A}_{uu} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i}$	$\dot{F}_{uu} = \frac{\dot{U}_f}{\dot{U}_o}$	电压放大倍数
电压并联式	\dot{U}_o	\dot{I}_f	转移电阻 $\dot{A}_{ui} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_i} (\Omega)$	$\dot{F}_{iu} = \frac{\dot{I}_f}{\dot{U}_o} (S)$	互阻放大倍数
电流串联式	\dot{I}_o	\dot{U}_f	转移电导 $\dot{A}_{iu} = \frac{\dot{I}_o}{\dot{U}_i} (S)$	$\dot{F}_{ui} = \frac{\dot{U}_f}{\dot{I}_o} (\Omega)$	互导放大倍数
电流并联式	\dot{I}_o	\dot{I}_f	电流放大倍数 $\dot{A}_{ii} = \frac{\dot{I}_o}{\dot{I}_i}$	$\dot{F}_{ii} = \frac{\dot{I}_f}{\dot{I}_o}$	电流放大倍数

分析方法

(1) 负反馈类型判别技巧



- 反馈的有无——找联系
- 反馈的交直流——电容观察法
- 反馈的极性——瞬时极性法
- 反馈的组态——看端子、输出短路法

分析方法

(2) 深度负反馈下的增益估算

1. 确定反馈类型

2. 找出反馈网络

3. 根据反馈类型确定 F 的含义，并计算 F ：

若串联反馈：将输入端交流开路

若并联反馈：将输入端交流短路

} 计算此时 X_o
产生的 X_f

则反馈系数

$$F = X_f / X_o$$

4. 计算 $A_f = 1/F$ ；

5. 确定 $A_f = X_o/X_s$ 含义，将 A_f 转换成 $A_{uf} = U_o/U_s$

分析方法

(3) 负反馈对电路性能的影响

① 降低增益

② 减小增益灵敏度（或提高增益稳定性）

③ 改变电路输入、输出电阻

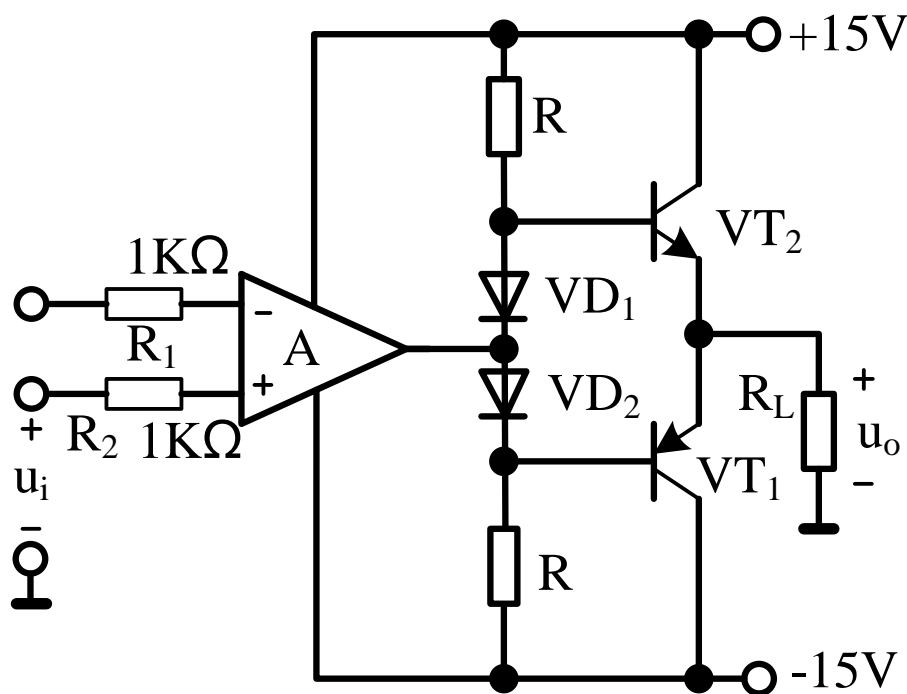
	电压串联	电流串联	电压并联	电流并联
r_i	增高	增高	减低	减低
r_o	减低	增高	减低	增高

④ 减小频率失真（或扩展通频带）

⑤ 减小非线性失真

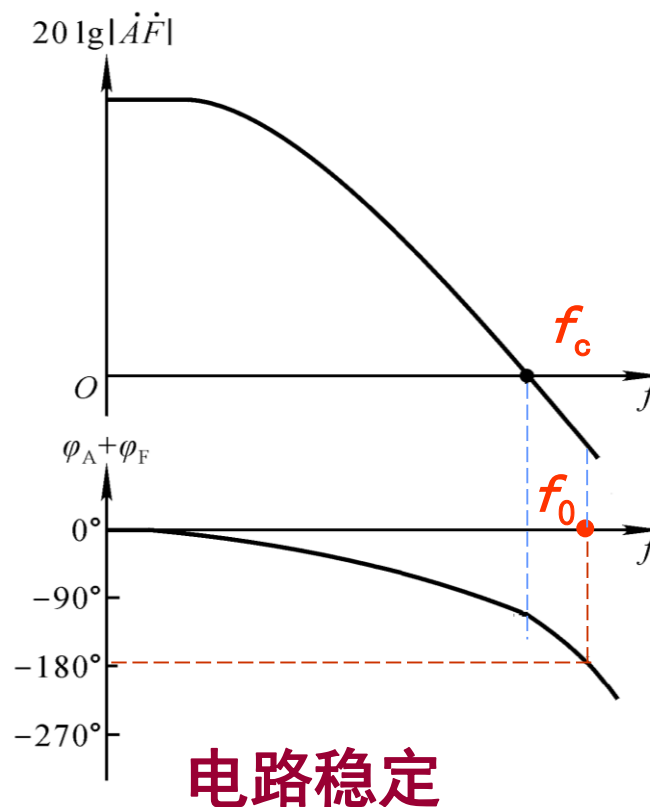
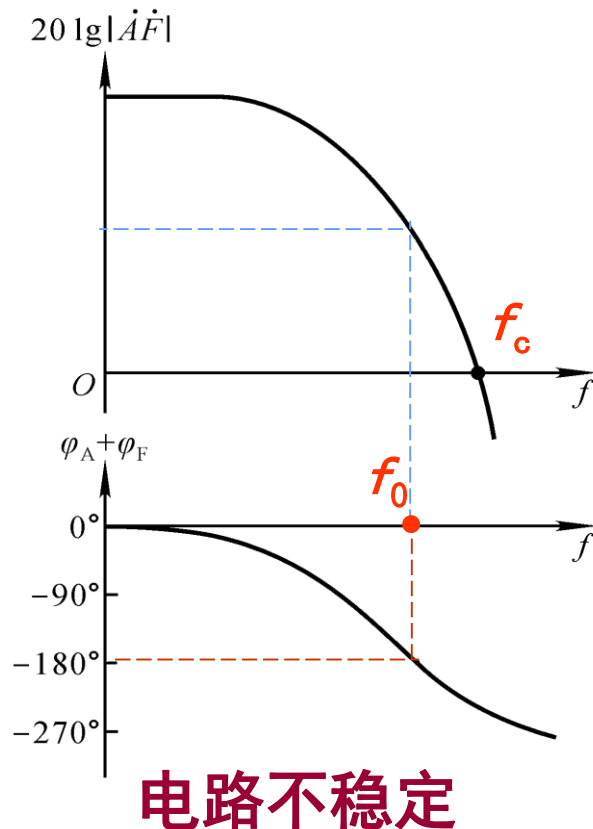
(4) 按需引入反馈

由运放组成的放大电路如图示。为了使 A_u 稳定, R_o 小,应引入什么样的反馈?请在图中画出来。若要求电压放大倍数 $|A_u|=20$, 选用元件的数值要多大?



分析方法

(4) 稳定性分析



$f_0 < f_c$, 电路不稳定, 会产生自激振荡;

$f_0 > f_c$, 电路稳定, 不会产生自激振荡。

电路设计

按需引入反馈

一. 在电路输出端

若要求电路 v_o 稳定或 R_o 小 \Rightarrow 应引入电压负反馈。

若要求电路 i_o 稳定或 R_o 大 \Rightarrow 应引入电流负反馈。

二. 在电路输入端

若要求 R_i 大或索取信号源电流小 \Rightarrow 引入串联负反馈。

若要求 R_i 小或索取信号源电流大 \Rightarrow 引入并联负反馈。

三. 反馈效果与信号源内阻 R_s 的关系

若采用 R_s 较小的电压源激励 \Rightarrow 应引入串联负反馈

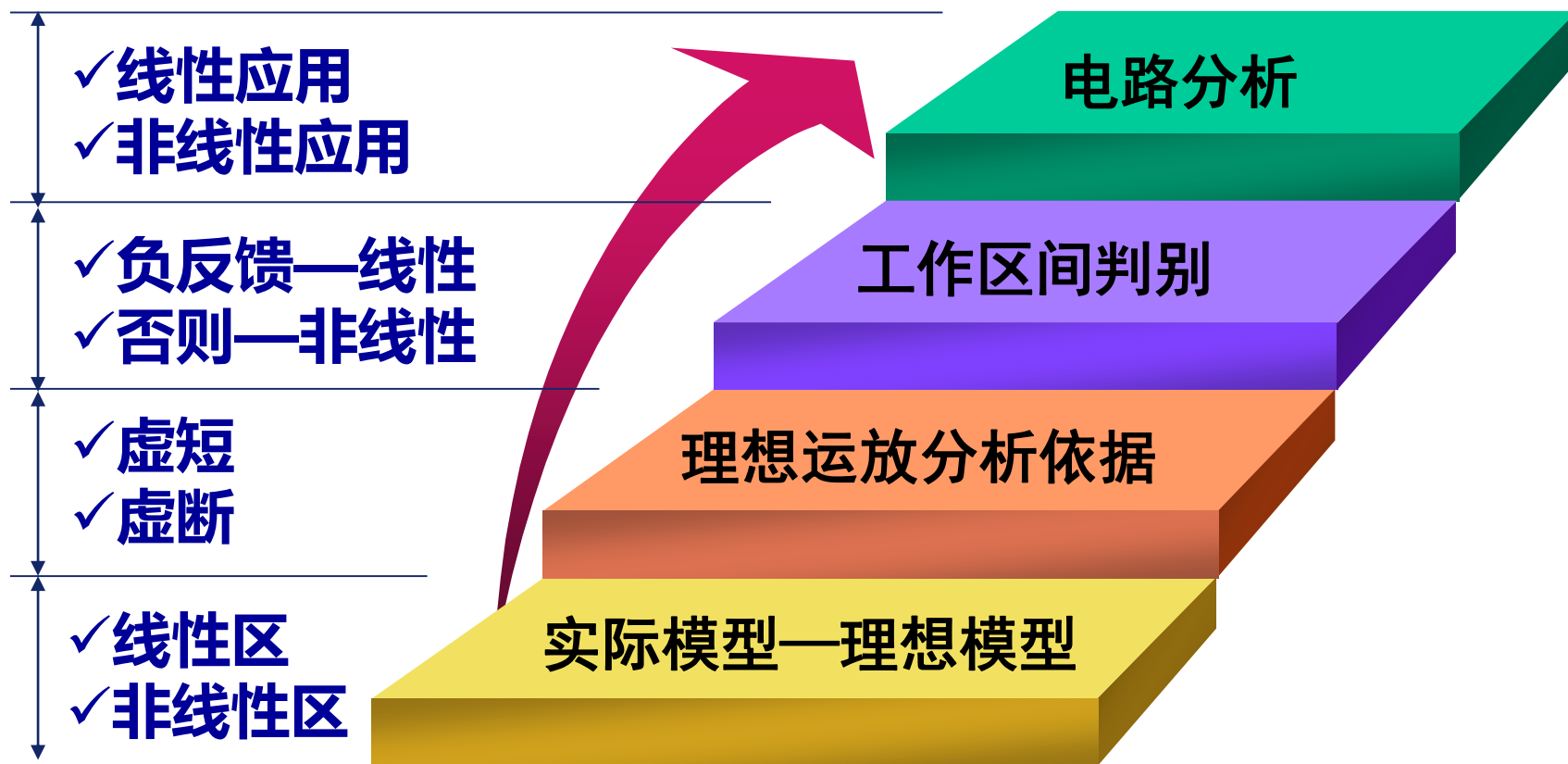
若采用 R_s 较大的电流源激励 \Rightarrow 应引入并联负反馈



七、集成运放的应用

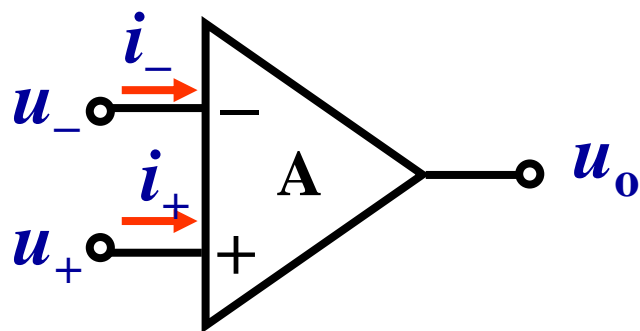
Op-Amp Applications

要点

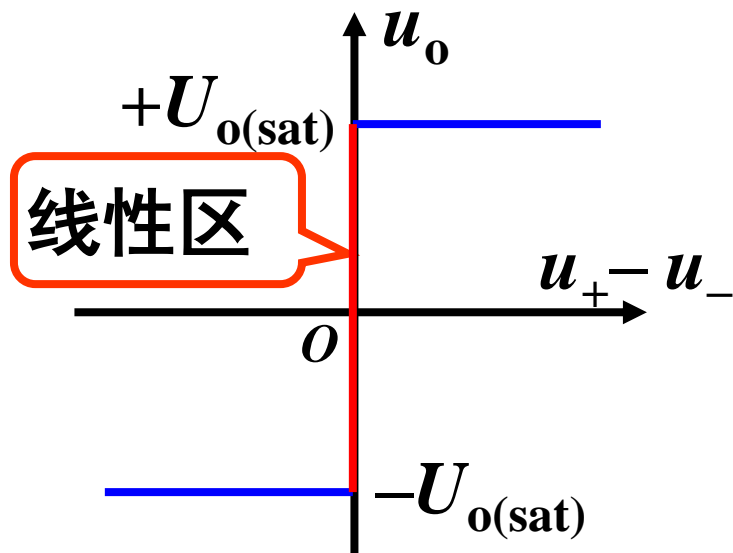


理想运放模型

(3) 理想运放工作在线性区的特点



电压传输特性



因为 $u_o = A_{uo}(u_+ - u_-)$, 所以

① 差模输入电压约等于 0
即 $u_+ = u_-$, 称“虚短”

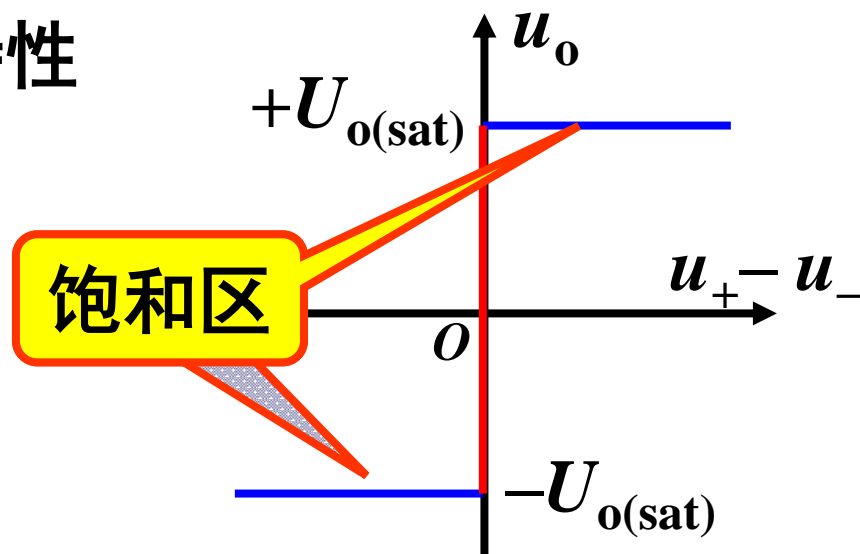
② 输入电流约等于 0
即 $i_+ = i_- \approx 0$, 称“虚断”

③ 如果信号从反向端输入,
同相端接地 $u_+ \approx 0$,
 $u_- \approx 0$ 反相端电位接近于
“地” 电位, 即虚地。

理想运放模型

(4) 理想运放工作在饱和区的特点

电压传输特性



当 $u_+ > u_-$ 时, $u_o = +U_{o(sat)}$

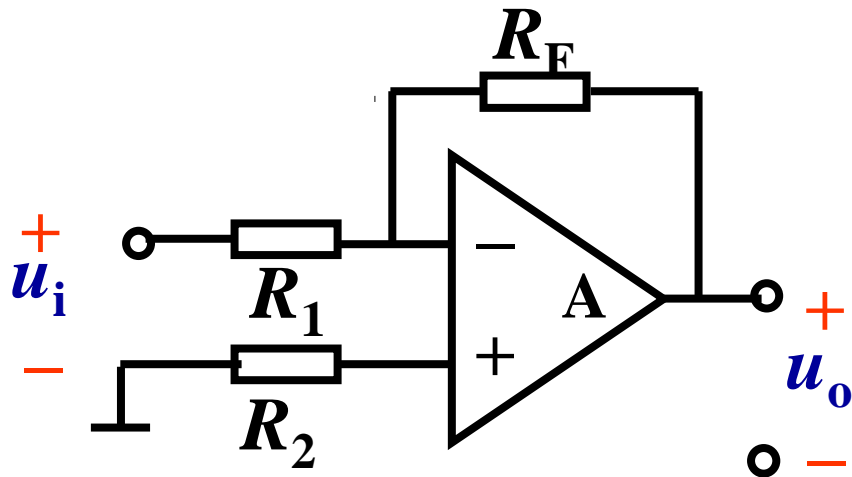
$u_+ < u_-$ 时, $u_o = -U_{o(sat)}$

① 不存在“虚短”现象

② $i_+ = i_- \approx 0$, 仍存在“虚断”现象

工作区间判别

集成运放工作在线性的电路特征： 电路引入深度负反馈



通过电路是否引入了负反馈来判断电路是否工作在线性区。若无负反馈，则工作在非线性区

线性应用： 有虚断、有虚短

非线性应用： 有虚断、无虚短

是为分析集成运放应用输入信号和输出信号关系的基本出发点

线性电路

(1) 信号运算电路

比例、加减、电压跟随器、微积分（波形转换）

(2) 滤波电路

应用、分析方法、频率特性

- (1) “虚短”和“虚断”是分析输入和输出信号关系的出发点
- (2) 对于单一信号的运算电路，在分析运算关系时，应首先列出关键节点的电流方程
- (3) 对于复杂电路可以优先考虑叠加原理

非线性电路

电压比较器

- (1) 分类
- (2) 描述方法
- (3) 分析方法

电压传输特性的三个要素：

- (1) 输出高电平 U_{OH} 和输出低电平 U_{OL}
- (2) 阈值电压 U_T
- (3) 输入电压过阈值电压时输出电压跃变的方向